

Adaptives Wasserförderersystem im Hybridbetrieb mit einem konventionellen Wasserkraftwerk

- Beispiel in einer Gebirgsregion im Norden Vietnams -

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

von der KIT-Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Katrin Trautwein, M. Sc.

aus Rottweil

Tag der mündlichen Prüfung:

04.02.2022

Referent:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Korreferent:

PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs

Karlsruhe 2022

Kurzfassung

Die Grundversorgung mit Energie und Wasser ist die Existenzgrundlage des Menschen und darüber hinaus zur Sicherung der Lebensraumqualität und des industriellen Fortschritts von entscheidender Bedeutung. Der Umbau der Energieversorgung weg von konventionellen fossilen und nuklearen Energiequellen hin zur Nutzung regenerativer Energieträger ist Kern einer nachhaltigen Entwicklung. In der Wasserförderung bestehen die Herausforderungen darin, die Erschließung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen weltweit nachhaltig zu gestalten, sowie eine dauerhafte Wasserversorgung in ausreichender Menge und Qualität bereitzustellen. Dabei bedarf es ganzheitliche und interdisziplinäre Ansätze, die nicht überall auf der Welt auf vergleichbarem Niveau vorhanden sind.

In Entwicklungs- und Schwellenländern stellt eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserversorgung eine große Herausforderung dar. Gerade in tropischen und subtropischen Karstgebieten mit ausgeprägter Regen- und Trockenzeit steht Wasser aufgrund hoher Versickerungsraten und fehlender Oberflächenspeicher oft nur in tiefen Tälern, Schluchten und unterirdischen Höhlensystemen zur Verfügung. Aufgrund fehlender ökonomisch und ökologisch nachhaltiger Technologien zur Nutzbarmachung dieser Wasservorkommen sind die Menschen im hohen Maße der Trockenzeit ausgesetzt.

Die direkte mechanische Nutzung der Wasserkraft zur Wasserförderung hat eine jahrhundertealte Tradition. Aufgrund der Vorteile gegenüber anderen regenerativen Energieformen bietet sie Chancen, die Wasserversorgung in diesen Regionen zu verbessern. Die vorhandenen Wasserkraftpotentiale werden jedoch lediglich von einzelnen konventionellen Wasserkraftwerken zur Stromerzeugung genutzt. Während der mehrmonatigen Trockenzeit sind gerade Kleinwasserkraftwerke durch einen starken Abfall in der Stromerzeugung gekennzeichnet. Die vorhandenen Wassermengen sind zu gering, um einen wirtschaftlichen Betrieb aufrechtzuerhalten. In eben dieser Trockenphase sind die Menschen in den höher gelegenen Siedlungen teils mit enormen Versorgungsengpässen konfrontiert, doch bleiben die Wasserkraftpotentiale zur möglichen Lösung dieses Umstands bisher ungenutzt.

Aufgrund dieser Missstände ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines wasserkraftbetriebenen Wasserfördersystems zur Nutzbarmachung der geringen Abflussmengen während der Trockenzeit. Das Konzept basiert auf einem Bypass-System mit einer Einheit bestehend aus einer Förderpumpe und einer Pumpe als Turbine (PAT) für den Hochdruckbereich. Durch die hydraulische und betriebliche Anbindung an ein Wasserkraftwerk kann mit vergleichsweise geringem infrastrukturellem Aufwand der Stillstand von Wasserkraftwerken während der mehrmonatigen Trockenzeit sinnvoll kompensiert und die für den Turbinenbetrieb nicht effizient verwertbaren Wassermengen für die Wasserversorgung zugänglich gemacht werden. Je nach Dargebots- und Bedarfssituation kann das Wasserfördersystem genutzt werden und ermöglicht so flexible Betriebsszenarien. Für eine effiziente

Bewirtschaftung bedarf es zudem angepasste Betriebskonzepte und einfache, intuitiv bedienbare Steuerungs- und Monitoringsysteme. Die genannten Aspekte stellen dabei einen völlig neuen Ansatz dar.

Basierend auf der entwickelten Konzeption wurde ein Wasserförderersystem für ein Hochdruck-Ausleitungskraftwerk entwickelt, um auch in der Trockenzeit einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage aufrechtzuerhalten und über 10.000 Menschen zuverlässig mit Wasser zu versorgen. Die Pilotanlage wurde durch die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundvorhaben KaWaTech Vietnam (Förderkennzeichen 02WCL1291A, Laufzeit September 2013 bis August 2016) und KaWaTech Solutions (Förderkennzeichen 02WCL1415, Laufzeit November 2016 bis Juli 2021) in einer subtropischen Karstregion im Norden Vietnams realisiert. Um das Wasserförderersystem erfolgreich in die bestehende Anlageninfrastruktur einzugliedern, wurden technisch einfache, pragmatische und robuste Lösungsansätze entwickelt. Aufgrund der Wasserentnahme aus einem natürlichen Fließgewässer mussten die Betriebsszenarien unter Berücksichtigung der naturräumlichen Randbedingungen (z.B. Feststofffracht) ausgewählt werden. Die praxisorientierten Erfahrungswerte dienen dabei als Initial für die Umsetzung ähnlicher Vorhaben in Bedarfsregionen mit vergleichbaren Randbedingungen.

Abstract

The supply of electric power and water is of decisive importance to secure the quality of a living environment and the industrial progress. Therefore, a sustainable development aims at an alteration of energy supply, away from conventional, fossil and nuclear and towards renewable energy resources. When it comes to water production, the challenge is to create a sustainable opening and use of water resources all over the world, while providing a permanent, sufficient and good quality supply of water. To do so, there is a requirement of holistic and interdisciplinary approaches, that do not have the same standard all over the world.

In developing and emerged developing countries, a sustainable supply of water becomes a challenge. Tropical and subtropical climate zones characteristically have seasonal rain and dry periods, which lead to a huge temporal variability of water supply. Adding the hydrogeological properties of karst (porous structure, high seepage rate, etc.), these regions are often coined with significant water deficiency. Equally in deep valleys, canyons and underground caves, huge water resources can be found. To open these deposits, high expenditure of energy is required. The direct mechanical usage of hydropower has had its tradition for many years. Having lots of advantages compared to all the other renewable energy forms, hydropower offers many possibilities to improve water supply in those regions. Because of the extreme climatic and geographic conditions, until today, the potential of hydropower is only used by few conventional hydroelectric facilities. Dry periods lasting several months, with only little water far below the calculated discharge, lead to a bad efficiency, breakdowns or even long-lasting downtimes. At the same time, the local population in elevated settlements suffers from the lack of water as the existing (not insignificant) runoff volumes remain unused.

This work is about developing a hydro powered system to make low water discharge accessible. Adding a bypass system to a hydroelectric facility enables the power plant to compensate for the efficiency loss or even the downtimes of power generation during the dry season. With only little infrastructural effort, hydroelectric facilities can be upgraded to contribute to water supply. One innovation of the concept is to mechanically link together a booster pump segment and a pump as turbine (PAT) for the high-pressure. Another innovation is to integrate this system into an already existing hydroelectric facility. Depending on the supply of water and the need, the system can be switched on or off and allows flexible operating scenarios. Therefore, appropriate operating concepts and simple, intuitive control units are needed. The mentioned aspects form a completely new approach.

Based on the developed conception, an adaptive water supply system as bypass-system for a high-pressure-run-of-river system for 10.000 people was designed. The pilot facility was

realized in a subtropical karst region in the north of Vietnam. The joint research project KaWaTech was government-funded by the Federal Ministry of Education and Research. To integrate this water supply system into the existing infrastructure of the hydroelectric facility, simple, pragmatic and robust solutions were developed. Taking the water from running water, the operating scenarios depended on the environmental conditions (e.g. solid loads). The practical experience gained serves as an initial basis for the implementation of similar projects in regions with comparable conditions.

Danksagung

Diese Arbeit ist während den vergangenen fünf Jahren in meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) entstanden. Während dieser Zeit konnte ich an der Entwicklung innovativer und nachhaltiger Technologien für eine angepasste Wasserversorgung in Karstregionen mitwirken. In den internationalen Forschungsprojekten KaWaTech und KaWaTech Solutions durfte ich in einem interdisziplinären Netzwerk mit deutschen und vietnamesischen Partnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen, industriellen Unternehmen und öffentlichen Verwaltungseinrichtungen zusammenarbeiten.

Für die Übernahme des Hauptreferats, den hilfreichen Ratschlägen und die persönliche Unterstützung zum Gelingen meiner Arbeit möchte ich mich in besonderem Maße bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann bedanken. Auch danke ich Herrn PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs für die freundliche Übernahme des Korreferats. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Nico Goldscheider, Herrn Prof. Dr. Stefan Norra und Frau Prof. Dr. Caroline Kramer für das Mitwirken in der Prüfungskommission.

Herrn Dr.-Ing. Jochen Fritz, Herrn Steffen Schmidt und Herrn Michael Fath der Firma KSB SE & Co. KGaA danke ich für die gute Zusammenarbeit in den letzten Jahren. Gemeinsam haben wir erfolgreich das entwickelte Fördersystem im Norden Vietnams implementiert und dabei die vielen unvorhergesehenen Herausforderungen stets bewältigen können. Bei allen deutschen, belgischen und vietnamesischen Projektpartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen, öffentlichen Verwaltungseinrichtungen und der freien Wirtschaft bedanke ich mich für die hervorragende und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Besonders hervorheben will ich hier Herrn Dr.-Ing. Peter Oberle, der mich oft in außergewöhnlicher Weise bei der Bewältigung vieler technischer und organisatorischer Fragestellungen unterstützt hat. Vielen Dank!

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden für die Unterstützung und den großen Rückhalt bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung und Ansatz	3
1.3 Verbundprojekt KaWaTech	4
1.4 Aufbau und Struktur	5
2 Wasserförderung unter Nutzung von Wasserkraft	9
2.1 Energiebedarf in Wasserfördersystemen	9
2.1.1 Energieverluste im Rohrnetz	9
2.1.2 Leistungsbedarf einer Pumpe	12
2.2 Potentielle Energiequellen	13
2.2.1 Energieformen und Antriebsmöglichkeiten	13
2.2.2 Wasserkraftpotentiale weltweit	16
2.3 Wasserkraftbetriebene Wasserfördersysteme	17
2.4 Rückwärtslaufende Pumpen als Turbinenersatz	22
2.4.1 Allgemeines	22
2.4.2 Unterschiede zu konventionellen Turbinen	23
2.4.3 Problemstellung bei der Dimensionierung	24
2.4.4 Systemvariablen	25
2.4.5 Hydraulische Optimierungen	28
2.4.6 Verhalten der PAT in Anlagen	29
3 Adaptives Wasserfördersystem für konventionelle Wasserkraftwerke	33
3.1 Klimatische und naturräumliche Randbedingungen	33
3.2 Soziokulturelle und sozioökonomische Randbedingungen	37
3.3 Problematiken und Lösungsansätze	38
3.3.1 Energiebereitstellung für die Wasserförderung	38
3.3.2 Wasserkraftnutzung in tropischen und subtropischen Klimazonen	40
3.3.3 Effizienz von Wasserkraftwerken während der Trockenmonate	44
3.3.4 Optimierung der Wasserkraftwerke für die Wasserförderung	46
3.4 Konzeption des adaptiven Wasserfördersystems	47
3.4.1 Angepasstes Systemkonzept	47
3.4.2 Bemessungsgrundlagen für das Wasserfördermodul	49
3.4.3 Planungsschritte für das Bypass-System	53

4 Der Norden Vietnams als Modellregion für die Pilotanlage	59
4.1 Klima und Naturraum	59
4.1.1 Lage und Topographie	59
4.1.2 Klima und Hydrologie	60
4.1.3 Geologie und Hydrogeologie	61
4.2 Soziokultur und Sozioökonomie	63
4.2.1 Siedlungsstruktur und Wasserbedarf	63
4.2.2 Aktuelle Wasserversorgungssituation	64
4.2.3 Entwicklung des Tourismus	67
4.3 Problematiken und Lösungsansatz	69
5 Anlagenkonzeption unter Berücksichtigung vorgegebener Randbedingungen	71
5.1 Ausgangszustand des Wasserkraftwerkes	71
5.1.1 Systemaufbau und Systemkomponenten	71
5.1.2 Hydrologische und hydrogeologische Ausgangsdaten	73
5.1.3 Hydraulische und bauliche Zustandsanalyse	75
5.2 Angepasstes Systemkonzept	81
5.3 Bemessung des Wasserfördermoduls	83
5.3.1 Übersicht der Bemessungsgrößen	83
5.3.2 Anforderungen an die Maschinenauswahl	85
5.3.3 Dimensionierung der Maschinenkombination	87
5.3.4 Konstruktiver Aufbau	90
5.3.5 Prüffeldvalidierung	92
5.4 Bemessung des Rohrleitungssystems	94
5.4.1 Fallleitung und Bypass	94
5.4.2 Rohranlage des Wasserförderersystems	94
5.4.3 Hochdruck-Förderleitung	97
5.5 Rehabilitations- und Optimierungsmaßnahmen	101
5.6 Maßnahmen zur Vermeidung von Feststoffeintrag	105
5.6.1 Maschinenspezifische Grenzwerte	105
5.6.2 Erhebung von Naturdaten	106
5.6.3 Bauwerksseitige Vorkehrungen	108
5.6.4 Kontinuierliche Überwachung der Feststofffracht	113
5.7 Intuitiv bedienbares Monitoring- und Alarmsystem	116
5.7.1 Übersicht der Betriebsparameter	116
5.7.2 Aufbau des Steuerungssystems	117
5.7.3 Monitoring- und Alarmsystem	119
5.8 Angepasste Betriebsstrategien	120
5.9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	123
6 Pilothafte Umsetzung des Wasserförderersystems in der Modellregion	127
6.1 Bilaterales Projektmanagement	127
6.1.1 Verbundstruktur	127
6.1.2 Strategisches und operatives Vorgehen	129
6.2 Implementierungsstrategien	131

6.2.1	Entwurfs- und Ausführungsplanung	131
6.2.2	Begleitung der Baumaßnahmen	131
6.2.3	Installation der Maschinentechnik	134
6.2.4	Installation der Anlagensteuerungstechnik	135
6.2.5	Maßnahmen zur Reduktion des Feststoffeintrages	136
6.2.6	Wartungs- und Instandhaltungsstrategien	139
6.2.7	Sicherstellung der Funktionsfähigkeit	140
6.3	Technologie- und Wissenstransfer	142
6.3.1	Schulungsunterlagen	142
6.3.2	Ausbildungsprogramm	146
6.3.3	Übergabe der Pilotanlage	147
7	Evaluation und Übertragbarkeit der Pilotanlage	149
7.1	Betriebliche Zustandsanalyse	149
7.1.1	Validierung der Förderleistung	149
7.1.2	Regelungs- und Betriebsverhalten	150
7.1.3	Bewertung der Absetzleistung im Einlaufbecken	150
7.1.4	Auswertung der Benutzerfreundlichkeit	151
7.2	Technische Zustandsanalyse	152
7.2.1	Maschinentechnik	152
7.2.2	Alarm- und Monitoringsystem	154
7.3	Übertragbarkeit des adaptiven Wasserförderersystems	155
8	Zusammenfassung und Ausblick	158
Literaturverzeichnis		163

Abbildungsverzeichnis

1.1	Energieerzeugungstechnologien aus den verschiedenen Epochen nach WB-GU (2003) (links), Weltbevölkerungsentwicklung nach UN (2021) (rechts)	2
2.1	Rohrleitungsabschnitt mit kontinuierlichen Verlusten (links) und lokalen Verlusten durch Rohraufweitung (rechts) nach Zanke (2013)	11
2.2	Leistungsfluss eines Pumpenaggregats mit Strom oder Treibstoff (1) mechanischer Leistung (2) hydraulischer Leistung bzw. Förderleistung (3) nach Patt und Gonsowski (2011)	13
2.3	Umwandlungsprozess von der Gewinnung der Primärenergie bis zur Nutzenergie nach Joos (2019)	14
2.4	Übersicht der Nettowirkungsgrade verschiedener Kraftwerkstypen nach Giesecke und Mosonyi (2009)	15
2.5	Übersicht der Energieformen und verschiedener Wandlungsprozesse der Energie bis hin zur Wasserförderung mittels Pumpe nach Wembacher (2013)	16
2.6	Weltweite Stromerzeugung aus Wasserkraft (BWK, 2019)	17
2.7	Prinzipskizze des unterirdischen wasserkraftbetriebenen Wasserfördersystems Bribin nach Nestmann und Oberle (2009)	19
2.8	Funktionsweise des stehenden Saughydropulsor nach Preger (1912)	20
2.9	Funktionsweise des hydraulischer Widder	21
2.10	Aufbau einer Spiralpumpe aus dem Jahre 1910 nach Eytelwein (1842)	22
2.11	Pumpenquerschnitt mit Kennzeichnung der inneren Strömungsverluste nach Singh (2005)	28
2.12	Wirkungsgradsteigerung der PAT durch Modifikation an Laufrad und Gehäuse nach Nestmann und Oberle (2009)	29
2.13	Turbinenkennlinien mit Leerlauf- und Widerstandskennlinie sowie Anlagenkennlinie H_A nach Gülich (2013)	30
2.14	Drosselregelung einer PAT nach Gülich (2013)	31
3.1	Lage der Innertropischen Konvergenzzone (ITC) im Januar und Juli nach Diercke und Michael (2015)	34
3.2	Weltweite Vorkommen von Karbonatgestein eingeteilt in die Klimaklassifikation von Köppen-Geiger (Goldscheider u. a., 2020)	36
3.3	Weltweites Vorkommen von physischer und ökonomischer Wasserknappheit nach Walter (2020)	37
3.4	Stromverbrauch aus Wasserkraft und Bevölkerungswachstum in Vietnam in den Jahren 1990 bis 2019 nach Eglitis (2021) und Statista (2021)	41

3.5	Abflussregime des Rheins am Beispiel der Pegel Basel (Oberrhein), Andernach (Mittelrhein) und Lobith (Niederrhein) sowie Abflussregime der vietnamesischen Flüsse Da am Pegel Hoa Bin, Lo am Pegel Dao Duc und Gam am Pegel Chiem Hoa nach IMRR (2013) und Belz (2007)	45
3.6	Wirkungsgradverlauf von PATs für den unteren Teillastbereich von konventionellen Turbinen in Abhängigkeit der relativen Auslastung eines Wasserkraftwerkes	46
3.7	Kopplung von PAT und Pumpe (mit/ohne Getriebe) (a) sowie Kopplung von PAT und Generator mit Umwandlung in Elektrizität (b)	47
3.8	Systemskizze des angepassten Wasserförderersystems als Bypasslösung für Wasserkraftwerke	48
3.9	Kopplung einer Spiralgehäusepumpe als Turbinenersatz mit einer Gliederpumpe	50
3.10	Einsatzbereich der PAT nach Fritz und Schmidt (2017)	53
3.11	Planungsschritte für das Bypass-System	57
4.1	Lage der Modellregion im Norden Vietnams, in der Provinz Ha Giang	60
4.2	Die Modellregion in der Trockenzeit (links) und Regenzeit (rechts)	61
4.3	Querschnittsprofil des Ma Le Höhlensystems als Referenz für kontinuierliche Messungen von Wasserspiegellagen bzw. des Abflussdargebots im Seo Ho Fluss nach Nestmann u. a. (2017)	62
4.4	Distrikthauptstadt Dong Can City als typische vietnamesische Kleinstadt (oben) und weit verteilte Siedlungen in den umliegenden Karsthügeln (unten)	64
4.5	Beispiele für die Wasserversorgung in der Distrikthauptstadt Dong Van und den umliegenden Siedlungen	65
4.6	Sattelitenbilder der Distrikthauptstadt Dong Van City sowie Übersicht der Hotels im Jahr 2010 und 2019	67
4.7	Entwicklung der Einwohner- und Touristenzahl in der Distrikthauptstadt Dong Van City und Abschätzung des Gesamtwasserbedarfs seit Eintritt in das globale Geoparknetz der Weltkulturorganisation UNESCO im Jahr 2010	68
4.8	Monatliche Stromproduktion der WKA Seo Ho während der Regen- und Trockenzeit im Zeitraum 2011 bis 2016	70
5.1	Schematische Darstellung der einzelnen Systemkomponenten des Hochdruck-Ausleitungskraftwerkes (WKA Seo Ho)	72
5.2	Abflusskurve des Vorfluters, ermittelt im Höhlenabschnitt Ma Le 2 für den Zeitraum 2011 bis 2015 nach Nestmann u. a. (2017)	74
5.3	Niederschlagswerte in der Modellregion für den Zeitraum 2000 bis 2016 nach NCHMR (2017)	75
5.4	Idealisierter Sedimentationsweg eines Feststoffpartikels nach Patt und Gonsowski (2011)	77
5.5	Wirkungsgrad und Leistung der WKA Seo Ho bei unterschiedlichen Abflüssen von ca. 65 l/s bis ca. 205 l/s	79
5.6	Baulicher Zustand der Systemkomponenten Wehr (1), Sandfang (2), Triebwasserkanal (3), Einlaufbecken (4) und Maschinentechnik (6)	81

5.7	Systemskizze mit Kopplung des mechanisch angetriebenen Wasserförder-	82
systems an die WKA Seo Ho durch einen Bypass		
5.8	Schnittbild einer Gliederpumpe der Baureihe Multitec nach KSB (2011)	86
mit den kritischen Stellen in Bezug auf die Feststoffbeladung		
5.9	Vielversprechende Modulkombinationen als Ergebnis einer Variantenstudie	88
durch das IWG und KSB SE & Co. KGaA		
5.10	3D-CAD-Modell des adaptiven Wasserfördermoduls nach Fritz und Schmidt	91
(2017)		
5.11	Beispielhafter Aufbau der ARPEX-Kupplung (Typ ARPEX-ARP 6) nach	91
Flender (2002)		
5.12	Prüffeldergebnisse der Einzelmessung der PAT (Typ Multitec 65/2 6.1) im	91
Turbinen- (links) und Pumpenbetrieb (rechts) erstellt durch KSB SE &		
Co. KGaA		
5.13	Fördermenge (links) und Wirkungsgrad (rechts) der Wasserfördermodule	92
unter Berücksichtigung des Gesamtabflusses nach Fritz und Schmidt (2017)		
5.14	Konzeptioneller Entwurf der Demonstrationsanlage mit Aufstellung eines	93
Überseecontainers mit Vormontage		
5.15	Konzeptioneller Entwurf der Demonstrationsanlage mit Montage vor Ort .	96
5.16	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der WKA Seo Ho und der De-	97
motionsanlage nach Stoffel (2016)		
5.17	Leitungstrasse und Höhenprofil der Hochdruck-Förderleitung	98
5.18	Druckstoßberechnung der Förderleitung ohne (links) und mit (rechts) Wind-	99
kessel nach Nestmann u. a. (2017)		
5.19	Neugestaltete Sohlentnahme mit Schnittzeichnung des Entnahmeschachts	102
und der angepasster Stabgeometrie		
5.20	CAD-Modell des umgestalteten Sandfangs mit Grobrechen am Übergang	103
vom Sandfang in den Triebwasserkanal und Rückbau der Einengung		
5.21	CAD-Modell des Ist- und Soll-Zustandes des Einlaufbeckens zur Einhaltung	104
des vorgegebenen Grenzkorndurchmessers (0,25 mm)		
5.22	Förderdruck der Pumpe Δp_P und Druckverlust der Anlage Δp_A bei unter-	105
schiedlichem Feststoffgehalt des Förderstroms Q nach KSB (2005)		
5.23	Feststofffracht und Abflüsse im Einlaufbecken und Sandfang sowie im Seo	107
Ho Fluss während der Regenzeit 2014 und der Trockenzeit 2015 nach Nest-		
mann u. a. (2017)		
5.24	Darstellung des Messprofils zur Bewertung der Strömungssituation im Ein-	108
laufbecken (Ist-Zustand)		
5.25	Geschwindigkeitsprofil über die Tiefe und Breite bei einem Abfluss von 280	109
l/s ohne Prallwand (oben) und mit Prallwand an Position 1 (Eintauchtiefe:		
0,75 m) (unten)		
5.26	Modellversuch zur Bestimmung des Fassungsvermögens von Filterrohren	111
im eingetauchten Zustand		
5.27	Vorentwurfsplanung des Filterrohrs in DN350 (Länge: 2 m, Schlitzweite:	112
1,5 mm) mit Etage; Befestigung der Etage durch eine Ringraumdichtung .		
5.28	Darstellung des Schwimbalkens im Einlaufbecken zur Abhaltung von	113
Treibgut		

5.29 Zusammenhang der Sondenaufzeichnung und der Kalibrierproben für den Bereich unterhalb von 200 NTU und unterhalb von 50 NTU auf Basis der Messkampagne des AGW-AqG	114
5.30 Sondenaufzeichnung mehrerer Trübungssereignisse im Einlaufbecken der WKA Seo Ho	115
5.31 Übersicht der Anlagensteuerung und Positionierung der Messinstrumente .	117
5.32 Übersicht der Anzeigetafel des zentralen Schaltschrankes mit dem Alarm-Management-System	121
5.33 Betriebsstrategien mit Fokus Wasserförderung (rechts) sowie Wasserförderung und Stromerzeugung (links))	122
5.34 Amortisationsdauer für verschiedene Betriebs- und Bedarfsszenarien mit der Einheit „ €_{VN} “ nach Nestmann u. a. (2017)	124
6.1 Einteilung des Verbundprojektes in vier Arbeitspakete	128
6.2 Vorgaben zur Sicherstellung einer zufriedenen Ausführungsqualität bei Schweißarbeiten	132
6.3 Bauliche Umsetzung der Förderleitung sowie Qualitätssicherung der Schweißarbeiten durch die Herstellung eines Schweißprobestücks und Fach-Schulungen	133
6.4 Überwachung der Betonbauarbeiten am Wehr (links) und Einlaufbecken (rechts)	134
6.5 Installation des Fördersystems mit hochpräziser Ausrichtung für einen spannungsfreien Zusammenschluss aller Komponenten	135
6.6 Installation der Sonden am Einlaufbecken (links) und des Schaltschrankes (mitte) sowie Fertigstellung des Alarm- und Monitoringsystems (rechts) .	136
6.7 Installation der Lamellen (oben) und Strömungsbild mit und ohne eingesetzten Lamellen (unten)	137
6.8 Filterrohr und Etage im eingebauten Zustand	138
6.9 Installation des Balkens (links) und Einsatz des Balkens zur Abführung von Treibgut (rechts)	139
6.10 Wartungs- und Instandhaltungsstrategien für einen nachhaltigen effektiven und sicheren Betrieb des Wasserfördersystems	140
6.11 Überwachung der Drehzahl, des Vordrucks und der Trübung (oben), Installation des KSB Guard System (Online-Anbindung) (unten)	141
6.12 Grafik mit Betriebsvorgaben für das schrittweise Anfahren bei Betrieb von Fördermodul 1 und Fördermodul 2 (B2)	143
6.13 Schrittweise Vorgehen für die Einstellung von Normal- und Sonderbetriebszuständen	144
6.14 Handlungsempfehlungen bei der Anzeige von Störfällen am Schaltschrank .	145
6.15 Praxisschulungen an der wasserbaulichen Infrastruktur sowie an der Demonstrationsanlage auf Basis der eigens hierfür erstellten Handbücher und Poster	146
6.16 Wasserkraftwerk mit Bypass-System (oben), Eröffnungsfeier und symbolische Inbetriebnahme der Fördermodule (unten)	147
6.17 Referenzanlage Seo Ho zur Versorgung von mehr als 10.000 Menschen mit Wasser in der Modellregion	148

7.1	Korngrößenverteilung der gesammelten Sedimentpartikel am Einlauf (SP1) und Auslauf (SP2) des Einlaufbeckens während der Regenzeit	151
7.2	Graphische Darstellung der automatisch aufgezeichneten Betriebsdaten während eines Trübungssereignisses	154

Tabellenverzeichnis

2.1	Dimensionslose Kennzahlen nach Singh (2005)	27
3.1	Nutzbares und derzeit genutztes Kleinwasserkraftpotential mit einer installierten Leistung bis 10 MW nach UNIDO und ICSHP (2019)	42
3.2	Leistungsdaten mehrerer Laufwasserkraftwerke im Norden Thailands über einen Zeitraum von 25 Jahren nach Sakulphan und Bohez (2018)	43
3.3	Bewertungsmatrix als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der zielführendsten Maschinenkonfiguration	56
4.1	Genutzte Versorgungskonzepte in Dong Van City nach Pham (2019)	67
5.1	Kritische Korngrößen im Einlaufbecken und Sandfang nach den Ansätzen von Vischer und Huber (1993) und Ortmanns (2006)	78
5.2	Wirkungsgrad und Abflussbereich bei Minimalabfluss, Teillast- und Volllastbetrieb einer Pelton-Turbine an der WKA Seo Ho	80
5.3	Modulkombinationen als Ergebnis einer Variantenstudie durch das IWG und KSB SE & Co. KGaA	88
5.4	Bewertungsmatrix für die zielführendste Modulvariante	89
5.5	Zusammenfassung der Prüffeldergebnisse des Wasserfördermoduls für die WKA Seo Ho durch KSB SE & Co. KGaA	94
5.6	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Montage vor Ort und der Vormontage in einem Überseecontainer	96
5.7	Ergebnisse der hydraulischen Vorbemessung der Förderleitung mit einer integralen Rauheit $k_2 = 0,4$ mm	98
5.8	Einteilung der Förderleitung in Abschnitte bzgl. des maximal auftretenden Drucks	100
5.9	Ergebnisse des Modellversuchs mit PVC-Filterrohren DN150 und verschiedenen Spaltweiten	111
5.10	Übersicht der durch das Monitoring- und Alarmsystem erfassten Betriebsparameter	118
5.11	Prognostizierter Wasserbedarf und Potential der Betriebsstrategie 1 (Fokus Wasserförderung) und der Betriebsstrategie 2 (Fokus Stromerzeugung und Wasserförderung)	122
7.1	Ermittelte effektive Schwingungswerte v_{eff} der x-, y- und z-Achse an den Lagersätzen mittels KSB Guard System	153

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung Bedeutung

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ADCP	Ultraschall-Doppler-Verfahren
AGW	Institut für Angewandte Geowissenschaften
AP	Arbeitspaket
AqG	Abteilung Aquatische Geochemie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CERWASS	National Center for Rural Water Supply and Sanitation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Nenndurchmesser
DVWG	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EVN	Nationaler Energieversorger Electricity Vietnam
FM	Fördermodul
FV	Normative Fassungsvermögen
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HESCO	Hydraulic Equipment Joint Stock Company
HGPC	Vietnamesische Provinzverwaltung Ha Giang Peoples' Committee
Hyd	Abteilung Hydrogeologie
ICSHP	International Center on Small Hydro Power
IMB	Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISE	Frauenhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ITC	Innertropische Konvergenzzone
IWG	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
KAAD	Katholischer Akademischer Ausländer-Dienst
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MOIT	Vietnamesisches Ministerium für Industrie und Handel
MONRE	Vietnamesisches Ministerium für natürliche Ressourcen und Umwelt
MP	Messprofil
NCHMF	Vietnam National Centre for Hydro-Meteorological Forecastings
NTU	Nephelometrischer Trübungswert
PAT	Pumpe als Turbine
PDP VII	Vietnamesischer Energieentwicklungsplan
PEA	Thailändischer Netzbetreiber Provincial Electricity Authority

PV	Photovoltaik
RKV	Ringkolbenventil
RUB	Ruhr-Universität Bochum
SDI	Seriell Digital Interface
SW	Schlitzweite
TLU	Thuy Loi Universität Hanoi
TP	Teilprojekt
UDM	Ultraschall-Durchflussmessgerät
UNESCO	Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur
UNIDO	United Nations Organization
U+Ö	Institut für Umwelttechnik + Ökologie im Bauwesen
VIGMR	Vietnamesische Institut für Geowissenschaften und Mineralische Rohstoffe
VNAT	Vietnam National Administration of Tourism
WKA	Wasserkraftwerk
XRD	Röntgendiffraktometrie

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
A	Querschnittsfläche	m^2
B	Breite	m
c_T	Feststoffkonzentration im Förderstrom	%
c_u	Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit	$m \ s^{-1}$
D	Durchmesser	m
d	Durchmesser	mm
d_B	Korndurchmesser	mm
E	Energiehöhe	m
F_{Fr}	Rückwirkende Kraft	$kgms^{-2}$
F_{St}	Rückstellende Kraft	$kgms^{-2}$
F_P	Äußere Kraft	$kgms^{-2}$
f_H	Fallhöhenfaktor	-
f_Q	Mengenfaktor	-
f_η	Wirkungsgradfaktor	-
g	Erdbeschleunigung	ms^{-2}
H	Fall- oder Förderhöhe	m
$H_{Opt.}$	Fall- oder Förderhöhe im Bestpunkt	m
h	Wassertiefe	m
h_v	Verlusthöhe	m
K	Faktor	-
k_s	Relative Rauheit	m
k_2	Integrale Rauheit	m
L	Länge	m
M	Drehmoment	Nm
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	$kg \ s^{-1}$
N	Drehzahl	min^{-1}
$NPSH$	Net Positive Suction Head	m
$NPSH_A$	Net Positive Suction Head available	m
$NPSH_R$	Net Positive Suction Head required	m
n	Drehzahl	min^{-1}
n_S	Spezifische Drehzahl	min^{-1}
P	Leistungszahl	-
P_Q	Förderleistung	W

P_M	Motoren- oder Antriebsleistung	W
P_P	Leistung Pumpe	W
P_T	Leistung Turbine	W
p	Druck	$k g m^{-1} s^{-2}$
Q	Durchfluss	$m^3 s^{-1}$
Q_A	Ausbaudurchfluss	$m^3 s^{-1}$
Q_{FM}	Gesamtdurchfluss Fördermodul	$m^3 s^{-1}$
$Q_{Opt.}$	Volumenstrom im Bestpunkt	$m^3 s^{-1}$
Q_P	Fördermenge	$m^3 s^{-1}$
Q_T	Schluckvermögen	$m^3 s^{-1}$
R	Hydraulischer Radius	m
Re	Reynoldszahl	-
s	Minderleistungszahl	-
$T_{Hyd,Welle}$	Drehmoment an der Welle	Nm
t	Zeit	s
u	Strömungsgeschwindigkeit	$m s^{-1}$
u	Umfangsgeschwindigkeit	$m s^{-1}$
u_E	Strömungsgeschwindigkeit im Zulaufkanal	$m s^{-1}$
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	$m^3 s^{-1}$
v	Strömungsgeschwindigkeit	$m s^{-1}$
w	Sinkgeschwindigkeit	$m s^{-1}$
w_0	Sinkgeschwindigkeit in stehendem Wasser	$m s^{-1}$
Y	spezifische Stutzenarbeit	$m^2 s^{-2}$
z	Ortshöhe	m
α	Korrekturkoeffizient	-
η_G	Wirkungsgrad Generator	-
η_{Hyd}	Hydraulischer Wirkungsgrad	-
η_{Komp}	Wirkungsgrad Getriebe, Kupplungen usw.	-
η_{Mech}	Mechanischer Wirkungsgrad	-
η_{Opt}	Wirkungsgrad im Bestpunkt	-
λ	Rohreibungszahl	-
ξ	lokaler Verlustbeiwert	-
ρ	Dichte	$kg m^{-3}$
ρ_S	Feststoffdichte	$kg m^{-3}$
ρ_M	Dichte des Feststoff-Wassergemisches	$kg m^{-3}$
ϕ	Durchflusszahl	-
ψ	Druckzahl	-
ω	Winkelgeschwindigkeit	$rad s^{-1}$
ΔK_a	Axialer Wellenversatz	mm
ΔK_r	Radialer Wellenversatz	mm
ΔK_w	Winkelversatz	mm
Δp	Förderdruck, Druckdifferenz	$N m^{-2}$

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund

Das globale Wasservorkommen hat ein Volumen von ca. 1,39 Mrd. km³ und bedeckt etwa 71 % der Erdoberfläche (Fritsch u. a., 2019). Es ist in den Meeren, auf den Kontinenten und in der Atmosphäre gespeichert, befindet sich aber in einem sich ständig erneuernden Kreislauf. Wasser verdunstet und steigt nach oben, wird vom Wind transportiert und gelangt in Form von Regen, Schnee oder Hagel wieder auf die Erdoberfläche zurück. Dort angekommen besitzt das Wasser eine höhere potentielle Energie als in den Meeren und fließt teils über oberflächlichen oder unterirdischen Abfluss wieder in die Meere zurück. In dem gigantischen Transportsystem mit der Sonne als Antrieb und der Atmosphäre als Wärmekraftmaschine wird das Wasser immer wieder auf ein energetisch nutzbares Höhenniveau angehoben und steht damit als regenerative Energiequelle zur Verfügung. In den Flüssen und Seen der Erde befinden sich schätzungsweise etwa 225.000 km³ Wasser mit einem Energiegehalt von 160 EJ (Quaschning, 2019).

Aufgrund der endlichen Vorkommen an fossilen Energieträger und den damit verbundenen Emissionen zielt die nachhaltige Entwicklung auf den Umbau der Energieversorgung mit regenerativen Energiequellen ab (siehe Abbildung 1.1). Unter dem Begriff „Wasserkraft“ versteht man heute vor allem die Umwandlung der kinetischen und potentiellen Energie des Wassers durch die Nutzung von Turbinen und über den Antrieb von Generatoren in elektrische Energie. Die Wasserkraft ist bei der Stromerzeugung weltweit der wichtigste regenerative Energieträger. Der globale Anteil der Wasserkraft an der Gesamtenergieerzeugung liegt bei etwa 4.306 TWh/a (BWK, 2019). Vorteile der Wasserkraft sind die vergleichsweise hohe Planbarkeit im Unterschied zu z.B. Sonnenenergie und Windkraft, die gute Regelbarkeit der erzeugten Energie sowie die hohen Wirkungsgrade. (REN21, 2019)

Aus der vorindustriellen Geschichte gibt es Beispiele, in welchen Wasserkraft auch zur Wasserförderung genutzt wurde (z.B. Hydraulischer Widder, Spiralpumpe). Diese Technologien zeichnen sich durch hohe Robustheit und geringen Betriebs- und Wartungsaufwand aus. Mit der Elektrizität und des Industriealters verloren viele dieser Technologien jedoch zusehends an Bedeutung. (Zambrano u. a., 2019)

Die globale Energiewende, sozioökonomische, soziokulturelle, klimatische und geografische Randbedingungen in Entwicklungs- und Schwellenländern sowie der Bedarf einer dauer-

haften Wasserversorgung in ausreichender Menge und Qualität fordern einfache Lösungen für die Wasserförderung.

Besonders prekär ist die Wasserversorgung in tropischen und subtropischen Karstregionen mit ausgeprägter Regen- und Trockenzeit. Aufgrund hoher Versickerungsraten und fehlender Wasserspeicher an der Oberfläche steht das Wasser oft nur in großen Tiefen mit starken Abflussschwankungen zur Verfügung. Die Nutzbarmachung dieser Wasservorkommen ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Die Abhängigkeit von einer infrastrukturellen Vernetzung und von nicht regenerativen Energieträgern wie z.B. dem Dieselkraftstoff führen zu erheblichen Einschränkungen in der Wasserförderung. Aufgrund fehlender Energiequellen und Antriebsmöglichkeiten wird die Wasserversorgung häufig über dezentrale und individuelle Konzepte umgesetzt. In der Regenzeit wird meist Niederschlagswasser aufgefangen und in der Trockenzeit rares Quellwasser aus den tiefen Schluchten zu den Haushalten transportiert. (Oberle u. a., 2018)

Vor dem Hintergrund der schwierigen Wasserversorgungssituation in tropischen und subtropischen Karstregionen stellt die Nutzung der Wasserkraft als Antriebsenergie für die Wasserförderung einen sinnvollen Ansatz dar. Hierbei kann die Infrastruktur eines bestehenden Wasserkraftwerkes für die Wasserförderung nutzbar gemacht werden. Während geringe Abflussmengen in der Trockenzeit den Turbinenbetrieb zur Energiegewinnung zum Erliegen bringen, ist diese Energie für die Wasserförderung noch ausreichend. Genauso im ländlichen Raum sind die Wasserkraftwerke aufgrund fehlender hydrologischer Daten nicht ideal auf die lokalen Randbedingungen abgestimmt. Die Effizienz der Wasserkraftwerke ist zudem oftmals durch unzureichende Wartung beeinträchtigt. Auch die Veränderung des Abflussregimes durch den Klimawandel kann sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirken. (Sakulphan und Bohez, 2018; Wan u. a., 2021)

Durch die Entwicklung robuster und erschwinglicher wasserkraftbetriebener Wasserfördertechnologien können die für den Turbinenbetrieb nicht verwertbaren Niedrigwassermengen effizient für die Wasserförderung genutzt werden. Hierdurch kann die besonders in den Trockenmonaten schwierige Versorgungssituation in den umliegenden Siedlungsgebieten der Wasserkraftwerke verbessert und eine deutliche Steigerung der Lebensqualität in Wassermangelgebieten erreicht werden.

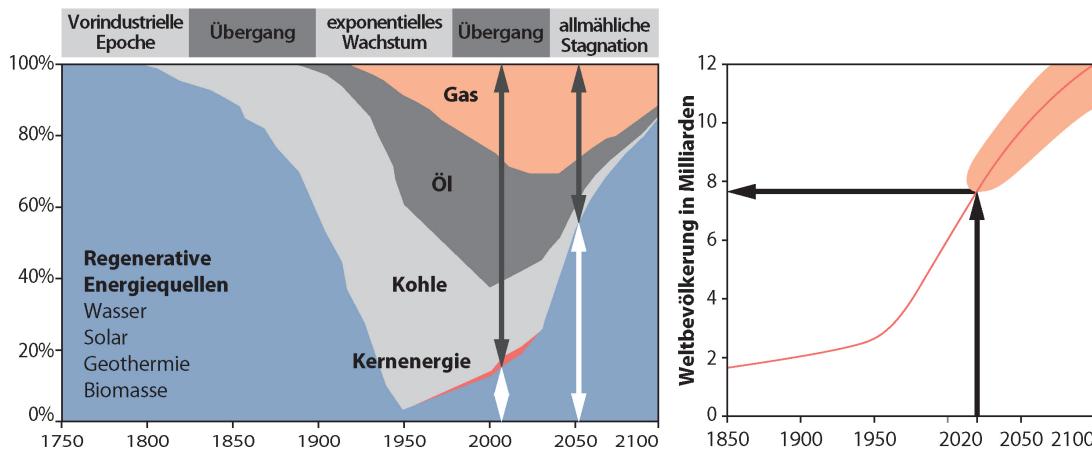


Abbildung 1.1: Energieerzeugungstechnologien aus den verschiedenen Epochen nach WB-GU (2003) (links), Weltbevölkerungsentwicklung nach UN (2021) (rechts)

1.2 Zielsetzung und Ansatz

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines mechanisch angetriebenen Wasserförderkonzeptes für die hydraulische und betriebliche Anbindung an ein Wasserkraftwerk. Der Fokus liegt dabei auf tropischen und subtropischen Karstgebieten in Entwicklungs- und Schwellenländern. Oft ist die zu erwartende Ausbeute von Wasserkraftwerken während der Trockenzeit zu gering, um die Anschaffungskosten einer Turbine für die geringen Abflussmengen zu amortisieren. Durch ein speziell auf diese Bedingungen ausgelegtes adaptives Wasserfördersystem kann künftig das verbleibende Energiepotential an Wasserkraftwerken mit geringem infrastrukturellen Aufwand für die Wasserförderung genutzt werden. Zur Sicherung der Nachhaltigkeit sollen die Technologien auf einem ganzheitlichen Ansatz entsprechend der vorherrschenden technischen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen basieren. Zur Energieerzeugung werden Pumpen im Turbinenbetrieb (PAT) eingesetzt, die ihrerseits über eine Welle bzw. ein Getriebe direkt mit Pumpen für die Wasserförderung gekoppelt sind. Dieser Aufbau kam bislang im Hochdruckbereich noch nicht zum Einsatz. Invers betriebene Pumpen stellen dabei eine kostengünstige, robuste und wartungsarme Alternative zu klassischen Turbinen dar. Die hydraulische und betriebliche Anbindung an ein Wasserkraftwerk soll mit vergleichsweise geringem infrastrukturellen Aufwand durch einen Bypass in Form eines Rohrabschnitts an der bestehenden Fallleitung erfolgen. Hierdurch kann das Triebwasser je nach Wasserdargebot und Bedarfssituation zur Stromproduktion und / oder Wasserförderung genutzt werden. Das geförderte Wasser soll dann über ein Verteilungsnetz per Gravitation in die Siedlungen geleitet werden.

Um das Wasserfördersystem erfolgreich in die bestehenden Strukturen der Regionen einzugliedern, sollen möglichst einfache, pragmatische und robuste Lösungsansätze entwickelt werden. Sowohl die maschinentechnische Ausstattung als auch eine etwaige elektrotechnische Steuer- bzw. Regeleinheit müssen zur Gewährleistung eines nachhaltigen Anlagenbetriebs hohe Anforderungen an Robustheit, Bedienung, Wartungsaufwand, Ersatzteilbeschaffung erfüllen. Durch die Anpassung der hydraulischen Charakteristika der Pumpe und PAT bzgl. einer einheitlichen Nenndrehzahl kann auf den Einsatz eines Getriebes bewusst verzichtet und der Wartungsaufwand reduziert werden. Hinsichtlich der Wasserentnahme aus einem natürlichen Fließgewässer ist die Abrasionsbeständigkeit der sensiblen Komponenten gegenüber der Feststofffracht zu berücksichtigen (u.a. durch die Auswahl geeigneter Metalllegierungen). Weiter sind Konzepte zum Schutz der PAT und Pumpe vor dem Eintrag der mitgeführten Feststofffracht erforderlich (u.a. kontinuierliche Überwachung der Feststofffracht, Einsatz eines horizontalen Filterrohrs am Einlauf zur Fallleitung). Darüber hinaus ist die Entwicklung von Betriebskonzepten für die bislang neuartige Anbindung an Wasserkraftwerke notwendig. Das Monitoring- und Alarmsystem soll einfach und intuitiv zu bedienen sein. Es soll als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der Anlage dienen und durch Alarmzustände über umgehende Neueinstellung informieren. Durch die Messwertausgabe an einem zentralen Schaltschrank sollen die Betreiber abfluss- und bedarfsabhängig zwischen Stromerzeugung und Wasserförderung wählen können. Die Festlegung der Betriebsstrategie (Fokus Wasserförderung und / oder Stromproduktion) hat direkten Einfluss auf den Umfang der erforderlichen elektrotechnischen Ausstattung des Wasserfördersystems (energetisch autark und / oder netzgespeist). Durch eine zusätzliche Erweiterung mit einem automatisierten Not-Stopp sollen kriti-

sche Betriebszustände (z.B. Unterschreitung des Ausbaudurchflusses oder Lastabwurf) vermieden werden. Neben der Entwicklung eines angepassten Betriebskonzeptes soll ein Wartungs- und Betriebshandbuch ausgearbeitet werden, welches an die Kenntnisse der künftigen Betreiber anknüpft. Um ein Bewusstsein für die mit dem Betrieb einhergehenden technische, betriebliche und finanzielle Verantwortung zu schaffen, wird eine didaktisch fundierte, grafische Aufbereitung aller wesentlichen Inhalte angestrebt.

Als übergeordnetes Ergebnis dieser Arbeit ergibt sich ein allgemeingültiger Leitfaden zur Bemessung sowie zur hydraulischen und betrieblichen Anbindung des Wasserfördermoduls an ein bestehendes Wasserkraftwerk. Als konkretes Ergebnis wird das entwickelte Wasserfördermodul im Rahmen des Verbundvorhabens KaWaTech, welches näher im Abschnitt 1.3 beschrieben wird, pilotaft im Dong Van Karst Plateau im Norden Vietnams umgesetzt.

Diese Arbeit soll mit folgenden Lösungsansätzen zur Verbesserung der Wasserversorgung im Allgemeinen und im Norden Vietnams im Speziellen beitragen:

- Entwicklung eines angepassten Systemkonzeptes zur flexiblen Nutzung der Dar gebotsschwankungen an Wasserkraftwerken (Wasserförderung und/oder Stromproduktion)
- Auslegung und Optimierung der Maschinentechnik auf Basis invers betriebener Pumpen als Turbinenersatz (PAT) für Hochdruckanlagen
- Verwendung einfacher, pragmatischer und robuster Lösungen zur Adaption eines oder mehrerer Fördermodule an die bestehende Anlageninfrastruktur
- Entwicklung eines angepassten Monitoring- und Alarmsystems (energetisch autarke und/oder netzgespeiste Systeme)
- Umsetzung einer Referenzanlage mit einer Förderleistung von bis zu 1,5 Mio. l/d als Demonstrationsprojekt im Rahmen des Verbundvorhabens KaWaTech

1.3 Verbundprojekt KaWaTech

Das Verbundvorhaben KaWaTech wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und beinhaltet die FuE-Projekte KaWaTech Vietnam (Förderkennzeichen 02WCL1291A, Laufzeit September 2013 bis August 2016) und KaWaTech Solutions (Förderkennzeichen 02WCL1415, Laufzeit November 2016 bis Juli 2021). Innerhalb des Verbundvorhabens arbeitet ein interdisziplinäres Netzwerk deutscher und vietnamesischer Partner aus Universitäten, Forschungseinrichtungen, industrieller Unternehmen und öffentlicher Verwaltungseinrichtungen gemeinsam an der Entwicklung und Erprobung innovativer Lösungen für eine angepasste Wasserversorgung in tropischen und subtropischen Karstregionen auf Basis regenerativer Energiekonzepte. Die Umsetzung der Forschungsaktivitäten erfolgt dabei im nordvietnamesischen Dong Van Karst Plateau. Seit 2010 ist diese Karstlandschaft der erste offizielle UNESCO Geopark Vietnams und der Zweite in ganz Südostasien.

Ein zentrales Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung innovativer Wasserförder- und -verteilkonzepte, welche die nachhaltige Wasserversorgung von ca. 10.000 Menschen sicherstellen soll. Zudem soll durch die Bereitstellung von praxisorientierten Erfahrungswerten das Initial für die Multiplikation ähnlicher Vorhaben in Bedarfsregionen mit vergleichbaren Rahmenbedingungen im Wasserversorgungssektor gegeben werden. Dies erfordert einen interdisziplinären Ansatz, um die Expertise verschiedenster Fachbereiche einzubinden. Es ergeben sich Arbeitsschwerpunkte und Aktivitäten in den Bereichen speläologische Erkundungen, hydrogeologische und hydrologische Untersuchungen, wasserkraftbasierte und photovoltaikbasierte Fördersysteme, angepasste Wasserverteilungssysteme und Wasseraufbereitungsanlagen, nachhaltige Baustoffe und Bautechniken sowie Wasserschutzmaßnahmen in Karstgebieten. Zur Gewährleistung eines nachhaltig erfolgreichen Technologie- und Wissenstransfers werden die Aktivitäten durch Capacity-Development-Maßnahmen unterstützt.

Das Verbundprojekt wird auf deutscher Seite vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) koordiniert. Weitere Wissenschaftspartner sind das Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) und das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) des KIT sowie die Ruhr-Universität Bochum (RUB), vertreten durch das Institut für Umwelttechnik + Ökologie im Bauwesen (U+Ö). Partner aus der freien Wirtschaft sind aus den Bereichen Pumpentechnik, Anlagenbau und Messtechnik (KSB SE & Co. KgaA, Markus Klotz GmbH, Hydro-Elektrik GmbH, Disy GmbH). Vietnamesische Wissenschaftspartner sind das am Ministerium für natürliche Ressourcen und Umwelt (MONRE) angesiedelte Vietnamesische Institut für Geowissenschaften und mineralische Rohstoffe (VIGMR), die Provinzverwaltung Ha Giang Peoples' Committee (HGPC) sowie die Thuy Loi Universität Hanoi (TLU).

1.4 Aufbau und Struktur

Der Aufbau dieser Arbeit lässt sich thematisch in drei Teile gliedern. Im ersten Teil wird der Stand der Wissenschaft und Technik vorgestellt, welcher zum umfassenden Verständnis der zu lösenden Problematik sowie des entwickelten Lösungsansatzes benötigt wird. Im zweiten Teil werden die Probleme und Potentiale in der Wasserförderung und Wasserkraftnutzung aufgrund der extremen naturräumlichen (u.a. stark schwankendes Wasserdargebot, große Höhenunterschiede, hoher Feststofftransport) und soziokulturellen Randbedingungen (u.a. Mangel an angepassten Technologien, fehlender Technologietransfer) aufgezeigt und ein allgemeingültiger Lösungsansatz für die Optimierung bestehender Wasserkraftwerke durch ein adaptives Wasserfördersystem erarbeitet. Darauf aufbauend wird im dritten Teil der entwickelte Lösungsansatz als spezifische Lösung an einer Pilotanlage im Norden Vietnams umgesetzt und dessen Betrieb analysiert. Die Inhalte der einzelnen Kapitel dieser Arbeit werden im Folgenden kurz erläutert:

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen der Wasserkraftnutzung und Wasserförderung beschrieben. Da die Motivation, Wasser auf ein höheres Niveau zu heben, schon seit dem Sesshaftwerden der Menschheit besteht, wird zudem ein Überblick über die Funktionsweise historischer wasserkraftbetriebener Wasserfördersysteme gegeben. Die mechanische Kopplung einer Wasserkraftmaschine mit einer Förderpumpe lässt sich bis in die

Antike zurückverfolgen (z.B. „Maschine von Marly“ zur Versorgung des Schlossparks Versailles) (Brandstetter, 2006). Einige Technologien (z.B. Hydraulischer Widder) zeichnen sich noch heute durch ein hohes Anwendungsspektrum insbesondere für den dezentralen Einsatz in entlegenen Regionen aus. Daher sind die Grundlagen der historischen Technologien auch für diese Forschungsarbeit noch im großen Maße relevant. Bestandteil näherer Betrachtung sind invers betriebene Kreiselpumpen.

Kapitel 3 behandelt die Entwicklung des Wasserförderersystems als Bypass-System für Wasserkraftwerke. Hierbei wird zunächst, neben der Einordnung der klimatischen und naturräumlichen sowie sozioökonomischen und soziokulturellen Randbedingungen, die Wasserversorgungsproblematik in den ländlichen Siedlungsstrukturen näher beschrieben. Durch die großen Höhendifferenzen zwischen der Lage der Wasserressourcen und den Verbrauchern sind in Anbetracht des hohen Energiebedarfs enorme hydraulische Anforderungen an die Wasserfördertechnik gegeben. Dabei stellt die direkte Nutzung der Wasserkraft durch die direkte mechanische Kopplung einen sinnvollen Ansatz zur Bereitstellung der Antriebsenergie für Wasserförderersysteme dar. Bislang werden die Wasserkraftpotentiale lediglich an Wasserkraftwerken zur Stromproduktion genutzt. Darauf aufbauend wird die Effizienz der Wasserkraftwerke aufgrund der zeitlichen und räumlichen Schwankungen des Wasserdargebots analysiert. Hierfür ist eine Betrachtung des Nutzungsgrades konventioneller Wasserkraftwerke erforderlich. Es zeigt sich, dass vor allem während der Trockenmonate viele Anlagen einen derart schlechten Wirkungsgrad erzielen, dass es aufgrund ökonomischer Ineffizienz zu Standzeiten kommt. Um eine zukünftige Wasserversorgung in diesen Regionen zu ermöglichen, wird ein angepasstes Systemkonzept vorgestellt, welches die Nutzung der für den Turbinenbetrieb nicht effizient verwertbaren Niedrigwassermengen vorsieht. Das mechanisch betriebene Wasserförderersystem ist für diese geringen Abflussmengen ausgelegt und über einen Bypass an das Wasserkraftwerk gekoppelt. Die Dargebotsschwankungen an Wasserkraftwerken können hierdurch über die Teilsysteme Wasserkraftwerk und Wasserförderersystem flexibel genutzt werden.

In Kapitel 4 wird der Norden Vietnams als Modellregion zur Umsetzung der Demonstrationsanlage beschrieben. Dabei wird die bestehende Wasserversorgung in den ruralen und urbanen Siedlungsstrukturen analysiert. Die vorhandenen Wasserkraftpotentiale in der Modellregion werden bislang lediglich von einem Hochdruck-Ausleitungskraftwerk zur Stromproduktion genutzt. Dieses kann jedoch aufgrund der abfallenden Wirkungsgrade der Turbinen in der Trockenzeit nicht wirtschaftlich betrieben werden. Das verbleibende Energiepotential bleibt gerade in Zeiten, in denen der Bedarf an Wasser für den alltäglichen Gebrauch und die Bewässerung am höchsten ist, ungenutzt.

In Kapitel 5 wird der Ausgangszustand des vorhandenen Wasserkraftwerkes analysiert und hydraulische, bauliche und betriebliche Konzepte für die Anbindung des Wasserförderersystems vorgestellt. Neben der Entwicklung der Maschinentechnik befasst sich das Kapitel u.a. mit technischen Lösungen zur Optimierung des Feststoffrückhalts zum Schutz des Wasserfördermoduls. In Korrelation mit den soziokulturellen Randbedingungen sind zudem Betriebsstrategien und angepasste Steuerungs- und Regelungskonzepte aufgezeigt. Abschließend wird das Systemkonzept auf seine Wirtschaftlichkeit hin untersucht.

In Kapitel 6 erfolgt die technische Umsetzung unter Berücksichtigung der dort vorherrschenden Randbedingungen. Die Implementierungsstrategien stehen hierbei im Einklang mit den individuellen und kulturellen Gegebenheiten und zielen auf eine nachhaltige,

lokale Wirtschaft ab. Die Umsetzung orientiert sich an den (realistisch) erreichbaren Qualifikationen des Fachpersonals vor Ort und dessen Möglichkeiten. Durch die inter- und transdisziplinäre Kooperation aller Beteiligten in allen Stadien der Technologieentwicklung und -implementierung kann ein umfassender Technologie- und Wissenstransfer ermöglicht werden.

In Kapitel 7 wird im Rahmen einer umfassenden technischen und betrieblichen Zustandsanalyse die Funktionalität der technischen Komponenten und die Nachhaltigkeit des adaptiven Wasserförderersystems evaluiert. Abschließend wird die Übertragbarkeit der Demonstrationsanlage bewertet.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche vertiefende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gegeben.

Kapitel 2

Wasserförderung unter Nutzung von Wasserkraft

Wasser und Energie sind fast immer untrennbar verbunden. Für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserförderung kommt der Wahl der Energieform und dem Antrieb eine wichtige Bedeutung zu. In Entwicklungs- und Schwellenländern sind dabei hohe Anforderungen an die Antriebstechnik hinsichtlich Robustheit, Langlebigkeit, Wartungsarmut und Reparaturfreundlichkeit gefordert. Im vorliegenden Abschnitt wird der Energiebedarf in Wasserfördersystemen aufgezeigt und Energieformen und Antriebsmöglichkeiten dargestellt. Als älteste regenerative Energietechnik wurde die Wasserkraft bereits in der Antike zur Wasserförderung genutzt. Die globale Energiewende sowie der Bedarf einer dauerhaften Wasserversorgung in ausreichender Menge und Qualität machen heute den Einsatz wasserkraftbetriebener Wasserfördertechnologien an dezentral gelegenen Standorten wieder interessant. Bestandteil näherer Betrachtung sind hierbei Pumpen als Turbinen (PAT) als Antriebsaggregate für Hochdruckpumpen.

2.1 Energiebedarf in Wasserfördersystemen

2.1.1 Energieverluste im Rohrnetz

Die benötigten Grundlagen der Rohrhydraulik werden im Folgenden für stationäre Strömungen, d.h. zeitunabhängige Strömungen, behandelt. Für weitere Erklärungen und Ausführungen wird auf Lehr- und Handbücher der Hydromechanik verwiesen (z.B. Surek und Stempin (2007), Böswirth u. a. (2014) oder Zanke (2013)).

Massenerhaltung

Der Massenerhaltungssatz verlangt, dass die Masse m einer Stromröhre konstant bleibt. Das bedeutet, dass die in ein System eintretende Masse stets der aus einem System austretenden Massen entspricht. Dieses Prinzip der Massenerhaltung kann durch die Kontinuitätsgleichung ausgedrückt werden:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \rightarrow \dot{m} = \rho_k \cdot v_{m,k} \cdot A_k = \text{konst.} \quad (2.1)$$

Dabei wird der Massenstrom \dot{m} an der betrachteten Stelle k über die Dichte ρ_k , die mittlere Fließgeschwindigkeit $v_{m,k}$ und die Fläche A_k beschrieben.

Für inkompressible Fluide ($\rho = \text{konst.}$) wird üblicherweise mit dem Volumenstrom \dot{V} anstelle des Massenstromes \dot{m} gerechnet. Die Kontinuitätsgleichung vereinfacht sich zu:

$$\frac{dV}{dt} = 0 \rightarrow \frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{V} = v_{m,k} \cdot A_k = \text{konst.} \quad (2.2)$$

Der Volumenstrom resp. Durchfluss ist innerhalb des Systems gleich groß. Demnach reduziert sich zur Erhaltung eines konstanten Volumenstroms die Fließgeschwindigkeit bei Erhöhung der durchströmten Fläche bzw. bei größerem Rohrdurchmesser und umgekehrt.

Energieerhaltung

Die Energieerhaltung resp. Bernoulli-Gleichung sagt aus, dass für inkompressible Fluide in einer verlust- und rotationsfreien Strömung die Gesamtenergie E_{Ges} jedes Teilchen in einer Strömungsrohre konstant ist, sofern nicht von außen Energie zu- oder abgeführt wird. Die Gesamtenergie jedes Teilchens setzt sich zusammen aus der kinetischen Energie $E_K = 1/2 \cdot m \cdot v_m^2$, der potentiellen Energie $E_P = m \cdot g \cdot z$ und der Druckenergie $W_P = (m/\rho) \cdot p$; mit der Masse m , der mittlere Fließgeschwindigkeit v_m , der Erdbeschleunigung g , der Höhendifferenz z zum Bezugsniveau und dem Druck p . Die Summe der Energieteile bleibt entlang der Stromröhre erhalten, wobei je nach hydraulischen und geometrischen Randbedingungen die Größen der spezifischen Energieanteile variieren können. Bezogen auf die Gewichtseinheit des Fluids können die Energieanteile anschaulich in Energiehöhen ausgedrückt und als Meter Wassersäule interpretiert werden. Es gilt für jeden Punkt k der Stromröhre:

$$\frac{v_{m,k}^2}{2g} + \frac{p_k}{\rho \cdot g} + z_k = E_{Ges,k} = \text{konst.} \quad (2.3)$$

Mithilfe der Bernoulli-Gleichung können die Größen der Energieanteile an jeder Stelle im System berechnet werden. Die Gleichung gilt jedoch nur für verlustfreie Strömungen. Um die zusätzlichen Energieverluste eines realen Fluids infolge Wandreibung und Viskosität sowie bedingt durch die Rohrgeometrie zu berücksichtigen, muss die Gleichung erweitert werden.

Energieverluste

Die Energieverluste in einer Rohrströmung setzen sich grundsätzlich zusammen aus den kontinuierlichen Verlusten $h_{v,kont}$ in einem geraden Leitungsabschnitt und den lokalen Verlusten $h_{v,lok}$ aufgrund von geometrischen Änderungen im Rohrverlauf (z.B. Krümmer, Abzweigungen, Verjüngungen oder Erweiterungen, Armaturen).

Um die kontinuierlichen und lokalen Energieverluste in einer Rohrströmung zu berücksichtigen, muss die Bernoulli-Gleichung durch einen zusätzlichen Term, den Energieverlusthöhenterm h_v , erweitert werden. Die erweiterte Bernoulli-Gleichung realer inkompressibler Fluide mit der auftretenden Verlusthöhe zwischen den zwei Bilanzierungspunkten 1 und 2 lautet:

$$\frac{v_{m,1}^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{v_{m,2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 + h_{v,kont} + h_{v,lok} \quad (2.4)$$

Abbildung 2.1 zeigt Ausschnitte eines Rohrsystems mit kontinuierlichen und lokalen Energieverlusten.

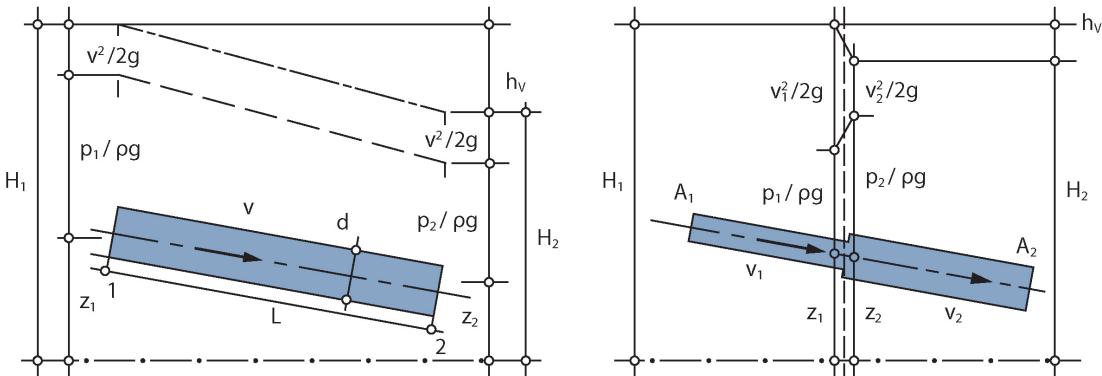


Abbildung 2.1: Rohrleitungsabschnitt mit kontinuierlichen Verlusten (links) und lokalen Verlusten durch Rohraufweitung (rechts) nach Zanke (2013)

Die kontinuierlichen Verluste können durch den Ansatz nach Darcy-Weißbach berücksichtigt werden:

$$h_{v,kont} = \lambda \cdot \frac{v_{m,k}^2}{2g} \cdot \frac{L}{D} \quad (2.5)$$

Dabei ist λ die dimensionslose Rohreibungszahl, L die Länge des durchströmten Rohrab schnittes, $v_{m,k}^2/2g$ die Geschwindigkeitshöhe und D der Rohrdurchmesser.

Die Rohreibungszahl λ ist eine Funktion der Reynoldszahl Re und der relativen Rauheit k_s/D :

$$\lambda = f(Re, \frac{k_s}{D}) \quad (2.6)$$

Die Reynoldszahl Re beschreibt die Strömungsart (laminar oder turbulent) und die Geschwindigkeitsverteilung (parabolisch oder logarithmisch) bedingt durch die Einflüsse von Trägheit und Viskosität. Die relative Rauheit k_s/D berücksichtigt die Rohrbeschaffenheit (äquivalente Sandrauigkeit k_s) in Relation zum Rohrdurchmesser D. Die Ansätze zur Ermittlung der Rohreibungszahl λ für laminare und turbulente Rohrströmungen wurden durch zahlreiche Versuche über einen breiten Parameterbereich (Re und k_s/D) evaluiert und im Moody-Diagramm zusammengefasst. Die Zusammenhänge der einheitslosen Größen der Reibungszahl λ , der Reynoldszahl Re und der relativen Rauheit k_s/D finden sich in der Fachliteratur. An dieser Stelle sei für weitere Informationen auf Sigloch (2017) und Nikuradse (1932) verwiesen.

Die lokalen Energieverluste entstehen aufgrund von Einbauten wie Bögen, Schieber oder Querschnittsänderungen. Zum Beispiel kommt es bei einer plötzlichen Rohraufweitung zu Ablösungen in diesem Bereich und dadurch zu Rückströmungen und erhöhten Energieverlusten durch turbulente Dissipation. Die lokal begrenzten Auswirkungen können durch

den dimensionslosen Verlustbeiwert ξ beschrieben werden. Dieser wird üblicherweise proportional zur Geschwindigkeitshöhe parametrisiert und ergibt sich zu:

$$h_{v,lok} = \xi \cdot \frac{v_{m,k}^2}{2g} \quad (2.7)$$

Die Verlustbeiwerte werden dabei fast immer durch experimentelle Untersuchungen bestimmt. Eine Zusammenstellung der Verlustbeiwerte für verschiedene Einlaufgeometrien findet sich z.B. in Miller (1990) oder Idelchik und Fried (1986).

2.1.2 Leistungsbedarf einer Pumpe

Pumpen sind Arbeitsmaschinen, die über einen Antrieb Energie in Form von mechanischer Arbeit aufnehmen und auf das Fördermedium übertragen. Dabei muss ausreichend Energie bereitstehen, um die geodätische Förderhöhe und die Energieverluste im Rohrnetz beim Wassertransport zu überwinden. Die Kreiselpumpe ist die am häufigsten verwendete Bauform. Der Energieumsatz in Kreiselpumpen beruht grundsätzlich auf hydrodynamischen Vorgängen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass alle Druck- und Energiedifferenzen proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit sind. Das Wasser strömt durch den Saugstutzen dem Laufrad axial zu und wird durch Zentrifugalbeschleunigung nach außen gedrückt. Durch die Umlenkung und die Querschnittsänderung am Austritt entsteht eine Druckerhöhung. Je nach Förderhöhe und Förderstrom wird die Kreiselpumpe mit radialem, halbaxialen oder axialen Laufrädern ausgeführt. Der Anwendungsbereich kann durch mehrstufige oder mehrflutige Bauformen erweitert werden. (Gülich, 2013)

Die Förderleistung einer Pumpe P_Q bezeichnet die von der Pumpe erbrachte nutzbare Leistung bei der Erzeugung einer Förderhöhe H und eines Förderstromes Q . Sie ist also die dem System zugeführte Energie und ergibt sich durch Multiplikation des geförderten Massenstromes $\dot{m} = \rho Q$ und der spezifischen Förderarbeit $Y = g H$:

$$P_Q = \dot{m} \cdot Y = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.8)$$

Bei allen Bewegungsvorgängen in Strömungsmaschinen entstehen „Verluste“, die in Wärme umgesetzt werden. Der Leistungsbedarf einer Pumpe P_W ist die von der Pumpenwelle aufgenommene mechanische Leistung. Er ist um die Verlustleistung der Pumpe größer als die Förderleistung und beträgt:

$$P_W = \frac{P_Q}{\eta_P} \quad (2.9)$$

Die Verlustleistung, d.h. die hydraulischen Verluste in der Pumpe selbst (zwischen Saug- und Druckstutzen) sowie ihrer Lagerreibungsverluste können durch den Pumpenwirkungsgrad η_P erfasst werden. Die Motoren- oder Antriebsleistung P_M berechnet sich aus der Wellenleistung P_W und dem Motorenwirkungsgrad η_M (Patt und Gonsowski, 2011):

$$P_M = \frac{P_W}{\eta_M} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_P \cdot \eta_M} \quad (2.10)$$

Der Gesamtwirkungsgrad ($\eta_{Ges.} = \eta_P \cdot \eta_M$) liegt für gewöhnlich zwischen 0,6 und 0,8. Der Pumpenwirkungsgrad η_P reicht von 0,7 bis 0,9. (Fritsch u. a., 2019) Bei der Auswahl der

Größe des Antriebes (meistens Elektromotor) ist die Auslegungsleistung der Pumpe im Betriebspunkt zugrunde zu legen. Der entsprechende Leistungsfluss ist in Abbildung 2.2 veranschaulicht.

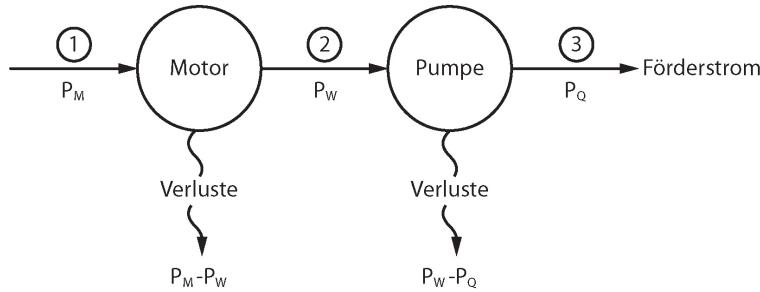


Abbildung 2.2: Leistungsfluss eines Pumpenaggregats mit Strom oder Treibstoff (1) mechanischer Leistung (2) hydraulischer Leistung bzw. Förderleistung (3) nach Patt und Gonsowski (2011)

Etwa 20 % des weltweiten Energieverbrauchs werden durch Wasserförderersysteme verursacht. Die Energiekosten machen dabei etwa 85 % bis 90 % der Lebenszykluskosten aus. Der Energieverbrauch eines Wasserförderersystems wird von folgenden Faktoren bestimmt (Schindl und Payer, 2015):

- Pumpenwirkungsgrad (Bauform und Konstruktion der Pumpe etc.)
- Motorenwirkungsgrad (Energieeffizienz des Antriebsmotors etc.)
- Anlagenbauteile, wie Rohre, Einbauten und Armaturen
- Auslegung des Wasserförderersystems (aufgrund von Sicherheitszuschlägen werden oft überdimensionierte Pumpen eingesetzt)
- Pumpenregelung (z.B. Anlasssystem, ggf. Drehzahlregelung (Frequenzumrichter) und Transformation zur Bereitstellung der erforderlichen Maschinenspannung)
- Belastungsprofil der Anlage

2.2 Potentielle Energiequellen

2.2.1 Energieformen und Antriebsmöglichkeiten

Die Energie kann in verschiedenen Formen auftreten als elektrische Energie (z.B. Energie einer Spule oder eines Kondensators), potentielle Energie (z.B. gespeicherte Energie des Wassers), kinetische Energie (z.B. Bewegungsenergie des Windes), Wärmeenergie (z.B. Energie von der Sonne) oder chemische Energie (z.B. Energie von fossilen Brennstoffen). Dabei gilt für all diese Energieformen W_i der Erhaltungssatz der besagt, dass in einem abgeschlossenen System die Summe aller Energieformen bei Zustandsänderungen konstant bleibt. D.h. die Energie kann in einem geschlossenen System weder erzeugt noch vernichtet werden.

werden, sodass die Energie nur durch Änderung der Energieform genutzt werden kann. Es gilt (Joos, 2019):

$$\sum_i W_i = \text{konst.} \quad (2.11)$$

Die Nutzung der aus der Umwelt entnommenen Energie ist immer mit einem Energieumwandlungsprozess und somit mit Verlusten gekoppelt. Mithilfe des Energiewirkungsgrades kann das Verhältnis zwischen Eingangsenergie und Nutzenergie beschrieben werden. Viele Energieumwandlungsprozesse bestehen dabei aus mehreren Umwandlungsprozessen wie z.B. beim Dampfkraftwerk (Chemische Energie → Wärmeenergie → Bewegungsenergie → elektrische Energie). (Joos, 2019)

Die Prozesskette von der Gewinnung der Primärenergie bis zur Nutzenergie, d.h. die Energieform, die der Energieabnehmer für die gestellte Aufgabe letztlich benötigt, kann mithilfe des Flussdiagramms in Abbildung 2.3 beschrieben werden.

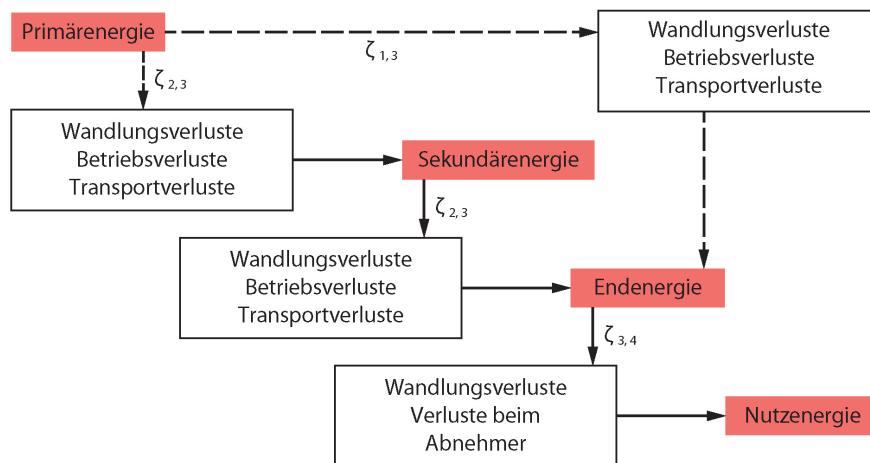


Abbildung 2.3: Umwandlungsprozess von der Gewinnung der Primärenergie bis zur Nutzenergie nach Joos (2019)

Im Folgenden sind die einzelnen Umwandlungsstufen beschrieben (Joos, 2019):

- **Primärenergie:** Als Primärenergie bezeichnet man die Energien, die direkt der Umwelt entnommen werden wie etwa fossile Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) oder fossile Mineralien (Uranerz) sowie alternative Energieträger (Sonnenenergie, Windenergie, Geowärme, Biomasse, Wasserkraft).
- **Sekundärenergie:** Die Sekundärenergie entsteht durch Umwandlung der Primärenergie in eine Form, die leicht zu verteilen ist. Falls nach der Wandlung die neue Energieform direkt zum Energieabnehmer transportiert werden kann, wie z.B. die elektrische Energie aus einem Dampfkraftwerk auf Kohlebasis, erübrigts sich dieser Schritt.
- **Endenergie:** Als Endenergie bezeichnet man die Energieform, die dem Energieabnehmer nach den Umwandlungsprozessen zur Verfügung steht z.B. elektrische Energie oder chemische Energie in Form von Heizöl oder Heizgas.

- **Nutzenergie:** Unter Nutzenergie versteht man die Energieform, die der Energieabnehmer für die gestellte Aufgabe letztlich benötigt z.B. mechanische Energie.

Die Nettowirkungsgrade verschiedener Kraftwerkstypen in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Hierbei zeichnen sich Wasserkraftwerke mit einem hohen Wirkungsgrad aus und wandeln bis zu 90 % der Wasserkraft in nutzbare Energie um. (Giesecke und Mosonyi, 2009).

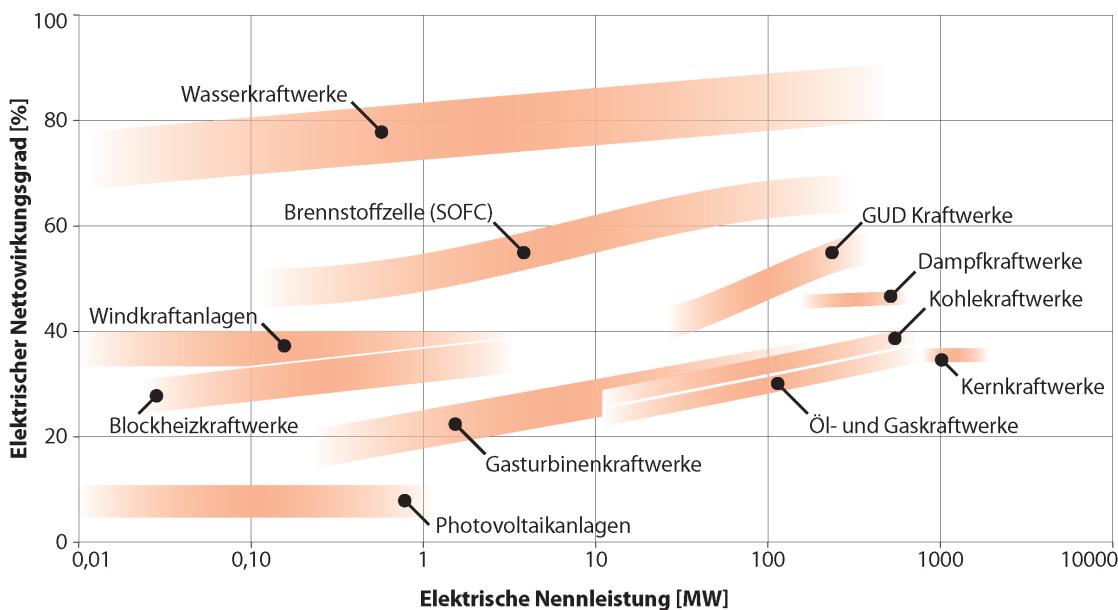


Abbildung 2.4: Übersicht der Nettowirkungsgrade verschiedener Kraftwerkstypen nach Giesecke und Mosonyi (2009)

Für den Antrieb eines Wasserfördersystems wird entsprechend Abbildung 2.2 mechanische Energie benötigt. Die Antriebsenergie kann durch die Muskelkraft von Mensch oder Tier, die Nutzung der Schwerkraft oder der Energie aus fossilen oder regenerativen Energieformen bereitgestellt werden. Abbildung 2.5 liefert einen Überblick über die Energieformen und die verschiedenen Umwandlungsprozesse bis hin zur Nutzenergie resp. Wasserförderung mittels Pumpe.

Für die Wasserförderung stehen eine Vielzahl an Systemen mit unterschiedlichem Technisierungsgrad zur Verfügung. Die Wahl des Antriebs hängt unter anderem davon ab, wie hoch der Leistungsbedarf der Pumpe ist. Auch Faktoren wie die Wartungsfreundlichkeit, die Energieeffizienz und die Systemkomplexität in Bezug auf die sozioökonomischen und soziokulturellen Rahmenbedingungen können eine Rolle spielen. Während in einigen Ländern (z.B. in Deutschland, Spanien, USA, aber auch in China) der Ausbau regenerativer Energien derzeit rasch zunimmt, wird ein weltweites Wachstum jedoch noch durch - im Vergleich zu konventionellen Energieträgern - relativ hohe Investitionskosten und den notwendigen Technologietransfer erschwert (Joos, 2019). Der Direktantrieb ermöglicht im Vergleich zu Solarenergie, Biomasse und Geothermie eine geringere Systemkomplexität, da auf verlustbehaftete Zwischenstufen verzichtet werden kann. Die Umwandlung von potentieller Energie in mechanische Energie ist dabei ein fast idealer Wandlungsprozess.

Bei z.B. Solarenergie kann lediglich elektrischer Strom bereitgestellt werden. Dabei treten deutlich höhere Energieverluste auf (Abwärme, Reibung etc.).

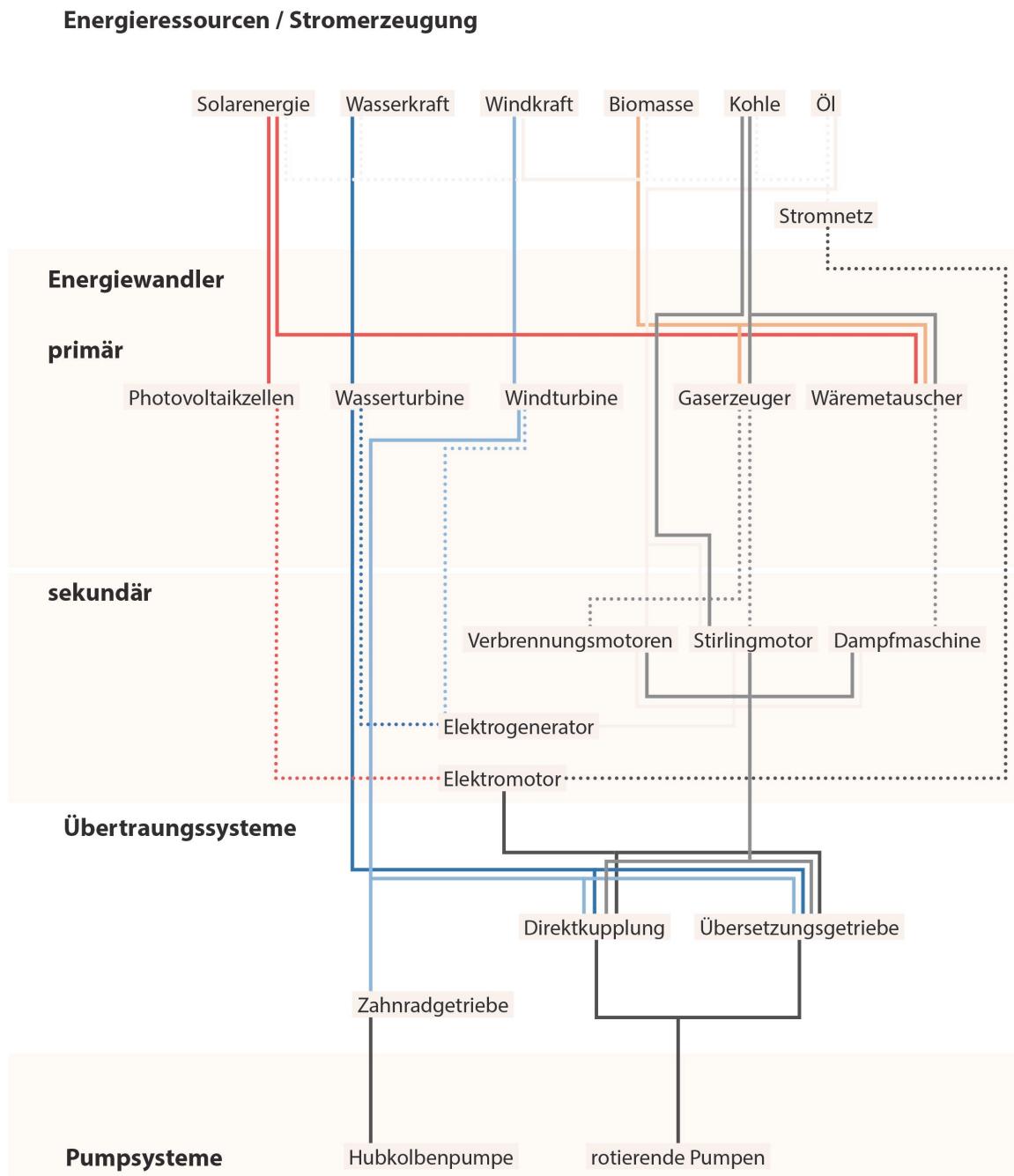


Abbildung 2.5: Übersicht der Energieformen und verschiedener Wandlungsprozesse der Energie bis hin zur Wasserförderung mittels Pumpe nach Wembacher (2013)

2.2.2 Wasserkraftpotentiale weltweit

Die Wasserkraft ist neben der Windkraft die älteste vom Menschen genutzte Energiequelle. In der Geschichte finden sich zahlreiche Beispiele, in welchen die Energie des Wassers für

den direkten Antrieb von Wasserförderersystemen genutzt wurde (siehe Abschnitt 2.3). Mit der Elektrizität und des Industriezeitalters verloren viele dieser Technologien jedoch an Bedeutung.

Heute wird unter dem Begriff „Wasserkraft“ vor allem die Umwandlung der kinetischen und potentiellen Energie des Wassers durch die Nutzung von Turbinen und über den Antrieb von Generatoren in elektrische Energie verstanden. Die Wasserkraft ist bei der Stromerzeugung weltweit die wichtigste regenerative Energiequelle. Vorteile der Wasserkraft sind die vergleichsweise hohe Planbarkeit im Unterschied zu z.B. Sonnenenergie und Windkraft, die gute Regelbarkeit der erzeugten Energie sowie die hohen Wirkungsgrade.

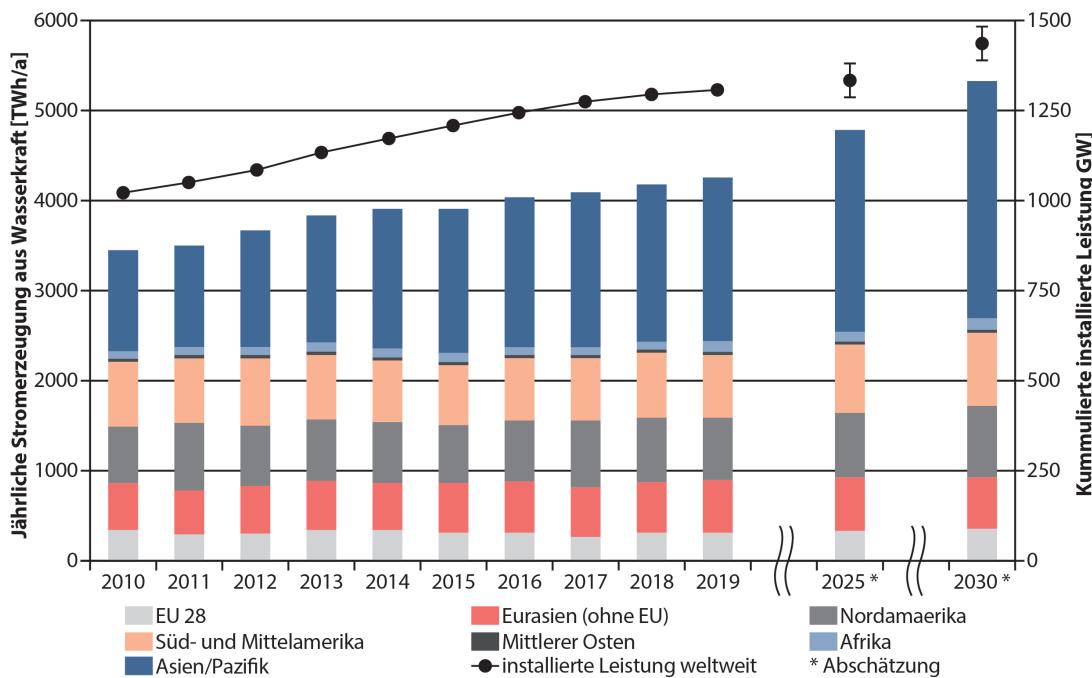


Abbildung 2.6: Weltweite Stromerzeugung aus Wasserkraft (BWK, 2019)

Eine Übersicht der weltweiten Stromerzeugung aus Wasserkraft ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Während in Europa bereits ein hoher Ausbaustand erreicht ist, wurde der größte Zubau 2019 - wie auch in den vergangenen Jahren - in Asien mit einer neu installierten Leistung von rund 6,2 GW (rund 70 % in China) realisiert (BWK, 2019). Als ausgereifte Technologie bietet die Wasserkraft vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern die Möglichkeit, die wirtschaftliche Situation und den Lebensstandard zu verbessern. Dabei wird in vielen Staaten insbesondere die Kleinwasserkraft zunehmend ausgebaut (UNIDO und ICSHP, 2019).

2.3 Wasserkraftbetriebene Wasserförderersysteme

Die Nutzung lokaler Wasservorkommen spielte bereits in der Antike eine entscheidende Rolle. Durch entstandene Siedlungen und landwirtschaftliche Anbauflächen musste zunehmend Wasser von tieferliegenden Vorkommen auf ein höheres Niveau gehoben werden.

Lange Zeit wurde hierfür die Muskelkraft von Mensch und Tier eingesetzt. Jahrzehnte später wurde die Energie des Wassers, d.h. die Überführung der Wasserkraft in mechanische Arbeit eingesetzt. Die Vergangenheit zeigt in eindrucksvoller Weise die großartigen Leistungen der damaligen Völker in Verbindung mit dem Wasser und den das Wasser beherrschenden Baumaßnahmen. Die direkte Nutzung der Wasserkraft zur Wasserförderung verlor jedoch durch das Industriezeitalter, der Elektrizität und der Entdeckung des Erdöls zusehends an Bedeutung. Die Ölkrise um 1973 führte zwar zu einem erneuten kurzen Aufblühen wasserkraftbetriebener Wasserfördertechnologien, durch sinkende Ölpreise im 20. Jahrhundert ging das Interesse jedoch wieder zusehends zurück. Heute rücken diese Technologien im Hinblick auf eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserversorgung v.a. in schlecht erschlossenen Regionen erneut in den Fokus. In der Forschung und Praxis erfahren diese Ansätze eine vielseitige Weiterentwicklung und Optimierung. (Zambrano u. a., 2019)

Einige historische und innovative wasserkraftbetriebene Wasserfördersysteme sind im Folgenden aufgezeigt:

Die direkte mechanische Kopplung einer Wasserkraftmaschine resp. Antriebsmaschine und einer Pumpe lässt sich bis in die Antike zurückverfolgen. Als erste hydraulische Antriebsmaschine ermöglichte das Wasserrad bereits im 3. Jahrhundert die Umsetzung von potentieller oder kinetischer Energie in den Antrieb von Wasserfördersystemen. Durch die Umwandlung der Drehbewegung in eine lineare Bewegung mithilfe von Kurbelwellen und Pleuelstangen konnte die Wasserrad- und Pumpentechnik zu immer leistungsstärkeren und komplexeren mechanisch gekoppelten Systemen weiterentwickelt werden. (Giesecke und Mosonyi, 2009) Mit den gesammelten Erfahrungen verschiedenster Techniken in der Wasserversorgung wurde im 17. Jahrhundert die größte hydraulisch angetriebene Pumpenanlage Europas zur Versorgung des Schlosssparks Versailles gebaut. Eine vierstufige Wasserhebeanlage mit 221 Pumpen wurde mit 14 unterschlächtigen Wasserrädern mit einem Durchmesser von 12 m angetrieben. Die sogenannte "Maschine von Marly" konnte bei einem Höhenunterschied von 160 m etwa 2.000 - 2.500 m^3 Wasser pro Tag fördern. Bei einem Wirkungsgrad von lediglich 6,7 % mit einer Nutzleistung von 59 KW werden die gigantischen Ausmaße dieser Anlage deutlich. (Brandstetter, 2006)

Die erste Innovation zur Nutzbarmachung hoher Wassergefälle mit geradliniger Bewegung wurde 1747 entwickelt. Als Antrieb wird das Prinzip der perpendikulären Röhren ausgenutzt. Die Wassersäulenmaschine besteht aus einem Zylinder, in dem ein Kolben durch den hydrostatischen Druck der Wassersäule geradlinig hin und her bewegt wird. Aufgrund der geringen Drehzahlen von 4 bis 12 Taktzyklen pro Minute waren die Wassersäulenmaschinen für den Antrieb träger Systeme wie Kolbenpumpen und Fördermaschinen im Bergbau besonders geeignet. Mit dieser Innovation konnten schließlich Druckhöhen von einigen hundert Metern in nur einer Stufe genutzt werden. Während das Verhältnis Aufschlag- zu Pumpwasser bei traditionellen Wasserrädern 18:1 (Wirkungsgrad: 5,3 %) betrug, waren die Wassersäulenmaschinen mit ihrer kompakten Bauweise und einem Verhältnis von 4:1 (Wirkungsgrad: 20 %) deutlich überlegener. Die komplizierte Mechanik, wie etwa exakte Zylinderbohrungen und Dichtungsprobleme sowie Druckstöße führte jedoch häufig zu Betriebsstörungen. Ab 1870 kam der Schmidt'sche Motor in Anlehnung an die Wassersäulentechnik für kleine Leistungen zum Einsatz. Dieser Druckwasser-Kolbenmotor fand vor allem für die Trinkwasserförderung in entlegenen bzw. infrastrukturell schwachen Re-

gionen Anwendung. Als Beispiel dafür wurde 1902 eine hydraulische Pumpstation mit zwei Schmidt'schen Wassermotoren und zwei dreizylindrischen Hochdruck-Plungerpumpen ausgebaut. Ohne den Einsatz von fremder Energie konnte bis in die 60er Jahre das Wasser bei einer Fallhöhe von 40 m über eine Förderhöhe von 240 m in einen zentralen Behälter eingespeist und der umliegenden Gemeinde gravitär zur Verfügung gestellt werden. Bei einer Drehzahl von 80 U/min wurde eine Leistungsfähigkeit von 0,65 - 0,74 l/s erzielt. Die Pumpe ist über eine elastische Kupplung direkt mit dem Wassermotor verbunden. Das Interesse an einer direkten mechanischen Kopplung von Kraft- und Arbeitsmaschine für die Wasserversorgung ging jedoch mit der Einführung der Elektrizität und der Verfügbarkeit von Wechselstrommotoren zurück. (Wilcke, 2014; Morr-Siedelsbrunn, 2021; Döring, 2016)

Durch die mechanische Kopplung einer Pumpe mit ein Pumpe als Turbine (PAT) wurde weltweit erstmalig von Nestmann und Oberle (2009) ein unterirdisches Karstfließgewässer für die Trinkwasserförderung erschlossen. Durch den Bau eines unterirdischen Betonsperrwerks mit integriertem Wasserförderersystem, wird ein Teil des Karstwassers in einen 220 m höher gelegenen Verteilspeicher gefördert. Vorteile ergeben sich beim Einsatz von PAT durch einen einfachen konstruktiven Aufbau, geringe Investitionskosten, hohe Robustheit und hohe weltweite Verfügbarkeit der Standartmaschinen. Die Pilotanlage versorgt über 80.000 Menschen in den umliegenden Siedlungen mit Trinkwasser und dient als Initial für die Multiplikation ähnlicher Vorhaben weltweit. (Nestmann und Oberle, 2009) Eine Skizzierung des unterirdischen wasserkraftbetriebenen Wasserförderersystems ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

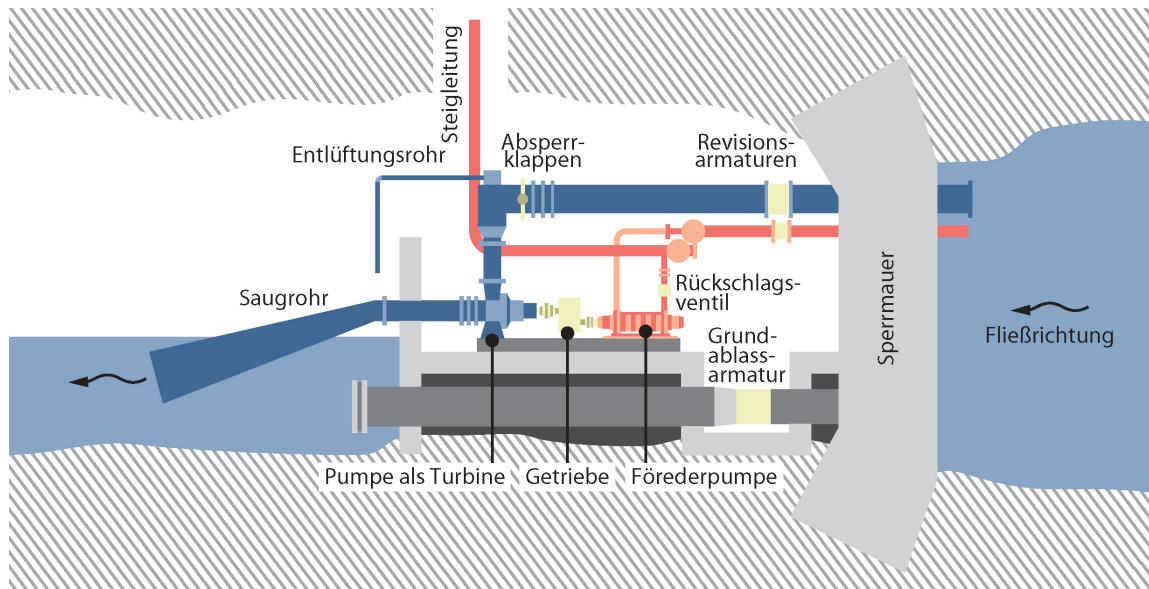


Abbildung 2.7: Prinzipskizze des unterirdischen wasserkraftbetriebenen Wasserförderersystems Bribin nach Nestmann und Oberle (2009)

Die Kombination aus Pumpe und Turbine ermöglicht eine kompakte Bauweise und somit einen flexiblen Einsatz. Ein Beispiel für solch ein Maschinentyp ist der vom königlichen Baurat Adolf Abaraham im Jahre 1910 entwickelte Hydropulsor. Hierbei werden sehr

kleine Triebwassergefälle zur Verarbeitung sehr großer Wassermengen ausgenutzt. Der Hydropulsor besteht aus einem Laufrad oder Umschaltrad, das durch gekrümmte Schaufeln in verschiedene Kammern unterteilt ist. Durch die Triebkraft des Wassers wird das Laufrad in Bewegung gesetzt und die Kammern werden abwechselnd mit dem Druckrohr und dem Turbinenauslass verbunden. Somit zerlegt sich das in das Laufrad eintretende pulsierende Wasser in zwei Teile, das „Arbeitswasser“ und das Förderwasser. Ein einziges Laufrad kann mehrere in die Maschine einmündende Triebrohre gleichzeitig bedienen. Das Triebwasser pulsiert dann in Phasenverschiebung mit der entsprechenden Periodenzahl, abhängig von der Umlaufzahl des Rades und der Anzahl der Rohre. In der Praxis lag die Anzahl der Triebrohre aus wirtschaftlichen Gründen je nach Größe der Maschine meist zwischen 2 und 40. In einer weiteren Ausführung des Hydropulsors fließt zusätzlich von unten Saugwasser in die Maschine. Das Druck- und Saugwasser vereinigen sich und fließen als Mischwasser nach außen ab. (Preger, 1912) Die Funktionsweise ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

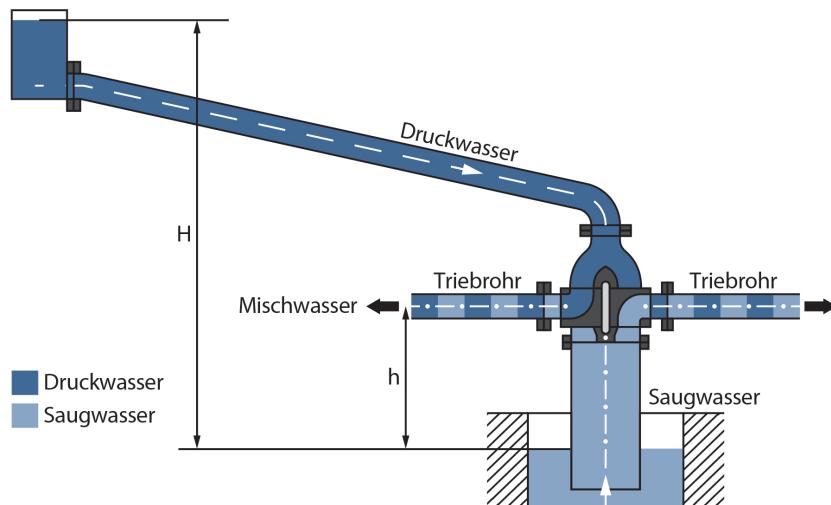


Abbildung 2.8: Funktionsweise des stehenden Saughydropulsor nach Preger (1912)

Die ersten Wasserhebemaschinen wurden im 18. und 19. Jahrhundert entwickelt. Diese bilden ein schwingungsfähiges System, welches mit nur einem einmaligen Anstoß in Betrieb gesetzt werden. Somit läuft automatisch ein ununterbrochener, oszillierender Pumpvorgang. Vor allem in Gebirgsregionen wurden diese Techniken zur Nutzbarmachung kleiner und kleinster Wasserkraftpotentiale der Bäche und Quellen eingesetzt, um höher gelegener Siedlungen mit Wasser zu versorgen. (Zambrano u. a., 2019; Schneider, 2011)

Der hydraulische Widder, sog. Stoßheber, ist eine Wasserhebemaschine, die durch Anregungsenergie des strömenden Wassers betrieben wird. Hierbei wird die bei einem geringen Gefälle erzeugte Fließgeschwindigkeit genutzt, um einen Teil des Wassers mittels Stoßwirkung auf ein höheres Niveau zu heben. Das Prinzip des hydraulischen Widders wurde erstmals 1796 entwickelt. Durch die exakte Abstimmung der Widdersysteme auf ihre Eigenresonanz kann Wasser aus einem Reservoir mit Hilfe eines Stoß- und Druckventils sowie einem Windkessel in einem Steigrohr in die Höhe gedrückt werden. Das einfache

Funktionsprinzip mit lediglich zwei beweglichen Komponenten und einem autonomen Betrieb zeichnet sich durch geringe Investitionskosten aus und hat zudem den Vorteil eines geringen Wartungsaufwandes. (Lorenz, 1910; Schneider, 2011) Die Funktionsweise des hydraulischen Widder ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

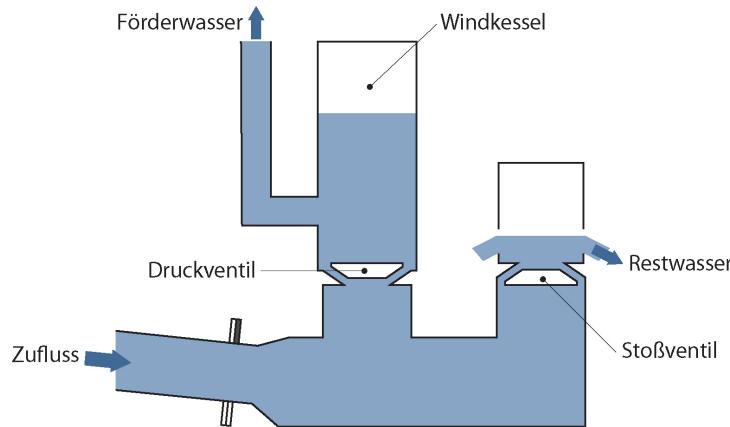


Abbildung 2.9: Funktionsweise des hydraulischer Widder

Auch heute zeichnet sich der hydraulische Widder durch ein hohes Anwendungsspektrum insbesondere für den dezentralen Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern aus, wo bei sich das Grundprinzip über zwei Jahrhunderte kaum verändert hat. Gegenüber dem ursprünglichen Stoßheber aus Gusseisen oder Kupfer weisen die heutigen Fabrikate eine Vielzahl technischer Verbesserungen auf. Durch Verbundwerkstoffe sowie neue Venturi- und Rückschlagventile sind heutzutage Fallhöhen von über 100 m sowie Förderhöhen von bis zu 500 m realisierbar. Die Effizienz der Systeme steigt, je größer das Verhältnis von Förder- zu Fallhöhe ist und je geringer die Wasserverluste sind. Die aus dem Stoßventil austretende Wassermenge beträgt in der Regel das Zehn- bis Fünfzehnfache des geförderten Wassers. Durch geeignete Dimensionierungsverhältnisse konnte der hydraulische Widder schließlich auf einen optimalen Resonanzbetrieb abgestimmt werden. Liegt die Schwingungsfrequenz im Bereich der Eigenresonanz des Wassers, können bei geringen Anregungsstößen über das Stoßventil große Amplituden von Druckschwingungen generiert werden. Die Wassermenge kann somit in der Steigleitung wesentlich höher gehoben und ein hydraulischer Wirkungsgrad von über 92 % erzielt werden. (Schneider, 2011)

Die Lambachpumpe wurde Ende des 19. Jahrhunderts konzipiert. Im Gegensatz zum hydraulischen Widder wird anstatt der Bewegungsenergie der statische Wasserdruck genutzt, um einen Triebkolben mit großem Durchmesser aus einem Zylinder zu drücken. Ein fest am Triebkolben angebrachter Druckkolben drückt das Wasser in die Förderleitung. Die Lambachpumpe funktioniert als Druck-Übersetzer und arbeitet nach dem Zylinder-Kolben-Prinzip. Der wichtigste Vorteil ist der hohe Wirkungsgrad von bis zu 90 %, die enorme Lebensdauer und Zuverlässigkeit sowie die Möglichkeit, Grauwasser für den Antrieb und Quellwasser für die Förderung zu nutzen. Während hydraulische Widder sich über den langen Zeitraum bewährt haben, zählen Lambachpumpen heute zu den technischen Denkmälern. (Lambach, 1950; Marienheide, 2014; Zambrano u. a., 2019)

In Anlehnung an die Archimedische Schraube wurde die Spiralturbine im Jahr 1764 von

Wirz in Zürich entworfen. Sie besteht aus einem halb eingetauchten, um eine horizontale Achse schraubenförmig gewundenes Rohr. Das eine Ende des Rohres ist trichterförmig erweitert, während das andere Ende an das Steigrohr angeschlossen ist. Durch die kontinuierliche Rotation wird abwechselnd Wasser und Luft geschöpft. Die Drücke der Wasserschichten unter Vermittlung der dazwischen befindlichen komprimierten Luftsichten summieren sich nach dem Steigrohr hin und lassen das Wasser in das Steigrohr aufsteigen. Der Antrieb erfolgt durch beispielsweise horizontalachsige Wasserräder, deren untere Radschaufeln in die Flussströmung eintauchen oder durch axial angeströmte Propeller. (Wembacher, 2013; Eytelwein, 1842) Der Aufbau der Spiralglockenpumpe ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

Aufgrund des steigenden Wasserbedarfs in der Landwirtschaft und der Notwendigkeit des Einsatzes ökologisch verträglicher und nachhaltiger Wasserförderungssysteme wurde von der Firma aQysta die traditionelle Spiralglockenpumpe aus dem 18. Jahrhundert weiterentwickelt. Die Nutzung der kinetischen Energie in Flüssen, Bächen oder Kanälen und der Einsatz einer Spiralglockenpumpe mit Wasserradantrieb ermöglichen bei einem Höhenunterschied von 20 m die Förderung von bis zu 40 m^3 Wasser pro Tag. Unter Berücksichtigung der technischen und sozioökonomischen Aspekte werden die direkt gekoppelten wasserradbetriebenen Spiralglockenpumpen bereits in Nepal, Indonesien, Kolumbien etc. kommerziell eingesetzt. Maas (2019)

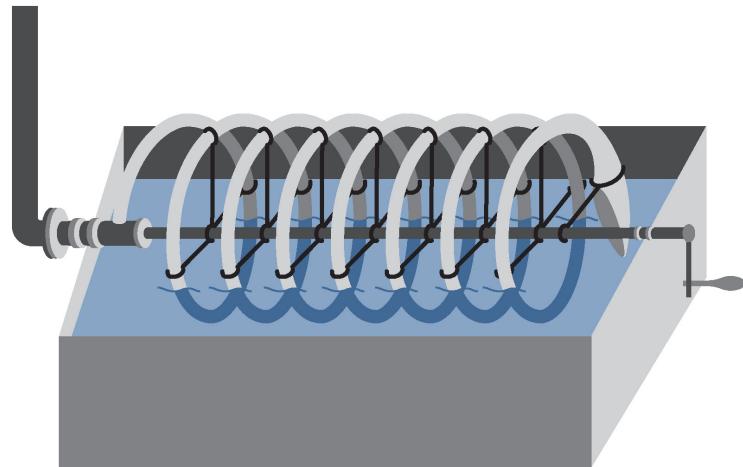


Abbildung 2.10: Aufbau einer Spiralglockenpumpe aus dem Jahre 1910 nach Eytelwein (1842)

2.4 Rückwärtslaufende Pumpen als Turbinenersatz

2.4.1 Allgemeines

Bei dem Einsatz von Pumpen als Turbinen (PAT) strömt das Wasser gegen die Pumprichtung vom eigentlichen Druck- zum Saugstutzen und die Drehrichtung des Laufrades kehrt sich um. Die aus der Strömung entzogene Energie kann dabei an anderer Stelle dem Strömungsmedium wieder zugeführt werden oder ist als Energie (in mechanischer oder elektrischer Form) auf vielfältige Weise verwendbar. Bisherige Einsatzgebiete liegen

vor allem im Bereich der Energierückgewinnung (z.B. Druckabbau in Trinkwassernetzen), der Restwassernutzung (z.B. Grundablässe von Talsperren) sowie der Energieerzeugung (z.B. Kleinwasserkraftwerke). (Stoffel, 2016; Hellmann, 2009)

Die PAT ist bereits seit über 80 Jahren Gegenstand der Forschung. Die ersten Untersuchungen führten Thoma (1931) und Knapp (1937) durch, als sich die Ingenieure mit der vollständigen (Vier-Quadranten-) Charakteristiken der Kreiselpumpe beschäftigten. Daraufhin wurde die Strömungsumkehr von Pumpen zu einer interessanten Fragestellung für viele Pumpenhersteller. Es wurden zahlreiche Forschungsarbeiten u.a. zur Vorausberechnung der Turbinenkennlinie auf Basis vorhandener geometrischer Pumpendaten veröffentlicht wie z.B. Kittredge (1933), Stepanoff (1957), Gopalakrishnan (1986), Sharma (1985), Schmiedl (1988), Cohrs (1996) sowie Singh (2005). Auch heute befasst man sich aufgrund der Vielfältigkeit der möglichen Pumpenbauarten und der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten mit diesem Thema.

2.4.2 Unterschiede zu konventionellen Turbinen

Als Alternative zu konventionellen Wasserturbinen zeichnen sich PAT durch eine einfache Bauweise, hohe Robustheit sowie geringem Betriebs- und Wartungsaufwand aus. Weitere Vorteile ergeben sich durch die Vielzahl an unterschiedlichen Bauformen und -größen sowie der weltweiten Verfügbarkeit einzelner Komponenten in verschiedenen Werkstoffausführungen (z.B. Dichtungen, Lager etc.). Konventionelle Turbinen hingegen werden für einen speziellen Anwendungsfall konstruiert und produziert, wodurch deutlich höhere Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten entstehen können. Ein Nachteil der PAT ist das Fehlen einer eigenen Regeleinrichtung, wie z.B. verstellbare Leitschaufeln bei Francis-Turbinen oder verstellbare Düsenquerschnitte bei Pelton-Turbinen. Dadurch reagieren PAT sehr schnell auf sich wechselnde Betriebszustände und verlieren im Teillastbereich sehr schnell an Wirkungsgrad (Cohrs, 1996). Dieser Nachteil kann jedoch durch den parallelen Aufbau mehrerer und größtmäßig unterschiedlicher Maschinen sinnvoll kompensiert werden. Dem geringeren Wirkungsgrad im Vergleich zu konventionellen Turbinen stehen geringere Anschaffungskosten gegenüber (Hellmann, 2009). Zudem können über gezielte hydraulische Optimierungen an Laufrad- und Gehäusegeometrie Wirkungsgrade erreicht werden, die im optimalen Betriebspunkt an die von Turbinen heranreichen (Singh, 2005).

Zusammenfassend ergeben sich folgende Vor- und Nachteile einer PAT gegenüber einer konventionellen Turbine:

Vorteile einer PAT:

- + Vielzahl an Pumpen in verschiedensten Bauformen und -größen
- + Große Auswahl von Werkstoffen, Dichtungen und sonstigem Zubehör
- + Preisgünstige Serienproduktion
- + Einsatz von Gliederpumpen bei großen Fallhöhen und kleinen Durchsatzmengen
- + Geringere Komplexität bzgl. Steuerungs- und Überwachungsaufwand
- + Geringerer Betriebs- und Wartungsaufwand

Nachteile einer PAT:

- Geringe Anpassungsfähigkeit wegen fehlendem verstellbarem Leitapparat

- Geringerer Wirkungsgrad und schlechtes Teillastverhalten

Die erwähnten Vorteile machen den Einsatz von PAT vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern interessant. Bezogen auf die in der vorliegenden Arbeit behandelten Problemstellungen ermöglicht die Anwendung einer Pumpe im Turbinenbetrieb gekoppelt mit einer weiteren Pumpe einen sinnvollen Lösungsansatz für eine energieautarke Wasserförderung.

2.4.3 Problemstellung bei der Dimensionierung

Bei dem Einsatz einer rückwärtslaufenden Pumpe als Turbine steht man vor folgenden Fragestellungen:

1) Die Auswahl einer geeigneten Pumpe:

Bei Pumpen im Turbinenbetrieb lassen sich weder die inneren hydraulischen Verluste noch die Turbinenkennlinien vorausberechnen. Die wichtigsten Merkmale für den Turbinenbetrieb werden häufig aufgrund statistischer Korrelationen abgeschätzt. Dabei werden eine Vielzahl an Maschinen praktischen Tests unterzogen und die Förderdaten im Wirkungsgradoptimum bei Turbinenbetrieb auf die des Pumpenbetriebs bezogen (Gülich, 2013). Eine Streuung der Berechnungsansätze kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, da sich die hydrodynamischen Eigenschaften einer Pumpe unterschiedlich auf die Eigenschaften im Turbinenbetrieb auswirken und nur zu einem gewissen Grad zutreffend abgebildet werden können. Von Einfluss sind vor allem die Bauart (Spirale, Leitrad, Ein- oder Mehrstufigkeit etc.), die Maschinengröße und hydrodynamische Güte sowie der Reaktionsgrad (u.a. abhängig von der spezifischen Drehzahl) (Wesche, 2016). Hinzu kommt, dass Pumpen im Turbinenbetrieb aufgrund der festen geometrischen Strömungsverhältnisse ein schlechtes Teillastverhalten ausweisen und sehr schnell auf sich wechselnde Betriebszustände reagieren (z.B. Fallhöhe oder Durchfluss). Eine der größten Herausforderungen besteht demnach in einer zielgerichteten Auswahl des Pumpentyps für den Turbinenbetrieb sowie der Einhaltung eines optimalen hydraulischen Betriebsbereichs. Eine falsche Pumpenauswahl führt zu einer Verschiebung des Betriebspunktes sowie zu einer geringeren effektiv nutzbaren Leistung und ggf. zum Scheitern eines Projektes (Singh, 2005).

2) Die Optimierung der Pumpe im Betrieb als Turbine:

Die Hydraulik einer Pumpe ist prinzipiell nicht für den Turbinenbetrieb ausgelegt. Daher können je nach Pumpenbauart und Konstruktionsmerkmale in den Übergangszonen zwischen Laufrad und Gehäuse sowie an den Laufradrändern z.T. hohe Strömungsverluste durch Turbulenzen und Sekundärströmungen entstehen. Die Schwierigkeit besteht darin, die inneren hydraulischen Verluste sowie die äußeren Verluste zu ermitteln. Für eine Optimierung ist ein umfassendes Verständnis bezüglich des Energieumsatzes der PAT erforderlich. Hierfür werden die Grundlagen der Hydraulik sowie experimentelle und numerische Methoden herangezogen. (Singh, 2005)

3) Das Verhalten der Turbine in Anlagen:

Die Anforderungen an eine PAT sind je nach Standort sehr unterschiedlich, so dass sich die kommerzielle Anwendung lediglich auf einige Anwendungsbereiche beschränkt. Dies ist eines der größten Hindernisse bei der Weiterentwicklung der PAT-Technologie. Für eine erfolgreiche Anwendung ist das System als Ganzes mit den einzelnen Anlagen- bzw. Pumpenkomponenten und dem Hydrauliksystem (einschließlich Druck- und Saugrohren) sowie deren Verhalten in der Anlage zu analysieren. Dabei ist ein umfassendes Verständnis aller Komponenten und das Zusammenspiel im Gesamten entscheidend. (Singh, 2005)

Die theoretischen Grundlagen zur Beantwortung dieser Fragestellungen sind in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

2.4.4 Systemvariablen

Die maßgebenden Systemvariablen einer rückwärtslaufenden Pumpe als Turbine sind im Folgenden beschrieben (Singh, 2005):

- **Spezifische Stutzenarbeit (Y):** Die spezifische Stutzenarbeit bezieht sich auf das auszunutzende Energiegefälle zwischen dem Druck- und Saugstutzen. Neben der spezifischen Stutzenarbeit ist auch der Begriff der Fallhöhe in Gebrauch. Es gilt der Zusammenhang: $Y = gH$.
- **Volumenstrom (Q):** Der Volumenstrom beschreibt das durch einen Querschnitt in einer bestimmten Zeit strömende Wasser zuzüglich den Leckverlustströmen an Dichtungen.
- **Wellenleistung (P_W):** Die Wellenleistung ist die an der Welle der PAT abgegebene Leistung durch die Drehbewegung des Laufrades. Durch die Umlenkung des Fluids in den Laufschaufeln entsteht eine Impulsänderung, die eine entsprechend Umfangskraft und damit ein Drehmoment hervorruft.
- **Drehzahl (N):** Die Drehzahl ist der Quotient aus der Zahl der Umdrehungen eines rotierenden Laufrades und setzt die Energie des Fluids in mechanische Drehbewegung um.

Durch die Auslegungswerte Drehzahl N, Volumenstrom Q und spezifische Stutzenarbeit Y erhält man mit dem Wirkungsgrad die zugehörige Wellenleistung. Dabei besteht zwischen den drei Größen N, Q, Y eine starke gegenseitige Abhängigkeit. Wird eine der drei Größen verändert, führt dies zu einer Änderung mindestens einer der beiden anderen Größen. (Cohrs, 1996)

Um zu einer Beziehung zwischen den Größen spezifische Stutzenarbeit Y resp. auszunutzendes Gefälle gH und der Wellenleistung P_W zu gelangen, wird die Eulersche Strömungsmaschinen-Hauptgleichung genutzt. Mithilfe des Impuls- bzw. Drallsatzes für die ideale Energieumsetzung in den Laufrädern von Strömungsmaschinen erhält man die Eulersche Strömungsmaschinen-Hauptgleichung in folgender Form (Singh, 2005):

$$gH_{EU,\infty} = u_1 \cdot c_{u1} - u_2 \cdot c_{u2} \quad (2.12)$$

Dabei ist u die Umfangsgeschwindigkeit und c_u die Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit am Ein- und Austritt. Durch die idealen Verhältnisse mit unendlicher Schaufelzahl sind die Druck- und Geschwindigkeitsunterschiede unendlich klein und die Strömung folgt exakt der Schaufelkontur. In der Praxis haben Strömungsmaschinen jedoch eine begrenzte Anzahl an Schaufeln. Die Strömung verläuft dann am Laufradaustritt nicht mehr schaufelkongruent resp. winkeltreu. Durch die sog. Minderablenkung (Schlupf) der Strömung wird die Dralländerung verringert. Sie äußert sich in einer Minderleistung der Strömungsmaschine gegenüber dem Berechnen nach der Stromfadentheorie. Pfleiderer und Petermann (1991) untersuchten als Erste die Minderablenkung an Pumpen und Turbinen und stellten eine experimentell begründete Näherungsformel zur Berücksichtigung der Minderleistung aufgrund endlicher Schaufelzahl auf. Diese wurde später von Engel (1931) genutzt, um die Minderleistung bei Zentripetalturbinen zu bestimmen. Cohrs (1996) untersuchte unterschiedliche Näherungsverfahren zur Berücksichtigung der Minderleistung an mehrstufigen rückwärtslaufenden Kreiselpumpen im Turbinenbetrieb. Es wurden die besten Übereinstimmungen mit dem Minderleistungsansatz von Engel (1931) erzielt. Dabei wird das Verhältnis zwischen den Schaufelarbeiten bei endlicher und unendlicher Schaufelzahl durch eine halbempirische Minderleistungszahl s definiert. Es gilt:

$$gH_{EU,Schlupf} = \frac{gH_{EU,\infty}}{(1+s)} \quad (2.13)$$

Damit und mit den hydraulischen Verlusten an Laufrad und Gehäuse (Zone I-VI) entsprechend Abbildung 2.11 ergibt sich nach Singh (2005) die spezifische Stutzenarbeit:

$$gH = gH_{EU,Schlupf} + g(H_{L,I} + H_{L,II} + H_{L,III} + H_{L,IV} + H_{L,V}) \quad (2.14)$$

Die hydraulische Leistung $P_{Hyd,Welle}$ setzt sich aus dem Drehmoment $T_{Hyd,Welle}$ und der Winkelgeschwindigkeit ω zusammen und ist ebenfalls eine Funktion von $gH_{EU,Schlupf}$ und den inneren Verlusten am Laufrad (Zone III-IV-V). Es gilt (Singh, 2005):

$$P_{Hyd,Welle} = T_{Hyd,Welle} \cdot \omega = \rho \cdot Q \cdot (gH_{EU,Schlupf} - gH_{L,III} - gH_{L,IV} - gH_{L,V}) \quad (2.15)$$

Die Definition des hydraulischen Wirkungsgrades η_{Hyd} lautet (Singh, 2005):

$$\eta_{Hyd} = \frac{P_{Hyd,Welle}}{\rho \cdot Q \cdot (gH)} \quad (2.16)$$

$$\eta_{Hyd} = \frac{gH_{EU,Schlupf} - g \cdot (H_{L,III} + H_{L,IV} + H_{L,V})}{gH_{EU,Schlupf} + g \cdot (H_{L,I} + H_{L,II} + H_{L,III} + H_{L,IV} + H_{L,V})} \quad (2.17)$$

Damit kann gezeigt werden, dass eine Änderung von $gH_{EU,Schlupf}$ sowohl das auszunutzende Gefälle gH als auch die Ausgangsleistung $P_{Hyd,Welle}$ beeinflusst. Durch eine Erhöhung von $gH_{EU,Schlupf}$ kann die Gesamt- als auch die Ausgangsleistung erhöht werden und umgekehrt. Hierdurch wird der hydraulische Wirkungsgrad entsprechend beeinflusst.

Die äußere Verluste, wie z.B. die Lagerreibung, werden durch den mechanischen Wirkungsgrad η_{Mech} erfasst. Der Gesamtwirkungsgrad η ist definiert als (Singh, 2005):

$$\eta = \eta_{Hyd} \cdot \eta_{Mech} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot T}{60 \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H} \quad (2.18)$$

Ein wesentlicher Bestandteil bei der Optimierung einer PAT ist die Leistungsmessung. Die Nettoleistung kann durch die Messung des Drehmomentes T auf der PAT-Welle ermittelt werden. Dieses Drehmoment beinhaltet somit auch die mechanischen Verluste. Alternativ wäre die elektrische Leistung zu messen, allerdings treten dabei zusätzliche Verluste auf (thermische Verluste, Verluste durch Messgeräte etc.).

Zur Leistungsbeurteilung einer PAT ist es von Interesse, wie sich die Strömungsmaschine in Abhängigkeit von der Geometrie verhält. Da Strömungsmaschinen in ihrer Geometrie eindeutig beschrieben werden können, ist eine generelle dimensionsanalytische Darstellung möglich. Mit Festlegung der Geometrie und der kinematischen Eigenschaften kann man ein verallgemeinertes Bild bei Vergrößerung oder Verkleinerung der Maschinen in der Übertragung finden. Die Ähnlichkeitstheorie für die experimentelle Forschung ist der Fachliteratur z.B. Borel (1968) oder Kobus (1974) zu entnehmen.

Zur Beurteilung von Versuchsergebnissen sind demnach dimensionslose Kennzahlen zweckmäßig. Für den Bezugsdurchmesser D wird für gewöhnlich der größte Durchmesser der Laufradbeschaffelung eingesetzt. Der Durchfluss Q und die Drehzahl N sind Einstellgrößen, die sich im Experiment tatsächlich variieren lassen und eine Interpretation der komplexen hydraulischen Strömungsverhältnisse aufgrund z.B. geometrischer Modifikationen zulassen (siehe Abbildung 2.12). Das auszunutzende Gefälle gH und die Wellenleistung P_W sind demnach abhängige Größen. Die dimensionslosen Kennzahlen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst (Singh, 2005).

Tabelle 2.1: Dimensionslose Kennzahlen nach Singh (2005)

Kennzahl	Formelzeichen	Berechnungsformel
Durchflusszahl	ϕ	$\frac{Q}{N \cdot D^3}$
Druckzahl	ψ	$\frac{gH}{N^2 \cdot D^2}$
Leistungszahl	P	$\frac{P_W}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5}$
Hydraulischer Wirkungsgrad	η_{Hyd}	$\frac{P}{\phi \cdot \psi}$

Für die Darstellung von Versuchsergebnissen können Kennliniendiagramme mit Kurven für Fallhöhe, Wirkungsgrad und Leistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom festgelegt werden (Singh, 2005):

$$\psi = f(\phi) \quad P = f(\phi) \quad \eta = f(\phi) \quad (2.19)$$

Die dimensionslosen Kennzahlen fassen komplexe Zusammenhänge aus dem Bereich der Strömungsmechanik in einer Zahl zusammen und sind in vielen Bereichen wichtige Hilfsmittel in der experimentellen Forschung des Ingenieurswesens. Zum Beispiel bringt Nestmann (1984) die Kennzahlen in Relation zu Belüftungsvorgängen, um die Leistungseinträge im Vergleich zum Stofftransport zu quantifizieren. In dieser Arbeit wird die Nutzung der Kennzahlen nicht weiterverfolgt, da es hier um die Bemessung einer ersten Anlage

geht und nicht um die Untersuchung von verschiedenen Anlagengrößen. Bei einem möglichen Transfer dieses Systems auf andere Regionen ist eine Dimensionsanalyse unumgänglich.

2.4.5 Hydraulische Optimierungen

Da das Laufrad einer Pumpe prinzipiell nicht für den Turbinenbetrieb konzipiert ist, entstehen in den Übergangszonen zwischen Laufrad und Gehäuse sowie an den Laufradrändern Strömungsverluste durch Turbulenzen und Sekundärströmung. Ein Pumpenquerschnitt mit Kennzeichnung der inneren Strömungsverluste ist in Abbildung 2.11 gegeben.

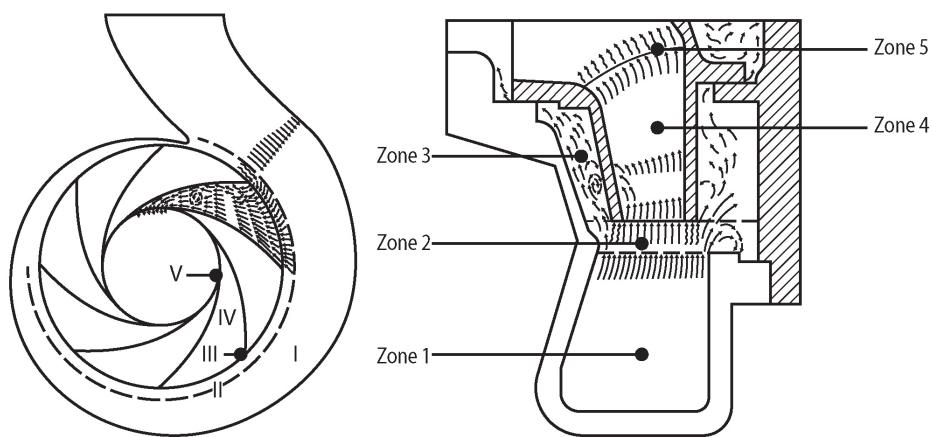


Abbildung 2.11: Pumpenquerschnitt mit Kennzeichnung der inneren Strömungsverluste nach Singh (2005)

Im Hinblick auf die Reduzierung der inneren hydraulischen Verluste wurde von Singh (2005) umfassende experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurde durch systematische Variation der Laufrad- und Gehäusegeomtrien die Änderung der Leistung und des Wirkungsgrades mithilfe von dimensionslosen Kennzahlen untersucht (siehe Abschnitt 2.4.4). Der Gesamtwirkungsgrad wurde dabei über die Messung von Drehmoment bestimmt. Durch Abrunden der Schaufelkanten des Laufradeinlasses und die Anbringung von Gehäuseringen konnten entsprechend günstigere Strömungseigenschaften erzielt werden und Wirkungsgrade erreicht werden, die im optimalen Betriebspunkt an die von Turbinen heranreichen. Auch die Vergrößerung des Saugmundes und die Entfernung der Saugmundrippe haben Auswirkungen, die jedoch nicht einheitlich sind und von weiteren Geometrien abhängen. Nähere Informationen zu den hydraulischen Optimierungen können Singh (2005) entnommen werden.

In Abbildung 2.12 ist exemplarisch die Optimierung der PAT durch Modifikation an Laufrad und Gehäuse dargestellt. Durch gezielte Modifikationen konnte durch Singh (2005) Wirkungsgrade von 85 % erzielt werden.

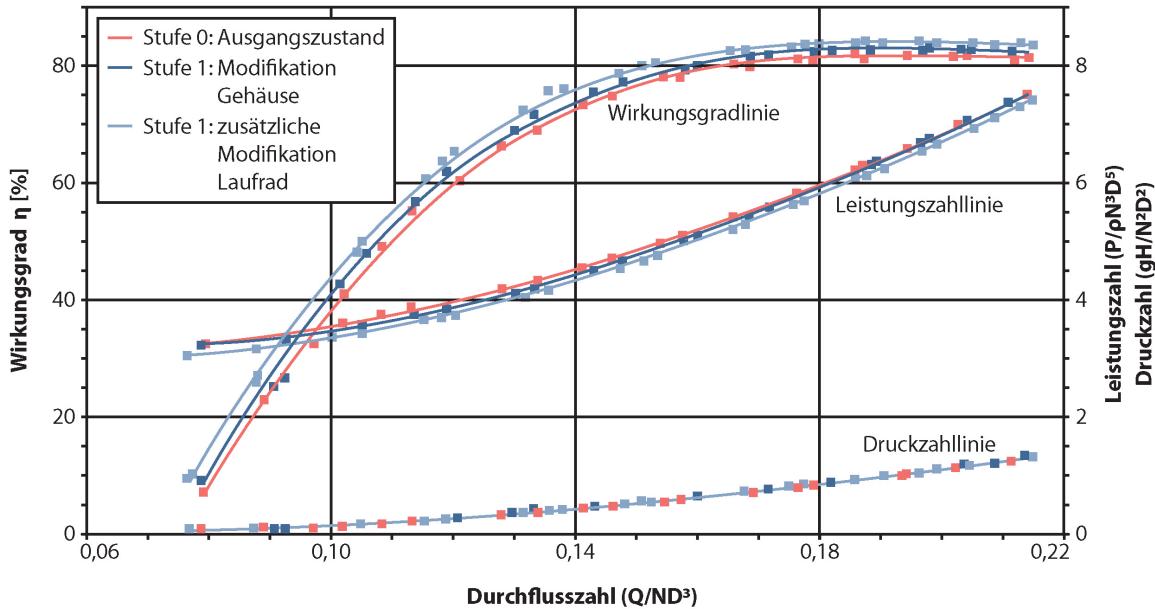


Abbildung 2.12: Wirkungsgradsteigerung der PAT durch Modifikation an Laufrad und Gehäuse nach Nestmann und Oberle (2009)

2.4.6 Verhalten der PAT in Anlagen

Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erwähnt, hängt der effiziente Einsatz von der zielgerichteten Auswahl des Pumpentyps für den Turbinenbetrieb sowie der Einhaltung eines optimalen hydraulischen Betriebsbereichs resp. konstanten Betriebszuständen ab. Im Folgenden wird das Verhalten der PAT in Anlagen näher beschrieben:

Grenzen des Turbinenbetriebes

Im Turbinenkennfeld stellen die Leerlauf- und Widerstandskennlinie die technischen Grenzen für den Betrieb dar.

- Die Leerlaufkennlinie ($M = 0$ bzw. $P = 0$) definiert die unbelastete, ungebremste und frei durchdrehende PAT und nimmt bei steigender Fallhöhe zu. Nach der Ähnlichkeitgesetzen ergibt der Zusammenhang $Q_L \sim n$ und $H_L \sim n^2 \sim Q^2$ die Leerlaufkennlinie, die eine Parabel durch den Koordinatenursprung darstellt, wie anhand von Abbildung 2.13 einzusehen. Bei einer statischen Fallhöhe $H_{A,Stat}$ läuft die PAT abzüglich der Strömungsverluste H_V in Zulauf- und Ablaufleitung bei einer Fallhöhe H_T . Bei Lastabwurf würde sich bei konstantem H_T die Durchgangsdrehzahl auf der Leerlaufkennlinie im Punkt D_1 einstellen. Die PAT und die angekoppelten Bauteile müssen auf die daraus resultierende Umfangsgeschwindigkeit ausgelegt sein, damit die Anlagenkomponenten bei diesen Betriebsverhältnissen keinen Schaden davon tragen. (Gülich, 2013; Hellmann, 2009)
- Die Widerstandskennlinie ($n = 0$) beschreibt den Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fallhöhe bei feststehendem Laufrad. Mit $H_W \sim Q^2$ erhält man die Widerstandskennlinie als Parabel durch den Koordinatenursprung. Dabei wird auf die

festgebremste Turbinenwelle ein hydraulisches Moment („Festbremsmoment“) ausübt. Es gilt: $M_W \sim H_W \sim Q^2$. Bei einer bestimmten Fallhöhe stellt sich ein entsprechender Durchfluss Q ein, der maßgeblich durch innere Strömungswiderstände beeinflusst wird. (Gülich, 2013; Hellmann, 2009)

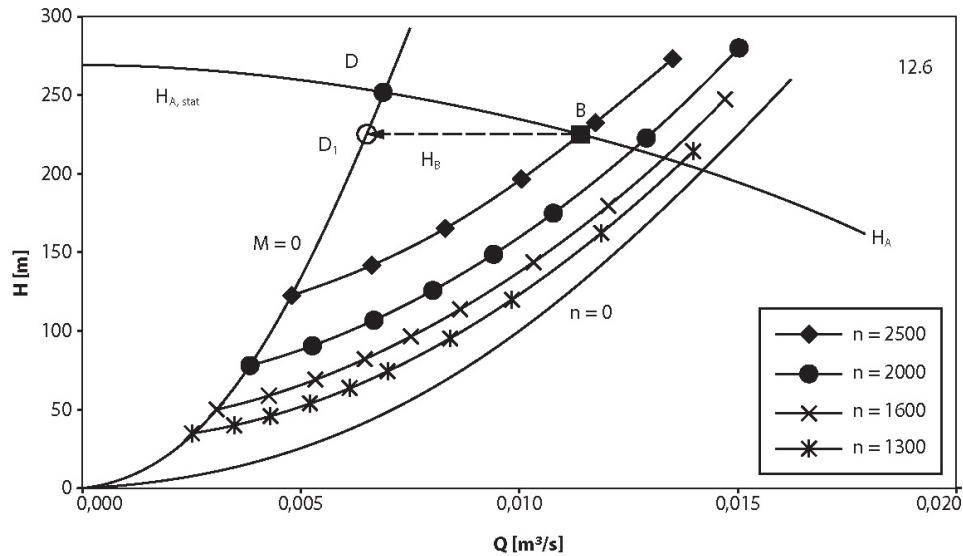


Abbildung 2.13: Turbinenkennlinien mit Leerlauf- und Widerstandskennlinie sowie Anlagenkennlinie H_A nach Gülich (2013)

Regelungsarten

Ein zuverlässiger Betrieb ist nur dann gewährleistet, wenn die PAT im System gut integriert ist. Dazu gehört die Implementierung von adäquaten Regelverfahren, die sicherstellen, dass die PAT im optimalen Betriebspunkt arbeitet. Mithilfe der im Folgenden beschriebenen Regelverfahren können wechselnde Betriebszustände gefahren werden:

- Eine Drosselregelung kann eingesetzt werden, wenn entsprechend Abbildung 2.14 der durch die PAT zu verarbeitende Volumenstrom Q_1 kleiner ist als im Schnittpunkt A der Turbinen- und Anlagenkennlinie ($Q_1 < Q_A$). Der Anlagenpunkt D liegt dabei über der Turbinenkennlinie. In diesem Fall wird die Höhendifferenz ΔH_{DRV} abgedrosselt und die Leistung $P = \rho g Q_1 \Delta H_{DRV}$ dissipiert. (Gülich, 2013)
- Eine Bypassregelung ist (aufgrund der festen Drehzahl und unveränderlichen Schaukelstellung einer PAT) anzuwenden, wenn Volumenströme größer sind als im Schnittpunkt A der Anlagen- und Turbinenkennlinie ($Q_2 > Q_A$) und der Durchsatz in der Anlage entspannt werden muss. Dabei wird das überschüssige Fluid durch einen Bypass geleitet, in dem die gesamte Fallhöhe H_B abgedrosselt und die Leistung $P = \rho g (Q_2 - Q_B) \Delta H_B$ dissipiert wird. Der gewünschte Betriebspunkt der Anlage liegt unter der Turbinenkennlinie. (Gülich, 2013)
- Eine Drehzahlregelung ist vorteilhaft, wenn sich der Volumenstrom und die Fallhöhe so verhalten, dass das PAT-System zu jedem Zeitpunkt nahe dem Optimum

gefahren werden kann. Eine geringere (höhere) Drehzahl führt bei konstanter Fallhöhe zu einem höheren (geringeren) Schluckvermögen, wie anhand von Abbildung 2.13 ersichtlich ist. Dabei sollte ein Betrieb im Teillastbereich aufgrund des steilen Wirkungsgradabfalls vermieden werden. Die Wirtschaftlichkeit ist abhängig davon, welcher Regelbereich gefahren werden muss und wie eng Leerlauf- und Widerstandskenntlinie beieinander liegen (n_q ist dabei von Einfluss). (Gülich, 2013)

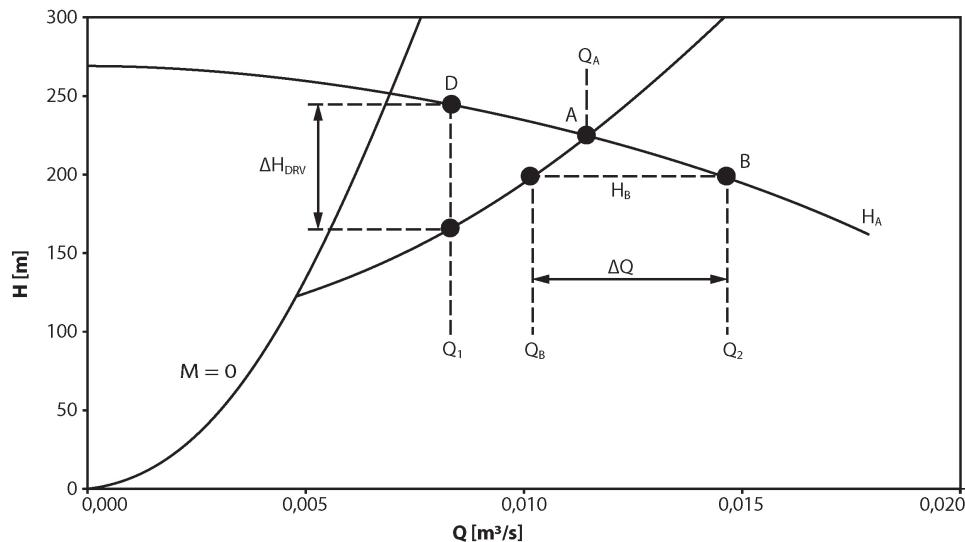


Abbildung 2.14: Drosselregelung einer PAT nach Gülich (2013)

Allgemeine Hinweise für die Anwendung

- 1) Um Kavitation bzw. die unerwünschten Auswirkungen der Kavitation wie z.B. Geräuschentwicklung, Schwingung und Abrasion ausschließen zu können, muss im Turbinenbetrieb ein minimaler Gegendruck vorhanden sein. Basierend auf Praxiserfahrungen kann der $NPSH_R$ -Wert im Turbinenbetrieb mit ungefähr 35 bis 50 % des $NPSH_R$ der Anlage angenommen werden. (Gülich, 2013)
- 2) Die auftretenden Radialkräfte sind vergleichsweise klein. Das Fluid strömt weitestgehend ablösungsfrei durch das Spiralgehäuse, sodass keine großen Störungen in der Umfangssymmetrie auftreten. Auch die Axialkräfte betragen etwa 40 bis 70 % der Kräfte im Pumpenbetrieb. (Gülich, 2013)
- 3) Durch die Modifikation der Laufräder nach Abschnitt 2.4.5 können hydraulische Verluste verringert und der Wirkungsgrad gesteigert werden.
- 4) Aufgrund des schlechten Teillast- und Überlastverhalten wird ein Optimum der Betriebsparameter im Bereich des zu erwartenden Betriebspunktes im Schnittpunkt der Anlagen- und Turbinenkennlinie angestrebt (die PAT sollte also nicht überdimensioniert werden). Bei steigendem Volumenstrom und damit fallender Drehzahl wird schnell - bei ca. dem 1,5-fachen von Q_{Opt} - die Betriebsgrenze erreicht. (Hellmann, 2009)

Kapitel 3

Adaptives Wasserförderungssystem für konventionelle Wasserkraftwerke

Wasserknappheit entsteht in vielen Regionen der Erde durch extreme klimatische und naturräumliche Randbedingungen verbunden mit wirtschaftlich bedingten technischen Defiziten. In tropischen und subtropischen Gebirgsregionen mit ausgeprägter Regen- und Trockenzeit ist das Wasserdargebot einer starken zeitlichen Variabilität unterworfen. In Verbindung mit den hydrogeologischen Eigenschaften von Karst (poröse Bodenstruktur, hohe Versickerungsrate etc.) ist die Bevölkerung oftmals mit Wasserknappheit konfrontiert. Gleichzeitig existieren teils enorme Wasservorkommen in tiefen Tälern, Schluchten und z.T. unterirdischen Höhlensystemen, deren Nutzbarmachung jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Das vorhandene Wasserkraftpotential wird oftmals lediglich von einzelnen konventionellen Wasserkraftwerken zur Stromerzeugung genutzt, wobei während der Trockenzeit viele der Anlagen nicht effizient betrieben werden können. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen wird in diesem Kapitel ein Lösungsansatz für die Wasserförderung vorgestellt, der auf der bestehenden Infrastruktur konventioneller Wasserkraftwerke aufbaut. Das Förderkonzept basiert auf einem Bypass-System mit einer mechanisch gekoppelten Einheit einer Pumpe als Turbine (PAT) und einer Förderpumpe für Hochdruckbedingungen. Durch die hydraulische und betriebliche Anbindung an bestehende Wasserkraftwerke können die in den trockenen Monaten stark sinkenden Abflussmengen für die Wasserförderung genutzt werden.

3.1 Klimatische und naturräumliche Randbedingungen

Die räumliche und zeitliche Verteilung des Wassers in der Atmosphäre, auf den Kontinenten und den Meeren wird durch den Wasserkreislauf bestimmt. Der natürliche Wasserkreislauf mit Verdunstung, Wolkenbildung, Niederschlag und Abfluss ist ein hochkomplexes Zusammenspiel einer Vielzahl dynamischer Prozesse. Das Ausmaß der Wasserknappheit wird von den Abflussverhältnissen resp. Niederschlagsmengen, den topographischen bzw. geographischen Verhältnissen sowie den Untergrundverhältnissen bestimmt.

Im Folgenden sind die extremen klimatischen und hydrogeologischen Randbedingungen näher beschrieben, die zu einer defizitären Wasserversorgung führen und angepasste inno-

vative Ansätze zur Förderung, Verteilung und Aufbereitung der vorhandenen Wasserressourcen erfordern.

Klima und Hydrologie

In tropischen und subtropischen Gebirgsregionen mit ausgeprägter Regen- und Trockenzeit unterliegt das Wasserdargebot starken saisonalen Schwankungen bzw. einem ausgeprägten Jahresgang. Vereinfacht betrachtet sorgt am Äquator die hohe Sonneneinstrahlung und die starke Erwärmung der Erdoberfläche bzw. Wasseroberfläche sowie der Aufstieg und die Kondensation der feuchten Luftmassen für überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Mit zunehmender Entfernung vom Äquator nimmt die Intensität und Dauer des Niederschlages ab - die Landschaft wird überwiegend trockener. Der maximale Niederschlag findet vorwiegend in der äquatorialen Tiefdruckrinne, der Innertropischen Konvergenzzone (ITC), statt. Die Sonne steht im Zenit und die Passate der Nord- und Südhalbkugel treffen aufeinander. Aufgrund der Rotationsachse der Erde verlagert sich der durch die ITC verursachte Zenitalregen im Verlauf des Jahres entsprechend dem Zenitstand der Sonne zwischen den beiden Wendekreisen. Die humide Zone mit maximalem Niederschlag bzw. die aride Zone mit sehr geringem Niederschlag bewegen sich auf einer Nord-Süd-Achse. Die ITC und deren jahreszeitliche Verschiebung ist in Abbildung 3.1 veranschaulicht. Im Juli befindet sich die Regenzeit nördlich des Äquators u.a. über Zentral-China und im Januar südlich des Äquators u.a. über den indonesischen Inseln. Da die ITC über das Jahr hinweg zwischen dem nördlichen und südlichen Wendekreis oszilliert, verkürzt sich die Regenzeit mit zunehmender Entfernung vom Äquator - die Trockenzeit hält dementsprechend länger an. (Diercke und Michael, 2015)

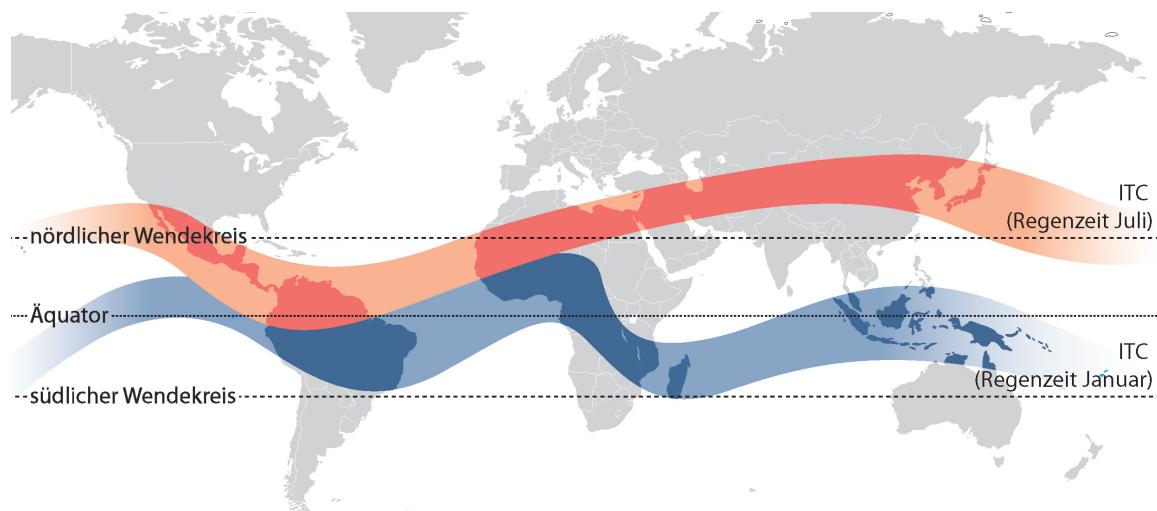


Abbildung 3.1: Lage der Innertropischen Konvergenzzone (ITC) im Januar und Juli nach Diercke und Michael (2015)

In Regionen mit ausgeprägter Regen- und Trockenzeit wie beispielsweise Vietnam, Madagaskar oder Indonesien kommt es aufgrund der Konzentration des Niederschlages auf nur wenige Monate im Jahr zu starken zeitlichen Abflussschwankungen. Während in der

Regenzeit meist ein Überangebot an Wasser zur Verfügung steht, sind die Regionen in der Trockenzeit mit dem Problem der Wasserknappheit konfrontiert.

Der Klimawandel und die damit einhergehende Veränderung des Wasserhaushaltes verschärfen die Situation. Der Wasserkreislauf wird durch höhere Temperaturen und einer exponentiellen Zunahme des Sättigungsdampfdruckes beschleunigt. Global betrachtet führt die deutlich höhere Wasseraufnahmekapazität der Atmosphäre zu einer Zunahme des mittleren jährlichen Niederschlages resp. Abflusses. Dies bedeutet jedoch aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Disparitäten nicht unweigerlich eine bessere Wasserverfügbarkeit. Zwar prognostizieren Modellrechnungen und Klimaszenarien eine höhere Niederschlagsintensität, jedoch auch eine Zunahme der Zeit zwischen den einzelnen konvektiven Niederschlägen. Damit werden durch die Beeinflussung der Niederschlagscharakteristik Extremereignisse wie Hochwasser, Hitze- oder Dürreperioden zunehmen. Der Weltklimarat Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) rechnet aufgrund des Klimawandels beispielsweise in Zentral-, Süd- und Südostasien mit einer Verschlechterung der Wasserverfügbarkeit in den großen Flusssystemen. (IPCC, 2007)

Hydrogeologie

Die hydrogeologischen Verhältnisse bestimmen weiter das Ausmaß der Wasserknappheit. In Karstgebieten sind natürliche Wasserspeicher an der Oberfläche aufgrund der geochemischen Zusammensetzung des Untergrunds und der hohen Versickerungsrate kaum bzw. nicht vorhanden. Die Geologie in diesen Regionen besteht hauptsächlich aus geklüfteten Karbonatgesteinen wie Kalkstein oder Dolomit. Durch verstärkte geochemische Lösungsvorgänge von Karbonatgesteinen wird die Landoberfläche mit verschiedener Ausprägung von Karsthügeln und Dolinen sowie die unterirdischen Höhlensysteme geformt. Aufgrund einer dynamischen Wasser-Gesteins-Wechselwirkung entwickeln sich Karstgrundwasserleiter ständig weiter. Dringt Wasser durch Klüfte in das Kalkgestein ein, löst sich im Inneren der Kalk und ein Teil der Klüfte wird zu einem Netzwerk aus Spalten, Röhren und Höhlen erweitert. Der Durchfluss und die damit einhergehenden Lösungsprozesse nehmen mit Vergrößerung der Klüfte weiter zu.

Zwar gehören Karstwasserressourcen weltweit zu den wichtigsten nutzbaren Süßwasserressourcen, deren Erschließung und Bewirtschaftung ist jedoch aufgrund der tiefen Lage der Wasservorkommen mit hohem Aufwand verbunden. In den Karstaquiferen ergeben sich Fließgeschwindigkeiten mit ca. 50 bis 500 m/h. Diese sind wesentlich schneller als in Sand und Kies, wo Fließgeschwindigkeiten von 0,5 bis 5 m/Tag als typisch gelten. Zudem entwässern sie oftmals zu großen Karstquellen hin, die sich durch hohe mittlere Schüttungen (oft 1 bis über 100 m³/s) und starke Schüttungsschwankungen (oft um einen Faktor > 100) auszeichnen (Ford und Williams, 2007). Gleichzeitig sind sie besonders verletzlich (vulnerabel) gegenüber Schadstoffeinträgen. Durch die oft geringmächtigen Böden und offenen Klüfte und Spalten können die Schadstoffe leicht in den Untergrund eindringen und sich dort in einem Netzwerk aus Karströhren und Höhlen rasch ausbreiten (Richter u. a., 2021).

Karstregionen nehmen ca. 15,2 % der nicht vereisten Oberflächen ein. Man findet sie auf allen fünf Kontinenten in unterschiedlicher Dichte und Verbreitung. Einen Überblick über die globale Verteilung von Karbonatgestein resp. Karstgebieten eingeteilt in die fünf

großen Klimazonen nach Köppen-Geiger ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Typische tropische und subtropische Karstregionen finden sich demnach u.a. in China, im südostasiatischen Raum von Vietnam über Laos und Thailand bis in den indonesischen Inselarchipel. Sie sind gekennzeichnet durch steil aufragende Bergkuppen des Kegel- und Turmkarstes. In China besteht etwa 26,5 % der Landesfläche aus Karst, das entspricht etwa einer Fläche von 2,55 Millionen km². In Vietnam sind es etwa 27,2 % mit 0,09 Millionen km² und in Indonesien etwa 15,9 % mit 0,3 Millionen km². (Goldscheider u. a., 2020)

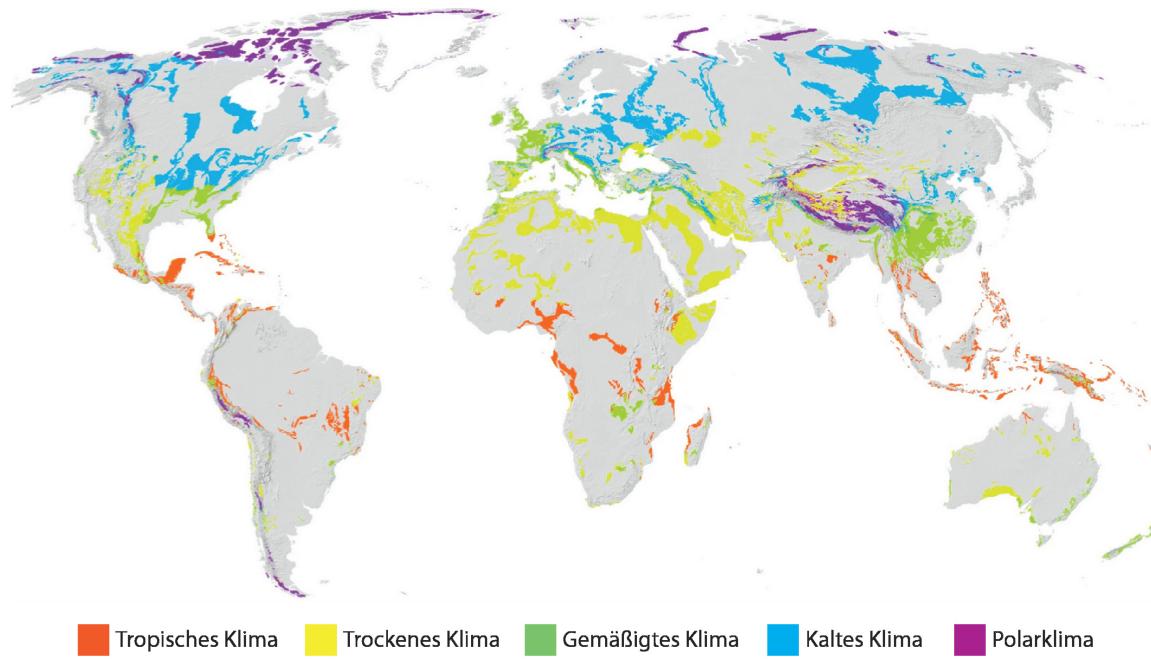


Abbildung 3.2: Weltweite Vorkommen von Karbonatgestein eingeteilt in die Klimaklassifikation von Köppen-Geiger (Goldscheider u. a., 2020)

Zusammenfassung: In tropischen und subtropischen Karstregionen, wo sich der Niederschlag auf nur wenige Monate im Jahr konzentriert und es keine natürlichen Speicher für das überschüssige Niederschlagswasser aus der Regenzeit gibt, ist die Wasserversorgung besonders prägnant. Starkniederschläge können innerhalb kürzester Zeit kleine Gerinne zu reißenden Strömen verwandeln oder schlagartig ganze Höhlensysteme mit enormen Druckhöhen fluten. In der Trockenzeit hingegen fallen teils ganze Flusssysteme trocken.

Die wichtigsten klimatischen und naturräumlichen Randbedingungen, die eine adäquate Wasserversorgung verhindert, sind im Folgenden zusammengefasst:

- Stark schwankendes Wasserdargebot (Regen- und Trockenzeit)
- Klimabedingte Zunahme von Extremen wie Hochwasser, Hitze oder Dürre
- Abhängigkeit von schwer zugänglichen z.T. unterirdischen Wasserressourcen
- Morphodynamische Prozesse und z.T. extreme hydrodynamische Kräfte
- Extreme topographische Höhenunterschiede

3.2 Soziokulturelle und sozioökonomische Randbedingungen

Infolge demographischen Wandels, wirtschaftlichem Wachstum und den damit einhergehenden Lebensstiländerungen und Landnutzungsänderungen hat sich der weltweite Wasserverbrauch im Verlauf der vergangenen 100 Jahre versechsfacht (UNESCO, 2020). Während in Industrienationen hochentwickelte innovative Technologien verfügbar sind, um das Entstehen einer Wasserknappheit zu verhindern, sind in Entwicklungs- und Schwellenländern die Voraussetzungen auf vergleichbarem Niveau nicht vorhanden. Zentrale Ansatzpunkte wie Minimierung des Wasserverbrauchs, Maximierung der Wasserverfügbarkeit und innovative Technologien scheitern aufgrund komplexer sozioökonomischer und politischer Dynamik und fehlender Einbeziehung von Akteuren aus der gesamten Gesellschaft, der Wirtschaft und dem Umweltbereich. Insbesondere das Fehlen eines übergeordneten Systemkonzeptes, eine ungenügende Systemkenntnis sowie eine mangelnde Systemplanung führen zu einer defizitären Wasserversorgung. Zudem werden die Systeme oftmals entgegen ihrer technischen Konzeption betrieben. Langfristig führt dies zu Ausfällen resp. langanhaltenden Standzeiten oder gar zu einem Versagen der Systemkomponenten und somit zu einer zunehmenden Verschlechterung der Versorgungssituation im Gesamten.

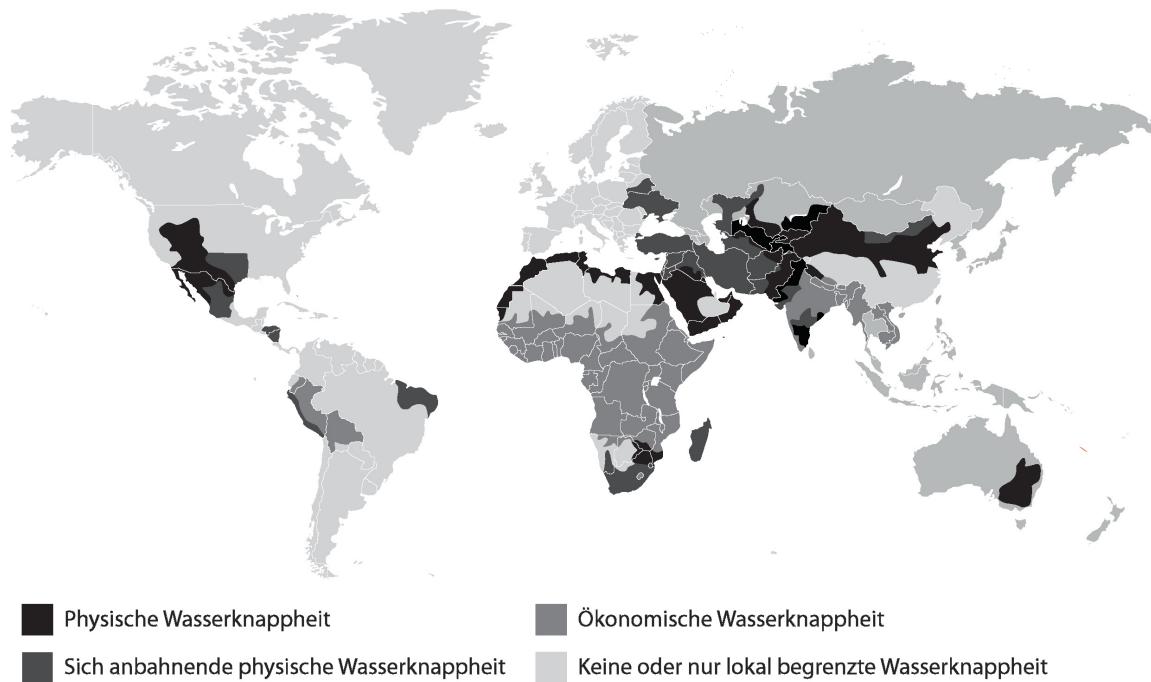


Abbildung 3.3: Weltweites Vorkommen von physischer und ökonomischer Wasserknappheit nach Walter (2020)

Eine Übersicht der weltweiten Verbreitung von Wasserknappheit ist in Abbildung 3.3 gegeben. Während bei physischer Wasserknappheit der Wasserbedarf die natürlich vorhandenen Ressourcen der Regionen übersteigt, kann die ökonomische Wasserknappheit durch einen technisch-wirtschaftlichen Fortschritt potentiell verhindert werden.

Eine unweigerliche Verschärfung der Versorgungsproblematik geht durch die Entwicklung des Tourismus einher. Der internationale Tourismus im Jahr 2019 ist im Vergleich zum Vorjahr um ca. 6 % gestiegen und soll bis 2030 von aktuell 1,5 Milliarden auf 2,2 Milliarden Touristen steigen. Im internationalen Vergleich sind die Besucherzahlen vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern überproportional hoch. Allein aus Deutschland reisen mehr als 11 Millionen Menschen pro Jahr in diese Regionen (BMZ, 2020). Die Zunahme des Tourismus bietet zwar vor allem im ländlichen Raum Chancen zur wirtschaftlichen Entwicklung, die gesellschaftlichen Veränderungen führen jedoch auch unweigerlich zu einer Verschärfung der Versorgungsproblematik im Wassersektor. Schadstoffeinträge, sich wandelnde Umweltbedingungen und menschliche Eingriffe haben aus ökologischer Sicht starke Auswirkungen auf die Gewässersysteme. Besonders Karstaquifere reagieren schnell und stark auf die sich ändernden Randbedingungen (Nestmann u. a., 2017).

Zusammenfassung: Im Hinblick auf die bereits erwähnten klimatischen und naturräumlichen Randbedingungen ist die Erschließung und Bewirtschaftung der vorhandenen Wasserressourcen aufgrund der großen Höhenunterschiede und der meist sehr heterogenen Siedlungsstruktur im ländlichen Raum mit hohem Aufwand verbunden. Durch den Mangel an angepassten, ökonomisch und ökologisch Technologien kann das Wasser aus den großen Tiefen der Bevölkerung häufig nicht zugänglich gemacht werden. Meist ist hierbei die Energiebereitstellung in Anbetracht der großen Förderhöhen und -distanzen sowie der defizitären Energieversorgung der limitierende Faktor.

Die wesentlichen sozioökonomischen und soziokulturellen Randbedingungen, die eine adäquate Wasserversorgung verhindern, sind im Folgenden zusammengefasst:

- Entlegene Gebirgsregionen mit eingeschränkter Elektrifizierung
- Steigender Wasserbedarf aufgrund Bevölkerungswachstum und Tourismus
- Große Förderhöhen und Förderdistanzen (Energiebedarf / Kosten)
- Mangel an Fachwissen und qualifizierten Fachkräften
- Mangel an angepassten, ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Technologien

3.3 Problematiken und Lösungsansätze

3.3.1 Energiebereitstellung für die Wasserförderung

Um Wasser auf ein höheres Niveau zu fördern, wird ausreichend Antriebsenergie benötigt. In Industrieländern - wie z.B. in Deutschland - mit flächendeckendem Einsatz von energieeffizienten Wasserfördertechnologien liegt der mittlere spezifische Energiebedarf für die Wasserförderung bei einer Förderhöhe von 100 m und einem Gesamtwirkungsgrad von $\eta = 0,7$ bei ca. $400 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \cdot 100 \text{ m})$ (Fritsch u. a., 2019). In Entwicklungs- und Schwellenländern mit teils veralteter und ineffizienter Technologien kann der Wert deutlich höher liegen. Demzufolge kommt der Wahl der Energieform und dem Antrieb eine wichtige Bedeutung zu. Dabei sind neben Kosteneffizienz (Anschaffungskosten sowie Betriebs- und

Unterhaltskosten) weitere Aspekte wie Bedienfreundlichkeit, Ersatzteilverfügbarkeit, Robustheit, Langlebigkeit, Wartungs- und Verschleißteilarmut, Reparaturfreundlichkeit sowie eine einfache Installation zu berücksichtigen (Wembacher, 2013). Die Zusammenhänge verschiedener Energiequellen und Antriebsmöglichkeiten für Pumpen sind in Abschnitt 2.2.1 dargestellt. Die gängigsten konventionellen und regenerativen Antriebsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der o.g. Randbedingungen sind im Folgenden gegenübergestellt.

Die weitaus überwiegende Anzahl an Pumpen in Entwicklungs- und Schwellenländern werden direkt mit Netzstrom betrieben. Vorteile besitzen die Elektromotoren durch einen hohen Wirkungsgrad sowie eine gute Regel- und Bedienbarkeit. Für einen verlässlichen Betrieb müssen die Elektromotoren auf die extremen naturräumlichen Randbedingungen wie z.B. starke Temperaturschwankungen, hohe relative Luftfeuchte ausgelegt sein. Die Betriebslast sollte dabei auf den Energiebedarf der Pumpe ausgelegt sein. Häufig werden jedoch Universalmotoren eingesetzt, wodurch es zu Ausfällen oder gar dem Ausbrennen des Motors kommen kann. Aufgrund der Abhängigkeit von Fremdenergie, der oftmals schlechten Stromversorgung mit schwankender Spannung und schwankender Frequenz und der teils fehlenden infrastrukturellen Anbindung ist der Netzstrombetrieb nur eingeschränkt möglich. Der Bedarf an elektrischer Energie führt zudem zu einer Abhängigkeit der Betriebskosten vom Strompreis, wodurch ein wirtschaftlicher Betrieb ggf. nicht sichergestellt werden kann. (Wembacher, 2013)

Eine weitere gängige Methode zur Energiebereitstellung erfolgt mittels Verbrennungsmotoren, welche direkt mechanisch oder mit einer Zwischenstufe, bestehend aus Generator und Elektromotor, gekoppelt sind. Hierbei werden vor allem Dieselmotoren aufgrund der schnellen Anfahrvorgänge, des günstigen Teillastverhalten sowie der guten Wirkungsgrade eingesetzt. Benzinmotoren hingegen weisen einen erhöhten Wartungsaufwand sowie eine geringere Lebensdauer auf. Der Einsatz von Gasmotoren ist aufgrund des schlechten Teillastverhalten aus ökonomischer Sicht nur eingeschränkt möglich (Fritsch u. a., 2019). Bezogen auf infrastrukturell schwach erschlossenen Regionen stellt die Abhängigkeit von nicht regenerativen Energieträgern (wie z.B. dem Dieselkraftstoff) auf Grund der begrenzten Verfügbarkeit und ineffizienter Nutzung eine Limitierung der Wasserversorgung aber auch eine potentielle Verschmutzungursache des u.a. vulnerablen Karst dar (Stoffel, 2016). Je höher der Energiebedarf von dieselgeneratorbetriebenen Fördersystemen ist, desto höher fallen die Betriebskosten aufgrund des Treibstoffbedarfs aus. Die Nachhaltigkeit ist weder aus wirtschaftlicher noch aus ökologischer Sicht gegeben.

Bei der dezentralen Energieerzeugung mittels erneuerbarer Energien steht eine große Zahl völlig unterschiedlicher Fördersysteme mit unterschiedlichstem Technisierungsgrad zur Verfügung. Dazu gehören die Solarenergie (z.B. Photovoltaische Fördersysteme), Geothermie und Bioenergie (z.B. Biogasanlagen) sowie Wind- und Wasserkraft (z.B. Wasserkraftbetriebene Fördersysteme). Generell gilt es bei der Wahl der Energiequelle und dem Antrieb einen Kompromiss zwischen der technischen Möglichkeit und der nachhaltigen Anwendbarkeit zu finden. Die erneuerbaren Energieformen Solarenergie und Wasserkraft werden im Folgenden aufgrund der geographischen und topographischen Lage der Regionen differenziert betrachtet.

Photovoltaik (PV) stellt heute eine gängige Methode zur Energiebereitstellung für die Wasserförderung in Entwicklungs- und Schwellenländern dar. Laut dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) sind PV-Fördersysteme mittlerweile eine ausgereif-

te Technik, vor allem für Systeme bis zu einer Größenordnung von 5 kW. Aber auch für größere Systeme (einige 100 kW) gibt es inzwischen neue Produkte mit geeigneter Leistungselektronik, wobei es sich hier eher um individuelle Lösungen und kein Produkt von der Stange handelt. Auch bei den Pumpen und Motoren gibt es nach Aussage der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) noch einige Verbesserungen wie Schraubenpumpen für höhere Förderhöhen oder neue Motorkonzepte mit besseren Starteigenschaften und variablen Eingangsspannungen. (Neidlein, 2019)

Die Nutzung der Sonne hat gegenüber fossilen Energieträgern den entscheidenden Nachteil, dass das Energieangebot volatil anfällt und nicht direkt beeinflussbar ist. Der Wasserbedarf und der Zeitpunkt der Förderung weichen im allgemeinen voneinander ab. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Wasserversorgung muss das PV-Fördersystem über einen Energiespeicher verfügen. Hierbei kommen zwei Möglichkeiten in Betracht: Speicherung der Wassermenge in einem Tank oder Speicherung der vom Solargenerator erzeugten Energie in einem Akkumulator. Wird die Solarenergie durch Akkumulatoren zwischengespeichert, kann das PV-Fördersystem in einem festen Betriebspunkt gefahren werden. In entlegenen, schlecht erschlossenen Regionen sind jedoch automatisierte elektrotechnische Regelungseinrichtungen nicht oder nur eingeschränkt geeignet. Die Speicherung erfolgt daher i.d.R. in einem Tank. (Ing.-Büro Mayer, 2000)

Da die Sonnenenergienutzung aufgrund der geringen Energiedichte einen relativ hohen Flächenbedarf hat, sind aus wirtschaftlicher Sicht Grenzen gesetzt. Die Versorgung ist lediglich an dezentral gelegenen Hofanlagen, Einzelgehöften und Kleinstsiedlungen mit geringer Förderleistung / -menge sinnvoll, deren Anbindung an bestehende Versorgungsnetze aufgrund technischer und/oder wirtschaftlicher Aspekte nicht möglich ist (Nestmann u. a., 2017).

Bei der dezentralen Wasserkraftnutzung wird unabhängig von der Leistungsklasse die Bewegungsenergie oder die potenzielle Energie in nutzbare Energie umgewandelt und direkt an die Förderpumpe übertragen. Hierfür ist das Wasserdargebot bzw. dessen jahreszeitliche Schwankungen sowie die nutzbare Fallhöhe entscheidend. Die mechanische Energietechnik resp. Wasserkrafttechnik wurde bereits in vorindustrieller Zeit zum Antrieb von Wasserfördersystemen genutzt (siehe Abschnitt 2.3). Für den dezentralen Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern ergeben sich aus technischer Sicht gegenüber allen anderen regenerativen Energieträgern Vorteile durch eine hohe Planbarkeit, eine permanent hohe Energiebereitstellung und einen einfachen mechanischen Aufbau. Die Wasserkraft stellt für die Wasserförderung aus großen Tiefen in Anbetracht des hohen Energiebedarfs einen sinnvollen autarken Lösungsansatz dar.

3.3.2 Wasserkraftnutzung in tropischen und subtropischen Klimazonen

Die vorhandenen Wasserkraftpotentiale werden heute fast ausschließlich zur Stromproduktion genutzt. Der Ausbau der Wasserkraft ist für viele Entwicklungs- und Schwellenländer ein entscheidender Garant für den wirtschaftlichen Aufschwung. Vor allem in großen Teilen Asiens setzen die Regierungen bei der Suche nach einem Ausweg aus dem Energieengpass vermehrt auf Wasserkraft. In China sind dabei die weltweit größten Wasserkraftpotentiale vorhanden. In Vietnam mit tropischem und subtropischem Klima wird

knapp 37 % des Stroms aus Wasserkraft gewonnen (UNIDO und ICSHP, 2019). Eine Übersicht des Stromverbrauchs aus Wasserkraft und des Bevölkerungswachstums in den Jahren 1990 bis 2019 ist in Abbildung 3.4 gegeben. Vietnam ist hierbei, wie ein Großteil der südostasiatischen Regionen, von stark fluktuierenden Abflüssen geprägt.

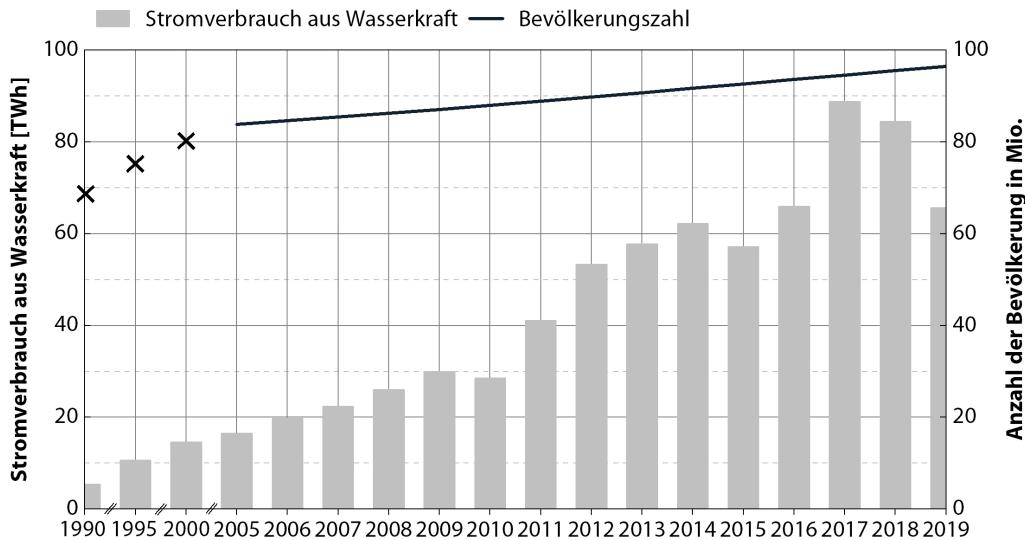


Abbildung 3.4: Stromverbrauch aus Wasserkraft und Bevölkerungswachstum in Vietnam in den Jahren 1990 bis 2019 nach Eglitis (2021) und Statista (2021)

Abhängig von der Nutzfallhöhe, der Energiewirtschaft, der installierten Leistung, der Topographie sowie der Betriebsweise kann grundsätzlich zwischen unterschiedlichen Kraftwerkstypen unterschieden werden (u.a. Lauf- vs. Speicherwerk oder auch Groß- vs. Kleinwasserkraftwerk). Eine allgemeine Einteilung der verschiedenen Typen von Wasserkraftwerken findet sich u.a. in Giesecke und Mosonyi (2009), wobei oftmals zwischen einzelnen Klassifizierungsgruppen enge Beziehungen und fließende Übergänge bestehen. Die Stromproduktion aus Wasserkraft ist dabei umso effizienter je mehr Wasser möglichst gleichmäßig über das Jahr verteilt zur Verfügung steht und desto größer die Fallhöhe des Wassers ist. In Regionen mit starken Abflussschwankungen und großen Höhenunterschieden wie bspw. in Vietnam sind vorrangig Speicherwerkste mit Anlagenleistungen von einigen 1000 MW weit verbreitet (u.a. Wasserkraftwerk Son La mit einer Nennleistung von 2.400 MW). Die Staudämme dienen neben der Deckung des Energiebedarfs mit klimafreundlicher Energie auch als Wasserreserve zur Überbrückung von Trockenzeiten, dem Hochwasserschutz oder der Bereitstellung von Bewässerungswasser.

Um auch die wirtschaftliche Situation und den Lebensstandard in abgelegenen Regionen zu verbessern, setzen die Regierungen vielerorts auch auf den Ausbau von Kleinwasserkraft. Hierbei sind vor allem Laufwasserkraftwerke weit verbreitet. Nach einer Studie der United Nations Organization (UNIDO) und des International Center on Small Hydro Power (ICSHP) sind knapp 34 % des weltweit verfügbaren Potentials an Kleinwasserkraft (Leistung bis 10 MW) ausgeschöpft. Das entspricht einer Gesamtkapazität von etwa 78.000 MW. In Asien mit dem höchsten Anteil an Kleinwasserkraft sind etwa 51.069 MW Leistung in Kleinwasserkraftanlagen installiert, dabei sind allein in Ostasien etwa 61 %

bereits erschlossen. Einen Überblick über das derzeit weltweit genutzte Kleinwasserkraftpotential mit einer installierten Leistung bis 10 MW ist in Abbildung 3.1 gegeben.

Tabelle 3.1: Nutzbares und derzeit genutztes Kleinwasserkraftpotential mit einer installierten Leistung bis 10 MW nach UNIDO und ICSHP (2019)

Kontinent	Vorhandenes Potential [MW]	Genutztes Potential [MW]	Anteil genutztes Potential [%]
Asien	138.276	51.069	37
Amerika	41.860	6.240	15
Europa	37.554	19.699	52
Afrika	10.240	595	6
Ozeanien	1.208	441	37

Da die Leistungsgrenze für Kleinwasserkraft nicht einheitlich geregelt ist, wird in manchen Ländern der Grenzwert deutlich höher festgesetzt, wie beispielsweise in Vietnam mit 30 MW oder China mit 50 MW (zum Vergleich: In Europa liegt der Grenzwert bei 10 MW).

In Vietnam beispielsweise sind etwa 23 % des dort verfügbaren Gesamtpotentials an Kleinwasserkraft von 7.200 MW vorrangig im subtropischen Norden und tropischen Zentralvietnam ausgebaut. Die ersten Kleinwasserkraftwerke wurden zwischen 1960 und 1985 von der Regierung finanziert. Innerhalb eines Jahrzehntes stieg die Anzahl an Kleinwasserkraftwerken rasant an. In dem nationalen Energieentwicklungsplan (PDP VII) für die Jahre 2011 bis 2020 war die Realisierung von 990 Kleinwasserkraftwerken mit einer Leistung von 4.300 MW geplant. Bis 2014 wurden bereits 361 Projekte mit einer Leistung von 1.200 MW umgesetzt. Aufgrund der hohen Erwartungen der Provinzen an industrielles Wachstum wurden Baugenehmigungen vergeben, ohne diese eingängig auf Wirtschaftlichkeit und Einhaltung der Umweltverträglichkeit zu überprüfen. Einige Projekte mit einer Gesamtleistung von über 1.000 MW wurden deshalb vom Ministerium für Industrie und Handel (MOIT) wieder aus dem Energieausbauplan gestrichen. Es konnten aufgrund der bereits gewonnenen Erfahrungen entweder keine Investoren gefunden werden oder erneute wirtschaftliche Bewertungen und Umweltverträglichkeitsabschätzungen ergaben eine zu geringe Rentabilität. Im Jahr 2016 beschloss MOIT nach einer dreijährigen Überprüfung, zusätzlich 471 Klein- und Kaskadenwasserkraftwerke mit einer installierten Leistung von 2.100 MW aus dem Energieausbauplan zu streichen. Weitere 213 potenzielle Projekte wurden aus Umwelt- und Effizienzgründen abgelehnt. Der Ausschuss für Wissenschaft, Technologie und Umwelt der vietnamesischen Nationalversammlung gibt an, dass knapp 30 % der bestehenden Kleinwasserkraftwerke nicht ausreichend geprüft wurden. Als Beispiel wird u.a. die ungünstige hydraulische Bemessung der Anlagen aufgeführt. Auch das im Rahmen dieser Arbeit begutachtete Kleinwasserkraftwerk aus den 90er Jahren zeigt, dass aufgrund der Auslegung der Turbinen auf die vergleichsweise hohen Abflüsse während der Regenzeit ein wirtschaftlicher Betrieb in den trockenen Monaten aufgrund reduzierter Leistungspotentials und abfallender Turbinenwirkungsgrade nicht aufrechterhalten werden kann. Die Folgen sind teils wochenlange Standzeiten. (UNIDO und ICSHP, 2019; Huu, 2015)

In weiteren südostasiatischen Ländern wie u.a. Thailand ist die Nutzung der Kleinwasserkraft aufgrund der hohen Niederschlagsmengen und großen Höhenunterschiede zwar lukrativ, die starken saisonalen Abflussschwankungen führen jedoch auch hier zu Problemen. Die nationalen Stromversorger Provincial Electricity Authority (PEA) geben an, dass viele Kleinwasserkraftwerke im Norden Thailands lediglich während der fünf- bis sechsmonatigen Regenzeit effizient betrieben werden können. (PEA, 2009; Sakulphan und Bohez, 2018)

In Tabelle 3.2 sind die Leistungsdaten einiger Laufwasserkraftwerke aus der Region über einen Zeitraum von 25 Jahren zusammengefasst. Die Turgo-Turbine ist dabei eine Ergänzung im Übergangsbereich von Francis- und Pelton-Turbinen. Über das Jahr betrachtet ergibt sich ein Anlagennutzungsgrad (Quotient aus dem tatsächlich erreichbaren und dem maximal möglichen Wert) von z.T. deutlich weniger als 50 %.

Tabelle 3.2: Leistungsdaten mehrerer Laufwasserkraftwerke im Norden Thailands über einen Zeitraum von 25 Jahren nach Sakulphan und Bohez (2018)

Laufwasserkraftwerke	Mae Tian	Mae Jai	Mae Ya	Mae Pai
Turbinentyp	Francis	Francis	Turgo	Turgo
Installierte Leistung (MW)	0,965 x 2	0,875	1,15	1,26 x 2
Mittlere Jahresenergieertrag (MWh)	4.370	1.927	4.334	8.015
Mittlere Wartungskosten (USD/kWh)	0,000975	0,002064	0,000688	0,000448
Mittlere Stromerzeugung (MW)	0,498	0,220	0,495	0,915
Nutzungsgrad	25,85	25,13	43,02	36,34

Die Beispiele aus Vietnam und Thailand skizzieren die Probleme an konventionellen Wasserkraftwerken bei stark fluktuiierenden Abflüssen. Gerade im ländlichen Raum ist die Bemessung der Wasserkraftwerke aufgrund der oftmals limitierten Datenverfügbarkeit mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Durch den Mangel an Fachwissen und qualifizierten Fachkräften sind vor allem Kleinwasserkraftwerke häufig nicht ideal auf die lokalen Randbedingungen abgestimmt. In Kombination mit einer unzureichenden Wartung führt dies zu einer weiteren Verschiebung bzw. Verschlechterung des Wirkungsgradverlaufs.

Parallel dazu wirkt sich die zunehmende Änderung des Abflussregimes aufgrund der Einflüsse des Klimawandels weiter auf die Effizienz der Wasserkraftwerke aus. Klimaforscher gehen davon aus, dass vor allem Südostasien eines der am stärksten betroffenen Gebiete infolge des Klimawandels sein wird. Durch die Veränderungen des südostasiatischen Monsun-Musters wird das Risiko von Dürren erhöht. Während die Auswirkungen des Klimawandels schon jetzt erkennbar sind, prognostizieren Wissenschaftler eine Zunahme von Extremen wie Überschwemmungen und Dürren in ganz Asien. Die Volatilität der Niederschläge wirkt sich unweigerlich auf die Stromerzeugung aus Wasserkraft aus. (Blackshear u. a., 2011)

Dies zeigt sich an einigen Großwasserkraftwerken in Vietnam, wobei die Situation auf dem Land vermutlich deutlich gravierender ist. Im Jahr 2010 waren die drei wichtigsten Wasserreservoirs wegen zu geringer Zuflüsse mitunter nur zu 35 % unter dem Durchschnittswert

gefüllt, sodass immer wieder die Stromzufuhr unterbrochen wurde. Das Wasserkraftwerk Hoa Binh, das in normalen Jahren über 10 TWh Strom ins Netz speist, brachte es 2010 maximal auf 8,5 TWh. Und auch im Jahr 2019 führte eine Hitzewelle in Zentralvietnam dazu, dass einige Wasserkraftwerke den Betrieb einstellen mussten. An den Staudämmen in den Distrikten Nam Giang und Dong Giang lag der Füllstand bei rund 20 % bis 30 % des Stauziels. Das Binh Dhien Wasserkraftwerk in Huong Tra produzierte 2019 lediglich 102 Mio. kWh. Zum Vergleich: Im Vorjahr wurden 0,18 TWh Strom erzeugt. (Than u. a., 2019; Schmitt, 2010)

3.3.3 Effizienz von Wasserkraftwerken während der Trockenmonate

Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 dargelegt, werden die vorhandenen Wasserkraftpotentiale im ländlichen Raum fast ausschließlich von konventionellen Kleinwasserkraftwerken zur Stromproduktion genutzt. Viele dieser Wasserkraftwerke sind aufgrund der starken Abflussschwankungen und der oftmals limitierten Datenverfügbarkeit nicht ideal auf die lokalen Randbedingungen abgestimmt.

Um die Probleme von Wasserkraftwerken im tropischen und subtropischen Raum mit mehrmonatiger Trockenzeit bewerten zu können, ist eine Betrachtung der typischen Abflussverhältnisse erforderlich. Prinzipiell können Gewässer bestimmten Abflussregimen zugeordnet werden. Darunter wird die gemittelte, regelhafte und jahreszeitliche Abfolge von Abflussschwankungen verstanden. Durch meteorologische, geomorphologische, hydrologische, pedologische, vegetationsseitige und anthropogene Faktoren treten typische Erscheinungsformen früher oder später bzw. ausgeprägter oder weniger ausgeprägt auf. Die einfachen Regime mit nur einem Abflussmaximum im Jahresgang können durch die Art der Speisung des Abflusses in verschiedene Kategorien unterteilt werden. Sie können durch Gletscherschmelze (glazial), durch Schneeschmelze (nival) und durch Regenwasser (pluvial) hervorgerufen werden. Mit dem dimensionslosen Pardé-Koeffizienten - auch Schwankungskoeffizient genannt - kann das zeitliche Abflussverhalten ausgedrückt werden. Er ist der Quotient aus dem langjährigen mittleren Monatsabfluss und dem langjährigen mittleren Jahresabfluss. (Nestmann und Ihringer, 2003)

In Abbildung 3.5 sind beispielhaft die Pardé-Koeffizienten mehrerer großer Flüsse ($> 500 m^3/s$) in der gemäßigten Klimazone (Fluss Rhein in Deutschland) und der tropischen und subtropischen Klimazonen (Fluss Da, Fluss Lo und Fluss Gam in Vietnam) gegenübergestellt. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Abflussschwankungen bedingt durch die Jahreszeit auftreten. In Deutschland werden die Flüsse vom pluvialen, nivalen und glazialen Regime bestimmt, wobei sich glaziale Abflussregime nur im Alpenraum finden. Der Rheinpegel Basel weist durch den dominierenden alpinen Einfluss eine typische nivale Grundprägung auf. Während dem Sommer führt der Rhein bei Basel bis zu 40 % mehr Wasser im Vergleich zum Jahresmittelabfluss. In den Wintermonaten sind es etwa 20 % weniger. Erst stromabwärts wird das nivale Regime durch die Nebenflüsse mit dem pluvialem Charakter überlagert. Ab dem Mittelrhein bei dem Pegel Adernach überwiegen die pluvialen Elemente. Die Abflussmengen nehmen dort im Februar um etwa 25 % zu. Im Sommer nimmt die Abflussmenge um etwa 30 % ab, was auf den geringen Niederschlag und die hohe Evapotranspiration zurückzuführen ist (Belz, 2007). In Vietnam

hingegen werden die Abflussmengen ausschließlich vom pluvialen Flussregime beeinflusst. Die Funktionsverläufe zeigen starke Diskrepanzen zwischen der Regen- und Trockenzeit. In den regenreichen Sommermonaten liegen die Werte um bis zu 180 % höher als der Jahresmittelabfluss. Während dieser Zeit fallen in Vietnam, wie auch in vielen weiteren Teilen Südostasiens, bis zu 80 % des Niederschlags. In den trockenen Monaten hingegen führen die Flüsse weniger als 30 % des mittleren Jahresabflusses.

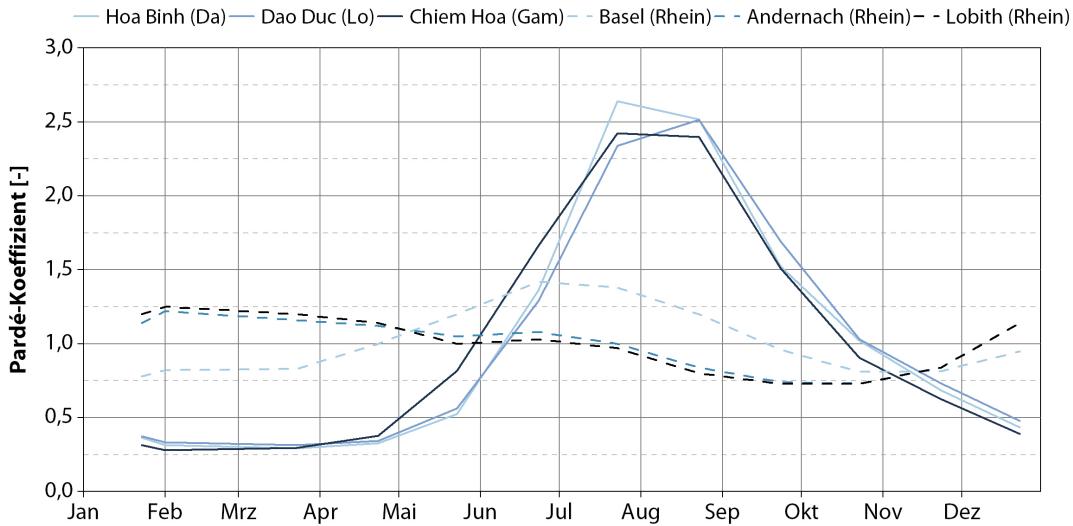


Abbildung 3.5: Abflussregime des Rheins am Beispiel der Pegel Basel (Oberrhein), Andernach (Mittelrhein) und Lobith (Niederhnein) sowie Abflussregime der vietnamesischen Flüsse Da am Pegel Hoa Binh, Lo am Pegel Dao Duc und Gam am Pegel Chiem Hoa nach IMRR (2013) und Belz (2007)

Die Abflussbedingungen haben direkten bzw. indirekten Einfluss auf die maßgebenden Parameter eines Wasserkraftwerkes selber (z.B. Ausbauleistung, Anzahl der Turbinen, Turbinentyp) sowie deren Wirtschaftlichkeit. Deutlich wird diese Abhängigkeit der Wasserkraft vom Wasserdargebot am Beispiel der Gleichung zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit einer Turbine (Böttcher, 2014):

$$P_T = \eta_T \cdot \rho \cdot g \cdot H_T \cdot Q_A \quad (3.1)$$

Die Leistung P_T ermittelt sich aus dem Wirkungsgrad der Turbine η_T , der nutzbaren Fallhöhe H_T und dem Durchfluss Q_A und spiegelt somit auch den Zusammenhang zwischen den wichtigsten physikalischen Komponenten einer Wasserkraftanlage und einem Anlagenstandort wieder. Der Wirkungsgrad, als Funktion der Beaufschlagung, hat hierbei einen entscheidenden Einfluss auf die Energieerzeugung. Im Folgenden werden die Wirkungsgrade konventionelle Turbinen im unteren Teillastbereich näher betrachtet. Die Wirkungsgradverläufe in Abhängigkeit der Beaufschlagung sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

Pelton-Turbinen und Francis-Langsamläufer werden aufgrund ihrer Charakteristika im Hochgebirge eingesetzt. Bei Pelton-Turbinen kommt es trotz des guten Teillastverhaltens bei einer Beaufschlagung mit weniger als einem Fünftel des Ausbaudurchflusses zu einem

signifikanten Wirkungsgradabfall. Bei Francis-Langsamläufern ist der Rückgang bereits unterhalb von zwei Fünfteln des Bemessungsdurchflusses der Fall. Zu Zeiten geringen Wasserdargebots erzielen die Turbinen aufgrund der deutlich unter dem Bemessungsabfluss liegenden verfügbaren niedrigen Abflussmengen einen derart schlechten Wirkungsgrad, dass es zu Ausfällen und lang anhaltenden Standzeiten kommt. Hinzu kommt, dass durch die zunehmende Änderung des Abflussregimes aufgrund der Einflüsse des Klimawandels die Wasserkraftwerke vermehrt ihre Grundlastfähigkeit verlieren bzw. zunehmende Niedrigwasserperioden die Stromproduktion stark reduzieren (siehe Abschnitt 3.3.2).

3.3.4 Optimierung der Wasserkraftwerke für die Wasserförderung

Das besondere Interesse gilt also dem Abflussspektrum, in dem der Wirkungsgrad der Turbinen stark zurückgeht und es zu Einbußen in der Stromerzeugung bzw. zum Stillstand der Anlagen kommt. Das verbleibende (nicht unerhebliche) Energiepotential bleibt gerade in Zeiten, in denen der Bedarf an Wasser für den alltäglichen Gebrauch und die Bewässerung am höchsten ist, häufig ungenutzt.

Eine mögliche Lösung, die Effizienz eines Wasserkraftwerkes zu steigern, könnte sich durch die Nutzung der geringen Wassermengen für die Wasserförderung ergeben. Die Ausbeute der vergleichsweise niedrigen Abflussmengen während der Trockenzeit ist jedoch oftmals zu gering, um die Anschaffungskosten einer weiteren Wasserturbine für den unteren Teillastbereich zu amortisieren. Als kostengünstige Alternative zu konventionellen Turbinen bieten sich Pumpen als Turbinen (PAT) an. Der Wirkungsgradverlauf von konventionellen Turbinen und PAT in Abhängigkeit der relativen Auslastung eines Wasserkraftwerkes ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

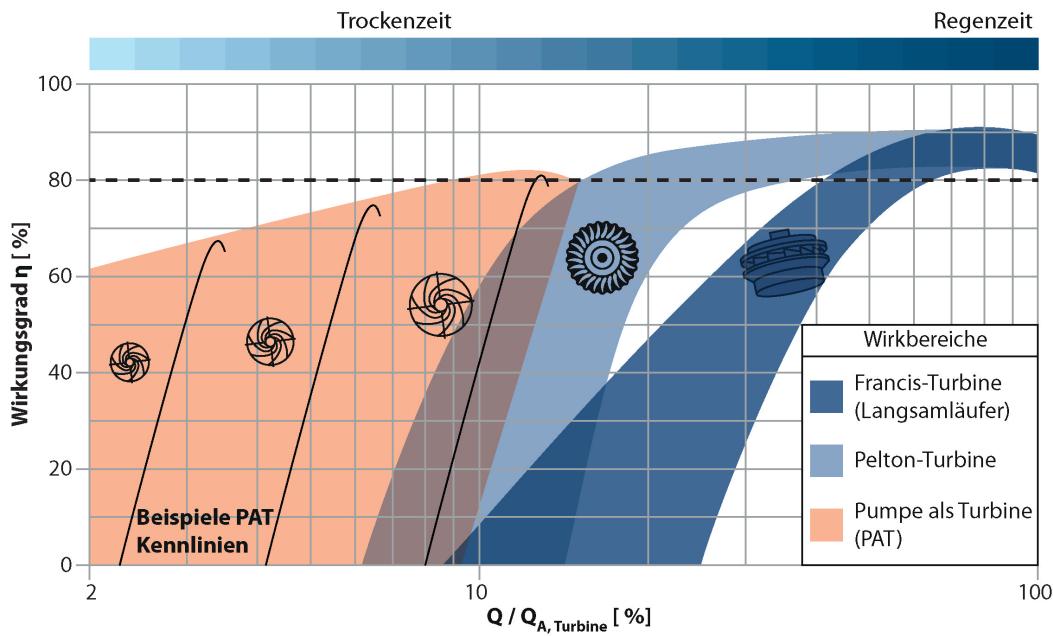


Abbildung 3.6: Wirkungsgradverlauf von PATs für den unteren Teillastbereich von konventionellen Turbinen in Abhängigkeit der relativen Auslastung eines Wasserkraftwerkes

Der Vergleich einer PAT und einer konventionellen Wasserturbine in Bezug auf die technischen, betrieblichen und ökonomischen Eigenschaften wird in Abschnitt 2.4.2 durchgeführt. Die geringen Investitionskosten, die einfache Funktionsweise, die hohe Robustheit sowie der geringe Betriebs- und Wartungsaufwand machen den Einsatz einer PAT für Entwicklungs- und Schwellenländern interessant.

Neben der häufigsten Anordnung der PAT mit einem Generator kann bei ausreichend Druckenergie das an der Welle verfügbare Moment auch durch die Kopplung mit einer Arbeitsmaschine genutzt werden. Die Kopplung von PAT und Generator mit Umwandlung in Elektrizität sowie die direkte Kopplung von PAT und Förderpumpe ist schematisch in Abbildung 3.7 dargestellt. Der Direktantrieb ermöglicht im Vergleich zur Kopplung mit einem Generator eine geringere Systemkomplexität sowie eine höhere Effizienz, da auf verlustbehaftete Zwischenstufen wie Generatoren und Elektromotoren verzichtet werden kann. Die entnommene Energiemenge kann demnach vollständig für den Antrieb der Pumpe sowie zur Kompensation der dissipativen Verluste des Gesamtsystems (Abwärme, Reibung etc.) genutzt werden (Fritz u. a., 2012). Hierdurch kann ein energieautarkes, ökonomisch und ökologisch nachhaltiges Wasserfördersystem geschaffen werden, dass einfach und mit wenig Wartungsaufwand zu handhaben ist. Mit vergleichsweise geringem technischen und finanziellen Aufwand kann die Energieausbeute an vorhandenen Wasserkraftwerken deutlich gesteigert und die Wasserversorgungssituation in den umliegenden Regionen verbessert werden.

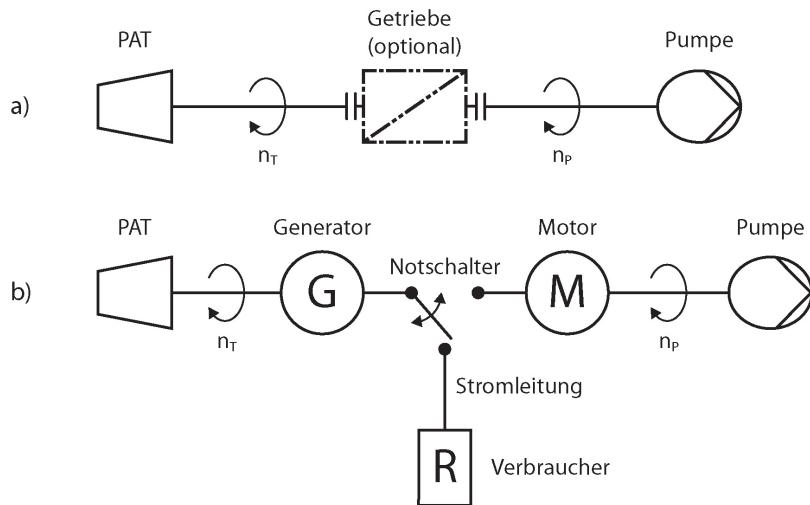


Abbildung 3.7: Kopplung von PAT und Pumpe (mit/ohne Getriebe) (a) sowie Kopplung von PAT und Generator mit Umwandlung in Elektrizität (b)

3.4 Konzeption des adaptiven Wasserfördersystems

3.4.1 Angepasstes Systemkonzept

Das Systemkonzept sieht die Optimierung bestehender Wasserkraftwerke durch ein innovatives Wasserfördersystem vor, um insbesondere während der jährlichen Trockenmonate

die geringen Abflussmengen zur wasserkraftbetriebenen Wasserförderung nutzen zu können. Mit einem eigens für den unteren Teillastbereich dimensionierten Wasserfördermodulen kann die Effizienz an bestehenden Anlagen deutlich gesteigert werden. Über einen Bypass kann mit vergleichsweise geringem infrastrukturellen Aufwand das Triebwasser je nach Abflussdargebot und Bedarfssituation zur Stromproduktion und / oder Wasserförderung genutzt werden. Die rein durch Wasserkraft geförderte Wassermenge wird über eine Hochdruck-Förderleitung in einen zentralen Hochbehälter eingespeist und den umliegenden Siedlungen gravitär zur Verfügung gestellt. Das Systemkonzept ist schematisch in Abbildung 3.8 dargestellt.

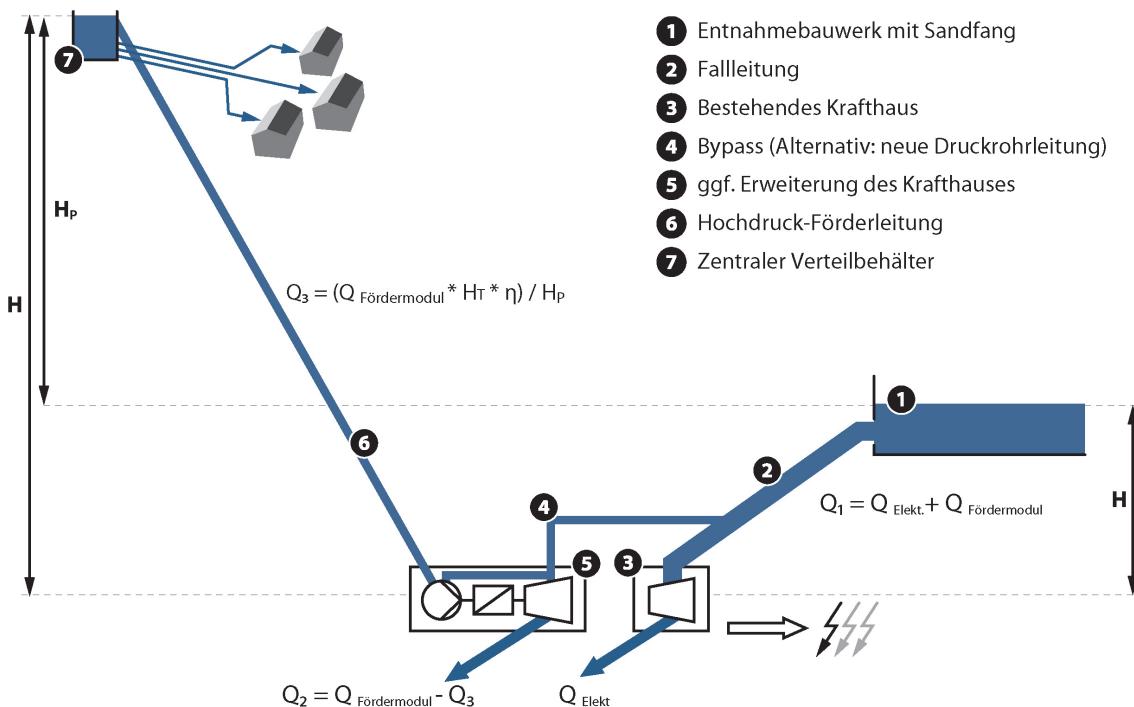


Abbildung 3.8: Systemskizze des angepassten Wasserförderersystems als Bypasslösung für Wasserkraftwerke

Das Wasserfördermodul besteht aus einer mechanisch gekoppelten Einheit einer Pumpe als Turbine (PAT) und einer Förderpumpe für den Hochdruckbereich. Dieser Aufbau zeichnet sich durch hohe Robustheit sowie geringen Betriebs- und Wartungsaufwand aus. Hierdurch kann eine flexible technische Lösung geschaffen werden, die der bereits erwähnten Aufgabe und den vorhandenen Randbedingungen perfekt angepasst ist.

Da eine invers betriebene Pumpe im Vergleich zu klassischen Turbinen keinen justierbaren Leitapparat besitzt und der Wirkungsgradverlauf einer PAT beidseitig vom Optimum deutlich steiler abfällt als bei Turbinen, hängt der effiziente Betrieb von einer zielgerichteten Auswahl der PAT sowie der Einhaltung des optimalen hydraulischen Betriebsbereiches ab (siehe Abschnitt 2.4). Durch z.B. den modularen bzw. parallelen Aufbau mehrerer Wasserfördermodule oder dem Einsatz externer Regeleinrichtungen kann dieser substantielle Nachteil kompensiert werden (Stoffel, 2016).

Der hydraulische Anschluss des Wasserförderersystems kann sowohl durch einen zusätzlichen Bypass in Form eines Rohrabschnittes an der bestehenden Fallleitung als auch alternativ durch ein parallel verlaufendes neues Druckrohr erfolgen. Weiterhin sind bautechnische Lösungen zur Optimierung und Rehabilitation der bestehenden Infrastruktur erforderlich (z.B. Erhöhung der Leistungsfähigkeit in Absetzbecken, Verbesserung der Ausnutzung des Wasserdargebots etc.). Hinsichtlich der Wasserentnahme aus einem natürlichen Fließgewässer ist zudem ein zusätzlicher Schutz des Wasserförderersystems vor dem Eintrag von mitgeführten Feststoffen erforderlich. Dies kann z.B. durch Integration geeigneter wasserbaulicher Strukturen und/oder technologischer Lösungen erfolgen. Welche bautechnischen Lösungen letztlich zielführend sind, muss für jeden Einzelfall gesondert geprüft werden.

Darüber hinaus ist die Entwicklung von Betriebskonzepten für die bislang neuartige Anbindung an Wasserkraftwerke notwendig. Es sind Regelungs- und Steuerungskonzepte gefragt, welche sich auf den Kenntnisstand der Betreiber beziehen. Ein intuitiv bedienbares Monitoringsystem soll den Betreibern ermöglichen, durch die Messwertausgabe an einem zentralen Schaltschrank abfluss- und bedarfsabhängig zwischen Stromerzeugung und Wasserförderung zu wählen. Die Festlegung der Betriebsstrategie (Fokus Wasserförderung und / oder Stromproduktion) hat direkten Einfluss auf den Umfang der erforderlichen elektrotechnischen Ausstattung des Wasserförderersystems (energetisch autark und / oder netzgespeist). Für einen ganzheitlichen Lösungsansatz im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine personalintensivere low-tech-Lösung aufgrund der meist niedrigen Lohnkosten gegenüber komplexeren technischen Systemen mit entsprechend höherer Anfälligkeit bei Störeinflüssen zu bevorzugen. Durch eine zusätzliche Erweiterung des Monitoringsystems um ein Alarmsystem kann das Betriebspersonal im Falle einer Überschreitung hinterlegter Grenzwerte (z.B. Unterschreitung des Ausbaudurchflusses oder Überschreitung der Feststofffracht) umgehend über Neueinstellungen informiert werden. Weiterhin sind für einen fachgerechten Betrieb und einen wirtschaftlichen Anlagenerhalt geeignete Wartungs- und Instandhaltungsstrategien sowie Betriebs- und Wartungshandbücher erforderlich. Dabei ist eine didaktisch fundierte, grafische Aufbereitung aller wesentlichen Inhalte anzustreben. Durch die visuelle Darstellung aller relevanter Systemkomponenten können technische und betriebliche Zusammenhänge präzise vermittelt sowie Sprachbarrieren und Kommunikationsprobleme (Missverständnisse, Fehlinterpretationen etc.) vermieden werden. Der Technologie- und Wissenstransfer ist hierbei ein entscheidendes Kriterium für die Nachhaltigkeit des Wasserförderersystems und ermöglicht eine Übertragbarkeit der Technologien und Methoden auf andere Standorte mit vergleichbaren Rahmenbedingungen.

3.4.2 Bemessungsgrundlagen für das Wasserfördermodul

Die Auswahl geeigneter Pumpen für das Wasserfördermodul erfolgt unter Berücksichtigung der o.g. Anforderungen sowie der standortspezifischen Gegebenheiten. Durch den Einsatz von verschiedenen Bauarten und Baugrößen für den Pumpen- und Turbinenbetrieb und der Vielzahl an unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen kann ein breites Anwendungsfeld geschaffen werden. Das Wasserfördermodul ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Nähere Informationen zu invers betriebenen Pumpen finden sich in Abschnitt 2.4 sowie in der Fachliteratur z.B. bei Gülich (2013).

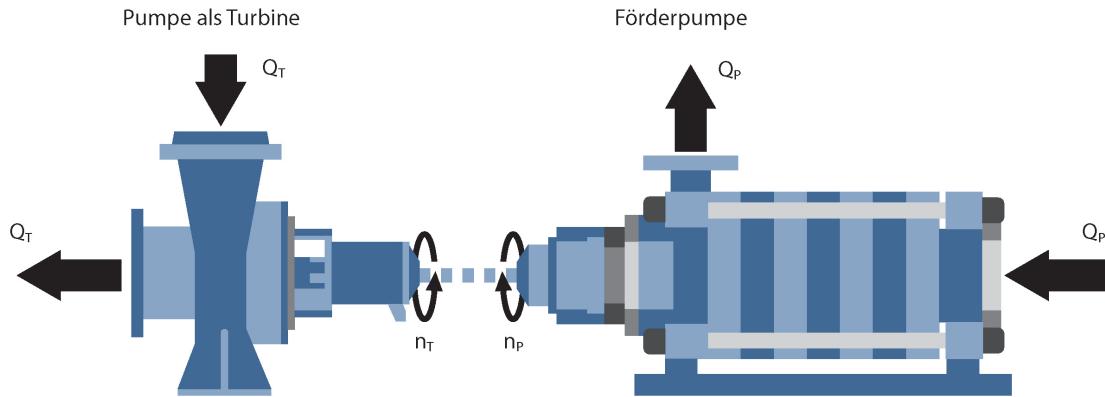


Abbildung 3.9: Kopplung einer Spiralgehäusepumpe als Turbinenersatz mit einer Gliederpumpe

Die PAT und die Pumpe sind über eine Kupplung und ggf. Getriebe miteinander verbunden. Entscheidend ist hierbei die „Leistungsgleichheit“ an den jeweiligen Wellenenden von PAT und Pumpe. Ist die PAT im Betrieb zu schwach, kann die angeschlossene Pumpe die erforderliche Leistung nicht erbringen. Wird zu viel Leistung generiert, geht Energie verloren oder die Pumpe wird überlastet. Die Schwankungen der Betriebsbedingungen werden selbsttätig durch das System reguliert. Die Leistungsbilanz von PAT und Pumpe unter Berücksichtigung von zwischengeschalteten Kupplung(en) und Getriebe sieht wie folgt aus (Baumgarten und Guder, 2005):

$$P_P = P_T \cdot \eta_{Komp.} \quad (3.2)$$

Die Gesamteffizienz, d.h. der Modulwirkungsgrad ist das Produkt der Einzelwirkungsgrade von PAT η_T , Pumpe η_P und verschiedener Verlustquellen η_{Komp} für u.a. Getriebe und Kupplungen (Baumgarten und Guder, 2005).

$$\eta_{Ges.} = \eta_T \cdot \eta_P \cdot \eta_{Komp.} = \frac{Q_P \cdot H_P}{Q_T \cdot H_T} \quad (3.3)$$

Das Schluckvermögen der PAT Q_T sowie die Fördermenge der Pumpe Q_P stehen in linearer Abhängigkeit zum Ausbaudurchfluss Q_A und ergeben sich aus der Energiebilanz. H_T ist hierbei die Fallhöhe der PAT und H_P die Förderhöhe der Pumpe.

$$Q_T = Q_A \cdot \left(1 - \frac{H_T \cdot \eta_{Ges.}}{H_T \cdot \eta_{Ges.} + H_P} \right) \quad (3.4)$$

$$Q_P = Q_A \cdot \left(\frac{H_T \cdot \eta_{Ges.}}{H_T \cdot \eta_{Ges.} + H_P} \right) \quad (3.5)$$

Die Abstimmung der lokalen naturräumlichen Anforderungen mit den technisch geeigneten und verfügbaren Maschinen ist ein aufwändiges Verfahren. Da während des Auslegungsprozesses Annahmen getroffen werden müssen (bzgl. Maschinenwirkungsgrad, Verlusthöhe, Mindestabfluss etc.) sind i.d.R. mehrere Iterationsstufen erforderlich. (Stoffel, 2016)

Die maßgeblichen Bemessungsgrößen sind im Folgenden beschrieben:

- **Ausbaudurchfluss Q_A :** Für die Festlegung des Ausbaudurchflusses Q_A sind umfangreiche Kenntnisse über die Abflussverhältnisse zur Beurteilung des verfügbaren Wasserkraftpotentials resp. des Mindestabflusses erforderlich. Die Auslegung erfolgt für den unteren Teillastbereich der Turbinen, da hier vergleichsweise geringe Wirkungsgrade zu erwarten sind und weiterhin bei höheren Abflüssen ein flexibles Zuschalten der Turbinen ermöglicht wird. Hierbei ist darauf zu achten, dass bei Auslastung der beiden Teilsysteme (Wasserkraftwerk und Wasserförderersystem) diese nicht in „Konkurrenz“ treten. Um dem schlechteren Teillast- und Überlastverhalten im Vergleich zu regelbaren Turbinen entgegenzuwirken, ist ein modularer bzw. paralleler Aufbau mehrerer Wasserfördermodule erforderlich.

Bei der Frage, auf welche Modulanzahl das Schluckvermögen Q_T und die Fördermenge Q_P aufgeteilt werden soll, kann die Entscheidung jedoch nicht immer rein auf Basis der hydraulischen Bedingungen getroffen werden. Im Folgenden sind die wesentlichen Aspekte aufgelistet, die bei der Festlegung des Ausbaudurchflusses berücksichtigt werden sollten:

- Durch ein niedriges Q_T , d.h. die Aufteilung des Mindestdargebots auf mehrere Maschinensätze, kann auch im Falle einer Unterschreitung in extremen Trockenjahren der Betrieb aufrechterhalten werden. Hierdurch kann einerseits eine höhere betriebliche Flexibilität ermöglicht werden, anderseits sind häufige Start- und Stoppvorgänge aufgrund der hohen mechanischen Belastung von Welle, Lager und Dichtungen zu vermeiden.
- Bei einem höheren Q_T besteht die Gefahr, dass das Pumpensystem über einen größeren Zeitraum des Jahres mit dem bestehenden Wasserkraftwerk konkurriert, was ggf. zu einem geringeren Nutzungsgrad des Abflussdargebots bzw. einem geringeren Gesamtwirkungsgrad führen könnte. Durch den Einsatz von größeren und damit langsamer laufenden Fördermodulen kann jedoch in Anbetracht der Entnahme des Triebwassers aus einem natürlichen Fließgewässer die Strömungsgeschwindigkeit in den Maschinensätzen und damit das Abrasionsrisiko reduziert werden.
- Durch den Einsatz baugleicher Module kann die Komplexität des Gesamtsystems geringer und die Betriebsstrategien deutlich einfacher werden.
- Durch den Einsatz unterschiedlicher Module kann das Abflussdargebot effizienter genutzt werden. Dies könnte jedoch wiederum dazu führen, dass das Regelungssystem u.U. deutlich komplexer wird und umfassendere betriebliche Kenntnisse des Personals erforderlich sind. Zudem kann die Ersatzteilbeschaffung und Instandhaltung erschwert und der Effizienzvorteil bei Ausfall eines Wasserfördermoduls evtl. hinfällig werden.
- **Fallhöhe H_T und Förderhöhe H_P :** Die Fallhöhe H_T und Förderhöhe H_P sind weitere wichtige Einflussgrößen für die Auslegung des Wasserfördermoduls. H_T ist hierbei proportional zur generierbaren Leistung und nimmt Einfluss auf die realisierbare Fördermenge Q_P . Da zur Bestimmung der Fall- und Förderhöhe die zu erwartenden strömungsbedingten Energieverluste zu berücksichtigen sind, muss das

Schluckvermögen Q_T und die Fördermenge Q_P gemäß Gleichung 3.4 und 3.5 näherungsweise abgeschätzt werden.

- **Maschinen- bzw. Systemwirkungsgrad η :** Weiter sind die Wirkungsgrade η bei der Vorauslegung zunächst noch unbekannt und müssen unter Berücksichtigung der Baugrößen ebenfalls realistisch abgeschätzt werden. Der Turbinenwirkungsgrad ist dabei i.d.R. vergleichbar mit den Wirkungsgraden im Normalbetrieb. Im Allgemeinen liegen die Spitzenwirkungsgrade bei PATs zwischen 80 % und 85 % und bei Förderpumpen zwischen 60 % und 90 % (Stoffel, 2016). Über gezielte Modifikation der Maschinen (z.B. Abrunden der Eintrittskanten) können Ablösungen und Stoßverluste im Turbinenbetrieb reduziert und eine Steigerung des Spitzenwirkungsgrades erzielt werden (siehe Abschnitt 2.4.5).
- **Betriebsdrehzahl n :** Die Festlegung der Betriebsdrehzahl n ist innerhalb des Auslegungsprozesses eine der schwierigsten Aufgaben. Während die Drehzahl einer Pumpe im Netzbetrieb durch die Netzfrequenz und Polpaarzahl der Motoren bzw. Generatoren annähernd konstant ist, stellt sich je nach Betriebspunkt der Förderpumpe und PAT bei Leistungsgleichgewicht eine resultierende Aggregatsdrehzahl ein. Die Kennlinien von PAT und Förderpumpe müssen aufeinander abgestimmt werden. Die Turbinenkennlinien können durch messtechnischen Versuche oder mittels statistischer Korrelationen bestimmt werden. Liegen die Kennlinien für PAT und Pumpe vor, werden entsprechend der Leistungsbilanz Betriebspunkte gesucht, bei denen die von der PAT abgegebenen Leistung mit der von der Pumpe aufgenommenen Leistung übereinstimmen (Stoffel, 2016). Abhängig von den gegebenen Randbedingungen können die Betriebsdrehzahlen beider Maschinen auch durch ein zwischengeschaltetes Getriebe angepasst werden. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass der Einsatz eines Getriebes zu einem komplexeren und somit weniger robusten Gesamtsystem führt. Die Notwendigkeit eines zwischengeschalteten Getriebes sollte demnach für den Einzelfall geprüft werden (Oberle u. a., 2016).

Mithilfe der spezifischen Drehzahl n_q können bei unterschiedlichen Betriebsdaten (Förderhöhe H_P bzw. Fallhöhe H_T , Fördermenge Q_P bzw. Schluckvermögen Q_T und Drehzahl n eines Pumpenlaufrades im Punkt des besten Wirkungsgrades η_{Opt}) Laufräder verschiedener Baugrößen miteinander verglichen und ihre optimale Bauform sowie die Form der zugehörigen Pumpenkennlinie klassifiziert werden. n_q ist die gedachte Drehzahl eines geometrisch ähnlichen Laufrades mit dem Förderstrom (Q_{Opt}) von 1 m³/s und einer Förderhöhe (H_{Opt}) von 1 m im Punkt des besten Wirkungsgrades (KSB, 2005). Ein gleiches n_q von zwei Maschinen bedeutet, dass die Geometrie, also z.B. Form und Winkel der Schaufeln, dieselbe ist. Auf die absolute Größe hat dieser Parameter keinen Einfluss. Die aus der Ähnlichkeitsmechanik stammende Kenngröße kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q_{opt}}}{(H_{Opt})^{3/4}} \quad (3.6)$$

Eine Übersicht über die Einteilung verschiedener Pumpentypen für den inversen Betrieb ist in Abbildung 3.10 gegeben. Bei zu großem n_q wird mit zunehmender Baugröße die

Machbarkeit aufgrund der Handhabbarkeit und der auftretenden Kräfte limitiert. Bei zu geringem n_q wird das Verhältnis von Austrittsquerschnitt zu Gehäusegröße zunehmend ungünstiger. Falls sich ungünstige resp. zu große spezifische Drehzahlen für die PAT ergeben, kann n_q durch eine zweiströmige oder mehrere kleinere, parallel betriebene Maschinen reduziert werden. Aber auch bei zu kleinen spezifischen Drehzahlen für die Förderpumpe ist eine Erhöhung mittels mehrstufiger Gliederpumpe möglich, wobei sich die Gesamtförderhöhe proportional auf die einzelnen Stufen aufteilt. D.h. für die Ermittlung von n_q wird lediglich die Förderhöhe einer Stufe benötigt. (Stoffel, 2016)

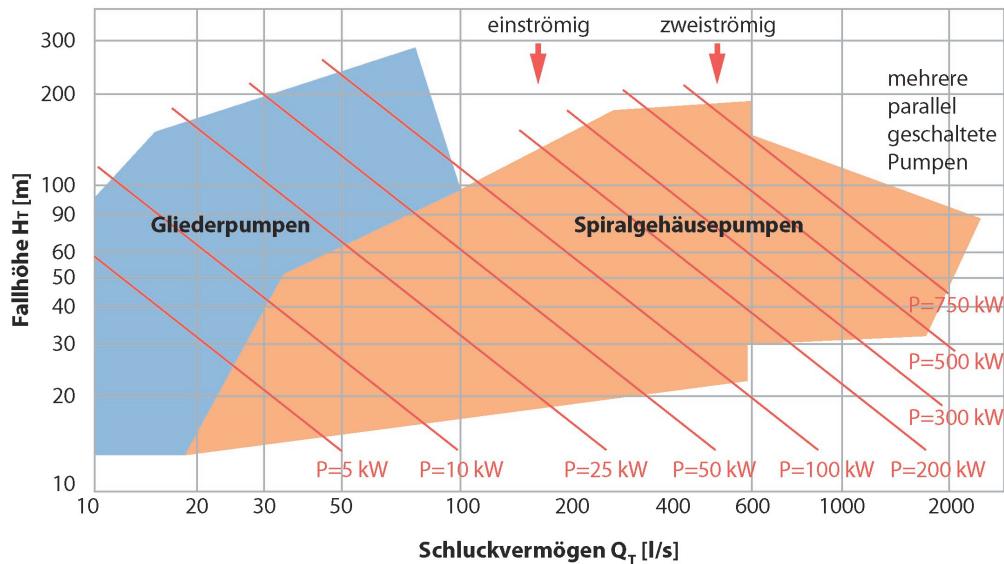


Abbildung 3.10: Einsatzbereich der PAT nach Fritz und Schmidt (2017)

3.4.3 Planungsschritte für das Bypass-System

Die grundlegenden Planungsschritte für die Umsetzung des Bypass-Systems an einem Wasserkraftwerk bzw. die Optimierung eines Wasserkraftwerkes durch ein adaptives Wasserförderersystem sind im Folgenden näher beschrieben.

a) Einsatzkriterien

Bezogen auf die in Abschnitt 3.1 und 3.2 beschriebenen Randbedingungen, ist das adaptive Wasserförderersystem für Wasserkraftwerke konzipiert, die während der mehrmonatigen Trockenzeit die vorhandenen Niedrigwassermengen für den Turbinenbetrieb nicht effizient nutzen können. Durch das Bypass-System soll der Stillstand der Wasserkraftwerke während der mehrmonatigen Trockenzeit sinnvoll kompensiert und für die Wasserförderung zugänglich gemacht werden.

b) Voruntersuchungen

Als Entscheidungsgrundlage und als Basis für die Planungsschritte sind umfangreiche Kenntnisse über die standortspezifischen Randbedingungen und Einflussgrößen erforderlich.

- **Naturräumliche Gegebenheiten:** Um die Eignung eines Standortes bewerten zu können sind die verfügbaren Wasserressourcen unter Normal- und Extrembedingungen (Minimal- und Maximalabflüsse), die topographischen Bedingungen (vorhandene Fallhöhe und erforderliche Förderhöhe) sowie die Wasserzusammensetzung zu ermitteln. Der Mindestabfluss sowie das Fall- zu Förderhöhenverhältnis sind dabei wichtige Eingangsgröße (siehe Abschnitt 3.4.2). Zudem dient eine detaillierte Betrachtung von Trübung, Schwebstoffkonzentration und -zusammensetzung der Vorhersage und Kontrolle des Sedimentationspotentials und von Abrasionsprozessen an Werkstoffen (Beton, Pumpen).

Im Folgenden sind die naturräumlichen Randbedingungen zusammengefasst:

- Minimal- und Maximalabflüsse
- Topographischen Höhenunterschiede
- Geschiebe- und Feststofffracht im Fließgewässer

- **Technische Gegebenheiten:** Damit das Wasserförderersystem in der Übergangs- und Regenzeit nicht mit dem Wasserkraftwerk konkurriert und ggf. zu einem geringeren Gesamtwirkungsgrad führt, ist die Bestimmung des Wirkungsgrades der Turbinen erforderlich. Weiterhin muss sichergestellt sein, dass der hydraulische und bauliche Ausgangszustand des Wasserkraftwerkes entsprechende Investitionen rechtfertigt. Eine Übersicht der für die Bypasslösung benötigten Systemkomponenten ist in Abbildung 3.8 gegeben.

Die technischen Randbedingungen sind im Folgenden zusammengefasst:

- Wirkbereich der Wasserturbinen
- Nutzbare Fallhöhe
- Hydraulischer und baulicher Anlagenzustand
- Geschiebe- und Feststoffrückhalt

- **Soziokulturelle Gegebenheiten:** Im Hinblick auf die Wasserförderung ist die Wasserbedarfssituation und -entwicklung zu bewerten. Neben der erforderlichen Fördermenge sind zudem die Siedlungsstruktur bzw. die zu überwindenden Distanzen und Höhendifferenzen zu berücksichtigen.

Zusammenfassend sind folgende soziokulturelle Randbedingungen entscheidend:

- Wasserbedarfssituation und -entwicklung (Fördermenge)
- Siedlungsstruktur (erforderliche Förderhöhe und -distanz)

c) Wirtschaftlichkeitsüberlegung

Wenn durch die Voruntersuchungen weiterer Untersuchungsbedarf festgestellt wird, empfiehlt es sich, eine grobe Wirtschaftlichkeitsabschätzung zum erzielbaren Nutzen in Relation zum benötigten Aufwand anzustellen. Die Fördermenge als zentrale und bestimmende Zielgröße ergibt sich rechnerisch aus der Leistungsbilanz von PAT und Förderpumpe (siehe Gleichung 3.5). Der benötigte infrastrukturelle Aufwand für die Erweiterung eines Wasserkraftwerkes ergibt sich überschlägig aus den Bauelementkosten für die zu sanierenden

bzw. zu erneuernden sowie den zu erweiternden Komponenten. Welche bautechnischen Lösungen letztlich zielführend sind, muss für jeden Einzelfall gesondert geprüft werden.

d) Entwurfsplanung

Für die Vordimensionierung des Wasserfördersystems sind die Eingangsparameter Ausbaudurchfluss, Fall- und Förderhöhe sowie Fördermenge festzulegen. Das übergeordnete Ziel ist dabei die Schaffung eines robusten und gleichzeitig effizienten Systems, welches eine flexible Zuschaltung zu den Wasserturbinen ermöglicht. Bei der Maschinenauswahl für den Regel- als auch für den inversen Betrieb sind hohe mechanische und hydraulische Anforderungen aufgrund der Hochdruckbedingungen sowie der Verarbeitung von Geringstabflüssen gegeben. Gleichzeitig sind u.a. Kriterien in Bezug auch eine hohe Effizienz bei gleichzeitig geringem Betriebs- und Wartungsaufwand sowie hoher Robustheit zu erfüllen.

Die wesentlichen Anforderungen an die Maschinen bzw. Modulauslegung sind im Folgenden zusammengefasst:

- Große Fall- und Förderhöhen
- Verarbeitung von Niedrigabflüssen während der Trockenzeit
- Drehzahlsynchronisation der Maschinensätze
- Abrasionsbeständigkeit bzw. Widerstandsfähigkeit gegenüber Sedimentdurchgang
- Möglichst einfacher Betrieb und Wartung
- Hohe Verfügbarkeit von Maschinen- und Ersatzteilen

Unter Berücksichtigung dieser Anforderung können verschiedene Maschinenkombinationen ermittelt werden. Variiert wird u.a. die Anzahl der Module, deren Baugröße, Stufenzahl und Nenndrehzahl, die Art der Axialentlastung sowie die Werkstoffe für strömungsberührende Bauteile. Zusätzlich kann zur Erweiterung des Wasserfördersystems eine externe Regeleinrichtung in Betracht gezogen werden. Hierdurch können im Falle geringer Abflüsse der Vordruck künstlich verringert und somit das Schluckvermögen der PAT sowie die Fördermenge der Pumpe reduziert werden. Wenngleich eine Drosselarmatur eine Energiedissipation bewirkt, so kann sie aus betrieblicher Sicht durch Vergrößerung des nutzbaren Abflussspektrums sinnvoll sein. Aus einer Vielzahl realisierbarer Konfigurationen kann mithilfe der Bewertungsmatrix in Tabelle 3.3 die zielführendste Konfiguration ausgewählt werden.

Nach der Festlegung der Fördermenge im Rahmen des Auslegungsprozesses sind unterschiedliche Betriebsstrategien (Stromproduktion, Wasserförderung sowie simultane Wasserförderung und Stromproduktion) zu entwickeln. Darauf aufbauend kann die messtechnische Ausstattung sowie die elektrotechnische Steuer- bzw. Regeleinheit festgelegt werden. Diese dient als essentielles Werkzeug für einen nachhaltigen Anlagenbetrieb und sollte an die Bedürfnisse und Beschränkungen der entlegenen Gebirgsregionen angepasst sein. Bei der Auswahl der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik kann prinzipiell zwischen vollautomatisierten, teilautomatisierten und händisch betriebenen Anlagen unterschieden werden. Hinsichtlich der Entnahme aus einem natürlichen Gebirgsfluss ist aus Verschleiß-

und letztlich Sicherheitsgründen eine kontinuierliche Überwachung der Feststofffracht erforderlich. Neben der Trübung sollten zur Überwachung des Zustandes auch die relevante Größen wie Drücke, Durchflüsse, Temperaturen, Drehzahlen und Leistungen gemessen werden.

Für die bestehenden Bauwerke sind Maßnahmen zur Rehabilitation und Optimierung abzuleiten (z.B. Verbesserung der Ausnutzung des Wasserdargebots, Erhöhung des Feststoffrückhaltes). Grundsätzlich ist zum Schutz der Wasserfördermodule der Geschiebe- und Feststoffeintrag neu zu bewerten. Eine Steigerung der Rückhaltekapazität kann z.B. durch Beruhigungsrechen bzw. Gleichrichterelemente oder durch Unterteilung des Beckens in mehrere Kammern erzielt werden. Durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen (z.B. Nutzung eines horizontalen Filterrohrs am Einlass der Fallleitung) kann mit vergleichsweise geringem finanziellen Aufwand der Eintrag von Feststoffen in die Fallleitung durch anthropogene Einflüsse vermieden werden. Für die Abhaltung des Treibguts können neben der Optimierung der Rechen z.B. Tauchwände, Schwimmbalken oder Kombinationen in Betracht gezogen werden.

Weiterhin ist das Wasserkraftwerk um neue Komponenten zu erweitern. Hierzu gehört der Bypass (alternativ neues Druckrohr), ggf. Maschinenhaus mit Rückgabebauwerk, die Hochdruckförderleitung sowie der Verteilspeicher. Bestehende Komponenten, die eine zusätzlichen Beanspruchung erfahren, müssen dahingehend überprüft werden (z.B. sind die Betonaufslager der Fallleitung bei Anschluss eines Bypasses hinsichtlich Massenkräfte, Kräfte infolge von Impulsübertragung, Strömungsumlenkungen usw. zu überprüfen).

Tabelle 3.3: Bewertungsmatrix als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der zielführendsten Maschinenkonfiguration

Kriterien	V1	V2	...	Vn
Betriebssicherheit bei extrem geringen Abflüssen				
Redundanz für Schadens- / Störfall				
Verwendung gleicher (Ersatz-) Teile				
Schulungs- und Wartungsaufwand				
Komplexität der Regelung				
Flexibilität bezüglich Regelung				
Simultane Wasserförderung und Stromerzeugung				
Deckung des aktuellen Wasserbedarfs				
Deckung des künftigen (höheren) Wasserbedarfs				
Planungs- und Entwicklungsaufwand				
Widerstandsfähigkeit gegenüber Feststoffbeladung				
Gesamtbewertung				

e) Wirtschaftlichkeitsbewertung

Durch die Festlegung der Betriebsstrategien (Fokus Wasserförderung und / oder Stromproduktion) kann die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage untersucht werden. Neben den

standortspezifischen Faktoren (u.a. Wasserbedarf, Abflussdargebot, Leistungsvermögen und wartungsbedingte Standzeiten beider Teilsysteme, Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten) sind auch übergeordnete Einflussgrößen (u.a. Investitionsrate, Zins- und Lohnentwicklung, Kaufkraftparitäten, Wasser und Strompreis) für die ökonomische Einschätzung zu berücksichtigen. Die Wahl der Betriebsstrategie hat Einfluss auf die Amortisationsdauer, da durch die Stromerzeugung und die Wasserförderung unterschiedliche Umsätze generiert werden. Ergänzend ist eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zu verschiedenen Wasserförderkonzepten durchzuführen. Hierbei ist das geplante wasserkraftbetriebene Förderkonzept mit neuen Turbinensätzen für den unteren Teillastbereich, konventionellen Förder systemen sowie regenerativen Förder systemen zu vergleichen.

f) Detailplanung

Für die weiteren Schritte ist die Bemessung des Wasserfördersystems sowie die Ausarbeitung von detaillierten Bauplänen bzgl. der zu sanierenden bzw. zu erneuernden sowie der zu erweiterten Komponenten des Wasserkraftwerkes erforderlich. Die Altteile, die weiterverwendet werden und zusätzliche Beanspruchungen erfahren müssen hierbei besonders berücksichtigt werden.

Zusammenfassung: Die Planungsschritte sind in Abbildung 3.11 zusammengefasst. Je nach Kraftwerkstyp und den lokalen Rahmenbedingungen können sich der Inhalt und Umfang im Einzelfall deutlich unterscheiden.

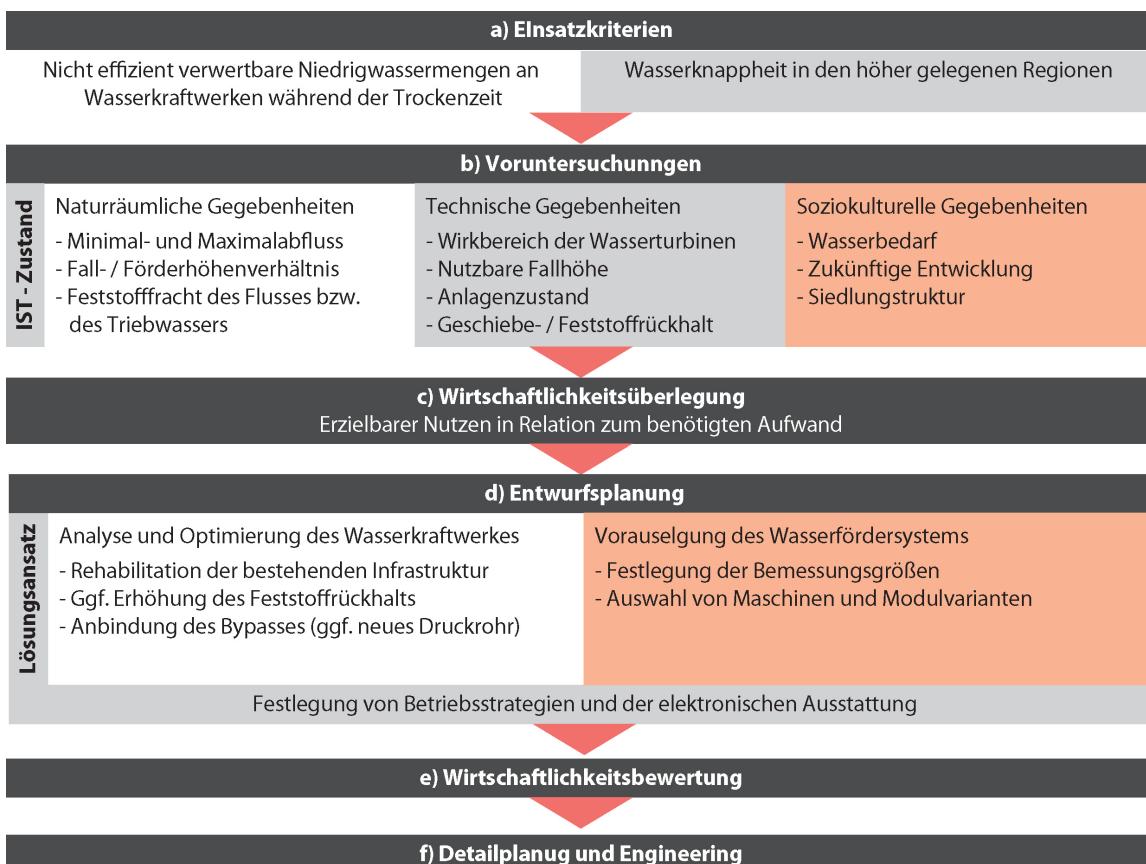


Abbildung 3.11: Planungsschritte für das Bypass-System

Kapitel 4

Der Norden Vietnams als Modellregion für die Pilotanlage

Die nördlichen Gebirgsregionen Vietnams sind ein typischer Vertreter sub-/tropischer Karstregionen in Schwellen- und Entwicklungsländern, die sich mit einer defizitären Wasserversorgung konfrontiert sehen. In der Modellregion - wie auch in vielen weiteren Bedarfsregionen - fehlt es an ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Technologien zur Erschließung und Förderung der Wasserressourcen. Diese sind für gewöhnlich auf tiefem geodätischem Niveau vorhanden und durch extreme Abflussschwankungen resp. Regen- und Trockenzeit gekennzeichnet. Durch die erhebliche Zunahme des Tourismus, was nicht zuletzt auf die Aufnahme der Modellregion in das UNESCO Global Geopark Network im Jahr 2010 zurückzuführen ist, verschärft sich die Wasserversorgungssituation zusehends. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Wasserversorgung in den ländlichen Regionen Nordvietnams. Dabei werden sowohl der aktuelle Stand als auch das zukünftige Entwicklungspotential der Wasserförderung, im Hinblick auf den in Kapitel 3 erarbeiteten technischen Lösungsansatz, näher betrachtet.

4.1 Klima und Naturraum

4.1.1 Lage und Topographie

Vietnam liegt an der Ostküste Südostasiens und grenzt an die umliegenden Nachbarstaaten China im Norden, Laos im Westen und Kambodscha im Südwesten. In Nord-Süd-Richtung erstreckt sich das Land über eine Länge von 1.650 km, an der schmalsten Stelle misst es lediglich 50 km. Südvietnam ist durch weitläufige Flachlandschaften mit sehr geringen geodätischen Höhenunterschieden geprägt, in Nordvietnam finden sich hingegen felsige Gebirgszüge mit Höhen von über 3.000 m+NN.

In Abbildung 4.1 ist die Modellregion am nördlichsten Ausläufer Vietnams, der Provinz Ha Giang, dargestellt. Sie erstreckt sich über die vier im äußersten Norden des Landes gelegenen Distrikte Quan Ba, Dong Van, Meo Vac und Yen Minh. Seit 2010 ist die Karstlandschaft dieser Distrikte als Dong Van Karst Plateau der erste offizielle UNESCO Geopark Vietnams und der Zweite in ganz Südostasien. Die stark zergliederte Topographie mit Geländehöhen bis zu 2.000 m+NN ist geprägt von steil aufragenden Karsthügeln

mit tiefen Tälern und Schluchten. Der Großteil der Bevölkerung im ländlichen Raum lebt in Siedlungen und einzelnen Gehöften auf einer Höhe von etwa 700 bis 1.500 m+NN. Die Distrikthauptstadt Dong Van City befindet sich, von einem Gebirgskamm umschlossen, auf einer Höhe von etwa 1.050 bis 1.080 m+NN. Die nur wenig vorhandenen Oberflächengewässer sind in einem Bereich von ca. 200 bis 500 m+NN anzutreffen. (Nestmann u. a., 2017)

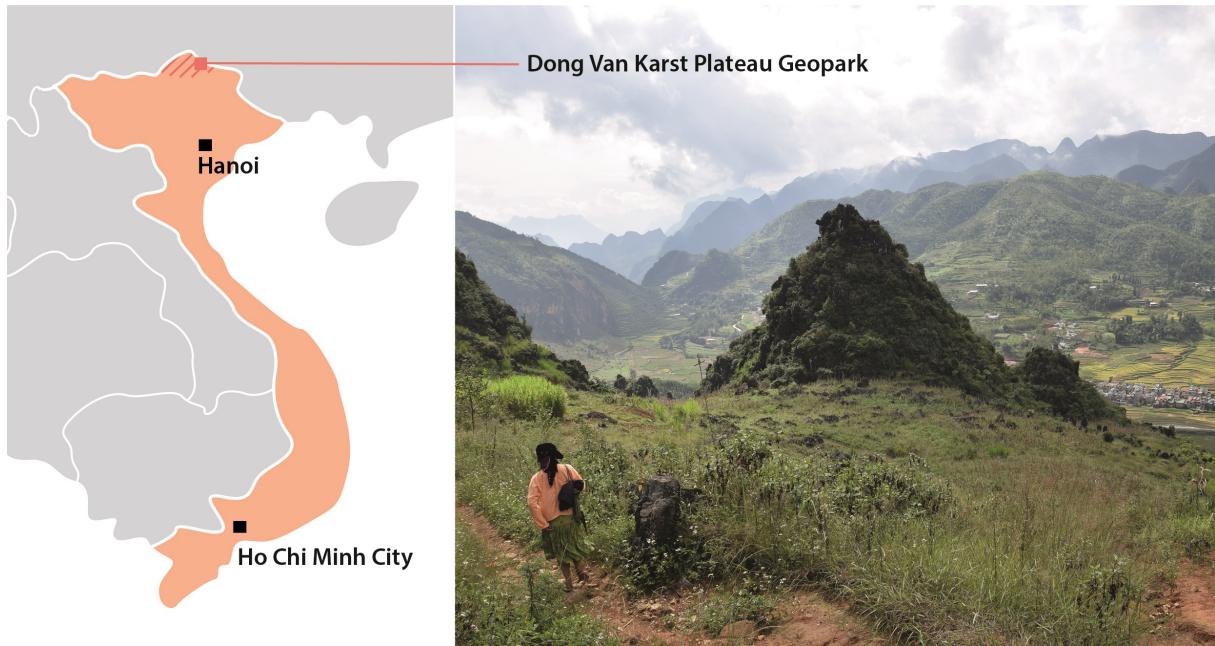


Abbildung 4.1: Lage der Modellregion im Norden Vietnams, in der Provinz Ha Giang

4.1.2 Klima und Hydrologie

Vietnam kann aufgrund der langen Ausdehnung in Nord-Süd-Richtung und der Lage zwischen nördlichem Wendekreis und Äquator in zwei Klimazonen eingeteilt werden. Im Süden sind tropische und im Norden subtropische Klimate vorherrschend. Die Sonnenstunden liegen im Norden im Mittel bei 1.681 Stunden pro Jahr und im Süden bei etwa 2.588 Stunden pro Jahr. Trotz der enormen regionalen Schwankungen beträgt die globale horizontale Sonneneinstrahlung (Global Horizontal Irradiation: GHI) im Jahresmittel im Norden ca. 3,4 kWh/m²/Tag und im Süden ca. 5,6 kWh/m²/Tag. Die Temperaturen im Jahresmittel liegen zwischen ca. 21 °C im subtropisch geprägten Norden und ca. 28 °C im tropischen Süden. (GERICS, 2016; Solargis, 2021)

Der Niederschlag zeigt in der Modellregion einen deutlich monsun-geprägten Jahresgang mit der Hauptregenzeit zwischen Mai und Oktober. Während dieser Zeit ist es heiß und feucht. Die Trockenzeit hingegen dauert von November bis April und ist meist sehr trocken und kühl. Der Jahresniederschlag in der Modellregion liegt im Mittel bei 1.360 mm. Etwa 85 % des Jahresniederschlages fallen während der Regenzeit in den Sommermonaten. Weiterhin ist der Niederschlag durch eine erhebliche Jahr-zu-Jahr-Variabilität, in so genannten El Niño-Jahren, gekennzeichnet. Dieses Klimaphänomen ist wesentlicher Treiber

des saisonalen und langzeitlichen Weltklimas und u.a. auch Ursache für die wiederkehrenden Dürren in Vietnam. (NCHMR, 2017)

In den letzten 30 Jahren zeigten beobachtete Jahresmitteltemperaturen eine statistisch signifikante Zunahme um $0,17^{\circ}\text{C}$ pro Dekade in den tropischen Regionen von Vietnam; in den subtropischen Regionen ist der Temperaturanstieg deutlich geringer. Klimamodellrechnungen projizieren einen mittelstarken Temperaturanstieg und damit einhergehend eine starke zeitliche Ausdehnung von Hitzeperioden sowie eine deutliche Verkürzung von Kälteperioden. Es kann eine Temperaturzunahme zwischen $1,4$ und $3,9^{\circ}\text{C}$ (in den Tropen) sowie zwischen $1,5$ und $4,2^{\circ}\text{C}$ (in den Subtropen) jeweils im Vergleich zum Basiszeitraum von 1971 bis 2000 als wahrscheinlich angenommen werden. Auch konnte in den letzten 30 Jahren eine leichte Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen beobachtet werden; im Süden deutlich stärker als im Norden. Zum Ende des Jahrhunderts wird eine Veränderung des Jahresniederschlages zwischen ca. 0 und +13 % im Vergleich zum Basiszeitraum 1971 bis 2000 für die Tropen und Subtropen erwartet. Die Mehrzahl der globalen Klimamodelle projizieren für die Zukunft einen positiven Niederschlagstrend mit intensiveren und häufigeren Starkregenereignissen. Für den Norden kann eine Tendenz zu längeren Trockenperioden aus den Simulationen abgeleitet werden; für den Süden ist kein eindeutiger Trend zu erkennen. (GERICS, 2016)

In Abbildung 4.2 ist die Modellregion in der Regen- und Trockenzeit dargestellt. In den trockenen Monaten ist die Gebirgsregion von kargen Landschaften und geringer Vegetation geprägt.

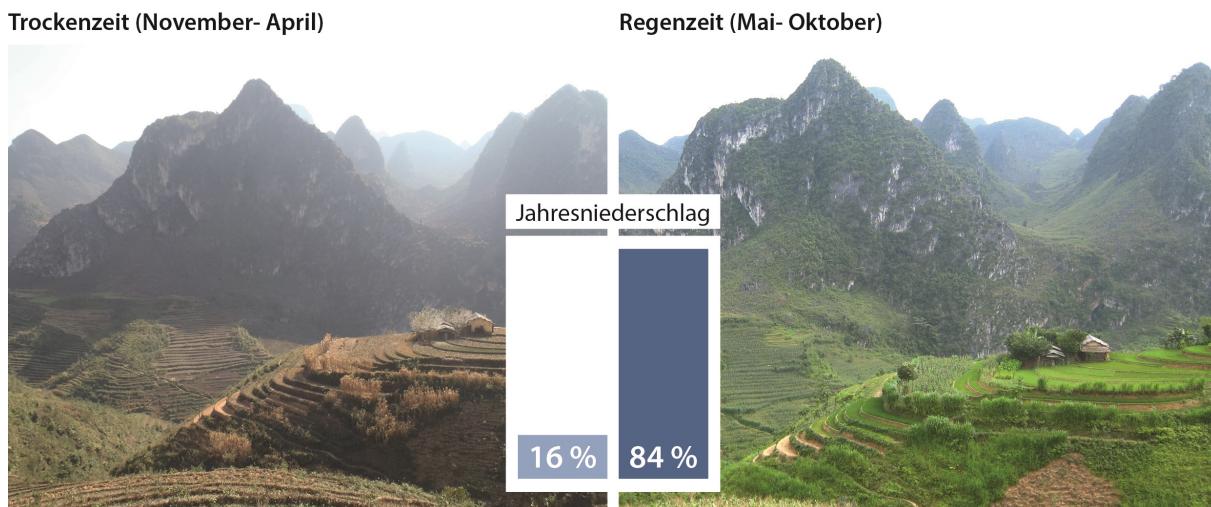


Abbildung 4.2: Die Modellregion in der Trockenzeit (links) und Regenzeit (rechts)

4.1.3 Geologie und Hydrogeologie

Die Geologie besteht ungefähr zur Hälfte aus Kalkgestein; weitere in der Modellregion anzutreffende Gesteinscharakteristika sind Silit-, Ton- oder Sandstein. Ohne Zwischen-speicherung an der Oberfläche verlagert sich der Niederschlag aufgrund der Porosität und hohen Infiltrationsrate des Karsts in den Untergrund. Das Wasser fließt durch Kluftungen und Spalten in großräumige, z.T. mehrere hundert Meter tiefe Höhlensysteme. Je nach

Ausprägung der Gesteinsschichten, verlagern sich sogar ganze Oberflächengewässer durch Schlucklöcher in die Höhlensysteme und treten mit großen Abflusschwankungen an verschiedenen Quellen wieder zu Tage. Das Wasser legt hierbei sowohl an der Oberfläche als auch im Untergrund teils enorme Höhenunterschiede zurück. Zur Bewertung der in der Modellregion verfügbaren Wasserressourcen unter Normal- und Extrembedingungen (Minimal- und Maximalabflüsse) wurden die hydraulischen Verbindungen zwischen Flüssen, wasserführenden Höhlen und Quellen im Rahmen von speleologischen Erkundungen untersucht. In der Regenzeit stellen sich in den Karsthöhlen teils Fließgeschwindigkeiten von bis zu 800 m/h ein. Durch die häufig kurzen Verweilzeiten in stark verkarsteten Aquiferen findet daher kaum Grundwasserspeicherung statt. Die Quellen weisen in der Regenzeit Schüttungen von bis zu 100 l/s auf; in der Trockenzeit versiegen sie teils gänzlich. Neben den starken Schwankungen der Quellschüttungen und Fließgeschwindigkeiten unterliegen auch die Wasserqualität und Morphodynamik infolge von Starkregenereignissen teils extremen Werten. (Nestmann u. a., 2017)

Der Gebirgsfluss Seo Ho ist einer von wenigen ständigen Oberflächengewässer in der Modellregion. Er wird hauptsächlich aus einem Karstaquifer auf einer Höhe von etwa 930 m+NN mit Wasser gespeist und fließt durch die Modellregion, bis er auf einer Höhe von ca. 500 m+NN in den Grenzfluss zwischen Vietnam und China mündet. Er entspringt hauptsächlich dem Ma Le Höhlensystem auf einer Höhe von etwa 900 m+NN. Das Querschnittsprofil des Ma Le Höhlensystems bzw. des Vorfluters des Seo Ho Flusses ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Durch das große Einzugsgebiet im Ma Le Tal stellt sich auch in der Trockenzeit ein Mindestabfluss von über 50 l/s ein. Während den Regenmonaten führt der Fluss hingegen einen vielfach höheren Abfluss von mehreren 1.000 l/s. (Nestmann u. a., 2017)

Eine eingehende Bewertung der Abflussanalysen ist Abschnitt 5.1.2 zu entnehmen.

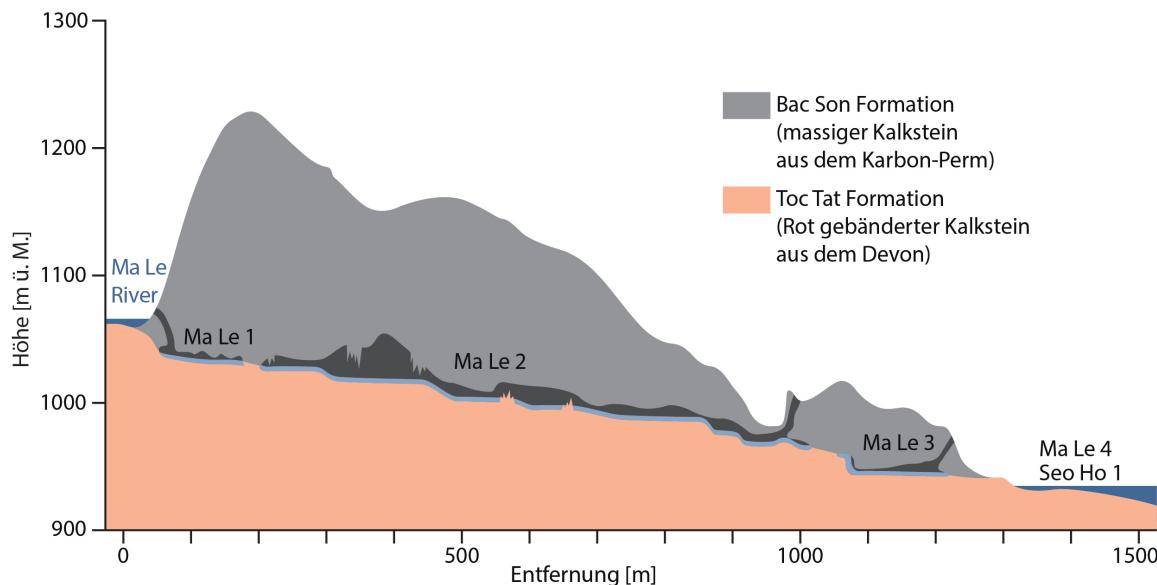


Abbildung 4.3: Querschnittsprofil des Ma Le Höhlensystems als Referenz für kontinuierliche Messungen von Wasserspiegellagen bzw. des Abflussdargebots im Seo Ho Fluss nach Nestmann u. a. (2017)

4.2 Soziokultur und Sozioökonomie

4.2.1 Siedlungsstruktur und Wasserbedarf

Die Modellregion innerhalb des Dong Van Karst Plateaus kann prinzipiell in zwei Bereiche unterteilt werden: Einen ruralen und einen urbanen Bereich. In dem ruralen Bereich lebt die Bevölkerung vornehmlich in räumlich weit verteilten Siedlungen mit etwa 10 bis 50 Haushalten bzw. etwa 40 bis 300 Einwohnern. Die Hütten bestehen meist aus Lehm, Stein oder Holz, die sich weitläufig um ein zentrales Versammlungsgebäude orientieren. Bewohnt werden die Hütten von Familien mit durchschnittlich 5 bis 6 Personen. Fast alle Hütten besitzen einen Stall mit Kühen, Hühner oder Schweinen. Die meisten Familien sind zudem mit einem Wasserspeicher ausgestattet. Während der Regenzeit kann dieser über private individuelle Konzepte, wie bspw. das Weiterleiten von Regenwasser über das Hausdach, mit Wasser gefüllt werden. Weitere Informationen zur Wasserversorgungssituation in den Dörfern werden im nachfolgenden Abschnitt 4.2.2 näher beschrieben.

In den ländlichen Bereichen leben überwiegend die ethnische Minderheit der Hmong; ein indigenes Volk Ost- und Südostasiens, mit eigener Sprache und eigenen kulturellen Regeln. Unter der vietnamesischen Bevölkerung sind die Hmong auch bekannt als „Menschen, die kein Wasser benötigen“. Der sorgfältige Wasserverbrauch und insbesondere die Wiederverwendung von Wasser werden in der Kultur der Hmong durch Symbole auf ihrer Kleidung dargestellt. Jeder Familienstamm hat seine eigenen Techniken und Methoden für einen effizienten Umgang mit der Ressource Wasser. Der einwohnerbezogene Tagesverbrauch inkl. des Wasserverbrauchs für Nutztierhaltung beträgt nach Zindler und Stolpe (2018) durchschnittlich ca. 20 l/(E·d). Nach der Weltgesundheitsorganisation (WHO) liegt dieser Wasserverbrauch im Bereich des Mindestwasserbedarfs für die Existenzsicherung. Für die Beschaffung von 20 l Wasser werden im Mittel etwa 60 Minuten benötigt. Hierbei müssen vor allem in der Trockenzeit z.T. zu Fuß enorme Höhendifferenzen überwunden werden. Trotz des sparsamen Umgangs mit dem Wassers leiden während der Regenzeit 45 % und während der Trockenzeit sogar 97 % der ländlichen Bevölkerung an Wasserknappheit. Zur Existenzsicherung ist die ländliche Bevölkerung vorwiegend auf Landwirtschaft, insbesondere den Reis-, Mais- und Getreideanbau angewiesen. Auf den Wochenmärkten der Distrikthauptstädte werden die erwirtschafteten Güter verkauft. Die gesamte ländliche Bevölkerung lebt aufgrund der geringen Löhne und der überwiegenden Selbstversorgung der Hmong unterhalb der Armutsgrenze (Zindler und Stolpe, 2018).

Der urbane Bereich mit der Distrikthauptstadt Dong Van City zeigt das typische Bild einer vietnamesischen Kleinstadt, mit zentralen Verwaltungs-, Bildungs-, Finanz- und Gesundheitseinrichtungen. Hier sind größtenteils die Ethnien der Kinh und Tay vertreten, die der vietnamesischen Bevölkerungsmajorität angehören. Entlang von asphaltierten Straßen befinden sich die meist zweistöckigen Gebäude aus Stahlbeton oder Mauerwerk. Während der obere Stock i.d.R. als Wohnraum dient, befinden sich im Erdgeschoss der Einzelhandel, das Gastronomiegewerbe, das Produktionsgewerbe oder das Dienstleistungsgewerbe. Durch den schnell wachsenden Tourismus sind in den letzten Jahren zudem eine Vielzahl an Hotels, Bars und Cafes entstanden. Trotz des zunehmenden Tourismus leben nach Zindler und Stolpe (2018) in der Distrikthauptstadt Dong Van immer noch etwa 47 % der Bevölkerung unterhalb der Armutsgrenze. Der einwohnerbezogene Tagesverbrauch liegt inkl. gewerblicher Wassernutzung im Jahresmittel bei 135 l/(E·d). Etwa 5 % der Bevölke-

rung ist während der Regenzeit und etwa 35 % der Bevölkerung während der Trockenzeit mit Wasserknappheit konfrontiert. Abbildung 4.4 zeigt den urbanen Bereich mit der Distrikthauptstadt Dong Van City und den ruralen Bereich mit räumlich weit verteilten Siedlungen.

Urbaner Bereich



Ruraler Bereich



Abbildung 4.4: Distrikthauptstadt Dong Can City als typische vietnamesische Kleinstadt (oben) und weit verteilte Siedlungen in den umliegenden Karsthügeln (unten)

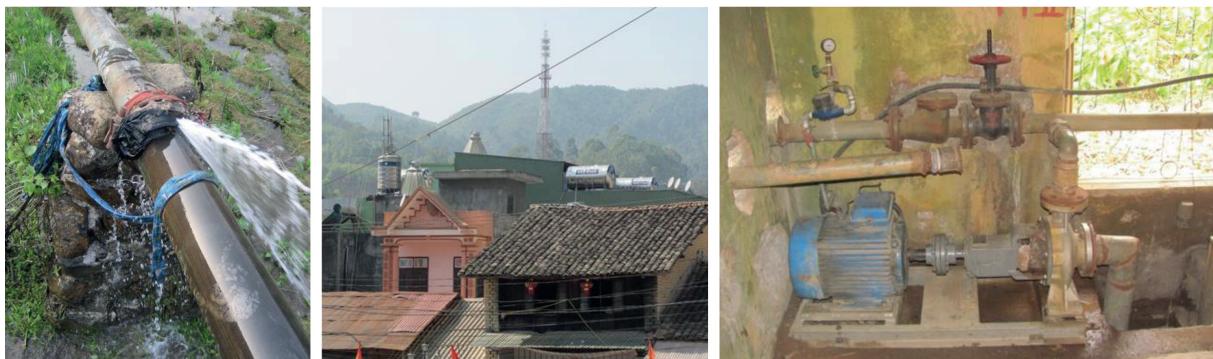
4.2.2 Aktuelle Wasserversorgungssituation

Im ruralen Bereich erfolgt die Wasserversorgung über dezentrale und individuelle Ansätze. Während der Regenzeit wird vorwiegend Regenwasser von den Dächern bspw. mittels Bambusstäben in private Wasserspeicher weitergeleitet. Quellwasser, dass sich im näheren Umfeld zur Siedlung befindet, wird z.T. über kleine private Schlauchsysteme gravitär zu den Häusern transportiert. Insgesamt werden in der Modellregion 36 Quellen von der ländlichen Bevölkerung für die Wasserversorgung genutzt. Während der Regenzeit liegen die Schüttungsraten bei bis zu 5.000 l/h; während der Trockenzeiten versiegt knapp die Hälfte dieser Quellen gänzlich. Bei lediglich zehn Quellen stellen sich in dieser Zeit Schüttungsraten von über 100 l/h ein. Während der Trockenzeit sind somit viele Haushalte auf das Tragen von Wasser aus einer Quelle oder einem Oberflächengewässer angewiesen. Diese befinden sich teils hunderte Meter unterhalb der Siedlungen. Zur Verbesserung der Versorgungssituation setzt die Regierung vielerorts auf den Einsatz zentraler, flach ausgebildeter, künstlicher Speicherbecken, die den Oberflächenabfluss und das Quellwasser während der Regenzeit speichern und für die anschließende Trockenzeit vorhalten.

Die dort verfügbaren Wasserressourcen stellen für viele Bewohner die einzige Wasserressource während der Trockenzeit dar. Neben der begrenzten Menge sind die künstlichen Speicherbecken auch durch eine sehr eingeschränkte Wasserqualität aufgrund natürlicher (Verkeimung) und anthropogener Einflüsse (bspw. Nutzung der Becken als Waschplatz) gekennzeichnet. Als weitere Nachteile sind die erheblichen Baukosten, hohe Verdunstungsraten sowie konstruktive Mängel zu nennen. Sind die Wasserressourcen während der gesamten Trockenzeit nicht ausreichend, ist die ländliche Bevölkerung auf den Zukauf von Wasser angewiesen. (Nestmann u. a., 2017)

Einige Beispiele für dezentrale und individuelle Wasserversorgungskonzepte im ländlich geprägten Raum sowie eine Übersicht der maroden Infrastruktur im leitungsgebundenen Verteilsystem in Dong Van City sind in Abbildung 4.5 gegeben.

Urbaner Bereich - Zentrale Wasserversorgung



Ruraler Bereich - Dezentrale Wasserversorgung



Abbildung 4.5: Beispiele für die Wasserversorgung in der Distrikthauptstadt Dong Van und den umliegenden Siedlungen

Im Zentrum der Distrikthauptstadt beziehen die Bewohner vorrangig ihr Wasser über ein zentrales leitungsgebundenes Versorgungssystem. In den äußeren, höher gelegenen Randbezirken versorgen sich die Bewohner analog zur ländlichen Bevölkerung über individuelle dezentrale und semizentrale Versorgungskonzepte mit Wasser. Im Süden des Stadtzentrums befinden sich zwei Speicherbehälter mit einem Volumen von 51 m^3 und 130 m^3 , die ursprünglich Quellwasser speicherten und in das Versorgungsnetz einspeisten. Nördlich des Zentrums befindet sich ein weiterer Speicherbehälter mit einem Volumen von 204 m^3 , der ursprünglich als Durchlaufbehälter genutzt wurde. Da alle Speicherbehälter

heute vom Leitungsnetz abgekoppelt sind, findet die Wasserförderung direkt in das Netz statt.

Das gesamte leitungsgebundene Wasserversorgungssystem ist in drei hydraulisch getrennte Zonen eingeteilt, die von je einer Pumpstation mit Wasser versorgt werden. Die Lang Nghien Pumpstation fördert Wasser aus einer Karstquelle, welche typischerweise durch starke Schüttungsschwankungen (etwa 10 l/s bis zu 50 l/s) und eingeschränkter Wasserqualität gekennzeichnet ist. Die Pumpstation ist mit zwei Kreiselpumpen ausgestattet und läuft im Netzstrombetrieb. In einer Zisterne mit einem Volumen von 65 m³ wird Wasser zwischengespeichert und sedimentiert. In der Regenzeit wird die Pumpstation täglich für etwa 10 bis 13 Stunden betrieben; in der Trockenzeit kann der Betrieb lediglich für etwa zwei Stunden aufrecht erhalten werden. Nach einer Messkampagne durch das IWG werden im Mittel 17 l/s in das Netz eingespeist. Da die Lang Nghien Pumpstation nicht ausreichend Wasser und Druck liefert bzw. das Leitungsnetz in einem zu maroden Zustand ist, kann das gesamte Versorgungsnetz nicht gleichzeitig mit Wasser versorgt werden. Das Netz wird in zwei Zonen unterteilt, in welche abwechselnd über einen Absperrschieber Wasser eingespeist wird. Die restlichen 7 % der Bewohner mit Leitungsanschluss werden durch die beiden netzstrombetriebenen Pumpstationen To 5 und Frontier Post im Osten der Stadt mit Wasser versorgt. Beide Pumpstationen beziehen Wasser aus einem 75 m tiefen Brunnen direkt aus dem Grundwasseraquifer. In der Pumpstation To 5 wird das Wasser in einer Zisterne mit 54 m³ zwischengespeichert und anschließend in das Leitungsnetz eingespeist. Die Frontier Post Pumpstation fördert ohne Zwischenspeicherung direkt in das Leitungsnetz. Da nur relativ wenig Wasser aus dem Grundwasseraquifer gefördert wird, ergibt sich zwischen Regen- und Trockenzeit kein wesentlicher Unterschied bezüglich der Einspeisemenge. Die Pumpstation To 5 ist nur alle zwei Tage für 8 bis 10 Stunden in Betrieb. Messungen haben ergeben, dass im Mittel etwa 2,6 l/s ins Leitungsnetz eingespeist werden. Die Frontier Post Pumpstation versorgt lediglich etwa 15 Haushalte und einen Kindergarten mit Wasser und läuft alle zwei Tage für etwa drei Stunden.

In allen Zonen erfolgt die Wasserversorgung aufgrund des begrenzten Dargebots in Verbindung mit einem maroden Netzzustand intermittierend. Um dennoch eine kontinuierliche Wasserversorgung in allen Zonen zu gewährleisten, wird Wasser in privaten Dachbehältern zwischengespeichert. Falls der Druck im Leistungssystem nicht ausreicht, um direkt in den Behälter zu fördern, wird das Wasser über einen zusätzlichen Behälter am Boden zwischengespeichert und anschließend über eine externe Pumpe in den Dachbehälter gefördert.

Die defizitäre Wasserversorgung in Dong Van City macht den Einsatz zusätzlicher Versorgungskonzepte für private Haushalte nötig. Insgesamt beziehen etwa 45 % der Bewohner ihr Wasser ausschließlich aus dem zentralen Wasserverteilungsnetz. Knapp 33 % beziehen ihr Wasser über Quellen und etwa 6 % aus privaten Brunnen. Ca. 16 % nutzen eine Kombination aus Verteilungsnetz und zusätzlicher Versorgungskonzepte wie Quellen, Brunnen oder Niederschlag. Eine Übersicht über die genutzten Wasserversorgungskonzepte ist in Tabelle 4.1 gegeben. Weitere Informationen zur Wasserversorgung in der Modellregion finden sich in Pham (2019) und Walter (2020).

Tabelle 4.1: Genutzte Versorgungskonzepte in Dong Van City nach Pham (2019)

Versorgungskonzept	Anteil [%]
zentrales Versorgungssystem	45 %
Quellen	33 %
zentrales Versorgungssystem und Quellen	12 %
private Brunnen	6 %
zentrales Versorgungssystem und private Brunnen	3 %
zentrales Versorgungssystem und Niederschlag	1 %

4.2.3 Entwicklung des Tourismus

Das Dong Van Karst Plateau wurde 2010 zum Mitglied des globalen Geoparknetzes der Weltkulturorganisation UNESCO erklärt. Seither hat sich der Tourismus in der Modellregion und in Folge der Wasserverbrauch und Wasserbedarf rapide entwickelt. In Abbildung 4.6 sind die Satellitenbilder der Distrikthauptstadt Dong Van City aus dem Jahr 2010 und 2019 gegenübergestellt.



Abbildung 4.6: Sattelitenbilder der Distrikthauptstadt Dong Van City sowie Übersicht der Hotels im Jahr 2010 und 2019

Die Veränderung der Stadt durch die Aufnahme in das UNESCO Geoparknetz und die hierdurch bedingte touristische Entwicklung ist deutlich erkennbar. Während im Jahr 2010 lediglich ein Hotel vorhanden war, sind bis 2019 über 50 weitere Hotels sowie eine Vielzahl an Bars und Restaurants entstanden. Einige Hotels sind mittlerweile mit bis zu 8 Stockwerken ausgestattet. In den statistischen Jahrbüchern des Distriktes wurde seither ein jährliches Bevölkerungswachstum von durchschnittlich 2,9 % verzeichnet. Im Jahr 2019 lebten insgesamt 7.600 Menschen in Dong Van. Laut der Provinzregierung steigen die Touristenzahlen seit 2010 im Mittel um jährlich 30 %. Während die Besucherzahlen in der Provinz Ha Giang im Jahr 2012 bei etwa 58.000 Touristen pro Jahr lagen, überstieg die Anzahl der Touristen 2017 erstmalig die 300.000 Marke. Im Jahr 2019 wurden ca. 335.000 Touristen in der Provinz Ha Giang gemeldet. Laut Vietnam National Administration of

Tourism (VNAT) wird bis 2030 eine Besucheranzahl in Nordvietnam von 1,1 Millionen Besuchern angestrebt, sodass auch zukünftig ein weiterer Anstieg der Bevölkerungs- und Touristenzahlen zu erwarten ist (VNAT, 2021). Wenngleich dieser Umstand Chancen zur wirtschaftlichen Entwicklung bietet, so führt er auch unweigerlich zu einer Verschärfung der ohnehin schon angespannten Wasserversorgungssituation.

Der Bevölkerungs- und Tourismuszuwachs sowie die Wasserbedarfssituation und die zukünftige Entwicklung sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Der Wasserbedarf in Dong Van ist seither um knapp 50 % angestiegen. Der Wasserverbrauch für die landwirtschaftliche Bewässerung wurde hierbei nicht berücksichtigt. Davon ausgehend, dass der Tourismus bis 2030 auf 1,1 Millionen Menschen pro Jahr ansteigt und das Bevölkerungswachstum jährlich etwa 2,9 % beträgt, wird bis 2030 ein Gesamtwasserbedarf von mehr als 753.500 m³/a benötigt. Hierbei wurde angenommen, dass die Touristenzahlen für die gesamte Provinz Ha Giang auch für Dong Van City gelten. Die durchschnittliche Aufenthaltsdauer der Touristen wurde mit 2,5 Tagen angesetzt. Der Pro-Kopf-Verbrauch wurde entsprechend den in Vietnam geltenden Vorgaben mit 120 l/(E·d) angesetzt.

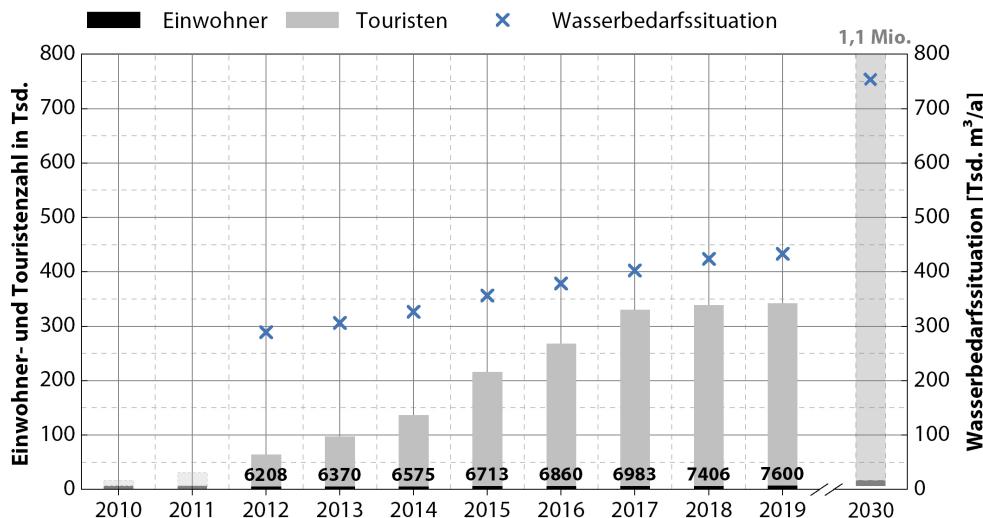


Abbildung 4.7: Entwicklung der Einwohner- und Touristenzahl in der Distrikthauptstadt Dong Van City und Abschätzung des Gesamtwasserbedarfs seit Eintritt in das globale Geoparknetz der Weltkulturoorganisation UNESCO im Jahr 2010

Aufgrund der maroden Infrastruktur des bestehenden Leitungsnetzes und des begrenzten Dargebots kann der stetig steigende Wasserbedarf nicht gedeckt werden. Folglich werden zahlreiche private Brunnen gebohrt, um das Wasser aus dem Karstgrundwasserleiter zu nutzen. Die privaten Brunnen haben meist keine Genehmigung und sind z.T. baulich unsachgemäß ausgeführt. Hierdurch entstehen potentielle Eintrittspfade von Schadstoffen in den Grundwasserauqifer. Die Auswirkungen der unkontrollierten Wasserentnahme auf die Schüttungsmengen der umliegenden Karstquellen sowie Kenntnisse zur Grundwasserneubildungsrate sind zudem bisher noch ungeklärt.

4.3 Problematiken und Lösungsansatz

Topographisch und hydrogeologisch stellt die Modellregion eine große Herausforderung dar. In der Trockenzeit kommt es zu einer signifikanten Verringerung der natürlichen Wasserressourcen. In dieser Zeit stehen nur noch knapp 16 % des Jahresniederschlags zur Verfügung. Durch das Versiegen der Quellen bzw. die Verlagerung der natürlichen Wasserspeicher tief in den Karstuntergrund ist die Nutzung mit erheblichem Aufwand resp. hohem Energiebedarf verbunden. Hinzu kommt die eingeschränkte Speicherfähigkeit des Bodens, die die Bildung von oberflächennahem Grundwasser und dessen Nutzung weiter erschwert.

Die Wasserversorgung erfolgt im ruralen Raum vornehmlich dezentral bzw. individuell. Lediglich in der Distrikthauptstadt Dong Van City beziehen die Bewohner ihr Wasser über ein zentrales, leitungsgebundenes Wasserversorgungssystem. Die dortige Versorgung erfolgt intermittierend. Über offene Hausanschlussleitungen oder Leckagen entleert sich das Leitungssystem in Zeiten ohne Netzeinspeisung. Es findet Lufteintrag in das Leitungssystem statt. Neben der Belastung der Infrastruktur durch Lufteintrag und Druckschwankungen führt diese Betriebsweise auch zwangsläufig zu einer zusätzlichen Verringerung der Wasserqualität durch den Eintrag von Verunreinigungen. Durch das Bevölkerungswachstum und die wirtschaftliche Entwicklung, aber vor allem durch den rapide zunehmenden Tourismus, wird die Wasserversorgungssituation zusehends kritischer. Die Folgen sind unkontrollierte Entnahmen aus dem Grundwasseraquifer durch eine Vielzahl von illegalen Brunnen.

Aufgrund der soziokulturellen und sozioökonomischen Gegebenheiten, den großen Distanzen und Höhenunterschiede sowie dem stark schwankenden Wasserdargebot fehlt es in der Modellregion - wie auch in vielen weiteren Bedarfsregionen - an ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Technologien zur Erschließung und Förderung der Wasserressourcen. In den tiefen Tälern und Schluchten existieren auch in der Trockenzeit Wasservorkommen, welche bislang lediglich von einzelnen Kleinwasserkraftwerken zur Energieerzeugung genutzt werden. Eines dieser Kraftwerke ist die Hochdruckanlage am Seo Ho Fluss mit einer installierten Ausbauleistung von ca. 500 kW. Die monatliche Stromproduktion für den Zeitraum 2011 bis 2016 kann Abbildung 4.8 entnommen werden.

Die Maschinensätze sind auf die vergleichsweise hohen Abflüsse während der Regen- bzw. Übergangszeit ausgelegt. Aufgrund der ungünstigen Dimensionierung sowie der schlechten Ausführung bzw. des defizitären Zustandes der wasserbaulichen Infrastruktur, kann zu Zeiten geringen Wasserdargebots ein wirtschaftlicher Betrieb nicht aufrecht erhalten werden. Zum Zeitpunkt der Begehung durch das IWG wurden trotz ausreichender Abflussmenge in der Regenzeit lediglich 200 kW erzeugt; das entspricht 40 % der angegebenen Ausbauleistung. Die Ursachen hierfür sind u.a. verminderte Leistungsfähigkeit des Fallleitung-Düsensystems und steuerungstechnischer Schwierigkeiten. Die durchschnittliche Energieerzeugung betrug für den Zeitraum 2011 bis 2016 knapp 1,35 GWh pro Jahr. Trotz eines vergleichsweise guten Teillastverhaltens der Pelton-Turbinen kann nach Aussage der lokalen Betreiber während der Trockenzeit eine mehrwöchige Abschaltung der Anlage aufgrund zu geringer Abflüsse in den meisten Jahren nicht vermieden werden. Während die Anlage über einen längeren Zeitraum komplett stillsteht bzw. ökonomisch ineffizient ist, leidet zur gleichen Zeit die Bevölkerung in höher gelegenen Siedlungen unter

erheblichem Wassermangel. Das verbleibende (nicht unerhebliche) Energiepotential bleibt bislang ungenutzt. Mit speziell auf diese Bedingungen ausgelegte Maschinensätzen kann die Antriebsenergie für die Wasserförderung generiert und mit geringem infrastrukturellem Aufwand die nicht verwertbaren Niedrigabflüsse effizient genutzt werden.

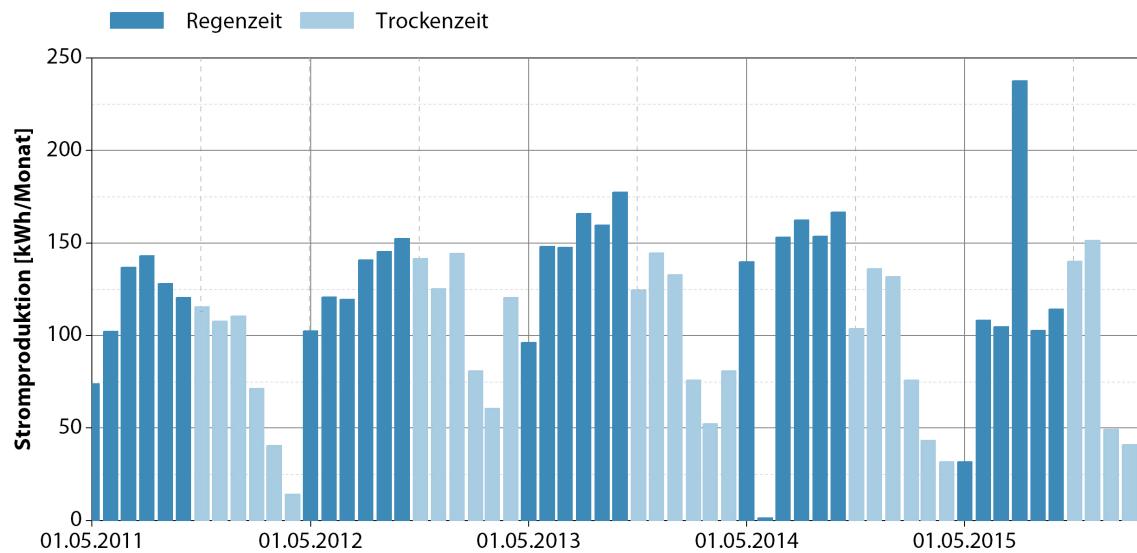


Abbildung 4.8: Monatliche Stromproduktion der WKA Seo Ho während der Regen- und Trockenzeit im Zeitraum 2011 bis 2016

Kapitel 5

Anlagenkonzeption unter Berücksichtigung vorgegebener Randbedingungen

Basierend auf dem entwickelten Förderkonzept für Wasserkraftwerke in Kapitel 3 wurde in der Modellregion exemplarisch eine Demonstrationsanlage implementiert. Die in den folgenden Abschnitten aufgezeigten Konzepte und Technologien dienen als Initial für die Multiplikation ähnlicher Vorhaben an Wasserkraftwerken mit vergleichbaren Randbedingungen (Anlagenabschaltung aufgrund zu geringer Effizienz, ungenutzte Restwassermen gen, Wassermangel in umliegenden Gebieten). In Kooperation mit dem Pumpenhersteller KSB Se & Co. KGaA wurde erstmalig ein PAT-gestütztes Wasserfördermodul für den Hochdruckbereich ausgelegt. Durch die hydraulische und betriebliche Anbindung des mechanisch angetriebenen Fördersystems an ein bestehendes Kleinwasserkraftwerk, können die nicht verwertbaren Niedrigwassermengen während der Trockenzeit effizient genutzt werden. Die rein durch Wasserkraft geförderte Wassermenge wird über eine Hochdruck-Förderleitung in einen zentralen Hochbehälter eingespeist und den umliegenden Siedlungen sowie der Distrikthauptstadt gravitär zur Verfügung gestellt. In Verbindung mit der sukzessiven Ertüchtigung des bestehenden Verteilnetzes in der Distrikthauptstadt können mehrere tausend Menschen nachhaltig mit Wasser versorgt werden.

5.1 Ausgangszustand des Wasserkraftwerkes

5.1.1 Systemaufbau und Systemkomponenten

Die Wasserkraftanlage Seo Ho (WKA Seo Ho) wurde in den 1990er Jahren im Tal des Seo Ho Flusses, 14 km nordwestlich von der Distrikthauptstadt Dong Van City, errichtet. Bei der Anlage handelt es sich um ein Hochdruck-Ausleitungskraftwerk mit einer Fallhöhe von ca. 195 m und einer installierten Ausbauleistung von insgesamt 500 kW. Das Wasser wird vom Seo Ho Fluss zum Krafthaus geleitet, turbiniert und wieder dem Gewässer zugeführt. Die Infrastruktur der WKA Seo Ho ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Da die Turbinen auf die vergleichsweise hohen Abflüsse während der Regen- und Übergangszeit ausgelegt sind, kann ein wirtschaftlicher Betrieb während der Trockenzeit, aufgrund des reduzierten Leistungspotentials und abfallender Turbinenwirkungsgrade, im unteren Teillastbereich

oft nicht aufrechterhalten werden (siehe Abbildung 4.8). In den meisten Jahren kann dann eine mehrwöchige Abschaltung der WKA Seo Ho nicht vermieden werden.

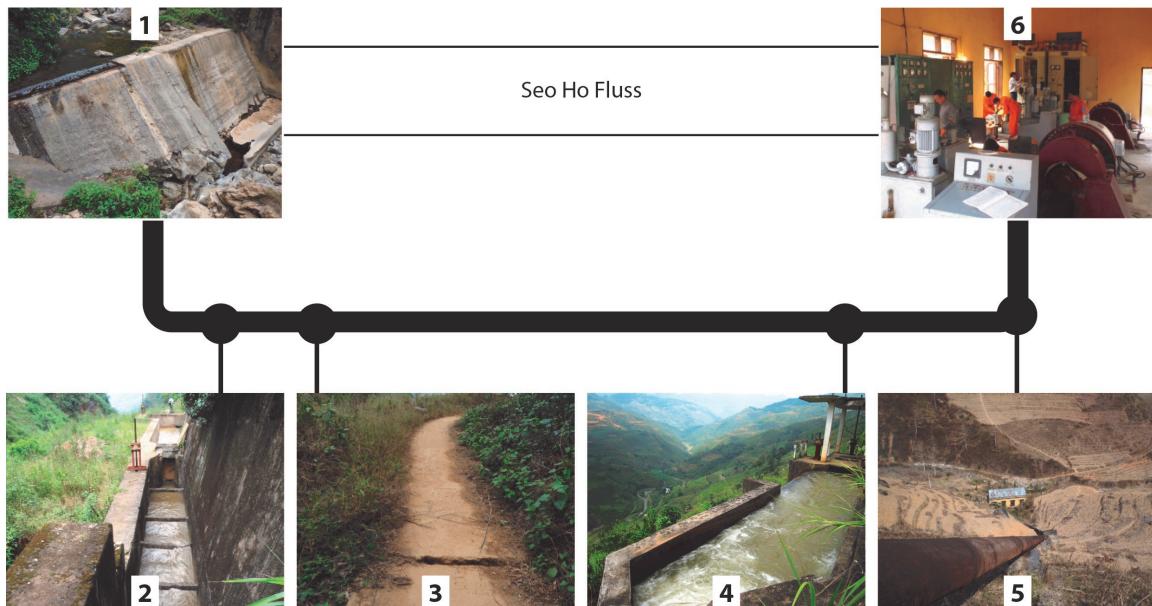


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der einzelnen Systemkomponenten des Hochdruck-Ausleitungskraftwerkes (WKA Seo Ho)

Zu den wesentlichen Systemkomponenten und Bauwerken gehören das Wehr mit Sohlentnahme (1), der Sandfang (2), der Triebwasserkanal (3), das Einlaufbecken (4), die Fallleitung (5) und das Krafthaus mit Maschinentechnik (6). Im Folgenden werden die Bestandteile der WKA Seo Ho näher beschrieben:

- (1) Das Wehr mit Sohlentnahme befindet sich in einem Tal mit sehr steilen Flanken. Unmittelbar nach der Entnahmestelle wird eine Höhendifferenz von 200 m über mehrere Kaskaden abgebaut. Es handelt sich um ein konventionelles Wehr mit einer Höhe von 5,8 m und einer Breite von 17 m. Es ist unterteilt in zwei Wehrfelder mit 8,5 m Breite und einer Neigung von 45° (in Strömungsrichtung gesehen: rechtes Feld) und 55° (in Strömungsrichtung gesehen: linkes Feld). Die linke Wehrkrone ist um ca. 0,1 m höher als die rechte Wehrkrone, in der sich die Sohlentnahme befindet. Bei der Sohlentnahme handelt es sich um einen Kanal mit einer zunehmenden Tiefe von 0,3 m auf 0,9 m, der das Triebwasser in den Sandfang leitet. Überdeckt wird die Sohlentnahme von einem 5° geneigten Rechen mit einer Breite von 0,5 m und einer Länge von 5 m. Die rechteckigen Stäbe haben eine Breite von 1,5 cm und einen lichten Stababstand von 3 cm.
- (2) Der Sandfang ist unterteilt in zwei Becken. Das erste Becken mit einer Länge von 14 m, einer Breite von 1,4 m und einer Tiefe von 2,1 m mündet in das zweite Becken mit einer Länge von 17 m, einer Aufweitung auf 3 m Breite und 3,2 m Tiefe. Beide Becken sind mit je einem Spülsschütz ausgestattet. Zwischen den Becken befindet sich eine Verengung, in der ursprünglich ein weiteres Spülsschütz vorhanden war.

- (3) Der Triebwasserkanal mit einer Länge von ca. 790 m verläuft unterirdisch und verbindet das zweite Becken des Sandfangs mit dem Einlaufbecken. Der Kanal besteht aus gedeckelten U-Betonprofilen mit einer Breite von 0,6 m und einer Höhe von 0,7 m. Die mittlere Neigung beträgt 2 %. Ca. 40 m vor dem Einlaufbecken geht der Kanal in ein Stahlrohr über mit einem Durchmesser von 500 mm und einer Neigung von 60 bis 70 %.
- (4) Das Einlaufbecken ist ca. 10,5 m lang, 2,1 m breit und maximal 3 m tief. Es hat die Aufgabe, das Triebwasser ohne Lufteintrag und unter Dämpfung von Abflusschwankungen bei kurzfristigen Lastwechseln der Turbinen in die Fallleitung zu leiten. Überschüssige Wassermengen werden über ein seitliches Streichwehr abgeführt. Unmittelbar vor dem Eintritt der Fallleitung befindet sich ein Feinrechen mit einer Maschenweite von 2,5 cm und einer Neigung von 27°. Hinter dem Feinrechen befindet sich ein Spülschütz.
- (5) Die Fallleitung mit einem Innendurchmesser von 524 mm weist eine Länge von 720 m auf. Es handelt sich um eine Stahlleitung mit einer Wandstärke von 9 mm. Im Bereich des Einlaufbeckens sowie im Bereich oberhalb des bestehenden Krafthauses verläuft die Leitung unterirdisch; der mittlere Abschnitt verläuft oberirdisch und ist auf Betonfundamenten aufgelagert.
- (6) Das Krafthaus mit der Maschinentechnik umfasst zwei baugleiche 1-düsige Pelton-Turbinen aus chinesischer Produktion sowie zwei Generatoren mit jeweils 3 Polpaaren. Über eine Trafoanlage wird die erzeugte elektrische Energie in das nationale Stromnetz eingespeist. Bei einem Zufluss von 225 l/s beträgt die Maximalleistung je Turbine 250 kW. Das turbinierte Wasser wird im Anschluss über einen unterirdischen Kanal wieder dem Seo Ho Fluss zugeführt. Die Regelung der Druckhöhe erfolgte ursprünglich über zwei installierte Manometer. Da beide Manometer defekt sind, wird die Druckhöhe optisch durch Regulierung der Wasserverluste am Streichwehr des Einlaufbeckens reguliert.

5.1.2 Hydrologische und hydrogeologische Ausgangsdaten

Die hydrologischen und hydrogeologischen Ausgangsdaten stellen eine wichtige Grundlage für die Bemessung des Wasserförderersystems dar. Durch ein umfassendes wasserwirtschaftliches Monitoring können Kenntnisse über die Abflüsse, Wasserstände, Niederschläge, Strömungsgeschwindigkeiten etc. gewonnen werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Abfluss- und Niederschlagsanalysen in der Modellregion unter Berücksichtigung der relevanten Aspekte für die Bemessung der Demonstrationsanlage diskutiert. Hierbei steht insbesondere die Bewertung des Abflussgeschehens im Ma Le Höhlensystem - Vorfluter des Seo Ho Flusses - im Fokus. Weiterführende Informationen zum interdisziplinären Monitoring in der Modellregion können Nestmann u. a. (2017) und Ender (2018) entnommen werden.

Die Abflussanalyse der ober- und unterirdischen Fließgewässer ist aufgrund der komplexen Eigenschaften des Karstuntergrunds und einer Vielzahl von Einflussgrößen (u.a. Niederschlagsvariabilität) mit hohem Aufwand verbunden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse des Ma Le Höhlensystems wurde in dem Höhlenabschnitt Ma Le 2 eine Pe-

gelsonde zur Abflussmessung installiert. Das Querschnittsprofil des Ma Le Höhlensystems ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Während der kontinuierlichen Datenaufzeichnung wurden wiederholt Kontrollmessungen mittels Ultraschall-Doppler-Verfahren (englisch: Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)) durchgeführt. Hierbei wurde ergänzend zu den anfänglich vermessenen Querschnittsprofilen das ADC-Profil zur Umrechnung der mittels Messsonde kontinuierlich erfassten Wasserspiegellagen in Abflusswerte eingemessen. Ergänzend zu der kontinuierlichen Datenaufzeichnung in Ma Le 2 wurden weitere punktuelle Abflussmessungen an Fließgewässern durchgeführt sowie Schüttungsraten von Quellen erfasst. Durch das Abflussmonitoring konnte belegt werden, dass zwischen der Messstelle im Höhlensystem und dem Wehr resp. der Sohlentnahme der WKA Seo Ho lediglich geringe Abflüsse aus dem benachbarten Höhlensystem Sang Ma Sao sowie oberflächiger Abfluss auf einer Strecke von wenigen hundert Metern zufließen. (Nestmann u. a., 2017)

Während der Trockenzeit wurde ein Mindestabfluss von 0,1 bis 0,12 m³/s ermittelt. In der Regenzeit ergaben sich Spitzenabflüsse von bis zu 2,2 m³/s, in Ausnahmefällen sogar bis zu 5 m³/s. Eine derart hohe Schwankungsbreite ist charakteristisch für tropische und subtropische Karstlandschaften. Durch die Erkenntnisse des Mindestabflusses in der niederschlagsärmsten Zeit des Jahres kann der Bemessungsabfluss für die Demonstrationsanlage festgelegt werden (siehe Abschnitt 5.3). In Abbildung 5.2 ist die Abflusskurve sowie die Wasserspiegellage im Ma Le Höhlensystem für den Zeitraum 2011 bis 2015 dargestellt.

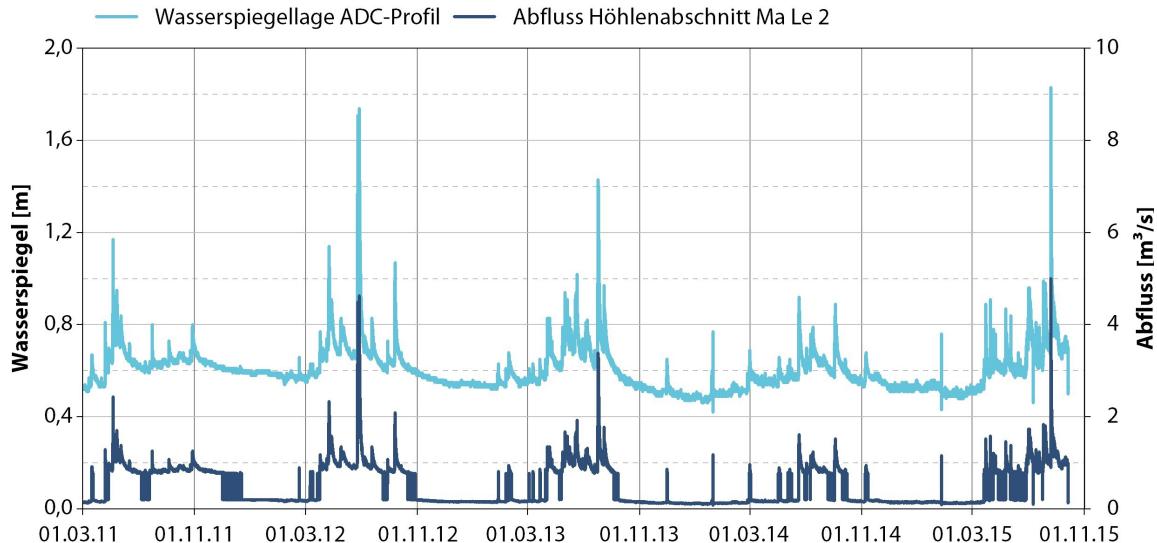


Abbildung 5.2: Abflusskurve des Vorfluters, ermittelt im Höhlenabschnitt Ma Le 2 für den Zeitraum 2011 bis 2015 nach Nestmann u. a. (2017)

Um den Niederschlag im Einzugsgebiet bewerten zu können, wurde ergänzend zur Untersuchung des Abflussdargebots Sekundärdaten des Vietnam National Centre for Hydro-Meteorological Forecastings (NCHMF) genutzt. Neben der Auswertung der Sekundärdaten wurde im Einzugsgebiet der WKA Seo Ho ein zusätzliches Niederschlagsmessnetz mit hoher zeitlicher Auflösung aufgebaut. Aufgrund von Vandalismus und technischer Probleme, wie u.a. ungewöhnlich schnelle Entladung der Loggerbatterien, war die Datenaufzeichnung jedoch sehr lückenhaft. In Abbildung 5.3 sind die Niederschlagswerte des

NCHMF für den Zeitraum 2000 bis 2016 dargestellt. Während den Sommermonaten von Mai bis Oktober beträgt der Niederschlag durchschnittlich 190 mm, wobei Juni mit im Mittel 307 mm, der niederschlagsreichste Monat ist. In den trockenen Monaten liegt der Niederschlag durchschnittlich bei 35 mm, wobei der Februar mit im Mittel 20 mm, der niederschlagsärmste Monat ist. (NCHMR, 2017)

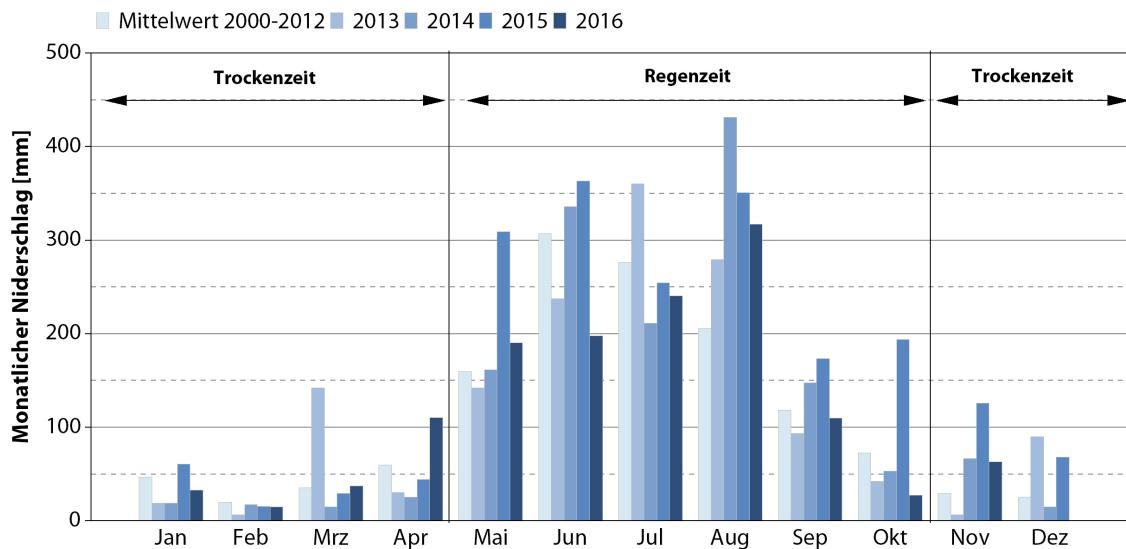


Abbildung 5.3: Niederschlagswerte in der Modellregion für den Zeitraum 2000 bis 2016 nach NCHMR (2017)

5.1.3 Hydraulische und bauliche Zustandsanalyse

Um ein Wasserkraftwerk im Hinblick auf einen ganzjährigen und energetisch optimierten Betrieb zu erweitern, muss sichergestellt sein, dass der Zustand der Systemkomponenten entsprechende Investitionen rechtfertigt. Gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern führt die oftmals unzureichende Wartung aller Systemkomponenten in Kombination mit den extremen naturräumlichen Gegebenheiten zu einem sukzessiven Verfall der wasserbaulichen Infrastruktur sowie zu einer Verschiebung des Wirkungsgradverlaufs der Turbinen. Folglich ist eine Bestandsaufnahme des Bauzustandes und der Maschinentechnik sowie der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Systemkomponenten entscheidend. Auf Grundlage der Bestandsaufnahme und unter Berücksichtigung von potentiell extremen Umgebungsfaktoren können Konzepte zur Effizienzsteigerung entwickelt werden.

Die Ergebnisse der hydraulischen und baulichen Zustandsanalyse der WKA Seo Ho werden im Folgenden vorgestellt:

(1) Wehr mit Sohlentnahme

Das Wehr mit Sohlentnahme befindet sich in einem insgesamt schlechten Zustand. Infolge von Hydroabrasionsverschleiß konnten erhebliche Schäden am Wehrkörper festgestellt werden; lokal mit teils offenliegender Bewehrung. Bei der Analyse der Leistungsfähigkeit der Sohlentnahme konnte eine maximale Triebwassermenge von 370 l/s ermittelt werden. Die theoretische Betrachtung nach Frank (1959) ergab eine Entnahmekapazität von 350

l/s bis 400 l/s. Die Kapazität wird zum Teil durch die Geometrie der Sohlentnahme limitiert. Da die erforderliche Abflussmenge bei voller Beaufschlagung beider Pelton-Turbinen bei 450 l/s liegt, ist die Sohlentnahme unterdimensioniert. Bei Abflüssen ab 300 l/s ergibt sich zudem eine Umläufigkeit über das linke Wehrfeld, sodass der Abfluss nicht vollständig der Sohlentnahme zugeführt wird. Die ungünstige Stabgeometrie und geringe Neigung des Rechens reduzieren die Entnahmekapazität weiter. Der Rechen weist eine hohe Anfälligkeit für Verklausung durch Geschiebe und Treibgut auf. Durch die Reinigung des Rechens konnte bei einem Abfluss von 370 l/s eine Steigerung der Entnahmleistung um 8 % erzielt werden.

(2) Sandfang

Die Leistungsfähigkeit des Sandfangs wird von mehreren Faktoren beeinflusst; dabei spielen strömungstechnische Aspekte eine wichtige Rolle sowohl beim Separieren und Absetzen der Sandkörner als auch beim periodischen Spülen abgesetzter Komponenten. Die Idealvorstellung einer völlig gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung wird in beiden Becken nicht erreicht. Der Grund liegt in der teils asymmetrischen und zu turbulenten Durchströmung aufgrund von Planungsfehlern. Durch die Querschnittsverengung zwischen den beiden aneinander gereihten Sandfangbecken kommt es zu einer, im Hinblick auf die Absetzkapazität, kontraproduktiven Erhöhung der Fließgeschwindigkeit. Zudem werden bereits abgelagerte Sedimente, bedingt durch die aus lokaler Geschwindigkeitserhöhung resultierende höhere, sohlnahe Schleppspannung, am Boden weitertransportiert. Die Absetzkapazität des Sandfangs wurde nach den Bemessungsansätzen von Vischer und Huber (1993) und Ortmanns (2006) ermittelt (siehe Erläuterungen 4) Einlaufbecken). Die Berechnungen ergaben bei einer Leistungsfähigkeit des Triebwasserkanaals von 400 l/s eine kritische Korngröße von 0,5 nach Vischer und Huber (1993) und 0,4 nach Ortmanns (2006). Aufgrund baulicher Mängel der beiden Spülsschütze am Sandfang treten zudem Wasserverluste von bis zu 30 l/s auf.

(3) Triebwasserkanal

Die Leistungsfähigkeit des Triebwasserkanaals kann mit den Ansätzen von Darcy-Weisbach für Freispiegel- und Druckabflussbedingungen analysiert werden. Durch eine Sensitivitätsanalyse mit Variation der Oberflächenrauheit wurde ein Abflussspektrum von 388 l/s bis 421 l/s als plausibel ermittelt. Das geringe mittlere Gefälle von 2 % im Abschnitt der gedeckelten U-Betonprofile limitiert die Durchflusskapazität des gesamten Kanals. Aufgrund von Verklausung durch Wurzeleinwüchse und Treibgut wird die Leistungsfähigkeit weiter eingeschränkt.

(4) Einlaufbecken

Im Einlaufbecken kommt es im Eintrittsbereich zu einer asymmetrischen und zu turbulenten Durchströmung. Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, geht der Triebwasserkanal kurz vor Eintritt in das Einlaufbecken in ein Stahlrohr über. Da die Rohrleitung mit einem Gefälle von 60 bis 70 % um 12° gegenüber der Längsachse des Einlaufbeckens versetzt ist, sorgt der somit schräg eingetragene Strömungsimpuls insbesondere im Eintrittsbereich für ein sehr heterogenes turbulentes Strömungsbild. Verstärkt wird das heterogene Strömungsbild durch den lateralen Abfluss über das Streichwehr, der eine weitere Sekundärströmung an der Wasseroberfläche initiiert. In Anbetracht der Funktion des

Einlaufbeckens als zusätzliches Rückhaltebauwerk für Feststoffe stehen die Strömungscharakteristika den Anforderungen an ein günstiges Absetzverhalten entgegen.

Die Effizienz des Einlaufbeckens resp. die maximal absetzbare (kritische) Korngröße wurde nach den Bemessungsansätzen von Vischer und Huber (1993) und Ortmanns (2006) ermittelt. Damit sich alle Körner absetzen, deren Durchmesser d größer oder gleich dem Bemessungskorn d_B sind, muss nach dem linearen Weg-Zeit Gesetz die Aufenthaltszeit des Bemessungskorns im wirksamen Raum mit seiner Absinkzeit übereinstimmen (Patt und Gonsowski, 2011). Die Gleichsetzung der mittleren Aufenthalts- und Absinkzeit liefert die Beziehung:

$$\frac{B \cdot h \cdot L}{Q} = \frac{h}{w} \quad \text{bzw.} \quad \frac{L}{u} = \frac{h}{w} \quad \text{bzw.} \quad w = \frac{Q}{B \cdot L} \quad (5.1)$$

Mit u wird die Strömungsgeschwindigkeit im Absetzbecken $u = Q/(B \cdot h)$, B die Beckenbreite, L die Beckenlänge, h die Wassertiefe und w die Sinkgeschwindigkeit des Bemessungskorns d_B im wirksamen Raum bezeichnet. In Abbildung 5.4 ist ein Längsschnitt durch den wirksamen Raum eines Absetzbeckens mit den linearisierten mittleren Bahnenkurven für verschiedene große Körner dargestellt.

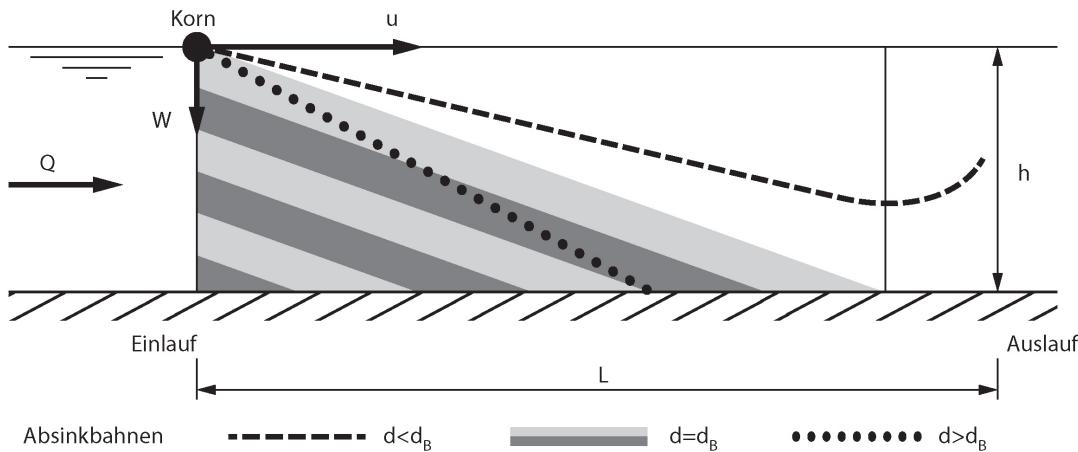


Abbildung 5.4: Idealisierter Sedimentationsweg eines Feststoffpartikels nach Patt und Gonsowski (2011)

Zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit von Partikeln bietet die Literatur umfangreiche Berechnungsansätze (z.B. Patt und Gonsowski (2011))). Diese beziehen sich überwiegend auf die Sinkgeschwindigkeit w_0 im ruhenden Fluid. Über ein Kräftegleichgewicht der Auftriebs- und Widerstandskräfte beim Sinken kann w_0 abgeleitet werden. Da die Sinkgeschwindigkeit w im fließenden Wasser infolge der größeren Turbulenz geringer ist als im ruhenden Wasser, wird die Abminderung nach Vischer und Huber (1993) mit folgendem Ansatz erfasst:

$$w = w_0 - \alpha \cdot u \quad \text{mit } \alpha = \frac{0,132}{\sqrt{h}} \quad (5.2)$$

w_0 ist die Sinkgeschwindigkeit des Grenzkorns im stehenden Wasser und wird nach der empirischen Gleichung von Zanke (1982) bestimmt. Mit α wird ein Korrekturkoeffizient

bezeichnet. Die Verringerung der Sinkgeschwindigkeit in turbulenter Strömung ist hierbei direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit u und umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Beckentiefe h . Um die Annahmen einer idealen Strömungsverteilung im wirksamen Raum zu gewährleisten sind folgende Verhältnisse einzuhalten:

$$B \leq \frac{L}{8} \quad \text{und} \quad \frac{h}{B} \approx 1,25 \quad (5.3)$$

Während der Bemessungsansatz von Vischer und Huber (1993) näherungsweise die Reduzierung der Absinkgeschwindigkeit durch allgemeine Turbulenzen beschreibt, berücksichtigt Ortmanns (2006) zusätzlich überschlägig den Turbulenzeintrag im Zulaufbereich mit dem dimensionsunechten, empirisch ermittelten Faktor K . Dabei gilt:

$$w = w_0 - \frac{0,21}{K} \quad \text{mit } K = \frac{1}{u^{0,4} \cdot u_e^{0,3}} \cdot m \cdot \frac{1}{(g \cdot R)^{0,15}} \quad (5.4)$$

Über die Parameter mittlere Strömungsgeschwindigkeit u , Zuflussgeschwindigkeit u_E sowie über die vertikale Neigung des Übergangs vom Zulaufkanal zum vollen Querschnitt x/m kann der exponentiell über die Beckenlänge abnehmende Verlauf der Turbulenzintensität zum vollen Querschnitt bestimmt werden. Somit wird auch der Verlauf der Turbulenz, welche maßgeblich die Effizienz eines Absetzbeckens bestimmt, berücksichtigt. (Ortmanns, 2006)

Die berechneten kritischen Korngrößen für Einlaufbecken und Sandfang nach den Bemessungsansätzen von Vischer und Huber (1993) und Ortmanns (2006) bei einer Leistungsfähigkeit des Triebwasserkanals von 400 l/s sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Der Grenzkorn-durchmesser für Hochdruckanlagen liegt für gewöhnlich bei etwa 0,4 mm.

Tabelle 5.1: Kritische Korngrößen im Einlaufbecken und Sandfang nach den Ansätzen von Vischer und Huber (1993) und Ortmanns (2006)

Berechnungsansatz	Grenzkorn Sandfang [mm]	Grenzkorn Einlaufbecken [mm]
Vischer und Huber (1993)	~ 0,5	~ 0,3
Ortmanns (2006)	~ 0,4	~ 0,7

Um Rückschlüsse über die Wasserverluste am Streichwehr des Einlaufbeckens durch die optische Justierung des Turbinenzuflusses zu erhalten, wurde eine Pegelsonde installiert. Im Durchschnitt lagen die Wasserverluste bei 33 l/s mit Spitzenwerten von bis zu knapp 150 l/s. Vor allem in der Regenzeit sind durch Verzögerungen in der Neueinstellung des Turbinenzuflusses entsprechend hohe Wasserverluste die Folge. Da auch während der Regenzeit meist nur eine Turbine betrieben wurde, lag die am Wehr entnommene Wassermenge während der Regenzeit deutlich über dem turbinierten Abfluss. Der insgesamt schlechte Zustand des Spülshützes führte zu weiteren Wasserverlusten von bis zu 10 l/s.

(5) Fallleitung

Die Fallleitung weist keine Leckagen auf. An einigen Fundamenten ist die Oberfläche teilweise durch Verwitterungsprozesse beschädigt. Die Funktionstüchtigkeit ist hierdurch jedoch nicht eingeschränkt.

(6) Maschinentechnik

Die Wirkungsgradbestimmung der hydraulischen Maschinen erfolgte indirekt durch die Messung der Betriebsparameter Fallhöhe H_T , generierte Energiemenge im Zeitraum Δt , turbinierte Wassermenge im Zeitraum Δt und Generatorwirkungsgrad η_G . Die Fallhöhe wurde zunächst über eine terrestrische Nivellementvermessung ermittelt. Die geodätische Höhendifferenz zwischen der Überfallkante am Streichwehr des Einlaufbeckens und der Turbinendüsenmitte liegt bei 194,6 m. Die Rohreibungsvorluste wurden auf Basis hydraulischer Berechnungen pauschal mit 0,6 m angesetzt. Die generierte Energiemenge im Zeitraum Δt konnte aus den aufgezeichneten Betriebsdaten abgelesen werden. Mit einem Ultraschall-Durchflussmessgerät (UDM) wurde die turbinierte Wassermenge an der Fallleitung exakt bestimmt. Aus den Planungsunterlagen der WKA Seo Ho wurde η_G mit 91 % entnommen. Die Turbinen wurden mit unterschiedlichen Abflüssen von ca. 65 l/s bis ca. 205 l/s beaufschlagt. Aufgrund des geringen Gesamtabflusses des Seo Ho Flusses war während der Messkampagne eine höhere Beaufschlagung nicht möglich. Der Turbinenwirkungsgrad wurde wie folgt berechnet:

$$\eta_T = \frac{E_{\text{Elekt.}}}{E_{\text{Pot. Druckhöhe}} \cdot \eta_G} \quad (5.5)$$

Der höchste Wert beträgt 68 % bei einem Schluckvermögen von 150 l/s; der geringste Wert liegt bei 54 % bei einem Schluckvermögen von 64 l/s. Die Wirkungsgrade liegen somit deutlich unter den Spitzenwirkungsgraden gängiger Pelton-Turbinen mit bis zu 92 % (Giesecke und Mosonyi, 2009). In Abbildung 5.5 ist der Wirkungsgrad und die Leistung bei einer Beaufschlagung von ca. 60 l/s bis ca. 205 l/s dargestellt.

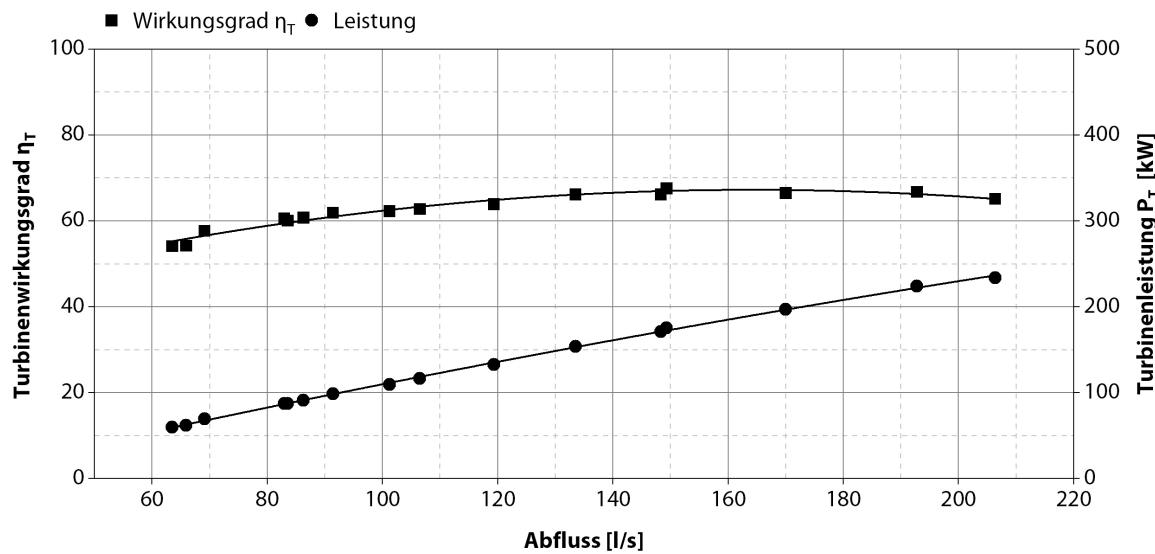


Abbildung 5.5: Wirkungsgrad und Leistung der WKA Seo Ho bei unterschiedlichen Abflüssen von ca. 65 l/s bis ca. 205 l/s

Die geringe Effizienz ist u.a. auf den defizitären technischen Zustand der Maschinensätze zurückzuführen. An den wesentlichen Turbinenbestandteilen wie den Bechern des Laufrades, dem Düsenmund und der Nadel sowie dem Führungsring kam es durch die

suspendierten Feststoffe im Triebwasser zu Abrasionsschäden. Insbesondere die Laufradschaufeln wurden durch Aufschweißen bereits mehrfach saniert. Nach Angaben der Planungsunterlagen wurde zudem eine zu hohe Betriebsdrehzahl von 1.000 min^{-1} realisiert. Das ungünstige Verhältnis zwischen Umdrehungs- und Strahlgeschwindigkeit steht einer hohen Effizienz entgegen. Für gewöhnlich ist bei den gegebenen Randbedingungen eine Drehzahl von 750 min^{-1} empfohlen. Die installierten Manometer zur Anzeige des Vordruckes der Turbinen sind ebenfalls defekt. Auch die automatischen Absperrarmaturen funktionieren aufgrund von zu hohem Feststoffeintrag nicht korrekt. Da der Überfall am Streichwehr vom Krafthaus aus sichtbar ist, wird der Wasserstand optisch kontrolliert und der Turbinenzufluss entsprechend justiert, um möglichst geringe Wasserverluste zu erzeugen.

Der Wirkungsgrad und Abflussbereich bei Minimalabfluss, Teillast- und Volllastbetrieb einer Pelton-Turbine ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Unterhalb eines Abflusses von 65 l/s ist ein Betrieb der WKA Seo Ho aus energetischer und letztlich auch wirtschaftlicher Sicht nicht möglich.

Tabelle 5.2: Wirkungsgrad und Abflussbereich bei Minimalabfluss, Teillast- und Volllastbetrieb einer Pelton-Turbine an der WKA Seo Ho

Betriebsbereich	Abflussbereich [l/s]	Wirkungsgrad [%]
Minimalabfluss	65	56
Teillastbetrieb	< 120	< 65
	120-150	65-68
Volllastbetrieb	> 150	< 68

Die Zustandsanalyse zeigt, dass die Systemkomponenten nicht ideal auf die lokalen Bedingungen abgestimmt sind und sich aufgrund mangelhafter Wartung in einem insgesamt schlechten Zustand befinden. Eine Übersicht einiger Schäden an den einzelnen Systemkomponenten der WKA Seo Ho ist in Abbildung 5.6 gegeben.



Abbildung 5.6: Baulicher Zustand der Systemkomponenten Wehr (1), Sandfang (2), Triebwasserkanal (3), Einlaufbecken (4) und Maschinentechnik (6)

5.2 Angepasstes Systemkonzept

Das Systemkonzept sieht die Erweiterung der WKA Seo Ho durch ein mechanisch angetriebenes Wasserförderersystem vor. Eine Schemaskizze der Demonstrationsanlage ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Für die Nutzbarmachung der für den Turbinenbetrieb nicht effizient verwertbaren Niedrigwassermengen wird in Zusammenarbeit mit KSB SE & Co. KGaA ein eigens für den unteren Teillastbereich der Wasserturbinen dimensioniertes adaptives Wasserfördermodul entwickelt. Die Innovation liegt in der Auslegung einer mechanisch gekoppelten Einheit einer PAT und einer Förderpumpe für den Hochdruckbereich (Druckhöhen bis 70 bar inkl. dynamischer Druckanteil) sowie in der hydraulischen und betrieblichen Anbindung an ein Wasserkraftwerk. Dies erfordert Lösungsansätze zu vielseitigen Fragestellungen hinsichtlich der Bemessung des Wasserförderersystems, der Optimierung der wasserbaulichen Infrastruktur, der Betriebsstrategien sowie der elektrotechnischen Ausstattung für den Anlagenbetrieb.

Durch einen Bypass an der Fallleitung kann je nach Bedarf das Triebwasser zur Wasserförderung mittels PAT-Antrieb und/oder Stromerzeugung über die Pelton-Turbinen genutzt werden. Die mittels Wasserkraft geförderte Wassermenge wird über eine Druckleitung in den Hochbehälter eingespeist. Von dort können täglich bis zu 1,5 Millionen Liter Wasser für die Distrikthauptstadt Dong Van City und die umliegenden Dörfer zur Verfügung ge-

stellt werden. Um eine gerechte Verteilung zu ermöglichen, ist der Hochbehälter mit einer Vorkammer und mehreren nachgeschalteten Unterkammern ausgestattet. Über freie, in der Breite anpassbare Wehrüberfälle kann das Wasser kontrolliert in die Unterkammern weitergeleitet werden. Die Unterkammern sind an die Leitungsnetze der Versorgungsgebiete der Distrikthauptstadt Dong Van City und der umliegenden Siedlungen angebunden. Nähere Informationen zu Verteilkonzept unter Berücksichtigung dynamischer Dargebotschwankungen können Walter (2020) entnommen werden.

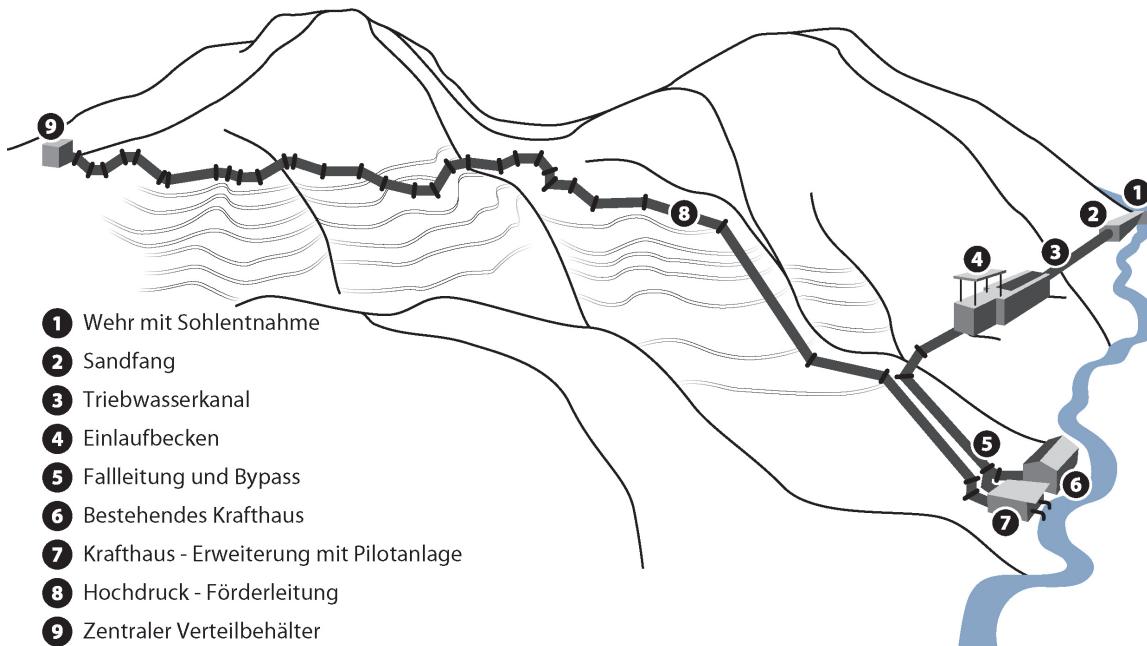


Abbildung 5.7: Systemskizze mit Kopplung des mechanisch angetriebenen Wasserfördersystems an die WKA Seo Ho durch einen Bypass

Hinsichtlich der Entnahme des Triebwassers aus einem natürlichen Gebirgsfluss sind bauwerksseitige Vorkehrungen zum Schutz der PAT und der Förderpumpe vor dem Eintrag mit geführter Feststofffracht zu treffen. Die konzeptionellen Anpassungen ergeben sich aus den hydraulischen und infrastrukturellen Randbedingungen der WKA Seo Ho. Um die vorgegebenen Grenzwerte bzgl. Feststofffracht und Korndurchmesser einzuhalten, sind u.a. am Einlaufbecken mehrere hydraulische Anpassungen erforderlich (z.B. Einbau von Prallwänden zur Strömungsgleichrichtung, Erweiterung um eine Diffusorstrecke zur allmählichen Verzögerung, Einsatz eines horizontalen Filterrohrs am Einlass zur Fallleitung). Weiterhin ist aufgrund des langjährigen Betriebs und der unzureichenden Wartung eine umfassende Sanierung der Bauwerke der WKA Seo Ho erforderlich.

Für einen sicheren Anlagenbetrieb wird unter Berücksichtigung der lokalen soziokulturellen Gegebenheiten ein intuitiv bedienbares Alarm- und Monitoringsystem entwickelt. Es dient als essentielles Werkzeug zur Erfassung der wesentlichen Betriebskenngrößen (Fördermenge und Schluckvermögen, Maschinendrehzahl, Vordruck, Feststofffracht). Eine zusätzliche Fail-Safe-Regelung informiert umgehend über kritische Betriebszustände (z.B. Unterschreitung des Ausbaudurchflusses oder Lastabwurf) und sorgt für ein sicheres

Abfahren des Fördersystems bei Überschreitung vorgegebener Grenzwerte. Die Messwertaufgabe erfolgt an einem zentralen Schaltschrank. Die Anzeigetafel ist mit nur wenigen Warn- und Alarmleuchten ausgestattet und grafisch fundiert aufbereitet. Durch entsprechende Farbgebung der Anzeigeelemente können der Regelbetrieb von Ausnahmesituativen bzw. Störfällen abgegrenzt und kritische Betriebszustände vermieden werden. Um ein Bewusstsein für die mit dem Betrieb einhergehende technische, betriebliche und finanzielle Verantwortung zu schaffen, werden Schulungsunterlagen und Handbücher für den Betrieb und die Wartung entworfen.

Vor dem Hintergrund der schwierigen Wasserversorgungssituation und der Anlagenabschaltung während der Trockenzeit wird ein ganzheitlicher Ansatz erarbeitet, welcher zur Sicherung der Nachhaltigkeit an die Umgebung angepasste technische Lösungen aufzeigt. Zusammenfassend soll diese Arbeit mit folgenden Lösungsansätzen für eine Verbesserung der Wasserversorgungssituation und Steigerung der Effizienz von Wasserkraftwerken beitragen:

- Entwicklung und Optimierung des Wasserfördermoduls für Hochdruckanlagen sowie Validierung der Funktionsfähigkeit
- Bautechnische Umgestaltung der bestehenden Infrastruktur der WKA Seo Ho hinsichtlich der Ankopplung des Fördermoduls (Bypass-System)
- Entwurf und Herstellung einer elektrotechnischen Ausstattung für den Anlagenbetrieb
- Entwicklung geeigneter Betriebs- und Instandsetzungsstrategien für einen transparenten und umfassenden Wissenstransfer
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des wasserkraftbetriebenen Fördersystems
- Erstellung eines Wartungs- und Betriebshandbuchs zur Vermittlung der technischen und betrieblichen Zusammenhänge

5.3 Bemessung des Wasserfördermoduls

5.3.1 Übersicht der Bemessungsgrößen

Die Eingangsparameter für die Auslegung des Wasserfördermoduls werden im Folgenden näher beschrieben. Weitere Informationen finden sich in Abschnitt 2.4 und Abschnitt 3.4.2.

Abfluss Q

Bei der Wahl des Bemessungsabflusses ist darauf zu achten, dass das Wasserförderersystem für den unteren Teillastbereich des Wasserkraftwerkes ausgelegt wird. Bei einem zu hohen Ausbaudurchfluss würde das Wasserförderersystem in der Übergangs- und Regenzeit mit dem Wasserkraftwerk konkurrieren und ggf. zu einem geringeren Gesamtwirkungsgrad führen. Durch die Aufteilung des Ausbaudurchflusses auf mehrere Maschinensätze kann im Falle einer Unterschreitung in extremen Trockenperioden der Betrieb aufrechterhalten

werden. Auch häufige Start- und Stoppvorgänge und somit hohe Anfahrdrehmomente (bis zu 300 % vom Nenndrehmoment) resp. hohe mechanische Belastung von Welle, Lager und Dichtungen können hierdurch vermieden werden.

Fallhöhe H_T

Durch einen Bypass oder ein parallel verlaufendes neues Druckrohr kann das Schluckvermögen der PAT und die Fördermenge der Pumpe zum Wasserförderersystem geleitet werden. Die real nutzbare Fallhöhe ergibt sich im Anschluss an die Erstauslegung der Maschinentechnik iterativ durch die Berücksichtigung des dynamischen Anteils als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit.

Förderhöhe H_P

Die Förderhöhe ergibt sich durch den manometrischen Höhenunterschied zwischen der Maschinenplattform und dem geplanten Verteilspeicher abzüglich des saugseitigen Vordruckes. Hinzu kommen die hydraulischen Energieverluste innerhalb des gesamten Rohrleitungssystems, welche quadratisch mit der Förderrate zusammenhängen. Somit ist zur Bestimmung der Förderhöhe ein bestmöglicher Leitungsverlauf (u.a. Berücksichtigung der dynamischen Drückhöhe und dem möglichen Auftreten von Druckstößen) sowie ein geeigneter Standort für die Errichtung des Verteilspeichers festzulegen. Für eine Erstauslegung der Maschinentechnik kann die statische Förderhöhe angesetzt werden; in Realität stellt sie jedoch ein unerreichbares Minimum dar. Im Zuge der Dimensionierung der Maschinentechnik wird zur statischen Förderhöhe der Verlustterm für die zu erwartenden strömungsbedingten Energieverluste addiert, sodass sich nach mehreren Iterationsstufen die zu erwartende Gesamtförderhöhe ergibt.

Maschinen- und Systemwirkungsgrad η

Der Systemwirkungsgrad setzt sich aus den Einzelwirkungsgraden der PAT und der Förderpumpe zusammen. Je nach Anwendungsfall eignen sich für das Fördermodul unterschiedliche Baureihen bzw. Baugrößen. Neben den hydraulischen Randbedingungen ist bei der Wahl des Maschinentyps eine Vielzahl an weiteren Einflussfaktoren wie u.a. die Feststoffbeladung zu berücksichtigen. Hierdurch wird auch der zu realisierende Wirkungsgrad beeinflusst. Im ersten Auslegungsschritt können jedoch die Wirkungsgrade der Einzelmaschinen vernachlässigt werden. Ab der ersten Iteration sollte dann eine (Vor-)Auswahl des Maschinentyps und der Baugröße getroffen werden, da die realisierbare Fördermenge unter Berücksichtigung der Maschinenwirkungsgrade geringer ausfällt als der berechnete Wert bei der Erstauslegung.

Wie in Abschnitt 3.4.2 bereits erläutert, erreichen die Wirkungsgrade der PATs in Abhängigkeit von der Baugröße, den Betriebsbedingungen sowie vom technischen Zustand der Maschinen zwischen 60 % und 80 %; Spitzenwerte liegen sogar um 5 % höher. Die gängigen Werte bei Pumpen liegen zwischen 70 % und 90 % (Hellmann, 2009). Der Modulwirkungsgrad hängt letztlich davon ab, ob ein Getriebe zur Drehzahlübersetzung erforderlich ist. Je nach Nennbetriebspunkt der Maschinen ist eine Synchronisierung oder eine Übersetzung der Betriebsdrehzahlen erforderlich. Der Einsatz eines Getriebes kann trotz der damit verbundenen energetischen Verluste zu einem höheren Gesamtwirkungsgrad führen, wenn die durch die Übersetzung der Betriebsdrehzahl höheren Einzelwirkungsgrade die Überkompensation der Getriebeverluste ermöglichen (Stoffel, 2016). Nach Stoffel (2016) führt

jedoch der Einsatz eines Getriebes zu einem komplexeren und somit weniger robusten Gesamtsystem.

Fördermenge Q_P

Die realisierbare Fördermenge ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit des Systems und stellt im Hinblick auf die Projektierung des Wasserfördersystems die zentrale und bestimmende Zielgröße dar. Die Fördermenge kann aus der in Gleichung 5.6 dargestellten Leistungsbilanz von PAT und Förderpumpe unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades von zwischengeschalteten Kupplung(en) und Getriebe $\eta_{Komb.}$ rechnerisch bestimmt werden.

$$P_T \cdot \eta_{Komb.} = \rho \cdot g \cdot H_T \cdot Q_T \cdot \eta_T \cdot \eta_{Komb.} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_P \cdot Q_P}{\eta_P} = P_P \quad (5.6)$$

5.3.2 Anforderungen an die Maschinenauswahl

Bei der Maschinenauswahl für den Regel- als auch für den inversen Betrieb ergeben sich hohe mechanische und hydraulische Anforderungen aufgrund des Einsatzes unter Hochdruckbedingungen sowie der Verarbeitung von geringen Abflussmengen. Gleichzeitig sollte der Schwerpunkt auf einer hohen Robustheit sowie einem geringen Betriebs- und Wartungsaufwand liegen. Das Anforderungsprofil ist im Folgenden näher beschrieben.

Die Auswahl der Maschinen erfolgt entsprechend den topographischen (Fall- und Förderhöhe) und hydrologischen (Mindestabfluss) Gegebenheiten. Für eine hohe Robustheit sollte dabei auf den Einsatz eines Getriebes zur Drehzahlübersetzung verzichtet werden. Voraussetzung hierfür ist die Abstimmung der hydraulischen Charakteristika beider Maschinen bzgl. einer einheitlichen Nenndrehzahl. Der Betriebs- und Wartungsaufwand kann weiter begünstigt werden, indem die PAT und die Förderpumpe aus der selben Baureihe ausgewählt wird. Die zuständigen Techniker müssen sich dann nur mit einer Maschinenart vertraut machen (unterschiedliche Baugrößen spielen hierbei eine untergeordnete Rolle).

Hinsichtlich der Wasserentnahme aus einem natürlichen Gebirgsfluss muss die Abrasionsbeständigkeit resp. die Widerstandsfähigkeit der Maschinen gegenüber Feststoffbeladung berücksichtigt werden. In Abbildung 5.8 sind die kritischen Komponenten einer Gliederpumpe dargestellt, deren frühzeitiges Versagen aufgrund zu hohem Feststoffeintrag als wahrscheinlich gilt.

Bei einer zu hohen Schwebstoffkonzentration kommt es zu einer Beeinträchtigung der Oberflächengüte strömungsführender Bauteile wie u.a. dem Laufrad. Der Schadensvorgang ist vergleichbar mit Sandstrahlen von Bauteilen und führt letztlich zu einer Reduktion des Wirkungsgrades und ggf. zu einem Ausfall der Bauteile. Das „Verklemmen“ von unzulässig großen Partikeln kann zu einer Vergrößerung des Spaltes zwischen Laufrad und Gehäuse führen, welcher i.d.R. bei wenigen Zehntelmillimetern liegt. Die Rückströmung von der Druck- zur Saugseite nimmt durch den vergrößerten Spalt zu und infolge dessen verringert sich der Wirkungsgrad. Bei der Maschinenauswahl gilt es demnach zu prüfen, in welchem Maß eine „natürliche“ Spaltaufweitung toleriert werden kann. Neben der Größe und Anzahl der Partikel hat auch deren Material starken Einfluss auf die Lebensdauer der Maschinen. Während organische Feststoffe keine oder nur geringe Schäden verursachen, führen Quarze hingegen aufgrund deren hoher Härte unweigerlich zu Schädigungen wie

bspw. einer Aufweitung von Ringspalten. Durch den Einsatz hochbeständiger Werkstoffe für sensible Komponenten (Laufrad, Dichtungen und Welle) können die Schädigungsmechanismen bis zu einem gewissen Grad begrenzt und der Instandhaltungsaufwand reduziert werden. (Stoffel, 2016)

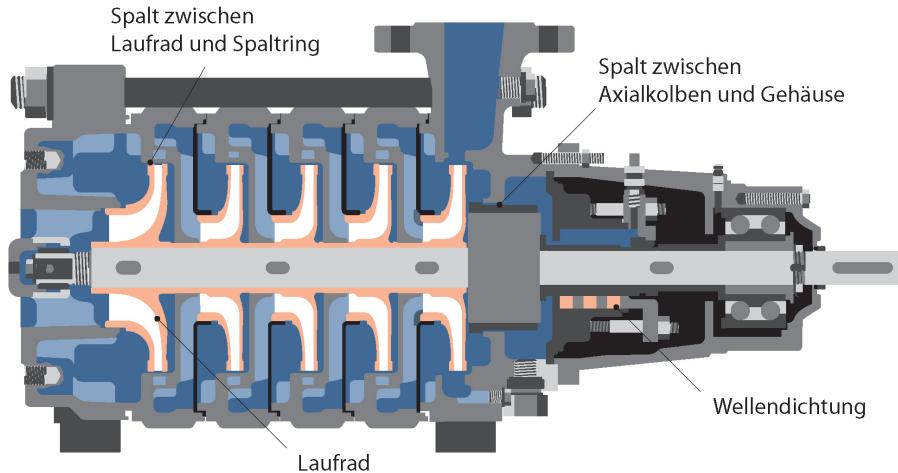


Abbildung 5.8: Schnittbild einer Gliederpumpe der Baureihe Multitec nach KSB (2011) mit den kritischen Stellen in Bezug auf die Feststoffbeladung

Weiter ist bei der Maschinenauswahl die konstruktive Gestaltung des Axialschubausgleichs im Hinblick auf die zu erwartende Feststoffbeladung im Betrieb zu berücksichtigen. Der Axialschub, d.h. die Resultierende aus allen auf einen Pumpenläufer wirkenden Axialkräften, entsteht bspw. aufgrund des Druckunterschiedes auf beiden Seiten eines Laufrades. Bei mehrstufigen Pumpen addieren sich die hydraulischen Axialkräfte aller Stufen zu einem Axialschub auf den Rotor. Zur Begrenzung der Baugröße des Axiallagers ist eine Kompensierung des Axialschubs erforderlich durch, bspw. gegenläufige Anordnung von Laufrädern, Ausgleich am einzelnen Laufrad durch Entlastungsbohrungen oder Gesamtausgleich durch einen Entlastungskolben. Die gegenläufige Anordnung der Laufräder führt generell zu einer vollständigen Kompensation des Axialschubes; die Maschine wird hierdurch jedoch deutlich komplexer. Zudem ist nach wie vor ein Axiallager für den Fall einer kavitiertenden Stufe erforderlich. Die Entlastungsbohrungen stellen eine robuste, bei großer Stufenzahl jedoch auch eine sehr aufwändige und teure Lösung dar. Für den gewünschten Schubausgleich durch Rückströmung von der Druck- zur Saugseite des Laufrades muss jedes Laufrad einzeln gebohrt werden. Die Ersatzteilbeschaffung wird hierdurch deutlich erschwert, da es sich nicht mehr um Standardlaufräder handelt. Zudem sind Entlastungsbohrungen mit einem Wirkungsgradrückgang verbunden, welcher im Vorfeld nur näherungsweise berechnet werden kann. Der Entlastungskolben führt im Betrieb zu einem Entlastungsstrom durch den Spalt zwischen rotierenden und stationären Teilen der Entlastungseinrichtung. Hierbei wird der Strom stark gedrosselt. Durch den Druckverlust entsteht eine resultierende Axialkraft auf die Entlastungseinrichtung; dem Axialschub der Laufräder entgegengesetzt. Dieser Schubausgleich findet i.d.R. bei Hochdruckanlagen mit sehr hohen Axialschüben Anwendung. Bei dem Einsatz von Entlastungskolben kann eine zu hohe Feststofffracht zu einer Aufweitung des o.g. Spalts und letztlich zu einer Verrin-

gerung der Entlastungswirkung bzw. im Extremfall zu Ausfall der Maschinen führen. Die zielführendste Entlastungsform muss für jeden Einzelfall geprüft werden. (Stoffel, 2016)

Das Anforderungsprofil für die Modulauslegung an der Demonstrationsanlage ist im Folgenden zusammengefasst:

- Druckhöhen bis 70 bar inkl. dynamischer Druckanteil
- Verarbeitung von geringen Abflussmengen von 100 l/s bis 120 l/s
- Drehzahlsynchronisation der Maschinensätze
- Abrasionsbeständigkeit bzw. Widerstandsfähigkeit gegenüber Sedimentdurchgang
- Möglichst einfacher Betrieb und einfache Wartung
- Hohe Verfügbarkeit von Maschinen- und Ersatzteilen

5.3.3 Dimensionierung der Maschinenkombination

Durch eine Variantenstudie mit unterschiedlichen Maschinenkombinationen kann unter Berücksichtigung der o.g. Anforderungen die optimale Konfiguration ermittelt werden. Hierbei wird die Anzahl der Wasserfördermodule, deren Baugröße, Stufenzahl und Nendrehzahl sowie die Werkstoffe für strömungsberührende Bauteile variiert. Die Abstimmung der naturräumlichen und soziokulturellen Anforderungen mit den technisch geeigneten Maschinen ist aufgrund der Annahmen bzgl. Maschinenwirkungsgrad, Verlusthöhe, Fördermenge etc. ein aufwendiges Verfahren (Stoffel, 2016). Die Dimensionierung erfolgt in iterativer Abstimmung mit der Bemessung der Rohranlage (Fallleitung und Bypass, Rohrsystem des Wasserförderersystems sowie Förderleitung), da die Wahl der Leitungsführung, Durchmesser, Position und Art der Formstücke und Armaturen Einfluss auf die Energieverluste haben (siehe Abschnitt 5.4).

Weiterhin ist aufgrund der eingeschränkten Regelbarkeit des Wasserfördermoduls deren Anpassung an ein schwankendes Wasserdargebot erforderlich. Grundsätzlich kann dies durch externe Regeleinrichtungen erfolgen (siehe Abschnitt 2.4.6). Durch den zusätzlichen Einsatz einer Drosselregelung am PAT-Zulauf kann der Betriebsbereich des Wasserförderersystems erweitert werden. Der Vordruck kann künstlich verringert und somit das Schluckvermögen der PAT sowie die Fördermenge der Pumpe reduziert werden. Zwar bewirkt der Einsatz einer solchen Drossel eine Energiedissipation, aus betrieblicher Sicht kann hierdurch das nutzbare Abflussspektrum jedoch sinnvoll vergrößert und häufige Start- und Stoppvorgänge reduziert werden. Weiterhin kann durch den parallelen bzw. modularen Aufbau mehrerer Wasserfördermodule der substantielle Nachteil eines fehlenden justierbaren Leitapparats zur Einstellung unterschiedlicher Betriebszustände kompensiert und ein breites Abflussspektrum bewirtschaftet werden (Stoffel, 2016).

Die Ergebnisse der Variantenstudie für die Demonstrationsanlage sind im Folgenden zusammengefasst:

Unter Berücksichtigung aller genannter Einflussparameter wurde in enger Kooperation mit KSB SE & Co. KGaA die Gliederpumpenbaureihe Multitec sowohl für den Regel- als

auch den inversen Betrieb als geeignete Pumpenbauart ausgewählt. Diese Baureihe zeichnet sich durch geringen Wartungsaufwand bei gleichzeitiger hoher Effizienz aus. Durch die hohe Anpassungsfähigkeit von Stufenzahl, Saug- und Druckstutzen wird im Hinblick auf Bedarfsregionen mit ähnlichen Randbedingungen ein höheres Multiplikationspotential ermöglicht. Aus einer Vielzahl von möglichen Maschinenkombinationen ist in Tabelle 5.9 eine Übersicht der drei erfolgversprechendsten Modulvarianten mit 55 l/s (FM 50) bzw. 80 l/s (FM 80) gegeben.

Tabelle 5.3: Modulkombinationen als Ergebnis einer Variantenstudie durch das IWG und KSB SE & Co. KGaA

Variante	Fördermodul FM80 Schluckvermögen 80 l/s	Fördermodul FM55 Schluckvermögen 55 l/s	Hauptbetriebsbereich
V1	1	0	65 l/s - 80 l/s
V2	0	2	45 l/s - 110 l/s
V3	1	1	45 l/s - 135 l/s

In Abbildung 5.9 sind die Modulvarianten einschließlich dem Betriebsbereich der Pelton-Turbinen dargestellt. Die zielführendste Konfiguration kann mithilfe der Bewertungsmatrix in Tabelle 5.4 ausgewählt werden.

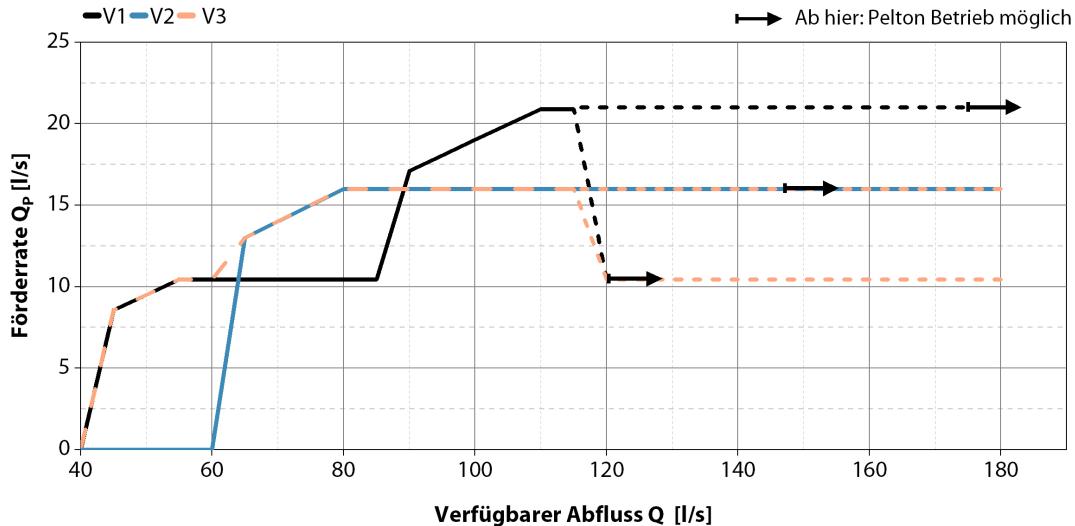


Abbildung 5.9: Vielversprechende Modulkombinationen als Ergebnis einer Variantenstudie durch das IWG und KSB SE & Co. KGaA

Im Vergleich zur Variante mit nur einem Fördermodul (V1), bietet die Variante mit jeweils zwei Fördermodulen (V2 und V3) eine höhere Flexibilität und Sicherheit auch bei ungewöhnlich geringen Abflüssen. Zudem kann ein größeres Abflussspektrum bei hoher Effizienz ermöglicht werden. Weitere entscheidende Vorteile von V2 und V3 sind im Hinblick auf die Redundanz im Störfall und die Möglichkeit zur Deckung eines höheren

künftigen Wasserbedarfs gegeben. Da die Modulvariante V2 zwei baugleiche Fördermodule mit einem Bemessungsabfluss von 55 l/s vorsieht und dies mit deutlich geringerem Entwicklungs-, Planungs- und Bauaufwand sowie mit geringerem Schulungsbedarf (einfachere Betriebsstrategien) verknüpft ist, wird die Modulvariante V2 für die pilothafte Umsetzung ausgewählt.

Tabelle 5.4: Bewertungsmatrix für die zielführendste Modulvariante

Kriterien	V1	V2	V3
Betriebssicherheit bei extrem geringen Abflüssen	-	+	+
Redundanz für Schadens- / Störfall	-	++	+
Verwendung gleicher (Ersatz-) Teile	o	+	-
Schulungs- und Wartungsaufwand	+	+	-
Komplexität der Regelung	+	o	-
Flexibilität bezüglich Regelung	-	+	+
Ganzjährige Förderung parallel zum Wasserkraftwerk	+	++	+
Deckung des aktuellen Wasserbedarfs	+	+	+
Deckung des künftigen (höheren) Wasserbedarfs	o	+	+
Planungs- und Entwicklungsaufwand	+	+	-
Gesamtbewertung	0	11	2

Für einen Bemessungsabfluss von 55 l/s kann die Turbinen- und Pumpenseite mit unterschiedlichen Multitec Baugrößen ausgestattet werden. Je nach Maschinenkombination ergeben sich unterschiedliche Stufenzahlen für die Maschinen. Neben den Anforderungen, dass die Pumpe und die PAT im jeweiligen Betriebspunkt möglichst annähernd im hydraulischen Optimum arbeiten, soll sich auch die Betriebsdrehzahl der Maschinen im zugelassenen Bereich befinden. (Fritz und Schmidt, 2017)

Die geeigneten Maschinenkombinationen mit deren Spezifikationen sind im Folgenden zusammengefasst:

Variante V2-A: MTC 65/2 stufig (PAT) - MTC 50/12 stufig (Pumpe)

- Gesamtdurchfluss Q_{FM} : 54 l/s
- Pumpenfördermenge Q_P : 11,3 l/s
- Drehzahl n: 2.700 min^{-1}
- Laufrad-Umfangsgeschwindigkeit: 30 m/s (PAT)
- Wirkungsgrad η_T : 75,5 %
- Wirkungsgrad η_P : 65,0 %

Variante V2-B: MTC 100/5 stufig (PAT) - MTC 65/16 stufig (Pumpe)

- Gesamtdurchfluss Q_{FM} : 54,5 l/s
- Pumpenfördermenge Q_P : 11,4 l/s
- Drehzahl n: 2.100 min^{-1}

- Laufrad-Umfangsgeschwindigkeit: 27 m/s (PAT)
- Wirkungsgrad η_T : 70,5 %
- Wirkungsgrad η_P : 67,5 %

Da die hydraulischen Kenngrößen wie Schluckvermögen, Gesamtwirkungsgrad sowie Förderrate beider Modulvarianten vergleichbar sind, ergibt sich für den Parallelbetrieb jeweils eine Förderrate von ca. 18 l/s. Hierbei ist die zu überwindende Förderhöhe maßgeblich von den Strömungsverlusten in der Förderleitung abhängig (siehe Abschnitt 5.4.3). Weiterhin erzielt die PAT bei angegebenen Schluckvermögen im Vergleich zu den bestehenden Pelton-Turbinen einen höheren Wirkungsgrad (siehe Abschnitt 5.1.1).

Der Vorteil von V2-B im Vergleich zu V2-A ist die geringere Systemdrehzahl resp. Laufrad-Umfangsgeschwindigkeit. Hierdurch kann i.A. ein geringerer Verschleiß durch Hydroabrasion erwartet werden. Die Feststoffe verhalten sich im Fliehkräftefeld des Laufrades anders als die Trägerflüssigkeit. Sie durchqueren die Stromlinien der Wasserströmung und stoßen bzw. reiben sich an den Wänden der Strömungskanäle. Dadurch wird die im Laufrad erzeugte Förderhöhe H_P um das Maß ΔH vermindert. Der Nachteil von V2-B sind die hohen Stufenzahlen für Pumpe und Turbine und somit höhere Preise für die Maschinen. Von Seiten des Maschinenherstellers KSB SE & Co. KGaA ist die zulässige Anzahl an Druckstufen bei der Multitec-Baureihe auf 16 begrenzt. Die Förderpumpe von V2-B ist mit einer Hydraulik ausgestattet, die eine nachträgliche Erhöhung der Stufenzahl resp. Förderhöhe nicht zulässt. Dies wäre bspw. dann erforderlich, wenn die energetischen Verluste in der Förderleitung deutlich höher ausfallen als erwartet. Da der Preis für die Maschinen von Variante V2-B um den Faktor 4 höher liegt als für Variante V2-A und eine nachträgliche Anpassung der Maschinenhydraulik im Bedarfsfall nicht möglich ist, fällt die Maschinenauswahl auf Variante V2-A. (Fritz und Schmidt, 2017; Nestmann u. a., 2017) Zum Schutz des Wasserfördermoduls vor unzulässig hohem Feststoffeintrag werden in Abschnitt 5.5 und 5.6.4 verschiedene Lösungsansätze vorgestellt.

5.3.4 Konstruktiver Aufbau

Die mechanisch gekoppelten Maschinen werden auf einem Grundrahmen aus Profilstahl verschraubt. Die Montage auf dem Betonfundament erfolgt durch eine Klemmvorrichtung mittels Pratzen und Ausgießen des Rahmens mit Vergussmörtel. Hierdurch können die Maschinen zu Revisionszwecken einfach demontiert werden. Zudem ist die Möglichkeit einer Nachjustierung des Wasserfördermoduls gegeben. Bei der Multitech-Baureihe ist durch den getrennten Dichtungsraum eine einfache Demontage von Lager und Wellendichtung, ohne Entfernung von hydraulischen Komponenten, möglich. Für die sensiblen Komponenten (Laufrad, Dichtungen und Welle) werden die widerstandsfähigsten Materialien der Standardbaureihe ausgewählt. Das selbstausrichtende Gleitlager besteht u.a. aus Siliziumkarbid und ist verschleißfest. Im Hinblick auf die in Abschnitt 5.3.2 genannten technischen Optionen für die Axialschubentlastung wird die Vorrichtung mit Entlastungskolben ausgewählt. Der Fokus bei der Auswahl der Komponenten lag auf dem Einsatz von Standardmaschinen sowie der vereinfachten Beschaffung von Ersatzteilen.

In Abbildung 5.10 ist eine Übersicht des Aufbaus des Wasserfördermoduls gemäß Variante V2-A mit 2-stufiger PAT, Kupplung mit Schutzabdeckung und 12-stufiger Förderpumpe dargestellt.

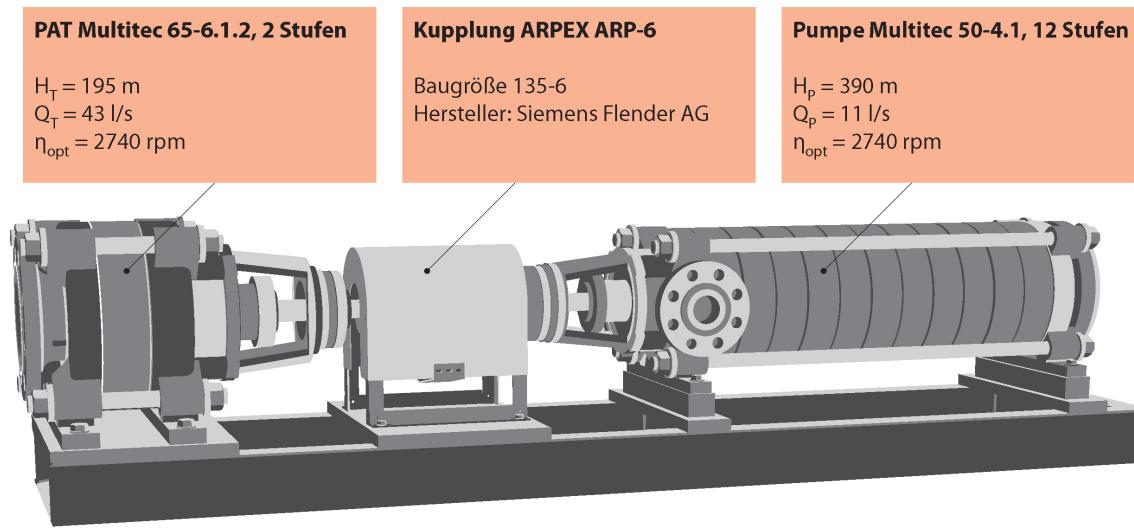


Abbildung 5.10: 3D-CAD-Modell des adaptiven Wasserfördermoduls nach Fritz und Schmidt (2017)

Zur Übertragung des Drehmoments wird eine verschleißarme Kupplung des Herstellers Siemens Flender ausgewählt (Typ ARPEX-ARP 6). Der Aufbau der ARPEX-Kupplung ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

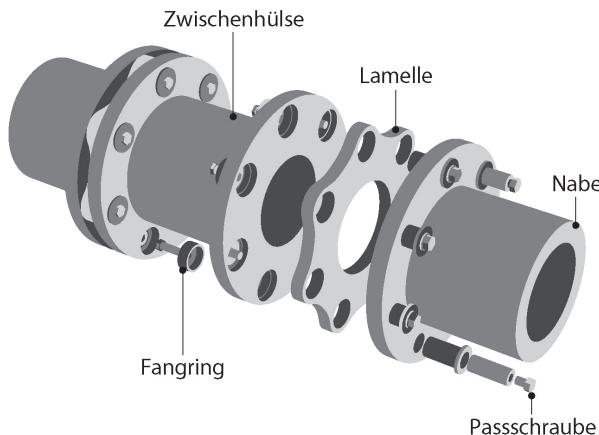


Abbildung 5.11: Beispielhafter Aufbau der ARPEX-Kupplung (Typ ARPEX-ARP 6) nach Flender (2002)

Die Lamellenpakete sind zwischen den Flanschen der Kupplungsnenben und der Zwischenhülse wechselseitig verschraubt; die Naben sind mit Abziehgewindebohrungen ausgeführt. Die Zwischenhülse ist in verschiedenen fixen Längen verfügbar und ermöglicht einen einfachen Wechsel der Lamellenpakete. Zulässige Wellenversätze der gewählten Baugröße 135-6 liegen im Bereich von $\Delta K_a = \pm 2,02 \text{ mm}$ (axial), $\Delta K_r = 1,62 \text{ mm}$ (radial; Wellenabstand 140 mm) und $\Delta K_w = 0,7^\circ$ (Winkelversatz). Die übertragbaren Drehmomente bei einem zulässigen Winkelversatz von $0,7^\circ$ liegen zwischen 100 und 17.000 Nm. Die Einhaltung der Grenzwerte ist durch die Ausrichtung mittels Haarlineal möglich; aufwendiges Messequipment wie bspw. ein Lasermessgerät sind nicht erforderlich. Durch die geschlossene

Flanschform und der kompakten Bauweise sind hohe Umfangsgeschwindigkeiten und hohe Drehzahlen möglich. (Flender, 2002)

Weitere technische Details zum konstruktiven Aufbau des Wasserfördermoduls finden sich in Fritz und Schmidt (2017).

5.3.5 Prüffeldvalidierung

Um die Leistungsfähigkeit des Wasserfördermoduls bewerten und für den Betrieb angepasste Strategien festlegen zu können sind ausführliche Prüffeldtests nötig. Die einzelnen Komponenten des Wasserfördermoduls sind sowohl einzeln als auch im späteren Komplettanlauf eingehend zu untersuchen. Die Pumpen sind durch Simulation verschiedener Förderhöhen mittels nachgeschalteter Drosselarmatur zu vermessen. Für die Versuche der PAT kann der erzeugte Vordruck mittels vorgesetzter Pumpe künstlich variiert und unterschiedliche Fallhöhen für die verschiedenen Betriebsbedingungen simuliert werden. Um den Betrieb des Wasserfördermoduls an einem Wasserkraftwerk möglichst realistisch abzubilden und Aussagen über das Regelungs- und Betriebsverhalten treffen zu können, ist die Turbinenkennlinie bei konstanter Fördermenge und die Pumpenkennlinie bei konstanter Fallhöhe zu ermitteln.

Eine umfassende Prüffeldvalidierung des entwickelten Wasserfördermoduls wurde auf dem Forschungsprüfstand der KSB SE & Co. KGaA in Frankenthal durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst:

Die Einzelmessungen der PAT im Pumpen- und Turbinenbetrieb ergeben hydraulische Spitzenwirkungsgrade von 75,5 % im Turbinenbetrieb und von 74,5 % im Pumpenbetrieb. Die gemessene Pumpen- und Turbinencharakteristik ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

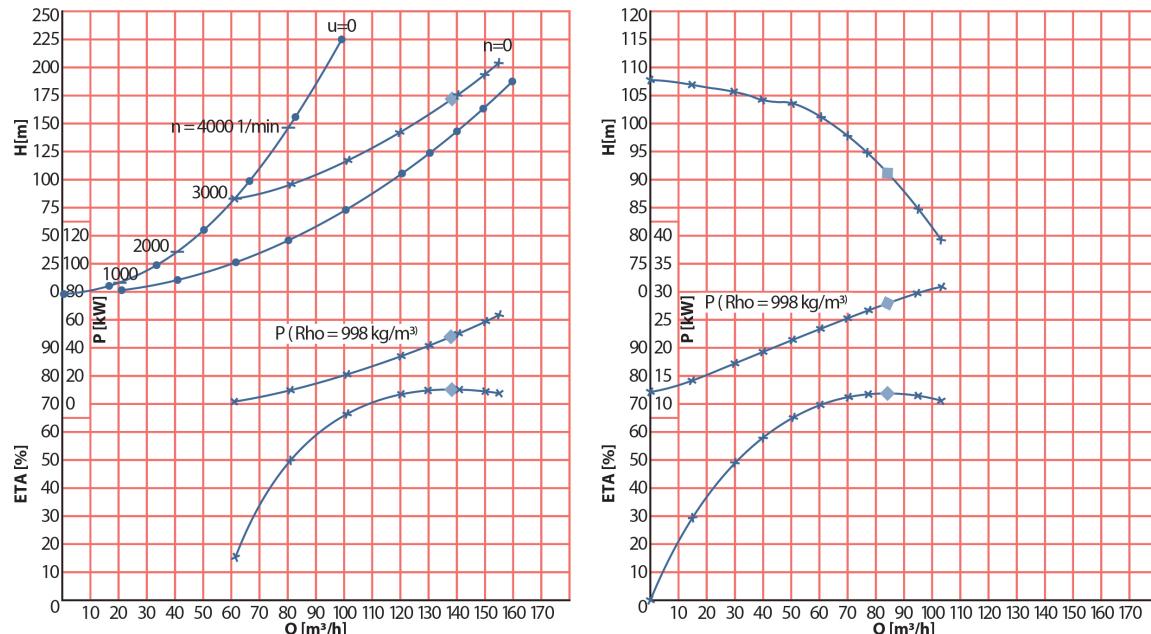


Abbildung 5.12: Prüffeldergebnisse der Einzelmessung der PAT (Typ Multitec 65/2 6.1) im Turbinen- (links) und Pumpenbetrieb (rechts) erstellt durch KSB SE & Co. KGaA

Aus den vorliegenden Ergebnissen der Einzelmessungen lassen sich zudem folgende Umrechnungsfaktoren vom Pumpen- in den Turbinenbetrieb ableiten:

$$f_Q = \frac{Q_{Opt.T}}{Q_{Opt.P}} = 1,46 \quad f_H = \frac{H_{Opt.T}}{H_{Opt.P}} = 1,52 \quad f_\eta = \frac{\eta_{Opt.T}}{\eta_{Opt.P}} = 1,01 \quad (5.7)$$

Hierbei ist f_Q der Mengenfaktor, f_H der Fallhöhenfaktor und f_η der Wirkungsgradfaktor. Demnach ist bei gleicher Drehzahl im Punkt des besten Wirkungsgrades im Turbinenbetrieb eine 1,46-fach höhere Menge als im Pumpenbetrieb zu erwarten. (Fritz und Schmidt, 2017)

Die Einzelmessungen der Förderpumpe ergeben einen Spitzewirkungsgrad von 65 %. Im Pumpenbetrieb ist keine Kavitationsanfälligkeit zu erwarten, da der saugseitige Vordruck bei 195 m liegt und der $NPSH_A$ Wert der Anlage um ein Vielfaches höher ist als der erforderliche $NPSH_R$ der Pumpe (laut Kennlinienheft etwa 1,5 m). Daher wird auf eine experimentelle Ermittlung des maschinenspezifischen $NPSH_R$ Wertes verzichtet. (Fritz und Schmidt, 2017)

Die Messungen des Wasserfördermoduls ergeben einen Nennwirkungsgrad von 49 %. Der Einzelwirkungsgrad der nahezu verlustfreien Kupplung beträgt 99,8 %. Die Drehzahl des Wasserfördermoduls liegt im Betriebspunkt bei etwa 2.700 min^{-1} . Die realisierbare Fördermenge liegt planmäßig bei 11 l/s im Einzelbetrieb und 18 l/s im Parallelbetrieb. Die Mindestabflussmenge für den Betrieb eines Fördermoduls liegt bei 25 l/s. Bis zu einer Gesamtabflussmenge ($Q_P + Q_T$) von 80 l/s ist der Einzelbetrieb, und ab 80 l/s der Parallelbetrieb, sinnvoll. (Fritz und Schmidt, 2017) Abbildung 5.13 zeigt die Fördermengen und die Wirkungsgrade bei Einzel- und Parallelbetrieb.

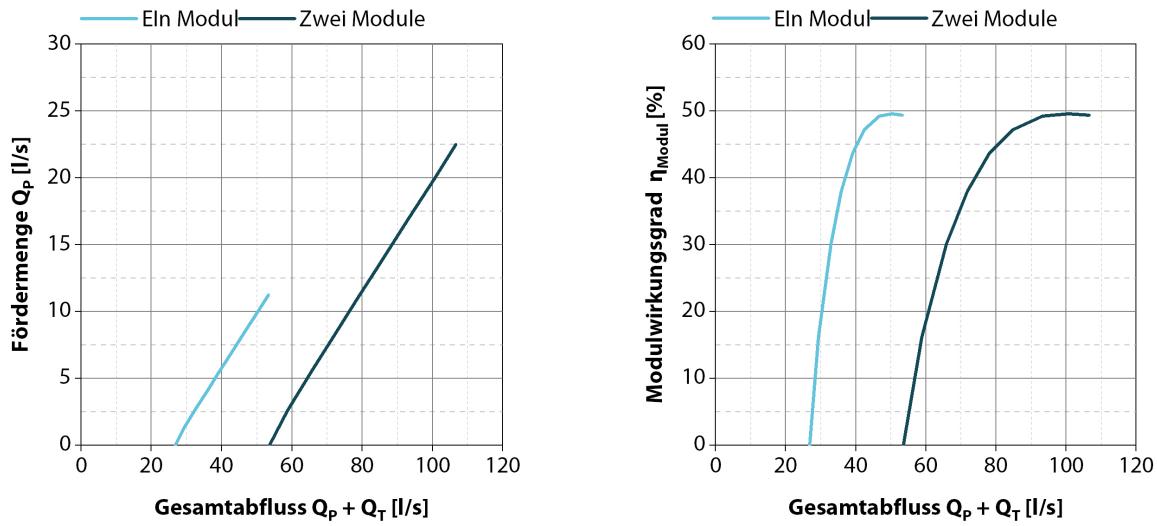


Abbildung 5.13: Fördermenge (links) und Wirkungsgrad (rechts) der Wasserfördermodule unter Berücksichtigung des Gesamtabflusses nach Fritz und Schmidt (2017)

Zusammenfassend sind in Tabelle 5.6 die Prüffeldergebnisse des entwickelten Wasserfördermoduls dargelegt.

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Prüffeldergebnisse des Wasserfördermoduls für die WKA Seo Ho durch KSB SE & Co. KGaA

Messwerte	PAT	Pumpe	Fördermodul
Durchfluss [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]	42,7	11,5	54,0
Fallhöhe [m]	195	-	195
Förderhöhe [m]	-	360	-
Drehzahl [min^{-1}]	3.020	2.700	2.700
Wirkungsgrad [%]	75,5	65,0	49,9

5.4 Bemessung des Rohrleitungssystems

5.4.1 Fallleitung und Bypass

Mithilfe eines Bypass-Systems in Form eines Rohrabzweigs an der bestehenden Fallleitung kann mit vergleichsweise geringem infrastrukturellen Aufwand das Wasserförderersystem angekoppelt und das Triebwasser je nach Bedarf für die Wasserförderung und/oder Stromproduktion genutzt werden. Die Bemessung des Bypasses erfolgt in iterativer Abstimmung mit der Dimensionierung des Wasserförderersystems (sieh Abschnitt 5.3). Die zusätzlichen Belastungen an der Fallleitung müssen entsprechend berücksichtigt werden.

An der WKA Seo Ho ist unmittelbar vor dem Verschwinden der Fallleitung im Untergrund oberhalb des bestehenden Krafthauses ein Bypass vorgesehen. Bauliche Änderungen der Fallleitung sind nicht vorgesehen, da die ermittelten Verlusthöhen aufgrund des Innen durchmessers von 524 mm und der triebwasserkanal seitigen Begrenzung der hydraulischen Leistungsfähigkeit auf 400 l/s etwa $h_f = 4,9 \text{ m}$ betragen. Das entspricht weniger als 2,5 % der statischen Fallhöhe. Die Leitungslänge des Bypasses liegt bei ca. 60 m. Auf Basis des Gesamtdurchflusses des Wasserförderersystems wird für den Bypass ein Nenndurchmesser von DN300 gewählt. Unmittelbar nach dem Abzweig von der Fallleitung ist eine Absperrklappe als Isolationsarmatur eingeplant, um im Falle von Wartungsarbeiten den gesamten neuen Krafthausbereich von der Fallleitung entkoppeln und somit den weiteren Betrieb der Pelton-Turbinen ermöglichen zu können. Weitere Einbauten sind zwischen Fallleitung und neuem Förder system nicht erforderlich bzw. vorgesehen.

5.4.2 Rohranlage des Wasserförderersystems

Beim vorgesehenen Schluckvermögen der beiden PAT von 86 m^3/s und der geplanten Fördermenge der Hochdruckpumpen von 18 l/s führt ein Nenndurchmesser von DN65 bis DN300 zur Einhaltung der technisch-wirtschaftlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Demzufolge sind geringe Energieverluste bzw. Verlusthöhen von weniger als $h_v = 0,4 \text{ m}$ zu erwarten. Das entspricht ca. 0,2 % der nutzbaren Fallhöhe. Dieser Wert beinhaltet die Rohreibung verluste sowie alle lokalen Verluste durch Formstücke (Abzweige und Querschnittsänderungen) und Armaturen (Isolationsarmatur, Absperrschieber und Rück schlagventil). Durch die Integration eines Ringkolbenventils (RKV) zur Drosselung des

Wasserförderersystems sind geringfügig höhere Gesamtverluste von bis zu 0,8 m zu erwarten (etwa 0,4 % der nutzbaren Fallhöhe). Da die hydraulischen Verluste der Rohranlage des Wasserförderersystems vernachlässigbar sind, kann die Leitungsführung sowie die Platzierung von Formstücken und Einbauten sehr flexibel gestaltet werden.

Prinzipiell kann die Montage des Wasserförderersystems vor Ort aus Einzelsegmenten aufgebaut oder vollständig vormontiert (z.B. in einem Überseecontainer) an den Bestimmungs-ort geliefert und dort an den Bypass und die Förderleitung angeschlossen werden. Durch die Montage vor Ort ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Flexibilität, da vor Ort auf Anpassungen reagiert werden kann (z.B. im Falle von Ungenauigkeiten bei der Fertigung der Betonfundamente). Nachteile ergeben sich je nach Anwendungsfall durch den Bedarf an Fachpersonal und -equipment bei der Installation (z.B. in Bezug auf das Schweißen von Bauteilen hoher Druckstufen). Die vollständige Vormontage der Anlage bietet den Vorteil, dass die Montage des Systems unter einfacheren Bedingungen in einer Produktionsstätte erfolgen kann und vor Ort lediglich an den Bypass und die Förderleitung angeschlossen werden muss. Nachteilig kann sich gerade an entlegenen Standorten mit eingeschränkter Zugänglichkeit die Anlieferung auswirken. Die Ausstattung eines Überseecontainers mit Maschinen- und Rohrleitungstechnik erfordert zudem administrativen Mehraufwand in Form einer nachträglichen TÜV-Abnahme. Dies wird z.B. bei Einschränkung der Stabilität erforderlich aufgrund statischer Verbindung von Rohrhalterungen an der Containerwandung. Die konzeptionellen Entwürfe sind in Abbildung 5.14 und 5.15 dargestellt.

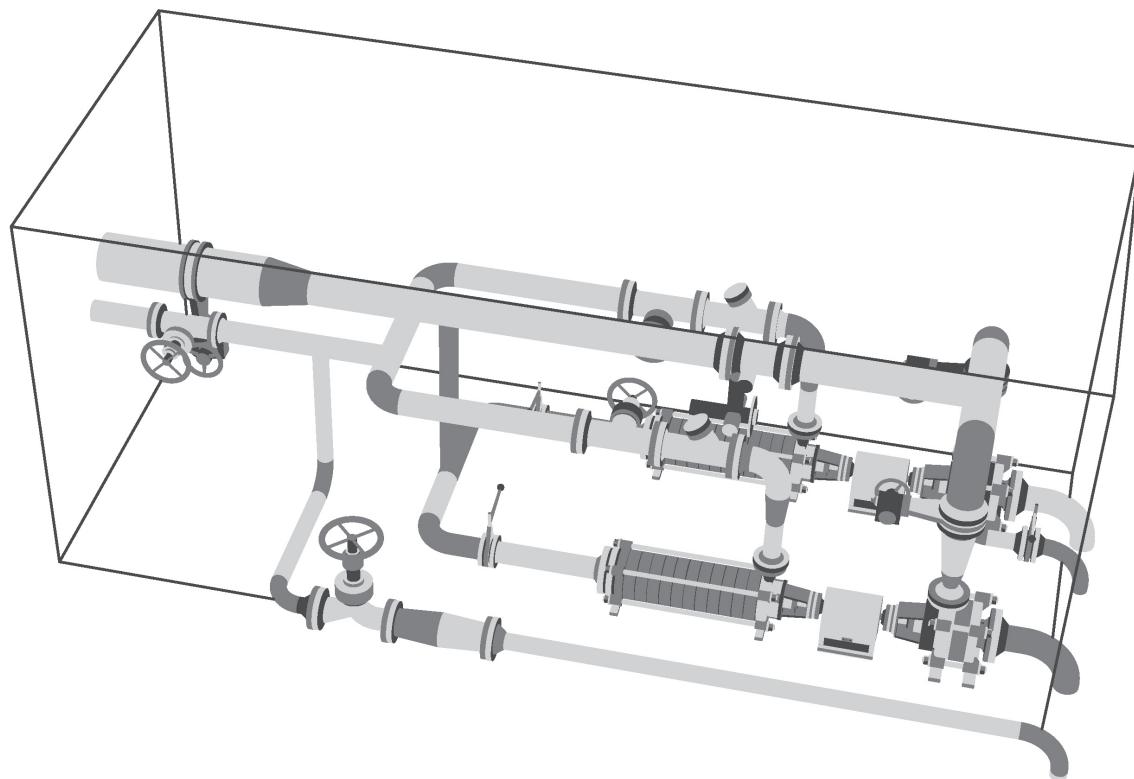


Abbildung 5.14: Konzeptioneller Entwurf der Demonstrationsanlage mit Aufstellung eines Überseecontainers mit Vormontage

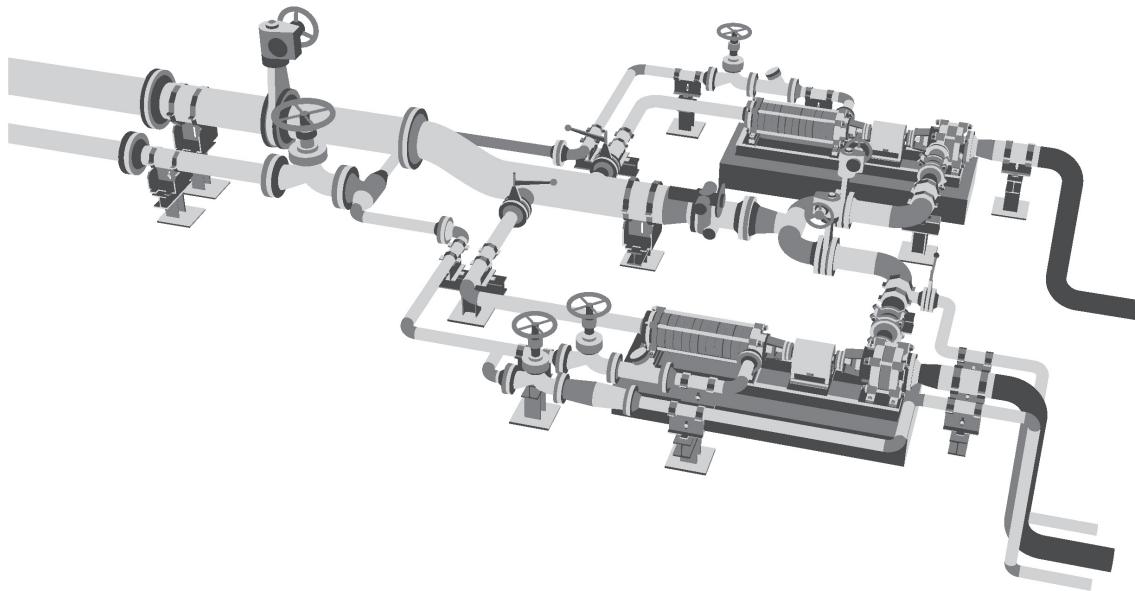


Abbildung 5.15: Konzeptioneller Entwurf der Demonstrationsanlage mit Montage vor Ort

Die Vor- und Nachteile der beiden Ausführungsvarianten sind im Folgenden zusammengefasst und bewertet:

Tabelle 5.6: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Montage vor Ort und der Vormontage in einem Überseecontainer

Kriterien	Montage vor Ort	Überseecontainer
Flexibilität	++	-
einfachere Montagebedingungen	-	++
Fachpersonal und -equipment	-	+
Zugänglichkeit	++	--
Gesamtbewertung	2	0

Aufgrund des entlegenen Wasserkraftwerk-Standortes und der schwierigen Anlieferung des Containers wird das Wasserförderersystem vor Ort montiert. Das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema als Grundlage für die Fertigungsplanung ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Es beschreibt die Struktur des Rohrleitungsverlaufs sowie die Positionierung von Armaturen. Die Rohranlage wird mit norminierten Rohrhalterungen auf Stützen aus Profilstahl montiert, um die erforderliche Festigkeit sowie die einfache Montage und Demontage für Revisionszwecke zu ermöglichen. Die Grundrahmen der Module werden, wie bereits in Abschnitt 5.3.4 beschrieben, mittels Schwerlastdübel und Klemmvorrichtung auf den Betonfundamenten befestigt und mit schwindfreiem Mörtel ausgegossen. Durch dieses Vorgehen kann nicht nur die erforderliche Festigkeit sondern auch eine Schwingungsdämpfung im Betrieb gewährleistet werden. Der Zusammenschluss aller Komponenten muss spannungsfrei erfolgen, um eine Mehrbelastung und letztlich Schäden an den

Komponenten durch einen verspannungsbedingten Versatz zu vermeiden. Die Start- und Stoppvorgänge erfolgen über das Öffnen und Schließen des RKV in der PAT-Zulaufleitung. Der Einzel- oder Parallelbetrieb wird durch die Absperrklappen auf der Druckseite der PAT eingestellt. Eine ausführliche Beschreibung des Betriebs- und Regelungsverhalten findet sich in Kapitel 7.

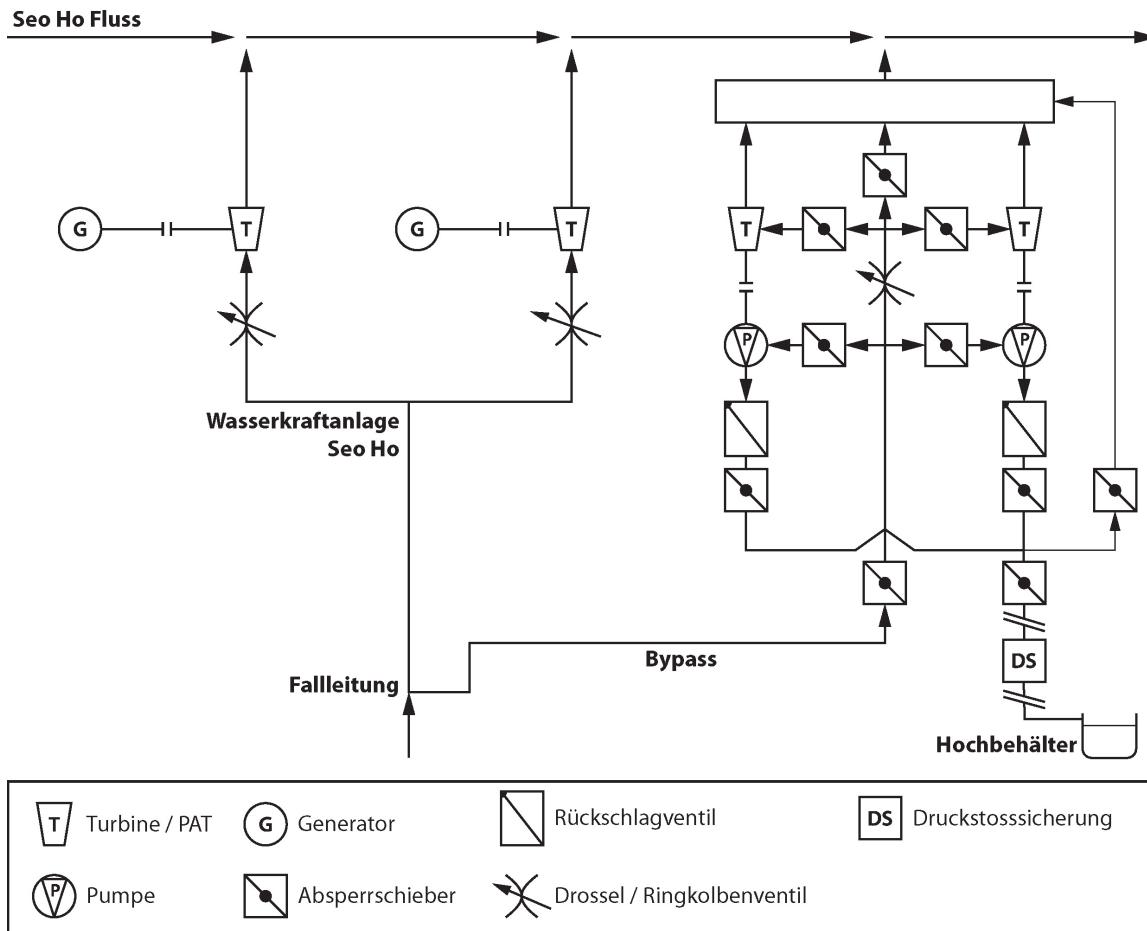


Abbildung 5.16: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der WKA Seo Ho und der Demonstrationsanlage nach Stoffel (2016)

5.4.3 Hochdruck-Förderleitung

Das Wasserfördermodul muss eine manometrische Förderhöhe von 550 m überwinden. Unter Berücksichtigung der dynamischen Druckhöhe und dem möglichen Auftreten von Druckstößen ergibt sich ein Nenndruck von 73 bar im unteren Teil der Leitung. Bei der Evaluierung verschiedener Leitungstrassen wurde ein steiler Anstieg im Bereich der hohen Drücke bevorzugt, um nach möglichst kurzer Leitungsstrecke auf ein niedriges Druckniveau zu gelangen. Durch die geringere mechanische Belastung über einen Großteil der Leitungsstrecke können aus statischer und letztlich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten Vorteile erzielt werden. Die Förderleitung erstreckt sich insgesamt über eine Strecke von 2.456 m und kann in zwei Abschnitte unterteilt werden. Der erste Leitungsabschnitt mit 870 m hat eine mittlere Steigung von ca. 48 %. Auf der restlichen Leitungsstrecke von

1.586 m ist eine deutlich geringere mittlere Steigung von ca. 8 % gegeben. Eine Übersicht hierzu findet sich in Abbildung 5.17.

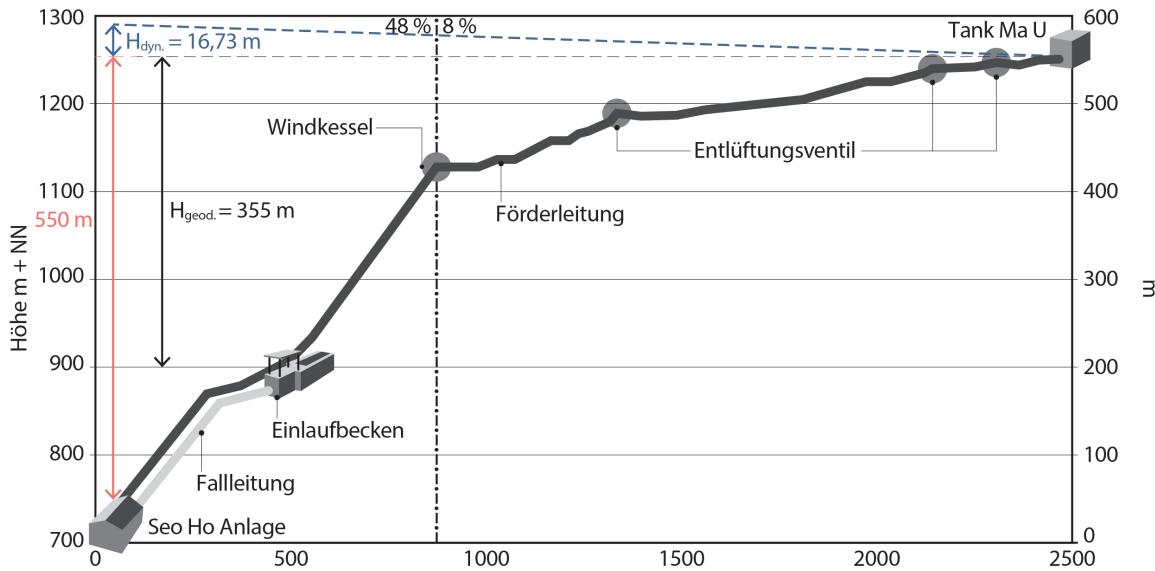


Abbildung 5.17: Leitungstrasse und Höhenprofil der Hochdruck-Förderleitung

Die Ermittlung von Durchmesser und des Druckverlust erfolgt unter Annahme eines Be-messungsdurchflusses von 18 l/s und einer Leitungslänge von 2.456 m. Die unterschiedlichen Rohrwandungen aufgrund der verschiedenen Druckstufen werden dabei vernachlässigt. Der von den Fördermodulen zu leistende Druck entspricht der geodätischen Förderhöhe von 550 m abzüglich des Vordrucks von 195 m und zuzüglich der dynamischen Druckhöhe. Für Stahlleitungen mit weitgehend gestreckter Leitungsführung und ohne Auskleidung wird eine integralen Rauheit k_2 von 0,4 mm angenommen (DVGW Arbeitsblatt GW 303-1 (2006)). Die Ergebnisse der hydraulischen Vorbemessung sind in Tabelle 5.7 aufgezeigt.

Tabelle 5.7: Ergebnisse der hydraulischen Vorbemessung der Förderleitung mit einer integralen Rauheit $k_2 = 0,4$ mm

Nominaler Durchmesser	Außendurchmesser [mm]	Innendurchmesser [mm]	Rohrwan-dung [mm]	Gewicht [kg/m]	Material-kosten [€]
DN125	139,7	131,7	4,0	13,4	66.000
DN150	168,3	160,3	4,0	16,2	80.000
DN200	219,1	211,1	4,0	21,1	104.000

	v [m/s]	Re [-]	k_2/d [-]	λ [-]	h_v [m]
DN125	1,47	192.584	0,003	0,027	55,1
DN150	0,99	158.224	0,002	0,026	19,8
DN200	0,57	120.149	0,002	0,025	4,8

Ein Nenndurchmesser von DN150 stellt einen sinnvollen Kompromiss zwischen Druckverlusten h_v und Anschaffungskosten dar. Die Druckverluste von 18,8 m entsprechen etwa 5,5 % der statischen Förderhöhe von 355 m. Ein Durchmesser von DN125 führt zu einem erheblich höheren Druckverlust von etwa 15,5 % der statischen Förderhöhe und u.U. zu einer Neuauswahl der Strömungsmaschinen. Ein Durchmesser von DN200 erzeugt zwar deutlich geringere Druckverluste von etwa 1,3 % der statischen Förderhöhe, jedoch sind erheblich höhere, technische nicht zu rechtfertigende Anschaffungskosten die Folge.

Nach der Auswahl des Nenndurchmessers von DN150 ist eine detaillierte Berechnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Rauheit und aller lokalen Verluste durchzuführen. Für die Stahlleitung wird eine Rauheit von $k_s = 0,09$ mm angesetzt. Unter Berücksichtigung des Zustandes der Rohrströmung bei den gegebenen Randbedingungen bzw. Strömungsgeschwindigkeiten, ergibt sich auf der Gesamtlänge der Leitung kontinuierliche Verluste von $h_{v,kont.} = 15,3$ m. Mit einem ermittelten aufsummierten Verlustbeiwert von $\xi = 28,54$ ergibt sich eine lokale Verlusthöhe von $h_{v,lok} = 1,43$ m. Der Gesamtdruckverlust der Förderleitung beträgt somit $h_v = 16,73$ m. Der Unterschied zwischen detaillierter und überschlägiger Betrachtung der Rauheit nach DVGW beträgt etwa $\Delta h_v = 3$ m. Für den Bemessungsfall der Leitung (beide Fördermodule im Betrieb) ergibt sich demnach eine Gesamtförderhöhe von ca. 375 m.

Die Leitungstrasse beinhaltet insgesamt drei lokale Hochpunkte. Je nach Strömungsgeschwindigkeit und Neigung der Leitung kann sich Luft an den lokalen Hochpunkten anammeln (z.B. durch einen fehlerhaften Betrieb oder Schäden an der Infrastruktur). Um eine Erhöhung des Strömungswiderstandes zu verhindern, sind an den drei lokalen Hochpunkten Entlüftungsventile vorgesehen. Zwischen den beiden Leitungsabschnitten mit einer Steigung von 48 % und 8 % wird ein Windkessel eingeplant, der ein Kollabieren der Leitung im Falle eines Druckstoßes verhindert (siehe Abbildung 5.17).

Ein Druckstoß kann durch ein unzulässig rasches Öffnen oder Schließen der Revisionsarmaturen am Wasserförderersystem oder durch einen plötzlichen Lastabfall an einem Fördermodul bspw. durch Bruch einer Kupplung oder Welle ausgelöst werden. Obwohl beide Szenarien sehr unwahrscheinlich sind und nur durch Fehlbedienung (Revisionsarmaturen) oder massive Einwirkung von außen (Lastabfall der Module) auftreten können, wurde eine Druckstoßberechnung seitens KSB SE & Co. KGaA durchgeführt.

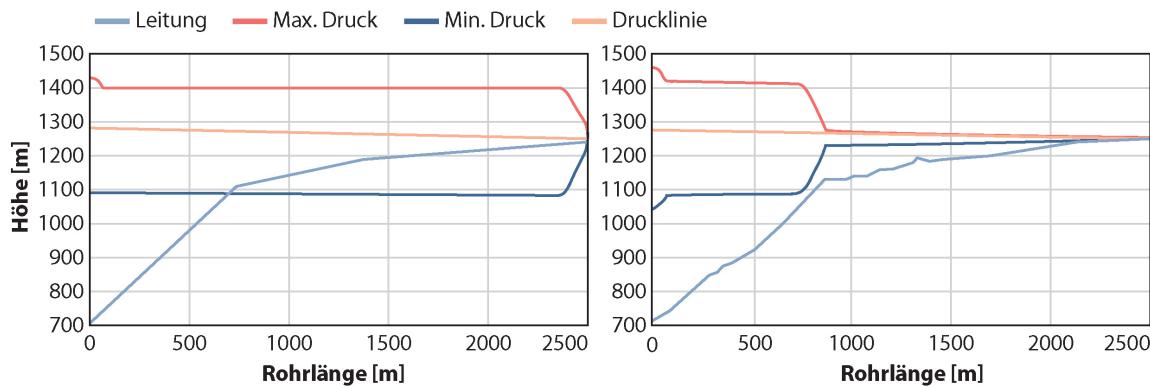


Abbildung 5.18: Druckstoßberechnung der Förderleitung ohne (links) und mit (rechts) Windkessel nach Nestmann u. a. (2017)

Die Ergebnisse der Druckstoßsimulation mit und ohne Windkessel sind in Abbildung 5.18 dargestellt. Die maximale Druckbelastung während eines Druckstoßes findet am Ausgang der Pumpe statt, an dem auch der maximale hydrostatische Druck wirkt. Während der ersten positiven Druckstoßwelle entsteht im unteren Teil der Förderleitung ein maximaler Druck von etwa 73 bar. Unter Berücksichtigung der hydrostatischen und dynamischen Druckhöhe ergibt sich der reine Druckstoß demnach zu etwa $\Delta p_{ds} = 16,3$ bar. Während der negativen Druckwelle fällt der Druck ab km 0+700 unter den Dampfdruck. Durch das Implodieren der Dampfblasen entstehen unzulässige niedrige Drücke, die zu einem Kollabieren des gesamten Leitungsabschnittes führen können. Durch einen Windkessel mit Druckstufe PN25 und einem Gesamtvolume von 500 l wird ein Unterschreiten des Dampfdruckes durch die Kompressibilität der Luft innerhalb des Kessels verhindert. Die sich ausbreitende Druckwelle wird im Windkessel reflektiert und wirkt sich daher im oberen Teil der Leitung nur sehr begrenzt aus.

Die Förderleitung ist einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt. Hierzu zählt u.a. der Innendruck, welcher sich aus dem hydrostatischen Druck, dem dynamischen Druck und der maximal auftretenden Druckkraft aus dem Druckstoß zusammensetzt. Der dynamische Druck und der Druckstoß können vereinfachend als konstante Druckkräfte angesehen werden. Bei der hydrostatischen Druckkraft handelt es sich um eine von der geodätischen Höhe abhängige Kraft. Die in der Leitung herrschende maximale Druckkraft p [bar] kann abhängig von der Höhenkote h wie folgt berechnet werden:

$$p(h) = (\Delta p_{ds} + h_v) + \frac{1,255 - h}{10} \quad (5.8)$$

Abhängig von dem maximal auftretenden Innendruck kann die Förderleitung in vier Abschnitte mit zulässigen Maximaldrücken bis 73 bar, 60 bar, 45 bar und 35 bar unterteilt werden. Der Innendruck wirkt als innere Kraft in Form von Längs-, Radial- und Tangentialkräften auf die Rohrwandung. Bei längskraftschlüssiger Verbindung werden die Kräfte über das Rohrmaterial abgetragen. Je größer die Druckkraft ist, desto höher muss die Wandstärke sein. Aufgrund der exzentrischen Krafteinwirkung an Rohrkrümmungen muss hier eine höhere Wandstärke sein als in geradlinigen Abschnitten. Die verschiedenen Abschnitte der Rohrleitung mit den jeweiligen Drücken und Wandstärken sind in Tabelle 5.8 gelistet.

Tabelle 5.8: Einteilung der Förderleitung in Abschnitte bzgl. des maximal auftretenden Drucks

Abschnitt	Höhe [m]	Max.Druck [bar]	Länge [m]	Wandstärke (Gerade) [mm]	Wandstärke (Krümmung) [mm]
I	707 - 830	73	241	6,3	11
II	830 - 980	60	315	5,6	7,1
III	980 - 1.080	45	142	4,5	5,6
IV	1.080 - 1.255	35	1.758	4,0	4,5

Das Lagerungs- und Dehnungskonzept fasst alle Maßnahmen zusammen, um die äußeren auf die Leitung einwirkenden Kräfte in den Untergrund zu übertragen. Hierzu gehören u.a.

der Entwurf und die Bemessung der Rohrlager und der Fundamente sowie ein Konzept für den Längenausgleich aufgrund von Temperaturschwankungen und temperaturinduzierten Dehnungen der oberirdisch verlegten Leitungsabschnitte.

Die statische Berechnung sowie die Erstellung des Lagerungs- und Dehnungskonzeptes erfolgte durch das Ingenieurbüro Röse, Ludwigsfelde. Hierbei wurden die Lasten aus Eigen gewicht der Rohrleitung, Innendruck, Reibung zwischen Rohrleitung und Lager, positive und negative Temperaturdehnung bei 50 °C bzw. -10 °C mit Einbautemperatur von 20 °C, Wind sowie positiver und negativer Druckstoß berücksichtigt. Die aus den Lastgrößen resultierenden Kräfte und Verschiebungen werden über ein nichtlineares Berechnungsmodell bestimmt. Das sich daraus ergebende Lagerungs- und Dehnungskonzept sieht drei Lagertypen (drei-, zwei- und einwertige Auflager) vor. In einem Abstand von 150 m werden die Festlager vorgesehen, welche die Rohrleitung in allen drei Raumebenen hält und alle Längskräfte aufnimmt. Damit die Leitung zwischen zwei Festlagern infolge der Belastung nicht durchhängt sind alle 6,5 m Führungslager geplant. Hierbei wird die Verschiebung des Rohres in Längsrichtung zugelassen. Die Gleitlager nehmen die vertikalen Kräfte auf und lassen eine Bewegung in horizontaler Raumebene (bezogen auf den Untergrund) zu. Die Verschiebung des Systems infolge Temperaturdehnung wird durch Dehnungs(U-)bögen (vier 90° U-Bögen) zwischen zwei Gleitlagern zugelassen. Die entstehenden Längskräfte durch die temperaturbedingten Dehnungen werden somit durch die Verformung resp. Verschiebung kompensiert. Hierbei wirken die rückwirkenden Kräfte F_{Fr} aus der Reibung zwischen Rohr und Führungslager sowie die rückstellenden Kräfte F_{St} aus der Steifigkeit des zusammengedrückten U-Bogens. Eine alternative Methode zur Dehnungskompensation sind Kompensatoren. Da die Längskraftschlüssigkeit nicht gegeben ist, wirken die inneren Druckkräfte zusätzlich als äußere Kräfte F_P auf die Widerlager. Die Vorentwurfsplanung sieht aufgrund der hohen Lasten beim Einsatz von Kompensatoren eine Dehnungskompensation mittels U-bogen vor. Bei der Erstellung der Ausführungsplanung durch die vietnamesischen Partner wurde jedoch ein Dehnungsausgleich mittels Kompensator gewählt, wodurch letztlich erheblich größere und widerstandsfähigere Fundamente benötigt werden.

5.5 Rehabilitations- und Optimierungsmaßnahmen

Um ein Wasserkraftwerk für einen ganzjährigen und energetisch optimierten Betrieb durch das Bypass-System zu erweitern, sind hydraulische und bauliche Konzepte zur Rehabilitation und Optimierung der bestehenden wasserbaulichen Infrastruktur erforderlich. Neben der Problematik einer unwirtschaftlichen Ausbauleistung sind weitere Gründe für eine geringe Effizienz eine ungünstige Ausgestaltung und Dimensionierung der Zusatzbauwerke sowie eine unzureichende Wartung und Instandhaltung der Systemkomponenten (siehe Abschnitt 3.3.2). Ein weiteres häufig anzutreffendes Problem in Gebirgsregionen ist der Hydroabrasionsverschleiß mit den Folgen bauwerksgefährdenter Schädigungen (z.B. Bewehrungsfreilegung) als auch hydraulisch wirksamer Oberflächenverschleiß (z.B. ungünstige Erhöhung der Rauheit). Durch Rehabilitationsmaßnahmen kann, je nach hydraulischem und baulichem Zustand der Systemkomponenten, die Effizienz deutlich gesteigert werden (z.B. Austausch alter Anlagenteile oder Optimierung der hydraulischen Ausleitung (Anströmung des Einlaufbauwerkes, der Rechenanlage oder der Turbinen; Reduzie-

rung der Kavitationsgefahr, Abströmverhältnisse im Turbinenauslauf und Unterwasser, Strömungslenkung im Triebwasserweg etc.)).

Durch das Bypass-System ergeben sich neue Anforderungen an die Systemkomponenten. Grundsätzlich ist zum Schutz des Wasserförderersystems der Geschiebe- und Feststoffeintrag in das System neu zu bewerten. Weiter kann ggf. durch eine Erhöhung des nutzbaren Abflusses die Effizienz der Gesamtanlage deutlich gesteigert werden. Die konzeptionellen Anpassungen ergeben sich dabei aus den hydraulischen und infrastrukturellen Randbedingungen des Wasserkraftwerkes. Zusätzliche Maßnahmen zum Schutz des Wasserförderersystems vor Feststoffeintrag sind in Abschnitt 5.6 näher beschrieben.

Am Beispiel der Demonstrationsanlage sind einige Lösungen aufgezeigt. Dabei lag der Schwerpunkt auf einer Erhöhung der Rückhaltekapazität der mitgeführten Feststofffracht. Um die hohen Verschleißraten beim hydraulischen Feststofftransport zu vermeiden, wurden durch das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) des KIT baustofftechnologische Untersuchungen zu optimierten Betonrezepturen auf Basis lokaler Ausgangsstoffe durchgeführt (siehe Nestmann u. a. (2017)).

(1) Wehr mit Sohlentnahme

Die Voruntersuchungen ergaben eine Entnahmekapazität der Sohlentnahme von ca. 370 l/s (siehe Abschnitt 5.1.3). Da dieser Wert nur geringfügig unterhalb der Durchsatzkapazität des Triebwasserkanals liegt (Berechnungen ergaben 390 l/s bis 420 l/s) und eine Vergrößerung des Triebwasserkanals nicht vorgesehen ist, wird eine Erhöhung der Entnahmefähigkeit daher nicht angestrebt. Das Entnahmehauwerk wird jedoch derart umgestaltet, dass künftig eine Verklausung bestmöglich entgegengewirkt werden kann. In der Vergangenheit kam es wiederholt trotz ausreichendem Abflussdargebot zu einer geringen Wasserentnahme, wodurch die Effizienz der WKA Seo Ho eingeschränkt wurde. Demzufolge wird die Sohlentnahme durch eine Vertiefung und Verbreiterung umgestaltet und die linken Wehrkrone erhöht. Zudem wird ein in Strömungsrichtung geneigter Rechen mit angepasster Stabgeometrie eingesetzt. Die Vorentwurfsplanung ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

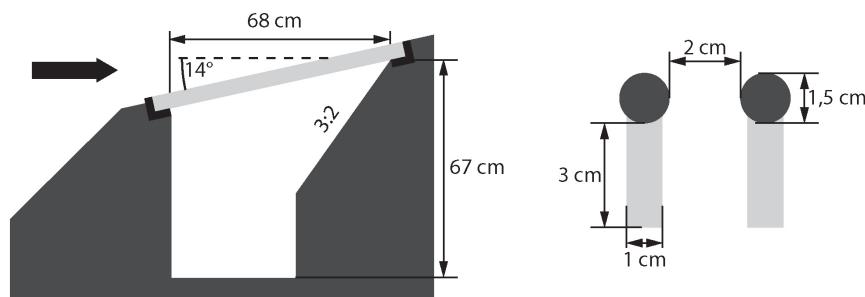


Abbildung 5.19: Neugestaltete Sohlentnahme mit Schnittzeichnung des Entnahmeschachts und der angepasster Stabgeometrie

(2) Sandfang

Die Geometrie des Sandfangs bzw. die daraus resultierende Rückhaltekapazität ermöglicht, den in Tabelle 5.1 dargelegten Berechnungsergebnissen zufolge, das Absetzen von

Partikeln mit einem Durchmesser größer als 0,4 mm (bei $Q = 400 \text{ l/s}$). Durch den Rückbau der Einengung zwischen den beiden aneinandergereihten Sandfangbecken ist eine deutliche Vergrößerung der Absetzstrecke und Rückhaltekapazität möglich. Als weitere Optimierungsmaßnahme kann durch den Einsatz eines Grobrechens am Eintritt des Triebwasserkanales Treibgut und Geschwemmsel zurückgehalten werden. Ergänzend hierzu sind zur Verringerung von Wasserverlusten am Sandfang die Erneuerung der Spülsschütze geplant. Abbildung 5.20 zeigt den Rückbau der Einengung zwischen den beiden Becken sowie den geplanten Grobrechen am Übergang vom Sandfang in den Triebwasserkanal.

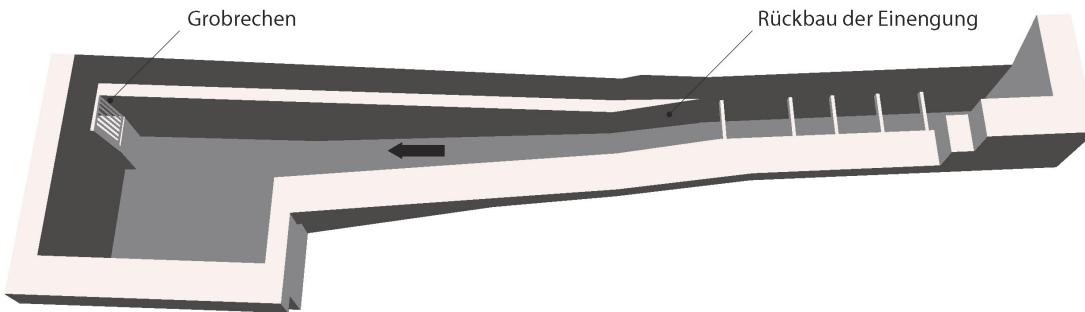


Abbildung 5.20: CAD-Modell des umgestalteten Sandfangs mit Gobrechen am Übergang vom Sandfang in den Triebwasserkanal und Rückbau der Einengung

(3) Triebwasserkanal

Die Optimierungsmaßnahmen am Triebwasserkanal umfassen zum einen das Entfernen von Wurzelbewuchs und Treibgut sowie die Ertüchtigung der Dichtungen zwischen den Betonbauteilen. Hierdurch soll verhindert werden, dass zwischen Sandfang und Einlaufbecken Partikel in das Triebwasser eingetragen werden. Um die Instandhaltung des Triebwasserkanals künftig einfacher zu gestalten, sind zusätzliche Revisionsöffnungen geplant. Der an das Einlaufbecken anschließende Abschnitt des Triebwasserkanals besteht aus einer schräg zulaufenden Rohrleitung. Zur Verbesserung der Strömungsbedingungen im Zuflussbereich des Einlaufbeckens wird dieses durch ein gerades offenes Gerinne ersetzt.

(4) Einlaufbecken

Am Einlaufbecken sind eine Vielzahl an Maßnahmen geplant, um die Absetzkapazität des vorgegebenen Grenzkorndurchmessers von 0,25 mm einzuhalten und die Wasserverluste zu reduzieren. In Abbildung 5.21 sind der Ist- und Soll-Zustand des Einlaufbeckens dargestellt.

Wie zuvor beschrieben, wird der Anschluss des Triebwasserkanals in ein zentrisch zuströmendes offenes Gerinne umgestaltet, um einen möglichst geringen Turbulenzeintrag zu erreichen. Der Strahl aus der verkürzten Rohrleitung tritt zunächst in ein Beruhigungsbecken ein. Im Anschluss daran befindet sich ein verengter Querschnitt, welcher durch eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit zu einer Gleichrichtung der Strömung führen soll. Daran schließen die Rampe und das Hauptbecken an. Um das Risiko von Strömungsablösungen zu verringern, wird die Neigung der Rampe von 1:1,215 auf 1:4,2 reduziert. Weiterhin wird die Beckenlänge und somit die Absetzstrecke von 6,65 m auf 10 m (zzgl.

Rampenverlängerung um 2,65 m auf 5 m) deutlich vergrößert. Somit liegt dem Ansatz von Ortmanns (2006) zufolge das Grenzkorn für die neue Beckengeometrie analog zum Sandfang bei 0,25 mm.

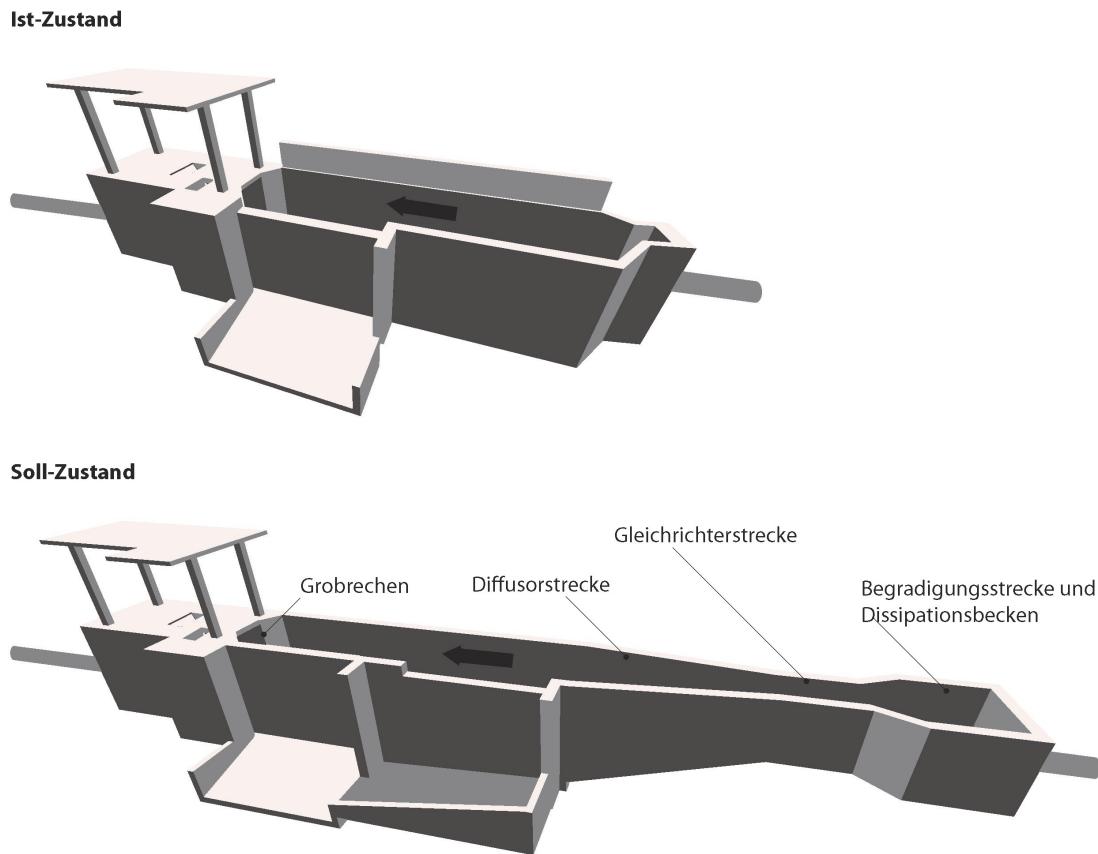


Abbildung 5.21: CAD-Modell des Ist- und Soll-Zustandes des Einlaufbeckens zur Einhaltung des vorgegebenen Grenzkorndurchmessers (0,25 mm)

Um jegliche Störstelle möglichst weit vom Eintritt der Fallleitung fernzuhalten, ist weiterhin eine Verlegung des Streichwehrs entgegen der Strömungsrichtung vorgesehen. Hierdurch wird die Absetzstrecke zwischen Streichwehr und Fallleitung ebenfalls vergrößert, wodurch der Feststoffeintrag in die Rohrleitung weiter verringert werden soll. Der bisherige Überfall wird verschlossen. Zudem wird die Sohlschwelle vor dem Fallleitungseintritt im Hinblick auf den Feststoffrückhalt und die Strömungsführung optimiert. Direkt vor der geplanten Schwelle befindet sich das Spülschütz des Einlaufbeckens, sodass Ablagerungen während der Spülung des Einlaufbeckens automatisch ausgetragen werden. Die Schwelle wird so dimensioniert, dass während der Spülprozesse keine Sedimente oder Feststoffe zum Einlass transportiert werden. Des Weiteren ist ein Feinrechen vorgesehen, um den Eintrag von Feststoffen zu verhindern. Analog zum Sandfang wird auch am Einlaufbecken durch den Austausch des Spülschütztes eine Verringerung der Wasserverluste erzielt.

(5) Fallleitung

Aufgrund des guten technischen Zustands ist die einzige bauliche Maßnahme, welche die Fallleitung betrifft, der Anschluss eines Bypasses. Hierdurch soll das Triebwasser zum neu-

en Fördersystem geleitet werden. Dieser Bypass wird als DN300-Rohrleitung ausgeführt und zweigt unmittelbar vor dem Verschwinden der Fallleitung im Untergrund oberhalb des bestehenden Krafthauses ab.

5.6 Maßnahmen zur Vermeidung von Feststoffeintrag

5.6.1 Maschinenspezifische Grenzwerte

Beim Einsatz des Wasserfördermoduls sind maschinenseitige Grenzwerte bezüglich des Korndurchmessers und der Schwebstoffkonzentration einzuhalten. Ein zu hoher hydraulischer Feststofftransport hat erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer der Maschinen (z.B. Unwuchten und Abplatzungen innerhalb der Maschinen). Die Auswirkungen der Feststoffe auf das Verhalten der Anlagenkennlinie, der Förderhöhe und der Wirkungsgrade der Maschinen ist nur schwer vorhersehbar. Lediglich einige Tendenzen lassen sich allgemein angeben:

Im Fliehkräftefeld durchqueren die Feststoffe die Stromlinien der Wasserströmung und stoßen und reiben sich an den Wänden der Strömungskanäle. Dadurch wird in Abhängigkeit von dem Teilchendurchmesser d_B , der Konzentration c_T und der Feststoffdichte ρ_S sowie der spezifischen Drehzahl n_q die im Laufrad erzeugte Förderhöhe H_P um das Maß ΔH_P vermindert. Da die gemittelte Dichte des Feststoff-Wassergemisches ρ_m nicht konstant bleibt, ist es nötig, die Kennlinie nicht als Förderhöhe H_P , sondern als Förderdruck Δp über dem Förderstrom Q darzustellen. Der Förderdruck Δp ist hierbei das Produkt aus der Dichte ρ_m und der verminderten Förderhöhe ($H_P - \Delta H_P$). Zwar werden bei Einflüsse durch die Feststofffracht verursacht, die Tendenzen sind jedoch gegenläufig. Während die Dichte den Druck erhöht, senkt die Förderhöhenminderung diesen wieder. Somit begünstigen schwere feinkörnige Feststoffe (z.B. Erz) eine Anhebung und grobe, leichte Feststoffe (z.B. Kohle) und kleinere spezifische Drehzahlen eher eine Absenkung der Pumpenkennlinie. (KSB, 2005)

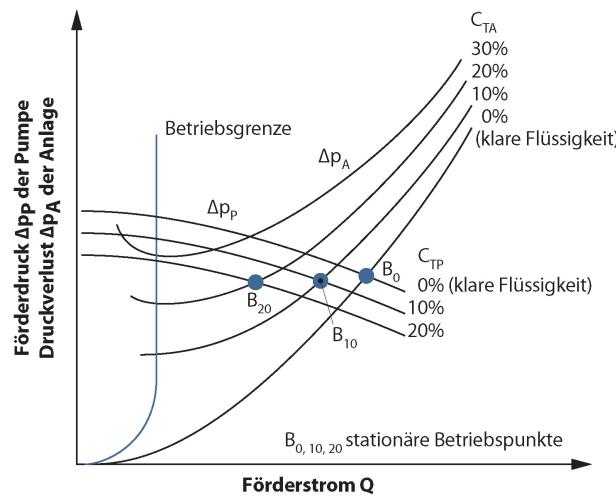


Abbildung 5.22: Förderdruck der Pumpe Δp_P und Druckverlust der Anlage Δp_A bei unterschiedlichem Feststoffgehalt des Förderstroms Q nach KSB (2005)

Das typische Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe beim hydraulischen Feststofftransport durch eine horizontale Rohrleitung ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Die ungewöhnliche Form der Anlagenkennlinie mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich durch das Ansammeln von abgesunkenen Feststoffteilchen an der unteren Rohrwand. Trotz sinkender Förderströme erhöhen sich die Strömungswiderstände, da einerseits die Reibungswiderstände steigen und sich anderseits der noch freie Querschnitt vermindert. Da die ungewöhnliche Form der Kennlinien ein Indiz für die beginnende Ablagerung der Rohrleitung ist, wird es allgemein als untere Betriebsgrenze angesehen. Der Schnittpunkt der Anlagenkennlinie und der Pumpenkennlinie verschiebt sich mit steigender Konzentration immer mehr zu kleineren Förderströmen, bis der Betriebspunkt schließlich unter die Betriebsgrenzen fällt. (KSB, 2005)

5.6.2 Erhebung von Naturdaten

Um Maßnahmen zur Erhöhung der Rückhaltekapazität planen, beurteilen bzw. durchführen zu können, sind Daten zur Feststofffracht in Abhängigkeit des Abflussregimes unerlässlich. Für die Beprobung der suspendierten Partikel kommen nach der DIN 38402-24 verschiedene Verfahren zum Einsatz (Filtration, Sedimentation und Zentrifugation). Die Zentrifugation mittels Durchlaufzentrifugen stellt zwar das optimale Verfahren dar (Abscheiderate > 90 %), durch die hohen Kosten und die Notwendigkeit einer externen Stromversorgung ist dieses Verfahren für extrem entlegene, ländliche Regionen jedoch ungeeignet. Daher wurden durch das Institut für Angewandte Geowissenschaften, Abteilung Aquatische Geochemie (AGW-AqG) des KIT verschiedene, an die Gegebenheiten in der Modellregion angepasste Methoden getestet und miteinander verglichen. Für die Filtration wurden ein Cellulose-Acetat-Filter („Membran-Spritzen Methode“) und ein handelsüblicher Kaffeefilter („Kaffeefilter Methode“) eingesetzt. Bei der Membran-Spritzen Methode wird ein definiertes Volumen des zu untersuchenden Triebwassers mit einer Spritze durch eine unter klimatischen Bedingungen eingewogene Zellulose-Acetat-Membran (Maschenweite 500 µm) gepresst. Die Membran wird im Anschluss unter den gleichen klimatischen Bedingungen eingewogen wie zu Beginn. Durch die Gewichtsdifferenz der Membran wird die Feststofffracht je beprobtes Volumen bestimmt. Bei der Kaffeefilter-Methode wird ebenfalls ein definiertes Probevolumen durch einen unter den o.g. Laborbedingungen eingewogenen handelsüblichen Kaffeefilter gefiltert. Die Gewichtsdifferenz nach bzw. vor der Beprobung ergibt die Feststofffracht je beprobtes Volumen. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Kaffeefilter und Membran-Spritzen Methode gut miteinander korrelieren. Zusätzlich wurde eine neuartige Methode mit Verwendung der lokal verfügbaren Komponenten entwickelt, bei der die Abfiltration der suspendierten Partikel passiv durch in den Fließquerschnitt installierten Siebgazen erzielt wird. Der Vergleich der Methoden zeigt, dass die Filtration mit einem Cellulose-Acetat-Filter und einem handelsüblichen Kaffeefilter eine praktische, unkomplizierte und schnelle Lösung darstellt. Die Ermittlung der Korngrößen erfolgte mittels Lichtmikroskop (für Filterspritzen) sowie Siebung und Lasergranulometrie (für Siebgazen). Die Härte der Partikel wurde durch Röntgendiffraktometrie (XRD) ermittelt und mithilfe von energie- und wellenlängendifpersiver Röntgenfluoreszenz (ED-RFA; WD-RFA) die Elementzusammensetzung der Partikel analysiert. (Nestmann u. a., 2017)

Der maschinenspezifische Grenzwert für die Feststofffracht liegt für die Multitec-Baureihe bei 20 mg/l. In Zusammenarbeit mit dem AGW-AqG wurde die Feststofffracht mittels Kaffeefilter und Membran-Spritzen Methode im Gebirgsfluss Seo Ho sowie im Sandfang und Einlaufbecken ermittelt. Die Ergebnisse, zusammen mit den Abflussmessdaten, sind in Abbildung 5.23 dargestellt.

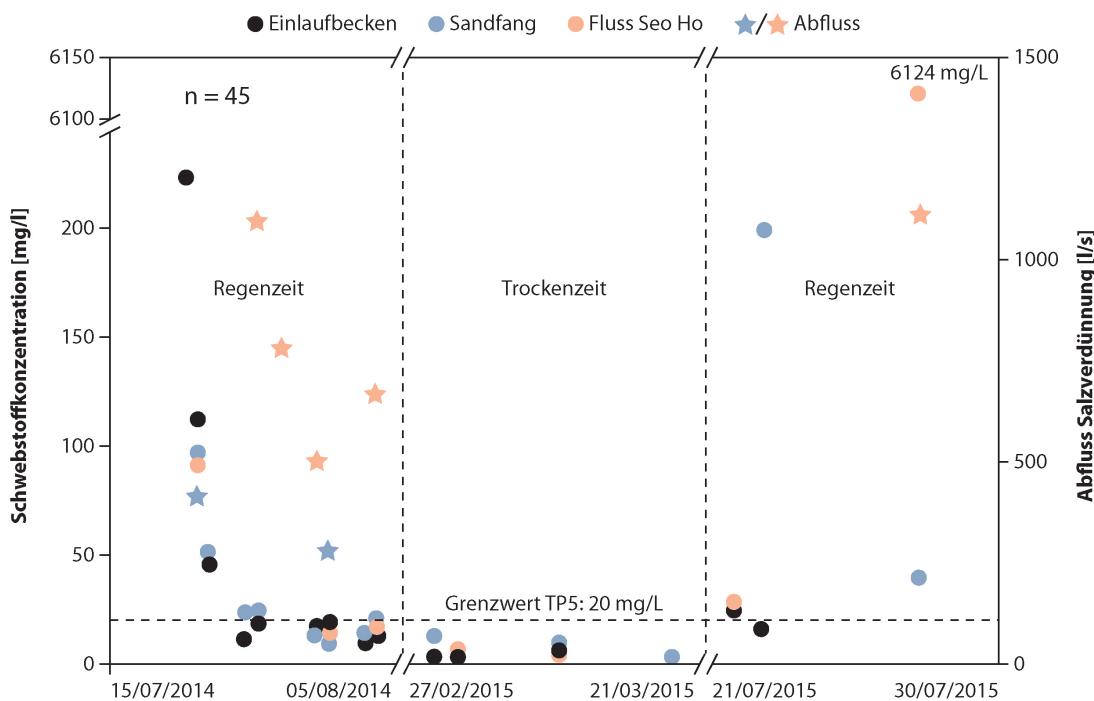


Abbildung 5.23: Feststofffracht und Abflüsse im Einlaufbecken und Sandfang sowie im Seo Ho Fluss während der Regenzeit 2014 und der Trockenzeit 2015 nach Nestmann u. a. (2017)

Die Feststofffracht variiert stark zwischen der Regenzeit und der Trockenzeit. In der Regenzeit kam es - mit zeitlichem Versatz - nach Niederschlagsereignissen immer wieder zu einer starken Trübung des Flusses und den Entsandungsbecken. Der festgelegte Grenzwert für die Feststofffracht von 20 mg/l wurde im Sandfang und im Einlaufbecken deutlich überschritten (Spitzenwerte von über 200 mg/l). Insbesondere am 17. und 18. Juli 2014 konnte eine Überschreitung der Feststofffracht im Einlaufbecken aufgrund eines Taifunereignisses, wenige Tage zuvor mit heftigen und anhaltenden Niederschlägen, beobachtet werden. Während der niederschlagsfreien Periode lag die Feststofffracht im Mittel bei etwa 10 mg/l. Der vorgegebene Grenzwert wurde während dieser Zeit nicht überschritten. (Nestmann u. a., 2017)

Die mineralogischen und geochemischen Analysen im Zuge der Messkampagnen durch das AGW-AqG ergaben, dass der Großteil der Partikel aus Quarz besteht. Weitere Vertreter sind die Mineralgruppen Glimmer, Tonminerale, Feldspäten und Calcit. Insbesondere die Quarzbestandteile stellen aufgrund ihrer Härte ein erhöhtes Hydroabrasionspotential dar. Aber auch Tonminerale mit geringer Härte wirken sich nachteilig auf u.a. Dichtungen aus und müssen bei der Bewertung technischer Aspekte berücksichtigt werden. Bei besonders

starken Abfluss- und Niederschlagsereignissen kam es zu einem Anstieg von Quarz, Aluminosilikate und Tonminerale. Als Haupterosionsstellen wurden anhand der Geochemie der Partikel das Ma Le Tal sowie das unterirdische Höhlensystem - welches das Ma Le Tal und das Seo Ho Tal verbindet - identifiziert. Hierbei wurden bei extremen Niederschlägen resp. Abflussspitzen bereits abgetauchte Pakete des Wasser-Schwebstoffgemisches im Höhlensystem remobilisiert. (Nestmann u. a., 2017)

5.6.3 Bauwerksseitige Vorkehrungen

Hinsichtlich der Wasserentnahme aus einem natürlichen Fließgewässer ist ein zusätzlicher Schutz des Wasserförderersystems vor dem Eintrag von mitgeführten Feststoffen erforderlich. Eine Steigerung der Rückhaltekapazität kann z.B. durch Gleichrichterelemente oder durch Unterteilung des Beckens in mehrere Kammern erzielt werden. Durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen (z.B. Nutzung eines horizontalen Filterrohrs am Einlass der Fallleitung oder Überdachung des Einlaufbeckens) kann mit vergleichsweise geringem infrastrukturellem Aufwand der Eintrag von Feststoffen aufgrund z.B. anthropogener Einflüsse vermieden werden. Für die Abhaltung des Treibguts können neben der Optimierung der Rechen z.B. Tauchwände, Schwimmbalken oder Kombinationen in Betracht gezogen werden.

An der Deomonstrationsanlage sind folgende Maßnahmen zur Reduktion des Feststoffeintrages geplant:

- 1) Einbauten zur Reduktion des Impulseintrages im Einlaufbecken
- 2) Filterrohr zur Reduzierung von Feststoffeintrag
- 3) Schwimmbalken zur Abführung von Treibgut

Zu 1): Zur Reduktion des Impulseintrages resp. zur Erhöhung der Absetzkapazität wurde die Strömungssituation im bestehenden Einlaufbecken im Ist-Zustand untersucht. Die Probenahme der Feststofffracht fand an der Wasseroberfläche und auf Achshöhe der Fallleitung bei Messprofil (MP) 2 statt. Die Positionen der Prallwände und der Messprofile sind in Abbildung 5.24 veranschaulicht.

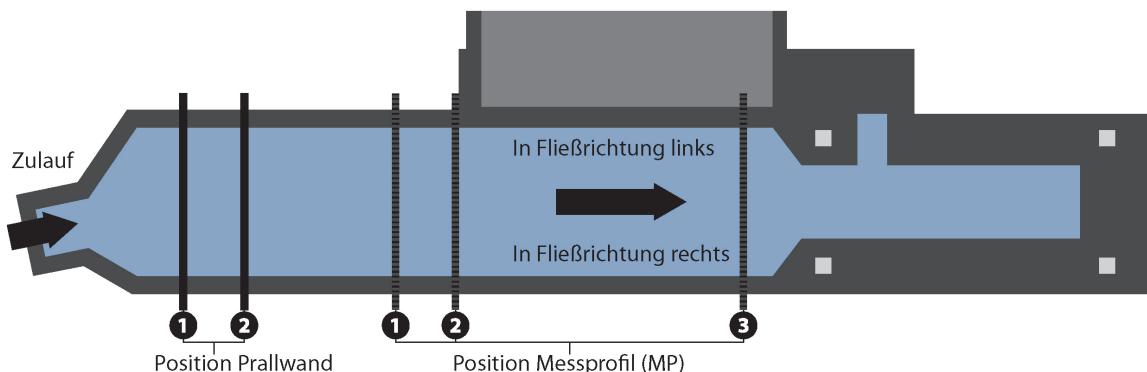


Abbildung 5.24: Darstellung des Messprofils zur Bewertung der Strömungssituation im Einlaufbecken (Ist-Zustand)

In Abbildung 5.25 ist die vertikale Verteilung der Fließgeschwindigkeit an drei einzelnen Messprofilen MP1, MP2 und MP3 ohne und mit Prallwand dargestellt. Die Fließgeschwindigkeit wurde bei einem Abfluss von 280 l/s mit dem Ultraschall-Doppler-Verfahren (AD-CP) gemessen. Die blauen Farben stellen Strömungen in Fließrichtung dar; die grauen Farben stehen für Rückströmungen.

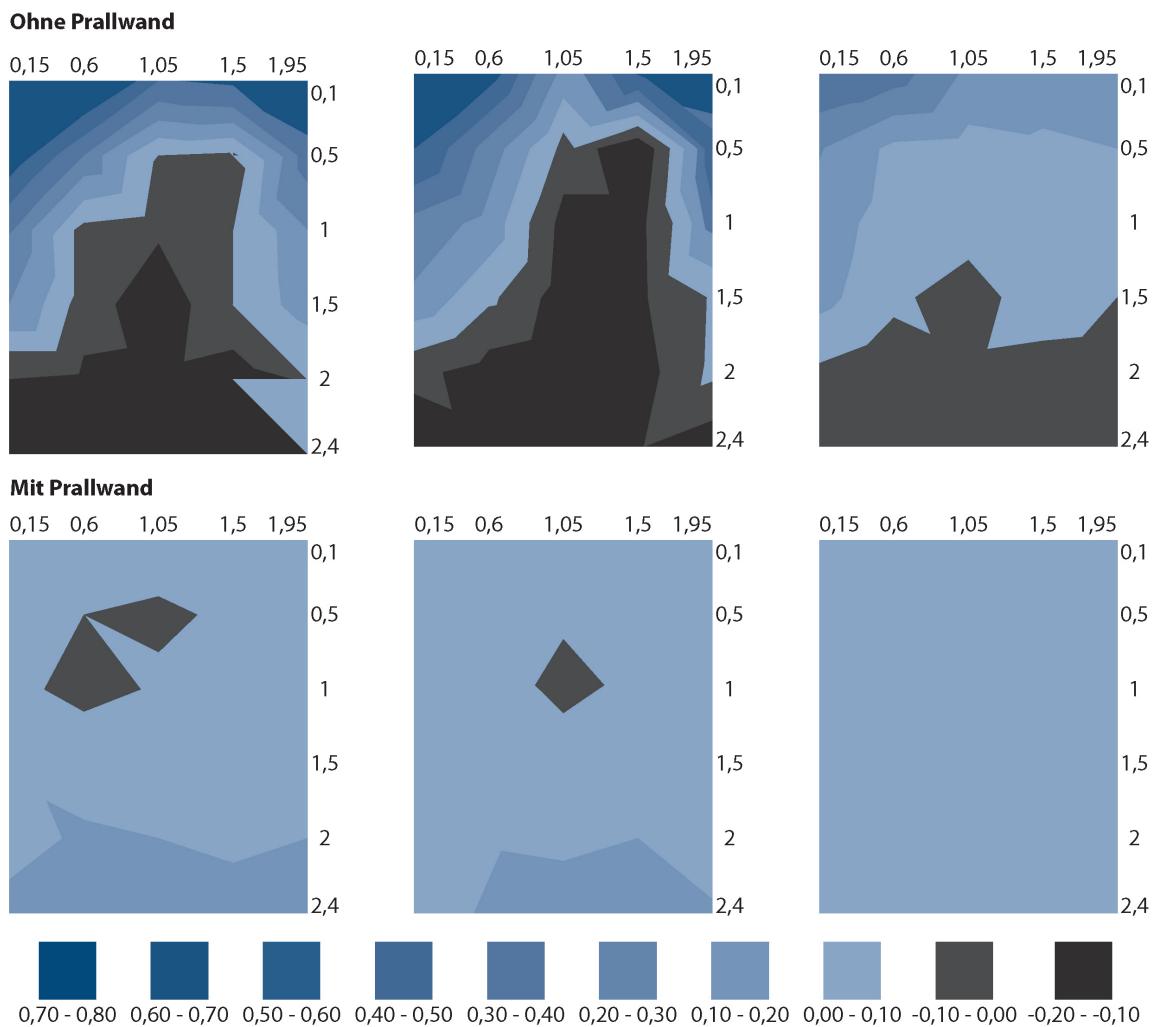


Abbildung 5.25: Geschwindigkeitsprofil über die Tiefe und Breite bei einem Abfluss von 280 l/s ohne Prallwand (oben) und mit Prallwand an Position 1 (Eintauchtiefe: 0,75 m) (unten)

Bei den Geschwindigkeitsprofilen ohne Prallwand ist zwar von MP1 zu MP3 eine Vergleichsmäßigung mit einer Reduktion der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von 0,8 m/s auf 0,38 m/s zu erkennen; es sind jedoch auch an allen Profilen Rückströmungen im Sohlbereich vorhanden. Die Feststofffracht betrug an der Wasseroberfläche 58,9 mg/l und auf Achshöhe der Fallleitung 69,9 mg/l.

Die Prallwand wurde an den Positionen 1 und 2 mit unterschiedlichen Einbautiefen eingesetzt. Der eingetragene Strömungsimpuls trifft dabei auf die Prallwand und Energie wird dissipiert. Durch die Einbautiefe resp. Unterkante der Prallwand ergibt sich eine

Zwangslinie mit konstanter horizontaler Höhe für das weiterfließende Wasser, wodurch die Strömung eine deutliche Beruhigung resp. Vergleichmäßigung erfährt.

Bei den Strömungsbildern mit Prallwand an Position 1 (Eintauchtiefe: 0,75 m) liegen die maximalen Fließgeschwindigkeiten bei 0,14 m/s (MP1) bzw. 0,05 m/s (MP3); Rückströmungen wurden nur sehr lokal bei den Profilen MP1 und MP2 ermittelt und betragen maximal -0,03 m/s. Die ermittelte Feststofffracht an der Wasseroberfläche bzw. auf Achshöhe der Fallleitung betrug 48,1 mg/l bzw. 52,2 mg/l; die Absetzkapazität konnte um 18,3 % bzw. 25,3 % erhöht werden.

Die Umsetzung der Gleichrichterelemente ist in Form von Lamellen geplant. Durch den Einsatz einer Lamellenwand aus zwei senkrechten, dicht hintereinander liegenden Ebenen kann die Lage der Lamellen nach Ertüchtigung des Einlaufbeckens (siehe Abschnitt 5.5) durch Versuche vor Ort genau auf die vorherrschende Strömungssituation abgestimmt werden. Durch Querverbindungen können die Lamellen in jeder Ebene gehalten und mit Klemm-Verschraubungen fixiert werden.

Zu 2): Die Installation eines Filterrohrs am Einlass der Fallleitung stellt eine zusätzliche Sicherheitsmaßnahme zur Verhinderung eines Feststoffeintrages dar. Hierdurch kann vermieden werden, dass Abplatzungen an der Betonoberfläche des Einlaufbeckens selbst oder aber Feststoffe während Mess-, Kalibrier- oder Wartungsarbeiten am Einlaufbecken in die Fallleitung eingetragen werden. Insbesondere die geplanten Sensoren des Monitoring- und Alarmsystems im Einlaufbereich der Fallleitung stellen ein erhöhtes Risiko dar.

In der Regel werden Filterrohre im Brunnenbau genutzt und bestehen aus beständigen PVC-Rohrstücken, die radial mit Schlitzen einer bestimmten Schlitzweite (SW) versehen sind (zwischen 0,2 – 5,0 mm). Die Anordnung der Slitze ist dabei normativ festgelegt. Filterrohre werden während des Brunnenbaus in das Erdreich eingetragen und sorgen für einen Rückhalt der Bodenmatrix bei gleichzeitiger Durchlässigkeit für das Grundwasser. Bei besonderen Ansprüchen der Bodenzusammensetzung oder bei größeren äußeren Kräften durch z.B. Erddruck, können auch Filterrohre aus nichtrostendem Stahl (Wickeldrahtfilter) verwendet werden. Aufgrund der höheren Festigkeit des Stahls kann hier auch eine sehr viel größere Durchlässigkeit des Filters erreicht werden. Ein solcher Wickeldrahtfilter wurde für den Einsatz im Einlaufbecken gewählt.

Die Ergiebigkeit des Wasserleiters vorausgesetzt, geht man bei der Filterdimensionierung von einer mittleren Eintrittsgeschwindigkeit des zu fördernden Wassers von 3 cm/s aus. Basierend auf dieser Randbedingung kann das Fassungsvermögen von Filterrohren in Abhängigkeit von Spaltweite und Rohrdurchmesser bestimmt werden. Da die Anordnung der Spalte normativ geregelt ist, ergeben sich für Filterrohre unterschiedlicher Hersteller identische Fassungsvermögen. Aus hydraulischer Sicht ergibt sich das Fassungsvermögen aus der Eintrittsgeschwindigkeit, der offenen Eintrittsfläche und den Energieverlusten an den Öffnungen.

Entsprechend der Nutzung des Filterrohrs als Einlaufstruktur unter Wasser ergeben sich jedoch andere Eintrittsgeschwindigkeiten, sodass das Filterrohr nicht entsprechend eines normalen Brunnenrohres dimensioniert werden kann. Um das Fassungsvermögen des Filters in einem solchen Fall zu bestimmen, war es daher notwendig die hydraulischen Eigenschaften von Filterrohren in einem experimentellen Modellversuch zu ermitteln. Hierfür wurden drei Filterrohre mit einem Nenndurchmesser DN150, einer Länge von 1 m und

Spaltweiten von SW = 0,3 mm, SW = 1,5 mm und SW = 3,0 mm untersucht. Abbildung 5.26 zeigt den Versuchsstand mit einem Filterrohr mit Spaltweite SW = 0,3 mm.



Abbildung 5.26: Modellversuch zur Bestimmung des Fassungsvermögens von Filterrohren im eingetauchten Zustand

Die Filterrohre wurden hierfür in einen Behälter eingebaut und der Auslass des Filterrohrs durch die Behälterwandung geführt. Anschließend wurde der Behälter mit Wasser gefüllt. Wasser fließt dann durch die Spalte des Filterrohrs in das Rohr und wird über den Auslass ausgetragen. Diese Situation entspricht also dem untergetauchten Filterrohr im Einlaufbecken, das Wasser in die Fallleitung einträgt. Der Zufluss in den Behälter wurde dann soweit erhöht, bis sich ein stationärer Fließzustand mit konstantem Wasserspiegel oberhalb des Filterrohrs einstellt. Der Zufluss in diesem Zustand entspricht dann dem Fassungsvermögen des Filterrohrs. Die Ergebnisse des Modellversuchs mit PVC-Filterrohren sind in Tabelle 5.9 dargestellt.

Tabelle 5.9: Ergebnisse des Modellversuchs mit PVC-Filterrohren DN150 und verschiedenen Spaltweiten

DN Spaltweite	VF normativ [l/s]	FV real [l/s]	Faktor [-]
DN150 SW = 0,3 mm	0,75	6,9	9,2
DN150 SW = 1,5 mm	1,24	12,5	10,1
DN150 SW = 3,0 mm	1,75	-	-

Für eine Spaltweite von SW = 0,3 mm ergab sich ein reales Fassungsvermögen von 6,9 l/s gegenüber einem normativen Fassungsvermögen (FV) von 0,75 l/s. Für eine Spaltweite von SW = 1,5 mm ergab sich ein reales Fassungsvermögen von 12,5 l/s gegenüber einem normativen Fassungsvermögen von 1,24 l/s. Für eine Spaltweite von SW = 3,0 mm konnte kein Fassungsvermögen ermittelt werden, da bei den geringen Wasserständen im Versuch die Durchflussskontrolle hier nicht über die Spaltweiten sondern über den Auslass selbst bestimmt wurde. Gegenüber den normativen Werten ergaben sich Faktoren zwischen 9,2 und 10,1.

Bei einer konstanten Eintrittsgeschwindigkeit ergibt sich das normative Fassungsvermögen verschiedener Filterrohre nur aufgrund der unterschiedlichen offenen Eintrittsflächen und

der Einlaufverluste. Selbiges wirkt sich auch auf das Fassungsvermögen bei einer Nutzung des Filterrohrs unter Wasser aus. Näherungsweise wurden daher die ermittelten Faktoren zur Dimensionierung des Filterrohrs im Einlaufbecken verwendet. Eine Übersicht der Umsetzung des Filterrohrs ist in Abbildung 5.27 gegeben.

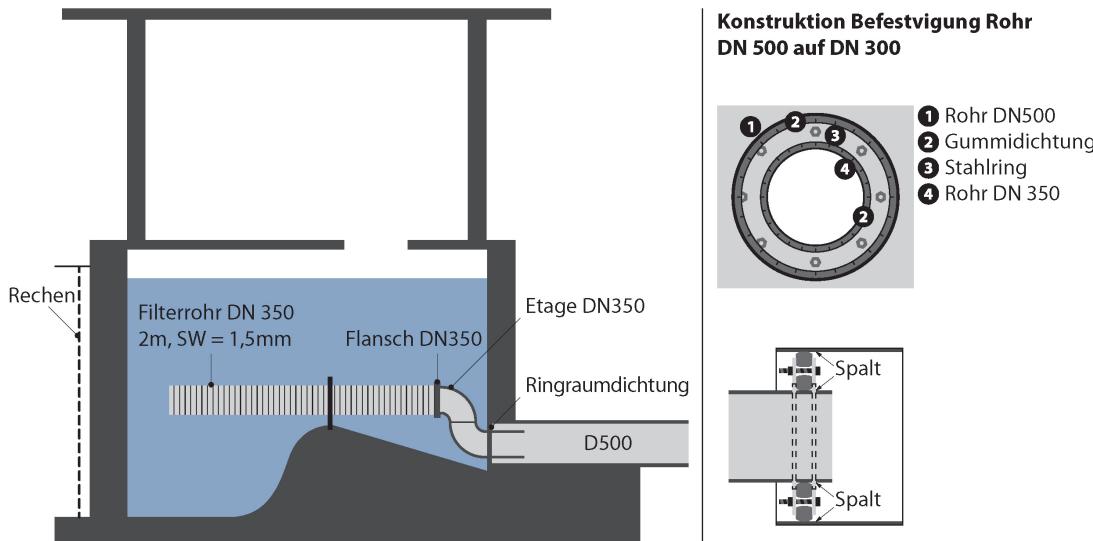


Abbildung 5.27: Vorentwurfsplanung des Filterrohrs in DN350 (Länge: 2 m, Schlitzweite: 1,5 mm) mit Etage; Befestigung der Etage durch eine Ringraumdichtung

Aufgrund der Festlegung einer künftigen Priorisierung der Wasserförderung durch die vietnamesischen Behörden (EVN, CERWASS und HGPC), wird ein Filterrohr in DN350 mit einer Spaltweite von $SW = 1,5$ mm gewählt. Normativ ergibt sich hier ein Fassungsvermögen von 12,2 l/s und pro laufendem Meter Filterrohr. Mit einer Faktorisierung von 10,1 kann für das Filterrohr mit 2 m Gesamtlänge also ein reales Fassungsvermögen von 250 l/s ermittelt werden. Ein Betrieb der Fördermodule im Parallelbetrieb mit einem Gesamtwasserbedarf von ca. 110 l/s sowie eine umfassende Spülung der Fallleitung ist hierdurch uneingeschränkt möglich. Aufgrund der Form der Schwelle wird das Filterrohr über eine Etage DN350, bestehend aus zwei 90°-Bögen, in die Fallleitung eingeführt. Die Befestigung und Abdichtung der Etage wird durch eine Ringraumdichtung umgesetzt. Diese befindet sich zwischen der Fallleitung DN500 und der Etage DN350. Durch eine Druck-Verpressung mittels Verschraubung dehnt sich die Ringraumdichtung radial aus und dichtet gegen die Innenseite der Fallleitung und die Außenseite der Etage ab. Das Filterrohr selbst wird durch Rohrschellen und Betonanker weiter stabilisiert.

Zu 3): Aufgrund der Wasserentnahme aus einem natürlichen Fließgewässer und der Lage der hydraulischen Infrastruktur inmitten der Natur, kann ein Eintrag von Treibgut, insbesondere von Blättern und Geäst, nicht verhindert werden. Zudem werden Teile der hydraulischen Infrastruktur und der gesamte Flussabschnitt vor der Wehranlage von der lokalen Bevölkerung genutzt, sodass auch ein anthropogener Eintrag von Geschwemmseln, wie z.B. Tüten oder Plastikteile, nicht ausgeschlossen werden kann. Ein Eintrag dieser Objekte in die Fördermodule muss ebenfalls verhindert werden, um eine Verstopfung oder Beschädigung der Anlage zu vermeiden. Daher wird entsprechend Abbildung 5.28 ein Balken installiert, der Treibgut über das Wehr des Einlaufbeckens abführt. Der Balken wird

in einem Winkel von ca. 30° angebracht. Entgegen einer üblicherweise Verwendung befinden sich Schwimmbalkens, schwimmt dieser Balken nicht auf der Wasserspiegeloberfläche, da Treibgut nur über das Seitenwehr abgeführt werden kann. Befindet sich der Wasserspiegel unterhalb des Seitenwehrs und damit auch unterhalb des Balkens, wird die Förderanlage durch das Monitoring- und Alarmsystem automatisch gestoppt, sodass kein Treibgut in das Leitungssystem eingetragen werden kann.

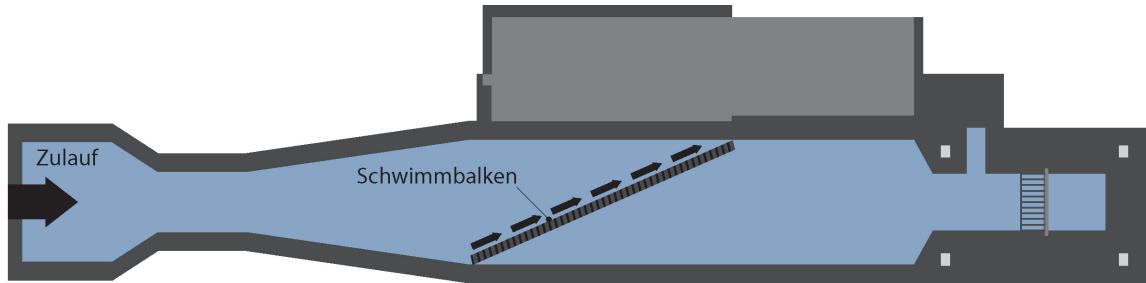


Abbildung 5.28: Darstellung des Schwimmbalkens im Einlaufbecken zur Abhaltung von Treibgut

5.6.4 Kontinuierliche Überwachung der Feststofffracht

Die Ergebnisse aus Abschnitt 5.6.2 ergaben, dass der Grenzwert von 20 mg/l die meiste Zeit eingehalten werden kann. Um dennoch kurzzeitige Abschaltungen bei Grenzwertüberschreitungen in der Regenzeit zu ermöglichen, muss die Feststofffracht kontinuierlich überwacht werden. Da eine direkte Probenahme zur kontinuierlichen Erfassung des Feststofftransportes nicht möglich ist, werden indirekte Verfahren genutzt. Verschiedene Untersuchungen, wie u.a. Spreafico u. a. (2005) belegen, dass die Feststofffracht mit der Trübung im Gewässer deutlich besser korreliert als mit dem Durchfluss oder dem Wasserstand. Dabei ist die Trübungssonde mit einem Reinigungssystem auszustatten, um eine Verfälschung der Daten aufgrund von Verschmutzungen zu vermeiden. Weiterhin sind ein ausreichend genauer Messbereich, geringe Messunsicherheiten sowie eine sehr gute Reproduzierbarkeit im gesamten Messbereich entscheidend. Nach Hillebrand (2008) eignet sich das Verfahren der 90°-Seitwärtsstreuung sehr gut für niedrige bis mittlere Trübungswerte. Eine Leuchtdiode sendet einen gebündelten Lichtstrahl aus, der durch die im Fluid vorhandenen Partikel gestreut wird. Der im 90°-Winkel zum Lichtstrahl angeordnete Detektor erfasst das so entstehende Streulicht. Je mehr Partikel im Wasser sind, desto höher ist die Streuung und somit auch der Trübungswert. Nimmt die Konzentration zu, beeinflussen sich die Partikel gegenseitig. Nicht jedes Teilchen wird durch deren größere Zahl von der Lichtquelle erreicht bzw. die Streustrahlung erreicht den Detektor nicht, so dass falsche Messwerte ermittelt werden. Kleine Korngrößen verursachen bei vergleichsweise kleiner Masse einen hohen Trübungswert, während größere Körner aufgrund der kleineren spezifischen Oberfläche relativ geringe Trübungen hervorrufen. Da die Sondenaufzeichnung von der Feststofffracht, der Größe und der Form der im Triebwasser vorhandenen Partikel beeinflusst wird, muss die Feststofffracht anhand von Sedimentproben in sondennähe kalibriert werden. Um einen wirtschaftlichen Betrieb des Wasserförderersystems sicherzustellen, sind zudem Trübe-Verlauf, -Intensität und -Dauer von Bedeutung.

Zur Überwachung der Feststofffracht an der Demonstrationsanlage wurde eine Trübungsponde unmittelbar vor Eintritt in die Fallleitung installiert. Im Zuge einer Messkampagne durch das AGW-AqG wurden die Trübungswerte sowie die Feststofffracht durch Sedimentproben erfasst. Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst:

Die Kalibriergeraden mit Berücksichtigung der Proben < 200 NTU (Bereich 1) und < 50 NTU (Bereich 2) sind in Abbildung 5.29 dargestellt. Der Regressionskoeffizient R verschlechtert sich von $R = 0,96$ (Bereich 1) auf $R = 0,80$ (Bereich 2). Eine Feststofffracht von 19 - 21 mg/l ergaben NTU-Werte zwischen 26 - 33 NTU.

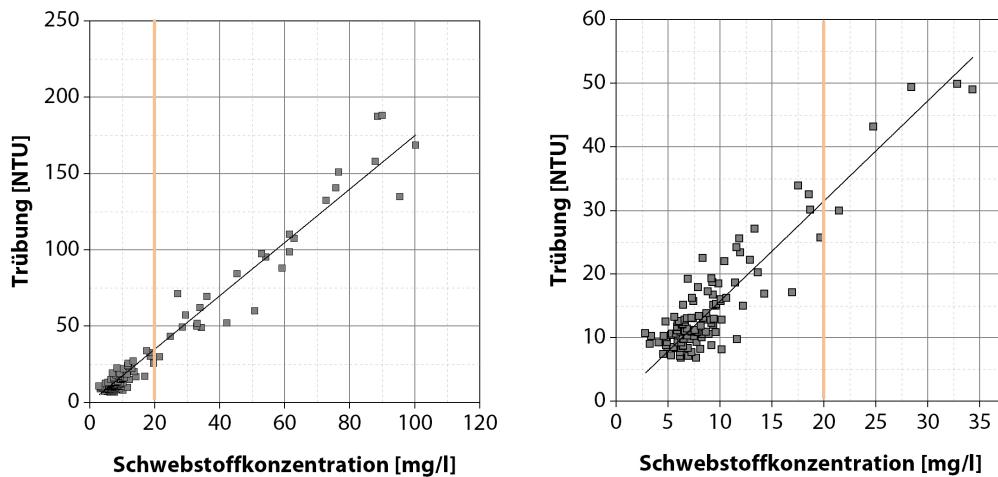


Abbildung 5.29: Zusammenhang der Sondenaufzeichnung und der Kalibrierproben für den Bereich unterhalb von 200 NTU und unterhalb von 50 NTU auf Basis der Messkampagne des AGW-AqG

Die Analyse der Grenzwertüberschreitungen hat gezeigt, dass die Auswahl des Kalibrierung einen entscheidenden Einfluss auf die Abschaltzeit der Anlage hat, welche bei 33 NTU im Vergleich zu 26 NTU um ca. 26 % geringer ausfällt. Da die Überschreitungen bei 33 NTU ca. 53 % aus Einzelwerten bestand, ist eine Abschaltung der Anlage erst nach der Erfassung von drei NTU-Werte sinnvoll. Weiterhin wird für die Umrechnung die Kalibriergerade der Bereich 1 (Proben < 200 NTU) herangezogen, um auch in niederschlagsfreien Perioden einen wirtschaftlichen Betrieb aufrechterhalten zu können. Während dieser Zeit lag die Feststofffracht im Mittel bei etwa 10 mg/l, wobei durch Aktivitäten im Fluss ein Anstieg der Feststofffracht beobachtet werden konnte. Als äquivalenter Grenzwert wird demnach ein NTU-Wert von 30 eingestellt.

Bei auftretenden starken Abfluss- oder Niederschlagsereignissen und zeitlich verzögertem Einsetzen der Trübe konnte bei einem Großteil der Ereignisse in der Modellregion ein parabelförmiger Verlauf mit sehr schnellem An- und Abstieg beobachtet werden. Im Zuge der Messkampagne durch das AGW-AqG (Betrachtungszeitraum 22.06.19 - 21.07.19) wurde ein durchschnittlicher Trübungswert (ohne Trübungssereignisse) von etwa 18 NTU mit einer Standardabweichung von 15,5 NTU ermittelt. Der Verlauf einiger Trübungssereignisse während dieser Zeit sind beispielhaft in Abbildung 5.30 dargestellt.

Die Grundtrübung von ca. 18 NTU ist als gestrichelte Linie erkennbar. Bei den starken Trübungssereignissen T1 und T2 steigt die Trübe sehr schnell auf Maximalwerte von

1.879 NTU und 2.060 NTU. Die Dauer der Trübungsereignisse betrug für T1 ca. 17 Stunden und für T2 ca. 12 Stunden. Die Trübungsanstiege von T1 und T2 wurden durch Niederschlagsmengen von 26,4 und 31,2 mm/h ausgelöst. Der Abfall der Trübe verläuft weniger identisch zum schellen Anstieg mit einer deutlich flacheren Kurve, weshalb der Ausgangswert deutlich später erreicht wird. Der Trübe-Verlauf von T3 und T4 mit geringen Maximalwerten von 221 NTU und 217 NTU zeigt ebenfalls einen sehr schnellen Anstieg der NTU-Werte. Ausgehend vom Grundwert wurde bei den Ereignissen T3 und T4 innerhalb von 10 min und 15 min die maximale Trübe erreicht. Die bisher gemachten Erfahrungen zeigen, dass die Trübungswerte innerhalb kürzester Zeit Maximalwerte erreichen können. Somit wird ein Messintervall von zwei Minuten empfohlen, damit nach der Registrierung von drei erhöhten Werten und einem Zeitraum von sechs Minuten eine Notabschaltung erfolgt.

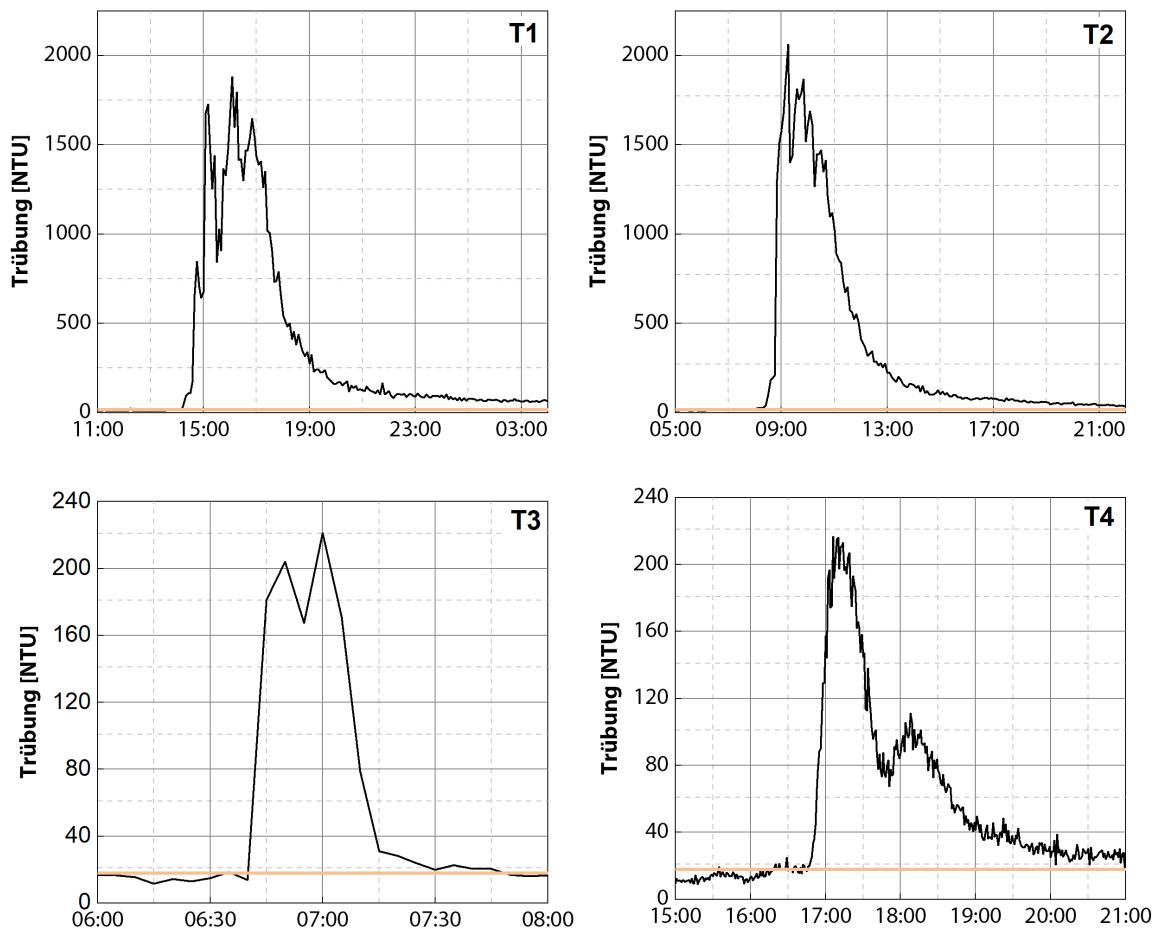


Abbildung 5.30: Sondenaufzeichnung mehrerer Trübungsereignisse im Einlaufbecken der WKA Seo Ho

5.7 Intuitiv bedienbares Monitoring- und Alarmsystem

5.7.1 Übersicht der Betriebsparameter

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Regelungs- und Steuerungskonzept übernimmt die Überwachung der maßgeblichen Betriebsparameter, auf welche im Folgenden näher eingegangen werden:

Statische Fallhöhe:

Eine wesentliche Kenngröße für den effizienten und sicheren Anlagenbetrieb ist die Fallhöhe. Sicherheitsrelevant ist der untere Grenzwert, der eine Mindestüberdeckung des Eintrittsquerschnitts der Fallleitung vorsieht. So sollen ein Lufteintrag in die Fallleitung sowie eine Remobilisierung von Sedimenten durch hohe Schleppspannungen bei geringen Füllständen vermieden werden. Relevant im Hinblick auf die Effizienz des Betriebs ist der obere Grenzwert, da es im Falle einer Überströmung des Streichwehrs zu Wasserverlusten kommt. Da die Variation der Fallhöhe bei Hochdruckanlagen durch die Tiefe des Einlaufbauwerks begrenzt ist, ist der Anlagenbetrieb aufgrund der resultierenden vernachlässigbaren Drehzahländerung nahezu unabhängig von dieser Kenngröße.

Trübung:

Aus Verschleiß- und letztlich Sicherheitsgründen ist die Feststoffbeladung einer Strömungsmaschine begrenzt (siehe Abschnitt 5.6.1). Daher sind Kenntnisse über die Feststofffracht im Triebwasser von entscheidender Bedeutung. Unmittelbar vor Eintritt in die Fallleitung wird die Trübung als Maß für die mitgeführte Feststofffracht erfasst. Durch die Analyse der Feststofffracht in Korrelation mit der Trübungssonde kann der Grenzwert für die Trübung resp. Feststofffracht eingestellt werden (siehe Abschnitt 5.6.4).

Fördermenge:

Dieser Parameter ist von zentraler Bedeutung für die Bewertung des Erfolgs der Anlage. Zudem ist die geförderte Wassermenge essentiell für die geplante Verbesserung der Wasserversorgung in der Modellregion. Ergänzend ermöglicht eine kontinuierliche Aufzeichnung der geförderten Wassermenge eine sukzessive Optimierung der Betriebsstrategie.

Drehzahl:

Aufgrund der selbstständigen Regelung des Wasserfördermoduls stellt sich je nach Betriebspunkt bei Leistungsgleichgewicht eine individuelle Moduldrehzahl ein. Die maximal mögliche Drehzahl resp. die Durchgangsdrehzahl wird an dem Fördermodul als Grenzwert eingestellt, um im Falle eines Lastabwurfs das Betriebspersonal zu alarmieren. Ein Lastabwurf tritt bei Entkopplung von PAT und Förderpumpe bspw. durch Wellenbruch auf und erfordert eine umgehende Abschaltung des betroffenen Moduls. Eine weitere Gefahr besteht bei unsachgemäßem Anfahren des Fördermoduls bei leerer Hochdruck-Förderleitung. Die PAT dreht dann aufgrund fehlendem Gegenmoment frei durch. Die Mindestdrehzahl wird eingestellt, um eine Überschreitung der zulässigen Temperaturgrenzen resp. Schäden

an den Lagersätzen zu vermeiden. Dieser Fall trifft ein, wenn bspw. bei Einsatz eines horizontalen Filterrohrs (siehe Abschnitt 5.6.3) die Leistungskapazität aufgrund mangelnder Wartung zu gering ist, um das Wasser in den Speicherbehälter zu fördern.

Durchflussmenge Falleitung:

Zur Quantifizierung der verfügbaren Wassermengen wird eine kontinuierliche Durchflussmessung an der Falleitung, unmittelbar vor dem abzweigenden Bypass vorgenommen. Kenntnisse bzgl. der Triebwassermenge sind entscheidend im Hinblick auf einen effizienten Betrieb sowie hinsichtlich künftiger Anpassungen der Betriebsstrategie. Um die gesamte, zur Verfügung stehende Wassermenge bestimmen zu können, werden zudem auf Basis der Pegelmessung im Einlaufbecken die Wasserverluste am Streichwehr bestimmt.

5.7.2 Aufbau des Steuerungssystems

Aufgrund des Pilotcharakters und den somit fehlenden Betriebserfahrungen, erfordert die Regelung der Anlage die Bereitstellung zuverlässiger Informationen über den jeweils aktuellen Betriebszustand und dient als essentielles Werkzeug für einen nachhaltigen Anlagenbetrieb. Bei der Entwicklung des komplexen Steuerungssystems sind unter den anspruchsvollen Randbedingungen hohe Anforderungen gegeben. Somit ist beim Aufbau des Steuerungssystems der Bedarf an elektrischer Energie zu berücksichtigen und die entsprechende Versorgung durch bspw. energetisch autarke und/oder netzgespeiste Systeme sicherzustellen. Im Hinblick auf künftige Serviceeinsätze und die Ersatzteilbeschaffung sind verfügbare Standardbauteile sowie Messgeräte international agierender Unternehmen einzusetzen.

Unter Berücksichtigung der soziokulturellen Herausforderungen wird im Folgenden am Beispiel der Demonstrationsanlage ein Steuerungssystem vorgestellt, welches zur Erfassung der wesentlichen Betriebskenngroßen sowie zur sofortigen Meldung von Grenzwertüberschreitungen im Dauerbetrieb eingesetzt werden kann. Eine Übersicht der Anlagensteuerung sowie Positionierung der Messinstrumente ist in Abbildung 5.31 gegeben.

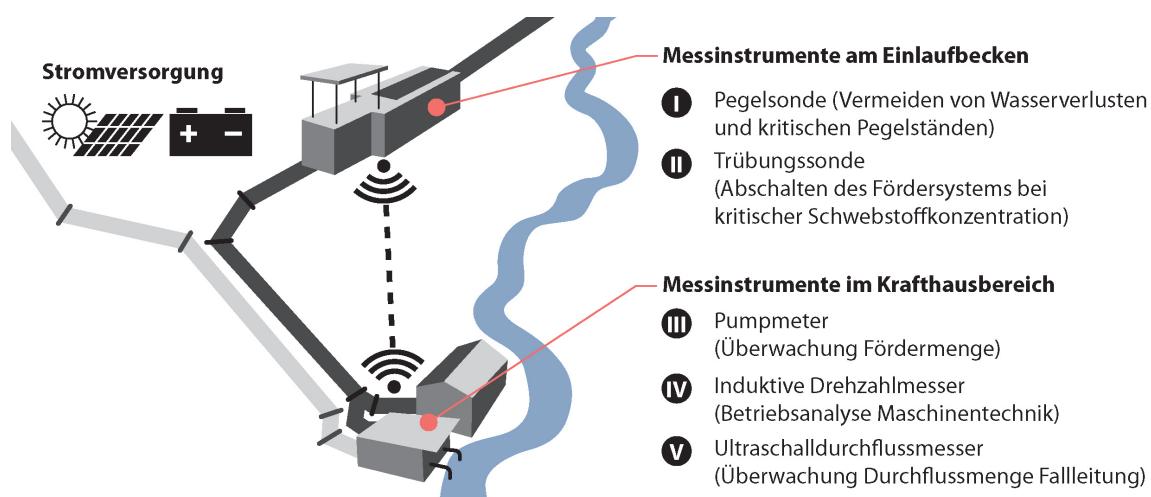


Abbildung 5.31: Übersicht der Anlagensteuerung und Positionierung der Messinstrumente

Am Einlaufbecken, unmittelbar vor Eintritt in die Fallleitung, wird die statische Fallhöhe und die Trübung erfasst. Die Datenübertragung zwischen Einlaufbecken und Krafthaus erfolgt über eine SDI-12 Schnittstelle, ein asynchrones serielles Kommunikationsprotokoll für SDI-12-Sensoren. Das Protokoll folgt einer Master-Slave-Konfiguration, bei der die erfassten Daten am Einlaufbecken durch einen Datenlogger im Maschinenhaus angefordert werden. Die Stromversorgung der elektrotechnischen Ausstattung am Einlaufbecken erfolgt über ein Photovoltaikmodul und Batteriespeicher.

Im Maschinenhaus wird zur Überwachung der Drehzahl ein elektrotechnisches Tachometer an der Kupplung der Fördermodule installiert. Ein Reflexions-Lichttaster misst dabei die Umdrehungen pro Minute. Zudem wird auf der Pumpenseite der Fördermodule ein induktiver Durchflussmesser zur Erfassung der Fördermenge installiert. Dieser besteht aus zwei Drucksensoren und einer Anzeigeeinheit. Er misst kontinuierlich den Saug- und Enddruck und ermittelt den Differenzdruck sowie den Betriebspunkt der Pumpe. Die Durchflussmenge in der Fallleitung, unmittelbar vor dem Abzweig zum Bypass, wird mittels einem Ultraschall-Durchflussmessgerät (UDM) erfasst.

Eine Übersicht der eingesetzten Messinstrumente mit deren Spezifikationen findet sich in der nachfolgenden Tabelle 5.10.

Tabelle 5.10: Übersicht der durch das Monitoring- und Alarmsystem erfassten Betriebsparameter

Messinstrumente am Einlaufbecken

Betriebsparameter	Messwertaufnehmer	Messbereich
(I) statische Fallhöhe	Relativdruckmesssonde Hersteller: Ott Typ: PLS	bis 4 m
(II) Trübung	Trübungssonde Hersteller: Ott Typ: Hydrolab HL4	bis 3.000 NTU

Messinstrumente im Krafthausbereich

Betriebsparameter	Messwertaufnehmer	Messbereich
(III) Fördermenge	Diagnosegerät Hersteller: KSB Typ: PumpMeter	-1 bis 65 bar
(IV) Drehzahl	Induktiver Drehzahlnehmer Hersteller: Baumer Typ: TA202	bis 600.000 min^{-1}
(V) Durchflussmenge Fallleitung	Ultraschalldurchflussmesser Hersteller: SebaKMT Typ: UDM 200	bis 1.000.000 l/min

Die Messwertausgabe als Entscheidungsgrundlage für die Regelung der Anlage erfolgt in einem zentralen Schaltschrank im Maschinenhaus. Die erfassten Messwerte werden in dem Datenlogger im zentralen Schaltschrank gespeichert, konfiguriert bzw. parametriert und über Leuchtdioden und Anzeigetafeln ausgegeben. Über ein individuell konfigurierbares Alarm- und Aktionsmanagement kann der im Schaltschrank integrierte Datenlogger bei Eintritt bestimmter Ereignisse selbstständig einen Alarm generieren und eine oder mehrere Aktionen ausführen. Das Betriebspersonal wird dann umgehend über die Notwendigkeit einer Neueinstellung der Anlage informiert. Hierdurch ist eine flexible Anpassung an die unterschiedlichen Erfordernisse möglich. In festzulegenden Intervallen werden die Daten im Datenlogger ausgewertet, wobei für den Fall von Grenzwertüberschreitungen eine höhere Taktung eingestellt wird. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Betriebsdaten ist zudem eine nachgeschaltete umfassende Betriebsanalyse möglich. Die Energieversorgung der messtechnischen Ausstattung im Maschinenhaus erfolgt netzgebunden. Um betriebliche Störungen aufgrund eines Stromausfalls zu vermeiden, ist eine Notstromversorgung durch Batterien vorgesehen.

Aufgrund der Sensibilität der Fördermodule gegenüber Feststoffeintrag und dem schnellen Anstieg der Trübe bei hohen Niederschlags- oder Abflussereignissen (siehe Abschnitt 5.6.4) wurde zusätzlich ein Regelsystem mit automatisiertem Not-Stopp entwickelt. Bei der Auswahl des elektrischen Antriebes war eine kurze Stellzeit zwingend, um beim Anfahren des Fördermoduls die Haftreibung und bei niedrigen Geschwindigkeiten die Mischreibung schnell zu überwinden. Nach umfangreichen Analysen zur Anfahrzeit wurde der elektrische Antrieb der Firma AUMA (Typ: AUMA MATIC SAR 07.6 mit Steuerung AM 01.1) mit einer Stellzeit von 20 Sekunden gewählt. Über einen Fernanschluss kann der Stellantrieb mit dem zentralen Schaltschrank verbunden werden, um ein automatisches Abfahren bei Alarmzuständen zu ermöglichen. Die Bedienung der Fördermodule erfolgt im Normalbetrieb per Knopfdruck und bei Ausnahme- oder Notzuständen per Handrad bei gleicher Untersetzung. Die Stromversorgung des elektrischen Antriebes erfolgt ebenfalls netzgebunden. Durch eine zusätzliche Batterieanlage mit 24-Volt-Gleichspannungsversorgung werden die Fördermodule bei Funktionsausfall des Monitoring- und Alarmsystems automatisch abgeschaltet.

5.7.3 Monitoring- und Alarmsystem

Auf Basis der Anzeigewerte am zentralen Schaltschrank kann der Betrieb des Wasserförderersystems und des Wasserkraftwerkes geregelt werden. Durch die Ausgabe der Wasserverluste am Einlaufbecken und die Durchflussmenge in der Fallleitung kann die Zu- und Abschaltung der Fördermodule bzw. der Wasserturbinen eingestellt werden. Die Informationen zur Fördermenge sind für das Betriebspersonal ein Maß für die Leistungsfähigkeit des Systems. Neben der Ausgabe der Betriebsparameter als Entscheidungsgrundlage für die Regelung der Anlage ist die zweite Hauptfunktion des Schaltschrankes die etwaige Anzeige von Warn- und Alarmmeldungen bei Grenzwertüberschreitungen. Entsprechend Abbildung 5.32 sind auf der Anzeigetafel des zentralen Schaltschrankes die Anlagenkomponenten und die erfassten Kenngrößen graphisch veranschaulicht.

Durch entsprechende Farbgebung der Anzeigeelemente wird der Regelbetrieb von Ausnahmesituationen bzw. Störfällen abgegrenzt. Beim Erreichen unzulässiger Betriebszustände

wird ein Alarm ausgelöst und die Fördermodule werden durch den elektrischen Antrieb automatisch abgeschaltet. Zum Schutz der Maschinentechnik werden für die Betriebsparameter Grenzwerte hinterlegt. Zur Überwachung der Solarbatterie am Einlaufbecken und der Notstromversorgung im Maschinenhaus sowie zur Sicherstellung der Datenübertragung von Trübung, Vordruck und Maschinendrehzahl sind im zentralen Schaltschrank weitere Leuchtdioden vorgesehen. Bei fehlenden Daten, aufgrund eines defekten Messinstrumentes oder fehlender Stromversorgung, wird die entsprechende Leuchtdiode aktiviert. Das Betriebspersonal wird somit im Falle von Störfällen über eine Warnmeldung auf der Anzeigetafel alarmiert und erhält an zentraler Stelle alle nötigen Informationen, die zur Behebung des Alarmzustandes nötig sind. Bei einem längeren Notstrombetrieb wird durch die Batterieanlage des Elektroantriebes ein automatisches Abschalten der Fördermodule sichergestellt.

5.8 Angepasste Betriebsstrategien

Nach der Bestimmung der (Förder-) Leistung des Wasserförderersystems müssen Betriebssstrategien ausgearbeitet werden. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Triebwasserkanal begrenzt den Zufluss zur WKA Seo Ho bei ca. 400 l/s. Eine Erhöhung der Durchsatzkapazität ist im Rahmen der Rehabilitations- und Optimierungsmaßnahmen nicht geplant. Den durch den Kanal geleiteten Gesamtabfluss gilt es auf das Fördersystem und die Pelton-Turbinen aufzuteilen.
- Der Wasserbedarf der lokalen Bevölkerung ist über das gesamte Jahr weitgehend konstant (siehe Abschnitt 4.2.2).
- Es wird ein Dauerbetrieb der Module angestrebt, da häufige Start- und Stoppvorgänge zu erhöhtem Verschleiß und verringerter Nutzungsdauer führen.
- Das RKV zur Regelung des Schluckvermögens der PAT und Förderpumpen soll in der gemeinsamen PAT-Druckleitung installiert werden, sodass im Einsatzfall beide Fördermodule gleichermaßen mit reduziertem Vordruck beaufschlagt werden.
- Der Einsatz der Drosselfunktion ist im Regelbetrieb nicht vorgesehen. Stattdessen soll gefördertes Wasser, welches nicht durch die angeschlossenen Nutzer entnommen wird, zur Grundwasseranreicherung in Dong Van verwendet werden. Denn aufgrund einer Vielzahl privater Entnahmestellen im Gebiet Dong Van City wurde bereits eine Absenkung des dortigen Grundwasserspiegels beobachtet. Im Falle extrem geringer Abflüsse ist jedoch der Drosselbetrieb dem vollständigen Abschalten der Wasserfördermodule vorzuziehen.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen wurden die nachfolgend beschriebenen Betriebsstrategien entwickelt:

- **Betriebsstrategie mit Fokus Wasserförderung:** Diese Betriebsstrategie setzt auf den Einzelbetrieb eines Wasserfördermoduls im unteren Abflussspektrum (> 40)

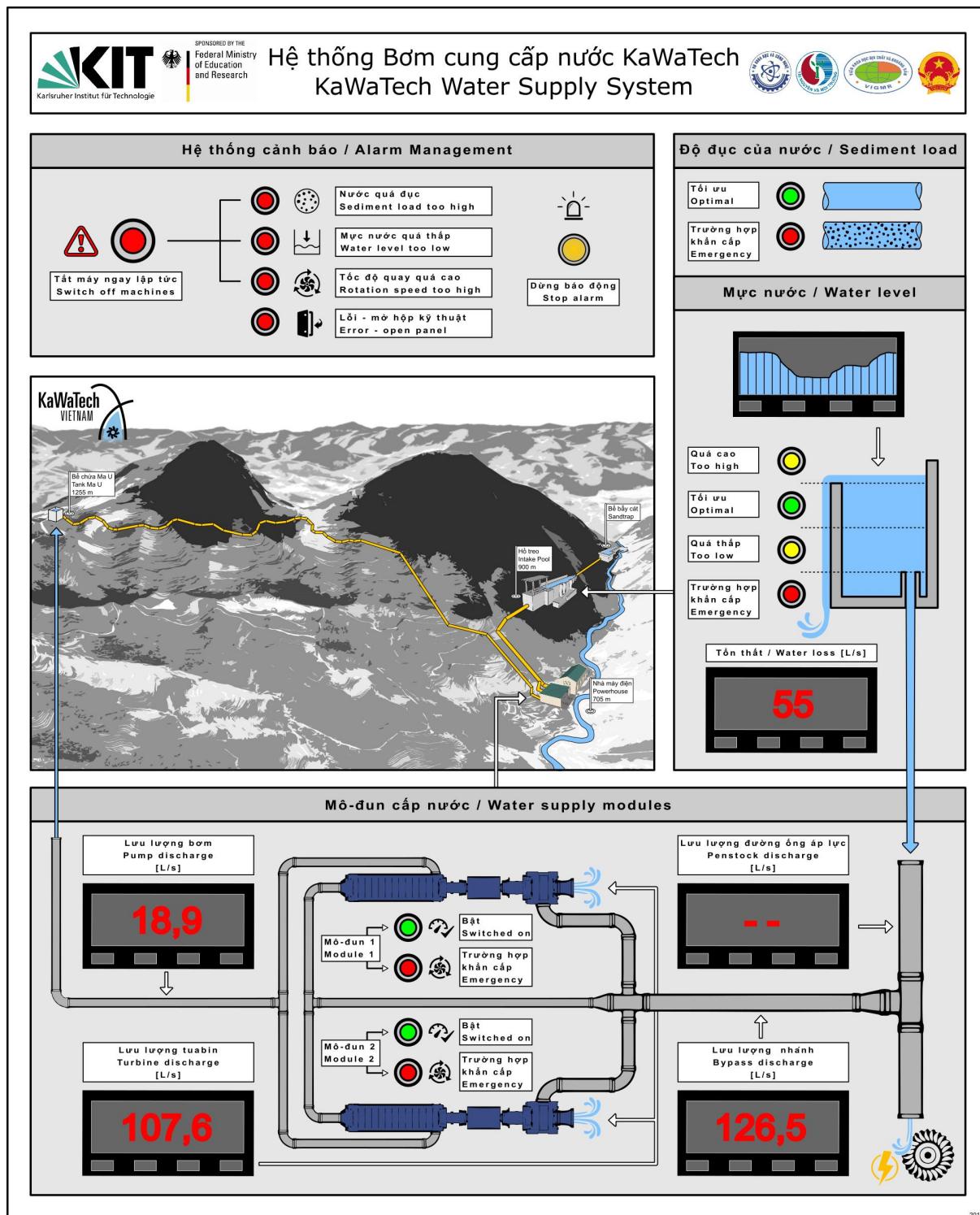


Abbildung 5.32: Übersicht der Anzeigetafel des zentralen Schaltschrances mit dem Alarm-Management-System

l/s) und eine möglichst frühe (> 80 l/s) Zuschaltung des zweiten Moduls bei höherem Dargebot. Weiterhin ist die abflussabhängige simultane Stromerzeugung mit ein (> 175 l/s) bzw. zwei (> 340 l/s) Peltonturbinen vorgesehen. Aufgrund der Begrenzung des Zuflusses auf 400 l/s ist im oberen Abflussspektrum (> 340 l/s) bei Vollastbetrieb beider Fördermodule lediglich ein Teillastbetrieb beider Peltonturbinen möglich.

- Betriebsstrategie mit Fokus Stromerzeugung und Wasserförderung:** Auch dieses Szenario setzt auf den Einzelbetrieb eines Wasserfördermoduls im unteren Abflussspektrum (> 40 l/s). Bei zunehmendem Abfluss ist die Zuschaltung einer (> 120 l/s) bzw. beider (> 280 l/s) Peltonturbinen vorgesehen. Da der aktuelle Wasserbedarf der Bevölkerung bereits durch ein Modul gedeckt werden kann, dient das zweite als Redundanz bzw. beide Module können alternierend eingesetzt werden, um lange Standzeiten zu vermeiden. Häufiges An- und Abfahren (mehrere täglich) gilt es dennoch möglichst zu vermeiden.

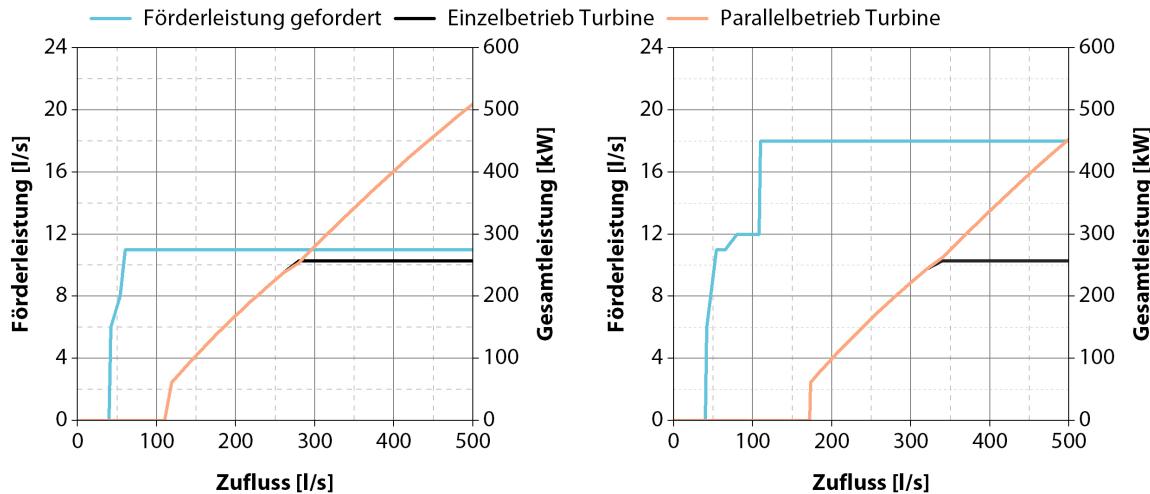


Abbildung 5.33: Betriebsstrategien mit Fokus Wasserförderung (rechts) sowie Wasserförderung und Stromerzeugung (links))

Einen Überblick über die Betriebsstrategien ist in Abbildung 5.33 gegeben. Aufbauend auf beiden Betriebsszenarien ist das ermittelte jährliche Potential im Hinblick auf die Wasserförderung und Stromerzeugung in Tabelle 5.11 dargestellt.

Tabelle 5.11: Prognostizierter Wasserbedarf und Potential der Betriebsstrategie 1 (Fokus Wasserförderung) und der Betriebsstrategie 2 (Fokus Stromerzeugung und Wasserförderung)

Potential	WKA Seo Ho	Betriebsstrategie 1	Betriebsstrategie 2
Wasserförderung	$0 \text{ m}^3/\text{a}$	$550000 \text{ m}^3/\text{a}$	$340000 \text{ m}^3/\text{a}$
Stromerzeugung	2420000 kWh/a	1310000 kWh/a	1920000 kWh/a

Es wurde ein Bedarf von 120 Liter pro Kopf und Tag, ein Bevölkerungswachstum bis 2036 von 0,93 % und eine lineare Entwicklung der Touristenzahlen auf Basis der statistischen Werte und Prognosen von 2005 bis 2020 angenommen. Zum Vergleich ist zudem das Leistungspotential der WKA Seo Ho gänzlich ohne Wasserförderung angegeben.

5.9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Nach Festlegung der Betriebsstrategien ist das Wasserfördersystem auf seine Wirtschaftlichkeit hin zu untersuchen. Neben der Bewertung der Investitionskosten für Maschinentechnik und Förderleitung sind verschiedene Betriebsszenarien in Abhängigkeit des Abflussdargebots zu definieren und die erwarteten Betriebs- und Wartungskosten näherungsweise zu bestimmen. Als maßgebende Einflussgrößen sind sowohl standortspezifische Faktoren (Wasserbedarf, Abflussdargebot, Leistungsvermögen und wartungsbedingte Standzeiten beider Teilsysteme, Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten) als auch übergeordnete Faktoren (Inflationsrate, Zins- und Lohnentwicklung, Kaufkraftparitäten, Wasser- und Strompreis) zu berücksichtigen. (Nestmann u. a., 2017)

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Demonstrationsanlage wurden die im Folgenden angeführten Aspekte und Zusammenhängen angenommen (Nestmann u. a., 2017):

- Die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage ist durch das Abflussdargebot in der Trocken- und Übergangszeit bzw. durch die Durchflusskapazität in der Übergangs- und Regenzeiten limitiert. Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basieren auf den Seo Ho Abflussdaten in Abschnitt 5.1.2.
- Die Abflüsse von mehr als 65 l/s wurden ausschließlich zur Stromerzeugung genutzt. Durch den Betrieb des Wasserfördersystems stehen diese Abflussmengen nicht mehr für die Stromproduktion zur Verfügung. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund des Anschlusses an das nationale Stromnetz der generierte Strom gänzlich verkauft werden kann. Somit muss der zur Wasserförderung genutzte Abfluss in der Bilanz der „Ausgaben“ zugewiesen werden.
- Der Verkauf des geförderten Wassers ist durch den Bedarf der Bevölkerung beschränkt. Da die Jahresfördermenge der kontinuierlich betriebenen Fördermodule den prognostizierten Bedarf für das Jahr 2036 (nach etwa 20 Jahren Betriebsdauer) ohne Berücksichtigung des Tourismus übersteigt, kann das geförderte Wasser nicht vollständig verkauft werden.
- Zwar wurde der Bedarf sowie dessen künftige Entwicklung auf Basis der Primär- und Sekundärdatenerhebung durch Nestmann u. a. (2017) und durch Zindler und Stolpe (2018) quantifiziert, so liegen den berechneten Werten Annahmen hinsichtlich der Entwicklung der Einwohner- und Touristenzahlen zugrunde.
- Durch eine Sensitivitätsanalyse in Bezug auf die Parameter, wie bspw. die Inflations- und Zinsentwicklung, wurde die Sensibilität der Ergebnisse geprüft.

- Da die im Rahmen des FuE-Vorhabens zur Verfügung gestellten finanziellen Mittel teils für forschungs- und entwicklungsbezogene Maßnahmen Verwendung fanden, wurden für den Standort der WKA Seo Ho die erforderlichen Investitionskosten ohne FuE-Anteil berechnet.
- Durch sogenannte Kaufkraftparitäten wurden die baurelevanten Kosten, die nicht in Vietnam entstanden sind, zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf das Kostenniveau Vietnams umgerechnet. Die synthetische Währung „ ϵ_{VN} “ ist der Geldbetrag in Euro, bezogen auf das Preisniveau in Vietnam.

Die ersten ökonomischen Einschätzungen zeigen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb unabhängig von der Wahl der Betriebsstrategie möglich ist. Voraussetzung hierfür ist ein sachgemäßer Betrieb (u.a. Steuerung des Systems auf Basis der Anzeigewerte des Monitorings- und Alarmsystems) und eine sachgemäße Wartung (u.a. Einhaltung von Wartungszyklen). In Abbildung 5.34 sind alle Investitionskosten vor Beginn der Nutzungsdauer und alle während der Nutzung anfallenden Ein- und Auszahlungen dargestellt. Da durch die Stromerzeugung und die Wasserförderung unterschiedliche Umsätze generiert werden, beeinflusst die Wahl der Betriebsstrategie die Amortisationsdauer. Für die favorisierte Betriebsstrategie mit Fokus Wasserförderung durch die vietnamesischen Partner wurde mit dem aktuellen Wasserbedarf die längste Amortisationsdauer berechnet. Gleichzeitig wird nach der Inbetriebnahme des Fördersystems eine rasche und erheblichen Erhöhung der Abnahmemenge erwartet, wodurch sich die berechnete Dauer auf bis zu 11,9 Jahren (bei unbeschränkten Bedarf) verkürzen kann. (Nestmann u. a., 2017)

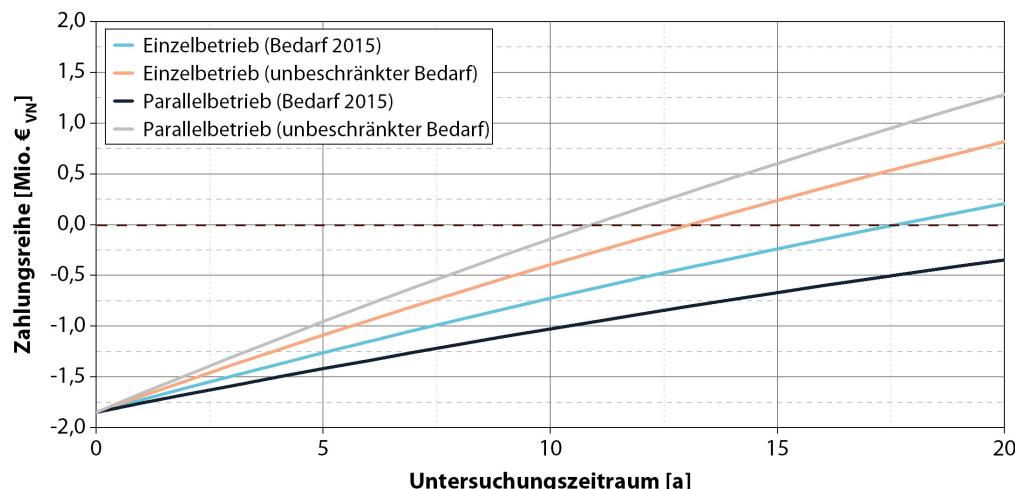


Abbildung 5.34: Amortisationsdauer für verschiedene Betriebs- und Bedarfsszenarien mit der Einheit „ ϵ_{VN} “ nach Nestmann u. a. (2017)

Ergänzend wurden alternative Förderkonzepte mit gleicher Förderleistung (11 l/s im Einzel-, 18 l/s im Parallelbetrieb), jedoch unterschiedlicher Energieversorgung (konventioneller Netzstrombetrieb, Antrieb durch alternative Formen erneuerbarer Energien) bewertet. Um die Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, wurde für alle betrachteten Förderkonzepte die Einspeisung des geförderten Wassers ins Verteilnetz am Hochbehälter vorausgesetzt. Folgende Förderkonzepte wurden unter Berücksichtigung der jeweiligen Investitions- und Betriebskosten untersucht (Nestmann u. a., 2017):

- 1) Vergleich PAT-gestütztes Förderkonzept mit neuen Turbinensätzen
- 2) Vergleich PAT-gestütztes Förderkonzept mit konventionellen Fördersystemen
- 3) Vergleich PAT-gestütztes Förderkonzept mit photovoltaik- und windkraftbasierten Fördersystemen

Zu 1): Aufgrund des schlechten Zustands der Pelton-Turbinen wurde die Variante mit neuen Turbinensätzen in Verbindung mit einem strombetriebenen konventionellen Pumpsystem untersucht. Da neben den neuen hochpreisigen Turbinen auch Elektromotoren als Antrieb für die Pumpen benötigt werden, ist diese Variante im Vergleich zu der Demonstrationsanlage mit deutlich höheren Investitionskosten verbunden. Lediglich auf die PAT als Antrieb für die Pumpen kann verzichtet werden. Alle weiteren Kosten für u.a. die wasserführenden Rohrleitungen bleiben wie auch bei allen anderen Varianten nahezu unverändert. Trotz der hohen Anschaffungskosten stellt der Einsatz neuer Pelton-Turbinen, aufgrund des deutlich höheren Spitzenwirkungsgrad in Verbindung mit einem besseren Teillastbetrieb, eine wirtschaftliche Variante dar. Im Vergleich zu den bestehenden Turbinen kann hierdurch über die Lebensdauer der Maschinensätze eine erheblich höhere Energiemenge generiert werden, welche sich vor allem bei langfristiger Nutzung von über 20 Jahren auswirkt. Es sind jedoch deutlich höhere Investitionskosten nötig. Die Umrüstung der WKA Seo Ho auf neue Turbinensätze stellt eine sinnvolle Ergänzungsmaßnahme dar.

Zu 2): Bei dieser Variante wird der Einsatz konventionelle Fördersysteme mit Netzstrom- oder Dieselgeneratorantrieb untersucht. Hierbei wird angenommen, dass die Wasserförderung vom Einlaufbecken zum Verteilspeicher erfolgt. Da bei einer konventionellen Förderung kein Triebwasser als Antriebsenergie benötigt wird und das Abflussdargebot vollständig zur Stromerzeugung genutzt werden kann, wurden die (fiktiven) Ausgaben in der Bilanz entsprechend reduziert. Zudem wurde ein effizienter Betrieb durch die Rehabilitationsmaßnahmen an der bestehenden wasserbaulichen Infrastruktur vorausgesetzt. Die Ausgaben für den Netzstrom und Dieselkraftstoff beziehen sich auf das Preisniveau von 2016. Trotz der signifikanten Betriebs- und Energiekosten wurde basierend auf den genannten Annahmen Fördersysteme mit Netzanschluss und Elektromotor bzw. Dieselgenerator und Elektromotor zunächst als wirtschaftlich konkurrenzfähig bewertet. Diese Aussage kann jedoch erheblich relativiert werden:

- Voraussetzung für die elektrische Wasserförderung ist ein Anschluss an das Stromnetz, welche mit erheblichen Mehrkosten einhergehen kann. Weiter ist vor allem in entlegenen bzw. unzureichend erschlossenen Regionen das Anwendungspotential aufgrund der infrastrukturellen Anbindung erheblich begrenzt.
- Aufgrund der geringen Auslastung der WKA Seo Ho in der Vergangenheit ist die Umsetzung eines künftig effizienteren Betriebes ungewiss. Falls bspw. auch bei ausreichendem Wasserdargebot weiterhin nur eine Pelton-Turbine betrieben wird, reduzieren sich die Einnahmen und die Vorteile des PAT-gestützten Förderkonzeptes überwiegen.

- Zwar entstehen am Nutzungsort keine betriebsbedingten Emissionen, die ökologische Nachhaltigkeit wird jedoch beim Einsatz fossiler Energieträger erheblich eingeschränkt.
- Der Einsatz eines Dieselgenerators als Antriebsaggregat ist durch die Verbrennung von Treibstoffen mit erheblichen Emissionsmengen an CO₂ verbunden. Des Weiteren besteht die Gefahr ein erhöhtes Kontaminationsrisiko bei austretendem Treibstoff, was aufgrund der Vulnerabilität der unterirdischen Wasserressourcen, insbesondere in Karstregionen, zu erheblichen Qualitätseinschränkungen führen kann.
- Die Betriebsaufwendungen konventioneller Fördersysteme korrelieren aufgrund der hohen Energiekosten mit der geförderten Wassermenge. Dies bedeutet, je höher die Förderleistung, desto höher fallen die Betriebskosten bei Netzstrom- oder Dieselgeneratorantrieb aus. Aufgrund der Abhängigkeit von der Strompreisentwicklung resp. der Kosten für den Dieselkraftstoff ist die ökonomische Konkurrenzfähigkeit konventioneller Fördersysteme somit als Momentaufnahme zu bewerten. Die Kostenentwicklung hat aufgrund des hohen Anteils der Energiekosten an den Gesamtkosten erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit bzw. die wirtschaftliche Nachhaltigkeit des Förderkonzeptes. Zum Vergleich: Bei dem Antrieb durch Wasserkraft sind die Betriebskosten nahezu unabhängig von der Leistungsfähigkeit des Systems.

Die ökonomischen Vorteilhaftigkeit konventioneller Fördersysteme ist somit durch die Be trachtung des Gesamtsystems für den jeweiligen Anwendungsfall zu entscheiden. Hierbei haben - neben rein wirtschaftlichen Aspekten - auch die strukturstrategischen und ökologischen Aspekte einen entscheidenden Einfluss.

Zu 3): Bei dem Einsatz dezentraler PV-Pumpsysteme wird das Leistungspotential lediglich bei max. Strahlungsintensität ausgeschöpft. Die größte Herausforderung ist somit die dauerhafte Sicherstellung der Energieversorgung zur Wasserförderung. Die Energieversorgung und Systemdimensionierung ist bei dezentraler Anwendung mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Der zusätzliche Einsatz eines Batteriespeichers ist mit höheren Investitionskosten verbunden und kann je nach Speichergröße im Hinblick auf das deutlich komplexere Regelungssystem ein substantieller technischer Nachteil sein. Durch den Anschluss einer Photovoltaikanlage an das bestehende regionale Stromnetz kann im Falle eines Energieüberschusses Strom in das Netz eingespeist und bei einer Unterversorgung, für einen kontinuierlichen Betrieb, Energie aus dem Netz entnommen werden. Aufgrund der vergleichsweise hohen Investitionskosten für Solarkraftanlagen kann mit dem PAT-gestützten Förderkonzept ein wirtschaftlicherer Betrieb als mit vergleichbaren on-grid Anwendungen realisiert werden.

Kapitel 6

Pilotfähige Umsetzung des Wasserförderungssystems in der Modellregion

Die Entwicklung des angepassten Wasserförderkonzeptes sowie deren exemplarische Implementierung in der Modellregion erfordert einen interdisziplinären Ansatz. Der Begriff „Angepasste Technologie“ ist aus der Entwicklungszusammenarbeit in den 1960er Jahren entstanden und wurde von dem Wirtschaftswissenschaftler Schumacher als sogenannte „Zwischentechnologie“ benannt. Es wurde versucht, die ökonomischen und technischen Defizite in Entwicklungsländern durch rapide industrielle Entwicklung nach westlichem Muster mit massivem Kapital- und Technologietransfer zu überbrücken. Schumacher forderte entgegen der westlich geprägten Industrialisierungs- und Modernisierungsstrategien eine „Zwischentechnologie“, welche der traditionellen Technologie weit überlegen, zugleich aber einfacher und billiger sein sollte als die hochentwickelten Technologien der Industriestaaten. Heute beschreibt der Begriff die psychologischen, sozialen, wirtschaftlichen, ökologischen und politischen Dimensionen der Technologie und reflektiert als „globales Konzept“ auch die Probleme wie geringe ökonomische Entwicklung oder ökologische Krisen. Hierbei geht es vielmehr um die richtige Technikauswahl - selten Neuerfindungen - unter den Kriterien der Wirtschaftlichkeit, Sozial- und Umweltverträglichkeit, technischer Machbarkeit und Zuverlässigkeit, nachhaltiger Anwendbarkeit, kultureller Kompatibilität und Einbeziehung traditionellen Wissens. (Grambow, 2013; Hartmann, 2010) Unter Berücksichtigung dieser Kriterien erfolgte die Konzeption und exemplarische Implementierung der Demonstrationsanlage in der Modellregion im Norden Vietnams.

6.1 Bilaterales Projektmanagement

6.1.1 Verbundstruktur

Die beidseitige - bilaterale - Form der Zusammenarbeit von deutschen und vietnamesischen Partnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen, Industrie und Behörden ermöglichte die Entwicklung und Erprobung nachhaltiger Lösungen, die an die lokalen Rahmenbedingungen angepasst sind. Zur Realisierung der Projektziele im Verbundprojekt KaWaTech wurden vier eng miteinander verknüpfte interdisziplinäre Arbeitspakete

(AP) definiert. Eine Übersicht über die Beiträge und Ziele der Arbeitspakete ist in Abbildung 6.1 gegeben.



Abbildung 6.1: Einteilung des Verbundprojektes in vier Arbeitspakete

Ein zentrales Ziel von AP1 war die Erfassung der hydrologischen, hydraulischen und hydrogeologischen Randbedingungen mittels neuer innovativer Methoden und Analysen. Darauf aufbauend konnten die Daten als Basis für Entscheidungsfindungen zur Technologieentwicklung und -implementierung sowie deren späteren Multiplikation genutzt werden. Die Inhalte von AP2 zielteten auf die Entwicklung und Erprobung innovativer Lösungen zur Wasserförderung ab. In Ergänzung hierzu befasste sich AP3 mit einer detaillierten Aufnahme und Bewertung der bestehenden Infrastrukturen sowie einer Prognose der Wasserbedarfsentwicklung. Auf Basis der Ergebnisse dieser Analysen erfolgte die Entwicklung und pilothefta Umsetzung eines semizentralen Verteilungskonzepts. Durch die Erfassung der Siedlungsstruktur und Landnutzung in AP4 konnten die technischen Lösungen im Hinblick auf die nachhaltige Nutzung und den Schutz der Karstwasserressourcen optimiert und unterstützt werden. Darüber hinaus wurden die Arbeiten durch sozio-ökonomische Analysen und Begleitmaßnahmen wie Workshops und Sensibilisierungskampagnen begleitet, um einen umfassenden Wissenstransfer und den Schutz der Ressource Wasser sicher-

zustellen. Um die Expertise der verschiedenen Fachbereiche einzubinden, wurde eine übergeordnete Verbundstruktur erstellt. Jedes Arbeitspaket umfasst mehrere Aktivitäten, die jeweils von einem oder mehreren Teilprojekten übernommen wurden. Der FuE-Verbund bestand aus fünf Wissenschaftspartnern (KIT und RUB), zwei Industriepartnern (KSB Se & Co. KGaA und Markus Klotz GmbH), dem KAAD und weiteren Partnern in Unteraufträgen (Vergabe an Dritte). Die Einteilung der insgesamt acht eng miteinander vernetzten Teilprojekte in die vier Arbeitspakete ermöglichte eine bessere Synchronisierung der Arbeitsabläufe und Nutzung der Synergieeffekte zwischen den Teilprojekten.

Aufgrund des komplexen Arbeitsumfangs und der interdisziplinären Anforderungen war zudem eine zentrale Koordination des Verbundprojektes während der gesamten Projektlaufzeit essentiell. Insbesondere die transdisziplinäre Kommunikation mit den vietnamesischen Projektpartnern war ein wesentliches Element für den Erfolg des Verbundprojektes. Um die bilaterale Zusammenarbeit effektiv zu gestalten, wurde die zentrale Koordination mit kontinuierlicher inhaltlicher und organisatorischer Abstimmung auf deutscher Seite durch das IWG und auf vietnamesischer Seite durch das vietnamesische Institut für Geowissenschaften und Mineralische Rohstoffe (VIGMR) übernommen.

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte und exemplarisch implementierte PAT-gestützte Wasserförderungssystem für Wasserkraftwerke in ländlichen Karstregionen (mit Fokus auf Entwicklungs- und Schwellenländern) erfolgte innerhalb von AP2 (Wasserkraft & Wasserförderung). Unter Berücksichtigung der Arbeitspakete AP1 (Untersuchung, Erkundung & Monitoring), AP3 (WasserVerteilung & -versorgung) und AP4 (Ressourcenschutz & soziokulturelle Aspekte) basieren die Technologien auf einem ganzheitlichen Ansatz, welcher an die Bedürfnisse und Beschränkungen in der Modellregion angepasst ist. Die interdisziplinäre Projektkonzeption erforderte eine enge Zusammenarbeit aller Teilprojekte der Arbeitspakete AP2, AP3 und AP4. Eine detaillierte Beschreibung aller Teilprojekte findet sich in Nestmann u. a. (2017).

6.1.2 Strategisches und operatives Vorgehen

Auf Basis der in Abschnitt 6.1.1 dargelegten übergeordneten Verbundstruktur wurden regelmäßige fachliche und organisatorische Abstimmungstreffen sowie jährliche Statusworkshops organisiert. Hierdurch konnten weiterführende bi- bzw. multilaterale Abstimmungsgespräche erheblich erleichtert werden. Die Arbeitsinhalte und der Zeitplan wurden durch die Koordinationsstelle mit den jeweiligen deutschen und vietnamesischen Partnern abgestimmt. Als Resultat dieser Abstimmungsgespräche wurde die Zielsetzung des Verbundvorhabens in einem gemeinsamen Dokument detailliert beschrieben. Hierdurch konnte eine klare Zuordnung von Zuständigkeiten erreicht werden. Weiterhin stellte dieses Dokument über den gesamten Projektverlauf die Grundlage der Arbeitsplanung auf deutscher und vietnamesischer Seite dar. Im Hinblick auf die Realisierung der Demonstrationsanlage konnten die jeweiligen Arbeitsschritte an klar definierten Zielvorgaben ausgerichtet und ein entsprechendes finanzielles Budget zur Verfügung gestellt werden. So wurden die Maschinen und Teile der technischen Ausstattung von deutscher Seite bereitgestellt, die bauliche Umsetzung erfolgte durch die vietnamesischen Partner.

Die Einbindung von Regierungsinstitutionen und Behörden war für den Technologie- und Wissenstransfer von entscheidender Bedeutung. Die Projektstruktur und die Abhängig-

keiten von politischen / strategischen Einflüssen wurde jedoch durch das Mitwirken dieser Institutionen zunehmend komplexer. Die Kommunikation mit vietnamesischen Partnern erfolgte daher übergeordnet durch die Verbundkoordination. Neben den Hauptpartnern VIGMR und HGPC wurden eine Vielzahl weiterer Regional- bzw. Provinzbehörden verschiedener Ministerien, Provinz- und Distriktverwaltungen sowie regionale Wasser- und nationale Stromversorger eingebunden. Die Bereitstellung der Teilfinanzierung durch das Ministerium für Wissenschaft und Technologie (MOST) lag im Verantwortungsbereich der vietnamesischen Koordinationsstelle. Die Provinzverwaltung HGPC war u.a. für eine Teilfinanzierung der baulichen Maßnahmen sowie die Abwicklung von Landbesitzansprüchen verantwortlich. Die nationalen Strom- (EVN) und Wasserversorger (CERWASS) partizipierten insbesondere im Hinblick auf die Planung und Implementierung der Demonstrationsanlage.

Die fachliche und organisatorische Abstimmung der Aktivitäten in der Modellregion erfolgte durch die Verbundkoordination. In enger Kooperation der Teilprojekte TP1 (IWG), TP2 (AGW-Hyd, AGW-AqG) und TP3 (IMB) sowie der vietnamesischen Partnerinstitutionen wurde ein interdisziplinäres Monitoring in der Modellregion aufgebaut. Hierdurch konnte eine valide Datengrundlage, u.a. in Bezug auf Niederschlagsverteilung, Abflussverhältnisse ober- und unterirdischer Fließgewässer, im Wasser enthaltenden Nähr- und Schadstoffe sowie physiko-chemischer Parameter wie Leitfähigkeit und pH-Wert, geschaffen werden. Des Weiteren wurde ein digitales Geländemodell mittels Sekundärdatenerhebung generiert und durch eine Vielzahl an Primärdaten zur Siedlungsstruktur sowie zur Bedarfssituation und -entwicklung im Distrikt Dong Van ergänzt. Die Datenbestände dienten zur Entscheidungsfindung, um eine bestmögliche Anpassung der Wasserfördertechnologie an die lokalen Bedingungen zu gewährleisten.

In Bezug auf die Planung und Implementierung der Demonstrationsanlage waren eine Vielzahl von Felduntersuchungen und bilateralen Treffen in Vietnam notwendig. Neben den Ortskundungen und den Datenerhebungskampagnen umfasste dies auch viele Besprechungen, Präsentationen und Workshops mit Ministerial-, Provinz- und Distriktregierungen sowie Behörden und wissenschaftlichen Projektpartnern. Zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen sowie der Funktionalität der Demonstrationsanlage wurde eine Entwurfsplanung der in Kapitel 5 beschriebenen Baumaßnahmen erarbeitet (u.a. Wasserbauwerke, Rohrleitungssystem, Maschinenplattform, Tosbecken) und den vietnamesischen Partnern bereitgestellt. Die Entwurfsplanung enthält alle Planungs- und Bemessungsgrundlagen und stellte die Grundlage der vietnamesischen Ausführungsplanung dar. Die Abstimmung der Ausführungsplanung war ein hoch-iterativer Prozess und erforderte die kontinuierliche fachliche und organisatorische Unterstützung der deutschen und vietnamesischen Verbundkoordination.

Die in Abschnitt 5.8 vorgestellten Betriebsstrategien mit Fokus auf die Wasserförderung oder auf die Stromerzeugung und Wasserförderung wurden mit den zuständigen vietnamesischen Behörden EVN, CERWASS und HGPC eingehend diskutiert. Aufgrund des Pilotcharakters der Anlage war insbesondere die Zuteilung von Zuständigkeiten zu klären. Da unter den Behörden Einigkeit bestand, die Wasserförderung zukünftig zu priorisieren, wurde auf Wunsch der Provinzverwaltung HGPC die Übereignung der WKA Seo Ho von EVN zum künftigen Betreiber CERWASS angestrebt. CERWASS ist bereits für mehr als 40% der ländlichen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Vietnam und auch für

viele Siedlungen im Distrikt Dong Van zuständig und besitzt einschlägige (Fach-) Kenntnisse in Bezug auf Förder- bzw. Pumpenanlagen. Da die Zuständigkeitsverteilung weiterhin eine rechtliche Regelung zur künftigen Stromerzeugung und Einspeisung in das nationale Netz durch CERWASS erfordert, wurde aufgrund des damit verbundenen enormen administrativen Aufwands seitens der Provinzverwaltung die Pelton-Turbinen außer Betrieb genommen.

6.2 Implementierungsstrategien

6.2.1 Entwurfs- und Ausführungsplanung

Die bautechnischen Maßnahmen wurden in einer Entwurfsplanung zusammengefasst und an die vietnamesischen Partner übergeben. Die Entwurfsplanung enthält Planungs- und Bemessungsgrundlagen, schematische Bauzeichnungen sowie Handlungsempfehlungen und stellte die Grundlage für die vietnamesische Ausführungsplanung dar. Aufgrund fehlerhafter Planungen und nicht eingehaltener Konzeptionen durch vietnamesische Planungsbüros wurden in mehreren Abstimmungsprozessen die Planungen überarbeitet. Hierbei wurde ein erheblicher Aufwand betrieben, den Planungs- und Ausführungsprozess permanent fachlich zu überwachen und ggf. tragfähige Kompromisslösungen zu erarbeiten.

6.2.2 Begleitung der Baumaßnahmen

Die infrastrukturellen Baumaßnahmen wurden von vietnamesischer Seite durch lokal ansässige Baufirmen und z.T. Baufirmen aus Hanoi umgesetzt. Aufgrund unterschiedlicher ausführender Firmen und Vergabemodalitäten wurden bereits zu Beginn der Bauarbeiten teils erhebliche Ausführungsmängel festgestellt. Die Betonierarbeiten an der Wehranlage wurden z.B. durch die lokale vietnamesische Baufirma fehlerhaft umgesetzt, sodass sich eine sehr geringe Betonfestigkeit ergab und nach kurzer Zeit erste Abplatzungen entstanden. Nach einer umfangreichen vor-Ort- und Labor-Evaluierung der Sanierungsarbeiten musste die gesamte Wehranlage unter Aufsicht von deutscher Seite erneuert werden. Daher war eine fachliche Begleitung aller Baumaßnahmen sowie die Erarbeitung von teils tragfähigen Kompromisslösungen notwendig. Insbesondere der Bau der Hochdruck-Förderleitung mit einem Bemessungsdruck zwischen 20 und 73 bar wurde zur Sicherstellung eines ausreichenden Qualitätsmanagements permanent durch Einsätze vor Ort überwacht. Aber auch durch z.T. Fernunterstützung von Deutschland konnte ein ausreichendes Qualitätsmanagement sichergestellt werden. Hierbei wurden im Rahmen dieser Arbeit folgende Anforderungen zur Qualitätssicherung definiert:

- Sicherstellung einer angemessenen Schweißqualität
- Sicherstellung einer angemessenen Betonqualität
- Organisatorische und fachliche Unterstützung bei allen Arbeitsabläufen

Zur Einschätzung der zu erwartenden Qualität der Schweißnaht an der Förderleitung wurde vor Beginn der Schweißarbeiten die Schweißnahtqualität der ausführenden Firma

Hydraulic Equipment Joint Stock Company (HESCO) begutachtet. Die Auswertung eines Schweißprobekörpers aus dem Werk in Hanoi zeigte, dass die Schweißnaht trotz optimaler Schweißbedingungen im Werk internationalen Qualitätsanforderungen nicht genügt. Durch die Untersuchung mittels einer Durchstrahlungsprüfung in Deutschland (Röntgenstrahlungsprüfung nach DIN EN ISO 17636-1) konnten folgende Fehler festgestellt werden: Poren, Porenanhäufung, Gaskanäle, Schlauchporen, Bindefehler und Ansatzfehler. Die Schweißer besitzen zwar ausreichende Fertigkeiten für den Rohrleitungsbau, bei der Vorbereitung des Probekörpers wurden jedoch Mängel festgestellt wie u.a. ein nicht fachgerechtes Abschleifen der Rohrenden zur Entfernung von Flugrost und Verschmutzungen entlang der Schweißbereiche. Während des Schweißens wurden zudem einige wichtige Arbeitsschritte nicht bzw. nur unzureichend ausgeführt, was letztlich zu den o.g. Fehlern in der Schweißnaht führte. Die Bildung verschiedener Porentypen und Gaskanäle resultierte z.B. aus einem nicht vollständigen Entfernen des Klinkers der einzelnen Schweißebenen. Ansatz- und Bindefehler entstanden, da kein Anschleifen der Schweißnaht vor der Benutzung neuer Elektroden sowie kein ausreichendes Anschmelzen der vorherigen Schweißnahtebene stattfanden.

Um eine zufriedenstellende Ausführungsqualität zu erhalten, wurden konkrete Vorgaben festgelegt. Eine Übersicht hierzu ist in Abbildung 6.2 gegeben.

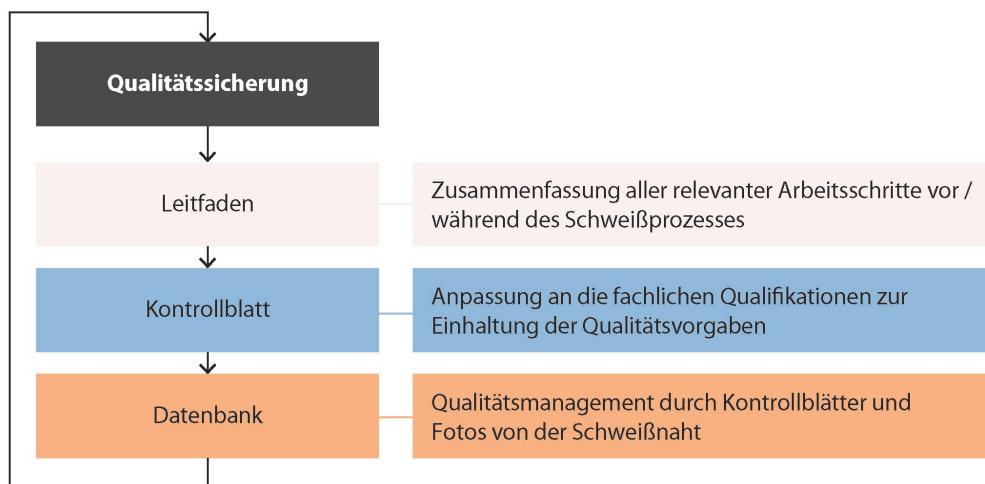


Abbildung 6.2: Vorgaben zur Sicherstellung einer zufriedenen Ausführungsqualität bei Schweißarbeiten

Um die o.g. Fehler bei den Schweißarbeiten an der Hochdruck-Förderleitung zu vermeiden, wurde ein Leitfaden zur Qualitätssicherung der Schweißarbeiten ausgearbeitet. Dieser fasst alle relevanten Arbeitsschritte zusammen, die vor und während des Schweißprozesses ausgeführt werden müssen. Zudem fand in Kooperation mit der Keller Industriemontagen GmbH zu Beginn der Schweißarbeiten eine zweiwöchige Fach-Schulung der ausführenden Baufirma HESCO vor Ort statt. Hierbei wurde der Leitfaden umfassend erläutert und an Probekörpern der Arbeitsablauf erprobt und optimiert. Unter Aufsicht der Keller Industriemontagen GmbH wurden die Fertigkeiten der Schweißer an der Hochdruck-Förderleitung unter den naturräumlichen und technischen Herausforderungen angepasst.

In Abbildung 6.3 ist die Überprüfung der Schweißqualität im Werk und vor Ort sowie die bauliche Umsetzung aufgezeigt.



Abbildung 6.3: Bauliche Umsetzung der Förderleitung sowie Qualitätssicherung der Schweißarbeiten durch die Herstellung eines Schweißprobestücks und Fach-Schulungen

Zur Einhaltung der Qualitätsvorgaben der Schweißarbeiten wurde ein auf die Randbedingungen vor Ort angepasstes Kontrollblatt für Schweißnähte erstellt. Das Kontrollblatt beinhaltet für jede Schweißnaht eine Identifikationsnummer sowie den Namen des Schweißers, die Anzahl der Schweißebenen, der verwendete Elektrodenentyp, der Elektrodendurchmesser und die Polarität des Schweißgeräts. Weiter wurden alle erforderlichen Arbeitsschritte für eine qualitativ hochwertige Schweißnaht gelistet. Durch das sukzessive Kontrollieren und Vermerken dieser Arbeitsschritte und der anschließenden Dokumentation durch ein Foto konnte eine Qualitätsminderung durch fehlende oder unsachgemäß ausgeführte Arbeitsschritte minimiert werden. Eine Online-Datenbank mit den ausgefüllten Kontrollblättern und den dazugehörigen Fotos, welche durch die vietnamesische Bauleitung den deutschen Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurde, ermöglichte die fachliche Unterstützung von Deutschland aus. Bei Qualitätsmängeln einzelner Schweißnähte konnte die vietnamesische Bauleitung umgehend informiert werden. Zudem konnte der Arbeitsfortschritt dokumentiert und analysiert werden.

Bei dem Bau der Fundamente für die Förderleitung sowie bei der Instandsetzung der hydraulischen Infrastruktur wurde die vom IMB entwickelte, angepasste Betonrezeptur auf Basis der verfügbaren Baustoffe in der Modellregion verwendet. Die Ausführung der Baumaßnahmen erfolgte mit teils ungeschultem Personal. Zudem wurden größtenteils orts-

ansässige Hmongs eingebunden. Dies hatte den Vorteil, dass sowohl eine unmittelbare wirtschaftliche Unterstützung für die lokale Bevölkerung geleistet als auch deren Interesse und Begeisterung für den neuartigen Versorgungsansatz geweckt werden konnte.

Gleichzeitig wurden bereits zu Beginn der Arbeiten erhebliche Mängel bei der Bauausführung festgestellt. Es fehlte an grundlegendem Fachwissen zur Herstellung von qualitativ hochwertigem Beton sowie dessen ordnungsgemäßen Einbau. Durch Schulung der Betonarbeiter vor Ort wurden das grundlegende Fachwissen sowie die Arbeitsabläufe vermittelt. Zur Einhaltung der Betonrezeptur wurden die Arbeiten zudem engmaschig betreut. In Abbildung 6.4 ist die Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen am Wehr und Einlaufbecken dargestellt.



Abbildung 6.4: Überwachung der Betonbauarbeiten am Wehr (links) und Einlaufbecken (rechts)

Nach Abschluss der Betonarbeiten wurden durch das IMB umfangreiche Bauwerkuntersuchungen hinsichtlich der Qualität vorgenommen (Bewehrungsführung, Druckfestigkeit, Betongüte, Feuchtigkeit, Überdeckmaß etc.) und die dabei erzielten Ergebnisse bezüglich des Bauwerkzustands mit den vietnamesischen Projektpartnern eingehend besprochen.

Die gesamten Baumaßnahmen mussten unter extremen naturräumlichen Randbedingungen umgesetzt werden. Insbesondere beim Rohrleitungsbau fand ein Großteil der Arbeiten an einem für Maschinen nicht zugänglichen Steilhang statt, sodass viele schwere Arbeiten nur mühsam von Hand ausgeführt werden konnten. Aufgrund der exponierten Lage der Modellregion, aber auch wegen der schlechten Ausrüstung der Baufirmen konnten für alle Erd-, Beton- und Stahlarbeiten nur kleine von Hand transportierbare Maschinen genutzt werden. Bei dem Rohrleitungsbau mussten über 900 Tonnen Baumaterial größtenteils von Hand verarbeitet werden. Durch die fachliche Unterstützung des KIT in Zusammenarbeit mit der vietnamesischen Bauleitung VIGMR konnte dennoch eine zufriedenstellende Ausführungsqualität hinsichtlich Stahl- und Betonarbeiten erlangt werden.

6.2.3 Installation der Maschinentechnik

Nach Abschluss der Vorarbeiten durch die vietnamesische Baufirma (Fertigung der Bodenplatte sowie der Betonfundamente für die Fördermodule im Krafthausbereich), konnte

die Maschinentechnik, wie in Abbildung 6.5 veranschaulicht, montiert werden. Unterstützt wurde die Installation durch Mitarbeiter des künftigen Betreibers CERWASS sowie der vietnamesischen Koordinationsstelle VIMGR.



Abbildung 6.5: Installation des Förderungssystems mit hochpräziser Ausrichtung für einen spannungsfreien Zusammenschluss aller Komponenten

Die in Abschnitt 5.4.2 konzeptionierte Rohranlage der Demonstrationsanlage wurde mit normierten Rohrhalterungen auf Stützen aus Profilstahl montiert. Dies ermöglicht eine hohe statische Festigkeit sowie eine einfache Montage und Demontage für Revisionszwecke. Die Grundrahmen der Module wurden mittels Schwerlastdübel und Klemmvorrichtungen („Pratzen“) auf den Betonfundamenten befestigt und mit schwindfreiem Mörtel ausgegossen. Durch dieses Vorgehen kann neben der Gewährleistung der erforderlichen Festigkeit auch eine Schwingungsdämpfung im Betrieb sichergestellt werden. Bei der Installation der Maschinentechnik wurde zudem darauf geachtet, dass der Zusammenschluss aller Komponenten weitgehend spannungsfrei erfolgt (siehe Abbildung 6.5). Hierdurch soll gewährleistet werden, dass es im Betrieb zu keinem vorspannungsbedingten Versatz kommt. Andernfalls kann dieser zu einer Mehrbelastung und letztlich zu einer Schädigung von Kupplung und Maschinenlagern führen. Das neue Pumphaus sowie das Tosbecken und der Rücklaufkanal für das turbinierte Wasser wurden nach Abschluss der Installationsarbeiten der Maschinentechnik durch die vietnamesische Baufirma errichtet.

6.2.4 Installation der Anlagensteuerungstechnik

Die Installation der Anlagensteuerungstechnik in Abbildung 6.6 erfolgte nach Fertigstellung aller Rehabilitations- und Optimierungsmaßnahmen an der wasserbaulichen Infra-

struktur. Da es bei den künftigen Betreibern am Bewusstsein für die messtechnische Erfassung der Betriebsparameter fehlte, wurden die Betreiber bei der Installation des Schaltschrankes und der Messtechnik integriert. Die Grenzwerte für die Betriebsparameter wurden in dem Datenlogger eingestellt. Die Aktivierung der Sirene und die automatische Abschaltung der Fördermodule wurden durch Simulation von Alarmzuständen getestet.



Abbildung 6.6: Installation der Sonden am Einlaufbecken (links) und des Schaltschrankes (mitte) sowie Fertigstellung des Alarm- und Monitoringsystems (rechts)

6.2.5 Maßnahmen zur Reduktion des Feststoffeintrages

Um den Feststoffeintrag in das Leitungssystem zu Reduzieren und die Absetzkapazität des Einlaufbeckens zu erhöhen, wurden in Abschnitt 5.6.3 Konzepte zur hydraulische Optimierung entwickelt. Die Umsetzung dieser Maßnahmen sind im Folgenden näher beschrieben:

Lamellenwand zur Reduktion des Impulseintrages im Einlaufbecken:

Die Lamellenwand besteht aus zwei senkrechten, dicht hintereinander liegenden Ebenen. In jeder Ebene werden die Lamellen durch drei Querverbindungen gehalten. Die einzelnen Lamellen lassen sich durch die Querverbindungen schieben und mit Klemm-Verschraubungen fixieren. Dadurch war es möglich, die Lage der Lamellen durch Versuche vor Ort genau auf die vorherrschende Strömungssituation abzustimmen. Hierbei wurden verschiedene Lamellen-Kombinationen eingestellt und anschließend das Strömungsverhalten mittels Uranin-Tracer visualisiert. Der Tracer wurde dabei schlagartig in einer Linie quer zur Strömung vor der Lamellenwand eingegeben.

Das effektivste Ergebnis wurde mit je acht Lamellen pro Ebene erreicht. Die erste Ebene besteht aus zwei 3er Gruppen und einer 2er Gruppe. Die zweite Ebene besteht aus vier 2er Gruppen. Innerhalb der Gruppen haben die Lamellen einen Abstand von ca. 2 cm. Die Gruppen selbst haben einen Abstand von ca. 10 cm zueinander. Mit diesen Abständen wird ein schnelles Zusetzen der Lamellen durch Geschwemmsel und größere Feststoffe (z.B. Stoffreste, Tüten oder Plastikabfälle) verhindert.

Abbildung 6.7 zeigt die Installation der Lamellenwand sowie das Strömungsbild, visualisiert durch einen Tracer-Versuch, ohne und mit eingesetzten Lamellen. Ohne Lamellen werden die hohen Fließgeschwindigkeiten in Stromrichtung rechts ersichtlich. Auf der linken Seite bilden sich hingegen leichte Rückströmungen aus. Hier ergibt sich also eine inhomogene Strömung. Mit eingesetzten Lamellen breitert sich die Strömung hingegen gleichmäßig aus und die Ausbildung einer Rückströmung wird verhindert.



Abbildung 6.7: Installation der Lamellen (oben) und Strömungsbild mit und ohne eingesetzten Lamellen (unten)

Filterrohr zur Verhinderung von Feststoffeinträgen:

Der Übergang von Einlaufbecken zu Fallleitung bestand ursprünglich nur aus einem einfachen Durchbruch der Fallleitung in das Einlaufbecken. Im Rahmen der Umbaumaßnahmen des Einlaufbeckens wurde daher vor dem Einlass eine Schwelle betoniert, um den Eintrag von abgelagerten Sedimenten und Feststoffen zu verhindern. Direkt vor der Schwelle befindet sich das Spülschütz des Einlaufbeckens, wodurch Ablagerungen während der Spülung automatisch ausgetragen werden. Die Schwelle wurde dabei so dimensioniert, dass während des Spülprozesses keine Sedimente oder Feststoffe zum Einlass transportiert werden können. Da, wie in Abschnitt 5.6.1 beschrieben, bereits einzelne Feststoffe zu massiven Schäden an den Fördermodulen führen können, wurde der offene Einlass der Fallleitung durch ein Filterrohr ersetzt. Hierdurch soll vermieden werden, dass Abplatzungen an der Betonoberfläche des Einlaufbeckens selbst oder aber Feststoffe während Mess-, Kalibrier oder Wartungsarbeiten am Einlaufbecken in die Fallleitung eingetragen werden. Das Filterrohr hat eine Länge von 2 m und einen Nenndurchmesser DN350. Die Spaltweite SW beträgt 1,5 mm. Aufgrund der Form der Schwelle wurde das Filterrohr über eine Etage DN350, bestehend aus zwei 90°-Bögen, in die Fallleitung eingeführt. Die Befestigung und Abdichtung der Etage wurde durch eine Ringraumabdichtung umgesetzt. Diese befindet

sich zwischen der Fallleitung DN500 und der Etage DN350. Durch eine Zug-Verpressung mittels Verschraubung dehnt sich die Ringraumabdichtung radial aus und dichtet gegen die Innenseite der Fallleitung und die Außenseite der Etage ab. Das Filterrohr selbst wurde durch Rohrschellen und Betonanker weiter stabilisiert. In Rahmen von Modellversuchen wurde ein Fassungsvermögen von 250 l/s ermittelt (siehe Abschnitt 5.6.3). Nach der Installation wurde das Fassungsvermögen durch einen Versuch am Einlaufbecken validiert. Hierbei ergab sich ein Fassungsvermögen von ca. 350 l/s. Ein Betrieb der Fördermodule im Parallelbetrieb mit einem Gesamtwasserbedarf von ca. 110 l/s ist somit uneingeschränkt möglich. Abbildung 6.8 zeigt den Einbau des Filterrohrs und der Etage.



Abbildung 6.8: Filterrohr und Etage im eingebauten Zustand

Balken zur Abführung von Treibgut:

Um den Eintrag von Treibgut (insbesondere von Blättern und Geäst) aber auch den anthropogenen Eintrag (wie z.B. Tüten oder Plastikteile) zu verhindern, wurde ein Balken zur Abführung dieser Objekte über das Wehr des Einlaufbeckens installiert. Der Balken wurde in einem Winkel von ca. 30° angebracht. Entgegen einer üblicherweise Verwendung findenden Schwimmbalkens, schwimmt dieser Balken nicht auf der Wasserspiegeloberfläche, da Treibgut nur über das Seitenwehr abgeführt werden kann. Befindet sich der Wasserspiegel unterhalb des Seitenwehrs und damit auch unterhalb des Balkens, wird die Förderanlage durch das Monitoring- und Alarmsystem automatisch gestoppt, sodass kein Treibgut in das Leitungssystem eingetragen werden kann. Abbildung 6.9 zeigt die Installation des Balkens und die Abführung von Treibgut während des Anlagenbetriebs.



Abbildung 6.9: Installation des Balkens (links) und Einsatz des Balkens zur Abführung von Treibgut (rechts)

6.2.6 Wartungs- und Instandhaltungsstrategien

Das wichtigste Element, um Störungen der Betriebsabläufe zu vermeiden, sind ordnungsgemäß installierte und instand gehaltene technische Einrichtungen. Die regelmäßige Instandhaltung dient neben einem fachgerechten Betrieb auch dem wirtschaftlichen Anlagenerhalt. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit Wartungs- und Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung der sozioökonomischen und soziokulturellen Aspekte. Ziel der hier vorgestellten Strategien ist die Vermeidung bzw. Minimierung von Schadensfällen durch die Umsetzung von geplanten, präventiven, in festgelegten Abständen.

Bei einem fachgerechten Betrieb und sachgemäßen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten kann das Wasserförderungssystem über sehr lange Zeiträume nachhaltig und wirtschaftlich erfolgreich betrieben werden. Obwohl die Anlage mit vergleichsweise wenig Wartungsaufwand zu handhaben ist, sind regelmäßige Kontrollgänge an der wasserbaulichen Infrastruktur von größter Wichtigkeit. Vor allem nach starken Regenfällen setzen sich häufig große Mengen an Feststoffen in den Absetzbecken ab. Diese können bei fehlenden Reinigungsarbeiten remobilisiert und in das Rohrleitungssystem eingetragen werden. Weiter können Treibgut und Geschwemmsel an den Rechen oder Verschmutzungen des Filterrohrs im Einlaufbecken die Effizienz, aber auch die Lebensdauer der Anlage verringern. Durch regelmäßige Kontrollgänge können Schwachstellen frühzeitig erkannt und darauf entsprechend reagiert werden. Grundvoraussetzung ist somit eine zuverlässige und regelmäßige Durchführung der in Abbildung 6.10 aufgezeigten Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen in regelmäßigen Abständen. Nur auf diese Weise kann der Anlagennutzungsgrad auf einem hohen Niveau gehalten werden. Hierbei sollen der Ist-Zustand der Maschinentechnik, Steuerungstechnik und wasserbaulichen Infrastruktur mit einem Soll-Zustand verglichen und bei Abweichungen bestimmte wiederherstellende Maßnahmen durchgeführt werden. In einem eigens hierfür erstellten Wartungshandbuch wurden für eine hohe Verständlichkeit einfache schematische Darstellungen verwendet und der Soll-Zustand fotografisch abgebildet. Es enthält Informationen über die Spezifikation al-

ler Systemkomponenten, Art und Häufigkeit erforderlicher Wartungsarbeiten sowie Handlungsanweisungen.

Die Wartung der Wasserförderermodule erfolgt durch KSB-Servicetechniker aus Vietnam. Aufgrund des Innovationscharakters wurden die KSB-Servicetechniker bereits während der Inbetriebnahme mit eingebunden und durch KSB Frankenthal vor Ort eingearbeitet. Um die Lebensdauer der Fördermodule zu verlängern, wurde ein Wartungsvertrag zwischen den Betreibern und KSB Vietnam abgeschlossen. Die Inhalte des Vertrags (Wartungsintervall, Ersatzteilbeschaffung etc.) wurden mit der deutschen und vietnamesischen Koordinationsstelle (IWG und VIGMR) sowie KSB Frankenthal engmaschig abgestimmt. Der Vertrag sieht eine jährliche Kontrolle der Fördermodule u.a. mit Überprüfung der Laufruhe, der Kupplungsausrichtung, der Wellendichtungen (Gleittringdichtung) und die Lager mit ggf. Austausch vor sowie eine jährliche Funktionkontrolle bei den Absperr- und Rückschlagorganen. Das Vorhalten von Ersatzteilen liegt in der Verantwortung des Betreibers und kann bei Bedarf über KSB Vietnam beschaffen werden. Die Angaben zu Verschleißteilen sowie zur erforderlichen Lagerhaltung von Ersatzteilen sind im Wartungs-handbuch aufgeführt.

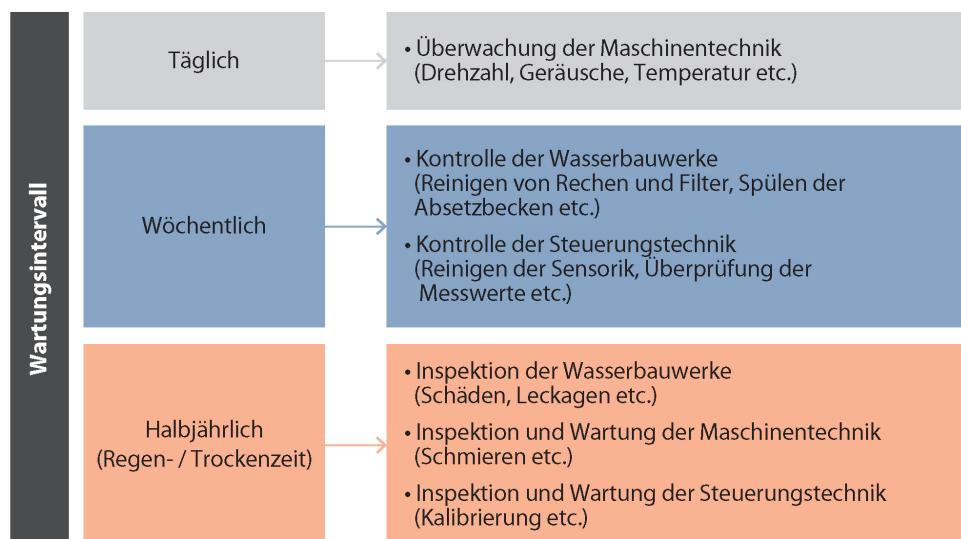


Abbildung 6.10: Wartungs- und Instandhaltungsstrategien für einen nachhaltigen effektiven und sicheren Betrieb des Wasserförderungssystems

6.2.7 Sicherstellung der Funktionsfähigkeit

Zur Sicherung der Funktionalität des Gesamtsystems ist die redundante Erfassung der Betriebsparameter von entscheidender Bedeutung. Wenngleich das in Abschnitt 5.7 vorgestellte angepasste Monitoring- und Alarmsystem den Anlagenbetrieb vollständig überwacht und den Einfluss menschlicher Fehlbedienung reduziert, wird der Umgang des Betriebspersonals mit dem System auf die wenigen Wartungszyklen sowie Warn- und Alarmmeldungen beschränkt. Ein routinierter Umgang dient jedoch dem frühzeitigen Erkennen von Schwachstellen sowie einem verbesserten Verständnis über die Funktionsweise der Anlage. Insbesondere die regelmäßige Überwachung der Betriebsparameter ist für einen effizienten und technisch-wirtschaftlich nachhaltigen Anlagenbetrieb wichtig. Neben den

durchzuführenden Drehzahlmessungen betrifft dies die Überwachung des Drucks im Rohrleitungssystem vor dem Anfahren der Fördermodule sowie die regelmäßige Kontrolle der kontinuierlich aufgezeichneten Trübungswerte.



Abbildung 6.11: Überwachung der Drehzahl, des Vordrucks und der Trübung (oben), Installation des KSB Guard System (Online-Anbindung) (unten)

Die Moduldrehzahl kann mithilfe eines Handdrehzahlmessgerätes regelmäßig überprüft werden. Durch die redundante Messung können Messwertfehler bspw. aufgrund von verschmutztem Reflexionslichttaster frühzeitig erkannt werden. Zudem wird ein Bewusstsein für den jeweiligen Betriebspunkt der Maschinen geschaffen, welcher sich bei Veränderung der Fallhöhe verschiebt und zu einer Änderung der Drehzahl führt.

Der Druck im Rohrleitungssystem muss vor dem Anfahren der Fördermodule durch die installierten Manometer an der Fall- und Förderleitung überprüft werden. Hierbei darf der Druck in der Förderleitung die 19,5 bar nicht unterschreiten, da ansonsten beim Anfahren kein Gegendruck auf der Pumpenseite vorhanden ist und dies zum Durchgang an den PAT führt (siehe Abschnitt 7.1.2).

Zur Charakterisierung der Trübung und somit zur Abschätzung der Feststofffracht kommt die Secchi-Scheibe zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein im 19. Jahrhundert entwickeltes und noch heute gebräuchliches limnologisches Hilfsgerät. Durch eine kreisförmige Blechscheibe mit vier abwechselnd schwarz weiß lackierten Sektoren kann die Sichttiefe ermittelt werden. Der Messwert ist abhängig von den Seheigenschaften, der Wetterlage und deren Lichteigenschaften. Die Messungen im Einlaufbecken sind in regelmäßigen Abständen zur gleichen Tageszeit und im Schatten durchzuführen. Da es sich bei der

Secchi-Scheibe um eine Abschätzung der Trübung handelt, ist ein zusätzliches Handmessgerät zur redundanten Erfassung der Trübung vorgesehen. Durch den Vergleich mit den kontinuierlich aufgezeichneten Trübungswerten können Abweichungen, aufgrund eines defekten Reinigungssystems, mangelnder Wartung oder unzureichender Kalibrierung, schneller identifiziert und die Betreiber hinsichtlich der maschinenspezifischen Grenzwerte sensibilisiert werden.

Durch die Installation eines cloud-basierten Überwachungssystems (KSB Guard Systems) an den Fördermodulen kann der Betriebszustand von jedem Ort aus überwacht werden. Über die Sensoreinheiten an den beiden PAT sowie an den Druck- und Saugseiten der Pumpen werden die Temperatur- und Schwingungsdaten aufgenommen. Ein Gateway mit LTE-Antenne sammelt die Daten und übermittelt diese per Mobilfunknetz an die KSB Cloud. Der Zugriff auf die Daten erfolgt über die KSB Guard App. Aufgrund des Pilotcharakters der Anlage und den somit fehlenden Betriebserfahrungen kommt der digitalen Zustandsüberwachung von Deutschland aus eine zentrale Rolle zu. Bei Abweichungen vom Normalbetrieb wird eine Meldung ausgegeben, sodass auch von Deutschland aus umgehend Kontakt mit dem Personal aufgenommen werden kann.

6.3 Technologie- und Wissenstransfer

6.3.1 Schulungsunterlagen

Auf operationeller Ebene ist der Technologie- und Wissenstransfer ein entscheidendes Kriterium für die Nachhaltigkeit des Wasserfördersystems, für deren Betrieb bislang keine Erfahrungswerte vorliegen. Der Technologie- und Wissenstransfer beschreibt die systematische und zielgerichtete Überführung des neuen Wissens zum Betreiber. Ein solcher Transfer ist ein entscheidender Impulsgeber für Lösungen der vielfältigen Problemlagen und ermöglicht die Bewertung der Übertragbarkeit der Technologien und Methoden auf andere Standorte mit vergleichbaren Rahmenbedingungen. (BMBF, 2021)

Entscheidend für solch einen transparenten und umfassenden Wissenstransfer ist die Ausarbeitung von Schulungsprogrammen und -unterlagen, welche sich auf den Wissensstand der künftigen Betreiber beziehen. Um ein Bewusstsein für die mit dem Betrieb einhergehende technische, betriebliche und finanzielle Verantwortung zu schaffen, wurde eine didaktisch fundierte, grafische Aufbereitung aller wesentlichen Inhalte angestrebt. Durch die visuelle Darstellung aller relevanten Systemkomponenten und der eindeutigen Bezeichnung durch Kennziffern können Kommunikationsprobleme (Missverständnisse, Fehlinterpretationen etc.) aufgrund von Sprachbarrieren vermieden werden. Für den Alltag ergänzend wurden Beschilderungen und Poster zur Vermittlung von technischen und betrieblichen Zusammenhängen entworfen.

In dem eigens ausgearbeiteten Betriebs- und Wartungshandbuch sind Informationen über die Spezifikation aller Maschinen und Komponenten enthalten. Das Wartungshandbuch beinhaltet es auf einfache und prägnante Weise die Art und Häufigkeit erforderlicher Wartungsarbeiten, Soll-Zustände der einzelnen Komponenten sowie entsprechende Handlungsanweisungen. Zur Vereinfachung der Ersatzteilbeschaffung sind zudem Angaben zu den Verschleißteilen sowie zur erforderlichen Lagerhaltung von Ersatzteilen enthalten. Das

Betriebshandbuch umfasst Informationen über Betriebseinstellungen sowie Handlungsempfehlungen bei Störfällen. Für eine rasche Informationsbeschaffung ist das schrittweise Vorgehen beim An- und Abfahren im Normal- und Sonderbetrieb vereinfacht in Grafiken aufbereitet.

Die Herausforderungen lagen darin, alle Grafiken einheitlich zu gestalten und die Betriebseinstellungen auf nur wenige Schritte zu beschränken. Hierdurch sollen Betriebsfehler durch z.B. falsche Einstellungen der Armaturen verhindert werden. Weiter kann eine falsche Reihenfolge beim Öffnen der Armaturen zu einem ungewollten Anfahren der Fördermodule durch einen Druckausgleich im Rohrsystem führen. Der Aufbau der Grafiken wird im Folgenden am Beispiel des Parallelbetriebes näher beschrieben.

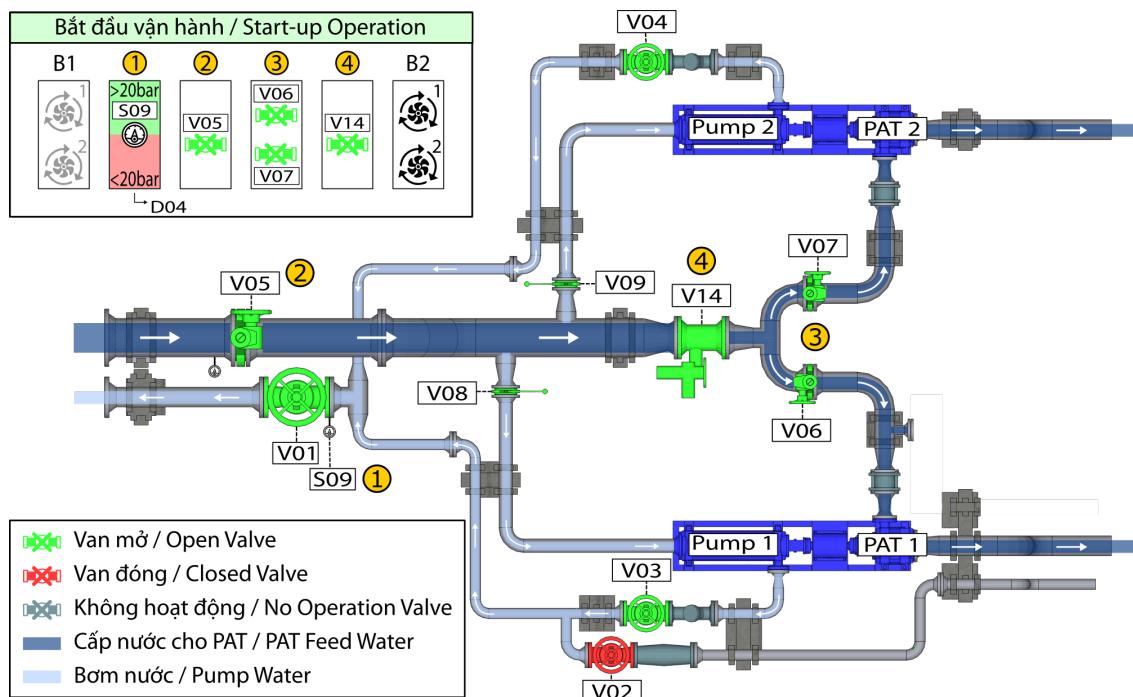


Abbildung 6.12: Grafik mit Betriebsvorgaben für das schrittweise Anfahren bei Betrieb von Fördermodul 1 und Fördermodul 2 (B2)

Abbildung 6.12 zeigt den Anfahrvorgang bei parallelem Betrieb. Das schrittweise Vorgehen ist in dem Kästchen dargestellt. Die entsprechende Einstellung der Armaturen (offen / zu) ist farblich (grün / rot) gekennzeichnet. Der Druck in der Fall- und Förderleitung kann durch einen Manometer abgelesen werden. In der Förderleitung muss ein Mindestdruck von 20 bar vorhanden sein, um ein sicheres Anfahren der Fördermodule zu gewährleisten. Bei Unterschreitung dieses Druckes wird auf den Anfahrvorgang bei leerer Förderleitung verwiesen. Nachdem die Armaturen entsprechend der Abbildung eingestellt sind, können die Fördermodule über das RKV (V14) in der gemeinsamen PAT-Druckleitung angefahren werden.

Die Einstellungen für das An- und Abfahren im Normalbetrieb (Einzel- und Parallelbetrieb) sowie für Sonderbetriebszustände (Spülvorgang, Entleerung, Füllvorgang) sind in Abbildung 6.13 gegeben.

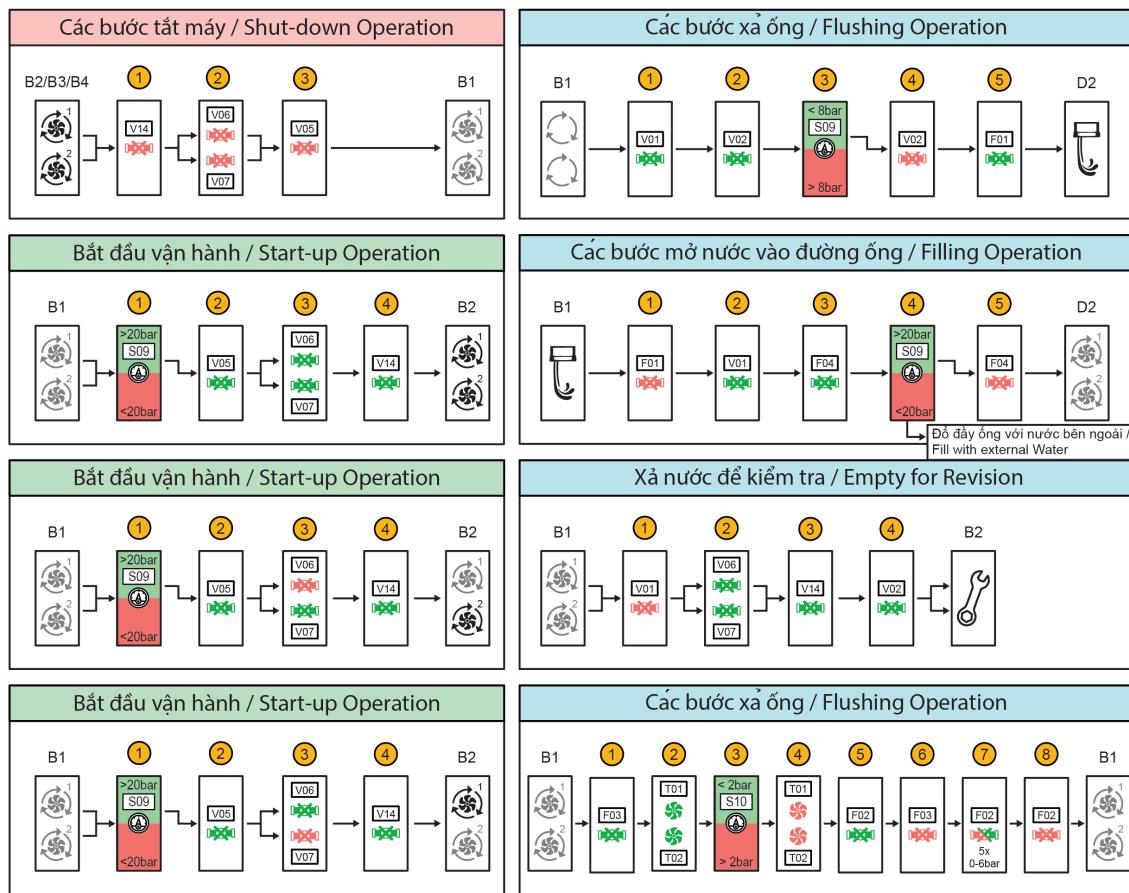


Abbildung 6.13: Schrittweise Vorgehen für die Einstellung von Normal- und Sonderbetriebszuständen

Weiterhin sind ergänzend hierzu Handlungsempfehlungen bei Warn- und Alarmmeldungen im Überwachungssystem vereinfacht dargestellt. Das Personal kann anhand der Warnleuchten und der Informationen in der Grafik feststellen, welche Maßnahmen zur Behebung der Situation zu ergreifen sind. Zudem können hierdurch technischen und betrieblichen Zusammenhänge übermittelt werden. Die Grafik mit den Handlungsempfehlungen bei Störfällen ist in Abbildung 6.14 dargestellt.

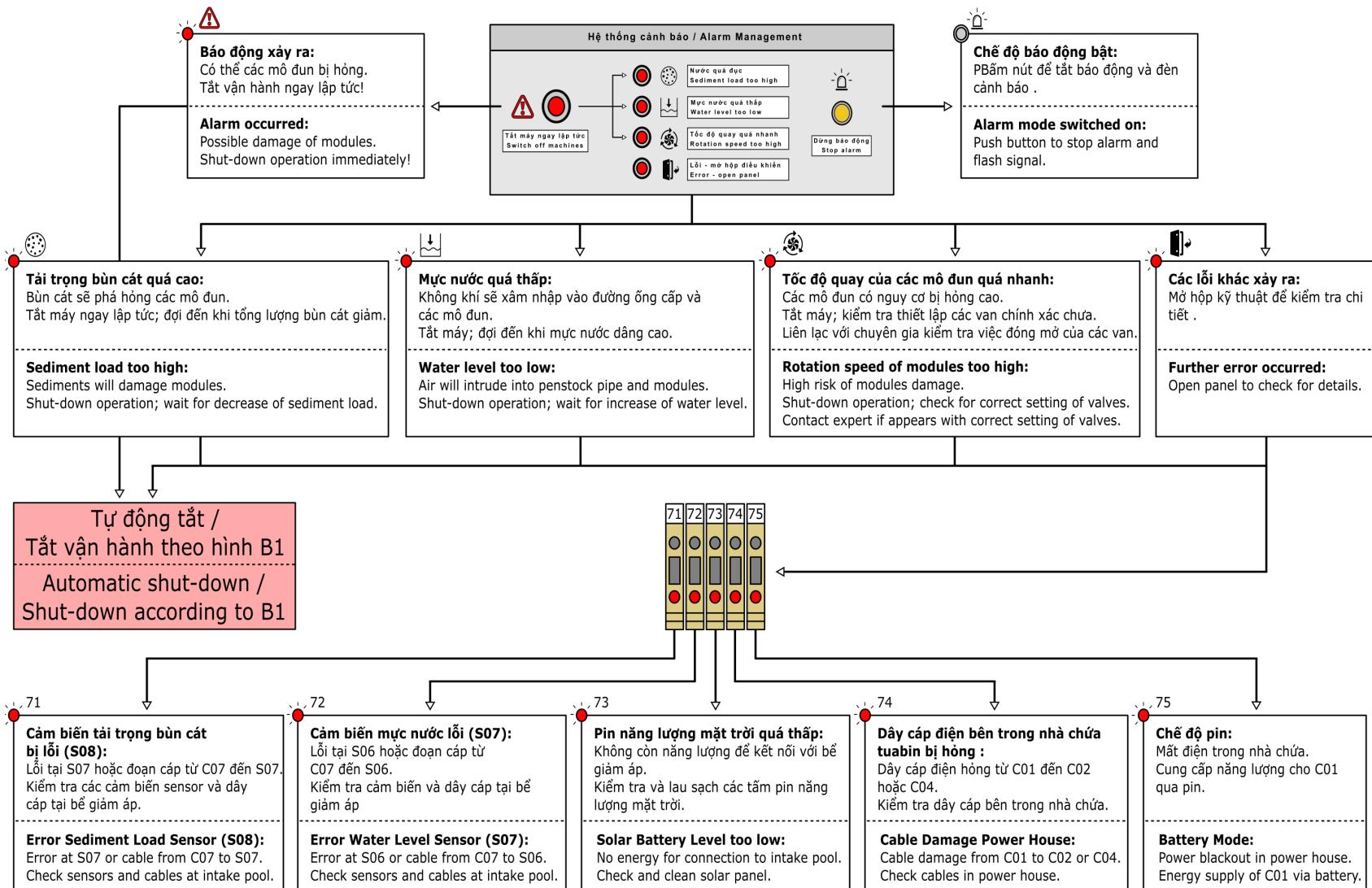


Abbildung 6.14: Handlungsempfehlungen bei der Anzeige von Störfällen am Schaltschrank

6.3.2 Ausbildungsprogramm

Die künftigen Betreiber der Demonstrationsanlage sind bereits für das vorhandene Wasserversorgungssystem der Distrikthauptstadt zuständig (siehe Abschnitt 4.2.2) und besitzen einschlägige (Fach-) Kenntnisse in Bezug auf Wasserförderanlagen. Neben dem Betrieb der Wasserförderungssysteme in der Distrikthauptstadt ist das Unternehmen auch für die Wartung und für Reparaturen am Leitungsnetz verantwortlich. Einige Mitarbeiter besitzen darüber hinaus Fachkenntnisse im Bereich Elektronik.



Abbildung 6.15: Praxisschulungen an der wasserbaulichen Infrastruktur sowie an der Demonstrationsanlage auf Basis der eigens hierfür erstellten Handbücher und Poster

Zur Qualifizierung des Personals wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Schulungen konzipiert und umgesetzt. Zunächst wurde ein Bewusstsein für die mit dem Betrieb der Anlage einhergehende technische, betriebliche und finanzielle Verantwortung geschaffen. Versäumnisse wie u.a. falsch eingestellte Armaturen sowie deren technische und betriebliche Konsequenzen waren Gegenstand der wiederholt durchgeführten Schulungen für das Personal. Zur Verdeutlichung der relevanten Betriebs- und Wartungsaspekte und der Vermittlung der technischen und betrieblichen Zusammenhänge wurden die in Abschnitt 6.3.1 entwickelten Schulungsunterlagen genutzt. Während der Ausbildung wurden sämtliche Unterlagen eingehend mit dem Personal besprochen und bei Verständnisproblemen die Unterlagen entsprechend den Hinweisen des Personals angepasst. Mithilfe der Plakate und Praxisschulungen wurde das Personal mit den unterschiedlichen Betriebszuständen vertraut gemacht. Die Reaktion auf Störungen im Alarm-Management-System sowie Fehlererkennung und deren Beseitigung war ebenfalls Teil der Ausbildung.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf den Routinemessungen, die im Dauerbetrieb zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit erforderlich sind. Dies betraf auch die ganzheitliche Betrachtung des Anlagenkonzeptes und die Einschätzung des Zustandes der Anlage aus technischer Sicht.

Auf Basis der im Rahmen der Schulungsmaßnahmen vermittelten Kenntnisse konnte die Demonstrationsanlage probeweise in den Regelbetrieb überführt werden. Mit zunehmender Betriebsdauer konnte die Unterstützung sukzessive reduziert und die technisch-betriebliche Verantwortung an die Betreiber übergeben werden.

6.3.3 Übergabe der Pilotanlage

Nach einer umfangreichen Implementierungs- und Schulungsphase erfolgte im Oktober 2019 im Rahmen einer feierlichen Zeremonie die Einweihung und offizielle Übergabe des wasserkraftbetriebenen Wasserförderungssystems an die Provinzregierung von Ha Giang resp. den örtlichen Betreiber CERWASS. Hierzu waren neben den deutschen und vietnamesischen Projektpartnern auch Vertreterinnen und Vertreter des BMBF und des vietnamesischen Forschungs- und Technologieministeriums sowie KSB SE & Co. KGaA anwesend. Einige Impressionen sind in Abbildung 6.16 dargestellt.



Abbildung 6.16: Wasserkraftwerk mit Bypass-System (oben), Eröffnungsfeier und symbolische Inbetriebnahme der Fördermodule (unten)

Durch die erfolgreiche Implementation der Referenzanlage wurde ein komplett energieautarkes, ökonomisch und ökologisch nachhaltiges System geschaffen, das zudem einfach und mit wenig Wartungsaufwand zu handhaben ist. Die Kapazitäten der Anlage reichen

aus, um mehr als 10.000 Menschen unabhängig von Regen- und Trockenzeiten mit Wasser zu versorgen. Die implementierte Modellanlage dient neben der Wasserförderung auch als Demonstrationsobjekt und bietet durch die aufgezeigten Techniken und die repräsentativen naturräumlichen Randbedingungen hervorragende Möglichkeiten für die Übertragung auf Standorte mit vergleichbaren Randbedingungen.



Abbildung 6.17: Referenzanlage Seo Ho zur Versorgung von mehr als 10.000 Menschen mit Wasser in der Modellregion

Kapitel 7

Evaluation und Übertragbarkeit der Pilotanlage

Die hier vorgestellten Evaluationsergebnisse bilden die Grundlage für die Beurteilung der Funktionalität der technischen Komponenten sowie der Effizienz und Nachhaltigkeit des wasserkraftbetriebenen Wasserförderersystems. Aufgrund der bis dato bestehenden Einreisebeschränkungen durch die Corona-Pandemie (Stand: September 2021) und der fehlenden Betriebsdaten erfolgte eine erste Evaluation der Pilotanlage auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse während der knapp einjährigen Testphase. Eine umfassende fundierte Bewertung des Anlagenbetriebes in enger Zusammenarbeit mit den lokalen Betreibern steht somit noch aus. Die Anlage wurde während der Testphase unter Aufsicht der deutschen Projektpartner temporär betrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Evaluation leistet einen wichtigen Beitrag zur Erschließung weiterer Regionen mit vergleichbaren Randbedingungen.

7.1 Betriebliche Zustandsanalyse

7.1.1 Validierung der Förderleistung

Zur Validierung der Leistungsfähigkeit der Wasserfördermodule wurde die Fördermenge im Einzel- und Parallelbetrieb mittels eines induktiven Ultraschall Durchflussmessgerätes (UDM) ermittelt. Die Messwerte wurden zusätzlich punktuell durch Pegelmessungen im Verteilspeicher Ma U sowie einer nachgeschalteten Volumenbilanzierung überprüft. Die hydraulischen Randbedingungen wurden während den Messungen konstant gehalten; eine Drosselung des Durchflusses fand nicht statt. Die ermittelte Fördermenge im Einzelbetrieb lag für Fördermodul 1 bei etwa 10,6 l/s und für Fördermodul 2 bei etwa 10,1 l/s. Im Vergleich zu den Ergebnissen auf dem Forschungsprüfstand der KSB SE & Co. KGaA (siehe Abschnitt 5.3.5) wurde ein Leistungsdefizit von 8 bis 12 % ermittelt. Im Parallelbetrieb lag die gemessene Fördermenge bei etwa 19,4 l/s und fällt etwa 7 % geringer aus als die Summe der gemessenen Förderströme im Einzelbetrieb. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die im System auftretenden Druckhöhenverluste sich quadratisch mit der Durchflussgeschwindigkeit erhöhen und somit größer ausfallen als beim Einzelbetrieb der Fördermodule. Hierdurch wurden die manometrische Anlagenförderhöhe größer und die

nutzbare Fallhöhe geringer, was somit in einer geringeren Förderleistung resultiert.

7.1.2 Regelungs- und Betriebsverhalten

Aufgrund des Innovationscharakters und den somit fehlenden Erfahrungswerten wurde in Zusammenarbeit mit KSB SE & Co. KGaA das Regelungs- und Betriebsverhalten in Praxistests erprobt. Trotz des Fehlens eines „drehzahlstützenden“ Generators arbeitet das Fördermodul in allen eingestellten Lastpunkten ausgesprochen laufruhig und stabil. Die Erfahrungswerte bezüglich dem Anfahrvorgang resp. Drehzahlverhalten und der mechanische Belastbarkeit im Hochdruckbereich sind im Folgenden zusammengefasst:

Beim Anfahrvorgang kann zwischen den drei Bereichen Anfahren bei leerer Förderleitung (1), Anfahren bei Vordruck (2) und Anfahren bei vollständig gefüllter Förderleitung (3) unterschieden werden. Bei einer Fallhöhe von 195 m und leerer Förderleitung findet bei geöffneten Armaturen nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren ein Druckausgleich zwischen Fall- und Förderleitung statt. In diesem Zustand findet keine echte Förderung der Pumpe statt und die PAT wird auf ihre Durchgangsdrehzahl von etwa 4.500 min^{-1} beschleunigt. Um unzulässig hohe Drehzahlen und somit Schäden an den Fördermodulen zu vermeiden, wird das RKV sowie der Absperrschieber auf der Druckseite der Pumpe gedrosselt. Um eine unzulässige Erwärmung des Wassers zu vermeiden, dürfen die Hochdruckpumpen nicht gegen geschlossenen Schieber laufen. Die Drosselstellung der Armaturen ist so zu wählen, dass der Druck auf der Antriebs- und Lastseite etwa einem Betriebspunkt in Bestpunktähnlichkeit entspricht. Durch das schrittweise Öffnen der Armaturen kann die Förderleitung bis auf die Höhe des Wasserstandes im Einlaufbecken gefüllt werden. Ist das Gegenmoment größer als das Antriebsmoment, verringert sich die Drehzahl des Antriebes. Bei einem Vordruck von 195 m beginnt die Förderung der Pumpe und es stellt sich bei geöffnetem Schieber eine Moduldrehzahl von etwa 2.550 min^{-1} ein.

Das Anfahren im Bereich 2 und 3 erfolgt über das RKV bei geöffnetem Schieber auf der Pumpenseite. Während des vollständigen Füllens der Förderleitung wird ein Gegendruck aufgebaut, und es stellt sich der Drehzahlverlauf gemäß der Ergebnisse auf dem Forschungsprüfstand ein. Bei einer Turbinenfallhöhe von 195 m und einer Förderhöhe von 360 m ergibt sich im stationären Betrieb eine Moduldrehzahl von ca. 2.720 min^{-1} .

Die Praxistests haben gezeigt, dass beim Anfahren einer leerer Förderleitung fachspezifische Erfahrungswerte benötigt werden. Eine falsche Drosselstellung kann schnell dazu führen, dass die Fördermodule außerhalb der Kennlinie fahren und Schäden an den Fördermodulen verursachen. Um dies zu vermeiden, wurde nachträglich die Vorkammer des Verteilspeichers über einen Bypass und eine Absperrarmatur mit der Förderleitung verbunden. Hierdurch kann die Förderleitung bis auf Höhe des Einlaufbeckens mit Wasser gefüllt werden. Das Anfahren erfolgt dann entsprechend den Bereichen 2 und 3 über das RKV.

7.1.3 Bewertung der Absetzleistung im Einlaufbecken

Die Absetzleistung im Einlaufbecken wurden mittels Schwebstoffporbenentnahme bestimmt. Die Messdatenaufbereitung und anschließende Auswertung erfolgten durch das AGW-AqG. Im Folgenden sind die Ergebnisse zusammengefasst:

Während der Regenzeit wurden Sedimentproben im Einlauf und Auslauf des Einlaufbeckens entnommen. Die Ergebnisse der Schwebstoffanalyse zeigten, dass im Einlaufbereich der Grenzkorndurchmesser von 0,25 mm mit einem Anteil von rund 43 Gewichts-% überschritten wurde. Etwa 36,1 Gewichts-% wurden durch die kritische Korngröße von 0,25 mm repräsentiert. Die Korngrößenfraktionen 0,036 - 0,125 mm waren mit lediglich 34,5 Gewichts-% vertreten. Im Auslaufbereich haben sich Partikel mit Durchmessern < 0,25 mm abgesetzt. Der Großteil der Partikel (rund 93,3 Gewichts-%) repräsentierte Durchmesser < 0,125 mm. Partikel mit Durchmessern $\geq 0,25$ mm waren in der Probe nicht vorhanden. Die mineralogische Untersuchung der aufgetrennten Korngrößen bestätigte Quarz als dominierende Mineralphase. In Abbildung 7.1 ist die Korngrößenverteilung der gesammelten Partikel im Ein- und Auslauf des Einlaufbeckens während der Regenzeit im Juli 2019 dargestellt.

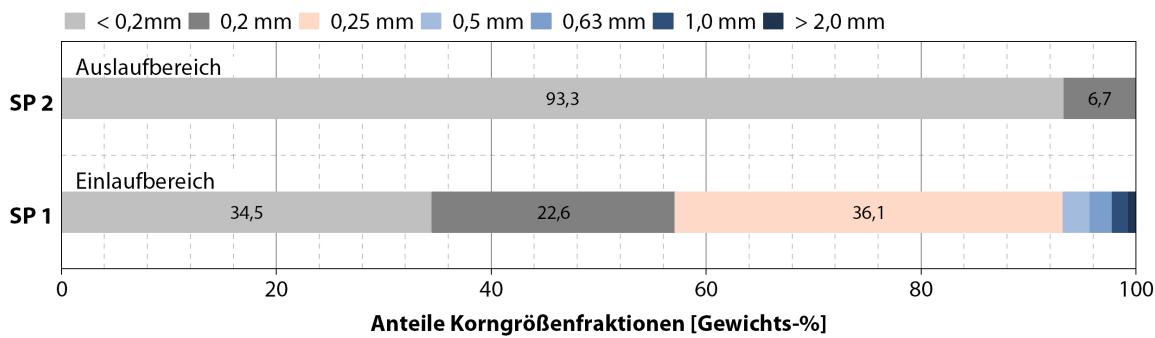


Abbildung 7.1: Korngrößenverteilung der gesammelten Sedimentpartikel am Einlauf (SP 1) und Auslauf (SP2) des Einlaufbeckens während der Regenzeit

Das Absetzbecken funktioniert demnach im gewünschten Maße. Lediglich durch Starkniederschläge wird eine über dem Durchschnitt liegende Feststofffracht mobilisiert, die dann auch größere Feststoffkomponenten enthalten kann. Für diesen Extremfall wurde das in Abschnitt 5.7 vorgestellte Monitoring- und Alarmsystem installiert. Bei Überschreitung eines hinterlegten NTU-Wertes als Indikator für die Feststofffracht wird ein Alarm ausgelöst und die Anlage automatisch abgeschaltet.

7.1.4 Auswertung der Benutzerfreundlichkeit

Im Rahmen der Implementierungsarbeiten wurde ein umfassender Technologie- und Wissenstransfer realisiert, um die lokalen Betreiber auf den eigenständigen Betrieb vorzubereiten (siehe Abschnitt 6.3). Es konnten alle erforderlichen Aufgaben an das Betriebspersonal übergeben werden. Nach einer vierwöchigen Betriebsbegleitung wurde im Zuge dieser Arbeit eine Befragung des Personals durchgeführt. Die Befragung dient dazu, eine Evaluierung des geleisteten Technologie- und Wissenstransfer vorzunehmen und den eventuellen Bedarf weiterer Schulungen abzuleiten. Bei der Befragung wurde das gesamte Betriebspersonal befragt (insgesamt 4 Personen, keine Befragung von Führungskräften). Die Bewertung erfolgte im 10-Punkte-System (1: Sehr schlecht, 10: Sehr gut).

Der Befragung zufolge, werden die Schulungs-, Betriebs- und Wartungsunterlagen als hilfreich erachtet (Zustimmung: 8/10) und die technischen Anleitungen als verständlich

angegeben (Zustimmung: 7.75/10). Auch auf detaillierte Fragen bezüglich dieser Thematik gab es eine positive Rückmeldung. So sind nach Aussage des Betriebspersonals die stetige Überwachung der Anlage sowie die regelmäßige Wartung und Instandhaltung von entscheidender Bedeutung für einen effizienten Betrieb. Darüber hinaus ist sich das Betriebspersonal bewusst, dass z.B. ein unzulässig hoher Feststoffeintrag zu Schäden an den Maschinensätzen führt. Durch die bewusste Auseinandersetzung mit dem Alarm- und Monitoringsystem während den Schulungsprogrammen ist das Betriebspersonal mit dessen Funktionsweise vertraut. Den Umfrageergebnissen zufolge verstehen sie die unterschiedlichen Alarmfunktionen des Steuerungssystems (9/10) und die Gefahr von möglichen Schäden an den Maschinen bei Über-/ Unterschreitung der Grenzwerte (10/10). Das Betriebspersonal fühlt sich ausreichend ausgebildet, um auch während Ausnahmesituationen bspw. Grenzwertüberschreitungen sachgemäß handeln zu können. Es wurde angegeben, dass es bei technischen Fragen oder Problem-/ Notsituation klare Ansprechpartner (Führungskräfte) gibt (10/10). Die bisherigen Erfahrungen bestätigen diese Einschätzung. Während des ersten Betriebsjahres wurden Problem- oder Notsituationen an die Führungskraft und anschließend an das KIT gemeldet. Über Fotodokumentation wurden die Schadensfälle analysiert und Lösungen erarbeitet. Weiterhin wurde in der Befragung angegeben, dass die technischen Hintergründe prinzipiell verständlich sind (Zustimmung: 6.5), jedoch weitere Schulungen wünschenswert sind (Zustimmung: 8).

Das Engagement des Personals ist insgesamt sehr gut. Es findet ein regelmäßiger Austausch zwischen den Betreibern und dem KIT mittels Sozialer Medien statt. Das transdisziplinäre Arbeiten ist hierbei sowohl für mögliche Anpassungen des Anlagenbetriebes als auch zur wissenschaftlichen Evaluierung des Gesamtsystems von großer Bedeutung. Das Personal gibt an, stolz auf das Mitwirken in einem interdisziplinären Verbundprojekt zu sein, und die Möglichkeit zu haben, mit neuen Technologien die lokale Bevölkerung unterstützen zu können. Die Betriebsbegleitung hat gezeigt, dass die Plakate insbesondere bei nicht alltäglichen Betriebszuständen und zur Analyse von Fehlermeldungen genutzt werden. Kontrollgänge an der wasserbaulichen Infrastruktur werden stattdessen in sehr unregelmäßigen Abständen durchgeführt. Die Betriebsparameter an der Pumpstation werden hingegen regelmäßig beim An- und Abfahren der Module kontrolliert. Dementsprechend wurden zusätzliche Schulungen angesetzt, um die Hintergründe der maßgeblichen Aufgaben weiter zu vertiefen.

7.2 Technische Zustandsanalyse

7.2.1 Maschinentechnik

Die aufgetretenen technischen Problemen resp. Schadensfälle und die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Optimierung sowie die Bewertung der Maschinendynamik sind im Folgenden näher beschrieben:

Schadensanalyse

Beim Bau der Hochdruck-Förderleitung und des Bypasses kam es trotz zahlreicher Schulungen und Hinweise aufgrund fehlender Verschlussklappen und unsachgemäßer Lagerung der Rohre zu einem erheblichen Eintrag von Sedimenten und teils großen Steinen in das

Rohrleitungssystem. Zum Schutz der Fördermodule wurden nachträglich Spülssysteme mit hoher Spülleistung resp. Fließgeschwindigkeiten bis 15 m/s installiert, um die horrenden Mengen an Sedimenten und Steinen aus dem Bypass und der Förderleitung zu entfernen. Dennoch kam es beim Anfahren der Fördermodule zu einem Blockieren der Kupplungen resp. zu einer Zwangsdurchströmung der PAT. Die Ergebnisse der Schadensanalyse zeigten, dass sich im Bereich der Entlastungseinrichtung Partikel festgesetzt hatten.

Um langfristig einen sicheren und effizienten Anlagenbetrieb gewährleisten zu können, wurde durch KSB SE & Co. KGaA der Entlastungskolben durch einen Kolben mit geringerem Durchmesser ausgetauscht. Durch die Aufweitung des Spalts zwischen rotierendem und stationärem Teil resp. die Zunahme der Rückströmung von der Druck- zur Saugseite konnte die Widerstandsfähigkeit der Pumpen gegenüber der Feststoffbeladung erhöht werden. Dem entgegengesetzt waren jedoch Wirkungsgradeinbußen unvermeidlich. Aufgrund der hohen Sensibilität der Fördermodule gegenüber der Feststoffbeladung und der deutlich über dem aktuellen Wasserbedarf liegenden Fördermenge wurde ein Wirkungsgradrückgang hingenommen. Erneute Messungen mittels UDM ergaben eine Reduktion der Leistungsfähigkeit um etwa 8 %. Die geförderte Wassermenge bei Vollastbetrieb lag für Fördermodul 1 bei 9,8 l/s und für Fördermodul 2 bei 9,2 l/s. Im Parallelbetrieb wurde eine Fördermenge von 18,4 l/s ermittelt.

Bewertung der Maschinendynamik

Zur Bewertung der Maschinendynamik wurde das Schwingungsverhalten mithilfe des KSB Guard Systems ermittelt. Die herangezogene effektive Sinkgeschwindigkeit v_{eff} ist ein Maß für den Energie-Inhalt der Schwingungen. Die Messungen erfolgten an den Lagersätzen auf der Antriebs- und Gehäuseseite der Pumpen und PAT. Hierdurch können Einwirkung von Wechselkräften signifikant widergespiegelt und somit der gesamte Schwingungszustand der Maschinen beschrieben werden. Die Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die ermittelten Effektivwerte.

Tabelle 7.1: Ermittelte effektive Schwingungswerte v_{eff} der x-, y- und z-Achse an den Lagersätzen mittels KSB Guard System

	Antriebsseite PAT [mm/s]	Antriebsseite Pumpe [mm/s]	Gehäuseseite Pumpe [mm/s]
Fördermodul 1	$v_{effX} = 0,63$	$v_{effX} = 0,47$	$v_{effX} = 0,60$
	$v_{effY} = 0,24$	$v_{effY} = 0,22$	$v_{effY} = 1,13$
	$v_{effZ} = 0,35$	$v_{effZ} = 0,84$	$v_{effZ} = 0,14$
Fördermodul 2	$v_{effX} = 1,05$	$v_{effX} = 0,33$	$v_{effX} = 0,36$
	$v_{effY} = 0,81$	$v_{effY} = 0,23$	$v_{effY} = 0,21$
	$v_{effZ} = 0,61$	$v_{effZ} = 0,26$	$v_{effZ} = 0,11$

Warngrenzwert: 5,1 mm/s, Alarmgrenzwert: 8,5 mm/s

Die Schwingungswerte lagen in dem Testjahr zwischen 0,11 mm/s und 1,13 mm/s. Der zulässige Grenzwert für die effektiven Schwingeschwindigkeiten mit 8,5 mm/s wurde hierbei nicht überschritten. Grundsätzlich kann durch die regelmäßige Schwingungsuntersuchung

der technische Zustand der Fördermodule abgeschätzt und Schadensfälle frühzeitig erkannt resp. Folgeschäden an Maschinen und Komponenten vermieden werden. Als gängige Ursachen für unzulässig hohe Effektivwerte sind hier insbesondere Fremdkörpereintrag, Verschleißerscheinungen, Anstreifen aufgrund von thermischer Ausdehnung sowie die Anregung durch Ausrichtungsfehler zu nennen.

7.2.2 Alarm- und Monitoringsystem

Um die kontinuierliche und langfristige Funktionsfähigkeit des Alarm- und Monitoringsystems gewährleisten zu können, wurde das System eingehender Funktionstests unterzogen. Hierbei wurden sämtliche Warn- und Alarmzustände simuliert und der automatische Not-Stopp überprüft. Während der Testphase wurden zudem die kontinuierlich gemessenen Betriebsparameter ausgewertet und die Zuverlässigkeit der Anzeige etwaiger Warn- und Alarmzustände bei Überschreitung hinterlegter Grenzwerte überprüft.

Abbildung 7.2 zeigt beispielhaft die Betriebsdatenauswertung mithilfe eines Matlabcodes für die Beurteilung der Funktionalität des Alarm- und Monitoringsystems. Die Anlage befand sich während diesem Zeitraum im Einzelbetrieb. Es konnte um etwa 07:30 Uhr ein relativ schneller Anstieg der Trübung auf etwa 450 NTU beobachtet werden. Nach der Registrierung von drei Grenzwertüberschreitungen (> 30 NTU) wurde der Betrieb automatisch eingestellt. Nachdem die NTU-Werte wieder auf ungefährliche Werte von 5 NTU bis 10 NTU gesunken war, wurde das Einlaufbecken und die Fallleitung von Sedimenten gereinigt. Danach wurde die Anlage wieder in Betrieb genommen.

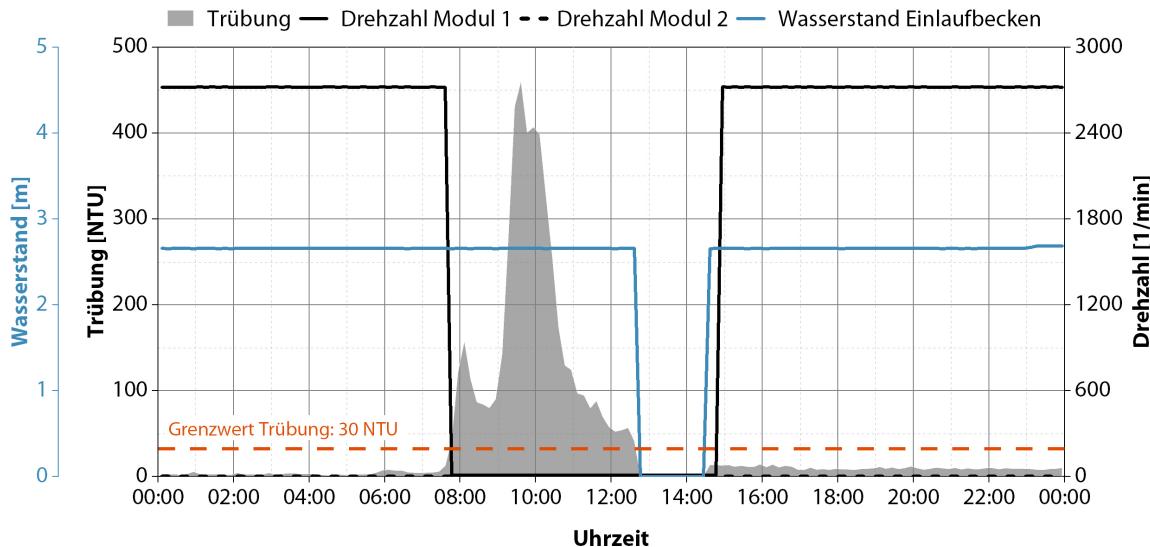


Abbildung 7.2: Graphische Darstellung der automatisch aufgezeichneten Betriebsdaten während eines Trübungseignisses

Während den Regenmonaten konnte mehrmals infolge von Trübungseignissen ein automatisches Abschalten der Anlage beobachtet werden. Dies ist vor allem aufgrund der Sensibilität der Fördermodule gegenüber Feststoffeintrag und dem erfahrungsgemäß schnellen Anstieg der Trübe bei hohen Niederschlags- oder Abflussereignissen von entscheidender

Bedeutung. Durch die kontinuierliche Überwachung des Wasserstandes im Einlaufbecken konnte zudem hohe Wasserverluste aufgrund einer aufgeplatzten Schweißnaht in der Fallleitung frühzeitig erkannt und Schäden an den Fördermodulen vermieden werden (z.B. durch Lufteintrag oder Remobilisierung von Sedimenten). Die Ausgabe der Durchflussmenge in der Fallleitung und der Wasserverluste über das seitliche Streichwehr ermöglichte ein effizientes Zu- und Abschalten der Fördermodule.

Die gesammelten Erfahrungen während der Testphase lassen folgende Aussagen zu:

- Die Ausgabe von Warn- und Alarmzuständen bei Überschreitung hinterlegter Grenzwerte funktioniert im gewünschten Maße. Mithilfe des automatisierten Not-Stopps kann ein rasches Abfahren der Fördermodule sichergestellt werden.
- Durch die Ausgabe der Wasserverluste am Einlaufbecken und der Durchflussmenge in der Fallleitung kann der Einzel- und Parallelbetrieb effizient geregelt werden.
- Mithilfe des entwickelten Matlabcodes können die kontinuierlich aufgezeichneten Betriebsparameter einfach und variabel ausgewertet und Rückschlüsse über die Funktions- und Betriebsweise der Anlage zugelassen werden.

Die wichtigsten Ergebnisse während des eigenständigen Betriebes durch die lokalen Betreiber basierend auf einer Fernbetreuung sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Im Laufe des ersten Betriebsjahres wurden zwei Schadensfälle gemeldet, welche zu Standzeiten einzelner Module führten. Nach Aussage der lokalen Betreiber kam es aufgrund eines technischen Problems in der Regelungstechnik des automatischen Anlagenstopps zu längeren Standzeiten. Nach umfangreicher Schadensanalyse mit Unterstützung aus Deutschland konnten die Ursache (ein defektes Netzteil) ermittelt und das Problem behoben werden.
- Aufgrund eines zerstörten Drehzahlmessgerätes kam es zu weiteren Ausfällen an einem Fördermodul. Trotz Kupplungsschutz gelangte nach Aussage der Betreiber ein Kabel in die Kupplung und zerstörte die Reflexions-Lichtschranke des Drehzahlmessgerätes. Da beim Aufbau des Monitoring- und Alarmsystem in Vietnam verfügbare Standardbauteile sowie Messgeräte international agierender Unternehmen eingesetzt wurden, konnten die Ersatzteile durch die Betreiber eigenständig besorgt und mit Unterstützung aus Deutschland erfolgreich installiert werden.

7.3 Übertragbarkeit des adaptiven Wasserfördersystems

Das angepasste Wasserförderungssystem wurde explizit für die in der Modellregion vorherrschenden Randbedingungen entwickelt (limitiertes und z.T. stark schwankendem Wasserdargebot, große Höhenunterschiede sowie hoher Feststoffeintrag). Als Bypass-System baut das Konzept auf die bestehende Infrastruktur des Wasserkraftwerkes Seo Ho auf. Dieses konnte bislang nur während der Übergangs- und Regenzeit wirtschaftlich betrieben werden. In den trockenen Monaten stand es aufgrund reduzierten Leistungspotentials und des abfallenden Wirkungsgrades teils mehrere Monate still. Weiterhin kam es

zu Abrasionsschäden aufgrund von Feststoffpartikeln im Triebwasser. Das Problem stark schwankender Wasserqualität und -quantität ist auch bei vielen weiteren Wasserkraftwerken insbesondere in der tropischen und subtropischen Klimazone zu beobachten. Um die Anlage wirtschaftlich betreiben zu können und das ungenutzte Wasserkraftpotential für die Wasserförderung zugänglich zu machen, wurde das wasserkraftbetriebene Wasserförderersystem implementiert. Das Konzept basiert auf einem Bypass-System mit zwei invers betriebenen Pumpen als Antriebsenergie. Mit der Umsetzung des angepassten Wasserförderersystems als Referenzanlage konnte ein komplett energieautarkes, ökonomisch und ökologisch nachhaltiges System geschaffen werden, das zudem einfach und mit wenig Wartungsaufwand zu handhaben ist. Die Praxistests sowie die einmonatige Betriebsbegleitung haben gezeigt, dass die Fördermodule unter hoher mechanischer Belastung in technischer und betrieblicher Hinsicht gut funktionieren. Auch das Alarm- und Monitoringsystem, als das wichtigste Instrument für das Betriebspersonal, funktioniert nahezu ohne Einschränkungen. Das PAT-gestützte Förderkonzept zur Adaption an bestehende Hochdruckanlagen liefert somit einen grundlegenden Beitrag zur Lösung der vielerorts in tropischen und subtropischen (Karst-) Gebieten anzutreffenden Wasserknappheit. Die in der Praxis erprobte Demonstrationsanlage lässt sich auf ländliche Regionen mit ähnlicher Versorgungsproblematik, Wirtschaftskraft und vergleichbarem Technologiestandard übertragen.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Während in Industrienationen (z.B. in Deutschland) hochentwickelte Technologien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft zur Verfügung stehen, sind die Voraussetzungen in Entwicklungs- und Schwellenländern nicht auf vergleichbarem Niveau vorhanden. Die Technologien können aufgrund der hohen finanziellen, technischen und organisatorischen Hürden sowie dem fehlenden Technologietransfer meist nicht effizient genutzt werden. Hinzu kommen klimatische und geographische Herausforderungen wie z.B. in Karstregionen mit tropischem und subtropischem Klima, die in dieser Arbeit besonders beleuchtet wurden. Diese sind geprägt durch ein limitiertes Wasserdangebot während der Trockenzeit. Gleichzeitig existieren teils enorme Wasservorkommen in tiefen Tälern, Schluchten und unterirdischen Höhlensystemen, dessen Nutzbarmachung jedoch mit hohem Aufwand verbunden ist. Hierdurch ergeben sich gravierende Hindernisse bei der Etablierung einer nachhaltigen Wasserversorgung.

Die vorhandenen Wasserkraftpotentiale werden fast ausschließlich von konventionellen Wasserkraftwerken zur Stromproduktion genutzt. In der Trockenzeit kann ein Betrieb aufgrund der geringen Abflussmengen oft nicht aufrechterhalten werden und die Anlagen stehen teils über viele Wochen still.

Als ganzheitlicher Lösungsansatz wurde ein flexibles wasserkraftbetriebenes Wasserförderkonzept entwickelt, welches auf die Infrastruktur konventioneller Wasserkraftwerke aufbaut. Durch den Einsatz eines Bypass-Systems kann mit vergleichsweise geringem infrastrukturellem Aufwand der Leistungsabfall in der Stromerzeugung resp. der Stillstand von Wasserkraftwerken während der mehrmonatigen Trockenzeit sinnvoll kompensiert und für die Wasserversorgung zugänglich gemacht werden. Die geringen Abflussmengen können durch den Einsatz einer Pumpen-Turbinen-Einheit genutzt werden. Die Innovation des Konzeptes liegt zum einen in der Auslegung einer mechanisch gekoppelten Einheit einer Pumpe als Turbine (PAT) und einer Förderpumpe für den Hochdruckbereich sowie in der hydraulischen und betrieblichen Anbindung an ein bestehendes Wasserkraftwerk.

Zunächst wird im Rahmen dieser Arbeit ein wasserkraftbetriebenes Förderkonzept für den Hybridbetrieb mit einem konventionellen Wasserkraftwerk in Form eines allgemeingültigen Ansatzes vorgestellt. Gerade an Mittel- und Hochdruckanlagen mit nur begrenzten Speichervolumen und längeren Standzeiten während der Trockenzeit kann die Energiegewinnung durch die Anbindung des Förderkonzeptes wirtschaftlicher gestaltet werden. Vor allem bei Kleinwasserkraftwerken ist oft die zu erwartende Energieausbeute während der

Trockenzeit zu gering, um die Anschaffungskosten einer Turbine für den unteren Teillastbereich zu amortisieren. Der Einsatz von PAT ist dabei eine kostengünstige Alternative zu konventionellen Turbinen. Bei der Bemessung des Wasserfördermoduls muss darauf geachtet werden, dass dieses mit dem Wasserkraftwerk nicht konkurriert, was ggf. zu einem geringeren Gesamtwirkungsgrad führen könnte. Weiter sind hohe Anforderungen an die Pumpen-Turbinen-Einheit hinsichtlich großer Fall- und Förderhöhen, Verarbeitung von kleinen Abflussmengen, Drehzahlsynchronisation der Maschinensätze, Widerstandsfähigkeit gegenüber Feststofffracht gegeben. Da die Auswahl der Maschinenkonfiguration nicht immer rein auf Basis hydraulischer Bedingungen getroffen werden kann, wird eine Bewertungsmatrix vorgestellt. Diese beinhaltet Aspekte wie u.a. Betriebssicherheit bei extrem geringen Abflüssen, Redundanz für Schadens- / Störfall, Komplexität und Flexibilität der Regelung. Neben den Bemessungsgrundlagen für das Wasserförderersystem werden die notwendigen Planungsschritte für den hydraulischen Anschluss an ein Wasserkraftwerk aufgezeigt. Durch einen zusätzlichen Bypass in Form eines Rohrabzweiges an der bestehenden Fallleitung kann das Triebwasser für die Stromproduktion und / oder Wasserförderung genutzt werden. Die notwendigen Anpassungen der Wasserbauwerke ergeben sich aus den hydraulischen und infrastrukturellen Randbedingungen des Wasserkraftwerkes. Dabei ist der Geschiebe- und Feststoffeintrag in das System aufgrund der geringeren maschinenspezifischen Grenzwerte bzgl. Schwebstofffracht und Korndurchmesser neu zu bewerten. Eine Steigerung der Rückhaltekapazität im Sandfang kann z.B. durch Gleichrichterelemente oder durch Unterteilung des Beckens in mehrere Kammern erzielt werden. Durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen (z.B. Nutzung eines horizontalen Filterrohrs am Einlass der Fallleitung) kann mit vergleichsweise geringem infrastrukturellem Aufwand der Eintrag von Feststoffen aufgrund z.B. anthropogener Einflüsse vermieden werden. Am Beispiel der Demonstrationsanlage sind einige Lösungskonzepte aufgezeigt. Je nach hydraulischem und baulichem Zustand der Systemkomponenten kann durch zusätzliche Modernisierungsmaßnahmen die Effizienz deutlich gesteigert werden (z.B. Austausch alter Anlagenteile oder Optimierung der hydraulischen Auslegung (Anströmung des Einlaufbauwerkes, der Rechenanlage oder der Turbinen; Reduzierung der Kavitationsgefahr, Abströmverhältnisse im Turbinenauslauf und Unterwasser, Strömungslenkung im Triebwasserweg etc.)).

Aufbauend auf den erarbeiteten Konzepten wird die Umsetzung des Wasserförderersystems an einem bestehenden Kleinwasserkraftwerk in Form eines Demonstrationsprojektes dargelegt. Die Pilotanlage wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundvorhabens KaWaTech in einer subtropischen Karstregion im Norden Vietnams realisiert. Die Region ist, wie ein Großteil der südostasiatischen Regionen, von stark fluktuierenden natürlichen Abflüssen geprägt und sieht sich mit einer defizitären Wasserversorgung konfrontiert. Die starke Zunahme des Tourismus führt zu einer Verschärfung der Versorgungsproblematik. Aufgrund fehlender angepasster Wasserfördertechnologien ist die Bevölkerung im ländlichen Raum auf die Nutzung von dezentralen und individuellen Konzepten zur Wasserbeschaffung angewiesen. In der Regenzeit wird Niederschlagswasser aufgefangen und in der Trockenzeit rares Quellwasser aus tiefen Schluchten zu den Haushalten transportiert oder kommerzielles Wasser zugekauft. Insbesondere in der Trockenzeit leidet die Bevölkerung z.T. unter erheblicher Wasserknappheit.

Bislang werden die vorhandenen Wasserkraftpotentiale lediglich durch ein in den 1990er-Jahren errichtetes Hochdruck-Ausleitungskraftwerk genutzt. Mit einer installierten Aus-

bauleistung von ca. 700 kW sind die Turbinen auf die vergleichsweise hohen Abflüsse während der Regen- bzw. Übergangszeit ausgelegt. In der Trockenzeit hat dies teils mehrwöchigen Stillstand der Anlage zur Folge. Vor diesem Hintergrund wird ein ganzheitliches Konzept vorgestellt, um die nicht verwertbaren Niedrigwassermengen an dem Wasserkraftwerk energetisch zu nutzen und die schwierige Wasserversorgungssituation in den umliegenden Siedlungsgebieten der Anlage zu verbessern. Unter Berücksichtigung der technischen, ökonomischen, ökologischen und soziokulturellen Randbedingungen basieren die Konzepte ausschließlich auf einfachen, pragmatischen und robusten Technologien und Lösungsansätzen, die weiter einen möglichst geringen Aufwand für Planung, Umsetzung und Betrieb erfordern.

Die Auswahl geeigneter Pumpen für das Wasserfördermodul erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Pumpenhersteller KSB SE & Co. KGaA. Dabei ergaben sich hohe Anforderungen an die Maschinenauswahl hinsichtlich Verarbeitung von geringen Abflussmenge, Druckhöhen bis 70 bar inkl. dynamischer Druckanteil und Abrasionsbeständigkeit bzw. Widerstandsfähigkeit gegenüber Sedimentdurchgang. Der Schwerpunkt lag hierbei auf einer hohen Robustheit sowie einem möglichst einfachem Betrieb und einfacher Wartung. Durch die Anpassung der hydraulischen Charakteristika beider Maschinen bzgl. einer einheitlichen Nenndrehzahl wurde auf den Einsatz eines Getriebes bewusst verzichtet. Voraussetzung für einen hohen Systemwirkungsgrad war die Abstimmung der hydraulischen Charakteristika beider Maschinen bzgl. dieser einheitlichen Nenndrehzahl. Zudem kamen Pumpen als Turbinenersatz bei direkter Kopplung mit Förderpumpen im Hochdruckbereich bislang noch nicht zum Einsatz. Auf Basis einer Variantenstudie und mit Hilfe der Bewertungsmatrix wurde für das Wasserfördersystem zwei parallel geschaltete Wasserfördermodule der Gliederpumpenbaureihe Multitec ausgewählt und auf dem Forschungsprüfstand der KSB SE & Co. KGaA deren Funktionsfähigkeit validiert. Weiterhin wurden zwei Ausführungsvarianten für den Aufbau des Wasserfördersystems vor Ort und der Vormontage in einem Überseecontainer entworfen und hydraulisch vordimensioniert. Zur Einhaltung der vorgegebenen maximalen Grenzwerte bzgl. Schwebstofffracht ($< 20 \text{ mg/l}$) und Grenzkorndurchmesser ($< 0,25 \text{ mm}$) wurden hydraulische und bauliche Konzepte zur Sanierung und Optimierung der Wasserbauwerke entwickelt. Im Hinblick auf einen nachhaltigen Dauerbetrieb wurde ein intuitiv bedienbares Alarm- und Monitoringsystem zur Erfassung der wesentlichen Betriebskenngrößen sowie zur sofortigen Meldung von Grenzwertüberschreitungen entwickelt. Aus Verschleiß- und letztlich Sicherheitsgründung ist u.a. eine kontinuierliche Überwachung des hydraulischen Feststofftransportes im Triebwasser erforderlich. Durch die Analyse der Feststofffracht in Korrelation mit der Trübung konnte ein Grenzwerte festgelegt werden. Eine automatisierte Fail-Safe-Regelung ermöglicht bei Überschreitung vorgegebener Grenzwerte im Alarm- und Monitoringsystem das zuverlässige Ausschließen von kritischen Betriebszuständen (z.B. Unterschreitung des Ausbaudurchflusses oder Überschreitung der Feststofffracht).

Die technische Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit den vietnamesischen Partnern unter Berücksichtigung der (realistisch) erreichbaren Qualifikationen des Fachpersonals vor Ort und dessen Möglichkeiten. Durch die inter- und transdisziplinäre Kooperation im Rahmen des Verbundvorhabens in allen Stadien der Technologieentwicklung und -implementierung konnte ein umfassender Technologie- und Wissenstransfer sichergestellt werden. Für einen fachgerechten Betrieb und eine hohe Langlebigkeit wurden auf einfache

und prägnante Weise Schulungsprogramme und -unterlagen entwickelt. Durch eine didaktisch fundierte, grafische Aufbereitung aller wesentlicher Inhalte wurde ein Bewusstsein für die mit dem Betrieb einhergehende technische, betriebliche und finanzielle Verantwortung geschaffen. Hierbei wurden Wartungs- und Instandhaltungsstrategien sowie eindeutige Betriebsvorgaben und Handlungsempfehlungen für Störfälle ausgearbeitet. Im Rahmen der Evaluierung konnte abschließend ein sachgemäßer Betrieb der Maschinentechnik und der Anlagensteuerung nachgewiesen werden. Da bis zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Arbeit aufgrund von Einreisebeschränkungen durch die Corona-Pandemie eine umfassende fundierte Bewertung des Anlagenbetriebs nicht möglich war, sind weitere Betriebsanalysen in enger Kooperation mit den lokalen Betreibern geplant.

Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse liefern eine wissenschaftlich fundierte und in der Praxis erprobte Grundlage für die Entwicklung und nachhaltige Implementierung angepasster Technologien für die Wasserversorgung in ländlichen Karstregionen mit ähnlicher Versorgungsproblematischen, Wirtschaftskraft und vergleichbarem Technologiestandard. Die breitgefächerten Anwendungsoptionen sind dabei nicht auf die Randbedingungen in tropischen und subtropischen Karstgebieten begrenzt und lassen sich auch auf Nicht-Karstgebiete mit ähnlichen Randbedingungen weltweit übertragen (Anlagenabschaltung aufgrund zu geringer Effizienz, ungenutzte Abflussmengen, Wassermangel in umliegenden Gebieten, große Höhenunterschiede).

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des wasserkraftbetriebenen Fördermoduls bietet sich in Höhlen bzw. schwer zugänglichem Gelände an. Dabei sind hohe Anforderungen hinsichtlich kleiner bis mittlerer Volumenströme sowie kleiner turbinenseitiger und hoher pumpe seitiger Drücke gefordert. Im Rahmen des Verbundvorhabens KaWaTech wurde ein Wasserförderkonzept entwickelt, welches sich im grundlegenden Aufbau (PAT, ggf. Getriebe, Hochdruckförderpumpe) an dem hier behandelten Wasserfördermodul orientiert. Für einen autarken Betrieb an dezentralen Standorten sind geeignete wasserbauliche Strukturen und/oder technologische Lösungen z.B. zur selbstregelnden Beseitigung von Verstopfungen nötig. Durch eine Schutzhülle bzw. Betonkapsel kann das Wasserfördermodul z.B. in Höhlen vor den äußeren Einflüssen geschützt werden.

Aufbauend auf den entwickelten Konzepten und Technologien können unabhängige und sich ergänzende dezentrale Wasserförderkonzepte auf Basis regenerativer Energien einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige Wasserversorgung leisten. In der Modellregion im Norden Vietnams sind z.B. PV-Pumpsysteme eine vielversprechende Ergänzung. Einige Dörfer können aufgrund deren exponierten Lage vom Versorgungssystem nicht abgedeckt werden. Da aber auch diese Dörfer insbesondere in der Trockenzeit große Probleme mit Wasserknappheit haben, kann durch die Anbindung eines PV-Pumpsystems an die bestehende Infrastruktur die Versorgung sichergestellt werden.

Literaturverzeichnis

- [Baumgarten und Guder 2005] BAUMGARTEN, Sven ; GUDER, Wolfgang: Pumpen als Turbinen. In: *Technik kompakt* (2005), Nr. 11, S. 2–9
- [Bellmann u. a. 2012] BELLMANN, Claudia ; HELBIG, Ulf ; MECHTCHERINE, Viktor ; HORLACHER, Hans-B. ; STAMM, Jürgen: *Hydroabrasiver Verschleiß an Wasserbauwerken – Ursachen, Mechanismen, Prognose*. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, 35. Dresdner Wasserbaukolloquium, 2012
- [Belz 2007] BELZ, Jörg Uwe: *Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert: Analyse, Veränderungen, Trends*. Lelystad : Secretariaat CHR/KHR, 2007. – ISBN 9789070980337
- [Blackshear u. a. 2011] BLACKSHEAR, Ben ; CROCKER, Tom ; DRUCKER, Emma ; FILOON, Jhon ; KNELMAN, Jak ; SKILES, Michaela: Hydropower Vulnerability and Climate Change: A Framework for Modeling the Future of Global Hydroelectric Resources. Environmental Studies Senior Seminar Project, Middlebury College, 2011
- [BMBF 2021] BMBF: *Richtlinie zur Förderung von Forschungsprojekten zum Thema „Wissenstransfer“*. 2021. – URL <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3331.html>. – Zugriffsdatum: 21. April 2021
- [BMZ 2020] BMZ: *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Sonderseite zum Thema Tourismus*. 2020. – URL <http://www.bmz.de/webapps/tourismus/index.html/de/impressum>. – Zugriffsdatum: 29. März 2020
- [Borel 1968] BOREL, Lucien: Dimensionslose Kennzahlen für Turbomaschinen. In: *Schweizerische Bauzeitung* (1968)
- [Böswirth u. a. 2014] BÖSWIRTH, Leopold ; BSCHORER, Sabine ; BUCK, Thomas: *Technische Strömungslehre: Lehr- und Übungsbuch*. 10. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. – ISBN 9783658056681
- [Böttcher 2014] BÖTTCHER, Jörg: *Wasserkraftprojekte*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. – ISBN 978-3-642-40111-4
- [Brackel 2015] BRACKEL, Benjamin: Energiearmut: Wenig Strom, wenig Chancen. Heinrich Böll Stiftung, 2015

- [Brandstetter 2006] BRANDSTETTER, Thomas: *KRÄFTE MESSEN. Die Maschine von Marly und die Kultur der Technik 1680 - 1840*. Weimar, Bauhaus Universität Weimar, Dissertation, 2006
- [BWK 2019] BWK: *Wasserkraft als Stromquelle und -speicher*. 2019. – URL <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bwk/erneuerbare-energien/wasserkraft-als-stromquelle-und-speicher/>. – Zugriffsdatum: 21. August 2021
- [Cohrs 1996] COHRS, Dieter: *Untersuchungen an einer mehrstufigen rückwärtslaufenden Kreiselpumpe im Turbinenbetrieb*. Verlag und Bildarchiv, W.H. Faragallah, 1996. – ISBN 3929682141
- [Dangwal und Aggarwal 2019] DANGWAL, Kiran K. ; AGGARWAL, Manju: Irrigation using Natural Energy Sources. In: *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* 28 (2019), Nr. 5. – ISSN 2277-3878
- [Diderot und Alembert 1755] DIDEROT, D. ; ALEMBERT, J.L.R.: *Encyclopédie Ou Dictionnaire Raisonné Des Sciences, Des Arts Et Des Métiers: Do - Esy.* 5. Briasson, 1755
- [Diercke und Michael 2015] DIERCKE, Carl ; MICHAEL, Thomas: *Diercke-Weltatlas*. 1. Auflage 2015. Braunschweig : Westermann, 2015. – ISBN 3141008000
- [Döring 2016] DÖRING, Mathias: 2500 Jahre Energie aus Wasser. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2016
- [Douglas und Kamila 2017] DOUGLAS, Bertram ; KAMILA, Nieradzinska: Zero Energy Distributed Micro Pumped Hydro : Venturo Pump Performance - Technical Report. University of Strathclyde, Glasgow, 2017
- [Eglitis 2021] EGLITIS: *Bevölkerungswachstum in Vietnam*. 2021. – URL <https://www.laenderdaten.info/Asien/Vietnam/bevoelkerungswachstum>. – Zugriffsdatum: 02.Juli 2021
- [Eiche u. a. 2016] EICHE, E. ; HOCHSCHILD, M. ; HARYONO, E. ; NEUMANN, T.: Characterization of recharge and flow behaviour of different water sources in Gunung Kidul and its impact on water quality based on hydrochemical and physico-chemical monitoring. In: *SpringerOpen, Applied Water Science* (2016), Nr. 6
- [Ender 2018] ENDER, Anna: *Evaluation of highly variable water quality as basis for a sustainable water supply in the Dong Van karst region, Northern Vietnam*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2018
- [Engel 1931] ENGEL, L.: *Die Rücklaufdrehzahlen der Kreiselpumpen*. Braunschweig, Technische Hochschule Braunschweig, Dissertation, 1931
- [ESHA 2004] ESHA ; EUROPEAN SMALL HYDROPOWER ASSOCIATION (Hrsg.): *Handbuch zur Planung und Errichtung von Kleinwasserkraftwerken*. 2004

- [Eytelwein 1842] EYTELWEIN, Johann A.: *Handbuch der Mechanik fester Körper und der Hydraulik*. Friedrich Fleischer, 1842
- [Figuier 1875] FIGUIER, Louis: *Les merveilles de l'Industrie*. Band 3. 1875. – 365 S
- [Flender 2002] FLENDER ; FLENDER GMBH (Hrsg.): ARPEX ARP: *Ganzstahlkupplungen für Pumpenantriebe nach API 610/671: Handbuch*. 2002
- [Ford und Williams 2007] FORD, Derek ; WILLIAMS, Paul: *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester : Wiley, 2007. – ISBN 0470849975
- [Frank 1959] FRANK, J.: *Fortschritte in der Hydraulik des Sohlenrechens. Der Bauingenieur, Heft 1*. 1959
- [Fritsch u. a. 2019] FRITSCH, Peter ; BAUR, Andreas ; HOCH, Winfried ; MERKL, Gerhard ; RAUTENBERG, Joachim ; WEISS, Matthias ; WRICKE, Burkhard: *Mutschmann-Stimmelmayr: Taschenbuch der Wasserversorgung*. 17. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2019. – ISBN 9783658232214
- [Fritz u. a. 2012] FRITZ, J. ; RÖSLER, W. ; SCHMIDT, S. ; STOFFEL, D. ; OBERLE, P. ; NESTMANN, F.: Using Pumps as Turbines Combines with Pumps for Water Supply in an efficient Way without the need of Electrical Power. Tagungsband IWRM Karlsruhe, Seite 312-319, Karlsruhe, 2012
- [Fritz und Schmidt 2017] FRITZ, Jochen ; SCHMIDT, Steffen: Abschlussbericht: Teilprojekt 5: Konzeptentwicklung und Umsetzung von Fördermodulen für Wasserförderanlagen: Förderkennzeichen 02WCL1291C. KSB Aktiengesellschaft, 2017
- [Gandhi und Srinivasan 2020] GANDHI, Oktoviano ; SRINIVASAN, Dipti: *Sustainable energy solutions for remote areas in the Tropics*. Cham : Springer, 2020 (Green Energy and Technology). – ISBN 3030419525
- [GERICS 2016] GERICS: *Climate Fact Sheet Vietnam*. 2016. – URL www.climate-service-center.de
- [Giesecke und Mosonyi 2009] GIESECKE, Jürgen ; MOSONYI, Emil: *Wasserkraftanlagen*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. – ISBN 978-3-540-88988-5
- [Glynn 1853] GLYNN, Joseph: *Rudimentary Treatise on the Power of Water: As applied to Drive Flour Mills, and to Give Motion to Turbines and Other Hydrostatic Engines*. London : J. Weale, 1853
- [Goldscheider u. a. 2020] GOLDSCHEIDER, Nico ; CHEN, Zhao ; AULER, Augusto S. ; BAKALOWICZ, Michel ; BRODA, Stefan ; DREW, David ; HARTMANN, Jens ; JIANG, Guanghui ; MOOSDORF, Nils ; STEVANOVIC, Zoran ; VENI, George: Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. In: *Hydrogeology Journal* 28 (2020), Nr. 5, S. 1661–1677. – ISSN 1431-2174

- [Gopalakrishnan 1986] GOPALAKRISHNAN, S.: Power Recovery Turbines For The Process Industry. Turbomachinery Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, 1986
- [Grambow 2013] GRAMBOW, Martin: *Nachhaltige Wasserbewirtschaftung: Konzept und Umsetzung eines vernünftigen Umgangs mit dem Gemeingut Wasser*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2013. – ISBN 978-3-8348-1863-8
- [Gülich 2013] GÜLICH, Johann F.: *Kreiselpumpen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-40031-5
- [Hartmann 2010] HARTMANN, Veit: *Wiederbelebung des Themas Angepasste Technologien durch Elemente der Technikfolgenabschätzung, BWL - Wirtschaftspolitik, GRIN: Studie im Auftrag der Gesellschaft für angepasste Technologien e.V.* München : GRIN Verlag, 2010. – ISBN 9783656124320
- [Heimerl und Kohler 2013] HEIMERL, Stephan (Hrsg.) ; KOHLER, Beate (Hrsg.): *Wasser als Energieträger: Hydraulische Strömungsmaschinen für kleine Durchflüsse und niedrige Fallhöhen*. Bd. 43. IWASA. 2013
- [Hellmann 2009] HELLMANN, D. H. ; AKTIENGESELLSCHAFT, KSB (Hrsg.): *Kreiselpumpen-Lexikon. 4. Überarbeitete und erweiterte Auflage*. München : Ottweiler Druckerei und Verlag GmbH., 2009. – ISBN 978-3-00-029711
- [Hillebrand 2008] HILLEBRAND, Gudrun: *Transportverhalten kohäsiver Sedimente in turbulenten Strömungen: Untersuchungen im offenen Kreisgerinne*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2008
- [Hötzl 2009] HÖTZL, Heinz: Nutzung von Karstwasservorkommen für die Trinkwasserversorgung - Gefährdungspotentiale und Schutz. In: *WasserWirtschaft* (2009), Nr. 7-8, S. 24–30
- [Huu 2015] HUU, Ty P.: *Dilemmas of hydropower development in Vietnam: Between dam-induced displacement and sustainable development*. Uitgeverij Eburon, Delft, 2015. – ISBN 9789059729599
- [Idelchik und Fried 1986] IDELCHIK, I. E. ; FRIED, Erwin: *Handbook of hydraulic resistance*. 2. Auflage. Washington : Hemisphere Pub. Corp., 1986. – ISBN 3540159622
- [IMRR 2013] IMRR: *Assessment and analysis of Climate Change Impacts and Adaptation in Vietnam: Agriculture and Water by World Bank 2010*. 2013. – URL <http://baobab.elet.polimi.it/iwrmwiki/>. – Zugriffsdatum: 08. Mai 2017
- [Ing.-Büro Mayer 2000] ING.-BÜRO MAYER: *Photovoltaisch betriebene Pumpsysteme (PVPS)*. 2000
- [Intriago u. a. 2018] INTRIAGO, Juan C. ; ERTSEN, Maurits ; DIEHL, Jan C. ; MICHAVILA, Jaime ; PINILLA, Eva Maria A.: Co-creation of affordable irrigation technology: The DARE-TU project. Proceedings of the International Conference Water Science for Impact, 2018

- [IPCC 2007] IPCC (Hrsg.): *Climate Change 2007: the Physical Science base – summary for policy makers*. URL <http://www.ipcc.ch>, 2007
- [Joos 2019] JOOS, Franz: *Nachhaltige Energieversorgung: Hemmnisse, Möglichkeiten und Einschränkungen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. – ISBN 9783658232016
- [Kittredge 1933] KITTREDGE, C.P.: Vorgänge bei Zentrifugalpumpenanlagen nach plötzlichem Ausfallen des Antriebes. In: *Mitteilungen des Hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule München*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1933, S. 53–73. – ISBN 9783486767339
- [Knapp 1937] KNAPP, R. T.: Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behavior, 1937, S. 683–689. – Transactions of the A.S.M.E.
- [Kobus 1974] KOBUS, Helmut: Anwendung der Dimensionsanalyse in der experimentellen Forschung des Bauingenieurwesens. In: *Die Bautechnik* (1974), Nr. 3, S. 88–94
- [KSB 2005] KSB ; KSB SE & Co. KGAA (Hrsg.): *Auslegung von Kreiselpumpen*. 5. Frankenthal : KSB SE & Co. KGaA, 2005. – ISBN 3000047344
- [KSB 2011] KSB ; KSB SE & Co. KGAA (Hrsg.): *Multitec / Multitec-RO: Hochdruckpumpe in Gliederbauart: Betriebs-/ Montageanleitung*. 2011
- [Lambach 1950] LAMBACH ; MASCHINENFABRIK WILH. LAMBACH (Hrsg.): *Die Lambach-Pumpe*. 1950
- [Lorenz 1910] LORENZ, H.: Theorie des Hydraulischen Widders. In: *VDL-Zeitschrift* (1910), Nr. H. 1, S. 88–90
- [Maas 2019] MAAS, Elsbeth: *The Design of a Product Service System for aQysta: Barsha Summit*. Delft, Delft University of Technology, Masterarbeit, 2019
- [Marienheide 2014] MARIENHEIDE, Lambach P.: *Lambachpumpen*. 2014. – URL http://www.oberwipper.de/oberwipper_cont/oberwipper/LambachPumpen.html. – Stand: 29.05.2014, Zugriffsdatum: 30. September 2021
- [Menny 2006] MENNY, Klaus: *Strömungsmaschinen: Hydraulische und thermische Kraft- und Arbeitsmaschinen*. 5. Wiesbaden : Tuebner Verlag, 2006. – ISBN 10 3-519-46317-2
- [Miller 1990] MILLER, Donald S.: *Internal flow systems*. 2. Auflage. Cranfield : BHR Group, 1990. – ISBN 0947711775
- [Morr-Siedelsbrunn 2021] MORR-SIEDELSBRUNN: *Die alte Wasserversorgung von Rothenberg*. 2021. – URL <http://www.morr-siedelsbrunn.de/odenwald/alte-wasserversorgung-rothenberg/>. – Zugriffsdatum: 30. September 2021

- [NCHMR 2017] NCHMR ; HYDRO-METEOROLOGICAL FORECASTINGS, Vietnam National C. for (Hrsg.): *Klimadatenbank*. 2017. – URL <http://www.imh.ac.vn/nghiep-vu/cat54/Thong-bao-khi-tuong-nong-nghiep>, . – Zugriffsdatum: 08. Februar 2017
- [Neidlein 2019] NEIDLEIN, Hans-Chrisoph: Mit Solarenergie Wasser pumpen und reinigen. In: *EnergieZukunft* (2019)
- [Nestmann 1984] NESTMANN, Franz: *Sauerstoffeintrag durch Blasen und Entwicklung eines Mechanischen Belüftungsverfahrens*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1984
- [Nestmann u. a. 2017] NESTMANN, Franz ; GOLDSCHEIDER, Nico ; NEUMANN, Thomas ; MÜLLER, Harald S.: *KaWaTech - Entwicklung nachhaltiger Technologien für die Karstwasserwirtschaft*. 2017. – Abschlussbericht. Förderkennzeichen 02WCL1291A
- [Nestmann und Ihringer 2003] NESTMANN, Franz ; IHRINGER, Jürgen: *Hydrologie: Kursbegleitendes Skript*. 2003
- [Nestmann und Oberle 2009] NESTMANN, Franz ; OBERLE, Peter: Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer, Yogyakarta Special Province, Indonesien: Abschlussbericht. KIT Karlsruher Institut für Technologie, 2009
- [Nestmann u. a. 2015] NESTMANN, Franz ; OBERLE, Peter ; KLINGEL, Philipp ; MUHAMMAD, Ikhwan ; STOFFEL, Daniel: Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) in Gunung Kidul, Java, Indonesien. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 02WM0877. Karlsruhe : KIT Karlsruher Institut für Technologie, 2015
- [Nikuradse 1932] NIKURADSE, J.: Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren. In: *Verein deutscher Ingenieure, Forschungsheft 356* (1932)
- [Oberle u. a. 2016] OBERLE, Peter ; STOFFEL, Daniel ; FRITZ, Jochen ; SCHMIDT, Steffen ; RÖSLER, W. ; NESTMANN, Franz: Development of sustainable water supply technologies by using pumps as turbines for the extension of existing hydro power plants. In: *3rd International Rotating Equipment Conference*. Düsseldorf, 2016
- [Oberle u. a. 2018] OBERLE, Peter ; STOFFEL, Daniel ; WALTER, David ; KAHLES, Georg ; RIESTER, Katrin ; NESTMANN, Franz: Implementierung innovativer Wasserförder- und -verteilkonzepte in einer Gebirgsregion in Norden Vietnams. In: *WasserWirtschaft* (2018), Nr. 4, S. 32–38
- [Ortmanns 2006] ORTMANNS, Christoph: *Entsander von Wasserkraftanlagen*. Zürich, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Dissertation, 2006
- [Patt und Gonsowski 2011] PATT, Heinz ; GONSOWSKI, Peter: *Wasserbau*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978-3-642-11962-0
- [PEA 2009] PEA: The Feasibility Study for Construction of Small Hydropower Plants. Water Resources Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University: Bangkok, Thailand, 2009

- [Pfeffer 2009] PFEFFER, Karl-Heinz: Wassermangel - ein globales Problem in Karstlandschaften. In: *WasserWirtschaft* (2009), Nr. 7-8, S. 19–23
- [Pfleiderer und Petermann 1991] PFLEIDERER, Carl ; PETERMANN, Hartwig: *Strömungsmaschinen*. Sechste, neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg and s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 1991. – ISBN 9783662101018
- [Pham 2019] PHAM, Thang T.: *Technical Performance Indicators for Small-sized Water Supply Networks - Case Study in Dong Van City, Vietnam*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2019
- [Preger 1912] PREGER, Ernst: Der Hydropulsor, eine neue Wasserfördermaschine. In: *Polytechnisches Journal* 327 (1912), S. 737–741
- [Quaschning 2019] QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung – Klimaschutz*. 10., aktualisierte und erweiterte Auflage. München : Hanser, 2019. – ISBN 9783446461130
- [Rapp 2021] RAPP, Christoph: *Hydraulik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. – ISBN 978-3-658-34171-8
- [REN21 2019] REN21 (Hrsg.): *Renewables 2019: Global Status Report*. Paris, 2019
- [Richter u. a. 2021] RICHTER, Dominik ; GOEPPERT, Nadine ; ZINDLER, Björn ; GOLDSCHEIDER, Nico: Spatial and temporal dynamics of suspended particles and E. coli in a complex surface-water and karst groundwater system as a basis for an adapted water protection scheme, northern Vietnam. In: *Hydrogeology Journal* 29 (2021), Nr. 5, S. 1965–1978
- [Sakulphan und Bohez 2018] SAKULPHAN, Kiattisak ; BOHEZ, Erik: A New Optimal Selection Method with Seasonal Flow and Irrigation Variability for Hydro Turbine Type and Size. In: *Energies* 11 (2018), Nr. 11, S. 3212
- [Schiffer und Hennig 2018] SCHIFFER, Hans P. ; HENNIG, Thomas: Die Rolle der Wasserkraft bei der globalen Stromerzeugung. Welche Schlüsse lassen sich aus den Partizipationserfahrungen ziehen? Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 643–663. – ISBN 978-3-658-09415-7
- [Schindl und Payer 2015] SCHINDL, Hans ; PAYER, Hans-Jörg: *Strömungsmaschinen*. Berlin : De Gruyter Oldenbourg, 2015. – ISBN 9783486768855
- [Schmiedl 1988] SCHMIEDL, E.: *Serial centrifugal pumps operating as turbines; Section A-6 ‘Pumps used as Turbines’*. 1988
- [Schmitt 2010] SCHMITT, Stefanie: Vietnam: Wasserkraft Energielieferant Nummer Eins. In: *Asia Brige* (2010)
- [Schneider 2011] SCHNEIDER, Adolf: Energieumwandlung mit Eigenresonanz: Nutzung schwingender Flüssigkeitssäulen zur Umsetzung kinetischer Energie in mechanische bzw. elektrische Energie. In: *NET-Journal* 16 (2011), Nr. 5/6, S. 30–33

- [Sharma 1985] SHARMA, K.R.: *Small Hydro Electric Projects - Use of Centrifugal pumps as Turbines.* 1985
- [Sigloch 2017] SIGLOCH, Herbert: *Technische Fluidmechanik.* 10. Auflage. Berlin : Springer-Verlag, 2017. – ISBN 978-3-662-54466-2
- [Singh 2005] SINGH, Punit: *Optimization of Internal Hydraulics and of System Design for PUMPS AS TURBINES with Field Implementation and Evaluation.* Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2005
- [Solargis 2021] SOLARGIS: *Global Solar Atlas.* 2021. – URL <https://globalsolaratlas.info/map?c=23.220524,105.205078,11>. – Zugriffsdatum: 03. Mai 2021
- [Spreafico u. a. 2005] SPREAFICO, M. ; LEHMANN, Ch. ; GRASS, A.: *Feststoffbeobachtung in der Schweiz.* 2005. – Ein Tätigkeitsbericht der Landeshydrologie, Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 8
- [Statista 2021] STATISTA: *Verbrauch von Strom aus Wasserkraft in Vietnam in den Jahren 1990 bis 2019.* 2021. – URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/585772/umfrage/verbrauch-von-strom-aus-wasserkraft-in-vietnam/>. – Zugriffsdatum: 02.Juli 2021
- [Stepanoff 1957] STEPANOFF, A.J.: Special Operating Conditions of centrifugall Pumps. In: *Centrifugal and Axial Flow Pumps.* John Wiley & Sons, 1957, S. 269–292
- [Stoffel 2016] STOFFEL, Daniel: *Angepasste Technologien zur Wasserförderung in Karstregionen und deren Implementierung in Schwellen- und Entwicklungsländern.* Karlsruhe, KIT Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016
- [Surek und Stempin 2007] SUREK, Dominik ; STEMPIN, Silke: *Angewandte Strömungsmechanik: für Praxis und Studium.* 1. Auflage. Wiesbaden : Tuebner Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8351-0118-0
- [Than u. a. 2019] THAN, Dac ; THANH, Vo ; HAI, Nguyen: *Hydropower dams run out of water on lack of rain.* 2019. – URL <https://e.vnexpress.net/news/news/hydropower-dams-run-out-of-water-on-lack-of-rain-4031062.html#>. – Zugriffsdatum: 17.Juni 2021
- [Thoma 1931] THOMA, D.: Vorgänge beim Ausfallen des Antriebes von Kreiselpumpen. In: *Mitteilungen des Hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule München Heft 4.* Berlin, Boston : De Gruyter, 1931, S. 102–106. – ISBN 9783486764017
- [UN 1992] UN ; UNITED NATIONS (Hrsg.): *Agenda 21: Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung.* 1992
- [UN 2021] UN ; NATIONS, United (Hrsg.): *World Population Prospects 2019.* 2021. – URL <https://population.un.org/wpp/>. – Zugriffsdatum: 23. September 2021

- [UNCC 2019] UNCC ; UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE (Hrsg.): *First Monitoring Report La La HP Project, Vietnam.* 2019. – URL <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/RWTUV1301377895.16/view>
- [UNESCO 2020] UNESCO: *Wasser und Klimawandel: Weltwasserbericht der Vereinten Nationen 2020.* 2020
- [Unger und Hurtado 2014] UNGER, Jochem ; HURTADO, Antonio: *Alternative Energietechnik.* Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. – ISBN 978-3-658-06739-7
- [UNIDO und ICSHP 2016] UNIDO ; ICSHP ; RHEINISCH-UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION, VIENNA, AND INTERNATIONAL CENTER ON SMALL HYDRO POWER, HANGZHOU (Hrsg.): *The World Small Hydropower Development Report 2016.* 2016
- [UNIDO und ICSHP 2019] UNIDO ; ICSHP ; UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (Hrsg.) ; INTERNATIONAL CENTER ON SMALL HYDRO POWER (Hrsg.): *World Small Hydropower Development Report 2019: Asia, Oceania.* 2019
- [VDI 2008] VDI: Wasserknappheit & Technologie. Übersichtsstudie. Zukünftige Technologien Nr. 76. ISSN 1436-5928. Düsseldorf, 2008
- [Vischer und Huber 1993] VISCHER, D. ; HUBER, A.: *Wasserbau: hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern.* 1993
- [VNAT 2021] VNAT: *Approval of the Master Plan for Tourism Development in Ha Giang Province.* 2021. – URL <https://vietnamtourism.gov.vn/index.php/docs/687>. – Zugriffsdatum: 16. Mai 2021
- [Voith 2013] VOITH, Sabine: Staudämme zur Elektrizitätserzeugung durch Wasserkraft: Planung, Kosten, Umwelt. In: *Erneuerbare Energien* (2013)
- [Walter 2020] WALTER, David: *Wasserverteilungssysteme zur Umgestaltung einer gerechten Verteilung eines limitierten Wasserdargebots.* Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2020
- [Wan u. a. 2021] WAN, Wenhua ; ZHAO, Jianshi ; POPAT, Eklavyya ; DOELL, Petra: Analyzing the Impact of Streamflow Drought on Hydroelectricity Production: A Global-Scale Study. In: *Water Resources Research* 57 (2021), Nr. 4
- [Wang u. a. 2017] WANG, Jiao ; SCHLEIFER, Leah ; ZHONG, Lijin ; WORLD RESOURCES INSTITUTE (Hrsg.): *No Water, No Power.* 2017. – URL <https://www.wri.org/insights/no-water-no-power>
- [WBGU 2003] WBGU: *Welt Im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit.* Berlin, Heidelberg : Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2003. – ISBN 978-3-642-55861-0
- [Wembacher 2013] WEMBACHER, Mascha: *Wasserpumpen in der Entwicklungshilfe.* Wiesbaden, Hochschule RheinMain, Interdisziplinäres Projekt, 2013

- [Wesche 2016] WESCHE, Wolfgang: *Radiale Kreiselpumpen: Berechnung und Konstruktion der hydrodynamischen Komponenten*. 2. Auflage. Berlin : Springer-Verlag, 2016. – ISBN 978-3-662-48911-6
- [Wilcke 2014] WILCKE, Thomas ; VERKEHRS- UND VERSCHÖNERUNGSVEREIN ROTENBURG (Hrsg.): *Das alte Pumpwerk*. 2014
- [Zambrano u. a. 2019] ZAMBRANO, Juan Carlo I. ; MICHAVILA, Jaime ; PINILLA, Eva A. ; DIEHL, Jan C. ; ERTSEN, Maurits W.: Water Lifting Water: A Comprehensive Spatiotemporal Review on the Hydro-Powered Water Pumping Technologies. In: *Water* 11 (2019), Nr. 8, S. 1–33. – ISSN 2073-4441
- [Zanke 2013] ZANKE, Ulrich: *Hydraulik für den Wasserbau*. 3. Aufl. 2013. Berlin and Heidelberg : Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-05489-1
- [Zhai u. a. 2013] ZHAI, Yan W. ; LIU, Chang W. ; ZHAI, Xina X.: Research on Main Problems and their Countermeasures on Chinese Small Hydropower Development. In: *Applied Mechanics and Materials* 295-298 (2013), S. 1889–1893
- [Zindler und Stolpe 2018] ZINDLER, Björn ; STOLPE, Harro: *FuE-Verbundvorhaben KaWaTech: Vietnamesisch-Deutsche Kooperation zur Entwicklung nachhaltiger Technologien für die Karstwasserwirtschaft, Teilprojekt 7, Ländliche Entwicklung, Ressourcenschutz und soziokulturelle Aspekte*, Ruhr-Universität Bochum, Abschlussbericht: Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum: 01.09.2013 bis 31.12.2016, 2018