

Nachhaltige Kleinwasserkraft-Entwicklung in Zentralasien – Hydro4U in der Planungsphase

Bertalan Alapfy, Tobias Siegfried, Bernhard Zeiringer, Daniel S. Hayes, Moritz Roth, Hannah Schwedhelm, Pieterjan Verhelst, Johan Coeck und Nils Rüther

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dem ganzheitlichen Planungsprozess für einen der Demostandorte innerhalb des Hydro4U Projekts, dem At-Bashy-Kleinwasserkraftwerk in Kirgisistan. Das Kleinwasserkraftwerk wird an einem bestehenden Wehr geplant, welches derzeit zur Bewässerungsausleitung genutzt wird. Hydrologische Modelle wurden verwendet um den Referenzzustand des Einzugsgebietes darzustellen, sowie um Aussagen über die klimatologische Entwicklung und die verfügbaren Wasserressourcen in der Zukunft treffen zu können. Zusätzlich wurden Befischungen durchgeführt, um Kenntnissen über die vorherrschende Fischfauna zu gewinnen und dies als Grundlage für die Planung der Fischaufstiegsanlage zu verwenden. Structure from Motion (SfM) wurde als Methodik angewandt, um detaillierte Gelände- und Bauwerksinformationen zu erhalten, die die Planung der Kraftwerkskomponenten in Verbindung mit dem bestehenden Bauwerk unterstützt. Basierend auf diesen Informationen wird an diesem Standort ein Kleinwasserkraftwerk bestehend aus zwei Modulen mit einer Nennleistung von 1,2 MW gebaut.

1 Einleitung

Das von der EU finanzierte Projekt Hydro4U demonstriert innovative Technologien und Methoden durch die Umsetzung von zwei Kleinwasserkraftanlagen in Zentralasien (Jorde et al., 2022). Einer dieser Demostandorte befindet sich am Fluss At-Bashy südöstlich der Stadt Naryn in Kirgisistan und wurde als Demonstrationsanlage für die modulare "Hydroshaft Power Solution" (HSPS) ausgewählt, die im Rahmen des Hydro4U-Projekts entwickelt wurde. Das Design ist eine Optimierung des bereits bestehenden Schachtkraftwerk-Konzepts, das an der Technischen Universität München entwickelt wurde (Sepp & Rutschmann, 2014). Die Optimierungen zielen darauf ab, die technischen Komponenten zu standardisieren, sie auf einem modularen Rahmen zu platzieren und die konstruktive Komplexität zu reduzieren, so dass die Kosten erheblich gesenkt werden können und die Implementierung auch an abgelegenen Standorten bei schwierigen Rahmenbedingungen möglich ist.

Die Gegebenheiten des Projektstandorts sind gut geeignet, um diese Bauweise und Technologie zu demonstrieren. Ein bestehendes Wehr mit drei Drucksegmenten (Abb. 1) bietet Platz für bis zu drei Module mit je einer Turbine. Die Tatsache, dass das Wehr saniert werden muss, erhöht den Nutzen des Projekts. Da das Wehr für die Bewässerungsausleitung genutzt wird, ist der Wasser-Energie-Nahrungsmittel-Klima-Nexus Zusammenhang zu betonen.

Trotz des großen Potenzials wurde die Entwicklung von Kleinwasserkraft in Kirgisistan in den letzten Jahrzehnten nicht vorangetrieben. Aus diesem Grund gibt es nur wenige Erfahrungen in diesem Bereich und keine mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie vergleichbaren Umweltschutzvorschriften. Das Hydro4U-Konsortium hat sich zum Ziel gesetzt, an diesem Standort ein Projekt zu entwickeln, das einen ganzheitlichen Planungsansatz mit innovativen Methoden verfolgt, der weit über den Rahmen üblicher Planungsstudien in vergleichbarer Größenordnung in dieser Region

hinausgeht. Die gewonnenen Erfahrungen und der stattfindende Wissenstransfer sollen sicherstellen, dass ähnliche Projekte in Zukunft mit den entsprechenden Methoden und Technologien auf kommerzieller Basis durchgeführt werden können. Der vorliegende Beitrag beschreibt verschiedene Aspekte dieses ganzheitlichen Planungsprozesses.



Abb. 1 Wehr der Bewässerungsausleitung At-Bashy

2 Hydrologie

Der Fluss At-Bashy ist ein linker Nebenfluss des Naryns in Zentralasien, dessen Einzugsgebiet im kirgisischen Oberlauf des größeren Syr-Darya-Einzugsgebiets liegt. Mit einem mittleren Abfluss von $16,6 \text{ m}^3/\text{s}$ für Aufzeichnungen aus den Jahren 1970 bis 1995 bietet der Gebirgsfluss gute Bedingungen für die Entwicklung der Wasserkraft (Datenquelle: Kyrgyzhydromet). Das Abflussregime ist nivo-glazial und damit stark saisonal geprägt, mit Niedrigabflüssen während der kalten Wintermonate (Normabfluss von $8,1 \text{ m}^3/\text{s}$) und Spitzenabflüssen während der warmen Jahreszeit von April bis September (Normabfluss von $24,0 \text{ m}^3/\text{s}$). Im Winter ist der Fluss mit beträchtlichen Eismengen ($>30 \text{ cm}$ dick) bedeckt.

Um die Planung des Kraftwerks zu unterstützen, wurde ein konzeptionelles hydrologisches Modell implementiert, kalibriert und validiert. Anschließend erfolgte die Berechnung von Abflussdauerlinien und die Quantifizierung der Klimaauswirkungen im Einzugsgebiet im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Für alle Simulationen wurde das hydrologische Modell mit täglichen Zeitschritten ausgeführt. Für die Modellierung des Abflusses wurde das HBV-Modell verwendet, das in dem Modellierungsprogramm RS MINERVE (Seibert, 1997; Roquier et al., 2021) implementiert ist. Um die höhenabhängige Dynamik der jährlichen Schneeschmelze adäquat abzubilden, wurde das Flusseinzugsgebiet in Teileinzugsgebiete und Höhenbänder mit einem vertikalen Abstand von 200 m unterteilt. Die Abgrenzung des Einzugsgebiets und der Höhenbänder wurde in QGIS erstellt unter Verwendung des digitalen Höhenmodell SDRTM mit einer Auflösung von 30 Metern (QGIS-Entwicklungsteam 2022; NASA JPL 2013). Für jedes Höhenband und jedes Teileinzugsgebiet wurden separate numerische Niederschlags-Abfluss-Modelle mit Hilfe des hochaufgelösten CHELSA V21-Klimadatensatz implementiert (Karger, Wilson, et al. 2021; Karger et al. 2020; Karger, Conrad, et al. 2021; Karger et al. 2017). Höhenband-spezifische tägliche Temperatur- und Niederschlagsdaten zwischen dem 01.01.1979 und dem 31.12.2011 wurden für die Modellkalibrierung, -validierung und die Simulation des Referenzzustandes verwendet, mit dem zukünftige Abflüsse unter Klimaszenarien verglichen werden.

Gletscherbeiträge wurden mit Python Glacier Evolution (PyGEM) berechnet und als Quellterme zu den Niederschlags-Abfluss-Simulationen hinzugefügt (Rounce, Hock, und Shean, 2020; Rounce et al., 2023). Für die Modellkalibrierung und -validierung wurden monatliche Abflussbeobachtungen am Pegel Atschakamandy aus den Jahren 1979 bis 1995 verwendet, die von der

kirgisischen Agentur Hydromet bereitgestellt wurden. Drei CMIP6-Klimamodelle und vier Kombinationen globaler sozioökonomischer Szenarien (SSP126, SSP245, SSP370 und SSP585) wurden im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf das hydrologische System des At-Bashy-Flusses bewertet. Die mittleren zukünftigen Überschreitungsdauerlinien, die über drei globale Klimamodelle (GCM) und zehn Jahre für jedes Szenario zusammengefasst wurden, sind im Betriebsbereich des geplanten Wasserkraftwerks ähnlich. Bei allen Szenarien wird für die Zukunft allgemein ein Rückgang der Wasserverfügbarkeit um ca. 25 % im Vergleich zum Referenzzustand erwartet (Bereich: 20-50 m³/s). Dieser Rückgang wird für die kalte Jahreszeit im Vergleich zur Ausgangssituation in der gleichen Größenordnung prognostiziert. Diese projizierten Entwicklungen stehen im Einklang mit den erwarteten Veränderungen der Hydrologie des zentralasiatischen Hochgebirges.

3 Umweltverträglichkeit

3.1 Hydromorphologie

Das bestehende Wehr befindet sich in einem verzweigten Flussbett (siehe Abschnitt 4.1, Abb. 3), das durch hydromorphologische Prozesse wie Erosion, Transport und Ablagerung von Sedimenten gekennzeichnet ist. Diese Prozesse müssen verstanden und bewertet werden, um das Wasserkraftwerk nachhaltig zu planen und zu betreiben. Im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit ist es von entscheidender Bedeutung, die negativen Auswirkungen künstlicher Bauwerke auf natürliche morphologische Prozesse und damit verbundene Ökosystemleistungen zu minimieren. Im Hinblick auf die technisch-ökonomische Nachhaltigkeit muss jedoch auch das Risiko der Sedimentation im Ober- und Unterwasser minimiert werden. Verfügbare historische Luftbilder werden genutzt, um Flusslaufveränderungen in der Vergangenheit in Übereinstimmung mit hydrologischen Informationen zu identifizieren. Zusätzlich bilden hochaufgelöste Drohnenbilder und digitale Höhenmodelle (siehe Abschnitt 4.1) die Grundlage für die Bestimmung der Sedimentkorngrößenverteilungen sowie für die Berechnungen und Simulationen der Strömungsverhältnisse und des Sedimenttransports. Fotos von Sedimenten werden mit der Software Basegrain (Detert und Weitbrecht, 2013) ausgewertet und dienen zur Definition von Eingabeparametern für hydrodynamische und hydromorphologische Simulationen. Diese Simulationen liefern weitere Erkenntnisse über die Geschwindigkeitsverteilungen und Sedimenttransportkapazitäten im Oberwasser des Wehrs. Außerdem erleichtern diese Daten die Identifizierung möglicher Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Sedimentkonnektivität.

3.2 Bewertung der Fischfauna und Planung von Fischwanderhilfen

Um die Fischvielfalt und den Populationsstatus des At-Bashy-Flusses zu bewerten, wurde im Oktober 2022 eine semi-quantitative Fischbestandserhebung mit einem Rucksack-Elektrobefischungsgesetz (Honda FEG 1500, 1,5 kW) durchgeführt. Dabei wurden vier Abschnitte beprobt: zwei der Abschnitte befanden sich flussaufwärts der Wehranlage [1: Schluchtabschnitt im Oberlauf, 13,7 km flussaufwärts des Wehrs, 41°14'52.4 "N 76°22'58.6 "E; 2: 2,8 km flussaufwärts des Wehrs, 41°13'46.9 "N 76°15'55.3 "E], und zwei Abschnitte flussabwärts der Anlage [1: direkt flussabwärts des Wehrs, 41°13'40.4 "N 76°13'35.9 "E; 2: flussabwärts der Stadt At-Bashy, 41°12'00.3 "N 75°44'15.2 "E]. In jedem Abschnitt wurden alle verfügbaren Lebensraumtypen (z.B. Furten, Kolke, Buchten, Uferbereiche) beprobt. Die Erhebung konnten das Vorkommen von drei Fischarten bestätigen (siehe Tab. 1).

Tab. 1 Nachgewiesene Fischtaxa im At-Bashy Fluss, einschließlich Längen- und Gewichtsangaben

Fischtaxa	Gefangene Exemplare	Mittlere Länge \pm SD [mm]	Mittleres Gewicht \pm SD [g]
Steinschmerle (<i>Triplophysa</i> sp.)	373	79.5 \pm 19.1	3.4 \pm 2.1
Osman (<i>Diptychus</i> sp.)	208	97.1 \pm 25.3	6.5 \pm 4.9
Schneeforelle (<i>Schizothorax</i> sp.)	138	104.9 \pm 35.5	15.1 \pm 13.2

Alle Fischtaxa waren sowohl stromaufwärts als auch stromabwärts des Wehrs zu finden, wobei mehr Individuen stromabwärts gefunden wurden (Abb. 2). Der stromabwärts gelegene Abschnitt bei der Stadt At-Bashy wies mit 360 Ind./100 m die höchsten Häufigkeiten für Schmerle, 98 Ind./100 m für Osman und 193 Ind./100 m für Schneeforelle auf. Der Abschnitt unmittelbar flussabwärts des Wehrs wies ähnliche Häufigkeiten von Schmerle (50 Ind./100 m) und Osman (73 Ind./100 m) auf wie der flussaufwärts gelegene Abschnitt in der Schlucht (Schmerle: 40 Ind./100 m; Osmane: 74 Ind./100 m). Schneeforellen konnten in diesen beiden Abschnitten nicht nachgewiesen werden. Dagegen war die Schneeforelle in dem Abschnitt stromauf des Wehres häufiger anzutreffen (11 Ind./100 m) als die beiden anderen Taxa. Dort wurde die Schmerle in geringer Menge gefunden (2 Ind./100 m); Osmane fehlten an diesem Standort völlig (Abb. 2).

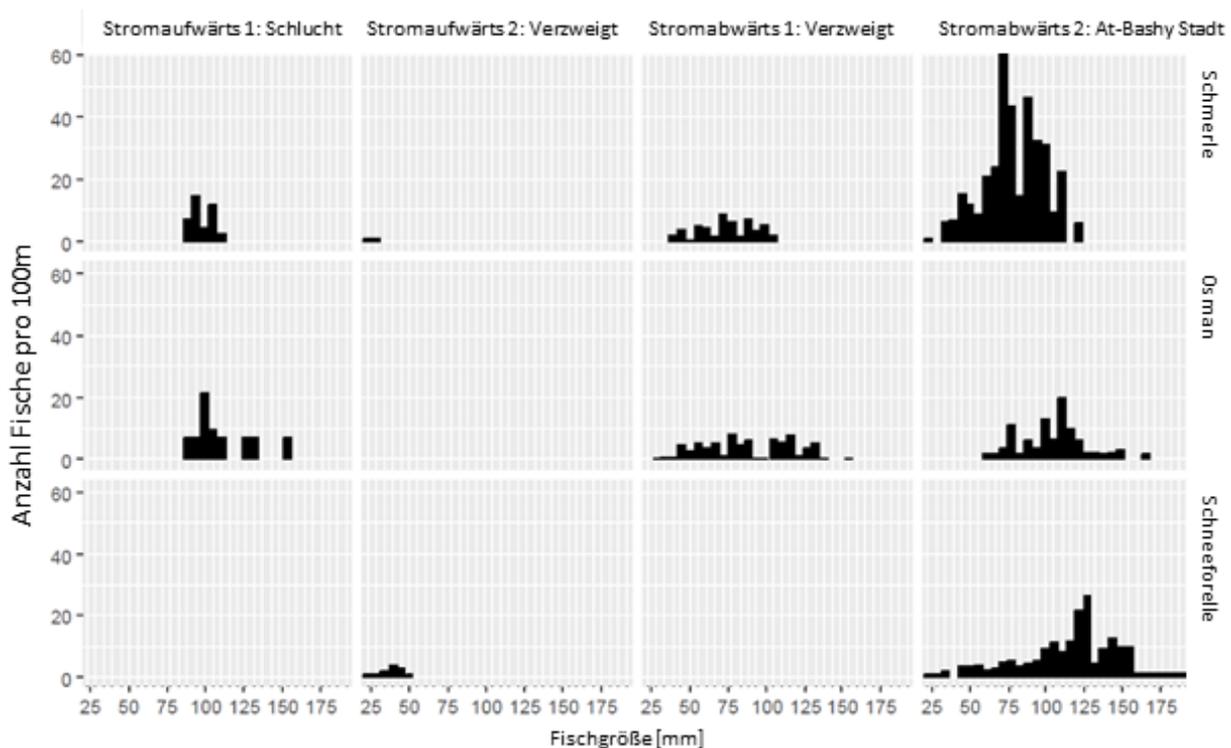


Abb. 2 Populationsstatus der drei Fischtaxa, die im Fluss At-Bashy an zwei Abschnitten flussaufwärts und zwei Abschnitten flussabwärts des Umleitungswehrs gefangen wurden, normiert auf Fische pro 100 m Flusslänge.

Die Analyse der Fischpopulation ergab einen akzeptablen Zustand. Der Anteil der Jungfische deutet darauf hin, dass sich die Fische im At-Bashy-Fluss-System auf natürliche Weise fortpflanzen. Die Längen-Frequenz-Diagramme der vier beprobten Abschnitte zeigen jedoch auch, dass

das Wehr die Laichwanderung erwachsener Fische behindert, wodurch die Bestandsgröße stromaufwärts des Wehrs verringert wird. Die große Anzahl subadulter und adulter Fische, insbesondere der Schneeforellen, in den unteren Abschnitten deutet darauf hin, dass diese Flussbereiche als Winterhabitate genutzt werden, was ebenfalls die Bedeutung der Flussverbindung für auf- und abwärts wandernde Fische unterstreicht.

Basierend auf diesen Erkenntnissen ist die Vernetzung in Längsrichtung der wichtigste Aspekt der ökologischen Sanierung an diesem Standort. Daher wird mit dem Bau des Wasserkraftwerks der Bau einer Fischaufstiegsanlage verknüpft, die Wanderfischen Korridore bieten soll, um die künstlich geschaffene Barriere zu überwinden. Durch diese Maßnahmen wird das einzige Wanderhindernis in einem ansonsten weitgehend unberührten Flussabschnitt umgangen; entsprechend positive Entwicklungen der natürlich vorkommenden Fischfauna sind daher zu erwarten. Die allgemeinen Anforderungen an voll funktionsfähige Fischaufstiegsanlagen basieren auf der Auffindbarkeit und Durchgängigkeit für alle Arten, was bei der Gestaltung des Fischpasses berücksichtigt wird. Abhängig von der Flussgröße und den jahreszeitlichen Abflussverhältnissen am Planungsstandort wurde zunächst ein geeigneter Fischaufstiegstyp ermittelt, der in der Nähe des Wehrs liegen sollte, um Fische zum Einstieg zu locken. Aufgrund der topografischen Gegebenheiten und der steilen Böschungen in der Nähe des Kraftwerks scheint eine Kombination aus einem naturnahen Umgehungsgerinne und einem vertikalen Schlitzpass am Ein- und Ausstieg am besten geeignet. Zusätzlich zu den möglichen flussabwärts gerichteten Wanderkorridoren über die bestehenden Hochwasserentlastungsanlagen und die Fischaufstiegsanlage bietet die modulare Hydroshaft-Lösung einen funktionalen Korridor für flussabwärts wandernde Fische (Geiger et al., 2016).

Nach dem Bau des Wasserkraftwerks und des Fischpasses am Demostandort At-Bashy ist es wichtig, die Effizienz des Fischpasses durch eine geeignete Bewertungsmethode wie die Telemetrie zu bewerten. Obwohl an vielen Orten der Welt Studien zur Fischwanderung durchgeführt worden sind, wurden solche Studien unseres Wissens nach bisher nicht in Kirgisistan durchgeführt; auch die Techniken für solche Studien sind im kirgisischen Kontext neu. Die passiven integrierten Transponder (PIT) und die Radiotelemetrie sind die am besten geeigneten Telemetrie-Techniken für den Standort. PIT- und Radiotelemetrie sind im Gegensatz z. B. zur akustischen Telemetrie unempfindlich gegenüber Turbulenzen. PIT-Tags senden ein Signal mit einer eindeutigen ID aus, wenn sie sich über eine Antenne bewegen, denn dadurch wird der Tag aufgeladen. Daher sind PIT-Tags nicht auf Batterien angewiesen und können mehrere Jahre lang halten. Außerdem sind sie sehr klein (z.T. so groß wie ein Reiskorn). Der Erfassungsbereich einer solchen Antenne ist jedoch je nach Art des Antennensystems und der verwendeten PIT-Tags auf maximal 10-50 cm begrenzt. Daher eignet sich diese Technik nur für den Einsatz innerhalb des Fischpasses. Die Strömung des At-Bashy Flusses ist zu dynamisch und zu tief, um Antennen im Flusskanal anzubringen. Trotz des begrenzten, aber wichtigen Wissens über die Fischwanderung durch den Fischpass mit Hilfe der PIT-Telemetrie kann diese Technik durch die Radiotelemetrie ergänzt werden, um das Bewegungsverhalten der markierten Fische in größerem Maßstab zu kartieren, z. B. um den Zeitpunkt der Ankunft am Hindernis oder am Fischpass und das Aufenthaltsverhalten, aber auch potenzielle Laichplätze flussaufwärts nach der Passage zu ermitteln.

4 Technische Planung

4.1 Von der Drohnenvermessung zum 3D-Modell

Structure from Motion (SfM) hat sich zu einer integralen Methode zur Erstellung von 3D-Modellen der natürlichen und bebauten Umwelt entwickelt. Mit der Fotogrammetrie-Software Agisoft Metashape Professional Edition wurde ein Arbeitsablauf implementiert, der Luftbilder verarbeitet, um digitale Höhenmodelle (DEM) und 3D-Modelle bestehender Strukturen für die nachfolgenden Planungsaufgaben zu erstellen. Im Fall des At-Bashy-Projekts stellt es einen großen Vorteil dar, in der Planungsphase mit realen Daten zu arbeiten anstelle der oft unzureichenden Bestandspläne. Da hier die neuen Komponenten des Kraftwerks an die bestehenden Strukturen des Wehrs angeschlossen werden, ist hier die Genauigkeit von entscheidender Bedeutung.

Für einen effizienten Vermessungsflug wurde das Kartierungsgebiet im Vorfeld mit QGIS definiert und in die Software DJI Pilot 2 importiert. Je nach Hardware (Kamera, Drohne) werden relevante Informationen für den autonomen Flug hinzugefügt, wie Flughöhe und Geschwindigkeit. Mit den gegebenen Einstellungen betrug das Kartierungsgebiet 1,25 km² und bestand aus 3.398 Fotos. Die geschätzte Flugzeit betrug 1:33 h, abhängig von den Windverhältnissen. Die Fotos wurden mit der Vollformatkamera DJI Zenmuse P1 mit einer Festbrennweite von 35 mm aus 120 m Höhe aufgenommen, die von einer DJI Matrice M300RTK Drohne getragen wurde. Um auf schwankende Lichtverhältnisse zu reagieren und hohe Iso-Werte (Iso-Rauschen) bei Bewölkung zu vermeiden, wurde dieser Wert in den Kameraeinstellungen festgelegt. Die Blende und die Verschlusszeit des Objektivs wurden auf Automatik eingestellt. 32 Bodenkontrollpunkte (Ground Control Points, GCPs) wurden im Kartierungsgebiet ausgelegt und mit einer GNSS-Basis-Rover-Einrichtung genau vermessen. Zu diesem Zweck wird die Basis an einem festen Punkt kalibriert. Der Rover ist mit der Basis verbunden und wird zur Vermessung der GCPs eingesetzt. Bei der Nachbearbeitung wurden die Bilder zunächst in Metashape importiert und Fotos schlechter Qualität aussortiert. Um die Fotos korrekt auszurichten, wurde ein Referenzkoordinatensystem (WGS84 UTM Zone 43N) definiert. Die Koordinaten der GCPs wurden in Metashape importiert und den jeweiligen Bildern zugewiesen, auf denen sich die GCPs befinden. Auf diese Weise konnte der Fehler bei der Ost- und Nordrichtung sowie der Höhe reduziert werden (unter 3 cm zwischen Modell und Referenzkoordinatensystem).



Abb. 3 Erstelltes Orthofoto (links) und Punktwolke (rechts)

Schließlich kann das Orthofoto erstellt werden, wie in Abb. 3 zu sehen ist. Mit der Software cloud compare kann störende Vegetation retuschiert werden, um ein digitales Höhenmodell (DEM) und eine Punktwolke zu erstellen, die als Planungsgrundlage für das Projekt dienen. Aus der dichten Wolke des Bauwerks werden insbesondere die relevanten Maße derjenigen Bauteile abgeleitet,

an die das neue Bauwerk angeschlossen werden soll. Die Daten werden in ein Gebäudeinformationsmodell integriert, das die Geometrie des Bestandsbauwerks enthält.

4.2 Entwurf des neuen Bauwerks

Im Gegensatz zu den bisher realisierten Schachtkraftwerk-Projekten, bei denen das System individuell für einen bestimmten Standort entworfen und gebaut werden musste, wurden bei dem von der TUM, Global Hydro und Muhr entwickelten HSPS-System alle technischen Komponenten in einer standardisierten Produktlinie mit vordefinierten Schnittstellen und Montagepunkten zusammengefasst, was den Aufwand für Konstruktion, Fertigung und Montage reduziert. Die Hauptkomponenten eines HSPS-Moduls (Abb. 4) werden an einem Stahlgerüst mit vordefinierten Montagepunkten für eine einfache bauliche Umsetzung befestigt: Turbinen-Generator-Einheit mit Hebesystem, Absperrschieber inkl. Antriebssystem und Rechen mit Reinigungsmechanismus. Die Anpassung an spezifische Standortbedingungen erfolgt durch Verstellmöglichkeiten innerhalb des Baukastensystems, so dass Breite, Länge und Höhe der Bauteile des Moduls entsprechend variiert werden können. Weitere Flexibilität wird durch die Möglichkeit geschaffen, mehrere Module nebeneinander zu platzieren.



Abb. 4 3D-Modell einer HSPS-Einheit.

Auf der Grundlage der gesammelten und in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Informationen wurde ein ganzheitlicher Planungsansatz gewählt, um alle relevanten Aspekte in den Entwurf des neuen Kraftwerks zu integrieren. Im ersten Schritt mussten die wichtigsten Planungsparameter - Fallhöhe und Ausbauabfluss - festgelegt werden. Am gegebenen Standort wurden die folgenden Randbedingungen für die Bestimmung des Bemessungsabflusses berücksichtigt: (i) Wasserverfügbarkeit unter Berücksichtigung künftiger hydrologischer Veränderungen aufgrund des Klimawandels, (ii) Nexus-Beschränkungen aufgrund des bestehenden und potenziell wachsenden Bedarfs an Wasserumleitung, (iii) technische Beschränkungen aufgrund der Geometrie des bestehenden Bauwerks (das Wehr bietet Platz für maximal drei identische Module) und (iv) wirtschaftliche Beschränkungen zur Bestimmung der Rentabilität zusätzlicher Investitionen zur Erhöhung des Ausbaugrades. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurde beschlossen, zwei Module mit einem Turbinenabfluss von je $9 \text{ m}^3/\text{s}$ zu installieren. Die Gesamtkapazität von $18 \text{ m}^3/\text{s}$ wird im Durchschnitt an 50 d/a verfügbar sein, wenn man das trockenste Jahr aller Klimawandel-Szenarien berücksichtigt, und an 140 d/a, wenn man das feuchteste Jahr berücksichtigt.

Das bestehende Bauwerk gibt die Fallhöhe weitgehend vor, zusätzlich wurde eine Stauzielerhöhung und Unterwasser-Eintiefung angestrebt. Bei der Ermittlung wurden folgende Aspekte berücksichtigt: (i) Abflusskapazität der bestehenden Hochwasserentlastungsanlage (3 Drucksegmente und ein fester seitlicher Überfall), (ii) flussaufwärts und flussabwärts gelegene Sohlgefälle und Fließgeschwindigkeiten, um Sedimentablagerungen zu vermeiden, und (iii) Geometrie des Unterwasserkanals. Aufgrund schlechter Datenlage wurde für die Dimensionierung der Hochwasserabfuhr ein Reverse-Engineering-Ansatz auf folgende Weise umgesetzt. Zunächst wurde angenommen, dass der BHQ-Pegel 1 m unterhalb der Dammkrone des stromaufwärts gelegenen Deiches liegt. Dann wurde ein numerisches hydrodynamisches 3D-Modell erstellt, um die Abflusskapazität mit dem angenommenen BHQ-Niveau zu berechnen. Anschließend wurden die neuen Bauwerkskomponenten in das Modell eingefügt und die Simulationen mit demselben BHQ-Niveau durchgeführt. Schließlich wurde die Anordnung der Komponenten optimiert, um die gleiche Abflusskapazität wie bei der bestehenden Geometrie zu erreichen.

Um die Fallhöhe weiter zu erhöhen, wurde die Geometrie des Unterwasserkanals umgestaltet. Da die flussabwärts gelegenen Böschungen teilweise eingestürzt sind - wahrscheinlich aufgrund zu steiler Hänge und anhaltender Erosion - muss dieser Bereich ohnehin saniert werden. Bei diesen Bauarbeiten soll die linke Böschung rückverlegt werden, um das Flussbett zu verbreitern. Außerdem soll das Längsprofil des Flussbetts auf einer Länge von rund 300 m um durchschnittlich 0,5 m eingetieft werden, so dass ein einheitliches Gefälle von etwa 0,15 % erreicht wird. Bei der Planung wurde berücksichtigt, dass der Sedimenttransport auch innerhalb dieser neuen Geometrie stattfinden wird. Mit dieser Kombination von technischen Maßnahmen kann die Bruttofallhöhe beim Bemessungsabfluss um 1,1 m auf eine Bemessungshöhe von 7,9 m erhöht werden. Unter Berücksichtigung des Bemessungsabflusses wird das Kraftwerk eine Nennleistung von ca. 1,2 MW haben und - je nach dem hydrologischen Szenario - voraussichtlich 7-8 GWh/Jahr Energie erzeugen.

Die neuen Betonstrukturen des Kraftwerks werden so einfach wie möglich gehalten. Jedes Modul wird aus einem Fundament und zwei Seitenwänden bestehen. Das modulare Trägersystem, welches alle Montagepunkte für die Stahlwasserbaukomponenten und die elektromechanische Ausrüstung beinhaltet, wird anschließend zwischen den Wänden aufgebaut und mit Zweitbeton vergossen. Auf diese Weise gibt es nur zwei Betonierphasen, was einen einfachen, kosten- und zeiteffizienten Bauprozess ermöglicht. Da die neuen Betonbauwerke stromabwärts von einem bestehenden Bauwerk (Abb. 5) errichtet werden, dessen Qualität nicht zuverlässig beurteilt werden kann, müssen die neuen Bauteile als statisch unabhängiges System konzipiert werden. Dennoch muss das bestehende Wehrfundament unterfangen werden, da die neuen Bauteile tiefer liegen müssen als das Fundament des bestehenden Bauwerks. Obwohl es sich um ein strukturell unabhängiges System handeln muss, müssen die neuen Seitenwände an den bestehenden Wehrpfeilern wasserdicht angeschlossen sein, um einen Zulaufkanal zu den HSPS-Einheiten zu schaffen.

5 Ausblick

Dieser Bericht bietet einen Überblick der hydrologischen, ökologischen und technischen Planungsarbeiten für den Bau eines Wasserkraftwerks am At-Bashy-Fluss. Die endgültige Machbarkeitsstudie und der Entwurf für die behördliche Genehmigung auf der Grundlage der in diesem Artikel vorgestellten Informationen werden dem lokalen Projektentwickler Ende April 2023 vorgelegt. In Erwartung eines kurzen Genehmigungsverfahrens ist ein Baubeginn im August

2023 geplant. Sofern der Bau und die Installation der technischen Ausrüstung planmäßig verlaufen, wird die Inbetriebnahme für den Frühsommer 2024 erwartet. Dann wird eine detaillierte Bewertung der durchgeführten Maßnahmen beginnen und den Betrieb des KKW bis zum Ende des Hydro4U-Projekts im Mai 2026 begleiten (siehe www.hydro4u.eu für Aktualisierungen).

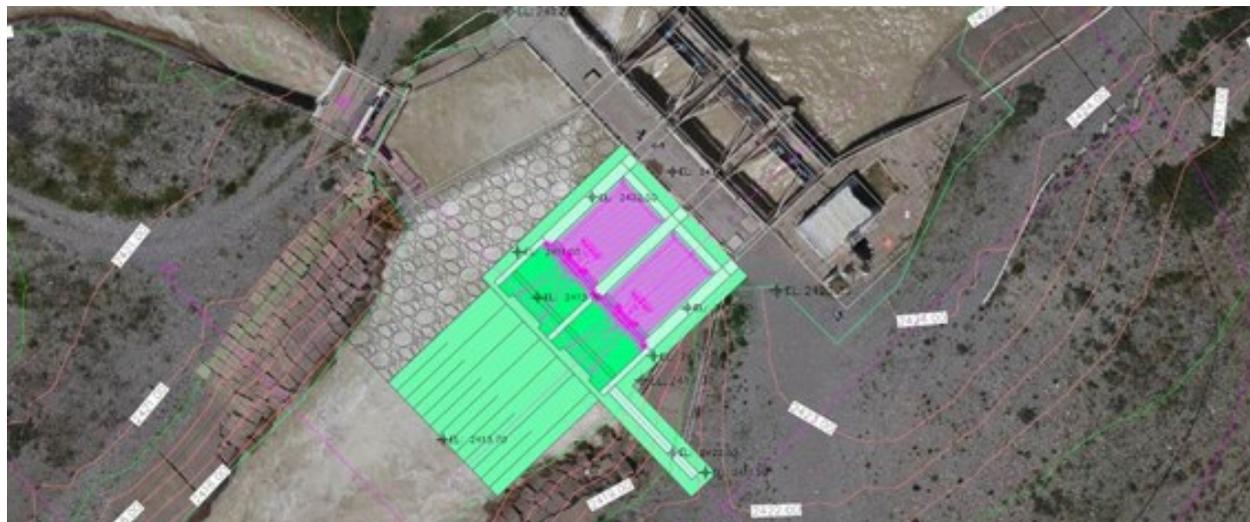


Abb. 5 Lageplan des Wasserkraftwerks am Wehr von At-Bashy.

Literatur

- Deinet S., Scott-Gatty K., Rotton H., Twardek W., Marconi V., McRae L., Baumgartner L., Brink K., Claussen J., Cooke S.T., Darwall W., Eriksson B., Garcia de Leaniz C., Hogan Z., Royte J., Silva L., Thieme M., Tickner D., Waldman J., Wanningen H., Weyl O., Berkhuisen A., "The living planet index (LPI) for migratory freshwater fish: technical Report." World Fish Migration Foundation, The Netherlands, 2020
- Detert, M., Weitbrecht, V. "User Guide to Gravelometric Image Analysis by BASEGRAIN." In *Advances in River Sediment Research*, edited by S. Fukuoka. Hoboken: CRC Press, 2013
- Geiger F., Cuchet M., Rutschmann P., "Experimental investigation of fish downstream passage and turbine related fish mortality at an innovative hydro power setup", *La Houille Blanche*, Number 6, 2016
- Jorde K., Alapfy B., Schwedhelm H., Siegried T., Habersack H., De Keyser J., Hayes D., Purushottam A., Schneider M., Anarbekov O., "EU supports small hydropower in Central Asia", *Hydropower & Dams*, Issue 5, 2022
- Karger D.N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R.W., Zimmermann N.E., Linder, H.P., Kessler M., "Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas." *Scientific Data* 4 (1): 170122., 2017
- Karger D.N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R.W., Zimmermann N.E., Linder, H.P., Kessler M., "Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas." *EnviDat*., 2021
- Karger D.N., Schmatz D.R., Dettling G., Zimmermann N.E., "High-Resolution Monthly Precipitation and Temperature Time Series from 2006 to 2100." *Scientific Data* 7 (1): 248. 2020

- Karger D.N., Wilson A.M., Mahony C., Zimmermann N.E., Jetz W., "Global Daily 1 Km Land Surface Precipitation Based on Cloud Cover-Informed Downscaling." *Scientific Data* 8 (1): 307. 2021.
- NASA JPL, "NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 Arc Second [Data Set]." NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2013
- QGIS Development Team, "QGIS Geographic Information System." Open Source Geospatial Foundation Project., 2022 <http://qgis.osgeo.org>.
- Roquier B., Fluxia Sanmartin J., Brauchli T., Baracchini T., Garcia Hernandez J., Foehn A., Paredes Arquiola J., De Cesare G., "RS Minerve." Windows. Sion. 2021
- Seibert J., "Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model." *Hydrology Research* 28 (4–5): 247–62., 1997. DOI: 10.2166/nh.1998.15.
- Sepp A., Rutschmann P., "Ecological hydroelectric concept shaft power plant", International Seminar on Hydro Power Plants, Vienna 11, 2014
- Silva A.T., Lucas M.C., Castro-Santos T., et al" The future of fish passage science, engineering, and practice.", in *Fish* 19: 340–62, 2018
- Rounce, D.R., Hock R., Maussion F., Hugonnet R., Kochtitzky W., Huss M., Berthier E., et al., "Global Glacier Change in the 21st Century: Every Increase in Temperature Matters." *Science* 379 (6627): 78–83. 2023
- Rounce, D.R., Hock R., Shean D.E., "High Mountain Asia PyGEM Glacier Projections with RCP Scenarios." NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 2020
- Verhelst, P., Brys, R., Cooke, S. J., Pauwels, I., Rohtla, M., & Reubens, J. "Enhancing our understanding of fish movement ecology through interdisciplinary and cross-boundary research." *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1-25., 2022

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. (TUM) Bertalan Alapfy, M. Sc.
 Hannah Schwedhelm, M. Sc.
 Moritz Roth, M. Eng.
 Prof. Dr. Nils R  ther
 Lehrstuhl für Hydraulic Engineering,
 TU München
 Arcisstraße 21, D-80333 München
bertalan.alapfy@tum.de

Dr. Tobias Siegfried
 hydrosolutions GmbH
 Venusstrasse 29, CH-8050 Zürich
siegfried@hydrosolutions.com

Dr. Dr.nat.techn. Daniel S. Hayes
 Dipl.-Ing. Bernhard Zeiringer
 Institut für Hydrobiologie und
 Gewässermanagement,
 Universität für Bodenkultur Wien
 Gregor-Mendel-Straße 33, AT-1180 Wien
bernhard.zeiringer@boku.ac.at

Dr. Pieterjan Verhelst
 Johan Coeck
 Aquatic Management, Research Institute for
 Nature and Forest EV-INBO
 Havenlaan 88 bus 73, BE-1000 Brüssel
pieterjan.verhelst@inbo.be