

Wasserkraftplanung Badam – ein Fallbeispiel für nachhaltige Wasserkraft an bestehender Bewässerungsinfrastruktur mit Potential zur Replikation

Hannah Schwedhelm, Aidar Zhumabaev, Tobias Siegfried, Tobias Hägele, Ianina Kopecki, Bertalan Alapfy, Daniel S. Hayes, Bernhard Zeiringer, Klaus Jorde und Nils Rütter

Zusammenfassung

Innerhalb des von der EU geförderten Projekts „Hydro4U – Sustainable small-scale hydropower in Central Asia“ sollen mögliche Standorte für nachhaltige Kleinwasserkraft identifiziert und Machbarkeitsstudien entwickelt werden. In der Region ist eine großausgebaute Bewässerungsinfrastruktur vorhanden, die bisher kaum energetisch genutzt wird. Mit Hilfe der Projektpartner, bestehend aus europäischen und lokalen Experten aus verschiedenen Fachrichtungen, kann durch Analyse der verfügbaren Wasserressourcen und deren aktueller Nutzung, der Entwicklung von innovativen Technologien sowie der Durchführung umfangreicher gewässerökologischer Untersuchungen das Energiepotenzial derartiger bestehender Bewässerungsinfrastruktur effizient und nachhaltig erschlossen werden. Der Standort Badam in Kasachstan wurde innerhalb des Projekts als ein geeigneter Standort identifiziert. Er befindet sich unterhalb eines Bewässerungsreservoirs, durch den eine für die Wasserkrafterzeugung nutzbare vergrößerte Fallhöhe vorhanden ist. Zur Ermittlung des Wasserdargebots wurden hydrologische Modelle erstellt und Simulationen von Klimaszenarien für zwei Einzugsgebiete erstellt, aus denen Wasser für die Bewässerung entnommen wird. Es wurden, wo möglich, vorhandene Abflussdaten zur Kalibrierung und Validierung der Modelle verwendet. Zusätzlich wurden gewässerökologische Studien durchgeführt und unter anderem Habitatmodelle erstellt, mit denen Mindestwasserfragen und Durchgängigkeitsaspekte in den Ausleitungsstrecken analysiert werden. Die Untersuchungen gewährleisten, dass die Wasserkraftnutzung umweltverträglich erfolgt und in den betroffenen Flussabschnitten eine Verbesserung der ökologischen Situation zu erwarten ist. Durch Besichtigungen der Anlagen und Auswertung der Bestandspläne wurden mögliche Standorte für das Krafthaus identifiziert. Im Rahmen einer Variantenstudie wurden ökonomisch sinnvolle Standorte und die zugehörige Technologie untersucht, sowie eine Strategie zur Speicherbewirtschaftung unter Einhaltung europäischer Nachhaltigkeitsstandards entwickelt. Planung und Umsetzung der Wasserkraftanlage sollen als Beispiel dafür dienen, wie eine bestehende Bewässerungsinfrastruktur unter Berücksichtigung von Ökologie sowie lokaler Wasserverfügbarkeit und -nachfrage nachhaltig energetisch genutzt werden kann.

1 Einleitung

1.1 Projektbeschreibung: Hydro4U

Das von der EU geförderte Projekt „Hydro4U – Sustainable small-scale hydropower in Central Asia“ befasst sich mit der Etablierung von Kleinwasserkraft in Zentralasien basierend auf europäischen Standards, um eine nachhaltige dezentrale Energieversorgung voranzutreiben. Das Projekt-Konsortium besteht aus zehn europäischen und drei zentralasiatischen Partnern verschiedener Fachrichtungen. Innerhalb des Projekts werden dabei zwei Kleinwasserkraftwerke geplant und gebaut (demonstration sites) und so die Umsetzbarkeit zweier innovativer und nachhaltiger Technologien in der Region aufgezeigt (Jorde et al. 2022). Weitere Aufgaben innerhalb

des Projekts sind die Weiterentwicklung und Modularisierung der beiden Kleinwasserkraft-Technologien, die Planung von weiteren Kleinwasserkraftwerken (planning sites) und die Entwicklung von GIS-basierten Werkzeugen und Handreichungen, die die Identifizierung weiterer potentieller Kleinwasserkraftstandorte sowie die Replikation solcher Wasserkraftprojekte vereinfachen. Der Fokus von Hydro4U liegt dabei auf einem ganzheitlichen, nachhaltigen Ansatz, der detaillierte hydrologische und ökologische Untersuchungen an den Wasserkraftstandorten umfasst, Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Klimaentwicklungen berücksichtigt sowie alle Aspekte des Water-Food-Energy-Climate Nexus (WFEC) in der Region beachtet, um die Wasserressourcen nachhaltig zu bewirtschaften. Weitere Informationen zum Projekt finden sich in Reisenbüchler et al. (2021) und Jorde et al. (2022).

1.2 Projektgebiet: Badam Reservoir

Das Badam Reservoir wurde innerhalb von Hydro4U als ein geeigneter Planungsstandort (planning site) identifiziert. Das Reservoir befindet sich im Süden von Kasachstan, südöstlich der Stadt Schymkent und besitzt ein Stauvolumen von 60 Mio. m³. Es wurde als Teil des Sayram-Togus-Badam-Bewässerungsnetzes gebaut, welches jeweils ein Ausleitungswehr in den Flüssen Sayram und Badam sowie mehrere Bewässerungskanäle und das kleinere Togus Reservoir mit 5 Mio. m³ umfasst (Abb. 1a). Weiterhin ist es Teil des großen Bewässerungssystems im Arys Einzugsgebiet. Die beiden Flüsse Sayram und Badam haben ihren Ursprung im Ugam Gebirge an der Grenze von Kasachstan zu Usbekistan. Sie besitzen ein stark saisonales Abflussregime, welches durch die Schneeschmelze im Frühjahr und Sommer geprägt ist. Der Sayram mündet südöstlich von Schymkent in den Badam, welcher nordwestlich von Schymkent in den Arys mündet. Im Sayram-Einzugsgebiet befindet sich eine Pegelstation ca. 20 km oberhalb des Ausleitungswehrs und zwei weitere Pegelstationen befinden sich unterhalb von Schymkent im Badam (Abb. 1a).

An dem Ausleitungswehr im Sayram wird rechts Wasser zur Bewässerung ausgeleitet und links Wasser zum Togus Reservoir geleitet. Teile des im Togus Reservoir gespeicherten Wassers werden in den Fluss Badam weitergeleitet und dort am Ausleitungswehr Badam ins Badam Reservoir geführt (blaue Pfeile in Abb. 1b). Unterhalb des Badam Reservoirs wird ein Teil des Wassers wieder zurück in das natürliche Flussbett des Badam geleitet, wo es weiter unterhalb im Arys Einzugsgebiet zur Bewässerung genutzt wird, während große Teile des Wassers zum Zweck der Bewässerung Richtung Schymkent geleitet werden. Durch die schnelle Entwicklung der Stadt Schymkent wurden in den letzten Jahrzehnten immer mehr zuvor landwirtschaftlich genutzte Flächen in Wohnflächen umgewandelt, wodurch die bewässerte Fläche und damit der Wasserbedarf zur Bewässerung in der Region zurückgegangen ist. Das zur Verfügung stehende Speichervolumen im Badam Reservoir wird nur noch zu kleinen Teilen benötigt und große Mengen des Wassers werden nur durch den Stauraum durchgeleitet und dann wieder dem Fluss Badam zugeführt. Einhergehend mit dem Rückgang der landwirtschaftlichen Flächen und dem Anstieg der Bevölkerungszahlen in Schymkent steigt der Energiebedarf der Region.

Der Standort am Badam Reservoir hat damit ein großes Potential zur lokalen Energieerzeugung aus Wasserkraft unter Nutzung der bestehenden Infrastruktur. An beiden Ausleitungswehren gibt es derzeit keine ökologischen Mindestwasserregelungen und auch keine Fischwanderhilfen. Als Planungsstandort in Hydro4U soll für diesen Standort die Nutzung der vorhandenen Wasserressourcen daher folgendermaßen optimiert werden (Abb. 1b):

- die zur Bewässerung benötigten Abflüsse müssen weiter gewährleistet werden,

- durch das vorhandene Stauvolumen im Badam Reservoir und die vorhandene Fallhöhe soll ganzjährig Energie aus Wasserkraft produziert werden, und
- die ökologische Situation in den bestehenden Restwasserstrecken der Flüsse Sayram und Badam soll durch Dotationskonzepte und Fischaufstiegshilfen an den Ausleitungswehren verbessert werden.

Die Planung einer Wasserkraftanlage in einer solchen bestehenden Bewässerungsinfrastruktur unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Wasserressourcen, der Ökologie und des WFEC-Nexus besitzt einen Vorzeigecharakter für die Region, in der viele solcher Bewässerungsbauwerke existieren.

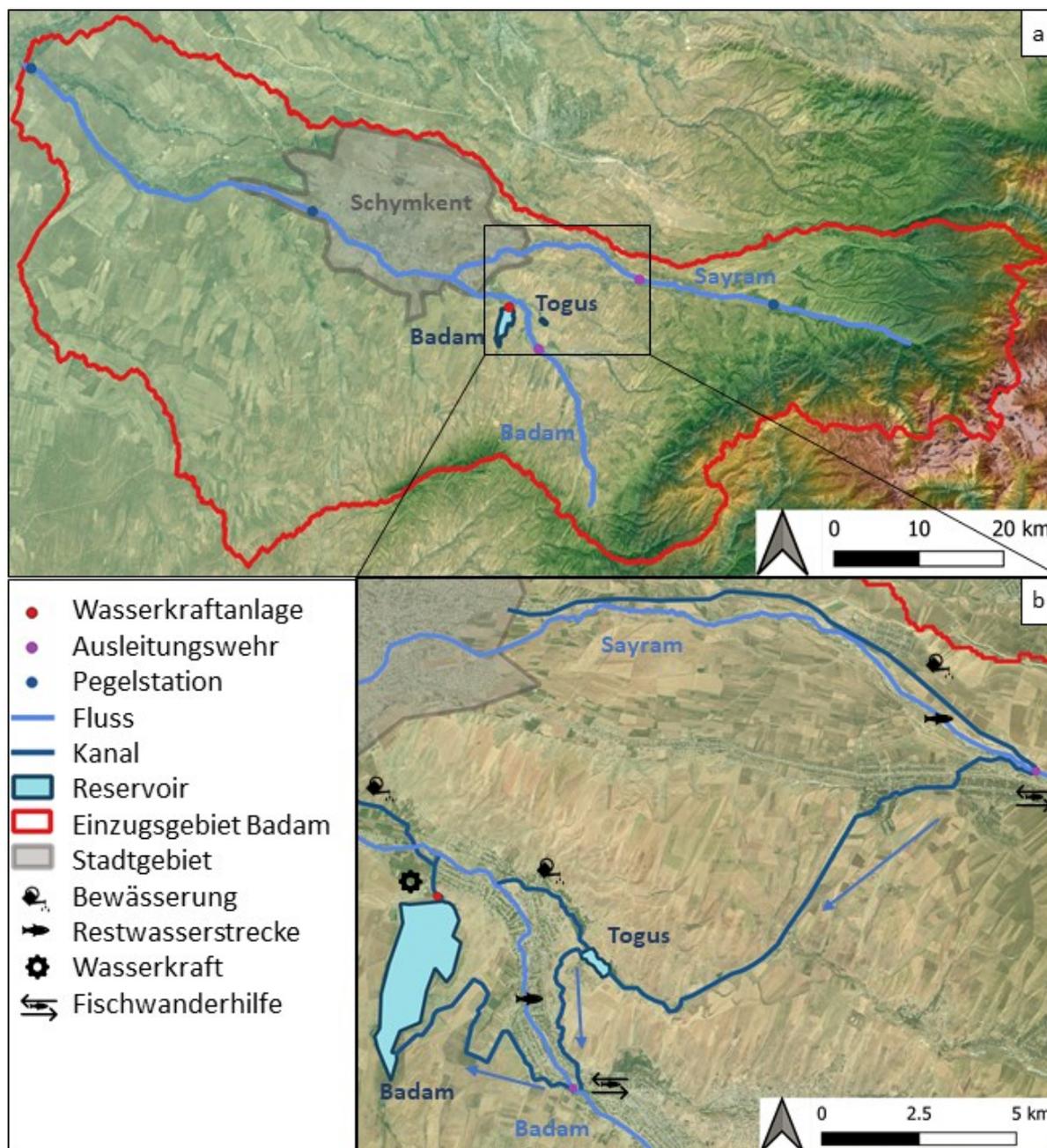


Abb. 1 Übersicht über das Projektgebiet (a) und die bestehende Bewässerungsinfrastruktur (b) am Badam Reservoir: blaue Pfeile zeigen die Richtungen, aus denen Wasser zum Reservoir Badam geleitet wird (Hintergrund: Google Satellite Bilder überlagert mit digitalem Höhenmodell aus USDS/NASA STRM Daten Version3 (WGS84), Jarvis et al. 2006)

2 Methodik

2.1 Hydrologie

Die Simulation der hydrologischen Bedingungen sowie der zugehörigen Klimaszenarien wurde in der frei verfügbaren RSMInverve Umgebung erstellt (RS Minerve 2021). Zur exakten Darstellung der Schneeschmelze im Zusammenhang mit der Höhenlage wurde das Einzugsgebiet in Teileinzugsgebiete sowie in Höhenbänder mit 200 m vertikaler Distanz unterteilt, für die jeweils ein hydrologisches Modell erstellt wurde. Der Gletschereinfluss wurde extern mit Hilfe von PyGEM (PyGEM 2022) quantifiziert und zu den Niederschlag-Abfluss-Simulationen addiert. Das Modell wurde kalibriert und validiert anhand dreier Pegelstationen (Abb. 1a) mit monatlichen Aufzeichnungen im Zeitraum von 1979 bis 2011. Es ist zu betonen, dass aufgrund spärlicher Messungen große Modellunsicherheiten bestehen. Das kalibrierte Modell wurde dann verwendet, um die Einflüsse der verschiedenen CMIP6 Niederschlags- und Temperaturszenarien basierend auf drei globalen Zirkulationsmodellen (GCM) und vier sozioökonomischen Varianten (SSP) auf die hydrologischen Bedingungen zu bestimmen. Mit diesen Simulationen der derzeitigen (1979-2011) sowie der prognostizierten zukünftigen hydrologischen Bedingungen (2015-2099) können Aussagen über künftig zur Verfügung stehende Abflüsse getroffen werden. Dies ist relevant für die Planung der Bewässerung, der ökologischen Restwasserabflüsse sowie für die Wasserkraft.

2.2 Ökologie

Als Grundlage für die ökohydraulischen Untersuchungen wurden in zwei repräsentativen Restwasserabschnitten des Badams und Sayrams terrestrische Vermessungen, Drohnenbefliegungen, Abflussmessungen, Kartierungen und Befischungen durchgeführt. Bis zum aktuellen Zeitpunkt konnte auf Basis der aufgenommenen Sohlpunkte und der Aufnahmen aus der Drohnenbefliegung anhand der Structure from Motion Methode ein digitales Geländemodell für den Flussabschnitt Badam entwickelt werden (Abb. 2). Mit den Ergebnissen aus der hydrologischen Simulation wurden Abflüsse abgeleitet, für welche ein hydrodynamisch-numerisches 2D Modell erstellt wurde. Durch die Abflussmessungen und aufgezeichnete Wasserspiegellagen konnte das erstellte Modell kalibriert werden.

Für die hydraulischen Berechnungen wurde die Software SRH-2D (SRH-2D 2020) verwendet. Die Ergebnisse der hydraulischen Berechnungen und Befischungen dienen wiederum als Basis für die Habitatmodellierung mit CASiMiR Fish (CASiMiR 2023). Das Habitatmodell verknüpft die hydraulischen Parameter (Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen bei verschiedenen Abflüssen) und die am Gewässer erhobenen Daten (Substratkartierung) mit den Habitatanforderungen einzelner Fischarten und deren Entwicklungsstadien. Die qualitativen Ergebnisse liegen als Flächen verschiedener Habitateignungen vor. Anhand der berechneten Eignungen bei unterschiedlichen Abflüssen und den Anforderungen für eine Durchgängigkeit der typischen Fischfauna können Empfehlungen für jahreszeitspezifische ökologische Mindestabflüsse (environmental flows) erarbeitet werden, die zukünftig eine umweltverträgliche, fischfreundliche Wasserkraft ermöglichen. Fischökologische Untersuchungen Ende 2022 konnten zwölf Fischarten für das Untersuchungsgebiet belegen, der Großteil davon Kleinfischarten, u.a. der Gattung *Gobius*, *Nemacheilus* oder *Cobitis*. Als Zeigerart für die Restwassermodellierung wurde die Snowtrout (*Schizothorax eurystomus*), eine strömungsliebende Fischart der Familie *Cyprinidae*, identifiziert, für welche Habitatpräferenzdaten aus dem usbekischen Flusssystem Shakhimardan vorliegen (Hayes et al. 2023).



Abb. 2 Orthofoto entwickelt aus der Drohnenbefliegung mit Umrandung (rot) des erstellten hydrodynamisch-numerischen 2D Modells und Wasseranschlagslinie (blau) für den Kalibrierungsabfluss in der Strecke Badam (links); Zeigerart für die Habitatmodellierung – Snowtrout (*Schizothorax eurystomus*) (rechts).

2.3 Variantenuntersuchung

Durch die Begehung der bestehenden Bauwerke zusammen mit den Betreibern der Anlage und dem Investor sowie durch die Auswertung der Bestandspläne konnten sowohl potentielle Standorte für das Kraftwerk identifiziert als auch Randbedingungen definiert werden, die bei der Planung der Wasserkraftanlage sowie der Fischaufstiegshilfen eingehalten werden müssen (Freihalten von Zufahrtswegen, Gewährleisten der Hochwasserabfuhr, Beibehalten der vollständigen Kapazität des vorhandenen Auslaufbauwerks am Badam Reservoir). Unterhalb des Badam Reservoirs wird das Wasser in einem offenen Kanal zurück in den Fluss beziehungsweise in den Bewässerungskanal geleitet. Dieser Kanal besitzt aufgrund der bestehenden Topographie ein starkes Gefälle. Unter Beachtung dieser zusätzlichen Möglichkeit, Fallhöhe zu gewinnen, wurden drei mögliche Standorte für die Wasserkraftanlage definiert, die sich unterschiedlich weit unterhalb des Staudamms befinden (Tab. 1). Für diese Standorte wurden dann in Absprache mit dem Projektpartner GlobalHydro passende Turbinentypen und deren Anzahl definiert, die hinsichtlich ihrer Leistung verglichen werden.

3 Ergebnisse

3.1 Hydrologie

Abb. 3 zeigt die aus den hydrologischen Simulationen erstellten Abflussganglinien für Sayram und Badam kurz vor der jeweiligen Ausleitung für die derzeitige Situation und die Zukunftsszenarien. Die prognostizierten zukünftigen Abflusswerte besitzen aufgrund der unterschiedlichen Annahmen für die Temperatur- und Niederschlagsentwicklung einen starken Schwankungsbereich. Allgemein ist jedoch festzustellen, dass die verfügbaren Abflüsse sich kaum ändern werden. Eine zeitliche Verschiebung der Abflussganglinie mit früherem Einsetzen der Schneeschmelze durch die Temperaturerhöhung ist zu erwarten sowie erhöhte Winterabflüsse aufgrund der fortschreitenden Erwärmung.

Basierend auf den Abflusssimulationen wird deutlich, dass derzeit und in Zukunft auch außerhalb der Bewässerungsperiode im Frühjahr und Sommer in beiden Flüssen mit einem Basisabfluss zwischen 5 bis 8 m³/s zu rechnen ist, der abzüglich der ökologischen Restwasserabflüsse ganzjährig für die Energieerzeugung aus Wasserkraft genutzt werden kann. Die Abflusssimulationen unterliegen allerdings Modellunsicherheiten, die sich aus den fehlenden Messdaten zur Kalibrierung und Validierung ergeben. Hinzukommt, dass derzeit an den Ausleitungswehren keine exakten Abflüsse gemessen werden, die zur Überprüfung der simulierten Abflüsse dienen könnten.

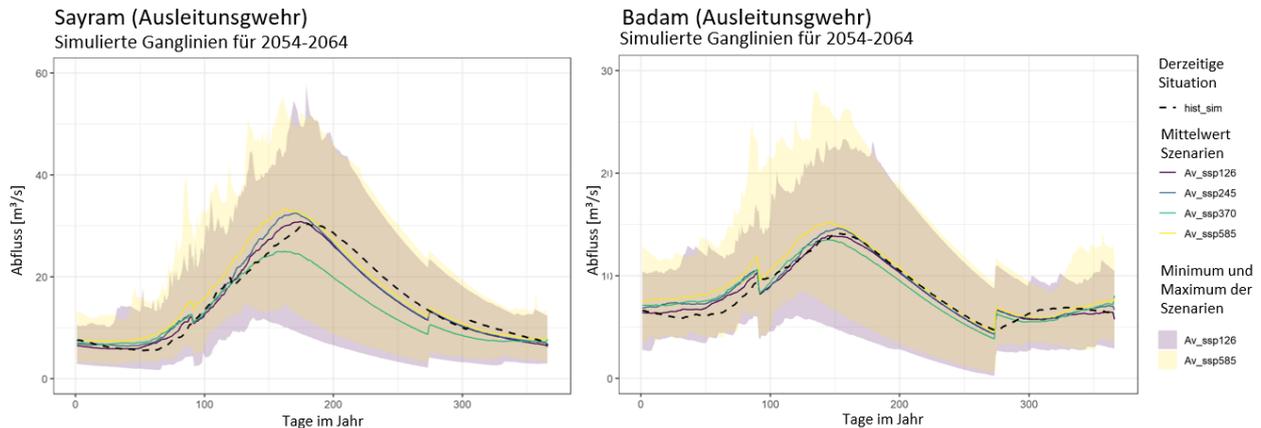


Abb. 3 Simulierte Abflussganglinien für Sayram und Badam für die derzeitige Situation und die Zukunftsszenarien (basierend auf verschiedenen SSP) dargestellt für die Periode 2054–2064. Die durchgezogenen Linien zeigen die langjährigen Mittel. Die Sprünge der Hydrographen im Frühjahr und Herbst entstehen aufgrund von Wassertransfer zwischen den Einzugsgebieten.

3.2 Ökologie

Für die ökohydraulische Bewertung des Ausleitungsabschnitts Badam wurden die hydraulischen Verhältnisse (Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen) bei elf verschiedenen Abflüssen zwischen 0,25 m³/s und 13,6 m³/s ermittelt. Auf Basis dieser hydraulischen Daten wurden Habitate für drei Altersstadien der Snowtrout (juvenil, subadult und adult) berechnet und analysiert. Die Habitateignungen (SI; engl.: suitability index) in Form von sogenannten SI-Flächendiagrammen sind in Abb. 4 dargestellt. Auf der Abszisse sind die berechneten Abflüsse und auf der Ordinate die Habitatflächen aufgetragen. Die Färbungen stehen für unterschiedliche Habitateignungen eingeteilt in Kategorien von „sehr gut“ (blau) bis „schlecht“ (grau).

Nach den Kriterien zur Durchwanderbarkeit für die adulte Snowtrout (Wassertiefe <10 cm nicht durchgängig, 10–15 cm teilweise durchgängig, >15 cm mit hoher Wahrscheinlichkeit durchgängig (Hayes et al. 2023)) sollte der Mindestabfluss für die Badam-Strecke 500 l/s betragen. Die noch ausstehende Empfehlung zur dynamischen saisonalen Abflussregelung wird neben den Durchgängigkeitsanforderungen auch die berechneten Habitatverteilungen für die drei verschiedenen Altersstadien der Snowtrout berücksichtigen. Mit dieser Empfehlung soll eine Lebensraumqualität in den Ausleitungsstrecken gewährleistet werden, welche die Besiedlung des Flusses durch die typische aquatische Fischfauna nicht einschränkt. Weitere notwendige ökologische Maßnahmen im Rahmen einer nachhaltigen Projektplanung sind die Ausarbeitung von Fischauf- und -abstiegsbauwerken an den Ausleitungswehren sowie Fischschutzmaßnahmen, die das Einschwimmen von Fischen in das Kanalsystem der Wasserkraftanlage verhindern.

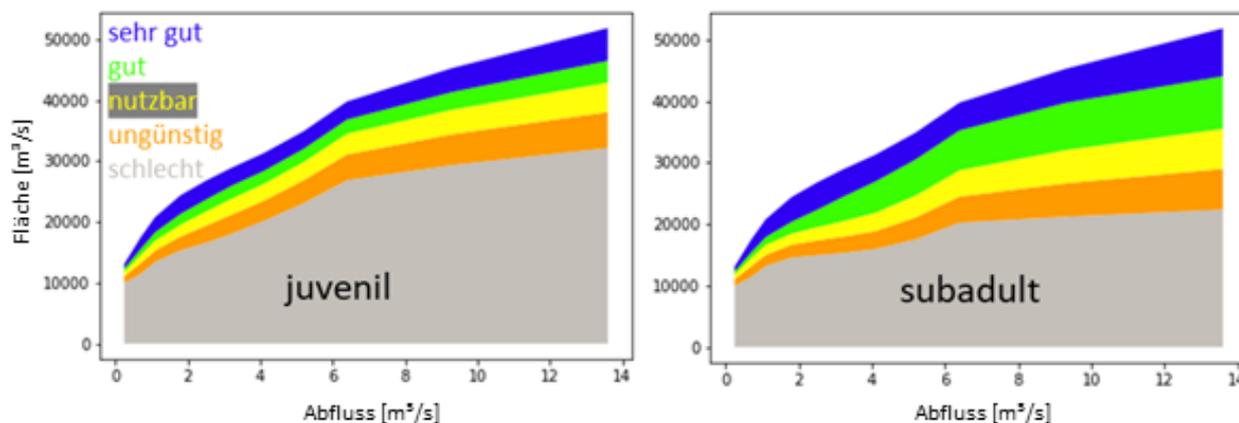


Abb. 4 Habitatangebot in Abhängigkeit vom Abfluss im betrachteten Restwasserabschnitt im Fluss Badam für juvenile (links) und subadulte Snowtrout (rechts).

3.3 Variantenuntersuchung

Durch die Ergebnisse der hydrologischen und ökologischen Untersuchungen sowie unter Beachtung der oben genannten Ziele (Abschnitt 1.2) konnte ein neues Wassermanagementkonzept entwickelt werden, welches die Grundlage der Variantenuntersuchung bildet. Die Ausleitungsmenge aus dem Sayram kann basierend auf den hydrologischen Simulationen erhöht werden. Nach dem hydrologischen Modell kann man von einem minimalen Abfluss im Sayram in Niedrigwasserzeiten außerhalb der Bewässerungsperiode von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgehen. Mit einer zusätzlichen konstanten Ausleitung von circa $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ in den linken Bewässerungskanal stehen immer noch mindestens $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ für eine ökologische Restwasserabgabe sowie einen Fischpass zur Verfügung. Dieser Abfluss muss mit den oben genannten Habitatmodellen für die Ausleitungsstrecke im Sayram verifiziert werden. Diese erhöhte Ausleitungsmenge wird über den Kanal dem Togus Reservoir und dann dem Fluss Badam zugeführt und kann dort als Zufluss zum Badam Reservoir verwendet werden. Aufgrund der derzeitigen Zustände der Kanäle und der angenommenen Verdunstung muss hier mit einem Verlust von 40% gerechnet werden, sodass konstant mindestens $2 \text{ m}^3/\text{s}$ mehr im Badam Reservoir zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zu den entnommenen Abflüssen aus dem Fluss Badam, die außerhalb der Bewässerungsperiode zur Füllung des Reservoirs benutzt werden, kann dieser erhöhte Zufluss durch das Reservoir geleitet und so konstant zur Energieerzeugung verwendet werden. In Zeiten, in denen die Auslaufmenge die Kapazität der Turbinen übersteigt, wie in Zeiten der Bewässerung, kann der zusätzliche Zufluss aus dem Sayram zur Füllung des Speichers verwendet werden. Das zusätzliche Volumen steht dann in den Herbstmonaten zur Wasserkraftproduktion zur Verfügung. Unter der Annahme, dass die zur Bewässerung benötigten Abflüsse unterhalb des Badam Reservoirs sich im Vergleich zu dem Ist-Zustand nicht verändern und somit weiter bereitgestellt werden müssen, ergeben sich die monatliche Zulaufganglinie, die Auslaufganglinie und das Volumen im Badam Reservoir wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.a,b,c** dargestellt.

Basierend auf der optimierten Auslaufganglinie (siehe Abb. 5b) wurde ein Ausbauabfluss für die Turbinen bis maximal $4 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt. Durch die Lage des Kraftwerks weiter unterhalb des Staudamms steigt die maximal vorhandene Fallhöhe an. Für Standort 3 steht allerdings nicht der gesamte Auslaufabfluss des Reservoirs zur Verfügung, da oberhalb das zur Bewässerung benötigte Wasser nach links abgeleitet wird.

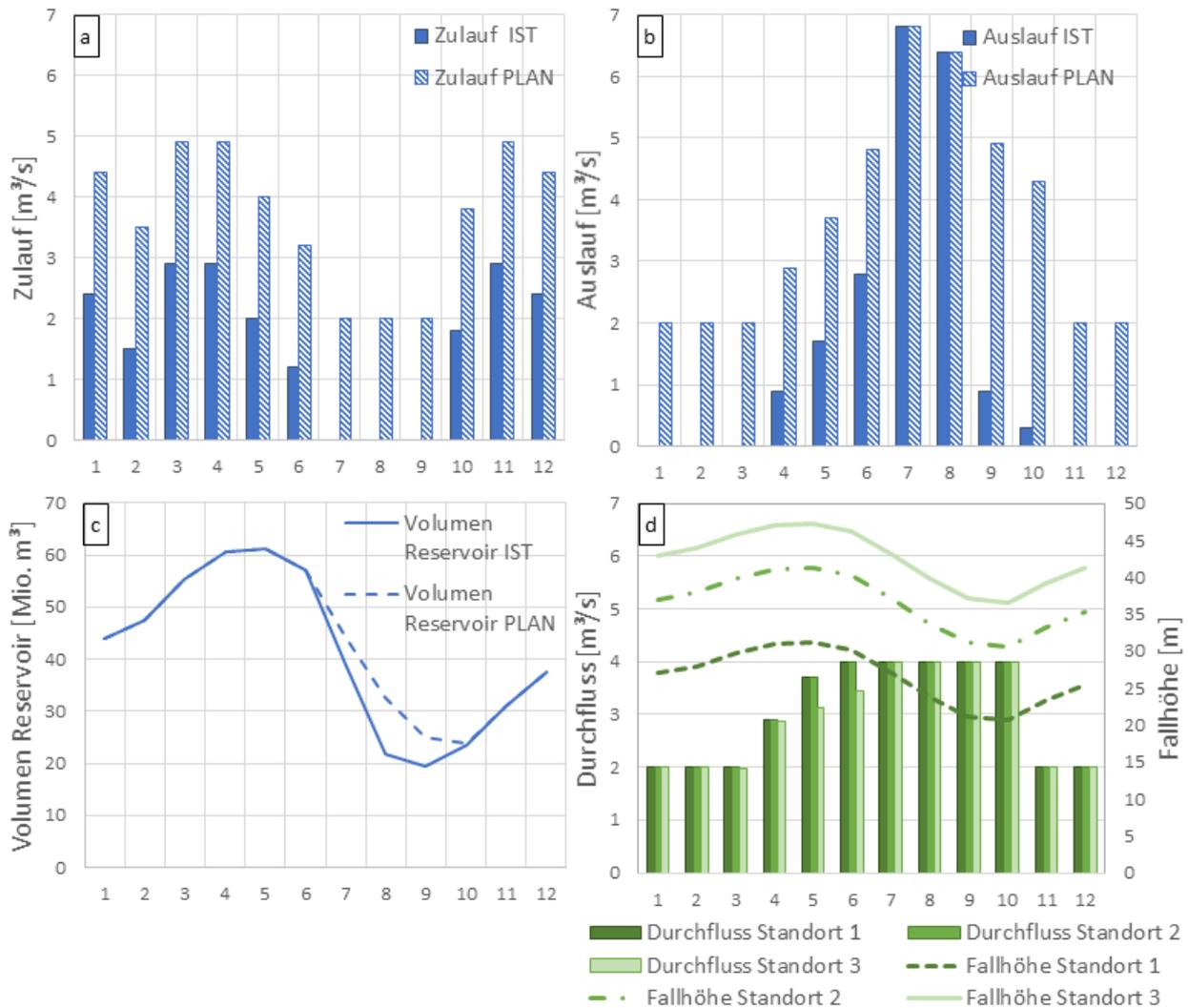


Abb. 5 (a) Zulaufganglinie, (b) Auslaufganglinie und (c) Wasservolumen im Reservoir für den Ist-Zustand und den Plan-Zustand sowie (d) die für die Wasserkraftproduktion zur Verfügung stehenden Abflüsse und Fallhöhen für die drei potentiellen Standorte basierend auf monatlichen Mittelwerten

Abb. 5d zeigt die für die drei Standorte monatlich zu Verfügung stehenden Abflüsse und Fallhöhen. Tab. 1 gibt zusätzliche charakteristische Zahlen zu den jeweiligen Standorten an. Dabei sind für den Standort 2 und 3 verschiedene Turbinenarten möglich, weshalb dort nochmal in drei Varianten unterschieden wird. Als Turbinenart kann am Standort 1 eine konventionelle Kaplan-Turbine eingesetzt werden, die sich hier durch ihren großen Abflussbereich auszeichnet. An den weiter unterhalb gelegenen Standorten können konventionelle Francis-Turbinen verwendet werden oder die innerhalb von Hydro4U von GlobalHydro weiterentwickelten Francis-Container-Turbinen (Jorde et. al. 2022). Aufgrund der gegebenen Fallhöhe besitzen diese Francis-Container einen maximalen Ausbauabfluss von $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Daher werden hier zwei bis drei Container in Kombination betrachtet. Eine Kombination solcher Container hat den Vorteil, dass Teillasten ebenfalls mit hohem Wirkungsgrad genutzt werden können.

Mit den unterschiedlichen Ausbauleistungen und Jahresarbeiten für die gegebene Auslaufganglinie können die unterschiedlichen Turbinenoptionen verglichen werden. Zusätzlich müssen allerdings die Bau- und Materialkosten betrachtet werden, die sich aufgrund der unterschiedlichen Lage und der Turbinenanzahl stark zwischen den Standorten unterscheiden. Weitere Kosten für die ökologischen Maßnahmen an den Restwasserstrecken (insbesondere Fischaufstiegshilfen)

sowie die Verbindung der Wasserkraftanlage mit dem bestehendem Auslaufbauwerk sind unabhängig von dem Wasserkraftwerksstandort und beeinflussen daher nicht den Variantenvergleich.

Basierend auf Tab. 1 ergibt sich, dass Option 2.1 derzeit die ökonomisch sinnvollste Variante darstellt. Diese Option hat im Vergleich zu den Optionen 1, 2.2 und 3.2 eine deutlich höhere Jahresarbeit. Zum anderen ist sie im Vergleich zu den Optionen 2.3, 3.1 und 3.3 mit kleineren Investitionskosten verbunden, da eine kürzere Druckleitung gebaut werden muss (im Vergleich zu Standort 3) und nur eine Turbine beschafft werden muss (im Vergleich zu 2.3 und 3.3).

Tab. 1 Variantenvergleich Wasserkraftstandorte

	Standort	Turbinenart	Abfluss [m³/s]	max. Fallhöhe [m]	Ausbauleistung [MW]	Jahresarbeit [MWh]
	1	Kaplan	0,4 - 4	31,2	1,15	6027
	2.1	Francis	1,6 - 4	41,2	1,51	7943
	2.2	2x Francis Container	0,6 – 2,8	41,2	1,05	6613
	2.3	3x Francis Container	0,6 – 4	41,2	1,50	8105
	3.1	Francis	1,2 – 4	47,2	1,73	8900
	3.2	2x Francis Container	0,6 – 2,8	47,2	1,21	7563
	3.3	3x Francis Container	0,6 – 4	47,2	1,72	8869

4 Diskussion und Ausblick

Der Planungsstandort am Badam Reservoir als Teil des Hydro4U Projekts stellt eine für die Region typische Planungsaufgabe dar. Auf der einen Seite ist es ein Vorzeigebeispiel, wie die bestehende Bewässerungsinfrastruktur unter Berücksichtigung des WFEC-Nexus (Jorde et al. 2022) zur Wasserkraftgewinnung nachhaltig genutzt werden kann. Zum anderen zeigt der Standort die Probleme auf, mit der die Region zu kämpfen hat und die die Umsetzung effizienter und nachhaltiger Wasserkraftanlagen erschweren. Dies betrifft einmal die Unsicherheit in den zur Verfügung stehenden Abflüssen, die die Wirtschaftlichkeit der Wasserkraftanlagen deutlich beeinflussen kann. Es sind wenige Pegelmessungen vorhanden und die Abflussaufzeichnungen an den Ausleitungswehren basieren auf veralteten oder teilweise falsch kalibrierten Abflussbeziehungen. Zusätzlich finden an den Flüssen lokale, nicht dokumentierte Wasserentnahmen statt, die die ankommenden Abflüsse an den Ausleitungswehren stark reduzieren. Zugleich erschweren die fehlenden Messdaten zur Validierung und Kalibrierung besonders im Badam Einzugsgebiet die Erstellung detaillierter hydrologischer Simulationen. Zusätzlich sind in Kasachstan keine ökologischen Maßnahmen wie Fischaufstiegshilfen oder die Einhaltung bestimmter ökologischer Restwasserabflüsse gefordert. Dies erschwert die Umsetzung sowie auch die Akzeptanz für solche Maßnahmen von Seiten der betreibenden Firmen und der investierenden Personen. Innerhalb von Hydro4U werden daher die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie mögliche Finanzierung- und Unterstützungsmöglichkeiten analysiert, die eine Umsetzung der ökologischen Maßnahmen erleichtern sollen. Die Schwierigkeiten und Lösungsmöglichkeiten, die an diesem Standort sowie an den zwei Demonstrationsstandorten in Kirgisistan und Usbekistan in Hydro4U identifiziert wurden, fließen in die Werkzeuge und Handreichungen ein, die innerhalb von Hydro4U entwickelt und zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht eine Umsetzung zukünftiger Wasserkraftprojekte gemäß internationaler Nachhaltigkeitskriterien in der Region.

Literatur

CASiMiR (2023) [Software]. Verfügbar unter <http://www.casimir-software.de/>

Hayes, D.S.; Karimov, E.; Karimov, B.; Coeck, J.; Schmutz, S.; Zeiringer, B. (2023). Habitat preferences of snow trout (*Schizothorax eurystomus*) in Uzbek rivers. 40th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) World Congress, Vienna, Austria (*in Review*).

Jarvis A.; Reuter, H.I.; Nelson, A.; Guevara E. (2006). Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). <http://srtm.csi.cgiar.org>, Zugriff: 15.03.2023

Jorde, K.; Alapfy, B.; Schwedhelm, H.; Siegfried, T.; Habersack, H.; De Keyser, J.; Hayes, D.S.; Purushottam, A.; Schneider M.; Anarbekov, O. (2022). EU supports small hydropower in Central Asia, *The International Journal on Hydropower & Dams*, 29(5), 52-59.

PyGEM (2022) [Software]. Verfügbar unter <https://github.com/drounce/PyGEM>, Zugriff: 15.03.2023

Reisenbüchler, M.; Alapfy, B.; Siegfried, T.; Rutschmann, R. (2021). Hydro4U - Nachhaltige Kleinwasserkraft in Zentralasien, *WasserWirtschaft* 12/2021, 10-15.

RS Minerve (2021) [Software]. Verfügbar unter <https://crealp.ch/rs-minerve>, Zugriff: 15.03.2023

SRH-2D (2020) [Software]. Verfügbar unter <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/models/srh2d/index.html>, Zugriff: 15.03.2023

Anschrift der Verfasser

Hannah Schwedhelm, M. Sc.
Bertalan Alapfy, M. Sc.
Prof. Dr. Nils Rüther
Lehrstuhl für Hydraulic Engineering,
TU München
Arcisstraße 21, D-80333 München
hannah.schwedhelm@tum.de
bertalan.alapfy@tum.de
nils.ruether@tum.de

Aidar Zhumabaev
Dr. Tobias Siegfried
hydrosolutions GmbH
Venusstraße 29, CH-8050 Zürich
zhumabaev@hydrosolutions.ch
siegfried@hydrosolutions.ch

Tobias Hägele, M. Sc.
Dr.-Ing. Ianina Kopecki
sje - Ecohydraulic Engineering GmbH Viereichenweg 12, D-70569 Stuttgart
haegele@sjeweb.de
kopecki@sjeweb.de

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
daniel.hayes@boku.ac.at
bernhard.zeiringer@boku.ac.at

Dr.-Ing. Klaus Jorde
KJ Consult
Ferdinand-Raunegger-Gasse 26,
AT- 9020 Klagenfurt
klaus.jorde@kjconsult.net