Dynamische Stauzielregelung als umweltverträgliche Wasserkraftoptimierung

S. Heimerl[1], N. Drews[2] und B. Kohler[1]

[1] Fichtner Water & Transportation GmbH, Sarweystr. 3, D-70191 Stuttgart, GERMANY
[2] Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, August-Bebel-Str. 30, D-01219 Dresden, GERMANY

E-Mail: stephan.heimerl@fwt.fichtner.de

Kurzfassung

Effizienzsteigernde Maßnahmen sind bei Wasserkraftanlagen eine wichtige Maßnahme, um diese regenerative Energieerzeugungsform umweltverträglich weiter zu entwickeln. Hierbei kann die dynamische Stauzielerhöhung einen wichtigen Beitrag leisten, indem zuflussabhängig der Stau angehoben und damit ein Fallhöhen- sowie Erzeugungsgewinn erzielt werden kann. In diesem Beitrag werden die Chancen und Randbedingungen dieser Anlagensteuerung und deren bauliche Voraussetzung sowie Erfahrungen aus dieser Betriebsweise vorgestellt.

Einleitung

Die Effizienz von Wasserkraftanlagen spielt für deren Betreiber heute vor allem in Deutschland eine entscheidende Rolle, da der Ausbaugrad der Wasserkraft an großen Fließgewässern in Deutschland bereits auf einem hohen Niveau liegt, die Wasserkraft an kleinen Fließgewässern seit Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Wesentlichen gefestigt ist und der Neubau von Querbauwerken für die Wasserkraftnutzung genehmigungstechnisch derzeit nahezu unmöglich erscheint.
Daher werden vielfach bestehende Anlagen effizienzsteigernd auch im Hinblick auf die aktuell geltenden Anforderungen aus dem EEG mit einer dort verlangten Steigerung des Leistungsvermögens, d. h. der Erzeugung, umgebaut. Darüber hinaus werden Standorte mit ruhenden Wassernutzungsrechten wieder in Betrieb genommen und bei Standorten ohne bisherige Wasserkraftnutzung angestrebt, diese in Betrieb zu nehmen. Bei der Planung derartiger Projekte kann eine dynamische Stauzielregelung v. a. als steuerungstechnische Optimierung eine zusätzliche effizienzsteigernde Maßnahme neben den sonst vielfach eingesetzten Maßnahmen darstellen.

Dynamische Stauzielregelung

Allgemeines

Mit einer dynamischen Stauzielregelung wird das Ziel verfolgt, die Jahresarbeit E_a einer Anlage durch eine Steuerungsoptimierung an der Staustufe zu steigern. Dafür wird das technisch nutzbare Potenzial am Standort der Anlage erhöht. Zwingende bauliche Voraussetzung dafür ist, wie in Abbildung 1 unten dargestellt, eine Wehranlage mit beweglichen Steuerelementen.
Steigt der Durchfluss eines Gewässers an, verlagert sich beim klassischen statischen Stau die Stauwurzel in Richtung Wehranlage. Während sich der Unterwasserstand der Anlage infolge des größeren Durchflusses anhebt, verbleibt der Oberwasserstand nahezu auf demselben Niveau. Dies hat eine Abnahme der Fallhöhe zur Folge.
Beim dynamischen Stau hingegen wird mit dem Regelorgan das Stauziel im Oberwasser Z_{Stau} schrittweise erhöht, so dass bei steigendem Unterwasserstand die Fallhöhenabnahme minimiert wird. Demnach steht über einen längeren Zeitraum im Jahr mehr Fallhöhe für eine energetische

Nutzung zur Verfügung, womit eine höhere Jahresenergieerzeugung erreicht wird. Optimiert wird die dynamische Stauzielregelung im Hinblick auf die Länge der Stauhaltung l_{Stau}, so dass durch den zusätzlichen Stau keine frei fließenden Gewässerstrecken gekürzt werden und damit umfangreiche umweltrechtliche Aspekte geprüft werden müssen.

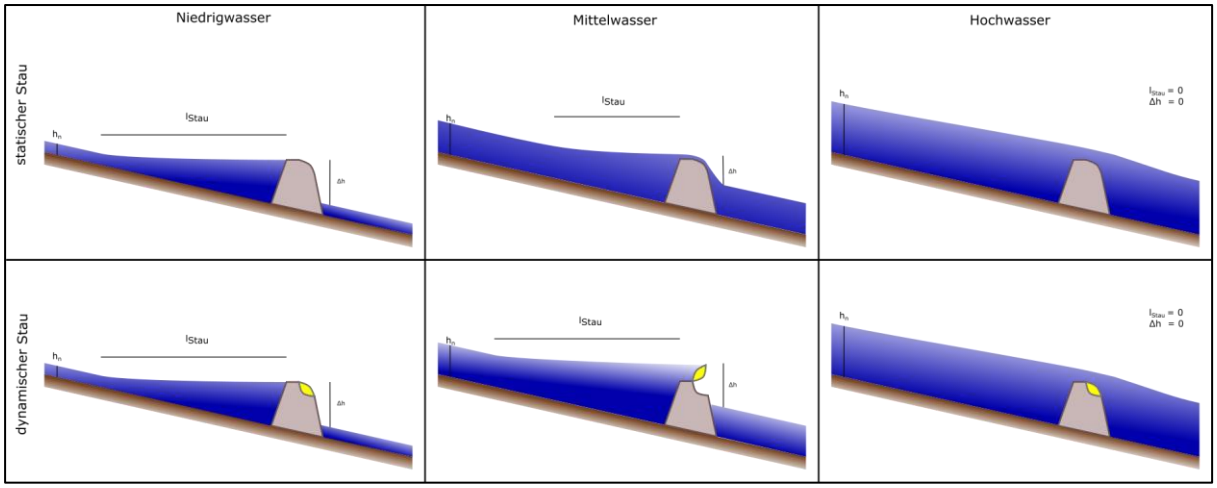


Abbildung 1: Prinzipskizze von statischer (oben) und dynamischer Stauzielregelung (unten) [1]

Die mögliche Fallhöhensteigerung durch den dynamischen Stau fällt dabei umso höher aus, je größer das Gefälle im relevanten Gewässerabschnitt ist.

Leistungsbetrachtung

Zur Berechnung der elektrischen Leistung sind die Fallhöhe und der Durchfluss linear miteinander kombiniert. Darüber hinaus werden die Dichte des Wassers, die Gravitation und der Gesamtwirkungsgrad der Anlage in der Gleichung zur Ermittlung der Netto-Leistung berücksichtigt. Aus hydraulischer Sicht lässt sich demzufolge eine Leistungssteigerung an Wasserkraftanlagen lediglich über einen zusätzlichen Turbinendurchfluss oder über zusätzliche Fallhöhe erzeugen. Letzteres ist der Ansatz der dynamischen Stauzielregelung.
Im Wert für die Fallhöhe h_f sind das Stauziel, der Unterwasserstand und die Summe der Verlusthöhen enthalten [2]:

$$h_f(t) = Z_{Stau} - Z_{UW}\big(Q(t)\big) - \sum_i h_{v,i} \ \ [m] \qquad (1)$$

Mit	t	…	Variable der Zeit	[s]
	Z_{Stau}	…	Stauziel	[m ü. NHN]
	$Z_{UW}(Q(t))$	…	Wasserspiegellage im Unterwasser	[m ü. NHN]
	$\sum_i h_{v,i}$	…	Summe der Verlusthöhen	[m]

Zu berücksichtigende Verlusthöhen sind von der Fließgeschwindigkeit abhängig, wie beispielsweise Rechen-, Ein- und Auslaufverluste. Für die Umsetzung der dynamischen Stauzielregelung sind diese weitgehend konstant. Abflussbedingt variabel ist hingegen die Wasserspiegellage im Unterwasser, wodurch bei einem statischen Stau eine frühere Reduzierung der Fallhöhe eintritt.

Um dem entgegenzuwirken, erhält das Stauziel bei einer dynamischen Stauzielregelung in Gleichung [1] ebenfalls eine Abhängigkeit vom Abfluss:

$$h_f(t) = Z_{Stau}\big(Q(t)\big) - Z_{UW}\big(Q(t)\big) - \sum_i h_{v,i} \ \ [m] \qquad (2)$$

Dadurch kann die Fallhöhe über das Stauziel gesteuert und die Abnahme der Fallhöhe in die Anlagensteuerung integriert werden. Änderungen an der Fallhöhenverfügbarkeit setzen sich linear in die Jahresarbeit der Anlage als Produkt aus Leistung und Zeit fort.

Steuerung

Die Umsetzung einer dynamischen Stauzielregelung erfolgt in den Betriebsgrenzen der installierten Maschinensätze. Demnach wird i. d. R. dem höchsten Betriebsdurchfluss das maximale Stauziel $Z_{Stau,max}$ zugeordnet. Entsprechend erfolgt die Zuordnung des minimalen Stauziels $Z_{Stau,min}$ dem niedrigsten Betriebsdurchfluss. Innerhalb dieses Betriebsregimes wird die dynamische Stauzielregelung so implementiert, dass die Länge der Stauhaltung konstant bleibt. Bei größeren Durchflüssen greifen Regelungen der Hochwassersteuerung, wie zum Beispiel die Vorentlastung zur Schaffung von zusätzlichem Retentionsraum oder der Retentionsstau zur Kappung des Hochwasserscheitels.

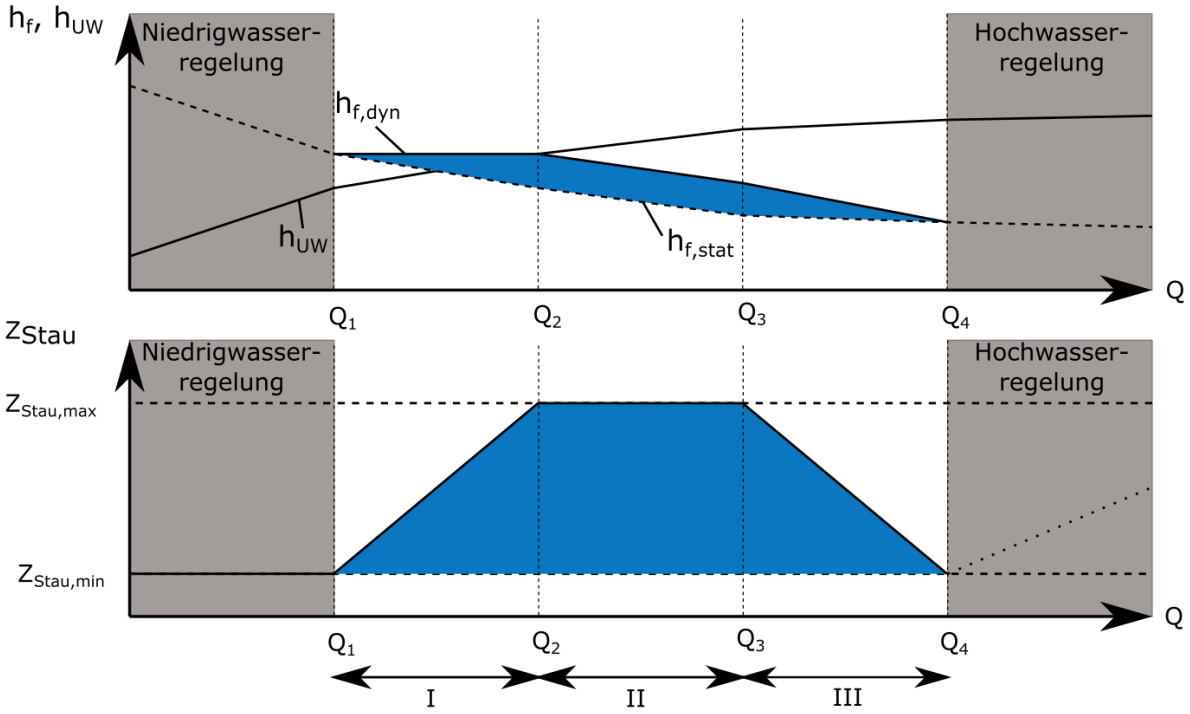


Abbildung 2: Schematisierte Steuerung und Fallhöhenverlauf bei einer dynamischen Stauzielregelung [1]

In der praktischen Umsetzung bedeuten diese Überlegungen, dass sich die Steuerung in drei Steuerungsphasen gliedert (Abbildung 2). Unterhalb der unteren Betriebsgrenze Q_1 greifen Regelungen für den Niedrigwasserfall und die Anlage steht aufgrund einer zu geringen Beaufschlagung der Turbinensätze.

Bei einer Überschreitung von Q_1 wird die Anlage in Betrieb genommen. Dabei wird das Stauziel über die gesamte Betriebsphase I so erhöht, dass die Fallhöhe und die Lage der Stauwurzel konstant gehalten werden.
Sobald das Regelorgan bei einer Durchflussmarke von Q_2 vollständig aufgestellt ist, kann das Stauziel aus konstruktiven Gründen nicht weiter angehoben werden und verbleibt über die Phase II auf dem Niveau des maximalen Stauziels $Z_{Stau,max}$, so dass die Fallhöhe infolge eines weiter steigenden Unterwasserstands abnimmt. Ab der oberen Betriebsgrenze Q_3 ist es schließlich ggf. erforderlich, das Stauziel zur Gewährleistung einer effektiven Hochwasserregelung über die Phase III hinweg zu senken. Während dieser Phase wird eine Wasserkraftnutzung nicht unbedingt komplett weiter betrieben, weil die vorhandene Fallhöhe unter die Grenze des wirtschaftlichen Betriebs der Anlage fallen kann.

Wirkungsweise
Wird das Stauziel dynamisch erhöht, vergrößert sich zeitweise die Höhe des Aufstaus im Fließgewässer, wobei der Verlauf der Staulinie sowie der Horizont des einsickernden Grundwassers vertikal gehoben werden. Daraus ergeben sich für die Bemessung einer Wehranlage relevante Wasserdrücke aus den verschiedenen Betriebszuständen der Anlage. Dabei sind der geringste Wasserstand zusammen mit dem Niedrigwasserabfluss und der höchste Wasserstand zusammen mit dem Hochwasserabfluss zu berücksichtigen.
Mit dem Einsatz einer solchen Steuerung steht für einen längeren Zeitraum im Jahr eine größere Fallhöhe zur energetischen Nutzung zur Verfügung (Abbildung 3). Der Effekt einer dynamischen Stauzielregelung macht sich besonders bei mittleren bis hohen Turbinendurchflüssen bemerkbar, da sich in diesem Bereich die Fallhöhe spürbar erhöht und damit die Jahresarbeit einer Anlage gesteigert wird.

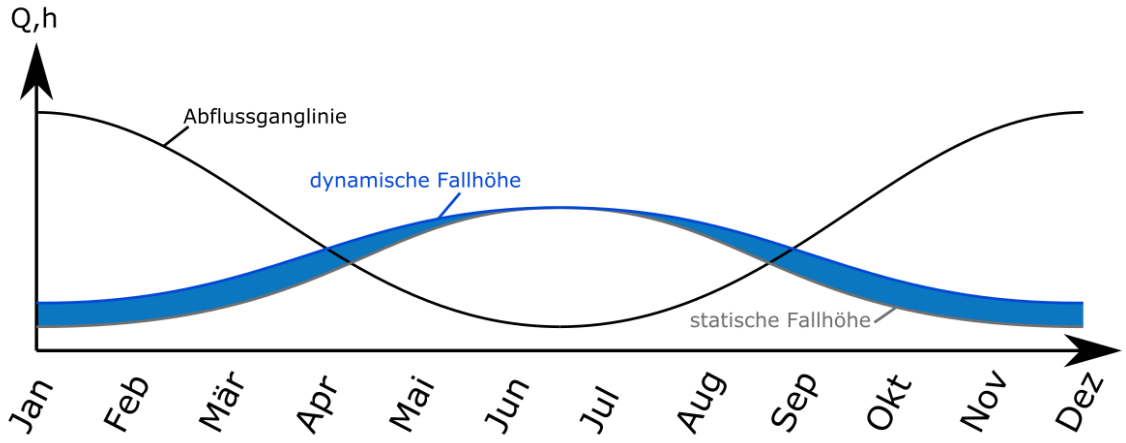


Abbildung 3: Prinzipielle Wirkungsweise der dynamischen Stauzielregelung im Regeljahr [1]

Setzt man den Betrachtungsmaßstab etwas größer an, bewirkt die Einführung einer dynamischen Stauzielregelung die Ausweitung des wirtschaftlich nutzbaren Potenzials an Fließgewässern und eine Stärkung der Rolle der Wasserkraft im Sektor der erneuerbaren Energien. Unter Berücksichtigung einer derartigen Steuerung würde das technisch nutzbare Potenzial der Wasserkraft in Deutschland, welches aktuell bei ca. 33,2 TWh bis 42,1 TWh [3] liegt, neu bewertet werden müssen.

Im Konflikt stehende Interessen
Neben energiewirtschaftlichen Vorteilen betreffen die Auswirkungen eines zeitweisen, zusätzlichen Aufstaus weitere Interessen. Aus diesem Grund ist vorab die Beeinträchtigung dieser zu untersuchen und zu bewerten.
In eine derartige Bewertung ist mit einzubeziehen, dass der zusätzliche Aufstau keine größere Wassertiefe bedeutet, sondern vielmehr eine Veränderung in der Dauer und Häufigkeit eines bestimmten höheren Stauziels im Betriebsregime der Anlage. Hierbei sind insbesondere folgende Themenkomplexe zu berücksichtigen:

- Hochwasserschutz,
- Land- und Forstwirtschaft,
- Siedlungsentwicklung,
- Natur- und Umweltschutz.

Wirtschaftlichkeit
Für die Umsetzung der dynamischen Stauzielregelung bei Bestandsanlagen ist eine Planung und Genehmigung einer solchen Steuerung notwendig. Beispielsweise ist statisch zu prüfen, ob ein temporär höherer Einstau die zulässigen Belastungen am Bauwerk oder im Untergrund übersteigt. Baulich müssen für die Anpassung einer Bestandsanlage an die Erfordernisse des dynamischen Staus die Ertüchtigung eines festen Wehres um ein Regelorgan oder gegebenenfalls die Neujustierung des Regelorgans an einem existierenden beweglichen Wehr berücksichtigt werden. Auch müssen die Umweltwirkungen geprüft werden.
Nach der Ertüchtigung der Anlage stehen den entstandenen Kosten als Nutzen die Mehreinnahmen aus der gesteigerten Jahresarbeit gegenüber.

Erfahrungen aus der Praxis

Realisierte Anlage an der oberen Donau
An der 2009 in Betrieb gegangenen, durch den Hauptautor neu geplanten Wasserkraftanlage Beuron an der Donau der dortigen Erzabtei St. Martin wurde erstmals eine dynamische Stauzielregelung zum Schutz eines oberwasserseitig der Stauwurzel liegenden Fischlaichhabitats realisiert.
Das seit 1922 betriebene Flusswasserkraftwerk St. Maurus liegt im Durchbruchstal der oberen Donau durch den südwestlichen Ausläufer der Schwäbischen Alb in Baden-Württemberg, Deutschland. Der Ausbauabfluss betrug ursprünglich 5,2 m^3/s. Im Rahmen der anstehenden Modernisierung mit schlussendlich einem Neubau der Wasserkraftanlage mit Wehr wurden die verschiedenen Optionen zur Steigerung der Jahresenergieerzeugung untersucht und ein Ausbauabfluss von 12 m^3/s festgelegt. Gegenüber den zwei kleinen Francis-Maschinen mit insgesamt 80 kW sollte künftig mit einer vertikalachsigen, doppelt regulierten Kaplanmaschine mit 263 kW installierter Leistung ein spürbar höherer Ertrag erwirtschaftet werden, um die umfangreiche Investition zu rechtfertigen.
Auf der Basis einer umfangreichen Abstimmung mit der Fischereifachverwaltung wurde in einer hydraulischen Berechnung ermittelt, dass die Zielsetzung einer querschnittsgemittelten Fließgeschwindigkeit von mindestens 30 cm/s im 1,7 km oberstrom liegenden Laichareal bei Abflüssen >7 m^3/s sowie einem um 0,60 m erhöhten Stauziel eingehalten wird. Bei geringeren Abflüssen muss dann ein niedrigerer Stau gefahren werden, um das Laichareal nicht einzustauen und damit die Fließgeschwindigkeit unter den Schwellenwert zu reduzieren.

Durch die verschiedenen Anforderungen der Leitfischarten Äsche, Bachforelle und der FFH-geschützten Groppe wurden die Anforderungen schließlich mehrdimensional, da jahreszeitlich unterschiedliche Regelungen zu finden waren:

- Laichzeit von Äsche und Groppe (März bis Mai)
- Außerhalb der Laichzeiten
- Laich- und Embryonalzeit der Bachforelle (Oktober bis Februar)

Schlussendlich konnte eine dreigeteilte, jahreszeitlich unterschiedliche Steuerregel entwickelt werden, auf deren Basis in Abhängigkeit des Zuflusses der Stauspiegel von bisher 2,60 m um bis zu 0,60 m (ca. 23 %) angehoben werden konnte, so dass in Verbindung mit dem höheren Ausbaudurchfluss in den vergangenen 10 Jahren des Betriebes eine erhöhte Erzeugung von 150 % gegenüber dem Altzustand erzielt werden konnte.
Seitens der Fischereifachverwaltung wurde die besonders wertvolle Laichstrecke über die Jahre hinweg intensiv befischt und begutachtet, wobei im Ergebnis festgestellt wurde, dass die gesteckten Ziele vollumfänglich erreicht wurden.

Planungsgrundlage für weiteres Umbauprojekt
Aufgrund der guten Erfahrungen mit der dynamischen Stauzielregelung, die die zuvor definierten und modellierten Ziele der einerseits ökologischen Aufwertung und andererseits deutlich erhöhten Jahresenergieerzeugung nachweislich erreichte, wurde dieses Konzept weiterverfolgt.
Im Rahmen der Vorplanung eines Kraftwerkneubaus mit der Zusammenlegung zweier Standorte an der unteren Nahe, einem linksseitigen Zufluss in den Rhein in Rheinland-Pfalz, Deutschland, wurde neben der Planung einer Fischaufstiegs- sowie Fischschutz- und Fischabstiegsanlage auch die Durchführbarkeit einer dynamischen Stauzielregelung untersucht. Anhand einer hydrodynamisch-numerischen 2-D-Simulation wurden für das Plangebiet die Ausdehnung der gestauten Fließstrecke sowie die Wasserspiegellagen im Ist-Zustand ermittelt. Anhand dieser Erkenntnisse wurde die Steuerung des beweglichen Wehres im dynamischen Stau entworfen und über eine Planungsvariante nachgewiesen, dass sich an der Ausdehnung des Staus keine Änderungen ergeben. Die durch die Steuerung hervorgerufenen Höhendifferenzen in den Wasserspiegellagen sind in Abbildung 4 dargestellt.

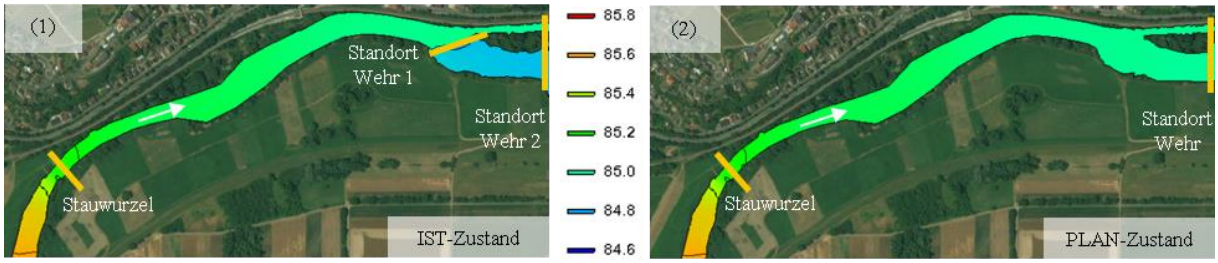


Abbildung 4: Wasserspiegellage bei Mittelwasser im Ist- (1) und Plan-Zustand (2) in [m ü. NN] [1]

Durch die Ertüchtigung des bestehenden festen Wehres am Standort 2 mit einer beweglichen Klappe als Regelorgan und der Einführung einer dynamischen Stauzielregelung kann bei Wegfall des bisherigen Wehres am Standort 1 bei dem genannten Vorhaben ein Teil der Fallhöhe für größere Durchflüsse erhöht und bei der Energieerzeugung genutzt werden, wodurch die Anlagenleistung steigt.

Weil diese jedoch seltener im Jahr auftreten, kann sich eine abflussbezogene punktuelle Steigerung der elektrischen Leistung von bis zu einem Viertel (je nach Abfluss) nicht vollständig in der Betrachtung der Jahresarbeit wiederfinden. Wie in Abbildung 5 dargestellt, steigt die Jahresarbeit entsprechend der zugrundeliegenden Abflussdauerlinie. An dieser Stelle werden die Dauerlinien mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten 95 %, 50 % und 5 % untersucht. Deutlich ist zu sehen, dass die Steigerung infolge der dynamischen Stauzielregelung bei den Abflussereignissen mit einer geringen Überschreitungswahrscheinlichkeit - und dementsprechend den höheren Abflüssen - mit zu erwartenden Werten umfangreicher ausfällt als bei Abflussereignissen mit einer höheren Überschreitungswahrscheinlichkeit.
In der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die zu erwartende Steigerung der Jahresarbeit mit bis zu 10 % für die Varianten höher ausfällt, welchen die weniger wahrscheinlichen Dauerlinien zugrunde legen. Für eine sehr wahrscheinliche, d. h. konservative Annahme der Dauerlinie liegt die Arbeitssteigerung bei ca. 7 %.

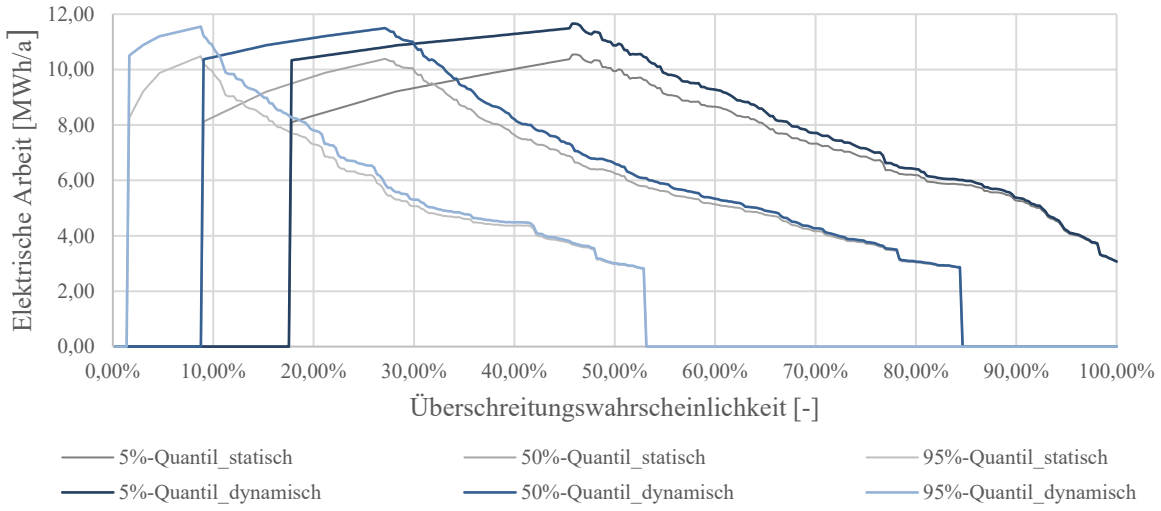


Abbildung 5: Vergleich der Jahresarbeit von einer statischen und einer dynamischen Steuerung mit Eintrittswahrscheinlichkeit [1]

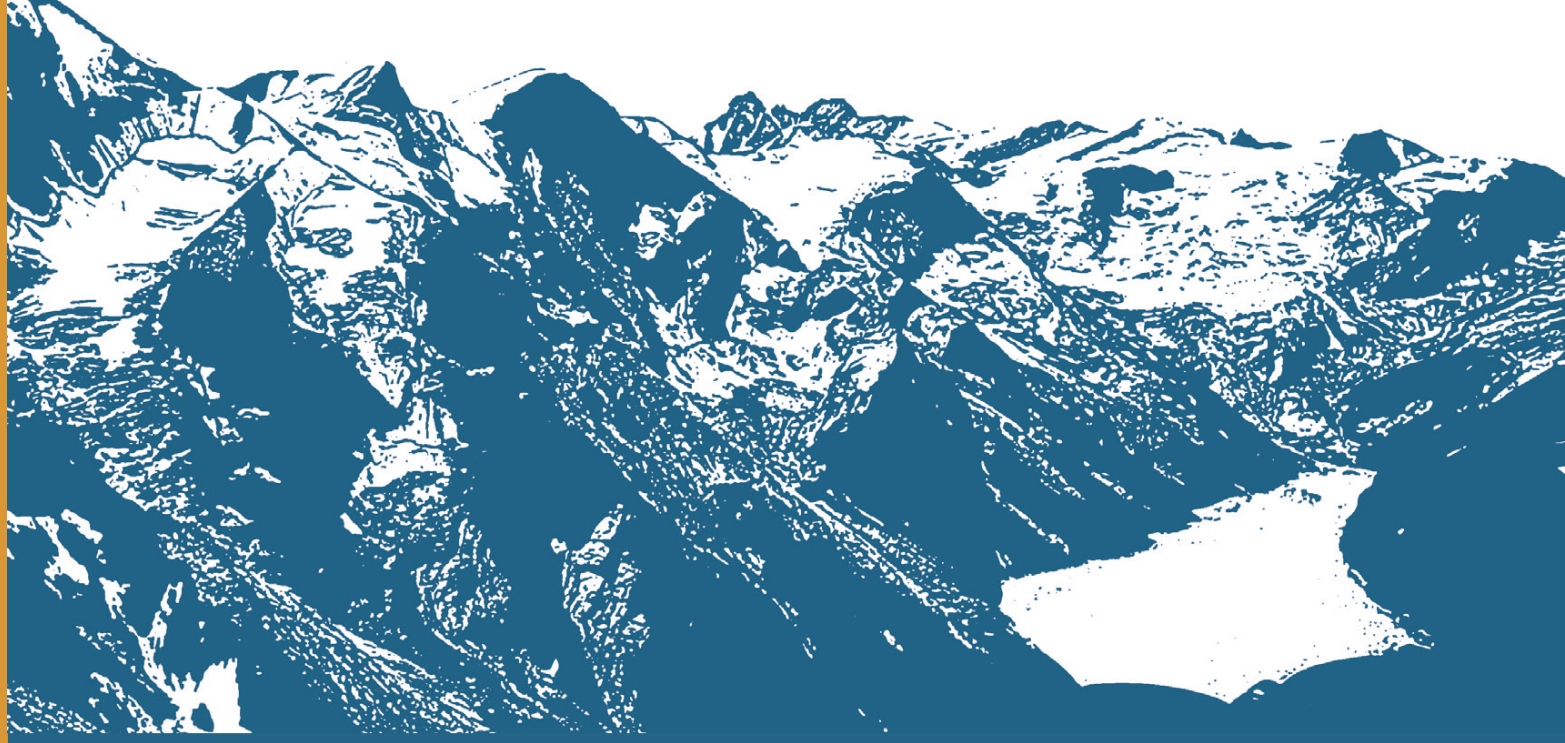
Fazit

Die dynamische Stauzielregelung ist eine effizienzsteigernde Anlagensteuerung sowohl bei Neuanlagen als auch bei Bestandsanlagen, welche keine direkte Mehrbelastung für die Umwelt bedeutet. Durch die oberwasserseitige Begrenzung des Staus an der Stelle, an welcher sich im Niedrigwasserfall die Stauwurzel befindet, werden keine zusätzlichen Gewässerabschnitte eingestaut. Einzig die Dauer und Häufigkeit eines bestimmten Stauziels wird nach energetischen Gesichtspunkten je nach Abfluss günstig verschoben.
Es bietet sich bei Bestandsanlagen an, eine dynamische Stauzielregelung in Kombination mit regulären Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen umzusetzen. Darüber hinaus ist die Realisierung einer derartigen Steuerung in Kombination mit ohnehin erforderlichen, ökologischen Aufwertungen der Anlagen, wie beispielsweise der Errichtung einer Fischaufstiegsanlage, denkbar und sinnvoll. Dabei sind Steigerungen der Jahresarbeit um 5-10 % und z. T. auch darüber durchaus möglich.

Quellenverzeichnis

[1] Drews, N.: Untersuchung von dynamischer Stauzielregelung hinsichtlich der Stauwurzelentwicklung. Diplomarbeit an der TU Dresden, 2017 (unveröffentlicht).

[2] Giesecke, J.; Heimerl, S.; Mosonyi, E. †: Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2014.
[3] Anderer, P.; Dumont, U.; Heimerl, S.; Ruprecht, A.; Wolf-Schumann, U.: Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland. In: WasserWirtschaft 100 (2010), Heft 9, S. 12-16.



Wasserbausymposium Graz 2018

Wasserwirtschaft - Innovation aus Tradition

18. - 20. September 2018, Graz, Österreich

Tagungsband

Herausgeber: Gerald Zenz

TU Graz
Technische Universität München
ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Arbeitsgemeinschaft Alpine Wasserkraft

© 2018
Verlag der Technischen Universität Graz
www.ub.tugraz.at/Verlag
ISBN 978-3-85125-638-3

Die Autoren sind für den Inhalt ihrer Beiträge verantwortlich. Die Texte der verschiedenen Beiträge des Bandes wurden unter der Aufsicht von jedem der betroffenen Autoren gesetzt.

Titelbilder Copyright bei
Graz Tourismus GmbH
und Technische Universität Graz
Layout und Design - Technische Universität Graz
Gedruckt von Medienfabrik Graz GmbH, Graz, Austria – www.mfg.at