

Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf die Passierbarkeit von Schlitzpässen

Philipp Werner und Nicole Saenger

Zusammenfassung

Der vom Menschen gemachte Klimawandel wirkt sich mehr denn je auf das Leben auf der Erde aus. Dies gilt sowohl für das Leben an Land als auch für das Leben im Meer und in den Flüssen. Obwohl wir die Veränderungen der Grundlagen, die sich auch auf ganze Ökosysteme auswirken, begreifen, kennen wir nicht alle Auswirkungen auf Wasserbauwerke. Aus diesem Grund wurden Experimente durchgeführt, die den Einfluss zunehmender und abnehmender Abflüsse auf Schlitzpässe zeigen. Der Versuch wird an einem 1:2 Modell in einem Gerinne der Wasserbauhalle an der Hochschule Darmstadt durchgeführt. Die Messdaten wurden mit den Bemessungsparametern der DWA-M 509 verglichen. Die wichtigsten Ergebnisse sind, dass zunehmende und abnehmende Abflüsse die Funktionsfähigkeit des vertikalen Schlitzpasses beeinflussen.

1 Einleitung

Der Wasserkreislauf wird sowohl durch klimatische als auch nichtklimatische Faktoren beeinflusst. Der Strahlungsantrieb durch Veränderungen der Treibhausgaskonzentrationen, der Aerosole und der Oberflächenalbedo führt zu Veränderungen der Verdunstung und des Niederschlags. Steigende CO₂-Konzentrationen beeinflussen den Wasserkreislauf durch pflanzenphysiologische Reaktionen, welche die Transpiration beeinflussen (Arias et al. 2021). Darüber hinaus wird die Widerstandsfähigkeit von Biotopen und Ökosystemen verringert. In Wechselwirkung mit dem Klimawandel stehen nicht-klimatische Gefahren wie Lebensraumverlust, Verlagerung von Lebensräumen, Fragmentierung, Übernutzung, Wasserentnahme, Nährstoffanreicherung und Verschmutzung ein große Rolle (Tanneberger et al. 2017; Ojanen und Minkkinen 2020; Page und Baird 2016).

Im Allgemeinen verringert eine steigende atmosphärische CO₂-Konzentration die Transpiration von Pflanzen, die sich auf die Bodenfeuchtigkeit, den Abfluss, die Rückführung von Feuchtigkeit in die Atmosphäre und die Oberflächentemperatur auswirkt (Skinner et al. 2017). Laut Lange et al. (2020) erhöht es außerdem die Temperaturen und verändert die Niederschlags- und Abflussmuster, erhöht die Variabilität von Temperatur, Abfluss und Wasserstand und erhöht die Häufigkeit von Extremereignissen. Diese Veränderungen haben Auswirkungen auf hydraulische Strukturen wie Dämme, Fischwege oder Wasserkraftwerke.

Eines der hydraulischen Bauwerke sind die vertikalen Schlitzpässe. Sie dienen dazu, Fischen und anderen Wasserlebewesen die Passage vom Unterwasser zum Oberwasser zu ermöglichen. Sie werden auf einen bestimmten Durchflussbereich ausgelegt, der an die vorherrschenden Fischarten angepasst ist. Gemäß der deutschen Richtlinie DWA-M 509 muss der vertikale Schlitzpass zusätzlich von Q_{30} bis Q_{330} eines Fließgewässers funktionieren. Die wichtigsten Parameter sind der Wasserstand in den Becken der Fischaufstiegsanlage, die maximale und minimale Fließgeschwindigkeit sowie die Energiedissipation in den Becken.

Um einen Überblick darüber zu erhalten, wie hoch der Einfluss des Klimawandels auf Schlitzpässe ist, wurden anhand von Fließgewässerdaten Versuche im Labor durchgeführt. Dabei wurde der Durchfluss durch die Fischaufstiegsanlage unter Berücksichtigung der Auswirkungen

des Klimawandels erhöht und verringert. Die Messwerte werden mit der Richtlinie (DWA M-509) verglichen.

Dieses Paper untersucht die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf die Bemessungsparameter von Schlitzpässen. Abschließend wird ein Überblick über die bei den Experimenten aufgenommenen Daten gegeben und die Belastbarkeit von vertikalen Schlitzpassagen beleuchtet.

2 Methode

2.1 Versuchsfeld

Das Gerinne mit dem Schlitzpass befindet sich in der Wasserbauhalle der Hochschule Darmstadt und ist in Anlage 4 dargestellt. Das Gerinne ist etwa $L_{ges} = 14,00$ m lang und $b_{ges} = 1,00$ m breit. Das Modell des Schlitzpasses im Verhältnis 1:2 wurde in die Rinne verbaut. Die Rinne selbst hat kein Gefälle. Die Sohle des Schlitzpasses ist jedoch mit einer Sohlneigung von $I_s = 5,40$ % in das Gerinne eingesetzt. Insgesamt überwindet der Schlitzpass einen Höhenunterschied von $h_{ges} = 0,38$ m. Die Sohle des Beckens besteht aus rundkörnigem Kies mit einer Korngröße von 16 – 32 mm. Die verbleibenden Fugen zwischen dem Glas und den Trennwänden wurden mit einer Dichtungsmasse abgedichtet. Insgesamt gibt es sechs Trennwände und somit fünf Becken mit den in Anlage 1 angegebenen Maßen. Der Abstand von der ersten bis zur letzten Trennwand beträgt $L_{Schlitzpass} = 6,87$ m. Einschließlich des Einlaufbereichs von $L_{Einlauf} = 3,00$ m hat das Modell eine Gesamtlänge von $L_{Modell} = 9,87$ m. Im Einlaufbereich des Gerinnes befinden sich mehrere Rohre mit einer Länge von $L_{Rohre} = 0,55$ m und einem Durchmesser DN70 zum Ausrichten der Strömung im Einlaufbereich der Rinne. Am unteren Ende befindet sich ein Wehr zur Regulierung des Unterwasserspiegels. Dieses wurde zu Beginn der Versuche auf einen Unterwasserstand von $h_{UW} = 0,378$ m eingestellt. Während der Messungen wurde das Wehr nicht verstellt, um die Strömungsverhältnisse im Schlitzpass nicht zu beeinflussen.

2.2 Messraster

Zunächst wurde ein Messraster erstellt. In der Nähe der Schlitze wurde ein feineres Raster gewählt. Insgesamt enthält das Messraster 161 Messpunkte. Das Messraster ist in Anlage 2 zu sehen. Die Hauptmesspunkte wurden mit Großbuchstaben benannt und haben einen Abstand in x-Richtung von etwa $\Delta x = 0,12$ m. Im Feinrasterbereich definieren Kleinbuchstaben das Raster und liegen zwischen den Hauptmesspunkten. In y-Richtung werden die Messpunkte mit einer Zahl benannt; sie haben einen Abstand von $\Delta y = 0,10$ m. Die Punktnummern bestehen also aus einem Buchstaben für die x-Richtung und einer Zahl für die y-Richtung. Im Bereich der Wände ist ein Sicherheitsabstand eingehalten, in dem keine Messungen vorgenommen werden, um die Sensoren des ADVs nicht zu beschädigen.

2.3 Messinstrumente

ADV-Vectrino

Das Vectrino (Firma Nortek) misst die Fließgeschwindigkeit von Wasser, indem sie ein physikalisches Prinzip namens Doppler-Effekt nutzen. Der Doppler-Effekt ist die Änderung der Frequenz einer Schallwelle, wenn sich eine Quelle in Bezug auf einen Beobachter bewegt. Die Schallimpulse die durch das Messgerät in die Wassersäule sendet, werden nicht vom Wasser selbst reflektiert, sondern von passiven Tracern, die im Wasser schweben. Diese Tracer sind in der

Regel Zooplankton oder Schwebstoffe, die sich mit der gleichen Durchschnittsfließgeschwindigkeit wie das Wasser bewegen, so dass die gemessenen Geschwindigkeiten der Wasserströmung entsprechen (Nortek 2022). Um sich auf die Qualität der Daten verlassen zu können und eine korrekte Berechnung der Fließgeschwindigkeiten zu ermöglichen, sind zwei Faktoren entscheidend. Die Signalstärke (Amplitude) als Parameter für das Ausmaß der akustischen Reflexion vom Wasser. Die Signalstärke ist als "Signal-to-Noise ratio", SNR (in dB), angegeben. Bei der Erfassung von Rohdaten (z. B. bei 25 Hz) wird empfohlen, ein SNR zu erreichen, der konstant über 15 dB liegt (Nortek 2022). Die Korrelation (COR) als Maß für die Ähnlichkeit der an den beiden Z-Sensoren gemessenen Impulsechos. Eine Korrelation von Null bedeutet, dass zwischen den beiden Echos keine Ähnlichkeit besteht, und eine Korrelation von 1 bedeutet, dass die beiden Echos identisch sind (Nortek 2022). Wenn die Korrelationen über ~70 % liegen, wird davon ausgegangen, dass das Gerät, Daten von guter Qualität erzeugt. Eine genaue Prüfung des Datensatzes ist jedoch der beste Weg, um einen Korrelationsschwellenwert für die Aussonderung schlechter Datenpunkte festzulegen (Nortek 2022). Der Unsicherheitsbereich des ADVs liegt bei $\pm 0.50\%$ und ist abhängig von der gemessenen Fließgeschwindigkeit und hat ± 1 mm/s als Standardabweichung (Nortek 2022).

Stechpegel

Zur Messung der Sohle und des Wasserstandes wurde ein mobiler Stechpegel eingesetzt. (Morgenschweis 2018). Der Stechpegel ist auf einem beweglichen Schlitten montiert und kann in x-, y- und z-Richtung verfahren werden. Mit Hilfe einer Ableseskala mit Nonius kann eine manuelle Genauigkeit von 0,1 mm erreicht werden (Morgenschweis 2018). Bedingt durch die Messanordnung treten Exzentrizitäten des Messpunktes auf, die bei der Messung berücksichtigt werden müssen. Die Exzentrizität in y- Richtung beträgt bei der Einstechlatte aufgrund des Versatzes auf dem Schlitten 2,5 cm. Der Punkt für die Ablesung des x-Wertes befindet sich links vom Messschlitten, was zu einer Exzentrizität von 20,5 cm führt.

2.4 Datenbearbeitung

Maßstabsfaktoren

Das Modell des Schlitzpasses ist in einem Maßstab von 1:2 erstellt. Dies muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Modelle werden unter der Annahme aufgebaut, dass zwischen der Natur und dem Modell physikalisch ähnliche Prozesse ablaufen. Die maßstabsbedingten Veränderungen dieser Prozesse müssen berücksichtigt werden. Ein Ansatz ist die Umrechnung des Modellmaßstabs in die verschiedenen Parameter, wie Geometrie, Fließgeschwindigkeiten und Abflüsse, die das Froude-Modell liefert. Dies kann angewandt werden, wenn Trägheits- und Schwerkrafteinflüsse vorherrschend sind. Hierfür gibt es unterschiedliche Faktoren für die verschiedenen Parameter, die vom Maßstab abhängen. M_L ist die Modellskalierung und der Kehrwert der Skala. M_L wird als Faktor für alle geometrischen Werte sowie für die Wassertiefen verwendet. M_u ist der Faktor für die Fließgeschwindigkeiten und M_Q für die Abflüsse. Alle gemessenen und berechneten Werte müssen mit den angegebenen Faktoren multipliziert werden (Kim et al. 2016).

$$M_L = 2 \text{ (Skalierung von 1:2)} \quad [1]$$

$$M_u = M_L^{\frac{1}{2}} = 1,414 \quad [2]$$

$$M_Q = M_L^{\frac{5}{2}} = 5,657$$

[3]

WinADV

Die Filterung der Daten ist ein wichtiger Aspekt bei der Analyse der ADV-Daten. SNR und COR sind gute Indikatoren für einige der möglichen Probleme, die bei der Verwendung eines ADV auftreten können, und WinADV bietet Filter, die auf diesen Werten basieren (Wahl 2000). WinADV bietet einen Filter, der auf dem SNR- und dem COR-Wert basiert, mit einem vom Benutzer gewählten Grenzwert (Wahl 2000). Der Fließgeschwindigkeitsabscheidefilter von WinADV kann bei Datendateien, die Fließgeschwindigkeitsmehrdeutigkeiten enthalten, hilfreich sein. Der Benutzer kann einen Grenzwert für eine der drei Fließgeschwindigkeitskomponenten festlegen und bestimmen, ob die Daten oberhalb oder unterhalb des Grenzwerts bleiben sollen (Wahl 2000).

Treten Spitzen in den Daten auf, überschreitet die Fließgeschwindigkeit den voreingestellten Fließgeschwindigkeitsbereich oder es liegt eine Kontamination durch frühere Impulse vor, die von den Grenzen komplexer Geometrien reflektiert werden (z. B. Kieselsteine im Bachbett). Leider sehen einige dieser Spitzen den natürlichen Schwankungen der Fließgeschwindigkeit sehr ähnlich (Goring und Nikora 2002). WinADV verwendet den Phasenraum-Schwellenwert, von Goring und Nikora (2002). Bei der Phasenraum-Schwellenwertmethode verwendet das Programm das Konzept einer Phasenraumdarstellung, in der die Variable und ihre Ableitungen gegeneinander aufgetragen werden. Die Punkte werden von einem Ellipsoid umschlossen, das durch das Universalkriterium definiert ist, und die Punkte außerhalb des Ellipsoids werden als Spikes bezeichnet. Die Methode wird so lange wiederholt, bis die Anzahl der guten Daten konstant ist (bzw. die Anzahl der neuen Punkte, die als Spikes identifiziert werden, auf null fällt) (Goring und Nikora 2002).

2.5 Messfehler

Bei Messungen treten Fehler auf. Das Ziel ist es, alle Messfehler zu beseitigen. Messfehler können in systematische Fehler, objektive Fehler, zufällige oder stochastische Fehler und subjektive Fehler unterteilt werden. Systematische Fehler werden durch Fehler der Messgeräte, der Messverfahren und des Messobjekts sowie durch messbare Umwelteinflüsse und persönliche Einflüsse der Beobachter verursacht. Bei objektiven Fehlern handelt es sich um Fehler des Messverfahrens oder des Messgeräts. Zufällige oder stochastische Fehler werden durch nicht messbare Veränderungen der Messkörper, der Messgeräte, des Messobjekts, der Umgebung und der Beobachter verursacht. Auch numerische Berechnungen, sind nicht beliebig genau, sondern fehlerbehaftet. Die zufälligen Fehler lassen sich in einer einzigen Messung weder nach Größe noch nach Vorzeichen bestimmen; sie können daher nicht korrigiert werden und machen das Ergebnis unsicher. Subjektive Fehler sind die vom Menschen verursachten Fehler während des Prozesses (Gräber 2016).

2.6 Untersuchte Durchflüsse

Für die untersuchten Durchflüsse wurde die Studie von Brahmer und Wrede (2014) verwendet. In dieser Studie analysierten sie den Einfluss des anthropogenen Klimawandels auf das Abflussverhalten in hessischen Flüssen. Zunächst verwendeten sie ein Modell. Ausgangspunkt eines

solchen Modells sind Emissionsszenarien, die eine mögliche Entwicklung der zukünftigen Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre in Abhängigkeit von einer angenommenen wirtschaftlichen, sozialen, politischen und technischen Entwicklung beschreiben (Brahmer und Wrede 2014). Dieses Modell wird für numerische Modelle (General Circulation Models oder GCMs) verwendet, welche die physikalischen Prozesse in der Atmosphäre, dem Ozean, der Kryosphäre und der Landoberfläche darstellen. GCMs sind die fortschrittlichsten Instrumente, die derzeit für die Simulation der Reaktion des globalen Klimasystems bei aufsteigenden Treibhausgaskonzentrationen zur Verfügung stehen. Mit dem GCM in Kombination mit dem Modell werden Läufe (runs) mit verschiedenen Initialisierungsbedingungen gestartet. Um Daten über regionale Klimaänderungen zu erhalten, werden zusätzlich regionale Klimamodelle (RCM) simuliert. Diese bilden nur einen räumlichen Ausschnitt des Klimasystems ab, allerdings mit einer höheren räumlichen Auflösung (Gittergrößen von etwa 1 - 50 km).

Regional gesehen treten die größten Abflusserhöhungen im hessischen Teil des Mains (Einzugsgebiete von Nidda, Kinzig und Odenwald) mit durchschnittlich 21 % auf, wobei die größten Zunahmen im Einzugsgebiet der Nidda zu verzeichnen sind. Im Einzugsgebiet der Lahn kommt es zu sehr gleichmäßigen Veränderungen mit Zunahmen zwischen 9 und 15 % des jährlichen Abflusses. Ähnliche Abflusserhöhungen sind in den Einzugsgebieten der Fulda und der Diemel zu verzeichnen, mit Erhöhungen zwischen 8 und 13 %. Die geringsten Abflussteigerungen sind im Ulsterbecken zu verzeichnen, wo die Steigerungen nur 3 – 5 % betragen (Brahmer und Wrede 2014). Der mittlere jährliche Abfluss (*MQ*) nimmt in der Zukunft für alle Einzugsgebiete zu, der Mittelwert über alle Einzugsgebiete beträgt 14 % mit einer Spanne von 9 – 30 %. Hier spiegelt sich vor allem die Zunahme des Niederschlags wider (Brahmer und Wrede 2014). Die mittleren monatlichen Durchflüsse nehmen im Vergleich zum Referenzzeitraum um 20 – 50 % zu, insbesondere in der Zeit von November bis April (hydrologischer Winter). In den Sommermonaten kommt es zu leichten Abnahmen des Abflusses in der Größenordnung von 5 %. Das Abflussregime mit höherem Abfluss im hydrologischen Winter und abnehmendem Abfluss im hydrologischen Sommer wird also in Zukunft zunehmen, wobei die Veränderungen im hydrologischen Sommer eher gering sein werden (Brahmer und Wrede 2014). Brahmer et al. (2012) untersuchten Durchflüsse getrennt für die beiden hydrologischen Jahreszeiten, Sommer und Winter. Sie analysierten einen Trend über den gesamten Simulationszeitraum, mit steigenden Winterabflüssen (5 – 10 % in der ersten Hälfte des Jahrhunderts und etwa 20 % danach) und sinkenden Sommerabflüssen (-10 % in der ersten Hälfte des Jahrhunderts und -15 bis -20 % danach). Darüber hinaus wurde an der Lahn die jahreszeitliche Veränderung bis 2100 mit einer Zunahme von bis zu 30 % des *MQ* im hydrologischen Winter und einer Abnahme von bis zu 21 % im hydrologischen Sommer untersucht (Brahmer et al. 2012).

Für die Fischaufstiegsanlage wurde ein *MQ* von 64,0 l/s nach den Vorgaben der DWA-M 509 berechnet. Die Fischregion wurde als Äschenregion definiert. Dieser Durchfluss diente als Ausgangsbasis für die Untersuchung von Veränderungen der Fließgeschwindigkeiten und Strömungsmuster. Aufgrund der Studien von Brahmer und Wrede (2014) und Brahmer et al. (2012) wurde der Bemessungsdurchfluss um 10 % und 20 % erhöht, um die Veränderungen des hydrologischen Winters nachzuahmen bzw. um 10 % und 20 % verringert, um die Veränderungen des hydrologischen Sommers nachzuahmen.

Tab. 1 Untersuchte Durchflüsse

Abflussmodell	Durchfluss
MQ _{Bemessung}	64 l/s
MQ _{Winter,10}	70,4 l/s
MQ _{Winter,20}	76,8 l/s
MQ _{Sommer,10}	57,6 l/s
MQ _{Sommer,20}	51,2 l/s

3 Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt konnten alle benötigten Daten während der Experimente gemessen werden. Einige mussten aufgrund der Qualität der SNR-Werte durch eine zweite Messung verifiziert werden. Um festzustellen, welche Daten verifiziert werden müssen, müssen Grenzen für das SNR und die COR gesetzt werden. Hier werden die Grenzen für SNR auf unter 10 dB als schlechte Daten, 10 dB – 20 dB als gute Daten und über 20 dB als sehr gute Daten festgelegt. Für die COR gelten alle Daten unter 40 % als schlechte Daten, 40 % - 60 % als gute Daten und über 60 % als sehr gute Daten. Bei allen analysierten Durchflüssen liegt der Mittelwert des SNR und der Korrelation über 20 dB für den SNR und über 60 % für die COR, was sehr gute Daten entspricht. Dies konnte so festgelegt werden, da die Fließgeschwindigkeiten in einem logischen Bereich liegen. Es wurden keine Extremwerte im Datensatz festgestellt.

Um zu überprüfen, ob die hydrologischen Winter- und Sommermodelle mit den Bemessungswerten übereinstimmen, müssen zunächst die Daten analysiert werden. Hier werden die Fließgeschwindigkeiten und der Wasserstand gemessen und die Energiedissipation berechnet. In Tabelle 2 sind alle wichtigen Parameter des vertikalen Schlitzpasses bei allen Strömungsvarianten dargestellt. Um die Daten für die maximalen Fließgeschwindigkeit zu erhalten, müssen die Daten der X-, Y- und Z-Sensoren, die die Fließgeschwindigkeit in diesen Richtungen messen, berechnet werden. Hier wird Formel [4] verwendet.

$$v = \sqrt{v_x^2 * v_y^2 * v_z^2} \quad [4]$$

Der Wasserstand wird mit dem Stechpegel gemessen. Die Differenz zwischen Oberwasser und Unterwasser ist die Differenz zwischen den Punkten A55 und C55. Die Energiedissipation kann mit der Formel [5] berechnet werden.

$$p_D = \rho_w * g * Q * \frac{\Delta h}{v} \quad [5]$$

Tab. 2 Bemessungsparameter des Schlitzpasses für alle Abflussmodell

Modell										
Abflüsse [l/s]	51,2		57,6		64		70,4		76,8	
Messpunkt	15%	40%	15%	40%	15%	40%	15%	40%	15%	40%
min. Wasserstand [cm]	28,95		31,97		35,59		37,21		39,50	
mittl. Wasserstand [cm]	33,86		37,29		39,98		42,83		45,56	
max. Wasserstand [cm]	39,94		44,01		46,48		49,80		51,99	
Differenz OW zu UW [m]	0,06		0,07		0,10		0,11		0,11	
min. Fließgeschwindigkeit [m/s]	0,03	0,02	0,02	0,03	0,06	0,04	0,02	0,03	0,02	0,05
mittl. Fließgeschwindigkeit [m/s]	0,54	0,52	0,56	0,52	0,57	0,53	0,58	0,54	0,60	0,57
max. Fließgeschwindigkeit [m/s]	1,21	1,21	1,25	1,20	1,24	1,23	1,27	1,25	1,29	1,31
Energiedissipation [W/m ³]	71,24		85,44		123,23		130,19		141,44	

Zur Analyse müssen die Daten mit den Modellkorrekturen des Froude-Modells (Kapitel 2.2.) skaliert werden. Die Energiedissipation wird nicht skaliert, sondern mit den skalierten Daten berechnet.

Tab. 3 Skalierte Bemessungsparameter des Schlitzpasses für alle Abflussmodell mit dem Froude – Modell

Maßstabsgetreu										
Abflüsse [l/s]	289,6		325,8		362,0		398,2		434,4	
Messpunkt	15%	40%	15%	40%	15%	40%	15%	40%	15%	40%
min. Wasserstand [cm]	57,90		63,94		71,18		74,42		79,00	
mittl. Wasserstand [cm]	67,72		74,59		79,95		85,67		91,13	
max. Wasserstand [cm]	79,88		88,02		92,96		99,60		103,98	
Differenz OW zu UW [m]	0,13		0,15		0,21		0,21		0,22	
min. Fließgeschwindigkeit [m/s]	0,04	0,03	0,03	0,05	0,08	0,05	0,02	0,05	0,03	0,07
mittl. Fließgeschwindigkeit [m/s]	0,76	0,73	0,80	0,74	0,80	0,75	0,82	0,77	0,85	0,80
max. Fließgeschwindigkeit [m/s]	1,71	1,70	1,77	1,70	1,76	1,74	1,79	1,77	1,82	1,86
Energiedissipation [W/m ³]	100,75		120,84		174,28		184,11		200,03	

Wasserstand

Der Wasserstand wird mit einem Stechpegel gemessen und ist insbesondere in turbulenten Bereichen schwerer einzustellen. Der Bemessungswert des Wasserstandes in FAA von Äschenregionen liegt bei $h_W = 0,53$ m. Der gemessene Mindestwasserstand des Schlitzpasses liegt bei einem Durchfluss von $Q = 0,29$ m³/s bei $h_W = 0,58$ m. Trotz des schwer einstellbaren Stechpegels ist die Differenz $\Delta h = 0,05$ m und somit außerhalb der Unsicherheit. Der gemessene Wasserstand ist größer als der Bemessungswert und alle Fische der Äschenregion können den Schlitzpass passieren.

Fließgeschwindigkeit

Die mit dem ADV gemessenen Fließgeschwindigkeiten werden zuerst mit der Formel [4] berechnet und dann über eine Maximalwertsuche ausgewertet. Die maximale Fließgeschwindigkeit ist für die Äschenregion mit $v_{max} = 2,00$ m/s festgelegt, wenn die Höhendifferenz (OW zu UW) unter $\Delta h = 3$ m liegt (DWA-M 509 2014). Die maximale gemessene Fließgeschwindigkeit im Schlitzpass beträgt $v_{max} = 1,86$ m/s. Somit ist der Schlitzpass für die Fische passierbar. Wenn man den Sicherheitskoeffizienten mit der Fließgeschwindigkeit verrechnet, verringert sich der Parameter. In Tabelle 4 ist die angepasste Fließgeschwindigkeit für die Fälle $S_b = 1,00$, $0,95$ und $0,90$ und $S_v = 0,95$ angegeben. Hieraus ergibt sich eine Verringerung des Bemessungswertes, was dazu führt, dass die gemessene maximale Fließgeschwindigkeit größer als der Bemessungswert ist. Dies ist bei allen Durchflussmodellen der Fall (je nach Sicherheitsbeiwert). Aus diesem Grund ist je nach Sicherheitsbeiwert der Schlitzpass nicht mehr passierbar.

Tab. 4 Angepasste maximale Fließgeschwindigkeit je nach Sicherheitskoeffizient

$V_{\text{Grenzwert,max}}$ [m/s]	S_b	S_v	$V_{\text{Bemessung,max}}$ [m/s]
2,00	1,00	0,95	1,90
2,00	0,95	0,95	1,81
2,00	0,90	0,95	1,71

Energiedissipation

Die maximale Energiedissipation ist mit $pd = 200,03 \text{ W/m}^3$ bei einem Durchfluss von $MQ_{\text{Winter},20} = 0,43 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnet. Die vom Regelwerk vorgegebene maximale Energiedissipation beträgt $pd = 200 \text{ W/m}^3$ für die Äschenregion. Damit ist der Schlitzpass nicht passierbar. Wird zusätzlich der Sicherheitskoeffizient von $S_P = 0,9$ verrechnet, ergibt sich ein Maximum von $pd = 180,00 \text{ W/m}^3$. Hier ist die Energiedissipation im Modell hydrologischer Winter +10 % ($MQ_{\text{Winter},10} = 0,40 \text{ m}^3/\text{s}$) mit $pd = 184,11 \text{ W/m}^3$ und +20 % ($MQ_{\text{Winter},20} = 0,43 \text{ m}^3/\text{s}$) mit $pd = 200,03 \text{ W/m}^3$ höher als die vorgegebene maximale Energiedissipation, so dass der Schlitzpass nicht passierbar ist.

4 Fazit

Die Experimente wurden wie geplant durchgeführt und die Messungen funktionierten mit einigen Anpassungen wie erwartet. Alle COR- und SNR-Werte liegen über der unteren Grenze von unter 10 dB für SNR und über 40 % für die COR, was alle Messungen als zuverlässig einordnet. Die Messungen bei 15 % des Wasserstandes waren im Durchschnitt von geringerer Qualität. Dies könnte auf die grobe Sohle zurückzuführen sein. Wenn die Messungen nicht gut genug gewesen wären, hätten die Messpunkte höher angesetzt werden müssen (20% des Wasserspiegels). In Anbetracht der Tatsache, dass alle Messungen gut waren, musste dies nicht angewendet werden.

Der Schlitzpass ist den Daten zufolge anfällig für den anthropogenen Klimawandel. Dies gilt insbesondere für die Energiedissipation. Hier wird der Bemessungswert von $p_d = 200,00 \text{ W/m}^3$ im hydrologischen Wintermodell +20 % ($MQ_{\text{Winter},20} = 0,43 \text{ m}^3/\text{s}$) überschritten. Wird ebenfalls der Sicherheitskoeffizient verrechnet, wird der Bemessungswert von $p_d = 180,00 \text{ W/m}^3$ durch das hydrologische Wintermodell +10 % ($MQ_{\text{Winter},10} = 0,40 \text{ m}^3/\text{s}$) überschritten. Der maximale Bemessungswert für die Fließgeschwindigkeit liegt bei $v_{\text{max}} = 2,00 \text{ m/s}$ und wird bei keinem Durchfluss überschritten. Werden die Sicherheitskoeffizienten verrechnet, wird die maximale Fließgeschwindigkeit von $v_{\text{max}} = 1,90 - 1,71 \text{ m/s}$ (je nach Sicherheitskoeffizient) von allen Durchflüssen überschritten. Der Wasserstand liegt über dem vorgegebenen Wert, so dass er für alle Fische passierbar ist.

Es lässt sich schlussfolgern, dass vor allem die Veränderungen im Winterhalbjahr (+20 % und +10 %) die Passierbarkeit des Schlitzpasses beeinflussen, und zwar durch die maximale Fließgeschwindigkeit und die Energiedissipation. Der Bemessungsgrenzwert für den Wasserstand, der vor allem bei den Sommerszenarien (-10 % und -20 %) eine Rolle spielen, wurden eingehalten. Somit lässt sich schlussfolgern, dass Schlitzpässe in Zukunft auf größere Abflussverhältnisse angepasst werden müssen. Eine Reduzierung der maximalen Fließgeschwindigkeit sowie die Reduzierung der Energiedissipation im Becken sind die maßgebenden Aufgaben. Wie der Schlitzpass an eine größere Strömung und höhere Fließgeschwindigkeit angepasst werden kann, wird zukünftig analysiert

5 Literaturverzeichnis

- Arias, P. A.; N. Bellouin; E. Coppola; R.G. Jones; G. Krinner; J. Marotzke et al. (2021): Technical Summary.
- Brahmer, Gerhard; Richter, K.-G.; Iber, Christian (2012): Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserscheitelabflüsse und Abflussverhalten im Lahnggebiet und im hessischen Maingebiet.
- Brahmer, Gerhard; Wrede, Sebastian (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse an hessischen Flüssen auf Basis hochaufgelöster Klima- und Wasserhaushaltsmodelle.
- Goring, Derek G.; Nikora, Vladimir I. (2002): Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. In: *J. Hydraul. Eng.* 128 (1), S. 117–126. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(117).
- Gräber, Peter-Wolfgang (2016): Automatisierungstechnik in der Wasserwirtschaft. Messfehler.
- Kim, Jung Hwan; Kwon, Soon Ho; Yoon, Kwang Seok; Du Lee, Han; Chung, Gunhui (2016): Hydraulic Experiment for Friction Loss Coefficient in Non-circular Pipe. In: *Procedia Engineering* 154, S. 773–778. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.582.
- Lange, Stefan; Volkholz, Jan; Geiger, Tobias; Zhao, Fang; Vega, Iliusi; Veldkamp, Ted et al. (2020): Projecting Exposure to Extreme Climate Impact Events Across Six Event Categories and Three Spatial Scales. In: *Earth's Future* 8 (12). DOI: 10.1029/2020EF001616.
- Morgenschweis, Gerd (2018): Hydrometrie. Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.
- Nortek (2022): The Comprehensive Manual for Velocimeters.
- Ojanen, Paavo; Minkkinen, Kari (2020): Rewetting Offers Rapid Climate Benefits for Tropical and Agricultural Peatlands But Not for Forestry-Drained Peatlands. In: *Global Biogeochem. Cycles* 34 (7). DOI: 10.1029/2019GB006503.
- Page, S. E.; Baird, A. J. (2016): Peatlands and Global Change: Response and Resilience. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 41 (1), S. 35–57. DOI: 10.1146/annurev-environ-110615-085520.
- Skinner, Christopher B.; Poulsen, Christopher J.; Chadwick, Robin; Diffenbaugh, Noah S.; Fiorella, Richard P. (2017): The Role of Plant CO₂ Physiological Forcing in Shaping Future Daily-Scale Precipitation. In: *J. Climate* 30 (7), S. 2319–2340. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0603.1.
- Tanneberger, F.; Tegetmeyer, C.; Busse, S.; Barthelmes, A.; Shumka, S.; Moles Mariné, A. et al. (2017): The peatland map of Europe. In: *Mires and Peat* 19, Artikel 22, S. 1–17.
- Wahl, Tony L. (2000): Analyzing ADV Data Using WinADV. In: Rollin H. Hotchkiss und Michael Glade (Hg.): Building Partnerships. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000. Minneapolis, Minnesota, United States, July 30-August 2, 2000. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, S. 1–10.

Anschrift der Verfasser

M. Eng. Philipp Werner

Prof. Dr.-Ing. Nicole Saenger

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen, Hochschule Darmstadt

Schöfferstraße 3, 64295 Darmstadt

philipp.werner@h-da.de