

Entwicklung von Betriebsvorgaben zur Reduzierung des Geschiebeeintrags in den Kraftwerkseinlauf des Eisenbahnerwehrs in einem physikalischen Modellversuch

Richard Huber und Jonas Pfeiffer

Zusammenfassung

Am Eisenbahnerwehr am Lech in Augsburg wird seit etwa 15 Jahren eine Wasserkraftanlage betrieben, die als Buchtenkraftwerk am rechten Ufer angeordnet ist. Zur Vermeidung von Geschiebeeintrag in das Kraftwerk wurde vor dem Einlauf eine Kiesfalle angeordnet, die beim Erreichen eines bestimmten Verlandungsniveaus hydraulisch freigespült werden soll.

Die Funktionalität des Spülkonzepts in der Praxis war gegeben, allerdings kam es in den letzten Jahren nach Aussage des Betreibers an der rechten Lechseite unmittelbar oberhalb des Eisenbahnerwehrs immer wieder zu starken Geschiebeablagerungen und deshalb zu sehr großem Geschiebeeintrag in die Kiesfalle. Mit hydraulischen Spülungen allein war eine vollständige Entleerung der Kiesfalle dann oft nicht mehr möglich und es war daher eine mechanische Unterstützung durch Baggerungen erforderlich.

In einem physikalischen Modellversuch (Vollmodell nach Froude, Maßstab 1:20) mit beweglicher Sohle und Anlaufstrecke sollten zur Verbesserung der Situation Vorgaben zur modifizierten Steuerung der verschiedenen Verschlusselemente der Anlage entwickelt werden und ggf. flussbauliche Maßnahmen im Stauraum untersucht werden.

Die Steuerung der Anlage im IST-Zustand ist u.a. gekennzeichnet durch eine Teilöffnung der Kiesschleuse ab einem Lechabfluss von $165 \text{ m}^3/\text{s}$. Diese Teilöffnung führt zu einer starken Querströmung in Richtung Kiesfalle und bei bestimmten Abflüssen zu starkem Geschiebeeintrag in die Kiesfalle. Durch den Verzicht auf diese Teilöffnung kann die Situation ohne weitere erforderliche Baumaßnahmen bei kleinen und mittleren Hochwasserereignissen deutlich verbessert werden

In weiteren Versuchen soll noch untersucht werden, ob durch zusätzliche flussbauliche Maßnahmen die Situation auch für große Hochwasserereignisse verbessert werden kann.

1 Ausgangssituation

Am Eisenbahnerwehr am Lech in Augsburg (Fkm 45,5) wird seit etwa 15 Jahren eine Wasserkraftanlage betrieben. Die Anlage besteht orographisch von links nach rechts aus (siehe Abb. 1):

- einem zweifeldrigen Schlauchwehr mit einer Gesamtbreite von ca. 96,5 m (Oberkante des gestellten Schlauchs 476,83 m+NN, Oberkante des festen Wehrs mit gelegtem Schlauch 476,48 m+NN),
- einer Fischaufstiegsanlage mit einer Breite von 4,00 m,
- einer Kiesschleuse mit einer Breite von 9,00 m und einer Sohlhöhe von 472,00 m+NN, ausgestattet mit einem Schütz (Höhe 3,63 m) mit Aufsatzklappe (Oberkante 477,10 m+NN),

- dem als Buchtenkraftwerk ausgebildeten Kraftwerk mit fünf Einlaufschützen (lichte Breite jeweils 4,95 m, Sohlhöhen 474,00 m+NN) und zwei vertikalen Kaplan turbinen mit einem gesamten Ausbauabfluss von $Q_A = 56 \text{ m}^3/\text{s}$.

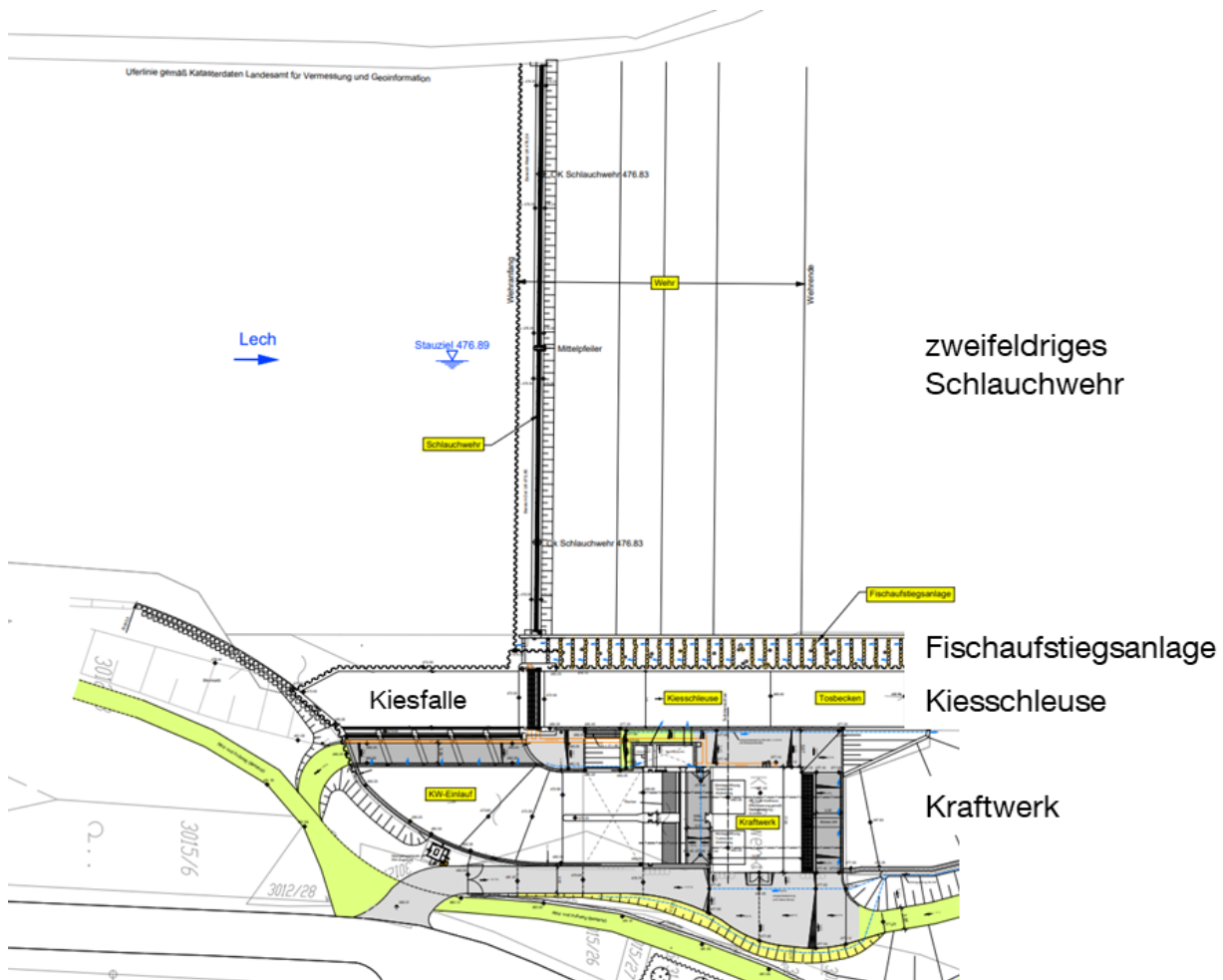


Abb. 1 Lageplan der Wehranlage, Fließrichtung von links nach rechts

Zur Vermeidung des Geschiebeeintrags in den Zulauf des Kraftwerks ist vor den fünf Einlaufschützen eine Kiesfalle angeordnet, die beim Erreichen eines bestimmten Verlandungsniveaus hydraulisch freigespült werden soll. Dazu werden bei einem geeigneten Abfluss die Kraftwerkseinläufe geschlossen, das Schlauchwehr gelegt und das Schütz der Kiesschleuse vollständig gehoben. Dadurch wird der Wasserstand im Oberwasser deutlich abgesenkt, im Zulauf zur Kiesfalle tritt schießender Abfluss und in der Kiesfalle ein Wechselsprung auf. Dieser mobilisiert das darin abgelagerte Geschiebe und transportiert es durch die Kiesschleuse ins Unterwasser. Neben der Kraftwerksanströmung wurden Kiesfalle und -schleuse in den Jahren 2004/2005 in einem physikalischen Modellversuch an der Versuchsanstalt Oberrach optimiert (Strobl et al., 2005).

Die Funktionalität des Spülkonzepts in der Praxis war gegeben, allerdings kam es in den letzten Jahren nach Aussage des Betreibers an der rechten Lechseite unmittelbar oberhalb des Eisenbahnerwehrs immer wieder zu starken Geschiebeablagerungen und deshalb zu sehr großem Geschiebeeintrag in die Kiesfalle. Mit hydraulischen Spülungen allein war eine vollständige Entleerung der Kiesfalle dann oft nicht mehr möglich und es war daher eine mechanische Unterstützung durch Baggerungen erforderlich.

2 Untersuchungsziele

In einem physikalischen Modellversuch mit beweglicher Sohle sollten

1. **Vorgaben zur Anlagensteuerung** (Schlauchwehr, Kiesschleuse und Kraftwerkseinlauf) entwickelt werden, die den Geschiebeeintrag in die Kiesfalle und den Kraftwerkseinlaufbereich minimieren, sowie
2. **ggf. flussbauliche Maßnahmen im Oberwasser** des Eisenbahnerwehrs untersucht werden, die die Geschiebeablagerungen auf die linke Lechseite verlagern, den Geschiebetransport über das Schlauchwehr verbessern und damit den Geschiebeeintrag in die Kiesfalle reduzieren. Falls sich solche Maßnahmen generell als geeignet erweisen, sollten anschließend die Anzahl, Position, Länge, Höhe und Ausrichtung im Grundriss optimiert werden.

3 Modell

Die darzustellenden Strömungssituationen sind von Trägheitskräften und der Schwerkraft dominiert. Deshalb war das Modell nach dem Modellgesetz von Froude zu betreiben. Der geometrische Modellmaßstab betrug (wie bereits im Modellversuch von 2004/2005) 1:20.

Um die Strömungsverhältnisse und das Geschiebetransportverhalten im Oberwasser des Eisenbahnerwehrs korrekt abzubilden, war ein Vollmodell über die ganze Flussbreite mit einer ausreichend langen Oberwasserstrecke (ca. 400 m) notwendig (siehe Abb. 2).

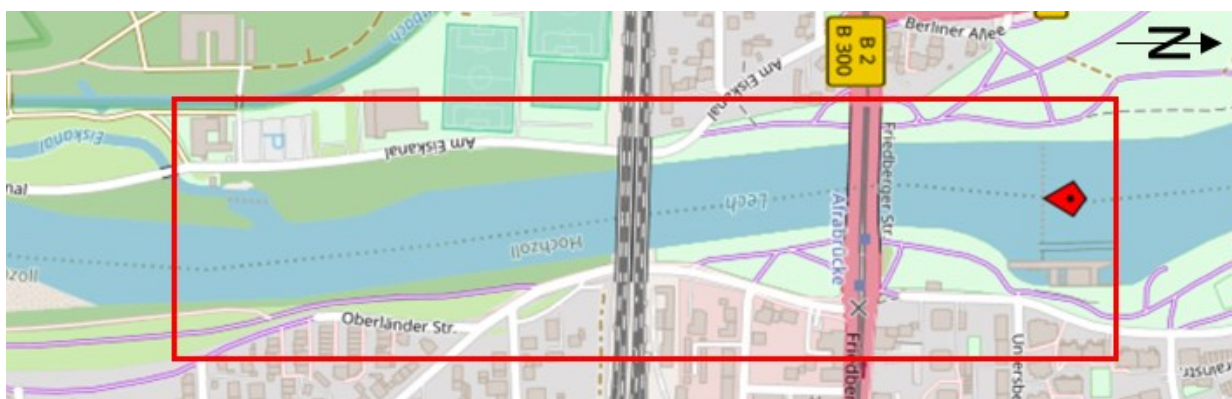


Abb. 2 Modellumgriff, Basis: Eisenbahnerwehr, Augsburg (Open Street Maps, 2023) veröffentlicht unter Open Database License ODbL

Die Wehr- und Kraftwerksbauwerke stellen das unterstromige Ende des Modells dar (siehe Abb. 3 links).

Die gesamte Oberwasserstrecke wurde mit beweglicher Sohle und festen Ufern ausgeführt (siehe Abb. 3 rechts). Die Modellierung basiert auf einer repräsentativen Sohle (Unterwasser-Laserscanning im 0,5 m Raster am 29.07.2013). Das im Lech vorhandene Geschiebe wurde maßstäblich durch Modellsand der Korngröße 0/3 mm mit einem mittleren Korndurchmesser von 1,2 mm modelliert. Eine idealisierte Anlaufstrecke mit beweglicher Sohle im oberstromigen Teil des Modells ermöglichte einen Geschiebeeintrag mit gesättigter Transportkapazität in die eigentliche Versuchsstrecke bis zum Kraftwerkseinlauf und Wehrbauwerk.

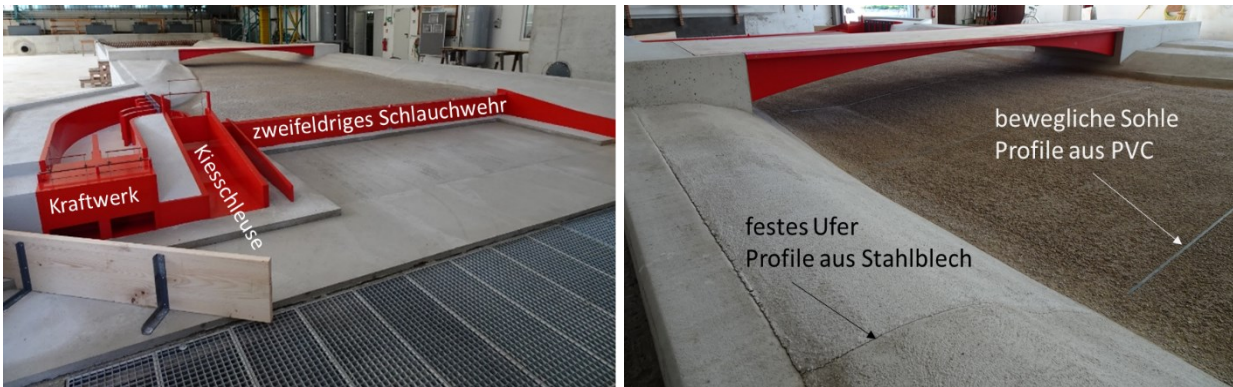


Abb. 3 links: Modellierung der Wehr- und Kraftwerksbauwerke (Messrinne für Kraftwerksabfluss noch nicht installiert); rechts: Modellierung der festen Ufer und der beweglichen Sohle (Die PVC-Profile wurden für die Versuche gezogen.)

4 Versuchsdurchführung und Messtechnik

4.1 Abflüsse und Wasserstände

Die Versuchsdauer betrug in der Regel 24 (Natur-)Stunden (entspricht ca. 5 h 20 min im Modell) bei konstantem Abfluss. Die Messung des stationären Modellzuflusses und falls erforderlich die Bestimmung des Kraftwerksdurchflusses erfolgte mit kalibrierten Messrinnen. Der Oberwasserstand wurde mittels Stechpegel gemessen.

4.2 Sohlvermessung

Die lokale Beurteilung und Dokumentation der verschiedenen Betriebszustände am Bauwerk erfolgten in der Regel visuell und photographisch.

Bei ausgewählten Versuchen wurde die Modellsohle mit Hilfe einer Drohne jeweils im trockenen Ausgangs- und Endzustand photogrammetrisch vermessen. Die daraus erzeugten digitalen Geländemodelle dienen zur Darstellung der im Versuch erfolgten Erosionen und Auflandungen.

5 Versuchsergebnisse

5.1 Anlagensteuerung im IST-Zustand und Versuchsprogramm

Derzeit wird die Anlage beim Anlaufen einer Hochwasserwelle wie folgt betrieben:

Tab. 1 Anlagensteuerung im IST-Zustand

Q_{Lech}	KW-Einläufe 1 - 5	Schlauchwehr (SW)	Kiesschleuse (KS)
< 160 m ³ /s	geöffnet	gestellt	geschlossen
160 m ³ /s	geöffnet	<u>wird gelegt</u>	geschlossen
165 m ³ /s	geöffnet	gelegt	<u>Teilöffnung auf 15%</u>
280 m ³ /s	<u>werden geschlossen</u>	gelegt	15% geöffnet
> 280 m ³ /s	geschlossen	gelegt	15% geöffnet

In Absprache mit dem Betreiber wurden auf Grundlage der bestehenden Anlagensteuerung zunächst mehrere typische Betriebssituationen definiert.

- Kraftwerksbetrieb bei $Q_{Lech} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ ($> MQ = 46 \text{ m}^3/\text{s}$)
Schlauchwehr gestellt, Kiesschleuse geschlossen
- Kraftwerksbetrieb bei $Q_{Lech} = 165 \text{ m}^3/\text{s}$
Schlauchwehr gelegt, Kiesschleuse wird teilgeöffnet
- ohne Kraftwerksbetrieb bei $Q_{Lech} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx MHQ = 386 \text{ m}^3/\text{s}$)
Schlauchwehr gelegt, Kiesschleuse 15% teilgeöffnet

5.2 Kraftwerksbetrieb bei $Q_{Lech} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$

5.2.1 Anlagensteuerung im IST-Zustand

In dieser Betriebssituation (siehe Abb. 4 links) sind die Kraftwerkseinläufe KW1 – KW5 geöffnet, der Kraftwerksdurchfluss beträgt $Q_A = 56 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Schlauchwehr (SW) ist gestellt und wird mit dem restlichen Abfluss von $24 \text{ m}^3/\text{s}$ überströmt. Die Kiesschleuse (KS) ist geschlossen (0% geöffnet).

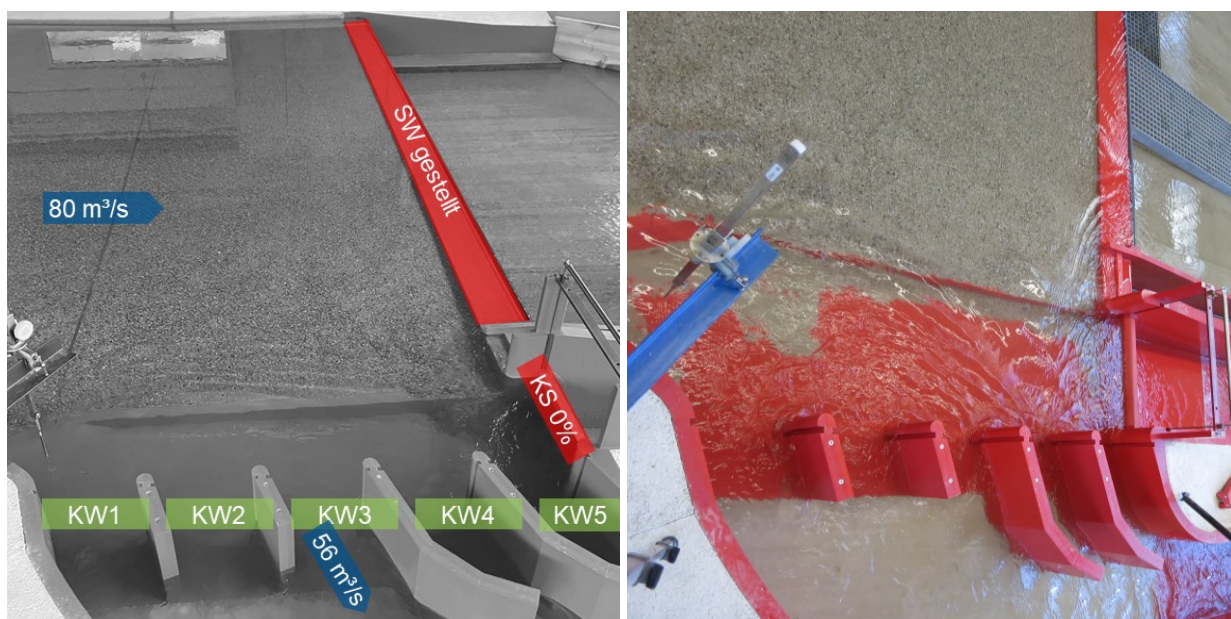


Abb. 4 links: Darstellung der Betriebssituation mit Anlagensteuerung im IST-Zustand; rechts: kein nennenswerter Eintrag in die Kiesfalle

Nach Beginn des Versuchs fand für wenige Minuten geringfügiger Geschiebetrieb im Nahbereich der Kiesfalle mit vernachlässigbarem Eintrag in die Kiesfalle statt (teilweise modellbedingt durch das Anfahren des Versuchs). Nach kurzer Zeit war ein Gleichgewichtszustand erreicht, es erfolgte kein weiterer Eintrag in die Kiesfalle (siehe Abb. 4 rechts). In der Natur ist dieser Zustand hinsichtlich des Geschiebeeintrags unkritisch.

5.2.2 Modifizierte Anlagensteuerung

Es ergab sich daher keine Notwendigkeit, das bestehende Steuerungskonzept für $Q_{Lech} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ zu modifizieren.

5.3 KW-Betrieb bei $Q_{Lech} = 165 \text{ m}^3/\text{s}$

5.3.1 Anlagensteuerung im IST-Zustand

In dieser Betriebssituation (siehe Abb. 5 links) sind die Kraftwerkseinläufe KW1 – KW5 noch geöffnet, der Kraftwerksdurchfluss beträgt weiterhin $Q_A = 56 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Schlauchwehr (SW) ist nun gelegt, die Kiesschleuse (KS) entsprechend der IST-Steuerung um 15% (0,77 m) teilgeöffnet.

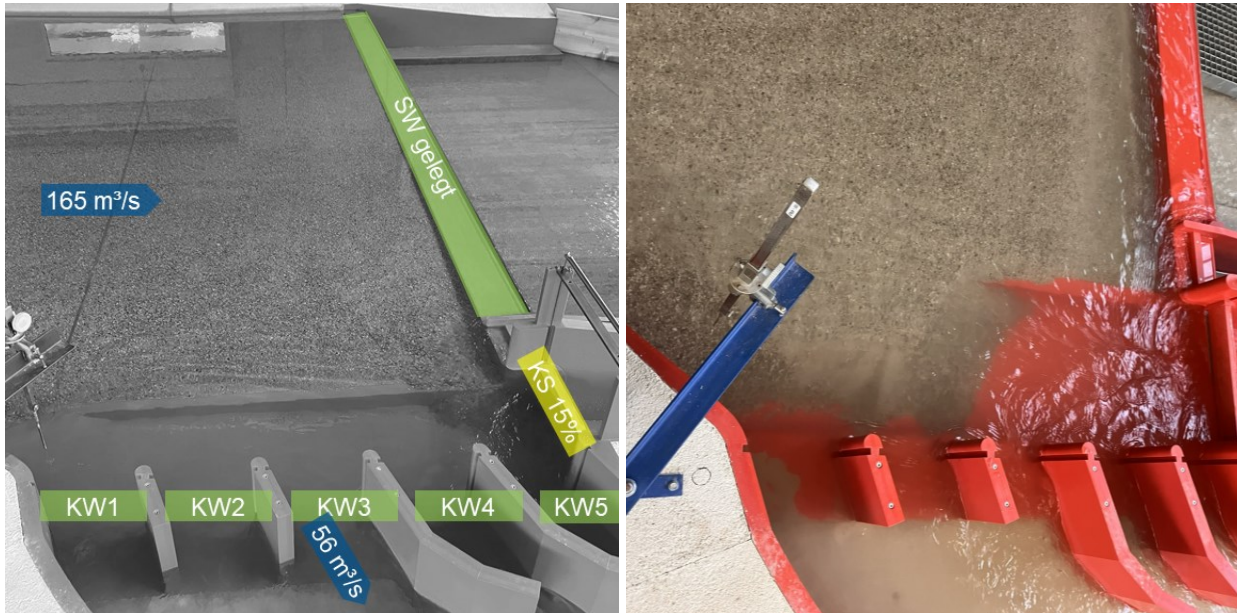


Abb. 5 links: Darstellung der Betriebssituation mit Anlagensteuerung im IST-Zustand; rechts: Geschiebeeintrag in Kiesfalle, Auskolkung vor Schlauchwehr

Im Stauraum war über die gesamte Versuchsdauer geringfügiger Geschiebetrieb zu beobachten.

Nach der Teilöffnung der Kiesschleuse ergab sich starker Geschiebetrieb im Nahbereich der Kiesfalle mit dauerhaften Geschiebeablagerungen im hinteren Teil der Kiesfalle, jedoch nicht bis direkt an die Einlaufschützen des KW-Einlaufs heran (siehe Abb. 5 rechts). Unmittelbar vor dem Bauwerk des rechten Schlauchwehrfelds zeigte sich eine Auskolkung aufgrund der ausgeprägten Querströmung zur Kiesschleuse und zum Kraftwerkseinlauf (Abflussanteil Kiesschleuse ca. 40%, Kraftwerk ca. 35%).

5.3.2 Modifizierte Anlagensteuerung

Aus dem oben beschriebenen Versuchsergebnis ergab sich die Überprüfung einer modifizierten Anlagensteuerung, bei der auf das Teilöffnen der Kiesschleuse bei $Q_{Lech} = 165 \text{ m}^3/\text{s}$ verzichtet und damit die Querströmung in Richtung Kiesfalle verringert wird (siehe Abb. 6 links).

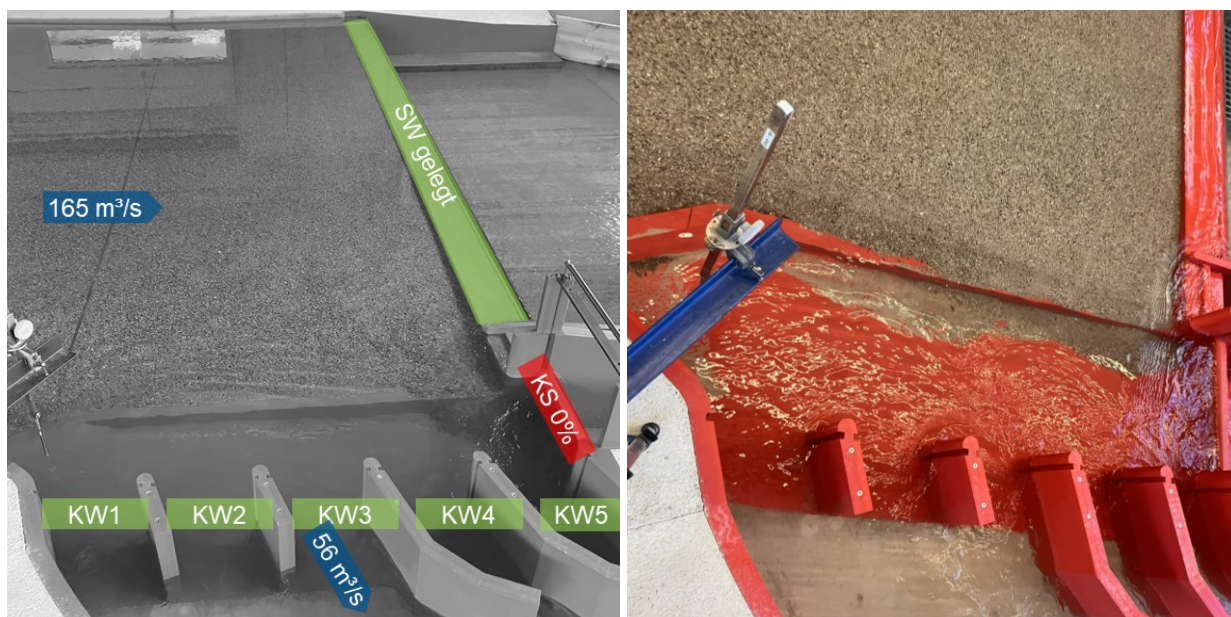


Abb. 6 links: Darstellung der Betriebssituation mit modifizierter Anlagensteuerung; rechts: Geschiebefälle weitgehend geschiebefrei

Durch den Verzicht auf die Teilöffnung der Kiesschleuse ergab sich nur geringfügiger Geschiebetrieb im Nahbereich des Bauwerks. Die Kiesfalle blieb weitgehend geschiebefrei (siehe Abb. 6 rechts).

5.4 Ohne Kraftwerksbetrieb bei $Q_{Lech} = 400 \text{ m}^3/\text{s} \approx \text{MHQ}$

5.4.1 Anlagensteuerung im IST-Zustand

In dieser Betriebssituation (siehe Abb. 7 links) ist das Kraftwerk nicht mehr in Betrieb und die Kraftwerkseinläufe KW1 - KW5 sind geschlossen. Das Schlauchwehr (SW) ist gelegt, die Kiesschleuse (KS) entsprechend der IST-Steuerung um 15% (0,77 m) teilgeöffnet.



Abb. 7 links: Darstellung der Betriebssituation mit Anlagensteuerung im IST-Zustand; rechts: vernachlässigbarer Geschiebeeintrag in die Kiesfalle

Im Stauraum war über die gesamte Versuchsdauer Geschiebetrieb zu beobachten, der zum Großteil über das Schlauchwehr geführt wurde.

Trotz Teilöffnung der Kiesschleuse ergaben sich im Gegensatz zum Versuch bei $Q_{Lech} = 165 \text{ m}^3/\text{s}$ kaum Geschiebeablagerungen in der Kiesfalle (siehe Abb. 7 rechts). Aufgrund des geschlossenen Kraftwerkseinlaufs wird die Querströmung in Richtung Kiesfalle nur durch den Abflussanteil der teilgeöffneten Kiesschleuse (ca. 20% im Gegensatz zu 75% bei $Q_{Lech} = 165 \text{ m}^3/\text{s}$) induziert.

5.4.2 Modifizierte Anlagensteuerung

Die Kiesschleuse ist geschlossen, um die Querströmung in Richtung Kiesfalle zu verringern (siehe Abb. 8 links).

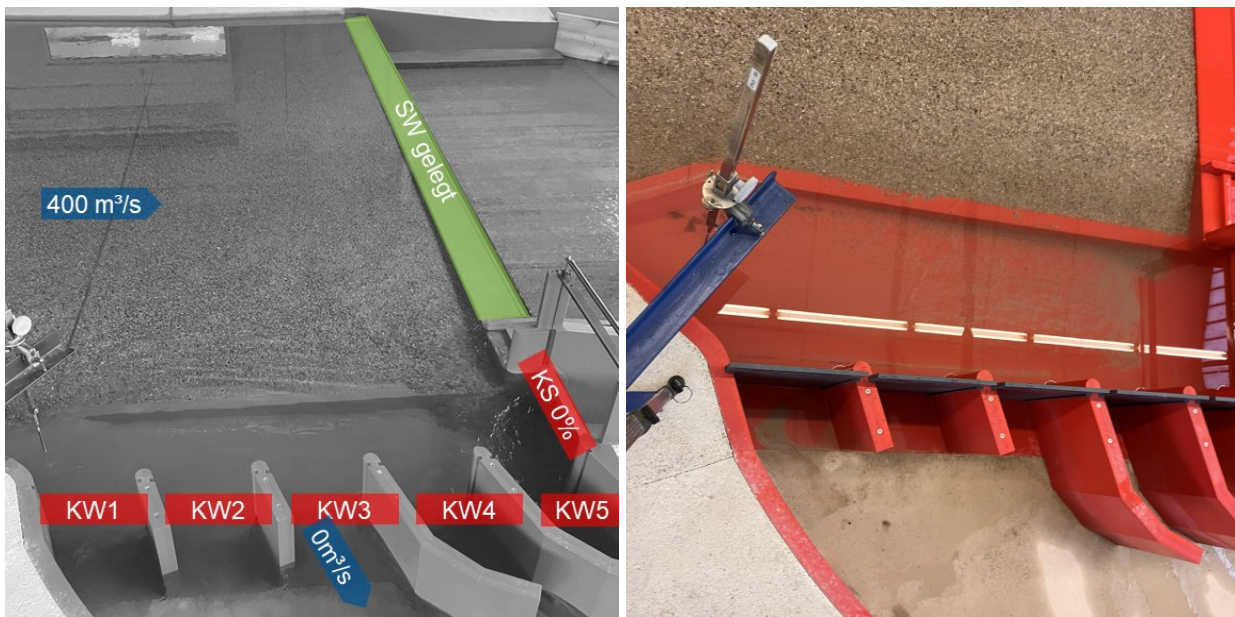


Abb. 8 links: Darstellung der Betriebssituation mit modifizierter Anlagensteuerung; rechts: kaum Geschiebeeintrag in die Kiesfalle

Es war kein nennenswerter Unterschied zur Situation im IST-Zustand zu beobachten, d.h. es fand auch in dieser Betriebssituation kein nennenswerter Eintrag in die Kiesfalle statt (siehe Abb. 8 rechts).

5.5 Ohne Kraftwerksbetrieb bei $Q_{Lech} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.1 Modifizierte Anlagensteuerung

Mit diesem Versuch sollte für die modifizierte Anlagensteuerung bei einem deutlich höheren als dem eigentlich für die Untersuchungen relevanten Abfluss die Verlandung im Einlaufbereich des Kraftwerks untersucht werden. In Absprache mit dem Betreiber wurde $Q_{Lech} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt (Größenordnung HQ_{30}). Die Kraftwerkseinläufe und die Kiesschleuse sind geschlossen, das Schlauchwehr ist gelegt (siehe Abb. 9 links).



Abb. 9 links: Darstellung der Betriebssituation mit modifizierter Anlagensteuerung; rechts: erheblicher Geschiebeeintrag in die Kiesfalle

Im Stauraum war über die gesamte Versuchsdauer starker Geschiebetrieb zu beobachten, der zum Großteil über das Schlauchwehr geführt wurde. Im Bereich der Aufweitung des Buchtenkraftwerks bildete sich allerdings eine hochliegende Front aus, die zu erheblichem Eintrag in die Geschiebefalle führte (siehe Abb. 9 rechts und Abb.10 links). Die Einlaufschützen zum Kraftwerk wurden dabei nicht verlegt.

In einem anschließenden Spülversuch mit Anwendung des im Modellversuch 2005 entwickelten Spülkonzepts ($Q_{Lech} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$, Kraftwerkseinläufe 1 - 5 geschlossen, Schlauchwehr gelegt, Kieschleuse vollständig geöffnet) konnte die Kiesfalle innerhalb von ca. 13 (Natur-)Stunden wieder hydraulisch weitgehend freigespült werden (siehe Abb. 10 rechts).

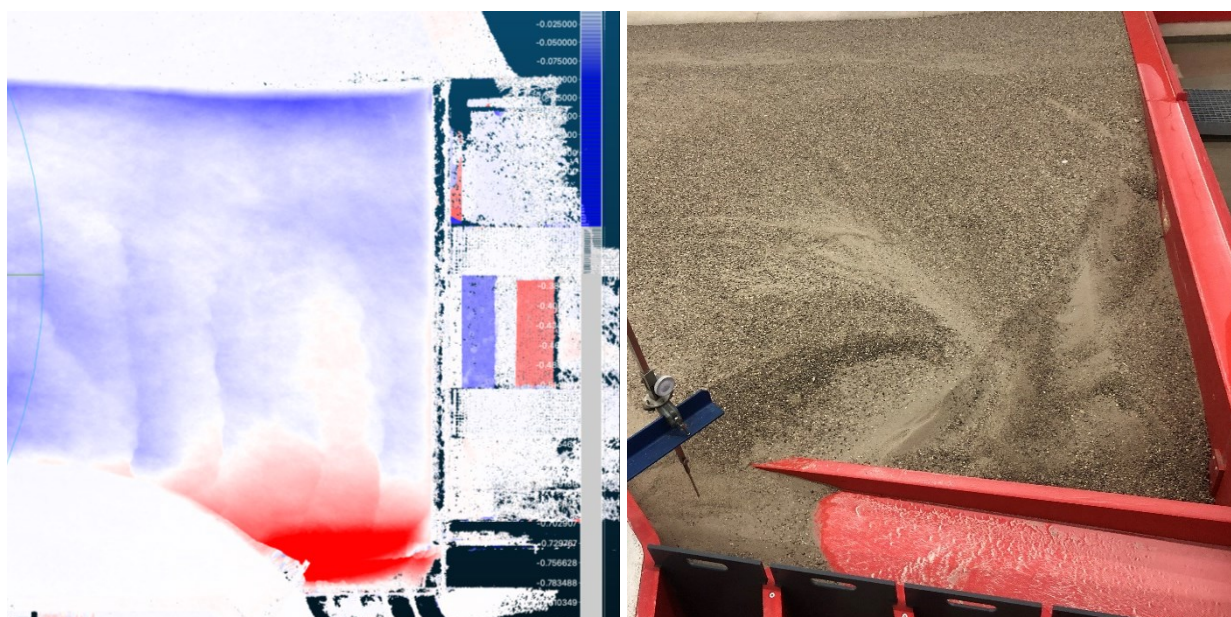


Abb. 10 links: photogrammetrische Auswertung der Modellsohle als Differenzbetrachtung zwischen End- und Anfangszustand (blau = Erosion, rot = Auflandung); rechts: Zustand nach der Spülung

6 Fazit und Ausblick

Durch die modifizierte Anlagensteuerung ohne Öffnung der Kiesschleuse kann im relevanten Abflussbereich (kleine, häufig auftretende Hochwasserereignisse) die Verlegung der Kieschleuse im Vergleich zur bisherigen Situation weitgehend vermieden werden. Daraus resultierende höhere Oberwasserstände sind im Hinblick auf wasserrechtliche Auflagen unkritisch, da der Hochwasserbetrieb mit gelegtem Schlauchwehr, geschlossenem Kraftwerk und geschlossener Kiesschleuse dem Zustand vor Errichtung der Kraftwerksanlage entspricht und damit hochwasserneutral ist.

In weiteren Versuchen soll untersucht werden, ob durch die Anwendung von flussbaulichen Maßnahmen im Stauraum auch für große Hochwasserereignisse der Eintrag in die Kiesfalle bzw. Anlandungen im Aufweitungsbereich verringert werden können.

Literatur

Open Street Maps, Deutschland. (n.d.). [Kartenausschnitt Eisenbahnerwehr, Augsburg] [Map]. Karte hergestellt aus Open Street Map Daten. Open Database License ODbL (<http://open-data-commons.org/licenses/odbl/>). Abgerufen 27.02.2023, from <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=16&lat=48.35455&lon=10.9393&layers=B00TF>

Strobl, T.; Sepp, A.; Wang, R. W.; Sperer, A. (2005). Wasserkraftanlage am Eisenbahnerwehr Lech / Augsburg, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München (Versuchsbericht, unveröffentlicht)

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Richard Huber
Versuchsanstalt für Wasserbau, TU München
Oberrach 15, D-82432 Walchensee
richard.huber@tum.de

Jonas Pfeiffer, B.Eng.
Versuchsanstalt für Wasserbau, TU München
Oberrach 15, D-82432 Walchensee
jonas1.pfeiffer@tum.de