

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Schüss, Biel/Bienne – Wechselwirkung zwischen Hochwasserschutz, Revitalisierung und Geschiebetransport

Zertifikatsarbeit
CAS Gewässerrenaturierung

von
Sauter Eva
Zertifikatslehrgang 2021/2022
Abgabetermin: 31.08.2022

FachkorrektorIn:

Dr., Antonetti Manuel

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Departement Life Sciences und
Facility Management, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Schloss, 8820 Wädenswil



Zitiervorschlag

Sauter, E. (2022). Schüss, Biel/Bienne – Wechselwirkung zwischen Hochwasserschutz, Revitalisierung und Geschiebetransport. Zertifikatsarbeit CAS Gewässerrenaturierung. ZHAW, Wädenswil.

Adresse Institut

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Departement Life Sciences und Facility Management, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen UNR, Grüental, 8820 Wädenswil, Schweiz.

Schlagworte

Schüss, Biel/Bienne, Hochwasserschutz, Revitalisierung, Geschiebetransport

Zusammenfassung

In beengten Raumverhältnissen steht die Umsetzung des Hochwasserschutzes grossen Herausforderungen gegenüber und die Wiederherstellung der natürlichen Funktionen des Gewässers ist nur begrenzt möglich, da die verschiedenen Anforderungen und Bedürfnisse in Konflikt stehen. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb die Wechselwirkung zwischen Hochwasserschutz, Gewässerrevitalisierung und Geschiebetransport am Beispiel der Schüss in Biel/Bienne untersucht und mögliche Konflikte identifiziert.

Im Stadtzentrum von Biel/Bienne besteht ein hohes Hochwasserschutzdefizit. Der Gewässerrichtplan, der derzeit überarbeitet wird, sieht deshalb als Hochwasserschutzmassnahme einen Entlastungsstollen vor. Des Weiteren werden seitens Geschiebesanierung Massnahmen an den bestehenden Geschiebesammlern gefordert, um den Geschiebetransport in diesem eintragsbestimmten Gewässer mit stabiler Sohle zu erhöhen und die erforderliche Fracht zu erreichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für den kanalisiertem Abschnitt zwischen Hauserwehr und Mündung in den Bielersee die Abflusskapazität anhand eines 1D hydronumerischen Modells hergeleitet. Über die Erhöhung der Sohlenrauigkeit wurden Sohlenstrukturierungen im Modell berücksichtigt und die Auswirkung einer möglichen Revitalisierung auf die Abflusskapazität abgeschätzt. Anschliessend wurden die Folgen der Drosselung bis zur entsprechenden Abflusskapazität auf den Geschiebetrieb für laufendes Geschiebe und die Unterschicht ermittelt.

Die Resultate zeigen, dass im heutigen Schüsskanal der Hochwasserschutz bis zu einem Abfluss von 55 – 60 m³/s gewährleistet ist, was lediglich ca. 55 % eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses entspricht. Revitalisierungsmassnahmen, die eine starke Erhöhung der Sohlenrauigkeit verursachen, führen zu einer starken Reduktion der Abflusskapazität und stehen damit im Konflikt mit der geforderten Geschiebesanierung. Aus Sicht Geschiebesanierung ist der Abfluss auf max. 50 m³/s zu reduzieren, um die Abflüsse im mittleren Jahr nicht zu beeinflussen und die erforderliche jährliche Fracht bestehend aus feinem laufendem Geschiebe zu erreichen. In den bereits revitalisierten Abschnitten, in welchen sich noch keine vollständige Deckschicht gebildet hat, sind höhere Abflüsse notwendig, um die Deckschichtbildung längerfristig zu verhindern.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Danksagung	1
Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	1
2 Material und Methoden	2
2.1 Untersuchungsgebiet	2
2.2 Hydrologie	5
2.3 Morphologie, Geschiebehalt	6
2.4 Hydronumerisches Modell	8
2.5 Modellverifikation	10
2.6 Abflusskapazität	10
2.7 Geschiebetransportkapazität	11
3 Resultate	14
3.1 Modellverifikation	14
3.2 Abflusskapazität	15
3.3 Geschiebetransportkapazität	18
3.3.1 Laufendes Geschiebe	18
3.3.2 Unterschicht	21
4 Diskussion	23
4.1 Verifikation und Modellgenauigkeit	23
4.2 Abflusskapazität im Ist-Zustand	23
4.3 Aufwertungspotential	24
4.4 Geschiebetransportkapazität	25
4.5 Hochwasserschutz, Strukturierungselemente und Geschiebe	26
4.6 Fazit	27
4.7 Ausblick	27
5 Literaturverzeichnis	29

1 Einleitung

Hochwasserschutz und Renaturierung gewinnen aufgrund vergangener Hochwasserereignissen und des Klimawandels immer mehr an Bedeutung. Die Kantone haben den Auftrag, wo erforderlich Massnahmen für den Hochwasserschutz umzusetzen und den natürlichen Verlauf der Gewässer möglichst beizubehalten oder wiederherzustellen (WBG Art. 4, GSchG Art. 37). GSchG Art. 43a fordert zusätzlich, dass der Geschiebehaushalt im Gewässer durch Anlagen nur unwesentlich beeinträchtigt wird und entsprechende Massnahmen vorzunehmen sind. Die Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft (2021) nennt als wichtigsten Erfolgsfaktor für die Wiederherstellung der natürlichen Funktionen die Aufweitung des Gewässerraums und Verstärkung der Eigendynamik, und empfiehlt in beengten Verhältnissen gezielte Ökosystembausteine wiederherzustellen.

Die Schüss im Zentrum von Biel/Bienne ist ein begradigtes Gewässer in stark beengten Verhältnissen. Aufgrund der kanalisierten Linienführung und der ebenen Sohle liegt eine Struktur- und Habitatarmut vor. Auch der Geschiebetrieb und die Fischgängigkeit ist wegen diverser Geschiebesammler und Wehre beeinträchtigt (Kanton Bern, 2022). Zusätzlich liegt ein Hochwasserschutzdefizit mit Bereichen geringer bis mittlerer Gefährdung vor (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020). Das kollektive Schadenpotential wird auf 15 Mio. Franken pro Jahr geschätzt und einige Verkaufsflächen im Untergeschoss weisen ein inakzeptables, individuelles Todesfallrisiko auf (Holinger AG, 2020). Da eine Verschlechterung des Hochwasserschutzes um bereits 1 % nicht akzeptabel ist, haben der Wasserbauverband «syndicat d'aménagement des eaux de la Suze» (SAES) und die kantonalen Fachstellen entschieden, dass keine ökologische Aufwertung ohne Lösung des Hochwasserschutzes realisiert werden darf (Bucher, 2022). Auf Grundlage des WBG Art. 17 wird im Auftrag des Kantons Bern derzeit der Gewässerrichtplan für die Schüss überarbeitet. Für die Lösung des Hochwasserschutzes wird eine Variante mit Entlastungstollen bei Frinvillier angestrebt, da nur mittels Entlastung der Hochwasserschutz gelöst und zusätzlich eine ökologische Aufwertung im Stadtzentrum von Biel/Bienne ermöglicht wird (Bucher, 2022).

In dieser Arbeit soll unter Annahme der Genehmigung des Gewässerrichtplans und Umsetzung des Entlastungstollens die Wechselwirkung zwischen Hochwasserschutz, Gewässerrevitalisierung und Geschiebetransport aufgezeigt werden. In Abhängigkeit der gewässerökologischen Aufwertung wird die Abflusskapazität des Schüsskanals ermittelt und die Auswirkungen der Abflussreduktion auf den Geschiebetransport im Abschnitt im Stadtzentrum, sowie in den bereits revitalisierten Abschnitten in Biel/Bienne abgeschätzt. Stehen die Massnahmen Hochwasserschutz, Revitalisierung und Geschiebesanierung im Konflikt?

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die ca. 36 km lange Schüss entspringt im Berner Jura südwestlich von Renan und mündet in der Stadt Biel in den Bielersee. Das Einzugsgebiet der Schüss umfasst eine Fläche von 207 km². Über weite Strecken zeigt die Schüss die Charakteristik eines typischen Talflusses auf, direkt oberhalb der Gemeinde Biel durchquert die Schüss die Taubenlochschlucht. In dieser Schlucht verliert die Schüss innerhalb weniger Kilometer an 130 m Höhe. Nach der Schlucht liegt ein Gefällsknick vor, innerhalb der Gemeinde Biel weist die Schüss ein flaches Nettogefälle von ca. 0.3 % auf. Innerhalb der Taubenlochschlucht bildet der anstehende Fels natürliche Sohlenfixpunkte. Innerhalb der Stadt Biel/Bienne liegt der Felshorizont deutlich tiefer, die Schüss durchquert alluviale Zonen.

Der Untersuchungsperimeter der vorliegenden Arbeit befindet sich innerhalb der Stadt Biel/Bienne zwischen der Solothurnstrasse und der Mündung in den Bielersee (Abbildung 1). Der Fokus liegt primär auf dem unteren Abschnitt, dem Schüsskanal zwischen Hauserwehr (Abbildung 2) und Bielersee (Abbildung 5, rechts), welcher zum heutigen Zeitpunkt noch nicht revitalisiert wurde. Die Schüss ist im unteren Abschnitt stark begradigt und verbaut, grösstenteils wird der Gewässerraum durch beidseitig angeordnete Mauern begrenzt. Das kanalisierte und gerade Gerinne weist eine monotone Sohlenbreite von ca. 11 bis 11.5 m auf (Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5). Die Ökomorphologie (Stufe F) wird als naturfremd/künstlich ausgewiesen (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022). Aufgrund der Kanalisierung und kolmatierten, ebenen Sohle sind kaum Strukturen und Habitate vorhanden und in den Sommermonaten bei wenig Abfluss kommt es zur Erwärmung des dünnen Wasserfilms. Der obere Abschnitt, Solothurnstrasse bis Hauserwehr, wurde zu grossen Teilen bereits revitalisiert und ist die Auflandungsstrecke der Schüss (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020). Deshalb wird für die Geschiebebetrachtung der Untersuchungsperimeter erweitert. Beim Hauserwehr teilt sich die Schüss in drei Arme: Der Schüsskanal und die zwei Seitenarme Biel- und Madretsch-Schüss. Die Biel-Schüss mündet ca. 500 m flussaufwärts des Bielersees wieder in die Schüss. Die Madretsch-Schüss mündet in die Zihl. Die Speisung der Seitenarme wird durch die Anlage reguliert, so dass sich ein nahezu konstanter Abfluss von 0.5 m³/s resp. 1.5 m³/s einstellt.



Abbildung 1: Untersuchungsgebiet Schüss in Biel/Bienne, Abschnitt Solothurnstrasse bis Mündung in den Bielersee (Orthophoto: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2021))



Abbildung 2: Hauserwehr, Biel/Bienne (links: Ansicht auf Wehranlage aus dem Unterwasser der Haupt-Schüss, rechts: Sicht auf die zwei Hauptschützen der Haupt-Schüss und Zufluss der Biel-Schüss)



Abbildung 3: Typische Gerinnegeometrie zwischen Hauserwehr und Jurastrasse (links) und zwischen Jurastrasse und Spitalstrasse (rechts)



Abbildung 4: Gerinnegeometrie zwischen Spital- und Viaduktstrasse (links) und zwischen Ländtestrasse und Europaquai (rechts)



Abbildung 5: Gerinnegeometrie zwischen Europaquai und Mündung in den Bielersee (Sicht von rechter Uferseite (links) und linker Uferseite (rechts))

2.2 Hydrologie

Am Hauserwehr befinden sich hydrologische Messstationen an der Hauptschüss unterhalb des Wehres, sowie je eine Messstation an den Seitenarmen Biel- und Madretsch-Schüss. Diese sind seit dem Jahr 2000 in Betrieb. Die Messstation am Schüss-Kanal (Hauptschüss) A067.1 (Bau- und Verkehrsdirektion des Kantons Bern, 2022) zeichnet aufgrund technischer Limiten keine Daten für Wasserspiegellagen unterhalb 433.16 m ü. M. resp. bei Abflüssen unter 1.0 m³/s auf (Bau- und Verkehrsdirektion des Kantons Bern, 2019). Das hydrologische Jahrbuch (Bau- und Verkehrsdirektion des Kantons Bern, 2019) dokumentiert für die Messreihe von 2000 bis 2019 einen Abfluss bei Mittelwasser von ca. 3.27 m³/s und bei Trockenwetter ca. 0.47 m³/s (Abbildung 7, rechts). Aufgrund der technischen Einschränkungen sind die Werte mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Anhand der Messreihe von 2000 bis 2020 wurde die Dauerkurve für den Schüsskanal ermittelt. Im Mittel treten maximale Abflüsse von ca. 50 m³/s auf (Abbildung 6, rot), im nassen Jahr wurde ein maximaler Abfluss von ca. 78 m³/s (Abbildung 6, blau) und im trockensten von ca. 38 m³/s (Abbildung 6, orange) gemessen.

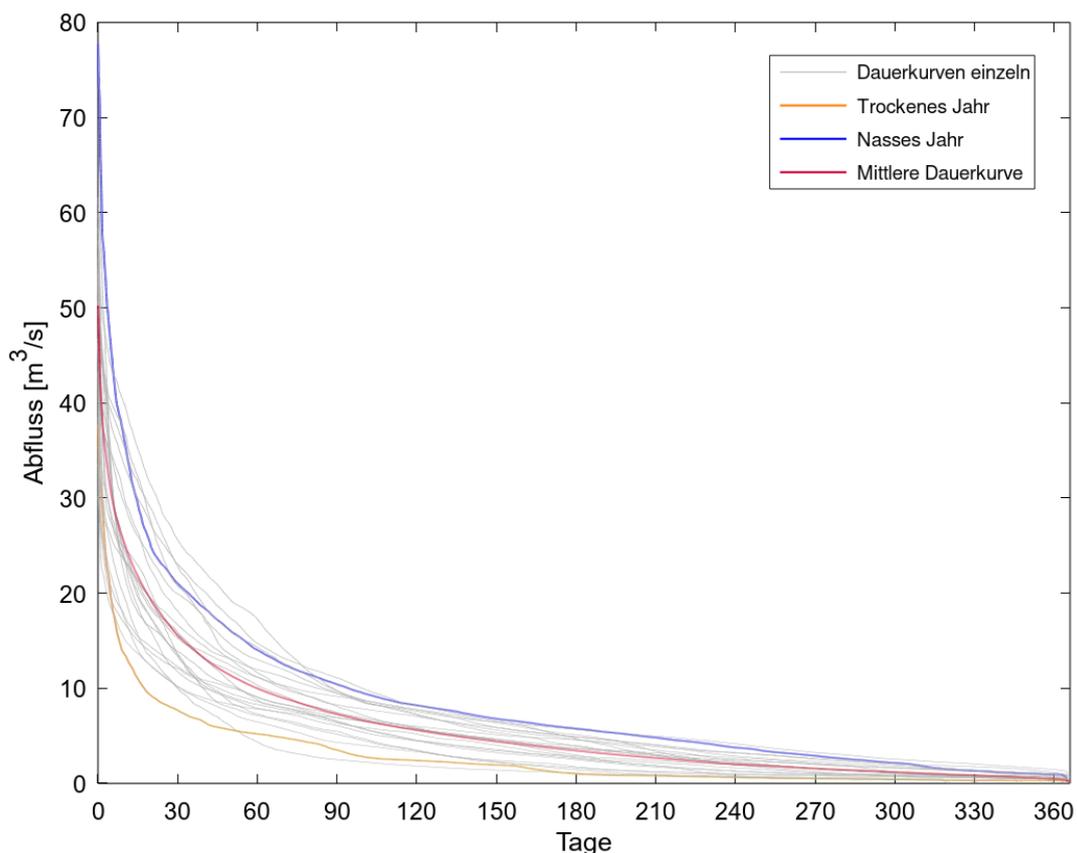


Abbildung 6: Dauerkurven für die Messstation A067.1 Schüss-Hauptkanal, Hauserwehr, Biel/Bienne

In der Schüss treten Hochwasser aufgrund von Schneeschmelze und gleichzeitigen Starkniederschlägen, oder bei mehreren Tagen langandauernden, intensiven, grossräumigen

Niederschlägen auf (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020). Die Abflussspitzen der Schüss innerhalb der Stadt Biel sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Das grösste dokumentierte Hochwasserereignis trat am 08./09. August 2007 mit einer Abflussspitze von ca. 78 m³/s auf. Während dieses Ereignisses kam es knapp zu keinen Ausuferungen (Abbildung 7, links).

Tabelle 1: Abflussspitzen Schüss, Biel/Bienne (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020)

Szenario	HQ _{2.33}	HQ ₅	HQ ₂₀	HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	EHQ
Haupt-Schüss	41 m ³ /s	53 m ³ /s	72 m ³ /s	82 m ³ /s	103 m ³ /s	150 m ³ /s	200 m ³ /s

Die Hochwasserszenarien sind stark abhängig vom Pegel im Bielersee, welcher die untere Abflussbedingung bestimmt. Die mittlere Wasserspiegellage im Sommer liegt auf ca. 429.43 m ü. M. (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020). Die Hochwasserpegel sind in Tabelle 2 erfasst.

Tabelle 2: Hochwasserpegel Bielersee (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020)

Szenario	HW ₃₀	HW ₁₀₀	HW ₃₀₀	EHW
Bielersee	430.6 m ü. M.	431.0 m ü. M.	431.3 m ü. M.	432.5 m ü. M.



Abbildung 7: Brücke Neumarktstrasse während des Hochwassers vom 08./09. August 2007 mit Abflussspitze ca. 78 m³/s (links, Foto: J. Bucher, OIKIII) und Schüss am 13.08.2022 bei Trockenwetter $Q < 1$ m³/s (Abfluss ausserhalb des Messbereiches, rechts, Foto: Sandro Bürki)

2.3 Morphologie, Geschiebehalt

Die kolmatierte Sohle innerhalb des Schüsskanals deutet auf einen stark beeinträchtigten Geschiebehalt hin. Innerhalb der Geschiebestudie (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021) wurde festgestellt, dass die Schüss sowohl im Ist-Zustand wie auch im Referenzzustand ein eintragsbestimmtes Gewässer ist resp. war. Aufgrund der kolmatierten Sohle und des nahen anstehenden Felsens in den Schluchtstrecken ist die Sohle weitgehend stabil und der

massgebende Transportmechanismus ist der Transport von laufendem Geschiebe über die stabile Deckschicht (Abbildung 8). Auch ist die Geschiebezufuhr ausschliesslich durch den Oberlauf und die Seitzubringer reguliert, da weder eine Mobilisierung des Sohlenmaterials noch Ufererosion möglich ist (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021). In den revitalisierten Abschnitten im Stadtgebiet hat sich bislang noch keine durchgehende Deckschicht gebildet, weshalb die Transportkapazität des Unterschichtmaterials massgebend ist (Abbildung 9). Die jährliche Geschiebefracht wird im Ist-Zustand aufgrund zahlreicher Geschiebesammler der Seitzubringern auf rund 160 – 170 m³ geschätzt, während das Geschiebepotential im Referenzzustand mit 400 – 500 m³/a deutlich höher war. Sowohl im Ist- wie im Referenzzustand wird das feine laufende Geschiebe bis zur Mündung des Bielersees durchtransportiert.

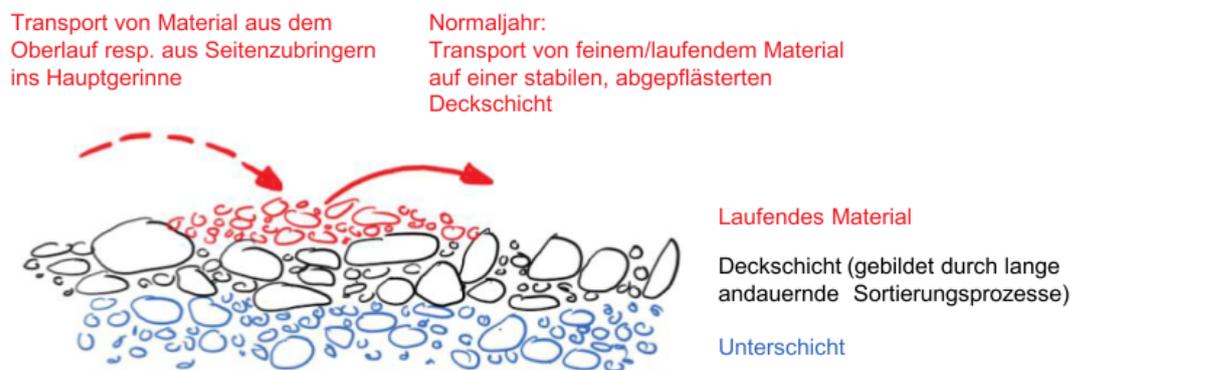


Abbildung 8: Geschiebetransport über stabile Deckschicht (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021)

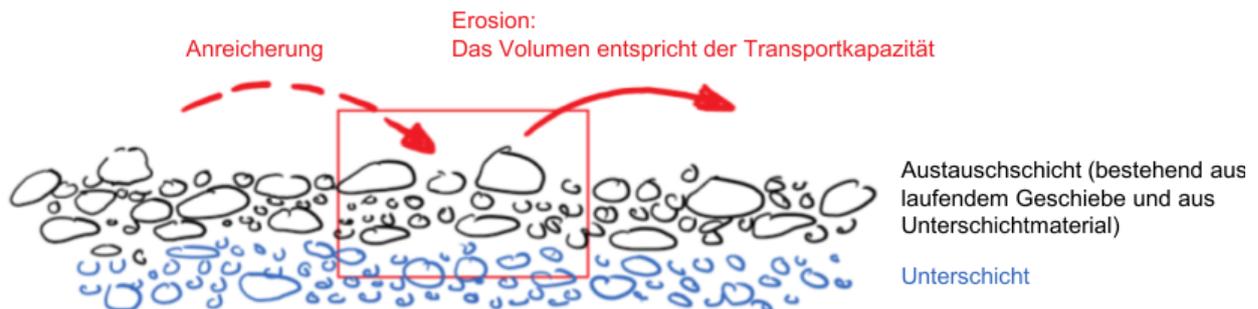


Abbildung 9: Geschiebetransport nach klassischer Methode (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021)

Im heutigen Zustand weist der Abschnitt zwischen Hauserwehr und Bielersee weder eine Erosions- noch eine Auflandungstendenz auf (Bucher, 2022). Innerhalb des Untersuchungsperimeters erfolgen nach Bedarf sporadische Kiesentnahmen im Mündungsbereich. Dokumentierte Entnahmen fanden in den Jahren 1996 (8'100 m³), 2008 (1'800 m³), 2017 (4'500 m³) und 2019 (150 m³) statt (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021). Im Bereich des Hauserwehrs waren bisher keine Entnahmen erforderlich. Die Wehranlage, insbesondere die Zuläufe der Seitenarme, wird mittels Spülungen gereinigt (Bucher, 2022). Das Hauser-Wehr wird

unter der Annahme, dass das laufende Geschiebe massgebend ist, als geschiebedurchgängig ($>1'000 \text{ m}^3$) beurteilt (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021).

Die im Rahmen des Wasserbaugesetzes (WBG) Art. 17 geforderten Erneuerung und Erweiterung der Gewässerrichtpläne sieht unter anderen eine Sanierung des Geschiebehaushaltes vor. Die Basis für die Festlegungen im Gewässerrichtplan bildet die Geschiebestudie von Hunziker, Zarn & Partner AG (2021), in welcher Massnahmen für die Sanierung abgeleitet werden. Die Massnahmen sind insbesondere die geschiebedurchgängige Ausbildung der Kiessammler. Weiter wurden für die Schüss u.a. die Sanierungsziele definiert, das Gerinne auf die natürliche Sohlenbreite aufzuweiten, das Längsgefälle des Referenzzustands nicht zu unterschreiten und in den limitierenden Flachstrecken eine Geschiebefracht gleich der Transportkapazität zu ermöglichen. Um die Ziele der Vollzugshilfe (Bundesamt für Umwelt, 2020) zu erfüllen, muss die erforderliche Geschiebefracht im Gewässer erreicht oder überschritten werden. Die Fracht darf aber nur so weit erhöht werden, so dass die Hochwassersicherheit unbeeinträchtigt bleibt. Die erforderliche Geschiebefracht für gewundene Gerinne mit Bänken entspricht 65 % der Fracht im Referenzzustand, d.h. für die Schüss $260 - 325 \text{ m}^3/\text{a}$.

2.4 Hydronumerisches Modell

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde das hydraulische Modell der Gefahrenkarte Biel/Bienne (Emch+Berger AG, 2022) als Grundlage zur Verfügung gestellt. Für die Gefahrenkarte wurde das Modell mit der Software HEC-RAS Version 4.1 anhand von Vermessungsdaten aufgebaut, kalibriert und berechnet (Abbildung 10). Mittels dem BASEtool HECRAS2basement.py (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 2014) wurde das HEC-RAS Modell in das BASEMENT-Format *.bmg konvertiert. Die Modellmodifikationen und Simulationen wurden anschliessend mit der Software Basement Version 2.8.2 (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 2022) ausgeführt.

Der Fokus der hydraulischen Untersuchungen dieser Arbeit liegt zwischen Hauserwehr (GEWISS km 2.055) und Bielersee (GEWISS km 0.000). Deshalb wurde die modellierte Schüss gekürzt und die Seitenarme vernachlässigt. Als obere Randbedingung wurde Normalabfluss definiert und als untere ein bekannter Wasserspiegel für die Simulation des Bielersees. Das Hauserwehr wurde mittels innerer Randbedingung im Modell berücksichtigt. Um die erforderliche Modellstabilität zu gewährleisten, musste die obere Randbedingung in genügendem Abstand zur inneren Randbedingung definiert werden. Deswegen wurde der Flussabschnitt bis zu km 2.517 im Oberwasser modelliert. Eine Verkürzung des Modells ist zulässig, da der zu untersuchende Modellperimeter durch das Hauserwehr vom oberliegenden Abschnitt hydraulisch entkoppelt ist,

2.5 Modellverifikation

Das bestehende und gekürzte Modell wurde mittels Sensitivitätsanalyse verschiedener Sohlenrauigkeiten von $k_{st} = 20$ bis $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ kalibriert resp. verifiziert. Die Verifikation erfolgte am Querprofil der Messtation A067.1. Anhand der gemessenen Wasserspiegellagen und Abflüssen des Jahres 2018 wurde die PQ-Beziehung der Messtation hergeleitet und mit den Messdaten verglichen. In diesem Jahr wurden Abflüsse bis max. $60 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen. Die Berechnungen wurden für Abflüsse von $1 - 5 \text{ m}^3/\text{s}$ jeweils mit einer Zunahme um je $1 \text{ m}^3/\text{s}$, und von $5 - 80 \text{ m}^3/\text{s}$ um je $5 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Für jeden berechneten Abfluss zwischen 1 und $60 \text{ m}^3/\text{s}$ und alle untersuchten Rauigkeiten wurde die Abweichung ΔWSPL (berechnet – gemessen) statistisch ausgewertet.

2.6 Abflusskapazität

Die Ermittlung der Abflusskapazität erfolgte für das Szenario HQ_{100} mit Pegel des Bielersees $\text{HW}_{30} = 430.60 \text{ m ü. M.}$ gemäss Gefahrenkarte (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020). Die Auswertung der hydronumerischen Modellierung erfolgte an den Brückenquerschnitten (Oberwasser) und unter Einbezug des erforderlichen Freibords nach KOHS (Kommission Hochwasserschutz, 2013) wurde die Abflusskapazität ermittelt. Der erforderliche Freibord setzt sich aus verschiedenen Teilfreiborden zusammen, welche Unschärfen in der Sohlenlage und Abflussberechnung, sowie die Prozesse Wellenbildung, Rückstau und Schwemmholzanfall berücksichtigen, und wird gemäss den Formeln (1) bis (4) hergeleitet. Die Unschärfe in der Sohlenlage sowie den Teil-Freibord aufgrund Wellenbildung und Rückstau wurden mit den Resultaten aus der hydronumerischen Modellierung berechnet. Die weiteren Teil-Freiborde wurden basierend auf Tabelle 3 und Tabelle 4 gewählt.

Erforderlicher Freibord	$f_{min} \leq f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} \leq f_{max}$	(1)
-------------------------	--	-----

Mit $f_{min} = 0.3 \text{ m}$ und $f_{max} = 1.5 \text{ m}$

Teil-Freibord aufgrund Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage	$f_w = \sigma_w = \sqrt{\sigma_{wz}^2 + \sigma_{wh}^2}$	(2)
---	---	-----

Unschärfe in der Abflussberechnung	$\sigma_{wh} = 0.06 + 0.06 h$	(3)
------------------------------------	-------------------------------	-----

Teil-Freibord aufgrund Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen	$f_v = \frac{v^2}{2g}$	(4)
---	------------------------	-----

Tabelle 3: Unschärfe in der massgeblichen Sohlenlage σ_{wz} nach KOHS (2013)

Gewässertyp	Unschärfe
Grösserer Talfluss	0.1 m
Wildbach	1.0 m
Gewässer mit stabiler Sohlenlage	0.0 m

Tabelle 4: Teil-Freibord für Schwemmholz nach KOHS (2013)

Schwemmholzart	Brücke mit glatter Untersicht	Brücke mit rauher Untersicht
Schwemmholz mit geringen Abmessungen (nur Äste)	0.3 m	0.5 m
Einzel angeschwemmte Baumstämme	0.5 m	1.0 m
Wurzelstöcke	1.0 m	1.0 m
Schwemmholz als Teppich angeschwemmt	1.0 m	1.0 m

2.7 Geschiebetransportkapazität

Die Untersuchung des Geschiebetransportes erfolgte an den vereinfachten Querprofilen Schüsskanal (Abbildung 11), Schüssinsel (Abbildung 12) und Renferareal (Abbildung 13). Die jährliche Geschiebetransportkapazität wurde nach dem auf Meyer-Peter und Müller (1948) basierten Ansatz von Wong und Parker (2006) berechnet.

Transportformel nach Wong & Parker (2006)

$$G_b = \frac{4.93\sqrt{g}\rho_s b}{s-1} \left[\left(\frac{k_{st,s}}{k_{st,r}} \right)^{\frac{3}{2}} R_s J - 0.047 (s-1)d_m \right]^{1.6} \quad (5)$$

Darin bedeuten:

G_b	Geschiebetransportrate [kg/s]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
$s = \rho_s/\rho$	relative Feststoffdichte
ρ_s	Feststoffdichte [kg/m ³]
ρ	Dichte des Wassers [kg/m ³]
$k_{st,r}$	Strickler-Beiwert für die Kornrauigkeit der Sohle [m ^{1/3} /s]
$k_{st,s}$	Strickler-Beiwert der Sohle [m ^{1/3} /s] (Kornrauigkeit und Formrauigkeit)
R_s	hydraulischer Radius des Sohlenquerschnitts [m]
J	Längsgefälle [-]
d_m	massgebender Korndurchmesser des Geschiebes [m]

Die Geschiebefunktion wurde mit dem Ansatz für Querschnitte mit kleinen Abflusstiefen- zu Breitenverhältnissen hergeleitet, d.h. für kleine Abflüsse mit der maximalen dimensionslosen Schubspannung $\Theta_{max} = hJ/(s-1)d_m$ und für grössere Abflüsse mit der mittleren dimensionslosen Schubspannung $\Theta_m = R_s J/(s-1)d_m$. Die Geschiebefrachten wurden sowohl für das laufende Geschiebe und die Unterschicht berechnet. Für die Unterschicht wurde

zusätzlich die Stabilität der Deckschicht mit dem Ansatz von Günter (1971) beurteilt. Dafür wurde der mittlere Korndurchmesser der Deckschicht anhand des charakteristischen Korndurchmessers d_{90} angenähert. Für die Berechnungen wurden die Korndurchmesser gemäss Tabelle 5 verwendet, welche im Rahmen der Geschiebestudie (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021) mittels Linienproben erhoben wurden.

Tabelle 5: Korndurchmesser nach Hunziker, Zarn & Partner AG (2021) basierend auf Linienproben (bei Kilometrierung km 1.98 wurden zwei Linienproben des laufenden Materials erfasst)

Stationierung [km]	Laufendes Material		Unterschicht	
	d_m [m]	d_{90} [m]	d_m [m]	d_{90} [m]
3.66	0.022	0.040	0.045	0.102
2.78	0.025	0.049	-	-
2.66	0.022	0.049	-	-
1.98	0.021 / 0.021	0.047 / 0.058	-	-
Mittelwert (km 34.97 bis 1.98)	0.027	0.056	0.052	0.106
Spektrum für Berechnungen	0.020 – 0.030	- ¹	0.045 – 0.052	0.106

¹ Für Berechnungen vernachlässigt, da die Kolmation der Sohle zu gross ist. Annahme: Material wird nur von flussaufwärts zugeführt.

Die hydraulischen Eingangsgrössen wurden unter Annahme von Normalabfluss nach Strickler ($J = 0.3 \%$, $k_{st} = 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) und für die Dauerkurven aus Abbildung 6 ermittelt. Der Einfluss der Abflussdrosselung auf die jährliche Geschiebefracht wurde für zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet:

- (1) für Abflüsse $Q > Q_{Drossel}$ wird die Geschiebetransportkapazität für $Q_{Drossel}$ erreicht
 → Annahme geschiebedurchgängige Entlastung resp. Geschiebezugabe im Unterwasser der Entlastung
- (2) für Abflüsse $Q < Q_{Drossel}$ wird kein Geschiebe transportiert
 → Annahme keine geschiebedurchgängige Entlastung resp. keine Geschiebezugabe im Unterwasser der Entlastung

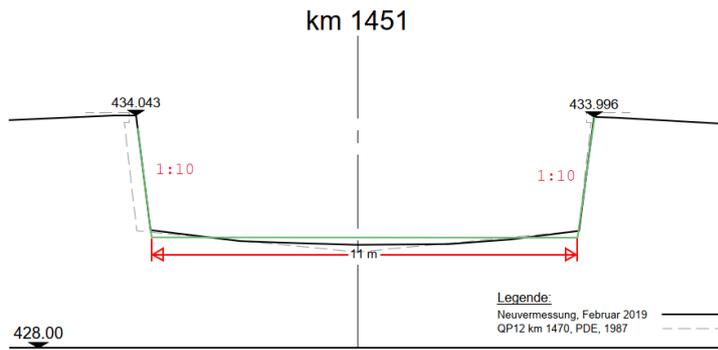


Abbildung 11: Querprofil Schüsskanal (km 1.452), Vermessung aus Emch+Berger AG Bern (2019) in schwarz, Approximation des Querprofils in grün

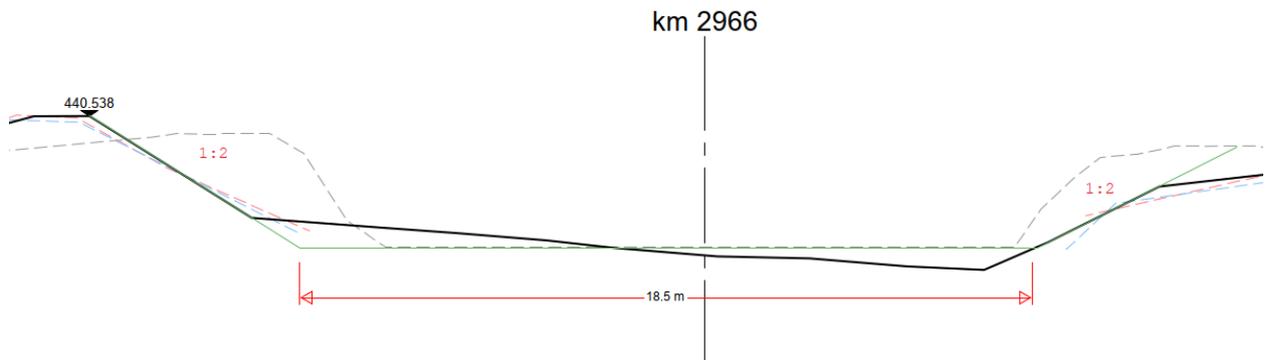


Abbildung 12: Querprofil Schüssinsel (km 2.966), Vermessung aus Emch+Berger AG Bern (2019) in schwarz, Approximation des Querprofils in grün

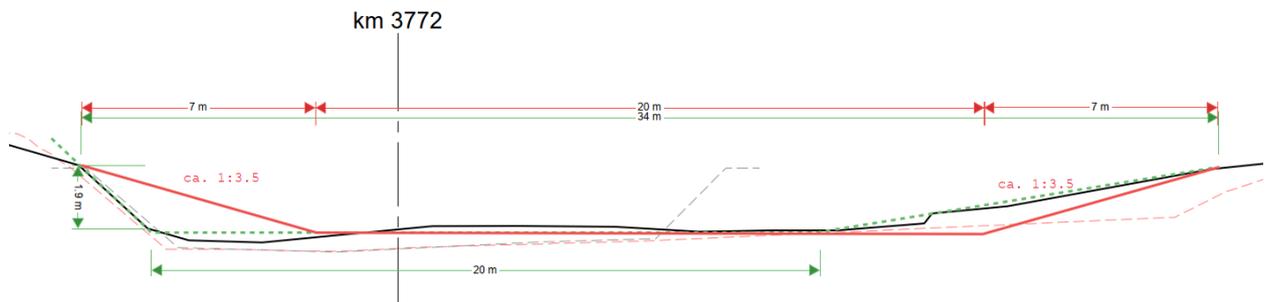


Abbildung 13: Querprofil Renferareal (km 3.772), Vermessung aus Emch+Berger AG Bern (2019) in schwarz, Approximation des Querprofils in grün, symmetrische Approximation in rot

3 Resultate

3.1 Modellverifikation

Abbildung 14 zeigt die berechneten Wasserspiegellagen für Sohlenrauigkeiten von $k_{st} = 20$ bis $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ sowie die hergeleitete PQ-Beziehung der Messstation A067.1. Die Resultate zeigen deutlich, dass die berechneten Wasserspiegellagen für alle angewendeten Rauigkeiten und Abflüsse 1 bis $60 \text{ m}^3/\text{s}$ tiefer als die gemessenen Pegel liegen.

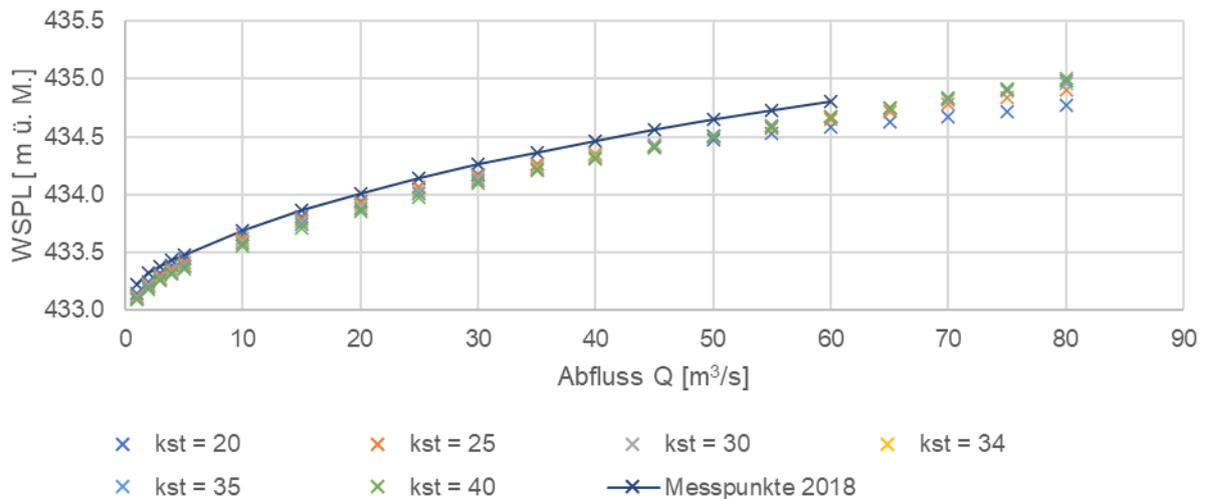


Abbildung 14: Vergleich der berechneten Wasserspiegellagen mit den Messdaten der Messstation A067.1 für verschiedene Abflüsse und modellierte Sohlenrauigkeiten $k_{st} [\text{m}^{1/3}/\text{s}]$

Die Abweichung ΔWSPL (berechnet – gemessen) liegt im Median zwischen -8 cm ($k_{st} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) und -15 cm ($k_{st} = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, Abbildung 15). Das Modell mit Sohlenrauigkeit $k_{st} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erzielt Werte, die im Mittel und Median am nächsten an der PQ-Beziehung der Messstation A067.1 liegen. Die Streuung für rauere Sohlen ist jedoch signifikant höher. Die geringste Streuung wird für Sohlenrauigkeiten $k_{st} = 34$ und $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erreicht.

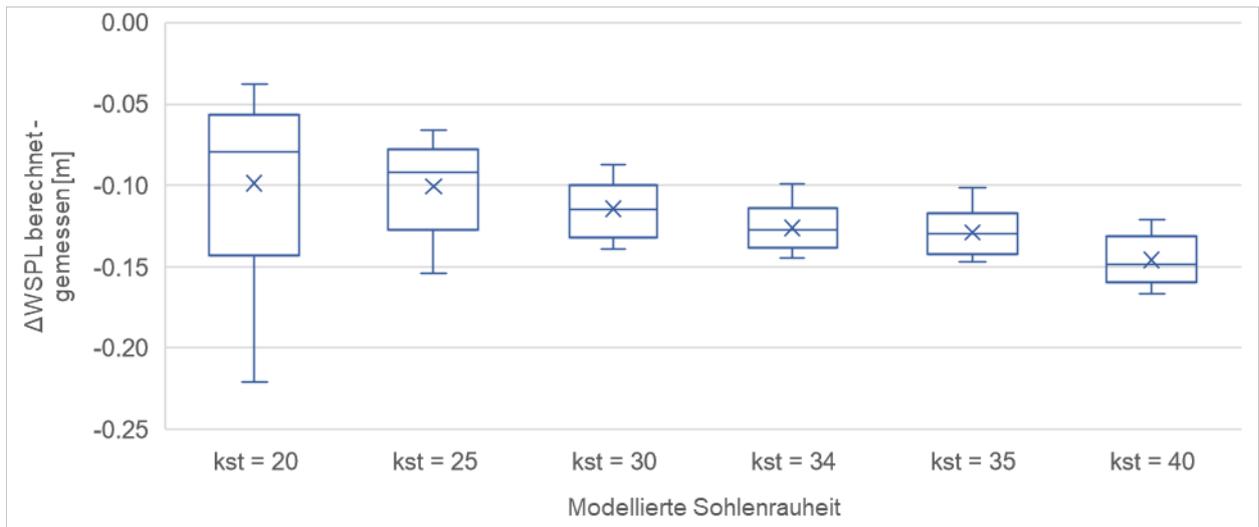


Abbildung 15: Statistische Auswertung der Differenz zwischen berechneter und gemessener Wasserspiegellagen für verschiedene modellierte Sohlenrauigkeiten k_{st} [$m^{1/3}/s$]

3.2 Abflusskapazität

Die resultierenden Wasserspiegelverläufe zeigen, dass im heutigen Zustand die Brücke Neumarktstrasse massgebend für die Hochwassersicherheit ist (Abbildung 16, Stationierung 1'452 m). Aufgrund der tiefliegenden Brückenunterkante (433.25 m ü. M.) bildet die Brücke das Nadelöhr der Schüss innerhalb des Stadtzentrums von Biel/Bienne. Die Bestimmung der Abflusskapazität erfolgte deshalb an diesem Querschnitt.

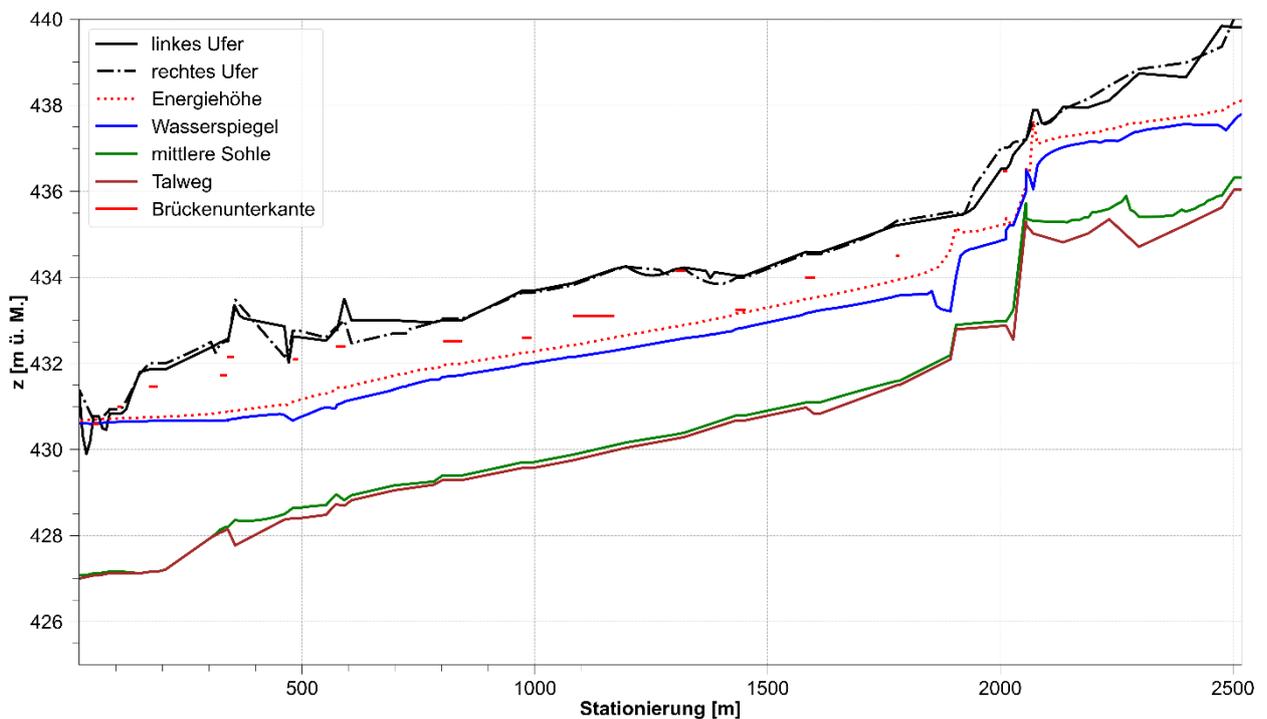


Abbildung 16: Hydraulisches Längenprofil für Sohlenrauigkeit $k_{st} = 34 m^{1/3}/s$ und $Q = 60 m^3/s$

Für verschiedene Sohlenrauigkeiten $k_{st} = 20$ bis $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und unter Einbezug des erforderlichen Freibords wurde die maximale Abflusskapazität bestimmt. Abbildung 17 oben zeigt die Abflusskapazitäten und die erforderlichen Freiborde unter Vernachlässigung des Teil-Freibords für Schwemmholz. In Abbildung 17 unten ist dieser Teil-Freibord (0.30 m für glatte, 0.50 m für raue Brückenuntersichten) zusätzlich berücksichtigt und führt zu einer Reduktion der Abflusskapazität um ca. $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Mit der Variation der Unschärfe in der massgeblichen Sohlenlage wird den Szenarien im Ist-Zustand (0.0 m) und nach Geschiebesanierung und Revitalisierung (0.2 resp. 0.4 m) Rechnung getragen. Abhängig von der Sohlenrauigkeit und den gewählten Teil-Freiborden resp. von den geforderten Sicherheitsanforderungen weist dieser Querschnitt eine Abflusskapazität von 35 bis max. $60 \text{ m}^3/\text{s}$ auf.

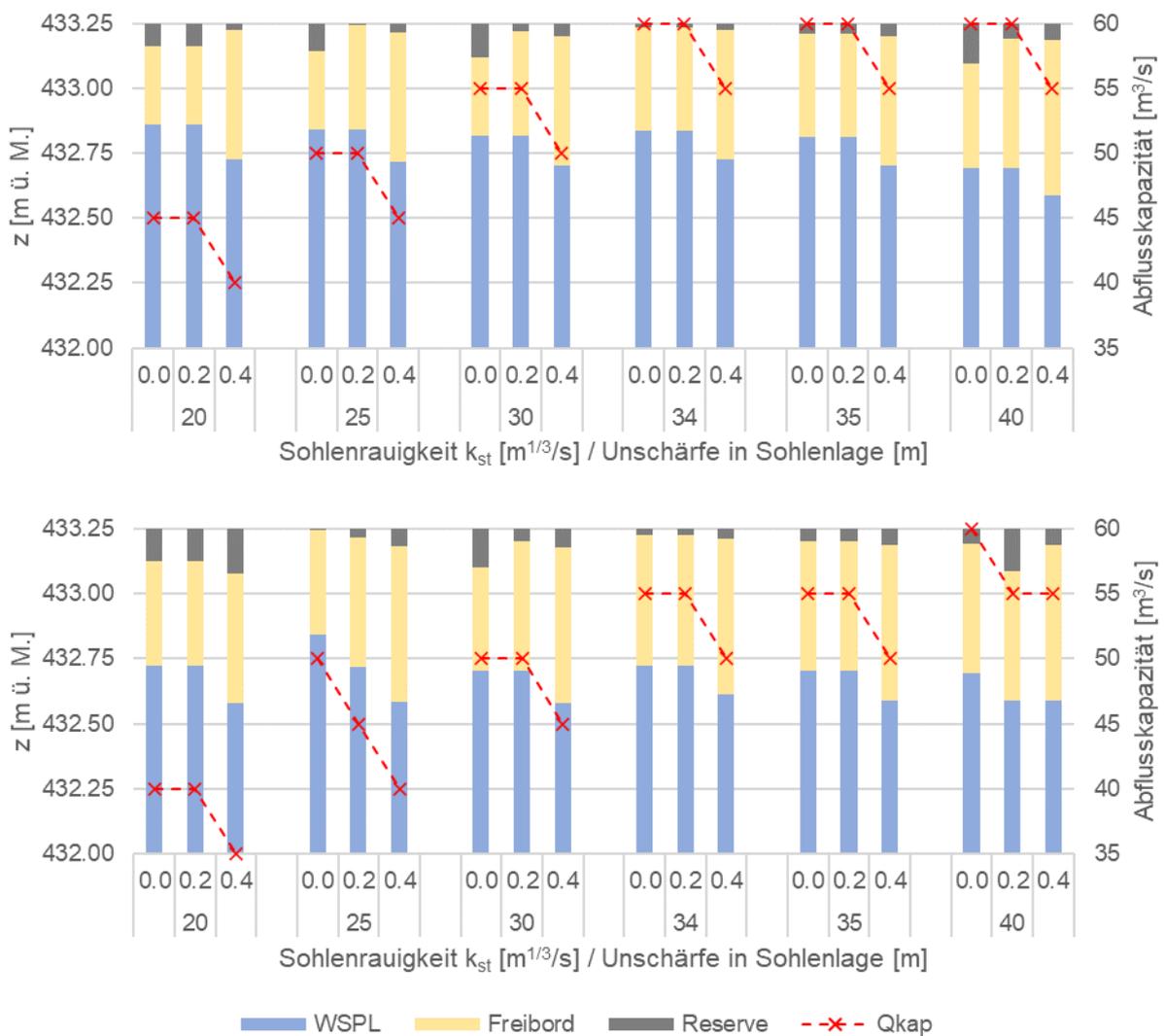


Abbildung 17: Wasserspiegellagen und Abflusskapazität unter Einhaltung des erforderlichen Freibords (oben: exkl. Schwemmholzanteil, unten: inkl. Schwemmholzanteil) für verschiedene Sohlenrauigkeiten ($k_{st} = 20 - 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) und massgebliche Unschärfen in Sohlenlage (0.0 – 0.4 m) im Querprofil Neumarktstrasse (GEWISS km 1.452)

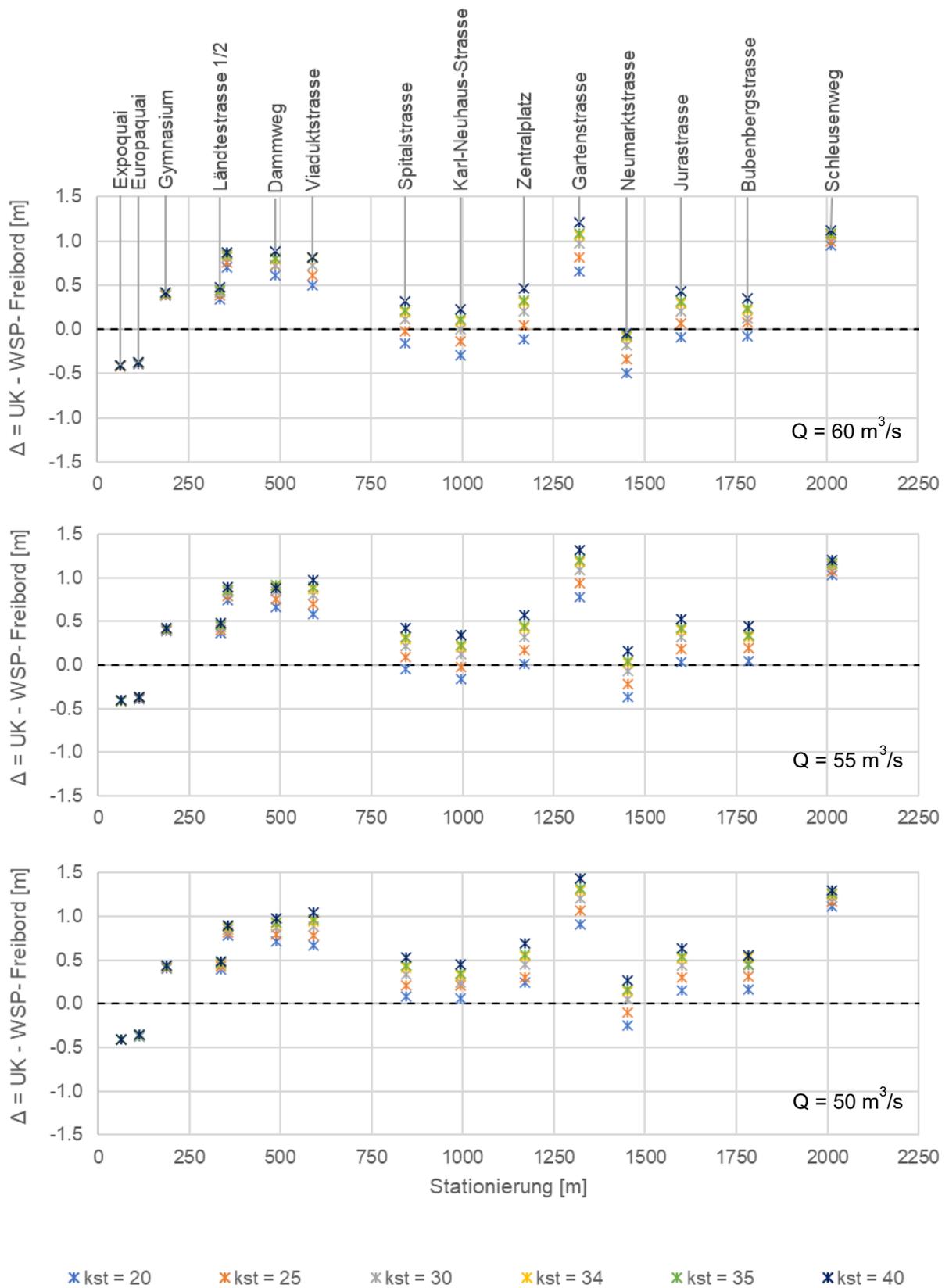


Abbildung 18: Berechnete Reserven für verschiedene Sohlenrauigkeiten in den Brückenquerschnitten für Abflüsse Q = 50, 55 und 60 m³/s unter Berücksichtigung des Teil-Freibords für Schwemmholz und Unschärfe in der Sohlenlage von 0.20 m

Anhand Abbildung 18 lassen sich die Abschnitte in Abhängigkeit ihrer Sensitivität auf die Sohlenrauigkeit ausweisen. Für Drosselabflüsse von $Q = 60$ bis $50 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt in den Bereichen Schleusenweg und Gartenstrasse sowie im Abschnitt Viaduktstrasse bis Gymnasium für alle betrachteten Rauigkeiten und Unschärfen in der Sohlenlage eine genügende Abflusskapazität vor. Im Abschnitt Bubenberg- bis Jurastrasse kann die Abflusskapazität inkl. Freibord für eine maximale Sohlenrauigkeit von $k_{st} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ bis zu einem Drosselabfluss von $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ gewährleistet werden. Bei höherem Drosselabfluss ist die Sohlenrauigkeit auf 25 bis $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ zu reduzieren. Im Abschnitt Zentralplatz bis Spitalstrasse wird die Abflusskapazität inkl. Freibord für eine maximale Sohlenrauigkeit von $k_{st} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ bis zu einem Drosselabfluss von $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ gewährleistet. Für höhere Abflüsse ist die Kapazität für eine maximale Sohlenrauigkeit $k_{st} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ resp. $34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gegeben. Die Brücken Euro- und Expoquai liegen im Einstaubereich des Bielersees mit $HW_{30} = 430.60 \text{ m}$ ü. M. und weisen deshalb für alle in Abbildung 18 betrachteten Szenarien einen ungenügenden Freibord auf.

3.3 Geschiebetransportkapazität

3.3.1 Laufendes Geschiebe

Das laufende Geschiebe mit mittlerem Korndurchmesser $d_m = 0.02 - 0.03 \text{ m}$ wird bei einer Geschiebezufuhr aus dem Oberwasser bereits ab Abflüssen von ca. $13 - 26 \text{ m}^3/\text{s}$ beim Renferareal, ca. $12 - 23 \text{ m}^3/\text{s}$ bei der Schüssinsel sowie $7 - 13 \text{ m}^3/\text{s}$ im Schüsskanal weitertransportiert.

Die berechneten Geschiebefrachten nach Wong & Parker (2006) unter Annahme einer Geschiebezugabe im Oberwasser gleich der Transportkapazität liegen zwischen $87 \text{ m}^3/\text{a}$ (Renferareal, trockenes Jahr, $d_m = 0.03 \text{ m}$) und $29'708 \text{ m}^3/\text{a}$ (Schüsskanal, nasses Jahr, $d_m = 0.02 \text{ m}$). Alle berechneten Frachten sind in Tabelle 6 erfasst. Die Transportkapazität ist sehr hoch und meist $> 500 \text{ m}^3/\text{a}$. Dieser Wert wird ausschliesslich im trockenen Jahr und für $d_m = 0.03 \text{ m}$ unterschritten. Im trockenen Jahr ist die Transportkapazität sowohl bei der Schüssinsel wie auch beim Renferareal kleiner der erforderlichen Fracht von $260 - 325 \text{ m}^3/\text{a}$.

Tabelle 6: Berechnete Geschiebefrachten nach Wong & Parker (2006) für die mittlere Dauerkurve sowie ein nasses und trockenes Jahr

Geschiebefrachten [m ³ /a]	Schüsskanal			Schüssinsel			Renferareal		
	mittel	nass	trocken	mittel	nass	trocken	mittel	nass	trocken
$d_{m,1} = 0.02 \text{ m}$	15'529	29'708	4'213	6'675	15'572	1'597	4'905	11'854	1'157
$d_{m,2} = 0.03 \text{ m}$	5'591	12'971	1'333	1'033	4'438	188	571	2'960	87

Die Reduktion der Geschiebefracht in Abhängigkeit des Drosselabflusses $Q = 35$ bis $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ist in Abbildung 19 für die drei untersuchten Querschnitte Schüsskanal, Schüssinsel und Renferareal ersichtlich. Die Geschiebekapazität beim Renferareal ist durch eine Abflussreduktion am stärksten betroffen: die Geschiebefracht wird im mittleren Jahr für Szenario 1 um ca. 10 bis 35 %, und für Szenario 2 um ca. 30 bis 70 % reduziert. Wird während der Abflussdrosselung kein Geschiebe transportiert (Szenario 2), wird die für die Geschiebesanierung geforderte jährliche Fracht von 260 bis 325 m^3 ab einem Drosselabfluss von $40 \text{ m}^3/\text{s}$ unterschritten. Wird während der Drosselung der Geschiebetransport entsprechend der Transportkapazität des Drosselabflusses aufrechterhalten (Szenario 1), wird die erforderliche Fracht nicht als Folge der Drosselung unterschritten. Bei der Schüssinsel wird die Fracht im mittleren Jahr um bis zu 60 % und im Schüsskanal bis zu 25 % reduziert. Unabhängig vom Drosselabfluss wird die erforderliche Fracht in beiden Querschnitten erreicht.

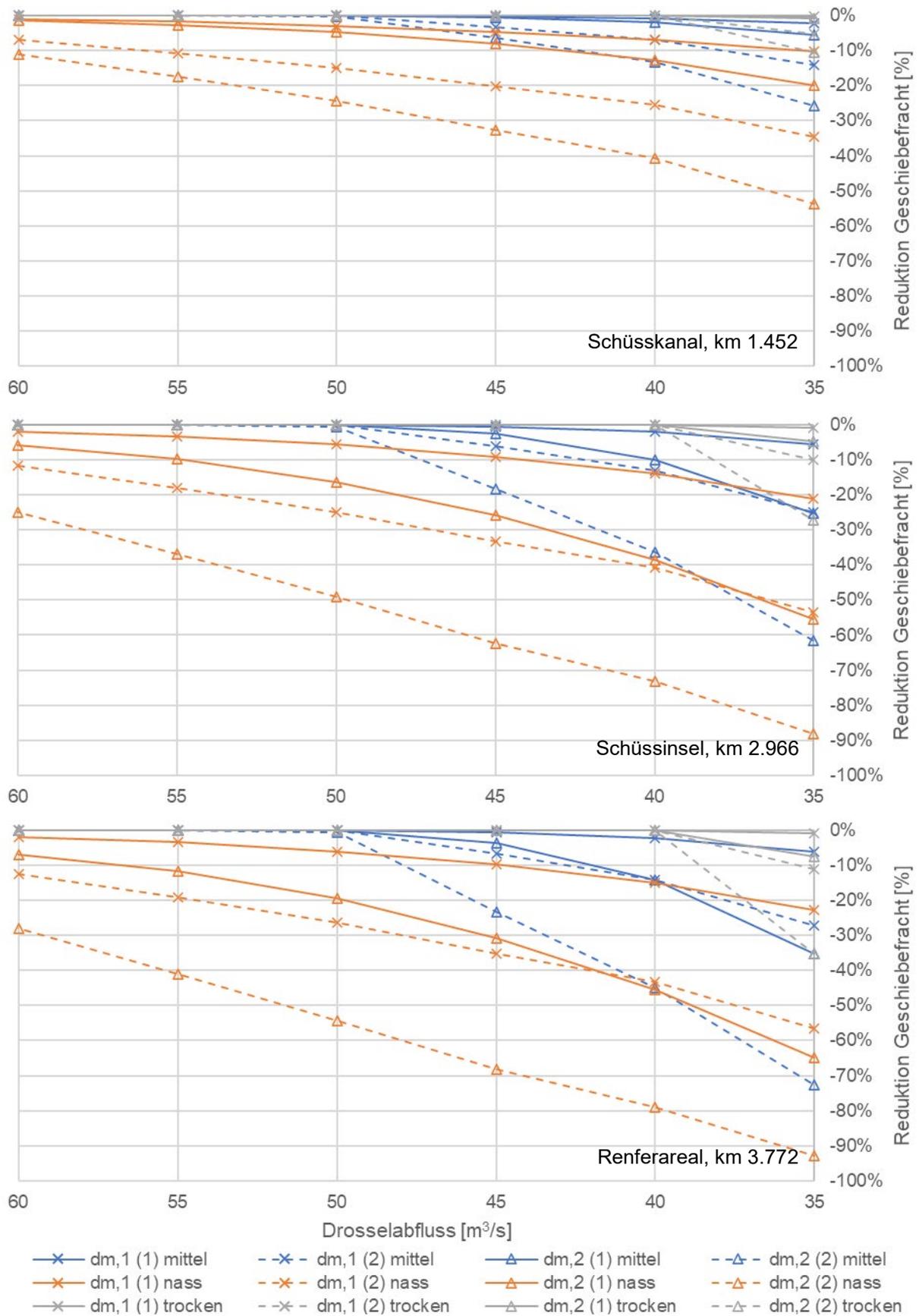


Abbildung 19: Reduktion der Fracht des laufenden Geschiebes [%] in Abhängigkeit des Drosselabflusses (Referenz Geschiebefracht für nicht gedrosselten Abfluss, Tabelle 6) für die mittlere Dauerkurve (blau) sowie ein nasses (orange) und trockenes Jahr (grau) für die Szenarien (1) und (2) nach Kap. 2.7

3.3.2 Unterschicht

Die Unterschicht mit mittlerem Korndurchmesser $d_m = 0.045 - 0.052$ m wird bei einer Geschiebezufuhr aus dem Oberwasser ab Abflüssen von ca. $52 - 67$ m³/s beim Renferareal, ca. $46 - 59$ m³/s bei der Schüssinsel sowie $24 - 30$ m³/s im Schüsskanal weitertransportiert. Ein Aufreissen der Deckschicht aus Unterschichtsmaterial mit Durchmesser $d_{90} = 0.106$ m erfolgt ab Abflüssen von ca. $144 - 158$ m³/s beim Renferareal, ca. $123 - 134$ m³/s bei der Schüssinsel sowie $57 - 62$ m³/s im Schüsskanal.

Die berechneten Geschiebefrachten nach Wong & Parker (2006) unter Annahme einer Geschiebezufuhr im Oberwasser gleich der Transportkapazität liegen zwischen 0 m³/a und $3'823$ m³/a (Schüsskanal, nasses Jahr, $d_m = 0.02$ m, s. Tabelle 7). Die Transportkapazität insbesondere im Bereich Renferareal und Schüssinsel ist gering und im mittleren sowie im trockenen Jahr findet wenig bis keinen Transport statt. Im Schüsskanal ist die Transportkapazität bedeutend grösser mit $27 - 3'823$ m³/a. Die stabile Deckschicht einer nicht vollständig kolmatierten, nicht gesicherten Sohle reisst ausschliesslich im Schüsskanal während eines nassen Jahres auf. Es resultiert eine Transportkapazität von $659 - 1'049$ m³/a.

Tabelle 7: Berechnete Geschiebefrachten der Unterschicht nach Wong & Parker (2006) für die mittlere Dauerkurve sowie ein nasses und trockenes Jahr

Geschiebefrachten [m ³ /a]	Schüsskanal			Schüssinsel			Renferareal		
	mittel	nass	trocken	mittel	nass	trocken	mittel	nass	trocken
Geschiebezufuhr flussaufwärts									
$d_{m,1} = 0.045$ m	897	3'823	162	4	438	0	0	177	0
$d_{m,2} = 0.052$ m	309	2'145	27	0	87	0	0	16	0
Deckschicht ($d_{90} = 0.106$ m)									
$d_{m,1} = 0.045$ m	0	1'049	0	0	0	0	0	0	0
$d_{m,2} = 0.052$ m	0	659	0	0	0	0	0	0	0

Die Reduktion der Geschiebefracht in Abhängigkeit des Drosselabflusses $Q = 35$ bis 60 m³/s ist in Abbildung 20 für die drei untersuchten Querschnitte Schüsskanal, Schüssinsel und Renferareal ersichtlich. Im Schüsskanal wird in Szenario 1 die Geschiebefracht im Mittel um ca. 25 bis 60 %, und in Szenario 2 um 60 bis 90 % reduziert. Bei der Schüssinsel und dem Renferareal wird der Geschiebetransport der Unterschicht ab einem Drosselabfluss von ca. 45 m³/s resp. 50 m³/s komplett unterbunden.

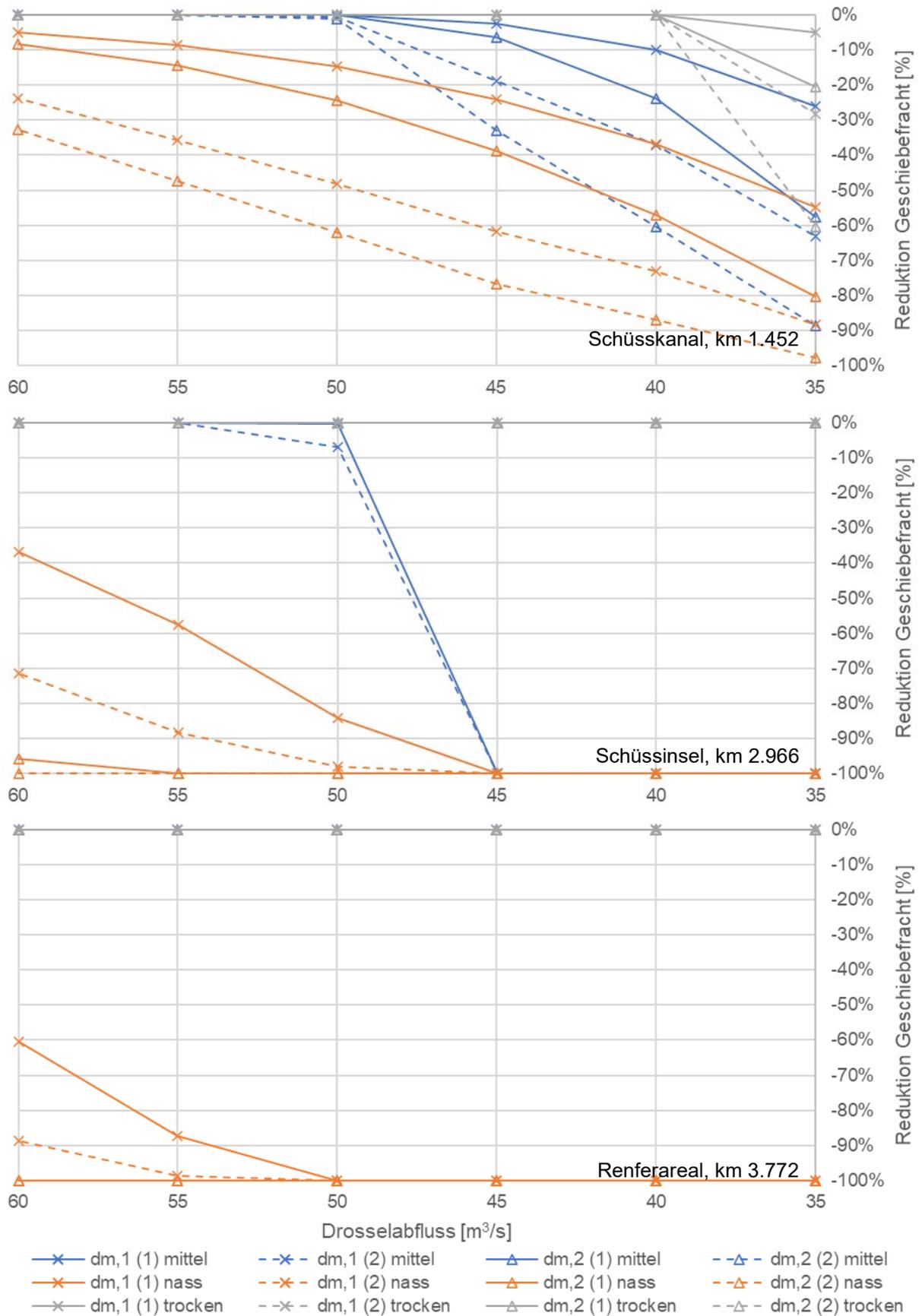


Abbildung 20: Reduktion der Geschiebefracht der Unterschicht [%] in Abhängigkeit des Drosselabflusses (Referenz Geschiebefracht für nicht gedrosselten Abfluss und Geschiebezugabe flussaufwärts, Tabelle 7Tabelle 6) für die mittlere Dauerkurve (blau) sowie ein nasses (orange) und trockenes Jahr (grau)

4 Diskussion

4.1 Verifikation und Modellgenauigkeit

Die Verifikation am Querprofil der Messtation A067.1 zeigt, dass die berechneten Wasserspiegellagen stets tiefer als die Messdaten liegen. Neben der Messgenauigkeit ist die Modellgenauigkeit massgebend für diese Abweichungen. Das Querprofil der Messtation, GEWISS km 1.944, aus dem Modell von Emch+Berger AG (2022) basiert nicht auf Vermessungsdaten, sondern wurde anhand des Querprofils km 2.002 und Annahmen in Sohlenlage und Uferhöhe angenähert. Eine engmaschigere Vermessung ermöglichte die Reduktion solcher Modellunsicherheiten, Abweichungen von 10 – 15 cm (Abbildung 15) liegen aber in einem vertretbaren Rahmen.

Aufgrund der geringen Streuung der Resultate für die Stricklerwerte $k_{St} = 34$ und $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ werden diese Simulationen als Annäherung des Ist-Zustandes angenommen. Diese Annahme wird zusätzlich auf der von Strickler postulierten Relation $k_{St} = 21.1/\sqrt[6]{d_{90}}$ für die charakteristischen Korndurchmesser d_{90} gestützt. Die Stricklerwerte $k_{St} = 34$ und $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ entsprechen dem charakteristischen Korndurchmesser $d_{90} = 4.7 - 5.8 \text{ cm}$ (Kapitel 2.7). Eine weitere Kontrollgrösse bietet das dokumentierte Ereignis vom August 2007 mit $Q_{max} = \text{ca. } 78 \text{ m}^3/\text{s}$. Während dieses Ereignisses erreichte der Wasserspiegel die Unterkante der Brücke Neumarktstrasse (Abbildung 7, links). Die Berechnungsergebnisse mit $k_{St} = 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ zeigen für $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Wasserspiegellage wenige Zentimeter unterhalb, und für $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ wenige Zentimeter oberhalb dieser Brückenunterkante.

4.2 Abflusskapazität im Ist-Zustand

Laut den Nachforschungen im Rahmen der Gefahrenkarte trat in der Stadt Biel/Bienne bisher keine sicherheitsrelevante Menge Schwemmholz während eines Ereignisses auf (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020). Dies wurde ebenfalls durch Jörg Bucher (2022), Oberingenieurkreis III des Kantons Bern bestätigt. Für HQ_{30} wird der Schwemmholzanfall als «unwesentlich», und für HQ_{100} als «gering» eingestuft, weshalb die Verkläusungsszenarien in der Gefahrenkarte ab Abflüssen grösser HQ_{30} berücksichtigt wurden, d.h. ab Abflüssen $Q > 82 \text{ m}^3/\text{s}$ (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020). Das Schwemmholzaufkommen nimmt mit der Grösse des Hochwasserereignisses zu. Eine Reduktion des Spitzenabflusses mittels Hochwasserentlastung oberhalb der Taubenlochschlucht reduziert das Potential für Schwemmholzeintrag in Biel/Bienne. Da alle betrachteten Drosselabflüsse kleiner als $82 \text{ m}^3/\text{s}$ sind, wird eine geringe Menge Schwemmholz anfallen. Diese Aussage wird durch den von

Rickenmann (1997) postulierten Ansatz gestützt, welcher das Schwemmholzaufkommen in Abhängigkeit der Wasserfracht formuliert. Aufgrund des hohen Schadenpotentials in der Stadt ist ein Sicherheitszuschlag für Schwemmholz durchaus sinnvoll, und die Anforderungen diesbezüglich sind mit der kantonalen Fachstelle zu definieren. Im heutigen Zustand weist der Schüsskanal eine ebene, stark kolmatierte Sohle mit intakter Sohlensicherung auf. Damit ist für die Freibordberechnung im Ist-Zustand die Unschärfe in der massgebliche Sohlenlage 0.0 m (Tabelle 3). Damit ist im heutigen Zustand in Abhängigkeit der Schutzanforderungen bzgl. Schwemmholz eine Abflusskapazität von 55 – 60 m³/s gegeben. Im Vergleich zum üblichen Schutzziel für Siedlungsraum HQ₁₀₀ = 103 m³/s ist das Hochwasserschutzdefizit signifikant.

4.3 Aufwertungspotential

Durch Strukturierungsmassnahmen, berücksichtigt über die Sohlenrauigkeit, werden in Abhängigkeit der Freibordberechnung Abflusskapazitäten zwischen 35 – 55 m³/s berechnet. Eine Unschärfe in der massgeblichen Sohlenlage von 0.4 m wird allerdings als unrealistisch eingestuft, da der kanalisierte Querschnitt eine sehr hohe Geschiebetransportkapazität aufweist und mit geringen Auflandungen zu rechnen ist. Im Rahmen der Naturgefahrenkarte (Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG, 2020) wurde in den revitalisierten Gewässerabschnitten eine Unschärfe in der Sohlenlage von 0.2 m angenommen, wobei die Auflandungstendenz der betroffenen Abschnitte Schüssinsel und Renferareal bedeutend grösser ist als im Schüsskanal. Somit wird in Abhängigkeit der Schutzanforderungen bzgl. Schwemmholz die Abflusskapazität nach Revitalisierungsmassnahmen auf 40 m³/s ($k_{st} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) bis 55 m³/s ($k_{st} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) geschätzt.

Die Aufwertungsmassnahmen, wie zusätzliche Bestockung, Totholzstrukturen, Lenkbuhnen u.ä., wurden mittels erhöhter Sohlenrauigkeit berücksichtigt. Veränderungen in der Sohlenlage durch die Massnahmen werden damit vernachlässigt. Ein Ausbruch aus der monotonen, ebenen Flusssohle und Bildung von Tiefenvariabilität ist eine Grundvoraussetzung für die Erhöhung der Habitatvielfalt. Auch im Hinblick auf den Klimawandel ist neben erhöhter Beschattung die Ausbildung eines Talwegs und damit ein konzentrierter Abfluss bei Niedrigwasser von zentraler Rolle um erhöhte Temperaturen zu verhindern und die Längsvernetzung auch bei Trockenwetter zu gewährleisten (Aeschlimann, 2021) (Eawag, 2013). Auch ist die Interaktion zwischen Bereichen unterschiedlicher Sohlenrauigkeiten mit dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Die in Abbildung 18 gezeigten Reserven dienen deshalb nur der Orientierung und basierend auf detaillierter Projektierung ist die Hydraulik zu überprüfen.

4.4 Geschiebetransportkapazität

Für das laufende Geschiebe wurden sehr hohe jährliche Geschiebefrachten berechnet, meist deutlich grösser $1'000 \text{ m}^3/\text{a}$. Diese Beobachtung kann durch Hunziker, Zarn & Partner AG (2021) bestätigt werden, in ihrer Geschiebestudie wurden ebenfalls Frachten $>1000 \text{ m}^3/\text{a}$ für die Schüss im Stadtgebiet dokumentiert. Die Unterschreitung dieser Grösse tritt hauptsächlich im betrachteten trockenen Jahr mit maximalem Abfluss von ca. $38 \text{ m}^3/\text{s}$ auf (Tabelle 6). In diesem Jahr traten keine kleinen Hochwasser $H_{Q_{2-5}}$, im Falle der Schüss ca. $40 - 53 \text{ m}^3/\text{s}$, welche für den Geschiebetransport massgebend sind, und bestätigt damit deren Relevanz.

Die Transportkapazität des Unterschichtmaterials ist signifikant kleiner und ein massgebender Transport ist im Bereich der Schüssinsel und des Renferareals ausschliesslich während des nassen Jahres gegeben. Die Werte aus Tabelle 7 können durch Hunziker, Zarn & Partner AG (2021) grösstenteils bestätigt werden. In ihrer Studie wurde für eine Dauerkurve mit $Q_{\text{max}} = \text{ca. } 60 \text{ m}^3/\text{s}$ im Bereich des Renferareals eine Transportkapazität von $160 - 170 \text{ m}^3/\text{a}$, bei der Schüssinsel von $360 - 370 \text{ m}^3/\text{a}$ und im Schüsskanal von ca. $590 \text{ m}^3/\text{a}$ ermittelt. Die Abweichung lässt sich einerseits daraus ableiten, dass in der Studie für den Abschnitt ab Hauserwehr ein geringeres Sohlgefälle ausgewiesen wurde. Andererseits ist die Methodik massgebend. In dieser Arbeit basieren die Geschieberegnerungen auf drei vereinfachten Querprofile mit einer ebenen Sohle von konstanter Breite sowie unter Vernachlässigung der bereits eingebauten Sohlenstrukturierung. In Abbildung 12 und Abbildung 13 ist ersichtlich, dass die Sohle an diesen Stellen nicht eben ist. Insbesondere für kleinere Abflüsse wird ein erhöhter Geschiebetrieb entlang des Talwegs erwartet. Dies wird einerseits durch den Ansatz für kleine Abflusstiefen- zu Breitenverhältnisse aus Bezzola (2017) gestützt, nach welchem die dimensionslose Sohlenschubspannung und damit die Transportkapazität mit der Abflusstiefe zunimmt. Andererseits führen variable Abflusstiefen zu lokal erhöhten Fliessgeschwindigkeiten und damit zu erhöhtem Geschiebetransport (Francalanci, Solari, Toffolon, & Parker, 2012). Weiter wurde für alle Querschnitte dieselbe Ganglinie, gemessen unterhalb des Hauserwehres, für die Berechnungen verwendet. Da beim Hauserwehr der Abfluss in drei Arme geteilt wird, ist der Abfluss im oberliegenden Abschnitt höher und der Geschiebetransport im Bereich des Renferareals und der Schüssinsel wird weiter unterschätzt. Das Systemverhalten in beiden Untersuchungen ist jedoch dasselbe: Der Bereich Renferareal ist massgebend und bei erhöhtem Eintrag von Unterschichtmaterial kommt es zu Ablagerungen (ca. $160 - 170 \text{ m}^3/\text{a}$ nach Hunziker, Zarn & Partner AG (2021) und Tabelle 7, Geschiebezugabe flussaufwärts für $d_{m,1}$).

Aufgrund der stark kolmatierten Sohle und der intakten Sohlensicherung ist die Sohle im Schüsskanal stabil und ein Aufreissen der Deckschicht, wie sie in Kapitel 3.3.2 ermittelt wurde, ist im heutigen Zustand unrealistisch. Auch ist der Geschiebeeintrag in den Schüsskanal durch den Abschnitt Renferareal limitiert, so dass die Geschiebetransportkapazität im heutigen Zustand nie erreicht wird. Auch nach Umsetzung der Geschiebesanierung wird die zugeführte Fracht kleiner der Geschiebekapazität sein. Nach Ausführung der Revitalisierungsmassnahmen wird keine stabile Deckschicht mehr vorhanden sein, weshalb die Sohlenerosion mittels Fixpunkte zu sichern ist.

4.5 Hochwasserschutz, Strukturierungselemente und Geschiebe

Eine umfangreiche gewässerökologische Aufwertung mit Strukturierungselementen des gesamten Schüsskanals bewirkt eine starke Erhöhung der Sohlenrauigkeit und erfordert eine starke Reduktion des Spitzenabflusses bis $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Dies zeigen die Resultate der Simulation mit sehr hoher Sohlenrauigkeit. Ein solch drastischer Eingriff ist aus Sicht Geschiebetransport unzulässig. Empfehlenswert ist eine Drosselung, so dass die Abflüsse und damit der Geschiebetrieb in einem mittleren Jahr unbeeinflusst sind, d.h. für die Schüss ein Abfluss von grösser $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Vom Renferareal bis zum Schüsskanal wurde für den Drosselabfluss von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Transportkapazität $>400 \text{ m}^3/\text{a}$ für das laufende Geschiebe bestimmt. Da zusätzlich das Hauserwehr für laufendes Geschiebe als durchgängig gilt (Hunziker, Zarn & Partner AG, 2021), wird das laufende Geschiebe bis zum Bielersee durchtransportiert und die erforderliche Fracht wird erreicht.

Um in den revitalisierten Abschnitten die Bildung einer stabilen Deckschicht und vollständiger Kolmation längerfristig zu verhindern, müssen Abflüsse von mind. $52 - 67 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Schüss auftreten. Falls es zur Deckschichtbildung kommt, sind sehr hohe Abflüsse ($>HQ_{100}$) erforderlich, um die Deckschicht aufzureissen. Unabhängig vom Drosselabfluss sind deshalb Strukturierungsmassnahmen wie bspw. Lenkbuhnen und Strömungstrichter empfehlenswert, die den Abfluss konzentrieren, zur Ausbildung eines deutlichen Talwegs mit erhöhten Fliessgeschwindigkeiten führen und Geschiebe umlagern (Mende, Huber, Schlienger, & Studer, 2017).

Die für die Geschiebesanierung geforderte Massnahme zur durchgängigen Ausbildung der Geschiebesammler und damit die Erhöhung des Geschiebeeintrags stehen nicht im Konflikt mit dem Hochwasserschutz sofern das laufende Geschiebe mit $d_m = 0.02 - 0.03 \text{ m}$ massgebend ist. Auch bei Drosselung auf die heutige Abflusskapazität von $55 - 60 \text{ m}^3/\text{s}$ wird die erforderliche Fracht von $260 - 325 \text{ m}^3/\text{a}$ erreicht. Bei erhöhtem Eintrag aus Unterschichtmaterial hingegen

kommt es zu Ablagerungen im Bereich Renferareal und Schüssinsel, und die Fracht wird nicht bis zur Mündung durchtransportiert. Durch die Kombination von Hochwasserschutz, Revitalisierung und Geschiebesanierung kommt es zum Konflikt, da die erhöhte Rauigkeit infolge Revitalisierung im Schüsskanal eine weitere Reduktion der Hochwasserspitzte erfordert und damit die erforderliche Fracht nicht erreicht wird. Die Revitalisierungsmassnahmen sind entsprechend an den Engstellen sparsam einzusetzen und auf den Hochwasserschutz abzustimmen.

4.6 Fazit

Das Hochwasserschutzdefizit im Stadtzentrum ist signifikant. Mit einer Abflusskapazität von 55 – 60 m³/s im heutigen Zustand kann nur ca. 55 % eines HQ₁₀₀ mit den erforderlichen Sicherheitsanforderungen abgeführt werden. Revitalisierungsmassnahmen mit deutlicher Erhöhung der Sohlenrauigkeit führen zu einer weiteren Kapazitätsreduktion bis auf ca. 40 m³/s. Aus Sicht Geschiebesanierung ist eine Reduktion auf maximal 50 m³/s zulässig, damit die Abflüsse im mittleren Jahr unbeeinflusst bleiben und die erforderliche Fracht aus laufendem Geschiebe nach Geschiebesanierung erreicht wird. Um in den revitalisierten längerfristig eine Deckschichtbildung zu verhindern, ist eine Erhöhung des Drosselabflusses auf ca. 52 – 67 m³/s und der Einsatz von Sohlenstrukturierungen erforderlich. Die Revitalisierung des Schüsskanals ist deshalb abgestimmt auf den Hochwasserschutz und Geschiebetrieb in Abschnitten unterschiedlicher Ausprägung umzusetzen.

4.7 Ausblick

Mit dieser Arbeit wurden die Zusammenhänge zwischen Hochwasserentlastung und Geschiebetrieb unter gängigen Annahmen untersucht. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sind u.a. diese Fragen zu klären:

- Anforderungen an den Freibord
Die Freibordberechnungen basieren auf den Empfehlungen von KOHS (Kommission Hochwasserschutz, 2013). Die Sicherheitsanforderungen sind mit der kantonalen Fachstelle zu definieren. Auch ist die Option von Druckbrücken zu prüfen, wodurch eine deutlich höhere Abflusskapazität des Schüsskanals erreicht und der Geschiebetransport in der Auflandungsstrecke erhöht würde.
- Geschiebetransport
Der Geschiebetrieb ist unter Berücksichtigung der variablen Sohle und der bestehenden Sohlenstrukturierung detaillierter zu untersuchen. Die bestehende Sohlenstrukturierung im Bereich der Schüssinsel und des Renferareals sind hinsichtlich Geschiebeumlagerung und -transport zu prüfen, und ggf. zu optimieren oder ergänzen.

- Revitalisierungsmassnahmen im Schüsskanal

Die Massnahmen, wie Sohlenstrukturierungen, Bestockung und Unterstände sind zu projektieren und die Hochwassersicherheit für die konkrete Planung ist zu prüfen. Die Übergänge zwischen Abschnitten unterschiedlicher Ausprägung sind so auszugestalten und anzuordnen, dass infolge der Aufwertung kein zusätzlicher Rückstau in den sensitiven Bereichen auftritt.

5 Literaturverzeichnis

- Aeschlimann, A. (2021). Fischgerechter Wasserbau im Lichte des Klimawandels. *VAW Mitteilungen 263: Wasserbau-Symposium 2021 - Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel* (S. 539- 548). Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- Bau- und Verkehrsdirektion des Kantons Bern. (2019). Hydrologisches Jahrbuch. *Suze, Hauptkanal - Biel/Bienne, Hauserwehr*.
- Bau- und Verkehrsdirektion des Kantons Bern. (2022). Hydrologische Messdaten A067.1 Schüss, Hauserwehr, Biel/Bienne. Abgerufen am 14. 06. 2022
- Bezzola, G. R. (2017). Flussbau. *Vorlesungsmanuskript*. Zürich: ETH Zürich.
- Bucher, J. (2022). Telefongespräch vom 22.03.2022.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2021). SWISSIMAGE 10cm. Abgerufen am 19. 08 2022
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2022). *geo.admin.ch - Karten der Schweiz*. Abgerufen am 02. 04 2022 von <https://map.geo.admin.ch/>
- Bundesamt für Umwelt. (2020). *Geschiebehauhalt - Massnahmen, Modul der Vollzugshilfe Renaturierung Gewässer, V20 (in Bearbeitung)*.
- Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft. (03. 12. 2021). *Bundesamt für Umwelt*. Von Revitalisierungen: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/massnahmen-zum-schutz-der-gewaesser/renaturierung-der-gewaesser/revitalisierungen.html> abgerufen
- Eawag. (2013). *Priorisierung von Flussrevitalisierungsprojekten - Ökologische Aspekte der Priorisierung und Revitalisierungspotenzial*. Dübendorf.
- Emch+Berger AG. (24. 02 2022). HEC-RAS V6.1 Model der Schüss in Biel. Biel/Bienne.
- Emch+Berger AG Bern. (17. 04 2019). Schüss Biel - Nullmessung. *Situation 1:5'000, Querprofile 1:100*. Biel/Bienne.
- Emch+Berger AG, Kellerhals+Haefeli AG. (2020). *Naturgefahrenkarte Biel 2020*.
- Francalanci, S., Solari, L., Toffolon, M., & Parker, G. (2012). Do alternate bars affect sediment transport and flow resistance in gravel-bed rivers? *Earth Surface Processes and Landforms*, 866–875.
- Günter, A. (1971). *Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen*. Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

- Holinger AG. (2020). *Risikoanalyse und Massnahmenstudie Naturgefahrenkarte, Stadt Biel/Bienne*.
- Hunziker, Zarn & Partner AG. (2021). *Sanierung Geschiebehaushalt Schüss*.
- Kanton Bern. (10. 02. 2022). *Geoportal des Kantons Bern*. Von Gewässerentwicklung: https://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub_gekobe&userprofile=geo&client=core&language=de abgerufen
- Kommission Hochwasserschutz. (2013). Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen. *Wasser Energie Luft*, S. 43-53.
- Mende, M., Huber, A., Schlienger, S., & Studer, F. (2017). Verwendung von Lenkbuhnen im naturnahen Gewässerunterhalt am Beispiel der Kempt in Fehraltdorf / Kanton Zürich. *Ingenieurbiologie*, 4/17, 12-18.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for Bed-Load transport. *IAHSR 2nd meeting, appendix 2*, (S. 39-64). Stockholm.
- Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *wasser. energie, luft*, 89. Jahrgang, Heft 5/6, 115-119.
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. (29. 07 2014). BASEtool HECRAS2Basement. Zürich.
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. (2022). BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow. Version 3.2.0. ETH Zürich.
- Wong, M., & Parker, G. (2006). Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1159-1168.