

Lebendige Limmat

Beurteilung des Projekts „Limmat Schlieren, Hochwasserschutz und
Revitalisierung“ aus wasserbaulicher und flussmorphologischer Sicht

**Im Auftrag des Kantons
Zürich, Amt für Abfall,
Wasser, Energie und Luft,
Wasserbau**

Walcheplatz 2 8090 Zürich
Referenz-Nr.: 85W-723-02
GZ BAW-IWB 005/2025

Wien, 08.01.2025

Am Brigittenauer Sporn 3, 1200 Wien
Dipl.-Ing. Dr. Michael Hengl
michael.hengl@baw.at

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Auftrag.....	6
2 Unterlagen und Inhalte.....	8
2.1 Variantenstudium	8
2.2 Vorprojekt Stand Februar 2023	8
2.3 Bauprojekt	10
2.4 Informationen aus vertiefenden Fragen.....	11
2.5 Besichtigung und Besprechung vor Ort	12
3 Antworten zu den gestellten Fragen	14
3.1 Vorbemerkung	14
3.2 Ausdehnung der Aufweitung Betschenrohr	14
3.3 Initialisierung der Aufweitung	16
3.4 Aufweitungen in den Abschnitten Zelgli und Kloster Fahr / Werd (Inselkette, Anschluss Giessen)	18
3.5 Uferschutz.....	19
3.6 Überlastfall im Betschenrohr.....	24
3.7 Hochwasserdamm: Aufbau, Dichtungskern ja / nein	26
3.8 Strukturierungsmassnahmen mit Totholz sowie kombinierte Massnahmen	28
3.9 Flussteiler zu Beginn Betschenrohr und bei Fährhaus zur Aufteilung des Abflusses....	29
3.9.1 Flussteiler vor Aufweitung Betschenrohr	29
3.9.2 Flussteiler vor Aufweitung Zelgli / Fahr	33
3.10 Interaktion mit dem Grundwasserträger	34
3.11 Bedeutung des naturnahen Geschiebehaushalts für die «neuen» Auen	36
3.12 Einschätzung der langfristigen Dynamik: Natürlichkeitsgrad?.....	38
4 Ergänzende Anmerkungen zum Projekt.....	40
Literatur.....	44
Abkürzungen.....	45

Zusammenfassung

Dieses Dokument enthält die Meinung des Verfassers zum Projekt Lebendige Limmat zwischen der Brücke der Autobahn A1, Zürich-Oberengstringen und der Brücke Überlandstrasse, vorwiegend aus wasserbaulicher und flussmorphologischer Sicht. Als Grundlage dienten Unterlagen aus der Projektierung (Variantenstudium, Vorprojekt und Bauprojekt mit mehreren Planständen, zuletzt 7.11.2024) sowie eine Liste von Fragen des Auftraggebers. Am 29. und 30.5.2024 erfolgten eine Besichtigung des Projektgebiets und die Diskussion verschiedener Themen, die bereits in den zur Verfügung stehenden Letztstand der Pläne eingeflossen sind.

Kernstück des Projekts ist die Aufweitung Betschenrohr. Diese geplante Verbreiterung des Flussbetts der Limmat ist aus flussmorphologischer Sicht weder über- noch unterdimensioniert. Sie gibt der Limmat genau den erforderlichen Raum um eine nachhaltige morphologische Dynamik zu entwickeln und bildet damit die Grundlage um ein funktionierendes Fluss-Auen-Ökosystems von der Aquatik über sich regelmäßig erneuernde Pionierstandorte bis zum Auenwald zu bilden. Von diesem Kernlebensraum ist, gemeinsam mit den flussauf und flussab anschließenden kleineren morphologischen Verbesserungen, eine starke Strahlwirkung und damit Vernetzung von Lebensräumen an der Limmat zu erwarten. Neben der Verbesserung der ökologischen Funktion für Fauna und Flora im Gewässerraum wird sich auch die Erlebbarkeit und damit die Erholungsfunktion des Gebiets für die Mehrheit der Bevölkerung verbessern.

Eine nachhaltige Morphodynamik kann sich allerdings nur dann einstellen, wenn die Limmat von flussauf ausreichend Geschiebe in die Flussaufweitung transportiert. Bis zur Sanierung des Geschiebehaushalts könnte das derzeit bestehende Geschiebedefizit temporär auch mit Kies aus den Aufweitungen ausgeglichen werden, vorausgesetzt es stehen die entsprechenden Mengen zur Verfügung und können von der Logistik her über den erforderlichen Zeitraum verteilt der Limmat zur Verfügung gestellt werden.

Insgesamt ist die zur Verfügung gestellte Planung gut durchdacht. Trotzdem ergeben sich aus den wasserbaulichen und flussmorphologischen Erfahrungen des Autors Vorschläge für die weitere Planung und die Ausführung des Projekts. Einige dieser Empfehlungen wurden vielleicht bereits angedacht und sind nur noch nicht niedergeschrieben. Im Detail

sind alle Vorschläge in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben. In dieser Zusammenfassung werden nur kurz einige wesentliche Punkte erwähnt.

Es sind dies:

- ein Vorschlag für eine Entscheidungshilfe, wie mit der Frage des Überlastfalls umgegangen werden kann (Kap. 3.6),
- die vertiefte Untersuchung der Geologie in den Aufweitungsbereichen für die bessere Prognose der unterschiedlichen Erosionsdynamik in Kies und Sand mit Auswirkungen auf Uferschutz und Initiierung der Aufweitungen, Materialbilanz betreffend Kies, Sand usw. (Kap. 4),
- die Initialisierung der Aufweitung Betschenrohr, insbesondere die Beschränkung des Maschineneinsatzes auf das unbedingt notwendige Ausmaß und Setzen von Maßnahmen, die die eigendynamische Entwicklung fördern (Kap. 3.3)
- Angaben zum Uferschutz, z. B. Ausführung Längsverbau und einzelne Sicherungsmaßnahmen im Detail; je nach lokaler Situation werden teilweise Abminderungen und Verstärkungen vorgeschlagen (Kap. 3.5),
- der Einfluss von Schwemmholz und damit verbundene Verklausungen auf den Hochwasserspiegel und die Stabilität von Brückenpfeilern (Kap. 4), möglicher Einfluss auf den Flussteiler Betschenrohr (Kap. 3.9.1),
- Vorschläge für die Berücksichtigung einer über die derzeitige Planung hinausgehende Vegetationsentwicklung in Zusammenhang mit dem Klimawandel um den geplanten Hochwasserschutzgrad zu erhalten (Kap. 4),
- Hinweise betreffend eine verstärkte Exfiltration von der Limmat in den Grundwasserkörper über eigendynamische Uferbereiche (Kap. 3.10).

1 Auftrag

Das Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung des österreichischen Bundesamts für Wasserwirtschaft wurde am 3.4.2024 beauftragt das Projekt Lebendige Limmat aus wasserbaulicher und flussmorphologischer Sicht zu beurteilen (Auftrags-Referenz-Nr.: 85W-723-02). Als Basis für die Beurteilung sind das abgeschlossene Vorprojekt (Stand Februar 2023) und der aktuelle Stand der laufenden Erarbeitung des Bauprojekts zu verwenden.

Mit dem Projekt Lebendige Limmat ist geplant den Lauf der Limmat zwischen der A1-Brücke Zürich-Oberengstringen und der Brücke Überlandstrasse auf einer Länge von rund drei Kilometern zu verbreitern und neu zu gestalten um sowohl den Hochwasserschutz als auch die Ökologie und Erholungsnutzung im Projektperimeter zu verbessern. Im Abschnitt Betschenrohr soll wieder eine natürliche, sich selbst erneuernde Auenlandschaft entstehen, wie sie vor der Korrektur typisch für die Limmat war. Dazu gehören neben den aquatischen und amphibischen auch die terrestrischen Lebensräume. Insbesondere aus den Dimensionen des Projekts und dem damit verbundenen Raumbedarf für den in Zukunft deutlich breiteren Fluss ergeben sich Fragen, die aus externer Sicht, unabhängig von den am Planungsprozess direkt beteiligten Personen beleuchtet werden sollen. Es ist geplant die Antworten auf diese Fragen für Informationen an Politik und Bevölkerung im Rahmen des Bewilligungsprozesses zu verwenden.

Die auftraggebende Stelle formulierte den nachstehenden Fragenkatalog, der auf Basis der zur Verfügung gestellten Unterlagen und Informationen im Kapitel 3 aus wasserbaulicher und flussmorphologischer Sicht beantwortet wird. Dabei fließen auch Erfahrungen aus Hochwasserschutz- und Renaturierungsprojekten in Österreich ein.

Fragenkatalog:

1. Ausdehnung der Aufweitung Betschenrohr (Länge und Breite ausreichend / überdimensioniert zur Zielerreichung?). Verhältnismässigkeit der Massnahmen in Bezug auf den natürlichen Zustand der Limmat.
2. Initialisierung: Ausgewogen und zielführend bezüglich räumlicher und zeitlicher Zielerreichung?

3. Aufweitungen in den Abschnitten Zelgli und Kloster Fahr / Werd (Inselkette, Anschluss Giessen). Einschätzung der geplanten Massnahmen hinsichtlich Zielerreichung. Sind alternative Massnahmen denkbar?
4. Uferschutz: Ausgestaltung und Ausdehnung, Einsatz der verschiedenen Massnahmen. Festlegung von Beobachtungs- und Interventionslinien.
5. Überlastfall im Betschenrohr (Vor- und Nachteile von definierter Entlastungsstrecke versus überströmbaren Damm).
6. Hochwasserdamm: Aufbau, Dichtungskern ja / nein.
7. Strukturierungsmassnahmen mit Totholz sowie kombinierte Massnahmen: Ausgestaltung, Einsatz der verschiedenen Elemente.
8. Flussteiler zu Beginn Betschenrohr und bei Fährhaus zur Aufteilung des Abflusses (doppelt gekrümmte aufgelöste Sichelschwellen mit mittiger Insel). Wie wird die Wirkung eingeschätzt? Für Weidlinge passierbar? Werden Anpassungen empfohlen?
9. Interaktion mit dem Grundwasserträger: Einschätzung der Auswirkungen der Revitalisierung auf den Grundwasserträger im Limmattal.
10. Bedeutung des naturnahen Geschiebehaushalts für die «neuen» Auen
11. Einschätzung der langfristigen Dynamik: Natürlichkeitsgrad?

Ergänzend enthält das Kapitel 4 noch weitere Anmerkungen zum Projekt, die sich im Zuge der Bearbeitung des Fragenkatalogs ergeben haben.

2 Unterlagen und Inhalte

2.1 Variantenstudium

Dieser Teil umfasst Unterlagen mit Stand April 2022 (Technischer Bericht „Limmat Schlieren, Hochwasserschutz und Revitalisierung“, Teil C: Variantenstudium vom 13.4.2022).

Im Technischen Bericht und den Plandarstellungen enthalten sind Module (Varianten V1, V2 und V3 mit unterschiedlichen Aufweitungs- und Strukturierungsszenarien) und die aus den Modulen entwickelten fünf Projektvarianten (MAX – maximale Aufweitung, MIN – minimale Aufweitung, Kombinationen K1, K2 und K3). Die Variante K3 ist die zuletzt aus den vorangegangenen Planungen abgeleitete Bestvariante.

Die Hauptziele der Planung sind: Hochwasserschutz, Revitalisierung (Morphologie, Lebensräume, Fauna und Flora) sowie Freizeit und Erholung. Des Weiteren sollen die technischen Eingriffe möglichst wenig sichtbar sein. Wertvolle Altarme im Abschnitt Autobahn C sollen erhalten bleiben und durch die Maßnahmen nicht beeinträchtigt werden.

2.2 Vorprojekt Stand Februar 2023

Aus dem Vorprojekt liegt neben dem Technischen Bericht (Stand 24.2.2023) eine Auswahl von wasserbaulichen Unterlagen vor. Insbesondere Lagepläne, Längenprofil, Querprofile „Abschnitte Gaswerk und Betschenrohr“ sowie „Abschnitt Zelgli – Fahr“ und vertiefende Berichte zu:

- Morphologie, Hydraulik und Geschiebe
- Grundwasser und Trinkwasserversorgung

Im Vorprojekt wurde die im Variantenstudium abgeleitete Bestvariante K3 weiterentwickelt.

Den Projektunterlagen sind folgende wichtige Grundlagen zu entnehmen:

Angaben zur Hydrologie (Durchflüsse in m^3/s) gemäß Tabelle 5 des Technischen Berichts (die obere Zeile der Tabelle enthält die Zahlenwerte aus dem Bericht, die untere Zeile enthält die anlässlich der Projektbesprechung am 30.5.2024 übergebenen, ab 2023 gültigen Werte):

NW	Q_m	Q_9	HQ_2	HQ_5	HQ_{10}	HQ_{30}	HQ_{100}	HQ_{300}	EHQ_a
35	95	230	335	410	450	570	640	690	850
						549	610	634	790

Der morphologische Referenzzustand ist definiert als: gewunden bis verzweigt mit Inseln und flussbegleitenden Auenwäldern. Aus alten Karten (um das Jahr 1670) stammen die folgenden Breitenangaben: Mittlere Sohlenbreite 110 m, minimale Sohlenbreite 70 m, maximale Sohlenbreite 200 m, mittlere Sohlenbreite inkl. Inseln 140 m, Breite der Flussaue (mit begleitenden Auenwäldern) bis 300 m (im Morphologiebericht ist die maximale Breite bei Oberengstringen mit 350 m angegeben).

Die heutige Sohlenbreite beträgt weitgehend konstant 50 m, das Längsgefälle des Flusses 1,5 ‰. Die mittlere Fließgeschwindigkeit variiert im Bestand zwischen 1,0 m/s (NW = 35 m^3/s) und ca. 3,0 m/s (EHQ_a).

Angaben zum Geschiebe: Das gesamte von flussauf kommende Geschiebe wird durchtransportiert (nach Bericht Morphologie und Hydraulik S 29 gibt es zwischen den Vermessungen 2002/3 und 2013 keine Eintiefungen oder Auflandungen), Der Referenzzustand für den Geschiebehaushalt liegt bei ca. 2'400 m^3/Jahr . Im Istzustand werden nur wenige 100 m^3/Jahr transportiert. Der Zielzustand nach Sanierung des Geschiebehaushalts liegt bei 1'800 m^3/Jahr (75% der Fracht im Referenzzustand).

Angaben zu den Korngrößen: Im Bericht Morphologie, Hydraulik und Geschiebe S 38 wird zwischen dem Sohlenmaterial und dem laufenden Geschiebe unterschieden. Die Angaben zum mittleren Korndurchmesser d_m und dem d_{90} aus den Sieblinien des Geschiebes stammen vom Unterwasser des Wehres Hönegg.

Sohlenmaterial: $d_m = 7,0 \text{ cm}$ $d_{90} = 20 \text{ cm}$
Geschiebe: $d_m = 3,0 \text{ cm}$ $d_{90} = 6,5 \text{ cm}$

Die Sohlenmorphologischen Berechnungen erfolgten mit 2'000 m³/Jahr Geschiebe und Korngrößen aus Proben vom Unterwasser des flussauf liegenden Wehres Höngg. In den Aufweitungen folgt daraus ein Sohlenhöhenversatz (Anhebung der mittleren Flusssohle) von 0,5 bis 1 m. In den nicht aufgeweiteten Zwischenstrecken bleibt die Sohle stabil. Gerechnet wurden zwei Szenarien (Szenario 1.3 mit maximalem Auenwald sowie Szenario 2.3 ohne Auenwald) über einen Zeitraum von 60 Jahren um eine Gleichgewichtssohle zu erreichen.

Angaben zum Grundwasser: Im Technischen Bericht des Vorprojekts (S 34) wird angeführt, dass die Grundwasserneubildung neben dem versickernden Niederschlagsanteil im Wesentlichen durch die Infiltration aus der Limmat erfolgt und dies vor allem unterhalb des Gaswerkareals Schlieren und im Gebiet Betschenrohr.

Im Technischer Bericht „Grundwasser und Trinkwasserversorgung“ (S 13) wird die begründete Vermutung geäußert, dass im heutigen Zustand die Infiltration auch nach längeren Phasen ohne Dekolmation mengenmäßig recht bedeutend bleibt.

„Beim Hochwasser 1999 stieg der Grundwasserspiegel wenige Dezimeter über das Terrain an“ (Zitat von S 11). Der maximale Abfluss der Limmat am Pegel Zürich, Unterhard betrug am 22.5.1999 586 m³/s (Quelle: BAFU) und lag damit zwischen HQ₃₀ und HQ₁₀₀. Auf S 16 sind für ein 20-jährliches Hochwasser die prognostizierten Veränderungen des Grundwasserstands bei Umsetzung des Projekts dargestellt.

Angaben zu den projektierten dynamischen Breiten und Längen der Aufweitungen:

- Aufweitung Gaswerk, A1-Brücke bis Künstlerareal 65 m, Länge ca. 250 m
- Aufweitung Betschenrohr, Künstlerareal bis Stelzerwisen 190 m, Länge ca. 880 m
- Aufweitung Zelgli / Kloster Fahr, Fährhaus bis Brücke Überlandstrasse 100 m, Länge ca. 600 m

2.3 Bauprojekt

Zum Bauprojekt wurden Lagepläne mit detaillierten Inhalten zu den einzelnen Maßnahmen wie Ufersicherung, Strömungslenkung, Gestaltung des Gewässerraums und Strukturierungen im Maßstab 1:1000 sowie eine Übersicht des gesamten Bereichs im Maßstab 1:2000 zur Verfügung gestellt. Als Basis für die Besprechung am 29. und

30.5.2024 stand die Planversion vom 14.2.2024 zur Verfügung. Am 12.6.2024 wurde eine aktualisierte Version (Planstand 28. bzw. 29.5.2024) übermittelt.

Des Weiteren wurde am 12.6.2024 ein Längenprofil zur Lage des Kieshorizonts in den geplanten Aufweitungsbereichen übergeben.

Am 7.11.2024 folgte eine weitere Überarbeitung des Projekts, die sieben Pläne enthielt:

- LeLi_BP_P4_Sit_Technisch2000_241008.pdf
- LeLi_BP_P6_Sit_Gaswerk_241008.pdf
- LeLi_BP_P7_Sit_Betschenrohr_241031.pdf
- LeLi_BP_P8_Sit_Zelgli_Fahr_241008.pdf
- LeLi_P10_QP Gaswerk_071124.pdf
- LeLi_P11_QP Betschenroh071124.pdf
- LeLi_P12_QP Zelgli_Werd071124.pdf

In diese Pläne sind auch anlässlich der Begehung und Besprechung vor Ort gegebene Empfehlungen zum Projekt eingeflossen und dienen damit als wesentliche Grundlage für die fachliche Beurteilung.

2.4 Informationen aus vertiefenden Fragen

Während der Durchsicht der übermittelten Unterlagen (Planstand Februar 2024) ergaben sich vertiefende Fragen, die seitens Auftraggeber und dem Büro Flussbau beantwortet wurden. In diesem Zusammenhang wurden folgende weitere Grundlagen übermittelt:

- Angaben für die Verteilung der Durchflüsse in den einzelnen Monaten auf der Internet-Seite des BAFU (nächstgelegene Station der Limmat: Zürich, Unterhard).
- Hochwasserganglinie HQ₃₀₀ mit Abflussscheitel 690 m³/s.
- Pläne mit Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten zum Projekt aus der numerischen 2d-Modellierung für Niedrigwasser, Mittelwasser, HQ₂ und HQ₁₀₀.
- Erforderliche Wassertiefe für Boote: 60 cm bzw. aus einzelner Forderung 80 cm.
- Längenprofil zur Höhe des Kieshorizonts (Höhendifferenz zwischen Gelände und Kiesschicht im Untergrund, welche vorwiegend aus feinkörnigem Material besteht).

2.5 Besichtigung und Besprechung vor Ort

Am 29.5.2024 wurde die Strecke gemeinsam mit Ueli Schälchli vom Büro Flussbau AG sowie Markus Federer von der Baudirektion des Kantons Zürich (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft – Wasserbau, Bau) begangen. Die Besichtigung startete flussauf der Projektstrecke beim Högger Wehr und ging weiter flussab bis Dietikon. Ab der Autobahnbrücke der A1 wurden die geplanten Maßnahmen diskutiert.



Abbildung 1: Beginn der Projektstrecke (Autobahnbrücke) flussab

Der Besichtigung folgte am 30.5.2024 eine Besprechung im Bauamt des Kantons Zürich, bei der sowohl vom Autor dieser Projektbeurteilung vorab übermittelte Fragen als auch weitere Fragen, die sich aus der Besichtigung ergaben diskutiert wurden.

Nachstehend sind alle gestellten und diskutierten Fragen kurz angeführt. Auf die Antworten wird, soweit für das gegenständliche Projekt und nach Überarbeitung der Pläne mit neuem Planstand Herbst 2024 noch relevant, in den folgenden Abschnitten 3 und 4 eingegangen.

Fragen, die am 14.5.2024 vorab für die Besprechung übermittelt wurden:

- Ist die Limmat durch Schwellbetrieb von Kraftwerken flussauf beeinträchtigt?
- Gibt es Aussagen zur Strahlwirkung der geplanten Maßnahmen in Richtung flussauf (auch Anschluss an den Zürichsee) und flussab?
- In welcher Entfernung bestehen ähnlich wirksame Kernlebensräume oder zumindest Renaturierungsbereiche mit guten Habitatstrukturen?
- Flussteiler: gibt es bereits Überlegungen zu den Höhen dieser Bauwerke? Zu den Breiten und Höhen der Lücken sowohl in der Fahrwasserrinne als auch zweiten Teil für den Fischweg?
- Hydrologie: Angaben zur Verteilung der Abflüsse im Jahr (insbesondere für die Freizeitnutzung mit Booten)?
- Hydrologie: Hochwasserwellen mit Aussagen zur Dauer (für Einstaudauer der Dämme)?
- Schwemmholz: Wie groß ist der Anfall von Schwemmholz bei Hochwasser derzeit? Sind an der Limmat Probleme mit Schwemmholz bekannt?
- Bootspassierbarkeit: welche Bootsgrößen sollen passieren können? Welchen Tiefgang haben diese Boote? Im Technischen Bericht werden neben Weidlinge auch noch Langboote erwähnt.

3 Antworten zu den gestellten Fragen

3.1 Vorbemerkung

In den nachfolgenden Teilkapiteln wird auf die in Kapitel 1 angeführten Fragen des Auftraggebers im Detail eingegangen. Wo als notwendig erachtet werden Verbesserungsvorschläge empfohlen. Darüber hinaus enthält das anschließende Kapitel 4 weitere Anmerkungen bzw. Empfehlungen zum Projekt, die über die Fragen des Auftraggebers hinausgehen.

3.2 Ausdehnung der Aufweitung Betschenrohr

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Ausdehnung der Aufweitung Betschenrohr (Länge und Breite ausreichend / überdimensioniert zur Zielerreichung?). Verhältnismässigkeit der Massnahmen in Bezug auf den natürlichen Zustand der Limmat.

Das Ziel einer jeden Flussaufweitung ist, möglichst naturnahe Lebensräume für die Tier- und Pflanzenwelt im Bereich des Gewässers zu schaffen. Dazu gehört neben dem aquatischen Lebensraum auch ein funktionierender Auenwald einschliesslich terrestrischer Übergangsbereiche. Die Gewässersohle der Limmat ist von Kies geprägt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dass folgende Lebensräume für ein funktionierendes Ökosystem vorhanden sind:

- Kolke (große Wassertiefen) für adulte Fische,
- Flachwasserzonen mit kiesigem und sandigem Substrat als Habitate für Jungfische und Wasserpflanzen,
- regelmäßig erneuernde, überströmte Kiesbänke als Laichhabitat und damit auch eine regelmäßig umgelagerte Kiessohle ohne äußere Kolmation mit einem offenen Kieslückenraum für benthische Organismen,
- über das Mittelwasser reichende, regelmäßig erneuernde Kiesbänke als Entwicklungsraum für Pioniervegetation und Brutgebiet für auf Kiesflächen brütende Vögel,
- Stillwasserzonen (Altarme) als Rückzugsorte für Fische und nicht ständig an den Fluss angebundene Wasserkörper wie z. B. Tümpel für Amphibien,

- Buschwerk im Uferbereich als Lebensraum für Reptilien, Kleintiere, Insekten; hier finden Fische bei Hochwasser strömungsberuhigte Rückzugsorte,
- Bäume in unterschiedlichsten Altersstadien als Lebensraum für Vögel und Insekten sowie die Beschattung von Wasserflächen. Buschwerk und Bäume sind die Quelle für Totholz im Gewässer als Nahrung und Rückzugsraum für Wasserlebewesen.

Im Bericht zur Morphologie des Vorprojekts ist der erforderliche Gewässerraum für die Limmat abgeleitet (85W-723_LiS_A1.3_Morphologie-Hydraulik+Geschiebe_230224.pdf) damit sich alle oben angegebenen Lebensräume bilden und dynamisch entwickeln können. Dazu gehört neben einer ausreichenden Breite auch eine ausreichende Länge. Ohne entsprechender Länge kann das Gewässer die zur Verfügung gestellte Breite nicht nutzen. Historisch ist aus einer Karte von 1650 zwischen Ober- und Unterengstringen eine Flussauenbreite von 350 m zu entnehmen (Bild 3 im Bericht Morphologie, Hydraulik und Geschiebe).

Die Aufweitung Betschenrohr weist bei einer Länge von 880 m eine mittlere dynamische Gewässerbreite von 190 m auf. Die maximale Gewässerbreite (abgelesen aus den zur Verfügung gestellten Plänen) beträgt ca. 250 m und steht der Limmat nur auf ca. 1/3 der Aufweitungslänge zur Verfügung.

Die im Morphologiebericht mit Berücksichtigung eines gegenüber den historischen Verhältnissen reduzierten Geschiebehaushalts und einer verringerten Hochwasserdynamik nachvollziehbar abgeleitete dynamische Sohlenbreite beträgt 90 m. Als Untergrenze für die Wellenlänge eines Mäanders folgt damit 540 m (6-mal die Sohlenbreite nach Yalin, 1992). Aus den historischen Plänen im Technischen Bericht ist abzulesen, dass Seitenarme mit einem Winkel α von maximal ca. 45° vom Hauptarm abzweigen. Daraus ergibt sich unter der Annahme einer Sinuskurve für die Flussachse eine Amplitude von ca. 86 m ($(0,5 \times \text{Wellenlänge} \times \tan \alpha) / \pi$). Die erforderliche Entwicklungsbreite für einen vollständigen Mäander mit 90 m Sohlenbreite beträgt somit 2-mal die Amplitude + 1-mal die Sohlenbreite = 262 m.

Daraus folgt, dass die geplante Aufweitung mit einer maximalen Entwicklungsbreite von ca. 250 m knapp unter dem erforderlichen Mindestmaß liegt. Die mittlere Breite von 190 m stellt bereits eine deutliche Einschränkung der Entwicklungsmöglichkeit dar. Für 190 m Breite ergibt sich eine Mäanderamplitude von 50 m und in weiterer Folge, bei 540 m Wellenlänge, ein Mäanderwinkel von ca. 30° . Für eine freie Mäanderentwicklung ist zumindest die 1,5-fache Mäanderlänge erforderlich. Das wären im gegenständlichen Fall

zumindest 810 m. Da die 6-fache Sohlenbreite die Untergrenze für eine freie Mäanderentwicklung darstellt, ist die im Projekt lediglich knapp 9 % größere Aufweitungslänge von 880 m nicht als überdimensioniert anzusehen. Sowohl der geplante Winkel für die Verschwenkung der Uferlinie in die Aufweitung als auch jener für die Rückführung am Ende der Aufweitung entsprechen etwa dem für die mittlere Breite von 190 m abgeleiteten Mäanderwinkel und sind damit ebenfalls weder über- noch unterdimensioniert.

Die oben dargestellte Ableitung der Mäanderentwicklung wurde unter anderem auch für eine eigendynamische Aufweitung an der Salzach (Grenze zwischen Österreich und Deutschland) durchgeführt und in einem flussmorphologischen Modellversuch getestet. Die Erfahrungen aus der Umsetzung des Projekts zeigten, dass der Modellversuch die später in der Natur beobachteten Aufweitungen gut vorhergesagt hat (Hengl & Hafner, 2016).

Zusammenfassend ergibt sich somit, dass die geplante Aufweitung Betschenrohr gerade ausreichend dimensioniert ist, um alle für den Flusstyp der Limmat erforderlichen Lebensräume zu bieten. Eine Einschränkung in der Breite würde die Entwicklung älterer Auenwaldbestände verhindern. Eine Verkürzung der Länge schränkt die dynamische Entwicklung und damit Erneuerung von aquatischen und semiaquatischen Lebensräumen ein. Umgekehrt würde eine Vergrößerung der Aufweitung, insbesondere in der Länge, das Entwicklungspotential hinsichtlich morphologischer Strukturen und Auenwald erhöhen.

3.3 Initialisierung der Aufweitung

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Ausgewogen und zielführend bezüglich räumlicher und zeitlicher Zielerreichung?

Der Plan für die Aufweitung Betschenrohr im Bauprojekt (LeLi_BP_P7_Sit_Betschenrohr_241031.pdf) enthält sehr detaillierte Angaben für die bauliche Ausbildung der Morphologie und Anordnung von Totholzstrukturen im gesamten Aufweitungsbereich.

Grundsätzlich ist der eigendynamischen Gewässerentwicklung auf Basis von Initialmaßnahmen gegenüber der maschinellen Vorformung morphologischer Strukturen der Vorzug zu geben.

Die Limmat weist im Projektabschnitt entsprechend den Berichtsangaben derzeit eine Sohlenbreite von $B = 50 \text{ m}$ sowie ein Gefälle von $J = 1,5 \text{ ‰}$ auf.

Die eigendynamische Entwicklungsfähigkeit eines Gewässers kann mit dem Ansatz von Scherle (1999) grob abgeschätzt werden. Dazu dient die Strömungsleistung $P = 9807 \times Q \times J/B$. Aus bisherigen Erfahrungen muss die Strömungsleistung in Kies-Flüssen über 100 W/m^2 betragen, damit maßgebliche eigendynamische Entwicklungen stattfinden. Für den gegenständlichen Abschnitt der Limmat ergibt sich, dass bei vorhandener Breite (ca. 50 m) und gegebenem Gefälle (ca. $1,5 \text{ ‰}$) ab einem HQ_5 (121 W/m^2) mit einer intensiveren eigendynamischen Gewässerentwicklung gerechnet werden kann. Auch bei ausreichender Strömungsleistung sind morphologische Strukturen im Gewässer erforderlich, die kräftige Querströmungen bewirken und damit die seitliche Gewässerentwicklung nach Entfernung der Ufersicherung auslösen. Im Projektabschnitt ist die Flusssohle weitgehend eben mit leichter Neigung zum Außenufer in den Kurven. Damit sind nur bei größeren Hochwässern ausreichende Querströmungen zu erwarten. Für eine komplette eigendynamische Umgestaltung des Aufweitungsbereichs wären mehrere Hochwässer von zumindest einem HQ_5 erforderlich. Daraus folgt, dass eine eigendynamische Entwicklung des gesamten Aufweitungsbereichs ohne Initialmaßnahmen sehr lange dauern würde. Um ausreichend aquatische und amphibische Habitate in kurzer Zeit zu erreichen, müssen diese an der Limmat maschinell vorbereitet werden, ebenso ist eine Initiierung der Verzweigung erforderlich, damit die Limmat möglichst rasch den mit der Aufweitung zur Verfügung gestellten Raum nutzen kann. Parallel entstehen mit der Initialisierung auch terrestrische Lebensräume auf Kiesbänken. Allein die Entwicklung von Auwaldstrukturen unterschiedlichen Alters benötigt auf jeden Fall längere Zeit.

Bei der Festlegung der endgültigen Initialmaßnahmen wird empfohlen bewusst Querströmungen für eigendynamische Entwicklungen einzusetzen und damit den maschinellen Aufwand zu reduzieren. Mögliche Elemente sind Kiesinseln an die die Strömung anprallt oder Kiesbänke die bei Hochwasser überströmt werden und ähnlich wie inklinante Buhnen die Strömung an zu erodierende Ufer- oder Inselbereiche lenken. Es wird empfohlen die Inselköpfe mit Holzpfählen zu stabilisieren, damit die Inseln auch bei größeren Hochwässern bis zum Abschluss der morphologischen Entwicklung erhalten bleiben. Unterstützend können auch Strukturen aus Holz (Buhnen, Schwemmholzrechen) zur Strömungslenkung und damit Aktivierung von Erosionsbereichen verwendet werden. Größere Steine (Blöcke) sind nicht zu empfehlen, da diese, wenn sie vom Hochwasser nicht umgelagert werden können, langfristig die freie morphologische Entwicklung stören.

Das derzeit bestehende, linksufrige Waldstück soll, wie in den Plänen vorgesehen nicht durch bauliche Initialmaßnahmen verkleinert, sondern nach Umsetzung der Initialisierung als Insel der natürlichen Entwicklung überlassen werden.

Für die Entwicklung der Aufweitung Betschenrohr wird die nachstehende Vorgangsweise empfohlen (falls rechtlich möglich):

- Maschinelle Herstellung von einigen wesentlichen, derzeit fehlenden morphologischen Strukturen und Einbau von Initialmaßnahmen, die die eigendynamische Entwicklung fördern sollen. Dazu gehört auch die Umsetzung der Verzweigung. Damit kann die Natur den zur Verfügung stehenden Gewässerraum bereits nach kurzer Zeit nutzen. Gleichzeitig vergrößert sich auch der für den Hochwasserabfluss zur Verfügung stehende Querschnitt.
- Beobachtung der Gewässerentwicklung (z. B. über 5 Jahre).
- Bei ausbleibenden Hochwässern und fehlender Habitatentwicklung werden weitere maschinelle Maßnahmen gesetzt, die bereits vorab rechtlich genehmigt wurden.

Diese Vorgangsweise wird auch deshalb empfohlen, da nicht auszuschließen ist, dass auf Grund außergewöhnlicher Umstände nach Initiierung der Verzweigung eines der beiden Teilgewässer stärker als geplant verlandet und, falls es sich um die Schifffahrtsrinne handelt, eventuell weitere maschinelle Eingriffe erforderlich werden. Mögliche und nicht vermeidbare Ursache dafür ist die „plötzliche“ Ablagerung einer wandernden Geschiebebank im abfallenden Ast einer größeren Hochwasserwelle mit intensivem Geschiebeeintrag von flussauf.

Des Weiteren ist zu beachten, dass die initiale Aufweitung des Fließquerschnitts keine Sohlenerosion im unmittelbar flussauf anschließenden Abschnitt auslöst.

3.4 Aufweitungen in den Abschnitten Zelgli und Kloster Fahr / Werd (Inselkette, Anschluss Giessen)

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Einschätzung der geplanten Massnahmen hinsichtlich Zielerreichung. Sind alternative Massnahmen denkbar?

Die Aufweitungen der Limmat in diesen Bereichen sind zwar deutlich kleiner als im Betschenrohr, aber immer noch ausreichend breit um die Ausbildung unterschiedlichster

morphologische Strukturen (Kiesbänke, flache und steile Uferbereiche) und damit wichtiger aquatischer Habitats zu ermöglichen. Auch Bereiche für die Ansiedlung von Pioniervegetation sind bei dieser Breite eventuell möglich. Die Verbesserung des Lebensraums in diesem Abschnitt ist eine wichtige Ergänzung des Kernlebensraums Betschenrohr und vergrößert die Strahlwirkung in Richtung flussab. Des Weiteren verringert sich der Abstand zum nächsten Kernlebensraum.

Eine zur geplanten Aufweitung vergleichbare Wirkung ist mit Strukturverbesserungen im bestehenden Flussbett nicht erreichbar. Bei Kleinmaßnahmen fehlt neben der für eine intakte Fließgewässerökologie erforderlichen regelmäßigen Umbildung und Erneuerung von Habitats in der Regel auch die Nachhaltigkeit. Beispielsweise verlanden kleine lokale Aufweitungen erfahrungsgemäß oft sehr schnell.

Neben der ökologischen Wirkung verbessern diese Aufweitungen und jene im Bereich Gaswerk auch die Erlebbarkeit des Gewässers und damit die Erholungsfunktion.

3.5 Uferschutz

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Ausgestaltung und Ausdehnung, Einsatz der verschiedenen Massnahmen. Festlegung von Beobachtungs- und Interventionslinien.

Generelle Aussagen zu den geplanten Uferschutzmaßnahmen enthält der Technische Bericht des Vorprojekts (Kap. 6.3.2). Weitere Angaben wurden dem Letztstand der Situationspläne und Querprofile aus dem Bauprojekt (Stand Oktober/November 2024) entnommen.

Den generellen Aussagen zum Uferschutz aus dem Technischen Bericht kann vollinhaltlich zugestimmt werden. Die vorgesehene Abstufung des Uferschutzes in Abhängigkeit von der Belastung (Kraftwirkungen durch das strömende Wasser und morphodynamische Prozesse) ermöglicht einerseits eine wirtschaftliche Ausführung und bietet andererseits ausreichend Freiraum für das Erreichen der ökologischen Ziele. Gleichzeitig wird den Erfordernissen des Hochwasserschutzes Rechnung getragen.

In einigen der zur Verfügung gestellten Querprofile ist ein **Längsverbau** mit Neigung 1:2 und einem vorgelagerten, horizontal ausgeführten, 1-lagigen Blockdepot auf einer Filterschicht zu sehen (z.B. linkes Ufer in QP 28.090 und weiter flussab, siehe Beispiel in

Abbildung 2). Die Steine aus dem horizontalen Blockdepot verlängern bei großen Kolken den geneigten Längsverbau. Das heißt die Blöcke werden frei gespült und sinken ab. Aus diesem Grund ist unter dem horizontalen Blockdepot eine Filterschicht wirkungslos und daher auch nicht notwendig. **Die Größe des Blockdepots ist auf die möglichen Kolk-tiefen zu bemessen.** Je nach erforderlicher Größe des Blockdepots ist auch eine zweilagige Ausführung in Betracht zu ziehen, da damit der Baugrubenaushub reduziert werden kann. Bei der Auswahl der Blockgrößen wird empfohlen diese so zu wählen, dass sie von der Strömung gerade nicht abtransportiert werden können. Größere Blöcke können leichter in den Untergrund einsinken und bieten daher weniger Schutz für die Uferböschung.

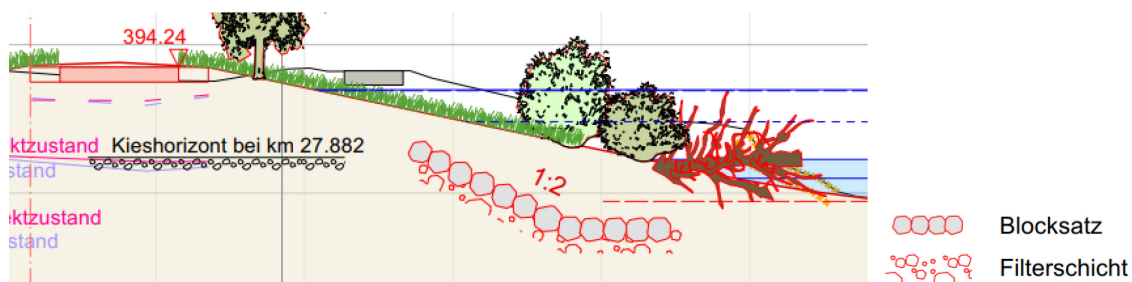


Abbildung 2: Beispiel Längsverbau mit Blockdepot und Filterschicht unter dem Blockdepot (QP 27.891 aus Datei LeLi_P10_QP Gaswerk_071124.pdf)

Zu den Strecken im Detail:

- Flussab A1 Brücke bis Gasisteg:
 - Linkes Ufer: Die vier Sichelbuhnen im Bereich der rückversetzten Uferlinie sind sowohl für die Ufersicherung als auch die Strukturierung des Gewässers im Außenbogen geeignet. Im Bereich des Querprofils QP 28.090 müsste der Längsverbau nicht direkt an die Buhne angeschlossen werden, da die Hauptströmung durch die Sichelform vom Ufer in Richtung Flussmitte abgelenkt wird. Ab ca. QP 27.891 beginnt die Aufweitung. Im Hochwasserfall liegt das Ufer hier im Bereich einer Innenkurve, so dass der überschüttete Längsverbau nur infolge Querströmungen bei kleineren Wasserführungen frei liegen wird. Die zusätzlich vorgesehenen Sicherungen mit Raubäumen und Wurzelstöcken sind wasserbaulich nicht erforderlich. Wenn ausreichend Material vorhanden ist, dienen sie auf jeden Fall der Ökologie.
 - Rechtes Ufer: Hier ist zu prüfen, ob die derzeit in der Limmat vorhandene Deckschicht an der Gewässersohle bis zum bordvollen Abfluss stabil bleibt. Wenn nicht ist ab dem Übergang auf die Außenkurvensituation zu prüfen, ob der vorhandene Uferschutz in Hinblick auf morphologisch zu erwartende Kolke ausreichend tief fundiert ist.

- Gasisteg bis Brücke Weiningerstrasse:
 - Linkes Ufer: Im **Bereich QP 27.488** ist ein Steilufer mit vorgelagertem Flachbereich ohne Längsverbau vorgesehen. Bei Hochwasser wird die Strömung entlang des Ufers gut geführt werden. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass im absteigenden Ast von Hochwasserwellen Querströmungen entstehen, die das Ufer angreifen. Da dieser Prozess nicht gut zu beobachten ist, sollte die Interventionslinie zumindest 20 m Abstand vom Damm aufweisen. Es ist zu prüfen, ob ausreichend Kies im Untergrund vorhanden ist oder auch mit rascher Erosion von Feinmaterial und damit großen morphologischen Veränderungen während eines Hochwassers zu rechnen ist.

Die sechs überschütteten Buhnen im **Bereich Brachweg** (flussab km 27.311) könnten durch einen Längsverbau und eine größere Buhne am Beginn dieses Abschnitts ersetzt werden. Der Bau dieser Buhnen dürfte aufwändiger sein als ein Längsverbau mit Blockdepot. Durch die Überschüttung bieten die Buhnen zumindest anfänglich keine zusätzlichen wertvollen Habitate. In diesem Bereich könnte stattdessen ein Auenwald initiiert werden, der durch die Lage im Südwesten eine gute Beschattung der Uferzonen ermöglicht. Die vorgeschlagene größere Buhne soll verhindern, dass sich die Strömung nachhaltig an das Ufer und den Längsverbau anlegt. Falls doch an den Buhnen festgehalten wird wäre zumindest die vollflächige Überschüttung zu vermeiden. Das spart auch bei den Erdarbeiten. Die Überschüttung ist im Plan auf HQ₁₀₀ minus 1 m vorgesehen. Ökologisch günstig wäre es stattdessen entlang des Uferverbaus ein Initialisierungsgerinne anzulegen, das bei Niedrig- bis Mittelwasser nur über Rückstau vom Unterwasser dotiert wird und damit einen Altarm bildet. Abgesehen von dem kleinen Altarm beim Aussichtsturm fehlen die für einen intakten Gewässerlebensraum erforderlichen Altarmstrukturen in der initialen Gewässergestaltung.

Im **Bereich QP 26.893** enthält der Situationsplan keine Ufersicherung. In diesem Bereich engt sich der Fließquerschnitt bereits deutlich ein. Mit dieser Einengung ist auch eine Belastung des Ufers verbunden. Des Weiteren können hier, nach Umformung der großen Insel, Querströmungen auftreten die zu Ufererosionen führen. Falls die Uferbereiche größer Abschnitte von Feinmaterial aufweisen (z.B. verlandete Altarme aus früherer Zeit) wird die Erosion sehr rasch fortschreiten. Daher wird empfohlen die Geologie in diesem Uferabschnitt zu untersuchen. Im Falle von Kies sind die im Plan enthaltenen Beobachtungs- und Interventionslinien

ausreichend. Bei Sand oder noch feinerem Material ist eine vorsorgliche Sicherung dieses Abschnitts empfehlenswert.

Der im Plan enthaltene, anschließende Längsverbau bis zur Brücke Weiningerstrasse ist für die im Verengungsbereich auftretenden hohen Belastungen und einen allfälligen Verengungskolk zu dimensionieren.

- Rechtes Ufer: Hier wird die bestehende Uferlinie bis auf zwei kurze Abschnitte beibehalten und es sind nur Strukturierungen vorgesehen. Falls die derzeit vorhandene Deckschicht an der Gewässersohle bis zum bordvollen Abfluss stabil bleibt sind die geplanten Maßnahmen ausreichend. Andernfalls ist zu prüfen, ob für die zu erwartenden Kolkiefen eine Verstärkung des bestehenden Längsverbaus erforderlich ist. Die Umsetzung von Verstärkungsmaßnahmen kann in Bereichen mit größeren vorgelagerten Anschüttungen auch auf Basis von Beobachtungs- und Interventionslinien erfolgen.

Der Rückbau des Uferschutzes auf kurzer Strecke im Bereich und flussab von km 27.488 erscheint in Zusammenhang mit der Ufergestaltung und Strukturierung unbedenklich. Im Bereich des Rückbaus flussauf von km 26.893 können Querströmungen zu Erosionen führen. Größere Schäden sind hier aber auch bei Überschreiten der vorgesehenen Interventionslinie nicht zu erwarten.

- Brücke Weiningerstrasse bis Brücke Überlandstrasse:
 - Linkes Ufer: **Bis etwa QP 26.097** wird die bisherige Linienführung beibehalten, so dass wie im Plan dargestellt keine Maßnahmen am vorhandenen Uferschutz erforderlich sind. Die Innenbogensituation lässt hier keine größeren Beanspruchungen erwarten.

Im nachfolgenden Abschnitt **bis nach QP 25.698** erfolgt eine Aufweitung des Gewässers und die Sicherung des neuen Ufers mit einem überschütteten Längsverbau. Durch die leichte Außenbogensituation ist hier ein Uferschutz unbedingt erforderlich. Des Weiteren ist laut Technischen Bericht zum Vorprojekt (S 95) eine Abdichtung des Ufers mit einer wenig durchlässigen Schicht zum Schutz der Grundwasserfassung Zelgli vorgesehen.

Flussab von QP 25.698 schließt eine leichte Innenbogensituation an, die es erlaubt, wie im Plan dargestellt nur punktuelle Sicherungsmaßnahmen zu setzen. Durch die beschränkte Breite der Aufweitung sind hier keine größeren, das Ufer

gefährdenden Querströmungen zu erwarten. Entlang der Steiluferbereiche (z. B. QP 25.298) wird sich vorgelagert eine flache Kiesbank einstellen, auf der sich mit der Zeit auch Vegetation festsetzen kann. Die vorgesehene Interventionslinie bietet bei Kies im Untergrund ausreichend Reaktionsmöglichkeit. Zwischen den Querprofilen QP 25.403 und QP 25.298 könnte die Interventionslinie auch noch etwas weitet in Richtung Damm gelegt werden, wenn im Untergrund ausreichend Kies vorhanden ist.

- Rechtes Ufer: Bis zur Abzweigung des Chlosterkanals bleibt das Ufer unverändert. Daran anschließend wird ein Abschnitt der bestehenden Ufersicherung entfernt.

Flussab von km 26.291 sind als Sicherungselemente lediglich Uferstrukturierungen vorgesehen. Durch den Außenbogen ist zu erwarten, dass die Interventionslinie bereits bei einem größeren Hochwasser erreicht wird.

Im **Bereich QP 26.097** ist eine Bucht geplant, deren Ufer ingenieurbologisch gesichert wird. Nur am unteren Ende der Bucht ist ein Längsverbau vorgesehen. Zusammen mit der im Plan enthaltenen Strukturierung des flussaufwärtigen Ufers und der damit verbundenen Ablenkung der Strömung sind die vorgesehenen Maßnahmen trotz der Lage in einer leichten Außenufersituation ausreichend.

Danach folgt ein unveränderter Uferabschnitt bis kurz nach der Fähre. Daran schließt die Aufweitung Zelgli und Kloster Fahr / Werd an. **Im unmittelbaren Aufweitungsbereich** bis zur Einmündung der Äusseren Giessen sind keine Ufersicherungen geplant. Dies ist vertretbar, wenn in diesem Bereich Kies ansteht. Bei feinkörnigerem Material können Kehrströmungen entstehen, die eine Seiten- und Rückwärtserosion bewirken. Die Interventionslinie könnte hier sehr rasch überschritten werden. Auch die Strömunglenkung beim Flussteiler kann im Zusammenhang mit Ablagerungen Querströmungen und damit Ufererosionen auslösen. Zumindest beim Flussteiler sollte die ingenieurbologische Sicherung (unterstützt mit Holzpfählen) etwas weiter flussab gezogen werden.

Ab der Mündung Äusserer Giessen sind zwei Buchten mit ingenieurbologischen Sicherungen geplant. Die erste Bucht ist als Steilufer gestaltet. Hier ist eine rein ingenieurbologische Sicherung zu wenig. Die großräumigen Strömungsverhältnisse ergeben eine Außenbogensituation. Damit besteht die Gefahr, dass der Fuß des Steilufers unterspült wird. In diesem Bereich sollte

zumindest eine Sicherung des Fußes mit Holzpfählen erfolgen. In der zweiten Bucht enthält der Plan ein flaches Ufer und entlang der Uferlinie sind große Findlinge und Totholz angeordnet. Diese Form der Sicherung und Ufergestaltung ist trotz der Außenbogensituation ausreichend.

An die Bucht mit dem Flachufer folgt anschließend ein kurzer Längsverbau, gefolgt von einem ungesicherten Abschnitt. Im Querprofil QP 25.298 ist dem ungesicherten Ufer ein sehr flacher Bereich mit einer Kiesbank vorgelagert. Auf Grund der Situation am Ende eines Außenbogens ist nicht auszuschließen, dass sich die Tiefenrinne zum rechten Ufer hin entwickelt. Über die Beobachtungs- und Interventionslinien kann aber rechtzeitig reagiert werden, so dass eine Gefährdung des Dammes nicht zu erwarten ist.

Der Längsverbau im Bereich der Verengung vor der Brücke Überlandstrasse ist auf die in der Verengung zu erwartende Kolkentiefe zu dimensionieren.

Wie bereits bei den Anmerkungen zu den einzelnen Uferschutzmaßnahmen aufgeführt, sind Interventionslinien nicht allein auf Grund der hydraulischen und morphologischen Beanspruchung festzulegen. Es sind auch die geologischen Untergrundverhältnisse zu beachten. Erosionen in sandig bzw. schluffigem Feinmaterial schreiten deutlich schneller voran als in Kies. Einen Unsicherheitsfaktor stellen insbesondere Ungleichförmigkeiten im Untergrund aus historischen Gewässerläufen dar. Das Ufer gefährdende Querströmungen treten im abfallenden Ast einer Hochwasserwelle im Zuge der Neubildung von morphologischen Strukturen auf. Die mit den Querströmungen verbundenen Ufererosionen können rasch über mehrere Meter voranschreiten und im Extremfall durch eine unmittelbar folgende, zweite Hochwasserwelle noch verstärkt werden.

3.6 Überlastfall im Betschenrohr

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Vor- und Nachteile von definierter Entlastungsstrecke versus überströmbaren Damm.

Um die Entscheidung zwischen Entlastungsstrecke und überströmbarem Damm als Absicherung gegen einen Dammbruch im Überlastfall zu unterstützen werden nachfolgend einige Fragen definiert.

Aus den Projektunterlagen geht hervor, dass die linksseitigen Uferhöhen entlang der Aufweitung für ein HQ_{300} ausgelegt sind. Hier verläuft eine durchgehende Dammstrecke. Der Freibord beträgt 0,5 m. Bei EHQ_a ist das Gerinne bordvoll und es kann zum Überschwappen kommen. Für das rechte Ufer wird im Projekt nur erwähnt, dass beim A1-Durchlass Gasisteg ein Fluten durch entsprechende Geländeaufhöhungen zu verhindern ist. Daraus ist anzunehmen, dass bei einem extremen Hochwasser auch rechtsufrig Überflutungen stattfinden können.

Daraus folgt die erste Frage als Entscheidungsbasis für die Beherrschung des Überlastfalls:

Auf welcher Seite können ausreichende Mengen entlastet werden?

Wenn dies sowohl links als auch rechts möglich ist, ist im nächsten Schritt zu klären:

Auf welcher Seite ist das Schadenspotential am kleinsten?

Wenn die Uferhöhen links und rechts gleich hoch sind ist keine Aussage möglich, welche Seite zuerst überflutet wird. Bei weiterem Anstieg der Wassermengen werden auf beiden Seiten Überflutungen stattfinden, wenn die Dämme stabil bleiben. Wenn die Überströmung auf einer Seite stattfinden soll, muss die Dammkrone auf dieser Seite niedriger liegen als auf der anderen Seite.

Bei überströmbaren Dämmen lässt sich im Vorhinein nicht sagen, an welcher Stelle entlang des Dammes das Wasser zuerst ausströmt. Daraus folgt die nächste Frage:

Kann mit der Ausleitung an einer vorgewählten Stelle das Schadenspotential reduziert werden?

Zu berücksichtigen sind hier auch Fragen der Evakuierung von Personen und die Freihaltung wichtiger Rettungswege für die Bewältigung des Ereignisses.

Wenn aus der Antwort auf die letztgenannte Frage nicht eine definierte Entlastungsstrecke festgelegt werden kann, verbleiben als weitere Entscheidungsgrundlage die Kosten.

Wie sieht der Vergleich Kosten – Schadenspotential für überströmbare Dämme versus eine definierte Entlastungsstrecke unter Beachtung der nachfolgenden Punkte aus?

- Die Dämme sind auf HQ₃₀₀ plus Freibord ausgelegt. Die Entlastungsstrecke springt bei Abflüssen über dem berechneten HQ₃₀₀-Wasserspiegel an.
- Die auf HQ₃₀₀ plus Freibord ausgelegten Dämme sind überströmbare ausgeführt. Daher erfolgt die Überflutung erst später und das Schadenspotential ist kleiner.

Für das Gesamtprojekt wird empfohlen noch folgende Aspekte zu beachten:

- Ist von flussauf her das gleiche Schutzniveau gegeben? Oder erfolgt die Überflutung des Umlands im Projektabschnitt bereits früher durch Ausuferungen flussauf?
- Gibt es flussab Bereiche mit geringerem Schutzniveau, von wo aus tiefliegende Flächen im Projektabschnitt über Rückströmung früher geflutet werden?
- Führen hohe Grundwasserstände bereits vor direkten Wasseraustritten aus der Limmat zu Überflutungen und damit auch zu Schäden?
- Bei einem überströmbaren Damm im Bereich Betschenrohr kann der Überlastfall auch in dem auf das gleiche Schutzniveau ausgebauten Abschnitt Zelgli / Fahr auftreten. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die Sohlenhebung in der Aufweitung Betschenrohr geringer ausfällt oder weniger Auenwald tiefere Wasserspiegel ergibt.

3.7 Hochwasserdamm: Aufbau, Dichtungskern ja / nein

Die nachfolgenden Ausführungen sind allgemein gehalten, da der Verfasser dieses Berichts keine größeren Erfahrungen betreffend Dammbau vorzuweisen hat.

Im Technischen Bericht des Vorprojekts ist auf Seite 48 in Bild 30 ein möglicher Dammquerschnitt dargestellt (Abbildung 3). Es ist dies ein innerer Körper aus wenig durchlässigem, verdichtetem Feinmaterial mit einer scherfesten Hülle aus Kies.

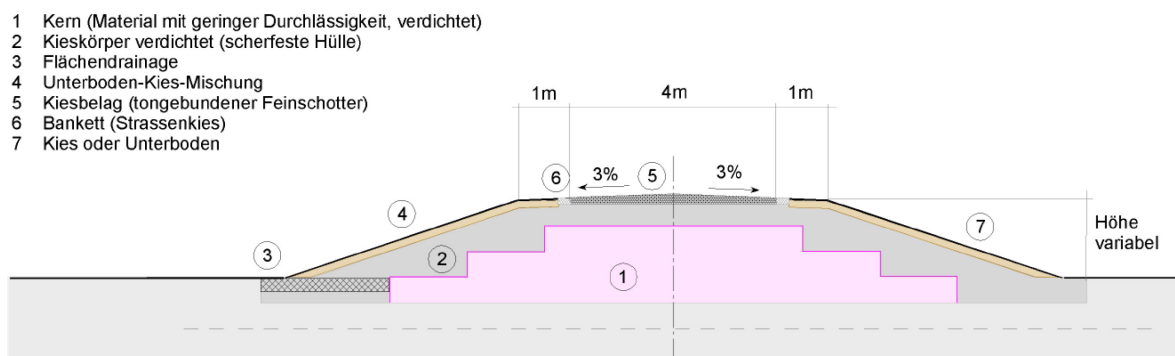


Abbildung 3: Querschnitt eines Hochwasserschutzdammes aus dem Vorprojekt
 (Datei 85W-723_LiS_A1.1_TechnischerBericht_230224.pdf)

Die übermittelte Hochwasserwelle für $690 \text{ m}^3/\text{s}$ (nach ab 2023 gültiger Hydrologie zwischen HQ_{300} und $EHQ_{a,r}$) zeigt einen sehr langen Nachlauf mit hohen Abflüssen, die aus dem Zürichsee kommen dürften (Abbildung 4). Dies deutet auf mehrere Tage Einstauzeit der Dämme hin. Im Abschnitt Betschenrohr liegt bereits der Wasserspiegel des HQ_2 aus dem Vorprojekt mit $335 \text{ m}^3/\text{s}$ höher als das hinter den linksufrigen Dämmen vorhandene Gelände.

Es ist generell zu empfehlen Hochwasserschutzdämme mit einem inneren Kern aus wenig durchlässigem (bindigem) Material herzustellen. Bei nicht bindigem Material führt jede mit dem Einstau verbundene Durchsickerung des Dammes zu innerer Erosion (Suffosion) von Feinteilen und damit zu einer Verschlechterung der Qualität des Dammkörpers (vermehrte Durchsickerung, Setzungen durch entstandene Hohlräume). Die oben erwähnten langen Einstauzeiten erfordern auf jeden Fall einen dichten Kern, wobei dies je nach Materialverfügbarkeit und Kosten auch mit anderen Methoden wie z. B. Dichtwänden erfolgen kann.

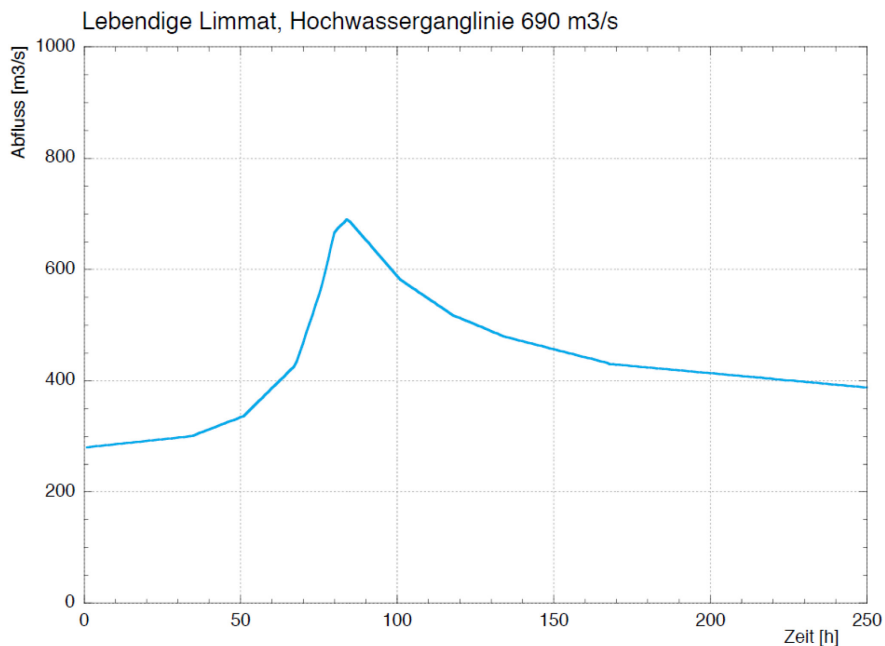


Abbildung 4: Hochwasserganglinie HQ_{300} (Datei HW-Ganglinie-690.pdf), erhalten von Ueli Schälchli

Als Beispiel sei hier der Hochwasserschutzdamm der Isar im Stadtgebiet von München erwähnt. Dort wurde als Dichtelement eine statisch tragende Wand gewählt. Damit können am Dammkörper auch Bäume und Büsche wachsen, da weder Erosionen noch Löcher von Wühltieren die Standfestigkeit und die Dichtheit der Dammkonstruktion negativ beeinflussen.

Wie eben erwähnt ist die Problematik von im Planungsgebiet vorkommenden Wühltieren (eventuell auch Biber?) zu beachten. Dazu ist die bei der Besprechung vom 30.5.2024 vorgeschlagene Sicherung mit Stahldrahtgeflecht für einen Dammkörper ohne statisch tragender Wand geeignet.

3.8 Strukturierungsmassnahmen mit Totholz sowie kombinierte Massnahmen

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Wie sind die Ausgestaltung und der Einsatz der verschiedenen Elemente zu sehen?

Totholz liefert einen wichtigen Beitrag zur ökologischen Funktionsfähigkeit eines Fließgewässers (z. B. aquatisches Habitat, Nahrungsquelle). Der Einsatz sollte sich an den vorhandenen Strukturen bei Referenzgewässern orientieren, so dass eine zukünftige Regenerationsfähigkeit gegeben ist. Ein über dieses Maß hinausgehender Einsatz von Totholz als rein ökologisches Element ist nicht erforderlich, da die Nachhaltigkeit nicht gegeben ist.

Für die Initiierung der Gewässerrevitalisierung können Totholzelemente eingesetzt werden um morphologische Entwicklungsprozesse zu fördern (siehe dazu auch Abschnitt 3.3). Zu beachten sind allfällige Auswirkungen auf den Hochwasserschutz im Unterlauf des Gewässers. Totholz kann bei Hochwasser innerhalb kurzer Zeit in Bewegung kommen und flussab den Schwemmholtzanfall gegenüber der Bestandsituation deutlich erhöhen.

Laut Auskunft vom Wasserbau des Kantons Zürich ist die Schwemmhholzproblematik derzeit gering, da flussauf in der Sihl ein großer Schwemmhholzrechen vorhanden ist. Aus dem Zürichsee sind ebenfalls keine maßgeblichen Schwemmhholzmengen zu erwarten. Je nach Umfang des Zwischeneinzugsgebiets kann damit die Regenerationsfähigkeit von Totholzablagerungen in den Aufweitungsbereichen eingeschränkt sein. Auch aus diesem Grund sollte der rein ökologisch motivierte Einsatz von Totholz während der Umsetzung nicht zu hoch sein. Die Abnahme der Totholzmengen könnte bei einer späteren Evaluierung der Massnahmen zu einer unnötig negativen Bewertung führen.

Bei Raubäumen, die auch als Sicherungselement für den Uferschutz gedacht sind, stellt sich die Frage, ob diese regelmäßig erneuert werden oder nur als temporäre Sicherungen

bis zur Entwicklung einer das Ufer stabilisierenden Vegetation dienen. Nur im zweiten Fall macht der Einsatz von Raubäumen Sinn.

3.9 Flussteiler zu Beginn Betschenrohr und bei Fährhaus zur Aufteilung des Abflusses

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Es ist jeweils eine doppelt gekrümmte aufgelöste Sichelschwelle mit mittlerer Insel geplant. Wie wird die Wirkung eingeschätzt? Für Weidlinge passierbar? Werden Anpassungen empfohlen?

3.9.1 Flussteiler vor Aufweitung Betschenrohr

Entsprechend den übermittelten Plänen aus dem Bauprojekt besteht der Flussteiler aus zwei Bereichen. Die Trennung erfolgt durch den Pfeiler der neuen Brücke Gasisteg und eine flussab anschließende, nur bei Hochwässern größer als etwa HQ₂ überflutete Insel (Abbildung 5). Rechts vom Pfeiler des neuen Gasistegs ist eine geschlossene Steinreihe mit zwei abgesenkten Bereichen vorhanden (die Steine sind heller gezeichnet). Die gekrümmte Länge beträgt geschätzt ca. 65 m. Links vom Pfeiler beträgt die Länge des Flussteilers geschätzt ca. 85 m. Diese Steinreihe weist mehrere, ca. 1,5 m breite Lücken für eine sohlengleiche Durchströmung auf. Entsprechend den Angaben im Technischen Bericht des Vorprojekts (Seite 72 und 73) ist die Fahrrinne für Boote im rechten Bereich vorgesehen. Die Lücke ohne Findlinge ist im Vorprojekt mit einer Breite von 10 m geplant. Im Situationsplan zum Bauprojekt ist eine 10 m breite Lücke ohne Findlinge nicht ersichtlich. Es bestehen nur zwei abgesenkte Bereiche mit 10 und 15 m Breite, wobei der 15 m Bereich als Schifffahrtsrinne bezeichnet ist.

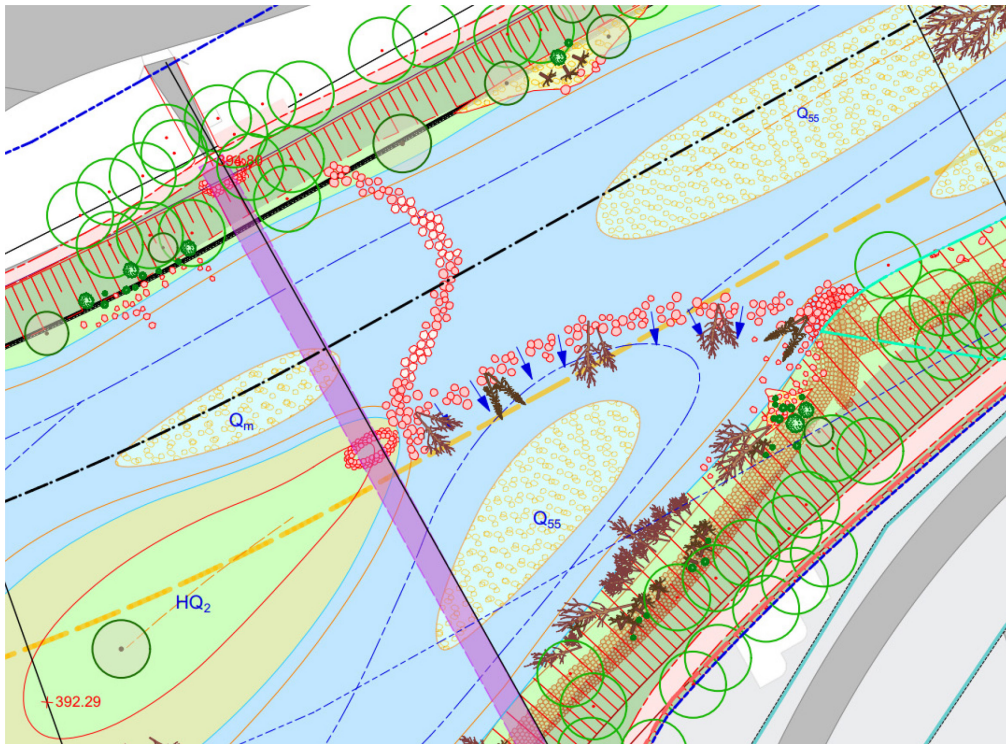


Abbildung 5: Flussteiler Betschenrohr (aus Datei LeLi_BP_P7_Sit_Betschenrohr_241031.pdf)

Bootspassierbarkeit:

Laut Auskunft des Wasserbaus im Kanton, ist die Freizeitnutzung mit Booten insbesondere in den Monaten Mai bis September gegeben. Für die Frage der ausreichenden Fahrwassertiefe sind die niedrigen Abflüsse von Interesse. Für eine 10 jährliche Wiederkehrperiode beträgt der Niedrigwasserabfluss $NM7Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ (kleinster, über sieben aufeinanderfolgende Tage gemittelter Abfluss innerhalb eines Niedrigwasserjahres, Quelle: Niedrigwasserwahrscheinlichkeiten des BAFU für den Pegel Limmat – Zürich, Unterhard, 22.1.2024).

Über die Höhenlage des Flussteilers liegen noch keine Informationen vor. Es ist darauf zu achten, dass im rechten Teil in den beiden Lücken die Steine so tief angeordnet werden, dass sie keine Hindernisse für die Durchfahrt mit Booten darstellen. Im Bereich des Gasistegs beginnt die mit der Aufweitung verbundene morphologische Anhebung der Sohle, so dass hier über die Zeit mit wechselnden Sohlhöhen zu rechnen ist. In den übrigen Bereichen sind die Steine so hoch anzuordnen, dass sie bei Niedrigwasser nicht oder nur sehr wenig überströmt werden um eine ausreichende Fließtiefe für Boote in den Lücken des rechten Flussteilers zu erreichen.

Betreffend Bootspassierbarkeit wird von folgenden Grundlagen ausgegangen:

- $Q = NM7Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Wiederkehrperiode 10 Jahre)
- Länge des Flussteilers ca. 150 m
- Länge der Lücken (abgesenkte Bereiche rechts und kleine Durchlässe links) ca. 30 bis 35 m.

Aus diesen Grundlagen ergibt sich eine geschätzte Fließtiefe von ca. 50 cm bei NM7Q ($30 \text{ m}^3/\text{s}$) und ca. 50 bis 60 cm bei MNQ ($35 \text{ m}^3/\text{s}$) wenn die hohen Bereiche des Flussteilers nicht bzw. nur sehr wenig überströmt sind. Diese Fließtiefe ist ähnlich wie im heutigen Zustand bei 50 m Sohlenbreite und 1,5 ‰ Gefälle (57 cm bei $30 \text{ m}^3/\text{s}$ und 63 cm bei $35 \text{ m}^3/\text{s}$, gerechnet als Rechteckprofil mit Strickler-Wert $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.)

An voralpinen Fließgewässern in Österreich in Verwendung befindliche Boote weisen in der Regel einen geringen Tiefgang auf (z. B. Zillen, die von den Feuerwehren auch an größeren Flüssen verwendet werden haben einen Tiefgang von ca. 20 cm). Auch Kanus haben einen ähnlichen Tiefgang. Für diese Fahrzeuge sind Fahrwassertiefen in den Furten von 30 bis 40 cm ausreichend. Größere Schlauchboote mit ca. 40 cm Tiefgang benötigen Fahrwassertiefen von ca. 50 bis 60 cm im Bereich der Furten.

Zum Tiefgang von Weidlingen konnte nur in Bretscher (1999) eine Aussage gefunden werden. Diese betrifft allerdings zum Lastentransport verwendete Weidlinge aus Holz. Bretscher (1999) gibt an, dass ein 53 Fuß (15,81 m) langer Weidling je nach Wasserstand 230 bzw. 180 Zentner (11,5 bzw. 9 t) befördern kann und dazu eine Fahrwassertiefe von 2,5 bis 3 Fuß (ca. 75 bis 89 cm) benötigt. Wenn der Weidling als Freizeitsportgerät nur mit Personen besetzt ist, ergibt sich ein deutlich geringerer Tiefgang, der sich vermutlich im Bereich der in Österreich verwendeten Zillen bewegen wird, womit 30 bis 40 cm Fahrwassertiefe ausreichen.

Wirkung des Flussteilers (hydraulisch und morphologisch):

Der geplante Flussteiler definiert die Sohlenhöhen am Beginn der beiden Teilgerinne und regelt damit die Aufteilung des Gesamtabflusses auf die beiden Gewässeräste. Er verhindert, dass sich in einem Ast eine Rinne ausbildet und damit der zweite Ast weniger Wasser erhält und damit sowohl die morphologische Aktivität als auch die ökologische Wirkung reduziert wird.

Die im Grundriss gekrümmte Form des rechten Flussteilers mit den beiden abgesenkten Bereichen begünstigt die Ausbildung einer vom Ufer abgesetzten Tiefenrinne und dient damit auch dem Schutz des rechten Ufers.

Der linke Ast des Flussteilers fördert die Ausbildung von Querströmungen. Durch die im Vergleich zum rechten Ast engen Lücken ergibt sich bei Niedrigwasser ein vielfältiges Strömungsmuster am Beginn des linken Flussarms. Bei höheren Wasserführungen ist durch die breite Zuströmung (bei gleicher Höhenlage der Steine über die Länge) und die Ablenkung der Strömung nach links zu erwarten, dass ein größerer Teil des Geschiebes in den linken Arm eingetragen wird. Das sichert einerseits die Tiefenrinne für den Bootsverkehr im rechten Arm und erfordert andererseits einen höheren Abflussanteil im linken Arm bei Hochwasser um eine Verlandung zu verhindern.

Aus den vorliegenden Plänen ist derzeit noch nicht klar, wie die Höhenlagen des Flussteilers über die Gewässerbreite ausgeführt werden soll. Wenn die Steine an den Ufern und im Bereich des Brückenpfeilers höher liegen kann in Ergänzung zur Bogenform im Grundriss eine zusätzliche Ablenkung der Strömung vom Ufer und vom Brückenpfeiler erreicht werden.

Weitere Aspekte:

Am Schnittpunkt der beiden Äste des Flussteilers steht der Pfeiler für den neuen Gasisteg. In Abhängigkeit vom Schwemmholzanfall bei Hochwasser und der damit verbundenen Verklausung am Pfeiler ergibt sich hier eine sehr hohe Beanspruchung der Sohle. Die Sohle im Bereich des Pfeilerkopfes ist mit großen Blöcken gut zu sichern und der Flussteiler auf beiden Seiten dicht anzuschließen, damit kein Kolk entsteht. Die Folge wäre ein Bruch des Flussteilers mit pfeilernahen Tiefenrinnen. Insbesondere für die Sicherung der Schifffahrtsrinne aber auch allgemein für die Gewährleistung der Durchflussaufteilung in der Verzweigung müsste die Stelle saniert werden.

Um die Belastung am Kreuzungspunkt der beiden Arme des Flussteilers und des Brückenpfeilers zu entschärfen wird vorgeschlagen folgende zwei Punkte zu prüfen, die auch miteinander kombiniert werden könnten:

1. Verschiebung des Gasistegs ein Stück flussab
2. Verschiebung des Flussteilers ein Stück flussauf

Bei beiden Maßnahmen würde der Kopf der anschließenden Insel die beiden Flussarme trennen und die Sohlenbelastung aus Verklausungen am Brückenpfeiler betrifft nur den einfacher zu sichernden Bereich der Insel. Der Inselkopf könnte analog zum Flussteiler Zelgli / Fahr mit Findlingen und Vegetation gesichert werden.

Da morphologische Prozesse immer wieder anders ablaufen als erwartet, kann mit der Ergänzung oder Entfernung von Steinen später relativ einfach in die Durchflussaufteilung zwischen den beiden Flussarmen eingegriffen werden.

3.9.2 Flussteiler vor Aufweitung Zelgli / Fahr

Als Trennung für die Teilung des Flusses in zwei Ströme fungiert hier eine hohe Insel, deren Kopf mit Findlingen und Vegetation gesichert ist. Der linke Teil des Bauwerks hat eine geschätzte Länge von ca. 34 m. In diesem Bereich ist eine Lücke (abgesenkte Findlinge) mit 18 m Breite als Schifffahrtsrinne im Situationsplan eingetragen. Der rechte Teil des Bauwerks mit mehreren ca. 1,5 bis 3 m breiten sohlengleichen Lücken ist geschätzt ca. 65 m breit.

In Summe weisen die Lücken etwa die gleiche Länge auf wie beim Flussteiler Betschenrohr. Daraus folgt, dass sich bei Niedrigwasser analoge Wassertiefen einstellen werden [ca. 50 cm bei NMQ7 (30 m³/s) und ca. 50 bis 60 cm bei MNQ (35 m³/s)], wenn die Ausführung bezüglich Höhenlage der Steine in gleicher Weise wie beim Flussteiler Betschenrohr erfolgt.

Die geplante Stabilisierung des Inselkopfes mit Findlingen und Vegetation sichert nachhaltig die Trennung der Limmat in zwei Flussarme.

Die Aussagen zur hydraulischen und morphologischen Wirkung des Flussteilers Betschenrohr gelten analog auch für den Flussteiler Zelgli / Fahr mit Berücksichtigung, dass sich die Schifffahrtsrinne bei Zelgli / Fahr im linken Teil und bei Betschenrohr im rechten Teil des Flussteilers befindet.

3.10 Interaktion mit dem Grundwasserträger

Die Frage aus dem Auftrag im Detail: Wie werden die Auswirkungen der Revitalisierung auf den Grundwasserträger im Limmattal eingeschätzt?

Diese Frage kann nur qualitativ auf Basis von Erfahrungen aus anderen Projekten beantwortet werden.

Durch die morphologischen Strukturen wird sich bei Niedrig- bis Mittelwasser die Interaktionsfläche der Limmat mit dem Grundwasser nicht wesentlich verändern. Eventuell sind die morphologischen Rinnen bei Niederwasser etwas schmaler als heute und daher auch der Wasserspiegel etwas höher, dafür die benetzte Fläche kleiner. Demnach sind im Regelfall auch keine wesentlichen Auswirkungen in diesen Zeiträumen zu erwarten.

Bei der Initiierung der Aufweitungen und den nachfolgenden eigendynamischen Entwicklungen des Gewässers können auf Basis von Erfahrung aus in Österreich umgesetzten Projekten im Bereich von Siedlungsgebieten folgende Hinweise gegeben werden:

- Es besteht nach Entfernen der heutigen Ufersicherung das Risiko einer deutlichen Erhöhung der Infiltration in den Grundwasserkörper. Während die Gewässersohle bereits bei leicht erhöhten Wasserführungen infolge des Schwebstoffgehalts relativ rasch kolmatiert, erfolgt die Abdichtung der gut durchlässigen Uferbereiche deutlich langsamer.
Vermutlich läuft der Kolmatierungsprozess an der Limmat langsamer als anderen alpinen Flüssen ab, da der aus dem Zürichsee stammende Abflussanteil deutlich weniger Schwebstoffe aufweist als der Anteil aus der Sihl.
- Im Hochwasserfall ist die überströmte Kiesfläche und damit auch die Interaktionszone mit dem Grundwasser in Zukunft deutlich höher als heute. Auch wenn die Wasserspiegel durch den breiteren Abflussquerschnitt eher niedriger ausfallen, ist mit einer erhöhten Infiltration zu rechnen. Des Weiteren werden Hochwässer im Zuge der morphologischen Dynamik immer wieder große Flächen der Kiessohle dekolmatieren. Auch dieser Prozess wird, ohne entsprechende Gegenmaßnahmen zu einem Anstieg des Grundwasserspiegels führen.

Der zukünftige HQ₃₀₀-Schutz wird im Ereignisfall, verbunden mit einem höheren Wasserspiegel in der Limmat ebenfalls zu verstärkter Dotierung des Grundwasserkörpers führen. Wie dem Bericht aus dem Vorprojekt zum Thema Grundwasser zu entnehmen ist, kann bereits heute bei Hochwasser der Grundwasserspiegel in Teilbereichen bis knapp unter und auch über das Gelände ansteigen. Das zeigen auch die Querprofile aus dem Bauprojekt in allen drei Bereichen von Gaswerk bis Zelgli / Fahr. Damit sind in Siedlungsbereichen nicht nur Keller und Tiefgaragen, sondern bei Grundwasseranstieg über das Niveau von Einlaufschächten auch die Kanalisation betroffen.

Aus den zur Verfügung gestellten Daten ist nicht ablesbar, wie groß das Grundwasserspiegelgefälle quer zur Limmat ist. In den Aufweitungsbereichen rückt die Uferlinie gegenüber heute weiter nach außen, womit bei einem Grundwasserspiegelgefälle von der Limmat zum umliegenden Gelände hin allein dadurch im Hochwasserfall das Grundwasser in weiter entfernten Gebieten steigt. Dieser Umstand wird auch im Vorprojekt erwähnt (Bericht „Grundwasser und Trinkwasserversorgung“ S 15).

Aus allen diesen Gründen ist es ratsam die im Vorprojekt angeführten Drainagen zu errichten um Grundwasseranstiege zu begrenzen. Mit Blick auf die lange Dauer von Hochwasserwellen (Abbildung 4) ist zu überlegen ob zusätzlich Pumpwerke erforderlich sind um den Grundwasserspiegel im Hinterland zu begrenzen und damit Überflutungen und Schäden zu vermeiden, die eventuell bereits heute, auch ohne Umsetzung des Projekts auftreten können.

Von Vorteil ist, dass die erhöhte Einspeisung von Wasser aus der Limmat in den Grundwasserleiter eine verbesserte Nutzungsmöglichkeit sowohl für Trink- als auch Brauchwasser ermöglicht.

Zum Schutz der Grundwasserfassung Zelgli ist eine Abdichtung des Ufers im Bereich des neu herzustellenden Längsverbaus vorgesehen (siehe auch die diesbezügliche Anmerkung in 3.5 zum Uferschutz).

Für die Grundwasserfassung Fahr ist laut Technischem Bericht zum Vorprojekt (S 96) ebenfalls eine Abdichtung der Ufer vorgesehen.

Aus den vorliegenden Unterlagen ist nicht ersichtlich, auf welchen Bereich sich die Abdichtungsmaßnahmen erstrecken werden. Die Abdichtungen müssen auf jeden Fall

gegen Erosion durch die Limmat geschützt werden und somit außerhalb der Grenzen der eigendynamischen Entwicklungsflächen liegen.

3.11 Bedeutung des naturnahen Geschiebehaushalts für die «neuen» Auen

Trotz vieler Gewässerrevitalisierungen sind, bezogen auf die Gesamtlänge unserer Fließgewässer, regelmäßig sich erneuernde terrestrische Habitate nach wie vor selten zu finden. Die für ein funktionierendes Fließgewässersystem notwendige Abfolge von Erosion und Sedimentation ist nur dann möglich, wenn erodierte und damit flussab verfrachtete Feststoffmengen von flussauf wieder zugeführt werden. Frische Sedimentationsflächen bilden das Substrat für Pionierpflanzen. Wenn diese Flächen länger bestehen kann sich die Vegetation im weiteren Verlauf zu einem Auwald entwickeln. Die im Zuge der baulichen Umgestaltung geschaffenen Pionierstandorte werden entweder bei Hochwasser erodiert oder entwickeln sich mit der Zeit zu Weichholz- und vielleicht auch Hartholzaunen. Ohne ausreichender Feststoffzufuhr von flussauf für die Bildung neuer Pionierstandorte würde damit ein wesentlicher Teil des Fluss-Auen-Ökosystems verlorengehen.

An einem kiesführenden Fluss entsteht die größte morphologische Dynamik bei Auflandung der Sohle, also wenn die natürliche Transportkapazität des Gewässers überschritten wird. Bei Geschiebemangel bilden sich morphologische Strukturen zurück (Flussverzweigungen verschwinden, Kiesbänke werden abgetragen). Das Gewässer entwickelt sich in Richtung einer ebenen Sohle. Mit der Abflusskonzentration auf ein Hauptgerinne und der Morphologie einer ebenen Sohle geht auch die Fähigkeit zu einer lateralen Laufentwicklung zurück, woraus eine weitere Monotonisierung des Gewässers folgt. Zusätzlich führt Geschiebemangel zu Sohlenerosion. Das Gewässerprofil tieft sich ein, allenfalls vorhandene Auen werden seltener überflutet und verlieren damit an Dynamik. Die Abbildung 6 zeigt die Veränderung der morphologischen Dynamik für einen ca. 10 km langen Abschnitt der Salzach an der Grenze zwischen Österreich und Deutschland. Infolge Geschiebedefizit hat sich die Salzach hier im Mittel um ca. 2 m eingetieft. Gleichzeitig haben die Kolke und damit auch die Geschiebebänke stark abgenommen. Dargestellt ist die Differenz zwischen mittlerer Sohle und Talweg für den Zeitraum 1959 bis 2023. Die beiden Spitzen in den Jahren 2002 und 2013 sind auf große Hochwässer zurückzuführen, bei denen Sohldurchschläge in feinkörnige Sedimente auftraten, die zu mehreren Metern tiefen Kolken führten.

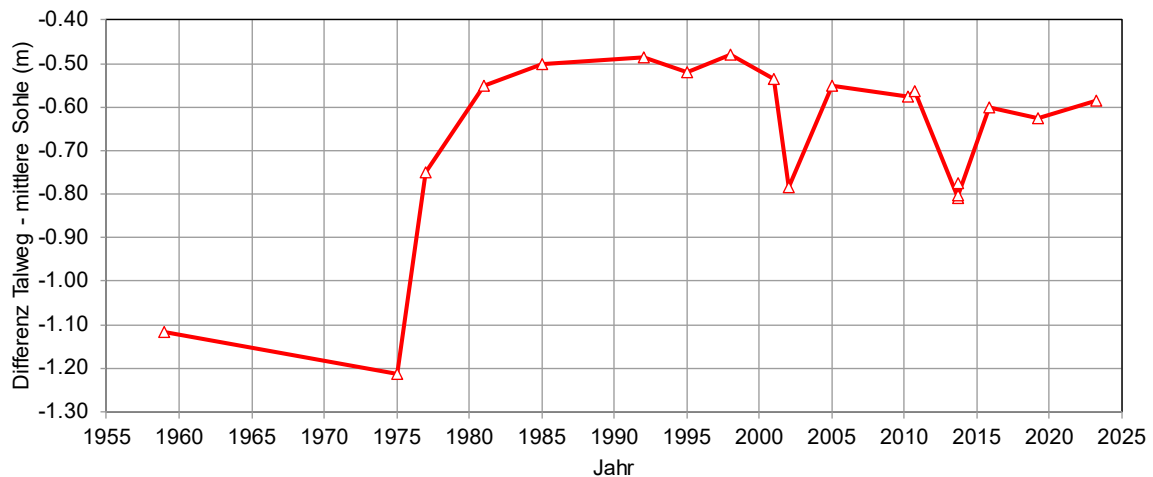


Abbildung 6: Beispiel für die Abnahme der morphologischen Dynamik eines Flusses bei Geschiebedefizit (Salzach, flussab der Stadt Salzburg)

Im Bericht zur Morphologie wird der natürliche Geschiebehaushalt der Limmat im Projektgebiet mit $2'400 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ angegeben. Nach Sanierung des Geschiebehaushalts wird mit $1'800 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ gerechnet. Das entspricht ca. 75 % des natürlichen Geschiebehaushalts. Bezogen auf die Aufweitung Betschenrohr bedeutet dies, dass bei 880 m Länge und 90 m Breite mit freier Kiessohle eine mittlere Höhe von lediglich 2 cm jedes Jahr vollständig erneuert wird. Praktisch erfolgen die Umlagerungen immer nur in Teilbereichen der Aufweitung. Des Weiteren führen laterale Verlagerungen des Geschiebes dazu, dass der Geschiebetransport verlangsamt wird und tatsächlich deutlich größere Volumina jährlich in Bewegung sein werden. Aus jüngeren Untersuchungen der ETH-Zürich (Rachelly, 2021) geht hervor, dass der für eine eigendynamische morphologische Entwicklung erforderliche Geschiebehaushalt 80 bis 100 % der Transportkapazität betragen sollte. Unter 60 % der natürlichen Transportkapazität bleibt der Fluss morphologisch inaktiv. Diese Erkenntnisse wurden anhand von Versuchen an Gewässern mit etwa 1 % Gefälle gewonnen. Da mit größerem Gefälle grundsätzlich eine größere Dynamik verbunden ist, ist anzunehmen, dass bei weniger steilen Gewässern der Prozentanteil am natürlichen Geschiebehaushalt tendenziell größer sein muss. Daraus folgt, dass die geplanten 75 % des natürlichen Geschiebehaushalts für die Limmat mit ca. 1,5 ‰ Gefälle eine gerade noch verträgliche untere Grenze darstellen um die für eine möglichst naturnahe Flussaue erforderliche Dynamik von Erosion und Sedimentation zu erreichen. Mit größeren Geschiebemengen könnte die morphologische Dynamik speziell im Initiierungsprozess der Aufweitung verbessert werden.

3.12 Einschätzung der langfristigen Dynamik: Natürlichkeitsgrad?

Die Grundlagen für die Beantwortung dieser Frage sind bereits in den Ausführungen der Kapitel 3.2 und 3.4 zu den Aufweitungen sowie in 3.11 zum Geschiebehaushalt enthalten.

Durch die Kombination von genügend Raum und einem ausreichenden Geschiebehaushalt ist die Basis für eine nachhaltige Dynamik des Fluss-Auen-Ökosystems gegeben.

Hochwässer sind die auslösenden Faktoren für die Morphodynamik. D.h. je nach Häufigkeit und Größe der Hochwässer ist mit Phasen stärkerer und schwächerer Dynamik in der Morphologie zu rechnen. In Phasen ohne oder nur mit geringer Morphodynamik verbleibt die Dynamik der Vegetationsentwicklung.

Für die Frage nach dem Natürlichkeitsgrad werden die Grundlagen für die Entwicklung von Habitaten in Abhängigkeit von der einem Gewässer zur Verfügung stehenden Breite aus Ghilardi, T, Roulier Ch. (2020) verwendet. Dazu ist noch anzumerken, dass die Betrachtung der Breite an einem Ort allein noch nicht die Entwicklung der gewünschten Habitate garantiert. Die Breiten müssen auch auf entsprechender Länge für die Gewässerdynamik verfügbar sein und mit ausreichend Geschiebe von flussauf versorgt werden.

Mit den Grundlagen aus dem Bericht Morphologie, Hydraulik und Geschiebe aus dem Vorprojekt (mittlere natürliche Sohlenbreite 110 m, Breite der Flussaue bei Oberengstringen aus Karte um 1650 ca. 350 m) und der Annahme, dass die bordvolle Breite bei HQ₂ bis HQ₅ etwa 130 m beträgt, ergeben sich in Abhängigkeit von der Breite die in Abbildung 7 dargestellten Gewässerfunktionen und der Erfüllungsgrad in Bezug auf die Natürlichkeit.

Eine analoge Abbildung ist auch im Bericht Morphologie, Hydraulik und Geschiebe aus dem Vorprojekt (Bild 10, S. 17) enthalten. Das Bild 10 aus dem Vorprojekt, das die Situation eines schwach gewundenen Gerinnes mit 90 m Sohlenbreite darstellt ist bezüglich Erfüllungsgrad etwas optimistischer als die Abbildung 7 mit einer um 20 m größeren natürlichen Sohlenbreite und der Annahme eines migrierenden Mäanders.

Der Unterschied ergibt sich dadurch, dass in dieser Zweitmeinung von den ursprünglichen Verhältnissen ausgegangen wird und das Bild 10 aus dem Vorprojekt auf einer bereits anthropogen veränderten Situation mit um ca. 20 % verringertem Geschiebehaushalt und reduzierter Hochwasserdynamik beruht.

Der Grad der Natürlichkeit bei der maximalen Entwicklungsbreite von 250 m in der Aufweitung Betschenrohr verringert sich von 80 auf ca. 70 %. Für die mittleren Entwicklungsbreite von 190 m in der Aufweitung Betschenrohr ergibt sich ein Natürlichkeitsgrad von etwa 60 %. In den anderen Aufweitungsbereichen ist im Wesentlichen nur im aquatischen Bereich eine Dynamik zu erwarten.

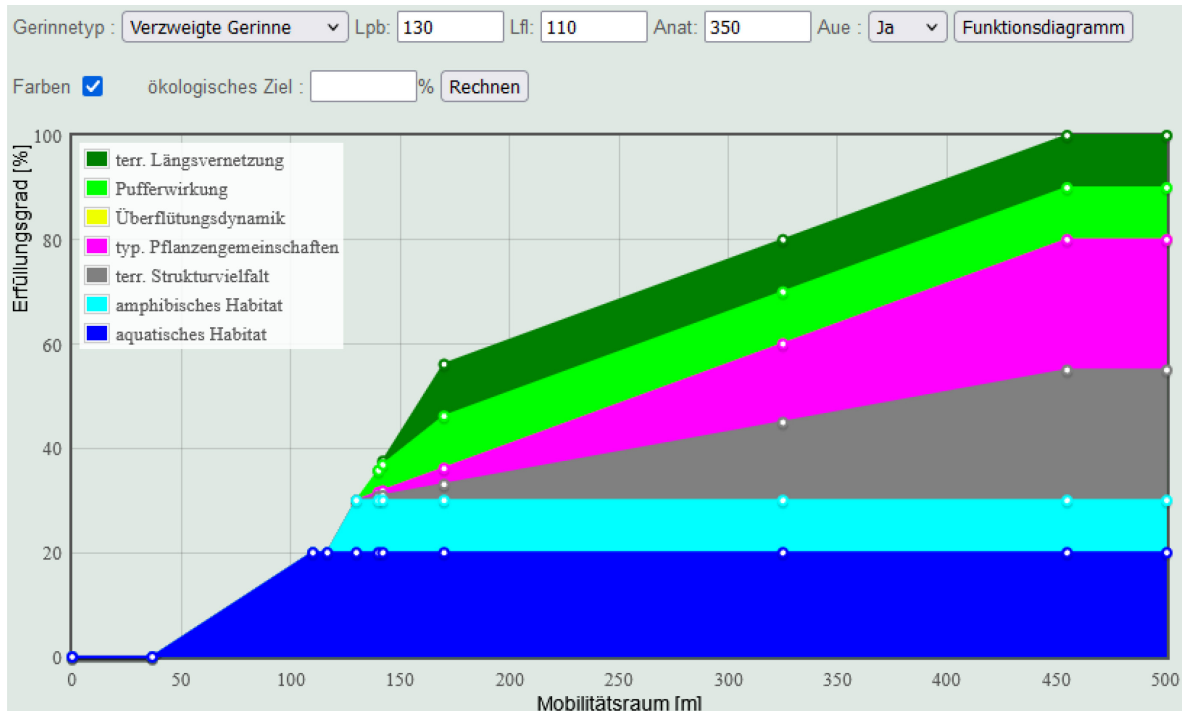


Abbildung 7: Basis für die Beurteilung des Grades der Natürlichkeit (Grundlage: Ghilardi, T, Roulier Ch., 2020)

Wie den Querprofilen aus dem Bauprojekt zu entnehmen ist, geht die Wasserspiegelbreite bei Hochwasser über die dynamischen Entwicklungsbreiten hinaus, so dass je nach Ausgestaltung und Pflege dieser Überflutungsbereiche insbesondere zusätzliche terrestrische Habitate für die Fauna und Flora zur Verfügung stehen.

4 Ergänzende Anmerkungen zum Projekt

Dieses Kapitel enthält einige ergänzende Anmerkungen, die sich sowohl auf die Planung als auch die Umsetzung des Projekts beziehen. Diese beruhen auf über 30 Jahre Tätigkeit des Autors in den Fachbereichen Wasserbau und Gewässermorphologie sowohl in der Planung (einschließlich wasserbauliches Versuchswesen) als auch im Monitoring umgesetzter Projekte.

Geschiebehaushalt: Wichtig ist, dass bereits während den weiteren Planungen zum Projekt die Sanierung des Geschiebehaushalts vorangetrieben wird. Wie im Kapitel 3.11 ausgeführt, funktioniert die Morphodynamik nur mit ausreichender Geschiebenachfuhr von flussauf. Andernfalls würden sich im Zuge der Bauausführung hergestellte Strukturen zurückbilden und sich damit auch die Habitatqualität wieder verschlechtern. Je nach Entfernung zu den Geschiebequellen im Einzugsgebiet, kann es einige Jahre dauern bis das Projektgebiet „Lebendige Limmat“ ausreichend Geschiebe erhält. Falls bei der Umsetzung der Aufweitungen mehr Kies gebaggert wird als an anderen Stellen wieder benötigt wird, könnte dieser Überschuss im Oberwasser kontrolliert eingebracht werden und damit von Beginn an den Geschiebehaushalt verbessern, auch wenn die Maßnahmen aus dem Einzugsgebiet noch nicht (vollständig) wirksam sind.

Geologie im Projektabschnitt: Die morphodynamische Entwicklung eines Gewässerabschnitts wird neben der Hydrologie auch vom Untergrundmaterial beeinflusst in dem sich der Fluss entwickeln soll. In Feinmaterial (sowohl Überlagerungen des Flussskieses als auch verfüllten Altarmen) schreiten Erosionen wesentlich schneller voran als in Kies. In den übermittelten Unterlagen zum Bauprojekt ist ein Längenprofil zum Kieshorizont entlang der Ufer enthalten. Da die geplanten Aufweitungen teilweise aber weit über die heutige Uferlinie hinausgehen, wird empfohlen die Untergrundverhältnisse detaillierter zu erkunden. Dies kann z. B. neben Baggerschürfen mit Ramm- oder Drucksondierungen erfolgen. Neben einer besseren Information zur Erosionsentwicklung, die auch für die Festlegung der Initialisierungsmaßnahmen verwendet werden kann, gewinnt man gleichzeitig verbesserte Daten für die Wieder- bzw. Weiterverwertung des im Zuge der Bauumsetzung anfallenden Materials, unter anderem auch für die oben erwähnte Geschiebezugabe zur temporären Verbesserung des Geschiebehaushalts. Aus

Erfahrung ist der Kies in Aufweitungsbereichen oft feiner, als das im Fluss transportierte Geschiebe. Dieser Unterschied kann über entsprechend höhere Geschiebezugabemengen ausgeglichen werden.

Schwebstoffhaushalt: In staubeeinflussten Gewässern kommt es in der Regel zu einer geänderten zeitlichen Verteilung des Schwebstofftransports. Außerhalb von Hochwasserperioden werden Schwebstoffe in den Stauräumen zurückgehalten. Bei Hochwasser kommt es damit zusammen mit dem natürlichen Schwebstoffaufkommen aus dem Einzugsgebiet zu einem erhöhten Schwebstoffanfall. Schwebstoffe lagern sich bevorzugt in Bereichen mit Vegetation ab, da dort die Fließgeschwindigkeit deutlich geringer ist als in der freien Strömung. Dies kann in Bereichen, die nicht der natürlichen Dynamik ausgesetzt sind zu nachhaltigen Verlandungen und damit Reduktion des Fließquerschnitts führen. Es wird empfohlen zu prüfen, ob dieser Prozess für die Projektstrecke maßgebend sein kann.

Hydrologie: Aus den übermittelten Unterlagen fällt auf, dass die Bemessungsabflüsse für den Hochwasserschutz im Laufe der Planungen reduziert wurden (z. B. HQ₃₀₀ von 690 auf 634 m³/s ab 2023). In Österreich gibt es auf Grund der zahlreichen Extremereignisse in den letzten Jahren eher die Tendenz die Bemessungsabflüsse zu erhöhen. Bei entsprechenden Wetterlagen können auch zwei Extremereignisse innerhalb weniger Tage auftreten. Es wird daher empfohlen zu prüfen, wie das Gewässersystem auf zwei kurz hintereinander auftretende Extremereignisse reagiert und ob die geplanten Notfallszenarien dafür ausreichen.

Vegetationsentwicklung und Hochwassersicherheit: In einem der eigendynamischen Entwicklung überlassenen Gewässerabschnitt mit hohem Natürlichkeitsgrad kann die Höhenlage des Hochwasserspiegels maßgeblich von der Vegetation beeinflusst werden. Auenwald verklaust und ist daher in der hydraulischen Berechnung als Abflussquerschnitt auszuschließen. Falls mehrere trockene Jahre aufeinander folgen, kann es sein, dass die Vegetation stärker zunimmt als geplant und Eingriffe für die Einhaltung des geplanten Hochwasserschutzgrades erforderlich sind. Auch der Klimawandel kann zu einer stärkeren Vegetationsentwicklung führen. Durch die höheren Temperaturen verlängern sich die Vegetationsperioden und damit auch die Chancen, dass Pionierpflanzen ausreichend stark im Untergrund verwurzeln oder eine den Boden schützende Pflanzendecke bilden und damit dem nächsten Hochwasser widerstehen. Es wird daher empfohlen für den Betrieb die Größe der von Bewuchs frei zu bleibenden Abflussquerschnitte zu definieren und diese im Betrieb zu überwachen. Des Weiteren sollten die erforderlichen

Mindestabflussquerschnitte und insbesondere alle für deren Erhaltung erforderliche Pflegemaßnahmen Teil des Antrags auf Projektgenehmigung sein. In Österreich ist speziell die naturschutzrechtliche Absicherung von Pflegemaßnahmen wichtig, um im Bedarfsfall unkompliziert eingreifen zu können.

Morphologische Entwicklung und Hochwassersicherheit: Aus dem Bericht Morphologie, Hydraulik und Geschiebe des Vorprojekts wird die Gleichgewichtssohle anhand einer hydrologischen Zeitreihe von 60 Jahren berechnet. Die so ermittelte Sohlenlage wird für die Berechnung der Hochwasserspiegellagen verwendet. Es stellen sich zwei Fragen:

- Ist nach am Ende der Rechnung eine Gleichgewichtssohle erreicht oder lässt sich aus der Analyse der zeitlichen Entwicklung von Querprofilen noch ein Trend ableiten?
- Trat innerhalb der berechneten Zeitreihe eine höhere Sohlenlage auf, die für den Hochwasserspiegel maßgebend sein könnte?

Schwemmholz und Verklausungen: Im Bericht Morphologie, Hydraulik und Geschiebe aus dem Vorprojekt wird auf Seite 30 erwähnt, dass die Hochwasserspuren bei der Brücke Weiningerstrasse deutlich über den Berechnungen liegen. Als möglicher Grund wird eine nicht ausreichende Erfassung der Geometrie aus der Vermessung angeführt. Ein weiterer Grund könnten Verklausungen sein. Mit den Renaturierungsmaßnahmen sowohl im Projektgebiet als auch vielleicht weiter flussauf kann sich die Schwemmholzmenge in Zukunft deutlich erhöhen. Selbst kurzfristig kann aus dem bestehen bleibenden und in die Flussaufweitung integrierten Waldstück im Betschenrohr viel Holz mobilisiert werden. Damit stellt sich die Frage nach möglichen Auswirkungen sowohl im Projektgebiet selbst als auch flussab.

Wie im Kapitel 3.8 bereits erwähnt, ist derzeit nur mit einem sehr geringen Schwemmholzaufkommen von flussauf zu rechnen, was sich negativ auf die Regenerierung der Totholzablagerungen in den renaturierten Bereichen auswirken kann. Es könnte analog zu den Maßnahmen für die Verbesserung des Geschiebehaushalts auch eine Verbesserung des Schwemmholzhaushalts angedacht werden. Z. B. in dem weiter flussauf bei Hochwasser zurückgehaltene Teile von Schwemmholz gezielt und kontrolliert wieder dem Fluss zugegeben werden.

Stabilität von Brückenpfeilern mit Verklausung: Untersuchungen für das Hochwasserschutzprojekt in der Internationalen Strecke des Alpenrheins zeigten, dass Verklausungen an Brückenpfeilern nicht nur zu einem Anstieg des Hochwasserspiegels, sondern auch zu einer sehr hohen Beanspruchung der Flusssohle mit der Konsequenz von

tieften Kolken führen. Daher sollten der Kolkschutz bzw. die Fundierungstiefe von Brückenpfeilern geprüft werden.

Closterkanal, Müligiessen, Äussere Giessen: Die Ausleitung in den Chlosterkanal erfolgt über ein Streichwehr. Entsprechend dem Bericht Morphologie, Hydraulik und Geschiebe aus dem Vorprojekt tritt im Bereich der Ausleitung keine Veränderung auf, demnach bleibt auch die Dotation gleich. Der Chlosterkanal verzweigt sich in Müligiessen und Äussere Giessen. Laut Technischem Bericht Seite 30 droht der Müligiessen während Trockenperioden abschnittsweise trocken zu fallen. Sind hier Verbesserungsmaßnahmen gewünscht? Dazu wären allerdings Maßnahmen außerhalb des derzeitigen Projektumfangs erforderlich.

Bootspassierbarkeit: Bei der Beantwortung der Fragen zu den Flussteilern wurde bereits auf den Aspekt der Bootspassierbarkeit eingegangen. Generell kann aber auch die Anwesenheit von Bibern im Projektgebiet Einfluss auf die Bootspassierbarkeit haben, wenn durch gefällte Bäume Hindernisse und möglicherweise auch Gefahrenbereiche entstehen.

Literatur

Bretscher, A. (1999). Zur Flussschifffahrt im Alten Bern. Wasserwege, Schiffe und Organisation. Berner Zeitschrift für Geschichte, Jg. 61, Nr. 3. Download https://www.bezg.ch/img/publikation/99_3/bretscher.pdf (letzte Überprüfung 8.1.2025)

Ghilardi, T, Roulier Ch. (2020). Gewässerraum für grosse Fließgewässer in der Schweiz. Manual zum Webtool. Bundesamt für Umwelt, Schweiz. Link zum Webtool: <http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/accueil-espace-ce-de.html> (letzte Überprüfung 8.1.2025)

Hengl M, Hafner T (2016). Eigendynamische Seitenerosion Prognose und Wirklichkeit. Wasserbau – mehr als Bauen im Wasser. Beiträge zum 18. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich. Technische Universität München Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Nr. 134

Rachelly C. (2021). Sediment Supply Control on River Widening, Morphodynamics and Refugia Availability. ETH-Zürich, VAW-Mitteilungen 265

Scherle J. (1999). Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen - Grundlagen, Leitbilder, Planung. Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Univ. Fridericana Karlsruhe, Mitteilung Nr. 199

Yalin M.S. (1992). River Mechanics. Pergamon Press, Oxford

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	Das heißt
HQx	Abfluss bei Hochwasser mit der Auftretenswahrscheinlichkeit x in Jahren
Kap.	Kapitel
km	Kilometer
Q	Abfluss
S	Seite
usw.	und so weiter

Bundesamt für Wasserwirtschaft

Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung

Am Brigittenauer Sporn 3, 1200 Wien

<https://www.baw.at/wasserbau.html>