

**ČEZMEJNI NAČRT ZA INOVATIVNO TRAJNOSTNO UPRAVLJANJE
MEJNE MURE IN IZBOLJŠANJE OBVLADOVANJA
POPLAVNE OGROŽENOSTI**

**GRENZÜBERSCHREITENDER MANAGEMENTPLAN ZUR INNOVATIVEN
NACHHALTIGEN BEWIRTSCHAFTUNG DER GRENZMUR UND ZUR
VERBESSERUNG DES HOCHWASSERRISIKOMANAGEMENTS**

Deliverable D.T1.3.2
Sedimenttransportstudie

Kurzfassung

Die Unterbrechung des Sedimentkontinuums und die Laufbegradigung und -verkürzung führten im Abschnitt der Mur an der Staatsgrenze zwischen Österreich und Slowenien (Grenzmur) zu einer starken morphologischen Beeinträchtigung und zu einer Eintiefung der Flusssohle, woraus ökologische und technische Probleme folgten. Zudem droht die geringe Mächtigkeit des Kieshorizonts mit einem Verlust des Kiesbetts und mit einem Durchschlag der Sohle in das Sediment des Tertiärs. Gleichzeitig ist die Grenzmur eingebettet in einem großen zusammenhängenden Auwald und flussab ohne Kontinuumsunterbrechung verbunden mit der Drau und der Donau, sodass dieser Abschnitt über ein großes ökologisches Potenzial verfügt. Im Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept für die Grenzmur aus dem Jahr 2001 wurde der Ufererosion eine bedeutende Rolle für den Erfolg von Rückbaumaßnahmen beigemessen; diese fand in einer daraufhin umgesetzten Maßnahme aber nur in begrenztem Ausmaß statt, woraufhin sich die generelle Wirksamkeit der Maßnahme reduzierte. Heute haben die Sohlhöhen der Grenzmur ein Rekordtief erreicht und zeigen somit dringenden Handlungsbedarf. Im Rahmen des EU Interreg SI-AT-Projekts goMURra wird ein neuer Managementplan mit Vorschlägen zu Renaturierungsmaßnahmen erarbeitet. Die vorliegende Studie dient der Entwicklung von Renaturierungsmaßnahmen, die den Bedarf an Geschiebeeintrag für eine natürlichere Morphologie der Grenzmur berücksichtigen.

Zunächst wurden Werkzeuge zur Abschätzung des Raumbedarfs für eine natürlichere Morphologie eingesetzt. Dann wurden unter Berücksichtigung der Raumwiderstände Maßnahmentypen entwickelt und mögliche Geometrien für einen Referenzabschnitt abgeleitet, in welchem die räumlichen Gegebenheiten die Umsetzung aller Maßnahmentypen zuließen. Grundlage für die Untersuchung bildete eine Hypothese, wonach der benötigte Geschiebeeintrag zur Stabilisierung der Sohlhöhen durch die Zurverfügungstellung einer größeren Breite und einer stärkeren Sinuosität (und damit abnehmendem Gefälle) sinkt, während der ökologische Nutzen steigt. Numerische Simulationen der Hydraulik, des Sedimenttransports, der Morphodynamik und der Hochwasserspiegellagen dienten schlussendlich einer eingehenden Überprüfung der Hypothese und anderer Maßnahmenwirkungen.

Es wurden drei Maßnahmentypen festgelegt: Bei Typ A ist die Grenzmur auf begrenzter Länge etwa 150 m breit, bei Typ B ist ein durchgehender Korridor mit einer Breite von etwa 220 m vorgesehen, und Typ C bietet einen durchgehenden Korridor, der breiter als 220 m ist und die größte Sinuosität und damit das geringste Gefälle ermöglicht. Die Modellläufe bestätigten die Verringerung der Geschiebe-transportkapazität in den entwickelten Maßnahmentypen, mit einer Reduktion von 9 % in Typ A, 31 % in Typ B und 56 % in Typ C. Breitere Verteilungen hydrodynamischer Variablen und größere benetzte Flächen deuten auf ein höheres Angebot an Habitaten hin. Kleinere Radien und Verzweigungen führen zu einer erhöhten Morphodynamik wie Ufererosion und Entwicklung von Kiesbänken und Inseln. Die verschiedenen in der Referenzstrecke getesteten Maßnahmentypen sind repräsentativ für die gesamte Grenzmur, was je nach örtlicher Platzverfügbarkeit eine Aneinanderreihung der Maßnahmentypen entlang der gesamten Grenzmur ermöglicht. Durch die Bereitstellung von mehr Raum für die Grenzmur würden sich die Kosten für dringend notwendige Geschiebezugaben reduzieren, während der ökologische Wert steigt. Die Bereitstellung eines Korridors (Maßnahmentyp C), in welchem sich die Grenzmur frei entwickeln kann, zeigte die größte Wirkung. Langfristig ist eine erhöhte Durchgängigkeit des Sediments aus dem Einzugsgebiet anzustreben.

Izveček

Prekinitiv prehodnosti plavin in uravnava ter skrajšanje struge so na mejnem odseku Mure med Avstrijo in Slovenijo (mejni Muri) povzročile močno morfološko spremenjenost in poglobljanje rečnega dna, kar ima za posledico ekološke in tehnične težave. Poleg tega grozi zaradi majhne debeline prodnate plasti preboj rečnega dna v terciarne plasti in izguba prodnate plasti. Hkrati je mejna Mura povezana z velikimi površinami obrečnega gozda in dolvodno brez prekinitve toka povezana z Dravo in Donavo, kar daje temu odseku velik ekološki potencial. V Načelni vodnogospodarski zasnovi za mejno Muro iz leta 2001 se je bočni eroziji pripisala pomembna vloga za uspeh renaturacijskih ukrepov. Ti so bili vendar izvedene zgolj v omejenem obsegu, zaradi česar se je tudi zmanjšal učinek tega ukrepa. Danes je višina rečnega dna na rekordnem nizkem nivoju in zahteva nujno ukrepanje. V okviru EU projekta goMURra v sklopu programa

Interreg SI-AT se je pripravil nov načrt upravljanja s predlogi za renaturacijske ukrepe. Predmetna študija naj omogoča razvoj renaturacijskih ukrepov, ki upoštevajo potreben vnos proda za naravnejšo morfolojo mejne Mure.

Najprej smo razvili orodje za ocenjevanje obsega potrebnih zemljišč za naravnejšo morfolojo. Potem smo z upoštevanjem prostorskih omejitev (ovir) razvili tipe ukrepov in iz tega izpeljali potencialne geometrije za referenčni odsek, v katerem prostorske razmere dopuščajo izvedbo vseh tipov ukrepov. Osnova raziskave je hipoteza, po kateri se bo potreben vnos proda za stabilizacijo dna zmanjšal z večjo širino struge in z večjo ukrivljenostjo (sinusnostjo) in z manjšim padcem, medtem ko se bo povečala ekološka korist. Numerične simulacije hidravlike, premeščanja plavin, morfodinamike in vodostajev visoke vode so nam omogočile preverjanje hipoteze in drugih učinkov ukrepov.

Določili smo trije tipe ukrepov: Pri tipu A je mejna Mura na omejeni dolžini široka približno 150 m, pri tipu B je predviden prehodni koridor širine 220 m in pri tipu C je koridor širši od 220 m, kar omogoča največjo vijugavost in s tem najmanjši padec. Izračuni modelov potrjujejo zmanjšanje premestitvene zmogljivosti v razvitih tipih ukrepov z redukcijo za 9 % v tipu A, za 31 % v tipu B in za 56 % v tipu C. Širša porazdelitev hidrodinamičnih spremenljivk in večje omočene površine nakazujejo večjo ponudbo habitatov. Manjši radiji in razvejanost povzročita večjo morfodinamiko, ki se izraža kot bočna erozija in razvoj prodišč ter otokov. Različni tipi ukrepov, preizkušeni na referenčnem odseku, so reprezentativni za celotno mejno Muro, kar glede na razpoložljive površine omogoča zaporedno razvrščanje tipov ukrepov vzdolž celotne mejne Mure. Mejna Mura bi z dodatnimi površinami povzročila manj stroškov za nujno potreben vnos proda, medtem ko bi se povečala ekološka vrednost. Največji učinek bi povzročil koridor ukrepa C, znotraj katerega bi se mejna Mura lahko prosto razvila. Dolgoročno bo potrebno stremeti po povečani prehodnosti plavin iz porečja.

Abstract


In the section of the Mura River along the state border between Austria and Slovenia (border Mura), channelisation and the interruption of the sediment continuum led to a strong morphological impairment and to an incision of the river bed, which resulted in ecological and technical problems. In addition, the little remaining thickness of the gravel layer implies the threat of losing the gravel bed or of a breakthrough into Tertiary sediment. At the same time, the border Mura is embedded in a large continuous alluvial forest and is connected to the Drava and the Danube downstream without a continuum interruption, so that this section has great ecological potential. In the basic water management concept for the Grenzmur from 2001, bank erosion was attributed an important role for the success of restoration measures; however, in a subsequent measure implemented, this only occurred to a limited extent, which reduced the general effectiveness of the measure. Today, the bed levels of the border Mura reached a record low and show an urgent need of action. Within the framework of the EU Interreg SI-AT project goMURra, a new management plan is being developed. The present study assists in developing restoration measures, which account for the need of bedload for restoring the morphology of the Mura River.

First, tools were applied for estimating the space requirements for a more natural morphology. Then, measure types were developed while considering spatial constraints, and possible target geometries were derived. We hypothesized that with increasing channel width and with increasing sinuosity (and hence decreasing slope), less bedload supply would be needed for stabilizing bed levels while ecological benefits would increase. Numerical simulations of hydraulics, sediment transport, morphodynamics and flood water levels then served an in-depth testing of the hypothesis and of other measures' effects in a reference reach, where the space availability would allow the implementation of each of the types.

Three measure types were established: In type A, the border Mura is about 150 m wide over limited length, in type B a continuous corridor is provided at a width of about 220 m, and type C offers a continuous corridor wider than 220 m, allowing the highest curvature and hence providing the smallest channel slope. The model runs confirmed the reduction of bedload transport capacity in the developed measure types, reaching 9 % in type A, 31 % in type B and 56 % in type C. Wider distributions of flow variables and larger wetted areas indicate a higher provision of habitats. Smaller radii and braiding cause an increased morphodynamics such as riverbank erosion and bar deposition. The different measure types tested in the reference reach are representative for the entire border Mura, which allows stringing together measure

types along the entire border Mura, depending on local space availability. By providing more space to the border Mura, maintenance costs for artificial bedload supply would decrease while strongly increasing the ecological benefits. The provision of a corridor (measure type C), which allows free lateral dynamics of the border Mura, showed the largest effects. Over long term, an increased sediment connectivity to the catchment is needed.

Dokumenteninformation

Tatsächliches Abgabedatum	11/2021
Verantwortlicher Partner für das Deliverable	Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit (A14) Wartingergasse 43, 8010 Graz
	
Andere involvierte Partner	-

Dissemination Ebene

Öffentlich	[X]
Beschränkt auf eine vom Konsortium festgelegte Gruppe	-
Vertraulich, nur für Mitglieder des Konsortiums	-

Autoren

DI Dr. Mario Klösch Ass.Prof. Priv.-Doz. DI Dr. Michael Tritthart DI Ulrich Beikircher Roman Dunst, BSc DI Markus Eder Univ.Prof. DI Dr. Dr.h.c. Helmut Habersack	Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung, Muthgasse 107, 1190 Wien im Auftrag des Projektpartners A14
--	--



Übersetzung

Mag. Dr. Andrea Haberl-Zemljič	Interlineas - Übersetzungsbüro für Slowenisch, Hautplatz 2, 8490 Bad Radkersburg
--------------------------------	---

Peer reviewers

DI Tanja Schriebl	A14
-------------------	-----

Versionierung

0.0	Erstentwurf (11/2021)
1.0	Endversion (11/2021)
2.0	Endversion mit Korrekturen (01/2022)

ERRATA

Version 2.0 beinhaltet die folgenden Korrekturen im Vergleich zu Version 1.0:

No.	Kapitel	Korrektur
1	7 ERGÄNZENDE ANALYSEN ZUR MASSNAHMENWIRKUNG	Korrigierte Beschreibung der Dauer der Maßnahmenwirkung bezüglich verfügbare Geschiebemengen im 2. Absatz des Kapitels.
2	7 ERGÄNZENDE ANALYSEN ZUR MASSNAHMENWIRKUNG	Korrigierter Achsentitel der Ordinate in Abbildung 78 und entsprechende Korrektur der Bildbeschriftung.
3	7 ERGÄNZENDE ANALYSEN ZUR MASSNAHMENWIRKUNG	Korrigierter Achsentitel der Ordinate in Abbildung 81, Verbesserung der Abbildung um den Inhalt verständlicher zu beschreiben, entsprechende Korrektur der Bildbeschriftung.
4	8 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	Korrigierter Text zum Zeitpunkt des Beginns des Kraftwerksbaus an der Mur im ersten Absatz des Kapitels.
5	8 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	Korrigierte Beschreibung der Dauer der Maßnahmenwirkung betreffend vorhandenes Geschiebe im 7. Absatz des Kapitels.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	14
2.	ZIELSETZUNG	15
3.	EINFÜHRUNG IN DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	16
3.1.	Lage und hydrologische Charakteristik	16
3.2.	Der historische Zustand der Grenzmur	18
3.3.	Die menschlichen Eingriffe	19
3.3.1.	Regulierungsmaßnahmen	19
3.3.2.	Sedimentrückhalt im Einzugsgebiet	20
3.3.3.	Veränderung flussmorphologischer und geschiebetransportrelevanter Größen 21	
3.4.	Auswirkungen auf die Sohlage	24
3.4.1.	Datengrundlagen.....	25
3.4.2.	Methodik der Auswertung	25
3.4.3.	Ergebnisse zur Sohlentwicklung.....	26
3.5.	Bisher umgesetzte Gegenmaßnahmen und deren Wirkung	30
3.5.1.	Das Wasserwirtschaftliche Grundsatzkonzept für die Grenzmur	30
3.5.2.	Maßnahme Gosdorf I	31
3.5.3.	Maßnahme Sieldorf	37
3.5.4.	Auswirkungen auf den gesamten Grenzmurabschnitt	37
3.6.	Ursache-Wirkungs-Analyse	39
3.6.1.	Grundlagen	39
3.6.2.	Übertragung der Grundlagen und der Erkenntnisse auf die Grenzmur	42
3.7.	Abgeleiteter Handlungsbedarf	43
4.	VORABSCHÄTZUNG DES RAUMBEDARFS.....	44
4.1.	Analyse historischer Karten.....	44
4.2.	Regimetheoretische Ansätze.....	46
4.2.1.	Da Silva-Diagramm (Da Silva, 1991; Ahmari und Da Silva, 2011)	47
4.2.2.	River bar predictor (Crosato and Mosselman, 2009).....	49
4.2.3.	Regimegleichung (Parker et al., 2007)	50
4.3.	Ingenieurmäßige Berechnungsmethoden	52

4.4.	Abschätzung des Längenbedarfs.....	54
4.5.	Abschätzung des erweiterten Platzbedarfs	55
4.6.	Zusammenfassende Beurteilung des Raumbedarfs.....	56
5.	ENTWICKLUNG VON MASSNAHMENVARIANTEN	57
6.	NUMERISCHE MODELLIERUNG	64
6.1.	Methoden.....	64
6.1.1.	Beschreibung der Modelle	64
6.1.2.	Modellaufbau	70
6.1.3.	Modellszenarien.....	82
6.2.	Ergebnisse	84
6.2.1.	Hydrodynamik	84
6.2.2.	Sedimenttransport	94
6.2.3.	Hochwasserspiegellagen	101
7.	ERGÄNZENDE ANALYSEN ZUR MASSNAHMENWIRKUNG.....	102
8.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	106
9.	LITERATUR	108

ABBILDUNGEN

Abbildung 1. Lage der Grenzmur und des Einzugsgebiets. Detail: Einteilung des Grenzmurabschnitts gemäß Wasserwirtschaftlichem Grundsatzkonzept (2001) (Klösch et al. 2011 unter Verwendung von Daten des Hydrologischen Atlas).....	16
Abbildung 2. Unterteilung der historischen Mur in Abschnitte unter Verwendung flussmorphologischer Kriterien. Abschnitt 1: pendelnd, 2: gestreckt, 3: verzweigt/gewunden, 4: gestreckt, 5: verzweigt/gewunden (Habersack et al., 2001b).	18
Abbildung 3: Ausschnitt der Franziszeischen Landesaufnahme für den Murabschnitt zwischen Mureck/Trate und Halbenrain/Apace (1821-1836) (Quelle: Österreichisches Staatsarchiv)..	18
Abbildung 4. Zeitlicher Verlauf eines Durchstiches von 1879 bis 1881 in den Plänen der Regulierung von Hohenburger (aus Habersack et al., 2001a).....	20
Abbildung 5. Kraftwerksanlagen im Einzugsgebiet der Grenzmur (Wagner et al., 2015)	21
Abbildung 6. Veränderung flussmorphologischer Parameter an der Grenzmur. a) Radius, b)Gefälle, und c) Breite. Die Abschnitte wurden entsprechend der geomorphologischen Charakteristik unterteilt (für die Lage der Abschnitte siehe Abbildung 1 und Abbildung 2) (Habersack et al., 2001b; modifiziert von Klösch et al., 2011).....	22
Abbildung 7. Historische Grenzmur und Grenzmur im Jahr 2000 im Abschnitt zwischen Mureck und Bad Radkersburg (Habersack et al., 2001b).....	22
Abbildung 8. Vergleich der Flächen pro Lauflänge von unterschiedlichen Gewässertypen an der Grenzmur (Flusskm 108 – 110; 1876 und 2000) (Jungwirth et al., 2001)	23
Abbildung 9. Lage und Fläche von Kiesinseln im Abschnitt zwischen Mureck und Radkersburg.	24
Abbildung 10. Mittlere Sohlhöhenänderung, sowie die Sohlhöhenänderung im Profil mit der größten Eintiefung (km 114,840) an der Grenzmur zwischen 1974 und dem Beginn der Umsetzung größerer Maßnahmen im Jahr 2006. Die unterschiedliche Distanz zwischen den Querprofilen wurde in der Berechnung der mittleren Sohlhöhenänderung des gesamten Abschnitts durch Gewichtung berücksichtigt.	27
Abbildung 11. Die mittleren Sohlhöhenänderungen in den Profilen, dargestellt im Längsverlauf, für den Zeitraum zwischen 1974 und dem Beginn der Umsetzung der größeren Maßnahmen im Jahr 2006. Die stärksten Erosionen zeigten sich bei Flusskilometer 114,840, knapp flussab von der natürlichen Schwelle bei Gosdorf, die durch die Sohlerosion immer mehr aus der Sohle ragte.	28
Abbildung 12. Entwicklung der Sohle im Querprofil bei Flusskilometer 114,840, in welchem bereits im Jahr 2006 nur mehr eine geringe Distanz zum Tertiär vorhanden war.....	29
Abbildung 13. Über den Zeitraum 1974 bis 2006 kumulierter Austrag an Sedimentvolumen aus der Grenzmur	30
Abbildung 14. Bei Gosdorf umgesetzte Flussaufweitung mit deren Maßnahmenkomponenten (Habersack et al., 2008).....	32
Abbildung 15. : Entwicklung der mittleren Sohlhöhen und des tiefsten Profilverlaufs in Querprofilen flussab der Aufweitung vor und nach der Maßnahmensetzung bei Gosdorf (Habersack et al., 2013).....	33

Abbildung 16. Lage der untersuchten Uferabschnitte im Maßnahmenabschnitt bei Gosdorf.	33
Abbildung 17. Ufererosion seit der Maßnahmenumsetzung in Gosdorf, für die in Abbildung 16 dargestellten Ufer, a) Querprofil im Uferabschnitt flussauf mit verstärkter Anströmung durch die vorhandene Schwelle, b) Querprofil im geraden Uferabschnitt flussab.	34
Abbildung 18. Ufererosion in einem geraden Uferabschnitt bei Gosdorf durch ein Hochwasserereignis am 22. Juli 2012 (Habersack et al., 2013).	35
Abbildung 19. Zurückgelegter Weg eines Geschiebekorns mit einer b-Achse von 33 mm, berechnet mit dem Formelansatz von Klösch und Habersack (2018) unter Verwendung des Datensatzes von Habersack et al. (2013) (Quelle Hydrografische Daten: Hydrografischer Dienst Steiermark).	36
Abbildung 20. Korngrößenverteilung von Vorlandsediment, ermittelt anhand von Daten des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts (Ständige österreichisch-slowenische Kommission für die Grenzmur, 2001), so wie auch das Zugabematerial bei Gosdorf vermutlich im Durchschnitt beschaffen war. Bis zu einer Korngröße von 33 mm könnte das Zugabematerial schon aus der Grenzmur ausgetragen worden sein.	36
Abbildung 21. a) Maßnahmenabschnitt bei Sieldorf mit eingezeichneter Profillage und b) Veränderung im Querprofil im Zeitraum zwischen 2012 und 2018, analysiert mit dem Tool HyMoLink (Klösch et al., 2019a)	37
Abbildung 22. Mittlere Sohlhöhenänderung, sowie die Sohlhöhenänderung im Profil mit der größten Eintiefung (km 114,840) an der Grenzmur seit 1974. Die unterschiedliche Distanz zwischen den Querprofilen wurde in der Berechnung der mittleren Sohlhöhenänderung des gesamten Abschnitts durch Gewichtung berücksichtigt.	38
Abbildung 23. Die mittleren Sohlhöhenänderungen in den Profilen dargestellt im Längsverlauf für den gesamten Zeitraum seit 1974, inklusive der Entwicklung nach dem Beginn der Umsetzung der größeren Maßnahmen im Jahr 2006.	38
Abbildung 24. Entwicklung der Sohle im Querprofil bei Flusskilometer 114,840 bis zur Vermessung im Jahr 2018, in welchem nur eine geringe Distanz zum Tertiär vorhanden ist.	39
Abbildung 25. Abhängigkeit der Morphologie und der Stabilität von der Menge des Sedimenteintrags und der Korngröße (Church, 2006)	41
Abbildung 26. Entwicklung von einem mehrarmigen und verzweigten Gerinne zu einem engen Kanal nach Reduktion des Sedimenteintrags (Marti und Bezzola, 2009).	42
Abbildung 27. Abhängigkeit der Morphologie von der Geschiebekonzentration nach Mueller and Pitlick (2014). Q_{bf} ist der bordvolle Abfluss, Q^* ist ein dimensionsloser Durchfluss, $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ ist die spezifische Dichte des Sediments (ρ_s / ρ) und D_{50} der Median des Korndurchmessers. Die Geschiebekonzentration C errechnet sich aus der Relation zwischen dem volumetrischen Geschiebetransport bei bordvollem Abfluss und dem bordvollen Abfluss. C_t ist die Geschiebekonzentration am Übergang zwischen einarmigen und verzweigten Gerinnen. ...	42
Abbildung 28. Abschnitte in historischen Karten des Grenzmurabschnitts (Abbildung links unten knapp flussab der Grenzmur bei Radenci) mit großen Breiten eines durchgehend benetzten Flussbetts.	45
Abbildung 29. Längen und Breiten von Kies-/Sandbänken und Inseln für Längen kleiner als 600 m an der Grenzmur gemäß der Josephinischen (ersten) Landesaufnahme (1764-1787).	46

Abbildung 30. Mittlere Sieblinie der im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts entnommenen volumetrischen Baggerproben (Quelle: Hengl et al., 2001)	47
Abbildung 31. Da Silva-Diagramm mit eingetragenen Pfaden der Mur vom aktuellen, regulierten Zustand über die Erhöhung der Gerinnebreite bis zu beginnenden Verzweigungen.	49
Abbildung 32. Berechnung des Bankmodus, der gemäß river bar predictor die auftretende Morphologie beschreibt, für verschiedene Gerinnebreiten.	50
Abbildung 33. Korridorbreite, die sich aus der Gerinnebreite, dem Gefälle und den Kurvenradien ergibt. α beschreibt dabei den Ablenkungswinkel im Wendepunkt. Die Korngröße an der Oberfläche des Flussbetts ergibt sich aus der umgekehrten Verwendung der Regimegleichung.	52
Abbildung 34. Abhängigkeit der Geschiebetransportkapazität von Gefälle und der Breite der Grenzmur (nach Habersack und Schneider, 2000).	53
Abbildung 35. Querprofil, wie es gemäß Modell Widest nach Uferrückbau nach zehn Jahren aussehen würde, bei einer Geschiebezufuhr gemäß Geschiebetransportkapazität in einem reguliert verbliebenen Abschnitt flussauf.	54
Abbildung 36. Berechnete Mindestlängen L_A eines Aufweitungsabschnitts an der Mur für unterschiedliche Aufweitungsweiten nach Hunzinger (1998). Zu beachten ist, dass diese Mindestlängen erst die Einstellung einer der Breite entsprechenden Morphologie erlauben. Damit diese Morphologie aber über einen großen Teil der Aufweitung vorhanden ist, sollten größere Längen angeboten werden (z.B. $2 \times L_A$).	55
Abbildung 37. Aus den Analysen zum Raumbedarf und zur Raumverfügbarkeit abgeleitete Maßnahmentypen für die Grenzmur.	58
Abbildung 38. Auf den Referenzabschnitt übertragener Grundriss mit der morphologischen Charakteristik des Maßnahmentyps A im Abschnitt zwischen Fluss-km 109,54 und 103,39 gemäß der zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept verwendeten Kilometrierung (in der Abbildung ist die aktuelle Kilometrierung dargestellt).	58
Abbildung 39. Auf den Referenzabschnitt übertragener Grundriss mit der morphologischen Charakteristik des Maßnahmentyps B im Abschnitt zwischen Fluss-km 109,54 und 103,39 gemäß der zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept verwendeten Kilometrierung (in der Abbildung ist die aktuelle Kilometrierung dargestellt).	59
Abbildung 40. Auf den Referenzabschnitt übertragener Grundriss mit der morphologischen Charakteristik des Maßnahmentyps C im Abschnitt zwischen Fluss-km 109,54 und 103,39 gemäß der zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept verwendeten Kilometrierung (in der Abbildung ist die aktuelle Kilometrierung dargestellt).	59
Abbildung 41. Stellvertretend für Typ A hergestellte Geometrie im Referenzabschnitt.	60
Abbildung 42. Stellvertretend für Typ B hergestellte Geometrie im Referenzabschnitt.	61
Abbildung 43. Stellvertretend für Typ C hergestellte Geometrie im Referenzabschnitt.	61
Abbildung 44. Aus der in goMURra im Jahr 2019 durchgeführten Vermessung erhaltene Geometrie im Referenzabschnitt, stellvertretend für Typ 0 (keine Veränderung des Verbauungsgrades).	62
Abbildung 45: Sohlenschichtung mit Austauschschicht (nach ATV-DVWK, 2003)	68

Abbildung 46. Typ 0 mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung	71
Abbildung 47. Typ A mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung sowie an den Inselflächen	71
Abbildung 48. Typ B mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung sowie an den Inselflächen	72
Abbildung 49. Typ C mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung sowie an den Inselflächen	72
Abbildung 50. Darstellung des gewählten Rechenetzes am Beispiel Typ 0.....	73
Abbildung 51. Korngrößenverteilung des Bettmaterials aus volumetrischen Proben; die im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts durchgeführt wurden.	75
Abbildung 52. Korngrößenverteilungen der Linienzahlanalysen für die Abschätzung der Deckschicht in Typ 0; Projekt Grenzmur	75
Abbildung 53. Korngrößenverteilungen der Sohlbelegung aus den Vorlands-Abschätzungen; Projekt Grenzmur	76
Abbildung 54. Zielzustand der gesamten Grenzmur und ausgewählte Profillagen, die repräsentativ für den gesamten Abschnitt der Grenzmur auf mögliche Auswirkungen auf Hochwasserspiegellagen untersucht werden.	78
Abbildung 55. Szenario einer mittleren Sohlhebung von 80 cm in Querprofilen der unterschiedlichen Maßnahmenabschnitte, die hinsichtlich Querprofilgeometrie und Überflutungsbreite repräsentativ sind für die Situation im Maßnahmenabschnitt des a) Typs A, b) B und c) C.	80
Abbildung 56. Volumsneutral (ohne Übertragung des in Schwebstoff übergehenden Anteils) umgelagerte Profile mit Überflutungsfläche, die hinsichtlich Querprofilgeometrie und Überflutungsbreite repräsentativ sind für die Situation im Maßnahmenabschnitt des a) Typs A, b) B und c) C.	81
Abbildung 57. Mittlere jährliche Sohleintiefung im Zeitraum 1974 bis 2003 im Referenzabschnitt.	82
Abbildung 58. Durchflussganglinie des Jahres 1986 am Pegel Mureck, und Verkürzung der Ganglinie durch Beschränkung auf Durchflüsse über $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	84
Abbildung 59. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der aktuellen Morphologie des Referenzabschnitts.	85
Abbildung 60. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der aktuellen Morphologie des Referenzabschnitts.	86
Abbildung 61. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs A im Referenzabschnitt.	87
Abbildung 62. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs A im Referenzabschnitt.	87
Abbildung 63. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs B im Referenzabschnitt.	88
Abbildung 64. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs B im Referenzabschnitt.	89
Abbildung 65. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs C im Referenzabschnitt.	90

Abbildung 66. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs C im Referenzabschnitt.	91
Abbildung 67. Verteilungen der Fließgeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Maßnahmentypen.....	92
Abbildung 68. Verteilungen der Wassertiefen in den unterschiedlichen Maßnahmentypen.	92
Abbildung 69. Verteilungen der Sohlschubspannungen in den unterschiedlichen Maßnahmentypen.....	93
Abbildung 70. Mittlere Sohlschubspannungen in den drei Maßnahmentypen A, B und C in Relation zum Mittelwert in der aktuellen Geometrie.....	94
Abbildung 71. Ergebnis der Kalibrierung des Sedimenttransportmodells, die anhand des Vergleichs von gemessenen mit modellierten Eintiefungsraten durchgeführt wurde.	95
Abbildung 72. Benötigter Geschiebeeintrag der Maßnahmenvarianten für einen ausgeglichenen Sedimenthaushalt, mit Angabe der Reduktion des benötigten Geschiebeeintrags im Vergleich zum aktuellen Zustand.	96
Abbildung 73. Geschiebetransportkapazität bzw. Geschiebebedarf in Abhängigkeit von der Hydrologie.	96
Abbildung 74. Morphodynamik in Typ 0 nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.....	99
Abbildung 75. Morphodynamik in Typ A nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.....	99
Abbildung 76. Morphodynamik in Typ B nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.....	100
Abbildung 77. Morphodynamik in Typ C nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.....	100
Abbildung 78. Wirkungsdauer der Zugabe für die verschiedenen Maßnahmentypen.	103
Abbildung 79. Aufenthaltsdauer von Geschiebe in den verschiedenen Maßnahmentypen.	104
Abbildung 80. Lateraler Sediment austausch in renaturierten Maßnahmenabschnitten mit Geschiebedotation durch Ablagerung von Sediment. a) Ufererosion bei Gosdorf, b) Ablagerung einer Kiesbank bei Sichelndorf, das vom in Gosdorf eingebrachten Sediment, aber auch von Sediment aus der Sohlerosion flussauf profitierte.....	104
Abbildung 81. Geschiebeeffizienz der verschiedenen Maßnahmenvarianten dargestellt durch Wirkungsdauer der Zugaben und Aufenthaltsdauer von Geschiebe.....	105

TABELLEN

Tabelle 1. Charakteristische Durchflüsse der Mur am Pegel Mureck (Hydrografischer Dienst, 2020).....	17
Tabelle 2: Flussaufweitungsprojekte mit Kies- und Sandeintrag an der Grenzmur seit 2003 (Geofoto, 2017)	31
Tabelle 3. Vergleich ausgewählter flussmorphologischer Parameter für den Abschnitt zwischen Mureck und Radkersburg (Habersack und Schneider, 2000).....	45
Tabelle 4. Morphologische Parameter der Maßnahmentypen.	63
Tabelle 5: Übersicht der gewählten Rauigkeiten in RSim-3D	70
Tabelle 6: Erosionsparameter	77
Tabelle 7. Nachbildung der aktuellen, regulierten Gerinnegeometrie durch ein Trapezgerinne.	79
Tabelle 8. Eigenschaften der Maßnahmenabschnitte.	79
Tabelle 9. Für unterschiedliche Elemente der Mur gewählte Rauigkeiten.....	82
Tabelle 10: Geschiebejahresfrachten der Maßnahmenvarianten basierend auf der Geschiebetransportkapazität.	95
Tabelle 11. Materialgewinn aus Initialmaßnahmen der Maßnahmentypen.	102

1. EINLEITUNG

Die Mur entlang der heutigen Grenze zwischen Österreich und Slowenien bildete historisch eine dynamische Flusslandschaft, die zu einem großen Teil aus mehreren Flussarmen bestand und ständig ihre Gestalt veränderte. Die Dynamik des verzweigt/gewundenen Flusslaufs bedeutete bei Hochwasser neben Überschwemmungen auch Laufverlagerungen. Somit geriet die Grenzmur zunehmend in Konflikt mit den entlang liegenden menschlichen Nutzungen (Landwirtschaft, Besiedelung, Müllerei). Beginnend im Mittelalter wurden lokale Regulierungen vorgenommen, bis die Grenzmur schlussendlich am Ende des 19. Jahrhunderts einer systematischen Regulierung unterworfen wurde.

War eine Erhöhung der Geschiebetransportkapazität zunächst erwünscht, um über eine selbsttätige Eintiefung der Sohle die Abflusskapazität zwischen den Uferböschungen zu erhöhen, so wurde die fortschreitende Sohlerosion - verstärkt durch die Errichtung von Wasserkraftwerken und Geschiebesperren im Einzugsgebiet - zunehmend zum Problem für die Anrainer sowie für die an der Grenzmur beheimatete Fauna und Flora. Wasserbaulich wurde man zunehmend konfrontiert mit der Unterspülung und der daraus resultierenden Destabilisierung der Ufersicherungen. Die verringerte Speisung des Grundwasserkörpers durch die tiefer liegende Mur verursachte zum Teil Probleme für die Trinkwasserversorgung und für die Landwirtschaft. Die Einengung und Begradigung ging einher mit einem Verlust an Habitaten für Fauna und Flora, mit fortschreitender Abtrennung der Au vom Gewässer durch eine schlechtere Anbindung der Mühlkanäle, seltenere Überschwemmungen und einem tieferliegenden Grundwasserspiegel. Bohrungen zeigten zudem eine geringe Mächtigkeit des Kieskörpers, und die Gefahr eines „Sohldurchschlags“ in das feinere Sediment des Tertiärs.

Das im Jahr 2001 fertiggestellte Wasserwirtschaftliche Grundsatzkonzept (Ständige österreichisch-slowenische Kommission für die Mur, 2001) entwarf Gegenmaßnahmen, die zumindest temporär durch eine künstliche Einbringung von Kies und das Zulassen von Seitenerosion zu einer Stabilisierung der Sohle führen sollten. Dabei wurde neben der künstlichen Geschiebezugabe eine besondere Bedeutung der Erosion der kieshaltigen Ufer nach Uferrückbau beigemessen, die den Grenzmurabschnitt über einen längeren Zeitraum mit Geschiebe hätte versorgen und der Eintiefung der Sohle entgegenwirken sollen. Die Wirkung der nachfolgend umgesetzten Maßnahmen konnte nachgewiesen werden, erwies sich aber als kleiner als erwartet, und die Sohleintiefung setzte sich fort. Dabei weisen die geringe Mächtigkeit des verbliebenen Kieshorizonts und die gemessenen Erosionsraten auf einen akuten Handlungsbedarf hin.

2. ZIELSETZUNG

Die unverminderte Gefahr eines Sohldurchschlags, sowie die Einhaltung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (Europäische Kommission, 2000) sowie die Sicherstellung des Hochwasserschutzes erforderten die Entwicklung eines neuen Managementplans, der auf den neuen Kenntnissen zu Ursache und Wirkung aufbaut. Dabei ist eine Berücksichtigung des Sedimenttransports von zentraler Bedeutung. Die gegenständliche Untersuchung ist Teil des EU-Interreg SI-AT Projekts goMURra und untersucht die Wirkung neu entwickelter Maßnahmen. Zunächst soll der Raumbedarf der Grenzmur für wirksame Maßnahmen ermittelt werden, der dann einer Raumwiderstandskarte (ausgewiesen in deliverable D.T1.3.1 des gegenständlichen Projekts) gegenübergestellt wird. Daraus abgeleitete Maßnahmentypen sollten im weiteren Schritt mittels numerischer Simulation überprüft werden. Von großer Bedeutung ist dabei eine Reduktion der erforderlichen Geschiebezugabe zur Stabilisierung der Sohle bei gleichzeitiger Wiederherstellung einer natürlicheren Morphologie und der entsprechenden morphologischen Prozesse.

3. EINFÜHRUNG IN DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Nachfolgend werden die Charakteristik des Untersuchungsgebietes dargestellt und die bisherigen Erkenntnisse als Grundlage für die Untersuchungen zusammengetragen.

3.1. Lage und hydrologische Charakteristik

Die Quelle der Mur befindet sich in den österreichischen Alpen in einer Seehöhe von 1900 m über Adria und fließt nach ungefähr 450 km in Kroatien bei Legrad in die Drau. Insgesamt entwässert die Mur eine Fläche von 13.824 km². Der Verlauf der Mur im Untersuchungsabschnitt repräsentiert die Staatsgrenze zwischen Österreich und Slowenien (Abbildung 1) und ist ungefähr 34 km lang.

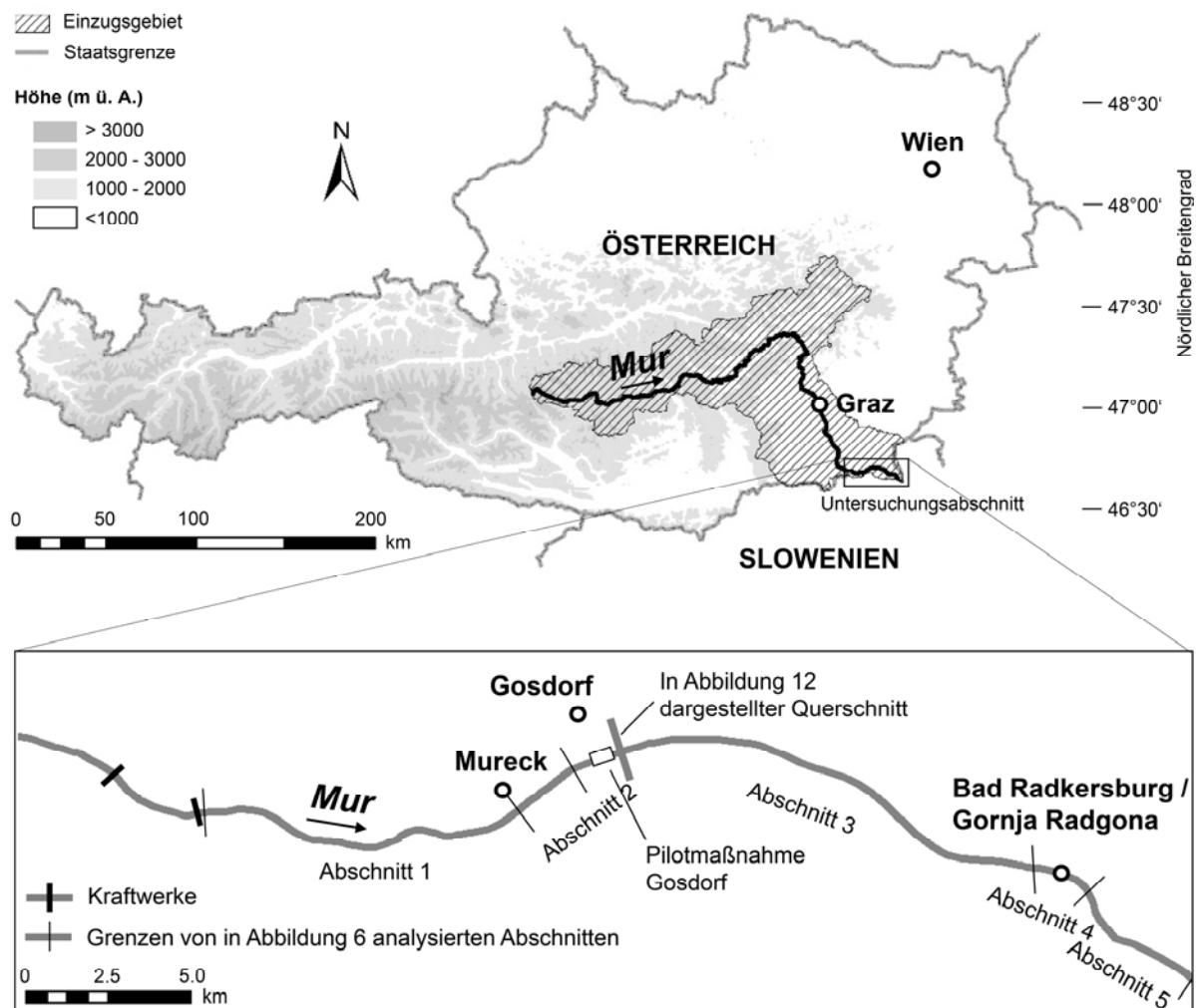


Abbildung 1. Lage der Grenzmur und des Einzugsgebiets. Detail: Einteilung des Grenzmurabschnitts gemäß Wasserwirtschaftlichem Grundsatzkonzept (2001) (Klösch et al. 2011 unter Verwendung von Daten des Hydrologischen Atlas).

Bis zum Ende des Untersuchungsabschnitts (flussab von Radkersburg) erreicht die Mur eine Länge von ungefähr 355 km und sie entwässert eine Einzugsgebietsfläche von 10.340 km². Dieser Abschnitt ist gekennzeichnet durch ein Sohlgefälle von 1.4 ‰ und einem

Mittelwasserabfluss von $146.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Hydrografischer Dienst Steiermark). Das einjährige Hochwasser erreicht einen Abfluss von $730 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Diese und weitere charakteristische Durchflüsse sind in Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1. Charakteristische Durchflüsse der Mur am Pegel Mureck (Hydrografischer Dienst, 2020)

Charakteristischer Durchfluss	Durchfluss ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
MQ	146,5
HQ1	730
HQ5	1000
HQ10	1250
HQ30	1490
HQ50	1600
HQ100	1800

Aufgrund der alpinen Lage des Einzugsgebiets kommt es während der Schneeschmelze im Mai zu den größten Abflussereignissen; weitere Abflussspitzen treten üblicherweise im Juli und im August auf (Hydrografischer Dienst Steiermark).

3.2. Der historische Zustand der Grenzmur

Ehemals bildete die Mur eine Flusslandschaft, die durch eine wiederholte Aufteilung des Hauptarms in mehrere Gerinne geprägt war. Habersack et al. (2001b) untergliederten die Mur in 5 Abschnitte (Abbildung 2).

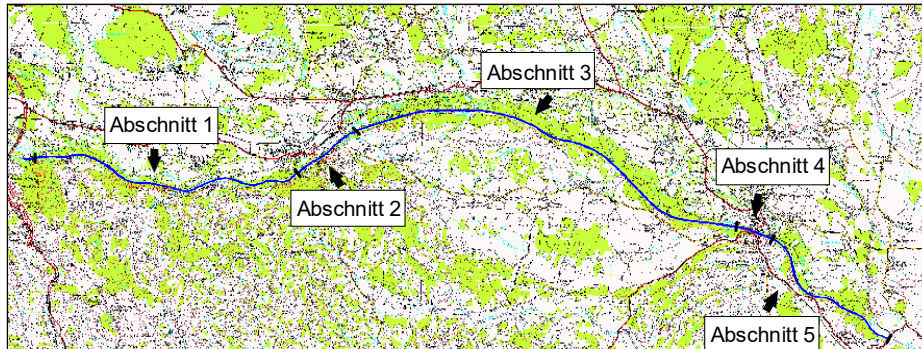


Abbildung 2. Unterteilung der historischen Mur in Abschnitte unter Verwendung flussmorphologischer Kriterien. Abschnitt 1: pendelnd, 2: gestreckt, 3: verzweigt/gewunden, 4: gestreckt, 5: verzweigt/gewunden (Habersack et al., 2001b).

Dort, wo die Mur entlang des Nordhangs der Windischen Bühel floss, zeigte sie einen pendelnden oder gestreckten Verlauf und die Breitenentwicklung war begrenzt. Im Gegensatz dazu erreichte das Flusssystem besonders große Breiten zwischen Mureck und Radkersburg, wo die Mur auf dem Abstaller Feld sich frei ausformen konnte ohne durch den Nordhang der Windischen Bühel behindert zu sein. In diesem Bereich war das gesamte Flusssystem mit Seitenarmen und Inseln bis zu etwa 1,2 km breit.

Laut Lamprecht (1953, in Habersack et al., 2001b) floss die Mur einst auch dort entlang des Hangs der Windischen Bühel, bevor ein Bergsturz bei Vratja vas im 15. Jahrhundert eine Verlagerung der Mur Richtung Nordosten verursachte. Diese Verlagerung der Mur in Richtung Nordosten dauerte durch wiederholte Verlagerungen bei Hochwässern bis zur systematischen Regulierung im 19. Jahrhundert an. Abbildung 3 zeigt die Franziszeische Landesaufnahme aus dem frühen 19. Jahrhundert für diesen Flussabschnitt.



Abbildung 3: Ausschnitt der Franziszeischen Landesaufnahme für den Murabschnitt zwischen Mureck/Trate und Halbenrain/Apace (1821-1836) (Quelle: Österreichisches Staatsarchiv).

3.3. Die menschlichen Eingriffe

Menschliche Eingriffe in die Grenzmur sind zum einen durch die Regulierungsarbeiten im Abschnitt vor Ort gegeben, zum anderen durch Maßnahmen im gesamten Einzugsgebiet, die vor allem den Sedimenthaushalt durch die Errichtung von Querbauwerken betreffen.

3.3.1. Regulierungsmaßnahmen

Erste Hinweise auf flussbauliche Maßnahmen sind seit dem 16. Jahrhundert dokumentiert, wobei ein Einsatz von Schiffen bereits seit der 2. Hälfte des 14. Jahrhunderts erwähnt wird und bereits zu dieser Zeit wasserbauliche Tätigkeiten vermuten lässt (Habersack et al., 2001a). Neben Schutzbauten wurden auch Mühlkanäle errichtet, die bei Hochwasser Laufverlagerungen begünstigten (Lamprecht, 1953, in Habersack et al., 2001a). D

Eine Verstärkung der Baumaßnahmen begann im Jahr 1775, nachdem der Bevölkerung und der Infrastruktur (Brücken und Straßen) die wiederholte Verlagerung der Mur am Abstaller Feld Richtung Norden zu schaffen machte. Die wasserbaulichen Maßnahmen, die neben planmäßigen Verbauungen auch Durchstiche enthielten (Tremel, 1946; in Habersack et al., 2001a), kamen aber bereits 1781 aufgrund von Budgetstreichungen für Verbesserung der Schiffbarkeit zum Stillstand und aufgrund fehlender Instandhaltung verfielen die Bauwerke auch wieder (Habersack et al., 2001a).

Ab 1860 begannen teilsystematische Regulierungsarbeiten, die aber hinsichtlich der Ziele des Einhalts von Laufveränderungen und einer Sicherstellung der Floßfahrt nicht zum gewünschten Ziel führten, sodass eine systematische Regulierung als einzige Lösung gesehen wurde (Hochenburger, 1894).

Schlussendlich wurde die Mur in den Jahren 1874 bis 1891 flussab der Sulmmündung bis zur ungarischen Grenze mit Einhaltung einer „Normalbreite“ bei Niederwasser von 76m und durch Begradigung mit Durchstichen über die Errichtung von Leitkanälen systematisch reguliert. Normalpläne, die für die voraussichtlich vorkommenden Bedingungen erstellt wurden, erleichterten dabei die Umsetzung. In Abbildung 4 ist der zeitliche Verlauf der Ausführung eines Durchstichs dargestellt.

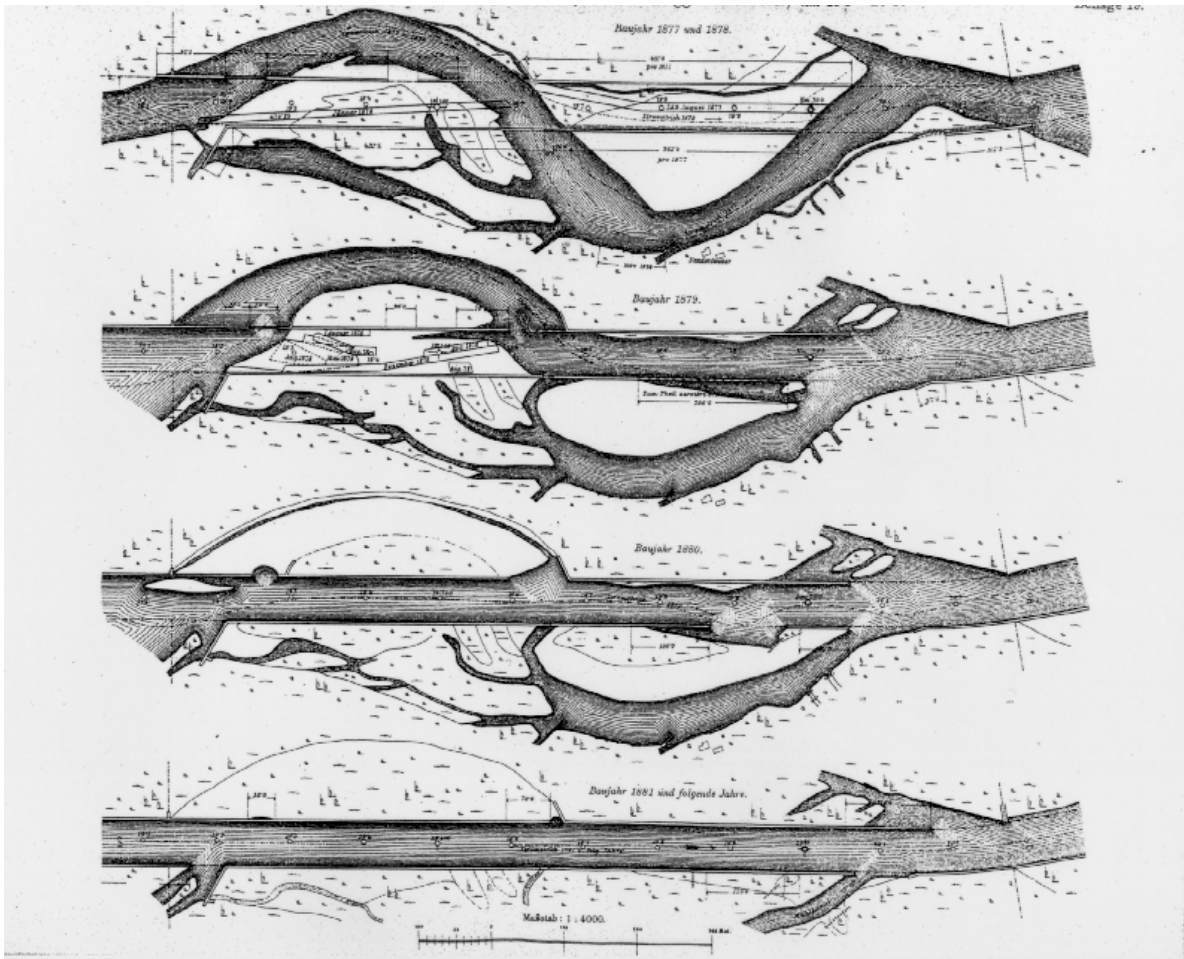


Abbildung 4. Zeitlicher Verlauf eines Durchstiches von 1879 bis 1881 in den Plänen der Regulierung von Hohenburger (aus Habersack et al., 2001a)

3.3.2. Sedimentrückhalt im Einzugsgebiet

Bereits kurz nach der systematischen Regulierung der Grenzmur nach den Plänen von Hohenburger wurde in den Jahren 1899 bis 1903 bei Lebring das erste Murkraftwerk errichtet (Austria-Forum, 2021). Heute befinden sich an der Mur eine Reihe von Kraftwerken, und gepaart mit Kraftwerksanlagen in Zubringern und Geschiebesperren im Einzugsgebiet führte das aufgrund des Sedimentrückhalts in Stauanlagen zu einer nahezu vollständigen Unterbrechung des Sedimentkontinuums. Abbildung 5 zeigt das Einzugsgebiet der Grenzmur und die darin errichteten Kraftwerksanlagen. Hengl et al. (2001) rechneten in ihren Untersuchungen für das Wasserwirtschaftliche Grundsatzkonzept nur mit sehr geringem Geschiebeeintrag in die Grenzmur. Der Kraftwerksbetreiber Verbund ist bestrebt die Durchgängigkeit zu verbessern und passte die Betriebsweise der Kraftwerke von Mellach bis Spielfeld an, auch um auf geänderte Hochwasserabflusswerte und vermehrtem Sedimenttransport aus der Oberliegerstrecke zu reagieren (Verbund, 2015).

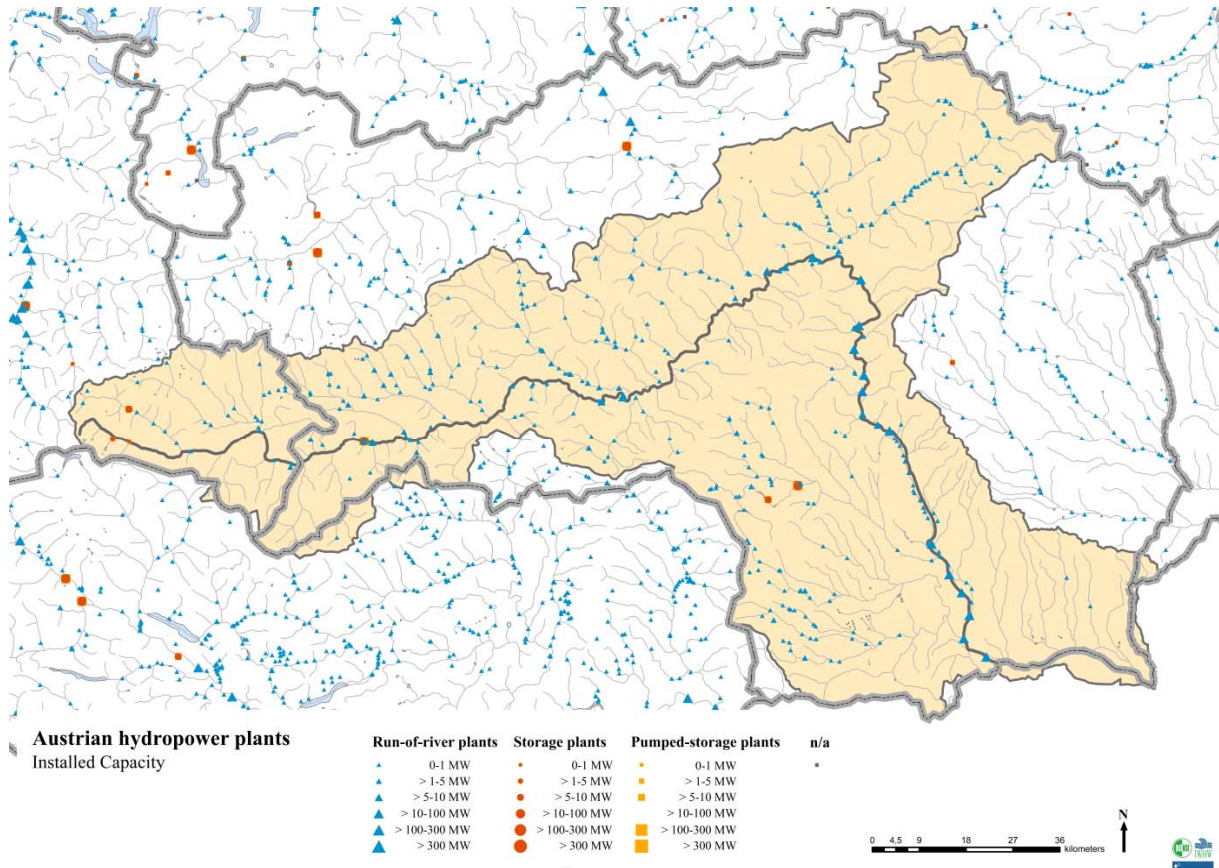


Abbildung 5. Kraftwerksanlagen im Einzugsgebiet der Grenzmuir (Wagner et al., 2015)

3.3.3. Veränderung flussmorphologischer und geschiebetransportrelevanter Größen

Die Regulierungsmaßnahmen führten zu einer starken Reduktion der Gerinnebreite (von bis zu 1200 m Umlagerungsbreite zu einem durchgehend 76 m schmalen Trapezgerinne (Abbildung 6c) und durch die Begradigung zu stark vergrößerten Radien (Abbildung 6a), wodurch sich das Gefälle von ca. 1.2 ‰ auf 1.4 ‰ erhöhte (Abbildung 6b). Als Flusskilometrierung wird im vorliegenden Bericht jene verwendet, auf die sich auch die Studien des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts (Ständige österreichisch-slowenische Kommission für die Mur) bezogen haben.

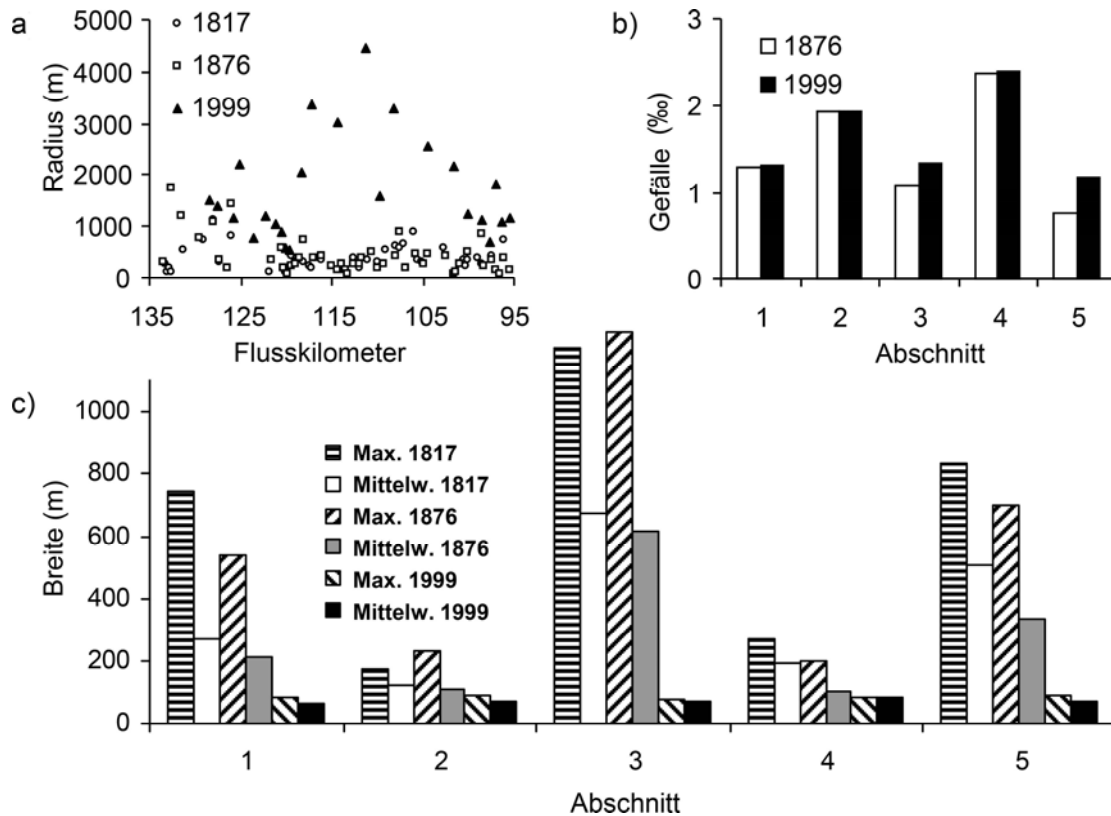


Abbildung 6. Veränderung flussmorphologischer Parameter an der Grenzmur. a) Radius, b) Gefälle, und c) Breite. Die Abschnitte wurden entsprechend der geomorphologischen Charakteristik unterteilt (für die Lage der Abschnitte siehe Abbildung 1 und Abbildung 2) (Habersack et al., 2001b; modifiziert von Klösch et al., 2011).

Die Änderung der Morphologie ist am stärksten im Abschnitt zwischen Mureck und Bad Radkersburg erkennbar, wo die Mur die größte Umlagerungsbreite aufwies (Abbildung 7).

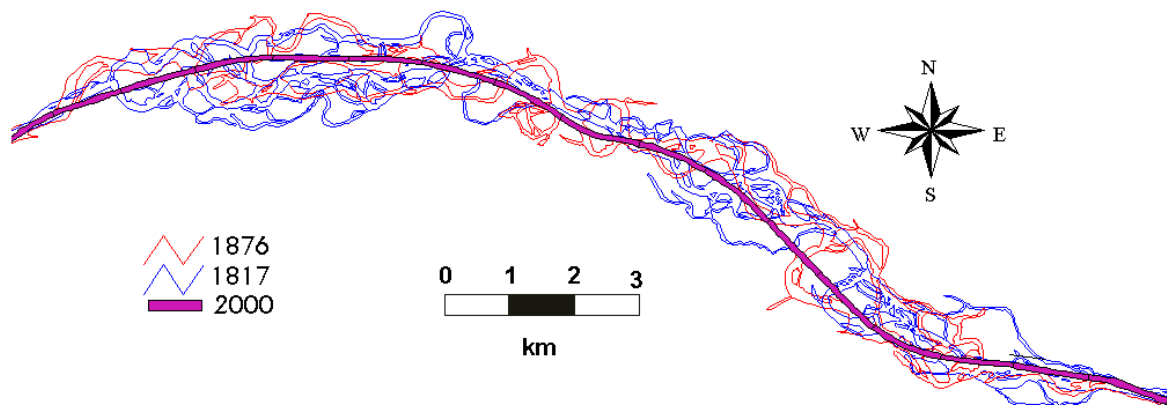


Abbildung 7. Historische Grenzmur und Grenzmur im Jahr 2000 im Abschnitt zwischen Mureck und Bad Radkersburg (Habersack et al., 2001b)

Dabei ging die Vielzahl der unterschiedlichen Gewässertypen und auch die Größe der mit Wasser benetzten Fläche verloren (Abbildung 8).

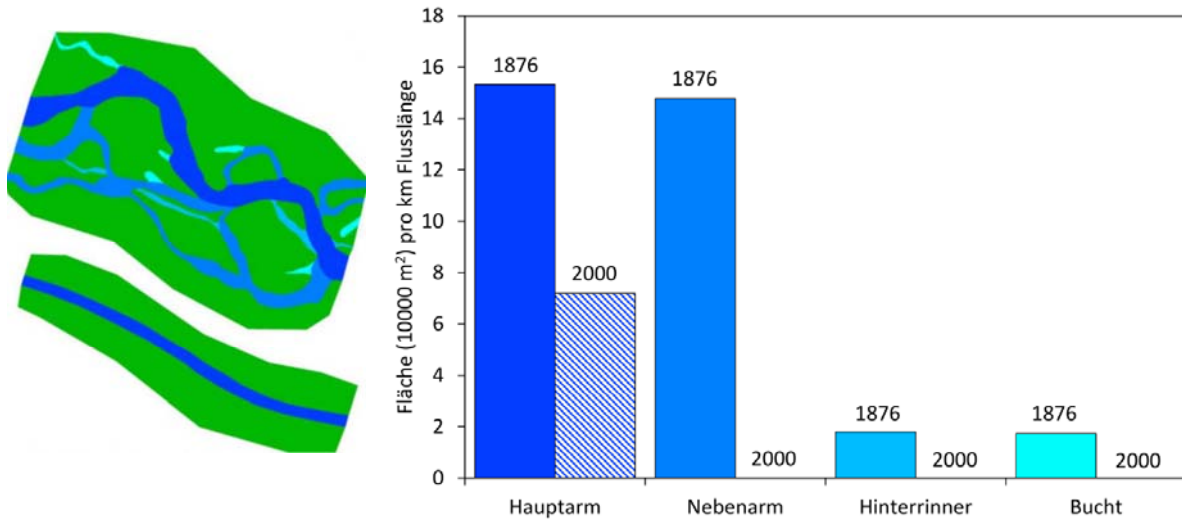
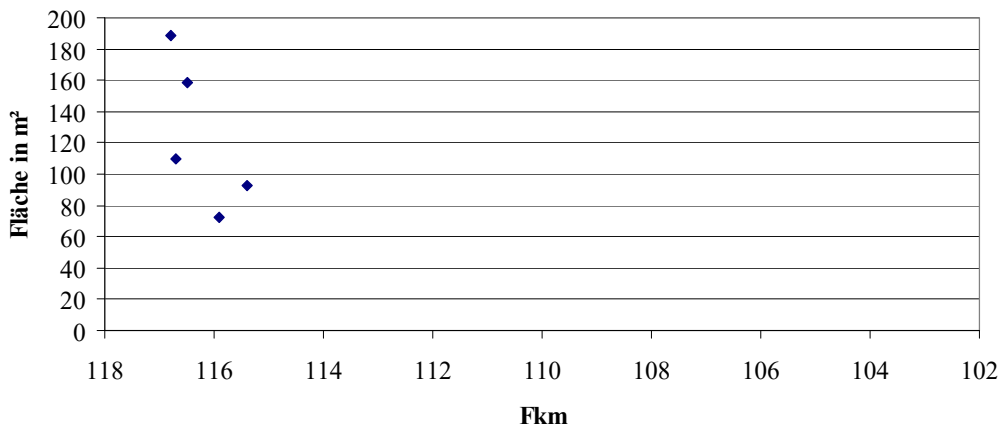


Abbildung 8. Vergleich der Flächen pro Lauflänge von unterschiedlichen Gewässertypen an der Grenzmur (Flusskm 108 – 110; 1876 und 2000) (Jungwirth et al., 2001)

Im Gegensatz zur Situation vor der systematischen Regulierung, in der sich die Mur in viele Arme aufteilte und sich so umflossene Inseln bildeten, gab es an der Grenzmur im Jahr 2000 keine Inseln mehr (Habersack et al., 2001b). Auch die Zahl und Fläche der Kiesbänke wurde stark reduziert. Besonders betroffen von der Reduktion ist der Abschnitt am Abstaller Feld zwischen Mureck und Radkersburg, wo Kiesbänke über einen langen Abschnitt vollständig verschwanden (Abbildung 9).

a)



b)

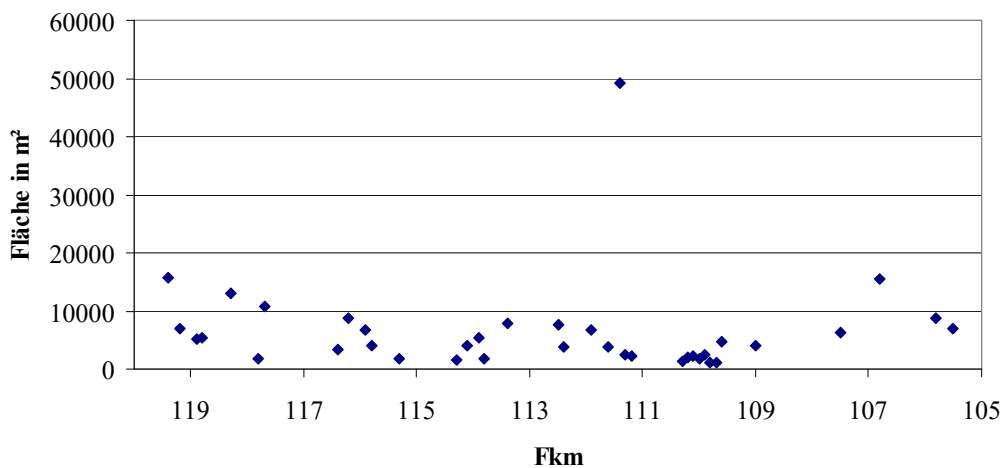


Abbildung 9. Lage und Fläche von Kiesinseln im Abschnitt zwischen Mureck und Radkersburg.

Die drastische Änderung dieser Werte ist nicht nur für die flussmorphologische Ausprägung von Bedeutung. Die Erhöhung der Wassertiefe im engeren Gerinne und das erhöhte Gefälle vergrößerten auch die Sedimenttransportkapazität der Grenzmur. Zudem stieg mit zunehmender Eintiefung bei gleichzeitiger Erhöhung der befestigten Ufer durch die Ablagerung von Feinsediment in Form von Uferreehen die Durchflusskapazität, sodass sich die Rahmenbedingungen für den Sedimenttransport zunehmend verschärften. Zusätzlich ist der (nahezu) fehlende Geschiebeeintrag in die Grenzmur von großer Bedeutung für die Flussmorphologie. Für die Wirkungszusammenhänge dieser Größen mit dem Sedimenttransport und der Flussmorphologie sei auf Kapitel 3.6 verwiesen.

3.4. Auswirkungen auf die Sohlage

Die Einengung und Begradigung des Flusslaufs, die mit der Hohenburger Regulierung Ende des 19. Jahrhunderts systematisch umgesetzt wurde, erhöhten die Wassertiefe und das Gefälle, und damit die auf die Mursohle wirkende Sohlschubspannung und die Geschiebetransportkapazität. Zusätzlich verringerte der Bau von Wildbachsperrern und Wasserkraftwerken den Sedimenteintrag aus dem Einzugsgebiet.

Diese Rahmenbedingungen an der Grenzmur für das Sedimentregime sorgten für eine Eintiefung der Flusssohle, gegen die bereits im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts für die Grenzmur (Ständige Österreichisch-Slowenische Kommission für die Mur, 2001) Gegenmaßnahmen entworfen und daraufhin erste Maßnahmen umgesetzt wurden. Im Rahmen des parallel laufenden Projekts „lifelineMDD“ des EU-Interreg Danube Transnational Programms erfolgt eine Studie zur Sedimentbilanz und zum Sedimenttransport im Biosphärenpark Mur-Drau-Donau (Klösch et al., in Vorbereitung), von welcher hier Ergebnisse für die Grenzmur dargestellt sind. Die Analyse der Sohlentwicklung soll Einblick in den aktuellen Zustand der Sohle der Grenzmur und in deren Entwicklung geben. Auch soll die Wirkung der bisher umgesetzten Maßnahmen beurteilt werden und im aktuell zu erstellenden Managementplan Berücksichtigung finden.

3.4.1. Datengrundlagen

Als Datengrundlage für die Analyse der Sohlentwicklung wurden Querprofilvermessungen im Grenzmurabschnitt herangezogen, die seit 1974 regelmäßig durchgeführt wurden. Zunächst wurden die Querprofile jährlich vermessen; nach 1983 setzten die Vermessungen bis 2015 mit einem Intervall von drei Jahren fort (mit verkürztem Intervall zwischen 1998 und 2000 während der Erstellung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts für die Grenzmur (Ständige österreichisch-slowenische Kommission für die Mur, 2001)). Die letzten verfügbaren Querprofilvermessungen stammen aus den Jahren 2016 und 2018.

Bis zum Jahr 1989 wurden die Geometrien 14 Querprofilen aufgenommen und der abgedeckte Abschnitt erstreckte sich von Flusskilometer 123,968 (flussauf) bis 98,079 (flussab). Ab 1992 wurde der Abschnitt flussauf um drei Querprofile ergänzt und dehnte sich daraufhin bis zu Flusskilometer 129,000 aus. Seit 2003 werden 40 Querprofile zwischen Flusskilometer 130,730 und Flusskilometer 95,036 vermessen. Im Jahr 2009 wurde methodisch von der Messung mit Lotstange zu einer berührungslosen Aufnahme mittels Echolot gewechselt.

3.4.2. Methodik der Auswertung

Der Fokus liegt auf der mittleren Sohlhöhe, deren Auswertung eine für den gesamten Flussquerschnitt repräsentative Sohlentwicklung wiedergibt.

In den bisherigen Analysen wurden in jedem Querprofil Stationierungen der Böschungsfüße festgelegt, um dazwischen die Sohle und damit den Auswertebereich einzugrenzen. Diese Stationierungen wurden dann in den nachfolgenden Vermessungen beibehalten und dazwischenliegend die mittlere Sohlhöhe ermittelt. Diese Methode eignete sich gut für das regulierte Gerinne, in welchem sich die Lage der Böschungsfüße nicht änderte. Mittlerweile wurden jedoch Rückbaumaßnahmen durchgeführt, wodurch sich die Böschungsfüße in einigen Querprofilen verlegten und somit der Sohlbereich außerhalb des festgelegten Auswertebereichs zu liegen kam. Dadurch musste nach einer neuen Methodik für die Analyse der Sohländerungen gesucht werden. Eine Möglichkeit wäre gewesen, den Auswertebereich laufend an die neue Stationierung der Böschungsfüße anzupassen. Es zeigte sich aber, dass der Böschungsfuß in natürlicheren Profilen - insbesondere bei flach ansteigenden Ufern - oft schwierig zu definieren ist.

Schlussendlich wurde eine Methode verwendet, die die Sohlhöhe im von einem festgelegten Durchfluss benetzten Bereich auswertet. Dazu wurde das im EU-Interreg Alpine Space Projekt HyMoCARES entwickelte Analysewerkzeug „Chevo“ (Tool for standardized assessment of channel evolution, Klösch et al., 2019b) verwendet.

Als Referenzdurchfluss, dessen Wasserspiegelhöhe den Sohlbereich abgrenzt, wurde der Mittelwasserabfluss gewählt ($146.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, gemessen am Pegel Mureck durch den Hydrografischen Dienst Steiermark). Die Analyse wurde mit einem höheren Durchfluss wiederholt ($606 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), um die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl des Abflusses für die Mur zu testen.

Um Konsistenz in den Ergebnissen zu gewährleisten, wurde diese Methodik auf die gesamte Zeitreihe angewandt. Dabei wurde die Analyse aber auf die seit 1974 aufgenommenen Querprofile beschränkt, da so durchgehend dieselbe Auflösung des Grenzmurabschnitts in die Auswertung eingehen konnte. Vergleichend wurde der Zeitraum ab dem Jahr 2003, ab welchem die Zahl der Querprofile stark erhöht wurde, auch unter Einbeziehung aller Querprofile ausgewertet.

3.4.3. Ergebnisse zur Sohlentwicklung

Zunächst ist die Entwicklung der Sohle für den Zeitraum vor der Umsetzung der ersten großen Rückbaumaßnahme („Gosdorf 1“) dargestellt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden lediglich kleinere Flussaufweitungsprojekte umgesetzt (siehe Kapitel 3.5), somit kann dieser Zeitraum als repräsentativ für die Entwicklung der regulierten Grenzmur ohne relevante Gegenmaßnahmen betrachtet werden.

3.4.3.1. Ergebnisse zur Sohlhöhenänderung

Die Auswertung zeigte eine kontinuierliche Eintiefung der mittleren Sohlhöhe der Grenzmur (Abbildung 10). Im Mittel tiefte sich die Sohle um 42 cm ein, was einer jährlichen Eintiefungsrate von 1,3 cm entspricht. Im Querprofil 114,840, knapp flussab von der natürlichen Schwelle, die durch die Sohleintiefung zunehmend aus dem Flussbett ragt, wurde die größte Eintiefung gemessen (1,15 m im Zeitraum 1974-2006, entspricht einer jährlichen Eintiefungsrate von 3,6 cm).

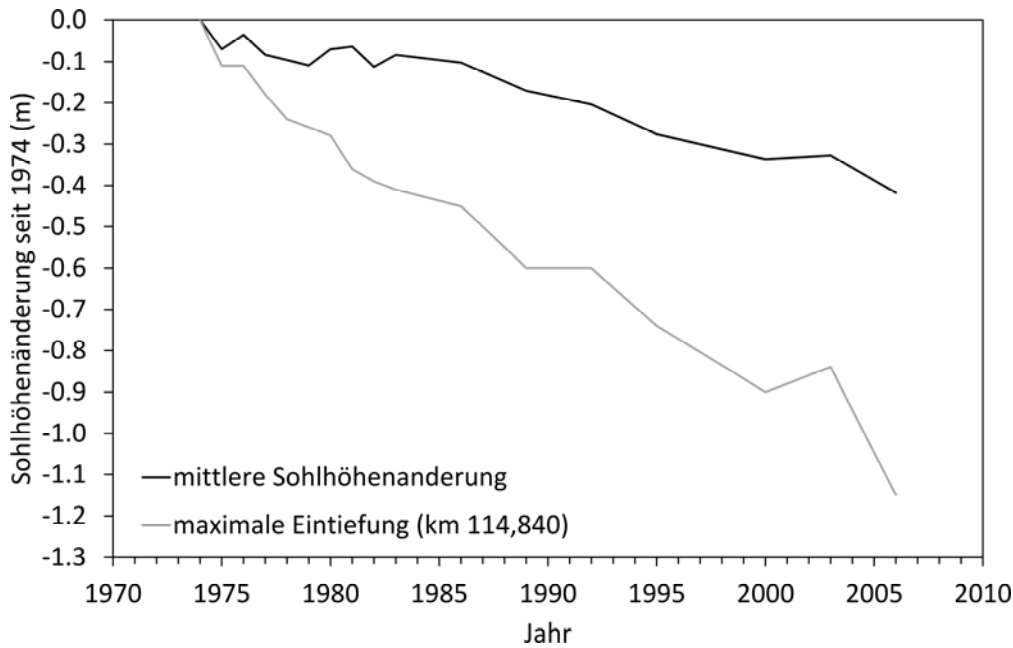


Abbildung 10. Mittlere Sohlhöhenänderung, sowie die Sohlhöhenänderung im Profil mit der größten Eintiefung (km 114,840) an der Grenzmuur zwischen 1974 und dem Beginn der Umsetzung größerer Maßnahmen im Jahr 2006. Die unterschiedliche Distanz zwischen den Querprofilen wurde in der Berechnung der mittleren Sohlhöhenänderung des gesamten Abschnitts durch Gewichtung berücksichtigt.

Wie bereits an der Eintiefung in Querprofil 114,840 erkennbar, ist die Eintiefung nicht gleichmäßig über die Grenzmuur verteilt. Die geringeren Eintiefungsraten zwischen Spielfeld bis vor Gosdorf lassen auf eine starke sohlstabilisierende Wirkung der natürlichen, aus dem Flussbett ragenden Schwellen schließen. Flussab von Gosdorf scheint sich eine Rotationserosion zu vollziehen, durch welche sich die Grenzmuur ihr Gefälle an die übermäßige Geschiebetransportkapazität bei gleichzeitig stark reduziertem Eintrag anpasst.

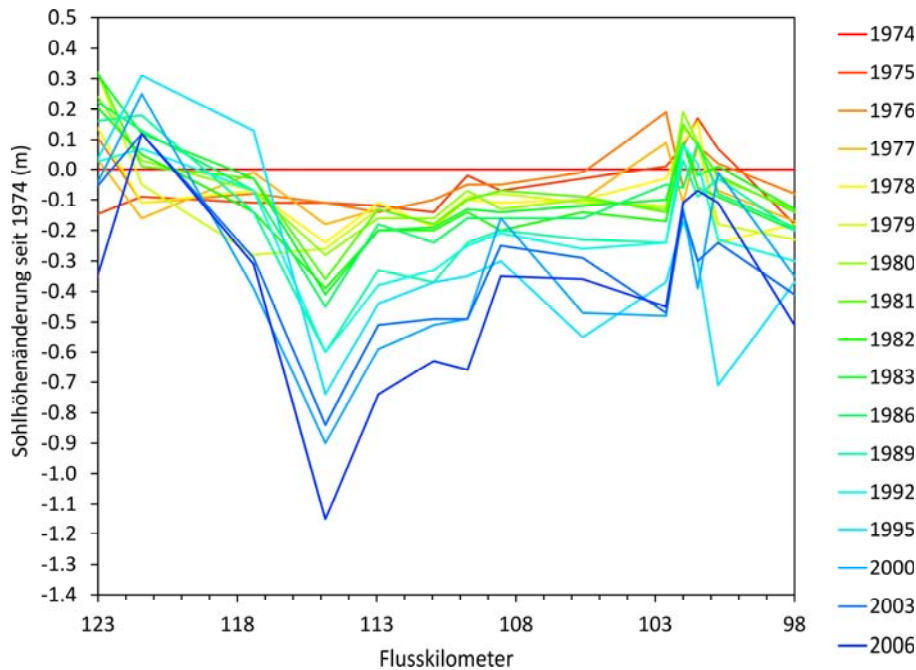


Abbildung 11. Die mittleren Sohlhöhenänderungen in den Profilen, dargestellt im Längsverlauf, für den Zeitraum zwischen 1974 und dem Beginn der Umsetzung der größeren Maßnahmen im Jahr 2006. Die stärksten Erosionen zeigten sich bei Flusskilometer 114,840, knapp flussab von der natürlichen Schwelle bei Gosdorf, die durch die Sohlerosion immer mehr aus der Sohle ragte.

In Habersack et al. (2001a) wurden Bohrungen im Vorland dazu verwendet, die Mächtigkeit der Kiesschicht des Quartärs und die Höhenlage der Grenze zum darunterliegenden, feineren Sediment des Tertiärs in den Entwürfen von Maßnahmenvarianten zu berücksichtigen. Dabei zeigte das Querprofil 114,840 eine nur noch geringe Distanz zum Quartär, sodass bei fortschreitender Sohleintiefung mit einem Verlust des Kiesbetts, der Freilegung des Tertiärs und eventuell mit einem Sohldurchschlag (plötzliche, starke Erosion in das Tertiär) zu rechnen ist (Abbildung 12).

Zum Vergleich wurde die Auswertung für den Zeitraum 2003 bis 2018 mit derselben Methode (Berechnung der mittleren Sohlhöhe im vom Wasser benetzten Sohlbereich) mit der größeren vorhandenen Profilanzahl wiederholt, um die Abhängigkeit der Auswertung von der räumlichen Auflösung zu überprüfen. Statt den nur 14 Profilen, die im gesamten Zeitraum vorhanden waren, standen nun 39 Profile zur Verfügung. Auch diese Auswertung zeigte im Jahr 2018 eine tiefere Sohle als im Jahr 2003 (-15,5 cm bei der Verwendung von 39 Profilen statt -14,3 cm bei der Verwendung nur 14 Profilen), bei einem Referenzdurchfluss von $606 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

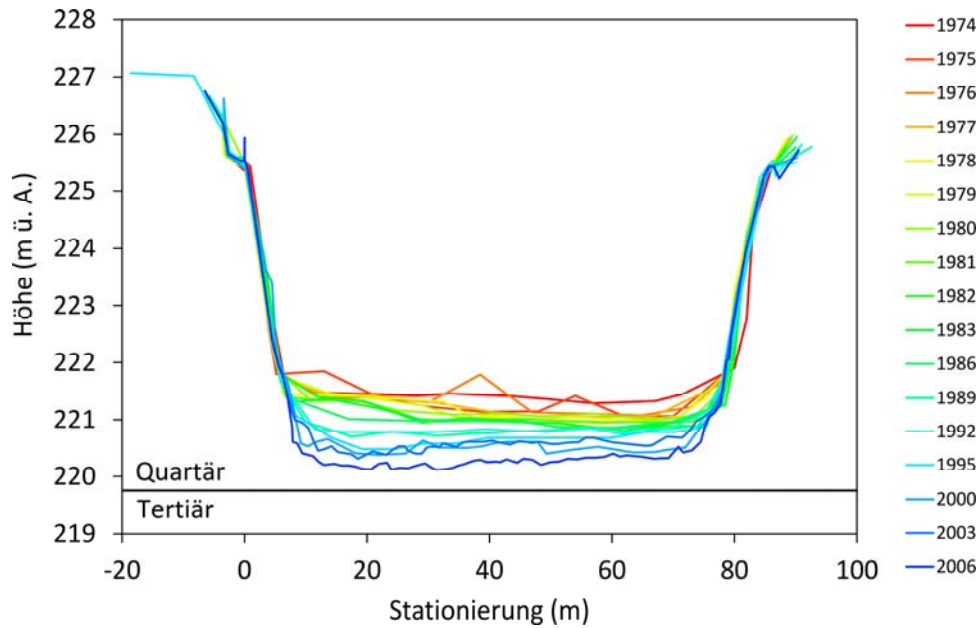


Abbildung 12. Entwicklung der Sohle im Querprofil bei Flusskilometer 114,840, in welchem bereits im Jahr 2006 nur mehr eine geringe Distanz zum Tertiär vorhanden war.

3.4.3.2. Ergebnisse zum Sedimentbudget

Die Querprofile wurden auch für eine Berechnung der Sedimentbilanz herangezogen. Dazu wurden Differenzen in den Querschnittsflächen mit einer Einflussbreite (halbe Distanz zu benachbarten Profilen) multipliziert. Sedimentzugaben, die bereits vor 2006 stattfanden, wurden berücksichtigt (Tabelle 2). Insgesamt wurden aus dem Grenzmurabschnitt im Zeitraum von 1974 bis 2006 860.000 m³ Sediment ausgetragen (Abbildung 13). Das Ergebnis spiegelt im Großen und Ganzen die Entwicklung der mittleren Sohlhöhe wider, weicht aber im Verlauf aufgrund leichter Veränderungen an den Ufern etwas von der Sohlhöhenentwicklung ab.

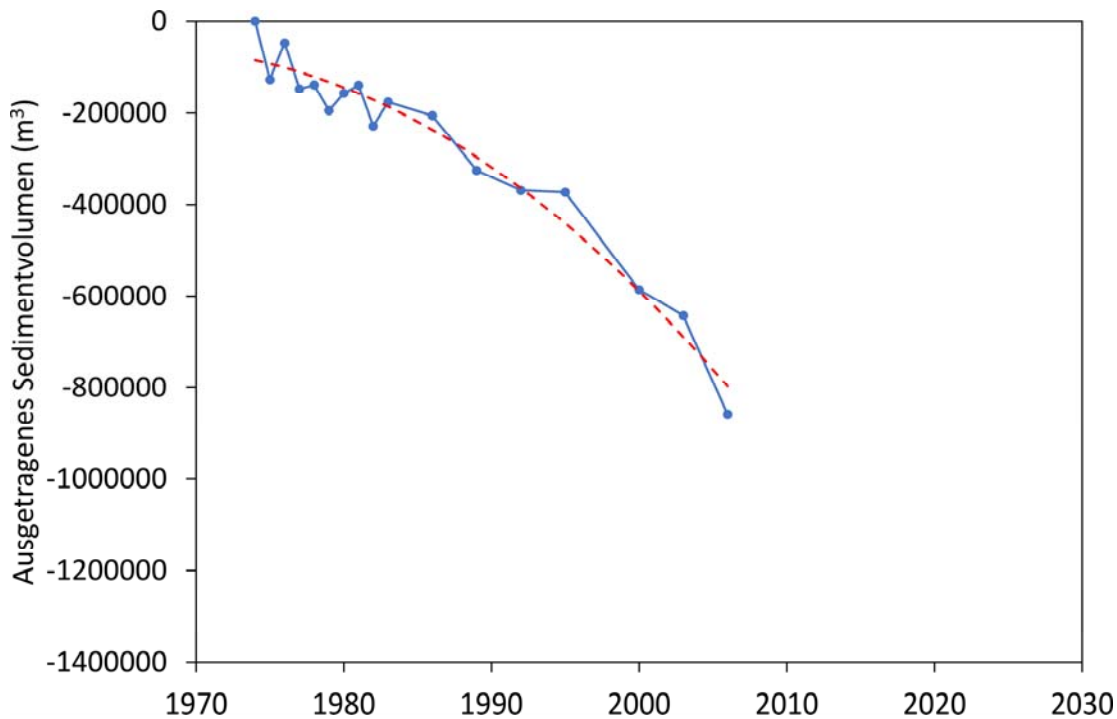


Abbildung 13. Über den Zeitraum 1974 bis 2006 kumulierter Austrag an Sedimentvolumen aus der Grenzmur

3.5. Bisher umgesetzte Gegenmaßnahmen und deren Wirkung

Um auf die wasserwirtschaftlichen und gewässerökologischen Probleme an der Grenzmur zu reagieren, wurde im Auftrag der Ständigen österreichisch-slowenischen Kommission für die Mur im Zeitraum zwischen 1998 und 2001 ein wasserwirtschaftliches Grundsatzkonzept geschaffen, das nach eingehenden Untersuchungen auch einen Entwurf von Gegenmaßnahmen enthielt. Die größte der nachfolgend umgesetzten Maßnahmen, Gosdorf 1, wurde einem intensiven Monitoring unterzogen, dessen Ergebnisse hier zusammengefasst werden.

3.5.1. Das Wasserwirtschaftliche Grundsatzkonzept für die Grenzmur

Im Rahmen der Erstellung des wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept für die Grenzmur (Ständige Österreichisch-Slowenische Kommission für die Mur, 2001) wurden intensive Untersuchungen zu wasserwirtschaftlichen Themenbereichen (Hochwasser, Sohlveränderungen, Grundlagen zum Geschiebetransport, Flussmorphologie, Flussbau, Geschiebetransportmodell, Niederwasser) und zu ökologischen Themenbereichen (Fischbestand, Strukturhebung, Makrozoobenthos) durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wurden Maßnahmen vorgeschlagen, die im wesentlichen künstliche Geschiebezugaben und das Zulassen von Ufererosion beinhalteten. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich die Mur nach Entfernung der Ufersicherungen über Ufererosion eigendynamisch den zur Verfügung gestellten Raum annimmt und das erodierte Ufersediment als temporäre Geschiebequelle verwendet.

Bei der Auswahl der Flussabschnitte wurde die historische und prognostizierte Sohleintiefung, die Kiesmächtigkeit über dem Tertiär, der geschieberelevante Anteil des Böschungssediments und die Raumverfügbarkeit berücksichtigt (Habersack et al., 2001a).

Die daraufhin umgesetzten Maßnahmenabschnitte, deren Umsetzungszeitraum und die bei der Umsetzung eingebrachte Sedimentmenge sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2: Flussaufweitungsprojekte mit Kies- und Sandeintrag an der Grenzmur seit 2003 (Geofoto, 2017)

Umsetzungsjahr	Gemeinde	Flussabschnitt (Flusskilometer)	Menge an Kies- und Sandeintrag (m ³)
2004/2005	Oberschwarza	128,500-128,890	14.000
	Weitersfeld		40.000
2006	Donnersdorf	109,740	20.000
2007	Gosdorf	115,554-116,040	69.000
		114,980-115,554	81.000
2011	Radkersburg Umgebung - Sicheldorf	96,020-97,334	18.000

3.5.2. Maßnahme Gosdorf I

In den Jahren 2006 und 2007 wurde bei Gosdorf im Abschnitt zwischen Flusskilometer 114.980 und 116,040 eine größere Maßnahme entsprechend den Empfehlungen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts umgesetzt (Abbildung 1). Das Grundsatzkonzept sah in diesem Abschnitt die größte Dringlichkeit der Umsetzung einer Maßnahme, da dort ein sehr geringer Abstand zum Tertiär gegeben war. Die Ufersicherungen wurden vom österreichischen Ufer über einen Kilometer Länge entfernt, und ein Aushub von 150.000 m³ Sediment diente als sofortige Zugabe zur lokalen Sohlhebung und zur Dotation des regulierten Abschnitts flussab. Zudem sollte sich die Mur eigendynamisch verbreitern, das erodierte Ufersediment in das Flussbett aufnehmen und durch die vergrößerte Gerinnebreite ihre Transportkapazität herabsetzen. In der im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept angewandten Geschiebetransportmodellierung (Hengl. et al., 2001), die zur Optimierung der Maßnahmenumsetzungen an der Grenzmur diente, ging man davon aus, dass sich die Mur innerhalb von 17 Jahren auf 150m verbreitern würde und über diesen Zeitraum mit aus der Ufererosion stammendem Sediment versorgt werden würde. Danach hätten gemäß den Berechnungen im Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept weitere Maßnahmenumsetzungen für eine Zeit von 60 Jahren für eine Stabilisierung der Sohle gesorgt und somit einen langen Zeitraum bis zu einer eventuellen Lösung zur Wiederherstellung des Sedimentkontinuums durch die Kraftwerke überbrückt.

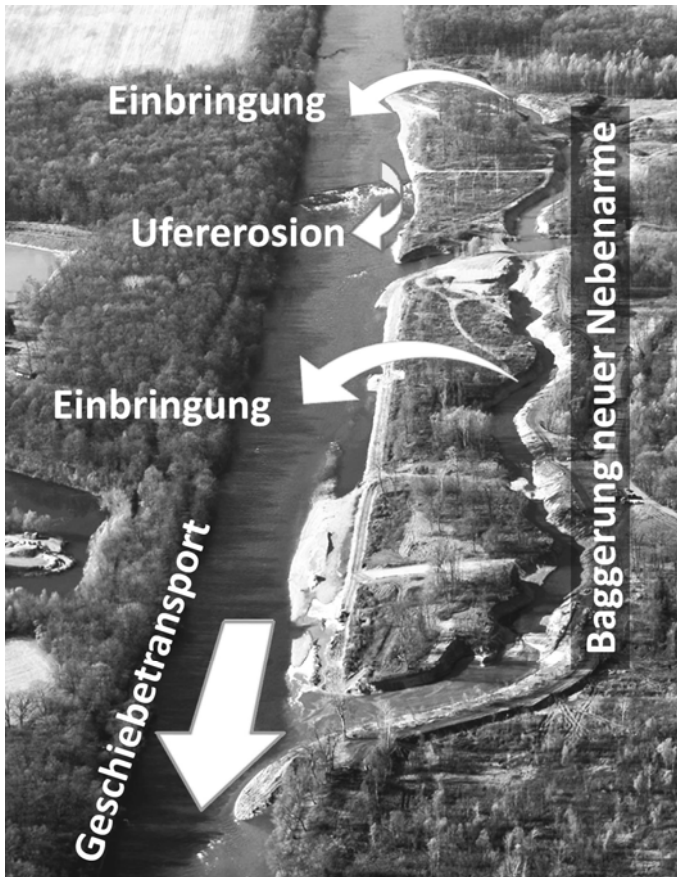


Abbildung 14. Bei Gosdorf umgesetzte Flussaufweitung mit deren Maßnahmenkomponenten (Habersack et al., 2008).

Vermessungen zeigten die positive Wirkung der Maßnahme im aufgeweiteten Abschnitt selbst, und auch im flussab liegenden, regulierten Abschnitt (Abbildung 15). So befand sich die mittlere Sohlhöhe im Jahr 2009 vorerst nicht nur in einem stabilisierten Zustand, sondern lag um 40 cm höher. Auch im flussab liegenden, regulierten Abschnitt wurde die eintiefende Entwicklung nicht nur gestoppt, sondern - zumindest vorübergehend - umgekehrt.

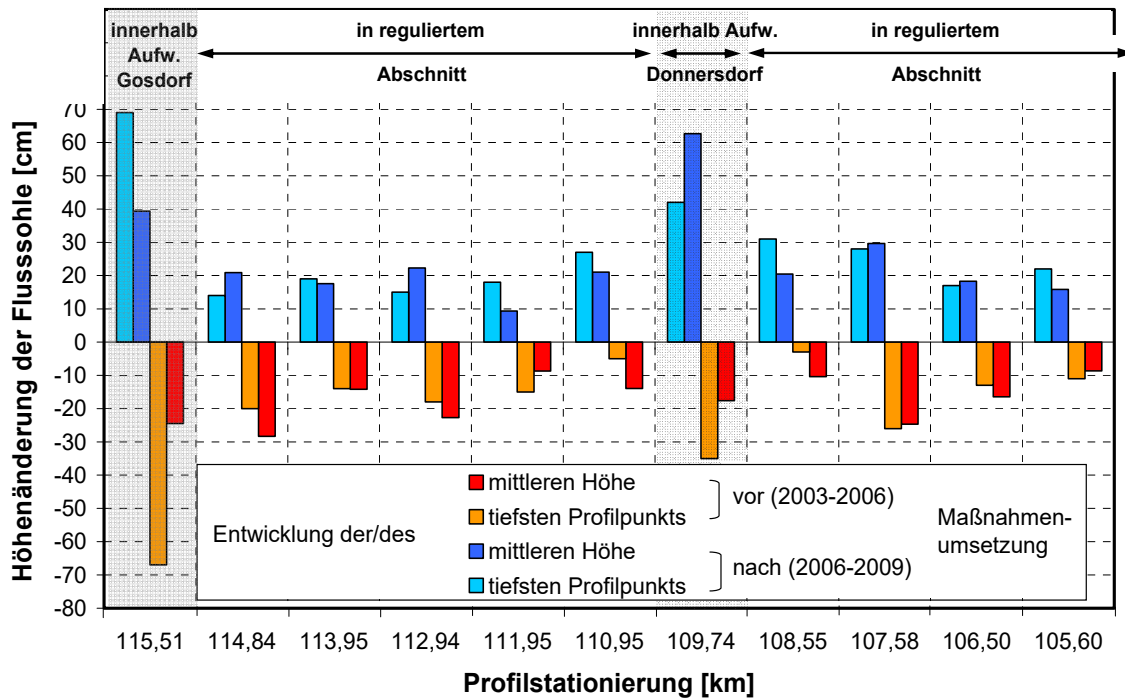


Abbildung 15.: Entwicklung der mittleren Sohlhöhen und des tiefsten Profilpunkts in Querprofilen flussab der Aufweitung vor und nach der Maßnahmenumsetzung bei Gosdorf (Habersack et al., 2013)

Die Vermessungen zeigten aber auch, dass die Verbreiterung und der damit einhergehende Eintrag von Sediment aus den Ufern nicht an die Erwartungen heranreichte. Abbildung 16 zeigt die Lage von Uferprofilen, die von Habersack et al. (2013) wiederholt fotogrammetrisch aufgenommen wurden.

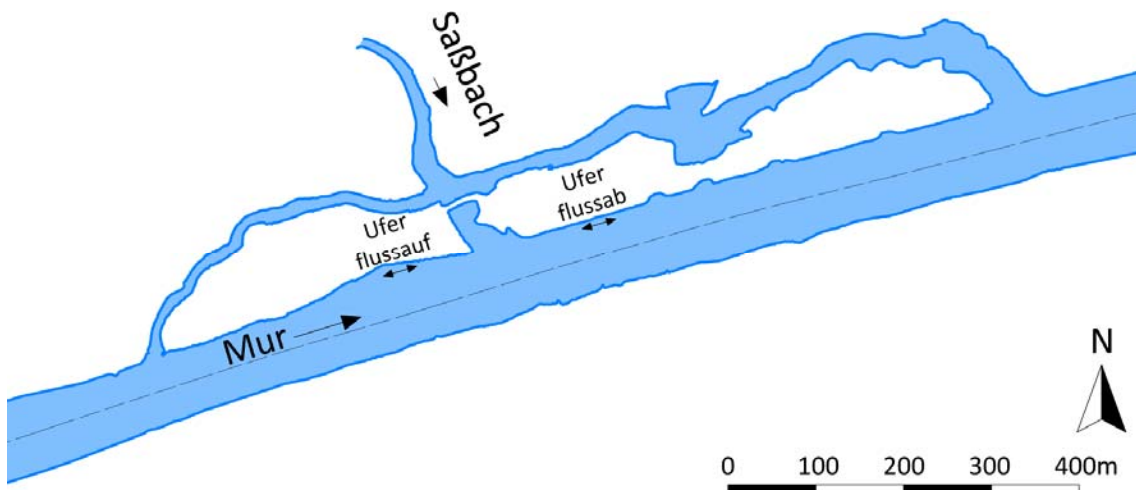


Abbildung 16. Lage der untersuchten Uferabschnitte im Maßnahmenabschnitt bei Gosdorf.

Abbildung 17 zeigt einen Vergleich der jüngsten fotogrammetrischen Aufnahme aus dem Jahr 2018 mit dem Zustand direkt nach der Bauumsetzung im Jahr 2007. Flussab der Schwelle, die eine verstärkte Anströmung des linken Ufers bewirkt, trat in Summe eine Uferosion von

ca. 28m auf, in einem geraden Abschnitt flussab davon wurden in Summe weniger als 10 m des Ufers erodiert.

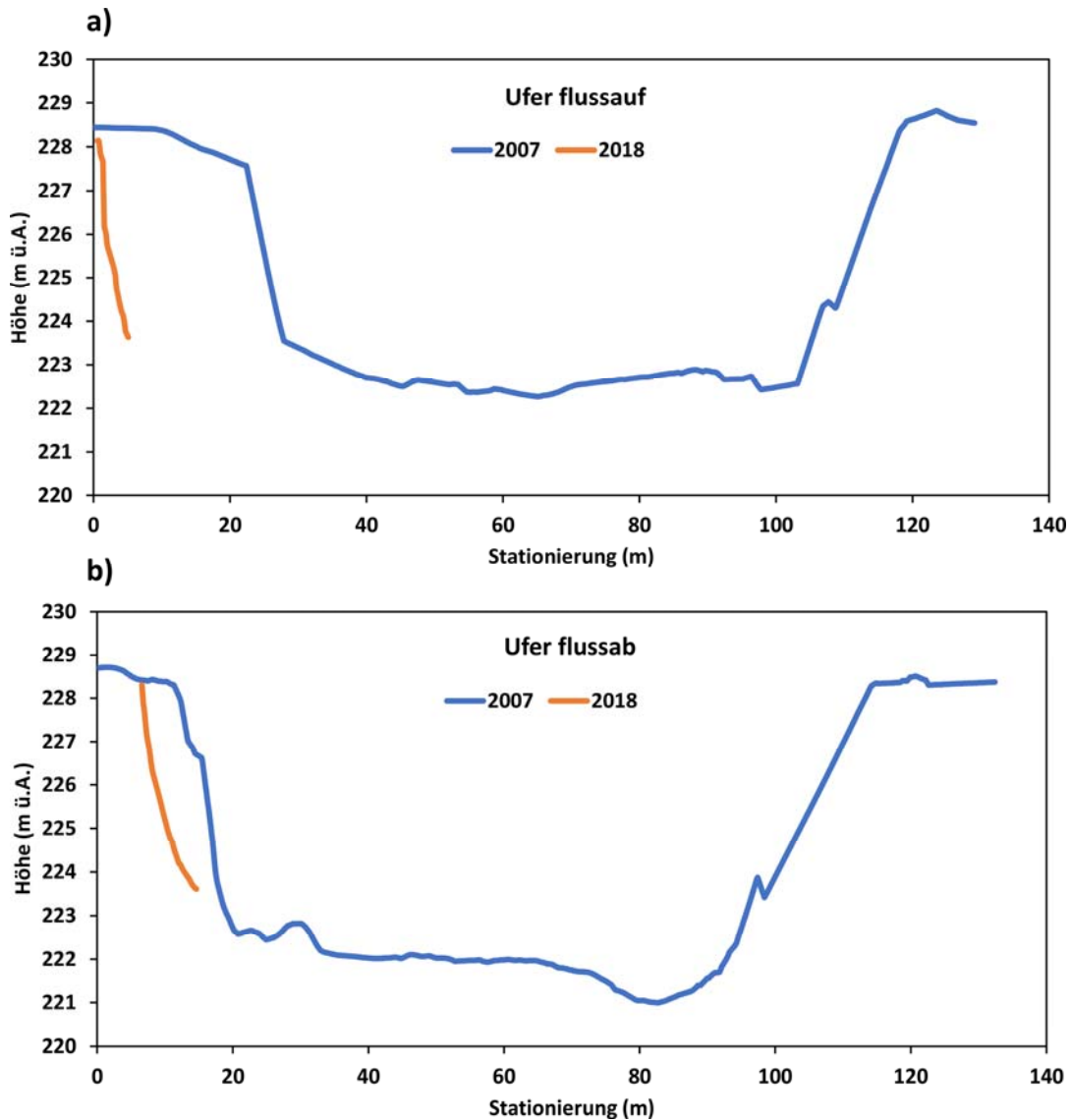


Abbildung 17. Ufererosion seit der Maßnahmenumsetzung in Gosdorf, für die in Abbildung 16 dargestellten Ufer, a) Querprofil im Uferabschnitt flussauf mit verstärkter Anströmung durch die vorhandene Schwelle, b) Querprofil im geraden Uferabschnitt flussab.

Dabei nahm das Ausmaß der Ufererosion stark ab. So verursachte das Hochwasserereignis vom 22. Juli 2012 mit einer Abflussspitze von $1228 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (nahe einem 10-jährlichen

Hochwasserereignis mit $1250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) im geraden Uferabschnitt flussab eine laterale Erosion von nur etwa 1 m (Abbildung 18, Habersack et al., 2013).

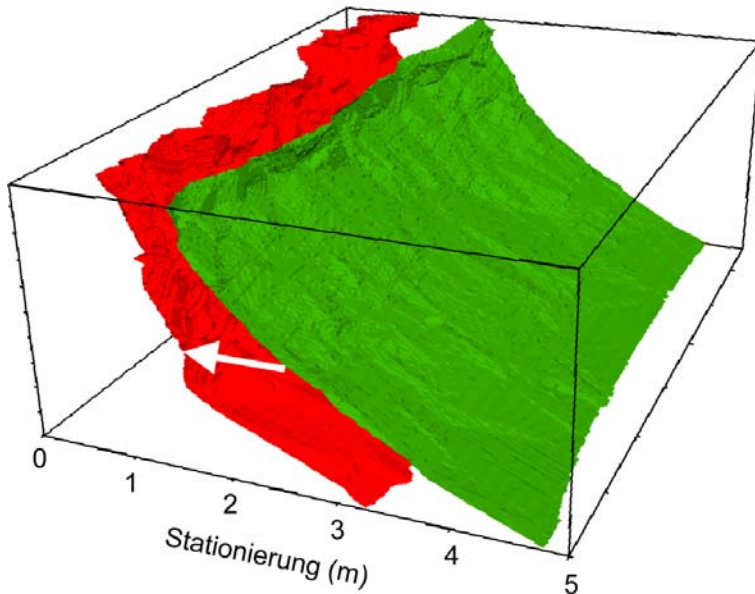


Abbildung 18. Ufererosion in einem geraden Uferabschnitt bei Gosdorf durch ein Hochwasserereignis am 22. Juli 2012 (Habersack et al., 2013).

Daraus resultierte neben der künstlichen Zugabe nur ein geringer Geschiebeeintrag aus Erosion des vorhandenen Sediments, der vom Vermessungsbüro Geofoto (2017) mit 27.000 m^3 beziffert wurde.

Gleichzeitig wurde das im Aufweitungsabschnitt abgelagerte Sediment während höheren Abflüssen rasch aus dem Aufweitungsabschnitt abtransportiert, sodass das eingetragene Geschiebe relativ rasch als Dotation wirkte. Im regulierten Gerinne flussab herrschte eine unverminderte Sohlbelastung vor, so dass das Geschiebe dort relativ hohe Geschwindigkeiten erreichte. Klösch und Habersack (2018) leiteten aus Geschiebetracerversuchen eine Transportgeschwindigkeitsformel ab, die hier auf den Datensatz von Habersack et al. (2013) angepasst und angewandt wurde um die Tracergeschwindigkeit und die Aufenthaltsdauer im Grenzmurabschnitt zu überprüfen. Demnach hätte Geschiebe mit einer Korngröße von 33 mm (b-Achse) Ende 2020 bereits den 20 km langen Abschnitt der Grenzmur flussab von Gosdorf verlassen (Abbildung 19).

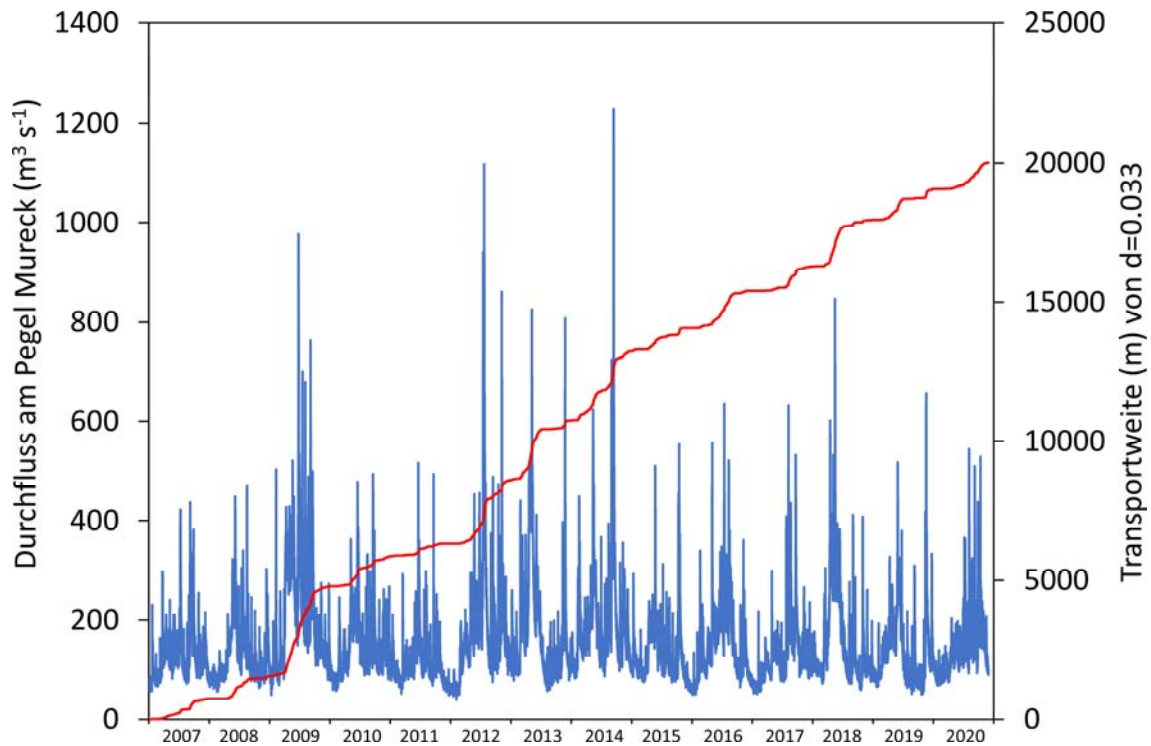


Abbildung 19. Zurückgelegter Weg eines Geschiebekorns mit einer b -Achse von 33 mm, berechnet mit dem Formelansatz von Klösch und Habersack (2018) unter Verwendung des Datensatzes von Habersack et al. (2013) (Quelle Hydrografische Daten: Hydrografischer Dienst Steiermark).

Nimmt man an, dass alle Körner bis zu dieser Größe bereits die Mur verlassen haben, so wurden bereits 83 % des zugegebenen Sedimentvolumens bereits ausgetragen (Abbildung 20).

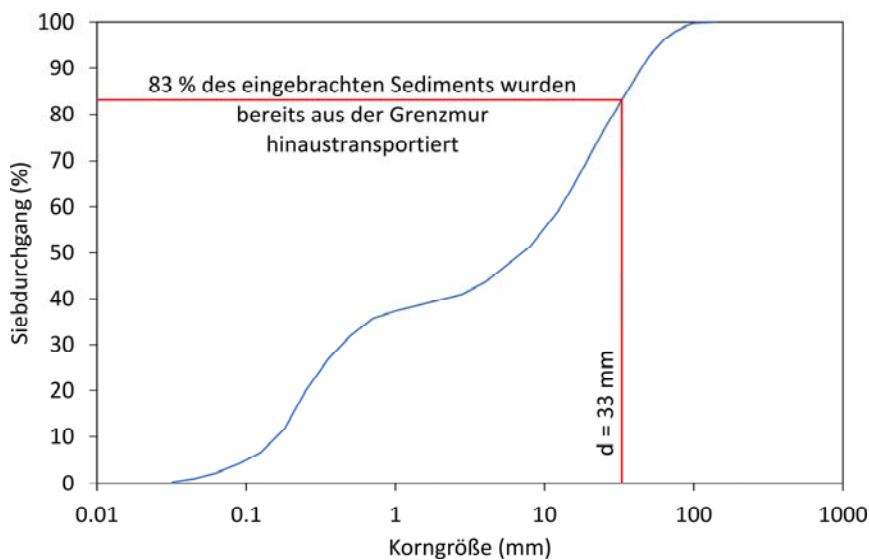
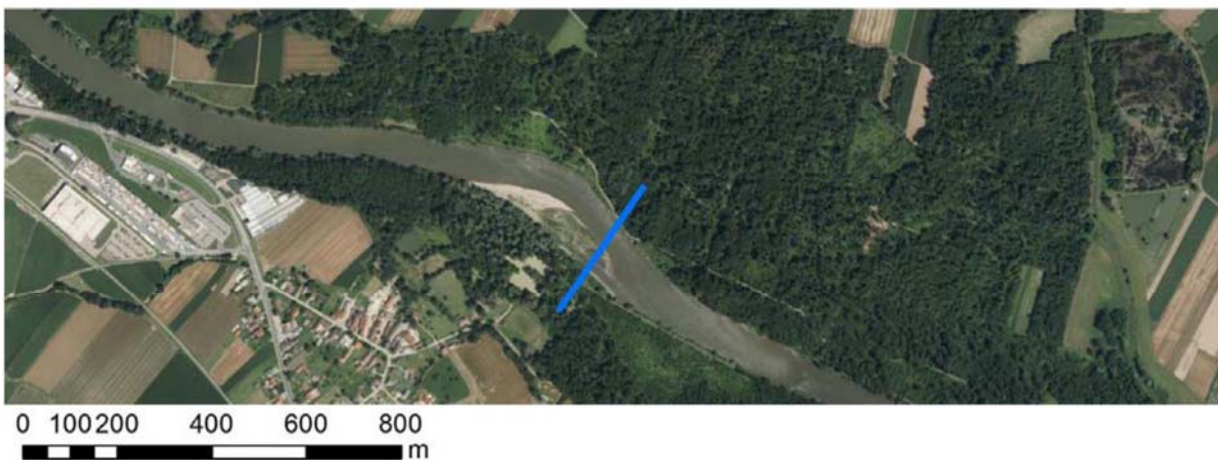


Abbildung 20. Korngrößenverteilung von Vorlandsediment, ermittelt anhand von Daten des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts (Ständige österreichisch-slowenische Kommission für die Grenzmur, 2001), so wie auch das Zugabematerial bei Gosdorf vermutlich im Durchschnitt beschaffen war. Bis zu einer Korngröße von 33 mm könnte das Zugabematerial schon aus der Grenzmur ausgetragen worden sein.

3.5.3. Maßnahme Sicheldorf

Im Rahmen des EU Interreg Danube Transnational Projekts lifelineMDD wurden auch andere Abschnitte der Grenzmur unter Verwendung der regelmäßig vermessenen Querprofile untersucht (Klösch et al., in Vorbereitung). Im Maßnahmenabschnitt bei Sicheldorf, am Ende des Grenzmurabschnitts flussab von Bad Radkersburg gelegen, wurden im Sommer 2012 entlang des österreichischen Ufers über ca. 1.4 km Länge die Sicherungen entfernt (Abbildung 21a). Dieser Maßnahmenabschnitt profitierte vom Sedimenteintrag aus der Sohlerosion flussauf und vom Eintrag aus flussaufgelegenen Maßnahmenumsetzungen, indem sich dort am Innenufer des Abschnitts eine Kiesbank ablagerte. Am Außenufer der Flusskrümmung fanden stärkere Erosionen statt (Abbildung 21b).

a)



b)

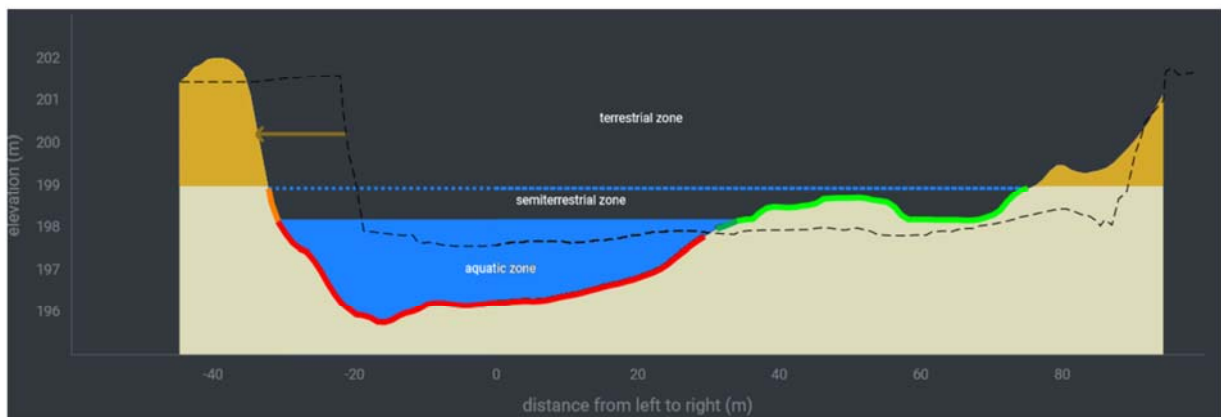


Abbildung 21. a) Maßnahmenabschnitt bei Sicheldorf mit eingezeichneter Profillage und b) Veränderung im Querprofil im Zeitraum zwischen 2012 und 2018, analysiert mit dem Tool HyMoLink (Klösch et al., 2019a)

3.5.4. Auswirkungen auf den gesamten Grenzmurabschnitt

Die nachfolgenden Wiederholungen der Querprofilvermessungen zeigten, dass die Sohleintiefung früher als erwartet wieder einsetzte (Abbildung 22). Gemäß der jüngsten

Vermessung im Jahr 2018 erreichte die Sohle mit einer Höhe von 48 cm unter dem Niveau des Vergleichsjahres 1974 ein neues Rekordtief.

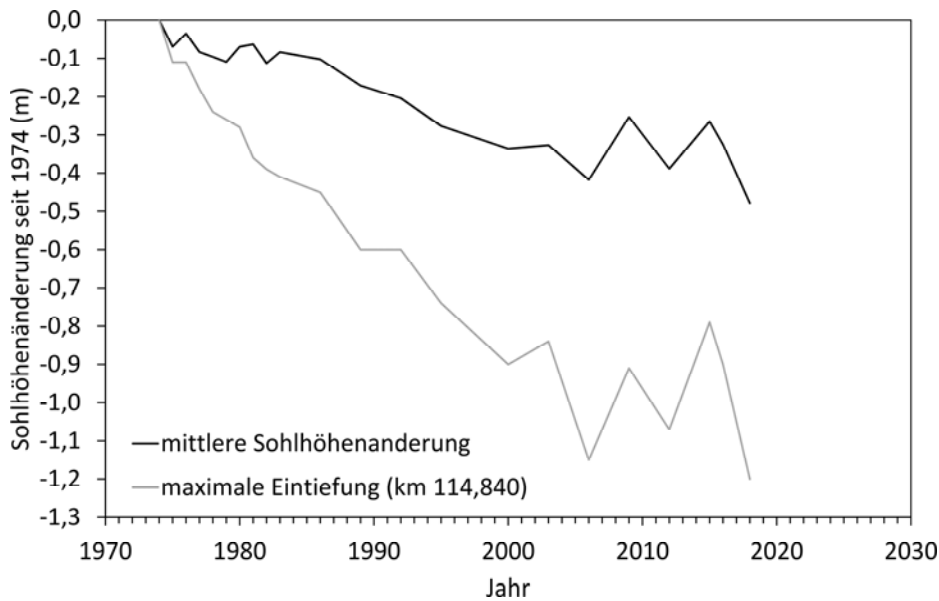


Abbildung 22. Mittlere Sohlhöhenänderung, sowie die Sohlhöhenänderung im Profil mit der größten Eintiefung (km 114,840) an der Grenz zur seit 1974. Die unterschiedliche Distanz zwischen den Querprofilen wurde in der Berechnung der mittleren Sohlhöhenänderung des gesamten Abschnitts durch Gewichtung berücksichtigt.

In einigen Abschnitten liegt die Sohle gemäß der jüngsten Vermessung im Jahr 2018 tiefer als je zuvor; auch im Querprofil 114,840 nahm die Erosion wieder ihren Lauf und erreichte mit einer Tiefe von 1,20 m (wieder gemittelt über den Querschnitt) unter der Vergleichshöhe von 1974 ein noch nie dagewesenes Ausmaß.

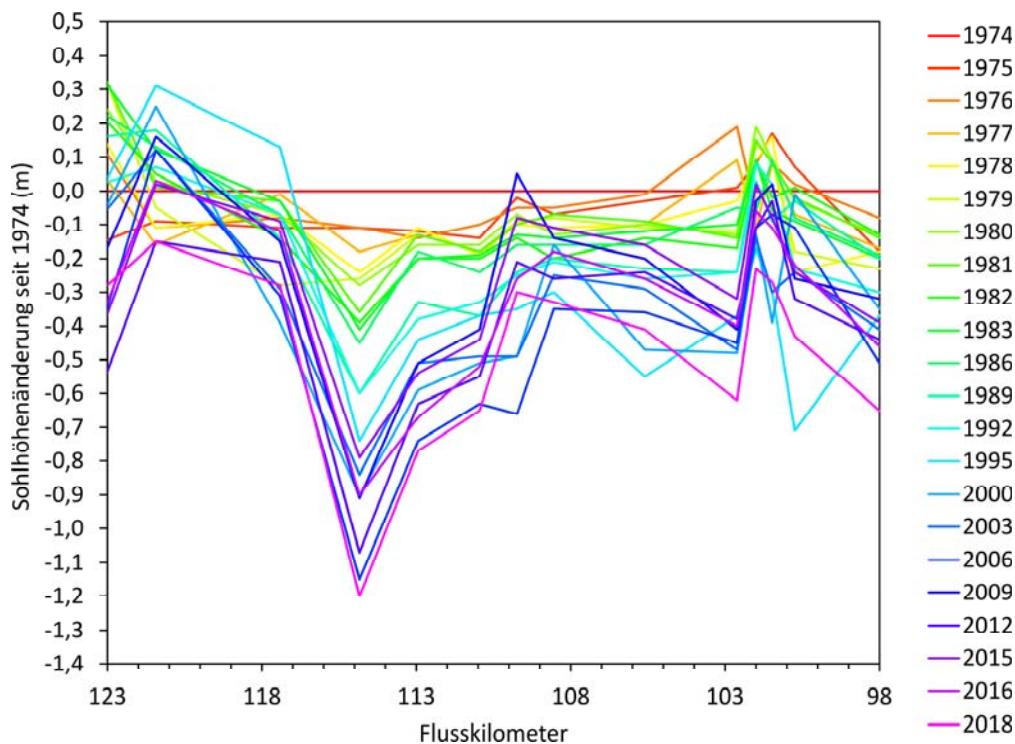


Abbildung 23. Die mittleren Sohlhöhenänderungen in den Profilen dargestellt im Längsverlauf für den gesamten Zeitraum seit 1974, inklusive der Entwicklung nach dem Beginn der Umsetzung der größeren Maßnahmen im Jahr 2006.

Somit nahm auch der Abstand zum feinkörnigeren Tertiär weiter ab, und mit einem gänzlichen Verlust der Kiesschicht ist in naher Zukunft zu rechnen, wenn keine umfassenden Gegenmaßnahmen gesetzt werden. Nach Freilegung des Tertiärs durch die Sohlerosion drohen je nach Erosionswiderstand starke Erosionsraten. An der Salzach bewirkte ein solcher Sohldurchschlag eine Sohlerosion von mehreren Metern während eines Hochwasserereignisses (Hengl, 2004).

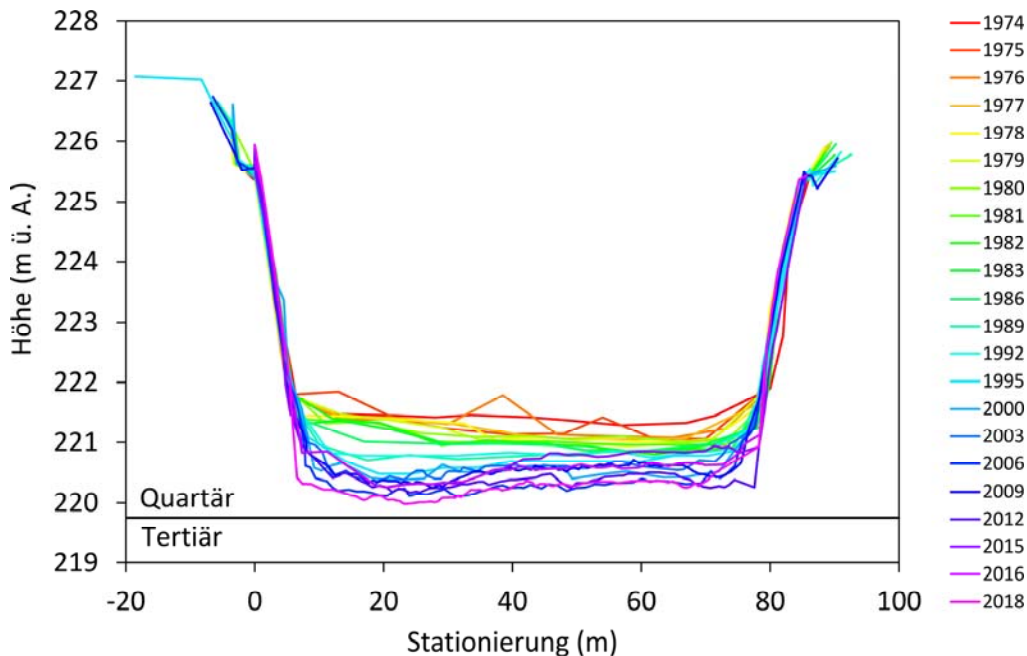


Abbildung 24. Entwicklung der Sohle im Querprofil bei Flusskilometer 114,840 bis zur Vermessung im Jahr 2018, in welchem nur eine geringe Distanz zum Tertiär vorhanden ist.

3.6. Ursache-Wirkungs-Analyse

Die Erkenntnisse, die aus der Entwicklung der Grenzmur vor und nach der Umsetzung gewonnen wurden, werden hier noch auf die Zusammenhänge mit den flussmorphologischen Rahmenbedingungen untersucht.

3.6.1. Grundlagen

3.6.1.1. Grundlagen zum Geschiebetransport

Die Sohlschubspannung τ kann in gleichförmigen Gerinnen unter stationären Bedingungen anhand folgender Formel berechnet werden:

$$\tau = \rho g R I \quad \text{Gleichung (1)}$$

Wobei ρ die Dichte des Wassers, g die Erdbeschleunigung, R der hydraulische Radius und I das Gefälle bedeuten. Der hydraulische Radius wird berechnet durch:

$$R = \frac{A}{U} \quad \text{Gleichung (2)}$$

Wobei A die Querschnittsfläche des Abflusses und U den benetzten Umfang bedeuten. In breiten Gerinnen wie der Mur nähert sich R dem Wert der Wassertiefe.

Es zeigte sich, dass der Geschiebetransport gut anhand der Sohlschubspannung berechnet werden kann. So geht die Sohlschubspannung wie in den meisten gebräuchlichen Geschiebetransportformeln auch in jene von Wong und Parker (2006) ein:

$$q_b = 3.97 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g d^3 \left[\frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g d} - 0.0495 \right]^{\frac{3}{2}} \quad \text{Gleichung (3)}$$

Wobei mit q_b der Geschiebetransport pro m Flussbreite, mit ρ_s die Dichte des Sediments und mit d der Korndurchmesser angegeben sind. Von Bedeutung ist auch der Exponent, der den Geschiebetransport bei zunehmender Sohlschubspannung potenziell ansteigen lässt.

Aufgrund der hier dargestellten Abhängigkeit der Sohlschubspannung von der Wassertiefe und vom Gefälle sind diese zwei Größen für den Geschiebetransport entscheidend, und müssen in der Entwicklung von Maßnahmentypen im Rahmen von goMURra entsprechende Beachtung finden.

3.6.1.2. Grundlagen zur Interaktion zwischen Sedimenteintrag und Morphologie

Schumm (1985) und Church (2006) leiteten aus Beobachtungen Zusammenhänge zwischen der Sedimentmenge, der Korngröße und der auftretenden Morphologie ab. Gemäß ihren Beobachtungen ist die entstehende Morphologie stark vom Sedimenteintrag abhängig. Für einen Fluss, der sich sein Bett in seinem eigenen Alluvial formen kann, bedeutet ein größerer Sedimenteintrag eine größere Gerinnebreite und/oder einen stärkeren Kurvenverlauf, sowie eine größere Tendenz zur Aufteilung in mehrere Arme (Abbildung 25).

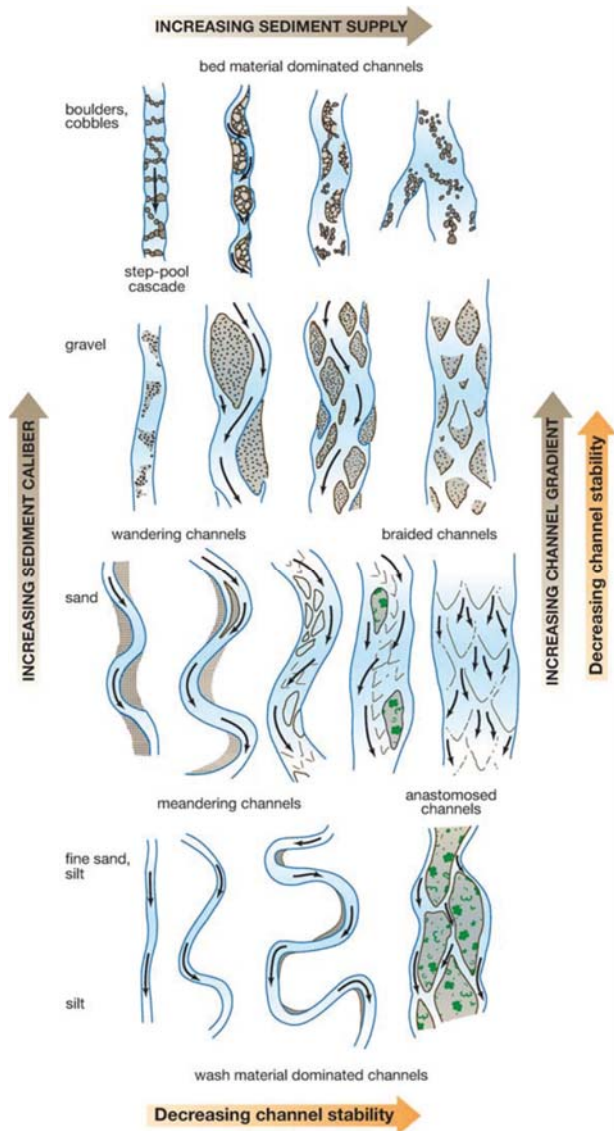


Abbildung 25. Abhängigkeit der Morphologie und der Stabilität von der Menge des Sedimenteintrags und der Korngröße (Church, 2006)

Umgekehrt verringern sich die Gerinnebreite und die laterale Dynamik stark, wenn der Sedimenteintrag reduziert wird. Marti und Bezzola (2009) bestätigten diesen flussmorphologischen Zusammenhang in einem Laborversuch (Abbildung 26).

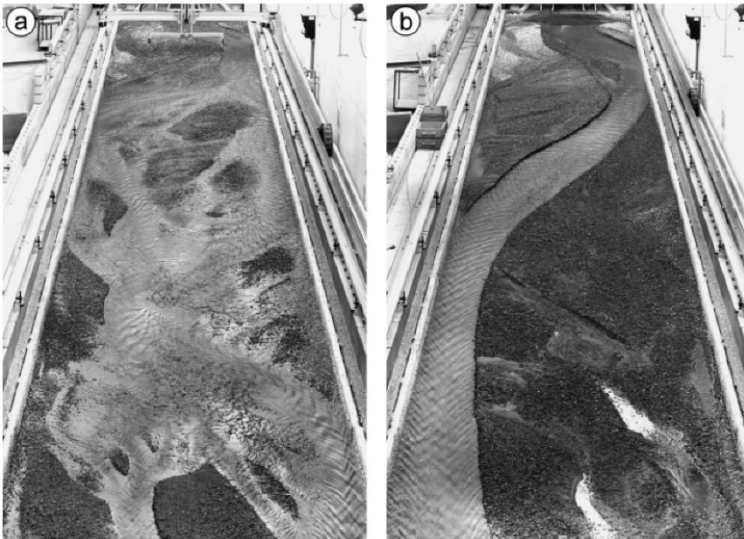


Abbildung 26. Entwicklung von einem mehrarmigen und verzweigten Gerinne zu einem engen Kanal nach Reduktion des Sedimenteintrags (Marti und Bezzola, 2009).

Mueller und Pitlick (2014) konnten die Abhängigkeit der Morphologie auch an der Geschiebekonzentration festmachen. Sie klassifizierten Flüsse mit bekanntem Geschiebetransport nach deren Morphologie, und konnten einen Schwellenwert für einen Übergang von einarmigen Gerinnen zu verzweigten Gerinnen definieren (Abbildung 27). Der Schwellenwert hängt dabei vom bordvollen Abfluss des jeweiligen Gerinnes ab.

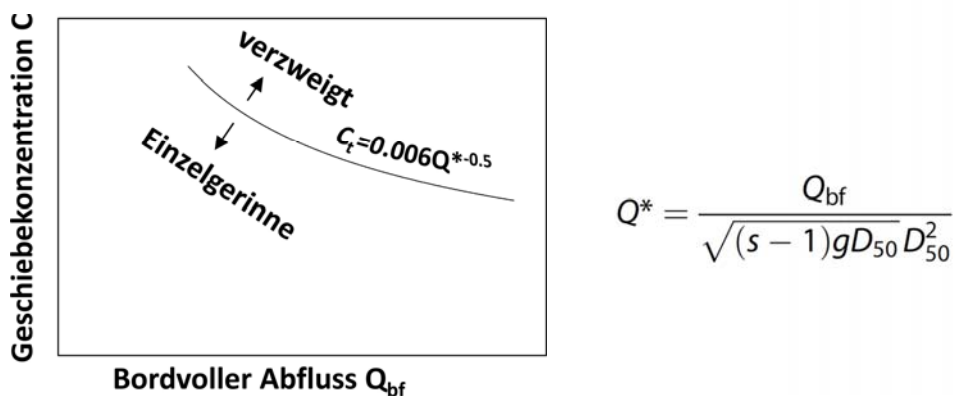


Abbildung 27. Abhängigkeit der Morphologie von der Geschiebekonzentration nach Mueller and Pitlick (2014). Q_{bf} ist der bordvolle Abfluss, Q^* ist ein dimensionsloser Durchfluss, s = die spezifische Dichte des Sediments (ρ_s/ρ) und D_{50} der Median des Korndurchmessers. Die Geschiebekonzentration C errechnet sich aus der Relation zwischen dem volumetrischen Geschiebetransport bei bordvollem Abfluss und dem bordvollen Abfluss. C_t ist die Geschiebekonzentration am Übergang zwischen einarmigen und verzweigten Gerinnen.

3.6.2. Übertragung der Grundlagen und der Erkenntnisse auf die Grenzmur

Bereits im Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept wurde die Rolle der Wassertiefe und des Gefälles für die Geschiebetransportkapazität berücksichtigt. Dementsprechend wurde bereits damals schon das Potenzial von beidem, einer möglichen Gefällsverkleinerung durch Laufverlängerung und einer Verringerung der Wassertiefe durch Gerinneverbreiterung, untersucht. Jedoch war damals der geringe laterale Erosionsdruck, der sich nach Entfernung der Ufererosion einstellen würde, nicht bekannt.

Der Eintrag an Sediment bei Gosdorf stammt fast ausschließlich aus der Sohlerosion im Abschnitt flussauf, sodass die Geschiebekonzentration dort sehr gering ist und demnach auch der Aufweitungsdruck entsprechend klein ist. Da die erwartete eigendynamische Aufweitung nicht auftrat, konnte die Maßnahme ihre sohlstabilisierende Wirkung nicht voll entfalten. Erst bei größerem Eintrag könnten sich Kiesbänke ausbilden, die den Abfluss dann seitlich ablenken und zu einer verstärkten Erosion der Ufer führen würden. Der gerade Verlauf im Aufweigungsabschnitt bei Gosdorf, in welchen sich der Abfluss nicht entlang der Ufer konzentriert, verschärfte noch die Situation. Damit die zur Verfügung stehende Breite in einem Abschnitt mit begrenzter Länge angenommen wird, müsste der Lauf vollständig verschwenkt werden.

Die in der Umgebung von Radkersburg bei Sieldorf umgesetzte Maßnahme war anderen Rahmenbedingungen ausgesetzt. Diese profitierte einerseits vom Sediment, das aus der Sohlerosion des gesamten Abschnitts stammte und in diesen Abschnitt eingetragen wurde, gemeinsam mit den Geschiebeeinträgen aus den Maßnahmenabschnitten. Der gekrümmte Verlauf förderte die Erosion des Außenufers, und das eingetragene Sediment bildete am Innenufer eine Kiesbank, die durch ihre Ausdehnung weitere Erosion am Außenufer begünstigte.

Das über die Maßnahmen in die Grenzmur eingetragene Geschiebe zeigte sehr hohe Transportgeschwindigkeiten, was eine kurze Aufenthaltsdauer des Geschiebes in der Grenzmur bedeutet, und auf einen geringen Austausch des Geschiebes mit dem Flussbett hinweist. Auch die Geschiebetransportgeschwindigkeit hängt von der Sohlschubspannung ab. Eine Reduktion der Sohlschubspannung, bei gleichzeitig erhöhtem Eintrag, würde diese Transportgeschwindigkeit herabsetzen und mehr lateralen und vertikalen Austausch des Sediments bewirken, und das Sediment länger im Abschnitt halten.

3.7. Abgeleiteter Handlungsbedarf

Die gemessene Erosionsrate an der Sohle der Grenzmur und das Wissen über die geringe Mächtigkeit des Kieshorizonts begründen einen akuten Handlungsbedarf. Ein möglicher Verlust des Kiesbetts verbunden mit einem möglichen Sohldurchschlag wäre aus vielerlei ökologischer und technischer Sicht katastrophal. Die Bedingungen für eine Sanierung mit ökologisch orientierten Maßnahmen wäre dann durch den mitunter immensen Verlust an Sedimentvolumen massiv erschwert. Zu berücksichtigen ist, dass die Sohlerosion bis zu einem eventuellen Sohldurchschlag kein berechenbarer, kontinuierlicher Prozess ist, sondern mit der Abhängigkeit von der Hydrologie zeitlich dem Zufall unterworfen ist und bereits das nächste größere Ereignis starke Veränderungen hervorrufen kann.

Die Zusammenschau der Erkenntnisse an der Grenzmur zeigte, dass zukünftige Maßnahmen große Laufveränderungen und Gerinneverbreiterungen enthalten müssen, die über die Bereitstellung eines ausreichenden Geschiebeeintrags in ihrer dynamischen Morphologie erhalten bleiben.

4. VORABSCHÄTZUNG DES RAUMBEDARFS

Neben der Korngröße des Sohlmaterials stellen die Gerinnebreite und das Gefälle Schlüsselparameter zur Reduktion der Sohlschubspannung und der Geschiebetransportkapazität, und somit zur Stabilisierung der Sohle dar (zusätzlich spielen der laterale Geschiebetransport, Ufererosion, Sohlformen und Rauigkeiten etc. eine Rolle). Dieses Kapitel dient nun der Abschätzung einer Gerinnebreite und eines Gefälles, das zur Schaffung eines dynamischen Gleichgewichts, Reduktion der Sohleintiefung und einer natürlicheren Morphologie notwendig ist und welche Breite vom Fluss überhaupt angenommen werden würde. Zur Dimensionierung von Gerinneaufweitung nannten Habersack und Klösch (2012) vier Ansätze:

- Analyse historischer Karten
- Regimetheoretische Ansätze
- Ingenieurmäßige Berechnungsmethoden
- Numerische Simulationen

Die numerischen Simulationen dienen im gegenständlichen Projekt zur detaillierten Überprüfung der Funktionstüchtigkeit von Maßnahmenvarianten. Für eine erste Ableitung des generellen Raumbedarfs als Vorabschätzung und zur Ableitung von Maßnahmenvarianten werden zunächst die einfacheren Ansätze verwendet.

4.1. Analyse historischer Karten

Eine Analyse historischer Karten hinsichtlich morphologisch und geschiebetransportrelevanter Parameter wurde bereits im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts durchgeführt (Abbildung 6). Demnach verfügte die Morphologie der Mur im historischen Zustand über eine Breite von bis zu ca. 1200 m (Habersack et al., 2001b). Solche Breiten wurden im Abschnitt zwischen Mureck und Bad Radkersburg erreicht, wo die Mur gemäß Klassifikation von Nanson and Knighton (1995) am meisten dem morphologischen Typ eines „laterally active, braided anabranching river“ entspricht. Eine solche Morphologie ist gekennzeichnet durch eine Aufteilung des Abflusses aufgrund hochliegender bewachsener Inseln in mehrere Arme, bei gleichzeitig in den einzelnen Gerinnen auftretenden Verzweigungen durch jüngere Sedimentbänke, und zeigt eine hohe seitliche Dynamik.

Habersack und Schneider (2000) werteten die historischen Karten hinsichtlich ausgewählter flussmorphologischer Parameter aus, und verglichen die erhaltenen Werte mit jenen des Zustands im Jahr 1999, der sich nur geringfügig vom aktuellen Zustand unterscheidet. Dabei zeigten sich besonders für den Abschnitt zwischen Mureck und Bad Radkersburg eine starke Reduktion der Umlagerungsbreiten (das Verhältnis von benetzter Breite zu Umlagerungsbreite erhöhte sich von einem Mittelwert von ca. 0,47 zu einem Wert von 1,00), starke Vergrößerung der Radien (von unter 400 m auf knapp 3000 m) und eine Reduktion der

Gerinneanzahl von bis zu 7 nebeneinander verlaufenden Gerinnen auf ein Einzelgerinne (Tabelle 3).

Tabelle 3. Vergleich ausgewählter flussmorphologischer Parameter für den Abschnitt zwischen Mureck und Radkersburg (Habersack und Schneider, 2000).

Jahr	Breitenverhältnis (benetzte Breite/Umlagerungsbreite)			Radien (m)			Gerinneanzahl		
	1817	1876	1999	1817	1876	1999	1817	1876	1999
Maximum	1,00	1,00	1,00	905	909	4457	bis 7	2-4(5)	1
Minimum	0,21	0,18	1,00	109	83	1592			
Mittelwert	0,47	0,52	1,00	379	348	2847			
Standardabw.	0,21	0,29		190	188	996			

Die Untersuchungen von Habersack und Schneider (2000) wurden noch durch Abmessungen von maximal auftretenden benetzten Breiten ergänzt. Diese halfen zusammen mit den anderen durchgeführten Analysen bei der Definition einer Mindestbreite, ab welcher mit einer Verzweigung durch das Hervortreten von Sedimentbänken gerechnet werden kann. In der noch etwas weniger detaillierten Josephinischen (ersten) Landesaufnahme aus dem Zeitraum 1764-1787 wurden benetzte Breiten von bis zu 262 m gemessen (Abbildung 28). Mehr Aussagekraft kann diesbezüglich von der detaillierteren zweiten Landesaufnahme erwartet werden, wo die größten Breiten in der Grenzmaur bis zu 180 m betragen. Unklar ist der Durchfluss, der bei der Kartierung vorgeherrscht hat und wie sich dieser auf die Kartierung von Kies- und Sandbänken ausgewirkt hat.

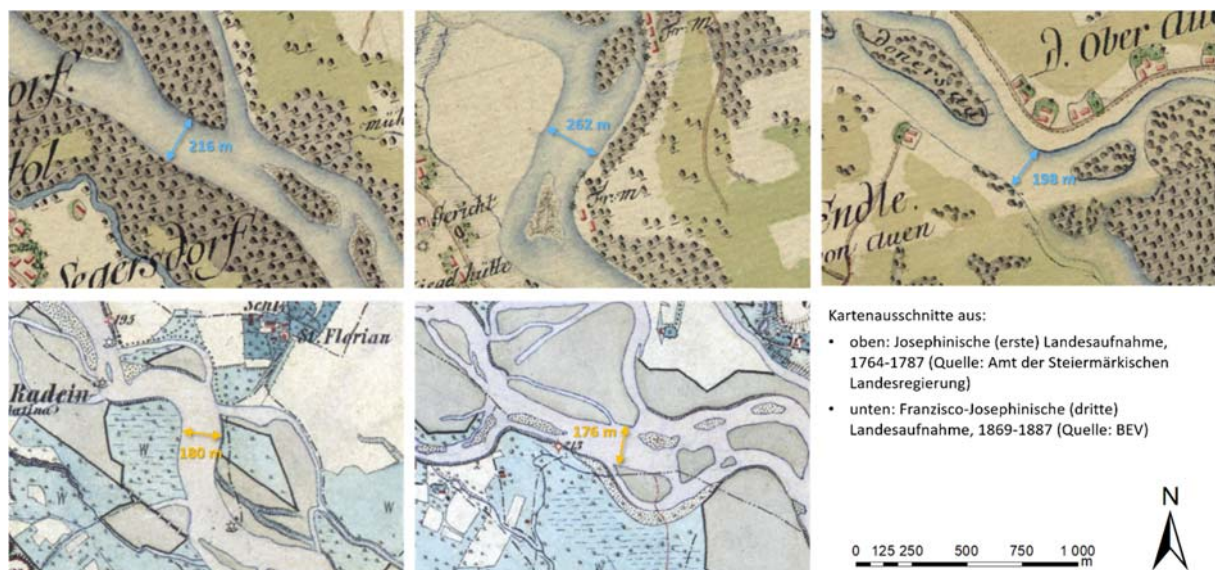


Abbildung 28. Abschnitte in historischen Karten des Grenzmaurabschnitts (Abbildung links unten knapp flussab der Grenzmaur bei Radecin) mit großen Breiten eines durchgehend benetzten Flussbetts.

Zusätzlich wurden anhand der ersten Landesaufnahme Informationen über die Längen und Breiten der Kies-/Sandbänke und der Inseln erhoben, die in die Entwicklung der Zielzustände Eingang fanden und im Modell „Widest“ verwendet wurden. Für Längen bis zu 600 m zeigte sich ein Breiten- zu Längenverhältnis von ca. 1:5 (Abbildung 29).

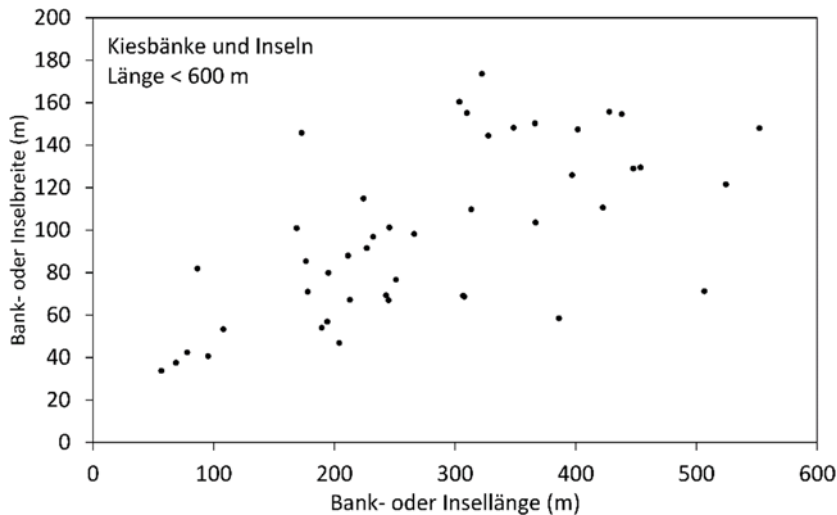


Abbildung 29. Längen und Breiten von Kies-/Sandbänken und Inseln für Längen kleiner als 600 m an der Grenzmur gemäß der Josephinischen (ersten) Landesaufnahme (1764-1787).

4.2. Regimetheoretische Ansätze

Regimetheoretische Ansätze verwenden gemessene Eigenschaften natürlicher Flüsse, die keiner Regulierung unterworfen wurden und sich hinsichtlich Sedimenthaushalt in einem Gleichgewichtszustand befinden (keine Auflandung oder Eintiefung). Auch die kontrollierten Bedingungen von Laborversuchen werden benutzt, um Zusammenhänge zwischen flussmorphologisch bedeutenden Größen herzustellen. Dabei werden Eigenschaften wie der bordvolle Abfluss, die Breite, Tiefe und Korngröße zueinander in Beziehung gesetzt und empirische Formeln abgeleitet, anhand welcher dann auch eine bestimmte Breite berechnet werden kann.

Allen hier angewandten Methoden ist gemein, dass eine repräsentative Korngröße und ein repräsentativer Durchfluss als Eingangswerte gegeben sein müssen. Als Korngröße wurde der d_{50} (Median der Kornverteilung) der Proben aus dem Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept herangezogen. Dabei wurden Daten der mittleren Sieblinie der volumetrischen Baggerproben aus Themenbereich 1.6 (Hengl et al., 2001) des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts entnommen, wo aus den erhobenen Kornverteilungen auch die Standardabweichung der Kornverteilung berechnet wurde (Abbildung 30). Der d_{50} dieser Kornverteilung beträgt demnach 26.9 mm, bzw. 18.9 mm und 36.0 mm bei Abzug/Addition der Standardabweichung. Diese drei Werte wurden in den nachfolgenden Berechnungen verwendet.

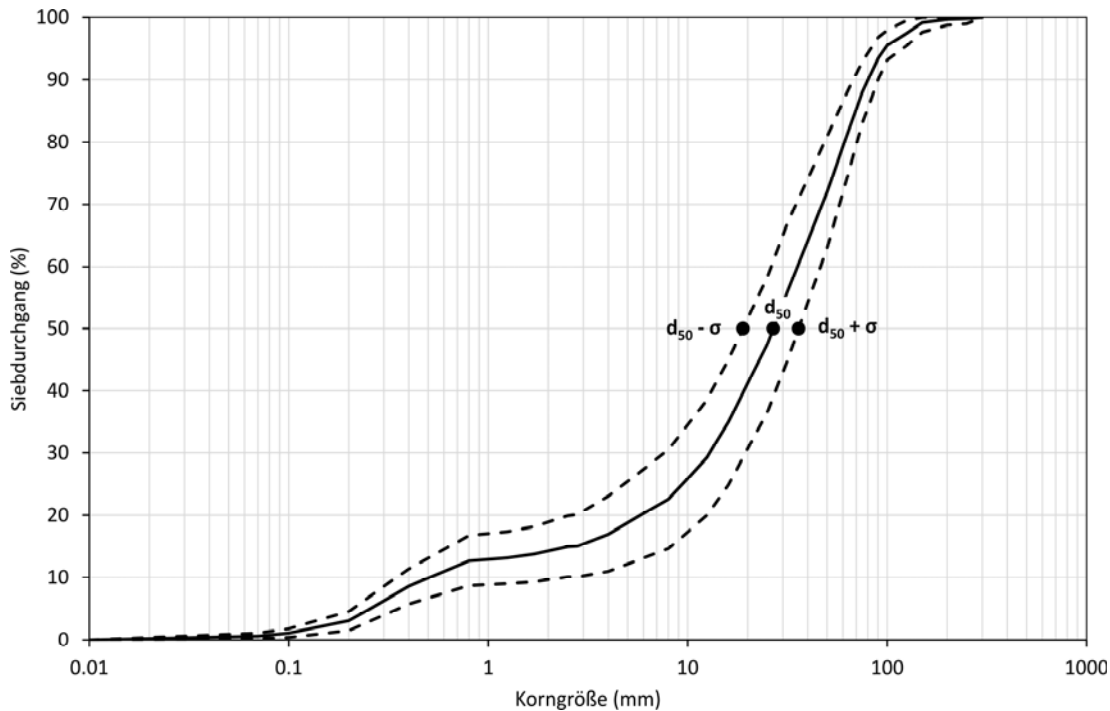


Abbildung 30. Mittlere Sieblinie der im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts entnommenen volumetrischen Baggerproben (Quelle: Hengl et al., 2001)

Zusätzlich wurde gemäß Empfehlungen von Biedenham et al. (2000) der bettbildende Abfluss abgeschätzt. Biedenham et al. (2000) empfehlen für den bettbildenden Abfluss a) entweder auf den bordvollen Abfluss, oder b) auf Hochwässer mit bestimmten Wiederkehrintervallen zurückzugreifen (ein Durchfluss zwischen dem eines MJHQ und eines HQ5), oder c) den effektiven Durchfluss zu berechnen, der den größten Anteil der Sedimentfracht transportiert. Von der Grenzmur sind ausreichend Daten vorhanden, um alle drei Methoden anzuwenden. Weil aber ein Durchfluss für eine natürlichere Morphologie benötigt wird, können die aktuellen Geometriedaten des regulierten oder nur wenig aufgeweiteten Gerinnes nicht für eine Abschätzung des Durchflusses herangezogen werden. Der bordvolle Abfluss entspricht aufgrund der Eintiefung nicht dem eines natürlichen Gerinnes, und der effektive Durchfluss wäre für das regulierte Gerinne zu klein ausgefallen, da durch die Einengung des Gerinnes die kritischen Sohlschubspannungen bereits bei kleinen Durchflüssen überschritten werden. Aus diesem Grund wurde für die Analysen jene Option zur Abschätzung des bettbildenden Abflusses gewählt, die von der Gerinnegeometrie unabhängig ist: der Hochwasserabfluss mit bestimmtem Wiederkehrintervall. In den Analysen wurden nun die Durchflüsse verwendet, die am Rand des von Biedenham (2000) genannten Spektrums stehen: das MJHQ (das ist an der Grenzmur am Pegel Mureck ein Durchfluss von $721 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) und das HQ₅ ($1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ am Pegel Mureck).

4.2.1. Da Silva-Diagramm (Da Silva, 1991; Ahmari und Da Silva, 2011)

Da Silva (1991) überprüfte Zusammenhänge zwischen dem Verhältnis Breite/Wassertiefe und dem Verhältnis Wassertiefe/Korndurchmesser mit der jeweilig vorhandenen Morphologie eines Flusses. Dabei konnte sie in einem Diagramm gut die unterschiedlichen Morphologien

eines Flusses abgrenzen, und definierte die Grenzen mit entsprechenden Formeln. Das Diagramm wurde von Ahmari und Da Silva (2011) noch verfeinert.

Anhand einer einfachen Berechnung in einem Trapezgerinne wurde nun für unterschiedliche Sohlbreiten die Wassertiefe berechnet, und die Werte für das Verhältnis zwischen Wassertiefe h und Korndurchmesser d und für Breite B zu Wassertiefe h eingetragen. Diese Untersuchung wurde für ein MJHQ ($721 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) und für ein HQ₅ ($1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) durchgeführt, sowie jeweils für die drei verschiedenen Korngrößen, um Kenntnis über die dahingehende Sensitivität zu gewinnen. Nun wurde untersucht, welche Breite dem Gerinne zur Verfügung gestellt werden müsste, damit die Morphologie in den Diagrammbereich der multiplen Bänke und Verzweigung übergeht, da sich diese Aufzweigung in mehrere Gerinne als wesentliche Eigenschaft der Grenzmur im historischen Zustand zeigte.

Der aktuelle, regulierte Zustand der Mur kam je nach verwendetem Durchfluss und je nach verwendeter Korngröße im Diagrammbereich der Mäander und im Diagrammbereich der alternierenden Bänke zu liegen (Abbildung 31). Dass die gestreckte regulierte Mur hier zum Teil als mäandrierender Fluss klassifiziert wird, hat damit zu tun, dass die Diagrammbereiche ausschließlich anhand von Daten von natürlichen Flüssen abgeleitet wurden und dass im regulierten Fluss das Breiten zu Tiefenverhältnis jenem eines mäandrierenden Flusses entsprechen kann.

Bei Erhöhung der Gerinnebreite verändert sich auch die Wassertiefe, wodurch die Einträge im Diagramm nach links oben wanderten. Bei Verwendung des MJHQ als bettbildenden Abfluss übertritt die Grenzmur bei einer Breite von 206 m und einer Korngröße von 26.9 mm die Schwelle zur verzweigten Morphologie (bzw. 195 m bei Verwendung des um die Standardabweichung vergrößerten Wert der Korngröße, und 221 m bei Verwendung des um die Standardabweichung verkleinerten Wert der Korngröße). Bei Verwendung des HQ₅ als bettbildenden Abfluss übertritt die Grenzmur bei einer Breite von 239 m und einer Korngröße von 26.9 mm die Schwelle zur verzweigten Morphologie (bzw. 226 m bei Verwendung des um die Standardabweichung vergrößerten Wert der Korngröße, und 255 m bei Verwendung des um die Standardabweichung verkleinerten Wert der Korngröße). Zu beachten ist, dass der Repräsentation des Querprofils durch ein Trapezgerinne bei größeren Breiten Grenzen gesetzt sind, da im natürlichen Zustand Anlandungen und Eintiefungen stattfinden, die eine etwas abweichende mittlere Wassertiefe erzeugen und somit auch zu etwas abweichenden Ergebnissen führen würde. Weiters sind in einem aufgeweiteten Flussbett, das sich zudem in einem dynamischen Gleichgewicht befindet, etwas kleinere Korngrößen als im regulierten Gerinne zu erwarten. Letzteres kann durch die um die Standardabweichung verkleinerte Korngröße berücksichtigt werden. Bemerkenswert ist, dass die erhaltenen Breiten für den Übergang der Mur von einem Einzelgerinne zu einer Verzweigung ungefähr jener Maximalbreiten einzelner Gerinne entsprechen, die anhand der historischen Karten erfasst wurden (Abbildung 28). Die erhaltene Breite ist als Mindestbreite anzusehen, die für eine Aufzweigung notwendig ist. Zur Erhaltung einer Morphologie, die einer natürlichen Ausformung entspricht, sind darüberhinausgehende Breiten zur Verfügung zu stellen. Zu beachten ist, dass der Geschiebeeintrag in dieser Betrachtung nicht Eingang findet, aber für eine Verzweigung Voraussetzung ist.

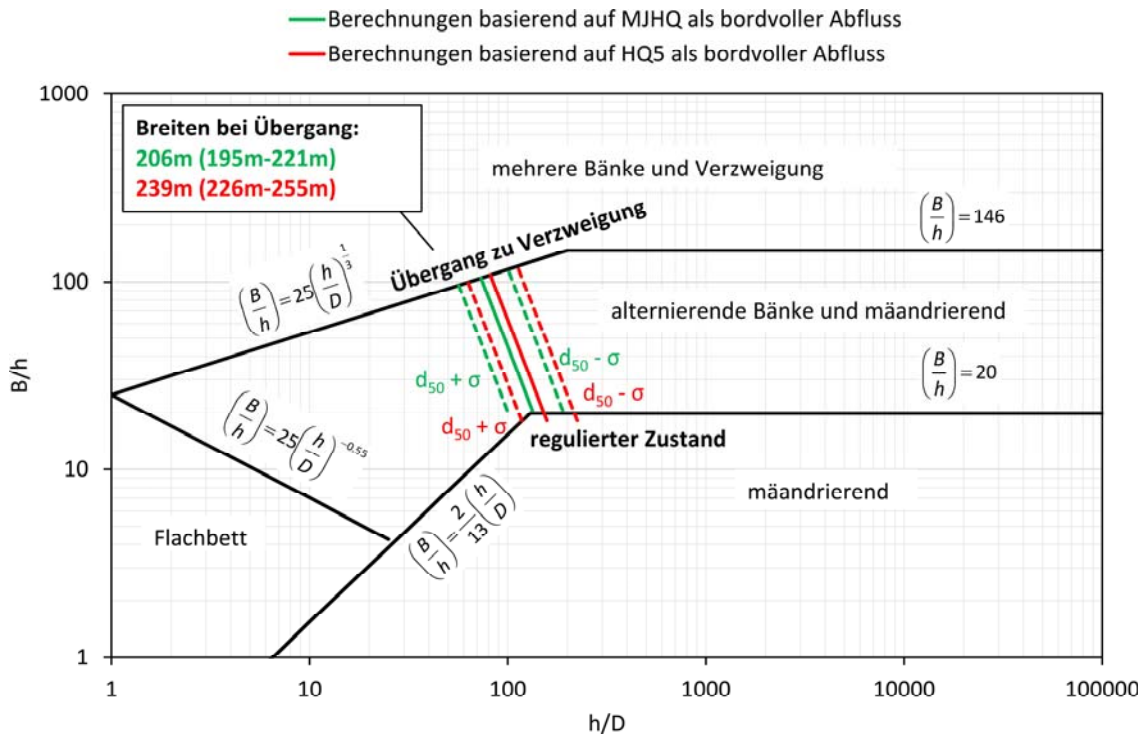


Abbildung 31. Da Silva-Diagramm mit eingetragenen Pfaden der Mur vom aktuellen, regulierten Zustand über die Erhöhung der Gerinnebreite bis zu beginnenden Verzweigungen.

4.2.2. River bar predictor (Crosato and Mosselman, 2009)

Crosato and Mosselman (2009) entwickelten ein einfaches, physikalisch basiertes, lineares Modell zur Vorhersage der Anzahl an Kies- und Sandbänken in einem Flussquerschnitt, die sich bei einer bestimmten Gerinnebreite unter der Voraussetzung eines dynamischen Gleichgewichts des Sedimenthaushalts einstellt. Die gewählte Breite sollte nicht die in der Natur maximal mögliche Breite überschreiten, auch ist das Modell für Breiten zu Tiefenverhältnissen größer als 100 aufgrund der Linearität des Modells nicht geeignet (solche Verhältnisse werden durch die große Wassertiefe eines bettbildenden Abflusses selten erreicht). Berechnet wird im Modell ein Modus m der Kies- oder Sandbänke, der die Anzahl der Kiesbänke in einem Querschnitt beschreibt:

$$m^2 = 0.17g \frac{(b-3)}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} D_{50}}} \frac{B^3 i}{C Q_w} \quad \text{Gleichung (4)}$$

wobei m =Anzahl der Sedimentbänke in einem Querprofil (siehe aber Abbildung 32 Abbildungen), g =Erdbeschleunigung ($m \text{ s}^{-2}$), b =Grad der Nichtlinearität von Sedimenttransport vs. tiefengemittelter Fließgeschwindigkeit (vorgeschlagen werden ein Wert für b von 4 in Sandbettflüssen und ein Wert von 10 in Kiesbettflüssen), B =Flussbreite (m), i =Gefälle, ρ_s =Sedimentfeststoffdichte, ρ_w =Dichte von Wasser, D_{50} =Median der Korngröße des Flussbetts, C =Chézy coefficient ($m^{(1/2)}s^{-1}$), Q_w =Durchfluss (m^3s^{-1}).

Der Chezy-Rauigkeitskoeffizient wurde dabei aus dem Ergebnis der Berechnung mit dem Stricklerwert rückgerechnet.

Der river bar predictor weist dem aktuellen regulierten Zustand einen Modus der Kiesbänke von rund 0.8 zu, was im Falle eines dynamischen Gleichgewichts ein Auftreten wenig stark ausgeprägter, alternierender Bänke entsprechen würde (Abbildung 32). Ein Modus von 2, bei welchem sich flussmittig Kiesbänke bilden, wäre laut der Anwendung bei Verwendung des MJHQ als bettbildenden Durchfluss ab einer Breite von 111 m wahrscheinlich, bei Verwendung des HQ₅ als bettbildenden Abfluss ab einer Breite von 124 m (beide Ergebnisse mit einem d_{50} von 26.9 mm). Beide Werte sind relativ klein, wenn man die möglichen Breiten im historischen Zustand und die mit dem in der Praxis anerkannten Diagramm von Da Silva erhaltenen, großen Breiten bedenkt. Eine Änderung der Korngröße um den Wert der Standardabweichung ändert die Breiten nur um ca. 5 %. Unklar ist, wie hoch Bänke bei Erreichen eines Barmodus von 2 bereits aus dem Wasser ragen und auch größere Abflüsse aufteilen.

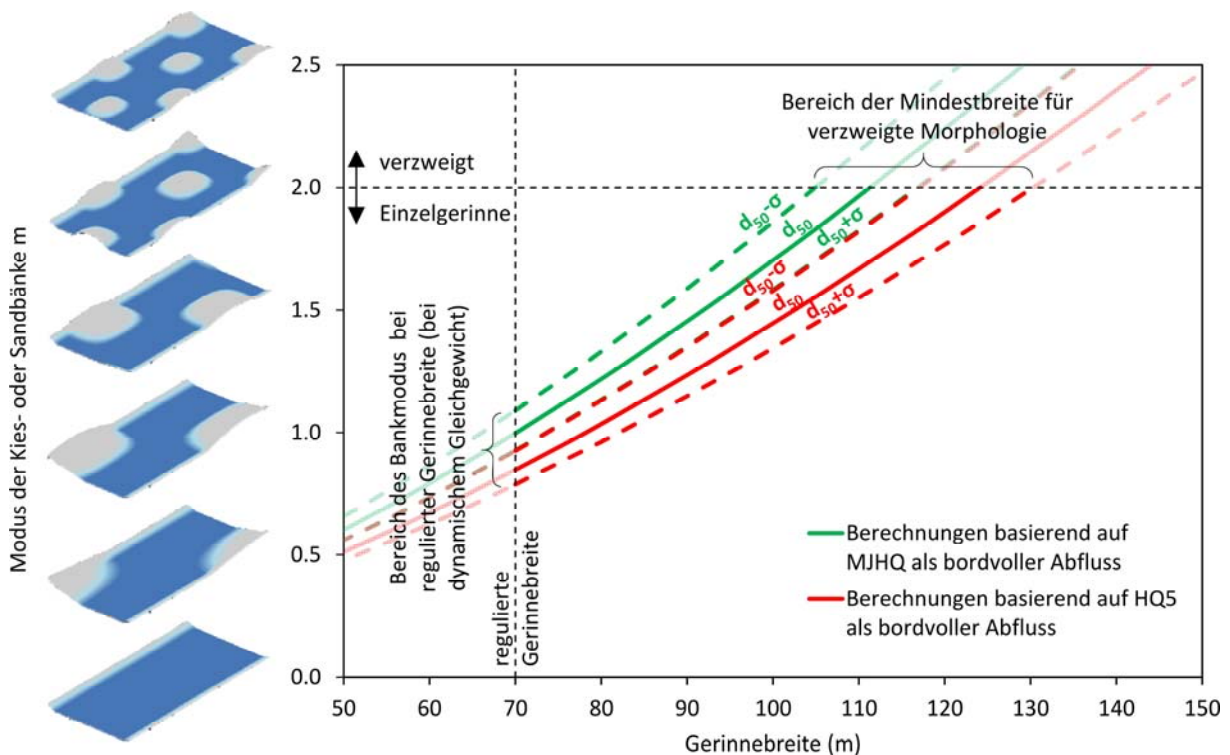


Abbildung 32. Berechnung des Bankmodus, der gemäß river bar predictor die auftretende Morphologie beschreibt, für verschiedene Gerinnebreiten.

4.2.3. Regimegleichung (Parker et al., 2007)

Regimegleichungen stellen eine formelmäßige Beziehung meist zwischen Durchfluss, Sediment und flussmorphologischen Größen her; so wird z.B. die durchschnittliche Flussbreite als Funktion des Durchflusses und der Korngröße beschrieben. Die Gleichungen werden empirisch aus Datensätzen abgeleitet. Dabei werden Daten von natürlichen Flusssystemen herangezogen. Oft stammen diese Daten aus Vermessungen vor der Umsetzung von wasserbaulichen Maßnahmen. Wichtig ist zu berücksichtigen, dass diese Regimegleichungen

nur von Flüssen mit einem Gerinne abgeleitet wurden und daher nur begrenzt für den Fall der Grenzmur einsetzbar sind.

Mit den Gleichungen Gleichung (5), Gleichung (6), und Gleichung (7) von Parker et al. (2007) kann allein mit Kenntnis des Durchflusses und der Korngröße die Wassertiefe, die Breite und das Gefälle abgeschätzt werden.

$$H_{bf} = \frac{0.382}{g^{1/5}} Q_{bf}^{2/5} \quad \text{Gleichung (5)}$$

$$B_{bf} = \frac{4.63}{g^{1/5}} Q_{bf}^{2/5} \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{g D_{S50} D_{S50}^2}} \right)^{0.0667} \quad \text{Gleichung (6)}$$

$$S = 0.101 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{g D_{S50} D_{S50}^2}} \right)^{-0.344} \quad \text{Gleichung (7)}$$

Worin H_{bf} = die Wassertiefe bei bordvollem Abfluss, B_{bf} =Breite bei bordvollem Abfluss, S = Gefälle, Q_{bf} = bordvoller Durchfluss, g =Erdbeschleunigung und D_{S50} = Median der Korngröße an der Oberfläche des Flussbetts.

Zu beachten ist, dass Parker et al. (2007) den Median des Sediments *an der Oberfläche* des Flussbetts verwenden. Unklar ist jedoch mit welcher Methode diese Korngröße in Parker et al. (2007) bestimmt wurde; gleichzeitig sind aus dem Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept nur sehr wenige Linienzahlanalysen vorhanden. Daher wurde die Analyse hier für ein ganzes Spektrum von möglichen Korngrößen durchgeführt.

Bevor die Methode auf ein breiteres Spektrum von Eingangsdaten angewandt wurde, wurde zunächst versucht einen Vergleich mit dem historischen Zustand herzustellen. Ein Gefälle von 1.1 ‰, das in etwa dem Gefälle des historischen Zustands entspricht, erreicht man mit Gleichung (7) beim Durchfluss des HQ_5 mit einem gewählten D_{S50} von 52,4 mm. Unter Verwendung derselben Korngröße und desselben Durchflusses in Gleichung (6) ergibt sich aber eine Breite von nur 112 m, die die Breite des natürlichen Zustands unterschätzt. Gleichzeitig erhält man eine unrealistisch hohe Wassertiefe (3.83 m), die nicht viel kleiner ist als die aktuelle (Mittelwert in den Querprofilen des Jahres 2018 ca. 4.34 m), trotz der erfolgten Eintiefung. Versucht man auch mit einem bordvollen Abfluss von $721 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (HQ_1) zu rechnen, so muss ein Korndurchmesser des Flussbetts an der Oberfläche von 46,0 mm gewählt werden um ein Gefälle von 1,1 ‰ zu erreichen, wobei die Breite dann 114 m beträgt. Auch dieser Wert scheint, verglichen mit den Breitenabmessungen in den historischen Karten, zu klein. Die Regimegleichung nach Parker scheint aufgrund ihrer Ableitung von Flüssen mit nur einem Gerinne für die Mur nicht anwendbar, und die erhaltenen Breiten sind nicht als Richtwerte für Maßnahmen zu verwenden.

Eine Verkleinerung des Gefälles auf einen historischen Wert von ca. 1,1 ‰ könnte nur über einen kurvigeren Verlauf erreicht werden, der eine gewisse Breite eines Korridors benötigt.

Die Breite eines solchen Korridors wurde nun für verschiedene Gefälle und Radien berechnet. Abbildung 33 zeigt, wie die Breite des benötigten Korridors mit abnehmendem Gefälle und zunehmendem Radius zunimmt. Der Median der Radien im mittleren Abschnitt der Grenzmaur betrug ca. 300 m, wonach die Korridorbreite zur Einhaltung des dortigen, historischen Gefälles von 1,1 ‰ (das historisch im mittleren Abschnitt vorhandene Gefälle) 469 m betragen müsste. Das ist ein Mindestwert, da hier Kreisbögen direkt aneinander gereiht wurden, während der Radius in der Natur eigentlich nur für den Scheitelpunkt eines Mäanders galt. In dieser Analyse wurde für die Berechnung der Gerinnebreite auf das HQ₅ stellvertretend für den bettbildenden Abfluss zurückgegriffen.

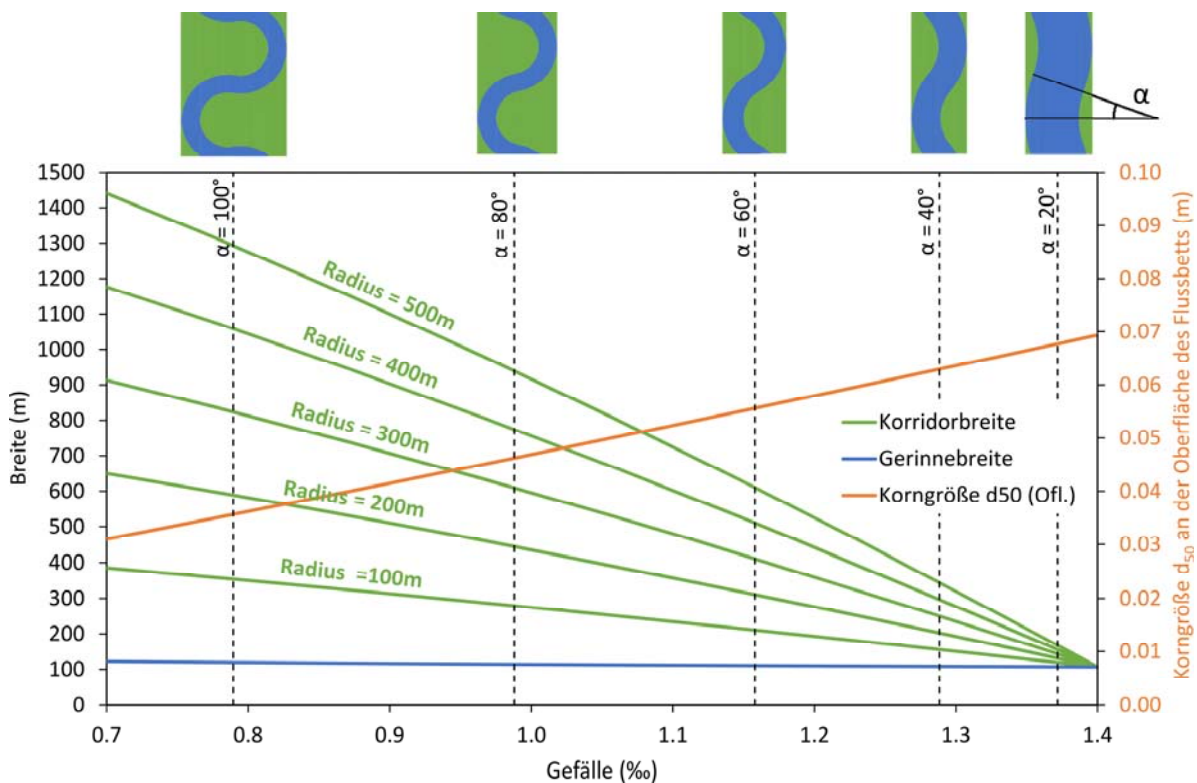


Abbildung 33. Korridorbreite, die sich aus der Gerinnebreite, dem Gefälle und den Kurvenradien ergibt. α beschreibt dabei den Ablenkungswinkel im Wendepunkt. Die Korngröße an der Oberfläche des Flussbetts ergibt sich aus der umgekehrten Verwendung der Regimegleichung.

4.3. Ingenieurmäßige Berechnungsmethoden

Ingenieurmäßige Berechnungsmethoden bedienen sich meist eines Querprofils, um die Auswirkung einer größeren Gerinnebreite nach Aufweitung auf den Sedimenttransport abzuschätzen. Habersack und Schneider (2000) verglichen bereits in Voruntersuchungen für das Wasserwirtschaftliche Grundsatzkonzept den Effekt einer Laufverlängerung mit dem Effekt einer Gerinneverbreiterung auf die Geschiebetransportkapazität. Innerhalb der räumlichen Möglichkeiten zeigte eine Gerinneverbreiterung eine stärkere Wirkung (Abbildung 34).

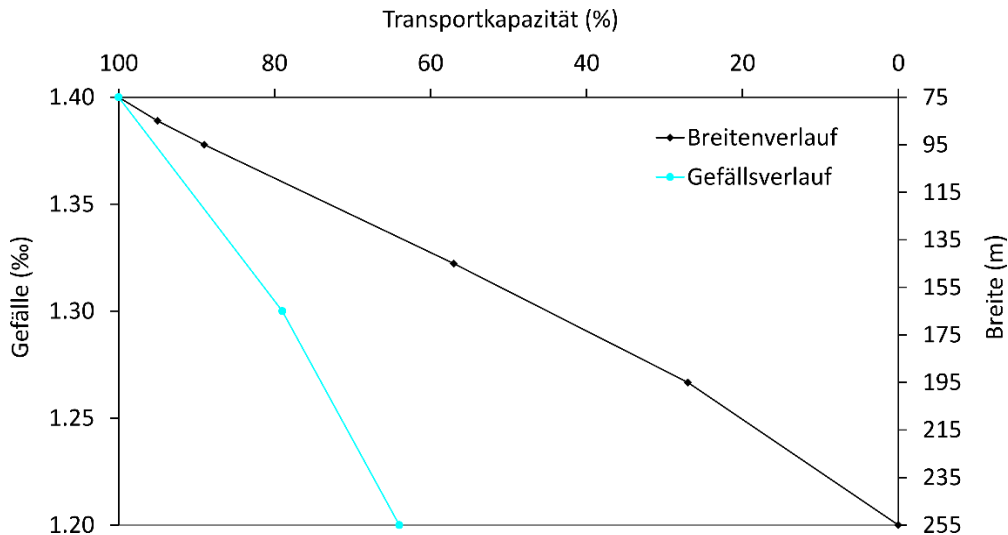


Abbildung 34. Abhängigkeit der Geschiebetransportkapazität von Gefälle und der Breite der Grenzmu (nach Habersack und Schneider, 2000).

Zur modellhaften Gerinneverbreiterung werden in vereinfachten ingenieurmäßigen Betrachtungen jedoch die Querprofile meist nur durch das Einfügen horizontaler Abschnitte verlängert oder das Querprofil generell durch vereinfachte Geometrien abgebildet, z.B. durch jene eines Trapez. Dabei werden Anlandungen, die eine unregelmäßige Geometrie und dadurch eine unregelmäßige Querverteilung der Sohlschubspannungen schaffen, ignoriert.

Klösch et al. (2019a) entwickelten mit dem Modell „widest“ eine solche ingenieurmäßige Betrachtung, die das Wachstum einer Kiesbank mit der Form einer Kosinusfunktion darstellt, und eine Ufererosion abhängig von der auftretenden Sohlschubspannung berechnet. Dabei werden von Hunzinger (1998) im Labor festgestellte morphologische Auswirkungen berücksichtigt, sowie von Klösch et al. (2015) während Abflussereignissen beobachtete Prozesse der Interaktion zwischen Kiesbankwachstum und Ufererosion nachgestellt. Um Werte für die Parameter der Ufererodierbarkeit zu erhalten, wurde auf eine von Habersack et al. (2013) aus Messungen abgeleitete Beziehung zwischen Durchfluss und Ufererosion für einen geraden Abschnitt in Gosdorf zurückgegriffen. Mithilfe einer zweidimensionalen hydrodynamischen Modellierung wurden die Sohlschubspannungen nahe den Böschungen ermittelt, sodass schlussendlich aus den Relationen zwischen Schubspannungen und Erosionsgeschwindigkeiten die kritische Schubspannung für Erosionsbeginn und der Erodierbarkeitskoeffizient abgeleitet werden konnte. Dabei ist zu beachten, dass die von Habersack et al. (2013) abgeleitete Beziehung nur auf wenigen Datenpunkten basieren konnte, vor allem die festgestellte kritische Sohlschubspannung wurde von sehr kleinen Veränderungen der Ufer abgeleitet, die innerhalb der Messunsicherheit liegen könnten.

Würde der Geschiebeeintrag von flussauf der Geschiebetransportkapazität im regulierten Gerinne bei aktuellem Sohlmaterial entsprechen, dann hätte sich in einem Uferrückbauabschnitt flussab innerhalb von 10 Jahren die Breite von 71 m auf 272 m verbreitert (Abbildung 35). In dieser Analyse wurde von einem Längen- zu Breitenverhältnis von Bänken und Inseln von 5 ausgegangen, so wie es anhand der historischen Karte der ersten Landesaufnahme erhoben wurde (Abbildung 29). Zu bedenken ist, dass bei sehr starker Breitenentwicklung der Aussagekraft dieses Modells Grenzen gesetzt sind, da sich (1) ab einer

gewissen Breite mehr als eine Kiesbank bilden könnte, und (2) die Breitenentwicklung dann auch nicht symmetrisch erfolgen würde (die Durchflussaufteilung wäre unterschiedlich zu beiden Seiten, wie auch die auftretende Morphodynamik). Wichtig zu betonen ist, dass sich diese Seitenerosion nur bei intaktem Geschiebeeintrag ergibt.

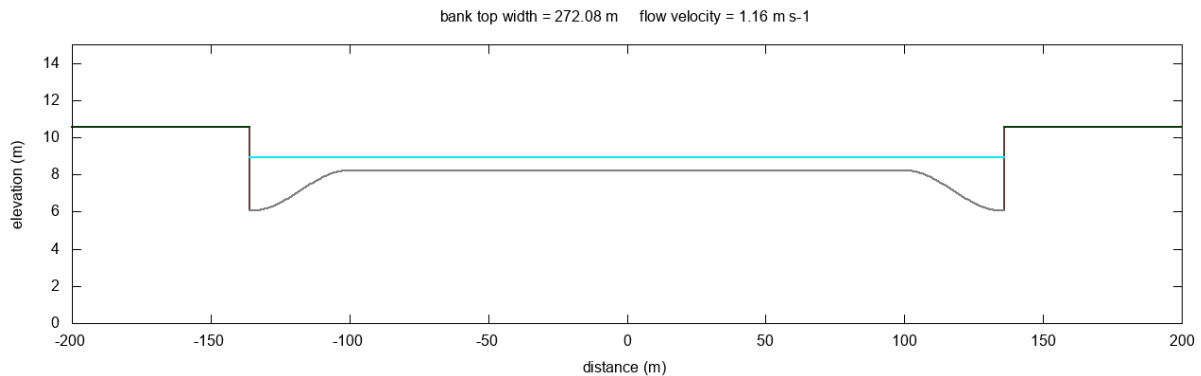


Abbildung 35. Querprofil, wie es gemäß Modell Widest nach Uferrückbau nach zehn Jahren aussehen würde, bei einer Geschiebezufuhr gemäß Geschiebetransportkapazität in einem reguliert verbliebenen Abschnitt flussauf.

4.4. Abschätzung des Längenbedarfs

Ein Rückbauabschnitt benötigt eine Mindestlänge, damit eine zur Verfügung gestellte Breite vom Fluss auch morphologisch angenommen wird. Hunzinger (1998) leitete aus Laborversuchen an symmetrischen, beidseitigen Aufweitungen mit geradem Zulauf Formeln zur Berechnung einer solchen Mindestlänge ab. Anhand einer dieser Formeln lässt sich zunächst die Länge einer trichterförmigen Erweiterung im Einlauf der Aufweitung L_w berechnen:

$$L_w = \frac{B_A - B_K}{2} [2.21 - 2.81 \ln(1 - F)] \quad \text{Gleichung (8)}$$

wobei B_A =die Breite des aufgeweiteten Abschnitts, B_K =die Breite des regulierten Abschnitts flussauf. Die Variable F errechnet sich durch:

$$F = 0.21 e^{\frac{7.1}{\frac{B_A}{B_K} + 3.5}} \quad \text{Gleichung (9)}$$

Die Mindestlänge L_A errechnet sich dann mit:

$$L_A \geq 2L_w + L_v \quad \text{Gleichung (10)}$$

wobei L_A die gesamte Länge der Aufweitung bezeichnet und L_v die Länge der Verengung, die die Aufweitung wieder in das regulierte Gerinne führt. Der Winkel der Verengung vom aufgeweiteten in den regulierten Abschnitt im Verengungsabschnitt L_v flussab zeigte laut Hunzinger bei 25° (gemessen zwischen einer Uferlinie der Verengung und dem ursprünglichen Ufer) nur kleine Energieverluste und ein Aufstauereffekt bei Hochwasserabflüssen sollte klein sein.

Wird nun ein Winkel von 25° für die Berechnung von L_v verwendet, ergeben sich ausgehend von einer Sohlbreite von 71 m (die Breite bei Mittelwasser beträgt ca. 76 m) die in Abbildung 36 dargestellten Mindestlängen von Aufweittingsabschnitten an der Grenzmauer. Bei den angegebenen Mindestlängen schafft es die Morphologie gerade erst bis zur vollständigen Ausbildung, bevor sie wieder im Verengungstrichter eingeengt wird. Demnach sollte eher die doppelte Länge bereitgestellt werden, damit die der Aufweitung entsprechende Morphologie über einen großen Teil der Länge vorhanden ist.

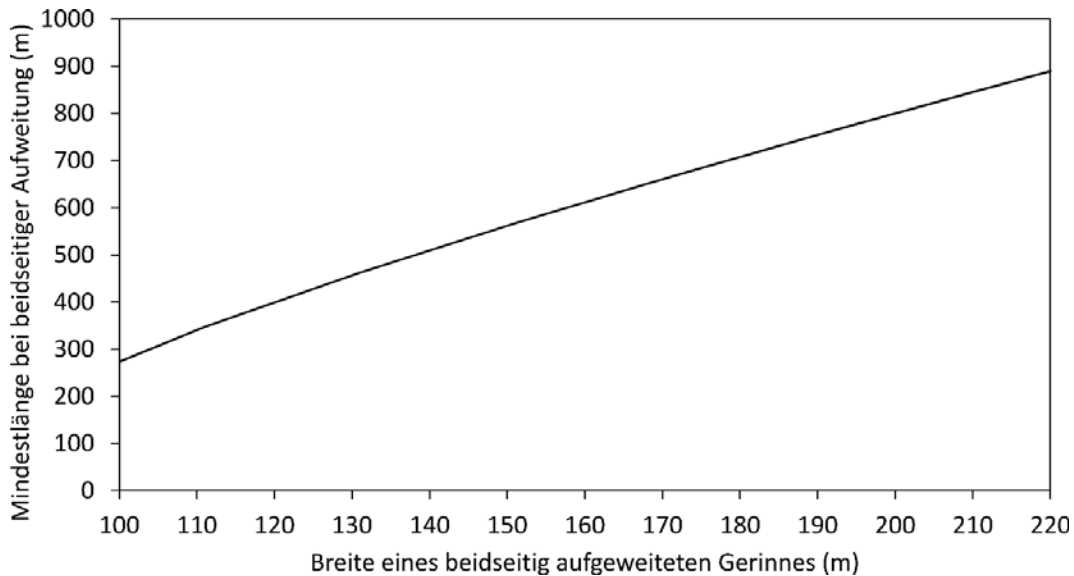


Abbildung 36. Berechnete Mindestlängen L_A eines Aufweittingsabschnitts an der Mauer für unterschiedliche Aufweittingsbreiten nach Hunzinger (1998). Zu beachten ist, dass diese Mindestlängen erst die Einstellung einer der Breite entsprechenden Morphologie erlauben. Damit diese Morphologie aber über einen großen Teil der Aufweitung vorhanden ist, sollten größere Längen angeboten werden (z.B. $2 \times L_A$).

Wie bereits erwähnt ist zu beachten, dass die Formeln für beidseitige Aufweitungen erstellt wurden. Bei einseitigen Aufweitungen mit denselben Breiten könnten sich größere Mindestlängen ergeben. In beiden Fällen hängt die Mindestlänge auch von der Zulaufbedingung ab; in Flussbiegungen sind andere Mindestlängen zu erwarten.

4.5. Abschätzung des erweiterten Platzbedarfs

Flüsse, deren Sedimenthaushalt sich in einem dynamischen Gleichgewicht befindet und die sich in ihrem eigenen Alluvialformen, haben zwar im Großen und Ganzen über lange Abschnitte gemessen eine gleichbleibende Charakteristik, jedoch kann lokal die morphologisch beanspruchte Breite großen zeitlichen Schwankungen unterworfen sein und der gesamte Flusslauf migrieren. Soll eine möglichst ungestörte Morphologie entstehen, ist der Kontakt mit künstlichen Zwangspunkten (z.B. Uferlängsverbauungen oder Buhnen) zu minimieren, da verhinderte Ufererosion zu Tiefenerosion führen und so die Morphologie beeinflussen würde. Das Modell Widest (Kapitel 4.3) zeigte für die Durchflussganglinie des Zeitraums zwischen 2010 und 2019 am Pegel Mureck eine von Anlandungen an der Sohle verstärkte Ufererosion von im Durchschnitt ca. 10 m an einem Ufer. Wo ausreichend Platz

gegeben ist, sollten entsprechende Platzreserven im Vorland berücksichtigt werden, um innerhalb eines bereitgestellten Korridors ein Pendeln des Gerinnes oder mehrerer Arme zu erlauben.

4.6. Zusammenfassende Beurteilung des Raumbedarfs

Gemäß den historischen Karten konnten einzelne Arme Breiten von bis zu 262 m erreichen, ohne dass an dieser Stelle Anlandungen zu Verzweigungen führten. Das Diagramm nach Da Silva schlägt eine Mindestbreite rund um ca. 220 m vor, die notwendig sind, um eine verzweigte Morphologie zu erhalten. Dementsprechend sollte für das Gerinne selbst (ohne Berücksichtigung eines Korridors für Verringerung des Gefälles und Möglichkeit zur lateralen Dynamik) eine Mindestbreite von 220 m zur Verfügung gestellt werden, um dynamische Aufzweigungen zu erhalten. Stellt man keine darüberhinausgehende Breite als Korridor zur Verfügung, würde diese Mindestbreite aber noch keine Möglichkeit für größere Laufverlängerungen bieten und somit nur eine kleine Gefällsverminderung bewirken.

Es zeigte sich, dass sich erst durch eine stark erhöhte Laufverlängerung in einem Korridor von über 469 m Breite ein natürliches Gefälle bei natürlichen Radien der Flusskrümmungen erreichen ließe. Soll den Außenufern noch Bewegungsspielraum geboten werden, und wird dem Gerinne selbst eine Breite für Verzweigungen im Gerinne zugewiesen (z.B. die zuvor errechneten 220 m), so muss die Korridorbreite noch darüber hinausgehen. Eine Erhöhung der Gerinnebreite, die Ablagerung von mittigen Kiesablagerungen und die Dynamik von Verzweigungen zulässt, und die zusätzliche Bereitstellung eines breiten Korridors für eine erhöhte Sinuosität würden sowohl die Wassertiefe als auch das Gefälle entscheidend verkleinern, sodass mit einer stärker reduzierten Geschiebetransportkapazität gerechnet werden könnte. Gleichzeitig wäre durch die Dynamik im Gerinne selbst, aber auch durch den kurvigen Verlauf und die Erosion natürlicher Ufer in einem bereitgestellten Korridor von einer stark erhöhten ökologischen Wirkung auszugehen.

Das Modell Widest (Klösch et al., 2019a) zeigte, dass Anlandungen im Gerinne zu starken Ufererosionen führen (ca. 10 m pro Jahr im untersuchten Zeitraum), und das Gerinne durch Aufteilung in zwei Gerinne entsprechend rasch große Breiten erreichen kann. Dementsprechend muss im besten Fall genügend Raum für eine solche laterale Dynamik vorhanden sein. Diese Dynamik setzt einen ausreichenden Geschiebetransport voraus.

Erfolgt ein Rückbau nur über eine begrenzte Länge, so ist abhängig von der Aufweitungsbreite auch eine Mindestlänge zu berücksichtigen. Bei einer Breite von ca. 150 m beträgt die vorgeschlagene Mindestlänge für eine symmetrische, beidseitige Aufweitung ca. 1000 m. Wird die Aufweitung nur einseitig durchgeführt, wäre wohl ein längerer Abschnitt nötig.

Zu beachten ist, dass diese Werkzeuge anhand von Daten bzw. Theorien entwickelt wurden, die von einem dynamischen Gleichgewicht des Sedimenthaushalts ausgehen; ausreichende Sedimentzufuhr ist zur Erreichung der Morphologie unumgänglich.

5. ENTWICKLUNG VON MASSNAHMENVARIANTEN

Ausgehend von den Analysen zum Raumbedarf (Kapitel 4) und von der Raumverfügbarkeit gemäß der in Deliverable D.T1.3.1 erstellten Raumwiderstandskarte wurden drei Maßnahmentypen definiert. Alle drei Maßnahmentypen sprechen die für die Sohlstabilisierung entscheidenden Parameter (Gerinnebreite und Gefälle) je nach Größe des bereitgestellten Raums in unterschiedlichem Ausmaß an. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass mit zunehmender Größe des Maßnahmentyps die Geschiebetransportkapazität abnimmt, sodass der Geschiebebedarf zur Stabilisierung der Sohlhöhen sinkt. Die drei Maßnahmentypen können folgendermaßen charakterisiert werden:

Maßnahmentyp A: Hier wird das Gerinne durch Aufweitung des Hauptarms oder durch die Anlage eines Nebenarms auf durchschnittlich ca. 150 m verbreitert. Dabei bewirkt die Erhöhung der Gerinnebreite eine kleine Verringerung der Geschiebetransportkapazität. Das Gefälle wird dabei nicht oder nur sehr eingeschränkt verändert, sodass ein Beitrag einer Gefällsreduktion nur geringfügig vorhanden ist. Die erforderliche Menge an Geschiebe zur Stabilisierung der Sohlhöhen bleibt erwartungsgemäß hoch. Die Länge der Aufweitung ist begrenzt, erstreckt sich aber mindestens über einen Kilometer. Diese Mindestlänge stellt sicher, dass die Morphologie die zur Verfügung gestellte Breite auch annehmen kann.

Maßnahmentyp B: Hier wird ein durchgehender Korridor von ca. 220 m Breite zur Verfügung gestellt, der neben der vergrößerten Gerinnebreite auch ein leichtes Pendeln des Flusslaufs zulässt, und durch die ermöglichte Sinuosität das Gefälle geringfügig verkleinert. Es wird von einer mittleren sohlstabilisierenden Wirkung der Maßnahme ausgegangen, und eine mittlere Menge an Geschiebezugabe wäre zur Haltung der Sohlhöhen notwendig.

Maßnahmentyp C: Hier wird einem Gerinne mit ca. 220 m Breite ein übergeordneter Korridor mit größerer Breite bereitgestellt, der eine eigendynamische Entwicklung der Gerinnebreite zulässt, wie auch stärkere Laufverschwenkungen, die das Gefälle entscheidend verkleinern. Verbauungen wären hier nur, wenn notwendig, an außenliegenden Böschungen von Krümmungen vorzusehen. Von der starken Erhöhung der Gerinnebreite bei gleichzeitig starker Reduktion des Gefälles ist von der größten sohlstabilisierenden Wirkung auszugehen, die die kleinste Geschiebedotation notwendig macht. Aufgrund des geringen Verbauungsgrades, der größten Flächen der unterschiedlichen Strukturen und der erwarteten Morphodynamik kann bei diesem Typ von der größten ökologischen Wirkung ausgegangen werden.

Zum Vergleich wurde auch ein **Maßnahmentyp 0** definiert, bei welchem die Geometrie dem aktuellen Zustand entspricht, eine entsprechende Geschiebezugabe aber die Sohle stabilisiert. Gemäß der Hypothese wird angenommen, dass Typ 0 am meisten Geschiebezugabe zur Haltung der Sohlhöhen benötigt. Der Maßnahmentyp 0 ist nicht mit dem Istzustand zu verwechseln, da eine solche Geschiebezugabe aktuell fehlt und sich die Sohlen eintiefen.

Die Untergliederung in drei Typen diene der nachfolgenden numerischen Untersuchung der Wirkungen unterschiedlicher Größen von Maßnahmen. Je nach Raumverfügbarkeit können auch Zwischenformen für die Umsetzung in der Grenzmur gewählt werden.

Abbildung 37 fasst die Charakteristik und die erwartete Wirkung der Maßnahmen zusammen.

	Regulierter Ausgangszustand	Maßnahmentyp A	Maßnahmentyp B	Maßnahmentyp C
Grundriss				
Raumbedarf	Regulierte Breite	klein (150m)	mittel (220m)	groß (220m und mehr)
Gerinnebreite	Regulierte Breite	Kleine Aufweitung oder Nebenarm	Große Aufweitung mit Kiesbänke	Gerinnebreite 220 m, Korridor > 220 m – mehr Morphodynamik, mehr Ufererosion, Kiesbänke
Sinuosität und Gefälle	Nur die „Sinuosität“ der Regulierung, höheres Gefälle	Keine/wenig zusätzliche Sinuosität, keine/wenig Veränderung des Gefälles	Geringfügige Erhöhung der Sinuosität, geringfüg. Verkleinerung des Gefälles	Höhere Sinuosität, kleineres Gefälle
Ufersicherungen	Alle Ufer verbaut	Höherer Anteil an Verbauung	Häufige Verbauungen	Ufersicherungen gesondert in Außenuffern falls notwendig
Parametergrößen	Gerinnebreite Sinuosität 	Gerinnebreite Sinuosität 	Gerinnebreite Sinuosität 	Gerinnebreite Sinuosität
Sohlstabilisierende Wirkung	keine	klein	mittel	hoch
Erforderliche Sedimentzugabe	sehr hoch	hoch	mittel	klein

Abbildung 37. Aus den Analysen zum Raumbedarf und zur Raumverfügbarkeit abgeleitete Maßnahmentypen für die Grenzmur.

Diese Maßnahmentypen wurden auf einen ca. 6 km langen Abschnitt der Grenzmur bei Apače/Halbenrain übertragen (Fluss-km 109,54-103,39) und die möglichen morphologischen Strukturen von entwickelten Zielzuständen im Grundriss dargestellt. Dieser Abschnitt wurde ausgewählt, da hier gemäß Raumwiderstandskarte aus D.T1.3.1 alle drei Maßnahmen umsetzbar wären.

Abbildung 38 zeigt eine Abfolge von vier Abschnitten des Typs A.

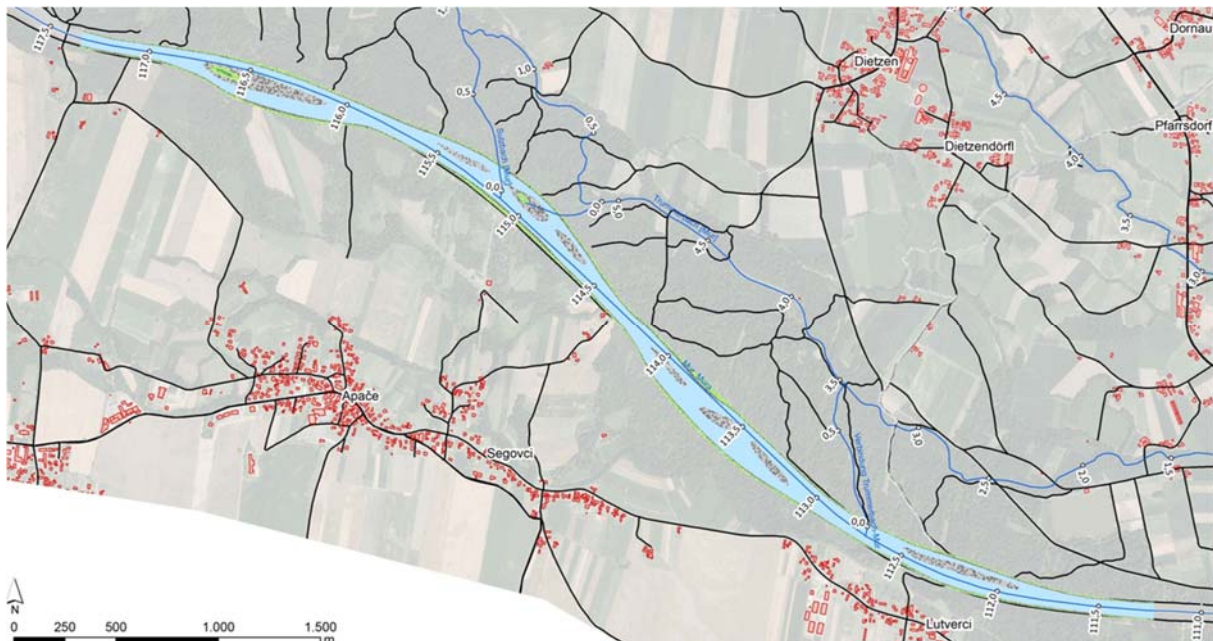


Abbildung 38. Auf den Referenzabschnitt übertragener Grundriss mit der morphologischen Charakteristik des Maßnahmentyps A im Abschnitt zwischen Fluss-km 109,54 und 103,39 gemäß der zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept verwendeten Kilometrierung (in der Abbildung ist die aktuelle Kilometrierung dargestellt).

Abbildung 39 zeigt einen durchgehenden Korridor von ca. 220 m Breite entsprechend der Vorstellung von Typ B.

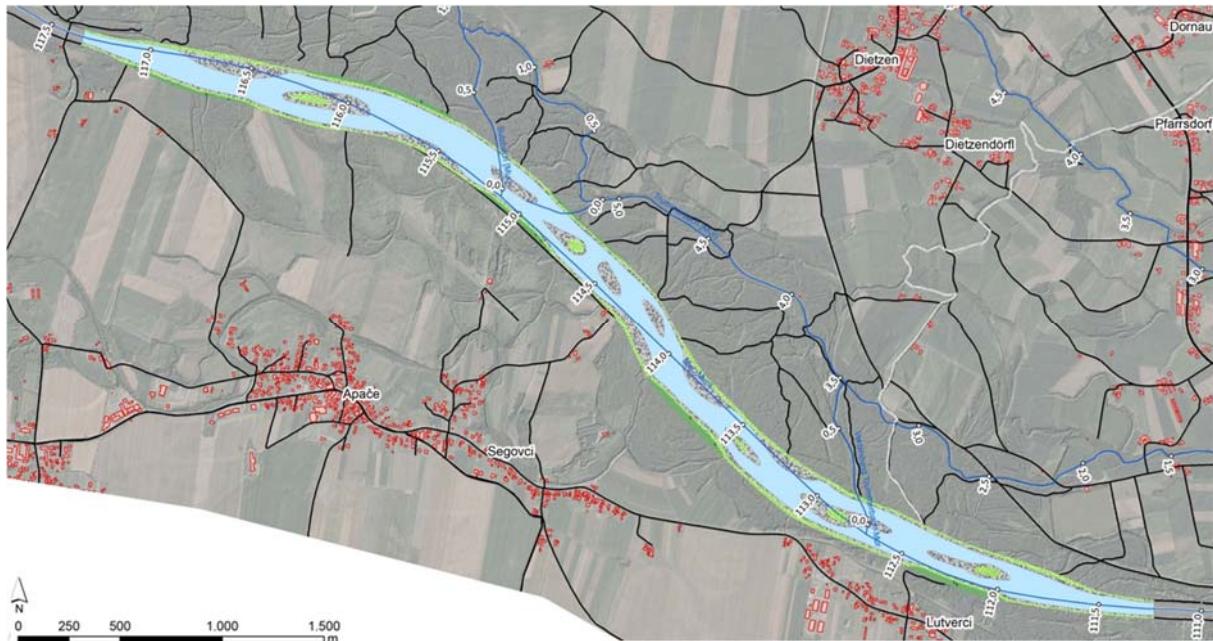


Abbildung 39. Auf den Referenzabschnitt übertragener Grundriss mit der morphologischen Charakteristik des Maßnahmentyps B im Abschnitt zwischen Fluss-km 109,54 und 103,39 gemäß der zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept verwendeten Kilometrierung (in der Abbildung ist die aktuelle Kilometrierung dargestellt).

Abbildung 40 spiegelt eine mögliche Morphologie des Typs C wider, dem ein breiter Korridor für weitere Umlagerungen eines oder mehrerer Gerinne zur Verfügung steht.

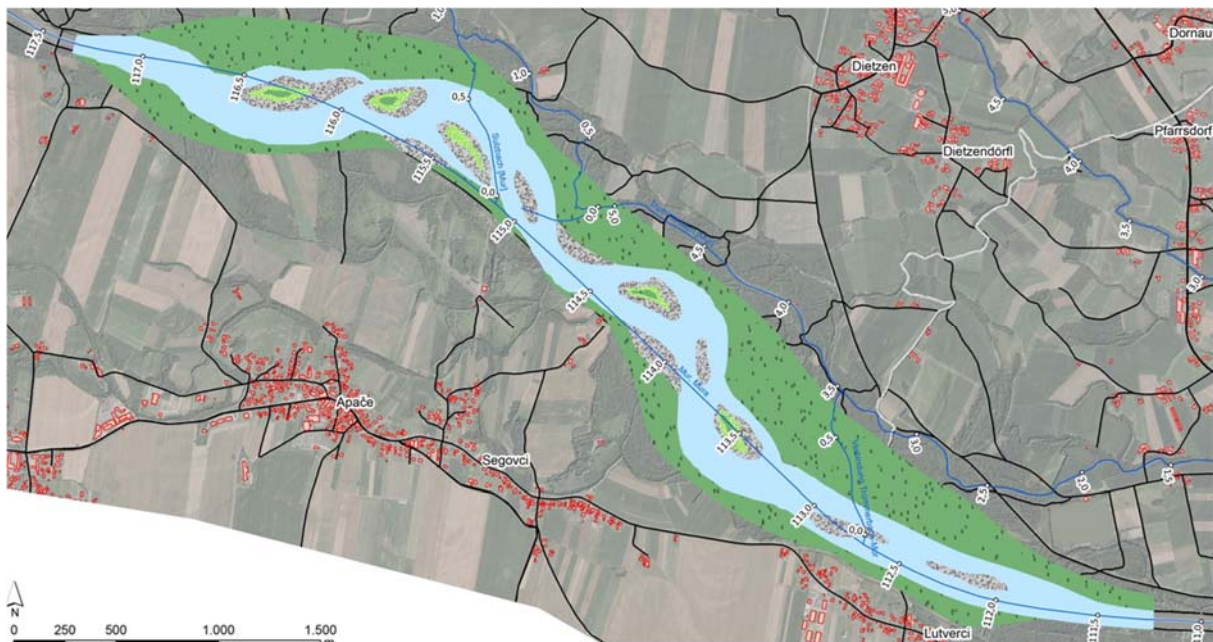


Abbildung 40. Auf den Referenzabschnitt übertragener Grundriss mit der morphologischen Charakteristik des Maßnahmentyps C im Abschnitt zwischen Fluss-km 109,54 und 103,39 gemäß der zum Zeitpunkt der Erstellung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept verwendeten Kilometrierung (in der Abbildung ist die aktuelle Kilometrierung dargestellt).

Die Grundrisse dienten in weiterer Folge der Ableitung von dreidimensionalen Geometrien. Dazu wurden in regelmäßigen Abständen von ca. 50 m Querprofilagen definiert, in welchen die Stationierungen der Wasseranschlagslinien sowie der Übergänge zu Flächen mit Pioniervegetation und Auwald abgelesen wurden. Zusätzlich wurden die wahrscheinlichen Lagen von Tiefstellen (Rinner, Kolke) übernommen. Mittels Berechnung von Wasserspiegelständen in den Querprofilen wurde die Tiefenverteilung so lange angepasst, bis die Wasseranschlagslinien vom mittleren Abfluss ungefähr an den Positionen in den Grundrissplänen zum Liegen kamen.

Abbildung 41 zeigt das auf diese Weise erhaltene Geländemodell für Typ A.

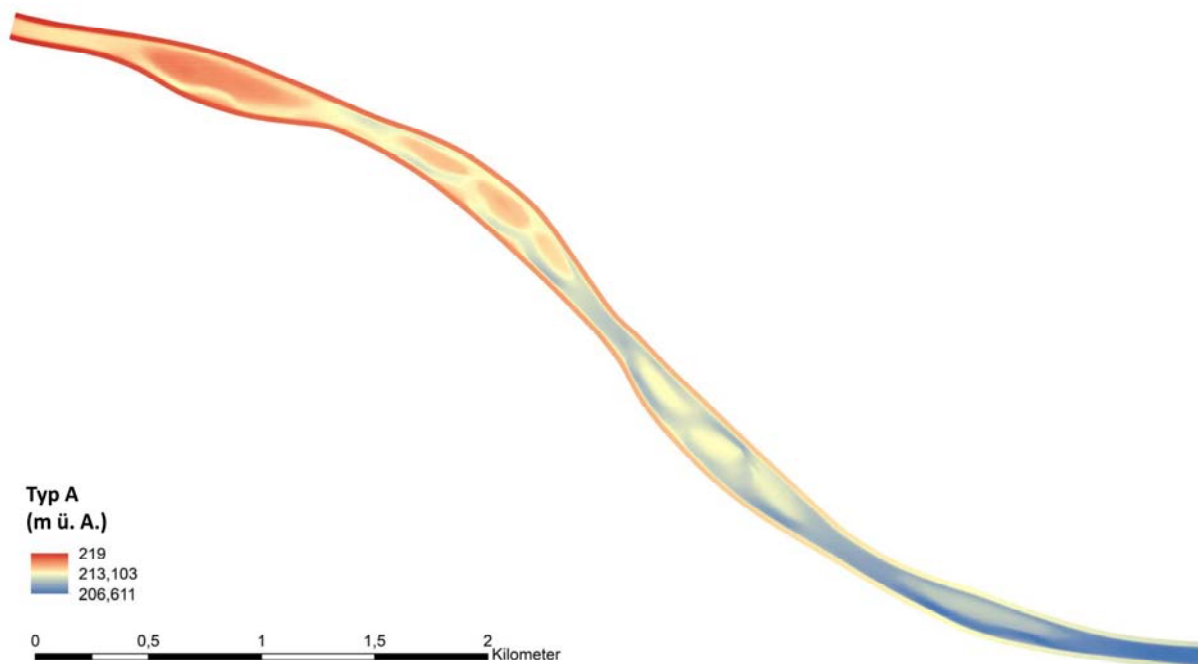


Abbildung 41. Stellvertretend für Typ A hergestellte Geometrie im Referenzabschnitt.

Das Geländemodell des Typs B im Referenzabschnitt ist in Abbildung 42 dargestellt.

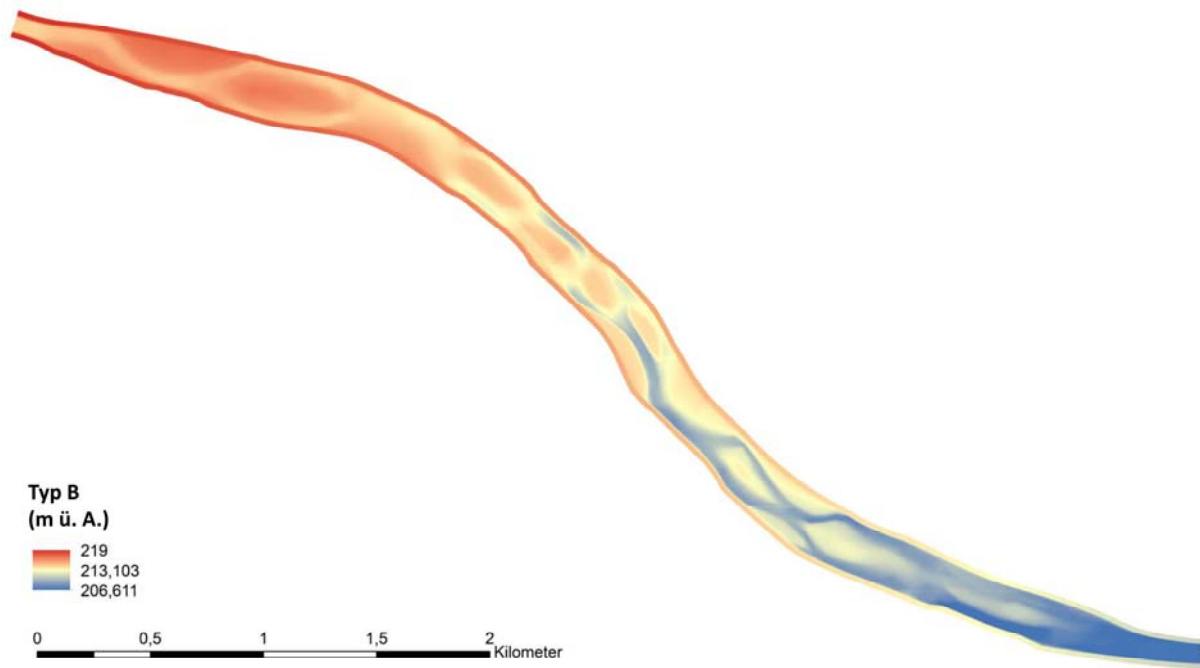


Abbildung 42. Stellvertretend für Typ B hergestellte Geometrie im Referenzabschnitt.

Abbildung 43 zeigt das Geländemodell für Typ C.

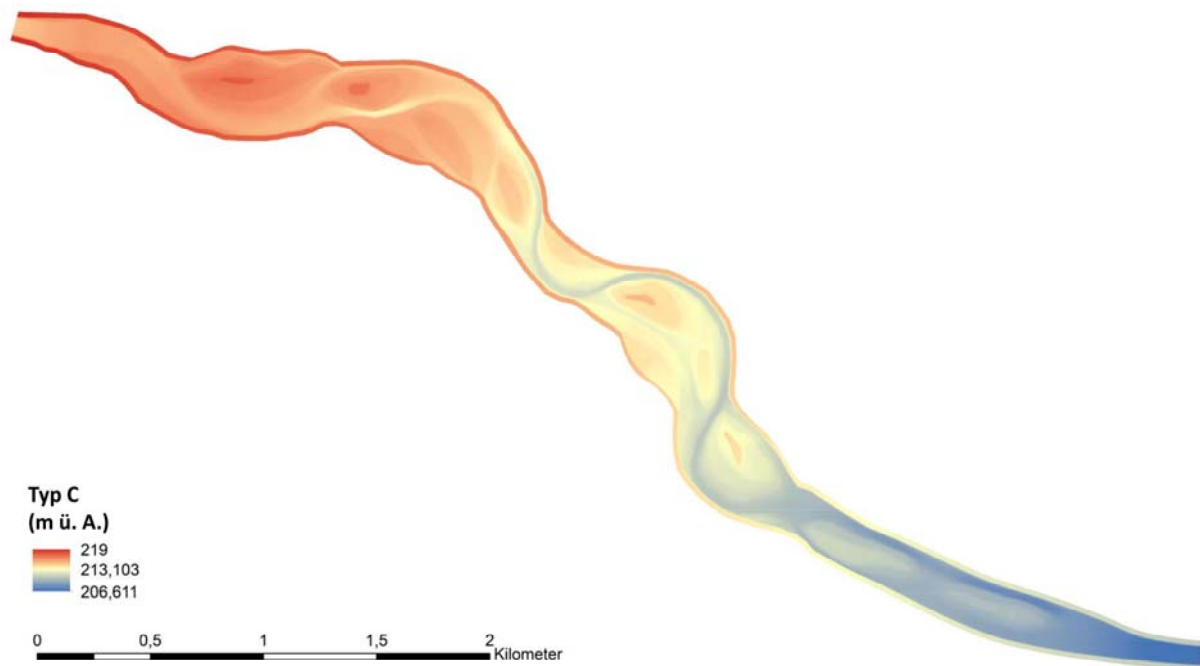


Abbildung 43. Stellvertretend für Typ C hergestellte Geometrie im Referenzabschnitt.

Für die Geometrie von Typ 0 wurde auf das vorhandene Geländemodell der Vermessung im Jahr 2019 zurückgegriffen (Abbildung 44), da aufgrund der engen Verbauung auch bei

ausreichender Geschiebezugabe kein relevanter morphologischer Unterschied zum aktuellen Zustand erwartet wurde.

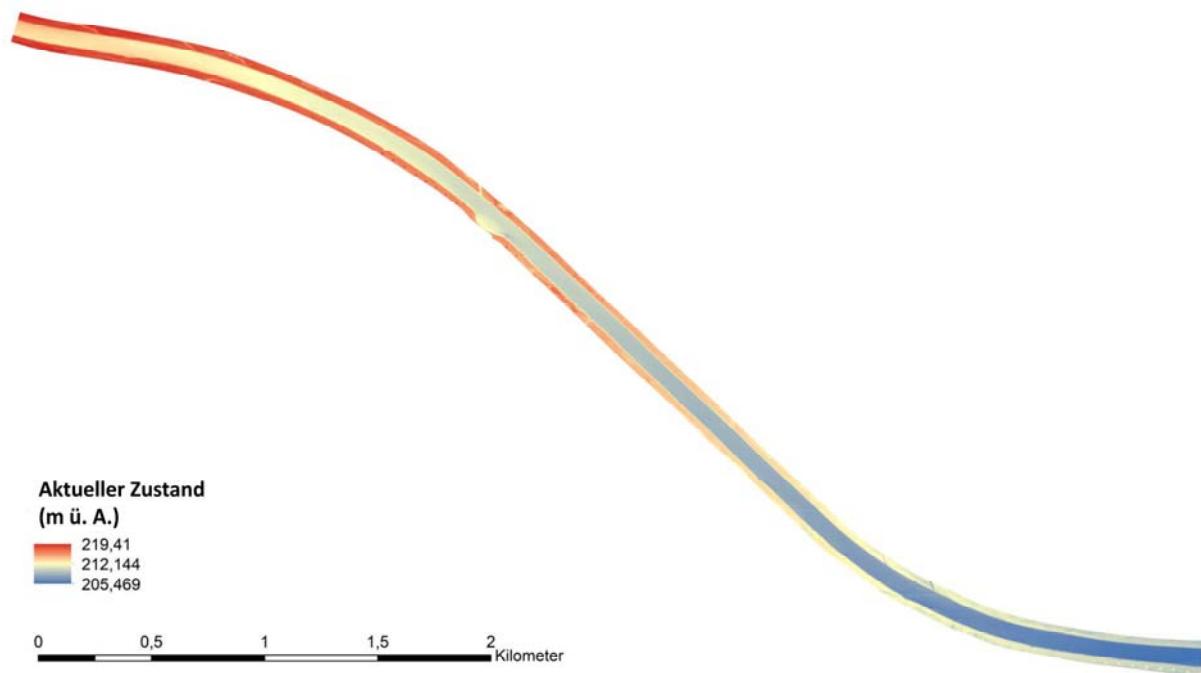


Abbildung 44. Aus der in goMURra im Jahr 2019 durchgeführten Vermessung erhaltene Geometrie im Referenzabschnitt, stellvertretend für Typ 0 (keine Veränderung des Verbauungsgrades).

Somit lagen schlussendlich vier Morphologien in dreidimensionaler Form vor, die numerisch auf ihre Wirkung auf Strömung und Sedimenttransport untersucht wurden.

Basierend auf diesen Geometrien ergeben sich für die Maßnahmentypen die in Tabelle 4 zusammengefassten, morphologischen Parameter. Die Gerinnebreite wurde durch Division der mit Wasser benetzten Fläche durch die Länge einer Mittellinie errechnet. Im Referenzabschnitt betragen die Gerinnebreiten in Typ 0 76 m, in Typ A durchschnittlich 139 m, in Typ B durchschnittlich 199 m und in Typ C durchschnittlich 247 m. Diese Durchschnittswerte beinhalten auch Übergänge flussauf und flussab in das regulierte Gerinne, wodurch die Breiten etwas von den zuvor genannten charakteristischen Breiten der Maßnahmentypen abweichen. Aufgrund der größeren Sinuosität verringert sich das Gefälle (berechnet für den Hauptarm) von 1,294 ‰ in Typ 0 zu 1,285 ‰ in Typ A, zu 1,250 ‰ in Typ B und um zu 1,146 ‰ in Typ C.

Bedeutend für die Morphodynamik sind einerseits die Radien, da deren Größe über das Vorhandensein von Prallufersituationen und somit über den Prozess der Ufererosion entscheiden. Ufererosion schafft Steilufer, die Habitat für in Böschungen brütende Vogelarten sein können, und bringt Totholz ein, die wiederum lokal für Morphodynamik sorgen und Unterstände für Fische bilden können. Gleichzeitig bewirkt eine eigendynamische Aufweitung und eine Verschiebung der Uferlinien durch Ufererosion laufend geänderte Rahmenbedingungen für die Strömung im Gerinne, und somit auch für die Morphologie des Flussbetts. Während die Radien im Referenzabschnitt über 2000 m betragen, reduziert sich

der Radius auf bis zu 1300 m in Typ A, auf bis zu 400 m in Typ B und auf bis zu 200 m in Typ C, wobei in Typ C am meisten unverbaute Ufer angetroffen werden und Prallufersituation an mehreren Stellen Ufererosion verursachen kann.

Zum anderen zeigt die Tendenz zur Verzweigung eine Dynamik von Kiesbänken und Inseln an, die wiederum für kiesbrütende Vogelarten, Pioniervegetation und eine Sukzession zu einem Auwald geeignet sind. Auch bieten flache Gradienten entlang der Wasseranschlagslinien Schutz für Jungfischpopulationen, und durch die Dynamik bestehen Ablagerungen auf der umgebenden Sohle aus locker gelagertem Kies, der sich für kieslaichende Fischarten zum Schlagen von Laichgruben eignet. Aus den erstellten Geometrien ergibt sich ein Verzweigungsindex (Gesamtlänge der einzelnen Arme dividiert durch die Länge des Hauptarms nach Mosley, 1981) von 1,0 in Typ 0 (keine Verzweigung), 1,8 in TypA und TypB, und 1,9 in TypC. In TypC ist am meisten Dynamik der Kiesbänke und Inseln zu erwarten, da sich die Uferlinien relativ frei bewegen können und die Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Kiesbänke regelmäßig ändern. Erhöhte Morphodynamik bewirkt lateralen Austausch des Sediments, sodass dass mehr Sediment an der Morphodynamik teilnimmt.

Tabelle 4. Morphologische Parameter der Maßnahmentypen.

	Typ 0	Typ A	Typ B	Typ C
Durchschnittliche Gerinnebreite	76 m	139 m	199 m	247 m
Durchschnittliches Gefälle Hauptarm	0,001294	0,001285	0,001250	0,001146
Radien des Hauptarms	> 2000 m	> 1300 m	> 400 m	> 200 m
Verzweigungsindex	1,0	1,8	1,8	1,9

6. NUMERISCHE MODELLIERUNG

Die numerische Modellierung dient nun der Überprüfung der aufgestellten Hypothese, wonach eine Vergrößerung der Gerinnebreite und eine Verkleinerung des Gefälles sohlstabilisierend wirken und den Bedarf an Geschiebezugabe verkleinern, und ob sich diese Wirkung in den Maßnahmentypen A, B, und C widerspiegelt. Darüber hinaus sollen die benötigten Geschiebezugaben, wie auch andere Charakteristika der Maßnahmentypen ermittelt und als Grundlage zur Bewertung der Maßnahmen quantifiziert werden.

6.1. Methoden

Für die Analyse der Maßnahmenvarianten kommen unterschiedliche Modellanwendungen zum Einsatz:

1. Das dreidimensionale, hydrodynamisch-numerische Modell RSim-3D (Tritthart, 2005) ermöglicht durch die Nachbildung auch von Sekundärströmungen eine naturgetreue Nachbildung der Sohlschubspannungen, auf die aufgrund deren Bedeutung für den Geschiebetransport ein besonderes Augenmerk gelegt wird. Ergebnisse des hydrodynamisch-numerischen Modells erlauben auch die Auswertung ökologisch relevanter Größen, wie die Verteilung der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten.
2. Das Sedimenttransportmodell iSed (Tritthart et. al., 2011) verwendet in weiterer Folge die mittels RSim-3D errechneten Sohlschubspannungen, um auf eine Sedimenttransportkapazität und auch auf einen durchschnittlichen Bedarf an Geschiebe schließen zu können.
3. Bei der Berechnung der Morphodynamik wird für den Teil der Hydrodynamik aus Geschwindigkeitsgründen auf das kommerziell erhältliche, zweidimensionale Modell Hydro_AS-2D (Nujic, 1998) zurückgegriffen, das wiederum mit dem Sedimenttransportmodell iSed gekoppelt wird.
4. Repräsentativ für den gesamten Abschnitt soll noch mittels Simulation der Hydrodynamik die mögliche Auswirkung der Maßnahmen auf die Hochwasserspiegelhöhen abgeschätzt werden. Dieser Untersuchung soll das eindimensionale hydrodynamisch-numerische Modell HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center) dienen.

Die erwähnten Modelle RSim-3D, iSed, Hydro_AS-2D und HEC-RAS werden nachfolgend beschrieben.

6.1.1. Beschreibung der Modelle

6.1.1.1. 3D-hydrodynamisch-numerisches Modell RSim-3D

Die dreidimensionale, hydrodynamisch-numerische Modellierung wurde mit dem dreidimensionalen Strömungsmodell RSim-3D (Tritthart, 2005) durchgeführt. Es handelt sich dabei um eine zunächst an der Technischen Universität Wien entwickelte und später am Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung (vormals Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau) der Universität für Bodenkultur weiterentwickelte Software zur Berechnung von Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen an Fließgewässern, die durch turbulente und komplexe Strömungssituationen gekennzeichnet sind.

Im Gegensatz zu zweidimensionalen Modellen, die auf Basis der vereinfachten Strömungsgleichungen – den so genannten Flachwassergleichungen – rechnen, werden in dreidimensionalen Strömungsmodellen die vollständigen Reynoldsgleichungen zur Beschreibung der turbulenten Flüssigkeitsbewegungen in allen drei Raumrichtungen zum Ansatz gebracht:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'\bar{v}'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'\bar{w}'}{\partial z} + f_x \\
\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} - \frac{\partial \bar{u}'\bar{v}'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}'^2}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'\bar{w}'}{\partial z} + f_y \\
\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} - \frac{\partial \bar{u}'\bar{w}'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}'\bar{w}'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{w}'^2}{\partial z} + f_z
\end{aligned} \quad (11)$$

Hierin bedeuten x , y und z die drei Raumrichtungen in einem globalen Koordinatensystem sowie t die Zeit als vierte Modelldimension im Fall einer instationären Berechnung. \bar{u} , \bar{v} und \bar{w} sind die zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten in den drei Raumdimensionen, während die jeweiligen Mittelwerte der turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen mit \bar{u}' , \bar{v}' und \bar{w}' bezeichnet sind. \bar{p} stellt den mittleren Druck im jeweiligen Berechnungspunkt dar, der aufgrund konvexer oder konkaver Stromfäden vom hydrostatischen Druck abweichen kann. $\bar{\rho}$ bezeichnet die Dichte des Wassers und ν die kinematische Viskosität. Mit den Termen f_x bis f_z werden externe Kraftwirkungen in den drei Raumrichtungen erfasst, beispielsweise die Corioliskraft.

Es müssen somit gleichzeitig sechs Differentialgleichungen gelöst werden: Je eine Gleichung pro Raumrichtung (Gleichung 1), zwei weitere Gleichungen zur Erfassung der Turbulenz, sowie die Kontinuitätsgleichung. Auch das Rechengitter muss den Anforderungen einer dreidimensionalen Beschreibung des Fließkontinuums Rechnung tragen und daher vertikal in einzelne Rechenzellen gegliedert sein (im vorliegenden Fall wurde eine Gliederung in 6 Tiefenschichten vorgenommen), was den Rechenaufwand weiter erhöht. Allerdings erlaubt die Verwendung eines dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells im Gegensatz zu Modellen niedrigerer Dimension die Abbildung zahlreicher zusätzlicher Fließphänomene, was jeweils im Einzelfall gegen den erhöhten Rechenaufwand abzuwägen ist:

- Vertikale Geschwindigkeitsverteilung und damit in Zusammenhang stehende Phänomene, z.B. Sekundärströmungen

- Neigung der Wasseroberfläche aufgrund der durch Zentrifugalkräfte in Krümmungen des Gerinneverlaufs hervorgerufenen Sekundärströmung
- Vertikale Turbulenzwirbelstrukturen
- Geschwindigkeitsprofile im Fall von konvexen oder konkaven Stromfäden (etwa bei unregelmäßigen Bettformen)

Das numerische Modell RSim-3D arbeitet zur Raumdiskretisierung mit Rechenzellen auf Basis von Polyedern mit vorwiegend sechseckiger Grundrissform. Diese Vorgehensweise erlaubt die Erfassung von rezirkulierenden Strömungsbereichen in größerer Genauigkeit als es mit Tetraedern oder Hexaedern der Fall wäre, wie in einigen wissenschaftlichen Arbeiten gezeigt werden konnte. Die Strömungsgleichungen werden mit Hilfe der Methode der Finiten Volumen gelöst, d.h. die einzelnen Differentialgleichungen werden zunächst integriert und erst dann effektiv gelöst. Auf diese Weise kann Unstetigkeiten – etwa Wechselsprungbereichen – ohne Auftreten numerischer Probleme begegnet werden. Zur Turbulenzmodellierung gelangt das k- ϵ Modell in Standardformulierung zur Anwendung, das mit Hilfe zweier Differentialgleichungen den Transport von turbulenter kinetischer Energie (im Endeffekt also turbulenter Strukturen) im Strömungsgebiet beschreibt. Das Modell kann sowohl für stationäre als auch instationäre Berechnungen herangezogen werden, wobei der rechnerische Aufwand im zweiten Fall jedoch außergewöhnlich hoch ist und daher im Zuge der gegenständlichen Berechnungen nicht zur Anwendung kam.

Die für ein dreidimensionales numerisches Fließgewässermodell erforderlichen Eingangsdaten unterscheiden sich nicht von den für ein 2D-Modell benötigten, da für die unbekanntenen Größen (etwa die Randbedingung für die turbulente kinetische Energie) Näherungsformeln existieren, mit deren Hilfe die fehlenden Randbedingungen vollautomatisch abgeschätzt werden können. Aus diesem Grund wird zur Modellierung folgendes benötigt:

- Digitales Geländemodell bzw. detaillierte Vermessung von Gewässersohle und Vorland
- Strukturanten (z.B. Dammkronen oder Verkehrswege)
- Kenntnis über Rauigkeitsverteilungen
- Durchfluss(-ganglinie) oberstrom
- Wasserstand(-ganglinie) unterstrom

An dieser Stelle sei angemerkt, dass 3D-Modelle im Regelfall nicht mit den sonst in der Hydraulik üblichen Rauigkeitsbeiwerten nach Strickler bzw. Manning arbeiten, sondern mit absoluten Rauigkeitshöhen, etwa der äquivalenten Sandrauheit nach Nikuradse. Aus diesem Grund muss auch keine Anpassung der einmal geeichten Rauigkeit bei unterschiedlichen Durchflüssen erfolgen, allerdings ist die Umrechnung von bereits bekannten Stricklerbeiwerten in absolute Rauigkeitshöhen naturgemäß mit einigen Unsicherheiten behaftet.

6.1.1.2. Sedimenttransportmodell iSed

Grundlage für die Modellierung des Sedimenttransports ist die hydrodynamisch-numerische Ermittlung des Strömungsfelds sowie der Wassertiefen und Sohlschubspannungen. Bei der Entwicklung des Sedimenttransportmodells iSed (Tritthart et al., 2009) stand die Koppelungsmöglichkeit mit bestehenden Hydrodynamik-Modellen im Vordergrund, d.h. die Strömungsgrößen werden nicht im Modell selbst berechnet, sondern von einem hydrodynamisch-numerischen Modell geliefert, welches in automatisierter Weise für jeden Zeitschritt aufgerufen wird. iSed erlaubt durch seinen modularen Aufbau die Koppelung mit 2D- und 3D-Modellen.

Nach Vorliegen einer Lösung für das Strömungsfeld wird zur numerischen Berechnung des Feststofftransports gemäß den auftretenden Transportprozessen eine Unterteilung in Schwebstoff und Geschiebe vorgenommen, deren Transportraten durch Lösung der jeweiligen Bestimmungsgleichungen ermittelt werden. Am Ende jedes Zeitschritts erfolgt eine Bilanzierung über alle Rechenzellen des Modells, in der aus dem ermittelten Feststofftransport die morphologische Veränderung (Erosion oder Sedimentation) für jeden Rechenknoten abgeleitet wird. Da unterschiedliche Kornfraktionen voneinander verschiedenes Transportvermögen aufweisen, ist durch die fraktionierte Berechnungsweise in einem abschließenden Schritt die Berechnung einer neuen Sieblinie möglich. Mit der solcherart modifizierten Modellgeometrie wird daraufhin wiederum das Hydrodynamik-Modell aufgerufen und der Vorgang beginnt von neuem.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten der numerischen Sedimenttransportmodellierung hinsichtlich ihrer Funktionsweise erläutert.

Geschiebetransport

In das Sedimenttransportmodell iSed wurden vier verschiedene empirische Geschiebetransportformeln implementiert – allesamt aufbereitet für fraktionierten Transport und mit Expositionskorrekturen versehen: Meyer-Peter/Müller (1948), van Rijn (1984), Egiazaroff (1965), Hunziker (1995). Im Rahmen der Modellierungen an der Mur wurde die Formel nach Meyer-Peter/Müller in angepasster Form verwendet:

$$q_{si} = p_i c_{MP} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_i^3} \left[\left(\frac{d_i}{d_{ref}} \right)^\alpha \frac{u^{*2}}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_i} - \theta_c \right]^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

Über die bereits erfolgten Definitionen hinaus bedeutet hierin q_{si} die Geschiebetransportkapazität der Kornfraktion i , d_i den repräsentativen Durchmesser der Kornfraktion, d_{ref} einen Referenzkorndurchmesser (gewählt wurde $d_{ref} = d_{50}$), ρ_s die Dichte der Sedimentkörner, ρ die Dichte des Wassers, g die Erdbeschleunigung und c_{MP} den sogenannten Vorfaktor nach Meyer-Peter/Müller. Für den kritischen Mobilitätsparameter θ_c gelangt eine Parametrisierung der Shields-Kurve (Shields, 1936) zur Anwendung. Die Größe α wird als Expositionsparameter der Formel bezeichnet.

Sohlevolution

Die zeitliche Evolution der Sohlage an jedem Rechenknoten folgt der Exner-Gleichung:

$$(1 - n_p) \frac{\partial z_i}{\partial t} + \frac{\partial q_{si,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{si,y}}{\partial y} = S_{dep,i} - S_{ero,i} \quad (13)$$

Hierin bedeutet z_i die Höhenveränderung der Sohle aufgrund der Transportvorgänge der Kornfraktion i , $q_{si,x}$ und $q_{si,y}$ den Geschiebetransport in x - und y -Richtung, $S_{dep,i}$ und $S_{ero,i}$ den Depositions- bzw. Erosionsfluss für die jeweilige Kornfraktion und n_p den Porenanteil des Sediments. Die Verteilung des Geschiebetransports in die Raumrichtungen erfolgt analog zur vektoriellen Aufteilung der sohlnahen Fließgeschwindigkeit. Da Gleichung (13) eine Differentialgleichung darstellt, kommt zu ihrer Lösung wiederum die Methode der Finiten Volumen zur Anwendung, d.h. die integrierte Bilanzgleichung wird unter Zuhilfenahme des Gauß'schen Integralsatzes numerisch auf einem Kontrollvolumen gelöst. Die Summe der Höhenveränderungen über alle Fraktionen liefert letztlich die vertikale Veränderung der Sohlage.

Kornsorrtierung

Im Sedimenttransportmodell iSed sind alle Ansätze zur Berücksichtigung des geschichteten Aufbaus der Sohle durch ein Mehrschichtmodell implementiert. Zusätzlich kommt das Austauschschichtkonzept zur Anwendung (Abbildung 45).

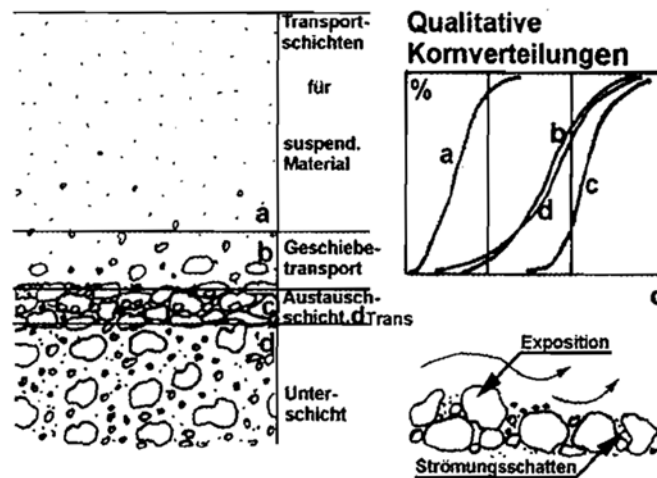


Abbildung 45: Sohlenschichtung mit Austauschschicht (nach ATV-DVWK, 2003)

Die Austauschschicht kann als oberste Schicht des Sohlenkörpers aufgefasst werden, in der sämtliche Mischungsprozesse vor sich gehen. Üblicherweise liegt die Dicke dieser Schicht d_{Trans} etwa im Bereich d_{90} bis $4 \times d_{90}$ des Sohlmaterials; sie ist vom Anwender vorzugeben und stellt eine Kalibriergröße des Modells dar. Bei Auftreten von Erosion wird das erodierte Material durch solches aus tieferen Schichten ersetzt, bei Sedimentation um das zum jeweiligen Rechenknoten transportierte Material ergänzt. Durch Vorliegen der Höhenveränderungen aufgrund der einzelnen Kornfraktionen (siehe Abschnitt 0) lässt sich auf diese Weise eine neue Sieblinie für jeden Rechenknoten ermitteln.

Ufererosion

Zur Berücksichtigung der Ufererosion markiert der Nutzer zunächst im Sedimenttransportmodell iSed mit Polylinien die Böschungsfußlinie. In einem bestimmten Abstand zu den Knoten dieser Linie berechnet das Hydrodynamikmodell die Schubspannung, die dann in einem separaten Querprofilmodell (SIMBERO – SIMulation of Bank EROsion) auf den unteren Teil der Böschung aufgebracht wird. Das Modell ist jenem von Osman und Thorne (1988) nachempfunden, das bei Überschreitung einer kritischen Schubspannung Strömungserosion am Böschungsfuß und bei Stabilitätsverlust den Böschungsbruch auslöst. Die Strömungserosion bestimmt in diesem Modell das Rückweichen des Böschungsfußes in Abhängigkeit von der Sohlschubspannung.

Der Böschungsbruch hat in diesem Modell für die Geschwindigkeit der Ufererosion insofern eine Bedeutung, dass er die Ausformung der Ufer und so die Geometrie und Hydrodynamik im Querprofil (und somit die Sohlschubspannungen entlang des Ufers) mitbestimmt. Die Böschungsstabilität wird abhängig von der Wichte, der Kohäsion und dem Reibungswinkel berechnet. Destabilisierend wirkt die resultierende Kraft aus dem Gewicht entlang der Gleitfläche. Stabilisierend wirken die Kohäsion in der Gleitfläche, sowie die Reibungskraft, die durch die Auflast des Bruchkörpers auf der Gleitfläche entsteht. Übersteigt die destabilisierende Kraft die stabilisierende Kraft, so kommt es zum Böschungsbruch und der Bruchkörper wird aus der Geometrie des Querprofilmodells entfernt. Im Sedimenttransportmodell wird jener Anteil der Böschung aus der Ufererosion, der bettbildend ist, der Sohle zugegeben.

6.1.1.3. 2D-hydrodynamisch-numerisches Modell Hydro_AS-2D

Das zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modell Hydro_AS-2D löst tiefengemittelte Strömungsgleichungen (Flachwassergleichungen) und verwendet für die räumliche Diskretisierung die Finite-Volumen-Methode. Zunächst wird mithilfe der Software SMS (Surface-Water Modelling System; Aquaveo, LLC, Provo, UT) das Berechnungsgitter erstellt, das aus Dreiecks- und Viereckselementen besteht. Nachfolgend werden die Rauigkeiten zugewiesen und die Randbedingungen bzw. Modellparameter definiert. Schlussendlich kann die zweidimensionale hydrodynamische Berechnung mit dem Programm Hydro_AS-2D, Version 5 durchgeführt werden.

Die Flachwassergleichungen gehen von der Annahme aus, dass über die Tiefe eine hydrostatische Druckverteilung herrscht. Sie leiten sich von der Integration der dreidimensionalen Kontinuitätsgleichung und der Reynolds- bzw. Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide ab. Für das Reibungsgefälle I_R wird der Ansatz nach Darcy-Weisbach verwendet. Für den Widerstandsbeiwert I wird die Formel nach Manning-Strickler herangezogen. In zweidimensionalen Simulationen basierend auf den Flachwassergleichungen gilt weiter die Annahme, dass der hydraulische Radius der Wassertiefe gleichgesetzt wird. Die Wirbelviskosität zur Abbildung der Turbulenz wird in Hydro_AS-2D aus einer Kombination von einem empirischen Ansatz sowie einer konstanten Viskosität ermittelt. Die konstante Viskosität bezieht sich hierbei auf das gesamte Element. Die Gleichungskoeffizienten werden über den Mittelwert definiert.

6.1.1.4. 1D-hydrodynamisch-numerisches Modell HEC-RAS

Das Modell HEC-RAS bildet das Gerinne durch Serien von Querprofilen nach und löst die eindimensionalen Gleichungen von Saint-Venant. Effekte von Flusskrümmungen oder Formänderungen der Querprofile auf die Hydraulik können nicht berücksichtigt werden.

6.1.2. Modellaufbau

6.1.2.1. Modellaufbau für die Untersuchung der Hydrodynamik

Zur Analyse der Hydrodynamik wird das dreidimensionale Modell RSim-3D herangezogen. Die dreidimensionale Berechnung ermöglicht es auch tiefenbezogene Phänomene, die sich in der Strömung abspielen, zu berücksichtigen. Dabei wird zu allererst die konvergierende Lösung der Hydrodynamik ermittelt. Für jeden untersuchten Durchfluss liegen somit die vorliegenden Strömungsverhältnisse vor.

In diesem Abschnitt werden die Datengrundlagen und der Modellaufbau, sowohl der einzelnen hydrodynamischen Modelle, als auch für das anschließende Sedimenttransportmodell iSed, erläutert.

Geländemodell

Die Koordinaten der digitalen Geländemodelle (DGM) werden als XYZ-Daten exportiert. Anschließend werden daraus neue Rasterdatensätze mit 1 m x 1 m Zellengröße trianguliert und ins 3D-hydrodynamische Modell RSim-3D importiert.

Rauigkeiten

Werte für die Rauigkeitsbelegung wurden aus dem Modell der Grenzmur der Firma RIOCOM entnommen, das für das EU-Interreg SI-AT Projekt CROSSRISK für Hochwasseruntersuchungen erstellt wurde.

Im hydrodynamischen Modell RSim-3D besteht die Möglichkeit die Rauigkeiten mit der äquivalenten Sandrauigkeit nach Nikuradse abzubilden, anstelle der Rauigkeiten nach Manning/Strickler. Dies bringt den Vorteil, dass die Rauigkeiten nicht dem Wasserstand angepasst werden müssen, sondern auf andere Durchfluss-Szenarien transferiert werden können.

Im Untersuchungsgebiet werden insgesamt zwei verschiedene Rauigkeiten gewählt (siehe Tabelle 5). Diese beruhen auf Erfahrungswerten aus Projekten in der Nähe, beziehungsweise werden diese aus den örtlichen Gegebenheiten abgeschätzt.

Tabelle 5: Übersicht der gewählten Rauigkeiten in RSim-3D

Struktur	Äquivalente Sandrauigkeit nach Nikuradse [m]
Hauptstrom	0,087
Inseln	0,150

Vorland	0,150
---------	-------

Die Rauigkeiten sind wie in Abbildung 46 bis Abbildung 49 aufgezeigt im Untersuchungsgebiet verteilt.

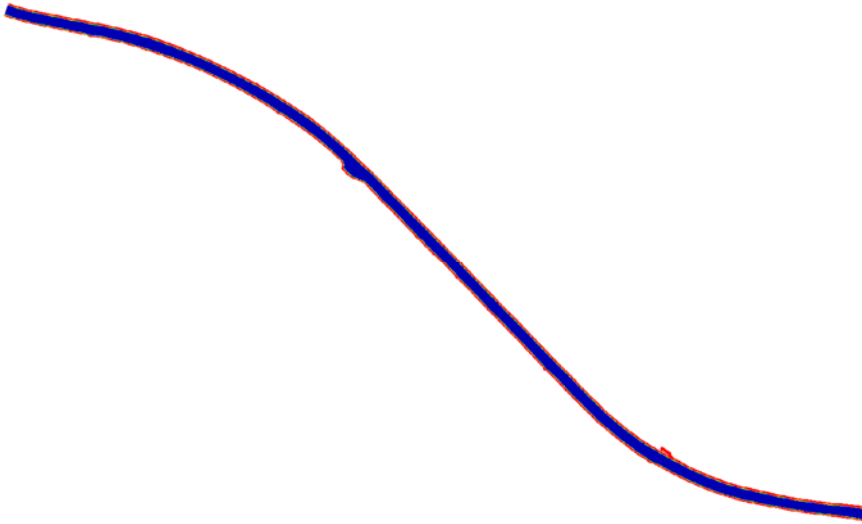


Abbildung 46. Typ 0 mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung

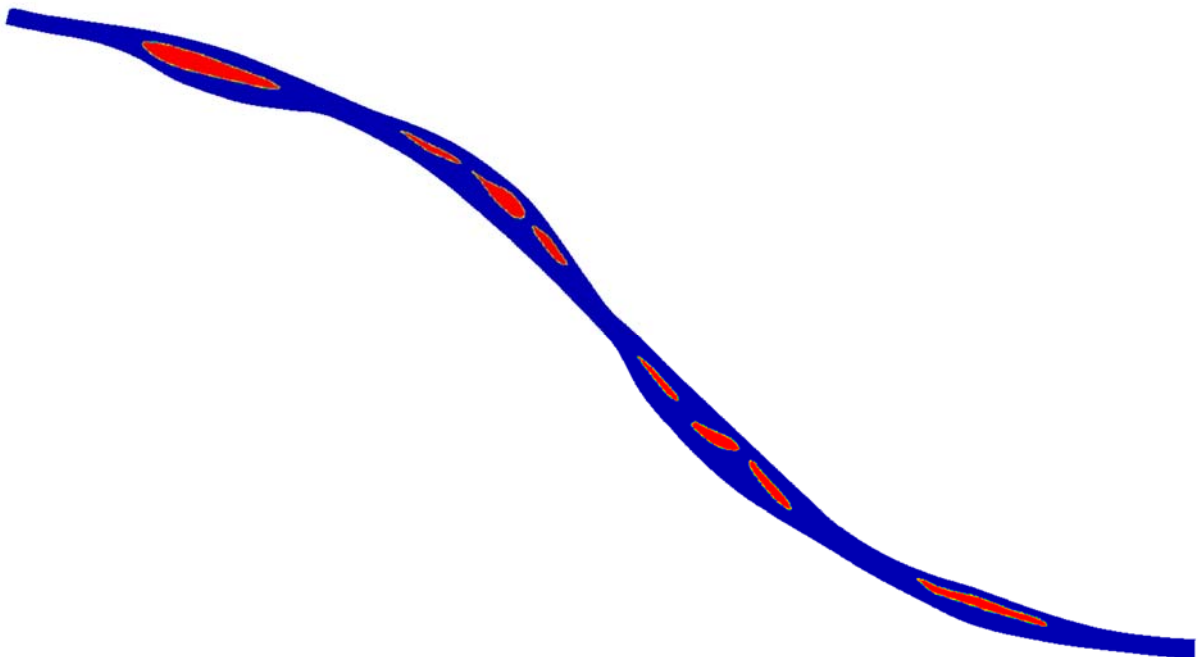


Abbildung 47. Typ A mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung sowie an den Inselflächen

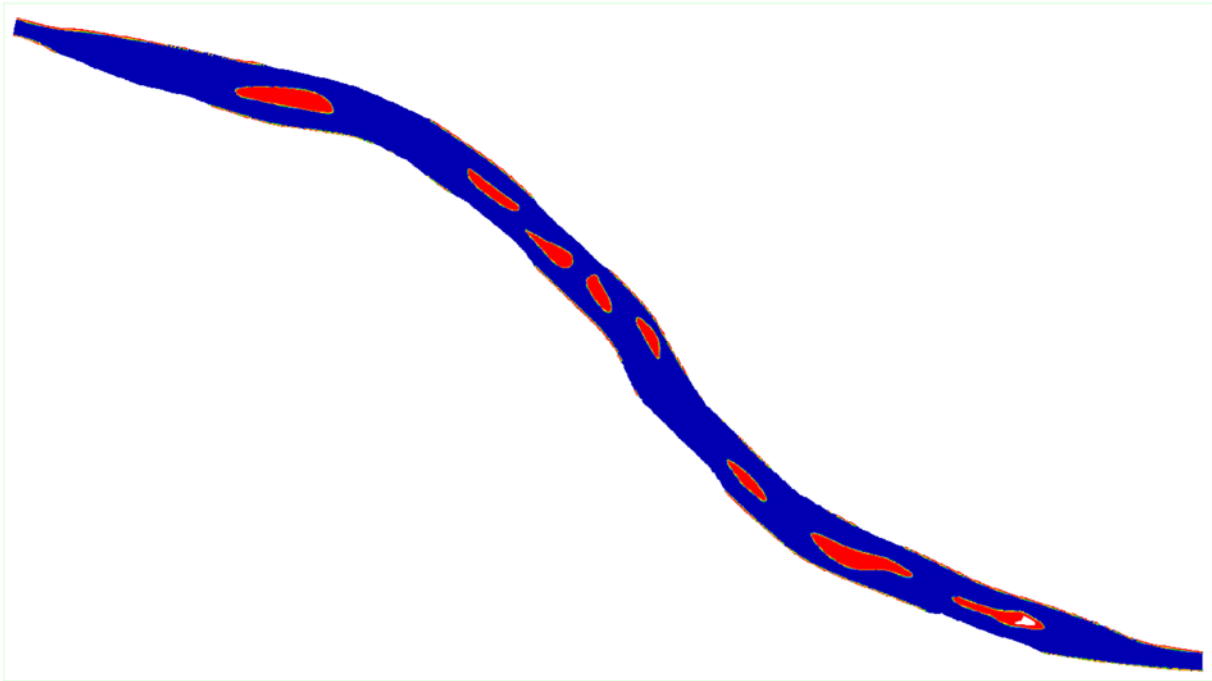


Abbildung 48. Typ B mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung sowie an den Inselnflächen

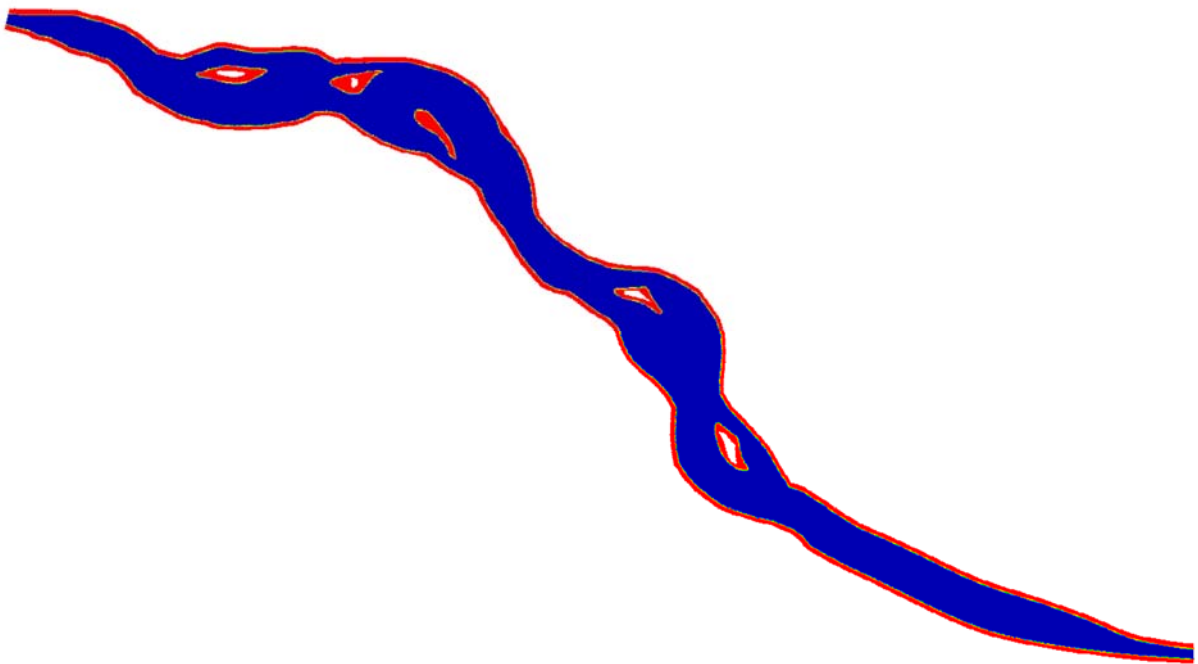


Abbildung 49. Typ C mit einer Rauigkeit von 0,087 m im Hauptstrom und 0,150 m an der Berandung sowie an den Inselnflächen

Rechennetz RSim-3D

Für die hydrodynamische Modellierung wird ein dreidimensionales Rechennetz aufgebaut. Die Zellengröße beträgt 4 m. Das Rechennetz wird in vertikaler Richtung in 6 Schichten unterteilt. Abbildung 50 zeigt den Bereich bei Stromkilometer 108,545 mit der dort gewählten Aufteilung des Rechennetzes für das Beispiel des Typs 0. Die blau markierten Zellen zeigen die

vorabgeschätzte benetzte Wasseroberfläche beim Szenario Typ 0 mit einem Durchfluss von $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

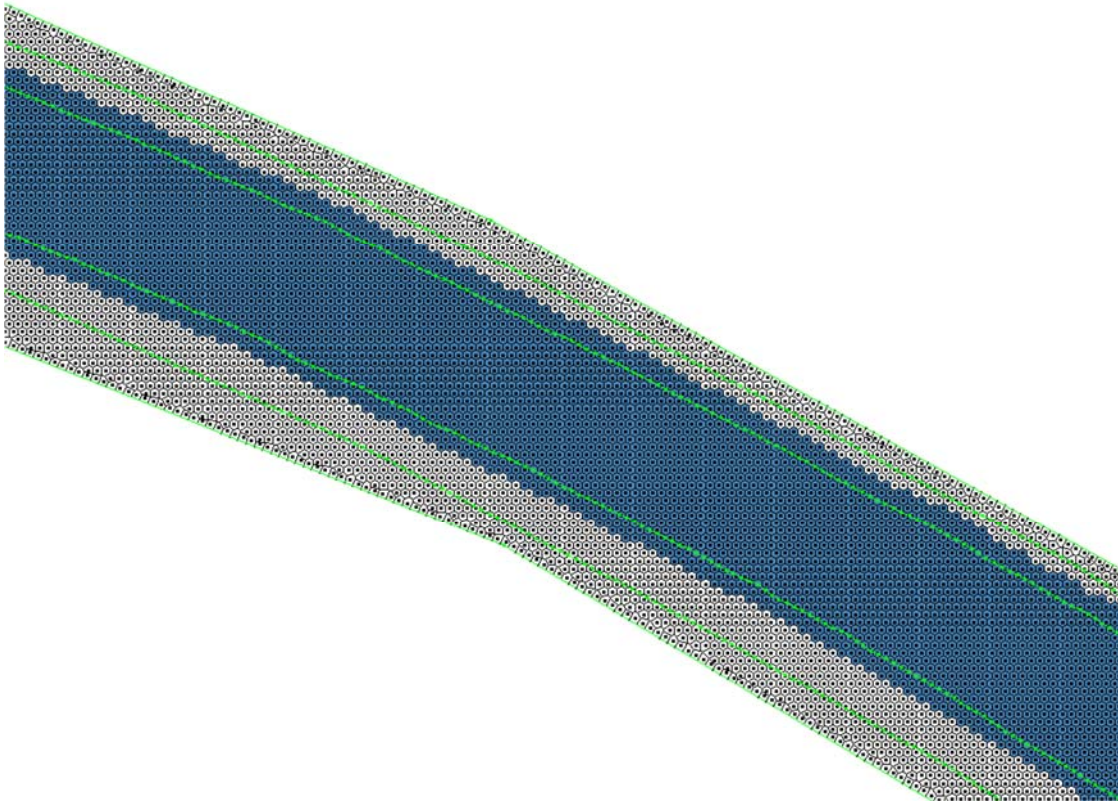


Abbildung 50. Darstellung des gewählten Rechnernetzes am Beispiel Typ 0

Randbedingungen RSim-3D

Als Randbedingung am Einlauf (Stromkilometer 109,540) werden 20 Durchflüsse ausgewählt, die den gesamten Bereich geschiebeführender Durchflüsse abdecken sollen.

Als Randbedingungen am Auslauf (Stromkilometer 103,385) werden die zugehörigen Wasserstände verwendet, die anhand der Vorberechnung mithilfe des zweidimensionalen Modells erhalten wurden.

Vorabschätzung der Wasserspiegellagen

Bevor die hydrodynamische Modellierung mittels RSim-3D gestartet werden kann, muss noch eine Vorabschätzung der Wasserspiegellagen zur Ermittlung einer Anfangsbedingung durchgeführt werden. Hierfür werden die Ergebnisse der Wasserspiegellagen aus dem 2D-Modell für das jeweilige Durchfluss-Szenario im Rasterformat in RSim-3D importiert.

6.1.2.1. Modellaufbau für die Untersuchung der Geschiebetransportkapazität und der Morphodynamik

Zunächst dient die Anwendung des Sedimenttransportmodells iSed der Bestimmung der Geschiebetransportkapazität und somit des Geschiebebedarfs zur Haltung eines dynamischen

Gleichgewichts des Sedimenthaushalts. In einem zweiten Schritt wird auch die Morphodynamik in den Zielzuständen der Maßnahmentypen simuliert.

Zur Analyse der Geschiebetransportkapazität kann das Sedimenttransportmodell auf die Ergebnisse der dreidimensionalen Simulation mittels RSim-3D zurückgreifen. Für die Analyse der Morphodynamik wird das Sedimenttransportmodell mit dem zweidimensionalen Modell Hydro_AS-2D gekoppelt, um den Vorteil kürzerer Rechenzeiten für die rechnerisch aufwändigeren Morphodynamikmodellierungen zu nutzen.

Nachfolgend werden die Eingangsdaten beschrieben, die zum Aufbau des Sedimenttransportmodells nötig waren.

Einstellung der Modellparameter

Einzustellende Modellparameter betreffen die Prozesse des Geschiebetransports und der Ufererosion.

Als Geschiebeformel wurde die Formel nach Meyer-Peter und Müller (1948) gewählt. Um den Kalibrierungsprozess zu beschleunigen, wurden die darin vorkommenden Größen, nämlich der Vorfaktor c_{MP} und die kritische dimensionslose Sohlschubspannung τ_c voneinander abhängig verändert. Die Veränderung beider Parameter erfolgt über einen Parameter a , der die beiden Parameter der Geschiebetransportformel so verändert, dass es einer Erhöhung oder Verkleinerung der auf die Sohle wirkenden Sohlschubspannung gleichkommt:

$$c_{MP} = 8a^{\frac{3}{2}} \quad (14)$$

$$\tau_c = \frac{0,047}{a} \quad (15)$$

Für die Bestimmung der Geschiebetransportkapazität wurde der Einkornansatz gewählt, damit das Ergebnis nicht von einem Auswaschen des Feinanteils aus der Sohle beeinflusst wird. In den Simulationen der Morphodynamik wurde auf die vom Modell iSed angebotene Mehrkornmodellierung zurückgegriffen.

Mithilfe der Hiding-Exposure-Korrektur konnte die Mobilität der Körner abseits vom mittleren Korndurchmesser gewählt werden.

Des Weiteren musste eine Mächtigkeit der aktiven Sohlschicht definiert werden. Diese definiert den Übergangsbereich zwischen der Deckschicht und dem sich darunter befindenden Bettmaterial. Für die Durchführung wird der Parameter mit 20 cm angenommen. Das bedeutet, dass in diesem Bereich eine vermischte Kornverteilung aus Deckschicht und Bettmaterial vorliegt.

Schlussendlich dienten limitierende Parameter der Effizienz, Richtigkeit und Stabilität des Modells. So wurde eine minimale Zellentiefe in der Hydrodynamik mit 0,01 m definiert, und der maximal mögliche Zeitschritt gemäß Courant-Friedrichs-Lewy Kriterium festgelegt.

Sedimentbelegung

Bei der Sedimentbelegung wird zwischen zwei Zuständen unterschieden:

Sedimentbelegung im Istzustand. Die Simulation des Istzustands diente der Kalibrierung des Modells. Dieser wurde mit der aktuell vorhandenen Sohle belegt, um anhand der vorhandenen Vermessungsdaten das Modell zu kalibrieren. Dabei wurden für die Unterschicht des Modells die Kornverteilungen der volumetrischen Proben herangezogen, die im Rahmen der Entwicklung des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts für die Grenzmur entnommen wurden. Trennt man den Anteil < 1 mm ab (Annahme dieser sei nicht bettbildend), so ergibt sich ein mittlerer Korndurchmesser von 41,4 mm (Abbildung 51).

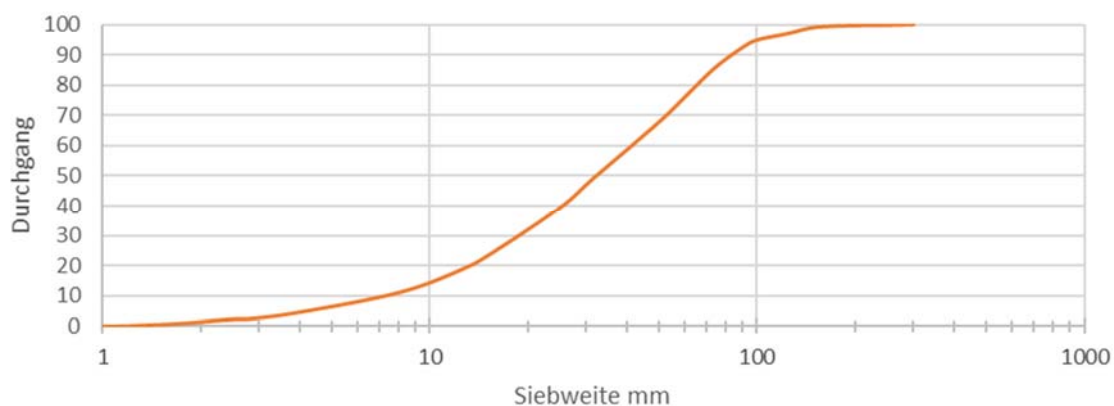


Abbildung 51. Korngrößenverteilung des Bettmaterials aus volumetrischen Proben; die im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts durchgeführt wurden.

Die Linienzahlanalysen des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts dienen der Nachbildung der Deckschicht (Abbildung 52).

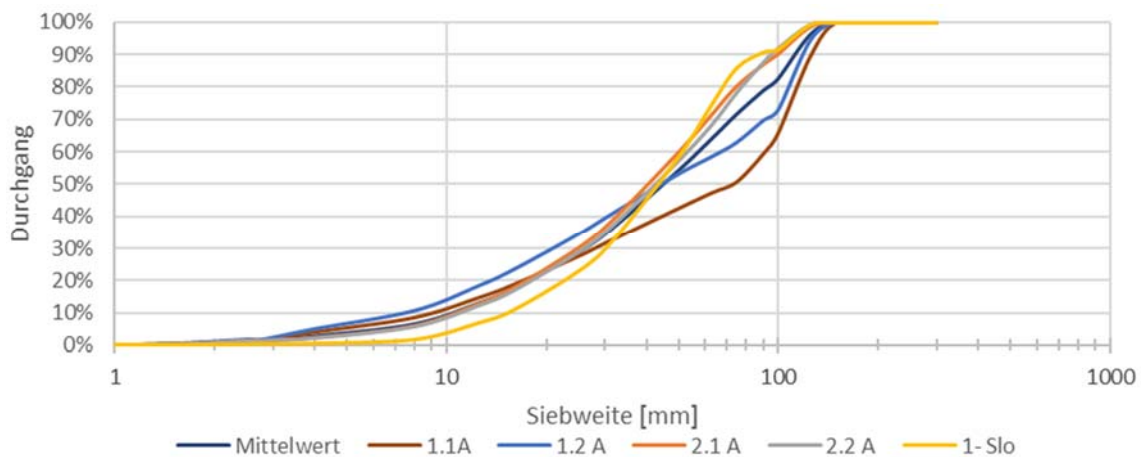


Abbildung 52. Korngrößenverteilungen der Linienzahlanalysen für die Abschätzung der Deckschicht in Typ 0; Projekt Grenzmur

Es wird eine Mächtigkeit der Deckschicht von 0,1 m angenommen. Das darunterliegende Bettmaterial wird mit 1,4 m modelliert, sodass sich eine gesamte Mächtigkeit der Sohle von 1,5 m ergibt. Die Verteilung erfolgt flächig homogen. Das Vorland wird als nicht erodierbar definiert.

Sedimentbelegung in den Maßnahmentypen (Typ 0, Typ A, Typ B und Typ C). Bei der Sohlbelegung der Maßnahmentypen wird davon ausgegangen, dass das Sediment dem im Vorland vorhandenen, etwas feineren Sediment ähnelt. Dies entspricht einerseits dem möglichen Szenario, dass Sediment aus dem Vorland der Grenzmur zugegeben wird, andererseits auch den Beobachtungen, dass Flüsse, deren Sedimenthaushalt sich in einem dynamischen Gleichgewicht befindet, feineres Substrat aufweisen als Flüsse, die einem Sedimentdefizit ausgesetzt sind.

Die Vorlandproben des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts lagen unterteilt in vier Tiefen vor: 0 m bis 1 m, 1 m bis 2 m, 2 m bis 3 m, 3 m bis 4 m. Aus den Kornverteilungen aller Probenstandorte wurden gemittelte Kornverteilungen errechnet, und der nicht bettbildende Anteil des Sediments wurde abgetrennt (Annahme einer Korngrößengrenze zwischen Geschiebe und Schwebstoff bei 1 mm).

Es wurde angenommen, dass künstlich zugegebenes Sediment oder eventueller Sedimenteintrag von flussauf dem durchschnittlichen Sediment der Vorlands entspricht (Abbildung 53). Die mittlere Korngröße dieses Sediments beträgt nach Abtrennung des Anteils < 1mm 24,8 mm. Diese Korngröße wurde in den Morphodynamiksimulationen beim Einlauf zugegeben.

Für die Erfassung der Geschiebetransportkapazität wurde davon ausgegangen, dass eine Sortierung des Sediments eine leicht gröbere Verteilung entstehen lässt, und dass das Sediment an der Oberfläche am ehesten der untersten Schicht der Vorlandproben entspricht, die nach Abtrennung des Anteils < 1mm einen mittleren Korndurchmesser von 28,5 mm aufweist (Abbildung 53).

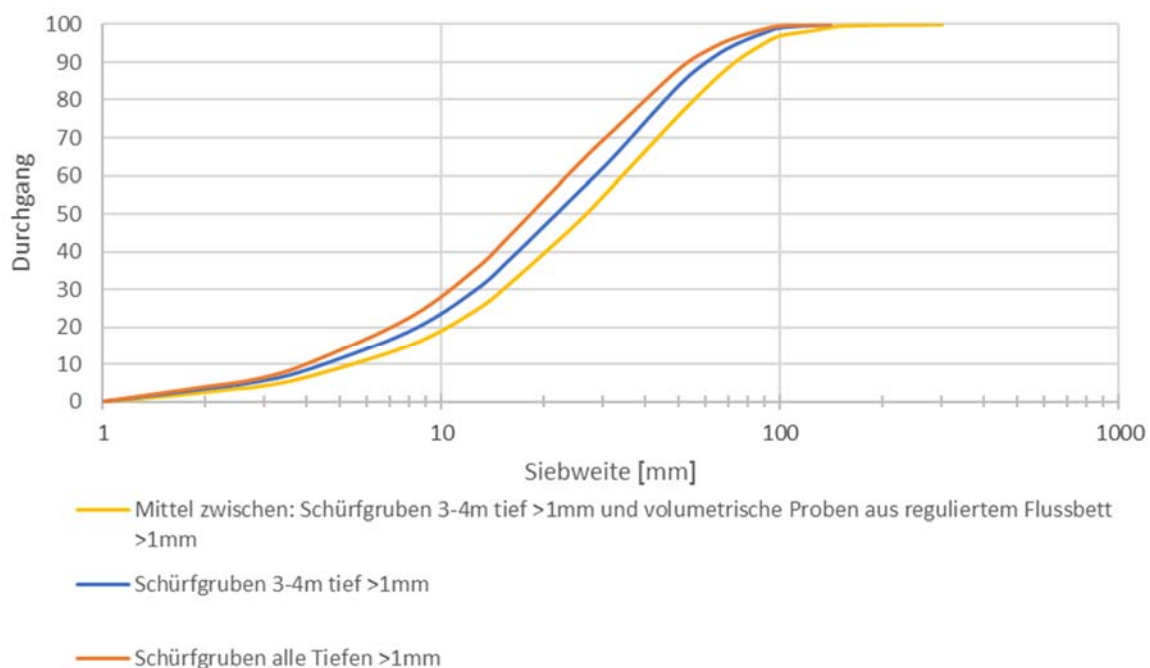


Abbildung 53. Korngrößenverteilungen der Sohlbelegung aus den Vorlands-Abschätzungen; Projekt Grenzmur

Die Variantentypen A, B und C werden ebenfalls mit einer homogenen Sedimentbelegung ausgeführt. Das Vorland ist dabei mit erodierbarem Sediment belegt.

Parametrisierung der Ufererosion

Für die kiesigen Böschungen, die durch enthaltenen Feinanteil zum Teil auch kohäsive Eigenschaften erlangen, liegen keine Messungen der Kohäsion vor, und die Strömungserosion an dieser Art von Böschungen blieb generell unerforscht. Ein Wert von 5 kN m^{-2} wurde als Kohäsion zugewiesen, um die im Feld beobachteten Böschungswinkel nachzubilden, die zum Teil weit über jenem des Reibungswinkels von rein kiesigem Material (32° - 37°) liegen.

Um dennoch Werte für die Parameter der Erodierbarkeit hinsichtlich Strömungserosion zu erhalten, wurde wie in Kapitel 4.3 auf eine von Habersack et al. (2013) aus Messungen abgeleitete Beziehung zwischen Durchfluss und Ufererosion für einen geraden Abschnitt in Gosdorf zurückgegriffen. Eine zweidimensionale hydrodynamische Modellierung lieferte böschungsnaher Sohlschubspannungen für mehrere Durchflüsse, sodass die Funktion von Habersack et al. in eine Erosionsrate/Schubspannungsbeziehung umgewandelt werden und die kritische Schubspannung und der Erodierbarkeitskoeffizient aus der Funktion abgeleitet werden konnten. Dabei ist zu beachten, dass die von Habersack et al. (2013) abgeleitete Beziehung nur auf wenigen Datenpunkten basieren konnte, vor allem die festgestellte kritische Sohlschubspannung wurde von sehr kleinen Veränderungen der Ufer abgeleitet, die innerhalb der Messunsicherheit liegen könnten.

In Tabelle 6 sind die verwendeten Parameterwerte zur Modellierung der Ufererosion angegeben.

Tabelle 6: Erosionsparameter

Wichte (kN m^{-3})	18,5
Kohäsion (kN m^{-2})	5,0
Innerer Reibungswinkel ($^\circ$)	34,5
Kritische Sohlschubspannung (N m^{-2})	15,0
Erosionskoeffizient ($\text{m}^2 \text{ s kg}^{-1}$)	0,0008

6.1.2.2. Modellaufbau für die Untersuchung der Auswirkung auf Hochwasserspiegellagen

Auswahl der Profillagen

Für die Analyse der Hochwasserspiegellagen wurden drei Profillagen des gesamten Abschnitts ausgewählt, jeweils ein Querprofil in einem Maßnahmenabschnitt des Typs A, ein Querprofil in einem Maßnahmenabschnitt des Typs B und ein Querprofil in einem Maßnahmenabschnitt des Typs C (Abbildung 54). Dabei fiel die Wahl auf Profillagen, welche auch die für den jeweiligen Typ charakteristische Anlandungsstrukturen beinhalten, um diese besonderen Bedingungen (als „worst case“) für die Hydrodynamik mitaufzunehmen.

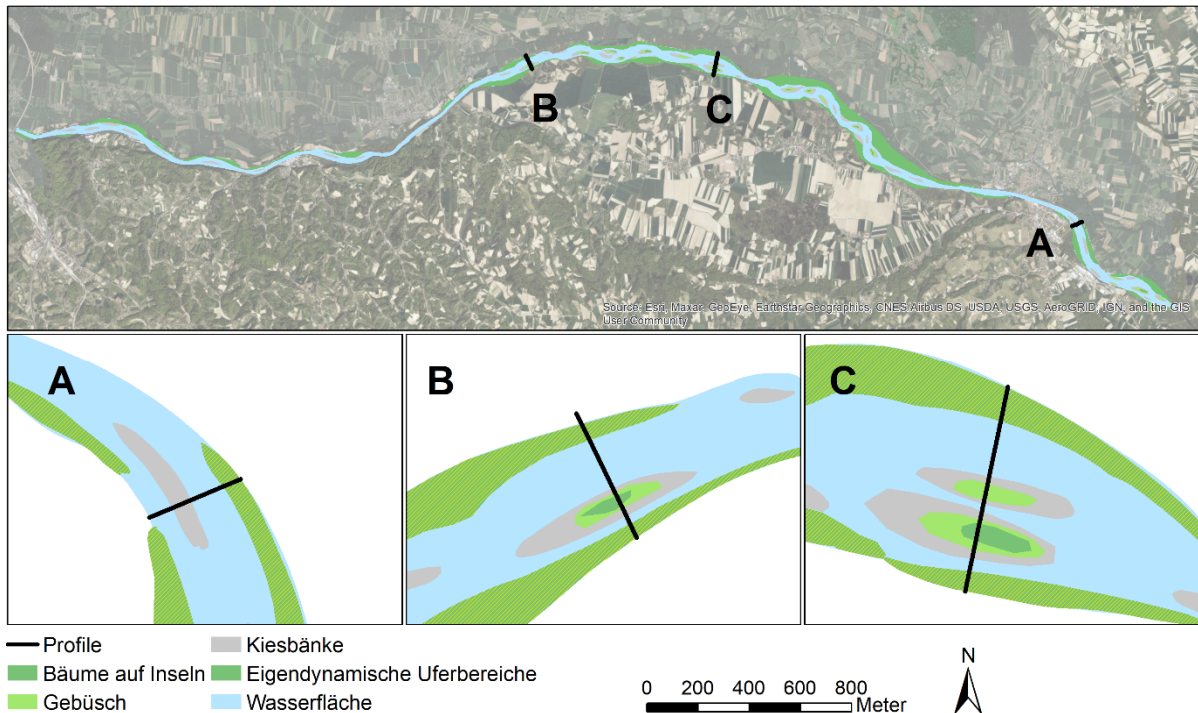


Abbildung 54. Zielzustand der gesamten Grenzmur und ausgewählte Profillagen, die repräsentativ für den gesamten Abschnitt der Grenzmur auf mögliche Auswirkungen auf Hochwasserspiegellagen untersucht werden.

Erstellung repräsentativer Querprofilgeometrien

Basierend auf dem Grundriss des Zielzustands wurden daraufhin in diesen Profillagen Querprofilgeometrien erstellt. Dabei wurde mittels hydrodynamischer Berechnungen darauf geachtet (wie in der Geometrieerstellung für den Referenzabschnitt), dass die Kiesbänke wie im Grundriss dargestellt bei Mittelwasserabfluss entsprechend aus dem Wasser ragen.

Dabei wurden zwei Szenarien untersucht:

1. Es ist davon auszugehen, dass sich die Sohle im Wechselspiel mit der Geschiebebezugabe heben wird. In diesem Szenario wurde eine Sohlhebung von durchschnittlich 80 cm in den Typen A, B und C angenommen und entsprechend in die Querprofile übertragen. Die Anlandungen konzentrieren sich dabei auf die Bereiche, wo gemäß Zielzuständen (Abbildung 54) Kiesbänke und/oder Inseln aufzufinden sind.
2. In diesem Szenario wurde das Querprofil vom regulierten zum renaturierten Zustand derartig umgeformt, dass sich das vor Ort vorhandene Sedimentvolumen des kiesigen, bettbildenden Anteils nicht änderte. Diese Vorgangsweise spiegelt das theoretische Szenario wider, wonach das gesamte durch künstliche Erdbewegungen oder durch Eigendynamik umgelagerte Sediment sich innerhalb des Querprofils verteilt. Nur das Sedimentvolumen des Feinsedimenthorizonts wurde aus dem aktuellen Zustand nicht in die neue Geometrie übernommen, da dieses entweder gar nicht erst eingebracht oder ohnehin rasch als Schwebstoff abtransportiert wird. Dies bildet ein theoretisches worst-case Szenario ab, da in der Realität ein großer Teil des Sediments aus den Aushubarbeiten kontinuierlich flussauf zugegeben wird anstatt diesen in einem Zuge

lokal zu verbauen, und da Sediment bereits während der Umbauarbeiten ausgetragen wird. Die Schürfgruben, die im Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept für die Grenzurmur (2001) analysiert wurden, zeigten, dass diese Feinsedimentauflage im Mittel eine Mächtigkeit von 1,24 m hat. Eine solche Feinsedimenthorizontmächtigkeit von 1,24 m wurde nun beim Übertrag des Sedimentvolumens vom aktuellen Zustand in die Profilgeometrie des Zielzustands abgezogen.

Für den aktuellen Zustand wurde für alle drei Maßnahmenabschnitte das aktuelle Gerinne einheitlich durch ein Trapezgerinne nachgebildet (Tabelle 7), das die durchschnittliche Geometrie wiedergibt und die Regulierung ausreichend repräsentiert.

Tabelle 7. Nachbildung der aktuellen, regulierten Gerinnegeometrie durch ein Trapezgerinne.

Sohlbreite	71 m
Uferhöhe	4,34 m
Böschungswinkel	34,5°
Längsgefälle	0,0014

Anhand der Karte der Abflussuntersuchung für das HQ₁₀₀ des Landes Steiermark wurden entlang der Abschnitte der drei Maßnahmentypen in regelmäßigen Abständen die Breiten der vom HQ₁₀₀ benetzten Flächen ermittelt. Dabei wurden aus Überflutungsflächen hinausragende Anhöhen in der Breitenermittlung nicht mitgerechnet, und die Breitenmessung nur innerhalb von Hochwasserschutzdämmen durchgeführt, sofern welche vorhanden waren. Die Medianwerte dieser Breiten für Typ A-, Typ B- und Typ C-Abschnitte wurden dann den jeweiligen Querprofilen als repräsentative Gesamtbreite (Gerinne mit Überflutungsfläche) zugeordnet. Diese Gesamtbreiten betragen für Typ A 668 m, für Typ B 735 m, und für Typ C 1255 m. Da die Überflutungsbreiten der unterschiedlichen Maßnahmenabschnitte variieren, wurde auch der aktuelle Zustand mit diesen drei Breiten berechnet um für jeden Typ den jeweiligen Vergleichszustand zu erhalten. Tabelle 8 zeigt charakteristische Abmessungen der erstellten Geometrien. Das Gefälle wurde dabei aus dem Durchschnittsgefälle der gesamten, regulierten Grenzurmur (1,4 ‰) unter Berücksichtigung der Laufverlängerung anhand von Mittellinien in den Maßnahmentypen A, B und C errechnet.

Tabelle 8. Eigenschaften der Maßnahmenabschnitte.

Maßnahmentyp	Breite Gerinne (m)	Breite mit Überflutungsfläche (m)	Gefälle (-)
A	207	668	0,00129
B	259	735	0,00128
C	426	1255	0,00119

In Abbildung 55 sind die für Typ A, Typ B und Typ C gemäß Szenario 1 (eine mittlere Sohlhebung von 80 cm) erstellten Querprofilgeometrien mit den jeweiligen, charakteristischen Überflutungsbreiten dargestellt.

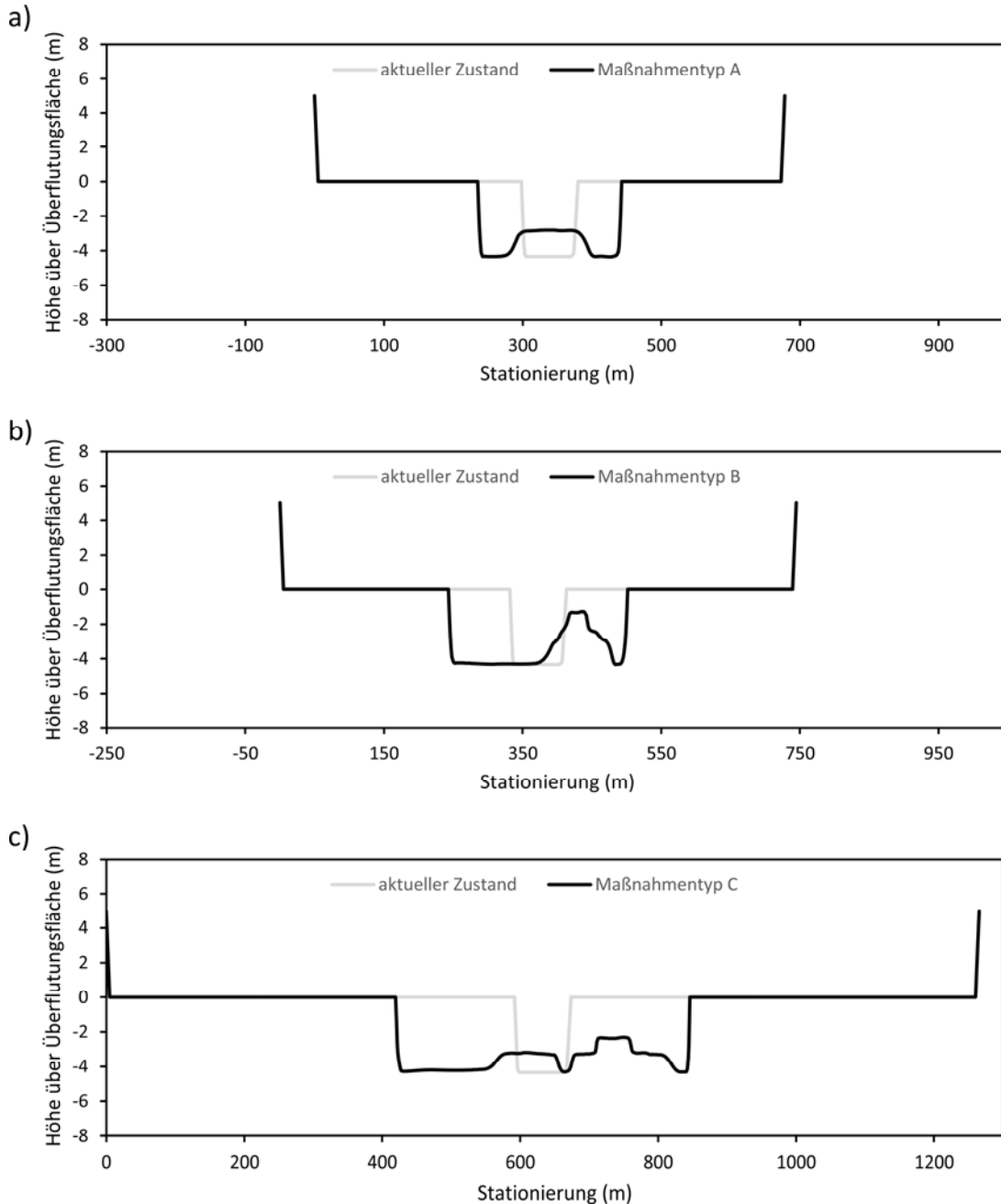


Abbildung 55. Szenario einer mittleren Sohlhebung von 80 cm in Querprofilen der unterschiedlichen Maßnahmenabschnitte, die hinsichtlich Querprofilgeometrie und Überflutungsbreite repräsentativ sind für die Situation im Maßnahmenabschnitt des a) Typs A, b) B und c) C.

In Abbildung 56 sind die für Typ A, Typ B und Typ C gemäß Szenario 2 (Umlagerung des Sediments innerhalb des Querprofils) erstellten Querprofilgeometrien mit den jeweiligen, charakteristischen Überflutungsbreiten dargestellt.

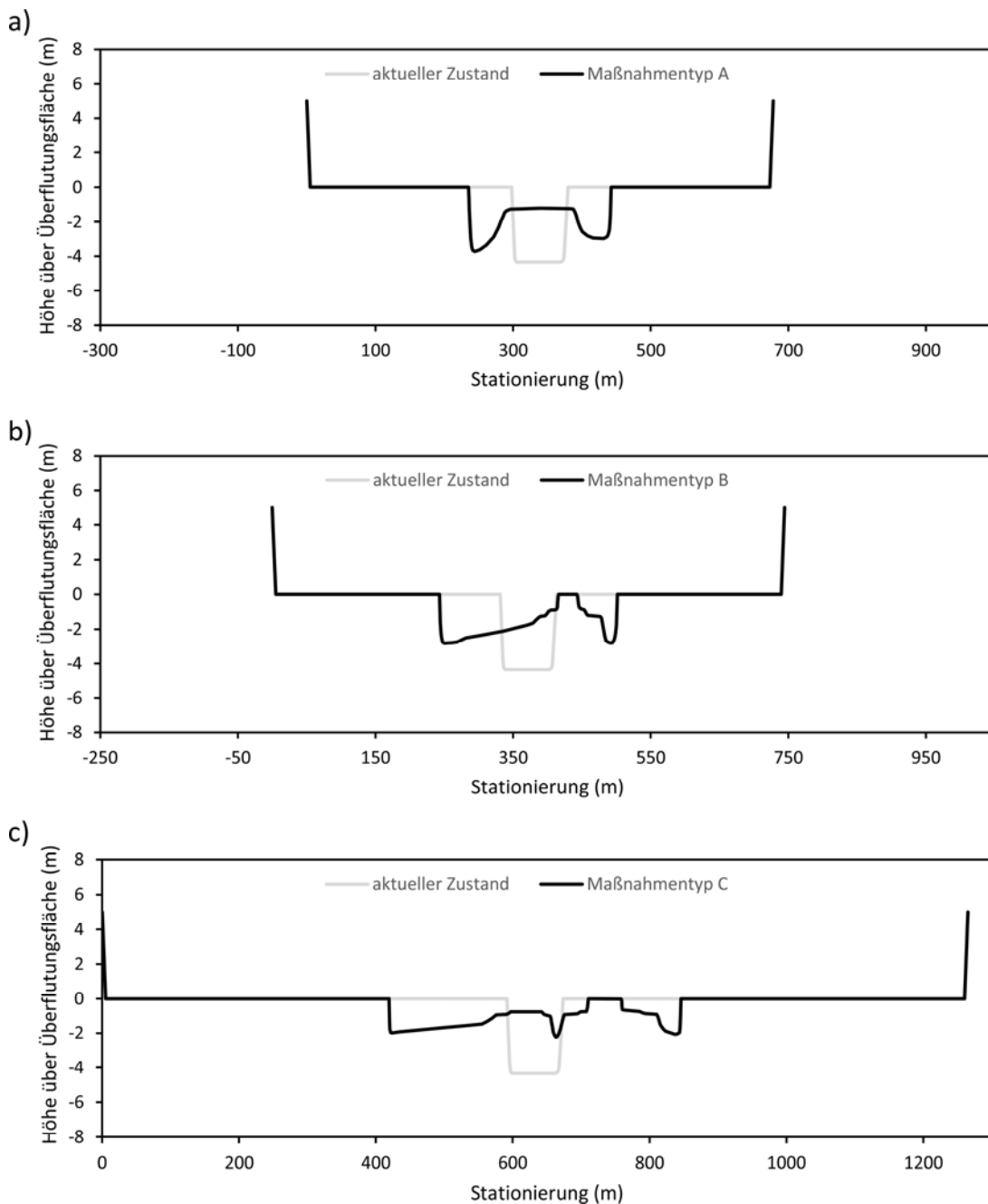


Abbildung 56. Volumsneutral (ohne Übertragung des in Schwebstoff übergehenden Anteils) umgelagerte Profile mit Überflutungsfläche, die hinsichtlich Querprofilgeometrie und Überflutungsbreite repräsentativ sind für die Situation im Maßnahmenabschnitt des a) Typs A, b) B und c) C.

Aufbau des hydrodynamischen Modells

Anhand der Querprofile wurden mithilfe des eindimensionalen, hydrodynamischen Modells HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center) Modelle der Grenzmur erstellt, in welchen die Wasserspiegelhöhen gleichförmiger, stationärer Abflüsse simuliert wurden. Das Spektrum der simulierten Abflüsse reichte von Mittelwasserabfluss bis zum Abfluss eines HQ₁₀₀. Dabei wurde den unterschiedlichen Maßnahmentypen das jeweilige

Sohlgefälle zugeordnet, das sich im Referenzabschnitt aus der Lauflänge und dem Sohlhöhenunterschied zwischen dem Einlauf- und dem Auslaufprofil ergab. Tabelle 9 listet die verwendeten hydraulischen Rauigkeiten auf, die den anderen Modellen und der Literatur entnommen wurden. Die Rauigkeit der Sohle dieses Modells wurde nicht separat kalibriert, da die Berechnung für den aktuellen Zustand in einem Trapezprofil erfolgt, das keinen direkten Vergleich mit der Realität zulässt, und weil es hier in erster Linie um einen relativen Vergleich zwischen aktuellem Zustand und den Maßnahmentypen geht. Maßnahmentyp B und C beinhalten auch im Gerinne Vegetationsflächen, die durch entsprechend gewählte Rauigkeiten berücksichtigt wurden.

Tabelle 9. Für unterschiedliche Elemente der Mur gewählte Rauigkeiten.

Flusselement	Manning-n ($s\ m^{-1/3}$)
Hochwasserschutzdamm	0.0286
Vorland und Inseln	0.1200
Gerinne und Kiesbänke	0.0313
Pioniervegetation	0.0833

6.1.3. Modellszenarien

6.1.3.1. Rechenläufe zur Kalibrierung des Sedimenttransportmodells

Die Sohlerosion des Istzustands im Referenzabschnitt diene als Datengrundlage für die Kalibrierung des Modells. Dabei wurde die mittlere Sohlerosion des Zeitraums 1974 – 2003 herangezogen, in welchem noch keine Maßnahmen gegen die Sohleintiefung umgesetzt wurden und daher konstante Rahmenbedingungen vorherrschten. Als Datengrundlage für die Nachbildung der negativen Sohlhöhenänderung stehen im Referenzabschnitt für den Zeitraum 1974 bis 2003 insgesamt vier vermessene Profile zur Verfügung. Nur zwei Profile befinden sich innerhalb des Referenzabschnitts (km 105,602 und km 108,450 gemäß alter, im Grundsatzkonzept verwendete Kilometrierung). Ein Profil flussauf (km 109,740) und eines flussab (km 102,615, beide ebenfalls alte Kilometrierung) des Referenzabschnitts wurden auch einbezogen.

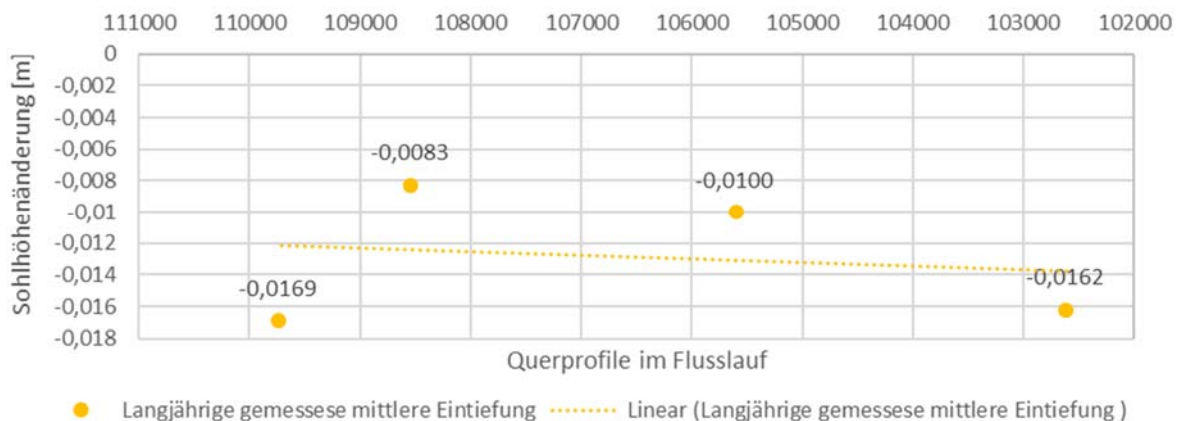


Abbildung 57. Mittlere jährliche Sohleintiefung im Zeitraum 1974 bis 2003 im Referenzabschnitt.

Während am Beginn des Grenzmurabschnitts direkt flussab vom Kraftwerk bei Spielfeld zwischen 1974 und 2003 kein Geschiebeeintrag eingerechnet wurde, musste flussab in den Referenzabschnitt Geschiebe aus der Sohlerosion im Abschnitt der Grenzmur flussauf eingetragen worden sein. Dieser Eintrag wurde aus der Sedimentbudgetanalyse übernommen, indem die Geschiebefracht für das Profil am Einlauf des Referenzabschnitts aus den benachbarten Querprofilen interpoliert wurde. Im Mittel wurde entsprechend dieser Analyse ca. 10700 m³ pro Jahr eingetragen. Da das Material aus der Sohle stammt, wurde für die Korngröße des eingetragenen Sediments auf die volumetrischen Proben des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts zurückgegriffen, wonach der mittlere Korndurchmesser nach Abtrennung des Feinanteils < 1 mm 41,4 mm beträgt.

6.1.3.2. Rechenläufe zur Erfassung der Geschiebetransportkapazität

Anhand der Modellkombination RSim-3D und iSed wird nun für jeden Maßnahmentyp ein Spektrum geschiebeführender Durchflüsse gerechnet und die Geschiebetransportkapazität auf der Sohle ermittelt. Mithilfe einer linearen Regression wird eine Formel für die Beziehung zwischen Geschiebetransport und Durchfluss abgeleitet, die in weiterer Folge auf eine Durchflussganglinie angewendet werden kann. Basierend auf der Durchflussganglinie von 1976 bis 2019 werden dann langjährige Mittelwerte für die Maßnahmentypen erhalten.

6.1.3.3. Rechenläufe zur Erfassung der Morphodynamik

Zur Ermittlung der Morphodynamik wird eine Durchflussjahresganglinie eines durchschnittlich feuchten Jahres modelliert, welche auch ein Ereignis in der Größe eines einjährigen Hochwasserereignisses beinhaltet, unter direkter Kopplung des zweidimensionalen Modells Hydro_AS-2d mit dem Sedimenttransportmodell iSed. Die Durchflussganglinie des Jahres 1986 wurde als repräsentative Ganglinie ausgewählt. Durch Abtrennung von Zeiträumen, in welchen der Durchfluss 150 m³ s⁻¹ unterschritt (entspricht dem Mittelwasserabfluss), kann die Dauer der zu berechnenden Ganglinie und somit die Rechenzeit wesentlich verkürzt werden (Abbildung 58).

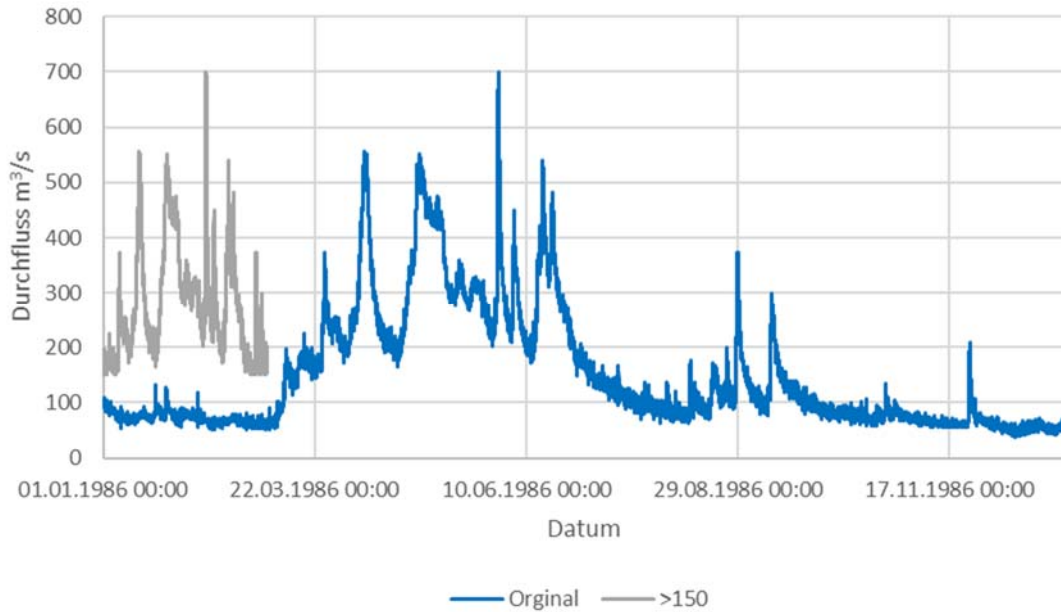


Abbildung 58. Durchflussganglinie des Jahres 1986 am Pegel Mureck, und Verkürzung der Ganglinie durch Beschränkung auf Durchflüsse über $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

6.1.3.4. Rechenläufe zur Erfassung der Auswirkung auf Hochwasserspiegellagen

In den hergestellten Querprofilen für Typ A, B, und C sowie für Typ 0 wurden stationäre Berechnungen in gleichförmigen Gerinnen durchgeführt, insbesondere der Durchfluss eines einjährigen Hochwasserereignisses ist in dieser Analyse zur Aussage über Auswirkungen auf den Hochwasserschutz relevant.

6.2. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der numerischen Modellierung von Hydrodynamik, Sedimenttransportkapazität und Morphodynamik dargestellt.

6.2.1. Hydrodynamik

Zunächst werden die Ergebnisse der dreidimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Simulation mithilfe des Modells RSim-3D zur Charakterisierung der verschiedenen Maßnahmentypen beschrieben und in einer Zusammenschau abschließend diskutiert. Bedeutung wird hierbei der Sohlschubspannung beigemessen, die den Geschiebetransport, aber auch die Substratverteilung bestimmt. Neben den Auswirkungen der Substratverteilung sind auch die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten und der Wassertiefen von ökologischer Relevanz. Nachfolgend sind Ergebnisse am Beispiel des Durchflusses eines einjährigen Hochwasserereignisses dargestellt.

6.2.1.1. Typ 0

Typ 0 repräsentiert hier die aktuelle Morphologie, deren Sohlage aber durch entsprechende Geschiebezugabe stabilisiert wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Morphologie sich

durch die enge Verbauung auch bei ausreichender Geschiebezugabe zur Haltung der Sohlage nicht wesentlich von der aktuellen Morphologie des sich eintiefenden Flussbetts unterscheidet. Abbildung 59 zeigt die Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers. Dabei zeigen sich durchgehend hohe Fließgeschwindigkeiten, die nur in der Nähe der Ufer kleinere Werte annehmen.



Abbildung 59. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der aktuellen Morphologie des Referenzabschnitts.

Die Sohlschubspannungen zeigen ein ähnliches Bild (Abbildung 60). Auch diese weisen durchgehend hohe Werte auf, wobei entlang der Ufer keine höheren Werte zu erkennen sind, da die Begradigung des Gerinnes keine stärkeren Krümmungen und Prallufersituationen zulässt. Von dieser homogenen Verteilung der Sohlschubspannung ist zu erwarten, dass Geschiebe ohne viel Interaktion mit umgebendem Sediment durch den Abschnitt transportiert wird.

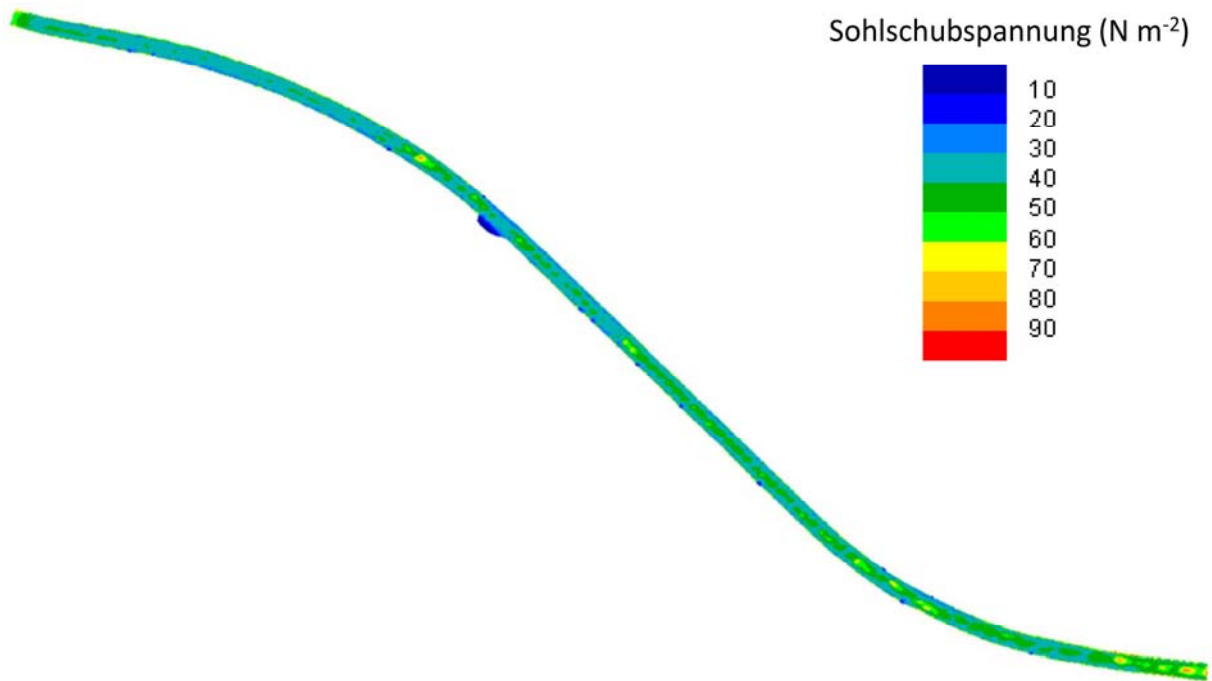


Abbildung 60. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der aktuellen Morphologie des Referenzabschnitts.

6.2.1.2. Typ A

Typ A zeigt hinsichtlich der Fließgeschwindigkeiten schon ein differenzierteres Bild (Abbildung 61). Die größere Breite und die Verteilung der Durchflüsse auf Haupt- und Nebenarme bewirken die Entstehung von räumlich begrenzten, ruhigeren Wasserbereichen, die auch bei größeren Durchflüssen verschiedensten Tieren als Rückzugsgebiet dienen kann.

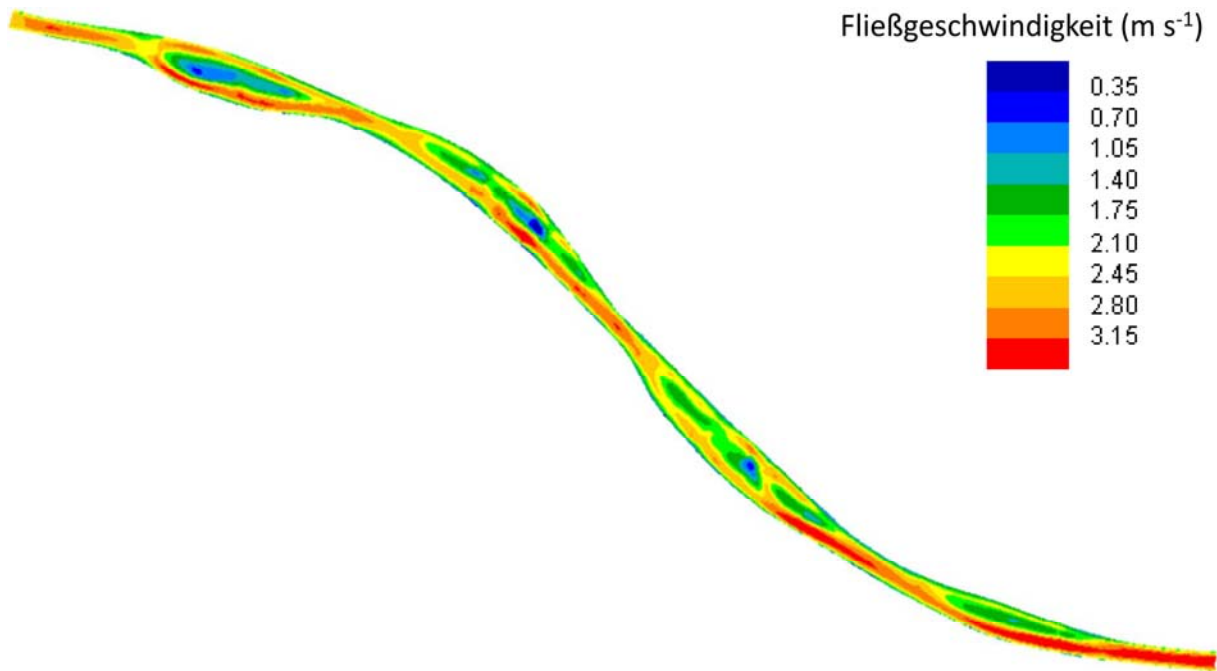


Abbildung 61. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs A im Referenzabschnitt.

Auch die Sohlschubspannungen zeigen eine heterogenere Verteilung, und lassen Anlandungs- und Erosionsbereiche erwarten, die für etwas Morphodynamik sorgen. Die stärkere Interaktion des eingetragenen Sediments mit der Morphologie bedeuten eine längere Aufenthaltszeit des Sediments im Abschnitt. Da die Außenufer noch immer eine Verbauung aufweisen, sind dieser Morphodynamik jedoch Grenzen gesetzt.

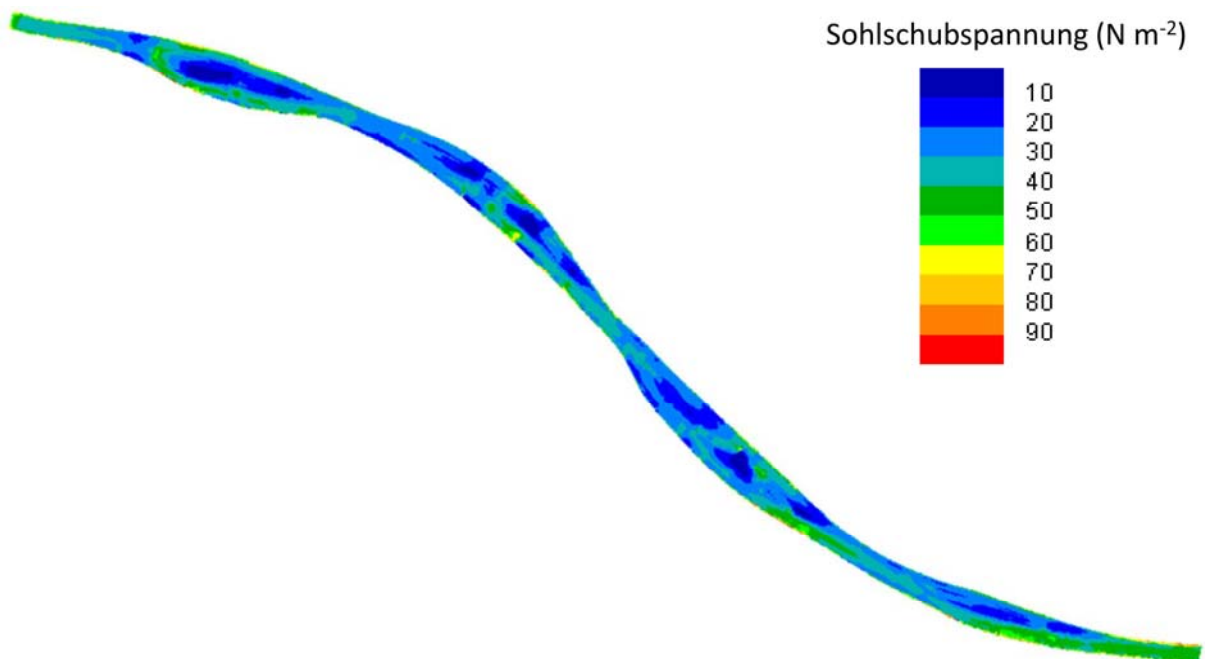


Abbildung 62. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs A im Referenzabschnitt.

6.2.1.3. Typ B

In Typ B zeigt der zur Verfügung stehende Platz Wirkung, sodass sich Bereiche mit höherer und Bereiche mit geringerer Fließgeschwindigkeit abwechseln. Auch bei dem dargestellten Hochwasserabfluss ist ein großes Spektrum an Fließgeschwindigkeiten im Abschnitt vertreten, nur vereinzelt ragen auch hier Inseln über die Wasseroberfläche, wo auch im Gerinne selbst Ruhigwasserzonen entlang der Wasseranschlagslinien zu erwarten sind.

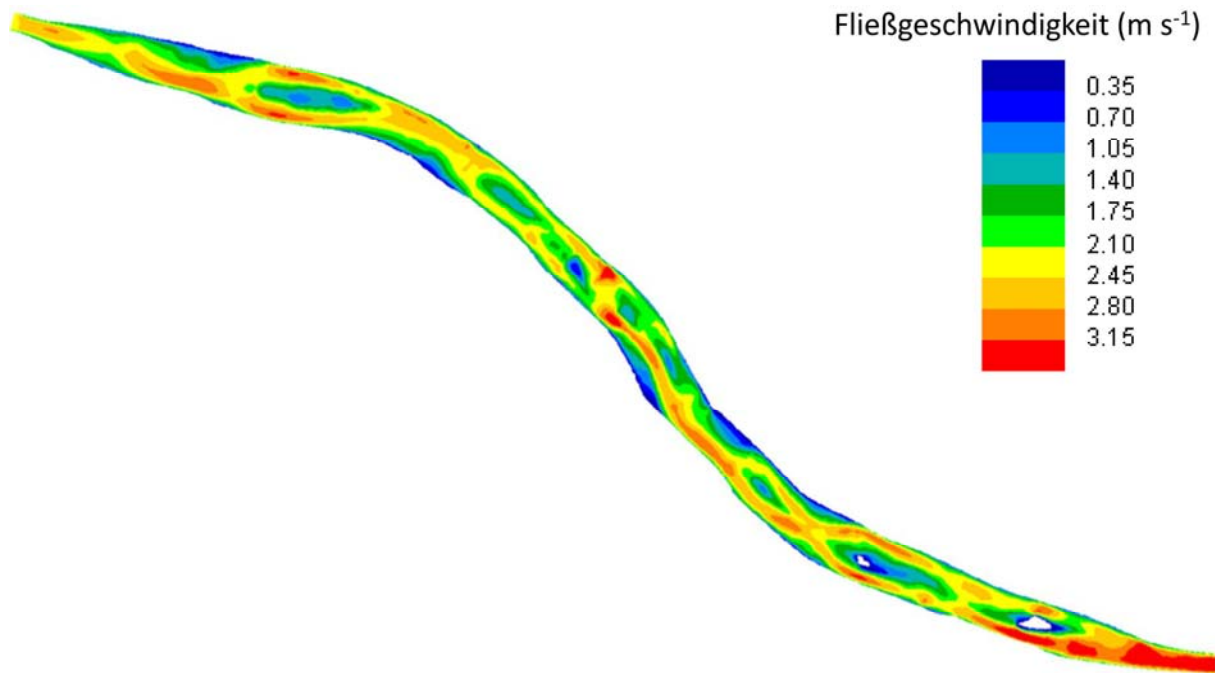


Abbildung 63. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs B im Referenzabschnitt.

Der Effekt der größeren Breite wird durch die im Mittel verkleinerten Sohlschubspannungen verdeutlicht. Es gehen nur mehr einzelne Bereiche mit starker Sohlbelastung hervor. Die größten Werte werden sehr lokal in schmälere Abschnitten mit etwa 50 N/m² erreicht. Durch die Abfolge von Bereichen mit kleinen und großen Sohlschubspannungen ist innerhalb des Korridors mit dauernden Umlagerungen zu rechnen. Stärkere Sohlschubspannungen treten aber hauptsächlich entlang der befestigten Außenufer auf, wo statt natürlicher Seitenerosion mit Tiefenerosion zu rechnen ist, wodurch die Morphologie noch beeinflusst ist.

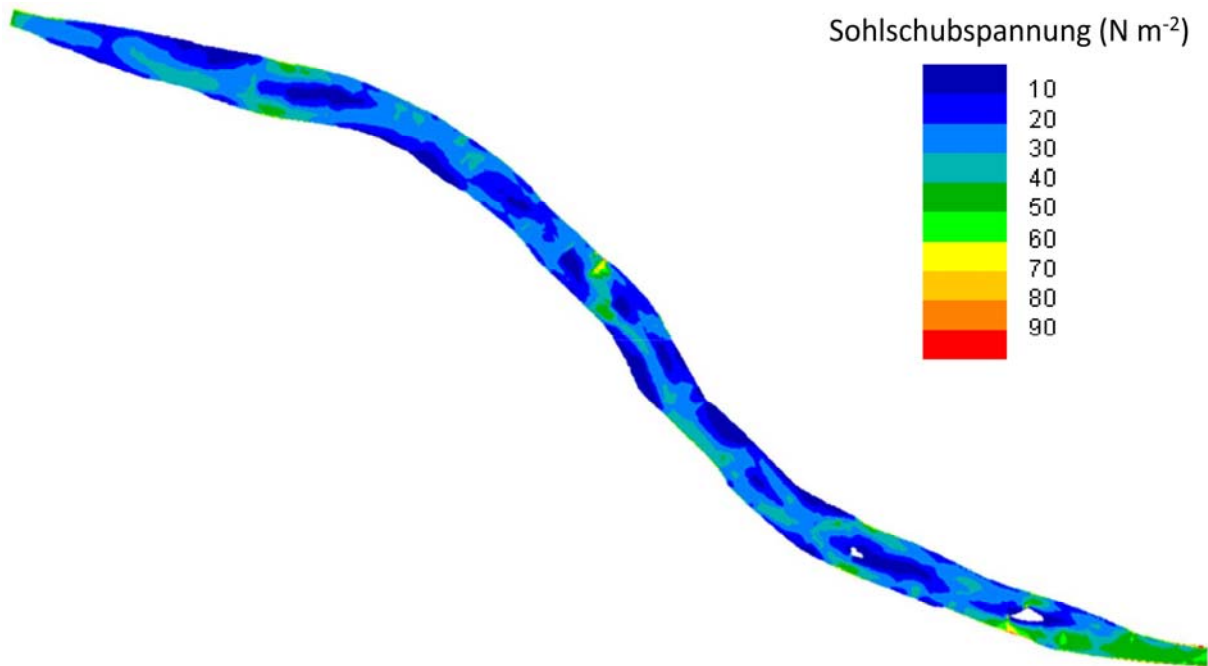


Abbildung 64. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs B im Referenzabschnitt.

6.2.1.4. Typ C

In Typ C ist der Effekt der zur Verfügung gestellten Breite auf die Fließgeschwindigkeitsverteilung am deutlichsten (Abbildung 65). Es bilden sich großflächig Ruhigwasserbereiche, und durch die mehrfach über die Wasserspiegellage ragenden Inseln treten in den Strömungsschatten auch mehrere Stillwasserbereiche auf. Die größeren Fließgeschwindigkeiten sind in ihrem Auftreten stark reduziert.

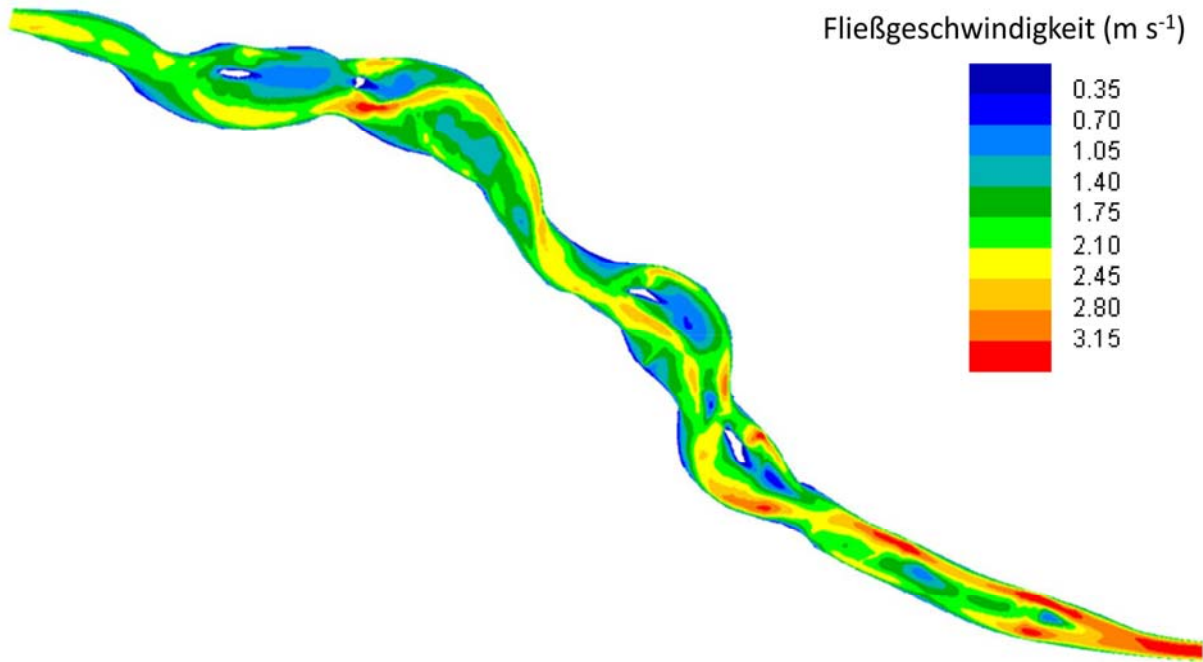


Abbildung 65. Fließgeschwindigkeiten des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs C im Referenzabschnitt.

Die Sohlschubspannungsergebnisse in Typ C zeigen, dass sich hier auch höhere Durchflüsse im Flussbett ausbreiten können und ohne große Sohlbelastungen abgeführt werden. Gleichzeitig variieren die Sohlschubspannungen stark, sodass mit großer Sortierung des Substrats und mit hoher Morphodynamik zu rechnen ist. Dadurch, dass die Außenufer größtenteils erodierbar sind, ändern sich die Rahmenbedingungen für die Morphologie laufend und es ist nachhaltig mit großer Morphodynamik zu rechnen. Während in Typ 0 mit einem durchgehenden Transport durch den Abschnitt zu rechnen ist, findet der Transport von Kies in Typ C gemäß der erhaltenen Verteilung der Sohlschubspannungen auf kleinerer räumlicher Skalenebene statt (von Rinnen entlang eines Böschungsfußes zur nächsten Kiesbank).

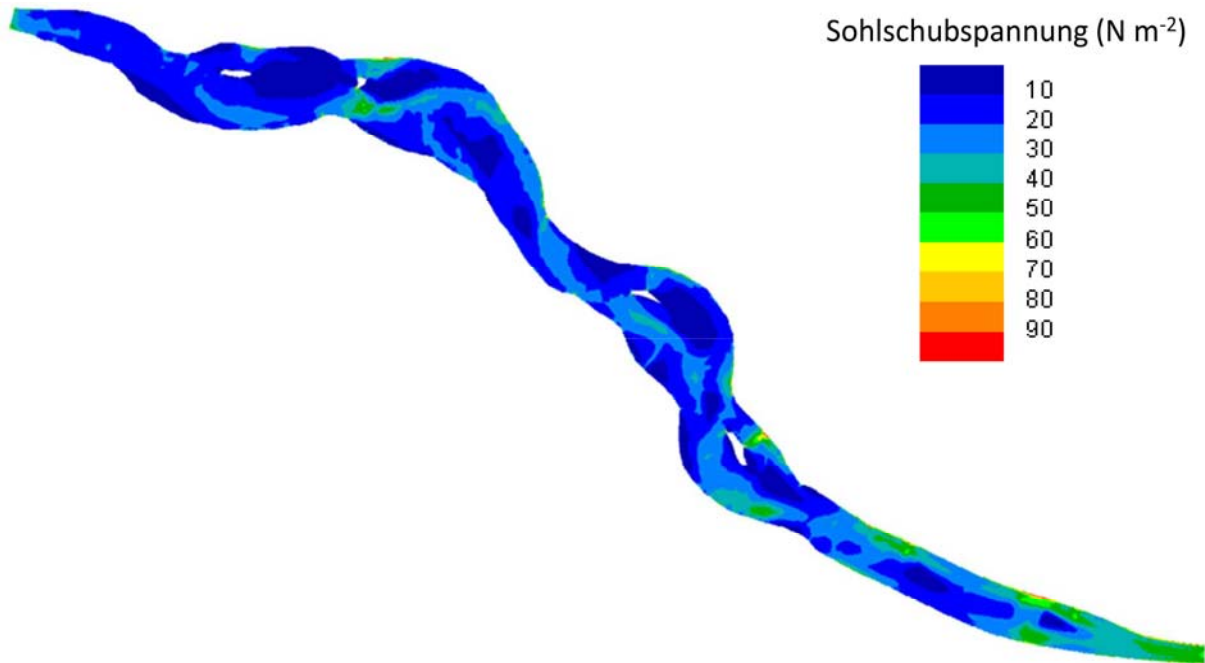


Abbildung 66. Sohlschubspannungen des Durchflusses eines einjährigen Hochwassers in der Morphologie des Typs C im Referenzabschnitt.

6.2.1.5. Zusammenfassung

Nachfolgend werden die hydrodynamischen Größen direkt gegenübergestellt. Es werden die Verteilungen der Fließgeschwindigkeit an der Oberfläche, der Sohlschubspannung und der Wassertiefe bei dem Durchfluss eines einjährigen Hochwasserereignisses analysiert.

Insgesamt zeigt sich mit zunehmender Größe der Maßnahmen eine wesentlich heterogenere Verteilung der hydrodynamischen Größen, bei gleichzeitiger Verschiebung der häufigsten Größen in den kleineren Wertebereich. Während in der aktuellen Geometrie Fließgeschwindigkeiten zwischen $2,75 \text{ m s}^{-1}$ und $3,00 \text{ m s}^{-1}$ am häufigsten auftreten, sind in Typ C Fließgeschwindigkeiten zwischen $1,75 \text{ m s}^{-1}$ und $2,00 \text{ m s}^{-1}$ am häufigsten (Abbildung 67). Trat die häufigste Fließgeschwindigkeitsklasse in der aktuellen Geometrie noch in 30 % der Fläche auf, ist die häufigste Fließgeschwindigkeitsklasse in Typ C aufgrund der heterogeneren Verteilung nur mehr in 18 % der Fläche zu finden.

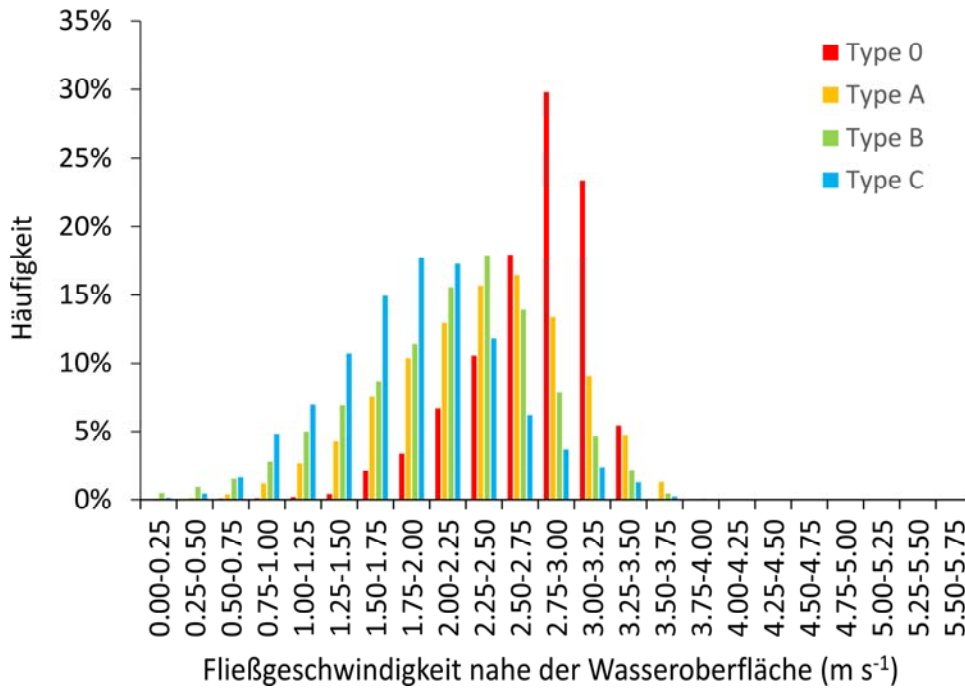


Abbildung 67. Verteilungen der Fließgeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Maßnahmentypen.

Die Wirkung der Maßnahmen ist vor allem in der Umverteilung der Wassertiefen ersichtlich (Abbildung 68). Im aktuellen Zustand wird das Flachbett deutlich, über welchem Wassertiefen zwischen 3,75 m und 4,00 m mit 42 % deutlich dominieren. In den Maßnahmentypen erreicht keine Wassertiefenklasse eine größere Häufigkeit als 13 %, und kleinere Wassertiefen treten stark in den Vordergrund.

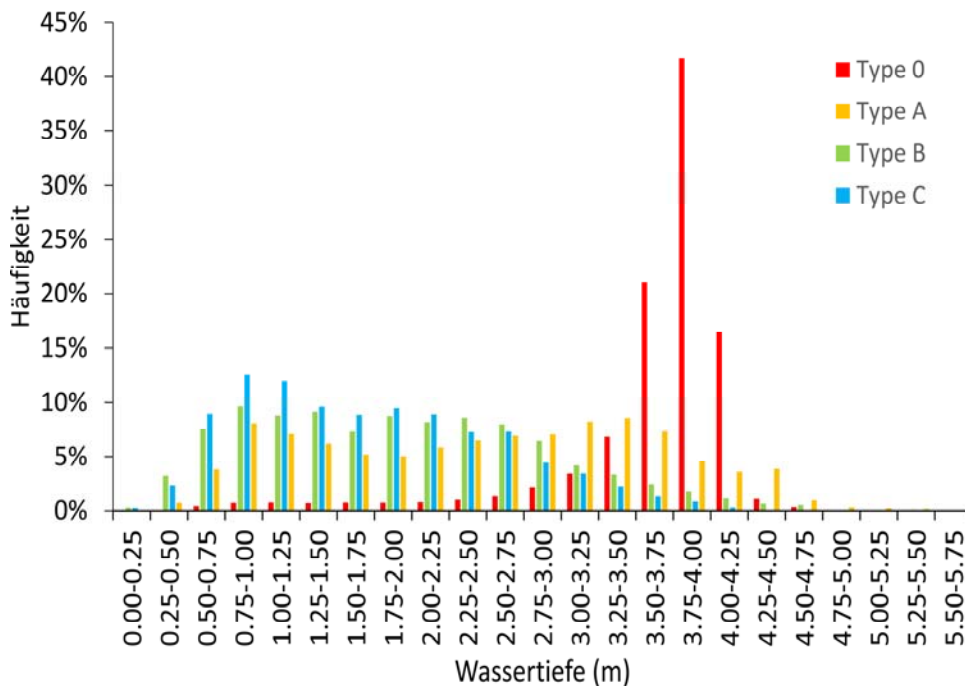


Abbildung 68. Verteilungen der Wassertiefen in den unterschiedlichen Maßnahmentypen.

Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Verteilung der Sohlschubspannungen (Abbildung 69). Herrschten in der aktuellen Geometrie Sohlschubspannungen in der Klasse 35 N m^{-2} bis 40 N m^{-2} in 33 % der Fläche vor, reduzierte sich der Flächenanteil dieser Klasse auf 4 % und die Sohlschubspannungen zwischen 15 % und 20 % dominieren mit einem Flächenanteil von 22 %.

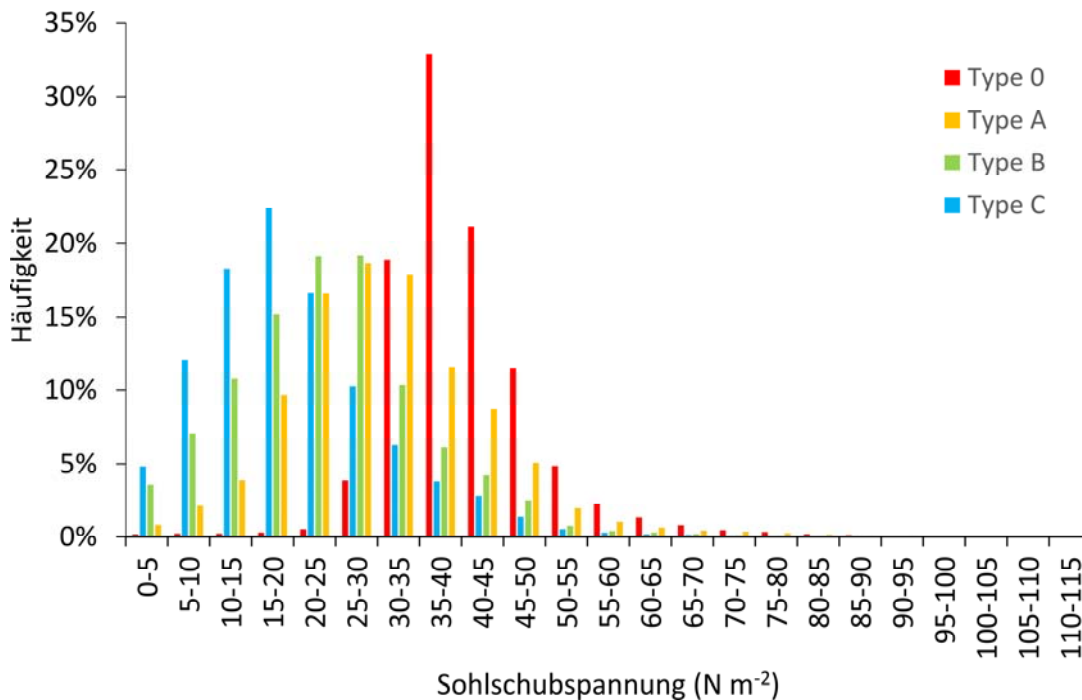


Abbildung 69. Verteilungen der Sohlschubspannungen in den unterschiedlichen Maßnahmentypen.

Die heterogeneren Verteilungen zeigen ein höheres Angebot an verschiedensten Habitaten an, auch bei Hochwasser werden der in der Mur lebenden Fauna Rückzugsgebiete angeboten. Flachwasserbereiche mit geringen Fließgeschwindigkeiten bieten flache Gradienten entlang der Wasseranschlagslinien und Schutz für Jungfischpopulationen. Die hohe Varianz und gleichzeitig kleineren Werte der Sohlschubspannungen lassen eine Dynamik erwarten, die regelmäßig Kies mobilisiert und auch wieder ablagert und aufgrund der frischen, lockeren Lagerung sich für kieslaichende Fischarten zum Schlagen von Laichgruben eignet.

Die mittlere Sohlschubspannung reduziert sich, verglichen mit dem aktuellen Zustand, um 24 % im Maßnahmentyp A, um 40 % in Typ B, und um 51 % in Typ C (Abbildung 70). Diese Reduktion deutet bereits auf eine starke Änderung der Rahmenbedingungen für den Geschiebetransport hin. Weil sich aber die Größe der benetzten Fläche mit dem Maßnahmentyp ändert, der Geschiebetransport erst über einem Schwellenwert einsetzt und nichtlinear mit der Sohlschubspannung zusammenhängt, kann erst die

Sedimenttransportsimulation endgültige Aussagen zu den Unterschieden im Geschiebetransport liefern.

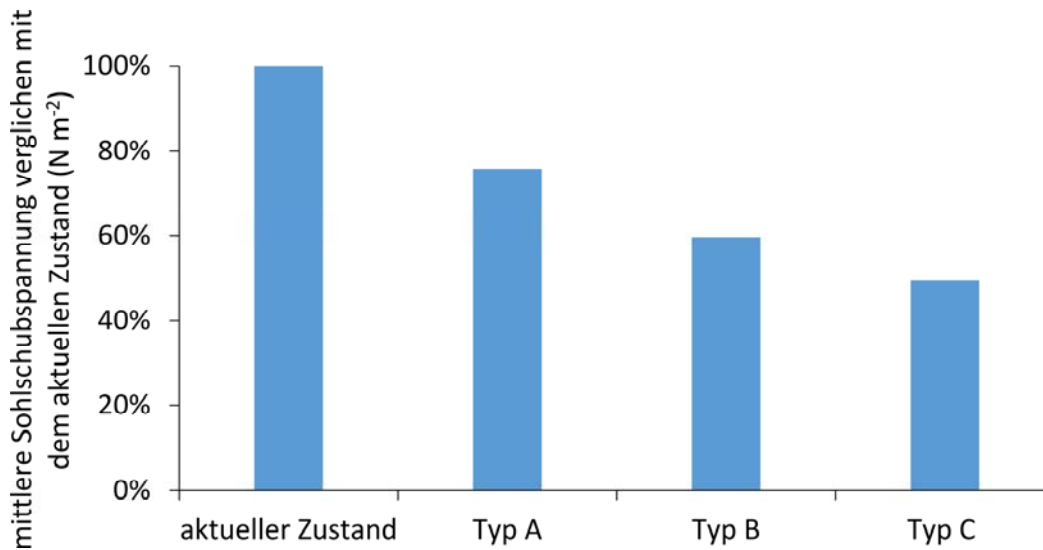


Abbildung 70. Mittlere Sohlschubspannungen in den drei Maßnahmentypen A, B und C in Relation zum Mittelwert in der aktuellen Geometrie.

6.2.2. Sedimenttransport

Zunächst wird das Ergebnis der Kalibrierung dargestellt, dann die anhand einer Jahreganglinie erhaltenen morphodynamischen Änderungen in den Maßnahmentypen A, B und C.

Ergebnis der Modellkalibrierung

Anhand der Werte 9,87 für den Vorfaktor und 0,041 für die kritische, dimensionslose Sohlschubspannung, sowie einer Hiding-Exposure Korrektur von 0,70 konnte eine gute generelle Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den gemessenen Daten herbeigeführt werden.

Zeigten bereits die Daten der vermessenen Profile eine gewisse Schwankungsbreite, so kommt es auch laut Modell zu keiner homogenen Eintiefung im Referenzabschnitt. Dies dürfte auf lokale Strömungsbedingungen zurückzuführen sein. Zudem ist der Effekt des sich abschwächenden Längsgefälles in diesem Abschnitt zu nennen. Profile am Auslauf weisen im Modell eine geringere Eintiefung auf. Die Werte am Auslauf wurden als Ausreißer betrachtet und nicht in der Kalibrierung berücksichtigt.

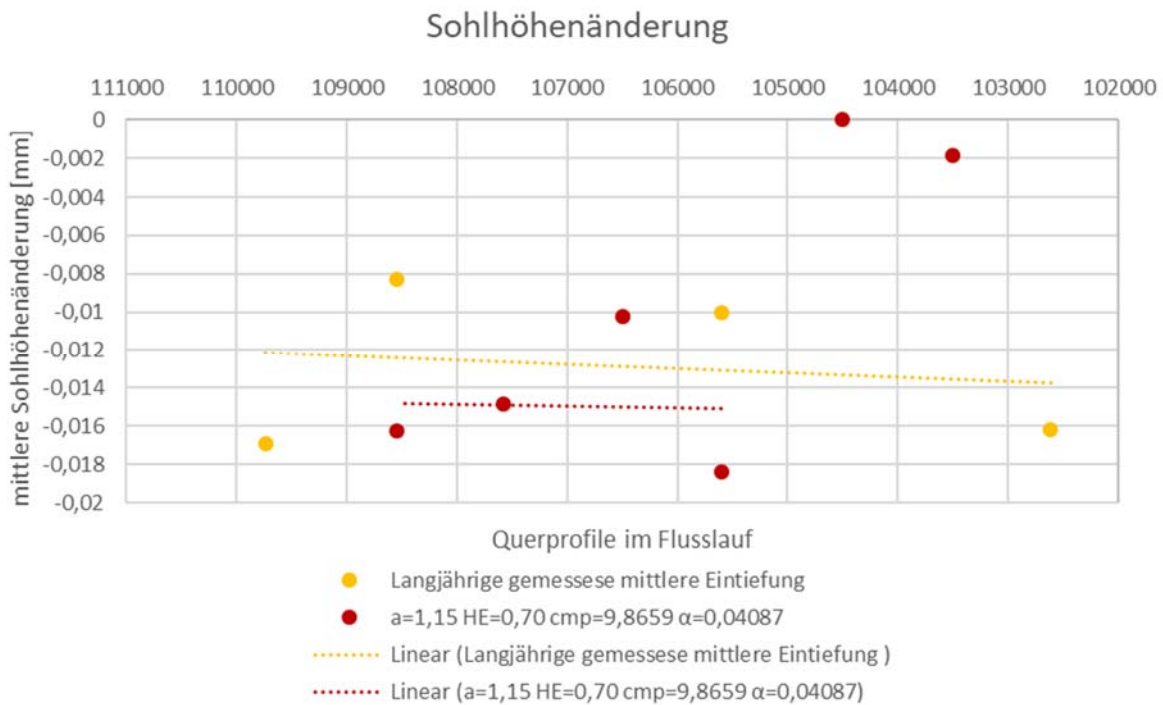


Abbildung 71. Ergebnis der Kalibrierung des Sedimenttransportmodells, die anhand des Vergleichs von gemessenen mit modellierten Eintiefungsraten durchgeführt wurde.

Nachfolgend werden die in den Maßnahmentypen ermittelten Transportkapazitäten dargestellt, die den Geschiebebedarf der Maßnahmen wiedergeben. Abschließend wird die simulierte Morphodynamik in den Maßnahmentypen beschrieben.

6.2.2.1. Geschiebetransportkapazität

Berechnung anhand Modellkombination RSim-3D und iSed

Mit dem Modell RSim-3D wurden zunächst für jeden Maßnahmentyp 20 Durchflüsse berechnet, mit welchen in äquidistanten Intervallen der gesamte Durchflussbereich abgedeckt wurde, der laut Vorberechnungen für Geschiebetransport sorgt. Anhand dieser Berechnungen konnte in weiterer Folge die Gesamtgeschiebefracht für die am Pegel Mureck vorhandene Durchflussganglinie (1974 – 2019), sowie eine mittlere Jahresfracht berechnet werden (Tabelle 10).

Tabelle 10: Geschiebejahresfrachten der Maßnahmenvarianten basierend auf der Geschiebetransportkapazität.

Maßnahme	Masse ($t a^{-1}$)	Volumen ohne Porenanteil ($m^3 a^{-1}$)	Volumen mit Porenanteil ($m^3 a^{-1}$)
		Annahme einer Feststoffdichte von 2650 kg m^{-3}	Annahme eines Porenanteils von 30%
Typ 0	82902	31284	44691
Typ A	75236	28391	40558

Typ B	57243	21601	30859
Typ C	36643	13828	19754

Betrachtet man diese Werte im Verhältnis, so ergibt sich die Darstellung aus Abbildung 72. Setzt man die Geschiebetransportkapazität mit dem Geschiebebedarf für einen ausgeglichenen Sedimenthaushalt gleich, so benötigt der Typ A um 9 %, der Typ B um 31 %, und der Typ C um 56 % weniger Geschiebeeintrag als die aktuelle Geometrie.

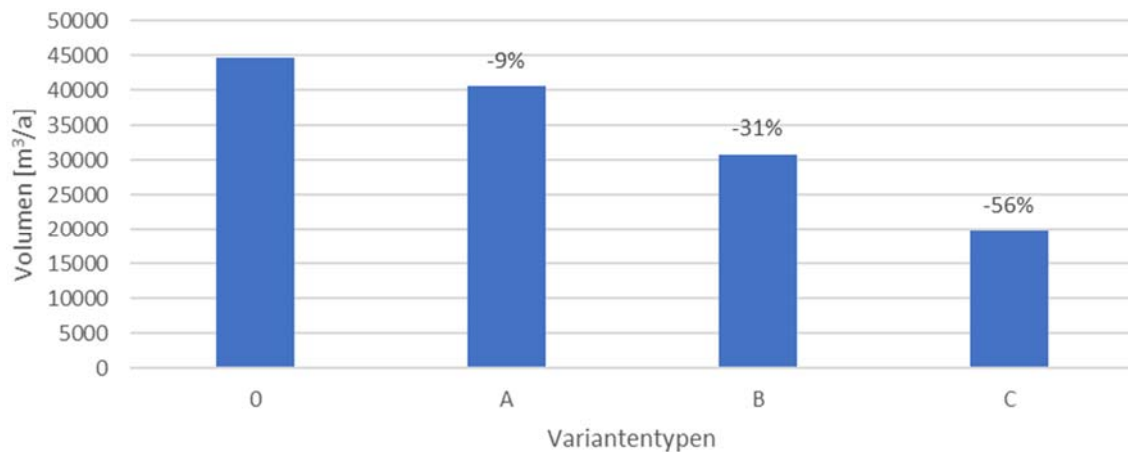


Abbildung 72. Benötigter Geschiebeeintrag der Maßnahmenvarianten für einen ausgeglichenen Sedimenthaushalt, mit Angabe der Reduktion des benötigten Geschiebeeintrags im Vergleich zum aktuellen Zustand.

Die Geschiebetransportkapazität zeigte sich als sehr abhängig von der Hydrologie. Der Geschiebebedarf kann zwischen einem Wert von nahezu Null und über 150000 m³ schwanken (Abbildung 73).

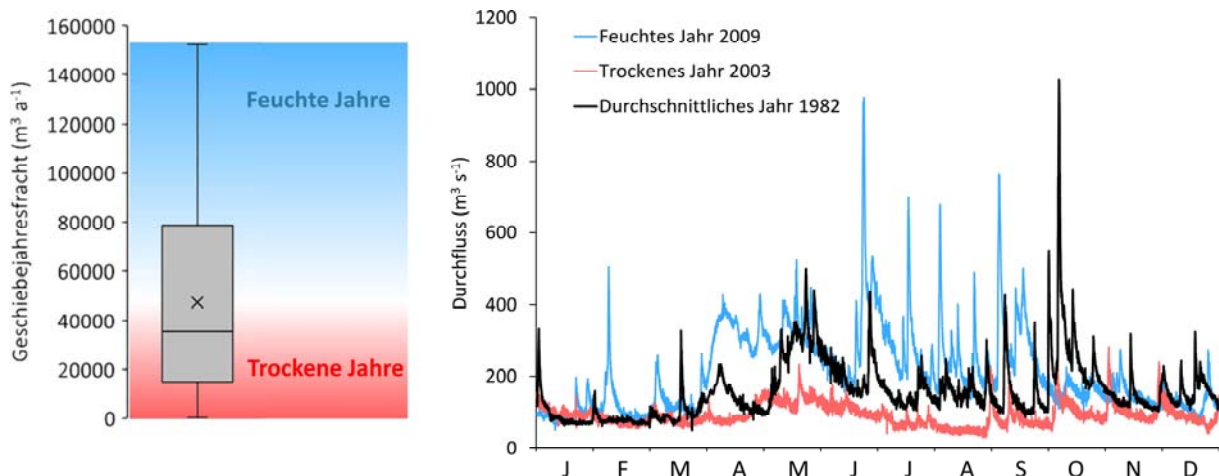


Abbildung 73. Geschiebetransportkapazität bzw. Geschiebebedarf in Abhängigkeit von der Hydrologie.

Plausibilisierung der Ergebnisse

Mit der Analyse der Geschiebetransportkapazität wurde der Geschiebebedarf der unterschiedlichen Maßnahmentypen ermittelt. In diesem Kapitel soll die Plausibilität dieser Ergebnisse durch Vergleiche mit unterschiedlichsten Daten überprüft werden. Da nur Daten

aus dem aktuellen Zustand vorhanden sind, und keine aus größeren Renaturierungsmaßnahmen mit relevanter Sedimentzugabe, kann für die Vergleiche am ehesten die in Typ 0 errechnete Geschiebetransportkapazität von 45.000 m^3 herangezogen werden. Diese Geschiebefracht wird nun mit existierenden Daten zum Geschiebetransport oder Geschiebeaustrag, sowie mit einer anderen Berechnungsmethode verglichen.

Geschiebefrachten durch Sohlerosion an der Grenzmur. Wenn ein möglicher, kleiner Geschiebeeintrag von flussauf durch das Kraftwerk bei Spielfeld in den Grenzmurabschnitt vernachlässigt wird, lassen die Querprofilvermessungen im Grenzmurabschnitt eine Berechnung der Geschiebefrachten zu. In einem Querprofil am Ende des Grenzmurabschnitts betrug die durchschnittliche Fracht im Zeitraum 1974 bis 2018 demnach knapp 29.000 m^3 . Dass auch der Wert am Ende des erodierenden Grenzmurabschnitts wesentlich kleiner ist als der errechnete Geschiebebedarf, lässt sich durch eine eventuell größere Erosionsbeständigkeit einer sich eintiefenden Sohle durch Deckschichtbildung, sowie durch die gröbere Kornverteilung im Vergleich zur feineren des Zugabematerials erklären. Betrachtet man direkt aufeinanderfolgende Vermessungen, erhält man als maximal aufgetretene Geschiebefracht durch ein Querprofil knapp $130.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ (berechnet am Ende des Grenzmurabschnitts im Zeitraum 1974-1975). Zu beachten ist, dass anhand von nur zwei Vermessungen nur sehr begrenzt Aussagen bezüglich Sohlhöhen, Sedimentbudget und -frachten getätigt werden sollten, da Unsicherheiten in der Vermessung stark ins Gewicht fallen können, auch ist der erhaltene Wert stark abhängig von der Hydrologie des analysierten Zeitraums.

Austrag von im Rahmen der Renaturierung Gosdorf eingebrachtem Sediment. Im Zeitraum ab der Baumsetzung wurde der Abschnitt bei Gosdorf viermal vermessen, sodass der Austrag des eingebrachten Sediments aus dem Nebenarmaushub beobachtet werden konnte, wobei ein Teil des Austrags aus der Seitenerosion stammte. Geht man von den Lastwagenzählungen der Baubetriebsleitung aus, wurden beginnend im November 2006 150.000 m^3 an Sediment in die Mur eingebracht. Habersack et al. (2013) ermittelten für den Zeitraum zwischen Mai 2007 und Dezember 2009 aus den Vermessungen einen Austrag von 42750 m^3 , zuzüglich zu 82500 m^3 , die bereits während der Materialeinbringung ausgetragen wurden. Zählt man noch den Eintrag aus der Sohlerosion flussauf dazu (ca. $3000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$), so erhält man im Mittel für den Zeitraum Mai 2007 bis Dezember 2009 einen Austrag von ca. $44.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$. Dieser Wert ist nahezu ident mit dem für Typ 0 errechneten Wert der Geschiebetransportkapazität. Zu beachten ist, dass der Austrag im Untersuchungszeitraum ungleichmäßig verlief (starker Anteil des Austrags während Baumsetzung) und es ist unklar wie gut die Hydrologie im kurzen Erhebungszeitraum von ca. 3 Jahren durchschnittlichen Bedingungen entspricht. Weil das Sediment hauptsächlich aus Zugabematerial bestand, ist der erhaltene Wert bezüglich Korngröße gut mit dem Bedarf auch an künftigen Zugaben vergleichbar.

Vereinfachte Berechnung im Trapezprofil. Das Flachbett der regulierten Mur lässt eine Nachbildung durch ein einfaches Trapezprofil zu, in welchem zur Plausibilisierung mit vereinfachter Methode der Geschiebetransport berechnet wurde. Es wurde dabei die Formel von Wong und Parker (2006) herangezogen, die auf der Formel von Meyer-Peter und Müller (1948) basiert, auf die Berücksichtigung eines Riffelfaktors verzichtet und stattdessen leicht

veränderte Formelparameter verwendet. Zieht man denselben Korndurchmesser heran wie in der Modellierung der Geschiebetransportkapazität (28,5 mm), so erhält man basierend auf der verfügbaren Durchflussganglinie eine mittlere jährliche Jahresfracht von $48.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$, die sich nur geringfügig vom Ergebnis der hier angewandten Modelle unterscheidet.

Geschiebetransportmessungen an der Grenzmur. Habersack et al. (2013) führten in Bad Radkersburg Geschiebemessungen durch, anhand welcher auch eine Geschiebetransportfunktion erstellt werden konnte. Zur Erstellung einer Geschiebetransportfunktion standen allerdings nur drei Messungen aus dem Jahr 2012 zur Verfügung, und der größte Durchfluss betrug $380 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Wird die von Habersack et al. (2013) erhaltene Geschiebetransportfunktion auf die gesamte Durchflussganglinie im Zeitraum zwischen 1976 und 2019 angewandt, erhält man eine mittlere jährliche Jahresfracht von nur knapp $9.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Aufgrund der genannten Unsicherheiten ist dieser Wert nicht als Richtwert anzusehen. Eine Messung von Habersack et al. (2013) aus dem Jahr 2010 deutet an, dass der Geschiebetransport auch wesentlich höher sein kann.

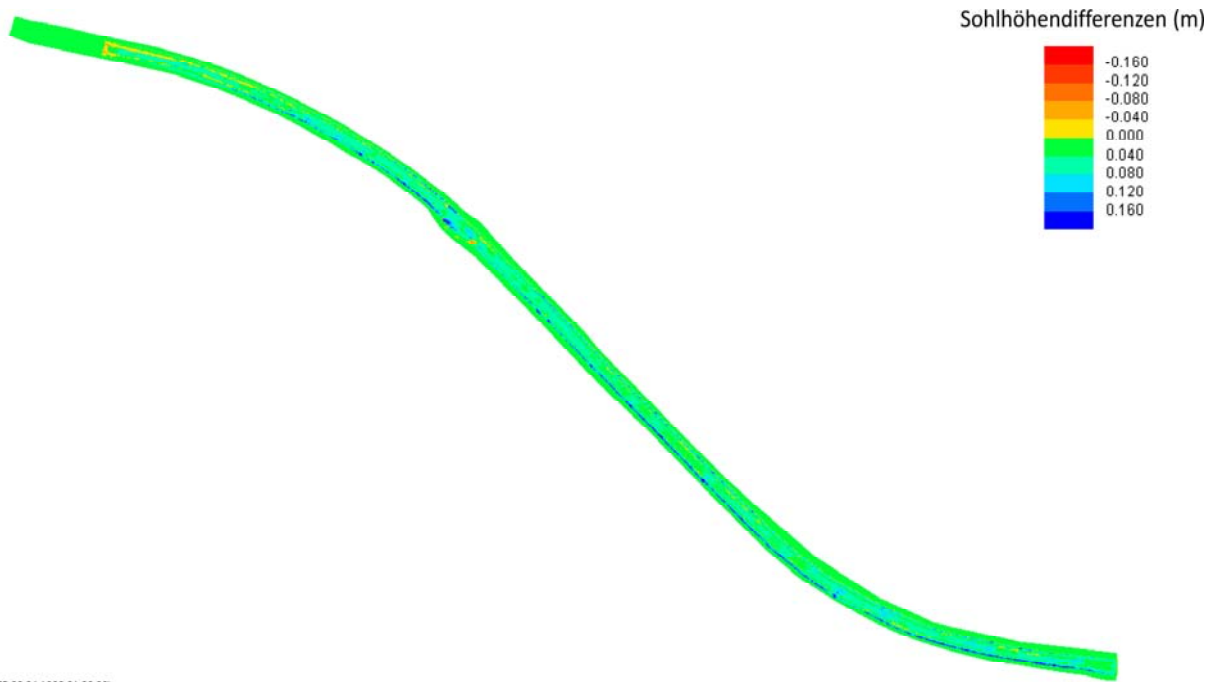
Vergleich mit gemessenen Geschiebefrachten an der Oberen Drau. An der Oberen Drau in Dellach im Drautal finden seit den 1990er Jahren intensive Geschiebeuntersuchungen statt, die hier zu einem Vergleich herangezogen werden sollen. Anhand von Korbfängermessungen im Zeitraum 2007 bis 2019 wurde eine mittlere Jahresfracht von ca. 53000 t gemessen (Habersack et al., 2021), das entspricht bei Annahme einer spezifischen Dichte von 2650 kg m^{-3} und einem Porenanteil von 30 % einer volumetrischen Fracht von $28000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$. Laut Habersack und Laronne (2002) beträgt die Breite des Flussbetts dort ca. 40 m, (71 m an der regulierten Grenzmur), das Gefälle 1,9 ‰ (1,4 ‰ in der regulierten Grenzmur), und die Korngröße 38,7 mm (in den Berechnungen für die Geschiebetransportkapazität wurden 28,5 mm als Korngröße verwendet). Ein Vergleich mit anderen Flüssen zur Plausibilisierung ist schwierig, auch weil in der Mur bei ausreichender Geschiebezugabe ein anderes Sedimentregime vorherrschen würde als an der ebenfalls von Eintiefung betroffenen Oberen Drau (die aktuelle Entwicklung der gesamten Oberen Drau unter Einwirkung der getätigten Rückbaumaßnahmen ist den Autoren unbekannt). Aber zumindest die Größenordnung betreffend scheint der errechnete Geschiebebedarf für Typ 0 eine realistische Größe zu sein.

Zusammenfassung der Plausibilisierung. Gemäß den getätigten Vergleichen erscheint der für Typ 0 errechnete Geschiebebedarf als plausibel. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch die für die drei Maßnahmentypen A, B und C errechneten Geschiebetransportkapazitäten realistisch sind, da sie mit derselben Modellkombination bestimmt wurden.

6.2.2.2. Morphodynamik

Ergebnisse der Modellierung der Morphodynamik

Die Gegenüberstellung der Maßnahmentypen zeigt, dass in dem regulierten Gerinne des aktuellen Zustands auch bei Stillung des Geschiebebedarfs keine flusstypischen Strukturen entstehen (Abbildung 74), während in den Maßnahmentypen A, B und C natürlichere morphodynamische Prozesse stattfinden.



175 77 04 1986 01 00 000

Abbildung 74. Morphodynamik in Typ 0 nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.

Die morphodynamischen Prozesse in Typ A (Abbildung 75) und Typ B (Abbildung 76) verlaufen in schmalen Bahnen, während in Typ C (Abbildung 77) eine großflächigere Beteiligung an Morphodynamik zu verzeichnen ist. Die verhinderte Seitenerosion an den Außenufern des Typs A und Typs B verursachen Verlagerungen entlang der Ufer je nach Durchflussgeschehen, die auch größere Erosionen verursachen.

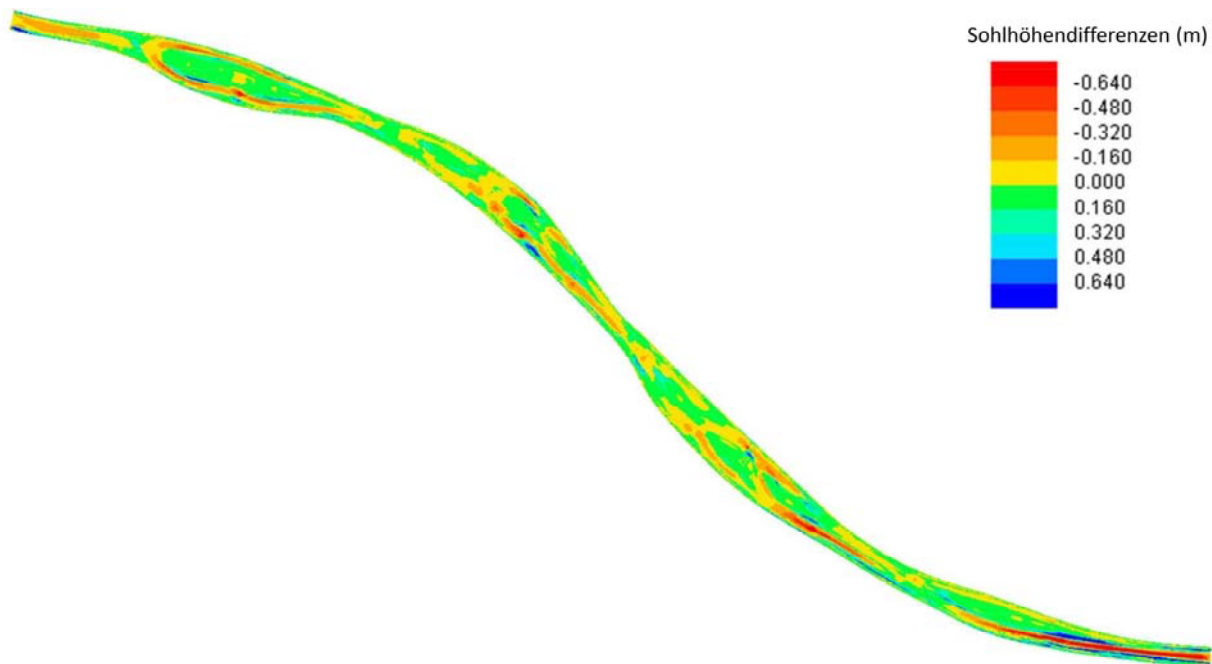


Abbildung 75. Morphodynamik in Typ A nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.

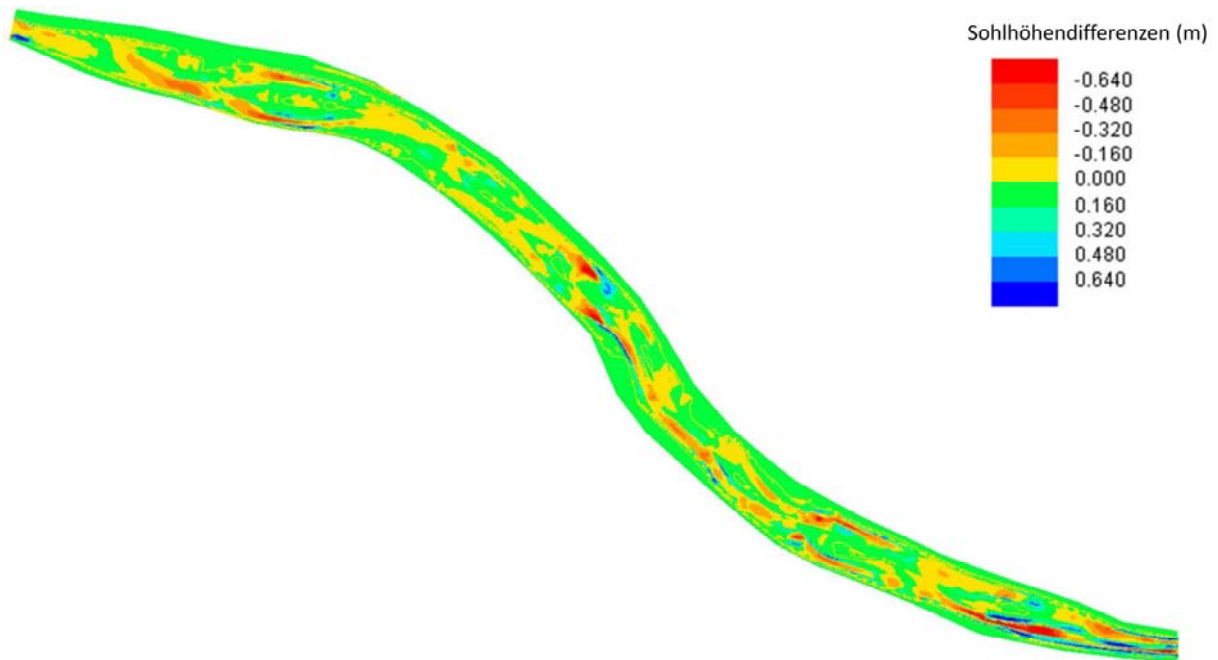


Abbildung 76. Morphodynamik in Typ B nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.

Die Größe der Flächen, in welchen Umlagerungen stattfinden, steigt mit der Größe des Maßnahmentyps. Dementsprechend ist in Typ C die größte Fläche an den Umlagerungen beteiligt (Abbildung 77).

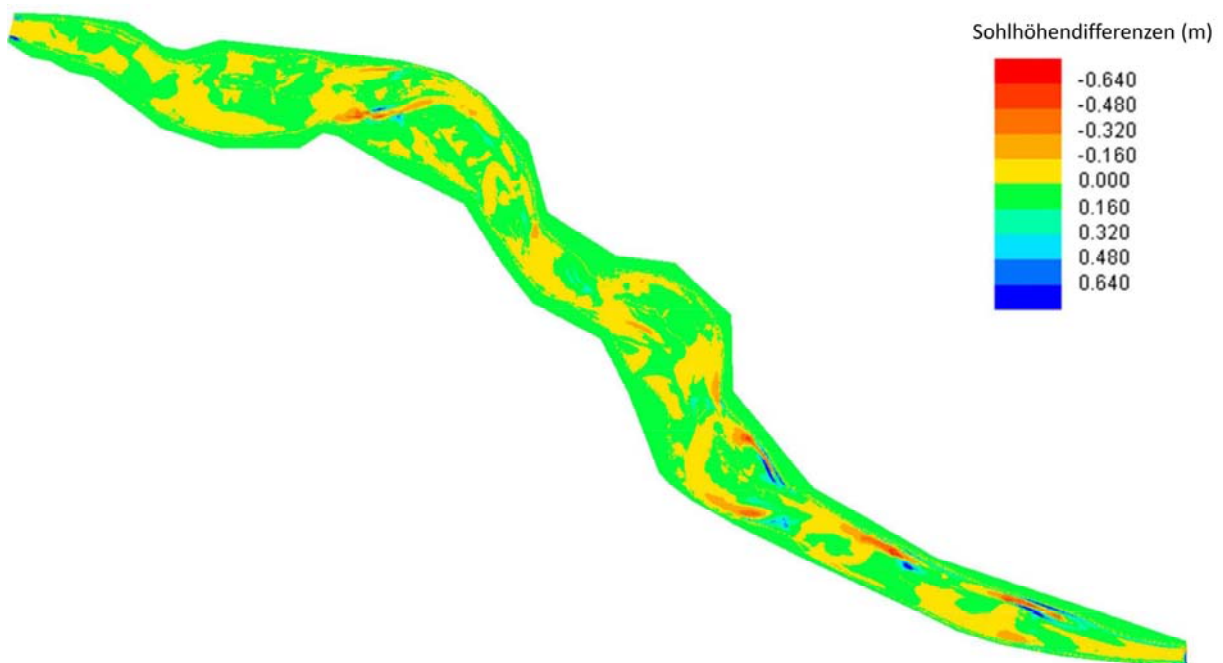


Abbildung 77. Morphodynamik in Typ C nach Durchrechnung der Durchflussganglinie des Jahres 1986.

Weitere Auswertungen zeigen eine intensive Dynamik vor allem in Typ C. Es kommt neben Umstrukturierungen, Abtrag und Anlandungen auch zu hufeisenförmigen Anlandungen in

jenen Bereichen, in denen sich der Fließquerschnitt aufweitet, welche durchwegs morphodynamisch bekannte Phänomene sind (vgl. Tritthart et al., 2011).

6.2.3. Hochwasserspiegellagen

Es wurden zwei Szenarien untersucht, wonach gemäß erstem Szenario eine mittlere Sohlhebung um 80 cm stattfindet, und gemäß Szenario 2 der gesamte Kies innerhalb des Querprofils umgelagert wird. Sollte sich selbst für das theoretische Extremszenario (Szenario 2) keine negative Beeinflussung des Hochwasserschutzes ergeben, so sind in der Realität generell verbesserte Bedingungen für den Hochwasserschutz zu erwarten.

Die Ergebnisse der Hochwasserspiegelanalyse zeigten, dass die Wasserspiegel eines hundertjährigen Hochwasserereignisses im ersten Szenario wie auch im zweiten Szenario nicht erhöht werden. Bei durchschnittlicher Sohlhebung um 80 cm (Szenario 1) verringert sich die Wasserspiegelhöhe des hundertjährigen Hochwassers um 1,34 m in Typ A, um 1,77 m in Typ B, und um 2,54 m in Typ C. Bei Szenario 2 (Umlagerung des gesamten Kieses innerhalb des Querprofils) beträgt die Absenkung immer noch 0,10 m in Typ A, 0,19 m in Typ B und 0,07 m in Typ C. Wie beschrieben, handelt es sich bei dem zweiten modellierten Szenario um ein theoretisches Szenario, das ein worst-case-Szenario für die Hochwasserspiegellagen darstellt.

Durch die Maßnahmen ist gemäß dieser Analyse eine Verbesserung für den Hochwasserschutz zu erwarten, da man von einer Absenkung der Hochwasserspiegellagen ausgehen kann.

7. ERGÄNZENDE ANALYSEN ZUR MASSNAHMENWIRKUNG

Es wurde in Kapitel 6.2.2 festgestellt, dass die Geschiebetransportkapazität und somit der Geschiebebedarf zur Stabilisierung der Sohle mit der Größe der Maßnahme sinkt. Diesen Geschiebebedarf kann man nun dem in D.T1.3.1 abgeschätzten Materialgewinn bei der Maßnahmenumsetzung gegenüberstellen (Tabelle 11). Größere Maßnahmenumsetzungen, besonders jene für Typ C, stellen größere Mengen an Geschiebe für die Geschiebedotation zur Verfügung, die gleichzeitig aufgrund einer kleineren Geschiebetransportkapazität langsamer ausgetragen werden.

Tabelle 11. Materialgewinn aus Initialmaßnahmen der Maßnahmentypen.

Maßnahmentyp	Kubaturen der Materialbewegungen (m ³ pro Kilometer Flusslänge)	Geschiebebedarf (m ³)
0	0	44691
A	100000	40558
B	135000	30859
C	275000	19754

Aus dem Verhältnis zwischen den in den verschiedenen Maßnahmentypen gewonnenen Kubaturen zum jeweiligen Geschiebebedarf lässt sich eine Wirkungsdauer der Maßnahmen errechnen (Abbildung 78). Demnach hätte eine Umsetzung gemäß Typ C die längste Wirkung: Eine Umsetzung der Maßnahme des Typs C über einen Kilometer würde den Geschiebebedarf eines gesamten Typ-C-Abschnitts von bis zu ca. 14 Jahren decken, während bei Typ 0 kein Material gewonnen wird und von Beginn an ca. 45000 m³ pro Jahr an Geschiebe zugeliefert

oder zum Teil durch verbesserte Durchgängigkeit von flussauf zur Verfügung gestellt werden müssten.

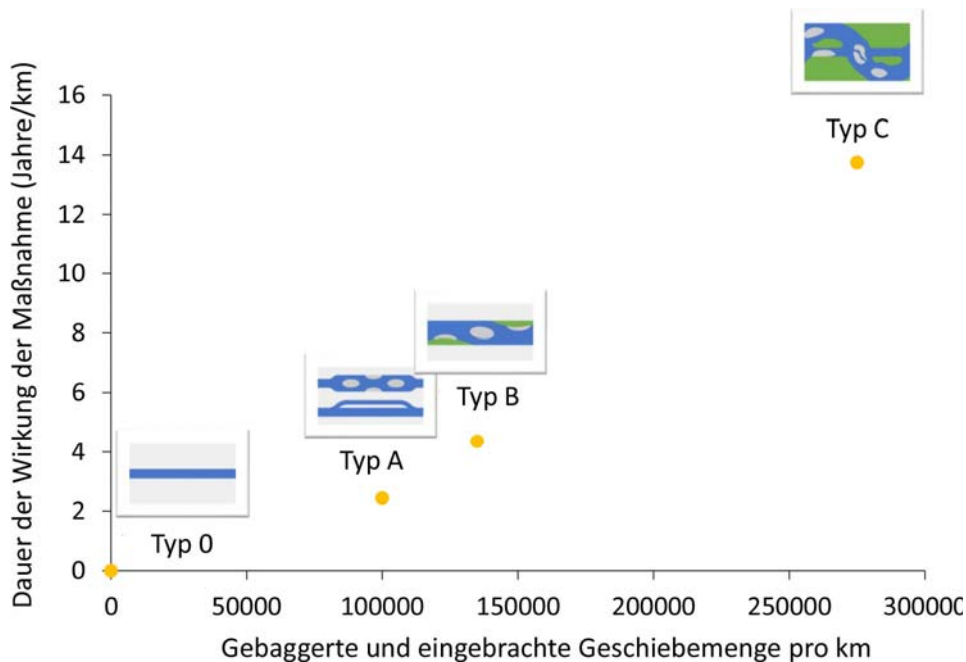


Abbildung 78. Wirkungsdauer des Sediments aus einem Kilometer Baumsetzung als Zugabe in einen Abschnitt des jeweiligen Maßnahmentyps.

Im Wechselspiel mit der Zugabe ist in den Jahren nach der Maßnahmenumsetzung in Typ A, B und C die Entstehung höherer Sohlagen zu erwarten, die den neuen Rahmenbedingungen entsprechen. Ein entsprechender Materialbedarf zur Entwicklung dieser neuen Sohlhöhen wurde in der Errechnung der Wirkungsdauer nicht berücksichtigt. Auch wurde der Feinsedimentanteil, welcher nicht bettbildend ist, nicht von den einzubringenden Kubaturen abgezogen. Das Ausmaß dieser Anteile wäre bei den Maßnahmenumsetzungen gesondert zu ermitteln.

Eine längere Wirkungsdauer des eingebrachten Geschiebes in größeren Maßnahmen macht sich auch bemerkbar, wenn man die Transportgeschwindigkeiten von Sediment in den unterschiedlichen Maßnahmentypen analysiert. Klösch und Habersack (2018) verwendeten Tracerversuche von Habersack et al. (2013) für eine Analyse der Geschiebegeschwindigkeiten zweier Korngrößen an der Grenzmur. Aus diesen Ergebnissen wurde für die gegenständliche Untersuchung eine Formel für die Geschiebegeschwindigkeit an der Grenzmur abgeleitet. Die Maßnahmentypen wurden durch Trapezgerinne mit den für die Typen charakteristischen Breiten nachgebildet, und die auftretenden Sohlschubspannungen berechnet. Basierend auf der Geschiebegeschwindigkeit hätte aus dem Vorland gewonnenes Zugabematerial der Korngröße 24,8 mm (entspricht für die Formelanwendung einer b-Achsenlänge von 28 mm) in Typ 0 im Zeitraum seit Umsetzung der Maßnahme Gosdorf ca. 33 km zurückgelegt, in Typ A nur ca. 16 km, in Typ B ca. 6 km und in Typ C nur ca. 2400 m (Abbildung 79a). Aus diesen Werten ergibt sich für die Länge des Grenzmurabschnitts eine Aufenthaltszeit dieser Korngröße von ca. 13 Jahren bei aktueller Gerinnegeometrie, während sich die Aufenthaltszeit bei Typ A, B und C auf 26 Jahre, 73 Jahre bzw. 175 Jahre erhöhen würde.

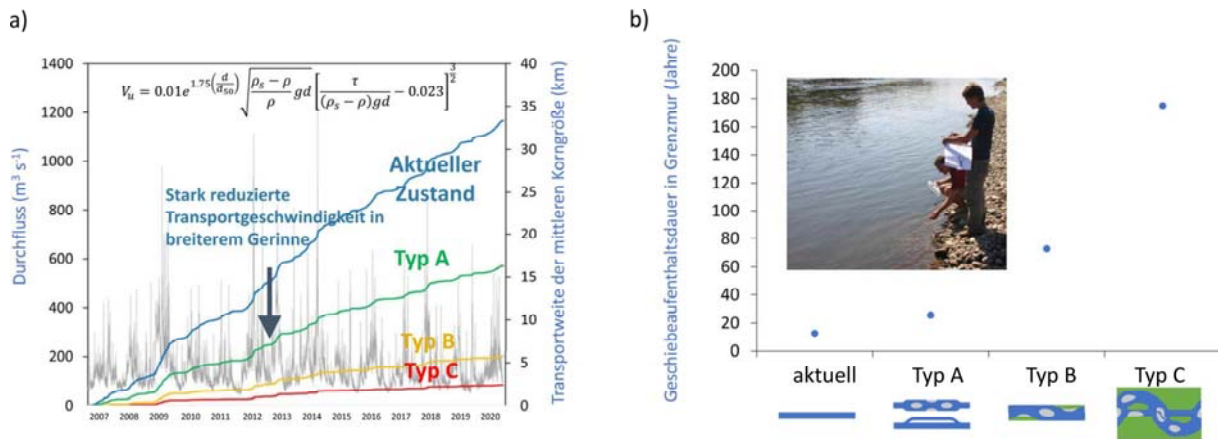


Abbildung 79. Aufenthaltsdauer von Geschiebe in den verschiedenen Maßnahmentypen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Geschiebetransport in der aktuellen Geometrie und dem Geschiebetransport in den aufgeweiteten Varianten ist der Austausch von Sedimenten durch morphodynamische Prozesse. Während das Geschiebe in der aktuellen Geometrie das Gerinne ohne Interaktion mit dem Umland durchwandert, erlauben größere Gerinnebreiten einen Austausch von Sediment an einer Stelle, bei gleichzeitiger Erosion an anderer Stelle (Abbildung 80). Besonders wenn Ufererosion und damit auch seitliche Verlagerungen zugelassen werden, wird Sediment über längere Zeiträume zwischengespeichert. Durch das ständige Umarbeiten der Sohle wird Entwicklungen wie starker Deckschichtbildung oder auch der Kolmation entgegengewirkt.

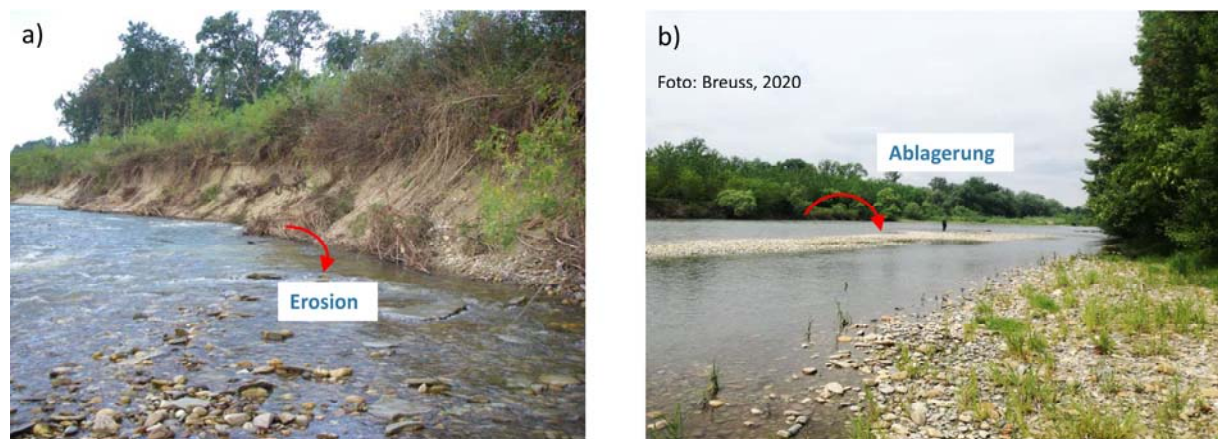


Abbildung 80. Lateraler Sedimentaustausch in renaturierten Maßnahmenabschnitten mit Geschiebedotation durch Ablagerung von Sediment. a) Ufererosion bei Gosdorf, b) Ablagerung einer Kiesbank bei Sieldorf, das vom in Gosdorf eingebrachten Sediment, aber auch von Sediment aus der Sohlerosion flussauf profitierte.

Die soeben ermittelte Wirksamkeit der Maßnahmen lässt sich aufgrund ihrer ökonomischen Bedeutung auch als Geschiebeeffizienz bezeichnen. In Abbildung 81 ist diese Geschiebeeffizienz zusammenfassend dargestellt, bestehend aus der Wirkungsdauer und der Aufenthaltszeit des Geschiebes in der Grenzmur. Mit zunehmender Maßnahmengröße wird mehr Material für eine Zugabe verfügbar. Zusammen mit der verringerten Transportkapazität

erhöht sich die Wirkungsdauer der Maßnahme. Die verringerte Transportkapazität wird auch durch die längere Aufenthaltsdauer von Geschiebe in der Grenzmur ersichtlich.

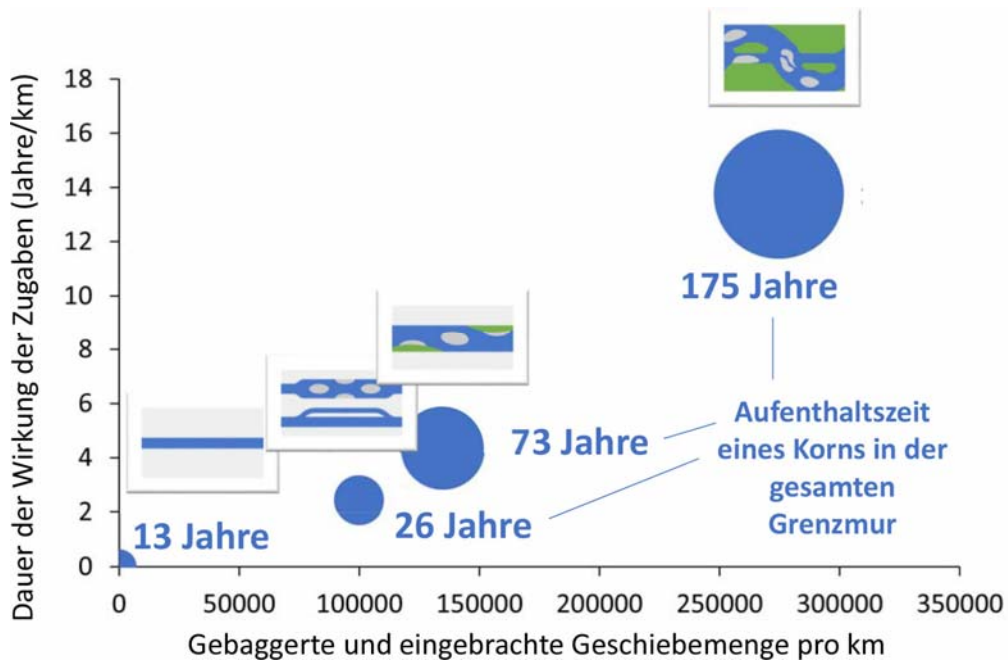


Abbildung 81. Geschiebeeffizienz der verschiedenen Maßnahmenvarianten dargestellt durch die Wirkungsdauer des Sediments aus einem Kilometer Bauumsetzung als Zugabe in einen Abschnitt des jeweiligen Maßnahmentyps und die Aufenthaltsdauer eines transportierten Korns in der Grenzmur bei Umsetzung des jeweiligen Maßnahmentyps entlang der gesamten Grenzmur.

8. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Grenzmur, einst ein Fluss der sich auf bis zu sieben nebeneinander verlaufende Gerinne aufteilte und eine Breite von bis zu 1,2 km erreichte, wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts systematisch reguliert. Die Breite wurde auf durchgehend 76 m eingeeengt, der Lauf durch Durchstiche begradigt und die Ufer durchgehend gesichert. Zusätzlich wurde schon kurz danach, am Ende des 19. Jahrhunderts, an der Mur mit dem Bau von Kraftwerken begonnen, die zusammen mit Wildbachsperrren die Sedimentkonnektivität unterbrachen.

Die Regulierung hatte durch die Verbauung unmittelbare ökologische Auswirkungen, hatte aber zusammen mit der erhöhten Geschiebetransportkapazität im Gerinne und mit dem Rückhalt des Geschiebes im Einzugsgebiet auch zur Folge, dass sich der Zustand durch Sohleintiefung für die Ökologie zunehmend verschlimmerte. Zudem wirkte sich die Sohleintiefung auch auf die menschlichen Nutzungen entlang der Grenzmur, wie auch auf die Stabilität der Regulierungsbauwerke selbst negativ aus. Zu guter Letzt droht noch die geringmächtige Kiesschicht mit einem vollständigen Verlust des Kiesbetts und einem Sohdurchschlag in das feinere Tertiär.

Gegenmaßnahmen, die im Sinne des im Jahr 2001 fertiggestellten Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts umgesetzt wurden, zeigten vorerst eine stabilisierende Wirkung. Da aber aufgrund des vernachlässigbaren Geschiebeeintrags von flussauf im Aufweittingsabschnitt bei Gosdorf nur wenig Aufweittingsdruck gegeben war und nur wenig Geschiebe eigendynamisch aus den Ufern eingetragen wurde, hielt die Wirkung der Maßnahme kürzer an als erwartet. Eine im Zuge dieser Erhebungen aktualisierte Analyse der Sohlhöhenentwicklung an der Grenzmur zeigte, dass die Sohleintiefung nach kurzer Stabilisierung unerwartet rasch wiedereinsetzte. Aktuell befindet sich die mittlere Höhe der Sohle unter dem Niveau vor der Umsetzung der Gegenmaßnahmen. Aus dem nun noch geringeren Abstand zum Tertiär sowie aus dem insgesamt noch höheren Druck auf die Biodiversität leitete sich ein dringender Handlungsbedarf zur Stabilisierung der Sohlhöhen ab.

Anhand von Abschätzungen wurde der Raumbedarf für eine natürlichere Morphologie ermittelt. Durch Gegenüberstellung mit der in D.T1.3.1 erstellten Raumwiderstandskarte wurden in weiterer Folge drei Maßnahmentypen definiert, die der unterschiedlichen Raumverfügbarkeit entlang der Grenzmur Rechnung tragen. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Geschiebebedarf zur Stabilisierung der Sohlhöhen mit zunehmender Maßnahmengröße sinkt. Als Schlüsselparameter für die Maßnahmenwirkung wurden dabei die Gerinnebreite und das Gerinnegefälle identifiziert und in der Entwicklung der Maßnahmentypen angesprochen. Die Maßnahmentypen beinhalten eine Verbreiterung des Gerinnes von aktuell ca. 76 m auf ca. 150 m bei begrenzter Länge (Typ A) oder über große Längen auf ca. 220 m (Typ B), sowie einer Zurverfügungstellung eines gesamten Korridors, innerhalb dessen die Mur sich frei entwickeln kann (Typ C). Durch die zunehmende Sinuosität nimmt das Gefälle mit zunehmender Maßnahmengröße ab und sollte zusätzlich zur Breitenerhöhung sohlstabilisierend wirken (von aktuell 1,4 ‰ auf 1,2 ‰ in Typ C).

Für die verschiedenen Maßnahmentypen wurden Geländemodelle erstellt, in welchen numerische Analysen der Hydrodynamik und des Sedimenttransports durchgeführt wurden.

Die Simulationen einer gekoppelten Modellanwendung eines 3D-hydrodynamisch-numerischen Modells und eines mehrdimensionalen Sedimenttransportmodells bestätigten die stabilisierende Wirkung der Maßnahmen und wiesen für den aktuellen Zustand mit ca. 45000 m³ Geschiebe pro Jahr den größten Geschiebebedarf aus. Durch die Maßnahmen würde der Geschiebebedarf gemäß errechneter Geschiebetransportkapazität auf ca. 41000 m³ in Typ A, auf ca. 31000 m³ in Typ B und auf ca. 20000 m³ in Typ C reduziert werden. Die mithilfe eines dreidimensionalen Modells simulierten Verteilungen der Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und der Sohlschubspannung lassen zudem erwarten, dass mit zunehmender Maßnahmengröße der ökologische Benefit durch heterogenere Verteilungen der Größen steigt und dieser Benefit in Typ C am größten ist. Auch die Modellierung der Morphodynamik weist darauf hin, dass die morphologische wie auch die ökologische Wirkung mit der Maßnahmengröße zunehmen.

Zusätzlich zur Reduktion des Geschiebebedarfs ist für die Instandhaltung der Maßnahmen auch relevant, dass bei der Maßnahmenumsetzung Material aus Aushubarbeiten gewonnen wird, das der Mur zugegeben werden kann. Bei Typ C wird am meisten Material verfügbar, bei dem gleichzeitig kleinsten Geschiebebedarf. Während beim Maßnahmentyp 0 (aktuelle Geometrie mit ausreichender Geschiebezugabe) sofort mit einer jährlichen Zugabe von ca. 45000 m³ begonnen werden müsste, hätte man mit Typ C aufgrund der Materialgewinnung aus den Umbauarbeiten pro Kilometer Umsetzung einen Zeitgewinn von bis zu 14 Jahren, bis man mit einer jährlichen Zugabe von nur 20000 m³ aus anderer Quelle fortsetzen müsste. Im Wechselspiel mit der Zugabe wird sich über die Zeit eine neue Sohlhöhe ergeben. Welcher Anteil des Materials zur Bildung einer neuen Sohlhöhe benötigt wird, muss erst festgestellt werden. Langfristig wird eine verbesserte Durchgängigkeit von flussauf aus dem Einzugsgebiet angestrebt, dabei ist die Wirkung der soeben angepassten Betriebsordnung der Kraftwerke flussab von Graz noch abzuwarten und zu erfassen. Bei eventuellen Änderungen an der Wehranlage Ceršak muss darauf geachtet werden, die Durchgängigkeit für Geschiebe gewährleisten zu können.

Eine unterschiedliche Geschiebeeffizienz in den Maßnahmentypen wurde auch durch eine Analyse der Transportgeschwindigkeiten verdeutlicht, wonach die Maßnahmen die Transportgeschwindigkeit des Geschiebes reduzieren und somit die Aufenthaltszeit des Geschiebes in der Grenzmauer erhöhen. Vertikale und laterale Konnektivität des Sediments lassen einen erhöhten Sedimenttausch erwarten, der die charakteristischen Erscheinungen einer sich eintiefenden Sohle, wie starke Deckschichtbildung und Kolmation, verhindert. Besonders im Maßnahmentyp C sorgt regelmäßige Morphodynamik durch ein ausbalanciertes Verhältnis von Erosionen an einer und Anlandungen an anderer Stelle für eine kontinuierliche Bereitstellung von Habitatvielfalt.

Die Umsetzung der Maßnahmen des Typs C zwischen Gosdorf und Radkersburg sollte zeitlich prioritär behandelt werden. Damit würde der Bereich mit der größten Sohleintiefung und mit am Beginn des Abschnittes gleichzeitig einem Abstand zum Tertiär von weniger als 0,5 m stabilisiert und morphologisch verbessert werden. Gleichzeitig würde sie für den flussauf anschließenden Abschnitt, in welchem die Eintiefung den Abstand zum Tertiär ebenso bereits stark verringerte, eine wirkungsvolle Stützfunktion ausüben.

9. LITERATUR

Ahmari H, Da Silva AM (2011): Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan, *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 718-727.

ATV-DVWK (2003). Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, Deutschland.

Austria-Forum (2021). https://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Damals_in_der_Steiermark/Wie_Graz_unter_Strom_kamm,abgefragt am 27.9.2021.

Biedenham DS, Copeland RR, Thorne CR, Soar PJ, Hey RD, Watson CC (2000). *Effective Discharge Calculation: A Practical Guide*. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Washington DC.

Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, pp. 325-354.

Crosato, A., and Mosselman, E. (2009), Simple physics-based predictor for the number of river bars and the transition between meandering and braiding, *Water Resour. Res.*, 45, W03424, doi:[10.1029/2008WR007242](https://doi.org/10.1029/2008WR007242).

Da Silva, A M (1991): Alternate bars and related alluvial processes. Thesis of master science, Queens University Kingston, Ontario Canada.

Europäische Kommission (2000). Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik

Egiazaroff, I.V. (1965). Calculation of nonuniform sediment concentration. *J. Hydraulics Div. ASCE* 91(HY4), 225–247.

Geofoto (2017). Flussquerprofilaufnahmen in der Grenzmurstrecke, km 95,0 – 130,7, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Raumplanung (Slowenien), und des Amts der Steiermärkischen Landesregierung.

Habersack H, Aigner J, Rindler R, Schwarz S, Tritthart M (2021). Geschiebemessungen an Drau & Isel, Messperiode 2018 -2019. Im Auftrag des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien.

Habersack H., Hornich R., Klösch M. (2008): Flussaufweitung an der Grenzmur - ein Beitrag zur Sohlstabilisierung. Internationales Symposium Neue Anforderungen an den Wasserbau 2008, Zürich, Switzerland, 11.09.2008 - 12.09.2008 In: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Neue Anforderungen an den Wasserbau; ISSN 0374-0056

Habersack H, Nachtnebel HP, Hengl M, Poppe M, Schneider J, Fazarinc R (2001a). Flussbau. Endbericht des Themenbereichs 1.5 des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts für die

Grenzmur – Phase I, im Auftrag der Ständigen österreichisch-slowenischen Kommission für die Mur.

Habersack H, Nachtnebel HP, Hengl M, Poppe M, Schneider J, Fazarinc R (2001b). Flussmorphologie. Endbericht des Themenbereichs 1.4 des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts für die Grenzmur – Phase I, im Auftrag der Ständigen österreichisch-slowenischen Kommission für die Mur.

Habersack H, Klösch M (2012). Monitoring und Modellierung von eigendynamischen Aufweitungen an Drau, Mur und Donau. *Österr Wasser- und Abfallw* 64, 411–422 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00506-012-0007-9>

Habersack H, Klösch M, Blamauer B (2013). Geschiebetransport und Seitenerosion an der Grenzmur. WP 3.1: Geschiebe- und Schwebstoffmonitoring, EU Interreg SI-AT Projekts DRA-MUR-CI.

Habersack H, Laronne JB (2002). Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on Helley-Smith sampling in an Alpine gravel bed river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 484-499.

Habersack, H.-M., Schneider, J., 2000. Ableitung und Analyse flussmorphologisch relevanter Parameter von historischen Karten. *Wasser & Boden*, 52. Jg., 6/2000, S. 55–S. 59.

Hengl H, Habersack H, Nachtnebel HP, Schneider J, Hunziker R, Mikos M (2001). Geschiebetransportmodell. Endbericht des Themenbereichs 1.6 des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts für die Grenzmur – Phase I, im Auftrag der Ständigen österreichisch-slowenischen Kommission für die Mur.

Hengl M (2004). Processes in river morphology and extreme floods, paper presented at Conference FloodRisk of the Austrian Ministry of Agriculture, For., Environ. and Water Management, Vienna.

Hochenburger F (1894): Darstellung der in der Periode 1874 - 1891 durchgeführten Arbeiten der Mur-Regulierung in Steiermark. Bearbeitet über Auftrag des k.k. Ministeriums des Innern, 119 S., Wien

Hunziker, R.P. (1995). Fraktionsweiser Geschiebetransport (Bedload transport in size fractions). VAW Mitteilung 138, ETH Zürich, Switzerland.

Hunzinger, L.M. (1998): Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung, Mitteilung Nr. 159 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

Jungwirth M, Zauner G, Pinka P, Hinterhofer M, Holzer G, Krusnik C, Melcher A, Povz M, Schlager E, Unfer G, Wiesner C, Zitek A (2001). Fischbestand Mur. Endbericht des Themenbereichs 2.1 des Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepts für die Grenzmur – Phase I, im Auftrag der Ständigen österreichisch-slowenischen Kommission für die Mur.

Klösch M, Hornich R, Baumann N, Puchner G, Habersack H (2011). Mitigating Channel Incision via Sediment Input and Self-Initiated Riverbank Erosion at the Mur River, Austria

In: Bennett S. J., Castro J. M., Simon A., Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools 194; American Geophysical Union; ISBN 978-0-87590-483-2

Klösch M, Blamauer B, Habersack H (2015). Intra-event scale bar–bank interactions and their role in channel widening. *Earth Surf. Process. Landforms*, 40, 1506– 1523. doi: [10.1002/esp.3732](https://doi.org/10.1002/esp.3732).

Klösch M, Habersack H (2018) Deriving formulas for an unsteady virtual velocity of bedload tracers. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43: 1529– 1541. doi: [10.1002/esp.4326](https://doi.org/10.1002/esp.4326).

Klösch M, Bertrand M, Boz B, Carolli M, Chouquet I, Dunst R, Egger G, Fragola G, Gaucher R, Gmeiner Ph, Goltara A, Hauer C, Holzapfel P, Humar N, Langendoen EJ, Javornik L, Liébault F, Maldonado E, Marangoni N, Molnar P, Pessenlehner S, Pusch M, Recking A, Rossi D, Rozman D, Šantl S, Stephan U, Habersack H (2019a). D.T2.3.1. Technical notes on tools to support planning and design of hydromorphological management and restoration measures, Work Package 2, EU-Interreg Alpine Space Projekt HyMoCARES.

Klösch M, Pessenlehner S, Dunst R, Langendoen EJ, Liébault F, Goltara A, Aigner J, Reeb F, Bertrand M, Habersack H (2019b). D.T2.2.1. Technical note on a multi-scale framework for assessing the hydromorphological conditions of rivers.

Klösch M, Dunst R, Habersack H (in Vorbereitung). Sediment balance and transport study. Deliverable D.T1.2.3 in Work Package 2 des Projekts lifelineMDD, Danube Transnational Programme DTP3-308-2.3, EU-Interreg.

Lamprecht O (1953): Die Wüstungen im Raume Spielfeld - Radkersburg. Veröffentlichungen der Historischen Landeskommission für Steiermark, 24. Band, 64 S., Graz

Marti C, Bezzola GR (2009). Bed Load Transport in Braided Gravel-Bed Rivers. In Braided Rivers (eds I. Jarvis, G. H. Sambrook Smith, J. L. Best, C. S. Bristow and G. E. Petts). doi:10.1002/9781444304374.ch9

Meyer-Peter E, Müller R (1948). Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd IAHR Congress, Stockholm, 39–64.

Mosley, M. P. (1981). Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, South Island, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6(2), 127–137. doi:10.1002/esp.3290060206.

Mueller ER, Pitlick J (2014). Sediment supply and channel morphology in mountain river systems: 2. Single thread to braided transitions, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, 1516–1541, doi:10.1002/2013JF003045.

Nanson GC, Knighton AD (1996). Anabranching rivers: Their cause, character and classification. *Earth Surf. Process. Landforms*, 21: 217-239. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199603\)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U)

- Nujic M. 1998. Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen. Mitteilungen des Institutes für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München: Munich; Nr. 62.
- Osman, A. M., and Thorne, C. R. (1988). "Riverbank stability analysis. I: Theory." *J. Hydraul. Eng.*, 114(2), 134-150.
- Parker G, Wilcock PR, Paola C, Dietrich WE, and Pitlick J (2007), Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers, *J. Geophys. Res.*, 112, F04005, doi:10.1029/2006JF000549.
- Schumm SA (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 13:1, 5-27
- Shields A (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Doktorarbeit an der Technischen Hochschule Berlin.
- Ständige Österreichisch-Slowenische Kommission für die Mur (2001). Wasserwirtschaftliches Grundsatzkonzept Grenzmur – Phase 1, Wien.
- Tremel F (1946): Schifffahrt und Flößerei auf der Mur. Jahresbericht des Akademischen Gymnasiums in Graz, Schuljahr 1945/46, S. 3-52, Graz
- Tritthart, M. (2005). Three-dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhedral finite volumes. *Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer*, Technische Universität Wien, Bd. 193.
- Tritthart, M., Schober, B., Liedermann, M., Habersack, H. (2009). Development of an Integrated Sediment Transport Model and its Application to the Danube River. *Proc. 33rd IAHR Congress*, Vancouver, Canada, 876-883.
- Tritthart M, Liedermann M, Schober B, Habersack H (2011). Non-uniformity and layering in sediment transport modelling 2: river application, *Journal of Hydraulic Research*, 49:3, 335-344, DOI: [10.1080/00221686.2011.583487](https://doi.org/10.1080/00221686.2011.583487)
- Van Rijn, L.C. (1984). Sediment transport 1: Bed load transport. *J. Hydraulic Eng.* 110(10), 1431–1456.
- Verbund (2015). Anpassung der Betriebsweise bei Hochwasser – Murkraftwerke Mellach bis Spielfeld. Technischer Bericht.
- Wagner B, Hauer C, Schoder A, Habersack H (2015). A review of hydropower in Austria: Past, present and future development. *RENEW SUST ENERG REV.* 2015; 50: 304-314
- Wong M, Parker G (2006). Re-analysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(11): 1159– 1168

www.gomurra.eu



Interreg 
SLOVENIJA – AVSTRIJA
SLOWENIEN – ÖSTERREICH
Evropska unija | Evropski sklad za regionalni razvoj
Europäische Union | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Projektpartner



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
DIREKCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA VODE



 **Bundesministerium**
Landwirtschaft, Regionen
und Tourismus



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE



Das Projekt goMURra (SIAT250) wird im Rahmen des Kooperationsprogramms Interreg V-A Slowenien-Österreich vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert