



BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

BAW



**Untersuchung der Auswirkung von Maßnahmen
im Elbevorland auf die Strömungssituation
und die Flussmorphologie am Beispiel der
Erosionsstrecke und der Rückdeichungsbereiche
zwischen Wittenberge und Lenzen**

- Schlussbericht -

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|--------------|
| 1 Zielstellung und Untersuchungsmethodik | 1 |
| 2 Struktur des Forschungsprojektes, Veröffentlichungen und Berichte, Bearbeiter und Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 5 |
| 3 Voraussetzungen | 9 |
| 3.1 Erosionsstrecke der Elbe | 9 |
| 3.2 Deichrückverlegung bei Lenzen | 10 |
| 3.3 Charakterisierung der zu untersuchenden Grundszenarien | 12 |
| 4 Allgemeine Fragestellungen | 14 |
| 4.1 Entwicklungsziele | 14 |
| 4.2 Untersuchungsrelevante Durchflüsse | 15 |
| 4.3 Vergleich von ausufernden Durchflüssen in unterschiedlichen Untersuchungsräumen | 20 |
| 4.4 Alternative Formen der Ergebnisdarstellung | 23 |
| 5 Eindimensionale Modelle am Beispiel der Feststofftransportmodelle der Erosionsstrecke der Elbe | 27 |
| 5.1 Allgemeines | 27 |
| 5.2 Modelltopografie | 27 |
| 5.3 Hydrologische Daten | 29 |
| 5.4 Morphologische Daten | 30 |
| 5.4.1 <i>Eigenschaften des Sohlenmaterials</i> | 30 |
| 5.4.2 <i>Eintrag von Geschiebe- und Schwebstoffmengen</i> | 31 |
| 5.5 Modellkalibrierung | 33 |
| 5.5.1 <i>Hydraulische Kalibrierung</i> | 33 |
| 5.5.2 <i>Sedimentologische Kalibrierung</i> | 34 |
| 5.6 Ausblick | 40 |
| 6 Zweidimensionale Modelle | 41 |
| 6.1 Modell in der Erosionsstrecke bei Klöden | 41 |
| 6.1.1 <i>Modellbeschreibung</i> | 41 |
| 6.1.2 <i>Untersuchte Varianten</i> | 43 |
| 6.1.3 <i>Ergebnisse</i> | 45 |
| 6.1.4 <i>Schlussfolgerungen</i> | 48 |
| 6.2 Modell der Rückdeichung bei Lenzen | 50 |
| 6.2.1 <i>Modellbeschreibung</i> | 50 |
| 6.2.2 <i>Untersuchte Varianten</i> | 52 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6.2.3 | <i>Ergebnisse</i> | 53 |
| 6.2.4 | <i>Zusammenfassung</i> | 59 |
| 7 | Aerodynamische Modelle | 60 |
| 7.1 | Aerodynamische Modelle mit variabler Überhöhung | 60 |
| 7.2 | Aerodynamisches Modell in der Erosionsstrecke bei Klöden | 65 |
| 7.3 | Aerodynamisches Modell bei Lenzen | 71 |
| 8 | Hydraulisches Modell bei Mockritz/Döbern | 78 |
| 8.1 | Modellbeschreibung | 78 |
| 8.2 | Varianten | 79 |
| 8.3 | Ergebnisse | 81 |
| 8.4 | Schlussfolgerungen | 85 |
| 9 | Modellvergleiche | 86 |
| 9.1 | Vergleich von Modellen im Bereich Klöden | 87 |
| 9.2 | Vergleich von Modellen im Bereich der Rückdeichung Lenzen | 91 |
| 9.3 | Vergleich von Modellen mit Vorlandrinnen und Deichrückverlegung | 94 |
| 10 | Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen im Forschungsprojekt | 97 |
| 10.1 | Erosionsstrecke | 97 |
| 10.2 | Deichrückverlegung | 99 |
| 10.3 | Erfahrungen bei der interdisziplinären Zusammenarbeit und beim Einsatz verschiedener Modellarten | 100 |
| 11 | Bibliografie | 101 |
| 12 | Glossar (Endnoten) | 106 |

Abbildungsverzeichnis

| | Seite |
|---|--------------|
| Abb. 1.1: Übersicht der Untersuchungsgebiete | 2 |
| Abb. 1.2: Lage der kleinen und mittelgroßen Modelle in der Erosionsstrecke | 4 |
| Abb. 1.3: Modelle mit mittelgroßem Untersuchungsbereich zur Rückdeichung Lenzen | 5 |
| Abb. 3.1: Analyse der Sohleneintiefung an Hand von Geometriepeilungen und von auf Q_{GIW} normierten Wasserspiegelfixierungen (Darstellung der Differenzen bezogen auf 1961-65 bzw. 1959) | 9 |
| Abb. 4.1: Ermittlung des „bettbildenden Durchflusses“ für Torgau (BfG, Außenstelle Berlin) | 17 |
| Abb. 4.2: Ermittlung des „bettbildenden Durchflusses“ für Wittenberg (BfG, Außenstelle Berlin) | 18 |

| | | |
|------------|---|----|
| Abb. 4.3: | Vergleich der Anteile der Vorländer am Gesamtdurchfluss im Querschnitt | 20 |
| Abb. 4.4: | Veränderung der Vorlandanteile am Gesamtdurchfluss zwischen 60er und 90er Jahren (El-km 163-197) | 21 |
| Abb. 4.5: | Veränderung der mittleren Durchflussanteile für El-km 163 bis 197 von Flussbett und Vorländern zwischen 1960er und 1990er Jahren (60er Jahre = 100%) | 22 |
| Abb. 4.6: | Beispielhafte Darstellung des Strömungscharakters eines Gebietes: Summe der Teilflächen im Untersuchungsgebiet, die bei definierter Wassertiefe mit einer bestimmten Geschwindigkeit überströmt werden) | 23 |
| Abb. 4.7: | Bühnenvarianten im Bereich des zweiseitigen Ausbaus, Elbe-km 162,0 bis 162,4 | 25 |
| Abb. 4.8: | Veränderung der Oberflächengeschwindigkeit durch Bühnenabsenkung (Modell Mockritz-Döbern) | 26 |
| Abb. 4.9: | Häufigkeit der Geschwindigkeitsklassen bei ausgewählten Varianten des hydraulischen Modells Mockritz-Döbern | 26 |
| Abb. 5.1: | Im Modell angesetzte und aus Geschiebemessungen ermittelte geschiebeführende Sohlenbreiten | 29 |
| Abb. 5.2: | Ganglinien, bestehend aus täglichen Abflusswerten und aus über verschieden lange Zeiträume gemittelten Abflüssen | 30 |
| Abb. 5.3: | Im Modell verwendete charakteristische Kornverteilungen | 31 |
| Abb. 5.4: | Geschiebetransport-Abfluss-Beziehung an der Messstelle Mühlberg | 32 |
| Abb. 5.5: | Schwebstofftransport-Abfluss-Beziehung an der Messstelle Mühlberg | 32 |
| Abb. 5.6: | Im Modell vorgegebene abflussabhängige Kornverteilungskurven des eingetragenen Geschiebematerials | 33 |
| Abb. 5.7: | Differenz zwischen den zu verschiedenen Zeitpunkten fixierten und den für die 1960er-Flussbettgeometrie berechneten Wasserspiegeln | 34 |
| Abb. 5.8: | Gleitende Schnitte der beobachteten und berechneten Änderungen der mittleren Sohlenhöhe in der Erosionsstrecke der Elbe zwischen 1961 und 1993 | 38 |
| Abb. 5.9: | Beobachtete und berechnete Wasserspiegeldifferenzen (um 130 m ³ /s) | 39 |
| Abb. 5.10: | Jährliche Frachten an Geschiebe, suspendiertem Sand und Feinschwebstoffen in der Erosionsstrecke der Elbe | 39 |
| Abb. 6.1: | Vergleich der Modellausdehnungen des 2D-HN- und des AD-Modells | 43 |
| Abb. 6.2: | Vergleich der Wasserspiegeldifferenzen in der Flussachse | 47 |
| Abb. 6.3: | Differenz der Strömungsgeschwindigkeiten bei Rückdeichung und Istzustand | 48 |
| Abb. 6.4: | Differenz der Strömungsgeschwindigkeiten im Flussschlauch bezogen auf den Istzustand | 49 |
| Abb. 6.5: | Untersuchte Linienführungen der Deichrückverlegung bei Lenzen | 51 |
| Abb. 6.6: | Modellnetz, Bewuchszonen und Rauheitsbereiche | 52 |
| Abb. 6.7: | Berechnete Geschwindigkeitsverteilung für HQ _{3,5} bei großer Rückdeichung | 54 |
| Abb. 6.8: | Fließgeschwindigkeiten im Bereich zwischen den bestehenden Deichen bei HQ _{3,5} | 55 |
| Abb. 6.9: | Anteil der Schlitze am Vorlandabfluss bei großer Rückdeichung | 57 |
| Abb. 6.10: | Wasserspiegel in Flussachse und Rückdeichungsbereich bei Variante 33 | 57 |
| Abb. 6.11: | Flächenanteile der Geschwindigkeits- und Wassertiefenklassen im Rückdeichungsbereich bei mittlerer Rückdeichung, HQ _{3,5} | 58 |
| Abb. 6.12: | Uferlinien bei mittlerer Rückdeichung | 59 |
| Abb. 7.1: | Nebelfluidinjektion bei El-km 481,9 zur Strömungssichtbarmachung im Luftmodell | 62 |

| | | |
|------------|--|----|
| Abb. 7.2: | Vertikale Geschwindigkeitsverteilung in Natur und im Luftmodell | 63 |
| Abb. 7.3: | Querschnittsdarstellung bei variabler zusätzlicher Überhöhung | 63 |
| Abb. 7.4: | Blick auf das Luftmodell „Klöden“ | 65 |
| Abb. 7.5: | Foto des Luftmodells „Erosionsstrecke“ (Gipsoberfläche, ohne Farbanstrich) | 67 |
| Abb. 7.6: | Sichtbarmachung der Sohlstromlinien mit Anstrichverfahren für Variante 1A – Deichrückverlegung (oben) und Istzustand (unten) | 68 |
| Abb. 7.7: | Linien gleicher Geschwindigkeiten für Variante 6 (Buhnenabsenkung) und Variante 5 (Buhnenabsenkung und kleine Uferabgrabung) sowie Nullzustand | 70 |
| Abb. 7.8: | Vergleich Variante 3 (große Uferabgrabung) und Nullzustand | 71 |
| Abb. 7.9: | Luftmodell Lenzen mit eingeebener Geschiebesohle | 72 |
| Abb. 7.10: | Geländemodell des Luftmodells Lenzen für den Nullzustand (aus Laserabstandsmessung) | 73 |
| Abb. 7.11: | Sohle des Geschiebekoffers nach dem Langzeitversuch für den Nullzustand | 74 |
| Abb. 7.12: | Sohle des Geschiebekoffers nach dem Versuch mit geschlitztem Deich | 75 |
| Abb. 7.13: | Sohle des Geschiebekoffers nach dem Versuch ohne Deich | 75 |
| Abb. 7.14: | Vergleich der mittleren Sohle im bereich der beweglichen Sohlenbreite im AD-Modell Lenzen | 76 |
| Abb. 7.15: | Vergleich der Entwicklung der mittleren Sohlen bezogen auf die Prognose für 15 Jahre im Nullzustand bei feuchter Ganglinie | 77 |
| Abb. 8.1: | Hydraulisches Modell mit eingebauten Flutrinnen | 78 |
| Abb. 8.2: | Grundriss des Modells mit Lage der Untersuchungsvarianten | 79 |
| Abb. 8.3: | Untersuchte Maßnahmen im Querschnitt | 80 |
| Abb. 8.4: | Ausschnitt der verzweigten Rinne des rechten Vorlandes | 82 |
| Abb. 8.5: | Isotachenpläne für Istzustand und Varianten mit Buhnenmodifikation | 83 |
| Abb. 8.6: | Vertikale Geschwindigkeitsverteilung bei $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$ | 84 |
| Abb. 9.1: | Vergleich der Wasserspiegel in der Flussachse bei Klöden | 88 |
| Abb. 9.2: | Vergleich von 2D- und AD-Modell | 89 |
| Abb. 9.3: | Fließgeschwindigkeiten für den Nullzustand aus 2D-HN-Modell bei $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ | 90 |
| Abb. 9.4: | Wasserspiegeldifferenzen im Flussbett zwischen großer Deichvariante und Nullzustand aus langen 1D- und 2D-HN-Modellen bei HQ_{20-25} | 92 |
| Abb. 9.5: | Anteile des rechten Vorlandes am Gesamtdurchfluss für El-km 481,9 im Vergleich verschiedener Modelle und Varianten | 93 |
| Abb. 9.6: | Vergleich des ermittelten Wasserspiegelabsinks für verschiedene Modelle bei großer Rückdeichung | 94 |

Tabellenverzeichnis

| | Seite |
|---|--------------|
| Tab. 1.1: Im Forschungsprojekt eingesetzte Modellarten | 3 |
| Tab. 1.2: Eingesetzte Modelle in den zwei Untersuchungsgebieten | 4 |
| Tab. 2.1: Modelle für die Untersuchungen in der Erosionsstrecke der Elbe | 6 |
| Tab. 2.2: Modelle für die Untersuchungen im Rückdeichungsbereich | 6 |
| Tab. 4.1: Untersuchungsrelevante Durchflüsse | 16 |
| Tab. 4.2: Durchfluss bei Geschiebepositionsbeginn in den Untersuchungsräumen | 19 |
| Tab. 4.3: Vergleich von Wasserspiegel und mittleren Geschwindigkeiten im Flussschlauch | 22 |
| Tab. 4.4: Liste der jeweiligen Anteile an der Gesamtfläche (12,3 km ²), die bei definierter Fließtiefe mit bestimmter Geschwindigkeit überströmt werden | 24 |
| Tab. 6.1: Durchflüsse am Bezugspegel Torgau | 44 |
| Tab. 6.2: Durchfluss und Geschwindigkeit im Referenzprofil b (Abb. 6.3) bei El-km 190 | 45 |
| Tab. 6.3: Maximaler Wasserspiegelabsenk in der Flussachse | 46 |
| Tab. 6.4: Durchfluss und Geschwindigkeit im Referenzprofil c) bei El-km 188,5 | 47 |
| Tab. 6.5: Parameter der untersuchten Rückdeichungsgebiete | 50 |
| Tab. 6.6: Modellnetze | 51 |
| Tab. 6.7: Anteile des Gesamtabflusses für das Rückdeichungsgebiet | 54 |
| Tab. 6.8: Mittlere und maximale tiefengemittelte Geschwindigkeiten in den Schlitten | 56 |
| Tab. 7.1: Vergleich von aerodynamischem und hydraulischem Modell | 61 |
| Tab. 7.2: Besonderheiten aerodynamischer Modelle im Vergleich mit hydraulischen Modellen | 61 |
| Tab. 7.3: Parameter der im Forschungsprojekt eingesetzten Luftmodelle | 64 |
| Tab. 8.1: Im hydraulischen Modell untersuchte Durchflüsse | 79 |
| Tab. 9.1: Nutzung verschiedener Modellarten bei Klöden | 87 |
| Tab. 9.2: Tabellarischer Vergleich der mittelgroßen Modelle mit Rückdeichung | 96 |
| Tab. 9.3: Tabellarischer Vergleich der mittelgroßen Modelle mit Vorlandrinnen | 97 |

8 Hydraulisches Modell bei Mockritz/Döbern

8.1 Modellbeschreibung

Die Entwicklung einer Maßnahmenkombination zur Erosionsminderung erfordert je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Modellarten. Für die Ermittlung räumlich hoch aufgelöster Strömungsparameter sind gegenständliche Modelle unverzichtbar. Daher wurde von der BAW im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Dresden und im Rahmen der Elbe-Ökologie-Forschung des BMBF ein hydraulisches Modell betrieben, welches die Elbe zwischen den Deichen von km 160,2 bis 164,0 abbildete. Die Untersuchungsstrecke ist eine Doppelkrümmung 5 km nördlich von Torgau, ein für die Erosionsstrecke typischer Abschnitt, der allerdings vergleichsweise schmale Vorländer und enge Krümmungen aufweist. Am Beispiel dieser Strecke sollte eine Maßnahmenkombination für Bereiche entwickelt werden, in denen Deichrückverlegungen nicht möglich sind.



Abb. 8.1: Hydraulisches Modell mit eingebauten Flutrinnen

Das hydraulische Modell wurde als überhöhtes Modell mit fester Kiessohle im Längenmaßstab 1:66 $\frac{2}{3}$ und im Höhenmaßstab 1:40 aufgebaut. Bei einer Breite von 10 bis 14 m betrug die Gesamtlänge des Modells 52 m, die Fließlänge auf Grund der Doppelkrümmung 57 m. Abb. 8.1 zeigt einen Blick in Fließrichtung auf das Modell bei $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$, einem Durchfluss mit einer Überschreitungshäufigkeit von 60 Tagen im Jahr (Jahresreihe 1936/95). Dies ist der Durchfluss, bei dem die Durchströmung der im Rahmen der Untersuchung angelegten Rinnen auf dem rechten Vorland beginnt. Die Untersuchungsdurchflüsse mit Natur- und Modellgrößen sind in Tab. 8.1 angegeben. Das untere Durchflussspektrum fasst die Durchflüsse bis zum langjährigen mittleren Durchfluss, $Q = 328 \text{ m}^3/\text{s}$, zusammen. Als oberes Durchflussspektrum wurde der Bereich von $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ bezeichnet.

| Bezeichnung | Naturdurchfluss a. P. Torgau [m ³ /s] | Modelldurchfluss [l/s] |
|---------------------------|---|---------------------------|
| Q_{GIW} | 135 | 8 |
| | 183 | 11 |
| MQ 1980/91 | 328 | 19 |
| $\overline{60} Q$ 1936/95 | 580 | 34 |
| HQ ₂ | 1220 | 72 |
| HQ ₅ | 1800 | 106 |

Tab. 8.1: Im hydraulischen Modell untersuchte Durchflüsse

Wegen räumlicher Begrenzungen der Laborhallen ist ein gegenständliches Modell nur für wenige Flusskilometer realisierbar. Um die großräumigen und langfristigen Auswirkungen der untersuchten Maßnahmen zu ermitteln, wurde begleitend ein eindimensionales hydrodynamisch-numerisches Feststofftransportmodell betrieben [HIRSCHAUER, 1999 und 2000]. In diesem ließ sich auch die Reaktion der Sohle auf die Maßnahmen berechnen. Das hydraulische Modell wurde bereits in [GOCHT, 1997], [BAW, 1998c und 1999b] vorgestellt. Ein detailliertes Gutachten liegt vor [BAW, 2000a], ergänzend ist ein Bericht [GOCHT, 2000] geplant. Die Aufstellung der Veröffentlichungen ist Kap. 2 zu entnehmen.

8.2 Varianten

Abb. 8.2 zeigt die Lage der untersuchten Varianten im Grundriss. Es wurden Maßnahmen an der Flusssohle, an den Buhnen und im Vorland untersucht. Die Art der Eingriffe skizziert Abb. 8.3.

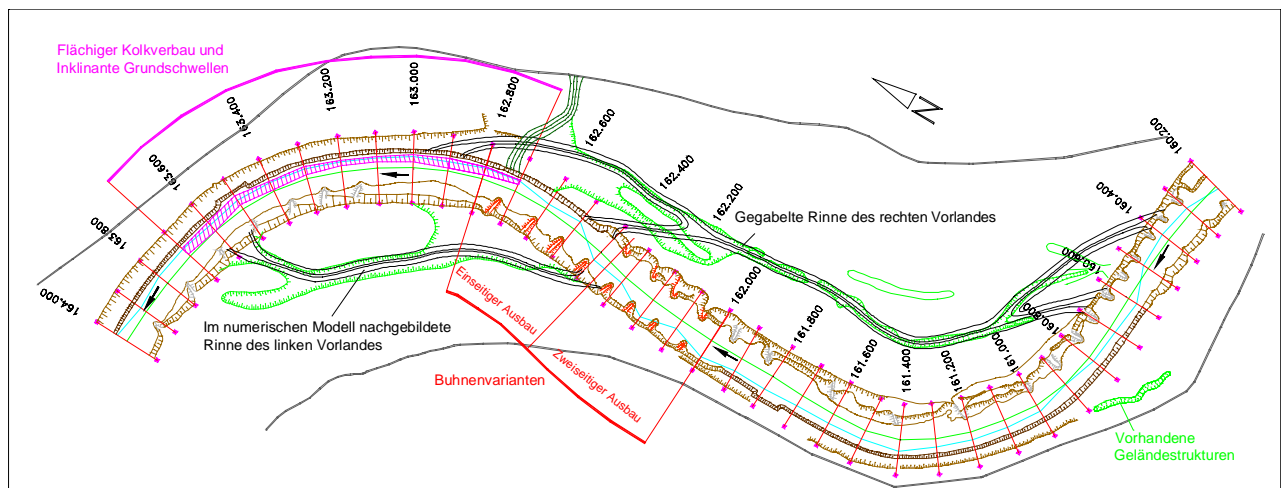


Abb. 8.2: Grundriss des Modells mit Lage der Untersuchungsvarianten

Maßnahmen an der Sohle:

Von Elbe-km 162,7 bis 163,7 wurde ein flächiger Kolkverbau der Linkskrümmung untersucht. Im selben Bereich wurde geprüft, ob sich die Sekundärströmung der Krümmung bei den gegebenen geometrischen Verhältnissen durch inklinante Grundswellen verringern lässt. Die Verbauhöhe betrug dabei für den flächigen Kolkverbau $GLW_{89}*(20d)^F - 2,4$ m, für die Grundswellen $GLW_{89}*(20d) - 2$ m.

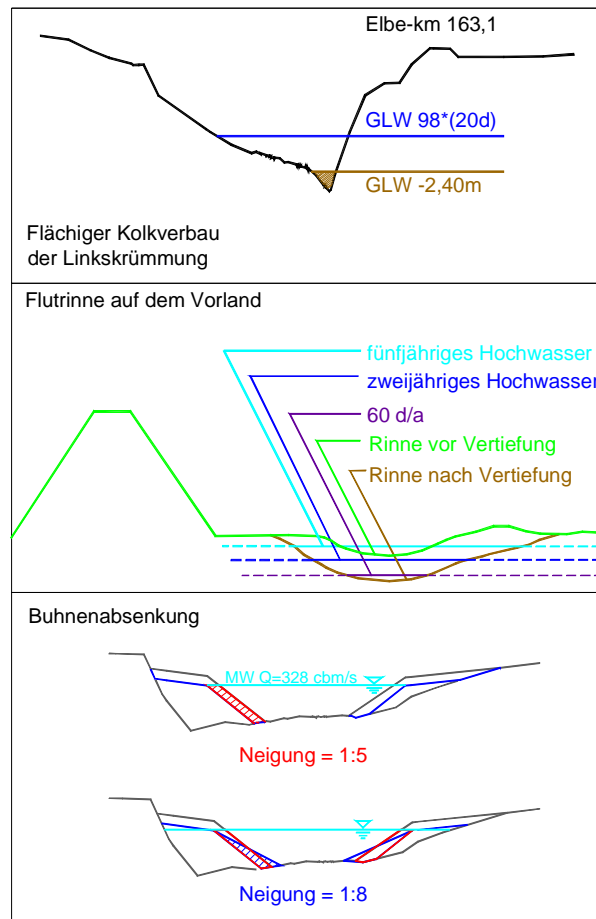


Abb. 8.3: Untersuchte Maßnahmen im Querschnitt

Maßnahmen im Vorland:

Die Anlage von Flutrinnen auf den Vorländern sollte das Mittelwasserbett entlasten. Die Sohle der Rinnen lag auf dem Niveau des Mittelwasserdurchflusses, $Q = 328 \text{ m}^3/\text{s}$ (Jahresreihe 1980/91), da eine Verschlechterung der Schiffahrtsverhältnisse im unteren Durchflussspektrum vermieden werden sollte. Die Regelung des Zulaufs erfolgte durch eine oberstromige Schwelle auf MW+1m, wodurch sich ein naturnaher Beginn des Einströmens von Unterstrom gewährleisten ließ. Abb. 8.2 zeigt, dass sich die Linienführung und die Anordnung von verzweigten Zu- und Ausläufen an den vorhandenen Geländestrukturen orientierte. Die möglichst große Fließlänge der Rinnen verhinderte eine Laufverkürzung im Hochwasserfall; die verschränkte Anordnung der Aus- und Zuläufe aufeinander folgender Rinnen verminderte Querströmungen, die die Schifffahrt behindern könnten. Der Zulauf der unterstromigen Rinne kam oberhalb des Auslaufes der oberstromigen Rinne zu liegen.

Modifikation der Buhnen:

An den Buhnen wurden Variationen der Höhe und Neigung untersucht: Da sie erosionsbedingt derzeit ca. einen Meter über den Mittelwasserspiegel ragen, eine aufwendige Verfüllung der gesamten Stromsohle zur Anhebung des Wasserspiegels aber nicht sinnvoll und möglich ist, wurden die Buhnen um einen Meter abgesenkt. Um eine Aufweitung des Niedrig- und Mittelwasserbettes zu vermindern, erhielt der Buhnenkopf eine von 1:5 auf 1:8 veränderte Böschungsneigung. Eine Zwischenvariante mit variabler Neigung des Buhnenkopfes (vorne 1:8, seitlich 1:5) erwies sich als Vorzugsvariante.

8.3 Ergebnisse

Die **Maßnahmen an der Sohle** (Kolkverbau und Grundswellen) veränderten die Strömungsverhältnisse bei Abflüssen bis Mittelwasser, also im Bereich häufiger und kleiner Abflüsse (unteres Durchflussspektrum). Oberstrom der Maßnahme war immer ein deutlicher Aufstau mit Fließgeschwindigkeits- und damit Erosionsminderung zu beobachten. Im Bereich und Unterstrom der Maßnahme erhöhten sich die Fließgeschwindigkeiten und das Wasserspiegelgefälle und damit auch das Erosionspotenzial, was zu einer Kolkbildung am Verbauende führen kann. Veränderungen der Stromsohle stellen im Rahmen der Erosionsminderung weniger eigenständige, großräumig einsetzbare, als vielmehr ergänzende Maßnahmen zur Sohlsicherung z.B. bei tiefen Kolken oder begleitend zu einem Flutrinneneinbau dar.

Rinnen auf den Vorländern können keine flächige Vorlandüberströmung initiieren, die bei naturnahen, mitteleuropäischen Flüssen etwa beim zweijährigen Hochwasser beginnt. Da aber ein flächenhafter Abtrag der Vorländer um ca. 1,5 m nicht realisierbar ist, stellen Rinnen ökologisch wertvolle Ersatzstrukturen zur Erhöhung von Strömungsdynamik und –diversität dar. Die Vorländer werden früher und häufiger am Durchflussgeschehen beteiligt als ohne Rinnen. Verzweigte Zu- und Ausläufe führten beim Anspringen zu vielfältigen Fließrichtungswechseln in den Rinnen; waren sie durchströmt, erhöhten sie die Vielgestaltigkeit der Strömungsprozesse. Querströmungen im Bereich der Rinneneinmündungen konnten nicht beobachtet werden.

Die hydraulische Wirkung der Rinnen auf den Flussschlauch setzte erst im oberen Durchflussspektrum ein. Ihre stärkste Wirkung entwickelten sie im Bereich ab dem zweijährigen Hochwasser, $Q = 1220 \text{ m}^3/\text{s}$, also bei seltenen und großen Abflüssen. Abb. 8.4 zeigt das Ergebnis einer videometrischen Messung der Oberflächengeschwindigkeiten: In einer Farbflächengrafik ist die Zunahme der Fließgeschwindigkeit mit dem Durchfluss in der verzweigten Rinne des rechten Vorlandes dargestellt (vergleiche Abb. 8.2). Ab dem fünfjährigen Hochwasser kann im Bereich zwischen den Verzweigungen auf Grund der Fließgeschwindigkeiten um 2 m/s mit einer eigenständigen morphologischen Entwicklung gerechnet werden. Die Verlandungsgefahr der Rinnen wurde nicht untersucht.

Die nicht verzweigte Rinne des linken Vorlandes wurde auch einzeln untersucht und im eindimensionalen Feststofftransportmodell nachgebildet. Die numerische Prognose unter Berücksichtigung der Sohlenreaktion zeigte eine langfristige Abnahme der Schubspannung im durch die Rinnen entlasteten Bereich des Flussbettes und führte zu einer geringfügigen Verringerung (um ca. 3 cm in 15 Jahren

zwischen km 162,4 und 163,6) der langfristigen Eintiefung. Allerdings kam es zu dieser verringerten Erosion durch Anlandungen im Maßnahmebereich während Hochwasserereignissen, bei denen die Rinnen beaufschlagt wurden. Dadurch stand für die in den Zeiten zwischen den seltenen Hochwassern ein „Polster“ für die weiter fortschreitende Erosion zur Verfügung. In der Praxis kann dieses „Polster“ ggf. aber nicht toleriert werden, wenn das Material nur kleinräumig abgelagert wird und dadurch nach dem Ablauf der Hochwasserwelle die notwendige Fahrwassertiefe nicht gewährleistet ist, so dass Baggerungen erforderlich werden.

Unterstrom der Rinnen ist im Flussbett mit verstärkter Erosion zu rechnen. Die numerische Prognose für die Rinnenvariante zeigte hier eine Zunahme der Eintiefung gegenüber der Prognose für den Istzustand um ca. 15 cm in 15 Jahren zwischen km 163,6 und 164,2. Diese Gefahr der kleinräumig zu starken Ablagerung oder Materialaufnahme könnte durch verzweigte Rinnenzu- und -ausläufe deutlich verringert werden.

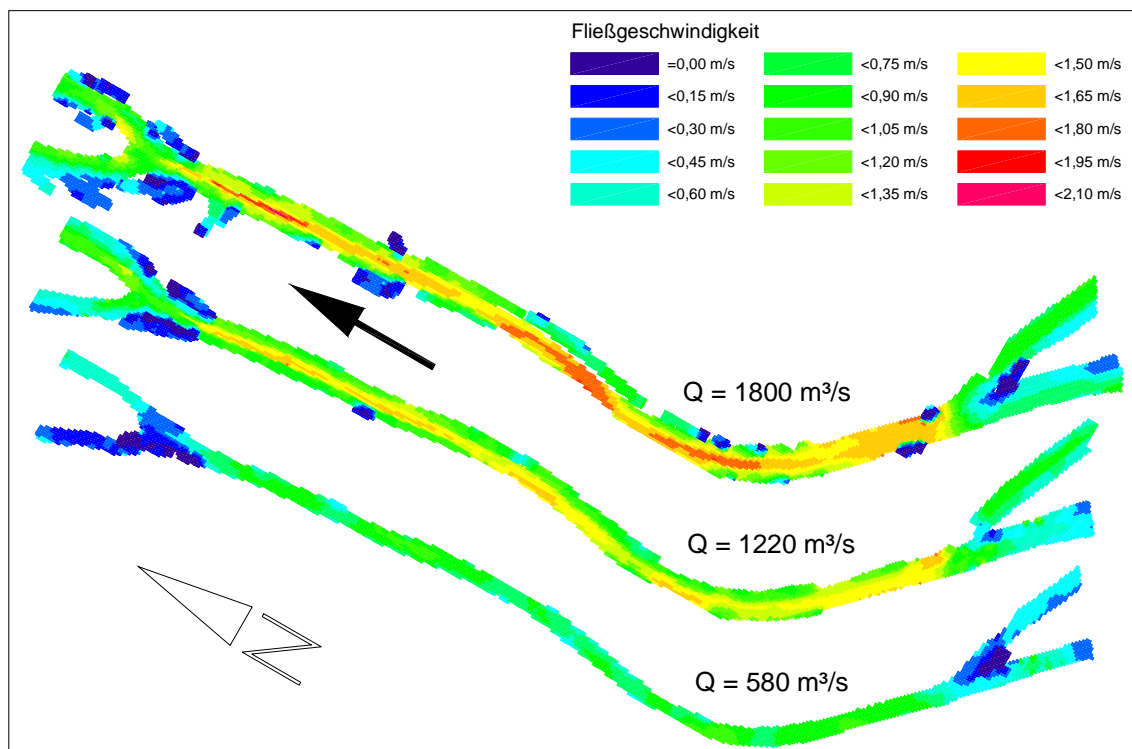


Abb. 8.4: Ausschnitt der verzweigten Rinne des rechten Vorlandes

Die Wirkung der **Buhnenmodifikation** ließ sich sowohl im unteren als auch im oberen Durchflussspektrum nachweisen. Bei einem Durchfluss $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$, der mit einer jährlichen Überschreitungsdauer von etwa 60 Tagen noch eine relativ große Häufigkeit aufweist, war ihre Wirkung am stärksten. Bild 5 zeigt einen Vergleich von Istzustand und Vorzugsvariante bei diesem Durchfluss. Dargestellt sind Isotachenpläne als Ergebnis einer Vielpunkt-Geschwindigkeitsmessung mit induktiv-magnetischem Messverfahren. Durch die Absenkung der Buhnen um 1 m entstanden über den Buhnenrücken Durchflussflächen von jeweils ca. 30 m^2 bei $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Zunahme der Durchflussfläche über den Buhnenrücken wurde bei diesem Durchfluss durch die Änderung der Kopfböschungsnei-

gung von 1:5 auf 1:8 teilweise kompensiert. Die Flächenabnahme betrug durch die flachere Kopfböschungeneigung von 1:8 rund 40 m². Der Wasserspiegelverfall durch die Flächenaufweitung um rund 9 % wurde so auf ca. 2 cm begrenzt.

Die Variantendarstellung weist den Erfolg der Maßnahme aus. Über den Bühnenrücken wurden links 15 m³/s, rechts wegen der geringeren Strömungsbelastung 11 m³/s abgeführt. Der Durchfluss im Hauptstrom sank dadurch um 5 %. Die Flächenaufweitung führte zu einer Verringerung der maximalen Fließgeschwindigkeiten um 0,2 m/s. Die mittlere Fließgeschwindigkeit sank von 1,4 auf 1,3 m/s.

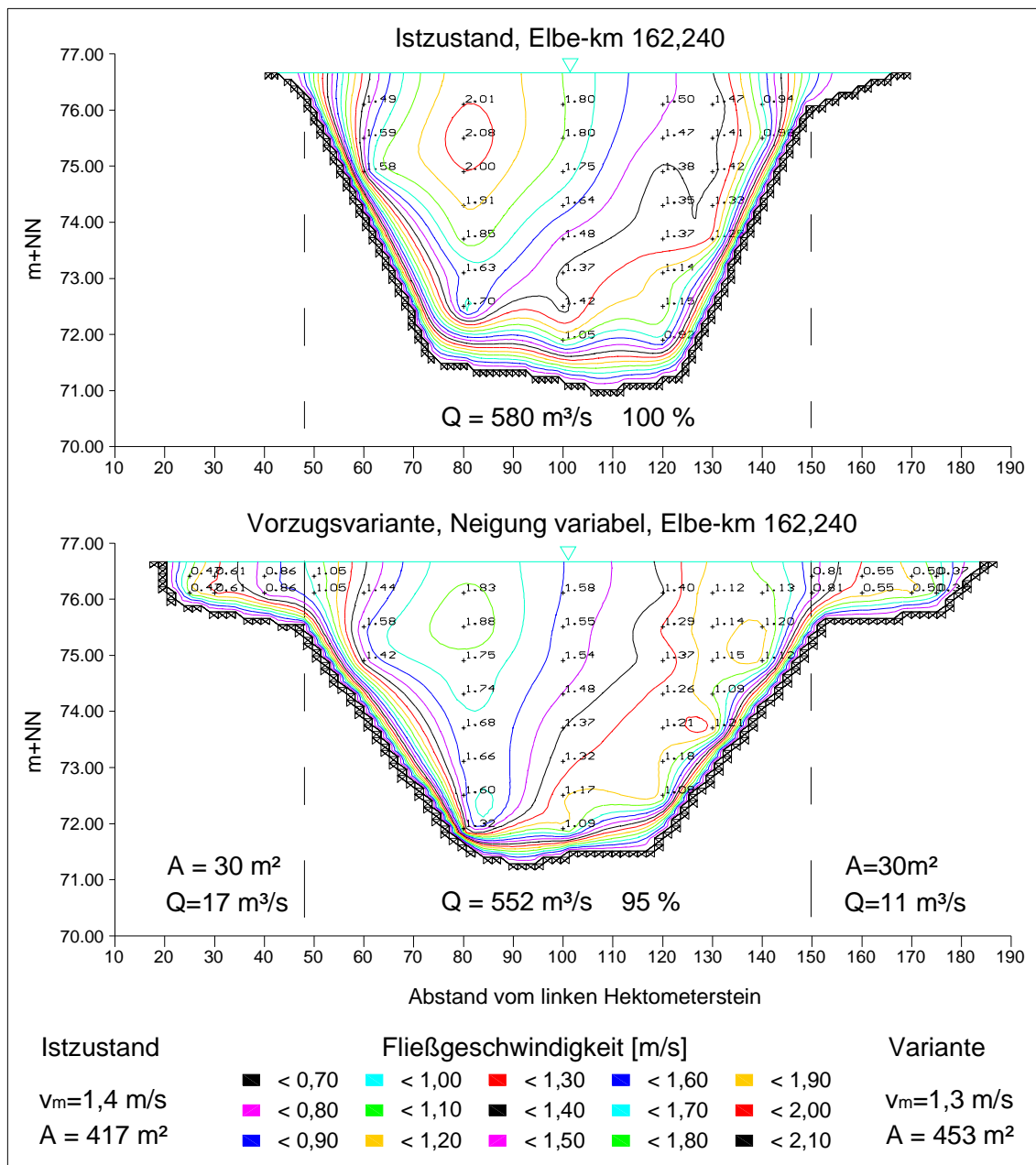


Abb. 8.5: Isotachenpläne für Istzustand und Varianten mit Bühnenmodifikation

Abb. 4.7 und Abb. 4.9 zeigen die Wirkung der Bühnenvarianten abgeleitet aus den mit videometrischer Methode gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten.

Die sohlnahe Schubspannung als Kriterium für die vom strömenden Wasser auf die Sohle ausgeübte Kraft wurde aus den in Abb. 8.6 oben dargestellten logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen abgeleitet. Sie wurden durch Messungen der sohlnahen Fließgeschwindigkeit mit einer Ultraschall-Sonde (Akustik Doppler Velocimetrie) gewonnen. Die für den Fahrrinnenbereich gemittelten sohlennahen Messpunkte sind in Abb. 8.6 oben eingetragen. Eine deutliche Schubspannungsminderung durch die Bühnenabsenkung konnte für $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$ nachgewiesen werden (Bild 6 unten). Die Auswertung ergab eine Verringerung der Schubspannung bei der Vorzugsvariante um 48 %. Ohne Abflachung der Neigung des Bühnenkopfes ließ sich eine Reduktion um 56 % erreichen. Da die Schubspannung proportional zum Geschwindigkeitsquadrat ist, fiel die Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit geringer aus: Sie sank von 1,4 m/s im Istzustand auf 1,3 m/s (Vorzugsvariante, mit Abflachung) und 1,2 m/s bei einheitlicher Neigung von 1:5.

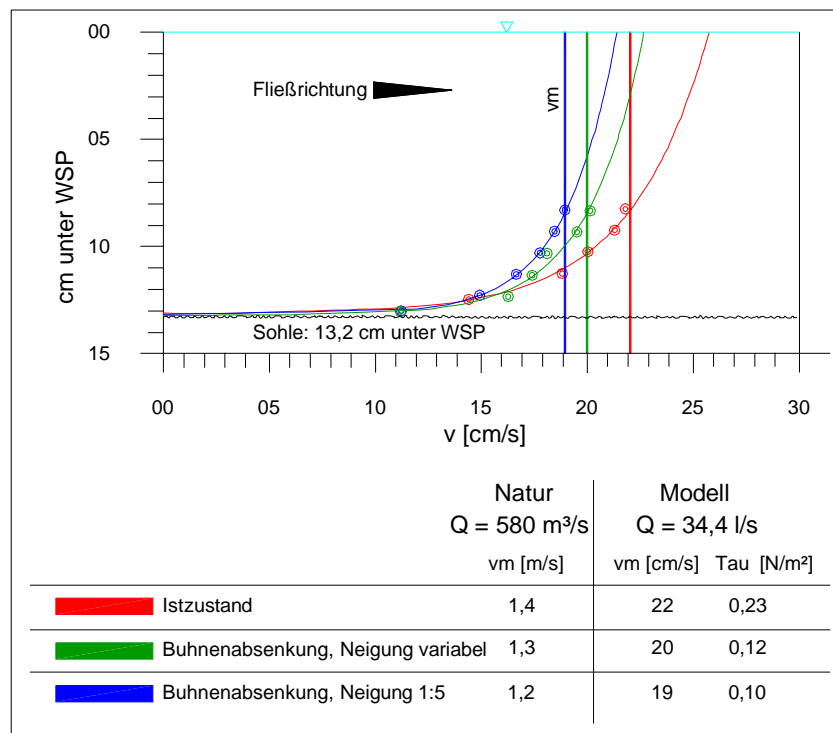


Abb. 8.6: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung bei $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$

Im Bereich der Maßnahme (km 162,0 bis 162,8) führt die Bühnenabsenkung im numerischen Feststofftransportmodell (mit Sohlenreaktion) zu einem Stillstand der Tiefenerosion. Nach 15 Jahren ist keine Eintiefung der Sohle festzustellen. Oberstrom (zwischen km 160,9 und 162,0) und unterstrom (zwischen km 162,8 und 163,4) der Maßnahme ist gegenüber der Prognose für den Istzustand mit einer stärkeren Eintiefung (um 3 bzw. 8 cm in 15 Jahren vergrößerte Eintiefung) zu rechnen.

Diese hinsichtlich der Erosionsminderung negativen Prognosen in den benachbarten Strecken der Bühnenabsenkung führten in einer früheren Prinzipuntersuchung mit großräumiger Absenkung der

Buhnen (ohne Modifikation der Buhnenneigung) zwischen km 140,3 und 163,4 [BAW 1998b] zur Schlussfolgerung, dass eine Buhnenabsenkung als durchgängig angewandtes Regelungsprinzip die Erosion nicht mindern kann. Durch die großräumige Buhnenabsenkung wurde der Wasserspiegel in der Gesamtstrecke abgesenkt. Bei Ausbau über lange Strecken hoben sich die grundsätzlichen Effekte

- geringerer Feststofftransport bis zu Durchflüssen bis zur früheren Ausuferungshöhe durch Vergrößerung der Fließquerschnitte und
- stärkere Erosion bei höheren Durchflüssen, da diese später (seltener) ausuferern

gegenseitig auf, bzw. die erosionsmindernden Effekte kamen durch die Wasserspiegelabsenkung nur eingeschränkt zum Tragen. Die aktuellen Untersuchungen zeigten allerdings, dass in sorgfältig ausgewählten relativ kurzen Streckenabschnitten (< ca. 2 km) unter der Voraussetzung, dass die benachbarten Strecken weniger erosionsgefährdet sind als das Maßnahmegebiet, Buhnenabsenkungen als lokale Maßnahme zur Erosionsminderung in den Entscheidungsprozess einbezogen werden können. Dabei ist die jeweils günstigste Art der Absenkung (z.B. mit Wiederherstellung oder Modifikation der Streichlinie, mit oder ohne Modifikation der Buhnenneigungen) entsprechend der Streckenbedingungen zu wählen. Durch diese Modifikationen kann auch auf die sonstigen Randbedingungen der Strecke (z.B. gewünschte Verringerung der Buhnenkopfkolk oder der Buhnenfeldverlandung) eingegangen werden. Bei der Ausführung einer Buhnenabsenkung ist die Notwendigkeit der Anpassung der an die Buhnenstrecken anschließenden Deckwerke zu prüfen.

8.4 Schlussfolgerungen

Die Absenkung der Buhnen hat sich kleinräumig bei geeigneten Randbedingungen als eine sinnvolle Maßnahme zur lokalen Verminderung der Sohlenerosion erwiesen. In den Untersuchungen wurden Buhnenabsenkungen jeweils unter Wiederherstellung der Sollstreichlinie realisiert. D.h. die über die angestrebte Normalbreite hinaus gehende Einengung der Wasserspiegelsbreite, die durch die bisher erfolgte Erosion aufgetreten ist (bei 1 m Eintiefung bei beidseitigem Buhnenverbau ca. 10 m Einengung), wurde damit beseitigt. Der Wasserspiegelverfall für Durchflüsse unter langjährigem MQ wurde durch Modifikation der Buhnenneigung kompensiert. Lokal können verschiedene Ausführungen der Buhnenabsenkung zweckmäßig sein. Die Anpassung an die benachbarten Deckwerksstrecken ist entsprechend der lokalen Gegebenheiten sorgfältig auszuführen.

Die Buhnenabsenkung in der untersuchten Ausführungsart ist – ebenso wie die Maßnahmen im Vorland – besonders in den Abschnitten der Erosionsstrecke der Elbe sinnvoll einsetzbar, in denen die Sohleintiefung im Wesentlichen durch höhere Durchflüsse (bei Buhnen Durchflüsse etwa über 2 MQ; bei Vorlandmaßnahmen, wenn die Rinnen anspringen) hervorgerufen wird. Das bedeutet, dass diese Maßnahmen im oberen Bereich der Erosionsstrecke eingesetzt werden können, wo das anstehende Sohlenmaterial erst bei höheren Durchflüssen durch den Strom bewegt wird (Angabe eines Bewegungsbeginnes in Form von Q_0 möglich – s. Kap. 4.2). Im unteren Bereich der Erosionsstrecke, in dem der langjährige mittlere Durchfluss als bettbildend anzusehen ist, muss bei geplanten Maßnahmen geprüft werden, ob lokal ggf. auf Grund der topografischen Verhältnisse höhere Durchflüsse die Erosi-

on anfachen. Wenn dies nicht der Fall ist, sollten Maßnahmen zur Erosionsreduzierung eingesetzt werden, die auch bei Durchflüssen unter 2MQ die Sohlenbelastung verringern. Lokal können das auch Bühnenabsenkungen sein, allerdings nur dann, wenn der mit der entsprechenden Ausführung der Absenkung (Wiederherstellung der Sollstreichlinie unter Beibehaltung der Bühnenneigung) einhergehende Wasserspiegelverfall auch bei Durchflüssen unter langjährigem MQ toleriert werden kann.

Beim Abtragen des alten Bühnenkörpers sollte eine Verbreiterung des Bühnenrückens in Kauf genommen werden, was beim weitgehenden Beibehalten des vorhandenen Bühnenkörpers naheliegend ist. Die Abflachung der Kopfböschungsneigung auf 1:8 führt zu einer Verbesserung der Fahrwassertiefe im Maßnahmenbereich. Falls auf Grund der aktuell ausreichenden Fahrwassertiefen leichte Wasserspiegelabsenkungen toleriert werden können, wie es z.B. im Untersuchungsgebiet der Fall ist, sollte die Böschungsneigung 1:5 beibehalten werden.

Unter ökologischen Gesichtspunkten ist zu berücksichtigen, dass ein Absenken der Bühnen auch bei gleichzeitiger Veränderung der Böschungen den Wasserstand um einige Zentimeter senkt und damit zum späteren Ausufernd im Maßnahmebereich führt, da ein größerer Durchflussanteil im Flussschlauch abgeführt werden kann als bisher. Als ergänzende Maßnahme kann deshalb ggf. eine Anordnung von Flutrinnen, die Abtragung von Uferreihen und die Wiederanbindung von Altarmen sinnvoll sein, da diese zu einer früheren Vorlanddurchströmung beitragen.

Kleine Rinnensysteme (Abflussanteil im Vorland $\leq 5\%$ bei HQ_2) lassen sich den Gegebenheiten des Geländes wesentlich besser anpassen als große (Abflussanteil $> 10\%$ bei HQ_2) und haben ebenfalls langfristig einen positiven Effekt ggf. ohne stark erosionsvergrößernde Auswirkungen in den benachbarten Strecken. Die negativen Begleiteffekte können durch Verzweigung der Rinnenein- und -ausläufe verringert werden.

Ein flächiger Kolkverbau eignet sich zur Behebung lokaler Schwachstellen (z.B. zum Verbau von Kolken, die die Standsicherheit von Bauwerken gefährden), nicht als großräumige Regelungsmaßnahme. Die verbaute Strecke ist durch das eingebrachte transportstabile Material gegen weitere Erosion zuverlässig geschützt. Unterstrom der verbauten Strecke ist mit einer verstärkten Erosion zu rechnen. Das Verbauniveau sollte möglichst tief gewählt werden.

Sowohl Bühnenabsenkung als auch Vorlandrinnen vermindern die Wasserspiegelhöhen im Hochwasserfall geringfügig und haben somit keine negativen Auswirkungen auf den Hochwasserschutz. Die Wirkung der untersuchten Sohlsicherungsmaßnahmen (Kolkverbau) auf die Wasserspiegelhöhe ließ sich nur bei Durchflüssen unter $Q = 580 \text{ m}^3/\text{s}$ nachweisen. Daher sind sie hochwasserneutral.