

**Versuchsstrecke mit technisch-biologischen
Ufersicherungen
Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer**

**Abschlussbericht der Monitoringphase
2012 bis 2017**

BAW-Nr. B3952.04.04.10151

BfG-Nr. 1677

31.08.2020

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung	1
2	Versuchsfelder	3
3	Teiluntersuchungen und wichtige Randbedingungen im Berichtszeitraum	7
3.1	Durchgeführte Teiluntersuchungen	7
3.2	Wichtige Randbedingungen	8
3.2.1	Wetter und Wasserstände	8
3.2.2	Porenwasserdruck	12
3.2.3	Hydraulische Uferbelastung	15
4	Ergebnisse hinsichtlich Standsicherheit und Vegetation	21
4.1	Gruppierung der Versuchsfelder	21
4.2	Neue Uferschutzmaßnahmen nach Rückbau der Steinschüttung (Versuchsfelder 2, 3, 5, 7)	21
4.2.1	Versuchsfelder 2 und 3 – M1 Weidenspreitlagen	21
4.2.2	Versuchsfeld 5 – M2 Röhrichtgabionen, M3 und M4, Steinmatratzen ohne bzw. mit Pflanzmatten	31
4.2.3	Versuchsfeld 7 – M5 Pflanzmatten auf Geotextilien, M6 Kokosgewebe über Nassansaat, M7 Röhrichtwalzen	38
4.3	Ökologische Aufwertungsmaßnahmen in der bestehenden Steinschüttung (Versuchsfelder 1, 4, 6, 8)	47
4.3.1	Versuchsfeld 1 – M8 Anlage senkrecht zum Ufer verlaufender Pflanzgräben, M9 Einbringen von Setzstangen, M12 Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie, M13 Einbau von Totholzstrukturen	47
4.3.2	Versuchsfeld 4 – M13 Einbau von Totholzstrukturen, M14 Aufbringen von kiesigem Substrat/Einzelstein-Gruppen	49
4.3.3	Versuchsfeld 6 – M10 Einbringen von Oberboden-Alginat, Ansaat durch Anspritzenverfahren, M11 Einpflanzung von Röhrichtbulten in die Steinschüttung	50
4.3.4	Versuchsfeld 8 – M12 Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie	51
4.4	Ohne Uferschutzmaßnahmen nach Rückbau der Steinschüttung (Versuchsfeld 9)	51
4.5	Zusammenfassende Bewertung der Standsicherheit der Maßnahmen	55
5	Ökologische Ergebnisse und Bewertung der Maßnahmen	59
5.1	Bewertung der ökologischen Wirksamkeit	59
5.2	Vegetationskundliche Ergebnisse und Bewertung	59
5.2.1	Methodische Hinweise	59
5.2.2	Sonderstandorte: Flachwasserzone und Heckenlagen	60
5.2.3	Artenreichtum	62
5.2.4	Diversität und Pflanzenmenge der unteren Böschungszone	65
5.2.5	Anteil heimischer und eingebürgerter (invasiver) Neophyten	66

5.2.6	Ufertypische Arten	67
5.2.7	Gefährdete und geschützte Pflanzenarten, Seltenheit	68
5.2.8	Böschungszonierung in Abhängigkeit von den hydrologischen Verhältnissen	71
5.2.9	Zusammenfassende Bewertung aus vegetationskundlicher Sicht	72
5.3	Faunistische Ergebnisse und Bewertung	74
5.3.1	Methodische Hinweise	74
5.3.2	Vögel	76
5.3.3	Reptilien	79
5.3.4	Laufkäfer	80
5.3.5	Spinnen	83
5.3.6	Makrozoobenthos	85
5.3.7	Fische	88
5.3.8	Zusammenfassende Bewertung aus faunistischer Sicht	91
5.4	Vegetation und Fauna – eine Synthese	94
5.4.1	Hintergrund	94
5.4.2	Laufkäfer und Vegetation	94
5.4.3	Avifauna, Reptilien und Vegetation	96
5.4.4	Blütenreichtum	96
5.4.5	Totholzeintrag	99
5.4.6	Weiden als Wirtspflanzen für spezialisierte Insekten	99
5.4.7	Zusammenfassende Synthese-Bewertung	100
5.5	Verwendung künstlicher und naturferner Materialien	103
5.6	CO ₂ -Speicherung der Bauweisen	104
5.7	Ökologische Gesamtbewertung	105
5.7.1	Ziele	105
5.7.2	Methoden	106
5.7.3	Bewertung	107
5.7.4	Fazit	109
6	Kosten	111
6.1	Herstellungskosten	111
6.2	Unterhaltungsaufwendungen	113
6.3	Bewertung	114
7	Gesamtbewertung der Versuchsfelder	117
8	Transfer gewonnener Erkenntnisse	123
8.1	Hintergrund und Bedarf	123
8.2	Methodik – Multikriterielle Entscheidungsanalyse	123
8.2.1	Kriterien	123
8.2.2	Szenarien	124
8.2.3	Skalierung	125
8.2.4	Paarweise Vergleiche – Erstellung von Vergleichsmatrizen	125

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

8.2.5	Ermittlung der Wichtungen	126
8.2.6	Ermittlung von Rangfolgen	127
8.3	Ergebnisse – Maßnahmeneignung für die Szenarien A bis E	127
8.3.1.	Szenario A	127
8.3.2	Szenarien B, C und D (Grenzwertbetrachtungen)	129
8.3.3	Szenario E	130
8.4	Fazit	131
9	Weiterführendes Monitoring	133
10	Zusammenfassung und Ausblick	135
	Literaturverzeichnis	139

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Lage der einzelnen Versuchsfelder (VF) (BAW, BfG, WSA-MA 2013)	3
Bild 2: Temperaturen (statistische Verteilung Tagesmaxima) der Jahre 2012 bis 2016	9
Bild 3: Monatsniederschläge 2011 (September und Oktober ganz links im Diagramm) bis 2016	10
Bild 4: Klimadiagramm nach Walter & Lieth (oben) und Darstellung der Trocken- und Feuchtperioden (unten)	11
Bild 5: Ganglinie der Wasserstände (Tagesmittelwerte) am Pegel Worms (PNP: 84,112 m ü NHN, DHHN2016/Höhenstatus 170; MW (Zeitraum 2009/2018) ≈ 200 cm, AZW ≈ MW)	12
Bild 6: Ergebnisse der Porenwasserdruckmesskampagnen	14
Bild 7: Prinzipielle Darstellung des Porenwasserüberdrucks im Boden bei Schiffsvorbeifahrt, Berechnungsformel nach (BAW 2011)	15
Bild 8: Längsprofile der gemessenen tiefengemittelten natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten in ca. 5 m-Uferabstand (Positive Werte in Fließrichtung des Rheins)	18
Bild 9: Übersicht: Entwicklung Weidenspreitlagen im VF 3 – 4/2012 (links), 7/2012 (Mitte), 7/2017 (rechts) (Fotos: BAW)	23
Bild 10: Befall junger Weidentriebe mit Pappel-Seide in VF 2, 8/2016 (links); lokal abgestorbene Triebe, 8/2016 (rechts) (Fotos: Katja Behrendt, BfG)	23
Bild 11: Zustand VF 2 kurz nach Rückschnitt am 10.4.2015 (links) und am 11.5.2015 (rechts) (Fotos: BAW)	24
Bild 12: Einmaß Querprofil km 440,845 (VF 2, großflächiger Rückschnitt) – gelb hinterlegt: Erodierter Bereich im Zeitraum 04/2012 bis 01/2019	26
Bild 13: Einmaß Querprofil km 440,925 (VF 3, kleinräumiger Rückschnitt) – gelb hinterlegt: Erodierter Bereich im Zeitraum 04/2012 bis 01/2019	26
Bild 14: Freigelegte Wurzeln der Weiden im VF 3 (Fotos: BAW)	28
Bild 15: Scherfestigkeitserhöhung des Bodens in Abhängigkeit von der Wurzelrockenmasse (Eisenmann 2015)	29
Bild 16: Im Labor ermittelter Bodenrückhalt unterschiedlich alter Weidenspreitlagen (Sokopp 2017)	30
Bild 17: Entwicklung der Gabionen, von links: 07/2012 – 07/2013 – 07/2017 (mit einer Steinlage saniertes Zustand) (Fotos: BAW)	33
Bild 18: Röhrichtgabionen am 10.11.2015, senkrechte Kante durch Steinverlagerungen innerhalb der Gabionen (Fotos: BAW)	34
Bild 19: Einmaß Querprofil km 441,100 (VF 5b, Steinmatratzen von MW – 0,5 m bis GOK)	36
Bild 20: VF 5b – Steinmatratzen, in der oberen Böschungshälfte gut bewachsen, in der unteren nahezu ohne Bewuchs (2.7.2015) (Foto: BAW)	37
Bild 21: Zustand Steinmatratzen (20.6.2018) (Foto: BAW)	37
Bild 22: Schäden im unteren Böschungsbereich 5/2012 (links), saniertes Zustand 7/2017 (Mitte); gute Entwicklung im oberen Böschungsbereich (rechts) 7/2017 (Fotos: BAW)	40

Bild 23:	Freigelegte Wurzeln in den Untersuchungsfeldern U1 und U2 (Pflanzmatten, Filtermatten nicht mehr vorhanden) (Heinzner 2017b)	42
Bild 24:	Freispülen der Wurzeln im Untersuchungsfeld U3, rechts: freigelegte Wurzeln im Untersuchungsfeld U4 (Fotos: BAW)	43
Bild 25:	Einmaß Querprofil km 441,240 (VF 7a, Kokosmatte über Nassansaat von MW +1,70 m bis GOK)	44
Bild 26:	Böschungsverformungen nach Überstau im VF 7a oben (22.3.2012) (Foto: BAW)	45
Bild 27:	Vegetationsentwicklung nach Sanierung im VF 7a oben (4.10.2013) (Foto: BAW)	45
Bild 28:	links: Größte Schadstelle im VF 7a, oben, km 441,200 (11/2015), rechts: Zustand nach der Sanierung (4/2017) (Fotos: BAW)	45
Bild 29:	Röhrichtwalzen beim und nach dem Einbau 2011 (Fotos: Katja Behrendt/Hans-Werner Herz, BfG)	46
Bild 30:	links: Weidensetzstange mit stammbürtigen Adventivwurzeln (07/2013), rechts: vitale Entwicklung der Weidenpflanzungen (06/2014) (Fotos: Katja Behrendt/Hans-Werner Herz, BfG)	48
Bild 31:	Strukturreicher Gehölzbewuchs nach Pflegeschnitt (07/2015) (Foto: Hans-Werner Herz, BfG)	49
Bild 32:	Bewuchsfreie untere/mittlere und stärker bewachsene, hydraulisch weniger belastete obere Böschungszone (06/2017) (Foto: Steffen Wieland, BfG)	50
Bild 33:	Schlammplonierflur mit blühender Sumpfkresse (06/2012) (Fotos: Katja Behrendt, BfG)	51
Bild 34:	gut ausgeprägte Röhrichtzone im Schutz des Steinwalls (05/2017)	51
Bild 35:	Entwicklung im Versuchsfeld 9 – 12/2011 (links, nach Bauabschluss), 7/2013 (Mitte), 3/2014 (rechts) (Foto: BAW)	52
Bild 36:	Einmaß Querprofil km 441,575 (VF 9, Versuchsfeldende nahe der Ausfachungsbühne)	53
Bild 37:	links: Aus dem Untergrund freigespülte alte Wasserbausteine im VF 9 (8.9.2016), rechts: Freigespülte Setzstangen (26.4.2018) (Fotos: BAW)	53
Bild 38:	Einmaß Querprofil km 441,500 (VF 9)	54
Bild 39:	Mit Wasserbausteinen gesichertes km-Schild bei km 441,500 (7.11.2017) (Foto: BAW)	54
Bild 40:	Flachwasserzone mit Wasser- und Röhrichtpflanzen (Fotos: Katja Behrendt, BfG)	61
Bild 41:	Straucharten der Heckenlagen (Fotos: Katja Behrendt, Andreas Sundermeier, BfG)	61
Bild 42:	Ähnlichkeit in der Artenzusammensetzung und Artenreichtum in der gesamten Monitoringperiode (links) und im Jahr 2016 (rechts). Die Lage steingepprägter, gehölzreicher und gras-krautreicher Bauweisen wird im Bild links durch Pfeile symbolisiert, deren Orientierung weist von der unteren zur oberen Böschungszone.	63
Bild 43:	Gesamtartenzahl der Versuchsfelder (Grafik links) und der unteren Böschungszonen (rechts) jeweils in den Jahren 2012 und 2016. In VF 8 wurde nur die untere Böschungszone betrachtet.	65

Bild 44:	Links Shannon-Diversitätsindex (dimensionslos), rechts Deckungssumme jeweils für die untere Böschungszone der Versuchsfelder	65
Bild 45:	Verhältnis der Deckungssummen heimischer und eingebürgerter (neophytischer) Arten im Jahr 2016. Deckungssumme jeweils normiert auf 100.	67
Bild 46:	Verhältnis der Deckungssummen ufertypischer (auntypischer und trockenzeigender Arten) zu auenuntypischen Arten im Jahr 2016. Deckungssumme jeweils normiert auf 100.	68
Bild 47:	Verbreitungskarte und Habitus des Ufer-Alant (Karte links, Foto oben) und des Taubenkropfs (Karte rechts, Foto unten). Der rote Pfeil zeigt die ungefähre Lage der Versuchsstrecke. Kartenquellen: Bundesamt für Naturschutz, Floraweb. (Fotos oben/unten: Yasmin Wingender, Katja Behrendt, BfG)	69
Bild 48:	Relative Verteilung von Arten auf Kategorien bundesweiter Häufigkeit. Horizontale Linien markieren den Durchschnittswert aller Versuchsfelder für den Anteil mäßig seltener (blau) bzw. mäßig seltener plus mäßig häufiger Arten (grün). Abkürzungen siehe Bild 46.	70
Bild 49:	Gewichtete mittlere Feuchtwerte der drei Böschungszonen (unten-mitte-oben) und den Referenzfeuchtwerten „Aue“ und „Ufersubstrat“. Abkürzungen siehe Bild 46.	71
Bild 50:	Sichtungshäufigkeiten der Reptilienarten an den einzelnen Versuchsfeldern während der Erfassung im Jahr 2017	79
Bild 51:	Arten- und Individuenzahlen der Laufkäfergesellschaften mit Differenzierung in ufertypische und uferuntypische Arten für alle VF und die Referenzstrecke in 2013/14 (oben) und 2017 (unten). Bitte beachten, dass bei der Erfassung im Jahr 2010 (Dreiecksymbole) sowohl Methodik als auch Erfassungsdesign abwichen.	82
Bild 52:	Arten- und Individuenzahlen der Spinnengemeinschaften mit Differenzierung in ufertypische und uferuntypische Arten für alle VF und die Referenzstrecke in 2013/14 (oben) und 2017 (unten).	84
Bild 53:	Gesamtartenzahlen und Anzahl der EPTCBO-Arten (Vertreter der Ordnungen: Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Coleoptera, Bivalvia, Odonata) an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke in den Untersuchungsjahren 2013 (oben) und 2017 (unten).	86
Bild 54:	Mittlere Artenzahlen (oben, MW \pm SD) und Individuenanteil von Neozoen an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke im Untersuchungsjahr 2017. An den beiden Versuchsfeldern mit eingebrachten Totholzelementen im aquatischen Bereich aufgeteilt für mineralische Substrate (Stein/Kies, hellgrau) und Totholz (dunkelgrau).	87
Bild 55:	Mittlere Artenzahl pro Befischungspunkt (\pm SE) und Gesamtartenzahl an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke über den gesamten Monitoringzeitraum (2012–2017).	89
Bild 56:	Mittlerer Individuenanteil der Arten der Referenzartenliste nach WRRL im Vergleich zu dem der Neozoen an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke über den gesamten Monitoringzeitraum (2012–2017). Die Sternchen zeigen signifikante Unterschiede an.	90

Bild 57:	Nichtmetrische multidimensionale Skalierung (NMDS) der Laufkäfergemeinschaften der VF 1 – 9 (schwarze Zahlen) und der Referenz (Ref) im Jahr 2017. Jeder Buchstabe repräsentiert eine Art, differenziert nach ufertypisch (U = blau) und nicht-ufertypisch (N = rot). Die Isolinien (graue Linien) zeigen den Gesamt-Deckungsgrad durch die Vegetation (2016). Der Gradient von Versuchsfeldern mit geringer Deckung zu solchen mit hoher Deckung wird durch den schwarzen Pfeil dargestellt. Zur Interpretation der NMDS-Diagramme vgl. TextBox 1 in Kap. 5.2.3.	95
Bild 58:	Blütenreichtum in den einzelnen Versuchsfeldern und der Referenzstrecke, Ziffern auf der Ordinate: Blumentypen (vgl. Fotos), Abszisse: Zeit (Monate), Balkenfarbe: Blütenfarben, Höhe der Balken: Blütenmenge, Länge der Balken: Dauer der Blüte (Fotos: BfG: Katja Behrendt (5.1, 7.2a/b), Hans-Werner Herz (2.1, 9.), Michael Schäffer (4.1), Krisztina Scholz (1.1, 1.2a, 6.1), Andreas Sundermeier (1.2b), Yasmin Wingender (3.1, 7.2c))	98
Bild 59:	Totholzablagerung in VF 1 (begrünte Steinschüttung) mit Befall des Schwefelporlings (Pfeil) (Foto Katja Behrendt, BfG)	100
Bild 60:	Galle der Gallwespe <i>Pontania virilis</i> auf Purpur-Weide in Weidenspreitlagen des VF 3 (Foto Andreas Sundermeier, BfG)	100
Bild 61:	Weidenschaumzikaden auf Weiden, die aus Setzstangen hervorgegangen sind (VF 9).	100
Bild 62:	Raupen der Weidenblattwespe in VF 1 (Beide Fotos Katja Behrendt, BfG)	100
Bild 63:	Ober- und unterirdische Trockenmasse. Links VF 3 (Weidenspreitlage) im Vergleich der Jahre 2012 und 2017. Rechts VF 7 (Pflanzmatten) im Jahr 2017, getrennt nach Lebensformen. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinate. Grafik nach Daten von (Schneider 2012), (Ziegenhorn 2017), (Heinzner 2017a, 2017b).	104
Bild 64:	Partieller Rückschnitt der Weidenspreitlage in VF 3 (Januar 2015) (Foto: WSA Oberrhein)	114
Bild 65:	Mahd der Pflanzmatten in VF 7 (Juni 2015) (Foto: WSA Oberrhein)	114

Tabellenverzeichnis		Seite
Tabelle 1:	Übersicht der getesteten Ufersicherungsmaßnahmen (VF = Versuchsfeld)	4
Tabelle 2:	Durchgeführte Teiluntersuchungen in der Monitoringperiode	7
Tabelle 3:	Maßgebende Wasserstände im Bereich der Versuchsstrecke (Eckdaten vom Pegel Worms von 2013)	12
Tabelle 4:	Daten der durchgeführten Porenwasserdruckmessungen	13
Tabelle 5:	Durchgeführte Messkampagnen zu hydraulischen Uferbelastungen aus natürlicher Strömung und Schifffahrt	16
Tabelle 6:	Gemessene maximale Wellenhöhen in zwei Querschnitten	17
Tabelle 7:	Berechnete, theoretisch maximal mögliche schiffsinduzierte Belastungsgrößen	19
Tabelle 8:	Gewährleistung des Uferschutzes durch Weidenspreitlagen	22
Tabelle 9:	Gewährleistung des Uferschutzes durch vorkultivierte Röhrichtgabionen	32
Tabelle 10:	Gewährleistung des Uferschutzes durch vorkultivierte Pflanzmatten	39
Tabelle 11:	Bewertung der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen an der Versuchsstrecke hinsichtlich der Gewährleistung der Uferstandsicherheit auf einer Skala von 1 bis 5 (1 – sehr schlecht, 2 – schlecht, 3 – mittel, 4 – gut, 5 – sehr gut)	56
Tabelle 12:	Vorkommen gefährdeter und geschützter Pflanzenarten SS: Steinschüttung, WSL: Weidenspreitlage, RG: Röhrichtgabionen, SM: Steinmatratzen. Versuchsfelder ohne Vorkommen entsprechender Arten sind nicht dargestellt.	69
Tabelle 13:	Zusammenfassung der drei miteinander korrelierten Subkriterien zu einem neuen Kriterium „Diversität und Gefährdung“ Wertstufen für die Sonderstandorte Flachwasserzone und Heckenlagen: gut [+], neutral [], schlecht [-] FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)	72
Tabelle 14:	Zusammenfassende Bewertung aus vegetationskundlicher Sicht Abkürzungen und Zeichen wie Tab. 13	73
Tabelle 15:	Haupt- und Unterkriterien und deren Gewichtung (Gew.) der unterschiedlichen Organismengruppen, die für die Bewertung der Versuchsfelder herangezogen wurden.	75
Tabelle 16:	Gesamtartenzahlen der beobachteten Vögel an der Versuchsstrecke und an umliegenden Flächen (Pufferzone in „Aue“ und Wasserfläche) in den Jahren 2010, 2013/14 und 2017; n. erf. – „nicht gesondert erfasst“	77
Tabelle 17:	Gildenverteilung der Vögel an den einzelnen Versuchsfeldern im Vergleich zur Referenz im Jahr 2017 unterteilt nach Rast-/Nahrungspotenzial (RaP), Brutpotenzial (BrP) und Brutpotenzialentwicklung (BrE) (Farbcode: grün...gut; gelb...günstig; rot...schlecht). Farbige Rahmen repräsentieren Verbesserungen (grün) bzw. Verschlechterungen (rot) zur Einschätzung auf Basis der Daten in 2013/2014.	78

Tabelle 18:	Bewertung der ökologischen Wirksamkeit der Maßnahmen in den einzelnen Versuchsfeldern jeweils für die untersuchten Organismengruppen Vögel, Reptilien, Laufkäfer, Spinnen in Wertstufen 1 (sehr gering), 2 (gering), 3 (mittel), 4 (hoch), 5 (sehr hoch) und die daraus abgeleitete Gesamtbewertung „terrestrische Fauna“ (bei doppelter Gewichtung der unterstrichenen Wertstufen). Die farbliche Kodierung steht für: orange= geringwertig (Wertstufe 2), gelb= mittelwertig (Wertstufe 3), grün= hochwertig (Wertstufe 4)	92
Tabelle 19:	Bewertung der ökologischen Wirksamkeit der aquatischen Maßnahmen in den Versuchsfeldern 1 und 4 jeweils für die untersuchten Organismengruppen Fische und Makrozoobenthos in Wertstufen 1 (sehr gering), 2 (gering), 3 (mittel), 4 (hoch), 5 (sehr hoch) und die daraus abgeleitete Gesamtbewertung „aquatische Fauna“. Die farbliche Kodierung steht für: rot= sehr geringwertig (Wertstufe 1), gelb= mittelwertig (Wertstufe 3), dunkelgrün= sehr hochwertig (Wertstufe 5)	93
Tabelle 20:	Bewertung der Versuchsfelder hinsichtlich ihrer Heterogenität FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)	103
Tabelle 21:	Bewertung hinsichtlich der Verwendung künstlicher und naturferner Materialien FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)	103
Tabelle 22:	Bewertung der Versuchsfelder hinsichtlich der Ökosystemleistung CO ₂ -Speicherung FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)	105
Tabelle 23:	Ökologische Gesamtbewertung für alle Maßnahmen in den Versuchsfeldern 1 bis 9 sowie in den Referenzbereichen (Steinschüttung). Wertstufen 1-5, 1 = sehr geringe ökologische Wirksamkeit, 2 = geringe ökologische Wirksamkeit, 3 = mittlere ökologische Wirksamkeit, 4 = hohe ökologische Wirksamkeit, 5 = sehr hohe ökologische Wirksamkeit.	108
Tabelle 24:	Herstellungskosten pro Versuchsfeld (VF)	112
Tabelle 25:	Bewertung der Kosten pro Versuchsfeld (VF)	116
Tabelle 26:	Vergleichende Bewertung der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen	118
Tabelle 27:	Vergleichende Bewertung der im aquatischen Bereich angeordneten Maßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion	119
Tabelle 28:	Gesamtbewertung der Maßnahmen bei gleicher Wichtung der drei Kriterien nach Tab. 26 (1. Spalte: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich Eignung unter den Bedingungen der Versuchsstrecke)	120
Tabelle 29:	Gesamtbewertung der Maßnahmen bei gleicher Wichtung von Standsicherheit und Ökologie ohne Berücksichtigung der Kosten (1. Spalte: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich Eignung unter den Bedingungen der Versuchsstrecke)	121

Tabelle 30:	Skalenwerte und reziproke Werte und deren Beschreibung für den paarweisen Vergleich von (Sub)-Kriterien, nach Saaty (1990)	125
Tabelle 31:	Vergleichsmatrix der Kriterien „Ökologie“, „Robustheit“ und „Gesamtkosten“ für Szenario A anhand von Skalenwerten und reziproken Werten nach Saaty (1990)	126
Tabelle 32:	Vergleichstabelle für die Kriterien "Ökologie", "Robustheit" und "Gesamtkosten" für das Szenario B (Ökologie absolut dominierend; Robustheit und Kosten kaum relevant) Skalenwert 1 = gleiche Bedeutung, Skalenwert 9 = absolut dominierend	126
Tabelle 33:	Wichtungen in % für die Kriterien "Ökologie", "Robustheit" und "Gesamtkosten" für die Szenarien A – E (Szenario A: Terrestrische Ökologie, Szenario E: Aquatische Ökologie, Szenarien B C, D: Grenzwertszenarien); Konsistenzverhältnis (C.R.).	127
Tabelle 34:	Rangfolge der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen für Szenario A; *Die Bewertungen für das Kriterium „Ökologie“ beziehen sich entsprechend der Definition von Szenario A ausschließlich auf terrestrische Uferlebensräume; Skala der Kriterienbewertungen: 1 = sehr schlecht, 2 = schlecht, 3 = mittel, 4 = gut, 5 = sehr gut; Ränge 1- 8: 1 = erster Rang (grün), 8 = letzter Rang (rot)	128
Tabelle 35:	Rangfolge der Zusatzmaßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion für Szenario A; Wichtungen für die Kriterien sind analog zu Tab. 34; *Eingehende Bewertungen für das Kriterium „Ökologie“ beziehen sich entsprechend Szenario A ausschließlich auf terrestrische Uferlebensräume.	129
Tabelle 36:	Rangfolgen der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen für die Szenarien A bis D, C.R. = 0; Ränge 1 – 8 bzw. 1 – 9: 1 = erster Rang (grün), 8 bzw. 9 = letzter Rang (rot); Wichtungen der Kriterien: Vgl. Tab. 33	129
Tabelle 37:	Rangfolge der Zusatzmaßnahmen ohne Uferschutzfunktion für Szenario E; Wichtungen für die Kriterien sind analog zu Tab. 8, C.R. = 0,001. *Eingehende Bewertungen für das Kriterium „Ökologie“ beziehen sich entsprechend Szenario E nur auf Maßnahmen im aquatischen Lebensraum und in der Wasserwechselzone (MW und darunter liegend).	130

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Übersicht – Randbedingungen
- Anlage 2: Übersicht der in den einzelnen Versuchsfeldern eingebrachten Pflanzen
- Anlage 3: Zusammenfassende Bewertung der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen hinsichtlich Stabilität und Gewährleistung des Uferschutzes sowie erforderliche Optimierungen und Anwendungsempfehlungen aus technischer Sicht
- Anlage 4: Maßnahmenblätter (Dokumentation der Einzelmaßnahmen)
- Anlage 5: Maßnahmen im Rahmen des weitergehenden Monitorings von 2021 bis zu nächst 2030
- Anlage 6: Bewertungstabellen Fauna
- Anlage 7: Multikriterielle Entscheidungsanalyse in Anlehnung an den Analytischen Hierarchie-Prozess (AHP) von Saaty (1990), Erläuterungen zu Kapitel 8

Abkürzungsverzeichnis

ABz	Außenbezirk
ADV-Messung	Acoustic Doppler Velocimeter-Messung
AHP	Analytischer Hierarchie Prozess (Analytic Hierarchy Process)
AZW	Ausbauzentralwasserstand
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BiolFlor	Datenbank biologisch-ökologischer Merkmale der Flora von Deutschland
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BOK	Böschungsoberkante
BOKU	Universität für Bodenkultur
BrE	Brutpotenzialentwicklung
BrP	Brutpotenzial
C.I.	Consistency Index (= Konsistenzindex)
C.R.	Consistency Ratio (= Konsistenzverhältnis)
EPTCBO-Arten	Arten aus den Ordnungen Ephemeroptera (Eintagsfliegen), Plecoptera (Steinfliegen), Trichoptera (Köcherfliegen), Coleoptera (Käfer), Bivalvia (Muscheln) und Odonata (Libellen)
FWZ	Flachwasserzone
GBB	Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen
Gew.	Gewichtung
GIW	Gleichwertiger Wasserstand
GOK	Geländeoberkante (= Böschungsoberkante)
HL	Heckenlage
HMULV	Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (aktuelle Bezeichnung: Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz)
HSW	Höchster schiffbarer Wasserstand
HW	Hochwasser
HWMI	Hochwassermarke I
HWMII	Hochwassermarke II
i.e.S.	im engeren Sinne
i.w.S.	im weiteren Sinne
Lfd m	pro laufenden Meter
LfU	Bayrisches Landesamt für Umwelt
LFV	Landesfischereiverband Bayern
LMB _{10/60} bzw. LMB _{5/40}	Light Mass Kategorie B (Wasserbausteine leichter Gewichtsklassen)
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
MNW	Mittleres Niedrigwasser
MP	Monitoringperiode

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

MS Worms	Aufsichtsboot des WSA Oberrhein
MW ± SD	Mittelwert ± Standard Deviation (= Standardabweichung)
MW	Mittelwasser
MZB	Makrozoobenthos
N	Nicht ufertypisch
n. erf.	Nicht gesondert erfasst
NHN	Normalhöhennull
NMDS	Nichtmetrische multidimensionale Skalierung
NN	Normalnull
PET	Polyethylenterephthalat
PNP	Pegelnullpunkt
PP	Polypropylen
R.I.	Random Index (= durchschnittlicher Konsistenzindex)
RaP	Rast-/Nahrungspotenzial
Ref	Referenzstrecke
RG	Röhrichtgabionen
RL	Rote Liste
rmANOVA	repeated measures Anova
SE	Standard Error
SM	Steinmatratzen
SS	Steinschüttung
Stk	Stück
TLW	Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine
U	Ufertypisch
VF	Versuchsfeld
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSA-MA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Mannheim (seit 2019 dem WSA Oberrhein zugehörig)
WSL	Weidenspreitlagen

An der Erstellung des Berichtes Beteiligte

Behrendt, Katja	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Vegetationskunde, Landschaftspflege
Fleischer, Petra	Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Referat Erdbau und Uferschutz (Federführung)
Gesing, Carolin	Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Referat Schifffahrt
Hannig, Marc	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Oberrhein, Fachbereich Schifffahrt
Prof. Dr. Koop, Jochen	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Tierökologie
Schäffer, Michael	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Tierökologie (bis 2019)
Schlüter, Volker	Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Referat Erdbau und Uferschutz
Schmitt, Kathrin	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Vegetationskunde, Landschaftspflege
Schneider, Agnes	Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Referat Erdbau und Uferschutz (bis 2019)
Sorgatz, Julia	Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Referat Erdbau und Uferschutz
Dr. Soyeaux, Renald (†)	Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Referat Erdbau und Uferschutz (bis 2018)
Dr. Sundermeier, Andreas	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Vegetationskunde, Landschaftspflege
Wieland, Steffen	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Tierökologie

Mit Beiträgen von

Dr. Esser, Daniel	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Vegetationskunde, Landschaftspflege
Herz, Hans-Werner	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Vegetationskunde, Landschaftspflege
Dr. Taupp, Thomas	Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Referat Tierökologie

1 Veranlassung

An Bundeswasserstraßen sind aufgrund der gesetzlichen und politischen Vorgaben die Anforderungen der Schifffahrt mit anderen Nutzungen und der ökologischen Entwicklung in Einklang zu bringen. Ein wichtiger Baustein zur Berücksichtigung ökologischer Belange ist die Gestaltung der Ufer. Ökologisch wünschenswert wäre ein ungesichertes Ufer, das aber vielerorts nicht möglich ist. Deshalb ist zu untersuchen, inwieweit sich durch die Anwendung technisch-biologischer Ufersicherungen eine ökologische Aufwertung unter Beibehaltung der Sicherungsfunktion und der angrenzenden Nutzungen mit vertretbarem Unterhaltungsaufwand realisieren lässt.

Im Rahmen des seit 2004 laufenden gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der BAW und BfG „Untersuchungen zu technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen“ wird seit 2011 am Rhein in der Nähe von Worms ein Naturversuch zu dieser Fragestellung durchgeführt. Träger der Maßnahme ist das damalige WSA Mannheim. Auf der Gemarkung Lampertheim werden am rechten Rheinufer in einem Abschnitt von 1 km Länge (km 440,600 bis km 441,600) neun technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen unter Wasserstraßenbedingungen getestet. Die neuen Ufersicherungsmaßnahmen sollen das ohne Schutz instabile Ufer in gleicher Weise wie eine konventionelle Steinschüttung vor Erosion und Böschungsrutschungen schützen und es gleichzeitig ökologisch aufwerten.

Das Projekt wird von einem umfangreichen Monitoring begleitet. Die Ergebnisse werden in regelmäßigen Monitoringberichten dokumentiert. Im 1. Zwischenbericht (BAW, BfG, WSA-MA 2012) sind die Randbedingungen, die einzelnen Bauweisen und deren Einbau dargestellt. Im 2. Zwischenbericht (BAW, BfG, WSA-MA 2013) wurden in sehr umfassender Weise die ersten Monitoringergebnisse des Jahres 2012 zusammengestellt und wichtige Grundlagen für die Auswertungen der Folgejahre geschaffen. Die 3., 4. und 5. Zwischenberichte (BAW, BfG, WSA-MA 2014; BAW, BfG, WSA-MA 2015; BAW, BfG, WSA-MA 2016) dokumentieren als Kurzberichte die wesentlichen Untersuchungen und Ereignisse für die Berichtszeiträume 11/2012 bis 10/2013 bzw. 11/2013 bis 10/2014 bzw. 11/2014 bis 10/2015.

Im vorliegenden Abschlussbericht, der analog zu den bisherigen Berichten zur Information des BMVI erstellt wurde, sind die Monitoringergebnisse für den Zeitraum 01/2012 bis 12/2017 zusammenfassend dargestellt und bewertet. Nach sechsjähriger Betriebszeit werden auf der Basis der bisherigen Entwicklung Aussagen zur Stabilität und zum Uferschutz der getesteten Maßnahmen sowie zu deren ökologischer Wirksamkeit gegeben. Es werden Empfehlungen für zukünftige Anwendungen der Maßnahmen an Binnenwasserstraßen ausgesprochen. Die Resultate sind zum Teil bereits in Arbeitshilfen und Bemessungsempfehlungen für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung eingeflossen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

2 Versuchsfelder

Bild 1 zeigt die Lage der Versuchsstrecke im Grundriss, gekennzeichnet sind die einzelnen Versuchsfelder am rechten Ufer und die Lage der Fahrrinne im Rhein von km 440,600 bis km 441,600. In fünf Abschnitten wurde die alte Steinschüttung etwa oberhalb Mittelwasser vollständig entfernt und durch pflanzliche Maßnahmen ersetzt, in einem dieser Abschnitte blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Abschnitten wurden unterschiedliche Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung der bestehenden Steinschüttung ausgeführt. Zwei Abschnitte ober- und unterstrom der Versuchsstrecke mit verbliebener Steinschüttung dienen als Referenz.

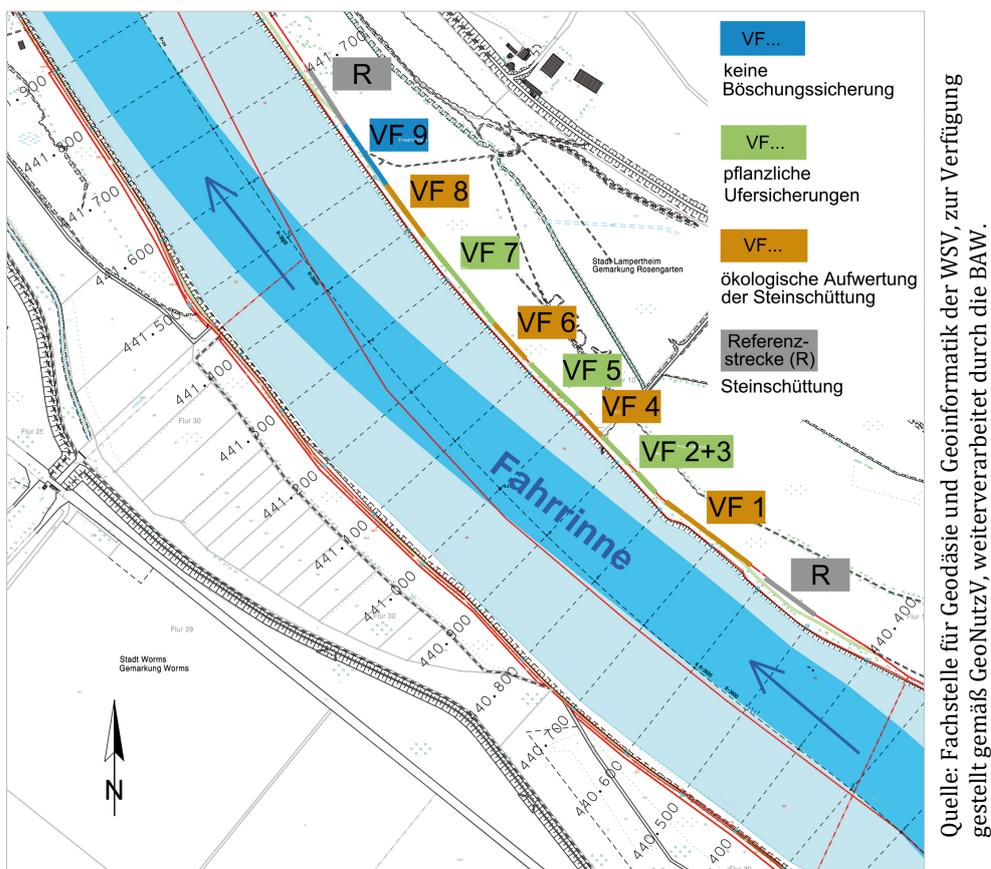


Bild 1: Lage der einzelnen Versuchsfelder (VF) (BAW, BfG, WSA-MA 2013)

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der eingebauten Ufersicherungsmaßnahmen und der wichtigsten ökologischen Ziele. In den Versuchsfeldern (VF) 2, 3, 5 und 7 (in Tabelle 1 grün hinterlegt) haben die neu eingebauten Ufersicherungen mit Pflanzen Uferschutzfunktion zu erfüllen. In den VF 1, 4, 6 und 8 (in Tabelle 1 braun hinterlegt) wird der Uferschutz dagegen weiterhin durch die verbliebene Steinschüttung gewährleistet. Eine Sonderstellung hat stromab das letzte Versuchsfeld 9, in dem nach Rückbau der Steinschüttung oberhalb Mittelwasser kein neuer Böschungsschutz vorgesehen wurde (in Tabelle 1 blau hinterlegt).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Die Randbedingungen am Rhein, die Konstruktion und der Einbau der einzelnen Maßnahmen, die ökologischen Ziele sowie das Monitoringprogramm sind ausführlich in (BAW, BfG 2010) und (BAW, BfG, WSA-MA 2012) dokumentiert. In einer tabellarischen Übersicht in Anlage 1 sind die wichtigsten Randbedingungen noch einmal zusammengefasst.

Für alle Maßnahmen gilt das übergeordnete ökologische Ziel der Förderung von Fauna und Flora. Für die VF 1, 2 und 3 wurde eine gehölzgeprägte Zielvegetation geplant, wie auch in Teilen des VF 5 (Heckenlage entlang der Böschungsschulter) und des VF 9 oberhalb der Ausfachungsbühne und entlang des Betriebswegs. Im VF 8 wurden bestehende Gehölzstrukturen auf der Böschung belassen. In den VF 5 (Röhrichtgabionen), 6, 7 und 8 (unterer Böschungsbereich) wurde eine Zielvegetation aus Röhricht und Gräsern festgelegt. Die VF 4, 5 (Steinmatratzen) und 9 (Uferböschung) unterliegen der natürlichen Sukzession ohne Vorgaben zur Zielvegetation.

Tabelle 1: Übersicht der getesteten Ufersicherungsmaßnahmen (VF = Versuchsfeld)

VF	km	Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen	Gewährleistung Uferschutz Ökologisches Ziel	Foto nach Einbau
1	440,626 bis 440,747	Vorhandene Steinschüttung mit Weidensetzstangen, Lebendfaschinen, Busch- und Heckenlagen; vorgelagerter Steinwall mit Flachwasserzone, Totholzstämmen mit Wurzelteiler	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung Ökologische Aufwertung der Steinschüttung durch standortgerechten Gehölzbestand, Strukturvielfalt und wellenberuhigte Flachwasserzone Verbesserung der Habitatqualität, insb. für Fische und Makrozoobenthos, gehölzbrütende Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen	
2	440,823 bis 440,859	Entfernung der Steinschüttung; Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung verlegt, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	Uferschutz durch Pflanzen Ökologische Aufwertung durch standortgerechten Gehölzbestand, Strukturvielfalt Verbesserung der Habitatqualität, insb. für gehölzbrütende Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen	
3	440,874 bis 440,945	Entfernung der Steinschüttung; Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung verlegt, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	Uferschutz durch Pflanzen Ökologische Aufwertung durch standortgerechten Gehölzbestand, Strukturvielfalt Verbesserung der Habitatqualität, insb. für gehölzbrütende Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen	

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

4	440,945 bis 441,997	Vorhandene Steinschüttung mit Kiesfüllung, Einzelsteingruppen, Totholzfaschinenbündel	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung Ökologische Aufwertung der Steinschüttung durch Strukturvielfalt zur Förderung der natürlichen Sukzession Verbesserung der Habitatqualität, insb. für Fische und Makrozoobenthos, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien	
5	441,006 bis 441,106	Entfernung der Steinschüttung; Einbau von Röhrlichtgabionen und Steinmatratzen auf Kornfilter, vorgezogenen Pflanzmatten auf Steinmatratzen, Heckenlagen	Uferschutz durch Kombination aus Pflanzen und technischen Komponenten Ökologische Aufwertung durch standortgerechte Ufervegetation (Röhrlicht, Gräser, Gehölze der Hartholzaue), Förderung der natürlichen Sukzession und Schaffung von Lebensraumstrukturen Verbesserung der Habitatqualität, insb. für röhrlicht-(gehölz)brütende Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien	
6	441,124 bis 441,197	Vorhandene Steinschüttung mit Oberboden-Alginatgemisch-Füllung, Nassansaat, Einzelpflanzen	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung Ökologische Aufwertung der Steinschüttung durch standortgerechte Ufervegetation (Röhrlicht, Gräser), Förderung der natürlichen Sukzession Verbesserung der Habitatqualität, insb. für röhrlichtbrütende Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien	
7	441,205 bis 441,366	Entfernung der Steinschüttung; Einbau von vorgezogenen Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvlies, Kunststoffvlies, Kokosmatte), Totholzfaschinen, Vegetationswalzen, Kokosgewebe über Nassansaat, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	Uferschutz durch Pflanzen Ökologische Aufwertung durch standortgerechte Ufervegetation (Röhrlicht, Gräser), Förderung der natürlichen Sukzession und Schaffung von Lebensraumstrukturen Verbesserung der Habitatqualität, insb. für röhrlichtbrütende Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien	

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

8	441,369 bis 441,480	Vorhandene Steinschüttung und Pflaster mit Röhrichtbewuchs; Erhöhung des vorhandenen Steinwalls	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung und Pflaster Ökologische Aufwertung durch Förderung der Röhrichtentwicklung im Schutz des Steinwalls Verbesserung der Habitatqualität, insb. für röhrichtbrütende Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien, bei höheren Wasserständen auch für aquatische Organismen	
9	441,480 bis 441,598	Entfernung der Steinschüttung; keine neue Ufersicherung im Böschungsbereich, Setzstangen zum Schutz des Betriebsweges; Ausfachungsbühne am unterstromigen Versuchsfeldende mit Weidensetzstangen und Faschinen	Kein Uferschutz auf Böschung, Setzstangen zur Begrenzung der Erosion zum Betriebsweg Ökologische Aufwertung durch begrenztes Zulassen von Eigendynamik und natürlicher Sukzession Förderung der strukturellen Vielfalt und Lebensraumdiversität, insb. für Vögel, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien	
R	440,510 bis 590 und 441,610 bis 441,690	Referenzstrecke: Konventionelle Steinschüttung	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung Keine ökologische Aufwertung	

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

3 Teiluntersuchungen und wichtige Randbedingungen im Berichtszeitraum

3.1 Durchgeführte Teiluntersuchungen

Im Rahmen des Monitorings wurden von 01/2012 bis 12/2017 die in Tabelle 2 aufgeführten Teiluntersuchungen zur Uferstabilität, zur hydraulischen Uferbelastung, Witterung und Wasserständen, der ökologischen Wirksamkeit und zum Unterhaltungsaufwand durchgeführt. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Universitäten fanden Sonderuntersuchungen zur Entwicklung einzelner Bauweisen statt.

Tabelle 2: Durchgeführte Teiluntersuchungen in der Monitoringperiode

Untersuchungen/ Dokumentationen	Zeitraum	Ziel/Inhalte
Uferstabilität		
Uferinspektionen (WSA Oberrhein, BAW, BfG)	laufend	Erfassung und Dokumentation des Zustandes der neuen Ufersicherungen (auch fotografisch), Beurteilung der Uferstabilität
Vermessung der Ufergeometrie (WSA Oberrhein)	2011, 2012, 2015, 2016, 2019	Einmaß von ausgewählten Querprofilen zur Erfassung von Erosion und Rutschungen im Böschungsbereich
Porenwasserdruckmessung (BAW)	2012, 2015	Porenwasserdruckmessungen im VF 3 bei laufender Schifffahrt (dazu Datenerhebung: Schiffsabmessungen und -geschwindigkeiten, Uferabstände)
Panorama-Fotoaufnahmen (BAW)	2 bis 3 x pro Jahr	Panorama-Fotoaufnahmen vom gegenüberliegenden Ufer zur Dokumentation der zeitlichen Entwicklung der neuen Ufersicherungsmaßnahmen
Hydraulische Uferbelastung		
Verkehrsbeobachtung und Messung der hydraulischen Uferbelastungen (BAW und Fa. Schmid im Auftrag der BAW)	2012 2013 2015	Registrierung der Schifffahrt mit den wichtigsten Daten, Messung der ufernahen Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten, Messung der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Weidenspreitlagen (VF 3) zur Erfassung des Einflusses der Weidensprosse auf die Strömungsgeschwindigkeiten
Witterung und Wasserstände		
Wetteraufzeichnung (BAW)	laufend	Erfassung und Auswertung von Tagestemperaturen und Niederschlägen (Daten von der FH Worms)
Registrierung der Rheinwasserstände (BAW)	laufend	Registrierung, grafische Darstellung und Bewertung der Rheinwasserstände
Ökologische Untersuchungen		
Vegetation (BfG)	2009/2010 (vor Baubeginn), 2012–2017	Erfassung der Pflanzenarten und -menge jeweils für unterschiedliche hangparallele Böschungszonen (Pflanzung und natürliche Sukzession), struktureller Parameter (Deckung, Schichtung Vegetation, Treibsel, Höhen-/Dickenwachstum gepflanzter Gehölze)
Aquatische Fauna		
Fischgemeinschaften (BfG)	2 x jährlich (Frühsommer, Herbst)	Elektro-Punktbefischungen entlang der Uferbereiche der Versuchsfelder und der Referenz
Makrozoobenthos (BfG)	Frühsommer 2013/14 und 2017 Herbst 2016	Flächenbezogene Kescherbeprobungen in den Uferbereichen der Versuchsfelder und der Referenz, Berücksichtigung der Sonderstrukturen (insbesondere Totholz)

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Terrestrische Fauna		
Avifauna (BfG)	2013/14 und 2017	Transektbegehung, Punktbeobachtung, Zufallsbeobachtung während 21 bzw. 20 Kartiertagen in den Untersuchungszeiträumen, Erfassung von Brut- und Raststatus, Vergleich mit IST-Zustandserfassung aus dem Jahr 2010
Reptilien (BfG)	2013/14 und 2017	Mehrere zeitstandardisierte Sichtbeobachtungen entlang von Transekten innerhalb der Untersuchungszeiträume, insbesondere in Verbindung mit Bodenfallenaktivitäten, Vergleich mit IST-Zustandserfassung aus dem Jahr 2010
Laufkäfer, Spinnen (BfG)	2013/14 und 2017	Erfassung mittels Bodenfallen in unterschiedlichen Böschungshöhen, fünf Fallen pro Versuchsfeld wo möglich, ggf. Ergänzung durch Kleinbecherfallen und Handfang; Spinnen in den krautreichen VF 5 und 7 auch mit Streifnetz
Unterhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen		
Dokumentation der Arbeiten (WSA Oberrhein)	laufend	Art und Umfang der durchgeführten Maßnahmen, Ausführungszeit und -dauer, Aufwand
Sonderuntersuchungen zur Entwicklung ausgewählter Bauweisen		
Wurzelausgrabung – FH Erfurt, im Rahmen einer Studienarbeit, mit BAW und BfG	4/ 2015	VF 2/3, 5, 7, 9: Erfassung des Arteninventars und struktureller Parameter innerhalb von Transekten, Wurzeluntersuchung an einer Weidensetzstange
Vegetationsuntersuchung – BOKU Wien, im Auftrag der BAW	2012-2015	VF 2/3: Untersuchungen zur Gehölzentwicklung gepflanzter Weiden (Triebblängen, Dickenwachstum, Vitalität, Artenverteilung, Deckungsgrad)
Wurzelaufgrabungen – Uni Hannover, im Rahmen von Masterarbeiten in Zusammenarbeit BAW, BfG	VF 2/3: 11/2012 und 4/2017 VF 7: 4/2017	VF 2/3, 7: Wurzelaufgrabungen – Erfassung Wurzelklassen, -längen, -intensität, -masse, Scherfestigkeitserhöhung des Bodens durch Wurzeln und CO ₂ -Speicherung jeweils für 3 hangparallele Böschungszonen

3.2 Wichtige Randbedingungen

3.2.1 Wetter und Wasserstände

Die besonders für die Entwicklung der Pflanzen in den technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen wichtigen Wetterdaten (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer) wurden seit 2011 regelmäßig erfasst und ausgewertet. Im Teilfachbericht „Wetterdaten und Rheinwasserstände der gesamten Monitoringperiode 2011 bis 2016“ (BAW 2018) sind alle Ergebnisse ausführlich dargestellt. Im Folgenden erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Wetterdaten.

Temperatur

Bild 2 zeigt die statistische Verteilung der maximalen Tagestemperaturen der Jahre 2012 bis 2016 – getrennt für das phänologische Winterhalbjahr (16.10. bis 4.4.) und das phänologische Sommerhalbjahr (5.4. bis 15.10.). Die jährlichen Verteilungen sind ähnlich, die Temperaturextreme reichen im Winter bis -14 °C (2012) und im Sommer bis $+39,8\text{ °C}$ (2015).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

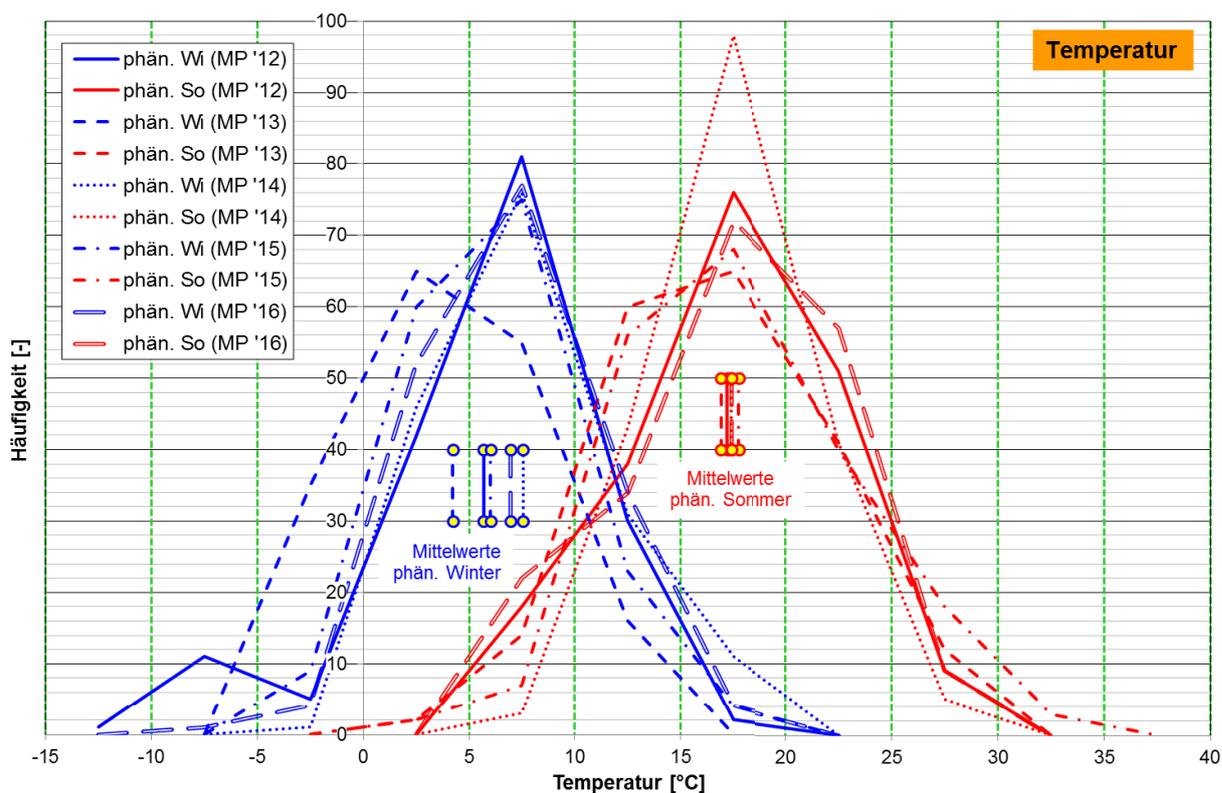


Bild 2: Temperaturen (statistische Verteilung Tagesmaxima) der Jahre 2012 bis 2016

Niederschlag

Bild 3 zeigt die monatlichen Niederschläge von 2011 bis 2016. Maximalwerte mit über 100 mm Niederschlag im Monat traten nur in den Sommermonaten auf – 2013 (Mai), 2014 (Juli und August) und 2016 (Mai). Das sind auch die 3 Jahre mit insgesamt den größten Jahresniederschlagsmengen von 752 mm, 729 mm bzw. 786 mm. Im Vergleich dazu betragen diese 2012 nur 593 mm und 2015 nur 468 mm. Besonders trockene Monate mit Niederschlag unter 20 mm traten überwiegend im Winter auf: 2012 (November, Februar und März), 2013 (Januar), 2014 (März) und 2015 (April).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

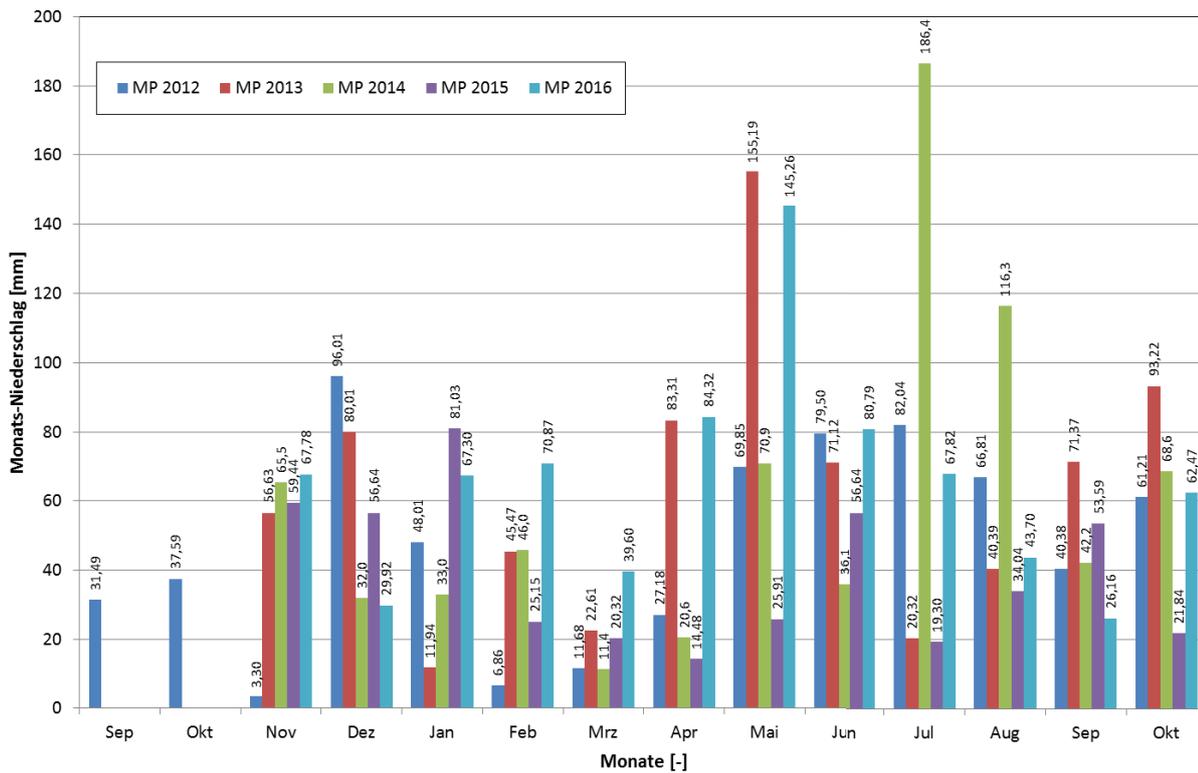


Bild 3: Monatsniederschläge 2011 (September und Oktober ganz links im Diagramm) bis 2016

Durch eine Kombination von Niederschlag und Temperatur, dargestellt im speziellen Klimadiagramm nach Walter & Lieth (Bild 4), können besonders trockene und feuchte Perioden hervorgehoben werden. Dabei werden die Niederschläge als Monatssummen und die Temperatur als Monatsmittel im Ordinatenverhältnis 3 : 1 aufgetragen. Liegt die Niederschlagskurve unterhalb der Temperaturkurve, handelt es sich um eine Trockenperiode, umgekehrt um eine Feuchtperiode.

Feucht- und Trockenperioden mit zum Teil extremen Bedingungen für die Pflanzen traten im Wechsel immer wieder auf. Sie korrelieren mit Niedrig- und Hochwasserperioden (Bild 5).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

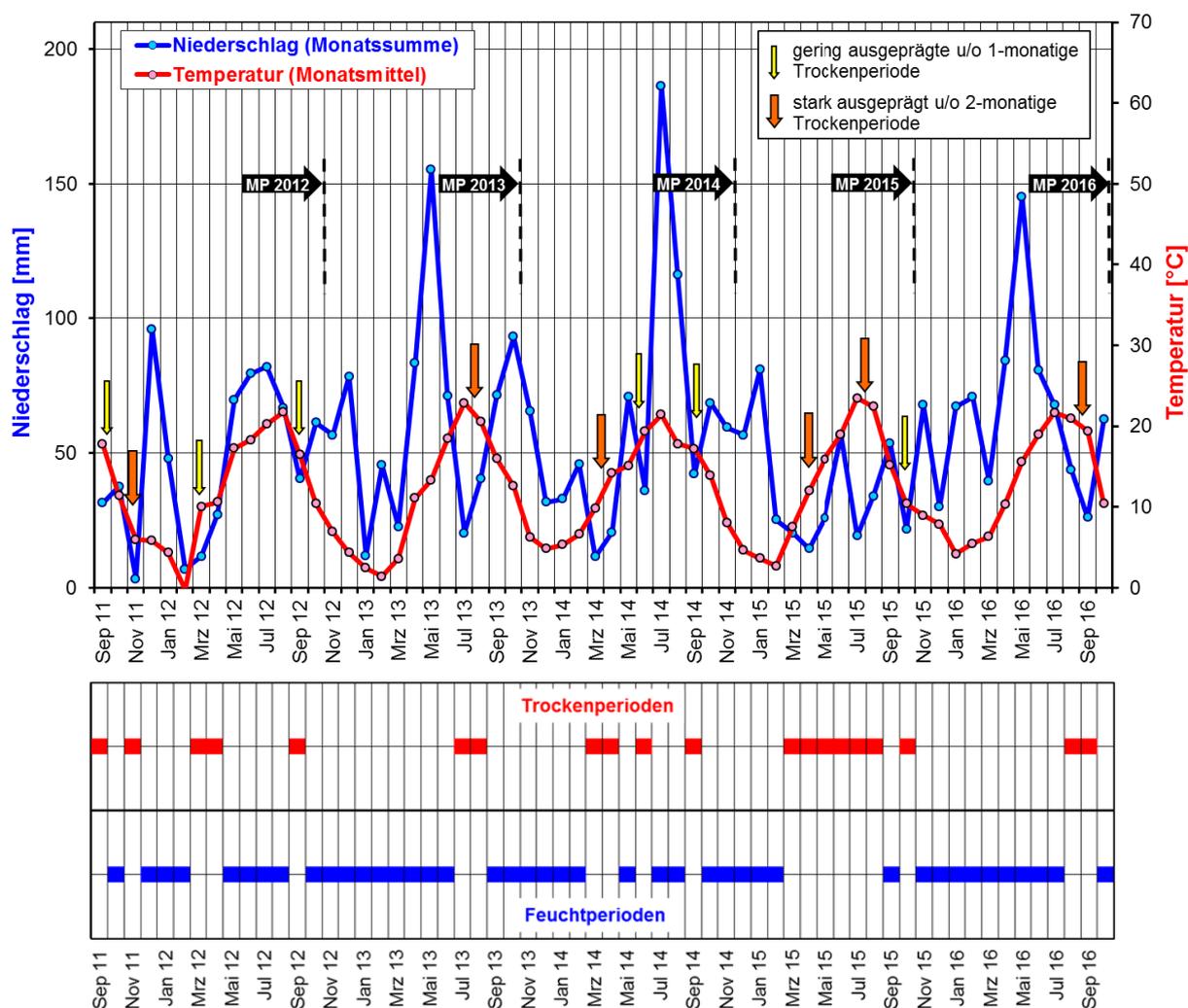


Bild 4: Klimadiagramm nach Walter & Lieth (oben) und Darstellung der Trocken- und Feuchtperioden (unten)

Wasserstände

Bild 5 zeigt die Ganglinie am Pegel Worms von 2011 bis 2016. Dargestellt sind zusätzlich die maßgebenden Wasserstände. Es wird deutlich, dass die neuen Ufersicherungen, angeordnet im hier grün markierten Bereich zwischen MW (\approx AZW) und Böschungsoberkante (BOK), immer wieder eingestaut wurden, der untere Bereich wesentlich häufiger und länger als der obere Böschungsbereich – bei gleichzeitigen schiffsinduzierten Belastungen. Die dazwischen liegenden Niedrigwasserphasen wurden meist von Trockenheit und häufig hohen Temperaturen begleitet. Beide Phasen hatten maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung, Widerstandskraft und Vitalität der Pflanzen. In Tabelle 3 sind zusätzlich die maßgebenden Wasserstände in der Versuchsstrecke zusammengestellt.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

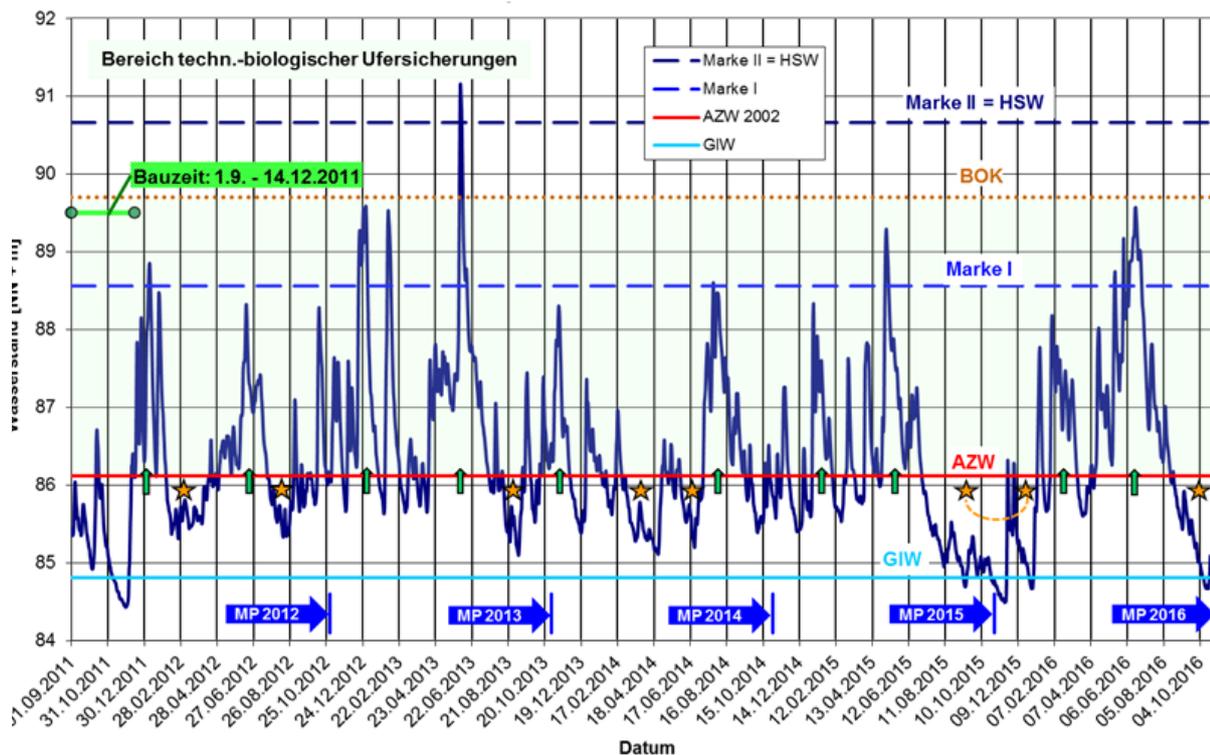


Bild 5: Ganglinie der Wasserstände (Tagesmittelwerte) am Pegel Worms (PNP: 84,112 m ü NHN, DHHN2016/Höhenstatus 170; MW (Zeitraum 2009/2018) \approx 200 cm, AZW \approx MW)

- ↑ Phasen mit hohem Wasserstand über AZW (> 4 Wo)
- ★ Phasen mit niedrigem Wasserstand unter AZW (> 4 Wo)

Tabelle 3: Maßgebende Wasserstände im Bereich der Versuchsstrecke (Eckdaten vom Pegel Worms von 2013)

	km 440,600 (VF 1)	km 441,100 (VF 5)	km 441,600 (VF 9)	km 443,400 Pegel Worms
GIW	NN + 85,12 m	NN + 85,06 m	NN + 85,02 m	NN + 84,81 m
MW (\approx AZW)	NN + 86,50 m	NN + 86,43 m	NN + 86,36 m	NN + 86,12 m
HWMI	NN + 88,90 m	NN + 88,85 m	NN + 88,79 m	NN + 88,56 m
HWMII (HSW)	NN + 91,04 m	NN + 90,92 m	NN + 90,90 m	NN + 90,66 m
GOK*	\sim NN + 90,00 m	\sim NN + 91,00 m	\sim NN + 89,50 m	

* Oberkante des angrenzenden Geländes (Böschungsoberkante)

3.2.2 Porenwasserdruck

Der während einer Schiffspassage auftretende Wasserspiegelabsenk (Kap. 3.2.3) kann in dem am Ufer anstehenden Boden zu Porenwasserüberdrücken führen. Diese können die effektiven Spannungen im Boden soweit verringern, dass es zu einem oberflächennahen Abgleiten der Böschung oder hydrodynamischen Bodenverlagerungen kommt. Um dies zu vermeiden, werden Schüttsteindeckwerke mit einem entsprechenden Flächengewicht bemessen. Das Auftreten relevanter

Porenwasserüberdrücke beeinflusst entscheidend, ob eine Ufersicherung mit Flächengewicht erforderlich ist oder nicht, d. h. ob das Ufer nur mit Pflanzen gesichert werden kann, wie z. B. mit Weidenspreitlagen, oder ob zusätzlich technische Bestandteile mit Flächengewicht anzuwenden sind wie z. B. in Röhrichtgabionen.

Tabelle 4: Daten der durchgeführten Porenwasserdruckmessungen

Messung	Tag der Messung	Wasserstand bei km 440,900 während der Messung (MW: NN + 86,46 m)	Registrierte Schiffe (davon auswertbar)
1	24.01.2012	NN + 88,74 m (MW + 228 cm)	24 (6) Güterschiffe
2	12.06.2012	NN + 87,89 m (MW + 143 cm)	13 (7) Güterschiffe
3	16.10.2012	NN + 88,06 m (MW + 160 cm)	22 (6) Güterschiffe 11 (9) MS Worms
4	19.02.2014	NN + 87,09 m (MW + 63 cm)	29 (15) Güterschiffe
5	06.05.2015	NN + 89,68 m (MW + 322 cm)	23 (8) Güterschiffe
			Σ:122 (51) Güterschiffe

Bei km 440,9 im VF 3 wurden am Ufer Porenwasserdrücke bei Schiffsvorbeifahrten in insgesamt fünf Messkampagnen bei verschiedenen Wasserständen gemessen. Dazu wurden bereits in der Bauphase Porenwasserdruckgeber in verschiedenen Tiefen im Boden eingebaut. Die Messungen erfolgten jeweils an einem Tag (Tabelle 4). Von den insgesamt registrierten 122 Schiffen erzeugten 51 Schiffe Absunkwerte, die für die Auswertung herangezogen werden konnten. Der fachliche Hintergrund, die Methodik und die Messeinrichtung sind ausführlich in (BAW 2014) dokumentiert.

Die Ergebnisse aller fünf Messkampagnen – der jeweils gemessene Wasserspiegelabsunk am Ufer und der dazu im Boden in einer Tiefe von 58 cm unter der Böschungsoberkante unmittelbar nach dem Absunkereignis maximal gemessene Porenwasserüberdruck – sind in Bild 6 dargestellt.

Bei den betrachteten 51 Güterschiffen wurden insgesamt relativ geringe Absunkwerte z_a bis maximal 20 cm gemessen. Größere Werte wurden nur bei den 2012 speziell zur Messung durchgeführten ufernahen Fahrten des Aufsichtsbootes des WSA Oberrhein „MS Worms“ registriert (27 bis 42 cm). Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit den 51 der jährlich etwa 40.000 verkehrenden Güterschiffe nur eine sehr geringe Anzahl an Schiffen (ca. 0,1 %) mit den Messungen erfasst wurde. Generell ist davon auszugehen, dass auch wesentlich größere Belastungen auftreten, nach Berechnungen mit GBBSOft+ sind bei km 440,9 Absunkwerte bis etwa 70 cm zu erwarten (Tabelle 7).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

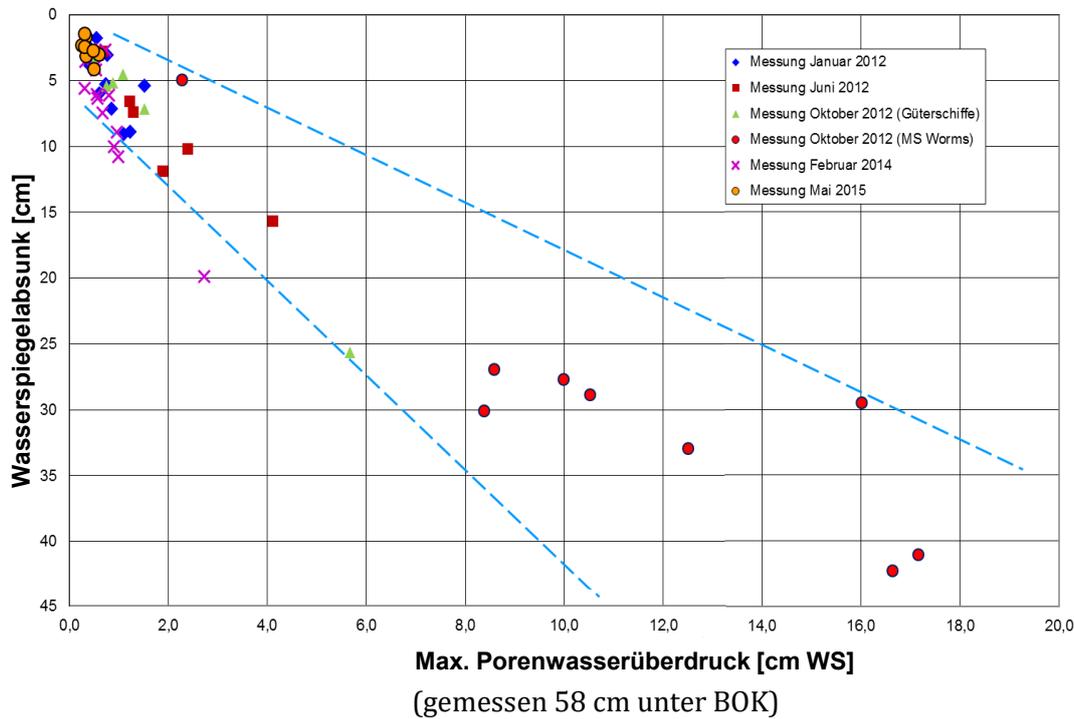


Bild 6: Ergebnisse der Porenwasserdruckmesskampagnen

Eine prinzipielle Darstellung des Verlaufs des Porenwasserüberdrucks $\Delta u(z)$ im Boden über die Tiefe z unter Böschungsoberkante unmittelbar nach dem Absinkereignis (grün hinterlegte Fläche) und die formelmäßige Erfassung nach (BAW 2011) zeigt Bild 7. Der Verlauf wird maßgebend von der Durchlässigkeit des Bodens k_f und der Absinkgeschwindigkeit v_{za} (b-Wert in der Formel in Bild 7) bestimmt. Die Porenwasserüberdrücke können maximal die Größe der Druckänderung infolge des Wasserspiegelabsunks erreichen. Die zu den Absinkwerten in 58 cm Tiefe gemessenen Porenwasserüberdrücke (Bild 6) liegen bei den Güterschiffen etwa bei 1/10 bis 1/3 der Druckänderung infolge des Wasserspiegelabsunks, bei der ufernahen Fahrt der MS Worms bei 1/3 bis 1/2 der Druckänderung. In größerer Tiefe liegen keine Messwerte vor. Ein Vergleich der gemessenen Absinkgeschwindigkeiten ($v_{za} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ bis $9 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$) mit der Durchlässigkeit des im Bereich der Messsonden anstehenden Bodens (kiesige Sande: $k_f \approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ bis $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) zeigt, dass die Absinkgeschwindigkeiten zum Teil nur wenig größer sind als die Durchlässigkeit des Bodens. Das heißt, die gemessenen geringen Porenwasserüberdrücke erscheinen plausibel. Sie zeigen jedoch deutlich, dass im Bereich der Weidenspreitlagen (VF 3) Porenwasserüberdrücke im Boden in Abhängigkeit des schiffsinduzierten Wasserspiegelabsunks auftreten, die die Uferstabilität beeinflussen können.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

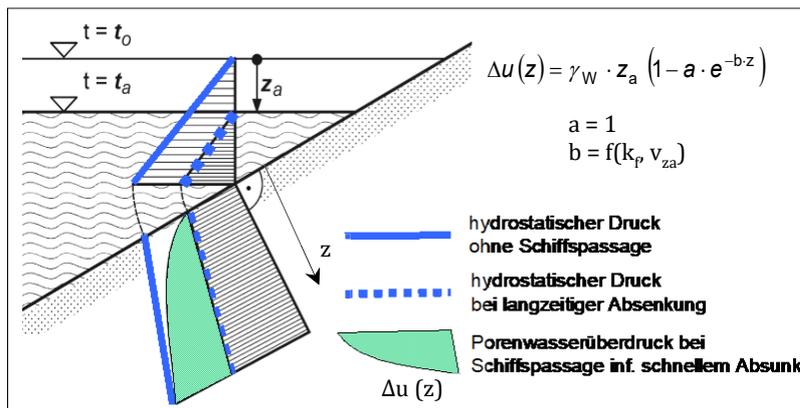


Bild 7: Prinzipielle Darstellung des Porenwasserüberdrucks im Boden bei Schiffsvorbeifahrt, Berechnungsformel nach (BAW 2011)

3.2.3 Hydraulische Uferbelastung

Messung der hydraulischen Belastung

Ein wichtiger Aspekt des Monitoringprogramms ist die Messung der hydraulischen Belastungen, die auf die eingebauten technisch-biologischen Ufersicherungen wirken. Wellen, Strömungen und der schnelle Wasserspiegelabsenk wurden im Bereich der Versuchsstrecke in insgesamt fünf Messkampagnen erfasst, von denen die ersten zwei vor Einbau der neuen Ufersicherungen stattfanden. Bei den Messkampagnen ist zwischen Strömungsmessungen, bei denen die natürliche Strömungsbelastung im Fokus steht, und Verkehrsbeobachtungen, bei denen zusätzlich die schiffsinduzierten Belastungen ermittelt werden, zu unterscheiden. Eine Auflistung der an der Versuchsstrecke durchgeführten Messkampagnen mit den jeweils ermittelten Größen ist in Tabelle 5 zu finden.

Die Vorgehensweise bei den Messkampagnen, die eingesetzten Messgeräte sowie die Auswertemethodik sind ausführlich in (Schmid 2009) erläutert. Bis auf die Messkampagne 2009 (Wasserstand: 20 bis 70 cm unter MW) fanden alle weiteren Messungen bei Wasserständen etwas unter der Hochwassermarken I (HWMI) (Kampagne - 2012) bzw. bei Wasserständen zwischen HWMI und Hochwassermarken II (HWMII) (Kampagne - 2011, 2013 und 2015) statt (s. Kap. 3.2.1).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 5: Durchgeführte Messkampagnen zu hydraulischen Uferbelastungen aus natürlicher Strömung und Schifffahrt

Datum	Art der Kampagne	Messprofile	Messungen bzw. Mess-größen	Wasserstand am Pegel Worms
19. – 26.08.2009	Verkehrsbeobachtung	440,600 441,100 441,600	Bugwellen-, Heckwellen- und Sekundärwellenhöhen Rück- und Wiederauffüllungsströmung Bugabsunk, -zeit Heckabsunk, -zeit	≈ NN + 85,7 m
20., 22. und 24.08.2009	Strömungsmessung	440,600 bis 441,600	Strömungsgeschwindigkeiten in Längsprofilen in 5 m, 10 m und 15 m Uferabstand Querprofilmessungen	
15.01.2011	Strömungsmessung	440,600 bis 441,600	Strömungsgeschwindigkeiten in Längsprofilen in 5 m, 10 m und 15 m Uferabstand Querprofilmessungen	≈ NN + 89,8 m
15.– 17.06.2012	Verkehrsbeobachtung	440,650 440,920 441,550	Bugwellen-, Heckwellen- und Sekundärwellenhöhen Bugabsunk, -zeit Heckabsunk, -zeit	≈ NN + 88,1 m
15.06.2012	Strömungsmessung	440,600 bis 441,600	Strömungsgeschwindigkeiten in Längsprofilen in 5 m, 10 m und 15 m Uferabstand Querprofilmessungen	
06./11.06.2013	Strömungsmessung	440,600 bis 441,600	Strömungsgeschwindigkeiten Ufernahe vertikale Profile in 28 Querprofilen Querprofilmessungen	06.06.2013: ≈ NN + 90,4 m 11.06.2013: ≈ NN + 88,6 m
07. – 09.05.2015	Verkehrsbeobachtung	440,690 440,920 441,050 441,275 441,525	Bugwellen-, Heckwellen- und Sekundärwellenhöhen Bugabsunk, -zeit Heckabsunk, -zeit	≈ NN + 89,0 m
07., 08. und 09.05.2015	Strömungsmessung	440,600 bis 441,600	ADV-Messungen in VF 3 Strömungsgeschwindigkeiten in Längsprofilen in 5 m, 10 m und 15 m Uferabstand Querprofilmessungen	

Ergebnisse

Während der drei Verkehrsbeobachtungen wurden insgesamt fast 1000 Schiffe registriert. Insbesondere aufgrund der geringeren Entfernung der Fahrrinne zum Ufer wurden die größten Wellenhöhen bei jeder Messkampagne am Anfang der Versuchsstrecke bei km 440,600 (VF 1) registriert. Stromab wurden mit größer werdender Entfernung der Fahrrinne zum Ufer geringere Wellenhöhen gemessen. Der Vergleich der verschiedenen Messkampagnen zeigt zudem eine deutliche Abhängigkeit der Wellenhöhen vom vorherrschenden Wasserstand. In Tabelle 2 sind die maximalen Bug-, Heck- und Sekundärwellenhöhen (H_{Bug} , H_{Heck} , H_{Sek}) der drei Messeinsätze aufgelistet. 2009 betrug die maximale Wellenhöhe 81 cm bei km 440,600. Bei km 441,600 am unterstromigen Ende der Versuchsstrecke wurden maximale Werte von rund 40 cm ermittelt. Im Gegensatz dazu lagen die gemessenen Wellenhöhen bei den Verkehrsbeobachtungen 2012 und 2015 maximal bei 24 cm bzw. 30 cm. 2015 waren die Messwerte tendenziell geringer als 2012, da HMWI überschritten wurde, was nach Rheinschiffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV) Restriktionen für die Schifffahrt, wie zum Beispiel eine zulässige Schiffsgeschwindigkeit von 20 km/h (über Grund) und das vorgeschriebene Fahren in der Fahrwassermitte (Talfahrt) bzw. im mittleren Drittel des Stroms (Bergfahrt), zur Folge hat.

Tabelle 6: Gemessene maximale Wellenhöhen in zwei Querschnitten

		Maximale Wellenhöhe [m]			Wasserstand [NN + m]
Jahr	km	H_{Bug}	H_{Heck}	H_{Sek}	
2009	440,600	0,51	0,81	0,57	85,7
	441,600	0,40	0,43	0,43	
2012	440,650	0,22	0,24	0,14	88,1
	441,550	0,12	0,14	0,11	
2015	440,690	0,08	0,10	0,30	89,0
	441,525	0,09	0,09	0,22	

Generell lässt sich sagen, dass unter Berücksichtigung der zum Teil unterschiedlichen Fahrweisen der Schiffe durch die Restriktionen ab HMWI die Wellenhöhen im Bereich der oberhalb MW eingebauten neuen Ufersicherungen je höher sind, umso niedriger der Wasserstand ist. Außerdem wird aus den Werten in Tabelle 6 ersichtlich, dass bei den höheren Wasserständen 2015 die maximalen Belastungswerte durch Sekundärwellen erzielt wurden und nicht durch Primärwellen.

Natürliche und schiffsinduzierte Strömungen überlagern sich, sodass es sehr schwierig ist, die ufernahen schiffsinduzierten Strömungen separat zu messen. Bei der Messkampagne 2009 zeigte sich beispielsweise bei der Auswertung, dass die schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten durch eine turbulente Grundströmung überprägt waren. Deshalb konnten keine belastbaren Ergebnisse zu schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt werden.

Die ufernahen Fließgeschwindigkeiten aus der natürlichen Strömung ohne Schifffahrtseinfluss wurden bei den Messkampagnen tiefengemittelt in Längsprofilen in 5 m, 10 m und 15 m Uferabstand ermittelt. Für die technisch-biologischen Ufersicherungen sind jedoch nur die Messungen

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

von 2011, 2012, 2013 und 2015 relevant, da der Wasserstand hier über MW und damit im Bereich der neuen Ufersicherungen lag (Bild 8).

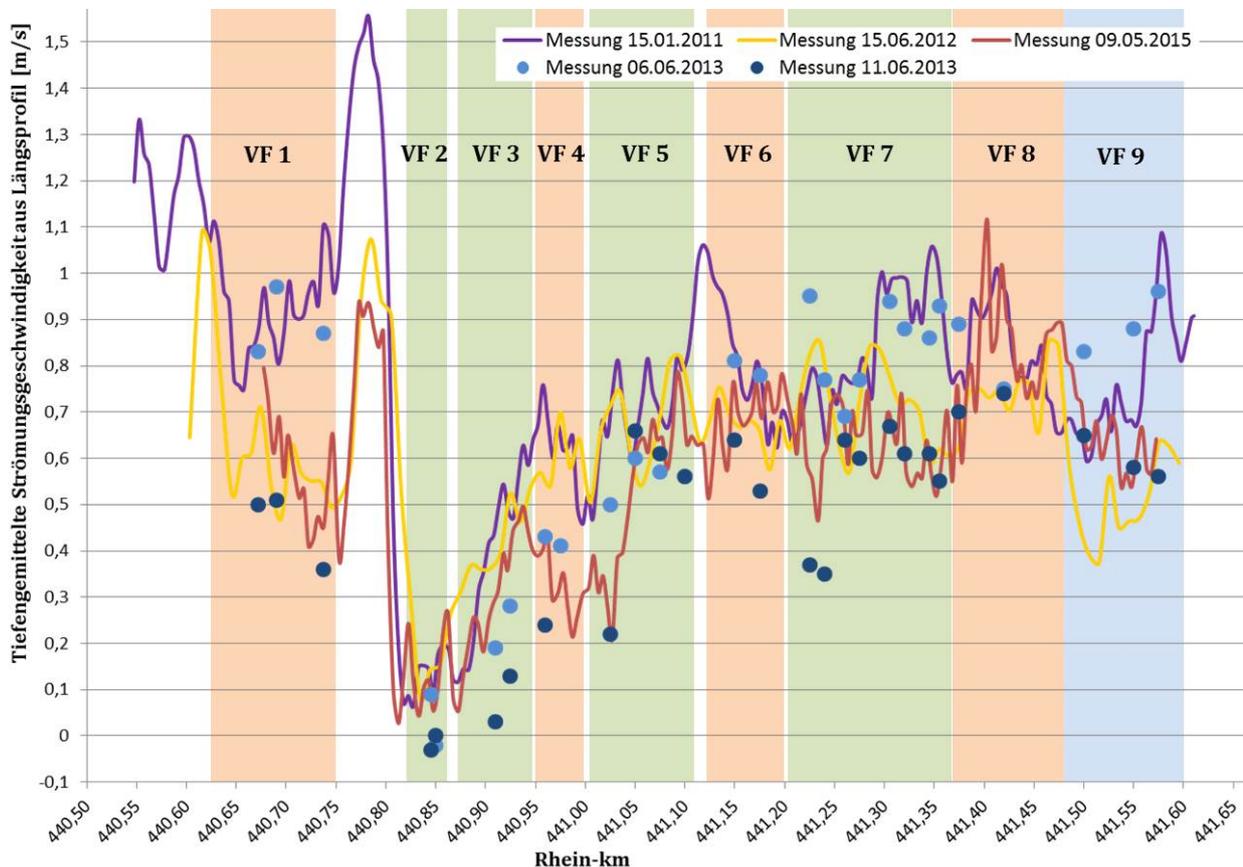


Bild 8: Längsprofile der gemessenen tiefengemittelten natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten in ca. 5 m-Uferabstand (Positive Werte in Fließrichtung des Rheins)

Die ufernahen Strömungsgeschwindigkeiten sind im ersten Teil der Strecke bis zum Ende von VF 4 aufgrund der Ufergeometrie stark schwankend. Im Bereich von VF 1 ist das Ufer mehrere Meter zurückversetzt. In Verlängerung der Uferlinie wurde ein Steinwall bis zu einer Höhe von MW + 0,5 m errichtet. Der anschließende Ufervorsprung beschleunigt die Strömung zunächst bis auf maximal 1,5 m/s und lenkt sie in Richtung Flussmitte. Dadurch entsteht im Bereich von VF 2 ein Strömungsschatten mit sehr geringen Geschwindigkeiten, die gegen Null tendieren oder im Fall der punktuellen Messungen 2013 lokal sogar entgegen der Fließrichtung im Hauptgerinne gerichtet sind. Die Strömungsverhältnisse gleichen sich im Verlauf der VF 3 und 4 wieder aus. Die Strömungsbelastung ist hier allerdings noch etwas geringer als in den stromab folgenden Abschnitten. Bis zum Ende der Versuchsstrecke bleiben die ufernahen Geschwindigkeiten auf ähnlichem Niveau (0,5 m/s bis 1,1 m/s). Einzelne Messspitzen der verschiedenen Jahre können u. a. an der jeweiligen Messposition liegen, die weiter in Richtung Flussmitte lag als bei anderen Messungen und dadurch höhere Geschwindigkeiten lieferte (z. B. 2015 in VF 8). Zu beachten ist dabei, dass bei eventuellen Schiffsvorbeifahrten höhere ufernahe Belastungen durch die Überlagerung mit den schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten auftreten können.

Uferbelastungen aus Wasserstandsschwankungen

Höhe und Dauer der Wasserstände bestimmen die Zeiten, in denen die Ufersicherungen hydraulischen Belastungen ausgesetzt sind. Sie haben dementsprechend einen wesentlichen Einfluss auf das Wachstum und die Stabilität der Pflanzen und damit die Uferstandsicherheit. Auf die Wasserstandsschwankungen wird in Kap. 3.2.1 eingegangen.

Fazit

Die hydraulischen Messungen zeigen, dass das Ufer durch schiffsinduzierte Wellen und Strömungen sowie durch die natürliche Strömung und die schwankenden Wasserstände stark belastet wird. Aufgrund der nur kurzen Messzeiträume der Verkehrsbeobachtungen zwischen drei und sieben Tagen kann derzeit aber keine Aussage darüber getroffen werden, ob diese Messdaten repräsentativ für die typischen schiffsinduzierten Belastungen in diesem Rheinabschnitt sind. Es ist davon auszugehen, dass die maximalen Belastungswerte in kurzen Messzeiträumen nicht unbedingt erfasst werden. Bei den in der Versuchsstrecke durchgeführten Verkehrsbeobachtungen wurden nur rund 1000 von jährlich rund 40.000 Schiffen erfasst. Dabei wurde bei der Messung 2009 ein Einzelwert von 81 cm für die Wellenhöhe in derselben Größenordnung gemessen wie das Programm zur Dimensionierung von Böschungssicherungen GBBSOft+ als Maximalwert berechnet. Die mit GBBSOft+ berechneten, theoretisch maximal möglichen Belastungsgrößen sind in Tabelle 7 für zwei Querprofile exemplarisch aufgeführt.

Tabelle 7: Berechnete, theoretisch maximal mögliche schiffsinduzierte Belastungsgrößen

	Rhein-km 440,90	Rhein-km 441,50
Maximale Wellenhöhe [m]	0,88	0,40
Maximaler Absenk [m]	0,73	0,19
Maximale Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	1,99	1,10

4 Ergebnisse hinsichtlich Standsicherheit und Vegetation

4.1 Gruppierung der Versuchsfelder

Im Folgenden werden die wichtigsten Monitoringergebnisse für den Untersuchungszeitraum von 01/2012, d. h. unmittelbar nach Bauabschluss, bis 12/2017 hinsichtlich der Stabilität der Einzelmaßnahmen und der Fähigkeit zur Gewährleistung des Uferschutzes sowie der Sanierungs- und Unterhaltungsmaßnahmen jeweils für die einzelnen Versuchsfelder dargestellt. Die Vegetationsentwicklung wird in diesem Zusammenhang in ihrer ufersichernden Funktion betrachtet, Aussagen zur ökologischen Wirksamkeit finden sich in Kap. 5. Die Maßnahmen wurden technisch unter dem Gesichtspunkt getestet, inwieweit sie als Ersatz für die konventionelle Steinschüttung in gleicher Weise wie diese das Ufer schützen können und unter welchen Bedingungen sie als Alternative zu empfehlen sind. Im Fokus stehen dabei die Versuchsfelder 2, 3, 5 und 7, in denen die technisch-biologischen Ufersicherungen die ursprüngliche Steinschüttung ersetzen und dementsprechend den Uferschutz gewährleisten müssen (Kap. 4.2). Für die Versuchsfelder 1, 4, 6 und 8, in denen die Steinschüttung als Uferschutz erhalten und ökologisch aufgewertet wurde, werden dagegen primär Ergebnisse zur Pflanzenentwicklung dargestellt (Kap. 4.3). Eine Sonderstellung nimmt Versuchsfeld 9 ein, da nach Rückbau der Steinschüttung keine neue Böschungssicherung eingebaut wurde. Hier geht es um die Beurteilung der Standsicherheit, der Erosionsentwicklung und der natürlichen Sukzession hinsichtlich des pflanzlichen Bewuchses (Kap. 4.4).

Eine zusammenfassende Übersicht zur Entwicklung der Maßnahmen in den Versuchsfeldern 1 bis 9 vom kritischen Anfangszustand bis heute aus Sicht der Uferstabilität und der Ökologie sowie zu den durchgeführten Unterhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen zeigen die in der Anlage 4 zusammengestellten Maßnahmenblätter M1 – M15.

4.2 Neue Uferschutzmaßnahmen nach Rückbau der Steinschüttung (Versuchsfelder 2, 3, 5, 7)

4.2.1 Versuchsfelder 2 und 3 – M1 Weidenspreitlagen

Weidenspreitlagen sind Uferschutzmaßnahmen, die aus lebendem Weidenastmaterial bestehen und kein signifikantes Eigengewicht besitzen. Sie wurden in den VF 2 und 3 bewusst, trotz der rechnerisch ermittelten Notwendigkeit einer flächigen Auflast, die maximal einer 30 cm dicken Steinschüttung entspricht (theoretisch möglicher Wasserspiegelabsenk bei Schiffsvorbeifahrt: 70 cm, Kap. 3.2.3), angewendet. Porenwasserüberdrücke im Boden wurden im VF 3 während der Messkampagnen bei einzelnen Schiffsvorbeifahrten nachgewiesen (Kap. 3.2.2). Zusätzlich ist aufgrund der Wellen- und Strömungsbelastung ein Schutz vor Oberflächenerosion erforderlich. Mit der Maßnahme wird untersucht, ob die Weidenspreitlagen – auch ohne signifikantes Flächengewicht – die beschriebenen Anforderungen an den Uferschutz erfüllen können (Tabelle 8).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 8: Gewährleistung des Uferschutzes durch Weidenspreitlagen

Anforderungen	Wie/wodurch soll Uferschutz gewährleistet werden?	
	Anfangszustand (ohne Wurzeln und Sprossen)	Langfristig (mit Wurzeln und Sprossen)
Wurzelwachstum in den Untergrund	Flächendeckende Verlegung austriebsfähiger Weidenäste mit ausreichenden Befestigungen (Querriegel und Pflöcke in engem Raster) und Übererdung für flächenhaften Bodenkontakt	Keine Hilfsmittel mehr erforderlich
Erosionssicherheit	Flächendeckende, lückenlose Abdeckung der Böschungsoberfläche mit den ausreichend befestigten Weidenästen	Oberirdische Sprosse und flächendeckendes oberflächennahes Wurzelgeflecht
Filterstabilität	Flächendeckende, lückenlose Abdeckung der Böschungsoberfläche mit den ausreichend befestigten Weidenästen oder zusätzlicher Einbau eines biologisch abbaubaren Geotextilfilters zwischen Boden und Weidenästen	Oberflächennahes, zusammenhängendes und ausreichend dicht verzweigtes Wurzelsystem im Boden (Wurzelgeflecht)
Sicherheit gegenüber Abgleiten (nur relevant bei Auftreten von Porenwasserüberdrücken)	Problematisch, da quasi kein Eigengewicht vorhanden; Erhöhung der Stabilität durch ausreichend lange und eng stehende Pflöcke (Bodenvernagelung)	Ausreichend feste und tief in den Untergrund reichende, dicht verzweigte Wurzeln im Boden (Einzelwurzeln, Wurzelgeflecht)
Sicherheit gegenüber hydrodynamischer Bodenverlagerung (nur relevant bei Auftreten von Porenwasserüberdrücken)	Nicht zu gewährleisten, da am Anfang quasi kein Eigengewicht vorhanden; Begrenzung der böschungsabwärts gerichteten Bodenbewegungen durch parallele Querriegel, die in einem entsprechend engen Raster in Böschungslängsrichtung angeordnet sind	Oberflächennahes, zusammenhängendes und ausreichend dicht verzweigtes Wurzelsystem im Boden (Wurzelgeflecht)

Für die Weidenspreitlage wurden gebietsheimische (autochthone) und standorttypische Strauch- (Purpur-Weide *Salix purpurea*, seltener Korb-Weide *S. viminalis*) und Baumweidenarten (Silber-Weide *S. alba*) auf einer benachbarten Spenderfläche gewonnen. Baum- und Strauchweiden wurden eingebracht, um eine höhere Vielfalt der Gehölzstrukturen zu erreichen. Die Silber-Weide ist die häufigste Baumweide am Rhein, die Purpur-Weide wurde aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Trockenresistenz und des nicht so kräftigen Wuchses (Vorteile bei der Unterhaltung) ausgewählt. Die Weidenäste wurden nach Rückbau der Steinschüttung ohne zusätzlichen Filter quer (VF 2) bzw. diagonal (VF 3) auf der 1 : 3 geneigten Böschung verlegt, mit Pflöcken und Querriegeln befestigt und ca. 2 bis 3 cm mit kiesigem Sand übererdet. Da vor allem die Äste der Purpur-Weide relativ dünn sind, standen Äste mit Durchmessern von ca. 0,5 cm bis 3 cm zur Verfügung, mit denen die vorgesehene flächendeckende Verlegung nicht erreicht werden konnte. Bereits bei den ersten Überstauereignissen und gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung wurde dadurch nicht nur die Übererdung, sondern zusätzlich lokal Boden unterhalb der Weidenäste erodiert. Auch das im unteren Böschungsbereich (bis etwa 1,70 m über MW) als zusätzlicher Erosionsschutz über den Weidenästen flächig verlegte und mit Maschendraht befestigte Fichtenreisig blieb unter Auftrieb weitestgehend wirkungslos und konnte die Erosion nicht verhindern. Einzelne Pflöcke, die

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

aufgrund von Steinen im Untergrund nicht tief genug eingebaut werden konnten, wurden zudem gelockert bzw. herausgezogen. Auch das fehlende Flächengewicht hat Instabilitäten in der kritischen Anfangszeit, in der sich Wurzeln und Sprosse für den Uferschutz erst ausbilden müssen, begünstigt.

Durch Nachbesserungsarbeiten (Nachschlagen von Pflöcken, erneute Übererdung) konnten sich die Weiden im weiteren Verlauf gut entwickeln (Bild 9) und das Ufer durch die wachsenden Wurzeln und Triebe zunehmend stabilisieren. Generell etwas schwächer zeigten sich die Weiden zunächst im unteren Böschungsbereich bis etwa 1 m über Mittelwasser und im oberen Böschungsdrittel. Im unteren Bereich werden die Weiden durch den permanenten Einfluss der schiffsinduzierten Belastungen und durch oftmals langanhaltende Überstauungen stark beansprucht. Im oberen Böschungsdrittel wirken sich hingegen Trockenheit und Schattendruck der benachbarten Pappeln nachteilig auf das Gehölzwachstum aus. Die wesentlich dünneren Triebe wurden dort zudem von der nur gering überflutungstoleranten parasitisch lebenden Pappel-Seide (*Cuscuta lupuliformis*; Bild 10) lokal zum Absterben gebracht.



Bild 9: Übersicht: Entwicklung Weidenspreitlagen im VF 3 – 4/2012 (links), 7/2012 (Mitte), 7/2017 (rechts) (Fotos: BAW)



Bild 10: Befall junger Weidentriebe mit Pappel-Seide in VF 2, 8/2016 (links); lokal abgestorbene Triebe, 8/2016 (rechts) (Fotos: Katja Behrendt, BfG)

Generell zeigte sich, dass die Wurzel- und Sprossbildung bevorzugt im Bereich der Querriegel und Pflöcke erfolgte, d. h. in den Bereichen, in denen die Äste von Anfang an fest an den Boden gepresst wurden und dadurch immer sehr guten Bodenkontakt hatten. Dies ist auch im Bild 9, links an den

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

ersten Austrieben entlang der Querriegel sichtbar. Zwischen den Querriegeln blieb die Wurzel- und Sprossausbildung bis heute geringer.

Drei Jahre nach Einbau erfolgten Anfang Februar 2015 testweise erste Unterhaltungsarbeiten an den Weiden. Dabei wurden die Weiden zu Vergleichszwecken im VF 2 großflächig und im VF 3 abschnittsweise und damit kleinräumiger, jeweils bis ca. 10 cm über der Böschungsoberfläche, zurückgeschnitten. Einzelne stark gewachsene Triebe wurden ausgespart und als künftig herauszupflegende „Zielbäume“ definiert. Aus technischer Sicht sollte die Flexibilität der bereits sehr dick gewachsenen Weidentriebe hinsichtlich Hochwasserabfluss erhalten bleiben und das Spross- und Wurzelwachstum zum Schutz des Ufers angeregt werden. Ökologisches Ziel war, durch den Rückschnitt einen gemischtaltrigen, mehrschichtigen und somit strukturreichen Weidenbestand zu entwickeln.



Bild 11: Zustand VF 2 kurz nach Rückschnitt am 10.4.2015 (links) und am 11.5.2015 (rechts) (Fotos: BAW)

Bild 11 zeigt den Zustand des VF 2 ca. 6 Wochen (links) und 10 Wochen (rechts) nach dem Rückschnitt. Der Übergang zum nicht zurückgeschnittenen Bereich ist in beiden Fotos sichtbar. Auch 2 ½ Jahre nach Rückschnitt ist dieser noch an der unterschiedlichen Wuchshöhe der Weiden (vgl. Bild 9 rechts) deutlich erkennbar.

Unmittelbar nach dem Rückschnitt führte eine längere Hochwasserperiode zum Einstau der Weiden bis zu 3 m über Mittelwasser (vgl. Bild 5) bei gleichzeitigen schiffsinduzierten Belastungen am Ufer. Die durch die aufgewachsenen Sprosse bereits erreichte Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten war hier durch den Rückschnitt nicht mehr gegeben. Insbesondere in den großflächig zurückgeschnittenen Bereichen des VF 2 trat verstärkt Erosion von zwischen den Weidensprossen abgelagertem Treibgut (Bild 11 links), aber auch von anstehendem Boden auf. Zusätzlich wurden die zurückgeschnittenen Weiden durch den langen Überstau und eine nach dem Hochwasser anschließende Trockenperiode mit hohen Temperaturen geschwächt. In diesem, am stärksten beanspruchten Böschungsbereich kam es zu lokalen Ausfällen der Weiden und großflächigen Ast-Hohllagen. Die Gesamtdeckung des Weidenbewuchses betrug im August 2016 nur noch ca. 20 bis 30 %. Nur im unteren und oberen Böschungsbereich konnten sich die Weiden regenerieren. Hier konnte im August 2016 eine Gesamtdeckung des Weidenbewuchses von ca.

70 – 80 % (unterer Böschungsbereich) und ca. 70 % (oberer Böschungsbereich) verzeichnet werden. Die höchsten Triebe der zurückgeschnittenen Silber-Weiden erreichten bis 3,50 m. Der untere Böschungsbereich stellte auch bei Niedrigwasser und Hitze ein ausreichendes Wasserangebot. Im oberen Böschungsbereich wurden die Weiden zudem insgesamt seltener und nur kurz eingestaut. Mit Beginn der Trockenperiode setzte jedoch im oberen Bereich – wie auch in den Vorjahren beobachtet – ein Befall der Weidentriebe mit parasitisch lebender Pappel-Seide ein und brachte einzelne Weidentriebe zum Absterben (Bild 10). Im August 2016 waren dadurch bereichsweise großflächig Triebe abgestorben und viele neue befallen. In Abhängigkeit der Länge einer Trockenperiode kann der Befall durch Pappel-Seide die Vitalität der Weiden grundsätzlich auch großflächig beeinträchtigen. Die Entwicklung wird dahingehend künftig im Auge behalten. Die vitalen Weidenbereiche, insbesondere im unteren Böschungsbereich, bieten durch Abbremsen der Strömung zwar einen gewissen Schutz, können aber zunehmende Erosion bei höheren Wasserständen nicht verhindern.

Im VF 3 mit den kleineren Rückschnittflächen zeigten die Weiden ein größeres Regenerationsvermögen und konnten sich insgesamt wieder gut erholen. Hier erreichte der Weidenbewuchs 2016 eine Gesamtdeckung von ca. 80 % im unteren und mittleren Böschungsbereich und ca. 65 % im oberen Böschungsbereich. In letzterem konnte ebenfalls der Befall mit Pappel-Seide beobachtet werden, die Weiden sind dort insgesamt weniger wüchsig und vital. Es konnten insgesamt Triebblängen einzelner nicht zurückgeschnittener Baumweiden (Silber-Weide) von bis zu 6 m bei Triebdurchmessern von bis zu 8 cm ermittelt werden.

Der Zustand in den VF 2 und 3 zeigt sich auch in den wiederholten Querprofileinmaßen des WSA Oberrhein (Bilder 12 und 13). Im Bild 12 ist erkennbar, dass im VF 2 bereits zwischen 2012 und 2015/16 begrenzt Erosion stattgefunden hat (bis maximal ca. 20 cm Tiefe). Nach 2015/16, d. h., nach dem großflächigen Rückschnitt hat die Erosion insbesondere im mittleren Böschungsbereich sehr stark zugenommen. Lokal wurden bis heute bis zu 70 cm Boden bei wiederkehrend hohen Wasserständen abgetragen. Im Vergleich dazu ist die Erosionsrate im VF 3 (Bild 13) nach dem kleinräumigen Rückschnitt geringer geblieben. Das heißt, für zukünftige Unterhaltungen ist immer ein kleinräumiger Rückschnitt zu empfehlen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

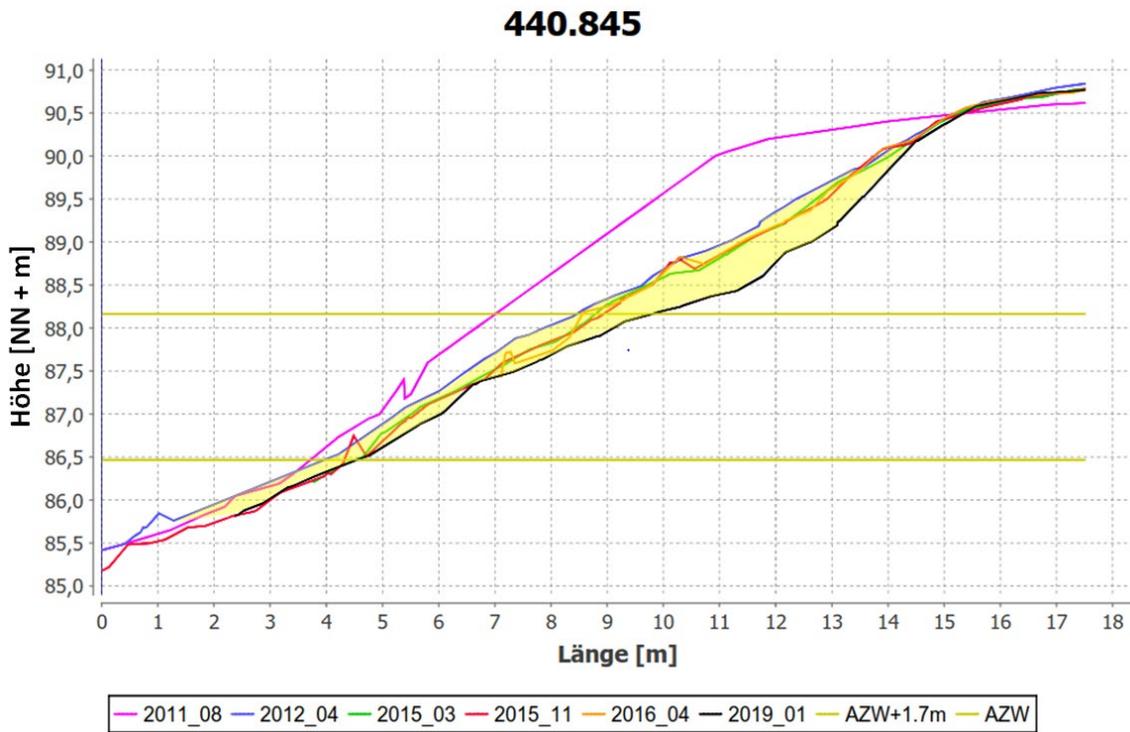


Bild 12: Einmaß Querprofil km 440,845 (VF 2, großflächiger Rückschnitt) – gelb hinterlegt: Erozierter Bereich im Zeitraum 04/2012 bis 01/2019

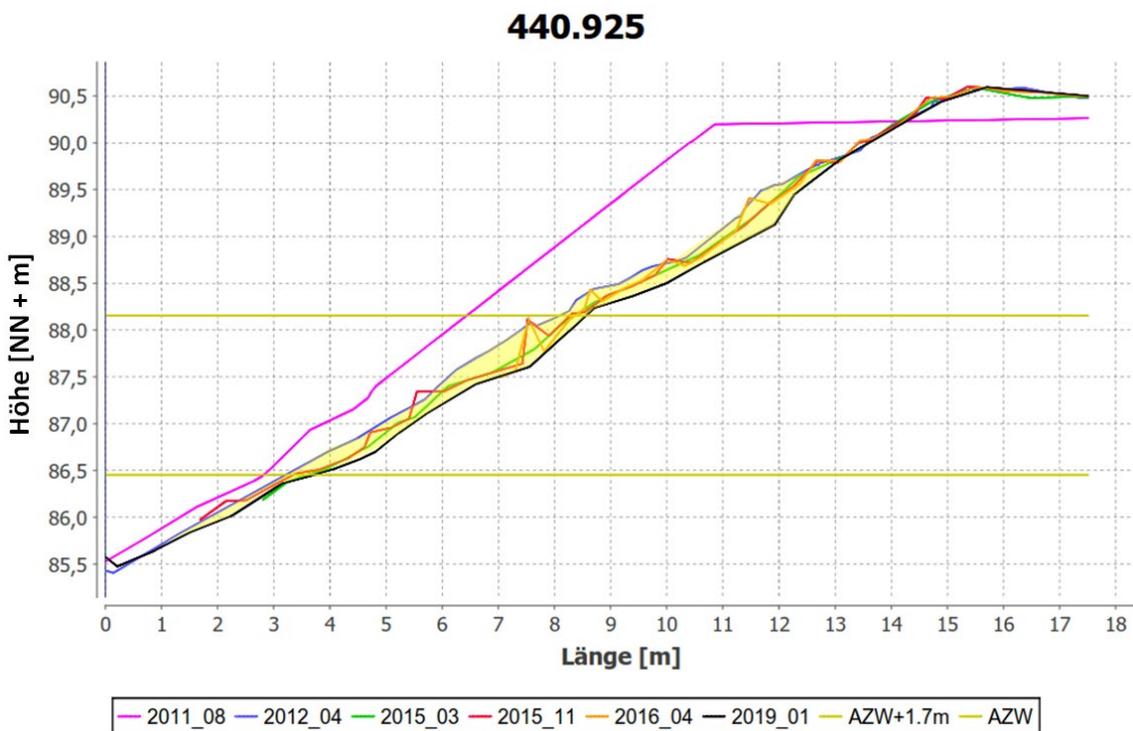


Bild 13: Einmaß Querprofil km 440,925 (VF 3, kleinräumiger Rückschnitt) – gelb hinterlegt: Erozierter Bereich im Zeitraum 04/2012 bis 01/2019

Um der fortschreitenden Erosion im VF 2 entgegenzuwirken, werden seit 2018 verschiedene Sanierungsmaßnahmen getestet. Anfang 2018 wurden zunächst einzelne Weidensetzstangen und im oberen Böschungsbereich Hartriegel (*Cornus sanguinea*), ein standorttypisches Hartholzauengehölz, zur Vegetationsverdichtung gepflanzt. Im Gegensatz zu den Weidensetzstangen konnte sich der Hartriegel im trockenen Jahr 2018 nicht erfolgreich etablieren. Im Februar 2019 wurde zusätzlich im mittleren Böschungsbereich eine lokale Sanierung mit einer neuen Weidenspreitlage auf einer begrenzten Fläche von ca. 6 m² durchgeführt. Versuchsweise wurden auch Weidenäste am Boden fixiert, Erfahrungen hierzu stehen noch aus. Solche Sanierungen sind notwendig, weil die Weide nicht aus Wurzelbrut neu austreibt. Der Wurzelstock ist zwar aufgrund der guten Regeneration nach mechanischer Beschädigung (Rückschnitt, Verletzungen) sehr vital und langlebig. Stirbt der Stock aber ab, wird die Bestandslücke im Boden mit der Zeit nur durch das sich ausbreitende Wurzelsystem der Nachbarpflanzen stabilisiert, ein oberirdischer Austrieb neuer Ruten aus dem Wurzelsystem erfolgt nicht. Da Weiden nur auf feuchten, offenen Rohböden keimen, ist auch eine Etablierung neuer Weiden aus Samen unwahrscheinlich.

Nach dem sehr trockenen Jahr 2018 wurde ein Absterben von Weiden im oberen Böschungsbereich festgestellt, was weiter zu beobachten sein wird.

Ergebnis der Wurzelaufrabungen

Die lokale Standsicherheit einer mit Weidenspreitlagen geschützten Uferböschung hängt maßgeblich von der Spross- und Wurzelbildung ab. Das oberflächennahe Wurzelgeflecht kann den Boden schützen, Oberflächenerosion verhindern und die Filterstabilität im Böschungsbereich gewährleisten. Weiterhin können die Wurzeln die Scherfestigkeit des Bodens erhöhen und so ein Abgleiten der Böschung infolge Wasserspiegelabsink bei Schiffsvorbeifahrt verhindern. Um die Standsicherheit der Uferböschung in den VF 2 und 3 beurteilen zu können, wurde der Zustand der Weidenwurzeln 2012 und 2017 in Zusammenarbeit mit der Leibniz-Universität Hannover jeweils in einem nicht von Rückschnitt beeinflussten Bereich am unterstromigen Ende des VF 3 durch Aufgrabungen untersucht.

Im November 2012 erfolgte bei km 440,940 eine erste Aufgrabung der Weidenwurzeln, um deren Entwicklung ein Jahr nach Einbau beurteilen zu können. An zwei Stellen in verschiedenen Höhen auf der Böschung wurden die Wurzeln auf einer Fläche von jeweils ca. 1,0 m x 0,5 m freigelegt. Dabei zeigte sich, dass sich bereits nach der ersten Vegetationsperiode ein relativ dichtes Wurzelwerk mit Wurzellängen bis 60 cm entwickelt hatte (Schneider 2013).

Im April 2017 wurde die Wurzelaufrabung nach 5-jähriger Anwuchszeit im Anschlussbereich der ersten Aufgrabung wiederholt (Ziegenhorn 2017). Die Wurzelbildung der hier überwiegend vorhandenen Purpur- und Silber-Weiden wurde in drei Feldern in unterschiedlicher Höhe auf der Böschung im Bereich zwischen Mittelwasser MW und der Hochwassermarken HWMI (MW +2,40 m) begutachtet. Dabei wurde ein tiefreichendes und sehr verzweigtes Wurzelsystem mit Wurzellängen bis 1,70 m nachgewiesen (Bild 14). Die Wurzeln wurden entnommen und im Labor der BAW untersucht und vermessen. Die Wurzelmasse wurde in Abhängigkeit der Tiefe unter der Geländeoberkante ermittelt. Zur Quantifizierung der stabilisierenden Wirkung wurden

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

die Ergebnisse von parallel in der BAW in Kooperation mit der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführten Laborversuchen herangezogen (Eisenmann 2015). An Weidenspreitlagen, in Versuchskästen aus Korb- und Purpurweidenästen über eine Vegetationsperiode vorgezogen, wurde in Großscherversuchen im Grundbaulabor der BAW die wurzelbedingte Scherfestigkeitserhöhung des Bodens in Abhängigkeit von der Wurzelrockenmasse ermittelt (Bild 15). Wenn dieser Zusammenhang unter Vernachlässigung des unterschiedlichen Alters der Weiden im Labor und in der Natur zugrunde gelegt wird, kann für die Weiden im Naturversuch am Rhein nach gut fünfjähriger Anwuchszeit von einer erreichten Scherfestigkeitserhöhung gegenüber dem nicht durchwurzelten Boden von mindestens 10 kN/m^2 bis in 10 cm Tiefe unter der Geländeoberkante (Wurzelrockenmasse: 4.500 g/m^3), von 4 kN/m^2 im Bereich von 10 cm bis 40 cm Tiefe (Wurzelrockenmasse: 1.000 g/m^3) und von 1 kN/m^2 im Bereich von 40 cm bis 70 cm Tiefe (Wurzelrockenmasse: 550 g/m^3) ausgegangen werden. Numerische Berechnungen mit dem Finite Elemente Programm PLAXIS zur Böschungstabilität zeigen, dass mit diesen Scherfestigkeiten des durchwurzelten Bodens unter den gegebenen Randbedingungen ein Abgleiten der Böschung infolge eines schnellen Wasserspiegelabsinks von 70 cm bei Schiffsvorbeifahrt verhindert werden kann. Das entspricht etwa dem theoretisch maximal zu erwartenden Absink im Bereich der Weidenspreitlagen. Das heißt, die Weidenspreitlagen können in der aktuellen Ausbildung das Ufer nachweislich vor Böschungsrutschungen schützen.



Bild 14: Freigelegte Wurzeln der Weiden im VF 3 (Fotos: BAW)

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

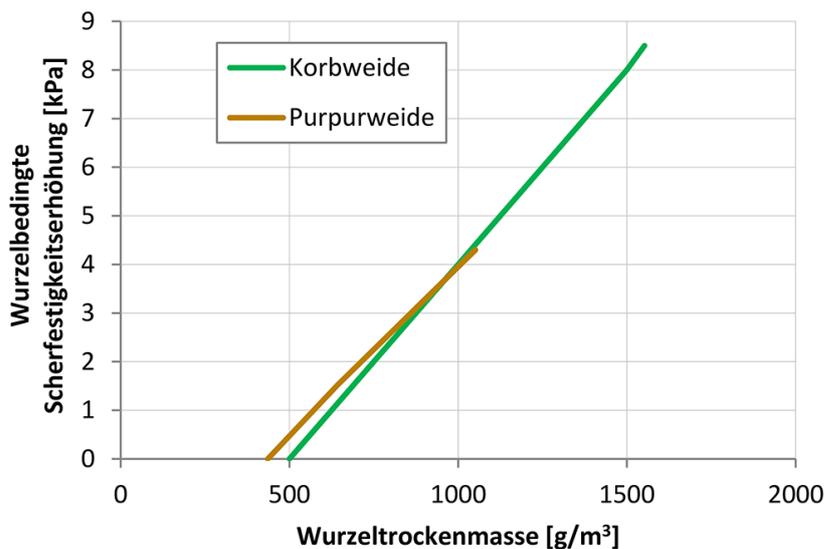


Bild 15: Scherfestigkeitserhöhung des Bodens in Abhängigkeit von der Wurzeltrockenmasse (Eisenmann 2015)

Eine weitere wichtige Erkenntnis der Wurzelgrabung ist, dass Asteinlagen mit Durchmessern größer als 2 cm deutlich mehr Wurzelmasse bilden als dünnere Asteinlagen. Außerdem wurden Wurzeln bevorzugt im Bereich der Querriegel und Pflöcke nachgewiesen, d. h. dort, wo die verlegten Weidenäste von Anfang an durch die Befestigungen fest an den Boden gedrückt wurden. Auch wenn sich die Wurzeln seitlich etwas ausbreiteten, blieben die Bereiche zwischen den Querriegeln deutlich weniger durchwurzelt.

Im Bereich der Asteinlagen wurde eine intensive oberflächennahe Durchwurzelung festgestellt, die bereits Boden zurückhalten und damit zur Filterfunktion und zum Schutz vor Oberflächenerosion beitragen kann. Das konnte auch in parallel im Grundbaulabor der BAW in Kooperation mit der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführten Filterversuchen bestätigt werden (Sokopp 2017). Hier wurden Äste der Korb- und Silberweide in Versuchskästen vorgezogen und nach Einbau sowie nach einer Anwuchszeit von einem, drei und sechs Monaten in einer dazu entwickelten Versuchseinrichtung getestet. Die Prüfkörper, bestehend aus Weidenästen und Boden (feinkiesiger Sand) wurden entsprechend der Wasserstraßenbedingungen durchströmt und der Bodenaustrag gemessen (Bild 16). Unmittelbar nach Einbau konnte der Boden – auch bei nahezu flächendeckender Verlegung der Weidenäste – nicht ausreichend zurückgehalten werden. Nach einer dreimonatigen Anwuchszeit war das Wurzelgeflecht der Weiden jedoch soweit ausgebildet, dass ein Bodenaustrag fast vollständig verhindert wurde.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

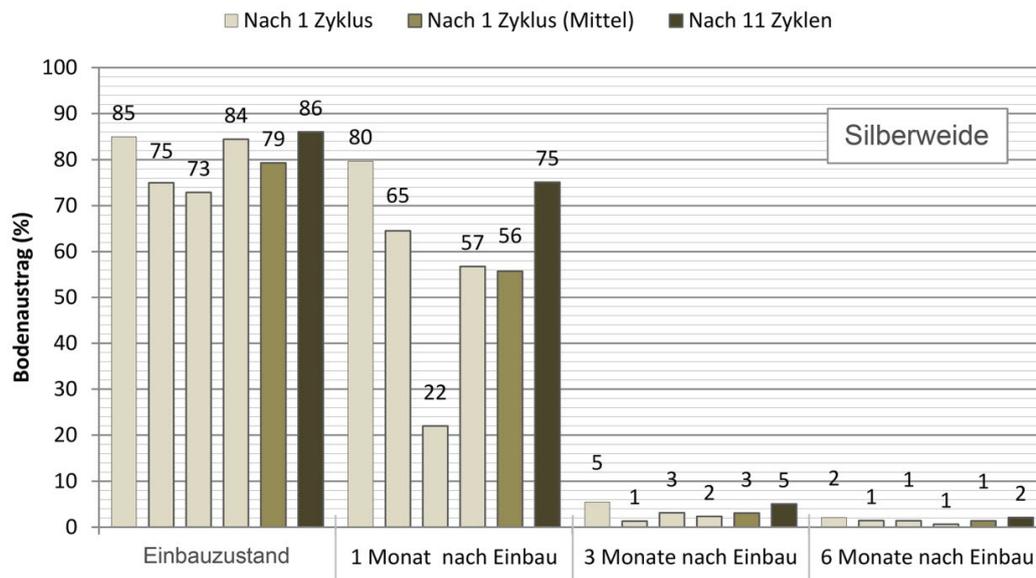


Bild 16: Im Labor ermittelter Bodenrückhalt unterschiedlich alter Weidenspreitlagen (Sokopp 2017)

Das bedeutet, dass gegebenenfalls temporär für die kritische Anfangszeit Zusatzmaßnahmen erforderlich sind. Aus diesem Grund wird aktuell im Rahmen eines Kooperationsprojektes unter Beteiligung des Fraunhofer-Instituts UMSICHT Oberhausen, FKUR Kunststoff GmbH, Trevira GmbH, BNP Brinkmann GmbH & Co. KG und der BAW ein definiert abbaubares Geotextil-Filtervlies entwickelt. Die erforderlichen technischen Eigenschaften (Festigkeit, Durchlässigkeit, Filterstabilität) müssen drei Jahre erhalten bleiben, danach soll sich das Vlies vollständig biologisch abbauen. Erste Prototypen werden gegenwärtig in der BAW und seit Anfang 2020 in einem Bereich der Versuchsstrecke (VF 6) getestet.

Ein dichter krautiger Unterwuchs blieb aus, da der Konkurrenzdruck der Weiden zu hoch war. Die zweireihig gepflanzte Heckenlage auf der Böschungsplanie von VF 2 aus Wasser-Schneeball (*Viburnum opulus*), Eingrifflichem Weißdorn (*Crataegus monogyna*), Rotem Hartriegel (*Cornus sanguinea*), Pfaffenhütchen (*Euonymus europaea*) und Hasel (*Corylus avellana*) entwickelte sich über den gesamten Monitoringzeitraum gut und vital. Durch die in den Untergrund wachsenden Wurzeln können die Heckenlagen zusätzlich zur Uferstabilität beitragen.

Prinzipiell haben sich die Weidenspreitlagen unter den Bedingungen der Versuchsstrecke gut bewährt. Die geplante Zielvegetation hat sich eingestellt. Der Uferschutz kann ausreichend gewährleistet werden. Voraussetzung ist ein optimaler Einbau der Weiden, der von Anfang an einen guten Bodenkontakt der Äste und damit eine flächendeckende Wurzel- und Sprossentwicklung ermöglicht. Entsprechende Hinweise zu Konstruktion und Einbau gibt das Kennblatt "Weidenspreitlagen", das nach den Erfahrungen an der Versuchsstrecke für zukünftige Planungen erstellt wurde (<https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/arbeitshilfen/kennblaetter>). Weitere Hinweise zur Optimierung der Bauweise und Anwendungsempfehlungen zeigt Anlage 3.

Eine wichtige Erkenntnis aus dem Naturversuch ist, dass für die langfristig vitale Entwicklung der Weiden schonende Unterhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Diese sind insbesondere in Bereichen, in denen der Hochwasserabfluss durch die aufwachsenden Weiden nicht negativ beeinflusst werden darf, notwendig. Optimale Unterhaltungsstrategien werden schwerpunktmäßig im weiterführenden Monitoring untersucht (Kap. 9).

Ein signifikanter Unterschied in der Entwicklung der quer und diagonal verlegten Weidenäste konnte nicht festgestellt werden. Aus technischer Sicht wird empfohlen, Weidenspreitlagen bevorzugt anzuwenden, wenn eine Ufersicherung ohne Flächengewicht erforderlich ist und die Böschungsneigung 1 : 3 nicht übersteigt. Mit zunehmender Wurzelentwicklung kann die Uferstabilität auch bei Auftreten von Porenwasserüberdrücken, d. h. bei notwendigem Flächengewicht, durch Weidenspreitlagen gewährleistet werden; im Anfangszustand ohne Wurzeln ist in diesem Fall jedoch mit Böschungsinstabilitäten und einem entsprechenden Unterhaltungsaufwand zu rechnen.

4.2.2 Versuchsfeld 5 – M2 Röhrichtgabionen, M3 und M4, Steinmatratzen ohne bzw. mit Pflanzmatten

Röhrichtgabionen

Röhrichtgabionen (Vegetationsgabionen), gefüllt mit kleinen Wasserbausteinen aus Quarzporphyr ($CP_{45/125}$, $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$) und Boden, ummantelt mit einer Kokosmatte und Maschendraht, vorgezogen mit krautigen Pflanzen der Röhricht- und Weichholzzone, sind Uferschutzmaßnahmen, die aus technischen und pflanzlichen Bestandteilen bestehen. Sie schützen das Ufer durch Pflanzen und zusätzlich durch den Aufbau und das Flächengewicht der Gesamtgabione. Trotz geringerer schiffsinduzierter Belastungen als im Bereich der Weidenspreitlagen (aufgrund der größeren Entfernung der Fahrrinne vom Ufer) ist aufgrund der im VF 5 relativ steilen Böschungsneigung von 1 : 2,5 rechnerisch auch eine Ufersicherung mit einem Flächengewicht erforderlich, das in Abhängigkeit vom Wasserstand maximal etwa dem Gewicht einer 30 cm dicken Steinschüttung entspricht (theoretisch maximal möglicher Wasserspiegelabsenk bei Schiffsvorbeifahrt: ca. 50 cm). Zusätzlich ist aufgrund der Wellen- und Strömungsbelastung ein Schutz vor Oberflächenerosion erforderlich. Wie der Uferschutz in der Versuchsstrecke mit Röhrichtgabionen gewährleistet werden kann, zeigt Tabelle 9.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 9: Gewährleistung des Uferschutzes durch vorkultivierte Röhrichtgabionen

Anforderungen	Wie/wodurch soll Uferschutz gewährleistet werden?	
	Anfangszustand (ohne Wurzeln und Sprosse)	Langfristig (mit Wurzeln und Sprosse)
Wurzelwachstum in den Untergrund	Guter flächenhafter Bodenkontakt durch Eigengewicht der Gabionenelemente	Guter flächenhafter Bodenkontakt durch Eigengewicht der Gabionenelemente
Erosionssicherheit	Gabionenelemente durch Aufbau selbst erosionsstabil, flächendeckende Verlegung auf einem bemessenen Kornfilter	Gabionenelemente durch Aufbau selbst erosionsstabil; Flächendeckende Verlegung auf einem bemessenen Kornfilter; Langfristig zusätzlicher Erosionsschutz durch oberirdische Pflanzenteile und Wurzeln
Filterstabilität	Filterstabiler Aufbau zwischen Untergrund, Kornfilter und Gabionenelementen und der Gabionenelemente selbst	Filterstabiler Aufbau zwischen Untergrund, Kornfilter und Gabionenelementen und der Gabionenelemente selbst; Langfristig zusätzlicher Schutz durch Wurzelgeflecht
Sicherheit gegenüber Abgleiten (nur relevant bei Auftreten von Porenwasserüberdrücken)	Durch ausreichendes Flächengewicht der Gabionenelemente und Kornfilter	Durch ausreichendes Flächengewicht der Gabionenelemente und Kornfilter; Langfristig zusätzlich durch Wurzelwachstum in den Untergrund
Sicherheit gegenüber hydrodynamischer Bodenverlagerung (nur relevant bei Auftreten von Porenwasserüberdrücken)	Durch ausreichendes Flächengewicht der Gabionenelemente und Kornfilter	Durch ausreichendes Flächengewicht der Gabionenelemente und Kornfilter; Langfristig zusätzlich durch oberflächennahes Wurzelgeflecht und Wurzelwachstum in den Untergrund

Die Röhrichtgabionen wurden mit einer Schichtdicke von 30 cm in der unteren Böschungshälfte zwischen Mittelwasser - 0,5 m und Mittelwasser + 1,70 m auf einem 30 cm dicken Kornfilter (Splitt) im VF 5a verlegt. Sie wurden bereits im April 2011 vorgefertigt und mit unterschiedlichen Arten für zwei Pflanzzonen über eine Vegetationsperiode vorkultiviert, sodass sie zum Zeitpunkt des Einbaus vollflächig bewachsen und durchwurzelt waren. Dabei war die Pflanzzone 1 (Mittelwasser - 0,5 m bis Mittelwasser + 0,5 m) überwiegend mit Schlank- und Ufer-Seggen (*Carex acuta*, *C. riparia* zu 60 bis 75 %) und zusätzlich mit einer Mischung aus weiteren Arten der Röhricht-/Weichholzzone und die Pflanzzone 2 (Mittelwasser + 0,5 m bis Mittelwasser + 1,70 m) hauptsächlich mit Rohr-Schwingel (*Festuca arundinacea*) und Rohr-Glanzgras (*Phalaris arundinacea*) (60 bis 75 %) und ebenfalls zusätzlich mit einer Mischung aus weiteren Arten der Röhricht-/Weichholzzone vorkultiviert. Bei der Anzucht wurden jedoch entgegen des Auftrages, die Arten gemischt zu pflanzen, einzelne Arten in Gruppen (sog. "Tuffs") angeordnet. Nachteilige Auswirkungen auf die Funktion der Röhrichtgabionen, wie sie nachfolgend beschrieben werden, wurden durch diese Art der Pflanzung möglicherweise verstärkt.

Durch das Flächengewicht der Gabionen und des Kornfilters, das zusammen über dem theoretisch maximal erforderlichen liegt, und deren lückenlose Anordnung konnte von Anfang an eine gute

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Lage der Gabionen auf der Böschung erreicht werden. Zusätzliche Befestigungen waren nicht erforderlich. Lediglich die Einbindung der Unterkante der Gabionen in die vorhandene Steinschüttung musste nach anfänglicher Rutschung der Gabionen auf der relativ steil geneigten Böschung (1 : 2,5) noch einmal nachgearbeitet werden. Danach entwickelten sich die vorkultivierten Pflanzen in den lagestabilen Röhrichtgabionen zunächst sehr gut (Bild 17 links). Weitere, durch natürliche Sukzession eingewanderte Arten ergänzten den Bewuchs.

Mit den regelmäßig wiederkehrenden höheren Wasserständen, die zu langen und vollständigen Überstauperioden bei gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung führten, traten jedoch zunehmend Bewuchsausfälle auf, zunächst primär im unteren sehr häufig eingestauten Böschungsbereich, später auch im gesamten Bereich der Röhrichtgabionen. Anfänglich konnten sich einzelne Pflanzenarten zwischen einzelnen Überstauereignissen immer wieder erholen. Ein fast 10-wöchiger ununterbrochener Überstau der gesamten Gabionen im Frühjahr 2013 (vgl. Bild 5) bei gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung und die sich anschließende wochenlange Trockenperiode führten jedoch zu großen Verlusten bestimmter Pflanzenarten (Pflanzzone 1: Rohr-Glanzgras, Weißes Straußgras (*Agrostis stolonifera*), Teich-Simse (*Schoenoplectus lacustris*), Ufer-Wolfstrapp (*Lycoopus europaeus*), Blut-Weiderich (*Lythrum salicaria*), Sumpf-Schwertilie (*Iris pseudacorus*); Pflanzzone 2: überwiegend Rohr-Glanzgras) und somit zu großen bewuchsfreien Flächen innerhalb der Gabionen aufgrund der „Tuff“-Bepflanzung. Die Bewuchsausfälle verstärkten sich in den Folgejahren nach Extremereignissen weiter. Allein die im unteren Bereich dominant gepflanzten Großseggen zeigten unter den gegebenen Bedingungen ein hohes Regenerationsvermögen aufgrund ihrer hohen Überstauungstoleranz, bildeten aber aufgrund des Pflanzschemas überwiegend Inselartige Bestände (Bild 17 Mitte). In Trockenzeiten hat das relativ grobe Pflanzsubstrat und der unter den Gabionen liegende Kornfilter die Regeneration der Pflanzen allerdings zunehmend erschwert. Eine spontane Einwanderung von Pflanzen war auf diesem Substrat kaum möglich.



Bild 17: Entwicklung der Gabionen, von links: 07/2012 – 07/2013 – 07/2017 (mit einer Steinlage sanierter Zustand) (Fotos: BAW)

Die großen Bewuchsausfälle begünstigten die Zerstörung und Auflösung der Kokosummantelung und damit bei Überstau zunehmenden Materialaustrag aus den Gabionen und in Folge Schäden an den Gabionen selbst. Diese intensivierten sich durch böschungsabwärts gerichtete Rutschungen der innerhalb der Gabionen nicht mehr lagestabilen Steine, sodass auch der darunter liegende Kornfilter lokal nicht mehr ausreichend vor Erosion geschützt war (Bild 18).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020



Bild 18: Röhrichtgabionen am 10.11.2015, senkrechte Kante durch Steinverlagerungen innerhalb der Gabionen (Fotos: BAW)

Die zum Teil „leere“ Maschendrahtumhüllung ragte aus der Böschung heraus und wurde zu einer Gefahr für Tiere, insbesondere für Fische bei Überstauereignissen. Eine Ausbreitung pflanzlichen Bewuchses (sowohl spontan auftretender Arten als auch der verbliebenen Seggen) war nicht mehr zu erwarten. Deshalb erfolgte Ende 2016 eine Sanierung der gesamten Röhrichtgabionen durch Abdeckung mit Splitt und einer Lage Wasserbausteinen. Die regenerationsstarken und überstauungstoleranten Seggen wachsen seitdem durch die Lücken der Steinlage hindurch (Bild 17 rechts) und profitieren von der Stabilität durch die Auflast. Bei einer Sonderkartierung des sanierten Bereichs 2017 wurden zwischen den Seggen vereinzelt Rohr-Glanzgras, Blut-Weiderich und Rohr-Schwingel – ebenfalls aus der ursprünglichen Pflanzung stammend – erfasst. Die anvisierte Zielvegetation könnte sich also mittelfristig nach der Sanierung noch einstellen.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Röhrichtgabionen aufgrund der hier verwendeten Pflanzenartenkombination und Fehlern bei der Anzucht (Bepflanzung einzelner Arten in „Tuffs“) unter den Bedingungen der Versuchsstrecke nicht ausreichend stabil waren. Prinzipiell sind Vegetationsgabionen aus technischer Sicht jedoch geeignet, die Standsicherheit der Ufer an Binnenwasserstraßen zu gewährleisten. Ihre langfristige Stabilität hängt in starkem Maße von der dauerhaften Vitalität der in den Gabionen vorkultivierten Pflanzen ab. Wichtig ist deshalb neben dem optimalen filter- und erosionsstabilen Aufbau und dem ausreichenden Flächengewicht der Gabionen die richtige Pflanzenartenauswahl bei guter Durchmischung – besonders hinsichtlich der erforderlichen Überstauungstoleranzen. Für die Anwendung von Vegetationsgabionen in Bereichen mit großen Wasserspiegelschwankungen, langen Überstauzeiten mit gleichzeitig schiffsinduzierten Belastungen im Wechsel mit Trockenzeiten konnten im Naturversuch geeignete und ungeeignete Pflanzen ermittelt werden (siehe Anlage 2). Die dominant gepflanzten Seggen (Schlank-, Ufer-Segge) zeigten die höchste Widerstandskraft gegen die genannten Randbedingungen der Versuchsstrecke. Arten wie Rohr-Glanzgras, Rohr-Schwingel und Blut-Weiderich, die natürlicherweise in dieser Böschungszone wachsen, haben sich in Abhängigkeit der Bepflanzung („Tuffs“), Bauweise und hydraulischen Belastung nicht bewährt. Da die Arten jedoch nach der Sanierung wieder auftraten, ist davon auszugehen, dass sie bei optimierter Bepflanzung und Bauweise durchaus Ufersicherungspotenzial besitzen. Hinweise zur optimalen Konstruktion,

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Pflanzenauswahl und Einbau gibt das Kennblatt „Vegetationsgabionen“, das von BAW und BfG nach den Erfahrungen an der Versuchsstrecke erstellt wurde (<https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/arbeitshilfen/kennblaetter>). Vegetationsgabionen können im Einflussbereich von Wasserspiegelabsenk und relevanten Porenwasserüberdrücken angewendet werden, wenn sie das erforderliche Flächengewicht und die entsprechenden Pflanzen besitzen. Weitere Hinweise gibt Anlage 3.

Steinmatratzen

Steinmatratzen – mit kleinen Wasserbausteinen aus Quarzporphyr ($CP_{45/125}$, $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$) gefüllte hochfeste längliche zylinderförmige Kunststoffnetze, die zu Matratzen zusammengebunden werden – sind Uferschutzmaßnahmen, die aus technischen Bestandteilen bestehen und sich durch natürliche Sukzession begrünen sollen. Sie sind im VF 5a und 5b, wie die Röhrichtgabionen, in einem Bereich angeordnet, in dem eine Ufersicherung mit einem Flächengewicht erforderlich ist, das theoretisch in Abhängigkeit vom Wasserstand maximal etwa dem Gewicht einer 30 cm dicken Steinschüttung entspricht (theoretisch maximal möglicher Wasserspiegelabsenk bei Schiffsvorbeifahrt: ca. 50 cm). Zusätzlich ist aufgrund der Wellen- und Strömungsbelastung ein Schutz vor Oberflächenerosion erforderlich. Der Uferschutz wird im Anfangszustand und langfristig durch einen erosions- und filterstabilen Aufbau (Einbau auf einem Kornfilter) und das Flächengewicht der Steinmatratzen und des Kornfilters gewährleistet.

Die Steinmatratzen mit einer Schichtdicke von 25 cm wurden im VF 5a oberhalb der Röhrichtgabionen von Mittelwasser + 1,70 m bis zur Böschungsoberkante und im VF 5b von der Höhe Mittelwasser – 0,5 m bis zur Böschungsoberkante lückenlos auf einem 30 cm dicken Kornfilter (Splitt) auf der 1 : 2,5 geneigten Böschung verlegt. Die Unterkante wurde im VF 5b in die unter Wasser verbliebene Steinschüttung eingebunden. Zusätzliche Befestigungen waren nicht erforderlich. Im VF 5b wurden auf den Steinmatratzen im unteren Böschungsbereich (bis MW + 1,70 m) vorkultivierte Pflanzmatten (Arten und Zonierung entsprechend der Röhrichtgabionen, siehe Anlage 2) verlegt und mit Holzlatten und Kabelbindern an den Steinmatratzen befestigt. Vorher wurde Splitt in die Steinschüttung eingespült. Im oberen Böschungsbereich sollte in den VF 5a und 5b eine Begrünung durch natürliche Sukzession erfolgen. Da die Befürchtung bestand, die Kunststoffnetze könnten durch Vandalismus zerschnitten werden (was mit einem Taschenmesser leicht möglich ist), wurden die Steinmatratzen einige Zentimeter hoch mit Auelehm übererdert.

Die Übererdung wurde im Monitoringzeitraum in Überstauperioden sukzessive in Höhe der Wasserstandslinien erodiert. Die anfänglich noch übererdeten Bereiche wiesen erwartungsgemäß eine höhere Gesamtdeckung pflanzlichen Bewuchses bei jedoch geringerer Artenvielfalt auf, da insbesondere einige wenige Stickstoff liebende Arten, wie z. B. Gewöhnlicher Beifuß (*Artemisia vulgaris*) dominierten. Neben Beifuß siedelten mit hoher Stetigkeit Arten wie Knäulgras (*Dactylis glomerata*), Kriech-Quecke (*Elymus repens*), Gewöhnliches Seifenkraut (*Saponaria officinalis*), Zypressen-Wolfsmilch (*Euphorbia cyparissias*), Kanadisches Berufkraut (*Conyza canadensis*), Große Klette (*Arctium lappa*), Weg-Rauke (*Sisymbrium officinale*) u. a. Auf den freigespülten Steinmatratzen traten zu den zuvor genannten Arten insbesondere einige Feuchtezeiger hinzu, wie

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Blut-Weiderich, Rohr-Glanzgras und Rohr-Schwengel. Die Steinmatratzen brachten somit eine Mischung aus Stickstoff liebenden Ruderalarten, Arten des Grünlandes, trockenheitsliebenden, aber auch feuchteliebenden Arten hervor, wobei eine Strahlwirkung sowohl des Gewässers als auch der angrenzenden Böschungsplanie zu beobachten ist. Als neophytische Gehölze traten vor allem Eschen-Ahorn (*Acer negundo*) und Platane (*Platanus x hispanica*) in Erscheinung, diese Gehölze werden jährlich einmal zurückgeschnitten. Die sukzessive aufgekommene Krautschicht kann durch die in den Untergrund wachsenden Wurzeln zusätzlich zur Böschungsstabilität beitragen.

Durch ihr Flächengewicht, das zusammen mit dem des Kornfilters über dem theoretisch maximal erforderlichen liegt, und die lückenlose Anordnung hatten die Steinmatratzen von Anfang an eine gute und stabile Lage auf der Böschung. Bis heute können sie unabhängig vom Bewuchs durch ihr Eigengewicht und den erosions- und filterstabilen Aufbau in sich und zum Untergrund die Uferstandsicherheit gewährleisten. Die Auswertung der regelmäßigen Querprofileinmaße dokumentiert die stabile Lage (Bild 19).

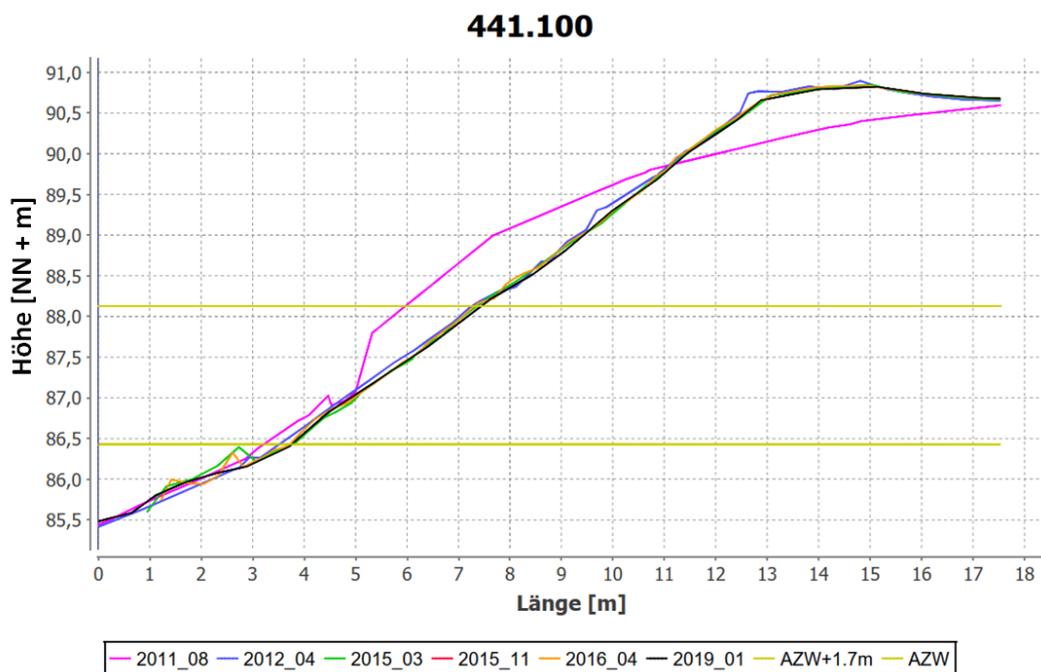


Bild 19: Einmaß Querprofil km 441,100 (VF 5b, Steinmatratzen von MW – 0,5 m bis GOK)

Die teilweise zur Begrünung der Steinmatratzen aufgebundenen Pflanzmatten im unteren Böschungsbereich von VF 5b haben sich nicht bewährt. Bereits 1 ½ Jahre nach Einbau waren alle vorkultivierten Pflanzen – auch die regenerationsstarken Seggen – vollständig ausgefallen (siehe Anlage 2). Hauptgründe sind „Pumpeffekte“, die durch Auftrieb und gleichzeitige Wellen- und Strömungsbelastung bei Überstau auf die quasi gewichtslosen Pflanzmatten wirkten. Die Auf- und Abbewegungen der Matten zwischen den Befestigungen verhinderten den flächigen Kontakt zum Untergrund und damit die Wurzelentwicklung in die Steinmatratzen und den Untergrund. Zusätzlich wurden die wenig verwurzelten Pflanzen in der anfänglichen Trockenphase bei niedrigen Wasserständen irreversibel geschädigt.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Die Pflanzmattenreste wurden 2013 entfernt und damit auch der untere Bereich der Böschung der natürlichen Sukzession überlassen. Bild 20 zeigt den Zustand der Steinmatratzen zwei Jahre später im Jahr 2015. Der obere und der untere Bereich sind noch sehr gut zu unterscheiden. Im Gegensatz zum schon recht gut begrüntem oberen Teil, der eher selten eingestaut wurde, ist der untere Bereich nahezu vegetationslos.



Bild 20: VF 5b – Steinmatratzen, in der oberen Böschungshälfte gut bewachsen, in der unteren nahezu ohne Bewuchs (2.7.2015) (Foto: BAW)



Bild 21: Zustand Steinmatratzen (20.6.2018) (Foto: BAW)

Bis 2018 konnte sich zwar mehr Vegetation auch im unteren Bereich ansiedeln (Bild 21), aber im Wasserwechselbereich bis etwa 1 m über MW ist aufgrund des sehr häufigen Einstaus und der hydraulischen Belastungen eine intensive Begrünung durch natürliche Sukzession offensichtlich nicht möglich.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Steinmatratzen unter den Bedingungen der Versuchsstrecke die Böschung ausreichend stabil schützen können. Die Anordnung von Pflanzmatten auf Steinmatratzen im unteren Böschungsbereich ist nicht zu empfehlen. Im Vergleich zur Steinschüttung bieten die gering mächtigen Steinmatratzen (25 cm) ein feineres Lückensystem, das bei hohen Wasserständen mit Schwemmsubstrat gefüllt wird. Pflanzenansiedlung und -wuchs werden

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

dadurch begünstigt, was sich im Versuchsfeldbereich – zumindest in den weniger stark belasteten mittleren und oberen Böschungsbereichen – zeigt. Langfristig könnte der Bewuchs die Kunststoffnetze vor Beschädigungen und Vandalismus schützen und mit den in den Untergrund wachsenden Wurzeln zur Stabilität der Bauweise und des Ufers beitragen. Weitere Hinweise zur Anwendung der Bauweise gibt Anlage 3.

Die am Übergang zur Böschungsplanie gepflanzte Heckenlage aus Hasel, Pfaffenhütchen, Feld-Ahorn (*Acer campestre*), Hartriegel, Weißdorn und Schneeball (Bild 21) entwickelte sich über den Monitoringzeitraum vital und bringt heute eine dichte Gehölzstruktur hervor, die zusätzlich die Böschung stabilisiert (siehe Anlage 2).

Hinsichtlich der Zielvegetation gab es für die Steinmatratzen keine Vorgaben, die Vegetation sollte sich spontan über die natürliche Sukzession einstellen. Da die Matratzen nicht bepflanzt wurden, bestand die Erwartung, dass sich ein lückigerer Bewuchs einstellt, im Vergleich zu Röhrichtpflanzungen oder Einsaaten. Die erwartete Entwicklung ist weitgehend eingetreten, mit Abstrichen in der unteren, häufig eingestauten Böschungszone und hinsichtlich des Aufkommens neophytischer Gehölze.

4.2.3 Versuchsfeld 7 – M5 Pflanzmatten auf Geotextilien, M6 Kokosgewebe über Nassansaat, M7 Röhrichwalzen

Pflanzmatten

Vorkultivierte Pflanzmatten auf der Basis von Kokosgewebe, verlegt auf der 1 : 3 geneigten Böschung auf verschiedenen Filtermatten, sind Uferschutzmaßnahmen, die primär aus pflanzlichen Bestandteilen bestehen und kein signifikantes Eigengewicht besitzen. Zur Erhöhung der Stabilität ist in das Kokosgewebe ein feines Kunststoffgitter eingearbeitet. Aktuelle Berechnungen mit GBBSOFT+ zeigen, dass aufgrund der stromab geringer werdenden schiffsinduzierten Belastungen (siehe Kap. 3.2.3) im VF 7 nur noch eine Ufersicherung als Schutz vor Oberflächenerosion erforderlich ist. Porenwasserüberdrücke infolge Absink bei Schiffsvorbeifahrt sind nicht relevant. Ein Flächengewicht ist nicht erforderlich. Ob und wie der Uferschutz durch Pflanzmatten grundsätzlich gewährleistet werden kann, zeigt Tabelle 10.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 10: Gewährleistung des Uferschutzes durch vorkultivierte Pflanzmatten

Anforderungen	Wie/ wodurch soll Uferschutz gewährleistet werden?	
	Anfangszustand (ohne Wurzeln und Sprosse)	Langfristig (mit Wurzeln und Sprosse)
Wurzelwachstum in den Untergrund	Ausreichende Befestigungen im engen Raster (Querriegel und Pflöcke) für flächenhaften Bodenkontakt der Matten	Keine Hilfsmittel mehr erforderlich
Erosionssicherheit	Lückenlose (überlappende) Abdeckung der Böschungsoberfläche mit erosionsstabilen Pflanz- und Filtermatten	Oberirdische Sprosse und flächendeckendes oberflächennahes Wurzelgeflecht
Filterstabilität	Lückenlose (überlappende) Abdeckung der Böschungsoberfläche mit auf den Boden abgestimmten Filtermatten (Anordnung zwischen Pflanzmatte und Boden)	Flächendeckendes oberflächennahes Wurzelgeflecht
Sicherheit gegenüber Abgleiten (nur relevant bei Auftreten von Porenwasserüberdrücken)	Problematisch, da quasi kein Eigengewicht; Erhöhung der Stabilität durch ausreichend lange und eng stehende Pflöcke (Bodenvernagelung)	Genügend tief reichende und dicht verzweigte Wurzeln im Untergrund
Sicherheit gegenüber hydrodynamischer Bodenverlagerung (nur relevant bei Auftreten von Porenwasserüberdrücken)	Nicht zu gewährleisten, da quasi kein Eigengewicht; Begrenzung der böschungsabwärts gerichteten Bodenbewegungen durch parallele Querriegel, die in einem entsprechend engen Raster in Böschungslängsrichtung angeordnet sind	Oberflächennahes, zusammenhängendes und ausreichend dicht verzweigtes Wurzelsystem im Boden (Wurzelgeflecht)

Die Pflanzmatten wurden im VF 7a von MW bis MW + 1,70 m und in den VF 7b und 7c von Mittelwasser bis zur Böschungsoberkante auf verschiedenen Filtermatten (Kunststoffvlies, Schafwollvlies, Kokosgewebe) verlegt und mit Pflöcken und Querriegeln auf der Böschung befestigt. Auch die Pflanzmatten wurden über eine Vegetationsperiode im Anzuchtbetrieb mit standorttypischen, krautigen Pflanzen der Röhricht- und Weichholzzone vorkultiviert (siehe Anlage 2). Dabei kamen mit dominanten Anteilen von 60 – 75 % Schlank- und Ufersegge, Rohr-Glanzgras und Rohr-Schwingel unter Beimischung weiterer Arten, wie Weißes Straußgras, Blutweiderich, Mädesüß (*Filipendula ulmaria*), Sumpf-Schwertlilie, Wasser-Schwaden (*Glyceria maxima*), Ufer-Wolfstrapp mit Anteilen von 25 – 40 % zum Einsatz (vgl. BAW, BfG, WSA-MA 2012). Bereits bei der Lieferung konnten deutliche Qualitätsunterschiede im Hinblick auf den Durchwurzelungsgrad und die Vitalität der Pflanzen festgestellt werden, die insgesamt deutlich hinter denen der Röhrichtgabionen lagen. Eine mögliche Ursache könnte in den hohen Sommertemperaturen während der Anzucht liegen. Dadurch begann sich das Schafwollvlies, das bereits im Anzuchtbecken unter den Pflanzmatten verlegt war, schneller zu zersetzen als erwartet. Die Zersetzung verschlechterte zudem die Wasserqualität in den Anzuchtbecken und damit die Wuchsleistung.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Es zeigte sich schnell ein sehr kritischer Anfangszustand. Bereits erste längere Einstauphasen im unteren Böschungsbereich (zwischen MW und etwa MW + 1,70 m) bei gleichzeitigen schiffsinduzierten Belastungen führten zu signifikanten Schäden (Bild 22 links). Pflöcke und Querriegel wurden gelockert und herausgezogen. Druckwechsel bei Überstau durch Auftrieb und gleichzeitige Wellen- und Strömungsbelastung führten zum Heben und Senken der quasi gewichtslosen Matten zwischen den Befestigungen, sodass die Wurzeln nicht in den Untergrund wachsen konnten oder wieder abrissen. Die vorkultivierten Pflanzen gingen hier letztendlich überwiegend ein (siehe Anlage 2). Gleichzeitig löste sich das im unteren Bereich eingebaute Schafwollvlies sehr schnell vollständig auf, sodass nur noch in den Bereichen mit Kunststoffvlies ein Erosionsschutz gegeben war. Die lokale Böschungsstandsicherheit war längerfristig nicht mehr ausreichend gewährleistet, sodass der untere Böschungsbereich bereits 2012/2013 mit einer einlagigen Wasserbausteinschicht saniert wurde. Die Pflanzmattenreste wurden durch die flächige Auflast gut stabilisiert, sodass die wenigen verbliebenen Pflanzen, insbesondere Rohr-Glanzgras, Seggen und Blut-Weiderich, davon profitieren konnten und seither aus den Lücken der Steinlage wachsen. Auch hier zeigt sich, vergleichbar zu der Bauweise der Röhrichtgabionen, dass diese Pflanzenarten bei optimierter Bauweise und Bepflanzung durchaus Ufersicherungspotenzial besitzen können. Hinzu treten Pflanzen aus natürlicher Sukzession, wie bspw. Schwarzfrüchtiger Zweizahn (*Bidens frondosa*), Wilde Sumpfkresse (*Rorippa sylvestris*) und Wiesen-Alant (*Inula britannica*) (Bild 22 Mitte).



Bild 22: Schäden im unteren Böschungsbereich 5/2012 (links), sanierter Zustand 7/2017 (Mitte); gute Entwicklung im oberen Böschungsbereich (rechts) 7/2017 (Fotos: BAW)

Wie im Bild 22 rechts erkennbar, konnten sich die Pflanzmatten im oberen, selten eingestauten und dadurch wesentlich weniger belasteten Bereich (Mittelwasser + 1,70 m bis Böschungsoberkante) nach wenigen Nachbesserungsarbeiten (flächige Nassansaat, Verlegung von Rasensoden) in der kritischen Anfangszeit dagegen gut entwickeln. Der flächige und dichte Bewuchs wird heute überwiegend von Grünlandarten (verschiedenste Gräser und Kräuter, wie bspw. Glatt-hafer (*Arrhenatherum elatius*), Knautgras, Wolliges Honiggras (*Holcus lanatus*), Weidelgras (*Lolium perenne*), Hornklee (*Lotus corniculatus*), Wiesen-Labkraut (*Galium mollugo*), Quecke und Arten der Ursprungsbepflanzung (insb. Rohr-Glanzgras, Rohr-Schwingel, Sumpf-Schwertlilie, Großseggen und Straußgras) geprägt. Die fortgeschrittene Entwicklung des Versuchsfeldes lässt sich daran erkennen, dass sich die Arten mehr und mehr entsprechend ihrer natürlichen Standortansprüche im hydrologischen Gradientengefälle verteilen. So siedeln im oberen Böschungsbereich auch typische Vertreter trocken-warmer Standorte, wie z. B. Rot-Schwingel (*Festuca rubra*), Zypressen-Wolfsmilch (*Euphorbia cyparissias*), Kleiner Wiesenknopf (*Sanguisorba minor*), Echtes

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Labkraut (*Galium verum*), Bunte Kronwicke (*Securigera varia*), Wiesen-Flockenblume (*Centaurea jacea*) und andere. Die Zielvegetation hat sich im oberen Böschungsbereich eingestellt, im unteren Bereich bleibt die weitere Entwicklung abzuwarten. Langfristig kann der von Gräsern und Kräutern dominierte Bewuchs im oberen Böschungsbereich nur durch regelmäßige Mahd erhalten werden, die vom ABz Worms/Oppenu in Abstimmung mit der BfG durchgeführt wird. Die Mahd dient insbesondere der Zurückdrängung der Haselblatt-Brombeere.

Ergebnisse der Wurzelausgrabung

Die lokale Standsicherheit der mit vorkultivierten Pflanzmatten geschützten Uferböschung ist neben den oberirdischen Pflanzenteilen maßgeblich von der Wurzelausbildung abhängig. Das oberflächennahe Wurzelgeflecht kann den Boden schützen und so Oberflächenerosion verhindern und langfristig die Filterstabilität im Böschungsbereich gewährleisten. Um die lokale Standsicherheit der Uferböschung im VF 7 beurteilen zu können, erfolgten 2017 in Zusammenarbeit mit der Leibniz-Universität Hannover Wurzelaufgrabungen in verschiedenen Bereichen mit Kunststoffvlies, Kokosgewebe und Schafwollvlies als Filter. Im Einzelnen wurden Aufgrabungen in vier Einzelfeldern durchgeführt, die sich alle in der oberen, selten eingestauten, gut entwickelten Böschungshälfte, oberhalb ca. MW + 1,70 m, befinden:

- U1: Pflanzmatte auf Schafwollvlies (km 441,327, Höhenlage ca. 2 m oberhalb MW)
- U2: Pflanzmatte auf Kokosgewebe (km 441,327, Höhenlage ca. 3 m oberhalb MW)
- U3/U4: Pflanzmatte auf Kunststoffvlies (km 441,300, Höhenlage ca. 2 m oberhalb MW)

Als Hauptpflanzenarten wurden in den Untersuchungsfeldern Ufer-Segge, Rohr-Glanzgras, Rohr-Schwengel, Rot-Schwengel und Kriech-Quecke bestimmt. Das Schafwollvlies (U1) war bei der Probenahme bereits biologisch abgebaut, das Kokosgewebe (U2) weitgehend verwittert. Nur das Kunststoffvlies in den Feldern U3 und U4 war noch vollständig vorhanden.

In den Feldern U1 und U2 wurden maximale Wurzellängen von 50 cm bis 70 cm nachgewiesen (Bild 23). Auf diese Durchwurzelungstiefen bezogen, wurde eine über die Fläche relativ gleichmäßige Wurzelausbildung mit ermittelten Wurzeltrockenmassen von 900 g/m³ bis 2700 g/m³ ermittelt. Die meisten Wurzeln sind in den oberen 10 cm bis 15 cm vorhanden (Bild 23) und bilden hier eine Art dichtes Wurzelvlies, was insbesondere hinsichtlich der Filterfunktion und des Schutzes vor Oberflächenerosion von Bedeutung ist.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

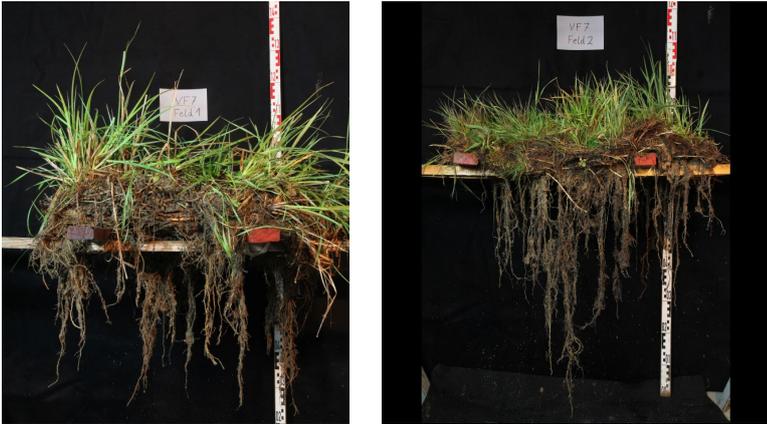


Bild 23: Freigelegte Wurzeln in den Untersuchungsfeldern U1 und U2 (Pflanzmatten, Filtermatten nicht mehr vorhanden) (Heinzner 2017b)

Eine besonders starke und tiefreichende Wurzelentwicklung wurde bei den Ufer-Seggen festgestellt. Hinsichtlich der Sicherungsfunktion sind auch Rohr-Schwengel, Rot-Schwengel und Kriech-Quecke positiv hervorzuheben. Da jede Pflanzenart ein für sie spezifisches Wurzelsystem entwickelt, ergibt sich in den artenreichen Pflanzmatten eine Kombination verschiedener Wurzelsysteme. Insgesamt kann hinsichtlich des Uferschutzes eine gute Wurzelentwicklung durch die Kombination aus Gräsern (große elastische Wurzelmasse mit einem dichten oberflächennahen horizontalen Wurzelvlies) und Kräutern (Dübelwirkung durch punktuelle größere Wurzeln) festgestellt werden.

In den Untersuchungsfeldern mit Kunststoffvlies (U3/U4) wurde die Wurzelentwicklung auch hinsichtlich der Wirkung des Vlieses auf die Wurzeln begutachtet. Die Wurzeln der Kräuter und Gräser konnten das Kunststoffvlies (bestehend aus PP und PET, mit einem Flächengewicht von 300 g/m²) gut durchdringen (Bild 24). Insgesamt wurden Wurzellängen bis 45 cm ermittelt (Bild 24, rechts). Auf diese Durchwurzelungstiefe bezogen, zeigte sich eine über die Fläche relativ gleichmäßige Wurzelausbildung mit insgesamt Wurzeltrockenmassen von 2700 g/m³ (U4) bis 3400 g/m³ (U3). Einige Wurzeln wiesen jedoch Einschnürungen durch das Geotextil auf, die bei Belastung gegebenenfalls Schwachstellen darstellen könnten. Unmittelbar unterhalb des Kunststoffvlieses zeigte sich ein 3 cm bis 5 cm dickes vliesähnliches „Gewirk“ aus feinen Wurzeln, auch oberhalb bildete sich ein dichtes, 5 cm bis 10 cm starkes vliesähnliches Wurzelsystem.

Mit der erreichten Wurzelausbildung ist davon auszugehen, dass die Wurzeln bereits gut Boden zurückhalten und die Uferböschung vor Oberflächenerosion schützen können. Hinsichtlich der Uferschutzfunktion positiv zu bewerten sind besonders die Arten: Ufer-Segge, Quecke und Rohr-Schwengel. Insbesondere der Rohr-Schwengel kann mit seiner Wurzelausprägung das Geotextil mit dem Boden verankern und damit zur Stabilisierung der Pflanzmatten auf der Böschung beitragen.

Wie bei den Weidenspreitlagen fand auch bei den krautigen Pflanzen die intensivste Wurzelbildung im Bereich der Pflöcke und Querriegel statt – dort wo die Pflanzmatten von Anfang an den

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

besten Bodenkontakt hatten (vgl. Bild 24 links, dort ist der Bewuchs inselartig um die Pflöcke herum entwickelt).



Bild 24: Freispülen der Wurzeln im Untersuchungsfeld U3, rechts: Freigelegte Wurzeln im Untersuchungsfeld U4 (Fotos: BAW)

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Pflanzmatten in Kombination mit Filtermatten und den hier verwendeten Befestigungen unter den Bedingungen der Versuchsstrecke nur in den oberen, wenig belasteten Böschungsbereichen erfolgreich waren. Das heißt, die Anwendung vorkultivierter Pflanzmatten mit geeigneter Pflanzenwahl ist nur für Wasserstraßen mit keinen oder nur sehr geringen Wasserspiegelschwankungen zu empfehlen. Hinweise zur optimalen Konstruktion und zum Einbau enthält das Kennblatt, das von BAW und BfG nach den Erfahrungen an der Versuchsstrecke erstellt wurde (<https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/arbeitshilfen/kennblaetter>). Wichtig ist auch die Erkenntnis, dass ein Kunststoffgeotextil prinzipiell durchwurzelbar ist. Das sich entwickelnde oberflächennahe vliesähnliche Wurzelsystem (oberhalb und unterhalb des Geotextils) kann zunehmend Filterfunktion übernehmen. Das heißt, die Anwendung eines biologisch vollständig abbaubaren Geotextils als temporärer Filter ist zu empfehlen. Ein entsprechendes abbaubares Geotextil wird derzeit unter Mitwirkung der BAW entwickelt (Kap. 4.2.1).

In häufig eingestauten Uferbereichen ist die Anwendung der getesteten Pflanzmatten mit den überwiegend punktuellen Befestigungen generell nicht zu empfehlen. Alternativ ist hier nach den Erfahrungen in der Versuchsstrecke eine Abdeckung der Pflanzmatten mit einer Lage Wasserbausteinen denkbar, die eine stabile Lage der Pflanzmatten und damit eine gute Wurzel- und Gesamtpflanzenentwicklung ermöglicht. Gleichzeitig ist dadurch ein Flächengewicht vorhanden, das zusätzlich stabilisierend wirkt. Weitere Hinweise zur Optimierung der Bauweise und Anwendungsempfehlungen gibt Anlage 3.

Kokosgewebe über Nassansaat

Im VF 7a erfolgte auf dem hergestellten Planum im oberen Böschungsbereich zwischen Mittelwasser + 1,70 m und Geländeoberkante auf der 1 : 3 geneigten Böschung eine Nassansaat mit standorttypischen Gräsern und Kräutern (siehe Anlage 2, u. a. Weißes Straußgras, Rohr-Schwinkel, Quecke, Rohr-Glanzgras, Wiesen-Fuchsschwanzgras (*Alopecurus pratensis*), Rasen-Schmiele (*Deschampsia cespitosa*)), die mit einem Kokosgewebe als Schutz abgedeckt wurde. Es handelt sich um eine rein pflanzliche Maßnahme ohne eigenes Flächengewicht. Das Kokosgewebe war sehr gut durchwurzelbar, aber nicht ausreichend filterstabil gegenüber dem anstehenden Boden.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Es wurde zudem nur punktuell mit Holzpflocken ohne Querriegel befestigt. Unter diesen Randbedingungen war von vornherein ein sehr kritischer Anfangszustand zu erwarten. Deshalb wurde diese Bauweise nur im oberen, selten eingestauten Bereich getestet.

Unmittelbar nach Einbau traten wiederholt hohe Wasserstände auf, die zum Einstau und gleichzeitiger hydraulischer Belastung der Kokosmatten führten. Aufgrund der hier im Vergleich zu den anderen Bereichen im VF 7 zunächst nur punktuellen Befestigungen der Kokosmatten und der fehlenden Filterstabilität traten in größerem Umfang Materialaustrag und Materialumlagerungen und damit Böschungsverformungen auf (Bild 26). Diese zeigen sich deutlich in den Querprofilaufnahmen (Bild 25). Gelb markiert sind die Erosionsbereiche, die zwischen Einbau Ende 2011 und April 2012 entstanden sind. Ein Schutz vor Oberflächenerosion war nicht gegeben.

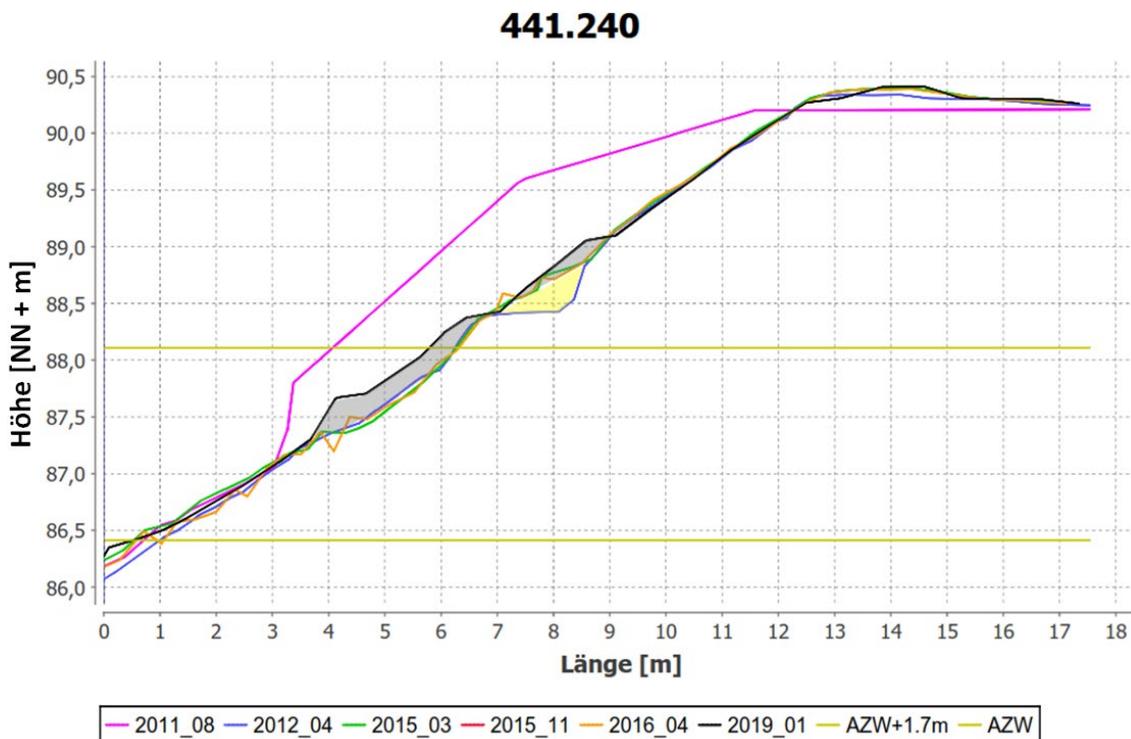


Bild 25: Einmaß Querprofil km 441,240 (VF 7a, Kokosmatte über Nassansaat von MW +1,70 m bis GOK)

Um weiteren Materialaustrag zu verhindern, erfolgte bereits 2012 eine entsprechende Sanierung (lokaler Einbau von Rasensoden, befestigt mit Querriegeln, zusätzliche Nassansaat (BAW, BfG, WSA-MA 2013)). Danach konnte sich dieser Bereich aufgrund des nur seltenen Einstaus 2013 zunächst etwas stabilisieren (Bild 27). Die Bewuchsentwicklung mit Gräsern und Kräutern schritt voran, jedoch blieben Bereiche des unregelmäßig erodierten Böschungsreliefs, insbesondere die von der Kokosmatte überspannten Vertiefungen, bewuchsfrei und vergrößerten sich mit jedem darauffolgenden Hochwasser.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020



Bild 26: Böschungsverformungen nach Überstau im VF 7a oben (22.3.2012) (Foto: BAW)



Bild 27: Vegetationsentwicklung nach Sanierung im VF 7a oben (4.10.2013) (Foto: BAW)

Bild 28 links zeigt die größte Schadstelle 2015 bei km 441,200 mit einer Fläche von fast 20 m² und einer Tiefe von maximal 45 cm. Da der lokale Böschungsschutz nicht mehr ausreichend gegeben war, wurden die Vertiefungen 2016 mit Kies verfüllt und abschließend nahezu der gesamte Bereich mit einer Lage Wasserbausteinen abgedeckt (Bild 28 rechts), im Einmaß 2019 als grau hinterlegte Fläche zu sehen (Bild 25). Nach der Sanierung profitierten, vergleichbar zum sanierten Bereich der Pflanzmatten und Röhrichtgabionen, regenerationsstarke Pflanzenarten von der Auflast der Steine und wachsen seitdem durch die Lücken der Steinlage. Zudem kann seit 2014 ein Aufkommen standorttypischer Gehölze beobachtet werden. Einzelne Weiden verjüngen sich an der Grenze der Weichholz- zur Hartholzaue. Im oberen Böschungsbereich siedeln einzelne Feld-Ulmen und Weißdorn. Die Entwicklung des krautigen Bewuchses im verbliebenen unsanierten Bereich verläuft wie für die Pflanzmatten beschrieben.



Bild 28: links: Größte Schadstelle im VF 7a, oben, km 441,200 (11/2015), rechts: Zustand nach der Sanierung (4/2017) (Fotos: BAW)

Im Ergebnis ist festzustellen, dass Kokosmatten über einer Nassansaat unter den Bedingungen der Versuchsstrecke selbst in den oberen selten eingestauten Uferbereichen die Böschungsstand-sicherheit nicht ausreichend gewährleisten können. Die Maßnahme erscheint nur anwendbar in Böschungsbereichen, die nicht durch Wellen und Strömungen belastet werden, d. h. in

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Wasserstraßen mit konstanten Wasserständen oberhalb des Wellenaufbaus (siehe Anlage 3). Die Zielvegetation hat sich erst nach umfangreichen Sanierungen eingestellt.

Röhrichtwalzen

Die Röhrichtwalzen, mit Kokosgewebe ummantelte und mit Kies und Röhrichtballen (siehe Anlage 2, u. a. Sumpf-Schwertlilie, Schilf, Gewöhnliche Teichsimse (*Schoenoplectus lacustris*), Wasser-Minze (*Mentha aquatica*), Ufer-Wolfstrapp) gefüllte Walzen, wurden in den VF 7b und 7c in Flusslängsrichtung zwischen MW und MW + 0,5 m eingebaut und abschließend punktuell mit einzelnen Wasserbausteinen beschwert. Sie dienten gleichzeitig als Fußsicherung für die oberhalb eingebauten Pflanzmatten (Bild 29).



Bild 29: Röhrichtwalzen beim und nach dem Einbau 2011 (Fotos: Katja Behrendt/Hans-Werner Herz, BfG)

In diesem Bereich um Mittelwasser wurden die Röhrichtwalzen von Anfang an sehr häufig und immer wieder lange eingestaut. Gleichzeitige hydraulische und schiffsinduzierte Belastungen führten sehr schnell zur Zerstörung des Kokosgewebes und zum Ausspülen des Kieses und der Röhrichtballen. Bereits 2012 mussten die Röhrichtwalzen mit Wasserbausteinen überschüttet werden, um das Ufer zu stabilisieren und die Fußsicherung für die Pflanzmatten wiederherzustellen.

Eine Anwendung erscheint nur denkbar an Wasserstraßen mit sehr geringen schiffsinduzierten und natürlichen Belastungen und nahezu konstanten Wasserständen.

4.3 Ökologische Aufwertungsmaßnahmen in der bestehenden Steinschüttung (Versuchsfelder 1, 4, 6, 8)

4.3.1 Versuchsfeld 1 – M8 Anlage senkrecht zum Ufer verlaufender Pflanzgräben, M9 Einbringen von Setzstangen, M12 Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie, M13 Einbau von Totholzstrukturen

Dieser Bereich am oberstromigen Beginn der Versuchsstrecke wird hydraulisch am stärksten belastet, da hier noch Prallhangbedingungen herrschen und die Fahrrinne nahe am Ufer entlangführt. Aus diesem Grund blieb die Steinschüttung hier erhalten und erfüllt weiterhin die Uferschutzfunktion. Mit den Pflanzungen, die mit zunehmendem Wurzelwachstum in den Untergrund die Böschung zusätzlich stabilisieren können, dem Einbringen von Totholz und der Anlage eines vorgelagerten Steinwalls als indirekten Uferschutz werden Möglichkeiten der ökologischen Aufwertung einer bestehenden losen Steinschüttung getestet.

In die 17 ausgehobenen, senkrecht zum Ufer verlaufenden Pflanzgräben wurden entsprechend der natürlichen Gewässer-/Uferzonierung standorttypische Gehölze der Weichholzaue (Purpur-, Silber-, (Fahl-), Korb-Weide) in der Böschungszone MW bis MW + 1,70 m eingebracht und Gehölze der Hartholzaue (Esche (*Fraxinus excelsior*), Schneeball, Hasel, Trauben-Kirsche (*Prunus padus*), Feld-Ahorn, Weißdorn, Pfaffenhütchen) in der Böschungszone oberhalb MW + 1,70 m gepflanzt (siehe Anlage 2). Dabei kamen wahlweise austriebsfähige und vor Ort gewonnene (gebietsheimische) Weiden zum Einsatz, die als Setzstangen, Weidenfaschinen oder Buschlagen (Weidenruten ohne Bewurzelung) eingebaut wurden. In den oberen Böschungslagen kamen wurzelnackte Gehölzjungpflanzen (sog. Heckenlagen) zur Anwendung. Zur Wiederherstellung einer einheitlichen Böschungsoberfläche wurden die Pflanzgräben mit Boden verfüllt und mit Wasserbausteinen angegedeckt.

Alle Pflanzungen haben sich im Monitoringzeitraum gut und vital entwickelt. Die Weidensetzstangen reagierten mit einer intensiven Bildung von stammbürtigen Adventivwurzeln auf die häufigen und teilweise lang andauernden Überstauzeiten in den unteren Böschungszonen, womit ein Sauerstoffmangel ausgeglichen werden konnte (Bild 30 links). Bereits im 2. Jahr nach Einbau erreichten die Weiden Triebblängen von bis zu 4 m (Bild 30 rechts). Die kräftigsten Triebe der überwiegenden Silber-Weiden erreichten zudem Durchmesser von bis zu 3,5 cm. Hinsichtlich der Vitalität des Austriebs war kein Unterschied zwischen langen und kurzen Setzstangen festzustellen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020



Bild 30: links: Weidensetzstange mit stambürtigen Adventivwurzeln (07/2013), rechts: Vitale Entwicklung der Weidenpflanzungen (06/2014) (Fotos: Katja Behrendt/Hans-Werner Herz, BfG)

Im Februar 2015 erfolgten erste Pflegeschnitte an den Weidensetzstangen und -faschinen. Um langfristig einen strukturreichen, mehrschichtigen Gehölzbestand zu erzielen, wurden unterschiedliche Rückschnittvarianten definiert. Hierzu werden einzelne Setzstangen seither durch das regelmäßige Einkürzen aller Triebe als „Kopfweiden“ entwickelt und die stärksten Triebe weiterer definierter Setzstangen als künftige „Baumweiden“ herausgepflegt. Lokal wurden Setzstangen bis auf Höhe ca. 10 cm über Steinschüttung schräg abgesägt, um weiterhin „Buschweiden“ zu formen. Innerhalb der Faschinen wurden die mächtigsten Triebe eingekürzt, um die Elastizität der Weiden hinsichtlich des Hochwasserschutzes zu bewahren. Weitere Setzstangen blieben unberührt. Alle Arbeiten wurden von den Kollegen des ABz Worms/Oppenheim händisch in enger Abstimmung mit BAW und BfG ausgeführt. Das Schnittgut wurde entfernt.

Die zurückgeschnittenen Gehölze entwickeln sich seither zu einem vitalen und dichten Bewuchs. Im Bild 31 sind die unterschiedlichen Gehölzstrukturen (Kopf- und Baumweiden, buschige Strauchweiden), die es durch die Pflegevarianten zu erzielen galt, zu erkennen. Die Zielvegetation hat sich damit eingestellt.

Die Steinschüttung zwischen den Pflanzungen blieb im unteren und mittleren Böschungsbereich überwiegend vegetationsfrei. Im oberen Böschungsbereich ist die aufgekommene Krautschicht von Haselblatt-Brombeere (*Rubus corylifolius* agg.) dominiert, der eine Mischung aus feuchteliebenden Arten (bspw. Rohr-Glanzgras, Ufer-Wolfstrapp, Hopfen (*Humulus lupulus*), Rohr-Schwingel), Stickstoff liebenden Arten (Große Klette, Brennnessel (*Urtica dioica*), Zaun-Winde (*Calystegia sepium*), Beifuß u. w.), Grünlandarten (Glatthafer, Quecke, Knaulgras u. w.) und Arten der Äcker- und kurzlebigen Unkrautfluren (bspw. Acker-Schachtelhalm (*Equisetum arvense*), Kompass-Lattich (*Lactuca serriola*), Acker-Winde (*Convolvulus arvensis*)) beigemischt ist. Die sukzessiv aufgekommenen krautigen Arten können durch die in den Untergrund wachsenden Wurzeln zusätzlich zur Böschungstabilität beitragen.



Bild 31: Strukturreicher Gehölzbewuchs nach Pflegeschnitt (07/2015) (Foto: Hans-Werner Herz, BfG)

Da das Ufer im VF-Bereich etwas zurückgesetzt ist, konnte ein Steinwall in Verlängerung der Uferlinie dem Böschungsbereich so vorgelagert werden, dass bei Wasserständen bis MW + 1 m eine wellenschlaggeschützte Flachwasserzone entsteht. Die Flachwasserzone wurde uferseits mit dem Einbau von Totholz (Baumstämme mit Wurzeltellern) strukturell aufgewertet, um die Bedingungen für die aquatische Fauna und für Wasserpflanzen zu verbessern.

Der zusätzliche indirekte Uferschutz wirkt sich förderlich auf die Entwicklung des pflanzlichen Bewuchses im unteren Böschungsbereich aus. Erste Röhrichinitialie (Seggen, Rohr-Glanzgras) und Weidenjungpflanzen konnten sich in diesem Bereich ansiedeln. In der Flachwasserzone haben sich Wasserpflanzen angesiedelt. In Jahren mit langanhaltenden Niedrigwasserständen entwickelte sich zudem eine artenreiche annuelle Uferflur (vgl. Kap. 5.2).

4.3.2 Versuchsfeld 4 – M13 Einbau von Totholzstrukturen, M14 Aufbringen von kiesigem Substrat/Einzelstein-Gruppen

Im VF 4 erfüllt die Steinschüttung weiterhin die Uferschutzfunktion. Eine Kieseinfüllung und die Anordnung von Strukturelementen (Gruppen großer Einzelsteine aus Granit) dienen einer ökologischen Aufwertung. Der Kies wurde im Monitoringzeitraum während der Überstauperioden weitestgehend erodiert. Die großen Granitsteine haben ihre Lage seit Einbau nicht wesentlich verändert.

Es lassen sich zwei Böschungszonen voneinander unterscheiden: Die überwiegend bewuchsfrei gebliebene untere/mittlere Böschungszone und die etwas stärker bewachsene obere Böschungszone (Bild 32). Es dominierten über den Erfassungszeitraum die Haselblatt-Brombeere mit zunehmend höheren Anteilen, gefolgt von Stickstoff liebenden und ruderalen Arten, wie z. B. Beifuß, Weißer Gänsefuß, Quecke, Acker-Winde und Amarant-Arten (*Amaranthus bouchonii*,

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

A. retroflexus). Wiederkehrender neophytischer Jungwuchs von Eschen-Ahorn wurde von Jahr zu Jahr händisch entfernt.

Hinsichtlich der Zielvegetation gab es für das Versuchsfeld keine Vorgaben, die Vegetation sollte sich spontan über die natürliche Sukzession einstellen.

Als Totholzstrukturen wurden Totholzfaschinen (bestehend aus Birke) im Bereich Mittelwasser in die Böschung eingebaut (in Bild 32 an der Wasserlinie zu erkennen). Diese haben sich seit dem Einbau 2011 bereits stark zersetzt und sind nur noch in Resten vorhanden. Um die ökologisch positive Wirkung zu erhalten, müssen sie durch neue ersetzt werden.



Bild 32: Bewuchsfreie untere/mittlere und stärker bewachsene, hydraulisch weniger belastete obere Böschungszone (06/2017) (Foto: Steffen Wieland, BfG)

4.3.3 Versuchsfeld 6 – M10 Einbringen von Oberboden-Alginat, Ansaat durch Anspritzverfahren, M11 Einpflanzung von Röhrichtbulten in die Steinschüttung

Im VF 6 erfüllt die Steinschüttung weiterhin die Uferschutzfunktion. Eine Oberboden-Alginat-Füllung und Nassansaat sowie lokale Röhrichtballenpflanzungen (siehe Anlage 2) in der Steinschüttung im Bereich der MW-Linie dienen der ökologischen Aufwertung.

Bereits in den Monitoringperioden 2012 und 2013 konnten durch Erosion bei hohen Wasserständen nur noch wenige Reste des Oberboden-Alginats und des nachträglich eingebrachten Kiesel im Lückensystem der Steinschüttung nachgewiesen werden. Ein Jahr später waren auch die Röhrichtballen erodiert. Die anfänglich bereits nur spärlich entwickelte Gräser-/Kräuternarbe auf den im oberen Böschungsbereich verbliebenen Alginatresten entwickelte sich im Monitoringzeitraum nicht weiter. Das Alginat ist heute vollständig ausgespült. Die Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung schlugen in diesem VF unter den gegebenen Belastungen des Rheins fehl. Das VF unterscheidet sich vom Bewuchs nicht mehr von der Referenzstrecke.

4.3.4 Versuchsfeld 8 – M12 Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie

In diesem VF wird die Uferschutzfunktion durch die verbliebene Steinschüttung bzw. das alte Pflaster gewährleistet. Durch die Erhöhung der Steinschüttung im Fußbereich des Pflasters (Steinwall) soll eine ökologische Aufwertung durch Förderung des bereits vorhandenen Röhrichtbewuchses auf der Berme und der angrenzenden unteren Böschungszone erreicht werden. Bei Wasserständen bis zur Oberkante des Steinwalls (MW + 0,5 m) wird die hydraulische Belastung auf die Uferböschung reduziert. Dadurch konnte sich in den letzten sechs Jahren eine arten- und blütenreiche Röhrichtzone mit Hochstauden feuchter Standorte, Flutrasenarten und Arten kurzlebiger Schlamm- und Pionierfluren (z. B. Zusammengedrückte Binse (*Juncus compressus*), Wilde Sumpfkresse, Weißes Straußgras, Rohr-Glanzgras, Rohr-Schwengel, Schlank-Segge, Gewöhnlicher Gilbweiderich (*Lysimachia vulgaris*), Ampfer-Knöterich (*Persicaria lapathifolia*), Blutweiderich u. a.; Bild 33, Bild 34) weiter ausdehnen. Nähr- und Besiedlungssubstrat für die Pflanzen wird durch eine mehrere Zentimeter mächtige Schlammschicht bereitgestellt, die sich auch in diesem VF (vgl. VF 1) hinter dem Steinwall auf der gepflasterten Berme abgelagert hat.

Die Entwicklung zeigt die positive Wirkung des erhöhten Steinwalls zur Reduzierung des Wellen- und Strömungsangriffs auf die Ufervegetation. Die geplante Zielvegetation aus Röhricht und Gräsern hat sich eingestellt.



Bild 33: Schlamm- und Pionierflur mit blühender Sumpfkresse (06/2012)
(Fotos: Katja Behrendt, BfG)



Bild 34: Gut ausgeprägte Röhrichtzone im Schutz des Steinwalls (05/2017)

4.4 Ohne Uferschutzmaßnahmen nach Rückbau der Steinschüttung (Versuchsfeld 9)

M15 – kein Uferschutz oberhalb MW, Weidensetzstangen auf Böschungskrone, Ausfachungsbühne

Im VF 9 wurden die Böschungen nach Rückbau der Steinschüttung zwischen Mittelwasser und Böschungsoberkante auf eine Neigung von 1 : 2 bis 1 : 3 profiliert und nicht mehr gesichert (Bild 35 links). Im stromab letzten Versuchsfeld ist die Fahrrinne mit ca. 140 m am weitesten vom

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Ufer entfernt, sodass hier relativ geringe schiffsinduzierte Belastungen am Ufer auftreten. Berechnungen zeigen, dass Porenwasserüberdrücke im Boden nicht relevant sind. Ein Uferschutz mit Flächengewicht ist deshalb nicht erforderlich, sondern nur ein Schutz gegen Oberflächenerosion, auf den hier bewusst verzichtet wurde. Ziel war es, in diesem Versuchsfeld eine natürliche Sukzession zuzulassen und gleichzeitig die Erosion zu beobachten und zu bewerten. Im Bereich zwischen Böschungsschulter und Betriebsweg wurden zwei Reihen Silber-Weidensetzstangen versetzt angeordnet, um zu untersuchen, ob durch die sich entwickelnden Wurzeln der Betriebsweg vor Erosion geschützt werden kann. Als unterstromigen Abschluss der Versuchsstrecke wurde eine aus Baumstämmen und Wasserbausteinen bestehende, mit Weidensetzstangen begrünte Ausfachungsbuhne angeordnet (siehe Anlage 2).

Die seit Anfang 2012 aufgetretenen Hochwasserereignisse mit Wasserständen zum Teil bis über das angrenzende Gelände haben bei gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung erwartungsgemäß zu einer ständig zunehmenden Erosion im gesamten Böschungsbereich geführt. Feinere Bestandteile in Sand- und auch Kies Korngröße wurden besonders in den häufig und lange eingestauten unteren Bereichen erodiert, sodass im Erscheinungsbild die aus dem Untergrund freigespülten Steine mit Kantenlängen größer als 5 bis 10 cm überwiegen (Bild 35 Mitte und rechts). Am unterstromigen Ende des Versuchsfeldes haben vor der Ausfachungsbuhne zum Ufer hin orientierte Verwirbelungen lokal zu größeren Erosionen bis zur Böschungsoberkante geführt. Dadurch sind in Abhängigkeit der Wasserstände bei Hochwasser terrassenartige Stufen in den oberen 2 m des anstehenden Auelehms entstanden.

Wie die Querprofileinmaße bei km 441,575 im Bild 36 zeigen, hat sich die Böschungskante hier am Versuchsfeldende nach Rückbau der Steinschüttung bis 2019 durch Erosion ca. 5 m landeinwärts verschoben. Gelb hinterlegt ist der erodierte Bereich.



Bild 35: Entwicklung im Versuchsfeld 9 – 12/2011 (links, nach Bauabschluss), 7/2013 (Mitte), 3/2014 (rechts) (Foto: BAW)

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

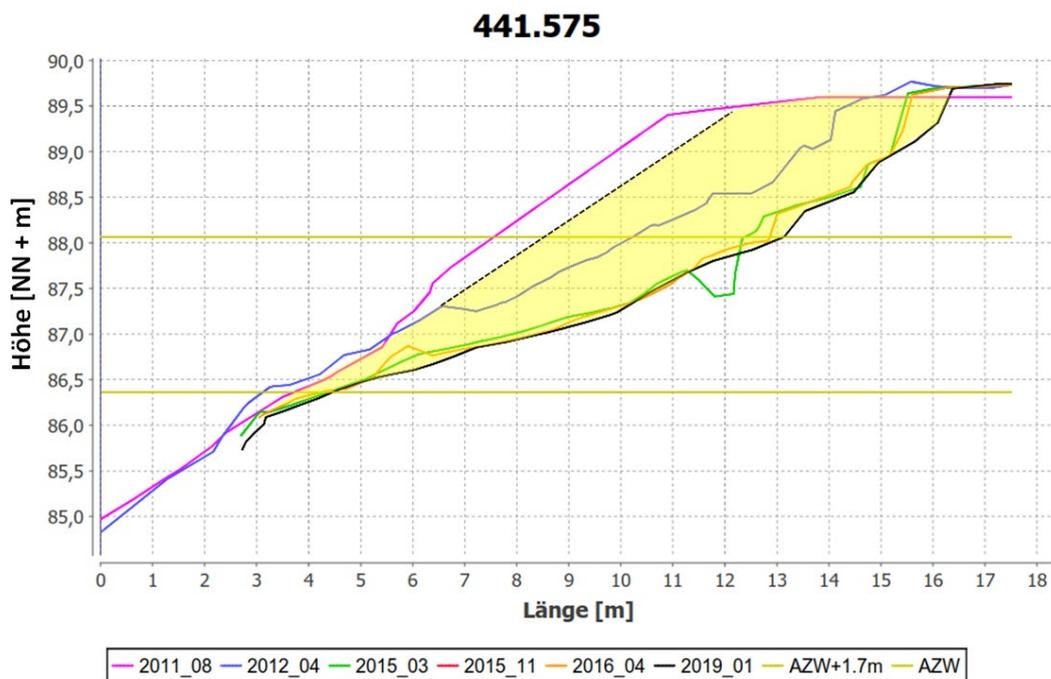


Bild 36: Einmaß Querprofil km 441,575 (VF 9, Versuchsfeldende nahe der Ausfachungsbühne)



Bild 37: links: Aus dem Untergrund freigespülte alte Wasserbausteine im VF 9 (8.9.2016), rechts: Freigespülte Setzstangen (26.4.2018) (Fotos: BAW)

Eine ähnliche Entwicklung zeigt Bild 38 für das Querprofil bei km 441,500, in dem das 500 m-Schild an der Böschungsoberkante steht (Bild 35 Mitte und rechts). Es hat hier zwar insgesamt weniger Erosion stattgefunden, aber bereits 2015 war die Erosion so weit fortgeschritten, dass das km-Schild erreicht war. 2016 wurde es neu eingebaut und mit Wasserbausteinen gesichert (Bild 39). Die Böschung hat sich im gesamten Versuchsfeld abgeflacht, nur im oberen Böschungsbereich sind im Auelehm fast senkrechte Abbruchkanten entstanden. Einzelne wasserseitige der insgesamt gut entwickelten Setzstangen auf der Böschungsplanie wurden dadurch bis zur Unterkante durch Erosion freigespült (Bild 35 rechts und Bild 37 rechts), sodass sie als Schutz vollständig verloren gingen. Deshalb wurde 2014 landseitig eine dritte Reihe Weidensetzstangen ergänzt.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

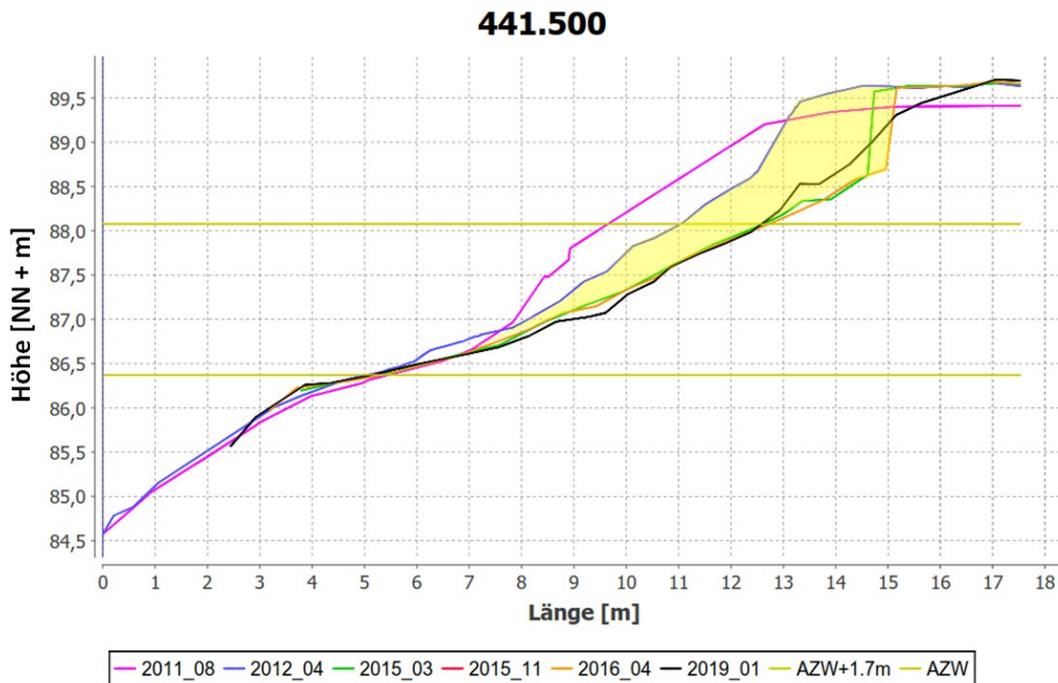


Bild 38: Einmaß Querprofil km 441,500 (VF 9)

Die Querprofileinmaße zeigen aber auch, dass im unteren Böschungsbereich seit 2015 nur noch geringe Veränderungen auftreten, d. h. dass die Böschung in der erreichten Neigung von etwa 1 : 6 bis 1:7 weitestgehend stabil ist. Ursache sind die aus dem Untergrund freigespülten kleineren Wasserbausteine aus alten Ufersicherungen der letzten 150 Jahre, die das Ufer jetzt schützen (Bild 35 Mitte und Bild 37 links).

Wurzelausgrabungen, die 2015 in Zusammenarbeit mit der FH Erfurt an einer Setzstange bei km 441,590 durchgeführt wurden, zeigen, dass sich zwischen den 2011 im Abstand von ca. 2 m eingebrachten Setzstangen kein flächiger „Wurzelschirm“ ausgebildet hat, der die fortschreitende Erosion zwischen den Weiden aufhalten könnte. Eine ausreichende Sicherung des Betriebsweges ist mit den aus den Setzstangen entwickelten Weiden nicht gegeben. Es ist davon auszugehen, dass die Weidensetzstangen zukünftig bei Erosion weiter freigespült werden und letztendlich verloren gehen.



Bild 39: Mit Wasserbausteinen gesichertes km-Schild bei km 441,500 (7.11.2017) (Foto: BAW)

Generell zeigen die Veränderungen in diesem Versuchsfeld, dass im Bereich der Versuchsstrecke Ufersicherungsmaßnahmen erforderlich sind, wenn keine Erosion des Ufers zugelassen werden kann. Im oberen, seltener eingestauten Bereich wird der anstehende Auelehm mit jedem Hochwasser weiter erodieren, sodass die Böschungskante sich weiter landeinwärts verschieben wird.

Die sukzessive Vegetationsentwicklung ist für den Erfassungszeitraum von einer hohen Dynamik geprägt. Die oben beschriebenen Prozesse mit Erosion und Um- und Neuverteilung von Korngrößenklassen führten eine ständige Verjüngung (Absterben/Neubesiedlung) von Pflanzengemeinschaften herbei. Während der untere Böschungsbereich im gesamten Monitoringzeitraum weitestgehend vegetationslos blieb, konnte sich im mittleren Böschungsbereich nach langanhaltenden Niedrigwasserphasen ein spärlicher Bewuchs (5 – 10 % Gesamtdeckung) einstellen. Es dominierten in diesen Niedrigwasserphasen typische Vertreter der Uferzonen nährstoffreicher Gewässer und annuelle Ufersaumarten, wie z. B. Ufer-Wolfstrapp, Schwarzfrüchtiger Zweizahn, Weißer und Vielsamiger Gänsefuß, Beifuß, Vogel- und Ampfer-Knöterich, Haselblatt-Brombeere, u. a.). Die Arten tolerieren keine Überflutung und fallen bei hohen Wasserständen temporär aus. Im oberen Böschungsbereich konnte der krautige Bewuchs hingegen in einigen Jahren eine Gesamtdeckung von bis zu 40 % erreichen. Unter den Arten dominierten Haselblatt-Brombeere, Acker-Winde, Beifuß, Vogel-Knöterich und Gräser, wie bspw. Quecke und Knaulgras. Ergänzt wurden die krautigen Arten durch ein sich sukzessive flächig ausbreitendes Hartriegel-Gehölz am Übergang zur Böschungsplanie. Die Entwicklung des Hartriegels als standorttypisches Gehölz der Hartholzaue wird sehr positiv bewertet. Mit zunehmendem Wurzelwachstum ist zumindest lokal von einer böschungsstabilisierenden Wirkung auszugehen. Eine Wurzelaufräumung ist zur Prüfung geplant. Aufgrund des dynamischen „Kommens und Gehens“ konnten die sukzessive aufgetretenen krautigen Pflanzen bisher keinen Beitrag zur Böschungstabilität leisten. Vorgaben zur Zielvegetation erfolgten nicht, das VF sollte sich in natürlicher Sukzession entwickeln.

4.5 Zusammenfassende Bewertung der Standsicherheit der Maßnahmen

Ziel des Naturversuchs am Rhein war es, aus technischer Sicht zu untersuchen, inwieweit die technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen mit den pflanzlichen Komponenten unter den gegebenen Randbedingungen das Ufer in gleicher Weise wie eine herkömmliche Steinschüttung schützen können. Die schiffsinduzierten Belastungen sind in jedem Versuchsfeld aufgrund der sich stromab vom Ufer entfernenden Fahrrinne etwas unterschiedlich. Auch innerhalb eines Versuchsfeldes sind aufgrund der großen Wasserspiegelschwankungen unterschiedliche hydraulische Einwirkungen vorhanden. Die unteren Böschungsbereiche waren wesentlich häufiger und länger eingestaut und damit durch Wellen und Strömungen belastet als die oberen Bereiche. Aus diesem Grund ist eine differenzierte Bewertung der einzelnen Maßnahmen erforderlich, für einige Maßnahmen gibt es eine unterschiedliche Bewertung für den oberen und unteren Böschungsbereich.

Bei den Ufersicherungsmaßnahmen, bei denen die Pflanzen zur Gewährleistung des Uferschutzes primär erforderlich sind (VF 2, 3, 5 und 7), hängt der Erfolg der Maßnahmen neben der Konstruktion der Maßnahme und deren Befestigungen im Anfangszustand maßgeblich von den gewählten Pflanzenarten hinsichtlich ihrer Eignung unter den gegebenen Randbedingungen (z. B. Überflutungstoleranz) und somit ihrer Vitalität und langfristigen Entwicklung ab. Anlage 2 zeigt in einer

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Übersicht alle verwendeten Pflanzenarten und bewertet durch farbliche Kodierung deren Entwicklung in den ersten 6 Jahren nach Einbau. Dabei ist zusätzlich gekennzeichnet, ob die Pflanzen in der jeweiligen Maßnahme für den Uferschutz erforderlich sind oder primär nur der ökologischen Aufwertung dienen, wie zum Beispiel in der begrüntem Steinschüttung.

In Tabelle 11 sind die getesteten Ufersicherungsmaßnahmen zusammenfassend in einer Übersicht dargestellt. Auf der Grundlage aller Ergebnisse der Versuchsstrecke wurden die Maßnahmen im Vergleich hinsichtlich ihrer Stabilität und der Gewährleistung der lokalen Uferstandsicherheit auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) bewertet. Diese Einschätzung bildet gleichzeitig die Grundlage für die zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen unter Berücksichtigung der Kriterien Standsicherheit, Ökologie und Kosten in Kap. 7.

Tabelle 11: Bewertung der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen an der Versuchsstrecke hinsichtlich der Gewährleistung der Uferstandsicherheit auf einer Skala von 1 bis 5 (1 – sehr schlecht, 2 – schlecht, 3 – mittel, 4 – gut, 5 – sehr gut)

VF	Technisch-biologische Uferschutzmaßnahmen/ Bauweisen	Bewertung Uferstandsicherheit
VF 1	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen, <u>ohne</u> vorgelagerten Steinwall VF 1, oben und unten	5
VF 2	Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung VF 2, oben und unten	3
VF 3	Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung VF 3, oben und unten	4
VF 4	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken, <u>ohne</u> Totholzfaschinen VF 4, oben und unten	5
VF 5	Rückbau der Steinschüttung, Röhrichtgabionen VF 5a, unten	2
	Rückbau der Steinschüttung, Steinmatratzen VF 5a, oben; VF 5b, oben und unten	5
VF 6	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Alginat VF 6, oben und unten	5
VF 7	Rückbau der Steinschüttung, Kokosmatte über Nassansaat VF 7a, oben	1
	Rückbau der Steinschüttung, Pflanzmatten VF 7a, b, c, unten	1
	Rückbau der Steinschüttung, Pflanzmatten VF 7b, c, oben	4
VF 8	Erhöhung des vorhandenen Steinwalls; vorhandenes Pflaster und Steinschüttung, Röhrichtbewuchs VF 8, unten	5
VF 9	Rückbau der Steinschüttung, ohne Böschungsschutz, Weidensetzstangen auf der Böschungsplanie ¹⁾ VF 9, oben und unten	1
Ref.	Steinschüttung als Referenz (bereits vorhanden vor der Umgestaltung)	5

¹⁾ Im VF 9 war die Standsicherheit von vornherein nicht zu gewährleisten, Erosion war erwünscht.

Von den getesteten Maßnahmen sind die ökologisch aufgewerteten Steinschüttungen (VF 1, 4, 6 und 8) als am stabilsten zu bewerten, sie konnten die Uferstandsicherheit unabhängig von den zusätzlich eingebrachten Pflanzen und Strukturelementen ohne Einschränkung gewährleisten. Auch die Steinmatratzen (VF 5b) haben sich unter den gegebenen Bedingungen im gesamten Böschungsbereich als zuverlässiger Uferschutz erwiesen. Die Röhrichtgabionen (VF 5a) sind nur bei entsprechender Optimierung der Pflanzenauswahl und -anordnung als geeignet zu bewerten (siehe Anlage 3). Bewährt haben sich hier im unteren häufig eingestauten Böschungsbereich nur die eingesetzten Seggen. Sie zeigten im Vergleich die höchste Überstauungstoleranz und das größte Regenerationsvermögen.

Alle Maßnahmen ohne signifikantes Flächengewicht waren weniger robust als die mit Gewicht. Sie erlitten zum Teil bereits im kritischen Anfangsstadium Schäden, sodass hier lokal früh Sanierungsmaßnahmen notwendig wurden. Die Weidenspreitlagen (VF 2, 3) sind prinzipiell als geeigneter Uferschutz für Wasserstraßen zu bewerten, Konstruktion und Einbau sowie Unterhaltung sind zu optimieren (siehe Anlage 3). Die erforderliche flächendeckende gute Entwicklung der Wurzeln und Sprosse der Weiden hängt maßgeblich von den Eigenschaften der verlegten Äste und den Befestigungen ab.

Die vorkultivierten Pflanzmatten (VF 7) haben sich in der eingebauten Form nur für nicht oder sehr selten eingestaute Böschungsbereiche als Uferschutz geeignet erwiesen. Hier konnten von den gepflanzten Arten besonders Schlank-, Ufer-Segge und Rohr-Schwengel zur Ufersicherung beitragen. Das Ufersicherungspotenzial dieser Arten wurde in den weniger belasteten oberen Böschungsbereichen durch das Zusammenwirken eines Gemischs weiterer Gräser/Kräuter – teils gepflanzt, teils durch natürliche Sukzession aufgekommen – verstärkt. In den häufig eingestauten unteren Böschungsbereichen konnte dagegen erst nach Abdeckung mit einer Lage Wasserbausteinen eine ausreichende Stabilisierung und damit Regeneration dieser Pflanzenarten erreicht werden. Kokosmatte über Nassansaat (VF 7a) ist eine sehr schwache Bauweise, die hier nicht den Uferschutz gewährleisten konnte. Sie erscheint nur oberhalb des maximalen Wasserstands bzw. Wellenaufbaus anwendbar.

Die ungesicherte Böschung im VF 9 hat trotz der im Vergleich zu den anderen Versuchsfeldern geringsten schiffsinduzierten Belastungen deutlich gezeigt, dass das Ufer ohne Uferschutzmaßnahmen instabil ist. Die mit jedem Hochwasser weiter fortschreitende Ufererosion kann auch durch die zwischen Betriebsweg und Böschungsoberkante punktuell eingebrachten und sehr gut entwickelten Weiden nicht verhindert werden.

In der tabellarischen Übersicht der Anlage 3 sind weitere Details zur Entwicklung der Maßnahmen, zu aufgetretenen Schäden und durchgeführten Sanierungsmaßnahmen dargestellt und erläutert. Es werden die hinsichtlich der Konstruktion und Ausführung notwendigen Optimierungen für die einzelnen Maßnahmen („lessons learned“) beschrieben, und es erfolgt aus technischer Sicht eine Bewertung der prinzipiellen Eignung der Maßnahmen als Ufersicherung an Binnenwasserstraßen. Anwendungsgrenzen und -empfehlungen werden angegeben.

5 Ökologische Ergebnisse und Bewertung der Maßnahmen

5.1 Bewertung der ökologischen Wirksamkeit

Die Bewertung der ökologischen Wirksamkeit wird anhand definierter Kriterien, die sich wiederum aus Subkriterien zusammensetzen, jeweils für die Vegetation (Kap. 5.2), die aquatische und terrestrische Fauna (Kap. 5.3) wie auch für die Beziehungen zwischen diesen Komponenten (Kap. 5.4) vorgenommen. Als weitere Kriterien gehen die verwendeten Baumaterialien (Kap. 5.5) und die Ökosystemleistungen – am Beispiel der CO₂-Fixierung – (Kap. 5.6) ein. Dabei werden fünf Wertstufen vergeben: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1). Die Gesamtbewertung der ökologischen Wirksamkeit erfolgt in Kap. 5.7.

Bei den hier untersuchten technisch-biologischen Ufersicherungen handelt es sich um Bauweisen, die eine Sicherungsfunktion für die Ufer erfüllen müssen. Sie unterscheiden sich von naturnahen Ufern durch weitgehend fehlende eigendynamische morphologische Prozesse, künstlich eingebrachte Pflanzen und die hydraulische Belastung durch die Schifffahrt, wodurch Maßnahmen unterhalb der Mittelwasserlinie nur eingeschränkt möglich sind.

Als Referenz zur Bewertung der ökologischen Wirksamkeit ist der naturnahe Uferzustand wegen dieser prinzipiellen Unterschiede nicht geeignet. Daher wird die ökologische Wirksamkeit der technisch-biologischen Bauweisen im Folgenden im Vergleich mit dem Zustand eines konventionellen Schüttsteindeckwerkes beurteilt, das in sicherheitsrelevanten Uferabschnitten an Binnenwasserstraßen durch technisch-biologische Ufersicherungen ersetzt werden soll. Insofern ist hier die erzielte ökologische Aufwertung gegenüber dem Schüttsteindeckwerk von Bedeutung.

5.2 Vegetationskundliche Ergebnisse und Bewertung

5.2.1 Methodische Hinweise

Untersuchungseinheiten waren die Bauweisen und die beiden Referenzfelder, differenziert in untere, mittlere und obere Böschungszone, also etwa im Bereich MNW bis MW, MW bis ca. MW +1,70 m und oberhalb MW +1,70 m. In Höhe der oberstromigen Referenz wurde zudem der Vegetationsstreifen zwischen Böschungsschulter und Betriebsweg, also die Böschungsplanie, erfasst (hier als „Aue“ bezeichnet). Der Zustand vor Baubeginn wurde im Sommer 2009 und Frühjahr 2010 erfasst. Nach Umsetzung der Maßnahmen fanden jährliche Untersuchungen in den Jahren 2012 bis 2017 statt. In den Jahren 2012 und 2014 erfolgten jeweils eine Frühjahrs- und eine Sommerbegehung. Aufgrund ungünstiger Wasserstände konnte im Jahr 2015 nur eine Frühjahrs-, in den Jahren 2013 und 2016 jeweils nur eine Sommererfassung realisiert werden. Eine Ausnahme stellt das VF 6 dar. Die ökologische Aufwertung schlug bereits in den ersten beiden Jahren unter den gegebenen Belastungen des Rheins fehl, weshalb das VF in den Folgejahren nicht weiter erfasst wurde (Kap. 4.3.3). Im Frühjahr 2017 wurden sanierte Bereiche in den VF 5 und 7 beprobt.

Je Termin wurden alle Pflanzenarten je Böschungszone und Bauweise erfasst und deren Deckung als Maß für die Artenmenge gemäß der Methodik nach Braun-Blanquet geschätzt (Dierschke

1994). Eine ausführliche Darstellung der Arbeiten inkl. versuchsfeldbezogener Besonderheiten erfolgte in (BAW, BfG, WSA-MA 2013). Im Monitoring wurden über 300 Datensätze erstellt und über 400 Pflanzenarten nachgewiesen. Zur Auswertung wurden mit NMDS-Ordinationen Parameter ermittelt (z. B. Böschungslage, Bauweise, Artenzahl), die die Varianz der Daten erklären. Aus der Pflanzenartenzusammensetzung wurden mittlere Zeigerwerte berechnet (Ellenberg et al. 1992). Biologisch-ökologische Pflanzenmerkmale wurden der Datenbank BiolFlor (Klotz et al. 2002), dem Pflanzen-Verbreitungsatlas (Netzwerk Phytodiversität Deutschland und BfN 2013) und www.floraweb.de entnommen. Der Gefährdungsstatus folgt der Roten Liste Deutschlands (Metzing et al. 2018) und Hessens (HMULV 2008), der Schutzstatus der Datenbank www.wisia.de.

In der Datenauswertung wurde nicht zwischen künstlich eingebrachten und spontan eingewanderten Arten differenziert, weil diese Differenzierung bei der Datenerhebung oft nicht zweifelsfrei getroffen werden konnte.

Die Vegetation der Bauweisen wird nach folgenden Subkriterien beurteilt:

- Wirkung von Sonderstandorten (Flachwasserzone und Heckenlagen)
- Artenreichtum (unter Einbeziehung des in Kap. 5.4 behandelten Blütenreichtums)
- Diversität und Pflanzenmenge der unteren Böschungszone
- Anteil heimischer und eingebürgerter (invasiver) Neophyten
- Vorkommen ufertypischer, gefährdeter und seltener Pflanzenarten
- Böschungszonierung in Abhängigkeit von den hydrologischen Verhältnissen

Die Subkriterien werden (außer „Sonderstandorte“) auf einer fünfstufigen Skala bewertet, die am Schluss dieses Unterkapitels (Tabelle 13 und Tabelle 14) zu einer Gesamtbewertung des Kriteriums „Vegetation“ verbalargumentativ zusammengeführt wird.

5.2.2 Sonderstandorte: Flachwasserzone und Heckenlagen

Eine durch einen Steinwall wellengeschützte Flachwasserzone wurde vorgelagert zu VF 1 (be-grünte Steinschüttung) angelegt. Entlang der Böschungsoberkante der VF 2 und 5 wurden Heckenlagen gepflanzt. Diese Bauweisen sind theoretisch mit jedem Versuchsfeld kombinierbar. Sie wurden daher unabhängig von den Versuchsfeldern als Sonderstandorte betrachtet. Ihre im Vergleich zu den Böschungen andere Artenzusammensetzung erschwert zudem eine gemeinsame statistische Auswertung, sodass auch deshalb eine unabhängige Betrachtung notwendig war.

Die eingebauten Totholzstrukturen (Wurzelteller in VF 1, Totholzfaschinen in VF 4 und Ausfächerungsbühne aus Totholz in VF 9) sind ebenfalls als Sonderstandorte zu betrachten. Da sie aber vornehmlich tierökologische Funktionen erfüllen, werden sie im vegetationskundlichen Teil nicht weiter betrachtet.

In der Flachwasserzone (VF 1) und an ihrem Ufer lagerte sich eine mehrere Zentimeter mächtige Schicht aus Feinsubstrat ab. Hier siedelten sich Pflanzenarten der Flussufergesellschaften (z. B. Gift-Hahnenfuß *Ranunculus sceleratus*) und Röhrichte (z. B. Schwanenblume *Butomus umbellatus*, Bild 40) als Initiale an, die allerdings noch keine stabilen Bestände bilden. In der Flachwasserzone

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

wurden Wasserpflanzen durch den Wellenschutz und den Substrateintrag gefördert. Im Jahr 2017 wurden fünf für den Rhein typische Wasserpflanzenarten nachgewiesen, neben den in Bild 40 dargestellten einheimischen Arten kamen auch noch Ähren-Tausendblatt (*Myriophyllum spicatum*) und der Neophyt Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii*) vor. Einige der Arten sind relativ selten, das Knoten-Laichkraut (*Potamogeton nodosus*) steht in Deutschland auf der Vorwarnliste.

Die gepflanzten Sträucher der Heckenlagen sind typische Vertreter der oberen Hartholzzone. Bild 41 zeigt eine Auswahl der eingebrachten Arten. Mit dem sukzessiv eingewanderten Taubenkropf (*Cucubalus baccifer*) kommt auch eine gefährdete Art vor (Kap. 5.2.7).

Flachwasserzonen und Heckenlagen stellen aus vegetationskundlicher Sicht sinnvolle Kombinationen mit den in den Versuchsfeldern getesteten Ufersicherungsbauweisen dar. Sie erhöhen die Strukturvielfalt und den Reichtum ufer- bzw. auentypischer Arten. Aquatische und häufig überflutete semiterrestrische bzw. selten überflutete Lebensräume werden gefördert und damit ein auf der Uferböschung breites Standortpektrum. Zusätzlich wird die naturnahe Böschungszonierung gestärkt.



Bild 40: Flachwasserzone mit Wasser- und Röhrichtpflanzen (Fotos: Katja Behrendt, BfG)



Bild 41: Straucharten der Heckenlagen (Fotos: Katja Behrendt, Andreas Sundermeier, BfG)

5.2.3 Artenreichtum

Die Versuchsstrecke führte im Vergleich zum Zustand vor Umsetzung der Maßnahmen zu einer Erhöhung des Artenreichtums der höheren Pflanzen. So wurden im Jahr 2016 in der Versuchs- und Referenzstrecke zusammen 162 Arten nachgewiesen, während im Jahr 2009, vor dem Bau der Versuchsstrecke, nur 27 Arten vorkamen.

Bild 42 zeigt eine Ordination der im Monitoringzeitraum erhobenen vegetationskundlichen Datensätze (ohne Sonderstandorte und VF 6). In Textbox 1 ist erläutert, wie eine solche Grafik zu lesen ist. Die Lage auf der Böschung ist farblich kodiert. Die einzelnen Punkte sind nicht beschriftet, weil dies die Lesbarkeit der Grafik stark beeinträchtigt hätte. Hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung lassen sich „steingeprägte“, „gehölzreiche“ und „gras-krautreiche“ Bauweisen differenzieren. Bei den steingeprägten Bauweisen handelt es sich um die beiden Referenzflächen, die verbliebene Steinschüttung im VF 1 und die verbliebene Steinschüttung mit Kieseinfüllung und Steinblöcken in den ersten Entwicklungsjahren (VF 4). Zu den gehölzreichen Bauweisen gehören die Pflanzgräben des VF 1, die Weidenspreitlagen (VF 2 und 3), der Bermenbereich im Schutz des Steinwalls mit Röhricht und den vor Maßnahmenumsetzung bereits vorhandenen Gehölzen (VF 8) sowie die mit Weidensetzstangen und -faschinen bepflanzte Steinschüttung oberhalb der Ausfachungsbühne in VF 9. Zu gras-krautreichen Bauweisen lassen sich hinsichtlich der Artenzusammensetzung die VF 4 (verbliebene Steinschüttung mit Kieseinfüllung und Steinblöcken nach längerer Entwicklungszeit), VF 5 (Röhrichtgabeln und Steinmatratzen), VF 7 (Pflanzmatten) und VF 9 (ohne Böschungsschutz) gruppieren. Neben der Gruppierung nach Versuchsfeldern zeichnet sich sowohl im Gesamtdatensatz als auch hinsichtlich der Daten des Jahres 2016 eine übergeordnete Gruppierung nach Böschungslage ab, d. h. die Böschungszonen zeigten sich hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung ähnlich.

Weiterhin wurde mit einer Regressionsanalyse die räumliche Beziehung der Artenzahlen innerhalb der Datensätze modelliert. Die Artenzahlen sind als Höhenlinien dargestellt. Das Modell zeigt einen deutlichen Gradienten von der unteren/mittleren Böschungslage zur oberen Böschungslage sowohl im Gesamtdatensatz als auch in den Daten von 2016. Der Gradient ist durch die Orientierung der Pfeile im linken Teil von Bild 42 visualisiert.

Bauweise, Artenzahl und Böschungszone sind somit wichtige Faktoren, die eine Gruppierung der einzelnen Datensätze ermöglicht. Das Regressionsmodell erklärt nahezu 79 % (Gesamtdatensatz) bzw. 91 % (Jahr 2016) der Varianz im Datensatz.

Die Artenzahl nahm von der unteren/mittleren zur oberen, seltener eingestauten Böschungszone zu. Steingeprägte Bauweisen zeigten den geringsten Artenreichtum mit einer vergleichsweise geringen Spanne zwischen oberer und unterer Böschungszone (grauer Pfeil bzw. Ellipse in Bild 42). Ihre Artenzusammensetzung ist von der der anderen Bauweisen deutlich verschieden. Gehölzreiche Bauweisen (Pfeil bzw. Ellipse in Magenta) wiesen geringe bis mittlere Artenzahlen auf, wobei die Weidenspreitlagen der VF 2 und 3, die Pflanzgräben mit Weidenfaschinen und -setzstangen in VF 1 sowie die Weidenpflanzungen oberhalb der Ausfachungsbühne im VF 9 eher geringen Artenreichtum zeigten, während die Heckenlagen in der oberen Böschungszone des VF 1 mittlere

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Artenzahlen hervorbrachten. Durch den hohen Anteil von Weiden bilden diese Bauweisen eine eigene Gruppe hinsichtlich der Artenzusammensetzung. Gras-krautreiche Bauweisen der VF 4 (Kieseinfüllung), 5 (Röhrlichtgabionen, Steinmatratzen) 7 (Pflanzmatten), 8 (Steinwall im Jahr 2016) und 9 (ohne Böschungsschutz) erreichten geringe bis hohe Werte (roter Pfeil bzw. Ellipse). In den gras-/krautgeprägten Bauweisen war die Spanne der Artenzahlen im Böschungsgradienten vergleichsweise hoch. Grundsätzlich können die höheren Artenzahlen in den oberen Böschungszonen durch die im Böschungsgradienten nach oben hin abnehmende hydraulische Belastung (z. B. infolge Strömung, Wellen, Einstau) erklärt werden.

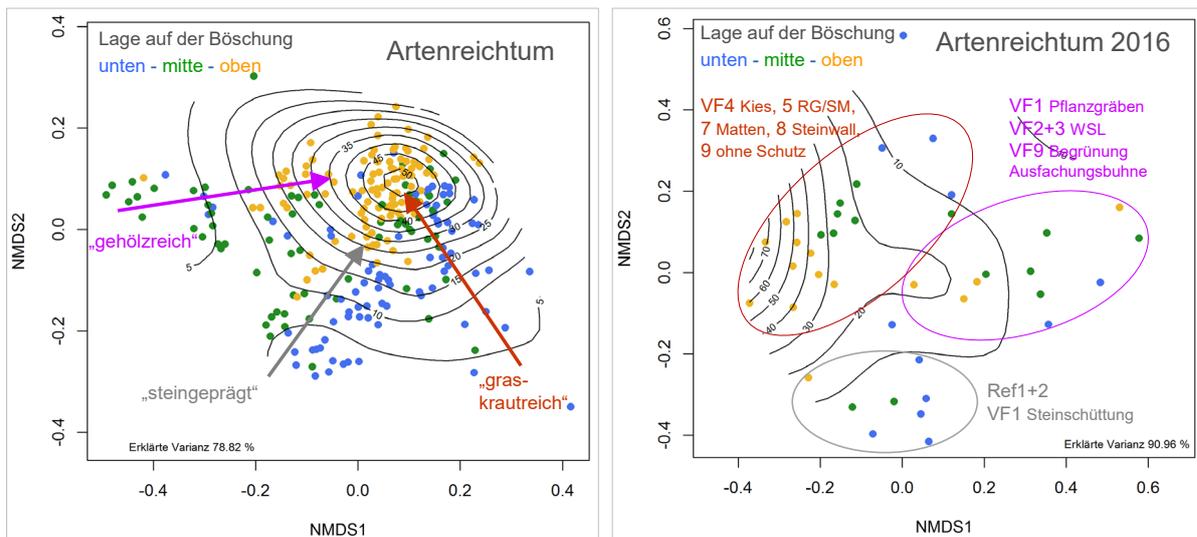


Bild 42: Ähnlichkeit in der Artenzusammensetzung und Artenreichtum in der gesamten Monitoringperiode (links) und im Jahr 2016 (rechts). Die Lage steingepägter, gehölzreicher und gras-krautreicher Bauweisen wird im Bild links durch Pfeile symbolisiert, deren Orientierung weist von der unteren zur oberen Böschungszone.

TextBox 1: Interpretation von NMDS-Grafiken: Die NMDS-Grafik ist das Ergebnis einer Nicht-metrischen **MultiDimensionalen Skalierung** und gibt einen Überblick über große Datenmengen. Jeder im Rahmen des Monitorings erhobene Datensatz (hier der Pflanzenbestand in einer bestimmten Böschungszone einer Bauweise zu einer bestimmten Zeit) entspricht einem Punkt. Die Punkte liegen umso näher beieinander, je ähnlicher die Information in dem Datensatz ist, benachbarte Punkte ähneln sich also deutlich in ihrer Artzusammensetzung. Die Grafik ist mit den grauen Isolinien eines Regressionsmodells überlagert. Die Isolinien sind wie das Höhenmodell einer Karte zu lesen. Datensätze mit etwa gleichen Werten bezüglich eines Parameters (in diesem Fall die Artenzahl) liegen damit auf einer der Isolinien. Das Regressionsmodell zeigt, dass artenarme Datensätze in der Grafik im Bereich niedriger Artenzahlen angeordnet wurden, die Datensätze der oberen Böschungszone im Bereich hoher Artenzahlen.

Die zeitliche Entwicklung des Artenreichtums ist in Bild 43 anhand des Vergleiches der Untersuchungsjahre 2012 und 2016 zu sehen. Die Artenzahlen waren nach der Umsetzung der Baumaßnahme am höchsten und sanken in den Folgejahren. Durch die Bautätigkeiten wurden nach Beendigung der Baumaßnahmen Unkraut- und Ruderalarten gefördert, die im Zuge der Sukzession und

dem Zuwachsen der Flächen verdrängt wurden. Außerdem fielen einige der eingebrachten Pflanzenarten aus, insbesondere in den Röhrichtgabionen (VF 5a) und Pflanzmatten im unteren, häufig eingestauten Böschungsbereich (VF 7) (Kap. 4).

Für die Bewertung des Subkriteriums Artenreichtum und nachfolgend für die Bewertung der weiteren genannten Subkriterien ist der Entwicklungszustand der einzelnen Versuchsfelder bzw. Bauweisen nach Abschluss der ersten Monitoringperiode (Ende 2016) ausschlaggebend.

Die Bewertung des Artenreichtums wird durch die Bewertung des in Kap. 5.4 vorgestellten Blütenreichtums ergänzt, um einen funktionalen Parameter (Nahrungsgrundlage für blütenbesuchende Insekten) in die vegetationskundliche Bewertung zu integrieren.

Die Bewertung des Artenreichtums wird zusammen mit dem im Kap. 5.4 dargestellten, tierökologisch bedeutsamen Blütenreichtum dargestellt. Versuchsfeld 7 (Pflanzmatten) war das arten- und blütenreichste Versuchsfeld und wurde daher mit Wertstufe 5 (sehr hochwertig) bewertet. Für die Steinmatratzen des VF 5 ergibt sich hinsichtlich des Artenreichtums Wertstufe 4, aufgrund des Blütenreichtums Wertstufe 5. Die arten- und blütenärmeren Röhrichtgabionen des VF 5a erhalten nach beiden Subkriterien Wertstufe 3. Auffällig war der starke Abfall der Artenzahlen in der unteren, häufig eingestauten Böschungszone der VF 7 und 5 (Bild 43 rechts) durch die Schäden in dieser Zone. Im Untersuchungsjahr 2016 war die Sanierung im VF 7 bereits erfolgt, im VF 5a erfolgte sie erst gegen Ende des Jahres. Mit Blick auf die 2017 erhobenen Daten der sanierten unteren Bereiche dieser beiden VF zeigt sich, dass einzelne regenerationsstarke und überstauungstolerante Arten der ursprünglichen Pflanzung von der Stabilität der Auflast der eingebauten einlagigen Steinlage profitieren und seither aus dem Lückensystem der Steinlage wachsen (Kap. 4.2.2 und Kap. 4.2.3). Diese Entwicklung wird im weiteren Monitoring beobachtet und künftig bewertet.

Die begrünzte Steinschüttung (VF 1) und der Steinwall (VF 8) nehmen hinsichtlich des Arten- und Blütenreichtums eine Mittelstellung ein (Wertstufe 3). Bei VF 8 wurde berücksichtigt, dass nur Daten der unteren Böschungszone in die Auswertung eingingen, weil an dem bereits vor Umsetzung der Baumaßnahmen artenreichen Pflaster der mittleren und oberen Böschung keine Maßnahmen erfolgten. Relativ geringe Artenzahlen (Wertstufe 2) zeigten die VF 4 (Kieseinfüllung), VF 9 (ohne Böschungsschutz) und VF 2 und 3 (Weidenspreitlagen diagonal und quer). Die Weidenspreitlagen und die Kieseinfüllung werden aufgrund ihres Blütenreichtums mit Wertstufe 3 bewertet, das VF ohne Böschungsschutz mit Stufe 2. Der Unterschied im Artenreichtum der beiden Weidenspreitlagen-Versuchsfelder im Jahr 2016 entsteht durch die höheren Ausfallraten der Weiden in VF 2 nach dem intensiveren Rückschnitt (vgl. Kap. 4.2.1). Der Bestand ist dadurch lichter und erlaubt mehr Arten Entwicklungsmöglichkeiten, was aus dem Blickwinkel der Standsicherheit negativ ist, hinsichtlich des Artenreichtums aber positiv. Eine Einstufung in unterschiedliche Wertstufen hinsichtlich des Artenreichtums ergab sich dabei aber nicht. Die beiden Referenzstrecken mit den geringsten Artenzahlen und Blütenmengen erhielten Wertstufe 1 (sehr geringwertig). Eine Übersicht aller Bewertungen für die Subkriterien „Artenreichtum“ und „Blütenreichtum“ ist Tabelle 13 zu entnehmen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

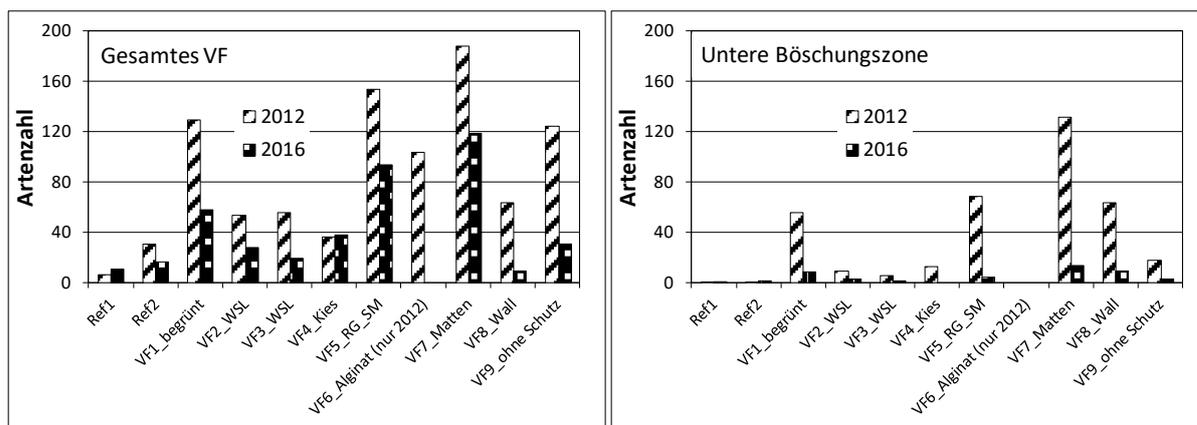


Bild 43: Gesamtartenzahl der Versuchsfelder (Grafik links) und der unteren Böschungszonen (rechts) jeweils in den Jahren 2012 und 2016. In VF 8 wurde nur die untere Böschungszone betrachtet.

Eine hohe Artenzahl ist aus ökologischer Sicht nicht zwangsläufig positiv zu bewerten, da diese auch durch ökologisch unerwünschte Arten oder Störungszeiger entstehen kann. In der Bewertung der Versuchsstrecke wird dennoch das Subkriterium „Artenreichtum“ im Sinne von „Artenzahl“ verwendet, weil die Landschaft im Umfeld der Versuchsstrecke stark ausgeräumt und relativ artenarm ist. Eine hohe Artenzahl an sich (unabhängig davon, welche ökologischen Funktionen diese Arten besitzen) ist somit in diesem landschaftlichen Kontext durchaus positiv zu werten. Die sehr ähnliche Bewertung des Artenreichtums einerseits und des Blütenreichtums andererseits zeigt zudem, dass es im Fall der Versuchsstrecke deutliche Beziehungen zwischen der Artenzahl (als Maß für den Artenreichtum) und einem Parameter der funktionalen Diversität (Blütenreichtum) geben kann.

5.2.4 Diversität und Pflanzenmenge der unteren Böschungszone

Aus den Daten des Jahres 2016 wurde der Shannon-Index, ein dimensionsloses Diversitätsmaß, berechnet (Dierschke 1994) (Bild 44 links). Zum anderen wird die Pflanzenmenge dieser Böschungszone herangezogen (Summe der Bodenbedeckung aller Arten, Bild 44 rechts).

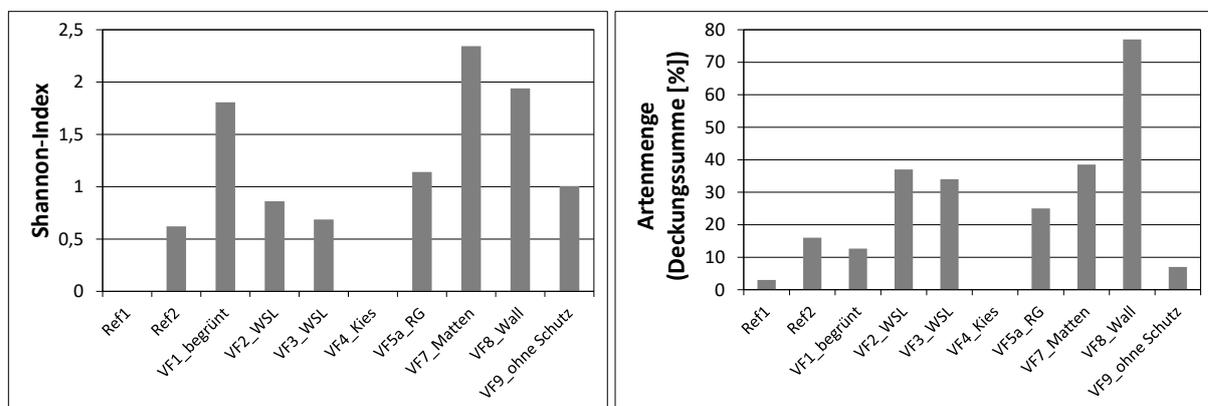


Bild 44: Links Shannon-Diversitätsindex (dimensionslos), rechts Deckungssumme jeweils für die untere Böschungszone der Versuchsfelder

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

In Kombination von Diversität und Pflanzenmenge erreichte die durch den Steinwall geschützte Berme (VF 8, Kap. 4.3.4, Bild 33 und Bild 34) die beste Ausprägung, gefolgt von den relativ diversen, aber mit geringerer Pflanzenmenge ausgestatteten Pflanzmatten (VF 7), die allerdings in der unteren Zone im Jahr 2016 bereits saniert waren (Kap. 4.2.3, Bild 22 Mitte). Beide VF wurden mit Wertstufe 5 bewertet.

In die Wertstufe 4 wurden die von Weiden geprägten Bauweisen der VF 1, 2 und 3 sowie die Röhrichtgabionen (VF 5a) eingestuft. Die VF zeigten entweder eine relativ hohe Pflanzenmenge (Weiden in den VF 2 und 3) bzw. noch eine relativ hohe Diversität, die in VF 1 durch den vorgelagerten Wellenschutz (Kap. 4.3.1, Bild 30/Bild 31) gefördert wurde. Die Diversität in den Röhrichtgabionen war den noch vorhandenen Pflanzenarten vor der Sanierung (Kap. 4.2.2, Bild 17 links und Mitte) geschuldet, bei aber bereits geringer Pflanzenmenge durch den Ausfall von Arten.

Im VF 9 (ohne Böschungsschutz) traten einzelne Vertreter der einjährigen Uferfluren auf, die ein typischer Vegetationsaspekt dieser Böschungszone sind und in der Versuchsstrecke nur hier nachgewiesen wurden. Die noch relativ hohe Diversität bei allerdings geringer Pflanzenmenge begründet die Wertstufe 3. Die Referenz (gemittelt aus beiden Strecken) wies hinsichtlich Diversität und Pflanzenmenge geringe Werte auf und wird mit Stufe 2 bewertet. In der unteren Böschungszone der Steinschüttung mit Kieseinfüllung und Steinblöcken (VF 4) wurden keine Pflanzen nachgewiesen (Kap. 4.3.2, Bild 32). In der unteren Zone der Steinmatratzen (VF 5b) trat nur sehr sporadisch Bewuchs auf, der im Jahr 2016 nicht beprobt wurde (Kap. 4.2.2, Bild 20). Für diese beiden Bauweisen wurde Wertstufe 1 vergeben. Im Zuge der weiteren Entwicklung (Kap. 4.2.2, Bild 21) ist auf den Steinmatratzen von einer zukünftigen Verbesserung auszugehen. Auch die Röhrichtgabionen (VF 5a) und Pflanzmatten (VF 7) sind aufgrund der eingeleiteten Sanierungsmaßnahmen noch nicht abschließend zu beurteilen. Tabelle 14 enthält eine Übersicht aller Bewertungen für das Subkriterium „Diversität untere Böschungszone“.

5.2.5 Anteil heimischer und eingebürgerter (invasiver) Neophyten

Zur Beurteilung wurden die Verhältnisse der Artenzahlen und der Deckungssummen beider Artengruppen herangezogen. Da beide Parameter ähnliche Ergebnisse lieferten, ist in Bild 45 nur die Deckungssumme für das Jahr 2016 dargestellt. Ein hoher Neophytenanteil, insbesondere invasiver Neophyten, wird als negativ bewertet.

Der Neophytenanteil war in der gesamten Versuchsstrecke aus ökologischer Sicht wenig problematisch, daher wurde keine Wertstufe 1 (sehr geringwertig) vergeben. Der Anteil eingebürgerter Neophyten und invasiver eingebürgerter Neophyten war in den Referenzstrecken am höchsten (Wertstufe 2). Aufgrund des relativ hohen Neophytenanteils in den Steinschüttungen zwischen den Pflanzgräben wird die begrünte Steinschüttung (VF 1) in Wertstufe 3 eingestuft. Die Wertstufe 4 erreichten die VF 2 und 3 (Weidenspreitlage), VF 4 (Kieseinfüllung), VF 5 (Steinmatratzen) und VF 7 (Pflanzmatten). Den geringsten Neophytenanteil und damit Wertstufe 5 zeigten die VF8 (Steinwall), VF 9 (ohne Böschungsschutz) und die Röhrichtgabionen (VF 5a). Im VF 8 wurde nur die untere Böschungszone betrachtet, die aufgrund der langen Überstauungszeiten nicht so

intensiv von Neophyten besiedelt wird. Tabelle 14 enthält eine Übersicht aller Bewertungen für das Subkriterium „Neophyten“.

Dass der Neophytenanteil insgesamt als unproblematisch zu bewerten ist, lag auch an der vorausschauenden Unterhaltung. So wurden in den Weidenspreitlagen Robinien im Jugendstadium gezogen, in den Steinmatratzen des VF 5 erfolgte ein regelmäßiger Rückschnitt von Eschen-Ahorn und Platane. In VF 7 wurden Hybrid-Pappeln (*Populus x canadensis*) bekämpft, die als Wurzelbrut aus den Wurzeln der gefälltten Pappeln auf der Böschungsoberkante aufkamen.

Der relativ hohe Neophytenanteil der Referenzstrecken ist den Hybrid-Pappeln geschuldet. Die drei häufigsten invasiven Neophyten waren Eschen-Ahorn (v. a. VF 1, 4, 5 und Referenz), Späte und Kanadische Goldrute (*Solidago gigantea* und *S. canadensis*) (v. a. VF 1, 5 und 7) sowie Robinie (VF 3).

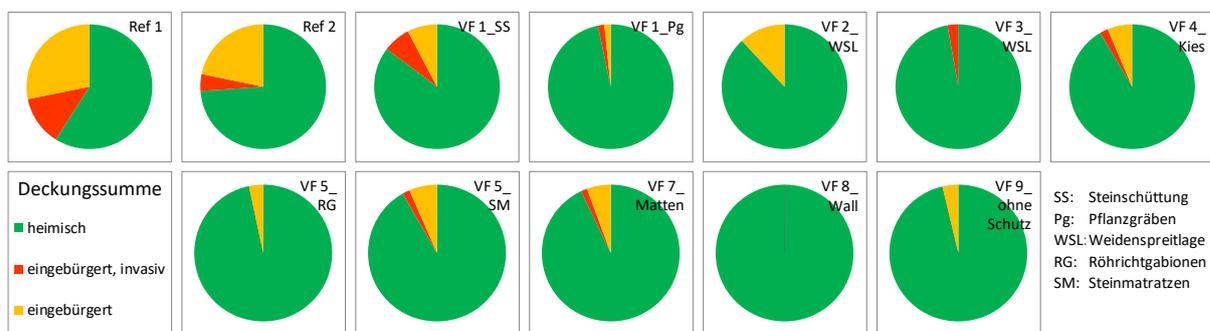


Bild 45: Verhältnis der Deckungssummen heimischer und eingebürgerter (neophytischer) Arten im Jahr 2016. Deckungssumme jeweils normiert auf 100.

5.2.6 Ufertypische Arten

Es wurden sowohl Artenzahlen als auch Artenmengen (Deckungssummen) beurteilt. Da beide Ansätze ähnliche Ergebnisse lieferten, ist in Bild 46 nur das Verhältnis der Deckungssummen ufertypischer und uferuntypischer Arten im Jahr 2016 dargestellt. Die Charakterisierung als „(un)typisch“ bzw. „trocken“ wurde den Zeigerwerten und der Zuordnung zu Pflanzengesellschaften in (Ellenberg et al. 1992) entnommen.

Die ufertypischen Arten sind in „auentypische“, also Feuchte bevorzugende Arten und „trockene“ Verhältnisse zeigende Arten differenziert. In der Versuchsstrecke mit ihren steilen, südexponierten Böschungen finden sich vor allem in der oberen, selten eingestauten Böschungszone eine Reihe trockenheits- und gleichzeitig überflutungsresistenter Arten, deren Vorkommen ebenso typisch für Auenstandorte ist, wie das der feuchteliebenden Arten. Auch unter naturnahen Verhältnissen sind in Auen trockene Standorte vorhanden. Daher wurden trockenheitszeigenden Arten ebenfalls als „ufertypisch“ gewertet.

Der Anteil ufertypischer Arten war in der Berme des VF 8 (Wertstufe 5) und den Referenzstrecken (Wertstufe 5) am höchsten. In VF 8 wurde nur die untere Böschungszone berücksichtigt, in der

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

sich natürlicherweise ein hoher Anteil ufertypischer Arten findet. Die Weidenspreitlagen (VF 2 und 3) und die begrünte Steinschüttung (VF 1) erreichten Wertstufe 4, das VF ohne Böschungsschutz (VF 9) wurde als mittelwertig (Wertstufe 3) eingeschätzt. Die Wertstufe 2 belegen die VF 7 (Pflanzmatten) und 5 (Röhrlichtgabionen), die Stufe 1 die VF 4 (Kieseinfüllung) und VF 5 (Steinmatratzen). Eine Übersicht aller Bewertungen für das Subkriterium „Ufertypische Arten“ liefert Tabelle 14.

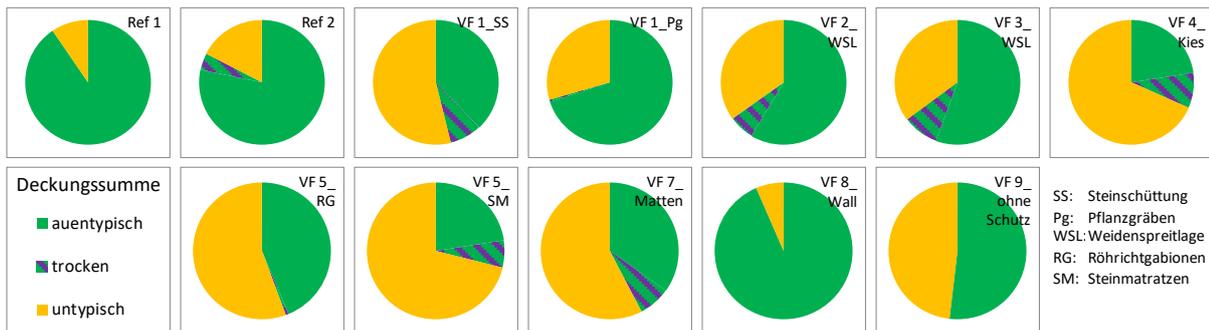


Bild 46: Verhältnis der Deckungssummen ufertypischer (aenotypischer und trockenzeitiger Arten) zu aenuntypischen Arten im Jahr 2016. Deckungssumme jeweils normiert auf 100.

5.2.7 Gefährdete und geschützte Pflanzenarten, Seltenheit

Die meisten gefährdeten und geschützten Arten kamen in den VF 7 (Pflanzmatten mit 8 Arten, Wertstufe 5) und VF 5 vor (Steinmatratzen, 5 Arten, Wertstufe 4) (Tabelle 12). Wegen des deutlichen Abstandes dieser beiden VF zu den anderen wird die Wertstufe 3 nicht vergeben. Es folgen die VF mit einer oder zwei Arten in Wertstufe 2: Weidenspreitlagen (VF 2 und 3), Röhrlichtgabionen (VF 5a) sowie begrünte Steinschüttung (VF 1). Wertstufe 1 belegen alle VF mit keinem oder einem Artnachweis mit sehr geringer Artenmenge, also die VF 4 (Kieseinfüllung), VF 8 (Steinwall), VF 9 (ohne Böschungsschutz) und die Referenz. Alle gefährdeten Arten sind spontan eingewandert, nur die Sumpfschwertlilie wurde im VF 7 gepflanzt, hat sich aber spontan in den VF 1, 5 und 9 mit geringer Individuenzahl angesiedelt.

Die Bauweisen Röhrlichtgabionen (VF 5a) und Schutz durch Steinwall (VF 8) sind hinsichtlich dieses Bewertungskriteriums etwas benachteiligt, weil sie nur auf der unteren bzw. unteren und mittleren Böschung eingebaut wurden, die artenärmer sind als die obere Böschungszone. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, in den Bauweisen eine gefährdete oder geschützte Art anzutreffen, geringer. Eine Übersicht aller Bewertungen für das Subkriterium „Gefährdete Arten“ ist Tabelle 13 zu entnehmen.

Die in Bild 47 abgedruckten Verbreitungskarten zeigen exemplarisch für Ufer-Alant und Taubenkropf die hohe Repräsentativität für die Auenlebensräume an großen deutschen Flüssen. Der Taubenkropf kommt auch in den eingangs beschriebenen Heckenlagen vor.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Tabelle 12: Vorkommen gefährdeter und geschützter Pflanzenarten

SS: Steinschüttung, WSL: Weidenspreitlage, RG: Röhrichtgabionen, SM: Steinmatratzen.

Versuchsfelder ohne Vorkommen entsprechender Arten sind nicht dargestellt.

Gefährdete und / oder geschützte Arten	RL Bund	RL Hessen	§	Vorkommen in den Versuchsfeldern im Jahr 2016							
				VF 1 SS	VF 2+3 WSL	VF 4 Kies	VF 5 RG	VF 5 SM	VF 7 Matten	VF 9 ohne Schutz	
Allium scorodoprasum Schlangen-Lauch		V									
Aristolochia clematitis Gewöhnliche Osterluzei	V	V									
Carex otrubae Hain-Segge		V									
Cucubalus baccifer Taubenkropf	3	3									
Dianthus carthusianorum Karthäuser-Nelke	V	V	§								
Inula britannica Ufer-Alant	V	3									
Iris pseudacorus Sumpf-Schwertilie			§								
Onobrychis viciifolia Esparsette	3										
Salvia pratensis Wiesen-Salbei	V										
Thalictrum flavum Gelbe Wiesenraute	V										
Ulmus minor Feld-Ulme		3									

RL (Rote Liste) 3: gefährdet
V: Vorwarnliste
gesetzlicher Schutz: §: besonders geschützt

Grundfarbe grün: spontan eingewandert
Grundfarbe braun: aus Pflanzung
Die Farbintensität symbolisiert die Deckungssumme

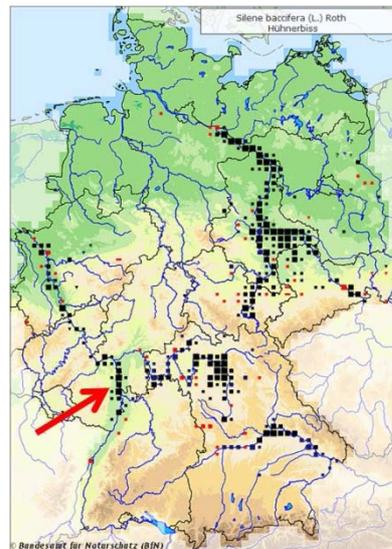
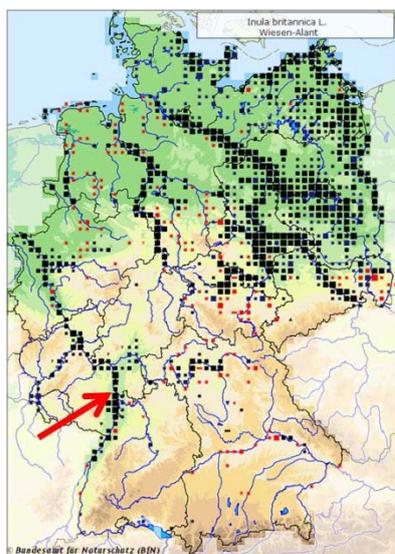


Bild 47: Verbreitungskarte und Habitus des Ufer-Alant (Karte links, Foto oben) und des Taubenkropfs (Karte rechts, Foto unten). Der rote Pfeil zeigt die ungefähre Lage der Versuchsstrecke. Kartenquellen: Bundesamt für Naturschutz, Floraweb. (Fotos oben/unten: Yasmin Wingender, Katja Behrendt, BfG)

Die Seltenheit einheimischer Arten wurde anhand der Messtischblattfrequenz beurteilt. Diese drückt aus, in wie vielen der in Deutschland rund 12.000 Kartenblattquadranten der Topographischen Karte 1 : 25.000 eine Art nachgewiesen wurde (www.floraweb.de). So kommt beispielsweise der Ufer-Alant (Bild 47 Karte links) in 1.837 Messtischblatt-Viertelquadranten vor, der Taubenkropf in 575 Viertelquadranten (Karte rechts). Gepflanzte Bestände der mäßig seltenen Purpur-Weide wurden nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zum vorangegangenen Kapitel, in dem nur die gefährdeten und geschützten Arten zur Einschätzung der ökologischen Wirksamkeit

herangezogen werden, geht bei dieser Betrachtung die Häufigkeit/Seltenheit des gesamten Artenbestandes ein.

Bild 48 zeigt die Verteilung von Arten verschiedener Häufigkeitsklassen auf die Versuchsfelder. Zur besseren Orientierung sind Mittelwerte eingezeichnet. Die Flora der Versuchsstrecke und der Referenz setzte sich überwiegend aus Allerweltsarten und Arten zusammen, die zumindest an Gewässern nicht selten sind. Da seltene Arten fehlten, wurde die Wertstufe 5 nicht vergeben. Die Versuchsfelder 3 (Weidenspreitlagen), 4 (Kieseinfüllung), 5 (Steinmatratzen), 7 (Pflanzmatten) und 8 (Steinwall) wiesen die vergleichsweise höchsten Anteile mäßig häufiger bis mäßig seltener Arten auf (Wertstufe 4). Die Referenzstrecken zeigten sich uneinheitlich, auch hier kamen vereinzelt vergleichsweise seltene Arten vor (im Mittel beider Strecken Wertstufe 3). Die VF 1 (Kombination Steinschüttung und Pflanzgräben), VF 2 (Weidenspreitlagen) und 5 (Röhrichtgäbionen) werden in Wertstufe 2 eingeordnet. Das VF 9 (ohne Böschungsschutz) besaß in Wertstufe 1 den höchsten Anteil bundesweit sehr häufiger Arten.

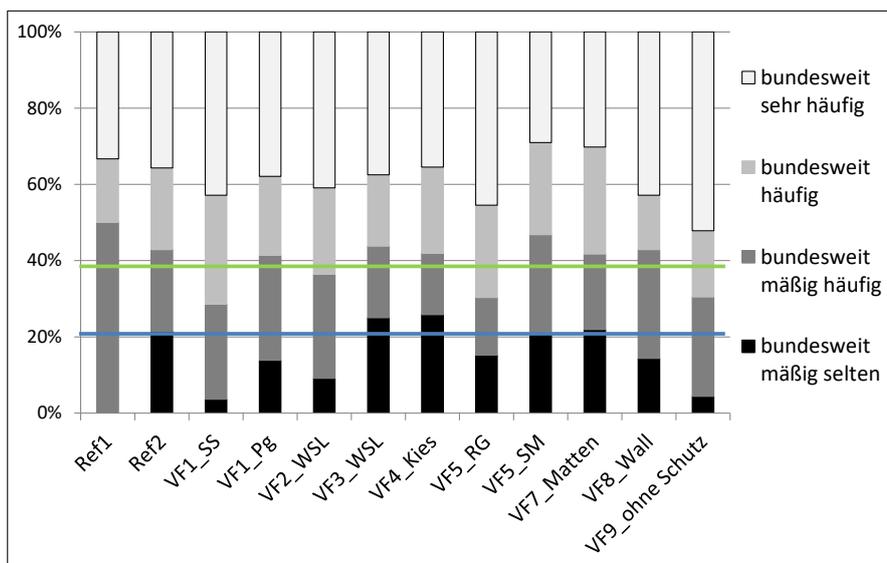


Bild 48: Relative Verteilung von Arten auf Kategorien bundesweiter Häufigkeit. Horizontale Linien markieren den Durchschnittswert aller Versuchsfelder für den Anteil mäßig seltener (blau) bzw. mäßig seltener plus mäßig häufiger Arten (grün). Abkürzungen siehe Bild 46.

Bundesweit vergleichsweise selten waren Arten mit Vorkommen entlang großer Fließgewässer wie Gelbe Wiesenraute (*Thalictrum flavum*) (VF 5, Steinmatratzen), Esels-Wolfsmilch (*Euphorbia esula*) (Steinmatratzen in VF 5 und in VF 7) und Knolliger Kälberkropf (*Chaerophyllum bulbosum*) (Referenzstrecke 2). Weiter sind beispielhaft Arten der Halbtrockenrasen und mageren Wiesen zu nennen, die auf den sonnigen, überwiegend 1 : 3 geneigten Böschungen in den seltener eingestauten oberen Bereichen gedeihen, z. B. Zypressen-Wolfsmilch (*Euphorbia cyparissias*) (VF 1, 4, 5, 7) und Wiesen-Salbei (*Salvia pratensis*) (VF 7).

5.2.8 Böschungszonierung in Abhängigkeit von den hydrologischen Verhältnissen

Zur Beurteilung der Zonierung wurden die nach der Artenmenge gewichteten mittleren Feuchtwerte herangezogen, berechnet aus den Daten von 2016 (Bild 49). Es wird beurteilt, inwieweit sich der bestehende Feuchtegradient auf der Böschung auch in der Vegetation der Versuchsfelder zeigt, also ob die Kombination aus künstlich eingebrachten und spontan eingewanderten Pflanzenarten eine Indikatorfunktion für die bestehenden Standorteigenschaften besitzt. Als Referenz wird der Feuchtwert des Bewuchses zwischen Böschungsschulter und Betriebsweg („Aue“), herangezogen, sowie der Feuchtwert des Bewuchses am unterstromigen Ende des VF 9 (ohne Böschungsschutz) vor der Ausfachungsbühne, weil hier durch die starke Erosion überwiegend das natürliche Substrat (Sand mit Auelehm) ansteht („Ufersubstrat“).

Eine den Standortbedingungen entsprechende Feuchtezonierung, die mit Wertstufe 5 bewertet wurde, entwickelte sich in den Weidenspreitlagen des VF 2. Auch im VF 8 zeigte die untere, häufig eingestaute Böschungszone den für diese Zone typischen Wert (Wertstufe 5), mittlere und obere Zone wurden nicht ausgewertet. Ebenfalls war das VF 9 (ohne Böschungsschutz) deutlich zwischen der unteren und der oberen Böschungszone differenziert, weshalb hier auch die Wertstufe 5 vergeben wurde. Für die mittlere Zone lagen keine Daten vor.

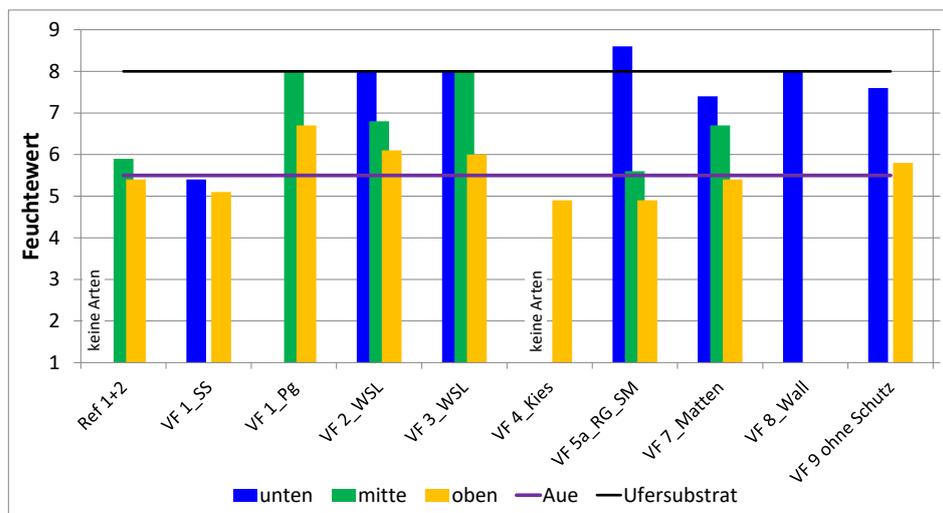


Bild 49: Gewichtete mittlere Feuchtwerte der drei Böschungszonen (unten-mitte-oben) und den Referenzfeuchtwerten „Aue“ und „Ufersubstrat“. Abkürzungen siehe Bild 46.

Im VF 3 hat sich wegen der geringeren Einwanderung spontaner Arten bisher keine Differenzierung zwischen unterer und mittlerer Böschungszone eingestellt (Wertstufe 4), ansonsten sind die Verhältnisse ähnlich wie in VF 2. Das VF 7 (Pflanzmatten) weist gegenüber den Referenzwerten etwas trockenere Verhältnisse bei ansonsten gut ausgeprägter Zonierung auf (Wertstufe 4). Wegen der ausgeprägt trockenere Verhältnisse in VF 1 (Kombination aus Steinschüttung und Pflanzgräben), wurde die Wertstufe 3 nicht vergeben, aufgrund der höheren Feuchteverhältnisse in den Pflanzgräben erreicht das VF die Wertstufe 2. Wertstufe 2 erhalten weiterhin die Röhrichtgabionen (VF 5). In den VF 4, 5 (SM) und den Referenzstrecken war die Zonierung besonders

schlecht ausgeprägt (Wertstufe 1). Dies ist dem steinigen Substrat und der damit einhergehenden Trockenheit und Wärme geschuldet.

5.2.9 Zusammenfassende Bewertung aus vegetationskundlicher Sicht

Für die Ableitung einer vegetationskundlichen Gesamtbewertung wurden zunächst die Subkriterien „Artenreichtum“, „Blütenreichtum“ und „gefährdete Arten“ zum neuen Kriterium „Diversität und Gefährdung“ zusammengefasst, weil die Bewertungen dieser drei Subkriterien miteinander korrelierten (Tabelle 13). Die Gesamtbewertung ist dann Tabelle 14 zu entnehmen.

Die Aggregation der Wertstufen zu einer Bewertung erfolgte unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der Wertstufen und einem verbalargumentativen Vergleich der Stärken und Schwächen der Bauweisen hinsichtlich der bewerteten Subkriterien. Damit folgt die Gesamtbewertung nicht allein einer rechnerischen Mittelwertbildung aus den Wertstufen der Subkriterien, sondern hohe Wertstufen wurden als „Stärken“ der Bauweisen interpretiert, denen ein höheres Gewicht in der Gesamtbewertung zugesprochen wurde.

Die Bauweisen wurden so den einzelnen Wertstufen zugeordnet, dass die gemäß den Subkriterien am besten abschneidenden Bauweisen die höchste Wertstufe erreichen, die am schlechtesten abschneidenden die geringste. So wurde möglichst die gesamte Wertstufenpanne ausgenutzt, um die Bewertung mit anderen ökologischen Kriterien (Kap. 5.3 bis 5.6) vergleichen zu können. Die Flachwasserzone und die Heckenlagen wurden als Sonderbauweisen lediglich einer vergleichsweisen groben Werteinstufung unterzogen.

*Tabelle 13: Zusammenfassung der drei miteinander korrelierten Subkriterien zu einem neuen Kriterium „Diversität und Gefährdung“
Wertstufen für die Sonderstandorte Flachwasserzone und Heckenlagen: gut [+], neutral [], schlecht [-]
FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante
Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)*

Subkriterium	FWZ	HL	VF 1	VF 2	VF 3	VF 4	VF 5 _RG	VF 5 _SM	VF 7	VF 8	VF 9	Ref
Artenreichtum	+	+	3	2	2	2	3	4	5	3	2	1
Blütenreichtum (vgl. Kap. 5.4)		+	3	3	3	3	3	5	5	3	2	1
gefährdete Arten	+	+	2	2	2	1	2	4	5	1	1	1
Neues Krite- rium: Diversität und Gefährdung	+	+	3	2	2	2	3	4	5	3	2	1

Die zusammenfassende Bewertung geht aus Tabelle 14 hervor und ergibt folgendes Ergebnis: Die Gruppe mit der bisher günstigsten Vegetationsentwicklung (Gesamtbewertung 5) waren die

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Pflanzmatten inklusive der dort vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen (VF 7), die gepflasterte Berme hinter dem Steinwall (VF 8) und die wellengeschützte Flachwasserzone als Sonderstandort im VF 1. In den beiden VF 7 und 8 wurden nahezu alle Subkriterien positiv bewertet. Es ergaben sich Defizite hinsichtlich ufertypischer bzw. gefährdeter Arten.

*Tabelle 14: Zusammenfassende Bewertung aus vegetationskundlicher Sicht
Abkürzungen und Zeichen wie Tabelle 13*

Subkriterium	FWZ	HL	VF 1	VF 2	VF 3	VF 4	VF 5 _RG	VF 5 _SM	VF 7	VF 8	VF 9	Ref
Diversität und Gefährdung	+	+	3	2	2	2	3	4	5	3	2	1
Diversität untere Böschungszone	+		4	4	4	1	4	1	5	5	3	2
Neophyten	-		3	4	4	4	5	4	4	5	5	2
ufertypische Arten	+	+	4	4	4	1	2	1	2	5	3	5
seltene Arten	+		2	2	4	4	2	4	4	4	1	3
Zonierung	+	+	2	5	4	1	2	1	4	5	5	1
Gesamtbewertung	5	4	3	4	4	2	3	3	5	5	3	2

Gesamtbewertung 4 erhielten die Weidenspreitlagen (VF 2 und 3) sowie die Heckenlagen auf Böschungsoberkanten. Die meisten Subkriterien erreichten hier eine positive Bewertung. Defizite bei den Weidenspreitlagen bestanden im Arten-, nicht aber im Blütenreichtum (v. a. wegen der intensiven Frühjahrstracht der Weiden) sowie dem weitgehenden Fehlen gefährdeter und seltener Arten. Die Weiden bildeten rasch einen dichten Gehölzbestand auf der Uferböschung, sodass krautige Arten aufgrund der Konkurrenz und des Schattendrucks überwiegend ausblieben.

In Wertstufe 3 finden sich VF 1 (begrünte Steinschüttung), die Steinmatratzen (VF 5_SM), VF 9 (ohne Böschungsschutz) und die Röhrichtgabionen (VF 5_RG). Einzelne Subkriterien wurden hier positiv beurteilt. Defizite des VF 1 lagen im geringen Vorkommen gefährdeter und seltener Arten und in der wenig ausgeprägten Zonierung der Pflanzen entlang des Feuchtegradienten der Böschung. Hier erwies sich die verbliebene Steinschüttung zwischen den Pflanzgräben als negatives Element. Die Steinmatratzen zeigten Defizite bei den Verhältnissen „Diversität untere Böschungszone“, „ufertypische Arten“ und der Zonierung. VF 9 zeigte Defizite beim Arten- und Blütenreichtum sowie dem Vorkommen gefährdeter oder seltener Arten. Die Röhrichtgabionen des VF 5 finden sich ebenfalls in Wertstufe 3. Ende 2016 wurde eine Sanierung der gesamten Röhrichtgabionen mit einer einlagigen Wasserbausteinschicht notwendig, da sich Bewuchsausfälle verstärkten und die Gabionen selbst instabil wurden (Kap. 4.2.2). Seither ist eine positive Entwicklung des pflanzlichen Bewuchses zu beobachten, die im weiteren Verlauf des Monitorings erfasst und künftig bewertet wird.

Das VF 4 (Steinschüttung mit Kieseinfüllung und Steinblöcken) und die Referenzstrecken mit Gesamtbewertung 2 zeigten deutlich weniger positive Effekte. Der im VF 4 eingebrachte Kies wurde im Laufe der Zeit überwiegend ausgespült, sodass sich das VF heute nur noch hinsichtlich der großen lagestabilen Steinblöcke und der für die Vegetation unwirksamen Totholzfaschinen von den Referenzstrecken unterscheidet. Es kommen dennoch vergleichsweise seltene Pflanzenarten vor bzw. ein relativ hoher Anteil ufertypischer Arten (Referenz), sodass für die Bauweisen die Wertstufe 1 nicht in Frage kam. Die Verwendung von Alginat (VF 6) hat sich als Bauweise nicht bewährt und erhielt Wertstufe 1 (in Tabelle 13 und Tabelle 14 nicht dargestellt). Entscheidend für die weitere Vegetationsentwicklung sind die Wirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen und die Art und Intensität der Unterhaltung. Die hier vorgestellte Reihung kann sich somit künftig noch verändern.

5.3 Faunistische Ergebnisse und Bewertung

5.3.1 Methodische Hinweise

Im Rahmen des ökologischen Monitorings zur Versuchsstrecke wurden verschiedene faunistische Organismengruppen (Vögel, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien, Makrozoobenthos, Fische) als Indikatoren für die ökologische Wirksamkeit der Versuchsstrecke untersucht. Der Fokus lag dabei insbesondere auf der Frage, inwieweit die eingebauten alternativen Sicherungsbauweisen das Potenzial besitzen, nachhaltig geeignete Habitatstrukturen für die untersuchten Organismen bereitzustellen. Dabei wurde möglichst differenziert beurteilt, welchen ökologischen Mehrwert der jeweilige Maßnahmentyp gegenüber einer konventionellen Steinschüttung für die jeweilige Organismengruppe birgt.

Die Untersuchungen zu den genannten Organismengruppen fanden im Rahmen einer IST-Zustandserfassung vor Umsetzung der Versuchsstrecke im Jahr 2010 und im Rahmen von zwei Erfolgskontrollen in den Jahren 2013/14 und 2017 statt. Im Zuge der beiden Erfolgskontrollen wurden die jeweiligen Versuchsfelder der Versuchsstrecke faunistisch beprobt. Davon abweichend erfolgte die Erfassung der Fischfauna in den Jahren 2010 und 2012 bis 2017 in der Regel zweimal jährlich (Frühsommer, Herbst).

Die Bewertung der ökologischen Wirksamkeit der einzelnen VF auf der Basis der einzelnen Organismengruppen erfolgte jeweils anhand spezifischer Kriterien, die für eine zusammenfassende Bewertung zunächst auf der Grundlage von Expertenwissen gewichtet wurden (Tabelle 15).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Tabelle 15: Haupt- und Unterkriterien und deren Gewichtung (Gew.) der unterschiedlichen Organismengruppen, die für die Bewertung der Versuchsfelder herangezogen wurden.

Organismengruppe	Hauptkriterium	Gew.	Unterkriterium	Gew.
Vögel	<i>Reproduktion</i>	1,0	Brut(verdacht)	0,6
			Brutpotenzial	0,4
Reptilien	<i>Artenreichtum</i>	1,0	Artenzahl	0,5
			Sichtungshäufigkeit	0,5
Laufkäfer	<i>Artenreichtum</i>	0,6	Artenzahl	0,4
			Individuenzahl	0,2
			Diversität	0,4
	<i>Artenzusammensetzung</i>	0,4	Anteil ufertypischer Individuen	0,7
			Arten der Roten Liste	0,3
Spinnen	<i>Artenreichtum</i>	0,6	Artenzahl	0,4
			Individuenzahl	0,2
			Diversität	0,4
	<i>Artenzusammensetzung</i>	0,4	Anteil ufertypischer Individuen	0,7
			Arten der Roten Liste	0,3
Fische	<i>Artenreichtum</i>	0,5	Gesamtartenzahl	0,5
			Mittl. Artenzahl pro Bef.-Punkt	0,5
	<i>Artenzusammensetzung</i>	0,5	Mittlerer Neozoenanteil	0,5
			Mittl. Artenzahl der Referenz	0,5
Makrozoobenthos	<i>Artenreichtum</i>	0,5	Gesamtartenzahl	1,0
	<i>Artenzusammensetzung</i>	0,5	Mittlerer Neozoenanteil	0,3
			Anzahl der EPTCBO-Arten*	0,7

*EPTCBO-Arten sind Arten aus den Ordnungen Ephemeroptera (Eintagsfliegen), Plecoptera (Steinfliegen), Trichoptera (Köcherfliegen), Coleoptera (Käfer), Bivalvia (Muscheln) und Odonata (Libellen)

Die Kriterien beschreibenden Parameter (Unterkriterien, vgl. Tabelle 15) wurden dazu in Werte von 1 (schlecht) bis 5 (sehr gut) übertragen und mit den Ergebnissen des Referenzabschnittes (konventionelles Deckwerk) verglichen.

Im Anschluss wurden die gewichteten Bewertungsergebnisse, in ähnlicher Weise wie in Kapitel 5.2 (Vegetation) in eine fünfstufige Bewertungsskala überführt, wobei das schlechteste Bewertungsergebnis die Wertstufe 1 (sehr geringwertig) und das beste Bewertungsergebnis die Wertstufe 5 (sehr hochwertig) erhielt. Die Wertstufen 2 (geringwertig), 3 (mittelwertig) und 4 (hochwertig) wurden berechnet (vgl. Anlage 6). Aus den jeweiligen Einzelbewertungen pro Organismengruppe wurde eine Gesamtbewertung „Terrestrische Fauna“ für die terrestrisch wirksamen Maßnahmen der VF 1 bis 9 und die terrestrische Referenz abgeleitet. Für die aquatisch wirksamen Maßnahmen der VF 1 und 4 (Flachwasserzone, Totholzfaschinen) und die aquatische Referenz wurde eine Gesamtbewertung „Aquatische Fauna“ vorgenommen. Nur in den beiden letztgenannten VF war von einer ökologischen Wirksamkeit auf die Fische und aquatischen Wirbellosen auszugehen. Da mögliche positive Effekte der terrestrischen Maßnahmen auf den aquatischen Lebensraum jedoch nicht auszuschließen sind, wurden die übrigen VF gleichfalls untersucht und die Ergebnisse im Folgenden dargestellt. Für die Gesamtbewertung der aquatischen

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Fauna wurden sie aufgrund der vergleichsweise kurzen Entwicklungszeit von fünf Jahren in Kombination mit teilweise intensiven Unterhaltungsarbeiten jedoch nicht berücksichtigt.

Für die Gesamtbewertung „Terrestrische Fauna“ wurde ein gewichteter Mittelwert aus den Bewertungen der terrestrischen Organismengruppen pro VF gebildet. Dabei wurden die Bewertungen der Organismengruppen, die nach im Vorfeld definierter Zielstellung durch die jeweiligen Maßnahmen gefördert werden sollten (vgl. Kap.2, Tabelle 1), doppelt gewichtet:

Gewichtung gemäß Zielstellung, beispielhaft für die Weidenspreitlage von VF 3 dargestellt:

Zielstellung der Weidenspreitlage in VF 3:

„Ökologische Aufwertung durch standortgerechten Gehölzbestand, Strukturvielfalt, Verbesserung der Habitatqualität, insb. für gehölzbrütende *Vogelarten, Laufkäfer, Spinnen*“

Bewertung der ökologischen Wirksamkeit von VF 3 für die terrestrischen Organismengruppen Vögel, Reptilien, Spinnen, Laufkäfer (Indikatoren aus Kapitel 5.3):

Organismengruppe	<i>Vögel</i>	<i>Reptilien</i>	<i>Spinnen</i>	<i>Laufkäfer</i>
Bewertung	5	3	3	4

Gewichtetes Mittel entsprechend der oben genannten Zielstellung:

$$(2 * 5 + 3 + 2 * 3 + 2 * 4) / 7 = 3,9$$

Bewertung der terrestrischen Fauna für Versuchsfeld 3 (Weidenspreitlagen) = 4

Für die Gesamtbewertung „Aquatische Fauna“ wurde der Mittelwert aus den Teilbewertungen Fische und Makrozoobenthos für die beiden VF 1 und 4 und die aquatische Referenz gebildet.

Eine Übersicht aller Bewertungsergebnisse (Wertstufenverteilung 1 bis 5) ist Tabelle 18 für die terrestrischen (Vögel, Laufkäfer, Spinnen, Reptilien) und Tabelle 19 für die aquatischen Organismengruppen (Fische und Makrozoobenthos) zu entnehmen. Die Gesamtbewertung „Terrestrische und aquatische Fauna“ ist Teil der in Kapitel 5.7 abschließend vorgenommenen ökologischen Gesamtbewertung.

5.3.2 Vögel

Die Avifauna wurde an 21 Tagen im Zeitraum zwischen September 2013 und Juni 2014 und an 20 Tagen im Zeitraum zwischen Mitte März 2017 und Oktober 2017 mittels Transektbegehung, Punktbeobachtung und Zufallsbeobachtung erfasst. Es wurden beobachtete und verhörte Vogelarten sowie Niststrukturen dokumentiert. Die Arten wurden in Annäherung an die Methodik nach Flade (1994) in Leitarten, lebensraumtypische und stete Begleitarten (basierend auf der Beschreibung typischer Vogelgemeinschaften verschiedener Lebensräume) eingeordnet. Eine Bewertung der einzelnen Bauweisen anhand der Gruppe der Vögel ist nur teilweise möglich, da diese

üblicherweise wesentlich großflächigere Lebensräume bewohnen, als sie durch die einzelnen Versuchsfelder bereitgestellt werden konnten. Daher erfolgte die Bewertung lediglich im Sinne einer gutachterlichen Einschätzung auf der Basis von Expertenwissen in fünf Wertstufen. Es werden zunächst die Daten der gesamten Versuchsstrecke (inklusive einer Pufferfläche in der angrenzenden „Aue“, Bereich bis ca. 50 - 100 m landseitig des Betriebsweges) aus den einzelnen Erfassungsjahren herangezogen, um eine allgemeine Einschätzung der zeitlichen Entwicklung der technisch-biologischen Bauweisen zu ermöglichen. Die Gesamtartenzahlen aus der IST-Zustandserfassung 2010 und den Erhebungsjahren 2013/14 sowie 2017 waren ähnlich und vergleichbar (Tabelle 16). Es konnten 67 % der von Flade (1994) für die „Ufernahe Zone großer Flüsse“ beschriebenen Leit- und steten Begleitarten nachgewiesen werden, von den typischen Rastvogelarten jedoch nur 17 %. Die Anzahl der nachgewiesenen Arten, die in der Roten Liste für Deutschland oder Hessen als gefährdet bzw. auf der Vorwarnliste geführt werden, unterschied sich nur leicht (2013/14: 22, 2017: 16). Die fünfjährige Entwicklung der Versuchsfelder reichte vermutlich nicht aus, um die Bedingungen für Brutvögel deutlich zu verbessern. Es waren nur geringe Veränderungen zwischen den Erhebungen der beiden Erfolgskontrollen zu verzeichnen (Tabelle 16). Diese waren in der begrüneten Steinschüttung (VF 1) und den Weidenspreitlagen (VF 2/3) sehr wahrscheinlich auf die beginnende Sukzession der Weiden zurückzuführen. Das sekundäre Dickenwachstum der Weidenruten wirkte sich positiv auf die Brutbedingungen für Gehölzbrüter, aber negativ auf die für Röhrichtbrüter aus. Das, aufgrund der geschaffenen Strukturen und des offeneren Charakters in den Versuchsfeldern mit Pflanzmatten (VF 7) und ohne Ufersicherung (VF 9) als gut eingeschätzte Brutpotenzial für bodenbrütende Arten, Watvögel und Böschung-/Höhlenbrüter, musste aufgrund zunehmender Störungsintensität durch Spaziergänger, Hunde und Angler teilweise zurückgestuft werden.

Tabelle 16: Gesamtartenzahlen der beobachteten Vögel an der Versuchsstrecke und an umliegenden Flächen (Pufferzone in „Aue“ und Wasserfläche) in den Jahren 2010, 2013/14 und 2017; n. erf. – „nicht gesondert erfasst“

Jahr der Erhebung	Arten insgesamt	Versuchsstrecke	„Aue“, entfernte Wasserfläche/Durchzug
2010	52	n. erf.	n. erf.
2013/2014	55	37	18
2017	52	32	20

Im Jahr 2017 konnten mit Nachtigall (*Luscinia megarhynchos*) in der Weidenspreitlage (VF 2/3), Mönchsgrasmücke (*Sylvia atricapilla*) und Gartengrasmücke (*Sylvia borin*) in den alten Kopfweiden im unveränderten oberen Böschungsbereich von VF 8 (Steinwall) sowie Sumpfrohrsänger (*Acrocephalus palustris*) im Bereich des belassenen Röhrichts am unterstromigen Ende des VF mit Pflanzmatten (VF 7) vier Arten als Brutvögel erfasst werden. Während der Saison 2013/14 wurden nur die ersten beiden Arten als ortstreu an der Versuchsstrecke nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Erfassungen zeigen, dass das Potenzial der gesamten Versuchsstrecke zur Bereitstellung geeigneter Habitatstrukturen im Sinne der Lebensraumeignung für die sieben Lebensraumgilden (Tabelle 17) im Vergleich zur Referenzstrecke nur leicht zugenommen hat (vgl. Anlage 6). Während die Referenzbereiche für alle Gilden überwiegend schlechte bzw. vereinzelt

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

günstige Verhältnisse sowohl für Brut- als auch für Rast- bzw. nahrungssuchende Vögel bieten, zeigen einzelne VF erste Tendenzen, geeignete Habitatstrukturen etablieren zu können. In vielen Fällen ist dies auf bestehende bzw. sich entwickelnde Gehölze zurückzuführen. Die eingebrachten Weidengehölze in den Spreitlagen (VF 2/3) sowie der begrüneten Steinschüttung (VF 1) bieten beispielsweise für Gehölzfreibrüter, wie die Nachtigall (*Luscinia megarhynchos*) und verschiedene Finkenvögel, eine zunehmend günstige Lebensraumeignung. Darüber hinaus wirken sich die strömungsberuhigte Flachwasserzone vor der begrüneten Steinschüttung (VF 1, vorgelagerter Steinwall) und die ausgeprägte Krautschicht der Pflanzmatten zusammen mit den belassenen Röhrichtanteilen (VF 7) positiv auf die Bedingungen zur Nahrungssuche und zur Rast für Wasservögel (Entenvögel, Gänse), Bodenbrüter (z. B. Bachstelze, *Motacilla alba*) und Röhrichtbrüter aus. Die Bauweisen, die das höchste Potenzial zur Bereitstellung nachhaltig geeigneter Habitatstrukturen zeigen (basierend auf der Datenauswertung und der fachgutachterlichen Einschätzung) wurden am besten bewertet. Dies sind die VF 2 und 3 (Weidenspreitlagen) und 7 (Pflanzmatten) mit Wertstufe 5, gefolgt von VF 8 (Steinwall) mit Wertstufe 4 (hochwertig). Die VF 1 (begrünete Steinschüttung) und 9 (ohne Böschungsschutz) bewegen sich mit den Wertstufen 2 (geringwertig) und 3 (mittelwertig) im Mittelfeld, während die VF 4 (Kieseinfüllung), 5 (Röhrichtgabionen/Steinmatten) und die konventionelle Steinschüttung mit Wertstufe 1 am schlechtesten bewertet wurden (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 17: Gildenverteilung der Vögel an den einzelnen Versuchsfeldern im Vergleich zur Referenz im Jahr 2017 unterteilt nach Rast-/Nahrungspotenzial (RaP), Brutpotenzial (BrP) und Brutpotenzialentwicklung (BrE) (Farbcode: grün...gut; gelb...günstig; rot...schlecht). Farbige Rahmen repräsentieren Verbesserungen (grün) bzw. Verschlechterungen (rot) zur Einschätzung auf Basis der Daten in 2013/2014.

Gilde	Bsp.	VF1			VF2/3			VF4			VF5			REF		
		RaP	BrP	BrE	RaP	BrP	BrE	RaP	BrP	BrE	RaP	BrP	BrE	RaP	BrP	BrE
Böschung-/Höhlenbrüter	<i>Eisvogel</i>	grün	rot	rot	gelb	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot
Bodenbrüter ohne Watvögel	<i>Bachstelze</i>	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot
Watvögel	<i>Uferläufer</i>	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot
Gehölzbrüter i.w.S.	<i>Nachtigall</i>	rot	grün	rot	rot	grün	rot									
Röhrichtbrüter	<i>Rohrsänger</i>	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot
Wasservögel i.e.S.	<i>Enten</i>	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot
sonst. relevante Arten	<i>Graureiher</i>	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot	rot

Gilde	Bsp.	VF6			VF7			VF8			VF9			REF		
		RaP	BrP	BrE												
Böschung-/Höhlenbrüter	<i>Eisvogel</i>	rot														
Bodenbrüter ohne Watvögel	<i>Bachstelze</i>	rot														
Watvögel	<i>Uferläufer</i>	rot														
Gehölzbrüter i.w.S.	<i>Nachtigall</i>	rot														
Röhrichtbrüter	<i>Rohrsänger</i>	rot														
Wasservögel i.e.S.	<i>Enten</i>	rot														
sonst. relevante Arten	<i>Graureiher</i>	rot														

5.3.3 Reptilien

Für die Erfassung der Reptilienfauna wurden während der ersten Erfolgskontrolle in 2013/14 die Methoden Reptilientafeln und Sichtbeobachtung im Rahmen der Kartierarbeiten angewendet. In 2017 wurde die Erfassung nur mittels Sichtbeobachtung durchgeführt, da sich die Methode der Reptilientafeln nicht bewährt hatte und der Mehrwert als vernachlässigbar erachtet werden konnte. Im Nachgang an die Erfassungen wurden die Präsenz und ggf. die Abundanz bzw. Reproduktion der gefundenen Arten abgeschätzt. Während sowohl bei der IST-Zustandserfassung im Jahr 2010 als auch in den Untersuchungsjahren 2013/14 im gesamten Bereich nur die Zauneidechse (*Lacerta agilis*) nachgewiesen werden konnte, kamen im Jahr 2017 zusätzlich Individuen einer Mauereidechsenpopulation (*Podarcis muralis*) sowie Einzelindividuen der Ringelnatter (*Natrix natrix*) vor (Bild 50).

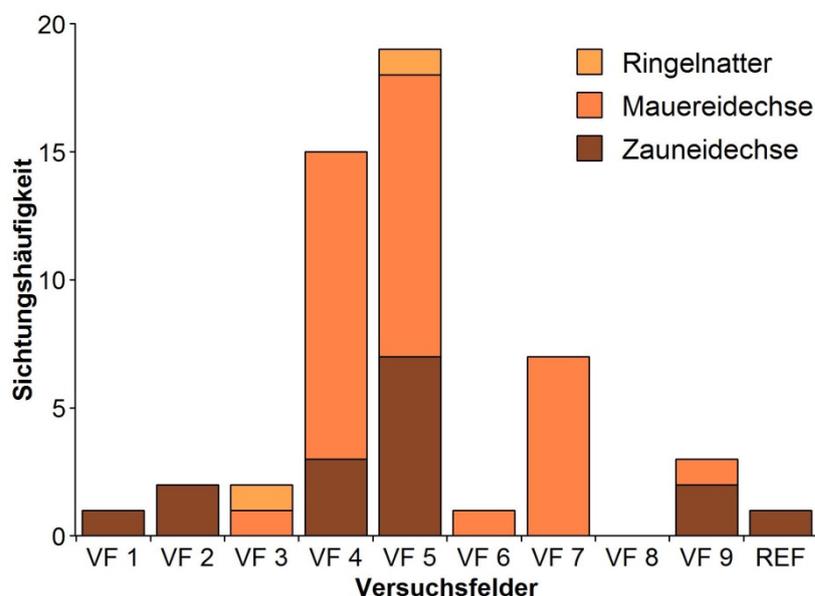


Bild 50: Sichtungshäufigkeiten der Reptilienarten an den einzelnen Versuchsfeldern während der Erfassung im Jahr 2017

Inwieweit das Einwandern der Mauereidechse auf die Umbauarbeiten bezogen werden kann oder ob es Teil einer nordwärts gerichteten Ausbreitungsbewegung der Art im Naturraum ist, bleibt hier unklar. Trotzdem wiesen die deutlich erhöhten Sichtungszahlen in den weitgehend offenen und besonnten Versuchsfeldern mit Kieseinfüllung und Steinblöcken (VF 4), Steinmatratzen (VF 5) und Pflanzmatten (VF 7) darauf hin, dass in diesen Versuchsfeldern durch die Maßnahmen geeignete Reptilienhabitate geschaffen wurden. Es ist jedoch anzunehmen, dass die nachgewiesenen Reptilien-Populationen über den gesamten „Auenbereich“ oberhalb der VF verbreitet sind und sich nicht auf einzelne VF beschränken. Reptilien sind daher nur eingeschränkt zur Qualitätsbeurteilung der einzelnen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen geeignet. Die Ergebnisse (vgl. Anlage 6) weisen jedoch darauf hin, dass oben genannte Maßnahmen bei entsprechender räumlicher Ausdehnung durchaus geeignet sein können, um bestehende Reptilienpopulationen zu verbinden und damit umfangreiche Gesamtlebensräume zu schaffen. Daher wurden sie in die Bewertung der Maßnahmen aufgenommen.

Hinsichtlich ihrer ökologischen Wirksamkeit für die Organismengruppe Reptilien erhielten die VF 4 (Kieseinfüllung) und VF 5 (Röhrichtgabionen/Steinmatratzen) die höchsten Wertstufen 4 und 5 (hochwertig bis sehr hochwertig). Tendenzen geeignete Reptilienhabitate bereitstellen zu können, zeigen weiterhin die VF 7 (Pflanzmatten) und 9 (ohne Böschungsschutz), weshalb sie Wertstufe 3 (mittlere Wertigkeit) erhielten. Die geringste Wertigkeit (Wertstufe 1) wurde für den relativ dicht bewachsenen unteren Böschungsbereich im Schutz des Steinwalls von VF 8 vergeben, während die übrigen VF 1 (begrünte Steinschüttung), 2 und 3 (Weidenspreitlagen) und die Referenz Wertstufe 2 (geringwertig) erhielten (vgl. Tabelle 18).

5.3.4 Laufkäfer

Die Laufkäferfauna wurde im Rahmen der IST-Zustandserfassung sowie im Rahmen der zwei Erfolgskontrollen mittels Bodenfallen und teilweise mittels Handfang erfasst. Im Rahmen der IST-Zustandserfassung im Jahr 2010 wurden jeweils fünf Bodenfallen in drei Untersuchungsflächen so eingebaut, dass sie sowohl die Zonierung der späteren Versuchsstrecke als auch der Referenzstrecke abbildeten. Im Rahmen der Erfolgskontrollen (2013/14 und 2017) wurden pro VF und in der Referenzstrecke jeweils fünf Bodenfallen in unterschiedlichen Böschungshöhen eingebaut sowie fünf zusätzliche Kleinbecherfallen im oberen Böschungsbereich von VF 8. Die Methode des Handfangs wurde zusätzlich in den VF 2, 5, 7 und teilweise 8 und 9 angewandt, da dort aufgrund der durchgeführten Baumaßnahmen Bodenfallen nur eingeschränkt eingebracht werden konnten.

Die Artengemeinschaft der Laufkäfer (Carabidae) zeigte in den Untersuchungen der beiden Erfolgskontrollen (2013/14 und 2017) generell eine starke Dynamik. Während die Gesamtartenzahlen beider Erfassungen mit 77 Arten (1425 Individuen) in 2013/14 und 69 Arten (1102 Individuen) in 2017 relativ ähnlich waren, unterschieden sich beide Aufnahmen jedoch stark in der Artenzusammensetzung, da nur ca. 60 % der Arten (44 gemeinsame Arten) in beiden Untersuchungen nachgewiesen wurden. Während der IST-Zustandserfassung im Jahr 2010 wurden nur sieben Laufkäferarten im Bereich der Ufer der späteren Versuchsstrecke nachgewiesen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Aufwand und das Design der Voruntersuchung nicht vollständig methodisch mit jener der Folgejahre vergleichbar war und dies bei der Auswertung berücksichtigt werden musste. Das unterstreicht die hohe interannuelle Variabilität von terrestrischen Wirbellosen-Gesellschaften und macht deutlich, weshalb bei der Bewertung der Versuchsfelder andere Messgrößen als das Vorhandensein oder Fehlen bestimmter Arten angewendet werden müssen. Daher stützt sich die Beurteilung auf Arten- und Individuenzahlen, Diversitäts-Index, den Anteil ufertypischer Individuen und die Anzahl vorkommender Arten der Roten Listen Deutschlands bzw. Hessens (Schmidt et al. 2016, Malten 1998) (vgl. Tabelle 15). In den Roten Listen wurden in der Erfassung von 2017 11 Arten (2013/14: 24 Arten) als stark gefährdet, gefährdet oder auf der Vorwarnliste geführt. Diese waren auf allen Versuchsfeldern außer der Referenz ähnlich verteilt, sodass pro VF mindestens eine (Weidenspreitlage, VF 2) und maximal fünf (ohne Böschungsschutz, VF 9) dieser Arten nachgewiesen wurden. Ähnliche Artenzahlen der Roten Liste (jeweils vier) konnten auch in den VF Röhrichtgabionen/Steinmatratzen (VF 5), Pflanzmatten (VF 7) und mit Steinwall im unteren Böschungsbereich (VF 8) nachgewiesen werden.

Die Arten- und Individuenzahlen der Laufkäfer waren an fast allen Versuchsfeldern zwischen den beiden Untersuchungen im Rahmen des Monitorings (2013/14 und 2017) vergleichbar (Bild 51). Dies betraf sowohl das Verhältnis zwischen Gesamtarten- und ufertypischen Artenzahlen als auch zwischen allen erfassten und den ufertypischen Individuen. Deutliche Unterschiede gab es jedoch an den Röhrichtgabionen/Steinmatratzen (VF 5) und dem Steinwall im unteren Böschungsbereich (VF 8). Dabei wurden an VF 5 sehr hohe Individuen- und Artenzahlen in der Untersuchungsperiode 2013/14 erfasst, während in 2017 nur etwa 54 % der Arten und nur 15 % der Individuen nachgewiesen wurden. Das Verhältnis zwischen ufertypischen und uferuntypischen Arten war jedoch mit Anteilen von 4 % in 2013/14 und 9 % in 2017 vergleichbar gering. Es ist dabei sehr wahrscheinlich, dass diese Effekte auf den großflächigen Ausfall der Röhrichtvegetation in den Gabionen in der zweiten Hälfte der Monitoringphase und die anschließenden Sanierungsmaßnahmen im Oktober 2016 (Überdeckung mit einer Lage Wasserbausteine, vgl. Kap. 4.2.2) zurückzuführen sind. Entgegen dieser negativen Entwicklung an VF 5 zeigte sich an VF 8 eine positive Entwicklung der Laufkäfergesellschaft. Diese äußerte sich sowohl in einer deutlichen Zunahme der Artenzahl von 17 auf 36, der Diversität von 2,2 auf 2,6, einer Zunahme der Anteile ufertypischer Arten von 17 % auf 50 %, einer Zunahme der Individuenzahlen von 1.3 auf 7.9 Individuen pro 10 Fallentagen und einem starken Anstieg des Anteils ufertypischer Individuen von 17 % auf 69 %. Damit wurden bei fast allen Parametern sehr hohe bis hohe Werte erreicht, woraus bezüglich der Laufkäferzönose in diesem Versuchsfeld die beste Bewertung resultierte (Wertstufe 5 „sehr hochwertig“). Hierfür ist in erster Linie die gute Entwicklung der Röhrichtvegetation im Bereich der durch den Steinwall besser geschützten Berme ursächlich zu erachten, da diese einer Vielzahl von ufertypischen Laufkäferarten geeignete Habitate bietet.

Im Vergleich zur Referenz hat sich an fast allen Versuchsfeldern bis auf VF 6 (erodiertes Alginat) eine diversere und individuenreichere Laufkäfer-Gesellschaft eingestellt (Bild 51 unten), weshalb die Referenz mit Wertstufe 2 (geringwertig) und VF 6 mit der geringsten Wertstufe 1 (sehr geringwertig) bewertet wurde. Die begrünzte Steinschüttung in VF 1 zeigte ähnlich arme Laufkäferzönosen wie die Referenz. Da der Anteil der ufertypischen Individuen sehr hoch war, wurde die Gesamtbewertung positiv beeinflusst und erhielt Wertstufe 3 (mittelwertig). Neben dem bereits erwähnten VF 8 wurden gute Bewertungen auf der Basis der eingangs aufgeführten Parameter auch an den VF ohne Böschungsschutz (VF 9), mit Kieseinfüllung und Steinblöcken (VF 4), mit Pflanzmatten (VF 7) und an der Weidenspreitlage (VF 3) erreicht. Dies war vor allem in höheren Arten- und Individuenzahlen und höheren Anteilen von ufertypischen Individuen bzw. dem vermehrten Auftreten von Rote-Liste-Arten begründet (vgl. Anlage 6). Alle VF erhielten Wertstufe 4 (hochwertig). Wertstufe 3 (mittelwertig) wurde für die intensiver unterhaltene Weidenspreitlage des VF 2 und die Röhrichtgabionen (VF 5) vergeben. Eine Übersicht aller vergebenen Wertstufen zeigt Tabelle 18.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

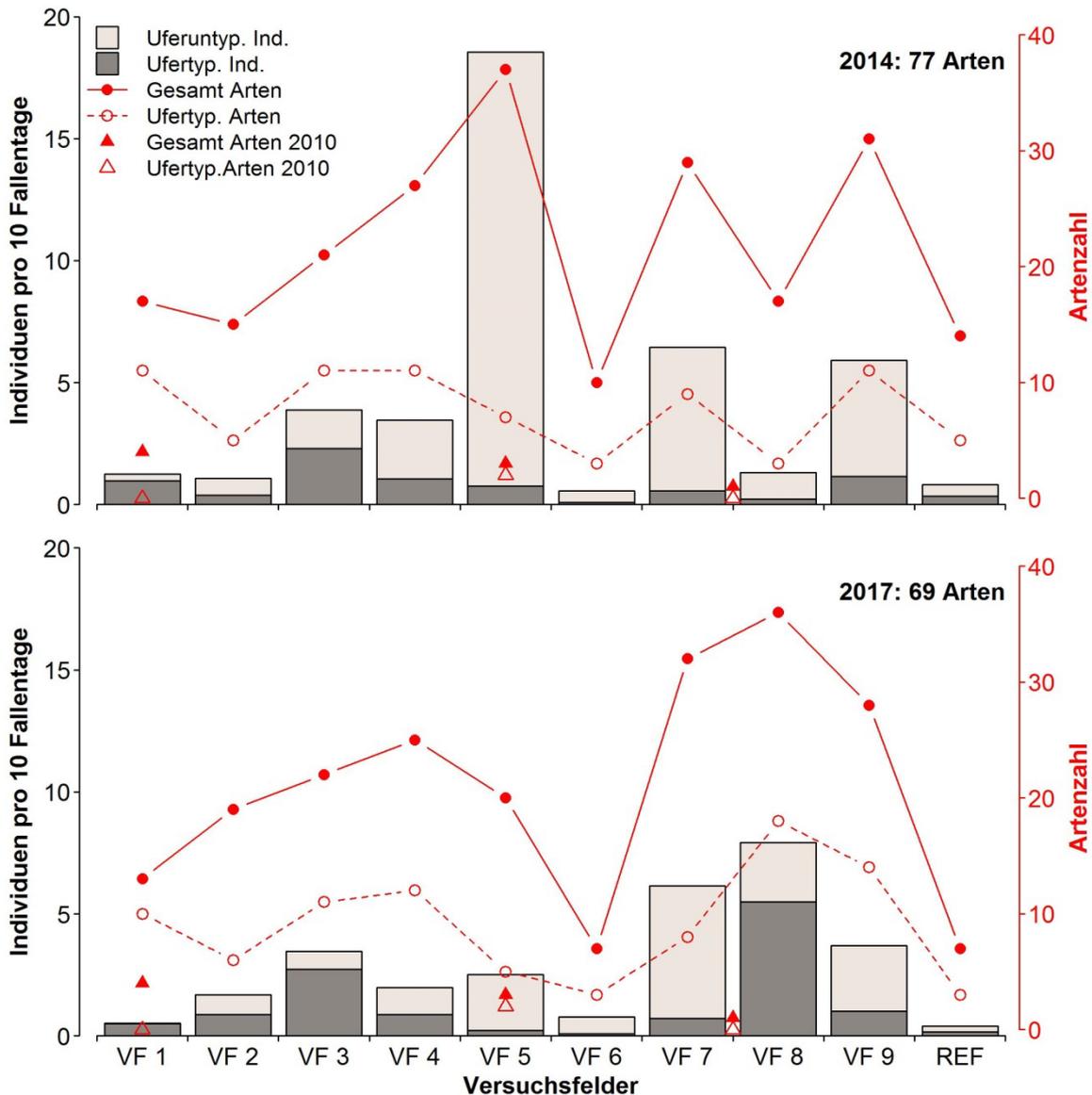


Bild 51: Arten- und Individuenzahlen der Laufkäfergesellschaften mit Differenzierung in ufertypische und uferuntypische Arten für alle VF und die Referenzstrecke in 2013/14 (oben) und 2017 (unten). Bitte beachten, dass bei der Erfassung im Jahr 2010 (Dreiecksymbole) sowohl Methodik als auch Erfassungsdesign abwichen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des Monitorings, dass die erste Zielvorgabe „Förderung der Artendiversität“ für die Laufkäferfauna an fast allen Versuchsfeldern der Versuchsstrecke erreicht wurde. Die zweite Zielvorgabe der „Förderung standortgerechter Zönosen“ wurde durch die starke Fluktuation der Arten über den Untersuchungszeitraum, sowie durch den deutlich erkennbaren Arten-Turn-Over innerhalb der Lebensgemeinschaften nur in vereinzelt VF sukzessive erreicht. Zu nennen sind hier die Weidenspreitlage (VF 3) und das Pflaster hinter dem Steinwall im unteren Böschungsbereich (VF 8) sowie etwas eingeschränkter auch die Kieseinfüllung mit Steinblöcken (VF 4) und der Bereich ohne Böschungsschutz (VF 9), an denen 2017 höhere Anteile von ufertypischen Individuen bzw. Arten nachgewiesen wurden. Eine erfolgreiche Ausprägung

standortgerechter Zönosen ist maßgeblich von der zukünftigen Unterhaltung und Entwicklung der Versuchsstrecke abhängig.

5.3.5 Spinnen

Die Spinnen wurden mit derselben Methode erfasst wie die Laufkäfer. Die Angaben zu Standort, Exposition und Beprobungsintervall der Bodenfallen gelten hier gleichermaßen. Im Rahmen der Erfolgskontrollen wurden in den Röhrichtgabionen/Steinmatratzen (VF 5) und den Pflanzmatten (VF 7) zudem die aufgewachsene Vegetation mit Streifkeschern beprobt, um wenig mobile Radnetzspinnen und Krabbenspinnen zu erfassen. Die Zusammensetzung der Spinnenzönose zeigte eine ähnlich große Dynamik wie die der Laufkäfer. Die Gesamtartenzahlen der beiden Erfassungszeiträume (2013/14, 2017) waren mit 77 bzw. 87 Arten und höheren Taxa zwar auch hier relativ ähnlich (Bild 52), jedoch traten davon ebenfalls nur 48 Taxa in den Fängen beider Erfassungen auf (ca. 60 %). Die Bewertung der Versuchsfelder basiert daher auf denselben Parametern wie bei den Laufkäfern (vgl. Tabelle 15 und Anlage 6). Während sich im ersten Erfassungszeitraum (2013/14) noch einzelne Versuchsfelder mit erhöhten Arten- und/oder Individuenzahlen hervorhoben (Weidenspreitlage (VF 3), Röhrichtgabionen/Steinmatratzen (VF 5) Pflanzmatten (VF 7)), zeigte sich 2017 eine etwas gleichmäßigere Besiedlung der Versuchsfelder auch im Vergleich zur Referenz (Bild 52). Leicht erhöhte Artenzahlen und höhere Besiedlungsdichten im Vergleich zur Referenz wiesen nur die Pflanzmatten (VF 7), das VF mit Pflaster hinter dem Steinwall im unteren Böschungsbereich (VF 8) und der Bereich ohne Böschungsschutz (VF 9) auf. Die begrünte Steinschüttung in VF 1 zeigte höhere Besiedlungsdichten, ohne dass sich die Artenzahlen unterschieden. Die relativen Anteile der ufertypischen Arten und Individuen unterschieden sich kaum untereinander. Die relativen Anteile der feuchteliebenden (hygrophilen) Individuen waren in der begrünten Steinschüttung (VF 1, 31 %), der Weidenspreitlage (VF 3, 38 %), der Kieseinfüllung mit Steinblöcken (VF 4, 41 %) und dem Steinwall im unteren Böschungsbereich (VF 8, 30 %) leicht erhöht, wobei auch die Steinschüttungsreferenz (REF) einen ähnlichen bzw. nur einen geringfügig niedrigeren Anteil (31 %) aufwies. Die anderen VF zeigten geringere Anteile. An allen VF überwogen Arten, die an trockene, sonnige Standorte angepasst sind.

Im Vergleich zur Erfolgskontrolle in 2013/14 nahm die Gesamtartenzahl der Spinnen in 2017 zu. Die Annahme, dass die fortschreitende Entwicklung der Vegetation innerhalb der jeweiligen VF zunehmend günstige Habitatstrukturen für eine größere Anzahl an Spinnenarten im Vergleich zum IST-Zustand (Steinschüttung) zur Verfügung stellt, muss in einigen Punkten kritisch hinterfragt werden. Ein Aspekt dabei ist die ökologische Zugehörigkeit der Arten zu den neu entstandenen Vegetationsstrukturen. Während bei der IST-Zustandserfassung im Jahr 2010 mit der Piratenwolfsspinnne (*Pirata latitans*) nur eine typische Uferart vertreten war, konnte innerhalb der Monitoringphase in 2014 und 2017, zumindest in den Weidenspreitlagen (VF 2 und VF 3), noch die ufertypische Wolfsspinnen-Art *Pirata hygrophilus* nachgewiesen werden. Darüber hinaus sind generell eher wenige Arten mit speziellen Habitatansprüchen an Flussufer erfasst worden (34 %). Im Vergleich zu den Laufkäfern wurde bei den Spinnen ein höherer Anteil an Trockenheit liebenden (xerophilen) Arten nachgewiesen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass Spinnen sich häufig zusätzlich an vertikalen Strukturen ausbreiten und sich daher nicht zwangsläufig an den Feuchteverhältnissen des Bodensubstrates orientieren müssen. Abschließend ist zum

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

jetzigen Zeitpunkt zu sagen, dass im Unterschied zu den Laufkäfern die erste Zielvorgabe „Förderung der Artendiversität“ zumindest in einzelnen Versuchsfeldern teilweise erreicht werden konnte. Die zweite Zielvorgabe, „Förderung standortgerechter Zönosen“, konnte bis zu diesem Zeitpunkt weniger gut erreicht werden und sollte zukünftig im Zuge eines Langzeitmonitoring erneut untersucht und bewertet werden.

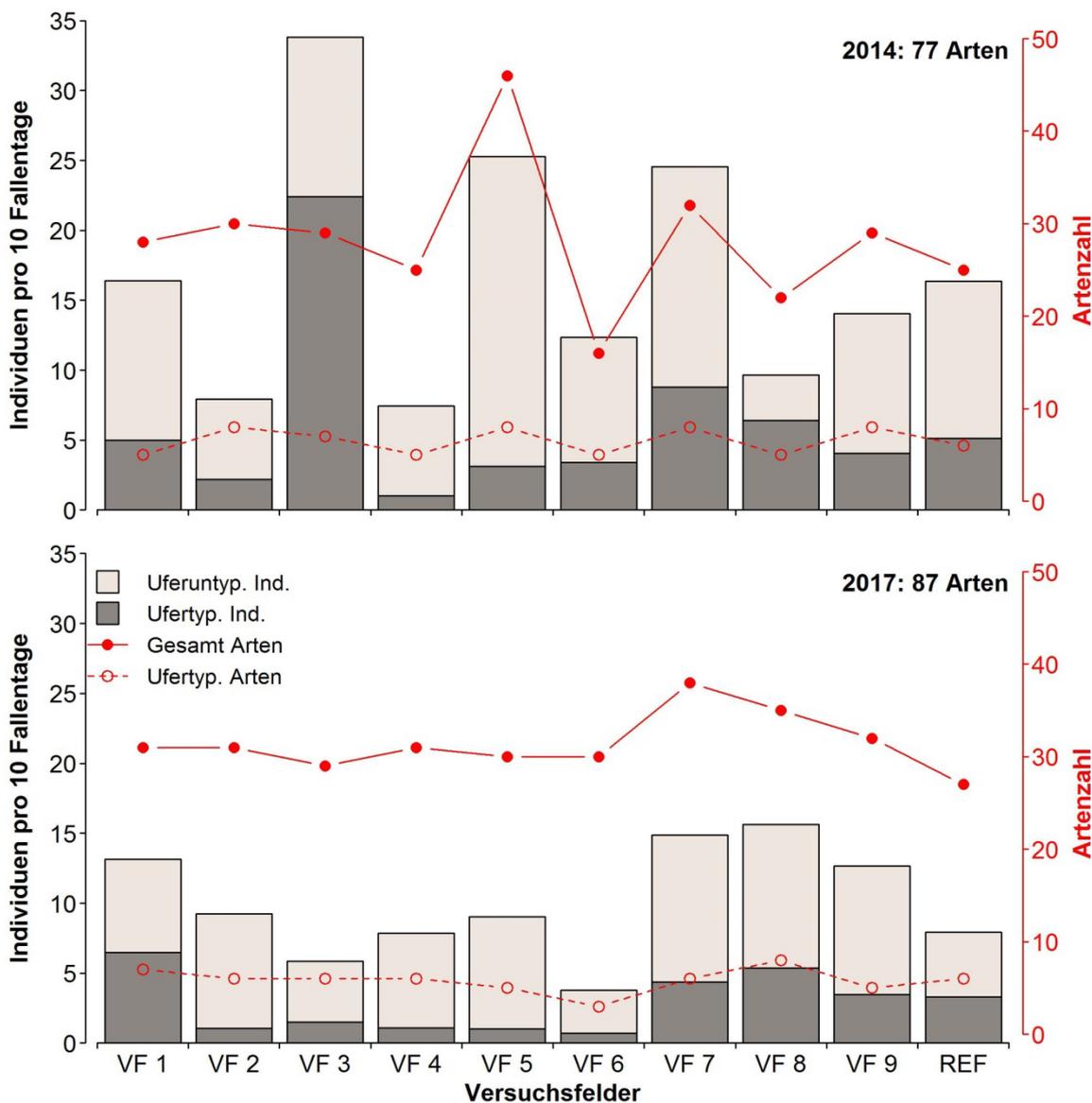


Bild 52: Arten- und Individuenzahlen der Spinnengemeinschaften mit Differenzierung in ufertypische und uferuntypische Arten für alle VF und die Referenzstrecke in 2013/14 (oben) und 2017 (unten).

In der Roten Liste Deutschlands als gefährdet aufgeführte Spinnen- und Weberknechtarten waren in beiden Erfassungskampagnen nur sehr gering vertreten. Dies betraf 2013/14 die gefährdete Art *Clubiona germanica* (VF 1) und 2017 die stark gefährdete Art *Leptorchestes berlinensis* (VF 1), die aber keinen ausgeprägten Habitatbezug zu Uferlebensräumen besitzen und in sehr geringen

Dichten auftraten. Dazu kamen 2013/14 mit *Singa nitidula* (VF 7) und *Heliophanus auratus* (VF 1) bzw. 2017 *Heliophanus auratus* (REF) und *Thanatus striatus* (VF 5) jeweils zwei Arten der Vorwarnliste, die sich alle durch einen starken Habitatbezug zu feuchten Uferlebensräumen auszeichnen.

Im Ranking der hinsichtlich der Spinnenzönose ökologisch wirksamsten Maßnahmen erhielten die VF 7 (Pflanzmatten), VF 8 (Steinwall vor Mittelwasserberme) und VF 9 (ohne Böschungsschutz) die höchsten Wertstufen (Wertstufe 5 „sehr hochwertig“ bzw. 4 „hochwertig“). Mit einer mittleren Wirksamkeit (Wertstufe 3) reihen sich die Maßnahmen Begrünte Steinschüttung (VF 1), Röhrlichtgabionen/Steinmatratzen (VF 5) und Alginat (VF 6) ein. Die schlechteste Wertstufe 1 (sehr geringwertig) erhielt aufgrund der gewichteten Bewertungsergebnisse (vgl. Anlage 6) die Weidenspreitlage von VF 3, während die übrigen Maßnahmen der VF 2 (Weidenspreitlage) und VF 4 (Kieseinfüllung) hinsichtlich ihrer ökologischen Wirksamkeit mit der Referenz gleichgesetzt wurden (Wertstufe 2 „geringwertig“) (vgl. Tabelle 18).

5.3.6 Makrozoobenthos

Das Makrozoobenthos wurde im Rahmen beider Erfolgskontrollen mit quantitativen und qualitativen Erfassungsmethoden beprobt. An allen VF wurden drei, an der Referenzstrecke fünf flächenbezogene Proben an ufernahen Bodensubstraten, nicht unter 0,5 m Wassertiefe entnommen und ausgewertet. Zusätzlich wurden interessante Sonderstrukturen (z. B. Wurzelteller VF 1, Faschinenbündel VF 4) qualitativ für einen Zeitraum von 20 min. beprobt. Während der ersten Erfolgskontrolle wurden 18 solcher Sonderstrukturen erfasst. Aufgrund des Verlustes bzw. fehlender Benetzung konnten während der zweiten Erfolgskontrolle nur sechs Sonderstrukturen untersucht werden.

Bei der Erhebung im Monitoringjahr 2017 konnten insgesamt nur 26 Taxa (Arten und höhere Gruppen) aus zwölf Wirbellosen-Ordnungen nachgewiesen werden. Im gesamten Bereich der Versuchsstrecke war die Besiedlung durch eingewanderte Arten Neozoen, besonders von Kleinkrebsen aus der Ordnung der Krebstiere (*Crustacea*) geprägt. Aufgrund der starken hydraulischen Belastung im Bereich der Versuchsstrecke wurden hydromorphologische bzw. strukturell aufwertende Maßnahmen im aquatischen Bereich nur in zwei der Versuchsfelder, der begrünten Steinschüttung (VF 1; Steinwall, strömungsberuhigt, Wurzelteller) und der Kieseinfüllung mit Steinblöcken (VF 4; Totholzfaschinen auf Mittelwasser-Niveau) umgesetzt. Dadurch waren Effekte auf die Zusammensetzung der aquatischen Fauna an allen anderen Versuchsfeldern nicht zu erwarten. Die Monitoringergebnisse und die Bewertung auf der Basis der gewählten Kriterien (siehe Tabelle 15) lieferten Indizien für positive Effekte dieser Maßnahmen auf das Makrozoobenthos (vgl. Anlage 6). Generell konnten deutliche Unterschiede in der Besiedlungsdichte der Makrozoobenthos-Gesellschaften zwischen den Erfassungsjahren 2013 und 2017 festgestellt werden. Die Artenzahlen waren in 2017 deutlich verringert und die Zönose damit ärmer als im Jahr 2013. Dabei blieben die generellen relativen Muster zwischen den Versuchsfeldern jedoch weitgehend erhalten (Bild 53). Besonders die mit Totholzelementen (Wurzeltellern) strukturell aufgewertete Flachwasserzone hinter dem vorgelagerten Steinwall an der begrünten Steinschüttung (VF 1) wies im Vergleich zur Referenz und den im aquatischen Bereich unveränderten VF eine deutlich erhöhte Artenzahl (21) und eine erhöhte Anzahl der Arten aus den Ordnungen

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Ephemeroptera (Eintagsfliegen), *Plecoptera* (Steinfliegen), *Trichoptera* (Köcherfliegen), *Coleoptera* (Käfer), *Bivalvia* (Muscheln) und *Odonata* (Libellen), sogenannten EPTCBO-Arten (8) auf (Bild 53). Da der mittlere Individuen-Anteil von Neozoen jedoch nahezu unverändert hoch war (68 %; Bild 54), wird deutlich, dass es sich dabei aber nur um geringe Individuenzahlen handelte. Daher war die Bewertung des Makrozoobenthos für das VF 1 im Vergleich zu den anderen Versuchsfeldern, relativ betrachtet, am höchsten, konnte absolut gesehen jedoch keine guten Werte erreichen. Am VF mit der Kieseinfüllung und den Totholzfaschinen im aquatischen Bereich (VF 4) waren die Gesamtartenzahl und die Anzahl der EPTCBO-Arten leicht erhöht. Zusammen mit einem etwas verringerten Neozoenanteil ergab sich eine erhöhte Gesamtbewertung für dieses VF im Vergleich zur Referenz (vgl. Anlage 6). Die nach Substraten (Totholz, Stein/Kies) aufgelöste Analyse hinsichtlich der mittleren Artenzahlen und der Neozoenanteile für diese beiden VF verdeutlicht die Bedeutung der Totholzstrukturen für die positive Besiedlungsentwicklung (Bild 54).

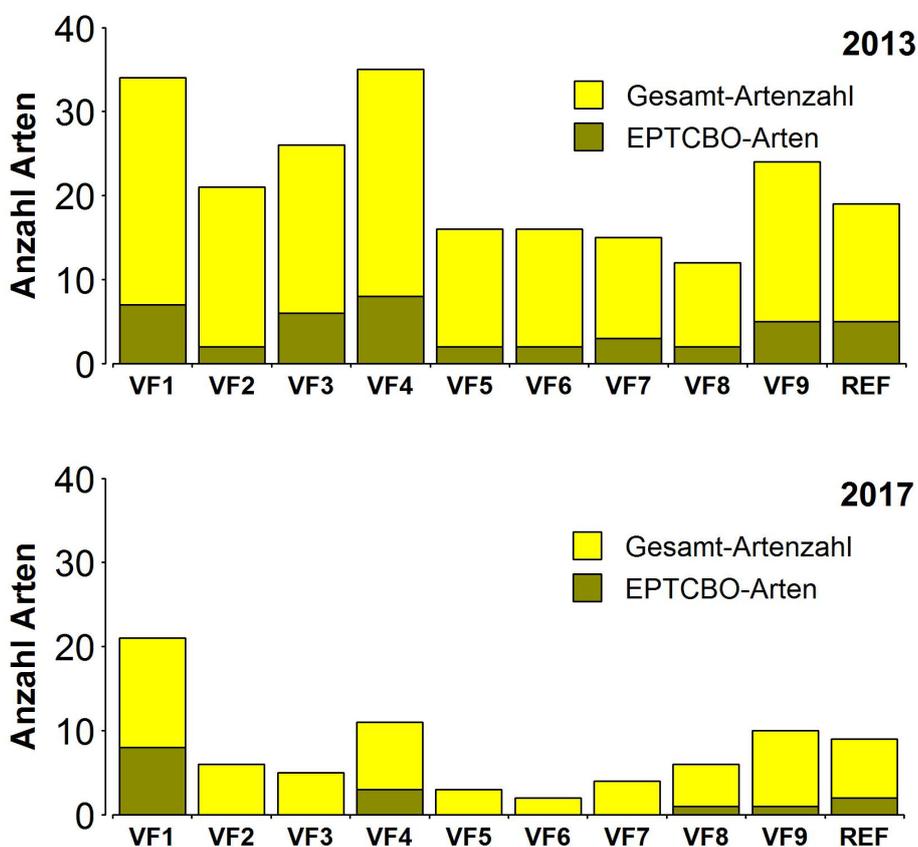


Bild 53: Gesamtartenzahlen und Anzahl der EPTCBO-Arten (Vertreter der Ordnungen: *Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Trichoptera*, *Coleoptera*, *Bivalvia*, *Odonata*) an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke in den Untersuchungsjahren 2013 (oben) und 2017 (unten).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

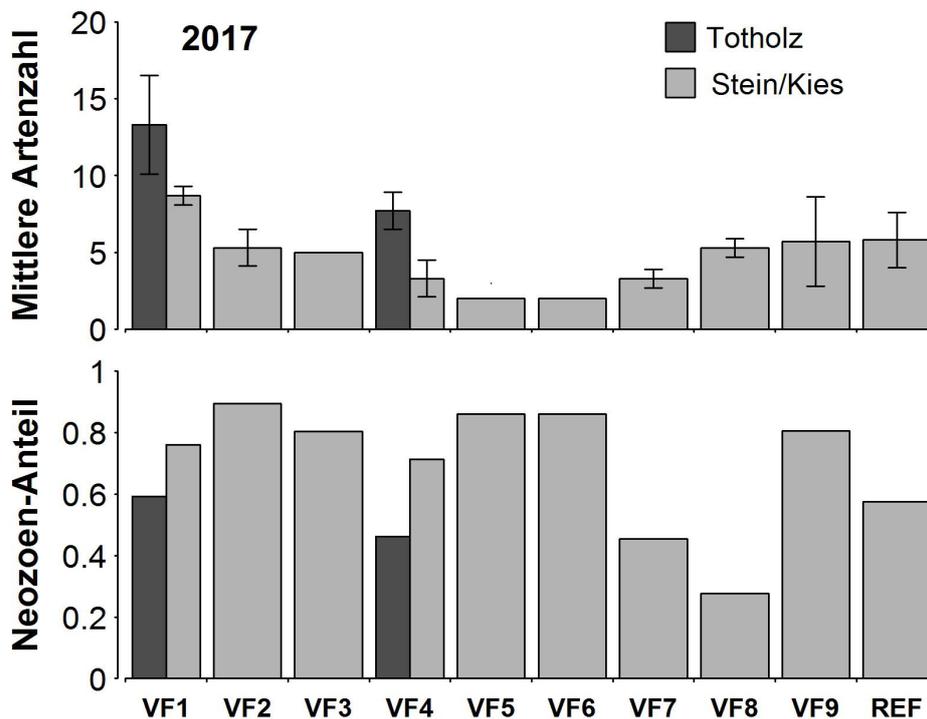


Bild 54: Mittlere Artenzahlen (oben, MW ± SD) und Individuenanteil von Neozoen an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke im Untersuchungsjahr 2017. An den beiden Versuchsfeldern mit eingebrachten Totholzelementen im aquatischen Bereich aufgeteilt für mineralische Substrate (Stein/Kies, hellgrau) und Totholz (dunkelgrau).

Daraus lassen sich Hinweise ableiten, dass Totholzelemente geeignete Habitate für heimische, gewässertypische wirbellose Organismen bieten können. Allerdings sind die Ergebnisse aufgrund der teilweise sehr geringen Artenzahlen (besonders im Jahr 2017), die auf eine stark verarmte Zönose hinweisen, generell kritisch zu betrachten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Lebensraumausstattung für aquatische Organismen im Rhein aufgrund vieler verschiedener Einflussfaktoren häufig sehr ungünstig ist und dies einen Effekt auf die aktuellen Ergebnisse der Maßnahmen haben könnte. Hinzu kommt, dass ein Teil der aquatischen Maßnahmen aufgrund ihrer Einbautiefe im Bereich des Mittelwassers nur eingeschränkt wirksam sein können, da sie nicht permanent benetzt sind. Dies wirkt sich besonders negativ auf Organismen aus, die aufgrund ihres annualen Lebenszyklus auf das permanente Vorhandensein solcher Habitate angewiesen sind. Die Ursachen für die deutlich geringeren Neozoenanteile in den im aquatischen Bereich nicht veränderten VF mit Pflanzmatten und dem Steinwall im unteren Böschungsbereich (VF 7 und 8) können auf der Basis der Daten nicht erklärt werden und müssen somit als Artefakt aufgrund der verarmten Zönose gewertet werden.

In der Bewertung erhielten nur die aquatisch wirksamen Maßnahmen der VF 1 (Flachwasserzone, Wurzelteller) und 4 (Kieseinfüllung, Totholzfascinen) eine Wertstufe, die im Vergleich zur Wirkung der Steinschüttung (aquatische Referenz) abgeleitet wurde. Bei diesem Vergleich konnte die Flachwasserzone die höchste ökologische Wirksamkeit für das Makrozoobenthos entfalten und erhält Wertstufe 5 (sehr hochwertig). Die positive Wirkung der Totholzfascinen lässt sich anhand der Daten ebenfalls ableiten, erhält anhand der Ergebnisse jedoch Wertstufe 3 (mittel-

wertig), während die Steinschüttung mit dem schlechtesten Ergebnis und somit Wertstufe 1 (sehr geringwertig) abschneidet (vgl. Tabelle 19).

5.3.7 Fische

Die Befischungen fanden in den Jahren 2010 (IST-Zustandserfassung vor Baumaßnahme) und 2012 bis 2017 jeweils im Juni/Juli und im September/Oktober statt. Im Frühjahr 2016 konnte hochwasserbedingt keine Befischung durchgeführt werden. Aufgrund von anhaltenden Niedrigwasserphasen war es zudem im Herbst 2015 und 2016 nicht möglich, das VF 1 (strömungsberuhigte Zone hinter Steinwall) zu befischen. Befischungsmethode war die Elektrofischerei mit Gleichstrom. Dazu wurde die Uferlinie mit dem Boot gegen die Strömung unter Anwendung der Random-Point-Abundance Sampling Methode abgefahren. Die Fische wurden an jedem Punkt nach dem Herauskeschern bestimmt, längenvermessen und umgehend schonend zurückgesetzt.

Insgesamt wurden bei den Befischungen im Monitoringzeitraum 17.240 Fische zugehörig zu 29 Arten nachgewiesen. Häufigste Fischart war die Schwarzmundgrundel (*Neogobius melanostomus*), eine eingewanderte Fischart aus dem kaspischen Raum mit 62,4 % Individuenanteil. Mit Abstand folgten dann Rotaugen (*Rutilus rutilus*) (17,7 %), Rapfen (*Leuciscus aspsius*) (6,4 %), Döbel (*Squalius cephalus*) (2,9 %), Flussbarsch (*Perca fluviatilis*) (2,5 %), Ukelei (*Alburnus alburnus*) (2,2 %), Nase (*Chondrostoma nasus*) (1,6 %), Aal (*Anguilla anguilla*) (1,1 %) und Hasel (*Leuciscus leuciscus*) (1 %). Alle anderen Fischarten waren jeweils mit weniger als einem Prozent vertreten. Wie bereits beim Makrozoobenthos (Kap. 5.3.6.) erwähnt, erfolgten strukturelle Maßnahmen im aquatischen Bereich nur in der begrüneten Steinschüttung (VF 1; Steinwall, strömungsberuhigt, Wurzelteller) und der Kieseinfüllung mit Steinblöcken (VF 4; Totholzfaschinen auf Mittelwasser-Niveau). Effekte auf die Zusammensetzung der Fischfauna waren daher ebenfalls nur an diesen beiden VF zu erwarten. Dies wurde auch hier durch die Monitoringergebnisse und die Bewertung auf der Basis der gewählten Kriterien (siehe Tabelle 15, Kap. 5.3.1) bestätigt. Weder die mittlere Artenzahl pro Befischungspunkt noch die Artenzusammensetzung unterschieden sich an diesen VF im Vergleich zur konventionell gesicherten Referenz (Steinschüttung; Bild 55 und Bild 56).

An den oben genannten VF (VF 1 und VF 4) zeigten sich jedoch deutliche Tendenzen zu einerseits erhöhten mittleren Artenzahlen pro Befischungspunkt (Bild 55) als auch zu höheren Anteilen an Individuen der Referenzfischarten nach Wasserrahmenrichtlinie (Bild 56) im Vergleich zum Bereich der Referenzstrecke. Aufgrund der teilweise starken Variabilität und der daraus resultierenden Streuung der Daten konnte der Unterschied zwischen den mittleren Artenzahlen nicht statistisch untermauert werden (rmANOVA, $p = 0.38$), für die Anteile der Individuen der Referenzartenliste aber schon (rmANOVA, $p = 0.035$), obwohl auch diese Daten einer starken Variabilität unterlagen. Als Grund hierfür muss neben populationsdynamischen Schwankungen infolge von biotischen und abiotischen Umweltfaktoren, auf einer höheren räumlichen Skala als die der VF, auch die teilweise eingeschränkte Wirksamkeit der entsprechenden Maßnahmen an den beiden VF berücksichtigt werden. So waren die Faschinenbündel in VF 4 aufgrund ihrer Einbautiefe im Bereich der Mittelwasserlinie nur an ca. 64 % der Tage im Monitoringzeitraum ökologisch wirksam. An den anderen Tagen waren sie nicht benetzt. Dies begünstigte zudem den rascheren Abbau der Totholzelemente, sodass deren Wirksamkeit abnahm und in absehbarer Zeit nicht mehr

gegeben sein wird. Eine Erneuerung der Totholzfaschinen wird angestrebt. Dabei sind Sanierungsmöglichkeiten zu prüfen, die eine nachhaltige positive Wirkung auf die aquatische Lebensgemeinschaft bei vertretbarem Aufwand ermöglichen. Außerdem ist für eine dauerhafte Wirksamkeit eine entsprechende Einbautiefe unterhalb der Mittelwasserlinie zwingend notwendig.

Auch die nachgewiesene Gesamtartenzahl erschien an der begrünten Steinschüttung (VF 1) im Vergleich zur Referenz (und allen anderen VF) etwas erhöht (Bild 55). Hier ist in erster Linie die durchströmte strömungsberuhigte Flachwasserzone hinter dem Steinwall als positiv wirkendes Strukturelement anzusehen, in der sich vor allem durch die eingebrachten Wurzelteller vielfältige Habitatstrukturen für diverse Fischarten gebildet haben. Dieser positive Effekt konnte sich jedoch aufgrund der relativ hohen Böschungslage des Steinwalls und der dadurch geringen Tiefe der Flachwasserzone ebenfalls nicht permanent auswirken, da der Bereich hinter dem Steinwall bei Niedrigwasser nur noch unzureichend an den Flussschlauch angeschlossen war bzw. sogar trockenfallen konnte. Daher konnten bei zwei Beprobungen keine Daten in diesem VF erhoben werden. Diese Befischungstermine wurden bei der vergleichenden Analyse aus statistischen Gründen nicht berücksichtigt, führten aber auch zu keiner grundlegenden Verzerrung der Verhältnisse.

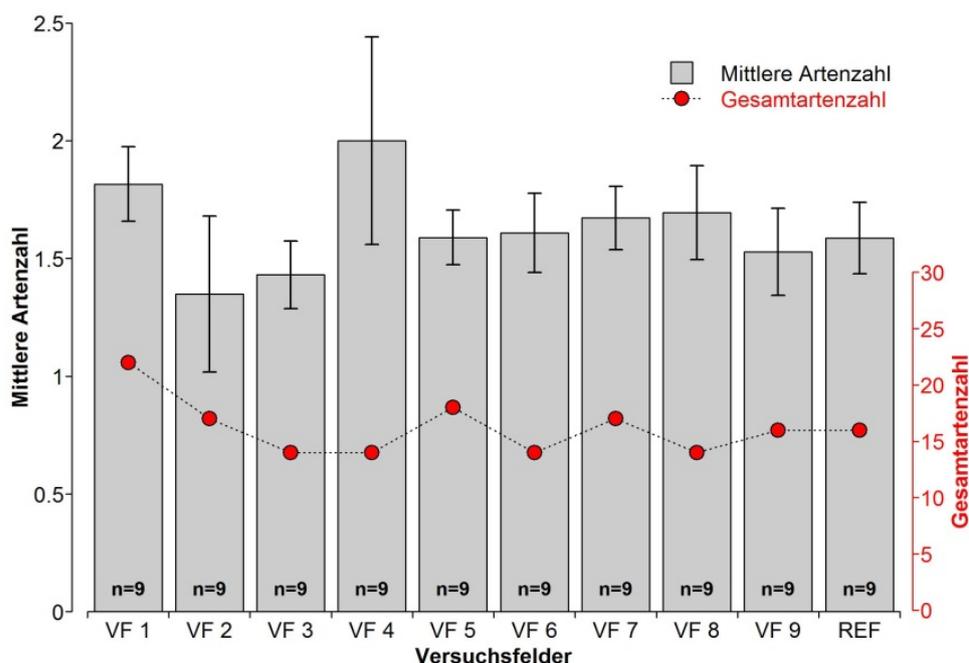


Bild 55: Mittlere Artenzahl pro Befischungspunkt ($\pm SE$) und Gesamtartenzahl an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke über den gesamten Monitoringzeitraum (2012–2017).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

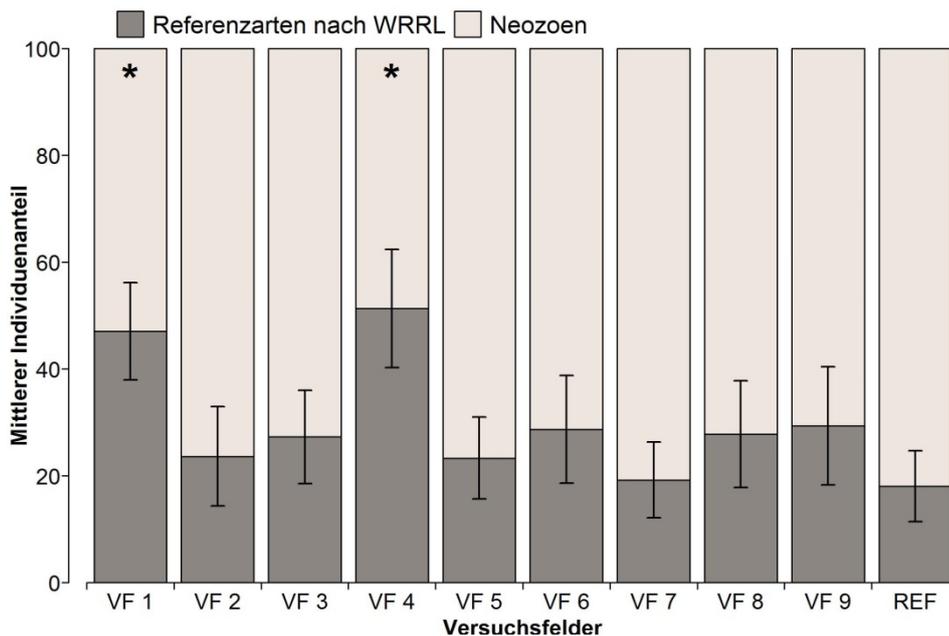


Bild 56: Mittlerer Individuenanteil der Arten der Referenzartenliste nach WRRL im Vergleich zu dem der Neozoen an den Versuchsfeldern der Versuchsstrecke über den gesamten Monitoringzeitraum (2012-2017). Die Sternchen zeigen signifikante Unterschiede an.

Die erhöhten Anteile der Individuen der Referenzarten an den VF 1 und VF 4 (Bild 56) deuten darauf hin, dass die geschaffenen Totholzstrukturen für die einheimische Fischfauna günstige Habitatbedingungen schaffen können. Positive Auswirkungen von Totholzstrukturen sind bereits bei Fließgewässern geringerer Ordnung häufiger beobachtet worden (Bayerisches Landesamt für Umwelt und Landesfischereiverband Bayern 2005). Außerdem deuten die Ergebnisse darauf hin, dass damit die Dominanz von eingewanderten Arten (Neozoen, besonders die invasive Schwarzmundgrundel) in den Binnenwasserstraßen etwas zurückgedrängt werden kann. Somit ist zusammenfassend festzustellen, dass die Monitoringergebnisse an zwei von neun VF positive Veränderungen der Lebensraumbedingungen für die Fischfauna anzeigen (VF 1 und VF 4). Diese Entwicklung ist jedoch aufgrund mehrerer Einflussfaktoren (z. B. geringe Benetzungszeit, geringe räumliche Ausdehnung) für die eingebauten technisch-biologischen Ufersicherungen in den beiden VF nur bedingt repräsentativ und könnte zukünftig durch Optimierung positiv gefördert werden. Bei entsprechend hohen Wasserständen konnten sich auch die kleinräumigen Strukturelemente (Faschinenbündel/Totholz) sowie strömungsberuhigte Bereiche positiv auf die Fischbesiedlung auswirken (höherer Anteil einheimischer Fischarten). In der Referenzstrecke wiederum dominierte die Schwarzmundgrundel, deren bevorzugter Lebensraum der steinige Gewässergrund mit erhöhtem Wellenschlag ist.

Analog zur Verteilung der Wertstufen für das Makrozoobenthos wurde sie für die Fische durchgeführt. Demnach erhielt die Flachwasserzone (VF 1) die höchste Wertstufe 5, gefolgt von den Totholzfaschinen (VF 4) mit Wertstufe 3 (mittelwertig). Die konventionelle Steinschüttung, auf die die Daten vergleichend bezogen wurden, erhielt mit Wertstufe 1 die geringste ökologische Wertigkeit für die Fische (vgl. Tabelle 19).

5.3.8 Zusammenfassende Bewertung aus faunistischer Sicht

Terrestrische Fauna

Die Ergebnisse des fünfjährigen Monitorings zeigen, dass die Bauweisen der Versuchsstrecke am Rhein für einige Organismengruppen zunehmend geeignete, auch ufertypische Habitatstrukturen zur Verfügung stellen können (vgl. Tabelle 18 und Tabelle 19). Dabei werden unterschiedliche Organismengruppen von unterschiedlichen Bauweisen gefördert, sodass die Auswahl der Bauweise stark von der ökologischen Zielstellung und dem umgebenden Naturraum abhängig ist. Aus verschiedenen Gründen müssen die bisher gewonnenen Erkenntnisse jedoch kritisch diskutiert werden. Die geringe Größe der VF ist bspw. für sehr mobile Faunengruppen, wie die Vögel, ein kritischer Parameter, da diese üblicherweise wesentlich größere Reviere besiedeln. Veränderungen im Artinventar sowie in Populationsstärken können somit nur sehr eingeschränkt auf einen konkreten Maßnahmentyp (max. 100 m Länge) zurückgeführt werden. Weiterhin wurden aufgrund der häufig an Wasserstraßen vorhandenen Randbedingungen - Nähe des Betriebsweges, wiederkehrende Unterhaltungs- und Sanierungsarbeiten sowie Angeltourismus - nicht nur die faunistischen Erhebungen häufig gestört, sondern muss auch in Betracht gezogen werden, dass sich dies negativ auf das Besiedlungspotenzial ausgewirkt haben kann. Es ist nicht auszuschließen, dass die genannten Störfaktoren einen Effekt auf die vorliegenden Ergebnisse zum Artinventar und den gemessenen Populationsstärken hatten. Daher ist davon auszugehen, dass die verschiedenen getesteten Bauweisen bei geringerer Störung ein höheres Habitatpotenzial für die ufertypische Fauna bereitstellen könnten als bislang festgestellt.

Insgesamt kann für die terrestrische Fauna positiv bewertet werden, dass über die gesamte Versuchsstrecke hinweg im Vergleich zur Referenzstrecke die Artenzahlen beinahe aller untersuchten Organismengruppen zugenommen haben. In Abhängigkeit der jeweiligen Habitatansprüche der nachgewiesenen Arten, sind erste Tendenzen für die Bereitstellung ufertypischer Habitatstrukturen für einzelne VF im terrestrischen Bereich ableitbar. Je nach Gestaltung und Entwicklung der verschiedenen Maßnahmentypen konnten unterschiedliche Zielorganismen gefördert werden. Keiner der eingebrachten Maßnahmentypen zeigt eine Aufwertung der Habitatstrukturen für alle Zielorganismen, vielmehr konnten einige Maßnahmentypen einzelne bzw. mehrere Zielgruppen fördern (Tabelle 18). Das beste Signal hinsichtlich ufertypischer Biodiversität zeigten dabei bisher die Laufkäfer.

Im Ranking aller Uferschutzmaßnahmen/Bauweisen zeigt die Gesamtbewertung „Terrestrische Fauna“ deutlich, dass alle VF im Vergleich zur Referenz (und dem referenzähnlichen VF 6 nach Scheitern des Alginats) eine mittlere bis hohe ökologische Wirksamkeit entfalten konnten. Die VF 7 (Pflanzmatten), 8 (Böschungsbereich im Schutz des Steinwalls) und 9 (ohne Böschungsschutz) zeigten mit Wertstufe 4 die höchste ökologische Wirksamkeit in der Gesamtbetrachtung aller untersuchten terrestrischen Organismengruppen.

Abschließend ist hervorzuheben, dass für eine erfolgreiche Etablierung faunistisch relevanter Lebensräume die fortschreitende zeitliche Entwicklung bei einem möglichst schonenden Unterhaltungskonzept der VF von zentraler Bedeutung ist. Erst das Zusammenspiel beider Faktoren

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

ermöglicht die Ausprägung ufertypischer Habitatstrukturen (z. B. Gehölzstrukturen für die Avifauna).

Tabelle 18: Bewertung der ökologischen Wirksamkeit der Maßnahmen in den einzelnen Versuchsfeldern jeweils für die untersuchten Organismengruppen Vögel, Reptilien, Laufkäfer, Spinnen in Wertstufen 1 (sehr gering), 2 (gering), 3 (mittel), 4 (hoch), 5 (sehr hoch) und die daraus abgeleitete Gesamtbewertung „terrestrische Fauna“ (bei doppelter Gewichtung der unterstrichenen Wertstufen). Die farbliche Kodierung steht für: orange= geringwertig (Wertstufe 2), gelb= mittelwertig (Wertstufe 3), grün= hochwertig (Wertstufe 4)

Uferschutzmaßnahme/Bauweise	Terrestrischer Bereich				
	Vögel	Reptilien	Laufkäfer	Spinnen	Gesamt terrestrisch
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen VF 1	<u>2</u>	2	<u>3</u>	<u>3</u>	2,6
Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung VF 2	<u>5</u>	2	<u>3</u>	<u>2</u>	3,1
Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung VF 3	<u>5</u>	2	<u>4</u>	<u>1</u>	3,1
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken VF 4	<u>1</u>	4	<u>4</u>	<u>2</u>	2,6
Rückbau der Steinschüttung, Röhrichtgabionen/Steinmatratzen VF 5	<u>1</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	3,0
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Alginat VF 6	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>3</u>	1,8
Rückbau der Steinschüttung, Pflanzmatten/Kokosmatte über Nassansaat VF 7	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	4,3
Erhöhung des vorhandenen Steinwalls; vorhandene Steinschüttung und Pflaster mit Röhrichtbewuchs VF 8	<u>4</u>	<u>1</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	3,5
Rückbau der Steinschüttung, ohne Böschungsschutz, Weidensetzstangen auf der Böschungsplanie VF 9	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>4</u>	3,5
Steinschüttung als Referenz (bereits vorhanden vor der Umgestaltung)	1	2	2	2	1,8

Aquatische Fauna

Für die aquatischen Organismengruppen (Fische und Makrozoobenthos) konnte die ökologische Wirksamkeit der eingebauten Strukturelemente in VF 1 (Flachwasserzone, strömungsberuhigt, Wurzelteller) und VF 4 (Kieseinfüllung, Totholzfaschinen) im Vergleich zur aquatischen Steinschüttung (Referenz) nachgewiesen werden (vgl. Tabelle 19). In der Gesamtbewertung „aquatische Fauna“ entfaltete die Flachwasserzone die höchste ökologische Wirksamkeit (Wertstufe 5). Dennoch sind auch hier die Ergebnisse kritisch zu diskutieren und werden nunmehr als erste positiv nachweisbare Trends eingestuft. Zum einen ist eine unzureichende Aussagekraft der Ergebnisse durch die veranschlagte Einbauhöhe (Mittelwasserniveau) der Maßnahmen und die somit zeitlich eingeschränkte Wirksamkeit auf die Fisch- und Makrozoobenthoszönose zu nennen. Bei sinkenden Wasserständen (unter MW) sowie bei kurzfristigen Wasserstandsschwankungen lässt die ökologische Wirksamkeit der Maßnahmen stark nach. Weiterhin waren die aktuellen Daten aus dem vergleichsweise kurzen Monitoringzeitraum von fünf Jahren durch häufige niedrige Wasserstände beeinflusst, sodass die Wirksamkeit der aquatischen Maßnahmen (insb. für VF 1) durch weitere Erhebungen in Zukunft verifiziert werden sollte. Obwohl entlang der Versuchsstrecke nur in einem vergleichsweise kleinen Bereich aquatisch wirksame Strukturen zum Einsatz kamen, konnten die Zielorganismen dennoch davon profitieren.

Tabelle 19: Bewertung der ökologischen Wirksamkeit der aquatischen Maßnahmen in den Versuchsfeldern 1 und 4 jeweils für die untersuchten Organismengruppen Fische und Makrozoobenthos in Wertstufen 1 (sehr gering), 2 (gering), 3 (mittel), 4 (hoch), 5 (sehr hoch) und die daraus abgeleitete Gesamtbewertung „aquatische Fauna“. Die farbliche Kodierung steht für: rot= sehr geringwertig (Wertstufe 1), gelb= mittelwertig (Wertstufe 3), dunkelgrün= sehr hochwertig (Wertstufe 5)

Bauweise, Strukturelement(e) Versuchsfeld	Aquatischer Bereich		
	Makrozoobenthos	Fische	Gesamt aquatisch
Vorgelagerter Steinwall mit Flachwasserzone, strömungsberuhigt, Wurzelteller VF 1	5	5	5
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies, Totholzfaschinen MW-0,5m bis MW VF 4	3	3	3
Keine Maßnahmen im aquatischen Bereich (Referenz)	1	1	1

Dem entgegenstehend zeigt die geringe Größe der VF, ein vergleichsweise kurzer Monitoringzeitraum, die nicht ausreichende Struktur- und Substratvielfalt unterhalb des Mittelwasserniveaus sowie die nur minimale Vernetzung zwischen dem aquatischen und terrestrischen Lebensraum (VF 1 und 4) noch große ökologische Defizite für die ufernahe Fauna.

5.4 Vegetation und Fauna – eine Synthese

5.4.1 Hintergrund

Für die ökologische Wirksamkeit von Maßnahmen sind funktionale Beziehungen zwischen Vegetation und Fauna wichtig. Der Blick auf die Funktion stellt Fragen wie: Was leistet die Vegetation für die Tierwelt, wozu ist sie gut? Stellen die technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen geeignete Lebensraumstrukturen für die untersuchten Tiergruppen bereit und werden diese Strukturen seitens der Fauna angenommen? Da es vielfältige Vernetzungen zwischen Vegetation und Fauna gibt, können diese Fragen nur exemplarisch anhand einer Auswahl an interessanten Trends aus der ersten fünfjährigen Monitoringphase beantwortet werden (Kap. 5.4.2 bis 5.4.6). Es folgt in Kap. 5.4.7 der Versuch, das Potenzial der einzelnen Versuchsfelder zur Bereitstellung geeigneter Lebensraumstrukturen und somit zur Erhöhung der Habitatqualität für weitere Organismengruppen als die im Monitoring untersuchten Zielorganismen anhand des Kriteriums „Heterogenität der Versuchsfelder“ abzuleiten.

5.4.2 Laufkäfer und Vegetation

Besonders deutlich war der Zusammenhang zwischen der Gesamtdeckung der Vegetation (als Maß für die Pflanzenmenge) und der Besiedelung durch ufertypische Laufkäferarten, sodass hierzu ein statistisches Modell erstellt werden konnte (Bild 57). Daraus geht hervor, dass sich mit zunehmender Gesamtdeckung der Vegetation der Anteil ufertypischer Laufkäferarten erhöhte. Dies ist anhand der Isolinien, der Richtung des schwarzen Pfeils und der Konzentration ufertypischer Arten bei hohen Werten der Isolinien zu erkennen. Vor allem die Versuchsfelder 2, 3 (Weidenspreitlagen) und 8 (Steinschüttung/ Pflasterung mit Steinwall) zeigten eine hohe Pflanzendeckung mit einem hohen Anteil ufertypischer Laufkäfer. Die VF 2 und 3 wurden mit strukturbildenden Gehölzen bepflanzt, in VF 8 wurde ufertypisches Röhricht gefördert, Gehölze waren bereits im Ist-Zustand auf der angrenzenden Böschung bereits vorhanden. Betrachtet man statt des Deckungsgrades der gesamten Vegetation nur den der Baum- und Strauchschicht (nicht im Bild dargestellt), ergeben sich ähnliche Muster, was die Bedeutung der Gehölze für die Besiedelung durch ufertypische Laufkäfer belegt. Röhricht und dichte Gehölzstrukturen boten somit ein hohes Potenzial zur Bereitstellung von geeigneten Habitaten für ufertypische Laufkäferarten. Als ursächlich können hier die höhere Beschattung und damit eine höhere Bodenfeuchte angenommen werden, ohne dass diesbezüglich Daten erhoben wurden.

Auf der anderen Seite des Gradienten, mit einem geringen Anteil ufertypischer Laufkäferarten und gleichzeitig vergleichsweise geringer Vegetationsdeckung stehen die VF 5 (Röhrichtgäbionen, Steinmatratzen) und 7 (Pflanzmatten). Hier nahm die Pflanzenmenge der unteren und mittleren Böschungszone aufgrund des häufigen Einstaus und der gleichzeitig wirkenden hydraulischen Belastung im Monitoringzeitraum ab bzw. - im Fall der Steinmatratzen - entwickelte sich in dieser Zone kaum Bewuchs. Somit bestanden im Jahr 2017 keine günstigen Habitatstrukturen mehr für ufertypische Laufkäfer. Die Wirkung der Sanierung der Maßnahmen (Steinauflage) im VF 5 und 7 bleibt abzuwarten.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Die VF 1 (begrünte Steinschüttung), 6 (Alginat) und die Referenz liegen in Bild 57 ganz außen, da sie durch eine geringe Individuenzahl charakterisiert sind. Die Kombination aus Alginat und Nassansaat (VF 6) scheiterte bereits nach kurzer Zeit, und es ist die ursprüngliche Steinschüttung auf der Böschung vorhanden. In der Referenz nimmt die unbewachsene Steinschüttung in der mittleren und unteren Böschungszone einen hohen Flächenanteil ein. Zwischen den Pflanzgräben der begrüneten Steinschüttung (VF 1) befindet sich ebenfalls Steinschüttung, die gepflanzten Gehölze stellen aber offensichtlich (wie in den VF 2, 3 und 8) einen positiven Faktor dar, da bei geringer Individuenzahl ein hoher Anteil ufertypischer Arten und Individuen vorhanden ist.

Abschließend sei noch angemerkt, dass es eine Reihe ufertypischer Laufkäferarten gibt, die offene, vegetationsarme Standorte bevorzugen (Kleinwächter et al. 2017). Hierbei handelt es sich um sommerlich trockenfallende Kies-, Sand- und Schlammflächen an ungesicherten, naturnahen Ufern zwischen dem mittleren Niedrig- und Mittelwasser (FFH-Lebensraumtyp 3270). Dieser Standorttyp zeichnet sich durch hoch spezialisierte, an die hydromorphologische Dynamik des Fließgewässers angepasste Pflanzen- und Tierarten aus. In der Versuchsstrecke ist dieser Standorttyp allenfalls im VF 9 (ohne Böschungsschutz) sehr kleinräumig realisiert. Ein positiver Trend hinsichtlich der Förderung dieser Laufkäferarten konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Technisch-biologische Ufersicherungen sind zur Förderung dieses Lebensraumes nur bedingt geeignet. Sie können aber ggf. in einem räumlichen Nebeneinander gesicherter und ungesicherter Uferbereiche als Sicherungselemente eingesetzt werden.

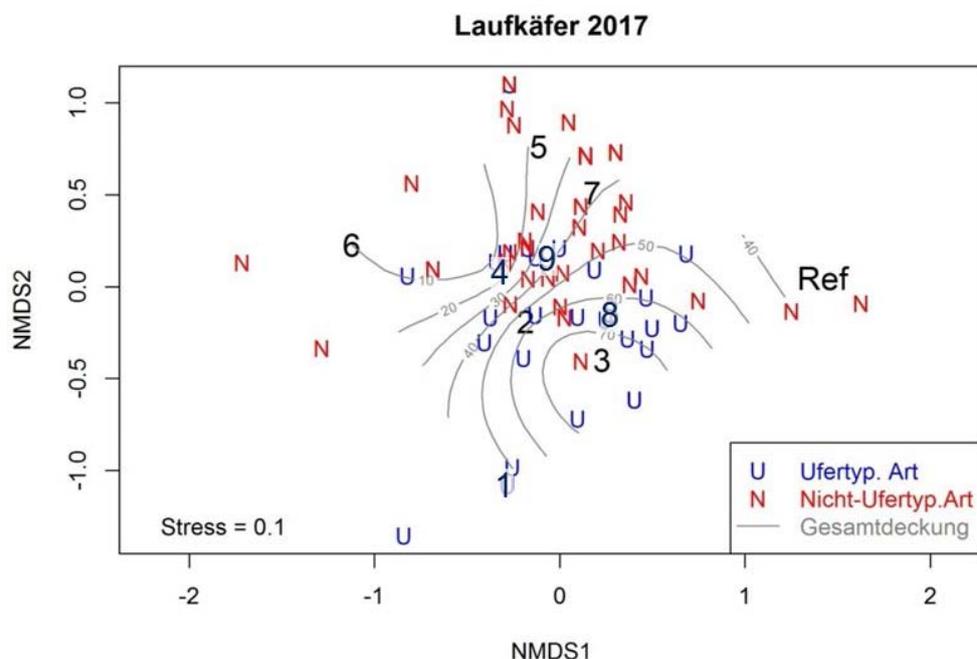


Bild 57: Nichtmetrische multidimensionale Skalierung (NMDS) der Laufkäfergemeinschaften der VF 1 – 9 (schwarze Zahlen) und der Referenz (Ref) im Jahr 2017. Jeder Buchstabe repräsentiert eine Art, differenziert nach ufertypisch (U = blau) und nicht-ufertypisch (N = rot). Die Isolinien (graue Linien) zeigen den Gesamt-Deckungsgrad durch die Vegetation (2016). Der Gradient von Versuchsfeldern mit geringer Deckung zu solchen mit hoher Deckung wird durch den schwarzen Pfeil dargestellt. Zur Interpretation der NMDS-Diagramme vgl. TextBox 1 in Kap. 5.2.3.

5.4.3 Avifauna, Reptilien und Vegetation

Ein Habitatpotenzial für Brutvögel besaßen in erster Linie bestehende und sich entwickelnde Gehölzstrukturen, die im Wachstum bereits etwas weiter fortgeschritten waren (Kap. 5.3.2). Solche dichten, schwer durchdringbaren Strukturen, wie sie in den VF 1, 2, 3 und 8 bestehen, hielten auch Erholungssuchende, Angler und Hunde fern. In den eher gehölzarmen, gut zugänglichen Versuchsfeldern war dies nicht der Fall, sodass diese Versuchsfelder ihre potenziell positive Wirkung auf Vögel des Offenlandes damit kaum entfalten konnten. Die Wirkung von Vegetationsstrukturen, die offene Versuchsfelder zum Weg hin abschirmen, wie etwa die Heckenlage auf der Böschungsoberkante des VF 5 (Röhrichtgabionen, Steinmatratzen), bleibt abzuwarten. Bereits nach 5 Jahren Entwicklungszeit ist aber zu konstatieren, dass die Heckenlagen die Arten- und Strukturvielfalt erhöhten und durch ihr Blüten und Fruchtangebot für Vögel und Insekten wichtig waren.

Es zeigte sich auch, dass Randstrukturen der Versuchsstrecke, z. B. ein dem VF 7 benachbartes Röhricht, positiv wirkten. Insofern ist die Einbindung technisch-biologischer Ufersicherungen in die Habitatstrukturen der Umgebung wichtig für so mobile Faunenelemente wie die Vogelwelt.

Für Gehölzbrüter, z. B. die Nachtigall, ist es bedeutsam, Gehölze ausreichenden Alters und Größe heranzuziehen. Der technische Anspruch an eine Weidenspreitlage, junge, biegsame Weidenruten auszubilden, die sich bei Strömungsangriff umlegen, um so einen Erosionsschutz zu gewährleisten und bei Erfordernis den Hochwasserabfluss nicht zu behindern, ist nur mit einem regelmäßigen Rückschnitt (ca. alle 5 Jahre) zu erreichen. Dies steht den Habitatansprüchen der Gehölzbrüter entgegen. Die bereits durchgeführte und zukünftige Unterhaltung der gehölzgeprägten Versuchsfelder zielt darauf ab, strukturreiche Gehölzbestände zu entwickeln, die sowohl verkehrlichen als auch ökologischen Ansprüchen gerecht werden.

Die Zauneidechse als häufigste Reptilienart benötigt einen Wechsel aus dichter und fehlender Vegetation, Kleinstrukturen, also etwa liegendes Totholz und Steinflächen mit Sonnenexposition. Diese Verhältnisse waren insbesondere in den VF 5 (Röhrichtgabionen, Steinmatratzen) und VF 4 (Steinschüttung mit Kieseinfüllung und Steinblöcken) realisiert. Im Vergleich der beiden Weidenspreitlagen-Versuchsfelder wurden im VF 2 mit der etwas offeneren Gehölzstruktur Zauneidechsen gesichtet, im dichteren Gehölzbestand des VF 3 erfolgten keine Nachweise.

5.4.4 Blütenreichtum

Aus den vegetationskundlichen Daten des Jahres 2016 wurde der Blütenreichtum der Versuchsfelder abgeleitet, indem zu jeder vorkommenden Art aus der Datenbank BioFlor (Klotz et al. 2002) deren Blumentyp (vgl. Textbox 2), Blütenfarbe und Blütendauer ermittelt wurde. Die Menge eines bestimmten Blumentyps über die Zeit wurde anhand der im Gelände ermittelten Deckung jeder Art eingeschätzt, das Vorhandensein mehrerer Blumentypen zu einer gegebenen Zeit wurde aufsummiert und in die Kategorien „viel-mittel-wenig“ transformiert. Die so ermittelten Blühspektren sind in Bild 58 dargestellt. Sie zeigen das potenzielle Blühverhalten in der Versuchsstrecke, da nicht direkt beobachtet wurde, ob eine Art auch tatsächlich in einer bestimmten Menge über die Zeit blüht. Für präzisere Daten wären intensive Geländebeobachtungen notwendig. Ein

Vergleich verschiedener Bauweisen hinsichtlich ihres Blütenangebotes ist aber durch die hier vorgenommene gröbere Betrachtung möglich.

Aus den Blühspektren des Bildes 58 können Rückschlüsse zur Lebensraumqualität für blütenbesuchende Insekten gezogen werden. In allen Versuchsfeldern wurde im Vergleich zur Referenz ein deutlich höherer Blütenreichtum nachgewiesen. Insbesondere die VF 7 und 5 zeigten eine hohe Diversität der Blüte, was ein günstiges Nahrungshabitat für blütenbesuchende Insekten erwarten lässt. Im VF 7 wurde auch die höchste Diversität an Spinnen nachgewiesen (Kap. 5.3.5), was an der günstigen Raumstruktur der grasig-krautigen Vegetation liegen kann, aber auch am dort vorhandenen Nahrungsangebot. Viele Pflanzenarten blühen im VF 5 und 7 auch noch spät im Jahr. Ein ausgeprägt frühes Blühmaximum zeigten dagegen die von Weiden geprägten Versuchsfelder mit der frühen Tracht der Weidekätzchen. So führt nicht nur das Blühverhalten innerhalb eines Versuchsfeldes, sondern auch das Nebeneinander verschiedener Felder zu einer blumentypenreichen, räumlich und zeitlich hohen Heterogenität des Blütenangebots.

Der Blütenreichtum korrespondiert stark mit dem in Kap. 5.2.3 vorgestellten Artenreichtum, eine Bewertung der ökologischen Wirksamkeit wird daher dort unter Aggregation der beiden Bewertungsaspekte vorgenommen.

TextBox 2: Blumentypen: In Bild 58 sind auf der Ordinate neun Hauptgruppen von Blumentypen nebst Untertypen durch Ziffern dargestellt (nach Kugler 1970 in (Klotz et al. 2002)). In dieser Klassifikation werden die Blütenformen hinsichtlich ihrer Morphologie, der dargebotenen Belohnung (Pollen, Nektar), der Art der Darbietung (z. B. Nektar offen zugänglich oder in der Blüte versteckt), der Zugänglichkeit für Insekten u. a. eingeteilt. So handelt es sich beispielsweise bei Blumentyp 9 um „Pinsel- und Bürstenblumen“, wie sie von Weiden bereitgestellt werden (Weidekätzchen im Frühjahr). In Bild 58 zeigen weidenreiche Versuchsfelder (z. B. VF 2+3) im Frühjahr ein ausgeprägtes Blühmaximum in Gelb (Silber-Weide) und Magenta (Purpur-Weide). Scheibenblumen mit weitgehend verborgenem Nektar gehören zu Blumentyp 1.2b. Hier zeigt die in vielen Versuchsfeldern präsente Haselblatt-Brombeere mit weißer Blüte einen deutlichen Blühaspekt von Mai bis Juli.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

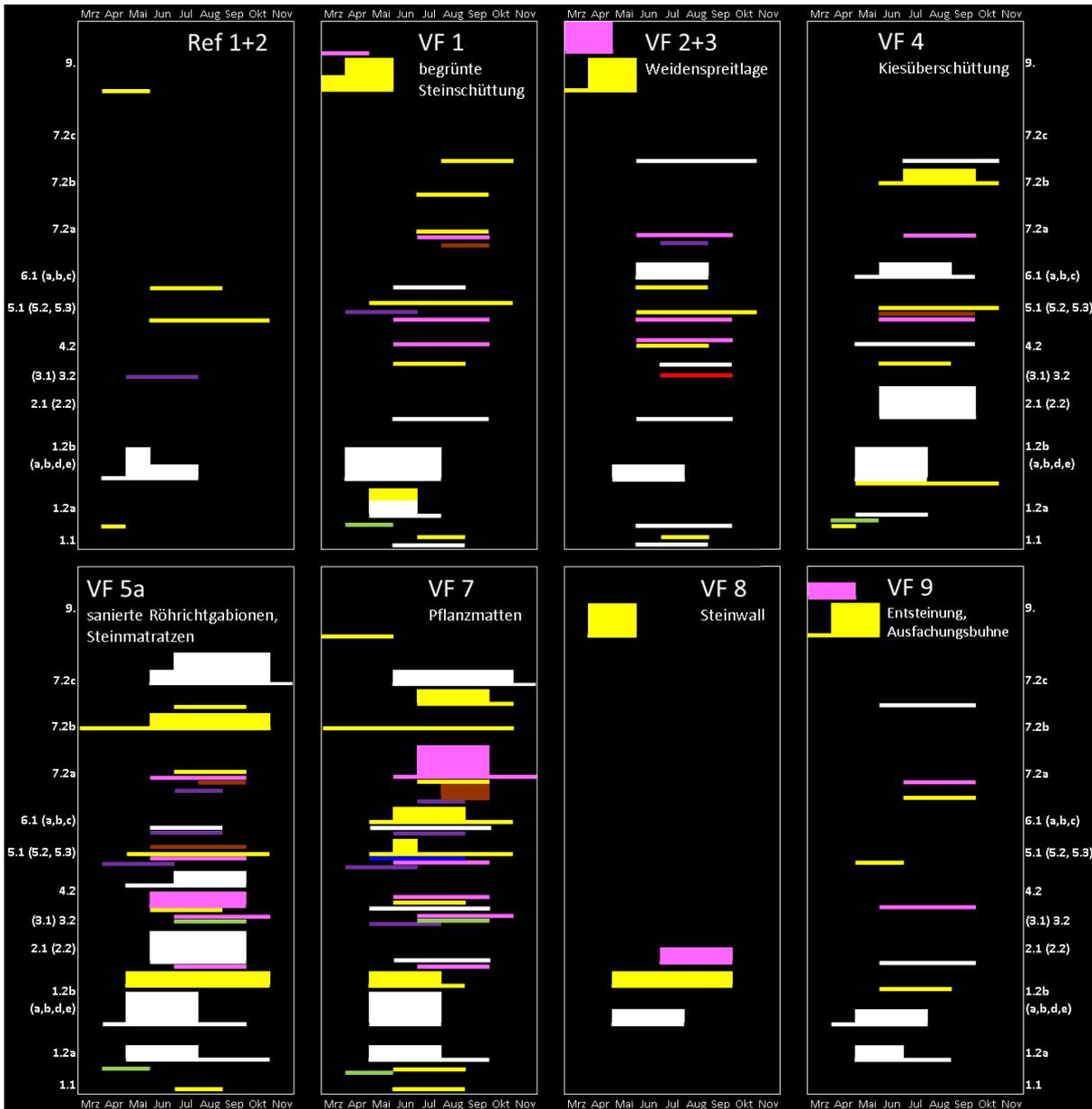


Bild 58: Blütenreichtum in den einzelnen Versuchsfeldern und der Referenzstrecke, Ziffern auf der Ordinate: Blumentypen (vgl. Fotos), Abszisse: Zeit (Monate), Balkenfarbe: Blütenfarben, Höhe der Balken: Blütenmenge, Länge der Balken: Dauer der Blüte (Fotos: BfG: Katja Behrendt (5.1, 7.2a/b), Hans-Werner Herz (2.1, 9.), Michael Schäffer (4.1), Krisztina Scholz (1.1, 1.2a, 6.1), Andreas Sundermeier (1.2b), Yasmin Wingender (3.1, 7.2c))

5.4.5 Totholzeintrag

Der Einfluss des eingebauten Totholzes auf Fische und Makrozoobenthos wurde im Rahmen des Monitorings untersucht, nicht jedoch der Einfluss von Totholzstrukturen (u. a. abgestorbene Pflanzenteile, Treibselansammlungen) auf die terrestrische Fauna. Insbesondere die gehölzgeprägten Bauweisen begrünzte Steinschüttung und Weidenspreitlagen (VF 1, 2 und 3) begünstigen den spontanen Eintrag von Totholz, welches eine entsprechend positive Wirkung auf Totholzbewohner zeigen dürfte. So wurden als holzzeretzende Pilze im VF 1 der Schwefelporling (*Laetiporus sulphureus*, Bild 59), im VF 2 der Spaltblättling (*Schizophyllum commune*) nachgewiesen. Solche Pilze arbeiten das Holz für Folgeorganismen auf. Die Dynamik des Ein- und Austrags von Totholz und seine Wirkung hinsichtlich Strukturanreicherung und als Lebensgrundlage für holzzeretzende Organismen wären Gegenstand spezieller Untersuchungen.

5.4.6 Weiden als Wirtspflanzen für spezialisierte Insekten

Die gepflanzten Weiden waren von einer Reihe Insektenarten besiedelt, die ein enges Wirtspflanzenspektrum aufweisen. Auch wenn zu diesem Themenkomplex lediglich Zufallsbeobachtungen vorliegen, zeigten diese doch, dass die gepflanzten Bestände in Nahrungsnetze eingebunden sind und sich die vorgestellten Arten in den Versuchsfeldern reproduzieren. An den Purpur-Weiden in den Weidenspreitlagen der VF 2 und 3 fanden sich regelmäßig die Gallen der Gallwespe *Pontania virilis*, die nur an dieser Weidenart vorkommen (Bild 60). Die Insekten induzieren die als Galle sichtbare Wucherung an der Pflanze, damit deren Larven in der Galle Schutz und Nahrung finden. Viele gallbildende Organismen haben komplexe Lebenszyklen (Bellmann 2017).

Ausschließlich an Weiden lebt die Weidenschäumzikade (*Aphrophora spec.*, Bild 61), die in VF 9 an Weidensetzstangen vorkam. Raupen der Weidenblattwespe (*Nematis salicis*, Bild 62) wurden im VF 1 auf Weiden in der begrünnten Steinschüttung beobachtet. Der Unterschied zu den Referenzstrecken dürfte hier quantitativer Natur sein, da dort auch Weiden vorkommen, allerdings in geringerer Menge und damit vermutlich auch mit einer geringeren Menge der sie besiedelnden Organismen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020



*Bild 59: Totholzablagerung in VF 1 (begrünte Steinschüttung) mit Befall des Schwefelporlings (Pfeil)
(Foto Katja Behrendt, BfG)*



*Bild 60: Galle der Gallwespe *Pontania virilis* auf Purpur-Weide in Weidenspreitlagen des VF 3
(Foto Andreas Sundermeier, BfG)*



Bild 61: Weidenschumzikaden auf Weiden, die aus Setzstangen hervorgegangen sind (VF 9).



*Bild 62: Raupen der Weidenblattwespe in VF 1
(Beide Fotos Katja Behrendt, BfG)*

5.4.7 Zusammenfassende Synthese-Bewertung

Anhand der hier vorgestellten schlaglichtartigen Beispiele lässt sich konstatieren, dass die technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen geeignete Lebensraumstrukturen für die untersuchten terrestrischen Tiergruppen bereitstellen und diese Strukturen seitens der Fauna auch angenommen werden. Die funktionale und strukturelle Diversität aller noch bestehenden Versuchsfelder ist höher als die der Referenz. Die Ergebnisse und Beobachtungen legen nahe, dass sich in den ersten Entwicklungsjahren ein Potenzial zur Etablierung vielfältiger Nahrungsnetze eingestellt hat. Dieses kann durch eine wie auch bisher praktizierte Unterhaltung, die die Belange der Biodiversität berücksichtigt, erhalten und weiter gefördert werden.

Auch wenn nur die Laufkäfer als einzige terrestrische Insektengruppe systematisch untersucht wurden, zeigen die obigen Betrachtungen dennoch das Potenzial der technisch-biologischen Ufersicherungen zur Förderung terrestrischer Insekten, sowohl hinsichtlich qualitativer (Artenzahlen) als auch quantitativer Aspekte (Insektenmenge). Beide Aspekte sind gemäß des Aktionsprogramms Insektenschutz der Bundesregierung zur Förderung von Insekten zu berücksichtigen (BMU 2018).

Das Nebeneinander verschiedener Strukturen sowie die Vernetzung der Versuchsstrecke mit der umgebenden Landschaft sind für mobile Organismengruppen wichtig. Manche Tiergilden (gehölzbrütende Vögel, an Weiden fressende Insekten) können auch durch die Tolerierung von mehr und älteren einheimischen Gehölzen in einer konventionellen Ufersicherung gefördert werden, wenn diese unter Sicherheitsaspekten benötigt wird.

Von der ökologischen Wirksamkeit der Maßnahmen profitieren die aquatische Fauna und die Arten, die auf häufig überflutete Lebensräume unter Mittelwasser spezialisiert sind, kaum. Gerade vor dem Hintergrund, einen Beitrag zur Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie leisten zu können, muss künftig der Gestaltungsraum für Maßnahmen unterhalb der Mittelwasserlinie deutlich erweitert werden. Hier müssen andersartige Maßnahmen zum Einsatz kommen (vorgelagerter Wellenschutz, naturnahes Substrat mit Zulassen der Morphodynamik, Totholzverwendung, Uferabflachung).

Für die zusammenfassende Bewertung der hier genannten Aspekte wird das Kriterium „Heterogenität der VF“ anhand folgender beschreibender Parameter definiert:

- Vielfalt unterschiedlicher Wuchsformen (Gehölze/Krautige)
- Vielfalt bereitgestellter Strukturelemente (Totholz, Treibselansammlungen, unterschiedliche Substrate)
- Mischungsverhältnis offene/bewachsene Bereiche

Dabei ist die Annahme und somit bewertungsrelevant: Je heterogener das Versuchsfeld bzw. die Maßnahme (Flachwasserzone/Heckenlagen) im Hinblick auf die genannten Parameter sind, desto mehr unterschiedliche Artengruppen profitieren von der bereitgestellten Habitatqualität (Nahrungs-, Fortpflanzungshabitat, Lebensstätte). Dabei geht der Ansatz über die untersuchten Tierartengruppen hinaus und schätzt das Potenzial anhand der Heterogenität der Versuchsfelder für ein breiteres Tierartenspektrum ab. Die Bewertung der Heterogenität der einzelnen VF wird nachfolgend verbal-argumentativ hergeleitet und stützt sich ausschließlich auf das Expertenwissen.

Die höchste Wertstufe erhält demnach VF 9 (ohne Böschungsschutz). Hier finden bei hohen Wasserständen Um- und Ablagerungsprozesse statt, die unterschiedliche Substratklassen (große Steine, Sand, Kies) hervorbringen. Durch die Maßnahme selbst wurden Weiden auf der Böschungsplanie eingebracht. Weitere Gehölze haben sich spontan angesiedelt. Zu Zeiten niedriger Wasserstände kommen einjährige Pionierfluren auf.

Mit Wertstufe 4 werden VF 1 (begrünte Steinschüttung) und VF 8 (Steinwall) bewertet. Im VF 1 wechseln unterschiedliche Gehölzformen aufgrund der Unterhaltungsstrategie (Kopf-, Baum-, Strauchweiden). Gehölze der Hartholzaue treten hinzu. Aufgrund der Maßnahme bringt das Feld einen Wechsel von bewachsenen Pflanzgräben zu überwiegend unbewachsenen Steinschüttungsbereichen hervor, in die viel Totholz und Treibsel eingetragen wird. Im Schutz des Steinwalls konnten sich erste Röhrichtinitiale ansiedeln. Zu Zeiten niedriger Wasserstände erscheinen dort einjährige Uferpionierfluren. Im VF 8 ist der Röhrichtbestand hinter dem Steinwall von bereits vorher vorhandenen Kopfweiden durchsetzt. Im Schutz des Steinwalls kommt es regelmäßig zu Schlamm-, Totholz- und Treibselansammlungen. Um die Kopfweiden herum befinden sich offene Pflasterbereiche. Eingebettet ist der Maßnahmenbereich in einen Wechsel von dicht bis wenig bewachsener Pflaster- und Steinböschung mit z. T. hohem Anteil an Gehölzen. Der Steinwall in VF 8 stellt allerdings eine Struktur dar, die den Übergang von aquatischen zu terrestrischen Lebensräumen, also die laterale Durchgängigkeit beeinträchtigt. Daher wurde keine Wertstufe 5 vergeben.

Wertstufe 3 erhalten die VF 2 und 3 (Weidenspreitlagen) und VF 7 (Pflanzmatten). Die Weidenspreitlagen halten durch ihren dichten Wuchs bei hohen Wasserständen sehr viel Totholz und Treibsel zurück, das sich zwischen den Weiden ablagert. Durch die Unterhaltung wechselt die Alters- und somit Höhenstruktur der Weiden. Aufgrund des Schattendrucks konnte sich jedoch keine Krautschicht etablieren. Offene, besonnte Bereiche bilden sich nur in Abhängigkeit der Rückschnittintensität. VF 7 erhält die Wertstufe aufgrund der Einheitlichkeit des Pflanzenwuchses. Hier dominieren die sukzessive eingewanderten in Kombination mit den gepflanzten Arten, und erste Gehölzinitiale wandern in das VF ein. Die eingebauten hölzernen Querriegel und die einlagige Wasserbausteinschicht im sanierten Bereich erhöhen die Strukturvielfalt.

In den VF 4 (Kieseinbringung), VF 5 (Röhrichtgabionen, Steinmatratzen) und in der Referenz herrschen Wasserbausteine (größere und kleinere Steinklassen) als einheitlicher Untergrund vor, womit die Struktur der Versuchsfelder einheitlich ist. Da in VF 4 noch Totholzfaschinen und Steinblöcke die Böschung strukturieren, wurde hier die Wertstufe 2 vergeben, das VF 5 und die Referenz erhalten die Wertstufe 1.

Die Flachwasserzone als Sonderstruktur erhält die Wertstufe 5. Als Totholzstrukturen wirken die eingebrachten Baumstämme mit Wurzelteller. Im Schutz des Steinwalls konnten sich erste Wasserpflanzen ansiedeln, und es ergaben sich positive Wirkungen auf die aquatische Fauna. Die gepflanzten Weidensetzstangen reichen zusätzlich mit ihren Wurzeln ins Wasser und bilden bei hohen und lang andauernden Wasserständen stammbürtige Adventivwurzeln. Oftmals sammelt sich Treibsel hinter dem Steinwall und im Laufe der Zeit bildete sich eine mehrere Zentimeter dicke Substratablagerung auf den Wasserbausteinen. Für die nur linienförmig eingebrachten Heckenlagen kann keine Bewertung vorgenommen werden. Eine Übersicht aller Bewertungen für das Kriterium „Heterogenität“ ist Tabelle 20 zu entnehmen.

Tabelle 20: Bewertung der Versuchsfelder hinsichtlich ihrer Heterogenität

FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante

Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)

Kriterium	FWZ	HL	VF1	VF2	VF3	VF4	VF5 _RG	VF5_ SM	VF7	VF8	VF9	Ref
Heterogenität	5	-	4	3	3	2	1	1	3	4	5	1

5.5 Verwendung künstlicher und naturferner Materialien

Mit Blick auf die ökologische Wirksamkeit der technisch-biologischen Ufersicherungen müssen auch die verwendeten Baumaterialien bei der Bewertung Berücksichtigung finden (Tabelle 21). Bei der Bewertung wurde davon ausgegangen, dass eine Bauweise, in der im Vergleich zur Referenz weder mehr noch weniger künstliche oder naturferne Materialien verwendet wurden, die mittlere Wertstufe 3 erhält. Die Bauweisen bzw. Versuchsfelder, die ohne künstliche oder naturferne Materialien auskamen, erhielten die höchste Wertstufe 5. Dies waren die Heckenlagen (HL) und das Versuchsfeld ohne Böschungsschutz (VF 9). Die Wertstufe 4 erhielten die Weidenspreitlagen (VF 2 und 3), in denen Draht zur Befestigung verwendet wurde.

Im VF 1 (begrünte Steinschüttung) und der Referenz blieb die Menge der Wasserbausteine gleich, weitere Materialien wurden nicht eingebracht, was mit Wertstufe 3 bewertet wurde. Für den Wellenschutz der Flachwasserzone (FWZ), die Einzelsteine in VF 4 (Kieseinfüllung), und den Steinwall des VF 8 wurden mehr Steine als im Ist-Zustand gebraucht. Hieraus ergibt sich die Wertstufe 2, weil die Wasserbausteine zwar Natursteine sind, jedoch am Rhein nicht natürlich vorkommen.

In den Steinmatratzen (VF 5b) und Röhrichtgabionen (VF 5a) wurde Polypropylen (thermoplastischer Kunststoff) bzw. verzinkter Draht zur Ummantelung der Steine verwendet. Steine kamen ebenso zum Einsatz, allerdings weniger und kleinere Steine als in der konventionellen Steinschüttung. Im VF 7 (Pflanzmatten) kamen teilweise ein Kunststoff-Geotextil zum Einsatz sowie ein feines Stützgerüst aus Kunststoff für den Kokosanteil in den Matten, der zur Verstärkung des Erosionswiderstandes eingebaut wurde. Zur Befestigung wurde Draht verwendet. Zudem wurden Wasserbausteine zur Abdeckung und damit Sanierung der schadhafte Röhrichtgabionen und Pflanzmatten verwendet. VF 5 und 7 erhielten somit die schlechteste Wertstufe (1).

Tabelle 21: Bewertung hinsichtlich der Verwendung künstlicher und naturferner Materialien

FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante

Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)

Kriterium	FWZ	HL	VF1	VF2	VF3	VF4	VF5 _RG	VF5_ _SM	VF7	VF8	VF9	Ref
Materialien	2	5	3	4	4	2	1	1	1	2	5	3

5.6 CO₂-Speicherung der Bauweisen

Im Kap. 4.2.1 und Kap. 4.2.3 wurden die Wurzelgrabungen in den VF 3 (Weidenspreitlage) und VF 7 (Pflanzmatten) vorgestellt und unter dem Standsicherheitsaspekt behandelt. Neben der Wurzel trockenmasse wurde auch die oberirdische Trockenmasse der Bauweisen bestimmt. Bild 63 (links) zeigt die Trockenmasse im VF 3 im Vergleich der Jahre 2012 (am Ende der ersten Vegetationsperiode nach Einbau) und 2017, gemittelt über alle untersuchten Proben. In Bild 63 (rechts) ist die mittlere ober- und unterirdische Trockenmasse aller Probestellen im VF 7 im Jahr 2017 dargestellt, differenziert nach verschiedenen Lebensformen.

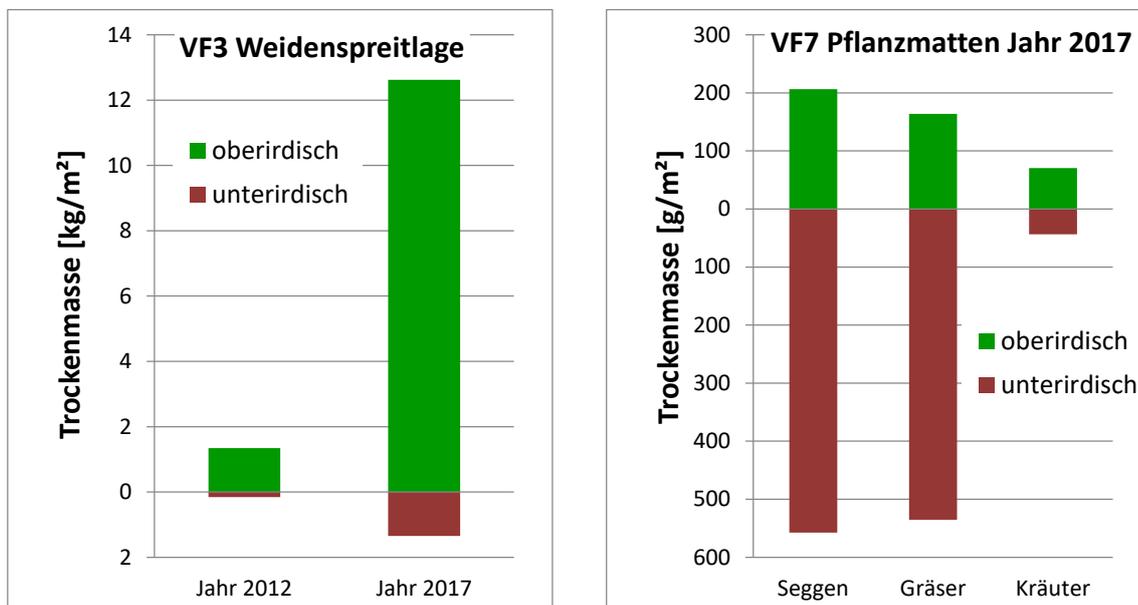


Bild 63: Ober- und unterirdische Trockenmasse. Links VF 3 (Weidenspreitlage) im Vergleich der Jahre 2012 und 2017. Rechts VF 7 (Pflanzmatten) im Jahr 2017, getrennt nach Lebensformen. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinate. Grafik nach Daten von (Schneider 2012), (Ziegenhorn 2017), (Heinzner 2017a, 2017b).

Aus dem Trockengewicht wurde über die Kohlenstoffgehalte das in der Biomasse gebundene CO₂ berechnet. Die CO₂-Speicherleistung gilt gemäß (Millennium Ecosystem Assessment 2005) als klimaregulierende Ökosystemleistung. Unter Berücksichtigung der Versuchsfeldgröße sind im gehölzreichen VF 3 21.700 kg CO₂ gespeichert, im gras-/krautreichen VF 7 1.800 kg, insgesamt also rund 23 Tonnen CO₂. Um diesen Wert als klimaregulierende Ökosystemleistung einzuordnen, wird ein Vergleich mit dem Klimamodell von (Notz & Stroeve 2016) herangezogen. Gemäß ihren Berechnungen schwindet das sommerliche arktische Meereis durch jede zusätzlich freigesetzte Tonne CO₂ um 3 m². Setzt man die Menge des gebundenen CO₂ mit dem Ausstoß von Pkws im Stadtverkehr in Beziehung, so war in der ober- und unterirdischen Pflanzenmasse des VF 3 im Jahr 2017 der CO₂-Ausstoß von 100.000 Pkw-Kilometern Stadtverkehr gebunden, im VF 7 ein Äquivalent von 8.500 Kilometern (Berechnet für einen Mittelklassewagen mit angenommenem Verbrauch von 8,7 l Benzin bzw. 6,8 l Diesel pro 100 km Stadtverkehr, im Mittel 21 kg CO₂-Ausstoß pro 100 km – berechnet nach dem Dekra-CO₂-Verbrauchsrechner www.co2online.de). Unter Berücksichtigung der Entwicklung der Weidenspreitlage im VF 3 lässt sich als Faustregel sagen, dass der

Biomassezuwachs von 1 m² Weidenspreitlage pro Jahr den CO₂ - Ausstoß von 20 km Stadtfahrt eines Mittelklasse-PKW bindet.

Auf der Basis der Biomasseuntersuchungen beider Versuchsfelder und der Daten zur Vegetationsdeckung des Jahres 2016 lässt sich die CO₂-Speicherung je Flächeneinheit für alle Versuchsfelder in Relation zueinander bewerten (Tabelle 22). Die Weidenspreitlagen und begrünte Steinschüttung (VF 1-3) schneiden mit den Wertstufen 4 und 5 am besten ab. Das VF 2 mit den lichterem Weidenbeständen wurde gegenüber dem dichter bewachsenen VF 3 um eine Wertstufe abgewertet. Die Heckenlagen und die Referenz erreichten wegen des Gehölzanteils Wertstufe 3. Das am dichtesten mit Gräsern und Kräutern bewachsene VF 7 (Pflanzmatten) wurde der gleichen Wertstufe zugeordnet, lückiger mit Gräsern und Kräutern bewachsene VF wurden in die Wertstufen 2 und 1 gestellt. Die Flachwasserzone mit ihrem Wasserpflanzenbewuchs, der nur eine sehr geringe Trockenmasse besitzt, wurde nicht bewertet.

Tabelle 22: Bewertung der Versuchsfelder hinsichtlich der Ökosystemleistung CO₂-Speicherung
FWZ: Flachwasserzone, HL: Heckenlage auf Böschungsoberkante
Wertstufen: sehr hochwertig (5), hochwertig (4), mittelwertig (3), geringwertig (2), sehr geringwertig (1)

	FWZ	HL	VF1	VF2	VF3	VF4	VF5 _RG	VF5 _SM	VF7	VF8	VF9	Ref
CO ₂ - Speicherung	-	3	4	4	5	1	1	2	3	3	2	3

5.7 Ökologische Gesamtbewertung

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus den ökologischen Untersuchungen an der Versuchsstrecke aus den vorhergehenden Kapiteln (5.1 – 5.6) im Sinne einer ökologischen Gesamtbewertung zusammengeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle Bewertungen der Ergebnisse relativ zueinander vergeben wurden und unter den bestehenden Randbedingungen der Versuchsstrecke am Rhein zu betrachten sind. Unter anderen Randbedingungen können sich die an der Versuchsstrecke getesteten technisch-biologischen Ufersicherungen anders entwickeln.

5.7.1 Ziele

Ein Ziel der ökologischen Gesamtbewertung ist die Integration aller ökologischen Teilbewertungen zu den Maßnahmenkombinationen in den Versuchsfeldern 1 bis 9 der Versuchsstrecke. Sie ermöglicht eine Reihung der getesteten Maßnahmen entsprechend ihrer ökologischen Wirksamkeit.

Die ökologische Gesamtbewertung bildet nachfolgend die Basis für eines von drei Kriterien (Ökologie, Standsicherheit, Kosten), die in Kapitel 7 in eine integrierende Gesamtbewertung der Versuchsstrecke eingehen. Ferner wird sie in Kapitel 8 für die Übertragung gewonnener Erkenntnisse auf andere Randbedingungen herangezogen.

5.7.2 Methoden

Im Folgenden wird die methodische Herangehensweise zur Ermittlung der ökologischen Gesamtbewertung erläutert. Grundsätzlich wird dabei in zwei Bewertungen unterschieden:

- Gesamtbewertung terrestrische Ökologie
- Gesamtbewertung aquatische Ökologie

Kriterien

Für die terrestrische und für die aquatische Gesamtbewertung wurden die folgenden abiotischen und biotischen Kriterien herangezogen:

Gesamtbewertung terrestrische Ökologie (Terrestrischer Bereich der VF 1-9 und Referenz):

- „Vegetation“ (Kap. 5.2.9)
- „Terrestrische Fauna“ (Kap. 5.3.8)
- „Heterogenität“ (Kap. 5.4.7)
- „Verwendete Materialien“ (Kap. 5.5)
- „CO₂-Speichervermögen“ (Kap. 5.6)

Gesamtbewertung aquatische Ökologie (Aquatischer Bereich der VF 1 und 4 und Referenz):

- „Aquatische Fauna“ (Kap. 5.3.8)
- „Vegetation Flachwasserzone“ (Tabelle 14)

Da aquatisch wirksame Strukturen nur in VF 1 (Steinwall mit Flachwasserzone) und in VF 4 (Totholzfaschinen) umgesetzt wurden, war in den übrigen Versuchsfeldern keine ökologische Wirksamkeit im aquatischen Bereich zu erwarten. Mögliche positive Effekte der terrestrischen Maßnahmen auf den aquatischen Lebensraum sind aufgrund der vergleichsweise kurzen Entwicklungszeit von fünf Jahren in Kombination mit teilweise intensiven Unterhaltungsarbeiten als sehr gering einzustufen und daher für die ökologische Gesamtbewertung vernachlässigbar.

Ermittlung ökologischer Gesamtbewertungen

Für jedes Versuchsfeld sowie für die jeweiligen Referenzbereiche (terrestrisch und aquatisch) wurde unter Berücksichtigung aller genannten Kriterien jeweils ein gewichteter Mittelwert gebildet. Die Wichtung der eingehenden Kriterien erfolgte in Abhängigkeit von der Frage, ob

- a) für ein Kriterium eine vertiefte Datenauswertung basierend auf einem umfangreichen Datenpool zugrunde gelegt werden konnte (doppelte Wichtung),
- b) relevante Informationen aus Begleitdaten (z. B. qualitative Abschätzung des Totholzvorkommens in einem Versuchsfeld während der Vegetationskartierung) beziehungsweise einer gutachterlichen Einschätzung abgeleitet wurden (einfache Wichtung).

Für die Gesamtbewertung der terrestrischen Ökologie der Maßnahmen der Versuchsfelder 1 bis 9 und der Referenz wurden die beiden biotischen Kriterien „Vegetation“ und „Terrestrische Fauna“ doppelt gewichtet, da sie im Fokus des fünfjährigen Monitorings stehend, von zentraler

Bedeutung sind und die Bewertung auf einem umfangreich erhobenen Datenpool basiert. Das biotische Kriterium „Heterogenität“ sowie die abiotischen Kriterien „Verwendete Materialien“ und „CO₂- Speichervermögen“ gehen einfach in die Gesamtbewertung zur terrestrischen Ökologie ein.

Für die Gesamtbewertung der aquatischen Ökologie gingen für das VF 1 (Steinwall mit Flachwasserzone) die beiden Kriterien „Aquatische Fauna“ und „Vegetation Flachwasserzone“ jeweils einfach gewichtet ein. Für die Totholzfaschinen als Sonderstruktur im VF 4 wurde die Bewertung des Kriteriums „aquatische Fauna“ direkt in die Gesamtbewertung der aquatischen Ökologie übernommen, da hier keine weiteren Subkriterien erfasst und bewertet wurden. Letzteres gilt ebenso für die Gesamtbewertung des aquatischen Referenzbereiches ohne Sonderstrukturen.

5.7.3 Bewertung

Die ökologische Gesamtbewertung wird in Tabelle 23 dargestellt. Für die aquatische Ökologie zeigt die durch den vorgelagerten Steinwall entstandene Flachwasserzone in VF 1 (ökologisch aufgewertete Steinschüttung) die höchste ökologische Wirksamkeit, gefolgt von einer mittleren ökologischen Wirksamkeit der unterhalb Mittelwasser liegenden Totholzfaschinen in VF 4. Beide Maßnahmentypen zeigen deutlich positive ökologische Effekte im Vergleich zum Referenzbereich ohne Sonderstrukturen. Für die terrestrische Ökologie ergeben sich drei Gruppierungen: Die VF 4 (ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken) und 5 (Steinmatratzen und Röhrichtgabionen) sowie der Referenzbereich zeigen mit Wertstufe 2 nur eine geringe ökologische Wirksamkeit. Das VF 1 (ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen) wird insgesamt mit Wertstufe 3, einer mittleren ökologischen Wirksamkeit bewertet. Davor reiht sich eine Gruppe von fünf Versuchsfeldern (VF 2, 3 – Weidenspreitlagen, VF 7 – Pflanzmatten, VF 8 – ökologisch aufgewertetes Pflaster, VF 9 – ohne Böschungsschutz, Weidensetzstangen auf Böschungsplanie), die jeweils mit Wertstufe 4 eine hohe ökologische Wirksamkeit in der Summe der betrachteten Kriterien zeigen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 23: Ökologische Gesamtbewertung für alle Maßnahmen in den Versuchsfeldern 1 bis 9 sowie in den Referenzbereichen (Steinschüttung). Wertstufen 1-5, 1 = sehr geringe ökologische Wirksamkeit, 2 = geringe ökologische Wirksamkeit, 3 = mittlere ökologische Wirksamkeit, 4 = hohe ökologische Wirksamkeit, 5 = sehr hohe ökologische Wirksamkeit.

Bewertete Maßnahmen Versuchsfeld (VF)	Vegetation	Terrestrische Fauna	Heterogenität	CO ₂ - Speichervermögen	Verwendete Materialien	Aquatische Fauna	Vegetation FWZ	Gesamtbewertung terrestrische Ökologie	Gesamtbewertung aquatische Ökologie
Flachwasserzone - VF 1						5	5		5
Totholzfaschinen - VF 4						3			3
Steinschüttung -Referenz (aquatisch)						1			1
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen - VF 1	3	3	4	4	3			3	
Weidenspreitlagen - VF 2	4	3	3	4	4			4	
Weidenspreitlagen - VF 3	4	4	3	5	4			4	
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken - VF 4	2	3	2	1	2			2	
Röhrichtgabionen - VF 5a	3	3	1	1	1			2	
Steinmatratzen - VF 5a, VF 5b	3	3	1	2	1			2	
Pflanzmatten - VF 7	5	4	3	3	1			4	
Ökologisch aufgewertetes Pflaster - VF 8	5	4	4	3	2			4	
Ohne Böschungsschutz, Weidensetzstangen auf Böschungsplanie - VF 9	3	4	5	2	5			4	
Steinschüttung - Referenz (terrestrisch)	2	2	1	3	3			2	

5.7.4 Fazit

Basierend auf einer Vielzahl definierter ökologischer Kriterien und Subkriterien konnte eine Gesamtbewertung der ökologischen Wirksamkeit für den aquatischen sowie für den terrestrischen Bereich, im Sinne einer Reihung der Maßnahmen an der Versuchsstrecke, vorgenommen werden. Es wird deutlich, dass der Großteil der Maßnahmen einen ökologischen Mehrwert gegenüber der konventionell gesicherten Steinschüttung (Referenz) schafft, insbesondere dort, wo zusätzlich Maßnahmen im aquatischen Bereich umgesetzt wurden. Dabei zeichnet sich für den terrestrischen Bereich der Trend ab, dass Maßnahmen, die eine möglichst hohe Strukturvielfalt und heterogene Entwicklung der ufernahen Vegetation mit entsprechender ufertypischer Zonierung zulassen (VF 7, 8 und 9, in geringerem Maße auch die VF 2, 3), insgesamt eine hohe ökologische Wirksamkeit aufweisen. Jene Maßnahmen, die von stark homogenen Strukturen ohne dynamische Entwicklungsmöglichkeiten der Ufermorphologie und des Uferbewuchses geprägt sind, insbesondere die robusten Bauweisen mit einem Flächengewicht in VF 4, 5a und 5b sowie die Steinschüttung des Referenzufers, zeigen eine geringe ökologische Wirksamkeit. Für den aquatischen Bereich ist neben der Strukturvielfalt der Schutz vor Schiffswellen und hohem Strömungsangriff relevant. Dies wird z. B. im aquatischen Bereich von Versuchsfeld 1 besonders deutlich, da durch den vorgelagerten Steinwall und durch das Einbringen von Totholz eine sehr hohe ökologische Wirksamkeit erzielt werden konnte.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass aufgrund verschiedener, unter Umständen konträrer ökologischer Zielstellungen, keine der getesteten Einzelbauweisen die Förderung aller notwendigen ökologischen Belange leisten kann. Vielmehr ist es von zentraler Bedeutung, im Vorfeld der Planung festzulegen, welche Zielorganismen und welche Zielhabitate zu fördern sind. Basierend darauf können ein möglichst geeigneter Maßnahmentyp bzw. eine Kombination ökologisch geeigneter Maßnahmen ausgewählt werden.

Abschließend verdeutlicht die ökologische Gesamtbewertung, dass technisch-biologische Ufersicherungen geeignete, auch ufertypische Habitate für verschiedenste Organismengruppen zur Verfügung stellen können.

6 Kosten

6.1 Herstellungskosten

Die Herstellungskosten für den rd. 800 m langen umgestalteten Uferbereich betragen im Jahr 2011 insgesamt 924.000,- €. In Tabelle 24 werden diese Kosten differenziert pro Versuchsfeld, pro lfd. m und pro m² aufgeschlüsselt. Die Planungskosten der Ingenieurbüros und Leistungen der Projektbeteiligten BAW, BfG und WSA sind nicht dargestellt. Die örtliche Bauüberwachung, die das Planungsbüro und der ABz Worms/Oppenheim wahrgenommen haben, wurde bei den Herstellungskosten der Versuchsfelder ebenfalls nicht monetär berücksichtigt.

Die Kosten (Stand 2011) sind als Bruttopreise angegeben. Hauptsächlich liegt diesen ein Mehrwertsteuersatz von 19 % zugrunde, nur bei einzelnen Leistungen für Pflanzmaterial wird ein reduzierter Satz von 7 % angewendet. Die Kosten für die Baustelleneinrichtung wurden anteilig auf die einzelnen Versuchsfelder aufgeteilt. Weitere pauschale Leistungen, wie die Kampfmittelsondierungen, finden nur bei den betroffenen Feldern (VF 1 – VF 5, VF 7, VF 9) Berücksichtigung.

Vor der Uferumgestaltung hatte die Böschung nahezu eine gleiche Neigung und Höhe. Mit der Uferumgestaltung erfolgte bei einzelnen Versuchsfeldern eine Abflachung, sodass sich die Böschungsfläche dort etwas vergrößert hat. In der Spalte 7 der Tabelle 24 werden dennoch die Kosten der einzelnen Versuchsfelder auf eine einheitliche Böschungslänge normiert. Anzumerken ist bei dem Vergleich der Werte, dass mehrere Bauweisen in einem Versuchsfeld zur Anwendung kamen, die zum Teil nicht flächig auf der Böschung eingesetzt wurden. Dies wird speziell beim VF 8 sichtbar, da hier nur ein Steinwall etwas erhöht wurde und keine weiteren Maßnahmen in der Böschung stattfanden. Die Kosten für einen notwendigen Rückbau der vorhandenen Stein-schüttung vor Einbau der alternativen Böschungssicherung sind in den Herstellungskosten enthalten.

In der Tabelle 24 in Spalte 8 werden Kosten pro Quadratmeter Böschungsfläche dargestellt. Da sich die Kosten in einem Versuchsfeld i. d. R. aus mehreren Bauweisen zusammensetzen, entsteht bei einer Normierung ein Mischpreis. Das VF 5 ist zum Beispiel in der Länge (in VF 5a und VF 5b) und zusätzlich in Böschungsfallrichtung unterteilt. Im VF 1 ist ein Quadratmeterpreis nicht angegeben, da die Herstellung des Steinwalls und der Pflanzgräben linienförmige Bauweisen sind. Diese Betrachtung trifft auch auf VF 8 (linienförmiger Steinwall) und VF 9 (keine flächendeckende Verwendung von Setzstangen und Herstellung einer Ausfachungsbühne) zu.

Die in der Tabelle dargestellten Einheitspreise können nicht als Kalkulationsgrundlage herangezogen werden, da sie letztendlich der unternehmerischen Kalkulation von nur einer Bietergemeinschaft zugrunde liegen. Ferner ist die Errichtung von Versuchsfeldern vom Aufwand her nicht mit einer normalen Uferbaumaßnahme vergleichbar.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Tabelle 24: Herstellungskosten pro Versuchsfeld (VF)

VF	km	Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen	Länge VF	Fläche VF	Kosten pro VF		
					pro VF	pro lfd m	pro m ²
					€	€/m	€/m ²
1	2	3	4	5	6	7	8
1	440,630 bis 440,800	Einbau von Weidensetzstangen, Lebendfaschinen, Busch- und Heckenlagen in vorhandene Steinschüttung; Vorgelagerter Steinwall mit Flachwasserzone, Totholzstämmen mit Wurzelteller	120,0	-	83.500	700	-
2	440,820 bis 440,860	Entfernung der Steinschüttung; Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung verlegt, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen; auf Böschungsplanie Heckenlagen	36,5	500	55.500	1520	111
3	440,880 bis 440,950	Entfernung der Steinschüttung; Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung verlegt, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	67,0	885	99.000	1480	112
4	440,950 bis 441,000	Vorhandene Steinschüttung mit Kiesfüllung, Einzelsteingruppen, Totholzfaschinenbündel	45,0	383	65.000	1440	170
5	441,000 bis 441,110	Entfernung der Steinschüttung; Einbau von Röhrlichtgabionen und Steinmatratzen auf Kornfilter, vorgezogene Pflanzmatten auf Steinmatratzen, Heckenlagen	100,0	1100	203.500	2040	185
6	441,125 bis 441,200	Vorhandene Steinschüttung mit Oberboden-Alginatgemisch-Füllung, Nassansaat, Einzelpflanzen	67,5	624	59.500	880	95
7	441,200 bis 441,375	Entfernung der Steinschüttung; Einbau von vorgezogenen Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvlies, Geotextil, Kokosmatte), Totholzfaschinen, Vegetationswalzen, Kokosgewebe über Nassansaat, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	157,0	1890	326.000	2080	172
8	441,375 bis 441,475	Erhöhung des vorhandenen Steinwalls; vorhandenes Pflaster und Steinschüttung, Röhrlichtbewuchs	98,5	-	3.500	40	-
9	441,475 bis 441,600	Entfernung der Steinschüttung; keine neue Ufersicherung im Böschungsbereich; Zulassen von begrenzter Erosion und Sukzession, Setzstangen zum Schutz des Betriebsweges auf der Böschungsplanie; Ausfachungsbühne am Ende des Feldes	109,0	-	28.500	260	-
Σ	440,630 bis 441,600		805,5		924.000		

Für die technisch-biologischen Bauweisen Weidenspreitlagen (VF 2 und 3), Pflanzmatten (VF 7) und Röhrichtgabionen (VF 5), die hauptsächlich flächig in der Böschung ausgeführt wurden, ergibt sich ein Preis von 110 – 185 €/m². Im Vergleich dazu sind die Kosten für den Neubau eines losen Schüttsteindeckwerks (LMB_{10/60}) mit 100 – 120 €/m² etwas niedriger. In diesen Einheitspreisen sind Allgemeinkosten (z. B. Baustelleneinrichtung, Vermessungsleistungen) enthalten. Des Weiteren hängen die Preise stark von dem Umfang der Baumaßnahme ab, sodass hier Abweichungen auftreten können. Da die Herstellungskosten nur versuchsfeldweise und nicht maßnahmenweise erfasst wurden, werden die Kosten zu den bereichsweise unterschiedlichen Maßnahmen in einem Versuchsfeld (VF 5 und 7) zusätzlich qualitativ abgeschätzt.

6.2 Unterhaltungsaufwendungen

In den Anfangsjahren ist eine Pflege der technisch-biologischen Bauweisen, wie z. B. Bewässerung, Neophytenbekämpfung oder das Freistellen der neuen Bauweisen von Spontanvegetation, unumgänglich. Der Rückschnitt der Gehölze ist in der Regel erst nach mehreren Jahren erforderlich.

Seit Herstellung 2011 fanden in den Versuchsfeldern 1, 2, 3 und 9, in denen Gehölze (z. B. Weidensetzstangen, Weidenspreitlagen, Busch und Heckenlagen) zum Einsatz kamen, Rückschnitt- und Pflegearbeiten statt. In den Weidenspreitlagen (VF 2 und 3) und in VF 1 wurden nach drei Jahren erstmalig Rückschnittarbeiten durchgeführt (Bild 64). Diese müssen in den kommenden Jahren in unterschiedlichem Umfang wiederholt werden. Im VF 1 ist in den Anfangsjahren durch Rückschnitt ein heterogener Gehölzbestand herausgepflegt worden. Bei den Röhrichtgabionen (VF 5) gab es in den ersten 4 Jahren keine nennenswerten Unterhaltungsaufwendungen. Da sich die Röhrichtgabionen, wie in Kap. 4.2.2 und Anlage 3 ausführlich beschrieben, nicht bewährt haben, wurden diese bereits mit einer Steinlage saniert. Bei den Bauweisen, bei denen auf Lebendmaterial (Pflanzen) verzichtet wurde (VF 4, 6, 8), fanden außer Neophytenbekämpfung bisher keine Unterhaltungsarbeiten statt. Die unmittelbar unter Mittelwasser angeordneten Totholzfaschinen im VF 4 müssen allerdings in naher Zukunft ersetzt werden. Die Pflanzmatten in VF 7 wurden anfangs jährlich, später alle 2 Jahre gemäht, um durch die sogenannte Schröpfmäh eine Verdichtung des Pflanzenwuchses zu initiieren (Bild 65). Bei einem konventionellen Schüttsteindeckwerk, wie in der Referenzstrecke, wird der sich einstellende Bewuchs in der Regel alle 5 bis 10 Jahre verjüngt oder auf den Stock gesetzt. Im bisherigen Zeitraum fanden in einer der Referenzstrecken im Februar 2019 Pflegearbeiten statt.

Insgesamt ist der bisherige Zeitraum zu kurz, um belastbare monetäre Aussagen zum langfristigen Unterhaltungsaufwand der einzelnen Bauweisen zu treffen. Verschiedene Unterhaltungsstrategien werden zudem erst im weiterführenden Monitoring untersucht. Daher wird der Aufwand relativ zueinander mit den Wertstufen 1 bis 5 bewertet (Tabelle 25).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020



Bild 64: Partiieller Rückschnitt der Weidenspreitlage in VF 3 (Januar 2015) (Foto: WSA Oberrhein)



Bild 65: Mahd der Pflanzmatten in VF 7 (Juni 2015) (Foto: WSA Oberrhein)

Die Einschätzung der Unterhaltungsaufwendungen begründet sich aus Erfahrungen an der Versuchsstrecke, kombiniert mit einer Abschätzung für die Zukunft. Ebenso besitzen die Bauweisen eine unterschiedlich lange Lebensdauer, die bei einer genauen monetären Betrachtung berücksichtigt werden müsste. Aus heutiger Sicht lässt sich nur eine qualitative Vergleichbarkeit der Felder zueinander und zur Referenzstrecke herstellen.

6.3 Bewertung

Für die Bewertung der Kosten (Herstellungskosten, Unterhaltungsaufwendungen und Gesamtkosten) wurde eine 5-stufige Klassifizierung durchgeführt:

- „5“ bedeutet niedrige Herstellungskosten oder geringer Unterhaltungsaufwand
- „1“ bedeutet hohe Herstellungskosten oder hoher Unterhaltungsaufwand

Das Ergebnis zeigt Tabelle 25.

Herstellungskosten

Die Pflanzmatten und Röhrichtgabionen wurden als kostenintensivste Bauweise eingestuft und erhielten somit die schlechteste Bewertung „1“. Die vorhandene Steinschüttung der Referenz stellt den Ausgangszustand dar. Da hier keine Kosten anfallen, wird die Höchstbewertung von „5“ vergeben.

Unterhaltungsaufwendungen

VF 6 und VF 7 unten erhalten keine Kostenangaben für Unterhaltung, da die Maßnahmen nicht erfolgreich waren. Eine Unterhaltung, bezogen auf die ursprüngliche Bauweise, fand nicht mehr statt. Im VF 9 wurde in den ersten Jahren nahezu keine Unterhaltung im Böschungsbereich durchgeführt. Um der fortschreitenden Ufererosion in Richtung Betriebsweg entgegen zu wirken, ist auf der Böschungsplanie eine zusätzliche Reihe von Weidensetzstangen errichtet worden, sodass der Unterhaltungsaufwand zunahm. Qualitativ lässt sich abschätzen, dass die technisch-biologischen Ufersicherungen mit Lebendmaterial wie Gehölzen oder Pflanzmatten einen höheren Aufwand in der Unterhaltung verursachen werden als konventionelle Schüttsteindeckwerke.

Gesamtkosten

Die Gesamtbewertung setzt sich aus den Subbewertungen Herstellungskosten und Unterhaltungsaufwendungen zusammen. Dabei wurden Unterhaltungskosten höher als die Herstellungskosten gewichtet. Die bisher durchgeführten Sanierungen wurden bei den Kosten nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass diese zukünftig bei Neuanwendungen nicht mehr anfallen, wenn die Bauweisen aufgrund der Erfahrungen der Versuchsstrecke entsprechend optimiert werden (siehe „lessons learned“, Kap. 4.5 und Anlage 3). Insgesamt werden die Herstellungskosten der technisch-biologischen Ufersicherungen höher als bei einem konventionellen Schüttsteindeckwerk liegen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 25: Bewertung der Kosten pro Versuchsfeld (VF)

Technisch- biologische Uferschutzmaßnahme/Bauweise	Bewertung (1: sehr schlecht, 2: schlecht, 3: mittel, 4: gut, 5: sehr gut)		
	Herstellungskosten	Unterhaltungsaufwendungen	Gesamtkosten
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen, ohne vorgelagerten Steinwall (Steinwall bei den Kosten nicht berücksichtigt, aber z. B. Kampfmittelsondierung) VF 1, oben und unten	3	4	4
Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung VF 2, oben und unten	2	2	2
Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung VF 3, oben und unten	2	2	2
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies, Steinblöcken und Totholzfaschinen VF 4, oben und unten	2	5	4
Rückbau der Steinschüttung, Röhrichtgabionen VF 5a, unten	1	5	3
Rückbau der Steinschüttung, Steinmatratzen VF 5a, oben; VF 5b, oben und unten	2	4	3
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Alginat VF 6, oben und unten	3	-	-
Rückbau der Steinschüttung, Kokosmatte über Nassansaat VF 7a, oben	3	3	3
Rückbau der Steinschüttung, Pflanzmatten VF 7a, b, c, unten	1	-	1
Rückbau der Steinschüttung, Pflanzmatten VF 7b, c, oben	1	4	3
Erhöhung des vorhandenen Steinwalls, vorhandenes Pflaster und Steinschüttung, Röhrichtbewuchs VF 8, unten	5	5	5
Rückbau der Steinschüttung, ohne Böschungsschutz, Weidensetzstangen auf der Böschungsplanie VF 9, oben und unten	4	3	3
Steinschüttung als Referenz (bereits vorhanden vor der Umgestaltung)	5	5	5

7 Gesamtbewertung der Versuchsfelder

Im Rahmen eines langjährigen Monitorings wird untersucht, inwieweit die verschiedenen technisch-biologischen Sicherungsmaßnahmen das Ufer unter den Randbedingungen am Rhein in ähnlicher Weise wie eine Steinschüttung schützen und es gleichzeitig gegenüber der Steinschüttung ökologisch aufwerten können. Primäre Anforderungen waren dementsprechend die Gewährleistung der Standsicherheit und die Erhöhung der ökologischen Wirksamkeit der Ufersicherungen. Die Kosten waren bei der Planung der Maßnahmen sekundär. Zum Vergleich werden zwei ober- und unterstrom an die Versuchsstrecke anschließende Referenzstrecken herangezogen, in denen die herkömmliche Steinschüttung unverändert erhalten blieb.

Im Kap. 4.5 (Tabelle 11) und Anlage 3 wurden die einzelnen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich der Gewährleistung der Uferstandsicherheit, im Kap. 5.7 (Tabelle 23) hinsichtlich der terrestrischen und aquatischen Ökologie und im Kap. 6.3 (Tabelle 25) hinsichtlich der Kosten (Gesamtkosten und getrennt Herstellungs- und Unterhaltungskosten) beurteilt. Entsprechend der Randbedingungen des Naturversuchs wurde zum Vergleich der Herstellungskosten als Ausgangssituation bei allen Maßnahmen von einer vorhandenen Steinschüttung ausgegangen. Für jede der drei Kategorien (Standsicherheit, Ökologie, Kosten) erfolgten vergleichende Bewertungen der Maßnahmen auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut). Die Bewertung der Kosten erfolgte dabei auf der Grundlage einer durch Expertenwissen gestützten Mittelwertbildung aus Herstellungs- und Unterhaltungskosten. Die Tabelle 26 zeigt diese Bewertungen in den Spalten 3 bis 5 für alle Maßnahmen der Versuchsfelder 1 bis 9 sowie für die Referenzbereiche (Schüttsteindeckwerk). Daraus ist zunächst ersichtlich, ob die einzelnen Maßnahmen die Uferstandsicherheit eher gut oder schlecht gewährleisten konnten, wie gut oder schlecht die ökologische Aufwertung einzuschätzen ist und ob die Kosten sehr hoch (sehr schlecht) oder eher sehr gering (sehr gut) waren.

Ergänzend erfolgt eine Gesamtbewertung der im Böschungsbereich oberhalb Mittelwasser angeordneten, primär im terrestrischen Bereich wirksamen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen. Dazu wird der Mittelwert der Bewertungen in den drei Kategorien bei gleichwertiger Berücksichtigung von Uferstandsicherheit, terrestrischer Ökologie und Gesamtkosten gebildet (dargestellt in der letzten Spalte der Tabelle 26). Nur für die Maßnahme „Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Alginat“ im VF 6 ist keine Gesamtbewertung möglich. Das Alginat wurde bereits im Anfangsstadium bei hohen Wasserständen ausgespült, sodass eine ökologische Bewertung nicht möglich ist. Die Standsicherheit ist unabhängig vom Alginat durch die Steinschüttung weiter gewährleistet.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 26: Vergleichende Bewertung der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen

Technisch-biologische Uferschutzmaßnahmen/Bauweisen		Bewertung (1: sehr schlecht, 2: schlecht, 3: mittel, 4: gut, 5: sehr gut)			
		Terrestrische Ökologie	Gesamtkosten	Uferstand-sicherheit	Gesamtbewertung (Mittelwert)
VF 1	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen, <u>ohne</u> vorgelagerten Steinwall VF 1, oben und unten	3	4	5	4,0
VF 2	Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung VF 2, oben und unten	4	2	3	3,0
VF 3	Rückbau der Steinschüttung, Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung VF 3, oben und unten	4	2	4	3,3
VF 4	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken, <u>ohne</u> Totholzfaschinen VF 4, oben und unten	2	4	5	3,7
VF 5	Rückbau der Steinschüttung, Röhrichtgabionen VF 5a, unten	2	3	2	2,3
	Rückbau der Steinschüttung, Steinmatratzen VF 5a, oben; VF 5b, oben und unten	2	3	5	3,3
VF 6	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Alginat VF 6, oben und unten	-	-	5	-
VF 7	Rückbau der Steinschüttung, Kokosmatte über Nassansaat VF 7a, oben	4	3	1	2,7
	Rückbau der Steinschüttung, Pflanzmatten VF 7a, b, c, unten	4	1	1	2,0
	Rückbau der Steinschüttung, Pflanzmatten VF 7b, c, oben	4	3	4	3,7
VF 8	Erhöhung des vorhandenen Steinwalls; vorhandenes Pflaster und Steinschüttung, Röhrichtbewuchs VF 8, unten	4	5	5	4,7
VF 9	Rückbau der Steinschüttung, ohne Böschungsschutz, Weidensetzstangen auf der Böschungsplanie VF 9, oben und unten	4	3	1	2,7
Ref.	Steinschüttung als Referenz (bereits vorhanden vor der Umgestaltung)	2	5	5	4,0

Der im VF 1 vorgelagerte Steinwall und die Totholzfascinen im VF 4 – beide ohne direkte Uferschutzfunktion – wurden als zusätzliche Maßnahmen zur Förderung der aquatischen Ökologie eingebaut. Diese Maßnahmen hätten theoretisch auch in jedem anderen Versuchsfeld ergänzend angeordnet und ökologisch wirksam werden können. Um die Ergebnisse bei der Gesamtbewertung der im terrestrischen Bereich der VF 1 bis 9 angewendeten Uferschutzmaßnahmen dadurch nicht zu beeinflussen, wird die aquatische Wirksamkeit dieser beiden Maßnahmen separat bewertet (Tabelle 27). Unabhängig von den Uferschutzmaßnahmen im Böschungsbereich oberhalb Mittelwasser zeigen sie ihr grundsätzliches ökologisches Potential für den aquatischen Bereich.

Tabelle 27: Vergleichende Bewertung der im aquatischen Bereich angeordneten Maßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion

Maßnahmen – Versuchsfeld (VF)	Aquatische Fauna	Vegetation FWZ	Gesamtbewertung aquatische Ökologie
Vorgelagerter Steinwall mit Flachwasserzone – VF 1	5	5	5,0
Totholzfascinen MW bis MW - 0,5 m – VF 4	3		3,0
Keine Maßnahmen im aquatischen Bereich (Referenz)	1		1,0

Aus der in Tabelle 26 dargestellten Gesamtbewertung in der Abstufung von „sehr gut“ (5) bis „sehr schlecht“ (1) ergibt sich eine Rangfolge der getesteten Uferschutzmaßnahmen von 1 bis 12 hinsichtlich ihrer Eignung unter den Bedingungen der Versuchsstrecke (Tabelle 28, 1. Spalte). Dabei erhalten Maßnahmen mit gleicher Gesamtbewertung, d. h. mit gleichem Mittelwert aus den Einzelkategorien, denselben Platz in der Reihenfolge. Wenn es z. B. drei 2. Plätze gibt, dann gibt es keinen 3. und 4. Platz, die nächstfolgende Maßnahme mit einer anderen Bewertung erhält dann Platz 5 usw.

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse, dargestellt in Tabelle 28, wie folgt beschreiben. Die durch Erhöhung des Steinwalls geschützte Steinschüttung und Pflasterung im VF 8 schneidet in der Gesamtbewertung am besten ab. Die Maßnahmen sind kostengünstig und können die Standsicherheit sicher gewährleisten. Im terrestrischen Bereich haben sie zumindest eine mittlere ökologische Wirksamkeit. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese Maßnahme nur sinnvoll ist, wenn gepflasterte Uferbereiche wie hier bereits vorhanden und stabil sowie ökologisch nicht unbedeutend sind und deshalb erhalten werden sollen. Als Neubaumaßnahme würde die Maßnahme aufgrund der hohen Kosten für die Herstellung eines Pflasters und aufgrund der Verfügbarkeit ökologisch wirksamerer Alternativen in der Rangfolge deutlich weiter hinten liegen.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

*Tabelle 28: Gesamtbewertung der Maßnahmen bei gleicher Wichtung der drei Kriterien nach Tabelle 26
(1. Spalte: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich Eignung unter den Bedingungen der Versuchsstrecke)*

Rang	Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen	Versuchsfeld	Gesamtbewertung
1	Erhöhung des vorhandenen Steinwalls; vorhandenes Pflaster und Steinschüttung, Röhrlichtbewuchs ¹⁾	VF 8	4,7
2	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen ohne vorgelagerten Steinwall	VF 1	4,0
2	Schüttsteindeckwerk als Referenz	Ref.	4,0
4	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken	VF 4	3,7
4	Pflanzmatten (oberer Böschungsbereich)	VF 7b,c oben	3,7
6	Steinmatratzen	VF 5	3,3
6	Weidenspreitlagen, quer eingebaut	VF 3	3,3
8	Weidenspreitlagen, diagonal eingebaut	VF 2	3,0
9	Ohne Böschungsschutz ²⁾	VF 9	2,7
9	Kokosmatte über Nassansaat ³⁾ (oberer Böschungsbereich)	VF 7a oben	2,7
11	Röhrlichtgabionen ³⁾ (unterer Böschungsbereich)	VF 5a unten	2,3
12	Pflanzmatte unten ³⁾ (unterer Böschungsbereich)	VF 7 unten	2,0

¹⁾ Maßnahmen im VF 8 sind nur zur Aufwertung bestehender Pflasterbereiche sinnvoll, nicht als Neubaumaßnahme.

²⁾ Im VF 9 war die Standsicherheit von vornherein nicht zu gewährleisten, Erosion war ökologisch erwünscht.

³⁾ Diese Maßnahmen konnten den Uferschutz nicht gewährleisten, die Bereiche wurden bereits z. T. mit Schüttsteinen saniert.

Weiterfolgend schneiden in der Gesamtbewertung auch die ökologisch aufgewertete Steinschüttung im VF 1 (ohne vorgelagerten Steinwall) und die Steinschüttung der Referenz gut ab. Maßgebend sind auch hier primär die Kriterien Standsicherheit und Kosten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Herstellung der Steinschüttung in der Bewertung keine Kosten anfallen, da diese überall die Ausgangssituation darstellt. Ökologisch ist die aufgewertete Steinschüttung besser als die Referenz.

Danach, aber noch im guten Bewertungsbereich, folgt die ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken ohne Berücksichtigung der aquatisch wirksamen Totholzfaschinen (VF 4). Hier sind Standsicherheit und Kosten auch gut bis sehr gut, die terrestrische Ökologie dagegen als schlecht zu bewerten. Gleich in der Gesamtbewertung sind die Pflanzmatten im oberen, selten eingestauten Böschungsbereich (VF 7) durch die gute Bewertung der terrestrischen Ökologie. Standsicherheit und Kosten sind dagegen etwas schlechter als im VF 4.

Es folgen die Steinmatratzen (VF 5) und die Weidenspreitlagen (VF 2 und 3) mit mittleren Bewertungen. Diese konnten die Standsicherheit gut bis sehr gut gewährleisten, die erreichte

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

ökologische Aufwertung ist zumindest bei den Weidenspreitlagen gut, die Kosten liegen dagegen eher im mittleren bis hohen Bereich.

Das Versuchsfeld ohne Böschungsschutz (VF 9) bekommt aufgrund der relativ geringen Kosten und der guten ökologischen Aufwertung im terrestrischen Bereich insgesamt auch eine mittlere Bewertung, obwohl die Standsicherheit nicht gegeben ist.

Die Kokosmatte über Nassansaat (VF 7) im oberen Böschungsbereich erhält durch die gute ökologische Wirksamkeit gerade noch eine mittlere Bewertung, gefolgt von den insgesamt schlecht bewerteten Röhrichtgabionen (VF 5) und Pflanzmatten im unteren, häufig eingestauten Böschungsbereich (VF 7). Alle drei Maßnahmen konnten die Standsicherheit nicht gewährleisten, die Bereiche wurden bereits überwiegend mit einer Steinlage saniert. Die dementsprechend sehr schlechte Bewertung der Standsicherheit dominiert die Gesamtbewertung. Allerdings sind auch die Kosten insbesondere bei den Pflanzmatten sehr hoch, sodass trotz guter Bewertungen der ökologischen Wirksamkeit (mit Ausnahme der Röhrichtgabionen) die Gesamtbewertungen im Vergleich am schlechtesten sind.

Tabelle 29: Gesamtbewertung der Maßnahmen bei gleicher Wichtung von Standsicherheit und Ökologie ohne Berücksichtigung der Kosten (1. Spalte: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich Eignung unter den Bedingungen der Versuchsstrecke)

Rang	Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen	Versuchsfeld	Gesamtbewertung
1	Erhöhung des vorhandenen Steinwalls; vorhandenes Pflaster und Steinschüttung, Röhrichtbewuchs	VF 8	4,5
2	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen ohne vorgelagerten Steinwall	VF 1	4,0
2	Pflanzmatten (oberer Böschungsbereich)	VF 7b, c oben	4,0
2	Weidenspreitlagen, quer eingebaut	VF 3	4,0
5	Weidenspreitlagen, diagonal eingebaut	VF 2	3,5
5	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken	VF 4	3,5
5	Steinmatratzen	VF 5	3,5
5	Schüttsteindeckwerk als Referenz	Ref.	3,5
9	Ohne Böschungsschutz ²⁾	VF 9	2,5
9	Kokosmatte über Nassansaat ³⁾ (oberer Böschungsbereich)	VF 7a oben	2,5
9	Pflanzmatte unten ³⁾ (unterer Böschungsbereich)	VF 7 unten	2,5
12	Röhrichtgabionen ³⁾ (unterer Böschungsbereich)	VF 5a unten	2,0

¹⁾ Maßnahmen im VF 8 sind nur zur Aufwertung bestehender Pflasterbereiche sinnvoll, nicht als Neubaumaßnahme.

²⁾ Im VF 9 war die Standsicherheit von vornherein nicht zu gewährleisten, Erosion war erwünscht.

³⁾ Diese Maßnahmen konnten den Uferschutz nicht gewährleisten, die Bereiche wurden bereits z. T. mit Schüttsteinen saniert.

Zusätzlich zu dieser Gesamtbewertung wurde zum Vergleich ein Ranking der Uferschutzmaßnahmen ermittelt ohne Berücksichtigung der Kosten, diese waren bei der Planung der Versuchsstrecke nicht relevant. Dazu wurde der Mittelwert nur aus den Bewertungen für die Standsicherheit und für die terrestrische Ökologie gebildet. Das Ergebnis zeigt Tabelle 29. Unter diesen Randbedingungen ändert sich die Gesamtbewertung der einzelnen Maßnahmen auf der Skala von 1 bis 5 nur wenig. Aber in der Reihung (1. Spalte in Tabelle 29) wandern erwartungsgemäß kostenintensivere Maßnahmen nach vorne – die Pflanzmatten im oberen Böschungsbereich von Platz 4 auf Platz 2 und die Weidenspreitlagen von den Plätzen 6 und 8 auf die Plätze 2 und 5. Die sehr kostengünstigen Schüttsteindeckwerke der Referenz und die ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken gehen dagegen von Platz 2 auf Platz 5 bzw. von Platz 4 auf Platz 5. Änderungen in der Rangfolge gibt es allerdings nur bei den Maßnahmen im Mittelfeld, die beiden am besten und insbesondere die drei am schlechtesten bewerteten Maßnahmen sind bei beiden Betrachtungen dieselben – also unabhängig von der Berücksichtigung der Kosten.

Generell zeigt das Ergebnis, dass die ökologische Aufwertung von vorhandenen Steinschüttungen oder gepflasterten Bereichen eine gute und ökologisch erfolgreiche sowie zugleich kostengünstige Möglichkeit ist, Ufer auch dann naturnäher zu gestalten, wenn aufgrund großer hydraulischer Belastungen nicht auf eine Steinschüttung verzichtet werden kann. In jedem Fall ist die Anordnung aquatisch wirksamer Strukturen (z. B. Schaffung von Flachwasserzonen durch vorgelagerte Steinwälle oder Totholzfaschinen unterhalb Mittelwasser) zu empfehlen, die die Lebensraumbedingungen für Fische, aquatische Wirbellose sowie Wasserpflanzen deutlich verbessern können. Auch die anderen technisch-biologischen Ufersicherungen können die Ufer grundsätzlich gut sichern und ökologisch aufwerten. Welche Maßnahmen konkret einsetzbar sind, hängt jedoch maßgeblich von den hydraulischen Belastungen und den Anforderungen an die Standsicherheit ab, aber auch davon, wie relevant die Kosten im Einzelfall sind. Nicht alle Maßnahmen sind überall in gleicher Weise anwendbar und ökologisch wirksam. Im Kap. 8 wird beispielhaft gezeigt, welche der an der Versuchsstrecke untersuchten Maßnahmen unter anderen Randbedingungen und weiterführenden Zielstellungen ökologisch wirksam sein können. Es werden für verschiedene Szenarien Maßnahmenrangfolgen ermittelt, die aus übergeordneter Sicht im Rahmen von Vorplanungen als Entscheidungshilfe für die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Ufersicherung dienen können.

8 Transfer gewonnener Erkenntnisse

8.1 Hintergrund und Bedarf

Im Kap. 7 wurde eine integrative Bewertung der verschiedenen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen unter den Randbedingungen an der Versuchsstrecke am Rhein vorgenommen. Ziel war es, die vorhandenen terrestrischen und aquatischen Uferlebensräume ökologisch aufzuwerten und die Uferstandsicherheit in gleicher Weise wie durch ein Schüttsteindeckwerk zu gewährleisten.

Um eine integrative Gesamtbewertung der Maßnahmen für viele Entscheidungsträger in der Praxis zu erarbeiten, werden die gewonnenen Erkenntnisse darüber hinaus, soweit möglich, auf Uferbereiche an einer freifließenden Wasserstraße mit anderen Randbedingungen übertragen. Dies erfolgt anhand einer multikriteriellen Betrachtung im Sinne eines qualitativen Wissenstransfers. Sie wird für verschiedene Szenarien durchgeführt, die sich jeweils aus einer ökologischen Zielstellung und verschiedenen Randbedingungen zusammensetzen.

Durch die Ermittlung von Rangfolgen geeigneter technisch-biologischer Maßnahmen für die jeweiligen Szenarien, wird eine erste Entscheidungshilfe im Sinne einer qualitativen Vorauswahl bereitgestellt, die den Vorplanungsprozess für Uferentwicklungsprojekte unterstützen kann. Im Ergebnis kann damit die Eignung technisch-biologischer Maßnahmen für bestimmte Wasserstraßenabschnitte und ökologische Zielstellungen beurteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass diese Vorauswahl nicht die Prüfung der technischen Anwendbarkeit und die Abschätzung des ökologischen Potenzials der Maßnahmen im konkreten Fall ersetzt.

8.2 Methodik – Multikriterielle Entscheidungsanalyse

Multikriterielle Entscheidungsanalysen haben zum Ziel, Ergebnisse aus verschiedenen Disziplinen, die in unterschiedlichen Skalen vorliegen und auf unterschiedlichen Bewertungsverfahren basieren, zu einer integrativen Gesamtbewertung zusammenzuführen. Schröder und Kleinwächter (2017) haben gezeigt, dass der sog. Analytische Hierarchie Prozess (AHP) eine gute Möglichkeit darstellt, ökologische Maßnahmen an Wasserstraßen zu bewerten.

Der AHP wurde von dem Mathematiker Thomas L. Saaty entwickelt. Er setzt die verschiedenen relevanten Kriterien und ggf. Subkriterien nach festen mathematischen Regeln vergleichbar miteinander in Beziehung. Dies ermöglicht eine transparente und in sich konsistente Bewertung der getesteten technisch-biologischen Maßnahmen, die im Sinne des AHP Alternativen genannt werden (Westphal 2016). Die multikriterielle Entscheidungsanalyse in diesem Kapitel wurde in Anlehnung an das AHP-Verfahren von Saaty durchgeführt.

8.2.1 Kriterien

Die multikriterielle Analyse erfolgt für verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung von jeweils drei Kriterien. Anders als in Kap. 7 wird neben den Kriterien „Ökologie“ und „Gesamtkosten“ nicht die „Standicherheit“ betrachtet, da sie nicht unabhängig von den jeweils konkreten

Randbedingungen (insbesondere hydraulische Belastungen, anstehender Boden, Böschungsgeometrie) beurteilt werden kann. Es wird daher für den qualitativen Transfer die „Robustheit“ der Maßnahmen als Kriterium herangezogen.

In Anlehnung an BAW (2016) wird Robustheit im Sinne der Widerstandsfähigkeit der Maßnahmen gegenüber Beanspruchungen oder Ausfällen unabhängig von der Bemessung und damit unabhängig von den Randbedingungen verwendet. Die Maßnahmen werden auf der Grundlage der Bewertung der Unterkriterien „Flächengewicht“, „Fehleranfälligkeit der Herstellung“, „kritischer Anfangszustand“ und „Selbsteilungsvermögen/Sanierbarkeit“ im Vergleich untereinander als mehr oder weniger robust eingeschätzt. Die Robustheit der einzelnen Maßnahmen wurde ebenfalls auf einer Skala von 1 bis 5 (1 – sehr schlecht, 5 – sehr gut) bewertet. Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 37 zeigen neben der Bewertung der Robustheit auch die Bewertungen für Ökologie und Gesamtkosten.

Für den Transfer der Ergebnisse wurde zudem vorausgesetzt, dass die Maßnahmen unter Berücksichtigung der Erfahrungen an der Versuchsstrecke bei zukünftigen Anwendungen technisch optimiert eingebaut werden (Hinweise zu den erforderlichen Optimierungen siehe Anlage 3). Für diesen Zustand wurden die Eingangsdaten für das Kriterium „Robustheit“ bewertet.

8.2.2 Szenarien

Die Rangfolgenmittlung erfolgt für fünf verschiedene Szenarien A bis E, die alle an einer freifließenden Wasserstraße mit motorisierter Schifffahrt angesiedelt sind. Im Gegensatz zur Situation an der Versuchsstrecke ist in jedem Fall eine Flächenverfügbarkeit im Sinne einer Uferabflachung gegeben.

Im Szenario A wird angenommen, dass die Ufer stark abgeflacht werden können, was sich günstig auf die Uferstabilität auswirkt. Gesamtkosten sind kaum relevant. Aus ökologischer Sicht sollen zuvorderst terrestrische Uferlebensräume gefördert werden. Im Unterschied zur Versuchsstrecke ist die Ökologie wichtiger als die Robustheit der Maßnahmen.

Zusätzlich werden weitere drei Szenarien (B, C, D) als sogenannte Grenzwertszenarien betrachtet. Mit diesen soll untersucht werden, welche Rangfolge sich ergibt, wenn jeweils ein Kriterium gegenüber den beiden anderen als absolut prioritär angesehen wird. Für das Szenario B wird die Ökologie, für das Szenario C wird die Robustheit und für Szenario D werden die Gesamtkosten als prioritär eingestuft. Die jeweiligen anderen beiden Kriterien werden als kaum relevant eingestuft. Ökologisches Ziel ist jeweils die Förderung terrestrischer Lebensräume.

Für Szenario E werden die gleichen Randbedingungen wie für Szenario A angenommen. Die beiden Szenarien unterscheiden sich insofern, als dass anstelle der terrestrischen Lebensräume aquatische Lebensräume gefördert werden sollen. Die Maßnahmen der Szenarien A bis D wurden ausschließlich im terrestrischen Uferbereich eingebracht und können den aquatischen Lebensraum (unterhalb MW) ökologisch nicht aufwerten. Sie können jedoch mit verschiedenen

Zusatzmaßnahmen, die im aquatischen Bereich nachweislich ökologisch wirksam sind, kombiniert werden.

8.2.3 Skalierung

Der AHP nach Saaty (1990) wendet basierend auf einer 9-stufigen Bewertungsskala paarweise Vergleichsmatrizen als Grundlage zur Ermittlung verschiedener Rangfolgen unterschiedlicher Alternativen (hier: technisch-biologischer Maßnahmen) an. Dabei bedeutet der Skalenwert 1, dass im paarweisen Vergleich ein Kriterium von gleicher Bedeutung ist wie ein anderes Kriterium. Der Skalenwert 9 bedeutet, dass im paarweisen Vergleich ein Kriterium das andere Kriterium absolut dominiert. Skalenwerte dazwischen werden in Tabelle 30 beschrieben. Die paarweisen Vergleiche sind reziprok. Das heißt, für den gegenteiligen Vergleich ist der Kehrwert anzusetzen (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Skalenwerte und reziproke Werte und deren Beschreibung für den paarweisen Vergleich von (Sub)-Kriterien, nach Saaty (1990)

Skalenwerte	Beschreibung	Reziproke Werte	Beschreibung
1	gleiche Bedeutung	1	gleiche Bedeutung
3	etwas größere Bedeutung	1/3	etwas geringere Bedeutung
5	erheblich größere Bedeutung	1/5	Erheblich geringere Bedeutung
7	sehr viel größere Bedeutung	1/7	sehr viel geringere Bedeutung
9	absolut dominierend	1/9	absolut unterlegen
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	$\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{6}, \frac{1}{8}$	Zwischenwerte

8.2.4 Paarweise Vergleiche – Erstellung von Vergleichsmatrizen

Aus Szenario A ergeben sich verschiedene Bedeutungen für die drei Kriterien „Ökologie“, „Robustheit“ und „Gesamtkosten“. Um die Kriterien entsprechend dieser Bedeutungen relativ zueinander darzustellen, werden sie unter Anwendung der 9-stufigen Skala nach Saaty (1990) in paarweisen Vergleichen in Form einer Matrix angeordnet. Dabei wird entlang der jeweiligen Zeile das Verhältnis eines Kriteriums gegenüber einem anderen Kriterium eingetragen und umgekehrt mit reziproken Werten ergänzt (vgl. Tabelle 31). Es ist hierbei nicht nur zu entscheiden, ob ein Kriterium wichtiger, gleich wichtig oder weniger wichtig ist als ein anderes Kriterium. Außerdem ist die Stärke des Unterschiedes nach der von Saaty entwickelten Skala festzulegen (Saaty 1987).

Aufgrund der Randbedingungen in Szenario A (Größere Flächenverfügbarkeit mit der Option zur Böschungsabflachung, Gesamtkosten sind kaum relevant) wird dem Kriterium „Ökologie“ eine höhere Bedeutung zugeordnet als den Kriterien „Robustheit“ und „Gesamtkosten“. Da robustere Maßnahmen meist ökonomisch nachhaltiger sind, wird dem Kriterium „Robustheit“ eine höhere Bedeutung beigemessen als dem Kriterium „Gesamtkosten“. Es ergibt sich insgesamt folgende Vergleichsmatrix:

Tabelle 31: Vergleichsmatrix der Kriterien „Ökologie“, „Robustheit“ und „Gesamtkosten“ für Szenario A anhand von Skalenwerten und reziproken Werten nach Saaty (1990)

Kriterien	Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten
Ökologie	1	3	8
Robustheit	1/3	1	3
Gesamtkosten	1/8	1/3	1

Konkret wird im Zuge der paarweisen Vergleiche in Tabelle 31 für Szenario A das Kriterium „Ökologie“ als von etwas größerer Bedeutung eingestuft als das Kriterium „Robustheit“ (3 bzw. 1/3, beispielhaft fett gedruckt). Dem Kriterium „Ökologie“ wird gegenüber dem Kriterium „Gesamtkosten“ ferner eine nahezu dominierende Bedeutung beigemessen (paarweiser Vergleich von 8 bzw. 1/8). Außerdem erhält das Kriterium „Robustheit“ eine etwas größere Bedeutung als das Kriterium „Gesamtkosten“ (paarweiser Vergleich von 3 bzw. 1/3) (vgl. auch Tabelle 30).

Für jedes der drei Grenzwertszenarien wird jeweils eines der drei Kriterien „Ökologie“ (Szenario B), „Robustheit“ (Szenario C) und „Gesamtkosten“ (Szenario D) im paarweisen Vergleich gegenüber den anderen beiden Kriterien mit der Einstufung absolut dominierend (paarweiser Vergleich von 9 bzw. 1/9) eingeordnet. Die beiden anderen Kriterien werden mit gleicher Bedeutung (paarweiser Vergleich 1 zu 1) zueinander eingestuft. Beispielhaft ist dies in Matrizenform für Szenario B („Vielseitige Möglichkeiten zur Förderung der Ökologie; Robustheit und Kosten sind kaum relevant“) in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Vergleichstabelle für die Kriterien "Ökologie", "Robustheit" und "Gesamtkosten" für das Szenario B (Ökologie absolut dominierend; Robustheit und Kosten kaum relevant) Skalenwert 1 = gleiche Bedeutung, Skalenwert 9 = absolut dominierend

Kriterien	Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten
Ökologie	1	9	9
Robustheit	1/9	1	1
Gesamtkosten	1/9	1	1

8.2.5 Ermittlung der Wichtungen

Basierend auf den erstellten Vergleichstabellen wird im AHP nach Saaty (1990) anschließend die Wichtung für jedes Kriterium berechnet. Der AHP sieht eine logische Überprüfung der paarweisen Vergleiche vor. Hierzu wird ein Konsistenzverhältnis C.R. berechnet, welches < 0,1 sein sollte. Detaillierte Informationen zu den jeweiligen Berechnungen sind in der Anlage 7 (Kap. 4 Berechnung der Wichtungen und Kap. 5 Konsistenzprüfung) dokumentiert. Die Ergebnisse der Wichtungsrechnung für die Szenarien A bis E sind in Tabelle 33 dargestellt:

Tabelle 33: Wichtungen in % für die Kriterien "Ökologie", "Robustheit" und "Gesamtkosten" für die Szenarien A – E (Szenario A: Terrestrische Ökologie, Szenario E: Aquatische Ökologie, Szenarien B C, D: Grenzwertszenarien); Konsistenzverhältnis (C.R.).

Kriterien	Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten	Konsistenzverhältnis (C.R.)
Szenarien A und E	68 %	24 %	8 %	0,001
Szenario B	82 %	9 %	9 %	0
Szenario C	9 %	82 %	9 %	0
Szenario D	9 %	9 %	82 %	0

8.2.6 Ermittlung von Rangfolgen

Um für Szenario A eine Rangfolge geeigneter technisch-biologischer Maßnahmen zu ermitteln, muss zunächst das globale Gesamtgewicht für jede Maßnahme errechnet werden. Hierfür wurden die im Vorfeld vorgenommenen fachlichen Bewertungen der einzelnen Maßnahmen für die drei Kriterien „Ökologie“, „Robustheit“ und „Gesamtkosten“ (Wertstufen 1 – 5, vgl. Tabelle 34) mit den für sie errechneten Wichtungswerten (vgl. Tabelle 33) multipliziert und anschließend addiert. Basierend auf den errechneten globalen Gesamtgewichten werden die Ränge für die verschiedenen technisch-biologischen Maßnahmen vergeben („Rang“-Funktion in MS Excel).

Ähnlich wie in Kap. 7 wird in eine Rangfolge für die technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen und eine Rangfolge für die Zusatzmaßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion unterschieden (vgl. Tabelle 34, Tabelle 35, Tabelle 36, Tabelle 37). Im Gegensatz zum Kap. 7 werden für den Transfer aber nicht mehr die einzelnen Versuchsfelder bewertet, sondern nur noch die Maßnahmen selbst unabhängig von deren Anordnung an der Versuchsstrecke. So werden z. B. die Weidenspreitlagen und die Pflanzmatten nur jeweils einmal als Maßnahmen aufgeführt. Die Maßnahmen aus VF 8 „Erhöhung des vorhandenen Steinwalls; vorhandenes Pflaster und Steinschüttung, Röhrichtbewuchs“ werden anders als in Kap. 7 hier als Zusatzmaßnahme ohne direkte Uferschutzfunktion „Steinwall vor Mittelwasserberme“ behandelt, da es hier nur um die ökologische Wirkung des Steinwalls geht. Dieser kann in seiner Funktion als Sedimentfang und zur Reduzierung des Wellenangriffs aus ökologischer Sicht generell als sehr hochwertig bewertet werden.

8.3 Ergebnisse – Maßnahmeneignung für die Szenarien A bis E

8.3.1. Szenario A

Tabelle 34 zeigt die Maßnahmeneignung als Rangfolge für das Szenario A - „An einer freifließenden Wasserstraße mit motorisierter Schifffahrt sollen terrestrische Uferlebensräume gefördert werden. Flächenverfügbarkeit im Sinne einer Uferabflachung ist gegeben. Gesamtkosten sind kaum relevant“ (vgl. 8.2.2 und 8.2.4).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 34: Rangfolge der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen für Szenario A; *Die Bewertungen für das Kriterium „Ökologie“ beziehen sich entsprechend der Definition von Szenario A ausschließlich auf terrestrische Uferlebensräume; Skala der Kriterienbewertungen: 1 = sehr schlecht, 2 = schlecht, 3 = mittel, 4 = gut, 5 = sehr gut; Ränge 1–8: 1 = erster Rang (grün), 8 = letzter Rang (rot)

		Ökologie*	Robustheit	Gesamtkosten	Gesamtgewichte	Rangfolge Szenario A
Wichtungen		68 %	24 %	8 %		
Uferschutzmaßnahmen ¹⁾	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen	3	5	4	3,56	2
	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Strukturelementen (Kies, Steinblöcke)	2	5	4	2,88	7
	Weidenspreitlagen	4	3	2	3,60	1
	Röhrichtgabionen	2	4	3	2,56	8
	Steinmatratzen	2	4	3	2,56	8
	Kokosmatte über Nassansaat ²⁾	4	1	3	3,20	4
	Pflanzmatten	4	2	3	3,44	3
	Ohne Uferschutz natürliche Sukzession	4	1	3	3,20	4
	Steinschüttung als Referenz	2	5	5	2,96	6

¹⁾ Uferschutzmaßnahmen entsprechend Anlage 3 technisch optimiert.

²⁾ Kokosmatte über Nassansaat entsprechend Anlage 3 nur oberhalb des höchsten Wellenaufbaus anwendbar.

Die ermittelte Rangfolge für Szenario A zeigt, dass Weidenspreitlagen hier die am besten geeignete Bauweise zur Förderung der terrestrischen Ökologie sind. Dahinter reihen sich die Maßnahmen der ökologisch aufgewerteten Steinschüttung mit Pflanzen und die Pflanzmatten. Die Maßnahmen Kokosmatte über Nassansaat sowie eine Böschung ohne Uferschutz mit natürlicher Sukzession und die konventionelle Steinschüttung prägen das Mittelfeld. Auf den hinteren Rängen sind die Maßnahmen ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Strukturelementen sowie die Maßnahmen Röhrichtgabionen und Steinmatratzen. Grundsätzlich stellt die entstandene Rangfolge eine Vorauswahl dar. Diese muss für den konkreten Anwendungsfall aus technischer und ökologischer Sicht überprüft werden.

Für die Zusatzmaßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion im terrestrischen Uferbereich ergibt sich kein Unterschied in der Rangfolge (vgl. Tabelle 35). Für Szenario A sind die Maßnahmen Heckenlagen auf Böschungsplanie und Steinwall vor Mittelwasserberme (eines gepflasterten Ufers) mit jeweils einer Gesamtbewertung von 4,31 gleichermaßen gut geeignet und in ähnlichem Maße, wenn auch für unterschiedliche Zielorganismen, ökologisch wirksam.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Tabelle 35: Rangfolge der Zusatzmaßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion für Szenario A; Wichtungen für die Kriterien sind analog zu Tabelle 34; *Eingehende Bewertungen für das Kriterium „Ökologie“ beziehen sich entsprechend Szenario A ausschließlich auf terrestrische Uferlebensräume.

		Ökologie*	Robustheit	Gesamtkosten	Gesamtwichte	Rangfolge Szenario A
Wichtungen		68 %	24 %	8 %		
Zusatzmaßnahmen	Heckenlagen auf Böschungsplanie	4	5	5	4,32	1
	Steinwall vor Mittelwasserberme (eines gepflasterten Ufers)	4	5	5	4,32	1

8.3.2 Szenarien B, C und D (Grenzwertbetrachtungen)

Tabelle 36 zeigt die Rangfolgen der Maßnahmeneignung für die Grenzwertbetrachtungen durch die Szenarien B, C und D im Vergleich zu Szenario A.

Tabelle 36: Rangfolgen der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen für die Szenarien A bis D, C.R. = 0; Ränge 1 – 8 bzw. 1 – 9: 1 = erster Rang (grün), 8 bzw. 9 = letzter Rang (rot); Wichtungen der Kriterien: Vgl. Tabelle 33

Rangfolgen für Szenarien		A	B – Hauptgewicht „Ökologie“	C – Hauptgewicht „Robustheit“	D – Hauptgewicht „Gesamtkosten“
Uferschutzmaßnahmen ¹⁾	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen	2	5	1	2
	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Strukturelementen (Kies, Steinblöcke)	7	7	3	3
	Weidenspreitlagen	1	1	6	9
	Röhrichtgabionen	8	8	4	4
	Steinmatratzen	8	8	4	4
	Kokosmatte über Nassansaat ²⁾	4	3	8	7
	Pflanzmatten	3	1	7	4
	Ohne Uferschutz natürliche Sukzession	4	3	8	7
	Steinschüttung als Referenz	6	6	1	1

¹⁾ Uferschutzmaßnahmen entsprechend Anlage 3 technisch optimiert.

²⁾ Kokosmatte über Nassansaat entsprechend Anlage 3 nur oberhalb des höchsten Wellenaufbaus anwendbar.

Szenario B zeigt eine ähnliche Reihung der technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen wie Szenario A mit dem Zusatz, dass die Maßnahme Pflanzmatten gemeinsam mit der Maßnahme Weidenspreitlagen als sehr gut geeignet eingestuft wird. Die letzten Ränge belegen die Maßnahmen Röhrichtgabionen und Steinmatratzen. Liegt das Hauptgewicht auf dem Kriterium Robustheit wird deutlich, dass Ufersicherungsmaßnahmen mit technischen Komponenten die vordersten Ränge belegen, während Maßnahmen ohne Flächengewicht auf den hinteren Rängen angesiedelt sind. Liegt das Hauptgewicht, wie in Szenario D, auf den Gesamtkosten, wird die Maßnahme Weidenspreitlagen als am schlechtesten geeignet eingeschätzt und die Steinschüttung als Referenz sowie die begrünte Steinschüttung belegen die vorderen Ränge.

Für die beiden Zusatzmaßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion im terrestrischen Uferbereich, Heckenlagen auf Böschungsplanie und Steinwall vor Mittelwasserberme, ergeben sich gegenüber Szenario A keine Veränderungen für die Szenarien B, C und D.

8.3.3 Szenario E

Tabelle 37 zeigt die Ergebnisse für Szenario E - „An einer freifließenden Wasserstraße mit motorisierter Schifffahrt sollen aquatische Lebensräume ökologisch gefördert werden. Flächenverfügbarkeit für eine Abflachung der Böschung ist gegeben. Gesamtkosten sind kaum relevant“ (vgl. Kap. 8.2.2 und 8.2.4).

Tabelle 37: Rangfolge der Zusatzmaßnahmen ohne Uferschutzfunktion für Szenario E; Wichtungen für die Kriterien sind analog zu Tabelle 8, C.R. = 0,001. *Eingehende Bewertungen für das Kriterium „Ökologie“ beziehen sich entsprechend Szenario E nur auf Maßnahmen im aquatischen Lebensraum und in der Wasserwechselzone (MW und darunter liegend).

		Ökologie*	Robustheit	Gesamtkosten	Gesamtgewichte	Rangfolge Szenario E
Wichtungen		68 %	24 %	8 %		
Zusatzmaßnahmen im aquatischen Bereich	Steinwall mit Flachwasserzone	3	5	4	3,56	2
	Totholzfaschinen unterhalb MW	3	3	3	3,00	3
	Steinwall mit Flachwasserzone und Wurzelteller/Totholzfaschinen	5	3	2	4,28	1
	Totholz/Wurzelteller unterhalb MW	3	3	3	3,00	3
	Steinschüttung als Referenz (aquatisch)	1	5	5	2,28	5

Die Rangfolge zeigt, dass die Kombination aus Zusatzmaßnahmen zum Schutz vor Wellen- bzw. Strömungsangriff (Steinwall mit Flachwasserzone) und Maßnahmen zur Erhöhung der Strukturvielfalt (Wurzelteller, Totholzfaschinen) für Szenario E am besten geeignet sind (Rang 1). Ein alleiniger Schutz vor Wellen- bzw. Strömungsangriff ohne zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der strukturellen Vielfalt ist etwas weniger geeignet (Rang 2). Dies kann mit der geringeren

Eingangsbewertung des Kriteriums „Ökologie“ erklärt werden. Fischunterstände und Nahrungshabitate für das Makrozoobenthos können trotz Strömungsberuhigung ohne entsprechende Erhöhung der Strukturvielfalt nicht in gleichem Umfang wie in der Kombinationsvariante bereitgestellt werden. Maßnahmen zur Aufwertung der Strukturvielfalt ohne die Bereitstellung eines Schutzes vor Strömungs- und Wellenangriff (Ränge 3) sind ebenfalls etwas weniger geeignet als die Kombinationsvariante. Dies liegt aus ökologischer Sicht daran, dass insbesondere an freifließenden Wasserstraßen Fische und das Makrozoobenthos durch den starken Angriff von Strömung und Schiffswellen bei der Nahrungssuche sowie der Reproduktion eingeschränkt werden. Aquatische Makrophyten können sich unter diesen Randbedingungen ebenfalls nicht ansiedeln. An staugeregelten Wasserstraßen ist in der Regel ein geringerer Angriff durch Strömung zu erwarten, sodass Maßnahmen zur Erhöhung der Strukturvielfalt hier ggf. besser wirken könnten. Dennoch ist auch an staugeregelten Wasserstraßen die teilweise starke Belastung durch Schiffswellen aus der Berufs- bzw. Freizeitschifffahrt als Einschränkung für aquatische Organismen ein zu berücksichtigender Faktor. Daneben sind die Maßnahmen Totholz/Wurzelteller und Totholzfaschinen hinsichtlich ihrer Gesamtkosten etwas teurer.

8.4 Fazit

Die multikriterielle Betrachtung verschiedener Szenarien an einer freifließenden Wasserstraße zeigt, dass je nach Zielstellung und Randbedingungen verschiedene technisch-biologische Maßnahmen zur Auswahl für die Uferentwicklung an Bundeswasserstraßen geeignet sein können. Falls beispielsweise bei ausreichender landseitiger Flächenverfügbarkeit flachere Ufer realisierbar sind, belegen ökologisch sehr wirksame Maßnahmen ohne technische Komponenten, wie z. B. Weidenspreitlagen, in der Vorauswahl die vorderen Ränge.

Die Betrachtung der Grenz-Szenarien B, C und D verdeutlicht, dass die Rangfolge geeigneter Maßnahmen sehr stark von den im AHP ermittelten Wichtungen abhängt, die aus den im Vorfeld definierten ökologischen Zielvorstellungen („Was soll gefördert werden?“), den technischen Anforderungen und dem finanziellen Rahmen abgeleitet wurden. Ist die Robustheit und damit die Stabilität der Maßnahmen von besonders hoher Relevanz, sind an freifließenden Wasserstraßen die Maßnahmen mit technischen Komponenten, wie begrünte Steinschüttungen, aber auch Röhrichtgabionen und Steinmatratzen, in den vorderen Rängen angeordnet. Weniger robuste Maßnahmen befinden sich weiter hinten. Sind dagegen die Kosten bei der Entscheidung am wichtigsten, erscheinen die Referenz und die begrünten Steinschüttungen ganz vorn – auch deshalb, weil bei der Kostenermittlung von einer vorhandenen Steinschüttung ausgegangen wird. Kostenintensive Maßnahmen, wie die Weidenspreitlagen, belegen in diesem Fall die hinteren Ränge.

Wird das Kriterium „Ökologie“ absolut priorisiert bei sehr geringer Relevanz von Kosten und Robustheit, liegen, ähnlich wie in Szenario A, ökologisch sehr wirksame Maßnahmen ohne technische Komponenten, wie beispielsweise Pflanzmatten und Weidenspreitlagen, an der Spitze. Röhrichtgabionen und Steinmatratzen, die ökologisch im Vergleich weniger gut abgeschnitten haben, belegen die letzten Ränge.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Weiter zeigen die Ergebnisse, dass unter den hydraulischen Belastungen an einer freifließenden Wasserstraße verschiedene Möglichkeiten bestehen, den aquatischen Lebensraum durch den Einsatz geeigneter Zusatzmaßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion, ökologisch aufzuwerten (Szenario E). In der flexiblen Kombinierbarkeit aller Zusatzmaßnahmen, insbesondere jener im aquatischen Bereich, mit den Uferschutzmaßnahmen liegt ein besonderer Vorteil, der zahlreiche Varianten für einen naturnäheren Uferschutz an Binnenwasserstraßen ermöglicht. Diese kreativ kombinierten Lösungen werden einen wesentlichen Beitrag für eine Aufwertung der Ufer im Sinne einer ökologisch nachhaltigen Gewässerentwicklung leisten.

9 Weiterführendes Monitoring

In dem vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der ersten Monitoringphase von 2012 bis 2017 dargestellt und bewertet. Auf dieser Grundlage konnten wichtige Erkenntnisse zur Eignung der getesteten technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich der Gewährleistung des Uferschutzes und der ökologischen Wirksamkeit gewonnen werden. Einige wichtige Aspekte – wie beispielsweise die Langzeitstabilität, die weitere ökologische Entwicklung und die optimale Unterhaltung der unterschiedlichen pflanzlichen Maßnahmen – können nach dem vergleichsweise kurzen Beobachtungszeitraum noch nicht ausreichend beantwortet werden. Das Monitoring wird deshalb entsprechend fortgesetzt. Anlage 5 gibt einen Überblick über Inhalt und Umfang der im Einzelnen von 2021 bis zunächst 2030 vorgesehenen Aktivitäten. Ein weiterer Bericht mit Zwischenergebnissen ist 2026 vorgesehen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Am rechten Rheinufer von km 440,6 bis km 441,6 wird die Anwendbarkeit von technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen für Bereiche an Binnenwasserstraßen untersucht, in denen auf stabile Ufer nicht verzichtet werden kann. Die Maßnahmen sollen oberhalb von Mittelwasser als Ersatz für konventionelle Schüttsteindeckwerke das Ufer in gleicher Weise schützen und es gleichzeitig ökologisch aufwerten. Der Abschnitt am Rhein mit seinen hohen hydraulischen Belastungen infolge von Schifffahrt und Hochwasser, großen Wasserspiegelschwankungen, steilen Böschungsneigungen und technischem Schüttsteindeckwerk wurde bewusst gewählt, um die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen dieser Ufersicherungen auszuloten.

Die zu testenden technisch-biologischen Ufersicherungen wurden in neun Versuchsfeldern (VF) eingebaut. In vier Feldern blieb die Steinschüttung erhalten, zur ökologischen Aufwertung wurden Gestaltungs- und Pflanzmaßnahmen durchgeführt. In weiteren vier Feldern wurde die Steinschüttung oberhalb Mittelwasser entfernt und durch Ufersicherungen mit Pflanzen ersetzt. In einem Feld wurde nach Rückbau der Steinschüttung oberhalb Mittelwasser kein neuer Böschungsschutz vorgesehen. In einzelnen Feldern wurden zusätzliche lokale Maßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion unterhalb Mittelwasser realisiert. An die Strecke angrenzende Ufer mit konventioneller Steinschüttung dienten als Referenz.

Vor Baubeginn wurden Vegetation und Faunengruppen entlang der Versuchsstrecke erfasst. Seit Fertigstellung im Jahr 2011 wurden die Maßnahmen von einem umfangreichen Monitoringprogramm begleitet. Dabei wurden regelmäßig der Zustand der Maßnahmen, die technischen Randbedingungen (Ufergeometrie, hydraulische Belastungen, Wasserstände, Wetterdaten) und ökologischen Parameter (Vegetation, terrestrische und aquatische Faunengruppen und deren Wechselwirkungen, CO₂-Speicherleistung, verwendete Baumaterialien) sowie der Bau- und Unterhaltungsaufwand (Kosten) erfasst und ausgewertet.

Auf der Grundlage der Monitoring-Ergebnisse wurden die technisch-biologischen Ufersicherungen hinsichtlich der drei Kriterien – Gewährleistung der Uferstandsicherheit, Ökologie (terrestrisch/aquatisch) und Kosten – im Vergleich zur Steinschüttung als Referenz bewertet. Für jedes Kriterium erfolgten vergleichende Bewertungen der Maßnahmen auf einer Skala von „1“ (sehr schlecht) bis „5“ (sehr gut). Diese wurden zu einer integrativen Gesamtbewertung zusammengeführt.

Die Versuchsfelder am Rhein waren verschiedenen Einwirkungen ausgesetzt. Dabei haben sich neben der Schifffahrtsbelastung insbesondere die großen Wasserspiegelschwankungen von bis zu 6 m, die dadurch bedingten langen Überstauzeiten, aber auch die langen Trockenperioden mit Niedrigwasser und die heißen Sommer als maßgebende Belastungen für die Pflanzen der technisch-biologischen Ufersicherungen herausgestellt. Die unterschiedlichen Maßnahmen – mit und ohne technische Komponenten – konnten den Uferschutz unter diesen Bedingungen und in der gewählten Konstruktion und Ausführung nicht alle in gleicher Weise gewährleisten. Nach Optimierung der Maßnahmen („lessons learned“) und unter Berücksichtigung der gefundenen Anwendungsgrenzen können jedoch alle getesteten technisch-biologischen Ufersicherungen

grundsätzlich an Binnenwasserstraßen angewendet werden. Welche Maßnahmen im konkreten Fall aus technischer Sicht einsetzbar sind, hängt maßgeblich von den hydraulischen Belastungen und den Anforderungen an die Uferstandsicherheit ab.

Gleichzeitig konnte für die Maßnahmen eine ökologische Aufwertung gegenüber der Steinschüttung nachgewiesen werden – insbesondere hinsichtlich der Arten- und Strukturvielfalt, des Vorkommens seltener, ufertypischer und gefährdeter Arten, des Anteils heimischer Arten gegenüber Neobiota und der Ausbildung einer Uferzonierung. Hinsichtlich ökologischer Zielstellungen, die durchaus konträr sein können (z. B. Förderung sonniger Reptilienlebensräume versus Entwicklung ufertypischer Röhrichte), zeigte sich, dass keine der getesteten Einzelbauweisen die Förderung aller notwendigen ökologischen Belange leisten kann. Deshalb ist es von zentraler Bedeutung, im Vorfeld der Planung festzulegen, welche Zielorganismen und Zielhabitate zu fördern sind. Eine Maßnahmenkombination kann sinnvoller sein als eine Einzelmaßnahme.

Bei den hohen Anforderungen an die Uferstandsicherheit, den großen hydraulischen Belastungen und steilen Böschungen, wie hier am Rhein, haben sich die ökologisch aufgewerteten Steinschüttungen und Pflaster (VF 1, 4, 6 und 8) als am besten geeignet erwiesen. Sie können die Uferstandsicherheit unabhängig von den zusätzlich eingebrachten Pflanzen und Strukturelementen ohne Einschränkung gewährleisten. Die Maßnahmen sind zudem – da die bestehenden Steinschüttungen erhalten blieben – relativ kostengünstig. Im terrestrischen Bereich kann im Vergleich zur Referenz eine mittlere bis gute ökologische Wirksamkeit erreicht werden, lediglich die ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Steinblöcken (VF 4) zeigte in der bisherigen Entwicklung nur geringe Unterschiede zur Referenz. Die ökologisch aufgewerteten Steinschüttungen sind damit eine ökologisch erfolgreiche sowie zugleich relativ kostengünstige Möglichkeit, Ufer auch dann naturnäher zu gestalten, wenn aufgrund großer hydraulischer Belastungen auf eine Steinschüttung als Uferschutz nicht verzichtet werden kann.

Auch Bauweisen, in denen das Schüttsteindeckwerk ersetzt wurde, wie die Pflanzmatten (VF 7b und c) in den oberen, selten eingestauten Böschungsbereichen, die Steinmatratzen (VF 5) und die Weidenspreitlagen (VF 2, 3), sind unter diesen Randbedingungen anwendbar und erreichen unter Berücksichtigung aller drei Kriterien gute Ergebnisse. Weidenspreitlagen und Pflanzmatten zeigen zudem eine vergleichsweise hohe ökologische Wirksamkeit, die der Steinmatratzen lag in der bisherigen Entwicklung nur wenig über der Referenz. Dagegen konnten die Maßnahmen Kokosmatte über Nassansaat (VF 7a), Röhrichtgabionen (VF 5a) und Pflanzmatten (VF 7) im unteren häufig eingestauten Bereich den Uferschutz nicht ausreichend gewährleisten. Sie waren zudem teurer, sodass sie trotz guter ökologischer Ergebnisse in der Gesamtbewertung der Versuchsstrecke am Ende liegen. Das VF 9, das nach Rückbau der Steinschüttung ohne Böschungsschutz blieb, zeigt neben einer guten ökologischen Aufwertung eine zunehmende Ufererosion und damit auch, dass für stabile Ufer hier ein Uferschutz erforderlich ist.

Die insgesamt oberhalb Mittelwasser angeordneten Maßnahmen wirken ökologisch nur im terrestrischen Bereich. Hier sind eine möglichst große Strukturvielfalt und heterogene Vegetationsentwicklung besonders wirksam. Maßnahmen, die von stark homogenen Strukturen ohne dynamische Entwicklungsmöglichkeiten der Ufermorphologie und des Uferbewuchses geprägt sind,

insbesondere die robusten Bauweisen mit einem Flächengewicht, zeigten eine geringere ökologische Wirksamkeit. Ein deutlicher ökologischer Mehrwert gegenüber der konventionellen Steinschüttung wurde insbesondere dort erreicht, wo zusätzlich Maßnahmen im aquatischen Bereich umgesetzt wurden, wie die Totholzfashinen (VF 4) und Wurzelteller unterhalb Mittelwasser und die durch einen vorgelagerten Steinwall entstandene Flachwasserzone (VF 1). Für diese Maßnahmen konnte im Vergleich zur Referenz eine sehr gute Wirksamkeit für Wasserpflanzen, Fische und Makrozoobenthos nachgewiesen werden. Neben der Strukturvielfalt und dem Vorhandensein von Totholz war hierfür der Schutz vor Schiffswellen und hohem Strömungsangriff wichtig.

Auf der Grundlage der Erfahrungen beim Einbau und während des kritischen Anfangszustands werden für zukünftige Anwendungen Hinweise zur Optimierung der einzelnen Maßnahmen, insbesondere hinsichtlich der konstruktiven Ausführung und der Befestigungen, gegeben. Unter Berücksichtigung dieser Optimierungen werden für alle Maßnahmen aus technischer Sicht die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen an Binnenwasserstraßen angegeben (Anlage 3).

Zusätzlich wurde auf Basis der Bewertungen zur Versuchsstrecke eine Übertragung der Erkenntnisse auf andere Randbedingungen mittels einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse durchgeführt. Sind die Anforderungen an die Uferstabilität nicht so groß wie an der Versuchsstrecke oder ist die hydraulische Belastung geringer, können auch rein pflanzliche Maßnahmen, wie Weidenspreitlagen und Pflanzmatten, eher in eine bevorzugte Auswahl kommen. Mit diesen kann eine bessere ökologische Aufwertung im terrestrischen Bereich erzielt werden als mit den begrüntem Steinschüttungen. In jedem Fall ist die zusätzliche Aufwertung durch aquatisch wirksame Strukturen notwendig, um eine bestmögliche ökologische Gewässerentwicklung zu erreichen.

Das Monitoring in der Versuchsstrecke wird weitergeführt. Ziel aus technischer und ökologischer Sicht ist vor allem die Untersuchung der Langzeitentwicklung der Maßnahmen und der möglichen Unterhaltungsstrategien. Außerdem werden seit 2020 im Versuchsfeld 6 biologisch abbaubare Geotextilvliese zur Anwendung als Filter in technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen getestet. Diese sollen temporär im kritischen Anfangszustand zur Uferstabilität beitragen, bis die Wurzeln die Filterfunktion übernehmen können.

Generell haben die Untersuchungen gezeigt, dass bei der Planung und Ausführung von Ufersicherungen mit Pflanzen an Binnenwasserstraßen im Vergleich zu konventionellen Steinschüttungen in der Umsetzung und Unterhaltung verschiedene Besonderheiten zu beachten sind:

- eingeschränkte Einbauzeiten (Bau nur während der Vegetationsruhe)
- erforderliche Vorlaufzeiten (Vorkultivieren von Pflanzmatten, Gewinnen von Weidenästen während der Vegetationsruhe, etc.)
- höhere Anforderungen an Bauausschreibung und Baubegleitung
- ggf. höhere Baukosten
- ggf. höhere Unterhaltungsaufwendungen im kritischen Anfangszustand (Bewässerung, Nacharbeiten)

Zudem ist bei Anwendung an Flüssen die Hochwasserneutralität der Ufersicherungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Durch entsprechende Unterhaltung (Rückschnitte) ist zu vermeiden, dass der Abflussquerschnitt unzulässig eingeengt und der Hochwasserabfluss behindert wird.

Mit den bisherigen Ergebnissen sind bereits gute Grundlagen für zukünftige Anwendungen von technisch-biologischen Ufersicherungen für die Bereiche an Binnenwasserstraßen vorhanden, die sich aufgrund der Randbedingungen nicht vollkommen frei entwickeln dürfen, sondern geschützt werden müssen. Zur technischen Planung der Maßnahmen wurde ein Dimensionierungsverfahren (DWA 2016) und eine entsprechende Software (GBBSoft+) entwickelt, in die auch die Erkenntnisse der Versuchsstrecke eingeflossen sind (Söhngen et al. 2017). Damit kann für jedes Ufer geprüft werden, ob grundsätzlich eine Ufersicherung erforderlich ist, und wenn ja, welche technisch-biologischen Maßnahmen anwendbar sind. Eine konkrete Bemessung ist möglich. Zusätzlich sollte aus der Kenntnis des ökologischen Potenzials der Ufersicherungsmaßnahmen heraus deren Beitrag zur Behebung bekannter ökologischer Defizite des konkreten Uferabschnitts eingeschätzt werden.

Als weitere Planungsgrundlage wurden Kennblätter zu verschiedenen Maßnahmen erstellt (begrünte Steinschüttung, Weidenspreitlagen, Röhrichtgabionen und Pflanzmatten) (<https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/arbeitshilfen/kennblaetter>). Diese werden im Nachgang zu diesem Bericht um die neuen Erkenntnisse zur ökologischen Wirksamkeit und zur technischen Optimierung der Maßnahmen sowie zur Präzisierung der Anwendungsgrenzen ergänzt. Damit existieren erste fundierte Grundlagen zur Planung, Bemessung, Ausführung und ökologischen Bewertung von technisch-biologischen Ufersicherungen.

Weitere Ergebnisse, Berichte und Informationen zur Versuchsstrecke und zu allen anderen Aktivitäten im Rahmen des Forschungsprojektes werden aktuell im gemeinsamen Internetportal von BAW und BfG (<https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/>) bereitgestellt.

Mit den technisch-biologischen Ufersicherungen stehen Bauweisen zur Verfügung, die Wasserstraßenbereiche, bei denen auf eine Ufersicherung nicht verzichtet werden kann, ökologisch aufwerten können. Hier stellen sie eine sinnvolle Alternative zur Steinschüttung dar. Ungesicherte Ufer mit einer gewässertypischen hydromorphologischen Dynamik, wo immer diese an Binnenwasserstraßen realisiert werden können, sollen und können sie dagegen nicht ersetzen. Auch wenn sie als Bauweisen hinsichtlich des künstlichen Einbringens von Pflanzen und technischer Komponenten ökologische Defizite besitzen, können sie ein nachhaltiges Ufermanagement unterstützen, das die verschiedensten Interessen an Binnenwasserstraßen berücksichtigt und damit einen Beitrag zur Umsetzung rechtlicher, umweltpolitischer und wasserwirtschaftlicher Vorgaben leisten. Ziel ist es, die ökologischen Potenziale künftig deutlich erweitert und stärker chancenorientiert zu nutzen, um eine nachhaltige Gewässerentwicklung aktiv voranzutreiben. Im Fokus sollten dabei neben der Förderung der terrestrischen Ökologie insbesondere die dauerhafte ökologische Aufwertung des aquatischen Bereichs sowie die laterale und longitudinale Vernetzung von Uferlebensräumen stehen.

Literaturverzeichnis

BAW (2011): BAWMerkblatt Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GGB). Ausgabe 2010. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102451>.

BAW (2013): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Supplement 1. Wetterdaten und Rheinwasserstände 9/2011 – 10/2012. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/201306_3_Bericht_Suppl-1_Wetter-WSt.pdf.

BAW (2014): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Teilbericht. Wetterdaten und Rheinwasserstände 11/2012 – 10/2013. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Teilbericht_2013_Wetter-WSt_BAW.pdf.

BAW (2015a): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Teilbericht. Standsicherheit und Unterhaltung – Monitoringergebnisse 11/2012 bis 10/2013. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Teilbericht_2013_Standsicherheit_BAW.pdf.

BAW (2015b): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Teilbericht. Porenwasserdruckmessungen am 19.02.2014. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Teilbericht_Porenwasserdruckmessungen_19_02_2014.pdf.

BAW (2015c): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Teilbericht. Wetterdaten und Rheinwasserstände 11/2013 – 10/2014. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Teilbericht_2013-2014_Wetter-WSt.pdf.

BAW (2016): BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102463>.

BAW; BfG (2010): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Empfehlungen für die Ausführung der Ufersicherungen. Karlsruhe, Koblenz: Bundesanstalt für Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde. Online verfügbar unter <https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/publikationen/berichte>.

BAW; BfG; WSA-MA (2012): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Erster Zwischenbericht. Randbedingungen, Einbaudokumentation, Monitoring. Karlsruhe, Koblenz, Mannheim: Bundesanstalt für

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde; Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim. Online verfügbar unter <https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/publikationen/berichte>.

BAW; BfG; WSA-MA (2013): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Zweiter Zwischenbericht. Erste Monitoringergebnisse 2012. Karlsruhe, Koblenz, Mannheim: Bundesanstalt für Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde; Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim. Online verfügbar unter <https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/publikationen/berichte>.

BAW; BfG; WSA-MA (2014): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Dritter Zwischenbericht. Monitoringergebnisse 2013. Karlsruhe, Koblenz, Mannheim: Bundesanstalt für Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde; Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Kurzbericht_BAW_BfG_21_08_14b.pdf.

BAW; BfG; WSA-MA (2015): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Vierter Zwischenbericht. Monitoringergebnisse 2014. Karlsruhe, Koblenz, Mannheim: Bundesanstalt für Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde; Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/20150917_Kurzbericht_BAW_BfG_2014.pdf.

BAW; BfG; WSA-MA (2016): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Fünfter Zwischenbericht. Monitoringergebnisse 2015. Karlsruhe, Koblenz, Mannheim: Bundesanstalt für Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde; Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Mannheim. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/2016_08_Bericht_Versuchsstrecke_Monitoring.pdf.

Bayerisches Landesamt für Umwelt; Landesfischereiverband Bayern (2005): Totholz bringt Leben in Flüsse und Bäche. Augsburg, München.

Bellmann, Heiko (2017): Geheimnisvolle Pflanzengallen. Ein Bestimmungsbuch für Pflanzen- und Insektenfreunde. 2. Auflage. Wiebelsheim: Quelle & Meyer.

BfG (2014a): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Teilbericht. Vegetation. Monitoringergebnisse 11/2012 – 10/2013. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Teilbericht_2013_Vegetation_BfG.pdf.

BfG (2014b): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Teilbericht Fauna. Monitoringergebnisse 11/2012 – 10/2013. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Teilbericht_2013_Fauna_BfG.pdf.

BfG (2015): Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 – 441,6, rechtes Ufer. Teilbericht. 1. Erfolgskontrolle Fauna. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde. (unveröffentlicht).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (2015): Technisch-biologische Ufersicherungen, Rhein. 1. Erfolgskontrolle Fauna. Abschlussbericht 2014.

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (2017): Technisch-biologische Ufersicherungen, Rhein. 2. Erfolgskontrolle Fauna. Abschlussbericht 2017.

BMU (2018): Aktionsprogramm Insektenschutz der Bundesregierung. Diskussionsvorschläge des BMU für Maßnahmen. Berlin, Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Artenschutz/massnahmen_insektenschutz_bf.pdf.

Bothur, L.; Ernst, J.; Hübner, F. (2015): Vegetationskundliche Auswertung der ingenieurbio- logischen Maßnahmen der Versuchsfelder 2, 3, 7c. Studienarbeit im Modul MLA 1.06 Ingenieurbio- logie – Begrünung anthropogener Extremstandorte. Fachhochschule, Erfurt.

Braun-Blanquet, Josias (1964): Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. Dritte, neu- bearbeitete und wesentlich vermehrte Auflage. Wien: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>.

Bronstejn, Ilja Nikolaevic (1991): Taschenbuch der Mathematik. Frankfurt/M.: Deutsch.

Dierschke, Hartmut (1994): Pflanzensoziologie. Grundlagen und Methoden. Stuttgart: Ulmer (UTB für Wissenschaft Große Reihe Botanik, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften, 8078).

Dümpelmann, Christoph; Korte, Egbert (2014): Rote Liste der Fische und Rundmäuler Hessens (Pisces & Cyclostomata). 4. Fassung, Stand: September 2013. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/rote_liste_der_fische_und_rundmaeuler_web.pdf.

DWA (2016): Merkblatt DWA-M 519. Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Binnengewässern. März 2016. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, M 519).

Eisenmann, Jeannine (2015): Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen. Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit. Dissertation. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für In- genieurbio- logie und Landschaftsbau. Online verfügbar unter <https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubbw:1-17537>.

Ellenberg, Heinz; Weber, Heinrich E.; Wirth, Wolkmar; Düll, Ruprecht; Werner, Willy (1992): Zei- gerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 2., verb. und erw. Aufl. Göttingen: Goltze (Scripta geobo- tanica, 18).

Flade, Martin (1994): Die Brutvogelgemeinschaften Mittel- und Norddeutschlands. Grundlagen für den Gebrauch vogelkundlicher Daten in der Landschaftsplanung. Eching: IHW.

Heinzner, Kathrin (2017a): Geotechnische und ökologische Wirksamkeit von Pflanzmatten an Binnenwasserstraßen. In: Mitteilung der Gesellschaft der Ingenieurbiologie (45), S. 37–83.

Heinzner, Kathrin (2017b): Geotechnische und ökologische Wirksamkeit von Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen. Masterarbeit. Leibniz-Universität, Hannover. Institut für Umweltplanung.

HMULV (2008): Rote Liste der Farn- und Samenpflanzen Hessens. Erstellt von der Arbeitsgruppe "Rote Liste der Farn- und Samenpflanzen Hessens" der Botanischen Vereinigung für Naturschutz in Hessen e. V. (BVNH). 4. Fassung Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter http://natureg.hessen.de/resources/recherche/NAH/RoteListen/NA_RL_025_Farn_und_Samenpflanzen_Einleitung_2008.pdf.

Kleinwächter, Meike; Münchenberg, Tobias; Richter, Otto; Larink, Otto (2017): Laufkäfer (Carabidae). In: Meike Kleinwächter, Uwe Schröder, Silke Rödiger, Bernd Hentschel und Andreas Anlauf (Hg.): Alternative Buhnenformen in der Elbe. Hydraulische und ökologische Wirkungen. Stuttgart: Schweizerbart (Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 11), S. 107–140.

Klotz, Stefan; Kühn, Ingolf; Durka Walter (Hg.) (2002): BIOLFLOR – eine Datenbank mit biologisch-ökologischen Merkmalen zur Flora von Deutschland. Deutschland. Bonn-Bad Godesberg, Münster: Bundesamt für Naturschutz; BfN-Schriftenvertrieb Leserservice im Landwirtschaftsverlag (Schriftenreihe für Vegetationskunde, 38).

Korte, E., Hugo, R.: Die fischfaunistischen Referenzen der Fließgewässer in Rheinland-Pfalz. Mainz: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht des Landes Rheinland-Pfalz.

Kratzberg, S.; Goebel, T. (2015): Vegetationskundliche Auswertung der ingenieurbiologischen Maßnahmen der Versuchsfelder 5a und 9. Studienarbeit im Modul MLA 1.06 Ingenieurbiologie – Begrünung anthropogener Extremstandorte. Fachhochschule Erfurt.

Malten, Andreas (1998): Rote Liste der Sandlaufkäfer und Laufkäfer Hessens (Coleoptera: Cicindelidae, Carabidae). 1. Fassung, Stand: Nov. 1997. Wiesbaden: Hessisches Ministerium des Innern und für Landwirtschaft Forsten und Naturschutz (Natur in Hessen, 12). Online verfügbar unter http://natureg.hessen.de/resources/recherche/NAH/RoteListen/NA_RL_017_Laufkaefer_10_1998.pdf.

Metzing, D.; Garve, E.; Matzke-Hajek, G.; Adler, J.; Bleeker, W.; Breunig, T. et al. (2018): Rote Liste und Gesamtartenliste der Farn- und Blütenpflanzen (Trachaeophyta) Deutschlands. In: Bundesamt für Naturschutz (Hg.): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 7: Pflanzen. Bonn-Bad Godesberg, Münster: Bundesamt für Naturschutz; BfN-Schriftenvertrieb Leserservice im Landwirtschaftsverlag (Naturschutz und biologische Vielfalt, 70,7), S. 13–358.

Millennium Ecosystem Assessment (2005): Ecosystems and human well-being. Synthesis. Washington, DC: Island Press. Online verfügbar unter <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>.

Netzwerk Phytodiversität Deutschland; BfN (Hg.) (2013): Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands. Bonn-Bad Godesberg, Münster: Bundesamt für Naturschutz; BfN-Schriftenvertrieb Leserservice im Landwirtschaftsverlag.

Notz, Dirk; Stroeve, Julienne (2016): Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO₂ emission. In: *Science* 354 (6313), S. 747–750. DOI: 10.1126/science.aag2345.

Refflinghaus, Robert (2009): Einsatz des Analytischen Hierarchie Prozesses zur Vorbereitung der kundenspezifischen Eingangsgrößen eines Quality Function Deployments. Teilergebnisse zum Teilprojekt A1. Technical Report 0901. Technische Universität Dortmund. Sonderforschungsbe-
reich 696. Online verfügbar unter http://www.sfb-696.de/uploads/media/Technical_Report_0901.pdf.

Rommelfanger, Heinrich J.; Eickemeier, Susanne H. (2002): Entscheidungstheorie. Klassische Kon-
zepte und Fuzzy-Erweiterungen. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).

Saaty, Rozann W. (1987): The Analytic Hierarchy Process. What it is and how it is used. In: *Mathe-
matical Modelling* 9 (3-5), S. 161–176. Online verfügbar unter [https://www.sciencedirect.com/
science/article/pii/0270025587904738](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738).

Saaty, Thomas L. (1990): How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. In: *European
Journal of Operational Research* 48, 1990 (1), S. 9–26.

Saaty, Thomas L. (2004): Decision making – The Analytic Hierarchy and Network Processes
(AHP/ANP). In: *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 13, 2004 (1), S. 1–35.

Saaty, Thomas L. (2008): Decision making with the analytic hierarchy process. In: *International
journal of services sciences* 1 (1), S. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.

Saaty, Thomas L.; Tran, Liem T. (2007): On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the
Analytic Hierarchy Process. In: *International Society of the Analytic Hierarchy Process (Hg.):
Proceedings of the 9th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process. for multi-cri-
teria decision making. ISAHP. Viña del Mar, 02.–06.08.2007. Online verfügbar unter
[http://www.isahp.org/2007Proceedings/Papers/Master%20Sessions/Fuzzifying%20Numerical%20
Judgements%20in%20AHP.pdf](http://www.isahp.org/2007Proceedings/Papers/Master%20Sessions/Fuzzifying%20Numerical%20Judgements%20in%20AHP.pdf).*

Schmid (2009): Verkehrsbeobachtungen am Rhein bei Worms bei Rhein-km 441. Messungen vom
August 2009. Bericht. Hg. v. Ingenieurbüro Schmid. Kapsweyer.

Schmidt, J.; Trautner, J.; Müller-Motzfeld, G. (2016): Rote Liste und Gesamtartenliste der Laufkäfer
(Coleoptera: Carabidae) Deutschlands. In: Bundesamt für Naturschutz (Hg.): Rote Liste gefährde-
ter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 4: Wirbellose Tiere (Teil 2). Bonn-Bad
Godesberg, Münster: Bundesamt für Naturschutz; BfN-Schriftenvertrieb Leserservice im Land-
wirtschaftsverlag (Naturschutz und biologische Vielfalt, 70,4), S. 139–204.

Schmitt, Kathrin; Schäffer, Michael; Koop, Jochen; Symmank, Lars (2017): River bank stabilisation by bioengineering. Potentials for ecological diversity. In: *Journal of Applied Water Engineering and Research* 6 (4), S. 262–273. DOI: 10.1080/23249676.2018.1466735.

Schneider, Eva (2013): Weidenspreitlagen als naturnahe Ufersicherung an Binnenwasserstraßen. Beurteilung der Uferschutzfunktion ein Jahr nach deren Einbau. Masterarbeit. Leibniz Universität, Hannover. Institut für Umweltplanung.

Schöll, Franz; Haybach, Arne; König, Bernd (2005): Das erweiterte Potamontypieverfahren zur ökologischen Bewertung von Bundeswasserstraßen (Fließgewässertypen 10 und 20: kies- und sandgeprägte Ströme, Qualitätskomponente Makrozoobenthos) nach Maßgabe der EU-Wasserrahmenrichtlinie. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 49 (5), S. 234–247. Online verfügbar unter <https://www.hywa-online.de/category/49-jahrgang-2005/heft-5-oktober-2005/>.

Schröder, Uwe; Kleinwächter, Meike (2017): Alternative Bühnenformen in der Elbe – Synthese. In: Kleinwächter, Meike; Schröder, Uwe; Rödiger, Silke; Hentschel, Bernd; Anlauf, Andreas (Hg.): *Alternative Bühnenformen in der Elbe. Hydraulische und ökologische Wirkungen*. Stuttgart: Schweizerbart (Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 11), S. 197–217.

Söhngen, B.; Fleischer, P.; Liebenstein, H. (2017): German guidelines for designing alternative bank protection measures. In: *Journal of Applied Water Engineering and Research* 6 (4), S. 298–305. DOI: 10.1080/23249676.2018.1514281 (<https://doi.org/10.1080/23249676.2018.1514281>).

Sokopp, Manuel (2017): Die Auswirkungen von Spreitlagen aus Strauch- oder Baumweiden auf die Uferstabilität schiffbarer Binnenfließgewässer. Dissertation. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau.

Stein, Christian; Walz, Ulrich (2012): Hemerobie als Indikator für das Flächenmonitoring. Methodenentwicklung am Beispiel von Sachsen. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 44 (9). Online verfügbar unter https://www.nul-online.de/artikel.dll/NuL09-12-Inhalt-261-266-1_MzM4NNTA4Nw.PDF.

Sukopp, Herbert (1969): Der Einfluss des Menschen auf die Vegetation. In: *Plant Ecol* 17 (1), S. 360–371. DOI: 10.1007/BF01965917.

Trefflich, Anette; Klotz, Stefan; Kühn, Ingrid (2002): Blühphänologie. In: Klotz, Stefan, Kühn, Ingrid; Walter, Durka (Hg.): *BIOLFLOR – eine Datenbank mit biologisch-ökologischen Merkmalen zur Flora von Deutschland*. Bonn-Bad Godesberg, Münster: Bundesamt für Naturschutz; BfN-Schriftenvertrieb Leserservice im Landwirtschaftsverlag (Schriftenreihe für Vegetationskunde, 38), S. 127–131.

Walter, Heinrich; Lieth, Helmut (1967): *Klimadiagramm-Weltatlas*. Jena: Fischer.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Westphal, Daniel (2016): Adaptive Verkürzung des Analytischen Hierarchie Prozesses zur rationalen Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme. genehmigte Dissertation. Technische Universität, Berlin. Fakultät VII – Wirtschaft und Management. Online verfügbar unter https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/5937/4/westphal_daniel.pdf.

Ziegenhorn, Layla (2017): Geotechnische und ökologische Wirksamkeit von Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen. Masterarbeit. Leibniz Universität, Hannover. Institut für Umweltplanung.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Anlage 1

Übersicht – Randbedingungen im Bereich der Versuchsstrecke Rhein, km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer (BAW, BfG 2010)

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Anlage 1: Übersicht – Randbedingungen im Bereich der Versuchsstrecke Rhein, km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer (BAW, BfG 2010)

Lage	Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer (1 km Länge) Hessisches Rheinufer unterhalb Einmündung des Lampertheimer Altarmes im Landschaftsschutzgebiet „Rheinheissisches Rheingebiet“
Ufersicherung im Ausgangszustand	Technisches Deckwerk – Lose Steinschüttung ohne zusätzliche Filterschicht Wasserbausteine LMB _{5/40} in einer Schichtdicke von 60 bis 90 cm, lokal altes Pflaster, viele Steine im Untergrund
Ufergeometrie	Böschungneigungen: 1:2 bis 1:3 Böschungshöhe: 10 m (km 440,6) ... 7 m (km 441,6), Oberkante des angrenzenden Geländes (GOK): ca. NN +91,0 m ... NN +89,5 m
Flussgeometrie	In Fließrichtung Übergang vom Prallhangbereich zum Gleithangbereich km 440,6: Prallhangbereich, Fahrrinne nahe am Ufer (ca. 25 m) km 441,6: Gleithangbereich, Fahrrinne weiter vom Ufer entfernt (ca. 140 m)
Baugrund	Von GOK bis ca. NN +89,0 m Auelehm; darunter bis ca. 3 m unter Rheinsohle: kiesige Sande, geringe bis mittlere Festigkeit, Schluffinseln
Hydrologie/ Uferbelastungen aus natürlicher Strömung	Große Wasserspiegelschwankungen – Differenz zwischen GIW und HSW (HW): ca. 6 m (> 7 m) Ufernahe Strömungsgeschwindigkeiten und Schubspannungen (aus HN-Modellen): HWMI: $v_{str} = 0,99$ (km 440,6) ... 0,95 m/s (km 441,6), $\tau = 3,6$ (km 440,6) ... 3,4 N/m ² (km 441,6) HWMII: $v_{str} = 1,50$ (km 440,6) ... 1,30 m/s (km 441,6), $\tau = 7,0$ (km 440,6) ... 5,7 N/m ² (km 441,6) Ufernahe Strömungsgeschwindigkeiten (aus Messungen, gemessen in ca. 5 m Uferabstand): maximal 1,5 m/s
Uferbelastungen infolge Schifffahrt	Aus Messungen: Maximale Heckwellenhöhe am Ufer: 0,81 m (km 440,9), maximal Sekundärwellenhöhe: 0,57 m (km 440,9) <i>Bemerkung: Bei den Messungen wird nur immer ein Bruchteil der jährlich hier verkehrenden ca. 40.000 Binnenschiffe erfasst.</i> Berechnet nach (BAW 2011): Maximale Wellenhöhe: 0,40 (km 441,5) ... 0,88 m (km 440,9), maximaler Wasserspiegelabsenk: 0,19 m (km 441,5) ... 0,73 m (km 440,9), maximale Strömungsgeschwindigkeit: 1,10 m/s (km 441,5) ... 1,99 m/s (km 440,9)
Vegetation im Ausgangszustand	Geringe Artenvielfalt (keine geschützten Arten, überwiegend Kratzbeergestrüpp, Allerweltsarten, neophytische Gehölze wie Eschen-Ahorn und Hybrid-Pappeln), geringe Vegetationszonierung, kaum Strukturvielfalt, geringes Bestiedlungspotenzial
Fauna im Ausgangszustand	Geringe Artenvielfalt; bei den terrestrischen Faunengruppen fehlen die Uferspezialisten, meist dominieren Arten ohne spezifische Umweltansprüche; bei der aquatischen Fauna dominiert das Neozoen.

Anlage 2

Übersicht der in den einzelnen Versuchsfeldern eingebrachten Lebendbauweisen/Pflanzelemente, ihrer primären Funktion und den darin eingesetzten Pflanzenarten

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Anlage 2: Übersicht der in den einzelnen Versuchsfeldern eingebrachten Lebendbauweisen/Pflanzelemente, ihrer primären Funktion und den darin eingesetzten Pflanzenarten

Erläuterungen zur Tabelle:

Pflanzenarten mit farblicher Kodierung zur Bewertung ihrer Entwicklung in den ersten 6 Jahren nach Einbau (Angaben der Pflanzenarten in Klammern: Einbringung in vergleichsweise geringer Menge):

- **grün:** Pflanzenarten haben sich in der jeweiligen Bauweise/Zone sehr gut entwickelt (Ausbreitungspotenzial gegeben!);
- **orange:** Pflanzenarten ließen sich in der jeweiligen Bauweise/Zone stets nachweisen, jedoch mengen-/bzw. deckungsmäßig unterrepräsentiert. Ausbreitungspotenzial ist ggf. bei optimierter Bauweise (siehe Anlage 3) gegeben;
- **rot:** Pflanzenarten sind in der jeweiligen Bauweise/Zone überwiegend ausgefallen;
- **schwarz:** Jeweilige(s) Lebendbauweise/Pflanzelement ist bereits zu Beginn ausgefallen, so dass eine Bewertung der Entwicklung der eingebrachten Pflanzenarten nicht möglich ist.

Kennzeichnung der primären Funktion der Pflanzen in den Versuchsfeldern:

- **U:** Pflanzen primär zur Ufersicherung eingebaut und damit erforderlich für die Ufersicherung – Ohne Pflanzen kein Uferschutz gegeben!
- **Ö:** Pflanzen primär zur ökologischen Aufwertung eingebaut, nicht erforderlich für Ufersicherung, können bei guter Entwicklung langfristig auch einen Beitrag zur Ufersicherung leisten – Uferschutz auch ohne Pflanzen gewährleistet!

Versuchsfeld 1		
M8 Anlage senkrecht zum Ufer verlaufender Pflanzgräben, M9 Einbringen von Setzstangen, M12 Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie, M13 Einbau von Totholzstrukturen		
Lebendbauweise/Pflanzelement	Funktion	Pflanzenarten
Weidensetzstangen (M8, 9)	Ö	Silber-, Korb-Weide, (Fahl-Weide)
Lebendfaschinen (M8)	Ö	Silber-, (Purpur-, Fahl-, Korb-Weide)
Buschlagen (M8)	Ö	Silber-, (Purpur-, Fahl-, Korb-Weide)
Heckenlagen (M8) (wurzelnackte Gehölzjungpflanzen)	Ö	Feld-Ahorn, Hasel, Blutroter Hartriegel, Esche, Pfaffenhütchen, Gewöhl. Schneeball, Trauben-Kirsche
Versuchsfeld 2 und 3		
M1 Weidenspreitlagen, Heckenlage		
Lebendbauweise/Pflanzelemente	Funktion	Pflanzenarten
Weidenäste (M1)	U	Silber-, Purpur-, (Fahl-, Korb-Weide)
Querriegelhölzer (M1)	U	Silber-Weide
Heckenlage (VF2) (wurzelnackte Gehölzjungpflanzen)	Ö	Eingrifflicher Weißdorn, Feld-Ahorn, Hasel, Blutroter Hartriegel, Pfaffenhütchen, Gewöhl. Schneeball

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Versuchsfeld 4 M13 Einbau von Totholzstrukturen, M14 Aufbringen von kiesigem Substrat/Steinblöcken		
Lebendbauweise/Pflanzelemente	Funktion	Pflanzenarten
---		---
Versuchsfeld 5 M2 Röhrichtgabionen, M3 und M4 Steinmatratzen ohne bzw. mit vorgezogenen Pflanzmatten, Heckenlage		
Lebendbauweise/Pflanzelemente	Funktion	Pflanzenarten
Vorgezogene Röhrichtgabionen (VF5a, M2) im Bereich MW - 0,5m bis MW + 1,70 m →mit unterschiedlichen Artendominanzverhältnissen für zwei Pflanzonen!	U	Pflanzzone 1: MW - 0,5 m bis MW + 0,5 m Hauptart: Schlank-, Ufer-Segge (60-75 %) + Mischung aus Arten der Röhricht-/Weichholzzone, z. B.: Weißes Straußgras, Gewöhnl. Teichsimse, Sumpf-Schwertlilie, Rohr-Glanzgras, Ufer-Wolfstrapp, Blut-Weiderich (25-40 %) Pflanzzone 2: MW + 0,5 m bis MW + 1,70 m Hauptart: Rohr-Schwingel und Rohr-Glanzgras (60-75 %) + Mischung aus Arten der Röhricht-/Weichholzzone, z.B.: Schlank-, Ufer-Segge und s. o., Gräser, z. B.: Quecke, Wiesen-Fuchschwanz, Rasen-Schmiele, Wolliges Honiggras (25-40 %) →bei Lieferung vollflächig bewachsen und durchwurzelt
Vorgezogene Pflanzmatten auf Steinmatratzen (VF5b, M4) im Bereich MW - 0,5 m bis MW + 1,70 m →mit unterschiedlichen Artendominanzverhältnissen für zwei Pflanzonen!	Ö	Pflanzzone 1: MW - 0,5 m bis MW + 0,5 m siehe Röhrichtgabionen Pflanzzone 1 →bewachsen und durchwurzelt im Monitoringzeitraum sind alle Arten ausgefallen! Pflanzzone 2: MW + 0,5 m bis MW + 1,70 m siehe Röhrichtgabionen Pflanzzone 2 →bei Lieferung bewachsen und durchwurzelt, bereichsweise geringer Bewuchs durch Ausfall dominanter Arten im Monitoringzeitraum sind alle Arten ausgefallen!
Heckenlage (VF5a und b) (wurzel-nackte Gehölzjungpflanzen)	Ö	Eingrifflicher Weißdorn, Feld-Ahorn, Hasel, Blutroter Hartriegel, Pfaffenhütchen, Gewöhnl. Schneeball

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Versuchsfeld 6 M10 Einbringen von Oberboden-Alginat und Ansaat durch Anspritzverfahren, M11 Einzelpflanzung von Röhrichtbulten in die Steinschüttung		
Lebendbauweise/Pflanzelemente	Funktion	Pflanzenarten
Nassansaat (M10) (30 g/m ² Saatgut)	Ö	Glatthafer, Gewöhnl. Weidelgras, Gewöhnl. Knaulgras, Rohr-Schwingel, Quecke, Wiesen-Fuchsschwanz, Wolliges Honiggras, Wiesen-Labkraut, Gewöhnl. Schafgarbe, Weißes Straußgras, Rohr-Schwingel, Rohr-Glanzgras Die Samen wurden weitestgehend ausgespült!
Einzelpflanzen (M11) (4 Stk Röhrichtballen/m ²) im Bereich MW - 0,5 m bis MW	Ö	Sumpf-Schwertlilie, Schmalblättriger Rohrkolben, Schilf, Gewöhnl. Teichsimse, Wasser-Minze, Ufer-Wolfstrapp, Blut-Weiderich Alle Röhrichtballen wurden ausgespült!
Versuchsfeld 7 M5 vorgezogene Pflanzmatten auf Geotextilien, M6 Kokosgewebe über Nassansaat, M7 Röhrichtwalzen		
Lebendbauweise/Pflanzelemente	Funktion	Pflanzenarten
Vorgezogene Pflanzmatten*1 (M5) (20 Stk Pflanzen/m ²) im Bereich VF7a1/a2 von MW - 0,5 m bis MW + 0,5 m im Bereich VF7a1/a2 von MW + 0,5 m bis MW + 1,70 m (Einbindung in Faschinengraben) und VF7b/c von MW + 0,5 m bis Böschungsoberkante	U	Hauptart: Schilf, Rohr-Glanzgras, Schlank-, Ufer-Segge (60-75 %) + Mischung aus Arten der Röhrichtzone, z.B.: Weißes Straußgras, Beinwell, Knotige Braunwurz, Blut-Weiderich, Gewöhnl. Teichsimse, Ufer-Wolfstrapp (25-40 %) →bereits bei Lieferung bereichsweise vegetationslos durch Ausfall einzelner Arten aufgrund schwieriger Anzuchtbedingungen! Hauptart: Schlank*2-, Ufer-Segge*2, Rohr-Glanzgras*2, Rohr-Schwingel*2 (60-75 %) + Mischung aus Arten der Röhrichtzone, z.B.: Weißes Straußgras, Beinwell, Knotige Braunwurz, Blut-Weiderich, Gewöhnl. Teichsimse, Ufer-Wolfstrapp (25-40 %) →bereits bei Lieferung bereichsweise vegetationslos durch Ausfall einzelner Arten aufgrund schwieriger Anzuchtbedingungen, deshalb bereichsweise mit abweichender Artenkombination (Ersatz):

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

		<p>Rohr-Glanzgras*² (30 %), Schlank-Segge*² (20 %), Sumpf-Schwertlilie (20 %), Sumpf-Segge (10 %), Blut-Weiderich (5 %), Mädesüß (5 %), Wasser-Minze (5 %), Bachbungen-Ehrenpreis (5 %)</p> <p>→ bei Lieferung vollflächig bewachsen und durchwurzelt</p>
Nassansaat (M6) (ca. 20 g/m ²) im Bereich MW + 1,70 m bis Böschungsober- kante	Ö	<p>Glatthafer, Gewönl. Weidelgras, Gewönl. Knaulgras, Rohr-Schwingel, Quecke, Wiesen-Fuchsschwanz, Wolliges Honiggras, Wiesen-Labkraut, Gewönl. Schafgarbe, Weißes Straußgras, Rohr-Glanzgras</p>
Röhrichtwalzen (M7) im Bereich VF7b/c von MW bis MW + 0,5 m (4 Stk Röhrichtballen/m ²)	Ö	<p>Sumpf-Schwertlilie, Schilf, Gewönl. Teichsimse, Blut-Weiderich, Ufer-Wolfstrapp, Wasser-Minze</p> <p>→ die Röhrichtwalze hielt den Belastungen des Rheins nicht stand. Alle Röhrichtballen wurden ausgespült!</p>
VF8 M12 Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie		
Lebendbauweise/Pflanzelemente	Funktion	Pflanzenarten
---		---
VF9 M15 kein Uferschutz oberhalb MW, Weidensetzstangen auf Böschungskrone, Ausfachungsbühne mit Weidensetzstangen und -faschinen		
Lebendbauweise/Pflanzelemente	Funktion	Pflanzenarten
Weidensetzstangen und -faschinen (M15)	U	Silber-Weide, (Korb-, Fahl-, Purpur-Weide)

*¹ Siehe auch (BAW/BfG/WSA-MA 2012) für ergänzende Angaben zu den eingesetzten Pflanzmatten (Mattentypen mit unterschiedlicher Artenkombination, Anzuchtbedingungen, Qualitätsmerkmale)

*² Die orange Farbkodierung bezieht sich bei den Arten auf die untere Böschungszone; in der oberen Böschungszone haben sich die Arten im Gesamtgefüge weiterer Arten gut entwickelt (= grün!).

Anlage 3

Zusammenfassende Bewertung der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen hinsichtlich Stabilität und Gewährleistung des Uferschutzes sowie erforderliche Optimierungen und Anwendungsempfehlungen aus technischer Sicht

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Anlage 3: Zusammenfassende Bewertung der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen hinsichtlich Stabilität und Gewährleistung des Uferschutzes sowie erforderliche Optimierungen und Anwendungsempfehlungen aus technischer Sicht

Uferschutz- maßnahme/ Bauweise	Stabilität der Maßnahmen/ Gewährleistung der lokalen Standsi- cherheit der Uferböschung	Durchgeführte Sanierungen	Prinzipielle technische Eignung für Wasserstraßen/ Erforderliche Optimierungen („lessons learned“)	Anwendungsempfeh- lung aus technischer Sicht
Ökologisch aufgewertete Steinschüttun- gen (1 : 3) VF 1, 4, 6, 8 oben und unten	Lokale Standsicherheit von Anfang an durch Steinschüttung ausreichend gege- ben	Keine Sanierung erforder- lich	Generell geeignet <i>(Alginat für Begrünung nicht ge- eignet! (VF 6))</i>	Anwendbar ohne techni- sche Einschränkung (Steinschüttung ist zu bemessen)
Weidenspreit- lagen VF 2 und 3 oben und unten (1 : 3)	Lokale Standsicherheit nicht ausreichend gegeben! Lokale Erosion von Boden unter den Wei- denspreitlagen im Anfangszustand, aber auch langfristig (weniger Wurzeln und Triebe zwischen den Querriegeln); forciert durch Unterhaltungsmaßnahmen, dabei größte Erosionen im VF 2 mit großfläch- igem Rückschnitt (insgesamt bis zu 70 cm Vertiefungen), im VF 3 mit kleinflächigem Rückschnitt bis zu 40 cm Erosion	Lokale Sanierung 2018 im Mittelbereich des VF 2: Weidensetzstangen, Hartriegel (ohne Erfolg), lokale Weidenspreitlage (Wirkung wird sich erst län- gerfristig zeigen); Weitere Beobachtung!	Prinzipiell geeignet Optimierter Einbau/Unterhaltung: Flächendeckende Verlegung der Weidenäste, ggf. auf abbaubarem Geotextil; geringere Abstände der Querriegel (< 50 cm) und Holz- pflocke für besseren Bodenkon- takt; im Rahmen der Unterhaltung keine großflächigen Rückschnitte bis auf 10 cm über dem Boden	Anwendbar bei opti- miertem Einbau unter ähnlichen oder günstigeren Bedingun- gen* im Vergleich zur Versuchsstrecke

Kursiv: Ergebnisse, die nicht standsicherheitsrelevant sind

** Ähnliche oder günstigere Bedingungen im Vergleich zur Versuchsstrecke bedeutet, dass Böschungseignung, anstehender Boden und hydraulische Belastungen zu ähnlichen oder günstigeren Verhältnissen hinsichtlich der Uferstandsicherheit führen (Nachweis über entsprechende Berechnungen)*

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Uferschutz- maßnahme/ Bauweise	Stabilität der Maßnahmen/ Gewährleistung der lokalen Standsi- cherheit der Uferböschung	Durchgeführte Sanierungen	Prinzipielle technische Eignung für Wasserstraßen/ Erforderliche Optimierungen („lessons learned“)	Anwendungsempfeh- lung aus technischer Sicht
Röhrich- gabionen VF 5a unten (1 : 2,5)	Lokale Standsicherheit nicht ausreichend gegeben! Nach 5 Jahren Ausfall fast aller Pflanzenar- ten (außer Schlank- und Uferseggen); schnelle Zerstörung der Kokosummante- lung; Austrag von Boden aus den Gabio- nen; Steinverlagerungen in den Gabionen böschungabwärts; lokal Austrag des Kornfilters	Sanierung 2017: Abdeckung mit Kies und ei- ner Lage Wasserbausteinen; Schlank- und Uferseggen wachsen durch Steinlage; lokale Standsicherheit nach Sanierung mit Wasserbau- steinen ausreichend gegeben	Prinzipiell geeignet Optimierter Einbau: Geeignete Pflanzen (hier: Schlank- und Uferseggen); Verwendung ei- nes in den ersten Jahren stabilen, vorzugsweise langfristig biolo- gisch abbaubaren Geotextils als Ummantelung	Anwendbar bei opti- miertem Einbau unter ähnlichen oder günstigeren Bedingun- gen* im Vergleich zur Versuchsstrecke
Steinmatratzen VF 5a oben VF 5b oben und unten (1 : 2,5)	Lokale Standsicherheit von Anfang an aus- reichend gegeben	Keine Sanierung erforderlich (VF 5b unten: <i>Begrünung mit vorkultivierten Pflanzmatten nicht erfolgreich.</i>)	Generell geeignet (Für natürliche Sukzession geeig- net) (Pflanzmatten auf Steinmatratzen zur Begrünung nicht geeignet)	Anwendbar unter ähnlichen oder günstigeren Bedingun- gen* im Vergleich zur Versuchsstrecke
Pflanzmatten VF 7b, c oben (1 : 3)	Lokale Standsicherheit im Anfangszustand nicht ausreichend gegeben! Lokale Erosion von Boden unter den Pflanzmatten (keine Filterstabilität; Pflö- cke, Querriegel instabil unter Auftrieb, He- ben und Senken der Pflanz- und Filter- matte unter Auftrieb)	Lokale Sanierungen 2012: Einbau von Rasensoden, be- festigt mit engen Querrie- geln, nachträgliche Nassan- saat; Lokale Standsicherheit nach Sanierung ausreichend gege- ben	Prinzipiell geeignet in selten eingestauten Böschungs- bereichen Optimierter Einbau: mit vorzugsweise abbaubarem fil- terstabilem Geotextil und Querrie- geln im engeren Abstand und aus- reichend tiefen Pflöcken	Anwendbar bei opti- miertem Einbau in sel- ten eingestauten Berei- chen unter ansonsten ähnlichen oder günsti- geren Bedingungen* im Vergleich zur Ver- suchsstrecke

Kursiv: Ergebnisse, die nicht standsicherheitsrelevant sind

* Ähnliche oder günstigere Bedingungen im Vergleich zur Versuchsstrecke bedeutet, dass Böschungseignung, anstehender Boden und hydraulische Belastungen zu ähnlichen oder günstigeren Verhältnissen hinsichtlich der Uferstandsicherheit führen (Nachweis über entsprechende Berechnungen)

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Uferschutz- maßnahme/ Bauweise	Stabilität der Maßnahmen/ Gewährleistung der lokalen Standsi- cherheit der Uferböschung	Durchgeführte Sanierungen	Prinzipielle technische Eignung für Wasserstraßen/ Erforderliche Optimierungen („lessons learned“)	Anwendungsempfeh- lung aus technischer Sicht
Pflanzmatten VF 7a, b, c unten (1 : 3)	Lokale Standsicherheit von Anfang an nicht ausreichend gegeben! Häufiger Einstau verhindert durch Heben und Senken der Pflanz- und Filtermatte Wurzelwachstum in den Untergrund; kein Anwachsen der Pflanzen; Lockerung der Pflöcke und Querriegel; Erosion von Boden unter den Pflanz- und Filtermatten; Pflanzen sterben ab; Schafwollmatte löst sich sehr schnell auf	Sanierung 2012/2013: Flächendeckende Abdeckung der Pflanzmatten mit einer Lage Wasserbausteinen; Pflanzen wachsen durch Steinlage hindurch; Lokale Standsicherheit nach Sanierung mit Wasserbausteinen ausreichend gegeben	Nicht geeignet mit den getesteten Befestigungen in häufig eingestauten Bereichen Optimierter Einbau: mit einer Lage Wasserbausteinen als Befestigung	Anwendbar bei optimiertem Einbau unter ähnlichen oder günstigeren Bedingungen* im Vergleich zur Versuchsstrecke
Kokosmatte über Nassansaat VF 7a oben (1 : 3)	Lokale Standsicherheit von Anfang an nicht ausreichend gegeben! Lockerung der Pflöcke; deutliche Erosion von Boden unterhalb und durch Kokosmatte hindurch (fehlende Filterstabilität); umfangreiche Bodenverlagerungen unterhalb der Kokosmatte (keine Querriegel zur Begrenzung); zunehmende Böschungverformungen	Sanierung 2012: Auffüllen der Hohlräume; Abdeckung mit Rasensoden, befestigt mit Pflöcken und Querriegeln; nachträgliche Nassansaat (überwiegend nicht erfolgreich) Sanierung 2017: Großflächige Abdeckung mit einer Lage Wasserbausteinen; Lokale Standsicherheit nach Sanierung mit Wasserbausteinen ausreichend gegeben	Nicht geeignet in ständig oder zeitweise eingestauten Böschungsbereichen	Anwendbar nur oberhalb des höchsten Wellenaufbaus

Kursiv: Ergebnisse, die nicht standsicherheitsrelevant sind

* Ähnliche oder günstigere Bedingungen im Vergleich zur Versuchsstrecke bedeutet, dass Böschungsneigung, anstehender Boden und hydraulische Belastungen zu ähnlichen oder günstigeren Verhältnissen hinsichtlich der Uferstandsicherheit führen (Nachweis über entsprechende Berechnungen)

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Uferschutz- maßnahme/ Bauweise	Stabilität der Maßnahmen/ Gewährleistung der lokalen Stand- sicherheit der Uferböschung	Durchgeführte Sanierungen	Prinzipielle technische Eignung für Wasserstraßen/ Erforderliche Optimierungen („lessons learned“)	Anwendungsempfeh- lung aus technischer Sicht
Ohne Bö- schungsschutz, Weidensetz- stangen auf der Böschungs- planie VF 9 oben und unten (1 : 3)	Lokale Standsicherheit erwartungsgemäß von Anfang an nicht ausreichend gegeben! Andauernde, zunehmende Erosion im Böschungsbereich; Weidensetzstangen werden durch Erosion freigespült, verlie- ren ihren Halt und gehen verloren (Einzige Maßnahme, bei der die Standsi- cherheit planmäßig nicht zu gewährleisten war)	Lokale Sanierung 2016: Sicherung des 500 m – Schil- des mit Wasserbausteinen Weitere Beobachtung! Generelle Sanierung erfor- derlich, wenn stabiles Ufer gewünscht wird	Nicht geeignet, wenn stabile Ufer gefordert sind Einzelne Weidensetzstangen auf der Böschungsplanie bieten kei- nen Schutz vor Ufererosion	Anwendbar bei erosi- onsstabilen Ufern oder wenn Erosion uneinge- schränkt zugelassen werden kann

Kursiv: Ergebnisse, die nicht standsicherheitsrelevant sind

** Ähnliche oder günstigere Bedingungen im Vergleich zur Versuchsstrecke bedeutet, dass Böschungsneigung, anstehender Boden und hydraulische Belastungen zu ähnlichen oder günstigeren Verhältnissen hinsichtlich der Uferstandsicherheit führen (Nachweis über entsprechende Berechnungen)*

Anlage 4

Maßnahmenblätter (Dokumentation der Einzelmaßnahmen)

Anlage 4: Maßnahmenblätter (Dokumentation der Einzelmaßnahmen)

Im vorliegenden Bericht wurden primär die technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen in den einzelnen Versuchsfeldern betrachtet und bewertet. Ergänzend wird im Folgenden die Entwicklung aller Einzelmaßnahmen seit dem Einbau 2011 aus technischer und ökologischer Sicht dokumentiert. In Tab. A1 sind die Einzelmaßnahmen vorab aufgelistet, die entweder Teile der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen sind oder als zusätzliche Maßnahmen ohne Uferschutzfunktion zur Anwendung kamen. Außerdem zeigt die Tabelle, in welchen Versuchsfeldern die Einzelmaßnahmen eingebaut wurden.

Tabelle A1: Zuordnung der Einzelmaßnahmen zu den Versuchsfeldern

Technisch-biologische Uferschutzmaßnahmen als Ersatz der technischen Schüttsteindeckwerke oberhalb MW bzw. MW - 0,5 m	
M1 Weidenspreitlagen diagonal und quer eingebaut	VF 2 und 3
M2 Röhrichtgabionen auf Kornfilter	VF 5a unten
M3 Steinmatratzen auf Kornfilter ohne Pflanzmatten	VF 5a und 5b oben
M4 Steinmatratzen auf Kornfilter mit Pflanzmatten	VF 5b unten
M5 Pflanzmatten auf verschiedenen Geotextilien als Filter	VF 7a, 7b und 7c
M6 Kokosmatten über einer Nassansaat	VF 7a oben
M7 Röhrichtwalzen	VF 7b und 7c (bei AZW)
Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung der vorhandenen Schüttsteindeckwerke	
M8 Anlage senkrecht zum Ufer verlaufender Pflanzgräben in einer Steinschüttung mit wahlweise ausschlagfähigen Weidenfaschinen, Busch- und Heckenlagen	VF 1
M9 Einbringen von Weidensetzstangen	VF 1, VF 9
M10 Einspülen von Oberboden-Alginat in eine Steinschüttung und Ansaat durch Anspritzverfahren	VF 6
M11 Einzelpflanzung von Röhrichtbulen in die Steinschüttung	VF 6
M12 Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie zur Reduzierung schiffsinduzierter Belastungen	VF 1, VF 8
M13 Einbau von Totholzstrukturen (Totholzstämmen mit Wurzelteiler, Totholzfashinen, Ausfachungsbühne) in Steinschüttung	VF 1, VF 4, VF 9
M14 Aufbringen von kiesigem Substrat / Grobstein-Gruppen auf vorhandene Steinschüttung	VF 4
Kein Uferschutz nach Rückbau der Schüttsteindeckwerke oberhalb MW, begrenztes Zulassen freier Dynamik	
M15 Rückbau der technischen Ufersicherung, kein Uferschutz oberhalb von MW, begrenztes Zulassen freier Dynamik	VF 9

Maßnahme M1: Weidenspreitlagen diagonal (VF2) bzw. quer (VF3) eingebaut

Weidenspreitlagen (WSL) diagonal bzw. quer eingebaut (Böschungsneigung 1:3)	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): Kiesüberdeckung bei höheren Wasserständen zunehmend vollständig erodiert; Weidenäste und Befestigungen weitestgehend stabil; einzelne Pflöcke bei Überstau unter Auftrieb herausgezogen, begrenzte Erosion und Bodenverlagerungen unter den verlegten Ästen; Reisigabdeckung im unteren Böschungsbereich verhindert Erosion nicht; nicht flächendeckend verlegte Äste haben Erosion begünstigt; nachträglich erneute Kiesabdeckung für besseren Bodenkontakt der Weidenäste; gute Wurzelbildung, relativ dichtes, verzweigtes Wurzelsystem mit Längen bis 60 cm durch Aufgrabungen nachgewiesen <p>2013/14:</p> <ul style="list-style-type: none">– Gute, weitgehend flächendeckende Entwicklung der Weiden trotz zahlreicher Hochwasser, z. T. bis über die GOK reichend und 10 wöchigem Dauereinstau bis ca. MW +1,5 m; insgesamt guter Verbund mit dem anstehenden Boden erreicht; dadurch allmähliche Begrenzung weiterer Sedimentausspülungen und Bodenverlagerungen unter Weidenästen, kleinräumig noch Weiden ohne schlüssigen Bodenkontakt, insbesondere zwischen den Querriegeln; Gesamtstandsicherheit dadurch nicht beeinträchtigt– Wuchskräftigster Bereich zwischen MW +0,5/1,0 m und MW +1,7 m– Im unteren, am meisten durch Schifffahrt belasteten und häufig lange eingestauten Böschungsbereich (MW bis MW +1 m) vergleichsweise geringer Deckungsgrad, weniger und nicht so vitale Weidentriebe, diese 2014 mit sprossbürtigen Wurzeln <p>2015:</p> <ul style="list-style-type: none">– Weitere Aufgrabung bestätigt gut entwickeltes Wurzelsystem mit Längen bis 1,70 m, lokal nachgewiesene Wurzelbildung für Gewährleistung des Uferschutzes ausreichend, wenn diese flächendeckend vorhanden ist– Testen erster Unterhaltungskonzepte: Rückschnitt der Weiden bis ca. 10 cm über Böschungsoberfläche, z. T. sehr großflächig (VF 2), z. T. nur bereichsweise (VF 3), Schädigung der Weiden in großflächig zurückgeschnittenen Bereichen durch nachfolgende Wetterextreme (zunächst langer Überstau, dann Trockenheit), mittlerer Böschungsbereich am stärksten betroffen, hier verstärkte Bodenerosion– Gute Entwicklung der nicht bzw. nur lokal zurückgeschnittenen Weiden– Lokale Uferstabilität nach Rückschnitt der Weiden insbesondere im VF 2 nicht mehr überall ausreichend gewährleistet, zunehmende Bodenerosion bei HW <p>2018:</p> <ul style="list-style-type: none">– Wuchskräftigste Zone im unteren Böschungsbereich, durch sehr trockenen Sommer Absterben von Weiden im oberen Böschungsbereich– Weitere Beobachtung, da lokale Uferstabilität durch weitere Erosion kritisch
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none">– Flächige Gehölzentwicklung mit standorttypischen Gehölzen der Weichholzaue durch Verwendung niedrigwüchsiger Strauchweiden (Purpur-Weide) in Kombination mit höherwüchsigen Baumweiden (Silber-Weide); letztere deutlich als solche zu unterscheiden (Höhenstufung im Bestand als Strukturmerkmal)– Zunächst dominante Entwicklung der Purpur-Weide in allen Böschungszonen, in Folgejahren zunehmende Ausprägung einer Zonierung (Silber-Weide im unteren feuchteren Bereich dominant)

	<ul style="list-style-type: none"> – Spontane Entwicklung erster krautiger Arten und einzelner Robinien (Neophyt) im Schutz der Weiden (2012); Rückgang des Spontanbewuchses aufgrund zunehmender Beschattung durch die Weiden in den Folgejahren (insgesamt gehölzgeprägte Bauweise mit eher geringem Artenreichtum); in trockenen Jahren bereichsweise Schwächung der Weiden durch Befall mit Pappel-Seide, geringfügig Rostpilzbefall an Purpur-Weiden – Seit 2015 (erstmalige Unterhaltung) strukturreiche, mehrschichtige Bewuchsentwicklung insbesondere im weniger intensiv unterhaltenen VF 3; höhere Ausfallraten von Weiden in intensiv zurückgeschnittenen Bereichen (VF 2), dort hingegen temporäre Zunahme an krautigen Arten (höherer Artenreichtum und Feuchtezonierung erkennbar); mit sukzessiv eingewandertem Taubenkropf Vorkommen einer gefährdeten Art <p>Aquatische Fauna (2012-2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Es kann kein Einfluss der Maßnahme auf die Fisch- und Makrozoobenthosbesiedlung im Vergleich zur Referenz festgestellt werden. <p>Terrestrische Fauna (2013-2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vögel: Die WSL zeigen erste Tendenzen, geeignete Habitatstrukturen für Gehölzbrüter zu entwickeln. – Laufkäfer: Einstellung einer diverseren und individuenreicheren Laufkäfergesellschaft mit gestiegenem Anteil ufertypischer Arten über die Zeit – Reptilien: Weidenbestand als Reptilienhabitat ungeeignet – Spinnen: bisher kein eindeutiges Signal hinsichtlich der Spinnenzönose ableitbar – Sonstige Organismengruppen: WSL begünstigen spontanen Eintrag von Totholz, weshalb von einer positiven Wirkung auf Totholzbewohner ausgegangen wird; flächig blühende Bienenweide für Nektar und Pollen sammelnde Insekten, viele Insektenarten an Weiden mit engem Wirtspflanzenspektrum beobachtbar (Gallen der Gallwespe, Weidenschäumzikade, Raupen der Weidenblattwespe) <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bauweise besteht fast ausschließlich aus Lebend- und Naturmaterial – Hohe CO₂-Speicherleistung der Weiden als klimaregulierende Ökosystemleistung
<p>Pflege/ Unterhaltung</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Anfänglich: Beobachtung hinsichtlich Fraßschädlingen, schmarotzenden Arten, Rostpilzbefall (Schwächung der Weiden); Entfernung vereinzelt aufgekommener Neophyten (Robinie) – 2015: Rückschnitt der Weiden, VF 2: flächiger Rückschnitt in 95 % des Versuchsfeldes, Herauspflügen einzelner Baumweiden; VF 3: abschnittsweiser Rückschnitt (3 Abschnitte, dazwischen kein Rückschnitt); Herauspflügen einzelner Baumweiden
<p>Sanierungs- maßnahmen</p>	<ul style="list-style-type: none"> – 2012: nachträgliche Kiesabdeckung – 2018/19: Versuch einer Verdichtung der Weiden im mittleren Böschungsbereich des VF 2 durch Einbringen von Stekhölzern und probeweise einer lokalen Weidenspreitlage – Beobachtung der weiteren Entwicklung; nachträglich eingebrachter Hartriegel im oberen Böschungsbereich nicht erfolgreich

Maßnahme M2: Röhrichtgabionen auf Kornfilter (VF5a)

Röhrichtgabionen auf Kornfilter (Böschungsneigung 1:2,5)	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): relativ unkritisch, da aufgrund Eigengewicht von Anfang an stabile Lage auf der Böschung, keine zusätzlichen Befestigungen erforderlich; zunächst mangelnde Fußeinbindung in der Steinschüttung führte nach ersten Hochwässern zu leichten Rutschungen der Röhrichtgabionen (steile Böschungsneigung); gute Lagestabilität nach Verstärkung der Fußeinbindung mit Wasserbausteinen <p>2013:</p> <ul style="list-style-type: none">– Weiterhin Gewährleistung der Uferstabilität durch das Eigengewicht und die flächendeckende stabile Lage der Gabionen auf der Böschung sowie den filterstabilen Aufbau innerhalb der Gabionen und zum Untergrund (Kornfilter)– Weitere Hochwasser, insbesondere der 10-wöchige Dauereinstau der gesamten Gabionen, bei gleichzeitiger hydraulischer Belastung führten zu großen Verlusten bestimmter Pflanzenarten (Pflanzzone 1 (MW bis MW +1 m): Rohr-Glanzgras, Weißes Straußgras, Teich-Simse, Ufer-Wolfstrapp, Blut-Weiderich, Sumpfschwertlilie; Pflanzzone 2 (MW +1 m bis MW +1,7 m): Rohr-Glanzgras); nach HW einzelne lokale Schäden an den Gabionen, ausgelöst durch Pflanzenausfälle und Schäden am Kokosgewebe, so dass örtlich geringe Mengen innenliegenden Substrats ausgespült wurden <p>2014:</p> <ul style="list-style-type: none">– Bewuchsausfälle verstärkten sich weiter; in Pflanzzone 1 (s. o.) überwogen „nicht“ bis „kaum“ bewachsene Gabionenquadrate, lediglich die gepflanzten Großseggen erreichten noch eine Deckung von 30 % bei 35 % Gesamtdeckung pflanzlichen Bewuchses; in Pflanzzone 2 (s. o.) erreichten die gepflanzten Arten Rohr-Schwingel und Rohr-Glanzgras nur eine Gesamtdeckung von 25 %, es überwogen ebenfalls „nicht“ bis „kaum“ bewachsene Gabionenquadrate; Schäden an den Gabionen intensivierten sich, durch fehlende Pflanzen und fehlendes Kokosgewebe und zunehmenden Substrataustrag aus den Gabionen <p>2015:</p> <ul style="list-style-type: none">– Weiterhin stark rückläufige Bewuchsentwicklung (weitere Abnahme der Gesamtdeckung des Bewuchses auf 15–20 % in Pflanzzone 1 und 5–35 % in Pflanzzone 2); verbliebene Arten in den einzelnen Pflanzonen analog zu 2014; zunehmende böschungsabwärts gerichtete Steinverlagerungen innerhalb der substrat- und vegetationslosen Gabionen <p>2016:</p> <ul style="list-style-type: none">– Zum Teil „leere“ Maschendrahtumhüllungen im oberen Bereich infolge der Steinverlagerungen innerhalb der Gabionen, der darunter liegende Kornfilter kann zunehmend ausgetragen werden. Uferstabilität ist dadurch langfristig gefährdet, deshalb 2016 Stabilisierung durch Abdeckung der Gabionen mit einer Lage Wasserbausteinen <p>2017–2020:</p> <ul style="list-style-type: none">– Uferstabilität nach Sanierung mit Wasserbausteinen ausreichend gegeben
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): Initiierung einer standortgerechten Ufervegetation durch die nach unterschiedlicher Zonierung bepflanzten Röhrichtgabionen und beginnende Besiedlung mit Spontanbewuchs, somit Erhöhung der Lebensraumfunktion gegenüber dem weitgehend vegetationsfreien ursprünglichen Zustand

	<ul style="list-style-type: none"> – 2013: Röhrichtzone (unterer Böschungsbereich) nur noch in Teilbereichen mit großen Verlusten einzelner Arten (s. o.) ausgeprägt; Rückgang der anfänglichen Artenvielfalt; Seggen bislang überstauungstolerant und in Ausbreitung begriffen; höhere Deckungsgrade des Bewuchses in höher gelegener Pflanzzone 2 (kürzer überstaut als Pflanzzone 1); Rückgang des Spontanbewuchses – 2014: weiterer Bewuchsausfall, Rückgang der Artenzahlen und Deckungsgrade (Pflanzung und Spontanbewuchs), Pflanzzone 1 stärker betroffen als Pflanzzone 2 – 2015: anhaltend stark rückläufige Tendenz der Bewuchsentwicklung und Artenzahl in beiden Pflanzonen; vegetationsfreie Gabionenbereiche mit offen liegendem Drahtkörper überwiegen und stellen eine zunehmende Gefahr für Fische bei Überstauereignissen dar – 2016 (vor Sanierung): inselartiger Bewuchs mit alleinig aus ursprünglicher Pflanzung verbliebenen Seggen in Pflanzzone 1; in beiden Pflanzonen geringe Arten- und Blütenvielfalt (fast ausschließlich heimische, jedoch überwiegend uferuntypische „Spontan“-Arten), geringe Pflanzenmenge, mit sukzessiv eingewandertem Ufer-Alant Vorkommen einer RL-Art – 2017 (nach Sanierung) – 2019: insbesondere Seggen, aber auch weitere Arten der ursprünglichen Pflanzung und heimischer Spontanbewuchs profitieren von der Stabilität der Auflast und wachsen durch Lücken der Steinlage, seither wieder positive Entwicklung der pflanzlichen Artendiversität <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Es kann kein Einfluss der Maßnahme auf die Fisch- und Makrozoobenthosbesiedlung im Vergleich zur Referenz festgestellt werden. <p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vögel: Nach gutachterlicher Einschätzung bietet die Maßnahme in ihrem bisherigen Entwicklungsverlauf keine geeigneten Habitatstrukturen für Vögel. – Laufkäfer: höhere Individuen- und Artenzahlen in der Untersuchungsperiode 2013/14 im Vgl. zu 2017; jedoch vergleichbar geringer Anteil uferuntypischer Individuen (Effekte möglicherweise auf Verlust der Röhrichtvegetation und Sanierungsmaßnahmen zurückzuführen), insgesamt Einstellung einer diverseren und individuenreicheren Laufkäfergesellschaft im Vgl. zur Referenz – Reptilien: keine eindeutige Bewertung der Maßnahmenwirkung möglich – Spinnen: Maßnahme brachte in Untersuchungsperiode 2013/14 erhöhte Arten- und Individuenzahlen im Vgl. zur Referenz hervor, die sich in 2017 jedoch wieder an die Referenz angleichen; insgesamt hoher Anteil uferuntypischer Individuen, kein eindeutiger Effekt der Maßnahme ableitbar <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bauweise mit hohem Anteil künstlicher und naturferner Materialien (verzinkter Draht, Steine, Polypropylen als feines Stützgerüst für den Pflanzkörper)
<p>Pflege/ Unterhaltung</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Wenige Bewässerungsgänge nach Baufertigstellung, ansonsten keine Pflege – Beobachtung hinsichtlich neophytischer Arten und Fraßschädlingen – Intensive Beobachtung der Gabionen hinsichtlich Bewuchsentwicklung und Materialaustrag
<p>Sanierungs- maßnahmen</p>	<ul style="list-style-type: none"> – 2012: Verstärkung der Fußeinbindung durch zusätzliche Wasserbausteine kurz nach dem Einbau – 2016: Abdeckung der gesamten Röhrichtgabionen mit einer Lage Wasserbausteine (LMB_{5/40}) – 2017-2020: keine weiteren Sanierungsmaßnahmen erforderlich

Maßnahme M3: Steinmatratzen auf Kornfilter ohne Pflanzmatten, mit Oberbodenauftrag (VF5a und VF5b oben)

Steinmatratzen (SM) auf Kornfilter, ohne Pflanzmatten, mit Oberbodenauftrag (Böschungseigung 1:2,5)	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012): unkritisch, da aufgrund des Eigengewichts von Anfang an stabile Lage auf der Böschung; keine zusätzlichen Befestigungen erforderlich; Oberbodenauftrag in den von Hochwässern überfluteten Bereichen erwartungsgemäß erodiert, jedoch ohne Relevanz für die Uferstabilität – 2013: Uferschutz durch flächendeckende stabile Lage der Steinmatratzen auf der Böschung sowie den filterstabilen Aufbau durch Kornfilter auch nach weiteren Hochwässern und hydraulischer Belastung gewährleistet; vereinzelt punktuelle Schäden am Kunststoffnetz – 2014–2020: Aussagen haben weiterhin Bestand; keine weiteren Schäden am Kunststoffnetz aufgetreten, Uferschutz durch Steinmatratzen ausreichend gewährleistet
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012): schnelle und großflächige Besiedlung der Steinmatratzen mit krautiger Spontanvegetation; dichter und kräftiger Bewuchs der nahe der Böschungsschulter liegenden, noch übererdeten Bereiche im Vergleich zu den durch Hochwasser frei gespülten Steinmatratzen in den darunter liegenden Böschungsbereichen; Entwicklung eines arten- und strukturreichen Bewuchses aufgrund der unterschiedlichen Substratbedeckung – 2013: höhere Gesamtdeckung pflanzlichen Bewuchses in noch übererdeten im Vergleich zu freigespülten Bereichen (ca. 90 % im Vgl. zu 50 %); Stickstoffliebende Arten, insbesondere Beifuß, dominieren – 2014: höhere Gesamtdeckung pflanzlichen Bewuchses, jedoch geringere Artenzahl in noch übererdeten im Vergleich zu freigespülten Bereichen (ca. 75 % zu 55 % Deckung/Ø 34 Arten zu Ø 60 Arten); Stickstoffliebende Arten, insbesondere Beifuß und Große Klette dominieren – 2016: höhere Gesamtdeckung und Artenzahl in noch übererdeten im Vergleich zu freigespülten Bereichen (ca. 60 % zu 20 % Deckung/57 Arten zu 51 Arten); gras-krautreicher Bewuchs aus überwiegend heimischen, jedoch uferuntypischen Arten (bedingt durch die Lage der SM im mittleren und oberen Böschungsbereich), Vorkommen von 5 RL-Arten und einer geschützten Art, weiterhin Vorkommen von einigen bundesweit seltenen Arten mit Vorkommen entlang großer Fließgewässer bzw. Arten der Halbtrockenrasen- und mageren Wiesen, insgesamt hoher Arten- und Blütenreichtum im Vgl. zur Referenz <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Die Maßnahme ist aufgrund ihrer Lage im mittleren und oberen Böschungsbereich für Fische und Makrozoobenthos unwirksam. <p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vögel: kein nachweisbarer Effekt – Laufkäfer: insgesamt Einstellung einer diverseren und individuenreicheren Laufkäfergesellschaft im Vgl. zur Referenz; Vorkommen von 4 RL-Arten – Reptilien: deutlich erhöhte Sichtungszahlen im Vgl. zur Referenz deuten darauf hin, dass die offenen und besonnten Bereiche geeignete Reptilienhabitate stellen können – Spinnen: Maßnahme brachte in Untersuchungsperiode 2013/14 erhöhte Arten- und Individuenzahlen im Vgl. zur Referenz hervor, die sich in 2017 jedoch wieder

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

	<p>an die Referenz anglichen; insgesamt hoher Anteil uferuntypischer Individuen, kein eindeutiger Effekt der Maßnahme ableitbar</p> <ul style="list-style-type: none">– Sonstige Organismengruppen: hoher und diverser Blütenreichtum im Vgl. zur Referenz lässt auf erhöhte Lebensraumqualität für blütenbesuchende Insekten schließen <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none">– Bauweise mit hohem Anteil künstlicher und naturferner Materialien (Polypropylenetz, kleine Wasserbausteine)
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– Geringe Pflege und Unterhaltung: regelmäßige Entfernung vereinzelt aufgekommener Neophyten (Eschen-Ahorn, Goldrute, Robinie, Platane, Hybrid-Pappel, Topinambur)
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– 2012/2013: kleinere Reparaturarbeiten am Kunststoffnetz; anschließend keine Maßnahmen mehr erforderlich

Maßnahme M4: Steinmatratzen auf Kornfilter mit Pflanzmatten (VF5b, unten)

Nach Entfernen der Pflanzmatten 2013 keine weitere Betrachtung der ursprünglichen Bauweise, künftig weitere Betrachtung wie M3

Steinmatratzen (SM) auf Kornfilter mit Pflanzmatten (Böschungsneigung 1:2,5)	
Uferstabilität	<p>1. Steinmatratzen:</p> <ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): unkritisch, da aufgrund des Eigengewichts von Anfang an stabile Lage auf der Böschung, keine zusätzlichen Befestigungen auf der Böschung erforderlich– 2013: Uferschutz durch flächendeckende stabile Lage der Steinmatratzen auf der Böschung sowie den filterstabilen Aufbau durch Kornfilter auch nach weiteren Hochwässern und hydraulischer Belastung gewährleistet; vereinzelt punktuelle Schäden am Kunststoffnetz– 2014–2020: Aussagen von 2013 haben weiterhin Bestand, keine weiteren Schäden am Kunststoffnetz aufgetreten <p>2. Pflanzmatten, auf Steinmatratzen befestigt:</p> <ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): kein optimaler Zustand der Pflanzmatten bereits beim Einbau; Matten weisen kaum Eigengewicht auf; Auftrieb und Wellenbelastung bei Überstau führen zu Druckwechselln („Pumpeffekten“), dementsprechende Auf- und Abbewegungen der Matten verhindern dauerhaft flächigen Kontakt zum Untergrund und damit die Wurzelentwicklung in die Steinmatratzen; Trockenzeiten bei niedrigen Wasserständen und Frost schädigten Pflanzen; in relativ kurzer Zeit vollständiger Ausfall der vorkultivierten Arten der Pflanzmatten, Beschädigungen und lokale Zerstörung der Trägermatten (Kokosgewebe) selbst– 2013: weitere starke Belastungen, insbesondere durch 10-wöchigen Dauereinstau und gleichzeitige Schifffahrtsbelastung; keine Pflanzenentwicklung, Kokosträgergewebe vollständig erodiert; nur noch 3-dimensionales Kunststoffgitter vorhanden– Pflanzmatten auf Steinmatratzen sind unter den gegebenen Randbedingungen (Böschungsneigung 1:2,5, mehrfacher Überstau bei gleichzeitiger hydraulischer Belastung infolge Schifffahrt, Trocken- und Frostzeiten, schlechter Ausgangszustand der Matten, im Ergebnis fehlende Durchwurzelung der Steinmatratzen) nicht geeignet (deshalb Rückbau der Pflanzmattenreste)– Uferschutzfunktion durch Steinmatratzen ausreichend gegeben
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none">– Teilmaßnahme „Pflanzmatten“ nicht erfolgreich aufgrund des vollständigen Ausfalls der vorkultivierten und wenigen spontan eingewanderten Arten; das ökologische Ziel, eine naturnähere Ufervegetation zu entwickeln, konnte mit dem Einsatz von Pflanzmatten auf Steinmatratzen nicht erreicht werden; nach Entfernung der Pflanzmatten ökologische Entwicklung durch natürliche Sukzession erwartet– 2013: natürliche Sukzession bringt ca. 5 % Gesamtdeckung an Bewuchs auf Steinmatratzen nach Rückbau der Pflanzmatten hervor– 2014/2015: natürliche Sukzession nicht weiter vorangeschritten (nach wie vor geringe Gesamtdeckung von ca. 5 %)– 2016-2018: insgesamt nur spärliche Besiedlung mit überwiegend temporär auftretenden uferuntypischen Arten (nicht überflutungstolerant) <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none">– Es kann kein Einfluss der Maßnahme auf die Fisch- und Makrozoobenthosbesiedlung im Vergleich zur Referenz festgestellt werden.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

	<p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none">– Es fand keine differenzierte Betrachtung zwischen M3 und M4 statt, somit kein nachweisbarer Effekt auf die terrestrischen Tierartengruppen. <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none">– Bauweise mit hohem Anteil künstlicher und naturferner Materialien (Polypropylenetz, kleine Wasserbausteine)
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– Bewässerung der Pflanzmatten in der Anfangszeit– Entfernung vereinzelt aufgekommener Neophyten (Eschen-Ahorn, Goldrute)
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– 2012: Pflanzmatten nachträglich mit einzelnen Wasserbausteinen beschwert– August 2013: Entfernung der Pflanzmattenreste nach vollständigem Ausfall der Pflanzen einschließlich der Befestigungen; Steinmatratzen werden – wie im oberen Bereich – der Sukzession überlassen – siehe Maßnahme M3– Keine weiteren Maßnahmen erforderlich

Maßnahme M5: Pflanzmatten auf verschiedenen Geotextilien als Filter (VF 7)

Pflanzmatten auf verschiedenen Geotextilien als Filter (Böschungsneigung 1:3)	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012): Pflanzmatten beim Einbau in sehr schlechtem Zustand; sehr kritisch besonders im unteren, häufig eingestauten und damit höher belasteten Böschungsbereich; Auftrieb und Wellenbelastung bei Überstau führen zu Druckwechselln („Pumpeffekten“), dementsprechende Auf- und Abbewegungen der kaum Eigengewicht besitzenden Matten zwischen den punktuellen und linienförmigen Befestigungen; Bewegungen der Matten verhindern dauerhaft flächigen Kontakt zum Untergrund; dadurch z. T. keine Wurzelentwicklung in den Untergrund möglich; einige Pflöcke und Querriegel durch Auftrieb gelockert und z. T. herausgezogen; Befestigung der Matten dadurch im Überstaubereich teilweise nicht mehr ausreichend; teilweise böschungsabwärts gerichtete Bodenverlagerungen unter den Matten (nur durch Querriegel begrenzt), insgesamt viele Schäden, besonders im Bereich mit Schafwollvlies, schneller biologischer Abbau im Gegensatz zum eingebauten Kunststoffvlies; Uferschutz im unteren, häufig eingestauten Böschungsbereich nicht mehr ausreichend gegeben; im oberen, weniger eingestauten Böschungsbereich besserer Zustand, begrenzter Bodenaustrag durch nicht filterstabile Kokosmatten – 2013: weitere Zunahme der Schäden im unteren Böschungsbereich durch 10-wöchigen Dauereinstau bei gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung, Ausfall aller Pflanzen, Kokosträgermatte zerstört; Uferschutz durch Pflanzmatten und Filtermatten hier nicht mehr gewährleistet, Sanierung des gesamten unteren Böschungsbereiches (unterhalb MW +1,7 m) durch Abdecken mit einer Lage Wasserbausteinen; hingegen Stabilisierung des Zustandes in den oberen, selten eingestauten Böschungsbereichen (oberhalb MW +1,70 m) nach lokalen Sanierungsmaßnahmen mit Rasensoden, Querriegeln und einer Nassansaat, hier gute Entwicklung der Pflanzen – 2014/2015: Uferschutz im unteren Böschungsbereich durch eine Lage Wasserbausteine (LMB_{5/40}) ausreichend gegeben, Pflanzen wachsen durch Lückensystem der Wasserbausteine hindurch; weitere Stabilisierung im oberen Böschungsbereich aufgrund überwiegend niedriger Wasserstände; „ungestörte“ Weiterentwicklung und Ausbreitung der Pflanzen; VF-Bereich bis auf wenige kleine Schadstellen vollflächig und dicht bewachsen – 2016–2019: Uferschutz im oberen Böschungsbereich (oberhalb MW +1,70 m) durch Pflanzmatten ausreichend gegeben; <p>Pflanzmatten auf Filtermatten in den häufig und lange eingestauten Böschungsbereichen unter den gegebenen Randbedingungen nicht geeignet; der für die Wurzelbildung und Verzahnung mit dem Untergrund erforderliche permanente flächige Bodenkontakt konnte hier mit den punktuellen und linienförmigen Befestigungen nicht gewährleistet werden; Schafwollvlies (zu schneller Abbau) und Kokosgewebe (nicht filterstabil) in diesen Bereichen ungeeignet</p>
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012): trotz zahlreicher Bewuchsausfälle und Anfangsschwierigkeiten (überwiegend im unteren Böschungsbereich) positive Entwicklung aus vegetationskundlicher Sicht: hohe Anzahl und Vielfalt blühender Hochstauden, Röhrichte, Gräser und Kräuter; Initiierung einer standorttypischen Vegetationszonierung; Strukturhöhung in der Uferböschung; Unterschiede der Geotextilien u. a. hinsichtlich Inhaltsstoffen und Pflanzenwachstum erkennbar: Schafwolle mit düngender Wirkung → kräftigerer Bewuchs, Förderung Stickstoff liebender Arten; Kunststoffvlies → gutes und vitales Pflanzenwachstum, aber aus ökologischer Sicht nicht zu empfehlen, da unverrottbar

- 2013: große Verluste an Pflanzen im unteren Böschungsbereich aufgrund von Überstau bei höheren Wasserständen und gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung; ökologische Aussagen zunächst nur noch für den oberen Böschungsbereich möglich, hier positive Weiterentwicklung der Pflanzmatten; Arten aus Pflanzung werden konkurrenzstark und bauen standorttypischen Vegetationsbestand mit guter Artendurchmischung auf
- 2014: nach Sanierung des unteren Böschungsbereiches (bis MW +1,70 m) Aufwuchs vereinzelter regenerationsstarker und überstauungstoleranter Arten (ursprüngliche Bepflanzung) aus Lücken der Steinlage, Pflanzen profitieren von Stabilität durch Auflast der Steine; im oberen Böschungsbereich überwiegend dichter und vollflächiger Bewuchs, hohe Artenvielfalt im Bereich der VF 7 b und 7c; fortschreitende Entwicklung des VF daran erkennbar, dass sich Verteilung der Arten mehr und mehr den natürlichen Standortansprüchen der Arten angleicht (natürliche Uferzonierung)
- 2015: Vorkommen von überwiegend Seggen und Rohr-Glanzgras aus ursprünglicher Bepflanzung im Lückensystem der Steinschüttung (Sanierungsbereich); oberer Böschungsbereich weiterhin flächig und dicht bewachsen, dort neben Arten aus Ursprungspflanzung typische Arten trocken-warmer Standorte; Arten verteilen sich mehr und mehr entsprechend ihrer natürlichen Standortansprüche (natürliche Uferzonierung)
- 2016/2017: lückiger Initialbewuchs mit vereinzelt Röhricht und Feuchten Hochstauden im unteren sanierten Böschungsbereich; gras-krautreicher Bewuchs im oberen Bereich, überwiegend heimische Arten, jedoch hoher Anteil uferuntypischer „Spontan-Arten“, Vorkommen von 6 gefährdeten und 2 geschützten Arten, im Vgl. aller untersuchten Maßnahmen (M1–M15) Maßnahme mit dem höchsten Arten- und Blütenreichtum, gut ausgeprägte Zonierung
- 2018/2019: fortschreitende Entwicklung einer Röhrichtzone im unteren sanierten Böschungsbereich

Aquatische Fauna (2012–2018):

- Es kann kein Einfluss der Maßnahme auf die Fisch- und Makrozoobenthosbesiedlung im Vergleich zur Referenz festgestellt werden.

Terrestrische Fauna (2013–2017):

- Vögel: positive Wirkung der ausgeprägten Krautschicht in Kombination mit benachbartem Röhricht auf Bedingungen zur Nahrungssuche, zur Rast für Wasservögel, für Boden- und Röhrichtbrüter; Maßnahme mit hohem Potenzial zur Bereitstellung nachhaltig geeigneter Habitatstrukturen
- Laufkäfer: im Vgl. zur Referenz höhere Arten- und Individuenzahlen, höhere Anteile uferuntypischer Individuen und vermehrtes Auftreten von RL-Arten
- Reptilien: deutlich erhöhte Sichtungszahlen im Vgl. zur Referenz (Hinweis auf geeignete Reptilienhabitate)
- Spinnen: leicht erhöhte Artenzahlen und Besiedlungsdichten im Vgl. zur Referenz (günstige Raumstruktur der gras-krautigen Vegetation); Vorkommen einer Art der Vorwarnliste mit starkem Habitatbezug zu feuchten Lebensräumen
- Sonstige Organismengruppen: hohe Blütendiversität lässt auf günstiges Nahrungshabitat für blütenbesuchende Insekten schließen

Sonstiges:

- Bauweise mit überwiegend Lebendmaterial, dennoch Anteile an künstlichen und naturfernen Materialien (feines Stützgerüst aus Kunststoff für Kokosanteil in Matten, Kunststoff-Geotextil, Draht zur Pflock-/Querriegelverbindung)
- Mittlere CO₂-Speicherleistung im Vgl. aller Maßnahmen (klimaregulierende Ökosystemleistung)

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– Wenige Bewässerungsgänge nach Baufertigstellung– September 2012, Mai und Juli 2013 Mahd mit Freischneider zwischen Böschung und Betriebsweg, keine Mahd im Böschungsbereich; 2014 Mahd mit Freischneider in Böschungs- und Planiebereich; 2015 Komplettmahd im Böschungsbereich (Juni), ergänzende Teilmahd in VF 7b und c (Herbst); jeweils Abtransport des Mahdgutes; seit 2016 alternierende Teilmahd in den einzelnen Versuchsfeldabschnitten– Beobachtung und Beseitigung neophytischer Arten (Hybrid-Pappeljungwuchs)
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– 2012: Nachschlagen der Pflöcke und Querriegel nach jedem Überstau; nachträglich flächige Nassansaat zur Stabilisierung und lokale Sanierung mit Rasensoden im oberen Böschungsbereich; Abdecken des unteren Böschungsbereiches mit einer Lage großer Wasserbausteine zur Gewährleistung eines ausreichenden Uferschutzes, dabei in den Bereichen mit Schafwollvlies höher (bis MW +1,70 m), in den Bereichen mit Kunststoffvlies weniger hoch (bis ca. MW +1,00 m)– 2013: Sanierung des gesamten unteren Böschungsbereichs bis auf die Höhe von MW +1,7 m – Abdeckung mit einer Lage großer Wasserbausteine– 2014: Markierung eines kleinen, lokalen Auskolkungsbereichs im oberen Böschungsbereich von VF 7c; keine Sanierungsmaßnahmen, weitere Beobachtung des markierten Bereichs

Maßnahme M6: Kokosmatten über einer Nassansaat (VF 7a oben)

Kokosmatten über einer Nassansaat (Böschungsneigung 1:3)	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Angewendet nur im oberen, seltener eingestauten Böschungsbereich – Anfangsstadium (2012): sehr kritisch, die nur punktuellen Befestigungen der kaum Eigengewicht besitzenden Kokosmatten durch Pflöcke (keine Querriegel) nicht ausreichend bei Überstau und gleichzeitiger Schiffsbelastung; in großem Maße böschungsabwärts gerichtete Bodenverlagerungen unter den Matten, begrenzt nur durch Totholzfashinen am unteren Ende der Maßnahme; Kokosmatten nicht filterstabil, deshalb auch Bodenaustrag durch die Matten; Entstehung von größeren Hohlräumen unter den Kokosmatten; Sanierungsmaßnahmen erforderlich – 2013: Stabilisierung des Zustandes nach Sanierungsmaßnahmen mit Rasensoden und Querriegeln, gute Entwicklung der Pflanzen, da nur seltener Einstau – 2014: aufgrund niedriger Wasserstände insgesamt weiter gute und fast flächendeckende Pflanzenentwicklung; Manifestierung von sechs kleineren, lokalen Auskolkungsbereichen, deren Entwicklung weiter beobachtet wird – 2015: Vergrößerung der lokalen Schadstellen im unteren Teil der oberen Böschungshälfte durch zunehmenden Materialaustrag bei hohen Wasserständen; im übrigen Bereich nahezu vollflächiger Pflanzenwuchs – 2016: Sanierung der großen Schadstellen mit einer Lage Wasserbausteinen, Pflanzen wachsen durch Lücken der Steinlage – Kokosmatte über Nassansaat unter den gegebenen Bedingungen nicht geeignet – Uferschutz nach verschiedenen Sanierungen durch Wasserbausteine und Pflanzenentwicklung ausreichend gegeben
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012): Erstsaat (planmäßige Pflanzen) konnte sich aufgrund der oben beschriebenen Probleme (umfangreiche Bodenverlagerungen, Hohllagen, ausgeschwemmtes Saatgut) nicht etablieren; beginnende Entwicklung einer Gräser-/Kräuternarbe erst nach Sanierungen und überwiegend niedrigen Wasserständen – 2013: fortschreitende Entwicklung hin zu einem standorttypischen Vegetationsbestand mit guter Artendurchmischung; erhöhte Strukturvielfalt im Vergleich zur Referenz – 2014: überwiegend vollflächiger und dichter Bewuchs mit standorttypischen Gräsern und Kräutern, vereinzelt Aufkommen standorttypischer Gehölze; höchste Artenvielfalt mit 88 Arten (vgl. Referenzflächen mit Ø 11,5 Arten im oberen Böschungsbereich); fortgeschrittene Entwicklung des VF daran erkennbar, dass sich Verteilung der Arten mehr und mehr den natürlichen Standortansprüchen der Arten angleicht (natürliche Uferzonierung) – 2015: oberer Böschungsbereich mit Ausnahme der lokalen Schadstellen weiterhin flächig und dicht bewachsen, dort neben Arten aus Ursprungs- und Nachsaaten typische Arten trocken-warmer Standorte; Arten verteilen sich mehr und mehr entsprechend ihrer natürlichen Standortansprüche (natürliche Uferzonierung) – 2016: nach Sanierung erneuter Aufwuchs regenerationsstarker Pflanzen durch Lücken der Steinlage, Verjüngung einzelner Weiden an der Grenze der Weichholzaue zur Hartholzaue, einzelne Ulmen- und Weißdorngehölze im Bereich der Hartholzaue; ansonsten Aussagen vergleichbar zu M5

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

	<ul style="list-style-type: none">– 2018/2019: fortschreitende Entwicklung einer Weichholzzone im sanierten Bereich, stabile, arten- und blütenreiche Gräser-/Kräuternarbe im oberen unsanierten Bereich <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none">– Die Maßnahme ist aufgrund ihrer Lage im mittleren und oberen Böschungsbereich für Fische und Makrozoobenthos unwirksam. <p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none">– Vgl. Aussagen zu M5 (keine differenzierte Betrachtung zwischen M5 und M6) <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none">– Steigende Heterogenität des Bewuchses (Gehölzinitiale, Gräser/Kräuter) aus ökologischer Sicht positiv zu werten– Überwiegender Verbau von Lebendmaterial und naturnahem Material (Ausnahme: Draht zur Pflock-/Querriegelverbindung)– CO₂-Speicherleistung (siehe M5)
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– September 2012, Mai und Juli 2013: Mahd mit Freischneider zwischen Böschung und Betriebsweg, keine Mahd im Böschungsbereich– 2014/2015: Mahd mit Freischneider in Böschungs- und Planiebereich; Abtransport des Mahdgutes– 2016-2018: alternierende Teilmahd mit M5 im nicht sanierten oberen Böschungsbereich– Beobachtung und Beseitigung neophytischer Arten (Hybrid-Pappeljungwuchs)
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– 2012: Auffüllen der Hohlräume nach Aufschneiden der Kokosmatte mit Boden und Rasensoden, Abdecken mit Kokosmatte und ausreichende Befestigung (mit Pflocken und Querriegeln); nachträglich flächige Nassansaat– 2014: Markierung und Beobachtung lokaler Schadstellen– 2016: Sanierung der Schadstellen durch Auffüllen mit Kies und Abdecken mit einer Lage großer Wasserbausteine– Seit 2017: keine weiteren Sanierungsmaßnahmen erforderlich

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Maßnahme M7: Röhrichtwalzen (VF 7b, VF 7c unten)

Im Zuge der Sanierung des unteren Böschungsbereiches 2012/13 überschüttet, deshalb keine weitere Betrachtung der Maßnahme

Röhrichtwalzen	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none">– Röhrichtwalzen wurden parallel zur Uferlinie im Bereich bei MW als Fußsicherung für die Pflanzmatten der oberhalb anschließenden Böschung (vgl. M5) eingebracht– Anfangsstadium (2012): sehr kritisch; sehr schneller biologischer Abbau der Schafwollmatten, dadurch schneller Verlust an Festigkeit; lokale Schäden durch hydraulische Belastung, Austrag der Kiesfüllung; Kokosmatten auch nicht ausreichend stabil; keine Entwicklung der Pflanzenbulte durch die Umhüllung aus Schafwollvlies und Kokosgewebe– Röhrichtwalzen sind in der getesteten Form unter den gegebenen Randbedingungen nicht geeignet; im Zuge der Sanierung des unteren Böschungsbereiches 2012/13 mit Wasserbausteinen überschüttet– Uferschutz durch wieder hergestellte Steinschüttung gewährleistet
Ökologie	<ul style="list-style-type: none">– Etablierung/Initiierung einer Röhrichtzone mit Einzelpflanzen im Bereich um MW fehlgeschlagen– Keine Maßnahmenwirksamkeit für faunistische Zielorganismen
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– Keine Pflege und Unterhaltung erforderlich
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– 2012: Überschüttung mit Wasserbausteinen zur Gewährleistung einer stabilen Fußsicherung für die Pflanzmatten; anschließend keine Sanierungsmaßnahmen mehr erforderlich

Maßnahme M8: Anlage senkrecht zum Ufer verlaufender Pflanzgräben in einer Steinschüttung mit wahlweise ausschlagfähigen Weidenfaschinen, Weidensetzstangen, Busch- und Heckenlagen (VF1)

Anlage senkrecht zum Ufer verlaufender Pflanzgräben in einer Steinschüttung mit wahlweise ausschlagfähigen Weidenfaschinen, Weidensetzstangen, Busch- und Heckenlagen	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): unkritisch hinsichtlich Uferschutz; nach erstem Überstau lediglich leichte Sackungen im Bereich der wieder verfüllten Gräben; Wiederherstellung einer einheitlichen Oberfläche der Steinschüttung durch zusätzlichen Einbau von Steinen in den Gräben; danach stabiler Zustand– 2013–2020: ggf. Erhöhung des Uferschutzes durch zunehmende Verwurzelung der Pflanzen mit dem Deckwerk und dem Untergrund– Uferschutz durch verbliebene Steinschüttung gewährleistet
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): bis auf Einzelverluste insgesamt gute und vitale Entwicklung der eingebrachten Gehölze, nur anfänglich geringe Unterschiede in der Triebentwicklung zwischen den unterschiedlich hoch eingebauten Setzstangen; keine Ausfälle durch die teilweise sehr langen Überstauzeiten– 2013–2015: Gehölzentwicklung mit standorttypischen Gehölzen der Weichholzaue (Purpur-, Silber-, geringfügig Fahl-, Korb-Weide) in Böschungszone MW bis MW +1,70 m und der Hartholzaue (Esche, Schneeball, Hasel, Trauben-Kirsche und Feld-Ahorn) in der Böschungszone oberhalb MW +1,70 m, gutes Mischungsverhältnis der Arten; 2015 strukturreiche, mehrschichtige Bewuchsentwicklung der Weiden aufgrund der festgelegten Pflegevarianten unter Heranziehen von Baum- und Kopfweiden– 2016: Anstieg der Artenzahlen im Böschungsgradienten von unten (Weidenpflanzung) nach oben (Heckenlage), Anteil ufertypischer Arten in Pflanzgräben deutlich höher als in dazwischen liegenden Steinschüttungsbereichen mit relativ hohem Neophytenanteil, krautiger Bewuchs besteht überwiegend aus „Allerweltsarten“ ohne ufertypische Zonierung– 2017–2019: strukturreicher, heterogener Gehölzbestand aufgrund der festgelegten Pflegevarianten <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none">– Es kann kein Einfluss der Maßnahme auf die Fisch- und Makrozoobenthosbesiedlung im Vergleich zur Referenz festgestellt werden. <p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none">– Vögel: zunehmend günstige Lebensraumeignung durch bereitgestellte Habitatstrukturen für Gehölzbrüter– Laufkäfer: ähnlich artenarme Laufkäferzönose wie in Referenz, jedoch höherer Anteil ufertypischer Individuen– Reptilien: geringe Wirksamkeit für Reptilien– Spinnen: höhere Besiedlungsdichte bei vergleichbarer Artenzahl wie in Referenz, leicht erhöhte relative Anteile feuchteliebender Individuen im Maßnahmenvergleich– Sonstige Organismengruppen: Gehölzpflanzungen begünstigen spontanen Eintrag von Totholz, weshalb von einer positiven Wirkung auf Totholzbewohner ausgegangen wird; Gehölzblüte (insb. der Weiden) als Bienenweide für Nektar und Pollen sammelnde Insekten, viele Insektenarten an Weiden mit engem

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

	<p>Wirtspflanzenspektrum (vgl. M1) beobachtbar, hohes Fruchtangebot für Vögel und Insekten</p> <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none">– Erhöhung des Struktureichtums durch Ablagerung von Totholz und Treibsel nach Hochwasserereignissen– dichter, schwer durchdringbarer Gehölzbestand hält Angler und Erholungssuchende fern– Hohe CO₂-Speicherleistung der Gehölze als klimaregulierende Ökosystemleistung
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– 2012–2014: geringe Pflege und Unterhaltung; Beobachtung hinsichtlich neophytischer Arten, Fraßschädlingen und pflanzlichen Schmarotzern (z. B. Pappel-Seide); Freischneiden der Triebe der Heckenlagen– 2015–2019: wechselnde Rückschnittvarianten an Weidensetzstangen und -faschinen händisch durchgeführt; Ziel: struktureicher, mehrschichtiger Gehölzbestand– Kein Pflegeschnitt der Heckenlagen erforderlich
Sanierungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– 2012: nach Sackungen zusätzlicher Einbau von Wasserbausteinen in den Gräben; anschließend keine Sanierungsmaßnahmen mehr erforderlich

Maßnahme M9: Einbringen von Weidensetzstangen (VF1, VF9)

Einbringen von Setzstangen	
Uferstabilität	<p>VF 1:</p> <ul style="list-style-type: none">– Anordnung der Setzstangen in der vorhandenen Steinschüttung im unteren Böschungsbereich (keine Uferschutzfunktion)– Anfangsstadium (2012): unkritisch hinsichtlich Uferschutz– 2013-2019: gute Entwicklung, langfristig ggf. Erhöhung des Uferschutzes durch Verwurzelung der Weidensetzstangen mit dem Deckwerk und dem Untergrund– Uferschutz durch verbliebene Steinschüttung gewährleistet <p>VF 9:</p> <ul style="list-style-type: none">– Anordnung der Setzstangen auf der Böschungsoberkante; Setzstangen sollen das Ausmaß der Ufererosion oberhalb des ungesicherten Bereiches der Uferböschung zum Schutz des angrenzenden Betriebsweges begrenzen– Anfangsstadium (2012): unkritisch hinsichtlich Schutzes des Betriebsweges, da Wasserstände ausreichend unterhalb der Böschungsoberkante blieben– 2013: erstmals über die Geländeoberkante hinaus gehende Hochwasser führten zur teilweisen Freispülung einzelner Setzstangen der ufernahen Weidenreihe– 2014: weitere Erosion, vereinzelte 2013 bereits freigespülte Setzstangen nach wie vor im Boden verankert und vital– 2015: seit dem Rückbau der Steinschüttung 2011, Verschiebung der Böschungsschulter landwärts durch Erosion lokal um bis zu 5 m; mehrere Setzstangen wurden freigespült; einige kippten um und starben ab; Wurzelaufgrabung an einer Setzstange zeigt, dass bisher entwickelte Wurzeln die zunehmende Erosion an der Böschungsschulter nicht aufhalten können; weitere Erosion zwischen den einzelnen Weiden ist zu erwarten– 2016: Neubefestigung des Kilometerschildes (441,500), Fundament durch Erosion der Böschungsschulter freigespült– Bis 2020: zunehmende Erosionen, die auch in den Folgejahren fortschreiten werden; einzelne Setzstangen zur Begrenzung der Erosion unter den Randbedingungen der Versuchsstrecke ungeeignet– Weitere Beobachtung der Erosion hinsichtlich Schutzes des Betriebsweges
Ökologie	<p>Vegetation (VF 1 und 9):</p> <ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): teilweise Schwächung einzelner Weiden durch pflanzliche Schmarotzer (Befall mit Pappel-Seide)– 2013–2019: insbesondere in trockenen Jahren verstärktes Auftreten von schmarotzenden oder windenden Arten (Pappel-Seide, Acker- und Zaun-Winde), geringfügige Vitalitätseinbußen; Fortschreitende Entwicklung des Gehölzbewuchses aus gebietsheimischen und standorttypischen Weiden, Weidensetzstangen ergänzen mit weiterer Lebensraumfunktion die von krautigem Spontanbewuchs dominierte Böschungsplanie (VF9) sowie die im ursprünglichen Zustand weitestgehend vegetationsfreie Steinschüttung (VF1) und erhöhen den Strukturreichtum; weitere Strukturbereicherung durch mehrschichtige Bewuchsentwicklung nach durchgeführten Pflegeschnittvarianten und die Ablagerung von Totholz und Treibsel an Setzstangen nach Hochwasserereignissen (VF1) <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none">– Es kann kein Einfluss der Maßnahme (VF1 und 9) auf die Fisch- und Makrozoobenthosbesiedlung im Vergleich zur Referenz festgestellt werden.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

	<p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none">– Keine differenzierte Betrachtung von M9; vgl. Aussagen zu M8 <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none">– Maßnahme besteht ausschließlich aus Lebendmaterial– Weidengehölze mit hoher CO₂-Speicherleistung als klimaregulierende Ökosystemleistung– Weidenblüte als Bienenweide für nektar- und pollensuchende Insekten
Pflege/ Unterhaltung	<p>VF 1:</p> <ul style="list-style-type: none">– 2015–2020: Ausführung von verschiedenen Pflegeschnittvarianten (vgl. M8) <p>VF9:</p> <ul style="list-style-type: none">– September 2012, Mai und Juli 2013: Mahd im Bereich der Setzstangen zwischen Böschung und Betriebsweg, um Konkurrenzdruck der hochwüchsigen Spontanvegetation und dadurch gehemmter Triebentwicklung der jungen Weiden entgegenzuwirken– 2014–2020: Beobachtung der Ufererosion; 2014 mit Blick auf künftige Ufererosionen vorsorgliche Pflanzung einer weiteren Setzstangenreihe neben Betriebsweg, alternierender Rückschnitt einzelner Weidensetzstangen der älteren Pflanzung; 2015 mehrmalige Mahd im Bereich der neu gepflanzten Setzstangen, um Konkurrenzdruck durch krautigen Spontanbewuchs entgegenzuwirken– Beobachtung hinsichtlich Fraßschädlingen und pflanzlichen Schmarotzern (z. B. Pappel-Seide, Acker-Winde, Winden-Knöterich, Zaunwinde)– Beobachtung und Beseitigung neophytischer Arten (z. B. Topinambur)
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– VF 1: bisher keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich– VF 9: 2014 landseitige Anordnung einer dritten Reihe von Weidensetzstangen (Reihe musste aufgrund des hohen Schattendrucks der wasserseitigen Setzstangen mehrmals erneuert werden; Wuchserfolg erst nach deren Rückschnitt)– VF 9: 2016 Sanierung/Neubefestigung des Kilometerschildes (km 441,500)

Maßnahme M10: Einspülen von Oberboden-Alginat in die Steinschüttung und Ansaat durch Anspritzverfahren (VF6)

Einspülen von Oberboden-Alginat in die Steinschüttung und Ansaat durch Anspritzverfahren	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012): bei Überstau und Schifffahrtsbelastung oberflächennahe Erosion des Oberboden-Alginatgemisches und des Saatgutes bis zur Höhe des maximal aufgetretenen Wasserstandes; zusätzlicher Kieseinbau im unteren Böschungsbereich (bis ca. MW +1 m) nach ersten Erosionen des Oberboden-Alginats – 2013: bei wiederholtem und höherem Überstau als 2012 weitere Erosion des Oberboden-Alginatgemisches, nur noch lokal in Steinzwickeln vorhanden – Auswirkungen nicht standsicherheitsrelevant – 2014/2015: Alginat nur noch geringfügig und lokal im oberen Böschungsbereich (Übergang zur Böschungsplanie) vorhanden – Uferschutz durch verbliebene Steinschüttung gewährleistet, Alginat zur Begrünung unter den gegebenen Bedingungen nicht geeignet.
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – 2012: Initiierung einer Grasnarbe aus standorttypischen Gräsern und Kräutern nur in der Böschungszone oberhalb des maximal aufgetretenen Wasserstandes (Übergang zur Böschungsplanie) erfolgreich, noch vorhandene Alginatreste im Lückensystem der Steinschüttung fördern geringfügig Aufkommen von Spontanvegetation – 2013: Verkleinerung der Grasnarbe durch weitergehende Erosion, kaum Alginatreste vorhanden – 2014/2015: spärliche Grasnarbe, im Vgl. zu 2013 unverändert (nur noch lokal auf Alginatresten mit Gesamtdeckung von 15 % vorhanden) – 2016–2019: VF unterscheidet sich hinsichtlich der pflanzlichen Besiedlung nur sehr geringfügig von Referenzstrecke; pflanzenökologische Zielstellung konnte nicht erreicht werden <p>Aquatische und terrestrische Fauna (2012–2018): Keine Maßnahmenwirksamkeit für faunistische Zielorganismen</p>
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none"> – Bisher keine Pflege und Unterhaltung erforderlich – Beobachtung hinsichtlich neophytischer Arten
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> – Bisher keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Maßnahme M11: Einzelpflanzung von Röhrichtbulten in die Steinschüttung (VF6)

Röhrichtbulte wurden unter den vorherrschenden Bedingungen erodiert, deshalb keine weitere Betrachtung der Maßnahme

Einzelpflanzung von Röhrichtbulten in Höhe MW	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none">– Anfangsstadium (2012): Ausspülen der Pflanzbulte im Wasserwechselbereich infolge hydraulischer Belastungen infolge Schifffahrt und zeitweisem Überstau, kein ausreichender Halt in der Steinschüttung gegeben; jedoch keine Auswirkungen auf Uferschutz, da Röhrichtbulte ohne Uferschutzfunktion– Uferschutz durch verbliebene Steinschüttung gewährleistet, einzelne Pflanzbulte in vorhandener Steinschüttung unter den gegebenen Bedingungen zur Begrünung nicht geeignet
Ökologie	<ul style="list-style-type: none">– Etablierung/Initiierung einer Röhrichtzone mit Einzelpflanzen im Wellenaufbereich um MW fehlgeschlagen– Keine Maßnahmenwirksamkeit für faunistische Zielorganismen
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– Keine Pflege und Unterhaltung erforderlich
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– Keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich

Maßnahme M12: Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie zur Reduzierung der Uferbelastung vor Wellenschlag (VF1 und VF8)

Anlage eines Steinwalls parallel zur Uferlinie zur Reduzierung der Uferbelastung vor Wellenschlag	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Durch Errichtung (VF 1) bzw. Erhöhung (VF 8) eines Steinwalls parallel zur Uferlinie können die hydraulischen Belastungen (Wellenschlag, Strömungsgeschwindigkeiten) auf die eigentliche Uferböschung bei Wasserständen bis zur Oberkante des Steinwalls (MW +0,5 m) verringert werden – 2012–2020: Steinwälle im VF 1 und 8 stabil und technisch wirksam, Uferschutz durch auf der Uferböschung verbliebene Steinschüttung gewährleistet
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012): günstige Wirkung des Steinwalls auf die Entwicklung der Ufervegetation in VF1 und VF8, schlammige Ablagerungen auf Wasserbausteinen im Schutz des Steinwalls bieten Substrat und Nährsubstanz für die Besiedlung mit Spontanvegetation – Ansiedlung erster Arten der Laichkraut- und Röhrichtzone in VF1 – Flächenmäßige Zunahme des bereits vor Baumaßnahme vorhandenen kleinflächigen Röhrichtbewuchses und Hochstauden feuchter Standorte (VF8) – 2013: verstärkte Schlammablagerungen in entstandener Flachwasserzone und auf Wasserbausteinen im untersten Böschungsbereich (VF1) und auf Berme zwischen Pflaster und Steinwall (VF8), Einzelvorkommen der gefährdeten Schwabenblume (RL Hessen) in VF1, weitere positive Entwicklung des Röhrichtbewuchses in VF 8 – 2014/2015: Zunahme an Individuen standorttypischer Uferpflanzen (Rohr-Glanzgras, Blutweiderich, Schwabenblume, Schwarzfrüchtiger Zweizahn, Ampfer-Knöterich, Ufer-Wolfstrapp) auf Schlammablagerungen in VF 1; darauf auch 2015 deutliche Ausbildung eines krautigen Ufersaumes mit einjährigen Arten; in VF 8 Röhrichtzone mit Hochstauden feuchter Standorte und Arten kurzlebiger Schlammboden-Pionierfluren mit Gesamtdeckung von 40–50 % – 2016/2017: Pflanzenarten der Flussufergesellschaften und Röhrichte im Initial vorhanden (noch keine stabilen Bestände), 2017 Nachweis von 5 für den Rhein typischen Wasserpflanzen und 2 nichtheimischen Arten in Flachwasserzone (VF 1); Bermbereich im Schutz des Steinwalls (VF8) mit höchster Diversität und Pflanzenmenge in der unteren Böschungszone, höchstem Anteil ufertypischer Arten und geringstem Neophytenanteil im Vergleich aller Maßnahmen (untere Böschungszone) <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Keine Maßnahmenwirksamkeit für Fische im VF 8, Maßnahmenwirksamkeit für Makrozoobenthos nicht eindeutig (deutlich geringere Neozoenanteile in 2017) – Bezüglich VF 1 vgl. Aussagen zu M13 (beschriebene Wirksamkeit gilt für Maßnahmenkombination M12/M13, jedoch abnehmende Wirksamkeit des eigentlichen Steinwalls bei hohen und sehr niedrigen Wasserständen sowie kurzfristigen Wasserstandsschwankungen) <p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vögel: hohes Potenzial zur Bereitstellung geeigneter Habitatstrukturen für Gehölz- und Röhrichtbrüter (VF1 und 8) – Laufkäfer: positive Entwicklung der Laufkäferzönose im Vgl. 2013/14 bis 2017 in VF8, deutliche Zunahme der Artenzahlen, der Diversität, der Anteile ufertypischer

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

	<p>Arten und Individuen (beste Bewertung im Maßnahmenvergleich); keine differenzierte Betrachtung in VF1</p> <ul style="list-style-type: none">– Reptilien: relativ dichter Bewuchs im Schutz des Steinwalls nicht förderlich (VF8)– Spinnen: VF8 mit leicht erhöhten Artenzahlen und höheren Besiedlungsdichten im Vgl. zur Referenz, leicht erhöhte relative Anteile feuchteliebender Arten im Maßnahmenvergleich <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none">– Auffällig hohe Tieraktivität (Insekten, Vögel) in VF 1– Steinwall als sinnvolle Kombination mit Ufersicherungsbauweisen im Böschungsbereich (Reduzierung der hydraulischen Belastung, Förderung des Bewuchses)
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none">– Bisher keine Pflege und Unterhaltung erforderlich
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none">– Bisher keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich

Maßnahme M13: Einbau von Totholzstrukturen (Totholzstämmen mit Wurzelteller, Totholzfaschinen, Ausfachungsbuhne) in die Steinschüttung (VF1, VF4, VF9)

Einbau von Totholzstrukturen (Totholzstämmen mit Wurzelteller, Totholzfaschinen, Ausfachungsbuhne) in die Steinschüttung (ca. MW – 0,5 m bis MW)	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012) und 2013: Totholzelemente trotz mehrerer Hochwasserereignisse lagestabil in der Steinschüttung auf der Böschung verankert – 2014/ 2015: Totholzfaschinen in VF 4 in sich etwas gelockert (Schrumpfung, Verwitterung, Abgang von Einzelästen), jedoch nach wie vor lagestabil – 2017: zunehmende Auflösung der knapp unter MW angeordneten Totholzfaschinen aus Birkenholz im VF 4, Erneuerung erforderlich – Bis 2020: Totholzelemente der VF 9 (Buchen-Baumstämme der Ausfachungsbuhne) und 1 (Buchenstämmen mit Wurzelteller) noch weitestgehend intakt und funktionsfähig – Uferschutz durch verbliebene Steinschüttung gewährleistet
Ökologie	<ul style="list-style-type: none"> – 2012–2015: Anlagerung/ Abtrag von erodiertem Kies und Feinsubstrat im Bereich der Totholzfaschinen (VF4); Entstehung kleiner, flacher, kiesiger Uferbereiche zwischen den Faschinenbündeln, Erhöhung der Substratvielfalt – 2016–2020: Kiesablagerung im Bereich der weitgehend verwitterten Totholzfaschinen (VF4) zum Teil erodiert <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Deutliche Tendenzen zu einerseits erhöhten mittleren Fischartenzahlen als auch zu höheren Anteilen an Individuen der Referenzfischarten nach WRRL an Baumstämmen mit Wurzelteller (VF 1 – Ergebnis muss in Kombination der Maßnahme mit M12 gesehen werden: Totholz in strömungs- und wellenschaggeschütztem Bereich) und Totholzfaschinen (VF 4) im Vergleich zur Referenz, Dominanz der Schwarzmundgrundel (Neozoon) geringer als in den anderen VF und der Ref., regelmäßige Beobachtung von Jungfischschwärmen; Ausfachungsbuhne (VF 9) noch ohne erkennbare Wirkung auf die Fische – Deutlich erhöhte Makrozoobenthos-Artenzahlen und erhöhte Anzahl an EPTCBO-Arten an Totholzelementen in Flachwasserzone (VF1) im Vgl. zur Referenz, jedoch unverändert hoher mittlerer Individuenanteil an Neozoen, leichte Erhöhung der Makrozoobenthos-Gesamtartenzahl und Anzahl der EPTCBO-Arten an Totholzfaschinen (VF4) im Vgl. zur Referenz, etwas verringerter Neozoenanteil <p>Terrestrische Fauna (2013-2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Keine differenzierte Betrachtung der Maßnahmenwirksamkeit auf terrestrische Fauna <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Häufigeres Vorkommen von Prachtlibellen, insbesondere an Wurzeltellern in Flachwasserzone (VF1) beobachtet
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none"> – Bisher keine Pflege und Unterhaltung erforderlich
Sanierungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> – Bisher keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich – VF 4: Erneuerung der Totholzfaschinen vorgesehen

Maßnahme M14: Aufbringen von kiesigem Substrat / Grobstein-Gruppen auf vorhandene Steinschüttung (VF4)

Aufbringen von kiesigem Substrat / Grobstein-Gruppen auf vorhandene Steinschüttung	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Anfangsstadium (2012) und Folgejahre: in Abhängigkeit der Schifffahrtsbelastung und Überstauhöhen und -zeiten Erosion von Kies auf der Böschung, zum Teil Ablagerung im Bereich der Totholzfaschinen; stabile Lage der großen Granit-Einzelsteine – Uferschutz durch verbliebene Steinschüttung gewährleistet
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – 2012/2013: geringfügige pflanzliche Besiedlung mit Spontanvegetation, überwiegend im Strömungsschatten der Granit-Einzelsteine – 2014/2015: Besiedelung mit Spontanvegetation beschränkt sich überwiegend auf den oberen Böschungsbereich (nur noch wenige Arten im unteren und mittleren Bereich); höchster Anteil an Substratvariation im oberen Böschungsbereich – 2016: keine Pflanzen in der unteren und mittleren Böschungszone, relativ geringe Artenzahlen in der oberen Böschungszone, mittlerer Blütenreichtum (fehlende Böschungszonierung), uferuntypische Arten dominieren (vergleichsweise höchste Anteile bundesweit mäßig häufiger bis mäßig seltener Arten), geringer Neophytenanteil – 2017–2019: Kratzbeergestrüpp überwuchert den oberen/(mittleren) Böschungsbereich, unterer Böschungsbereich bewuchsfrei <p>Aquatische Fauna (2012–2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ggf. die in M13 (Maßnahmenkombination M13/M14) beschriebene Wirkung auf Fischzönose und Makrozoobenthosbesiedlung zusätzlich positiv durch Kiesablagerung an Totholzfaschinen beeinflussend <p>Terrestrische Fauna (2013–2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vögel: kein positiver Effekt nachweisbar – Laufkäfer: höhere Arten- und Individuenzahlen, höhere Anteile ufertypischer Arten und Individuen, vermehrtes Auftreten von RL-Arten im Vgl. zur Referenz – Reptilien: deutlich erhöhte Sichtungszahlen im Vgl. zur Referenz deuten darauf hin, dass die offenen und besonnten Bereiche geeignete Reptilienhabitats stellen können – Spinnen: kein positiver Effekt nachweisbar <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Erhöhung der Substratvariation der ursprünglich einheitlichen Steinschüttung (Wasserbausteine der Klasse LMB_{5/40}) – Keine Verwendung künstlicher Materialien – Erhöhte Besucherfrequenz (Granit-Einzelsteine bieten gute Sitzgelegenheit, Nutzung als Angelplatz, da Kombination mit M13)
Pflege/ Unterhaltung	Geringe Pflege und Unterhaltung: Entfernung vereinzelt aufgekommener Neophyten (Eschen-Ahorn, Robinie)
Sanierungsmaßnahmen	– Bisher keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich

Maßnahme M15: Rückbau der technischen Ufersicherung, kein Uferschutz oberhalb von MW, begrenztes Zulassen freier Dynamik (VF9)

Rückbau der technischen Ufersicherung oberhalb MW, begrenztes Zulassen freier Dynamik	
Uferstabilität	<ul style="list-style-type: none"> – Planmäßig keine Maßnahmen zur Uferstabilität nach Rückbau der Steinschüttung auf der Böschung oberhalb von MW (lediglich Weidensetzstangen auf Böschungsplanie, vgl. M9); unterhalb MW Uferschutz durch verbliebene Steinschüttung – Anfangsstadium (2012): Auftreten von Erosion im jeweils überstauten Bereich (wie erwartet und gewünscht) – 2013: weitere Hochwasser, erstmals Einstau der gesamten Böschung und des angrenzenden Geländes, Wasserstände bis ca. 1 m über Böschungsoberkante; zunehmende Erosion besonders der feineren Körnungen; im Ergebnis dominieren im Böschungsbereich die aus dem Untergrund freigespülten Steine mit Kantenlängen > 5 cm; zunehmende Abbruchkanten an der Böschungsschulter, vereinzelte freigespülte Weidensetzstangen – M9 (diese aber noch mit Wurzelkontakt zum Boden), Materialtransport auch durch vom angrenzenden Gelände zurücklaufendes Hochwasser – 2014: aufgrund niedriger Wasserstände nur begrenzt weitere Erosionen bis auf Höhe der maximalen Wasserstandslinie (ca. Marke HWMI± NN+88,56 m); vereinzelte 2013 bereits freigespülte Weidensetzstangen noch relativ stabil und vital; landseitige Anordnung einer dritten Reihe von Weidensetzstangen – 2015: seit dem Rückbau der Steinschüttung 2011 zunehmende Verschiebung der Böschungsoberfläche landwärts durch Erosion; größte Erosion am VF-Ende (Verschiebung der Böschungsschulter um bis zu 5 m); Wurzelauflagerung an einer der auf der Böschungsplanie eingebrachten Setzstangen hat gezeigt, dass die bisher entwickelten Wurzeln die zunehmende Erosion an der Böschungsschulter nicht aufhalten können; freigespülte Setzstangen kippen um und sterben ab; weitere Erosion zwischen den einzelnen Weiden ist zu erwarten; – 2016: Erneuerung des km-Schildes (km 441,500) auf der Böschungsplanie erforderlich, da infolge Fundamentunterspülung durch Erosion Standsicherheit des Schildes gefährdet – 2017–2019 und künftig: Beobachtung der Erosionsvorgänge hinsichtlich Betriebsweg, bisher Bestand des Betriebsweges noch nicht kritisch – Uferstandsicherheit weiterhin nicht gegeben; die alten, im Boden vorhandenen freigespülten Steine führen jedoch zu einer gewissen Stabilisierung; Erosionen gehen insbesondere im Oberen Auelehmbereich weiter – Weitere Beobachtung – Einzelne Setzstangen nicht als Erosionsschutz geeignet
Ökologie	<p>Vegetation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – 2012/2013: Einleitung der pflanzlichen Besiedlung mit Spontanvegetation in weniger hydraulisch belasteter oberen Böschungszone, insb. von Hartholzauengehölz (Blutroter Hartriegel) – 2014/2015: weitere Ausdehnung des Hartholzauengehölzes aus freier Sukzession; natürliche Ansiedlung von Weiden im Bereich einer unterstromigen, sandigen Auskolkung – 2016: relativ geringe Artenzahlen im Maßnahmenvergleich, Auftreten einzelner Vertreter der einjährigen Uferfluren im unteren, häufig eingestauten Böschungsbereich (dort relativ hohe Diversität bei allerdings geringer Pflanzenmenge), etwa gleicher Anteil autotypischer und -untypischer Arten (fast ausschließlich

	<p>„Allerweltsarten“) aber sehr geringer Neophytenanteil, gut ausgeprägte Böschungszonierung in Abhängigkeit der hydrologischen Verhältnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> – 2017–2019: überwiegend dynamische Vegetationsentwicklung (Arten kommen und gehen); Hartholzauengehölz (Hartriegel) stabil, vital und weiter in Ausbreitung begriffen; Kratzbeere überwuchert zunehmend oberen/(mittleren) Böschungsbereich; Aufkommen einzelner Weidengehölze im unteren Böschungsbereich <p>Aquatische Fauna (2012–2018)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bisher kein positiver Einfluss des durch die Erosion zunehmend flacher ausgebildeten Ufers auf die Fisch- und Makrozoobenthosfauna nachweisbar. <p>Terrestrische Fauna (2013–2017)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vögel: bisher mittleres Potenzial zur Bereitstellung geeigneter Habitatstrukturen – Laufkäfer: höhere Arten- und Individuenzahlen, höhere Anteile ufertypischer Arten und Individuen im Vgl. zur Referenz, höchstes Vorkommen von RL-Arten im Maßnahmenvergleich – Reptilien: Maßnahme zeigt Tendenz geeignete Reptilienhabitate bereitstellen zu können – Spinnen: leicht erhöhte Artenzahlen und höhere Besiedlungsdichten im Vgl. zur Referenz, bisher kein positiver Effekt auf Anteil ufertypischer Arten <p>Sonstiges:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Erhöhung des Substrat- und Struktureichtums durch Erosion bzw. Sedimentation und Ablagerung von Totholz/Treibsel nach Wasserstandsschwankungen und Hochwassern, höchste Heterogenitätsstufe im Maßnahmenvergleich – Hydromorphologische Dynamik (in gewissem Maß) gegeben – Kein Einbau künstlicher/naturferner Materialien
Pflege/ Unterhaltung	<ul style="list-style-type: none"> – Geringe Pflege und Unterhaltung, verstärkte Verkehrssicherung der Böschungsplanie – Entfernung vereinzelt aufgekommener Neophyten (Topinambur, Eschen-Ahorn)
Sanierungs- maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> – 2014: landseitige Anordnung einer dritten Reihe von Weidensetzstangen (Reihe musste aufgrund des hohen Schattendrucks der wasserseitigen Setzstangen mehrmals erneuert werden; Wucherfolg erst nach Rückschnitt) – 2016: Erneuerung des km-Schildes (km 441,500) – 2017–2020: keine weiteren Sanierungsmaßnahmen durchgeführt

Anlage 5

Maßnahmen im Rahmen des weitergehenden Monitorings von 2021 bis zunächst 2030

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Anlage 5: Maßnahmen im Rahmen des weitergehenden Monitorings von 2021 bis zunächst 2030

		Maßnahmen/Untersuchungen
Uferstabilität	Uferinspektion	2 x pro Jahr (Winter, Sommer), ggf. zusätzliche Inspektionen nach Extremereignissen (z. B. Hochwasser, Starkregen, Trockenzeiten)
	Fotodokumentation	Bei allen Uferinspektionen
	Panoramaaufnahmen	2 x pro Jahr (Winter, Sommer), ggf. zusätzliche Aufnahmen nach Extremereignissen (z. B. Hochwasser, Starkregen, Trockenzeiten)
	Vermessung	2022 und 2027 Vermessung ausgewählter Querprofile, ggf. zusätzliche Vermessungen nach Extremereignissen (z. B. Hochwasser, Starkregen, Trockenzeiten)
	PWD-Messungen	Insgesamt 3 Messungen (bei Wasserständen oberhalb MW), ggf. zusätzlich bei Messungen zur hydraulischen Belastung
Hydraulische Belastungen	Schiffsinduzierte Belastungen	Insgesamt 3 Messungen (bei Wasserständen oberhalb MW)
	Natürliche Belastungen	Insgesamt 3 Messungen (bei Wasserständen oberhalb MW)
Klimadaten/Wasserstände		Kontinuierliche Aufzeichnung und Auswertung (wie bisher)
Spezielle Untersuchungen		Testen biologisch abbaubarer Geotextilien (VF 6), Einbau 01/2020, danach regelmäßige Probenahmen nach 2, 3, 5, 10 und 20 Jahren; Untersuchung der Proben in der BAW hinsichtlich der technischen Eigenschaften und des Abbauverhaltens
Vegetation/Wurzelaufgrabungen		Wurzeluntersuchungen in verschiedenen Versuchsfeldern (Weiden VF 3, Seggen VF 5, Pflanzmatten VF 7, Hartriegel VF 9, ...)
Vegetation/Erfassung		2022 und 2027 umfangreiche Vegetationserfassung Ggf. zusätzlich spezielle Vegetationserfassungen (z. B. spezielle Aufnahmen Brombeeren, ...)
Fauna		2022 und 2027 faunistische Aufnahmen (alle Tiergruppen, z. B. Fische - Vergleich VF 1 und 4 mit Referenz)
Pflegemaßnahmen		Erfassung und Dokumentation aller Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen, die in den Monitoringjahren durchgeführt werden (müssen).
Schäden		Kontinuierliche Dokumentation bei Erfordernis
Sanierungsmaßnahmen		Kontinuierliche Dokumentation bei Erfordernis

Anlage 6

Bewertungstabellen Fauna

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

**Anlage 6: Bewertungstabellen Fauna
Bewertungstabelle Vögel**

Die Gesamtbewertung der Vögel setzt sich zusammen aus dem Hauptkriterium *Reproduktion* mit den Unterkriterien *Brut(verdacht)* und *Brutpotenzial*.

Vögel	Hauptkriterium	Reproduktion		Gesamtbewertung Vögel	Ranking
		Brut- (verdacht)	Brut- potenzial		
	Versuchsfeld	Wertstufe	Wertstufe		
Maßnahmentyp					
Begrünte Steinschüttung	VF 1	1	3	1,80	2
Weidenspreitlage	VF 2	3	4	3,40	5
Weidenspreitlage	VF 3	3	4	3,40	5
Kiesauflage mit Steinblöcken	VF 4	1	1	1,00	1
Röhrlichtgabionen/Steinmatratzen	VF 5	1	1	1,00	1
Alginatauftrag (erodiert)	VF 6	1	1	1,00	1
Pflanzmatten	VF 7	3	4	3,40	5
Steinwall im unteren Böschungsbereich	VF 8	3	3	3,00	4
Entsteinung, ohne Ufersicherung	VF 9	1	4	2,20	3
Konventionelles Deckwerk	REF	1	1	1,00	1

Bewertung	Ranking
1,00-1,30	1
1,31-1,90	2
1,91-2,50	3
2,51-3,10	4
3,11-3,40	5

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Bewertungstabelle Reptilien

Die Gesamtbewertung der Reptilien setzt sich zusammen aus dem Hauptkriterium *Artenreichtum* mit den Unterkriterien *Artenzahl* und *Sichtungshäufigkeit*.

Reptilien	Hauptkriterium <i>Unterkriterium</i>	Artenreichtum		Gesamtbewertung Reptilien	Ranking
		Artenzahl	<i>Sichtungshäufigkeit</i>		
Maßnahmentyp	Versuchsfeld	Wertstufe	Wertstufe		
Begrünte Steinschüttung	VF 1	2	1	1,50	2
Weidenspreitlage	VF 2	2	1	1,50	2
Weidenspreitlage	VF 3	3	1	2,00	2
Kiesauflage mit Steinblöcken	VF 4	3	4	3,50	4
Röhrrihgabionen/Steinmatratzen	VF 5	4	4	4,00	5
Alginatauftrag (erodiert)	VF 6	2	1	1,50	2
Pflanzmatten	VF 7	2	3	2,50	3
Steinwall im unteren Böschungsbereich	VF 8	1	1	1,00	1
Entsteinung, ohne Ufersicherung	VF 9	3	2	2,50	3
Konventionelles Deckwerk	REF	2	1	1,50	2

Bewertung	Ranking
1,00–1,38	1
1,39–2,13	2
2,14–2,88	3
2,89–3,63	4
3,64–4,00	5

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Bewertungstabelle Spinnen

Die Gesamtbewertung der Spinnen setzt sich zusammen aus den Hauptkriterien *Artenreichtum* und *Artenzusammensetzung*. Das Hauptkriterium *Artenreichtum* untergliedert sich in die Unterkriterien *Artenzahl*, *Individuenzahl* und *Diversität*. Das Hauptkriterium *Artenzusammensetzung* untergliedert sich in die Unterkriterien *Anteil ufertypischer Individuen* und *Rote-Liste-Arten*.

Spinnen	Hauptkriterium <i>Unterkriterium</i>	Artenreichtum			Gesamt Wichtung (0,4/0,2/0,4)	Artenzusammensetzung		Gesamt Wichtung (0,7/0,3)	Gesamtbewertung Spinnen Wichtung (0,6/0,4)	Ranking
		Artenzahl Wertstufe	Individuenzahl Wertstufe	Diversität Wertstufe		Anteil ufertyp. Individuen Wertstufe	Rote Liste Wertstufe			
Maßnahmentyp	Versuchsfeld	Wertstufe	Wertstufe	Wertstufe						
Begrünte Steinschüttung	VF 1	4	4	1	2,8	3	1	2,4	2,64	3
Weidenspreitlage	VF 2	4	2	3	3,2	1	1	1,0	2,32	2
Weidenspreitlage	VF 3	3	1	2	2,2	2	1	1,7	2,00	1
Kiesauflage mit Steinblöcken	VF 4	4	2	3	3,2	1	1	1,0	2,32	2
Röhrichtgabionen/Steinmatrizen	VF 5	4	2	5	4,0	1	1	1,0	2,80	3
Alginatauftrag (erodiert)	VF 6	4	1	5	3,8	1	1	1,0	2,68	3
Pflanzmatten	VF 7	5	5	5	5,0	2	1	1,7	3,68	5
Steinwall im unteren Böschungsbereich	VF 8	5	5	3	4,2	2	1	1,7	3,20	4
Entsteinung, ohne Ufersicherung	VF 9	4	4	5	4,4	2	1	1,7	3,32	4
Konventionelles Deckwerk	REF	3	2	2	2,4	3	1	2,4	2,40	2

Bewertung	Ranking
2,00-2,21	1
2,22-2,63	2
2,64-3,05	3
3,06-3,48	4
3,49-3,68	5

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Bewertungstabelle Laufkäfer

Die Gesamtbewertung der Laufkäfer setzt sich zusammen aus den Hauptkriterien *Artenreichtum* und *Artenzusammensetzung*. Das Hauptkriterium *Artenreichtum* untergliedert sich in die Unterkriterien *Artenzahl*, *Individuenzahl* und *Diversität*. Das Hauptkriterium *Artenzusammensetzung* untergliedert sich in die Unterkriterien *Anteil ufertypischer Individuen* und *Rote-Liste-Arten*.

Laufkäfer	Hauptkriterium Unterkriterium	Artenreichtum			Gesamt Wichtung (0,4/0,2/0,4)	Artenzusammensetzung		Gesamt Wichtung (0,7/0,3)	Gesamtbewertung Spinnen Wichtung (0,6/0,4)	Ranking
		Artenzahl Wertstufe	Individuenzahl Wertstufe	Diversität Wertstufe		Anteil ufertyp. Individuen Wertstufe	Rote Liste Wertstufe			
Maßnahmentyp	Versuchsfeld									
Begrünte Steinschüttung	VF 1	2	1	2	1,8	5	1	3,8	2,60	3
Weidenspreitlage	VF 2	2	2	3	2,4	3	1	2,4	2,40	3
Weidenspreitlage	VF 3	3	3	3	3,0	4	2	3,4	3,16	4
Kiesauflage mit Steinblöcken	VF 4	4	2	5	4,0	3	2	2,7	3,48	4
Röhrichtgabeln/ Steinmatrizen	VF 5	3	2	3	2,8	1	3	1,6	2,32	3
Alginatauftrag (erodiert)	VF 6	1	1	1	1,0	1	1	1,0	1,00	1
Pflanzmatten	VF 7	5	4	4	4,4	1	3	1,6	3,28	4
Steinwall im unteren Böschungsbereich	VF 8	5	4	5	4,8	4	3	3,7	4,36	5
Entsteinerung, ohne Ufersicherung	VF 9	4	3	5	4,2	2	3	2,3	3,44	4
Konventionelles Deckwerk	REF	1	1	1	1,0	3	1	2,4	1,56	2

Bewertung	Ranking
1,00-1,42	1
1,43-2,26	2
2,27-3,10	3
3,11-3,94	4
3,95-4,36	5

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Bewertungstabelle Fische

Die Gesamtbewertung der Fische setzt sich zusammen aus den Hauptkriterien *Artenreichtum* und *Artenzusammensetzung*. Das Hauptkriterium *Artenreichtum* untergliedert sich in die Unterkriterien *Gesamtartenzahl* und *mittlere Artenzahl* pro Befischungspunkt. Das Hauptkriterium *Artenzusammensetzung* untergliedert sich in die Unterkriterien *mittlerer Neozoenanteil* und *mittlere Artenzahl der Referenz*.

Fische	Hauptkriterium	Artenreichtum		Gesamt	Artenzusammensetzung		Gesamt	Gesamtbewertung Fische	Ranking
		Gesamtartenzahl	Mittl. Artenzahl		Mittl. Neozoenanteil	Mittl. Referenzartenzahl			
Maßnahmentyp	Versuchsfeld	Wertstufe	Wertstufe		Wertstufe	Wertstufe			
Vorgelagerter Steinwall mit Flachwasserzone, Wurzelteiler	VF 1	3	3	3,0	3	4	3,5	3,25	5
Weidenspreitlage	VF 2	1	1	1,0	1	1	1,0	1,00	1
Weidenspreitlage	VF 3	1	1	1,0	2	1	1,5	1,25	1
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Totholzfaschinen	VF 4	1	3	2,0	3	2	2,5	2,25	3
Röhrichtgabionen/Steinmatrizen	VF 5	2	1	1,5	1	3	2,0	1,75	2
Alginatauftrag (erodiert)	VF 6	1	2	1,5	2	2	2,0	1,75	2
Pflanzmatten	VF 7	1	2	1,5	1	3	2,0	1,75	2
Steinwall im unteren Böschungsbereich	VF 8	1	2	1,5	2	2	2,0	1,75	2
Entsteinung, ohne Ufersicherung	VF 9	1	1	1,0	2	3	2,5	1,75	2
Konventionelles Deckwerk	REF	1	1	1,0	1	2	1,5	1,25	1

Bewertung	Ranking
1,00–1,28	1
1,29–1,85	2
1,86–2,41	3
2,42–2,97	4
2,98–3,25	5

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Bewertungstabelle Makrozoobenthos

Die Gesamtbewertung des Makrozoobenthos setzt sich zusammen aus den Hauptkriterien Artenreichtum und Artenzusammensetzung. Das Hauptkriterium Artenzusammensetzung untergliedert sich in die Unterkriterien mittlerer Neozoenanteil und Anzahl der EPTCBO-Arten*.

Makrozoobenthos	Hauptkriterium	Artenreichtum	Artenzusammensetzung		Gesamt	Gesamtbewertung Makrozoobenthos	Ranking
			Neozoenanteil	EPTCBO-Arten*			
	Unterkriterium	Artenzahl	Wertstufe	Wertstufe	Wichtung (0,3/0,7)	Wichtung (0,5/0,5)	
Maßnahmentyp	Versuchsfeld	Wertstufe					
Vorgelagerter Steinwall mit Flachwasserzone, Wurzelteiler	VF 1	4	2	3	2,7	3,35	5
Weidenspreitlage	VF 2	1	1	1	1,0	1,00	1
Weidenspreitlage	VF 3	1	1	1	1,0	1,00	1
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Kies und Totholzfaschinen	VF 4	2	3	2	2,3	2,15	3
Röhrichtgäbionen/Steinmatratzen	VF 5	1	1	1	1,0	1,00	1
Alginatauftrag (erodiert)	VF 6	1	1	1	1,0	1,00	1
Pflanzmatten	VF 7	1	3	1	1,6	1,30	2
Steinwall im unteren Böschungsbereich	VF 8	1	4	1	1,9	1,45	2
Entsteinung, ohne Ufersicherung	VF 9	2	1	1	1,0	1,50	2
Konventionelles Deckwerk	REF	1	2	1	1,3	1,15	1

* EPTCBO-Arten sind Arten aus den Ordnungen Ephemeroptera (Eintagsfliegen), Plecoptera (Steinfliegen), Trichoptera (Köcherfliegen), Coleoptera (Käfer), Bivalvia (Muscheln) und Odonata (Libellen).

Bewertung	Ranking
1,00–1,29	1
1,30–1,88	2
1,89–2,47	3
2,48–3,06	4
3,07–3,35	5

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ■ August 2020

Zusammenfassende Bewertung

Für die Gesamtbewertung „Terrestrische Fauna“ wurde ein gewichteter Mittelwert aus den Bewertungen der terrestrischen Organismengruppen pro VF gebildet. Für die aquatisch wirksamen Maßnahmen der VF 1 und 4 (Flachwasserzone, Totholzfaschinen) und die aquatische Referenz wurde eine Gesamtbewertung „Aquatische Fauna“ vorgenommen.

Maßnahmentyp	Vogel	Reptilien	Spinnen	Laufkäfer	Fische	MZB	Ökologische Wirksamkeit	
							Terrestrische Fauna	Aquatische Fauna
Begrünte Steinschüttung	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>5</u>	2,6	5
Weidenspreitlage	<u>5</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	(1)	(1)	3,1	-
Weidenspreitlage	<u>5</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>4</u>	(1)	(1)	3,1	-
Kiesauflage mit Steinblöcken	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	2,6	3
Röhrichtgabionen/Steinmatratzen	<u>1</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	(2)	(1)	3,0	-
Alginatauftrag (erodiert)	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	(2)	(1)	1,8	-
Pflanzmatten	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	(2)	(2)	4,3	-
Steinwall im unteren Böschungsbereich	<u>4</u>	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	(2)	(2)	3,5	-
Entsteinung, ohne Ufersicherung	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>4</u>	(2)	(2)	3,5	-
Konventionelles Deckwerk	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	1,8	1

Die unterstrichenen Werte wurden gemäß der im Vorfeld definierten ökologischen Zielstellung (s. Tab. 1 im Bericht) doppelt gewichtet.

Werte in Klammern werden nicht berücksichtigt, da die Bewertung der ökologischen Wirksamkeit für die aquatische Fauna nur für VF1, VF4 und die Referenz vorgenommen wurde. Nur in den beiden genannten VF war von einer ökologischen Wirksamkeit auf die Fische und aquatischen Wirbellosen auszugehen. Da mögliche positive Effekte der terrestrischen Maßnahmen auf den aquatischen Lebensraum jedoch nicht auszuschließen sind, wurden die übrigen VF gleichfalls untersucht und bewertet. Für die Gesamtbewertung der aquatischen Fauna wurden sie jedoch nicht berücksichtigt.

Anlage 7

Multikriterielle Entscheidungsanalyse in Anlehnung an den Analytischen Hierarchie-Prozess (AHP) von Saaty (1990)

Erläuterungen zu Kapitel 8

Anlage 7: Multikriterielle Entscheidungsanalyse in Anlehnung an den Analytischen Hierarchie-Prozess (AHP) von Saaty (1990) – Erläuterungen zu Kapitel 8

1 Einführung

Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) wurde von Thomas L. Saaty entwickelt. Die Idee des AHP besteht darin, komplexe Entscheidungssituationen in handhabbare Einzelentscheidungen aufzuteilen. Die einfachste Einzelentscheidung ist der paarweise Vergleich zweier Komponenten. Eine Entscheidung über mehr als zwei Komponenten wird daher in diverse paarweise Vergleiche aufgeteilt. Diese können unabhängig voneinander, nacheinander gelöst und anschließend miteinander verrechnet werden. Dabei liegt die Stärke des AHP in der mathematisch logisch aufgebauten Berechnungsmethode. Mit ihr ist es nicht nur möglich, die einzelnen Paarvergleiche zu berechnen, es kann auch die Konsistenz der Entscheidungen getestet werden. Hierbei wird überprüft, ob die einzelnen Paarvergleiche zueinander logisch sind oder im Widerspruch zueinander stehen. Im Ergebnis erhält man eine strukturierte, transparente und in sich konsistente Entscheidung (Westphal 2016).

Der AHP folgt folgenden Schritten:

1. Definition der Zielvorstellungen (Szenarien)
2. Festlegung der Struktur (Zielstellungen, Kriterien, Alternativen)
3. Paarweiser Vergleich der Kriterien – Erstellen einer Vergleichsmatrix (Skalierung)
4. Berechnung der Wichtigkeit
5. Konsistenzprüfung
6. Erstellung der Rangfolge

2 Definition der Zielvorstellungen (Szenarien)

Ziel ist es, die an der Versuchsstrecke am Rhein gewonnenen Erkenntnisse auf Uferabschnitte mit anderen Randbedingungen zu übertragen. Hierzu werden Szenarien definiert, für die mit Hilfe des AHP die Eignung der verschiedenen technisch-biologischen Maßnahmen ermittelt wird. Die Untersuchung erfolgt für fünf verschiedene Szenarien A bis E, die alle an einer freifließenden Wasserstraße mit motorisierter Schifffahrt angesiedelt sind. Diese werden anhand von drei Kriterien bewertet (vgl. Kap. 3.1). Im Gegensatz zur Situation an der Versuchsstrecke ist in jedem Fall eine Flächenverfügbarkeit im Sinne einer Uferabflachung gegeben.

Im Szenario A wird angenommen, dass die Ufer stark abgeflacht werden können, was sich günstig auf die Uferstabilität auswirkt. Gesamtkosten sind kaum relevant. Aus ökologischer Sicht sollen zuvorderst terrestrische Uferlebensräume gefördert werden. Im Gegensatz zur Versuchsstrecke ist die Ökologie wichtiger als die Robustheit der Maßnahmen.

Zusätzlich werden weitere drei Szenarien (B, C, D) als sogenannte Grenzwertszenarien betrachtet. Mit diesen soll untersucht werden, welche Rangfolge sich ergibt, wenn jeweils ein Kriterium gegenüber den beiden anderen als absolut prioritär angesehen wird. Für das Szenario B wird die Ökologie, für das Szenario C wird die Robustheit und für Szenario D werden die Gesamtkosten prioritär betrachtet. Die jeweiligen anderen beiden Kriterien werden als kaum relevant eingestuft. Ökologisches Ziel ist jeweils die Förderung terrestrischer Lebensräume.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Das Szenario E entspricht im Hinblick auf die Randbedingungen Szenario A, mit dem Unterschied, dass statt der terrestrischen Lebensräume aquatische Lebensräume gefördert werden sollen. Die Maßnahmen der Szenarien A-D wurden ausschließlich im terrestrischen Uferbereich eingebracht und können den aquatischen Lebensraum (unterhalb MW) ökologisch nicht aufwerten. Sie können jedoch mit verschiedenen Zusatzmaßnahmen, die im aquatischen Bereich nachweislich ökologisch wirksam sind, kombiniert werden.

3 Festlegung der Struktur

3.1 Kriterien

Für die Übertragung der Ergebnisse werden ähnlich wie in Kap. 7 drei Kriterien zur Auswahl geeigneter Maßnahmen herangezogen. Neben den Kriterien „Ökologie“ und „Gesamtkosten“ wird anstelle der Standsicherheit jedoch das Kriterium „Robustheit“ betrachtet. Analog zu Kap. 7 wird in Bezug auf die Ökologie die Wirksamkeit der Maßnahmen auf die terrestrische und die aquatische Ökologie getrennt bewertet. Gleichermäßen bilden die Herstellungskosten und die Unterhaltungskosten das Kriterium „Gesamtkosten“.

3.2 Alternativen

Die verschiedenen technisch-biologischen Ufersicherungen stellen im Sinne des AHP die Alternativen dar. Diese wurden im Vorfeld bereits mit einer einheitlichen Skala von 1-5 hinsichtlich der Kriterien bewertet. Ferner wurden Zusatzmaßnahmen ohne Uferschutzfunktion im terrestrischen und aquatischen Bereich analysiert. Die Auswertung erfolgt getrennt für Maßnahmen mit und ohne Uferschutzfunktion sowie für Maßnahmen im terrestrischen und im aquatischen Uferbereich.

Bild 1 gibt einen Überblick über die Struktur des AHP. Sie bildet die Beziehung zwischen dem Ziel, eine optimale Ufersicherung für ein konkretes Szenario zu ermitteln, den Kriterien und den Alternativen ab.

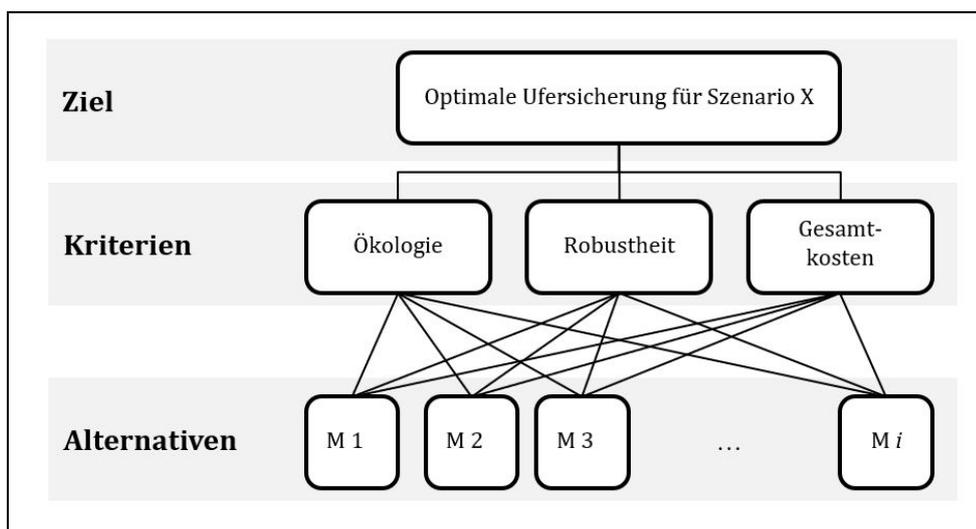


Bild 1: Struktur des Entscheidungsprozesses, abgeändert in Anlehnung an Saaty (1990), M = Maßnahmen (Technisch-biologische Ufersicherungen bzw. Zusatzmaßnahmen).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 1: Bewertung der Alternativen in Bezug auf die drei Kriterien analog zu Kap. 7

Alternativen	Kriterien (5: sehr gut bis 1: sehr schlecht)		
	Terrestrische Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten
Technisch-biologische Uferschutzmaßnahmen (nur terrestrisch wirksam)			
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen	3	5	4
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Strukturelementen (Kies, Steinblöcke)	2	5	4
Weidenspreitlagen	4	3	2
Röhrichtgabionen	2	4	3
Steinmatratzen	2	4	3
Kokosmatte über Nassansaat	4	1	3
Pflanzmatten	4	2	3
Ohne Uferschutz (natürliche Sukzession)	4	1	3
Steinschüttung als Referenz	2	5	5
Zusatzmaßnahmen ohne Uferschutz mit Auswirkungen auf die terrestrische Ökologie	Terrestrische Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten
Heckenlagen auf Böschungsplanie	4	5	5
Steinwall vor Mittelwasserberme	4	5	5
Zusatzmaßnahmen ohne Uferschutz mit Auswirkungen auf die aquatische Ökologie	Aquatische Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten
Steinwall mit Flachwasserzone	3	5	4
Totholzfashinenunterhalb MW	3	3	3
Steinwall mit Flachwasserzone und Wurzelteller/Totholzfashinen	5	3	2
Totholz/Wurzelteller unterhalb MW	3	3	3
Steinschüttung als Referenz (aquatisch)	1	5	5

¹⁾ Uferschutzmaßnahmen entsprechend Anlage 3 technisch optimiert.

²⁾ Kokosmatte über Nassansaat entsprechend Anlage 3 nur oberhalb des höchsten Wellenaufbaus anwendbar.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

In Tabelle 1 sind die vorab ermittelten Bewertungen der Alternativen für die drei Kriterien dargestellt. Analog zu Kap. 7 (Textteil) liegen sie in der dort verwendeten Skala 1 bis 5 vor, wobei der Wert 1 „sehr schlecht“ und der Wert 5 „sehr gut“ bedeuten. Die Werteskala ist für alle Kriterien einheitlich, sodass derselbe Wert bei allen Kriterien dieselbe Bedeutung hat. Tabelle 1 zeigt auch, dass die einzelnen Alternativen entweder nur Auswirkungen auf die terrestrische oder nur auf die aquatische Ökologie haben. Auf den jeweils anderen Bereich haben sie keinen Einfluss.

4 Paarweiser Vergleich der Kriterien – Erstellen einer Vergleichsmatrix (Skalierung)

Im ersten Schritt muss jedes Kriterium mit jedem anderen verglichen werden. Dabei ist nicht nur zu entscheiden, ob ein Kriterium wichtiger, gleichwichtig oder weniger wichtig ist. Es ist auch die Stärke des Unterschiedes nach der von Saaty entwickelten Skala festzulegen (Saaty 1987). Die Bedeutung der einzelnen Zahlenwerte ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Skalenwerte und reziproke Werte und deren Beschreibung für den paarweisen Vergleich von (Sub)-Kriterien nach Saaty (1990).

Skalenwerte	Beschreibung	Reziproke Werte	Beschreibung
1	gleiche Bedeutung	1	gleiche Bedeutung
3	etwas größere Bedeutung	1/3	etwas geringere Bedeutung
5	erheblich größere Bedeutung	1/5	Erheblich geringere Bedeutung
7	sehr viel größere Bedeutung	1/7	sehr viel geringere Bedeutung
9	absolut dominierend	1/9	absolut unterlegen
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Zwischenwerte

Aufgrund der Randbedingungen in Szenario A (Größere Flächenverfügbarkeit mit der Option zur Böschungsabflachung, Gesamtkosten sind kaum relevant) wird dem Kriterium „Ökologie“ eine höhere Bedeutung beigemessen als den Kriterien „Robustheit“ und „Gesamtkosten“. Da robuste Maßnahmen meist ökonomisch nachhaltiger sind, wird dem Kriterium „Robustheit“ eine höhere Bedeutung beigemessen als dem Kriterium „Gesamtkosten“. Es ergibt sich insgesamt folgende Vergleichsmatrix (vgl. Tabelle 3):

Tabelle 3: Vergleichsmatrix der Kriterien „Ökologie“, „Robustheit“ und „Gesamtkosten“ für Szenario A anhand von Skalenwerten und reziproken Werten nach Saaty (1990).

Kriterien	Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten
Ökologie	1	3	8
Robustheit	1/3	1	3
Gesamtkosten	1/8	1/3	1

5 Berechnung der Wichtungen

Aus der Vergleichsmatrix wird die Wichtung berechnet. Die Wichtung entspricht aufgrund mathematischer Überlegungen dem Eigenvektor des betragsgrößten Eigenwertes (Saaty 2004).

Dieser Eigenvektor kann auf analytischem Weg berechnet werden. Da dies sehr aufwendig ist, empfiehlt Saaty eine alternative Methode. In dieser muss zur Berechnung des Eigenvektors die Vergleichsmatrix häufig genug quadriert werden. Dann errechnen sich die Werte eines Eigenvektors, indem jeweils die Zeilensummen der neu errechneten Matrix gebildet werden. Diese Werte können normiert werden, indem sie jeweils durch die Gesamtsumme aller Werte geteilt werden (Saaty 1990). „Operationalisiert wird diese Theorie [...] indem die Ausgangsmatrix so häufig quadriert und die normierten Zeilensummen berechnet werden, bis die Änderung der so gewonnenen Prioritäten zwischen zwei Quadrierungen nur noch kleiner als ein vorher bestimmter Wert [...] ist.“ (Westphal 2016).

Zuerst wird die Vergleichsmatrix quadriert.

$$A_A^2 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 8 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 3 & 8 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 8,67 & 25 \\ 1,04 & 3 & 8,67 \\ 0,36 & 1,04 & 3 \end{pmatrix}$$

Bei der Multiplikation wird das Ergebnis berechnet, indem aus dem jeweiligen Zeilenvektor der ersten Matrix und dem jeweiligen Spaltenvektor der nächsten Matrix das Skalarprodukt gebildet wird (Bronstejn 1991). Beispielsweise wurde die 25 aus dem Vektor der ersten Zeile und dem der dritten Spalte errechnet:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 8 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = 1 \cdot 8 + 3 \cdot 3 + 8 \cdot 1 = 25$$

Zur Berechnung der normierten Zeilensummen wird die Summe der jeweiligen Zeilen der Ergebnismatrix durch die Gesamtsumme aller Werte geteilt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Berechnung des Wichtungsvektors für die quadrierte Vergleichsmatrix

Werte der quadrierten Vergleichsmatrix Szenario A			Zeilensumme	Wichtung
3	8,67	25	36,67	68,2 %
1,04	3	8,67	12,71	23,6 %
0,36	1,04	3	4,40	8,2 %
			Σ	100 %

Diese Prozedur ist solange zu wiederholen, bis das Ergebnis mit der gewünschten Genauigkeit vorliegt. Hierfür wird die Ergebnismatrix beispielhaft noch einmal quadriert:

$$A_A^4 = \begin{pmatrix} 3 & 8,67 & 25 \\ 1,04 & 3 & 8,67 \\ 0,36 & 1,04 & 3 \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} 27,1 & 78,0 & 225,1 \\ 9,4 & 27,1 & 78,0 \\ 3,3 & 9,4 & 27,1 \end{pmatrix}$$

Aus der neuen Matrix kann nun ebenfalls die Wichtung berechnet werden (Tabelle 5). Der Vergleich mit den zuvor berechneten Werten (Tabelle 4) zeigt, dass die Änderungen im Rahmen der hier verwendeten Genauigkeit nicht mehr sichtbar sind. Daher kann auf eine weitere Quadrierung verzichtet werden.

Tabelle 5: Berechnung des Wichtungsvektors für die doppelt quadrierte Vergleichsmatrix

Werte der quadrierten Vergleichsmatrix Szenario A			Zeilensumme	Wichtung
27,1	78,0	225,1	330,2	68,2 %
9,4	27,1	78,0	114,5	23,6 %
3,3	9,4	27,1	39,8	8,2 %
Σ			484,5	100 %

6 Konsistenzprüfung

Saaty hat eine Methode entwickelt, mit der sich die Wichtung der Kriterien ermitteln lässt, falls die Vergleichsmatrix nicht vollständig konsistent ist. Dennoch ist es erforderlich, dass die Bewertungen in sich logisch durchgeführt wurden. Hierfür wird die Konsistenzprüfung durchgeführt. Entscheidend ist dabei das Konsistenzverhältnis $C.R.$, welches den Wert 0,1 nicht übersteigen sollte (Saaty 1990). Dies wird durch den Vergleich des Konsistenzindex $C.I.$ mit einer festgesetzten Zufallskonsistenz $R.I.$ ermittelt. Bei $R.I.$ handelt es sich um einen gemittelten Konsistenzindex. Er wurde errechnet aus 50.000 verschiedenen reziproken Matrizen, bei denen die Vergleichswerte zufällig gewählt wurden. Für dreidimensionale Matrizen, die für 3 Kriterien erstellt wurden, gilt für diese Zufallskonsistenz $R.I. = 0,52$ (Saaty und Tran 2007).

$C.I.$ wird unter Verwendung des maximalen Eigenwertes λ_{max} berechnet. Dieser berechnet sich wie folgt:

Die allgemeine Formel für die Eigenwertberechnung: $A \cdot v = \lambda v$ muss gelöst werden (Bronstejn 1991). Da der Eigenvektor v auf beiden Seiten der Gleichung vorkommt, kann er mit einer reellen beliebigen Zahl multipliziert, d. h. skaliert werden. Es kann also z. B. auch der prozentuale Wichtungsvektor w aus Tabelle 4 eingesetzt werden. Somit erhält man für Szenario A ein Gleichungssystem, das wie folgt gelöst werden kann:

$$A_A \cdot w_A = \lambda_{max} \cdot w_A$$

Wird die Gleichung in Matrizenschreibweise dargestellt, kann die linke Seite ausmultipliziert werden:

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 8 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/8 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,682 \\ 0,236 \\ 0,082 \end{pmatrix} = \lambda_{max} \begin{pmatrix} 0,682 \\ 0,236 \\ 0,082 \end{pmatrix}$$

Dies ist gleichbedeutend mit dem Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} 1/0,682 (1 \cdot 0,682 + 3 \cdot 0,236 + 8 \cdot 0,082) &= 3,0000 = \lambda_{max} \\ \Leftrightarrow 1/0,236 (1/3 \cdot 0,682 + 1 \cdot 0,236 + 3 \cdot 0,082) &= 3,0056 = \lambda_{max} \\ 1/0,082 (1/8 \cdot 0,682 + 1/3 \cdot 0,236 + 1 \cdot 0,082) &= 2,9990 = \lambda_{max} \end{aligned}$$

Nach Refflinghaus (2009) können die unterschiedlichen Werte gemittelt werden.

Für Szenario A ergibt sich bei Mittelung der drei Werte: $\lambda_{max} = 3,00154$.

Zur Bewertung der Konsistenz kann somit die Differenz $\lambda_{max} - n$ verwendet werden. Dies hat jedoch folgenden Nachteil: Die Differenz des Wertes n vom maximalen Eigenwert ist genauso groß wie die Summe der Abweichungen aller anderen Eigenwerte zu null. $\lambda_{max} - n$ ist somit nicht nur

abhängig von der Konsistenz, die Differenz wird auch mit zunehmender Kriterienanzahl immer größer. Daher werden nach Saaty als Konsistenzindex (*C.I.*) die mittleren Werte aller anderen Eigenwerte angesetzt (Saaty und Tran 2007):

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \text{ Für Szenario A gilt somit: } C.I. = \frac{3,00154 - 3}{3 - 1} = 0,0077$$

Das Konsistenzverhältnis *C.R.* ergibt sich wie folgt:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \text{ Für Szenario A gilt somit: } C.R. = \frac{0,0077}{0,52} = 0,00148$$

Die Vergleichsmatrix des Szenario A erfüllt damit diese Bedingung. Sie ist somit nahezu konsistent (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Konsistenzprüfung für die ermittelten Prioritäten und Eigenvektoren (Gesamtgewichte) für die Kriterien "Ökologie", "Robustheit", "Gesamtkosten" für Szenario A.

Parameter	Definition	Wert
Maximaler Eigenwert	λ_{max}	3,00154
Konsistenzindex	$C.I. = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$	0,00148
Zufallskonsistenz bei 3 Kriterien	<i>R.I.</i> (Saaty und Tran 2007)	0,52
Konsistenzverhältnis	$C.R. = C.I./R.I.$	0,00148

7 Ermittlung von Rangfolgen

7.1 Berechnung der Rangfolgen für Szenario A

Der AHP sieht vor, dass die Bewertungen der technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen in Bezug auf die einzelnen Kriterien normalisiert werden. Dies ist erforderlich, um alle Bewertungen in eine einheitliche Skala zu überführen (Saaty 1990). Da hier die Bewertungen bereits in einer einheitlichen Skala vorliegen, wurde auf diesen Rechenschritt verzichtet. Deshalb können die Rangfolgen direkt ermittelt werden.

Um für Szenario A eine Rangfolge geeigneter technisch-biologischer Maßnahmen zu ermitteln, muss zunächst das globale Gesamtgewicht für jede Maßnahme errechnet werden. Hierfür wurden die im Vorfeld vorgenommenen fachlichen Bewertungen der einzelnen Maßnahmen für die drei Kriterien „Ökologie“, „Robustheit“ und „Gesamtkosten“ (Wertstufen 1-5, vgl. Tabelle 1) mit den für sie errechneten Wichtungswerten (vgl. Tabelle 4) multipliziert und anschließend addiert. Basierend auf den errechneten globalen Gesamtgewichten werden die Ränge für die verschiedenen technisch biologischen Maßnahmen vergeben („Rang“-Funktion in MS Excel).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 7: Rangfolge der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen für Szenario A; *Die Bewertungen für das Kriterium „Ökologie“ beziehen sich entsprechend der Definition von Szenario A ausschließlich auf terrestrische Uferlebensräume; Skala der Kriterienbewertungen: 1 = sehr schlecht, 2 = schlecht, 3 = mittel, 4 = gut, 5 = sehr gut; Ränge 1-8; 1= erster Rang (grün), 8= letzter Rang (rot)

		Ökologie*	Robustheit	Gesamtkosten	Gesamtbewertung	Rangfolge Szenario A
Wichtungen		68 %	24 %	8 %		
Maßnahmen zum Uferschutz ¹⁾	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen	3	5	4	3,56	2
	Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Strukturelementen (Kies, Steinblöcke)	2	5	4	2,88	7
	Weidenspreitlagen	4	3	2	3,60	1
	Röhrichtgabionen	2	4	3	2,56	8
	Steinmatratzen	2	4	3	2,56	8
	Kokosmatte über Nassansaat ²⁾	4	1	3	3,20	4
	Pflanzmatten	4	2	3	3,44	3
	Ohne Uferschutz natürliche Sukzession	4	1	3	3,20	4
	Steinschüttung als Referenz	2	5	5	2,96	6

¹⁾ Uferschutzmaßnahmen entsprechend Anlage 3 technisch optimiert.

²⁾ Kokosmatte über Nassansaat entsprechend Anlage 3 nur oberhalb des höchsten Wellenaufbaus anwendbar.

Tabelle 8: Berechnung der Rangfolge für terrestrische Zusatzmaßnahmen ohne Uferschutzfunktion

Zusatzmaßnahmen ohne direkte Uferschutzfunktion	Wichtung			Gesamtbewertung	Rangfolge Szenario A
	terrestrische Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten		
	68 %	24 %	8 %		
Heckenlagen auf Böschungsplanie	4	5	5	4,32	1
Steinwall vor Mittelwasserberme	4	5	5	4,32	1

7.2 Berechnung der Rangfolgen für die Szenarien B, C und D

Die Szenarien B, C und D stellen Grenzwertszenarien dar. Bei diesen wird geprüft, wie sich das Ergebnis ändert, wenn jeweils ein Kriterium gegenüber den beiden anderen als absolut prioritär angesehen wird.

Im ersten Schritt wird die Wichtigkeit der Kriterien relativ zueinander festgelegt und in die Vergleichstabellen eingetragen. Aus den Paarvergleichen werden die Vergleichstabellen generiert (Tabelle 9).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 9: Vergleichsmatrizen der Szenarien B, C und D

	Szenario B			Szenario C			Szenario D		
	Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten	Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten	Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten
Ökologie	1	9	9	1	1/9	1	1	1	1/9
Robustheit	1/9	1	1	9	1	9	1	1	1/9
Gesamtkosten	1/9	1	1	1	1/9	1	9	9	1

Da die Vergleichsmatrizen konsistent sind, beträgt der maximale Eigenwert $\lambda_{max} = 3$ für alle drei Szenarien (Saaty 1990). Die Wichtung kann direkt aus den Spaltenvektoren der Vergleichsmatrix berechnet werden (Saaty 1990; vgl. Tabelle 10)

Tabelle 10: Wichtungen der Szenarien B, C und D

	Szenario B		Szenario C		Szenario D	
	Ökologie	9/11	82 %	1/11	9 %	1/11
Robustheit	1/11	9 %	9/11	82 %	1/11	9 %
Gesamtkosten	1/11	9 %	1/11	9 %	9/11	82 %

Die drei Matrizen sind konsistent. Daher ist das Konsistenzverhältnis 0 (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Konsistenzprüfung für die Szenarien B, C und D

Parameter	Definition	Wert
Maximaler Eigenwert	λ_{max}	3
Konsistenzindex	$C.I. = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$	0
Zufallskonsistenz bei 3 Kriterien	R.I. (Saaty und Tran 2007)	0,52
Konsistenzverhältnis	C.R. = C.I./R.I.	0

Zur Ermittlung der Rangfolge werden die Skalenwerte wieder mit den Wichtungen verrechnet vgl. Tabelle 12).

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 12: Berechnung der Rangfolge der technisch-biologischen Uferschutzmaßnahmen für die Szenarien B, C und D; Kriterien- und Rangfolgenwertung analog zu Tabelle 7

Technisch-biologische Ufersicherungen ¹⁾				Szenario B	Szenario C		Szenario D		
	Wichtung	Ökologie		82 %	9 %		9 %		
		Robustheit		9 %	82 %		9 %		
		Gesamtkosten		9 %	9 %		82 %		
Skalenwert (Skala 1-5)			Gesamtbewertung	Rang	Gesamtbewertung	Rang	Gesamtbewertung	Rang	
Ökologie	Robustheit	Gesamtkosten							
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Pflanzen	3	5	4	3,27	5	4,73	1	4	2
Ökologisch aufgewertete Steinschüttung mit Strukturelementen (Kies, Steinblöcke)	2	5	4	2,45	7	4,64	3	3,91	3
Weidenspreitlagen	4	3	2	3,73	1	3	6	2,27	9
Röhrichtgabionen	2	4	3	2,27	8	3,73	4	3	4
Steinmatratzen	2	4	3	2,27	8	3,73	4	3	4
Kokosmatte über Nassansaat ²⁾	4	1	3	3,64	3	1,45	8	2,91	7
Pflanzmatten	4	2	3	3,73	1	2,27	7	3	4
Ohne Uferschutz natürliche Sukzession	4	1	3	3,64	3	1,45	8	2,91	7
Steinschüttung als Referenz	2	5	5	2,54	6	4,73	1	4,73	1

¹⁾ Uferschutzmaßnahmen entsprechend Anlage 3 technisch optimiert.

²⁾ Kokosmatte über Nassansaat entsprechend Anlage 3 nur oberhalb des höchsten Wellenaufbaus anwendbar.

7.3 Berechnung der Rangfolge für Szenario E

Das Szenario E unterscheidet sich vom Szenario A nur darin, dass die aquatische Ökologie und nicht die terrestrische Ökologie verbessert werden soll. Anstelle der terrestrisch wirksamen Maßnahmen müssen daher hier die aquatisch wirksamen Maßnahmen angesetzt werden. Alle anderen Eingangsgrößen entsprechen denen des Szenarios A. Die Berechnung ist in Tabelle 13 dargestellt.

Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Abschlussbericht der Monitoringphase 2012 bis 2017 ▪ August 2020

Tabelle 13: Berechnung der Rangfolge der Zusatzmaßnahmen ohne Uferschutzfunktion im aquatischen Bereich ohne direkte Uferschutzfunktion für Szenario E; Kriterien- und Rangfolgenwertung analog zu Tabelle 7

Zusatzmaßnahmen im aquatischen Bereich ohne direkte Uferschutzfunktion	Wichtung			Gesamtbe- wertung	Rangfolge Szenario E
	aquatische Ökologie	Robustheit	Gesamt- kosten		
	68 %	24 %	8 %		
Steinwall mit Flachwasserzone	3	5	4	3,56	2
Totholzfaschinen unterhalb MW	3	3	3	3,00	3
Steinwall mit Flachwasserzone und Wurzelteller/ Totholzfaschinen	5	3	2	4,28	1
Totholz/Wurzelteller unterhalb MW	3	3	3	3,00	3
Steinschüttung als Referenz (aquatisch)	1	5	5	2,28	5