

**BUNDESANSTALT  
FÜR WASSERBAU  
Karlsruhe**



**BUNDESANSTALT  
FÜR GEWÄSSERKUNDE  
Koblenz**

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

**Teilbericht  
Standicherheit und Unterhaltung  
Monitoringergebnisse: 11/2012 bis 10/2013**

**FuE-Projekt (BAW/ BfG)  
A39520410151**

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

**Teilbericht  
Standicherheit und Unterhaltung  
Monitoringergebnisse: 11/2012 bis 10/2013**

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Auftrag vom: Im Rahmen des F/E-Projektes „Technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen“

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39520410151

Aufgestellt von: Abteilung: Geotechnik (BAW)  
Referat: Erdbau und Uferschutz  
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Petra Fleischer

Karlsruhe, 30.03.2015

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

## Inhaltsverzeichnis

- 1 Veranlassung
- 2 Versuchsfelder
- 3 Monitoring „Standsicherheit und Unterhaltung“ – Berichtszeitraum 11/2012 bis 10/2013
  - 3.1 Monitoringaktivitäten
  - 3.2 Randbedingungen: Wasserstände und Wetter
  - 3.3 Einwirkungen: Hydraulische Belastungen
  - 3.4 Monitoringergebnisse
    - 3.4.1 Allgemeines
    - 3.4.2 Versuchsfelder VF 2 und 3: Weidenspreitlagen  
(VF 2: km 440,823 – km 440,859; VF 3: km 440,874 – km 440,945)
    - 3.4.3 Versuchsfeld VF 5: Röhrichtgabionen und Steinmatratzen, z.T. mit Pflanzmatten (km 441,006 – km 441,106)
    - 3.4.4 Versuchsfeld 7: Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten, Kokosmatte über Nassansaat (km 441,205 – km 441,366)
    - 3.4.5 Versuchsfeld 9: Ohne Uferschutzmaßnahmen nach Rückbau der Steinschüttung (km 441,480 – 441,598)
- 4 Fazit und Ausblick
- 5 Literatur

## Anlagenverzeichnis

- Anlagen 1.1 bis 1.4: Versuchsstrecke Rhein – Lage der Messpunkte/ Längsprofile der Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlagen 2.1 und 2.2: Versuchsstrecke Rhein – Strömungsgeschwindigkeiten im 5 m/ 10 m - Uferabstand, Messungen 2011/ 2012
- Anlagen 3.1 und 3.2: Versuchsstrecke Rhein – Strömungsgeschwindigkeiten, punktuell in Querprofilen gemessen, 06.06.2013/ 11.06.2013

## 1 Veranlassung

Im Rahmen des gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der BAW und BfG „Untersuchungen zu alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen“ wird seit 2011 am Rhein in der Nähe von Worms ein Naturversuch durchgeführt. Träger der Maßnahme ist das 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 unterschiedliche technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen unter Wasserstraßenbedingungen getestet. Die Randbedingungen und die von BAW und BfG gegebenen Empfehlungen für die Ausführung der Uferschutzmaßnahmen sind in (BAW, BfG, 2010) dokumentiert. In fünf Abschnitten wurde die alte technische Ufersicherung, eine lose Steinschüttung, etwa oberhalb AZW vollständig entfernt und in vier dieser Abschnitte durch alternative Maßnahmen unter Verwendung von Pflanzen ersetzt. In einem Abschnitt blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In weiteren vier Abschnitten wurden unterschiedliche Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung der auch oberhalb AZW verbliebenen Steinschüttung durchgeführt.

Im Ergebnis des Naturversuchs am Abschnitt eines freifließenden Flusses mit einem hohen Schifffahrtsbetrieb und sehr großen Wasserspiegelschwankungen werden wichtige Erkenntnisse zur Anwendung alternativer technisch-biologischer Ufersicherungen, deren Belastbarkeitsgrenzen und der ökologischen Wirksamkeit an Wasserstraßen erwartet.

Das Projekt wird von BAW, BfG und dem WSA Mannheim mit einem zunächst bis 2016 vorgesehenen Monitoringprogramm (BAW, BfG, WSA-MA, 2012) begleitet. Ziel ist eine Bewertung der neu eingebauten technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich

- der technischen Wirksamkeit zur Gewährleistung der Uferstabilität,
- der ökologischen Wirksamkeit und
- des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes.

Im Einzelnen werden dabei regelmäßig Untersuchungen bzw. Messungen hinsichtlich des Zustandes der Ufersicherungsmaßnahmen, der Uferstandsicherheit, der hydraulischen Uferbelastungen, der Rheinwasserstände und Wettereinflüsse, der Vegetation und Fauna, der Unterhaltungsmaßnahmen, Schäden und erforderlichen Sanierungsmaßnahmen durchgeführt und dokumentiert. Die Ergebnisse werden in jährlichen Berichten zusammengestellt. Im ausführlichen 2. Zwischenbericht (BAW, BfG, WSA-MA, 2013) wurden die einzelnen Monitoringaktivitäten erläutert und alle Ergebnisse aus dem Zeitraum 11/2011 bis 10/2012 zusammengestellt und bewertet. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde 2013 die Vorgehensweise geändert. Die jährlichen Monitoringergebnisse werden in einzelnen Fach-Teilberichten zu den Themenkomplexen Wetter und Rheinwasserstände, Standsicherheit und Unterhaltung, Vegetation, Fauna und ggf. in speziellen Messberichten dokumentiert. Auf Grundlage der

Teilberichte wird zusätzlich - insbesondere für die jährliche Berichterstattung an das BMVI - ein zusammenfassender Kurzbericht von BAW, BfG und WSA erstellt, der die wichtigsten Ergebnisse und Bewertungen beinhaltet.

Das vorliegende Gutachten ist der Teil-Fachbericht „Standsicherheit und Unterhaltung“, der die Monitoringergebnisse zu dieser Thematik aus dem Zeitraum 11/2012 bis 10/2013 beinhaltet. Darin wird die Zustandsentwicklung der einzelnen technisch-biologischen Bauweisen hinsichtlich der Gewährleistung der Uferstandsicherheit unter den gegebenen Randbedingungen und hydraulischen Belastungen dokumentiert und beurteilt.

## 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.

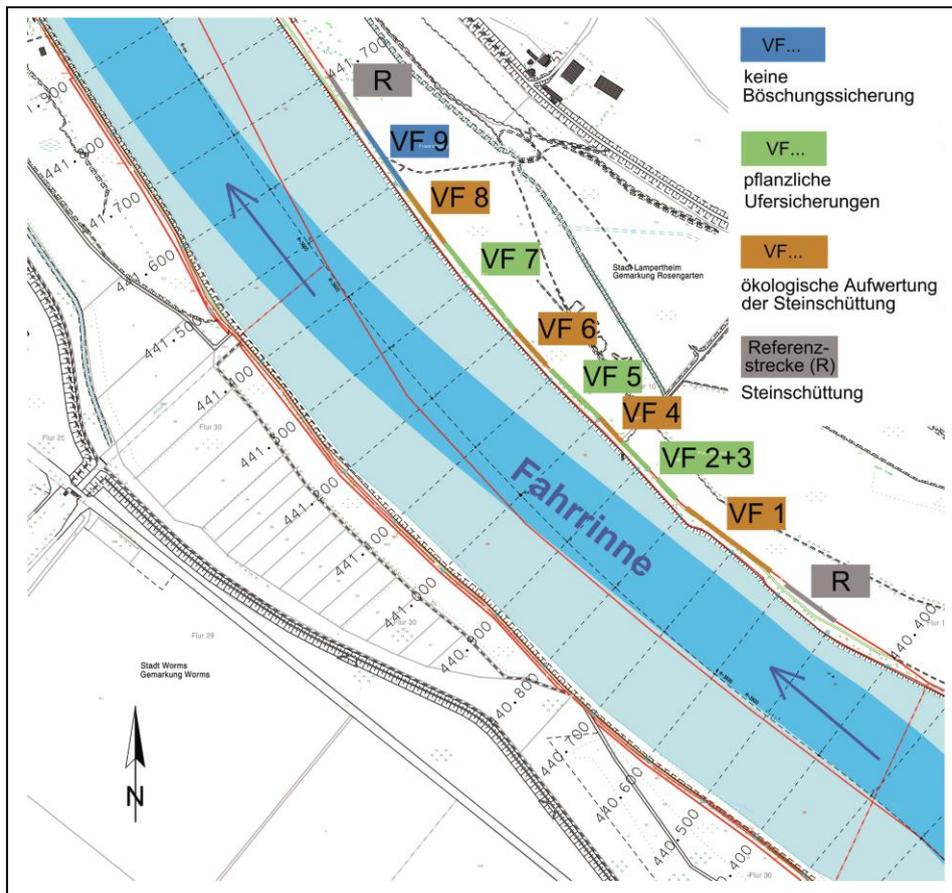


Bild 1: Lage der einzelnen Versuchsfelder (BAW, BfG, WSA-MA, 2013)

Tab. 1: Übersicht der neu eingebauten Ufersicherungsmaßnahmen (VF = Versuchsfeld)

VF	km	Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen	Gewährleistung Uferschutz	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	
2	440,823 bis 440,859	Entfernung der Steinschüttung; Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung verlegt, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	Uferschutz durch neue Maßnahmen mit Pflanzen	
3	440,874 bis 440,945	Entfernung der Steinschüttung; Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung verlegt, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	Uferschutz durch neue Maßnahmen mit Pflanzen	
4	440,945 bis 441,997	Vorhandene Steinschüttung mit Kiesfüllung, Einzelsteingruppen, Totholzfaschinenbündel	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung Ökologische Aufwertung der Steinschüttung	
5	441,006 bis 441,106	Entfernung der Steinschüttung; Einbau von Röhrichtgabionen und Steinmatratzen auf Kornfilter, vorgezogenen Pflanzmatten auf Steinmatratzen, Heckenlagen	Uferschutz durch neue Maßnahmen mit Pflanzen	
6	441,124 bis 441,197	Vorhandene Steinschüttung mit Oberboden-Alginatgemisch-Füllung, Nassansaat, Einzelpflanzen	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung Ökologische Aufwertung der Steinschüttung	
7	441,205 bis 441,366	Entfernung der Steinschüttung; Einbau von vorgezogenen Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvlies, Geotextil, Kokosmatte), Totholzfaschinen, Vegetationswalzen, Kokosgewebe über Nassansaat, befestigt mit Querriegeln, Holzpflocken, Drahtverspannungen	Uferschutz durch neue Maßnahmen mit Pflanzen	
8	441,369 bis 441,480	Vorhandene Steinschüttung und Pflaster mit Röhrichtbewuchs; Erhöhung des vorhandenen Steinwalls	Uferschutz durch vorhandene Steinschüttung und Pflaster	
9	441,480 bis 441,598	Entfernung der Steinschüttung; keine neue Ufersicherung im Böschungsbereich, Setzstangen zum Schutz des Betriebsweges; Ausfachungsbühne am unterstromigen Versuchsfeldende	Kein Uferschutz auf Böschung, Setzstangen zur Begrenzung der Erosion zum Betriebsweg	

Tab. 1 gibt eine Übersicht der in den einzelnen Versuchsfeldern eingebauten Ufersicherungsmaßnahmen. Es ist zusätzlich vermerkt, ob die neu eingebauten Ufersicherungen mit Pflanzen Uferschutzfunktion zu erfüllen haben (Versuchsfelder 2, 3, 5 und 7 – in Tab. 1 grün hinterlegt) oder ob die verbliebene Steinschüttung weiterhin den Uferschutz gewährleistet und die neuen Maßnahmen der ökologischen Aufwertung der Steinschüttung dienen (Versuchsfelder 1, 4, 6 und 8 - in Tab. 1 braun hinterlegt). Eine Sonderstellung hat stromab das letzte Versuchsfeld 9, in dem nach Rückbau der Steinschüttung oberhalb AZW kein neuer Böschungsschutz vorgesehen wurde (in Tab. 1 blau hinterlegt). Lediglich an der Böschungsschulter eingebaute Setzstangen sollen die Erosion zum Betriebsweg hin begrenzen. Grundlage für die Kilometerangaben in Tab. 1 ist das Einmaß der Versuchsfeldgrenzen durch die Fa. Intermetric im Jahr 2013.

### 3 Monitoring „Standsicherheit und Unterhaltung“ – Berichtszeitraum 11/ 2012 bis 10/2013

#### 3.1 Monitoringaktivitäten

Zur Beurteilung der neu eingebauten technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich der Zustandsentwicklung und der Fähigkeit, die Uferstandsicherheit in ausreichendem Maße zu gewährleisten, wurden 2013 die in Tab. 2 aufgeführten Untersuchungen bzw. Messungen durchgeführt.

Tab. 2: Monitoringaktivitäten hinsichtlich Standsicherheit der Maßnahmen und des Ufers im Untersuchungszeitraum 11/2012 bis 10/2013

Untersuchungen	Zeitraum	Ziel/ Inhalte
Laufende Uferinspektionen (WSA, BAW, BfG)	Gesamtes Jahr	Erfassung und Dokumentation des Zustandes der neuen Ufersicherungen und Beurteilung der Uferstabilität
Fotoaufnahmen (BAW)	31.10.12 6.3.13 22.7.13	Panorama-Fotoaufnahmen vom gegenüber liegenden Ufer zur Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung der neuen Ufersicherungsmaßnahmen
Messung der Strömungsgeschwindigkeiten bei HW (Ingenieurbüro Schmid im Auftrag der BAW) (Schmid, 2014)	6./11. 6.13	Ermittlung der ufernahen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der neuen Ufersicherungen (VF 1 bis 9) bei Hochwasser zur Quantifizierung der hydraulischen Belastungen der neuen Ufersicherungen
Vegetationskartierung (BfG, 2014)	26.-30.8.13	Vegetationsaufnahmen nach Braun-Blanquet (1965) je Versuchsfeld/Referenzstrecke und hangparalleler Untersuchungsfläche (3 Vegetationszonen) Erfassung des Pflanzenarteninventars mit Mengenschätzung (Artmächtigkeit) der einzelnen Arten; Aufnahme struktureller Parameter (z. B. Treibsel-/Totholzansammlung) Untersuchung der eingebauten Pflanzen auf Vitalität und Wuchsleistung

Die Ergebnisse der Messung der Strömungsgeschwindigkeiten (Schmid, 2014) und der Vegetationskartierungen (BfG, 2014), die u. a. Grundlage zur Bewertung der Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich Standsicherheit bilden, sind in gesonderten Teilberichten dokumentiert.

### **3.2 Randbedingungen: Wasserstände und Wetter**

Wasserstände und Wetterdaten im Untersuchungszeitraum sind ausführlich in dem entsprechenden Teilbericht dokumentiert (BAW, 2014).

Eine der wichtigsten Randbedingungen ist, dass die Ufersicherungsmaßnahmen neben den Schifffahrtsbelastungen permanent sehr großen Wasserspiegelschwankungen - und damit immer wieder auch längeren Überflutungs- und Trockenzeiten - ausgesetzt sind. Die 10-Jahres-Ganglinie des Rheins von 2004 bis 2014 (Bild 2), aufgezeichnet am Pegel Worms, zeigt eine Schwankungsbreite von fast 7 m.

Bild 3 zeigt die Ganglinie im Untersuchungszeitraum 11/2012 bis 10/2013 (BAW, 2014). Im Vergleich zur Monitoringperiode 2012 haben 2013 wesentlich mehr und auch höhere Hochwasserereignisse stattgefunden. Erstmals traten Wasserstände auf, die Anfang Juni die gesamten neuen Ufersicherungsmaßnahmen und 6 Tage lang auch das angrenzende Gelände überstauten. Im Bild 3 grün hinterlegt ist der Bereich zwischen AZW und der Böschungsoberkante (BOK), in dem die neuen Maßnahmen eingebaut wurden.

Bemerkenswert ist der lang andauernde Einstau des unteren Böschungsbereiches bis etwa AZW + 1,50 m über ca. 10 Wochen im Frühling von Mitte April bis Ende Juni 2013 - für die Pflanzen in diesem Bereich eine hohe Belastung, zumal sich unmittelbar danach eine ausgeprägte, etwa 8 Wochen andauernde Trockenzeit einstellte (BAW, 2014).

Hinsichtlich der Häufigkeit der Wasserstände sei vermerkt, dass ein 2-jährliches Hochwasser bei NN + 89,75 m liegt. Das heißt, mit einem Wasserstand bis etwa zur Böschungsoberkante („BOK“ siehe Bild 3) und dementsprechend mit einem vollständigen Einstau der technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen ist statistisch alle 2 Jahre zu rechnen.

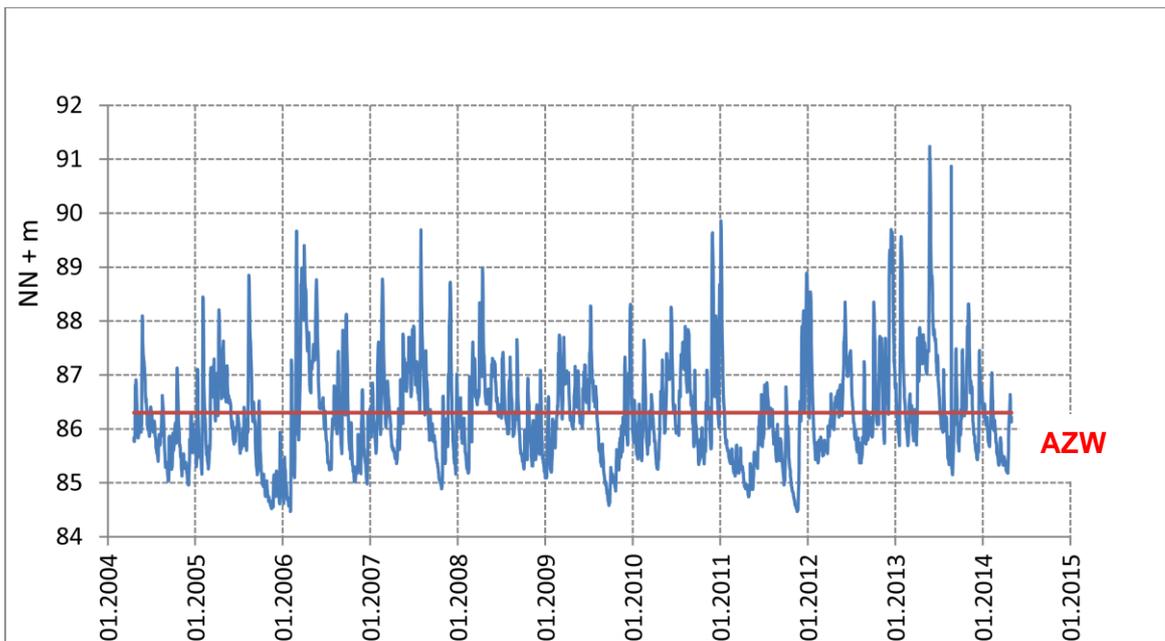


Bild 2: Rheinganglinie 2004 bis 2014 am Pegel Worms (Tagesmaximalwerte)

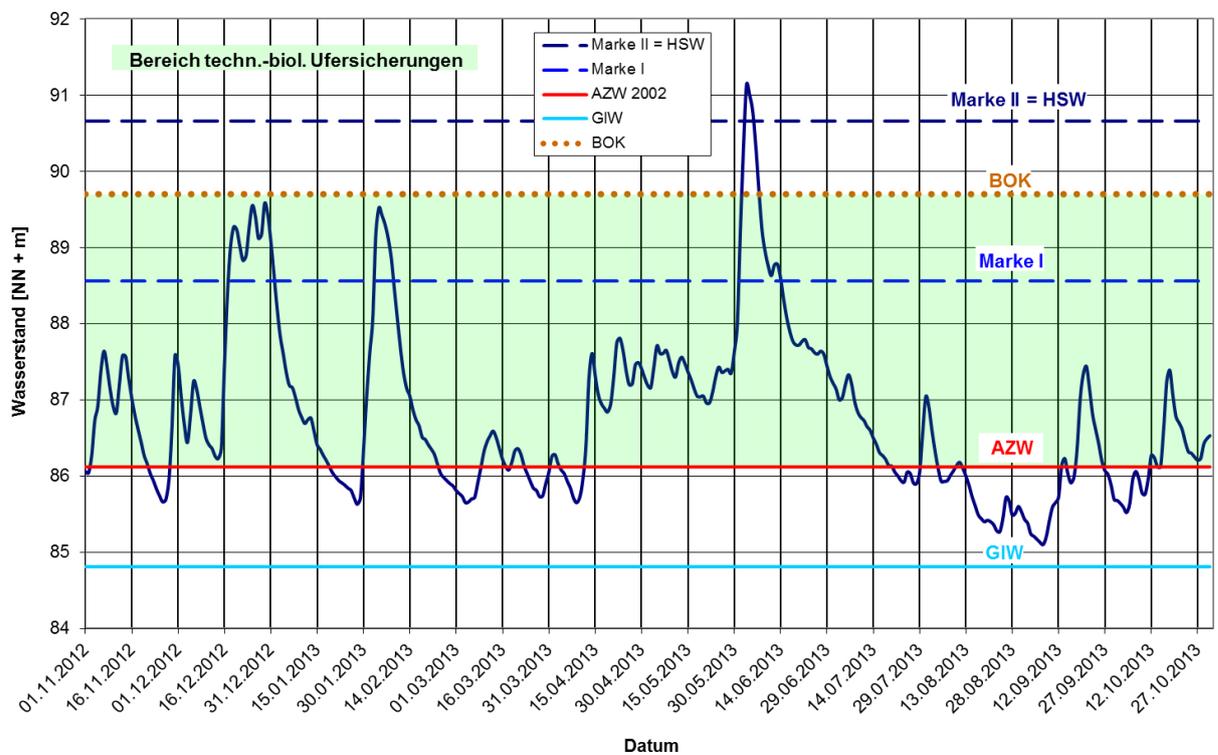


Bild 3: Rheinganglinie 11/2012 bis 10/2013 am Pegel Worms (Tagesmittelwerte)  
 (BAW, 2014)

Tab. 3 zeigt die Anzahl der Tage im Untersuchungszeitraum 11/2012 bis 10/2013, an denen ein bestimmter Wasserstand überschritten wurde, d. h. an denen der Böschungsbereich unterhalb der jeweils genannten Höhe eingestaut war. Daraus wird deutlich, dass der untere Böschungsbereich bis AZW + 0,5 m etwa die Hälfte des Jahres eingestaut und gleichzeitig durch schiffsinduzierte Einwirkungen belastet war, die Bereiche bis AZW + 1,0 m und bis AZW + 1,5 m waren etwa 1/3 bzw. 1/6 des Jahres eingestaut.

Tab. 3: Überschreitungen für ausgewählte Wasserstände (Werte Pegel Worms) (BAW, 2014)

Wasserstand	AZW - 0,5 m	AZW	AZW + 0,5 m	AZW + 1,0 m	AZW + 1,5 m	AZW + 1,7 m	AZW + 2,44 m	AZW + 4,54 m
[NN+m]	85,62	86,12	86,62	87,12	87,62	87,82	88,56	90,66*
Anzahl der Überschrei- tungstage	339	247	174	126	60	45	35	3

\* Die Böschungsoberkante liegt in der Höhe von NN+89,5m (VF 9) bis NN+91m (VF 5)

Der Temperaturverlauf weist im Beobachtungszeitraum keine extremen Besonderheiten auf. Bemerkenswert ist der milde Winter, in dem im Vergleich zum Vorjahr kein extremer Frost aufgetreten ist. Nur an sehr wenigen Tagen sank die Temperatur leicht unter 0°C (BAW, 2014).

### 3.3 Einwirkungen: Hydraulische Belastungen

Die technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen waren seit dem Einbau im November 2011 den hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt und gleichzeitig verschiedenen Hochwasserereignissen mit Wasserständen bis über das angrenzende Gelände (Bilder 2 und 3) ausgesetzt. Sie wurden dementsprechend in Abhängigkeit des Wasserstandes und ihrer Höhenlage auf der Böschung immer wieder durch Überstau, Auftrieb, Absunk, Wellen und Strömungen belastet.

Die ufernahen schiffsinduzierten hydraulischen Belastungen wurden für ausgewählte Querprofile und verschiedene Wasserstände unterhalb des höchsten schiffbaren Wasserstands (HSW) nach (GBB, 2010) berechnet. Angenommen wurde eine ufernahe Fahrt der Schiffe - üGMS (135 m x 12 m), 2er- und 4er Schubverband (186,5 m x 11,40 m bzw. 22,80 m), leer und vollabgeladen (Abladetiefe: 1,60 m bzw. 3,50 m) mit einer Geschwindigkeit von  $0,97v_{kr}$  bzw. mit 100% Motorleistung. Erste Berechnungen erfolgten 2010 im Zuge der Planungen für die Versuchsstrecke zur Abschätzung der zu erwartenden Belastungen für jeweils ein Querprofil am Anfang und am Ende der Versuchsstrecke (km 440,6 und km 441,6) (BAW, BfG, 2010). Weitere Berechnungen erfolgten 2013 vom Referat W4 der BAW im Rahmen einer Studie für zwei ausgewählte Querprofile (km 440,91 und km 440,550).

Zusätzlich wurden in mehreren Kampagnen (2009, 2011, 2012 und 2013) die ufernahen natürlichen hydraulischen Belastungen bei verschiedenen Wasserständen und für eine begrenzte Anzahl von Schiffen die schiffsinduzierten Belastungen gemessen. Tab. 4 gibt eine Übersicht zu den durchgeführten Berechnungen und Messungen.

Tab. 4: Berechnungen und Messungen zu den hydraulischen Uferbelastungen

	Datum	Wasserstände	Berechnungsgrößen/ Messgrößen	Veröffentlicht
<b>Berechnungen (schiffsinduzierte Belastungen)</b>				
Querprofile km 440,60 km 441,60	2010	GIW=AZW-1,4m MI=AZW+2,4 m MII=AZW+4,5 m (HSW)	Heckabsenk, Heckwellenhöhe, Strömungsgeschwindigkeiten (Wiederauffüllungsströmung, Rückströmung)	(BAW, BfG, 2010)
Querprofile km 440,92 km 441,55	2013	AZW+1m AZW+2,3 m AZW+4,4 m	Heckwellenhöhe, Strömungsgeschwindigkeiten (Wiederauffüllungsströmung, Rückströmung)	unveröffentlicht
<b>Messungen (natürliche und schiffsinduzierte Belastungen)</b>				
km 440,60 km 441,10 km 441,60	08/2009 7 Tage	~ AZW (552 Schiffe)	Bug- und Heckwellenhöhe, Se- kundurwellenhöhe Strömungsgeschwindigkeiten	(BAW, BfG, 2010)
km 440,60 bis km 441,60	01/2011 1 Tag	AZW+4m	Natürliche Fließgeschwindigkeiten: Längsprofile in Uferabständen von 5m und 10m	(BAW, BfG, WSA- MA, 2013) Anlagen 2.1/ 2.2
km 440,60 bis km 441,60	06/2012 3 Tage	AZW+2m (179 Schiffe)	Wellenhöhen: km 440,650, km 440,920, km 441,550 Natürliche Fließgeschwindigkeiten: Längsprofile in Uferabständen von 5m und 10m	(BAW, BfG, WSA- MA, 2013) Anlagen 2.1/ 2.2
km 440,60 bis km 441,60	06/2013 06.06.13	AZW+4,4m	Natürliche Fließgeschwindigkeiten: Vertikale Geschwindigkeitsprofile im Böschungsbereich in 26 Quer- profilen	(Schmid, 2014) Anlagen 3.1/ 3.2
	06/2013 11.06.13	AZW+2,6m		

Bei den Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten bei Wasserständen oberhalb AZW konnten die Strömungseinflüsse aus Schifffahrt nicht erfasst werden. Die Messwerte entsprechen den natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten in Fließrichtung des Rheins. Die 2011 und 2012 gemessenen ufernahen, über die Tiefe gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind in den Anlagen 2.1 und 2.2 als Längsprofile im Abstand von 5 m bzw. 10 m zur Uferlinie dargestellt. Die Lage der einzelnen Versuchsfelder ist darin gekennzeichnet. Die 2013 punktuell in den definierten 28 Querprofilen in verschiedenen Uferabständen gemessenen, ebenfalls über die Tiefe gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind tabellarisch in den Anlagen 3.1 (Messung am 6.6.2013) und 3.2 (Messung am 11.6.2013) – den Versuchsfeldern zugeordnet – dargestellt. Um die Messwerte aus den Jahren 2011, 2012 und 2013 vergleichen zu können, sind in den Anlage 1.1 bis 1.4 die Lage aller Messpunkte im Grund-

riss der Versuchsstrecke dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass mit Ausnahme des Versuchsfeldes 1 die Längsprofile im 5 m Uferabstand der Messungen 2011 und 2012 relativ nahe beieinander liegen und die Messwerte damit gut vergleichbar sind. Aus der zusätzlichen Darstellung der Lage der Messpunkte von 2013 in den Anlagen wird ersichtlich, welche Messpunkte im Bereich der Messungen von 2011 und 2012 liegen, d. h. welche Messpunkte für Vergleiche herangezogen werden können. Die Darstellung zeigt auch, dass die ufernächsten Messpunkte häufig unmittelbar im Bereich der neuen Ufersicherungsmaßnahmen liegen. Die Ergebnisse der Berechnungen und Messungen werden in den Unterkapiteln von Kap. 3.4 im Zusammenhang mit der Stabilität der Maßnahmen in den einzelnen Versuchsfeldern dargestellt und bewertet.

Zusätzlich wurden im Versuchsfeld 3 bei km 440,9 in zwei Messprofilen in verschiedenen Tiefen unter der Böschungsoberkante Porenwasserüberdrücke im Boden als Reaktion auf den Wasserspiegelabsenk bei Schiffsvorbeifahrt bei verschiedenen Wasserständen oberhalb AZW (24.01.2012, 12.06.2012, 16.10.2012) gemessen (BAW, BfG, WSA-MA, 2013). Dabei erfolgte bei den auswertbaren 50 Schiffsvorbeifahrten gleichzeitig die Erfassung der Wasserspiegelabsenkwerte. Diese Daten sind wichtig, um festzustellen, ob die neuen Ufersicherungen bei Überstau und gleichzeitigem Schiffsverkehr durch Porenwasserüberdrücke belastet und dementsprechend hinsichtlich Abgleiten und hydrodynamischer Bodenverlagerung gefährdet sind. Die ersten Ergebnisse werden bei der Beurteilung der Weidenspreitlagen in den Versuchsfeldern 2 und 3 im Kap. 3.4.2 berücksichtigt.

### **3.4 Monitoringergebnisse**

#### **3.4.1 Allgemeines**

Im Folgenden werden der Zustand und die Entwicklung der neuen Uferschutzmaßnahmen in den einzelnen Versuchsfeldern von November 2012 bis Oktober 2013 hinsichtlich der Gewährleistung der Uferstandsicherheit unter Berücksichtigung der bisherigen hydraulischen Einwirkungen dokumentiert und beurteilt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Versuchsfeldern (VF 2, 3, 5 und 7), in denen die technisch-biologischen Ufersicherungen die ursprüngliche Steinschüttung ersetzen und dementsprechend Uferschutzfunktion haben. Das Versuchsfeld 9 ohne Ufersicherung im Böschungsbereich wird hinsichtlich der Stabilität bzw. Instabilität der ungesicherten Böschung bewertet. Die Versuchsfelder 1, 4, 6 und 8, in denen die neuen Maßnahmen keine Uferschutzfunktion haben, sondern der ökologischen Aufwertung der erhaltenen Steinschüttung dienen, werden hinsichtlich der Pflanzenentwicklung und der Ökologie im Teilbericht Vegetation (BfG, 2014) behandelt.

### 3.4.2 Versuchsfelder VF 2 und 3: Weidenspreitlagen

(VF 2: km 440,823 - km 440,859; VF 3: km 440,874 - km 440,945)

#### Bauweise

Weidenspreitlagen wurden in den Versuchsfeldern VF 2 und VF 3 auf der Böschung nach Rückbau der Steinschüttung zwischen AZW - 0,5 m (VF 2) bzw. AZW (VF 3) und der Böschungsoberkante ohne zusätzliche Filterschicht diagonal bzw. quer verlegt. Die Befestigung erfolgte linienhaft mit lebenden Querriegelhölzern aus Silberweide (Abstand ca. 1 m), die jeweils senkrecht zu den Weidenästen angeordnet wurden, und dazwischen punktuell mit nicht austriebsfähigen Pflöcken (1 Stück pro m<sup>2</sup>) sowie Drahtverspannungen. Im unteren Böschungsbereich (unterhalb AZW + 1,7 m) wurde über den Weidenästen Fichtenreisig flächig verlegt und mit einem Wildschutzzaun befestigt. Damit sollte im häufig eingestauten Bereich der Erosionsschutz in der kritische Anfangsphase verbessert werden. Als Voraussetzung für gutes Anwachsen erfolgte abschließend eine Übererdung mit sandig-kiesigem Material (ca. 3 cm stark). Die Böschungsneigung beträgt 1:3. Weitere Details siehe (BAW, BfG, WSA-MA, 2012).

#### Gewährleistung Uferschutz - theoretisch

Weidenspreitlagen sind Uferschutzmaßnahmen, die nur aus pflanzlichen Bestandteilen aufgebaut sind und kein signifikantes Eigengewicht besitzen. Wie der Uferschutz gewährleistet werden soll, zeigt Tab. 5.

Tab. 5: Gewährleistung des Uferschutzes durch Weidenspreitlagen einschließlich Befestigungen

Anforderungen	Wie/ wodurch soll Uferschutz gewährleistet werden?	
	Anfangszustand (ohne Wurzeln und Sprosse)	Langfristig (mit Wurzeln und Sprossen)
<b>Wurzelwachstum in den Untergrund</b>	Ausreichende Befestigungen (Querriegel und Pflöcke) und Übererdung für flächenhaften Bodenkontakt	Keine Hilfsmittel mehr erforderlich
<b>Erosionssicherheit</b>	Lückenlose Abdeckung der Böschungsoberfläche mit befestigten Weidenästen Zusätzliche Abdeckung mit Fichtenreisig (befestigt mit Wildschutzzaun)	Oberirdische Sprosse und flächendeckendes oberflächennahes Wurzelgeflecht
<b>Filterstabilität</b>	Lückenlose Abdeckung der Böschungsoberfläche mit befestigten Weidenästen Zusätzliche Abdeckung mit Fichtenreisig (befestigt mit Wildschutzzaun)	Flächendeckendes oberflächennahes Wurzelgeflecht
<b>Sicherheit gegenüber Abgleiten</b>	Ausreichend lange und eng stehende Pflöcke (Bodenvernagelung)	Ausreichend feste und tief reichende, dicht verzweigte Wurzeln im Untergrund (Einzelwurzeln, Wurzelgeflecht)
<b>Sicherheit gegenüber hydrodynamischer Bodenverlagerung</b>	Nicht zu gewährleisten, aber: Begrenzung der böschungsabwärts gerichteten Bodenbewegungen durch parallele Querriegel	Ausreichend tiefe und dicht verzweigte Wurzeln im Untergrund (Wurzelgeflecht)

### Hydraulische Belastungen

Die Weidenspreitlagen waren seit dem Einbau im November 2011 den hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt und gleichzeitig verschiedenen Hochwasserereignissen mit Wasserständen bis über das angrenzende Gelände ausgesetzt. Sie wurden dementsprechend in Abhängigkeit von ihrer Höhenlage auf der Böschung und den herrschenden Rheinwasserständen immer wieder durch Überstau, Auftrieb, Absenk, Wellen und Strömungen belastet.

Aufgrund der gegebenen Randbedingungen und der auf dem Rhein verkehrenden Güterschiffe können im Bereich der Spreitlagen (VF 3) theoretisch die in Tab. 6 aufgeführten, nach (GBB, 2010) berechneten maximalen schiffsinduzierten Belastungsgrößen auftreten. Tab. 7 zeigt die bei Wasserständen über AZW bisher im Bereich der Weidenspreitlagen gemessenen schiffsinduzierten und natürlichen hydraulischen Belastungsgrößen.

Tab. 6: Berechnete ufernahe schiffsinduzierte hydraulische Belastungen bei km 440,92

Wasserstand	Heckwellenhöhe [m]	Wasserspiegelabsenk [m]	Wiederauffüllungsströmungsgeschwindigkeit [m/s]
AZW + 1 m	1,06	0,72	2,26
MHW (AZW + 2,3 m)	0,80	0,74	1,89
HSW (AZW + 4,4 m)	0,78	0,72	2,06

Tab. 7: Bisher gemessene ufernahe hydraulische Belastungen im Bereich der Weidenspreitlagen (VF 2 und VF 3)

Messkampagne	Heckwellenhöhe [m]	Natürliche, über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] <i>(Positive Werte in Fließrichtung des Rheins)</i>
15.01.2011 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4 m (Anlage 2.1)	-	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: VF 2: 0,08 – 0,20 VF 3: 0,14 – 0,63
15.06. 2012 (Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 2 m (Anlage 2.1)	0,28 (km 440,92)	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: VF 2: 0,08 – 0,30 VF 3: 0,35 – 0,53
06.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4,40 m (Anlage 3.1)	-	km 440,845 (VF 2): 0,09* km 440,850 (VF 2): -0,02* km 440,910 (VF 3): 0,19* km 440,925 (VF 3): 0,20*
11.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 2,60 m (Anlage 3.2)	-	km 440,845 (VF 2): -0,03* km 440,850 (VF 2): 0,00* km 440,910 (VF 3): 0,28* (0,03)** km 440,925 (VF 3): 0,43* (0,13)**

\* Strömungsgeschwindigkeit, gemessen etwa im Bereich der 5 m vom Ufer entfernten Längsprofile (2011 und 2012), siehe Anlage 1.2 und 2.1

\*\* Klammerwerte sind die ufer nächsten Messwerte im Bereich der Weidenspreitlagen (landseitig der 5 m - Profile)

Aus den Tabellen 6 und 7 wird deutlich, dass die bisher im VF 3 bei einem Wasserstand von AZW + 2 m gemessenen Heckwellenhöhen (0,28 m) deutlich unter den bei ähnlichem Wasserstand theoretisch möglichen Belastungen von 0,80 m (bei AZW + 2,30 m) liegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den Berechnungen nahezu die maximalen möglichen realistischen Belastungen für ungünstige Randbedingungen (ufernahe Fahrt des Schiffes mit 0,97  $v_{krit}$  bzw. 100% Motorleistung) ermittelt werden. Praktisch trifft diese Fahrweise natürlich nur auf einen Teil der Schiffe zu. Die bisher in den Messungen erfassten ca. 600 der jährlich hier verkehrenden 43.200 Schiffe (bei 120 Schiffen täglich) verursachten mit ihrer Fahrweise Heckwellenhöhen, die weit unter den maximal möglichen liegen. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass außerhalb der Messzeiten auch bereits größere hydraulische Belastungen als gemessen aufgetreten sind. Zur Erhöhung der Datenmenge sind in den nächsten Jahren weitere Messungen vorgesehen.

Eine Auswertung der 2013 gemessenen natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten in einzelnen Querprofilen (Anlagen 3.1/ 3.2) zeigt erwartungsgemäß die deutliche Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten mit kleiner werdendem Uferabstand. Die ufernächsten Messpunkte liegen etwa im Übergangsbereich der Weidenspreitlagen zur Steinschüttung bei AZW - 0,5 m (VF 2) bzw. AZW (VF 3) – Anlage 1.2. Hier betragen die am 11.6.2013 gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten etwa 0 m/s im VF 2 und 0,13 m/s im VF 3 (Tab. 7).

Tab. 8: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten im 5 m Längsprofil (VF 2 und VF 3)

	Gemessene, über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Längsprofile ca. 5 m Abstand vom Ufer (Anlagen 2.1/3.1/ 3.2/ 1.2) - [m/s] (Positive Werte in Fließrichtung des Rheins)			
	15.1.2011	15.-18.6.2012	6.6.2013	11.6.2013
	AZW + 4 m	AZW + 2 m	AZW + 4,4 m	AZW + 2,6 m
km 440,845 (VF 2)	0,14	0,15	0,09	-0,03
km 440,850 (VF 2)	0,15	0,15	-0,02	0,00
km 440,910 (VF 3)	0,46	0,38	0,19	0,28
km 440,925 (VF 3)	0,47	0,52	0,28	0,43

Zum Vergleich der bisherigen Messungen während der unterschiedlichen Hochwasserereignisse in allen Versuchsfeldern sind in Tab. 8 alle Messergebnisse zusammengestellt, die etwa im Bereich der Längsprofile in 5 m Uferabstand (siehe Anlage 1.2) erfasst wurden. Alle Messergebnisse zeigen nicht nur, dass im Bereich der Spreitlagen im Versuchsfeld 2 geringere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten als im Versuchsfeld 3, sondern auch, dass im Versuchsfeld 2 im Vergleich zu allen übrigen Versuchsfeldern die geringsten Strömungsgeschwindigkeiten gemessen wurden (siehe Anlagen 2.1 und 2.2). Im Versuchsfeld 2 betragen die 2011 (AZW + 4 m) gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten 0,08 m/s bis 0,20 m/s (Tab. 7). Bei ähnlichen Wasserständen 2013 lagen die gemessenen Geschwindigkeiten der

Strömung im Versuchsfeld 2 sogar nahe Null. Im VF 3 nahmen die Strömungsgeschwindigkeiten stromab bei allen Wasserständen wieder zu und erreichten am unterstromigen Versuchsfeldende (km 440,945) bei einem Wasserstand von AZW + 4 m (2011) Werte von 0,63 m/s. Die größten Strömungsbelastungen im Versuchsfeld 3 treten im Anschluss zum VF 4 auf.



Bild 4: Grundriss Versuchsfelder 1 bis 3

Die Ursache für die lokal sehr geringen Strömungsbelastungen im VF 2 liegt vermutlich in der Besonderheit der Ufergeometrie (Bild 4). Im Bereich des Versuchsfeldes 1 ist das Ufer mehrere Meter zurückgesetzt, in Verlängerung der Uferlinie wurde Ende 2011 der Steinwall errichtet. Bei den betrachteten Hochwasserabflüssen und entsprechender Überströmung des Steinwalls ist der Einfluss des Steinwalls auf die Strömungsgeschwindigkeiten vernachlässigbar gering. Das zeigt u. a. ein Vergleich der Messungen 2011 (vor Errichtung des Steinwalls) und 2013 (nach Errichtung des Steinwalls) bei ähnlichen Wasserständen (siehe Anlagen 1.1, 2.1, 3.1). Die 2012 gegenüber 2011 geringeren Strömungsgeschwindigkeiten im Versuchsfeld 1 resultieren vermutlich primär aus den unterschiedlichen Wasserständen und dem unterschiedlichen Uferabstand des Messpfades (siehe Anlage 1.1). Am Ende der Einbuchtung verkleinert sich der Abflussquerschnitt am Ufer, wodurch die Strömung zunächst beschleunigt wird. Weiter stromab im Übergangsbereich zum VF 2 verläuft das Ufer wieder etwas zurückgesetzt (Bild 4). Ufernah kommt es hier in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsbetrag zur Strömungsablösung bzw. zur Entstehung eines Strömungsschattens, wodurch sich die Strömung wieder verlangsamt. Sehr deutlich zeigen das die Messwerte 2011 und 2012 entlang des Längsprofils im 5 m Uferabstand (Anlage 2.1). Bei der Messung 2011 erhöht sich beispielsweise die Strömungsgeschwindigkeit von 0,97 m/s am Ende des VF 1

(km 440,747) auf maximal 1,56 m/s im Übergangsbereich zum VF 2 (km 440,780). Am Beginn des VF 2 (km 440,823) beträgt sie nur noch 0,08 m/s.

Die ufernahen Strömungsgeschwindigkeiten sind dementsprechend im VF 2 am kleinsten, gehen nahezu gegen Null. Die Weidenspreitlagen werden hier kaum durch natürliche Strömung belastet. Im VF 3 nimmt die Strömungsbelastung stromab relativ gleichmäßig von etwa 0,08 m/s auf die gemessenen Maximalwerte von 0,53 m/s (2012) bzw. 0,63 m/s (2011) zu. Die Strömungsbelastung ist damit auch im VF 3 noch etwas geringer als in allen anderen Versuchsfeldern. Maßgebend ist deshalb hier die schiffsinduzierte Strömungsbelastung, die bei ufernaher Fahrt im Versuchsfeld 3 bei Wasserständen von AZW + 1 m theoretisch 2,26 m/s betragen kann. Spezielle Messungen dazu sind 2015 vorgesehen.

Nach den Erfahrungen an kleineren Fließgewässern ohne Schifffahrt kann davon ausgegangen werden, dass Weidenspreitlagen im Anfangszustand und langfristig die bisher gemessenen geringen Wellenhöhen (H) und natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten (v) nach Tab. 7 und 8 aufnehmen können, ohne dass Oberflächenerosion auftritt (Grenzwerte nach (DWA, 2014):  $v = 2,0$  m/s und  $H = 0,4$  m (Initialzustand),  $v = 2,5$  m/s und  $H = 1,1$  m (Zustand mit Wurzeln und Sprossen). Die theoretisch möglichen schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen nach Tab. 6 liegen für den Anfangszustand über den Grenzwerten, so dass in dieser Phase Oberflächenerosion nicht ausgeschlossen werden kann. Mit zunehmender Entwicklung der Weidenspreitlagen können nach (DWA, 2014) langfristig jedoch auch diese Belastungen ohne Schäden aufgenommen werden.

Bei der Beurteilung der Uferstandsicherheit hinsichtlich Abgleiten und hydrodynamischer Bodenverlagerung sind die bei Schiffsvorbeifahrt im Boden auftretenden Porenwasserüberdrücke zu betrachten. Im Versuchsfeld 3 bei km 440,9 wurden in zwei Messprofilen in verschiedenen Tiefen bis maximal 1,40 m unter Böschungsoberkante Porenwasserdrücke im Boden - bisher während 3 Messkampagnen - gemessen (BAW, BfG, WSA-MA, 2013). Gleichzeitig wurde bei den auswertbaren 50 Schiffsvorbeifahrten über Druckmessdosen der Wasserspiegelabsenk gemessen (Tab. 9). Die Uferabstände der registrierten Schiffe lagen zwischen 47 m und 200 m.

Tab. 9: Ergebnisse der Porenwasserdruckmessung im Boden bei km 440,9 (Kap. 3.3)  
 (BAW, BfG, WSA-MA, 2013)

Messung	Wasserstand	Max. gemessener Absenk [cm]	Max. gemessener PWÜ [cm WS]
24.01.2012	AZW + 2,62 m	9,1	1,1
12.06.2012	AZW + 1,77 m	15,7	4,1
16.10.2012	AZW + 1,94 m	42,3	16,6

Die Messergebnisse zeigen, dass im anstehenden Boden im Böschungsbereich bei Schiffsvorbeifahrten Porenwasserüberdrücke aufgetreten sind. Das heißt, die Standsicherheit der Uferböschung mit Weidenspreitlagen muss auch hinsichtlich Abgleiten und hydrodynamischer Bodenverlagerung betrachtet werden. Bei gering durchlässigen Böden und schnellen Absunkgeschwindigkeiten kann der Porenwasserüberdruck theoretisch maximal Werte in der Größenordnung des Absunks erreichen. Nach den bisherigen Messergebnissen liegen die Porenwasserüberdrücke in der Größenordnung von maximal 1/3 der Absunkwerte. Eine Ursache für die geringen Werte ist der anstehende sandig-kiesige Boden. Weitere Messungen sind vorgesehen.

Aktuelle Standsicherheitsberechnungen zeigen, dass zur Gewährleistung der Sicherheit gegenüber Abgleiten theoretisch (unter Annahme der berechneten, theoretisch möglichen Belastungen nach Tab. 6) das Flächengewicht einer Steinschüttung (Steindichte  $2,65 \text{ t/m}^3$ ) mit einer Dicke von 28 cm (AZW + 1 m), 27 cm (AZW + 2,3 m) bzw. 23 cm (AZW + 4,4 m) erforderlich ist (GBB, 2010). Auf der Grundlage der zusätzlich während der Bauphase oberflächennah in Schürfen auf der Böschung entnommenen Bodenproben (BAW, BfG, WSA-MA, 2012) ist davon auszugehen, dass der Boden unterhalb der Spreitlagen etwas feiner ist als aufgrund der Bohrungen im Bereich des Betriebsweges angenommen. Den aktuellen Berechnungen wurde deshalb abweichend von den 2010 mit dem Boden B1 nach (MAR, 2008) durchgeführten Berechnungen (BAW, BfG, 2010) der Boden B2 nach (MAR, 2008) zugrunde gelegt. 2015 sind zusätzliche Bohrungen direkt im Böschungsbereich vorgesehen, um den anstehenden Boden noch genauer in den Berechnungen berücksichtigen zu können. Da die Weidenspreitlagen selbst kein signifikantes Eigengewicht besitzen, muss die Sicherheit gegenüber Abgleiten im Anfangszustand über technische Hilfsmittel (Holzpflöcke) und langfristig über die Wurzeln im Boden erreicht werden (Tab. 5). Hydrodynamische Bodenverlagerungen können im Anfangszustand nicht verhindert werden.

#### Beobachtungen hinsichtlich Uferstandsicherheit

Unmittelbar nach dem Einbau 2012 und auch 2013 wurden die Spreitlagen immer wieder durch Hochwasser eingestaut (Bild 3). Bereits nach den ersten Belastungen durch Auftrieb, Wellen und Strömungen zeigten sich in den Überstaubereichen die im Folgenden aufgeführten Schwachpunkte der Bauweise in der ausgeführten Konstruktion im kritischen Anfangszustand. Jeweils in Klammern stehen die 2012 durchgeführten Sofortmaßnahmen (BAW, BfG, WSA-MA, 2013).

- Der Boden zur Abdeckung der Weidenäste wurde fast vollständig erodiert. (Mehrere erneute Abdeckung mit Boden für erforderlichen Bodenkontakt)
- Einzelne zu kurze Pflöcke wurden gelockert und herausgezogen, durch Steine im Untergrund konnte beim Einschlagen nicht immer die Sohleinbindetiefe von 1 m erreicht werden. (Wiederholtes Nachschlagen der Pflöcke und Riegelhölzer)

- Das Reisig wurde durch Auftrieb angehoben und innerhalb des Wildschutzzaunes böschungsabwärts verlagert. (Nachträgliches Auflegen einzelner Wasserbausteine als Beschwerung)
- Boden unterhalb der Spreitlage wurde lokal erodiert und böschungsabwärts verlagert durch Oberflächenerosion und hydrodynamische Bodenverlagerung (Durch erneute Abdeckung der Weidenäste mit Boden wurde durch Erosion fehlender Bodenkontakt teilweise ausgeglichen)

Bei den bisher vorherrschenden hydraulischen Belastungen, die größer sein können als die bis jetzt stichprobenartig gemessenen Belastungen, konnte mit den Weiden in der Zeit der sich erst allmählich entwickelnden Wurzeln keine 100%ige Sicherheit gegen Oberflächenerosion und hydrodynamische Bodenverlagerung erreicht werden. Oberflächenerosion wurde zusätzlich begünstigt, weil die Weidenäste nicht, wie geplant, flächendeckend verlegt werden konnten. Dadurch waren in der Anfangszeit kein flächiger Oberflächenschutz und keine Filterstabilität gegeben. Der unter den Weidenspreitlagen anstehende Boden mit Korngrößen von  $D_{50} = 0,06 \text{ mm}$  bis  $2 \text{ mm}$  (VF 2) bzw.  $D_{50} = 0,04 \text{ mm}$  bis  $0,15 \text{ mm}$  (VF 3) ist bei den gemessenen und berechneten hydraulischen Belastungen nicht erosionsstabil (BAW, BfG, WSA-MA, 2013).

Mit zunehmendem Wurzelwachstum erhöhte sich 2013 die Erosionsstabilität, so dass die anfänglichen negativen Auswirkungen lokal begrenzt blieben (örtliche Vertiefungen bis maximal 30 cm Tiefe). Positiv haben sich die lebenden Querriegel ausgewirkt, die, an den Boden gepresst, die böschungsabwärts gerichteten Materialbewegungen begrenzen konnten. Außerdem haben sich entlang der Querriegel durch den guten Bodenkontakt linienhaft schnell Wurzeln und Triebe ausgebildet (BfG, 2014). Die Eigensteifheit der verlegten Weidenäste hat zu einer stabilen Lage der Spreitlagen beigetragen, die für das Eindringen und Festwachsen der Wurzeln im Boden erforderlich ist.

Der 2013 ca. 10 Wochen andauernde Überstau bis etwa AZW + 1,50 m und erstmals ein 6-tägiger Einstau bis über die Geländeoberkante konnten von den bereits gut entwickelten Weidenspreitlagen ohne signifikante Schäden aufgenommen werden (Bild 5). Triebtlängen bis zu 3 m und Deckungsgrade bis 90 % (insbesondere im wuchskräftigsten mittleren Böschungsbereich) wurden bis Oktober 2013 in beiden Versuchsfeldern erreicht (BfG, 2014).

Der sehr häufig eingestaute (Tab. 3) und dementsprechend hydraulisch am meisten belastete untere Böschungsbereich (von AZW – 0,5 m bis etwa AZW + 1 m) hat sich jedoch etwas schlechter entwickelt als die darüber liegenden Bereiche. Die Weidendeckung ist hier weiter geringer und die Weidentriebe sind weniger vital und kürzer (Bild 6). Im Vergleich der beiden Versuchsfelder erscheint die Wuchsleistung der Weiden im unteren Böschungsbereich bei VF 3 etwas besser zu sein (BfG, 2014). Die Art der Verlegung der Weidenäste im VF 3 – quer zur Fließrichtung – hat den Vorteil, dass das unterste Querriegelholz nahe AZW parallel

zur Uferlinie verläuft. Dadurch sind eine linienförmige Befestigung und ein entsprechend gutes Anwachsen der Weiden im untersten Böschungsbereich gegeben. Bei der Diagonalverlegung erreichen die Querriegelhölzer nur mit ihren unteren Enden etwa im 1 m Abstand den relevanten unteren Böschungsbereich. Dadurch bilden sich Sprosse und Wurzeln bevorzugt punktuell, so dass der Boden hier nicht so gut vor Erosion geschützt ist wie im VF 3.



Bild 5: VF 3 am 16.7.2013 nach langem Überstau im Frühjahr



Bild 6: VF 2 am 26.8.2013 - unterer Bereich mit deutlich geringerer Triebentwicklung



Bild 7: Wurzelgrabung im November 2012 bei km 440,950 (VF 3)

Bei einer Wurzelgrabung im Versuchsfeld 3 (Bild 7) konnte bereits im November 2012, d. h. nach einer Vegetationsperiode, im unteren Böschungsbereich ein gut ausgebildetes Wurzelwerk mit hohem Anteil an Feinwurzeln bei Einzelwurzellängen bis 60 cm nachgewiesen werden (BAW, BfG, WSA-MA, 2013). Es kann davon ausgegangen werden, dass die 2013 vorhandenen Wurzeln bereits signifikant zur Erhöhung der Scherfestigkeit des anstehenden

Bodens und damit zur Erhöhung der Böschungsstandsicherheit beitragen konnten. Das bei der Ausgrabung festgestellte oberflächennahe Geflecht aus überwiegend feinen Wurzeln kann zunehmend als Filter und Erosionsschutz wirken. Weitere Wurzelaufräumarbeiten sind in den nächsten Jahren geplant.

#### Bewertung

Insgesamt konnten die Weidenspreitlagen 2013 die vorherrschenden hydraulischen Belastungen infolge Hochwasser mit häufigem und langem Überstau und gleichzeitiger Schifffahrt unter den gegebenen Randbedingungen gut aufnehmen und den Uferschutz trotz anfänglicher lokaler Probleme ausreichend gewährleisten. Unterhaltungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen waren nicht erforderlich. Das Reisig als zusätzlicher Erosionsschutz hat sich nicht bewährt. Eine weitere Beobachtung der Entwicklung insbesondere des unteren Böschungsbereiches ist notwendig und erfolgt im Rahmen des Monitoring. Dabei sind die tatsächlich auftretenden hydraulischen Belastungen auch zukünftig zu messen, um die Datengrundlage zu erweitern. Aufgrund des erreichten Entwicklungszustandes der Weiden wurden erste Konzepte zur Unterhaltung ausgearbeitet, die erstmals 2015 umgesetzt werden.

### **3.4.3 Versuchsfeld VF 5: Röhrichtgabionen und Steinmatratzen, z.T. mit Pflanzmatten (km 441,006 - km 441,106)**

#### Bauweise

Im VF 5 wurden nach Rückbau der Steinschüttung mit standorttypischen Pflanzen vorgezogene Röhrichtgabionen (VF 5a) in einer Schichtdicke von 30 cm von AZW - 0,5 m bis AZW + 1,7 m lückenlos auf einem 30 cm starken Kornfilter eingebaut. Am unteren Ende wurden sie in die im Unterwasserbereich (unterhalb AZW - 0,5 m) verbliebene Steinschüttung eingebunden. Zusätzliche Befestigungen waren nicht erforderlich. Im Bereich zwischen AZW + 1,70 m und der Böschungsoberkante im VF 5a und im gesamten VF 5b wurden vorgefertigte Steinmatratzen, ebenfalls in einer Schichtdicke von 30 cm, lückenlos auf dem Kornfilter eingebaut. Im unteren Böschungsbereich (VF 5b) wurden bis zur Höhe AZW + 1,70 m vorgezogene Pflanzmatten auf den Steinmatratzen befestigt. Zur Vermeidung von Vandalismusschäden am umhüllenden Kunststoffnetz wurden die Steinmatratzen ohne Pflanzmatten im oberen Böschungsbereich (oberhalb AZW + 1,70 m) in einer Schichtdicke von etwa 10 cm übererdet (VF 5a und b). Die Böschungsneigung ist in diesem Versuchsfeld mit 1:2,5 relativ steil ausgebildet. Mehr zum Einbau siehe (BAW, BfG, WSA-MA, 2012).

#### Gewährleistung Uferschutz - theoretisch

Röhrichtgabionen und Steinmatratzen mit und ohne Pflanzmatten sind Uferschutzmaßnahmen, die im Gegensatz zu den Weidenspreitlagen zusätzlich technische Bestandteile aufweisen. Sie besitzen aufgrund der enthaltenen Wasserbausteine (CP<sub>45/125</sub>) von Anfang an ein stabilisierendes Eigengewicht. Wie der Uferschutz gewährleistet werden soll, zeigt Tab. 10.

Tab. 10: Gewährleistung des Uferschutzes durch Röhrichtgabionen und Steinmatratzen (beide hier „Elemente“ genannt)

Anforderungen	Wie/ wodurch soll Uferschutz gewährleistet werden?	
	Anfangszustand (ohne Wurzeln und Sprosse)	Langfristig (mit Wurzeln und Sprosse)
<b>Wurzelwachstum in den Untergrund</b>	Guter flächenhafter Bodenkontakt durch Eigengewicht der Elemente	Guter flächenhafter Bodenkontakt durch Eigengewicht der Elemente
<b>Erosionssicherheit</b>	Elemente durch Aufbau selbst erosionsstabil, flächendeckende Verlegung auf einem bemessenen Kornfilter	Elemente durch Aufbau selbst erosionsstabil, flächendeckende Verlegung auf einem bemessenen Kornfilter  Langfristig zusätzlicher Erosionsschutz durch oberirdische Pflanzenteile und Wurzeln
<b>Filterstabilität</b>	Filterstabiler Aufbau: Untergrund - Filter - Elemente	Filterstabiler Aufbau: Untergrund - Filter - Elemente
<b>Sicherheit gegenüber Abgleiten</b>	Durch ausreichendes Flächengewicht	Durch ausreichendes Flächengewicht  Langfristig zusätzlich durch Wurzelwachstum in den Untergrund
<b>Sicherheit gegenüber hydrodynamischer Bodenverlagerung</b>	Durch ausreichendes Flächengewicht	Durch ausreichendes Flächengewicht  Langfristig zusätzlich durch Wurzelwachstum in den Untergrund

### Hydraulische Belastungen

Die Röhrichtgabionen und Steinmatratzen mit und ohne Pflanzmatten waren seit dem Einbau im November 2011 den hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt und gleichzeitig verschiedenen Hochwasserereignissen mit Wasserständen bis über das angrenzende Gelände ausgesetzt. Sie wurden dementsprechend in Abhängigkeit von ihrer Höhenlage auf der Böschung und den herrschenden Rheinwasserständen immer wieder durch Überstau, Auftrieb, Absunk, Wellen und Strömungen belastet.

Aufgrund der gegebenen Randbedingungen und der auf dem Rhein verkehrenden Güterschiffe können im Bereich der eingebauten Röhrichtgabionen und Steinmatratzen theoretisch annähernd die in Tab. 11 aufgeführten schiffsinduzierten Belastungsgrößen auftreten. Diese wurden vereinfacht aus den bei den Querprofilen km 440,92 (Tab. 6) und km 441,55 (Tab. 16) nach (GBB, 2010) berechneten Belastungsgrößen für km 441,05 linear interpoliert. Es wurde davon ausgegangen, dass ähnliche Randbedingungen vorherrschen. Lediglich die Fahrrinne entfernt sich stromab relativ gleichmäßig weiter vom Bemessungsufer weg (Bild 1), die Uferabstände der Güterschiffe werden entsprechend größer und die hydraulischen Belastungen bei sonst gleichen Randbedingungen kleiner. Die gegenüber 1:3 etwas steilere Böschungsneigung von 1:2,5 wirkt sich nur unwesentlich auf die schiffsinduzierten Belastungen aus. Tab. 11 zeigt die bisher in diesem Bereich gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten (siehe Kap. 3.3).

Tab. 11: Interpolierte ufernahe schiffsinduzierte hydraulische Belastungen bei km 441,05 (Näherungswerte)

Wasserstand	Heckwellen- höhe [m]	Wasserspiegelabsenk [m]	Wiederauffüllungsströmungs- geschwindigkeit [m/s]
AZW + 1 m	0,90	0,60	2,00
MHW (AZW + 2,3 m)	0,70	0,65	1,75
HSW (AZW + 4,4 m)	0,65	0,60	1,90

Tab. 12: Bisher gemessene ufernahe hydraulische Belastungen im Bereich der Röhrichtgabionen und Steinmatratzen

Messkampagne	Heckwellenhöhe [m]	Natürliche, über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] <i>(Positive Werte in Fließrichtung des Rheins)</i>
15.01.2011 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4 m (Anlage 2.1)	-	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: 0,47 (km 441,006) ...0,90 (km 441,106)
15.06. 2012 Wasserstand: AZW + 2 m (Anlage 2.1)	0,25*** (km 441,05)	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: 0,50 (km 441,006) ...0,83 (km 441,090)
06.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4,40 m (Anlage 3.1)	-	km 441,025 (VF 5a): 0,50* km 441,050 (VF 5a): 0,60* km 441,075 (VF 5b): 0,58* (0,57)** km 441,100 (VF 5b): 0,77* (0,56)**
11.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 2,60 m (Anlage 3.2)	-	km 441,025 (VF 5a): 0,53* (0,22)** km 441,050 (VF 5a): 0,66* (0,24)** km 441,075 (VF 5b): 0,61* (0,41)** km 441,100 (VF 5b): 0,58*

\* Strömungsgeschwindigkeit, gemessen etwa im Bereich der 5 m vom Ufer entfernten Längsprofile (2011 und 2012), siehe Anlage 1.2 und 2.1

\*\* Klammerwerte sind die ufernächsten Messwerte unmittelbar im Bereich der Gabionen bzw. Steinmatratzen im unteren Böschungsbereich (landseitig der 5 m - Profile)

\*\*\* linear interpoliert aus Messwerten bei km 440,920 und km 441,550, da für das VF 5 keine Messwerte vorliegen

Da 2012 im Versuchsfeld 5 keine Wellenhöhen gemessen wurden, wurde eine Heckwellenhöhe aus den Messwerten bei km 440,92 und km 441,55 linear interpoliert. Auch hier zeigt sich, dass diese Heckwellenhöhe deutlich unter der bei ähnlichem Wasserstand theoretisch möglichen Belastung liegt. Da bisher nur ca. 600 der jährlich hier verkehrenden 43.200 Schiffe (bei 120 Schiffen täglich) in den Messungen erfasst wurden, ist nicht auszuschließen, dass auch bereits größere hydraulische Belastungen als gemessen, ggf. auch in der Größenordnung der berechneten Heckwellenhöhen, aufgetreten sind. Bei den weiter vorgese-

hener Messungen werden die schiffsinduzierten Belastungen auch in diesem Versuchsfeld erfasst.

Überschlägliche Standsicherheitsbetrachtungen durch Interpolation der Berechnungsergebnisse für die Querprofile bei km 440,92 (Kap. 3.4.2) und km 441,55 (Kap. 3.4.5) unter Berücksichtigung der Böschungsneigung von 1:2,5 im Versuchsfeld 5 zeigen, dass im Bereich des Querprofils km 441,05 bei Annahme eines Bodens B2 (MAR, 2008) zur Gewährleistung der Sicherheit gegenüber Abgleiten theoretisch das Flächengewicht einer etwa 30 cm dicken Steinschüttung (Steindichte  $2,65 \text{ t/m}^3$ ) erforderlich ist. Trotz der im Vergleich zu den Versuchsfeldern 2 und 3 (Weidenspreitlagen) etwas geringeren hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt (Tab. 11) sind hier aufgrund der steileren Böschungsneigung von 1:2,5 (statt 1:3) ähnlich große Flächengewichte erforderlich. Da die eingebauten Röhrichtgabionen und Steinmatratzen eine Dicke von 30 cm besitzen und mit Wasserbausteinen  $CP_{45/125}$  mit einer Steindichte von  $2,65 \text{ t/m}^3$  gefüllt sind, war das rechnerisch erforderliche Flächengewicht, das ein Abgleiten und hydrodynamische Bodenverlagerungen bei Absunkereignissen verhindert, von Anfang an vorhanden.

Eine Auswertung der 2013 in einzelnen Querprofilen gemessenen natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten (Anlagen 3.1/ 3.2 und 1.2) zeigt erwartungsgemäß die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten mit kleiner werdendem Uferabstand. Die ufernächsten Messpunkte liegen hier unmittelbar im Bereich der Röhrichtgabionen bzw. Steinmatratze im unteren Böschungsdrittel (Anlage 1.2). Die am 11.6.2013 gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten betragen hier im Versuchsfeld 5a  $0,22 \text{ m/s}$  (km 441,025) bzw.  $0,24 \text{ m/s}$  (km 441,050) und im Versuchsfeld 5b  $0,41 \text{ m/s}$  (km 441,075).

Anlage 2.1 zeigt die 2011 und 2012 im Längsprofil über die gesamte Versuchsstrecke gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im 5 m Uferabstand. Die Messwerte im VF 5 liegen insgesamt etwa zwischen  $0,5 \text{ m/s}$  (AZW + 2 m) am oberstromigen Anfang des VF 5 und  $0,9 \text{ m/s}$  (AZW + 4 m) am unterstromigen Ende des VF 5. Sie sind im Mittel deutlich größer als in den Versuchsfeldern 2 und 3 und etwas geringer als in den Versuchsfeldern 6, 7 und 8. Zum Vergleich sind alle Messergebnisse, die bisher während der unterschiedlichen Hochwasserereignisse im Bereich der Längsprofile etwa in 5 m Uferabstand (siehe Anlage 1.2) erfasst wurden, in Tab. 12 zusammengestellt.

Nach (DWA, 2014) kann ein Kammerdeckwerk – als solches können die Röhrichtgabionen und Steinmatratzen bezeichnet werden – ohne Berücksichtigung der Belastbarkeit der eingebauten Pflanzen ufernahe Strömungsgeschwindigkeiten bis  $2,6 \text{ m/s}$  und Wellenhöhen von 1 m aufnehmen. Diese Strömungsgeschwindigkeiten sind im Versuchsfeld 5 bisher bei Hochwasserabfluss nicht aufgetreten und theoretisch durch die Schifffahrt nicht zu erwarten. Auch die rechnerisch möglichen Heckwellenhöhen sind kleiner als 1 m. Eine ausreichende Sicherheit gegenüber Oberflächenerosion ist dementsprechend gegeben, solange die

Gabionen und Steinmatratzen in einem ordnungsgemäßen Aufbau und Zustand sind. Auch die Filterstabilität hängt langfristig vom Erhaltungszustand der Gabionen und Steinmatratzen ab. Detaillierte Grenzwerte, wie lange verschiedene Röhrichte einen ununterbrochenen Überstau bei gleichzeitigen Wellen- und Strömungsbelastungen schadlos aufnehmen können, gibt es bisher nicht.

#### Beobachtungen hinsichtlich Uferstandsicherheit

Die im VF 5a im unteren Böschungsbereich auf dem Kornfilter verlegten Röhrichtgabionen hatten aufgrund des ausreichenden Eigengewichtes von Anfang an - ohne zusätzliche Befestigungen - eine gute Stabilität auf der Böschung. Lediglich im Fußbereich kam es nach den ersten Hochwassern aufgrund einer unzureichenden Einbindung in die Steinschüttung im Unterwasserbereich zu einer Sackung der untersten Röhrichtgabionenreihe (BAW, BfG, WSA-MA, 2013). Durch nachträgliche Befestigung mit zusätzlichen Wasserbausteinen stabilisierte sich auch dieser Bereich schnell.

Insgesamt konnten sich die in den Röhrichtgabionen vorgezogenen Pflanzen zunächst gut entwickeln (BAW, BfG, WSA-MA, 2013). Durch wiederholte Hochwasser 2013 wurden sie jedoch immer wieder geschwächt. Besonders der 10-wöchige ununterbrochene Überstau bis fast zum oberen Ende der Gabionen (AZW + 1,70 m) im Frühjahr 2013 bei gleichzeitigen Einwirkungen infolge Schifffahrt und eine unmittelbar anschließende Trockenperiode bis Ende August 2013 belasteten die Pflanzen sehr stark (BfG, 2014). Im Gegensatz zu 2012 konnten sich nicht mehr alle Pflanzenarten von der Schädigung erholen (Bild 8). Während sich die dominant gepflanzten Seggen in den unteren Gabionenreihen (Pflanzzone 1: AZW – 0,5 m bis AZW + 0,5 m) und die dominant gepflanzten Arten Rohr-Schwengel und Rohr-Glanzgras in den oberen Gabionenreihen (Pflanzzone 2: AZW + 0,5 m bis AZW + 1,70 m) überwiegend gut halten konnten, fielen einige der vorkultivierten Arten fast gänzlich aus (BfG, 2014).



Bild 8: Röhrichtgabionen (VF 5a) nach andauerndem Überstau (15.7.2013)



Bild 9: Lokale Schäden an den Gabionen im VF 5a (15.7.2013)

Der Ausfall von Pflanzenarten führte dazu, dass große Teilbereiche der Gabionen nicht mehr bewachsen und bewurzelt sind (Bild 8). Dadurch traten auch an den Gabionen selbst vermehrt lokale Schäden auf. Das jetzt teilweise freiliegende Kokosgewebe, das die Steine und den Boden innerhalb der Drahtummantelung umfasst, ist durch die hydraulischen Belastungen örtlich zerstört worden. Dadurch konnten lokal innenliegender Boden und Kies ausgespült werden (Bild 9). Ohne einen schützenden Bewuchs und dessen Wurzelgeflecht können diese Prozesse weiter zunehmen, so dass letztendlich die Uferschutzfunktion der Gabionen langfristig gefährdet sein kann. Der Erfolg der Bauweise hängt deshalb entscheidend auch von den eingebauten Pflanzenarten und deren langfristiger Entwicklung ab.

Da die Gabionen mit ihrem Flächengewicht und dem filterstabilen Aufbau zum Untergrund trotz des lokalen Pflanzenausfalls und der beobachteten lokalen Schäden die Uferstandssicherheit weiterhin gewährleisten, waren Unterhaltungs- bzw. Sanierungsarbeiten 2013 nicht erforderlich. Der Zustand der Gabionen und die weitere Entwicklung der Pflanzen – ggf. Regenerierung und Ausbreitung der Seggen und des Rohr-Schwingels oder auch spontane Neuansiedlungen – müssen jedoch weiter beobachtet werden.

Die im Versuchsfeld 5b im unteren Bereich eingebauten Steinmatratzen mit darauf befestigten vorgezogenen Pflanzmatten waren, genau wie die Röhrichtgabionen (VF 5a), von Anfang an häufigen, auch länger andauernden Hochwassern ausgesetzt. Bereits im Juni 2012 waren ca. 95 % der vorkultivierten Pflanzen in den Pflanzmatten ausgefallen. 2013 verschlechterte sich der Zustand nach dem 10-wöchigen Überstau im Frühjahr bei gleichzeitiger Schiffsverkehrsbelastung so weit, dass überhaupt kein Bewuchs mehr vorhanden war (Bild 10) (BfG, 2014). Aus diesem Grund wurden die Reste der Pflanzmatten im Spätsommer 2013 vom Außenbezirk des WSA Mannheim entfernt (Bild 11). Die auf einem Kornfilter verlegten Steinmatratzen gewährleisten durch ihr Eigengewicht und den erosions- und filterstabilen Aufbau zum Untergrund weiterhin den Uferschutz.

Als mögliche Ursachen für das gescheiterte Anwachsen der in den Pflanzmatten vorgezogenen Pflanzen und das Ausbleiben einer natürlichen Sukzession, wie sie auf den Steinmatratzen ohne Pflanzmatten im oberen Böschungsbereich erfolgte, sind mehrere zusammenwirkende Faktoren zu nennen: Die Trägerkokos- und Filtermatten mit den Einzelpflanzen haben kaum ein Eigengewicht, sie sind nur punktuell und linienförmig auf der Böschung befestigt. Bei Überstau geraten sie unter Auftrieb, gleichzeitig wirken Wellen und Strömungen infolge Schifffahrt. Dies führt zu ständigen Druckwechseln („Pumpeffekten“), wodurch sich die leichten Matten zwischen den Befestigungen heben und senken. Ein beständiger flächiger Kontakt zwischen Matten und Untergrund ist dadurch nicht zu gewährleisten. Das notwendige Eindringen und Verankern der Wurzeln im Untergrund wird erschwert bzw. ganz verhindert. Möglicherweise bei niedrigen Wasserständen in den Untergrund gewachsene Einzelwurzeln reißen bei Überstau wieder ab. Das Kokosgewebe in den Matten wird nach und nach durch die hydraulische Belastung zerstört (Bild 10).

Eine ökologische Aufwertung der Steinmatratzen wird nach Entfernung der Pflanzmattenreste - ähnlich wie im oberen Böschungsbereich (Bild 11) - durch natürliche Sukzession angestrebt. Diese setzte im Untersuchungszeitraum bereits geringfügig ein. Eine weitere Beobachtung erfolgt im Rahmen des Monitoring.



Bild 10: Pflanzmatten auf Steinmatratzen (VF 5b) nach Hochwasserereignissen (15.7.2013)



Bild 11: Steinmatratzen (VF 5b) nach Rückbau der Pflanzmatten (4.10.2013)

Die im gesamten Versuchsfeld 5 im oberen Böschungsbereich oberhalb AZW + 1,70 m ohne Pflanzmatten eingebauten Steinmatratzen waren 2013 aufgrund ihrer Höhenlage nur wenigen kurzen Überstauperioden ausgesetzt. Sie konnten mit ihrem Eigengewicht und filterstabilen Aufbau die Belastungen ohne Schäden aufnehmen. Trotz Erosion der Übererdung durch die ersten Hochwasser sind keine signifikanten Schäden durch Vandalismus aufgetre-

ten. Eine natürliche Sukzession, d.h. eine Besiedlung mit einer krautigen Spontanvegetation, hat begonnen (BfG, 2014).

#### Bewertung

Es zeigt sich, dass mit den Röhrichtgabionen und Steinmatratzen, die das theoretisch erforderliche Flächengewicht und einen filter- und erosionsstabilen Aufbau besitzen, von Anfang an, auch in der kritischen Anfangsphase, ausreichende Sicherheit gegen Abgleiten, hydrodynamische Bodenverlagerung und Oberflächenerosion gewährleistet war. Hinsichtlich der langfristigen Beständigkeit müssen die Pflanzen einen vitalen, flächendeckenden Bewuchs auf den Gabionen und Steinmatratzen bilden. Mehrere Pflanzenarten haben lange Überstauzeiten bei gleichzeitigen schiffsinduzierten Belastungen jedoch nicht überstanden. Hier konnten bereits wichtige Erkenntnisse zur Überstauungstoleranz verschiedener Pflanzenarten unter Wasserstraßenbedingungen gewonnen werden. Die weitere Entwicklung der Pflanzen, ggf. Ausbreitung von Seggen, Rohr-Schwingel und Rohr-Glanzgras oder auch Spontanbesiedelung, aber auch der Zustand der Gabionen müssen hinsichtlich der Gewährleistung der Uferstabilität weiter beobachtet werden.

Zu den punktuell und linienförmig auf den Steinmatratzen befestigten Pflanzmatten ist festzustellen, dass diese in den häufig eingestauten unteren Böschungsbereichen nicht zu einer Initiierung eines flächendeckenden Bewuchses geeignet sind. Mit der hier angewendeten Bauweise (Pflanzmatten auf Steinmatratzen befestigt) ist unter den gegebenen Randbedingungen kein flächiger Verbund mit dem Untergrund und damit kein Anwachsen der in den Matten vorgezogenen Pflanzen zu erreichen. Die Steinmatratzen selbst gewährleisten nach wie vor den Uferschutz. In den wenig eingestauten oberen Böschungsbereichen ist die natürliche Sukzession weiter fortgeschritten.

#### **3.4.4 Versuchsfeld VF 7: Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten, Kokosmatte über Nassansaat (km 441,205 - km 441,366)**

##### Bauweise

Im VF 7 wurden nach Rückbau der Steinschüttung in den Teilfeldern 7a (Böschungsbereich von AZW – 0,5 m bis AZW + 1,70 m), 7b und 7c (jeweils von AZW + 0,5 m bis BOK) vorgezogene Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvliese und Kunststoffvliese (jeweils bis AZW + 1,70 m) und Kokosgewebe (von AZW + 1,70 m bis BOK)) - mit Überlappungen in Böschungsfallrichtung von 30 cm - eingebaut. Die Befestigung der Pflanzmatten erfolgte durch einzelne Holzpflocke und uferparallele Querriegel, in Höhe AZW + 1,70 m zusätzlich linienförmig durch Totholzfascinen (in VF 7a). Am unteren Ende wurden die Pflanz- und Filtermatten im VF 7a in die im Unterwasserbereich (unterhalb AZW - 0,5 m) verbliebene Steinschüttung eingebunden. In den VF 7b und 7c erfolgte die wasserseitige Fußeinbindung mittels Vegetationswalzen (uferparallel angeordnet im Bereich von AZW bis

AZW + 0,5 m), die mit doppelstelligem Kokosgewebe (VF 7b) bzw. Schafwollvlies mit Kokosgewebe (VF 7c) ummantelt wurden.

Im oberen Böschungsbereich des Versuchsfeldes 7a (zwischen AZW + 1,70 m und BOK) erfolgte nach Rückbau der Steinschüttung auf dem Planum eine Nassansaat und Abdeckung mit einer Kokosmatte. Diese wurde nur punktuell mit Holzpflocken befestigt. Die Böschungneigung beträgt im gesamten Versuchsfeld 1:3. Mehr zum Einbau siehe (BAW, BfG, WSA-MA, 2012).

Gewährleistung Uferschutz - theoretisch

Pflanzmatten auf Filtermatten und Kokosmatten über einer Nassansaat sind Uferschutzmaßnahmen, die aus pflanzlichen Bestandteilen aufgebaut sind und kein signifikantes Eigengewicht besitzen. Wie der Uferschutz gewährleistet werden soll, zeigt Tab. 13.

Tab. 13: Gewährleistung des Uferschutzes durch Pflanzmatten mit Filtermatten bzw. Kokosmatten (werden hier vereinfacht „Matten“ genannt)

Anforderungen	Wie/ wodurch soll Uferschutz gewährleistet werden?	
	Anfangszustand (ohne Wurzeln und Sprosse)	Langfristig (mit Wurzeln und Sprosse)
<b>Wurzelwachstum in den Untergrund</b>	Ausreichende Befestigungen (Querriegel und Pflocke) für guten flächenhaften Bodenkontakt der Matten	Keine Hilfsmittel mehr erforderlich
<b>Erosionssicherheit</b>	Lückenlose (überlappende) Abdeckung der Böschungsoberfläche mit erosionsstabilen Matten	Oberirdische Sprosse und flächendeckendes oberflächennahes Wurzelgeflecht
<b>Filterstabilität</b>	Lückenlose (überlappende) Abdeckung der Böschungsoberfläche mit auf den Boden abgestimmten Filtermatten	Flächendeckendes oberflächennahes Wurzelgeflecht
<b>Sicherheit gegenüber Abgleiten</b>	Ausreichend lange Pflocke, angeordnet im zulässigen Abstand zueinander (Bodenvernagelung)	Genügend tief reichende und dicht verzweigte Wurzeln im Untergrund
<b>Sicherheit gegenüber hydrodynamischer Bodenverlagerung</b>	Nicht zu gewährleisten, aber: Begrenzung der böschungsabwärts gerichteten Bodenbewegungen durch Querriegel (im Bereich mit Kokosmatte nicht vorhanden)	Genügend tief reichende und dicht verzweigte Wurzeln im Untergrund (Wurzelgeflecht)

Hydraulische Belastungen - Standsicherheit

Die Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten und Kokosmatten über der Nassansaat waren seit dem Einbau im November 2011 den hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt und gleichzeitig verschiedenen Hochwasserereignissen mit Wasserständen bis über das angrenzende Gelände ausgesetzt. Sie wurden dementsprechend in Abhängigkeit von ihrer

Höhenlage auf der Böschung und den herrschenden Rheinwasserständen immer wieder durch Überstau, Auftrieb, Absunk, Wellen und Strömungen belastet.

Aufgrund der gegebenen Randbedingungen und der auf dem Rhein verkehrenden Güterschiffe können im Bereich des Versuchsfeldes 7 theoretisch annähernd die in Tab. 14 aufgeführten maximalen hydraulischen Belastungsgrößen auftreten. Diese wurden vereinfacht aus den bei den Querprofilen km 440,92 (Tab. 6) und km 441,55 (Tab. 16) nach (GBB, 2010) berechneten Belastungsgrößen für das Querprofil km 441,285 linear interpoliert. Es wurde davon ausgegangen, dass ähnliche Randbedingungen vorherrschen. Lediglich die Fahrrinne entfernt sich stromab gleichmäßig weiter vom Bemessungsufer weg (Bild 1), die Uferabstände der Güterschiffe werden entsprechend größer und die hydraulischen Belastungen bei sonst gleichen Randbedingungen kleiner. Tab. 15 zeigt die bisher in diesem Bereich gemessenen Belastungsgrößen (siehe Kap. 3.3).

Tab. 14: Interpolierte ufernahe schiffsinduzierte hydraulische Belastungen bei km 441,285

Wasserstand	Heckwellenhöhe [m]	Wasserspiegelabsink [m]	Wiederauffüllungsströmungsgeschwindigkeit [m/s]
AZW + 1 m	0,65	0,40	1,50
MHW (AZW + 2,3 m)	0,49	0,43	1,47
HSW (AZW + 4,4 m)	0,48	0,42	1,64

Aus den Tabellen 14 und 15 wird auch für dieses Versuchsfeld deutlich, dass die aus bisherigen Messwerten für das Versuchsfeld 7 interpolierten Heckwellenhöhen deutlich unter den bei ähnlichem Wasserstand theoretisch möglichen Belastungen liegen. Da bisher nur ca. 600 der jährlich hier verkehrenden 43.200 Schiffe (bei 120 Schiffen täglich) in den Messungen erfasst wurden, ist davon auszugehen, dass auch bereits größere hydraulische Belastungen als gemessen, ggf. auch in der Größenordnung der berechneten Heckwellenhöhen, aufgetreten sind. Bei den weiter vorgesehenen Messungen werden die schiffsinduzierten Belastungen auch in diesem Versuchsfeld erfasst.

Tab. 15: Bisher gemessene ufernahe hydraulische Belastungen im Bereich der Pflanzmatten über Filtermatten und Kokosmatten über Nassansaat

Messkampagne	Heckwellenhöhe [m]	Natürliche, über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] <i>(Positive Werte in Fließrichtung des Rheins)</i>
15.01.2011 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4 m (Anlage 2.1)	-	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: 0,64...0,82 (VF 7a) 0,73...1,07 (VF 7b und 7c)
15.06. 2012 Wasserstand: AZW + 2 m (Anlage 2.1)	0,19*** (km 441,285)	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: 0,57...0,86 (VF 7a) 0,59...0,85 (VF 7b und 7c)
06.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4,40 m (Anlage 3.1)	-	km 441,225 (VF 7a): 0,95* km 441,240 (VF 7a): 0,77* km 441,260 (VF 7a): 0,69* km 441,275 (VF 7b): 0,77* km 441,305 (VF 7b): 0,94* km 441,320 (VF 7b): 0,88* km 441,345 (VF 7c): 0,86* km 441,355 (VF 7c): 0,93*
11.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 2,60 m (Anlage 3.2)	-	km 441,225 (VF 7a): 0,59* (0,37)** km 441,240 (VF 7a): 0,61* (0,35)** km 441,260 (VF 7a): 0,64* (0,38)** km 441,275 (VF 7a): 0,58* (0,60)** km 441,305 (VF 7b): 0,67* (0,66)** km 441,320 (VF 7b): 0,66* (0,61)** km 441,345 (VF 7c): 0,61* (0,41)** km 441,355 (VF 7c): 0,55* (0,49)**

\* Strömungsgeschwindigkeit, gemessen etwa im Bereich der 5 m vom Ufer entfernten Längsprofile (2011 und 2012), siehe Anlage 1.3 und 2.1

\*\* Klammerwerte sind die ufernähsten Messwerte unmittelbar im Bereich der Gabionen bzw. Steinmatratzen im unteren Böschungsbereich (landseitig der 5 m - Profile)

\*\*\* linear interpoliert aus Messwerten bei km 440,920 und km 441,550, da für das VF 7 keine Messwerte vorliegen

Überschlägliche Standsicherheitsbetrachtungen für das Querprofil km 441,285 durch Interpolation der Berechnungsergebnisse bei km 440,92 (Kap. 3.4.2) und km 441,55 (Kap. 3.4.5) zeigen, dass zur Gewährleistung der Sicherheit gegenüber Abgleiten und hydrodynamischen Bodenverlagerungen rechnerisch im Versuchsfeld 7 etwa das Flächengewicht einer 10 cm dicken Steinschüttung (Steindichte: 2,65 t/m<sup>3</sup>) erforderlich ist. Mit den Pflanz- und Filtermatten sowie Kokosmatten wird jedoch auch dieses erforderliche geringe Flächengewicht auf der Böschung nicht erreicht. Die vorhandenen Standsicherheitsdefizite müssen in der Anfangszeit durch die Pflöcke (Bodenvernagelung) und Querriegel (Begrenzung der Bodenverlagerungen) ausgeglichen werden. Langfristig sollen die Wurzeln die Sicherheit gewährleisten.

Eine Auswertung der 2013 in einzelnen Querprofilen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten (Anlagen 3.1/ 3.2 und 1.3) zeigt erwartungsgemäß auch hier eine deutliche Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten mit kleiner werdendem Uferabstand. Die ufernächsten Messpunkte (in Tabelle 15 mit \*\* gekennzeichnet) liegen bereits im Bereich der Pflanzmatten im unteren Böschungsdrittel. Am 11.6.2013 (AZW + 2,60 m) wurden hier im VF 7a kurz unterhalb der uferparallelen Totholzfaschine, die sich in der Höhe von AZW + 1,70 m befindet, Strömungsgeschwindigkeiten von 0,37 m/s (km 441,225) bis 0,60 m/s (km 441,275) gemessenen. In den VF 7b und 7c betragen die Strömungsgeschwindigkeiten kurz oberhalb der Steinschüttung 0,61 m/s bis 0,66 m/s bzw. 0,41 m/s bis 0,49 m/s.

Zum Vergleich aller Messergebnisse, die bisher bei unterschiedlichen Hochwasserereignissen etwa im Bereich der Längsprofile in 5 m Uferabstand und landseitig davon (siehe Anlage 1.5) ermittelt wurden, sind diese in Tab. 15 zusammengestellt. Bei den geringeren Wasserständen AZW + 2 m/ AZW + 2,6 m sind die etwa am gleichen Ort gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten erwartungsgemäß kleiner als bei den höheren Wasserständen AZW + 4 m/ AZW + 4,4 m. Die im Bereich der Längsprofile in 5 m Uferabstand gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten liegen bei den geringen Wasserständen zwischen 0,57 m/s und 0,86 m/s und bei den höheren Wasserständen etwa zwischen 0,64 m/s und 1,07 m/s.

Nach (DWA, 2014) können begrünte Böschungsschutzmatten mit Steckhölzern – diese können als Vergleich für Pflanzmatten auf Filtermatten herangezogen werden – ufernahe Strömungsgeschwindigkeiten bis 1,6 m/s und Wellenhöhen bis 25 cm aufnehmen. Diese Strömungsgeschwindigkeiten wurden im Versuchsfeld 7 bisher durch Hochwasserabfluss nicht erreicht. Infolge Schifffahrt können bei hohen Wasserständen maximal grenzwertige Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, die zulässigen Wellenhöhen können theoretisch überschritten werden (Tab. 14). Eine ausreichende Sicherheit gegenüber Oberflächenerosion ist dementsprechend nicht für alle Belastungen gegeben. Die Filterstabilität hängt vom Erhaltungszustand der Pflanz- und Filtermatten ab. Detaillierte Grenzwerte, wie lange verschiedene Röhrichte einen ununterbrochenen Überstau bei gleichzeitigen Wellen- und Strömungsbelastungen schadlos aufnehmen können, gibt es bisher nicht.

#### Beobachtungen hinsichtlich Uferstandsicherheit

Die schon beim Einbau der Pflanzmatten eher schlecht entwickelten Einzelpflanzen wurden durch wiederholte Hochwasser und gleichzeitige Schiffsbelastung weiter geschädigt. Die zur Befestigung und zur Böschungsstabilisierung erforderlichen, zum großen Teil jedoch aufgrund der Steinreste im Untergrund zu kurzen Pflöcke und Riegelhölzer wurden teilweise durch Auftrieb und Wellenbelastung gelockert bzw. herausgezogen. Unterhalb der leichten Matten traten böschungsabwärts gerichtete Bodenverlagerungen auf, im Bereich der nur punktuell befestigten Kokosmatte über der Nassansaat in besonderem Ausmaß. Erste Sanierungsmaßnahmen, insbesondere im häufig eingestauten unteren Böschungsbereich, wurden bereits 2012 erforderlich (BAW, BfG, WSA-MA, 2013).

Der 2013 aufgetretene lange, ca. 10-wöchige ununterbrochene Einstau der Pflanzmatten bis AZW + 1,50 m im Frühjahr von Mitte April bis Ende Juni und die sich unmittelbar anschließende Trockenperiode bis Ende August wirkten sich weiter negativ auf den Zustand der Pflanzmatten auf Schafwoll- bzw. Kunststoffvlies im unteren Böschungsbereich (bis AZW + 1,70 m) aus. Die einzelnen Pflanzen verloren zunehmend an Vitalität. Unter den vorherrschenden hydraulischen Belastungen konnten sich keine ausreichenden Wurzeln bilden und sich im Boden verankern, um den notwendigen Verbund mit dem Untergrund zu erreichen. Ähnlich wie bei den auf den Steinmatratzen befestigten Pflanzmatten im VF 5b (Kap. 3.4.3) führten auch hier Auftrieb, Wellen- und Strömungsbelastungen bei Überstau zu ständigen Druckwechseln („Pumpeffekte“), die die Matten permanent hoben und senkten und dadurch Wurzeln immer wieder abreißen ließen. Der dauerhaft erforderliche flächige Kontakt zwischen Pflanzmatten, Filtermatten und Untergrund konnte in den häufig eingestauten unteren Böschungsbereichen nicht erreicht werden. Die Befestigungen - Pflöcke und Querriegel - wurden zum Teil immer wieder herausgezogen. Pflanzen und Wurzeln konnten sich dementsprechend nicht, wie gewünscht, entwickeln und gingen zum großen Teil ein bzw. wurden ausgespült (BfG, 2014). Das Kokosträgergewebe der Pflanzmatten wurde ohne stabilisierende Pflanzen unter der hydraulischen Belastung zunehmend zerstört.

Im Gegensatz zu den Schafwollvliesen, die sich unter diesen Bedingungen wider Erwarten bereits im ersten Jahr nach Einbau in Auflösung befanden, konnten die Kunststoffvliese bei zunehmender Beschädigung der Pflanzmatten immer noch einen gewissen Schutz vor Erosion des anstehenden Bodens bieten. Nach den häufigen und zum Teil sehr langen Überstauereignissen hatte sich der Zustand im Sommer 2013 allerdings soweit verschlechtert, dass der Uferschutz durch die Pflanzmatten auf Geotextilien im unteren Böschungsbereich generell nicht mehr gewährleistet werden konnte (Bild 12). Zunehmende Bodenumlagerungen unter den Kunststoffvliesen und zunehmender Materialaustrag in den Bereichen mit aufgelöstem Schafwollvlies machten eine generelle Sanierung erforderlich. Im August 2013 wurden deshalb die in Teilen bereits 2012 begonnenen Sanierungsmaßnahmen ausgedehnt. Im Ergebnis ist der gesamte Uferbereich im VF 7 unterhalb AZW + 1,70 m mit Wasserbausteinen überschüttet, so dass der Uferschutz in diesem Bereich wieder durch eine entsprechend der Erfordernisse dünne Steinschüttung (1 bis 1 ½ -lagig) gewährleistet wird (Bild 13). Aktuelle Beobachtungen zeigen, dass vereinzelt noch Arten der ursprünglichen Pflanzmatten zwischen den Wasserbausteinen, die durch flächige Auflast einen guten Bodenkontakt der Reste der Pflanzmatten ermöglichen, aufkommen. Die Entwicklung wird weiter beobachtet.



Bild 12: Zustand nach 10-wöchigem Dauereinstau (15.7.2013)



Bild 13: Zustand nach Sanierung (7.10.2013)

Die Röhrichtwalzen, die im Bereich um AZW eingebaut worden waren und bereits 2012 durch häufigen Überstau Schaden genommen hatten, wurden im Zuge der Sanierungsmaßnahmen ebenfalls mit Wasserbausteinen überschüttet (BfG, 2014).

Der obere Böschungsbereich (oberhalb AZW + 1,70 m) war 2013 durch wenige kurzzeitige Hochwasser, einmalig auch 6 Tage lang bis über die Geländeoberkante, belastet, allerdings ohne wochenlang andauernden Überstau wie im unteren Bereich. Die in den VF 7b und 7c eingebauten Pflanzmatten auf Kokosmatten konnten sich hier nach anfänglichen lokalen Schäden und durchgeführten Ausbesserungsarbeiten weiter gut entwickeln. Wichtig waren dabei die parallel zur Uferlinie verlaufenden Querriegel als Befestigungen, da sie hangabwärts gerichtete Materialbewegungen unterhalb der Pflanzmatten begrenzen konnten. Die Pflanzmatten waren im August 2013 vollflächig und dicht bewachsen. Neben den gepflanzten Arten Rohr-Glanzgras, Weidelgras, Seggen, Ufer-Wolfstrapp und Blut-Weiderich (letztere mit geringeren Deckungsgraden) erreichten vor allem der als Hauptart gepflanzte Rohr-Schwengel und die über die Grünlandsaat eingebrachte Quecke Deckungsgrade bis 75 % (BfG, 2014).

Im oberen Böschungsbereich im Versuchsfeld 7a, im Bereich der Kokosmatten über einer Nassansaat traten bereits in der kritischen Anfangsphase 2012 nach ersten kurzen Überstauereignissen umfangreiche Bodenverlagerungen auf, so dass schon 2012 entsprechende Sanierungsmaßnahmen (Einbau von Rasensoden und Querriegeln, zusätzliche Nassansaat) erforderlich wurden (BAW, BfG, WSA-MA, 2013). Aufgrund der hier im Vergleich zu den anderen Bereichen im VF 7 zunächst nur punktuellen Befestigungen der Kokosmatten mit Holzpflocken und der fehlenden Filterstabilität zum Untergrund traten bei Überstau und hydraulischer Belastung infolge Schifffahrt in größerem Umfang Materialaustrag und Materialumlagerungen und damit Böschungsverformungen auf (Bild 14). Nach der Sanierung 2012

konnte sich dieser Bereich - mit einer durch die stattgefundenen Erosionen sehr unregelmäßigen Oberfläche - aufgrund des nur seltenen Einstaus 2013 stabilisieren, so dass keine weiteren Maßnahmen erforderlich waren. Auch hier konnte sich wie in den VF 7b und 7c im oberen Böschungsbereich ein dichter, fast vollflächiger Bewuchs aus Gräsern und Kräutern entwickeln. Dabei konnten sich Arten wie Rohr-Schwengel, Quecke, Weidelgras, Seggen, Honiggras als standorttypische Arten durchsetzen und erreichten mit spontan eingewanderten Arten eine Gesamtdeckung zwischen 70 – 90 % (Bild 15) (BfG, 2014).



Bild 14: Böschungsverformungen nach Überstau im VF 7a oben (22.3.2012)



Bild 15: Vegetationsentwicklung nach Sanierung im VF 7a oben (4.10.2013)

### Bewertung

2013 wurde deutlich, dass mit den nur punktuell und linienförmig befestigten Pflanzmatten ohne das theoretisch erforderliche Flächengewicht in den immer wieder, auch lange eingestauten, unteren Böschungsbereichen keine ausreichende Stabilität erreicht werden kann. Das erforderliche Flächengewicht wird nicht nur zur Gewährleistung der lokalen Böschungsstandsicherheit, sondern auch für einen flächigen und dauerhaften Bodenkontakt der Pflanzmatten gebraucht, der für ein Anwachsen der Pflanzen erforderlich ist.

Das Ausmaß der Instabilitäten und Schäden hängt von der Art der Befestigungen und der Art der Filtermatten sowie von der Häufigkeit und Dauer des Überstaus bei gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung ab. Werden die Matten nur punktuell durch Holzpflocke befestigt, treten mehr Bodenverlagerungen auf als bei zusätzlicher Anwendung von linienförmigen uferparallelen Querriegeln. Ein Anwachsen der in den Pflanzmatten vorgezogenen Einzelpflanzen im Untergrund wird bei punktuellen Befestigungen der Matten bei häufigem Einstau und gleichzeitiger Schifffahrtsbelastung erschwert bzw. verhindert. Der Einfluss der Einstaudauer zeigt sich deutlich an der unterschiedlichen Entwicklung des oberen und unteren Bereichs in den Versuchsfeldern 7b und 7c. Die Filterstabilität geht verloren, wenn sich die Filtermatten bio-

logisch abbauen, bevor das Wurzelsystem diese Aufgabe übernehmen kann, wie das hier bei dem verwendeten Schafwollvlies der Fall war.

Als Fazit kann zum jetzigen Zeitpunkt bereits festgestellt werden, dass Pflanzmatten auf Geotextil mit punktuellen und linienförmigen Befestigungen als Uferschutz an Wasserstraßen mit großen Wasserspiegelschwankungen und gleichzeitiger Belastung infolge Schifffahrt (in der Größenordnung wie hier am Rhein) in den unteren, häufig und lang eingestauten Bereichen der Uferböschung nicht geeignet sind. Schafwollvliese, wie sie hier verwendet wurden, sind ebenfalls nicht für Anwendungen in diesen Bereichen geeignet, da sie sich unter diesen Bedingungen zu schnell zersetzen.

Die Entwicklung der Pflanzmatten und Kokosmatten über Nassansaat, die sich im oberen Böschungsbereich derzeit in einem guten Zustand befinden, wird weiter beobachtet.

### **3.4.5 Versuchsfeld 9: Ohne Uferschutzmaßnahmen nach Rückbau der Steinschüttung (km 441,480 - 441,598)**

#### Bauweise

Im Versuchsfeld 9 erfolgte der Rückbau der Steinschüttung zwischen AZW und Böschungsoberkante, unterhalb von AZW blieb die Steinschüttung erhalten. Die entsteinte Böschung erhielt bewusst keine neuen Schutzmaßnahmen, die vorhandene Böschungsneigung von 1:2,5 bis 1:3 wurde nicht verändert. Ufererosion, die aus ökologischen Gründen erwünscht ist, wird begrenzt zugelassen und technisch bewertet. Zum Schutz des Betriebsweges wurden Setzstangen aus Silber-Weide in 2 Reihen auf der Böschungsplanie mit einem Abstand zum Betriebsweg von etwa 2 m und 4 m gesetzt. Das unterstromige Ende des Versuchsfeldes wurde mit einer Ausfachungsbühne aus Totholzstämmen gesichert, die mit Stahlseilen und Setzstangen im Untergrund befestigt und mit Wasserbausteinen abgedeckt wurde. Mehr zum Einbau siehe (BAW, BfG, WSA-MA, 2012).

#### Gewährleistung Uferschutz - theoretisch

In diesem Versuchsfeld geht es nicht um die Gewährleistung des Uferschutzes, sondern um die Beobachtung und Bewertung der Veränderungen der Böschungsgeometrie durch Erosion und Bodenverlagerungen aus technischer und ökologischer Sicht. Dabei sind die zwischen Betriebsweg und Böschungsoberkante eingebrachten Weidensetzstangen zu berücksichtigen, die mit ihrem Wurzelwerk die Lage der Abbruchkante landwärts begrenzen sollen.

#### Hydraulische Belastungen - Standsicherheit

Die Uferböschung war seit dem Einbau im November 2011 den hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt und gleichzeitig verschiedenen Hochwasserereignissen mit Wasserständen bis über das angrenzende Gelände ausgesetzt. Sie wurde dementsprechend in Abhän-

gigkeit der herrschenden Rheinwasserstände immer wieder durch Überstau, Auftrieb, Absenk, Wellen und Strömungen belastet.

Aufgrund der gegebenen Randbedingungen und der auf dem Rhein verkehrenden Güterschiffe können im Bereich des Versuchsfeldes 9 in Abhängigkeit des Wasserstandes theoretisch die in Tab. 16 aufgeführten, nach (GBB, 2010) für das Querprofil bei km 441,550 berechneten schiffsinduzierten Belastungsgrößen auftreten. Tab. 17 zeigt die bei Wasserständen über AZW bisher gemessenen schiffsinduzierten und natürlichen hydraulischen Belastungsgrößen.

Aus den Tabellen 16 und 17 wird auch für dieses Versuchsfeld deutlich, dass die bisher gemessenen Heckwellenhöhen unter den bei ähnlichem Wasserstand theoretisch möglichen Belastungen liegen. Da bisher nur ca. 600 der jährlich hier verkehrenden 43.200 Schiffe (bei 120 Schiffen täglich) in den Messungen erfasst wurden, ist nicht auszuschließen, dass auch bereits größere hydraulische Belastungen als gemessen, ggf. auch in der Größenordnung der berechneten Heckwellenhöhen, aufgetreten sind. Zur Erhöhung der Datenmenge sind weitere Messungen vorgesehen.

Tab. 16: Berechnete ufernahe schiffsinduzierte hydraulische Belastungen bei km 441,550

Wasserstand	Heckwellenhöhe [m]	Wasserspiegelabsenk [m]	Wiederauffüllungsströmungsgeschwindigkeit [m/s]
AZW + 1 m	0,33	0,18	0,95
MHW (AZW + 2,3 m)	0,26	0,21	1,16
HSW (AZW + 4,4 m)	0,26	0,21	1,33

Standsicherheitsberechnungen, durchgeführt für den km 441,550, zeigen, dass zur Gewährleistung der Sicherheit gegenüber Abgleiten und hydrodynamischer Bodenverlagerungen im Versuchsfeld 9 unter Annahme der theoretisch möglichen schiffsinduzierten Belastungen nach Tab. 16 und eines Bodens B2 (MAR, 2008) kein Flächengewicht erforderlich ist. Da der rechte Fahrrinnenrand hier mit 140 m sehr weit vom Ufer entfernt liegt, sind die schiffsinduzierten Belastungen wesentlich geringer als am oberstromigen Ende der Versuchsstrecke mit relativ nah am Ufer liegender Fahrrinne. Das bedeutet, dass bei einer Schiffsvorbeifahrt kein standsicherheitsrelevanter Porenwasserüberdruck im Boden entsteht. Hydrodynamische Bodenverlagerung und ein Abgleiten in einer böschungsp parallelen Gleitfläche sind dementsprechend auch ohne Uferschutzmaßnahmen nicht zu erwarten.

Tab. 17: Bisher gemessene ufernahe hydraulische Belastungen im Bereich des VF 9

Messkampagne	Heckwellenhöhe [m]	Natürliche, über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] <i>(Positive Werte in Fließrichtung des Rheins)</i>
15.01.2011 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4 m (Anlage 2.1)	-	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: 0,60 (km 441,500) ... 1,10 (km 441,580)
15.06.2012 (mit Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 2 m (Anlage 2.1)	0,13 (km 441,550)	Ca. 5 m vom Ufer entfernt: 0,37 (km 441,510)... 0,64 (km 441,580)
06.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 4,40 m (Anlage 3.1)	-	km 441,500: 0,83** km 441,550: 0,88** km 441,575: 0,96**
11.06.2013 (ohne Schifffahrt) Wasserstand: AZW + 2,60 m (Anlage 3.2)	-	km 441,500: 0,27* bis 0,65* km 441,550: 0,34* bis 0,58* km 441,575: 0,56*

\* Messpunkte liegen etwa im Bereich der 5 m vom Ufer entfernten Längsprofile (2011 und 2012), siehe Anlage 1.4

\*\* Messpunkte liegen ca. 7 m wasserseitig der 5 m vom Ufer entfernten Längsprofile (2011 und 2012)  
 Genaue Lage der Messpunkte „Strömungsgeschwindigkeit“ siehe Anlage 1.4

Hinsichtlich Oberflächenerosion sind die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten zu bewerten. Infolge Schifffahrt ist rechnerisch von Strömungsgeschwindigkeiten bis 1,33 m/s auszugehen. Bei Hochwasserabfluss wurden 2011 bei Wasserständen, die im VF 9 wie auch 2013 bis über das angrenzende Gelände reichten (AZW + 4 m, Bild 19), im oberstromigen Bereich von km 441,480 bis km 441,560 relativ geringe Strömungsgeschwindigkeiten von 0,6 m/s bis 0,75 m/s gemessen (im Längsprofil im 5 m Uferabstand). Weiter stromab stieg die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Ausfachungsbuhne durch die lokale Querschnittseinengung auf maximal 1,1 m/s an, bevor sie dahinter am Übergang zum „normalen“ Rheinufer auf 0,8 m/s absank (Anlage 2.1).

Bei Wasserständen von AZW + 2,60 m (2013) / AZW + 2 m (2012) wurden die natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten auch ufernäher unmittelbar im unteren, nicht gesicherten Böschungsbereich gemessen (Anlage 1.4). Über die Tiefe gemittelt betragen diese 2013 hier 0,27 m/s bei km 441,50 und 0,34 m/s bei km 441,55 (Anlage 3.1), etwas weiter wasserseitig im Übergangsbereich zur Steinschüttung 0,65 m/s bzw. 0,58 m/s (2013). 2012 wurden im unteren Böschungsbereich 0,37 m/s bei km 441,510 und 0,64 m/s bei km 441,580 gemessen (Anlage 2.1).

Berechnungen nach (GBB, 2010) ergeben für die theoretischen Belastungen infolge Schifffahrt (Wiederauffüllungsströmung: 1,33 m/s, Tab. 16) bei Wasserständen von AZW + 4,40 m eine zur Vermeidung von Erosion erforderliche Steingröße (einer gedachten Steinschüttung) von  $D_{50} = 5$  cm. Bild 16 zeigt die Kornverteilung der im Untergrund anstehenden Böden, die

bei der 2009 vom Betriebsweg aus bei km 441,495 abgeteufte Bohrung (BK 4) ermittelt wurden (BAW, BfG, 2010). Danach werden die überwiegend anstehenden Sande und Kiese von einer etwa 2 m starken Auelehmschicht überlagert. Nach Bild 16 haben die anstehenden Böden Korngrößen, die überwiegend im Schluff-, Sand- und Feinkiesbereich liegen und dementsprechend nach (GBB, 2010) als erosionsgefährdet einzustufen sind. Nach (Hjuström, 1935) erodiert Mittelsand ( $d = 0,2 \dots 0,6 \text{ mm}$ ) bereits bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,2 m/s. Erosionen sind dementsprechend zu erwarten.

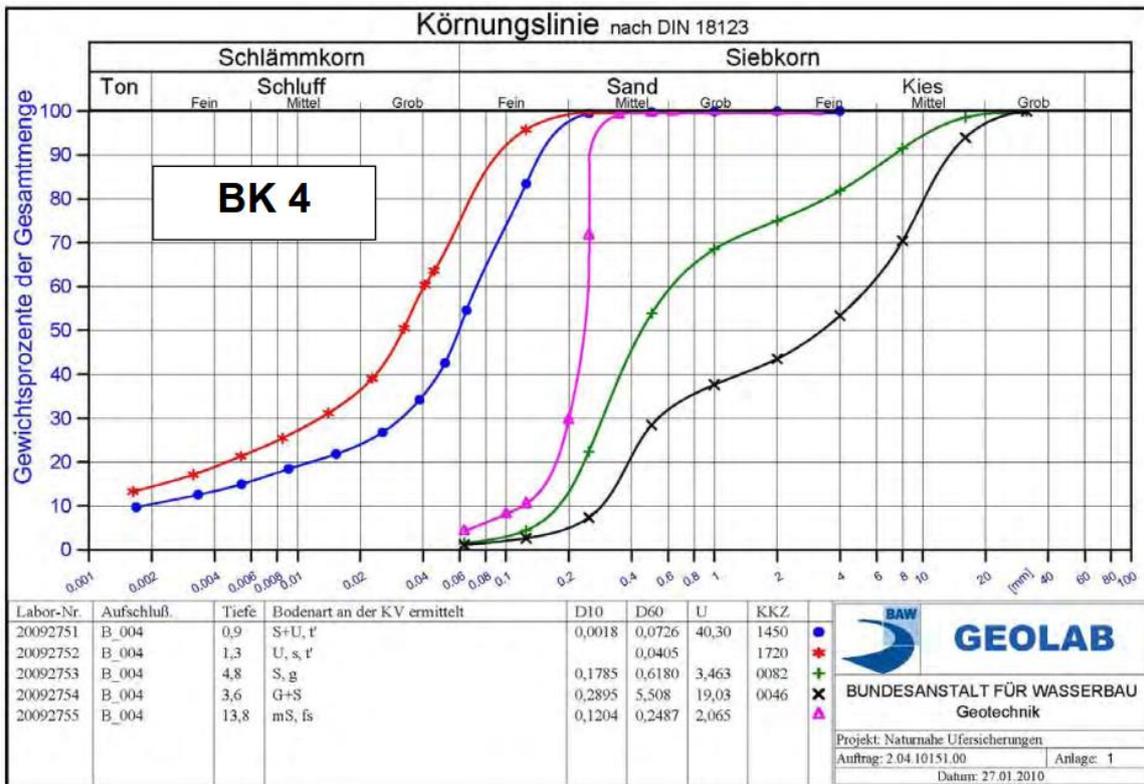


Bild 16: Kornverteilungskurven der bei km 441,495 anstehenden Böden (BAW, BfG, 2010)

### Beobachtungen hinsichtlich Uferstandsicherheit

Auch 2013 führten mehrere Hochwasser zum Einstau der Böschung, mehrere Tage sogar bis über das angrenzende Gelände. Bild 17 zeigt das Ufer unmittelbar nach Rückbau der Steinschüttung (Böschungsniegung ca. 1:3), Bild 18 zum Vergleich im Sommer 2013. Zunehmende Erosionen haben erwartungsgemäß zur Abflachung des häufig eingestauten Böschungsbereichs geführt. Entsprechend der aufgetretenen Strömungsbelastungen wurden hier Schluff-, Sand- und feine Kiesfraktionen erodiert, so dass im Erscheinungsbild Grobkies und die freigespülten Steine mit Kantenlängen größer 5 cm, die im Untergrund vorhanden waren, überwiegen (Bild 18).



Bild 17: VF 9 nach Rückbau der Steinschüttung  
2011



Bild 18: Zustand am 15.7.2013



Bild 19: Überflutung des angrenzenden Geländes  
am 4.6.2013



Bild 20: Erosion im Bereich der Böschungsschulter  
(15.8.2013)

Aufgrund der im Juni 2013 erstmals über die Geländeoberkante hinausgehenden Wasserstände (Bild 19) traten Erosionen auch im Bereich der Böschungsschulter auf. Zusätzlich hat das vom angrenzenden Gelände zurücklaufende Hochwasser zu lokalen Erosionsrinnen im Bereich der Böschungsschulter geführt - insbesondere nahe des Kilometerschildes bei km 441,500 (Bild 20). Einzelne Setzstangen der ufernahen Weidenreihe wurden teilweise freigespült. Sie blieben aber dennoch mit ihren Wurzeln im Boden verankert und zeigten kaum Vitalitätseinbußen. In der Auelehmschicht sind zum Teil senkrechte Abbruchkanten entstanden (Bild 20).

Am unterstromigen Ende des Versuchsfeldes haben zum Ufer hin orientierte Verwirbelungen vor der Ausfachungsbühne lokal zu größeren Erosionen bis zur Böschungsoberkante geführt. Hier sind in Abhängigkeit der Wasserstände bei Hochwasser terrassenartige Stufen im anstehenden Auelehm entstanden. Auch hier wurden einzelne Weidenetzstangen teilweise freigespült (Bild 21). Zur besseren Beurteilung der hydraulischen Belastung in diesem Be-

reich werden bei den nächsten Messungen zusätzlich zum Betrag der Strömungsgeschwindigkeiten detaillierte Auswertungen zu den Strömungsrichtungen vorgenommen.



Bild 21: Erosion am unterstromigen Versuchsfeldende (15.08.2013)

#### Bewertung

Generell zeigen die Veränderungen in diesem Versuchsfeld, dass im Bereich der Versuchsstrecke Ufersicherungsmaßnahmen erforderlich sind, wenn keine Erosion des Ufers zugelassen werden kann. Im Versuchsfeld 9 ist die aufgrund der vorherrschenden Strömungsbelastungen zu erwartende Erosion erwünscht. Der Betriebsweg ist durch die stattgefundenen Erosionen nicht gefährdet, so dass bisher keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich waren. Es wird beobachtet, wie sich das ungesicherte Ufer weiter entwickeln wird. Dabei ist besonders auf die Schutzwirkung der auf der Böschungsplanie angeordneten Weiden zu achten. Durch die im Untergrund vorhandenen, zunehmend freigespülten alten kleineren Wasserbausteine ist im Grunde wieder eine Art Ufersicherung entstanden, was bei den Auswertungen im Gegensatz zu einem sandigen oder kiesigen Ufer zu berücksichtigen sein wird.

#### **4 Fazit und Ausblick**

Die in der Versuchsstrecke am Rhein 2011 zwischen Mittelwasser und Geländeoberkante eingebauten neuen Ufersicherungsmaßnahmen und strukturverbessernden Maßnahmen wurden bisher 3 Jahre im Rahmen eines intensiven Monitorings beobachtet. Neben den schiffsinduzierten Belastungen und natürlichen Strömungsgeschwindigkeiten wirkten sich an der freifließenden Wasserstraße besonders die großen Wasserspiegelschwankungen und zum Teil langen Einstau- und Trockenzeiten auf die Stabilität der Maßnahmen aus.

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse lässt sich aus technischer Sicht feststellen, dass alle getesteten Maßnahmen bei den gegebenen Randbedingungen prinzipiell anwendbar sind,

allerdings ist der Anwendungsbereich auf der Böschung für einige Maßnahmen in Abhängigkeit der Überstauzeiten und -höhen einzuschränken. Hinsichtlich der Stabilität spielen außerdem die Größe des Flächengewichtes der Maßnahmen, die Überstauungstoleranz der eingebauten Pflanzen und die Art und Weise der Befestigungen sowie die Eigensteifigkeit der sehr leichten Ufersicherungsmaßnahmen eine wichtige Rolle.

Neben den ökologisch aufgewerteten Steinschüttungen (VF 1, 4, 6, 8 - (BfG, 2014)) haben die Steinmatratten (VF 5) und Weidenspreitlagen (VF 2 und 3) die vorhandenen Belastungen im gesamten Böschungsbereich gut aufgenommen und permanent den Uferschutz gewährleistet. Auch die Röhrichtgabionen (VF 5a) bilden bis jetzt einen guten Uferschutz, auch wenn im unteren Böschungsbereich ein Teil der vorgezogenen Pflanzen durch lange Überstauzeiten ausgefallen ist. Die leichten, punktuell und linear befestigten Pflanzmatten konnten im VF 7 im oberen wenig eingestauten Böschungsbereich erfolgreich das Ufer sichern. Im unteren, häufig und lange eingestauten Böschungsbereich haben sie sich dagegen weder auf Steinmatratten (VF 5a) noch auf Filtermatten (VF 7) bewährt. Im unteren Böschungsbereich des VF 7 musste die Uferstandsicherheit bereits durch eine Steinschüttung wiederhergestellt werden. Insgesamt konnten dementsprechend bereits erste Anwendungsgrenzen einzelner Maßnahmen ermittelt und wichtige Erkenntnisse zur Überstauungstoleranz eingebauter Pflanzenarten gewonnen werden. Alle bisherigen Erkenntnisse sind unter <http://ufersicherung.baw.de/de/index.html> abrufbar.

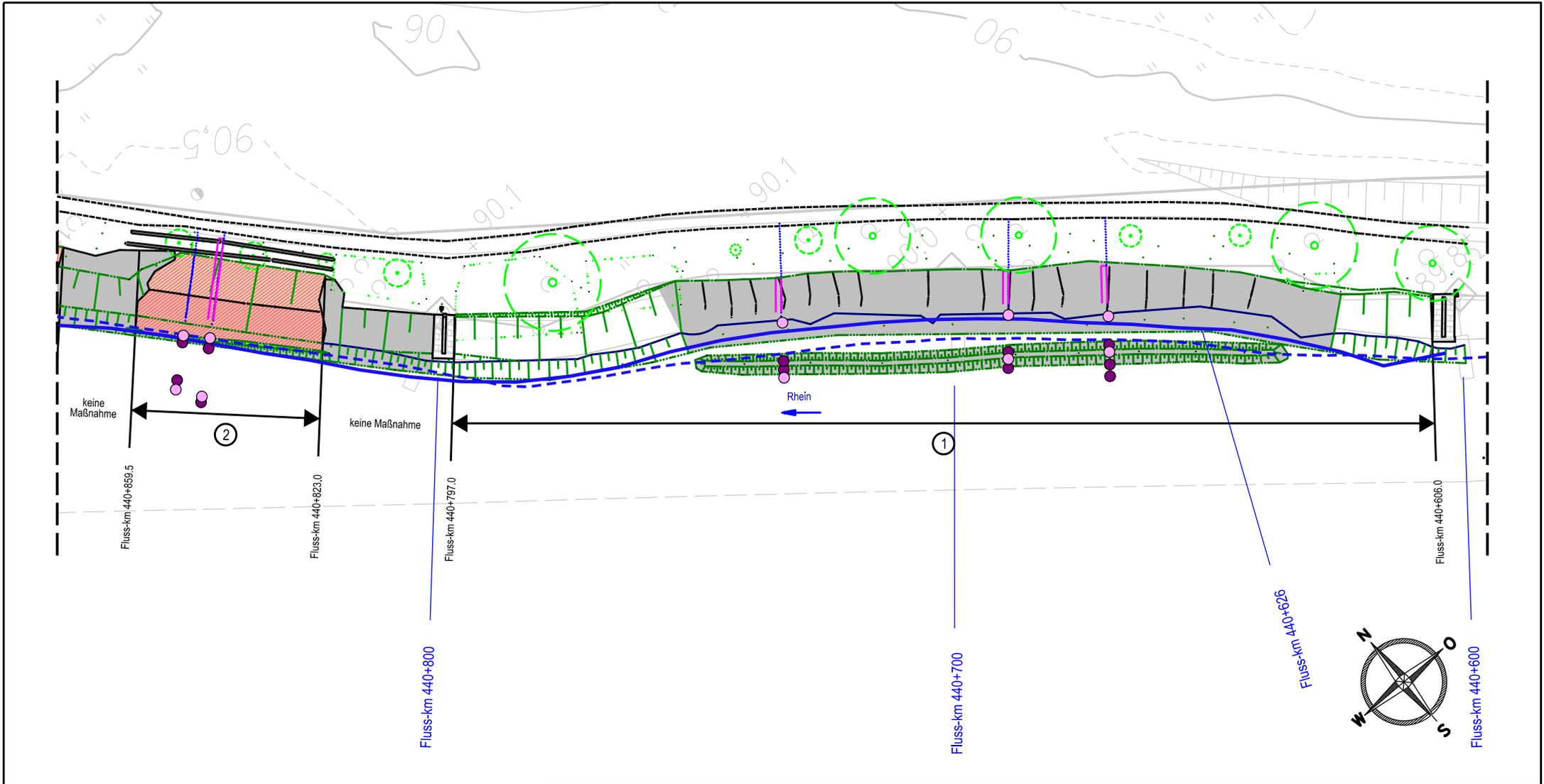
Die Untersuchungen werden in ähnlicher Weise zunächst bis 2016 weitergeführt, da eine fundierte Beurteilung der einzelnen Maßnahmen aus technischer und ökologischer Sicht erst nach mehreren Vegetationsperioden möglich ist. Die Ergebnisse werden in einem Abschlussbericht dokumentiert und mit den Ergebnissen der parallel in der BAW durchgeführten Labor- und Modellversuche in Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen einfließen. Damit werden immer bessere Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung technisch-biologischer Ufersicherungen als ökologisch verträglichere Alternative zum rein technischen Uferschutz an Wasserstraßen geschaffen, was gleichfalls die Handlungsoptionen der WSV mit Blick auf die gesetzlich vorgegebene aktive Erreichung ökologischer Ziele an Bundeswasserstraßen erweitert.

## 5 Literatur

(BAW, BfG, 2010) Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer – Empfehlungen für die Ausführung der Ufersicherung, BfG-Nr.: 1667, BAW-Nr.: 2.04.10151.00, Eigenverlag, Karlsruhe/Koblenz, Mai 2010

- (BAW, BfG, WSA-MA, 2012) Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim, Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer – Erster Zwischenbericht: Randbedingungen, Einbaudokumentation, Monitoring, Eigenverlag, Karlsruhe/Koblenz Januar 2012
- (BAW, BfG, WSA-MA, 2013) Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim, Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer – Zweiter Zwischenbericht: Erste Monitoringergebnisse 2012, Eigenverlag, Karlsruhe/Koblenz Juni 2013 – mit Anlagenband
- (BAW, 2014) Bundesanstalt für Wasserbau, Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen – Rhein-km 440,6 - 441,6, rechtes Ufer – Teilbericht (Supplement 2) Wetterdaten und Rheinwasserstände 11/2012 - 10/2013, Eigenverlag, Karlsruhe Juni 2014
- (BfG, 2014) Bundesanstalt für Gewässerkunde, Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen – Rhein-km 440,6-441,6, rechtes Ufer – Teilbericht Vegetation 11/2012 – 10/2013, Eigenverlag, Koblenz
- (GBB, 2010) Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB), Ausgabe 2010, Stand März 2011. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe. Online unter: [http://www.baw.de/de/die\\_baw/publikationen/merkblaetter/index.php.html](http://www.baw.de/de/die_baw/publikationen/merkblaetter/index.php.html)
- (DWA, 2014) Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. „Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Gewässern“, DWA-Merkblatt M519, Gelbdruck 2014
- (Hjulström, 1935) The morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris. In: Bulletin of the Geotechnical Institution of the University of Uppsala, Vol. 25, Schweden, 1935
- (MAR, 2008) Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- (Schmid, 2014) Ingenieurbüro Schmid, Bericht zur Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen auf dem Rhein bei Worms, interner Bericht, 17.6.2014

# Anlagen



**Legende:**

- Messpunkte 06.06.2013 (AZW+4,4m)
- Messpunkte 11.06.2013 (AZW+2,6m)
- Längsprofile Messung 01/2011 (AZW+4m)
- Längsprofile Messung 06/2012 (AZW+2m)

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		. Geprüft	Fleischer	13.01.15
.		. Gezeichnet	Schäfer	13.01.15
		Datei	A39520410151-IS-100.dgn	
		 Bundesanstalt für Wasserbau Kompetenz für die Wasserstraßen		
Maßstab	1:1000			

Versuchsstrecke Rhein Lage der Messpunkte/ Längsprofile der Strömungsgeschwindigkeiten	
Auftrags-Nr.	Anlagen-Nr.
A39520410151	1.1



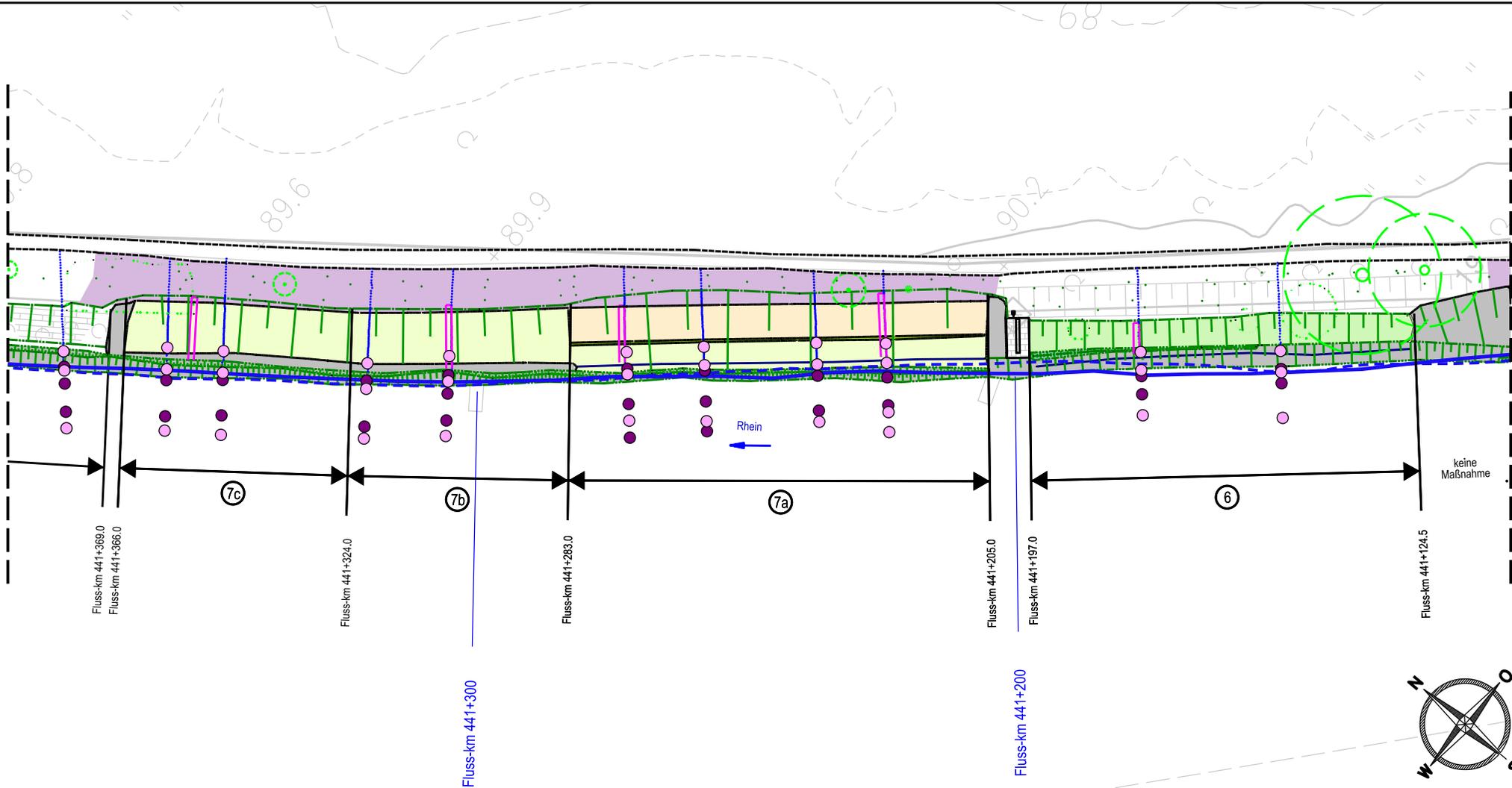
Legende:

- Messpunkte 06.06.2013 (AZW+4,4m)
- Messpunkte 11.06.2013 (AZW+2,6m)
- Längsprofile Messung 01/2011 (AZW+4m)
- Längsprofile Messung 06/2012 (AZW+2m)

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		Geprüft	Fleischer	13.01.15
.		Gezeichnet	Schäfer	13.01.15
		Datei	A39520410151-IS-101.dgn	
Maßstab		 Bundesanstalt für Wasserbau Kompetenz für die Wasserstraßen		
1:1000				

Versuchsstrecke Rhein  
 Lage der Messpunkte/  
 Längsprofile der  
 Strömungsgeschwindigkeiten

Auftrags-Nr. A39520410151	Anlagen-Nr. 1.2
------------------------------	--------------------



Legende:

- Messpunkte 06.06.2013 (AZW+4,4m)
- Messpunkte 11.06.2013 (AZW+2,6m)
- Längsprofile Messung 01/2011 (AZW+4m)
- Längsprofile Messung 06/2012 (AZW+2m)

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		Geprüft	Fleischer	03.06.13
.		Gezeichnet	Schäfer	03.06.13
		Datei	A39520410151-IS-102.dgn	
Maßstab		 Bundesanstalt für Wasserbau Kompetenz für die Wasserstraßen		
1:1000				

Versuchsstrecke Rhein  
 Lage der Messpunkte/  
 Längsprofile der  
 Strömungsgeschwindigkeiten

Auftrags-Nr. A39520410151	Anlagen-Nr. 1.3
------------------------------	--------------------



Legende:

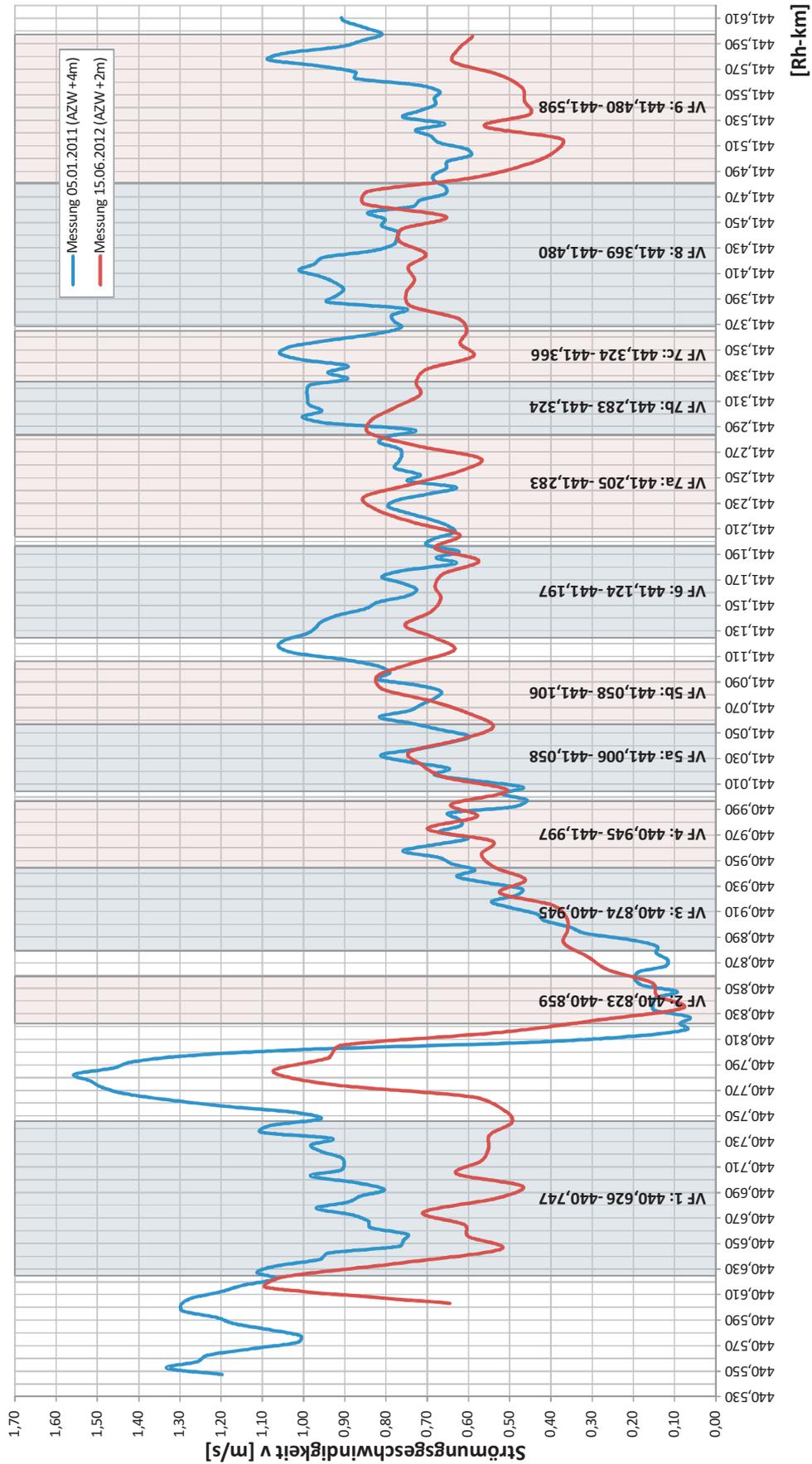
- Messpunkte 06.06.2013 (AZW+4,4m)
- Messpunkte 11.06.2013 (AZW+2,6m)
- Längsprofile Messung 01/2011 (AZW+4m)
- Längsprofile Messung 06/2012 (AZW+2m)

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		Geprüft	Fleischer	13.01.15
.		Gezeichnet	Schäfer	13.01.15
		Datei	A39520410151-IS-103.dgn	
		 Bundesanstalt für Wasserbau Kompetenz für die Wasserstraßen		
Maßstab	1:1000			

Versuchsstrecke Rhein  
 Lage der Messpunkte/  
 Längsprofile der  
 Strömungsgeschwindigkeiten

Auftrags-Nr. A39520410151	Anlagen-Nr. 1.4
------------------------------	--------------------

2.11/2012 gemessene, tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten  
Längsprofil im 5m-Uferabstand

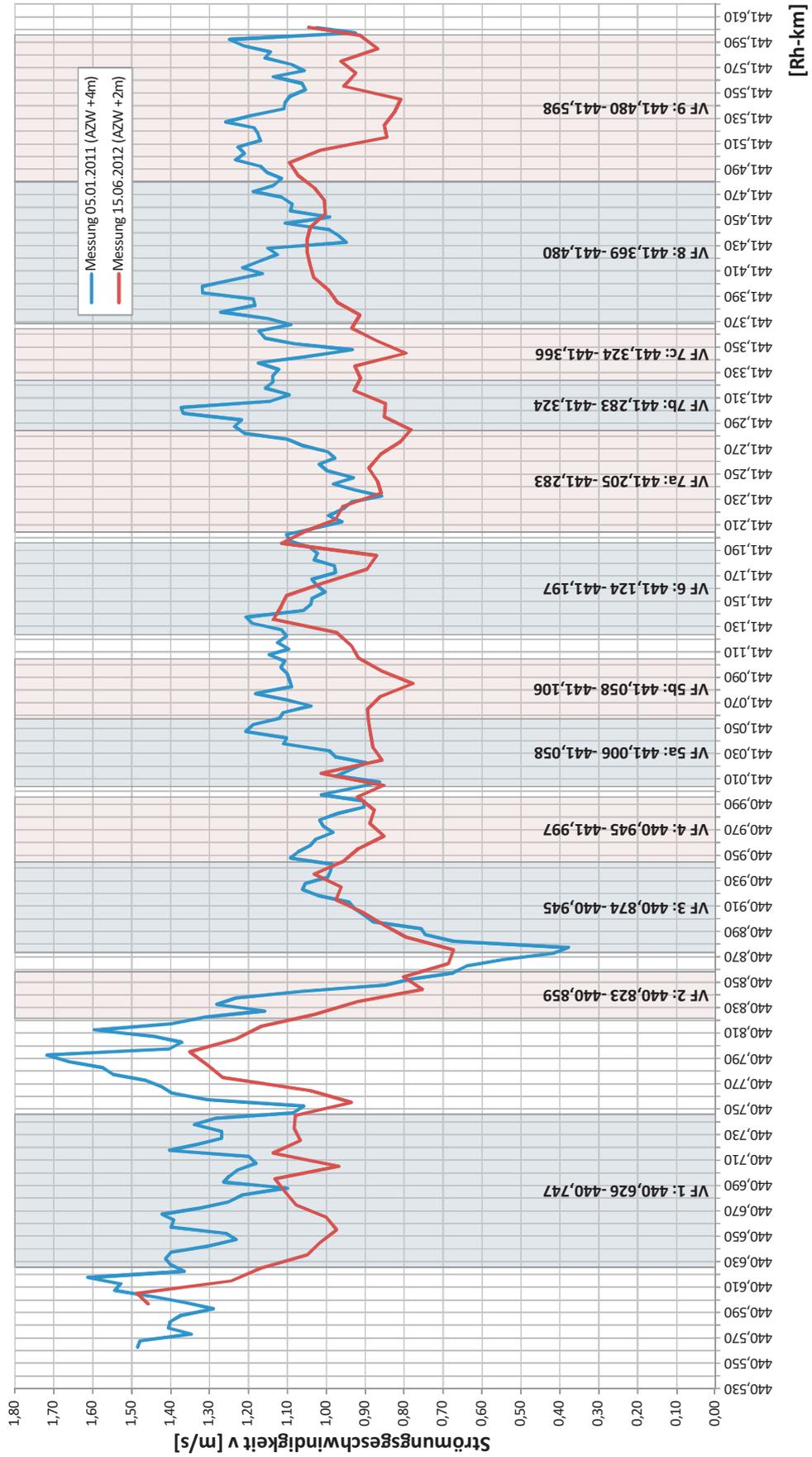


(Lage des Längsprofils im Grundriss siehe Anlage 1.1 bis 1.4)

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		Geprüft	Fleischer	22.04.15
		Gezeichnet	Steidl	22.04.15
		Datei	A39520410151-MS-100.cdr	
Maßstab		 <b>Bundesanstalt für Wasserbau</b> Kompetenz für die Wasserstraßen		
-				

Versuchsstrecke Rhein Strömungsgeschwindigkeiten im 5m-Uferabstand Messungen 2011/ 2012	
Auftrags-Nr. <b>A39520410151</b>	Anlagen-Nr. <b>2.1</b>

2011/2012 gemessene, tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten  
Längsprofil im 10m-Uferabstand



(Lage des Längsprofils im Grundriss siehe Anlage 1.1 bis 1.4)

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		Geprüft	Fleischer	22.04.15
		Gezeichnet	Steidl	22.04.15
		Datei	A39520410151-MS-100.cdr	
Maßstab		 <b>Bundesanstalt für Wasserbau</b> Kompetenz für die Wasserstraßen		
-				

Versuchsstrecke Rhein Strömungsgeschwindigkeiten im 10m-Uferabstand Messungen 2011/ 2012	
Auftrags-Nr. <b>A39520410151</b>	Anlagen-Nr. <b>2.2</b>

Messung 06.06.2013			
Versuchsfeld	Querprofil	Uferabstand/ Abstand SP**	$V_m^*$
	[m]	[m]	[m/s]
1	440.672	12,3	0,83
		16	1,23
		18,1	1,26
1	440.690	13,2	0,97
		16,2	1,08
1	440.737	13,1	0,87
		14,7	0,71
2	440.845	10,8	0,09
		20,9	1,15
2	440.850	10,6	-0,02
		17,6	0,63
3	440.910	11,2	0,19
		14,4	0,49
3	440.925	10,5	0,28
		14,2	0,63
4	440.960	5,3	0,43
		11,3	0,69
4	440.975	4,6	0,41
		12,5	0,86
5a	441.025	6,6	0,50
		10,6	0,64
5a	441.050	3,8	0,60
		8	0,77
		11,5	0,75
5b	441.075	5,6	0,57
		7,9	0,58
		10	0,74
5b	441.100	5	0,56
		9,1	0,77
6	441.150	7,3	0,81
		9,8	0,89
6	441.175	7,5	0,78
		10,7	0,87

Messung 06.06.2013			
Versuchsfeld	Querprofil	Uferabstand/ Abstand SP**	$V_m^*$
	[m]	[m]	[m/s]
7a1	441.225	11,6	0,95
		16,5	0,98
7a1	441.240	10,4	0,77
		16,5	0,99
7a2	441.260	9,5	0,69
		15	0,99
		20,2	1,00
7a2	441.275	9,1	0,77
		15,4	0,97
		21,3	1,24
7b	441.305	8,4	0,94
		11,6	0,88
7b	441.320	16,4	0,82
		9,1	0,88
7b	441.320	17,3	1,12
		10,7	0,86
7c	441.345	16,9	1,00
		10,8	0,93
7c	441.355	17,2	0,93
		8,3	0,89
8	441.375	11,3	0,84
		16,3	1,18
8	441.420	10,7	0,75
		15,3	1,02
9	441.500	14,6	0,83
9	441.550	12,9	0,88
		16,7	1,01
9	441.575	17,1	0,96
		19,8	1,10
		22,2	1,22

\*  $V_m$ : über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten in Fließrichtung

\*\* SP: Schnittpunkt zwischen Wasserspiegel bei Marke I (NN+88,56m) und Ufer

Wasserstand während der Messung: AZW +4.40m

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		Geprüft	Fleischer	22.04.15
		Gezeichnet	Steidl	22.04.15
		Datei	A39520410151-MS-100.cdr	
Maßstab		 <b>Bundesanstalt für Wasserbau</b> Kompetenz für die Wasserstraßen		
-				

**Versuchsstrecke Rhein**  
**Strömungsgeschwindigkeiten,**  
**punktuell in Querprofilen**  
**gemessen 06.06.2013**

Auftrags-Nr.

**A39520410151**

Anlagen-Nr.

**3.1**

Messung 11.06.2013			
Versuchsfeld	Querprofil [m]	Uferabstand/ Abstand SP** [m]	$V_m^*$ [m/s]
1	440.672	7,00	0,35
		13,60	0,76
1	440.690	6,30	0,51
		14,50	0,81
1	440.737	6,00	0,36
		16,20	0,67
2	440.845	8,90	-0,03
		19,80	0,88
2	440.850	9,30	0,00
		19,40	0,88
3	440.910	6,60	0,03
		10,70	0,28
		18,50	0,87
		22,50	1,08
3	440.925	7,20	0,13
		11,70	0,43
		17,70	0,66
		22,00	1,06
4	440.960	4,70	0,24
		9,70	0,60
		15,80	0,96
4	440.975	14,60	0,79
5a	441.025	4,50	0,22
		8,40	0,53
		15,80	0,91
5a	441.050	3,60	0,24
		7,40	0,66
		14,90	0,79
5b	441.075	4,30	0,41
		7,00	0,61
		13,50	0,54
		17,70	1,01
5b	441.100	8,60	0,56
		12,50	0,58
		20,00	1,19
6	441.150	4,10	0,48
		7,90	0,64
		16,00	0,89
6	441.175	3,20	0,32
		6,40	0,53
		14,40	1,05

Messung 11.06.2013			
Versuchsfeld	Querprofil [m]	Uferabstand/ Abstand SP** [m]	$V_m^*$ [m/s]
7a1	441.225	5,60	0,37
		9,10	0,59
		17,80	0,73
7a1	441.240	21,30	0,84
		4,60	0,35
		8,40	0,61
7a1	441.240	18,50	0,86
		5,30	0,38
		8,60	0,64
7a2	441.260	18,50	0,86
		6,20	0,60
		10,10	0,58
7a2	441.275	18,30	0,94
		5,00	0,66
		9,40	0,67
7b	441.305	19,10	0,96
		6,10	0,61
		10,60	0,66
7b	441.320	19,40	1,04
		5,60	0,41
		9,40	0,61
7c	441.345	20,40	0,97
		5,10	0,49
		8,90	0,55
7c	441.355	19,70	0,94
		5,60	0,63
		9,00	0,70
8	441.375	19,20	0,94
		6,20	0,30
		9,50	0,74
8	441.420	20,80	1,17
		6,10	0,27
		9,70	0,65
9	441.500	18,30	0,89
		4,40	0,34
		9,70	0,58
9	441.550	15,80	0,90
		20,00	1,02
		10,70	0,56
9	441.575	13,80	0,80
		21,90	0,98

\*  $V_m$ : über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten in Fließrichtung

\*\* SP: Schnittpunkt zwischen Wasserspiegel bei Marke I (NN+88,56m) und Ufer

Wasserstand während der Messung: AZW +4.40m

Geändert	Datum	Bearbeiter	Fleischer	Datum
.		Geprüft	Fleischer	22.04.15
		Gezeichnet	Steidl	22.04.15
		Datei	A39520410151-MS-100.cdr	
Maßstab				
-				

**Versuchsstrecke Rhein**  
**Strömungsgeschwindigkeiten,**  
**punktuell in Querprofilen**  
**gemessen 11.06.2013**

Auftrags-Nr.

**A39520410151**

Anlagen-Nr.

**3.2**