

Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Dipl.-Geoökol. Robert Leimkühler

Methodenentwicklung und Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit im Taubergießen bei Überflutungen



Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg im Breisgau, Dezember 2012

Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Dipl.-Geoökol. Robert Leimkühler

**Methodenentwicklung und Quantifizierung der
Fließgeschwindigkeit im Taubergießen bei Überflutungen**

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler
Koreferent: Dr. Roman Weichert

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg im Breisgau, Dezember 2012

"So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muß sie für fertig erklären,
wenn man nach Zeit und Umständen das Mögliche getan hat."
Johann Wolfgang von Goethe (1749 - 1832)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	XI
Extended summary	XII
Danksagung.....	XIII
Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen.....	XIV
Vorwort	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Forschungsfrage.....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.3 Sicherheitsvorkehrungen	1
2 Das Untersuchungsgebiet Taubergießen.....	2
2.1 Geographische und Naturräumliche Einordnung.....	2
2.2 Klima	5
2.3 Geologie	6
2.4 Böden	6
2.5 Wasserregime und Gewässernetz	7
2.6 Anthropogene Veränderung des Rheinabschnittes und Hochwasserereignisse der letzten Jahre	8
2.7 Revitalisierungsprojekt Taubergießen	9
3 Theoretische Grundlagen	12
3.1 Fließgeschwindigkeit- und Abflussmessung	12
3.2 Magnetisch-induktive Strömungssonde (MID).....	14
3.2.1 Funktionsweise	14
3.2.2 Messgenauigkeit	16
3.3 Karbonfiberstäbe	16
3.3.1 Materialeigenschaften.....	16
3.4 Auf einzelne umströmte Körper wirkende Strömungskräfte	17
4 Methoden und Vorgehensweise.....	18
4.1 Karbonfiberstabmethode	18
4.2 Referenz- und Querprofilmethode	20
4.3 Optische Verfolgung von treibenden Objekten.....	22
4.4 Erfassung des Wasserstandes.....	22
4.5 Kalibrierung und Vorversuch	23
4.5.1 Trockenkalibrierung.....	23
4.5.2 Vorversuch	25
4.5.3 Nasskalibrierung	26
4.6 Bestimmung des Elastizitätsmoduls	26
4.7 Plotaufbau.....	28
4.8 Auswertung der stationären Kameraaufnahmen.....	31
4.9 Widerstandsberechnung von umströmten Körpern	34
4.9.1 Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten aus Stabauslenkungen	36

5	Ergebnisse	38
5.1	Aufgetretene Hochwasserereignisse	38
5.1.1	Überflutungsdauer.....	38
5.1.2	Fließrichtung und Überflutungshöhen	39
5.2	Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit anhand von Karbonfaserstäben in Abhängigkeit der Wassertiefe.....	42
5.2.1	Trockenkalibrierung und Vorversuch	42
5.2.2	Nasskalibrierung	45
5.2.3	Elastizitätsuntersuchung.....	46
5.2.4	Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 1 bis 5	47
5.2.5	Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 6	47
5.2.6	Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 7	52
5.2.7	Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 8	54
5.3	Querprofilmessungen	55
5.3.1	Plot 1+4	55
5.3.2	Plot 2	55
5.3.3	Plot 3	56
5.3.4	Plot 5	57
5.3.5	Plot 6	58
5.3.6	Plot 7	59
5.3.7	Plot 8	61
5.4	Stöckchenmethode und Beobachtung von treibenden Objekten.....	62
5.5	Fließgeschwindigkeiten in den Breschen.....	63
5.5.1	Maßnahme 5.....	63
5.5.2	Maßnahme 1.....	66
5.6	Fehlerbetrachtung	66
6	Diskussion	69
6.1	Kalibrierung und Elastizitätsmodul	69
6.1.1	Trockenkalibrierung.....	69
6.1.2	Nasskalibrierung	70
6.1.3	Bestimmung des Elastizitätsmoduls	70
6.2	Untersuchungsflächen	70
6.2.1	Gewähltes Aufnahmeintervall	73
6.2.2	Referenzmethode	73
6.3	Ermittlung der Fließgeschwindigkeit aus Auslenkung und -winkel	73
6.4	Vergleich der Messdaten mit modellierten Daten des Hochwassermodells FlowMod	74
6.5	Verbesserungsvorschläge für Versuchsaufbau und Softwareprogrammierung	74
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	75
7.1	Ergänzender Forschungsbedarf	76
8	Nachwort.....	77
	Literaturverzeichnis	78
	Anhang A.....	83
	Abflussdaten und -ganglinien an Pegeln	83

Anhang B	87
Elastizitätsmodul	87
Kalibrierung der Schwimmkörper unter Trockenbedingungen	88
Anhang C	91
Steckbriefe der Untersuchungsflächen	91
Plot 1	91
Plot 2	92
Plot 3	93
Plot 4	94
Plot 5	95
Plot 6	97
Plot 7	99
Plot 8	100
Karten Plotskala	103
Abstandsschemata der acht Plots	111
Anhang D	112
Auslenkung Karbonfiberstäbe	112
Hochwasserimpressionen Taubergießen	114

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1: Lageplan des Taubergießen und der eingerichteten Messstandorte. Karteninformation: OpenStreetMap, Naturschutzgebiete Baden-Württembergs. Kartenprojektion: WGS 84.	4
Abbildung 2: Klimadiagramm für die Region des Taubergießen (nach Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2009)).....	5
Abbildung 3: Vertiefung des Rheinbetts und die damalige Absenkung der Wasser- stände im Rhein zwischen 1828 und 1950 (aus RAABE 1968).	8
Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Lageplan des 2007 realisierten Revitalisierungs- projektes Taubergießen (Stand Mai 2006). Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung Umwelt, Referat 56 "Naturschutz, Landschaftspflege".	11
Abbildung 5: Vereinfachung von räumlich und zeitlich variablen Fließgeschwindig- keiten zu einem repräsentativen gemittelten Wert für den Gesamtquerschnitt am Beispiel eines Vorfluters (nach Zanke 2002).	12
Abbildung 6: Magnetisch-induktives Messprinzip (Bonfig 2002, aus Morgenschweis 2010).	15
Abbildung 7: Messprinzip einer magnetisch-induktiven Strömungs-sonde (verändert nach Morgenschweis 2010).	15
Abbildung 8: Umströmung einer Kugel mit einer idealen Flüssigkeit (links) sowie unter Reibungsverlusten und Wirbelbildung einer realen Flüssigkeit wie zum Beispiel Wasser (rechts) (aus Zanke 2002).....	17
Abbildung 9: Tauchstab nach Jens (aus Morgenschweis 2010, nach Pegelvorschrift, Anl. D 1991).....	19
Abbildung 10: Grafische einer Abflussmessung mit Geschwindigkeits- und Abflussfläche. Geschwindigkeitsprofil und Zweipunktmessung einer Messlotrechten (nach Maniak 2000).	21
Abbildung 11: Untersuchungsfläche Standort 2 in unüberflutetem Zustand mit auf- gestelltem Zollstock und Karbonfiberstäben (unten Mitte) sowie gespannter Querprofileine.....	23
Abbildung 12: Prinzipskizze der Trockenkalibrierung.	24
Abbildung 13: Versuchsanordnung abgewandelter Zugversuch unter Trocken- bedingungen (links Schema, rechts Foto).	25
Abbildung 14: Versuchsanordnung im Zugversuch.....	26
Abbildung 15: Luftbildübersicht Standort eins bis vier im Nordosten des Taubergießen in der Nähe des äußeren Hochwasserschutzdamms (Quelle: Google Earth, verändert).	29
Abbildung 16: Versuchsaufbau an Plot 6 (links) und Querprofilansicht an Plot 7 im Überflutungszustand (rechts) (Aufnahmen vom 17.06. und 03.07.2012).	30
Abbildung 17: Übersicht über die Stabstandorte an Plot 7.	31
Abbildung 18: An den Zollstöcken abgelesene Wasserstände im Stunden-Intervall an den Plots eins bis vier im Zeitraum 13.06. bis 16.06.2012.	41
Abbildung 19: An den Zollstöcken abgelesene Wasserstände im 10-Minuten-Intervall an den Plots fünf und sechs im Zeitraum 12.06. bis 07.07.2012.....	41

Abbildung 20: Am Zollstock abgelesene Wasserstände im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03.07. bis 11.07.2012.....	41
Abbildung 21: An den Zollstöcken abgelesene Wasserstände im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben und acht im Zeitraum 01.09. bis 03.09.2012.	42
Abbildung 22: Am Zollstock und an Karbonfiberstäben täglich abgelesene Wasserstände an Plot acht im Zeitraum 29.06. bis 13.09.2012 mit Darstellung der Hochwasserwelle vom 02.09.2012.....	42
Abbildung 23: Korrelation zwischen Zugkraft und Auslenkung bei der Trockenkalibrierung.	43
Abbildung 24: Korrelation von SK-Niveau und Auslenkungswinkel in Abhängigkeit der horizontalen Zugkraft F_z mit aus der Nasskalibrierung (s. Kapitel 5.2.2) erhobenen extrapolierten Fließgeschwindigkeiten.....	44
Abbildung 25: Korrelation von horizontaler Auslenkung und Fließgeschwindigkeit bei verschiedenen SK-Niveaus.	45
Abbildung 26: Verhältnis zwischen den Größen Zugkraft und Durchbiegung zur Ermittlung des E-Moduls.....	46
Abbildung 27: Am 16. Juni im 10-Sekunden-Intervall aufgenommene Auslenkungen der Karbonfiberstäbe an Plot sechs.	48
Abbildung 28: Am 16. Juni im 10-Sekunden-Intervall aufgenommene Fließgeschwindigkeiten der Karbonfiberstäbe an Plot sechs.....	49
Abbildung 29: Auslenkungen der Karbonfiberstäbe im 10-Minuten-Intervall an Plot sechs im Zeitraum 17. - 18.06. (oben), 19. - 20.06. (Mitte) und 04. - 07.07.2012 (unten)..	50
Abbildung 30: Mittels Karbonfiberstabmethode berechnete Fließgeschwindigkeiten im 10-Minuten-Intervall an Plot sechs im Zeitraum 17. - 18.06. (oben), beziehungsweise im 30-Minuten-Intervall im Zeitraum 19. - 20.06. (Mitte) und 04. - 07.07.2012 (unten).	51
Abbildung 31: Korrelation Abfluss zur Auslenkung an Plot sechs zu den FLO-MATE-Messzeiten.	52
Abbildung 32: Horizontale Auslenkung der Karbonfiberstäbe im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03. - 08. Juli.....	53
Abbildung 33: Auslenkungswinkel der Karbonfiberstäbe im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03. - 08. Juli.	53
Abbildung 34: Berechnete Fließgeschwindigkeiten an den Karbonfiberstäben im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03. - 08. Juli.	54
Abbildung 35: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen an Querprofil Plot 1+4 (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).	55
Abbildung 36: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen (Querprofil Plot 2, zehnfach überhöht).	56
Abbildung 37: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen am Querprofil Plot 3	56
Abbildung 38: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen am Querprofil Plot 5	57

Abbildung 39: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten am Querprofil Plot 6 an den angegebenen Tagen (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).	59
Abbildung 40: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten am Querprofil von Plot 7 an den angegebenen Tagen (Maßstab 1:100, fünffach überhöht).	60
Abbildung 41: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten am Querprofil von Plot 8 an den angegebenen Tagen (Maßstab 1:100, fünffach überhöht).	61
Abbildung 42: Überflutungsereignisse in der Hausgrundkehle am 03.07. sowie 01.09.2012.	61
Abbildung 43: Boxplots der Fließzeiten der in Videos an Plot 6 verfolgten treibenden Objekte (aufgeteilt in Haupt- und Nebenarm).	62
Abbildung 44: Boxplots der passiven Geschwindigkeit der in Videos an Plot 6 verfolgten treibenden Objekte (aufgeteilt in Haupt- und Nebenarm)..	63
Abbildung 45: Überflutete Bresche (M5) im Tulla'schen Damm in der Nähe des Restrheins (Aufnahme vom 11.06.2012 15:35 Uhr).	65
Abbildung 46: Boxplot der ermittelten Auslenkung in der Bresche, ausgehend von Standfotos aus dem Video HDV_0464.	65
Abbildung 47: Betrachtung eines Fixpunktes über den Tagesverlauf am Beispiel der 60 cm-Marke am Zollstock Plot sieben. Je höher die Bildkoordinate, desto höher ist die Kameraneigung.	67
Abbildung 48: Vollkommen ausgelenkte Stäbe mit verfangenem Geschwemmsel an Plot 7 in der Nähe des Leopoldskanals. Blick von der stationären Kamera.	72
Abbildung 49: Grundwassermessstelle Nr. 22/067-5 als Teil des Grundwassermessnetzes des Regierungspräsidiums Freiburg. Der Lattenpegel im Hintergrund zeigt einen hohen Wasserstand an (links), Überflutete Furt der ehemaligen Rheinstraße an der Hausgrundkehle (Mitte). Rückwärtiger Blick auf vorige Brücke (rechts).	77
Abbildung 50: Überströmte Wegbrücke in der Nähe des Leopoldskanals (links), überflutete Grabenstruktur an der Langgrienquelle (Mitte) und Überflutete nördliche M1 (rechts).	77

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 1:	Kenndaten und Übersicht zur regionalen und standörtlichen Gliederung (nach PISOKE 2000, verändert).....	2
Tabelle 2:	Höchste Hochwasserabflüsse am Pegel Basel/Rheinlandhalle im Zeitraum 2004 bis 2009 (nach DGJ).....	7
Tabelle 3:	Statistische Jährlichkeiten (T_n) von Hochwasser am Pegel Basel/Rheinlandhalle (nach HVZ).....	7
Tabelle 4:	Spezifikationen der verwendeten Schwimmkörper und Muttern.	19
Tabelle 5:	Aufnahmebeginn der verwendeten Digitalkameras mit installierten Karbonfaserstäben.	28
Tabelle 6:	Wichtige Kenndaten Versuchsaufbau aller Untersuchungsflächen.	29
Tabelle 7:	Verwendete Tage ohne Überschwemmung für die Nulllage.	32
Tabelle 8:	Beobachtete Überflutungszeiten der einzelnen Untersuchungsflächen. Nächtliche Aufnahmen sind aus technischen Gründen nicht möglich.	39
Tabelle 9:	Vorversuch am 08.06.2012 in näherer Umgebung der Nieper Kühlen (Neukirchen-Vluyn).	44
Tabelle 10:	Gemessene Fließgeschwindigkeiten und Zugkräfte während der Nasskalibrierung.	46
Tabelle 11:	Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten am Querprofil Plot fünf (Nummerierung s. Abbildung A 17).	57
Tabelle 12:	Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten am Querprofil Plot sechs.	59
Tabelle 13:	Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten am Querprofil Plot sieben.	60
Tabelle 14:	gestoppte oder rekonstruierte mittlere Objektgeschwindigkeiten anhand von Fließstrecken.	62
Tabelle 15:	Durchgeführte hydrometrische Messungen im M5.	64
Tabelle 16:	Über die Stöckchenmethode ermittelte Fließgeschwindigkeit im M5.....	64

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abbildung A 1: Abfluss- und Wasserstandsganglinie am Pegel Basel/Rheinlandhalle im Zeitraum 02.06. bis 11.07.2012 (Bundesamt für Umwelt, Schweiz).	84
Abbildung A 2: Abfluss- und Wasserstandsganglinie am Pegel Basel/Rheinlandhalle im Zeitraum 02.08. bis 10.09.2012 (Bundesamt für Umwelt, Schweiz).	85
Abbildung A 3: Abflussganglinie am Pegel Riegel/Leopoldskanal im Zeitraum 01.06. .bis 31.07.2012 (Quelle: Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)).	86
Abbildung A 4: Aufsicht und Innenansicht Versuchsaufbau für die Elastizitätsuntersuchung; die notwendige Zugkraft bewirkt ein höhenverstellbares Waagschalengewicht.	88
Abbildung A 7: Übersichtsfoto Plot 3.	94
Abbildung A 9: Übersichtsfoto Plot 5.	96
Abbildung A 10: Versuchsaufbau Plot 6.	98
Abbildung A 11: Übersichtsfoto Plot 7.	100
Abbildung A 12: Übersichtsfoto Plot 8.	101
Abbildung A 13: Standortkarte Plot 1.....	103
Abbildung A 14: Standortkarte Plot 2 im Maßstab 1:100 (oben), stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 13.06.2012.	104
Abbildung A 15: Standortkarte Plot 3 im Maßstab 1:100; stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 14.06.2012.	105
Abbildung A 16: Standortkarte Plot 4 im Maßstab 1:100 (oben); stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 14.06.2012 (unten).....	106
Abbildung A 17: Standortkarte Plot 5 im Maßstab 1:100 (oben); stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 14.06.2012 (unten).....	107
Abbildung A 18: Standortkarte Plot 6 im Maßstab 1:70 (rechts); stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 16.06.2012 (links).	108
Abbildung A 19: Standortkarte Plot 7 im Maßstab 1:100 (oben); stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 03.07.2012 (rechts).	109
Abbildung A 20: Standortkarte Plot 8 im Maßstab 1:100; stationäre Aufnahme des Plots im Normalzustand.....	110
Abbildung A 21: Abstände zwischen Stäben, Zollstöcken und deren Entfernung zu den einzelnen stationären Kameras an Plot eins bis acht.	112
Abbildung A 22: Zwei aufgestellte KFS im M5 ohne SK und Lüsterklemme.....	114
Abbildung A 23: Hauptanströmrichtung Plot 6 auf die Karbonfaserstäbe.	114
Abbildung A 24: Überfluteter ehemaliger Forstweg, über den das Hochwasser auf mehreren Pfaden zu Plot 6 fließt..	114
Abbildung A 25: Nahaufnahme des Nebenarms an Plot 6	114
Abbildung A 26: Ehemaliger Plot 8 in der Nähe des Herrenkopfweges an einem Tümpel.	
115	
Abbildung A 28: Überflutete nördliche Bresche am Leopoldskanal.	115
Abbildung A 29: Langsam infiltrierendes Hochwasser an Plot 7 nach Überflutungsereignis mit Graureiher zwischen den beiden Zollstöcken.	115

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tabelle A 1: Provisorische Abflussdaten des amtlichen Pegels Basel/Rheinlandhalle für den Zeitraum Januar bis August 2012. Quelle: Bundesamt für Umwelt (Schweiz), Abteilung Hydrologie, Bern.	83
Tabelle A 2: Elastizitätsuntersuchung einiger Karbonfiberstäbe im Zugversuch (Tabelleninhalt in N).	87
Tabelle A 3: Streubreite einiger Karbonfiberstäbe im Durchmesser und in der Grundfläche.	87
Tabelle A 4: Trockenkalibrierung des kleinen Schwimmkörpers zwecks Messung der Zugkraft.	88
Tabelle A 5: Trockenkalibrierung des großen Schwimmkörpers zwecks Messung der Zugkraft.	89
Tabelle A 6: Auslenkungswinkel (Abweichung aus der Nulllage) der Karbonfiberstäbe bei bestimmten Zugkräften in Abhängigkeit des Angriffspunktes.	90
Tabelle A 7: Aufgenommene Videos an den Untersuchungsflächen.	102
Tabelle A 8: Auslenkung linker KFS ohne SK (Standbilder aus Videoaufnahme HDV_0464, 11.06.2012).	112
Tabelle A 9: Auslenkung linker KFS mit großem SK (Standbilder aus Videoaufnahme HDV_0464, 11.06.2012, 49 Sekunden nach Aufnahmebeginn).	113

Zusammenfassung

Sehr häufig basieren Hochwassermodelle in Hinblick auf das überflutete Vorland noch auf modellinternen kalibrierten Parametern, welche Hochwasserereignisse über die Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung beschreiben. Insofern sind modellierte hydrometrische Kenngrößen mit hohen Ungenauigkeiten behaftet.

Bislang sind nur wenige hydrometrische Messungen in den Überflutungsgebieten, wie sie Flussauen darstellen, durchgeführt worden. Der Einsatz von mobilen ADCP (Acoustic Current Doppler Profiler) brachte leider nicht den gewünschten Erfolg. Eine Alternative könnte die Nutzung von verankerten dünnen Karbonfiberstäben mit annähernd ein Meter Länge basierend auf der Umkehrung des Drehmomentwaagenprinzips sein, wie sie der Tauchstab nach Jens anwendet, in Kombination mit magnetisch-induktiven Strömungssonden als Referenz darstellen, um Messdaten für Hochwassermodelle zur Verfügung zu stellen. Als Vorfluter wird der Oberrhein und als Untersuchungsgebiet der rechtsrheinisch gelegene Taubergießen ausgewählt. An insgesamt acht verschiedenen Untersuchungsflächen (Plots) werden Fließgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Hierfür kommen ein tragbares Strömungsmessgerät nach dem magnetisch-induktiven Messprinzip (FLO-MATE Model 2000 der Firma Marsh-McBirney) sowie in definierter zeitlicher Abfolge von stationären Digitalkameras fotografierte, von der Strömung erfasste Karbonfiberstäbe als passive, automatisierte Messmethode zum Einsatz. Zudem werden auf den Untersuchungsflächen Hochwasserabflussmessungen anhand von Querprofilen unter Anwendung der Ein- und Zweipunktmethode vorgenommen. Für die Auswertung von Digitalfotos aus stationären Kameras wird die frei verfügbare Software GIMP (GNU Image Manipulation Program) verwendet. Werden die im Gelände aufgestellten Karbonfiberstäbe vom Hochwasser erfasst, setzen sie der Strömung einen Widerstand entgegen, der durch übergestülpte Schwimmkörper verstärkt wird. Über in regelmäßigen Abständen festgehaltene Auslenkungen der Karbonfiberstäbe in Abhängigkeit der Überflutungshöhe und der durch die Strömung ausgeübten Druckkraft lassen sich Rückschlüsse auf die momentanen Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen ziehen. Schließlich werden die Messergebnisse mit den beim Regierungspräsidium Freiburg (i. Br.) verwendeten Hochwassersimulationsmodell FlowMod erzeugten modellierten Fließgeschwindigkeiten und Überflutungshöhen für die kleinräumige Umgebung der Untersuchungsflächen verglichen.

Schlagwörter

Rheinhochwasser; Auwald; Fließgeschwindigkeit; Fließrichtung; Methodenentwicklung; Überflutungsfläche; Überflutungshöhe; Hydrometrie; Karbonfiberstab.

Extended summary

Very often flood models in relation to inundated forelands are still based on internal calibrated model parameters, which describes flood events via the components of the water management equation. Therefore available hydrometrical data have high inaccuracies.

Since today only a few hydrometrical measurements have been made in inundated forelands. Unfortunately using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) has proved unhelpful. One possible alternative solution could be use of thin carbon fibre bars of approximate one meter length, which have to be fixed onto the ground. Base on this method an inverted version of the "dive stick after Jens" is developed. The study area was located in the alluvial forest and natural reserve of Taubergießen, east of the Rhine. Eight different locations (plots) have been selected to measure flow velocities and runoff. Therefore the following equipment have been used: Magnetic inductive flow probe (FLO-MATE Model 2000 made by Marsh-McBirney), carbon fibre bars placed in the flow and automatically monitored by digital still interval cameras in continuous equal time distances. Additionally crosssection flood measurements were conducted in the study areas under using the one-point and two-point method. For the photo evaluation from digital still interval cameras, the Open-Source-Software GIMP (GNU Image Manipulation Program) is used. When the placed carbon fiber bars in the terrain are bended by the flood, they offer opposition to the flow, which is increased by two kind of small synthetic floats putted on the bars. On monitored deflections of the bars in regularly intervals in dependence of the inundation height and the thrust applied by the flow, conclusions into the current flow velocities and water heights can be read. Finally the results of measurement are compared with the modelled flow velocities und inundation heights calculated by the flood model "FlowMod", which is in use at the local regional authority in Freiburg (Breisgau).

Keywords

rhine floods, alluvial forests; flow velocity, flow direction; method developement; inundated area; inundation height; hydrometry; carbon fiber bar.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt:

Dr. Ulrike Pfarr (Referat 53.3 "Integriertes Rheinprogramm", Regierungspräsidium Freiburg) und Prof. Dr. Markus Weiler für die Vergabe dieses interessanten Themas. Dies ermöglichte mir erstmals ein Hochwasserereignis und damit die Wirkungen auf die umgestaltete (Rest-)Rheinaue im Taubergießen mitzuerleben.

Prof. Dr. Markus Weiler und Dr. Roman Weichert für die fachliche Betreuung dieser Arbeit und die Anstellung als Wihi zwecks Benutzung eines Institutsfahrzeuges.

Michael Georgi (Ramsar-Ranger-Oberrhein) für die Betreuung während der Geländearbeit. Er hatte immer ein offenes Ohr für mich und stand mir selbst nach Dienstschluss mit Rat zur Seite.

Dr. Stefan Pohl und Dipl. Hydrologe Jakob Garvelmann für die Benutzung von projekt-eigenen Digitalkameras inklusive passenden Gehäusen, erweiterten Akkus und Speicherkarten.

den Institutstechnikern Emil Blattmann und Lukas Neuhaus für ihre Geduld beim häufigen Ausleihen von FLO-MATE und Wathose.

meinem Vater Dipl.-Ing., Dipl.-Grad (FH) Hans-Gerd Leimkühler und dem Kapitän i. R. Richard Martz für die freundliche Zusammenarbeit im Hochwassergefahrengebiet.

Cand. Master of Science Michael Schwab für seine Hilfe beim Abbau der Messeinrichtungen.

dem Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Freiburg für die Erlaubnis meine Ausrüstung im ehemaligen Rheinwärterhaus unterzustellen und dort gegebenenfalls übernachten zu dürfen.

dem Referat 55 "Naturschutz, Recht" für die Befreiung von der Verordnung über das Naturschutzgebiet "Taubergießen" zum Befahren der Wege zwecks Transport von Gerätschaften für wissenschaftliche Untersuchungen.

meinem Bruder Dipl.-Ing. Harald Leimkühler für die Abstandskarten der Karbonfaserstäbe auf den verschiedenen Versuchsflächen.

Dipl.-Ing. Hans-Gerd Leimkühler fürs Korrekturlesen dieser Arbeit.

Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Abfluss oder Durchfluss	[m ³ /s]	Q
Arithmetisches Mittel		$\bar{x}$
Auflagebreite	[mm]	L
Biegung	[mm]	f
Dichte	[kg/m ³]	ρ
Druckkraft	[N]	F _w
Durchmesser	[mm]	d
Elastizitätsmodul	[N/mm ²]	E
Fläche	[m ²]	A
Fließgeschwindigkeit	[m/s]	V
Flusslänge	[km]	l _F
Geländehöhe über Meeresspiegel (Normal-Null)		m ü. NN
Geländeoberkante	[m. ü. M.]	GOK
Geographisches Informationssystem		GIS
Hochwasser-Vorhersage-Zentrale		HVZ
Hochwasser		HW
Höhe	[cm]	H
Jährlichkeit	[y]	T _n
Karbonfiberstab		KFS
Länge, Abstand	[m]	l
magnetisch-induktive Strömungssonde		MID
mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]	v _{mit}
mittlerer Abfluss	[m ³ /s]	MQ
Naturschutzgebiet		NSG
n-jährlicher ... Wasserstand	[cm]	W _n
n-jährlicher ... Abfluss	[m ³ /s]	Q _n
Pegel		P
Pegelnull		PN
Pegeloberkante	[m ü. M.]	POK
Reynoldszahl		Re
Rheinkilometer	[km]	Rh-km
Schwimmkörper		SK
Standardabweichung		S
Umfang	[m]	U
Videoaufnahmen		DSCF, HDV
Wassertiefe	[m]	h
Wasserstand	[m]	W
Zeit	[s, min, h, d, y]	t
Zugfestigkeit	[N/mm ²]	R _m
Zugkraft	[N]	F _z

Vorwort

Für mich war es wichtig in meiner zweiten Abschlussarbeit kein Simulationsmodell zu entwerfen, sondern selbständig Messungen in einer Umgebung vorzunehmen, die sonst nur wenige sozusagen hautnah miterleben. Diese ursprünglich mit dem Arbeitstitel "Methodenentwicklung und Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit in Poldern am Rhein bei Überflutungen" ausgeschriebene Masterarbeit hat mir direkt zugesagt, als es Anfang Januar darum ging, ein passendes Thema zu finden. In der Ausschreibung wurde vorgeschlagen, Tracermethoden (Salz und Fluoreszenz) sowie ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) zu verwenden, um die (kleinräumige) Variation der Fließgeschwindigkeitsverteilung zu ermitteln und damit die Tracerdurchgangskurve mit den Punktmessungen vergleichen zu können. Wegen praktischer und technischer Hindernisse konnte dies nicht umgesetzt werden. Das Regierungspräsidium Freiburg verwendet stationäre ADCP-Geräte, die im Boden versenkt werden und bei Überflutung des Geländes, im Gegensatz zu den mobilen Gerätschaften, von unten aus der Bewegung der Schwebfracht die Fließgeschwindigkeit berechnen.

Als das Untersuchungsgebiet des Taubergießen feststand, habe ich zunächst mit den örtlichen Förstern Kontakt aufgenommen und bei den zuständigen Behörden um Erlaubnis gefragt, mich im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit im Naturschutzgebiet abseits der Wege bei Hochwasser aufhalten zu dürfen. Dies stellte sich als komplizierter heraus als ich angenommen hatte. Um ein Fahrzeug auf den generell für den Verkehr gesperrten Wegen im Naturschutzgebiet nutzen und die Wege zu Fuß verlassen zu dürfen, bedurfte es einer naturschutzrechtlichen Befreiung gemäß §§ 78 und 79 des Naturschutzgesetzes (NatSchG) in Verbindung mit der betreffenden Schutzgebietsverordnung, die ich vom Regierungspräsidium Freiburg, Referat 55 erhalten habe.

Während meiner Geländearbeit im Sommer 2012 lernte ich den Ramsar-Ranger Michael Georgi kennen, der mir viel Hilfreiches über den Taubergießen als Naturschutzgebiet im Allgemeinen und bei Hochwasser im Speziellen erzählen konnte und als mein inoffizieller Betreuer vor Ort aus Sicherheitsgründen stets daran interessiert war, wo ich mich bei Hochwasser aufhielt. Glücklicherweise hat ein Hochwasserereignis am Oberrhein mit $2700 \text{ m}^3/\text{s}$ (gemessen am Pegel Basel/Rheinlandhalle) in der Spitze stattgefunden. Bei ausbleibender Hochwasserführung des Rheins hätte diese Arbeit nicht verfasst werden können.

1 Einleitung

Diese Masterarbeit wurde für das Regierungspräsidium Freiburg (Abteilung Umwelt, Referat Integriertes Rheinprogramm (53.3)) angefertigt.

1.1 Motivation und Forschungsfrage

Den Berechnungen der Hochwassermodelle liegen lediglich Modellparameter zugrunde, die den Gegebenheiten der Rheinhochwasser nachempfunden sind, sich jedoch nicht auf gemessene Werte der Fließgeschwindigkeit in den Überflutungsbereichen des Vorlandes stützen. Hierfür sind die meisten gängigen Erfassungsmethoden, welche in Fließgewässern angewendet werden, ungeeignet. Um die Fließgeschwindigkeiten im überfluteten Vorland annähernd quantifizieren zu können, werden aufgrund des Gefahrenpotentials von Hochwasserwellen automatisierte Methoden zur Erfassung entwickelt und während des Sommerhochwassers in der Rheinaue erprobt.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Zwar werden hydrologische Daten wie Wasserstände, Abfluss und Fließgeschwindigkeiten im Rahmen kontinuierlich fortgeschriebener Messprogramme routinemäßig erfasst (Tittizer & Krebs 1996, S. 353), allerdings existieren bislang keine Fließgeschwindigkeitsmessungen in Überflutungsgebieten bei Hochwasser, was die Genauigkeit der Berechnungen von Hochwassermodellen infrage stellt. Insofern kann nicht auf vorherige Messkampagnen zurückgegriffen werden.

Das Ziel dieser Masterarbeit besteht darin, Strömungsmessungen in der Oberrheinaue in einem Gebiet durchzuführen, in denen das vom Regierungspräsidium verwendete zweidimensionale Hochwassermodell "FlowMod" eine hohe Variation geringer Fließgeschwindigkeiten in der bewaldeten Aue ausgibt. Die gemessenen Fließgeschwindigkeiten werden schließlich mit den Modellergebnissen des zweidimensionalen Hochwassermodells zwecks Überprüfung der Überflutungsdynamik der Rheinaue Taubergießen (Stand: Mai 2003) verglichen.

Es wird befürchtet, dass in manchen Bereichen das Hochwasser nicht beständig abläuft und mehrere Tage existierende Tümpel zurücklässt, die Staunässeschäden an nicht angepassten, standortfremden Baumarten anrichten (Pfarr 2012).

1.3 Sicherheitsvorkehrungen

Für den Aufenthalt in Hochwassergefahrenbereichen wie sie rezente Auen darstellen, sind Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, um die Sicherheit der sich in ihnen bewegendenden Personen zu gewährleisten. Zum Einen muss bei starker Überflutung immer eine zweite Person anwesend sein, die im Falle eines Unfalls Hilfe holen oder verständigen kann. Zum Anderen sind beide Personen angehalten eine Schwimmweste tragen und ein Boot (Schlauchboot, Kanu etc.) an einer Leine mitzuführen. Auch ist es sinnvoll die zuständige Wasserschutzpolizeiwache (in diesem Fall die Dienststelle in Kehl) über den Aufenthalt im Gelände bei Hochwasser im Vorfeld zu informieren.

2 Das Untersuchungsgebiet Taubergießen

Die Kapitel 2.2 bis 2.4 lehnen sich an einen Forschungsbericht der Forstlichen Forschungs- und Versuchsanstalt Baden-Württemberg mit dem Titel *Die Waldstruktur im Bannwald des Taubergießen - eine Luftbilddauswertung im strukturreichen Auenwald* (Heft 22) an.

2.1 Geographische und Naturräumliche Einordnung

Tabelle 1: Kenndaten und Übersicht zur regionalen und standörtlichen Gliederung (nach PISOKE 2000, verändert).

Region	Mittlerer und südlicher Oberrhein / Oberrheinische Tiefebene
Hydrologische Gliederung	Furkationszone
Regionalwald	Planarer eschenreicher Übergangswald und Eschen-Stieleichen-Mischwald
Landkreis	Ortenau, Emmendingen
Gemarkung	Kappel-Grafenhausen, Rheinhausen, Rhinau (Frankreich), Rust
Schutzstatus	Naturschutzgebiet (seit 1979) mit Bann- und Schonwäldern (seit 1986)
Höhenlage [m NN.]	156 - 166 m
Jahresmitteltemperatur	9,9° C
Mittl. Jahresniederschlag	ca. 700 mm
Klima	Übergangsbereich gemäßigt-ozeanisch - submediterran
Geologie	alluviale Sedimente v. a. alpiner Herkunft
Substrat	kalkreiche und fluviatil sortierte Ablagerungen der Körnung Feinlehm, Sand und Kies
Bodentyp	Kalkauböden, v.a. Auenrohböden, Auenrendzinen, Auenpara- rendzinen und Auengleye
Rheinkilometer	252 - 263

Die Fließgeschwindigkeitsmessungen beschränken sich auf das rechtsrheinische Naturschutzgebiet (NSG) Taubergießen, welches in der südlichen Oberrheinebene nördlich des Kaiserstuhls in der Rheinauenniederung zwischen dem Mündungsbereich des Leopoldskanals und dem bei Rhinau gelegenen Baggersee gelegen ist. Die Abgrenzungen des Taubergießens mit einer West-Ost-Ausdehnung von 1-2 km bildet nach Westen der Restrhein, nach Osten der Waldrand. Das NSG umfasst neben bewirtschaftetem Grünland hauptsächlich Restbestände der standortangepassten Auwälder und ist mit vielen Schluten (Altarmen) durchzogen. Die Waldflächen des Taubergießens sind überwiegend in Besitz der Gemeinden Rhinau (französisch), Kappel-Grafenhausen, Rust und Rheinhausen (von Norden nach Süden). Mit einer Ausdehnung von 1681 ha stellt er einen der wenigen erhalten gebliebenen zusammenhängenden Auwäldern der mitteleuropäischen Flusslandschaften dar (PISOKE 2000). Ausgewiesen wurde der Taubergießen 1955 als Landschaftsschutzgebiet und schließlich am 27.9.1979, nach der Unterzeichnung der Verordnung durch den damaligen Regierungspräsidenten Dr. Person, zum Naturschutzgebiet erklärt.

Naturräumlich zählt der Taubergießen zur etwa 300 km langen und durchschnittlich 40 km breiten oberrheinischen Tiefebene, deren Existenz mit der Entstehung des Oberrheingrabens zusammenhängt. Von Basel auf 250 m ü. M. senkt sich die Tiefebene auf etwa 130 m ü. M. bis nördlich von Mainz ab (Gallusser & Schenker 1992).

Nach der hydrologischen Gliederung des Rheins liegt der Taubergießen innerhalb der 202 km langen (ehemaligen) Furkationszone des Oberrheins, die sich von Basel bis Karlsruhe mit einem durchschnittlichen Gefälle von 0,87 ‰ erstreckt. Die Haupt- und Nebenrinnen des Rheins waren natürlicherweise ständig in Umlagerung begriffen. In den Auen entwickelten sich zahlreiche unterschiedliche Gewässertypen wie perennierende Altarme, Druckwassertümpel, Kolke, Gießen und Moorgewässer (Tittizer & Krebs 1996). Das geringe Gefälle in der Rheinebene lässt regelmäßige Überschwemmungen zu. Die (Ober-) Rheinkorrektion nach den Plänen Johann Gottfried Tullas in der Mitte des 19. Jahrhunderts führte zu einer Gefällszunahme (Laufverkürzung: 81,8 km = 23 %), mit der eine Abflussbeschleunigung einherging. Dadurch kam es zu einer verstärkten Tiefen- sowie rückschreitenden Erosion des Rheins, infolge deren die Grundwasserstände sanken. Durch die Verkürzung des Flusslaufes und die Trockenlegung vieler Seitenarme am Oberrhein wurden die natürlichen Überschwemmungsflächen auf die Dammvorländer reduziert; mittlerweile sind nur noch 19,6 % der natürlichen Auenflächen erhalten geblieben (Tittizer et al. 1995, aus BFVNL 1975). Die Grundwasserstände sanken vielerorts mit der Trockenlegung soweit, dass die vom Hochwasser abgeschnittenen Baumarten der Auenflächen das Grundwasser nicht mehr erreichen konnten und die Hochwasser ausblieben, was in manchen Bereichen zu Austrocknungs- und Degenerationserscheinungen der Auenwälder führte (Lauterborn 1917). Als pflanzensoziologische Haupttypen der Überflutungsauere beziehungsweise prägende Waldgesellschaften geben Lohmeyer & Trautmann (1974) den Silberweidenwald, den Eichen-Ulmenwald und den Eichen-Hainbuchenwald an. Nähere Angaben können aus Piske (2000) entnommen werden.

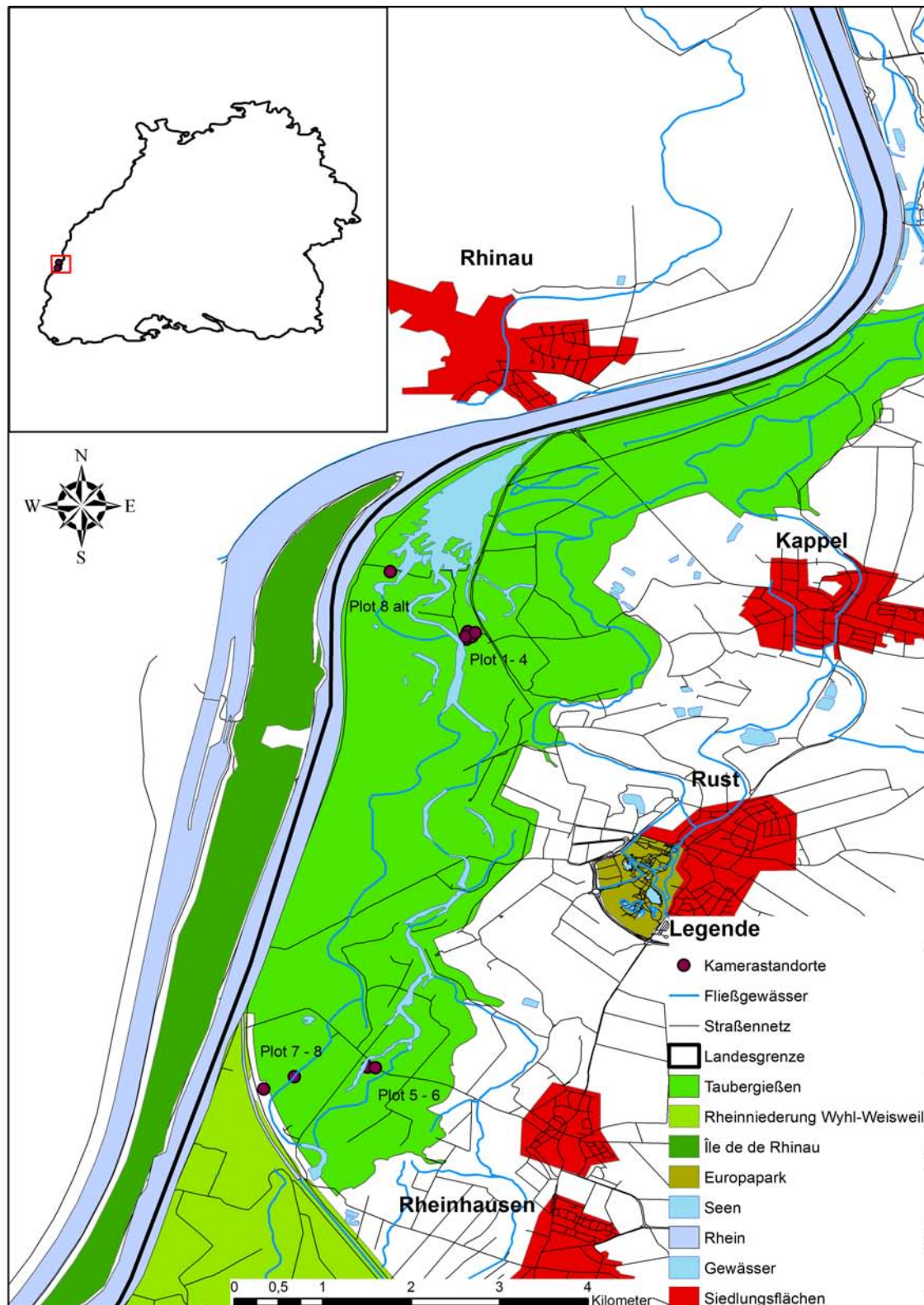


Abbildung 1: Lageplan des Taubergießen und der eingerichteten Messstandorte. Karteninformation: OpenStreetMap, Naturschutzgebiete Baden-Württembergs. Kartenprojektion: WGS 84.

2.2 Klima

Das regionale Klima der mittleren und südlichen Oberrheinebene ist geprägt durch die geographische Lage zwischen den quer zur Hauptwindrichtung verlaufenden Mittelgebirgen Vogesen und Schwarzwald. Atlantische Wetterfronten werden von den Vogesen abgebremst und zum Aufstieg gezwungen, wobei die Luftmassen einen großen Teil ihrer Luftfeuchtigkeit verlieren. Aus südwestlicher Richtung können Luftmassen aus dem Mittelmeerraum den Oberrheingraben nach Norden ziehen. So herrscht im Rheintal ein gemäßigt-warmes Klima vor (Pisoke 2000, S. 7). Bei der Gemeinde Rust östlich des Taubergießens und am Rand der Niederterrasse wird eine Jahresdurchschnittstemperatur von 9,8° C erreicht. Aufgrund von Kaltluftansammlungen sowie langsamerer Erwärmung des feuchten Auenbodens liegt sie im Naturschutzgebiet um 0,5 bis 1,0° C niedriger.

Als Jahresniederschlagsmenge werden 708 mm erreicht, wovon etwa 490 mm im Sommerhalbjahr fallen (Veres 1980). Der meiste Niederschlag fällt im Juni, am niederschlagsärmsten sind die Monate Januar und Februar. Mit durchschnittlich 0,3° C stellt der Januar den kältesten und mit 18,5° der Juli den wärmsten Monat im Jahr dar (Hügin 1962, Müller 1974). Mit 70 bis 80 Frosttagen (Tiefstwerte der Temperatur in 2 m Höhe unter 0° C) und 10 bis 20 Eistagen (Höchstwerte der Temperatur unter 0° C) sind die Winter im Bundesdurchschnitt als sehr mild und schneearm einzustufen. Auch die mittlere Zahl der Sommertage (Höchstwerte der Temperatur von mindestens 25° C) ist mit 40 bis 50 vergleichsweise hoch. Diese Daten stammen aus dem Klimaatlas Baden-Württemberg von 1953, welcher die Klimanormalperiode 1881 bis 1930 als Grundlage nimmt. Klimadaten aus der jüngeren Klimanormalperiode 1961 bis 1990 sind für den Taubergießen (FFH-Gebiet 7712-341) und die nähere Umgebung in Abbildung 2 dargestellt. In der Jahresniederschlagsverteilung lässt sich eine Verschiebung erkennen; so ist der Mai als niederschlagsreichster Monat anzusehen. Insgesamt ist im Jahresdurchschnitt ein Anstieg von 58 mm zu verzeichnen. Auch die Jahresdurchschnittstemperatur hat sich seitdem um 0,5° auf 10,3° C erhöht. Im Wasser- und Bodentatlas von Baden-Württemberg werden im Süden des Taubergießens 700 mm, im Nordosten dagegen 1.200 mm als jährliche Gebietsniederschlagshöhe und als jährliche Verdunstungshöhe 600 mm erreicht.

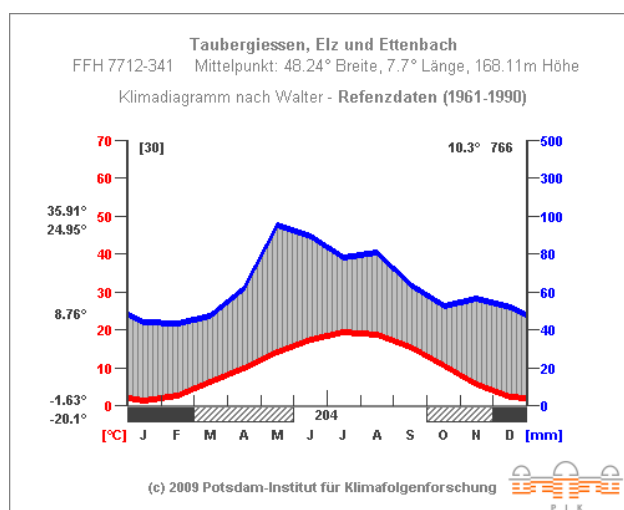


Abbildung 2: Klimadiagramm für die Region des Taubergießens (nach Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2009)).

2.3 Geologie

Großräumige tektonische Bewegungen der Erdkruste im Tertiär vor 45 Millionen Jahren, das anschließende zerbrechen und absinken von einzelnen Bruchstücken der Kontinentalscholle gelten als Ursache für die Grabenbildung am Oberrhein. Währenddessen hoben sich die Ränder dieser Bruchstücke auf beiden Seiten der Hauptbruchzone und formten die kristallinen Gebirgssockel der heutigen Mittelgebirge der Vogesen und des Schwarzwaldes. Seit dem Einsetzen der eiszeitlichen Klimaschwankungen vor 1,5 Millionen Jahren begann der Rhein eine bedeutende Vorflut für den Abfluss von Schmelzwasser der alpinen (Vorland-)gletscher zu werden und verfüllte im Laufe der Zeit die etwa 300 km lange und 40 km breite Oberrheinebene mit bis zu 380 m mächtigen Kiesablagerungen. Dies geschah hauptsächlich während der Kaltzeiten Mindel, Riß und Würm. In den Interglazialen schnitt sich der Rhein in die zuvor abgelagerten Sedimente ein (Schenker 1992). Infolge von häufigen Verlagerungen des Flussverlaufes bildete sich in der Gegend des Taubergießen eine drei bis fünf Kilometer breite Auenlandschaft. In seiner heutigen Erscheinungsform wird das Alter des Rheins mit maximal 500.000 Jahren und der Rheinauen mit etwa 8000 Jahren angegeben (Kutter & Späth 1993). Letztere bildeten sich zwar schon in den vorigen Interglazialen, wurden jedoch von Aufschotterungen in den nachfolgenden Kaltzeiten überdeckt. Die letzte Aufschotterungsphase fand in der Würm-Eiszeit vor etwa 20.000 bis 10.000 Jahren statt. Erst nach dem Abschmelzen der eiszeitlichen alpinen Gletscher zu Beginn des Holozäns konnte sich wieder eine Aue ausbilden.

2.4 Böden

Entsprechend des Rheineinzugsgebietes bilden mehrheitlich carbonatreiche Sedimente aus den Nördlichen Kalkalpen das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung. Im Bereich der Schwemmkegel der Mittelgebirgsflüsse kommen kristalline Sedimentanteile hinzu. Im Taubergießengebiet finden sich meist Variationen autentypischer Wechsellagerung variierender Korngrößenzusammensetzung mit scharfen Schichtungsgrenzen. Wichtige Faktoren für den Horizontaufbau sind die ehemalige Lage zum Talweg, die örtlich wechselnde Strömungsdynamik sowie die Verweildauer in Sedimentations- und Erosionszonen (für weiterführende Informationen s. Pisoke 2000 S. 14ff). Auensedimente bestehen aus übereinander geschichteten, in einer Talaue abgelagerten Hochwassersedimenten (Geyer & Gwinner 2011, S. 416). Folgende Bodentypen haben sich in der Rheinaue entsprechend der Karbonatserie ausgebildet, die unter dem Begriff Auensedimente zusammengefasst werden: Aus einem Auenrohboden / Kalk-Rambla entwickelt sich die Auenrendzina / Kalk-Paternia und schließlich der Braune Auenlehm / Auenpararendzina (Scheffer/ Schachtschabel 2002, S. 509). Ein Auenlehm bezeichnet "ein Bodenderivat aus Feinmaterial und Sanden, das durch Bodenabschwemmung im Einzugsgebiet zusammengetragen wurde" (LUBW 1999, S. 41). Geyer & Gwinner bezeichnen den Auenlehm als einen "meist braunen oder grauen tonigen Schluff mit wechselndem Sandgehalt" (S. 416). In Abhängigkeit der Jahresschwankung des Grundwasserstandes tritt auch Auengley auf. Alle Böden weisen eine gute Wasserdurchlässigkeit, hohe Basensättigung und aufgrund von Karbonatverwitterung frei verfügbaren Kalk auf. Deren geographische Verteilung hängen eng mit von der Fließdynamik des Rheins und seiner Nebengerinne (Altarme) zusammen, bevor die Rheinkorrektion im Taubergießengebiet von 1840 bis 1874 durchgeführt wurde (Pisoke 2000, Krause 1974). Mitgeführte Schweb- und Sedimentfrachten lagern sich während des absteigenden Astes von

Hochwässern in der Aue ab und bilden ein nährstoffreiches Sediment. (Gallusser & Schenker 1992).

2.5 Wasserregime und Gewässernetz

Jede Auenlandschaft weist variierende Überflutungsdauern auf und ist dadurch ein Stück einzigartig. Für das Abflussverhalten von Auen spielt das Wasserregime des jeweiligen Flusses mit seinem charakteristischen Wechsel von Hoch- und Niedrigwasser eine große Rolle. Ein wichtiges Ereignis im Wasserregime stellt die alljährliche Schneeschmelze im Einzugsgebiet dar, worauf Flüsse meist HW führen. Wann der Schnee zu schmelzen beginnt, hängt zum einen von der Klimazone und zum anderen von der Höhenlage im Einzugsgebiet des Flusses ab. So führen Hochgebirgsflüsse wie der Rhein häufig erst im Sommer zur Zeit der Schneeschmelze in den Alpen Hochwasser. Allerdings treten räumliche Unterschiede in der Ausprägung von Wasserstandsschwankungen auf. (Kutter & Späth 1993). Im Herbst und Winter werden in der Regel niedrige Mittelwasserstände (MW) des Rheins beobachtet, während im Frühjahr ansteigende Pegelstände und im Sommer die höchsten Werte registriert werden. Im Jahresverlauf treten im Januar die tiefsten Niedrigwasserabflüsse (NQ) auf und im Sommer in manchen Jahren vereinzelte HW-Abflüsse (HQ) von über 4000 m³/s (Lauterwasser & Hauck 1987). Als MW-Abfluss (MQ) gibt das Bundesamt für Umwelt (CH) am Pegel Basel/Rheinlandhalle 1060 m³/s für den Zeitraum 1931 bis 2000 und als 2-jährlichen HW-Abfluss 3160 m³/s an (HVZ 2012). Das HW-Ereignis in 2007 wird als etwa 100-jährlich angesehen (Misselwitz 2012). Historisch betrachtet waren in den letzten 60 Jahren die HW-Ereignisse von 1953, 1999 und 2007 von Bedeutung. Tabelle 2 zeigt beispielhaft die Abflusswerte der verschiedenen Hochwasserereignisse am Pegel Basel/Rheinlandhalle in den Jahren 2004 bis 2009 mit einem Einzugsgebiet von 35897 km².

Tabelle 2: Höchste Hochwasserabflüsse am Pegel Basel/Rheinlandhalle im Zeitraum 2004 bis 2009 (nach DGJ).

Datum	Q [m/s]	W [cm]	Hauptwert	Zeitraum
12.05.1999	5090	1058	HQ	1931 - 2007
14.01.2004	3080	855	HQ	2004
23.08.2005	3430	896	HQ	2005
10.04.2006	3460	899	HQ	2006
09.08.2007	4810	1034	HQ	2007
22.04.2008	3060	853	HQ	2008
18.07.2009	2980		HQ	2009

Tabelle 3: Statistische Jährlichkeiten (T_n) von Hochwasser am Pegel Basel/Rheinlandhalle (nach HVZ).

HW-Abfluss	W [m]	Q [m ³ /s]
2-jährlich	8,65	3160
10-jährlich	9,54	3980
20-jährlich	9,80	4240
50-jährlich	10,11	4560
100-jährlich	10,31	4780

2.6 Anthropogene Veränderung des Rheinabschnittes und Hochwasserereignisse der letzten Jahre

Nach der Tulla'schen Korrektur begannen viele verbliebene Altarme zu versanden und zu verschlickern (Tittizer und Krebs 1996, S. 29). Der Rhein hat auf dem Streckenabschnitt von Rhein-km 160 bis 250 (Schusterinsel bis Weisweil) bis 1950 seine Sohle in Bezug auf das Referenzjahr 1828 um bis zu knapp sieben Meter bei Rheinweiler fortlaufend erodiert. Im Abschnitt Weisweil bis Ottenheim dagegen ist ein Anstieg mit einem Maximum bei Rhinau (Rhinau) zu verzeichnen (Abbildung 3). Hier stieg der Rheinwasserstand um knapp einen Meter bis zum Jahr 1950 an. Als die sehr negativen landschaftshaushaltlichen Folgen vom Bau des Rheinseitenkanals sichtbar wurden, begannen verschiedene Interessengruppen ab etwa 1952 von den zuständigen französischen Behörden eine Überarbeitung der bisherigen Ausbaupraxis zu fordern. Dies mündete in den 1956 zwischen den BRD und der Republik Frankreich abgeschlossenen Luxemburger Verträgen, in denen anstatt des Weiterbaus des Rheinseitenkanals eine Schlingenlösung vereinbart wurde.

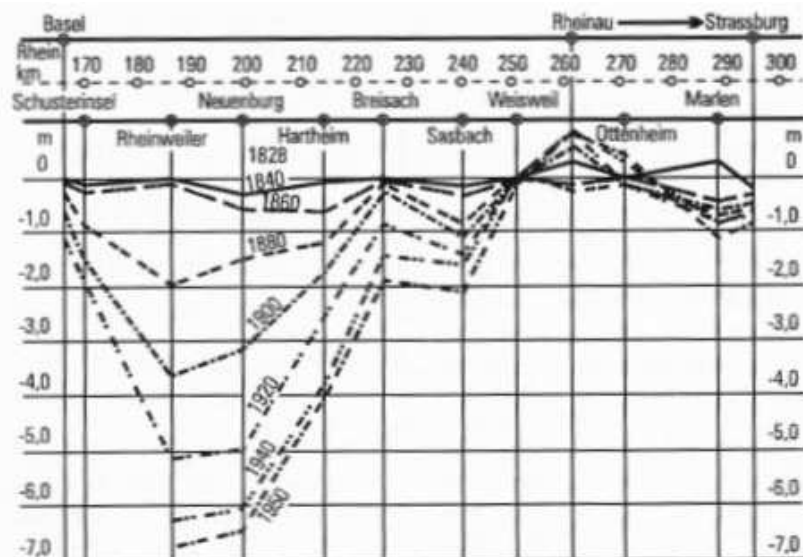


Abbildung 3: Vertiefung des Rheinbetts und die damalige Absenkung der Wasserstände im Rhein zwischen 1828 und 1950 (aus RAABE 1968).

Direkt westlich des Taubergießen wurde 1963 in deutsch-französischer Gemeinschaftsarbeit die Staustufe Rhinau und damit die Rhinauschlinge angelegt, um ein Laufwasserkraftwerk betreiben zu können. Als so genannte "Schlingenlösung" sollte ein Austrocknen der nahe gelegenen Auwälder wie am Rheinseitenkanal (Grand Canal d'Alsace) verhindert werden. Im Gegensatz zum Rheinseitenkanal besitzen die insgesamt vier angelegten Rheinschlingen keine verdichtete Sohle und ausbetonierten Uferbefestigungen, womit der Rhein seinen Grundwasserkontakt beibehält und der Grundwasserspiegel gehalten wird. Durch den Bau der Schlinge wird eine künstliche lang gestreckte Insel geschaffen, die den Namen Île de Rhinau (Insel Rhinau) trägt. Der entstandene Restrhein wird seit 1965 von Kulturwehren unterteilt, die als kulturbautechnische Maßnahmen den Grundwasserstand halten (TITTIZER & KREBS 1996, S. 33). Sie stellen feste Schwellen in Abständen von 1,7 - 3,0 km dar, welche eine vertraglich festgelegte Restwassermenge auf den gesamten Flussbettquerschnitt verteilen und den Wasserstand auf ein

mittleres Niveau vor dem Bau der Rhinauschlinge stabilisieren. Die nächstgelegenen Kulturwehre am Taubergießen sind die Niederhausener und die Ruster Sohlschwelle (Pisoke 2000, S. 19f).

Im Taubergießen wurde Mitte der 60er Jahre gleichzeitig zum Rheinausbau das Altrheinverbundsystem gebaut, um den Grundwasserstand zu stabilisieren und die ökologischen Verhältnisse zu verbessern. Beide Ansätze - die Schlingenlösung und das Altrheinverbundsystem - führten nicht zu der gewünschten Wirkung (Krause & Hügin 1987). Infolge des gleichmäßigen Abflusses und fehlender Niedrigwasserperioden war das angrenzende Bodenwasser nicht mehr in der Lage, in die Altarme zu gelangen (Pisoke 2000, S. 20). Zusätzlich wirkt sich der Rückstau insbesondere der rheinabwärts gelegenen, 1968 in Betrieb genommenen Staustufe Nonnenweier / Gerstheim (Rh-km 268,6) auf den nördlichen Teil des Taubergießen, insbesondere auf das Gebiet des Herrenkopfes aus. Somit entspricht er heute nicht mehr dem ursprünglichen "Badischen Dschungel" wie vor 200 Jahren, sondern stellt eine stark veränderte Restaue dar (Gallusser & Schenker 1992, S. 137). Von der Staustufe Weisweil bis zur Einmündung der Rhinauer Kanalschlinge in den Restrhein auf dem Wasserstandsniveau der Staustufe Nonnenweier / Gerstheim wird ein Höhenunterschied von etwa 12 Metern auf einer Strecke von 10 km zurückgelegt. Dies entspricht einem durchschnittlichen Gefälle von 0,12 % (von 172 auf 160 m ü. NN). Bei Mittelwasser leitet das Stauwehr Rheinau (Rh-km 249,2) einen Großteil des Rheinwassers in die Rhinauschlinge. In den Restrhein wird eine vertraglich festgelegte Mindestwassermenge von 30 bis 50 m³/s eingeleitet. Pisoke (2000) gibt dagegen als Mindestwassermenge 15 m³/s an, die an 65 Tagen im Jahr überschritten wird (S. 19). Führt der Rhein Hochwasser, wird der Kanal bis zu seiner Fassungskapazität von 1500 m³/s gefüllt und die überschüssigen Wassermassen durch ein Überlaufbauwerk an der Südspitze der Île de Rhinau in den Restrhein geleitet. Diese zusätzliche Wasserzufuhr führt in der Rheinaue zu Überschwemmungen. Im Juni dieses Jahres fand ein zweijährliches Hochwasserereignis mit einem Abfluss von schätzungsweise 2800 m³/s statt (s. Anhang A). Dieses Ereignis hat die meisten eingerichteten Messstandorte (Plots) im Auwald erreicht und zur Auslenkung von aufgestellten Karbonfaserstäben geführt.

2.7 Revitalisierungsprojekt Taubergießen

Nach der Begradigung durch Tulla besitzt der Oberrhein nur noch eine hochgradig "gedämpfte" natürliche Fließdynamik, was sich auf die verbliebenen noch intakten Auwälder negativ auswirkte. Bei der Ausweisung des Taubergießen als Schutzgebiet wiesen bereits die forstlichen Gutachter in Bezug auf die Entwicklung der Wälder auf die veränderten hydrologischen Verhältnisse hin, die durch den Ausbau des Rheins und die damit verbundenen Veränderungen der Waldgesellschaften verursacht würden (LAUTERWASSER & HAUCK 1987). Als Folge hatte sich mit der Zeit zunehmend organisches Feinmaterial in den Schluten abgelagert, woraufhin die heimischen Fischarten immer weniger geeignete Laichplätze fanden. Dies war der Grund für eine gemeinschaftlich von deutscher und französischer Seite durchgeführte und aus EU-Zuschüssen finanzierte Revitalisierung des Taubergießen und der Île de Rhinau, die im Jahr 2005 begonnen und 2007 fertig gestellt wurde (KAISER 2008). Tittizer und Krebs formulierten in ihrem 1996 erschienenen Buch über die Ökosystemforschung des Rheins und seiner Auen Maßnahmen zur Reaktivierung des Ökosystems Rhein/Rheinaue, wobei zum einen die hydrologischen Verhält-

nisse durch die Kombination von Renaturierung und Hochwasserschutz und zum anderen die Wiederherstellung der Kommunikation von Grund- und Oberflächenwasser durch regelmäßige Überflutungen verbessert werden sollen. Als Maßnahmen zur Verbesserung der morphologischen Verhältnisse empfahlen sie unter anderem die Aufhebung der Trennung von Fluss und Aue an geeigneten Standorten durch die Entfernung und Rückverlegung von Deichen sowie den Anschluss von Altarmen an das Gewässernetz. Dies wurde mit dem Revitalisierungsprojekt des Taubergießen umgesetzt.

Im Rahmen der Revitalisierung wurden Deichniederlegungen (Breschen) in die rechtsseitigen Uferdämme des Leopoldskanals und des Restrheins gegraben, neue Wasserarme geschaffen, stehende Gewässer wieder an fließende Schluten angeschlossen, direkte Verbindungen zwischen nahe gelegenen Schluten und dem Rhein hergestellt, sowie ein landseitiger Hochwasserschutzdamm rückverlegt. Die Deichniederlegungen erlauben ein Einlaufen des Leopoldskanals in den Taubergießen bereits ab einem Wasserstand von 1,40 m (Walser 2012). Führt der Rhein Hochwasser, so staut sich der Mündungsbereich des Leopoldskanals und das Rheinhochwasser gelangt ebenfalls von Süden in den Taubergießen. In den vergangenen Jahrzehnten überfloss der Restrhein im Mittel an sieben Tagen im Jahr den Tulla'schen Uferdamm, wobei das Wasser ausgehend von den festen Schwellen der Kulturwehre fächerförmig in die Aue floss. Außerhalb der Hochwasserzeiten ließen zwei regelbare Einlassbauwerke eine kontrollierte Einleitung von Rheinwasser zu, allerdings lässt sich diese Art der Wasserzufuhr in ihrer ökologischen Wirkung nicht mit einem Hochwasser vergleichen (Gallusser & Schenker 1992). Mit dem Anlegen von Deichniederlegungen wurden Überschwemmungen der rezenten Aue bei relativ geringem Wasserstand ermöglicht. Besonders die zwei entstandenen Breschen entlang des Leopoldskanals sowie eine Bresche im Leinpfad entlang des Restrheins führen zu häufigeren Hochwasserereignissen im Auenwald. Hier werden ebenso wie in den Untersuchungsflächen nach Möglichkeit bei Überflutung Fließgeschwindigkeitsmessungen vorgenommen.

Bereits nach einigen Jahren verbesserte sich die Fließdynamik in den Schluten und der Überflutungsauie dahingehend, dass ein naturnaher Hoch- und Niedrigwassereinfluss ermöglicht wurde (Kaiser 2008). Im zweidimensionalen, mit FlowMod erstellten Hochwassermodell von 2003 (Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig) sind diese Veränderungen nicht berücksichtigt, weshalb schnellere Fließgeschwindigkeiten als berechnet in der Überflutungsauie zu erwarten sind. Abbildung 4 zeigt eine Auswahl von Maßnahmen des Projektes im südlichen Teil des Taubergießen. Deutlich sind hier die zahlreichen Gießen und Altarme beiderseits des Rheins zu erkennen, welche für das Ökosystem Auenwald von großer Bedeutung sind. Von den insgesamt 13 Maßnahmen, wie zum Beispiel die Schaffung von Fließverbindungen zwischen Stückergraben und kleinem Rhein, sind besonders die Deichniederlegungen der Maßnahmen eins und fünf (genannt M1 und M5) für die Reaktivierung der Auendynamik hervorzuheben. Gut zu erkennen ist auch der um einige hundert Meter rückverlegte ehemalige Hochwasserschutzdamm (schwarze bzw. grüne Linie im Osten des Taubergießen).

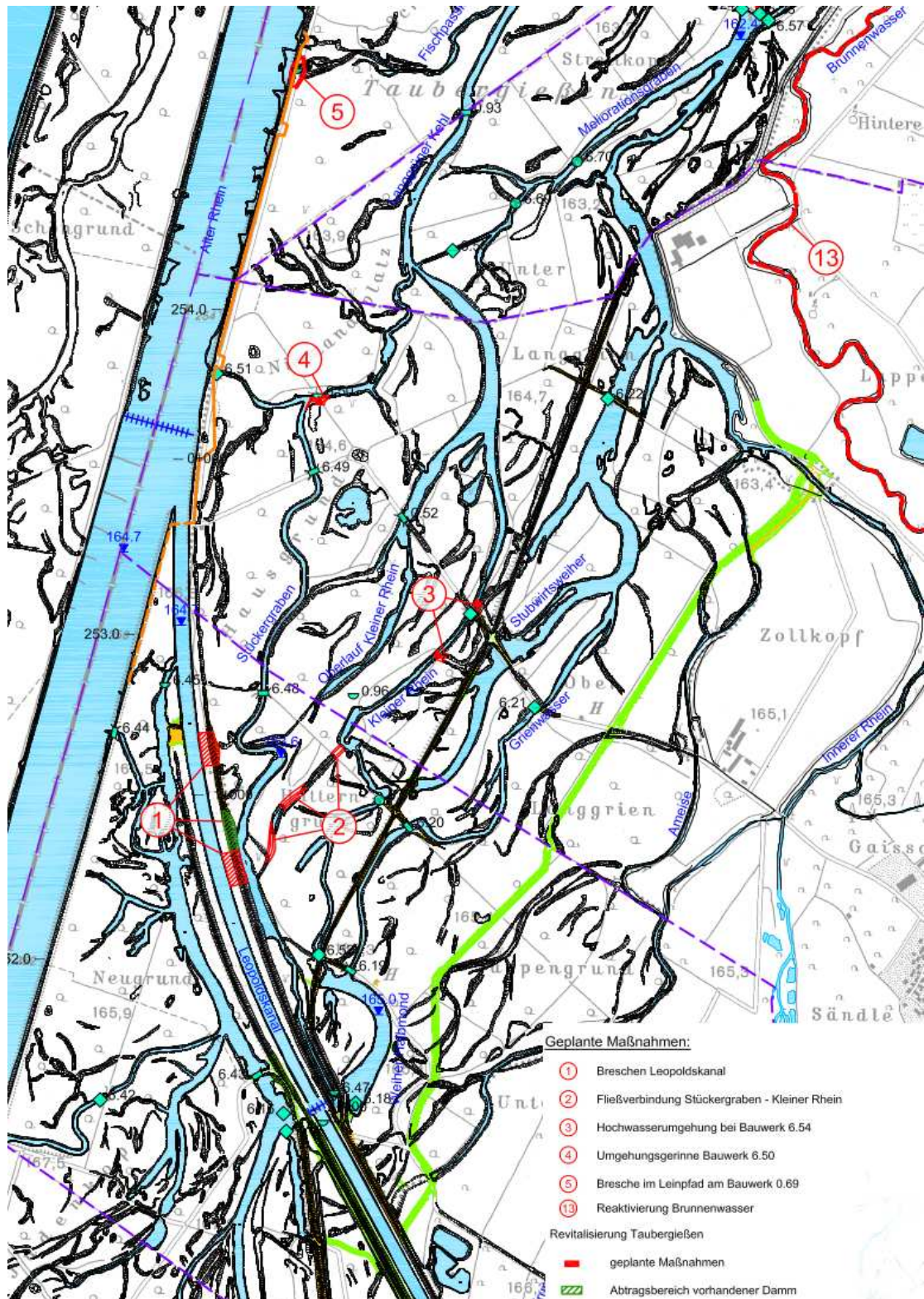


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Lageplan des 2007 realisierten Revitalisierungsprojektes Taubergießen (Stand Mai 2006). Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung Umwelt, Referat 56 "Naturschutz, Landschaftspflege".

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Fließgeschwindigkeit- und Abflussmessung

Die Fließgeschwindigkeit (oder Strömungsgeschwindigkeit, kurz v) ist abhängig von der Wassermenge, der Sohlenreibung und dem Gefälle im Gerinnebett. Sie ist zudem örtlich und zeitlich variabel: Es gilt $v = f(x, y, z, t)$. Aufgrund der inneren Reibung und des Haftens an der Sohle und den Ufern nimmt sie zu den Gerinnebegrenzungen ab. Die auftretende Turbulenz bewirkt eine Schwankung der Fließgeschwindigkeit an jedem Ort um einen Mittelwert. Für viele Anwendungsgebiete sind die Turbulenz und die Verteilung der Geschwindigkeit im Querschnitt nebensächlich (Zanke 2002). Um die vielfältigen und sich häufig rasch ändernden realen Fließgeschwindigkeiten handhabbar zu machen, werden in der Regel starke Vereinfachungen vorgenommen und lediglich eine mittlere Geschwindigkeit über den gesamten Querschnitt angegeben, welche in Abbildung 5 verdeutlicht sind.

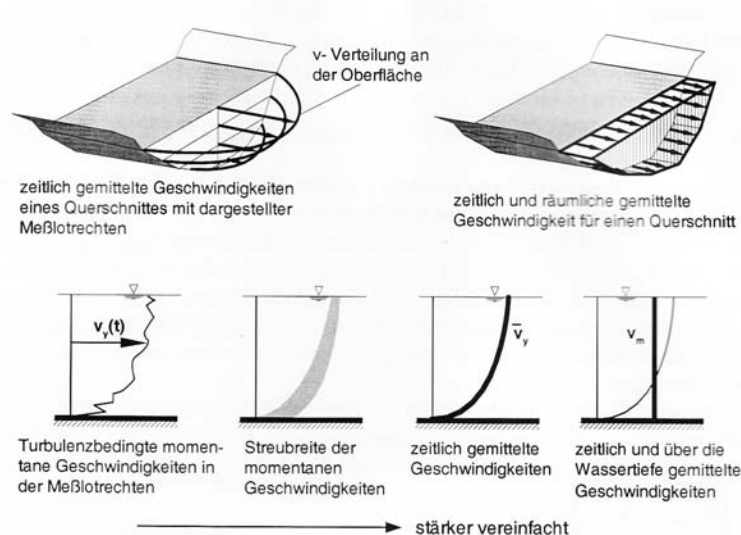


Abbildung 5: Vereinfachung von räumlich und zeitlich variablen Fließgeschwindigkeiten zu einem repräsentativen gemittelten Wert für den Gesamtquerschnitt am Beispiel eines Vorfluters (nach Zanke 2002).

Die obere linke Teilabbildung zeigt eine reale, zeitlich gemittelte Fließgeschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt und die Wassertiefe. Dabei geben die Pfeillängen die Fließgeschwindigkeit v an. In der unteren linken Teilabbildung sind die infolge von Turbulenzen auftretenden Momentangeschwindigkeiten $v_y(t)$ an einer Messlotrechten dargestellt. Bei genügend häufiger Messung lässt sich ein/e Schwankungsbereich / Streubreite eingrenzen, welche(r) bei einer zeitlichen arithmetischen Mittelung vereinfachend als Linie $\bar{v}_y$ angeben lässt (unten Mitte). Als weitere Vereinfachung kann die Fließgeschwindigkeit über das arithmetische Mittel der gesamten Messlotrechten beschrieben werden (unten rechts). Wenn eine solch starke Vereinfachung erwünscht ist, können die einzelnen räumlichen und zeitlichen Mittelwerte der Messlotrechten zusätzlich über den gesamten Querschnitt einer einheitlichen Gesamtgeschwindigkeit v_m zusammengefasst werden, womit die Verteilungsinformationen verloren gehen.

Der Durchfluss Q bezeichnet in der Hydrologie das Wasservolumen, welches pro Zeiteinheit einen definierten oberirdischen Fließquerschnitt durchfließt (Pertl 2004, S. 7).

Ziel von Durchflussmessungen ist es, das Dargebot an Oberflächenwasser in ausgewählten Flussquerschnitten zu bestimmen (Dyck & Peschke 1995, S. 92).

"Pegel müssen leicht zugänglich und bei allen Wasserständen gut abzulesen sein. Für Pegelprofile mit Überschwemmungsland wird sich daher oft eine Zweiteilung des Pegels in einen Niedrigwasser-Pegel und einen Hochwasser-Pegel als notwendig erweisen. Schließlich ist darauf zu achten, dass an der Pegelstelle Abflussmessungen entsprechend den einschlägigen Vorschriften ausgeführt werden können" (Zanke 2002, S. 71).

Analog zu offenen Gerinnen wird zur Bestimmung des Durchflusses im überfluteten Vorland die allgemeine Grundgleichung verwendet:

$$Q = v_m \cdot A \quad (1.1)$$

mit

A = durchströmter Querschnitt [m^2]

v_m = mittlere Fließgeschwindigkeit im Durchflussquerschnitt [m/s]

Führen die Fließgewässer Hochwasser, welche das Vorland überfluten, so können Durchflussmessungen ebenfalls in den Überflutungsflächen vorgenommen werden. Im Furkationsbereich des Oberrheins, wozu der Taubergießen zählt, wurde der Talweg im Rahmen der Rheinkorrektur von seinen zahlreichen Nebenarmen abgeschnitten und die verzweigte Linienführung verhindert (Zepp 2003, S. 150). Nur noch bei extremer Hochwasserführung floss Oberflächenwasser vom Rhein über den Tulla'schen Damm in die Altarme und reanimierte sie zu Fließgewässern. Eine Besonderheit des Taubergießen besteht in einer Vielzahl von Gießen (unterseeischen Quellen), die eine Austrocknung vieler Altarme verhindern (Isele 2010). Durch die vom Revitalisierungsprojekt angelegten Breschen werden bereits bei kleinen Hochwasser großflächigere Teile der Rheinaue überflutet. Im Hochwasserfall ist es möglich, auch hier Fließgeschwindigkeits- und Durchflussmessungen analog zu Gerinnen vorzunehmen, welche in Verbindung mit Wasserstandsaufzeichnungen eine Abflussganglinie ergeben. Dies stellt die Ausgangslage für das oberirdische Wasserdargebot dar (Maniak 1993, S. 58). Anders als in Gerinnen treten in überflutetem, bewaldetem Vorland aufgrund einer Vielzahl an zu umfließenden Hindernissen keine laminaren Strömungen auf. Man spricht in diesem Fall von einer gerichteten Strömung (Weichert 2012).

3.2 Magnetisch-induktive Strömungssonde (MID)

In den 1960er Jahren wurde nach Durchflussmessverfahren gesucht, welche auch in Gewässern mit Verkräutung, Rückstau, Fließumkehr und beweglicher Gewässersohle ohne Einschränkungen eingesetzt werden können (Morgenschweis 2010, S. 439). Schließlich entdeckte GILS 1970 das magnetisch-induktive Prinzip (MID). Nach diesem Prinzip gebaute Geräte lassen sich in Freispiegelgerinnen einsetzen. Dieses physikalische Messprinzip wird im Folgenden erläutert.

3.2.1 Funktionsweise

Standardmäßig werden für Fließgeschwindigkeitsmessungen in Gerinnen hydrometrische Messflügel verwendet, die eine Mindestgeschwindigkeit von 0,05 m/s, einen kraut- und feststofffreien Messquerschnitt, sowie quasi laminare Strömungen benötigen, um keine ungenauen Messergebnisse zu liefern bzw. damit der Flügel nicht beschädigt wird. In der Überflutungsauwe führen Hochwasser stets grosse Mengen an Suspensionen, Sedimentfrachten und Geschwemmsel mit sich, warum hydrometrische Messflügel für das Anwendungsgebiet als nicht geeignet angesehen werden. Eine Alternative stellen magnetisch-induktive Strömungs-sonden dar, die keine beweglichen Teile aufweisen. Gegenüber den genannten Erscheinungen sind sie unempfindlich und auch bei sehr niedrigen Fließgeschwindigkeiten einsetzbar.

Das Messprinzip einer MID beruht auf dem Faradayschen Induktionsgesetz (Morgenschweis 2010, S. 440). Die MID induziert eine elektrische Spannung, indem eine elektrisch leitende Flüssigkeit (in diesem Fall Wasser) durch ein im Inneren des Sensors erzeugtes Magnetfeld fließt. Diese Spannung ist zur mittleren Fließgeschwindigkeit v_m , der Magnetfeldstärke B und dem Elektrodenabstand L proportional. Von abgeleiteten Differentialgleichungen aus der Poisson'schen Gleichung mit einer Randbedingung 2. Art lässt sich vereinfachend folgende Gleichung aufstellen (Engl 1970, Engl 1972, Shercliff 1962, nach Morgenschweis 2010), ein rotationssymmetrisches Strömungsprofil und ein unendlich langes, homogenes Magnetfeld vorausgesetzt:

$$U = B \cdot L \cdot v_m \quad (1.2)$$

mit

U = induzierte Spannung [V]

B = Feldstärke des Magnetfelds [$V \cdot s/m^2$]

L = Länge des Leiters (Abstand der Elektroden) [m]

v_m = mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

Da der Elektrodenabstand L und die magnetische Feldstärke in einer MID konstant sind, lässt sich Gleichung (1.2) wie folgt vereinfachen, wenn sich die leitende Flüssigkeit senkrecht zum Magnetfeld bewegt:

$$U = k \cdot v_m \quad (1.3)$$

Damit ist die induzierte Spannung U direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit v , welche direkt auf dem Display des Anzeigegeräts ablesbar ist. Die Konstante k bezieht sich auf bauart-spezifische Größen wie Länge des Leiters und Stärke des Magnetfeldes. Somit wirkt eine durch ein Magnetfeld strömende leitende Flüssigkeit wie ein bewegter elektrischer Leiter mit einer

räumlichen Ausdehnung, wenn die leitfähige Flüssigkeit senkrecht zum Magnetfeld strömt (Abbildung 6). In der Regel werden bei MID Magnetfelder durch Magnetfeldspulen erzeugt. Induzierte Spannungen lassen sich mit Metallelektroden abgreifen und messen. Abbildung 7 zeigt die Funktionsweise der beschriebenen Messsonde: Im vorderen Teil des Messkopfes befindet sich eine Magnetfeldspule (B), deren induzierte Spannung durch die Fließgeschwindigkeit v des umgebenden Mediums erzeugt und mit zwei Elektroden (Linien) im Elektrodenabstand L erfasst wird. Sie lässt sich durch ein angeschlossenes Spannungsmessgerät anzeigen.

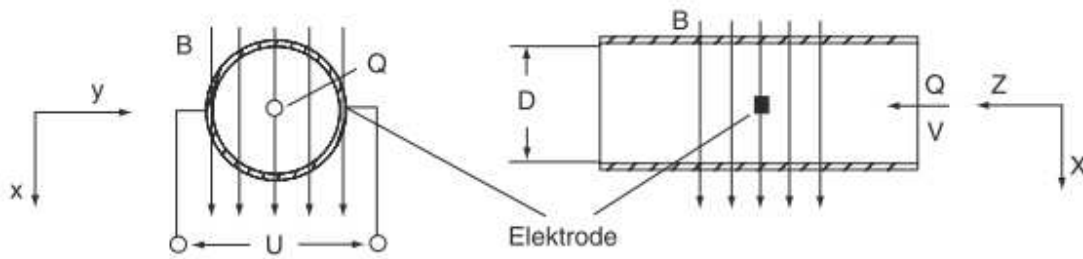


Abbildung 6: Magnetisch-induktives Messprinzip (Bonfig 2002, aus Morgenschweis 2010).

Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des magnetisch-induktiven Messprinzips ist eine minimale elektrische Leitfähigkeit von $50 \mu\text{S}/\text{cm}$, wobei die Leitfähigkeitsveränderung sich nicht auf die Fließgeschwindigkeitsanzeige des verwendeten Gerätes auswirkt.

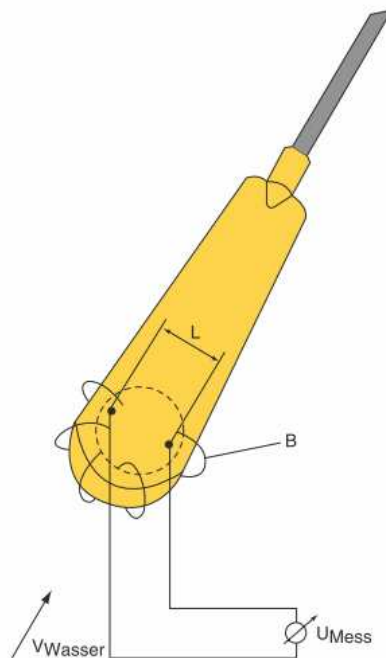


Abbildung 7: Messprinzip einer magnetisch-induktiven Strömungs-sonde (verändert nach Morgenschweis 2010).

Auf dem magnetisch-induktiven Prinzip beruhende Strömungssonden zur Durchflussmessung sind seit Anfang der 80er Jahre erhältlich. Eine Strömungssonde besteht aus einem Messkopf, worin eine Magnetspule, zwei senkrecht zu Magnetfeld und Fließrichtung angebrachte isolierte Elektroden, sowie die Messelektronik untergebracht sind. Über ein wasserfestes Koaxialkabel besteht eine Verbindung zum einem tragbaren digitalen Anzeigergerät.

3.2.2 Messgenauigkeit

An der Landeshydrologie und -geologie Bern (LHG) führte HODEL umfangreiche Vergleichsmessungen mit elektromagnetischen Geschwindigkeitssonden durch. Für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete MID "FLO-MATE Modell 2000" der Firma Marsh-McBirney mit folgenden Herstellerangaben:

- Nullpunktstabilität $\pm 0,015 \text{ m/s}$
- Genauigkeit $\pm 2 \%$ vom Messwert + Nullpunktstabilität

Das Gerät wurde im Eichkanal der LHG getestet; dabei stellte HODEL eine Abweichung von $< 0,05 \text{ m/s}$ und darüber hinaus eine Überschreitung der Nullpunktstabilität bei längeren Messungen fest (HODEL 1996 in Skript zum Hydrometrischen Geländepraktikum 2011).

3.3 Karbonfiberstäbe

3.3.1 Materialeigenschaften

Karbonfiberstäbe bestehen aus synthetischen Kohlefasern (Kohlenstofffaser) - einer Kohlenstoffverbindung aus Polyacrylnitril (PAN) - welche bei Pyrolyse entstehen, wobei sich die Querverbindungen der Molekülketten lösen. Durch gleichzeitiges Anlegen einer Zugspannung an die organischen Fasern werden die Kohlenstoffmoleküle vermehrt parallelisiert (kovalente Verbindungen in Faserrichtung), wobei die Kohäsionskräfte zunehmen und die Fasern höhere Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul erhalten (Krüger 2007, S. 15). Sie besitzen ähnliche physikalische und mechanische Eigenschaften wie Graphit, welcher wegen seiner Schichtstruktur eine Anisotropie aufweist. In Abhängigkeit von der Krafteinwirkungsrichtung unterscheidet sich der Elastizitätsmodul stark. Entlang der z-Achse beträgt er $5,24 \cdot 10^5 \text{ Ncm}^{-2}$, in Ebenenrichtung dagegen $18,77 \cdot 10^5 \text{ Ncm}^{-2}$. Senkrecht der Längsebene ist die Zugfestigkeit gegenüber der Querebene um das zwei- bis fünffache höher. In z-Richtung ist die Härte nach Mohs (H_M) um das 4,5 fache größer als in der Ebene (Krüger 2007, S. 22f).

3.4 Auf einzelne umströmte Körper wirkende Strömungskräfte

Auf Überflutungsflächen treten natürlicherweise häufig Strömungsverluste infolge von umströmten Körpern auf, welche stark von der Form und der REYNOLDS-Zahl Re der Körper abhängen. Als signifikante Länge l_{char} gilt bei langen Körpern deren Länge l und bei kompakten Körpern wie zum Beispiel Kugeln der Durchmesser d . Die Stelle an der die Strömung senkrecht auftrifft wird Staupunkt S genannt (Abbildung 8 links). Hier nimmt die Druckhöhe um das Maß der kinetischen Energiehöhe $v^2/2g$ und die Fließgeschwindigkeit bis zum Erreichen des Kugeldurchmessers aufgrund von Stromlinieneinengung zu, während der Druck abfällt. Ist die maximale Breite überschritten, weitet sich das Stromlinienfeld wieder aus und die Geschwindigkeit geht auf das anfängliche Niveau zurück. Bis zum rückwärtigen Staupunkt S ist die kinetische Energiehöhe aufgebraucht. Für den beschriebenen Idealfall in einer reibungsfreien Flüssigkeit lassen sich das Strömungs- und Druckfeld mit der Potentialtheorie näherungsweise erklären. In der Realität tritt eine so genannte Strömungsablösung bei der Umfließung auf, womit sich die Druckkräfte erhöhen. Als Ursache hierfür gilt ein Druckanstieg in der Grenzschicht. Hinter der umströmten Kugel reißen die Stromlinien ab und es entstehen Reibungsverluste. Die Flüssigkeitsteilchen (hier Wasser) innerhalb der Grenzschicht erleiden hierdurch Energieverluste, werden immer langsamer bis sie im rückwärtigen Bereich der Kugel von der Druckverteilung der Außenströmung eine Rückströmung und hieraus wiederum Wirbel bilden (Abbildung 8 rechts). Werden die Wirbel weiter verfolgt lassen sich periodisch pendelnde Wirbel hinter den umströmten Körpern feststellen (Kármánsche Wirbelstraße) (Zanke 2002, S. 52f). Neben den SK werden auch die Karbonfaserstäbe umströmt und bilden als Hindernisse einen Strömungswiderstand. In der Fachliteratur wird anstelle von Stäben oder Säulen eine quer angeströmte Walze angegeben, welche in der Grundform einem Stab entspricht. In Abhängigkeit der Länge und des Durchmessers des Körpers, sowie der REYNOLDS-Zahl lässt sich ein Widerstandsbeiwert c_w ermitteln.

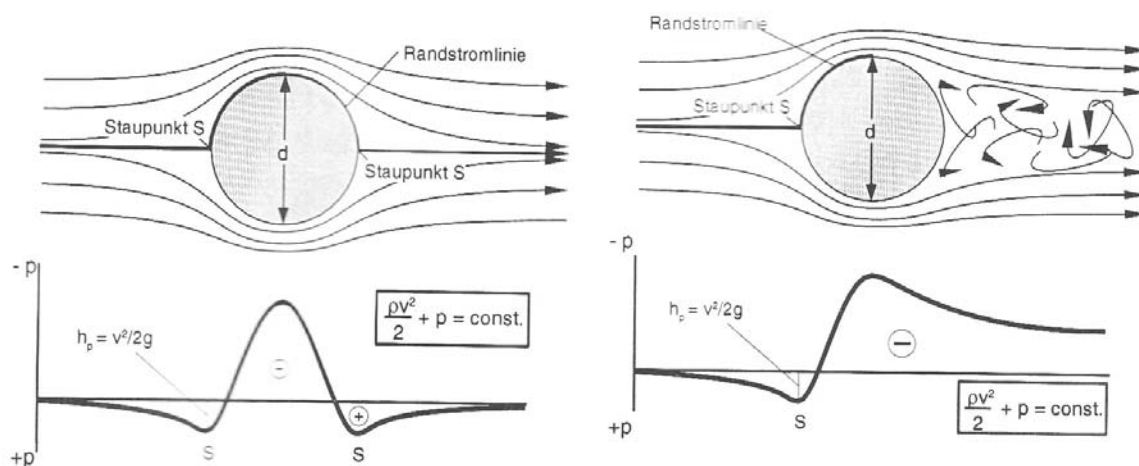


Abbildung 8: Umströmung einer Kugel mit einer idealen Flüssigkeit (links) sowie unter Reibungsverlusten und Wirbelbildung einer realen Flüssigkeit wie zum Beispiel Wasser (rechts) (aus Zanke 2002).

4 Methoden und Vorgehensweise

Für den Einsatz im überfluteten Vorland sind nur wenige gängige Methoden anwendbar, wie die magnetisch-induktive Durchflussmessung, die ohne bewegliche und somit störungsanfällige Teile auskommt. Theoretisch einsetzbar wäre auch eine Ultraschallmessung für die Ermittlung des Abflusses mittels eines mobilen Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP), der die mittlere Fließgeschwindigkeit v_{mit} in mehreren Teilebenen über vom Hochwasser mitgeführten Sediment-fracht erfasst und zu einem Gesamtabfluss integriert (Maniak 2000, S. 66). Diese Messtechnik weist jedoch einen Blank-Bereich von 25 bis 30 cm auf und ist somit bei geringeren Überflutungshöhen untauglich. Zudem ist hierbei eine sechsmonatige Kalibrierung vor Ort erforderlich. Dies macht einen ADCP für den Einsatz im Rahmen einer Masterarbeit ungeeignet. Der bisherige Einsatz von mobilen ADCP im überfluteten Vorland brachte häufig keine brauchbaren Daten (Mehlig 2012). Für die Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit in der Überflutungsaue werden im Rahmen dieser Masterarbeit zwei verschiedene Messmethoden angewendet. Mangels etablierter Messmethoden zur Erfassung der Fließgeschwindigkeit im überfluteten Vorland wird eine neue Methode für Überflutungshöhen niedriger als ein Meter getestet (s. Karbonfaserstabmethode). Weil diese Methode zu Beginn des Hochwasserereignisses Mitte Juni nicht im vollen Umfang zur Verfügung stand, wurde als Notbehelf Oberflächenschwimmer in Form von Astteilen über festgelegte Fließstrecken verfolgt. Grundsätzlich eignen sich SK mit einer Eintauchtiefe von weniger als 1/4 der vorhandenen Wassertiefe ohne störenden Windeinfluss. In Gerinnen werden normalerweise 15 bis 25 Schwimmer über die gesamte Breite verteilt und ihre Fließzeit zwischen zwei vorgegebenen Querschnitten eingesetzt um die Oberflächengeschwindigkeit des Vorfluters zu ermitteln. Falls keine zusätzlichen Messungen mit zum Beispiel hydrometrischen Messflügeln erfolgt, kann kein Abminderungsfaktor verwendet werden. Statt dessen werden die Schwimmergeschwindigkeiten pauschal mit einem Abminderungskoeffizienten w_0 multipliziert und dadurch verringert. Für geringe Wassertiefen gibt Maniak (2000) w_0 -Werte von 0,75 bis 0,85 an.

4.1 Karbonfaserstabmethode

Eine mögliche einfache Messmethode beruht auf einer Umkehrung des Prinzips der Drehmomentwaage, welches der vom Gewässerbiologen G. Jens entwickelte und 1968 publizierte Tauchstab (nach Jens) nutzt. Bei letzterem handelt es sich um einen Pendelströmungsmesser, bei dem ein senkrechter runder Holzstab konischer Formung von etwa einem Meter Länge, welcher am oberen Ende ein Drehgelenk mit einer verschiebbaren horizontalen Metallstange (Gewichtsstab) der gleichen Länge und einen ebenfalls am Drehgelenk orthogonal angeordneten Handgriff aufweist. Das Drehgelenk fungiert für den Gewichtsstab als Achse und ist mit dem Holzstab fest verbunden. Die waagrechte Lage von ersterem wird von einer Libelle (Wasserwaage) am oberen Teil des Drehgelenkes angezeigt. An einem Ende des Gewichtsstabes befindet sich eine Gewichtsscheibe als Gegengewicht zur auf den Holzstab wirkenden Strömungskraft, wenn der Holzstab von einer Person am Haltegriff in ein Fließgewässer gehalten wird. Diese lenkt den Stab in Fließrichtung und damit den Gewichtsstab aus der Waagerechten aus. Durch Verschieben des Gewichtsstabes in der Halterung am Drehgelenk lässt sich die horizontale Lage unter Zuhilfenahme der Libelle wieder herstellen. Auf dem Gewichtsstab sind Markierungen angebracht, an denen die Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

abgelesen werden kann (Morgenschweis 2010, S. 166). Diese Umkehrung des Prinzips der Drehmomentwaage bewirken biegsame Karbonfaserstäbe mit einer Länge von einem Meter und einem Durchmesser von zwei mm, die eine Auslenkung mit "Pendelbewegung" beschreiben, wenn sie vom Hochwasser erfasst werden. Der Strömungswiderstand der Anordnung wird durch über die Stäbe gestülpte runde handelsübliche PVC-Schwimmkörper (im weiteren Verlauf mit SK abgekürzt) mit Innenbohrung (ursprünglich für den Hochsee-Netzbau hergestellt) erhöht. Sie sind entlang der Stäbe aufgrund ihrer im Verhältnis zum Stabdurchmesser weiteren Innenbohrung frei beweglich, wodurch sie in der Lage sind, sich dem jeweiligen Wasserstand anzupassen. Sie benötigen allerdings eine Beschwerung, damit ihre Eindringtiefe erhöht und eine vergrößerte Aufprallfläche erzeugt wird. Die Beschwerung erfolgt mit ineinander verpressten Muttern (M10, M5), welche an den Enden der Innenbohrung mit Heißkleber am SK befestigt werden. Es werden zwei verschiedene Größen von SK verwendet (Tabelle 4). Die größeren eiförmigen Schwimmkörper erhalten eine Beschwerung von 35 g, während die kleineren tönchenförmigen mit 22 g beschwert werden.

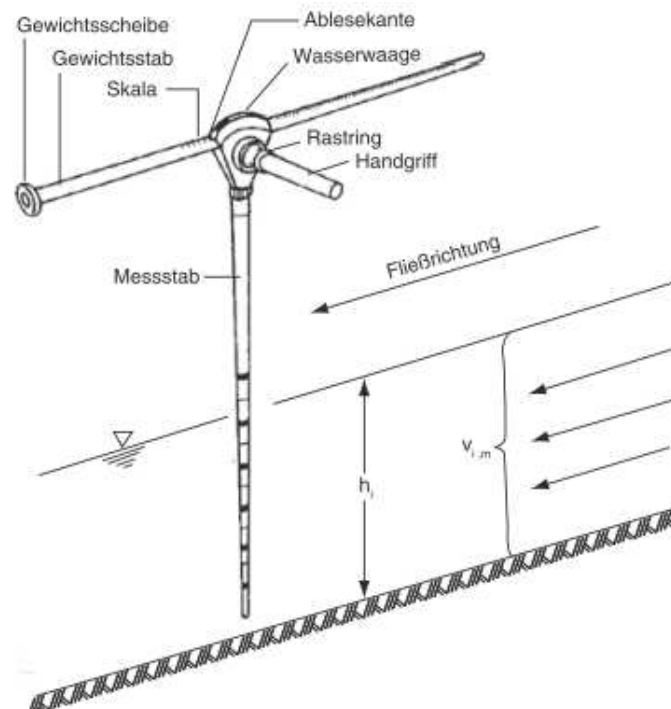


Abbildung 9: Tauchstab nach Jens (aus Morgenschweis 2010, nach Pegelvorschrift, Anl. D 1991).

Tabelle 4: Spezifikationen der verwendeten Schwimmkörper und Muttern.

Schwimmkörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Lochdurchmesser [mm]	Gewicht [g]	Form
A	55	33	9	35	Tönnchen
B	79	41	10	68	Ei

Die von der Strömung bewirkte Auslenkung der Stäbe wird mittels Digitalkameras abhängig vom gewählten Aufnahmeintervall fotografisch erfasst. Bei der Auswertung ist der Abstand der Stäbe zur jeweiligen Digitalkamera zu berücksichtigen. Um die Auslenkung mit der Fließgeschwindigkeit in Verbindung bringen zu können, muss eine Beziehung hergestellt werden. Hierbei wird mangels etablierter Methoden mit Wertepaaren der gemessenen Fließgeschwindigkeit und der Auslenkung zur möglichst selben Zeit empirisch vorgegangen. Anhand einer Messskala, welche in Referenzfotos hinter dem Stab positioniert ist, kann die Auslenkung in Zentimetern abgelesen werden. Marken mit weißer Lackfarbe in 10 cm Abständen sind eine weitere Ablesemöglichkeit, um in ruhigen Strömungsverhältnissen die Wassertiefe direkt an den Stäben abzulesen. Da diese Marken annähernd den gleichen Abstand zur Kamera aufweisen wie die Spitzen, ist es möglich den Abstand zwischen den Marken eines Stabes als Maßeinheit zu benutzen. Das empfohlene Aufnahmeintervall beträgt eine Stunde. Dies stellt zwar ein hinreichend kleines Intervall für Fließgeschwindigkeitsschwankungen dar, allerdings kann hiermit die Pendelbewegungen der Stäbe nicht berücksichtigt werden, da lediglich Momentaufnahmen eingefangen werden. Als kürzestes Aufnahmeintervall lässt sich die Kamera aufgrund der vorinstallierten Software auf zehn Sekunden einstellen. Dieses Intervall wurde zur Untersuchung des kurzzeitigen Schwankungsverhaltens der Stäbe an Plot sechs an zwei Tagen angewendet. In diesem Fall ist die Speicherkarte mit einer Kapazität von 2 GB und einer maximalen Aufnahmeanzahl von 1000 Fotos bereits nach 2 Stunden, 46 Minuten und 40 Sekunden voll. Bei einem eingestellten Intervall von 10 Minuten wird eine Aufnahmezeit von 6 Tagen, 22 Stunden und 40 Minuten erreicht. Die Ermittlung der auf die Stäbe wirkenden Strömungskraft ist für die Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit anhand der Stabmethode von besonderer Bedeutung. In Kapitel 4.6 wird auf die Berechnung der Strömungskraft eingegangen.

4.2 Referenz- und Querprofilmethode

Zur genauen Messung der Fließgeschwindigkeiten an den einzelnen Karbonfaserstäben (Referenzmethode) sowie für die Ermittlung des Abflusses an Querprofilen kommt eine mobile Strömungssonde der Marke FLO-MATE Model 2000 der Firma Marsh-McBirney aus den USA zum Einsatz. Es handelt sich um ein freilandtaugliches tragbares Strömungsmessgerät nach dem elektromagnetischen Messprinzip (Kapitel 3.1). Für einen gemittelten Fließgeschwindigkeitswert wird eine Standard-Integrationszeit von 30 Sekunden verwendet. Mit einem Messgestänge lässt sich jede gewünschte Höhe der Messsonde über GOK bis zu 80 cm einstellen. An den Karbonfaserstäben wird die Fließgeschwindigkeit knapp unterhalb der Wasseroberfläche gemessen, welche auf die Schwimmkörper einwirkt. Teilweise finden auch Messungen mit der Standardmethode (Querprofilmethode) statt.

Für Querprofile werden Leinen quer zur (erwarteten) Fließrichtung über eine Entfernung von < 20 m zwischen Bäume oberhalb des Hochwasserspiegels gespannt und in regelmäßigem Abstand von einem Meter mit Isolierband umwickelt, um konstante Messstellen für die Abflussmessung zu gewährleisten. Abhängig von der gewünschten Genauigkeit, der Wassertiefe und von der verfügbaren Zeit zur Durchführung der Messung wird die Anzahl der Messpunkte in der Messlotrechten festgelegt.

Zwei Messvarianten werden bei den Querprofilmessungen abhängig von der Wassertiefe angewendet. Für die Berechnung der Fließgeschwindigkeit in der Messlotrechten wird bei der Einzelmessung der Wert der Geschwindigkeitsmessung mit der mittleren Fließgeschwindig-

keit gleichgesetzt. Bei der Zweipunktmessung werden beide Werte gemittelt, um den Zielwert zu erhalten. Am Messgestänge kann die Wassertiefe direkt abgelesen werden. Nach Maniak (2000, S. 64) muss die Einpunktmessung bei geringen Wassertiefen von $0,1 < h < 0,75$ m angewendet werden. Um die Genauigkeit zu erhöhen, wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch bei einer Wassertiefe ≤ 20 cm eine Einpunktmessung in 60 % der Tiefe und bei > 20 cm die amerikanische Zweipunktmethode in 80 % und 20 % der Tiefe vorgenommen. Allerdings erfordert diese Vorgehensweise größere Messzeiten pro Messlotrechte von $h \leq 20$ cm.

Der Gesamtabfluss lässt sich arithmetisch oder grafisch ermitteln. Bei den arithmetischen Verfahren werden über gemittelte Fließgeschwindigkeiten oder gemittelte Durchflussbreiten die Teilabflüsse berechnet. Folgende Gleichung wird für die Berechnung von Teilabflüssen einzelner Messlotrechten bei gemittelter Fließgeschwindigkeit verwendet:

$$Q = \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \cdot b \quad \text{und} \quad \sum Q_i = Q \quad (1.4)$$

Da die Querprofile nicht die gesamte Durchflussbreite b des Hochwassers im Wald abdecken können, gilt die Profillänge als partielle Durchflussbreite b_p :

$$Q = h_1 v_1 \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right) + h_2 v_2 \left(\frac{b_2 + b_3}{2} \right) + \dots \quad (1.5)$$

Ansonsten lässt sich der Abfluss bei der grafischen Methode über Geschwindigkeitsflächen oder Linien gleicher Geschwindigkeit (Isotachen) ermitteln. Hierbei wird die mittlere Fließgeschwindigkeit jeder Lotrechte mit der jeweiligen Wassertiefe multipliziert, in die Grafik aufgetragen und die Endpunkte zu einer Geschwindigkeitsfläche verbunden (Abbildung 10). Der Durchfluss ist gleich dieses Flächeninhalts. Mittels numerischer Verfahren wie beispielsweise der Spline-Interpolation kann diese Methode beschleunigt werden (Maniak 2000, S. 65). Aus zeitlichen Gründen wird im Rahmen dieser Masterarbeit auf eine graphische Auswertung verzichtet.

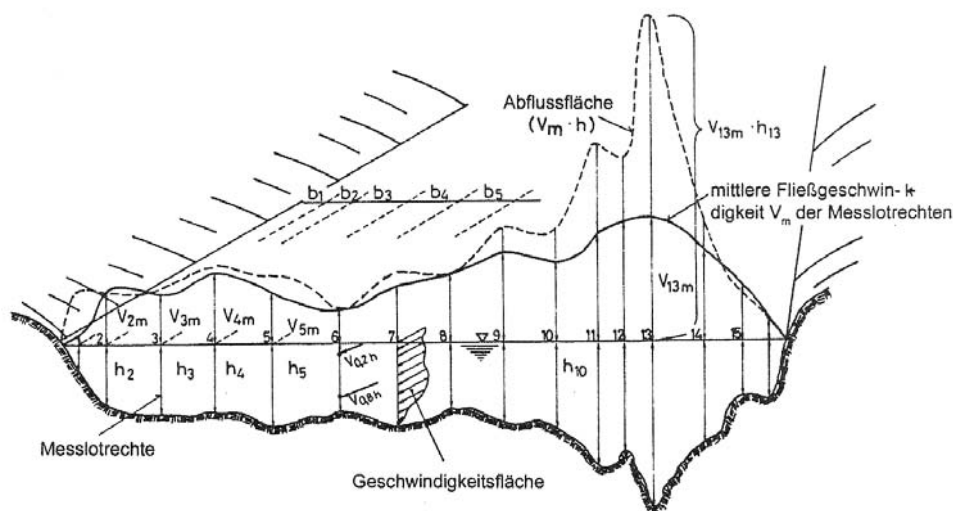


Abbildung 10: Grafische einer Abflussmessung mit Geschwindigkeits- und Abflussfläche. Geschwindigkeitsprofil und Zweipunktmessung einer Messlotrechten (nach Maniak 2000).

Obwohl sich über die gesamte Querschnittsbreite gemittelte Fließgeschwindigkeitswerte möglicherweise analytisch rekonstruieren lassen, werden an den vorgenommenen Querprofilmessungen bei Zweipunktmessungen lediglich über die einzelnen Messlotrechten gemittelt, weil diese Vorgehensweise der gängigen Praxis entspricht. Zudem wird an den Querprofilen im überfluteten Zustand eine tägliche Messung als ausreichend angesehen, womit hier keine zeitliche Fließgeschwindigkeitsverteilung erforderlich ist.

4.3 Optische Verfolgung von treibenden Objekten

Die sehr einfache Stöckchenmethode wird häufig zur ersten Abschätzung von Fließgeschwindigkeiten in kleinen Gerinnen angewendet. Hierbei wird ein schwimmender Gegenstand (meist ein Bruchstück eines Astes) vor einer bekannten Fließstrecke ins Wasser gegeben und mit der Strömung abgetrieben. Die benötigte Zeit für die Passierung der Fließstrecke stellt einen Indikator für die Oberflächengeschwindigkeit im Gerinne dar. Dieses Prinzip lässt sich auf geneigte, überflutete Flächen übertragen. Es ist jedoch sicherzustellen, dass der verwendete Gegenstand genügend Auftrieb erzeugt und nicht von Hindernissen abgelenkt wird oder daran hängen bleibt. Wenn natürlicherweise nur wenige Gegenstände an der Fließstrecke vorbei schwimmen, können zusätzliche vor die Fließstrecke platzierte Gegenstände die Fließgeschwindigkeit visualisieren. Alternativ lassen sich auch übriges Geschwemmsel oder Luftblasenansammlungen auf stationären Fotos mit geeignetem Intervall verfolgen. Im Zeitraum 11. bis 16. Juni werden anstelle der Auslenkung von Karbonfiberstäben die Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche mittels Stöckchenmethode und der Beobachtung anderer treibender Objekte näherungsweise bestimmt. Hierzu dienen zwei parallel zur Fließrichtung aufgestellte Stangen als abgesteckte Fließstrecke, mit der Plot fünf und sechs ausgerüstet werden. Die Fließstrecken betragen 3,00 beziehungsweise 4,45 m.

Häufig sind mangels fester Objekte lediglich Luftblasenansammlungen an Plot sechs verfolgbar. Insgesamt wurden 5060 Fotos an fünf Tagen im 10-Sekunden-Intervall gesichtet. Im Bild haben die die Fließstrecke eingrenzenden Stangen einen Abstand in Pixel zueinander, der als Referenz der Entfernung der Objekte im Bild zum Fließstreckenbeginn genommen wird. Wenn ein Objekt auf zwei nacheinander geschossenen Aufnahmen zu erkennen ist, kann mittels Dreisatz die zurückgelegte Distanz innerhalb des Intervalls berechnet werden. Zusätzlich werden Videos für die Objektverfolgung eingesetzt, in denen idealerweise die gesamte Fließstrecke enthalten ist. Bei Videos, in denen nur ein Teil zu sehen ist, wird annäherungsweise der Abstand von Stäben zu einer der beiden Stangen herangezogen.

4.4 Erfassung des Wasserstandes

Die Erfassung des Wasserstandes erfolgt meist mit Hilfe von Pegeln. Aus Kostengründen können keine standardisierten Lattenpegel oder Schreibpegel verwendet werden. Letztere benötigen zudem für das Gehäuse eine vom Hochwasser nicht erreichbare erhöhte Position. Unter Umständen reichen zwei Meter über GOK in offenem Gelände nicht aus. Als Ersatz dient eine in den Auenboden getriebene Zaunstange mit einem daran gebundenen Zollstock. Da man auf den Digitalfotos die Zahlen auf dem Zollstock nicht erkennen kann, wird er in regelmäßigem Abstand mit kontraststark gefärbtem Isolierband umwickelt (Abbildung 11). Der Wasserspiegel am Zollstock wird von der Digitalkamera aufgenommen und über seinen Abstand von der nächst-

gelegenen Markierung im Bild ermittelt. Leider muss auf eine kontinuierliche Aufzeichnung verzichtet werden, weil die Wassertiefe nur bei Tageslicht fotografisch festgehalten werden kann. Von den insgesamt 996 im 10-Sekunden-Intervall (2 Stunden 46 Minuten) am 16. Juni geschossenen Fotos an Plot 6 werden je halbe Stunde an zehn Minuten Bildmaterial sowie im übrigen Zeit-raum im 10-Minuten-Intervall die Wassertiefen an den Stäben ermittelt. Die verbliebenen erhalten Wassertiefen der zeitlich nächstgelegenen ausgewerteten Fotos, da sich die Wasser-spiegellage lediglich minimal innerhalb weniger Minuten verändert. Auch an den Folgetagen kann aus Zeitgründen teilweise nicht im 10-Minuten-Intervall die Wassertiefen an den Stäben ermittelt werden. Zeitsparender ist ein 30-Minuten-Intervall.



Abbildung 11: Untersuchungsfläche Standort 2 in unüberflutetem Zustand mit aufgestelltem Zollstock und Karbonfaserstäben (unten Mitte) sowie gespannter Querprofilleine.

4.5 Kalibrierung und Vorversuch

4.5.1 Trockenkalibrierung

In zwei kleinen Fließgewässern wurde am 08. Juni die Fließgeschwindigkeit mittels Stöckchenmethode über eine Distanz von acht beziehungsweise zehn Metern mit fünf beziehungsweise sieben Wiederholungen ermittelt und hieraus der arithmetische Mittelwert gebildet. Ein Hering mit SK wurde ebenfalls in den Gewässern aufgestellt und dort die Auslenkung infolge Kraftübertragung beobachtet. Bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,07 m/s sowohl mit oder ohne SK trat keine sichtbare Auslenkung auf (ohne stationärer Kamera). Beim schneller fließenden zweiten Gewässer mit neigte sich der Stab dagegen deutlich (Tabelle 9). Hier wurde eine Nylonschnur mittig an den SK gebunden und das andere Ende an einer 1-Newton-Federwaage befestigt. Anschließend wird an der Federwaage so weit gezogen, dass sich die Stabauslenkung nahezu aufhebt. Die Federwaage zeigt dabei näherungsweise die auf den Stab wirkende Kraft an. Ein erster Vergleich ergibt eine um 0,1 N höhere Krafteinwirkung auf den eiförmigen SK bedingt durch größeres Volumen und Oberfläche (0,21 N gegenüber 0,11 N).

Die ermittelte Fließgeschwindigkeit und die benötigte Kraft geht in eine Trockenkalibrierung ein (Prinzipskizze Abbildung 12). Hierbei wird ein Karbonfiberstab (KFS) von einem Meter am unteren Ende eingespannt. Eine mittig am SK befestigte Schnur verbindet ihn mit einer horizontal auf gleicher Höhe angeordneten Federwaage, an der am anderen Ende die gewünschte Kraft durch vorsichtiges Ziehen angelegt werden kann (symbolhaft durch ein Gewicht dargestellt). In Zugrichtung kann die Auslenkung des Stabes, abhängig von der Zugkraft, anhand eines Maßbandes abgelesen werden. Da die Stabspitze bei der Auslenkung annähernd einen Kreisbogen beschreibt, muss zum Ablesen des Auslenkungswertes die virtuelle Verlängerung des Stabes bis zum Maßband vorgenommen werden. Eine festgezogene Lüsterklemme unterhalb des Schwimmkörpers verhindert sein Absinken unter Trockenbedingungen.

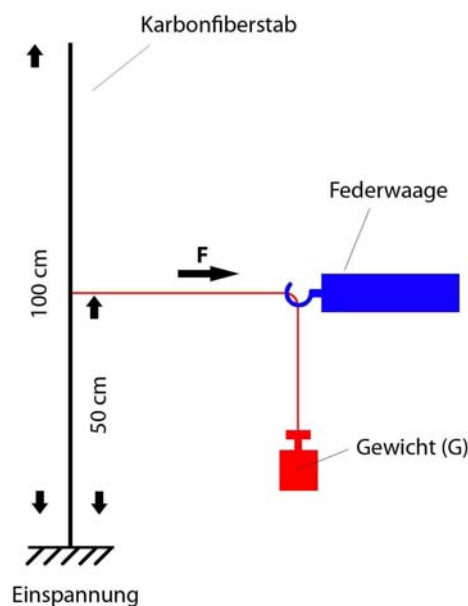


Abbildung 12: Prinzipskizze der Trockenkalibrierung (der beschwerte SK am Stab mitsamt der Lüsterklemme ist nicht dargestellt).

In 0,1 N-Schritten wird je 10 cm Höhenlage des SK die Auslenkung notiert und deren Winkel über den Arkustangens berechnet (s. Anhang B, Sinusgleichung Heidorn 2009):

$$\tan(\varphi) = \frac{x}{l} \quad (1.6)$$

mit

φ = Auslenkungswinkel [°]

x = horizontale Auslenkung [cm]

l = Stablänge [cm]

Beispielsweise wird zunächst bei einem Niveau von 10 cm eine Kraft von einem N aufgewendet, um eine Auslenkung x von 3,6 cm bzw. einem Auslenkungswinkel φ von 2,1° zu bewirken. Bei einem Niveau von 40 cm sind es bereits 49 cm beziehungsweise 26,1°. Die Durchführung der Methode zeigt, dass vor allem bei größeren Abständen des SK vom Einspannpunkt und bei größere(r/n) Auslenkung/ Auslenkungswinkeln das Eigengewicht des SK das Messergebnis stark

verfälscht. Auch sind die Ablesewerte der Federwaage recht ungenau. Daher wird der Versuch unter einer veränderten Anordnung wiederholt (Abbildung 13). Der vertikal fest eingespannte KFS wird hier mittels einer dünnen Schnur über eine Umlenkrolle mit einer Reihe von Gewichten horizontal belastet und die Auslenkung fotografisch festgehalten. Die Schnur, mit deren Hilfe am Stab gezogen wird, repräsentiert die auf die SK wirkende Druckkraft des strömenden Wassers. Unter Überflutungsbedingungen üben die SK aufgrund ihres Auftriebs keine vertikale Kraft auf den Stab aus. Da dies unter Trockenbedingungen nicht gegeben ist, wird auf SK im Zugversuch verzichtet. Die Messung wird in steigenden Abständen von jeweils zehn cm Höhenniveau so lange fortgesetzt, bis ein Auslenkungswinkel von ca. 50 bis 60 Grad erreicht ist.

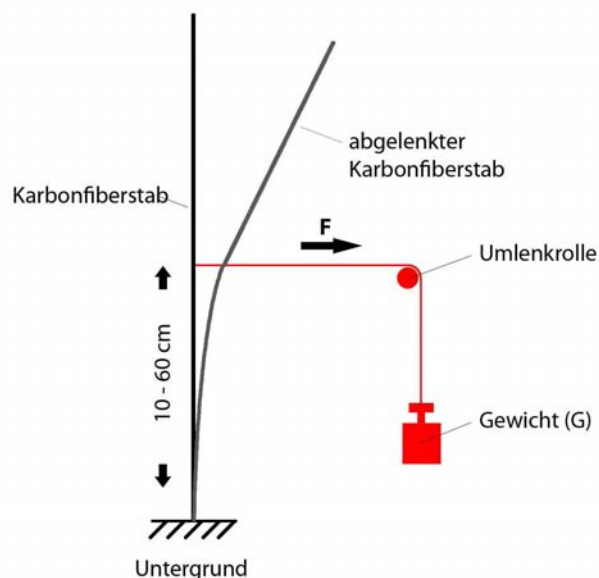


Abbildung 13: Versuchsanordnung abgewandelter Zugversuch unter Trockenbedingungen (links Schema, rechts Foto).

4.5.2 Vorversuch

Nach abgeschlossener Trockenkalibrierung wird die Messmethodik an zwei kleinen Fließgewässern getestet. Auch dort wird eine Schnur um den Schwimmkörper und das freie Ende an eine Federwaage gebunden. Anschließend hält eine Person die Federwaage entgegen der Fließrichtung dermaßen, dass die Schnur sich spannt und die resultierende Auslenkung aus der Strömung kompensiert wird. Über folgende Beziehung lässt sich die Zugkraft F_z unter Zuhilfenahme der Stöckchenmethode in die gesuchte Fließgeschwindigkeit umrechnen.

$$v_{\text{Stab}} = \frac{F_z \cdot v_{\text{Stöck}}}{F_D} \quad (1.7)$$

mit

v_{Stab} = Fließgeschwindigkeit am Stab [m/s]

F_z = Zugkraft (Trockenkalibrierung) [N]

$v_{\text{Stöck}}$ = Fließgeschwindigkeit aus der Stöckchenmethode [m/s]

F_D = Druckkraft (Vorversuch) [N]

4.5.3 Nasskalibrierung

In der Peregrinskehle ist am 16. Juni eine Nasskalibrierung unter realen Bedingungen durchgeführt worden. Dazu wird ein Zelthering in Ufernähe möglichst senkrecht in den Gerinneuntergrund getrieben und mit einem Stab, einem Schwimmkörper sowie einer Lüsterklemme versehen. Eine dünne Schnur wird am Schwimmkörper befestigt und entgegen der Fließrichtung derart gespannt, dass der Stab bei Strömung nahezu senkrecht steht (s. Vorversuch). Am freien Ende der Schnur befindet sich eine digitale Hängewaage, mit der die benötigte Zugkraft gemessen wird. Jeweils zehn Messungen mit beiden SK-Größen werden als ausreichend angesehen. Um die auf diese Weise gemessene Kraft mit der Fließgeschwindigkeit in Beziehung setzen zu können, werden vor und nach der Kalibrierung ebenso insgesamt zehn Fließgeschwindigkeitsmessungen mittels FLO-MATE durchgeführt.

4.6 Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Als einen wichtigen Kennwert für die Charakterisierung von Werkstoffen ist der Elastizitätsmodul ein Maß für deren Biege- und Festigkeitsverhalten. Er bezeichnet den Widerstand, welchen ein Material einer elastischen Verformung entgegensetzt (Smolik 2000). Noch vor über zehn Jahren führten Anzeigeungenauigkeiten, zu hohe Mindestauflösungen und Probleme bei der Messwert-Darstellung zu Fehlern, sowohl im konventionellen als auch im rechnergestützten Verfahren (Ledworuski et al. 2000). In einer in Deutschland übernommenen EU-Norm

(DIN EN 10002) hat man versucht einen einheitlichen Standard für die Anforderungen von Zugversuchen zu schaffen. Als Anlehnung für den durchgeführten Zugversuch zur Quantifizierung des Elastizitätsmoduls dient ein Skript zum Praktikum Physik 1 der Hochschule München (2011). Einige KFS werden auf einer Vorrichtung im Abstand von $L = 153 \text{ mm}$ horizontal unterstützt und auf halber Länge senkrecht nach unten mit einem Gewicht von 1 kg belastet, welches auf einer Digitalwaage positioniert ist (Abbildung 14). Mittels eines Hubtisches ist das Gewicht höhenverstellbar, wodurch die Kraft auf die Stäbe als Differenz des Gewichtes und dem angezeigten Wert auf der Waage variiert werden kann. In Abständen von 100 g erfasst eine recht empfindliche Messuhr mit 10 mm Messbereich und $0,1 \text{ mm}$ Auflösung das Biegeverhalten der KFS.



Abbildung 14: Versuchsanordnung im Zugversuch.

Aus dem linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Zugversuch lässt sich der Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) ermitteln. Zu Beginn eines solchen Zugversuches ist die Dehnung häufig proportional zur angelegten Spannung; dies entspricht der Hooke'schen Gerade, welche durch das Hooke'sche Gesetz $\sigma = \varepsilon E$ beschrieben wird. Man kann bei unterschiedlichen Werkstoffen lineares und nichtlineares Verhalten beim Zugversuch beobachten. Wird eine kritische Spannung überschritten (Elastizitätsgrenze), dehnt sich das Material bei anfangs linear elastischem Verhalten ohne weitere Spannungserhöhung mehr oder weniger stark bis der Bruch erfolgt. Derartig hohe Zugkräfte treten für den im Rahmen dieser Masterarbeit vorgesehenen Zweck nicht auf. Daher kann innerhalb des linearen Bereiches des Hooke'schen Gesetzes das Elastizitätsmodul aus der Durchbiegung beim Biegeversuch bestimmt werden:

$$E = \frac{F_Z \cdot l^3}{48 \cdot f \cdot J} \quad (1.8)$$

mit

E = Elastizitätsmodul [GPa/mm² kN/mm²]

F_Z = aufgewendete Zugkraft [N]

l = Auflagelänge [mm]

J = Flächenträgheitsmoment Biegeprobe [mm⁴]

wobei das Flächenträgheitsmoment für kreisrunde Querschnitte lautet:

$$J = \frac{\pi d^4}{64} \quad (1.9)$$

mit

d = Durchmesser Biegeprobe [mm]

Wird Gleichung (1.9) in (1.8) eingesetzt, ergibt sich für kreisrunde Querschnitte :

$$E = \frac{4 \cdot F_Z \cdot l^3}{3 \cdot f \cdot \pi \cdot d^4} \quad (1.10)$$

Bei einem Rundstab von zwei mm Durchmesser errechnet sich $J = 0,785 \text{ mm}^4$. Aus dem Biegeversuch ergibt ein Mittelwert des Elastizitätsmoduls für Karbonfiberstäbe von $E = 135 \text{ GPa} / 135 \text{ kN/mm}^2$. Der Auslenkungswinkel φ (im Bogenmaß) für einen einseitig eingespannten Hebelarm (Kragträger) ergibt sich aus der Statik zu:

$$\varphi = \frac{F_Z \cdot h^2}{2 \cdot E \cdot J} \quad (1.11)$$

mit

F_Z = horizontal wirkende Kraft bei einseitig senkrecht eingespanntem Stab [N]

h = Höhe über Einspannpunkt (Wassertiefe) [m]

E = Elastizitätsmodul [kN/mm²]

J = Flächenträgheitsmoment für kreisrunde Querschnitte [mm⁴]

4.7 Plotaufbau

Auf acht Untersuchungsflächen (Plots) werden orthogonal zur Fließrichtung jeweils eine stationäre Kamera an Bäumen aufgehängt in deren Blickwinkel mehrere Stäbe und ein Zollstock positioniert sind (vgl. Abbildung 17). Als Digitalkameras werden Modelle der Serie Pentax Optio W90 mit Intervallaufnahmefunktion verwendet. Um diese vor Wettereinflüssen und Vandalismus zu schützen sind sie in Vogelhausattrappen mit einer vorderen Öffnung für die Kameralinse untergebracht. Zudem sind sie mit Kabeln zum Anschluss von externen Li-Ionen Akkus ausgestattet, welche eine Spannung von 2,7 V und einer Kapazität von 3,2 Ah aufweisen. Der Einsatz von Blitzlicht ist nicht möglich, weil zum Einen die Konstruktion der verwendeten Holzkästen keine entsprechende Öffnung besitzt und zum Anderen, weil dies zu einem stark ansteigenden Stromverbrauch führen würde, was ein häufigeres Auswechseln der externen Akkus zur Folge hat. Somit ist deren Design nicht für Aufnahmen bei Dunkelheit ausgelegt. Als Verankerung der zwei Millimeter starken und einen Meter langen Karbonfiberstäbe dienen handelsübliche 30 cm lange Zeltheringe aus Kunststoff mit obigen zwei Zentimeter tiefen Bohrungen des gleichen Durchmessers. In diese Bohrungen werden die Stäbe gesteckt und verklebt. Sie werden anschließend jeweils mit einem Schwimmkörper und einer farbigen Lüsterklemme am oberen Ende versehen, um ein Abdriften des Schwimmkörpers bei zu starker Strömung zu verhindern und eine bessere Erkennung der Stabspitze in den Bildaufnahmen zu ermöglichen. Diese Anordnung wird innerhalb der Plots in den Waldboden bis zur Oberkante des Herings eingebracht, um die nötige Standfestigkeit zu gewährleisten. Auch ein Intervall von zehn Sekunden entspricht nicht der Schwingfrequenz der meisten Stäbe von weniger als einer Sekunde. Mit einer großen Anzahl von Aufnahmen mit gleicher Zeitabfolge können die Schwingungen der einzelnen Stäbe statistisch beschrieben werden. Als Kompromiss zwischen Schwingfrequenz, langer Akkulaufzeit und seltenem Wechseln der Speicherkarten wird bei den südlichen Untersuchungsflächen ein Aufnahmeintervall von zehn Minuten gewählt; für die nördlichen eine Stunde. In Tabelle 5 sind die ersten Fotos der einzelnen Standorte, in denen Karbonfiberstäbe zu sehen sind, aufgeführt. Wegen einer verspäteten Lieferung der SK wurden die Stäbe nicht schon zu Beginn des Hochwasserereignisses aufgestellt.

Tabelle 5: Aufnahmebeginn der verwendeten Digitalkameras mit installierten Karbonfiberstäben.

Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6	Plot 7	Plot 8
16. Juni 14:00 Uhr	16. Juni 15:00 Uhr	16. Juni 19:00 Uhr	16. Juni 13:30 Uhr	17. Juni 12:45 Uhr	16. Juni 17:37 Uhr	03. Juli 19:01 Uhr	29. Juni 11:00 Uhr

Die ersten vier Plots sind bereits Mitte Mai eingerichtet worden, allerdings noch ohne Karbonfiberstäbe. Diese wurden am 17. Juni nachgerüstet. Ihre genauere Lage im Taubergießen ist in Abbildung 15 dargestellt. Hier ist erkennbar, dass Plot eins und vier sich ein Querprofil aufgrund ihrer geringen Distanz zueinander teilen. Jeder Plot erhält drei Karbonfiberstäbe, welche in der Nähe der Zollstöcke aufgestellt werden. Um die Kameras vor Hochwasser und Vandalismus zu schützen, werden sie in über zwei Metern Höhe an Bäume befestigt. Da die Aufhängung der Holzkästen keinen großen Neigungswinkel zulässt, müssen sich die zu fotografierenden Objekte in angemessenem Abstand von mehreren Metern befinden. Ein behinderungsfreier Blick auf die Stäbe ist bei dichter Strauch- und Krautschicht nicht immer gegeben. Um den Holzkasten mit der Kamera tragen zu können, werden ausreichend kräftige Bäume benötigt, die sich auch im

Überflutungsfall nur wenig neigen. Einige Kennwerte aller Standorte sind in Tabelle 6 aufgeführt. Standortpläne im Maßstab 1:100 befinden sich im Anhang.



Abbildung 15: Luftbildübersicht Standort eins bis vier im Nordosten des Taubergießen in der Nähe des äußeren Hochwasserschuttdamms (Quelle: Google Earth, verändert).

Tabelle 6: Wichtige Kenndaten Versuchsaufbau aller Untersuchungsflächen (Details s. Anhang C).

Plot	Standort	Blickrichtung (°)	Anbringungshöhe [m]	Anzahl Stäbe	Länge Querprofil [m]	Anzahl Messlotrechte
1	48° 17' 24,2" N 7° 42' 13,4" O	SW (195)	2,30	3	14,73	13
2	48° 17' 26,4" N 7° 42' 12,1" O	NNO (50)	2,70	3	14,48	13
3	48° 17' 25,9" N 7° 42' 14,9" O	S (170), O	2,30	3 bis 4	14,40	14
4	48° 17' 23,6" N 7° 42' 11,7" O	N (0)	2,30	3		
5	48° 14' 46,8" N 7° 41' 35,4" O	O	1,62	3	12,10	11
6	48° 14' 46,6" N 7° 41' 38,3" O	O	1,80	5 bis 7	14,35	13
7	48° 14' 38,8" N 7° 40' 57,4" O	SSO (160)	1,80	5 bis 7	17,15	16
8	48° 17' 48,3" N 7° 41' 43,7" O	OSO (110)	1,60	2 bis 7	23,40	22

Bei Plot drei gibt es orthogonal zur Fließrichtung aufgrund eines jungen, dichten Baumbestandes nur wenig geeignete Exemplare und gut begehbare Strecken, weshalb hier der "Kamerabaum" als Querprofilende ausgewählt wird. Geeignete Stellen für zwei weitere Plots (fünf und sechs) finden sich im Oberlanggrien westlich des Altrheins in der Nähe der Rheinstraße aus Niederhausen (s. Abbildung 1). Bei den in Tabelle 6 angegebenen Koordinaten werden die beiden Kameras mit Blickrichtung nach Osten aufgehängt. Ausgestattet wird Plot fünf mit einer Fließstrecke von drei Metern, einem Zollstock, drei Karbonfiberstäben und einem Querprofil. Plot sechs mit einer Fließstrecke von 4,45 m, einem Zollstock, fünf bis sieben Karbonfiberstäben und einem Querprofil. Während Plot fünf auf einer mit Efeu und Gras bewachsenen Lichtung etwa 50 m südwestlich der Straße eingerichtet wird, befindet sich Plot sechs in einem alten Waldbestand in der Nähe eines Feuchtbiotops und eines ehemaligen Wirtschaftsweges etwa 15 m von der Straße entfernt. Zum Zeitpunkt des Aufbaus waren beide Flächen überflutet, wobei noch keine Karbonfiberstäbe wegen fehlender SK eingesetzt werden konnten. Für die ersten vier Tage dienen die Fließstrecken zur Berechnung der Oberflächenfließgeschwindigkeit als Alternative. Etwa 70 m östlich der nördlichen im Zuge der Revitalisierung gegrabenen Bresche am Leopoldskanal wird nach dem Juni-Hochwasser am 03. Juli ein weiterer Plot eingerichtet. Hier befindet sich eine ziemlich weitläufige, mit Bäumen durchsetzte Lichtung mit teilweise Schilfbewuchs am Waldrand. An einem mehrstämmigen Baum innerhalb der Lichtung wird der Holzkasten mit der Kamera in 1,80 m über GOK angebracht.

Die nähere Umgebung weist stellenweise dichte Brennesselgewächs-Stauden und einige umgefallene Bäume auf, wahrscheinlich infolge von vorhergehenden Überflutungen. Auf einer Freifläche werden eine Reihe von Karbonfiberstäben und ein zunächst ein provisorischer Zollstock von 60 cm Länge in einer Entfernung von sechs bis zehn Metern zur Kamera aufgestellt. Im Laufe des Messzeitraums wird dieser durch einen ein Meter langen ersetzt und zusätzlich ein weiterer, zwei Meter langer Zollstock für höhere Überflutungen installiert. Ein Querprofil befindet sich nordöstlich des Kamerastandortes (Abbildung 16 rechts). Da dieser Plot sich nahe der Bresche befindet, treten hier häufige Überflutungen auf, auch bei niedrigen Hochwasser.



Abbildung 16: Versuchsaufbau an Plot 6 (links) und Querprofilansicht an Plot 7 im Überflutungszustand (rechts) (Aufnahmen vom 17.06. und 03.07.2012).



Abbildung 17: Übersicht über die Stabstandorte an Plot 7 (Aufnahme vom 09.07.2012).

Direkt südlich des Herrenkopfweges und westlich der Herrenkopfkehle befinden sich eine Reihe von Tümpeln, welche möglicherweise bei Hochwasser Anschluss an das Gewässernetz erhalten. Hier werden die ersten beiden mit SK versehenen Karbonfiberstäbe nicht weit vom Ufer eingesetzt (s. Abbildung A 26). Nachdem Mitte Juni an dieser Stelle keine Strömung zu verzeichnen gewesen ist, wird der Standort am 29. Juni in die Überschwemmungszone entlang der Hausgrundkehle in der Nähe der Langgrienquelle verlagert (Abbildung 1). Diese weist im Uferbereich eine ausreichend große Freifläche mit einigen Bäumen auf, von denen ein nahe am Ufer stehendes Exemplar als Kamerastandort ausgewählt wird, wobei die Kamera selbst den östlichen Teil der Hausgrundkehle sowie die angrenzende mit Gräsern bewachsene Freifläche überblickt.

4.8 Auswertung der stationären Kameraaufnahmen

Im Dunkeln benötigen die Kameras eine längere Belichtungszeit (inklusive kleiner Blendenzahl und großer Linsenöffnung), wobei die schwankenden Stäbe unschärfer abgebildet werden. Dies führt zu einigen nicht lokalisierbaren Positionen sowohl der Stabspitzen als auch der Stäbe selber, weshalb für die betroffenen Fotos Fehlwerte eingetragen werden müssen.

Folgende Daten werden mittels der Bildbearbeitungssoftware GIMP (GNU Image Manipulation Program) in den während der Überflutung aufgenommenen Fotos erhoben (Datentabellen s. beigefügten Datenträger):

- 1) Position der Stabspitzen im Auslenkungszustand (Pixel)
- 2) Position der Stabspitzen im Ruhezustand (Pixel)
- 3) Auslenkung der Stabspitzen gegenüber der Nulllage (Pixel, cm)
- 4) Auslenkungswinkel der Stäbe (Grad)
- 5) Wasserstand an den Zollstöcken (Pixel, cm)
- 6) Wassertiefe an den Stäben (Pixel, cm)
- 7) Korrektur Auslenkung bei Bildverschiebung (Pixel, cm)

Zu 1)

Als Stabspitze wird wegen besserer Sichtbarkeit der Berührungspunkt von Stab und Schraube innerhalb der Lüsterklemme definiert. An seitlich aufgenommenen Lüsterklemmen sind die Öffnungen für die Schraubköpfe meist deutlich zu erkennen. Die Lüsterklemmen selbst sind am freien Stabende befestigt.

Zu 2)

Die Nulllage der Stäbe (Ruhelage) wird an nicht von Hochwasser betroffenen Tagen durch Messen der Stablage ermittelt. Da die Stäbe der ereignisreichsten Standorte (Plot sechs und sieben) während der Überflutung aufgestellt wurden, muss die Nulllage nach Ablauf des Hochwassers erfasst werden. Nach einer Bildverschiebung (beabsichtigt oder unbeabsichtigt) empfiehlt sich für den darauf folgenden Zeitraum eine neue Nulllagenerfassung der Stäbe.

Tabelle 7: Verwendete Tage ohne Überschwemmung für die Nulllage (Ruhelage).

Überflutungszeitraum	Plot 6	Plot 7
16.06. - 21.06.	22./23.06.	
04./03.07. - 08.07.	04.07.	09.07.
01.09. - 03.09.	22.08.	

Mehrheitlich wird für Plot sechs der 23. Juni als Nulllage verwendet, weil er den ersten "trockenen" Tag nach der Überflutung darstellt. In der Nacht vom 22. auf den 23. Juni ist Stab drei gebrochen worden, so dass er umgelegt auf dem Boden lag, weshalb ersatzweise der 22. Juni für die Nulllage herangezogen wird. An diesem Tag betrug die Überflutungshöhe lediglich einige Zentimeter, wobei Stab drei nicht benetzt wurde.

Zu 3)

Die Positionen der jeweiligen Stabspitze in den Fotos bei Strömung werden mit dem arithmetischen Mittelwert aus der Nulllage in Beziehung gesetzt. Man erhält die Auslenkung bzw. die Abweichung der Stabspitzen zur Nulllage mit einer Längenangabe, die zunächst in Pixel ausgegeben wird. Da sich der Abstand zwischen Kamera- und Stabstandort nicht verändert hat, kann für eine Pixellänge im Foto mittels Dreisatz auf eine reale Länge abhängig der Entfernung umgerechnet werden. Dies geschieht beispielsweise indem eine Messlatte wie ein "überdimensionales Lineal" hinter jeden Stab gehalten und fotografiert wird. Eine andere Möglichkeit ist, die Markierung der Stäbe zur Auswertung heranzuziehen, indem man die Neigung in oder entgegen der Kamerarichtung vernachlässigt. Grundsätzlich nimmt eine einzelne Fotokamera eine Bildebene auf. Um einen räumlichen Eindruck für die tatsächliche Pendelbewegung erhalten zu können, werden mindestens zwei nebeneinander postierte Kameras mit gleichzeitiger Bildauslösung benötigt. Ein derartiger Aufwand - auch in Bezug auf die Bildauswertung - wird in dieser Arbeit nicht betrieben. Jedes Pixel ist durch seine Lage in x- und y-Richtung entlang der Koordinatenachsen definiert. So werden sowohl der X- als auch der Y-Wert der Stabspitzen in Null- und ausgelenkter Lage erhoben und über den Satz des Pythagoras die Auslenkungsweite für jeden fotografierten Zeitpunkt berechnet (nächste Seite):

$$\xi = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1.12)$$

mit

ξ = Auslenkung

x_1 = X-Wert Stabspitze ausgelenkter Zustand

$\bar{x}_2$ = X-Wert Stabspitze in Nulllage

y_1 = Y-Wert Stabspitze ausgelenkter Zustand

$\bar{y}_2$ = Y-Wert Stabspitze in Nulllage

Zu 4)

Es gibt unterschiedliche Methoden die fotografierten Auslenkungswinkel der Stäbe zu bestimmen. Zum Einen können sie manuell mit Hilfe des Werkzeuges "Maßband" in GIMP erfasst werden, indem eine Linie von der Stabspitze zu einem möglichst weitab gelegenen Punkt entlang des jeweiligen Stabes gezogen wird. In der Regel ist dies der Berührungspunkt der Schwimmkörpermitte mit dem Wasserspiegel. Zum Anderen kann der gesuchte Winkel anhand zweier Koordinatenpaare über den Arkustangens berechnet werden:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right) \quad (1.13)$$

mit

α = Auslenkungswinkel

x_1 = X-Wert Stabposition Schwimmkörper

x_2 = X-Wert Stabspitze

y_1 = Y-Wert Stabposition Schwimmkörper

y_2 = Y-Wert Stabspitze

Wenn der Stab allerdings derart schwankt, dass im Foto kein eindeutiger Berührungspunkt erkennbar ist, wird die Mitte festgesetzt. Dies gilt auch bei nicht scharf abgebildeten Stäben, wenn der zugehörige Schwimmkörper nicht auf dem jeweiligen Foto zu sehen ist.

Zu 5)

Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, dient ein an einer Eisen- oder Zaunstange festgebundener Zollstock als Ersatz für eine amtliche Pegellatte. In einem Abstand von 20 cm befinden sich Isolierbandstreifen als Markierung, die eine Orientierungshilfe zur Höhe des Wasserstands sind. In den einzelnen Fotos wird der Abstand zwischen einer sichtbaren Markierung und dem Wasserspiegel in Pixel gemessen und mittels Dreisatz in Zentimeter umgerechnet. Die Subtraktion der Markierungshöhe (z.B. 40 cm) mit dem Abstand ergibt auf einfache und hinreichend genaue Weise den Wasserstand, beziehungsweise die Wassertiefe.

Zu 6)

In einem Abstand von zehn Zentimetern werden die Stäbe mit einem etwa ein Zentimeter breiten Streifen mit weißer Lackfarbe markiert. Unter der Annahme, dass die Karbonfaserstäbe senkrecht stehen, lässt sich die Wassertiefe ebenfalls mittels Dreisatz näherungsweise ermitteln. Da der Waldboden nicht eben ist, befindet sich jeder Stab auf einem geringfügig unterschiedlichen Höhenniveau. So kann der Wasserstand am Zollstock nur mit einer Höhenkorrektur auf die Stäbe übertragen werden.

Zu 7)

Verändert sich der Blickwinkel der (stationären) Digitalkameras, so entsteht ein systematischer Fehler bei der Auslenkungsrechnung. Je nach Verschiebungsrichtung wird sie über- bzw. unterschätzt. Mit Hilfe eines Fixpunktes - zum Beispiel die Mitte einer Zollstockmarkierung - kann die Bildverschiebung quantifiziert und als Korrekturfaktor nachfolgender fotografischer Aufnahmen in die Auslenkung übernommen werden.

4.9 Widerstandsberechnung von umströmten Körpern

Dieses Kapitel ist vorwiegend dem Lehrbuch "Hydromechanik von Gerinnen und Küstengewässern" von Ulrich C.E. Zanke (2002) entnommen. Als ersten Schritt der Umströmungsberechnung von Körpern ist zunächst der Strömungszustand zu ermitteln, welcher durch sein Fließverhalten als laminar oder turbulent bezeichnet wird. Für die Beschreibung des Fließverhaltens von Flüssigkeiten wird die nach ihrem Entdecker OSBORNE REYNOLDS benannte dimensionslose Reynoldszahl $Re = v \cdot l_{char} / \nu$ verwendet, in die die Fließgeschwindigkeit v , die charakteristische Länge l_{char} und die kinematischen Viskosität ν als Flüssigkeitseigenschaft eingehen. Die kinematische Viskosität ν steht gegenüber der dynamischen Viskosität mit $\nu = \eta / \rho$ in Beziehung und wird meist in $\text{m}^2/\text{s} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ angegeben. Sie ist druck- und temperaturabhängig. Für 20° C warmes Wasser, was bei einem Sommerhochwasser im überfluteten Vorland nicht unrealistisch ist, und bei Atmosphärendruck von 1 bar beträgt $\nu = 1,002 \text{ m}^2/\text{s}$ (Brehm 2009, S. 7). Als Grenze zwischen laminarem und turbulentem Fließverhalten gilt ein Wert von $Re \approx 2300$. Während die Strömungsverluste bei laminarer Strömung mit der Fließgeschwindigkeit linear ansteigen, nehmen sie bei turbulentem Fließverhalten mit der 2. Potenz zu. Turbulenzen treten dann auf, wenn die Trägheitskräfte gegenüber den Zähigkeitskräften überwiegen (bei hohen REYNOLDS-Zahlen $\gg 2300$) (Zanke 2002 S. 65).

Anschließend wird aus der Druckkraftdifferenz am Körper die resultierende Kraft für den Widerstand in der Strömung berechnet. Bei einer gerichteten Strömung mit vielen zu umfließenden Vegetationshindernissen kann nicht von kleinen REYNOLDS-Zahlen ausgegangen werden, womit der Druckwiderstand der Körper größer ist als deren Reibungswiderstand. Proportional zur Druckzunahme im Staupunkt nimmt die wirksame Druckdifferenz ebenfalls zu. Der Faktor der Druckzunahme ist stark von der Form des umflossenen Körpers abhängig. Auf feste Widerstände treffende Flüssigkeiten und Gase werden nach dem Auftreffen zur Seite abgelenkt, sowohl horizontal als auch vertikal. Somit wirken Teilkräfte auf umströmte Körper in die genannten Richtungen. Als Berechnungsgleichung des Strömungswiderstandes in horizontaler Richtung gilt folgende Beziehung (nächste Seite):

$$F_w = \frac{1}{2} c_D \rho v^2 A_{proj} \quad (1.14)$$

mit

F_w = Fluidodynamischer Widerstand [N]

c_D = Druckwiderstandsbeiwert [-]

ρ = Dichte [kg/m^3]

v = Anströmgeschwindigkeit [m/s]

A_{proj} = Projektionsfläche / Anströmfläche [m^2]

Als Druckwiderstandsbeiwert c_D (engl. drag coefficient) wird ein Proportionalitätsfaktor bezeichnet, der von der spezifischen Körperform und bei nicht voll ausgebildeter Turbulenz hinter dem Körper auch von dessen Re_d -Wert (d = Körperdurchmesser) abhängt. Durch Umformung obiger Gleichung erhält man den c_D - / c_{wD} - Wert:

$$c_D = \frac{F_w}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{proj}} \quad (1.15)$$

Bei geringen Re-Zahlen kommt der Reibungswiderstandsbeiwert c_{wR} hinzu, der in der Praxis häufig nicht angegeben wird. Zusammen mit dem Druckwiderstandsbeiwert ergibt er den Widerstandsbeiwert c_w (Koch 2003):

$$c_w = c_{wD} + c_{wR} \quad (1.16)$$

Nach Oertel et al. (2011) besitzt eine Tonnenform, wie sie die SK aufweisen, einen c_w -Wert von 0,59. Als Anströmfläche wird eine halbe Oberfläche A eines gestreckten Ellipsoiden (Rotationsellipsoiden) mit den Halbachsen a , b und c ($a > b = c$) verwendet:

$$A = \pi \cdot c^2 \left(1 + \frac{c}{a} \frac{\arcsin \varepsilon}{\varepsilon} \right) = 2A_{proj} \quad (1.17)$$

mit

a = Durchmesser des SK in der y -Achse [mm]

b = Durchmesser des SK in der x -Achse [mm]

c = Durchmesser des SK in der z -Achse [mm]

ε = numerische Exzentrizität des Ellipsoiden [-] $= \sqrt{1 - (c/a)^2}$

Die Länge der Halbachsen entsprechen der Geometrie der SK in

Tabelle 4. Somit weist der kleinere, tönchenförmige SK eine Anströmfläche von $0,010 \text{ m}^2$ und der größere, eiförmige SK $0,0175 \text{ m}^2$ auf. Wenn nun die einzelnen Größen bei $\rho = 998,20 \text{ kg/m}^3$ für Wasser mit einer Temperatur von 20°C unter Atmosphärendruck und einer Fließgeschwindigkeit von $0,20 \text{ m/s}$ zusammengerechnet werden, erhält man einen resultierenden Fluidodynamischen Widerstand F_w für den eiförmigen SK von $0,1 \text{ N}$ (für den tönchenförmigen $0,053 \text{ N}$). Weil die SK nicht komplett eintauchen wird nur ein Teil ihrer Oberfläche umströmt. Als nicht benetzte Teilfläche wird eine Gleichung für die Berechnung von mit Brennstoff gefüllten Tankoberflächen angewendet, wobei die Tanks eine ellipsoidische Form aufweisen. Das gefüllte Segment entspricht dabei der nicht benetzten SK-Oberfläche:

$$A_s = \frac{HB}{4} \left(\arccos \left(1 - \frac{2H_s}{H} \right) - \left(1 - \frac{2H_s}{H} \right) \cdot \sqrt{\frac{4H_s}{H} - \frac{4H_s^2}{H^2}} \right) \quad (1.18)$$

mit

A_s = nicht benetzte Schwimmkörperfläche [m^2]

H = Höhe [m]

B = Breite [m]

H_s = Segmenthöhe [m]

Beim eiförmigen SK beträgt die nicht benetzte Segmenthöhe im Ruhezustand ein cm, bei tönnchenförmigen aufgrund seiner vergleichsweise geringeren Beschwerung zwei cm. Nicht berücksichtigt werden Flächenänderungen infolge von Pendelbewegungen sowie mit hohen Fließgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Biegungen der Stäbe als Abweichung von der Ruhelage. Zusätzlich zu den SK bewirken auch die Karbonfaserstäbe einen, wenn auch geringeren, Strömungswiderstand. Ihre Form ähnelt einer quer angeströmten Walze. Dabei geht das Verhältnis von Länge zu Durchmesser in die Berechnung des c_w -Wertes ein. Bei einer Länge l von rund einem Meter und einem Durchmesser d von zwei Millimetern wird das Verhältnis l/d mit 500 als unendlich angesehen, wofür $c_w = 1,20$ bei einer REYNOLDS-Zahl niedriger als $9 \cdot 10^{-4}$ als Literaturwert angegeben wird (Skript Strömungsmechanik I, Universität Magdeburg). Die Anströmfläche von Stäben entspricht der Hälfte der Oberfläche von Zylindern (ohne Grundfläche):

$$A_{\text{proj}} = \pi \cdot r \cdot L \quad (1.19)$$

mit

r = Radius [m]

L = benetzte Länge [m]

hierbei wird annäherungsweise die Wassertiefe h als benetzte Stablänge L angenommen.

4.9.1 Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten aus Stabauslenkungen

Bei den Strömungsmessungen liegen als Messwerte die Auslenkungswinkel α und die Wassertiefen h (Lotrechte zur Länge der Hebelarme) vor. Um α mit (1.11) in Beziehung setzen zu können, ist eine Umrechnung ins Bogenmaß nötig:

$$\alpha = \frac{\varphi \cdot 180}{\pi} \quad (1.20)$$

Die Druckkraft der Strömung auf die Schwimmkörper ermittelt sich durch Umstellung von (1.11) zu:

$$F_w = \frac{\varphi \cdot 2 \cdot E \cdot J}{h^2} \quad (1.21)$$

In obige Gleichung wird φ eingesetzt und nach α aufgelöst:

$$\alpha = \frac{F \cdot h^2 \cdot 180}{2 \cdot \pi \cdot E \cdot J} \quad (1.22)$$

nach Einsetzen der Konstanten ergibt sich (nächste Seite):

$$F_w = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot 135000 \cdot 0,785}{180 \cdot h^2} \quad (1.23)$$

Bei einem Auslenkungswinkel von 2° und einer Wassertiefe von 20 cm errechnet sich eine auf den Stab wirkende Druckkraft von $F_w = 0,185$ N. Als arithmetisches Mittel des Flächenträgheitsmomentes J für einen kreisrunden Querschnitt aus neun untersuchten Stäben ergibt sich obiger Wert über folgende Beziehung (nächste Seite):

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (1.24)$$

Wie in Kapitel 4.9 beschrieben sind für den tönncchenförmigen SK eine Anströmfläche A_{proj} von $0,01 \text{ m}^2$ und beim eiförmigen SK $0,0175 \text{ m}^2$ ermittelt worden. Der gesamte Strömungswiderstand der Anordnung setzt sich zusammen aus dem Widerstandsanteil des Schwimmkörpers und des von der Überflutungshöhe abhängigen Anteils des Karbonfiberstabes (s.(1.14)):

$$v = \sqrt{\frac{F_w}{0,5 \cdot \rho \cdot (c_{w_{Stab}} \cdot \pi \cdot r \cdot h + c_{w_{SK}} \cdot A_{proj_{SK}})}} \quad (1.25)$$

Auf der Grundlage dieser Gleichung lassen sich die Fließgeschwindigkeiten aus den Variablen der Wassertiefen und der Auslenkungswinkel ermitteln. Über den Arkustangens lässt sich auch ausgehend von der horizontalen Auslenkung und der Stablänge der Auslenkungswinkel α berechnen, allerdings berücksichtigt diese einfache Winkelfunktion nicht den Bieungsgrad der Stäbe unterhalb der Wasseroberfläche.

5 Ergebnisse

Bei Tageslicht sind die verwendeten Karbonfiberstäbe mit ihren weißen Farbmarkierungen auf den Fotos der Intervallkameras gut erkennbar. Im frühen Morgengrauen und bei später Dämmerung sind die anthrazitfarbenen Stäbe allerdings häufig nicht sichtbar, weshalb bei den jeweiligen Fotos Fehlwerte in den Auslenkungswinkeln eingesetzt werden müssen. Durch die Verwendung von Leuchtband direkt unterhalb der Lüsterklemmen und in der Auswertung späterer Fotos mit mehr Sonneneinstrahlung lässt sich die Position des Berührungspunktes für die Auslenkung rekonstruieren.

5.1 Aufgetretene Hochwasserereignisse

Während des Untersuchungszeitraumes (16. Mai bis 10. September 2012) haben drei Hochwasserereignisse stattgefunden. Beim ersten handelt es sich um ein 2-jährliches Hochwasser mit einem Abfluss von $2478 \text{ m}^3/\text{s}$ am 13. Juni 2012 am amtlichen Pegel Basel / Rheinland-halle gemessen (vgl. Anhang A: provisorische Abflussdaten des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie) bzw. 2205 m^3 am Pegel Hauenstein (Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW), s. Datenblatt auf Datenträger). Mit insgesamt 17 Tagen Überflutungsdauer zeigte Plot sechs sich als "ergiebigste" Untersuchungsfläche. In Bezug auf die Überflutungshöhe traten bei Plot sieben Wassertiefen auf, bei denen ein Aufenthalt ohne Boot als gefährlich einzustufen ist. An den Hochwasserspitzen der im Juni und September aufgetretenen Hochwasserereignisse ist keine Person vor Ort gewesen.

Zusätzlich zu den drei Überflutungsereignissen von Juni bis September erfolgt Mitte Oktober ein viertes, jedoch nicht hydrometrisch erfasstes Rheinhochwasser. Zu dieser Zeit sind die Messeinrichtungen seit einem Monat abgebaut (s. Anhang). Eine Ein-Person-Exkursion in die Überschwemmungsgebiete des Taubergießen gegen Nachmittag des 12. Oktober liefert einige Überflutungshöhen und Eindrücke der überfluteten Aue (s. Nachwort).

5.1.1 Überflutungsdauer

Die Instrumentierung mit Karbonfiberstäben in den Untersuchungsflächen (Plots) erfolgte zu den in Tabelle 5 angegebenen Zeiten. Querprofile der Plots eins bis sechs werden am 13. Juni gespannt, die übrigen an den Tagen der Instrumentierung. Wegen ausbleibender Überflutung bzw. Strömung sind die Plots drei und acht verlegt worden. Plot drei befand sich auf leicht erhöhtem Gelände und blieb während der Hochwasserspitze am 13. Juni trocken, weshalb ein nahe gelegener Standort auf niedrigerem Niveau eingerichtet wurde. Ursprünglich am 12. Juni in der Nähe des Herrenkopfweges in einem stehenden Gewässer mit zwei Karbonfiberstäben installiert, blieb an Plot acht die erhoffte Dynamik bis zum 29. Juni aus. Dies stellte ebenfalls einen Grund für einen neuen Standort dar, der in der Nähe der Langgrienquelle im Süden des Taubergießen gefunden wurde. Tabelle 8 beinhaltet die beobachteten Überflutungszeiten an den einzelnen Plots bei Tageslicht.

Tabelle 8: Beobachtete Überflutungszeiten der einzelnen Untersuchungsflächen. Nächtliche Aufnahmen sind aus technischen Gründen nicht möglich.

Datum	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6	Plot 7	Plot 8
12.06.						14:45 - 17:47	keine Bilder	keine Bilder
13.06.	06:00 - 21:00	08:00 - 21:00		06:00 - 21:00	16:51 - 21:45	11:17 - 14:07	keine Bilder	keine Bilder
14.06.	06:00 - 21:00	06:00 - 10:00	18:00 - 21:00	06:00 - 21:00	11:07 - 16:40	12:57 - 15:52	keine Bilder	keine Bilder
15.06.	06:00 - 14:00	06:00 - 14:00	06:01 - 14:01	06:00 - 21:00	13:00 - 21:44	12:02 - 14:48	keine Bilder	keine Bilder
16.06.				06:00 - 21:00	05:15 - 21:30	10:03 - 20:46	keine Bilder	keine Bilder
17.06.						14:01 - 21:21	keine Bilder	keine Bilder
18.06.						05:41 - 21:41	keine Bilder	keine Bilder
19.06.						05:31 - 21:01	keine Bilder	keine Bilder
20.06.						05:41 - 21:26	keine Bilder	keine Bilder
21.06.						05:26 - 14:06	keine Bilder	keine Bilder
22.06.						06:00 - 21:00	keine Bilder	keine Bilder
02.07.						11:50 - 21:00		
03.07.						05:40 - 10:00	19:01 - 21:41	20:20 - 21:50
04.07.						08:50 - 21:30	05:21 - 21:41	
05.07.						05:30 - 14:00	07:01 - 21:31	
06.07.						05:50 - 21:30	05:51 - 21:41	
07.07.						05:30 - 12:30	05:31 - 21:41	
08.07.							06:11 - 21:41	
01.09.							17:20 - 20:20	18:53 - 20:23
02.09.							06:50 - 20:10	06:43 - 17:03
03.09.							06:50 - 10:00	

5.1.2 Fließrichtung und Überflutungshöhen

An den Plots eins bis vier erfolgte die Kameraaufhängung und Zollstockaufstellung vor Überflutungsbeginn, warum eine ideale orthogonal zur Fließrichtung ausgerichtete Blickrichtung der Digitalkameras nicht immer gegeben ist. So floss das Hochwasser an Plot eins in Richtung Nordosten einer geringfügig tiefer gelegenen Lichtung zu und damit entgegen der Kamerablickrichtung. An Plot zwei floss es dagegen in Kamerarichtung. Bei den übrigen Plots (mit Ausnahme der verlegten) waren die Kamerapositionen orthogonal zur Fließrichtung angebracht (s. Standortkarten im Anhang).

Das Juni-Hochwasser erreichte die nördlichen Plots am Herrenkopfgrund in der Nacht vom 12. auf den 13. Juni (Abbildung 18). Am Morgen dieses Tages wurde an Plot eins bereits ein Wasserstand von 28 cm registriert. Im Laufe des Tages stieg er auf einen Maximalwert von 46 cm (14:00 Uhr), sank in den nachfolgenden Stunden leicht ab und blieb bis zum frühen Morgen des Folgetages konstant bei 41,5 cm. Anschließend sank der Wasserstand kontinuierlich bis in die Mittagsstunden des 15. Juni Pfützen übrig bleiben, deren (Rest-)Wasser innerhalb eines Tages versickerte. Die Überflutungshöhe betrug hier etwa 20 cm mehr als bei Plot zwei. Aufgrund der räumlichen Nähe aller vier Plots ist der Hochwasserverlauf ähnlich. Da der Zollstock an Plot vier

in einem etwa 45 cm tiefen Graben errichtet wurde, ist dort der Wasserstand gegenüber Plot eins im Durchschnitt 32 cm höher. Nachdem Plot drei am 14. Juni verlegt worden ist, erreichte am neuen Standort der Wasserstand ein Maximum von 28 cm (19:00 Uhr). Aufgrund eines nicht optimal ausgerichteten Kamerablickfeldes konnten am Folgetag keine Wasserstände unterhalb von 20 cm erfasst werden. Etwa acht Stunden nach dem letzten ablesbaren Wasserstand fällt der Standort trocken. Bei Plot fünf und sechs tritt die Überflutung früher auf, da diese Standorte bei der Messinstallation bereits 36 bzw. 56 cm hoch überflutet waren. Die wenige Stunden umfassenden Zeiträume zu Beginn der Beobachtungen gehen auf das minimal einstellbare Aufnahmeintervall zurück, wobei die Speicherkarte nach $2\frac{3}{4}$ Stunden zu wechseln gewesen wäre.

Am 03. Juli wurde hinter der nördlichen rechten Leopoldskanalbresche Plot sieben während eines Überschwemmungsereignisses neu eingerichtet, hier steigt der Wasserstand am ersten innerhalb von einer Stunde und 40 Minuten von 49 auf 90 cm (19:00 bis 20:40 Uhr). Dieser Juli-Hochstand ist jedoch rekonstruiert, weil der aufgestellte 60 cm lange Zollstock überspült wurde. Am Morgen des Folgetages erreicht das Wasser ebenso Plot sechs (gegen 07:00 Uhr). Während das Ereignis am östlichen Plot nach vier Tagen wieder vorüber ist, dauert es an Plot sieben Tage an (Abbildung 19). Auch hier führt eine Fehleinstellung der optischen Bildvergrößerung dazu, dass Wasserstände unterhalb von 17 cm nicht am Zollstock abgelesen werden können. Daher wird eine Projektion der umliegenden Stäbe auf den Zollstockstandort durchgeführt. Bei der ersten Plot acht erreichenden Hochwasserwelle ist der Wasserstand anhand von Marken nur schwer rekonstruierbar und wird aus Zeitgründen nicht in Abbildung 22 dargestellt. Erst später erfolgte ein Nachrüsten mit einem 2 m langen Zollstock an einer etwa 50 cm tiefen Stelle in der Hausgrundkehle. In Abbildung 21 ist das September-Hochwasser an den südlich in der Nähe des Leopoldskanals befindlichen Plots dargestellt. Man erkennt an Plot sieben einen schnellen Anstieg der Überflutungshöhe. Innerhalb von zehn Minuten stieg das Wasser vom Trockenzustand um 37 cm an und erreichte drei Stunden später einen Hochstand von 1,22 m (20:00 Uhr). In den letzten beiden Fotos vor Nachteinbruch ist ein leichter Rückgang erkennbar. Am folgenden Morgen beträgt der Wasserstand am Zollstock lediglich 69 cm, steigt bis 12:30 Uhr auf 84 cm an und fällt bis Nachteinbruch auf 41 cm. Am Morgen des 03. September ist die Überflutungshöhe auf etwa elf cm zurückgegangen und fällt weiter bis gegen 08:00 Uhr der Zollstock nicht mehr benetzt wird. Abbildung 22 zeigt einen nahezu konstanten Wasserstand in der Hausgrundkehle innerhalb von 77 Tagen mit Ausnahme der Hochwasserwellen.

Wenn der an den Zollstöcken ablesbare Wasserstand sich unterhalb des Bildrandes befindet, ist es nicht möglich ihn anhand der Fotos direkt abzulesen, weshalb er aus Überflutungshöhen an den umliegenden Stäben rekonstruiert werden muss. Am langen Zollstock wird im Mittel ein um fünf Zentimeter höherer Wasserstand angezeigt. Dies lässt darauf schließen, dass die Geländeoberfläche an seiner Position um diese Länge höher liegt.

Die Daten zu den beobachteten Wasserständen sind auf dem beigefügten digitalen Datenträger in der Tabelle "Auslenkung und Wasserstand" unter der Rubrik Wasserstand enthalten.

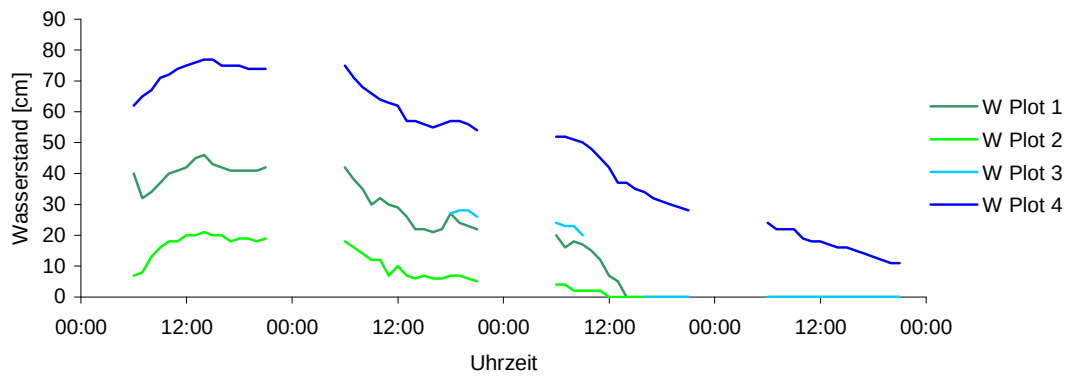


Abbildung 18: An den Zollstöcken abgelesene Wasserstände im Stunden-Intervall an den Plots eins bis vier im Zeitraum 13.06. bis 16.06.2012.

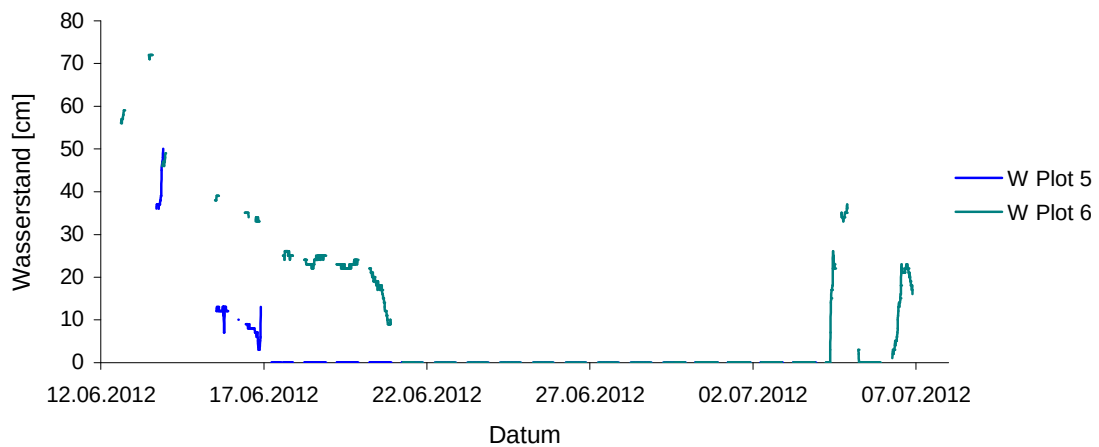


Abbildung 19: An den Zollstöcken abgelesene Wasserstände im 10-Minuten-Intervall an den Plots fünf und sechs im Zeitraum 12.06. bis 07.07.2012.

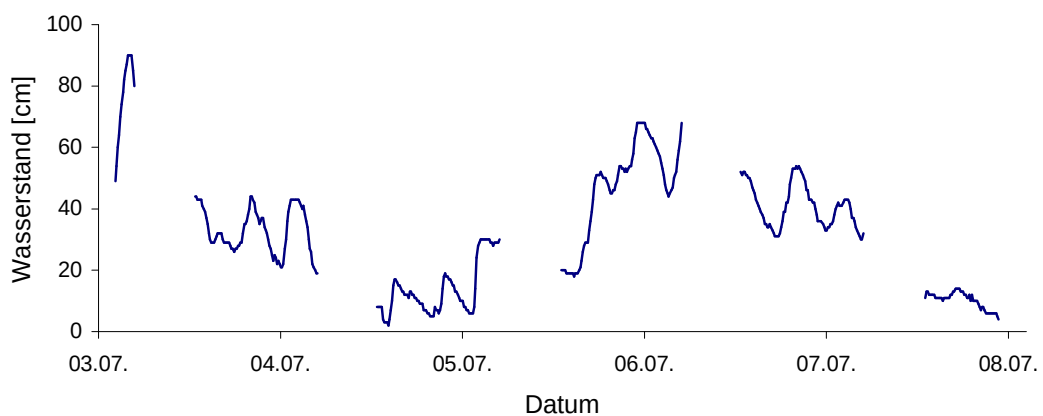


Abbildung 20: Am Zollstock abgelesene Wasserstände im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03.07. bis 11.07.2012.

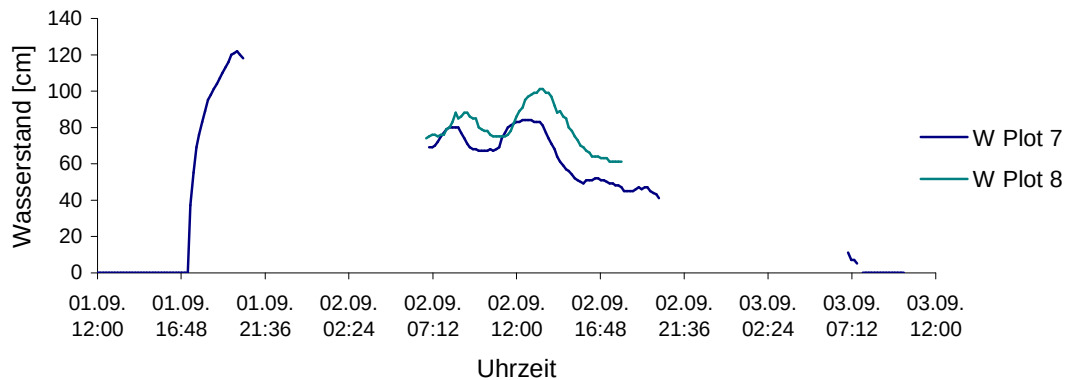


Abbildung 21: An den Zollstöcken abgelesene Wasserstände im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben und acht im Zeitraum 01.09. bis 03.09.2012.

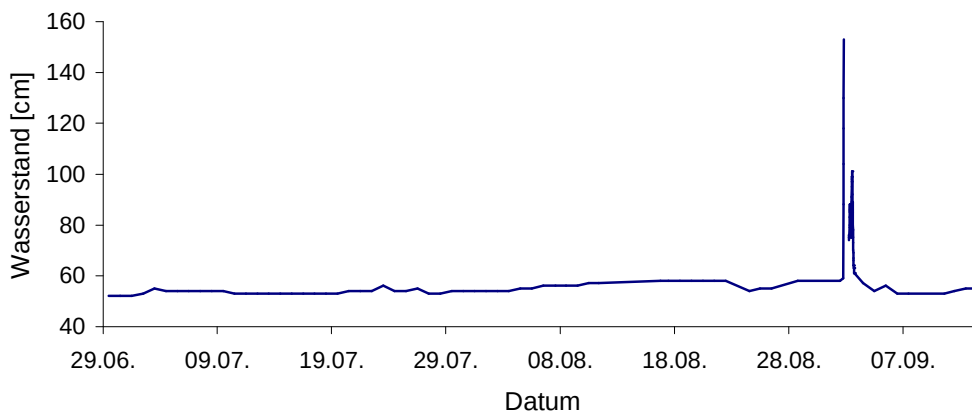


Abbildung 22: Am Zollstock und an Karbonfaserstäben täglich abgelesene Wasserstände an Plot acht im Zeitraum 29.06. bis 13.09.2012 mit Darstellung der Hochwasserwelle vom 02.09.2012 (vgl. Abbildung 21, ohne Hochwasserwelle vom 03.07.2012).

5.2 Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit anhand von Karbonfaserstäben in Abhängigkeit der Wassertiefe

5.2.1 Trockenkalibrierung und Vorversuch

Maximal wird bei einer Krafteinwirkung auf den untersuchten KFS im Bereich von 0,1 bis 1 N ein Winkel von $54,1^\circ$ erreicht. Bei einem Niveau von etwa 50 cm (eiförmiger SK) beziehungsweise 60 cm (tönnchenförmiger SK) bewirkt das Eigengewicht des mit Muttern beschwerten SK eine erheblich zunehmende Biegung des zwei Millimeter im Durchmesser messenden KFS. Je höher der SK auf dem Fiberstab angeordnet wird (entsprechend des gedachten Wasserspiegelniveaus), desto größer wird der gemessene Abweichungswinkel in der Auslenkung gegenüber dem umströmten Zustand, bei dem der SK auf der Wasseroberfläche schwimmt und keinen seine Gravitation das Auslenkergebnis nicht beeinflusst. Ab einem kritischen Niveau bewirkt allein das Eigengewicht des SK eine derart starke Stabneigung in Zugrichtung, dass ohne äußere

Einwirkung der Karbonfiberstab in ausgelenkter Lage verharret. Die Versuche sind daher oberhalb des kritischen Niveaus abgebrochen worden. Die erhobenen Auslenkungen in Abhängigkeit vom SK-Niveau sind in Abbildung 23 dargestellt, worin das Biegemoment der dünnen KFS veranschaulicht wird. Dieser Kalibrierungsversuch zeigt einen Zusammenhang der Auslenkung x [cm] vom Angriffspunkt der Zugkraft und der Beeinflussung derselben durch das jeweilige Eigengewicht der beschwerten SK. Deutlich erkennbar ist die Proportionalität des Biegemomentes zur Hebelarmlänge. Wird letztere verlängert, erhöht sich x bei unveränderter Zugkraft. Ab einem kritischen Niveau verfälscht das Eigengewicht der beschwerten SK die Zielgröße, wobei sie deutlich überschätzt wird. Während sich x bei den Niveaus von zehn bis 30 cm in der Abbildung nahezu gleichen, ist ab einer Hebelarmlänge von 40 cm eine mit zunehmender Zugkraft erhöhende Abweichung der verschiedenen SK aufgrund ihres jeweiligen Gewichtes zu erkennen (Abbildung 23).

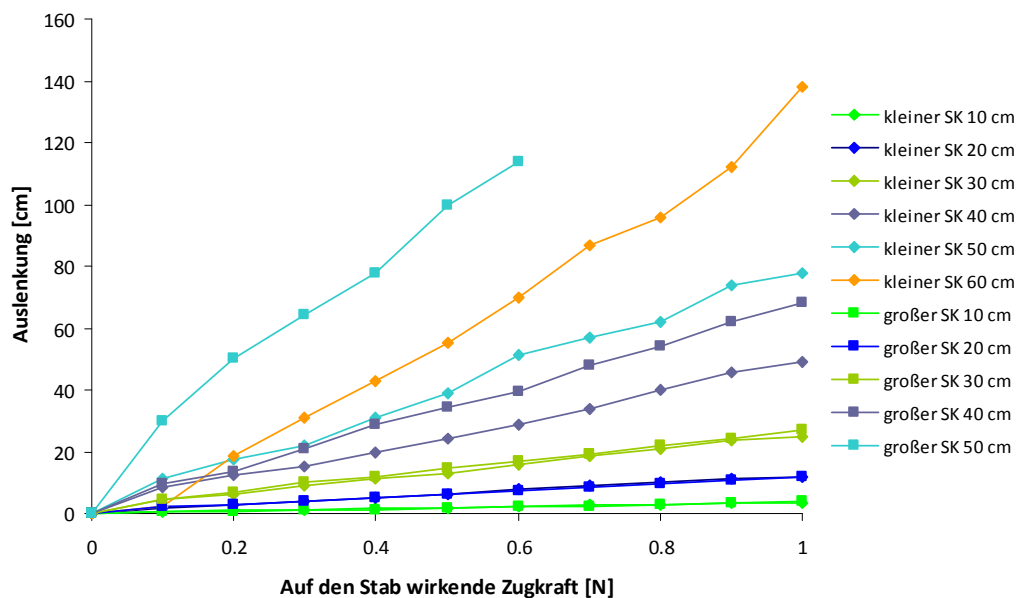


Abbildung 23: Korrelation zwischen Zugkraft und Auslenkung bei der Trockenkalibrierung.

Bei aufgesetztem eiförmigen SK und einem Niveau von 50 cm ist nach einer Kraftauswirkung von 0,6 N die Testreihe aufgrund zu starker Stabneigung abgebrochen worden. Der zweite Wert vom 60 cm-Niveau des tönchenförmigen SK stellt wahrscheinlich einen Messfehler dar.

Auch die Auslenkungswinkel in Bezug auf die ausgeübte Zugkraft zeigen einen sehr ähnlichen Zusammenhang. Einige Ergebnisse aus der Trockenkalibrierung lassen sich auf ein überflutetes Areal übertragen. So besteht eine starke Abhängigkeit der Auslenkung von der Wassertiefe, weil sich der Stab mit zunehmendem Hebelarm mit geringerem Kraftaufwand auslenken/biegen lässt. Als ersten Test für die Ermittlung von Druckkräften durch fließendes Wasser wird ein Vorversuch in zwei kleinen Fließgewässern durchgeführt. Eine quantitative Messung anhand der Stöckchenmethode über Fließstrecken von 8 beziehungsweise 10 Metern ergab durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten von 0,07 beziehungsweise 0,44 m/s (Tabelle 9). Die Wassertiefen werden anhand von Fotoaufnahmen rekonstruiert; sie entsprachen etwa 50 und 15 cm.

Tabelle 9: Vorversuch am 08.06.2012 in näherer Umgebung der Nieper Kühlen (Neukirchen-Vluyn).

Messung	Nieper Kühlen (Durchstich)		Offener Entwässerungskanal	
	t [s]	v [m/s]	t [s]	v [m/s]
1	115	0,07	25	0,40
2	110	0,07	23	0,43
3	116	0,07	21,5	0,47
4	105	0,08	22,5	0,44
5	115	0,07	19,2	0,52
6			25	0,40
7			22	0,45
$\bar{x}$	112,2	0,07	22,6	0,44

In den Nieper Kühlen reichte die Oberflächenfließgeschwindigkeit nicht für eine Anzeige auf der Federwaage aus, weshalb nur die aus dem offenen Entwässerungskanal ermittelte Druckkraft in (1.7) eingeht. Hier wurde für den kleineren tönchenförmigen SK eine Druckkraft von 0,11 N und für den größeren eiförmigen eine Druckkraft von 0,21 N gemessen. Demnach entspricht eine Zugkraft von beispielsweise 0,5 N einer korrespondierenden Fließgeschwindigkeit v_{Stab} von zwei Metern pro Sekunde. Beim veränderten Zugversuch besteht mittels fotografischer Auswertung die Möglichkeit die Auslenkung und den Auslenkungswinkel ohne mechanische Beeinträchtigung der Anordnung zu bestimmen. In Abbildung 13 ist das Biegeverhalten eines eingespannten und ausgelenkten KFS deutlich zu erkennen. Unterhalb der Stelle an der die Schnur ansetzt, biegt sich der Stab in Zugrichtung, während er oberhalb gerade ist. Auf diesen Stab wird stufenweise eine Zugkraft ausgewirkt und die resultierende(n) Auslenkung und Auslenkungswinkel fotografisch festgehalten (Abbildung 24).

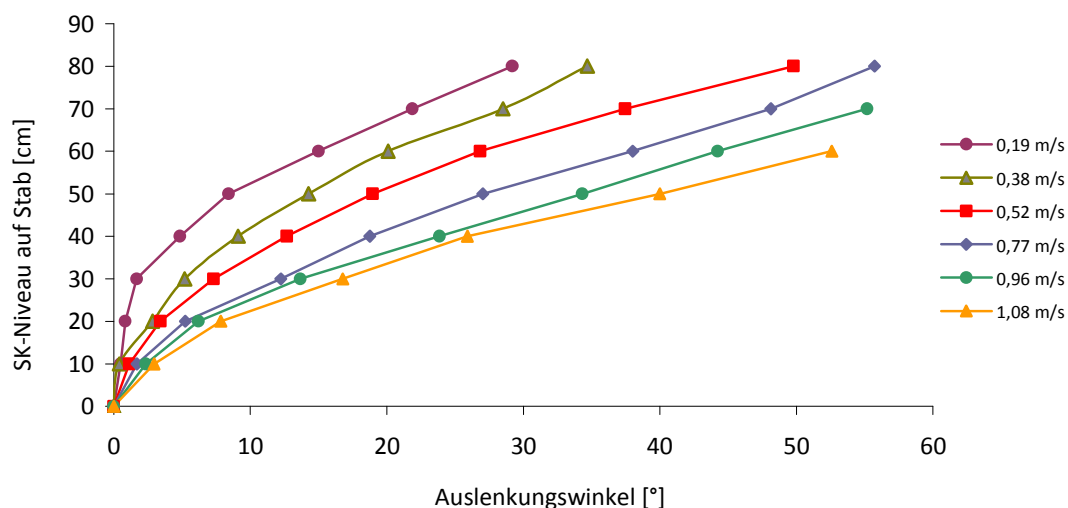


Abbildung 24: Korrelation von SK-Niveau und Auslenkungswinkel in Abhängigkeit der horizontalen Zugkraft F_z mit aus der Nasskalibrierung (s. Kapitel 5.2.2) erhobenen extrapolierten Fließgeschwindigkeiten.

Hieraus wird eine Korrelation zwischen gemessener Auslenkung und korrelierter Fließgeschwindigkeit hergestellt (Abbildung 25). Werte über 1,0 m/s werden in der überfluteten Aue nur innerhalb von Schluten gemessen.

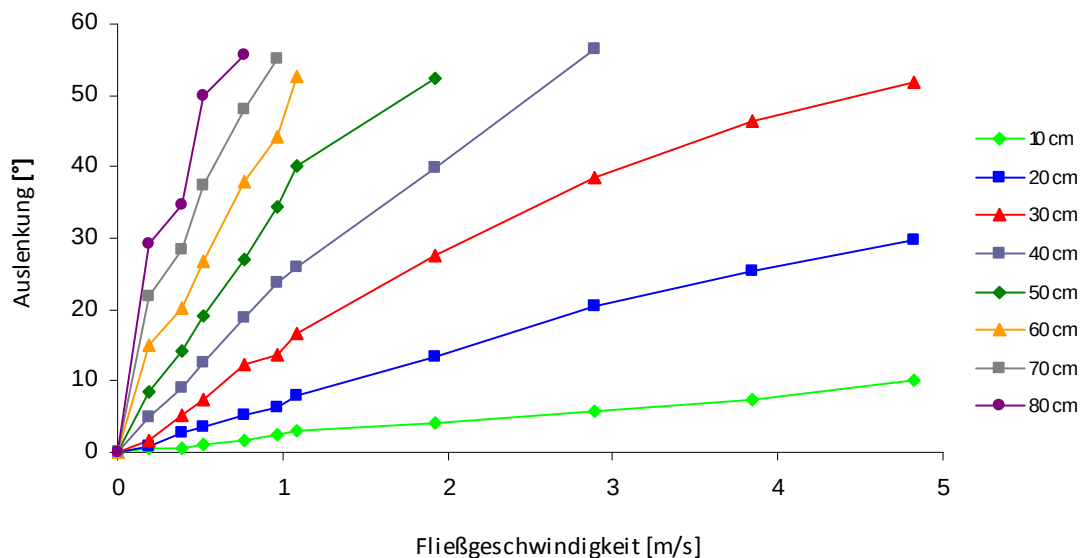


Abbildung 25: Korrelation von horizontaler Auslenkung und Fließgeschwindigkeit bei verschiedenen SK-Niveaus.

Deutlich lässt sich hieran der Zusammenhang des Beugegrades mit der ausgeübten Zugkraft erkennen: Je geringer das angehängte Gewicht und kürzer der Hebelarm, desto näher verbleibt der Stab an der Senkrechten als Ausgangslage. Charakterisieren lassen die Kurvenverläufe als natürliche Logarithmusfunktionen. Einige Ausreißer treten hier auf, so sind die Auslenkungswinkel auf 80 cm SK-Niveau bei angelegten 20 und 40 g wahrscheinlich zu niedrig.

5.2.2 Nasskalibrierung

Die Nasskalibrierung in der Peregrinskehle wurde am 16. Juni bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,54 m/s an einem einzigen Standort durchgeführt. Während vor Kalibrierungsbeginn die Strömung durchschnittlich 0,57 m/s schnell war, nahm sie nach deren Ende um 0,05 m/s ab. Bei aufgestecktem tönnchenförmigen SK beträgt die zur Wiederherstellung der senkrechten Stablage benötigte Kraft durchschnittlich 0,28 N mit einer Standardabweichung S von 0,06 N. Wird der eiförmige SK verwendet, zeigte die digitale Hängewaage eine Kraft von durchschnittlich 0,55 N mit einer Standardabweichung von 0,13 N an. Umgerechnet auf ein m/s ergeben sich Kräfte von 0,52 bzw. 1,02 N. Wird die Einheit Newton als Umrechnungsfaktor verwendet, würde ein N bei kleinem SK 1,93 m/s und bei großem SK 0,98 m/s entsprechen. Die aus

Tabelle 10 ermittelten mittleren Fließgeschwindigkeiten und Zugkräfte werden mit den Ergebnissen aus der zweiten Trockenkalibrierung kombiniert. Die Kursiv geschriebenen Fließgeschwindigkeiten wurden vor Beginn der Nasskalibrierung gemessen, die übrigen nach Abschluss.

Tabelle 10: Gemessene Fließgeschwindigkeiten und Zugkräfte während der Nasskalibrierung.

v [m/s]	SK A	SK B
	F_z [N]	F_z [N]
0,54	0,31	0,40
0,58	0,27	0,53
0,6	0,27	0,49
0,53	0,18	0,58
0,55	0,18	0,80
0,47	0,36	0,67
0,53	0,31	0,62
0,52	0,27	0,45
0,53	0,31	0,54
0,51	0,31	0,40

5.2.3 Elastizitätsuntersuchung

Im beschriebenen Zugversuch wird das Zuggewicht von 100 bis 1000 g in 100 g-Schritten erhöht. Durch den auf den einzelnen Stab wirkende, nach unten gerichtete Kraft lässt sich die Durchbiegung f mittels einer Längenmessuhr erfassen und der E-Modul über Anwendung des Hooke'schen Gesetzes berechnen. Insgesamt werden neun Stäbe hinsichtlich ihrer Durchbiegung untersucht. Hierbei tritt eine Streubreite auf, die während Erhöhung der Zugkraft deutlich zunimmt. Weisen alle Stäbe bei leichten Zugkräften noch geringe Abweichungen von bis zu 0,4 mm auf, so erhöhen sie sich auf 1,5 mm bei einer Zugkraft von 10 N (Stab 1 und Stab 4). Grundsätzlich verdeutlicht die Elastizitätsuntersuchung eine lineare Korrelation zwischen Zugkraft und Durchbiegung (Abbildung 26). Auffällig ist, dass der E-Modul mit zunehmendem Zuggewicht abnimmt (vgl. Tabelle A 2), welcher auf Basis von (1.10) bestimmt wird. Als arithmetisches Mittel der Elastizität der neun Stäbe wird ein Wert von $0,785 \text{ mm}^4$ ermittelt.

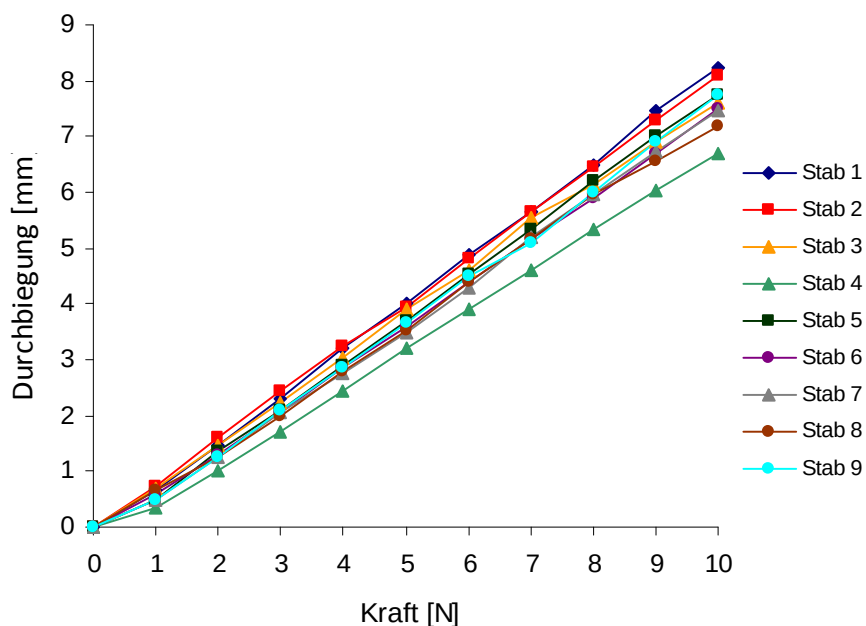


Abbildung 26: Verhältnis zwischen den Größen Zugkraft und Durchbiegung zur Ermittlung des E-Moduls.

5.2.4 Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 1 bis 5

An den Untersuchungsflächen eins bis fünf war das Hochwasser bereits wieder abgeflossen als die Instrumentierung Mitte Juni erfolgte (s. Tabelle 8). Ein späteres Hochwasserereignis blieb bis zum Ende der Messperiode aus. Damit sind an diesen Standorten zwar Überflutungshöhen, jedoch keine kontinuierliche Aufnahme der Fließgeschwindigkeit aus der Auslenkung von Karbonfiberstäben verfügbar.

5.2.5 Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 6

An diesem Standort entstanden zahlreiche Aufnahmen. Insgesamt wurden die Karbonfiberstäbe 6875 Mal im Zusammenhang mit den auftretenden Fließgeschwindigkeiten bei insgesamt 11710 Überflutungsaufnahmen fotografiert. Bei der restlichen Anzahl handelt es sich um Fotos mit der Intention aus der Verfolgung von treibenden Objekten im 10-Sekunden-Intervall auf die Oberflächenfließgeschwindigkeit zu schließen (s. Kapitel 5.4). An Plot sechs strömt das Wasser aus Richtung des nahe gelegenen Feuchtbiotops über einen ehemaligen Wirtschaftsweg aus verschiedenen östlichen Richtungen auf die Karbonfiberstäbe (Abbildung A 24 links). Mit großer Wahrscheinlichkeit stammt das lokale Hochwasser aus dem nahe gelegenen Altrhein. In der Strömung befinden sich fünf im Auenboden verankerte Karbonfiberstäbe im Blickfeld der in einer Höhe von 1,60 m mit einem minimalen Abstand von 3,60 m aufgehängten Kamera (zwei Stäbe kamen nach den Hochwasserereignissen im Juni und Juli hinzu und wurden bis zur erneuten Überflutung Mitte Oktober nicht ausgelenkt).

In der folgenden dreiteiligen Abbildung 27 sind die Auslenkungen der fünf KFS im 10-Sekunden-Intervall am 16. Juni dargestellt. Man erkennt einen deutlichen Unterschied im Schwingverhalten der Stäbe ohne SK (Stab eins und Stab fünf innerhalb der ersten Viertelstunde) und mit SK. Im Video HDV_0493 ist ein direkter Vergleich zwischen Stab eins (im Vordergrund ohne SK und Lüsterklemme) und den Stäben zwei (SK B) und drei (SK A) möglich. Während die Stäbe zwei und drei in der schneller fließenden Strömung des Nebenarms (s. Abbildung A 25) platziert sind, steht Stab eins in einer beruhigten Zone. Die Wassertiefen betragen an Stab eins etwa 25 cm, an Stab zwei 30 cm sowie an Stab drei 20 cm. Man erkennt die schnellere Schwingfrequenz von Stab eins ohne einen SK und vergleichsweise weite Amplituden an den übrigen Stäben. Dieses Verhalten ist nicht nur von der Größe des aufgesteckten SK abhängig, auch Randbedingungen wie das lokale Strömungsverhalten, der Aufstellungsstandort und die lokale Wassertiefe sind von Bedeutung. In Abbildung 27 ist exemplarisch an Plot sechs das Schwingverhalten von fünf Stäben am 16. Juni im 10-Sekunden-Intervall aufgetragen. Auch hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen vergrößerter Anströmfläche in Form von aufgesetzten SK und fehlendem zusätzlichen Strömungswiderstand erkennbar. Stab fünf erhielt nach einer Viertelstunde nach Beginn des Beobachtungszeitraums einen eiförmigen SK, was sein Schwingverhalten stark verändert hat. Mit etwa 50 bis 90 cm hebt sich seine Auslenkung über einen Zeitraum von 35 Minuten über die der anderen Stäbe ab. Von etwa 19:10 bis 19:33 Uhr erhöht sie sich an Stab vier um etwa 10 cm. Im Schwingverhalten lässt sich bislang keine Periodizität erkennen. Dies gilt auch für die aus den jeweiligen, spezifischen Auslenkungswinkeln berechneten Fließgeschwindigkeiten (Abbildung 28). Hierin wird deutlich, dass eine analytische oder statistische Interpretation der Daten unter einer zu findenden Pendelfunktion notwendig sind, um Sprünge der berechneten Geschwindigkeiten zu vermeiden.

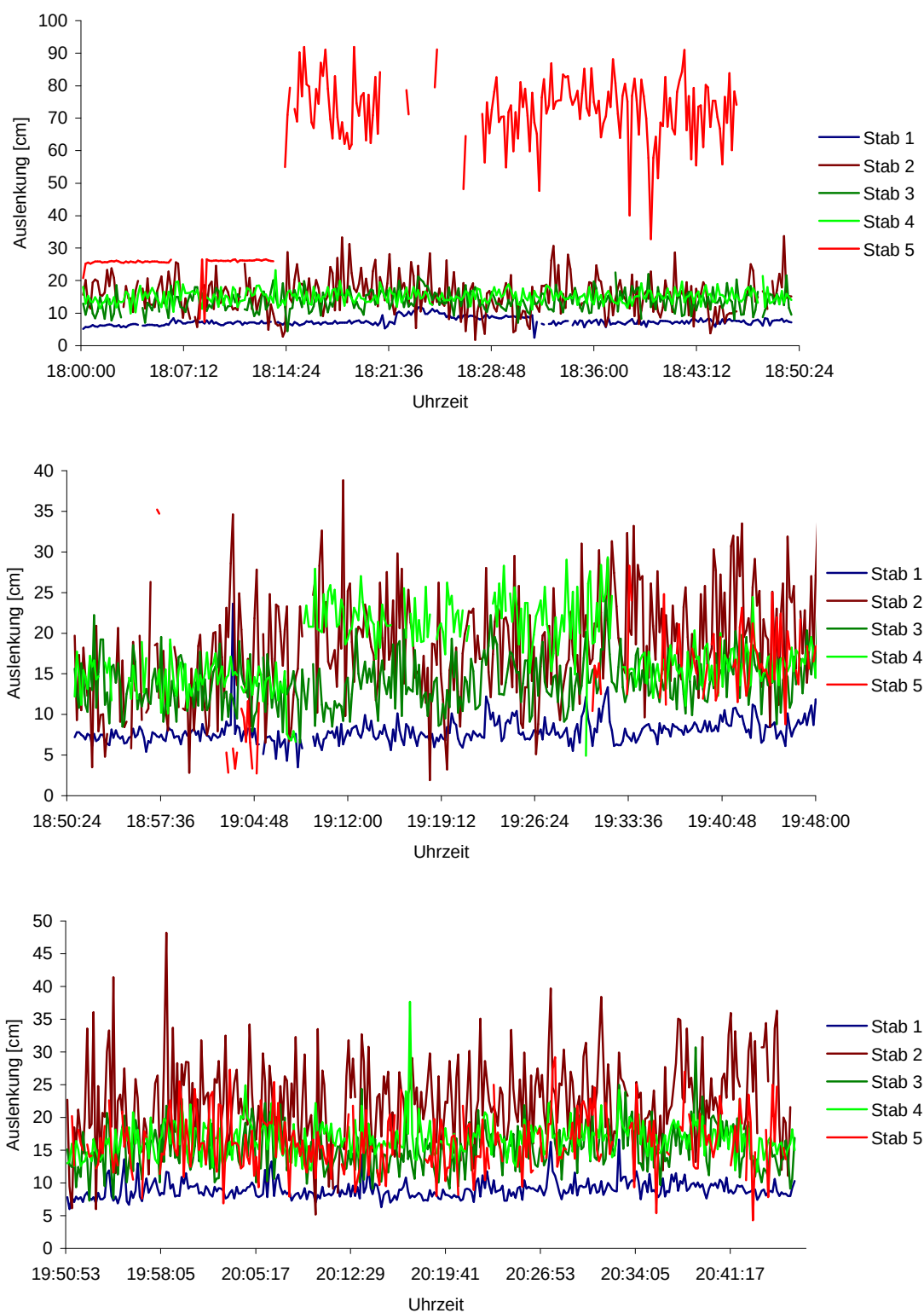


Abbildung 27: Am 16. Juni im 10-Sekunden-Intervall aufgenommene Auslenkungen der Karbonfaserstäbe an Plot sechs.

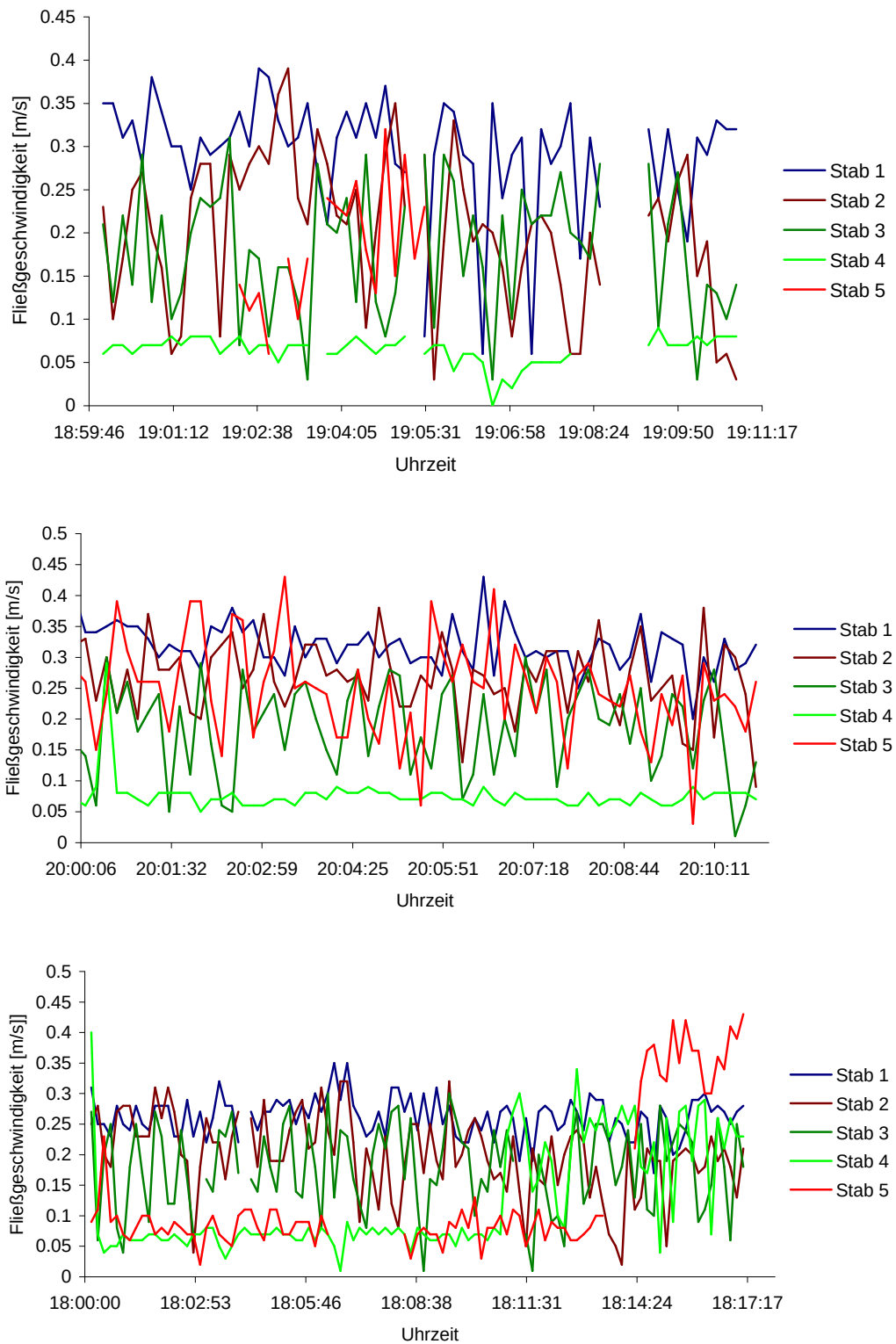


Abbildung 28: Am 16. Juni im 10-Sekunden-Intervall aufgenommene Fließgeschwindigkeiten der Karbonfaserstäbe an Plot sechs.

In Abbildung 29 ist der Zeitraum vom 17. Juni bis zum Ende der Juli-Überflutung am 07. Juli dargestellt. Aufgrund einer versehentlichen "Knickung" von Stab vier während einer Fließgeschwindigkeitsmessung mittels FLO-MATE knapp oberhalb der Verankerung besitzt dieser nicht mehr genügend Standfestigkeit und zeigt deshalb am 18.06. ab 09:10 Uhr eine verfälschte Auslenkung an. Aus Zeitgründen beinhaltet Abbildung 30 im mittleren und unteren Teil halbstündige Werte.

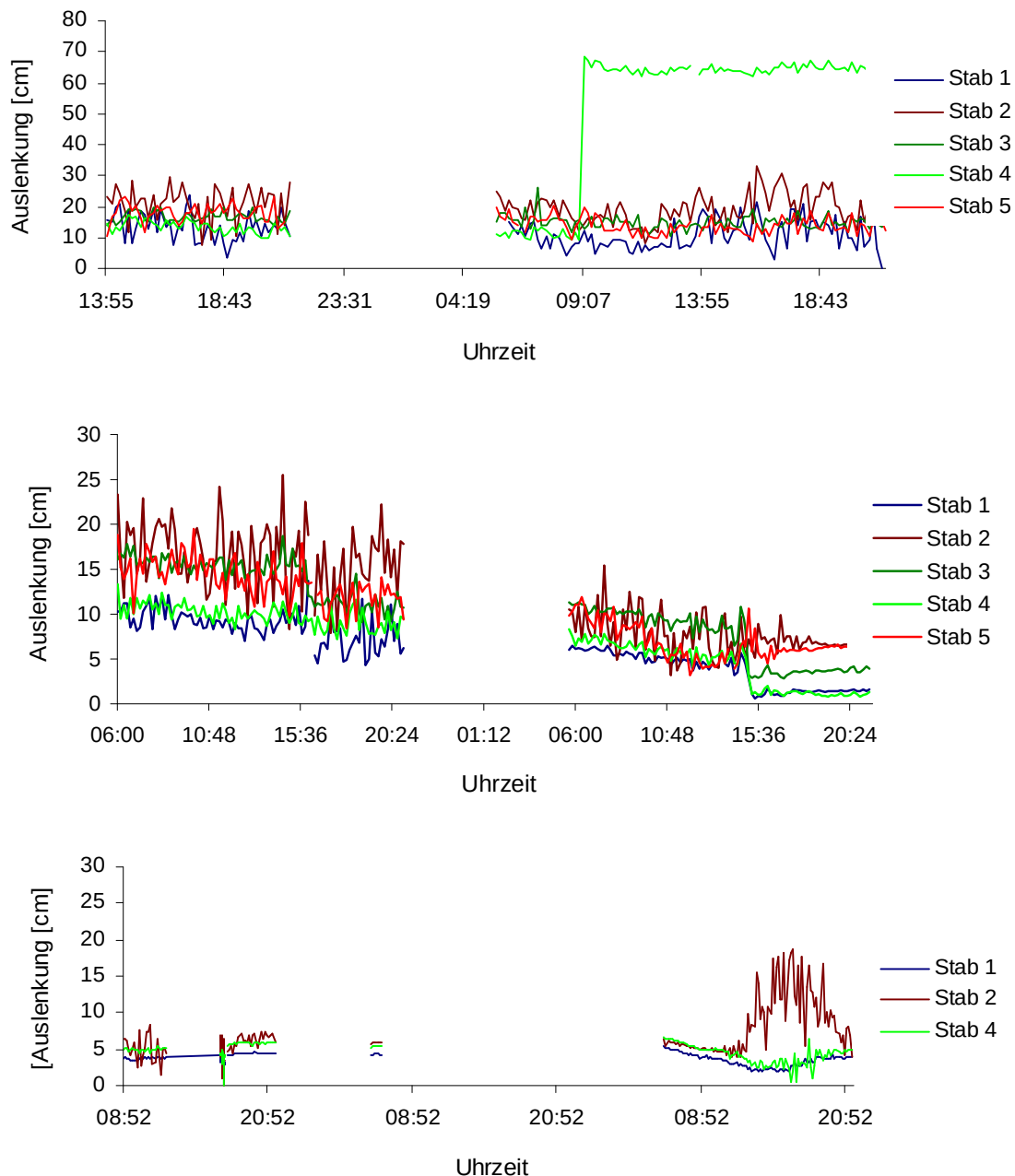


Abbildung 29: Auslenkungen der Karbonfaserstäbe im 10-Minuten-Intervall an Plot sechs im Zeitraum 17. - 18.06. (oben), 19. - 20.06. (Mitte) und 04. - 07.07.2012 (unten). Die hohen Werte von Stab zwei erklären sich aus einer versehentlichen Schiefstellung.

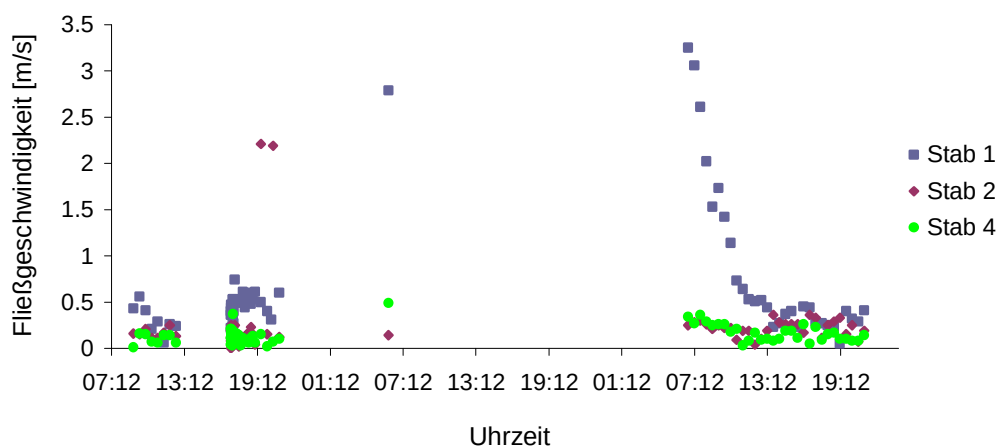
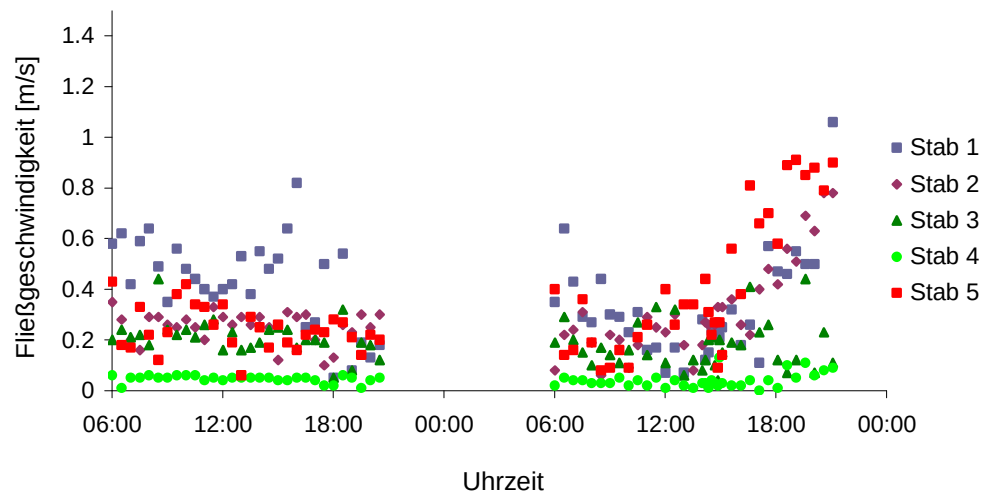
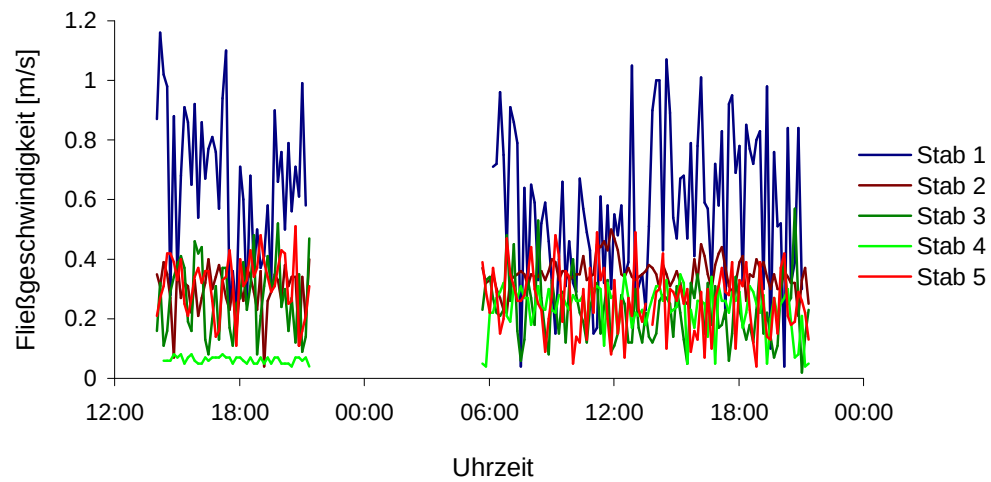


Abbildung 30: Mittels Karbonfaserstabmethode berechnete Fließgeschwindigkeiten im 10-Minuten-Intervall an Plot sechs im Zeitraum 17. - 18.06. (oben), beziehungsweise im 30-Minuten-Intervall im Zeitraum 19. - 20.06. (Mitte) und 04. - 07.07.2012 (unten).

Bei angenommenen gleicher Fließgeschwindigkeit über einen Meter breite um einen KFS, lässt sich aus den FLO-MATE-Messungen der Abfluss berechnen. Bei einer konstanten Fließgeschwindigkeit im betrachteten System über eine Dauer von einer Stunde kann der Abfluss der Auslenkung der einzelnen Stäbe gegenübergestellt werden. Am Beispiel von Plot sechs ergibt sich Abbildung 31, auf die aus Zeitgründen nicht näher eingegangen werden kann. An den übrigen Plots sind für eine gleichartige Korrelation nicht genügend Daten vorhanden.

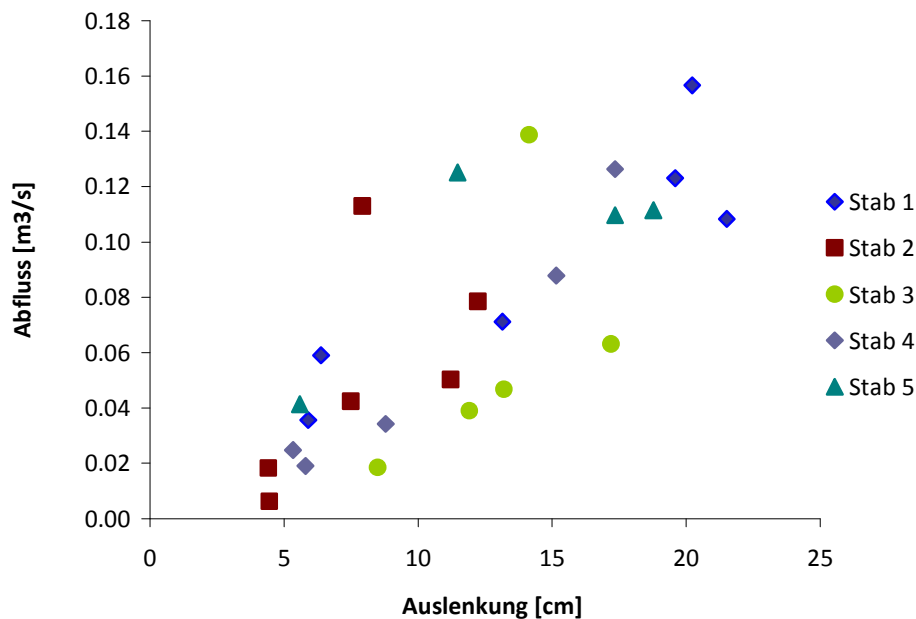


Abbildung 31: Korrelation Abfluss zur Auslenkung an Plot sechs zu den FLO-MATE-Messzeiten.

5.2.6 Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 7

Dieser Plot ist insofern interessant, da er das über die nördliche rechte Bresche im Leopoldskanal in den Taubergießen gelangende Wasser direkt erfasst. Aufgrund von Hochwasserbarrieren wurde diese Untersuchungsfläche erst Anfang Juli eingerichtet. Wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, nimmt die Überflutungshöhe innerhalb weniger Stunden stark zu, was sich auch in einem steilen Anstieg der Auslenkung der sieben hier aufgestellten Stäbe bemerkbar macht (Abbildung 32). Am 05. Juli war die Wasserstand am Zollstock auf unter 10 cm gesunken und es waren nur sehr geringe oder keine Fließgeschwindigkeiten vorhanden (s. Fotos stationäre Kamera). Dies erzeugt bei der verwendeten Fließformel stark verfälschte Fließgeschwindigkeiten (Abbildung 34). In den Morgenstunden des 06. Juli trat eine hohe Überflutungsdynamik mit schwankenden Überflutungshöhen auf. Am Vormittag zeigen die Stäbe für die Dauer dieses Tages eine erhöhte verstärkte Auslenkung. Ab etwa 40 cm Überflutungshöhe nimmt an diesem Plot die Fließgeschwindigkeit zu, weil nachfolgende niedrigere Barrieren überspült werden (links außerhalb des Kamerablickfeldes). Auch im übrigen Zeitraum bei rückläufigem Hochwasser werden die Fließgeschwindigkeiten stark überschätzt. Beim späteren September-Hochwasser verding sich Geschwemmsel an den Stäben, womit sie für die Dauer dieses Überschwemmungsereignisses ausfielen.

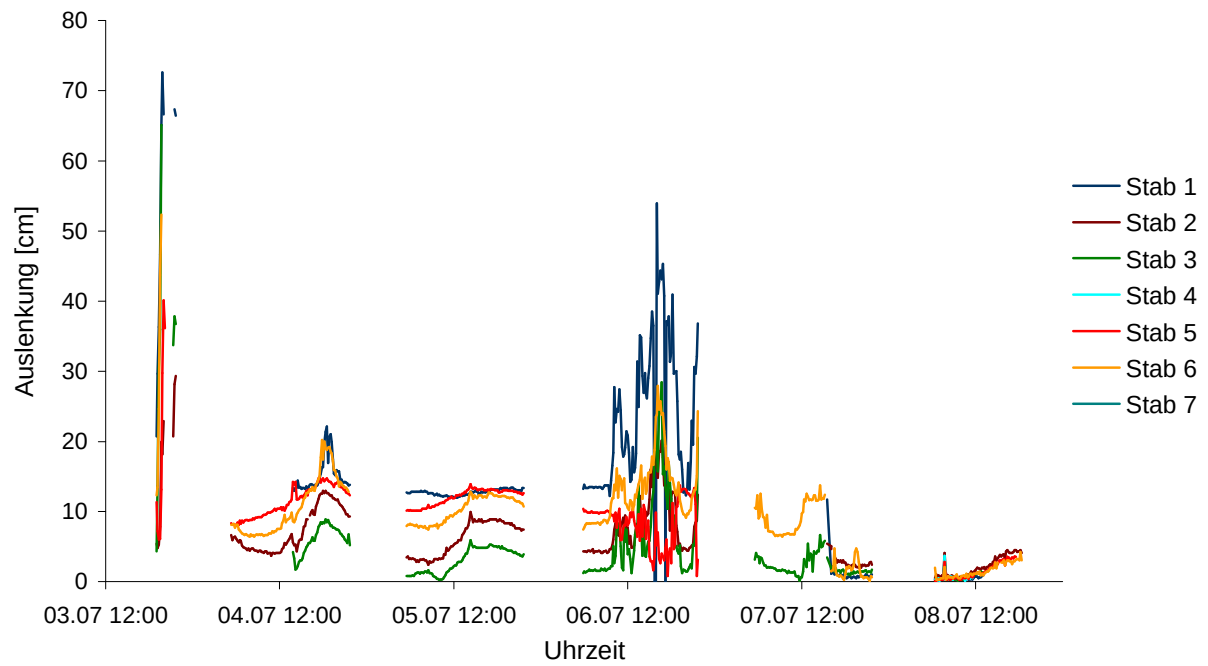


Abbildung 32: Horizontale Auslenkung der Karbonfaserstäbe im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03. - 08. Juli.

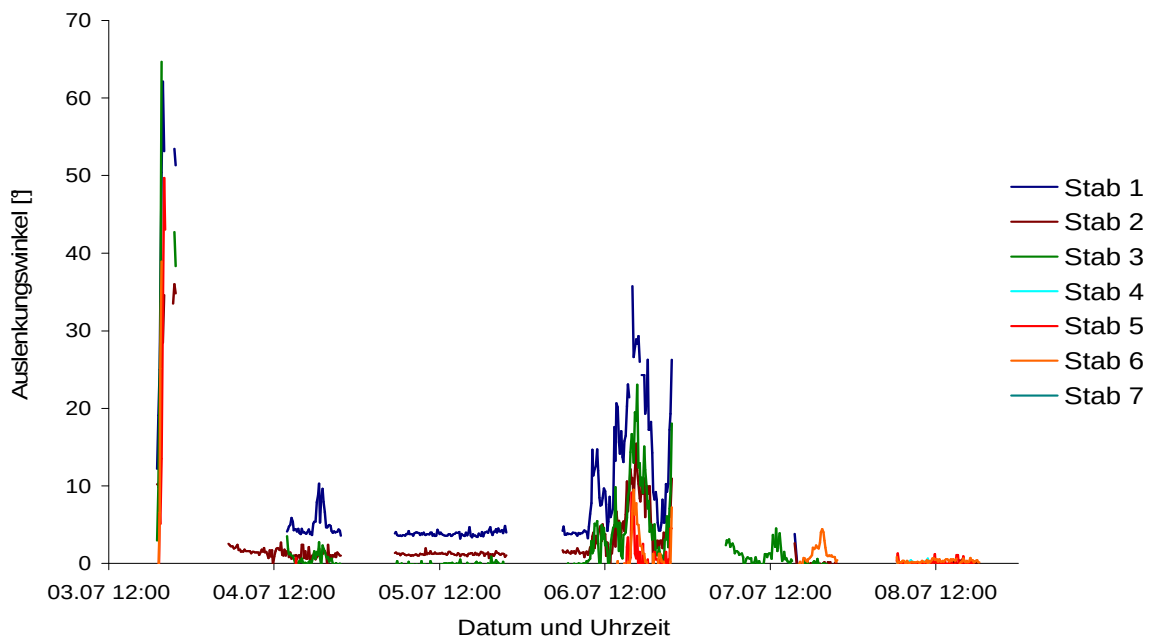


Abbildung 33: Auslenkungswinkel der Karbonfaserstäbe im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03. - 08. Juli.

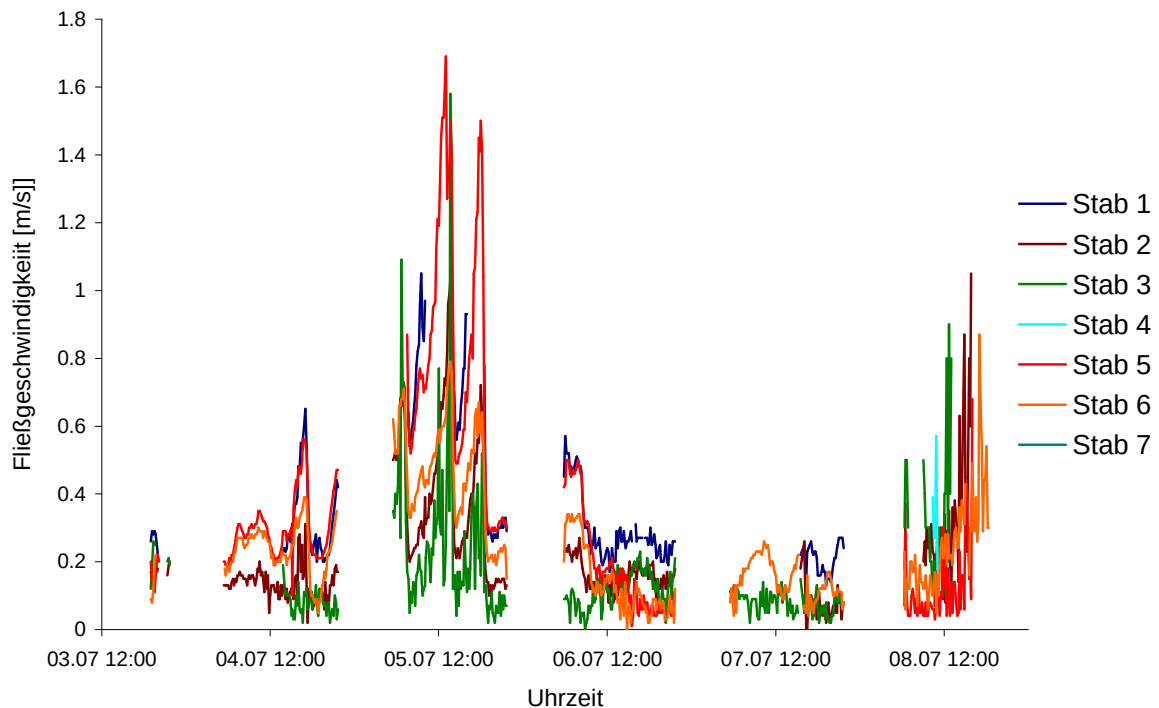


Abbildung 34: Berechnete Fließgeschwindigkeiten an den Karbonfiberstäben im 10-Minuten-Intervall an Plot sieben im Zeitraum 03. - 08. Juli.

5.2.7 Auslenkung und Fließgeschwindigkeit Plot 8

An der Langgrienquelle fanden während des Untersuchungszeitraums vom 29. Juni bis zum 13. September zwei Überschwemmungen statt. Die erste ereignete sich am 03. Juli ab 20:30 Uhr, dauerte bis in die Dämmerung an und war am darauf folgenden Morgen bereits abgelaufen. Eine zweite trat am 01. September ab etwa 18:50 Uhr auf und übertraf erstere, zumindest bis in die Abendstunden, was an der höheren Wasserspiegellage deutlich erkennbar ist (Abbildung 42). Vermutlich stammt das Hochwasser aus dem über die Ufer getretenen Stückergraben, fließt über ein kurzes Waldstück nordostwärts und sammelt sich dort bis ein Durchbruch zum das Waldstück von der Langgrienquelle trennenden Wirtschafts- und Wanderweg erfolgt (DSCF 1117 und 1125). Von dort fließt es über die Langgrienquelle und einem anschließenden Kiesbett in die Hausgrundkehle, an der Plot acht eingerichtet wurde. Ist der Weg überflutet, gelangt das Hochwasser innerhalb weniger Minuten mit hoher Geschwindigkeit an die in der Sohle der Hausgrundkehle verankerten Karbonfiberstäbe und lenkt diese so schnell komplett aus, dass sie auf den Bildern der stationären Kamera von Beginn an nicht sichtbar sind (DSCF 1120, 1123 und 1124). Insofern sind an diesem Plot nur Querprofilmessungen im Ruhezustand verfügbar.

5.3 Querprofilmessungen

5.3.1 Plot 1+4

Dieses Querprofil wurde aufgrund ungeeigneter Bäume und hügeligem Relief an den einzelnen Plots zwischen letztere in etwa 20 m Entfernung gespannt. Hier weist die Topographie keine Gräben oder Hügel auf, welche wahrscheinlich anthropogenen Ursprungs sind. Somit kann eine Profillänge von 14,73 m mit 13 Messlotrechten gespannt werden. Im Untersuchungszeitraum trat ein Überschwemmungsereignis von zwei bis drei Tagen Dauer am 13. Juni mit einer maximalen Überschwemmungshöhe von 51 cm auf. An der tiefsten Messlotrechten wurde auch am ersten Überschwemmungstag gegen 20 Uhr eine maximale Fließgeschwindigkeit von 0,03 m/s gemessen. An den übrigen Messlotrechten strömte das Wasser mit 0,01 und 0,02 m/s nahe der Nachweisgrenze in nordöstliche Richtung. Zwischen den Messlotrechten vier und acht verlangsamt ein dichter Krautschichtbewuchs die Strömung zusätzlich. Vor den Messlotrechten neun und zehn befindet sich ein Baum, welcher ein Strömungshindernis darstellt und gleichfalls zu einer Verlangsamung beiträgt. Am folgenden Tag wurde zwischen 16:30 und 17:00 Uhr eine Wasserspiegelabsenkung zum Vortag von durchschnittlich 19 cm sowie keine Strömung verzeichnet. Es haben sich sporadische Tümpel gebildet, deren Restwasser innerhalb von ein bis zwei Tagen in den Waldboden infiltriert ist. Am 15. Juni gegen 15 Uhr waren die Tümpel soweit verschwunden, dass nur noch in den Querprofilvertiefungen eine Wassertiefe von bis zu neun cm an zwei Messlotrechten vorgefunden wurde. Abbildung 35 fasst die Beobachtungen der Überschwemmungshöhen zusammen.

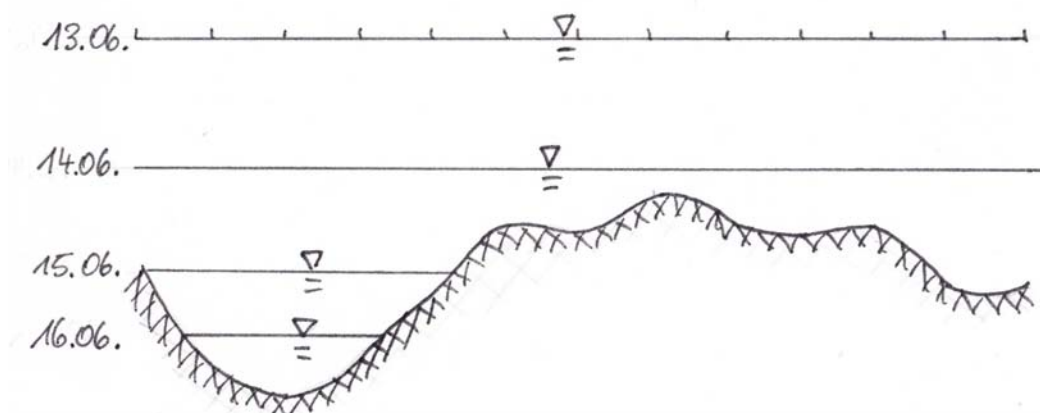


Abbildung 35: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen an Querprofil Plot 1+4 (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).

5.3.2 Plot 2

Die nordwestliche Untersuchungsfläche im Herrenkopfgrund wurde lediglich am 13. Juni um maximal 22 cm überflutet (Messung zwischen 19:00 und 19:20 Uhr). Mit einer Länge von 14,48 m befindet sich das Querprofil an Plot zwei in Sichtweite der stationären Kamera und ist entlang der Nordwest-Südost-Achse gespannt. Hier strömte das Hochwasser in südwestliche Richtung. Die aufgetretenen Fließgeschwindigkeit ähneln sich mit 0,00 bis 0,03 m/s denen an Plot 1+4. Infolge der geringen Überflutungshöhe mit durchschnittlich 15 cm bremsen unter anderem Sträucher oder Baumstümpfe die Fließgeschwindigkeit. Im Vergleich zum Querprofil

1+4 ist die vorgefundene Wassertiefe um 20 cm niedriger. Am Nachmittag des Folgetages ist der Plot bereits größtenteils wieder trocken gefallen. Am Zollstock konnte noch ein Wasserstand von vier cm abgelesen werden, allerdings hat während der Überflutung eine zwei cm mächtige Sedimentablagerung stattgefunden, weshalb die Wassertiefe lediglich zwei cm betrug. Die erfasste Überschwemmungshöhe ist in Abbildung 36 dargestellt.

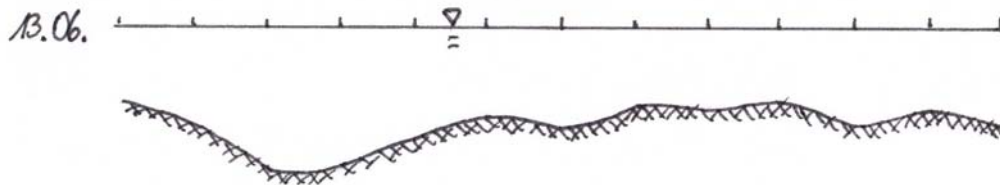


Abbildung 36: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen am Querprofil Plot 2 (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).

5.3.3 Plot 3

Als die ursprünglich in einer etwas erhöhten Lage aufgebaute Untersuchungsfläche 3 in der Hochwasserspitze am 13. Juni nicht überflutet wurde, ist sie am Folgetag in nahe gelegenes, tieferes und bereits überflutetes Gelände verlegt worden (s. Abbildung A 7 und Abbildung A 15). Hier trat zwischen 18:15 und 19:00 Uhr eine maximale Wassertiefe von 49 cm sowie eine maximale Fließgeschwindigkeit von 0,11 m/s auf. Während am westlichen Profilteil nur sehr geringe Fließgeschwindigkeiten verzeichnet werden konnten, nahm sie nach Osten hin zu. Auch in 80% der Wassertiefe wurde ab der Messlotrechte Nummer zehn eine geringe Strömung mit bis zu 0,05 m/s gemessen (Messlotrechte Nummer 15). Das 14,40 m lange und 15 Messlotrechten umfassende Querprofil endet nach Osten an einem Tümpel; an seinem Ufer ist das Gelände abschüssig. Am 15. Juni gegen 13:30 Uhr ist das Hochwasser um durchschnittlich 22 cm zurückgegangen und hat einen Teil des Querprofils trocken gelegt (Abbildung 37). Lediglich am östlichen Ende ist visuell eine sehr leichte Strömung festzustellen gewesen, die unterhalb der Nachweisgrenze lag. Am nahe des Querprofils aufgestellten Zollstock hat sich während des Überflutungsereignisses drei cm Sediment abgelagert.

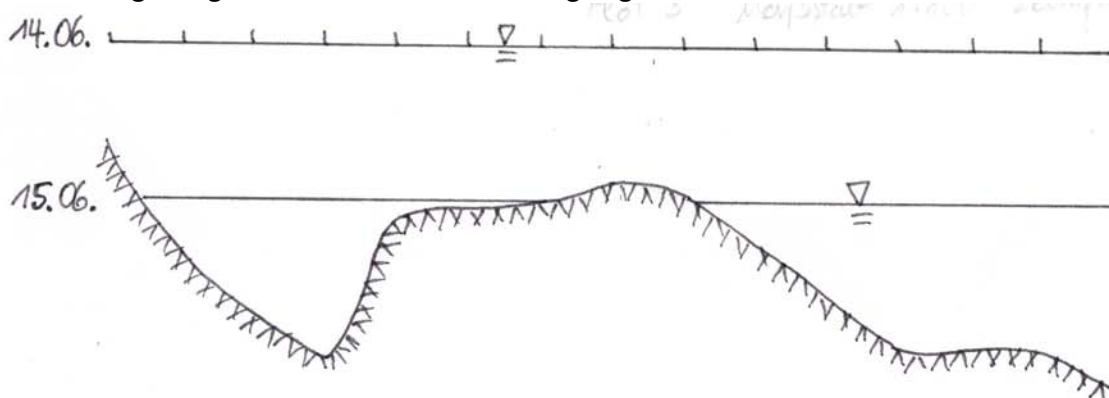


Abbildung 37: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen am Querprofil Plot 3 (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).

5.3.4 Plot 5

Diese zusammen mit Plot sechs im Oberlanggrien befindliche Untersuchungsfläche ist mit einem Querprofil einer Länge von 12,10 m mit elf Messlotrechten in Ost-West-Richtung ausgestattet. Es verläuft entlang eines Pfades zum Altrhein und einer Lichtung. Am 13. Juni wurde es 22 bis 37 cm hoch überflutet (17:00 bis 17:30 Uhr). In diesem Zeitraum wies die Strömung Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,06 m/s, einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,04 m/s und nördliche Fließrichtung auf. Teilweise beeinflussen nahe stehende Bäume das Fließverhalten. Einen Tag später hat die Überflutungshöhe um 15 cm abgenommen und es hat eine Richtungsumkehr nach Süden stattgefunden. Ebenfalls sind die Fließgeschwindigkeiten im Mittel um 0,02 m/s gesunken. Am dritten Überschwemmungstag nahm die Überflutungshöhe um weitere sechs cm ab, somit verbleiben durchschnittlich neun cm (12:30 Uhr). Die Geschwindigkeit der Strömung sinkt um 0,01 m/s und ist damit kaum noch nachweisbar. Einen weiteren Tag später werden nur noch Wassertiefen von bis zu elf cm gemessen. Das verbliebene Wasser am Pfad und der angrenzenden Lichtung weisen keine Strömung mehr auf. Nach vier Tagen Überflutung liegt der gesamte Standort wieder trocken. In Abbildung 38 sind die vorgefundenen Wassertiefen aufgetragen.

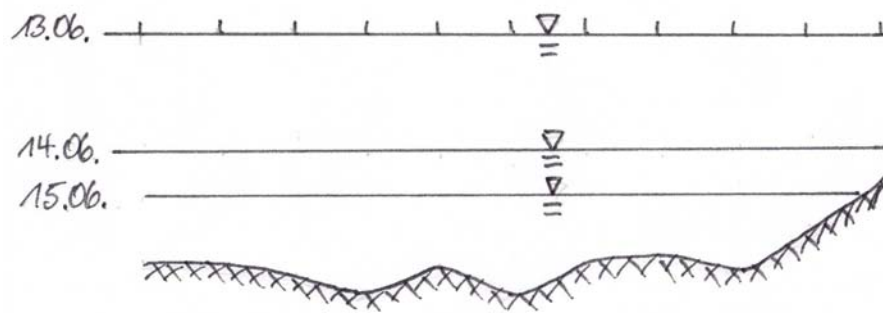


Abbildung 38: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten an den angegebenen Tagen am Querprofil Plot 5 (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).

Tabelle 11: Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten am Querprofil Plot fünf (Nummerierung s. Abbildung A 17).

Lotrechte	13.06.		14.06.		15.06.		16.06.	
	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s
1	31	0,00	16	0	11	0,01	7	0,00
2	31	0,05	15	0,02	10	0,01	7	0,00
3	33	0,06	20	0,05	13	0,02	9	0,00
4	35	0,05	19	0,05	13	0,02	9	0,00
5	31	0,03	15	0,02	9	0,01	5	0,00
6	35	0,03	17	0,02	11	0,01	8	0,00
7	31	0,05	15	0,03	10	0,01	7	0,00
8	30	0,03	14	0,02	9	0,01	5	0,00
9	32	0,03	17	0,02	12	0,01	8	0,00
10	27	0,03	13	0,01	5	0,00	0	
11	20	0,05	9	0,01	0		0	

5.3.5 Plot 6

Ebenfalls im Oberlanggrien in der Nähe der ehemaligen Rheinstraße gelegen, traten an diesem Plot die längsten Überflutungszeiten auf. Während er bestimmt schon früher überflutet gewesen ist, wurde hier am 12. Juni die Untersuchungsfläche eingerichtet. Die erste Querprofilmessung wurde dagegen am 13. Juni durchgeführt. Die Beobachtungen von treibenden Objekten am Vortag beziehungsweise das Wasserniveau an den als Fließstreckenbegrenzungen dienenden Stangen lässt auf einen Anstieg der Überflutungshöhe von etwa 14 cm schließen. Auch an diesem Querprofil beeinflussen Bäume und Sträucher das Fließverhalten des Hochwassers. So befindet sich direkt an der Messlotrechten Nummer zwei ein Strauch, an der Messlotrechten Nummer vier ebenfalls ein Strauch 1,10 m vor dem Querprofil, vor Nummer sechs ein großer Baum mit 2,25 m Umfang in 2,10 m Entfernung, ein Baumstumpf direkt an der Lotrechten Nummer sieben und vor Nummer zehn in 1,20 m Entfernung ein weiterer Baum mit 2,25 m Umfang (Nummerierung von Westen nach Osten). Die Fließrichtung ist durchgehend nach Norden gerichtet. Am Mittag des ersten Messtages betrug die durchschnittliche Wassertiefe 41 cm mit einer Spannweite von 23 bis 60 cm und $v_{mit} = 0,13$ m/s. Einen Tag später ist die Überflutungshöhe um 10 cm gesunken, dagegen hat die mittlere Fließgeschwindigkeit v_{mit} über das gesamte Querprofil mit 0,20 m/s um 0,07 m/s zugelegt. Während dieser Zeit hat eine Verlagerung der Fließgeschwindigkeitsverteilung stattgefunden; während sie sich an den ersten beiden Messlotrechten wenig verändert hat, stieg sie an der Lotrechten Nummer drei deutlich um 0,26 m/s, verringerte sich an der folgenden um 0,14 m/s und erhöhte sich an Nummer fünf und sechs um den vorigen Wert. Auch an Nummer zwölf ist ein Anstieg von 0,15 auf 0,31 m/s zu verzeichnen, während sie an den umliegenden Lotrechten lediglich geringfügig zunimmt. Nachdem das Hochwasser den vorgelagerten ehemaligen Forstweg überquert hat, fließt es an verschiedenen Stellen in den Baumbestand, dabei befindet sich südöstlich des Kamerastandortes der Haupteinlauf mit einer Entfernung von etwa zwölf Metern bis zur eingerichteten Fließstrecke. Von dort bis zum Querprofil legt das Wasser weitere acht bis neun Meter zurück. Je nach Überflutungshöhe fließen auch ein bis zwei "Nebenarme" mit einem kürzeren Gefälle vom Forstweg aus zum Plot (Abbildung A 18). Um die Mittagszeit des 15. Juni wurde eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0,16 m/s gemessen. Dies stellt eine Verringerung von 0,04 m/s im Vergleich zum Vortag dar. Auch sank die Wassertiefe um sieben cm. Vom 15. auf den 16. Juni sank die Wassertiefe um weitere sechs cm auf durchschnittlich 18 cm. In diesem Zeitraum ist die erste Messlotrechte (13) trocken gefallen. Mit lediglich drei cm Wassertiefe war an der Messlotrechten Nummer eins keine Fließgeschwindigkeit messbar. An den übrigen Lotrechten betrug v_{mit} 0,17 m/s und hat damit leicht zugenommen. Am fünften Messtag sind zusätzlich zur Lotrechten Nummer 13 auch Nummer eins sowie elf und zwölf trocken gefallen. Insgesamt fiel die Wasserspiegellage um sechs cm. Die Fließgeschwindigkeit ist wieder auf das Niveau vom 15. Juni zurückgegangen. In den folgenden zwei Tagen blieb die Wasserspiegellage konstant mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von etwa 0,14 m/s. Am 20. Juni sind auch die Messlotrechten Nummer zwei und zehn trocken gefallen, während an Nummer neun die Wassertiefe für eine Messung zu gering war. An den restlichen Lotrechten verringerte sich die Überflutungshöhe um sieben cm, dies führte bei Nummer sieben nicht mehr zu einer Überspülung des Baumstumpfes, womit ein neues zu umströmendes Hindernis entstanden ist und die Fließgeschwindigkeit bis unterhalb der Nachweisgrenze abnahm. Werden diese Stellen nicht

berücksichtigt, erhöht sich im übrigen Profil die mittlere Geschwindigkeit auf 0,19 m/s. Einen weiteren Tag später ist das komplette Querprofil trocken gefallen.

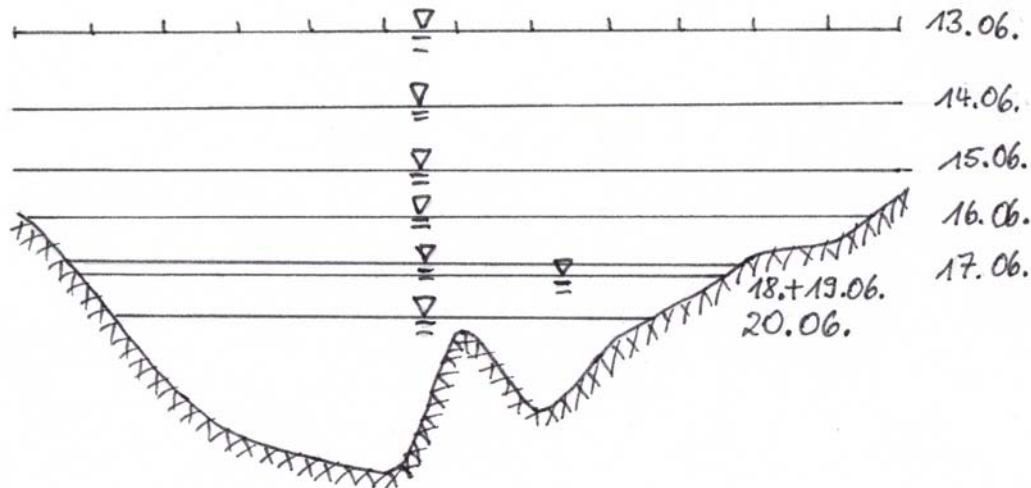


Abbildung 39: Gemessene Wassertiefen der Lotrechte am Querprofil Plot 6 an den angegebenen Tagen (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).

Tabelle 12: Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten am Querprofil Plot sechs.

	13.06.		14.06.		15.06.		16.06.		17.06.		18.06.		19.06.		20.06.	
Lotrechte	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s
1	24	0,10	12	0,09	7	0,05	3	0	0		0		0		0	
2	36	0,09	27	0,07	19	0,05	14	0,04	7	0,01	6	0,01	6		0	
3	48	0,05	35	0,31	31	0,04	21	0,03	15	0,02	13	0,01	13	Keine Messung durchgeführt	6	0
4	55	0,31	45	0,17	37	0,34	32	0,39	24	0,37	23	0,32	23		17	0,17
5	58	0,16	46	0,40	39	0,16	33	0,18	27	0,23	24	0,22	24		18	0,28
6	60	0,16	47	0,40	39	0,29	34	0,25	27	0,20	25	0,21	26		19	0,12
7	41	0,12	40	N/A	30	0,10	25	0,03	19	0,04	19	0,07	17		12	0
8	52	0,25	45	0,19	32	0,41	27	0,43	20	0,37	19	0,38	20		12	0,17
9	42	0,06	30	0,05	23	0,09	15	0,09	11	0,08	9	0,05	10		3	0
10	37	0,18	27	0,18	20	0,25	13	0,24	7	0,10	6	0,03	5		0	
11	31	0,11	19	0,12	14	0,23	7	0,15	0		0		0		0	
12	29	0,15	19	0,31	12	0,10	6	0,03	0		0		0		0	
13	23	0,06	12	0,11	5	0,04	0		0		0		0		0	

5.3.6 Plot 7

Dieser Plot wurde am 03. Juli in überflutetem Zustand bei schnell zunehmender Wassertiefe eingerichtet. Während der zweistündigen Einrichtung (etwa 17:30 bis 19:30 Uhr) stieg der Wasserspiegel am errichteten Zollstock von 45 auf 64 cm an. Auch einige Stunden nach Messbeginn nimmt die Überflutungshöhe hinter der nördlichen M1, wo sich Plot sieben befindet, deutlich zu (s. auch Kapitel 5.1.2). Aus Sicherheitsgründen ist nach der Ploteinrichtung keine Querprofilmessung durchgeführt worden. Am darauf folgenden Tag ist die erste Hochwasserspitze abgelaufen und es wurde eine durchschnittliche Wassertiefe von 20 cm und eine Fließgeschwindigkeit von 0,08 m/s am Querprofil vorgefunden. Am östlichen Abschnitt floss das

Hochwasser nicht orthogonal auf das Profil, sondern wurde nach Westen abgelenkt. Diese Fließrichtung wurde während der nächsten Messungen beibehalten. Gegen Nachmittag des 06. Juli trat wieder eine deutlich höhere Überflutung mit 54 cm und einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,24 m/s auf. Bis zur Messung am vierten Überflutungstag (14:35 bis 15:15 Uhr) fielen die Wassertiefe und auch die Fließgeschwindigkeit um die Hälfte. Am 08. Juli war noch Restwasser auf dem Plot vorhanden, das Querprofil ist jedoch trocken gefallen. In Abbildung 40 sind die vorgefundenen Wassertiefen aufgetragen. Tabelle 13 enthält zusätzlich die zugehörigen Fließgeschwindigkeiten an den einzelnen Messlotrechten. Eine erneute Überflutung im Zeitraum 01. bis 03. September wurde nicht mit der magnetisch-induktiven Strömungssonde dokumentiert.

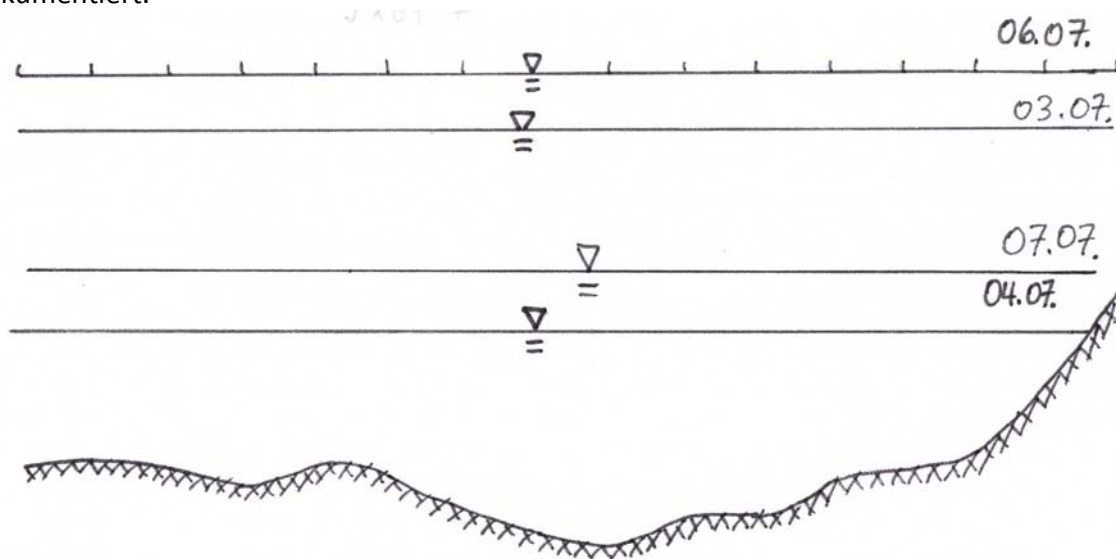


Abbildung 40: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten am Querprofil von Plot 7 an den angegebenen Tagen (Maßstab 1:100, zehnfach überhöht).

Tabelle 13: Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten am Querprofil Plot sieben.

Lotrechte	04.07.		06.07.		07.07.	
	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s
1	22	0,07	53	0,23	28	0,12
2	20	0,09	53	0,28	27	0,14
3	19	0,13	54	0,22	27	0,10
4	24	0,09	56	0,33	30	0,13
5	20	0,09	53	0,21	26	0,14
6	22	0,08	55	0,29	28	0,13
7	24	0,05	59	0,14	31	0,06
8	27	0,05	63	0,11	35	0,10
9	28	0,05	64	0,13	36	0,08
10	20	0,07	60	0,06	29	0,15
11	24	0,08	60	0,18	32	0,15
12	24	0,07	56	0,24	33	0,15
13	18	0,12	54	0,51	25	0,18
14	16	0,11	52	0,33	25	0,16
15	6	0,04	42	0,34	16	0,12
16	0		30	0,26	6	0,06

5.3.7 Plot 8

Der örtlich bis zu 70 cm tiefe und etwa sieben Meter breite Gießen (Hausgrundkehle) weist unter Normalbedingungen lediglich Fließgeschwindigkeiten nahe der Nachweisgrenze auf. So konnte bei den Querprofilmessungen auf 20 % der Wassertiefe eine maximale Geschwindigkeit von 0,02 m/s gemessen werden. Häufig ist keine Strömung messbar gewesen. Aus der Langgrienquelle und einer weiteren nahe liegenden Quelle erhält die Hausgrundkehle an ihrem Ursprung einen Zufluss, welcher wahrscheinlich die Verdunstungsverluste ausgleicht und den Wasserspiegel konstant hält (HDV_0012). So ist letzterer innerhalb von zwölf Tagen zwischen den einzelnen Messungen nur um zwei cm gesunken (Abbildung 41). Insgesamt besitzt das an diesem Plot gespannte Querprofil eine Länge von 23,40 m, wobei die Ufer nur kurzzeitig bei Hochwasserführung des Rheins überflutet werden. Derartige Ereignisse fanden am 03. Juli und 01. September statt, an denen unter anderem aus Sicherheitsgründen keine Messungen durchgeführt wurden (Abbildung 42, vgl. Abbildung A 20).

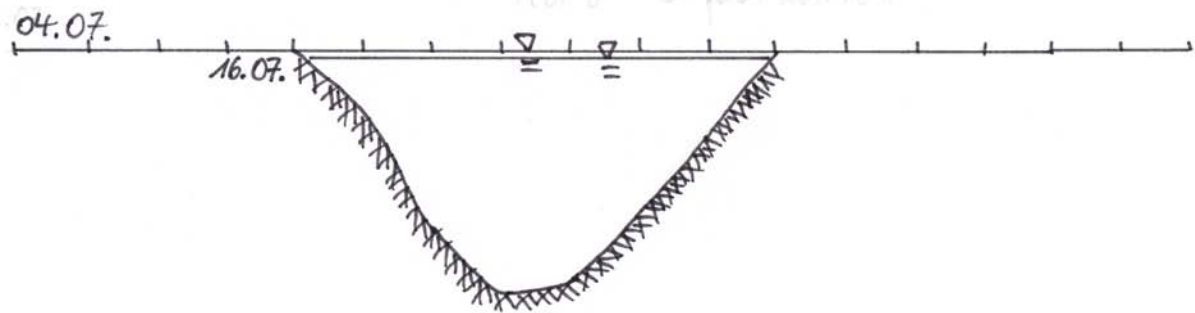


Abbildung 41: Gemessene Wassertiefen der Lotrechten am Querprofil von Plot 8 an den angegebenen Tagen (Maßstab 1:100, fünffach überhöht).



Abbildung 42: Überflutungsereignisse in der Hausgrundkehle am 03.07. sowie 01.09.2012.

5.4 Stöckchenmethode und Beobachtung von treibenden Objekten

An den Plots sechs und sieben erfolgte die Instrumentierung mit Karbonfaserstäben erst nach Überflutungsbeginn. Für die Plots eins bis fünf kam sie infolge kürzerer Überflutungsdauer leider zu spät. Das Hochwasser war bereits abgeflossen (s. Tabelle 5). Zu Beginn des Hochwasserereignisses beziehungsweise nach der Einrichtung sind an Plot fünf und sechs Messungen der Oberflächenfließgeschwindigkeit mit treibenden "Stöckchen" sowie über die Verfolgung von Objekten auf Fotos vorgenommen worden. Hinzu kommen Einzelmessungen am M5 zur Zeit der Stabbeobachtung am 11. Juni. In den ersten fünf Messtagen sind als arithmetische Mittelwerte der passiven Objektgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche die in Tabelle 14 aufgeführten Fließgeschwindigkeiten ermittelt worden:

Tabelle 14: gestoppte oder rekonstruierte mittlere Objektgeschwindigkeiten anhand von Fließstrecken.

Datum		11.06.	12.06.	13.06.	14.06.	15.06.	16.06.
Plot 5	v [m/s]			0,05	0,09		
Plot 6	v [m/s]		0,53	0,41	0,27	0,19	0,26
M5	v [m/s]	0,49					

An Plot fünf sowie in der Deichniederlegung am Restrhein wurden die ins Wasser gegebenen Stöckchen über definierte Fließstrecken verfolgt. Im M5 diente hierzu die Distanz zwischen den beiden aufgestellten Stäben von 1,50 m. Auch über diverse Videoaufnahmen sind treibende Objekte über eine Fließstrecke aufgenommen worden, hauptsächlich an Plot sechs (HDV_0467, 0482, 0483, 0485, 0486, 0488, 0491). Hierbei wird die Zeit gestoppt, die einzelne Objekte für das Passieren der Fließstrecke benötigen. Die folgenden beiden Abbildungen fassen die Ergebnisse der benötigten Fließzeit und der berechneten Fließgeschwindigkeit in Form von Boxplots zusammen (in alphabetischer Reihenfolge). Unterschieden wird hierbei zwischen Haupt- und Nebenarm.

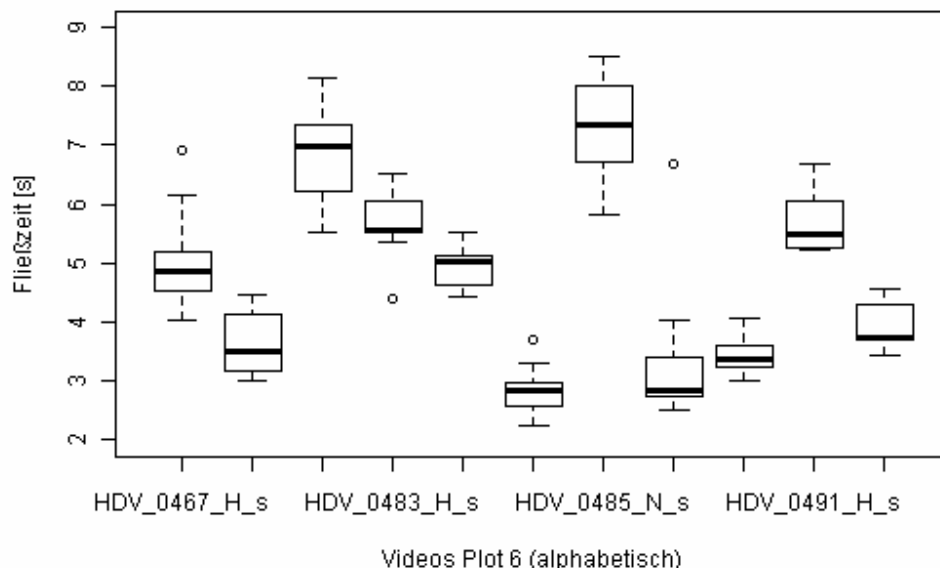


Abbildung 43: Boxplots der Fließzeiten der in Videos an Plot 6 verfolgten treibenden Objekte (aufgeteilt in Haupt- und Nebenarm).

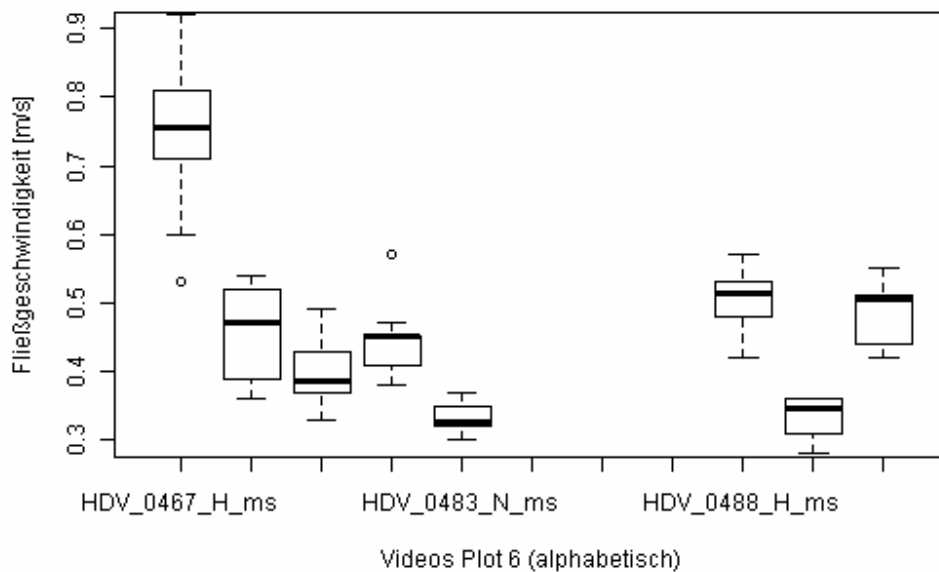


Abbildung 44: Boxplots der passiven Geschwindigkeit der in Videos an Plot 6 verfolgten treibenden Objekte (aufgeteilt in Haupt- und Nebenarm). Die Boxplotgrafiken der Videos 0485 und 0486 sind nicht dargestellt).

5.5 Fließgeschwindigkeiten in den Breschen

Neben den "Hauptuntersuchungsflächen" werden während des Hochwasserereignisses vom 12. bis 22. Juni in unregelmäßigen Abständen auch Fließgeschwindigkeiten und Überflutungshöhen in der Bresche entlang des Leinpfades ("Maßnahme 5") sowie in der nördlichen Bresche des Leopoldkanals ("Maßnahme 1") ermittelt. Dies geschieht hauptsächlich mittels MID auf dem Weg zu bzw. von den Hauptuntersuchungsflächen. Zusätzliche Digitalkameras sind aufgrund sicherheitstechnischer Bedenken und fehlender Aufhängemöglichkeiten nicht an den Breschenhängen installiert worden. Die Breschen selbst werden von hoch frequentierten Wegen gequert. Der Leinpfad als einer der beiden ist ein beliebter Rad- und Wanderweg entlang des Restrheinufer, weshalb eine dauerhafte Instrumentierung mit Karbonfiberstäben und Digitalkameras als zu unsicher angesehen wird.

5.5.1 Maßnahme 5

Die ehemalige Maßnahme 5 (M5) des Revitalisierungsprojektes befindet sich im Westen des Schaftheugrunds zwischen Restrheinufer und Waldrand und wird schon bei geringem Hochwasser überschwemmt. Im M5 wurden an sechs Tagen Wasserstands- und an drei Tagen Fließgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Diese stellen nicht die gesamte Überflutungsdauer dar, vielmehr sind sie als Stichproben zu verstehen. Während der Hochwasserspitze Mitte Juni war der Zugang großräumig verwehrt, weshalb die Überflutungshöhen und Strömungsverhältnisse zu jener Zeit unbekannt sind. Meist wurden die Wassertiefen auf dem überfluteten Leinpfad gemessen. Während vom 19. bis 21. Juni die Wassertiefen abnahmen, wurde am 11. Juni eine maximale Wassertiefe von 70 cm mit einer durchschnittlichen v von 0,18 m/s gemessen (Tabelle 15). Für eine so nahe am Rhein gelegene Stelle sind die Fließgeschwindigkeiten auffallend gering. Dies mag daran liegen, dass der ansteigende Ast des Hochwassers nicht

erfasst wurde. Im Allgemeinen steigt das Gelände vom Ufer bis zum Leinpfad leicht an und fällt anschließend zum Wald hin leicht ab. Bei Überflutung fließt das Wasser nach der Breschenpassierung über einen Tümpel in die Fischpasskehle als Nebenarm des kleinen Rheins. Abbildung 45 zeigt die um etwa 70 cm überflutete Bresche zu Beginn des Junihochwassers.

Tabelle 15: Durchgeführte hydrometrische Messungen im M5.

Datum	Uhrzeit	Beschreibung Messstelle	h [cm]	Ø v [m/s]
11.06.2012	16:00	Wiese	50	0,18
	17:30	Wiese	70	0,15
19.06.2012	15:05	Weg	20 - 24	
20.06.2012	17:00	Weg	10 - 15	
21.06.2012	13:50	Weg	≈ 5	
01.07.2012	22:16	Weg	37 - 39	
	10:49	Weg	< 20	
	16:15	Weg	bis 29	
03.07.2012	21:50	Mitte Weg	55	0,10
		Mitte Weg	52	0,10
		Mitte Weg	51	0,11
04.07.2012	10:40	Weg	24 - 25	
	11:30	Weg	34	0,07
		Weg	35	0,08
06.07.2012	11:45	Weg	36	0,06
		Wiese	42	0,06
		Wiese	39	0,07
		Wiese	48	0,05
08.07.2012	12:27	Weg	≈ 5	0,00

Zusätzlich sind an diesem Tag Fließgeschwindigkeitsuntersuchungen mit zwei Karbonfiberstäben durchgeführt worden. Diese sind auf der überfluteten Wiese östlich des Leinpfades positioniert (48° 15' 45,6" N, 7° 41' 04,9" O). Hier führt die Strömung ziemlich viel Geschwemmsel in Form von Gras mit sich, was sich an den Stäben verfängt und sie damit in ihrer Bewegung beeinträchtigt. Als erste Schätzung von v werden treibende Grashalme zwischen den beiden Stäben als Fließstrecke beobachtet und die benötigte Zeit für die Fließstrecke von 1,50 m gestoppt.

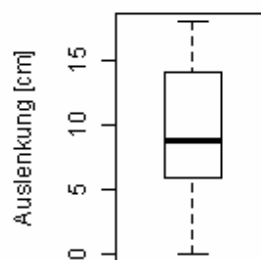
Tabelle 16: Über die Stöckchenmethode ermittelte Fließgeschwindigkeit im M5.

Beschreibung	t [s]				Ø v [m/s]
In der Nähe der Stäbe	3,0	4,0	3,3	3,75	0,43
In der Nähe des Ufers	7,4	5,8	7,0		0,23
Vor den Stäben	2,8	3,2	3,3		0,49



Abbildung 45: Überflutete Bresche (M5) im Tulla'schen Damm in der Nähe des Restrheins (Aufnahme vom 11.06.2012 15:35 Uhr).

Die Fließgeschwindigkeit ist neben den in Kapitel 3 genannten Kenngrößen auch von der Entfernung zur Gerinnewandung abhängig, welche aufgrund ihrer Oberflächenrauigkeit die Strömung abbremst. Während in der Breschenmitte eine Fließgeschwindigkeit von annähernd 0,5 m/s mit der Stöckchenmethode ermittelt wird, nimmt sie mit 0,43 und 0,23 m/s zum Ufer hin kontinuierlich ab (Tabelle 16). Die beiden Stäbe befinden sich etwa fünf Meter von der rechtsseitigen Böschung entfernt in einer Wassertiefe von 50 cm (Abbildung A 7). Bei dieser Stabmessung wurden die Zeltheringe mit einer Stab-Eintauchtiefe von 34 cm aufgrund des kiesigen Bodentextur nicht vollständig in den Untergrund getrieben. Da in diesem Fall der Standort bei Auf- und Abbau der Stäbe überflutet war, ist keine Nulllage der Stäbe unter Trockenbedingungen vorhanden. Alternativ wird eine senkrechte Nulllage entlang einer aufgestellten Wasserwaage angenommen und die Auslenkung hierauf bezogen. Abbildung 46 zeigt statistische Kennzahlen für die Stabauslenkung in der Bresche am 11. Juni.



HDV_0464

Abbildung 46: Boxplot der ermittelten Auslenkung in der Bresche, ausgehend von Standfotos aus dem Video HDV_0464.

5.5.2 Maßnahme 1

An den beiden Leopoldskanalbreschen (Absenkung rechter Leopoldskanaldamm Nord und Süd) sind Einzelmessungen der Wassertiefe und der Fließgeschwindigkeit in unregelmäßigem Abstand vorgenommen worden. Vorwiegend beschränken sich die Messungen auf die nördliche Bresche, hinter der sich Plot sieben in etwa 60 m Entfernung befindet. Begonnen haben sie gegen Ende des Junihochwassers am 19. Juni, an dem gegen 15:45 Uhr an der südlichen Bresche Wasserstände von < 15 cm und an der nördlichen < 27 cm vorgefunden wurden. Gegen Abend des 02. Juli erfolgte eine umfangreichere Untersuchung an der nördlichen Bresche. Während um 18:30 Uhr die Wassertiefen zwölf bis 20 cm bei Fließgeschwindigkeiten von 0,11 bis 0,14 m/s betragen, steigen sie bis 21:00 Uhr um etwa 20 cm an bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,25 m/s. Am Tag darauf wurde um 16:45 Uhr auf dem Weg innerhalb der Bresche Wassertiefen von 18 bis 25 cm und später um 20:00 Uhr gegen 52 cm gemessen. Die letzte Messung erfolgte am 06. Juli gegen 14:30 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Überflutungshöhe 16 bis 23 cm mit Fließgeschwindigkeiten einer Spannweite von 0,15 bis 0,56 m/s.

5.6 Fehlerbetrachtung

Die größte Fehlerkomponente der Karbonfaserstabmethode ist das Auftreten von periodischen Schwankungen (Pendelbewegungen) der Stäbe durch Turbulenzen der gerichteten Strömung, welche die horizontale Auslenkung und damit auch den Auslenkungswinkel teilweise um eine Größenordnung verändern können. Die verwendete Berechnungsformel für die Fließgeschwindigkeit reagiert zudem sehr sensibel in Bezug auf geringe Änderung der Auslenkung / Auslenkungswinkel bei ebenfalls geringen Wassertiefen. Die Auslenkungsunterschiede im fast Trockenzustand bedingen sich durch eine Erfassungsmöglichkeit der Stabpositionen bzw. der -Winkel im Bereich von 10^{-1}° mit GIMP. Eine äußere Beeinflussung durch Wind oder geringfügige Blickfeldverschiebung, die durch Transpirationseffekt des Kamerabaumes hervorgerufen werden, ist nicht auszuschließen. Da mit den verwendeten Kameras nur Momentaufnahmen möglich sind, ist eine weiterführende statistische Auswertung oder mit einer Pendelfunktion notwendig, um eine konstante Fließgeschwindigkeit aus einer Reihe von Momentaufnahmen zu erhalten. Die Nulllage (Ruhelage) der Stäbe konnte oft aufgrund der Bodenbeschaffenheit nicht gänzlich senkrecht eingestellt werden. Hinzu kommen die unterschiedliche Kameraperspektive und der teilweise Aufbau in überflutetem Areal. Wenn die Instrumentierung während der Überflutungsphase durchgeführt werden muss, ist eine Ruhelage nur bedingt erfassbar da die Strömung die Stäbe hauptsächlich in Fließrichtung auslenkt (ohne Pendelbewegung). Näherungsweise lässt sich die Stablage ohne SK betrachten. Wird die Ruhelage nach Ablauf des Hochwassers ermittelt, können nach der Aufstellung eine Reihe von Faktoren wie zum Beispiel angeschwemmte Gegenstände oder aufgeweichter Auenboden zu einer Verlagerung jener führen. Die Befestigung der Kamerakästen an den geeigneten Bäumen hat an manchen Standorten zu einer Veränderung des Blickfeldes durch Windeinfluss, Umfangvariation des tragenden Baumes durch Transpiration oder anderer Parameter wie Temperatur geführt. An der Wasseroberfläche reflektierte, direkte Sonneneinstrahlung kann zudem zu einer Beeinträchtigung der Sichtbarkeit der Karbonfaserstäbe führen. Die x/y-Bildkoordinaten von Fixpunkten wie die Isolierband-Markierungen an den Zollstöcken variierten über den Tagesverlauf (Abbildung 47).

Dieser Effekt ist bislang noch nicht ausreichend ergründet. Bei weiter entfernten Stäben zur Kamera war der Effekt naturgemäß größer.

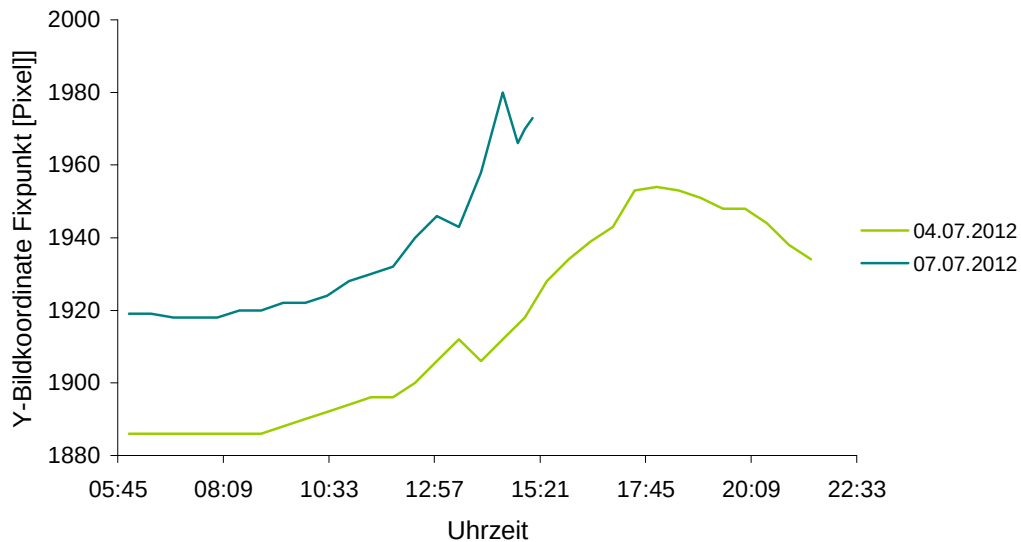


Abbildung 47: Betrachtung eines Fixpunktes über den Tagesverlauf am Beispiel der 60 cm-Marke am Zollstock Plot sieben. Je höher die Bildkoordinate, desto höher ist die Kameraneigung.

Die Ursachen hierfür liegen wahrscheinlich in den oben genannten Faktoren. Dies bedarf jedoch weiterführender Forschung. Ein weiterer starker, wenn auch unbeabsichtigter Einfluss auf die statische automatische Beobachtung der Karbonfaserstäbe entstand durch das regelmäßige Austauschen der Speicherkarten und externen Akkus.

Die exemplarisch durchgeführte Nasskalibrierung in der Peregrinskehle lässt nur eine ungenaue Bestimmung der auf die Messapparatur einwirkenden Strömungskräfte zu, wie die Streubreite der Kalibrierungsmessungen zeigt. Die hieraus gewonnenen Daten wirken sich auf die ermittelten Fließgeschwindigkeiten an den Karbonfaserstäben aus. Eine theoretische Ermittlung der Stablage aufgrund der vorhandenen Elastizitätsmodule (durchschnittlich 135000 GPa) führt zu annähernd realistischen Werten, ersetzt jedoch keine systematische Kalibrierung unter bekannten Randbedingungen.

Als geringfügige Fehlerkomponente der Trockenkalibrierung ist zu nennen, dass die Zugkraft auf den Stab mit Schwimmkörper nicht immer im Rechten Winkel zum Lot hin erfolgte. Ursprünglich als Erkennungsmerkmal der Stabspitzen gedacht, sind grüne Lüsterklemmen vor Blattwerk als Hintergrund unter Umständen sehr schwer auf eine Entfernung von mehreren Metern zu erkennen. Wenn die jeweiligen Stäbe sichtbar sind, können die Spitzen aus der Stabneigung und -länge annäherungsweise lokalisiert werden. Dabei helfen die Farbmarkierungen an den Stäben. Bei hellen oder schwachen Lichtverhältnissen und Pendelbewegung treten zusätzliche Ungenauigkeiten auf, die zu Fehlwerten führen können. Während der Fließgeschwindigkeitsmessung mittels MID verdeckt die Messperson gegebenenfalls nahe gelegene Stäbe, was bei der Bildauswertung zu weiteren Fehlwerten führt. Treten schnellere Fließgeschwindigkeiten ab etwa 40 cm Wassertiefe auf, werden die Stäbe derart stark ausgelenkt, dass die Schwimmkörper bis an die Stabspitzen abdriften können. Damit "liegen" die Stäbe mit den SK horizontal an der

Wasseroberfläche und können nicht mehr für die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit herangezogen werden. Führt das Hochwasser zudem viel Geschwemmsel mit sich, kann dies sich an den Stäben und auch an den Zollstöcken verfangen. Es tritt ein Kumulations- und Beschwerungeffekt auf, der ein selbstständiges Wiederaufrichten der Stäbe verhindert. Werden die Markierungen an den Stäben für die örtliche Wassertiefe herangezogen, tritt ein mit steigender Überflutungshöhe und Fließgeschwindigkeit zunehmender Ablesefehler auf, da der Hebelarm zunimmt und ein größer werdender Anteil der Stäbe von der Strömung erfasst wird. Beispielsweise führte eine rasch ansteigende Überflutung an Plot sieben am 01. September zu Auslenkungen bis etwa 53° an Stab drei. Auf dem nachfolgenden Foto zehn Minuten später sind fast alle dort aufgestellten Stäbe komplett ausgelenkt worden. Dieser Zustand hielt bis zur Dämmerung an. Bei Plot acht wurde nach raschem und stark zunehmendem Hochwasser zwei Mal ein KFS fortgerissen und ein in der Hausgrundkehle befindlicher Zollstock mitsamt Befestigungsstange um 35° gebogen.

6 Diskussion

Im Juni und Juli traten zwei Hochwasserereignisse am Restrhein im Taubergießen auf. Am Pegel Basel/Rheinlandhalle trat die Hochwasserspitze in der Nacht vom 12. auf den 13. Juni mit $2700 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Eine Hochwasserwelle dieser Größenordnung erreicht den Taubergießen innerhalb von etwa acht Stunden. Dieser Zeitspanne liegen Berechnungen zugrunde, dass eine Hochwasserwelle bei einem Hochwasserabfluss von $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ etwa zehn bis elf Stunden und bei einem Abfluss von rund $3400 \text{ m}^3/\text{s}$ etwa sechs Stunden benötigt (Pfarr 2012). Anfang Juli ereignete sich ein zweites Hochwasser mit bis zu $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Spitze gegen Mittag des 03. Juli (s. Wasserstandsganglinie Pegel Basel/Rheinlandhalle im Anhang). Dieses zweite Hochwasserereignis erreichte einen Tag später als nördlichsten Standort Plot sechs mit maximal 22 cm Überflutungshöhe sowie gegen Abend die südlicher gelegenen Plots sieben und acht. An diesem Tag erreichte eine Hochwasserwelle erstmalig Plot acht, welche bis zum Morgen des 04. Juli abgeklungen ist.

6.1 Kalibrierung und Elastizitätsmodul

6.1.1 Trockenkalibrierung

Die Versuchsreihe hätte unter Verwendung von Federwaagen höherer Belastbarkeit fortgeführt werden können. Bei der Versuchsdurchführung Anfang Juni wurde eine Zugkraft von einem N als Äquivalent zu auftretenden Strömungskräften angesehen, weil lediglich kleine Fließgewässer einer Beprobung unterzogen wurden. Wäre dieser Versuch ohne SK durchgeführt worden, könnte das Biegemoment auch für längere Hebelarme bestimmt werden.

Unstetigkeiten in den Kurven sind auf Messfehler in der Anordnung zurück zu führen. Nach abgeschlossener Kalibrierung wurde erkannt, dass die verwendete Umlenkrolle einen zu großen Reibungswiderstand besaß. Auch wurde im ersten Ansatz versucht, den Auslenkungswinkel mechanisch zu bestimmen. Dies hatte höhere Toleranzen bei der Ablesung zur Folge.

Je stärker die Stäbe gebogen werden, desto größer ist der Ablesefehler, womit die Wassertiefe überschätzt wird. Deswegen sind Wasserstände vom Zollstock auf die einzelnen geringfügig unterschiedlichen GOK-Niveaus zu übertragen. Die durchgeführte Trockenkalibrierung liefert für den Bereich 10 - 50 cm Höhenniveau des Schwimmkörpers Anhaltspunkte für die notwendige (Zug-/Druck-)kraft, um eine resultierende Auslenkung zu bestimmen. Allerdings ersetzt sie keine Kalibrierung unter (sporadischen) Fließgewässerbedingungen. So sind aufgrund des Eigengewichtes unter Trockenbedingungen je nach Masse des beschwerten Schwimmkörpers bei simulierten Wasserständen von über 50 cm keine Kräfte messbar. Durch Extrapolation der Messergebnisse niedriger simulierter Wasserstände ist im praktischen Fall dennoch mit einem Ergebnis zu rechnen, weil der Auftrieb des Schwimmkörpers gegenüber seiner Masse überwiegt. An der Spitze der Stäbe sollte eine möglichst geringe Masse angebracht werden, um eine zusätzliche Pendelbewegung zu vermeiden bzw. zu minimieren. Bei einer Trockenkalibrierung ist eine Untersuchung ohne Schwimmkörper, wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben, vorzuziehen.

6.1.2 Nasskalibrierung

Aus den verschiedenen Standardabweichungen der aufgewendeten Zugkraft zur Senkrechthaltung des Stabes in der Nasskalibrierung (0,06 zu 0,13 N) kann wahrscheinlich auf eine stärkere Pendelbewegung des Stabes in Kombination mit größerer Anströmfläche geschlossen werden. Praktische Vorversuche in einem Strömungskanal sind erforderlich, um das Widerstands- und Pendelverhalten der mit Schwimmkörper versehenen Stäbe bei variierender Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit und Fließverhalten genauer untersuchen zu können.

6.1.3 Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Die in der Elastizitätsuntersuchung auftretende Streubreite ist materialbedingt und anhand von Fotografien im Gelände nicht erkennbar, zumal die Stäbe nicht konsequent nummeriert wurden und so ihrem Standort nicht zugeordnet werden können. Mit Abnahme des E-Moduls bei stärkeren Zugkräften verringert sich der Widerstand des Materials gegen Verformung. Um keine unrealistischen, während eines Hochwasserereignisses auftretenden Strömungskräfte zu simulieren, endet der Zugversuch bei einer Anlegung von 9,81 N.

6.2 Untersuchungsflächen

In den Vogelhausattrappen sind die Kameras zum Austausch von Speicherkarten nur an einer Seite mit Schrauben am Gehäuse befestigt. Bei der Anbringung der Kamera ist sorgfältig auf eine korrekter Ausrichtung des Blickfeldes zu achten. Wird dies nicht konsequent umgesetzt, können unbeabsichtigt einzelne am Blickfeldrand aufgestellte Stäbe nicht aufgenommen werden. Auch kann sich ersterer durch den Austausch der Speicherkarten oder der externen Batterien leicht verändern, wenn die Kameras nicht genau in die Ausgangsblicklage zurückversetzt wird. Bei der Installation von Stäben in überflutetem Areal ist zudem auf ein ausreichend weites Blickfeld der Digitalkamera zu achten. Während der ersten Tage der Messperiode war die Vergrößerung zu stark eingestellt, so dass bei abnehmender Überflutungshöhe zum Beispiel bei Plot sieben der aus dem Wasser herausragende Teil von Zollstock und Stab nicht komplett auf den Fotos abgebildet sind und die jeweilige Wassertiefe von gänzlich sichtbaren Stäben übertragen werden muss. Zu Beginn der Messperiode von Plot sieben ereignete sich am Nachmittag des 03. Juli ein Hochwasser im Leopoldskanal, bei dem die aufgestellten Stäbe dermaßen ausgelenkt wurden, dass sie sich horizontal in Fließrichtung neigten und der provisorische, 60 cm lange Zollstock überspült wurde. Glücklicherweise lassen sich an einem umgestürzten Eichenstamm ungefähre Wasserhöhen zum Zeitpunkt der Bildaufnahmen ermitteln. Ein direktes Ablesen ist nicht möglich, weil auf der Rinde keine eindeutig vom Hochwasser stammende Feuchtigkeit als Markierung verblieben ist. In den späten Abendstunden ist der Wasserstand auf den Bildern zudem nicht mehr klar zu erkennen. Sobald die Überflutung eine gewisse Höhe und Fließgeschwindigkeit erreicht hat, werden die Karbonfaserstäbe bis zur Waagerechten ausgelenkt. Hierzu trägt im Wesentlichen der entlang der Stäbe frei bewegliche, als Strömungswiderstand dienende Schwimmkörper bei. Beträgt die Stabneigung über etwa 50°, wird er von der Strömung den Stab entlang bis an die als Arretierung dienende Lüsterklemme getrieben. Der Auftrieb der Schwimmkörper verhindert ihr Absinken. Eine selbstständige Wiederaufrichtung wäre nur bei abnehmender Fließgeschwindigkeit möglich. Ist dieser Zustand kompletter Auslenkung erreicht, verfängt sich leicht in ihnen Geschwemmsel und bewirkt eine

auf das Stabende wirkende Beschwerung, die zum Verharren des Schwimmkörpers in dieser Position führt, selbst wenn das Hochwasser vorbei ist. Beispielhaft ist hierfür das Hochwasserereignis vom 01. bis 03. September zu nennen, bei dem ich nicht anwesend war und bei dem die Stäbe nach einer Überflutungshöhe von maximal knapp 130 cm zwei Tage lang unbrauchbar gewesen sind. Eine Befreiung der Stäbe vom Geschwemmsel ist daher regelmäßig erforderlich. Insofern eignet sich die beschriebene Stabmethode nicht zum vollautomatischen Anzeigen der Fließgeschwindigkeit. Am vorderen Zollstock hat sich während dieses Ereignisses dermaßen viel Geschwemmsel verfangen, dass eine genaue Ablesung der Wassertiefe nicht mehr möglich ist. Am weiter entfernten, längeren Zollstock traten keine Beeinträchtigungen auf. Zwar wurde am Herrenkopfgrund (Plot 1 bis 4) der vermutete Mindesthochwasserabfluss des Rheins von 3500 m³/s (Georgi 2012) für eine Überflutung dieses Areals deutlich unterschritten, jedoch brachte das Mitte Juni aufgetretene Hochwasserereignis dem auf etwa 164 m ü. NN. gelegenen Gelände lediglich drei (in Niederungen vier) Überflutungstage mit Überflutungshöhen von maximal 46 cm (13.06.2012). An Plot vier zeigte der in einem Graben von etwa 45 cm Tiefe aufgestellte Zollstock am selbigen Tag einen maximalen Wasserstand von 77 cm an. Nach einigen Tagen Überschwemmung ist der Auenboden stark aufgeweicht; bei häufigem Messen an den Querprofilen entstehen Trit্তvertiefungen und eine geringfügige Veränderung der Mikrotopographie, woraus Ungenauigkeiten in der Wassertiefe von wenigen cm entstehen können. Dies trat besonders bei Plot drei zum Vorschein.

Bei abnehmender Wassertiefe erhöhte sich während der ersten Überflutungstage die Fließgeschwindigkeit im östlich von der Kamera gelegenen Nebenarm im Vergleich zur Hauptströmung (HDV_0477, HDV_0478). Dies erklärt den Fließgeschwindigkeitsanstieg an der Messlotrechten Nummer fünf und sechs am 14. Juni. Eine weitere Verzweigung einige Meter nördlich zeigte dieselbe Charakteristik. Dies führte an der Messlotrechten Nummer zwölf zu einer erhöhten Geschwindigkeit gegenüber dem Vortag. Anhand der Videoserie HDV_0484 bis 0486 sowie HDV_0493 und 0494 ließe sich das Stabverhalten an Plot sechs über jeweils eine Minute analysieren. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit jedoch kaum möglich.



Abbildung 48: Vollkommen ausgelenkte Stäbe mit verfangenem Geschwemmsel an Plot 7 in der Nähe des Leopoldskanals. Blick von der stationären Kamera.

Beim Verfolgen von treibenden Objekten entlang von Fließstrecken ist zu beachten, dass hierbei die Genauigkeit mit kürzerem Intervall der Fotoaufnahmen zunimmt. Dieses Verfahren wird in Zeiträumen eingesetzt, in denen keine Messungen nach der Stöckchenmethode erfolgt sind. Auf den Intervallaufnahmen sind nur wenige treibende Gegenstände sichtbar, warum auch Luftblasenansammlungen für die Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit herangezogen werden. Von Nachteil ist allerdings ihre Formunbeständigkeit bei REYNOLDS-Zahlen oberhalb der laminaren Strömung, was ein Wiederfinden in Strömungsrichtung auf nachfolgenden Aufnahmen deutlich erschwert. Mitunter sind Luftblasenansammlungen auf diesen Fotos nicht eindeutig zuordbar. Nach dem Zulauf in die Hausgrundkehle bei Plot acht verteilt sich das Quellwasser im verhältnismäßig großen Quellwasserkörper. Unter Normalbedingungen reicht die Quellwassermenge nicht aus, um den örtlich bis zu 70 cm tiefen Gießen in Strömung zu versetzen. Es werden nur Fließgeschwindigkeiten nahe der Nachweisgrenze von 10^{-2} m/s gemessen. Auch das beim Regierungspräsidium eingesetzte zwei-dimensionale Hochwassermodell FlowMod berechnet im Überflutungsfall im Bereich des eingerichteten Plots Fließvektoren $> 0,3$ m/s bei einem Gesamtabfluss am Pegel Wyhl von $1800 \text{ m}^3/\text{s}$. Die hydraulischen Berechnungen des Modells stammen aus dem Jahr 2003; vier Jahre vor den Dammabsenkungen. In Anbetracht der potentiellen Überflutungshöhen wäre die Einrichtung eines Schwimpegels aufwendig geworden. Eine kontinuierliche Erfassung des Durchflusses durch Bauwerke ist in einem Naturschutzgebiet nicht zulässig und zudem würden sie eine teure Lösung darstellen, da sie entsprechend potentieller Überflutungshöhen, dem gewünschten Messbereich abhängig von der Form und Breite des Kontrollquerschnittes sowie des gewünschten hydraulischen Auflösungsvermögens dimensioniert werden müssten und seltener durchströmt werden. Hinzu kommt die

geringen Gefälleverhältnisse in den Auen. Für eine Durchflussermittlung über Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen (WQ-Beziehungen) reichen zum einen modellierte Überflutungshöhen in der Regel nicht aus, zum anderen werden Querprofile über die gesamte Breite der Überflutungsfläche benötigt, die in einem Auwald nur schwer einzurichten sind ohne auf digitale Geländemodelle (DGM) auf der Basis von Laserscanndaten zurückzugreifen. Auch sonst sind im Hochwasserbereich Durchflussganglinien aufgrund technischer Schwierigkeiten meist unzureichend (Morgenschweis 2010, S. 389).

6.2.1 Gewähltes Aufnahmeintervall

Bei den nördlichen Plots wurde bei Überschwemmung das zuvor eingestellte Aufnahmeintervall von einer Stunde nicht verringert bzw. auf einheitlich zehn Minuten geändert, weil zu diesem Zeitpunkt die Karbonfiberstäbe mit einer entsprechenden Anzahl an Schwimmkörpern nicht zur Verfügung standen. Ansonsten wären die stationären Kameras an diesen Plots auf das kürzere Intervall umgestellt worden. Für das Beobachten der Überflutungshöhen an Zollstöcken ist ein Foto pro Stunde ausreichend intervalliert. Zusätzlich zu den in Kapitel 4.7 beschriebenen Argumenten, stellt ein Aufnahmeintervall von zehn Minuten auch einen Kompromiss in Hinblick auf die Bildauswertungsaufwand dar. Wie in den Videos HDV_0484, 0485, 0486 sowie 0494 zu sehen ist, liegen die Schwingfrequenzen im Bereich unterhalb einer Sekunde. Ist wie bei Stab eins (Plot sechs, Video HDV_0493) die Pendelbewegung ohne SK aufgrund der geringeren Anströmfläche kleiner, ist auch die Schwingfrequenz höher.

6.2.2 Referenzmethode

Wichtig ist neben dem täglichen Einsatz des FLO-MATE bei überfluteten Plots unter anderem ein homogenes Magnetfeld (Beeinflussung durch Fremd-Magnetfelder), um möglichst genaue Messwerte zu erhalten. Aus logistischen Gründen konnte das FLO-MATE zeitweise nicht ständig mitgeführt werden. Insgesamt wird die Verwendung der MID als unproblematisch angesehen. Manchmal schwankte der Anzeigewert derart stark, dass eine längere Messzeit als üblich notwendig wurde. Durch die in Kapitel 4.2 genannten Vorteile der unbeweglichen Messsonde haben sich das FLO-MATE als zuverlässig erwiesen.

6.3 Ermittlung der Fließgeschwindigkeit aus Auslenkung und -winkel

Eine Auswertung der Auslenkungswinkel mit GIMP ist recht präzise. Sie kann überprüft werden durch das trigonometrische Verhältnis von Stabspitze und sichtbarem Stabfuß an der Wasseroberfläche, verdeckt durch den jeweiligen SK. Allerdings ist der Standfuß der Stäbe an den jeweiligen Kunststoff-Zeltheringen im überfluteten Zustand nicht bekannt. Leider konnte bislang keine vernünftige Korrelation der berechneten mit den gemessenen Werten erreicht werden, obwohl sie die gleiche Größenordnung besitzen. Der Grund hierfür liegt in der großen Schwingungsamplitude der Stabauslenkungen durch Oszillation sowie in beschränkten Messmöglichkeiten zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und des Winkels der sich biegenden umströmten Stäbe unterhalb der Wasseroberfläche, weshalb die Stäbe unbedingt in einem Strömungskanal kalibriert werden sollten. Bei der Rückpendelung der Stäbe treten negative Auslenkungswinkel auf, die in der Berechnungsformel als positive Fließgeschwindigkeiten durch Umwandlung des Terms unterhalb der Wurzel in einen positiven Wert. Ansonsten erhält man eine imaginäre Zahl.

6.4 Vergleich der Messdaten mit modellierten Daten des Hochwassermodells FlowMod

Den Darstellungen der Überflutungshöhen aus den 2D-Modell-Berechnungen des Hochwassermodells FlowMod liegen Höhendaten einer photogrammetrischen Befliegung mit einer Rastergröße von 30*30 m zugrunde. Seit einigen Jahren sind Laserscanndaten höherer Auflösung mit einer Rastergröße von 1*1 m verfügbar. Aufgrund der höheren Auflösung der Laserscanndaten sind insbesondere im Schlutenbereich bis zu 0,5 m niedrigere Geländeoberflächen erkennbar, weshalb etwa 0,5 m höhere Überflutungshöhen auftreten können als in den Karten angezeigt. Zusätzliche Daten über die Überflutungsflächen, beziehungsweise die Geländeoberkante erreichende Grundwasserstände, registrieren im Taubergießen mit Dataloggern ausgerüstete Schreibpegel, welche vierteljährlich ausgelesen und in der Grundwasserdatenbank eingepflegt werden. Diese Informationen stehen für den Hochwasserzeitraum Sommer 2012 noch nicht zur Verfügung.

6.5 Verbesserungsvorschläge für Versuchsaufbau und Softwareprogrammierung

Während der Bearbeitungszeit kamen eine Reihe von alternativen und weiterführenden Ideen auf, wie Fließgeschwindigkeiten in der Überflutungsauflage besser ermittelt werden können.

Anstatt ein kontinuierliches Aufnahmeintervall der Digitalkameras zu benutzen, wie es beim verwendeten Bautyp ausschließlich möglich ist, könnte eine Kamerasoftware entwickelt werden, die eine Aufnahmeserie in kurzer Abfolge mit anschließender definierter Bereitschaftsphase ermöglicht. Bisher können nur konstante Intervalle eingestellt werden. Ein weiterer gegenwärtiger Nachteil ist die Limitierung der Aufnahmeanzahl von 1000 Stück in Serie. Eine Erweiterung dieser Softwarefunktion wäre sinnvoll, zumal bei 1000 Bildern im 16:9-Format und einem Speicherplatzbedarf von durchschnittlich 1,65 MB Speicherkarten einer Kapazität von zwei GB ausreichen. Mittlerweile sind Speicherkarten mit maximal 64 GB erhältlich, womit sie seltener ausgetauscht werden müssten. Eine Alternative zur Verwendung von Speicherkarten stellt die Datenfernübertragung dar, welche allerdings aus Kostengründen nicht eingesetzt wird.

Um die Schwingfrequenz der Karbonfaserstäbe besser erfassen zu können, wären aufgehängte und zeitgesteuerte Videokameras mit einer Aufzeichnungszeit von drei Minuten pro Stunde geeigneter, weil so beispielsweise treibende Gegenstände entlang einer definierten Fließstrecke besser verfolgt werden können. Videos haben gegenüber Einzelbildern den Vorteil, dass keine Momentaufnahmen aufgezeichnet werden, sondern für den Betrachter eine "flüssige" Aufnahme aufeinander folgender Fotos produziert wird (24 Bilder pro Sekunde). Bei den aufgetretenen Fließgeschwindigkeiten wären Aufnahmeintervalle zwischen zwei und fünf Sekunden von Vorteil, um mit an der Fließstrecke vorbei treibendem Geschwemmsel und Luftblasen bei Plot sechs die Oberflächenfließgeschwindigkeit zu ermitteln. Beim eingestellten Minimalintervall von 10 Sekunden können sie nicht zweifelsfrei auf zwei aufeinander folgenden Bildern identifiziert werden. Falls genügend Strom zur Verfügung steht, könnten zeitgesteuerte Scheinwerfer zur Beleuchtung der Karbonfaserstäbe eingesetzt werden. Um einen unnötigen Stromverbrauch zu vermeiden sollte vor der Bildaufnahme eine Aktivierung von etwa fünf Sekunden mit anschließendem Abschalten genügen.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Prinzipiell eignet sich die verwendete Karbonfiberstabmethode (mit Einschränkungen), um Fließgeschwindigkeiten in der überfluteten Aue automatisiert indirekt zu erfassen. Über die horizontale Auslenkung der Stäbe beziehungsweise über die Auslenkungswinkel lässt sich in Abhängigkeit von der Wassertiefe, der Schwimmkörpergröße und -form sowie der Elastizität des verwendeten Materials auf die Fließgeschwindigkeit schließen. Allerdings schwanken die Stäbe je nach auftretender Druckkraft der Strömung und der Höhe der Schwimmkörperposition periodisch mit einer bislang nur wenig erforschten Amplitude und Schwingfrequenz. Zur Zeit können diese Pendelbewegungen der Stäbe nicht berücksichtigt werden. Zum einen wären dreidimensionale Aufnahmen der Stäbe mit mehreren Kameras notwendig und zum anderen wurden noch keine Funktionen im Rahmen dieser Arbeit gefunden, die diese Bewegungen in Abhängigkeit von Hebelarm und Druckkraft, die durch die Wassertiefe und die Fließgeschwindigkeit verursacht wird, beschreiben. Insofern kann nur zu jedem beobachteten Auslenkungswinkel eine Fließgeschwindigkeit zugeordnet werden. Die Messung von Fließgeschwindigkeiten mittels magnetisch-induktiver Strömungssonde ist wichtig um zusätzliche konventionell ermittelte Daten zur Verfügung stellen zu können.

Die Wahl der Untersuchungsflächen ist nicht nur abhängig von der Geländehöhe (m ü. NN) und der Nähe zu Fließgewässern, sondern auch vom Abflussregime des jeweiligen Vorfluters. Die aufgetretenen gemessenen Überflutungen überstiegen außer im Schlutenbereich nur in der Nähe der nördlichen Leopoldskanalbresche ein Meter Höhe. Bei schnell ansteigendem Hochwasser mit hohen Fließgeschwindigkeiten wie an der Langgrienquelle (Plot acht) wären dickere, längere und weniger biegsame Stäbe notwendig. Karbonfiber hat sich als Material als gut geeignet erwiesen. Im Bereich von wenigen cm/s treten relativ große Unsicherheiten bei den gemessenen Fließgeschwindigkeiten v der verwendeten tragbaren Strömungssonde auf (nicht quantifiziert), weil diese für Fließgerinne mit deutlich höheren v ausgelegt ist. Die Nachweisgrenze dieses Gerätes beträgt 0,01 m/s und die Genauigkeit bei ebenfalls 10^{-2} m/s. Für Gebiete niedriger Überflutungshöhen und geringer Fließgeschwindigkeiten von wenigen cm/s, die das Hochwassermodell FlowMod ausgibt (Bereich 0,02 bis etwa 0,2 m/s), bedarf es sensiblerer und für Überflutungsflächen geeignete Messgeräte.

Eine Kalibrierung der Karbonfiberstäbe mit unterschiedlichen Randbedingungen in einem Strömungskanal ist dringend notwendig, da bei der bisher durchgeführten Nasskalibrierung nur ein Strömungsgewässer mit einer Wassertiefe und einer Fließgeschwindigkeit beprobt wurde. Zusätzlich wurde das Ergebnis durch Turbulenzen beeinflusst. Insofern wären weitere Forschungen nötig, ob die Erfassung der Auslenkung von Karbonfiberstabspitzen mit passend dimensionierten Schwimmkörpern über stationär angebrachte Kameras für Fließgeschwindigkeitsmessungen plausible Werte liefert. Da mit an Führungsstangen angebrachten magnetisch-induktiven Strömungssonden lediglich manuell punktförmige Fließgeschwindigkeiten gemessen werden können, eignen sich möglicherweise integrierende Messungen mit Feldspulen für Querprofilbreiten von bis zu 20 m. W. Herschy (1985) und Morgenschweis u. Sévar (1995) geben für diese modifizierte MID-Methode eine wesentlich höhere Messgenauigkeit an (Morgenschweis 2010). Jedoch arbeiten die Feldspulen mit auf der Gewässersohle montierten Punktelektroden. In temporär überfluteten Auwäldern mit viel Sedimentumlagerung (mehrere Zentimeter pro Hochwasserereignis) könnte das Signal zwischen Feldspule und den Elektroden

abreißen. Mit zunehmender Überflutungsbreite schwächt sich die magnetische Feldstärke der Spule(n) ab. Deshalb wird empfohlen diese möglichst nah an der Wasseroberfläche zu platzieren. Bei einer potentiellen Überflutungshöhe von über einem Meter und entsprechenden Unsicherheiten der Vorhersagbarkeit der tatsächlichen Wassertiefe kann die Distanz zwischen Feldspule und Wasseroberfläche sehr lang sein. Damit eine solche Anlage funktioniert, muss ein ausreichend starkes Magnetfeld aufgebaut werden, weshalb Fragen bezüglich der Beziehung zwischen Aufwand, Nutzen und Finanzierbarkeit offen stehen.

Um auch bei Dunkelheit eine Auswertung zu ermöglichen, könnte eine Beleuchtung der Stabspitze mittels Strom sparender LED erfolgen. Die Batterie dafür könnte im Kunststoffhering untergebracht werden. Die Stromzuführung müsste innerhalb des KFS erfolgen.

7.1 Ergänzender Forschungsbedarf

Diese Masterarbeit beschränkt sich bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeit aus der Pendelbewegung von Karbonfiberstäben auf eine einzige Bildebene, weshalb die reale räumliche Pendelbewegung nicht berücksichtigt werden kann. Wahrscheinlich kann durch den Einsatz mehrerer aufeinander abgestimmter Intervallkameras (statische oder bewegte Bilder) die räumliche Pendelbewegung erfasst und dadurch der perspektivische Fehler reduziert werden. Es bleibt weiterhin zu erforschen, ob ein Aufnahmeintervall von zehn Minuten für die Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit als ausreichend angesehen werden kann. Ein versuchsweise eingestelltes Intervall von zehn Sekunden ist über mehrere Stunden zu umfangreich. Auch sollte die komplette Amplitude der Pendelbewegungen fotografisch bzw. videografisch erfasst werden, um einen systematischen Fehler ausschließen zu können. Unbedingt sinnvoll wäre die Kalibrierung der Karbonfiberstäbe in einem Strömungskanal, um deren Schwankungsverhalten inklusive der Periodizität zu erforschen. In dieser Arbeit werden die Fließgeschwindigkeiten anhand der Stabauslenkung empirisch mit einer Reihe von Unsicherheiten ermittelt. Zur systematischen Untersuchung müsste eine komplette Amplitude aufgenommen und ihr eine entsprechende Fließgeschwindigkeit zugeordnet werden. Auch der Effekt der Transpiration von Bäumen, an denen Kamerakästen angebracht werden, auf Blickfeldverschiebungen des Kamerabildes im Tagesverlauf mit variierender Lichteinstrahlung wird wahrscheinlich zu einer verbesserten Anwendung der Karbonfiberstabmethode führen. Diese Problematik könnte mit der Verwendung von Pfählen als Befestigung umgangen werden.

8 Nachwort

Nachdem die Messeinrichtungen einen Monat vorher abgebaut worden sind, trat vom 10. bis 16. Oktober ein weiteres Hochwasser am Rhein und Leopoldskanal auf (Der Rhein führte am Pegel Hauenstein an sieben Tagen über $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Leopoldskanal fünf Tage lang über $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (s. Abflussdaten auf Datenträger). Nach dem Höchststand des Hochwassers am 11. Oktober, erfolgte am Tag darauf eine mit Zollstock, Kamera, Wathose und Schwimmweste ausgerüstete Exkursion in das Überflutungsgebiet und zu den vier südlich gelegenen ehemaligen Plots. Während der Anfahrt beobachtete ich am im Dornskopf in der Nähe der Holzbrücke befindlichen Lattenpegel den bisher höchsten Wasserstand von 1,82 m (Abbildung 49). Zum Zeitpunkt des Hochwasserscheitels ist das Befahren der Wege mit einem Kraftfahrzeug unmöglich. Diesmal diente ein Fahrrad als Fortbewegungsmittel, welches durch die Furten getragen werden konnte. Der Lattenpegel des Rheinpegels Rust (betrieben durch das Regierungspräsidium Freiburg) zeigte 1,85 m an. Im überfluteten nördlichen M1 wurden Wassertiefen von 66 bis 73 cm an unterschiedlichen Stellen auf dem Weg gemessen. Am Lattenpegel an der Mündung des Leopoldskanals in den Restrhein stand das Wasser 1,40 m hoch. Neben den Furten wurden auch die im Süden des Taubergießen befindlichen Wegbrücken überspült. In der Nähe der Langgrienquelle trat bereits einige Meter nach Beginn der Überflutungsrinne eine Wassertiefe von 85 cm auf (Abbildung 50). An den Plot sechs wurden 55 cm und an Plot fünf 20 cm Wassertiefe gemessen.



Abbildung 49: Grundwassermessstelle Nr. 22/067-5 als Teil des Grundwassermessnetzes des Regierungspräsidiums Freiburg. Der Lattenpegel im Hintergrund zeigt einen hohen Wasserstand an (links), Überflutete Furt der ehemaligen Rheinstraße an der Hausgrundkehle (Mitte). Rückwärtiger Blick auf vorige Brücke (rechts).



Abbildung 50: Überströmte Wegbrücke in der Nähe des Leopoldskanals (links), überflutete Grabenstruktur an der Langgrienquelle (Mitte) und Überflutete nördliche M1 (rechts).

Literaturverzeichnis

- BFVNL - Bundesforschungsanstalt für Vegetationskunde, Naturschutz und Landschaftspflege (1975): *Ermittlung und Untersuchung der schutzwürdigen und naturnahen Bereiche entlang des Rheins*. Rheinische Landschaften. Schriftenreihe für Naturschutz und Landschaftspflege, Heft 11: 163 S.
- BRIERN (1999): *Die Gewässerlandschaften Baden-Württembergs*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Abteilung Wasser und Altlasten; 105 S.
- DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST (1953): *Klima-Atlas von Baden-Württemberg*. Bad Kissingen; 37 S.
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen, Berlin; 536 S.
- ENGL, W. L. (1970): *Der induktive Durchflussmesser mit inhomogenem Magnetfeld*. Teil I. Archiv für Elektrotechnik 52, Heft 6, 344-359.
- Engl, W. L. (1972): *Der induktive Durchflussmesser mit inhomogenem Magnetfeld*. Teil II. Archiv für Elektrotechnik 54, Heft 5, 269-277.
- GEYER, O. F. & GWINNER M. P. (2011): *Geologie von Baden-Württemberg*. Fünfte völlig neu bearbeitete Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart; 626 S.
- GALLUSSER, W. A. & SCHENKER, A. (1992): *Die Auen am Oberrhein - Les zones alluviales du Rhin supérieur*. Birkhäuser Verlag, Basel. ISBN 3-7643-2805-3; 192 S.
- HERSCHY, R. W. (2009): *Streamflow Measurement*. 3. Auflage, Taylor & Francis, Abingdon.
- HODEL, H. (1996): *Vergleichsmessungen mit elektromagnetischen Geschwindigkeitssonden*. In: Landeshydrologie und -geologie Bern (Hrsg.): 100 Jahre Eichstätte für hydrometrische Flügel. Hydrologisches Seminar vom 04./05. November 1996 in Ittrigen b. Bern, Hydrologische Mitteilungen Nr. 24, Bern.
- HÜGIN (1962): *Wesen und Wandlung der Landschaft am Oberrhein*. Sonderdruck Beiträge zur Landespflege 1; 186-250.
- ISELE, D. (2010): *Alter und Herkunft der sublakustrischen Quellen in Taubergießen*. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.
- KAISER, T. (2008): *Naturerlebnis Rheinauen, von Basel - zum Taubergießen - bis Straßburg*. Schillinger Verlag GmbH, Freiburg; 120 S.

- KUTTER, S. & SPÄTH, V. (1993): *Rheinauen - bedrohtes Paradies am Oberrhein*. G. Braun GmbH, Karlsruhe; 120 S.
- KRAUSE, W. & HÜGIN, G. (1987): *Ökologische Auswirkungen von Altrheinverbundsystemen am Beispiel des Altrheinausbaus*. Natur Landschaft 62 (1); 9.
- KRÜGER, A. (2007): *Neue Kohlenstoffmaterialien - Eine Einführung*. Teubner Verlag Studienbücher Chemie; 469 S.
- LAUTERBORN, R. (1917): Die geographische und biologische Gliederung des Rheinstromes. II. Teil. Sitzungsbericht Heidelberger Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung B. VII, 6. Abhandlung; 61 S.
- LAUTERWASSER, E. & HAUCK, J. (1987): *Wald, Forstwirtschaft und Naturschutz im Taubergießengebiet*. Gutachten zur künftigen Waldbehandlung. Schriftenreihe LFV 64; 158 S.
- MANIAK, U. (1993): *Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York; 568 S.
- MANIAK, U. (2005): *Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 65f.
- MORGENSCHWEIS, G. (2010): *Hydrometrie - Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-05389-4; 582 S.
- MORGENSCHWEIS, G. (2004): *Mobile magnetisch-induktive Strömungssonden zur Fließgeschwindigkeitsmessung - Überprüfung von 2 Messsonden mit Laser-Doppler-Velocimetrie*. DGM (37) 1993, H. 3/4,; 71 - 79.
- MORGENSCHWEIS, G. & SÉVAR, J.-M. (1995): *Integrierende magnetisch-induktive Durchflussmessung in offenen Gerinnen - Konzept und erste Erfahrungen*. Internationales Seminar der Hydrometrie vom 27.-30.03.1995 in Kempten/Allgäu, Kempten.
- MÜLLER, T. (1974): *Die naturräumliche Lage und Klimadaten des Taubergießengebiets*. In: Landesstelle für Naturschutz und Landschaftspflege: Das Taubergießengebiet, eine Rheinauenlandschaft. Die Natur- und Landschaftsschutzgebiete Baden-Württembergs 7; 142 - 146.
- OERTEL, H.; BÖHLE, M.; REVIOL, T. (2011): *Strömungsmechanik - Grundlagen, Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele*. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden; 470 S.

- OSTERMANN, R. (2004): *Vegetationsdynamik in Bannwäldern des Taubergießengebietes. Überflutungsauwe der Staubeiche des Oberrheins*. Waldschutzgebiete Baden-Württemberg, Band 4, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Waldökologie; 80 S.
- PALEIT, J. & SIEPE, A. (2007): *Revitalisierung Taubergießen - alter Rhein mit neuer Dynamik*. Staatliche Naturschutzverwaltung Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg; 16 S.
- PERTL, A. (2004): *Vergleich von Methoden und Messgeräten für die Durchflussmessung an Oberflächengewässern*. Diplomarbeit an der Karl-Franzens-Universität Graz.
- PISOKE, T. (2000): *Die Waldstruktur im Bannwald Taubergießen - eine Luftbildauswertung im strukturreichen Auwald*. Heft 22. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Botanik und Standortkunde, Freiburg; 103 S.
- RAABE, W. (1968): *Wasserbau und Landschaftspflege am Oberrhein*. Schr.-R. Dt. Rat Landespl. 10; 24 - 31.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg; 583 S.
- SCHENKER, A. (1992): *Naturraum und Auenökologie. Naturräumliche Gegebenheiten am Oberrhein*. In Galluser, W.A. & Schenker, A. (Hrsg.): *Die Auen am Oberrhein. Ausmaß und Perspektiven des Landschaftswandels am südlichen und mittleren Oberrhein seit 1800. Eine umweltdidaktische Aufarbeitung*. Berlin; 530 S.
- SCHÖNWIESE, C.D. (2000): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. 3. verbesserte und erweiterte Auflage. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart; 302 S.
- SHERCLIFF, J. A. (1962): *The Theory of Electromagnetic Flow Measurement*. Cambridge University Press, Cambridge.
- TITTIZER, T., KREBS F., ZIMMER M., DOMMERMUTH M., BÄTHE J. (1995): *Erarbeitung einer Konzeption für ein langfristiges ökologisches Beobachtungssystem des Rheins*. Forschungsbericht 109 02 041. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Berlin; 74 S.
- TITTIZER, T., & KREBS, F. (1996): *Ökosystemforschung - Der Rhein und seine Auen - eine Bilanz*. Bundesanstalt für Gewässerkunde im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Bundesumweltforschungsplanes des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Springer Verlag Berlin, Heidelberg; 468 S.

UM, LUBW - Umweltministerium Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2012): *WaBoA - Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg*. 4. Auflage, Stuttgart.

VERES (1980): *Erläuterungen zu den Standortskarten der Rheinauewaldungen der Forstbezirke Ettenheim, Lahr, Kehl*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg; 124 S.

WEILER, M. & LANGE J. (2011): Skript zum Hydrologischen Geländepraktikum 2011, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; 108 S.

ZANKE, U. C. E. (2002): *Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer für Bauingenieure Umwelt- und Geowissenschaftler*. Parey Buchverlag Berlin; 330 S.

ZEPP, H. (2003): *Geomorphologie*. 2. durchgesehene Auflage, Verlag Ferdinand Schöningh Paderborn München Wien Zürich; 354 S.

Persönliche Mitteilungen

GEORGI, M. (2012): Ramsar-Ranger-Oberrhein, Bundesumweltministerium, Außenstelle Rhinau (rechtsrheinisch).

MEHLIG, B. (2012): Fachbereichsleiter Hochwasserschutz, Stadtentwässerung, Klima, Wasserwirtschaft (FB 53), Abteilung Wasserwirtschaft, Gewässerschutz des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

MISSIEWITZ, J. (2012): Mitarbeiter des Referats "Integriertes Rheinprogramm" (Ref 53.3), Abteilung Umwelt des Regierungspräsidiums Freiburg (RPF).

PFARR, U. (2012): Stellvertretende Referatsleiterin "Integriertes Rheinprogramm" (Ref 53.3), Abteilung Umwelt des Regierungspräsidiums Freiburg.

WALSER, B. (2012): Betriebsleiter des Flussbaubetriebshofes Riegel (Ref 53.2), Abteilung Umwelt des Regierungspräsidiums Freiburg.

WEICHERT, R. (2012): Referatsleiter Flusssysteme, Abteilung Wasserbau. Bundesamt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.

Internetquellen

HOCHWASSER-VORHERSAGE-ZENTRALE BADEN-WÜRTTEMBERG (HVZ 2012): Stammdaten für den Pegel Basel/Rheinlandhalle.

<http://www.hvz.lubw.baden-wuerttemberg.de>

DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH (DGJ 2004 bis 2009): *Rheingebiet Teil I, Hoch- und Oberrhein*.

Zugriff am 12.05.2012

KOCH, M. (2003): *Technische Hydraulik*. Vorlesungsskript Fachgebiet Geohydraulik und Ingenieurhydrologie Wintersemester 2002/2003, Fachbereich Bauingenieurwesen, Universität Kassel; 133 S.

zu beziehen über <http://www.uni-kassel.de/fb14/geohydraulik/Lehre/Hydraulik/skript/>

Zugriff am 14.11.2012

LEHRSTUHL FÜR STRÖMUNGSMECHANIK & STRÖMUNGSTECHNIK (2012): *Arbeitsheft* für Bachelorstudenten. Institut für Strömungstechnik & Thermodynamik, Universität Magdeburg; 66 S.

HEIDORN D. (2009): *Das Fadenpendel*. In: Physikalisches Praktikum 2, Mechanische Schwingungen und Wellen.

http://www.dieter-heidorn.de/Physik/SS/Praktika/P2_MechSchwWel/MechSchwWel.html

Zugriff am 31.10.2012

PIK (2009): Klimadaten und Szenarien für Schutzgebiete. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung; Klimadiagramm nach WALTER für den Bereich Taubergiessen, Elz und Ettenbach

<http://www.pik-potsdam.de/~wrobel/sg-klima-3/landk/Emmendingen.html>

Zugriff am 24.04.2012

PREHM, A. (2009): *Strömungslehre*. Skript zum Praktikum der Technischen Chemie, Universität Oldenburg; 17 S.

<http://www.gmehling.chemie.uni-oldenburg.de/Praktikum/Stroemungslehre.pdf>

SMOLIK, C. (2000): *Elastizitätsmodul*. In: Online Glossar Velotechnik.

http://www.smolik-velotech.de/glossar/e_ELASTIZITAETSMODUL.html

Zugriff am 29.10.2012

Berechnung eines Ellipsensegments

<http://www.had2know.com/academics/ellipse-segment-tank-volume-calculator.html>

Zugriff am 15.11.2012

Anhang A

Abflussdaten und -ganglinien an Pegeln

Tabelle A 1: Provisorische Abflussdaten des amtlichen Pegels Basel/Rheinlandhalle für den Zeitraum Januar bis August 2012. Quelle: Bundesamt für Umwelt (Schweiz), Abteilung Hydrologie, Bern.

Abfluss	Rhein - Basel, Rheinlandhalle										LH 2289
Débit	Koordinaten	613400 / 267650	Höhe	246 m ü.M.	Fläche	35897 km²	Mittlere Höhe	1025 m ü.M.	Vergletscherung	1.2 %	
Portata	Coordinate		Altitudine		Superficie		Altitudine moyenne		Extension glacier		
							Altitudine media		Ghiacciaio		
2012	Jan./Janv.	Febr./Févr.	März/Mars	April/Avril	Mai/Mai	Juni/Juin	Juli/Juillet	Aug./Août	Sept./Sept.		
	Genn.	Febr.	Mars	Avril	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Sett.		
Tagesmittel	1 1788	978	703	807	1156	1213	- 1698	895			1
	2 1610	982	+ 752	779	- 1270	1231	1805	903			2
	3 1594	928	792	800	1276	1252	1847	898			3
	4 1652	842	796	934	1249	1525	1777	864			4
	5 1784	789	792	980	1280	1616	1761	904			5
Moyenne journalière	6 2033	+ 816	785	942	1323	1578	1878	+ 950			6
	7 1695	805	761	898	1329	1549	1790	1003			7
Media giornaliera	8 1640	784	760	970	1274	2123	1662	986			8
	9 1542	775	740	936	1229	2119	1618	945			9
	10 1409	738	731	921	1266	1973	1556	893			10
m³/s	11 1339	679	696	1008	1304	2010	1484	861			11
	12 1212	680	687	- 1064	1389	2236	1356	830			12
	13 1181	696	707	1095	1471	+ 2478	+ 1309	824			13
	14 1107	661	708	1039	1402	2274	1250	783			14
	15 1027	683	710	1056	1387	2046	1200	752	-		15
	16 959	710	694	1455	+ 1360	1903	1257	943			16
	17 914	679	719	1285	1290	1807	1206	898			17
	18 907	- 664	716	1129	1197	1757	1153	803			18
	19 914	682	754	1050	1139	1759	1128	786			19
	20 1098	675	854	+ 995	1101	- 1717	1117	783			20
	21 1315	646	833	958	1158	1706	1098	846			21
	22 1445	629	837	948	1336	1685	1113	816			22
	23 1390	610	- 835	950	1457	1602	1032	809			23
	24 1282	610	- 812	995	1459	1573	1014	863			24
	25 1255	668	782	1034	1421	1567	1003	923			25
+Maximum Massimo	26 1196	768	788	973	1334	1709	978	1062			26
	27 1157	745	793	969	1293	1722	943	1017			27
- Minimum Minimo	28 1185	893	814	966	1258	1711	972	972			28
	29 1158	680	817	1007	1230	1684	970	945			29
	30 1048		827	1140	1236	1639	978	1032			30
	31 1017		821		1241		928	- 1370	+		31
Monatsmittel											
Moyenne mensuelle	1318	734	- 768	1003	1294	1759	+ 1319	908			m³/s
Media mensile											
Maximum/Massimo											
Spitze/Pointe/Punta	2273	1040	1016	- 1650	1574	2740	+ 2049	1732			m³/s
Datum/Date/Data	6.	3.	6.	16.	23.	12.	3.	31.			
											m³/s

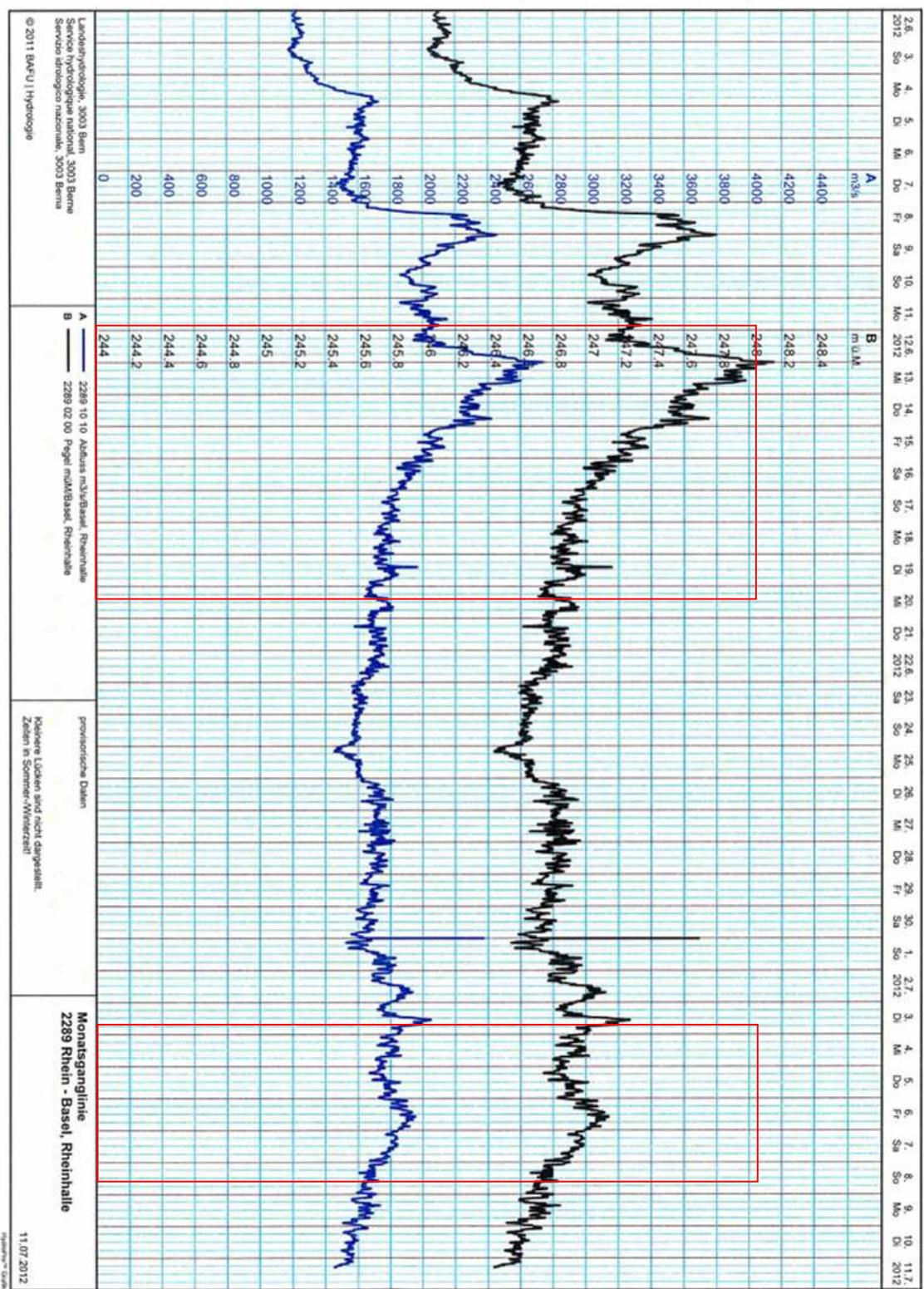


Abbildung A 1: Abfluss- und Wasserstandsganglinie am Pegel Basel/Rheinlandhalle im Zeitraum 02.06. bis 11.07.2012 (Bundesamt für Umwelt, Schweiz). In den rot umrahmten Zeiträumen traten Überschwemmungen im Taubergießen auf.

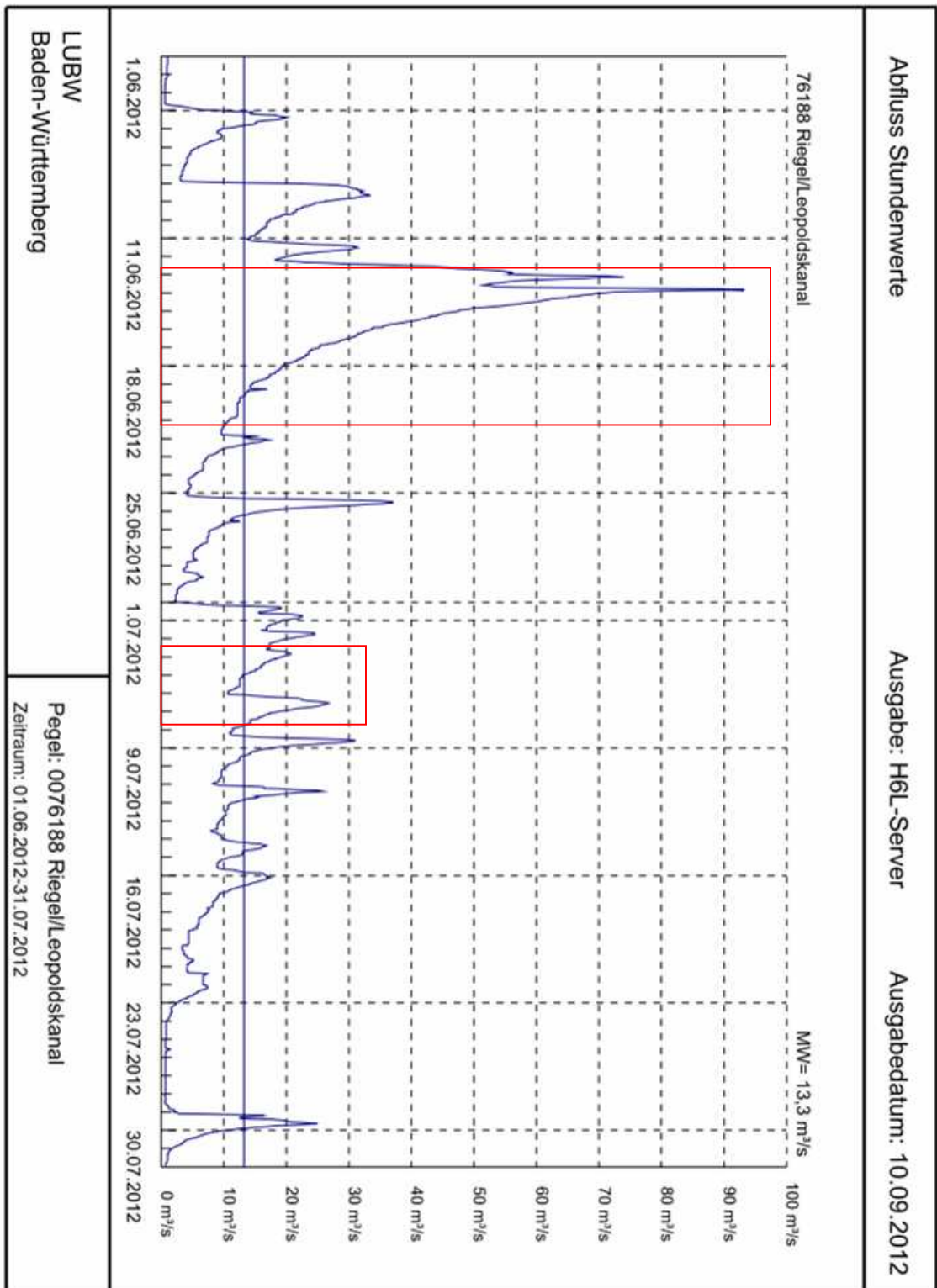


Abbildung A 3: Abflussganglinie am Pegel Riegel/Leopoldskanal im Zeitraum 01.06. bis 31.07.2012
 (Quelle: Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)).

Anhang B

Elastizitätsmodul

Tabelle A 2: Elastizitätsuntersuchung einiger Karbonfiberstäbe im Zugversuch (Tabelleninhalt in N).

Stab	Größe	Zuggewicht [g]										$\bar{x}$
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
1	f [mm]	0.65	1.45	2.3	3.2	4	4.9	5.65	6.5	7.45	8.25	119.6
	E [GPa]	143.3	128.5	121.5	116.5	116.5	114.1	115.4	114.7	112.6	112.9	
2	f [mm]	0.75	1.6	2.45	3.25	3.95	4.8	5.65	6.45	7.3	8.1	116.5
	E [GPa]	124.2	116.5	114.1	114.7	117.9	116.5	115.4	115.6	114.9	115.0	
3	f [mm]	0.7	1.45	2.25	3.05	3.9	4.6	5.55	6.15	6.9	7.6	123.2
	E [GPa]	133.1	128.5	124.2	122.2	119.4	121.5	117.5	121.2	121.5	122.6	
4	f [mm]	0.35	1	1.7	2.45	3.2	3.9	4.6	5.35	6.05	6.7	161.7
	E [Gpa]	266.2	186.3	164.4	152.1	145.6	143.3	141.8	139.3	138.6	139.1	
5	f [mm]	0.5	1.35	2.1	2.9	3.7	4.55	5.35	6.2	7	7.75	131.7
	E [Gpa]	186.3	138.0	133.1	128.5	125.9	122.9	121.9	120.2	119.8	120.2	
6	f [mm]	0.6	1.3	2.05	2.85	3.6	4.4	5.15	5.9	6.7	7.5	132.5
	E [Gpa]	155.3	143.3	136.3	130.8	129.4	127.0	126.6	126.3	125.2	124.2	
7	f [mm]	0.5	1.25	2.05	2.75	3.5	4.3	5.2	5.95	6.75	7.45	137.0
	E [Gpa]	185.3	149.1	136.3	135.5	133.1	130.0	125.4	125.3	124.2	125.1	
8	f [mm]	0.65	1.25	2	2.8	3.54	4.4	5.15	5.95	6.55	7.2	133.3
	E [Gpa]	143.3	149.1	139.8	133.1	131.6	127.0	126.6	125.3	128.0	129.4	
9	f [mm]	0.5	1.27	2.1	2.85	3.65	4.5	5.1	6	6.9	7.75	134.3
	E [Gpa]	186.3	146.7	133.1	130.8	127.6	124.2	127.9	124.2	121.5	120.2	

Tabelle A 3: Streubreite einiger Karbonfiberstäbe im Durchmesser und in der Grundfläche.

Stab	Ø [mm]	A [mm ²]
1	1.98	3.08
2	1.99	3.11
3	1.95	2.99
4	1.98	3.08
5	2.00	3.15
6	1.99	3.11
7	2.00	3.15
8	2.02	3.21
9	1.98	3.08

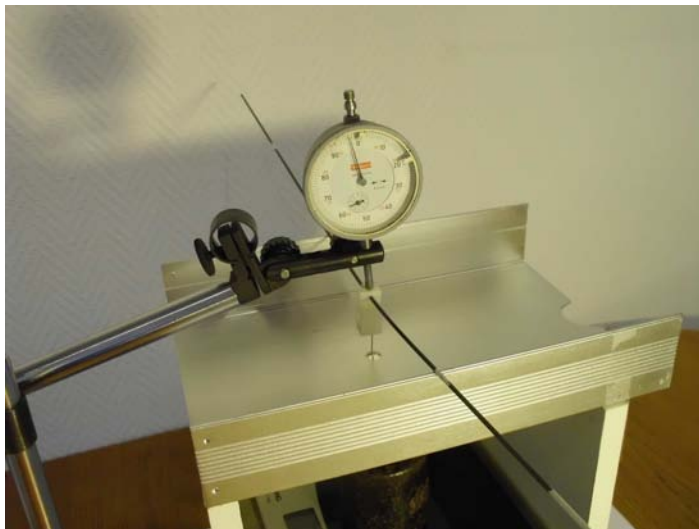


Abbildung A 4: Aufsicht und Innenansicht Versuchsaufbau für die Elastizitätsuntersuchung; die notwendige Zugkraft bewirkt ein höhenverstellbares Waagschalengewicht.

Kalibrierung der Schwimmkörper unter Trockenbedingungen

Tabelle A 4: Trockenkalibrierung des kleinen Schwimmkörpers zwecks Messung der Zugkraft.

Schwimmer Höhe über GOK [cm]	aufgewendete Kraft [N]	korrespondierende Fließgeschwindigkeit [m/s]	Auslenkung [cm]	Auslenkung [°]	Auslenkung [°]	Fließgeschwindigkeit [m/s]
10	0	0	0	0.0	0	0.0
	0.1	0.4	0.8	0.5	1	1.7
	0.2	0.8	1.2	0.7	2	3.8
	0.3	1.2	1.3	0.7		
	0.4	1.6	1.8	1.0		
	0.5	2	1.8	1.0		
	0.6	2.4	2.3	1.3		
	0.7	2.8	2.6	1.5		
	0.8	3.2	3	1.7		
	0.9	3.6	3.4	1.9		
20	1	4	3.6	2.1		
	0.1	0.4	1.8	1.0	1	0.0
	0.2	0.8	3	1.7	2	1.0
	0.3	1.2	4.2	2.4	3	1.6
	0.4	1.6	5.3	3.0	4	2.2
	0.5	2	6.3	3.6	5	2.8
	0.6	2.4	7.8	4.5	6	3.3
	0.7	2.8	8.8	5.0	7	4.2
	0.8	3.2	10.2	5.8		
	0.9	3.6	11.3	6.4		
30	1	4	11.8	6.7		
	0.1	0.4	4.3	2.5	2	0.3
	0.2	0.8	6.3	3.6	4	0.9
	0.3	1.2	8.9	5.1	6	1.5
	0.4	1.6	11	6.3	8	2.2
	0.5	2	12.8	7.3	10	2.7
	0.6	2.4	16	9.1	12	3.2
	0.7	2.8	18.5	10.5	14	4.0

Fortsetzung **Tabelle A 4:**

Schwimmer Höhe über GOK [cm]	aufgewendete Kraft [N]	korrespondierende Fließgeschwindigkeit [m/s]	Auslenkung [cm]	Auslenkung [°]	Auslenkung [°]	Fließgeschwindigkeit [m/s]
30	0.8	3.2	21.1	11.9		
	0.9	3.6	23.5	13.2		
	1	4	25	14.0		
40	0.1	0.4	8.5	4.9	5	0.4
	0.2	0.8	12.3	7.0	10	1.4
	0.3	1.2	15.2	8.6	15	2.2
	0.4	1.6	19.5	11.0	20	3.0
	0.5	2	24.3	13.7	25	3.7
	0.6	2.4	28.8	16.1	30	4.6
	0.7	2.8	34	18.8		
	0.8	3.2	40	21.8		
	0.9	3.6	45.5	24.5		
	1	4	49	26.1		
50	0.1	0.4	11	6.3	5	0.3
	0.2	0.8	17.3	9.8	10	0.8
	0.3	1.2	21.8	12.3	15	1.4
	0.4	1.6	31	17.2	20	1.9
	0.5	2	39	21.3	25	2.3
	0.6	2.4	51	27.0	30	2.8
	0.7	2.8	57	29.7	35	3.5
	0.8	3.2	62	31.8	40	4.2
	0.9	3.6	74	36.5		
	1	4	78	38.0		
60	0.1	0.4	2	1.1	5	1.1
	0.2	0.8	18.5	10.5	10	0.8
	0.3	1.2	31	17.2	15	1.1
	0.4	1.6	43	23.3	20	1.4
	0.5	2	55	28.8	25	1.7
	0.6	2.4	70	35.0	30	2.1
	0.7	2.8	86.5	40.9	35	2.4
	0.8	3.2	96	43.8	40	2.7
	0.9	3.6	112	48.2	45	3.3
	1	4	138	54.1	50	3.7

Tabelle A 5: Trockenkalibrierung des großen Schwimmkörpers zwecks Messung der Zugkraft.

Schwimmer Höhe über GOK [cm]	aufgewendete Kraft [N]	korresp. Fließgeschwindigkeit [m/s]	Auslenkung [cm]	Auslenkung [°]	Auslenkung [°]	Fließgeschwindigkeit [m/s]
10	0	0.00	0	0.0	0	0.00
	0.1	0.21	0.3	0.2	1	1.22
	0.2	0.42	0.6	0.3	2	2.44
	0.3	0.63	1	0.6		
	0.4	0.84	1.4	0.8		
	0.5	1.05	1.8	1.0		
	0.6	1.26	2.2	1.3		
	0.7	1.47	2.5	1.4		
	0.8	1.68	3	1.7		
	0.9	1.89	3.6	2.1		
	1	2.10	3.9	2.2		

Fortsetzung Tabelle A 5:

Schwimmer Höhe über GOK [cm]	aufgewendete Kraft [N]	korrespondierende Fließgeschwindigkeit [m/s]	Auslenkung [cm]	Auslenkung [°]	Auslenkung [°]	Strömungs- geschwindigkeit [m/s]
20	0.1	0.21	2	1.1	1	0.18
	0.2	0.42	2.8	1.6	2	0.52
	0.3	0.63	3.9	2.2	3	0.84
	0.4	0.84	5	2.9	4	1.17
	0.5	1.05	6.3	3.6	5	1.45
	0.6	1.26	7.2	4.1	6	1.83
	0.7	1.47	8.3	4.7	7	2.16
	0.8	1.68	9.3	5.3		
	0.9	1.89	10.6	6.1		
	1	2.10	11.8	6.7		
30	0.1	0.21	4.6	2.6	2.0	0.16
	0.2	0.42	6.7	3.8	4.0	0.44
	0.3	0.63	10	5.7	6.0	0.66
	0.4	0.84	12	6.8	8.0	0.98
	0.5	1.05	14.5	8.3	10.0	1.27
	0.6	1.26	17	9.6	12.0	1.56
	0.7	1.47	19	10.8	14.0	1.91
	0.8	1.68	21.7	12.2	16.0	2.19
	0.9	1.89	24.2	13.6		
	1	2.10	27	15.1		
40	0.1	0.21	9.5	5.4	5	0.19
	0.2	0.42	13.5	7.7	10	0.55
	0.3	0.63	21	11.9	15	0.80
	0.4	0.84	28.5	15.9	20	1.05
	0.5	1.05	34.5	19.0	25	1.38
	0.6	1.26	39.5	21.6	30	1.75
	0.7	1.47	48	25.6		
	0.8	1.68	54	28.4		
	0.9	1.89	62	31.8		
	1	2.10	68	34.2		
50	0.1	0.21	30	16.7	5	0.06
	0.2	0.42	50	26.6	10	0.16
	0.3	0.63	64	32.6	15	0.29
	0.4	0.84	78	38.0	20	0.44
	0.5	1.05	100	45.0	25	0.58
	0.6	1.26	114	48.7	30	0.77

Tabelle A 6: Auslenkungswinkel (Abweichung aus der Nulllage) der Karbonfiberstäbe bei bestimmten Zugkräften in Abhängigkeit des Angriffspunktes.

N	0,01	0,02	0,027	0,04	0,05	0,056	0,1	0,15	0,2	0,25
10 cm	0.49	0.41	1.15	1.7	2.34	2.96	4.04	5.68	7.39	10.09
20 cm	0.85	2.84	3.42	5.24	6.19	7.84	13.49	20.51	25.43	29.85
30 cm	1.69	5.19	7.32	12.24	13.68	16.77	27.62	38.57	46.45	51.92
40 cm	4.85	9.11	12.66	18.76	23.85	25.9	39.95	56.56		62.68
50 cm	8.41	14.27	18.96	27.02	34.32	40	52.42			
60 cm	14.99	20.09	26.85	38	44.22	52.6				
70 cm	21.87	28.5	37.46	48.12	55.17					
80 cm	29.2	34.68	49.8	55.71						

Anhang C

Steckbriefe der Untersuchungsflächen

Plot 1

Kamera

Standort

WGS-84 (geographisch): 48° 17' 24,2" N 7° 42' 13,4" O
WGS-84 (dezimal): 48,29012° N 7,70379° O

Blickrichtung: Südwesten (195°)
Höhe über Grund: 2,30 m
Aufnahmebeginn: 16.05.2012
Aufnahmeende: 06.08.2012 Abbau am 16.08.2012
Anzahl geschossene Fotos: 1094
Aufnahmeintervall: 1 Stunde
Anzahl Überschwemmungstage: 3
Datum Überschwemmungstage: 13.-15.06.2012
Überschwemmungsfotos: 42

Zollstock

Entfernung zur Kamera: 4,90 m
Höhe der letzten Markierung: 1,20 m

Stäbe

Datum der Aufstellung: 16.06.2012
Anzahl Stäbe: 3
Schwimmkörper: Stab 1 klein Stab 2 groß Stab 3 klein
Abstand zur Kamera: Stab 1 4,30 m Stab 2 4,60 m Stab 3 3,60 m
Zollstock 5,40 m

Querprofil

Spanndatum: 14.06.2012
Länge des Querprofils: 14,73 m
Anzahl an Messstellen: 13
maximaler Wasserstand: 49 cm
Endkoordinaten
WGS-84 (geographisch):
48° 17' 24,1" N 7° 42' 12,7" O
48° 17' 24,1" N 7° 42' 12,9" O
WGS-84 (dezimal):
48,29003° N 7,70353° O
48,29003° N 7,70358° O



Abbildung A 5: Übersichtsfoto Plot 1.

Plot 2

Kamera

Standort

WGS-84 (geographisch):

48° 17' 26,4" N 7° 42' 12,1" O

WGS-84 (dezimal):

48,29066° N 7,70337° O

Blickrichtung:

Nord-Nordost (50°)

Höhe über Grund:

2,70 m

Aufnahmebeginn:

16.05.2012

Aufnahmeende:

10.09.2012

Abbau am 17.09.2012

Anzahl geschossene Fotos:

613

davon unbrauchbar:

45

Aufnahmeintervall:

1 Stunde

Entfernung zum Zollstock:

4,50 m

Anzahl Überschwemmungstage:

2

Datum Überschwemmungstage:

13.-14.06.2012

Überschwemmungsfotos:

22

Zollstock

Entfernung zur Kamera:

4,60 m

Höhe der letzten Markierung:

1,20 m

Stäbe

Datum der Aufstellung:

16.06.2012

Anzahl Stäbe:

3

Schwimmkörper:

Stab 1 groß Stab 2 groß Stab 3 klein

Abstand zur Kamera:

Stab 1 4,50 m Stab 2 4,90 m Stab 3 5,40 m

Querprofil

Spanndatum: 13.06.2012

Länge des Querprofils: 14,48 m

Anzahl an Messstellen: 13

maximaler Wasserstand: 20 cm

Endkoordinaten

WGS-84 (geographisch): nicht erfasst

WGS-84 (dezimal):



Abbildung A 6: Übersichtsfoto Plot 2.

Plot 3

Kamera

Standort

alt	WGS-84 (geographisch):	
neu	WGS-84 (geographisch):	48° 17' 25,9" N 7° 42' 14,9" O
alt	WGS-84 (dezimal):	
neu	WGS-84 (dezimal):	48,29016° N 7,70314° O

Blickrichtung alter Standort:	Süden (170°)	
Blickrichtung neuer Standort:	Osten	
Höhe über Grund alter Standort:	2,30 m	
Aufnahmebeginn alter Standort:	16.05.2012	
Aufnahmebeginn neuer Standort:	14.06.2012	
Aufnahmeende:	10.09.2012	Abbau am 17.09.2012
Anzahl geschossene Fotos alter Standort:	464	
davon unbrauchbar:	15	
Anzahl geschossene Fotos neuer Standort:	1208	
Aufnahmeintervall:	1 Stunde	
Anzahl Überschwemmungstage (alt):	0	
Anzahl Überschwemmungstage (neu):	3	
Überschwemmungszeitraum (alt):	-	
Überschwemmungszeitraum (neu):	14.-16.06.2012	
Überschwemmungsfotos:	27	

Zollstock

Höhe der letzten Markierung:	1,00 m
Entfernung zur Kamera alter Standort:	4,70 m
Entfernung zur Kamera neuer Standort:	5,40 m

Stäbe

Datum der Aufstellung:	16.06.2012			
Anzahl Stäbe:	3			
Schwimmkörper:	Stab 1 klein	Stab 2 klein	Stab 3 groß	
Abstand zur Kamera:	Stab 1 4,20 m	Stab 2 5,30 m	Stab 3 6,55 m	

Querprofil

Spanndatum:	14.06.2012	
Länge des Querprofils:	14,40 m	
Anzahl an Messstellen:	14	
maximaler Wasserstand:	47 cm	
Endkoordinaten		
WGS-84 (geographisch):	48° 17' 25,9" N	7° 42' 14,9" O
	48° 17' 26,3" N	7° 42' 15,5" O
WGS-84 (dezimal):	48,29053° N	7,70414° O
	48,29064° N	7,70431° O



Abbildung A 7: Übersichtsfoto Plot 3.

Plot 4

Kamera

Standort

WGS-84 (geographisch):	48° 17' 23,6" N	7° 42' 11,7" O
WGS-84 (dezimal):	48,28988° N	7,70324° O

Blickrichtung:	Norden (0°)	
Höhe über Grund:	2,30 m	
Aufnahmebeginn:	16.05.2012	
Aufnahmeende:	03.09.2012	Abbau am 17.09.2012
Anzahl geschossene Fotos:	1681	
Aufnahmeintervall:	1 Stunde	
Anzahl Überschwemmungstage:	4	
Überschwemmungszeitraum:	13.-16.06.2012	
Überschwemmungsfotos:	64	

Zollstock

Höhe der letzten Markierung:	1,80 m
Abstand zur Kamera:	4,45 m

Stäbe

Datum der Aufstellung:	16.06.2012			
Anzahl Stäbe:	3			
Schwimmkörper:	Stab 1 klein	Stab 2 groß	Stab 3 groß	
Abstand zur Kamera:	Stab 1 4,15 m	Stab 2 3,35 m	Stab 3 4,00 m	

Querprofil

s. Kamerastandort 1 (die beiden Standorte teilen sich ein Querprofil)

Sonstiges

Grabentiefe: ca. 45 cm

Plot 5

Kamera

Standort

WGS-84 (geographisch): 48° 14' 46,8" N
7° 41' 35,4" O

WGS-84 (dezimal): 48,24633° N
7,69317° O

Blickrichtung: Osten

Höhe über Grund: 1,80 m

Aufnahmebeginn: 13.06.2012

Aufnahmeende: 07.09.2012

Abbau am 07.09.2012

Anzahl geschossene Fotos: 7414

Aufnahmeintervall:

Datum	Intervall
13.06.2012	10 s
14.06.2012	20 s
15.06.2012	60 s
16.06.2012	15 min
17.06.2012	60 min
29.06.2012	10 min

Anzahl Überschwemmungstage: 4

Überschwemmungszeitraum: 12.-16.06.2012

Überschwemmungsfotos: 2184

Zollstock

Höhe der letzten Markierung: 1,20 m

Abstand zur Kamera: 4,25 m

Stäbe

Datum der Aufstellung: 17.06.2012

Anzahl Stäbe: 3

Schwimmer: Stab 1 klein Stab 2 groß Stab 3 groß

Abstand zur Kamera: Stab 1 4,60 m Stab 2 5,00 m Stab 3 3,58 m

Stangen

Abstand der Stangen zur Kamera: 4,20 m

Fließstrecke: 3 m



Abbildung A 8: Übersichtsfoto Plot 4 (noch ohne Karbonfiberstäbe).

Querprofil

Spanndatum:	14.06.2012	
Länge des Querprofils:	12,10 m	
Anzahl an Messstellen:	11	
maximaler Wasserstand:	20 cm	
Endkoordinaten		
WGS-84 (geographisch):	48° 14' 46,8" N	7° 41' 35,4" O (in Fl. links)
	48° 14' 46,9" N	7° 41' 35,6" O (in Fl. rechts)
WGS-84 (dezimal):	48,24633° N	7,69317° O
	48,24636° N	7,69322° O

Hauptströmungsrichtung: Süden, später Norden (Richtungsumkehr)



Abbildung A 9: Übersichtsfoto Plot 5 (noch ohne Karbonfaserstäbe).

Plot 6

Kamera

Standort

WGS-84 (geographisch): 48° 14' 46,6" N 7° 41' 38,3" O
WGS-84 (dezimal): 48,24628° N 7,69397° O

Blickrichtung:

Osten

Höhe über Grund:

1,80 m

Aufnahmebeginn:

12.06.2012

Aufnahmeende:

04.09.2012

Abbau am 07.09.2012

Anzahl geschossene Fotos:

11710

Aufnahmeintervall:

Datum	Intervall
12.06.2012	10 s
17.06.2012	10 min
22.06.2012	60 min
29.06.2012	10 min
04.07.2012	10 s
04.07.2012	10 min

Anzahl Überschwemmungstage:

17

Überschwemmungszeitraum:

12.-22.06.2012 + 02.07.-07.07.

Überschwemmungsfotos:

6875

Zollstock

Höhe der letzten Markierung:

1,00 m

Abstand zur Kamera:

4,52 m

Stäbe

Datum der Aufstellung:

16.06.2012

Anzahl Stäbe:

5 - 7

Verhältnis große zu kleine Schwimmer:

2/3, 3/3 bzw. 4/3 (chronologisch)

minimaler Abstand zur Kamera:

3,60 m

Schwimmer:

Stab 1	groß	Stab 2	groß	Stab 3	klein
Stab 4	klein	Stab 5	groß	Stab 6	groß
Stab 7	klein				

Abstand zur Kamera:

Stab 1	?	Stab 2	4,43 m	Stab 3	5,45 m	Stab 4
3,60 m	Stab 5	4,50 m	Stab 6	3,75 m		
Stab 7	4,20 m					

Stangen

Datum der Aufstellung:

12.06.2012

Abstand der Stangen zur Kamera:

4,70 m

Fließstrecke:

4,45 m

Querprofil

Spanndatum:	13.06.2012	
Länge des Querprofils:	14,35 m	
Anzahl an Messstellen:	12	
maximaler Wasserstand:	60 cm	
Endkoordinaten		
WGS-84 (geographisch):	48° 14' 46,5" N	7° 41' 38,4" O
	48° 14' 46,3" N	7° 41' 38,7" O
WGS-84 (dezimal):	48,24625° N	7,69400° O
	48,24619° N	7,69408° O

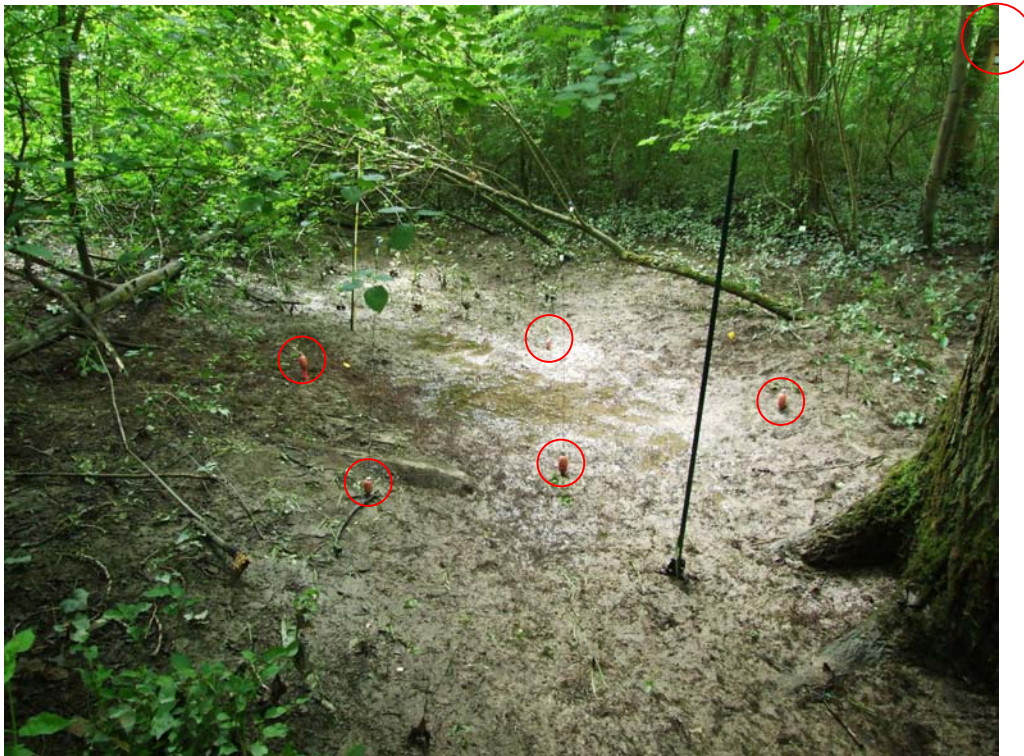


Abbildung A 10: Versuchsaufbau Plot 6 (rechts oben im Bild ist der Holzkasten angedeutet).

Plot 7

Kamera

Standort

WGS-84 (geographisch): 48° 14' 38,8" N 7° 40' 57,4" O

WGS-84 (dezimal): 48,24411° N 7,68261° O

provisorischer Standort:

WGS-84 (geographisch): 48° 14' 39,0" N 7° 41' 10,4" O

WGS-84 (dezimal): 48,24417° N 7,68622° O

Blickrichtung: Süd-Südost (160°)

Höhe über Grund: 1,80 m

Aufnahmebeginn: 03.07.2012

Aufnahmeende: 07.09.2012 Abbau am 17.09.2012

Anzahl geschossene Fotos (bis 23.07.): 5498

Aufnahmeintervall:

Datum	Intervall
03.07.2012	60 min
04.07.2012	10 min

Zoom geändert: 09.07.2012 12:40 Uhr

Anzahl Überschwemmungstage: 6

Überschwemmungszeitraum: 03. - 08.07.2012 + 01. - 03.09.2012

Überschwemmungsfotos: 574

Zollstock

Höhe letzte Markierung:: kurz: 0,40 bzw. 0,60 m lang: 1,80 m

Abstand zur Kamera: kurz: 6,85 m lang: 8,45 m

Stäbe

Datum der Aufstellung: 03.07.2012

Anzahl Stäbe: 5 bis 7

Verhältnis große zu kleine Schwimmer: 3/2, 4/2 bzw. 5/2

Schwimmkörper: Stab 1 groß Stab 2 klein Stab 3 groß

Stab 4 groß Stab 5 groß Stab 6 klein

Stab 7 groß

Abstand zur Kamera: Stab 1 6,75 m Stab 2 9,90 m Stab 3 8,10 m

Stab 4 8,65 m Stab 5 9,73 m Stab 6 8,21 m

Stab 7 5,65 m

Querprofil

Spanndatum: 03.07.2012

Länge des Querprofils: 17,15 m

Anzahl an Messstellen: 16

maximaler Wasserstand: 64 cm (gemessen)

Endkoordinaten

WGS-84 (geographisch): 48° 14' 38,9" N 7° 40' 57,7" O (in Fl. rechts)

48° 14' 39,7" N 7° 40' 57,9" O (in Fl. links)

WGS-84 (dezimal): 48,24414° N 7,68269° O

48,24436° N 7,68275° O



Abbildung A 11: Übersichtsfoto Plot 7 (noch ohne Karbonfaserstäbe).

Plot 8

Kamera

Standort

alt	WGS-84 (geographisch):	48° 17' 48,3" N	7° 41' 43,7" O
	WGS-84 (dezimal):	48,29675° N	7,69547° O
neu	WGS-84 (geographisch):	48° 14' 43,3" N	7° 41' 08,6" O
	WGS-84 (dezimal):	48,24536° N	7,68572° O

Blickrichtung alter Standort:

Blickrichtung neuer Standort: Ost-Südost (110°)

Höhe über Grund: 1,60 m

Aufnahmebeginn alter Standort: 12.06.2012

Aufnahmebeginn neuer Standort: 29.06.2012

Aufnahmeende: 13.09.2012 Abbau am 17.09.2012

Anzahl geschossene Fotos (alt): 260

Anzahl geschossene Fotos (neu): 4467

Aufnahmeintervall:

Datum	Intervall
12.06.2012	60 min
29.06.2012	10 min

Anzahl Überschwemmungstage: 3

Datum Überschwemmungstage: 03.07.2012 + 01.09. - 02.09.2012

Überschwemmungsfotos: 64

Zollstock

Höhe letzte Markierung: 1,80 m
Abstand zur Kamera: 5,00 m

Stäbe

Datum der Aufstellung: 12.06.2012 bzw. 29.06.2012
Anzahl Stäbe: 2, 4 bzw. 7 (chronologisch)
Verhältnis große zu kleine Schwimmer: 1/1, 2/2 bzw. 4/4
Schwimmer:
Stab 1 groß Stab 2 groß Stab 3 klein
Stab 4 klein Stab 5 groß Stab 6 klein
Stab 7 groß
Abstand zur Kamera:
Stab 1 4,60 m Stab 2 5,75 m Stab 3 6,50 m
Stab 4 5,30 m Stab 5 8,60 m Stab 6 9,80 m
Stab 7 8,10 m

Querprofil

Spanndatum: 04.07.2012
Länge des Querprofils: 23,40 m
Anzahl an Messstellen: 22
maximaler Wasserstand: 70 cm (gemessen)
Endkoordinaten
WGS-84 (geographisch): 48° 14' 43,2" N 7° 41' 08,6" O
48° 14' 43,2" N 7° 41' 09,0" O
WGS-84 (dezimal): 48,24533° N 7,68567° O
48,24533° N 7,68583° O



Abbildung A 12: Übersichtsfoto Plot 8 (vier Karbonfiberstäbe in der Hausgrundkehle, drei rechts am Ufer).

Tabelle A 7: Aufgenommene Videos an den Untersuchungsflächen.

	Video	Format	Länge	Datum	Uhrzeit	Inhalt
Plot 1	HDV_0473	MP4-Video	00:00:50	15.06.2012	16:16:52	Wasserstandsdokumentation
Plot 2	HDV_0453	MP4-Video	00:01:45	16.05.2012	12:50:44	Standortfindung und Umgebung
	HDV_0470	MP4-Video	00:00:45	14.06.2012	15:55:18	stehendes Wasser auf Untersuchungsfläche
Plot 3	HDV_0475	MP4-Video	00:00:29	15.06.2012	16:28:54	Hochwasser hat sich zurückgezogen
	HDV_0471	MP4-Video	00:00:41	15.06.2012	15:57:16	stehendes Wasser auf Untersuchungsfläche
Plot 4	HDV_0472	MP4-Video	00:00:33	15.06.2012	15:58:12	stehendes Wasser auf Untersuchungsfläche
	HDV_0474	MP4-Video	00:00:27	15.06.2012	16:23:18	Wasserstandsdokumentation
Plot 5	HDV_0479	MP4-Video	00:00:55	16.06.2012	11:06:54	stehendes Wasser auf Untersuchungsfläche
Plot 6	HDV_0467	MP4-Video	00:01:07	13.06.2012	11:43:28	Strömungscharakteristik und Fließgeschwindigkeit
	HDV_0468	MP4-Video	00:00:33	13.06.2012	11:45:18	Haupteinlauf zur Untersuchungsfläche
	HDV_0477	MP4-Video	00:01:12	16.06.2012	10:26:36	Nebeneinläufe zur Untersuchungsfläche
	HDV_0478	MP4-Video	00:05:05	16.06.2012	10:33:50	Strömungscharakteristik und Fließgeschwindigkeit
	HDV_0482	MP4-Video	00:01:02	16.06.2012	18:22:38	Auslenkung Stäbe ohne Schwimmkörper
	HDV_0483	MP4-Video	00:03:02	16.06.2012	18:27:56	Auslenkung Stäbe mit/ohne Schwimmkörper
	HDV_0484	MP4-Video	00:01:01	16.06.2012	18:34:18	Auslenkung Stab 2 mit Linealbrett im Hintergrund
	HDV_0485	MP4-Video	00:01:01	16.06.2012	18:36:18	Auslenkung Stab 4 mit Linealbrett im Hintergrund
	HDV_0486	MP4-Video	00:01:01	16.06.2012	18:38:40	Auslenkung Stab 3 mit Linealbrett im Hintergrund
	HDV_0488	MP4-Video	00:00:22	16.06.2012	19:33:42	neue Position Stab 5
	HDV_0489	MP4-Video	00:00:26	16.06.2012	19:35:44	Stab 5 angebrochen
	HDV_0491	MP4-Video	00:01:01	16.06.2012	20:03:46	neue Position Stab 5
	HDV_0492	MP4-Video	00:01:01	17.06.2012	13:19:12	Strömungscharakteristik und Fließgeschwindigkeit
	HDV_0493	MP4-Video	00:00:26	17.06.2012	13:23:24	Auslenkung Stab 1 ohne Schwimmkörper
	HDV_0494	MP4-Video	00:01:01	17.06.2012	13:25:14	Auslenkung Stab 1 mit Schwimmkörper
	DSCF1030	Videoclip	00:00:59	20.06.2012	13:41:40	Standortdokumentation
	HDV_0006	MP4-Video	00:02:01	04.07.2012	17:31:12	Strömungscharakteristik und Fließgeschwindigkeit
Plot 7	DSCF1085	Videoclip	00:00:25	02.07.2012	19:57:38	Wassereinlauf in Wald von der Bresche aus
	DSCF1090	Videoclip	00:00:40	02.07.2012	20:10:46	Standortdokumentation
	DSCF1111	Videoclip	00:00:29	03.07.2012	16:58:40	Standortdokumentation
	DSCF1112	Videoclip	00:00:06	03.07.2012	19:39:20	Strömungscharakteristik und Fließgeschwindigkeit
	DSCF1113	Videoclip	00:01:06	03.07.2012	19:40:34	Strömungscharakteristik und Fließgeschwindigkeit
	HDV_0009	MP4-Video	00:00:26	08.07.2012	19:54:20	Standortdokumentation
Plot 8	HDV_0476	MP4-Video	00:00:55	15.06.2012	17:11:12	Standortdokumentation
	HDV_0480	MP4-Video	00:00:34	16.06.2012	11:55:12	Standortdokumentation
	DSCF1117	Videoclip	00:03:22	03.07.2012	20:29:52	Beginn Durchbruchereignis
	DSCF1120	Videoclip	00:00:17	03.07.2012	20:31:44	Fortsetzung Durchbruchereignis
	DSCF1123	Videoclip	00:01:18	03.07.2012	20:35:42	Fortsetzung Durchbruchereignis
	DSCF1124	Videoclip	00:00:33	03.07.2012	20:42:12	Strömungscharakteristik
	DSCF1125	Videoclip	00:00:26	03.07.2012	20:45:54	Fortsetzung Durchbruchereignis
	HDV_0010	MP4-Video	00:00:40	08.07.2012	11:48:08	Standortdokumentation
	HDV_0012	MP4-Video	00:00:20	16.07.2012	13:05:34	Quellzufluss

Karten Plotskala

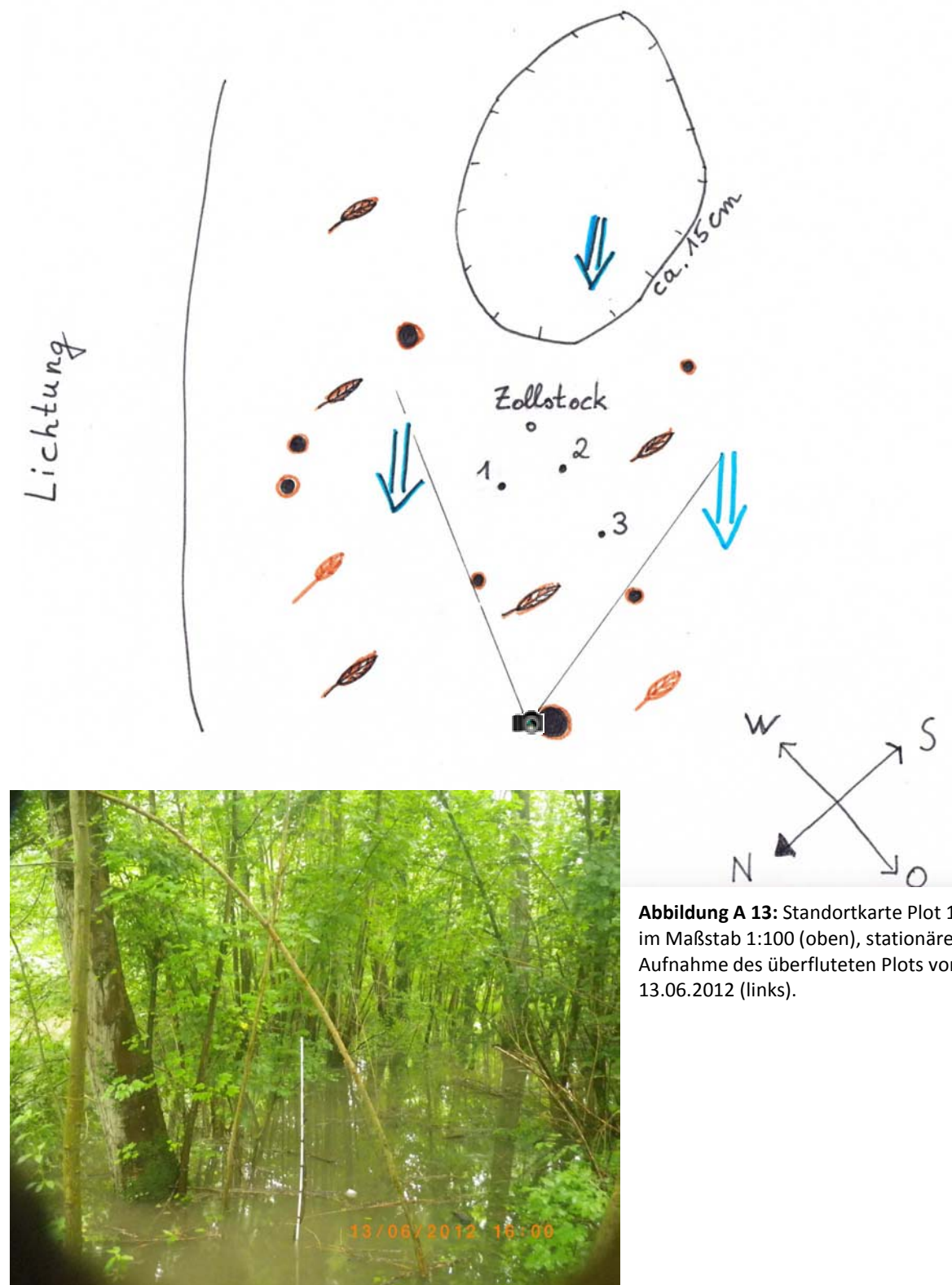


Abbildung A 13: Standortkarte Plot 1 im Maßstab 1:100 (oben), stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 13.06.2012 (links).

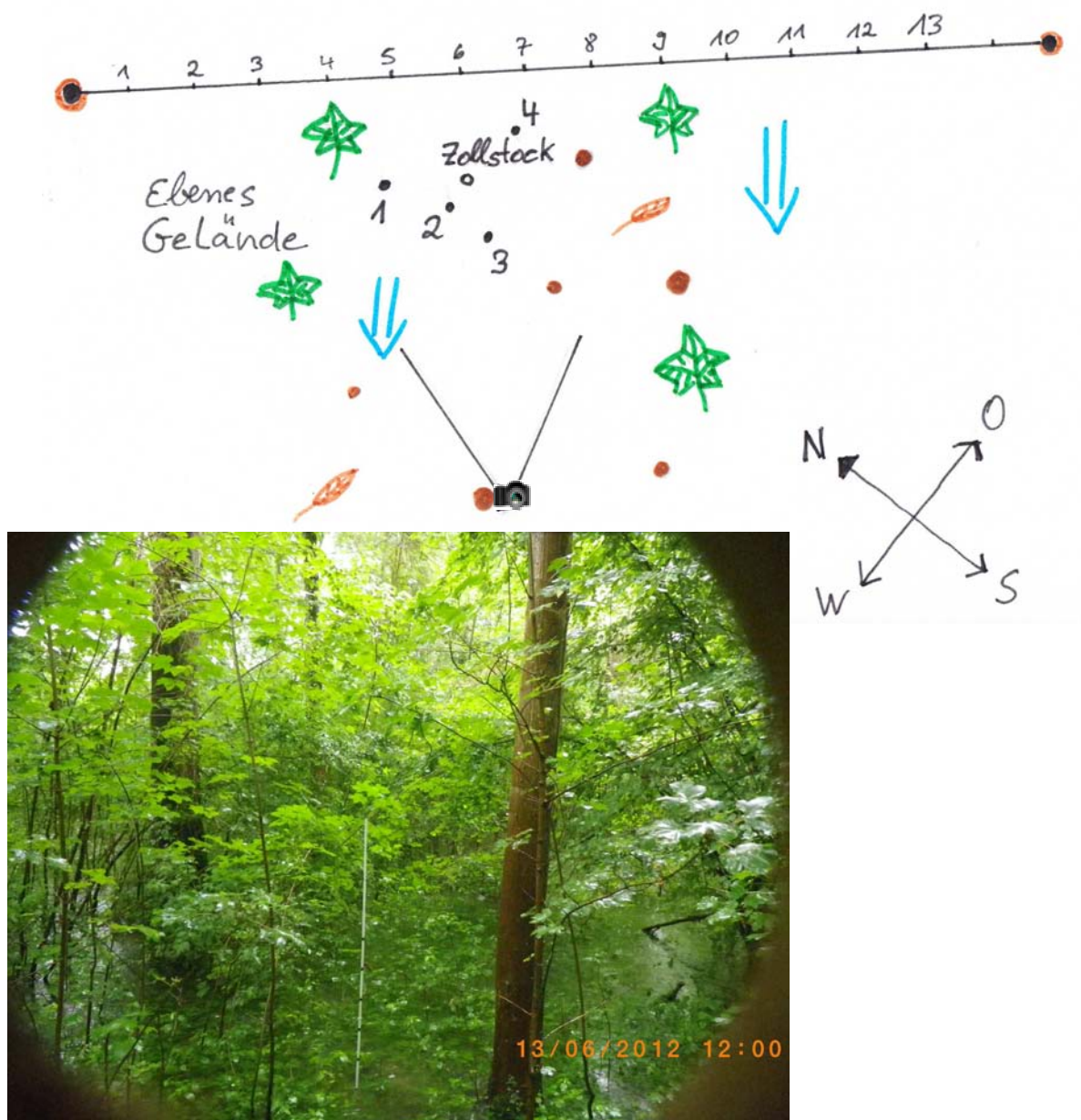


Abbildung A 14: Standortkarte Plot 2 im Maßstab 1:100 (oben), stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 13.06.2012 (unten).

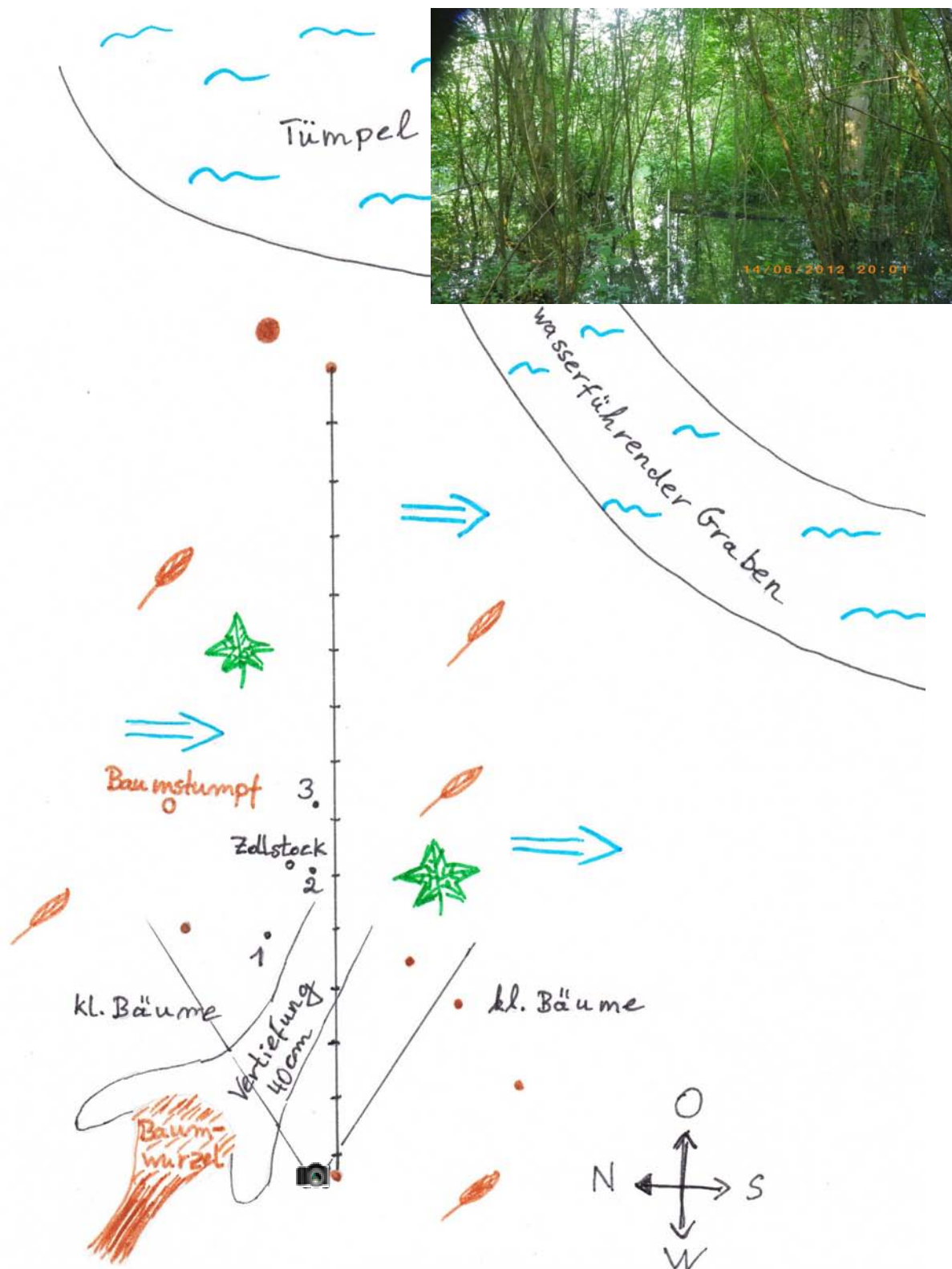


Abbildung A 15: Standortkarte Plot 3 im Maßstab 1:100; stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 14.06.2012 (oben links, noch ohne Karbonfiberstäbe).

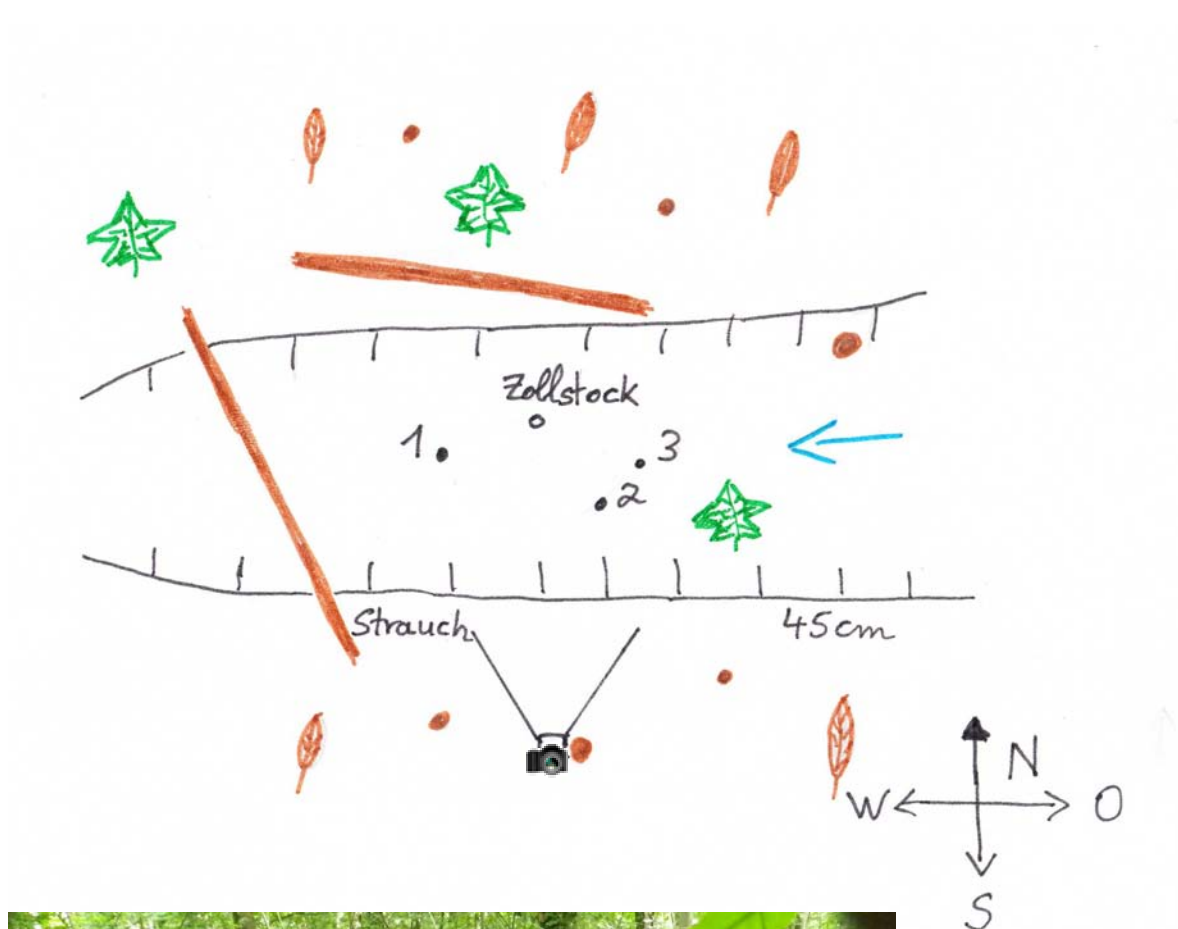


Abbildung A 16: Standortkarte Plot 4 im Maßstab 1:100 (oben); stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 14.06.2012 (unten, noch ohne Karbonfaserstäbe).

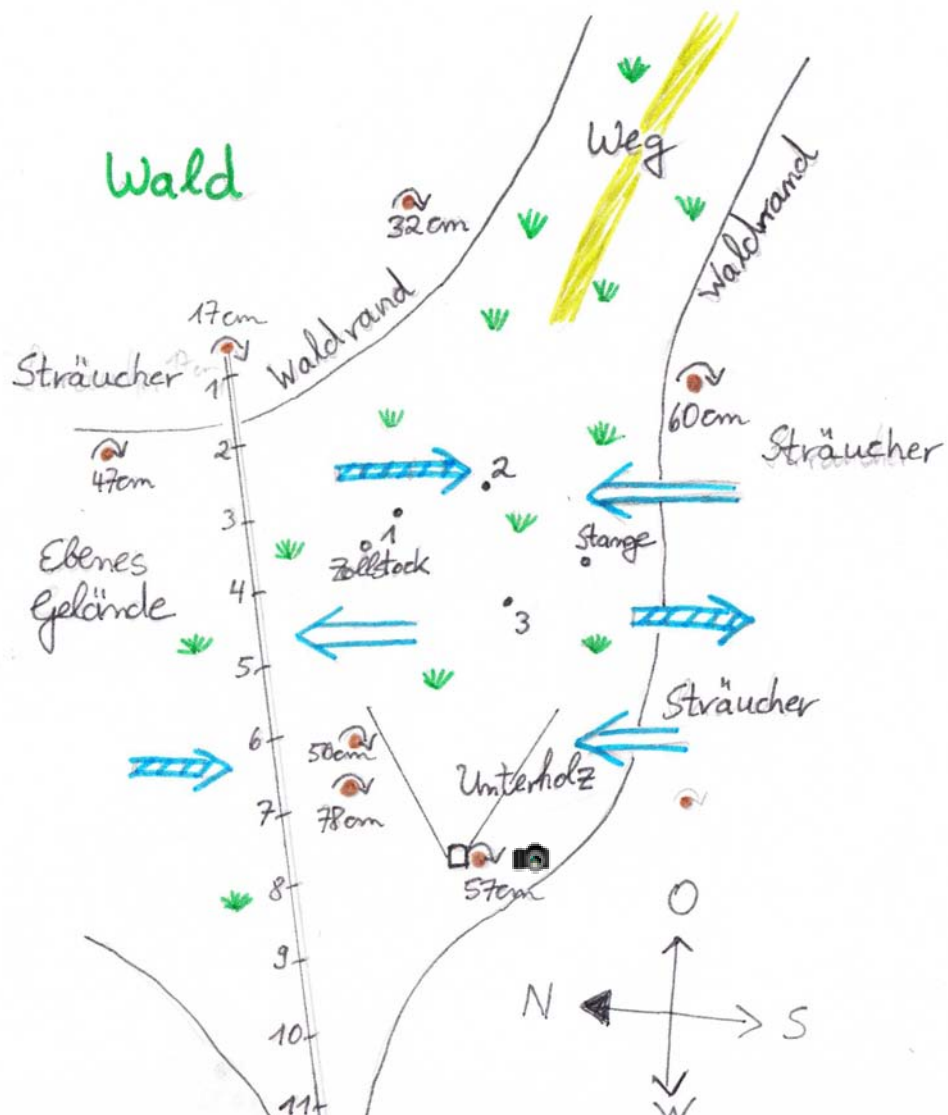


Abbildung A 17: Standortkarte Plot 5 im Maßstab 1:100 (oben); stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 14.06.2012 (unten, noch ohne Karbonfaserstäbe).

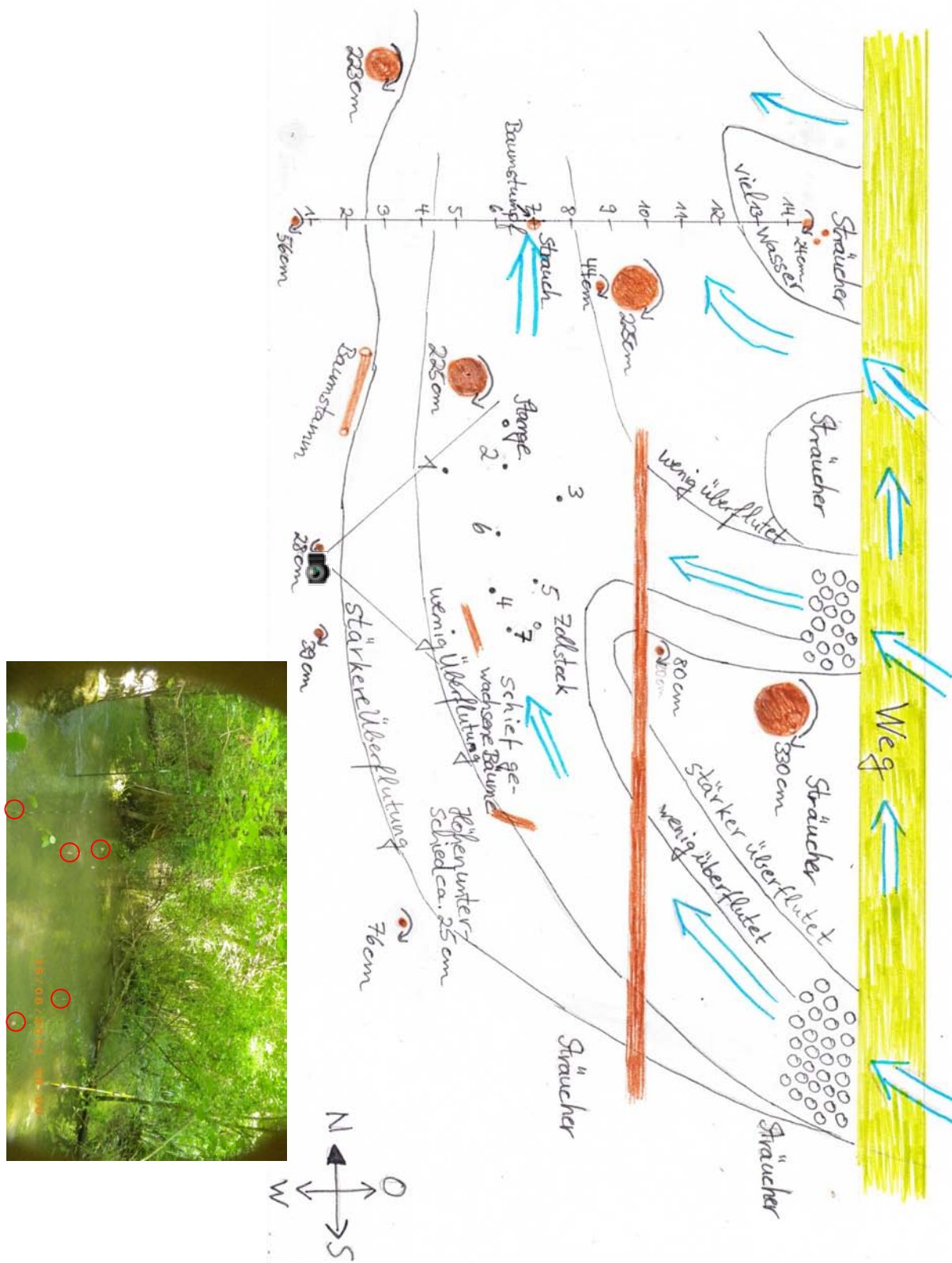


Abbildung A 18: Standortkarte Plot 6 im Maßstab 1:70 (rechts); stationäre Aufnahme des überfluteten Plots vom 16.06.2012 (links, der Schwimmkörper von Stab 1 ist nicht im Bild enthalten).

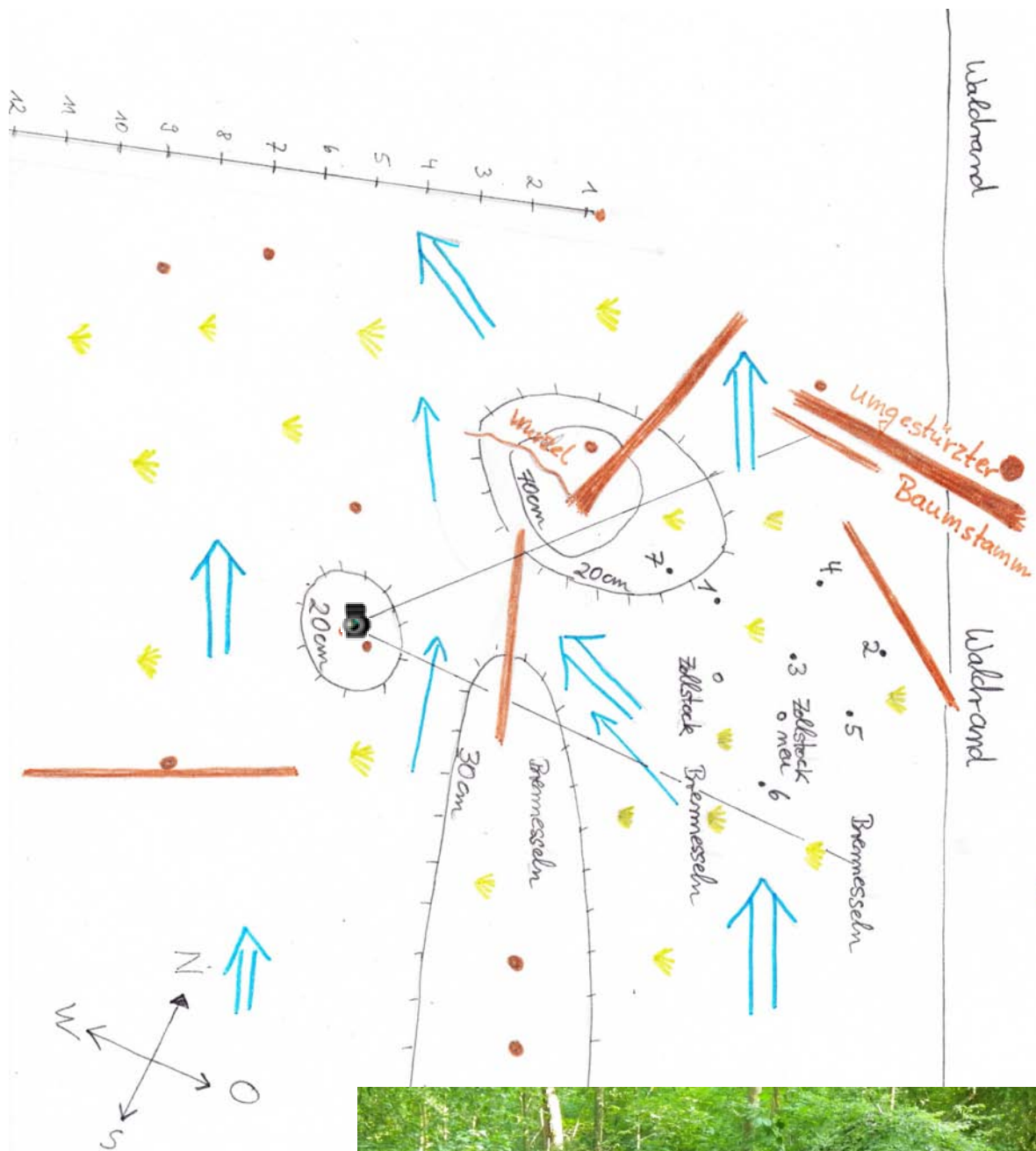


Abbildung A 19:
Standortkarte Plot 7 im Maßstab
1:100 (oben); stationäre Aufnahme
des überfluteten Plots vom
03.07.2012 (rechts).



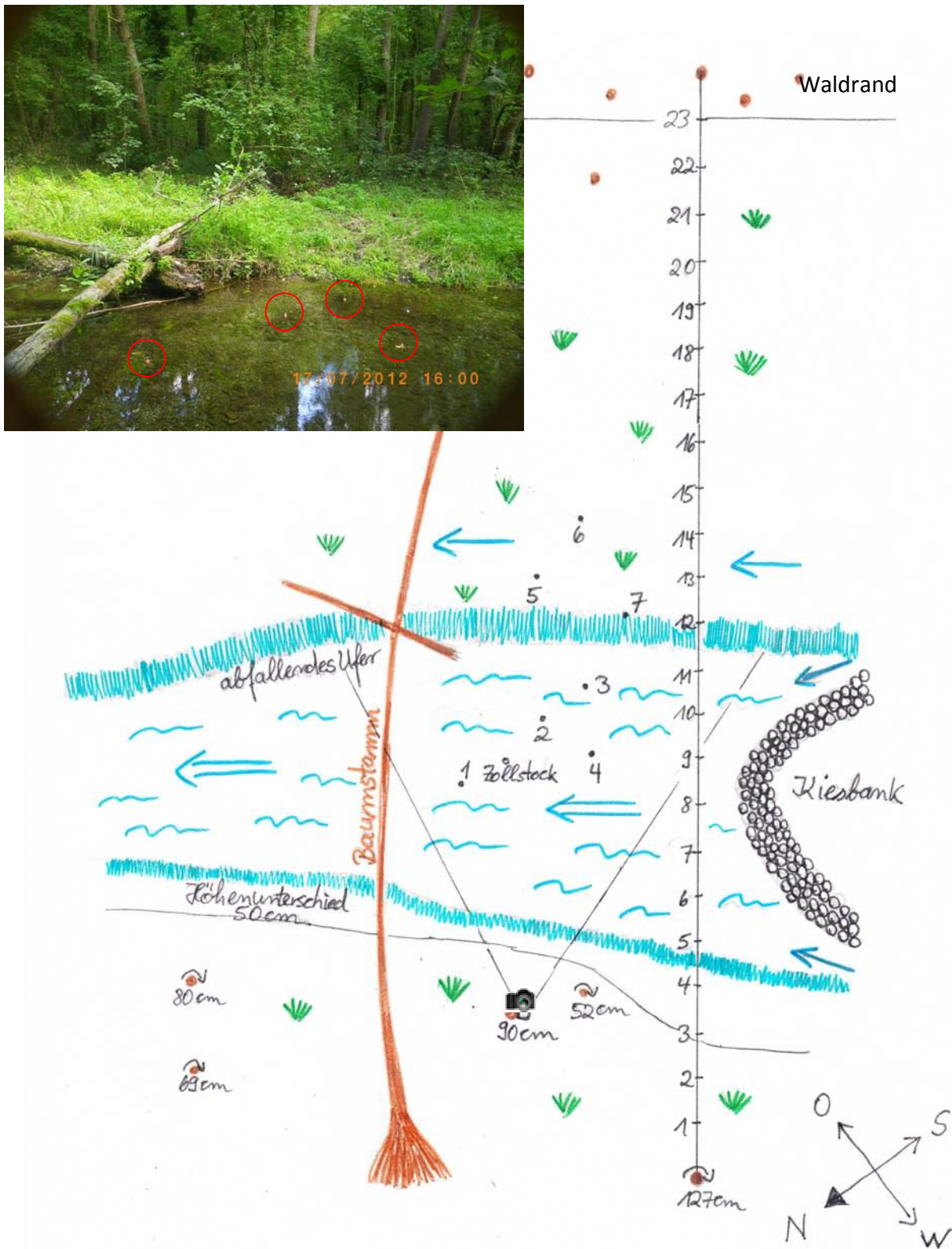
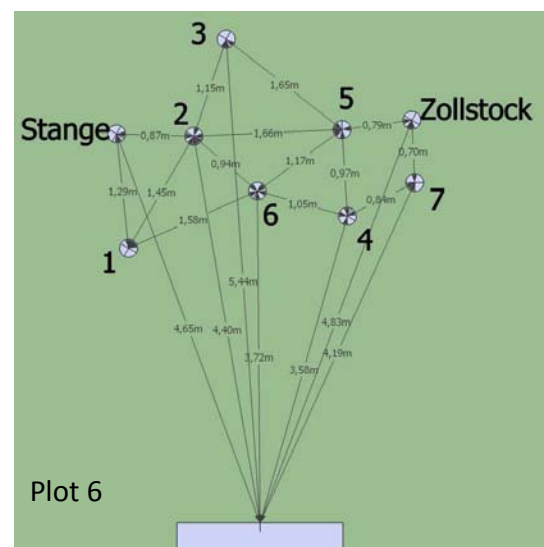
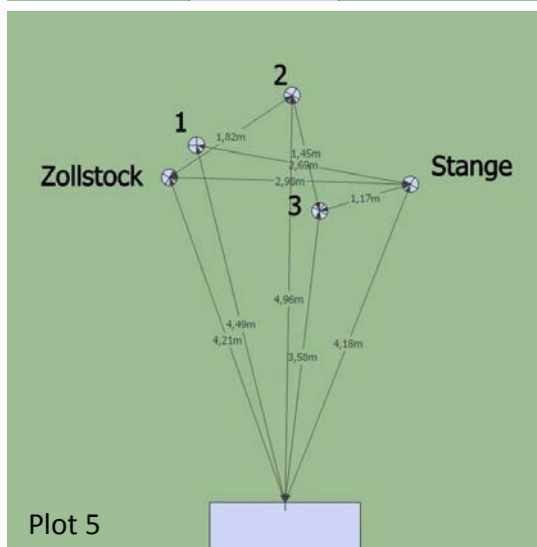
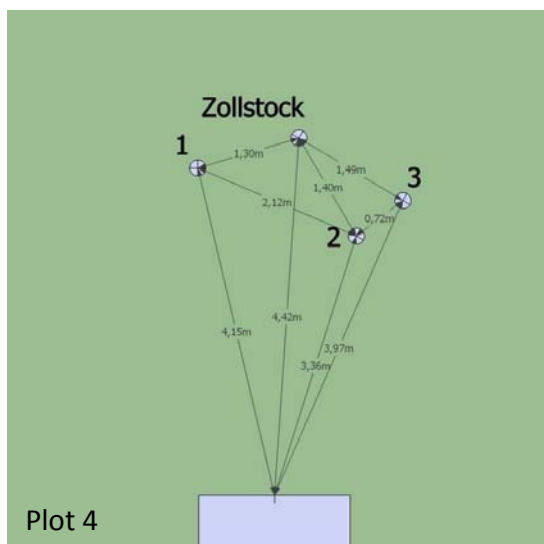
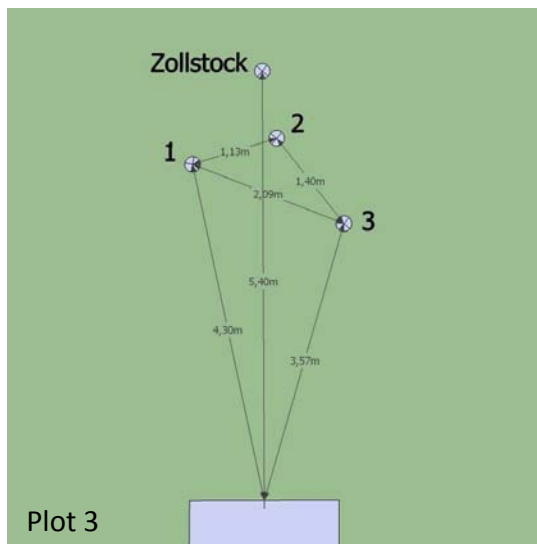
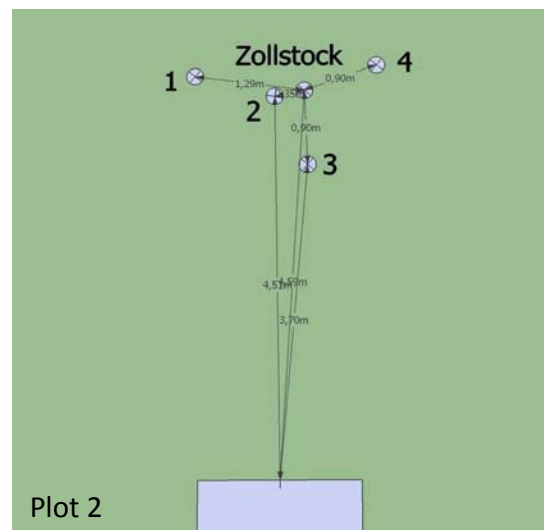
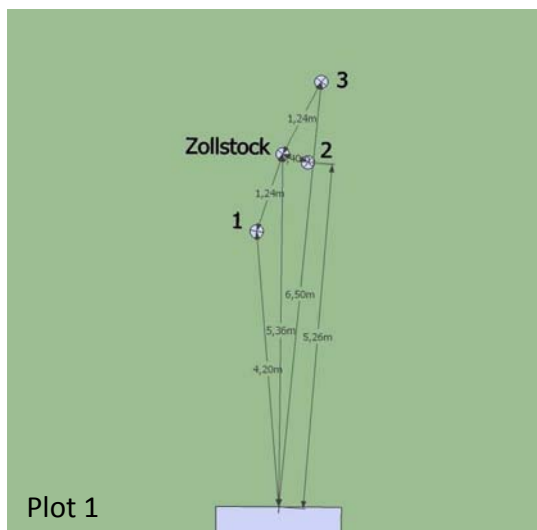


Abbildung A 20: Standortkarte Plot 8 im Maßstab 1:100; stationäre Aufnahme des Plots im Normalzustand vom 17.07.2012 (oben links).

Abstandsschemata der acht Plots



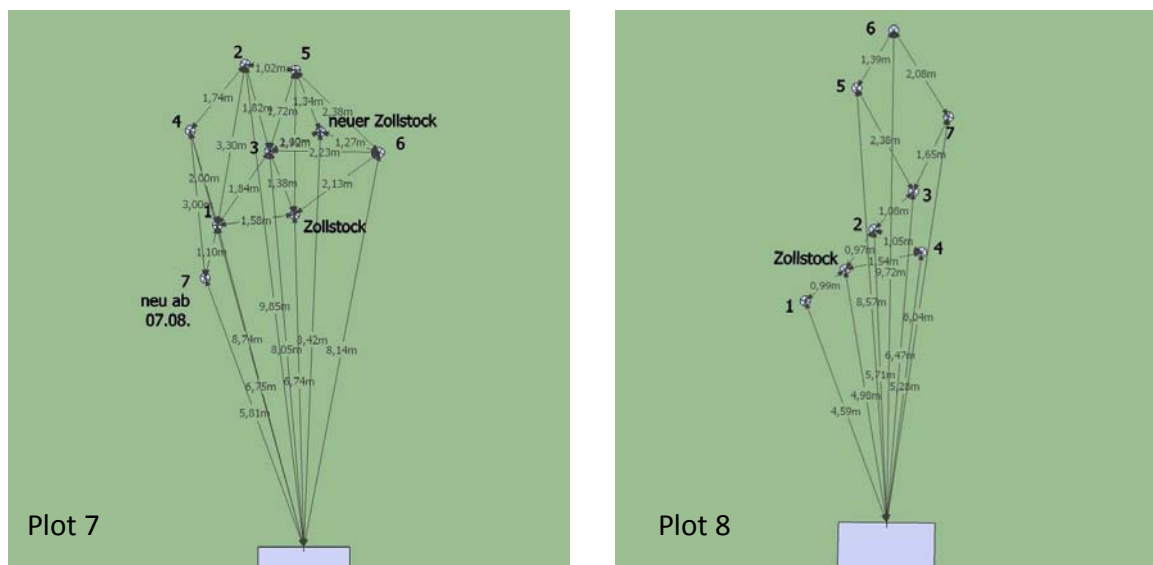


Abbildung A 21: Abstände zwischen Stäben, Zollstöcken und deren Entfernung zu den einzelnen stationären Kameras an Plot eins bis acht (verwendete Software: Google Sketchup).

Anhang D

Auslenkung Karbonfaserstäbe

Die folgenden Tabellen stellen lediglich einen kleinen Teil der angelegten Tabellen dar. Die übrigen sind auf den beigefügten Datenträgern enthalten.

Tabelle A 8: Auslenkung linker KFS ohne SK (Standbilder aus Videoaufnahme HDV_0464, 11.06.2012).

80 cm = 166 Pixel (Messlatte)			Wasserstand [cm]		35
Sekunde	Rechte Kante Lot [Pixel]	Spitze x-Wert	Auslenkung [Pixel]	Auslenkung [cm]	Schwankungs-änderung (δx) [cm]
0	504	509	5	2.4	
1	504	507	3	1.4	1.0
2	504	506	2	1.0	0.5
3	504	506	2	1.0	0.0
4	504	506	2	1.0	0.0
5	504	507	3	1.4	-0.5
6	504	505	1	0.5	1.0
7	504	505	1	0.5	0.0
8	504	506	2	1.0	-0.5
9	504	508	4	1.9	-1.0
10	504	507	3	1.4	0.5
11	504	506	2	1.0	0.5
12	504	507	3	1.4	-0.5
13	504	506	2	1.0	0.5
14	504	506	2	1.0	0.0
15	504	507	3	1.4	-0.5
16	504	507	3	1.4	0.0
17	504	508	4	1.9	-0.5
18	504	506	2	1.0	1.0
19	504	506	2	1.0	0.0
20	504	504	0	0.0	1.0
21	504	504	0	0.0	0.0

Tabelle A 9: Auslenkung linker KFS mit großem SK (Standbilder aus Videoaufnahme HDV_0464, 11.06.2012, 49 Sekunden nach Aufnahmebeginn).

80 cm = 164 Pixel (Messlatte)			Wasserstand [cm]		34
Sekunde	Rechte Kante Lot [Pixel]	Spitze x-Wert	Auslenkung [Pixel]	Auslenkung [cm]	Schwankungs- änderung (δx) [cm]
0	506	482	24	11.7	
1	506	480	26	12.7	1.0
2	506	478	28	13.7	1.0
3	506	477	29	14.1	0.5
4	506	473	33	16.1	2.0
5	506	474	32	15.6	-0.5
6	506	474	32	15.6	0.0
7	506	475	31	15.1	-0.5
8	506	476	30	14.6	-0.5
9	506	476	30	14.6	0.0
10	506	479	27	13.2	-1.5
11	506	474	32	15.6	2.4
12	506	475	31	15.1	-0.5
13	506	473	33	16.1	1.0
14	506	475	31	15.1	-1.0
15	506	476	30	14.6	-0.5
16	506	473	33	16.1	1.5
17	506	470	36	17.6	1.5
18	506	474	32	15.6	-2.0
19	506	476	30	14.6	-1.0
20	506	477	29	14.1	-0.5
21	506	477	29	14.1	0.0
22	506	477	29	14.1	0.0
23	506	474	32	15.6	1.5
24	506	478	28	13.7	-2.0
25	506	474	32	15.6	2.0
26	506	469	37	18.0	2.4

Hochwasserimpressionen Taubergießen



Abbildung A 22: Zwei aufgestellte KFS im M5 ohne SK und Lüsterklemme.



Abbildung A 23: Hauptanströmrichtung Plot 6 auf die Karbonfiberstäbe. Linkerhand des Bildes ist eine grüne Stange zu erkennen, die den Beginn der Fließstrecke kennzeichnet.

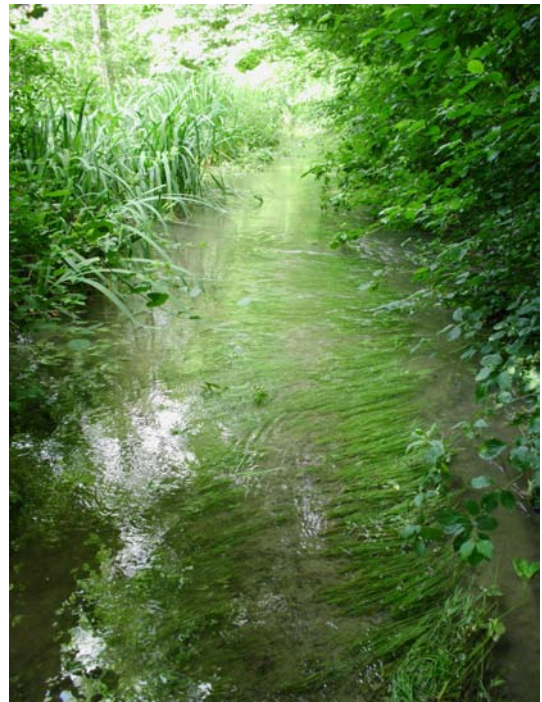


Abbildung A 24: Überfluteter ehemaliger Forstweg, über den das Hochwasser auf mehreren Pfaden zu Plot 6 fließt. Linkerhand erkennt man ein Sumpfareal.



Abbildung A 25: Nahaufnahme des Nebenarms an Plot 6, in welchem Stab 5 positioniert ist.



Abbildung A 26: Ehemaliger Plot 8 in der Nähe des Herrenkopfweges an einem Tümpel (Aufnahme vom 14.06.2012).



Abbildung A 27: verfangenes Geschwemmsel markiert an der nördlichen M1-Bresche die ehemalige Überflutungshöhe. Der als Maßstab dienende Zollstock ist ein Meter hoch (Aufnahme vom 02.07.2012).



Abbildung A 28: Überflutete nördliche Bresche am Leopoldskanal (Aufnahme vom 02.07.2012).



Abbildung A 29: Langsam infiltrierendes Hochwasser an Plot 7 nach Überflutungsereignis mit Graureiher zwischen den beiden Zollstöcken (Aufnahme vom 03.09.2012).

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbständig und unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Ort, Datum

Unterschrift