



Technische
Universität
Braunschweig



gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Identifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten durch die holistische Analyse von Fischtrajektorien und Strömungsbedingungen

AZ 35499/01

Abschlussbericht

Verfasser: Dipl.-Ing. Ralph Eikenberg und Prof. Dr.-Ing. Jochen Aberle

Technische Universität Braunschweig
Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Abteilung Wasserbau und Gewässermorphologie
Beethovenstr. 51 a
38106 Braunschweig

Projektlaufzeit: 01.12.2020 bis 31.05.2023

Braunschweig, September 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Zusammenfassung.....	VII
1 Einleitung und Motivation	8
2 Methodik und Vorgehensweise	10
2.1 Vorbemerkungen	10
2.2 Arbeitspakete.....	11
3 Projektablauf und -ergebnisse.....	13
3.1 Arbeits- und Zeitplan.....	13
3.2 Digitales Höhenmodell der Ilme-Sohlegleite.....	15
3.2.1 Trockenlegung und Vermessung der Sohlegleite.....	16
3.2.2 Erstellung des digitalen Höhenmodells	20
3.3 Grundlagendaten im Feld	22
3.3.1 Wasserstands-Abfluss-Beziehung der Sohlegleite.....	22
3.3.2 Erste ADV-Geschwindigkeitsmessungen.....	23
3.4 Laborexperimente.....	25
3.4.1 Aufbau des Labormodells	25
3.4.2 Fischbeobachtungen im Labor.....	33
3.4.3 Hydraulische Messungen.....	40
3.5 Felduntersuchungen	46
3.5.1 Fischbeobachtungen	46
3.5.2 Hydraulische Messungen.....	50
3.6 Zusammenführung der Ergebnisse und Analyse	54
4 Öffentlichkeitsarbeit, Veröffentlichungen und Vorträge	55
4.1 Presseberichte.....	55
4.2 Web.....	56
4.3 Social Media	57
4.4 Veröffentlichungen.....	58
4.5 Vorträge.....	59
4.6 Studentische Arbeiten.....	60

5	Fazit und Ausblick.....	61
6	Literatur.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Drohnenaufnahme der im Rahmen des Projekts untersuchten Sohlengleite in der Ilme in Niedersachsen (Aufnahme: Eikenberg).....	8
Abb. 1.2	Projektlogo	9
Abb. 2.1	Projektübersicht mit Arbeitspaketen und Schema der Grundidee	10
Abb. 3.1	Prinzipiskizze zur Trockenlegung der Sohlengleite in der Ilme	16
Abb. 3.2	Fischbergung mittels Elektrofischerei durch den Fischereiverein Einbeck e.V. (Aufnahmen: Herrmann, Eikenberg).....	16
Abb. 3.3	a) bereitgestellte Bigbags und Sandsäcke; b) Einheben der Bigbags in die Ilme; c) Verlegen der Kunststoffolie und der Sandsäcke; d) Aufbau der Sperre ist abgeschlossen. (Aufnahmen: Eikenberg)	17
Abb. 3.4	Pumpentechnik im Einsatz und Ilme unterstrom der Gleite mit Restwasser. a) Pumpentechnik zwischen der Sperre und der Gleite; b) gepumptes Restwasser in der Ilme unterstrom der Gleite. (Aufnahmen: Eikenberg).....	18
Abb. 3.5	Trockengelegte Sohlengleite (Aufnahmen: Eikenberg).....	18
Abb. 3.6	Einmessen der Marker (a) und der Fixpunkte (b). (Aufnahmen: Eikenberg)	19
Abb. 3.7	Laichgruben von Bachforellen im Oberwasser der Gleite (Dezember 2020, Aufnahme: Eikenberg).....	20
Abb. 3.8	Vergleich der erstellten Punktwolken. a) Laserscan, b) bis d) SfM, jeweils in der Draufsicht mit Angabe der geodätischen Höhe in [m+NHN]	21
Abb. 3.9	Digitales dreidimensionales Modell der gesamten Sohlengleite. Maßstab in [m], Höhen in [m+NHN].	21
Abb. 3.10	Wasserstand-Abfluss-Beziehungen für das System Sohlengleite/Mühlenkanal	22
Abb. 3.11	Geschwindigkeitsmessungen zur Erstellung einer h-Q-Beziehung für die Gleite. a) Messquerschnitt im Oberwasser der Gleite; b) hydrometrischer Flügel. (Aufnahmen: Eikenberg).....	23
Abb. 3.12	Messrahmen für die ADV-Messungen im Feld (Aufnahme: Eikenberg)	23
Abb. 3.13	Schemaskizze des „Laxelerators“ mit Angabe der Außenabmessungen (Bild: Vattenfall, modifiziert).....	25
Abb. 3.14	Abgrenzung des Modellbereichs. a) Strömungsbild auf der Gleite bei Niedrigwasser mit Hauptströmungspfad (rote Linie), b) gewählter Ausschnitt des DHM für das Labormodell. (Foto: Eikenberg).....	26
Abb. 3.15	a) Fräsprozess zur Herstellung der einzelnen Modellblöcke; b) fertiggestellter Modellblock, ohne Beschichtung. (Aufnahmen: Vattenfall)	26

Abb. 3.16	a) Einbau der Unterkonstruktion; b) Einbau der einzelnen Modellblöcke. (Aufnahmen: Vattenfall).....	27
Abb. 3.17	Draufsicht und Längsschnitt des Versuchsaufbaus im Laxelerator (nicht maßstäblich)	27
Abb. 3.18	a) Stoßschwelle im Einlaufbereich der Rinne; b) Gitterwand als obere Begrenzung der Modell- bzw. Versuchsstrecke. (Aufnahmen: Eikenberg).....	28
Abb. 3.19	Anrampungen vom Rinnenboden zur Modelloberfläche im (a) Ober- und (b) Unterwasser. (Aufnahmen: Eikenberg).....	28
Abb. 3.20	Startbox (Aufnahmen: Eikenberg)	29
Abb. 3.21	a) Trennwand im Unterwasser; b) Überfallwehr am Ende der Rinne. (Aufnahmen: Eikenberg)	29
Abb. 3.22	Das fertiggestellte Modell der Sohlengleite im Testbetrieb (Aufnahme: Eikenberg).....	30
Abb. 3.23	a) Visueller Vergleich der drei Datensätze. b) Laserscan des Labormodells (Foto: Eikenberg)	30
Abb. 3.24	Übersicht der installierten Kameras und ungefähre Blickrichtungen (Kegel) bzw. abgedeckte Bereiche (farbige gestrichelte Rahmen).....	31
Abb. 3.25	Situationsaufnahmen der drei Modelldurchflüsse. a) $Q_1 = 372$ l/s; b) $Q_2 = 844$ l/s; c) $Q_3 = 1200$ l/s. (Aufnahmen: Eikenberg).....	32
Abb. 3.26	a) Forelle (Altersklasse 0+); b) Äsche. (Aufnahmen: Eikenberg)	33
Abb. 3.27	a) Groppe; b) Flussbarsch. (Aufnahmen: Eikenberg).....	34
Abb. 3.28	Hältertanks im Vattenfall-Labor	35
Abb. 3.29	Einbau einer Barriere für die Groppen.....	37
Abb. 3.30	Trajektorien der Forellen (Tests #19, #20, #21, #23, #26 und #28) aus den Laborversuchen	39
Abb. 3.31	Trajektorien der Flussbarsche (Test #22) aus den Laborversuchen	39
Abb. 3.32	Trajektorien der Groppen (Test #29) aus den Laborversuchen	40
Abb. 3.33	a) Messrahmen im Einsatz (Q3), b) montierte Vectrino-Sonde. (Aufnahmen: Eikenberg).....	40
Abb. 3.34	Messpositionen der Geschwindigkeitsmessungen aus den Laboruntersuchungen	41
Abb. 3.35	Hydrometrischer Flügel. a) Hötzsch Flowtherm NT.2 Handgerät sowie Sonde mit Anschlusskabel; b) Sondenkopf mit Propeller. (Aufnahmen: Eikenberg).....	42
Abb. 3.36	a) Schwimmpartikel; b) Einzelframe um unteren Bereich des Modells (Q2). (Aufnahmen: Eikenberg)	42
Abb. 3.37	Darstellung der Wassertiefen für die im Labor untersuchten Durchflüsse. a) Q_1 , b) Q_2 , c) Q_3	43

Abb. 3.38	Ergebnisse der ADV-Punktmessungen für die drei untersuchten Durchflüsse im Labor. Dargestellt sind die zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten mit Magnitude und Richtung. a) Q_1 ; b) Q_2 ; c) Q_3	44
Abb. 3.39	Darstellung der Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche für die im Labor untersuchten Durchflüsse. a) Q_1 ; b) Q_2 ; c) Q_3	45
Abb. 3.40	a) Kamerapositionen während der Fischbeobachtungen im Feld (mit Ausrichtung des ungefähre Sichtfeldes). b) Technik-Box am Ufer der Ilme.	47
Abb. 3.41	In den Felduntersuchungen ermittelte Trajektorien alle beobachteten Fischarten.	49
Abb. 3.42	a) Messpositionen und b) Messrahmen auf der Gleite und c) ADV-Sonde im Einsatz.	50
Abb. 3.43	Wassertiefen während der Feldmessungen auf Grundlage der interpolierten Wasserspiegellagen. Die verwendeten Sohlenhöhen für beziehen sich auf den Scan der Sohlengleite im Oktober 2020.	51
Abb. 3.44	Ergebnisse der ADV-Punktmessungen im Feld. Dargestellt sind die zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten mit Magnitude und Richtung.	52
Abb. 3.45	Oberflächenströmungsfeld aus den Feldmessungen (Aufnahmedatum des zugrundeliegenden Videos: 28.07.2022).	53
Abb. 4.2	Screenshot der Projektwebsite.....	56
Abb. 4.3	Instagram-Posts @lwiwasserbau zum Projekt (zeitliche Reihenfolge absteigen von oben links nach unten rechts).....	57

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Übersicht des Projektes, aufgeschlüsselt nach Arbeitspaketen	13
Tab. 3.2	Ergebnis der Fischbergung. Fischarten, Größenklassen und Anzahl	17
Tab. 3.3	Ergebnis der Genauigkeitsuntersuchung. A – Punktwolke Felddaten, B – DHM, C – Punktwolke Labormodell. „ref“ kennzeichnet jeweils den Referenzdatensatz für den Vergleich	30
Tab. 3.4	Übersicht der eingesetzten Kameratypen (Fotos: Eikenberg).....	31
Tab. 3.5	Körperlängen der verwendeten Fische, Angaben in [mm]	34
Tab. 3.6	Übersicht der durchgeführten Mehrarten-Tests und Anzahl der jeweils im Oberwasser gefangenen Fische.....	36
Tab. 3.7	Übersicht der durchgeführten Einzelarten-Tests und Anzahl der jeweils im Oberwasser gefangenen Fische.....	38
Tab. 3.8	Anzahl der durchgeführten Vectrino-Messungen.....	41
Tab. 3.9	Spezifikationen der in den Felduntersuchungen verwendeten Unterwasserkameras	46
Tab. 3.10	Auflistung der während des Beobachtungszeitraums vom 30.06.2022 bis zum 15.07.2022 von den im Oberwasser installierten Kameras 10.1, 10.2 und 15.1 beobachteten Fische.	48

Zusammenfassung

Die hydraulische Dimensionierung naturnaher unstrukturierter Sohlengleiten erfolgt derzeit über empirische Berechnungsansätze, die auf abschnittsgemittelten Werten basieren, so dass Aussagen über lokale Strömungsverhältnisse nur bedingt möglich sind. Der Nachweis passierbarer Wanderkorridore für Fische ist daher mit Unsicherheiten behaftet, weshalb dieser Gleitentyp trotz seiner Vorteile oftmals nicht umgesetzt wird. Das Projekt "MigRamp – *Identifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten durch die holistische Analyse von Fischtrajektorien und Strömungsbedingungen*" (DBU-AZ 35499/01, Laufzeit 12/2020-05/2023) hatte zum Ziel, das Verständnis über aufwärtsgerichtete Fischwanderungen auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten zu verbessern. Dabei sollten insbesondere hydraulische und topografische Randbedingungen zur Identifikation und Definition von Wanderkorridoren berücksichtigt werden.

Eine bestehende Sohlengleite an der Ilme in Niedersachsen diente als „best-practice“-Beispiel für das Projekt. Das Bauwerk ist nachweislich ökologisch durchgängig und kann aufgrund seiner naturnahen unstrukturierten Bauweise als Prototyp bezeichnet werden. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Leineverband als Vertreter der Ingenieurpraxis, in dessen Zuständigkeitsbereich sich das Bauwerk befindet, wurde die Gleite in einer bislang einzigartigen Aktion temporär trockengelegt und detailliert vermessen. Das erstellte dreidimensionale Geländemodell in hoher Genauigkeit diente als Grundlage für die weiteren Untersuchungen. Zur Durchführung der umfangreichen Laboruntersuchungen unter kontrollierten Bedingungen stellte der Projektpartner Vattenfall Research and Development AB sein Wasserbaulabor in Älvkarleby, Schweden, zur Verfügung. Im dortigen *Laxelator*, einer weltweit einzigartigen Versuchseinrichtung für großskalige ethohydraulische Experimente, wurde ein 1:1-Modell der Ilme-Sohlengleite eingebaut und detaillierte kamerabasierte Fischbeobachtungen sowie hydraulische Messungen unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Auf Grundlage der Erfahrungen in den Laboruntersuchungen konnte das Versuchsprogramm schließlich in Felduntersuchungen an der Ilme wiederholt und der einmalige Datensatz vervollständigt werden.

Sowohl Fischtrajektorien verschiedener Arten und Größen- bzw. Leistungsklassen als auch lokale und globale Strömungsbedingungen wurden im Labor wie in der Natur in Abhängigkeit des Abflusses und der Sohlentopographie dokumentiert, was wiederum die Identifizierung und Quantifizierung von Wanderkorridoren von aufsteigenden Fischen ermöglichte. Die Arbeit erlaubte außerdem erstmals einen direkten Vergleich von Labor- und Naturuntersuchungen auf einer naturnahen Sohlengleite. Die umfangreiche Auswertung und Analyse der erhobenen Daten erfolgt in der Dissertationsschrift von Herrn Ralph Eikenberg mit dem Titel „Verknüpfung von Strömungsfeld, Sohlengeometrie und Fischtrajektorien auf unstrukturierten Sohlengleiten“. Die Projektergebnisse tragen zur Entwicklung neuer und verbesserter Dimensionierungskriterien für naturnahe unstrukturierte Sohlengleiten und somit zur Verbesserung der ökologischen Durchgängigkeit der Fließgewässer bei.

1 Einleitung und Motivation

Naturnahe unstrukturierte Sohlengleiten sind Bauwerke zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit in Fließgewässern, die durch die flächige und unregelmäßige Anordnung von Störsteinen eine räumlich heterogene Gewässersohle mit vielfältigen Strömungsverhältnissen aufweisen. Sie passen sich, verglichen mit geometrisch definierten Bauformen, sehr gut in das Erscheinungsbild des jeweiligen Fließgewässers ein und bieten zusätzliche Habitate für die aquatische Fauna (vgl. Abb. 1.1).

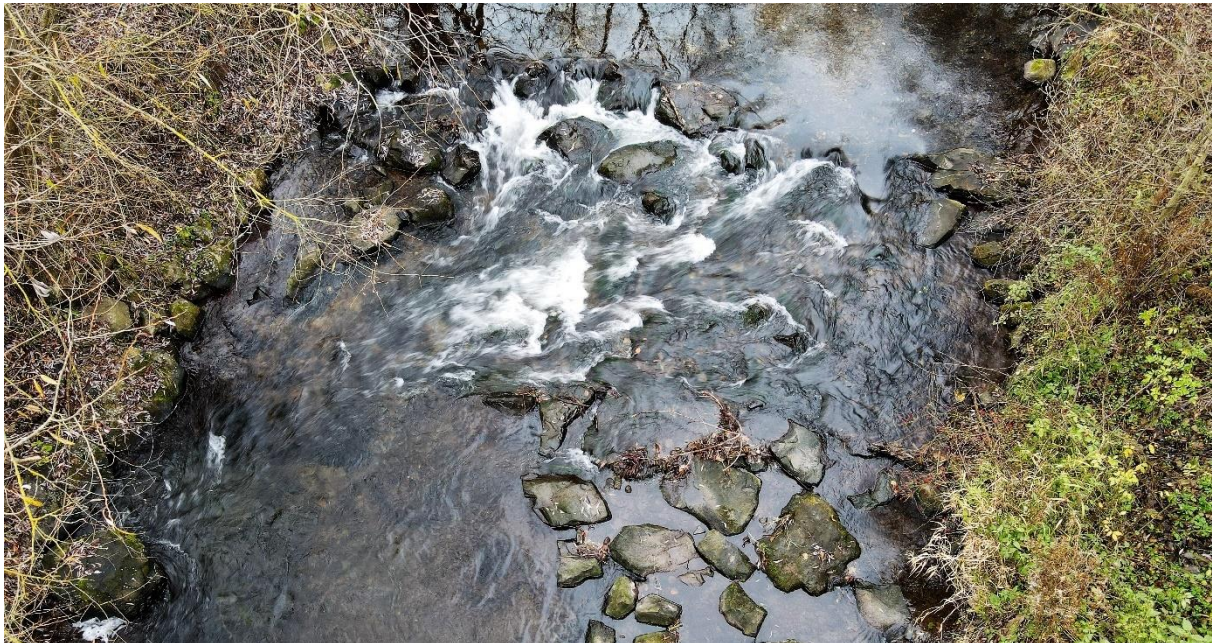


Abb. 1.1 Drohnenaufnahme der im Rahmen des Projekts untersuchten Sohlengleite in der Ilme in Niedersachsen (Aufnahme: Eikenberg)

Die hydraulische Dimensionierung dieser Bauwerke erfolgt über empirische Berechnungsansätze, die auf abschnittsgemittelten Werten basieren (DWA, 2009), so dass die zur Fischpassierbarkeit nötigen Aussagen über lokale Strömungsverhältnisse nicht möglich sind. Dies wiederum bedeutet, dass der Nachweis passierbarer Wanderkorridore auf Grundlage des aktuellen technischen Regelwerks gemäß DWA M-509 (DWA, 2014) für Fische mit Unsicherheiten behaftet ist, weshalb dieser Gleitentyp trotz seiner Vorteile oftmals nicht umgesetzt wird. Deshalb wird in der Praxis fast ausschließlich auf eher technische, aber trotzdem „naturnah“ genannte Bauformen wie Riegel-Beckenstrukturen zurückgegriffen, obwohl nach Auskunft der in der Praxis zuständigen Behörden, Planer und Unterhaltungsverbände in Niedersachsen naturnahe unstrukturierte Sohlengleiten als Vorzugslösung für die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit angesehen werden.

Die Zielsetzung des Projekts "MigRamp – *Identifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten durch die holistische Analyse von Fischtrajektorien und Strömungsbedingungen*" bestand daher in der Verbesserung des Verständnisses über aufwärtsgerichtete Fischwanderungen auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten unter besonderer Beachtung hydraulischer und topografischer Randbedingungen zur Identifikation und Definition von Wanderkorridoren. Darüber hinaus sollten die im Rahmen des Projekts erhobenen Daten zur Verbesserung der Dimensionierungsgrundlagen und Monitoringverfahren von naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten dienen.

Die Ziele des Projekts werden auch durch das Akronym „MigRamp“, welches aus den Silben „mig“ für engl. *migration*, also Migration, Wanderung, und „ramp“ als engl. Begriff für Sohlengleite gebildet wird, und durch das Logo (Abb. 1.2), das einen idealisierten Ausschnitt aus einer Sohlengleite mit dem Symbol eines Fisches (Äsche) auf einer durchgehenden gestrichelten Linie (Trajektorie) zeigt, reflektiert.



Abb. 1.2 Projektlogo

Das Projekt begann am 01. Dezember 2021 und endete am 31. Mai 2023. Dieser Bericht fasst den Projektablauf zusammen und gibt einen Überblick über die Ergebnisse. In Kapitel 2 wird zunächst die Methodik und generelle Vorgehensweise in Form der Arbeitspakete beschrieben. Der Projektablauf, auch unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch die COVID-19-Pandemie sowie ein Einblick in die durchgeführten Arbeiten werden zusammen mit den erzielten Ergebnissen in Kapitel 3 vorgestellt. Die detaillierten Ausführungen zu den Projektergebnissen und deren Analyse sind der Dissertation von Herrn Ralph Eikenberg mit dem Titel „Verknüpfung von Strömungsfeld, Sohlengeometrie und Fischtrajektorien auf unstrukturierten Sohlengleiten“ zu entnehmen (in Vorbereitung). Kapitel 4 gibt einen Überblick über die Öffentlichkeitsarbeit, Veröffentlichungen und Vorträge. Der Bericht schließt mit einem Fazit und Ausblick in Kapitel 5.

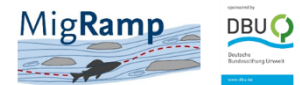
2 Methodik und Vorgehensweise

2.1 Vorbemerkungen

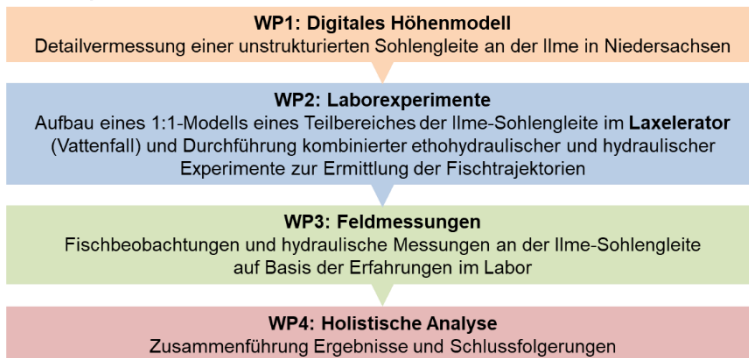
Die im Projekt MigRamp durchgeführten Untersuchungen zur Identifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten fokussierten sich exemplarisch eine bestehende naturnahe unstrukturierte Sohlengleite in der Ilme in Niedersachsen (Abb. 1.1). An dieser Gleite wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Leineverband umfangreiche Naturuntersuchungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden in dem Projekt erstmalig detaillierte fischbiologische und hydraulische Untersuchungen an einem 1:1 Modell dieser Sohlengleite im *Laxelerator*, einer einzigartigen Versuchseinrichtung für ethohydraulische Versuche des Projektpartner Vattenfall Research and Development AB im Vattenfall-Wasserbaulabor in Älvkarleby, Schweden, durchgeführt.

In den Natur- und Laboruntersuchungen wurden sowohl Fischtrajektorien als auch lokale und globale Strömungsbedingungen in Abhängigkeit des Abflusses und der Sohlentopographie des Bauwerks dokumentiert, was wiederum die Identifizierung und Quantifizierung von Wanderkorridoren von aufsteigenden Fischen erlaubte. Das Projekt war in insgesamt vier Arbeitspakete untergliedert, die schematisch in Abb. 2.1 im Zusammenhang mit der Grundidee des Projekts dargestellt sind und im Folgenden Abschnitt kurz beschrieben werden.

Identifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten durch die holistische Analyse von Fischtrajektorien und Strömungsbedingungen



Arbeitspakete:



Projektpartner:

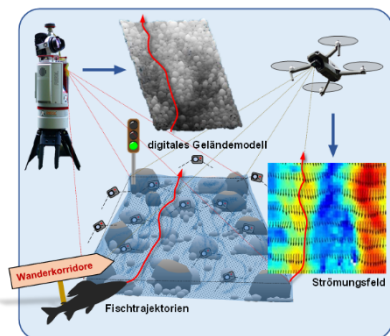


Abb. 2.1 Projektübersicht mit Arbeitspaketen und Schema der Grundidee

2.2 Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Digitales Höhenmodell

Das erste Arbeitspaket umfasste die Erstellung eines digitalen Höhenmodells (DHM) der Ilme-Sohlengleite. Aufgrund der zeitlich eingeschränkten Möglichkeiten zum Arbeiten im Gewässer wurde die Vermessung der Sohlengleite noch vor dem Projektbeginn bereits im Oktober 2020 durchgeführt. Die Sohlengleite wurde temporär trockengelegt, so dass die Bauwerkstopographie mit hochauflösenden Messverfahren aufgenommen werden konnte. Basierend auf dem erhaltenen digitalen Höhenmodell wurde das Labormodell für den *Laxelator* produziert. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets werden in Abschnitt 3.2 vorgestellt. Weitere Grundlagendaten, insbesondere eine Wasserstand-Abfluss-Beziehung des Bauwerks wurden im Frühjahr 2021 erhoben.

Arbeitspaket 2: Laborexperimente

Die Laborexperimente wurden im Zeitraum August bis November 2021 im Vattenfall-Wasserbaulabor in Älvkarleby, Schweden, durchgeführt und sind in Abschnitt 3.4 näher beschrieben. Die kontrollierten Bedingungen im *Laxelator* erlaubten die detaillierte räumliche Bestimmung der für den Fischaufstieg relevanten Größen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit entlang der im Vorfeld mit hochauflösenden Kameras identifizierten Trajektorien für drei verschiedene Fischarten bzw. Größenklassen. Die nach den ethohydraulischen Tests durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen waren in zwei Teile gegliedert. Zum einen wurden die Strömungsgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche großflächig über videometrische Verfahren bestimmt. Zu anderen sollten die Geschwindigkeiten im Wasserkörper in hoher zeitlicher Auflösung in verschiedenen Höhenlagen über der Sohle gemessen werden. Aufgrund der hochturbulenten Strömungsbedingungen in Kombination mit hohem Lufteintrag lieferte der erhaltene Datensatz nicht die ursprünglich vorgesehenen Detailinformationen über die Turbulenzstrukturen über der Gleite.

Arbeitspaket 3: Feldmessungen

Auf Grundlage der Erfahrungen im Labor zur Ermittlung der Fischtrajektorien wurden im Sommer 2022 Naturuntersuchungen an der Ilme-Sohlengleite erfolgreich durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.5). Diese wurde dafür an geeigneten Positionen ebenfalls mit Unterwasserkameras instrumentiert, um das im *Laxelator* beobachtete Verhalten der Fische mit dem Verhalten in der Natur zu vergleichen. Das detaillierte Strömungsfeld über der Gleite wurde unter Naturbedingungen mit denselben Verfahren wie im Labor erfasst. Allerdings war auch hier die Datenqualität der Messungen im Wasserkörper nicht zufriedenstellend, so dass lediglich mittlere Geschwindigkeitswerte für die folgende Analyse verwendet werden konnten.

Arbeitspaket 4: Holistische Analyse

Die ganzheitliche Analyse der Labor- und Naturuntersuchungen diente zur erstmaligen fischbasierten Identifizierung und somit dem direkten Nachweis von Wanderkorridoren und Migrationsmustern in Abhängigkeit lokaler hydraulischer und topographischer Verhältnisse auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten. Im Rahmen der Analyse

wurden die Trajektorien mit den Informationen zur Gleitengeometrie sowie zur Hydraulik (Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten) verschnitten und umfassend ausgewertet.

Die ursprünglich geplante Vorgehensweise nach dem von Lacey et al. (2012) entwickelten IPOS-Konzept, d.h. dass neben den übergeordneten hydraulischen Parametern Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit auch die Turbulenzeigenschaften der räumlich heterogenen Strömung und deren Verknüpfung mit den ermittelten Fischtrajektorien auf der Sohlengleite betrachtet werden, konnte aufgrund der Datenqualität nicht eingehalten werden. Da die Quantifizierung der hydraulischen Verhältnisse entlang der identifizierten Wanderkorridore und die von Fischen bei der Passage gemiedenen Bereiche auch über die Oberflächenströmung und die Wassertiefen möglich war, können die Projektergebnisse als zufriedenstellend betrachtet werden.

Vielmehr sind die erhobenen Daten als äußerst wertvoll zu betrachten, da im Rahmen dieses Projektes erstmals Fischtrajektorien und hydraulische Größen auf einer naturnahen Sohlengleite in Labor- und Felduntersuchungen betrachtet wurden und verglichen werden konnten. Für die umfassende Aufbereitung und Analyse der erhobenen Daten wird auf die Dissertationsschrift vom Bearbeiter des Projektes Herrn Ralph Eikenberg verwiesen (in Fertigstellung, Veröffentlichung Ende 2023/Anfang 2024).

Während des Projektes wurde mit Akteuren aus der Praxis zusammengearbeitet und die Zwischenergebnisse im Rahmen von Vorträgen und Workshops vorgestellt und diskutiert. So konnte die Anpassung des Untersuchungsprogramms auf praktische Anforderungen sowie die praxisgerechte Auswertung der Daten hinsichtlich von Dimensionierungskriterien, bautechnischen Aspekten und Funktionskontrollen garantiert werden.

3 Projektablauf und -ergebnisse

3.1 Arbeits- und Zeitplan

Entgegen dem Arbeits- und Zeitplan im Projektantrag ergaben sich einige Änderungen innerhalb der ursprünglich geplanten Reihenfolge der Arbeitspakete. Die Übersicht in Tab. 3.1 fasst den Projektablauf, aufgeschlüsselt nach den einzelnen Arbeitspaketen, zusammen.

Tab. 3.1 Übersicht des Projektes, aufgeschlüsselt nach Arbeitspaketen

Arbeitspakete und Einzelschritte		Zeitraum
Arbeitspaket 1 Digitales Höhenmodell		
	Detailvermessung der Sohlengleite	10/20
	Datenaufbereitung und Erstellung DHM	11/20 – 02/21
Arbeitspaket 2 Laborexperimente		
	Vorbereitung der Laborexperimente	02/21 – 08/21
	Aufbau Modells im Laxelerator durch Vattenfall	08/21 – 09/21
	Laborexperimente im Laxelerator	09/21 – 11/21
	Abbau des Modells im Laxelerator durch Vattenfall	12/21
	Aufbereitung und Auswertung der Labordaten	11/21 – 02/23
Arbeitspaket 3 Feldmessungen		
	Wasserstand-Abfluss-Beziehung der Sohlengleite	03/21 – 06/21
	Konzept Geschwindigkeitsmessungen	07/21 – 08/21
	Datenaufbereitung und -auswertung	08/21 – 11/22
	Vorbereitung Fischbeobachtungen	12/21 – 06/22
	Fischbeobachtungen und Geschwindigkeitsmessungen	07/22
	Aufbereitung und Auswertung der Felddaten	07/22 – 06/23
Arbeitspaket 4 Holistische Analyse		
	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	05/23 – 09/23
Abschlussbericht		05/23 – 09/23

Die bereits zum Projektbeginn angesetzten Laborexperimente mussten aus verschiedenen Gründen in den Herbst 2021 verschoben werden. So gab es insbesondere Verzögerungen in der Verfügbarkeit des *Laxelerators* und nicht zuletzt waren die Auswirkungen der Corona-Pandemie durch Reisebeschränkungen und die allgemeine Situation in Schweden ausschlaggebend für diese Änderungen. Die Zeit wurde genutzt, um neben einer detaillierten Wasserstand-Abfluss-Beziehung der Ilme-Sohlengleite auch erste Erfahrungen mit der vorgesehenen Messtechnik sowohl für die Hydraulik als auch für die Fischbeobachtungen im Feld zu sammeln. Für die abschließende Vorbereitung und Durchführung der Laborexperimente ging Herr Eikenberg ab Ende August 2021 bis Ende November 2021 nach Schweden.

Das Labormodell wurde ab Juni 2021 unter Federführung von Vattenfall erstellt und im August 2021 mit dem Aufbau im *Laxelerator* begonnen. Die Inbetriebnahme erfolgte im September

2021. Nachdem die Einrichtung des Versuchsaufbaus abgeschlossen war, konnten die Kameras installiert und letzte Anpassungen für den Betrieb vorgenommen werden. Die Laboruntersuchungen konnten im November 2021 erfolgreich abgeschlossen werden.

Im Sommer 2022 folgten die Felduntersuchungen an der Ilme, wobei zunächst die Fischbeobachtungen durchgeführt wurden. Während der anschließenden hydraulischen Messungen herrschten glücklicherweise vergleichbare Bedingungen wie bei den Fischbeobachtungen, so dass beide Datensätze verknüpft werden konnten. Darüber hinaus entsprach der Durchfluss in der Ilme in guter Näherung den hydraulischen Bedingungen bei einem der im Labor eingestellten hydraulischen Situationen.

Aufgrund der Fülle an Daten wurde bereits während der Messkampagnen mit der Auswertung der Videoaufnahmen begonnen. Die Aufbereitung und Auswertung der Daten wurden im Sommer 2023 abgeschlossen.

Die Ergebnisse aus der Datenaufnahme im Labor und im Feld werden in diesem Kapitel vorgestellt. Für weiter Ausführungen und die Analyse der Daten wird auf die Dissertation von Herrn Eikenberg verwiesen (in Vorbereitung).

3.2 Digitales Höhenmodell der Ilme-Sohlegleite

Das Arbeitspaket 1 beinhaltete die Detailvermessung der Sohlegleite in der Ilme und die Erstellung eines digitalen Höhenmodells (DHM) aus den aufgenommenen Daten. Das DHM der Sohlegleite stellte eine wichtige Grundlage für das Projekt dar, da es sowohl als Basis für den Aufbau des Labormodells als auch für die Analyse der Fischtrajektorien und der Strömungsverhältnisse diente.

Die Datenaufnahme für das Arbeitspaket 1, d.h. die Detailvermessung der Sohlegleite in der Ilme, musste vor dem offiziellen Beginn des Projektes durchgeführt werden, um nicht in die sensiblen Zeiträume für das Laichgeschäft der Kieslaicher (speziell der Bachforelle) ab ca. Ende Oktober/Anfang November zu gelangen. Daher wurde unmittelbar nach der Benachrichtigung über die Genehmigung des Projektantrages durch die DBU (15.09.2020) mit der Planung begonnen. Diese fand in enger Abstimmung mit den für wasser- bzw. naturschutzfachliche Fragen und Genehmigungen zuständigen Stellen des Landkreises Northeim (Untere Wasserbehörde und Untere Naturschutzbehörde) sowie dem für die Belange des Fischschutzes in Niedersachsen zuständigen Dezernat Binnenfischerei – Fischereikundlicher Dienst des Niedersächsischen Landesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (LAVES) statt.

Bei einem Ortstermin am 25.09.2020 wurde zunächst das Vorgehen für die Trockenlegung der Gleite besprochen und als Datum dafür der 22.10.2020 festgesetzt. Da die Ilme bzw. die Sohlegleite in einem FFH-Gebiet liegt (FFH-Gebiet Nr. 128, „Ilme“), wurde vom Projektbearbeiter ein Antrag auf eine FFH-Vorverträglichkeitsprüfung bei der Unteren Naturschutzbehörde des Landkreises Northeim gestellt. Darin waren das geplante Vorgehen sowie die angedachten Schutzmaßnahmen beschrieben. Der Antrag wurde mit Schreiben vom 19.10.2020 genehmigt. Die Belange des Fischschutzes in Form einer vorherigen Fischbergung mittels Elektrofischerei sowie die vorzuhaltende Restwassermenge in der Ilme unterstrom der trockengelegten Gleite wurden in Rücksprache mit dem LAVES festgelegt.

Bei der Trockenlegung der Sohlegleite und den Vermessungsarbeiten waren die folgenden Parteien beteiligt:

- Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, Abt. Wasserbau und Gewässermorphologie (hauptverantwortliche Organisation, Vermessungsarbeiten, 4 Personen),
- Institut für Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig (technische Unterstützung bei den Vermessungsarbeiten, 1 Person),
- Leineverband (Projektpartner, Absperrung der Ilme, 2 Personen),
- Technisches Hilfswerk, Ortsverband Einbeck (Pumpentechnik, 6 Personen) und
- Fischereiverein Einbeck e.V. (Fischereiberechtigter, Elektrofischen, 3 Personen).

Aus Gründen des Infektionsschutzes wurde auf eine breite Ankündigung dieser Aktion verzichtet und stattdessen im Nachgang ein Pressebericht verfasst (siehe Abschnitt 4.1).

3.2.1 Trockenlegung und Vermessung der Sohlgleite

Für die Vermessung wurde das Wasser der Ilme durch die Errichtung eines temporären Dammes mehrheitlich in den dort abzweigenden Mühlenkanal geleitet und die Sohlgleite auf diese Weise trocken gelegt (Abb. 3.1).

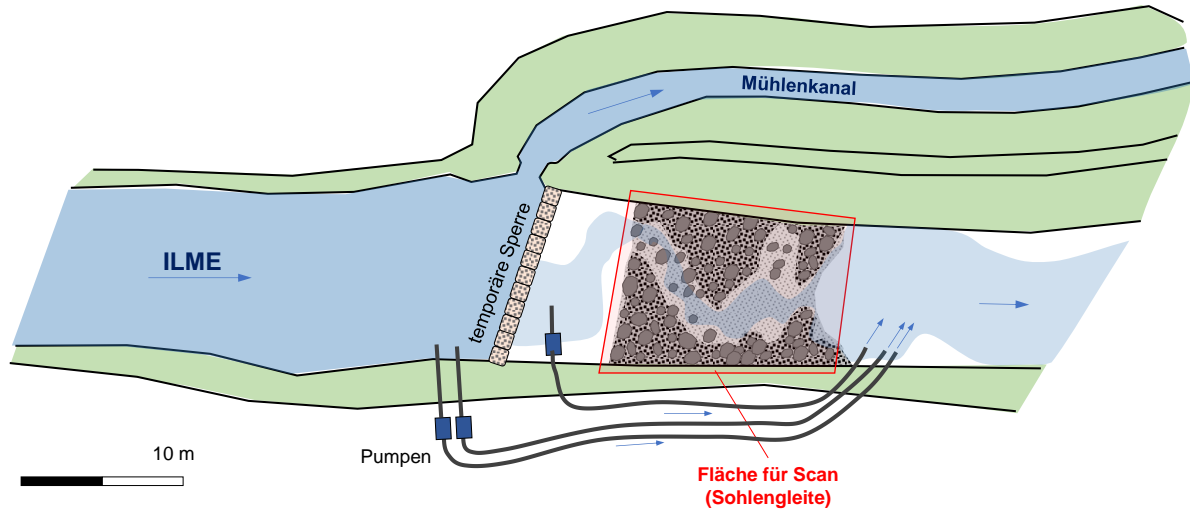


Abb. 3.1 Prinzipskizze zur Trockenlegung der Sohlgleite in der Ilme

Um Schäden von den im Bereich der Sohlgleite befindlichen Fischen abzuwenden, wurden diese unmittelbar vor Beginn der Trockenlegung mittels einer Elektrofischerei der Gleite durch dazu befähigte und ausgebildete Mitglieder des Fischereivereins Einbeck e.V. (Fischereiberechtigter) geborgen (Abb. 3.2). Die gefangenen Fische wurden gezählt und schnellstmöglich im Oberwasser der Gleite und in ausreichender Entfernung wieder ausgesetzt. Das Ergebnis der Befischung ist in Tab. 3.2 aufgelistet. Insgesamt wurden 86 Fische aus acht Arten gefangen und umgesetzt. Im weiteren Verlauf haben Mitglieder des Fischereivereins die trocken gelegte Gleite permanent beobachtet und die wenigen noch darauf verbliebenen Fische schonend geborgen.



Abb. 3.2 Fischbergung mittels Elektrofischerei durch den Fischereiverein Einbeck e.V. (Aufnahmen: Herrmann, Eikenberg)

Tab. 3.2 Ergebnis der Fischbergung. Fischarten, Größenklassen und Anzahl

Fischart		Größenklassen [cm]				Σ
		3-<10	10-<20	20-<30	30-<40	
Bachforelle	<i>Salmo trutta</i>		3	3	2	8
Elritze	<i>Phoxinus sp.</i>	26				26
Europäischer Aal	<i>Anguilla anguilla</i>		1	1		2
Äsche	<i>Thymallus thymallus</i>		7	1		8
Groppe	<i>Cottus gobio</i>	10	1			11
Dreistachliger Stichling	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	27				27
Atlantischer Lachs	<i>Salmo salar</i>		3			3
Bachschmerle	<i>Barbatula barbatula</i>		1			1
gesamt:					86	

Im Anschluss an die Fischbergung konnte mit dem Aufbau des temporären Dammes (Abb. 3.3) begonnen werden. Für die Arbeiten wurde vom Leineverband ein Bagger zur Verfügung gestellt. Im Vorfeld sind insgesamt 20 Bigbags (90 x 90 x 90 cm, Füllhöhe ca. 80 cm) sowie 100 Sandsäcke (40 x 60 cm) vom Leineverband mit Kies bzw. Sand befüllt und vor Ort verbracht worden. Nachdem sich der Bagger im Wasser oberstrom der Gleite positioniert hatte, konnten die Bigbags am Ufer nacheinander angeschlagen in die Ilme eingehoben werden. Der so entstandene Damm wurde mit Unterstützung der Mitglieder des THW vom Oberwasser her mit einer Kunststoffplane und den Sandsäcken so gut wie möglich abgedichtet.

**Abb. 3.3** a) bereitgestellte Bigbags und Sandsäcke; b) Einheben der Bigbags in die Ilme; c) Verlegen der Kunststofffolie und der Sandsäcke; d) Aufbau der Sperre ist abgeschlossen. (Aufnahmen: Eikenberg)

Aufgrund der lockeren Kiesohle der Ilme war die Sperre nicht vollständig dicht und Wasser drückte unter dieser hindurch. Die etwa 50 l/s an Sickerwasser konnten über mehrere Pumpen zwischen Sperre und Gleitenkrone abgefangen und ins Unterwasser gefördert werden. Zusammen mit einer weiteren leistungsstarken Pumpe im Oberwasser der Sperre konnte so für eine ausreichende Restwassermenge in der Ilme unterstrom der Gleite von etwa 150 l/s gesorgt werden (Abb. 3.4). Der Gesamtdurchfluss der Ilme an diesem Tag betrug ca. 800 l/s, so dass etwa 650 l/s durch den Mühlenkanal abfließen. Im Unterwasser musste außerdem ein zweiter (niedriger) Damm aus Sandsäcken errichtet werden, um den Einstau des Gleitenfußes zu verhindern. Nach etwa zweieinhalb Stunden konnte mit den Vermessungsarbeiten begonnen werden (Abb. 3.5).



Abb. 3.4 Pumpentechnik im Einsatz und Ilme unterstrom der Gleite mit Restwasser. a) Pumpentechnik zwischen der Sperre und der Gleite; b) gepumptes Restwasser in der Ilme unterstrom der Gleite. (Aufnahmen: Eikenberg)



Abb. 3.5 Trockengelegte Sohlgleite (Aufnahmen: Eikenberg)

Für die Detailvermessung der Gleite kamen drei verschiedene Messverfahren zum Einsatz, um eine Punktwolke für die weitere Verarbeitung zu generieren bzw. diese zu georeferenzieren. Zunächst wurden 16 Markerpunkte gleichmäßig auf der gesamten Sohlgleite verteilt, deren Koordinaten mittels differentiellem GNSS (Global Navigation Satellite System) eingemessen wurden. Hierfür kam ein Viva-GS15-Empfänger der mit passendem Viva-CS10-Feld-

Controller der Firma Leica zu Einsatz. Die Marker waren auf quadratische Kunststoffplatten (12 x 12 cm) aufgeklebt und jeweils mit einem individuellen 12bit-Code versehen (Abb. 3.6a). Zur temporären Befestigung der Platten auf den Steinblöcken diente handelsüblicher Fensterkitt. Die Marker dienten primär als Referenzen für die weiter unten beschriebenen photogrammetrischen Vermessungsarbeiten, waren aber ebenso für die Referenzierung der mittels Laserscan erstellten Punktwolke nützlich. Zusätzlich wurden fünf Fixpunkte für die späteren Feldmessungen mit einem Winkelschleifer auf der Gleite verteilt und eingemessen (Abb. 3.6b).

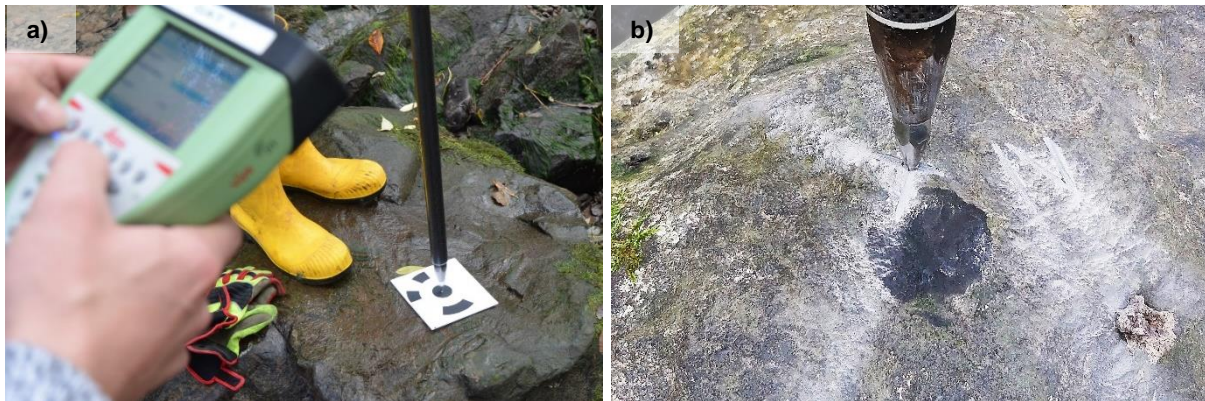


Abb. 3.6 Einmessen der Marker (a) und der Fixpunkte (b). (Aufnahmen: Eikenberg)

Der Laserscan wurde von einem Mitarbeiter des Instituts für Geoökologie (IGÖ) der TU Braunschweig durchgeführt, da das LWI nicht über solch ein Gerät verfügt. Hierbei kam ein terrestrischer Laserscanner des Herstellers RIEGL (Modell VZ-400i) mit einem Sichtfeld von $100^\circ \times 360^\circ$ (vertikal x horizontal) zum Einsatz. Das Gerät wurde an 14 verschiedenen Positionen auf der Gleite positioniert, um eine möglichst geringe Verschattung der Punktwolke zu vermeiden, und die Laserpulsrepetitionsrate betrug 1,2 MHz. Auf dem Scanner war zusätzlich eine DSLR-Kamera montiert, um durch ergänzende Fotoaufnahmen der späteren Punktwolke RGB-Farbwerte zuordnen zu können.

Bei der Structure-from-Motion-Photogrammetrie (SfM, hier als Synonym für den gesamten Workflow verwendet) wird vom abzubildenden Objekt durch eine Reihe sich überlappender Fotoaufnahmen aus allen möglichen Blickwinkeln und einen Merkmalsabgleich zunächst eine dünne unskalierte Punktwolke in einem relativen Koordinatensystem erstellt. Durch die Verwendung von Marker- bzw. Kontrollpunkten, deren absolute Lage bekannt ist, erfolgt anschließend eine Skalierung und Georeferenzierung. Die Dichte der Punktwolke ist nach Abschluss des Workflows deutlich größer. In diesem Fall wurden von den anwesenden Mitarbeitern bzw. Studierenden des LWI insgesamt vier Foto-Datensätze mit verschiedenen digitalen Spiegelreflexkameras erstellt, um einerseits die Güte der Daten sicherzustellen und andererseits Erfahrungen bei der Verwendung unterschiedlicher Aufnahmegерäte zu sammeln.

Die Vermessungsarbeiten konnten nach drei Stunden abgeschlossen werden. Anschließend wurden die Pumpen abgeschaltet bzw. aus der Ilme entfernt und die Bigbag-Sperre sukzessive geöffnet, bis sich die Ausgangssituation hinsichtlich der Wasseraufteilung zwischen Ilme

und Mühlenkanal wieder eingestellt hatte. Die gesamte Aktion verlief ohne Probleme und zur vollen Zufriedenheit aller Beteiligten, was insbesondere der hohen Professionalität der Anwesenden geschuldet war. Es sei angemerkt, dass vom Fischereiberechtigten einige Wochen später drei Laichgruben (vermutlich von Bachforellen) auf dem vom Bagger frisch aufgelockerten Kies festgestellt wurden (Abb. 3.7).



Abb. 3.7 Laichgruben von Bachforellen im Oberwasser der Gleite (Dezember 2020, Aufnahme: Eikenberg)

3.2.2 Erstellung des digitalen Höhenmodells

Die Erstellung der Punktwolke aus den Daten des Laserscans wurde freundlicherweise von einem Mitarbeiter des IGÖ übernommen und dem Projektbearbeiter anschließend übermittelt. Diese Punktwolke war deutlich dichter als die aus der SfM, wies allerdings im Bereich der Sickerwasser-Rinnsale, bei den verbliebenen unvermeidbaren Wasserflächen sowie in einigen verschatteten Bereichen deutliche Fehlstellen (Abb. 3.8a) auf. Nach der Bereinigung (Entfernen der Randbereiche) bestand diese Punktwolke noch aus ca. 190 Mio. Punkte.

Nach Sichtung der vier aufgenommenen Fotoreihen und dem Aussortieren von nicht verwendbaren Aufnahmen konnten die Datensätze mit der Software Agisoft Metashape Professional (Version 1.6.5.11249) weiterverarbeitet bzw. die Punktwolken aus den Fotografien erstellt werden. Die generierten Punktwolken wurden mit Hilfe der Software CloudCompare (Version 2.11.3) beschnitten, gefiltert und anschließend auf Ihre Qualität (Punktdichte, Fehlstellen, Rauschen) überprüft (Abb. 3.8b bis Abb. 3.8d). Auf die detaillierte Beschreibung des Workflows wird hier verzichtet und stattdessen auf Eikenberg (2023) verwiesen.

Die qualitativ beste Punktwolke (ca. 69 Mio. Punkte) wurde schließlich für die Weiterverarbeitung ausgewählt. Leider war diese selbst nach der Bereinigung in vielen Bereichen, sowohl auf und zwischen den Steinblöcken als auch im Bereich der z.T. kiesbedeckten Sohle veräusert so dass sie nicht für die Erstellung des gesamten DHM in der gewünschten Detailgüte verwendet werden konnte. Allerdings konnte dieser Nachteil durch die Kombination der Punktwolken des Laserscans und SfM kompensiert werden.

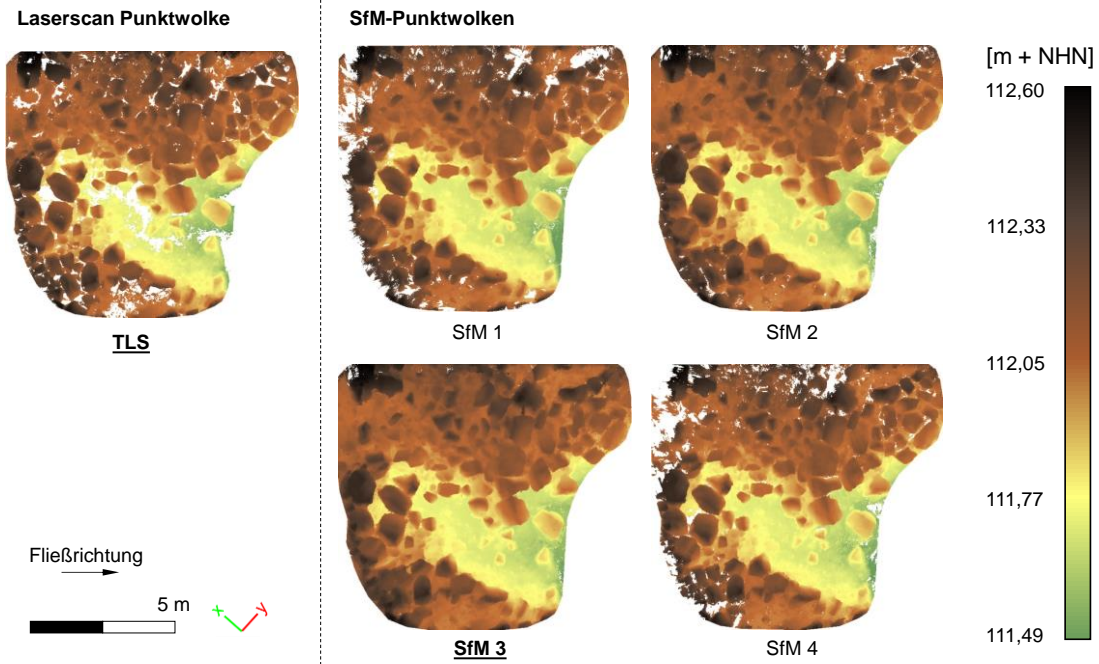


Abb. 3.8 Vergleich der erstellten Punktwolken. a) Laserscan, b) bis d) SfM, jeweils in der Draufsicht mit Angabe der geodätischen Höhe in [m+NHN]

Die Laserscan-Punktwolke diente als Basis für das digitale Höhenmodell der Sohlengleite und die genannten Fehlstellen wurden mit Informationen aus der SfM-Punktwolke gefüllt, um eine lückenlose Oberfläche zu erhalten. Die finale Punktwolke umfasst eine Fläche von ca. 90 m² bei ca. 85 Mio. Punkten. Hieraus konnte anschließend mit der Software MeshLab (Version 2020.12) ein Gitter bzw. ein digitales Höhenmodell generiert werden, das die Geometrie der Sohlengleite in einem hohem Detailgrad darstellt (Abb. 3.9). Dieses digitale Höhenmodell bildete die Grundlage für die Laborexperimente (s. Kap. 3.3.1).

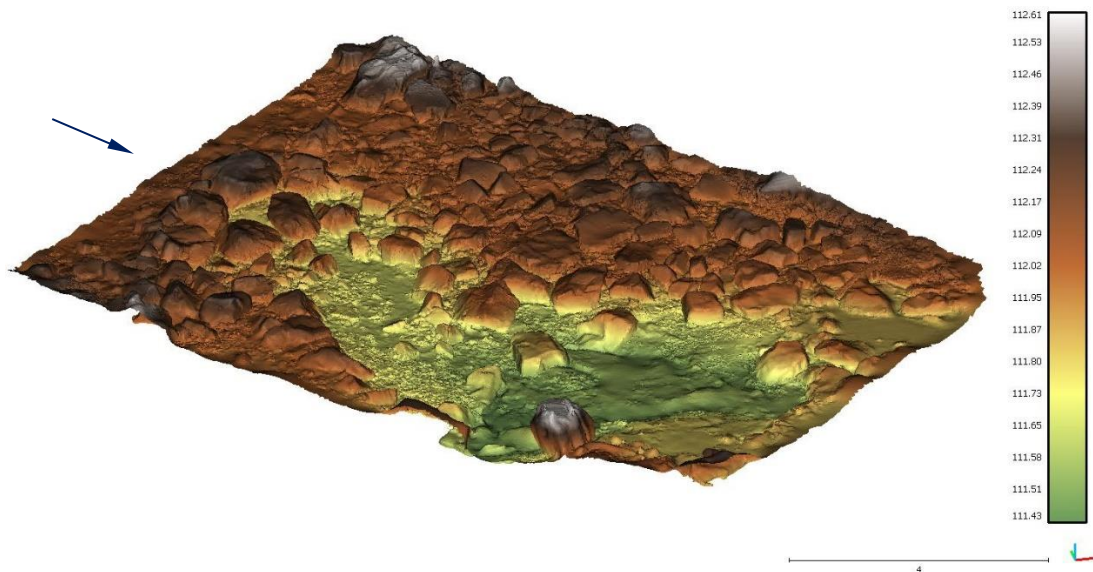


Abb. 3.9 Digitales dreidimensionales Modell der gesamten Sohlengleite. Maßstab in [m], Höhen in [m+NHN].

3.3 Grundlegendaten im Feld

Aufgrund der COVID-19-Pandemie kam es, wie bereits schon angemerkt wurde, zu Veränderungen im Zeitplan des Projekts. Um den Zeitverlust zu minimieren wurden, abweichend vom ursprünglich geplanten Ablauf, bereits zu Beginn des Projekts mit den Naturmessungen an der Sohlengleite in der Ilme begonnen, die im Folgenden beschrieben werden.

3.3.1 Wasserstands-Abfluss-Beziehung der Sohlengleite

Im Frühjahr 2021 wurden an verschiedenen Tagen im Zeitraum von Ende März bis Anfang Juni die Durchflüsse der Ilme auf der Gleite und des abzweigenden Mühlenkanals bestimmt. Zusätzlich wurden die Wasserspiegellagen an verschiedenen Querschnitten aufgenommen, um daraus die Wasserstand-Abfluss-Beziehungen (h-Q-Beziehungen) für das System Sohlengleite/Mühlenkanal zu erhalten. Abb. 3.10 zeigt die Ergebnisse, die auch zur korrekten Einstellung der Wasserspiegellagen in den Laborexperimenten herangezogen wurden (vgl. Abschnitt 3.4.1).

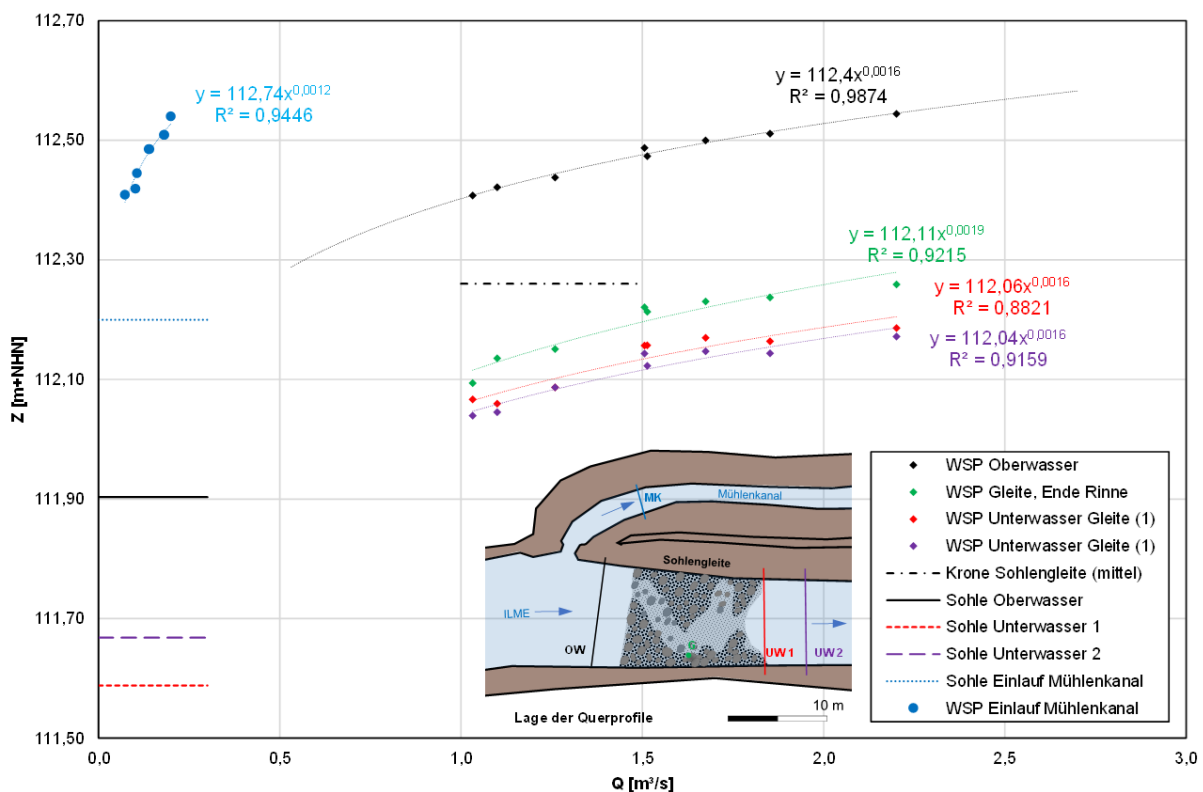


Abb. 3.10 Wasserstand-Abfluss-Beziehungen für das System Sohlengleite/Mühlenkanal

Die Durchflüsse wurden aus Geschwindigkeitsmessungen mit einem hydrometrischen Flügel (Fa. OTT) jeweils in einem Querschnitt in der Ilme zwischen Sohlengleite und Ausleitung Mühlenkanal und im Mühlenkanal selbst berechnet. Hierfür wurde zur Orientierung eine Schnur senkrecht zur Hauptströmung über das Gewässer gespannt und entlang dieser in Abständen von 1 m vertikale Geschwindigkeitsprofile und die jeweiligen Wassertiefen gemessen (Abb.

3.11). Über die bekannte Querschnittsfläche konnte der Durchfluss berechnet werden. Die Höhen der Fixpunkte, die Sohlhöhen und Wasserspiegellagen wurden mit einem einfachen Nivelliergerät bestimmt.



Abb. 3.11 Geschwindigkeitsmessungen zur Erstellung einer h-Q-Beziehung für die Gleite. a) Messquerschnitt im Oberwasser der Gleite; b) hydrometrischer Flügel. (Aufnahmen: Eikenberg)

3.3.2 Erste ADV-Geschwindigkeitsmessungen

Nach Erstellung der h-Q-Beziehungen wurden detaillierte Geschwindigkeitsmessungen auf der Gleite entlang der Hauptströmungsrinne (d.h. im späteren Modellbereich) durchgeführt. Da hierfür mehrerer Messtage notwendig waren, durfte der Durchfluss nur wenig schwanken, um einen konsistenten Datensatz zu erhalten. Die Messungen fanden im Juli und August 2021 statt. Die Erstellung dieses ersten Datensatzes diente im Wesentlichen dazu, Erfahrungen zu sammeln und das verwendete Equipment für die Feldmessungen im Frühjahr 2022 zu optimieren.

Die Fließgeschwindigkeiten wurden mittels eines Acoustic-Doppler-Velocimeters (ADV) gemessen. Hierfür wurde ein mobiles Rahmengestell (Innenmaße 2,1 m x 1,0 m) aus Aluminium gebaut, welches auf vier Stahlfüßen an beliebiger Position auf der Gleite aufgestellt werden konnte (Abb. 3.12).



Abb. 3.12 Messrahmen für die ADV-Messungen im Feld (Aufnahme: Eikenberg)

Die Ausrichtung des Messrahmens erfolgte über den Bezug auf mindestens zwei der Fixpunkte auf der Gleite, die mittels eines Tachymeters aufgenommen wurden. Die ADV-Sonde wurde an einer Traversierung befestigt, die die gewünschte Einstellung in den drei Raumrichtungen ermöglicht. So konnten nach dem Aufstellen und der Ausrichtung des Rahmengestells alle Bereiche unterhalb des Rahmens mit der Sonde erreicht werden.

Das Messprinzip der verwendeten Vectrino+-Sonde (Nortek, „downlooking“ Labor- und Feldsonde, jeweils kabelgebunden) beruht auf dem Dopplerprinzip. Über die Rückstreuung akustischer Pulse mit bekannter Frequenz an den in der Strömung transportierten Partikeln und die sich daraus ergebende Phasenverschiebung werden die Geschwindigkeitskomponenten in den drei Raumrichtungen berechnet. Das Messvolumen des Vectrino+ befindet sich 5 cm (Laborsonde) bzw. 10 cm (Feldsonde) unterhalb des Sondenkopfes. Während der Messung muss die Sonde komplett eingetaucht sein, d.h. der oberflächennahe Bereich der Wassersäule kann nicht bedient werden. Die Messfrequenz betrug 50 Hz oder 100 Hz, die Messdauer 120 s.

Der Messrahmen wurde an zehn verschiedenen Positionen im späteren Modellbereich aufgestellt und an insgesamt 81 vertikalen Profilen bzw. 529 Einzelpunkten die Geschwindigkeiten gemessen. Aus der Auswertung der Geschwindigkeitsdaten konnten Rückschlüsse abgeleitet werden, wie die kommenden Messungen optimiert werden können. Hierbei kann erwähnt werden, dass die Datenqualität aufgrund der oft starken Turbulenz der Strömung in Kombination mit einem hohen Anteil an Luftblasen, der geringen Wassertiefe und deutliche Vibrationen des Messrahmens nicht immer optimal war. Diese Geschwindigkeitsdaten wurden aufgrund der nicht vergleichbaren Durchflusssituation in der Ilmen nicht weiter verwendet.

3.4 Laborexperimente

Für die Laborexperimente (Arbeitspaket 2) stellte der Projektpartner Vattenfall R&D in seinem Wasserbaulabor in Älvkarleby (Schweden) die ethohydraulische Versuchsrinne *Laxelerator* zu Verfügung (Abb. 3.13). Der Aufbau der speziell für großskalige Experimente mit Fischen konzipierten Versuchsrinne ähnelt einer Rennbahn mit zwei parallelen, jeweils 24 m langen und 4 m breiten Kompartimenten, die über zwei 180°-Kurven verbunden sind. Über die installierten Pumpen kann das Wasservolumen so bewegt (beschleunigt) werden, dass bei 2 m Abflusstiefe bis zu 16 m³/s an Durchfluss erreicht werden.

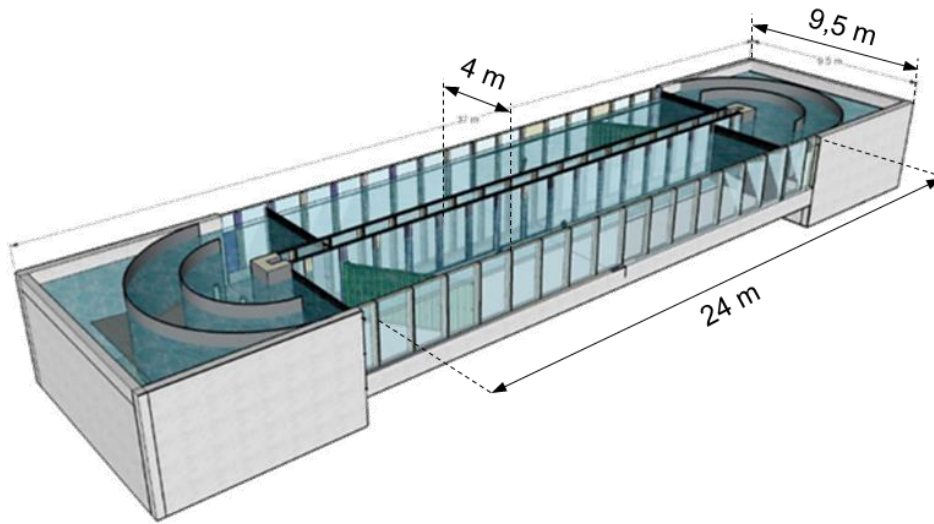


Abb. 3.13 Schemaskizze des „Laxelerators“ mit Angabe der Außenabmessungen (Bild: Vattenfall, modifiziert)

3.4.1 Aufbau des Labormodells

Herstellung der Modellgeometrie und Einbau

Aufgrund der Beschränkung des Modellbereichs auf 4 m Gesamtbreite (dies entspricht der vorgegebenen Kompartimentbreite), wurde die Sohlgleite als Teilmodell im Maßstab 1:1 konzipiert. Dieses umfasst die Rinnenstruktur inklusive der Randbereiche, die bei Niedrig- bis Mittelwasser der Ilme den Großteil des Durchflusses aufnimmt. Der Zuschnitt wurde auf Grundlage der aus der Vermessung bekannten Geometrie, ergänzt durch eine Drohnenaufnahme des Strömungsbildes, definiert (siehe Abb. 3.14). Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurde der Modellbereich im Maßstab 1:7 in einer hydraulischen Rinne des LWI mit Naturstein von Hand nachgebaut, so dass das Strömungsbild im Modellbereich untersucht und mit dem der realen Gleite verglichen werden konnte. Somit konnte sichergestellt werden, dass für den Fischeaufstieg interessante Bereiche später im großskaligen Modell korrekt dargestellt wurden. Auch wurde die Ausrichtung des Modellbereichs entgegen der ursprünglich geplanten Variante leicht gedreht, um die Abbildung der Randbereiche zu optimieren.

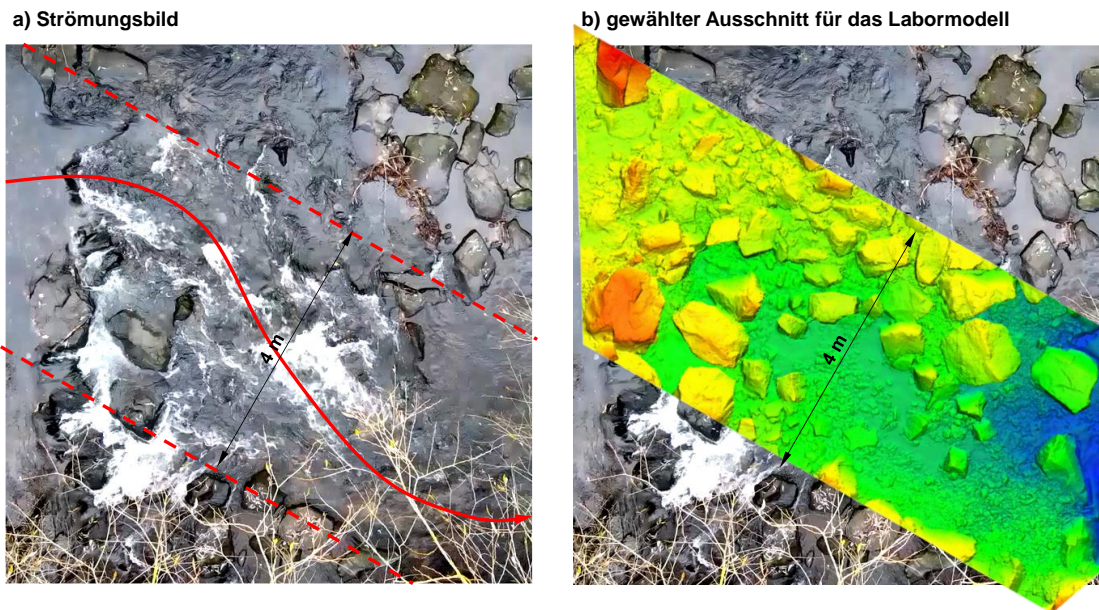


Abb. 3.14 Abgrenzung des Modellbereichs. a) Strömungsbild auf der Gleite bei Niedrigwasser mit Hauptströmungspfad (rote Linie), b) gewählter Ausschnitt des DHM für das Labormodell. (Foto: Eikenberg)

Vom ursprünglichen Plan, das Modell mit natürlichen Steinblöcken und Flusskies aufzubauen wurde abgesehen, da nach ersten Erfahrungen aus der oben genannten studentischen Arbeit schnell klar war, dass dies unverhältnismäßig aufwendig und teuer werden könnte. In Absprache und mit Unterstützung des Projektpartners Vattenfall wurde deshalb das Sohlengleitmodell mittels CNC-Frästechnik von einer externen Spezialfirma (Broby modellindustri AB) aus besonders festem Styropor (Materialdichte 400 kg/m^3) gefertigt und an Vattenfall geliefert (Abb. 3.15). Als Grundlage für den Fräsvorgang diente die zuvor genannte digitale Modellgeometrie und das Modell wurde in Form von Einzelelementen (Abmessungen ca. $1,15 \times 3,94 \text{ m}$) hergestellt.

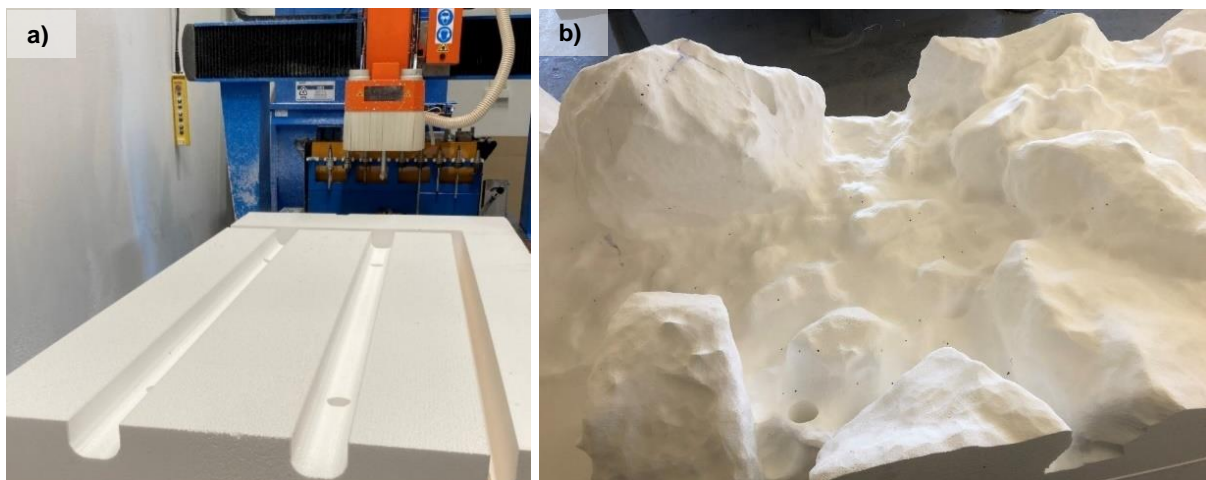


Abb. 3.15 a) Fräsprozess zur Herstellung der einzelnen Modellblöcke; b) fertiggestellter Modellblock, ohne Beschichtung. (Aufnahmen: Vattenfall)

Für die ethohydraulischen Experimente wurde einer der beiden Abschnitte des *Laxelerators* so abgetrennt, dass er als hydraulische Rinne genutzt werden konnte. Der Einbau der Modellgeometrie erfolgte auf einem doppelten Boden aus Stahlblech, der im Betonboden befestigt war (Abb. 3.16a). Hierauf wurden die Einzelelemente aufgeklebt und zusätzlich über vertikale Anker in allen vier Ecken mit der Unterkonstruktion verbunden. Die Lücken zwischen den Blöcken und der Rinnenwand wurden mit einem Fixier- und Dichtmittel gefüllt. Ursprünglich war eine dunkle Farbgebung für das Modell vorgesehen (Abb. 3.16b).



Abb. 3.16 a) Einbau der Unterkonstruktion; b) Einbau der einzelnen Modellblöcke. (Aufnahmen: Vattenfall)

Es stellte sich jedoch bei einem ersten Test mit Wasser heraus, dass der gesamte Modellkörper trotz aller Sicherheitsmaßnahmen nicht vollständig gegen Auftrieb gesichert war, da sich einer der Blöcke um einige Zentimeter hob. Daraufhin wurde entschieden, das gesamte Modell mit einem wasserdichten Membran- und Folienkleber (Webertec) zu versehen und die Unterkonstruktion durch ein Drainagesystem zu lenzen. Diese Beschichtung musste umweltverträglich sein, so dass die Fischtests ohne Bedenken durchgeführt werden konnten. Leider war das verwendete Material nur in einem Weißton erhältlich, was die endgültige Farbe des Modells erklärt. Der finale Versuchsaufbau ist in Abb. 3.17 dargestellt.

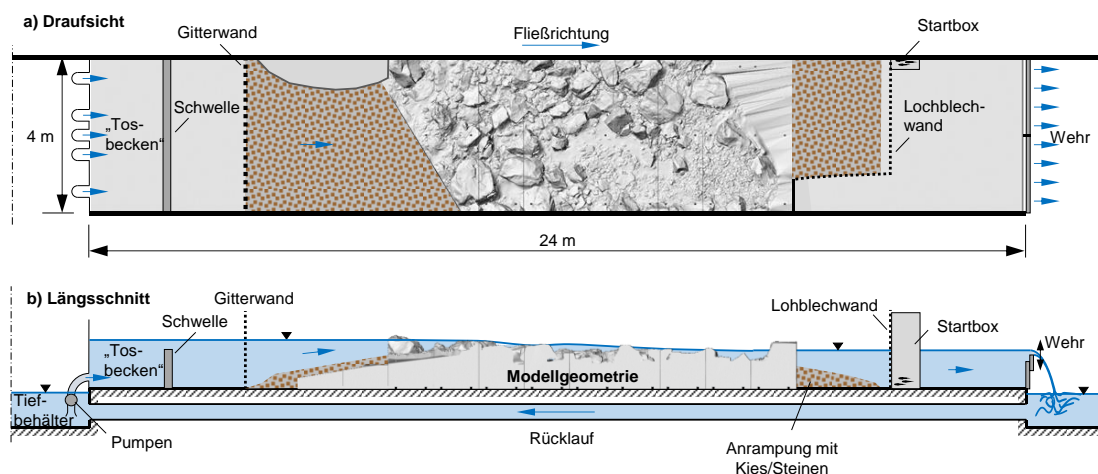


Abb. 3.17 Draufsicht und Längsschnitt des Versuchsaufbaus im Laxelerator (nicht maßstäblich)

Die Kosten für die Herstellung des Modells bzw. das Fräsen übertrafen die ursprünglich dafür angesetzte Summe, aber der Kostenüberhang wurde freundlicherweise von Vattenfall übernommen. Um die geplanten Durchflüsse von bis zu 1.300 l/s sicherzustellen, wurde von Vattenfall außerdem eine weitere Pumpe angeschafft.

Die Wasserversorgung erfolgte über die zwei Tiefbehälter des *Laxelators*, die über Rohrleitungen unter den Versuchsstrecken verbunden sind (vgl. Abb. 3.17). Die Gesamtförderleistung der angeschlossenen drei Pumpen betrug abhängig vom Wasserstand im Tiefbehälter bzw. der Förderhöhe ca. 1.400 l/s. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten des Wassers bei Verlassen der Rohrmündungen in die Rinne musste eine senkrechte, ca. 1 m hohe Stoßschwelle eingebaut werden (Abb. 3.18a). Darauf folgte eine 2 m hohe durchlässige Gitterwand, die zusätzlich mit einer feinen Gaze bespannt war, um später die Fische daran zu hindern, in den Einlaufbereich der Rinne zu gelangen (Abb. 3.18b).



Abb. 3.18 a) Stoßschwelle im Einlaufbereich der Rinne; b) Gitterwand als obere Begrenzung der Modell- bzw. Versuchsstrecke. (Aufnahmen: Eikenberg)

Über eine geneigte Schüttung aus Kies und gebrochenem Steinmaterial erfolgte sowohl im Ober- wie auch im Unterwasser der Anschluss an die Modellgeometrie (Abb. 3.19).



Abb. 3.19 Anrampungen vom Rinnenboden zur Modelloberfläche im (a) Ober- und (b) Unterwasser. (Aufnahmen: Eikenberg)

Im Unterwasser war ebenfalls eine ca. 2 m hohe senkrechte Trennwand eingebaut, die mit einem Stahl-Lochblech versehen war. Aus dieser Trennwand heraus mündete die Öffnungsklappe der Startbox (Abb. 3.20) für die Fischtests. Unterstrom der Trennwand regulierte eine Staubalkenkonstruktion mit mobilem Überfallwehr den Unterwasserstand.



Abb. 3.20 Startbox (Aufnahmen: Eikenberg)

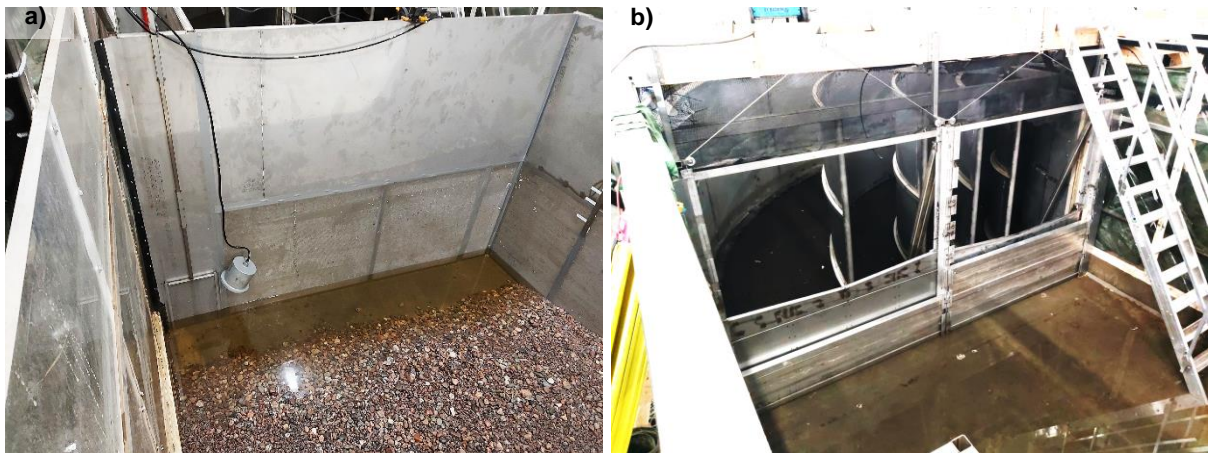


Abb. 3.21 a) Trennwand im Unterwasser; b) Überfallwehr am Ende der Rinne. (Aufnahmen: Eikenberg)

Das Wasser stammte aus dem benachbarten Fluss Dalälven und konnte bei Bedarf vor und auch während der Versuche gefiltert werden. Das System beinhaltete ebenso eine Kühlvorrichtung, um die Wassertemperatur während der ethohydraulischen Versuche konstant zu halten. Abb. 3.22 zeigt das fertiggestellte Modell im Betrieb.



Abb. 3.22 Das fertiggestellte Modell der Sohlengleite im Testbetrieb (Aufnahme: Eikenberg)

Vor dem Beginn der Laborexperimente wurde die Genauigkeit der Modellgeometrie überprüft. Hierzu ist das Modell mittels eines Laserscans vermessen und die erhaltene Punktwolke anschließend mit dem zu Grunde liegenden DHM verglichen worden (Abb. 3.23). Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Tab. 3.3 zusammengestellt und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, da lediglich Abweichungen im Millimeterbereich vorlagen.

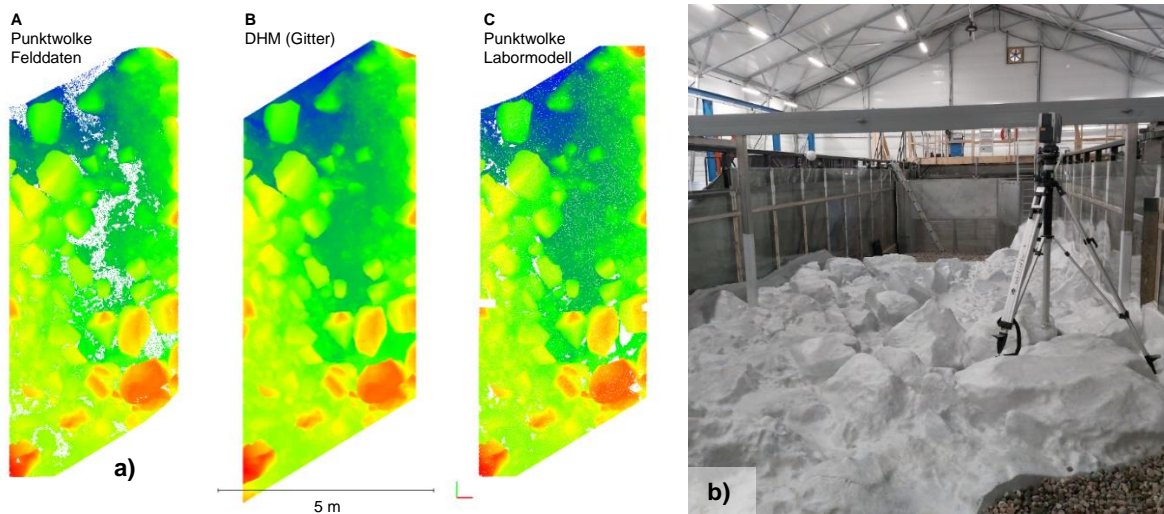






Abb. 3.23 a) Visueller Vergleich der drei Datensätze. b) Laserscan des Labormodells (Foto: Eikenberg)

Tab. 3.3 Ergebnis der Genauigkeitsuntersuchung. A – Punktwolke Felddaten, B – DHM, C – Punktwolke Labormodell. „ref“ kennzeichnet jeweils den Referenzdatensatz für den Vergleich

	mittlere Differenz [mm]	Standardabweichung [mm]
A _{ref-B}	-1.1	6.2
A _{ref-C}	5.3	7.0
B _{ref-C}	-0.4	5.5

Für die Fischbeobachtungen während der ethohydraulischen Tests wurde das Modell mit einem umfangreichen Kamerasystem ausgestattet, das aus den in Tab. 3.4 aufgelisteten Komponenten bestand. Insgesamt wurden bis zu 31 Kameras zur Beobachtung der Fische eingesetzt. Die Positionen der einzelnen Kameras sind in Abb. 3.24 dargestellt. Die Steuerung erfolgte über eine Controller-Station (Hikvision-Modelle) sowie über zwei Desktop-PCs (Endoskopkameras).

Tab. 3.4 Übersicht der eingesetzten Kameratypen (Fotos: Eikenberg)

Bezeichnung	Typ	Anzahl	Positionen	Foto
R1, R1	Hikvision Netzwerkkamera (Pro Serie)	2	Blick senkrecht von oben	
U1 – U3	Hikvision Unterwasserkamera (kabelgebunden)	3	am Beginn und am Ende des Modells	
C1 – C8	Hikvision PTZ-Netzwerkkamera (EasyIP)	8	im Unterwasserbereich und im Modellbereich Blick jeweils von außen durch die Rinnenwand	
E01 – E21	Endoskopkameras (Kabellänge 5 m)	21	Auf der Modellgeometrie befestigt im Modell verteilt	

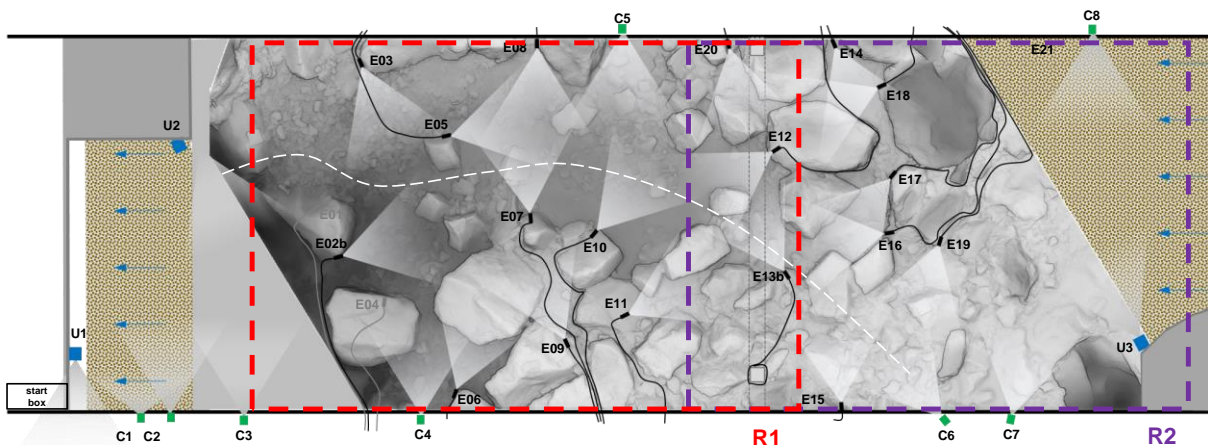


Abb. 3.24 Übersicht der installierten Kameras und ungefähre Blickrichtungen (Kegel) bzw. abgedeckte Bereiche (farbige gestrichelte Rahmen)

Für die Laborexperimente waren drei unterschiedliche hydraulische Situationen vorgesehen, die sich am Niedrig- bis Mittelwasserdurchfluss der Ilme orientieren (vgl. Abschnitt 3.3.1). Ausgehend von drei Durchflüssen bzw. sich daraus ergebenden Wasserspiegellagen in der Natur wurden diese Wasserspiegellagen im Oberwasser des Modells durch Regelung der installierten Pumpenfördermenge eingestellt. Die korrespondierenden Wasserstände im Unterwasser wurden durch das mobile Überfallwehr am Ende der Rinne eingestellt. Die Wasserspiegellagen wurden über Höhenmarkierungen an der Rinnenwand kontrolliert.

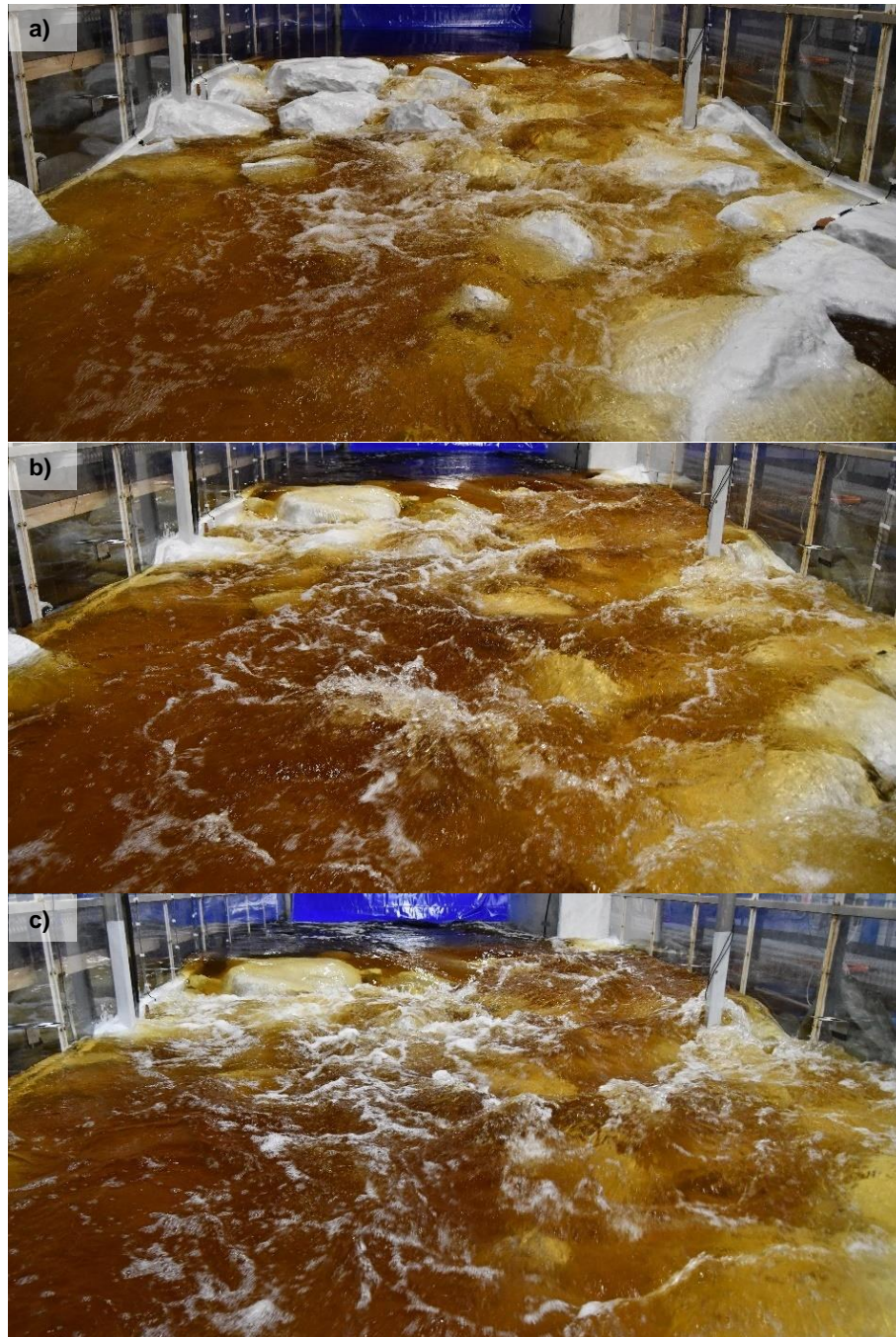


Abb. 3.25 Situationsaufnahmen der drei Modelldurchflüsse. a) $Q_1 = 372$ l/s; b) $Q_2 = 844$ l/s; c) $Q_3 = 1200$ l/s. (Aufnahmen: Eikenberg)

Eine direkte Messung des Modelldurchflusses war leider nicht möglich, da die Steuereinheiten der Pumpen lediglich die Umdrehungsgeschwindigkeiten der Laufräder angegeben haben. Daher wurden die drei Durchflüsse über Geschwindigkeitsmessungen im schmalsten Querschnitt im Oberwasser des Modells ermittelt. Die Modellabflüsse ergaben sich daraus zu $Q_1 = 372 \text{ l/s}$, $Q_2 = 844 \text{ l/s}$ und $Q_3 = 1200 \text{ l/s}$ (Abb. 3.25).

3.4.2 Fischbeobachtungen im Labor

Vorbereitungen

Die Fischtests sowie der Umgang mit den verwendeten Fischen wurden mit Unterstützung von Dr. David Aldvén durchgeführt. Herr Aldvén ist Fischbiologe und bei Vattenfall hauptverantwortlicher Mitarbeiter für den Betrieb des *Laxelators*.

Die Fischtests wurden den vier Arten Forelle (*Salmo trutta*), Äsche (*Thymallus thymallus*), Groppe (*Cottus gobio*) und Flussbarsch (*Perca fluviatilis*) durchgeführt. Entgegen der Beschreibung im Projektantrag musste aus verschiedenen Gründen leider auf den Einsatz von Elritzen (*Phoxinus sp.*) und Aalen (*Anguilla anguilla*) verzichtet werden.

Die Forellen (Abb. 3.26a) stammten aus der in Älvkarleby ansässigen Fischzucht der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften (SLU). Die Tiere sind für das seit vielen Jahren laufende Programm zur Bestandsstützung der lokalen Forellenbestände vorgesehen. Es wurden zwei Altersklassen (0+ und 1+) in den Versuchen verwendet. Die Forellen wurden nach den Tests im Dalälven ausgesetzt.

Die Äschen (Abb. 3.26b) stammten ebenfalls aus einem Zuchtprogramm, allerdings von einer Fischzucht nahe Bollnäs, ca. 150 km nördlich von Älvkarleby (Bröderna Olssons Fiskodling, Lottefors). Dies war die nahe gelegenste Möglichkeit, Äschen in ausreichender Anzahl zu beschaffen. Die Tiere wurden kurz vor Beginn der Tests vor Ort abgeholt und nach Älvkarleby gebracht. Leider haben die meisten Äschen die ersten Tage nach dem Transport nicht überstanden. Da die Fische ein ungewöhnliches Schwimmverhalten zeigten und zum Teil orientierungslos wirkten, könnte eine Schädigung des Nervensystems vorgelegen haben. In Kombination mit dem Stress führte dies bei den meisten Tieren nach wenigen Tagen zum Tod. Die Äschen mit unauffälligem Verhalten wurden separiert und für die Experimente verwendet.

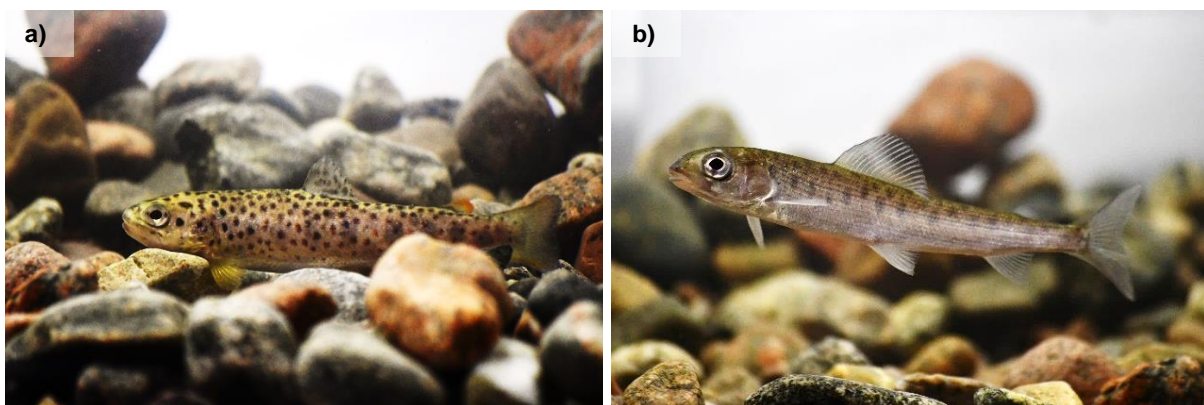


Abb. 3.26 a) Forelle (Altersklasse 0+); b) Äsche. (Aufnahmen: Eikenberg)

Als dritte Fischart kamen Gropen zum Einsatz, die aus dem Dalälven stammten (Abb. 3.27a). Die Tiere wurden mittels Elektrofischerei an verschiedenen naturnahen Teilstrecken des Flusses von Mitarbeitern des SLU (z.T. im Rahmen eines Elektrofischerei-Lehrgangs) gefangen und nach den Laborexperimenten dort wieder ausgesetzt.

Die Flussbarsche (Abb. 3.27b) stammten aus Wildfängen mittels Reusen aus dem Dalälven und wurden zunächst für eine Versuchsreihe des SLU im Modell eines technischen Fischpasses im Nachbarkompartiment des *Laxelators* eingesetzt. Nach einer Ruhephase von mehr als einer Woche wurden sie dann in den MigRamp-Experimenten verwendet und anschließend wieder im Dalälven ausgesetzt.



Abb. 3.27 a) Groppe; b) Flussbarsch. (Aufnahmen: Eikenberg)

In Tab. 3.5 sind die Körperlängen der verwendeten Fische, jeweils aus Stichproben berechnet, aufgeführt.

Tab. 3.5 Körperlängen der verwendeten Fische, Angaben in [mm]

Fischart	Minimum	Mittelwert	Maximum	Standardabweichung	Größe der Stichprobe
Forelle 0+	68	101,2	128	11,8	45
Forelle 1+	214	216,8	267	16,4	11
Äsche	72	93,6	116	13,0	43
Groppe	53	82,2	114	14,4	44
Flussbarsch	85	119,7	173	24,9	45

Die Tiere wurden während der Versuchszeit in eigens dafür aufgestellten Becken (Fassungsvermögen 800 l), die auf vier verschiedene Kreisläufe aufgeteilt waren, gehalten (Abb. 3.28). So sollte vermieden werden, dass es ggf. zu einem Totalverlust aller Tiere kommt. Das verwendete Wasser stammte aus dem Dalälven, wurde gefiltert und konnte bei Bedarf ebenfalls gekühlt werden. Der Boden der Tanks wurde mit Kies bedeckt und jeweils einige Strukturelemente eingesetzt. Eine Gitterabdeckung verhinderte ein Herausspringen der Fische.

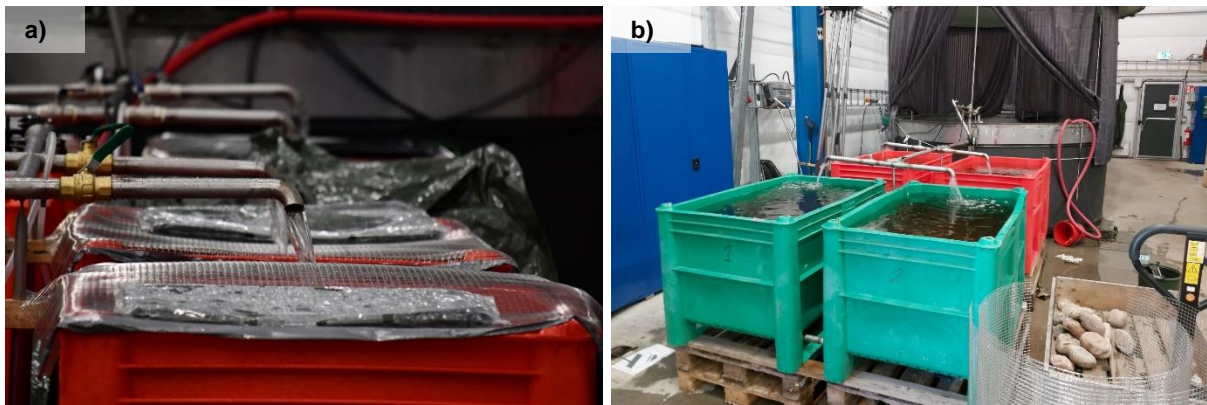


Abb. 3.28 Hältertanks im Vattenfall-Labor

Die Tanks wurden mehrmals täglich kontrolliert sowie Wassertemperatur und Sauerstoffgehalt geprüft und die Fische mit Krill bzw. Trockenfutter (Forellen) gefüttert.

Versuchsplan / Übersicht

Ziel der Versuche mit Fischen war es, die Bewegungen der Fische im Modell über die installierte Kamertechnik bei verschiedenen hydraulischen Bedingungen aufzunehmen. Der Ablauf eines Tests bestand grundsätzlich aus den folgenden Schritten:

1. Einstellung des Modelldurchflusses und Kontrolle über die Wasserstandsmarken, ggf. mit Fotoaufnahme
2. Entnahme der vorgesehenen Fische für den Test und Zwischenhälterung in mit Folie bedeckten Eimern
3. Starten der Aufzeichnung aller Kameras
4. Erneute Kontrolle des Durchflusses bzw. der Wasserstände im Modell und ggf. Korrektur der Pumpenleistung
5. Einsetzen der Fische in die geschlossene Startbox bzw. in das Unterwasser des Modells
6. Öffnen der Startbox nach 10 Minuten
7. Führung eines Protokolls bei Anwesenheit im Labor (kein Protokoll bzw. unvollständig bei den Tests über Nacht).
8. Abschalten der Pumpen nach Ablauf der Versuchszeit
9. Einfangen und Zählen der Fische im Unter- und Oberwasser
10. Messen der Fische (unter Betäubung)
11. Zurücksetzen der Fische in die Hälterbecken / Vorbereiten für Aussetzen im Dalälven

Zwischen dem 04.10.2021 und dem 29.10.2021 wurden insgesamt 31 ethohydraulische Tests mit verschiedenen Randbedingungen (Anzahl Fischarten, Individuenzahl und Dauer) durchgeführt.

Die Tests lassen sich grob in zwei Einheiten unterteilen:

(1) Mehrarten-Tests (#01 - #15)

In diesen Tests wurden von jeder Fischart jeweils drei Individuen pro Einzeltest verwendet, d.h. jeder Einzeltest wurde mit insgesamt 12 Tieren durchgeführt. Die Einzeltests dauerten jeweils drei Stunden, so dass pro Arbeitstag zwei Tests durchgeführt werden konnten. Pro Durchfluss wurden fünf Wiederholungen durchgeführt, wobei die Reihenfolge zufällig gewählt wurde. Die verbliebenen Äschen sowie einige der Groppen wurden in diesen Tests mehrfach verwendet, jedoch mit einem zeitlichen Abstand von mindestens einem Tag. Tab. 3.6 zeigt eine Übersicht der Mehrarten-Tests.

Tab. 3.6 Übersicht der durchgeführten Mehrarten-Tests und Anzahl der jeweils im Oberwasser gefangenen Fische

Test Nr.	Datum	Setting*	Q	Dauer [h]	Anzahl Aufsteiger			
					Tr	Gr	Bu	Pe
01	04.10.2021	MS-L1	Q1	03:00	0	0	0	0
02	04.10.2021	MS-M1	Q2	03:00	0	0	0	0
03	05.10.2021	MS-M2	Q2	03:00	0	0	0	1
04	05.10.2021	MS-L2	Q1	03:00	0	0	0	0
05	06.10.2021	MS-H1	Q3	03:00	0	0	0	1
06	06.10.2021	MS-L3	Q1	03:00	1	0	0	0
07	07.10.2021	MS-L4	Q1	03:00	0	0	0	0
08	07.10.2021	MS-M3	Q2	03:00	0	0	0	0
09	08.10.2021	MS-H2	Q3	03:00	0	0	0	0
10	08.10.2021	MS-H3	Q3	03:00	0	0	0	0
11	11.10.2021	MS-L5	Q1	03:00	0	0	0	0
12	11.10.2021	MS-H4	Q3	03:00	1	0	0	0
13	12.10.2021	MS-H5	Q3	03:00	0	0	0	0
14	12.10.2021	MS-M4	Q2	03:00	0	0	0	0
15	13.10.2021	MS-M5	Q2	03:00	0	0	0	0

* **MS** – multi-species; **L, M, H** – low, medium, high (flow); **Tr** – trout; **Gr** – grayling; **Bu** – bullhead; **Pe** – perch

Insgesamt vier Fische (zwei Forellen, zwei Flussbarsche) erreichten während dieser ersten Testeinheit das Oberwasser des Modells. Die Groppen hielten sich nach Verlassen der Startbox mehrheitlich auf der Anrampung unterstrom des Modellbereichs auf und verließen diesen bis auf wenige Ausnahmen nicht. Alle anderen Arten waren dagegen innerhalb des Modells sehr aktiv, schwammen aber meist nicht bis in das Oberwasser.

(2) Einzelarten-Tests (#16 -#31)

Aufgrund der geringen Anzahl an Fischen, die in der ersten Testeinheit das Oberwasser des Modells erreicht haben, wurde für die zweite Testeinheit, in der jeweils nur eine Art zum Einsatz kam, entschieden, die Testdauer ab Test Nr. 19 deutlich zu steigern. Ebenso wurde die Anzahl

an Individuen erhöht, um so die Wahrscheinlichkeit für möglichst viele erfolgreiche Aufstiege zu erhöhen. Zudem kam die Startbox in der zweiten Testeinheit nicht mehr zum Einsatz, da diese in der ersten Testeinheit oftmals nicht eigenständig von den Fischen verlassen wurde. Die Fische wurden stattdessen zum Start des Tests am Beginn des Modellbereichs schonend aus den Eimern ins Wasser entlassen.

Für diese Testeinheit konnten von der Fischzucht des SLU Forellen in einer zusätzlichen Größenklasse (1+) beschafft werden. Die Flussbarsche wurden aufgrund der weiten Größenspanne in zwei Gruppen von <120 mm und ≥ 120 mm eingeteilt, wobei diese in den betreffenden Tests jeweils zur Hälfte eingesetzt wurden.

Um die Groppen von den Versteckmöglichkeiten auf der unteren geschütteten Rampe fernzuhalten, wurde für die letzten drei Tests eine zaunähnliche ca. 30 cm hohe Barriere am Ende des Modells eingebaut (Abb. 3.29). Obwohl einige wenige Tiere während der Versuche die Barriere nach Unterstrom überwinden konnten, erfüllte sie ihren Zweck.



Abb. 3.29 Einbau einer Barriere für die Groppen

Die Einzelarten-Tests hatten eine Dauer von 03:00 bis 20:06 Stunden und wurden zum Teil über Nacht ausgeführt. Tab. 3.7 zeigt eine Übersicht mit der Anzahl der jeweils aufgestiegenen Individuen.

Die Anzahl aufgestiegener Fische ist mit 63 in der zweiten Testeinheit deutlich größer als in der ersten. Während von den Forellen in beiden Größenklassen und bei jedem Durchfluss jeweils mindestens fünf Fische erfolgreich aufgestiegen sind, war es bei den Flussbarschen lediglich eine größere Anzahl beim Durchfluss Q2. Bei Q1 ist kein Flussbarsch ins Oberwasser geschwommen, bei Q3 ein Fisch. Die Groppen waren innerhalb des Modells zum Teil sehr mobil, wobei allerdings nach keinem der drei Durchflüsse Groppen im Oberwasser gefunden wurden. Mit den Aufsteigern der ersten Testeinheit liegen somit insgesamt 67 Fischtrajektorien von Forellen und Flussbarschen für die weitere Auswertung vor.

Tab. 3.7 Übersicht der durchgeführten Einzelarten-Tests und Anzahl der jeweils im Oberwasser gefangenen Fische

Test Nr.	Datum	Setting*	Q	Dauer [h]	n	Anzahl Aufsteiger				
						Tr-L	Tr-S	Pe-L	Pe-S	Bu
16	18.10.2021	TrL-L1	Q1	03:00	10	0				
17	18.10.2021	TrL-M1	Q2	03:00	10	2				
18	19.10.2021	TrL-H1	Q3	03:00	10	0				
19	19./20.10.2021	TrL-M2	Q2	20:06	15	10				
20	20.10.2021	TrL-H2	Q3	07:26	15	6				
21	20./21.10.2021	TrS-L	Q1	15:12	20		11			
22	21.10.2021	PeSL-M	Q2	07:26	30			7	5	
23	21./22.10.2021	TrS-M	Q2	15:35	20		8			
24**	22.10.2021	(PeSL-M2)	Q2	07:33	30			1	0	
25	25.10.2021	PeSL-H	Q3	07:43	30			1	0	
26	25./26.10.2021	TrL-L2	Q1	15:29	15	5				
27	26.10.2021	PeSL-L	Q1	07:40	30			0	0	
28	26./27.10.2021	TrS-H	Q3	15:11	20		7			
29	27.10.2021	Bu-L	Q1	06:30	25					0
30	28.10.2021	Bu-M	Q2	06:30	25					0
31	29.10.2021	Bu-H	Q3	06:30	25					0

* **MS** – multi-species; **L,M,H** – low, medium, high (flow), **Tr** – trout; **Gr** – grayling; **Pe** – perch; **Bu** – bullhead;
S, L – small, large (fish size), **n** – Anzahl der Fische im Test

** #24 Wiederholung von #22

Ergebnisse aus den ethohydraulischen Tests

Im Rahmen der Fischbeobachten im Labor wurden insgesamt 1.350 Stunden Videomaterial in den Einzelartentests und 4,370 Stunden in den Mehrartentests aufgenommen. Da bei den Mehrartentests, wie oben beschrieben, nur wenige Fische das Oberwasser erreichten und die Kameras R1 und R2 (Aufnahme von oben) noch nicht installiert waren, wurde auf eine weitere Auswertung dieser Daten verzichtet und die Trajektorien ausschließlich aus den Einzelartentests identifiziert.

Die Auswertung der Einzelartentests erfolgte zunächst über die Identifizierung der Trajektorien in der xy-Ebene durch die Auswertung der Aufnahmen R1 und R2 (Tab. 3.7). Dies geschah in zwei Schritten, wobei zunächst wurden die Aufnahmen der Kamera R2, betrachtet und die Zeiten, zu denen die einzelnen Fische das Oberwasser erreichten, ermittelt wurden. Anschließend wurden die Schwimmpfade der aufgestiegenen Fische aus den Aufnahmen von R2 und R1 zurückverfolgt. Notiert wurden außerdem eventuelle Ruhezeiten bzw. die Positionen/Bereiche, in denen Fische längere Zeit verweilten. Einige der Trajektorien konnten aus verschiedenen Gründen (Sichtigkeit, Bildqualität und Fischgrößen) nicht bzw. nicht vollständig werden sind wurden daher nicht weiter berücksichtigt. Die Aufnahmen der Unterwasserkameras wurden insbesondere dazu genutzt, die Informationen von R1 und R2 zu überprüfen bzw. bei Unsicherheiten bezüglich der genauen Schwimmpfade konnten diese in den meisten Fällen über den Abgleich der Unterwasseraufnahmen ausgeräumt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen die ermittelten Trajektorien für die verschiedenen Tests bzw. Fischarten. In Abb. 3.30 sind die Trajektorien der Forellen (beide Altersklassen) für jeden Durchfluss dargestellt. Darin ist bereits eine generelle Verschiebung der Schwimmpfade in die Randbereiche bzw. aus der Hauptströmung heraus mit steigendem Durchfluss erkennbar.

Da die Flussbarsche mit Ausnahme eines Fisches bei Q_3 lediglich beim Durchfluss Q_2 vom Unter- ins Oberwasser geschwommen waren, beschränkt sich die Datenauswertung auf den Test Nr. #22. Die Trajektorien zeigt Abb. 3.32.

Wegen ihrer geringen Körpergröße und der hüpfenden Fortbewegung an der Modellsohle waren die Groppen nur bei Q_1 auf den Videoaufnahmen von R1 und R2 auszumachen (Abb. 3.31). Ab Q_2 ist die Wasseroberfläche so unruhig, dass die Fische nicht mehr verfolgt werden konnten.

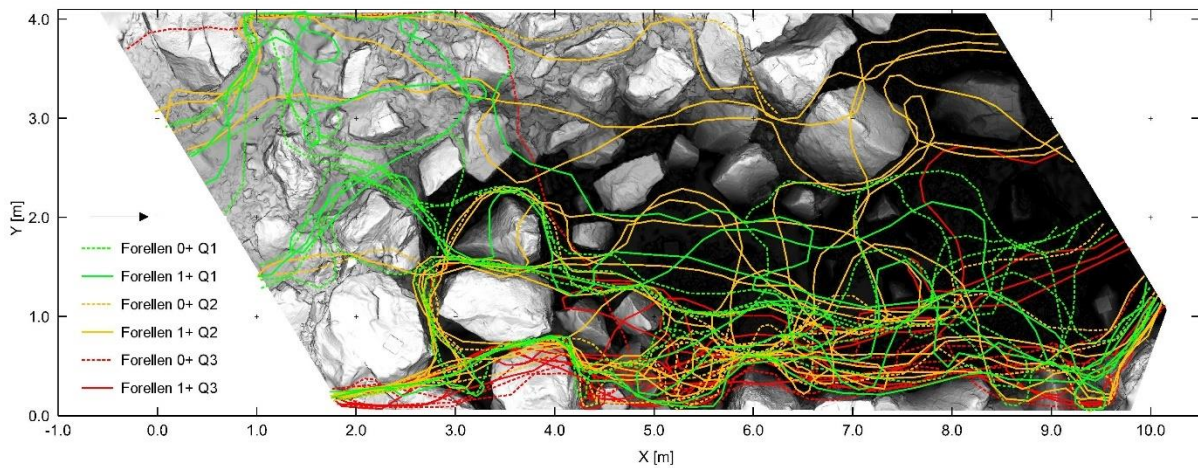


Abb. 3.30 Trajektorien der Forellen (Tests #19, #20, #21, #23, #26 und #28) aus den Laborversuchen

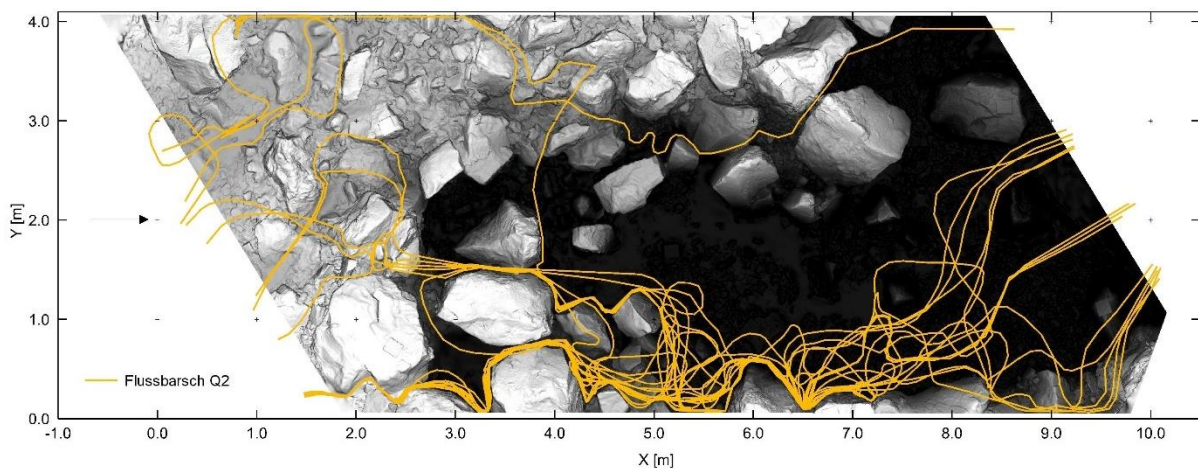


Abb. 3.31 Trajektorien der Flussbarsche (Test #22) aus den Laborversuchen

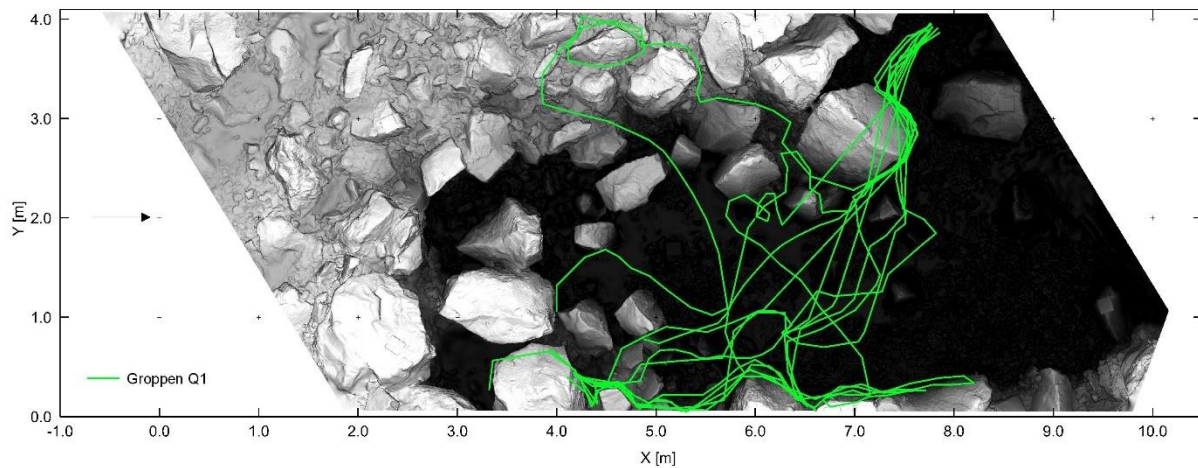


Abb. 3.32 Trajektorien der Gropfen (Test #29) aus den Laborversuchen

3.4.3 Hydraulische Messungen

Durchführung der hydraulischen Messungen

Im Anschluss an die Fischtests wurden hydraulische Messungen im Modell durchgeführt, um später die Strömungseigenschaften entlang der Fischtrajektorien beschreiben zu können. Hierbei wurden die Fließgeschwindigkeiten im Modell wie in den Naturmessungen mittels eines Acoustic-Doppler-Velocimeters (ADV) aufgenommen. Für die Vectrino-Messungen im *Laxelerator* wurde von Vattenfall eine Stahl-Rahmenkonstruktion gebaut, die über Rollen auf den Rinnenwänden manuell verschoben werden konnte. Innerhalb des Rahmens wurde eine Traversierung mit Aufhängung angebracht, so dass die Vectrino-Sonde entlang der drei Raumachsen verschoben werden konnte (Abb. 3.33a). So war es möglich, mit der Sonde jeden gewünschten Punkt unterhalb des Rahmens im Wasserkörper anzusteuern.

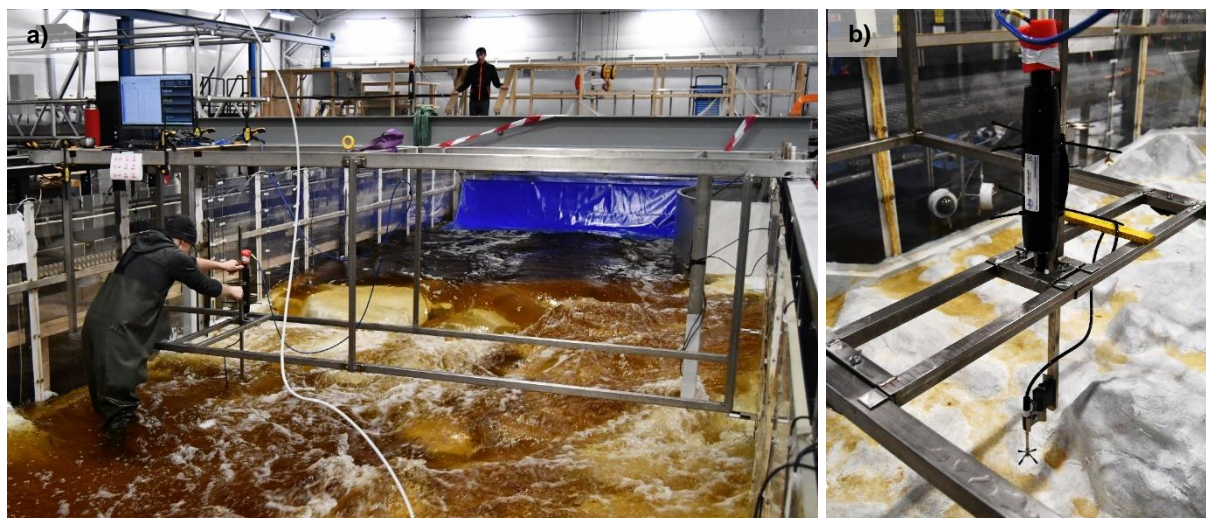


Abb. 3.33 a) Messrahmen im Einsatz (Q3), b) montierte Vectrino-Sonde. (Aufnahmen: Eikenberg)

An jeder Messposition wurden je nach Wassertiefe zwei bis sieben Punkte über die Vertikale im Abstand von 5 bis 10 cm gemessen. Außerdem wurde die Wassertiefe notiert. Die Messdauer betrug jeweils 120 s (Messfrequenz 100 Hz), um eine Konvergenz der Daten sicherzustellen. Abb. 3.34 zeigt die Verteilung der Messpunkte im Modell und Tab. 3.7 die Anzahl der durchgeführten Messungen je Durchfluss. Auf Grundlage der Beobachtungen während der ethohydraulischen Tests wurde versucht, die für den Fischaufstieg relevanten Gebiete der Gleitengeometrie bzw. der sich einstellenden Strömung zu erfassen. Diese Bereiche waren nicht bei jedem der Durchflüsse identisch, so dass für einige Messpositionen nur Daten von zwei oder einem Durchfluss vorlagen. Wie schon bei den Feldmessungen mit der ADV-Sonde, war auch im Labor die Datenqualität aufgrund der hydraulischen Randbedingungen oftmals nicht optimal.

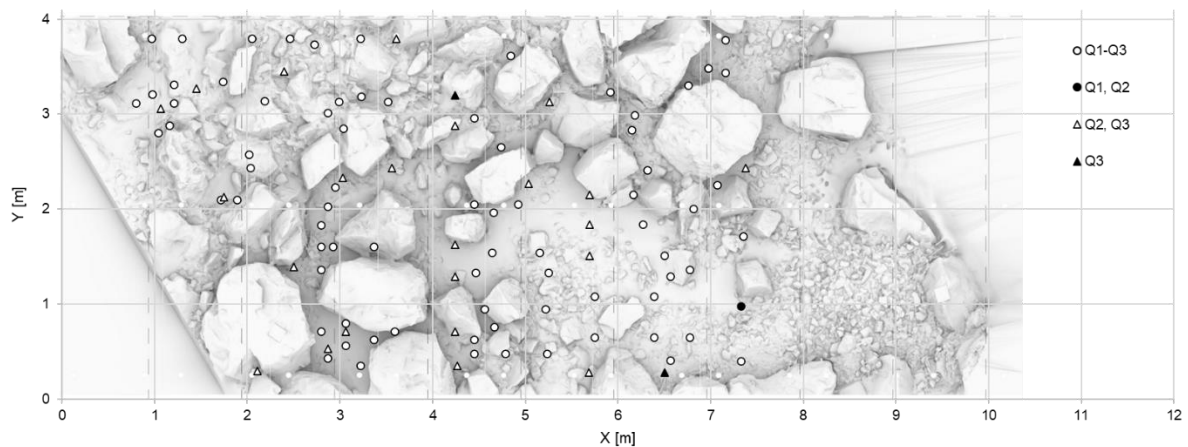


Abb. 3.34 Messpositionen der Geschwindigkeitsmessungen aus den Laboruntersuchungen

Tab. 3.8 Anzahl der durchgeführten Vectrino-Messungen

	Durchfluss im Modell [l/s]	Anzahl Messpositionen	Anzahl Messpunkte
Q1	372	79	262
Q2	844	101	334
Q3	1200	100	351

Ergänzend zu den Vectrino-Messungen wurden für jeden Durchfluss an einigen Punkten mit einem hydrometrischen Flügel (Höntzsch Flowtherm NT.2, Sonde ZS16, Sondendurchmesser 16 mm, Abb. 3.35) die Geschwindigkeiten gemessen. Das verwendete Gerät misst die Umdrehungsfrequenz des angeströmten Flügelrades und gibt direkt eine Geschwindigkeit aus. Die Sonde wurde dabei von Hand auf der Modellsohle aufgesetzt und die Propellerachse in Hauptströmungsrichtung ausgerichtet. Ausgegeben wurden jeweils über zehn Sekunden gemittelte Werte. Die Werte dienen lediglich zur Kontrolle der Größenordnung der Geschwindigkeiten.



Abb. 3.35 Hydrometrischer Flügel. a) Hötzsch Flowtherm NT.2 Handgerät sowie Sonde mit Anschlusskabel; b) Sondenkopf mit Propeller. (Aufnahmen: Eikenberg)

Um Informationen über das Strömungsfeld an der Oberfläche zu erhalten, wurden bei jedem Durchfluss Videoaufnahmen mit einer Drohne (DJI Mavic Air 2) gemacht. Die Drohne wurde dafür jeweils senkrecht über der oberen und der unteren Hälfte des Modells positioniert. Während der Aufnahmen wurden Schwimmpartikel (Abb. 3.36a) zugegeben, um die softwarebasierte Auswertung mit PIVlab (Thielicke & Stammhuis, 2014; Thielicke & Sonntag, 2021) bzw. die Ermittlung der Geschwindigkeitsvektoren zu erleichtern.

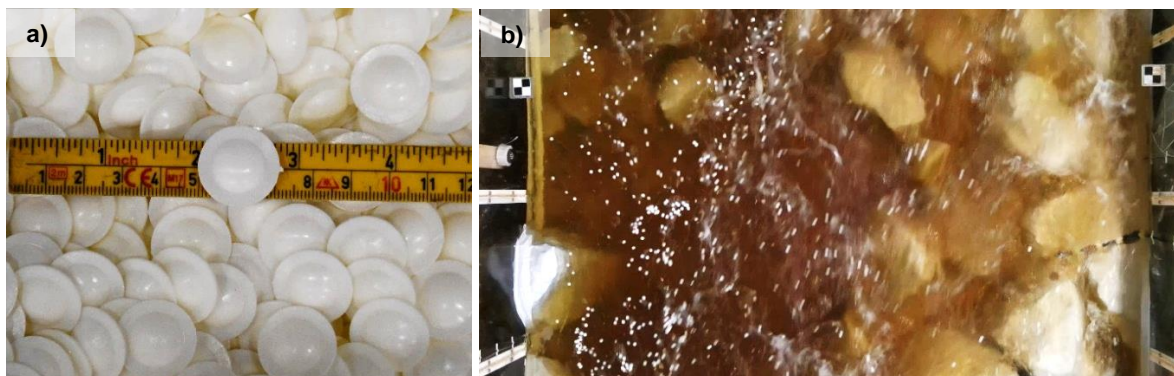


Abb. 3.36 a) Schwimmpartikel; b) Einzelframe um unteren Bereich des Modells (Q2). (Aufnahmen: Eikenberg)

Ergebnisse

An den Positionen der ADV-Messungen wurden die Wassertiefen aufgenommen, so dass über eine Interpolation und den Vergleich mit der Sohlenlage eine flächige Verteilung der Wassertiefen für jeden Durchfluss erstellt werden konnte (Abb. 3.37).

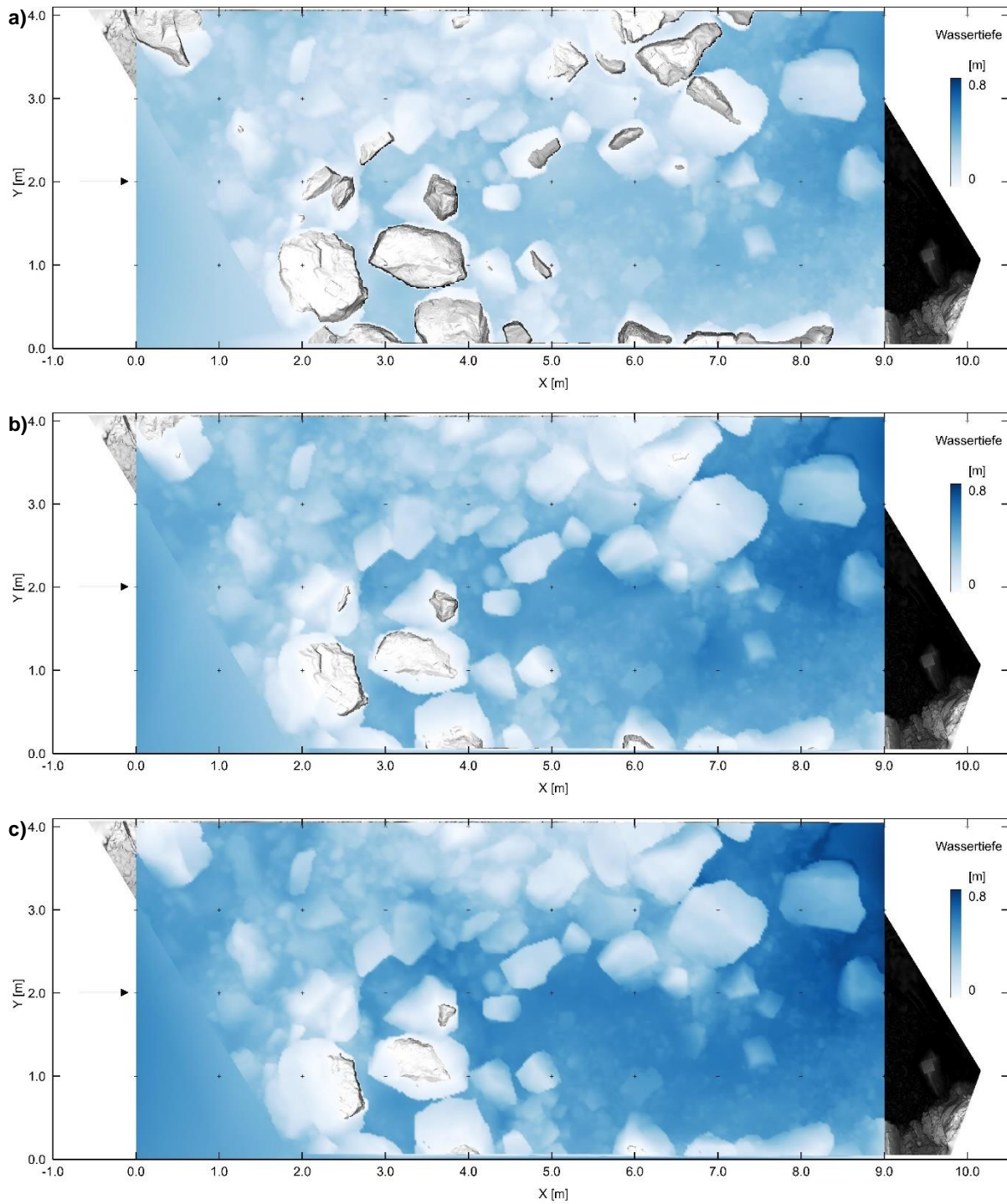


Abb. 3.37 Darstellung der Wassertiefen für die im Labor untersuchten Durchflüsse. a) Q_1 , b) Q_2 , c) Q_3 .

Die Ergebnisse der ADV-Punktmessungen für alle Durchflüsse zeigt Abb. 3.38.

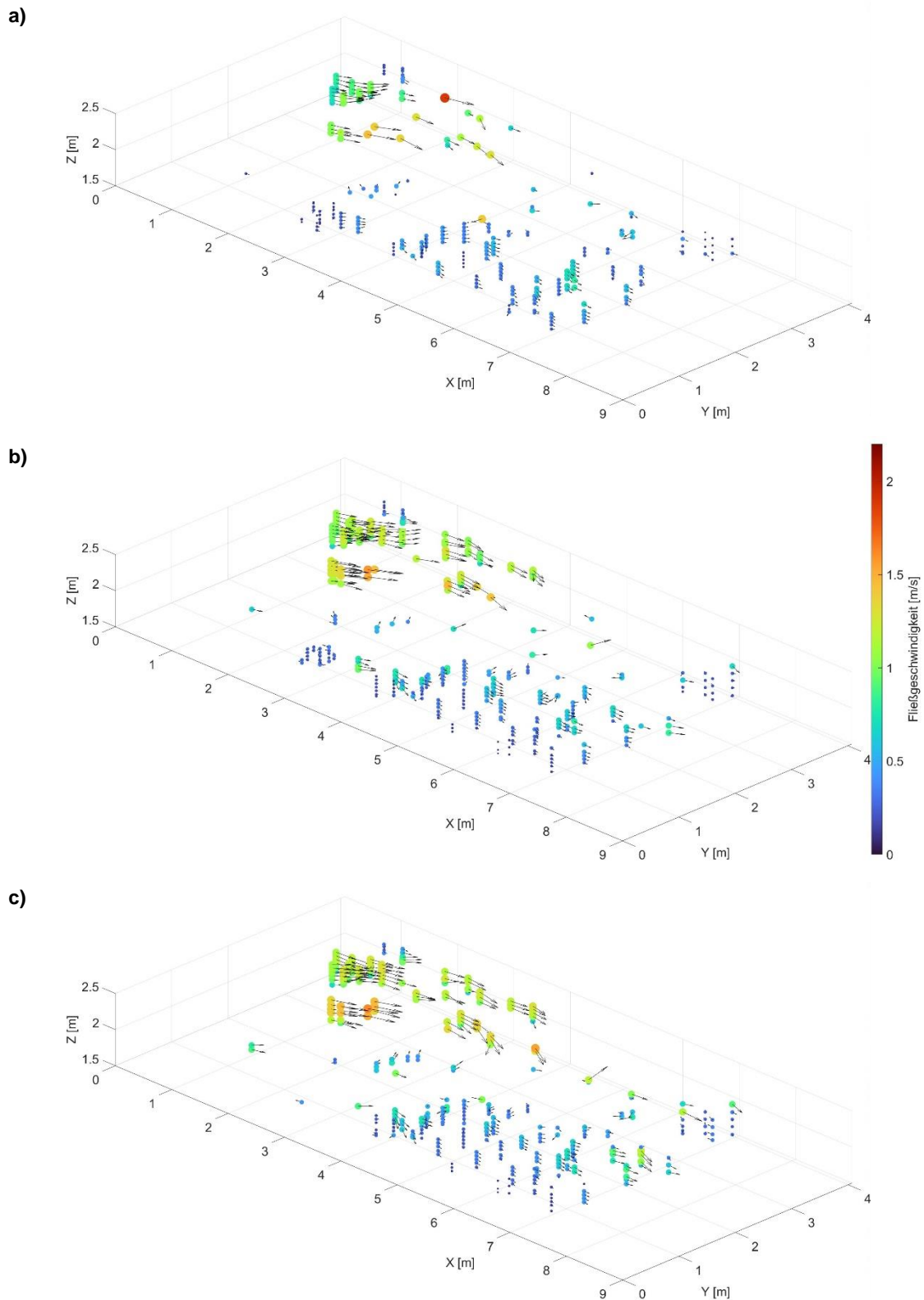


Abb. 3.38 Ergebnisse der ADV-Punktmessungen für die drei untersuchten Durchflüsse im Labor. Dargestellt sind die zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten mit Magnitude und Richtung. a) Q_1 ; b) Q_2 ; c) Q_3 .

Die Auswertung der Drohnenaufnahmen ergaben die in Abb. 3.39 dargestellten Ergebnisse für das Strömungsfeld an der Wasseroberfläche. In allen Plots ist ca. bei $X = 3,6$ m ein deutlicher Übergang senkrecht zur Rinnenachse zu erkennen. Dieser resultiert aus der Methodik bei der Erstellung der Strömungsfelder bzw. der Verzeichnung in den Randbereichen der getrennt aufgenommenen und später zusammengefügt Bereiche.

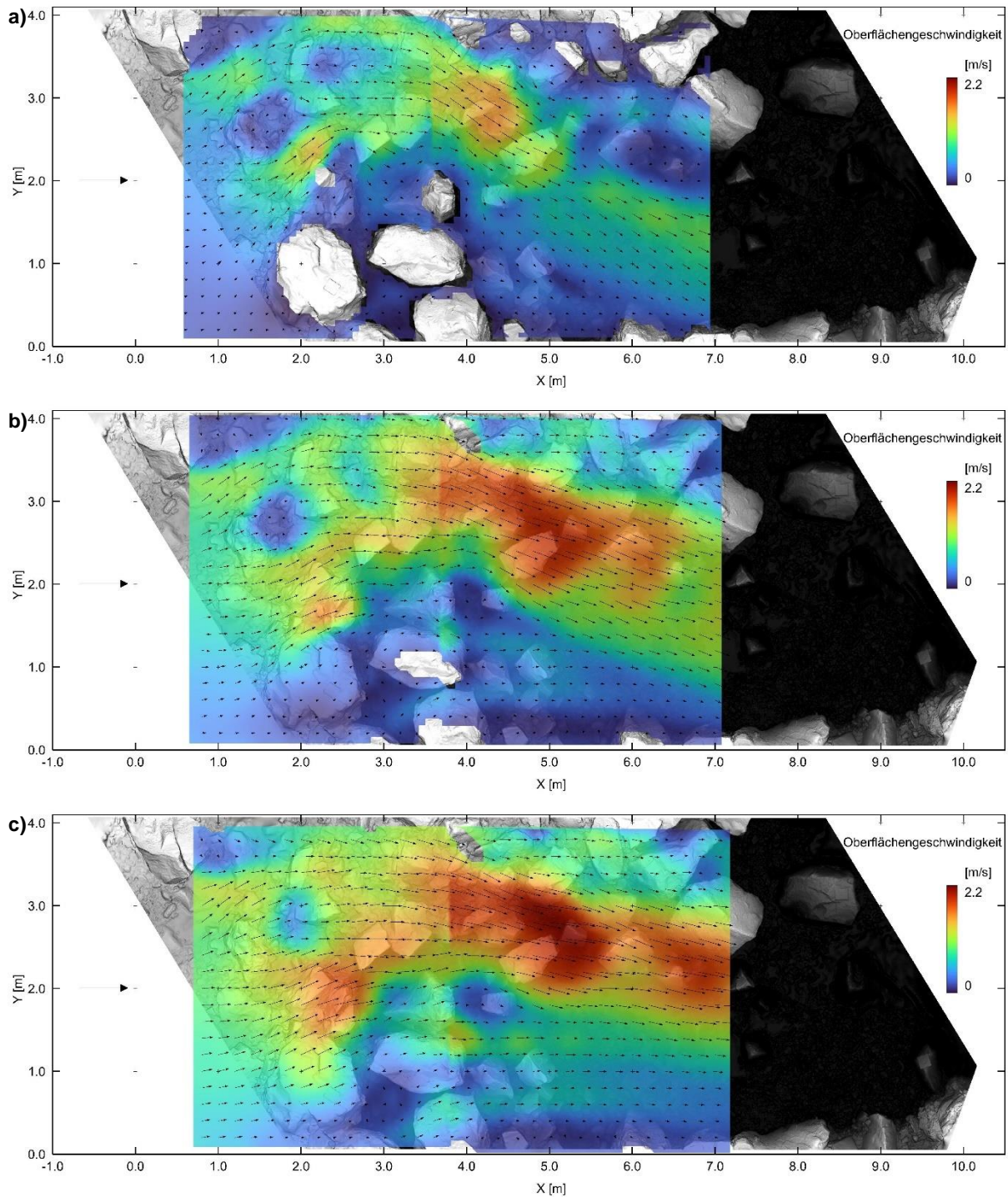


Abb. 3.39 Darstellung der Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche für die im Labor untersuchten Durchflüsse. a) Q_1 ; b) Q_2 ; c) Q_3 .

3.5 Felduntersuchungen

Die Felduntersuchungen an der Ilme (Arbeitspaket 3) fanden im Juli 2022 bei beständigen meteorologischen und hydraulischen Bedingungen statt. Aufgrund des Niedrigwassers wurden die Fischbeobachtungen auf den Bereich der Niedrigwasserrinne beschränkt.

3.5.1 Fischbeobachtungen

Kamerasystem

Auf Grundlage der Erfahrungen aus den Laboruntersuchungen wurde die Sohlgleite in der Ilme mit insgesamt 15 wasserdichten IP-Kameras ausgestattet. Die Spezifikationen der Kameras sind in Tab. 3.9 aufgeführt.

Tab. 3.9 Spezifikationen der in den Felduntersuchungen verwendeten Unterwasserkameras

Produktname	AP-W5036	
Klassifizierung	IP68, Wasserdruck 150 kPa (5 m Wassertiefe bei MSL)	
Auflösung	2560x1440, Full HD SC5239 CMOS Sensor, 0,1 Lux, F 1.2	
Objektiv	3,6 mm, horizontaler Winkel 80 °, Fokus 2,0 m	
Abmessungen, Gewicht und Material	90 x 90 x 70 mm (ohne Halterung), 1,2 kg (ohne Kabel und Standfuß, s.u.) Edelstahl Vergütung 304	
Infrarot (Nachtsicht)	42 IR LEDs, photosensitive IC-Kontrolle, Tag/Nacht-Umschaltung	
Ethernet	RJ-45-Anschluss	
Nachbearbeitung	Beklebung des Edelstahlgehäuses mit schwarzem Gewebeband, Lackierung der Halterung (grün), Anbringung eines zylinderförmigen Standfußes als zusätzliches Gewicht (ebenfalls grün lackiert)	

Das System bestand aus den folgenden Komponenten:

- 15 Unterwasserkameras mit Kabellängen von 10 m, 15 m und 20 m
- Netzwerk-Switch
- Netzwerk-Festplattenrekorder
- Spannungswandler
- zwei Sätze von jeweils 12 V-Starterbatterien (je 95 Ah) für die Energieversorgung

Die Kameras waren an verschiedenen Stellen im Oberwasserwasser (3 Kameras) und entlang der Niedrigwasserrinne sowie in den Seitenbereichen aufgestellt (Abb. 3.40a). Die Einzelkomponenten wurden in einer geräumigen Aluminium-Transportbox am linken Ufer der Ilme untergebracht (Abb. 3.40b). Die Box war mit einem Schloss gesichert und grün gefärbt, um in der Umgebung unscheinbar zu sein. Ein Hinweisschild machte auf die Beobachtungen und die potenzielle Gefahr durch einen Stromschlag aufmerksam.

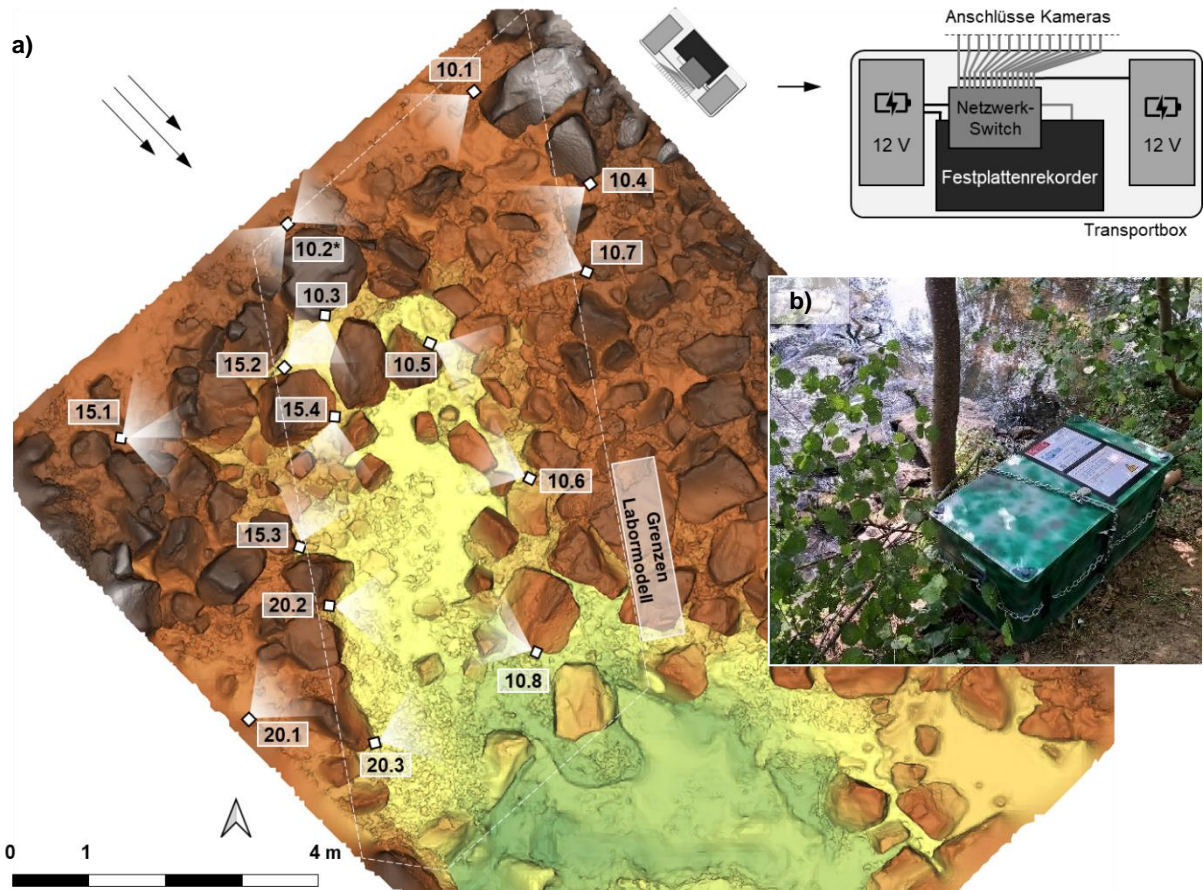


Abb. 3.40 a) Kamerapositionen während der Fischbeobachtungen im Feld (mit Ausrichtung des ungefähren Sichtfeldes). b) Technik-Box am Ufer der Ilme.

Ablauf der Fischbeobachtungen

Die Fischbeobachtungen erfolgten ab dem 30.06.2022 (Einbau der Kameras) bis zum 15.07.2022 mit einem Tag Unterbrechung. Während der gesamten Beobachtungsdauer kam es nicht zu Beschädigungen oder Vandalismus. Häufig wurden Anwohner der nahen Ortschaft Hullersen vor Ort angetroffen, die über die Untersuchungen informiert waren und zum Teil bei der Aufsicht unterstützten.

Die Energieversorgung reichte leider nur für maximal einen Tag, wobei die Leistungsfähigkeit der Batterien im Lauf der zwei Wochen abnahm. Grundsätzlich wurden die Batterien täglich in den Nachmittagsstunden zum Aufladen gewechselt. Bei dieser Gelegenheit konnten die Daten vom Vortrag gesichert und die Kameras auf eventuelle Verschmutzungen durch Treibgut oder anhaftendes Makrozoobenthos untersucht werden.

Zur Kontrolle der Wasserstände und damit des Durchflusses wurde außerdem im Oberwasser ein Datenlogger (Micro Diver, Van Essen Instruments). Diese speicherte in fünf-Minuten-Intervallen die Drücke sowie die Wassertemperatur. Über einen vorher eingemessenen Höhenbezug und eine außerhalb des Wassers installierte Drucksonde zur Kalibrierung von Luftdruckschwankungen konnte später der zeitliche Verlauf der Wasserspiegellagen bestimmt werden.

Der Durchfluss der Ilme blieb während der Felduntersuchungen nahezu konstant bei ca. 650 bis 700 l/s.

Ergebnisse

Insgesamt konnten 3.999 Stunden an Videomaterial gesichert werden. Die Auswertung begann bereits während der Beobachtungskampagne und erfolgte prinzipiell wie bei den Fischbeobachtungen im Labor. Dabei wurde immer zunächst die Aufnahmen der Kameras im Oberwasser gesichtet, um „Aufsteiger“ zu identifizieren (Tab. 3.10). Demnach erreichten etwa 1.300 Fische das Oberwasser, wobei 95 % davon Elritzen bzw. Elritzenschwärme waren. Deren absolute Anzahl konnte oft nur geschätzt werden. Der übrige Anteil setzte sich aus den vier Arten Bachforelle, Äsche, Aal und Groppe zusammen.

Tab. 3.10 Auflistung der während des Beobachtungszeitraums vom 30.06.2022 bis zum 15.07.2022 von den im Oberwasser installierten Kameras 10.1, 10.2 und 15.1 beobachteten Fische.

Fischart	Größe [cm]	Kamera	Individuen	Σ
Forelle (Bachforelle) <i>Salmo trutta</i>	> 25*	10.1	4	4
		10.2	0	
		15.1	0	
Äsche <i>Thymallus thymallus</i>	ca. 10*	10.1	55	60
		10.2	5	
		15.1	0	
Elritze <i>Phoxinus sp.</i>	ca. 5-8	10.1	1200**	1223
		10.2	23	
		15.1	0	
Europäischer Aal <i>Anguilla anguilla</i>	> 40	10.1	1	4
		10.2	3	
		15.1	0	
Groppe <i>Cottus gobio</i>	< 10	10.1	0	1
		10.2	1	
		15.1	0	
* ausschließlich adulte Bachforellen und juvenile Äschen				
** Auftreten im Schwarm, Wert gerundet				

Die im Oberwasser identifizierten Fische wurden nach einem Ausschlussprinzip so präzise wie möglich über die nahegelegenen Kameras nach Unterstrom verfolgt. So ergaben sich 105 Trajektorien, von denen 77 auf einzelne Fische der genannten Arten sowie Elritzenschwärme entfallen. Die übrigen Trajektorien stammen von Fischen, die zwar über eine längere Distanz (mindestens zwei Kameras) verfolgt werden konnten, aber nicht ins Oberwasser aufgestiegen sind. Vollständige Trajektorien vom Unter- ins Oberwasser konnten von vier adulten Bachforellen ermittelt werden. Abb. 3.41 zeigt die identifizierten Trajektorien nach Arten differenziert.

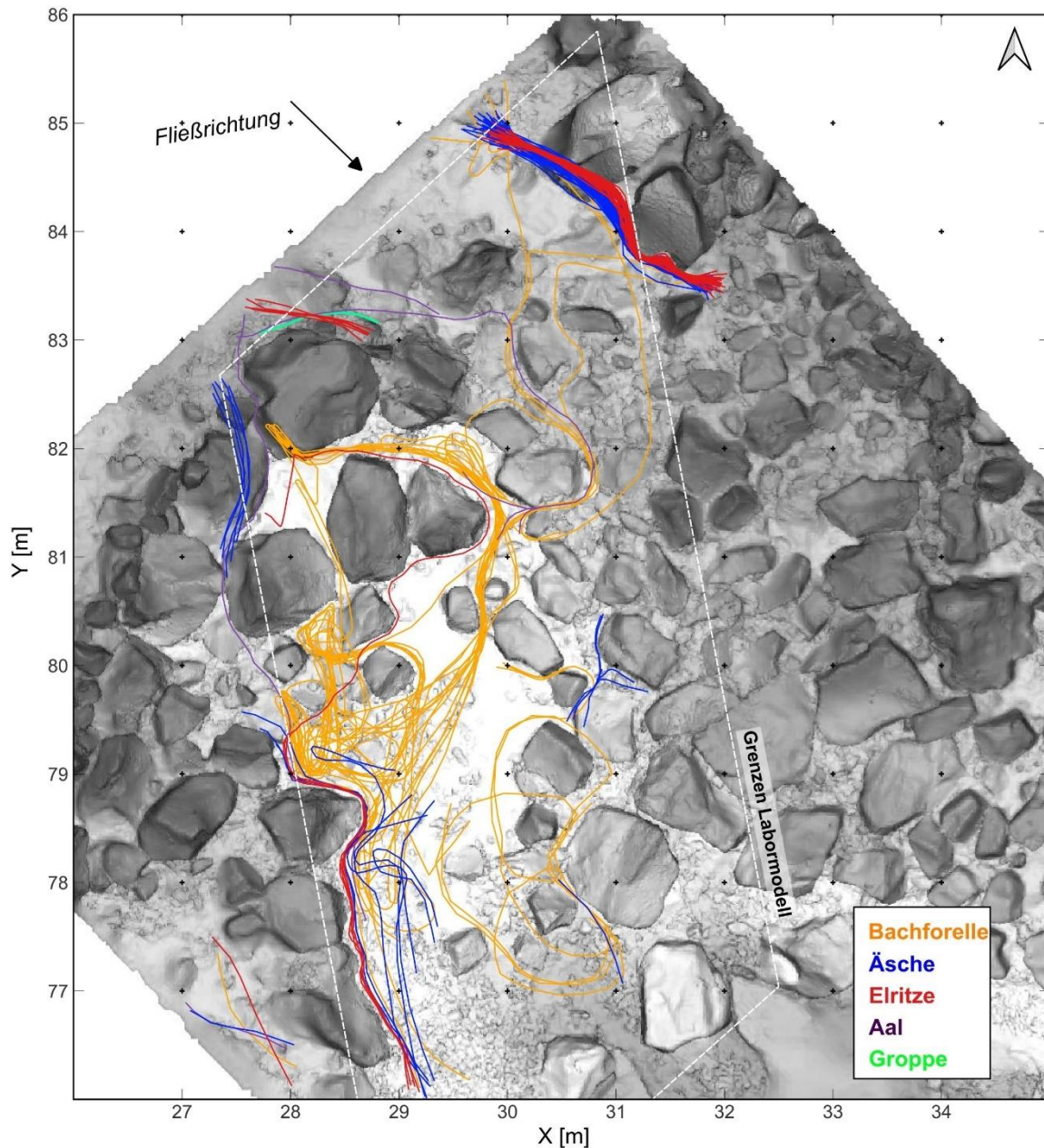


Abb. 3.41 In den Felduntersuchungen ermittelte Trajektorien alle beobachteten Fischarten.

3.5.2 Hydraulische Messungen

Durchführung der hydraulischen Messungen

Nachdem die Kameras wieder ausgebaut waren, wurden in der zweiten Juli-Hälfte 2022 die hydraulischen Messungen vorgenommen. Zunächst kam eine ADV-Sonde (Nortek Vectrino Profiler) zu Einsatz, die mit dem in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Messrahmen an verschiedenen Positionen auf der Gleite aufgestellt wurde (Abb. 3.42). An insgesamt acht Messtagen zwischen dem 19.07.2022 und dem 28.07.2022 wurden insgesamt 612 Einzelmessungen an 177 Positionen (Abb. 3.42a) durchgeführt.

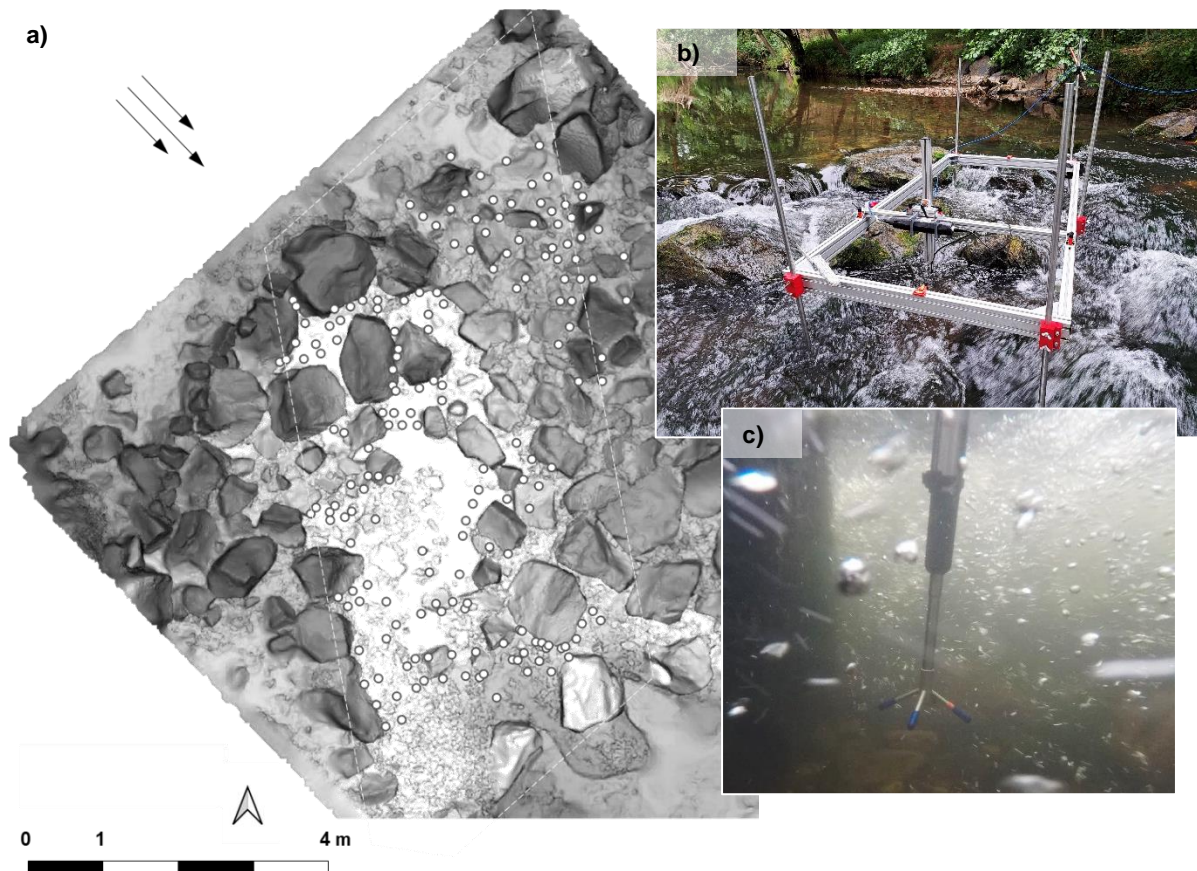


Abb. 3.42 a) Messpositionen und b) Messrahmen auf der Gleite und c) ADV-Sonde im Einsatz.

Das Strömungsfeld an der Wasseroberfläche wie im Labor auf Grundlage von Videoaufnahmen mit einer Drohne ermittelt. Auf die Zugabe von Tracerpartikeln wurde jedoch verzichtet, da eine genügend lange Aufnahmezeit sehr viel an Material benötigt hätte, welches unter Umständen unterstrom der Gleite hätte aufgefangen werden müssen. Im Vorfeld durchgeführte Testaufnahmen zeigte, dass die Strömung durch die Unregelmäßigkeiten an der Wasseroberfläche ausreichend genau zu bestimmen sind. Die Auswertung der Videoaufnahmen erfolgte in gleicher Weise wie im Labor.

Ergebnisse

Wie im Labor wurde auf der Ilme-Sohlengleite an jeder Messposition die Wassertiefe gemessen, so dass die flächige Wasserspiegellage interpoliert werden konnte. Daran ergab sich die in Abb. 3.43 gezeigte flächige Verteilung der Wassertiefen für den Zeitraum der Messungen.

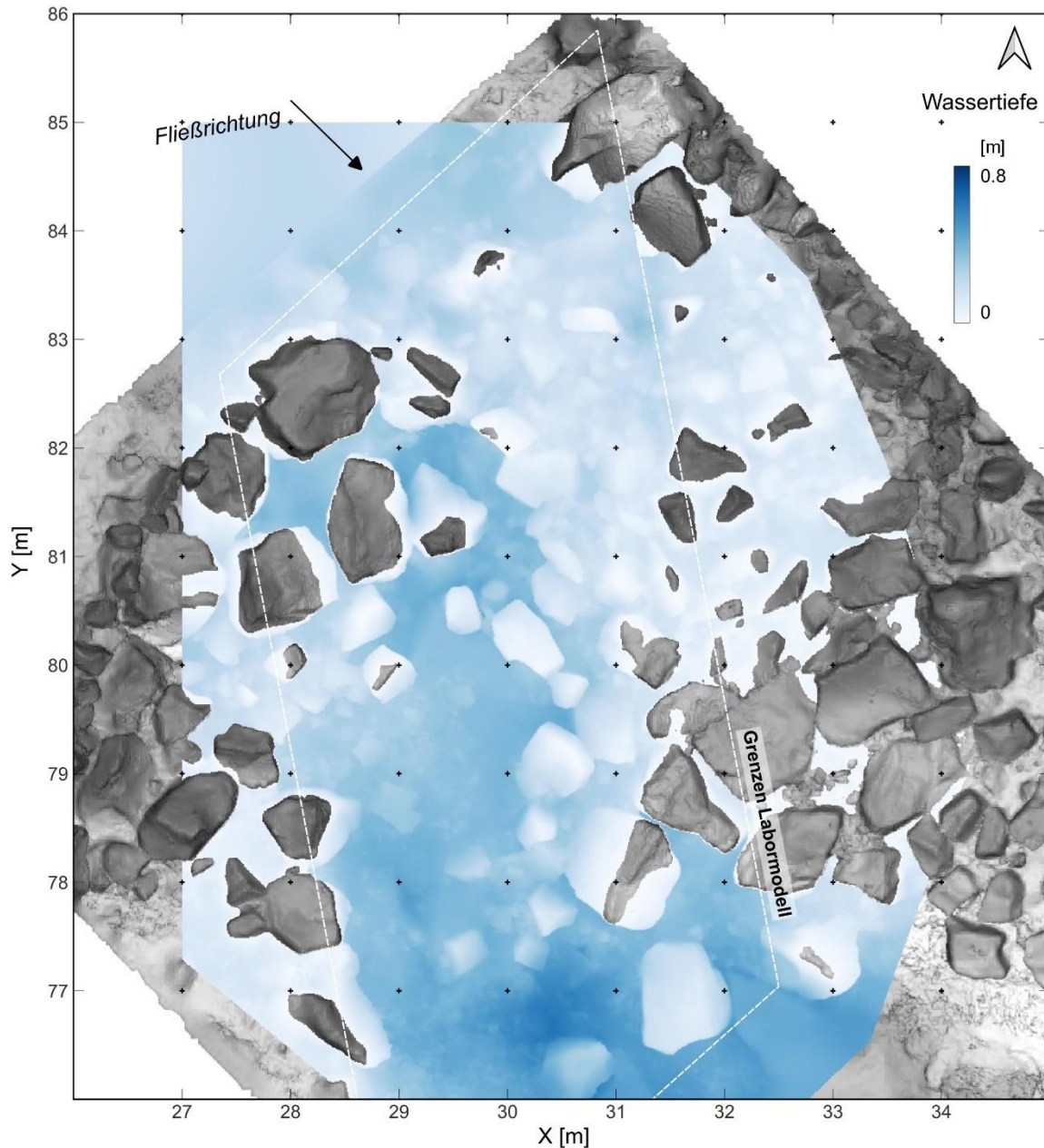


Abb. 3.43 Wassertiefen während der Feldmessungen auf Grundlage der interpolierten Wasserspiegellagen. Die verwendeten Sohlenhöhen für beziehen sich auf den Scan der Sohlengleite im Oktober 2020.

Anmerkung: Bei einem Hochwasserereignis im Februar 2022 kam es vermutlich zu einem vermehrten Geschiebeeintrag auf die Sohlengleite, da sich ein Baumstumpf mit Wurzelteller direkt im Oberwasser vor der rechten Seite der Gleitenkrone festgesetzt. Um den Wurzelteller herum entstand ein Kolk mit etwa 0,5 m Tiefe und 3 m Durchmesser. Das erodierte Substrat wurde

dabei von der Strömung über die Krone auf die Gleite bzw. in den Unterwasserkolk transportiert. Die Sohlenlagen zwischen den Störsteinen änderte sich (in der Regel in Form von Aufhöhungen), so dass die Wassertiefen nicht mehr direkt mit denen im Labor (d.h. basierend auf dem Zustand zum Zeitpunkt der Trockenlegung und Vermessung) vergleichbar sind.

Abb. 3.44 zeigt die Ergebnisse der ADV-Punktmessungen (zeitlich gemittelte Geschwindigkeit bzw. Magnitude mit Angabe der Richtung).

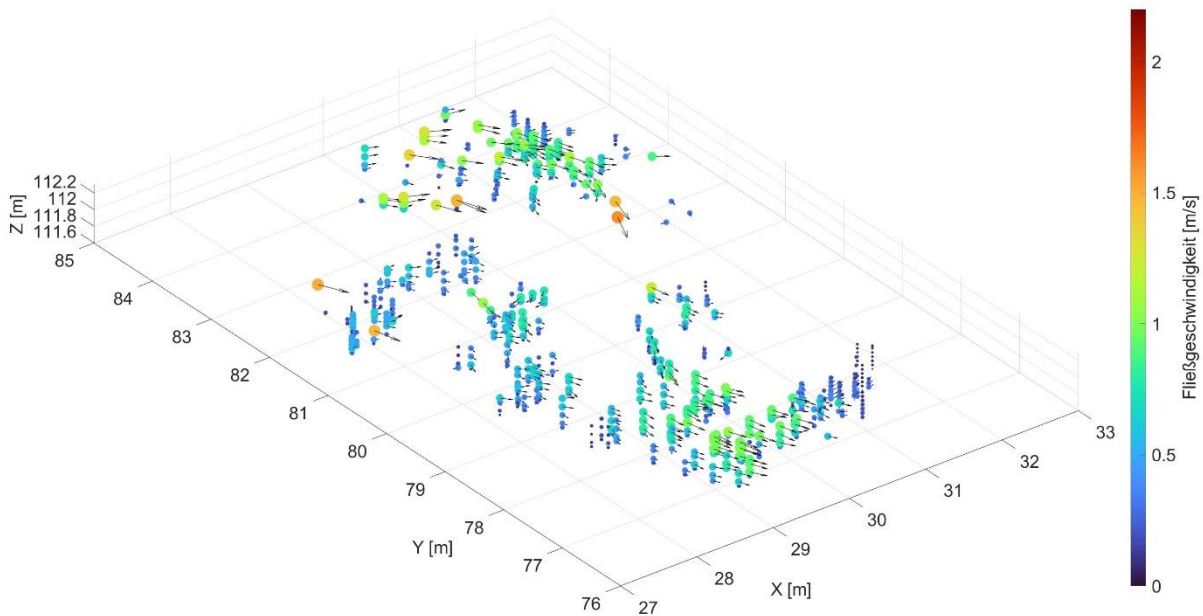


Abb. 3.44 Ergebnisse der ADV-Punktmessungen im Feld. Dargestellt sind die zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten mit Magnitude und Richtung.

Das Oberflächenströmungsfeld zeigt Abb. 3.45. Da keine Tracer verwendet wurden (s. Erläuterungen oben), wird vermutlich die Fließgeschwindigkeit im Zulaufbereich in die Niedrigwasserrinne unterschätzt. Dort war die Wasseroberfläche sehr glatt, so dass die für die Bestimmung der Geschwindigkeiten nötigen Änderungen in den Einzelbildern nicht ausreichten. Dies unterstreicht ein Vergleich mit den Ergebnissen der ADV-Punktmessungen, die in diesem Bereich größer sind, was aufgrund der Geschwindigkeitsverteilung in diesem ungestörten Bereich mit gleichmäßiger Anströmung auch zu erwarten wäre.

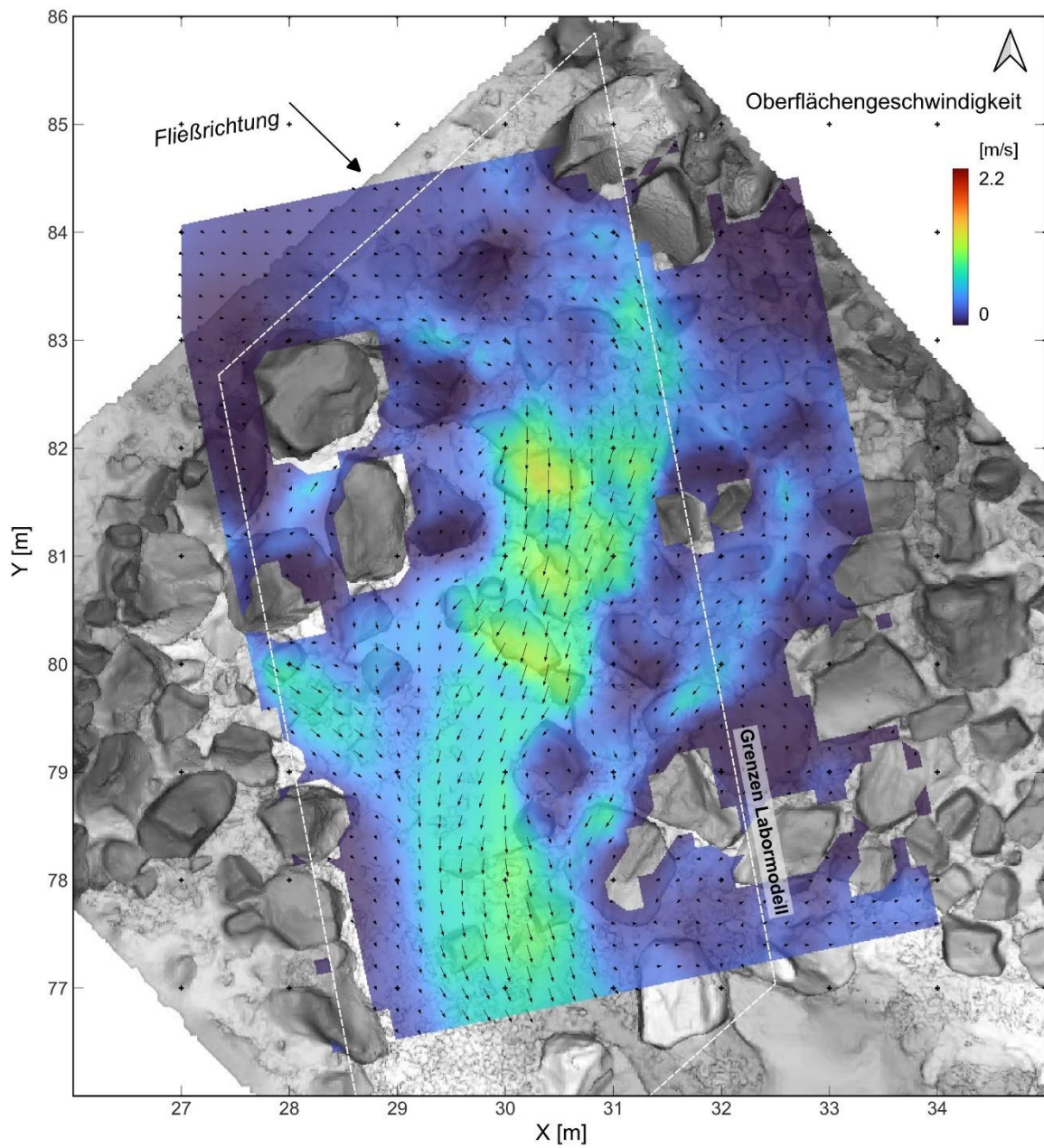


Abb. 3.45 Oberflächenströmungsfeld aus den Feldmessungen (Aufnahmedatum des zugrundeliegenden Videos: 28.07.2022).

3.6 Zusammenführung der Ergebnisse und Analyse

Die Zusammenführung und Analyse der Ergebnisse (Arbeitspaket 4) erfolgte im Rahmen der Dissertation von Herrn Eikenberg mit dem Titel „Verknüpfung von Strömungsfeld, Sohlengeometrie und Fischtrajektorien auf unstrukturierten Sohlengleiten“, die gesondert veröffentlicht wurde (Eikenberg, 2023, in Vorbereitung).

Wesentliche Inhalte dieser Analyse sind:

- Verknüpfung der Fischtrajektorien mit den geometrischen und hydraulischen und geometrischen Informationen
- Ermittlung von Aufstiegszeiten und Ruhezeiten
- Vergleich von Labor- und Felddaten
- Vergleich der Daten mit dem technischen Regelwerk
- Sohlengleiten als Habitat
- Gesamtbeurteilung der Ergebnisse, auch in Bezug auf die Anwendungsmöglichkeiten des IPOS-Konzeptes
- Empfehlungen für die Praxis

Die Daten werden über den Publikationsserver der TU Braunschweig (LeoPARD, www.tu-braunschweig.de/leopard) veröffentlicht.

4 Öffentlichkeitsarbeit, Veröffentlichungen und Vorträge

4.1 Presseberichte

Das Projekt wurde in mehreren Pressemitteilungen (PM) bzw. -berichten zu unterschiedlichen Stadien vorgestellt.

- Januar 2021: PM zum Projektauftritt an die Lokalpresse in der Stadt Einbeck gegeben („Einbecker Morgenpost“ und Sonntagsanzeiger „Eule“ bzw. „Leinetal24“ als online-Ausgabe). [Link](#).
- Im halbjährlich erscheinenden Magazin der SwedCOLD (Swedish Committee on Large Dams) erschien in der Ausgabe 2021/02 eine kurze Notiz über das Projekt (in schwedischer Sprache). [Link](#).
- Februar 2022: PM zum Abschluss der Laborexperimente im Magazin der TU Braunschweig und in der „Einbecker Morgenpost“. [Link](#).
- Juli 2022: Kurze PM zu den Fischbeobachtungen im Feld („Leinetal24“). [Link](#).
- September 2022: PM zur Teilnahme am Format „Meet the Scientist“ im Wissenschaftsmuseum Phaeno in Wolfsburg (vgl. Abschnitt 4.5). [Link](#).

4.2 Web

Für das Projekt wurde innerhalb der LWI-Website eine eigene Projektwebsite in deutscher und englischer Sprache eingerichtet, die abhängig vom Fortschritt des Projektes laufend aktualisiert wurde.

The screenshot shows the website for the 'MigRamp' project. At the top, there is a navigation bar for the Technische Universität Braunschweig with links for 'Studium & Lehre', 'Forschung', 'International', 'Die TU Braunschweig', and 'Struktur'. Below this is a breadcrumb trail: 'Technische Universität Braunschweig > Struktur > Fakultät > Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltingenieurwesen > Institut > Leibniz-Institut für Wasserbau > Wasserbau und Gewässerökologie > Deutscher Fund-Praxis > MigRamp'. The main content area is titled 'MigRamp' and features a large photograph of a river with a green text box overlaid: 'Identifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlgleiten durch die holistische Analyse von Fischkorridoren und Strömungsbedingungen'. To the right of the image is a sidebar titled 'Forschung und Projekte' with a list of projects: 'Eros-VSP', 'MigRamp' (highlighted), 'PRO-MUD', 'Sohlförmigen', 'RHINDS', and 'IHATEC II'. Below the image is a section 'Kenndaten zum Projekt' with a table:

Leitung	Prof. Dr.-Ing. Jochen Aberle
Bearbeitung	Dipl.-Ing. Ralph Thiermer
Laufzeit	12/2020 - 05/2023
Förderung	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Kooperationspartner	Leibniz-Institut
	Vattenfall Research & Development AG

Below the table is a 'Kurzbeschreibung' section. The text reads: 'Dieses Projekt zielt darauf ab, Wanderkorridore von aufsteigenden Fischen auf naturnahen unstrukturierten Sohlgleiten durch die Verknüpfung von Fischkorridoren, Sohltopographie, und lokalem Strömungsfeld zu identifizieren und zu quantifizieren. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern werden kombinierte fischbiologische und hydraulische Untersuchungen über einer bestehenden Sohlgleite an der Itze in Niedersachsen und an einem 1:1 Modell dieser Sohlgleite im Laborator, in einer weltweit einzigartigen Forschungseinrichtung für...' To the right of the text is a small diagram showing a cross-section of a riverbed with a fish, a drone, and a color-coded map of the riverbed.

Abb. 4.1 Screenshot der Projektwebsite

Weblinks:

- (DE) <https://www.tu-braunschweig.de/lwi/wasserbau/forschung/projekte/migramp>
- (ENG) <https://www.tu-braunschweig.de/en/lwi/wasserbau/research/projects/migramp>

4.3 Social Media

Über den Instagram-Kanal @Iwiwasserbau der Abteilung Wasserbau und Gewässermorphologie wurden regelmäßig Posts zum Projekt unter dem Hashtag #migramp eingestellt (Abb. 4.2).

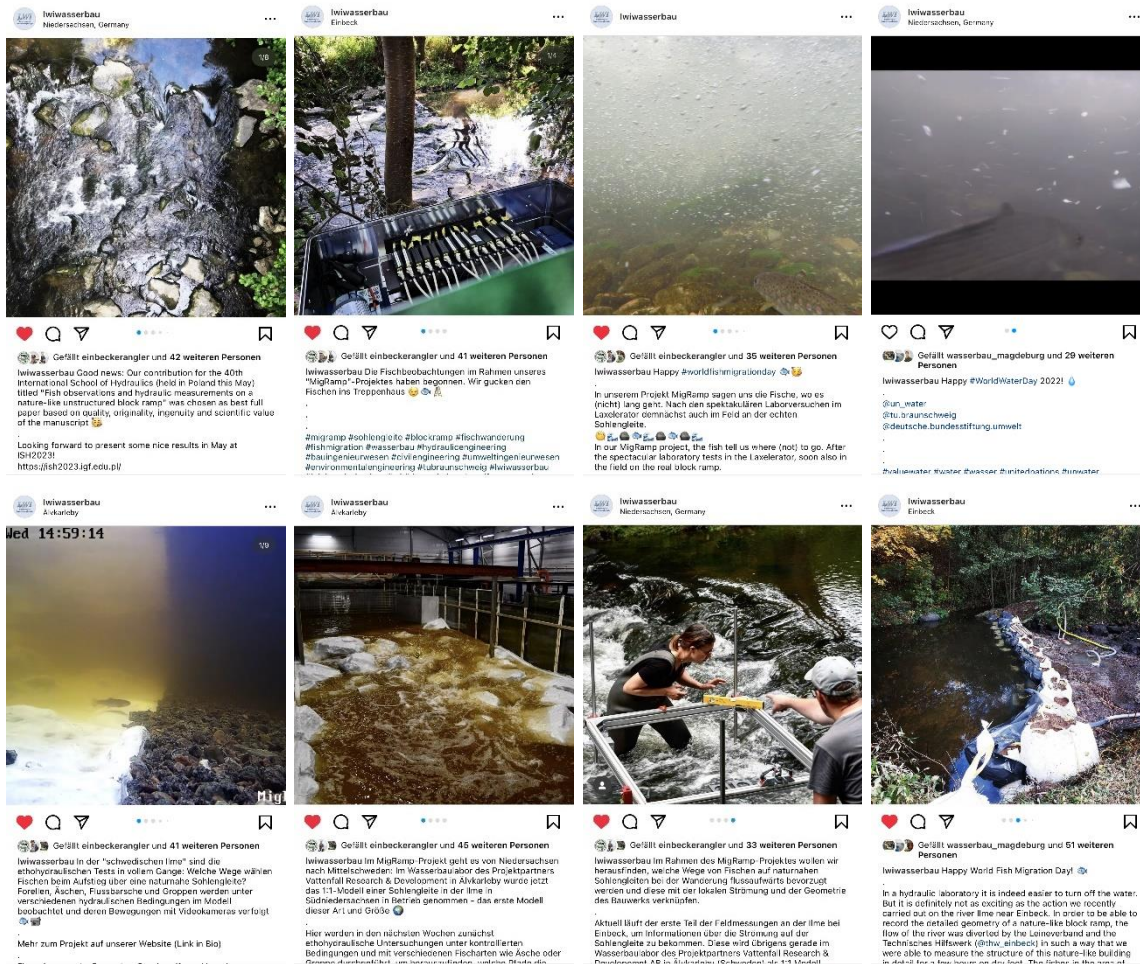


Abb. 4.2 Instagram-Posts @Iwiwasserbau zum Projekt (zeitliche Reihenfolge absteigen von oben links nach unten rechts)

4.4 Veröffentlichungen

Während der Laufzeit wurde das Projekt bzw. erste Ergebnisse in den nachfolgend aufgelisteten Veröffentlichungen präsentiert.

Konferenzbeiträge:

- Eikenberg, R. & Aberle, J. (2021). „In-situ survey of an unstructured block ramp." Book of Extended Abstracts: Webinar on Experimental Methods and Laboratory Instrumentation in Hydraulics, 13-15 April 2021. Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation, vol. 434 (E-11), 2021, pp. 63-65, doi:10.25171/InstGeoph_PAS_Publs-2021-020. Mit Vortrag.
- Eikenberg, R. & Aberle, J. (2022): „MigRamp – Identifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten“. Beitrag in: „Rampen 2022 – Grundlagen, Beispiele und Erfahrungen“, Tagungsband zu ÖWAV-Kolloquium „Rampen“ in Wien am 10.05.2022 (unveröffentlicht). Mit Vortrag.
- Eikenberg, R. & Aberle, J. (2022): „MigRamp - Nachweis von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten", Beitrag zum 45. Dresdner Wasserbaukolloquium 2022. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 68, 115-124. Online: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108916>. Mit Vortrag.
- Eikenberg, R., Andreasson, P., Aldvén, D., Persson, L., Aberle, J. (2022): „Construction of a full-scale physical model of an unstructured block ramp", Proc. 39th IAHR World Congress, June 19-24, 2022, Granada, Spain, Ed. Miguel Ortega-Sánchez, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research - IAHR, pp. 1361-1370, doi://10.3850/IAHR-39WC2521716X2022838. Mit Vortrag.
- Eikenberg, R., Aberle, J., Andreasson, P., Aldvén, D. & Persson, L. (2022): “Fish trajectories over a full-scale model of a nature-like unstructured block ramp”. Proc. 11th Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2022, Nov 8-10, 2022, Kingston und Ottawa, Kanada.
- Eikenberg, R. & Aberle, J. (2023): “Fish observations and hydraulic measurements on a nature-like unstructured block ramp”. Beitrag zur 40th International School of Hydraulics, Katy Rybackie, Polen, 23.-26.05.2023. Mit Vortrag. Die Beiträge dieser Veranstaltung werden in der Springer-Reihe „GeoPlanet: Earth and Planetary Systems“ veröffentlicht (voraussichtlich Anfang 2024). Der Beitrag wurde außerdem ausgezeichnet als „best full paper“.

Populärwissenschaftliche Zeitschriften:

- Zintz, K.; unter Mitwirkung von Eikenberg, R. (2023): „Fische auf Wanderschaft“. In: Bild der Wissenschaft, 60. Jahrgang, 1/2023, 54-59. Konradin Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen.

Dissertationen:

- Eikenberg, R. (2023): „Verknüpfung von Strömungsfeld, Sohlengeometrie und Fischtrajektorien auf unstrukturierten Sohlengleiten“. Dissertation. Technische Universität Braunschweig. (in Vorbereitung)

4.5 Vorträge

Das Projekt wurde im Rahmen folgender Vorträge im Rahmen von Workshops und informellen Treffen bei Behörden und Organisationen vorgestellt (in chronologischer Reihenfolge):

- Online-Vortrag mit dem Titel "*In-situ survey of an unstructured block ramp*" (15.04.2021), im Rahmen des Webinars „Experimental Methods and Laboratory Instrumentation in Hydraulics“ vom 13.-15.04.2021. Organisiert und durchgeführt von The Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences, in Zusammenarbeit mit IAHR Committee on Experimental Methods and Instrumentation und dem IAHR Poland Young Professional Network.
- Online-Vortrag zur Vorstellung des Projektes für interessierte Mitglieder des Fischereivereins Einbeck e.V. (04.11.2021)
- Teilnahme am FishPath-Workshop an der ETH Zürich (28.04.2022) mit eigenem Vortrag zum Projekt und fachlichem Austausch
- Vorstellung des Projektes im Wissenschaftsmuseum „Phaeno“ in Wolfsburg (03.09.2022) im Rahmen des Formats „Meet the Scientist“.
- Ortsbegehung mit Vertretern des Dezernat Binnenfischerei – Fischereikundlicher Dienst des Landes Niedersachsen (Nds. Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, LAVES) und des Leineverbandes während der Fischbeobachtungen an der Ilme mit anschließendem Vortrag und Diskussion (11.07.2022)
- Vorstellung des Projektes beim Landesbetriebs Straßen, Brücken, Gewässer (LSBG) der Freien und Hansestadt Hamburg (04.07.2022)
- Vorstellung des Projektes bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Wasserstraße und Umwelt (06.10.2022)
- Vorstellung der Projektergebnisse beim Dezernat Binnenfischerei – Fischereikundlicher Dienst des Landes Niedersachsen (Nds. Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, LAVES) in Hannover (15.02.2023)
- Vorstellung der Projektergebnisse beim Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Betriebsstelle Süd, Braunschweig (22.03.2023)
- Vorstellung der Projektergebnisse beim Anglerverband Niedersachsen e.V. (AVN) in Hannover (18.04.2023)
- Beitrag zum Geoökologischen Kolloquium der TU Braunschweig (20.04.2023)
- Vorstellung der Projektergebnisse beim Leineverband, Northeim (26.04.2023), im Rahmen einer Mitarbeiterfortbildung

4.6 Studentische Arbeiten

Im Rahmen des Projektes wurden folgende studentische Arbeiten angefertigt:

- Henri Busch: „*Detailvermessung einer naturnahen unstrukturierten Sohlengleite*“, Bachelorarbeit, 03/2021 (unveröffentlicht)
- Patrick Herrmann: „*Design des gegenständlichen Modells einer naturnahen unstrukturierten Sohlengleite*“, Bachelorarbeit, 03/2021 (unveröffentlicht)
- Finn Alsguth: „*Geschwindigkeitsmessungen auf einer naturnahen unstrukturierten Sohlengleite*“, Studienarbeit, 11/2021 (unveröffentlicht)
- Luka Rühl: „*Wanderkorridore von Flussbarschen (*Perca fluviatilis*) auf einer naturnahen unstrukturierten Sohlengleite*“, Studienarbeit, 04/2022 (unveröffentlicht)
- Maximilian Wiegmann: „*Wanderkorridore von Forellen (*Salmo trutta*) auf einer naturnahen unstrukturierten Sohlengleite*“, Bachelorarbeit, 03/2022 (unveröffentlicht)
- Sven Krause: „*Einsatz einer Fisch-Sinnes-Sonde auf einer naturnahen Sohlengleite*“ Masterarbeit, 06/2022 (unveröffentlicht)
- Paul Francesco Calamita: „*Felduntersuchungen zur Ermittlung von Wanderkorridoren auf einer naturnahen unstrukturierten Sohlengleite*“, Bachelorarbeit, 08/2022 (unveröffentlicht)
- Luka Rühl: „*Hydraulische Untersuchungen zur Quantifizierung von Wanderkorridoren auf einer naturnahen unstrukturierten Sohlengleite*“, Masterarbeit, 10/2022 (unveröffentlicht)

5 Fazit und Ausblick

Im Projekt MigRamp wurden erstmals umfangreiche fischbiologische und hydraulische Untersuchungen an einer bestehenden naturnahen und unstrukturierten Sohlengleite sowie an einem 1:1-Modell des Bauwerks durchgeführt. Durch die sehr gute Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Leineverband und Vattenfall Research & Development AB war es möglich, die innovativen Ansätze im Projekt erfolgreich umzusetzen und einen einzigartigen Datensatz zu erstellen. Die konkreten Projektziele, das heißt die erstmalige direkte Quantifizierung von Wanderkorridoren auf naturnahen unstrukturierten Sohlengleiten und die Ermittlung der hydraulischen Gegebenheiten entlang dieser Pfade, konnten somit erreicht werden.

Mit der Trockenlegung und Vermessung der Sohlengleite in der Ilme konnte ein ungewöhnliches, aber geeignetes Verfahren angewendet werden, um in kleinen Fließgewässern bei moderatem Aufwand und minimalem Eingriff in die Ökologie, die detaillierte Bauwerksgeometrie zu bestimmen. Eine vergleichbarer Datensatz existiert nach Kenntnis der Autoren bisher nicht. Der digitale Zwilling der Sohlengleite lieferte die Basis für die weiteren Untersuchungen, insbesondere das Labormodell im Laxelerator, welches mit Hilfe der noch relativ neuen Methode der subtraktiven Fertigung mittels CNC-Frästechnik hergestellt werden konnte. Der dadurch ermöglichte hohe Detailgrad sorgte für bestmögliche naturähnliche Strömungsbedingungen in den Experimenten. Die Nutzung von Videokameras zur Nachverfolgung der Fische bot den besonderen Vorteil, die Tiere nicht mehr als durch das Handling im Labor nötig bzw. im Feld praktisch nicht zu beeinflussen.

Neben den Fischtrajektorien aus den Laborversuchen und Naturbeobachtungen lagen für alle betrachteten Fälle die flächigen Verteilungen der Wassertiefen sowie der Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche vor. Aufgrund verschiedener Herausforderungen, insbesondere der hochgradig turbulenten Strömungsbedingungen sowohl bei den Natur- wie auch bei den Laboruntersuchungen, konnten leider kaum Informationen zu den Turbulenzeigenschaften der Strömung im Wasserkörper bzw. entlang der identifizierten Wanderkorridore bekommen werden. Das IPOS-Konzept nach Lacey et al. (2012) konnte daher nicht wie vorgesehen angewendet werden.

Aus der Analyse der umfassenden Daten der hydraulischen Gegebenheiten entlang der von den Fischen gewählten Pfade und von Bereichen, die beim Aufstieg gemieden oder als Ruhebereich genutzt wurden, konnten wertvolle Erkenntnisse sowohl für die hydraulische als auch für die biologische Dimensionierung solcher Bauwerke gewonnen werden. Darüber hinaus lieferte der Vergleich der Ergebnisse aus den Labor- und den Felduntersuchungen einen wichtigen Beitrag zur bislang mehrheitlich auf Laboruntersuchungen beschränkten Ethohydraulik. Nicht zuletzt zeigen die Projektergebnisse die besondere Eignung unstrukturierter Sohlengleiten als Habitat.

Die Projektergebnisse flossen in die Dissertationsschrift von Herrn Ralph Eikenberg mit dem Titel „Verknüpfung von Strömungsfeld, Sohlengeometrie und Fischtrajektorien auf unstrukturierten Sohlengleiten“ ein (in Vorbereitung). Die Daten stehen der wissenschaftlichen Fachwelt frei zur Verfügung.

6 Literatur

- DWA (2009):** Naturnahe Sohlengleiten. DWA-Themen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2014):** Merkblatt DWA-M 509 Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Be-messung, Qualitätssicherung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Eikenberg, R. (2023):** Verknüpfung von Strömungsfeld, Sohlengeometrie und Fischtrajektorien auf unstrukturierten Sohlengleiten. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. (in Vorbereitung)
- Lacey, R.W.J., Neary, V.S., Liao, J.C., Enders, E.C. & Tritico, H.M. (2012):** The IPOS framework: Linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. *River Res. Applic.*, 28, 429-443.
- Thielicke, W., Sonntag, R. (2021):** Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab. *Journal of Open Research Software*, 9: 12. DOI: <https://doi.org/10.5334/jors.334>
- Thielicke, W. & Stamhuis, E.J. (2014):** PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software* 2(1):e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>