

Diploma Thesis

# Flume study on the morphodynamics of installed trees

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## Laborversuche zur Morphodynamik von installierten Raubäumen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieur  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Michael Holzer, BSc**

Matr.Nr.: 01226962

unter der Anleitung von

**Dr.-Ing. Ingo Schnauder**

**Univ. Prof. PhD Koen Blanckaert**

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Forschungsbereich Wasserbau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/E222-1, A-1040 Wien



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Kurzfassung

Totholz übernimmt in Fließgewässern unverzichtbare ökologische Funktionen zum Erhalt der Morphologischen- und Artenvielfalt. Ortsfest installierte Raubäume mit Wurzelteller, die gegen die Fließrichtung orientiert sind, bieten bei Renaturierungen eine Möglichkeit den Totholzanteil im Fließgewässer zu erhöhen. Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die zeitliche Entwicklung der Sohlenmorphologie, abhängig vom Abstand zur Gewässersohle, sind jedoch noch wenig erforscht. Daher wurde in dieser Studie eine systematische Untersuchung in Fließrinnenversuchen durchgeführt.

Für die Laborversuche wurden die Raubäume durch eine Kreisscheibe (Wurzelteller) und einem Kreiszyylinder (Stamm) idealisiert und als Raubaum (astloser Stamm mit Wurzelteller) und nur Wurzeltellern (ohne Stamm) in schwimmender und sohlennaher Lage untersucht. Im Fokus standen dabei die Unterschiede und Auswirkungen auf die zeitliche Entwicklung der Kolke und Dünen, sowohl hinsichtlich des Stammes als auch der beiden unterschiedlichen Installationshöhen.

Dafür wurden von Beginn jeder Versuchsdurchführung regelmäßige morphologische Laserscans der Sohle durchgeführt. Diese Daten wurden zu Oberflächenmodellen aufbereitet und anhand von Farbkonturdarstellungen und vertikalen Längsschnitten ausgewertet. Damit konnte die Entwicklung von Hauptkolken und Hauptdünen um und im Nachlauf des Wurzeltellers gezeigt werden.

Die signifikantesten Unterschiede in Bezug auf Kolkentiefe, -lage, -form, Dünenhöhe, -lage und -form traten zwischen solennaher und schwimmender Installation auf. Geringen Einfluss hatte hingegen der Stamm auf die Kolke und Dünen im Nachlaufbereich und keinerlei Einfluss auf die Kolkbildung oberstrom des Wurzeltellers.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Abstract

In rivers, deadwood plays an essential ecological role in preserving morphological and species diversity. When it comes to river restoration efforts, the installation of stationary trees with upstream-facing root plates provides a means to increase the presence of deadwood in rivers. However, the effects of these structures on the temporal evolution of riverbed morphology, depending on their distance from the riverbed, have been relatively underexplored and were therefore systematically investigated in this study using sediment flume experiments.

For this laboratory experiments, trees were idealized as a circular plate (root plate) and a circular cylinder (stem). Both the tree (stem with root plate) and root plates alone (without the stem) were examined in floating and near-bed positions. The study focused on the differences and impacts on the temporal development of pools and dunes, considering the stem and the two different installation heights.

To achieve this, regular morphological laser scans of the flume bed were conducted from the beginning of each trial. These scans were processed into surface models and analyzed using color contour plots and vertical longitudinal profiles. This approach enabled us to illustrate the development of main pools and dunes around and downstream of the root plate.

The most significant disparities in terms of pool depth, location, shape, dunes height, location, and shape were observed between near-bed and floating installations. The stem, on the other hand, had little influence on the pools and dunes downstream of the structure and had no impact on pool formation upstream of the root plate.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Motivation .....	3
3	Grundlagen zur Morphologie um Baumstrukturen .....	4
3.1	Beobachtung und Feldmessung um Baumstrukturen .....	4
3.2	Analogien mit ingenieurtechnischen Kolkprozessen .....	10
3.2.1	Tunnel scour (TS).....	10
3.2.2	Pier scour (PS).....	12
3.3	Zusammenfassung zum Stand des Wissens bezüglich der Morphodynamik um Baumstrukturen .....	13
3.4	Potenzial von Baumstrukturen als Fischhabitate.....	13
3.4.1	Bedeutung von Baumstrukturen als Teilhabitate für Fischökotope .....	13
3.4.2	Ökologische Funktionen von Kolken.....	16
4	Laborversuche .....	19
4.1	Versuchsrinne .....	19
4.2	Baummodell .....	19
4.3	Versuchsanordnungen .....	21
4.4	Messtechnik und -durchführung zur Morphologie.....	23
4.4.1	Regelmäßige Messungen im Nachlauf.....	25
4.4.2	Regelmäßige Messungen im Kolk oberstrom der Kreisscheibe.....	25
4.4.3	Abschlussmessungen (trocken) .....	26
4.4.4	Schwierigkeiten während der Messungen .....	26
4.5	Aufbereitung der Laserscanner-Rohdaten.....	26
4.5.1	Teilung, Zuordnung und Zusammenfügen der Rohdaten.....	26
4.5.2	Korrektur der Rohdaten.....	27
4.5.3	Aufbereitung in CloudCompare .....	29
4.6	Auswertung und Schnitte der Sohlenveränderungen .....	29
5	Ergebnisse der Laborversuche.....	30
5.1	Beobachtete Wirbelsysteme und Strömungsmuster .....	30
5.2	Kreisscheibe ohne Stamm, schwimmend (1a).....	31
5.3	Kreisscheibe mit Stamm, schwimmend (1b).....	34
5.4	Kreisscheibe ohne Stamm, sohlennah (2a, Db).....	38
5.5	Kreisscheibe mit Stamm, sohlennah (2b).....	43
5.6	Längsschnitte der Luftmessungen .....	47
5.7	Beobachtungen der Korngrößensortierung.....	48

5.8	Vergleich der Entwicklung von Dünenhöhen, Kolk-tiefen und Lage des SLS .....	50
5.8.1	Zeitliche Entwicklung der maximalen Dünenhöhe .....	50
5.8.2	Zeitliche Entwicklung des SLS bei Versuchen 1a und 1b.....	51
6	Diskussion.....	53
6.1	Unterschiede durch die Installationshöhe der Raubäume.....	53
6.2	Unterschiede zwischen Raubaum und Wurzelteller ohne Stamm.....	54
6.3	Vergleich mit Naturmessungen .....	55
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	56
	Literaturverzeichnis.....	58
	Abbildungsverzeichnis .....	59
	Tabellenverzeichnis.....	62
	Anhang.....	63



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 1 Einleitung

Totholz ist ein ökologisch wertvolles Element in Fließgewässern und sollte in diesen je nach Gewässertyp in unterschiedlicher Menge und Form vorkommen (Umweltbundesamt, 2014). Es schafft Struktur, besiedelbare Oberfläche, Retentionsvolumen für Sedimente, Diversität in Bezug auf die Strömung, die Wassertiefe, das Sediment und die Biologie. Selbst ist es Biomasse, daher Nahrung für viele Lebewesen und zusammengefasst bietet es Habitate für viele Arten. Wie in Abbildung 1 gezeigt können bei abfließender Hochwasserwelle Bäume mit Wurzelteller gegen die Fließrichtung ausgerichtet im Flussbett liegen bleiben bzw. mit dem Wurzelteller an der Sohle hängen bleiben und führen zu einer Diversität von Morphologie und Strömung. So bilden sich Kolke, Dünen und Schotterbänke um den Baum. Der Baum kann durch Verklausungen, Sedimentablagerungen und Bewuchs zu einer ortsstabilen Baumstruktur werden (Abbe, et al., 2003). Durch die Ausrichtung in Fließrichtung und einen Abstand zum Ufer bleibt der Verbaugrad niedrig und Uferinteraktionen oder -erosion bleiben gering oder vernachlässigbar.



Abbildung 1: Bei abfließender Welle auf den Schotterterrassen abgelagerter Baum im Fluss Tagliamento, Nordost-Italien (Fließrichtung von links nach rechts, Foto: Schnauder)

Der gute ökologische Zustand ist das Mindestziel, welches in der Wasserrahmenrichtlinie vorgegeben wird. Um bei der Renaturierung von Fließgewässern den guten ökologischen Zustand zu erreichen, ist Totholz Teil der Renaturierung und sollte daher belassen, eingebracht, ggf. eingebaut werden. Ein typischer Totholzanteil am Solsubstrat für den guten ökologischen Zustand ist >5-10% bei vielen Flusstypen, wie z.B. bei Flüssen der Kalkalpen, Flüssen des Alpenvorlandes oder kiesgeprägte Tieflandflüsse (Umweltbundesamt, 2014). Trotzdem wird Totholz aus Fließgewässern gezielt entfernt, um beispielsweise Verklausungen und Erosion der Sohle oder Ufer vorzubeugen. Der gezielte Einbau von Totholzstrukturen in Fließgewässer gewinnt deshalb zunehmend an Bedeutung, da diese lage- und ortsstabil ausgeführt werden können und damit das Risiko der Mobilisierung bei Hochwasser minimiert wird. Typische Totholzstrukturen sind Wurzelstöcke, Raubäume, Baumstämme, aus Baumfragmenten zusammengesetzte Strukturen (engl. ‚engineered log jam‘). Diese werden meist im Uferbereich schräg oder quer zur Fließrichtung eingebracht und dienen oft der Ufersicherung.

Eine weitere Möglichkeit den Totholzanteil zu erhöhen ist, ganze Bäume mit Wurzelteller, auch Raubaum genannt, in Fließrichtung orientiert und in Flussmitte platziert, einzubauen (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Das natürliche Vorbild davon sind abgelagerte Bäume in naturnahen kiesgeprägten und breiten Flüssen, wie in Abbildung 1 gezeigt. Die Auswirkungen dieser eingebauten Bäume auf das Fließgewässer sind noch unzureichend erforscht und sie kamen bisher nur vereinzelt bei Renaturierungen zur Anwendung. (Schnauder, et al., 2022) (Schulz-Zunkel, et al., 2022)



Abbildung 2: Einbau und Befestigung mit Ketten und Betonblöcken eines Raubaumes mit Wurzelteller in den Fluss Mulde bei Dessau, Sachsen-Anhalt (Fließrichtung von rechts nach links, Foto: Schrenner, WWF)



Abbildung 3: Fertig eingebauter Raubaum mit Wurzelteller. Fixiert durch Ketten und Betonblöcke. (Fließrichtung von rechts nach links, Foto: Nele Klimmer, WWF)

## 2 Motivation

In der Literatur finden sich Feldmessungen zu bereits eingebauten Raubäumen mit Wurzelteller, später auch als Baumstruktur bezeichnet (Schnauder, et al., 2022). Diese liefern zeitlich gesehen nur eine Momentaufnahme, jedoch keine Informationen, welche Prozesse und mit welcher Geschwindigkeit zu dem gemessenen Zustand führten. Um mehr über die Auswirkungen eines Raubaumes mit Wurzelteller auf die Morphologie der Sohle, die zeitliche Entwicklung der Sohle, sein Potenzial als Fischhabitat zu erfahren und damit den Einsatz in Zukunft zu erleichtern bzw. gezielter zu planen, wurden Laborversuche in einer Fließrinne durchgeführt. Die Systematik der zeitlichen Entwicklung der Morphologie der Sohle um ein Baummodell stand dabei wegen der fehlenden Informationen aus der Literatur im Fokus.

### 3 Grundlagen zur Morphologie um Baumstrukturen

#### 3.1 Beobachtung und Feldmessung um Baumstrukturen

Abbe und Montgomery (1996) untersuchten Baumstrukturen im Queets River, British-Columbia, USA. In Abbildung 4 ist eine Skizze aus deren Arbeit zu sehen. Sie zeigt eine im Fluss aufzufindende Baumstruktur. Dessen Hauptelemente sind der zentral liegende Baum mit Wurzelteller, der halbmondförmige Kolk oberstrom des Wurzeltellers (pool), die Ablagerung oberstrom des Kolks (bar) und die langgezogene Ablagerung entlang des Stammes (bar und floodplain). Der Wurzelteller ist gegen die Fließrichtung orientiert. Die Ablagerung vor dem Kolk ist nur bei live-bed Verhältnissen zu beobachten.

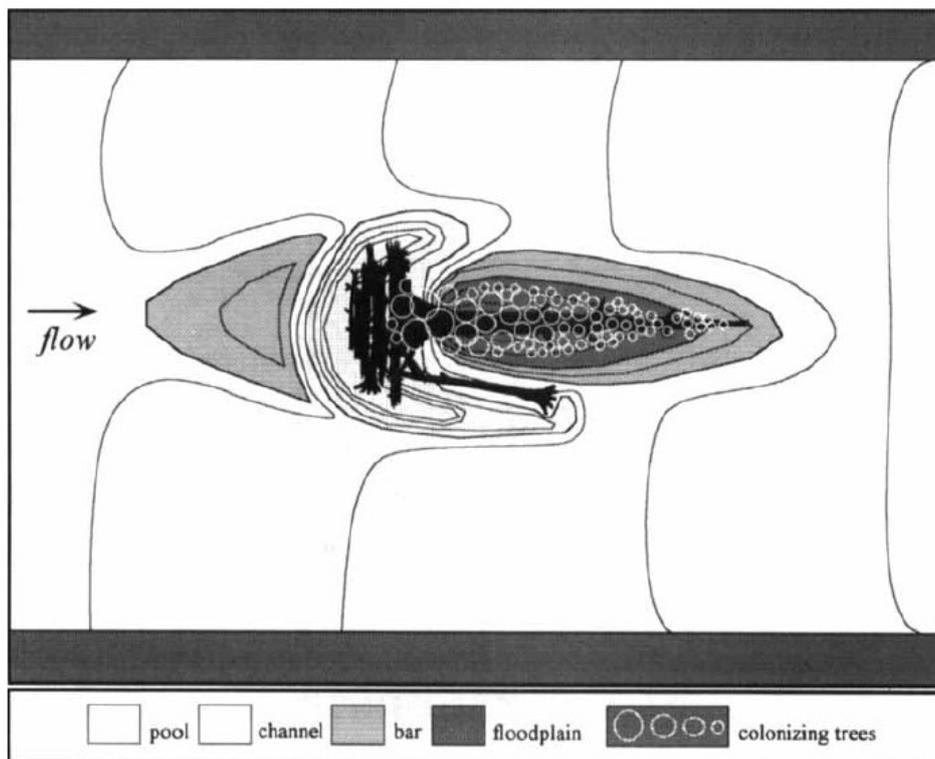


Abbildung 4: Skizze einer Baumstruktur im Fluss mit Darstellung der umgebenden Morphologie der Sohle (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996).

Sie unterteilten die Bildung dieser Baumstruktur in mehrere morphologische Stufen ein (siehe Abbildung 5). Zu Beginn wird ein Baum mit Wurzelteller abgelagert und beeinflusst die Strömung. So kommt es, wie in Abbildung 5a dargestellt, im Bereich der Plusssymbole (+) zur Erhöhung der Sohlenschubspannung, somit zum Abtrag der Sohle, und im Bereich der Minussymbole (-) zur Verringerung der Sohlenschubspannung, somit zu Ablagerungen. In Abbildung 5b ist die veränderte Sohle mit den oben genannten Hauptelementen und beginnender Verklausung dargestellt. In Abbildung 5c ist die Verklausung weiter fortgeschritten, der Kolk und die Ablagerungen haben sich vergrößert und es kann zu einer Inselbildung entlang des Stammes kommen.

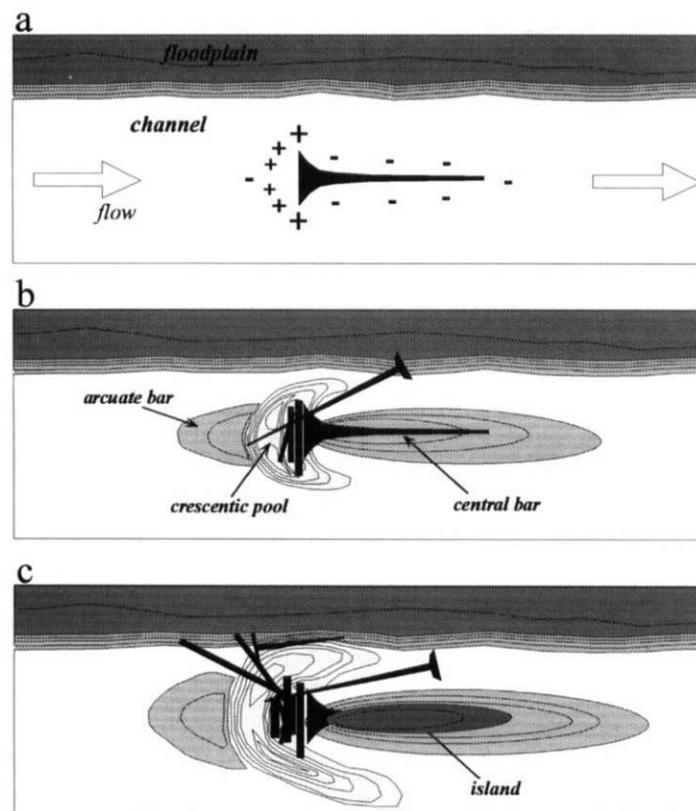


Abbildung 5: Einteilung der Entwicklung der Sohle um eine Baumstruktur in morphologische Stufen a, b, c (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996).

In Abbildung 6 ist eine Feldmessung der Sohlenmorphologie um eine Baumstruktur dargestellt. Sie zeigt den Baum mit Wurzelteller, den halbmondförmigen Kolk, die leicht ausgeprägte Ablagerung vor dem Kolk und eine Ablagerung mit zwei Hochpunkten entlang des Stammes.

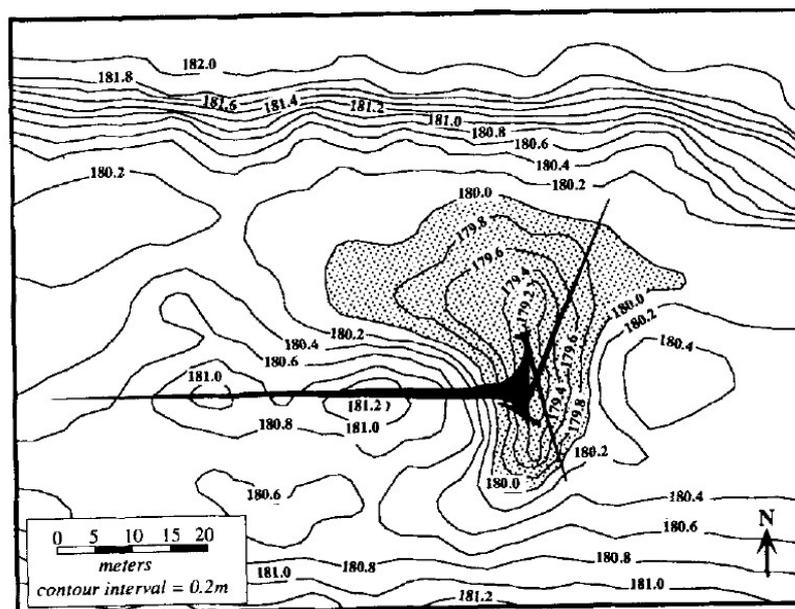


Abbildung 6: Feldmessung der Sohlenveränderungen durch Umströmung einer Baumstruktur. (Fließrichtung von rechts nach links, modifizierte Abbildung nach Abbe & Montgomery, 1996)

Der HSV (siehe unten 3.2.1 und 3.2.2) ist das Strömungsmuster das zur Kolkbildung vor der Baumstruktur führt und ist in Abbildung 7 in der ersten morphologischen Stufe (siehe Abbildung 5a) in der Symmetrieachse des Baumes idealisiert dargestellt.

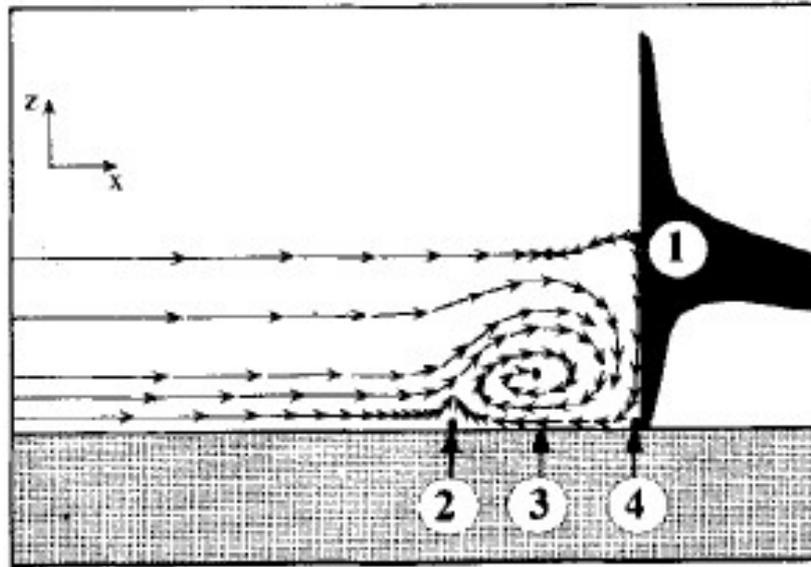


Abbildung 7: Qualitatives Strömungsmuster vor der Baumstruktur vor der Kolkbildung. (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996)

Im Gegensatz zu Abbildung 7 ist in Abbildung 8 das im Feld gemessene Strömungsmuster nach der Kolkbildung dargestellt. Hier ist ebenfalls der HSV erkennbar.

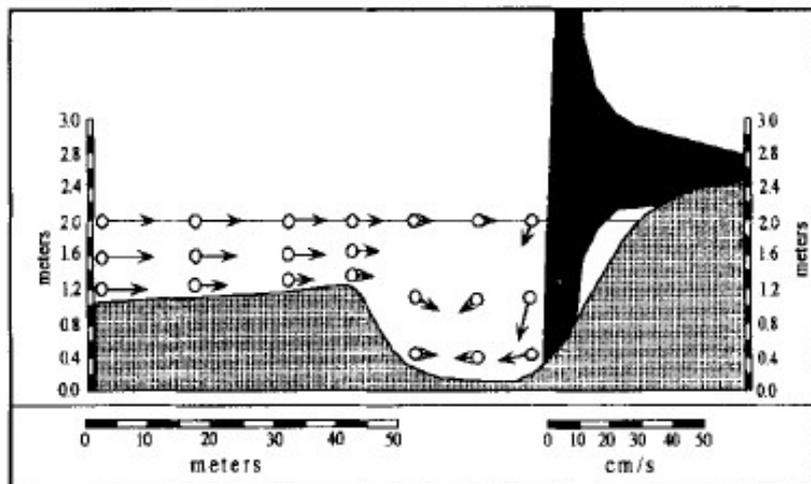


Abbildung 8: Gemessenes Strömungsmuster vor der Baumstruktur bei vorhandenem Kolk. Pfeillänge entspricht der gemessenen Geschwindigkeit. (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996)

Bäume werden bei Hochwasser mobilisiert und werden bei abfließender Welle im Flussbett abgelagert. Dabei bleiben sie am Wurzelteller an der Sohle hängen und orientieren sich mit dem Wurzelteller gegen die Fließrichtung. Sobald der Baum ortsstabil ist, kommt es, wie in Abbildung 9 zu sehen, zur Anpassung der Sohle um die entstandene Baumstruktur. Bleibt die Baumstruktur stabil, kann es zu der in Abbildung 9 gezeigten morphologischen Entwicklung kommen (Gurnell, et al., 2005).

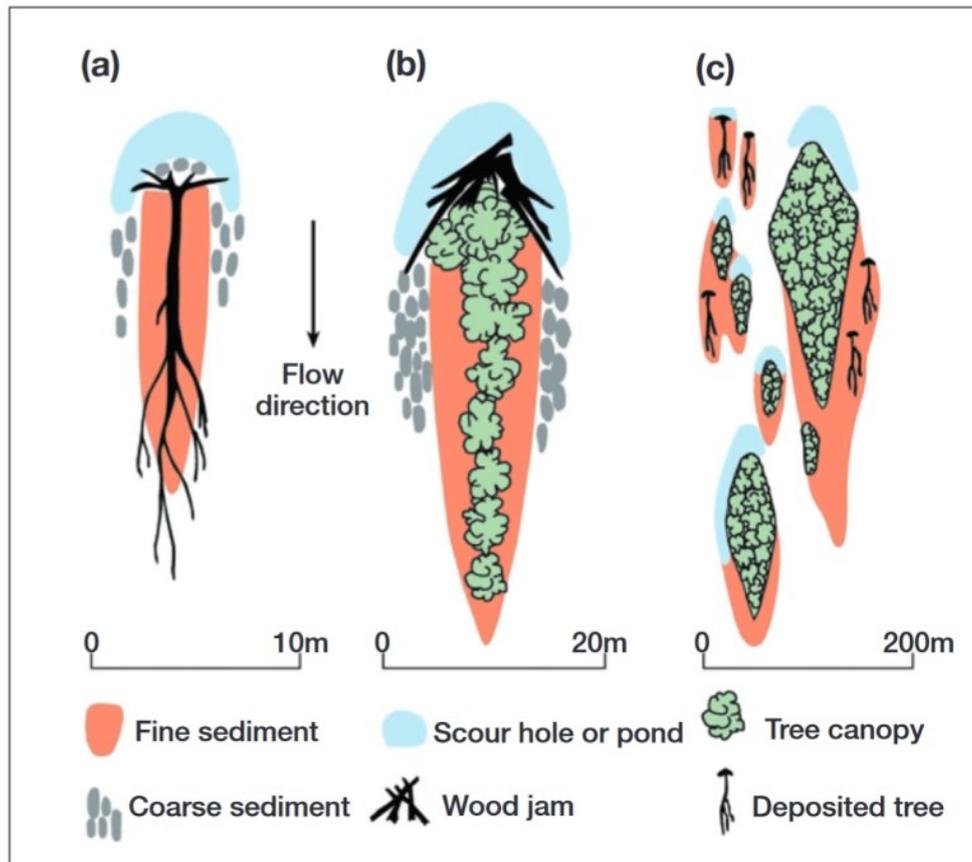


Abbildung 9: Morphologische Entwicklungen des Flussbettes um bzw. durch Baumstrukturen. (a) Baum, lagestabil bei abfließender Welle auf Flusssohle, deponiert mit halbmondförmigen Kolk, Feinsedimentablagerungen entlang des Stammes und grobes Sediment im Bereich der Scherschichten. (b) Ältere und größer gewordene Baumstruktur mit Verkläuserung und Bewuchs. (c) Durch mehrere Baumstrukturen entstandene Flusslandschaft mit Inselbildung. (modifizierte Abbildung aus Gurnell et al., 2005)

Im LW-Manual (2016) wird auf abgelagerte Bäume wie in Abbildung 10 eingegangen. Es wird darin der Wert  $B$  definiert, der die Verringerung der Abflussbreite angibt, und qualitativ das hydraulische Muster um den Baum behandelt. Die Wirbelgröße an den Scherschichten im Verhältnis zum Wurzeltellerdurchmesser wirkt sich auf Sedimentation in der Rezirkulationszone aus (Bureau of Reclamation and U.S. Army Engineer Research and Development Center (USBR and ERDC), 2016).

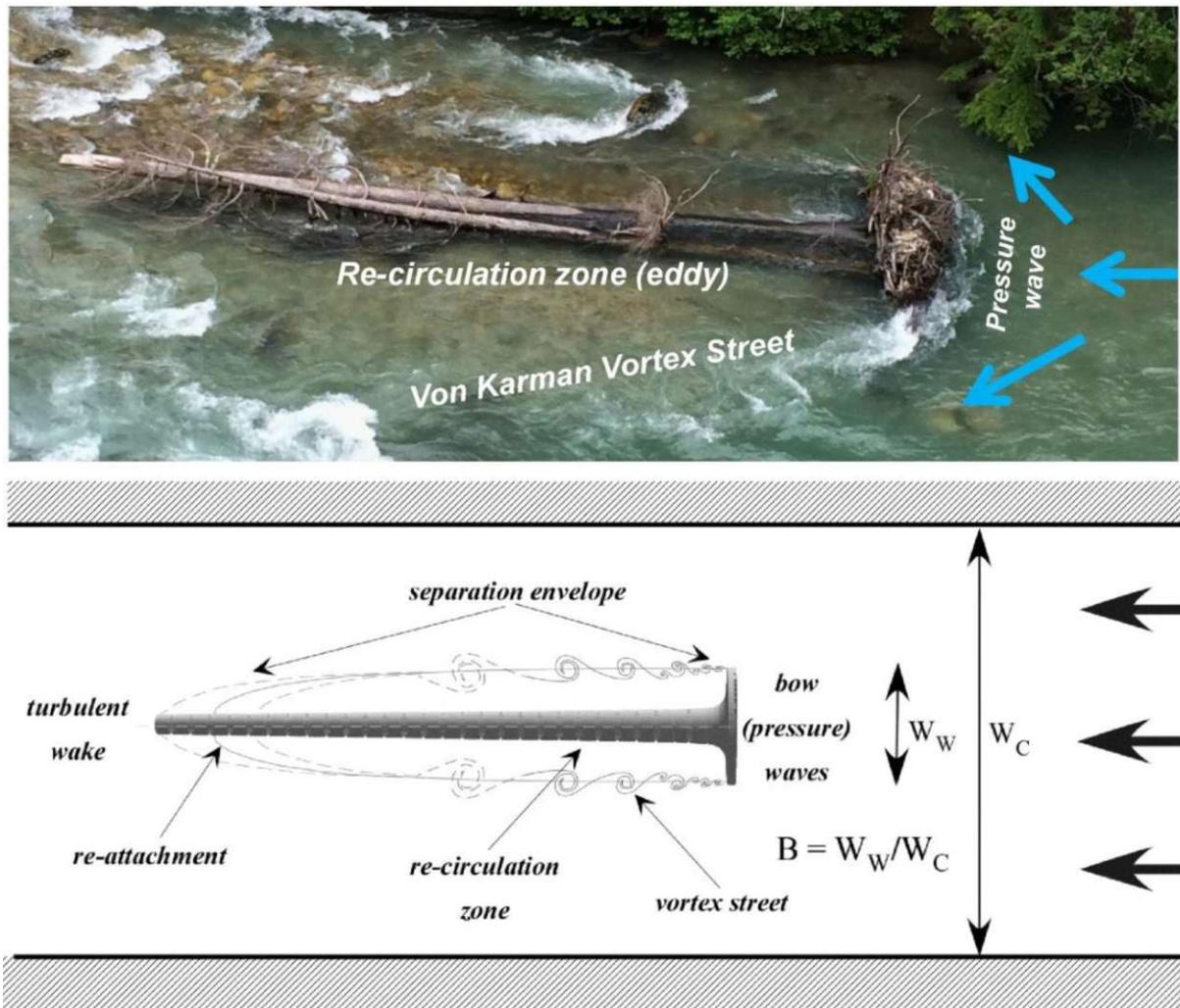


Abbildung 10: Abgelagerter Baum mit Wurzelschock (Bild oben). Qualitative Beschreibung des Strömungsmusters um den Baum (Bild unten, Scherschicht fälschlicherweise als vortex street bezeichnet). (Fig. 4.9 aus LW-Manual, 2016)

Im Fluss Mulde in Deutschland wurden Raubäume mit Wurzelteller durch Ankerketten und Betonblöcke ortsgebunden installiert (siehe Abbildung 11). Dabei blieb durch den Auftrieb der Bäume ein Freiheitsgrad in vertikaler Richtung erhalten. Die Bäume konnten also bei Hochwasser aufschwimmen und sich von der Sohle lösen und bei Niedrigwasser auf die Sohle ablegen. Messungen hierzu liegen jedoch keine vor und auch ein ggf. vorhandener Bodenkontakt der Wurzel während der durchgeführten Messkampagne war aufgrund der Wassertrübung durch Algenblüte nicht zweifelsfrei zu bestimmen. (Schnauder, et al., 2022), (Schulz-Zunkel, et al., 2022)



(Foto: Schrenner, 2018)

Abbildung 11: Eingebauter Raubbaum nach einem Jahr bei Niedrigwasser. Fixiert durch Ketten und Betonblöcke. Anderer Baum als in Abbildung 12. (Fließrichtung von rechts nach links, Foto: Schrenner, 2018)

In Abbildung 12 ist die Topografie der Sohle ein Jahr nach der Installation der Raubäume dargestellt. Die zwei Baumstrukturen sind dabei mit dem Wurzelteller gegen die Fließrichtung orientiert. Bei Baum 1 (Tree 1) ist ein halbmondförmiger, relativ symmetrischer Kolk (engl. 'crescent shape pool'), um den Wurzelteller zu erkennen. Im Bereich des Stammes und weiter in Fließrichtung ist eine langgezogene Sedimentablagerung zu sehen, die größte Ablagerung liegt dabei links des Stammes.

Baum 2 (Tree 2) hat einen unsymmetrischen Kolk um den Wurzelteller, jedoch eine annähernd symmetrische und große Sedimentablagerung entlang des Stammes und im Nachlauf. Grundsätzlich sind beide Erosions- und Ablagerungsstrukturen qualitativ ähnlich, jedoch fallen die Ablagerung um Baum 2 wesentlich größer aus und die Erosion im Kolk geringer. Dies lässt sich mit der Lage von Baum 2 im Nachlauf von Baum 1 erklären (Schnauder, et al., 2022).

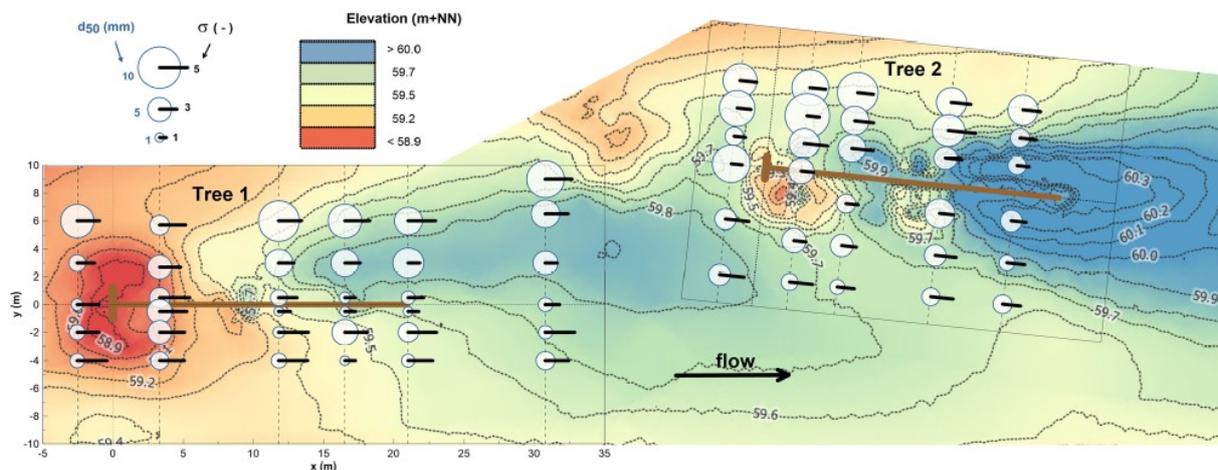


Abbildung 12: Messung der Sohlenlage und Sedimentverteilung um zwei Baumstrukturen. (modifizierte Abbildung aus Schnauder et al., 2022)

### 3.2 Analogien mit ingenieurtechnischen Kolkprozessen

In Tabelle 1 sind relevante technische Kolktypen zusammengefasst und die Größenordnung der Kolktiefe, bezogen auf die Objektgröße, angegeben. Anschließend wird detaillierter auf den tunnel scour (TS) und den pier scour (PS) eingegangen.

Table 1 Summary of the most relevant properties of technical scour types for clear-water conditions. Data from deposited trees and Mulde LWD installations were added for comparison.

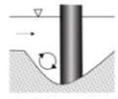
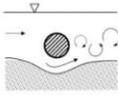
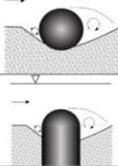
Type	Configuration	Study	Scour depth (clear-water)	Deposition height	Equilibrium time-scale	Authors
	Reference case: Single vertical cylinder	flume	$1.4 - 2.3 D$ (fine – coarse sediment at subcritical Fr-numbers)			Garcia (2007)
	Single horizontal cylinder, 2D case (infinite length), over- and underflow	flume	$0.3 - 1.0 D$ (uniform sand)		$T^* = 0.02 \theta^{-1.7}$	Mao et al., 1986 Sumer et al., 1988 Fredsoe et al. (1992) Fredsoe, 2016
	Underflow rectangular bridge deck 2D case	flume	$2.2 D$ (uniform sand)			Hahn & Lyn (2010)
	Single horizontal cylinder, 3D case (finite length)	numerical	$0.4 - 0.55 D$ (for slenderness $L/D = 1 - 6$ , uniform sand)		increased	Liang et al., (2020)
	Single sphere (vertically fixed)	flume	$0.22 D$ (uniform sand)			Truelsen et al. (2005)
	Movable submerged bluff body of finite width, subject to self-burial processes	flume				
	Fixed submerged pier	flume				Euler et al. (2017)
	No information	field	$0.5 D$ (up to 1.0 m for a debris-jammed tree width of 2.0 m, gravel-bed) $0.13 D$ (1.35 m for a debris-jammed tree width of 10.0 m, gravel-bed)			Edwards et al., 1999 Abbe & Montgomery, 1996

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten technischen Kolktypen bei Klarwasserverhältnissen. (Tabelle: Schnauder)

#### 3.2.1 Tunnel scour (TS)

Tunnelerosion/Tunnelkolk (eng. 'tunnel scour') (TS) wurde im Rahmen von Unterwasserpipelines untersucht, z.B. Kabelstränge am Meeresboden. Daher liegen Erkenntnisse nur für einfache geometrische Querschnitte vor. Dazu gehören infinite horizontale Kreiszyylinder und finite horizontale Kreiszyylinder mit einer Schlankheit von  $L/D = 1-6$  (Tabelle 1). Beim TS sind zwei Prozesse zu unterscheiden: die Untertunnelung (eng. 'jet-scour') und die Wirbelstraße (eng. 'vortex-shedding') im Nachlaufbereich.

Von Sumer et al. (1988) wurden Versuche mit horizontal angeströmten Kreiszyindern in Wandgrenschichten und mit beweglicher Sohle durchgeführt. Dabei wurde auf die Wirbelablösungen unterhalb und oberhalb des Kreiszyinders eingegangen und die daraus resultierenden Sohlenveränderung gemessen. Wie in Abbildung 13 zu sehen, wurde dabei ein Kreiszyylinder auf der Sohle platziert, überströmt, unterströmt, die Kolkbildung/Sohlenveränderung gemessen und als Längsschnitt dargestellt.

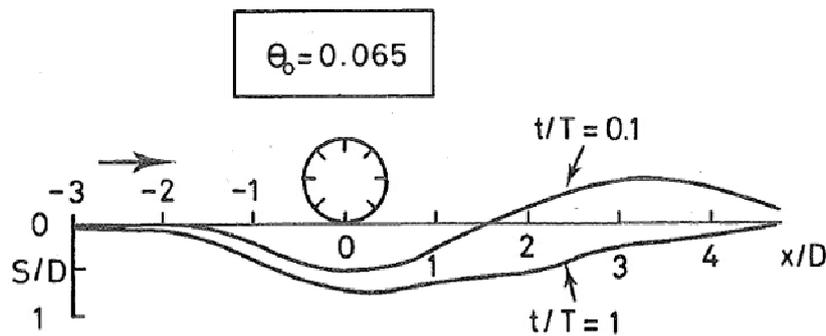


Abbildung 13: Längsschnitt der Sohlenveränderung bei Über- und Unterströmung eines horizontal angeordneten Kreiszyinders mit Durchmesser  $D$  bei clear-water-scour und live-bed Verhältnissen.  $D = 100$  mm,  $T = 250$  min (Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes).  $S$  = Kolktiefe,  $t$  = Zeit,  $\theta_0$  = Shields-Parameter der ungestörten Sohle. (modifizierte Abbildung aus Sumer et al., 1988).

Durch die Unterströmung entstand ein Tunnelkolk, der mit der Zeit in Fließrichtung größer wird und hier bei  $t/T=1$  seinen Gleichgewichtszustand erreicht. Bei der Kurve  $t/T = 0,1$  ist der Tunnelkolk unter dem Kreiszyinder zu sehen und eine Düne aus abgelagertem Material aus dem Tunnelkolk. Bei der Kurve  $t/T = 1$  (Gleichgewichtszustand) ist die Düne abgetragen bzw. in Fließrichtung transportiert, der Tunnelkolk länger und der tiefste Punkt ist in Fließrichtung gewandert. Die maximale Kolktiefe liegt hier bei etwa  $0,8 D$  und die Länge des Kolkloches bei etwa  $7 D$ . Der Shields-Parameter  $\theta_0$  der ungestörten Sohle betrug  $0,065$  und lag etwas über dem kritischen Wert  $\theta_{cr}$  von  $0,04$ . Somit lagen live-bed Verhältnisse vor. Anders wie bei der Baumstruktur kommt es hier zu einer Über- und Unterströmung, einer zweidimensionalen Strömung und zu Wirbelablösungen oberhalb und unterhalb des Kreiszyinders (Sumer, et al., 1988).

Andere Versuche wurden von Truelsen et al. (2005) mit einer Kugel durchgeführt. Dabei entstand eine dreidimensionale Strömung, ähnlich wie bei der Baumstruktur. Vor der Kugel bildet sich zu Beginn ein Hufeisenwirbelsystem (eng. ‚horseshoe-vortex system‘) (abgekürzte Bezeichnung: HSV) (siehe auch Abbildung 15), das zur Kolkbildung führt. Die Kolkbildung durch den HSV führt mit fortschreitender Zeit und Größe des Kolkes zu einer Untertunnelung und zur Abschwächung des HSV. In Abbildung 14 ist abhängig vom Abstand der Kugel zur Sohle die Gleichgewichtskolktiefe des Tunnelkolkes eingetragen (Truelsen, et al., 2005).

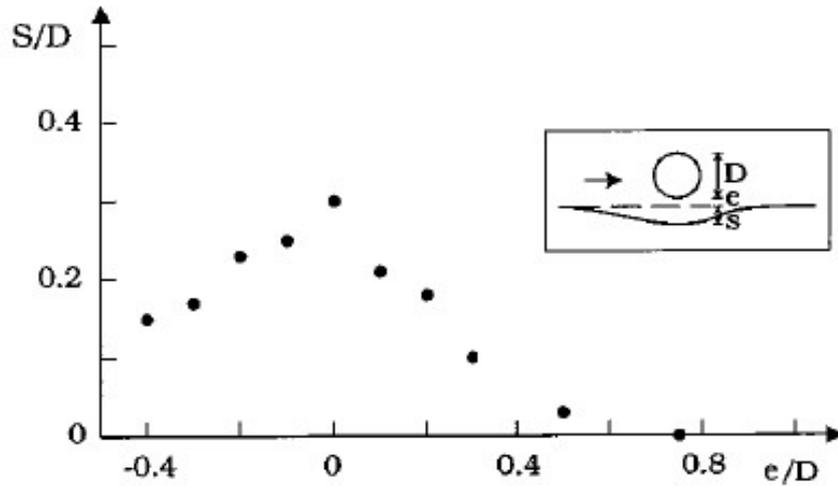


Abbildung 14: Einfluss der Position einer Kugel auf die Gleichgewichtskolkentiefe.  $D$  = Kugeldurchmesser,  $e$  = Abstand der Kugel zur Sohle,  $S$  = Gleichgewichtskolkentiefe.  $\theta = 0.12$  (modifizierte Abbildung aus Truelsen et. al., 2005).

Bei  $e/D = 0$  ist der Kolk mit  $S/D = 0,3$  am tiefsten. Mit zunehmendem Abstand der Kugel zur Sohle ( $e/D > 0$ ) verringert sich die Kolkentiefe und geht ab  $0,8 e/D$  gegen Null. Bei  $e/D < 0$  ist die Kugel teilweise in der Sohle eingegraben. Hier kommt es ebenfalls zu einer Abnahme der Gleichgewichtskolkentiefe (Truelsen, et al., 2005).

### 3.2.2 Pier scour (PS)

Bei nicht überströmten, stehenden Objekten wie z.B. dem stehenden Kreiszyylinder kommt es an der angeströmten Seite zur Entstehung eines „Horseshoe-Vortex“ (HSV) Wirbelsystems (siehe Abbildung 15). Der HSV entsteht nahe der Sohle durch die nach unten abgeleitete Strömung an der angeströmten Seite des Kreiszyinders und führt zur Kolkbildung vor dem Kreiszyylinder. Mit zunehmender Kolkgröße nimmt die Stärke des HSV ab und es kommt zu einem Gleichgewichtszustand, bei dem der Kolk seine Größe nicht mehr verändert. Ein weiteres Wirbelsystem bildet sich in Fließrichtung direkt hinter dem Kreiszyylinder, der „Wake-Vortex“ (WV) (siehe Abbildung 15). Der WV führt nahe dem Kreiszyylinder zur Kolkbildung, verliert jedoch weiter in Fließrichtung relativ schnell an Stärke und so sind meist Ablagerungen im Nachlaufbereich zu beobachten (Richardson, et al., 2001).

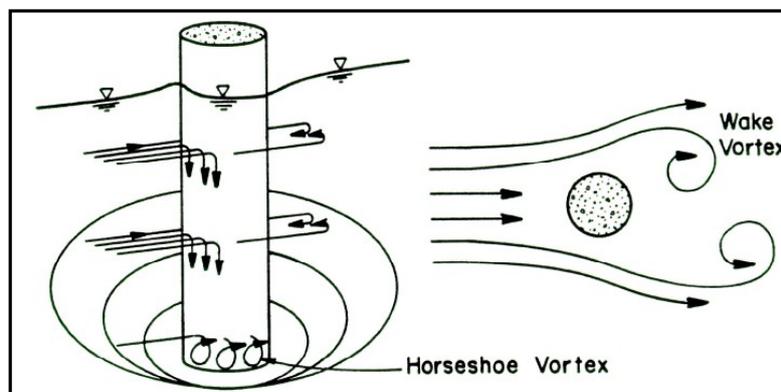


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Kolkes und der Strömung um einen stehenden Kreiszyylinder. Modifizierte Abbildung aus Richardson und Davis 2001.

### 3.3 Zusammenfassung zum Stand des Wissens bezüglich der Morphodynamik um Baumstrukturen

Für ganze Baumstrukturen liegen kaum quantifizierende Messungen vor und die meisten Studien wurden qualitativ durchgeführt, ohne die hydraulischen Randbedingungen zu erfassen. Die qualitativen Beobachtungen zeigen jedoch recht ähnliche Muster bei den Kolken und Ablagerungen, insbesondere die Halbmondform des Kolkes (engl. 'crescent shape') und langgezogene Sedimentablagerungen im Nachlaufbereich entlang des Stammes. Sedimentablagerungen durch den Aufstauereffekt oberstrom des Wurzeltellers wurden ebenfalls in mehreren Studien beobachtet.

Die hydraulischen und morphologischen Prozesse, die diese Muster um die Bäume verursachen, sind derzeit noch weitgehend spekulativ und schwer mit ingenieurtechnischen Kolkprozessen, wie „tunnel scour“ und „pier scour“, zu vergleichen. Letztere haben klare Randbedingungen und gehen von lagestabilen Objekten aus, was im Falle von abgelagerten oder installierten Baumstrukturen nicht der Fall ist. Porosität und Form der Baumstrukturen sind weitere Eigenschaften, die sich schwer mit geometrischen Vollkörpern (Kreiszyylinder, Kugel) vergleichen lassen.

### 3.4 Potenzial von Baumstrukturen als Fischhabitate

Fische sind die aquatischen Organismen, denen bezüglich der Habitatanforderungen immer noch am meisten Aufmerksamkeit geschenkt wird. Demgegenüber sind die Ansprüche von Makrozoobenthos, Wasserpflanzen, Algen oder Biofilmen weitaus weniger erforscht. Folglich lassen sich bisher eigentlich nur für Fische Kriterien zur Habitateignung von Baumstrukturen, insbesondere zu den entstehenden Kolken, in der Literatur finden, die nachfolgend kurz zusammengestellt werden.

#### 3.4.1 Bedeutung von Baumstrukturen als Teilhabitate für Fischökotope

Nach Barkdoll et al. (2012) brauchen Fische in Fließgewässern unabhängig von der Art folgende Mindestanforderungen an ihren Lebensraum:

- unterschiedliche Teilhabitate (Diversität)
- Bereiche mit Schutz vor Fressfeinden
- ausreichende Wassergüte
- Bereiche mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten, um sich zu entwickeln, um zu rasten, um sich zu verstecken, für die Nahrungssuche und zum Laichen.
- geeignete Wassertemperatur
- entsprechend große Bereiche, um heranzuwachsen

Für die Herstellung fischartspezifischer Fischökotope sind unterschiedliche Teilhabitate zu planen. Abgeschätzte Orientierungswerte für die einzelnen Teilhabitate sind in der Literatur vorhanden (Becker, et al., 2022). Typische Teilhabitate in einem Fischökotop sind z. B.

- flache strömungsarme Bereiche,
- flach abfallende, angeströmte Bereiche,
- Deckungsstrukturen und
- Kolke.

Diese Teilhabitate sind charakterisiert durch die Mindestgröße, Flächenanteil, Verteilung, Tiefe und Fließgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 16 bis Abbildung 18). Sie haben für ein funktionierendes Fischökotop in den für die jeweilige Art angeführten Wertebereichen zu liegen. Nur wenn alle Teilhabitate in entsprechender Qualität und Quantität vorhanden sind, kann von einem funktionierenden Fischökotop ausgegangen werden (Becker, et al., 2022).

Installierte Baumstrukturen stellen potentiell ein Inventar an den oben aufgezählten Teilhabitaten bereit. Besonders die Auskolkungen um Baumstrukturen können gut mit den fischspezifischen Anforderungen abgeglichen werden. So können in der Planung Baumgröße, Wurzeltellerdurchmesser oder Stammlänge so festgesetzt werden, dass optimale Bedingungen für Fische entstehen (Anlanger, et al., 2022).

Die Größe, Positionierung und erforderliche Anzahl der Baumstrukturen kann, z. B. für ein Barben-Ökotoptop, aus den in Abbildung 16 und Abbildung 17 angegebenen Orientierungswerten für die Teilhabitate Kolke und Deckungsstrukturen abgeleitet werden. So ist entlang eines mindestens 5 km langen Flussabschnittes 1 % der Wasserfläche mit großen Kolken mit mindestens 15 m<sup>2</sup> Fläche, mindestens einem Meter Tiefe, besser mit mehr als zwei Meter Tiefe, vorzusehen. Auf 10 % der Wasserfläche sind kleine Kolke und Deckungsstrukturen mit jeweils mindestens 6 m<sup>2</sup> Fläche, mosaikartig verteilt im Flussabschnitt und mindestens einem Meter Tiefe bzw. mindestens 0,5 Meter Tiefe zu planen.

Barbe Herstellung eines Fischökotops (Schätzungen)			Lauflänge ≥ 5 km	
Strukturen	Teilhabitate für	Mindestfläche (Einzelstruktur)	Relative Lage	Flächenanteil
1. überströmte Kiesflächen	Laichplatz	50 m <sup>2</sup>	oberhalb 2.	5 %
2. flache, strömungsarme Bereiche	Brütlinge	8 m <sup>2</sup>	unterhalb 1.	10 %
3. flach abfallende, angeströmte Bereiche	Juvenile	20 m <sup>2</sup>		15 %
4. Fließrinnen	Adulte, Juvenile	50 m <sup>2</sup>		20 %
5. Deckungsstrukturen	Adulte, Juvenile	6 m <sup>2</sup>	verteilt im PB	10 %
6. Kolke	klein Adulte, Juvenile	6 m <sup>2</sup>	verteilt im PB	
	groß Adulte	15 m <sup>2</sup>		1 %

Abbildung 16: Orientierungswerte für die Herstellung eines Barben-Ökotops. Modifizierte Abbildung aus Becker et al. (2022).

Bachforelle Herstellung eines Fischökotops (Schätzungen)			Lauflänge: wenige 100 m	
Strukturen	Teilhabitate für	Mindestfläche (Einzelstruktur)	Relative Lage	Flächenanteil
1. überströmte Kiesflächen	Laichplatz	5 m <sup>2</sup>	v.a. oberhalb 2.	10 %
2. flache, strömungsarme Bereiche	Brütlinge	4 m <sup>2</sup>	nahe oder unterhalb 1.	10 %
3. Rauschen	Juvenile	30 m <sup>2</sup>		15 %
4. Deckungsstrukturen	Adulte, Juvenile	2 m <sup>2</sup>	mosaikartig verteilt (auch < 30 m zu 1.)	20 %
5. Kolke	Adulte	4 m <sup>2</sup>		

Abbildung 17: Orientierungswerte für die Herstellung eines Bachforellen-Ökotops. Modifizierte Abbildung aus Becker et al. (2022)

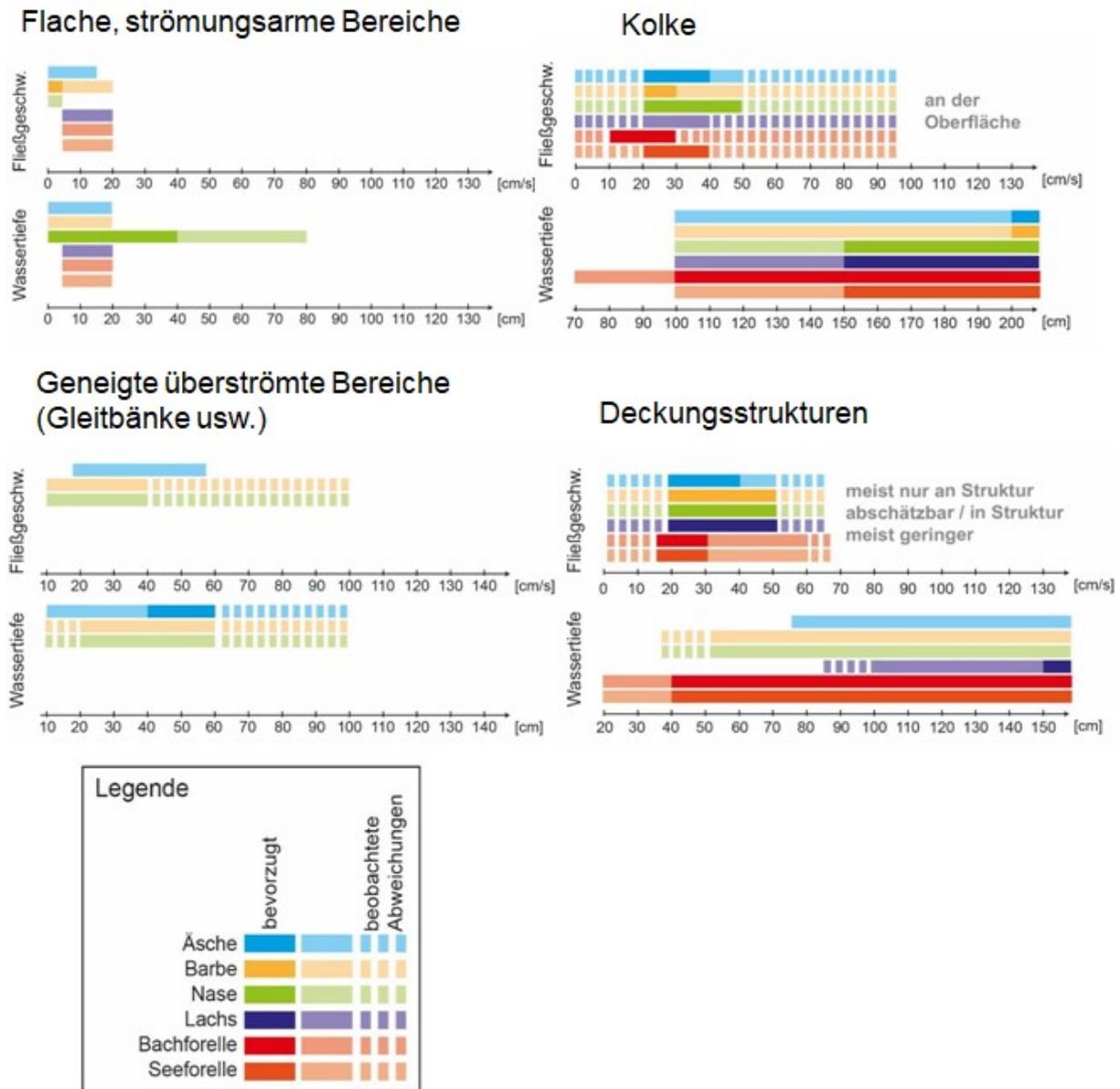


Abbildung 18: Orientierungswerte der artspezifischen hydro-morphologischen Habitateignung. Modifizierte Abbildungen aus Becker et al. (2022).

### 3.4.2 Ökologische Funktionen von Kolken

Kolke stellen für unterschiedliche Lebewesen im Gewässer zeitlich-räumlich dynamische Funktionen bereit. Diese sind für die meisten aquatischen Organismen und selbst für die meisten Fischarten noch nicht hinreichend bekannt, erschlossen, klassifiziert und parametrisiert.

Beispielsweise bilden nach Becker et al. (2022) Kolke wichtige Einstandsräume für zahlreiche Fischarten. Sie werden wegen der erhöhten Tiefe und häufig vorhandener Deckungsstrukturen (Oberflächenturbulenz, Wurzelwerk, Unterspülungen, Totholz) meist als Unterstand genutzt, dienen auch als Überwinterungsorte oder während der Tageszeit als Ruheräume.

Die Entstehung von Kolken kann mittels Strukturen, z. B. Totholzstrukturen, aber auch Brückenpfeiler, durch die gezielte Strömungslenkung und die Initiierung eigendynamischer Prozesse gefördert bzw. geplant werden. Je nach der Beschaffenheit der Sohle können sich Kolke durch Änderung der Strömungsverhältnisse sehr schnell bilden und als Teilhabitat für gewisse Zeit geeignet sein. Kolke können jedoch durch zu große Abflüsse, wegen zu hoher Strömungsgeschwindigkeiten oder ungünstiger Wirbelsysteme im Kolk, als Teilhabitat zeitlich

begrenzt unbrauchbar sein. Bei Niedrigwasser werden sie dann oft wegen ihrer Tiefe zu einem überlebenswichtigen Refugium für viele Arten. (Barkdoll, et al., 2012)

Barben brauchen Deckungsstrukturen, die von mehreren Tieren genutzt werden können. Dafür sind relativ große, tiefe Kolke im Idealfall mit zusätzlichen Deckungsstrukturen notwendig. Diese Kolke dienen als Wintereinstände bei oft Niedrigwasserbedingungen und werden auch in anderen Jahreszeiten bei höheren Abflüssen genutzt. Auch kleinere Kolke sind erforderlich, da sie von Einzeltieren oder Kleingruppen als Unterstand genutzt werden. Bachforellen benötigen ebenfalls Kolke bzw. Deckungsstrukturen, da sie am Laichplatz (ca. < 30 m Entfernung) Unterstandsmöglichkeiten benötigen, um vor, zwischen und nach den eigentlichen Laichvorgängen Ruhephasen einlegen zu können. Diese Kolke sollten eine größere Wassertiefe, eine reduzierte Fließgeschwindigkeit und Sichtschutz nach oben aufweisen. Gut geeignet sind z. B. Kolke mit Turbulenz an der Wasseroberfläche, Kolke um Totholz, unterspülte Ufer und Wurzelraumkolke. (Becker, et al., 2022)

Nach Avery-Gomm et al. (2014) bieten die Kolke in Kolk-Furt-Sequenzen Niedrigwasser-Refugien für die bei mittleren Abflüssen in Furten lebenden Arten. Mit der Zeit sinkt jedoch die Wasserqualität (bez. Sauerstoff, Temperatur), sowie die Verfügbarkeit von Nahrung und es steigt die Exposition gegenüber Fressfeinden. Damit ist die Refugialfunktion zeitlich limitiert, bzw. die Habitatqualität nimmt mit der Zeit in Kolken ab.

Auch Magoulik et al. (2003) bestätigen die Wichtigkeit der Wassergüte für die Überlebenschancen in Kolken, darunter Wassertemperatur, gelöste Sauerstoffkonzentration, pH-Wert und Nährstoffgehalt. Die Durchströmung, der Wasseraustausch und die Konnektivität sind also neben der reinen Geometrie der Kolke weitere wichtige Parameter für die Habitateignung als Niedrigwasserrefugium.

Nach Barkdoll et al. (2012) interagieren Fische mit dem Sediment der Flusssohle auf mehrere Art und Weise. Zum Beispiel hat es Auswirkungen auf Fortpflanzung und Nahrungssuche. Geeignete Korngrößen für die Eiablage sind je nach Fischart unterschiedlich. Um Feinsedimentablagerung und damit Verlust an Durchlässigkeit der Sohle zu verhindern, z. B. sehr wichtig auf den Laichflächen und für die Gesundheit des Makrozoobenthos, muss die Fließgeschwindigkeit entsprechend hoch sein. Fische haben artspezifisch eine maximale nachhaltige Dauerschwimmgeschwindigkeit, abhängig von Alter, Fischgröße, Gesundheit und Wassertemperatur. Sie besitzen eine kurzzeitige maximale Schwimmgeschwindigkeit (ca. 20 sec.) und eine lange maximale Schwimmgeschwindigkeit (ca. 20 bis 200 Minuten). Die Strömungsverhältnisse im gesamten Habitat müssen in Summe dem Fisch ermöglichen, gegen die Strömung zu schwimmen und die Position halten zu können. Strömungssysteme um Strukturen können Strömungsgeschwindigkeiten erhöhen oder auch verringern und somit Fischen beim Halten der Position helfen bzw. es schwieriger machen.

Lokale Kolke können wegen ihrer unterschiedlichen Entstehungsart, Formen, Durchströmungsarten und dynamischen Wirbelsystemen eine Varianz der Wassertiefe und Schubspannungsgeschwindigkeiten bereitstellen (siehe 3.2) womit durch die Kornsortierungswirkung der Strömung eine Varianz in den Korngrößen der Deckschichten einhergeht.

Zusammenfassend lassen sich also weitere Kriterien definieren, die für die Eignung als Habitat wichtig sind, aber nicht in 3.4.1 erfasst wurden. (Becker, et al., 2022), (Avery-Gomm, Stephanie; Rosenfeld, Jordan S.; Richardson, John S.; Pearson, Michael, 2014), (Magoulick, et al., 2003), (Barkdoll, et al., 2012), (Matthews, et al., 1994), (Mcintosh, et al., 2000)

- Deckungsstrukturen (Schutz vor Räubern): Überdeckung/Beschattung/Sichtschutz (Becker, et al., 2022)
- Wasserqualität im Kolk (u. a. Wassertemperatur, gelöster Sauerstoffgehalt, Nährstoffe) (Magoulick, et al., 2003)
- Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser (Matthews, et al., 1994)
- Sedimenteigenschaften; Korngröße, Kornsortierung, Feinsedimentanteil (Barkdoll, et al., 2012)
- Strömungsstruktur, Fließgeschwindigkeit und Turbulenz im Kolk (abflussabhängig) (Barkdoll, et al., 2012)
- Niedrigwasserrefugium, Niedrigtemperaturrefugium, Hochwasserrefugium (Barkdoll, et al., 2012), (Mcintosh, et al., 2000)
- Konnektivität mit anderen Teilhabitaten und Kolken über Furten und/oder Fließrinnen (Barkdoll, et al., 2012)

## 4 Laborversuche

### 4.1 Versuchsrinne

Die Laborversuche wurden im Wasserbaulabor der TU Wien in einer 30 m langen und 2,5 m breiten Versuchsrinne durchgeführt (siehe Abbildung 19). Das Sediment der Rinne war ein Mittelsand mit mittlerem Korndurchmesser  $d_{50}=1,5$  mm, mit einer Standardabweichung von 2,4. Der Kleinstkorndurchmesser betrug 0,3 mm und der Größtkorndurchmesser 5 mm. Ab 4 m vom Zulauf der Rinne bis 10 m hatte das Sediment eine Schichtstärke von 0,15 m, von 10 m bis 20 m eine Schichtstärke von 0,75 m.

Die Versuche wurden unter Klarwasserbedingungen (engl. 'clear water conditions' bzw. 'clearwaterscour'), ohne Sedimentzugabe durchgeführt. Dazu wurden die Wassertiefe mit der Regelklappe auf 0,25 m und der Durchfluss auf 250 l/s eingestellt. Daraus ergab sich eine mittlere Fließgeschwindigkeit im vollen Rinnenquerschnitt von 0,4 m/s. Die Schubspannungsgeschwindigkeit der ungestörten Sohle wurde mit 0,02 m/s ermittelt. Der kritische Shieldsparameter für das Kleinst- und Mittelkorn betrug 0,03. Der Shields-Parameter lag bei 0,08 (Kleinstkorndurchmesser), 0,016 (Mittelkorndurchmesser) und 0,005 (Größtkorndurchmesser). Die feineren Kornfraktionen (Feinsand) wurden also nur an der Oberfläche der Sohle mobilisiert und verfrachtet. Die größeren Fraktionen blieben dagegen stabil und führten zu einer leichten Deckschichtbildung. Somit wurde der Feinsandtransport mit fortlaufender Zeit durch die Deckschichtbildung immer weniger. Die Froude-Zahl der Strömung war 0,26 und die Reynoldszahl der Strömung bei  $7,7 \times 10^4$ .

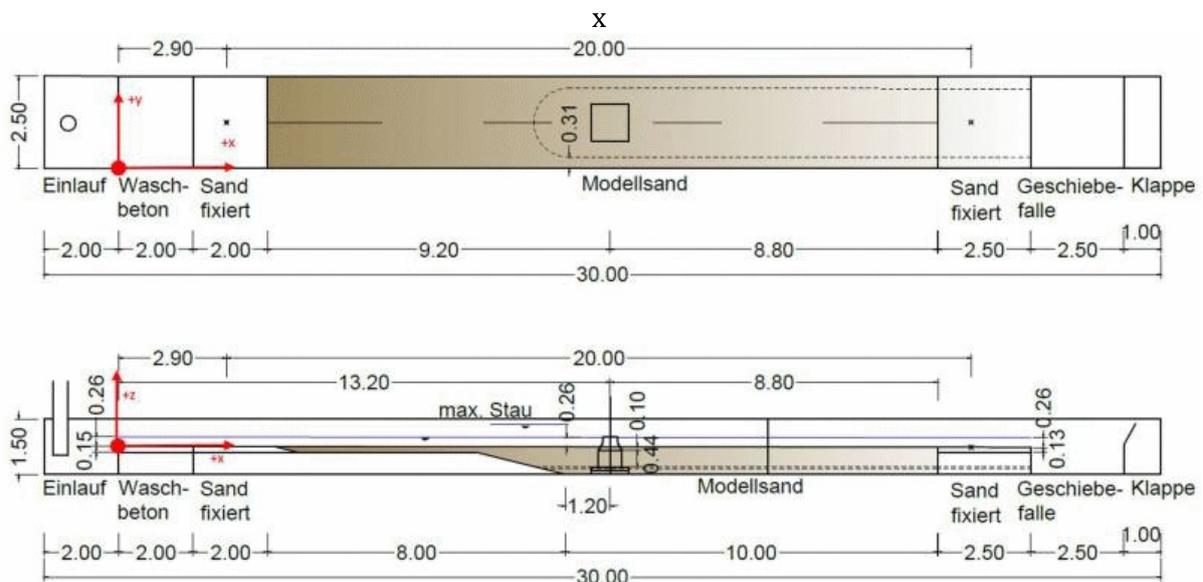


Abbildung 19: Versuchsrinne im Wasserbaulabor der TU Wien

### 4.2 Baummodell

Aufgrund der Größe der Versuchsrinne konnte ein relativ großes Baummodell im Maßstab von ca. 1:5, bezogen auf den Wurzeltelleraußendurchmesser, umgesetzt werden. Als geometrische Vorlage diente ein eingebauter astloser Baum (Raubaum) mit 20 m Länge, einem Wurzeltelleraußendurchmesser im Bereich von 1,5 m bis 2 m und einem Stammdurchmesser von 0,7 m an der Basis (siehe Abbildung 12 Baum 1, Abbildung 20 und Abbildung 21). Das Baummodell bestand aus einer Kreisscheibe als Wurzelteller und einem Kreiszyylinder als Stamm (Abbildung 22).

Die Kreisscheibe wurde aus einer Dreischichtsperrholzplatte, dem Maßstab 1:5 entsprechend, mit einem Durchmesser von  $D = 40$  cm und einer Dicke von 2,5 cm gefertigt. Die auf den Durchmesser der Kreisscheibe bezogene Reynoldszahl lag bei  $1,2 \times 10^5$ . Der Kreiszyylinder war zentrisch, rechtwinklig, fest und biegesteif an der Kreisscheibe montiert. Er bestand aus einem PVC-Kunststoffrohr und seine Abmessungen lagen nahe dem gewählten Größenmaßstab von 1:5. Sein Außendurchmesser war 12 cm und die Länge betrug 3 m.



Abbildung 20: Astloser Baum mit Wurzelteller (Raubaum), Wurzelteller mit Bewuchs überdeckt, geometrische Vorlage für das Baummodell, Baum 1 (Tree 1) aus Abbildung 12 mit Größenskala. (Foto: Schnauder)



Abbildung 21: Astloser Baum mit Wurzelteller (Raubaum), geometrische Vorlage für das Baummodell, Baum 1 (Tree 1) aus Abbildung 12. Bild links: Aufnahme kurz nach Einbau, Bild rechts: spätere Aufnahme mit Bewuchs am Wurzelteller. (Fotos links: Nele Klimmer, WWF; Foto rechts: Schnauder)

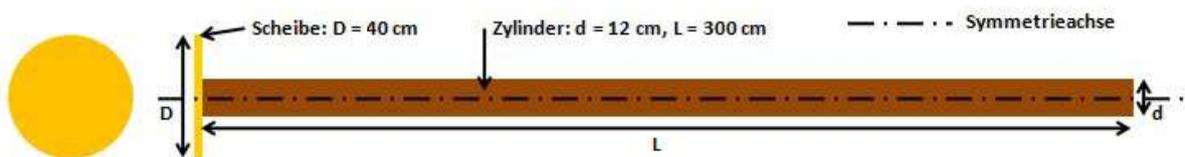


Abbildung 22: Skizze des Baummodells, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Baummodell aus Kreisscheibe und Kreiszyylinder.

Das Baummodell war an der Kreisscheibe eingespannt montiert. Das Ende des Kreiszyinders war mit einer Stange seitlich gehalten, um laterale Schwingungen zu verhindern. Der Kreiszyylinder war waagrecht, in Fließrichtung orientiert und die Kreisscheibe im rechten Winkel zur Strömung orientiert (siehe Abbildung 23). Die eingespannte Kreisscheibe wurde auch ohne Kreiszyylinder für Versuche eingesetzt (siehe Abbildung 24).



Abbildung 23: Versuchsrinne mit eingebautem Baummodell vor Versuchsbeginn. Sohle ist glatt abgezogen. Kreisscheibe zum Teil eingegraben und Kreiszyylinder liegt auf der Sohle auf. Biegesteif montierte Kreisscheibe und Lagesicherung durch Stange am hinteren Ende des Kreiszyinders. (Foto: Schnauder)



Abbildung 24: Biegesteif montierte Kreisscheibe ohne Kreiszyylinder am Ende eines Versuchs. Rinne nicht vollständig entleert, Wasser im Kolk sichtbar. (Foto: Schnauder)

### 4.3 Versuchsanordnungen

Vier Konfigurationen des Baummodells in zwei verschiedenen Installationshöhen, jeweils mit und ohne montierten Kreiszyylinder, wurden untersucht. Das Kriterium für die Wassertiefe der Rinne und Lage des Baummodells war, dass zu Beginn der Versuche bei beiden Positionen gleich viel Verbaugrad (projizierte angeströmte Fläche in Fließrichtung) durch die Kreisscheibe vorhanden war. Die Kreisscheibe ragte bei allen Versuchen mit 65 % des Durchmessers ( $D$ ) in den Fließquerschnitt. Der übrige Teil (35 % von  $D$ ) ragte bei Position 1 über die

Wasseroberfläche hinaus und bei Position 2 in das Sediment (siehe Abbildung 25 bis Abbildung 28).

- Position 1 war der Versuchsaufbau für den schwimmenden Baum. Dabei wurde der Stamm/Kreiszyylinder gerade so viel ins Wasser positioniert, dass seine Oberfläche gerade noch unter Wasser war. Die Kreisscheibe war dadurch, wie oben erwähnt, nur teilweise im Wasser eingetaucht und der Rest ragte über die Wasserlinie hinaus (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26).
- Position 2 war der Versuchsaufbau für den sohlennahen Baum. Dabei lag der Kreiszyylinder auf der Sohle auf und die Kreisscheibe war teilweise eingegraben (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28).

Für drei Konfigurationen wurde jeweils ein Versuch durchgeführt und für die vierte Konfiguration zwei Versuche.

Die Versuche haben folgende Kurzbezeichnungen:

- 1a Position 1 ohne Stamm (Abbildung 25)
- 1b Position 1 mit Stamm (Abbildung 26)
- 2a Position 2 ohne Stamm (Abbildung 27)
- 2b Position 2 mit Stamm (Abbildung 28)
- Db Position 2 ohne Stamm (Abbildung 27)

Somit wurden insgesamt fünf Versuche durchgeführt. Versuch 2a wurde ein zweites Mal durchgeführt (Versuchslauf Db) und dabei wurde die zeitliche Kolkentwicklung oberstrom der Kreisscheibe gemessen. Neben den angeführten Messungen wurden noch weitere im Rahmen des Versuchsprogramms durchgeführt. Diese sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

### 1a

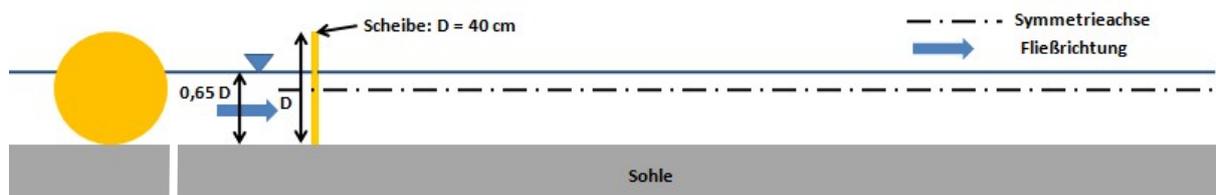


Abbildung 25: Versuchsanordnung 1a, Position 1 (schwimmender Baum), Kreisscheibe, kein Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe von vorne, rechts: Seitenansicht Kreisscheibe

### 1b

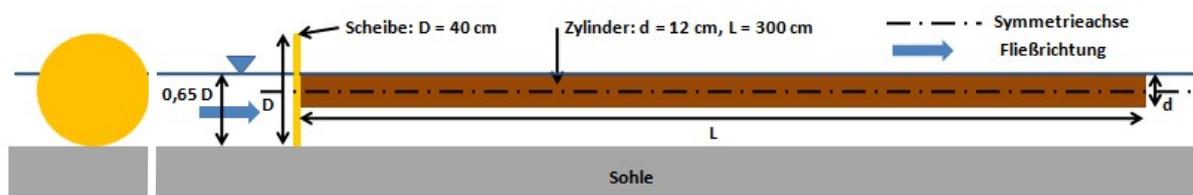


Abbildung 26: Versuchsanordnung 1b, Position 1 (schwimmende Installation), Kreisscheibe mit Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Baummodell

## 2a/Db

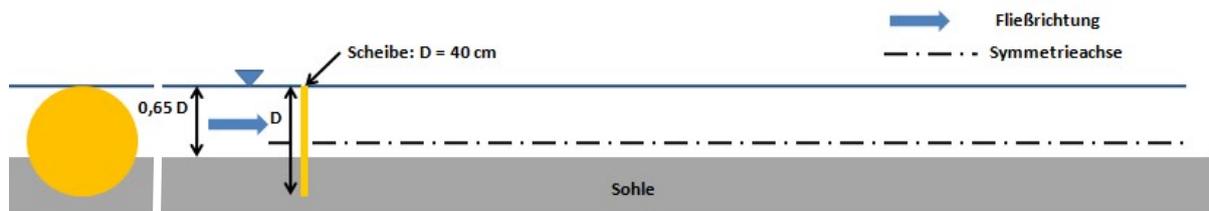


Abbildung 27: Versuchsanordnung 2a/Db, Position 2 (sohlennaher Installation), Kreisscheibe, kein Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Kreisscheibe

## 2b

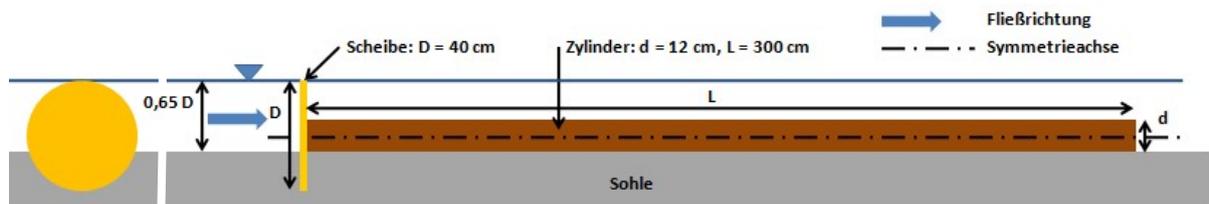


Abbildung 28: Versuchsanordnung 2b, Position 2 (schwimmende Installation), Kreisscheibe mit Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Baummodell

#### 4.4 Messtechnik und -durchführung zur Morphologie

Ziel war es, die durch das Baummodell induzierte Morphodynamik der Sohle zu erfassen. Dazu wurden geomorphologische Messungen mit einem verfahrenbaren oberflächenvermessenden Laserscanner in drei Bereichen (Abbildung 29) und Modi durchgeführt:

- Regelmäßige Messungen während des laufenden Versuches mit eingetauchten und vertikal ausgerichteten Laserscanner. Wegen der eingeschränkten Verfahrbarkeit waren diese Messungen nur einseitig (rechte Hälfte) im Nachlauf möglich.
- Regelmäßige Messungen mit Rotationsscan oberstrom der Kreisscheibe, um die dynamische Entwicklung des Kolkes (Tunnel und/oder Pier scour) zu erfassen. Der Laserscanner fuhr dabei mehrere Positionierungspunkte an und scannte dort über Eigenrotation.
- Abschlussmessung im Trockenen nach dem Ende der Versuche, nach Ablassen des Wassers und nach Demontage des Baummodells. Dabei wurden die gesamte Rinnenbreite, größere Bereiche im Nachlauf und oberstrom des Baummodells abgedeckt.

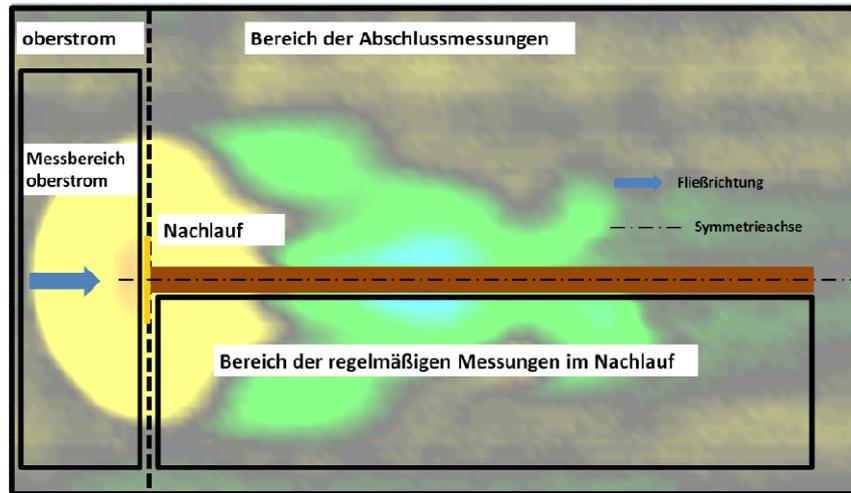


Abbildung 29: Einteilung der Fläche um das Baummodell in den Bereich oberstrom der Kreisscheibe, Nachlauf und durch den Laserscanner gemessene Bereiche. Baummodell mit beispielhafter Darstellung einer Abschlussmessung der Sohle als Farbkontur im Hintergrund.

In Abbildung 30 ist der eingesetzte Laserscanner 2GS ULS-100 abgebildet. Der Laserscanner ist für Punktmessungen mit Entfernungen von 0,13 m bis 1 m in Luft und Wasser geeignet. Er scannt über einen Fächer mit  $50^\circ$  unter Wasser,  $68^\circ$  in Luft und misst dabei 480 Punkte. Daraus ergibt sich eine variierende scannbare Breite je nach Abstand zur Sohle, Abbildung 31. Jeder Punkt wird mit seinen x-, y-, z-Koordinaten und einem Wert zwischen 0 und 255, der die am Sensor gemessene Intensität der Lichtreflektion quantifiziert, im CSV-Format gespeichert (siehe Abbildung 32). Der Laserscanner war auf einer Traverse montiert und konnte in x-, y- und z-Richtung mit einer Software automatisch positioniert und verfahren werden (siehe Abbildung 31). Das Messprinzip ist in Abbildung 30 links dargestellt. Das von der Oberfläche reflektierte Licht des Lasers wird im optischen Sensor detektiert und der Einfallswinkel gemessen. Daraus wird durch Triangulation die Entfernung zum Messpunkt errechnet (2G Robotics Inc., 2015).

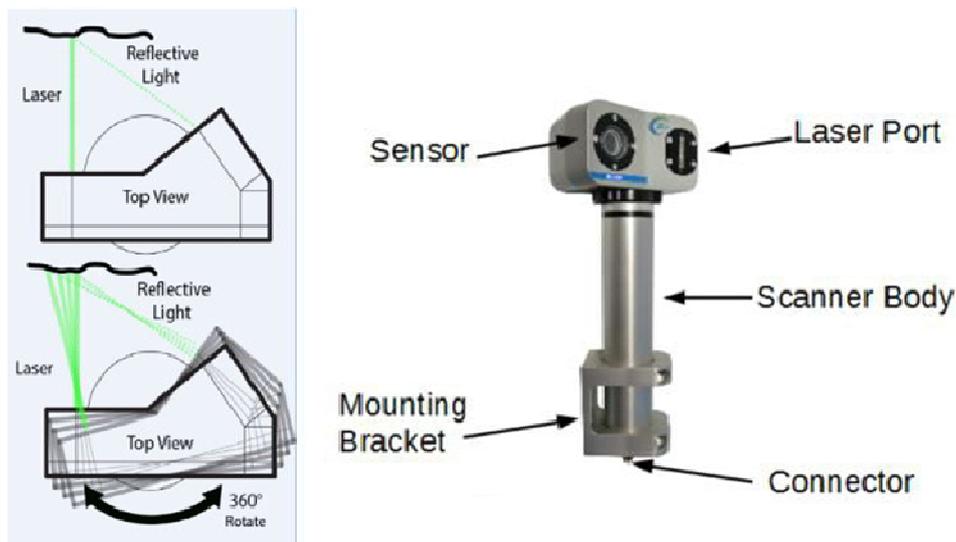


Abbildung 30: Laserscanner Messprinzip (links), Laserscanner 2GS ULS-100 (rechts) (2G Robotics Inc., 2015).

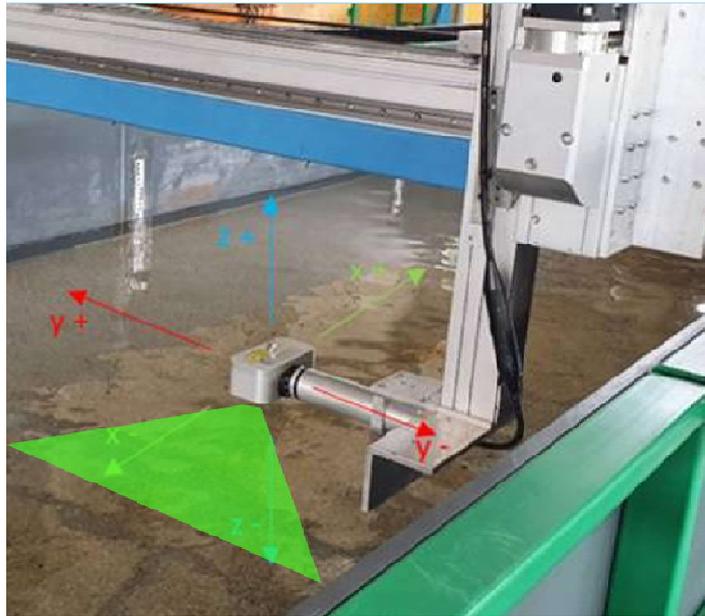


Abbildung 31: Auf einer Traverse montierter, nach unten orientierter Laserscanner mit Darstellung der x-, y-, z-Achsen. Qualitative Darstellung der scannbaren Breite durch den grünen Fächer.

#### 4.4.1 Regelmäßige Messungen im Nachlauf

Die Startposition des Laserscanners wurde so nah wie möglich an der Kreisscheibe und am Rohr gewählt. Er wurde während der Messung ins Wasser eingetaucht und mit der Traverse mit konstanter Geschwindigkeit von der Startposition in x-Richtung gefahren. Die anderen Achswerte blieben konstant. Es wurde in Längsrichtung mit einer Auflösung von 5 mm gemessen und in Querrichtung ergab sich durch den Fächer und den Abstand zur Sohle eine Auflösung von weniger als 1 mm. Die scannbare Breite der Sohle durch den Fächer war geringer als der Messbereich, weshalb der Laserscanner in mehreren Bahnen, abwechselnd in und gegen die Fließrichtung, über die Sohle gefahren wurde. Wegen der variierenden scannbaren Breite wurden die Bahnen seitlich überlappt gefahren. Die Länge der Bahnen wurde je nach Zeitpunkt der Messung festgelegt. Bei späteren Messungen waren sie länger, weil sich die morphologischen Änderungen der Sohle weiter in den Nachlauf ausgebreitet hatten. Es wurde in Fließrichtung betrachtet die rechte Seite der Sohle gescannt und der Kolk um die Kreisscheibe konnte nur teilweise erfasst werden (siehe Abbildung 29).

Wie in 4.3 angeführt gab es fünf Versuche mit dem Baummodell. Pro Versuch wurden mehrere Messläufe mit dem Laserscanner durchgeführt. Dabei wurden die zeitlichen Abstände der Messläufe, wegen der immer langsameren morphologischen Veränderung der Sohle, vergrößert. Angestrebt wurden Messläufe nach einer Stunde, 3, 6, 12, 24 und 48 Stunden. Zwischen den Messläufen wurde der Laserscanner wieder aus dem Wasser herausgefahren. Ein Messlauf dauerte je nach Länge der Bahnen bis zu 25 Minuten.

#### 4.4.2 Regelmäßige Messungen im Kolk oberstrom der Kreisscheibe

Um eine regelmäßige, morphologische Messung oberstrom der Kreisscheibe zu erhalten, wurde der Versuch 2a (Kreisscheibe ohne Stamm, Kreisscheibe in Sohle teilweise eingegraben) wiederholt und nur oberstrom der Kreisscheibe (siehe Abbildung 29) mit dem Laserscanner gemessen. Dabei war die Kolkbildung oberstrom der Kreisscheibe von Interesse. Die Messung erfolgte zeitlich analog wie oben in 4.4.1. Der Laserscanner wurde dabei jedoch nicht in Längsrichtung über den Messbereich gefahren, sondern an mehreren Stellen über dem Messbereich eingetaucht positioniert und schrittweise rotiert.

#### 4.4.3 Abschlussmessungen (trocken)

Am Ende des jeweiligen Versuches erfolgten die Abschlussmessungen. Bei diesen Abschlussmessungen wurde der gesamte Sohlenbereich um das Baummodell gescannt (siehe Abbildung 29). Nach dem Abstellen der Pumpen wurde die Rinne langsam entleert, sodass sich die Sohle nicht mehr veränderte. Darauffolgend konnte in der trockengelegten Rinne das Baummodell abgebaut werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Sohle so wenig wie möglich verändert. Anschließend wurde die Abschlussmessung über den gesamten Bereich um das Baummodell in Luft durchgeführt (siehe Abbildung 29). Der Laserscanner fuhr wieder mit sich überlappenden Bahnen über den Messbereich.

#### 4.4.4 Schwierigkeiten während der Messungen

Probleme bei der internen Datenspeicherung und -konvertierung im Laserscanner führten bei den Messungen immer wieder zu Ausfällen und damit zu Datenverlusten ganzer Bahnen. Diese konnten nur zum Teil durch entsprechende Wiederholungsmessungen kompensiert werden und waren mit erheblichem Stress verbunden. Daher liegen nicht für alle Versuche konsistente und vollständige Datensätze vor. In späteren Versuchen wurde der Laserscanner so umprogrammiert, dass die Bahnen in Einzeldateien gespeichert wurden und damit am Ende der Messung nicht mehr intern zusammengeführt werden mussten. Das sorgte für eine Verbesserung der Ausfälle, konnte das Problem aber nicht ganz unterbinden. Zumindest war mit der Einzelspeicherung aber direkt aus den Dateiattributen ersichtlich, welche Bahnen fehlten, sodass gezielt nachgemessen werden konnte.

### 4.5 Aufbereitung der Laserscanner-Rohdaten

Die Bearbeitung der Rohdaten der Lasermessung erfolgte in mehreren Schritten, auf die in den nachfolgenden Kapiteln (4.5.1 – 4.5.3) einzeln eingegangen wird:

- Geometrische Teilung, Zuordnung der Rohdaten zu den gemessenen Bahnen und Zusammenfügen der Bahnen zu vollständigen Dateien für jeden Messlauf.
- Korrektur und Neuberechnung der Punktwolke (x-, y-, z-Koordinaten) für Abweichungen der Laserachse von der Messlotrechten und für die Verwendung von Luft-Kalibrierung bei den Nachlaufmessungen in Wasser.
- Bereinigung und Aufbereitung in CloudCompare. Entfernung von Ausreißern und Daten mit geringer Güte. Erstellen von Oberflächenmodellen (Gitter), Farbkonturdarstellungen und Schnitten aus der Punktwolke.

#### 4.5.1 Teilung, Zuordnung und Zusammenfügen der Rohdaten

Die Rohdaten aller Bahnen wurden nach jedem Messlauf in einer CSV-Datei in vier Spalten abgespeichert (siehe Abbildung 32). Bei den Messläufen über Nacht wurden alle Messungen und Bahnen in einer Datei abgespeichert. Da immer wieder Teile oder ganze Bahnen nicht gespeichert wurden, mussten die CSV-Dateien geometrisch in alle Bahnen geteilt werden, um die fehlenden Bahnen zu identifizieren und, wenn zeitlich möglich, durch wiederholte Messung einzelner Bahnen zu ergänzen. Die Bahnen vollständiger Messläufe wurden zusammengefügt und für die weitere Bearbeitung als TXT-Dateien abgespeichert.

-6370.000	669.999	-280.002	0.000
-6370.000	669.999	-280.002	0.000
-6370.000	440.026	-617.163	16.000
-6370.000	440.699	-618.042	16.000
-6370.000	442.568	-617.188	19.000
-6370.000	443.738	-617.336	16.000
-6370.000	445.059	-617.258	27.000
-6370.000	446.005	-617.724	33.000
-6370.000	447.409	-617.510	34.000
-6370.000	448.805	-617.296	34.000
-6370.000	450.134	-617.174	36.000
-6370.000	451.278	-617.322	38.000
-6370.000	452.714	-617.020	42.000

Abbildung 32: Auszug aus einer Messung. Rohdaten vom Laserscanner. Spaltenweise von links nach rechts: x-, y-, z-Koordinaten und Wert für die Intensität der Lichtreflektion.

#### 4.5.2 Korrektur der Rohdaten

Im zweiten Schritt der Aufbereitung wurden die Messbahnen für Abweichungen der Laserachse von der Messlotrechten und für die Verwendung von Luft-Kalibrierung bei den Messungen im Nachlauf in Wasser korrigiert. Dieser Schritt war notwendig, da

- wegen der Durchbiegung der Traverse die Ausrichtung der Laserachsen nicht mit der messlotrechten übereinstimmte (Abbildung 33),
- alle regelmäßigen Messungen im Nachlauf mit Luft-Kalibrierung durchgeführt wurden und entsprechend für Messungen in Wasser umgerechnet werden mussten (Abbildung 34).

Gerade der letzte Schritt war schwieriger als erwartet, da keine einfache Umrechnungsformel zur Verfügung stand und erst eine entwickelt werden musste.

Nach mehreren Versuchen wurde als ‚best-practice‘ eine semi-empirische Korrekturgleichung entwickelt, die den unterschiedlichen Brechungswinkel und die unterschiedliche Lichtausbreitungsgeschwindigkeit in Wasser und Luft berücksichtigt. Die Neuberechnung erfolgte mit Matlab (Skript siehe Anhang). Neben den Einflüssen aus der Luft-Wasser-Kalibrierung wurde auch die Durchbiegung der Traverse korrigiert. Die Korrektur aufgrund der Durchbiegung wurde auch an den richtig kalibrierten Luftmessungen angewandt. Mit der Neuberechnung wurden die y-Koordinate und die z-Koordinate korrigiert. Die x-Koordinate musste nicht verändert werden.

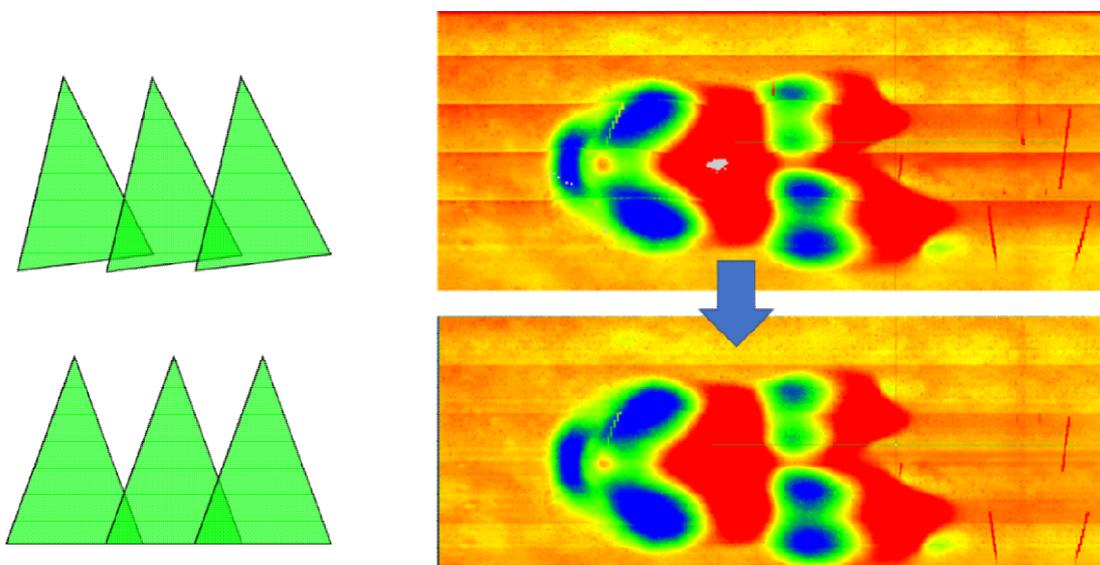


Abbildung 33: Beispiel der Korrektur der Traversendurchbiegung

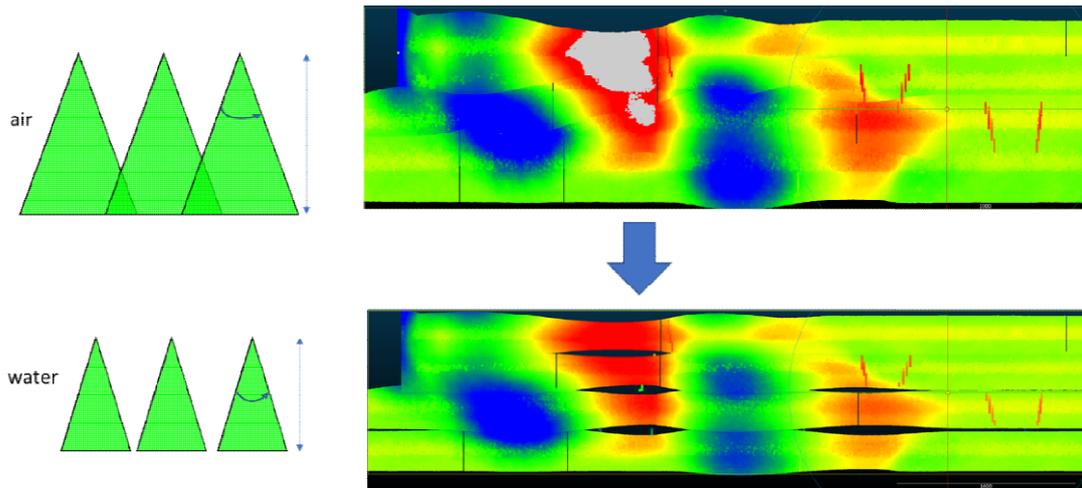


Abbildung 34: Beispiel der Korrektur von Luft- auf Wasser-Kalibrierung

In Abbildung 35 ist beispielhaft das Ergebnis der Korrektur an einem Querschnitt durch die Sohle dargestellt. Darin sind folgende Daten und Schnitte dargestellt;

- Die roten Punkte (end\_water\_wrong) sind die Messpunkte der unkorrigierten Rohdaten der Unterwassermessung aus 4 Scanbahnen. Hier ist deutlich zu erkennen, dass es größere Streuungen im Bereich unmittelbar unter dem Laser, also in der Mitte der jeweiligen gescannten Bahn gab. Die hängt mit der starken Reflektion zusammen, die damit zu einer Überbelichtung des Sensors geführt hat.
- Die grünen Punkte (end\_water\_corr) sind die korrigierten Messpunkte nach der Neuberechnung, Filterung und Löschen der äußeren Winkelbereiche mit dem Korrekturalgorithmus. Die einzelnen Scanbahnen schließen dabei gut aneinander an, die Messpunkte verlaufen kontinuierlich und auch die vertikale Streuung hat sich reduziert.
- Die beiden Linien sind Schnitte durch das mit CloudCompare berechnete Gitter (mesh), so wie sie später den Schnittauswertungen zugrunde liegen. Die schwarze Linie (end\_air\_corr) zeigt die Sohlenlage der nur mit der Traversendurchbiegung korrigierten Luftmessung (Referenzdaten) und die grüne Linie die Sohlenlage aus den korrigierten Unterwasserdaten (end\_water\_corr). verbleibende, maximale vertikale Abweichungen liegen damit etwa in der Größenordnung von 1 cm, bzw. von  $D/40$  ( $0.025 D$  bzw. 2,5 % von  $D$ ).

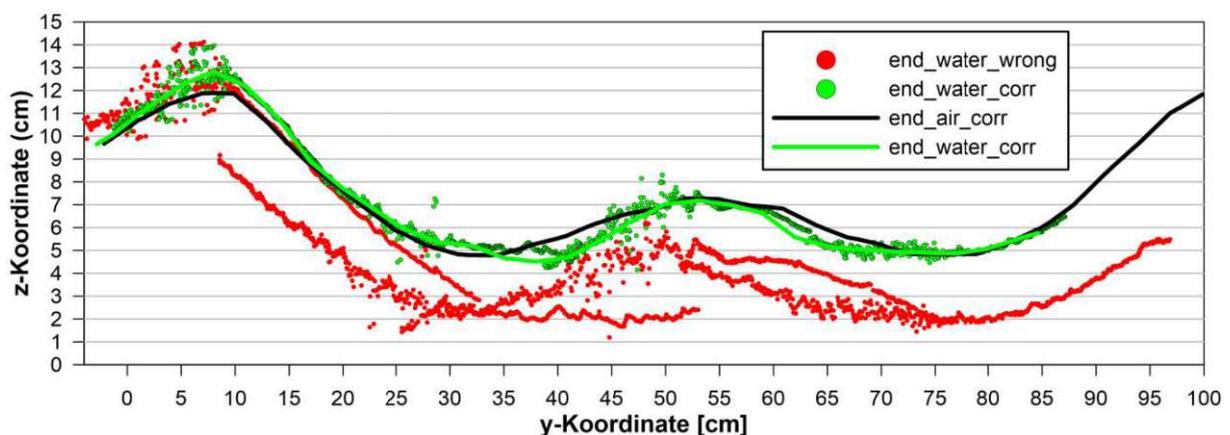


Abbildung 35: Vergleich von Rohdaten (rote Punkte) und korrigierten Daten (grüne Punkte) mit den Schnittdaten aus dem Mesh der Luftmessung (schwarze Linie) und der korrigierten Unterwassermessung (grüne Linie).

### 4.5.3 Aufbereitung in CloudCompare

Die weiteren Schritte wurden mit dem Programm „CloudCompare“ ausgeführt. Dabei wurden die Punktwolken mit dem Wert für die Intensität der Lichtreflektion gefiltert, alle nicht plausiblen, nicht gebrauchten Punkte visuell weggeschnitten und starke Ausreißer mit einem Statistikwerkzeug entfernt. Danach wurden die verbleibenden Punkte in ein Gitter mit 3 cm Quadraten gemittelt. Aus dem Gitter konnten Schnitte und Farbkonturdarstellungen erstellt werden. Vertikale Längsschnitte wurden an 3 Positionen erstellt. So nah wie möglich an der Symmetrieachse (0 D), am Rand der Kreisscheibe (0,5 D) und im Abstand des Scheibendurchmessers von der Symmetrieachse des Baummodells (1 D), siehe unten 4.6.

## 4.6 Auswertung und Schnitte der Sohlenveränderungen

Die z-Koordinaten des Gitters der in 4.5 aufbereiteten morphologischen Lasermessungen der Sohle wurden für die Auswertung als Farbkonturen visualisiert. Die Kolke sind von Gelb nach Rot verlaufend, die Dünen von Grün nach Blau verlaufend dargestellt. Der schwarze/dunkle Bereich liegt nahe der Sohlausgangslage. Die gemessene z-Koordinate der Oberfläche ist auf den Scheibendurchmesser D ( $D = 40 \text{ cm}$ ) bezogen. Die Zahlenwerte der Farbskala sind daher aus z-Koordinate/D berechnet. Für alle Farbkonturdarstellungen wurde die gleiche Farbskala angewendet.

Bei den Schnitten ist auf der x-Achse die auf D bezogene Fließrichtung orientierte x-Koordinate eingetragen ( $x/D$ ). Die y-Achse zeigt die überhöhte auf D bezogene Tiefe und Höhe der Sohle ( $z/D$ ). In Abbildung 36 und Abbildung 37 ist die Lage der Schnittführung dargestellt. Die Lage des Schnittes 0 D ( $y/D=0$ ) ist beim Fall mit Stamm und Fall ohne Stamm unterschiedlich. Die Lage der Schnitte 0,5 D ( $y/D=0,5$ ) und 1 D ( $y/D=1$ ) ist bei allen Fällen gleich.

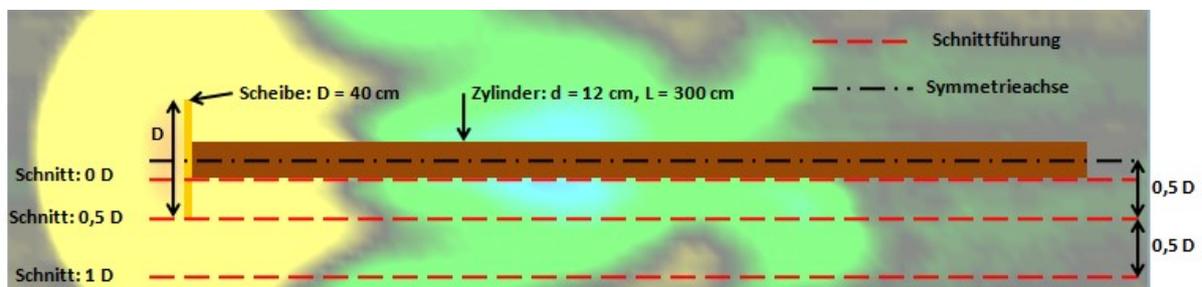


Abbildung 36: Baummodell: Kreisscheibe mit Stamm, Lage der Schnittführung von 0 D, 0,5 D und 1 D.

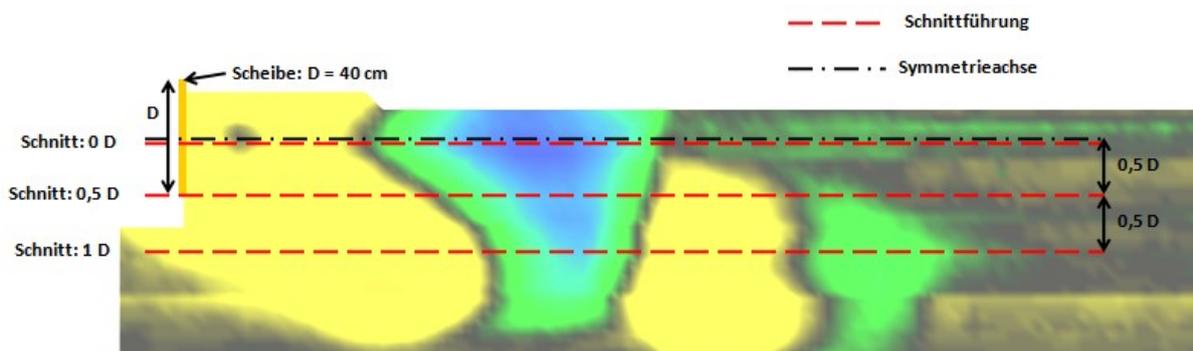


Abbildung 37: Baummodell: Kreisscheibe ohne Stamm, Lage der Schnittführungen von 0 D, 0,5 D und 1 D.

## 5 Ergebnisse der Laborversuche

In diesem Abschnitt sind die beobachteten Wirbelsysteme, Strömungsmuster, Sedimentablagerungen und die Ergebnisse der ausgewerteten morphologischen Lasermessung dargestellt. Durch Farbkonturdarstellungen wird die 3-dimensionale Form der Sohle erkennbar. Schnitte reduzieren die dreidimensionale Sohle auf eine zweidimensionale Ebene, wodurch an den gewählten Stellen eine bessere Darstellung des zeitlichen Verlaufs möglich ist. In Diagrammen ist die zeitliche Entwicklung der Kolktiefe, Kolklage und Dünenhöhe dargestellt.

### 5.1 Beobachtete Wirbelsysteme und Strömungsmuster

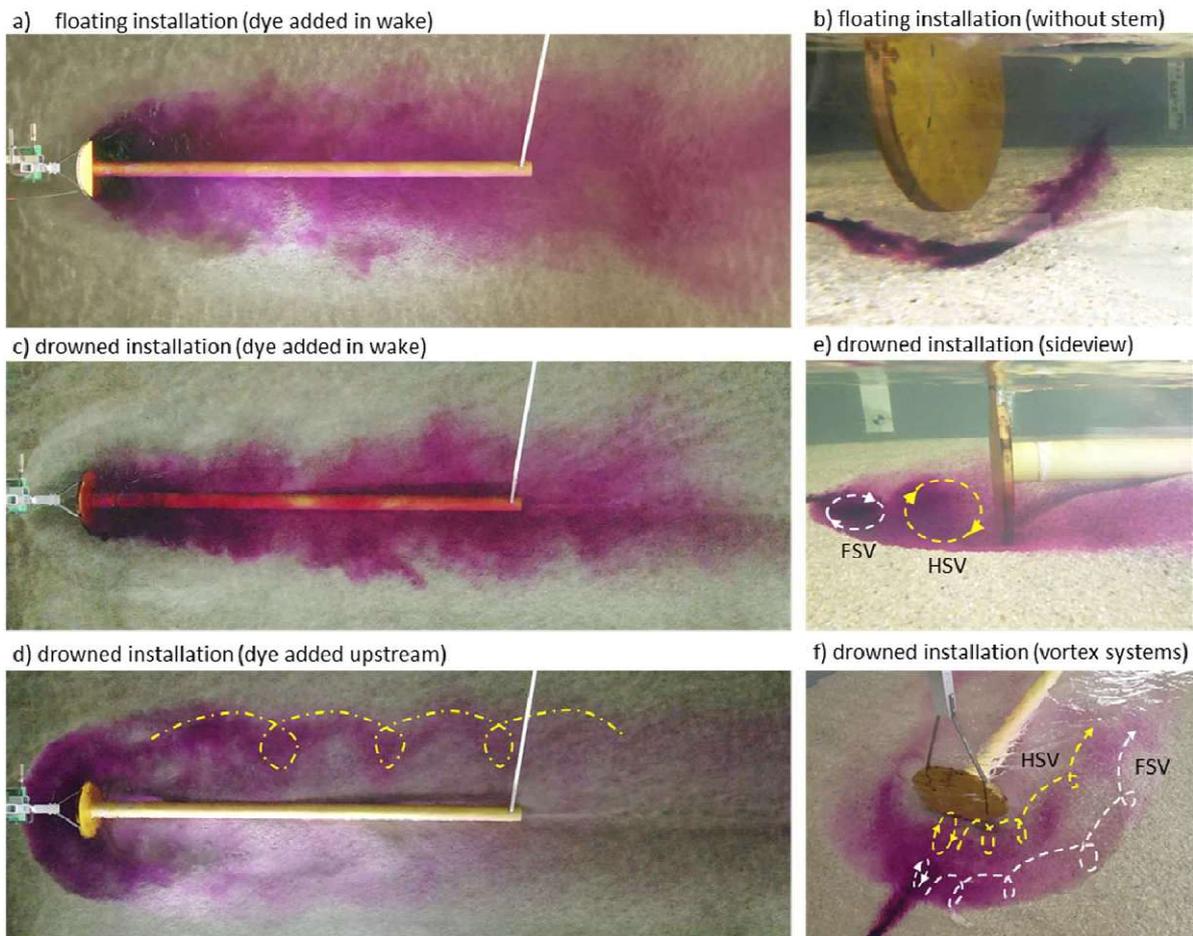


Abbildung 38: Durch Farbstoffzugabe sichtbare Wirbelsysteme und Strömungsmuster um die untersuchten Baummodelle. HSV = horseshoe vortex, FSV = flow separation vortex. Modifizierte Abbildung aus Schnauder et al. (2022).

In Abbildung 38 sind die Wirbelsysteme und Strömungsmuster durch Farbstoffzugabe zu sehen. Bei b) ist die Untertunnelung (engl. 'jet-scour') und der TS gut zu sehen, bei c) und f) die beiden Wirbelsysteme FSV (engl. 'flow separation vortex') und HSV (engl. 'horseshoe vortex'), die für die Kolkbildung vor der Kreisscheibe (ist ein PS) verantwortlich sind.

## 5.2 Kreisscheibe ohne Stamm, schwimmend (1a)

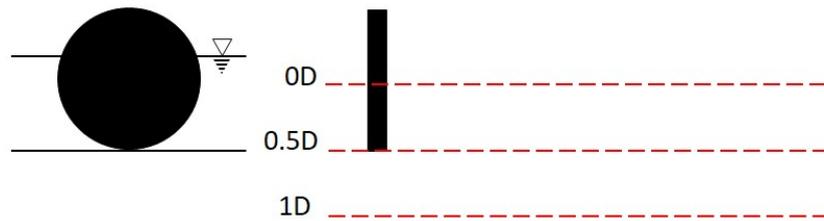


Abbildung 39: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 1a

In Abbildung 40 sind die Farbkonturen vom Versuch 1a dargestellt. Hier ist die Kreisscheibe ohne Kreiszyylinder montiert und ragt aus dem Wasser (siehe Abbildung 39 und 4.3). Dieser Versuch war der erste und wurde länger als die folgenden laufen gelassen. Er dauerte 98 Stunden. Aus den gemessenen Daten des Laserscanners wurden die Unterwassermessungen nach 1, 4, 10, 23 und 50 Stunden ausgewählt, um die zeitliche Veränderung der Sohle darzustellen. Als Vergleich ist auch die Abschlussmessung in Luft nach 98 Stunden angeführt.

Nach 1h ist bereits eine deutliche Kolkbildung (gelb) unter der Kreisscheibe zu erkennen. Dies ist ein Tunnel scour (TS) (vergleiche 3.2.1). Das zum Teil wieder abgelagerte Material aus dem Kolk ist im Nachlaufbereich in der Farbe Grün erkennbar. Der gelbe Bereich hinter der Scheibe im Nachlaufbereich ist ein Shearlayer-scour (SLS). Dahinter ist in grün der Beginn der Düne zu sehen.

Nach 4 h ist die morphologische Hauptstruktur der Sohle gut erkennbar. Sie besteht aus dem TS unter der Kreisscheibe, dem SLS und einer sichelförmigen Düne aus abgelagertem Material aus den vorderen Kolken. Auch direkt im Nachlauf der Kreisscheibe ist noch eine kleine Ablagerung erkennbar.

Nach 10 h ist der SLS deutlich vergrößert und entsprechend auch die Düne. Das Unterstromende der Düne ist in Fließrichtung gewandert. Die Düne ist noch sichelförmig. Der Bereich zwischen TS und SLS beginnt zu erodieren.

Bei 23 h ist die Düne im Nachlaufbereich der Kreisscheibe deutlich größer geworden. Das Unterstromende der Düne hat seine Sichelform verloren und ist weiter in Fließrichtung gewandert. Im Nachlauf der Düne ist jetzt eindeutig ein sekundärer Kolk zu erkennen. Der Bereich zwischen TS und SLS wurde weiter abgetragen und beide Kolkbereiche verbinden sich.

Bei 50 h ist die Düne im Nachlaufbereich der Kreisscheibe weiter deutlich größer geworden und das Unterstromende stark in Fließrichtung gewandert. Der TS und SLS hat sich ebenfalls vergrößert und der Bereich zwischen TS und SLS wurde noch tiefer.

Die Farbkontur bei 98 h ist eine Luftmessung und ist nur unter Berücksichtigung von 4.5.2 mit den Unterwassermessungen vergleichbar. Der gesamte Bereich um das Baummodell ist dargestellt und hat eine geringe Asymmetrie. Qualitativ ist keine größere Veränderung zum 50 h Scan zu erkennen. Unterstrom der Düne haben sich Sekundärkolke und Sekundärdünen gebildet und vergrößert.

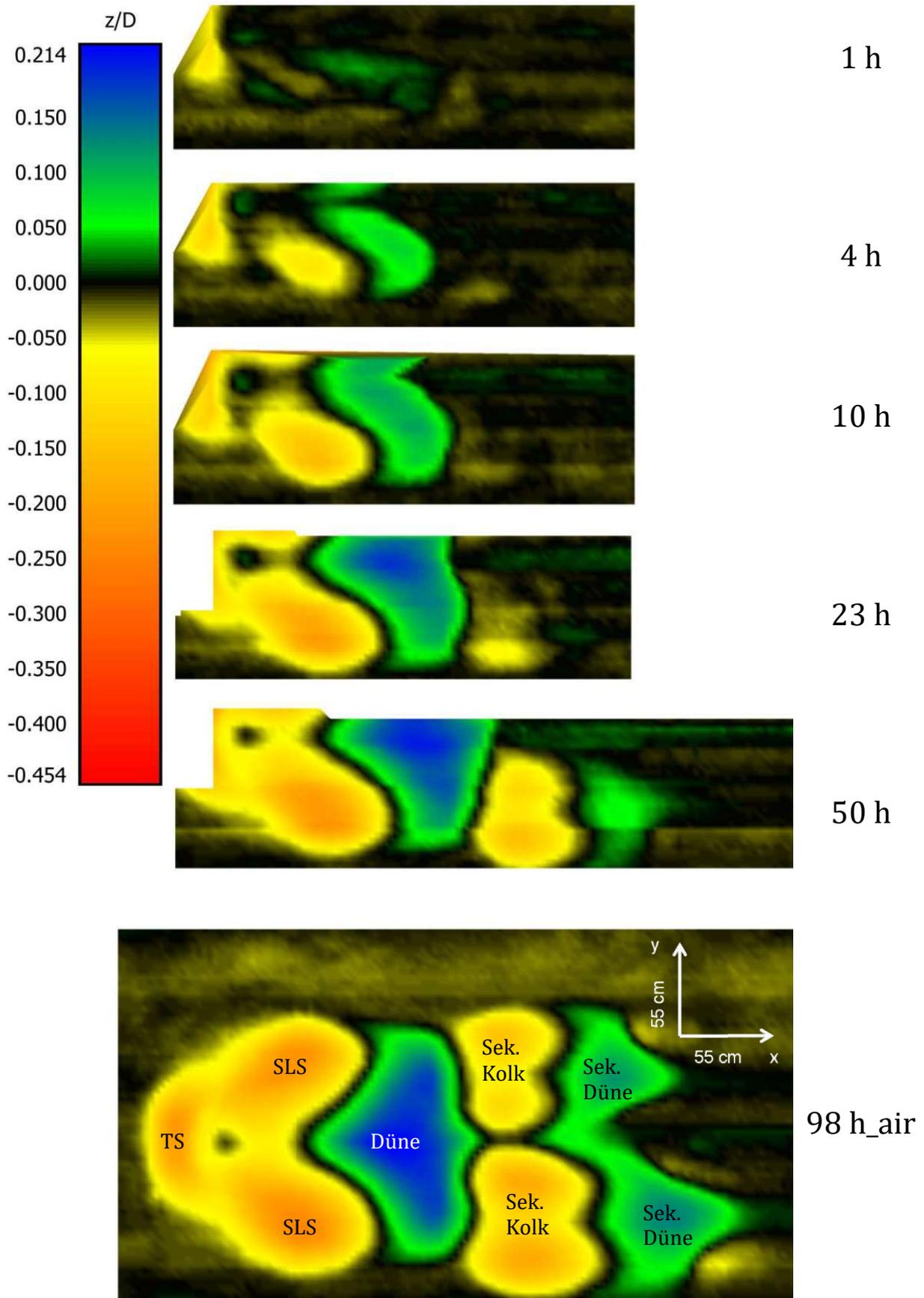


Abbildung 40: Farbkonturen Versuch 1a, Kreisscheibe ohne Stamm, Position 1 (schwimmend), Unterwassermessungen von 1h bis 50 h, Luftmessung bei 98 h, Farbskala  $z/D$

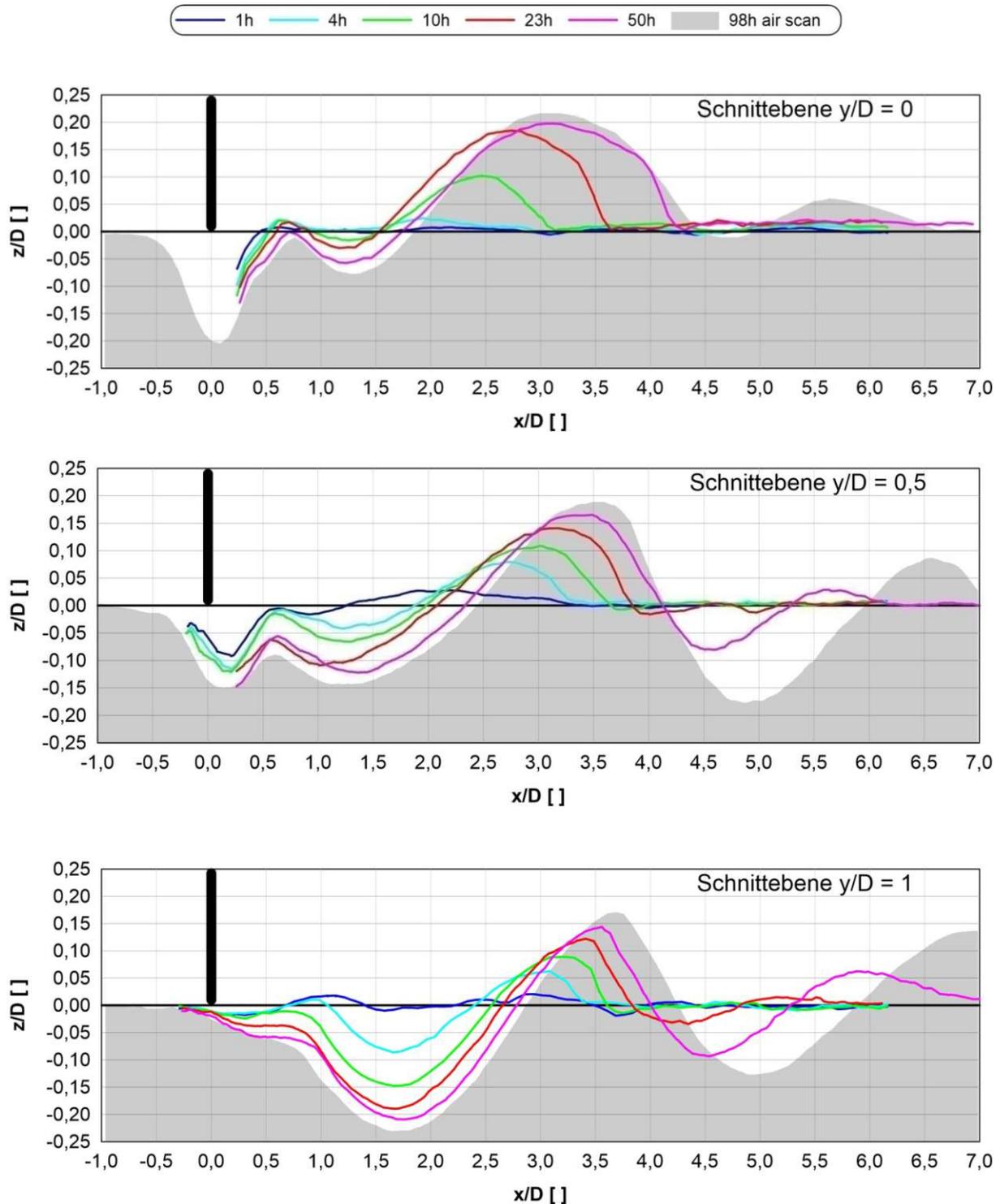


Abbildung 41: Vertikale Längsschnitte von 1a in den Ebenen:  $y/D=0$ ,  $y/D=0,5$  und  $y/D=1$  von 1 h bis 98 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D ( $D=40$  cm) bezogen.

In Abbildung 41 ist der Schnitt  $y/D=0$  ( $0 D$ , siehe Abbildung 37), nahe der Symmetrieachse, dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass die Dünenhöhe mit fortschreitender Zeit weniger zunimmt und der höchste Punkt und das Unterstromende der Düne in Fließrichtung wandern. Die oberstrom Seite der Düne wandert dagegen weniger. Die 50 h Schnittlinie liegt nah an der 98 h Schnittlinie. Daraus wurde abgeleitet, dass die Sohle bei ca. 5 h eine stabile Form erreicht. Deshalb wurden die weiteren Versuche zwischen 48 h und 50 h abgebrochen. Oberstrom der Düne ist das Kolkloch des SLS zu sehen, welches mit der Zeit tiefer wird. Bei 98 h ist unterstrom der Düne die sekundäre Düne zu sehen.

In Abbildung 41 ist der Schnitt  $y/D=0,5$  ( $0,5 D$ , siehe Abbildung 37) dargestellt. Hier sind die gleichen Veränderungen wie beim Schnitt  $0 D$  zu erkennen. Zusätzlich sind bei  $50 h$  der sekundäre Kolk, die sekundäre Düne und ein tieferes Kolkloch des SLS zu erkennen. Die maximale Höhe der Düne ist geringer als bei  $0 D$ .

In Abbildung 41 ist der Schnitt  $y/D=1$  ( $1 D$ , siehe Abbildung 37) dargestellt. Hier sind die gleichen Veränderungen wie beim Schnitt  $0 D$  und  $0,5 D$  zu erkennen. Zusätzlich ist schon bei  $23 h$  der sekundäre Kolk erkennbar, die Kolkentiefe des SLS ist maximal und erreicht bei  $50 h$  fast den gleichen absoluten Wert wie die maximale Dünenhöhe in  $0 D$ .

### 5.3 Kreisscheibe mit Stamm, schwimmend (1b)

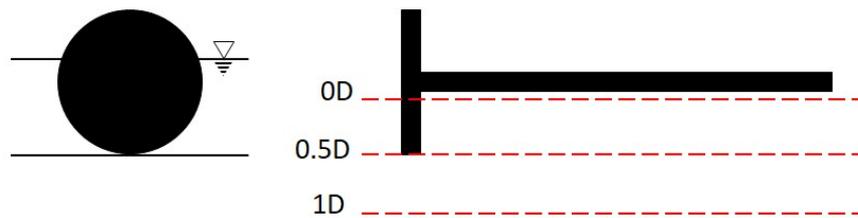


Abbildung 42: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 1b

In Abbildung 43 sind die Farbkonturen vom Versuch 1b dargestellt. Hier ist die Kreisscheibe mit Kreiszyylinder/Stamm montiert und ragt aus dem Wasser (siehe Abbildung 42 und 4.3). Aus den gemessenen Daten des Laserscanners wurden die Unterwassermessungen nach 1, 3, 6, 9, 25, 48 Stunden ausgewählt, um die zeitliche Veränderung der Sohle darzustellen. Zum Vergleich ist auch die Abschlussmessung in Luft nach 52 h angeführt.

Nach 1 h ist bereits eine deutliche Kolkbildung (gelb) unter der Kreisscheibe zu erkennen. Dies ist ein Tunnel scour (TS) (vergleiche 3.2.1). Das zum Teil wieder abgelagerte Material aus dem Kolk ist im Nachlaufbereich in grün erkennbar. Der gelbe Bereich im Nachlaufbereich ist ein Shearlayer-scour (SLS). Unterstrom davon ist in grün der Beginn der Düne zu sehen.

Nach 3 h ist die Grundstruktur gut erkennbar. Sie besteht aus dem TS unter der Kreisscheibe, dem SLS und der Düne aus abgelagertem Material aus den vorderen Kolken. Auch direkt unterstrom der Kreisscheibe ist noch eine kleine Ablagerung erkennbar.

Nach 6 h sind der SLS und die Düne deutlich vergrößert und die Hauptstrukturen aus TS, SLS und Düne gut erkennbar. Die Ablagerung zwischen SLS und TS wurde abgetragen und dieser Bereich beginnt tiefer zu erodieren.

Bei 9 h sind die Düne, der SLS und der TS größer und tiefer bzw. höher geworden. Der Bereich zwischen TS und SLS wurde weiter abgetragen.

Bei 25 h ist wieder eine deutliche Vergrößerung der Düne und SLS erkennbar. Die Unterstromseite der Düne ist in Fließrichtung gewandert. Die Kolklöcher des TS und SLS beginnen ineinander überzugehen.

Bei 48 h ist die Düne nahe der Symmetrieachse weiter deutlich größer geworden und ihr Unterstromende in diesem Bereich am weitesten in Fließrichtung gewandert. Der TS und SLS haben sich vergrößert und der Bereich zwischen TS und SLS wurde noch mehr abgetragen. TS und SLS bilden ein zusammenhängendes Kolkloch. Unterstrom der Düne ist ein sekundärer Kolk zu sehen.

Die Farbkontur bei 52 h ist eine Luftmessung und ist nur unter Berücksichtigung von 4.5.2 mit den Unterwassermessungen vergleichbar. Qualitativ ist keine größere Veränderung zum 48 h Scan zu erkennen. In der Symmetrieachse ist der Abdruck des Stammes nicht zu sehen. Hier wurden die z-Koordinaten links und rechts des Stammes zur Interpolation in diesem Bereich benutzt. Dies erfolgte zur besseren Vergleichbarkeit mit dem Versuch 1a (siehe Abbildung 40). Der gesamte Bereich um das Baummodell ist dargestellt und hat eine geringe Asymmetrie.

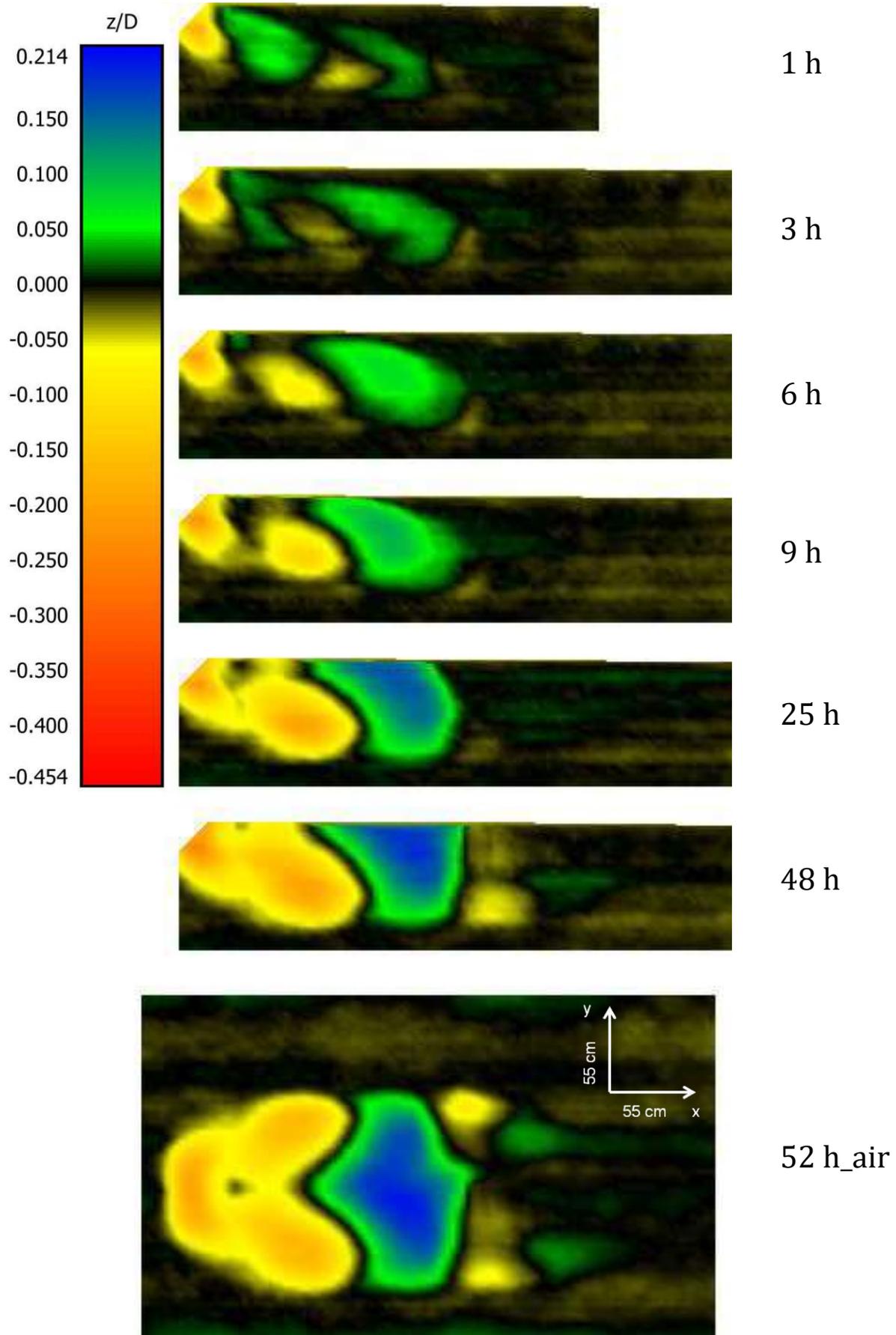


Abbildung 43: Farbkonturen Versuch 1b, Kreisscheibe mit Stamm, Position 1 (schwimmend), Unterwassermessungen von 1 h bis 48 h, Luftmessung bei 52 h mit interpoliertem Stammbereich, Farbskala  $z/D$  ( $D = 40$  cm).

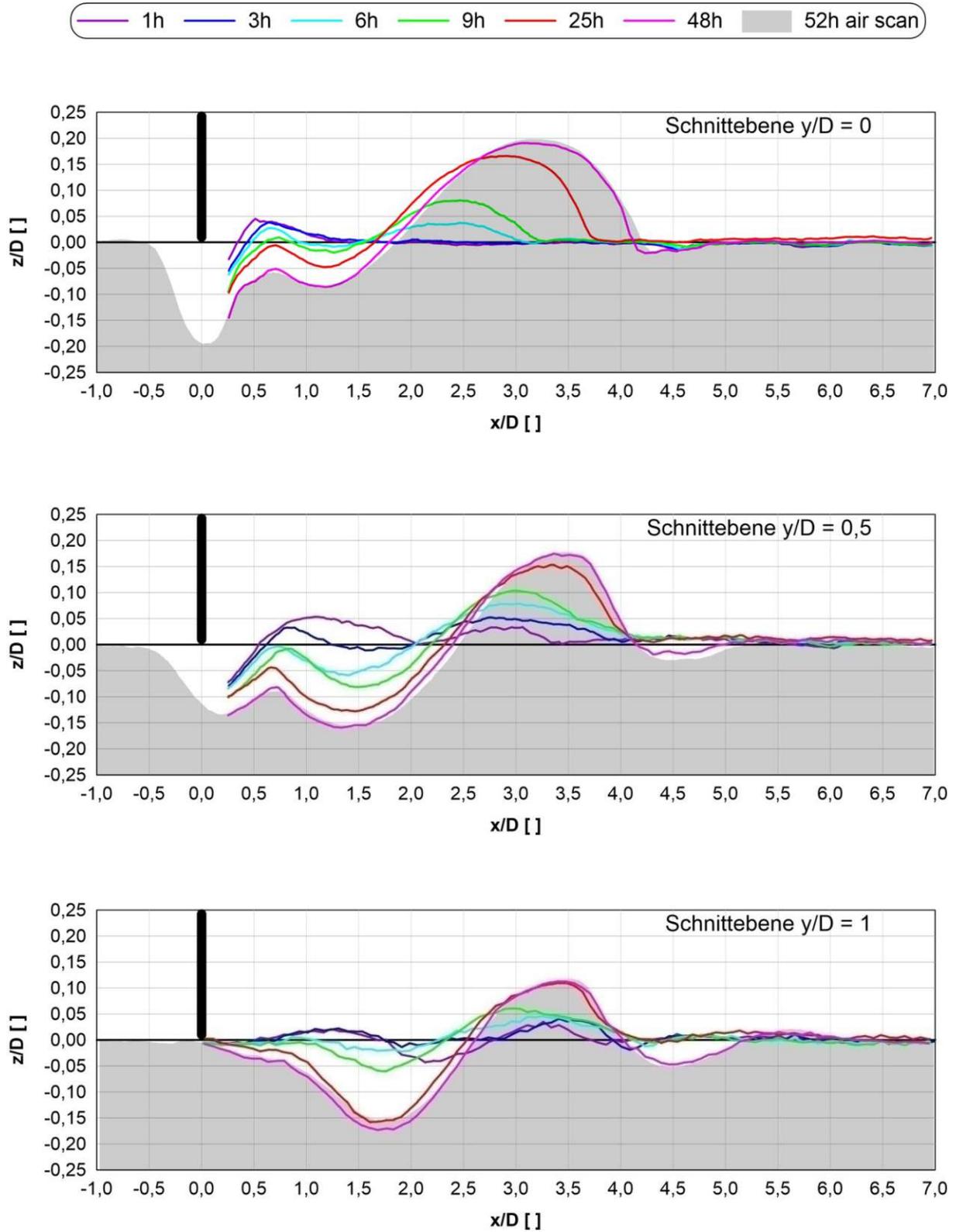


Abbildung 44: Vertikale Längsschnitte von 1b in den Ebenen:  $y/D=0$ ,  $y/D=0,5$  und  $y/D=1$  von 1 h bis 52 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D ( $D=40$  cm) bezogen.

In Abbildung 44 oben ist der Schnitt  $y/D=0$  (0 D, siehe Abbildung 36) nahe dem Stamm dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass die Düne in diesem Schnitt zu Beginn nicht vorhanden ist. Direkt unterstrom der Kreisscheibe wurde Material aus dem Kolk unter der Kreisscheibe durch den TS abgelagert. Zwischen 6 und 9 Stunden wird die Düne höher, die Lage verändert sich nur wenig. Bei 25 h ist eine deutliche Vergrößerung der Höhe und Länge zu sehen. Der höchste Punkt und das Unterstromende der Düne sind in Fließrichtung gewandert. Die Oberstromseite der Düne wandert dagegen wenig in x-Richtung. Bei 48 h ist die Düne weiter gewachsen und in Fließrichtung gewandert. Die Düne ist an der Unterstromseite deutlich steiler als an der Oberstromseite. Oberstrom der Düne ist der Kolk aus dem SLS zu sehen, welcher anfänglich nicht erkennbar ist. Ab 6 h ist gut zu verfolgen, wie er mit der Zeit tiefer wird.

In Abbildung 44 mittig ist der Schnitt  $y/D=0,5$  (0,5 D, siehe Abbildung 36) dargestellt. Hier sind die gleichen Vorgänge wie beim Schnitt 0 D zu erkennen ausgenommen Folgendes: Die Düne ist bei 1 und 3 Stunden schon vorhanden. Die Ablagerung unterstrom der Kreisscheibe ist größer und die Entwicklung des SLS ist ab 3 h zu erkennen. Der SLS ist in diesem Schnitt tiefer als bei 0 D. Die Düne ist bis auf 1 h und 3 h niedriger als bei 0 D. Der höchste Punkt der Düne wandert in Fließrichtung, die Unterstromseite der Düne jedoch nicht.

In Abbildung 44 unten ist der Schnitt  $y/D=1$  (1 D, siehe Abbildung 36) dargestellt. Hier sind die gleichen Vorgänge wie beim Schnitt 0,5 D zu erkennen, ausgenommen Folgendes: Der SLS ist in diesem Schnitt maximal und ist größer als die Düne. Zu Beginn liegt sein tiefster Punkt in x-Richtung bei  $2,25 x/D$  und wandert dann nach  $1,75 x/D$ . Zwischen 25 h und 48 h ist keine große Änderung des SLS und der Düne zu sehen. Die Düne wandert zu Beginn gegen die Fließrichtung und bei 25 h wieder in Fließrichtung.

#### 5.4 Kreisscheibe ohne Stamm, sohlennah (2a, Db)



Abbildung 45: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 2a und Db

In Abbildung 46 und Abbildung 47 sind die Farbkonturen vom Versuch 2a (Db) dargestellt. Hier ist die Kreisscheibe ohne Kreiszyylinder/Stamm montiert und ragt in das Sediment (siehe Abbildung 45 und 4.3). Aus den gemessenen Daten des Laserscanners wurden die Unterwassermessungen nach 1, 3, 6, 15 (12), 24, 49 (48) Stunden ausgewählt, um die zeitliche Veränderung der Sohle darzustellen. Zum Vergleich sind die Abschlussmessungen in Luft nach 53 h (2a) und die Abschlussmessung in Luft nach 49 h (Db) angeführt.

Nach 1 h hat sich durch den HSV und den FSV (siehe 5.1) ein Kolk vor der Kreisscheibe gebildet (Gelb und Rot). Dieser Kolk wird auf Englisch *pir-scour* (vergleiche 3.2.2) genannt. Unterstrom der Kreisscheibe geht der *pir-scour* (PS) in den SLS über. Das zum Teil wieder abgelagerte Material aus dem Kolk ist im Nachlaufbereich in grün und blau erkennbar. Es liegt als längliche Düne in Fließrichtung orientiert direkt mittig im Nachlauf der Kreisscheibe (Hauptdüne) und als zweite Düne in Fließrichtung unterhalb des äußeren Rands des Kolks (Nebendüne).

Nach 3 h ist der PS gegen die Fließrichtung und in Querrichtung gewachsen. Die Hauptdüne wurde länger und höher, die Nebendüne geringfügig größer.

Nach 6 h hat sich der PS gegen die Fließrichtung und in Querrichtung weiter vergrößert. Die Hauptdüne wurde noch länger und höher, die Nebendüne geringfügig größer.

Nach 15 h bzw. 12 h ist die Hauptdüne am hinteren Ende breiter geworden. Die Nebendüne wurde geringfügig größer. Der PS hat sich oberstrom der Kreisscheibe gegen die Fließrichtung und in Querrichtung vergrößert. Der SLS ragt deutlich aus dem Kolk um die Kreisscheibe heraus.

Bei 24 h ist die Hauptdüne länger, breiter und höher geworden. Die Nebendüne hat sich wenig verändert. Der PS hat sich oberstrom der Kreisscheibe gegen die Fließrichtung und in Querrichtung vergrößert. Der SLS wurde größer und hat im Bereich zwischen Haupt- und Nebendüne Sediment abgelagert. Die Untertunnelung der Kreisscheibe hat eingesetzt und das Kolkloch unterstrom der Kreisscheibe ist erkennbar größer geworden.

Nach 49 h bzw. 48 h ist die Hauptdüne länger, breiter und höher geworden. Entlang der Symmetrieachse ist sie am stärksten in die Länge gewachsen. Die Nebendüne hat sich relativ wenig verändert. Der PS hat sich oberstrom der Kreisscheibe gegen die Fließrichtung und in Querrichtung geringfügig vergrößert. Der SLS wurde größer und hat im Bereich zwischen Haupt- und Nebendüne Sediment abgelagert. Die Untertunnelung der Kreisscheibe ist stärker geworden und das Kolkloch unterstrom der Kreisscheibe ist noch größer geworden.

Die Farbkonturen bei 2a 53 h und Db 49 h sind Luftmessung und sind nur unter Berücksichtigung von 4.5.2 mit den Unterwassermessungen vergleichbar. Bei 53 h bzw. 49 h sind alle Abmessungen der Dünen und Kolke nur geringfügig größer geworden. Beim Versuch Db ist die Hauptdüne etwas länger als beim Versuch 2a. Der gesamte Bereich um das Baummodell ist dargestellt und hat nur eine geringfügige Asymmetrie.

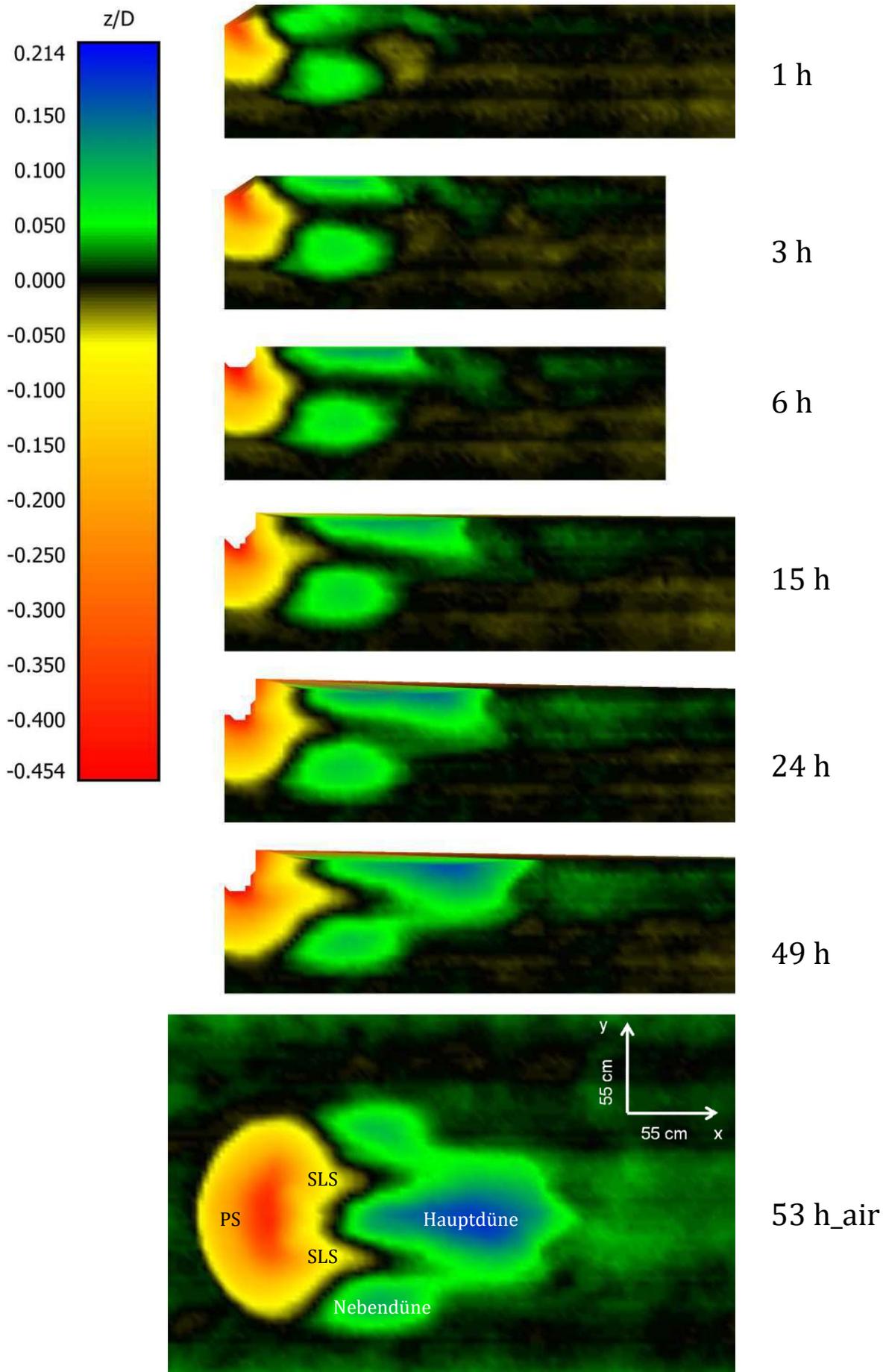


Abbildung 46: Farbkonturen Versuch 2a, Kreisscheibe ohne Stamm, Position 2 (sohlennah), Unterwassermessungen von 1h bis 49 h, Luftmessung bei 53, Farbscala  $z/D$  ( $D=40$  cm).

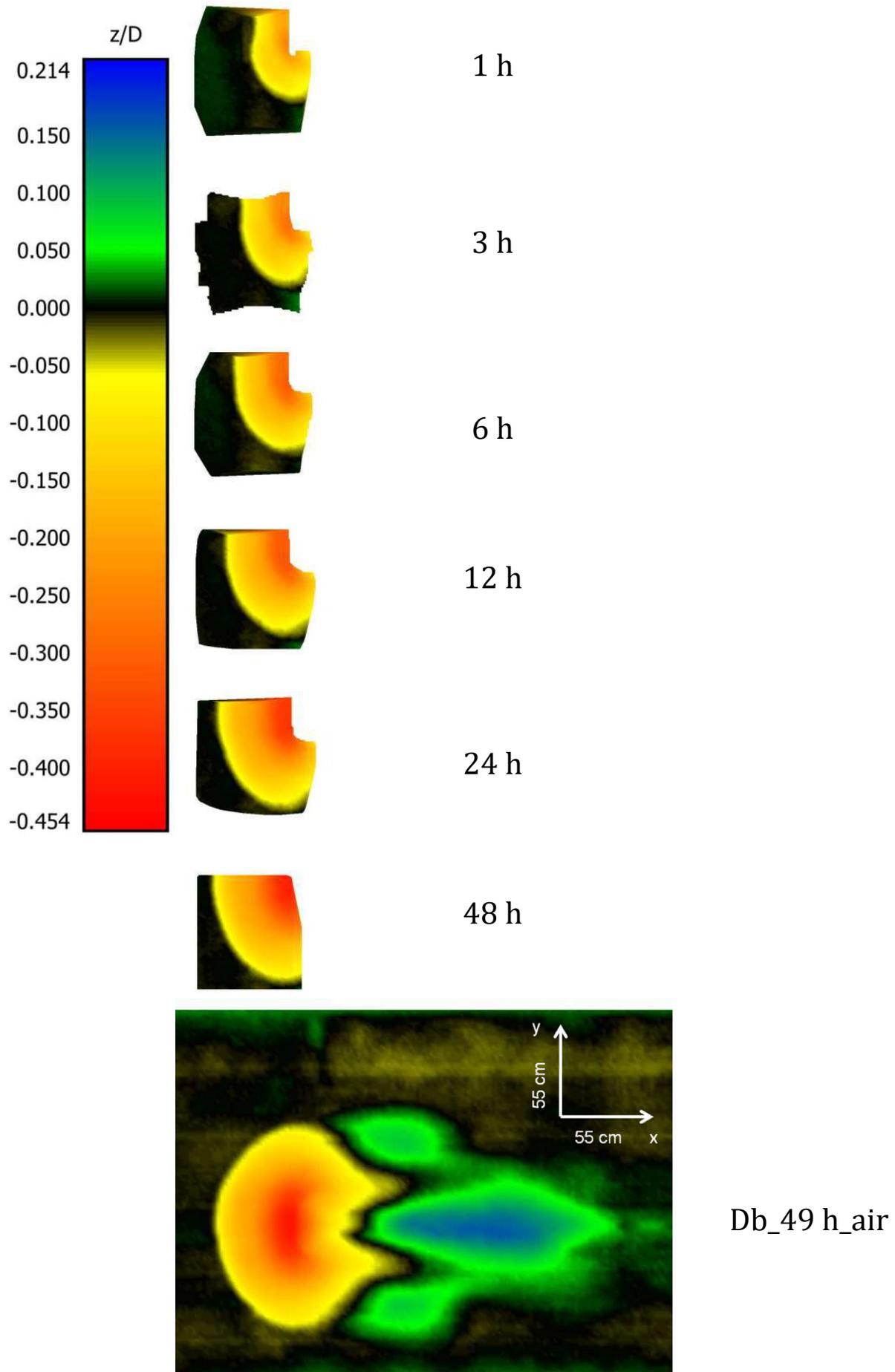


Abbildung 47: Farbkonturen Versuch Db, Kreisscheibe ohne Stamm, Position 2 (sohlennah), Unterwassermessungen von 1h bis 48 h, Luftmessung bei 49 h, Farbskala  $z/D$  ( $D=40$  cm).

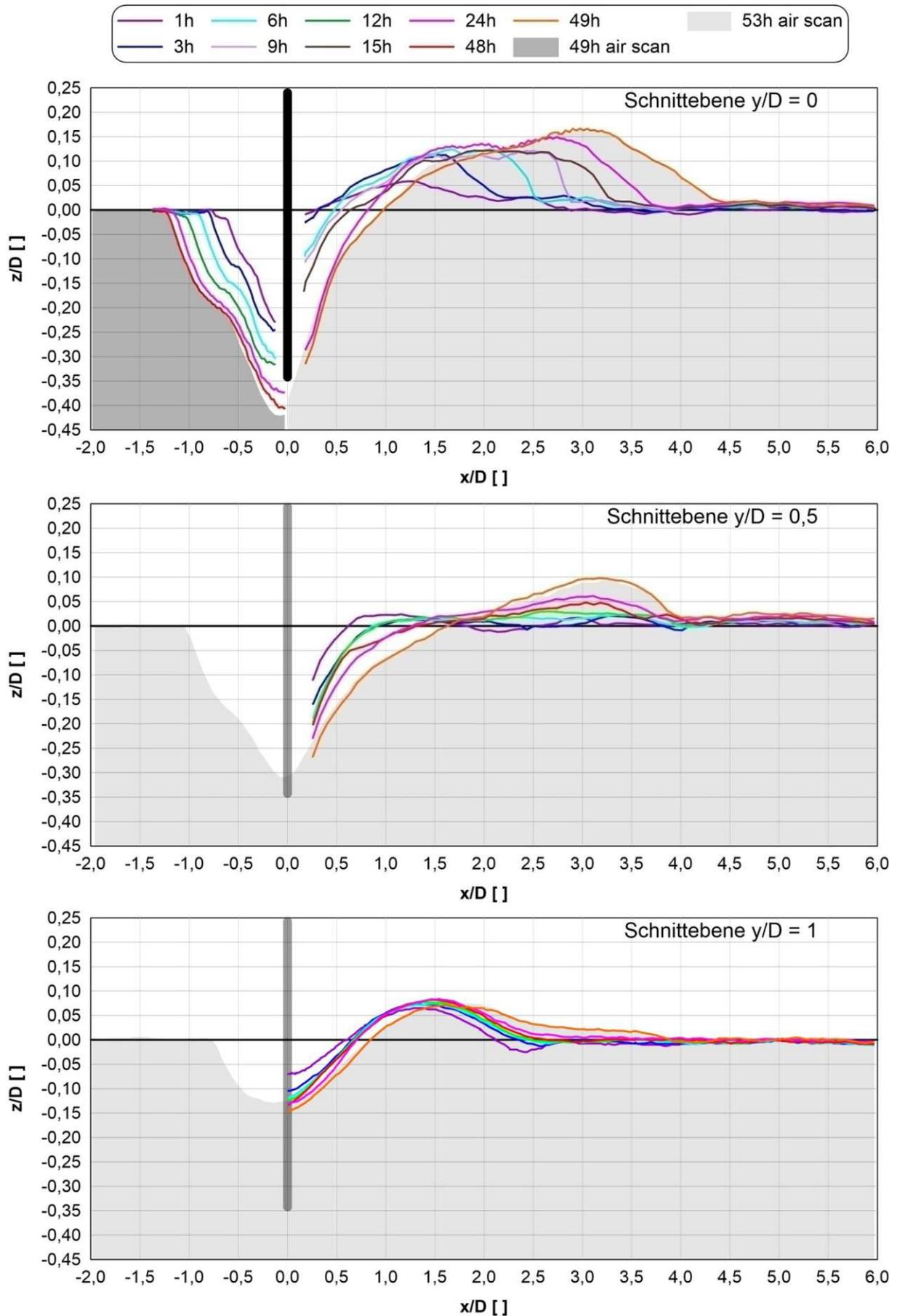


Abbildung 48: Vertikale Längsschnitte von Versuch 2a in den Achsen:  $y/D=0$ ,  $y/D=0,5$  und  $y/D=1$  von 1 h bis 49 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D ( $D=40$  cm) bezogen. Bei  $y/D=0$ , oberstrom der Kreisscheibe, sind die Schnitte aus dem Db Versuch eingezeichnet.

In Abbildung 48 oben ist der Schnitt  $y/D=0$  (0 D, siehe Abbildung 37) nahe der Symmetrieachse dargestellt. Dieser Schnitt zeigt die Entwicklung der Hauptdüne. Die Dünenoberstromseite liegt zu Beginn näher an der Kreisscheibe und bewegt sich mit der Zeit in Fließrichtung. Das Unterstromende der Düne wird zunächst immer steiler und dann wieder flacher. Es wandert mit der Zeit in Fließrichtung, wodurch die Düne immer länger wird. Die Höhe nimmt zu Beginn stärker zu und ändert sich mit der Zeit immer weniger. Der Kolk direkt unter- und oberstrom (der PS) der Kreisscheibe wird mit der Zeit immer tiefer. Bei 24 h zeigt sich das Einsetzen der Untertunnelung durch die Tiefe und Steilheit dieser Kolke. Der PS wird mit der Zeit gegen die Fließrichtung größer und hat eine Stufe, die durch die doppelte Wirbelstruktur des HSV und des FSV entsteht. Die Dünenhöhe nimmt mit fortschreitender Zeit weniger zu und der höchste Punkt bewegt sich in Fließrichtung. Die 49 h bzw. 48 h Messung liegt relativ nahe der 53 h Luftmessung.

In Abbildung 48 mittig ist der Schnitt  $y/D=0,5$  (0,5 D, siehe Abbildung 37) dargestellt. Dieser Schnitt zeigt die Entwicklung des SLS und den Bereich zwischen Hauptdüne und Nebendüne. Der SLS wird mit der Zeit immer tiefer und in Fließrichtung länger. Der SLS geht in Fließrichtung in den Randbereich der Hauptdüne über. Hier ist die Vergrößerung der Hauptdüne bei 49 h markant. Dies zeigt eine relativ starke Verlängerung, Verbreiterung und Erhöhung der Hauptdüne zwischen 24 h und 49 h.

In Abbildung 48 unten ist der Schnitt  $y/D=1$  (1 D, siehe Abbildung 37) dargestellt. Dieser Schnitt zeigt die Entwicklung des Randbereichs des PS und der Nebendüne. Die Tiefe des Randbereichs des PS nimmt zu Beginn schneller zu und ändert sich mit der Zeit immer weniger. Die Nebendüne ist von Beginn an deutlich vorhanden und ändert sich nur relativ wenig. Zwischen 24 h und 49 h wird sie flacher und länger.

## 5.5 Kreisscheibe mit Stamm, sohlennah (2b)

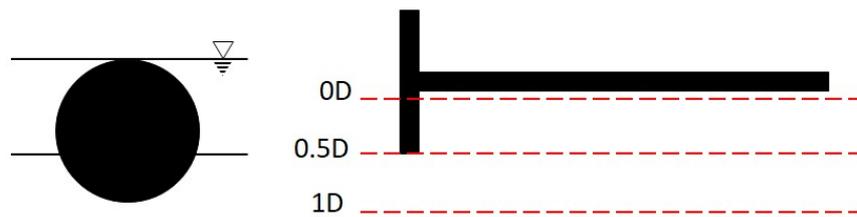


Abbildung 49: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 2b

In Abbildung 50 sind die Farbkonturen vom Versuch 2b dargestellt. Hier ist die Kreisscheibe mit Kreiszyylinder/Stamm montiert und ragt in die Sohle (siehe Abbildung 49 und 4.3). Aus den gemessenen Daten des Laserscanners wurden die Unterwassermessungen nach 1, 3, 7, 16, 25, 45 Stunden ausgewählt, um die zeitliche Veränderung der Sohle darzustellen. Zum Vergleich ist auch die Abschlussmessung in Luft nach 53 h angeführt.

Nach 1 h ist um die Kreisscheibe ein Kolkloch zu sehen, das durch den HSV, FSV und SLS entsteht. Die Grundform der Dünenstruktur ist bereits vorhanden. Sie besteht aus der vorderen und hinteren, nahe am Stamm liegenden Hauptdünen und der seitlichen Nebendüne.

Bei 3 h haben sich der Kolk und die Dünen vergrößert. Die vordere Hauptdüne ist höher und länger geworden, die hintere Hauptdüne ist in Fließrichtung gewandert.

Nach 7 h ist die vordere Hauptdüne breiter und länger geworden, jedoch etwas niedriger. Die hintere Hauptdüne ist weiter in Fließrichtung gewandert und breiter geworden. Die Nebendüne ist größer geworden und beginnt sich mit der vorderen Hauptdüne zu verbinden.

Nach 16 h sind alle drei Dünen größer geworden und verbunden. Besonders die vordere Hauptdüne ist länger, breiter und höher geworden. Der Kolk direkt unterstrom der Kreisscheibe hat sich markant in Fließrichtung vergrößert und deutet auf die erfolgte Untertunnelung hin.

Nach 25 h ist die vordere Hauptdüne breiter geworden und die hintere Hauptdüne in Fließrichtung gewandert. Der Kolk direkt unterstrom der Kreisscheibe hat sich weiter in Fließrichtung vergrößert.

Nach 45 h ist die vordere Hauptdüne breiter geworden und deutlich höher. Die hintere Hauptdüne ist in Fließrichtung gewandert und deutlich höher und größer geworden. Der Kolk direkt unterstrom der Kreisscheibe hat sich weiter in Fließrichtung vergrößert.

Die Farbkontur bei 53 h ist eine Luftmessung und ist nur unter Berücksichtigung von 4.5.2 mit den Unterwassermessungen vergleichbar. Bei der Abschlussmessung nach 53 h hat sich im Vergleich mit der Messung nach 45 h wenig verändert. Es ist der gesamte Bereich, um das Baummodell zu sehen. Dort, wo der Stamm/Kreiszyylinder eingebaut war, ist der Abdruck in der Sohle davon zu erkennen. Die Asymmetrie der vorderen Hauptdüne und der Nebendüne ist gering, die hintere Hauptdüne hat eine größere Asymmetrie.

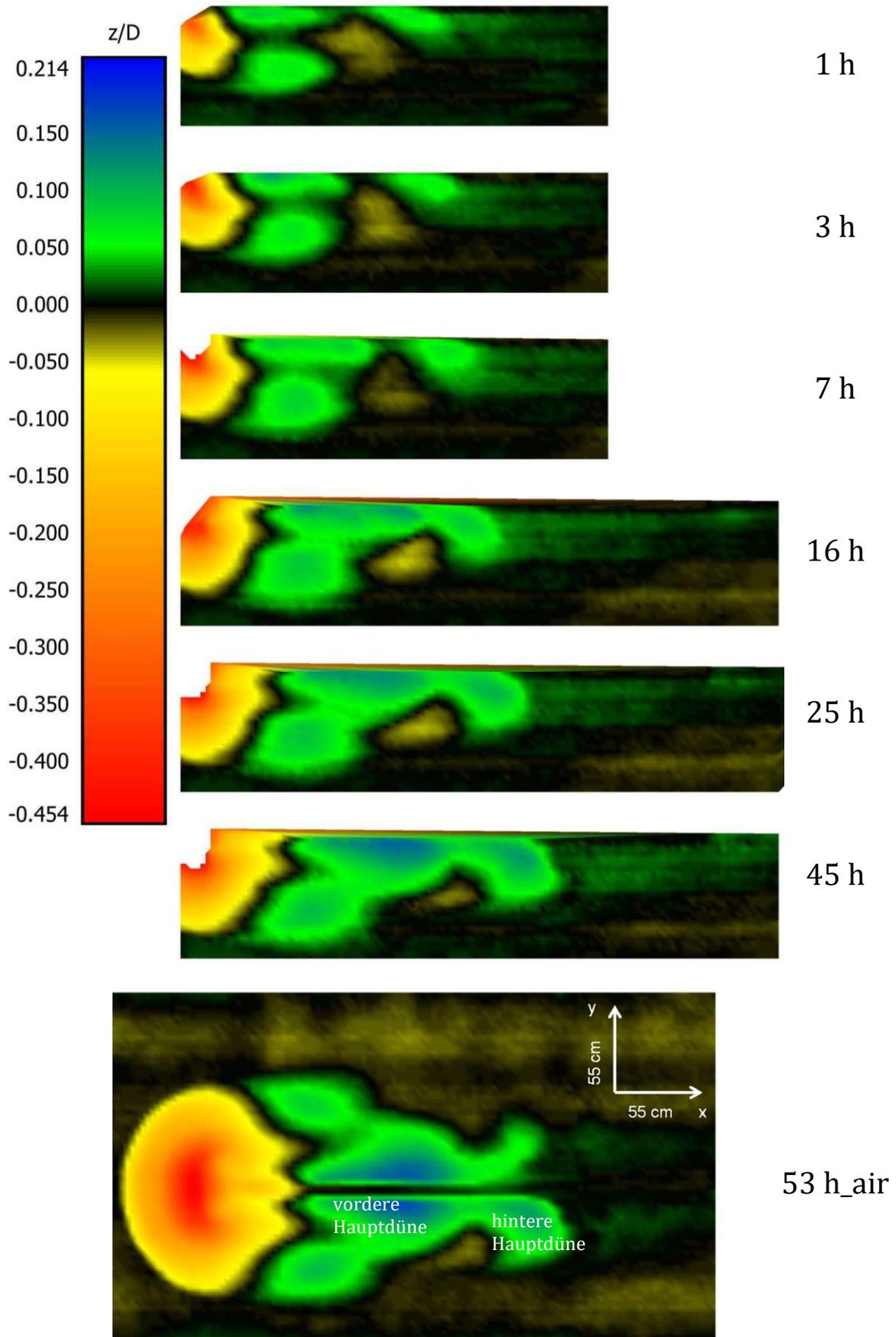


Abbildung 50: Farbkonturen Versuch 2b, Kreisscheibe mit Stamm, Position 2 (sohlennah), Unterwassermessungen von 1 h bis 45 h, Luftmessung bei 53 h, Farbskala  $z/D$

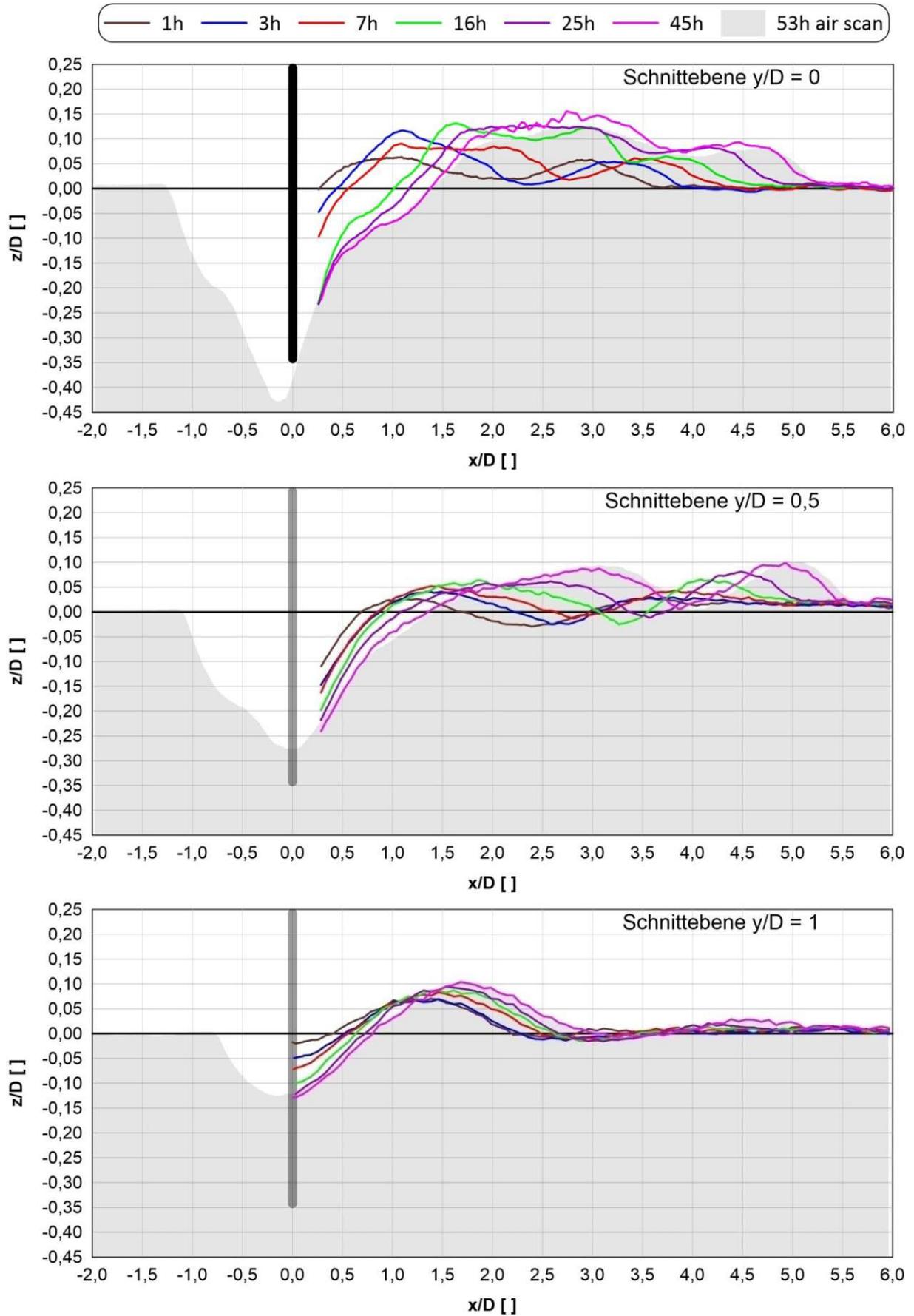


Abbildung 51: Vertikale Längsschnitte von Versuch 2b in den Achsen:  $y/D=0$ ,  $y/D=0,5$  und  $y/D=1$  von 1 h bis 45 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D (D= 40 cm) bezogen.

In Abbildung 51 oben ist der Schnitt  $y/D=0$  ( $0 D$ , Abbildung 36) nahe dem Stamm dargestellt. Dieser Schnitt zeigt die Entwicklung des Kolkes unterstrom der Kreisscheibe, der vorderen und hinteren Hauptdüne. Der Kolk, unterstrom der Kreisscheibe, wird mit der Zeit immer tiefer und breitet sich in Fließrichtung aus. Er erfährt zwischen 7 h und 16 h eine starke Vergrößerung, die durch das volle Einsetzen der Untertunnelung verursacht wird. Bis 25 h und 45 h ist die Vergrößerung im Vergleich dazu dann vergleichsweise gering. Die vordere und hintere Hauptdüne ist nach 1 h erkennbar. Dabei haben sie noch eine annähernd gleiche Höhe. Bei 3 h ist die vordere Hauptdüne deutlich höher geworden, die hintere Hauptdüne in Fließrichtung gewandert und ihre Höhe annähernd gleich geblieben. Nach 7 h ist die vordere Hauptdüne länger und etwas niedriger geworden. Die hintere Hauptdüne ist weiter in Fließrichtung gewandert und ihre Höhe annähernd gleich geblieben. Zwischen 7 h und 16 h ist wie auch beim Kolk eine markante Veränderung zu sehen. Die vordere Hauptdüne ist in Fließrichtung gewandert, länger geworden, besitzt zwei Gipfel und ist deutlich höher als die hintere Hauptdüne. Die hintere Hauptdüne ist in Fließrichtung gewandert und mit der vorderen Hauptdüne deutlich verbunden. Nach 25 h haben sich vordere und hintere Hauptdüne verbunden und haben sich in Fließrichtung verlagert. Ihre maximale Höhe hat sich nicht vergrößert. Nach 45 h ist die Hauptdüne wieder in Fließrichtung gewandert und ist höher geworden.

In Abbildung 51 mittig ist der Schnitt  $y/D=0,5$  ( $0,5 D$ , siehe Abbildung 36) dargestellt. Dieser Schnitt zeigt die Entwicklung des Kolkes am Rand unterstrom der Kreisscheibe (SLS), den Randbereich der vorderen und den Randbereich der hinteren Hauptdüne. Der SLS wird kontinuierlich tiefer und größer mit der Zeit. Eine markante Änderung durch das Einsetzen der Untertunnelung ist nicht zu erkennen. Die vordere Hauptdüne wird kontinuierlich höher und verlagert sich in Fließrichtung. Die hintere Hauptdüne wird über die Zeit höher und wandert in Fließrichtung. Die vordere und hintere Düne verbinden sich in diesem Schnitt nach 45 h nicht.

In Abbildung 51 unten ist der Schnitt  $y/D=1$  ( $1 D$ , siehe Abbildung 36) dargestellt. Dieser Schnitt zeigt einen Teil der zeitlichen Entwicklung des Kolkes an seinem Rand und die zeitliche Entwicklung der Nebendüne. Der Kolk wird mit der Zeit immer tiefer, jedoch immer weniger tiefer. Die Nebendüne wird mit der Zeit höher und wandert in Fließrichtung. Der Bereich unterstrom der Nebendüne bleibt weitgehend unverändert.

## 5.6 Längsschnitte der Luftmessungen

In der folgenden Abbildung 52 sind die Längsschnitte an der Stelle 0 D ( $y/D=0$ ), der Abschlussmessungen in Luft von 1a, 1b, 2a, 2b und von der Feldmessung an der Mulde dargestellt:

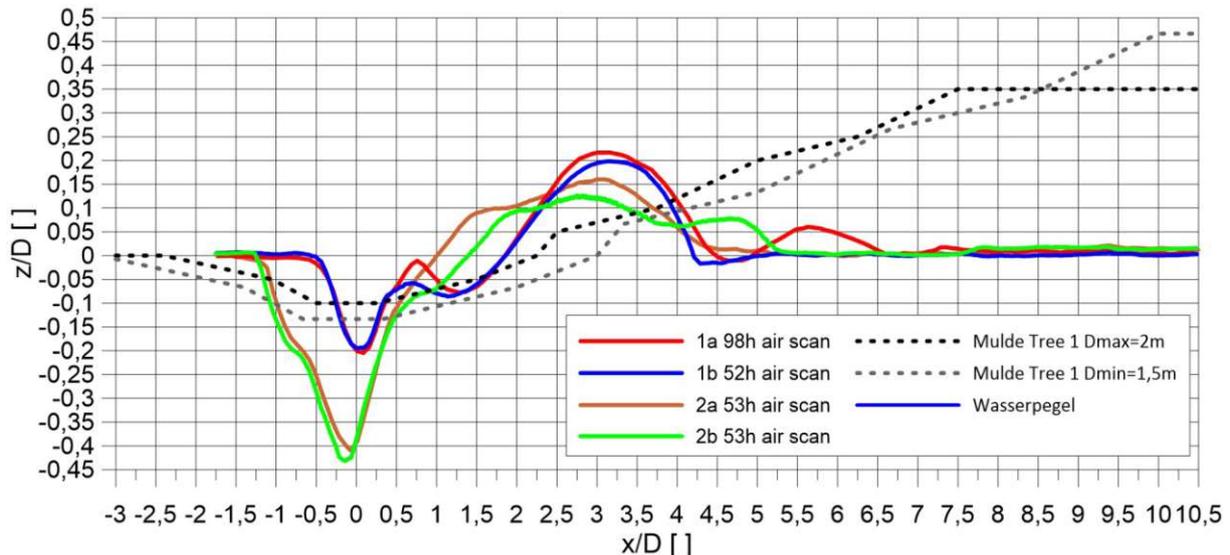


Abbildung 52: Längsschnitte bei 0 D ( $y/D=0$ ) der Luftmessungen von 2a, 1a, 1b, 2b und zum Vergleich ein grober Längsschnitt nahe dem Stamm aus der Feldmessung von Tree 1 (Mulde, siehe 3.1). z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D ( $D=40$  cm) bezogen. Bei Tree 1 lag D zwischen 1,5 m und 2 m.  $x/D=0$ : Lage des Wurzeltellers.

### Vergleich: 1a mit 1b (schwimmender Baum/Wurzelteller)

Bei 1a und 1b gibt es bei der Kolklochtiefe des TS wenig Unterschied, obwohl Versuch 1a 98 h lief, also fast doppelt so lang wie 1b. Ein markanter Unterschied ist jedoch am unterstrom liegenden Ende des TS zu sehen: Wie auch in 5.1 Abbildung 38 b zu sehen, untertunnelt die Strömung die Kreisscheibe und wird durch die Form des TS relativ steil nach oben geleitet. Dadurch wurde die Sohle weniger abgetragen als bei 1b. Die Form und Position der Düne ist bei 1a und 1b sehr ähnlich. Bei 1a sind unterstrom der Düne, durch die relativ lange Versuchsdauer, ein sekundärer Kolk und eine sekundäre Düne zu sehen.

### Vergleich: 2a mit 2b (sohlennaher Baum/Wurzelteller)

Versuch 2a und 2b haben eine ähnliche Kolkform und -tiefe. Die Form der Düne von 2a und 2b ist unterschiedlich. Bei 2a geht der Kolk steil in die Düne über. Bei 2b ist eine schmale Stufe zwischen Kolk und Düne zu sehen, wodurch die Düne etwas weiter unterstrom beginnt. Die Oberseiten beider Dünen sind zwar unterschiedlich hoch und lang, jedoch haben beide eine Stufe. Bei 2b hat die Düne unterstromseitig einen zweiten Teil mit einem zweiten Hochpunkt, wodurch sie etwas länger als bei 2a ist.

### Vergleich: 1a und 1b mit 2a und 2b (Vergleich schwimmender mit sohlennahem Raubaum)

Der Unterschied der Kolktiefe liegt bei  $\Delta z = 0,2 D$  und der Dünenhöhe zwischen  $\Delta z = 0,1 D$  und  $\Delta z = 0,05 D$ . Die Positionen der maximalen Dünenhöhen liegen um  $x = 3 D$  in x-Richtung von der Kreisscheibe (siehe Abbildung 54: downstream distance) entfernt und weichen maximal um  $\Delta x = 0,5 D$  von einander ab. Die Düne von 2a und 2b ist länger und niedriger als bei 1a und 1b und geht fließend in den Kolk über. 2a und 2b haben in x-Richtung betrachtet wesentlich längere Kolke als 1a und 1b. Sie beginnen bei etwa  $x = 1,25 D$  oberstrom der Kreisscheibe und bei 1a und 1b bei etwa  $x = 0,5 D$  oberstrom der Kreisscheibe. Die Position der tiefsten Punkte der Kolke liegt bei 2a und 2b knapp oberstrom und bei 1a und 1b knapp unterstrom der Kreisscheibe.

### Vergleich mit der Mulde

Bei den Feldmessungen in der Mulde konnte die vertikale Lage des Wurzeltellers über der Sohle und auch der Wurzel Durchmesser unter Wasser wegen der starken Trübung nicht gemessen werden. Außerdem lagerte sich Schwemmgut am Wurzelteller ab, sodass Durchmesser und Porosität über den Kolkbildungsprozess und danach ebenfalls nicht als konstant angenommen werden können.

Der direkte Vergleich über Durchmesser-standardisierte Längsprofile in Abbildung 52 ist also mit Vorsicht zu betrachten. Grundsätzlich verläuft das Längsprofil in der Mulde aber wesentlich stetiger und flacher. Der Abfall in den Kolk ist stetig und flach, und der Übergang zur Düne verläuft ohne Sprung mit konstantem Gefälle. Die Düne in der Mulde ist deutlich länger und höher, mit ihrem höchsten Punkt etwa zwei Stammlängen hinter dem Wurzelteller ( $x = 40m$ ,  $x/D \cong 20$ ). Auch das Volumen der Düne ist damit wesentlich größer, während die Kolktiefe etwa dem TS-Fall entspräche (1a, 1b), aber kleiner als der PS-Fall wäre (2a, 2b). Es kann an dieser Stelle nur spekuliert werden, dass die Strömungsverhältnisse und der Sedimenttransport in der Mulde nicht mit denen im Labor zu vergleichen waren. Möglich wäre beispielsweise, dass in der Mulde länger anhaltende geringere Abflüsse und eine Vergrößerung des Wurzeltellers durch Schwemholzakkumulation nach der initialen Kolkbildung zu einer Auswaschung oder Verfüllung des Kolkes geführt haben könnten. In dieser Phase könnten auch noch feinere Korngrößenanteile transportiert und im Nachlauf des Baumes abgelagert worden sein, was die größere Düne erklären würde. Das bedeutet auch, dass die Sohlenveränderungen der Mulde nicht mit Klarwasserverhältnissen (clear-waterscour) erklärt werden können, wie sie im Laborversuch realisiert wurden.

## 5.7 Beobachtungen der Korngrößen-sortierung

Das Sediment der Rinne war leicht ungleichförmig und bildet an der Oberfläche eine leichte Deckschicht durch selektive Erosion der feineren Fraktionen aus (vgl. 4.1). Die resultierende Akkumulation von Grobkorn (3-4 mm) an der Oberfläche ist in den meisten Aufnahmen der Sohle nach den Versuchen auch deutlich zu erkennen. Nachfolgend wird darauf eingegangen, ob die Aufnahmen darüber hinaus Aufschluss über eine Sortierung in den Kolkbereichen und den Ablagerungs-/Dünenbereichen ermöglichen. Zur besseren Visualisierung wurde ein einfacher Edge-Detection-Filter in IrfanView angewendet (Abbildung 53, rechte Seite).

Feines Sediment lagert sich generell in Bereichen mit geringer Turbulenz ab und kann dort auch zur Kolmation führen. Die Bildanalyse zeigt, dass

- bei 1a im Stagnationsbereich oberstrom des Kolkes Feinkorn an der Oberfläche liegen geblieben ist (zwischen  $2 D < x < 0,5 D$  vom Wurzelteller). Bei 2a ist dies nicht der Fall, hier reicht das Kolkloch aber auch in den Stagnationsbereich hinein (bis  $x \sim 1,25 D$  vom Wurzelteller).

- Die longitudinale Düne in der Nachlaufachse (Abbildung 53 f und g) zeigt sich bei allen drei Fällen ebenfalls mit Feinkorn an der Oberfläche. Bei 2b führen wohl die Stammnähe und der direkte Nachlauf des Stammes zu den Feinkornablagerungen, bei 1a eher die sekundären Dünenformen und die generelle Symmetrie der Strömung. Bei 2a führt wohl der Nachlauf des Wurzeltellers zu den Feinkornablagerungen. Bei 2b und 2a sind die zwei durch FSV und HSV geschaffenen Stufen im Kolkloch oberstrom des Wurzeltellers zu sehen. Unterstrom der Stufen sind Feinkornablagerungen erkennbar (Abbildung 53 b und c).

Bereiche mit Grobkorn an der Oberfläche liegen, wie in Abbildung 53 (h) und (i) in den Kolken, wo FSV, HSV und Untertunnelung zu höheren Sohlenschubspannungen führen. Auch die Oberstromseite der Dünen bieten Grobkornbereiche und ebenfalls bei den in 1a im Nachlauf gebildeten sekundären Dünen und Kolken sind Grobkornbereiche zu sehen.

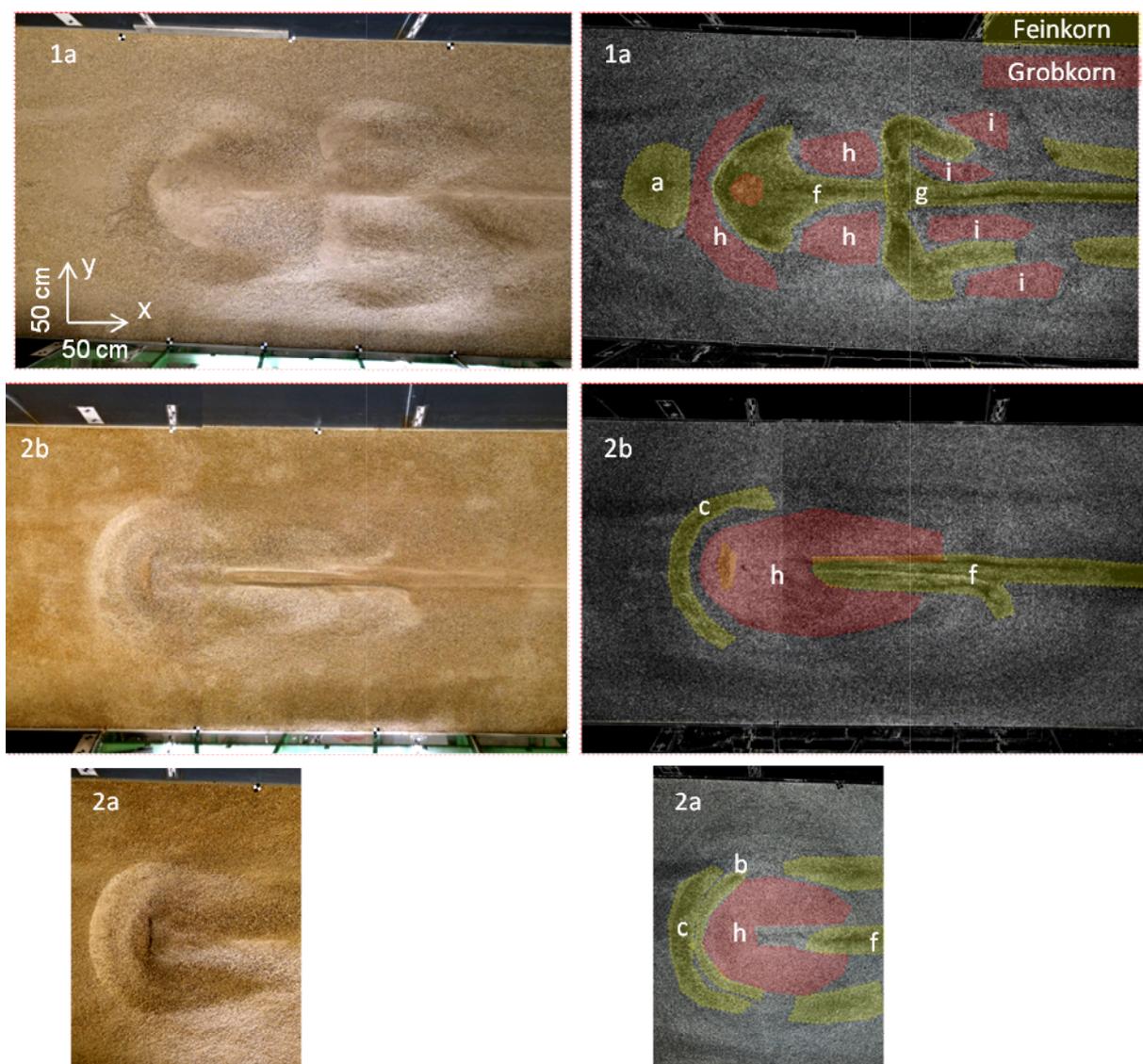


Abbildung 53: Aufnahme und Edge-Detection von Versuchen 1a (98h), 2b (53h) und 2a (53h) nach Versuchsende und bei entleerter Rinne. Bereiche; (a) Stagnation, (b) Kolk untere Stufe, (c) Kolk obere Stufe, (f) primärer Dünenkamm, (g) sekundärer Dünenkamm, (h) Hauptkolk, (i) Sekundärkolk.

## 5.8 Vergleich der Entwicklung von Dünenhöhen, Kolkiefen und Lage des SLS

Um die zeitliche Entwicklung der tiefsten (SLS) und höchsten Punkte (Düne) der Sohle zu erfassen, wurden in den Farbkonturen die entsprechenden Punkte mit ihren Koordinaten in CloudCompare gemessen. In den folgenden Diagrammen ist die zeitliche Entwicklung der Tiefe, der Höhe und der Lage dieser Punkte eingetragen. Auf der x-Achse ist bei allen Diagrammen die Zeit und auf der y-Achse die entsprechende bezogene Abmessung aufgetragen. In Abbildung 54 sind zur besseren Übersicht die Auskolkungs- und Ablagerungsbereiche skizziert.

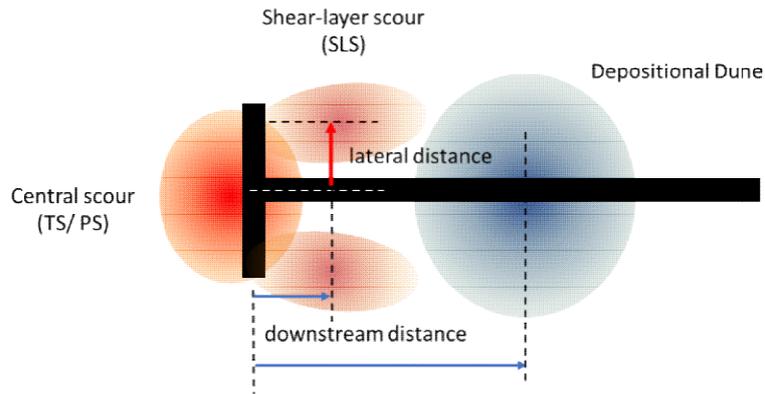


Abbildung 54: Auskolkungs- und Ablagerungsbereiche um das Baummodell

### 5.8.1 Zeitliche Entwicklung der maximalen Dünenhöhe

In Abbildung 55 ist die zeitliche Entwicklung der maximalen Dünenhöhe vom Versuch 1a, 2a, 1b, und 2b zu sehen. Sie ist auf  $D$  ( $D = 40$  cm) bezogen. Auf der x-Achse ist die Zeit und auf der y-Achse die bezogene Höhe dargestellt. Der Versuch 1a wurde 98 h durchgeführt und zeigt, wie die maximale Dünenhöhe immer weniger zunimmt. Die anderen Versuche wurden zwischen 45 h und 49 h abgebrochen.

1b zeigt bis 10 h einen ähnlichen Verlauf wie 1a. Dann wächst die Düne von 1a schneller als die von 1b und erreicht bei 48 h mit  $0,20 D$  einen annähernd gleichen Wert wie 1b mit  $0,19 D$ . 2b und 2a unterscheiden sich deutlich von 1a und 1b. Bei 2b ist nach 7 h die Verringerung der Dünenhöhe markant. Die Verläufe der Dünenhöhen von 2a und 2b weisen in den ersten Stunden Unterschiede auf, gleichen sich jedoch bis zum Versuchsende bei 45 h um  $0,16 D$  an einander an.

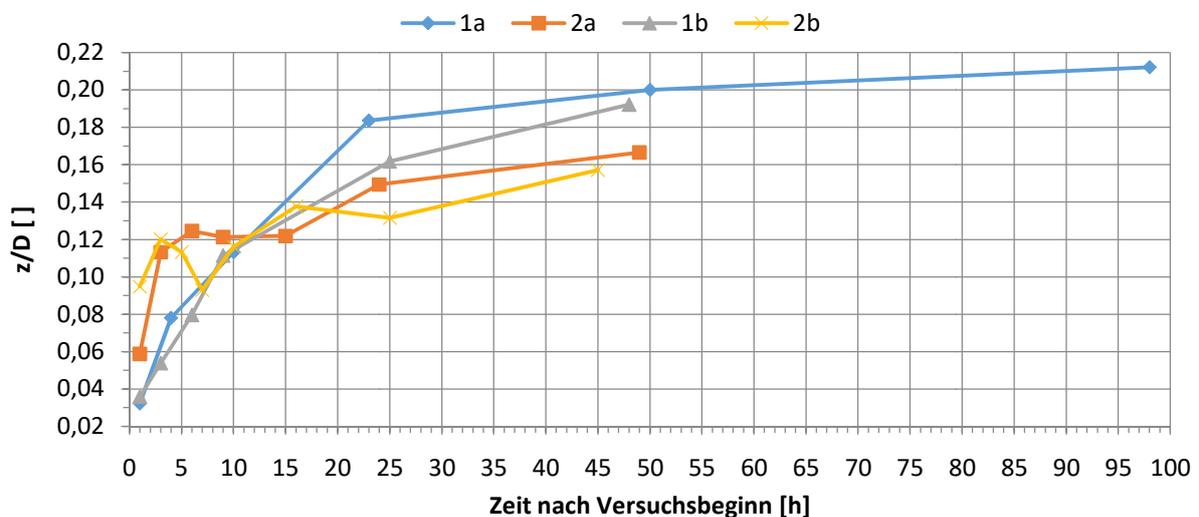


Abbildung 55: Zeitliche Entwicklung der maximalen auf  $D$  ( $D = 40$  cm) bezogenen Dünenhöhe ( $z$ -Koordinate) der Versuche 1a, 2a, 1b, 2b.

5.8.2 Zeitliche Entwicklung des SLS bei Versuchen 1a und 1b

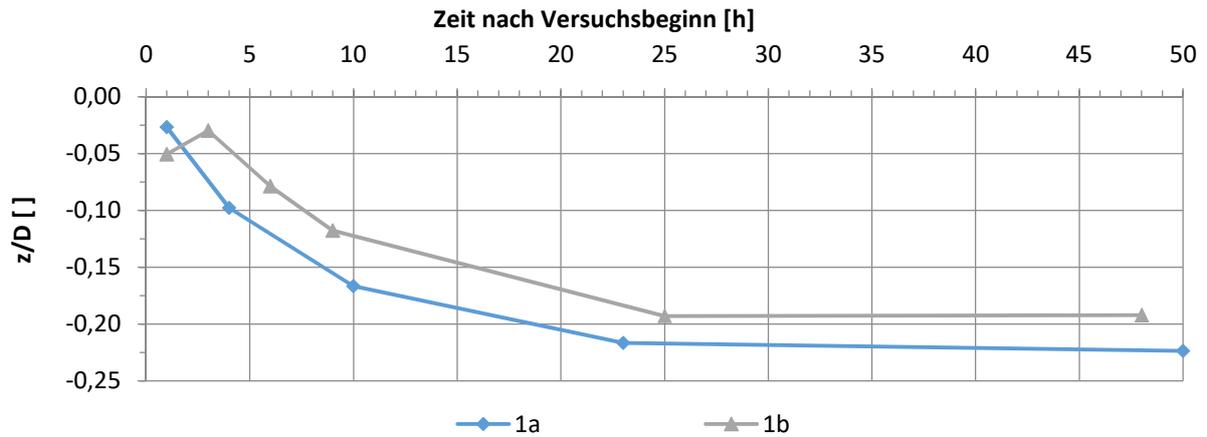


Abbildung 56: Zeitliche Entwicklung der maximalen auf D (D = 40 cm) bezogenen Erosionstiefe (z-Koordinate) des SLS bei 1a und 1b.

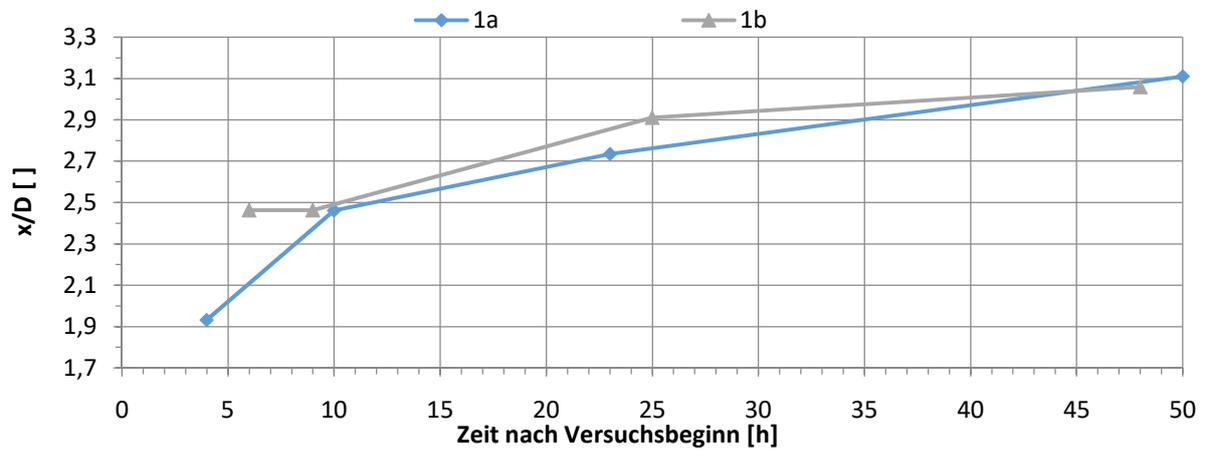


Abbildung 57: Downstream distance SLS: Zeitliche Entwicklung der auf D (D = 40 cm) bezogenen Entfernung von der Kreisscheibe, in Fließrichtung (x-Koordinate), des tiefsten Punktes des SLS bei 1a und 1b.

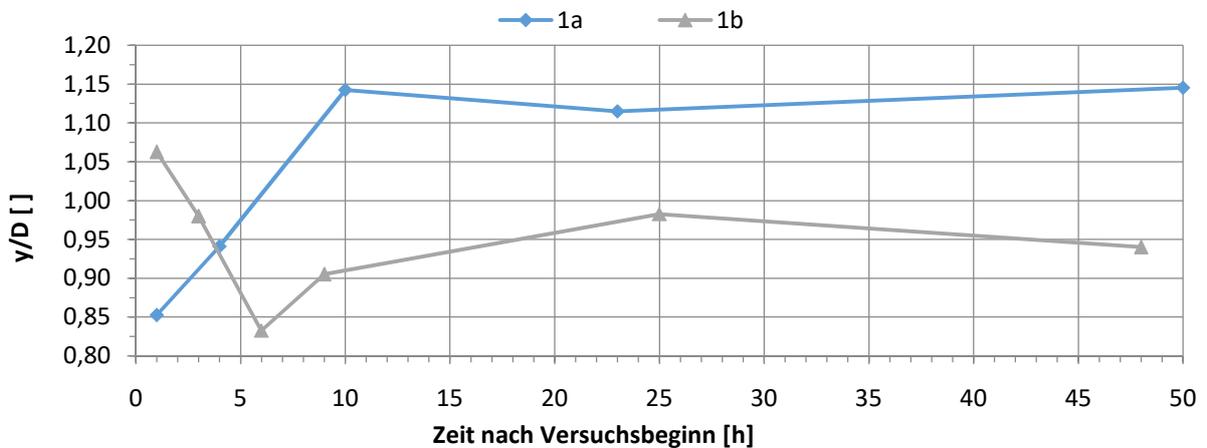


Abbildung 58: Lateral distance SLS: Zeitliche Entwicklung der auf D (D = 40cm) bezogenen Entfernung von der Symmetrieachse, quer zur Fließrichtung (y-Koordinate), des tiefsten Punktes des SLS bei 1a und 1b.

In Abbildung 56 bis Abbildung 58 ist die zeitliche Entwicklung des SLS bei den Versuchen 1a und 1b (Fall: schwimmender Baum) bezüglich Tiefe und Lage in Längs- und Querrichtung dargestellt:

In Abbildung 56 ist die zeitliche Entwicklung der auf  $D$  bezogenen maximalen Erosionstiefe ( $z/D$ ) des SLS dargestellt. Es zeigt sich bei beiden Versuchen ein Gleichgewichtszustand ab 25 h, der durch die gleichbleibende Erosionstiefe bis zum Versuchsende gekennzeichnet ist. 1b hat bis auf die erste Messung durchgehend eine geringere Kolkstiefe als 1a. Die Differenz ist jedoch gering und beträgt zum Ende rund 0,03  $D$ .

In Abbildung 57 ist die zeitliche Entwicklung der auf  $D$  bezogenen, in Fließrichtung gemessenen Entfernung ( $x/D$ ) zwischen dem tiefsten Punkt des SLS und der Kreisscheibe dargestellt. 1a wandert zwischen 4 h und 10 h stärker in Fließrichtung und nimmt dann einen ähnlichen Verlauf wie 1b. 1b ändert sich zwischen 6 h und 9 h kaum. Bei beiden Versuchen wandert der tiefste Punkt kontinuierlich in Fließrichtung. Obwohl in Abbildung 56 die Tiefe am Ende des Versuchs nicht mehr zunimmt, ist in Abbildung 57 ein Wandern in Fließrichtung zu erkennen.

In Abbildung 58 ist die zeitliche Entwicklung der auf  $D$  bezogenen lateralen Entfernung ( $y/D$ ) zwischen dem tiefsten Punkt des SLS und der Symmetrieachse des Baummodells dargestellt. 1a zeigt in den ersten 10 h eine konstante Bewegung, weg von der Symmetrieachse von 0,85  $D$  nach 1,15  $D$  und bleibt bis zur letzten Messung in diesem Bereich. 1b verlagert sich bis 6 h von 1,07  $D$  bis auf 0,83  $D$  zum Stamm und anschließend bis zur letzten Messung in den Bereich 0,95  $D$ . 1a liegt deutlich weiter weg von der Symmetrieachse als 1b. Der Unterschied bei der letzten Messung beträgt 0,2  $D$ .

## 6 Diskussion

### 6.1 Unterschiede durch die Installationshöhe der Raubäume

Die zentrale Fragestellung für die Laborversuche war, wie sich die schwimmende und die sohlennahe Installation auf die Morphodynamik auswirken. Aus den Ergebnissen ergaben sich wesentliche Unterschiede, die in Abbildung 59 grafisch dargestellt und nachfolgend stichpunktartig zusammengefasst werden.

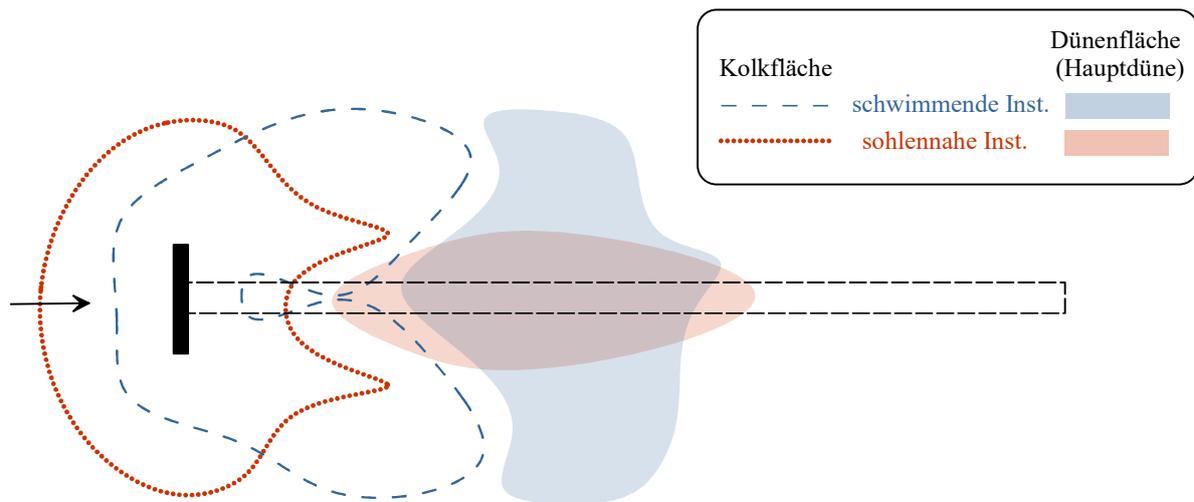


Abbildung 59: Umriss der Kolk- und Dünenbereiche bei schwimmend und sohlennah installiertem Raubaum/Wurzelteller. Fließrichtung: von links nach rechts.

- Die Installationshöhe hat großen Einfluss auf die Kolkform und Kolkgröße oberstrom des Wurzeltellers. Im schwimmenden Fall war ein kürzerer, flacherer und C-förmiger Kolk zu beobachten, bei sohlennaher Installation ein vergleichsweise längerer, tieferer und D-förmiger Kolk.
- Die Strömungsmuster um den Wurzelteller sind ebenfalls unterschiedlich. Bei schwimmender Installation findet nur eine Untertunnelung statt (tunnelscour), bei sohlennaher Installation wird der anfängliche pierscour („PS“) Kolkprozess maßgeblich durch den Horseshoe vortex scour („HSV“) und seine Wirbelstruktur geprägt, bis in der letzten Phase dann auch noch Untertunnelung einsetzt. Hierbei bleibt aber die PS-Kolkform grundsätzlich bestehen und es findet nur noch eine größere Eintiefung bzw. Auswaschung statt.
- Damit sind auch die Scherschichten und der shearlayer scour („SLS“) im Nachlauf unterschiedlich ausgeprägt und positioniert. Bei schwimmender Installation bilden sich zwei große SLS aus, die sich longitudinal und lateral nach außen weiter ausbreiten. Bei sohlennaher Installation werden die beiden SLS weitgehend vom globalen pierscour Kolk überlagert. Sie sind weniger markant und liegen näher an der Symmetrieachse (Stamm).

- Die Hauptdünen unterschieden sich bezüglich Höhe, Form und Lage: Bei der schwimmenden Installation tritt eine vergleichsweise höhere, breite und kurze Düne ein. Die Düne bei der sohlennahen Installation ist länglich, vergleichsweise schmaler und niedriger.
- Nebendünen bilden sich bei sohlennaher Installation neben den SLS. Diese resultieren aus Ablagerungen von im Kolk mobilisiertem und durch den HSV transportiertem Sediment. Bei schwimmender Installation treten keine Nebendünen auf.
- Bezüglich der Kornverteilung wechseln sich bei schwimmender Installation Bereiche mit Feinkorn und Grobkorn ab und sind um den Baum mosaikartig verteilt. Oberstrom des Kolkloches kommt es im Stagnationsbereich zu Feinkornablagerungen. Im Kolkloch oberstrom des Wurzeltellers bilden sich Grobkornakkumulationen und unterstrom Feinkornablagerungen. Bei sohlennaher Installation konzentrieren sich die Feinkornablagerungen entlang des Stammes bzw. entlang der Symmetrieachse und oberstrom des Wurzeltellers im Kolkloch. Grobkornablagerungen/-akkumulationen sind generell im Kolk, um den Wurzelteller und in den SLS Bereichen zu finden.
- Was die zeitliche Entwicklung der Kolk- und Ablagerungsformen betrifft, so bildet sich der TS bei schwimmender Installation sofort in den ersten Stunden und bleibt danach weitgehend stabil. Die SLS wachsen dagegen langsam, erreichen ihre maximale Tiefe nach etwa 24 h und wandern bis zum Versuchsende sehr langsam weiter nach unterstrom. Bei sohlennaher Installation benötigt die PS-Phase eine relativ kurze Zeit (12 h). Die anschließende Untertunnelung, die mit einer Abschwächung der HSV-Kohärenz verbunden ist, dauert demgegenüber lange, bis ein Gleichgewicht erreicht wird, da ja zunächst das Sedimentdepot hinter dem Wurzelteller abgetragen werden muss und danach noch eine Glättung des Kolkes durch die Unterströmung erfolgt.

## 6.2 Unterschiede zwischen Raubaum und Wurzelteller ohne Stamm

Eine weitere Fragestellung war, welchen Einfluss das Vorhandensein eines Stammes auf die Morphodynamik hat. Aus den Laborversuchen mit fixierten, bewegungsfreien Raubäumen können folgende Schlüsse abgeleitet werden:

- Das Vorhandensein eines Stammes hat keinen Einfluss auf die Kolkbildung oberstrom des Wurzeltellers. Das gilt unabhängig von der Installationshöhe.
- Bei schwimmender Installation mit Stamm liegt der SLS etwas näher an der Symmetrieachse als ohne Stamm.
- Ablagerungsstrukturen sind bei schwimmender Installation mit und ohne Stamm praktisch identisch. Bei sohlennaher Installation verursacht der Stamm eine sekundäre Dünenform, die weiter unterstrom und nahe am Stamm liegt.
- Der Stamm führt bei sohlennaher Installation in seinem Nachlauf zu einer langgezogenen Feinsedimentablagerung.

### 6.3 Vergleich mit Naturmessungen

Am Ende können die Laborversuche nicht nachvollziehen, welche Prozesse in der Mulde zur Kolkbildung geführt haben. Die generell größere Flachheit und „Ausgewaschenheit“ der Sohlenstrukturen ist nicht gut mit den markanten Strukturen in den Laborversuchen zu vergleichen. Dafür kann es zwei Hauptgründe gegeben haben; (i) die Abfluss- und Sedimentdynamik in der Mulde mit langanhaltenden Mindestwasserabflüssen („Auswaschung“?) und (ii) die wahrscheinlich abflussabhängige Höhenposition. Für Letzteres spricht, dass die Kolkform in der Mulde eine Mischform aus dem C- und D-förmigen Kolken der Versuche ausmacht. So könnte z. B. das Aufschwimmen des Raubaumes bei höheren Abflüssen nach der Installation zunächst zur C-Form (TS) geführt haben und später dann durch ein Aufliegen des Baumes auf der Sohle, zu einem D-förmigen Kolk (PS). Dies bleibt jedoch Spekulation.

Die Ablagerungsstrukturen in der Mulde sind vom Volumen her größer als das erodierte Kolkvolumen. Das bedeutet, dass ein Großteil des im Nachlauf abgelagerten Materials aus der freien Außenströmung kommen musste. In Laborversuchen müssen solche Verhältnisse also mit (Fein) Sedimentzugabe im Zulauf untersucht werden. Die Ablagerungsformen sind dann wesentlich größer als bei den hier untersuchten Klarwasserverhältnissen. Klarwasserverhältnisse sind damit letztendlich nur für die Untersuchung der Kolkbildung geeignet.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge von Fließrinnenversuchen im Labor wurde systematisch die zeitliche Entwicklung der Morphologie der Sohle um installierte Raubäume mit Wurzelteller (astloser Stamm) und Wurzeltellern (ohne Stamm) in schwimmender und sohlennaher Lage untersucht. Motivation und Vorlage waren bereits installierte Raubäume und deren Feldmessungen im Fluss Mulde. Diese lieferten zeitlich gesehen nur eine Momentaufnahme, jedoch keine Informationen, welche Prozesse und mit welcher Geschwindigkeit zu dem gemessenen Zustand führten.

Die Wurzelteller waren gegen die Fließrichtung orientiert, wurden frontal angeströmt, waren lagefixiert, bewegungsfrei installiert und waren als Baummodelle als Kreisscheibe mit und ohne Kreiszyylinder idealisiert.

Die dynamische Entwicklung der Kolke, Dünen und Ablagerungen wurde, ausgehend von einer glatt abgezogenen horizontalen Initialsohle, bei Klarwasserverhältnissen, durch einen oberflächenvermessenden Laserscanner erfasst. Messläufe wurden während der laufenden Versuche mit eingetauchtem Laserscanner regelmäßig und mit größer werdenden Intervallen über einen Teil der Sohle durchgeführt. Bei abschließenden Lasermessungen in Luft wurde am Ende der Versuche bei entleerter Rinne und ausgebauten Baummodellen die gesamte Sohle erfasst. Die regelmäßigen Messungen erfolgten nach 1, 3, 6, 12, 24, 48 Stunden und die abschließenden Messungen nach Abstellen der Pumpen, je nach Versuch bei 98 und rund 52 Stunden.

Die gemessenen Daten wurden durch Teilung, Zuordnung, Zusammenfügen, Korrektur und Erstellung von Oberflächenmodellen umfangreich im Programm „CloudCompare“ und weiteren Programmen aufbereitet. Ausgewertet wurden die morphologischen Änderungen mittels Farbkonturdarstellungen und vertikaler Längsschnitte der Oberflächenmodelle. Außerdem wurden Wirbelsysteme, Strömungsmuster durch Farbstoffzugabe und Korngrößensortierung durch Lichtbildaufnahmen analysiert.

Die vier untersuchten Fälle waren schwimmender Raubaum mit Wurzelteller, schwimmender Wurzelteller (ohne Stamm), sohlennaher Raubaum mit Wurzelteller und sohlennaher Wurzelteller (ohne Stamm).

In den Farbkonturdarstellungen und Schnitten zeigt sich die schnelle Dynamik der Kolke, Dünen und Ablagerungen zu Beginn der Versuche. Gegen Versuchsende bei rund 48 h ist eine starke Abnahme bis Stagnation der Sohlendynamik zu sehen. Damit entwickelt sich bei allen Fällen bis Versuchsende eine morphologische Hauptstruktur, bestehend aus Kolk um den Wurzelteller (PS/TS), Kolk im Scherschichtbereich (SLS) und Hauptdüne im Nachlaufbereich des Wurzeltellers. Beim sohlennahen Fall gehört außerdem eine Nebendüne zur Hauptstruktur.

Der Stamm hat bei allen Fällen keinen Einfluss auf die Kolkbildung oberstrom des Wurzeltellers und wenig Einfluss im Nachlaufbereich. Im schwimmenden Fall beeinflusst er die laterale Lage des SLS, im sohlennahen Fall die Form der Hauptdünen.

Markante Unterschiede der Hauptstrukturen sind zwischen schwimmender und sohlennaher Installation aufgetreten. Während beim schwimmenden Fall die rasche Untertunnelung des Wurzeltellers und der shearlayer scour („SLS“) im Nachlauf zum letztendlich C-förmigen und vergleichsweise flachen, jedoch flächenmäßig ähnlich großen Kolk führt, kommt es bei der sohlennahen Installation anfänglich zu einem pier scour („PS“) Kolkprozess, D-förmigen Kolk, der maßgeblich durch den Horseshoe vortex scour („HSV“) und seine Wirbelstruktur geprägt wird. In der letzten Phase setzt dann auch noch Untertunnelung ein und führt in Summe zu einem vergleichsweise tieferen und oberstrom des Wurzeltellers längeren Kolk.

Bei den Hauptdünen im Nachlauf zeigen sich Unterschiede bezüglich Höhe, Form und Lage: Bei der schwimmenden Installation tritt eine vergleichsweise höhere, breite und kurze Düne ein. Die Düne bei der sohlennahen Installation ist länglich, vergleichsweise schmaler und niedriger.

Unterschiede bei der Korngrößen-sortierung waren hauptsächlich zwischen schwimmender und sohlennaher Installation zu beobachten. Durch die Lichtbildaufnahmen am Ende der Versuche und deren Analyse konnte die Sohle in Bereiche mit Feinkornablagerungen und Grobkornakkumulationen unterteilt werden.

In den Laborversuchen ergaben sich markante Erosions- und Ablagerungsstrukturen, die klar voneinander abzugrenzen waren. Demgegenüber dokumentierten die Feldmessungen nach langanhaltenden Niedrigwasserverhältnissen in der Mulde eine eher „ausgewaschene“ Morphologie. Aufgrund der unbestimmten Randbedingungen kann die vertikale Lage der Bäume und damit der kolkbildende Prozess in der Mulde aber nicht über die Laborversuche rekonstruiert oder nachgewiesen werden.

Daraus ergeben sich natürlich sofort Fragestellungen für weitergehende Versuche:

- Wie lange bleiben Erosions- und Ablagerungsstrukturen nach den bettbildenden Abflüssen ausgeprägt und wann setzen Auswaschungsprozesse ein?
- Wie wichtig ist der Sedimenttransport für die Kolkbildung, aber vor allem auch für die Retention von Feinsedimenten im Nachlauf?
- Sind kurzzeitig „markante“ oder langfristig vorhandene ausgewaschene morphologische Strukturen für die Ökologie wichtiger? Wie ist die Strömungsdynamik in beiden Fällen und welche Arten können kurzzeitig und längerfristig davon profitieren?

Die Dynamik der Fließgewässer und Veränderungen in den Abfluss- und Sedimentregimen sind für morphodynamische Untersuchungen derzeit noch eine große Herausforderung. Dass diese unmittelbar mit der Habitateignung und den ökologischen Funktionen zusammenhängen, ist zwar unbestritten, aber andererseits kaum durch Prozess- und Modellverständnis belegt. Hier ergibt sich gerade auch für optimierte Renaturierungsmaßnahmen ein großes Potential für Forschung und Anwendungen.

## Literaturverzeichnis

**2G Robotics Inc. 2015.** ULS-100/200 User Manual.

**Abbe, Tim B. und Montgomery, David R. 2003.** Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology* 51 (2003) 81–107. [www.elsevier.com/locate/geomorph](http://www.elsevier.com/locate/geomorph) (letzter Zugriff: 06.06.2023).

**Anlanger, Christine, et al. 2022.** Large wood in river restoration: A case study on the effects on hydromorphology, biodiversity, and ecosystem functioning. *Int Rev Hydrobiol.* 2022;107:34–45. Wiley-VCH GmbH. <https://doi.org/10.1002/iroh.202102089> (letzter Zugriff: 27.09.2023).

**Avery-Gomm, Stephanie; Rosenfeld, Jordan S.; Richardson, John S.; Pearson, Michael. 2014.** Hydrological drought and the role of refugia in an endangered riffle-dwelling fish, Nooksack dace (*Rhinichthys cataractae* ssp.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* [dx.doi.org/10.1139/cjfas-2013-0585](https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0585) (letzter Zugriff: 05.09.2023).

**Barkdoll, F. ASCE, Brian D. und Huckins, Casey J. 2012.** The Role of Bridge Scour in Relation to Stream Restoration. *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries* © ASCE 2012. 2012.

**Becker, Andreas und Ortlepp, Johannes. 2022.** Fischökologisch funktionsfähige Strukturen in Fließgewässern Methodik zur Herleitung des strukturellen Defizits als Grundlage der Schaffung von funktionsfähigen Lebensräumen für die Fischfauna in den Gewässern Baden-Württembergs. *Landesstudie Gewässerökologie Baden-Württemberg. Regierungspräsidium Tübingen Geschäftsstelle Gewässerökologie.*

**Bureau of Reclamation and U.S. Army Engineer Research and Development Center (USBR and ERDC). 2016.** National Large Wood Manual: Assessment, Planning, Design, and Maintenance of Large Wood in Fluvial Ecosystems: Restoring Process, Function, and Structure. [www.usbr.gov/pn/](http://www.usbr.gov/pn/) and <http://cw-environment.usace.army.mil/restoration.cfm> (click on "River Restoration," then "Techniques") (letzter Zugriff: 20.01.2016).

**Gurnell, Angela, et al. 2005.** Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. *Front Ecol Environ* 2005; 3(7): 377–382, *The Ecological Society of America.* 2005.

**Magoulick, Daniel D. und Kobza, Robert M. 2003.** The role of refugia for fishes during drought: a review and synthesis. *Freshwater Biology* (2003) 48, 1186–1198.

**Matthews, Kathleen R., et al. 1994.** Cool Water Formation and Trout Habitat Use in a Deep Pool in the Sierra Nevada, California. *Transactions of the American Fisheries Society*, 123:4, 549–564. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1994\)123<0549:CWFATH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1994)123<0549:CWFATH>2.3.CO;2) (letzter Zugriff: 06.09.2023).

**Mcintosh, Bruce A., et al. 2000.** HISTORICAL CHANGES IN POOL HABITATS IN THE COLUMBIA RIVER BASIN. *Ecological Applications*, 10(5), 2000, pp. 1478–1496. 2000.

**Richardson, E.V. und Davis, S.R. 2001.** Evaluating Scour At Bridges Fourth Edition. *Publication No. FHWA NHI 01-001 May 2001 Hydraulic Engineering Circular No. 18, National Highway Institute.*

**Schnauder, I. und Blanckaert, K. 2022.** Flow and morphologic diversity provided by tree installations in rivers. *Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, TU Wien, Vienna, Austria.*

**Schnauder, I., Anlanger, C. und Koll, K. 2022.** Wake flow patterns and turbulence around naturally deposited and installed trees in a gravel bed river. *International Review of Hydrobiology* 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1002/iroh.202102096> (letzter Zugriff: 24.02.2023).

**Schulz-Zunkel, C., et al. 2022.** Effective restoration measures in river-floodplain ecosystems: Lessons learned from the 'Wilde Mulde' project. *Int Rev Hydrobiol.* 2022;107:9–21. [wileyonlinelibrary.com/journal/iroh](http://wileyonlinelibrary.com/journal/iroh) (letzter Zugriff: 05.04.2023). 2022.

**Sumer, M.B., et al. 1988.** EFFECT OF LEE-WAKE ON SCOUR BELOW PIPELINES IN CURRENT. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 1988.114:599-614.

**Truelsen, C., Sumer, M.B. und Fredsøe, J. 2005.** Scour around spherical bodies and self-burial. *JOURNAL OF WATERWAY, PORT, COASTAL, AND OCEAN ENGINEERING © ASCE / JANUARY/FEBRUARY 2005.*

**Umweltbundesamt. 2014.** Hydromorphologische Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen Anhang 1 von „Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle“. *Umweltbundesamt Deutschland. ISSN 1862-4804.* <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strategien-zur-optimierung-von-fließgewässern> (letzter Zugriff: 15.01.2023).

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Bei abfließender Welle auf den Schotterterrassen abgelagerter Baum im Fluss Tagliamento, Nordost-Italien (Fließrichtung von links nach rechts, Foto: Schnauder)..... 1
- Abbildung 2: Einbau und Befestigung mit Ketten und Betonblöcken eines Raubaumes mit Wurzelteller in den Fluss Mulde bei Dessau, Sachsen-Anhalt (Fließrichtung von rechts nach links, Foto: Schrenner, WWF) ..... 2
- Abbildung 3: Fertig eingebauter Raubaum mit Wurzelteller. Fixiert durch Ketten und Betonblöcke. (Fließrichtung von rechts nach links, Foto: Nele Klimmer, WWF)..... 2
- Abbildung 4: Skizze einer Baumstruktur im Fluss mit Darstellung der umgebenden Morphologie der Sohle (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996).. 4
- Abbildung 5: Einteilung der Entwicklung der Sohle um eine Baumstruktur in morphologische Stufen a, b, c (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996)..... 5
- Abbildung 6: Feldmessung der Sohlenveränderungen durch Umströmung einer Baumstruktur. (Fließrichtung von rechts nach links, modifizierte Abbildung nach Abbe & Montgomery, 1996) ..... 5
- Abbildung 7: Qualitatives Strömungsmuster vor der Baumstruktur vor der Kolkbildung. (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996)..... 6
- Abbildung 8: Gemessenes Strömungsmuster vor der Baumstruktur bei vorhandenem Kolk. Pfeillänge entspricht der gemessenen Geschwindigkeit. (modifizierte Abbildung aus Abbe & Montgomery, 1996) ..... 6
- Abbildung 9: Morphologische Entwicklungen des Flussbettes um bzw. durch Baumstrukturen. (a) Baum, lagestabil bei abfließender Welle auf Flusssohle, deponiert mit halbmondförmigen Kolk, Feinsedimentablagerungen entlang des Stammes und grobes Sediment im Bereich der Scherschichten. (b) Ältere und größer gewordene Baumstruktur mit Verklausung und Bewuchs. (c) Durch mehrere Baumstrukturen entstandene Flusslandschaft mit Inselbildung. (modifizierte Abbildung aus Gurnell et al., 2005)..... 7

- Abbildung 10: Abgelagerter Baum mit Wurzelschock (Bild oben). Qualitative Beschreibung des Strömungsmusters um den Baum (Bild unten, Scherschicht fälschlicherweise als vortex street bezeichnet). (Fig. 4.9 aus LW-Manual, 2016)..... 8
- Abbildung 11: Eingebauter Raubaum nach einem Jahr bei Niederwasser. Fixiert durch Ketten und Betonblöcke. Anderer Baum als in Abbildung 12. (Fließrichtung von rechts nach links, Foto: Schrenner, 2018) ..... 9
- Abbildung 12: Messung der Sohlenlage und Sedimentverteilung um zwei Baumstrukturen. (modifizierte Abbildung aus Schnauder et al., 2022)..... 9
- Abbildung 13: Längsschnitt der Sohlenveränderung bei Über- und Unterströmung eines horizontal angeordneten Kreiszyinders mit Durchmesser  $D$  bei clear-water-scour und live-bed Verhältnissen.  $D = 100$  mm,  $T = 250$  min (Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes).  $S$  = Kolktiefe,  $t$  = Zeit,  $\theta_0$  = Shields-Parameter der ungestörten Sohle. (modifizierte Abbildung aus Sumer et al., 1988)..... 11
- Abbildung 14: Einfluss der Position einer Kugel auf die Gleichgewichtskolkentiefe.  $D$  = Kugeldurchmesser,  $e$  = Abstand der Kugel zur Sohle,  $S$  = Gleichgewichtskolkentiefe.  $\theta = 0.12$  (modifizierte Abbildung aus Truelsen et al., 2005)..... 12
- Abbildung 15: Schematische Darstellung des Kolkes und der Strömung um einen stehenden Kreiszyinder. Modifizierte Abbildung aus Richardson und Davis 2001. .... 12
- Abbildung 16: Orientierungswerte für die Herstellung eines Barben-Ökotops. Modifizierte Abbildung aus Becker et al. (2022). .... 14
- Abbildung 17: Orientierungswerte für die Herstellung eines Bachforellen-Ökotops. Modifizierte Abbildung aus Becker et al. (2022) ..... 15
- Abbildung 18: Orientierungswerte der artspezifischen hydro-morphologischen Habitateignung. Modifizierte Abbildungen aus Becker et al. (2022). .... 16
- Abbildung 19: Versuchsrinne im Wasserbaulabor der TU Wien ..... 19
- Abbildung 20: Astloser Baum mit Wurzelteller (Raubaum), Wurzelteller mit Bewuchs überdeckt, geometrische Vorlage für das Baummodell, Baum 1 (Tree 1) aus Abbildung 12 mit Größenskala. (Foto: Schnauder) ..... 20
- Abbildung 21: Astloser Baum mit Wurzelteller (Raubaum), geometrische Vorlage für das Baummodell, Baum 1 (Tree 1) aus Abbildung 12. Bild links: Aufnahme kurz nach Einbau, Bild rechts: spätere Aufnahme mit Bewuchs am Wurzelteller. (Fotos links: Nele Klimmer, WWF; Foto rechts: Schnauder) ..... 20
- Abbildung 22: Skizze des Baummodells, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Baummodell aus Kreisscheibe und Kreiszyinder..... 20
- Abbildung 23: Versuchsrinne mit eingebautem Baummodell vor Versuchsbeginn. Sohle ist glatt abgezogen. Kreisscheibe zum Teil eingegraben und Kreiszyinder liegt auf der Sohle auf. Biegesteif montierte Kreisscheibe und Lagesicherung durch Stange am hinteren Ende des Kreiszyinders. (Foto: Schnauder)..... 21
- Abbildung 24: Biegesteif montierte Kreisscheibe ohne Kreiszyinder am Ende eines Versuchs. Rinne nicht vollständig entleert, Wasser im Kolk sichtbar. (Foto: Schnauder) ..... 21
- Abbildung 25: Versuchsanordnung 1a, Position 1 (schwimmender Baum), Kreisscheibe, kein Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe von vorne, rechts: Seitenansicht Kreisscheibe..... 22
- Abbildung 26: Versuchsanordnung 1b, Position 1 (schwimmende Installation), Kreisscheibe mit Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Baummodell..... 22
- Abbildung 27: Versuchsanordnung 2a/Db, Position 2 (sohlennaher Installation), Kreisscheibe, kein Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Kreisscheibe..... 23

Abbildung 28: Versuchsanordnung 2b, Position 2 (schwimmende Installation), Kreisscheibe mit Stamm, links: Ansicht Kreisscheibe, rechts: Seitenansicht Baummodell.....	23
Abbildung 29: Einteilung der Fläche um das Baummodell in den Bereich oberstrom der Kreisscheibe, Nachlauf und durch den Laserscanner gemessene Bereiche. Baummodell mit beispielhafter Darstellung einer Abschlussmessung der Sohle als Farbkontur im Hintergrund.....	24
Abbildung 30: Laserscanner Messsprinzip (links), Laserscanner 2GS ULS-100 (rechts) (2G Robotics Inc., 2015).....	24
Abbildung 31: Auf einer Traverse montierter, nach unten orientierter Laserscanner mit Darstellung der x-, y-, z-Achsen. Qualitative Darstellung der scannbaren Breite durch den grünen Fächer.....	25
Abbildung 32: Auszug aus einer Messung. Rohdaten vom Laserscanner. Spaltenweise von links nach rechts: x-, y-, z-Koordinaten und Wert für die Intensität der Lichtreflektion.....	27
Abbildung 33: Beispiel der Korrektur der Traversendurchbiegung .....	27
Abbildung 34: Beispiel der Korrektur von Luft- auf Wasser-Kalibrierung.....	28
Abbildung 35: Vergleich von Rohdaten (rote Punkte) und korrigierten Daten (grüne Punkte) mit den Schnittdaten aus dem Mesh der Luftmessung (schwarze Linie) und der korrigierten Unterwassermessung (grüne Linie). .....	28
Abbildung 36: Baummodell: Kreisscheibe mit Stamm, Lage der Schnittführung von 0 D, 0,5 D und 1 D.....	29
Abbildung 37: Baummodell: Kreisscheibe ohne Stamm, Lage der Schnittführungen von 0 D, 0,5 D und 1 D.....	29
Abbildung 38: Durch Farbstoffzugabe sichtbare Wirbelsysteme und Strömungsmuster um die untersuchten Baummodelle. HSV = horseshoe vortex, FSV = flow separation vortex. Modifizierte Abbildung aus Schnauder et al. (2022). .....	30
Abbildung 39: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 1a.....	31
Abbildung 40: Farbkonturen Versuch 1a, Kreisscheibe ohne Stamm, Position 1 (schwimmend), Unterwassermessungen von 1h bis 50 h, Luftmessung bei 98 h, Farbskala z/D....	32
Abbildung 41: Vertikale Längsschnitte von 1a in den Ebenen: $y/D=0$ , $y/D=0,5$ und $y/D=1$ von 1 h bis 98 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D (D= 40 cm) bezogen. ....	33
Abbildung 42: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 1b .....	34
Abbildung 43: Farbkonturen Versuch 1b, Kreisscheibe mit Stamm, Position 1 (schwimmend), Unterwassermessungen von 1 h bis 48 h, Luftmessung bei 52 h mit interpoliertem Stammbereich, Farbskala z/D (D = 40 cm).....	35
Abbildung 44: Vertikale Längsschnitte von 1b in den Ebenen: $y/D=0$ , $y/D=0,5$ und $y/D=1$ von 1 h bis 52 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D (D= 40 cm) bezogen. ....	36
Abbildung 45: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 2a und Db.....	38
Abbildung 46: Farbkonturen Versuch 2a, Kreisscheibe ohne Stamm, Position 2 (sohlennah), Unterwassermessungen von 1h bis 49 h, Luftmessung bei 53, Farbskala z/D (D=40 cm). .....	39
Abbildung 47: Farbkonturen Versuch Db, Kreisscheibe ohne Stamm, Position 2 (sohlennah), Unterwassermessungen von 1h bis 48 h, Luftmessung bei 49 h, Farbskala z/D (D=40 cm). .....	40

Abbildung 48: Vertikale Längsschnitte von Versuch 2a in den Achsen: $y/D=0$ , $y/D=0,5$ und $y/D=1$ von 1 h bis 49 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D (D= 40 cm) bezogen. Bei $y/D=0$ , oberstrom der Kreisscheibe, sind die Schnitte aus dem Db Versuch eingezeichnet.....	41
Abbildung 49: Position der Kreisscheibe und der Schnitte bei Versuch 2b .....	43
Abbildung 50: Farbkonturen Versuch 2b, Kreisscheibe mit Stamm, Position 2 (sohlennah), Unterwassermessungen von 1 h bis 45 h, Luftmessung bei 53 h, Farbscala $z/D$ ...	44
Abbildung 51: Vertikale Längsschnitte von Versuch 2b in den Achsen: $y/D=0$ , $y/D=0,5$ und $y/D=1$ von 1 h bis 45 h, z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D (D= 40 cm) bezogen.....	45
Abbildung 52: Längsschnitte bei 0 D ( $y/D=0$ ) der Luftmessungen von 2a, 1a, 1b, 2b und zum Vergleich ein grober Längsschnitt nahe dem Stamm aus der Feldmessung von Tree 1 (Mulde, siehe 3.1). z-Koordinate überhöht, x- und z-Koordinaten auf D (D= 40 cm) bezogen. Bei Tree 1 lag D zwischen 1,5 m und 2 m. $x/D=0$ : Lage des Wurzeltellers.....	47
Abbildung 53: Aufnahme und Edge-Detection von Versuchen 1a (98h), 2b (53h) und 2a (53h) nach Versuchsende und bei entleerter Rinne. Bereiche; (a) Stagnation, (b) Kolk untere Stufe, (c) Kolk obere Stufe, (f) primärer Dünenkamm, (g) sekundärer Dünenkamm, (h) Hauptkolk, (i) Sekundärkolk.....	49
Abbildung 54: Auskolkungs- und Ablagerungsbereiche um das Baummodell .....	50
Abbildung 55: Zeitliche Entwicklung der maximalen auf D (D = 40 cm) bezogenen Dünenhöhe (z-Koordinate) der Versuche 1a, 2a, 1b, 2b.....	50
Abbildung 56: Zeitliche Entwicklung der maximalen auf D (D = 40 cm) bezogenen Erosionstiefe (z-Koordinate) des SLS bei 1a und 1b. ....	51
Abbildung 57: Downstream distance SLS: Zeitliche Entwicklung der auf D (D = 40 cm) bezogenen Entfernung von der Kreisscheibe, in Fließrichtung (x-Koordinate), des tiefsten Punktes des SLS bei 1a und 1b. ....	51
Abbildung 58: Lateral distance SLS: Zeitliche Entwicklung der auf D (D = 40cm) bezogenen Entfernung von der Symmetrieachse, quer zur Fließrichtung (y-Koordinate), des tiefsten Punktes des SLS bei 1a und 1b.....	51
Abbildung 59: Umrisse der Kolk- und Dünenbereiche bei schwimmend und sohlennah installiertem Raubaum/Wurzelteller. Fließrichtung: von links nach rechts. ....	53

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten technischen Kolktypen bei Klarwasserverhältnissen. (Tabelle: Schnauder) .....	10
---	----

## Anhang

### Skript zur Laserdatenkorrektur

```
% Laser scanner data correction for bed topography analyses
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Air - Water data Correction %%%%%%%%%%
% assume a laser speed in water of 75% in air
% assume an vertical offset of the laser origin -85 mm from traverse-zero reference
% assume an angle of 68° in air and 50° in water
% angle correction (traverse position)
% assume an correction angle of +2° (25° -> 27°)
% angle limiter (reflection at wide angles/accuracy)
% neglect data of angles <22° and >-18°
% quality limiter (reflection)
% neglect data with q-factor <20 ???
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Air data correction %%%%%%%%%%
%
% angle correction (traverse position)
%     the correction angel depends on the y-position of the traverse system:
%
%     traverse pos. y (mm)           correct. angle (°)
%     0                             1.4
%     400                            1.2
%     800                            1.6
%     1200                           0.5
%     1600                           0
%
% angle limiter (reflection at wide angles/accuracy) for double-overlapping sheets
%     neglect data of angles <27° and >-26°
%     do nor apply limiter for sheet edges without overlapping
%
% quality limiter (reflection)
%     neglect data with q-factor < 50
%
% Output: .txt file of the form : [X Y Z Angle Quality]
%
% Théo Fernandez
%*****

%% Selection of the data file .txt
clc; clear all; close all;

% addpath('X:\10_Messtechnik\60_LASER\data_correction_procedure_IS\');

% Manuel way if you want to take other data at each run
[FullFileName, PathName] = uigetfile({'y:\10_Messtechnik\60_LASER\data_correction_procedure_IS\*.txt'}, 'Select the measurement file'); % User-
friendly way to get file
SplitFileName = strsplit(FullFileName,{'.'}); % Split the name to have all the informations
FileName = [PathName,SplitFileName{1}]; % Creation of a FileName for opening other files later
Data = load([PathName,FullFileName]);

% Fast way to load a specific file
% Data = load('X:\10_Messtechnik\60_LASER\data_correction_procedure_IS\disc1a_92a.txt');
% FileName = ['TEST_disc1a_92a'];

[Index_Setup,tf] = listdlg('ListString',{'Air - Water','Air - Air'},'SelectionMode','single'); clear tf; % List for selection of the Setup

clear FullFileNamePathNameSplitFileName

%% Find Traverse coordinate system when there is a change of dataset ( Three lines With 0 0 0), put them in different cells and find Y0 and Z0.
clear Dataset indx_dataset

k=0;
for i=1:length(Data)-2

    if ((Data(i,2) == Data(i+1,2) && Data(i,2) == Data(i+2,2)) == 1 &&... % Find the First line where the change of dataset can be seen
        (Data(i,4) == 0 && Data(i+1,4) == 0 && Data(i+2,4) == 0) == 1) == 1

        k=k+1; j=1;
        indx_dataset(k)= i; % Pick up the index value
        Y0(k) = round(Data(i,2)); Z0(k) = round(Data(i,3)); % Pick up Y0 and Z0

    elseif ((Data(i,2) == Data(i-1,2) && Data(i,2) == Data(i+1,2)) == 1 &&... % Find the 2 other lines but we don't do anything
        (Data(i,4) == 0 && Data(i-1,4) == 0 && Data(i+1,4) == 0) == 1) == 1 || ...
        ((Data(i,2) == Data(i-2,2) && Data(i,2) == Data(i-1,2)) == 1 &&...
        (Data(i,4) == 0 && Data(i-2,4) == 0 && Data(i-1,4) == 0) == 1) == 1
```

```

else
    dataset{k}(j,1:4) = Data(i,1:4); % Put the rest of the values into different cells
    j=j+1;
end

end
dataset{end}(end+1:end+2,1:4)=[Data(end-1,1:4);Data(end,1:4)]; % Put the 2 last values missing in the cells

% [Index_Setup,tf] = listdlg('ListString',{'Air - Water','Air - Air'},'SelectionMode','single'); clear tf; % List for selection of the Setup

clear Data k

%% Setup for Air to Water

% Parameters and correction factors
if Index_Setup == 1
Fact_Speed = 0.75; % Correction Speed of Light: Air to Water
Fact_Angle = 50/68; % Spreading angle Air/Water
Fact_Offset_Z = 85; % Laser Offset on Z from traverse in [mm]
for i=1:length(Y0) % Laser Roll correction angle. Done for each Dataset as it can be different
    if ( Y0(i) > -100 && Y0(i) <= 200 ) % All boundaries must be defined
Fact_Roll(i) = 2;

        elseif ( Y0(i) > 200 && Y0(i) <= 600 )
Fact_Roll(i) = 2;

        elseif ( Y0(i) > 600 && Y0(i) <= 1000 )
Fact_Roll(i) = 2;

        elseif ( Y0(i) > 1000 && Y0(i) <= 1400 )
Fact_Roll(i) = 2;

        elseif ( Y0(i) > 1400 && Y0(i) <= 1800 )
Fact_Roll(i) = 2;

    end
end
MinQ = 20; % Minimum acceptable quality value
Alpha_Max = 25 - Fact_Roll; % Cut angle right side water rel to corrected angle
Alpha_Min = -25 - Fact_Roll; % Cut angle left side water rel to corrected angle
end

%% Setup for Air roll correction (Air to Air)

% Parameters and correction factors
if Index_Setup == 2
Fact_Speed = 1; % Correction Speed of Light: Air to Air
Fact_Angle = 1; % Spreading angle Air/Air
Fact_Offset_Z = 0; % Laser Offset on Z from traverse in [mm]
for i=1:length(Y0) % Laser Roll correction angle. Done for each Dataset as it can be different
    if ( Y0(i) > -100 && Y0(i) <= 200 ) % All boundaries must be defined
Fact_Roll(i) = 1.4;

        elseif ( Y0(i) > 200 && Y0(i) <= 600 )
Fact_Roll(i) = 1.2;

        elseif ( Y0(i) > 600 && Y0(i) <= 1000 )
Fact_Roll(i) = 1.6;

        elseif ( Y0(i) > 1000 && Y0(i) <= 1400 )
Fact_Roll(i) = 0.5;

        elseif ( Y0(i) > 1400 && Y0(i) <= 1800 )
Fact_Roll(i) = 0;

    end
end
MinQ = 20; % Minimum acceptable quality value
Alpha_Max = 30 - Fact_Roll; % Cut angle right side air rel to corrected angle
Alpha_Min = -30 - Fact_Roll; % Cut angle left side air rel to corrected angle
end

%% Wrong geometry: Computing - Corrected - Length and Angle for each point
%% IS corrected length computation

```

```

for i=1:length(dataset) % Applying the correction formula

    for j=1:length(dataset{i})

lengthi{i}(j) = sqrt( (Y0(i) - dataset{i}(j,2)).^2 + (Z0(i) + Fact_Offset_Z - dataset{i}(j,3)).^2 );
anglei{i}(j) = atand( (dataset{i}(j,2) - Y0(i)) / (dataset{i}(j,3) - Z0(i)) );

clengthi{i}(j) = lengthi{i}(j) * Fact_Speed;
canglei{i}(j) = anglei{i}(j) * Fact_Angle + Fact_Roll(i);

yc{i}(j) = Y0(i) - clengthi{i}(j) * sind(canglei{i}(j));
zc{i}(j) = Z0(i) - clengthi{i}(j) * cosd(canglei{i}(j));

        end

    end

clear lengthiclengthianglei

%% Filter values: Removing everything under Qmin, Alpha-Min or above Alpha_Max

% Idx_MinQ = cellfun(@(dataset) find(dataset(:, 4) <= MinQ), dataset, 'UniformOutput', false);

for i=1:length(dataset)
    k=1;
    for j=1:length(dataset{i})

        if ((dataset{i}(j,4) >= MinQ) && (canglei{i}(j) >= Alpha_Min(i)) && (canglei{i}(j) <= Alpha_Max(i))) == 1 % Apply the filter according to values
            previously chosen

Xc{i}(k) = dataset{i}(j,1); % Pick up the filtered X
Yc{i}(k) = yc{i}(j); % Pick up the corrected and filtered Y
Zc{i}(k) = zc{i}(j); % Pick up the corrected and filtered Z
CAnglei{i}(k) = canglei{i}(j); % Pick up the corrected and filtered angle
Quality{i}(k) = dataset{i}(j,4); % Pick up the corrected and filtered Quality

            k=k+1;
        end
    end
end

Dataset= [cell2mat(Xc)',cell2mat(Yc)',cell2mat(Zc)',cell2mat(CAnglei)',cell2mat(Quality)']; % Put everything together: [X Y Z Angle Quality]

clear dataset XcYcycZczcCAngleicanglei Quality

%% Export in .txt for visualization on Cloud Compare

dlmwrite([FileName,'_Corrected.txt'],Dataset,'newline','pc');

disp('Program run successfully')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```