

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Zorndt, Anna; Carstensen, Christina

**FAUST. Teilprojekt E: Laboruntersuchungen BAW. FuE-
Abschlussbericht B3955.02.04.70230**

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108336>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2021): FAUST. Teilprojekt E: Laboruntersuchungen BAW. FuE-Abschlussbericht B3955.02.04.70230. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
FAUST
Teilprojekt E:
Laboruntersuchungen BAW
B3955.02.04.70230

April 2021

FuE-Abschlussbericht
FAUST
Teilprojekt E: Laboruntersuchungen BAW

Beginn des Vorhabens: April 2018

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.02.04.70230

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
 Referat: K1
 Projektleiterin: Dr.-Ing. Anna Zorndt
 Bearbeiterin: Christina Carstensen

Hamburg, April 2021

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

Zusammenfassung

Eine zentrale Fragestellung bei der Beratung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist die Prognose der Auswirkungen von Um- und Ausbaumaßnahmen von Seeschifffahrtsstraßen auf die Morphodynamik und den Sedimenttransport. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an die Güte der Simulationsmodelle ist eine kontinuierliche Verbesserung des Systemverständnisses in diesem Bereich von großer Bedeutung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts FAUST werden der Sedimenttransport und die Bodenaustauschprozesse in Bereichen mit feinen Sedimenten untersucht. Die Prozesse, die zur dauerhaften Deposition von Feinsedimenten bei einer gleichzeitig stark durchströmten Fahrrinne führen, sind zurzeit noch nicht vollständig beschrieben und mit den aktuell zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeugen bisher nicht ausreichend gut abbildbar.

Ein Untersuchungsschwerpunkt des Projekts ist die Wirkung von Bodenformen auf die Strömung und die stattfindende Energiedissipation. Zur Betrachtung dieses Aspektes wurden im Rahmen des in diesem Bericht beschriebenen Teilprojekts Laborversuche an skalierten Modelldünen durchgeführt. Die eingesetzten Modelldünen wurden unter der Berücksichtigung aktueller Studien an in der Weser vorkommenden, natürlichen Dünen angelehnt. Anhand von systematischen und umfangreichen Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten wurden das Strömungsfeld sowie die Turbulenzintensität im Bereich der Modelldüne ermittelt.

Die Ergebnisse der Laborversuche tragen zum verbesserten Prozessverständnis bei und dienen als Grundlage für weitere, zukünftige Untersuchungen. Es wird empfohlen, zusätzliche Laboruntersuchungen durchzuführen und hierbei die Modellkörper in den Versuchen auch an Dünenformen anzulehnen, welche der Rauheitsprädiktion in numerischen Modellen zugrunde liegen und in der Regel eine Vereinfachung der natürlichen Dünenmorphologie darstellen. Anhand eines Vergleiches der Ergebnisse der in diesem Bericht beschriebenen und der empfohlenen zukünftigen Untersuchungen kann der Einfluss unterschiedlicher Dünenformen auf die Strömungsprozesse und die Energiedissipation ermittelt werden. So ließe sich ein möglicher Fehler bei der Rauheitsparametrisierung im numerischen Modell, bedingt durch die Vereinfachung der Dünenmorphologie, abschätzen. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen können schließlich langfristig zur Verbesserung numerischer Modelle und deren Vorhersage der Rauheitswirkung von Bodenformen beitragen. Auf diese Weise kann die Beratungsleistung im Bereich Sedimentmanagement optimiert und das Ziel einer modellgestützten Prognose weiterverfolgt werden.

Darüber hinaus steht als Ergebnis des bereits durchgeführten Messprogramms ein konsistent erhobener und qualitätsgesicherter Datensatz zur Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle zur Simulation von Strömung über Bodenformen zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Problemdarstellung und Ziel	1
1.1	Forschungsprojekt FAUST und Bedeutung für die WSV	2
1.2	Methodik	2
2	Stand des Wissens – Bodenformen und ihre Rauheitswirkung	3
2.1	Entstehung von Bodenformen	3
2.2	Erscheinungsformen	4
2.2.1	Riffel	5
2.2.2	Dünen	6
2.2.3	Antidünen	7
2.2.4	Überlagerte Bodenformen	7
2.3	Fließwiderstand und hydraulische Rauheit	8
2.3.1	Turbulenz bei der Überströmung einer Düne	10
2.3.2	Strömungsprozesse und Turbulenz bei Dünen mit steilen Böschungswinkeln und einfacher Geometrie	11
2.3.3	Einfluss flacher Böschungswinkel auf Strömungsprozesse und Turbulenz	12
2.3.4	Einfluss natürlicher Geometrien auf Strömungsprozesse und Turbulenz	14
2.4	Vorhersage der Rauheitswirkung von Bodenformen	17
3	Messkonzept	19
3.1	Strömungsumlaufrinne	19
3.2	Strömungsmessungen mittels ADV-Sensorik	21
3.2.1	Messprinzip	22
3.2.2	Wichtige Kennwerte zur Beurteilung der Qualität der Messung	23
3.2.3	Konfiguration der Sonden	24
3.2.4	Datenorganisation	26
3.2.5	Erforderliche Messdauer	27
3.3	Analyse der Strömungsdaten	30
3.3.1	Aufbereitung der Daten mittels MATLAB	30
3.3.2	Despiking mit der Phase-Space Thresholding Method	31
4	Untersuchungskonzept	32
4.1	Froude'sches Modellgesetz und Maßstabeffekte	33
4.2	Dünen und hydrodynamischen Parameter in der Weser	34
4.3	Laboruntersuchungen mit Modelldünen	39
4.3.1	Voruntersuchungen an Dreiecksdüne (TriPrelim)	40
4.3.2	Untersuchungen an skalierten Düne mit Flood Slip Face (FloodSF)	42
4.3.3	Untersuchungen an skalierten Düne mit Ebb Slip Face (EbbSF)	45
5	Ergebnisse der Laboruntersuchungen	48
5.1	Ergebnisse der Voruntersuchungen an Dreiecksdüne (TriPrelim)	48
5.2	Ergebnisse der Untersuchungen an skalierten Düne mit Flood Slip Face (FloodSF)	50
5.2.1	Strömungsfeld	50

5.2.2	Verteilung der TKE	52
5.3	Ergebnisse der Untersuchungen an skaliertes Düne mit Ebb Slip Face (EbbSF)	54
5.3.1	Strömungsfeld	54
5.3.2	Verteilung der TKE	56
6	Diskussion der Ergebnisse	58
6.1	Versuchsergebnisse und Turbulenzparameter	58
6.2	Vereinfachungen und Grenzen der Laborversuche	59
6.3	Vergleich mit Strömungsprozessen über Dreiecksdüne	60
7	Zusammenfassung und Ausblick	61
8	Referenzen	62
9	Anlage: Dokumentation zur Umlaufrinne und Hinweise zur Messtechnik	67
9.1	Große Umlaufrinne am BAW-Standort Hamburg	67
9.2	Strömungsgenerierung	67
9.3	Messtechnik	69
9.3.1	ADV-Sensorik	69
9.3.2	Profilmessung beim Vectrino Profiler	70
9.3.3	Einfluss der Nominal Velocity Range auf die Messergebnisse (Vectrino sidelooking)	76
9.4	Sekundärströmungen in der Versuchsrinne	80
9.4.1	Rinne ohne Einbauten	80
9.4.2	Rinne mit eingebautem Rohrpaket als Strömungsgleichrichter	85
9.4.3	Ermittlung eines geeigneten Messbereichs	91
9.5	Anhang: Querprofile der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x	94
9.5.1	Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x bei Wasserstand $h = 0,80$ m	94
9.5.2	Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit bei Wasserstand $h = 1,0$ m	102

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Zusammenhang zwischen der Sohlschubspannung τ_0 und der Strömungsgeschwindigkeit v für verschiedener Bodenformen bei Laborversuchen (durchgezogene Linie: mobile Sohle, gestrichelte Linie: fixierte Sohle)(Engelund und Fredsøe 1982)	4
Bild 2: Zuordnung verschiedener Bodenformen in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit U_{10} und dem Korndurchmesser D_{10} für Wassertiefen $d_{10} = 0,16$ m bis 0,25 m (Venditti 2013, nach Boguchwal und Southard 1990)	5
Bild 3: Schematische Darstellung einer steilgeböschten Düne (oben) und einer flachgeböschten Düne (unten) (Venditti 2013)	9
Bild 4: Ablösezone und Nachlaufströmung: (a) Schematische Darstellung der Ablösezone (flow separation zone) mit Kennzeichnung der Länge L'_{st} , (b) Turbulente Kinetische Energie (TKE) bei numerischer Simulation, die Nachlaufströmung (wake) in Rot markiert (Lefebvre et al. 2014)	11
Bild 5: Schematische Darstellung der Strömungsprozesse über asymmetrischen Dünen (aus Venditti 2013, u. a. nach Best 2005)	12
Bild 6: Vergleich der horizontalen Geschwindigkeiten(a-c), vertikalen Geschwindigkeiten (d-f) und Turbulenten Kinetischen Energie über Bodenformen mit Leewinkeln von 10° , 20° und 30° ($H/h = 0,17$), Ausdehnung der Ablösezone mit weißer Linie gekennzeichnet (Lefebvre und Winter 2016)	13
Bild 7: TKE und vertikale Geschwindigkeitsprofile über verschiedenen Leewinkeln: (a) 30° , (b) 20° , (c) 10° (Kwoll et al. 2016)	14
Bild 8: An natürliche Dünen angenäherte Dünengeometrie der Modelldünen von Kwoll et al. (2016) mit Luvseite (s, stoss) und zweigeteilter Leeböschung zwischen c (Dünenkamm, crest) und t (Dünental, trough) sowie Böschungskante (b, brink point)	15
Bild 9: Morphologie von Bodenformen: a)Überblick über mögliche Kanten und Böschungssegmente sowie deren Bezeichnung, b) Arten von Luvböschungen, c) Arten von Leeböschungen (Lefebvre et al. 2016)	16
Bild 10: Horizontale Geschwindigkeiten und TKE über Dünen mit Slip Face Winkeln von (a)/(d) 12° , (b)/(e) 18° und (c)/(f) 24° , Ablösezonen in rot gepunktet und magenta (Lefebvre et al. 2016)	17
Bild 11: Zusammenstellung von empirischen Formeln zur Vorhersage der Formrauheit (Lefebvre und Winter 2016)	18
Bild 12: Umlaufrinne der BAW, Standort Hamburg: (a) Schematische Darstellung (nicht maßstabsgetreu), (b) Blick auf den für Versuche zur Verfügung stehenden Rinnenbereich	20

Bild 13:	Messwagen: (a) Überblick, (b) Verfahrbare Messtraverse am Rinnenwagen zur Anbringung der ADV-Sonde	20
Bild 14:	(a) Eingesetzte Vectrino Sonde in der Variante sidelooking und (b) Vectrino Profiler in der Variante downlooking	21
Bild 15:	Ausrichtung der Empfänger und Koordinatensystem bei downlooking und sidelooking Sonden (nach Nortek 2018)	23
Bild 16:	Optimale Amplituden und SNR-Werte im Sweet Spot beim Vectrino Profiler in 5 cm Entfernung zum Sender (Nortek 2015)	24
Bild 17:	Benennung der Messdateien	27
Bild 18:	Boxplot der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung in Abhängigkeit des Auswertezitraums in z = 10 cm Höhe über Sohle bzw. 5 cm über Dünenböschung (EbbSF)	29
Bild 19:	Boxplot der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung in Abhängigkeit des Auswertezitraums in z = 30 cm Höhe über Sohle bzw. 5 cm über Dünenböschung (EbbSF)	29
Bild 20:	Boxplot der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung in Abhängigkeit des Auswertezitraums in z = 50 cm Höhe über Sohle bzw. 5 cm über Dünenböschung (EbbSF)	30
Bild 21:	Exemplarischer Ausschnitt einer ungefilterten Geschwindigkeitszeitreihe (blau) und Zeitreihe nach Filterung und Ersatz der Ausreißer anhand gleitenden Medians (rot)	32
Bild 22:	Schematische Darstellung einer ebbstrom-gerichteten Düne mit Begrifflichkeiten (Lefebvre et al. 2020)	35
Bild 23:	Übersicht über Vorkommen, Abmessungen und Orientierung der Weserdünen gemittelt über den Zeitraum 2009 bis 2011 (verändert nach Lefebvre et al. 2020), grün und rot markiert: Abmessungen und Geometrien als Vorbild für Modell	36
Bild 24:	Für Laborversuche gewählte Dünentypen: (a) Ebbstrom-orientierte Düne mit Flood Slip Face, (b) Ebbstrom-orientierte Düne mit Ebb Slip Face	36
Bild 25:	Strömungsgeschwindigkeiten im Messquerschnitt Rechtenfleth (verändert nach BAW 2016)	38
Bild 26:	Abschätzung der lokalen Wassertiefe im Bereich Rechtenfleth: (a) Übersicht Position Rechtenfleth, (b) DGM und Kennzeichnung des analysierten Längsschnittes, (c) Längsschnitt durch Gewässersohle	39
Bild 27:	Einbaubereich der jeweiligen Modelldünen (schematische Darstellung, nicht maßstabsgetreu)	40
Bild 28:	Abmessungen und Ansicht der nicht maßstäblichen Modelldüne TriPrelim	41

Bild 29:	Positionen für Messungen an TriPrelim mit Vectrino Profiler (downlooking)	41
Bild 30:	Schematische Darstellung der ebbstromgerichteten Düne mit Flood Slip Face (FloodSF) mit Abmessungen im Modellmaßstab	42
Bild 31:	Einbau der Modelldüne (FloodSF) in der Umlaufrinne	43
Bild 32:	Positionen für Erst- und Zweitmessungen an FloodSF mit Vectrino Sonde (sidelooking)	44
Bild 33:	Positionen für Erst- und Zweitmessungen an FloodSF mit Vectrino Profiler (downlooking)	45
Bild 34:	Schematische Darstellung der ebbstromgerichteten Düne mit Ebb Slip Face (EbbSF) mit Abmessungen im Modellmaßstab	46
Bild 35:	Eingebaute Modelldüne in Laborrinne: (a) seitlicher, schräger Blick auf die Leeböschung, (b) Blick von schräg oben auf die Modelldüne	47
Bild 36:	Positionen für Erst- und Zweitmessungen an EbbSF mit Vectrino Profiler Sonde (downlooking)	48
Bild 37:	Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über Dreieckdüne in Vorversuchen: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs mit Strömungswirbel	49
Bild 38:	Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über FloodSF, Messung mit Vectrino: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs mit Strömungswirbel	51
Bild 39:	Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über FloodSF, Messung mit Vectrino Profiler: (a) Übersicht, (b) und (c) Vergrößerung des Leebereichs	52
Bild 40:	Höhe der TKE und Verteilung über der FloodSF bei Messungen mit Vectrino	53
Bild 41:	Höhe der TKE und Verteilung über der FloodSF bei Messungen mit Vectrino Profiler: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs, höchsten TKE-Werte markiert	54
Bild 42:	Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über EbbSF im Überblick	55
Bild 43:	Strömungswirbel im Leebereich der EbbSF	56
Bild 44:	Höhe der TKE und Verteilung über der EbbSF: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs, höchsten TKE-Werte markiert	57
Bild 45:	SNR- und Korrelationswerte der Messung an Längsposition $x = 53,25$ m, in Rot Abweichungen bei den Höhenpositionen $z = 6$ cm, $z = 7$ cm und $z = 8$ cm	57
Bild 46:	Mögliche Optionen für Dünenvariante mit dreieckiger Form (Tri)	61
Bild 47:	(a) Schematische Darstellung der Strömungsumlauf Rinne, (b) Fotografie des oberirdisch zugänglichen Rinnenabschnitts	67

Bild 48:	Schiffspropeller als Strömungsantrieb im unterirdischen Abschnitt der Umlaufrinne	68
Bild 49:	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit der Nennfrequenz [%] für Antrieb des Bugstrahlruders bei unterschiedlichen Wassertiefen (rot: 80 cm, grün: 90 cm, hellblau: 95 cm, orange: 100 cm, dunkelblau: 110 cm)	68
Bild 50:	Eingesetzte Vectrino Sonden: (a) in der Variante sidelooking und (b) Vectrino Profiler in der Variante downlooking	70
Bild 51:	Horizontale Strömungsgeschwindigkeit v_x in unterschiedlichen Höhen über der Sohle, gemessen mit 30 Layer á 1 mm Zellgröße: (a) Übersicht über gesamte Wassersäule, (b) Messungen in den ersten 0,2 m über der Sohle (bereits fehlergefiltert)	72
Bild 52:	Horizontale Strömungsgeschwindigkeit v_x bis 0,2 m über der Sohle Höhe, gemessen mit 8 Layer á 4 mm (bereits fehlergefiltert)	73
Bild 53:	Vergleich der Messungen: v_x gemessen mit (i) 30 Layern (blau/Kreis), (ii) 8 Layern (rot/Dreieck) und (iii) 1 Layer (schwarz/Sternchen) (bereits fehlergefiltert)	74
Bild 54:	SNR- und Korrelationswerte für Messungen mit (a) 30 Layer, (b) 8 Layer, (c) 1 Layer je Messvolumen	75
Bild 55:	Zeitreihe der horizontalen Geschwindigkeit in Strömungsrichtung v_x bei unterschiedlich eingestellter Nominal Velocity Range, Rohdaten (blau) und gefilterte Daten (rot) (Rinnenlängsposition $x = 53,8$ m, Höhe über Sohle $z = 60,5$ cm, $v_{\text{soll,m}} = 0,31$ m/s)	78
Bild 56:	Zeitreihe der horizontalen Geschwindigkeit in Strömungsrichtung v_x bei unterschiedlich eingestellter Nominal Velocity Range, Rohdaten (blau) und gefilterte Daten (rot) (Rinnenlängsposition $x = 53,8$ m, Höhe über Sohle $z = 80,5$ cm, $v_{\text{soll,m}} = 0,31$ m/s)	79
Bild 57:	Schematische Darstellung der Messpositionen mit Draufsicht (Überblick Rinne und Ausschnitt einer Rinnenlängsposition) und Seitenansicht (nicht maßstäblich)	81
Bild 58:	Messpositionen im Rinnenquerschnitt für Längspositionen $x = 9,50$ m und $x = 54,0$ m (nicht maßstäblich)	81
Bild 59:	Querprofile der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an den Rinnenlängspositionen $x = 9,0$ m, $x = 36,0$ m und $x = 63,0$ m bei Wasserstand $h = 0,8$ m (grün) und $h = 1,0$ m (rot)	84
Bild 60:	Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 9,50$ m, Blick in Strömungsrichtung	84
Bild 61:	Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 54,0$ m, Blick in Strömungsrichtung	85

Bild 62:	Rohrpaket als Strömungsgleichrichter: Komplette Ansicht, Einbau in Rinne und Position	86
Bild 63:	Rinneneinlauf ($x = 9,50$ m): Horizontale Geschwindigkeitsquerprofile, Zeitreihen sowie Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x (m/s) in $z = 30$ cm ohne (blau) und mit Rohrpaket (rot)	88
Bild 64:	Rinnenmitte ($x = 36,0$ m): Horizontale Geschwindigkeitsquerprofile, Zeitreihen sowie Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x (m/s) in $z = 30$ cm ohne (blau) und mit Rohrpaket (rot)	88
Bild 65:	Rinnenende ($x = 54,0$ m): Horizontale Geschwindigkeitsquerprofile, Zeitreihen sowie Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x (m/s) in $z = 30$ cm ohne (blau) und mit Rohrpaket (rot)	89
Bild 66:	Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 9,50$ m bei Einbau eines Rohrpaketes, Blick in Strömungsrichtung	90
Bild 67:	Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 54,0$ m bei Einbau eines Rohrpaketes, Blick in Strömungsrichtung	90
Bild 68:	Rohrpaket während Strömungsversuch ($P = 35$ %, $v_m \approx 1$ m/s)	91
Bild 69:	RMS von v_x , v_y , v_z im Rinnenlängsprofil ohne Gleichrichter ($h = 1,0$ m, $v_{soll} = 1$ m/s, Rinnenquerposition $y = 750$ mm, $z = 30$ cm)	92
Bild 70:	RMS von v_{res} im Rinnenlängsprofil ohne Gleichrichter ($h = 1,0$ m, $v_{soll} = 1$ m/s, Rinnenquerposition $y = 750$ mm, $z = 30$ cm)	93

Tabellenverzeichnis		Seite
Tabelle 1:	Überblick über gewählten Konfigurationsparameter der ADV-Sonden	26
Tabelle 2:	Überblick über Abmessungen und Böschungswinkel der repräsentativen Weserdünen für Laborversuche	37
Tabelle 3:	Natur- und Modellgrößen der FloodSF	43
Tabelle 4:	Natur- und Modellgrößen der Dünenvariante EbbSF	46
Tabelle 5:	Werte für nominal, vertical und horizontal velocity range für Vectrino, untersuchte Werte kursiv dargestellt	77
Tabelle 6:	Messpositionen bei Wassertiefe $h_1 = 0,8$ m ($P = 35$ %, $z = 0,25$ m)	82
Tabelle 7:	Versuchsprogramm bei Wassertiefe $h_2 = 1,0$ m ($P = 35$ %, $z = 0,3$ m)	82
Tabelle 8:	Positionen für verdichtete Messung bei Wassertiefe $h = 1,0$ m und Rinnenlängsrichtung $x = 9,50$ m ($P = 35$ %)	83
Tabelle 9:	Versuchsprogramm für Messungen mit Rohrpaket bei Wassertiefe $h = 1,0$ m ($P = 35$ %)	87

1 Problemdarstellung und Ziel

In natürlichen Gewässern und Flüssen sind sogenannte Sohl- bzw. Bodenformen weit verbreitet. Je nach Sedimentzusammensetzung und hydraulischen Bedingungen nehmen Bodenformen unterschiedliche Geometrien sowie Größenordnungen an und lassen sich anhand dieser Merkmale kategorisieren: In den Tideästuaren der Deutschen Bucht treten beispielsweise mit Längen von bis zu 100 m und Höhen im Meterbereich sogenannte Dünen auf (Winter et al. 2016). Natürliche Dünen besitzen meist eine asymmetrische Grundform und flache Böschungswinkel, wobei die Dünenflanken häufig Kanten und verschiedenen Abschnitte unterschiedlicher Neigung aufweisen (Lefebvre et al. 2016).

Bodenformen verursachen einen Fließwiderstand und beeinflussen auf diese Weise die hydrodynamischen Prozesse wie auch den Sedimenttransport im Gewässer. Verursacht wird diese Rauheitswirkung zum einen durch die Reibung am Einzelkorn und zum anderen vor allem durch die Überströmung der Bodenform selbst. Bei der Überströmung kann an Bodenformen eine Strömungsablösung mit einer Rezirkulation und einer turbulenten Verwirbelung auftreten, infolgedessen der Strömung Energie entzogen wird.

Entscheidend für das Auftreten einer Strömungsablösung sowie für die Stärke der Turbulenz und der damit einhergehenden Energiedissipation ist die Beschaffenheit der Leeböschung. Es wurde beobachtet, dass an flachen Böschungswinkeln von Dünen ($\ll 30^\circ$) die Strömungsablösung und somit die Rezirkulation unterbrochen oder gar nicht stattfindet (z. B. Best und Kostaschuk 2002). Bei komplexeren Dünenformen mit einer aus mehreren Segmenten zusammengesetzten Böschung wurde festgestellt, dass der steilste Bereich der Leeböschung, der sogenannte *Slip Face*, maßgebend für das Auftreten einer Strömungsablösung ist (Lefebvre et al. 2016). Grundsätzlich nimmt die Turbulenzintensität und somit die Energiedissipation mit Zunahme des Neigungswinkels des jeweils rauheitswirksamen Böschungsbereichs zu (Lefebvre und Winter 2016, Kwooll et al. 2016, Lefebvre 2019). Es besteht demnach ein enger Zusammenhang zwischen der Morphologie und der durch die Bodenform verursachte Rauheitswirkung.

Für die großräumige Untersuchung von Ästuaren mit numerischen Modellen werden Bodenformen in der Regel nicht einzeln aufgelöst, sondern durch die Festlegung eines Rauheitskennwerts für ein bestimmtes Gebiet parametrisiert. Die zur Ermittlung dieses Kennwerts herangezogenen Rauheitsprädiktoren berücksichtigen allerdings bislang nur die Länge und Höhe sowie nach jüngeren Entwicklungen den durchschnittlichen Leewinkel der Bodenform (Lefebvre und Winter 2016). Demnach wird für die bodenformbezogene Rauheitsabschätzung eine dreieckige Grundform der Bodenformen angenommen, die Morphologie nicht berücksichtigt und somit ein möglicherweise vorhandener, steiler und rauheitswirksamer Böschungsanteil vernachlässigt.

Der Anlass der in diesem Bericht beschriebenen Untersuchung ist eine Überprüfung der Annahme, dass trotz jeweils gleicher Höhen- und Längenabmessung die Energiedissipation über einer Düne mit einem rauheitswirksamen *Slip Face* sich von der Energiedissipation über einer Düne mit dreieckiger Grundform und dadurch kleinerem Leeböschungswinkel unterscheidet. Hierfür werden zunächst Dünen mit einer rauheitswirksamen *Slip Face*-Böschung hinsichtlich ihrer Rauheitswirkung untersucht.

Mithilfe der Ergebnisse aus diesen und zukünftigen Untersuchungen kann schließlich eine Abschätzung darüber erfolgen, ob durch die Vereinfachung der Dünenform im numerischen Modell ein Fehler bei der Rauheitsparametrisierung entsteht sowie dieser Fehler qualitativ benannt werden. Die hier erzielten Untersuchungsergebnisse sollen langfristig zur Verbesserung numerischer Modelle hinsichtlich der Rauheitsparametrisierung beitragen.

1.1 Forschungsprojekt FAUST und Bedeutung für die WSV

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) berät die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) unter anderem bei Fragestellungen hinsichtlich der Auswirkungen von Um- und Ausbaumaßnahmen von Seeschifffahrtsstraßen auf die Morphodynamik und den Sedimenttransport. Für die Beratung ist vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an die Güte der Simulationsmodelle eine stetige Verbesserung des Systemverständnisses in diesem Bereich wichtig.

Das Forschungsprojekt FAUST beschäftigt sich mit dem Sedimenttransport in den Ästuaren und den Bodenaustauschprozessen in Gewässerbereichen feiner Sedimente. Anhand von Messungen in der Natur, im Labor sowie mithilfe von numerischen Untersuchungen sollen diese Prozesse am Beispiel der Weser betrachtet werden. Gegenstand des in diesem Bericht beschriebenen Teilprojekts ist die wechselseitige Abhängigkeit zwischen der Hydrodynamik und den Bodenformen, welche einen Teilaspekt des zu betrachtenden Gesamtsystems darstellt.

Ziel des Projekts FAUST ist neben der Erlangung eines besseren Prozessverständnisses die Entwicklung von konzeptionellen Ansätzen zur Verbesserung der numerischen Modelle. Durch eine verbesserte Abbildung der Bodenaustauschprozesse und des Sedimenttransportes in Modellen können die Beratungsleistung im Bereich Sedimentmanagement weiter erhöht und das Ziel einer modellbasierten Prognose weiterverfolgt werden.

1.2 Methodik

Die bodenformbedingten Strömungs- und Turbulenzprozesse werden anhand von Experimenten im physikalischen Modell untersucht. Hierzu werden Laborversuche in einer Strömungsrinne mit skalierten Modelldünen durchgeführt. Reale, in der Weser vorkommende Dünenformen mit *Slip Face*-Böschung werden für die Untersuchungen abstrahiert und als zweidimensionale Einzeldüne in die Versuchsrinne eingebaut. Die hydrodynamischen Randbedingungen der Versuche werden ebenfalls an die in der Weser herrschende Hydrodynamik angelehnt, wobei die Generierung einer unidirektionalen Strömung konstanter Geschwindigkeit vorgesehen und somit eine auf einen einzelnen Strömungszustand reduzierte Betrachtung der Hydrodynamik vorgenommen wird.

Zur Erfassung der Strömungsstruktur über der Modelldüne werden systematische Messungen im Bereich des Modellkörpers durchgeführt. Hochfrequente akustische Strömungsmessungen der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten ermöglichen die Analyse der turbulenten Strömung, sodass die Energiedissipation, ausgedrückt durch die turbulente kinetische Energie (TKE), bestimmt werden kann. Anhand der Erkenntnisse aus der Auswertung der Turbulenzstrukturen und der TKE sollen qualitativ Rückschlüsse auf die Energiedissipation in Abhängigkeit der Dünenmorphologie gezogen werden.

2 Stand des Wissens – Bodenformen und ihre Rauheitswirkung

Natürliche Fließgewässer besitzen im Allgemeinen eine Sohle, die sich aus körnigem Material, wie beispielsweise Sand, zusammensetzt. Unter bestimmten Bedingungen wird das Sohlmaterial unter dem Einfluss der Strömung in Bewegung gesetzt, transportiert und wieder abgelagert. Infolge dieser Vorgänge entstehen auf der Gewässersohle sogenannte Sohl- bzw. Bodenformen, die je nach Sedimentzusammensetzung und hydraulischen Randbedingungen unterschiedliche Geometrien sowie Größenordnungen annehmen können. Die entstehenden Formen können klassifiziert und unterschiedlich benannt werden, häufig werden die Begriffe Riffel (kleine Bodenformen) und Dünen (große Bodenformen) verwendet.

Bodenformen sind in Flüssen wie auch Tidegewässern weitverbreitet. Seit Jahrzehnten werden Bodenformen wissenschaftlich untersucht. Hierbei wurden neben zahlreichen Naturbeobachtungen auch physikalische Versuche durchgeführt, bei denen Bodenformen unter Laborbedingungen und steuerbaren Randbedingungen erzeugt und analysiert werden können. Für die Untersuchungen in Modellen wurden vielfältige Schwerpunkte gewählt: Neben morphodynamischen Analysen, wie beispielsweise die Betrachtung des Entstehungsprozesses oder der Entwicklungsmechanismen von Bodenformen, sind zudem häufig die Strömungsprozesse über den Bodenformen untersucht worden.

2.1 Entstehung von Bodenformen

In Laborversuchen konnte beobachtet werden, dass Bodenformen in ihrer Entstehung und Entwicklung bestimmte Muster durchlaufen, bis sie einen Gleichgewichtszustand erreichen. Zu den Hintergründen und Ursachen dieser Mechanismen wurden in der Vergangenheit zahlreiche Theorien aufgestellt. Einer dieser Ansätze beruht beispielsweise auf der Annahme eines Instabilitätsproblems (Engelund und Fredsøe 1982): Wenn durch eine Strömung eine Störung auf einer ebenen, flachen Sohle hervorgerufen wird, vergrößert sich diese Fehlstelle mit der Zeit. Die Sohle gerät in ein Ungleichgewicht und bildet auf der zuvor glatten Sohle Bodenformen aus.

Nach Venditti et al. (2005a) können zwei Arten der Bodenformentstehung unterschieden werden: (i) Entstehung der Bodenformen infolge einer bereits vorhandenen Fehlstelle in der Sohle, (ii) eine unmittelbare bzw. instantane Entstehung von Bodenformen. Die Entstehung von Bodenformen aufgrund von bereits vorhandenen Fehlstelle (i) erfolgt dann, wenn die herrschenden Sohl Schubspannungen τ_* entweder unterhalb der kritischen Sohl Schubspannung $\tau_{*,krit}$ liegen oder der kritischen Sohl Schubspannung entsprechen ($\tau_* \leq \tau_{*,krit}$). In diesem Fall findet ein ungleichmäßiger und stellenweiser Sedimenttransport statt. Solange die Sohle frei von Fehlstellen ist, tritt keine Entstehung von Bodenformen ein. Wenn eine Fehlstelle in Form einer Vertiefung oder einer Erhebung (z. B. ein Widerstand) in der glatten Sohle vorliegt, kommt es über der Störung zu einem Strömungsabriss. Infolge dessen werden lokale Schubspannungen erzeugt, die zu einer Ablösung von Sediment führen. In Versuchen von Venditti et al. (2005a) zeigte sich, dass sich eine vorhandene Fehlstelle in der Sohle stromabwärts bewegt und sich vervielfacht, sodass sich ein Feld von Störungen in der Sohle – und somit eine Fläche von Bodenformen – ausbildet.

Die unmittelbare, instantane Entstehung von Bodenformen ohne bereits vorhandene Störungen in der Sohle (ii) findet statt, wenn die Sohl Schubspannungen den Grenzwert $\tau_{*,krit}$ überschreiten

($\tau_* > \tau_{*,krit}$). Hierbei treten Bodenformen großflächig und gleichzeitig entlang der kompletten Gewässersohle nach einem bestimmten Muster auf (Venditti et al. 2005a):

1. Bildung eines regelmäßigen Musters von gitterförmigen Bögen,
2. das Gitter wandert und beginnt Käme auszubilden,
3. die Käme der Bodenformen werden regelmäßiger und ordnen sich in etwa parallel an (Entstehung von 2D-Formen),
4. die Bodenformen wachsen in Höhe und Länge.

Die Mechanismen, die zur Ausbildung von Bodenformen führen, sind zum heutigen Stand allerdings noch nicht endgültig beschrieben und werden in der Literatur nach wie vor diskutiert (Coleman und Nikora 2008; Venditti 2013).

2.2 Erscheinungsformen

In Abhängigkeit der Korngröße des Sediments sowie des Strömungszustandes des Gewässers entstehen verschiedene Arten von Bodenformen, welche sich als quer zur Strömungsrichtung auftretende Formen aus wiederholenden Strukturen zusammensetzen (Ashley 1990). Je nach Geometrie und Größenordnung erhalten die Bodenformen verschiedene Bezeichnungen, wobei meist zwischen Riffel, Dünen oder Antidünen unterschieden wird. In der Literatur werden zahlreiche Diagramme vorgestellt, mithilfe derer ein Zusammenhang zwischen verschiedenen Randbedingungen und dem Auftreten bestimmter Bodenformarten hergestellt wird. Engelund und Fredsøe (1982) entwickelten beispielsweise das in Bild 1 gezeigte Diagramm, welches bei Laborversuchen entstehende Bodenformen darstellt und den Zusammenhang zwischen Sohlschubspannung τ_0 , einer stetig und gleichmäßig zunehmenden Strömungsgeschwindigkeit v und dem Auftreten verschiedener Bodenformen beschreibt.

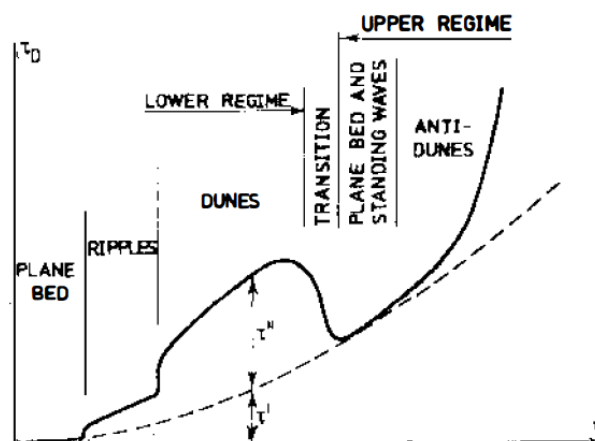


Bild 1: Zusammenhang zwischen der Sohlschubspannung τ_0 und der Strömungsgeschwindigkeit v für verschiedener Bodenformen bei Laborversuchen (durchgezogene Linie: mobile Sohle, gestrichelte Linie: fixierte Sohle)(Engelund und Fredsøe 1982)

Bild 2 zeigt ein von Venditti (2013) nach Boguchwal und Southard (1990) modifiziertes Diagramm zur Vorhersage von Bodenformen bei Wassertiefen d zwischen 0,16 m und 0,25 m in

Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit U und der Korngröße D des Sediments. Die Parameter d , U und D wurden gemäß Boguchwal und Southard (1990) an ihre Äquivalentwerte bei Temperaturen von 10°C angepasst (d_{10} , U_{10} , D_{10}).

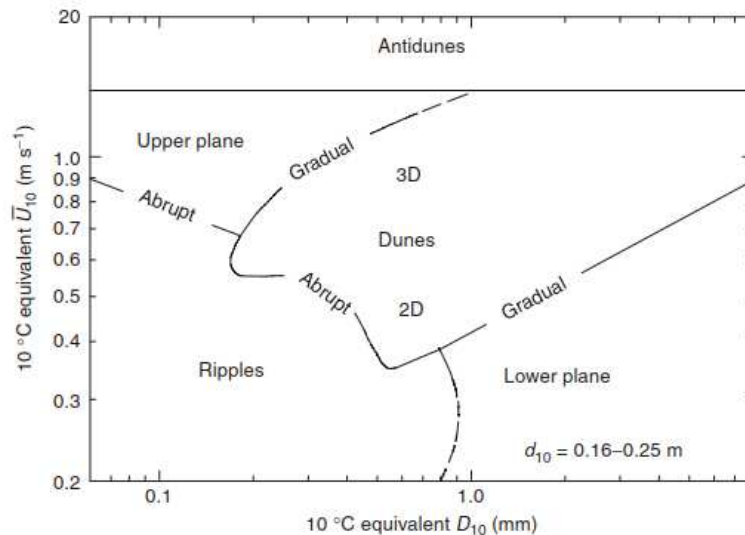


Bild 2: Zuordnung verschiedener Bodenformen in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit \bar{U}_{10} und dem Korndurchmesser D_{10} für Wassertiefen $d_{10} = 0,16 \text{ m}$ bis $0,25 \text{ m}$ (Venditti 2013, nach Boguchwal und Southard 1990)

2.2.1 Riffel

Gemäß DIN 4049-3 sind Riffel „kleine, meist regelmäßige Sohlwellen, die sich in Strömungsrichtung bewegen und deren Höhe von der Wassertiefe unabhängig ist“. Riffeln besitzen eine asymmetrische Form mit einer steileren Böschung auf der strömungsabgewandten Seite. Sie bilden sich unter hydraulisch glatten Bedingungen aus (Engelund und Fredsøe 1982). Die sich ergebenden Riffelabmessungen sind abhängig von der vorhandenen Sedimentgröße. Laut Soulsby (1997) wird die Länge eines Riffels λ_r häufig als etwa das Tausendfache des Mediandurchmessers des Sediments d_{50} ,

$$\lambda_r = 1000 d_{50}, \quad (2.1)$$

und die Höhe des Riffels Δ_r als bis zu $1/7$ der Länge

$$\Delta_r = \lambda_r / 7 \quad (2.2)$$

angegeben.

Um die Abmessungen von Riffeln im Gleichgewichtszustand zu beschreiben und vorhersagen zu können, verglich Baas (1993) von ihm durchgeführte Messungen in Rinnenversuchen mit Ergebnissen aus Laborexperimenten in der Literatur. Hieraus entwickelte er ebenfalls empirische Beziehungen zur näherungsweise Vorhersage von Riffellängen λ_r und -höhen Δ_r in Abhängigkeit des Sedimentdurchmessers d_{50} :

$$\lambda_r = 75,4 \log d_{50} + 197, \quad (2.3)$$

$$\Delta_r = 3,4 \log d_{50} + 18. \quad (2.4)$$

Riffellängen sind gemäß Literatur nicht größer als 0,6 m (z. B. Friedrich et al. 2006, Balachandar und Prashanth 2011), Riffelhöhen nicht größer als 0,03 m (Friedrich et al. 2006) bzw. 0,04 m (Balachandar und Prashanth 2011). Riffel bilden sich nur bis zu Korngrößen von 0,6 mm aus, d. h. bei Korn-Reynoldszahlen Re_g kleiner als 5 (Bennett und Best 1996; Venditti 2013).

2.2.2 Dünen

Dünen stellen größerskalige Bodenformen dar, welche im Gegensatz zu Riffeln einen Einfluss auf die Wasseroberfläche sowie das gesamte, oberhalb liegende Strömungsfeld ausüben (Friedrich et al. 2006). Dünen sind gemäß DIN 4049-3 „meist regelmäßige Sohlwellen, die sich in Strömungsrichtung bewegen und deren Höhe von der Wassertiefe abhängig ist“ und entstehen bei einer Korngröße des Sediments von $d_{50} > 0,15$ mm (Friedrich et al. 2006). Dünen sind meist von asymmetrischer, dreieckiger Form. Die Luvseite besitzt eine flache Böschung, die Leeseite ist steiler.

Das bei der Dünenentstehung komplexe und noch nicht in der Gänze verstandene Zusammenspiel zwischen Fluid und Sediment (Bradley und Venditti 2017) erschwert eine Aussage darüber, welche Dünenhöhe und -länge in Abhängigkeit verschiedener Parameter, wie bspw. der Wassertiefe oder der Korngröße, zu erwarten sind. In der Literatur werden daher zahlreiche Ansätze zur Vorhersage von Dünenabmessungen vorgestellt.

Die in der Literatur beschriebenen Prädiktoren für zu erwartende Dünenhöhen Δ_d und Dünenlängen λ_d sind beispielsweise

$$\Delta_d = h/6 \quad (2.5)$$

und

$$\lambda_d = 5h. \quad (2.6)$$

(Venditti 2013; Yalin 1964). Ansätze von Yalin (1964) und Van Rijn (1984), die in Soulsby (1997) vorgestellt werden, beschreiben die Dünenhöhe Δ_d als

$$\Delta_d = \frac{h}{6} \left(1 - \frac{\tau_{krit}}{\tau_0} \right) \text{ für } \tau_{krit} \leq \tau_0 \leq 17,6 \tau_{krit} \quad (2.7)$$

und die Dünenlänge λ_d als

$$\lambda_d = 2 \pi h. \quad (2.8)$$

Van Rijn (1984) schlägt zur Vorhersage der Dünenhöhe Δ_d und -länge λ_d zusätzlich folgende Ansätze vor:

$$\Delta_d = 0,11 h \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,3} (1 - e^{-0,5 T_s}) (25 - T_s) \text{ für } \tau_{crit} \leq \tau_0 \leq 26 \tau_{crit} \quad (2.9)$$

mit $T_s = \frac{\tau_0 - \tau_{krit}}{\tau_{krit}}$,

$$\lambda_d = 7,3 h. \quad (2.10)$$

Die vorgeschlagenen Dünenprädiktoren basieren allerdings zum Teil auf Daten, die bei der Bodenformgenerierung in Laboren gewonnen wurden. Es wird angemerkt, dass die Anwendung dieser Prädiktoren in der Natur aufgrund der großen Variabilität der dort vorkommenden Dünenabmessungen nur begrenzt möglich ist (Bradley und Venditti 2017). Zudem besitzen Dünen in der Natur häufig keine dreieckige Grundform, sondern unregelmäßige Böschungsformen, die sich aus mehreren Segmenten unterschiedlicher Neigungswinkel zusammensetzen (Lefebvre et al. 2016, s. auch Abschnitt 2.3.4).

2.2.3 Antidünen

Antidünen sind „wellige Sohlenformen, die sich bei schließendem Abfluss bilden und phasengleich mit den Oberflächenwellen gegen die Strömungsrichtung wandern“ (DIN 4049-3). Antidünen treten auf, nachdem Dünen aufgrund von hohen Strömungsgeschwindigkeiten ausgewaschen wurden und sich zunächst eine ebene Sohle eingestellt hat. Im Längsschnitt gesehen bildet sich an der Sohle ein sinusförmiges Profil aus. Die Eigenschaften von Antidünen sollen an dieser Stelle nicht nähergehend betrachtet werden, da in natürlichen sandigen Fließgewässern in erster Linie Riffel und Dünen vorkommen.

2.2.4 Überlagerte Bodenformen

Neben Laborversuchen haben vor allem auch Naturmessungen gezeigt, dass Bodenformen unterschiedlicher Größenskalen überlagert auftreten können (z. B. Parsons et al. 2005; Venditti et al. 2005b; Winter et al. 2016; Doré et al. 2018), solange genug Raum und Zeit zur Entwicklung einer kleinerskaligen, überlagernden Struktur vorhanden sind (Ashley 1990). Die größerskalige Bodenform, die überlagert wird, wird als primäre Bodenform bezeichnet, während die überlagernde kleinerskalige Form als sekundäre Bodenform bezeichnet wird.

Überlagerte Bodenformen müssen nicht zwangsläufig in Form von Riffeln oder Dünen auftreten: Venditti et al. (2005b) erfassten in Modellexperimenten mit hochauflösenden Messtechniken über Dünen befindliche Strukturen, die sowohl Eigenschaften von Riffel, von Geschiebefracht als auch von Dünen aufwiesen und daher nicht eindeutig klassifiziert werden konnten. Die beobachteten Bodenformen, welche etwa ein Zehntel der Höhe der von ihnen überlagerten Bodenform besaßen, wurden von Venditti et al. (2005b) als *sand sheets* bezeichnet. Diese *sand sheets* wandern die Dünenböschung hinauf und bewegen sich gegenüber den Dünen mit acht- bis zehnfacher Geschwindigkeit fort. Dabei versorgen die *sand sheets* die Dünenkrone mit Sediment, was laut Venditti et al.

(2005b) nicht zu einem Anstieg der Dünenhöhe führt, sondern letztendlich den Mechanismus darstellt, der die Wanderbewegung auch der größeren, überlagerten Bodenform hervorruft.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, werden in der Literatur Diagramme vorgestellt, mithilfe derer ein Zusammenhang zwischen Randbedingungen wie bspw. dem Strömungszustand oder der Korngröße des Sediments und dem dadurch bedingten Auftreten einer bestimmten Bodenform hergestellt wird. Laut diesen Diagrammen ist die Anwesenheit von zwei Bodenformskalen am gleichen Ort zur gleichen Zeit nicht möglich (s. auch Wilbers 2004). Venditti et al. (2005b) vermuten allerdings aufgrund ihrer Beobachtungen in den Laborversuchen, dass sich sowohl die *sand sheets* als auch die überlagerten Dünen in einem Gleichgewichtszustand mit der Strömung befinden. Eine Theorie zur Begründung dieses Phänomens stammt von Rubin und McCulloch (1980). Deren Untersuchungen ließen darauf schließen, dass direkt über den primären Bodenformen Grenzschichten vorhanden sind, in denen geringere Schubspannungsgeschwindigkeiten herrschen und sich auf diese Weise innerhalb dieser Grenzschichten kleinere Bodenformen entwickeln und bestehen können.

In Tideästuaren tritt die Besonderheit auf, dass Bodenformen einer bidirektionalen und instationären Strömung ausgesetzt sind. Infolge dessen variiert insbesondere die Höhe der Bodenformen mit der sich verändernden Strömung (Ernstsen et al. 2006). In Naturmessungen und Laborversuchen konnte bei überlagerten Bodenformen zudem festgestellt werden, dass die kleineren sekundären Bodenformen ihre Ausrichtung in Abhängigkeit der Strömungsrichtung während der Tidezyklen anpassen (Dillo 1960; Ernstsen et al. 2006; Svenson et al. 2009). Die Ausrichtung der primären Bodenformen bleibt währenddessen unverändert in Richtung der Ebbströmung (Svenson et al. 2009; Kwoil et al. 2014). Auch in den tidebeeinflussten Ästuaren der Deutschen Bucht treten überlagerte Bodenformen auf. Diese setzen sich aus ca. 100 m langen und meterhohen primären Bodenformen sowie überlagerten, kleineren, ca. 10 m langen und im Dezimeterbereich hohen sekundären Bodenformen zusammen, wobei letztere teilweise von noch kleineren Bodenformen überlagert werden (Winter et al. 2016).

2.3 Fließwiderstand und hydraulische Rauheit

Der Fließwiderstand in einem Gewässer entsteht bei flacher Sohle durch die Kornrauheit der einzelnen Körner des Sohlmaterials. In Abhängigkeit des Korndurchmessers kann die äquivalente Sandrauheit k_s ermittelt werden, mit Hilfe derer unabhängig von der Wassertiefe oder der Fließgeschwindigkeit die Rauheit der glatten Sohle beschrieben werden kann.

Befinden sich auf der Gewässersohle Bodenformen, so setzt sich die Rauheit der Gewässersohle aus der Kornrauheit des Einzelkorns des vorhandenen Sediments sowie der Formrauheit, gegeben durch die Bodenformen, zusammen (z. B. Engelund und Hansen 1967, Venditti 2013). Der Fließwiderstand bei Anwesenheit von Bodenformen entsteht dadurch, dass zusätzlich zur Reibung am Einzelkorn bei der Überströmung des Sohlkörpers Turbulenzen auftreten, welche der Strömung Energie entziehen (z. B. Engelund und Hansen 1967, s. auch Abschnitt 2.3.1).

Turbulenzen entstehen unter anderem dadurch, dass am Dünenkamm eine Strömungsablösung stattfindet und sich im Leebereich der Düne ein Strömungswirbel mit einer rezirkulierenden Strömung bildet (s. Abschnitt 2.3.2). Ob ein Strömungsabriss stattfindet, wird unter anderem durch

die Beschaffenheit und vor allem die Neigung der leeseitigen Dünenböschung vorgegeben. Häufig werden Dünen in zwei Gruppen eingeteilt:

- (i) steilgeböschte Dünen (*high-angle dunes*) mit einem Böschungswinkel von ungefähr 30° , der dem natürlich entstehendem Schüttwinkel entspricht, und einer asymmetrischen Form,
- (ii) flachgeböschte Dünen (*low-angle dunes*) mit einem Böschungswinkel $< 30^\circ$ und einer eher symmetrischen Form (s. Bild 3).

Untersuchungen haben gezeigt, dass über steilgeböschten Dünen eine Strömungsrezirkulation zu beobachten ist (s. Abschnitt 2.3.2) und somit die Rauheitswirkung größer ist als bei flachgeböschten Dünen, bei denen eine Rezirkulation unterbrochen oder gar nicht stattfindet (Best und Kostaschuk 2002, Kwoll et al. 2016; Lefebvre und Winter 2016, s. Abschnitt 2.3.3).

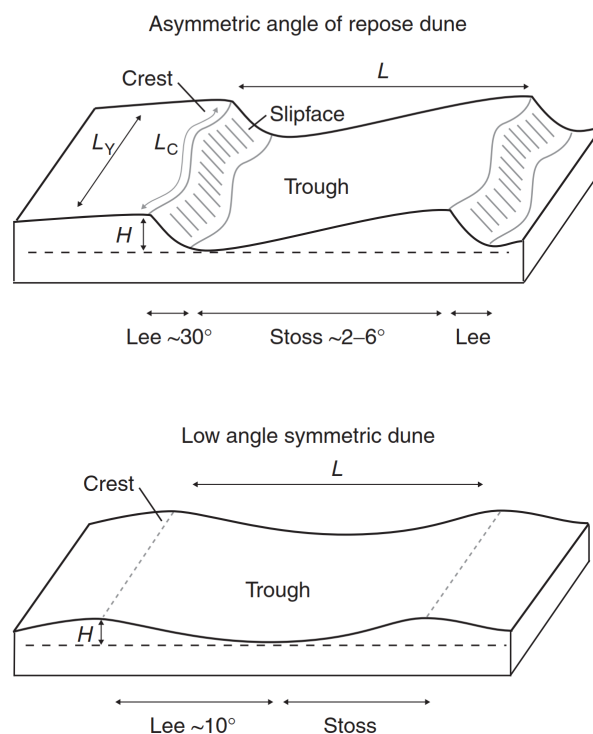


Bild 3: Schematische Darstellung einer steilgeböschten Düne (oben) und einer flachgeböschten Düne (unten) (Venditti 2013)

Während steilgeböschte Dünen vor allem unter Laborbedingungen in Strömungsrinnen entstehen (z. B. Naqshband et al. 2014,), sind flachgeböschte Dünen in natürlichen Fließgewässern verbreitet (Kostaschuk und Villard 1996, Best und Kostaschuk 2002). Natürlich vorkommende Dünen besitzen zudem keine einfache Dreiecksgeometrie, sondern durch Überlagerung (vgl. Abschnitt 2.2.4), Deformation während ihrer Migration oder infolge anderer Prozesse, wie beispielsweise einer instationären Strömung, kompliziertere Formen, wie Messungen in der Natur gezeigt haben (z. B. Parsons et al. 2005, Ernstsens et al. 2006, Kwoll et al. 2014). Die Dünenflanken können sich beispielsweise aus mehreren Abschnitten mit unterschiedlichen Neigungswinkeln zusammensetzen, von denen einige Abschnitte steile ($> 30^\circ$), andere flache Neigungen ($< 30^\circ$) aufweisen

können (Lefebvre et al. 2016, s. Abschnitt 2.3.4). Um trotzdem eine Zuordnung zur Gruppe der entweder steil- oder flachgeböschten Dünen vornehmen zu können, wurde in der Vergangenheit häufig der Böschungswinkel anhand der mittleren Neigung zwischen dem höchsten Punkt der Böschung am Dünenkamm und dem tiefsten Punkt im Düental abgeschätzt (z. B. Best et al. 2010). Rückschlüsse auf die Rauheitswirkung anhand dieser vereinfachten Betrachtung können allerdings fehlerhaft sein (Lefebvre et al. 2016).

2.3.1 Turbulenz bei der Überströmung einer Düne

Eine turbulente Strömung zeichnet sich dadurch aus, dass die Strömungsgeschwindigkeit in allen drei Raumrichtungen starken Schwankungen unterliegt. Eine gemessene turbulente Strömungsgeschwindigkeit \vec{v} lässt sich in ihren Mittelwert $\bar{\vec{v}}$ sowie ihre Abweichungen vom Mittelwert \vec{v}' , die zeitlichen Fluktuationen, zerlegen (Reynoldszzerlegung):

$$\vec{v} = \bar{\vec{v}} + \vec{v}' \quad (2.11)$$

Um die Turbulenz zu bestimmen, kann die Bewegungsenergie, die in den turbulenten Wirbeln der Strömung enthalten ist, ermittelt werden. Die Intensität der Turbulenz lässt sich anhand der Varianzen der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten mit

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (2.12)$$

beschreiben und wird als Turbulente Kinetische Energie (TKE) bezeichnet.

In der turbulenten Zone im Leebereich von Dünen, über denen sich die Strömung ablöst und sich ein Strömungswirbel ausbildet, finden eine starke Produktion und Dissipation von turbulenter Energie statt (z. B. Engelund und Fredsøe 1982, Nelson et al. 1993, Venditti und Bennett 2000, Lefebvre et al. 2014). Es bilden sich ein Bereich mit einer rezirkulierenden Strömung, der Ablösezone (*flow separation zone*) sowie eine Nachlaufströmung (*wake*) aus, in der die TKE erhöht ist (s. Bild 4). Die Länge und Ausdehnung der Ablösezone sowie der Nachlaufströmung beeinflusst die Rauheitswirkung einer Bodenform (z. B. Venditti 2007, Lefebvre et al. 2014). Lefebvre et al. (2014) untersuchten die Zusammenhänge zwischen Größe der Ablösezone sowie der Nachlaufströmung und verschiedenen Parametern wie relativer Dünenhöhe, Fließgeschwindigkeit, Seitenverhältnis und Rauheitslänge anhand von numerischen Versuchen an Dünen mit einem Lee Winkel von 30°. Sie konnten zeigen, dass ein Zusammenhang insbesondere zwischen der Ausdehnung der Nachlaufströmung und der Formrauheit und somit auch der gesamten Rauheitswirkung bei der steilgeböschten Düne besteht.

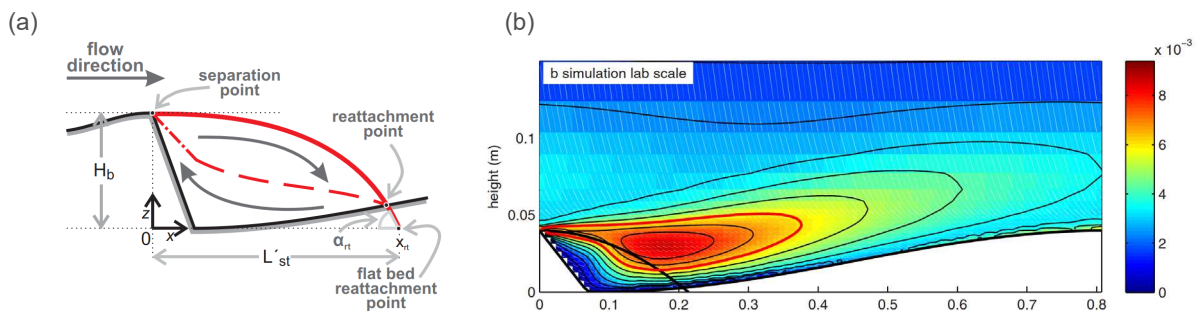


Bild 4: Ablösezone und Nachlaufströmung: (a) Schematische Darstellung der Ablösezone (flow separation zone) mit Kennzeichnung der Länge L'_{st} , (b) Turbulente Kinetische Energie (TKE) bei numerischer Simulation, die Nachlaufströmung (wake) in Rot markiert (Lefebvre et al. 2014)

Die von Lefebvre et al. (2014) untersuchten Dünengeometrien entsprechen mit einer cosinusförmigen Luvböschung und einer steilgeböschten, geraden Leeböschung nicht einer natürlichen Dünenform. Auch wurden regelmäßige Dünenabfolgen betrachtet, während in der Natur nacheinander angeordnete Dünen in Form und Abmessung variieren. Lefebvre et al. (2014) merken an, dass die Auswirkung der Position des Ablösepunktes auf die Ablösezone, die Nachlaufströmung und die resultierenden TKE in weiteren Studien untersucht werden sollte, um hieraus den Einfluss komplizierterer Geometrien auf die Formrauheit abzuschätzen. Der Einfluss komplexere Geometrien auf die Turbulenzentstehung wird in Abschnitt 2.3.4 nochmals anhand einiger Beispiele näher beschrieben.

2.3.2 Strömungsprozesse und Turbulenz bei Dünen mit steilen Böschungswinkeln und einfacher Geometrie

Bei Dünen mit steilen Leeböschungen von größer als 30° und einer einfachen Geometrie (dreieckig oder mit sinusförmiger Luv- und gerade Leeböschung) lassen sich die Strömungsprozesse über der Bodenform wie folgt beschreiben (z. B. Engelund und Fredsøe 1982; Best 2005; Balachandar und Prashanth 2011; Venditti 2013): Bei der Überströmung der Düne wird die Strömung entlang der Luvböschung aufgrund der Abnahme des Strömungsquerschnitts beschleunigt (*acceleration*). An bzw. direkt hinter der Dünenkrone nimmt der Strömungsquerschnitt abrupt zu, es findet ein Strömungsabriss statt. Im Dünental bildet sich ein Bereich mit einer rückwärtsgerichteten Strömung und einem Strömungswirbel, die Ablösezone, aus (*separation zone*). Der Wiederanschlusspunkt (*reattachment point*) der rezirkulierenden Strömung befindet sich in einem Abstand von etwa 4-6 Dünenhöhen stromabwärts zum Dünenkamm. Oberhalb dieses Bereichs bildet sich eine Art Wirbelschleppe bzw. eine Nachlaufströmung (*wake*) aus, die den rezirkulierenden Strömungsbereich von der freien Oberfläche abgrenzt (*shear layer*). Stromabwärts zum Wiederanschlusspunkt entsteht eine interne Grenzschicht (*internal boundary layer, IBL*). An dieser Stelle stabilisiert sich die Strömung. Die Geschwindigkeitsverteilung der Strömung über der Tiefe nähert sich wieder einem für eine stationäre, turbulenten Strömung typischem logarithmischen Profil an. In Bild 5 werden die Strömungsprozesse über asymmetrischen Dünen schematisch veranschaulicht.

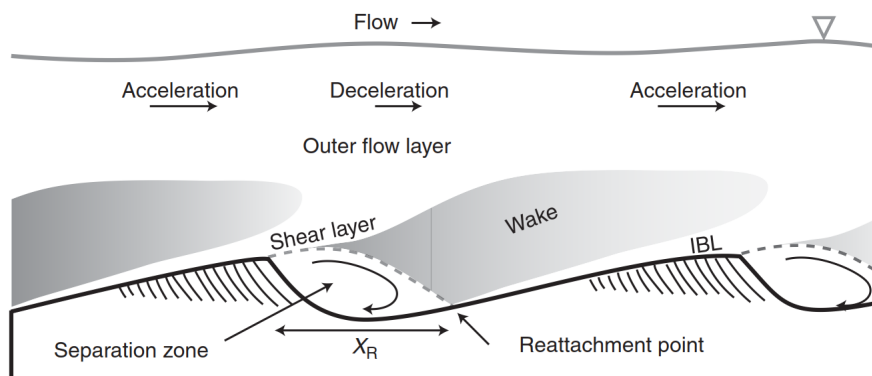


Bild 5: Schematische Darstellung der Strömungsprozesse über asymmetrischen Dünen (aus Venditti 2013, u. a. nach Best 2005)

2.3.3 Einfluss flacher Böschungswinkel auf Strömungsprozesse und Turbulenz

In natürlichen Gewässern besitzen Dünen häufig flache Böschungen mit Winkeln kleiner als 30° (z. B. Best und Kostaschuk 2002, Best et al. 2010, Kwoll et al. 2014). Messungen in der Natur, numerische Untersuchungen wie auch Laborstudien zeigen, dass die Strömungsprozesse über flachgeböschten Dünen von denen über steilgeböschten Dünen (vgl. Abschnitt 2.3.2) abweichen.

Kostaschuk und Villard (1996) führten Messungen an natürlichen Flussdünen durch. Die Dünen waren sowohl von symmetrischer als auch asymmetrischer Form, beide Geometrien besaßen aber flache Böschungen. Der Leewinkel der symmetrischen Dünen war durchschnittlich geringer als 8° , die asymmetrischen Dünen wiesen Leewinkel von bis zu 19° auf. Zur Untersuchung der Rezirkulation im Leebereich der Düne, die für steilgeböschte Dünen typisch ist, führten Kostaschuk und Villard (1996) Strömungsmessungen in direkter Nähe zur Böschung durch. Die Messungen zeigten, dass keine rückwärtsgerichtete Strömung im Leebereich der Düne festzustellen war, wobei nicht ausgeschlossen wurde, dass trotzdem eine unterbrochen Rezirkulation stattgefunden hat.

Lefebvre und Winter (2016) konnten mithilfe von numerischen Berechnungen feststellen, dass nicht nur der Leewinkel, sondern auch die relative Höhe der Düne (Dünenhöhe zu Wassertiefe H/h) die Strömungsprozesse beeinflussen. Der Einfluss der relativen Höhe zeigte sich beispielsweise bei der Bestimmung des kleinsten Leewinkels, bei der eine Strömungsrezirkulation festgestellt werden konnte: Für große relative Dünenhöhen konnten bereits ab Leewinkeln von 11° eine Strömungsablösung und eine Rückströmung beobachtet werden, bei geringen relativen Höhen hingegen erst bei Winkeln steiler 18° .

Für Dünen mit einer für eine unidirektionale Strömung typischen relativen Höhe von 0,17 konnte eine Ablösezone und eine Nachlaufströmung erst ab Leewinkeln größer als 17° festgestellt werden. Mit zunehmendem Leewinkel nahm auch Größe und Intensität der Nachlaufströmung zu, wie Lefebvre und Winter 2016 in Bild 6 veranschaulichen. Eine ausgeprägte Nachlaufströmung mit einer erhöhten TKE konnte erst dann identifiziert werden, wenn auch eine Ablösezone entstanden war. Eine voll ausgeprägte rezirkulierende Strömung mit einer Mindestlänge von 4,5-mal

der Dünenhöhe konnte ab einem Leewinkel von 24° (für alle untersuchten Verhältnisse H/h) festgestellt werden.

Auch anhand von Laborexperimenten wurde untersucht, inwiefern sich die Strömungsprozesse bei flacher als 30° geneigten Leeböschungen verändern. Best und Kostaschuk (2002) konnten an einer Modelldüne im Labor zeigen, dass an einer flachen Böschung von 14° keine permanente, sondern eine unterbrochene Strömungsrezirkulation stattfindet.

Den Effekt unterschiedlicher Leewinkel auf die Strömungsprozesse untersuchten und verglichen Kwooll et al. (2016), indem sie im Labor bei gleichbleibender Dünenmorphologie (d. h. gleicher Länge und Höhe) und Strömungsrandbedingungen lediglich den Dünenleewinkel variierten. Eine permanente Strömungsablösung konnte nur bei der steilgeböschten Düne mit einem Leewinkel von 30° beobachtet werden. Bei einem Leewinkel von 20° konnte lediglich eine unterbrochene Ablösung festgestellt werden. Die Höhe der TKE im Leebereich der 10° - und 20° -Leeböschungen war geringer als bei der Düne mit einer 30° -Leeböschung (s. Bild 7).

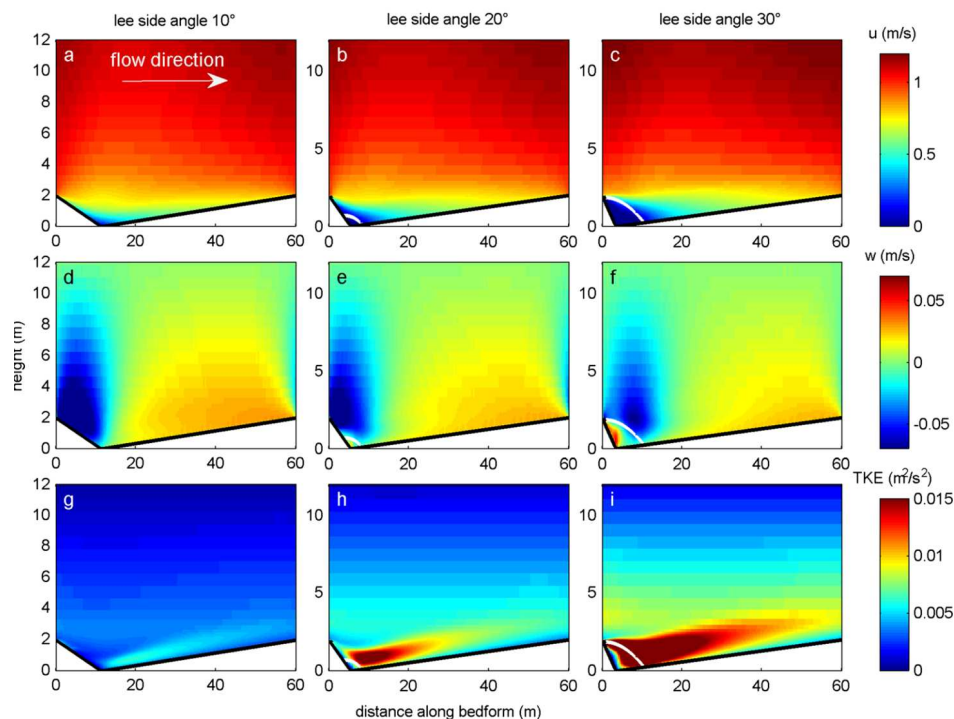


Bild 6: Vergleich der horizontalen Geschwindigkeiten(a-c), vertikalen Geschwindigkeiten (d-f) und Turbulenten Kinetischen Energie über Bodenformen mit Leewinkeln von 10° , 20° und 30° ($H/h = 0,17$), Ausdehnung der Ablösezone mit weißer Linie gekennzeichnet (Lefebvre und Winter 2016)

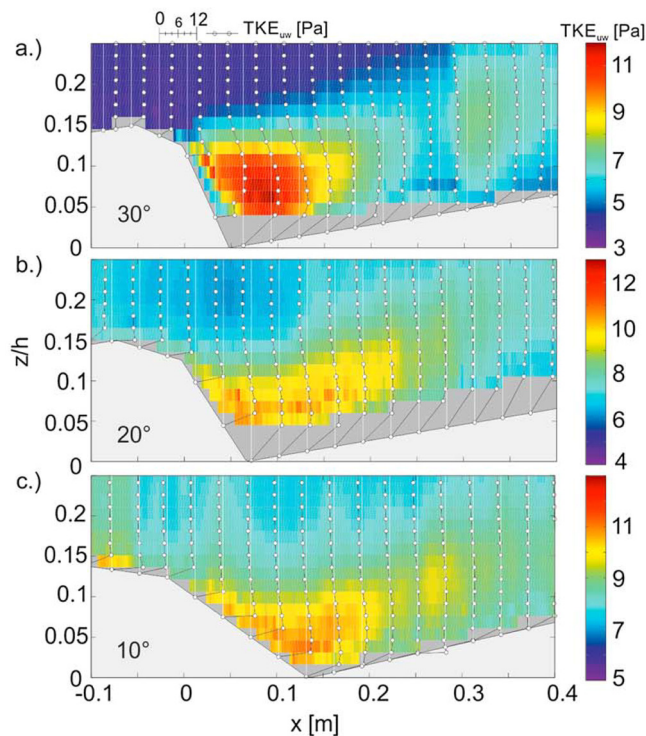


Bild 7: TKE und vertikale Geschwindigkeitsprofile über verschiedenen Leewinkeln: (a) 30°, (b) 20°, (c) 10° (Kwoll et al. 2016)

2.3.4 Einfluss natürlicher Geometrien auf Strömungsprozesse und Turbulenz

Kwoll et al. (2016) näherten sich bei ihren Laborexperimenten bei der Modelldünenform an natürlich vorgefundene Dünengeometrien an, indem die Leeböschung auf halber Strecke mit einer Kante (*brink point*) versehen wurde. Der horizontale Abstand von der Kante zum höchsten Punkt, dem Dünenkamm, und von der Kante zum tiefsten Punkt im Dünental wurde gleich groß gewählt (s. Bild 8). Obwohl der Fokus der Untersuchungen auf den Auswirkungen durch die Variation des unteren, steileren Böschungsabschnitts lag, merken Kwoll et al. (2016) an, dass auch die Neigung des vom Kamm zur Kante reichenden Böschungsabschnitts die Strömungsprozesse beeinflusst und eine scharfkantige Böschung eine permanente Strömungsablösung verursachen kann, während über einer flachen Kante mit eher sinusförmigem Böschungsverlauf keine Ablösung stattfindet.

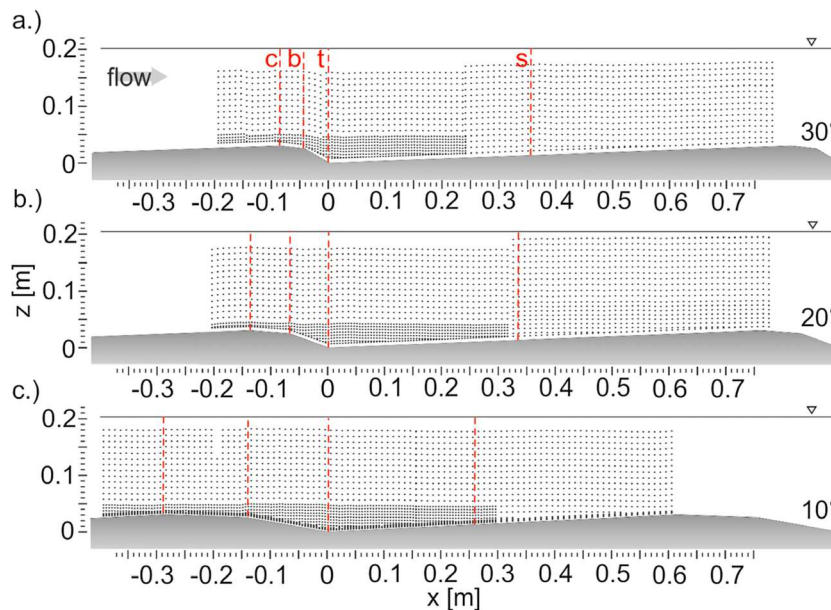


Bild 8: An natürliche Dünen angenäherte Dünengeometrie der Modelldünen von Kwooll et al. (2016) mit Luvseite (*s*, stoss) und zweigeteilter Leeböschung zwischen *c* (Dünenkamm, crest) und *t* (Dünental, trough) sowie Böschungskante (*b*, brink point)

Auch Lefebvre et al. (2016) setzen den Schwerpunkt in ihrer Veröffentlichung auf die Untersuchung von komplizierteren, natürlichen Dünenformen. Sie betonen, dass natürliche Dünen häufig eine sinusförmige Luvböschung und meistens eine oder mehrere Kanten oder Brüche (*brink points*) in der Luv- und Leeböschung enthalten und häufig einen vergleichsweise steilen Böschungsabschnitt, den sogenannten *Slip Face*, besitzen (s. Bild 9). Diese kompliziertere Geometrie insbesondere der Leeböschung sei aber bis zu dem Zeitpunkt in Studien nur selten berücksichtigt worden sein, eine Ausnahme bilden Kwooll et al. (2016) (s. o.). Aus früheren Untersuchungen ist allerdings beispielsweise bekannt (z. B. Paarlberg et al. 2007), dass bei segmentierten Böschungen der Strömungsabriss nicht, wie bei einer einteiligen Böschung, am Dünenkamm, sondern an der Kante zum *Slip Face* stattfindet.

Um die Strömungs- und Turbulenzprozesse über diesen natürlichen Dünen mit *Slip Face* zu untersuchen, führten Lefebvre et al. (2016) numerische Simulationen durch. Neben dem Einfluss verschiedener *Slip Face* Winkel betrachteten Lefebvre et al. (2016) u. a. auch die Auswirkungen unterschiedlicher Längen von oberer und unterer Leeböschung, der Position des *Slip Face* und des Winkels der oberen Leeböschung. Anhand von bereits erhobenen Datensätzen aus Echolotmessungen (Frings 2007) im Rio Paraná (Argentinien) und im Unterrhein (Niederlande) identifizierten Lefebvre et al. (2016) im Vorfeld zu den Simulationen typische morphologische Eigenschaften von natürlichen Dünen und fassten diese zu Kategorien zusammen. In Bild 9 sind die ausgearbeiteten Charakteristika natürlicher Bodenformen veranschaulicht. Für die Simulationen wurden diese Geometrien und Abmessungen berücksichtigt.

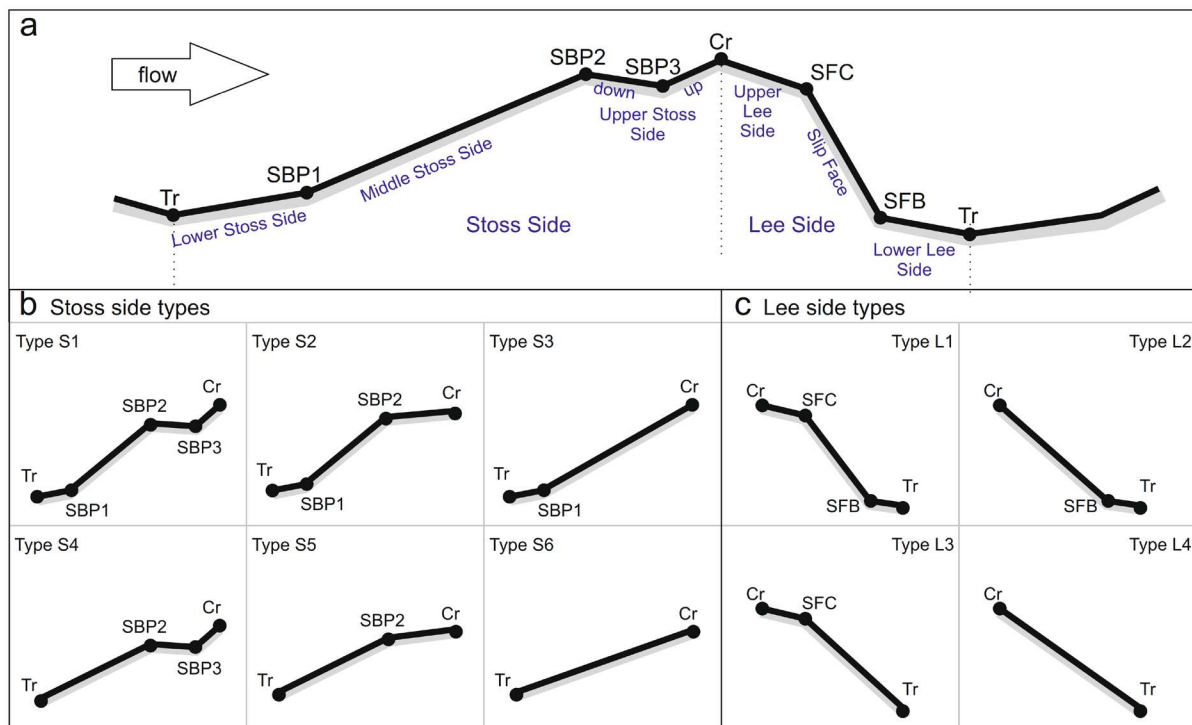


Bild 9: Morphologie von Bodenformen: a) Überblick über mögliche Kanten und Böschungssegmente sowie deren Bezeichnung, b) Arten von Luvböschungen, c) Arten von Leeböschungen (Lefebvre et al. 2016)

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Ausbildung und Beschaffenheit der rezirkulierenden Strömung bei segmentierten Bodenformen vor allem abhängig ist von dem Winkel des *Slip Face* und weniger durch die Abmessungen oder Position der Leeabschnitte über oder unter dem *Slip Face*. Für *Slip Face* Winkel kleiner als 18° konnte kein Strömungsabriss und keine Rückströmung beobachtet werden, für Neigungswinkel größer 18° bildete sich eine Ablösezone aus (s. Bild 10). Mit größer werdendem Winkel nahm auch die Länge der Ablösezone zu. Auch die Größe der auftretenden Schubspannungen und somit auch der TKE sowie die Ausbildung einer Nachlaufströmung wurden vordergründig durch den *Slip Face* Winkel beeinflusst. Einen weiteren Effekt auf die Schubspannungen hatte neben dem *Slip Face* Winkel lediglich der Winkel der oberen Leeböschung: Mit zunehmendem Neigungswinkel dieses Böschungsabschnitts nahm die Schubspannung ab.

Die Kenntnis über Beschaffenheit der Leeböschung mit ihren einzelnen Segmenten sowie insbesondere über den Winkel des *Slip Face* Abschnitts ist laut Lefebvre et al. (2016) demnach für die Abschätzung der Rauheitswirkung von Bodenformen sehr wichtig. Die Annahme einer einfachen, dreieckigen Geometrie und vor allem lediglich die Bestimmung der Höhe und Länge sowie der daraus resultierenden Böschungswinkel sind für eine Abschätzung der Rauheitswirkung ungenau, da rauheitswirksame Bereiche wie der *Slip Face* nicht erfasst würden.

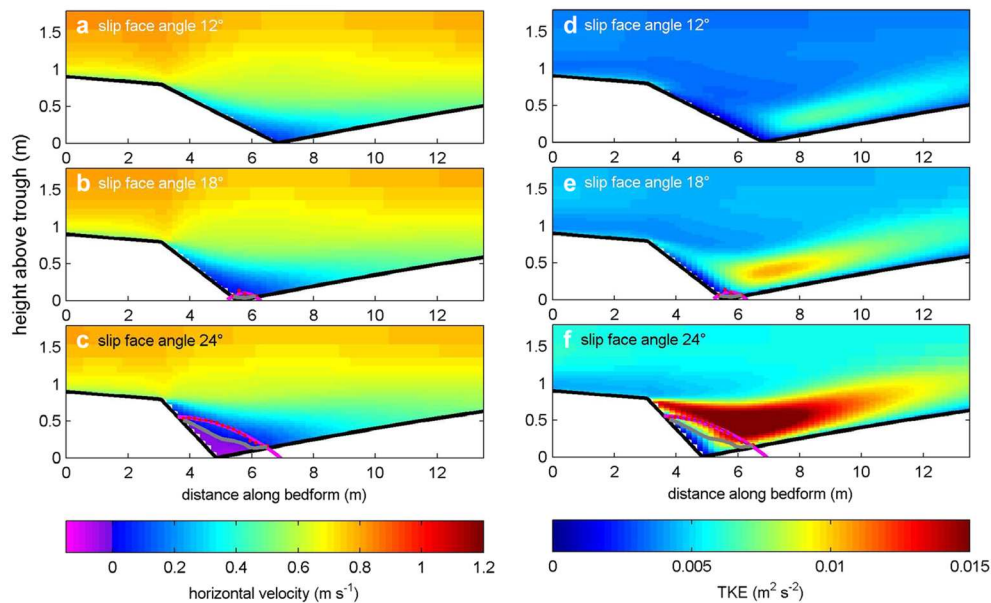


Bild 10: Horizontale Geschwindigkeiten und TKE über Dünen mit Slip Face Winkeln von (a)/(d) 12°, (b)/(e) 18° und (c)/(f) 24°, Ablösezonen in rot gepunktet und magenta (Lefebvre et al. 2016)

2.4 Vorhersage der Rauheitswirkung von Bodenformen

Ansätze zur Vorhersage der Rauheitswirkung von Bodenformen wurden in der Literatur vielfach untersucht und vorgestellt (z. B. Yalin 1964; Van Rijn 1984; Karim 1999). Oft angewandt wird der Ansatz zur Rauheitsprädiktion nach Van Rijn (1993). Dieser besagt, dass die Rauheit einer Gewässersohle mit Bodenformen durch die Addition mehrerer äquivalenter Sandrauheiten k_s ermittelt werden kann. Der gesamte Fließwiderstand k_s setzt sich in diesem Fall zusammen aus der äquivalenten Sandrauheit des Kornes (*grain*) k_{sG} und der äquivalenten Sandrauheit der Bodenform (*form*) k_{sF} :

$$k_s = k_{sG} + k_{sF} \quad (2.13)$$

In numerischen Modellen wird die durch Bodenformen entstehende Rauheitswirkung oftmals parametrisiert, insbesondere wenn die Modelle große Gebiete wie beispielsweise ganze Ästuar abilden. Zur Abschätzung und Vorhersage der Formrauheit wurden empirische Gleichungen entwickelt, die allerdings auf idealisierten Geometrien und Abmessungen von Bodenform beruhen und die Formrauheit lediglich mit der Bodenformhöhe und dem Seitenverhältnis Höhe zu Länge (H/L) in Beziehung setzen (Lefebvre und Winter 2016, s. Bild 11). Des Weiteren stammen die Daten, die diesen Formeln zugrunde liegen, aus Laborexperimenten mit steilgeböschten Dünen. Von den betrachteten Formeln berücksichtigt lediglich der Prädiktor von Van Rijn (1993) eine hiervon abweichenden Leeböschungsneigung durch einen Korrekturfaktor, der für Labordünen 1, für natürliche Dünen 0,7 beträgt (vgl. Bild 11).

Table 1 Form roughness predictors

Equation	Reference
$f_f = \left(\frac{1}{3.3 \log \left(\frac{hL}{H^2} \right) - 2.3} \right)^2$	VH67, Vanoni and Hwang (1967)*
$f_f = 10 \frac{H^2}{hL} \exp(-2.5 \frac{H}{h})$	E77, Engelund (1977)*
$f_f = \frac{8g}{\left(18 \log \frac{12h}{k_s'} \right)^2}$ with $k_s'' = 1.1 \gamma_d H (1 - \exp(-25H/L))$ and $\gamma_d =$ 1 for angle-of-repose bedforms and 0.7 for non-angle-of-repose bedforms	VR93, Van Rijn (1993)
$f_f = \frac{8g}{\left(18 \log \frac{12h}{3z_{0b}} \right)^2}$ with $z_{0b} = \frac{H^2}{L}$	S97, Soulsby (1997)
$f_f = \frac{8g}{\left(18 \log \frac{12h}{k_s'} \right)^2}$ with $k_s'' = 0.57H$	B10, Bartholdy et al. (2010)

*Vanoni and Hwang (1967) and Engelund (1977) cited in Ogink (1989)

Bild 11: Zusammenstellung von empirischen Formeln zur Vorhersage der Formrauheit (Lefebvre und Winter 2016)

Lefebvre und Winter (2016), die in numerischen Untersuchungen der Strömungsprozesse über Dünen den Leewinkel variierten und auch flachgeböschte Dünen betrachteten, überprüften die Anwendbarkeit dieser Rauheitsprädiktoren auf ihre Simulationsdaten. Die beste Übereinstimmung von gemessener und vorhergesagter Formrauheit f_f konnte erreicht werden, indem sie den Prädiktor von Vanoni und Hwang (1967) anpassten und um einem Reduktionsfaktor γ zur Berücksichtigung des Leewinkels erweiterten:

$$f_f = \gamma \frac{1}{19,75 \log \left(\frac{hL}{H^2} \right) - 20} \quad (2.14)$$

mit

$$\gamma = \frac{1}{1 + e^{-0,3 \theta + 5,9}} \quad (2.15)$$

und

- h: Wassertiefe [m],
- L: Länge der Düne [m],
- H: Höhe der Düne [m],
- θ : Leewinkel [°].

Wie Lefebvre und Winter (2016) anmerken, wurde dieser Prädiktor anhand Daten aus Simulationen mit Dünen einer einfachen, dreieckigen Geometrie angepasst. Die Einwirkungen komplexerer Dünenformen mit Kanten und einer *Slip Face*-Böschung (vgl. Abschnitt 2.3.4) auf die Formrauheit werden mit dieser Gleichung nicht erfasst.

3 Messkonzept

Die hier beschriebenen Untersuchungen der hydraulischen Prozesse bei der Überströmung einer Düne erfolgten anhand von physikalischen Laborversuchen in einer Strömungsumlauf Rinne. Zunächst wurden Voruntersuchungen an einer nicht skalierten Dreiecksdüne (TriPrelim) durchgeführt, anhand derer die vorgesehene Messtechnik sowie die Methoden und Werkzeuge zur Datenanalyse erprobt wurden. Die Erfahrungen aus den Vorversuchen hinsichtlich der Mess- und Versuchsdurchführung flossen in die anschließend durchgeführten Versuchsreihen am skalierten Dünenmodell (ebbstrom-orientierten Düne mit *Flood Slip Face* (FloodSF) und ebbstrom-orientierten Düne mit *Ebb Slip Face* (EbbSF), näherer Erläuterungen hierzu s. Kapitel 4) ein. Bei Bedarf wurden einzelne Einstellungen und Randbedingungen im Rahmen der Versuche nochmals optimiert. Im folgenden Kapitel wird das erarbeitete Messkonzept vorgestellt und ein Überblick über die Versuchseinrichtung gegeben. Die zur Strömungserfassung eingesetzte akustische Messtechnik und deren Funktionsprinzip sowie die zur Analyse der turbulenten Strömungsdaten angewandten Methoden werden erläutert.

3.1 Strömungsumlauf Rinne

Die für die Versuche eingesetzte Umlauf Rinne setzt sich aus zwei geraden Abschnitten zusammen, die an ihren jeweiligen Enden durch halbkreisförmige Bereiche zu einem geschlossenen Umlauf Rinne verbunden sind. Ein Abschnitt ist unterirdisch in Form einer Rohrleitung ausgebildet, der gerade Abschnitt ist über die Versuchshalle oberirdisch zugänglich. Die Gesamtlänge der Strömungsrinne beträgt 220 m, für Experimente steht der oberirdische Bereich mit einer Länge von rund 70 m und einer Breite von 1,50 m zur Verfügung. Für die Vorversuche und die Untersuchungen an den Modelldünen wurde ein Wasserstand von 1 m eingestellt. Der Strömungsantrieb befindet sich unterirdisch auf der gegenüberliegenden Seite des Versuchsabschnitts in Form eines Schiffspropellers, mit dem bei einem Wasserstand von 1 m maximale Strömungsgeschwindigkeiten von 1 m/s in zwei Strömungsrichtungen generierbar sind. Bild 12 zeigt die Umlauf Rinne der BAW sowie eine schematische Darstellung des Aufbaus der Rinne. Detailliertere Informationen zur Strömungsumlauf Rinne sowie zum Strömungsantrieb sind der Anlage (Dokumentation zur Umlauf Rinne und Hinweise zur Messtechnik) zu entnehmen.

Im Vorfeld zu den Experimenten wurden ausführliche Untersuchungen zum Auftreten von Sekundärströmungen, die beispielsweise durch die Geometrie des Einlaufbereichs, aber auch die Propellerbewegung verursacht werden können, sowie zu Möglichkeiten der Gleichrichtung dieser Strömungen durchgeführt. Parallel zu den Untersuchungen und den Messungen in der Rinne wurden zusätzlich numerische CFD-Simulationen durchgeführt. Auf Grundlage der erlangten Ergebnisse wurde auf eine Strömungsgleichrichtung im Einlaufbereich der Rinne verzichtet. Um Einflüsse durch Sekundärströmungen zu minimieren, wurde für die Messungen an den Modelldünen

ein Abschnitt im hinteren Bereich der Rinne mit etwa 50 m Abstand zum Einlaufbereich gewählt. Durch die große Entfernung zum Einlaufbereich kann sichergestellt werden, dass der gemessene Strömungszustand am Modell lediglich von den lokalen Randbedingungen beeinflusst und der Einfluss von Sekundärströmungen nicht mehr vorhanden ist (s. Bild 69 und Bild 70). Eine genauere Beschreibung zur Untersuchung eines geeigneten Messbereichs ist der Anlage (Dokumentation zur Umlaufrinne und Hinweise zur Messtechnik) zu entnehmen.

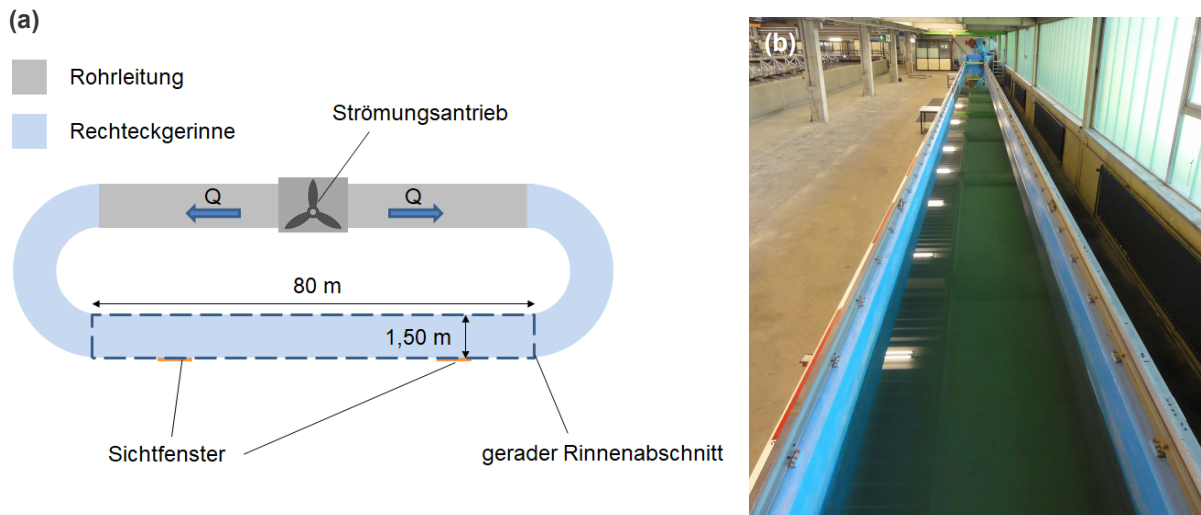


Bild 12: Umlaufrinne der BAW, Standort Hamburg: (a) Schematische Darstellung (nicht maßstabsgetreu), (b) Blick auf den für Versuche zur Verfügung stehenden Rinnenbereich

Im Bereich der Versuchsstrecke befindet sich über der Rinne ein in beide Richtungen längs verfahrbarer Wagen, an dem die Anbringung von Messtechnik möglich ist (s. Bild 13). Die Installation von Messsonden kann an festen Traversen erfolgen, zusätzlich ist eine in Querrichtung sowie in der Höhe verfahrbare Traverse vorhanden. Diese Traverse und der Messwagen werden über einen Schrittmotor angetrieben.

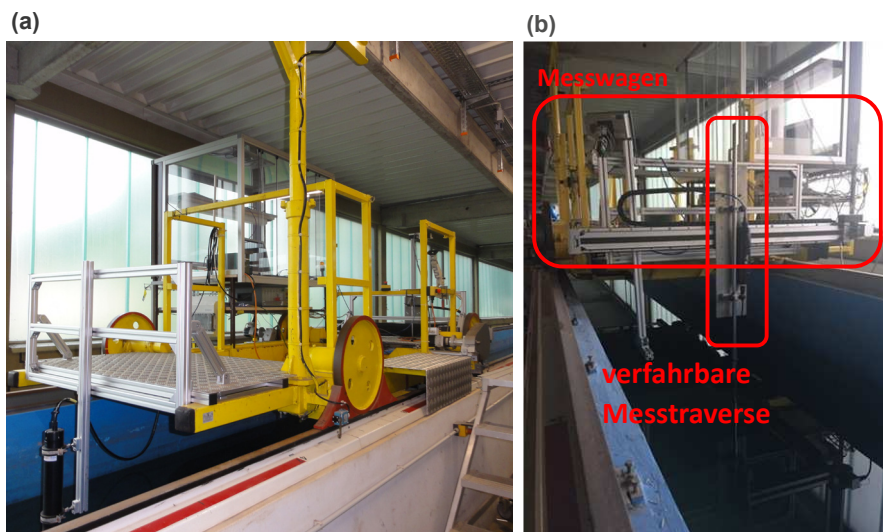


Bild 13: Messwagen: (a) Überblick, (b) Verfahrbare Messtraverse am Rinnenwagen zur Anbringung der ADV-Sonde

An der verfahrbaren Traverse erfolgte die Installation der ADV-Strömungsmesssonde (*Nortek Vectrino* bzw. *Vectrino Profiler*), da für die Strömungserfassung eine Abtastung mehrerer Messpositionen in vertikaler Richtung vorgesehen ist und mithilfe die motorgesteuerte Verfahrbarkeit unkompliziert möglich ist. Auch ein schrittweises Verfahren in Querrichtung ist möglich, war aber im Rahmen der Versuche nicht erforderlich. Auf das Messprinzip und die Konfiguration der ADV-Strömungssonde wird in nächsten Abschnitt 3.2 detaillierter eingegangen.

Zur Erfassung des Wasserstands in der Rinne befindet sich weitere Sensorik am Rinnenwagen sowie im Einlaufbereich der Rinne, hierzu s. Anlage.

3.2 Strömungsmessungen mittels ADV-Sensorik

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wurden ADV-Sonden (*Acoustic Doppler Velocimeter*) der Firma *Nortek* eingesetzt. ADV-Sonden eignen sich insbesondere für die Erfassung von turbulenter Strömung, da eine Messung mit einer hohen Abtastrate von bis zu 200 Hz möglich ist. Für die hier durchgeführten Versuche wurden zwei unterschiedliche Sonden eingesetzt: Eine *Vectrino*-Sonde in der sogenannten *sidelooking*-Variante sowie eine *Vectrino Profiler*-Sonde in der *downlooking*-Variante.

Die Bezeichnungen *sidelooking* und *downlooking* beziehen sich auf die Geometrie des Sondenkopfes (s. Bild 14). Bei der *sidelooking*-Sonde ist der Messkopf mit den vier symmetrisch verteilten Empfängerarmen im 90°-Winkel zur Seite abgeknickt. Das Messvolumen befindet sich seitlich neben dem Messkopf. Bei der *downlooking*-Sonde ist der Sender mit den Empfängerarmen nach unten ausgerichtet, das Messvolumen befindet sich unterhalb des Messkopfes.

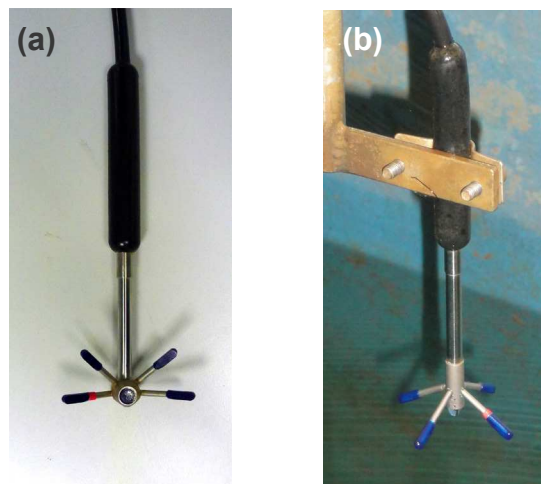


Bild 14: (a) Eingesetzte *Vectrino* Sonde in der Variante *sidelooking* und (b) *Vectrino Profiler* in der Variante *downlooking*

Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Sonden besteht darin, dass mit dem *Vectrino Profiler* Messungen von kleinen vertikalen Strömungsprofilen über einem Bereich von bis zu 3 cm Höhe gemessen werden können. Innerhalb des Messvolumens können mit einer einzelnen Messung bis zu 30 Geschwindigkeitszeitreihen erfasst werden. Die maximale vertikale Auflösung des Profils beträgt somit 1 mm. Mit dem *Vectrino* ist dies nicht möglich, hier werden Punktmessungen der

x-, y- und z-Geschwindigkeit innerhalb eines Messvolumens mit einer Höhe von 2,5 mm bis 8,5 mm (benutzerdefiniert einstellbar) durchgeführt.

Hier vorgenommene Voruntersuchungen haben allerdings gezeigt, dass die Nutzung und Verwertbarkeit von Daten aus Profilmessungen zusätzliche Bearbeitungsschritte zur Qualitätssicherung erforderlich machen, da die Belastbarkeit der Messdaten aus den Randbereichen des Messvolumens nicht für die weitere Analyse und Interpretation ausreichte (s. Anlage zur Dokumentation der Umlaufrinne, Kapitel 9.3.2). Die Datenqualität von mit dem *Vectrino Profiler* durchgeführten Punktmessungen war hingegen auch ohne zusätzliche Filterung zufriedenstellend. Für die Strömungsmessungen am physikalischen Modell, die mit dem *Vectrino Profiler* durchgeführt wurden, wurde das Messgerät daher als Punktmesssonde konfiguriert. Für eine Beschreibung der Voruntersuchungen zur Messung von Strömungsprofilen mit dem *Vectrino Profiler* siehe Anlage (Dokumentation der Umlaufrinne).

3.2.1 Messprinzip

Das Messprinzip der *Vectrino*- und *Vectrino Profiler*-Sonden basiert auf dem physikalischen Prinzip des sogenannten Doppler-Effekts. Der Doppler-Effekt beschreibt die zeitliche Dehnung bzw. Stauchung eines Signals und somit eine Frequenzänderung und Phasenverschiebung, wenn eine Signalquelle sich von einem Empfänger entfernt oder umgekehrt ein Empfänger sich von der Signalquelle wegbewegt.

Nortek (2017) beschreibt die Funktionsweise der Messsonden wie folgt: Die Sonde sendet zwei kurze Signale aus. Die Signale werden an im Wasser befindlichen Partikeln reflektiert und von den Empfängern der Sonde wieder aufgenommen. Anschließend werden die Signale in mehrere Segmente zerlegt, die unabhängig voneinander ausgewertet werden. Nachdem der zweite, konsekutiv ausgesendete Puls zerlegt wurde, wird die Phasendifferenz zwischen den reflektierten Signalen für jedes Segment berechnet. Die Phasendifferenz liefert die Geschwindigkeit des Wasserpartikels und somit die Geschwindigkeit der Strömung.

Eine Phasendifferenz der reflektierten Signale kann lediglich innerhalb einer Periode zwischen $[-\pi, \pi]$ ermittelt werden. Aus diesem Grund ist im Vorfeld die von der Sonde maximal zu messende Geschwindigkeit durch den Nutzer festgelegt (*Nominal Velocity Range, NVR*, vgl. Abschnitt 3.2.2), um den Bereich $[-\pi, \pi]$ zu definieren. Tritt eine höhere Fließgeschwindigkeit als vorgegeben auf, ist die Phasendifferenz größer als $\pm\pi$. Eine eindeutige Zuordnung zwischen der ermittelten Phasendifferenz und der daraus resultierenden Geschwindigkeit ist nicht mehr möglich und führt zur Annahme eines falschen Geschwindigkeitswertes.

Beim *Vectrino Profiler* handelt es sich um eine *downlooking*-Sonde, bei der die vier rund um den mittig positionierten Sender angeordnet sind. Jeweils ein Empfängerpaar, bestehend aus den jeweils zwei gegenüberliegenden Empfängern, misst die x-Komponente (1-3) sowie die y-Komponente (2-4) der horizontalen Geschwindigkeit. Beide Empfängerpaare erfassen unabhängig voneinander die vertikale z-Geschwindigkeitskomponente (z_1 und z_2) (s. Bild 15a-c).

Bei der eingesetzten *Vectrino sidelooking*-Sonde befinden sich zwei Empfängerarmchen sich gegenüberliegend in einer Linie rechts und links vom Sender (1 und 2), die zwei anderen Empfänger sind schräg dazu nach oben ausgerichtet (3 und 4) (s. Bild 15d). Die x- und y-Komponente werden

von Empfängerpaar 1-2 gemessen, die z-Komponente wird durch die Empfänger 3 und 4 erfasst. Anders als bei der *Vectrino Profiler* Sonde wird die z-Geschwindigkeit nur einmal bestimmt (z1).

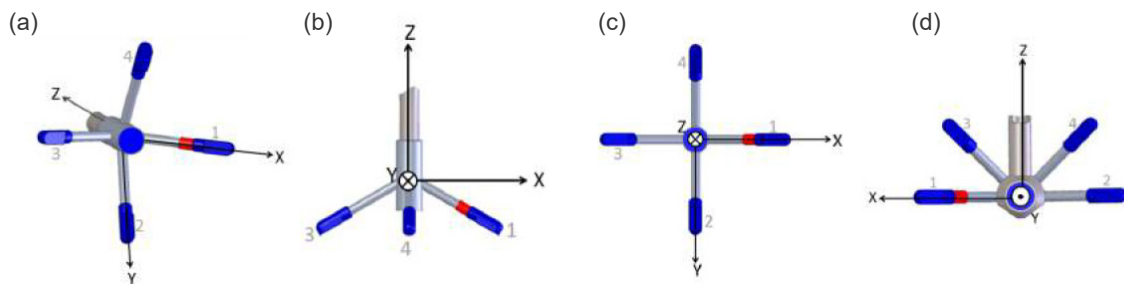


Bild 15: Ausrichtung der Empfänger und Koordinatensystem bei downlooking und sideloooking Sonden (nach Nortek 2018)

3.2.2 Wichtige Kennwerte zur Beurteilung der Qualität der Messung

Zur Beurteilung der Qualität der erfassten Daten sind einige Kennwerte zu berücksichtigen, die während der Messung zusätzlich zur Strömungsgeschwindigkeit ermittelt und bereitgestellt werden. Insbesondere das Signal-Rausch-Verhalten (SNR) und die Korrelation wurden bei den durchgeführten Versuchen zur Einschätzung der Belastbarkeit der Daten herangezogen. Im Folgenden werden die Hintergründe zum Signal-Rausch-Verhalten (SNR) und zur Berechnung der Korrelation kurz beschrieben, Details und weitere Kennwerte sind den Leitfäden von Nortek (z. B. Nortek 2018) zu entnehmen.

Das Signal-Rausch-Verhalten, engl. *Signal-to-Noise ratio* (SNR), stellt die Signalstärke im Verhältnis zum Hintergrundrauschen dar und ist definiert als

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{Amplitude_{signal}}{Amplitude_{noise}} [dB]. \quad (3.1)$$

Gemäß Nortek (2018) wird für Messungen zum Zwecke der Aufnahme von Rohdaten ein SNR-Wert von über 15 dB empfohlen. Für die Erhebung von Daten, die für weitere Analysen zeitlich gemittelt werden, sollte der SNR mindestens 5 dB betragen. Bezüglich der beiden Sondenarten *Vectrino* und *Vectrino Profiler* wird nochmals unterschieden: Für den *Vectrino* wird empfohlen, mit einem SNR > 15 dB zu messen. Für den *Vectrino Profiler* sollte bei Messung eines Geschwindigkeitsprofils der SNR in der Mitte des Messprofils etwa 30 dB und an den Rändern etwa 20 dB betragen. Der Bereich mit dem höchsten SNR wird befindet sich etwa 5 cm unterhalb des Senders und wird als *sweet spot* bezeichnet (s. Bild 16). Auch für die Durchführung von Punktmessungen sollte die Sonde so konfiguriert werden, dass das eingestellte Messvolumen sich in im *sweet spot* befindet, um bestmögliche SNR-Werte zu erreichen.

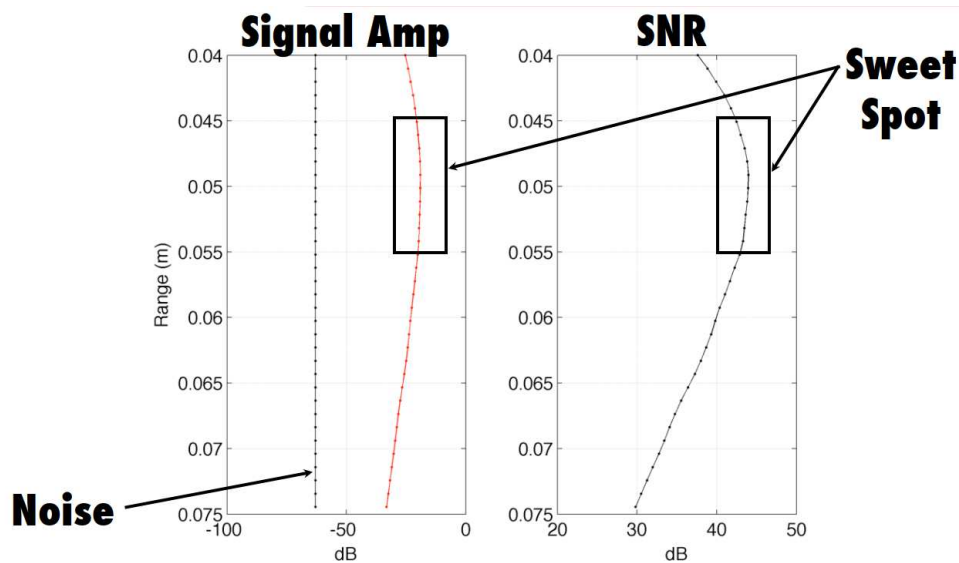


Bild 16: Optimale Amplituden und SNR-Werte im Sweet Spot beim Vectrino Profiler in 5 cm Entfernung zum Sender (Nortek 2015)

Einen wichtigen Hinweis auf die Qualität der Messung liefert die Korrelation der Daten. Die Korrelation beschreibt die Ähnlichkeit zwischen den zwei Pulsechos, die von der ADV-Sonde nach der Reflexion an Partikeln wieder empfangen werden.

Da die Pulse zeitversetzt ausgesendet werden, erreichen sie das Messvolumen ebenfalls mit einem entsprechenden Zeitversatz. Während dieses Zeitraums können sich die Geschwindigkeitsverhältnisse im Messvolumen verändern, sodass die zwei reflektierten Pulse nicht identisch sind. Bei der Berechnung des Phasenversatzes zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit wird auch die Korrelation zwischen den zwei Pulsechos ermittelt. Je höher die Korrelation zweier Werte, desto ähnlicher sind sich die Signale. Eine Korrelation von 100 % bedeutet, dass zwei Werte identisch sind. Je geringer die Korrelation, desto unähnlicher sind sich die Signale und desto größer ist die Messunsicherheit, mit der die Geschwindigkeit bestimmt wurde. Nortek (2018) empfiehlt für belastbare Daten Korrelationen von über 90 %.

Gründe für geringe Korrelationswerte können Störsignale, aber auch eine zu geringe Anzahl an Streupartikeln im Wasser sein. Starke Schwankungen der Geschwindigkeit bei hoher Turbulenz können ebenfalls Grund einer geringen Korrelation sein. Sokoray-Varga und Höger (2014) beschreiben als Möglichkeiten zur Anhebung der Verbesserung der Korrelationswerte zum einen die Erhöhung der Streupartikel im Wasser, zum anderen die Anpassung von Konfigurationseinstellungen wie bspw. eine Erhöhung der *Nominal Velocity Range*.

3.2.3 Konfiguration der Sonden

Zur Konfiguration der *Vectrino* und *Vectrino Profiler* Sonden sind mehrere Parameter durch den Benutzer anpassbar. Im Rahmen der Untersuchungen in der Umlaufrinne wurden insbesondere folgende Parameter variiert:

- Messfrequenz
- Abstand des Messvolumens zur Sonde (*blanking distance*)
- Geschwindigkeitsbereich (*Nominal Velocity Range*)
- Anzahl der Messzellen (bei *Vectrino Profiler*)
- Größe des Messvolumens
- Größe der Messzellen (bei *Vectrino Profiler*)

Die Wahl der Messfrequenz erfolgte vor dem Hintergrund, die Datenmenge möglichst gering zu halten und dennoch anschließend die stattfindenden Prozesse ausreichend auflösen zu können. Um die turbulenten Strukturen zeitlich zu erfassen, wurde daher die Messfrequenz im Anschluss an die Vorversuche von 10 Hz auf 100 Hz erhöht.

Weitere Konfigurationen erfolgten sondenspezifisch. Beispielsweise erlaubt die *Vectrino Profiler*-Sonde die Unterteilung des Messvolumens in einzelne Messlayer zur Erfassung eines Geschwindigkeitsprofils innerhalb des Messvolumens. Diese Einstellungsmöglichkeit wurde für die Vorversuche noch genutzt, die Anzahl der Messlayer bei den späteren Versuchen jedoch auf eine einzelne Zelle reduziert, d. h. die *Vectrino Profiler*-Sonde als Punktmesssonde eingesetzt.

Die Auswahl der übrigen Einstellungen erfolgte vor allem mit dem Ziel, bei der Messung eine bestmögliche Datenqualität zu erreichen. Beurteilt wurde die Qualität anhand der Kennwerte für SNR und Korrelation sowie anhand des Erscheinungsbildes der Geschwindigkeitszeitreihe. Im Allgemeinen erforderten die Versuchsbedingungen nur kleine Anpassungen der Einstellungen, da überwiegend gute SNR-Werte im Bereich von 15 dB (*Vectrino*) bzw. 30 dB (*Vectrino Profiler*) sowie Korrelationen > 90 % erreicht werden konnten. Auffällig niedrige Korrelationen traten beispielsweise in Sohlnähe bzw. in der Nähe zur Dünenböschung auf. Hierbei handelt es sich um das bekannte Auftreten von sogenannten *weak spots*. In diesen Bereichen werden die von der Sonde ausgesandten Pulse infolge von nahegelegenen Oberflächen durch Interferenz gestört (vgl. Anlage, Dokumentation zur Umlaufrinne und Hinweise zur Messtechnik, Abschnitt 9.3.3). Eine Minimierung dieses Effekts konnte durch das schrittweise Anpassen der eingestellten NVR erreicht werden, da eine der Änderung der NVR auch eine Änderung des Zeitabstand zwischen zwei ausgesendeten Pulsen einhergeht und eine Interferenz verhindert werden kann. Das Vermeiden von *weak spots* kann bei der *Vectrino Profiler*-Sonde auch durch Aktivierung des *adaptive ping interval* erreicht werden (vgl. Anlage, Dokumentation zur Umlaufrinne und Hinweise zur Messtechnik, Abschnitt 9.3.3).

Auch die Anzahl der Ausreißer in den Geschwindigkeitszeitreihen konnte durch eine angepasste Vorgabe des zu erwartenden Geschwindigkeitsbereichs (NVR) kontrolliert werden. Die NVR wurde hierbei an die vertikalen Messpositionen angepasst und dort entsprechend kleiner gewählt, da in Sohlnähe geringere Strömungsgeschwindigkeiten herrschen.

Nortek (2018) beschreibt, dass beim *Vectrino Profiler* in einem sogenannten *sweet spot* in 5 cm Abstand zum Sender die besten SNR- und Korrelationswerte erzielt werden können (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dies konnte bei den hier durchgeführten Experimenten insbesondere für die Messpositionen, an denen stärkere Turbulenzen herrschten, bestätigt werden. Die *blanking distance* wurde daher im Anschluss an die Vorversuche fest gewählt zu 5 cm. In weniger turbulenten Bereichen und Ausnahmefällen wurde hiervon abgewichen, z. B. wenn nur durch eine Änderung der

blanking distance bestimmte Messpositionen erreicht werden konnten (beispielsweise aufgrund einer eingeschränkten Verfahrbarkeit der Sonde durch nahe gelegene Oberflächen).

Das Messvolumen wurde in der Regel größtmöglich gewählt, da eine Zugabe von Streupartikeln in die Strömungsrinne nicht gewünscht war, um weiterhin die Einsehbarkeit des Versuchsaufbaus und der Sondenposition durch die vorhandenen Sichtfenster zu ermöglichen. Da ein größeres Messvolumen eine größere Anzahl an Streupartikel enthält, konnten auf diese Weise eine gute Signalstärke und gute SNR-Werte erreicht werden. In stärker turbulenten Bereichen, wie beispielsweise im Leebereich der Modelldünen, konnten schwächere SNR-Werte und Korrelation teilweise trotz einer Anpassung der Konfigurationsparameter nicht verbessert werden. Die Qualität dieser Daten ist dennoch immer noch ausreichend gut.

Eine Übersicht über die gewählten Parameter bietet Tabelle 1. Für weiterführende Informationen zu möglichen Konfigurationen und deren Auswirkung auf die Datenerfassung sei auf die Leitfäden von Nortek, z. B. Nortek (2018), sowie auf die "BAWEmpfehlungen zu Messungen mit dem Vectrino" von Sokoray-Varga und Höger (2014) hingewiesen.

Tabelle 1: Überblick über gewählten Konfigurationsparameter der ADV-Sonden

	TriPrelim	FloodSF		EbbSF
	Vectrino Profiler	Vectrino	Vectrino Profiler	Vectrino Profiler
Messfrequenz [Hz]	10	100	100	100
Nominaler Geschwindigkeitsber. (NVR) [m/s]	var.	2,5	1	var.
Länge des ausges. Pulses (transmit length) [mm]	4	1,8	4	4
Ping Algorithmus [-]	var.	var.	var.	var.
Größe des Messvolumens [mm]	30	7	4	4
Anzahl der Messlayer [-]	8	1	8/1	1
Größe des Messlayers [mm]	4	7	-	-
Abstand zum Messvol. (blanking distance) [cm]	4	5	4/5/6	4/5
Sendeleistung (power level) [-]	high	high	high	high

3.2.4 Datenorganisation

Die Strömungsmessungen können von der durch Nortek bereitgestellten Software sowohl in Echtzeit visualisiert und als Datei für die anschließende Auswertung abgespeichert werden. Die Messungen wurden so organisiert, dass für jede gemessene Position eine eigene Datei mit den

Messdaten erstellt wurde. Die Messdatei enthält neben den Strömungszeitreihen u. a. Angaben zur Messdauer, zum Start- und Endzeitpunkt der Messung sowie Kennwerte wie SNR und Korrelation, stellt allerdings keine Informationen zur Position der Messung bereit. Um die nachträgliche Zuordnung der Daten zur Mesposition sicherzustellen, befinden sich die Angaben zur Längs-, Quer- und Höhenposition der jeweiligen Messung im Dateinamen der Messdatei. Zusätzlich sind der Wasserstand und die gewählte Propellerantriebsleistung in der Dateibezeichnung angegeben. Bei einer Durchführung von Messung und Wiederholungsmessung an identischen Positionen sind im Dateinamen des Weiteren die Erstmessung und Zweitmessung gekennzeichnet. Meist folgt bei im Dateinamen auf die benutzerdefinierte Bezeichnung eine sondenspezifische, von Nortek vergebene Zahlen- oder Buchstabenkombination, die beim Zugriff auf den Dateinamen unberücksichtigt blieb. Die Bedeutung der einzelnen Dateinamenbestandteile ist in Bild 17 veranschaulicht. Der Datensatz für die Versuchsreihe am skalierten Dünenmodell der Variante EbbSF wird unter <https://doi.org/10.48437/02.2021.K.9900.0001> (Carstensen 2021) bereitgestellt (vgl. Abschnitt 5.3).

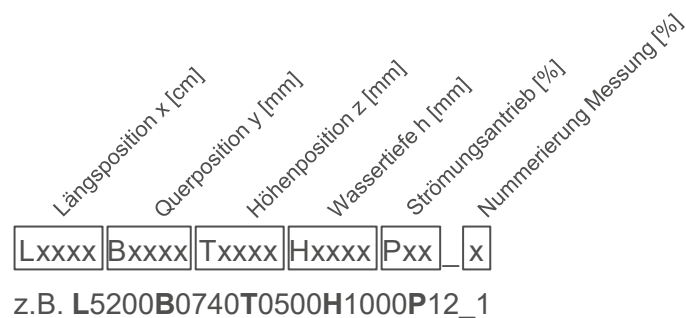


Bild 17: Benennung der Messdateien

3.2.5 Erforderliche Messdauer

Die Länge der Versuchsdauer ist so zu wählen, dass die auftretenden charakteristischen Geschwindigkeitsfluktuationen und somit im Fokus stehende Turbulenzprozesse innerhalb des Messzeitraums vollständig erfasst werden. Für die Vorversuche an der Dreiecksdüne TriPrelim und die Versuche an der Dünenvariante FloodSF wurde ein Messzeitraum von 120 s gewählt, mit dem die Prozesse in den Bereichen mit durchschnittlicher Turbulenz ausreichend abgebildet werden konnten. Für den stärker turbulenten Leebereich der Dünen zeigte sich, dass ein längerer Messzeitraum die dort ablaufenden Prozesse möglicherweise genauer abbilden würde. Vor diesem Hintergrund wurde für die Dünenvariante EbbSF in zusätzlichen Vorversuchen der Einfluss der Versuchsdauer im Bereich der Leeböschung untersucht. Vor allem im sohl- und böschungsnahen Leebereich der Düne sind die größten Turbulenzen sowie ausgeprägte Geschwindigkeitsfluktuationen zu erwarten. Daher galt es insbesondere für Messungen in diesem Bereich, einen ausreichend langen Messzeitraum zu ermitteln.

Zu diesem Zwecke wurden Messungen an der Rinnenlängsposition $x = 53,05$ m im unmittelbaren Leebereich der Düne an drei Höhenpositionen über der Sohle ($z = 10$ cm, $z = 30$ cm und $z = 50$ cm) Strömungsmessungen durchgeführt. Die Höhe der Dünenböschung betrug an dieser Stelle 5 cm über der Sohle, sodass die Messposition sich in 5 cm, 25 cm und 45 cm Abstand zur

Dünenböschung befanden. Es wurden jeweils eine Messung sowie eine Wiederholungsmessung mit einer Messdauer von 15 Minuten vorgenommen. Die Messfrequenz der eingesetzten *Vectrino Profiler*-Sonde betrug 100 Hz, die Höhe des Messvolumens entsprach 4 mm.

Die gemessenen Zeitreihen zeigten keine auffälligen Strukturen oder Trends über den gemessenen Zeitraum. Zur Beurteilung der erforderlichen Messdauer wurden daher die Komponenten der Strömungsgeschwindigkeiten anhand von sogenannten Boxplots betrachtet. Bild 18 zeigt die Auswertung der Zeitreihen mit Boxplots. Ein Boxplot der Zeitreihe zeigt in diesem Fall

- den Median der Zeitreihe anhand einer roten Markierung,
- das untere und oberer Quartil anhand der Größe des Kastens,
- in etwa die größten und kleinsten Werte der Zeitreihe anhand der sogenannten Whisker,

wobei innerhalb des Bereichs zwischen dem Ende des oberen Whiskers und des unteren Whiskers in diesem Fall etwa 99,3 % der Daten enthalten sind. Übrige Daten werden als Ausreißer betrachtet, sind aber hier nicht dargestellt. Exemplarisch für alle Strömungskomponenten werden nachfolgend die Auswertungen der x-Komponente gezeigt. Die beschriebenen Ergebnisse konnten auch für die gemessenen y- und z-Strömungskomponenten festgestellt werden und spiegeln sich auch in den Wiederholungsmessungen wider.

In Bild 18 sind Boxplots für die Zeitreihen der x-Geschwindigkeit über eine Messdauer von 1 min, 2 min, 3 min usw. bis 15 min dargestellt. Die Messposition befand sich in 10 cm über der Sohle bzw. 5 cm über der Düne. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass der Median des Datensatzes für die kurzen Analysezeiträume von 1 min und 2 min etwas kleiner ist sowie die Kästen im Vergleich zu den längeren Messzeiträumen etwas weiter unten platziert sind. Auch die Ausdehnung und Position der Whisker weicht von den übrigen Boxplots ab. Ab einer Länge von 3 Minuten hingegen ähneln sich die Mediane, die unteren und oberen Quartile sowie die Wertebereich der Datensätze (s. rot markierter Bereich in Bild 18).

In einer größeren Entfernung zur Sohle bzw. Modelldüne von 30 cm bzw. 25 cm zeigt sich, dass durchschnittlich nach 2 min bereits nur noch kleine Schwankungen des Medians in Abhängigkeit des Auswertezeitraums festzustellen sind. In Bild 19 zeigt, dass ab einer Messdauer von 2 min keine gravierenden Unterschiede in Bezug auf die durch den Boxplot dargestellten Kennwerte mehr festzustellen sind. Die Mediane der Zeitreihen unterscheiden sich bereits nach 1 min Auswertezeitraum kaum voneinander, lediglich der Wertebereich weicht nach 1 min Auswertezeitraum noch von dem der längeren Datensätze ab.

Für die in einer Höhe über der Sohle von $z = 50$ cm gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sind für Analysezeiträume größer als 1 min kaum mehr Unterschiede in Bezug auf Median, Quartile sowie den Wertebereich des Datensatzes in Abhängigkeit des Analysezeitraums festzustellen, wie aus Bild 20 ersichtlich wird.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde für die Versuchsdurchführung an der Variante EbbSF Folgendes festgelegt: Für Messungen im unmittelbaren Leebereich der Düne, in dem die größten Geschwindigkeitsfluktuationen auftreten, werden bis zu einer Höhe von $z = 30$ cm über der Sohle die Geschwindigkeitsmessungen über einen Zeitraum von 4 min durchgeführt. Mit zunehmendem Abstand zum Dünenkamm wird die Höhe, bis in die eine 4-minütige Messungen vorgenommen wird, verringert auf zunächst $z = 25$ cm und anschließend $z = 20$ cm. In den übrigen, weniger

turbulenten Bereichen wurde eine Messdauer von 2 min für die Auswertung des zu betrachtenden Prozesses als ausreichend bewertet. Auch im Luvbereich der Düne wird als ausreichende Messdauer ein Zeitraum von 2 min bestimmt. Die für die Vorversuche an TriPrelim und die Versuche am Modell FloodSF gewählten 120 s sind für die Berechnung von Mittelwerten ausreichend.

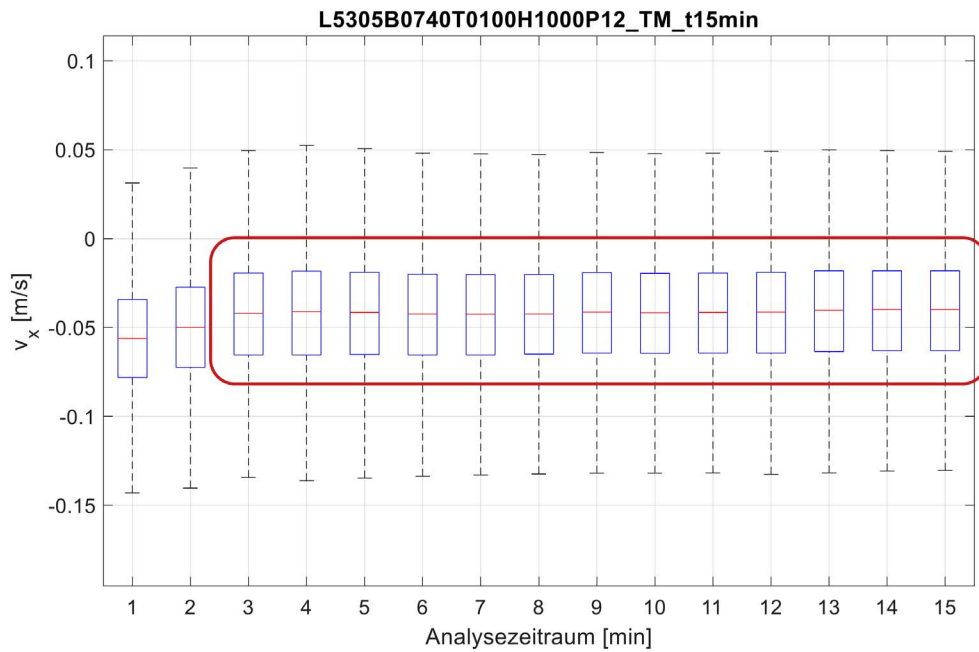


Bild 18: *Boxplot der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung in Abhängigkeit des Auswertzeitraums in $z = 10$ cm Höhe über Sohle bzw. 5 cm über Dünenböschung (EbbSF)*

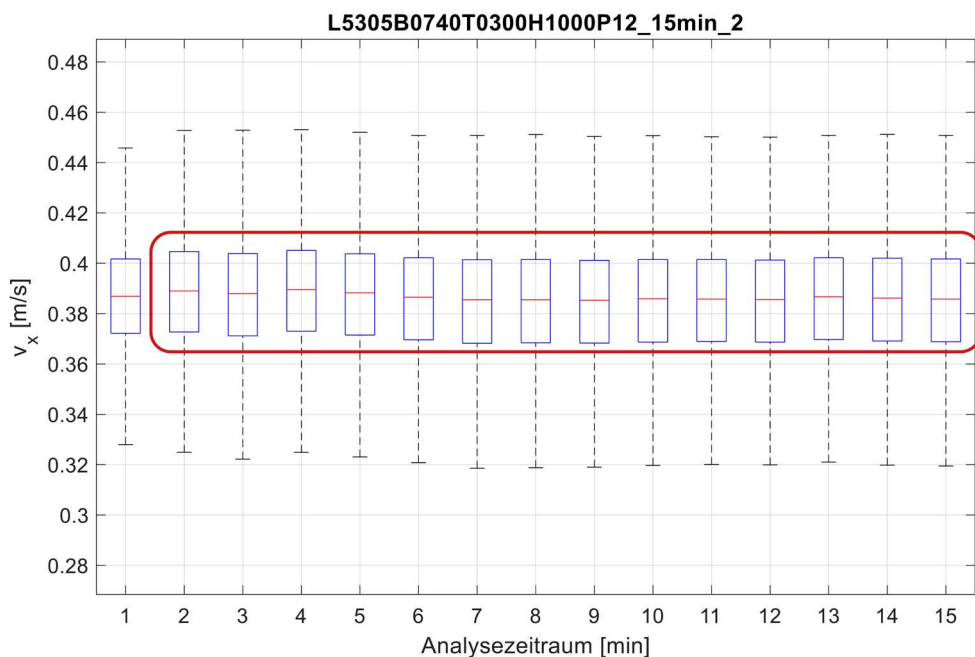


Bild 19: *Boxplot der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung in Abhängigkeit des Auswertzeitraums in $z = 30$ cm Höhe über Sohle bzw. 5 cm über Dünenböschung (EbbSF)*

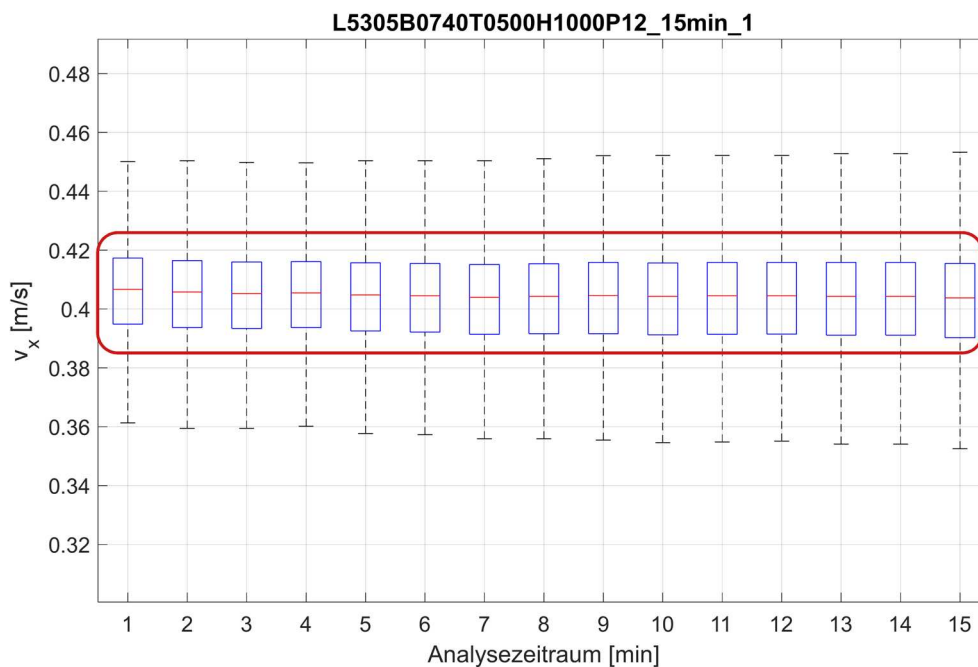


Bild 20: Boxplot der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung in Abhängigkeit des Auswertzeitraums in $z = 50$ cm Höhe über Sohle bzw. 5 cm über Dünenböschung (EbbSF)

3.3 Analyse der Strömungsdaten

Die mit der *Vectrino*- und *Vectrino Profiler*-Sonde gemessenen Strömungsdaten werden durch die von *Nortek* bereitgestellte Software als Datei im Binärformat aufgezeichnet und abgespeichert. Anschließend können die erfassten Daten mit einem hierfür bereitgestellten Modul in ein ASCII-Format konvertiert werden, die *Vectrino Profiler* Software ermöglicht darüber hinaus eine Konvertierung in ein MATLAB-Datenformat. Die aufgezeichneten Daten enthalten neben den Strömungsgeschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung u. a. auch die Werte für Korrelation und SNR sowie die gewählten Konfigurationsoptionen.

Die weiteren Bearbeitungsschritte der Daten erfolgte für beide Sonden mittels der Software MATLAB. Hierfür wurden eigene Skripte geschrieben, mit denen u. a. das Einlesen, verschiedene Analysen sowie die Datenvisualisierung durchgeführt wurden (s. Abschnitt 3.3.1).

Ein wichtiger Schritt bei der Nachbereitung von ADV-Strömungsdaten ist eine Fehlerfilterung der Rohdaten, bei denen wenig belastbare Werte mit niedrigen SNR- und Korrelationswerten sowie vor allem Ausreißer in den Zeitreihen identifiziert und entfernt werden. Für das Entfernen von Ausreißern stehen mehrere Ansätze zur Verfügung, von denen die *Phase-Space Thresholding Method* nach Goring und Nikora (2002) im Rahmen der Datenauswertung Verwendung fand und in Abschnitt 3.3.2 erläutert wird.

3.3.1 Aufbereitung der Daten mittels MATLAB

Zur Analyse der mit den ADV-Sonden erfassten Daten wurde die Software MATLAB verwendet. Mithilfe der entwickelten Routinen sind zum einen die Rohdaten der gemessenen

Geschwindigkeiten sowie wichtige Kennwerte wie z. B. SNR und Korrelation aus den gemessenen Datensätzen abrufbar, zum anderen wurden Methoden zur Durchführung verschiedener Aufarbeitungsschritte sowie zur Berechnung von statistischen Kennwerten implementiert. Eine graphische Darstellung der Rohdaten wie auch der prozessierten Daten und verschiedener berechneten Parameter erfolgt ebenfalls mit MATLAB.

Die in MATLAB durchgeführten Bearbeitungsschritte lassen sich in die folgenden Gruppen einteilen:

- (i) die Umwandlung der Daten in eine MATLAB-kompatible Datenstruktur sowie das Einlesen der Daten mit einer Zuordnung der Messposition anhand des Dateinamens (vgl. Abschnitt 3.2.4),
- (ii) die Entfernung der Ausreißer aus den Daten mit der *Phase-Space Thresholding Method* nach Goring und Nikora (2002) (s. Abschnitt 3.3.2),
- (iii) die Berechnung von statistischen Kennwerten wie beispielsweise Median oder Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der Geschwindigkeiten sowie der Turbulenten Kinetischen Energie (TKE),
- (iv) die graphische Darstellung von Geschwindigkeiten oder berechneten Kennwerten.

Neben der Veranschaulichung der gemessenen Prozesse konnte anhand der visualisierten Daten die Wirksamkeit der Filtermethode bezüglich der Qualitätssicherung kontrolliert und ggf. weitere Bearbeitungsschritte unternommen werden. Zum anderen ermöglichte die graphische Darstellung die Identifizierung von abweichenden Messungen, welche nicht auf eine physikalische Ursache, sondern auf Messfehler oder Fehler bei der Versuchsdurchführung zurückzuführen sein könnten.

Die Erfahrungen aus der Analyse der Vorversuche zeigten, dass die für ADV-Daten wichtige Qualitätssicherung durch die Anwendung der *Phase-Space Thresholding Method* ausreichte und keine weitere Fehlerfilterung erforderlich war. Eine zusätzliche Filterung der Daten nach SNR- und Korrelationswerten bewirkte keine weitere Verbesserung der Daten, da durch das Anwenden der *Phase-Space Thresholding Method* bereits Messdaten mit niedriger Korrelation und SNR aus dem Datensatz entfernt wurden.

3.3.2 Despiking mit der Phase-Space Thresholding Method

Die mit einer ADV-Sonde erfassten Rohdaten enthalten oftmals Ausreißer, bei denen es sich um fehlerhafte Daten handeln kann. Nach Goring und Nikora (2002) setzt sich das Entfernen von Ausreißern aus ADV-Rohdaten aus zwei Schritten zusammen: Zunächst sind die Ausreißer als solche zu identifizieren (und nicht zu verwechseln mit natürlichen Schwankungen der turbulenten Strömung), anschließend sind die Ausreißer zu entfernen. Goring und Nikora (2002) beschreiben verschiedene Methoden zur Identifizierung von Ausreißern. Eine der gängigsten Anwendungen ist hiervon die *Phase-Space Thresholding Method* (Sokoray-Varga und Höger 2014). Bei dieser Methode wird ein sogenannter Phasenraum (*phase-space*) definiert, der durch die Strömungsgeschwindigkeit u [cm/s] sowie die erste Ableitung der Geschwindigkeit Δu [cm/s²] und die zweite Ableitung der Geschwindigkeit $\Delta^2 u$ [cm/s³] beschrieben wird. Die Geschwindigkeitswerte ordnen

sich innerhalb dieses Phasenraumes in Form eines Ellipsoids an, wobei sich innerhalb des Ellipsoids qualitativ gute Messwerte befinden und Ausreißer außerhalb des Ellipsoids auftreten. Die Größe des Ellipsoids stellt demnach den Filtergrenzwert dar. In mehreren Iterationsschritten werden die als Ausreißer detektierten Datenpunkte aus der Zeitreihe entfernt. Vor der Anwendung der Filtermethode ist der Mittelwert der Messdaten aus dem Messsignal zu entfernen. Auf Daten, die eine langperiodische Schwingung enthalten, ist ein Hochpassfilter anzuwenden.

Für weiteren Analysen ist es oftmals erforderlich, die durch die Entfernung von Datenpunkten entstandenen Lücken in der Zeitreihe durch interpolierte Daten zu schließen. Nach Goring und Nikora (2002) sind zur Ersetzung von entfernten Datenpunkten verschiedene Ansätze möglich. Für die im Rahmen der Laborversuche gefilterten Zeitreihen wurden entfernte Ausreißer durch die Anwendung eines gleitenden Medians, welcher über ein Fenster von in der Regel 30 Datenwerten um den zu interpolierenden Datenpunkt gebildet wurde (s. Bild 21), ersetzt.

Für tiefergehenden Erläuterungen bezüglich der Methoden zur Entfernung und zum Ersatz von Ausreißern aus ADV-Daten siehe Goring und Nikora (2002).

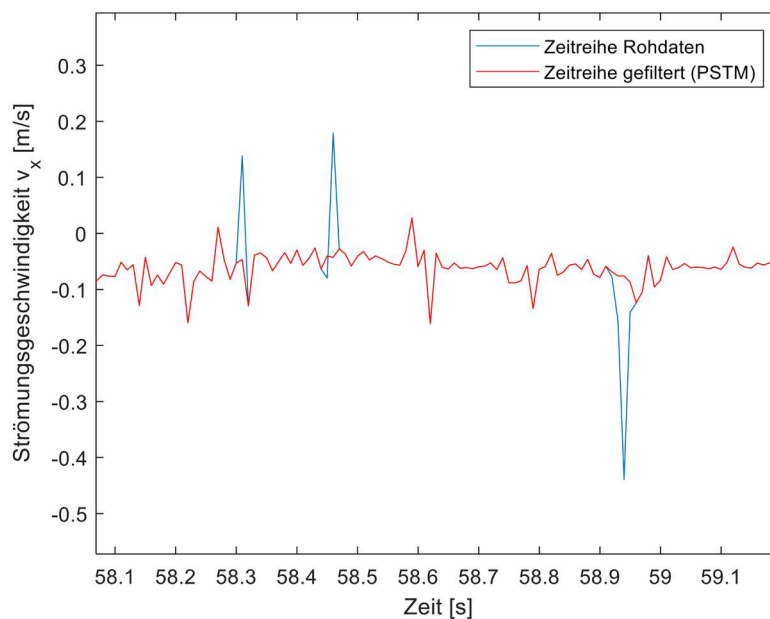


Bild 21: Exemplarischer Ausschnitt einer ungefilterten Geschwindigkeitszeitreihe (blau) und Zeitreihe nach Filterung und Ersatz der Ausreißer anhand gleitenden Medians (rot)

4 Untersuchungskonzept

In den Laborversuchen zur Untersuchung der Strömungs- und Turbulenzprozesse über Dünen wurden abstrahierte Modellkörper eingesetzt. Das für die Voruntersuchungen eingesetzte Modell ist eine vereinfachte, asymmetrische Düne ohne direkten Bezug zu einer natürlich vorkommenden Form. Die Geometrie und die Abmessungen der für die anschließenden Versuche eingesetzten Modelldünen wurden hingegen an in der Weser vorkommende Dünen angelehnt und unter der Anwendung des Froude'schen Modellgesetzes im Maßstab 1:10 in Modellgrößen umgerechnet.

Alle Versuchsreihen wurden unter einer unidirektionalen Strömung und einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit sowie einem gleichbleibenden Wasserstand durchgeführt.

Im Folgenden werden die Hintergründe zur Wahl der jeweiligen Modelldünen sowie der Zusammenhang zwischen den Modell- und Naturgrößen der Dünenabmessungen und der hydraulischen Parameter beschrieben. Zudem wird ein Überblick über die gewählten Abmessungen der eingesetzten Modelldünen gegeben, das Versuchsprogramm beschrieben sowie die Verteilung der Messpositionen über der jeweiligen Modelldüne dargestellt.

4.1 Froude'sches Modellgesetz und Maßstabeffekte

Aufgrund der vorhandenen Abmessungen der Versuchseinrichtung und den somit begrenzten Platzverhältnissen ist es nicht möglich, die zu untersuchenden Bodenformen in ihrer Naturgröße, d. h. im Maßstab 1:1, nachzubilden. Die Abmessungen der abzubildenden Düne wie auch die hydraulischen Parameter sind daher mit einem Maßstab umzurechnen. Eine geometrische und kinematische Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell kann durch die Verwendung eines Maßstabsfaktors, der für Längengrößen und zeitliche Abläufe gilt, erfüllt werden. Eine Einhaltung der dynamischen Ähnlichkeit, d. h. der Ähnlichkeit zwischen den in der Natur und im Modell auftretenden Kräften, ist bei skalierten Modellen nicht gegeben.

Um dennoch die dynamische Ähnlichkeit wenigstens teilweise zu erfüllen, werden Ähnlichkeits- bzw. Modellgesetze herangezogen. Bei der Anwendung dieser Gesetze werden die Trägheitskraft sowie eine weitere Kraft, die den zu untersuchenden Prozesse maßgeblich beeinflusst, berücksichtigt. Zur Festlegung des anzuwendenden Gesetzes ist daher im Vorfeld zu entscheiden, welche (neben der Trägheitskraft) weitere Kraft für den zu betrachtenden Prozess wichtig ist und somit berücksichtigt werden muss.

Bei den Untersuchungen an Modelldünen handelt es sich um Versuche in einem offenen Gerinnemodell. Für diese Modelle mit Strömungen mit freier Wasserspiegeloberfläche sind Massen- und Schwerkrafteinflüsse von Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wurde für die Versuche an den Modelldünen die Skalierung der geometrischen und hydrodynamischen Größen anhand des Froude'schen Modellgesetzes vorgenommen. Zur Wahrung der Naturähnlichkeit ist hierbei das Verhältnis von Trägheitskräften F_T zu Schwerkraften F_G in Natur und Modell gleich zu halten,

$\frac{F_T}{F_G} = 1$. Die Froude-Zahl

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{h \cdot g}} \quad (4.1)$$

mit

v : Strömungsgeschwindigkeit [m/s],

h : Wassertiefe [m],

g : Erdbeschleunigung [m²/s],

nimmt daher im Modell den gleichen Wert an wie in der Natur. Durch die Wahl der Froude'schen Modellähnlichkeit werden andere, dennoch wirkende Kräfte vernachlässigt. Die dadurch

entstehenden Maßstabeffekte können bei der Übertragung von Ergebnissen aus dem Modell- in den Naturmaßstab zu Abweichungen führen.

Auch die bei Turbulenzprozessen wichtigen viskosen Kräfte können bei Anwendung des Froude'schen Modellgesetzes in Natur und Modell nicht identisch sein. Das Verhältnis von Reibungs- zur Trägheitskräften wird durch die Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad (4.2)$$

mit

ρ : Dichte des Wassers [kg/m^3],

v : Strömungsgeschwindigkeit [m/s],

d : charakteristische Länge, hier: Wassertiefe [m],

η : dynamische Viskosität [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$],

beschrieben. Die Reynoldszahl gibt Aufschluss darüber, ob es sich bei der Strömung um eine laminare ($Re < 500$, offene Gerinneströmung) oder turbulente Strömung ($Re > 500$, offene Gerinneströmung) handelt. Die Reynoldszahl im hier untersuchten skalierten Modell beträgt $Re \approx 3 \cdot 10^4$ bei mittleren Fließgeschwindigkeiten von $v_m = 0,3 \text{ m/s}$ und einer Wassertiefe von $h = 1 \text{ m}$, die Strömung ist demnach voll turbulent.

Vor dem Hintergrund der hohen herrschenden Reynoldszahl – und somit einer sowohl im Modell als auch in der Natur vorhandenen voll ausgeprägten turbulenten Strömung – sind Maßstabeffekte in Bezug auf die Skalierung der Trägheitskräfte als vernachlässigbar anzunehmen und mit der Anwendung des Froude'schen Modellgesetzes eine ausreichende hydrodynamische Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell gegeben.

4.2 Dünen und hydrodynamischen Parameter in der Weser

Anhand von Peildaten der Wesersohle zwischen Weser-km 0 bei Bremen und Weser-km 111 in der Außenweser, die über mehrere Jahre aufgenommen wurden, konnten Lefebvre et al. (2020) die Verteilung, Morphologie und Dynamik von in der Weser vorkommenden Bodenformen analysieren. Lefebvre et al. (2020) ermittelten dabei u. a. die Dünenlängen und -höhen, die Ausrichtung der Dünen (flutstrom- oder ebbstromorientiert), die mittleren und maximalen Böschungswinkel der Lee flanken sowie insbesondere das Vorhandensein und die Position und Länge einer *Slip Face*-Böschung. Als *Slip Face* wurden in diesem Fall Böschungsabschnitte mit einem Neigungswinkel $> 15^\circ$ definiert.

Die Auswertung ergab, dass mit Ausnahme eines größeren Abschnitts zwischen Weser-km 55 und 75 entlang des überwiegenden Teils der untersuchten Strecke Bodenformen vorzufinden waren. Über den analysierten Zeitraum von fünf Jahren sowie über den betrachteten Weserabschnitt variierten die Bodenformhöhen zwischen 0,3 m und 1,6 m, die Bodenformlängen betragen zwischen 20 m und 60 m. Die Abmessungen und auch Orientierung der Bodenformen veränderte sich zudem mit den schwankenden, jahreszeitlich bedingten Abflussverhältnissen in der Weser. Bei

hohen Oberstromzuflüssen im Winter und Frühling waren die Bodenformen steiler und von größerer Länge. Die Ebbstromgeschwindigkeiten waren in diesem Zeitraum höher, sodass die Bodenformen ebbstrom-orientiert waren und meistens einen sogenannten *Ebb Slip Face* und keinen *Flood Slip Face* besaßen (s. Bild 22). In den Sommer- und Herbstmonaten hingegen gab es sowohl flutstrom-orientierte Bodenformen mit einem *Flood Slip Face* (Weser-km 15 bis 30) als auch ebbstrom-orientierte Bodenformen weiter stromabwärts (Weser km 30 bis 55), die überwiegend einen *Ebb Slip Face*, aber teilweise auch einen *Flood Slip Face* besaßen.

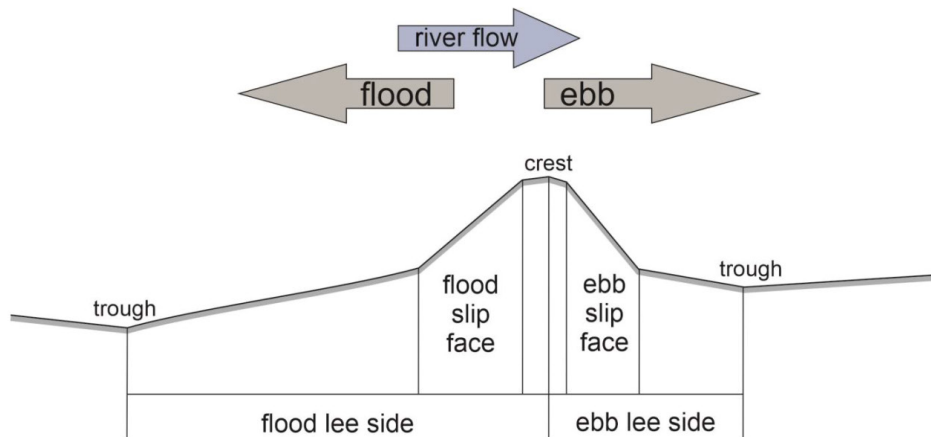


Bild 22: Schematische Darstellung einer ebbstrom-gerichteten Düne mit Begrifflichkeiten (Lefebvre et al. 2020)

Für die hier beschriebenen Laboruntersuchungen im physikalischen Modell wurden in der Weser vorkommende Dünengeometrien und typische Dünenabmessungen nachgebildet. In Bild 23 sind die Analyseergebnisse von Lefebvre et al. (2020) gemittelt über den Zeitraum 2009 bis 2011 in graphischer Form veranschaulicht. Für die skalierten Laborversuche wurden zwei zwischen Weser-km 25 und 55 vorkommende Dünentypen ausgewählt: (i) eine ebbstrom-orientierte Düne mit einem *Flood Slip Face* sowie (ii) eine ebbstrom-orientierte Düne mit einem *Ebb Slip Face* (s. Bild 24).

Ebbstrom-orientierte Dünen mit einem *Flood Slip Face* traten zwischen den ungefähren Weser-km 25 und 35 sowie zwischen Weser-km 45 und 50 auf (s. Bild 23, grün markierter Bereich) und waren mit einem Anteil von 10 % im betrachteten Weserabschnitt nicht so häufig vertreten wie ebbstrom-orientierte Dünen mit einem *Ebb Slip Face*, die mit einem Anteil von rund 20 % bis knapp über 50 % und über den gesamten betrachteten km-Bereich vorzufinden waren. Die Höhen beider Dünentypen lagen in einem Bereich zwischen 1 m und 2 m, die Dünenlängen betragen von rund 30 m und bis zu 50-60 m weiter stromabwärts bei Weser-km 50 bis 52. Die mittlere Böschungsneigung der ebbstrom-orientierten Dünen betrug 5° - 8° auf der steileren und 3° - 5° auf der flacheren Dünenflanke. Die Spanne der Abmessungen und Böschungswinkel der zwei betrachteten Dünentypen sind in Tabelle 2 zur Übersicht zusammengefasst.

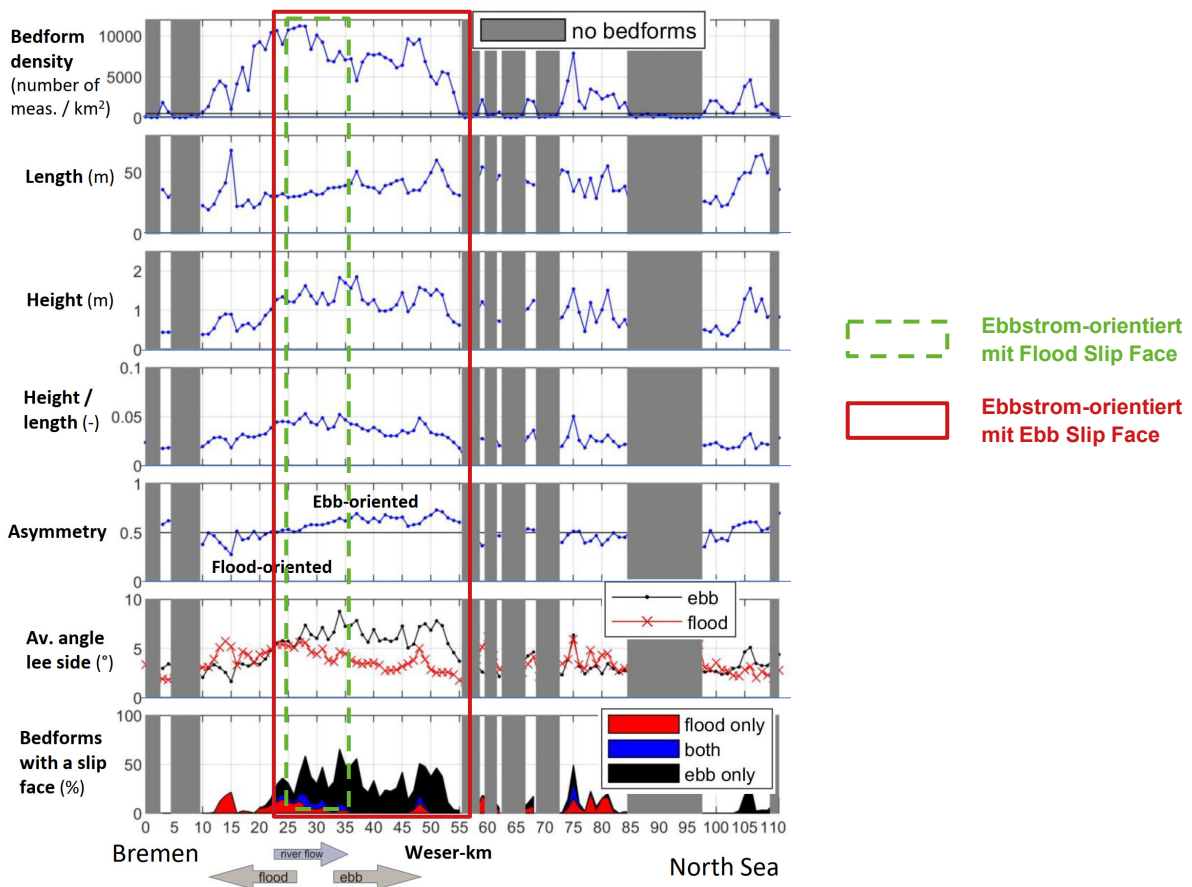


Bild 23: Übersicht über Vorkommen, Abmessungen und Orientierung der Weserdünen gemittelt über den Zeitraum 2009 bis 2011 (verändert nach Lefebvre et al. 2020), grün und rot markiert: Abmessungen und Geometrien als Vorbild für Modell

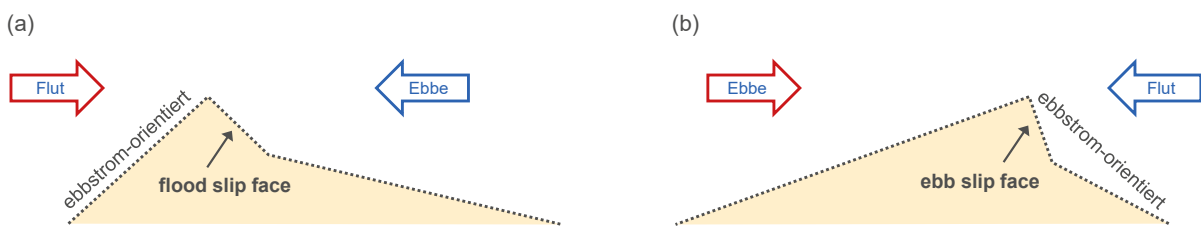


Bild 24: Für Laborversuche gewählte Dünentypen: (a) Ebbstrom-orientierte Düne mit Flood Slip Face, (b) Ebbstrom-orientierte Düne mit Ebb Slip Face

Tabelle 2: Überblick über Abmessungen und Böschungswinkel der repräsentativen Weserdünen für Laborversuche

	Ebb-orientierte Düne mit <i>Flood Slip Face</i>	Ebb-orientierte Düne mit <i>Ebb Slip Face</i>
Länge	25 - 40 m	25 - 60 m
Höhe	1,2 - 1,8 m	1,2 - 1,8 m
Seitenverhältnis H/L	0,04 - 0,05	0,02 - 0,05
Durchschnittlicher Leewinkel	5° - 8°	5° - 8°
Durchschnittlicher Luvwinkel	2° - 5°	2° - 5°

Auf Basis der Ergebnisse der durch Lefebvre et al. (2020) durchgeführten Analyse wurden für die zwei Dünentypen (i) und (ii) jeweils Abmessungen und Böschungswinkel aus dem festgestellten Wertebereich ausgewählt, die repräsentativ gelten und unter Berücksichtigung von Limitierungen und Randbedingungen, die die Versuchseinrichtung vorgibt, mit einem Maßstabsfaktor von 10 nach dem Froude'schen Modellgesetz in Modellgrößen umgerechnet (vgl. Abschnitt 4.1). Einen Überblick über die für das Modell gewählten Abmessungen im Modellmaßstab werden in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 gegeben.

Für die Festlegung der hydrodynamischen Randbedingungen im Modell wurden aus dem Bereich Rechtenfleth (Weser-km 47) (i) zur Beurteilung lokaler Wassertiefen Wasserstandsdaten der dort befindlichen Messtation in Kombination mit einem Digitalen Geländemodell (DGM) aus dem Jahr 2012 betrachtet sowie (ii) zur Einschätzung realistischer Strömungsgeschwindigkeiten Daten aus ADCP-Strömungsmessungen aus den Jahren 2009 bis 2011 (BAW 2016) herangezogen. Gemäß der Analyse von Lefebvre et al. (2020) sind im Bereich des Weser-km 47 die zu untersuchenden Dünentypen vorzufinden. In diesem Bereich unterliegt die Weser dem Einfluss der Gezeiten, sodass eine bidirektionale und instationäre Strömung herrscht. Für die Modelluntersuchungen wurde diese Dynamik nicht abgebildet und vereinfachend eine stationäre, unidirektionale Strömung generiert. Zudem ist nicht vorgesehen, Naturgrößen exakt abzubilden, sondern realistischer Parameter zu finden, die eine typische Größenordnung der Naturwerte darstellen.

Die im Jahr 2009, 2010 und 2011 gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich Rechtenfleth zeigen, dass die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in einem Bereich von ca. 0,7 m/s bis 0,8 m/s lagen und die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten ca. 0,9 m/s bis 1 m/s betragen (s. Bild 25). Gemäß der Gewässerdaten des Gewässerkundlichen Informationssystems der WSV (WSV 2020) betragen im Zeitraum vom 01.11.2005 - 31.10.2015 das Mittlere Tidehochwasser MThw 7,04 m bzw. 2,04 müNHN und das Mittlere Tideniedrigwasser MTnw 3,09 m bzw. - 1,91 m üNHN (Pegelnulldpunkt -5,0 m müNHN). Laut DGM von 2012 (inphoris GmbH und smile consult GmbH 2014) befanden sich die Dünentäler im Bereich Rechtenfleth auf einem Niveau von ca. - 15 müNHN bis - 13 müNHN (s. Bild 26c). Die lokalen Wassertiefen variieren demnach je nach

Position und je nach Tide zwischen ca. 11 müNHN und 17 müNHN, womit eine durchschnittliche Wassertiefe von rund 14 m herrscht.

Als für die Laborversuche konstanten hydrodynamischen Parameter wurden repräsentativ eine lokale Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s gewählt (Modell: ca. 0,3 m/s), welche der in der Natur gemessenen maximalen Ebbstromgeschwindigkeit entspricht und etwas höher als die maximal gemessenen Flutstromgeschwindigkeiten ist. Da die festgestellte durchschnittliche Wassertiefe von 14 m im gewählten Maßstab von 1:10 einer Modellwassertiefe von 1,4 m entspricht und dieser Wasserstand in der Versuchsrinne nicht umsetzbar ist (max. Füllstand: 1,3 m), wurde für die Laborversuche eine etwas geringere lokale Wassertiefe von 10 m im Naturmaßstab und folglich 1 m im Modellmaßstab festgelegt.

Ziel der Laborversuche ist in erster Linie eine qualitative Betrachtung von Prozessen unter Randbedingungen, die an eine reale Situation angelehnt sind. Vor diesem Hintergrund sind die geringen Abweichungen zwischen den natürlichen und der für das Modell gewählten hydrodynamischen Parameter vertretbar, da sich die heranzuziehenden Parameter innerhalb der Größenordnung von in der Weser beobachteten Werten befinden. Die für die jeweiligen Versuchsaufbauten umgesetzten hydrodynamischen Parameter im Natur- und Modellmaßstab werden im Abschnitt 4.3 nochmals aufgezeigt.

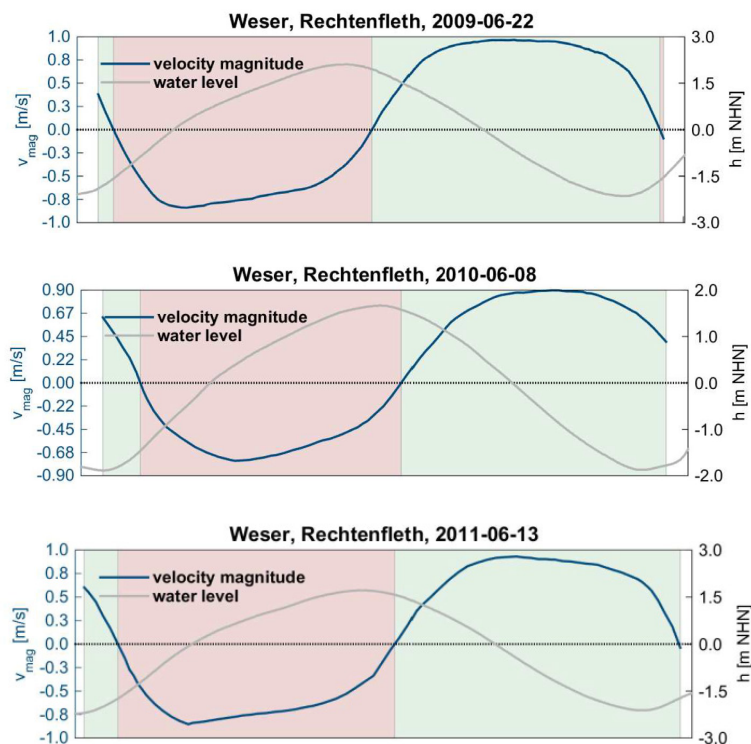


Bild 25: *Strömungsgeschwindigkeiten im Messquerschnitt Rechtenfleth (verändert nach BAW 2016)*

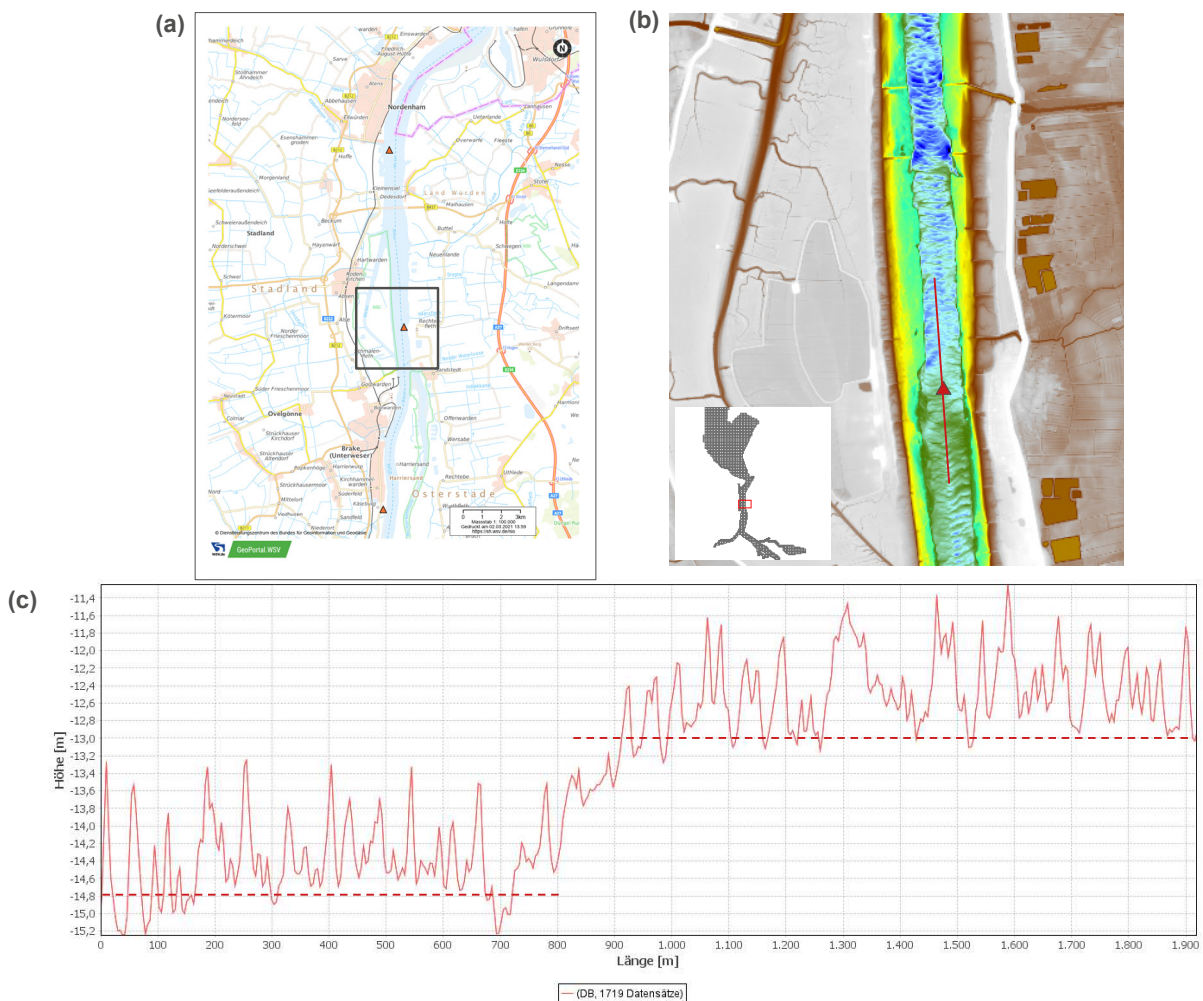


Bild 26: Abschätzung der lokalen Wassertiefe im Bereich Rechtenfleth: (a) Übersicht Position Rechtenfleth, (b) DGM und Kennzeichnung des analysierten Längsschnittes, (c) Längsschnitt durch Gewässersohle

4.3 Laboruntersuchungen mit Modelldünen

Im Vorfeld zu den Untersuchungen am skalierten Dünenmodell wurden Voruntersuchungen an einer nicht skalierten Dreiecksdüne (TriPrelim) durchgeführt (Abschnitt 4.3.1). Die anschließenden Untersuchungen am skalierten Dünenmodell erfolgten an einer ebbstrom-orientierten Düne mit *Flood Slip Face* (FloodSF) und an einer ebbstrom-orientierten Düne mit *Ebb Slip Face* (EbbSF).

Für alle Versuchsreihen wurden zweidimensionale, fixierte Modelldünen eingesetzt. Die Dünenböschungen wurden aus Riffelblech hergestellt, die zur gewünschten Geometrie durch Knicken bzw. konstruierte Winkel geformt wurden, wobei die einzelnen Böschungsabschnitte ungekrümmt blieben. Durch die Verwendung von Riffelblech wurde die natürliche Oberflächenrauheit natürlicher Dünen im Modell nicht nachgebildet.

Alle jeweiligen Versuchsdünen wurden im hinteren Bereich der Versuchsstrecke in die Strömungsrinne eingebaut. Dieser Bereich hatte sich in zuvor durchgeführten Untersuchungen als geeigneter Messbereich herausgestellt hat (s. Anlage Dokumentation zur Rinne, Kapitel 9.4.3). Je

nach Länge der Modelldüne erfolgte der Einbau mit der Anfangsposition $x = 50,80$ m für die Dünenvarianten FloodSF und EbbSF bzw. $x = 53,0$ m für die Vorversuche an TriPrelim und für alle Modelle mit der Endposition vor dem Sichtfenster bei $x = 53,80$ m. Die Dünen wurden zur Sicherung quer zur Rinne mittels einer Schraube fixiert.

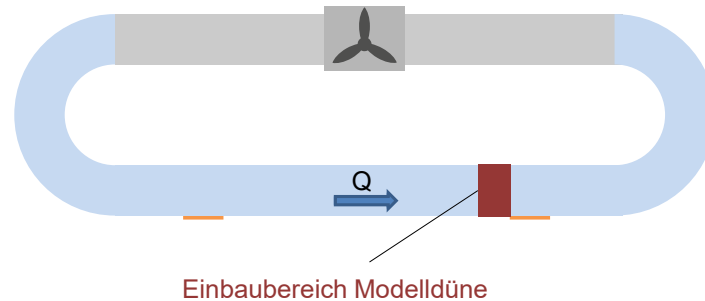


Bild 27: Einbaubereich der jeweiligen Modelldünen (schematische Darstellung, nicht maßstabsgetreu)

4.3.1 Voruntersuchungen an Dreiecksdüne (TriPrelim)

Zur Vorbereitung der skalierten Laborversuche wurden Voruntersuchungen an einer Düne mit einer einfachen Dreiecksgeometrie, flacher Luvböschung und steiler Leeböschung (Leewinkel 30°) durchgeführt. Die Geometrie der Modelldüne sowie die hydrodynamischen Randbedingungen sind nicht an ein in der Natur vorzufindendes Setup angelehnt. Sowohl die Abmessungen der Modelldüne als auch die Strömungsgeschwindigkeit sowie der Wasserstand sind nicht von Naturgrößen mit einem Maßstabsfaktor in Modellgrößen umgerechnet worden. Ziel der Vorversuche war es, bei der Erfassung grundlegender und bereits bekannter Prozesse während der Überströmung von Bodenformen zum einen die eingesetzte Messtechnik zu erproben und zum anderen anhand der Ergebnisse die vorgenommenen Einstellungen, wie bspw. die gewählten Messpositionen und die Messdauer, zu beurteilen und daraus optimale Randbedingungen für die weitere Versuchsdurchführung abzuleiten.

Die aus einem in Form geknicktem Riffelblech angefertigte (s. Bild 28) Modelldüne besaß Abmessungen von 80 cm in der Länge und 15 cm in der Höhe. Die Breite betrug der Rinnenbreite entsprechend 150 cm. Der Einbau der Düne in die Rinne erfolgte mit der längeren, flachen Seite der Strömung zugewandt (Luv) und mit der steilen Flanke in strömungsabgewandte Richtung (Lee). Die Modelldüne wurde im hinteren Abschnitt der Rinne zwischen Längsposition $x = 53,0$ m und $x = 53,80$ m eingebaut.

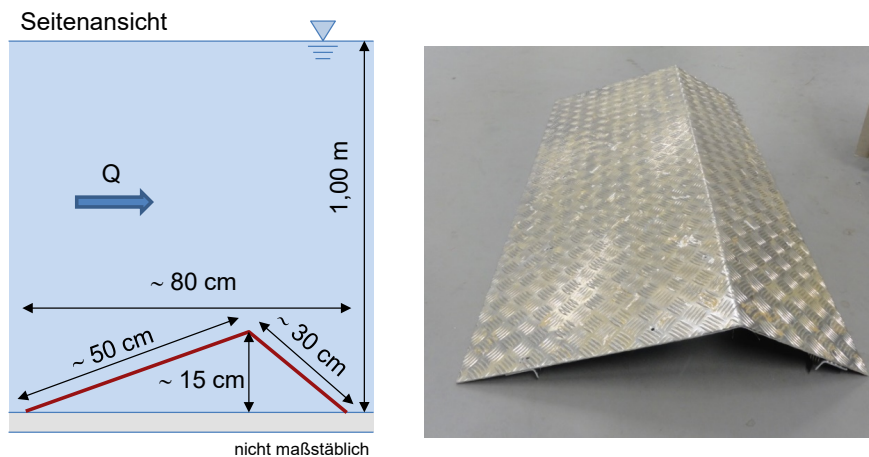


Bild 28: Abmessungen und Ansicht der nicht maßstäblichen Modelldüne TriPrelim

Für die Erfassung der Strömung wurde die *Vectrino Profiler*-Sonde verwendet. Die Messsonde wurde in Rinnenquerrichtung mittig positioniert und Einzelmessungen in unterschiedlichen Höhen über der Düne durch ein Verfahren der Sonde mithilfe der motorbetriebenen Vertikaltraverse durchgeführt. Die Messpositionen sind in Bild 29 veranschaulicht. Die Messungen wurden mit einer Messfrequenz von 10 Hz und mit einer Messdauer von 120 s je Messposition durchgeführt. Die Wassertiefe während der Versuche betrug $h = 1$ m, die generierte mittlere Strömungsgeschwindigkeit wurde nicht variiert und betrug 1 m/s.

Die Messungen wurden je Längsposition über die gesamte Wassertiefe, mit einem vertikalen Abstand von 5 cm zwischen zwei Messpositionen, vorgenommen. In Dünennähe sowie in Nähe zur Wasseroberfläche wurden die vertikalen Abstände zwischen zwei Positionen auf 3 cm verringert. Abweichend hiervon wurde für die Längspositionen $x = 54,1$ m, $x = 54,2$ m und $x = 54,3$ m die Strömung lediglich bis in eine Höhe von etwa 60 cm über der Sohle erfasst. Der horizontale Abstand zwischen den Messungen betrug 10 cm im Leebereich sowie kurz vor dem Dünenkamm, eine einzelne Zusatzmessung an Rinnenlängsposition 54,50 m ist im horizontalen Abstand von 5 cm zu den benachbarten Messpositionen durchgeführt worden. Zudem wurden vier weitere Messungen im Luvbereich sowie im Bereich stromabwärts der Düne mit 15 cm bis 25 cm zu den benachbarten Messpositionen vorgenommen.

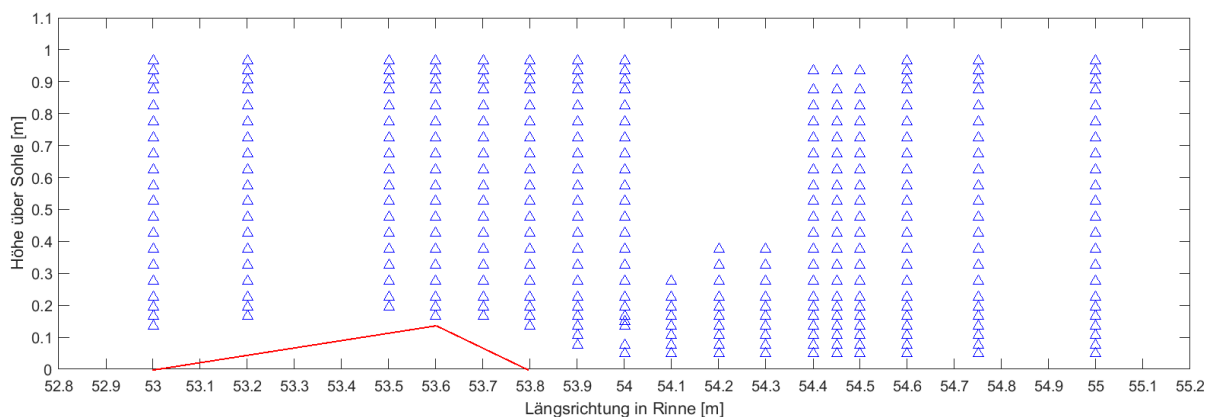


Bild 29: Positionen für Messungen an TriPrelim mit *Vectrino Profiler* (downlooking)

4.3.2 Untersuchungen an skaliertem Düne mit Flood Slip Face (FloodSF)

Für erste Untersuchungen hinsichtlich der Strömungs- und Turbulenzprozesse wurde eine Modelldüne eingesetzt, deren Geometrie sich an in der Weser beobachteten ebbstrom-orientierten Dünen mit *Flood Slip Face* orientiert (vgl. Abschnitt 4.2). Bild 30 zeigt eine schematische Darstellung des Längsschnittes der Modelldüne mit den Abmessungen im Modellmaßstab, in Bild 31 ist die von oben fotografierte, in die Laborrinne eingebaute Modelldüne zu sehen. Die gewählten Modellabmessungen und hydrodynamischen Parameter sowie die dazugehörigen Naturgrößen aus der Weser sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Anströmung der Düne erfolgt von der steileren Böschungsseite (Böschung ohne *Slip Face*), d. h. bei dem untersuchten Zustand handelt es sich um einen Zeitpunkt während der Flutphase. Der *Slip Face*-Winkel der Modelldüne wurde mit einer Neigung von 21° ausgebildet. Gemäß Ergebnissen aus vergangenen Studien (vgl. Abschnitte 2.3.3 und 2.3.4) ist bei diesem Winkel eine Strömungsablösung und die Ausbildung eines Strömungswirbels zu erwarten.

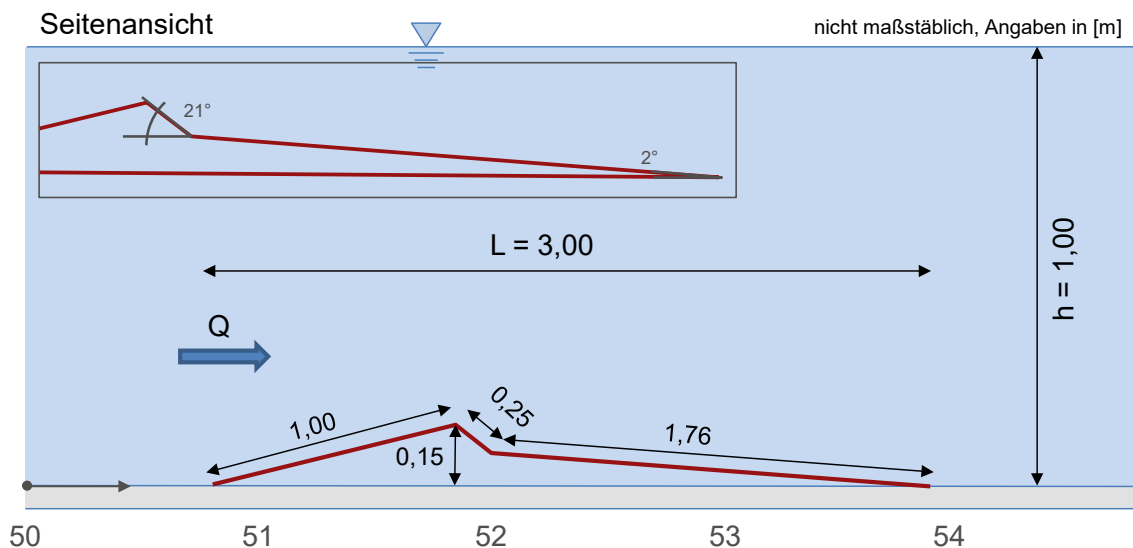


Bild 30: Schematische Darstellung der ebbstromgerichteten Düne mit Flood Slip Face (FloodSF) mit Abmessungen im Modellmaßstab



Bild 31: Einbau der Modelldüne (FloodSF) in der Umlaufrinne

Tabelle 3: Natur- und Modellgrößen der FloodSF

Maßstab 1:10	Umrechnungsfaktor	Natur	Modell
Länge	N_L	30 m	3,0 m
Höhe	N_L	1,50 m	0,15 m
Höhe der Slip Face Böschung	-	-	0,10 m
Seitenverhältnis H/L	-	0,05	
Durchschnittlicher Leewinkel	-	9°	
Luvwinkel	-	4°	
Slip Face Winkel	-	21°	
Wassertiefe	N_L	10 m	1,0 m
Strömungsgeschwindigkeit	$\sqrt{N_L}$	1 m/s	0,3 m/s
Froude-Zahl	-	0,1	0,1
Reynolds-Zahl	-	10^6	$3 \cdot 10^4$

Für die Strömungsmessungen an der Variante FloodSF wurde zunächst die *Vectrino*-Sonde eingesetzt und anschließend mit Messungen der *Vectrino Profiler* Sonde ergänzt. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte anhand von vertikalen Messprofilen, die in Rinnenquerrichtung mittig über der Modelldüne positioniert wurden. Die vertikalen Messprofile wurden an

(i) einer Position vor der Düne, (ii) im Bereich des *Slip Face* und im Leebereich der Düne sowie bei den Versuchen mit der *Vectrino* Sonde zusätzlich (iii) im Bereich hinter der Düne durchgeführt. Hierbei wurden zur Sicherstellung reproduzierbarere Ergebnisse in der Regel jedes Vertikalprofil zweimal gemessen, sodass für die Positionen jeweils eine Messung und eine Wiederholungsmessung vorliegen.

In Dünennähe sowie in Nähe zur Wasseroberfläche wurden die vertikalen Abstände zwischen den einzelnen Messpositionen enger gewählt als in der übrigen Wassersäule, um die stärker turbulenten Bereiche möglichst genau erfassen zu können. Für die *Vectrino*-Messungen betragen die vertikalen Abstände zwischen zwei Messpositionen 3 cm bzw. 5 cm, bei den Messungen mit der *Vectrino Profiler*-Sonde wurden die dünennahen Messungen in vertikaler Richtung verdichtet, sodass die Abständen 1 cm, 3 cm bzw. 5 cm betragen. Die horizontalen Abstände im Lee des *Slip Face* bei den *Vectrino*-Messungen betragen 10 cm, bei den anschließenden Messungen mit der *Vectrino Profiler* Sonde wurde ein Teil des übrigen Leebereichs untersucht und größere horizontale Abstände von 20 cm gewählt. Die Positionen der Messungen im Längsschnitt sind in Bild 32 und Bild 33 graphisch dargestellt. Die Messdauer für alle durchgeführten Messungen betrug 120 s.

Die gewählten Konfigurationen für das jeweils eingesetzte Messgerät sind der Tabelle 1 in Abschnitt 3.2.3 zu entnehmen.

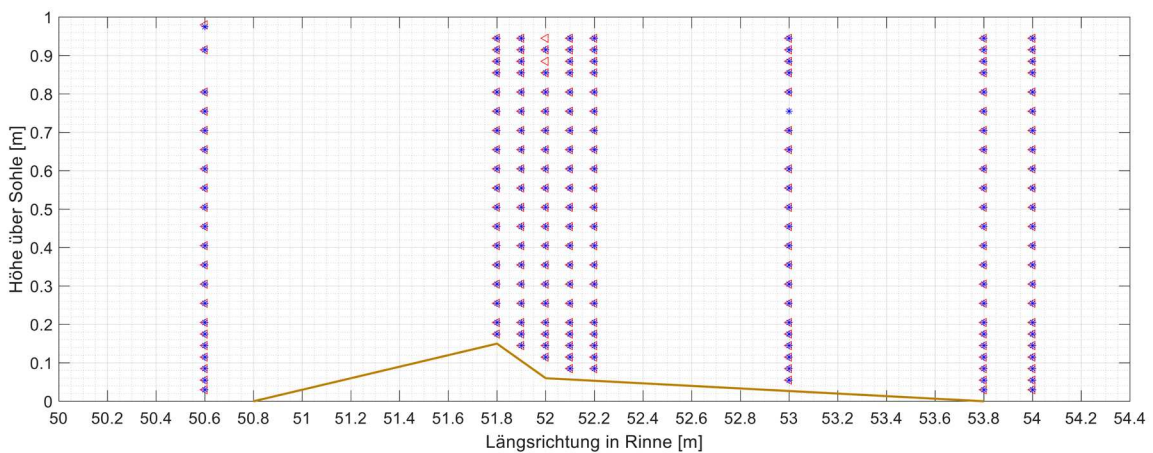


Bild 32: Positionen für Erst- und Zweitmessungen an FloodSF mit Vectrino Sonde (sideloeking)

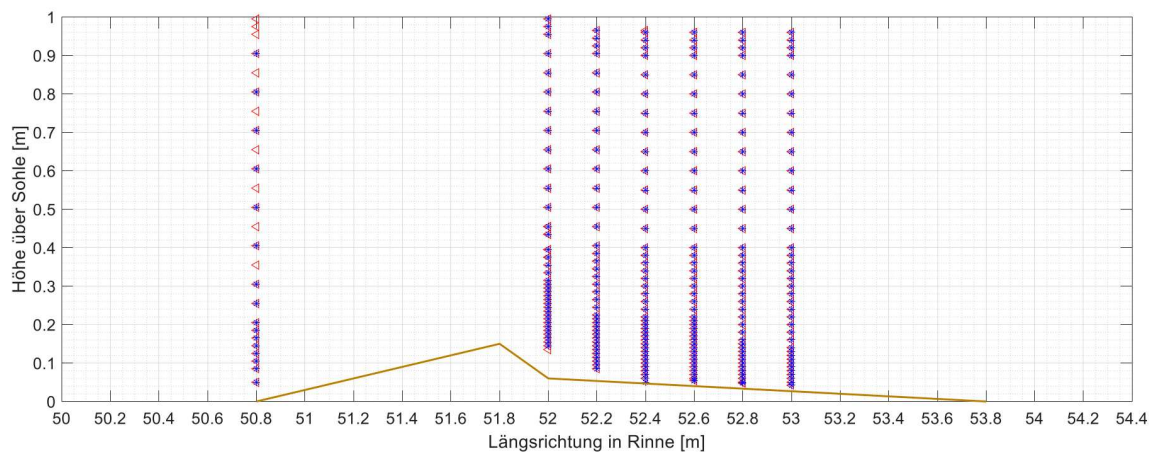


Bild 33: Positionen für Erst- und Zweitmessungen an FloodSF mit Vectrino Profiler (downloading)

4.3.3 Untersuchungen an skaliertem Dünen mit Ebb Slip Face (EbbSF)

Der zweite untersuchte Dünentyp basiert auf den in der Weser vorkommenden ebbstrom-orientierten Dünen mit einem *Ebb Slip Face*. Die repräsentativ ausgewählten Naturabmessungen und im Maßstab 1:10 umgerechneten Modellgrößen sind in Tabelle 4 zusammengefasst, eine schematische Darstellung der Modelldüne im Längsschnitt mit den Modellabmessungen ist in Bild 34 zu sehen. Der *Slip Face*-Winkel wurde mit einer Neigung von 25° steiler als bei Dünenvariante FloodSF konstruiert. Aufgrund des Winkels größer als 18° war wie bei Variante FloodSF (vgl. Abschnitt 4.3.2) mit einem Strömungsabriss und einer Strömungsrezirkulation im Leebereich der Düne zu rechnen (Studien zum Einfluss des *Slip Face* Winkels auf Strömungsprozesse s. Abschnitte 2.3.3 und 2.3.4).

Bild 35 zeigt zwei Ansichten der in der Laborrinne eingebauten Düne. Wie in Bild 34 und Bild 35 gekennzeichnet wurde die Modelldüne aus Richtung der flachen Böschung angeströmt und demnach der Zeitpunkt maximaler Strömungsgeschwindigkeiten während der Ebbphase abgebildet.

Tabelle 4: Natur- und Modellgrößen der Dünenvariante EbbSF

Maßstab 1:10	Umrechnungsfaktor	Natur	Modell
Länge	N_L	30 m	3,0 m
Höhe	N_L	1,50 m	0,15 m
Höhe der Slip Face Böschung	-	-	0,10 m
Seitenverhältnis H/L	-	0,05	
Durchschnittlicher Leewinkel	-	9°	
Luvwinkel	-	4°	
Slip Face Winkel	-	25°	
Wassertiefe	N_L	10 m	1,0 m
Strömungsgeschwindigkeit	$\sqrt{N_L}$	1 m/s	0,3 m/s
Froude-Zahl	-	0,1	0,1
Reynolds-Zahl	-	10^6	$3 \cdot 10^4$

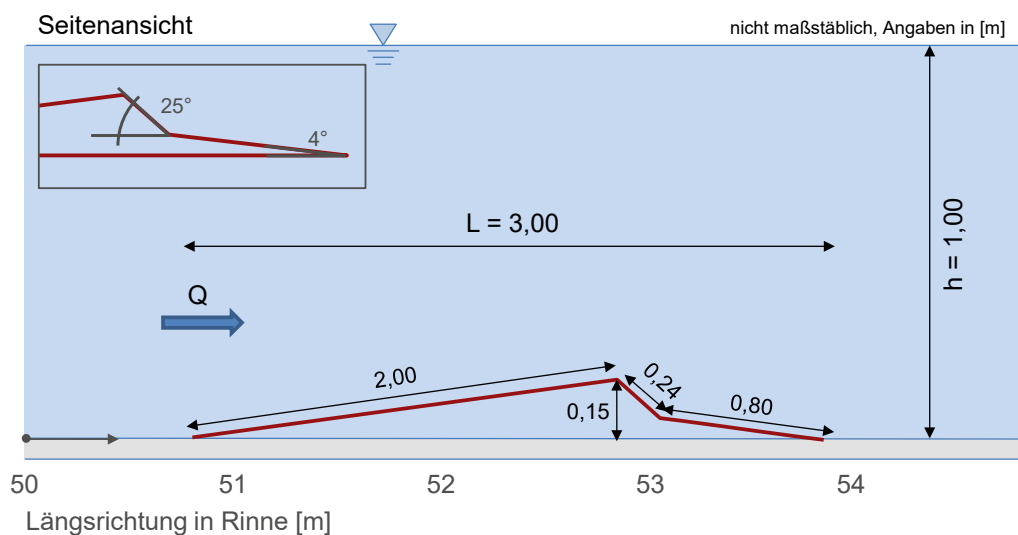


Bild 34: Schematische Darstellung der ebbstromgerichteten Düne mit Ebb Slip Face (EbbSF) mit Abmessungen im Modellmaßstab

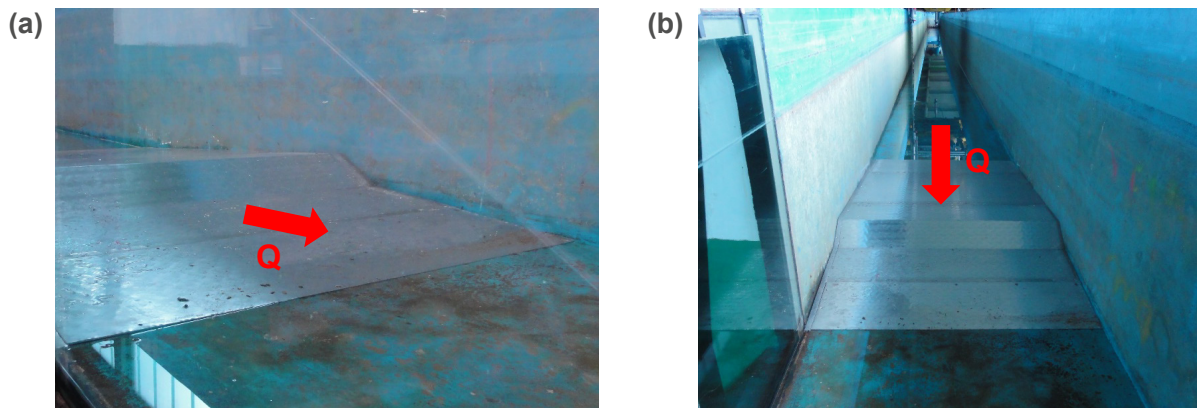


Bild 35: Eingebaute Modelldüne in Laborrinne: (a) seitlicher, schräger Blick auf die Leeböschung, (b) Blick von schräg oben auf die Modelldüne

Wie bei den anderen Versuchsreihen wurden vertikale Strömungsprofile mittig zur Rinnenquer- richtung aufgenommen. Die Positionen der Strömungsmessungen an der Dünenvariante EbbSF sind in Bild 36 veranschaulicht. Im Gegensatz zu den Messungen an der Variante FloodSF wurde zum einen lediglich die *Vectrino Profiler* Sonde eingesetzt, da diese sich besser eignet um in direkter Nähe zu Oberflächen zu messen. Zum anderen wurde die Anzahl der Messungen erhöht und der komplette Bereich über der Modelldüne erfasst. Zudem wurden Strömungsprofile an zwei Positionen vor der Düne sowie über eine Strecke von etwa 60 cm hinter der Düne aufgenommen. Der horizontale Abstand zwischen den Messungen betrug im Luvbereich der Düne 20 cm und wurde kurz vor dem Dünenkamm auf 10 cm und im stärker turbulenten Dünenleebereich auf 5 cm reduziert. Der vertikale Abstand zwischen zwei Messpositionen im Dünenluv betrug 2-3 cm bzw. im verdichteten Bereich vor dem Dünenkamm sowie im dünen- bzw. sohnahen Leebereich 1 cm. Für die weniger turbulenten Bereiche oberhalb des sohnahen Raums wurde eine gröbere vertikale Verteilung der Messpositionen gewählt, welche auf Basis der Erfahrungen aus den zuvor durchgeführten Versuchsreihen zur Erfassung der hier herrschenden Strömung ausreichte. Der vertikale Abstand zwischen zwei Messpositionen betrug hier 5 cm. Im Bereich hinter der Düne wurde der Abstand nochmals vergrößert auf 10 cm. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird, wie schon bei den Untersuchungen an der Dünenvariante FloodSF, durch jeweils eine Messung und Wiederholungsmessung an jeder Messposition nachgewiesen. Die Messdauer pro Position betrug, wie in Abschnitt 3.2.5 erläutert, für diese Versuchsreihe in den turbulenten Bereichen des Strömungsfeldes 4 min bzw. 240 s und im restlichen Bereich 2 min bzw. 120 s.

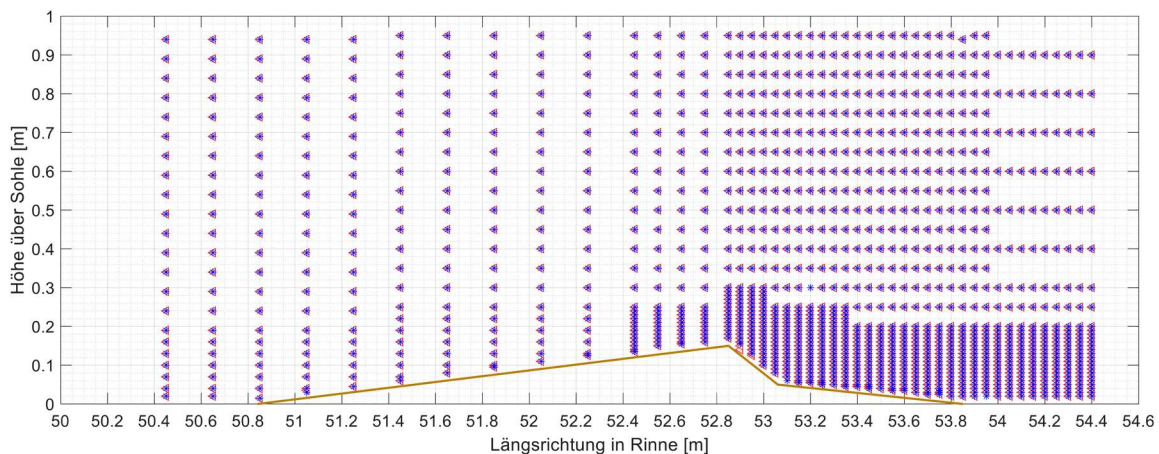


Bild 36: Positionen für Erst- und Zweitmessungen an EbbSF mit Vectrino Profiler Sonde (downlooking)

5 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Anhand der in den Laborversuchen gemessenen Geschwindigkeitszeitreihen der Strömung konnten für alle drei untersuchten Dünengeometrien vertikale Strömungsprofile bestimmt werden. Für die Messungen an den skalierten Modelldünen mit *Slip Face*-Böschung wurde zudem die Verteilung und Größe der Turbulenten Kinetischen Energie (TKE) berechnet. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse vorgestellt und graphisch veranschaulicht.

Eine Berechnung und Auswertung der TKE erfolgte nicht für die Versuche an der Dreiecksdüne, da die für die Erprobung der Messsonde teilweise nicht optimal gewählten Konfigurationseinstellungen zu vermehrten Ausreißern oder Rauschen führten. Auf die Berechnung der vertikalen Strömungsprofile, für deren Berechnung Werte über einen größeren Zeitraum gemittelt wurden, sind durch die Mittelung die Auswirkungen dieser Störungen in der Regel nur gering und vernachlässigbar. In die Berechnung der TKE hingegen fließen u. a. die Varianzen der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten mit ein. Rauschen oder Ausreißer erhöhen somit die TKE und würden unter diesen Umständen fälschlicherweise als Turbulenz interpretiert werden, sodass von einer Auswertung der TKE bei den Untersuchungen an der Dreiecksdüne abgesehen wurde.

5.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen an Dreiecksdüne (TriPrelim)

Das gemessene Strömungsfeld über der Düne TriPrelim wird anhand von Vektoren in Bild 37 veranschaulicht. Eingegangen in die Berechnung der Vektoren sind die horizontale x-Geschwindigkeit v_x in Strömungsrichtung sowie die vertikale z-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit v_z , beide Werte gemittelt über 120 s Versuchsdauer. Anhand der Farbgebung ist der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit [m/s] ableitbar. Auf eine Legende zur Kennzeichnung des Zusammenhangs zwischen der Vektorlänge und der damit dargestellten Fließgeschwindigkeit wurde verzichtet. Über die unterschiedlichen Längen der Vektoren ist eine qualitative Beurteilung der Geschwindigkeitsverteilungen möglich.

Die Auswertung zeigt, dass sich über der Dreiecksdüne TriPrelim die für eine Überströmung von Bodenformen mit einem steilen Leewinkel von 30° sowie einer geraden Leeböschung typischen Prozesse, wie die Ausbildung einer permanenten Rezirkulation (z. B. Nelson et al. 1993, Kwoell et al. 2016, vgl. auch Abschnitt 2.3), beobachten lassen. Im Luvbereich der Düne (Positionen $x = 53,0$ und $x = 53,2$ m) lässt sich ein für Gerinneströmungen typisches, noch wenig beeinflusstes logarithmisches Geschwindigkeitsprofil feststellen. Mit zunehmender Nähe zum Dünenkamm nimmt die sohl- bzw. dünennahe Fließgeschwindigkeit zu. Direkt über dem Dünenkamm zeigt die Auswertungen eine abrupte Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit. Im Leebereich der Düne kann die für den strömungsabgewandten Bereich von Bodenformen charakteristische Rezirkulationszone erkannt werden: Durch die Vektordarstellung veranschaulicht liegt in Sohlhöhe eine rückwärts- bzw. stromaufwärts gerichtete Strömung hinter dem Dünenkamm vor. Zudem kann ein Wirbel identifiziert werden, der sich in vertikaler Richtung bis in eine Höhe von ca. 15-20 cm über der Sohle sowie in horizontaler Richtung über etwa 0,9 m Länge (bis Position 54,5 m) erstreckt (s. auch vergrößerter Diagrammbereich in Bild 37). Diese Länge entspricht der sechsfachen Dünenhöhe und liegt somit innerhalb der in der Literatur angegebenen Abschätzung des Wiederanschlusspunktes im Abstand von 4-6-facher Dünenhöhe (s. Abschnitt 2.3.2). Die horizontalen Geschwindigkeiten in der Rezirkulationszone sind im Vergleich zur mittleren vertikalen Geschwindigkeit gering und bewegen sich in einem Bereich zwischen etwa $-0,25$ m/s (rückwärtsgerichtet) und $+0,25$ m/s. Ab der Rinnenlängsposition $x = 54,6$ m lassen sich für die horizontalen, in Strömungsrichtung gerichteten Geschwindigkeiten keine negativen Werte mehr feststellen, die Strömung stabilisiert sich und das vertikale Geschwindigkeitsprofil nimmt wieder eine logarithmische Verteilung an.

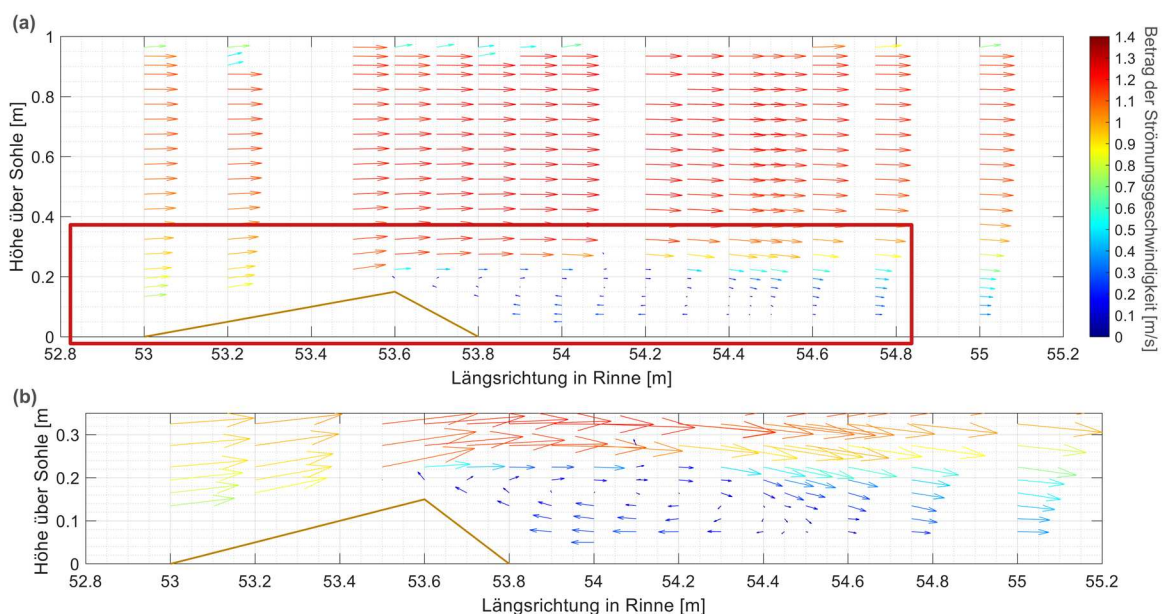


Bild 37: Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über Dreieckdüne in Vorversuchen: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs mit Strömungswirbel

Die Ergebnisse aus den Vorversuchen an TriPrelim zeigten, dass für eine genauere Analyse der Position und Ausdehnung der Rezirkulationszone und der Position des Wiederanschlusspunktes

oder anderer, für die Überströmung von Dünen typischen Prozesse (wie beschrieben in Abschnitt 2.2.2) die Abstände zwischen den einzelnen Messpositionen kleiner zu wählen sind bzw. die Verteilung der Messpositionen dichter zu gestalten ist. Für den Zweck der Voruntersuchungen, die anschließenden Strömungsversuche an der skalierten Modelldüne vorzubereiten, sind die gewonnenen Ergebnisse ausreichend. Es konnte gezeigt werden, dass der in der Literatur für steilgeböschten Dreiecksdünen beschriebene Strömungswirbel im Dünenleebereich unter den gewählten Randbedingungen (Abmessungen der Düne sowie der Versuchsanordnung, Fließgeschwindigkeit und eingesetztes Messgerät) beobachtet werden konnte.

5.2 Ergebnisse der Untersuchungen an skalierten Düne mit Flood Slip Face (FloodSF)

Anhand der erfassten Strömungsdaten über der ebborientierten Modelldüne mit einem *Flood Slip Face* auf der flachen und längeren Böschungsseite wurden das Strömungsfeld mit Richtung und Größe der Strömungsgeschwindigkeiten sowie die Höhe und Verteilung der TKE über der Düne ermittelt. Die Ergebnisse der zwei Versuchsreihen, durchgeführt mit dem *Vectrino* und dem *Vectrino Profiler*, werden nachfolgend vorgestellt.

5.2.1 Strömungsfeld

Zur Ermittlung des Strömungsfeldes über der ebborientierten Modelldüne mit *Flood Slip Face* wurden aus den gemessenen und fehlergefilterten Strömungszeitreihen mittlere Geschwindigkeiten über die Messdauer von 120 s berechnet. Zur Veranschaulichung der Richtung und des Betrages der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten wurden Strömungsvektoren ermittelt, die für die Messungen mit der *Vectrino*-Sonde in Bild 38 und für die Messungen mit der *Vectrino Profiler*-Sonde in Bild 39 dargestellt sind. Für die Ermittlung der Strömungsvektoren wurde die horizontale x- sowie die vertikale z-Komponente der Strömung berücksichtigt. Für diese zweidimensionale Betrachtung der Strömungsstruktur über der Düne wurde die y-Strömungsgeschwindigkeit nicht berücksichtigt. Zudem betragen die Geschwindigkeitsanteile in Querrichtung nahezu Null und sind somit vernachlässigbar.

Für die Darstellung in Bild 38 und Bild 39 sind die Vektoren der Erst- und Zweitmessung übereinander abgebildet. Hierdurch wird ersichtlich, dass eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Erst- und Wiederholungsmessungen vorliegt. Lediglich bei den Messungen mit der *Vectrino Profiler*-Sonde im dünnennahen Bereich weichen Erst- und Zweitmessung teilweise in Richtung und Betrag voneinander ab. Ein möglicher Grund für die Abweichungen sind hohe Turbulenzen in der Nähe zur Böschung, welche die Messwerterfassung erschweren und zu ungenauen Messungen führen können (s. *weak spots* in Abschnitt 2.3.2). Da das Auftreten von Ausreißern sich lediglich auf diesen messtechnisch schwierig erfassbaren Bereich und wenige Ausnahmen beschränkt, zeigen die Messergebnisse insgesamt eine sehr gute Reproduzierbarkeit.

Die Form der vertikalen Geschwindigkeitsprofile folgt für beide Versuchsreihen einem für turbulenten Strömungen typischen logarithmischen Verlauf mit Geschwindigkeiten von ca. 0,4 m/s im oberen Bereich der Wassersäule und zur Sohle abnehmenden Werten. Die Geschwindigkeit in etwa 30 % der Wassertiefe, die der mittleren vertikalen Strömungsgeschwindigkeit entspricht, beträgt im noch ungestörten Vertikalprofil vor dem Modell rund 0,3 m/s und entspricht somit der

generierten Sollgeschwindigkeit. Die erfassten Strömungsgeschwindigkeiten sind zudem erwartungsgemäß – aufgrund des durch die Düne verengten Fließquerschnitts – im Leebereich oberhalb des Dünenkamms etwas höher als im Luvbereich der Düne sowie im hinteren Bereich der Leeböschung.

Anhand der Messungen mit dem *Vectrino* kann gezeigt werden, dass bei der segmentierten Modelldüne im Leebereich direkt hinter dem *Slip Face* ein Strömungswirbel entsteht. Die Vergrößerung der Vektordarstellung in Bild 38b veranschaulicht, dass die böschungsnahen Strömung rückwärtsgerichtet ist.

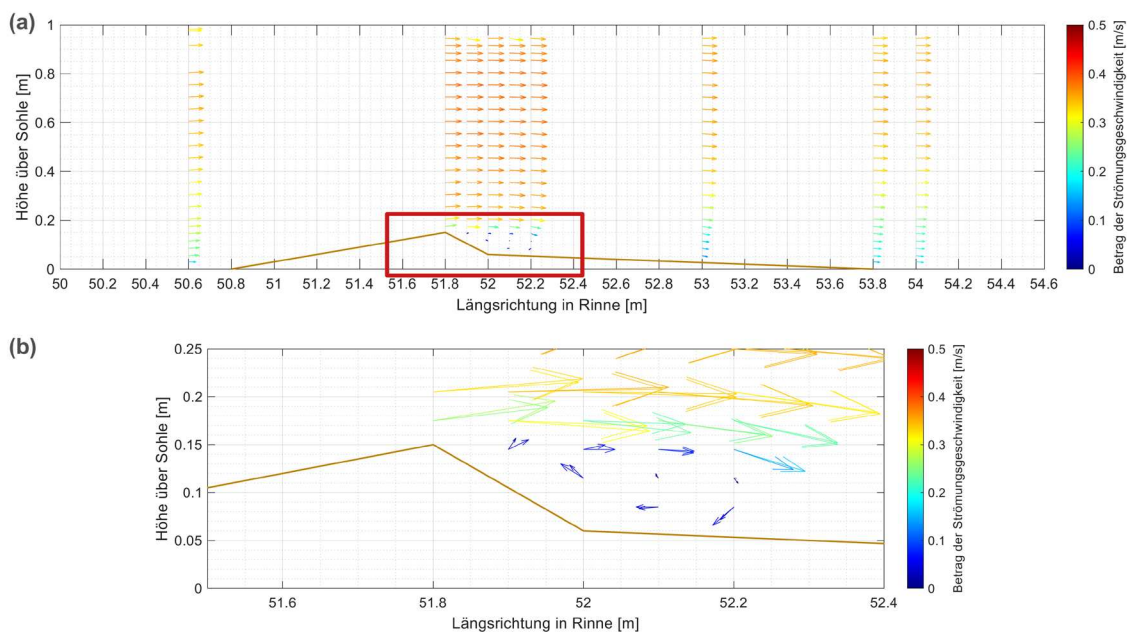


Bild 38: Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über FloodSF, Messung mit Vectrino: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs mit Strömungswirbel

Mittels der Messungen mit dem *Vectrino Profiler*, die in Bild 39 veranschaulicht sind, konnte die Strömungsrezirkulation im Leebereich bzw. hinter dem *Slip Face* nicht abgebildet werden. Die erfassten sohnnahen Strömungsgeschwindigkeiten an der Längspositionen $x = 52,0$ m, $x = 52,2$ m und teilweise an $x = 52,4$ m sind übereinstimmend mit den Ergebnissen aus den *Vectrino* Messungen ebenfalls rückwärtsgerichtet, ein eindeutig ausgeprägter Wirbel kann allerdings nicht identifiziert werden. Die über den mit der *Vectrino*-Sonde erfassten Bereich hinaus gemessenen Profile zwischen $x = 52,4$ m und $x = 53,2$ m deuten darauf hin, dass sich eine ggf. vorhandene Strömungsrezirkulation bis in einen Abstand von maximal 1 m hinter dem Dünenkamm erstreckt, da ab dieser Position keine sohnnahe, rückwärtsgerichtete Strömung gemessen wurde (s. Bild 39b).

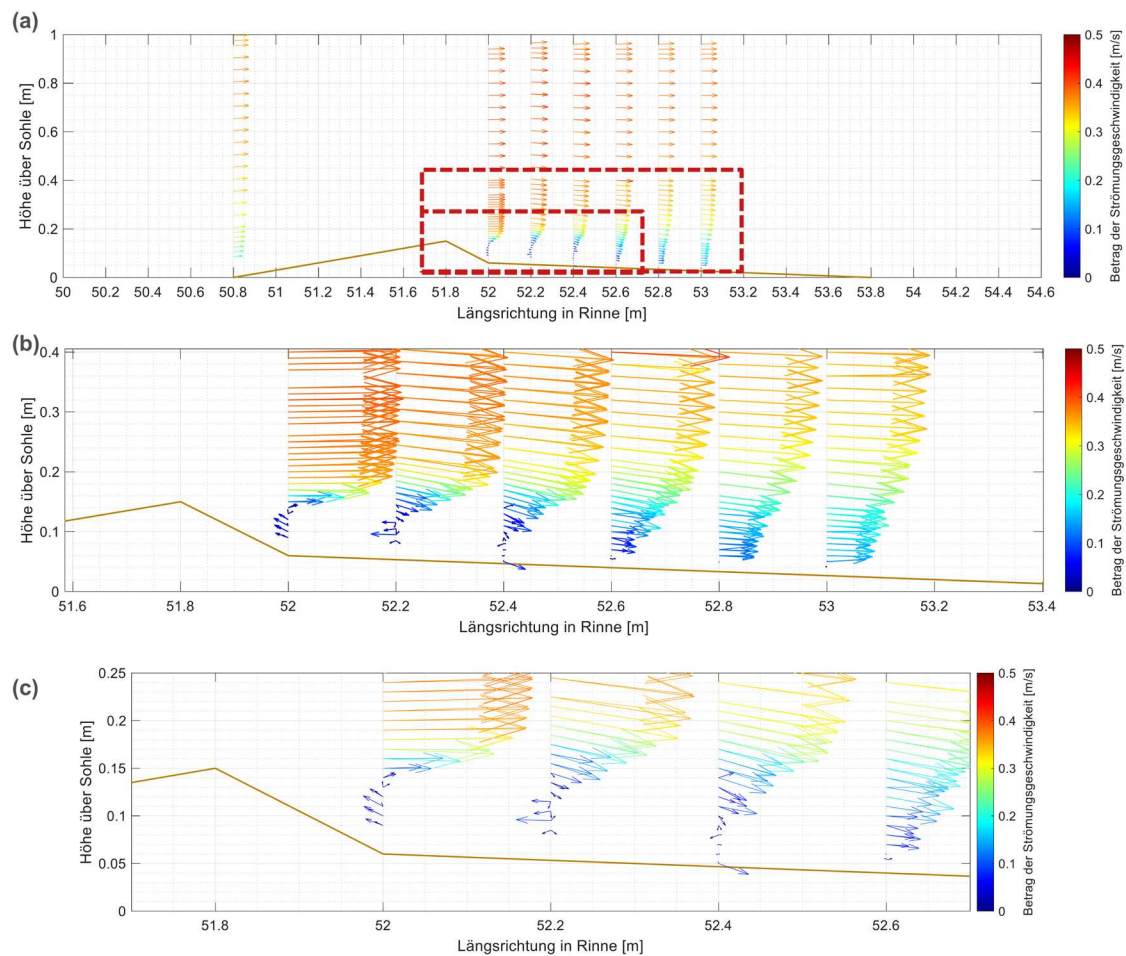


Bild 39: Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über FloodSF, Messung mit Vectrino Profiler: (a) Übersicht, (b) und (c) Vergrößerung des Leebereichs

5.2.2 Verteilung der TKE

Zur Einschätzung der Turbulenzintensität während der Überströmung der Modelldüne wurde die TKE gemäß Gleichung (2.12) aus allen drei Geschwindigkeitskomponenten berechnet. Da eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Erst- und Zweitmessung vorliegt (vgl. Abschnitt 5.2.1), wird im Folgenden jeweils die Erstmessung zur Berechnung der TKE herangezogen.

Für die Messungen sowohl mit dem *Vectrino* als auch mit dem *Vectrino Profiler* konnten im Dünenleebereich erhöhte TKE-Werte festgestellt werden. Mit zunehmender vertikalen als auch horizontalen Entfernung zum Dünenkamm und zur *Slip Face*-Böschung nehmen die TKE-Werte ab (s. Bild 40 und Bild 41).

Wegen des zum einen recht großen horizontalen Abstands zwischen den einzelnen Messungen und zum anderen aufgrund der nicht über die gesamte Modelldüne verteilten Messpositionen, weder bei den Versuchen mit dem *Vectrino* noch mit dem *Vectrino Profiler*, ist die Bestimmung und Eingrenzung einer Zone mit einer erhöhten TKE nicht möglich. Die Ergebnisse deuten allerdings darauf hin, dass die TKE insbesondere im Bereich unmittelbar hinter dem *Slip Face* maximal

ist und eine Zone mit erhöhter TKE sich bis in etwa 1 m horizontaler Entfernung zum Dünenkamm ausdehnt.

Im direkten Vergleich der berechneten Werte aus den mit dem *Vectrino* und dem *Vectrino Profiler* gemessenen Strömungen fällt auf, dass die Höhe der TKE an den redundant gemessenen Positionen $x = 52,0$ m und $x = 53,0$ m nicht identisch sind. Die aus den Messungen mit dem *Vectrino Profiler* berechneten TKE-Werte sind etwas kleiner. Bei der Betrachtung der insgesamt Größenordnung der TKE aus beiden Versuchsreihen werden allerdings vergleichbare Werte erreicht: Die Werte bewegen sich in einem Bereich zwischen der maximal berechnete TKE von ca. $0,015 \text{ m}^2/\text{s}^2$ im Bereich hinter dem *Slip Face* (Messungen mit *Vectrino*) und ca. $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bis $0,006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in ca. 1 m Entfernung zum Dünenkamm stromabwärts (Messungen mit *Vectrino Profiler*).

Insbesondere die aus den Messungen mit dem *Vectrino Profiler* berechnete TKE zeigt einige Ausreißer, deren Wert im Vergleich zu den räumlich angrenzenden TKE-Werten erhöht ist. Dies ist vor allem an der Position $x = 52,4$ m in einer Höhe über der Sohle von ca. 15 cm sowie an Position $x = 52,60$ m in ca. 38 cm Höhe und bei mehreren Vertikalprofilen in direkter Sohlhöhe zu beobachten. Der erhöhten TKE an diesen Positionen wird keine physikalische Ursache zugrunde gelegt. Die Abweichungen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge nicht optimal gewählter Sensorkonfigurationen und, insbesondere in Sohlhöhe, auf erschwerte Messrandbedingungen infolge großer Turbulenz zurückzuführen (vgl. auch Abschnitt 5.2.1).

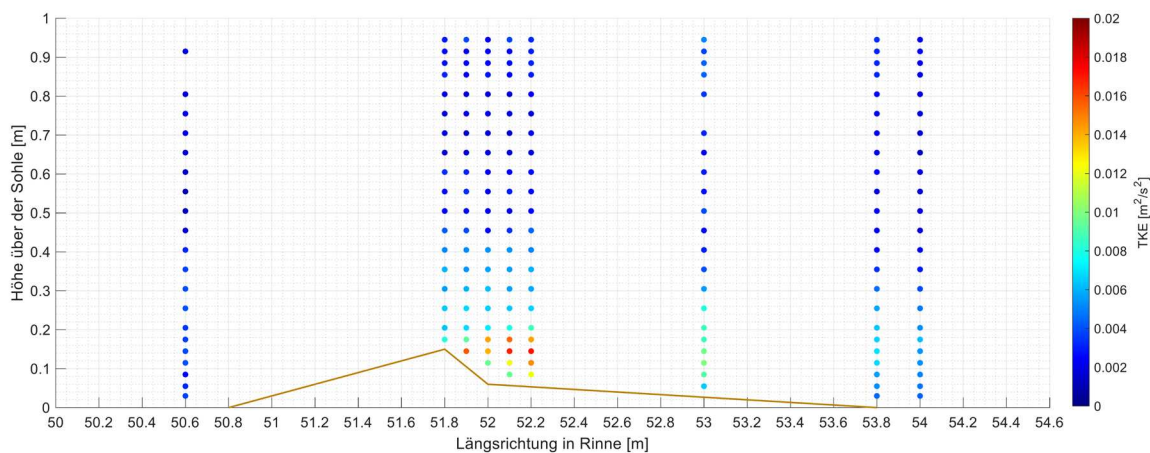


Bild 40: Höhe der TKE und Verteilung über der FloodSF bei Messungen mit *Vectrino*

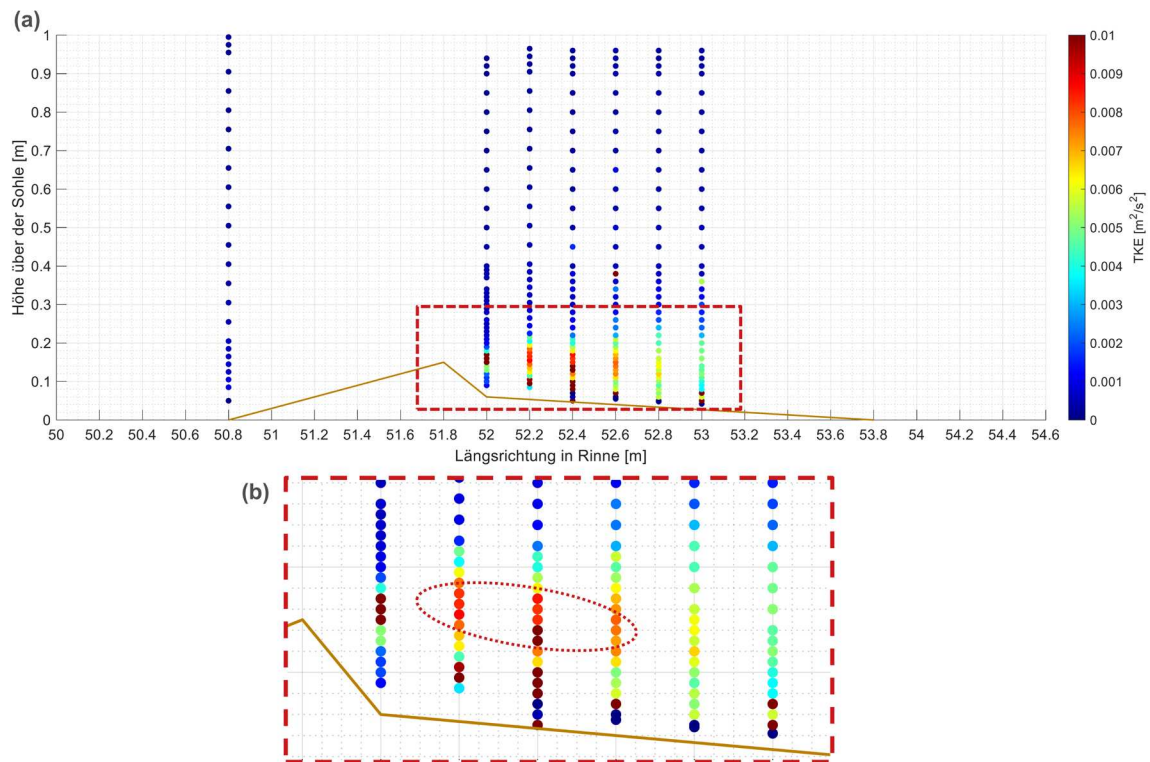


Bild 41: Höhe der TKE und Verteilung über der FloodSF bei Messungen mit Vectrino Profiler: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs, höchsten TKE-Werte markiert

5.3 Ergebnisse der Untersuchungen an skaliertem Düne mit Ebb Slip Face (EbbSF)

Mithilfe der umfangreichen Strömungsmessungen über der ebborientierten Modelldüne mit *Ebb Slip Face* konnte ein detailliertes Bild über die Größe und Richtung der Strömungsgeschwindigkeiten bei der Überströmung der Düne gewonnen werden. Zusätzlich wurde anhand der erfassten Daten, wie auch bei der Dünenvariante FloodSF (s. Abschnitt 5.2), die TKE zur Einschätzung der Turbulenzintensität während der Überströmung berechnet. Der im Rahmen dieser Versuchsreihe erhobene Datensatz wird unter <https://doi.org/10.48437/02.2021.K.9900.0001> (Carstensen 2021) bereitgestellt.

5.3.1 Strömungsfeld

Aus den über der Modelldüne gemessenen und prozessierten Geschwindigkeitszeitreihen wurden über die jeweilige Messdauer gemittelte Strömungsgeschwindigkeiten berechnet. Die Messdauer der Daten variierte zwischen 4 min in sohnahen Bereichen mit höherer Turbulenz und 2 min an den übrigen Messpositionen (für Hintergründe hierzu vgl. Abschnitt 4.3.3).

Die Vertikalprofile der gemittelten Geschwindigkeiten sind in Bild 42 als farblich skalierte Vektoren dargestellt. Wie auch bei der Analyse der Versuche an der Dünenvariante FloodSF sind in die Berechnung des Geschwindigkeitsbetrags und der Richtung die horizontale Geschwindigkeit v_x in Strömungsrichtung und die vertikale Geschwindigkeit v_z eingegangen. Die horizontale Querkomponente v_y der Strömung wurde für diese zweidimensionale Betrachtung nicht berücksichtigt.

Wie auch bei der Versuchsreihe an der Dünenvariante FloodSF kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der durchgeführten Erst- und Zweitmessung eines jeweiligen Vertikalprofils festgestellt werden. Wie in Bild 42 veranschaulicht ist, sind die Richtung und Länge der aus Erst- und Zweitmessung übereinander dargestellten Vektoren übereinstimmend. Minimal voneinander abweichende Erst- und Zweitmessungen treten lediglich an vereinzelt Messpositionen in unmittelbarer Sohl- bzw. Böschungsnähe auf und sind vernachlässigbar. Demnach liegen reproduzierbare Daten vor.

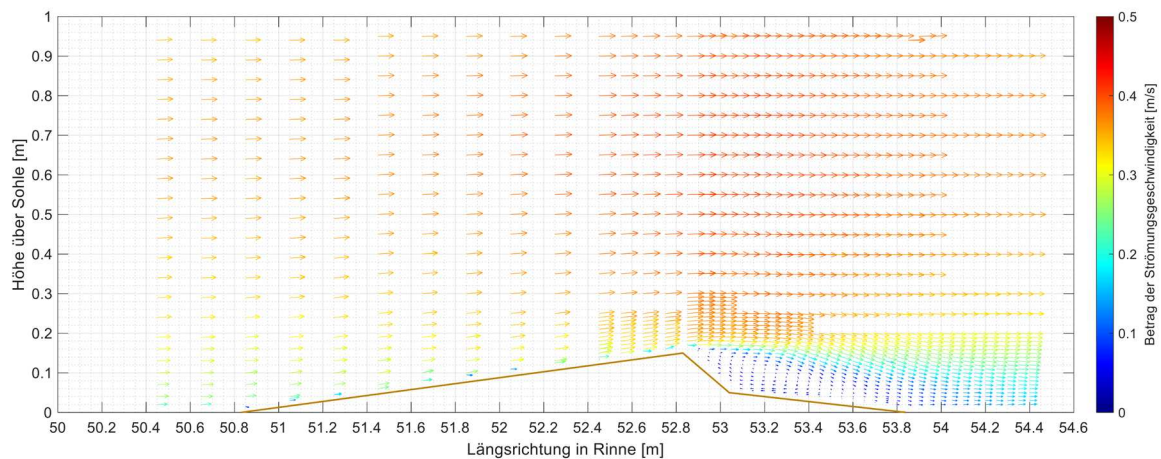


Bild 42: Geschwindigkeitsvektoren (v_x und v_z) über EbbSF im Überblick

Die Analyse der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zeigt, dass die Strömung grundsätzlich wie zu erwarten (i) zur Sohle und in Wasseroberflächennähe geringere Geschwindigkeiten aufweist, (ii) entlang der Luvböschung beschleunigt und (iii) oberhalb des Dünenkamms und entlang der Leeböschung wieder langsamer wird. Die maximalen Geschwindigkeiten der Vertikalprofile betragen ca. 0,4 m/s, die über die Wassertiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeit entspricht der Sollgeschwindigkeit von $v_m \approx 0,3$ m/s.

Im Leebereich der Düne konnte hinter der *Slip Face*-Böschung ein Strömungswirbel eindeutig festgestellt werden, wie in Bild 43 zu sehen ist. Der Strömungswirbel erstreckt sich horizontal zwischen den Längspositionen $x = 52,90$ m und $x = 53,55$ m und somit über eine Länge von ca. 65 cm. Vertikal dehnt sich der Strömungswirbel bis in eine Höhe von ca. 12 cm bis 15 cm über der Sohle aus, d. h. der Wirbel erstreckt sich vertikal über eine Höhe von rund 10 cm. Der Wiederanschlusspunkt an die Strömung befindet sich im Bereich zwischen den Längspositionen $x = 53,60$ m und $x = 53,70$ m und demnach in rund 80-90 cm Entfernung zum Dünenkamm.

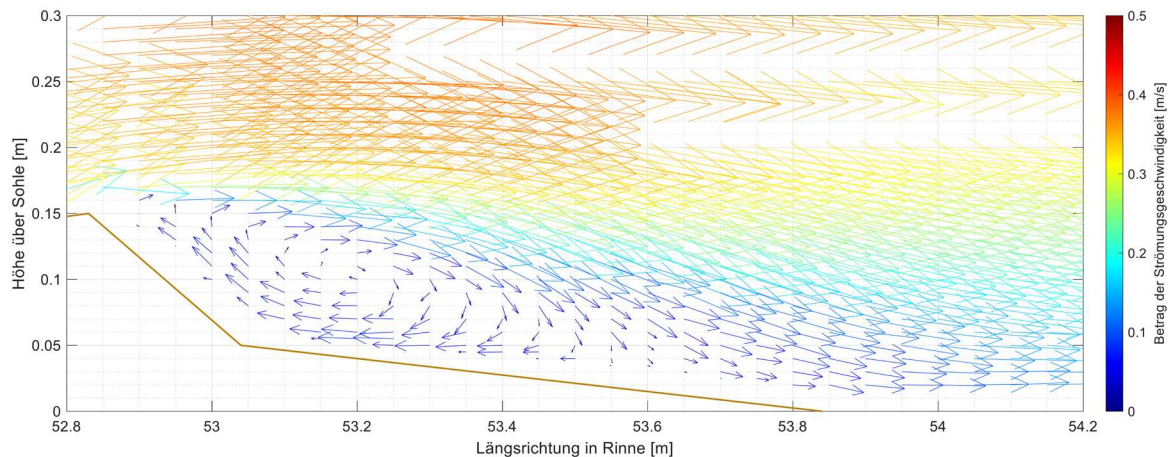


Bild 43: Strömungswirbel im Leebereich der EbbSF

5.3.2 Verteilung der TKE

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben konnte gezeigt werden, dass die erhobenen Daten reproduzierbar sind. Für die Berechnung der TKE wurden daher die Daten der Erstmessung herangezogen.

Bei der Überströmung des Modells EbbSF sind im Bereich der Leeböschung erhöhte TKE-Werte zu beobachten. Wie Bild 44 zeigt, beginnt dieser Bereich kurz hinter dem Dünenkamm (in ca. 10 cm Abstand), verläuft entlang der Leeböschung leicht abwärtsgerichtet und läuft stromabwärts aus. Die höchsten TKE-Werte sind in der Mitte dieses Bereiches in 0,4 m bis in ca. 1 m Entfernung zum Dünenkamm vorzufinden. Die maximalen TKE-Werte liegen in einem Bereich zwischen $0,008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und treten in einem Abstand von ca. 40-80 cm zum Dünenkamm auf.

Außerhalb dieses Bereichs wurden an der Längsposition $x = 53,25 \text{ m}$ in Böschungsnähe einzelne Positionen mit einer ebenfalls erhöhten TKE festgestellt. Bei näherer Betrachtung der an diesen Messpositionen aufgenommenen Zeitreihen konnte festgestellt werden, dass die Korrelation der dieser Messdaten außergewöhnlich niedrig ist sowie die SNR-Werte vergleichsweise erhöht sind (s. Bild 45). Dies deutet darauf hin, dass es an den Messpositionen in $z = 6 \text{ cm}$, $z = 7 \text{ cm}$ und $z = 8 \text{ cm}$ über der Sohle Störungen während der Datenerfassung gab. Denkbar ist, dass durch die nahegelegene Dünenböschung die Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit beeinträchtigt wurde (vgl. Messprinzip der ADV-Sonden in Kapitel 3.2). Vor diesem Hintergrund sind diese Datenpunkte als Ausreißer infolge von Messungenauigkeiten zu interpretieren.

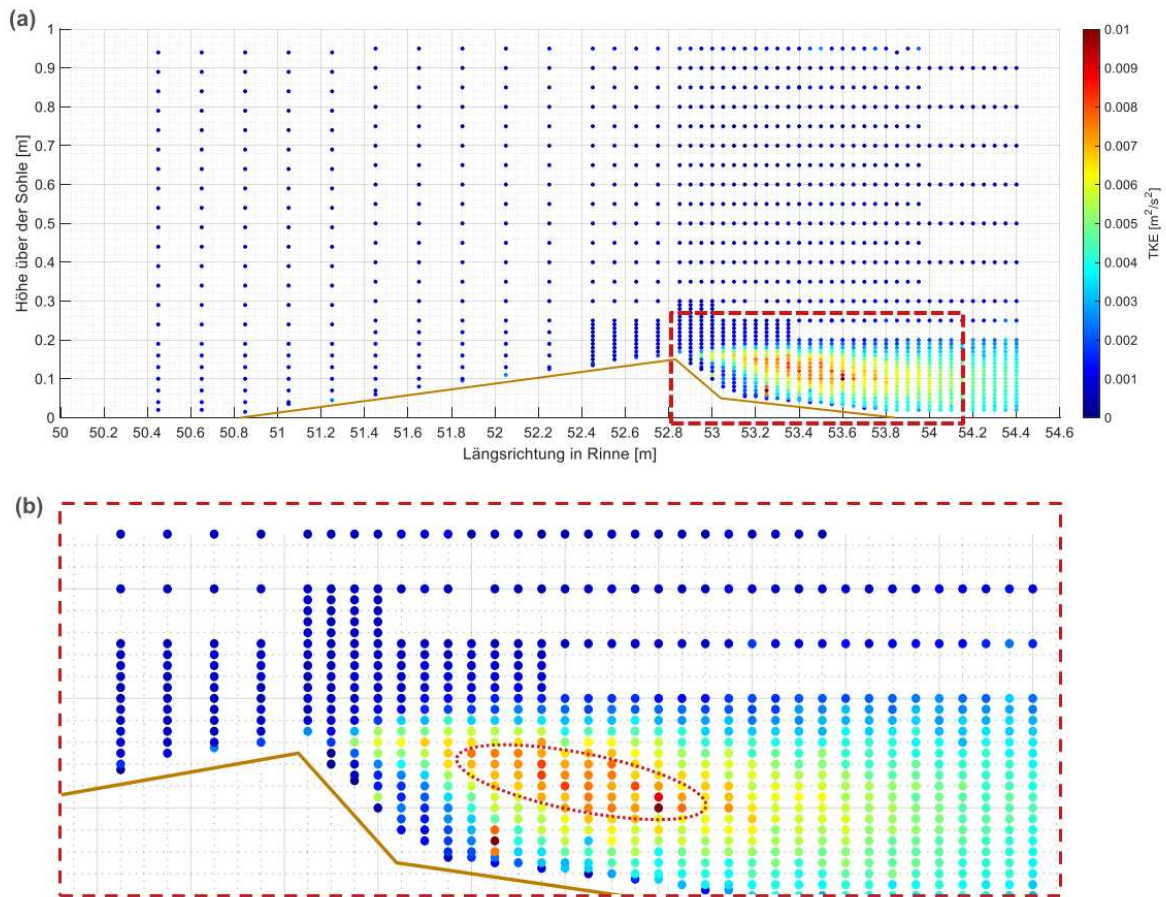


Bild 44: Höhe der TKE und Verteilung über der EbbSF: (a) Übersicht, (b) Vergrößerung des Leebereichs, höchsten TKE-Werte markiert

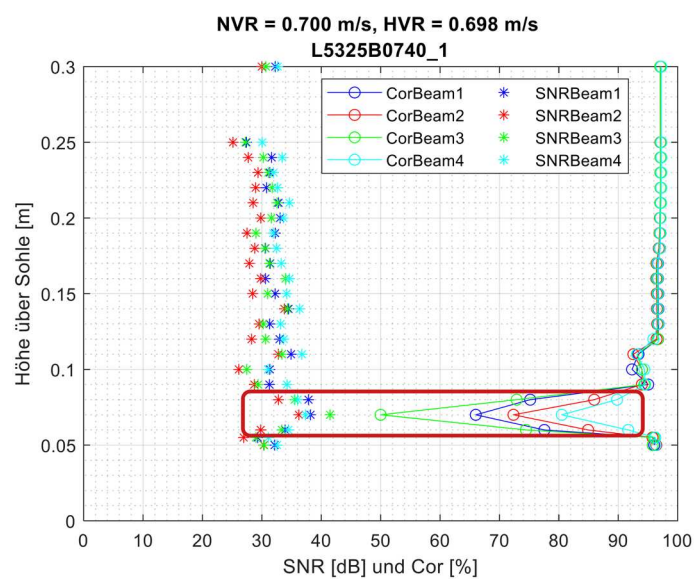


Bild 45: SNR- und Korrelationswerte der Messung an Längsposition $x = 53,25 \text{ m}$, in Rot Abweichungen bei den Höhenpositionen $z = 6 \text{ cm}$, $z = 7 \text{ cm}$ und $z = 8 \text{ cm}$

6 Diskussion der Ergebnisse

Bei der Interpretation der Messergebnisse sind einige Punkte zu berücksichtigen, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden sollen. Hierzu zählen zum Beispiel die Grenzen des physikalischen Modellwesens: Neben Maßstabseffekten, die insbesondere bei der Deutung von aus dem Modell- in den Naturmaßstab umgerechneten Größen beachtet werden müssen, sind Modelleffekte zu berücksichtigen, welche bedingt sind durch die erforderliche vereinfachte Abbildung der Natur im Modell.

Die nachfolgenden Hinweise und Diskussionspunkte beziehen sich auf die Untersuchungen an den skalierten *Slip Face*-Modelldünen. Die Ergebnisse aus den Vorversuchen werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da Zweck der Vorversuche die Vorbereitung der eigentlichen Untersuchungen war und die Ergebnisse nicht für eine weiterführende Interpretation vorgesehen sind.

Versuchsreihen über einer dreieckigen Dünengeometrie zwecks Gegenüberstellung verschiedener Dünenformen sind im Rahmen der Projektlaufzeit nicht durchgeführt worden. Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen der Energiedissipation über einer *Slip Face*-Düne und über einer dreieckigen Dünengeometrie sind die entsprechenden Experimente noch erforderlich. Ideen für mögliche Geometrien der Dreiecksdüne für zukünftig durchzuführende Laborversuche werden nachfolgend vorgestellt.

6.1 Versuchsergebnisse und Turbulenzparameter

Sowohl die Messergebnisse an der ebborientierten Modelldüne mit *Flood Slip Face* (FloodSF) als auch an der Modelldüne mit *Ebb Slip Face* (EbbSF) bestätigen den in der Literatur beschriebenen Einfluss eines *Slip Face*-Winkels auf den Strömungsabriss und die beobachtete Ausbildung eines Strömungswirbels: Der *Slip Face*-Winkel der beiden im Labor untersuchten und zuvor beschriebenen Modelldünen ist größer als der häufig genannte Mindestwinkel von rund 20° , der zur Ausbildung einer permanenten Ablösezone vorhanden sein sollte. Bei beiden Modelldünen konnte in den Laborversuchen die Ausbildung eines Strömungswirbels hinter dem Dünenkamm und oberhalb stromab hiervon ein Bereich mit erhöhten TKE-Werten festgestellt werden.

Aufgrund der engeren Verteilung der Messpositionen bei der Variante EbbSF ist die Identifizierung des Strömungswirbels hier besser möglich. Der Wiederanschlusspunkt befindet sich ungefähr im Abstand von 5-6-facher Dünenhöhe (H_D) zum Dünenkamm. Die Länge der Ablösezone liegt somit innerhalb der in der Literatur für Dreiecksdünen oder Dünen mit steilgeböschten Leewinkel genannten Größe der Ablösezone von $4-6 \cdot H_D$ (Engel 1981, Paarlberg et al. 2007).

Des Weiteren lässt sich bei den Messungen an der Variante EbbSF eine Nachlaufströmung feststellen, die durch erhöhte TKE-Werte gekennzeichnet ist und mit Ergebnissen anderer Untersuchungen, z. B. Venditti 2007, übereinstimmt. Die Höhe der bei der Modelldüne auftretenden maximalen TKE von ca. $0,008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ist vergleichbar mit Werten aus der Literatur: Messungen von Kwoll et al. (2016) an Labordünen wurden mit einer etwas größeren mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $0,62 \text{ m/s}$ und bei einer geringeren Wassertiefe von $0,2 \text{ m}$ und somit einer höheren Reynoldszahl von $1,24 \cdot 10^5$ durchgeführt. Die dort untersuchte Dünengeometrie weicht von der hier untersuchten Variante ab, die relative Höhe der Düne H/h ist mit $0,15$ allerdings identisch

zur EbbSF-Düne ($H_D/h = 1/0,15$). Der Vergleich zeigt, dass die maximalen TKE-Werte mit ca. $0,011 \text{ m}^2/\text{s}^2$ von Kwooll et al. (2016) bei einer Düne mit einem 20° -Winkel etwas größer sind, aber dennoch der Größenordnung der Werte aus den hier durchgeführten Laborversuchen entsprechen. Die Differenz ergibt sich vermutlich insbesondere aufgrund der unterschiedlichen hydrodynamischen Randbedingungen.

Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 angemerkt wurde, bestehen Unterschiede in der Größenordnung zwischen der aus den Messungen mit *Vectrino* ermittelten TKE gegenüber den aus Messungen mit *Vectrino Profiler* berechneten Werten. Die Ursache hierfür ist unklar, sinnvoll wäre eine Untersuchung hinsichtlich eines möglichen Einflusses der Sondenkopfgeometrie (vgl. Abschnitt 3.2) auf die Messdaten. Insbesondere sind hierbei die sondenspezifisch hervorgerufenen Störungen wie beispielsweise ein Messrauschen zu untersuchen und gegenüberzustellen sowie der eventuelle Einfluss von Störungen auf die Berechnung der TKE zu betrachten.

Neben der Auswertung der Strömungszeitreihen hinsichtlich der Geschwindigkeiten, deren Richtung und der resultierenden TKE sind weitere Analysen möglich. Für die nähere Beschreibung des Strömungswirbels wäre beispielsweise die Berechnung des sogenannten *Intermittency Factor* aufschlussreich. Dieser definiert den prozentualen Anteil einer an einem Punkt gemessenen Zeitreihe, der eine rückwärtsgerichtete Strömung zeigt (Best und Kostaschuk 2002; Kwooll et al. 2016) und drückt somit aus, ob eine Rezirkulation nur kurzzeitig und unterbrochen oder über längere Zeiträume auftritt. Andere Kennwerte zur Beschreibung der Strömungs- und Turbulenzeigenschaften sind u. a. die Reynolds-Schubspannungen (*Reynolds shear stress*) oder die Turbulenzproduktion. Weitere Analysemöglichkeiten von Strömungsversuchen an Modelldünen sowie weitere Kennwerte sind u. a. in Best und Kostaschuk (2002) und Kwooll et al. (2016) beschrieben. Für eine genauere Charakterisierung der Strömungsprozesse und sowie einen späteren Vergleich mit Daten aus anderen Versuchsreihen ist die Berechnung weiterer Kennwerte sinnvoll.

6.2 Vereinfachungen und Grenzen der Laborversuche

Im Rahmen der Modelluntersuchungen mussten einige Vereinfachungen in Bezug auf die Nachbildung zum einen der natürlichen Düne und deren Umgebung sowie zum anderen der hydrodynamischen Prozesse getroffen werden. Vor dem Hintergrund der zu untersuchenden Fragestellung war der Einsatz unbeweglicher Modelle erforderlich, da ein Vergleich zwischen definierten Dünenformen stattfinden sollte und ausschließlich der Effekt der Dünengeometrie auf Strömungs- und Turbulenzprozesse bzw. auf die resultierende Energiedissipation herauszuarbeiten war. Sedimenttransport sowie die Auswirkungen von Wanderung und Umformung der Düne auf die Strömung werden demnach im Rahmen der Messungen nicht erfasst und sind zudem nicht Gegenstand der Untersuchung. Des Weiteren können durch die Fixierung des Dünenmodells Messungen über einen längeren Zeitraum sowie an zahlreichen und unterschiedlichen Messpositionen durchgeführt werden, ohne dass die Form und die Position der Düne sich verändert. Das Strömungsfeld über der Düne konnte hierdurch detailliert ermittelt sowie eine rezirkulierende Strömung identifiziert werden.

Der Weserabschnitt, in dem die zum Vorbild genommenen Dünenformen vorkommen, ist gekennzeichnet durch den tidebedingten Wechsel der Strömungsrichtung sowie variierende Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände. Die Tidedynamik wurde im Rahmen der Laborversuche

nicht nachgebildet, sondern eine konstante, mittlere Strömungsgeschwindigkeit – am Vorbild der Größenordnung der maximalen Ebb- und Flutstromgeschwindigkeit – generiert sowie ein ebenfalls an der Natur orientierter, aber unveränderter Wasserstand eingestellt. In Bezug auf die Hydrodynamik zeigen die Ergebnisse daher lediglich eine Momentaufnahme der in der Natur ablaufenden Prozesse.

Zudem zeigte die Analyse der Verteilung und Morphologie der Weserdünen von Lefebvre et al. (2020), dass eine Bandbreite verschiedener Dünenlängen, Dünenhöhen, Böschungswinkel und deren Beschaffenheit (mit und ohne *Slip Face*) sowie verschiedene Ausprägungen der Asymmetrie auftreten. Bei den für die Versuche herangezogenen Dünentypen FloodSF und EbbSF und den gewählten Abmessungen und Böschungseigenschaften handelt es sich jeweils um exemplarisch gewählte Größen und Formen, mit der die Spanne verschiedener Morphologien und Abmessungen repräsentiert werden soll.

Untersucht wurde zudem eine Einzeldüne, wohingegen in der Natur Dünenfelder auftreten. Auf ein Dünental folgt demnach in einer natürlichen Umgebung in der Regel die Luvböschung der benachbarten Düne, während in den Laborversuchen die Dünenböschung an die horizontale Rinne- sohle anschließt. Direkt benachbarte Dünen und angrenzende Böschungen würden die Strömungsstruktur sowie die Rezirkulation und Nachlaufströmung zusätzlich beeinflussen und wahrscheinlich eine abweichende Position und Ausdehnung dieser hervorrufen. Die Rauheitswirkung wäre demnach eine andere. Zudem sind die Modelldünen zweidimensional sowie mit geraden Böschungen ausgebildet, d. h. beispielsweise nicht mit sinusförmiger Böschungsform oder, wie in Natur möglich, mit kleineren überlagerten Bodenformen. Demnach ist die Morphologie der Modelldüne deutlich weniger komplex als in der Natur üblich und infolgedessen auch die im Laborversuch auftretenden Prozesse. Auch die Oberflächenrauheit der Modelldüne wurde nicht nachgebildet, der Anteil einer natürlichen Oberflächenkornrauheit an der Gesamtrauheitswirkung der Bodenform wird somit vernachlässigt.

In Bezug auf die Übertragbarkeit der Beobachtungen im Modell in die Natur sind die genannten Punkte zu berücksichtigen. Eine direkte Umrechnung der Ergebnisse vom Modell- in den Naturmaßstab ist vor dem Hintergrund der genannten Vereinfachungen nicht sinnvoll. Die gewonnenen Modellergebnisse ermöglichen allerdings eine qualitative Beurteilung der Strömungsprozesse und der Verteilung von Turbulenzintensität bei der Überströmung der Dünenmodelle.

6.3 Vergleich mit Strömungsprozessen über Dreiecksdüne

Zur Klärung der Ausgangsfragestellung, welche qualitativen Unterschiede zwischen der Energiedissipation bei der Überströmung einer Düne mit *Slip Face* gegenüber der Energiedissipation bei einer Düne mit vereinfachter, dreieckiger Geometrie ohne *Slip Face* bestehen, sind weitere Strömungsversuche an ebendieser dreieckigen Dünengeometrie durchzuführen und anschließend die die Ergebnisse gegenüberzustellen. Die Höhe und Länge der Dreiecksdüne im Modell (nachfolgend als Tri bezeichnet) sind dabei identisch zu den Höhen- und Längenabmessungen der *Slip Face* Dünen zu wählen. Vor dem Hintergrund des kleineren Datensatzes aus den Versuchen mit der Variante FloodSF sind für die Gegenüberstellung vor allem die Daten der Messungen an der Variante EbbSF heranzuziehen. Zudem sollten für die spätere Vergleichbarkeit neben den hydrodynamischen Größen auch die Versuchsrandbedingungen gleich gewählt werden: Hierzu zählt

der Einsatz der gleichen Sondenart, identischen Abtastraten und Messdauern sowie eine den bereits durchgeführten Versuchen entsprechende vertikale und horizontale Verteilung der Messpositionen. Für eine anschließende Gegenüberstellung der Ergebnisse sollten zusätzlich zur Ermittlung des Strömungsfeldes und der TKE weitere Analysen durchgeführt werden und zusätzliche Turbulenzparameter bestimmt werden (vgl. Abschnitt 6.1).

Abgesehen von der für die Vergleichbarkeit erforderliche Beibehaltung der Dünenhöhe und -länge sind hinsichtlich der Position des Dünenkamms sowie der resultierenden Böschungswinkel unterschiedliche Ausführungsvarianten für Tri möglich. Bild 46 zeigt verschiedene denkbare Optionen für die Dreiecksdüne Tri. Welche Dünenvariante für die Gegenüberstellung – insbesondere vor dem Hintergrund des Nutzens der Ergebnisse für die numerische Modellierung – sinnvoll wäre, ist noch zu diskutieren.

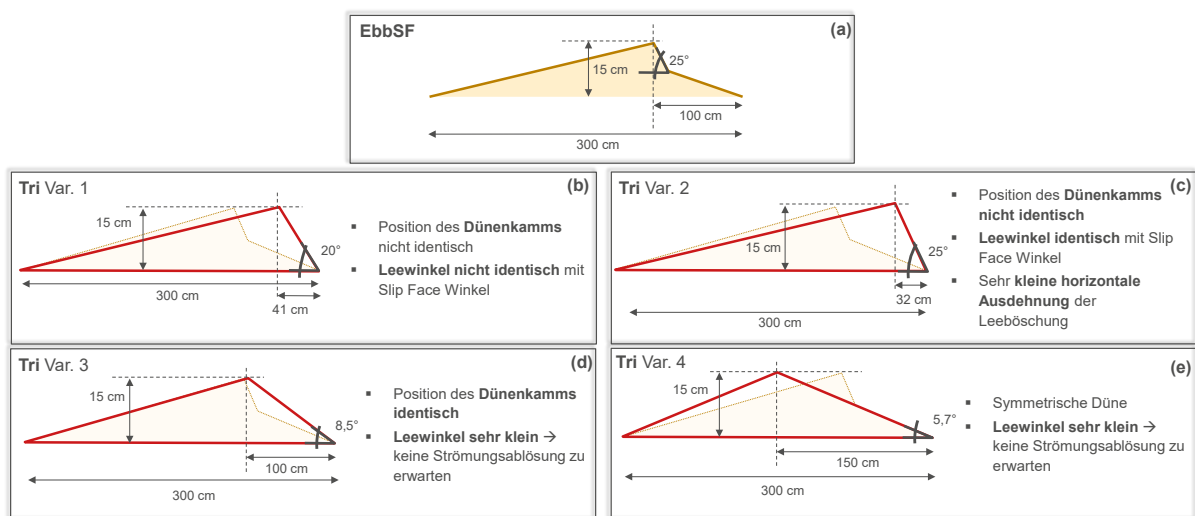


Bild 46: Mögliche Optionen für Dünenvariante mit dreieckiger Form (Tri)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung der Rauheitswirkung von Dünen mit einer *Slip Face*-Böschung wurden physikalische Laborversuche in einer Strömungsrinne durchgeführt. Die Experimente erfolgten mit nach Froude skalierten, zweidimensionalen und fixierten Modelldünen im Maßstab 1:10. Die Geometrie und die Abmessungen der Modelldünen sowie die hydrodynamischen Parameter wurden an in der Weser vorkommende Dünen angelehnt. Als Dünenmodelle dienten zwei repräsentativ ausgewählte Dünentypen: (i) eine ebborientierte Düne mit *Flood Slip Face* (FloodSF) und (ii) eine ebborientierte Düne mit *Ebb Slip Face* (EbbSF). Die Modelldünen wurden einer unidirektionalen Strömung mit konstanter Geschwindigkeit bei gleichbleibendem Wasserstand ausgesetzt.

Anhand von akustischen Strömungsmessungen konnten die Strömungs- und Turbulenzstrukturen über den zwei Modelldünen mit *Slip Face*-Böschung ermittelt werden. Sowohl über der Modelldüne mit *Flood Slip Face* (FloodSF) als auch über der Modelldüne mit *Ebb Slip Face* (EbbSF) konnte im Dünenleebereich eine rückwärtsgerichtete Strömung gemessen werden. Für die Dünenvariante EbbSF konnte zudem anhand des hier größeren Datensatzes mit enger verteilten Messpositionen ein Strömungswirbel und somit eine Ablösezone (*flow seperation zone*) identifiziert werden. Der Wiederanschlusspunkt der rezirkulierenden Strömung konnte qualitativ

ermittelt werden und befindet sich für die Variante EbbSF in einem Abstand von rund 80-100 cm ($\approx 5-6 \cdot H_D$) zum Dünenkamm.

Die Berechnung der TKE-Werte aus den Strömungsdaten hat gezeigt, dass im Leebereich beider Modelldünen erhöhte Werte auftreten. Die Größenordnung der maximalen TKE beträgt $0,008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bis $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Eine Nachlaufströmung (*wake*), die durch den Bereich einer erhöhten TKE gekennzeichnet ist, konnte mithilfe der engeren Verteilung der Messpositionen für die Variante EbbSF ermittelt werden. Der Bereich der Nachlaufströmung beginnt am Dünenkamm und verläuft leicht abwärtsgerichtet entlang der Dünenleeböschung.

Die Ergebnisse aus den hier vorgestellten Laborversuchen dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen: Zur Ermittlung der Unterschiede zwischen der Energiedissipation über einer Düne mit *Slip Face*-Böschung und der Energiedissipation über einer Düne mit dreieckigem Längsschnitt – mit jeweils gleichen Längen- und Höhenabmessungen – sollten in zukünftigen Untersuchungen Experimente an einem Dünenmodell mit dreieckiger Grundform ohne *Slip Face*-Böschung durchgeführt und die Untersuchungsergebnisse den hier festgestellten Beobachtungen gegenübergestellt werden. In diesem Zusammenhang sind zudem zusätzliche Analysen der Daten und die Berechnung weiterer Turbulenzparameter möglich und für ein noch detaillierteres Prozessverständnis sinnvoll. Die Erkenntnisse über die qualitativen und – mithilfe von künftigen, weiterführenden Analysen – auch quantitativen Unterschiede hinsichtlich der Energiedissipation können schließlich langfristig zur Verbesserung numerischer Modelle und deren Vorhersage der Rauheitswirkung von Bodenformen herangezogen werden.

8 Referenzen

Ashley, Gail M. (1990): Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem-SEPM Bedforms and Bedding Structures. In: *Journal of Sedimentary Research* 60 (1), S. 160–172. DOI: 10.2110/jsr.60.160.

Baas, Jaco H. (1993): Dimensional analysis of current ripples in recent and ancient depositional environments. Ph.D. Thesis. Utrecht University, The Netherlands, zuletzt geprüft am 12.06.2018.

Balachandar, Ram; Prashanth, H. (2011): Bed Forms and Flow Mechanisms Associated with Dunes. In: Silvia Susana Ginsberg (Hg.): *Sediment Transport: InTech*.

BAW (2016): Das Schwebstoffmessprogramm an Weser, Elbe und Ems 2009-2011. Messbericht. Interner Bericht der BAW. Vorgelegt von Dr. Steffen Grünler, unveröffentlicht.

Bennett, Sean J.; Best, James L. (1996): Mean flow and turbulence structure over fixed ripples and the ripple-dune transition. In: *Coherent Flow Structures in Open Channels*, John Wiley & Sons Ltd., S. 281–314, zuletzt geprüft am 03.05.2018.

Best, James L. (2005): The fluid dynamics of river dunes. A review and some future research directions. In: *J. Geophys. Res.* 110 (F4), n/a-n/a. DOI: 10.1029/2004JF000218.

Best, James L.; Kostaschuk, Ray A. (2002): An experimental study of turbulent flow over a low-angle dune. In: *J. Geophys. Res.* 107 (C9), S. 318. DOI: 10.1029/2000JC000294.

- Best, James L.; Simmons, Stephen; Parsons, Daniel R.; Oberg, Kevin; Czuba, Jonathan; Malzone, Chris (2010): A new methodology for the quantitative visualization of coherent flow structures in alluvial channels using multibeam echo-sounding (MBES). In: *Geophysical research letters* 37 (6). DOI: 10.1029/2009GL041852.
- Boguchwal, Lawrence A.; Southard, John B. (1990): Bed configurations in steady unidirectional water flows; Part 1, Scale model study using fine sands. In: *Journal of Sedimentary Research* 60 (5), S. 649–657. DOI: 10.1306/212F923C-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Bradley, Ryan W.; Venditti, Jeremy G. (2017): Reevaluating dune scaling relations. In: *Earth-Science Reviews* 165, S. 356–376. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.11.004.
- Carstensen, Christina (2021): FAUST: Laborversuche in einer Strömungsrinne mit skalierter Modelldüne (EbbSF). Bundesanstalt für Wasserbau, DOI: 10.48437/02.2021.K.9900.0001.
- Coleman, Stephen E.; Nikora, Vladimir I. (2008): Initiation and growth of fluvial dunes. In: *Marine and River Dune Dynamics*. Online verfügbar unter http://www.shom.fr/fileadmin/SHOM/PDF/04-Activites/sedimentologie/marid123/a7_Coleman_al.pdf, zuletzt geprüft am 14.05.2018.
- Dillo, Hans Georg (1960): Sandwanderungen in Tideflüssen. In: *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover* (17).
- Doré, Arnaud; Bonneton, Philippe; Marieu, Vincent; Garlan, Thierry (2018): Observation and numerical modeling of tidal dune dynamics. In: *Ocean Dynamics* 68 (4-5), S. 589–602. DOI: 10.1007/s10236-018-1141-0.
- Engel, Peter (1981): Length of flow separation over dunes. In: *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 107, S. 1133–1143.
- Engelund, F.; Fredsøe, Jørgen (1982): Sediment Ripples and Dunes. In: *Annu. Rev. Fluid Mech.* 14 (1), S. 13–37. DOI: 10.1146/annurev.fl.14.010182.000305.
- Engelund, F.; Hansen, Eggert (1967): A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Copenhagen, Denmark: Teknisk Forlag, zuletzt geprüft am 27.08.2018.
- Ernstsen, Verner B.; Noormets, Riko; Winter, Christian; Hebbeln, Dierk; Bartholomä, Alexander; Flemming, Burghard W.; Bartholdy, Jesper (2006): Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. In: *Geo-Mar Lett* 26 (3), S. 151–163. DOI: 10.1007/s00367-006-0026-2.
- Friedrich, Heide; Nikora, Vladimir I.; Melville, Bruce W.; Coleman, Stephen E. (2006): Statistical interpretation of geometric differences in ripple and dune shapes. In: *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering*, zuletzt geprüft am 19.04.2018.
- Frings, Roy (2007): From gravel to sand. Downstream fining of bed sediments in the lower river Rhine. PhD Thesis. Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
- Goring, Derek G.; Nikora, Vladimir I. (2002): Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. In: *J. Hydraul. Eng.* 128 (1), S. 117–126. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(117).
- inphoris GmbH; smile consult GmbH (2014): Airborne Laser-Scanner-Befliegungen der Unter- und Außenweser - 2012 bis 2015. Abschlussbericht Bearbeitungsjahr 2012.

Karim, Fazle (1999): Bed-Form Geometry in Sand-Bed Flows. In: *J. Hydraul. Eng.* 125 (12), S. 1253–1261. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:12(1253).

Kostaschuk, Ray A.; Villard, Paul (1996): Flow and sediment transport over large subaqueous dunes. Fraser River, Canada. In: *Sedimentology* 43 (5), S. 849–863. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1996.tb01506.x.

Kwoll, Eva; Becker, Marius; Winter, Christian (2014): With or against the tide. The influence of bed form asymmetry on the formation of macroturbulence and suspended sediment patterns, zuletzt geprüft am 19.06.2018.

Kwoll, Eva; Venditti, Jeremy G.; Bradley, Ryan W.; Winter, Christian (2016): Flow structure and resistance over subaqueous high- and low-angle dunes. In: *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 121 (3), S. 545–564. DOI: 10.1002/2015JF003637.

Lefebvre, Alice (2019): Three-Dimensional Flow Above River Bedforms. Insights From Numerical Modeling of a Natural Dune Field (Río Paraná, Argentina). In: *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 124 (8), S. 2241–2264. DOI: 10.1029/2018JF004928.

Lefebvre, Alice; Herrling, Gerald; Zorndt, Anna; Krämer, Knut; Becker, Marius; Winter, Christian (2020): Tidal bedforms dynamics, Weser River, Germany. EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020. EGU2020-13499, 2020.

Lefebvre, Alice; Paarlberg, Andries J.; Winter, Christian (2014): Flow separation and shear stress over angle-of-repose bed forms. A numerical investigation. In: *Water Resour. Res.* 50 (2), S. 986–1005. DOI: 10.1002/2013WR014587.

Lefebvre, Alice; Paarlberg, Andries J.; Winter, Christian (2016): Characterising natural bedform morphology and its influence on flow. In: *Geo-Mar Lett* 36 (5), S. 379–393. DOI: 10.1007/s00367-016-0455-5.

Lefebvre, Alice; Winter, Christian (2016): Predicting bed form roughness. The influence of lee side angle. In: *Geo-Mar Lett* 36 (2), S. 121–133. DOI: 10.1007/s00367-016-0436-8.

Naqshband, Suleyman; Ribberink, Jan S.; Hulscher, Suzanne J. M. H. (2014): Using Both Free Surface Effect and Sediment Transport Mode Parameters in Defining the Morphology of River Dunes and Their Evolution to Upper Stage Plane Beds. In: *J. Hydraul. Eng.* 140 (6), S. 6014010. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000873.

Nelson, Jonathan M.; McLean, Stephen R.; Wolfe, Stephen R. (1993): Mean flow and turbulence fields over twodimensional bed forms. In: *Wasserbau - mehr* 29 (12), S. 3935–3953, zuletzt geprüft am 10.05.2019.

Nortek (2015): Nortek Vectrino Profiler. Online verfügbar unter <http://195.62.126.26/lib/user-seminars/ketil-horn-vectrino-profiler/view>, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 26.03.2021.

Nortek (2017): The Comprehensive Manual. AWAC, Aquadopp, Aquadopp Profiler, 2D Horizontal Profiler, Vector, Vectrino, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

Nortek (2018): The Comprehensive Manual for Velocimeters. Vector, Vectrino, Vectrino Profiler. Online verfügbar unter <https://support.nortekgroup.com/hc/en-us/articles/360029839351-The-Comprehensive-Manual-Velocimeters>.

Nortek (2020a): Vectrino. Technical Specifications. Online verfügbar unter <https://www.nortekgroup.com/export/pdf/Vectrino%20.pdf>.

Nortek (2020b): Vectrino Profiler. Technical Specifications. Online verfügbar unter <https://www.nortekgroup.com/export/pdf/Vectrino%20Profiler.pdf>.

Paarlberg, Andries J.; Dohmen-Janssen, C. Marjolein; Hulscher, Suzanne J. M. H.; Termes, Paul (2007): A parameterization of flow separation over subaqueous dunes. In: *Water Resour. Res.* 43 (12), S. 161. DOI: 10.1029/2006WR005425.

Parsons, Daniel R.; Best, James L.; Orfeo, O.; Hardy, Richard J.; Kostaschuk, Ray A.; Lane, S. N. (2005): Morphology and flow fields of three-dimensional dunes, Rio Paraná, Argentina. Results from simultaneous multibeam echo sounding and acoustic Doppler current profiling. In: *J. Geophys. Res.* 110 (F4), n/a-n/a. DOI: 10.1029/2004JF000231.

Rubin, D. M.; McCulloch, D. S. (1980): Single and Superimposed Bedforms: A Synthesis of San Francisco Bay and Flume Observations. In: *Sedimentary Geology* 26 (1-3), S. 207–231, zuletzt geprüft am 29.08.2018.

Sokoray-Varga, Béla; Höger, Verena (2014): Messungen mit dem Vectrino. In: *BAWEmpfehlung*, zuletzt geprüft am 09.05.2019.

Soulsby, Richard (1997): Dynamics of marine sands. A manual for practical applications. London: Telford.

Svenson, C.; Ernstsén, Verner B.; Winter, Christian; Bartholomä, Alexander; Hebbeln, Dierk (2009): Tide-driven sediment variations on a large compound dune in the jade tidal inlet channel, Southeastern North Sea. In: *Journal of Coastal Research* (SPEC. ISSUE 56), S. 361–365.

Van Rijn, Leo C. (1984): Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. In: *J. Hydraul. Eng.* 110 (10), S. 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431).

Van Rijn, Leo C. (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. 1993. Aufl. The Netherlands: Aqua publications (1006).

Vanoni, V. A.; Hwang, L. S. (1967): Relation between bed forms and friction in streams. In: *Journal of the Hydraulics Division* 93, S. 121–144.

Venditti, Jeremy G. (2007): Turbulent flow and drag over fixed two- and three-dimensional dunes. In: *J. Geophys. Res.* 112 (F4), S. 185. DOI: 10.1029/2006JF000650.

Venditti, Jeremy G. (2013): Bedforms in Sand-Bedded Rivers. In: John F. Shroder (Hg.): *Treatise on geomorphology*. London, Waltham, MA: Academic Press, S. 137–162, zuletzt geprüft am 06.04.2018.

Venditti, Jeremy G.; Bennett, Sean J. (2000): Spectral analysis of turbulent flow and suspended sediment transport over fixed dunes. In: *J. Geophys. Res.* 105 (C9), S. 22035–22047. DOI: 10.1029/2000JC900094.

Venditti, Jeremy G.; Church, Michael A.; Bennett, Sean J. (2005a): Bed form initiation from a flat sand bed. In: *Journal of Geophysical Research* 110 (F1), S. 797. DOI: 10.1029/2004JF000149.

Venditti, Jeremy G.; Church, Michael A.; Bennett, Sean J. (2005b): Morphodynamics of small-scale superimposed sand waves over migrating dune bed forms. In: *Water Resour. Res.* 41 (10), S. 323. DOI: 10.1029/2004WR003461.

Wilbers, A.W.E. (2004): The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. PhD Thesis. Utrecht University, Utrecht, Niederlande, zuletzt geprüft am 25.06.2018.

Winter, Christian; Lefebvre, Alice; Becker, Marius; Ferret, Y.; Ernstsén, Verner B.; Bartholdy, Jesper et al. (2016): Properties of active tidal bedforms. In: Thierry Garlan (Hg.): *Marine and River Dune Dynamics*. North Wales, UK.

WSV (2020): Gewässerkundliches Informationssystem der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Online verfügbar unter <http://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=4970030>.

Yalin, Mehmet Selim (1964): Geometrical properties of sand waves. In: *Journal of the Hydraulics Division* 90 (5), S. 105–119.

9 Anlage: Dokumentation zur Umlaufrinne und Hinweise zur Messtechnik

9.1 Große Umlaufrinne am BAW-Standort Hamburg

Die Umlaufrinne des BAW-Standorts Hamburg setzt sich aus zwei geraden Abschnitten zusammen, die an ihren jeweiligen Enden durch halbkreisförmige Bereiche zu einem geschlossenen Umlaufgerinne verbunden sind. Ein gerader Abschnitt ist unterirdisch in Form einer Rohrleitung DN1400 ausgebildet, der andere Geradenabschnitt ist über die Versuchshalle oberirdisch zugänglich. Dieser gegenüber der Rohrleitung liegende Rinnenabschnitt besitzt einen rechteckigen Querschnitt und kann als Versuchsstrecke genutzt werden. Die Gesamtlänge der Umlaufrinne beträgt ca. 220 m. Die Rohrleitung besitzt eine Länge von rund 80 m, die Länge des oberirdisch zugänglichen Rechteckgerinnes beträgt ca. 90 m, von denen rund 70 m als Versuchsstrecke geeignet sind. Im Bereich dieses Abschnitts sind für eine optische Beobachtung seitlich zwei bodentiefe Sichtfenster vorhanden. Die Breite des Rechteckabschnitts beträgt 1,50 m, die Tiefe ca. 1,50 m. Die Befüllung der Rinne ist bis zu einem maximalen Wasserstand von 1,30 m möglich. Die die Geradenabschnitte verbindenden Kurvenabschnitte besitzen jeweils eine Länge von ca. 25 m. Eine schematische Darstellung der Umlaufrinne ist in Bild 47 zu sehen.

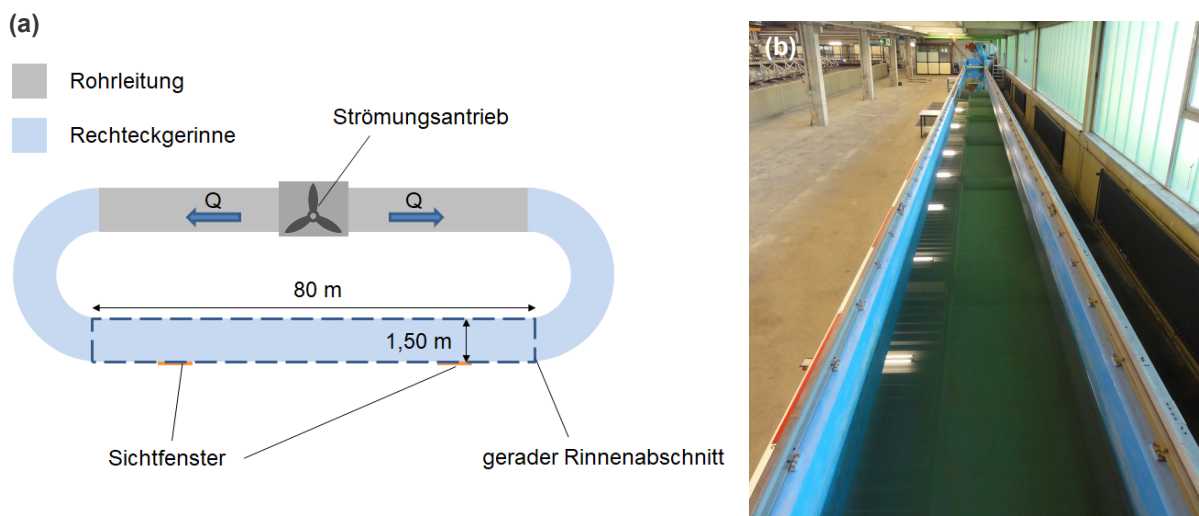


Bild 47: (a) Schematische Darstellung der Strömungsumlaufrinne, (b) Fotografie des oberirdisch zugänglichen Rinnenabschnitts

9.2 Strömungsgenerierung

Die Generierung der Strömung erfolgt durch einen Schiffspropeller (Bild 48). Dieser befindet sich auf mittlerer Strecke der unterirdisch verlegten Rohrleitung gegenüber Versuchsabschnitts (vgl. auch Bild 47).

Die Strömungsgeschwindigkeit kann über die Antriebsleistung des Propellers variabel eingestellt werden, bei einer Wasserfüllhöhe von 1,0 m sind Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 1,5 m/s einstellbar. Die Generierung der Strömung ist in beide Richtungen möglich.

Bild 49 zeigt den Zusammenhang zwischen der eingestellten Frequenz für den Propellerantrieb und die daraus entstehenden mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Rinnenquerschnitt für die Wassertiefen $h = 80$ cm (rot), $h = 90$ cm (grün), $h = 95$ cm (hellblau), $h = 100$ cm (senffarben) und $h = 110$ cm (dunkelblau).

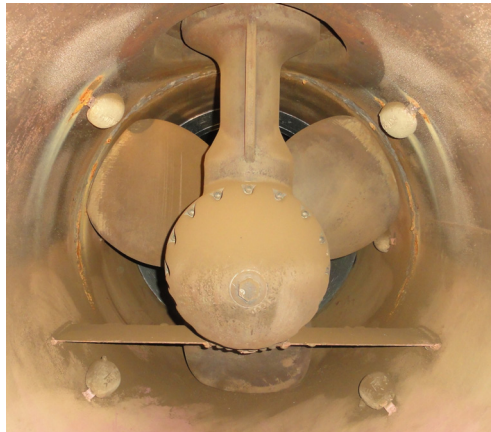


Bild 48: Schiffspropeller als Strömungsantrieb im unterirdischen Abschnitt der Umlaufrinne

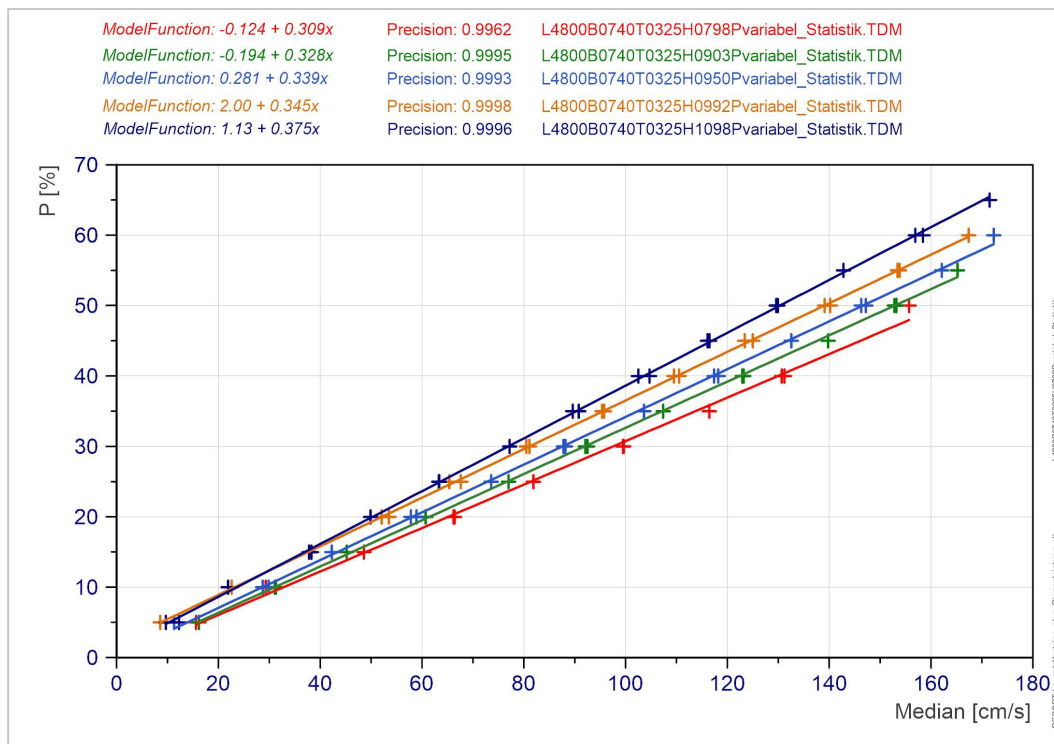


Bild 49: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit [cm/s] in Abhängigkeit der Nennfrequenz [%] für Antrieb des Bugstrahlruders bei unterschiedlichen Wassertiefen (rot: 80 cm, grün: 90 cm, hellblau: 95 cm, orange: 100 cm, dunkelblau: 110 cm)

9.3 Messtechnik

Zur Installation von Messtechnik sind ein in Längsrichtung mittels Schrittmotor verfahrbarer Rinnenwagen sowie eine in Querrichtung und in der Höhe einstellbare Traverse vorhanden. Die anzufahrende Längsposition des Messwagens kann mit einer Genauigkeit im cm-Bereich vorgegeben und angefahren werden, die Ist-Position wird dabei über eine Software-Anwendung angezeigt und kann somit während des Verfahrens sowie bei Erreichen der Zielposition überprüft werden. Eine redundante Möglichkeit zur Kontrolle der Längsposition der Messtraverse ist durch einen am Rinnenwagen fest installierten Laserdistanzsensor gegeben, der den Abstand des Wagens zur einer bekannten Zielposition am Ende des Versuchsabschnitts misst. Des Weiteren fest installiert am Rinnenwagen ist ein Ultraschallpegel zur Messung des Wasserstandes. Der gemessene Wasserstand sowie die Längsposition des Rinnenwagens können in Echtzeit abgegriffen werden und dienen als Kontrollwerte zur Bestimmung der Längsposition der Messtraverse und zur Überprüfung des Füllstandes der Rinne.

Im Ein-/Auslaufbereich der Versuchsstrecke der Rinne, der in Nähe des Füllrohrs gelegen ist, befinden sich fest installiert eine Ultraschallmesssonde sowie ein magnetostriktiver Messpegel zur redundanten Messung des Wasserstands. Infrastruktur zur Bereitstellung der Daten für die weitere Analyse und Verarbeitung ist vorhanden, wird zurzeit aber noch nicht verwendet.

9.3.1 ADV-Sensorik

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Umlaufrinne werden der *Vectrino Profiler* sowie der *Vectrino* der Firma Nortek eingesetzt. Beide Sonden sind mit der Firmware *Vectrino Plus* ausgestattet. Dadurch sind Messungen mit bis zu 200 Hz Abtastrate möglich, die Standard-Firmware ermöglicht lediglich Messfrequenzen bis 25 Hz. Die ADV-Sonden bestehen aus einem Gehäuse, aus dem ein starrer Stab mit einem Messkopf ragt. Der Messkopf setzt sich zusammen aus einem mittig positionierten Sender sowie vier um diesen Sender symmetrisch verteilten Empfängerärmchen.

Die Bezeichnungen *sidelooking* und *downlooking* beziehen sich auf die Geometrie des Sondenkopfes (s. Bild 50). Bei der *sidelooking* Sonde ist der Messkopf mit den vier Empfängerärmchen im 90°-Winkel zur Seite abgelenkt. Das Messvolumen befindet sich seitlich neben dem Messkopf. Bei der *downlooking* Sonde ist der Sender mit den symmetrisch verteilten Empfängerarmen nach unten ausgerichtet, das Messvolumen befindet sich unterhalb des Messkopfes.

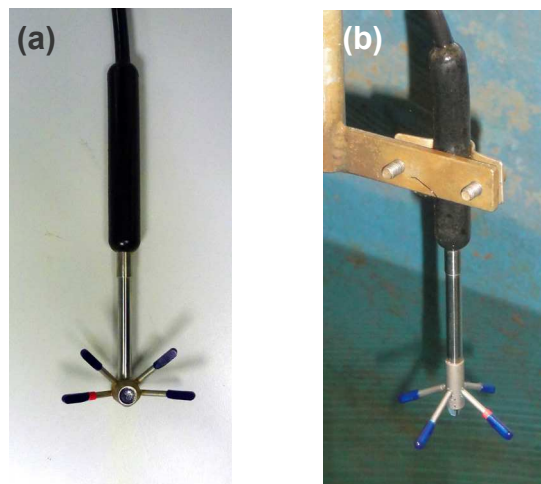


Bild 50: Eingesetzte Vectrino Sonden: (a) in der Variante sidelooking und (b) Vectrino Profiler in der Variante downlooking

Im Gegensatz zur *Vectrino* Sonde, die innerhalb eines kleinen Messvolumens punktuelle 3D Geschwindigkeiten misst, ist der *Vectrino Profiler* in der Lage, die Strömungsgeschwindigkeiten über einen Bereich von 30 mm mit einer maximalen Auflösung von 1 mm, d. h. mit 30 Geschwindigkeitswerten, in Form eines Geschwindigkeitsprofils abzubilden. Das Messvolumen befindet sich unterhalb des Senders. Der Abstand zum Sender, die Größe des Messvolumens sowie die Größe der einzelnen Messzellen des Profils können durch den Nutzer angepasst werden (Abstand vom Sender: 45 mm-75 mm, Größe des Messvolumens: max. 30 mm, Zellgröße: 1 mm-4 mm).

In Abschnitt 9.3.2 dieser Anlage werden Untersuchungen beschrieben, die zeigen, dass die Nutzung und Verwertbarkeit von Daten aus Profilmessungen zusätzliche Bearbeitungsschritte zur Qualitätssicherung erforderlich machen, da die Qualität der Messdaten aus den Randbereichen des Messvolumens nicht für die weitere Analyse und Interpretation ausreicht. Die Datenqualität der Punktmessungen hingegen war auch ohne zusätzliche Filterung zufriedenstellend.

Für den *Vectrino Profiler* beträgt die Messgenauigkeit gemäß Nortek (2020b) $\pm 1\%$ des gemessenen Wertes ± 1 mm/s, für den *Vectrino* $\pm 0,5\%$ des gemessenen Werts ± 1 mm/s (Nortek 2020a).

9.3.2 Profilmessung beim Vectrino Profiler

Wie zu Beginn des Kapitels 9.3.1 beschrieben bietet der *Vectrino Profiler* die Option, sein Messvolumen in mehrere vertikale Zellen (im Weiteren auch *Layer* genannt) zu unterteilen und für jede Zelle jeweils eine Strömungsgeschwindigkeiten zu messen. Möglich sind Zellgrößen in vertikaler Richtung von 1 mm, 2 mm, 3 mm oder 4 mm, die Größe kann durch den Benutzer festgelegt werden. Das Messvolumen lässt sich in maximal 30 Zellen mit einer Zellgröße von 1 mm einteilen, sodass mit jeweils einer Messung über einen vertikalen Bereich von 3 cm insgesamt 30 Geschwindigkeiten erfasst werden können. Für größer gewählte Zellen reduziert sich die Anzahl der maximal möglichen Zellen pro Messvolumen entsprechend. Die Höhe des Messvolumens, d. h. der vertikale Messbereich, kann kleiner als die maximal möglichen 30 mm gewählt werden, sodass beispielsweise auch Punktmessung in einem Messvolumen von 1 mm bis 4 mm Größe möglich sind.

Zur Untersuchung der Messqualität in Abhängigkeit der gewählten Zellanzahl im Messvolumen wurden Strömungsmessungen in der Umlaufrinne bei einer mittleren Sollgeschwindigkeit von $v_{m,soll} = 0,33$ m/s und einem Wasserstand $h = 1$ m durchgeführt. Folgende Einstellungen und Messdauern wurden für die Messungen mit dem *Vectrino Profiler* gewählt:

- (i) 30 Layer, Zellgröße: 1 mm, Messvolumen: 30 mm, $t_{mess} = 4$ min bis $z = 0,21$ m, $t_{mess} = 2$ min ab $z = 0,25$ m
- (ii) 8 Layer, Zellgröße: 4 mm, Messvolumen: 32 mm, $t_{mess} = 4$ min bis $z = 0,17$ m, $t_{mess} = 2$ min ab $z = 0,19$ m
- (iii) 1 Layer, Zellgröße: 4 mm, Messvolumen: 4 mm, $t_{mess} = 2$ min

Zum Zwecke des überwiegend qualitativen Vergleichs der Ergebnisse aus den drei Messeinstellungen sowie zur Bewertung einer geeigneten Einstellung für die Messungen erfolgte die Auswertung der Daten mit Schwerpunkt auf die Hauptkomponente, d. h. x-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit v_x . Die horizontale Querkomponente v_y und vertikale z-Komponente v_z der Strömung wurden nicht betrachtet.

Bild 51 zeigt ein gemessenes vertikales Geschwindigkeitsprofil einer Messung mit 30 Layern und den unter (i) genannten Einstellungen. In Bild 51a fällt auf, dass bis in eine Höhe von ca. $z = 0,2$ m die erfassten Geschwindigkeiten sehr schwanken und erst oberhalb dieses Bereichs der zu erwartende logarithmische Verlauf der Geschwindigkeiten sichtbar wird, wobei auch hier Geschwindigkeitsausreißer auftreten. Die Geschwindigkeiten im sohlnahen Bereich bis in $z = 0,2$ m werden in Bild 51b nochmals vergrößert dargestellt. Mit einer Linie verbunden sowie mit einem Kasten umrandet sind jeweils die 30 Messwerte, die in dem jeweiligen Messvolumen während einer Messung aufgenommen wurden. Die Höhenpositionen der Sonde wurden in diesem Bereich so gewählt, dass sich die Messvolumen der einzelnen Messungen überschneiden und somit die ersten und letzten zehn Messzellen von jeweils zwei angrenzenden Messvolumen an identischen Höhenpositionen befinden.

Auffällig ist, dass für die Höhenpositionen, für die aufgrund der sich überlappenden Messvolumina jeweils zwei Messwerte vorliegen, für identische Messpositionen überwiegend unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten gemessen wurden. Für die Fälle, in denen sich deutliche Abweichungen abzeichnen, sind die Geschwindigkeitswerte aus den oberen 10 Layer eines Messvolumens tendenziell geringer als die unteren 10 Layer des überlappenden Messvolumens.

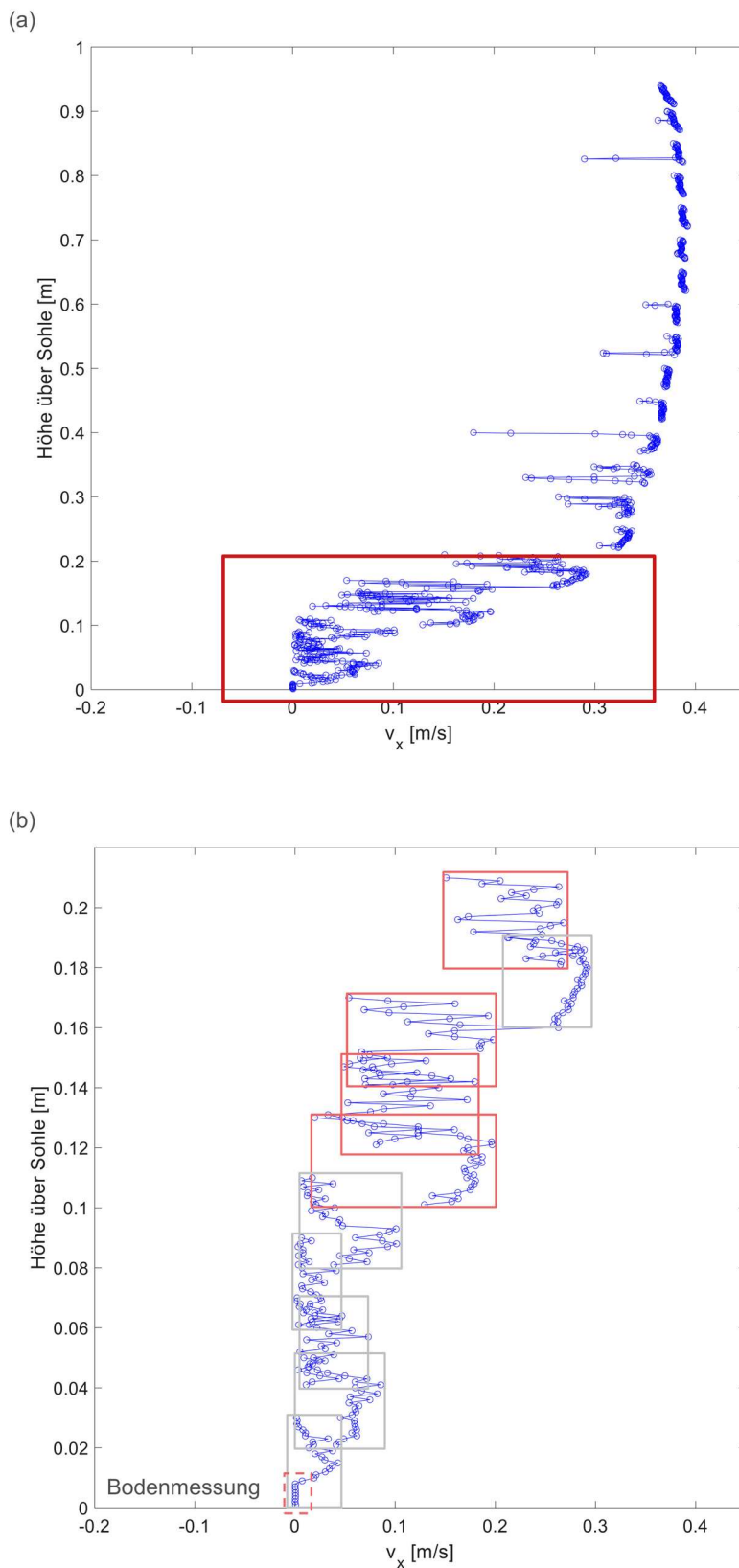


Bild 51: *Horizontale Strömungsgeschwindigkeit v_x in unterschiedlichen Höhen über der Sohle, gemessen mit 30 Layer á 1 mm Zellgröße; (a) Übersicht über gesamte Wassersäule, (b) Messungen in den ersten 0,2 m über der Sohle (bereits fehlergefiltert)*

Des Weiteren sind deutliche Schwankungen der Geschwindigkeitswerte innerhalb eines Messvolumens erkennbar. In Rot markiert sind die Messungen mit den größten Abweichungen zwischen kleinster und größter erfasster Geschwindigkeit innerhalb des Messvolumens. Die festgestellten Differenzen zwischen zwei erfassten Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb eines Messvolumens liegen teilweise in einer Größenordnung von 0,2 m/s (bei einer generierten mittleren vertikalen Geschwindigkeit von 0,33 m/s).

Die Messungen mit den unter (ii) beschriebenen Einstellungen mit 8 Zellen pro Messvolumen und jeweils 4 mm Zellgröße wurden ebenfalls so durchgeführt, dass sich die Messvolumina in ihrer Höhenposition überlappen. Die Positionen der ersten und letzten drei von insgesamt 8 Zellen der benachbarten Messvolumina sind jeweils identisch. Bei der Betrachtung der Ergebnisse im Bereich zwischen Sohle und $z = 0,2$ m über der Sohle (s. Bild 52) lässt sich ebenfalls feststellen, dass die Geschwindigkeiten identischer Positionen voneinander abweichen. Die größten Abweichungen sind in Bild 52 rot markiert und bewegen sich in einer Größenordnung von knapp 0,1 m/s bis 0,2 m/s. Die Markierung der Messungen in ca. $z = 0,12$ m über der Sohle kennzeichnet Geschwindigkeiten aus zwei unterschiedlichen Messvolumina, die trotz gleicher Höhenpositionen deutlich voneinander abweichen. Auch unter diesen Messeinstellungen treten innerhalb der Messvolumina Schwankungen der Geschwindigkeitsgrößenordnung auf. Die Geschwindigkeitsprofile, die im Bereich zwischen $z = 14$ cm und $z = 17$ cm sowie $z = 16$ cm und $z = 19$ cm gemessen wurden, weisen einen regelmäßigeren Verlauf mit nach oben etwas zunehmenden Geschwindigkeiten auf. Auch im Bereich zwischen $z = 8$ cm und $z = 11$ cm lässt sich ein ähnlich ausgebildetes Profil finden. Sowohl die Auswertung der Messungen mit 30 Layer (Bild 51a) und als auch die mit 8 Layern (Bild 52) zeigt, dass mit zunehmenden Abstand zur Sohle der Verlauf der Profile gleichmäßiger wird und Schwankungen sowie Ausreißer abnehmen.

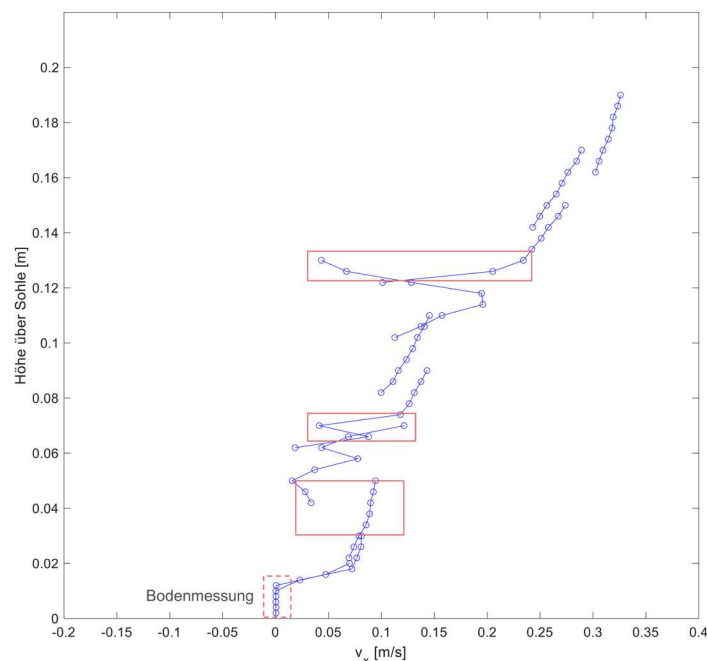


Bild 52: Horizontale Strömungsgeschwindigkeit v_x bis 0,2 m über der Sohle Höhe, gemessen mit 8 Layer á 4 mm (bereits fehlergefiltert)

Für einen Vergleich der Ergebnisse zwischen allen drei gewählten Messeinstellungen sind die ermittelten Geschwindigkeiten v_x in Bild 53 gegenübergestellt. Aus der graphischen Darstellung geht hervor, dass die in blau gekennzeichneten Geschwindigkeiten aus den Messungen mit 30 Layern geringere Werte aufweisen als die der anderen Messungen. Etwas höhere Geschwindigkeiten zeigen sich für die Messungen mit 8 Layern, während mit den Punktmessungen (1 Layer) die tendenziell größten Geschwindigkeiten erfasst wurden. Die Abweichungen zwischen den Messungen an identischen Höhenpositionen besitzen eine Größenordnung von etwa 1-2 cm/s, wobei vereinzelt auch deutlich größere Abweichungen festzustellen sind. Damit liegen diese festgestellten Abweichungen außerhalb des Bereichs der Messgenauigkeit von in diesem Fall maximal ± 2 mm/s bis ± 4 mm/s (Nortek 2020a, 2020b) und sind daher als Messfehler bzw. Ausreißer zu betrachten.

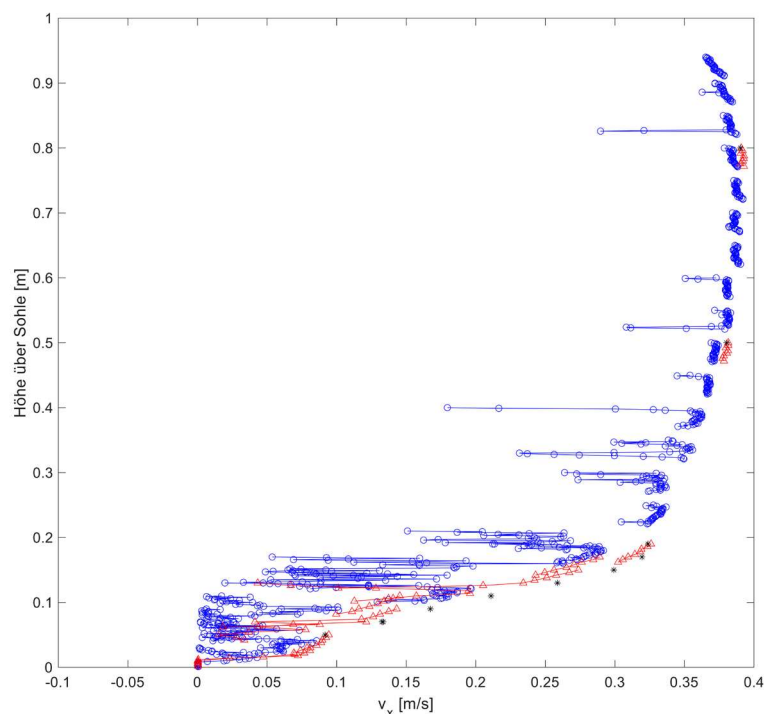


Bild 53: Vergleich der Messungen: v_x gemessen mit (i) 30 Layern (blau/Kreis), (ii) 8 Layern (rot/Dreieck) und (iii) 1 Layer (schwarz/Sternchen) (bereits fehlergefiltert)

Weitere Hinweise auf die Qualität und Belastbarkeit der Daten liefert die Bewertung nach dem Signal-Rausch-Verhalten (SNR) und die Analyse der Korrelation. Bild 54 zeigt für die jeweiligen Messeinstellung SNR [dB] und Korrelation [%] der Daten in den verschiedenen vertikalen Messpositionen. Nortek (2018) empfiehlt für belastbare Daten SNR-Werte von 20 bis 30 dB sowie Korrelationen von über 90 %. Für die Messungen mit 30 Layern sind die SNR-Werte für den größten Teil der Messdaten kleiner als die empfohlenen 20-30 dB (in Bild 54 hinterlegt mit rot). Auch die Korrelation unterschreitet überwiegend den von Nortek (2018) empfohlenen Wert von größer als 90 % (in Bild 54 ebenfalls hinterlegt mit rot). Lediglich einzelne Messdaten aus dem mittleren Bereich des jeweiligen Messvolumens erreichen Korrelationswerte von über 90%. Bei den Messungen mit 8 Layern werden höhere Werte für SNR und Korrelation erreicht, hier liegt der größte Teil dieser Werte innerhalb des empfohlenen Bereichs. Insbesondere in den unteren Zellen der

jeweiligen Messvolumina entsprechen SNR und Korrelation hingegen nicht den empfohlenen Mindestwerten. Die Werte von sowohl SNR als auch Korrelation bei den Punktmessungen mit einer Messzelle liegen mit Ausnahme einzelner Ausreißer innerhalb der anzustrebenden Wertebereiche. Der parabolische Verlauf der SNR- und Korrelationswerte von Messungen mit mehreren Layern wird von Nortek (2018) als charakteristisch beschrieben. Die höchsten Werte für SNR und Korrelation sind nach Nortek (2018) im sogenannten *sweet spot* zu erwarten, der sich 5 cm unterhalb des Senders befindet. Auch für die hier erfassten Daten kann festgestellt werden, dass die Maximalwerte für SNR und Korrelation in etwa 5 cm unterhalb der Höhenposition des Senders auftreten.

Des Weiteren hinzuweisen sei auf die rot gestrichelt umrandeten SNR-Werte direkt über der Sohle in Bild 54a und Bild 54b. Die deutlich höheren Werte sind darauf zurückzuführen, dass die Positionen der unteren Zellen des Messvolumens sich rechnerisch bereits in der Sohle befinden. Die Signale, die vom Messgerät zur Ermittlung der Geschwindigkeit an diesen Positionen ausgesendet werden, werden an der Sohle reflektiert. Das Reflexionsvermögen der harten Sohle ist im Vergleich zu Reflexionen an im Wasser befindlichen Partikeln besser, sodass die reflektierte Signalstärke höher ist als an anderen Positionen in der Wassersäule. Dies ist bei der Interpretation der gemessenen Werte zu beachten. Geschwindigkeiten, die an diesen Positionen gemessen wurden, sollten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

Die Auswertung dieser Messungen und der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Nutzung und Verwertbarkeit von Daten aus Messungen mit mehreren Messzellen eine zusätzliche Vorbearbeitung und Beurteilung anhand von SNR- und Korrelationswerte erforderlich machen, sodass Daten schlechter Qualität aus den Randbereichen der gemessenen Profile nicht für die weitere Analyse und Interpretation herangezogen werden. Es hat sich gezeigt, dass die Datenqualität der Punktmessungen auch ohne zusätzliche Filterung zufriedenstellend ist.

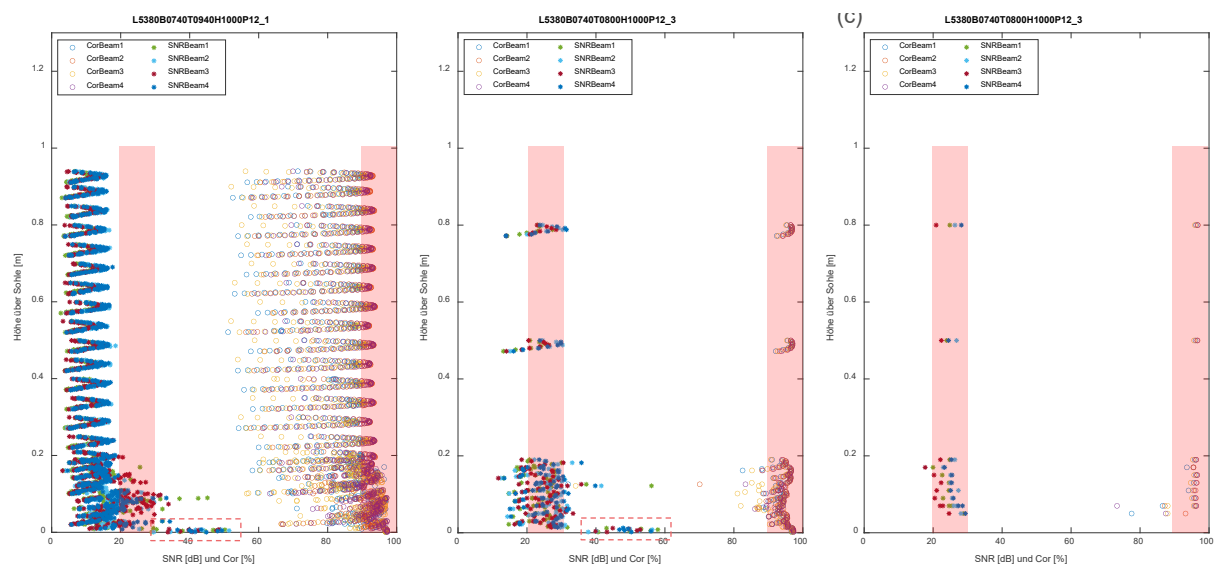


Bild 54: SNR- und Korrelationswerte für Messungen mit (a) 30 Layer, (b) 8 Layer, (c) 1 Layer je Messvolumen

9.3.3 Einfluss der Nominal Velocity Range auf die Messergebnisse (Vectrino sidelooking)

Die Qualität der Daten wird unter anderem durch den benutzerdefinierten Geschwindigkeitsbereich beeinflusst, der bei den Nortek-Sonden als *Nominal Velocity Range* (NVR) einstellbar ist. Die *Nominal Velocity Range* (NVR) wird in [m/s] eingestellt und muss an die maximal zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten angepasst werden. Übersteigen die auftretenden Geschwindigkeiten den für die NVR eingestellten Wert, tritt ein sogenanntes *Phase Wrapping* auf: In der gemessenen Zeitreihe zeigt sich eine abrupte, unrealistische Änderung der Geschwindigkeitsgrößenordnung.

Die NVR setzt sich aus dem Geschwindigkeitsbereich der vertikalen Geschwindigkeitskomponente sowie der horizontalen Komponente zusammen. Zu beachten sei hierbei, dass die Bezeichnung „horizontal“ und „vertikal“ auf die Orientierung relativ zur Senderachse bezieht: Für die *downlooking*-Sonde gilt der horizontale Wert für die x- und y-Richtung und der vertikale Wert für die z-Richtung. Bei der *sidelooking*-Sonde ist die Senderachse um 90° abgelenkt, sodass sich der horizontale Geschwindigkeitsbereich auf die vertikale z-Geschwindigkeitskomponente bezieht und der kleinere Grenzwert, der als *vertical velocity range* gekennzeichnet ist, für die horizontalen x- und y-Komponenten gilt.

Die eingestellte NVR bestimmt den zeitlichen Versatz zwischen zwei ausgesendeten Pulsen und spielt somit auch eine Rolle bei der Vermeidung sogenannter *weak spots*. *Weak spots* treten auf, wenn ein Teil eines zuerst gesendeten Pulses nicht an einem Partikel im Messvolumen, sondern an einer nahegelegenen festen Oberfläche reflektiert wird und anschließend zeitgleich mit dem nächsten Puls das Messvolumen passiert. Dies führt zu einer Interferenz der Signale und hat eine schlechte Datenqualität mit niedrigen SNR- und Korrelationswerten zur Folge. Eine Tabelle zur Orientierung über die kritischen Abstände zu Oberflächen in Abhängigkeit der NVR stellt Nortek (2018) in einer technischen Dokumentation zur Verfügung.

Durch die Anpassung der NVR und somit der Anpassung des Zeitversatzes zwischen den Pulsen können *weak spots* vermieden werden. Der *Vectrino Profiler* bietet zudem die Möglichkeit, anhand eines sogenannten *adaptive ping interval* den Zeitversatz zwischen zwei Pulsen dynamisch an die bestehenden Randbedingungen anzupassen und so ebenfalls das Auftreten von *weak spots* zu minimieren.

Um die Auswirkungen unterschiedlicher NVR auf eine gemessene Zeitreihe bei der Messung mit der *Vectrino* Sonde zu untersuchen, wurden an einer Position in der Umlaufrinne bei gleichbleibenden Randbedingungen, d. h. ohne Veränderung von Einbauten sowie bei gleichbleibender Strömungsgeschwindigkeit, Messungen unter Variation der NVR durchgeführt. Die Strömung wurde mit der Propellereinstellung $P = 12\%$ (Anteil an der Nennfrequenz) generiert, sodass eine mittlere vertikale Strömungsgeschwindigkeit von ca. $v_m = 0,32$ m/s im Bereich vor der eingebauten Modelldüse vorlag. Bei den nachfolgend verglichenen Daten handelt es sich um Daten aus Messungen an der Rinnenlängsposition $x = 53,80$ m an einer eingebauten asymmetrischen Bodenform mit *Slip Face*, Variante FloodSF (s. FuE-Abschlussbericht FAUST, Teilprojekt E: Laboruntersuchungen BAW). Diese Messposition befindet sich direkt über dem Ende der Luvböschung.

Untersucht wurden NVR-Werte von (i) 0,3 m/s, (ii) 1,0 m/s und (iii) 2,5 m/s. Bei der *sidelooking*-Sondenvariante ist zu beachten, dass in diesem Fall die *horizontal velocity range* (HVR) für die vertikale Geschwindigkeitskomponente (d. h. v_z) gilt und die *vertical velocity range* (VVR) sich auf

die horizontalen Geschwindigkeitsanteile v_x und v_y beziehen. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die für die *Vectrino sidelooking* geltenden Werte.

Tabelle 5: Werte für nominal, vertical und horizontal velocity range für Vectrino, untersuchte Werte kursiv dargestellt

	NVR [m/s]	0,03	0,1	0,3	1,0	2,5	4,0
v_x/v_y	VVR [m/s]	0,08	0,13	0,27	0,54	0,94	1,5
v_z	HVR [m/s]	0,26	0,44	0,94	1,88	3,28	5,25

Bild 55 und Bild 56 zeigen die über 120 s Dauer an zwei verschiedenen Höhenpositionen ($z = 60,5$ cm und $z = 80,5$ cm) gemessenen Zeitreihen der horizontalen Fließgeschwindigkeiten in Strömungsrichtung (blau) sowie die mittels *Phase-Space Thresholding Method* (PSTM) gefilterte Zeitreihe (rot).

Beim Vergleich der ungefilterten Zeitreihen fällt auf, dass die Anzahl der Ausreißer in Abhängigkeit der gewählten NVR variiert. Für die kleinste untersuchte NVR von 0,3 m/s treten über die gesamte Messdauer Ausreißer auf. Die großen Ausreißer befinden sich nur unterhalb der Zeitreihe und besitzen fast einheitlich eine Höhe im Betrag von ca. 0,5 m/s.

Auffällig verhalten sich die Messwerte für eine NVR von 1,0 m/s. Über die gesamte Messdauer sind sowohl oberhalb als auch unterhalb deutliche Ausreißer zu erkennen, die sich oberhalb bis zu Werten von ca. 1,3 m/s und unterhalb bis ca. -0,7 m/s erstrecken, d. h. sich ± 1 m/s um den Median der Strömungsgeschwindigkeit bewegen. Über dieses Band von Ausreißern hinaus treten zusätzlich vereinzelt Ausreißer auf, die Werte bis 2,4 m/s oder, unterhalb der Zeitreihe, -1,7 m/s erreichen, d. h. ca. ± 2 m/s des Geschwindigkeitsmittels einnehmen. Mit der PSTM werden die Ausreißer mit Betrag ± 1 m/s aufgrund ihrer großen Anzahl und regelmäßigen Anordnung nicht als solche erkannt und nicht aus der Zeitreihe entfernt (s. rote Färbung).

Die Zeitreihen von v_x , die mit NVR = 2,5 m/s gemessen wurden, enthalten die geringste Anzahl an Ausreißern. Wird zusätzlich zur Anzahl der Ausreißer die Korrelation der Messung für die unterschiedlichen NVR verglichen, fällt auf, dass die Korrelation für die Messung bei NVR = 2,5 m/s einen etwas höheren Wert an den untersuchten Messpositionen annimmt: Für NVR = 0,3 m/s und NVR = 1,0 m/s beträgt die Korrelation an den betrachteten Messpositionen rund 65 % bis 68 %, für die Einstellung NVR = 2,5 m/s wird eine Korrelation von ca. 70 % erreicht.

Aufgrund dieser Beobachtungen wird für Messungen mit der *Vectrino sidelooking* bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten der Größenordnung von etwa 0,3 m/s ein NVR von 2,5 m/s empfohlen.

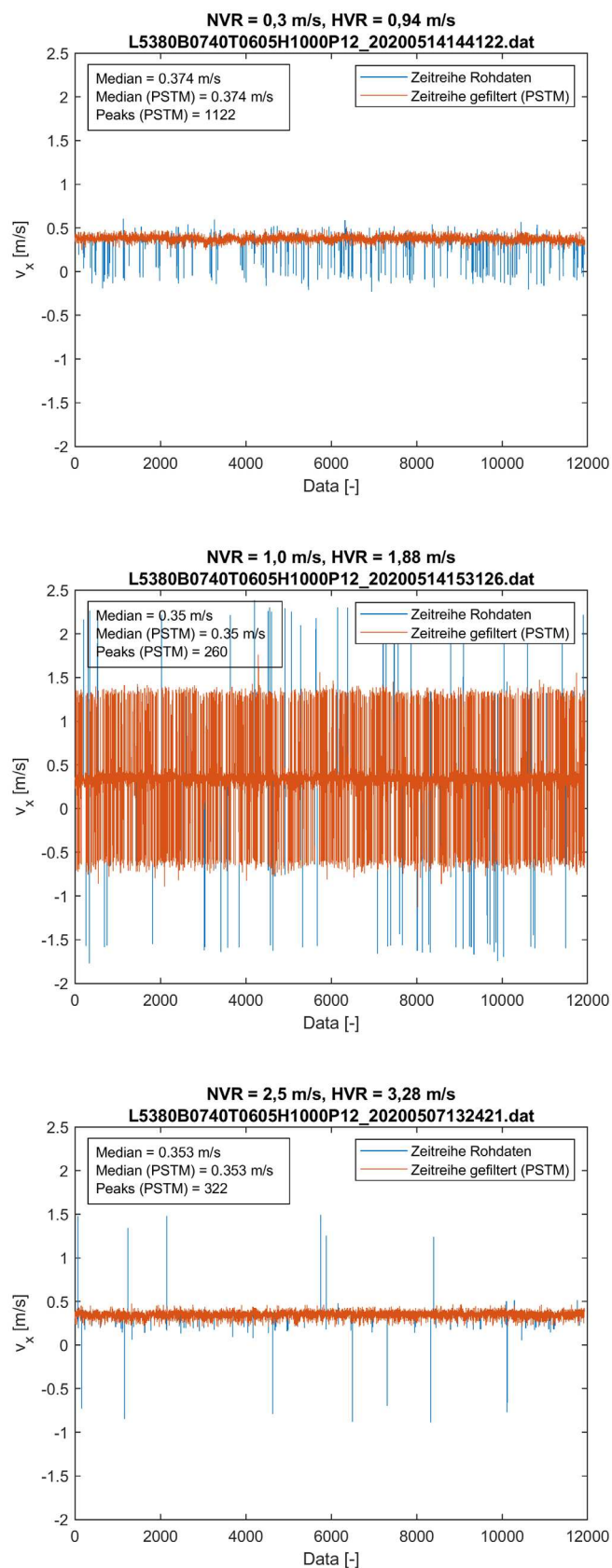


Bild 55: Zeitreihe der horizontalen Geschwindigkeit in Strömungsrichtung v_x bei unterschiedlich eingestellter Nominal Velocity Range, Rohdaten (blau) und gefilterte Daten (rot) (Rinnenlängsposition $x = 53,8$ m, Höhe über Sohle $z = 60,5$ cm, $v_{soll,m} = 0,31$ m/s)

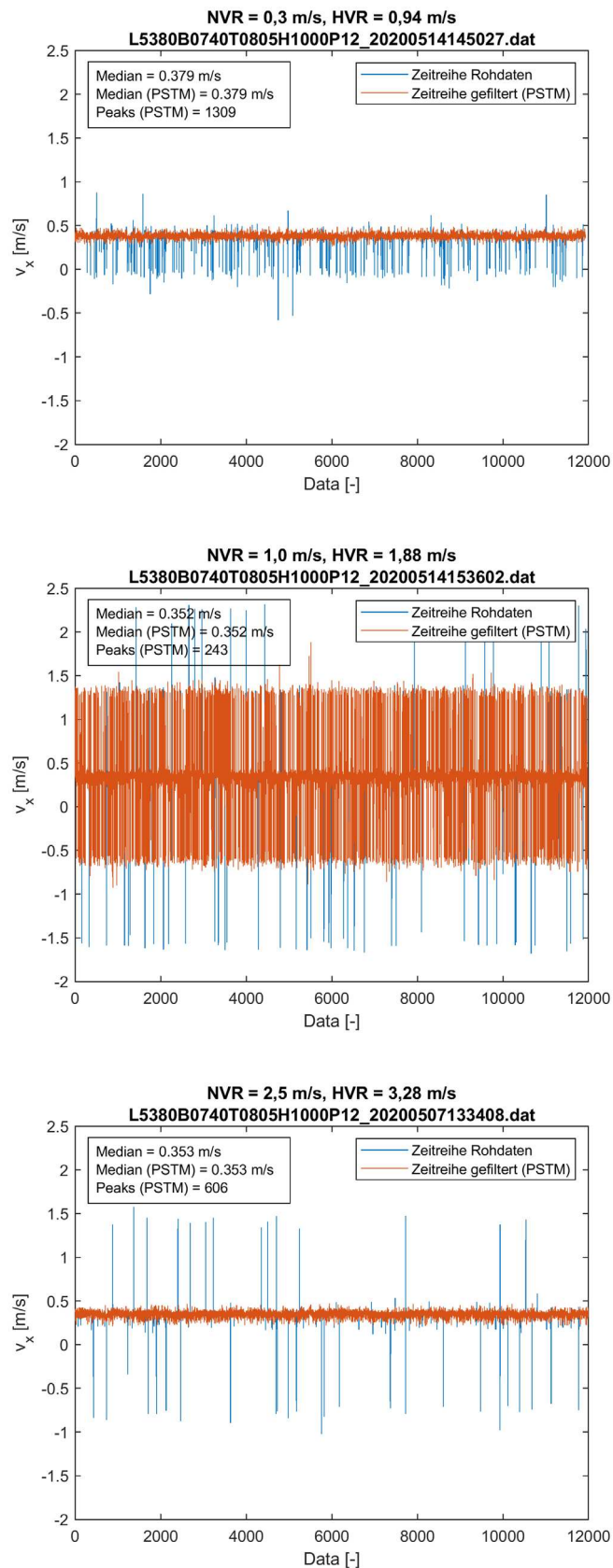


Bild 56: Zeitreihe der horizontalen Geschwindigkeit in Strömungsrichtung v_x bei unterschiedlich eingestellter Nominal Velocity Range, Rohdaten (blau) und gefilterte Daten (rot) (Rinnenlängsposition $x = 53,8$ m, Höhe über Sohle $z = 80,5$ cm, $v_{soll,m} = 0,31$ m/s)

9.4 Sekundärströmungen in der Versuchsrinne

Bei der Erzeugung einer Strömung in einem physikalischen Modell treten Effekte auf, die beispielsweise durch die Geometrie oder aufgrund von baulichen Eigenschaften der Versuchseinrichtung hervorgerufen werden. Diese Effekte sind möglichst zu reduzieren bzw. bestenfalls aus dem System zu entfernen, um einen Einfluss auf die wesentlichen, zu untersuchenden physikalischen Prozesse zu minimieren bzw. auszuschließen.

In Bezug auf die Umlaufrinne sind zwei grundsätzliche Quellen für Sekundärströmungen zu nennen: (i) Beim Betreiben des Schiffspropellers entstehen spiralförmige Verwirbelungen und (ii) entstehen durch die Geometrie der Umlaufrinne mit ihren Kurvenabschnitten Sekundärströmungen durch die Krümmung des Querschnittes. Diese Sekundärströmungen treten unmittelbar am Ort ihrer Entstehung auf, d. h. im Bereich des Schiffspropellers und in sowie hinter den Kurvenabschnitten. Ob ein Einfluss der Sekundärströmungen auch noch weiter stromab sowie im vorgesehen Messbereich festzustellen ist (Abschnitt 9.4.1) und ob der Einbau eines Rohrpaketes als Strömungsgleichrichter zur Minimierung oder gar Auslöschung von Sekundärströmungen führen kann (Abschnitt 9.4.2), wurde mithilfe von Messungen untersucht.

9.4.1 Rinne ohne Einbauten

Zur Untersuchung der Strömungseigenschaften der Umlaufrinne wurden die Strömungsgeschwindigkeiten mit der *Vectrino Profiler*-Sonde gemessen. Zur Feststellung der horizontalen Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten wurden für zwei verschiedene Füllstände der Rinne an insgesamt 15 Positionen entlang der Rinnenlängsrichtung horizontale Strömungsquerprofile erfasst. Die Versuche wurden bei zwei Wassertiefen $h_1 = 0,8$ m und $h_2 = 1,0$ m durchgeführt. Die Antriebsleistung des Strömungspropellers wurde zu $P = 35$ % eingestellt, sodass Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,9 m/s und 1,2 m/s herrschten.

Die Strömung wurde auf einem Querprofil an 11 über die Rinnenbreite verteilten Messpunkten erfasst, die sich in einer Höhe über der Sohle $z_1 = 0,25$ m (für $h_1 = 0,8$ m) bzw. $z_2 = 0,35$ m für ($h_2 = 1,0$ m) befanden (s. Tabelle 6 und Tabelle 7 sowie Bild 57). Die Höhe der Messpositionen z_1 und z_2 entsprach damit etwa 30 % der Wassertiefe. Die in dieser Höhe herrschende Fließgeschwindigkeit entspricht bei einer stationär gleichförmigen Strömung in etwa der mittleren Geschwindigkeit über die gesamte Wassertiefe.

Für den Füllstand $h_1 = 1,0$ m wurde zusätzlich im Anfangsbereich sowie im hinteren Bereich der Rinnenabschnitts (Rinnenlängsposition $x = 9,50$ m und $x = 54,0$ m) Messungen in mehreren Höhenpositionen durchgeführt, sodass das Strömungsbild über den gesamte Rinnenquerschnitt bestimmt werden konnte (s. Bild 58). Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Messpositionen.

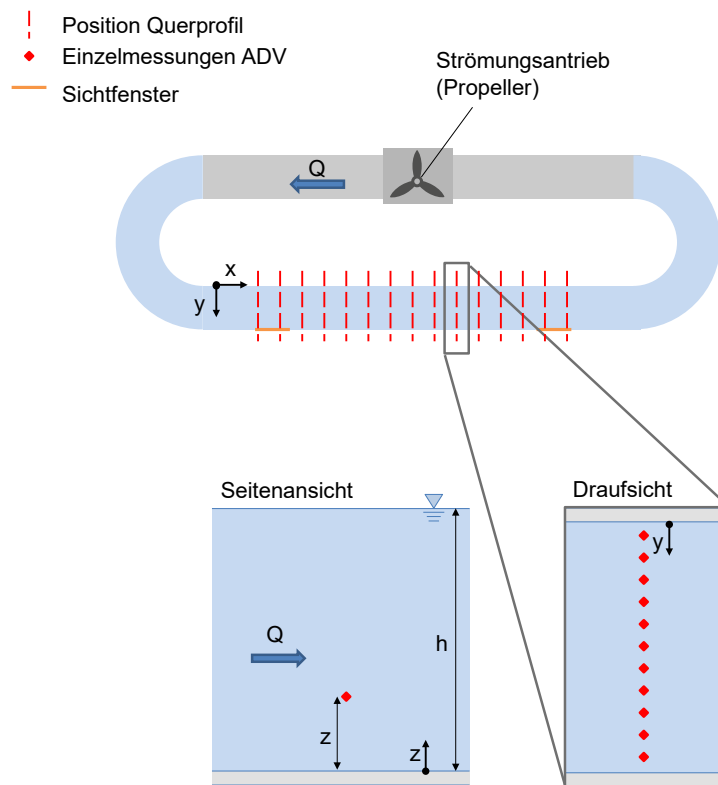


Bild 57: Schematische Darstellung der Messpositionen mit Draufsicht (Überblick Rinne und Ausschnitt einer Rinnenlängsposition) und Seitenansicht (nicht maßstäblich)

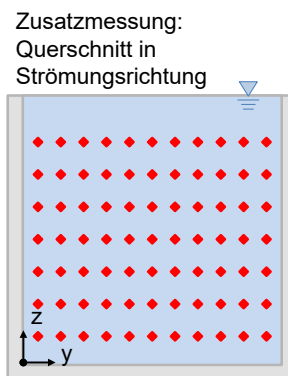


Bild 58: Messpositionen im Rinnenquerschnitt für Längspositionen $x = 9,50\text{ m}$ und $x = 54,0\text{ m}$ (nicht maßstäblich)

Tabelle 6: Messpositionen bei Wassertiefe $h_1 = 0,8$ m ($P = 35$ %, $z = 0,25$ m)

x-Position [m] (Längsrichtung in Rinne)	9,0; 12,5; 13,5; 18,0; 22,5; 27,0; 31,5; 36,0; 40,5; 45,0; 49,5; 54,0; 58,5; 59,5; 63,0
y-Position [mm] (Ist-Position)	14,0; 26,0; 38,0; 50,0; 62,0; 74,0; 86,0; 98,0; 110,0; 122,0; 133,5

Tabelle 7: Versuchsprogramm bei Wassertiefe $h_2 = 1,0$ m ($P = 35$ %, $z = 0,3$ m)

	y-Position [cm] (Sollposition und Ist-Position)										
	14,0	26,0	38,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
9,0	14,0	26,0	37,9	49,9	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
12,5	11,0	23,5	35,5	47,0	59,0	71,0	83,0	95,0	107,0	118,0	130,0
13,5	14,0	26,0	26,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
18,0	11,0	23,8	35,3	46,8	58,5	70,0	81,5	93,0	105,0	116,5	128,3
22,5	14,0	26,0	38,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
27,0	14,0	26,0	38,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
31,5	14,0	26,0	38,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
36,0	11,0	23,5	35,0	46,8	58,3	70,0	81,7	93,0	104,8	116,5	128,3
40,5	14,0	26,0	38,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
45,0	14,0	26,0	38,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
49,5	14,0	26,0	38,0	50,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
54,0	11,0	23,5	35,2	47,0	58,5	70,0	81,7	93,3	105,	116,0	128,2
58,5	14,0	26,0	38,0	47,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
59,5	14,0	26,0	38,0	47,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5
63,0	14,0	26,0	38,0	47,0	62,0	74,0	86,0	98,0	110,0	122,0	133,5

Tabelle 8: Positionen für verdichtete Messung bei Wassertiefe $h = 1,0$ m und Rinnenlängsrichtung $x = 9,50$ m ($P = 35$ %)

x-Position [m] (Längsrichtung in Rinne)	9,5 und 54,0
y-Position [mm] (Ist-Position)	11,5; 23,5; 35,5; 47,5; 59,5; 71,5; 83,5; 95,5; 107,5; 119,5; 131,0 (leichte Abweichungen bei $x = 54,0$ und $z = 30$ cm)
z-Position ü. Sohle [cm] (Ist-Position)	2,0; 15,0; 30,0; 45,0; 60,0; 75,0; 90,0

Die Querprofile der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten v_x für alle gemessenen Rinnenlängspositionen sind im Anhang als Anhang 1 - Anhang 30 in Abschnitt 9.5.1 und 9.5.2 beigelegt. Exemplarisch sind Bild 59 die Querverteilung der horizontalen Komponente der Strömungsgeschwindigkeit v_x über die Rinnenbreite für drei Rinnenlängspositionen dargestellt: (i) Rinnenlängsposition $x = 9,0$ m am Anfang der Rinne, (ii) $x = 35,0$ m im mittleren Bereich der Rinne und (iii) $x = 63,0$ m. Die Messungen wurden für die Wasserstände $h_1 = 0,80$ m und $h_2 = 1,0$ m durchgeführt. Die Messposition z befand sich in etwa 30 % der Wassertiefe ($z_1 = 0,25$ m für h_1 , $z_2 = 0,35$ m für h_2), da auf dieser Höhe über der Sohle ungefähr die über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeit erfasst werden kann.

Aus Bild 59 geht hervor, dass die Strömungsgeschwindigkeiten an allen dargestellten Rinnenlängspositionen und für beide Wasserstände in Wandnähe durch die dort auf die Fließgeschwindigkeit wirkenden Schubspannungen abnehmen. Zur Rinnenwand reduzierte Strömungsgeschwindigkeiten wurden auch bei allen anderen Messungen beobachtet werden (vgl. Abschnitt 9.5.1 und 9.5.2). Hierbei handelt es sich um einen typischen und zu erwartenden Modelleffekt, der bei der Auswertung wandnaher Bereiche – falls dies erforderlich ist – berücksichtigt werden muss.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass vor allem für die Rinnenlängspositionen kleineren Wertes, d. h. am Rinnenanfang in Nähe zum Austritt aus dem Kurvenbereich, das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit sich außermittig befindet, d. h. das Strömungsprofil nicht symmetrisch zur Rinnenlängsachse ausgebildet ist (s. Bild 59, rot gestrichelte Linie entspricht Rinnenlängsachse). Insbesondere gilt dies für die Versuche bei der geringeren Wassertiefe $h_1 = 0,8$ m.

Die außermittig höheren Strömungsgeschwindigkeiten deuten auf Sekundärströmungen hin, die bei der Durchströmung des gekrümmten Bereichs am Rinneneinlauf entstehen und durch die eine Beschleunigung der Strömung zur Außenkurve der Rinne verursacht werden. Für die Wassertiefe $h_2 = 1,0$ m scheint der Einfluss der Krümmung und somit die Ausprägung der Sekundärströmungen mit fortschreitendem Rinnenmeter, d. h. mit größerer Entfernung zum Kurvenbereich und mit zunehmender durchflossener Rinnenstrecke, abzunehmen. Für die Wassertiefe $h_1 = 0,8$ m ist auch bei Rinnenlängsposition $x = 63,0$ m noch ein deutlich außermittiges Strömungsmaximum feststellbar. Die Wassertiefe bzw. die Strömungsgeschwindigkeit sind daher Einflussfaktoren für die Ausprägung der Sekundärströmungen.

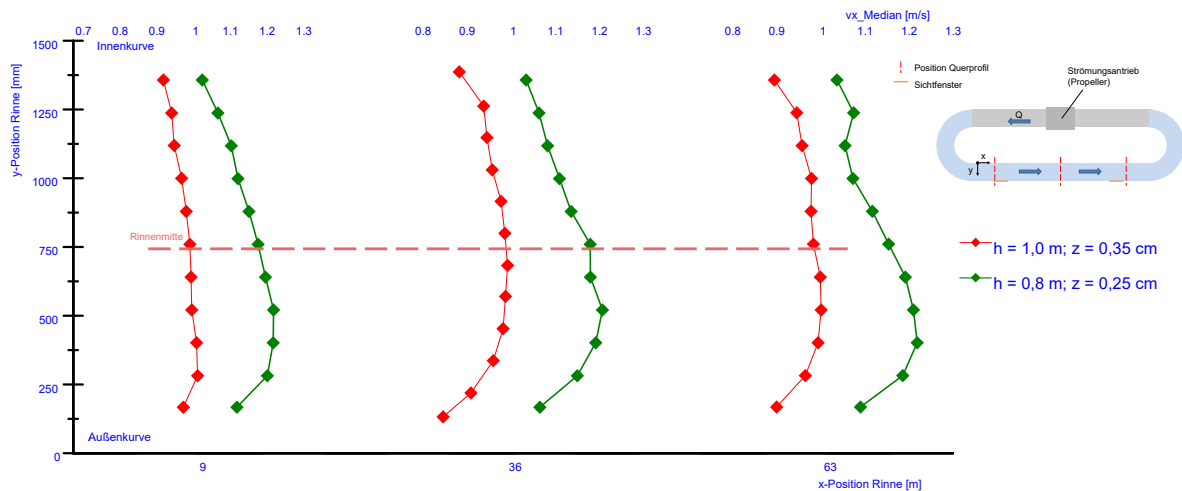


Bild 59: Querprofile der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an den Rinnenlängspositionen $x = 9,0\text{ m}$, $x = 36,0\text{ m}$ und $x = 63,0\text{ m}$ bei Wasserstand $h = 0,8\text{ m}$ (grün) und $h = 1,0\text{ m}$ (rot)

Für die an den Rinnenlängspositionen $x = 9,50\text{ m}$ und $x = 54,0\text{ m}$ durchgeführten verdichteten Messungen bei einem Wasserstand von $h = 1,0\text{ m}$ zeigen Bild 60 und Bild 61 die festgestellte Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Fließquerschnitt. In Bild 60 ist anhand der Farbcodierung zu sehen, dass sich im Anfangsabschnitt der Rinne erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten über einen größeren Bereich in der Außenseite ausbilden.

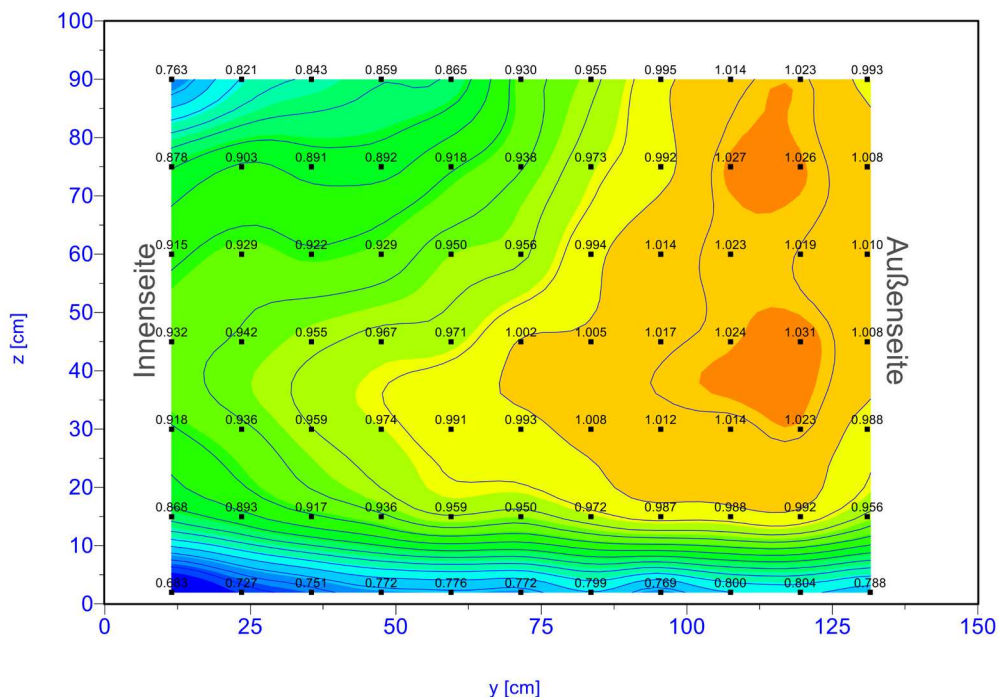


Bild 60: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 9,50\text{ m}$, Blick in Strömungsrichtung

Für die zweite Position im hinteren Rinnenabschnitt ($x = 54,0 \text{ m}$) zeigt sich ein zu einer vertikalen Achse in Rinnenmitte symmetrischeres Strömungsbild als an Position $x = 9,50 \text{ m}$. Erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten treten hier im Bereich zwischen $z = 0,70 \text{ m}$ und $z = 0,80 \text{ m}$ über der Sohle im mittleren Bereich des Rinnenquerschnittes auf. Die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen insbesondere in Richtung der Rinnenwände und der Rinnensohle ab.

Anzumerken ist, dass die Farbabstufung zwischen zwei Geschwindigkeiten eng gewählt ist. Die erfassten Geschwindigkeiten bewegen sich in einem Bereich zwischen etwa $0,8 \text{ m/s}$ und maximal 1 m/s für Position $x = 9,50 \text{ m}$ bzw. maximal $1,1 \text{ m/s}$ für Position $x = 54,0 \text{ m}$. Ein Farbsprung vollzieht sich daher zwischen Geschwindigkeiten mit einer Differenz von etwa $0,02 \text{ m/s}$.

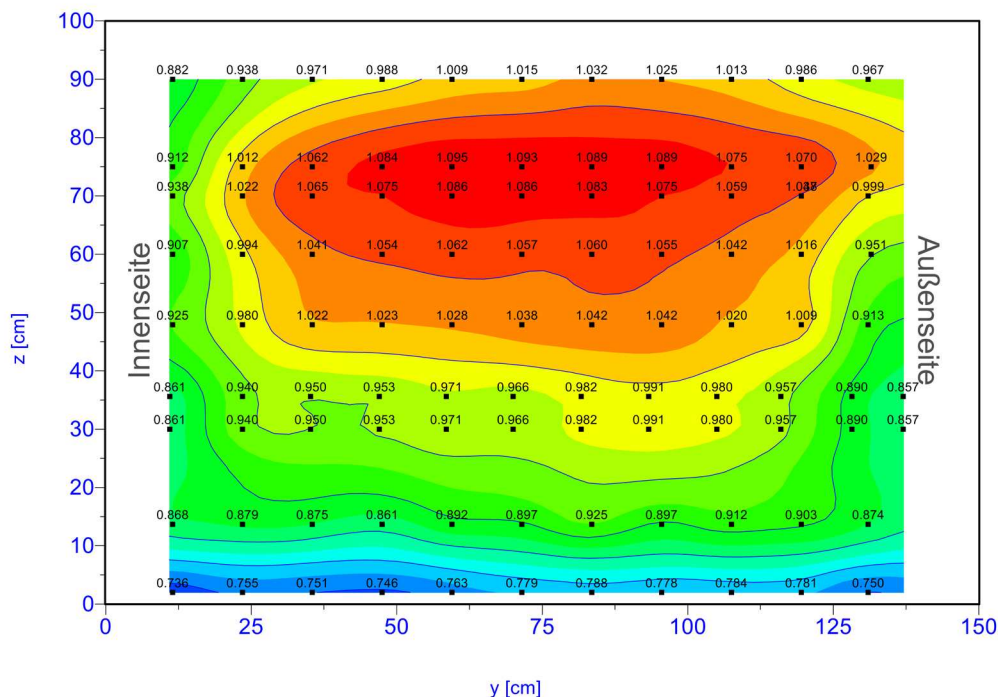


Bild 61: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 54,0 \text{ m}$, Blick in Strömungsrichtung

9.4.2 Rinne mit eingebautem Rohrpaket als Strömungsgleichrichter

Zur Reduktion von unerwünschten Störungen der Strömung, die beispielsweise durch die Rinnen-geometrie verursacht werden, ist der Einsatz von sogenannten Strömungsgleichrichtern möglich. Mithilfe dieser sollen modellerzeugte Effekte wie Sekundärströmungen oder Verwirbelungen aus der Strömung entfernt bzw. zumindest reduziert werden.

Wie in Abschnitt 9.4.1 beschrieben, treten auch in der Umlaufrinne Sekundärströmungen auf, die das Strömungsbild beeinflussen und deren Auswirkungen bis in den Versuchsbereich hineinreichen können. Zur Entfernung dieser Sekundärströmungen aus dem Strömungsbild wurde ein Strömungsgleichrichter in Form eines Rohrpaketes eingebaut (s. Bild 62). Das Rohrpaket besteht aus handelsüblichen Kanalgrundrohren aus PVC. Insgesamt wurden 35 Rohre zu dem Paket zusammengesetzt, mit sieben Rohren in horizontaler Richtung und acht Rohren in vertikaler

Richtung. Die Rohre besitzen einen Innendurchmesser von 19 cm, einen Außendurchmesser von 20,5 cm sowie an jeweils einem Rohrende den Bereich mit Muffe mit einem Durchmesser von 23,5 cm. Die Rohre wurden so miteinander verschraubt, dass sich jeweils ein Rohrende ohne Muffe neben einem Rohrende mit Muffe befindet. Die Länge der Rohre beträgt 60 cm, für das zusammengesetzte Rohrpaket ergeben sich die Abmessungen 1460 x 1060 x 600 mm (B x H x T).

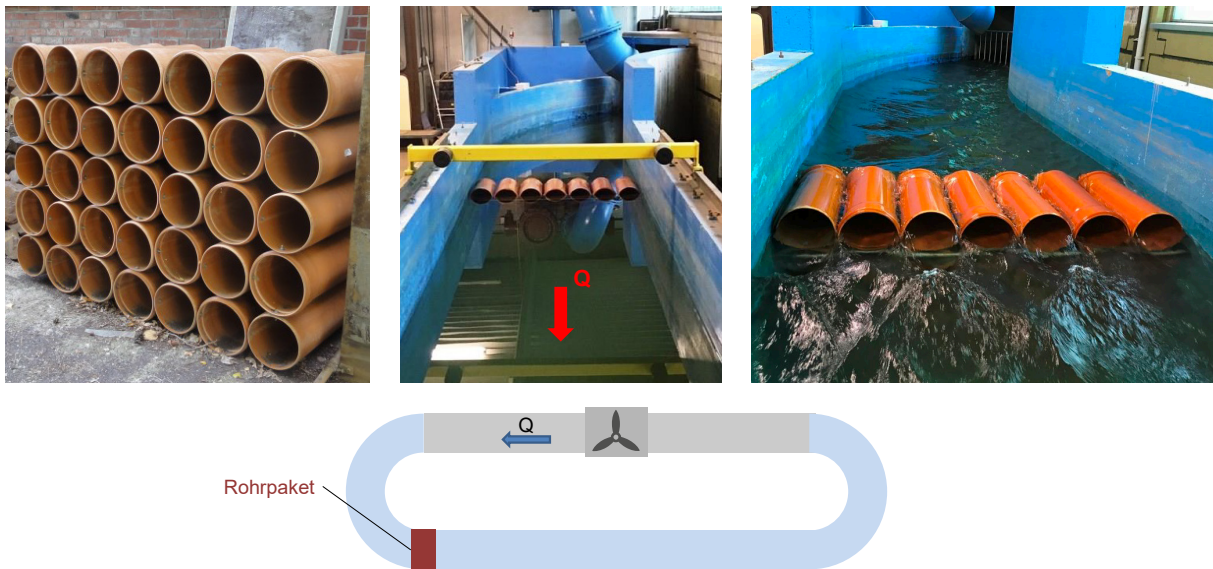


Bild 62: Rohrpaket als Strömungsgleichrichter: Komplette Ansicht, Einbau in Rinne und Position

Durch den Einbau des Rohrpaketes, bestehend aus den in Strömungsrichtung angeordneten Rohren, soll eine Parallelisierung der Strömung bewirkt werden, um auf diese Weise Querströmungen aus dem Fließquerschnitt zu unterbinden. Zur Untersuchung dessen, inwieweit eine Parallelisierung der Strömung gelingt, wurden Strömungsmessungen verteilt über die Rinnenbreite an drei Rinnenlängspositionen durchgeführt: (i) am Rinneneinlauf ($x = 9,50$ m), (ii) im mittleren Bereich in Rinnenlängsrichtung ($x = 36,0$ m) und (iii) in hinteren Bereich der Rinne ($x = 54,0$ m). Geschwindigkeiten wurden in (i) in ca. 30 % der Wassertiefe über der Sohle ($z = 30$ cm) sowie an Position $x = 9,50$ m und $x = 54,0$ m in (ii) 60 cm und (iii) 90 cm über der Sohle gemessen. Der Wasserstand wurde zu $h = 1,0$ m gewählt, da für diese Wassertiefe in Versuchen selbst ohne Strömungsgleichrichtung eine angestrebte, homogenere Verteilung der Strömung festgestellt werden konnte (vgl. Abschnitt 9.4.1). Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 9 zusammengefasst.

In Bild 63 werden Ergebnisse aus Messungen am Rinneneinlauf ohne (blau) und mit (rot) Gleichrichter gegenübergestellt. Die Strömungsquerprofile zeigen die über 120 s Messdauer ($z = 30$ cm) gemittelten horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten v_x am Rinneneinlauf ($x = 9,50$ m). Beim Vergleich der beiden Strömungsprofile wird ersichtlich, dass an der Innenseite der Rinne (in Strömungsrichtung links) die Geschwindigkeiten mit Gleichrichter etwas stärker in Richtung Rinnenwand abnehmen. Die an der Position $y = 115$ mm (d. h. die sich am weitesten innen und in Strömungsrichtung links befindende Messposition) treten mit Gleichrichter etwa um etwa 0,1 m/s geringere Strömungsgeschwindigkeiten auf. Zur Rinnenmitte gleichen sich die Profile wieder

aneinander an und, einem ähnlichen Verlauf folgend, nehmen zur rechten Seite bzw. Außenseite der Rinne wieder ab. Die Abnahme der Geschwindigkeit erfolgt nicht so stark wie zur rechten Rinnenseite. Demnach scheint für den Einlaufbereich der Rinne der Gleichrichter wenig Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeiten ausüben: Im Außenbereich sind die Geschwindigkeiten weiterhin höher als im Innenbereich, wie im Versuchsaufbau ohne Gleichrichter ist das Strömungsprofil unsymmetrisch zur Rinnenlängsachse. Beim Vergleich der Zeitreihen sowie der Geschwindigkeitsverteilung kann festgestellt werden, dass die Schwankungsbreite der horizontalen Geschwindigkeit v_x für den Fall mit Gleichrichter leicht abnimmt.

Tabelle 9: Versuchsprogramm für Messungen mit Rohrpaket bei Wassertiefe $h = 1,0$ m ($P = 35$ %)

x-Position [m]	z-Position [cm ü. S.]	y-Position [mm]										Datum	
		115	235	355	475	595	715	835	955	1075	1195		1310
9,5	30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	06.06.19
9,5	60	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	06.06.19
9,5	90	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11.06.19
36,0	30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11.06.19
54,0	30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13.06.19
54,0	90	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	13.06.19
54,0	60	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	17.06.19

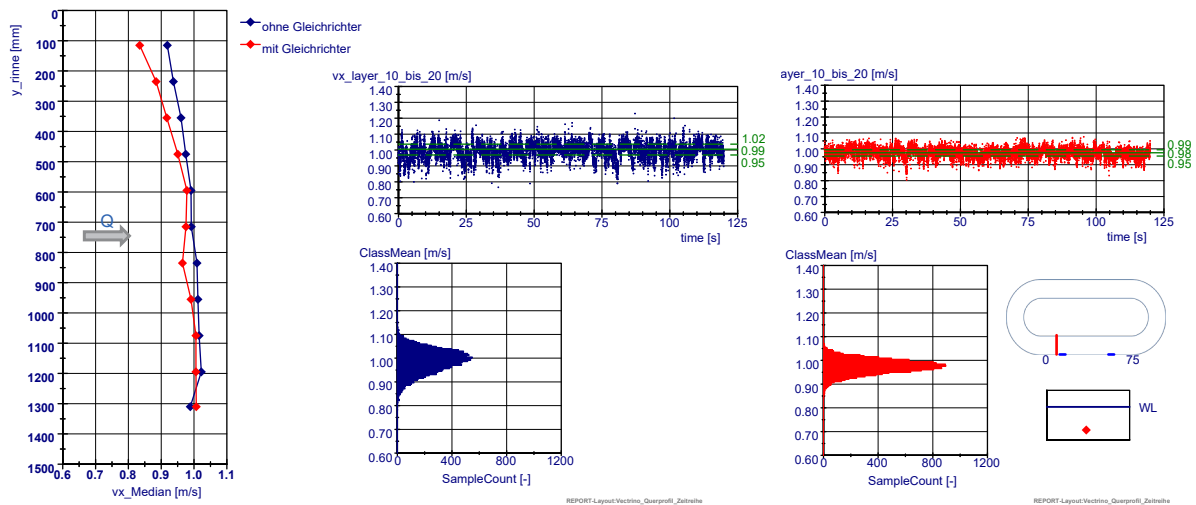


Bild 63: Rinneneinlauf ($x = 9,50 \text{ m}$): Horizontale Geschwindigkeitsquerprofile, Zeitreihen sowie Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x (m/s) in $z = 30 \text{ cm}$ ohne (blau) und mit Rohrpaket (rot)

Für den in Längsrichtung mittleren Bereich der Rinne zeigen die Querprofile ähnliche Verläufe für die Versuche mit und ohne Gleichrichter (s. Bild 64), die Strömungsgeschwindigkeiten sind mit Einsatz des Gleichrichters geringfügig kleiner. Die Schwankungen der Geschwindigkeiten über die Messdauer sind für beide Versuche ähnlich groß.

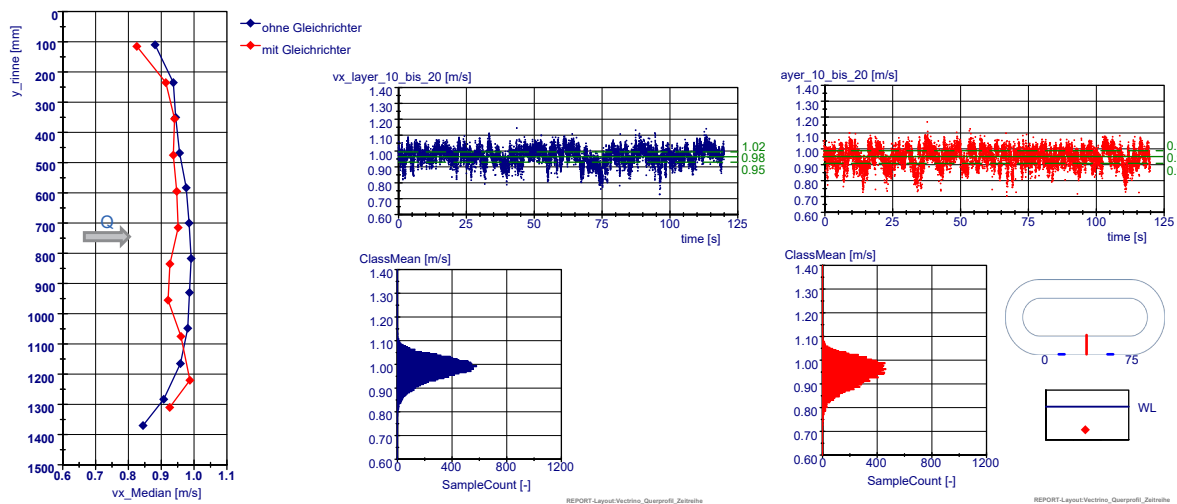


Bild 64: Rinnenmitte ($x = 36,0 \text{ m}$): Horizontale Geschwindigkeitsquerprofile, Zeitreihen sowie Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x (m/s) in $z = 30 \text{ cm}$ ohne (blau) und mit Rohrpaket (rot)

Im hinteren Bereich der Rinne folgen die Querprofile von der Innenseite bis zur Rinnenquermitte ($y \approx 700 \text{ mm}$) einem fast identischen Verlauf (s. Bild 65). Auf der Rinnenaußenseite nehmen die Geschwindigkeiten mit Gleichrichter zunächst etwas stärker ab, gleichen sich aber dem Geschwindigkeitsniveau der Messung ohne Gleichrichter zum Rand wieder an. Unter Einsatz des

Gleichrichters ist das Querprofil leicht unsymmetrischer, die Schwankungsbreite der Geschwindigkeit etwa größer als ohne eingebauten Gleichrichter.

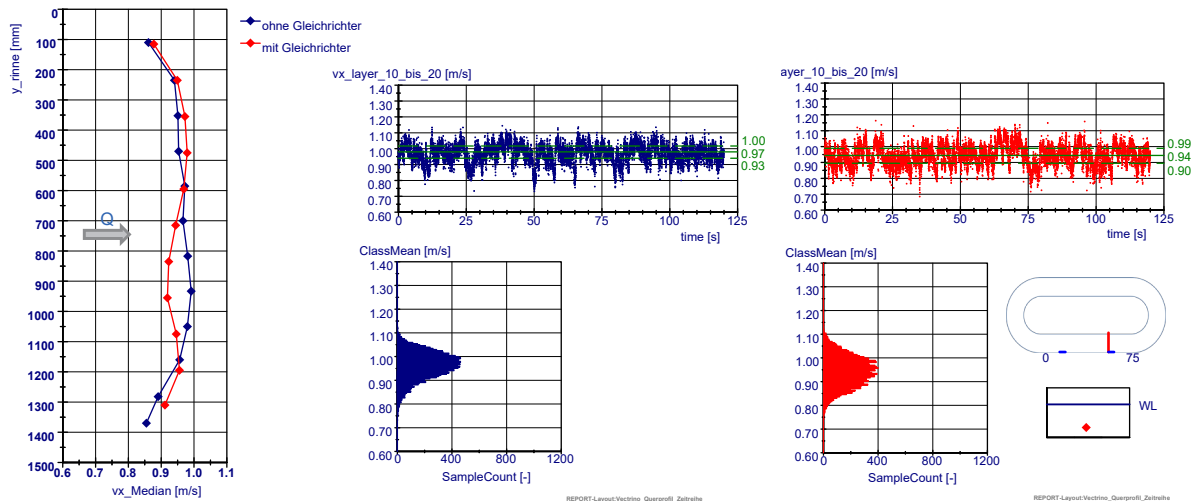


Bild 65: Rinnenende ($x = 54,0$ m): Horizontale Geschwindigkeitsquerprofile, Zeitreihen sowie Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x (m/s) in $z = 30$ cm ohne (blau) und mit Rohrpaket (rot)

Anhand der Zusatzmessungen in $z = 60$ cm und $z = 90$ cm über der Sohle an Längsposition $x = 9,50$ m und $x = 54,0$ m konnte die in Bild 66 und Bild 67 dargestellte Verteilung der horizontalen Geschwindigkeiten v_x über einen Teil des Rinnenquerschnitts abgeschätzt werden. Auffällig ist für die Längsposition $x = 9,50$ m die im Vergleich zur Messung ohne Rohrpaket unveränderte unsymmetrische Verteilung der Geschwindigkeiten. Wie in Bild 60 für die Versuche ohne Rohrpaket dargestellt treten auch hier erhöhte Werten außermittig im Bereich der Rinnenaußenseite auf.

Für den hinteren Bereich der Rinne liegt für Versuche mit und ohne Rohrpaket eine ähnliche Verteilung der Geschwindigkeiten vor: Wie aus Bild 67 ersichtlich wird, verlagert sich das Geschwindigkeitsmaximum im Vergleich zum Rinnenanfang an dieser Position wieder in die Mitte, sodass ein symmetrischeres Strömungsbild als im Auslaufbereich hinter der Kurve vorzufinden ist.

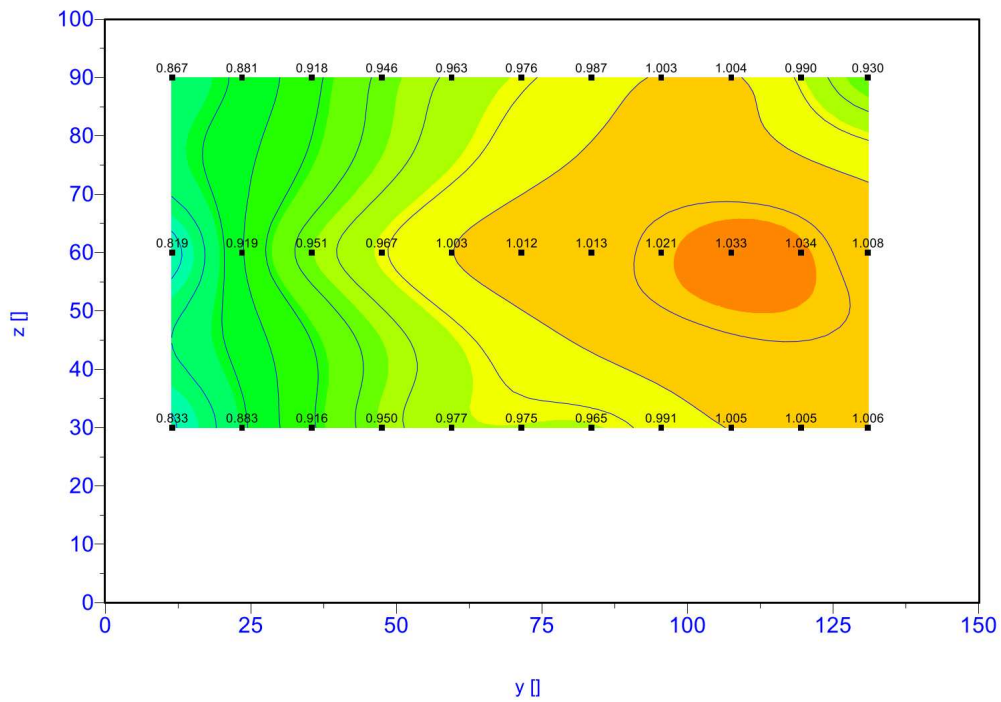


Bild 66: Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 9,50$ m bei Einbau eines Rohrpaketes, Blick in Strömungsrichtung

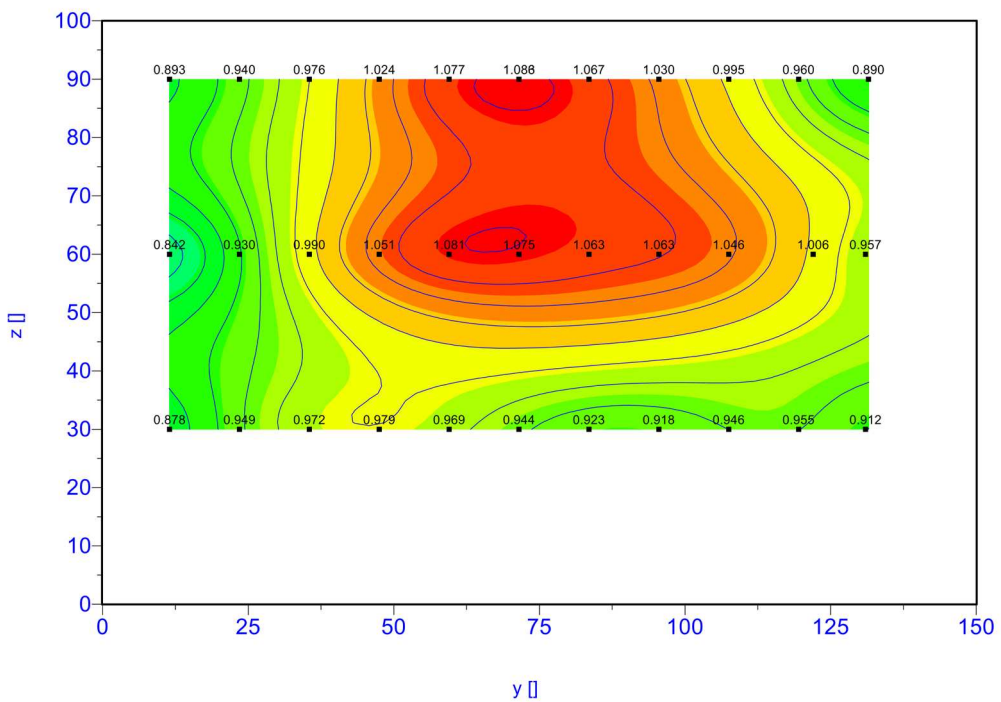


Bild 67: Verteilung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten v_x an Rinnenlängsposition $x = 54,0$ m bei Einbau eines Rohrpaketes, Blick in Strömungsrichtung

Während der Versuchsdurchführung mit Einbau des Strömungsgleichrichters konnten zudem folgende Beobachtungen gemacht werden: Bei der Generierung einer Strömung von etwa 1 m/s kam trat vor dem Rohrpaket ein Aufstau des Wassers sowie hinter den Rohren ein Absenk auf. Des Weiteren kam es an der Wasseroberfläche und somit in den oberen Dezimetern des Rohrpaketes zur Überströmung des Gleichrichters. Das Wasser strömte hierbei in der oberen Rohrreihe in die Zwischenräume der einzelnen Rohre. Bild 68 zeigt Aufstau, Absenk und Überströmen am Rohrpaket während der Versuchsdurchführung.

Die Auswirkungen dieser Vorgänge konnten nicht nur unmittelbar am Strömungsgleichrichter, sondern auch noch einige Meter stromabwärts beobachtet werden. Demnach ruft der Einbau des Gleichrichters weitere störende Modelleffekte hervor. Aus diesem Grund und da zum einen der gewünschte Effekt des Rohrpaketes, nämlich die Minimierung von Sekundärströmungen sowie Parallelisierung der Strömung, für den Anfangsbereich der Rinne nicht festgestellt werden konnte sowie zum anderen für den mittleren und hinteren Rinnenbereich ebenso kein positiver Effekt des Rohrpaketes auftrat, wurde für die Durchführung nachfolgender Versuche der Ausbau des Rohrpaketes beschlossen und keine Strömungsgleichrichtung eingesetzt.

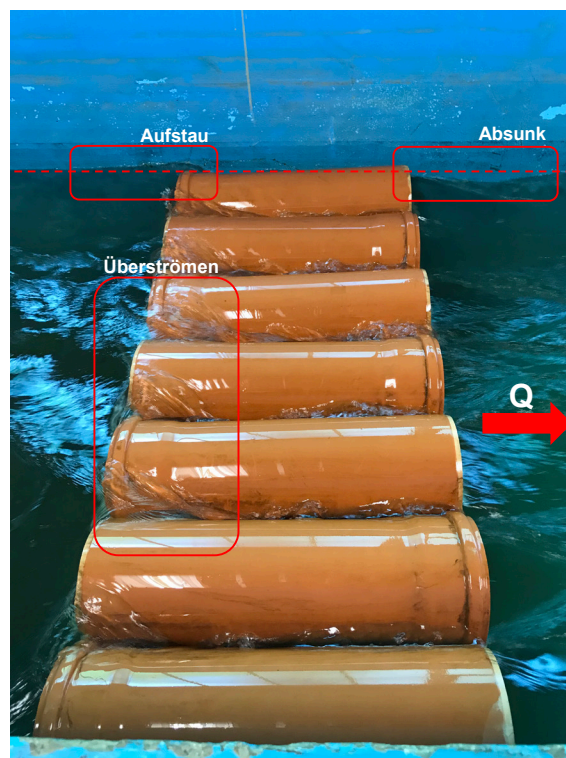


Bild 68: Rohrpaket während Strömungsversuch ($P = 35 \%$, $v_m \approx 1 \text{ m/s}$)

9.4.3 Ermittlung eines geeigneten Messbereichs

Der Vergleich von Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Geschwindigkeitsverteilungen an verschiedenen Rinnenpositionen hat gezeigt, dass unabhängig vom Einsatz eines Strömungsgleichrichters im hinteren Bereich der Rinne, d. h. mit fortschreitender Rinnenlängsposition x , das Strömungsprofil einen gleichmäßigeren Verlauf annimmt. Die Modelleffekte infolge von Sekundärströmungen aus dem Kurvenbereich reduzieren sich demnach stromab vom Einlaufbereich

mit zunehmendem Rinnenlängsmeter. Für die durchzuführenden Messungen ist daher ein Bereich in einem weiter hinten liegendem Rinnenabschnitt auszuwählen.

Neben einem möglichst symmetrischen Strömungsbild in Querrichtung zur Fließrichtung ist für optimale Messbedingungen auch eine Gleichförmigkeit der Strömung in x-Richtung anzustreben: Eine Energiedissipation sollte hauptsächlich infolge von Reibungsverlusten an der Sohle und an den Rinnenwänden entstehen und nicht durch Dissipation aufgrund von Turbulenzen, die beispielsweise beim Übergang vom Kurven- in den Geradenbereich der Rinne verursacht werden. Die Turbulenz der Strömung lässt sich mithilfe der Berechnung des quadratischen Mittels (engl.: Root Mean Square, RMS) der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten charakterisieren. Der RMS dient als Maß für die mittlere Schwankungsbreite der Fließgeschwindigkeit.

Für die durchgeführten Strömungsversuche ($h = 1,0$ m) ohne Einbau eines Gleichrichters wurden die RMS-Werte entlang der Rinne für die einzelnen Strömungskomponenten v_x , v_y , v_z (Bild 69) sowie für die resultierende Strömungsgeschwindigkeit v_{res} (Bild 70) berechnet. Der RMS der Strömungsgeschwindigkeit zeigt insbesondere für die y-Komponente im Anfangsbereich der Rinne (bis ca. Rinnenlängsposition $x = 20$ m) stärkere Schwankungen. Grundsätzlich zeichnen sich für alle drei Komponenten über den gesamten Rinnenverlauf nur leichte Schwankungen des RMS ab, die sich ab Position $x = 30$ m (etwa Rinnenlängsmitte) auf etwa (i) 6 cm/s für v_x , (ii) 5 cm/s für v_y und (iii) und 3 cm/s für die vertikale Komponente v_z einpendeln, jedoch in der Tendenz leicht zunehmende Werte mit fortschreitendem Rinnenmeter zeigen. Als geeigneter Messbereich für spätere Messungen zeigte sich trotz dieses festgestellten Trends der Bereich zwischen den ungefähren Rinnenlängspositionen $x = 48$ m und $x = 60$ m, für den nahezu konstante RMS-Werte gemessen werden konnten.

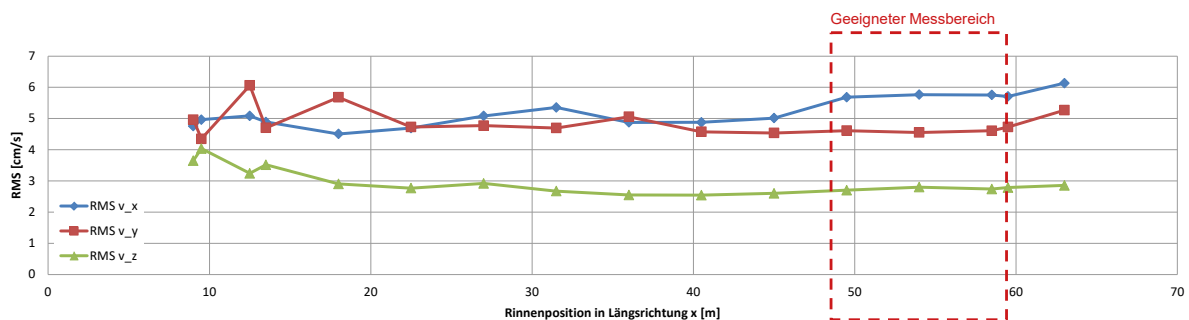


Bild 69: RMS von v_x , v_y , v_z im Rinnenlängsprofil ohne Gleichrichter ($h = 1,0$ m, $v_{soll} = 1$ m/s, Rinnenquerposition $y = 750$ mm, $z = 30$ cm)

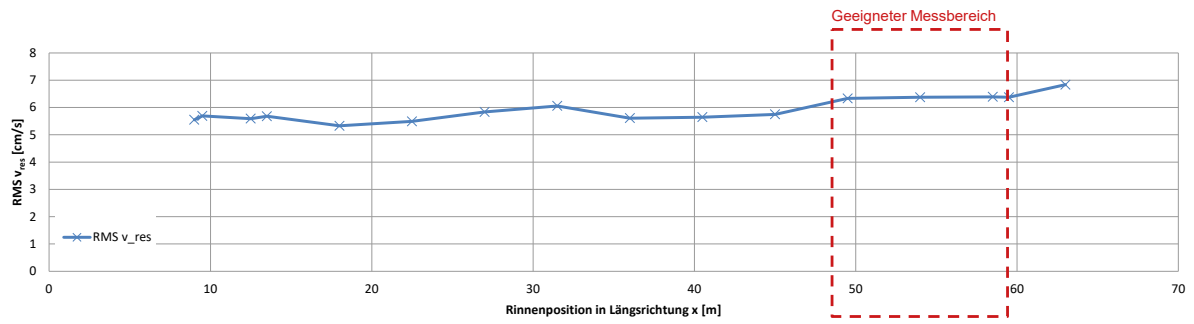
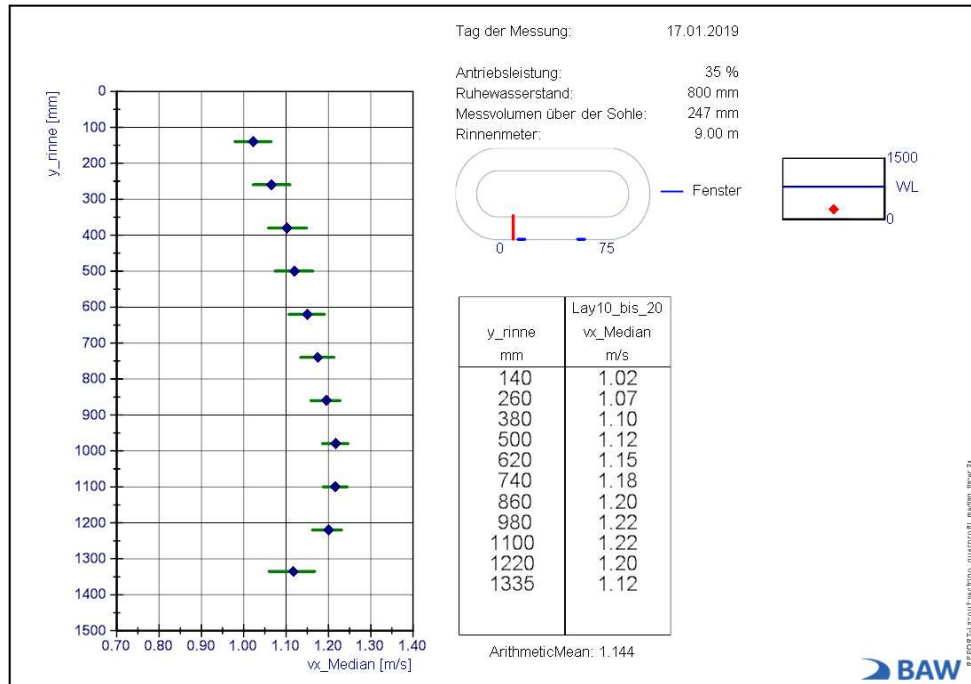


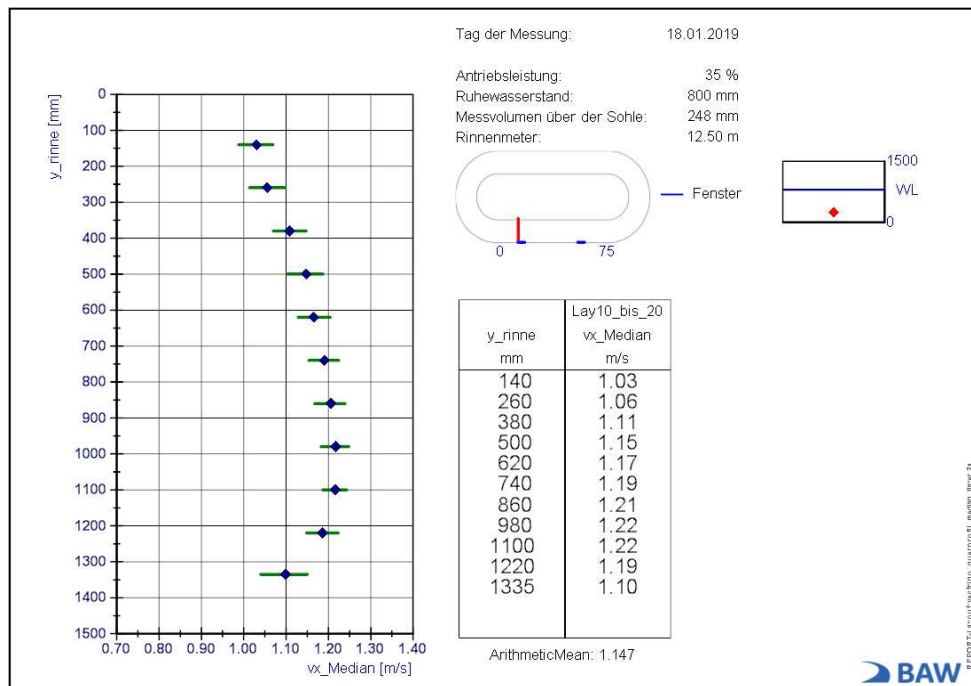
Bild 70: RMS von v_{res} im Rinnenlängsprofil ohne Gleichrichter ($h = 1,0$ m, $v_{soll} = 1$ m/s, Rinnenquerposition $y = 750$ mm, $z = 30$ cm)

9.5 Anhang: Querprofile der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x

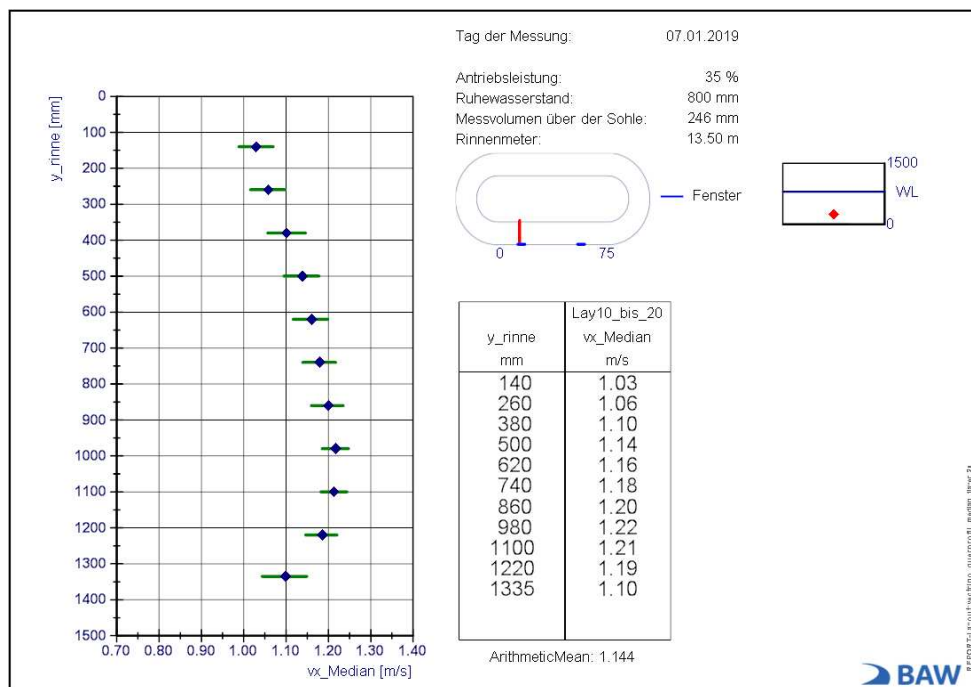
9.5.1 Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x bei Wasserstand $h = 0,80$ m



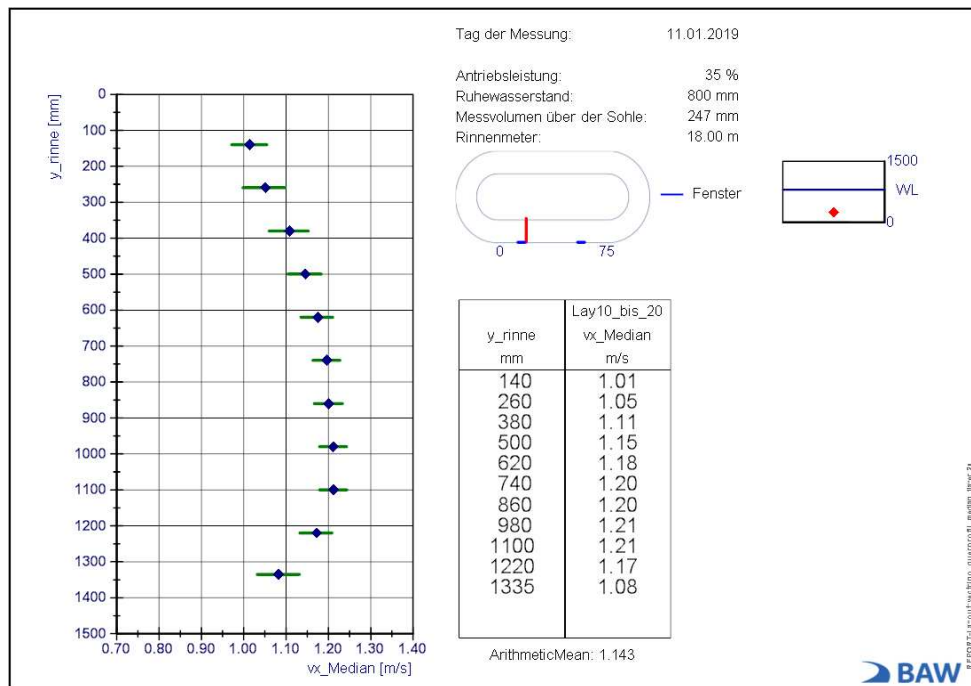
Anhang 1: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 9,0$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



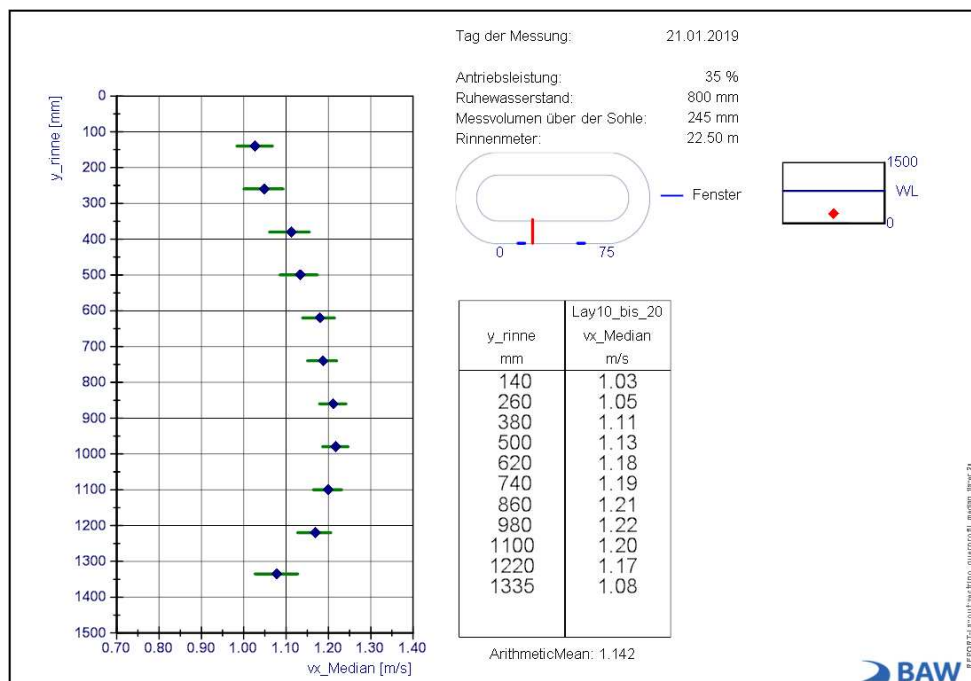
Anhang 2: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 12,50$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



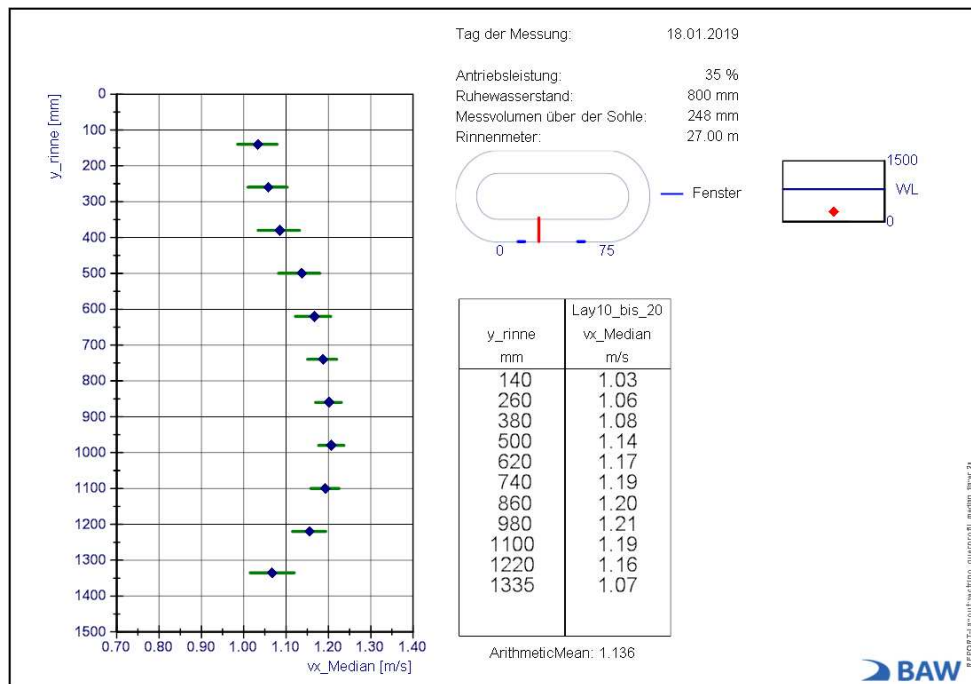
Anhang 3: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 13,50$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



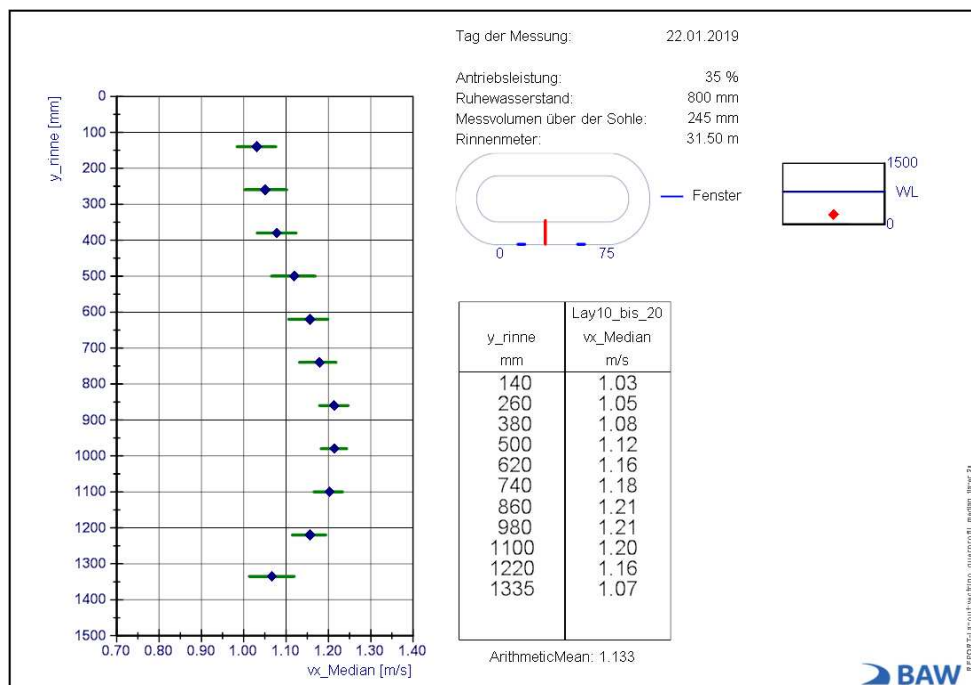
Anhang 4: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 18,0$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



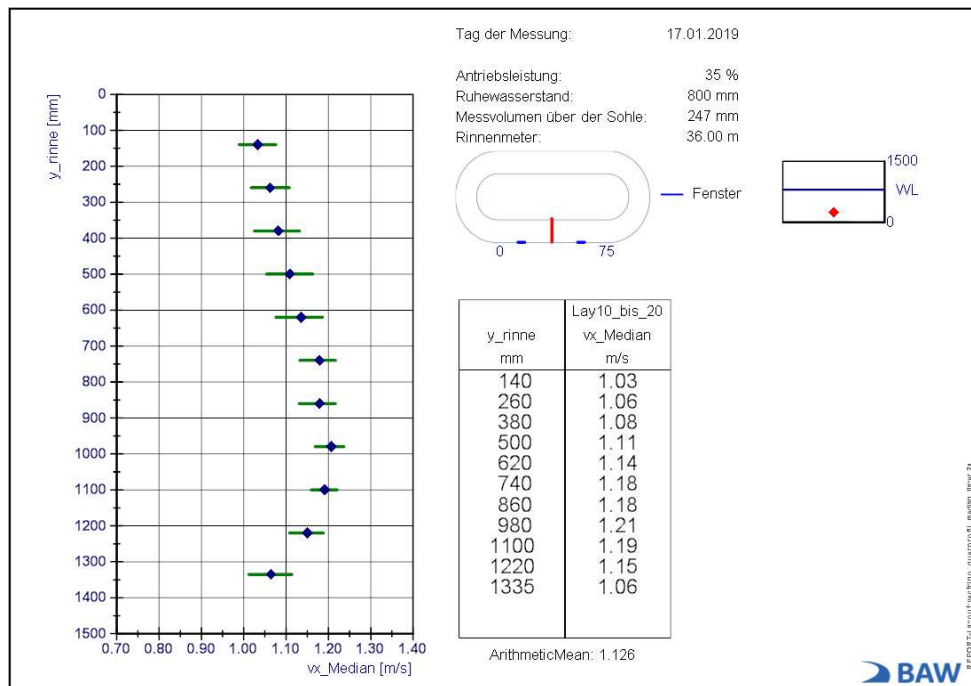
Anhang 5: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 22,50$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



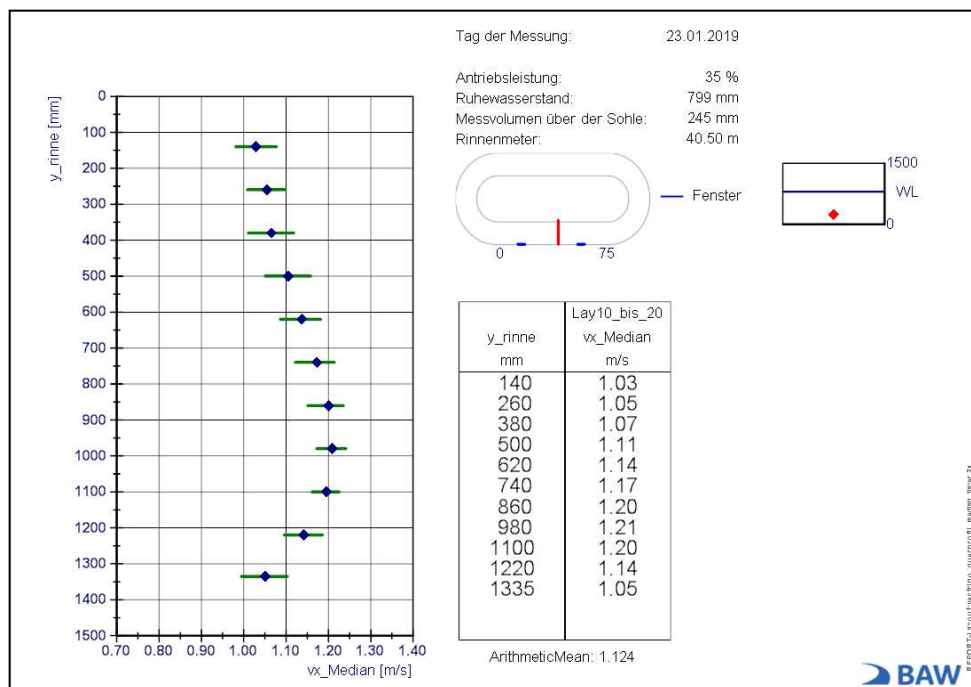
Anhang 6: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 27,0$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



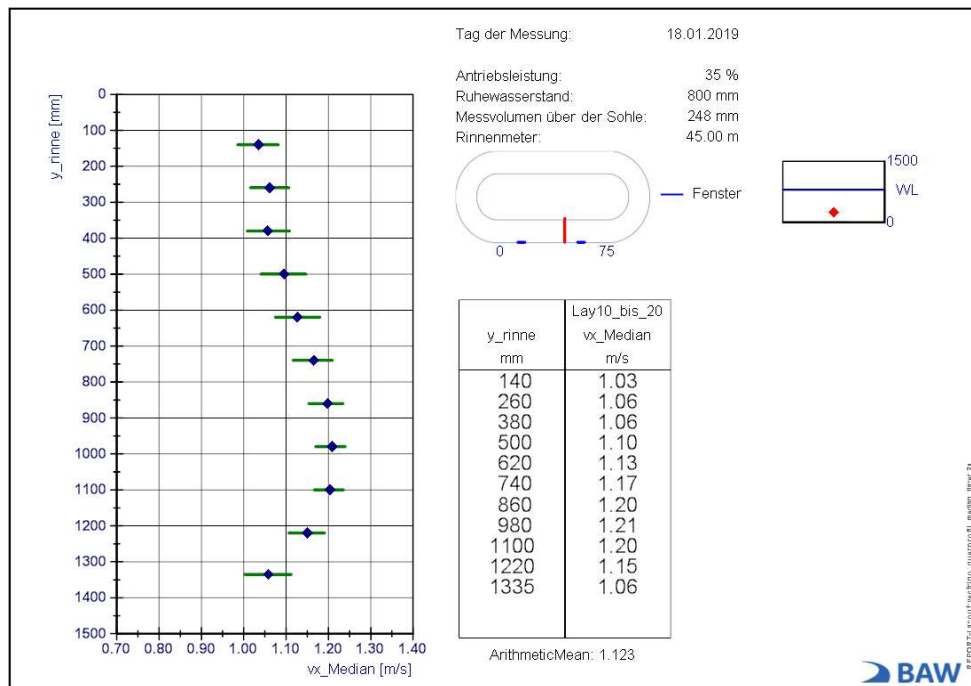
Anhang 7: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 31,50$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



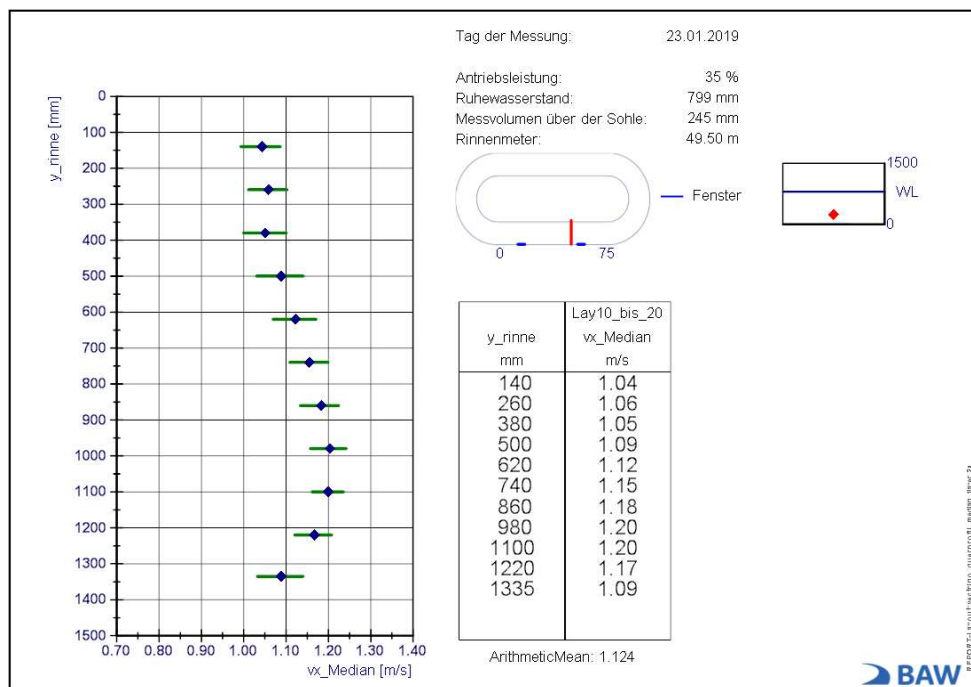
Anhang 8: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 36,0$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



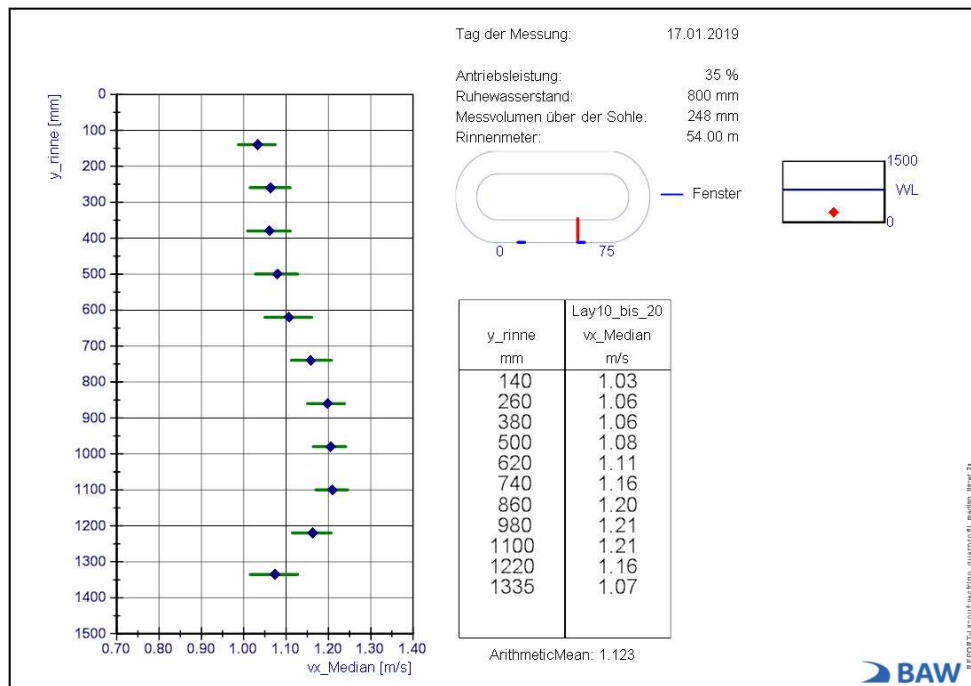
Anhang 9: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 40,5$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



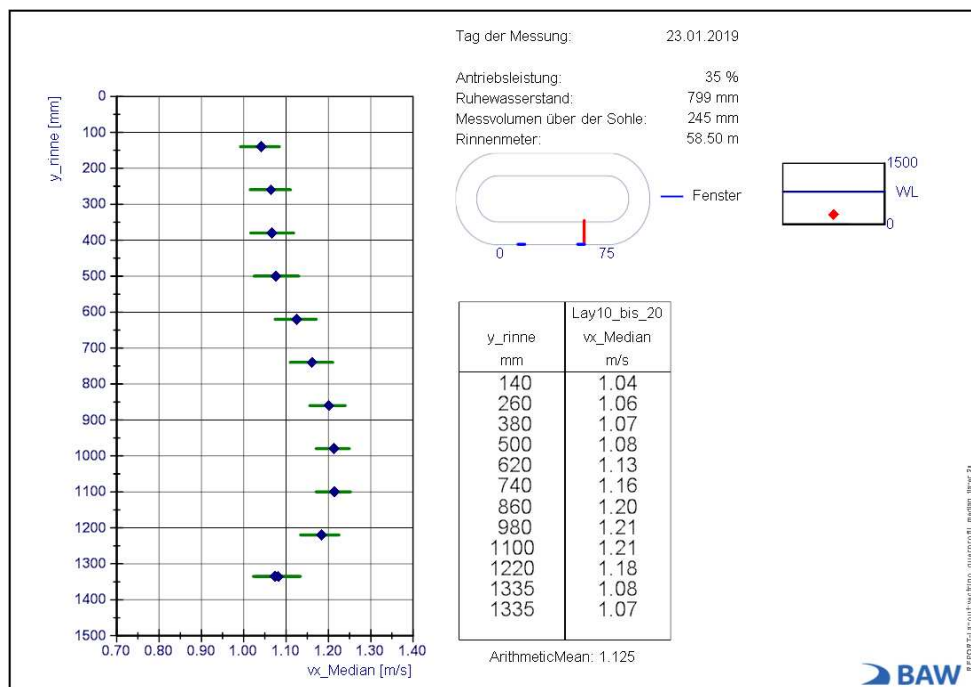
Anhang 10: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 45,0$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



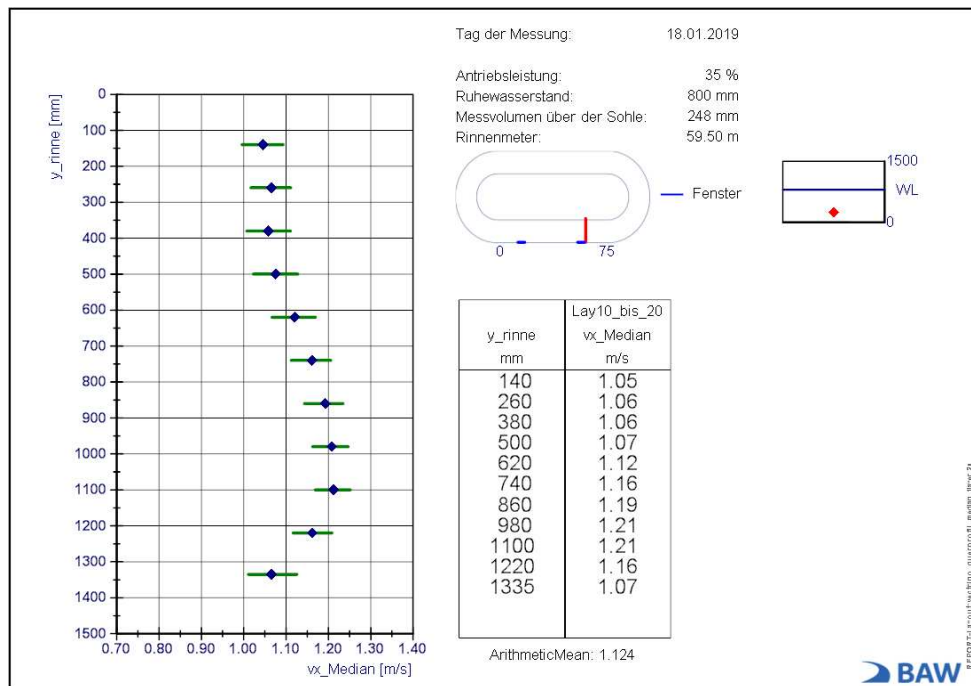
Anhang 11: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 49,50$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



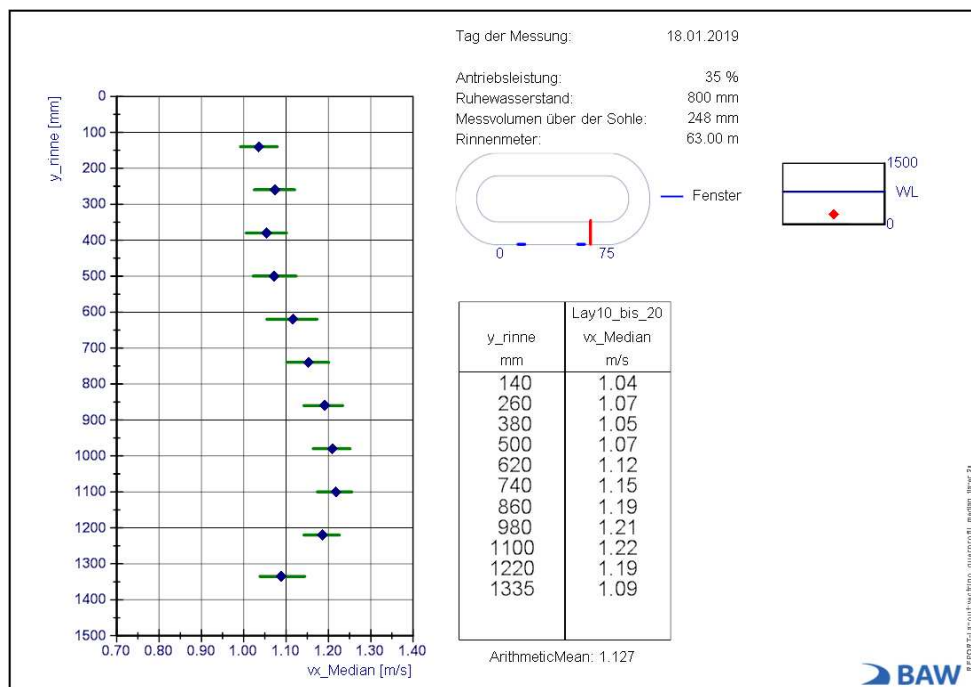
Anhang 12: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 54,0$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



Anhang 13: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 58,50$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)

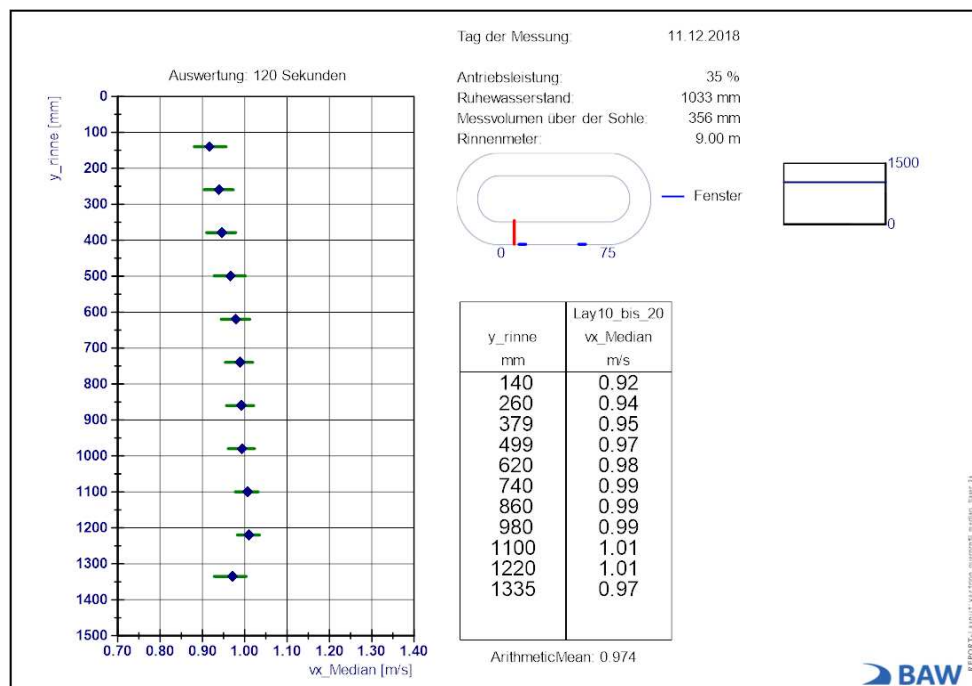


Anhang 14: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 59,50$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)

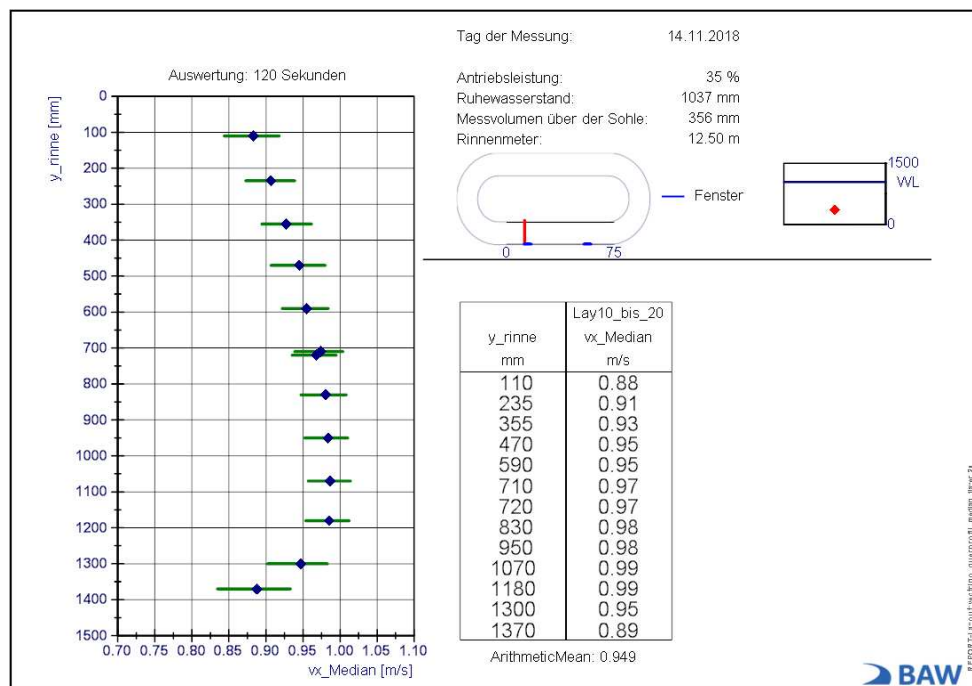


Anhang 15: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 63,0$ m ($h = 0,80$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)

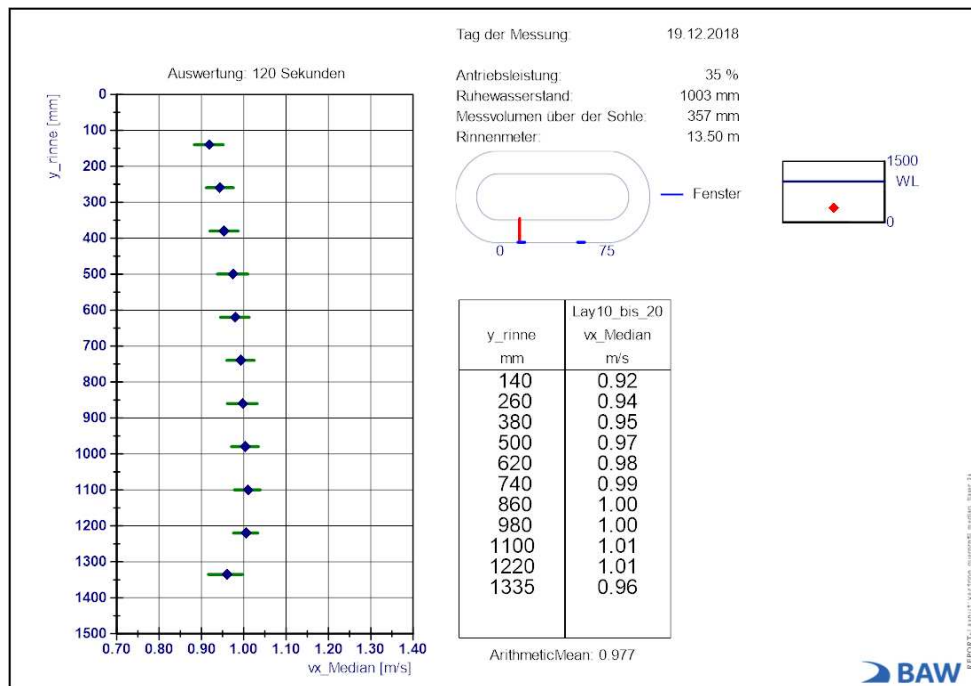
9.5.2 Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit bei Wasserstand $h = 1,0$ m



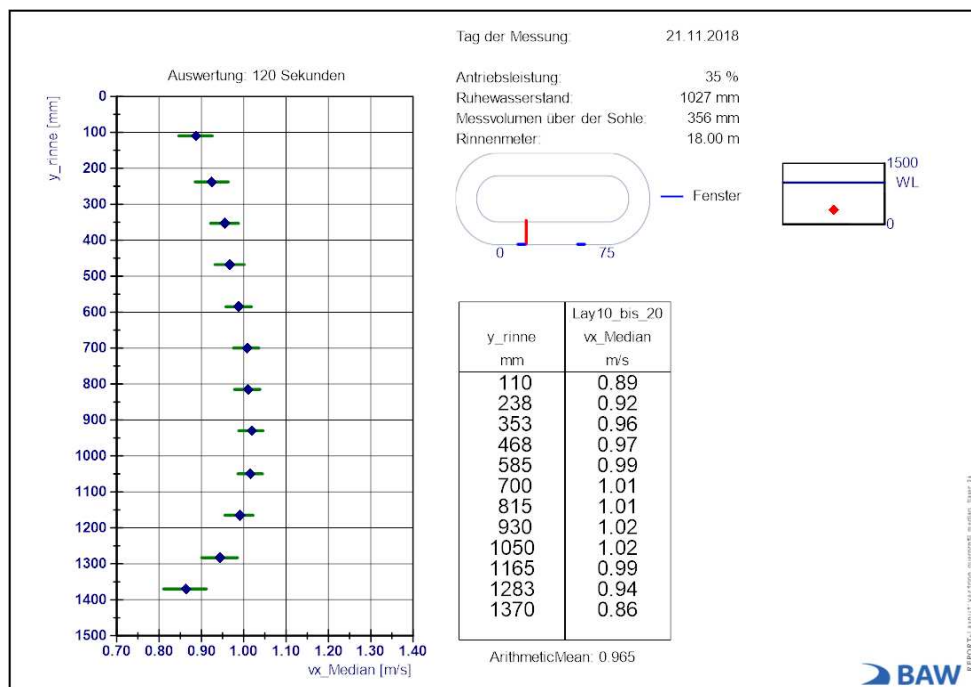
Anhang 16: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 9,0$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



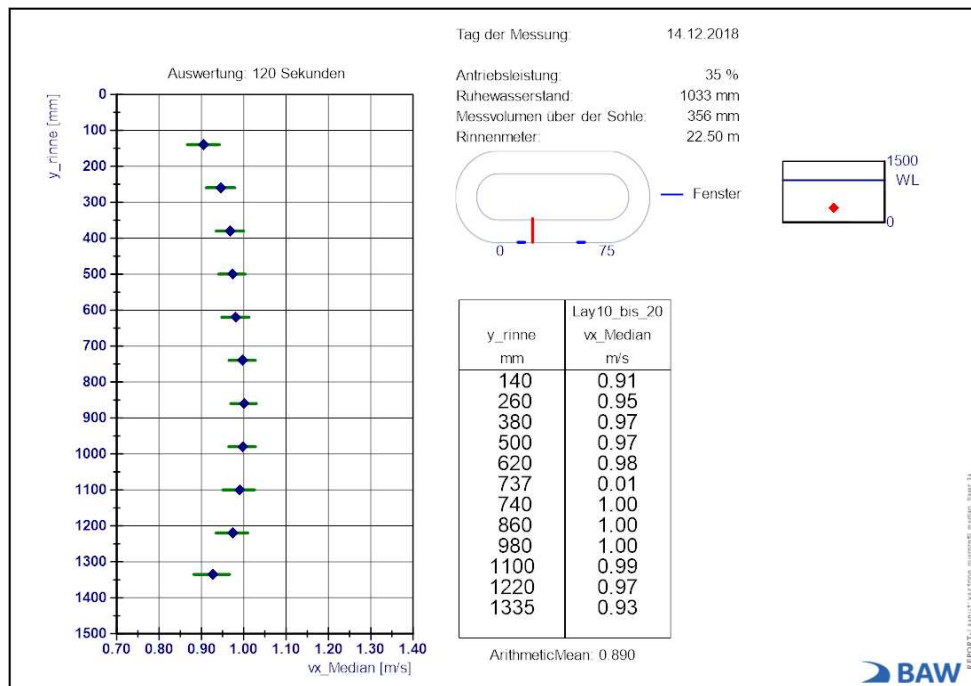
Anhang 17: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 12,50$ m ($h = 1,0$ m): Median der Strömungszeitreihe (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



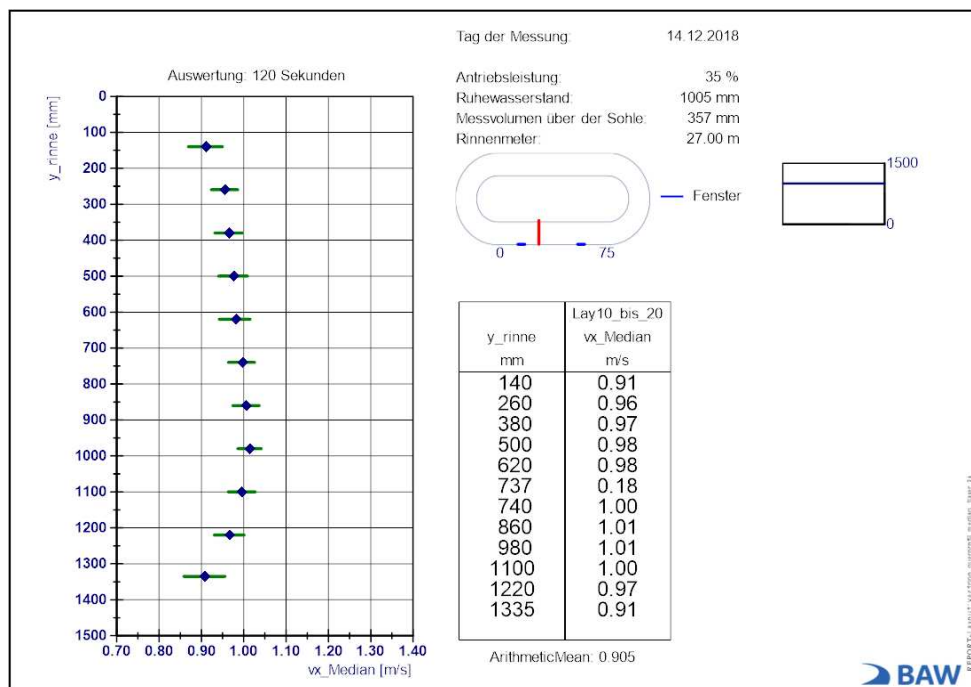
Anhang 18: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 13,50$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



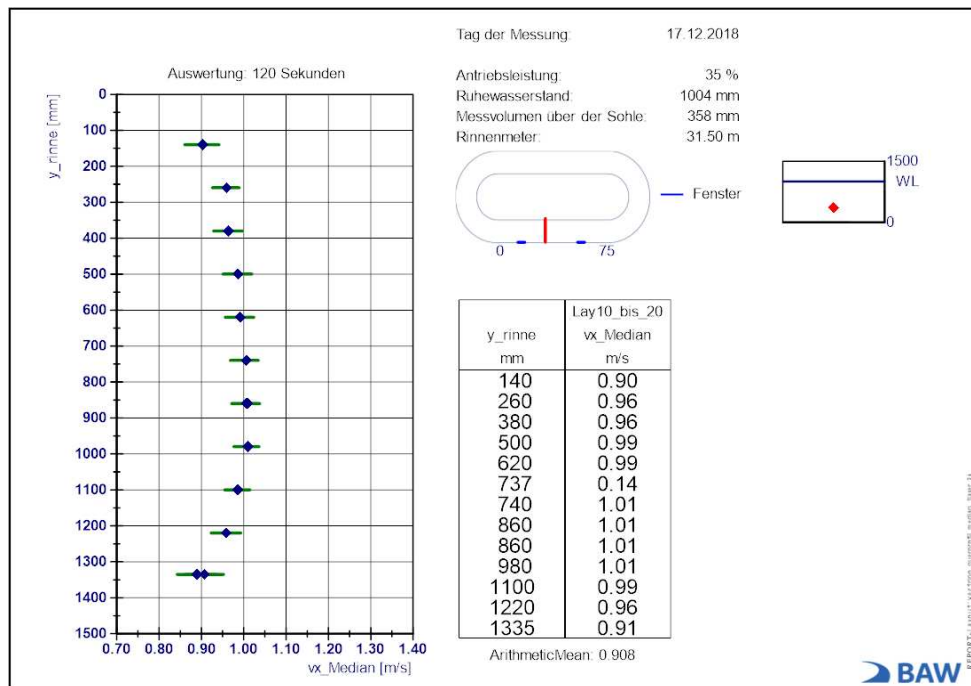
Anhang 19: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 18,0$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



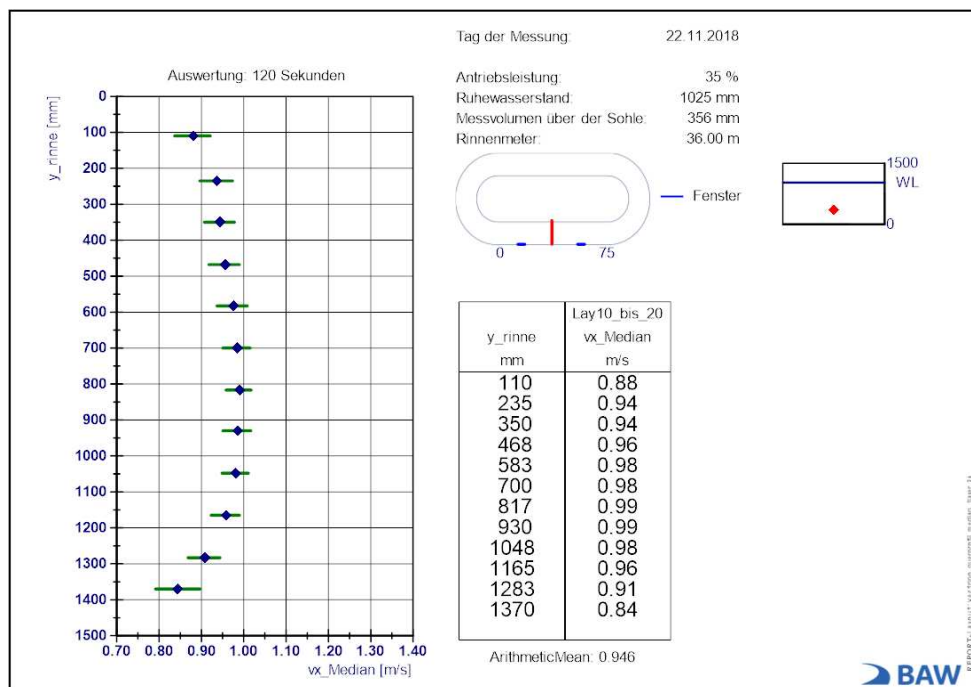
Anhang 20: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 22,50$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



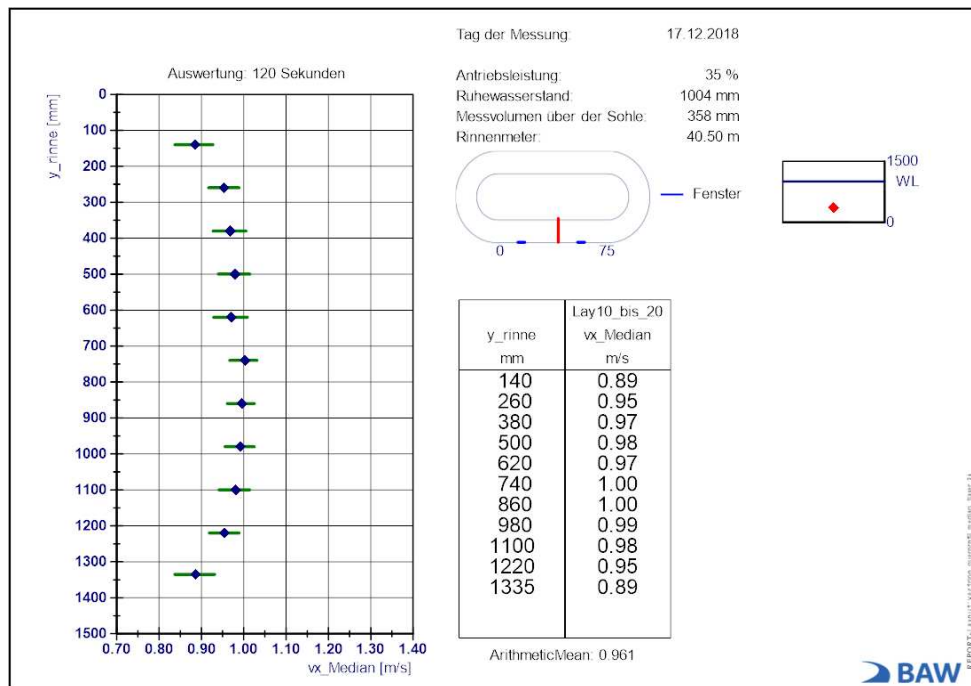
Anhang 21: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 27,0$ m ($h = 1,0$ m): Median der Strömungszeitreihe (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



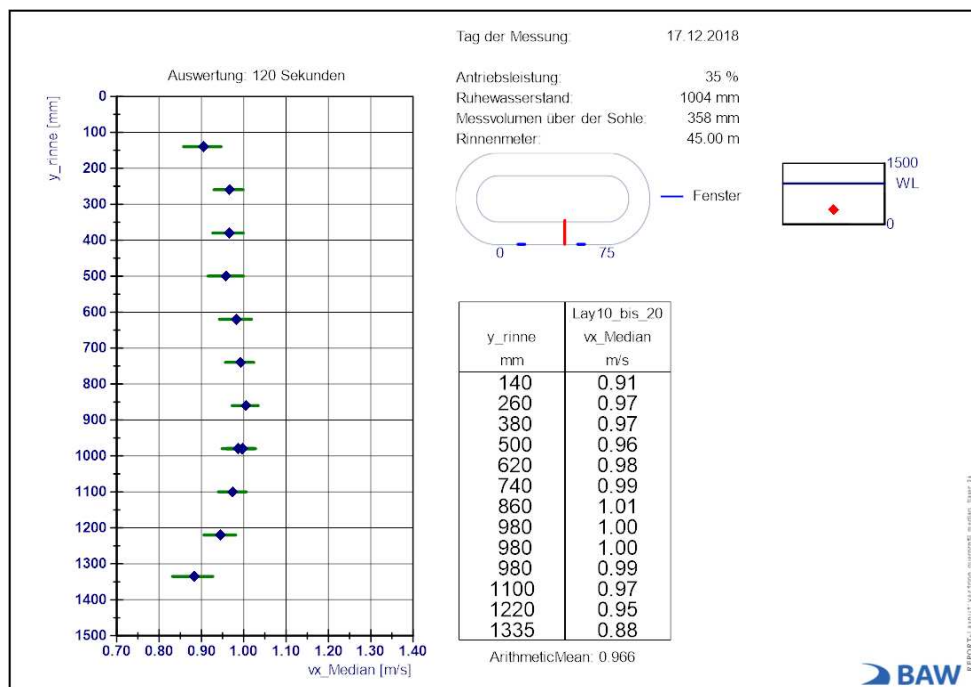
Anhang 22: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 31,50$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



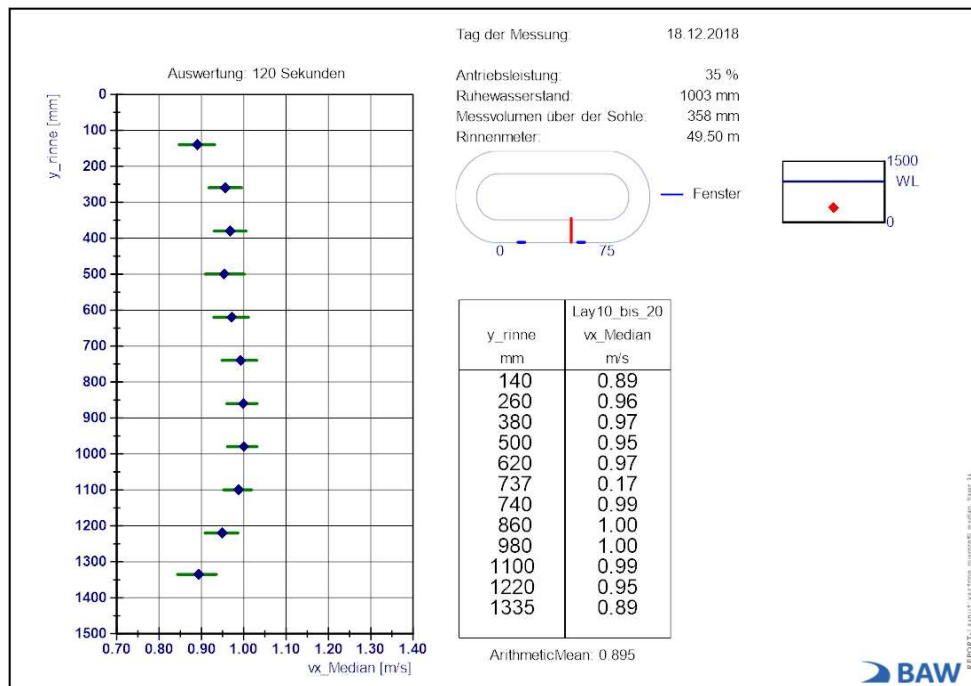
Anhang 23: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 36,0$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



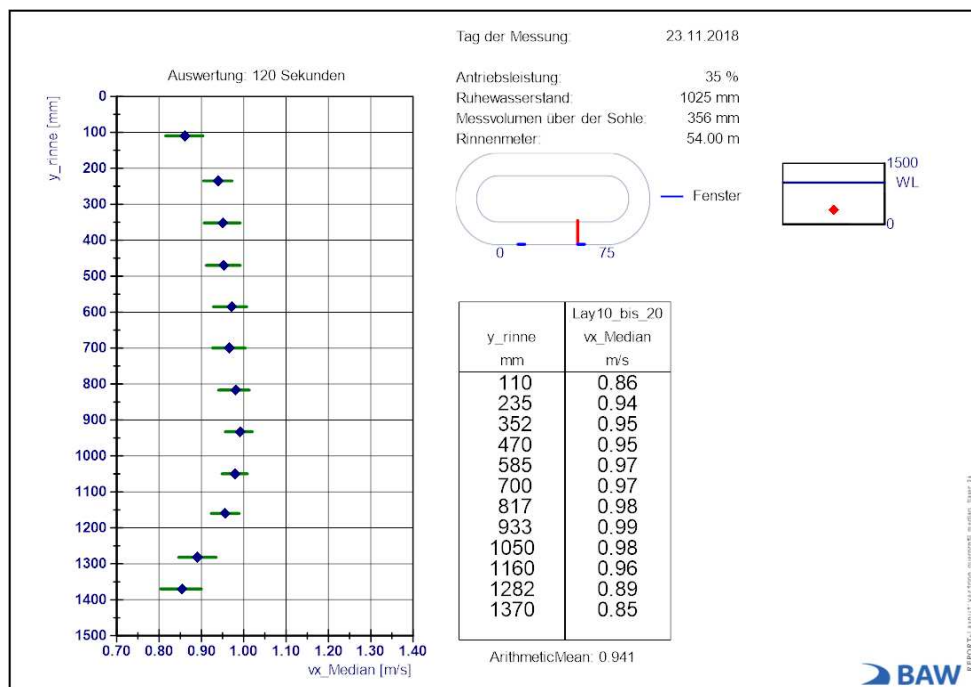
Anhang 24: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 40,50$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



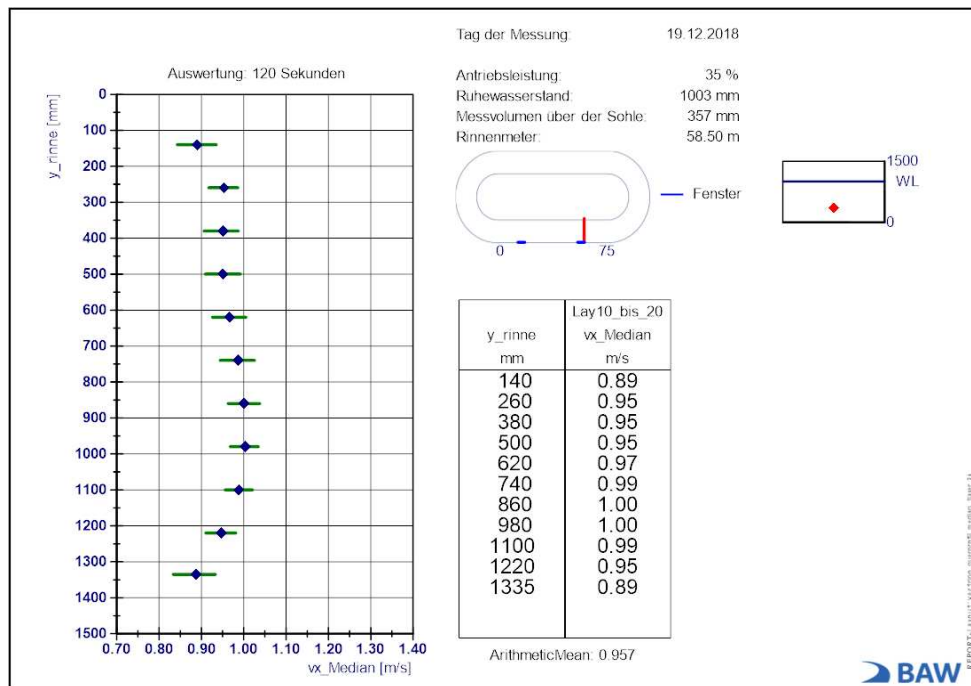
Anhang 25: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 45,0$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



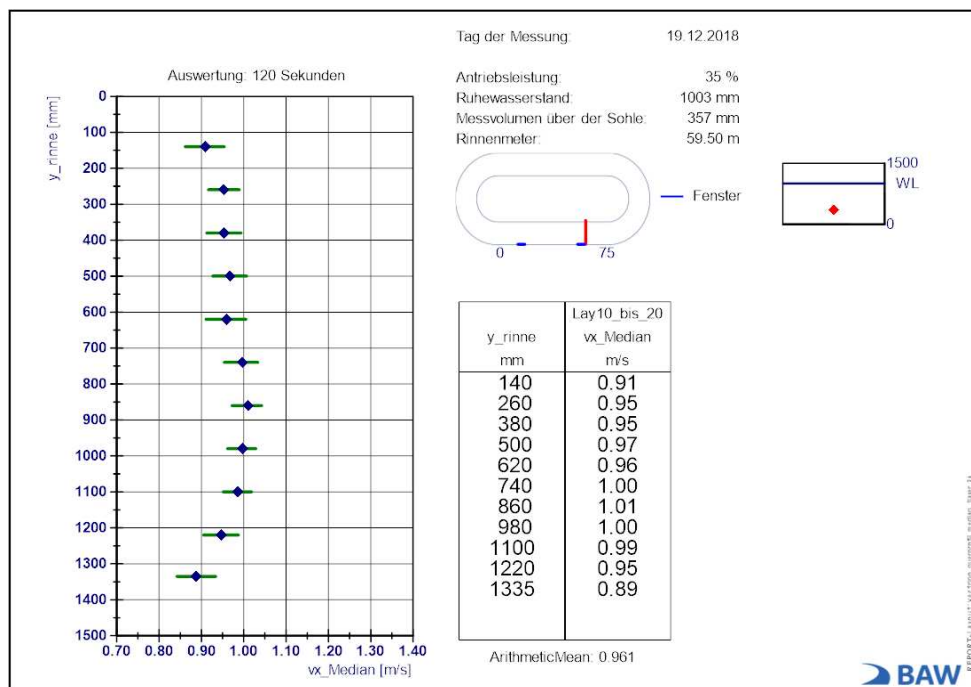
Anhang 26: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 49,50$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



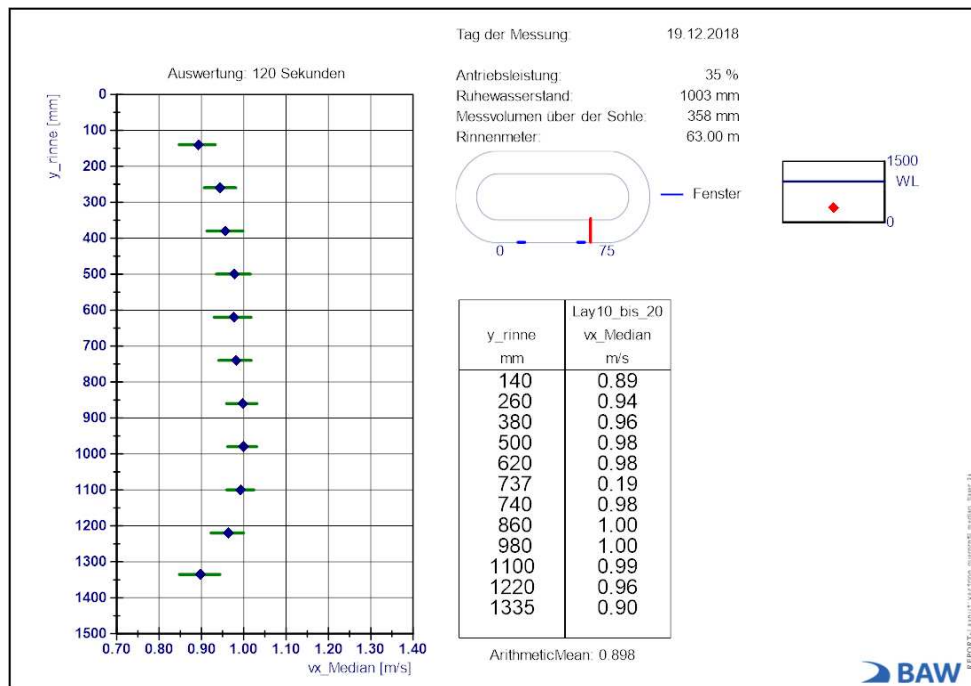
Anhang 27: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 54,0$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



Anhang 28: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 58,50$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



Anhang 29: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 59,50$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)



Anhang 30: Querprofil der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit v_x an Rinnenlängsposition $x = 63,0$ m ($h = 1,0$ m): Median (blau) und Streuungsmaß, begrenzt durch unteres und oberes Quartil (grüner Strich)