Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin

Aerodynamische Belastungen auf Beschäftigte im Gleisbereich durch Vorbeifahrt von Zügen in Abhängigkeit von Zuggeschwindigkeit, Zugtyp und Entfernung vom Gleis

F 06-1402

Abschlussbericht FSA e.V.

Dr. Dirk Lorenz, Diplom-Physiker

Dr. Jan-Niklas Tödt, Diplom-Physiker

Hermann Schiebler, Diplom-Physiker

Dr. Sebastian Nissle, Diplom-Ingenieur Maschinenbau

Paul Schupin, M. Sc. Chemieingenieurwesen & B. Sc. Elektro- und Informationstechnik

Janna Lamprecht, Diplom-Physikerin

Ronny Herzog, B. Eng. Elektro- und Medientechnik

Mannheim, September 2025

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **1**

Abstract **3**

1 Einleitung **7**
1.1 Gefahrenbereich und Feste Absperrung 7
1.1.1 Gefahrenbereich 7
1.1.2 Feste Absperrung 9
1.2 Projekt F 06-1402 10
1.3 Zielsetzung 11

2 Literaturrecherche **12**
2.1 Allgemeiner Überblick 12
2.2 Bewertungskriterium Gleichgewichtsverlust 13
2.2.1 Bewertungsgröße Kraft und Kraftgrenzwerte 13
2.2.2 Bewertungsgröße Windgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeitsgrenzwerte 17
2.3 Bewertungskriterium Druckwirkung 25
2.4 Zusammenfassender Überblick 27

3 Gewinnung geeigneter Messdaten **31**
3.1 Messort 31
3.2 Messaufbau 32
3.3 Durchführung der Messungen 36
3.4 Messergebnisse 37
3.5 Auswertung 50
3.5.1 Windgeschwindigkeit 50
3.5.1.1 Doppelstockzug Baureihe 446 51
3.5.1.2 S-Bahn Baureihe 425 54
3.5.2 Windbeschleunigung 59
3.5.2.1 Doppelstockzug Baureihe 446 59
3.5.2.2 S-Bahn Baureihe 425 63

3.5.3 Druck . . . 66
3.5.3.1 Doppelstockzug Baureihe 446 . . . 66
3.5.3.2 S-Bahn Baureihe 425 . . . 68

4 Modellierung **71**
4.1 Strömungsmodell und Simulationsgeometrie . . . 71
4.2 Charakterisierung der Zugmodelle . . . 74
4.2.1 InterCity-Express Baureihe 403 . . . 74
4.2.2 InterCity . . . 74
4.2.3 S-Bahn Baureihe 425 . . . 75
4.2.4 Doppelstockzug Baureihe 446 . . . 75
4.2.5 Güterzug . . . 76
4.3 Durchführung der Simulationen . . . 77
4.4 Auswertung . . . 78
4.5 Prüfung der Simulationspräzision . . . 81
4.5.1 Zeitlicher Verlauf der horizontalen Windgeschwindigkeit . . . 81
4.5.1.1 Doppelstockzug Baureihe 446 . . . 81
4.5.1.2 S-Bahn Baureihe 425 . . . 84
4.5.1.3 Güterzug, InterCity und InterCity-Express . . . 86
4.5.2 Zeitlicher Druckverlauf . . . 90
4.5.2.1 Doppelstockzug Baureihe 446 . . . 90
4.5.2.2 S-Bahn Baureihe 425 . . . 92
4.5.2.3 Güterzug, InterCity und InterCity-Express . . . 94
4.5.3 Maxima der Windgeschwindigkeit . . . 96
4.5.3.1 Doppelstockzug Baureihe 446 . . . 97
4.5.3.2 S-Bahn Baureihe 425 . . . 99
4.5.4 Amplitude der Bugdruckwelle . . . 101
4.5.4.1 Doppelstockzug Baureihe 446 . . . 101
4.5.4.2 S-Bahn Baureihe 425 . . . 103
4.6 FSAero . . . 105
4.6.1 Schar-Modus . . . 105
4.6.2 Vergleichs-Modus . . . 106
4.6.3 Heatmap-Modus . . . 106
4.6.4 Belastungs-Modus . . . 107

5 Belastungsanalyse mit FSAero **111**
5.1 Windgeschwindigkeit . . . 111
5.2 Windbeschleunigung . . . 117
5.3 Druck . . . 122

5.4 Kraft . . . 128
5.5 Gleichgewichtsstabilität . . . 129
5.6 Drehimpuls, Drehmoment, Arbeit und Leistung . . . 133

6 Ergebnisdiskussion und Ausblick 138
6.1 Diskussion der Ergebnisse . . . 138
6.1.1 Literaturrecherche . . . 138
6.1.2 Aufbau einer Messapparatur . . . 140
6.1.3 Gewinnung von Messdaten . . . 140
6.1.4 Modellierung . . . 141
6.1.5 Darstellung der Ergebnisse . . . 143
6.1.6 Analyse von Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck . . . 143
6.1.6.1 Bewertung der Windgeschwindigkeit . . . 143
6.1.6.2 Bewertung der Windbeschleunigung . . . 147
6.1.6.3 Bewertung des Drucks . . . 148
6.1.7 Auswirkung windinduzierter Kraft auf Menschen . . . 149
6.1.8 Fazit . . . 151
6.2 Ausblick . . . 154
6.2.1 Optimierter Forschungsansatz . . . 154
6.2.2 Sichere Vorbeifahrt an Gleisbaustellen ohne Warnsysteme . . . 156

Literaturverzeichnis 157

Abbildungsverzeichnis 168

Tabellenverzeichnis 194

A Lärmmessung am Bahngleis 196

B Messdaten 231
B.1 Tabellen . . . 232
B.1.1 Messdatenauswertung . . . 232
B.2 Grafiken . . . 248
B.2.1 Messdatenauswertung . . . 248
B.2.2 Messdatendiagramme . . . 258
B.2.2.1 Ohne Feste Absperrung . . . 259
B.2.2.2 Mit fester Absperrung und Schallschutzmatten . . . 443

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	$\mathrm{m/s^2}$	Windbeschleunigung
a_{xy}	$\mathrm{m/s^2}$	aus unbearbeiteten Windgeschwindigkeitsdaten abgeleitete horizontale Windbeschleunigung
$\hat{a}$	$\mathrm{m/s^2}$	maximale Windbeschleunigung bei böigem Wind ohne Messdatenbearbeitung
$\hat{a}_{0,4}$	$\mathrm{m/s^2}$	maximale Windbeschleunigung bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 0,4 s
$\hat{a}_1$	$\mathrm{m/s^2}$	maximale Windbeschleunigung bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 1,0 s
A_{M}	$\mathrm{m^2}$	maximale Querschnittsfläche des Menschen senkrecht zur Strömungsrichtung
A_{O}	$\mathrm{m^2}$	Oberfläche eines Menschen
b	m	Breite des Gefahrenbereichs um ein Gleis
B_{M}	m	Breite des Modells eines Menschen
c_{A}	-	Koeffizient zur Berechnung der Kraft auf einen Menschen aufgrund der Beschleunigung eines strömenden Mediums
c_{W}	-	Koeffizient zur Berechnung der Kraft auf einen Menschen aufgrund der Geschwindigkeit eines strömenden Mediums
d	m	Abstand zwischen Mensch und Gleisachse
d_{Sim}	m	Breite der Simulationsgeometrie
dp/dt, $\frac{dp}{dt}$	mbar/s	Druckanstiegsgeschwindigkeit, Druckgradient
$d\hat{p}/dt$	mbar/s	maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit
dp/dt_{g}	mbar/s	Grenzwert für die Druckanstiegsgeschwindigkeit einer zeitlich veränderlichen Druckschwingung, oberhalb der Unbehagen beim Menschen auftritt
E_{W}	J	von der windinduzierten Kraft geleistete Arbeit an einem Menschen
E_{Wg}	J	Grenzwert für die an einem Menschen geleistete Arbeit des Windes, oberhalb der dieser das Gleichgewicht verlieren kann
F	%	Luftfeuchte
$\hat{F}$	N	Maxima eines zeitlichen Kraftverlaufs
F_{a}	N	windbeschleunigungsinduzierte Kraft auf einen Menschen

F_g	N	Grenzwert einer horizontal auf den Körperschwerpunkt eines Menschen wirkenden Kraft, oberhalb der dieser das Gleichgewicht verlieren kann
F_G	N	gravitationsinduzierte Kraft auf einen Menschen
F_u	N	windgeschwindigkeitsinduzierte Kraft auf einen Menschen
F_W	N	windinduzierte Kraft auf an einen Menschen
$\bar{F}_\mathrm{Wg}$	N	Grenzwert für die mittlere windinduzierte Kraft auf einen Menschen, oberhalb der dieser das Gleichgewicht verlieren kann
g	$\mathrm{m/s^2}$	Gravitationsbeschleunigung
h_Sim	m	Höhe der Simulationsgeometrie
H_M	m	Größe eines Menschen bzw. eines Modells eines Menschen
$\hat{I}$	N	statistischer Wert der Maximalkraft auf einen menschlichen Dummy bei der Passage eines Zuges
J_M	$\mathrm{kg\,m^2}$	Trägheitsmoment eines Menschen bzw. menschlichen Dummys
k	-, $\mathrm{J/m^3}$	Faktor und turbulente kinetische Energiedichte
l_DS	m	Länge des simulierten Doppelstockzuges
l_IC	m	Länge des simulierten InterCity
l_ICE	m	Länge des simulierten InterCity-Express
l_GZ	m	Länge des simulierten Güterzuges
l_SB	m	Länge der simulierten S-Bahn
l_Sim	m	Länge der Simulationsgeometrie
L	Nms	Drehimpuls eines Menschen
L_G	Nms	gravitationsinduzierter Drehimpuls eines Menschen
m	kg	Masse eines Menschen
M	Nm	Drehmoment
M_g	Nm	Grenzwert eines Drehmoments auf einen Menschen, oberhalb dessen dieser das Gleichgewicht verlieren kann
$\bar{M}_\mathrm{W}$	Nm	mittleres windinduziertes Drehmoment auf einen Menschen
$\bar{M}_\mathrm{Wg}$	Nm	Grenzwert für das mittlere windinduzierte Drehmoment auf einen Menschen, oberhalb dessen dieser das Gleichgewicht verlieren kann
$\hat{N}$	kg/m	gemessene Maximalkraft auf einen menschlichen Dummy dividiert durch das Quadrat der Zuggeschwindigkeit
$\bar{\hat{N}}$	kg/m	Mittelwert der Größe $\hat{N}$
O_M	$\mathrm{m^2}$	Oberfläche eines Menschen
p	mbar	Druck
p_0	mbar	Umgebungsdruck
$\hat{p}$	mbar	maximaler Druck
P_g	dB, W	Grenzwert für den Schalldruckpegel einer zeitlich veränderlichen Druckschwingung, oberhalb der Unbehagen beim Menschen auftritt und Grenzwert für die gravitationsinduzierte Leistung auf einen Menschen, oberhalb der ein Mensch sein Gleichgewicht verlieren kann

$\bar{P}_{\mathrm{W}}$	W	Mittelwert der windinduzierten Leistung auf einen Menschen
$\bar{P}_{\mathrm{Wg}}$	W	Grenzwert für die mittlere windinduzierte Leistung auf einen Menschen, oberhalb der dieser das Gleichgewicht verlieren kann
R	-	Korrelationskoeffizient
t_{g}	s	Zeitspanne, in welcher der Schwerpunkt eines starren Modell-Menschen beim Kippvorgang über den Ort seiner Rotationsachse hinaus wandert
u	m/s	Betrag der Windgeschwindigkeit
u_0	m/s	Windgeschwindigkeit beim Eintritt in die Simulationsgeometrie und horizontale Windgeschwindigkeit vor einer Zugpassage
u_{g}	m/s	Grenzwert der horizontalen Windgeschwindigkeit, oberhalb der ein Mensch sein Gleichgewicht verlieren kann
u_{xy}, v_{xy}	m/s	gemessene horizontale Windgeschwindigkeit ohne Messdatenbearbeitung
$\bar{u}$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind
$\bar{u}_{0,4}$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 0,4 s
$\bar{u}_{0,5}$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 0,5 s
$\bar{u}_1$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 1,0 s
$\bar{u}_3$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 3,0 s
$\bar{u}_{10}$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 10 s
$\bar{u}_{600}$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 600 s
$\hat{u}$	m/s	maximale horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind ohne Messdatenbearbeitung
$\hat{u}_{0,4}$	m/s	maximale horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 0,4 s
$\hat{u}_1$	m/s	maximale horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 1,0 s

$\hat{u}_3$	m/s	maximale horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 3,0 s
$\bar{u}_{\max,1}$	m/s	Mittelwert aus mehreren maximalen horizontalen Windgeschwindigkeiten bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 1,0 s
$\bar{u}_{\Delta t}$	m/s	mittlere horizontale Windgeschwindigkeit bei böigem Wind bei gleitender Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von Δt
u'	-	Turbulenzintensität
v_Z	km/h	Zuggeschwindigkeit
$\bar{v}_\mathrm{Z}$	km/h	mittlere Zuggeschwindigkeit
$\hat{v}_\mathrm{Z}$	km/h	vorgesehene Höchstgeschwindigkeit eines Zuges
V_M	m^3	Volumen eines Menschen
x_FA	m	Distanz zwischen Gleisachse und äußerem Rand einer Festen Absperrung
Δp	mbar	Amplitude der Bugdruckwelle
Δp_g	mbar	Grenzwert für die Amplitude einer zeitlich veränderlichen Druckschwingung, oberhalb der Unbehagen beim Menschen auftritt
Δp_gI	mbar	vom Menschen maximal tolerierbare Amplitude einer Druckwelle im Infraschall-Bereich
$\Delta \hat{p}$	mbar	maximale Amplitude in einer zeitlich veränderlichen Druckschwingung
δt	s	kleines Zeitintervall bzw. Zeitschrittweite bei der numerischen Lösung von Differentialgleichungen
Δt	s	Breite des Mittelungszeitintervalls bei der gleitenden Mittelwertbildung
Δv_Z	km/h	Differenz zwischen zwei Zuggeschwindigkeiten
φ	°	Windrichtung
φ_0	°	Horizontale Richtung des Umgebungswindes
ϵ	$\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^3$	Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie
ρ	kg/m^3	Dichte der Luft bei Standardbedingungen
$\sigma_{\hat{N}}$	kg/m	Standardabweichung der Größe $\hat{N}$
Θ	°	Neigungswinkel eines kippenden Modells eines Menschen in Bezug auf die Vertikale

Glossar

Begriff	Definition
Arbeitsbereich	Räumlicher Bereich im und um das Arbeitsgleis, in dem Beschäftigte Tätigkeiten ausführen.
Arbeitsbreite	Ab Achse des Arbeitsgleises gemessene Breite des Raumes, der für die Ausführung der Tätigkeit am Arbeitsgleis in Anspruch genommen wird.
Arbeitsgleis	Gleis, in dem Tätigkeiten durch Beschäftigte ausgeführt werden.
Bewertungsgröße	Physikalische Größe oder mathematische Verknüpfung von physikalischen Größen, welche mit Bewertungskriterien zur Bewertung ihrer Einhaltung verknüpft sind.
Bewertungskriterium	Wirkung auf Menschen durch eine Bewertungsgröße, welche bei Überschreiten eines Bewertungsgrößengrenzwertes negative gesundheitliche Folgen hat oder haben kann.
Gefahrenbereich	Der Gefahrenbereich ist gleich der horizontalen Ausdehnung des Gleisbereichs.
Gleisachse	Mitte zwischen den beiden Schienensträngen eines Gleises.
Gleisbereich	Der von bewegten Schienenfahrzeugen in Anspruch genommene Raum sowie der Raum unter, neben oder über Gleisen, in dem Beschäftige durch bewegte Schienenfahrzeuge gefährdet werden können.
Schienenoberkante	Höchster Punkt des Schienenprofils bezogen auf die Horizontale, auf der das Schienenprofil ruht.
Stabilitäts-verlustdauer	Zeitspanne, in welcher der Schwerpunkt eines starren Modell-Menschen beim Kippvorgang über den Ort seiner Rotationsachse hinaus wandert.
Grenzwert	Aerodynamische Belastung, oberhalb der ein Mensch sein Gleichgewicht verlieren kann.

Nachbargleis	Gleis neben dem Arbeitsgleis, wobei der Sicherheitsraum zwischen den Gefahrenbereichen beider Gleise weniger als 0,8 m beträgt.
Sicherheitsraum	Der an den Gefahrenbereich anschließende Raum für den sicheren Aufenthalt der Beschäftigen bei der Vorbeifahrt von Schienenfahrzeugen.
Simulationsgeometrie	Virtuelles Volumen, in welchem sich die Computersimulation eines Vorganges abspielt
Windreibungskraft	Reibungskraft, die Luftbewegung auf einen Menschen ausübt.
Windinduzierte Kraft	Kraft auf einen Menschen, welche durch Wind über verschiedene aerodynamische Größen wie Druck, Windgeschwindigkeit und Windbeschleunigung insgesamt ausgeübt wird.
Zugpassage	Vorbeifahrt eines Zuges an einem definierten Ort.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht ist Teil eines übergeordneten Projekts, welches das Ziel hat, die systematische Analyse und Bewertung von Sicherungsmaßnahmen im *Gleisbereich*[1] unter Berücksichtigung signifikanter Gefährdungen, betrieblicher Rahmenbedingungen sowie weiterer relevanter Einflussfaktoren — insbesondere des Faktors Mensch — mit dem Ziel, die Wirksamkeit, Praxistauglichkeit und Angemessenheit von Sicherungsmaßnahmen zu überprüfen und zu optimieren. Ein wichtiger Aspekt des Projekts ist die Untersuchung aerodynamischer und akustischer Belastungen auf Beschäftigte am Gleis bei *Zugpassagen*, wobei der Schwerpunkt auf den aerodynamischen Belastungen liegt. Mit letztgenannter Fragestellung setzt sich der vorliegende Berichts auseinander. Im Fokus steht dabei, wie sich aerodynamische Belastungen bzw. die dadurch resultierenden Gefahren auf die Beschäftigen am Gleis in einem Abstand von $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ von der *Gleisachse* erhöhen, wenn Züge schneller als mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ passieren. Hintergrund dieser Fragestellung ist unter anderem das Bestreben der Deutsche Bahn AG, zukünftig auf die akustische Warnung der Beschäftigten am Gleis zu verzichten, wenn Züge schneller als $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ (bis zu $160\,\mathrm{km/h}$) an Festen Absperrungen vorbei fahren.

Eine umfangreiche Literaturstudie wird durchgeführt, deren Ergebnis in Auszügen im vorliegenden Bericht dargelegt wird. Die wesentlichen Erkenntnisse sind, dass die aerodynamischen Belastungen auf Personen am Gleis mit dem Abstand zur Gleisachse sinken und mit der Zuggeschwindigkeit steigen. Unterschiedliche Zugtypen erzeugen unterschiedlich hohe aerodynamische Belastungen, wobei Güterzüge – insbesondere mit Autotransportwaggons – den worst case darstellen. Die maximale Windgeschwindigkeit neben dem Gleis bei Passagen ein und desselben Zuges unterliegt starken statistischen Schwankungen. Vorhandener Wind – insbesondere Seitenwind – sowie ausladende Kleidung können die aerodynamischen Belastungen auf Personen am Gleis signifikant erhöhen. Es existieren zahlreiche *Bewertungsgrößen* und *Grenzwerte*, um maximal zulässige aerodynamische Belastungen auf Menschen zu definieren. Die Grenzwerte streuen stark, so dass bis heute kein Konsens über maximal zulässige aerodynamische Belastungen auf Menschen besteht.

Eine Apparatur für die Messdatengewinnung am Gleis wird entwickelt. Mit Hilfe eines aus neun Messpunkten bestehenden Arrays werden die Windgeschwindigkeits- und Druckverläufe bei der Passage unterschiedlicher Zugtypen mit verschiedenen Zuggeschwindigkeiten erfasst. Zur Messung werden Ultraschall-Anemometer und Drucksensoren eingesetzt. Die Drucksensoren sind mit Nachbildungen des menschlichen Ohres verkleidet, um so die Druckwirkung auf das Trommelfell zu messen zu können. Die Zuggeschwindigkeit wird vierfach redundant mit Radar, Lichtschranken und Kamerasystemen erfasst. Die akustische Belastung am Gleis wird mit Schallpegelmessgeräten bestimmt. Insgesamt werden Windgeschwindigkeits- und Druckverläufe von dreiundsechzig Züge verschiedenen Typs aufgezeichnet.

[1] *Kursiv* gestellte Begriffe sind im Glossar erläutert.

CAD-Nachbildungen der messtechnisch erfassten Züge werden in die freie CFD-Software OpenFOAM importiert. Durch die Simulation der Zugfahrten mit Hilfe eines Großrechners werden Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck im Gleisbereich als Funktion von Zeit, Ort, Zugtyp und Zuggeschwindigkeit berechnet. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt mit den gewonnenen Messdaten. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsdaten, wobei auftretende Abweichungen bei den Maxima im Bereich von Interesse unter 30 % bleiben.

Die Software *FSAero* wird entwickelt, um die Daten aus den Simulationen darstellen, vergleichen, mitteln und bewerten zu können. Die Software verfügt über vier Modi:
Im Schar-Modus können die Maxima von Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druckamplitude (Bugwelle) als Funktion der fünf Parameter Zugtyp, Zuggeschwindigkeit v_Z, Abstand von der Gleisachse d, Höhe über der *Schienenoberkante* z und Stärke der gleitenden Mittelung Δt in einem Diagramm dargestellt werden, wobei einer der Parameter als Schar-Parameter ausgewählt werden kann.
Im Vergleichs-Modus können ausgewählte Kurven aus dem Schar-Modus in ein separates Diagramm zu Analysezwecken importiert werden.
Der Heatmap-Modus zeigt eine Karte mit der örtlichen Verteilung der Maxima von Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druckamplitude im Gleisbereich. Variiert werden können v_Z, Δt und z. Die in der Höhe z auftretenden Maxima werden zusätzlich als Funktion von d in einem Diagramm dargestellt.
Der Belastungs-Modus dient dazu, das windinduzierte Drehmoment auf einen virtuellen Menschen neben dem Gleis zu berechnen. Berücksichtigt werden dabei die *Windreibungskraft* sowie die von der Windbeschleunigung induzierte Kraft. Variiert werden können die Körpergröße und der BMI des Modell-Menschen sowie sein Aufenthaltsort. Weiterhin sind die Parameter Zugtyp, v_Z, d, z und Δt wählbar. Darüber hinaus wird die Bewegung des Modell-Menschen unter Wirkung des windinduzierten und gravitationsbedingten Drehmoments berechnet. Kippt der Modell-Mensch um – insbesondere in weniger als der *Stablitätsverlustdauer* – ist Gleichgewichtsverlust eingetreten. Im Belastung-Modus werden darüber hinaus die zeitlichen Verläufe von Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck dargestellt, wobei der Betrachtungsort ausgewählt werden kann.

Mit FSAero wird analysiert, wie sich Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druckamplitude neben dem Gleis als Funktion von Zugtyp, v_Z, d, z und Δt ändern. Weiterhin wird untersucht, welches Drehmoment diese aerodynamischen Belastungen auf einen Modell-Menschen mit der Körpergröße $H_\mathrm{M} = 1{,}78\,\mathrm{m}$ und $BMI = 25$ ($79{,}2\,\mathrm{kg}$) im Abstand von $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ entwickeln und ob der Modell-Mensch zu Fall gebracht werden kann. Der Modell-Mensch steht dabei auf dem Erdboden neben dem Gleis ($z = -0{,}65\,\mathrm{m}$). Variiert werden Zugtyp und v_Z. Die Ergebnisse dieser Analyse sind:

1. Passieren Personenzüge mit $v_\mathrm{Z} > 120\,\mathrm{km/h}$ Baustellen mit Festen Absperrungen ohne Warnsysteme verringert sich die Arbeitssicherheit der Beschäftigen am Gleis.

2. Weil jeder Zugtyp ein für ihn charakteristisches Windfeld mit sich führt, ist die Messung der maximalen Windgeschwindigkeit an nur einem Ort neben dem Gleis nicht ausreichend, um damit die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen am Gleis charakterisieren zu können.

3. Wegen 2. erlauben lokal gemessene Windgeschwindigkeitsmaxima keine Vergleiche der zugtypabhängigen Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Beschäftige am Gleis.

4. Die Windbeschleunigung darf bei der Bestimmung von windinduzierten Drehmomenten auf Menschen am Gleis nicht vernachlässigt werden.

5. Gleitende Mittelung von Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungskurven verfälscht die Berechnung der windinduzierten Drehmomente auf Menschen.

6. Rechnungen mit dem Belastungs-Modus in FSAero weisen auf einen Grenzwert für die *windinduzierte Kraft* von $F_\mathrm{g} = 90 \pm 20\,\mathrm{N}$ hin.

7. In $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse erzeugen der simulierte Güterzug mit Geschwindigkeit oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 100\,\mathrm{km/h}$ und der InterCity mit Zuggeschwindigkeit oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 130\,\mathrm{km/h}$ windinduzierte Kräfte, welche den Modell-Menschen in FSAero umkippen. Deshalb kann es zu Gleichgewichtsverlusten bei Beschäftigen am Gleis kommen wenn es aufgrund fehlender Warnsysteme zu Schrecksituationen kommt (lange Schreckstarren).

8. Aufgrund 7. und weil die windinduzierten Kraftspitzen des simulierten Güterzuges alle bekannten Grenzwerte für die maximal zulässige windinduzierte Kraft überschreitet, erscheint die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit des Güterzuges von $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ in Gleisbaustellen zu hoch.

9. Die zuginduzierte maximale Windbeschleunigung des simulierten InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ übersteigt diejenige des simulierten Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ an allen Orten.

10. Die zuginduzierte maximale Windgeschwindigkeit des simulierten InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ übersteigt diejenige des simulierten Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ an einigen Orten.

11. Die zuginduzierten maximalen Druckamplituden und maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten der simulierten herkömmlichen Personenzüge mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ sind mindestens doppelt so groß wie die des simulierten Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. Sie überschreiten dadurch einige bzw. alle Grenzwerte für maximal zulässige Druckamplituden bzw. Druckanstiegsgeschwindigkeiten für das menschliche Wohlbefinden. Aufgrund dessen sowie der großen Anzahl und Streuung dieser Grenzwerte kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich diese Art der Druckbelastung auf Dauer nicht negativ auf die Konzentration oder Gesundheit von Beschäftigten am Gleis auswirkt. Die vom simulierten InterCity-Express mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ generierten Druckbelastungen liegen in etwa gleichauf mit denjenigen des simulierten Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$.

12. Basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Untersuchung wird ein weiter entwickeltes Forschungsprojekt vorgeschlagen.

Abstract

This report is part of a larger project that aims to systematically analyse and evaluate safety measures in the track area, taking into account significant hazards, operational conditions and other relevant factors factors – in particular the human factor – with the aim of reviewing and optimising the effectiveness, practicality and appropriateness of safety measures. An important aspect of the project is the investigation of aerodynamic and acoustic stress on employees on the track when trains pass, with a focus on aerodynamic stress. The present report deals with the latter issue. The focus is on how aerodynamic loads and the resulting hazards increase for employees on the track at a distance of $d = 2.3\,\mathrm{m}$ from the track axis when trains pass at speeds greater than $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. The background to this issue is, among other things, Deutsche Bahn AG's desire to dispense with acoustic warnings for employees on the track in future when trains pass fixed barriers at speeds greater than $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ (up to $160\,\mathrm{km/h}$).

An extensive literature review has been conducted, the results of which are presented in excerpts in this report. The key findings are that the aerodynamic loads on people on the track decrease with distance from the track centre line and increase with train speed. Different types of trains generate different levels of aerodynamic loads, with freight trains — especially those with car transport wagons -– representing the worst case. The maximum wind speed next to the track when the same train passes is subject to significant statistical fluctuations. Existing wind — especially crosswinds — and loose clothing can significantly increase the aerodynamic loads on people on the track. There are numerous evaluation parameters and limit values for defining the maximum permissible aerodynamic loads on people. The limit values vary widely, so that to date there is no consensus on the maximum permissible aerodynamic loads on people.

A device for collecting measurement data on the track is being developed. An array consisting of nine measuring points is used to record wind speed and pressure profiles as different types of trains pass by at various speeds. Ultrasonic anemometers and pressure sensors are used for the measurements. The pressure sensors are covered with replicas of the human ear in order to measure the pressure effect on the eardrum. The train speed is recorded four times redundantly using radar, light barriers and camera systems. The acoustic load on the track is determined using sound level meters. In total, wind speed and pressure profiles of sixty-three trains of different types are recorded.

CAD replicas of the trains recorded by measurement technology are imported into the free CFD software OpenFOAM. By simulating train journeys using a mainframe computer, wind speed, wind acceleration and pressure in the track area are calculated as a function of time, location, train type and train speed. The simulation results are verified using the measurement data obtained. There is good agreement between the measurement and simulation data, with any deviations occurring at the maxima in the area of interest remaining below 30 %.

The software *FSAero* is being developed to display, compare, average and evaluate data from simulations. The software has four modes:
In cluster mode, the maxima of wind speed, wind acceleration and pressure amplitude (bow wave) can be displayed as a function of the five parameters train type, train speed v_Z, distance from the track axis d, height above the top of rail z and strength of moving average Δt can be displayed in a diagram, whereby one of the parameters can be selected as the cluster parameter.
In comparison mode, selected curves from cluster mode can be imported into a separate diagram for analysis purposes.
The heat map mode displays a map showing the local distribution of the maxima of wind speed, wind acceleration and pressure amplitude in the track area. v_Z, Δt and z can be varied. The maxima occurring at height z are also displayed in a diagram as a function of d.
The load mode is used to calculate the wind-induced torque on a virtual person next to the track. The wind friction force and the force induced by wind acceleration are taken into account. The height and BMI of the model person as well as their location can be varied. Furthermore, the parameters train type, v_Z, d, z and Δt can be selected. In addition, the movement of the model person under the effect of wind-induced and gravity-induced torque is calculated. If the model person tips over — especially in less than the stability loss duration – a loss of balance has occurred. In load mode, the temporal progression of wind speed, wind acceleration and pressure is also displayed, whereby the viewing location can be selected.

FSAero is used to analyse how wind speed, wind acceleration and pressure amplitude change alongside the track as a function of train type, v_Z, d, z and Δt. Furthermore, it examines the torque that these aerodynamic loads exert on a model human with a height of $H_M = 1.78$ m and a BMI of 25 (79.2 kg) at a distance of $d = 2.3$ m and whether the model human can be knocked over. The model human stands on the ground next to the track ($z = -0.65$ m). The train type and v_Z are varied. The results of this analysis are:

1. If passenger trains with $v_Z > 120\,\mathrm{km/h}$ pass construction sites with fixed barriers without warning systems, the occupational safety of workers on the track is reduced.

2. Because each train type has its own characteristic wind field, measuring the maximum wind speed at just one location next to the track is not sufficient to characterise the effect of aerodynamic loads on people on the track.

3. Because of 2. locally measured wind speed maxima do not allow comparisons of the train type-dependent effect of aerodynamic loads on employees on the track.

4. The wind acceleration must not be neglected when determining wind-induced torques on people on the track.

5. Sliding averaging of wind speed and wind acceleration curves falsifies the calculation of wind-induced torques on people.

6. Calculations with the load mode in FSAero indicate a limit value for the wind-induced force of $F_g = 90 \pm 20\,\mathrm{N}$.

7. At a distance of $d = 2.3\,\mathrm{m}$ from the track axis, the simulated goods train with a speed above $v_Z \approx 100\,\mathrm{km/h}$ and the InterCity with a train speed above $v_Z \approx 130\,\mathrm{km/h}$ generate wind-induced forces that cause the model human in FSAero to tip over. This can lead to loss of balance for people working on the track if they are startled due to the lack of warning systems (long startled stares).

8. Due to 7. and because the wind-induced force peaks of the simulated goods train exceed all known limits for the maximum permissible wind-induced force, the currently permissible maximum speed of the goods train of $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ in track construction sites appears too high.

9. The train-induced maximum wind acceleration of the simulated InterCity with $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ exceeds that of the simulated goods train with $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ at all locations.

10. The train-induced maximum wind speed of the simulated InterCity with $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ exceeds that of the simulated goods train with $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ in some places.

11. The train-induced maximum pressure amplitudes and maximum pressure rise velocities of the simulated conventional passenger trains with $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ are at least twice as high as those of the simulated goods train with $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$. As a result, they exceed some or all of the limit values for maximum permissible pressure amplitudes or pressure increase velocities for human well-being. Due to this and the large number and dispersion of these limit values, it cannot be ruled out with certainty that this type of pressure load will not have a negative impact on the concentration or health of employees on the track in the long term. The pressure loads generated by the simulated InterCity Express with $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ are roughly the same as those of the simulated goods train with $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$.

12. Based on the findings of the present study, a further developed research project is proposed.

1 Einleitung

Für alle Arbeiten an Gleisanlagen sind Sicherungsmaßnahmen zum Schutz der Beschäftigten vor den Gefahren des Bahnbetriebs erforderlich. Dies gilt sowohl für Arbeiten im Gleisbereich als auch für Arbeiten in dessen Nähe [84]. Aufgrund der Verschiedenheit der Arbeitsaufgaben im Gleisbereich und Geländetypen um Gleisanlagen existiert nicht eine einzige Sicherungsmaßnahme, sondern ein Set von Sicherungsmaßnahmen. Beispiele aus diesem Set sind die Gleissperrung, die Feste Absperrung (FA), automatische Warnsysteme (AWS, ATWS) oder Streckenposten. Aus dem Set der Sicherungsmaßnahmen werden für jede Gleisbaustelle anhand von Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die bestmöglichen Sicherungsmaßnahmen ausgewählt [36–38,60,84].

1.1 Gefahrenbereich und Feste Absperrung

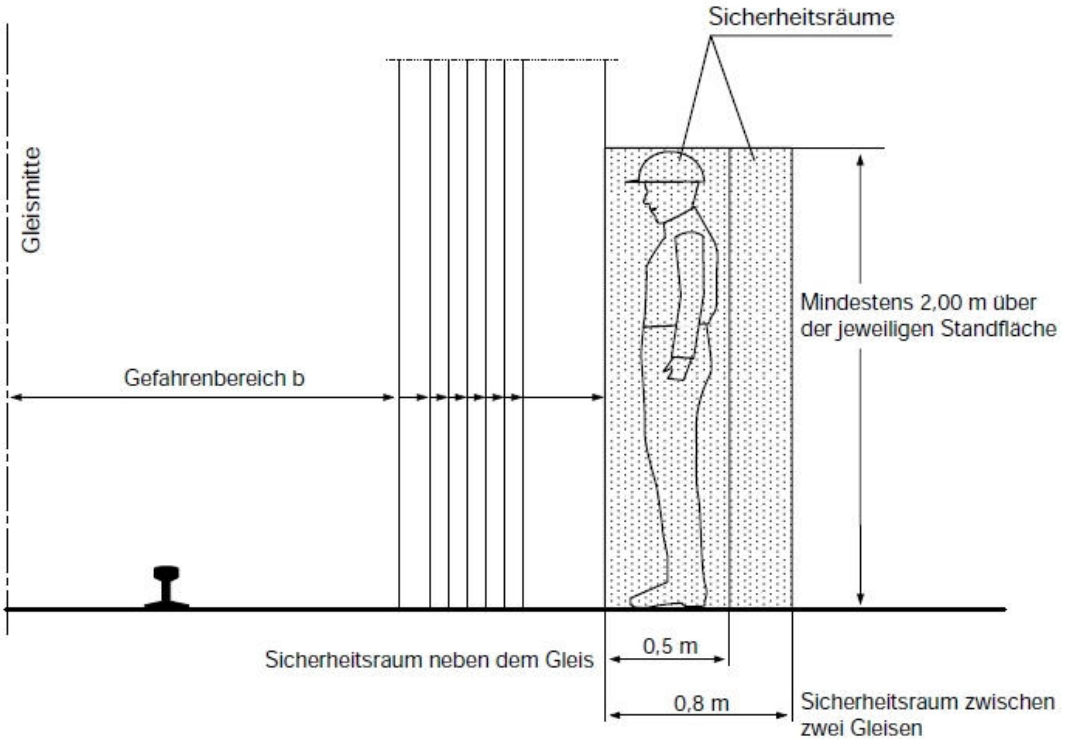
1.1.1 Gefahrenbereich

Um einige der gängigen Sicherungsmaßnahmen sinnvoll anwenden zu können, wird auf den *Gefahrenbereich* links und rechts neben einem Gleis zurückgegriffen. In [36, 37] ist dieser definiert und in Abbildung 1.1, oben dargestellt. Man entnimmt der Abbildung, dass die Breite b des Gefahrenbereichs von der Zuggeschwindigkeit v_{Z} abhängt, jedoch nicht vom Zugtyp. Letzterer hat jedoch aufgrund verschiedener physikalischer Eigenschaften einen signifikanten Einfluss auf die Höhe aerodynamischer und akustischer Belastungen von Menschen am Gleis.

In [37] findet man auf Seite 11 unten: "Die Maße des Gefahrenbereichs sind [...] bei der Vorbeifahrt von Schienenfahrzeugen auftretenden Windreibungskräfte ermittelt worden.“ Hier fehlt jedoch eine Quellenangabe. Auch eine umfangreiche Literaturrecherche der Autoren lieferte keine Quellen, in denen der in Abbildung 1.1 definierte Gefahrenbereich wissenschaftlich fundiert aus Messungen aerodynamischer Belastungen auf Menschen bei Zugpassage abgeleitet wird. Weitere Ausführungen dazu finden sich in Abschnitt 2.

Im unteren Teil der Abbildung 1.1 ist der Mindestabstand von der Gleisachse gezeigt, welcher bei der Lagerung von Geräten, Bauteilen und Baustoffen zwingend einzuhalten ist. Wie man der Abbildung entnimmt, ist dieser Abstand abhängig von der Höhe über der Schienenoberkante. Er ist nicht abhängig von der Zuggeschwindigkeit, dem Zugtyp oder der Art der Gegenstände. Insbesondere Letzteres verwundert, da sich Gegenstände erheblich in ihrem Masse/Luftwiderstand-Verhältnis, d. h. in ihrem Beharrungsvermögen bei Einwirkung aerodynamischer Belastungen, unterscheiden können (Beispiel: Zementsack, Stehleiter). In den Abständen, die in die gepunkteten Flächen der Abbildung hineinreichen, müssen Gegenstände gegen die Auswirkungen aerodynamischer Belastungen durch Zugpassagen gesichert werden. Dies kann z. B. durch Befestigung oder Beschweren geschehen.

v_z (km/h)	≤ 40	≤ 50	≤ 70	≤ 90	≤ 120	≤ 140	≤ 160	≤ 280
b (m)	1,85	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	3,00



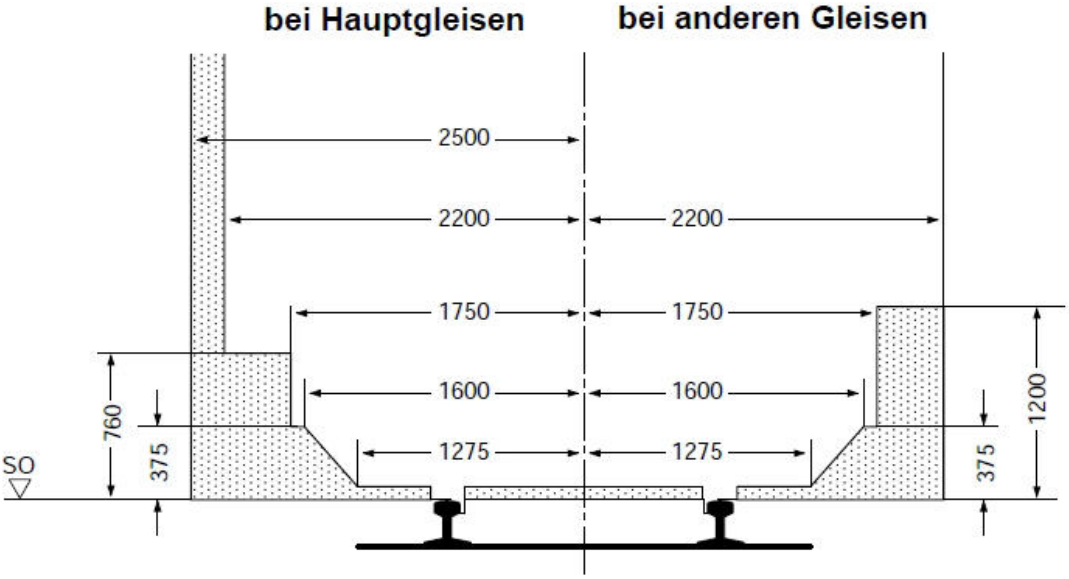


Abbildung 1.1: Oben: Definiton des personenbezogenen Gefahrenbereichs um ein Gleis. Unten: Raum für das Ablegen von Geräten, Baustoffen und Bauteilen. In den mit Punkten gekennzeichneten Raum dürfen Geräte, Baustoffe und Bauteile nur abgelegt werden, wenn die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen getroffen sind [36, 37].

1.1.2 Feste Absperrung

Die Feste Absperrung (FA), wie in Abbildung 1.2 zu sehen, ist eine gängige und weit verbreitete Sicherungsmaßnahme. Sie erfüllt den Grundsatz der räumlichen Trennung von *Nachbargleis* und *Arbeitsbereich*, sie trennt Mensch und Gefahr voneinander, indem sie ein unbeabsichtigtes Betreten des Gefahrenbereichs des Nachbargleises verhindert. Um eine FA einsetzen zu können, müssen bestimmte Voraussetzungen wie beispielsweise eine ausreichende Höhe über der Standfläche der Beschäftigten und eine ausreichende *Arbeitsbreite* erfüllt sein [84]. Der Abstand x_{FA} der FA von der Gleisachse orientiert sich an der Breite b des Gefahrenbereichs, ist also – ebenso wie b – abhängig von der Zuggeschwindigkeit. Der Abstand von $x_{\mathrm{FA}} = 1{,}90\,\mathrm{m}$ darf dabei keinesfalls unterschritten werden. Ob neben der FA weitere Sicherungsmaßen wie Arbeitsunterbrechung, Gefahrenbereichsräumung oder automatische Warnsysteme (ATWS) erforderlich sind, hängt von der Zuggeschwindigkeit und vom Montageort der FA ab. Seit Januar 2016 gilt das in Tabelle 1.1 dargestellte Schema [60].

Tabelle 1.1: Regelungen zum Einsatz von Kombinationen aus Festen Absperrungen und automatischen Warnsystemen [60].

v_{Z} [km/h]	Sicherungsmaßnahmen
$v_{\mathrm{Z}} \leq 120$	– FA auf Grenze Gefahrenbereich – Einschneiden in Gefahrenbereich bis 0,2 m zulässig – Kein ATWS – Weiterarbeit bei Zugfahrt
$120 < v_{\mathrm{Z}} \leq 160$	– FA auf Grenze Gefahrenbereich – Einschneiden in Gefahrenbereich nicht zulässig – Einsatz von ATWS – Arbeitsunterbrechnung bei Zugfahrt
$120 < v_{\mathrm{Z}} \leq 160$	– Gefahrenbereich überschreitet FA in den Arbeitsbereich hinein um maximal 0,6 m, wobei $x_{\mathrm{FA}} \geq 1{,}90\,\mathrm{m}$ einzuhalten ist – Einsatz von ATWS – Arbeitsunterbrechnung bei Zugfahrt – Räumung des Gefahrenbereichs neben der FA bei Zugfahrt im Nachbargleis

Aus Tabelle 1.1 entnimmt man, dass bei Sicherung mit FA bis zu einer Geschwindigkeit von $v_{\mathrm{Z}} = 120\,\mathrm{km/h}$ keine Warnung vor Fahrten im Nachbargleis erforderlich ist und die Arbeiten nicht unterbrochen werden müssen. Die FA darf um maximal 20 cm in den Gefahrenbereich des Nachbargleises eingerückt werden, d. h. die Beschäftigten halten sich um nicht mehr als 20 cm im Gefahrenbereich des Nachbargleises auf. Bei Geschwindigkeiten $v_{\mathrm{Z}} > 120\,\mathrm{km/h}$ ist zusätzlich zur FA eine Warnung erforderlich. Bei $v_{\mathrm{Z}} > 120\,\mathrm{km/h}$ müssen die Arbeiten darüber hinaus für die Zugvorbeifahrt unterbrochen werden [84]. Wenn die FA um mehr als 20 cm innerhalb des Gefahrenbereichs steht, muss dieser vor der Zugpassage geräumt werden, wenn gilt $v_{\mathrm{Z}} > 120\,\mathrm{km/h}$.



Abbildung 1.2: Links: Feste Absperrung mit Einschneidungen (Juliane Manteuffel, 2015). Rechts: Feste Absperrung ohne Einschneidungen (HPZ GmbH).

1.2 Projekt F 06-1402

Im Oktober 2014 wurde das Projekt F 06-1402 "Risikobetrachtung von Sicherungsmaßnahmen für spezielle Tätigkeiten im Gleisbereich unter Berücksichtigung signifikanter Risiken und Parameter" durch die FSA gestartet. Ziel des Projekts ist die systematische Analyse und Bewertung von Sicherungsmaßnahmen im Gleisbereich unter Berücksichtigung signifikanter Gefährdungen, betrieblicher Rahmenbedingungen sowie weiterer relevanter Einflussfaktoren — insbesondere des Faktors Mensch — mit dem Ziel, die Wirksamkeit, Praxistauglichkeit und Angemessenheit von Sicherungsmaßnahmen zu überprüfen und zu optimieren. Ein besonderes Augenmerk wird im Rahmen des Projektes auf die Sicherungsmaßnahme Feste Absperrung gelegt.

Wie in Abschnitt 1.1 ausgeführt wurde, hängt die Anwendungsvariante der FA von den örtlichen Gegebenheiten sowie von v_Z ab. $v_Z > 120\,\mathrm{km/h}$ führt in der Regel zu geringer Arbeitsbreite im *Arbeitsgleis* und kann Arbeitsunterbrechung, Gefahrenbereichsräumung und den Einsatz eines ATWS notwendig machen. Dies stört den Betriebsablauf der Bahn vergleichsweise wenig. $v_Z \leq 120\,\mathrm{km/h}$ hingegen ermöglicht einen breiten Arbeitsbereich und macht weitere Sicherungsmaßnehmen neben der FA obsolet, was durch den Verzicht auf ein ATWS einen wichtigen Beitrag zur Lärmminderung darstellt. Der Betriebsablauf der Bahn wird durch die reduzierte Geschwindigkeit bei der Durchfahrt jedoch erheblich gestört, was Zugverspätungen bzw. Kapazitätseinbußen bei der Bahn zur Folge hat.
Weil beim Einsatz einer FA auf ein ATWS verzichtet werden kann wenn $v_Z \leq 120\,\mathrm{km/h}$ gilt, verfolgt die Bahn das Ziel, die Nutzung der FA auszuweiten, wobei jedoch die Störungen im Betriebsablauf minimiert werden sollen. Letzteres ist nur möglich, wenn $v_Z > 120\,\mathrm{km/h}$ gilt, was jedoch gemäß Tabelle 1.1 den Einsatz eines ATWS und weitere Sicherungsmaßnahmen notwendig machen würde, wenn das bisherige Sicherheitsniveau gehalten werden soll. Diese gegensätzlichen Interessenlagen – $v_Z > 120\,\mathrm{km/h}$ ohne ATWS einerseits und möglichst große Arbeitsbreite und -sicherheit anderseits – führten auf die Fragen, bis zu welchen x_{FA} und v_Z das Arbeiten neben einer Festen Absperrung sicher ist und wie die Einsatzmöglichkeiten der FA optimiert werden können? [84]

Das Projekt ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil [84] wurde die Situation von Beschäftigen im Gleisbereich aus psychologischer Sicht analysiert und daraus deren Unfallrisiken abgeleitet. Im zweiten Projektteil wurden Unfallrisiken untersucht, die durch aerodynamische Belastungen auf Beschäftigte im Gleisbereich durch Zugpassagen entstehen.

1.3 Zielsetzung

Um Aussagen über Unfallrisiken und Gesundheitsrisiken bei Beschäftigten im Gleisbereich durch aerodynamische und akustische Belastungen machen zu können, wurde das Konzept entwickelt, Luftbewegungs-, Druck- und Lärmmessdaten von vorbeifahrenden Zügen in unmittelbarer Nähe am Bahngleis zu gewinnen. Anschließend wurden die Messergebnisse der Aerodynamik mit Hilfe von CFD-Computersimulationen auf weitere Situationen extrapoliert werden. Das Vorhaben führte zu nachfolgend definierter Zielsetzung:

Minimalziele:

1. Durchführung einer umfassenden Literaturrecherche zum Thema.
2. Aufbau einer Messapparatur, mit der Zuggeschwindigkeit, Luftbewegung, Druckverlauf und Lärmbelastung bei Zugvorbeifahren als Funktion von Zugtyp, Zuggeschwindigkeit, Höhe über der Schienenoberkante sowie Abstand von der Gleisachse zeitlich synchron erfasst werden können.
3. Gewinnung von einschlägigen Messdaten durch eine Messkampagne am Gleis.
4. Generierung eines, mit Hilfe von Messdaten verifizierten Computermodells, mit dem die Messsituation möglichst genau abgebildet werden kann.
5. Entwicklung einer Methodik, welche die Maximalwerte verschiedener aerodynamischer Größen in Abhängigkeit von Zuggeschwindigkeit, Zugtyp und Ort neben dem Gleis wiedergeben kann.
6. Vergleich der Maximalwerte verschiedener aerodynamischer Größen in Abhängigkeit von Zuggeschwindigkeit, Zugtyp und Ort neben dem Gleis.

Maximalziele:

7. Ableitung einer Methode zur Bestimmung der Kraft oder der Wirkung auf Personen, die durch aerodynamische Lasten hervorgerufen werden.
8. Bewertung der durch aerodynamische Lasten hervorgerufenen Kraft oder Wirkung auf Personen.

Hinsichtlich Lärmbelastung ist wurde keine Computermodellierung durchgeführt. Die angestrebten Lärmmessungen sollen die Frage beantworten, ob Beschäftigte am Gleis unter bestimmten Bedingungen unzulässig hohen Lärmbelastungen ausgesetzt sind. Der Untersuchungsbericht findet sich in Anhang A.

2 Literaturrecherche

2.1 Allgemeiner Überblick

Die Frage nach aerodynamischen Belastungen auf Menschen beschäftigt die Wissenschaft schon seit geraumer Zeit. Die Themenfelder, in denen diese Frage eine Rolle spielt, sind vielfältig. Eine umfangreiche Recherche förderte entsprechend zahlreiche Literaturstellen zu Tage, die auf Tauglichkeit zur Beantwortung der Frage nach den aerodynamischen Belastungen auf Menschen geprüft und anschließend durchgearbeitet wurden. Die aufgefundenen Abhandlungen befassen sich beispielsweise mit der Entstehung von Luftströmungen und Druckfeldern durch (Gleis)fahrzeuge, mit strömungs- und druckinduzierten Kräften auf Objekte und Menschen und mit den Auswirkungen von Druckfeldern auf die menschliche Gesundheit, insbesondere das menschliche Gehör. In einigen dieser Literaturstellen werden notwendigerweise diese Themenbereiche miteinander verknüpft, wenn der Frage nach aerodynamischen Belastungen auf Objekte und Menschen durch Fahrzeuge nachgegangen wird. Es findet sich vergleichsweise wenig Literatur darüber, welche physischen bzw. gesundheitlichen Auswirkungen durch Schienenfahrzeuge hervorgerufene aerodynamische Belastungen auf Menschen haben. Im folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Literaturstellen, in stark gestraffter Form zusammengefasst, wobei Literaturnennungen nicht vollumfänglich, sondern exemplarisch sind. Im Literaturverzeichnis sind die aufgefundenen Literaturstellen in Gänze aufgelistet.

Im Wesentlichen existieren drei Arten aerodynamischer Belastungen auf Menschen, welche durch die drei physikalischen Größen Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck charakterisiert sind. Um die Wirkung dieser aerodynamischen Belastungen auf Menschen bewerten zu können, benötigt man zunächst *Bewertungskriterien*. Ein typisches Bewertungskriterium ist beispielsweise der Gleichgewichtsverlust eines Menschen: Ein nahe am Gleis stehender Mensch darf durch aerodynamische Belastungen auf gar keinen Fall stürzen. Um zu prüfen, ob ein Bewertungskriterium eingehalten wird oder nicht, müssen Bewertungsgrößen definiert werden, welche mit den verschiedenen Arten der aerodynamischen Belastungen in irgendeiner Art und Weise verknüpft sind. Eine solche Bewertungsgröße kann beispielsweise der Staudruck, die windinduzierte Kraft oder einfach nur die Windgeschwindigkeit sein. Idealerweise existieren für jede Bewertungsgröße Grenzwerte, oberhalb der die aerodynamischen Belastungen auf Menschen nicht mehr akzeptabel sind, sprich, beim Bewertungskriterium der ungewollte Zustand eintritt, beispielsweise der Gleichgewichtsverlust eines Menschen.
Stellt die Messung bzw. Bestimmung von Bewertungsgrößen bereits eine Herausforderung dar, so verschärft sich der Schwierigkeitsgrad exorbitant, wenn die Frage nach der Wirkung dieser Bewertungsgrößen auf Menschen, sprich die Festlegung von Grenzwerten, gestellt wird. Ursache hierfür sind die individuellen Eigenschaften von Menschen. Beispielsweise seien hier die Unterschiede in den Reaktionszeiten auf äußere Belastungen, in der Physis oder etwa der Psyche genannt. Dazu kommen die vielfältigen

Möglichkeiten der Körperhaltung und einiges mehr. Die Folge dieser komplexen Problematik ist, dass zu jedem Bewertungskriterium unterschiedliche Bewertungsgrößen sowie zahlreiche Grenzwerte existieren, wobei Letztgenannte breit streuen. Für die Zulassung von Personenzügen konnte man sich im Rahmen der Europäischen Normung zuletzt auf Grenzwerte für die Bewertungsgröße Windgeschwindigkeit in Bezug auf das Bewertungskriterium Gleichgewichtsverlust einigen, jedoch steht nach wie vor außer Zweifel, dass bis heute nicht im Detail verstanden ist, wie aerodynamische Belastungen auf Menschen entstehen und wirken bzw. welche Folgen diese haben können.

Wie bereits oben erwähnt, wird der Gleichgewichtsverlust aktuell als wichtigstes Bewertungskriterium für aerodynamische Belastungen auf Menschen angesehen. Aber auch die Wirkung von Druckfeldern auf Menschen wird von einigen Autoren als wichtig angesehen. Im Folgenden werden deshalb diese beiden Bewertungskriterien genauer beleuchtet.

2.2 Bewertungskriterium Gleichgewichtsverlust

2.2.1 Bewertungsgröße Kraft und Kraftgrenzwerte

Mehrere Autoren untersuchten im Hinblick auf einen möglichen Gleichgewichtsverlust beim Menschen bereits in den 1950er, 60er und 70er Jahren die Kraft, welche durch strömende Luft unter atmosphärischen Bedingungen am Menschen hervorgerufen wird. Bei diesen Experimenten wurde in der Regel die Windgeschwindigkeit u als physikalische Größe gemessen und der Bezug zur am Menschen angreifenden Kraft F_W mit dem Newton'schen Reibungsgesetz

$$F_\mathrm{u} = \frac{1}{2}\, c_\mathrm{W}\, \rho\, A_\mathrm{M}\, u^2 \tag{2.1}$$

hergestellt. In (2.1) steht ρ für die Dichte der Luft und A_M für die maximale Querschnittsfläche des angeströmten Menschen senkrecht zur Strömungsrichtung. c_W ist ein Koeffizient, dessen Zahlenwert vom umströmten Körper abhängt. Für einen leicht bekleideten Menschen gilt $c_\mathrm{W} = 1{,}17$ (z. B. [73, 104]). Zur Kontrolle der Richtigkeit dieses Ansatzes maßen einige Autoren [39,87] parallel zur Windgeschwindigkeit direkt die vom Fahrtwind auf einen zylinderförmigen Körper ausgeübten Kraft, wobei dieser Dummy in seinen aerodynamischen Eigenschaften denen eines menschlichen Körpers nachempfunden war (Abbildung 2.1). Diese Messungen wurden mit konstanter und/oder variabler (böig) Windgeschwindigkeit in Windkanälen, in speziellen Versuchsständen oder aber auch direkt am Bahngleis durchgeführt [39, 51, 52, 68, 87, 104, 114]. Einige der Autoren stellten fest, dass sich der Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und windinduzierter Kraft auf Menschen bei böigem Wind mit (2.1) nicht exakt herstellen lässt [39, 88, 114]. Seinerzeit wurde vermutet, dass auch die von Zügen mitgeführten Druckwellen Kräfte auf Menschen am Gleis ausüben [39,88]. Spätere Arbeiten zeigten, dass es vor allem die Windbeschleunigung ist, die zusätzlich zur Windgeschwindigkeit gemäß (2.1) eine Kraft auf Menschen bzw. Objekte ausübt [18,99,100,105]. Gemäß **Brennen** [18] muss Gleichung (2.1) um einen Term erweitert werden, welcher die Kraft

auf Menschen durch die Windbeschleunigung a beschreibt:

$$F_{\mathrm{W}} = \frac{1}{2}\, c_{\mathrm{W}}\, \rho\, A_{\mathrm{M}}\, u^2 + c_{\mathrm{A}}\, \rho\, V_{\mathrm{M}}\, a \tag{2.2}$$

V_{M} ist hier das Volumen eines Menschen und c_{A} erneut ein Koeffizient, dessen Zahlenwert vom umströmten Körper abhängt. Für Menschen ist c_{A} unbekannt, weshalb (2.2) bis heute nicht für die Bestimmung der windinduzierten Kraft auf Menschen verwendet wird. **Lorenz** [82] hat durch Vergleich der Messwerte von **Schmitt** [104] und **Swearingen** et al. [114] unter Anwendung von (2.2) den Wert von c_{A} zu etwa $c_{\mathrm{A}} = 2{,}5 \pm 0{,}5$ abgeschätzt. Von **Tödt** [117] parallel dazu durchgeführte CFD-Simulationen der Umströmung eines menschenähnlichen Testkörpers mit böigem Wind bestätigen diesen Wert.

Bereits in den 1960er Jahren führte Schmitt [104] im Windkanal direkte Kraftmessungen auf reale Menschen als Funktion der Windgeschwindigkeit, Körpereigenschaften, -haltung und -orientierung durch. Swearingen et al. [114] taten ähnliches, jedoch in einem speziellen Versuchsstand und – im Gegensatz zu Schmitt – mit böigen Winden. Beide gingen der Frage nach, ab welchen Windstärken verlieren Menschen ihr Gleichgewicht? Beide erhielten Kraftgrenzwerte im Bereich $129{,}0\,\mathrm{N} < F_{\mathrm{g}} < 366{,}6\,\mathrm{N}$. Swearingen stellte fest, dass böiger Wind höhere Kräfte als gleichmäßiger Wind hervorruft, was – wie man heute weiß – in (2.2) begründet liegt.

Ebenfalls in den 1960er Jahren nutzte **Durov** [39] einen zylindrischen Dummy zur direkten Messung aerodynamisch induzierter Kräfte auf Menschen am Eisenbahngleis. Bei seinen Messungen stellte Durov fest, dass der größte Kraftimpuls bei der Passage des Zugkopfes auftritt und zwischen 0,25 s und 0,35 s lang ist. Je schneller der Zug, desto höher und kürzer der Kraftimpuls. Während der genannten Zeitspanne wandert die Richtung des Kraftvektors einmal um 360° um den Dummy herum. Er leitete aus seinen Messungen mit Hilfe einer einfachen Modellbetrachtung einen Kraftgrenzwert von $F_{\mathrm{g}} = 48{,}5\,\mathrm{N}$ (inklusive Sicherheitsfaktor 2) ab. Bei der Modellbetrachtung nahm Durov an, dass sich der menschliche Körper beim Einwirken des Kraftimpulses aufgrund dessen zeitlicher Kürze wie ein starrer Körper verhält. Belegt wird diese Hypothese durch die Arbeiten von **Decker** [23] bzw. **Fukuchi** [51], in welchen die Reaktionszeit eines Menschen auf äußere Krafteinwirkungen mit 0,375 s beziffert wird (Tabelle 2.2). Gemäß Abbildung 2.2 verliert ein Modell-Mensch dann das Gleichgewicht, wenn das Lot seines Schwerpunktes SP aufgrund der kraftinduzierten Drehbewegung des Körpers über den Ort seiner Rotationsachse RA hinaus gewandert ist.

In den 1970er Jahren führte Montagné **Montagné** [87] ebenfalls Messungen mit zylindrischen Dummys an TGVs durch und erhielt ähnliche Ergebnisse wie Durov. Er nennt einen Kraftgrenzwert von $F_{\mathrm{g}} = 100{,}0\,\mathrm{N}$ ohne Herleitung oder Quellenangabe.

Bonnema [13] leitete in den 1990er Jahren den Grenzwert $F_{\mathrm{g}} = 43\,\mathrm{N}$ für die aerodynamisch induzierte Kraft auf Menschen ab, indem er ein von **Stockwell** [113] entwickeltes, sogenanntes biodynamisches Modell eines Menschen einsetzte. Dieses biodynamische Modell besteht aus 5 Körperteilen, welche mit Gelenken und Federn miteinander verbunden sind (Abbildung 2.3, links). Das Modell wurde durch videotechnische Bewegungsmessungen und Druckmessungen an menschlichen Probanden am Bahngleis

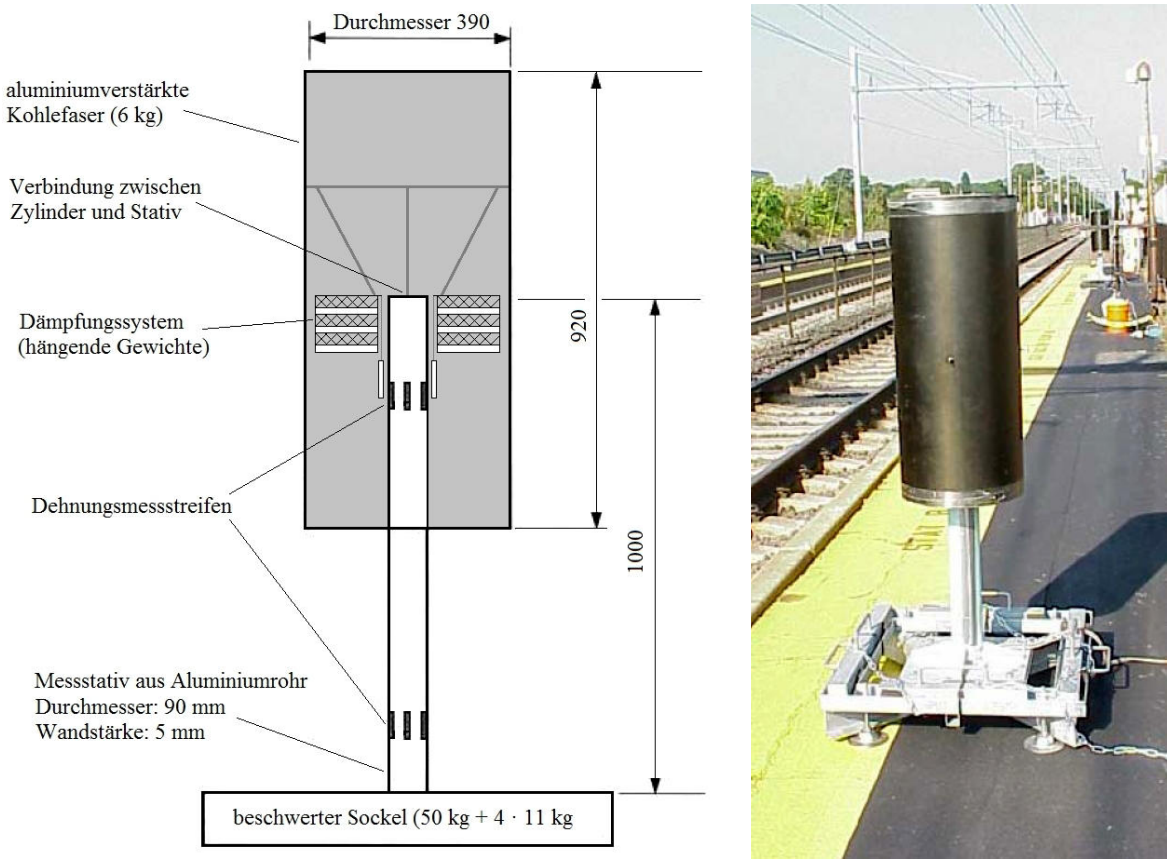


Abbildung 2.1: Zylinderförmiger Dummy zur direkten Messung der aeordynamisch induzierten Kraft auf Menschen am Bahngleis [41, 119].

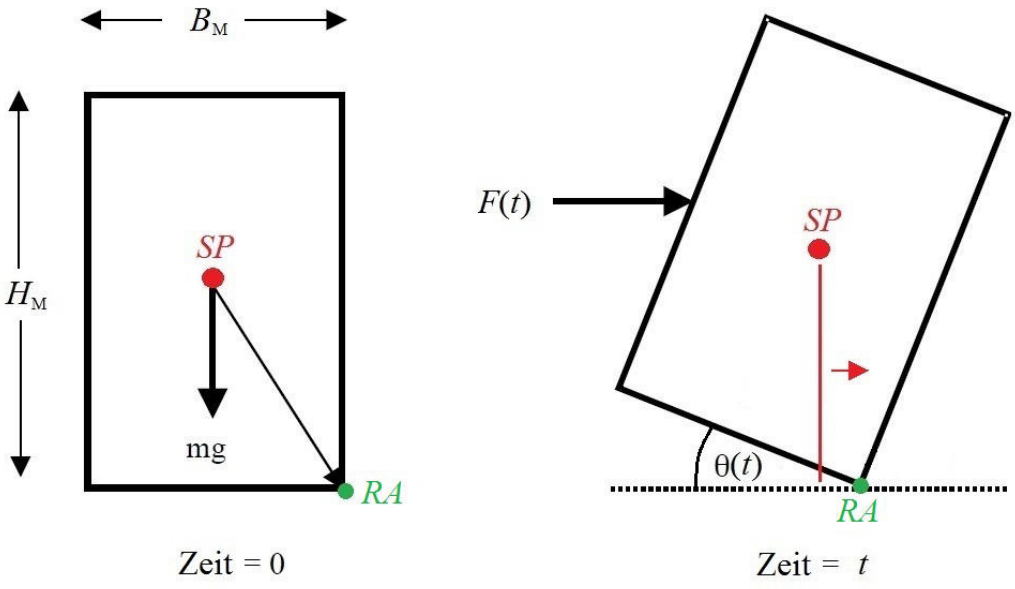


Abbildung 2.2: Modellierung des Gleichgewichtsverlustes eines Menschen.

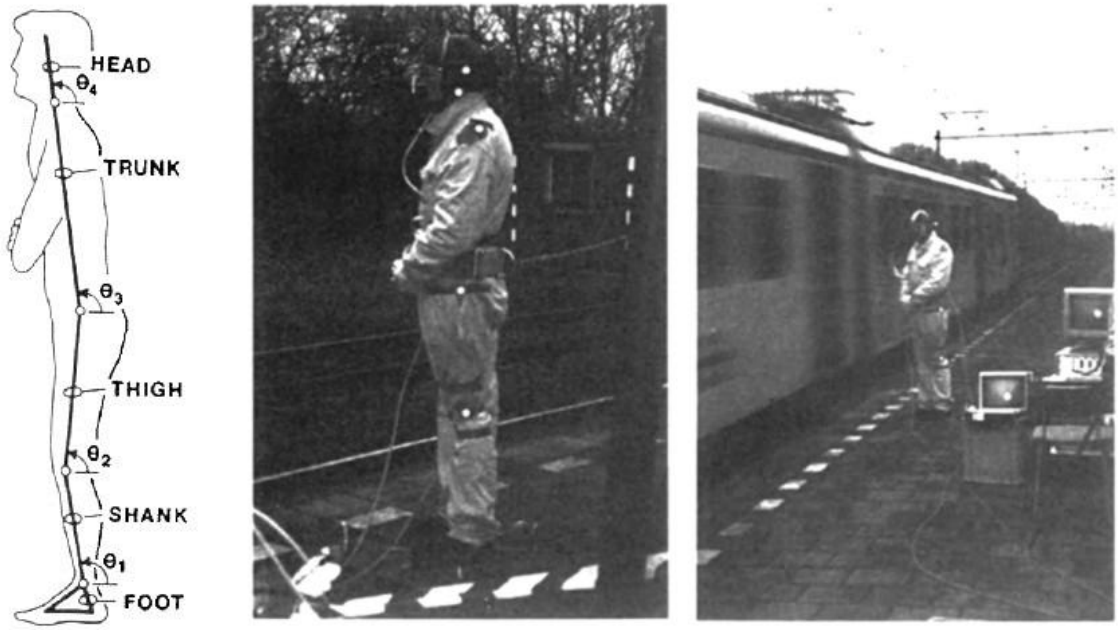


Abbildung 2.3: Biodynamisches Modell des Menschen (links) und dessen Kalibrierung durch Druck- und Bewegungsmessungen an menschlichen Probanden am Bahngleis (rechts). Im zweidimensionalen biomechanischen Modell wird der Mensch in die 5 Abschnitte Kopf, Rumpf, Ober- und Unterschenkel sowie Fuß gegliedert, welche über Gelenke beweglich miteinander verbunden sind. Wie das Modell auf äußere Kräfte reagiert, wird mit Hilfe der Variation von Feder- und Dämpfungskonstanten gesteuert. Diese Konstanten regeln die in den Gelenken wirksamen Kräfte [13].

kalibriert (Abbildung 2.3, rechts), um anschließend umfangreiche Druckmessdaten – als Input für das Modell – mit menschenähnlichen Dummys am Bahngleis zu gewinnen. Mit diesem Ansatz leitete er darüber hinaus zugtypabhängige Sicherheitsabstände von 2,65 m bis 3,45 m bezogen auf die Gleisachse für Züge mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ ab.

Im Regelwerk für den Europäischen Eisenbahnverkehr wird in der **Technische Spezifikationen für die Interoperabilität für das Teilsystem „Fahrzeuge“** (TSI Loc & Pas) von 2002 [41] eine rechnerisch aufbereitete Form der windinduzierten Kraft als Bewertungsgröße für aerodynamische Belastungen auf Menschen im Gleisbereich genannt und ein Grenzwert für diese angegeben. Dabei wird direkt die windinduzierte Kraft auf einen zylindrischen Dummy (Abbildung 2.1) gemessen und die Ableitung der Bewertungsgröße aus den Kraftmesswerten sowie ein zugehöriger Grenzwert beschrieben. Laut genannter TSI muss für die Zulassung eines Zuges der Grenzwert

$$\hat{I} \leq 185\,\mathrm{N} \tag{2.3}$$

eingehalten werden, mit

$$\hat{I} = (\bar{\hat{N}} + 2\,\sigma_{\hat{N}})\,\hat{v}_\mathrm{Z}^2 \qquad \text{und} \qquad \hat{N} = \frac{\hat{F}}{v_\mathrm{Z}^2} \tag{2.4}$$

$\hat{F}$ ist die bei jeder Zugpassage gemessene maximale Kraft auf den Dummy. $\sigma_{\hat{N}}$ ist

die Standardabweichung, die sich aus der Mittelwertbildung über die $\hat{N}$ ergibt. $\hat{v}_{\mathrm{Z}}$ ist die vorgesehene Höchstgeschwindigkeit eines Zuges auf einem Streckenabschnitt. Der Grenzwert (2.3) bezieht sich lediglich auf die Zulassung von Zügen und gilt nicht hinsichtlich Gesundheitsschutz von Menschen gegenüber aerodynamischen Belastungen [10, 60, 123]. Die TSI Loc & Pas von 2002 ist inzwischen nicht mehr gültig.

Abschließend sei hier eine Arbeit von **Hong-Qi** [67] aus dem Jahre 2019 genannt, in der er einen Überblick über die Hochgeschwindigkeitseisenbahn in China gibt. Im Hinblick auf aerodynamische Belastungen auf Menschen am Gleis nennt Hong ebenfalls die windinduzierte Kraft als Bewertungsgröße und gibt als Grenzwerte $F_{\mathrm{g}} = 100\,\mathrm{N}$ für Fahrgäste auf dem Bahnsteig und $F_{\mathrm{g}} = 130\,\mathrm{N}$ für Beschäftigte am Bahngleis an.

Bereits an der vergleichsweise kleinen Auswahl der hier vorgestellten Arbeiten, welche sich mit der Angabe von Kraftgrenzwerten in Bezug auf einen windinduzierten Gleichgewichtsverlust von Menschen befassen, ist erkennbar, wie groß die Streubreite der Kraftgrenzwerte ist. Auch gegenwärtig laufen Forschungsprojekte zum Thema der Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen am Bahngleis, was zeigt, dass diese Frage wissenschaftlich noch immer nicht zufriedenstellend beantwortet ist [123]. Bei einem kürzlich abgeschlossenen Projekt gab es erneut deutliche Hinweise darauf, dass die windinduzierte Kraft auf Menschen nicht durch Gleichung (2.1) gegeben, sondern größer ist [123].

2.2.2 Bewertungsgröße Windgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeitsgrenzwerte

Die korrekte Kraftmessung mit Hilfe von zylindrischen Dummys ist messtechnisch äußerst anspruchsvoll und fehleranfällig. Ein Grund dafür ist beispielsweise die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Schwingungsdämpfung des Dummys. Weil die Kraftbestimmung mit Hilfe der Windgeschwindigkeit – wie oben ausgeführt – ebenfalls fehlerbehaftet ist, meiden verschiedene Autoren die Kraft als Bewertungsgröße und verwenden alternativ dazu die relativ leicht zu messende Windgeschwindigkeit, wohl wissend, dass es sich dabei lediglich um eine Stellvertretergröße für die komplexen Vorgänge handelt [10, 73, 74, 90, 94]. Dabei werden in der Regel nicht die reinen Windgeschwindigkeitsmessdaten als Bewertungsgröße verwendet, sondern verarbeitete Varianten derselben wie beispielsweise die Summe des gleitenden Mittelwertes über die Windgeschwindigkeitsmessdaten plus dem zweifachen der Standardabweichungen aus mehreren Einzelmessungen. Die Bewertungsgrößen wurden/werden in der Regel mit einer Beobachtung der Reaktion menschlicher Probanden auf die Windbelastung in Windkanälen, Straßenschluchten oder direkt am Bahngleis verknüpft, woraus schließlich Grenzwerte für die Windgeschwindigkeit abgeleitet wurden/werden. Exemplarisch sollen hier insbesondere die Arbeiten von **Murakami** et al. [90], **Peters** [94] und **Jordan** [73, 74] beleuchtet werden, nicht zuletzt auch darum, weil genannte Arbeiten Vergleiche mit den Werten anderer Autoren beinhalten. Diese Daten sind in Abschnitt 2.4 in Form der Übersichtstabelle 2.2 vollständig aufgelistet.

1980 veröffentlichten Murakami et al. [90] eine dreiteilige Studie über Windeffekte auf Fußgänger. Im ersten Teil hatten acht Probanden die Aufgabe, definierte Figu-

ren auf dem Boden des großen Windkanals des Japan Automobile Research Institute ($13\,\mathrm{m} \times 6\,\mathrm{m} \times 5\,\mathrm{m}$) zu gehen. Dabei wurden die Probanden einmal einem gleichförmigen Wind und einmal einem böigen Wind ausgesetzt. Letztgenannter wurde generiert, in dem lückenhafte Holzwände im Windkanal aufgestellt wurden, an denen die Probanden entlang gehen mussten (Abbildung 2.4). Die Fußabdrücke und Bewegungen der Probanden wurden videotechnisch erfasst sowie die Probanden nach Ihrem Empfinden befragt. Die Windgeschwindigkeit wurde mit Schallanemometern gemessen. Für die Auswertung wurde die Geschwindigkeit des gleichförmigen Windes u mit der Spitzenwindgeschwindigkeit $\hat{u}$ eines böigen Windes im Freien identifiziert. Weiter wurde davon ausgegangen, dass die mittlere Windgeschwindkeit $\bar{u}$ bei böigem Wind im Freien halb so groß ist wie die Spitzenwindgeschwindigkeit der zugehörigen Böe $\hat{u}$. Die Auswertung ergab, dass die Fußabdrücke irregulär werden bzw. Beeinträchtigungen beim Gehen auftreten, wenn bei gleichförmigen Wind die Geschwindigkeit von $10\,\mathrm{m/s}$ überschritten wird. Ist der Wind böig, tritt Instabilität unter obiger Annahme $\bar{u} = \hat{u}/2$ oberhalb einer mittleren Windgeschwindigkeit von $5\,\mathrm{m/s}$ auf. Hinsichtlich des Gleichgewichtsverlusts ist böiger Wind für Fußgänger generell eine größere Herausforderung als gleichförmiger Wind.

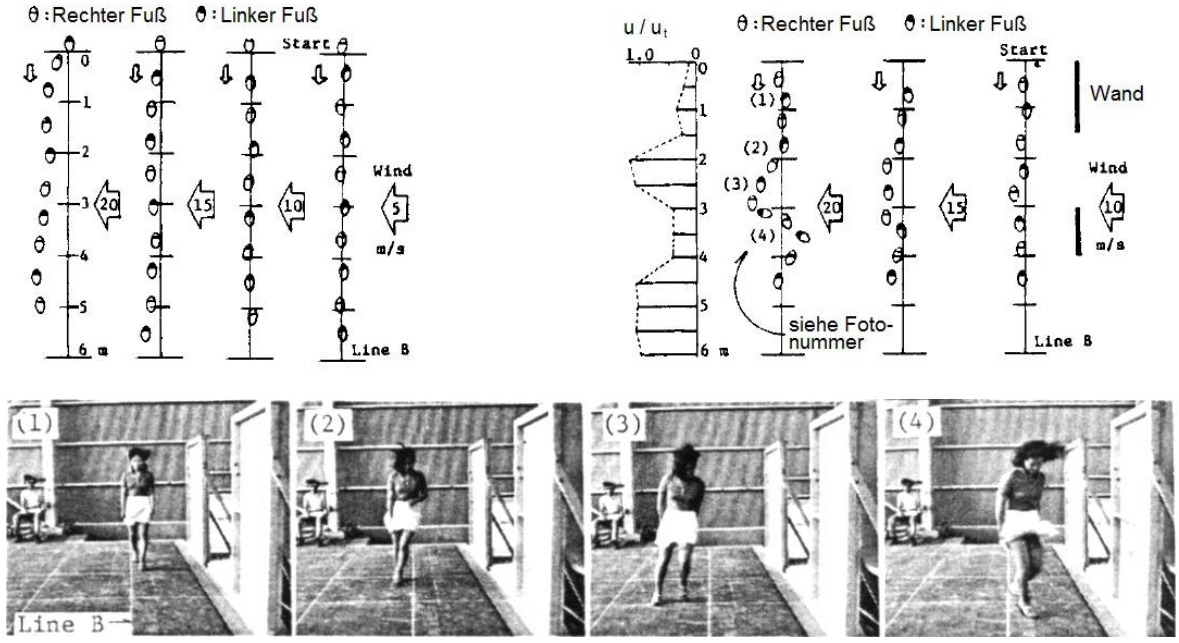


Abbildung 2.4: Wind wirkt auf eine Probandin, die entlang einer gerade Linie gehen soll (unten). Resultierende Schrittfolge bei Einwirkung von gleichmäßigem (oben links) und ungleichmäßigem (oben rechts) Wind. [90].

Im zweiten Teil der Untersuchung wurden ausgewählte Probanden angewiesen, entlang einer Geraden zu gehen, welche auf einem Gehweg am Fuße eines Hochhauses auf den Asphalt gezeichnet war. Die Fußabdrücke und die Bewegungen der Probanden wurden videotechnisch erfasst sowie die Probanden nach ihrem Empfinden befragt Die Windgeschwindigkeit wurden entlang der Geraden in einer Höhe von $1\,\mathrm{m}$ über dem Erdboden mit Schallanemometern gemessen. Als Bewertungsgröße wurde die mit $\Delta t = 10\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelte Windgeschwindigkeit $\bar{u}_{10}$ definiert. Dabei wurde in niedrig- (20 %) und

hochturbulenten (50 % - 60 %) Wind unterschieden. Es zeigte sich, dass Instabilitäten beim Gehen bei hochturbulentem Wind bereits bei mittleren Windgeschwindigkeiten $\bar{u}_{10}$ oberhalb von 3 m/s auftraten. Die Spitzenwindgeschwindigkeit in den Böen lag hier bei 8 m/s bis 9 m/s. Bei niedrigturbulentem Wind beginnen die Instabilitäten beim Gehen oberhalb von 7 m/s.

Im dritten Teil der Untersuchung wurden insgesamt 2.176 Fußgänger beim Gehen am Fuße des oben genannten Hochhauses videotechnisch beobachtet (Abbildung 2.5). Parallel dazu wurde der Wind erneut mit Schallanemometern in einer Höhe von 1 m über dem Erdboden gemessen. Für die Auswertung wurden die gemachten Videoaufnahmen mit drei verschiedenen Bewertungsgrößen verknüpft, nämlich einmal mit der unbearbeiteten Windgeschwindigkeit u, der mit $\Delta t = 3\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Windgeschwindigkeit $\bar{u}_3$ und der mit $\Delta t = 600\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Windgeschwindigkeit $\bar{u}_{600}$. Die Auswirkungen des Windes auf das Gangbild der Fußgänger wurden von Murakami et al. in die 5 Grade (Tabelle 2.1) eingestuft. Bei der Auswertung zeigte sich, dass sich keine Korrelation zwischen den Graden der Gehbeeinträchtigung und $\bar{u}_{600}$ herstellen ließ. Dies gelang am besten mit der unbearbeiteten Windgeschwindigkeit u. Murakami et al. resümierten, dass beim Einsatz einer gleitenden Mittelung das Mittelungszeitintervall maximal $\Delta t = 3\,\mathrm{s}$ betragen sollte.
Murakami et al. trugen die relative Anzahl der gehbeeinträchtigten Fußgänger separiert nach dem Grad der Beeinträchtigung und des Geschlechts über $\bar{u}_3$ auf und verglichen dies mit den Ergebnissen anderer Autoren. Das Resultat zeigt Abbildung 2.6. Murakami et al. ziehen aus ihren Ergebnissen den Schluss, dass Instabilität beim Gehen auftritt wenn gilt $\bar{u}_3 > 10\,\mathrm{m/s}$. Das Diagramm im oberen Teil von Abbildung 2.6 zeigt jedoch auch, dass Instabilität vom Typ Grad 3 und 4 durchaus auch bei niedrigeren Werten von $\bar{u}_3$ auftreten kann, nämlich bei $5\,\mathrm{m/s} < \bar{u}_3 < 10\,\mathrm{m/s}$.

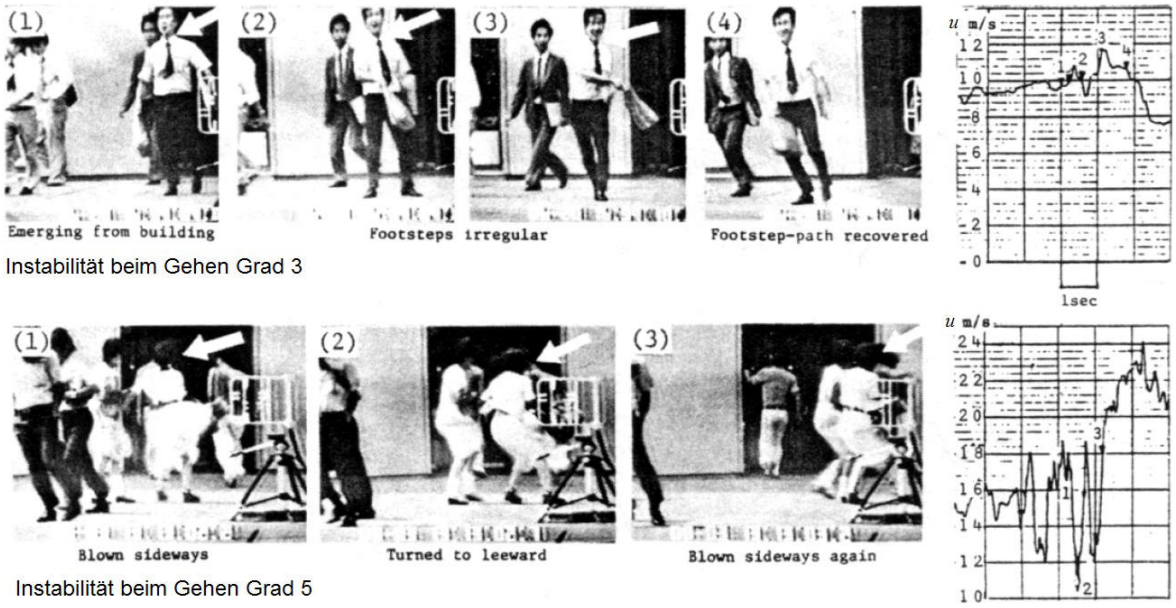


Abbildung 2.5: Auswirkungen von böigem Wind auf Fußgänger. Oben ist eine Instabilität Grad 3 mit zugehörigen Windgeschwindigkeitsverlauf gezeigt. Unten ist eine Grad 5-Instabilität zu sehen [90].

Tabelle 2.1: Gradeinteilung von Gang-Instablitäten durch Murakami et al. [90].

Grad der Gang-Instabilität	Auswirkung
1	keine
2	Schritte minimal ungleichmäßig
3	Schritte ungleichmäßig
4	Abweichung von der Gehrichtung
5	Gehen ist nicht mehr kontrollierbar, Umblasen

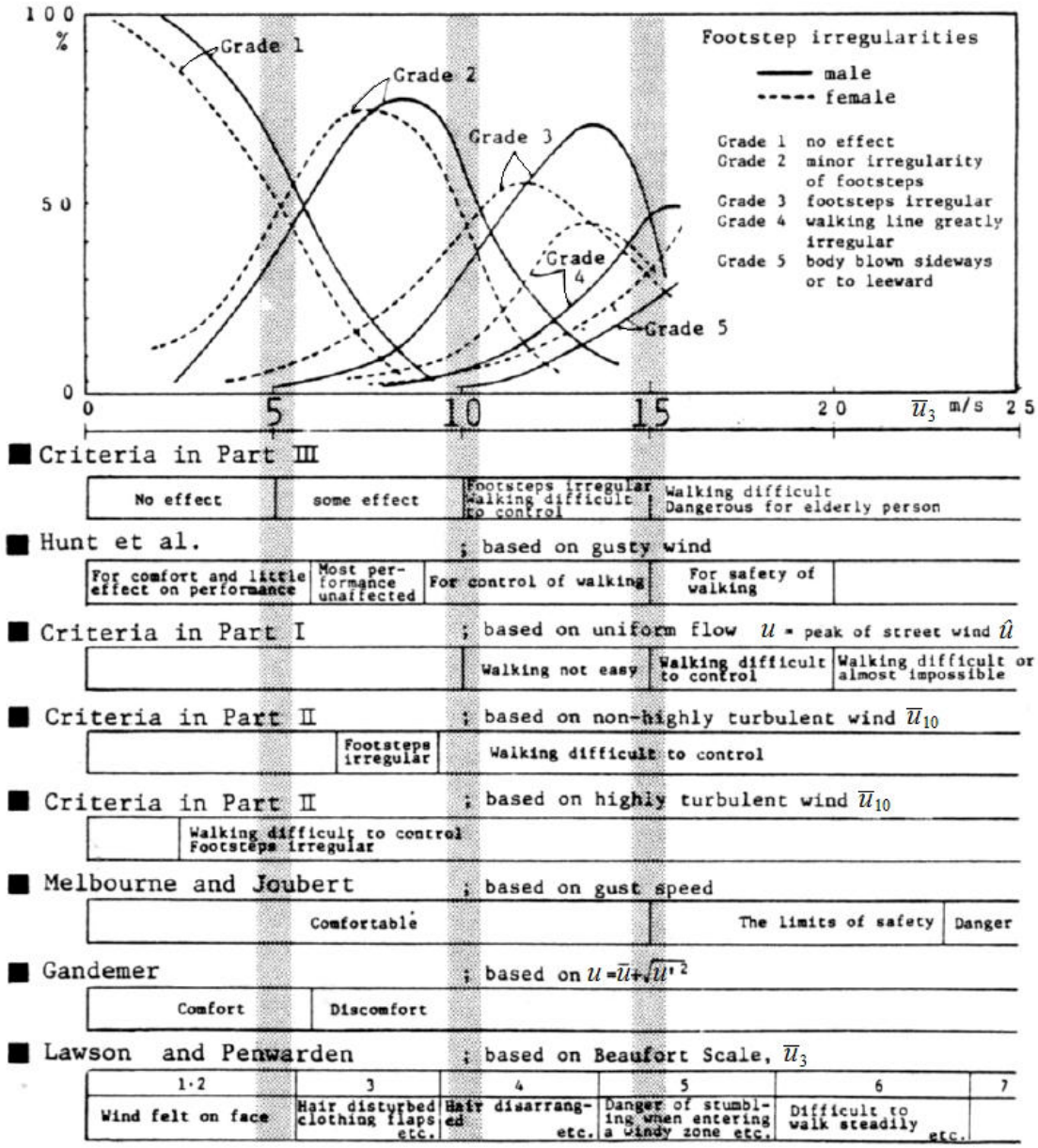


Abbildung 2.6: Ergebnisse von Murakami et al. im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Autoren [90]. Zu beachten sind die unterschiedlichen Mittelwertbildungen bei der Windgeschwindigkeit.

Weithin beachtete Arbeiten zur Frage nach der Stabilität des menschlichen Gleichgewichts unter Einwirkung aerodynamischer Belastungen haben Jordan [73] bzw. Jordan et al. [74] im Jahr 2008 veröffentlicht. Zur Beantwortung der Fragestellung nutzten sie Windkanalexperimente und Modellierungen des Gleichgewichstverlustes. Bei den Windkanalexperimenten setzte Jordan Gruppen menschlicher Probanden einem schnellen Windgeschwindigkeitsanstieg aus und erfasste videotechnisch die Reaktion der Menschen (Abbildung 2.7). Variiert wurden die Probanden sowie der Windgeschwindigkeitswert, bis zu dem der Anstieg erfolgte. In Abbildung 2.8 ist ein Teil der Ergebnisse zu sehen. Man entnimmt der Abbildung, dass weibliche Menschen bereits oberhalb einer Windendgeschwindigkeit von 7 m/s das Gleichgewicht verlieren können und dass die instabilste Position jene mit dem Gesicht gegen die Strömungsrichtung ist.
Bei der Modellierung dieses Vorgangs greift Jordan unter anderem auf das Modell von **Johnson** [70] in Abbildung 2.2 zurück. Um den Neigungswinkel des Modells $\Theta(t)$ in Abhängigkeit der windinduzierten Kraft $F_{\mathrm{W}}(t)$ zu berechnen, muss

$$J_{\mathrm{M}} \frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2} = F_{\mathrm{W}}(t) \Big(2B_{\mathrm{M}} \sin(\Theta) + H_{\mathrm{M}} \cos(\Theta) \Big) - mg \Big(B_{\mathrm{M}} \cos(\Theta) - H_{\mathrm{M}} \sin(\Theta) \Big) \quad (2.5)$$

gelöst werden, wobei J_{M} das Trägheitsmoment des Modellkörpers ist und für $F_{\mathrm{W}}(t)$ näherungsweise Gleichung (2.1) angesetzt wird. Die erforderlichen Daten für die Geometrie des Modells wurden der Literatur entnommen, z. B. [27, 47, 73]. Ein Mensch verliert demnach dann das Gleichgewicht (d. h. er führt Korrekturschritte aus), wenn sein Schwerpunkt schneller über seine Rotationsachse wandert als seine Reaktionsdauer lang ist. In diesem Falle verhält sich der Mensch wie ein starrer Körper, so die Annahme. In ihrer Arbeit nahm Jordan die Reaktionsdauern an, welche in den ersten beiden Zeilen der Tabelle 2.2 gelistet sind. Trotz der Einfachheit dieses Modells konnte Jordan zeigen, dass es die experimentell erzielten Ergebnisse qualitativ gut wiedergibt.

Tabelle 2.2: Abschätzung der Dauer, während der die Muskeln des menschlichen Körpers nicht auf äußere Krafteinwirkungen reagieren.

Referenz	Reaktionsdauer [s]	Bemerkungen
Fukuchi [51]	0,375	für jüngere Menschen
Jordan [73]	0,476	für ältere Menschen
Durov [39]	0,300	
Bottema [14]	0,400	minimale Böendauer für den Gleichgewichtsverlust
Bundesamt für Verkehr [16], Peters [94]	0,500	

1999 veröffentlichte Peters [94] eine seinerzeit neuartige Bewertungsgröße für maximal zulässige aerodynamische Belastungen auf Menschen am Gleis bei der Passage von Hochgeschwindigkeitszügen. Peters stellte fest, dass die Gesamtwirkung einer Windböe durch die Kombination aus der Änderung der Windrichtung, der Beschleunigung zu Beginn der Böe, dem Durchschnitt der Windgeschwindigkeit und der Dauer der Böe bestimmt wird. Dabei ist die Kombination von Windgeschwindigkeit und deren Dauer

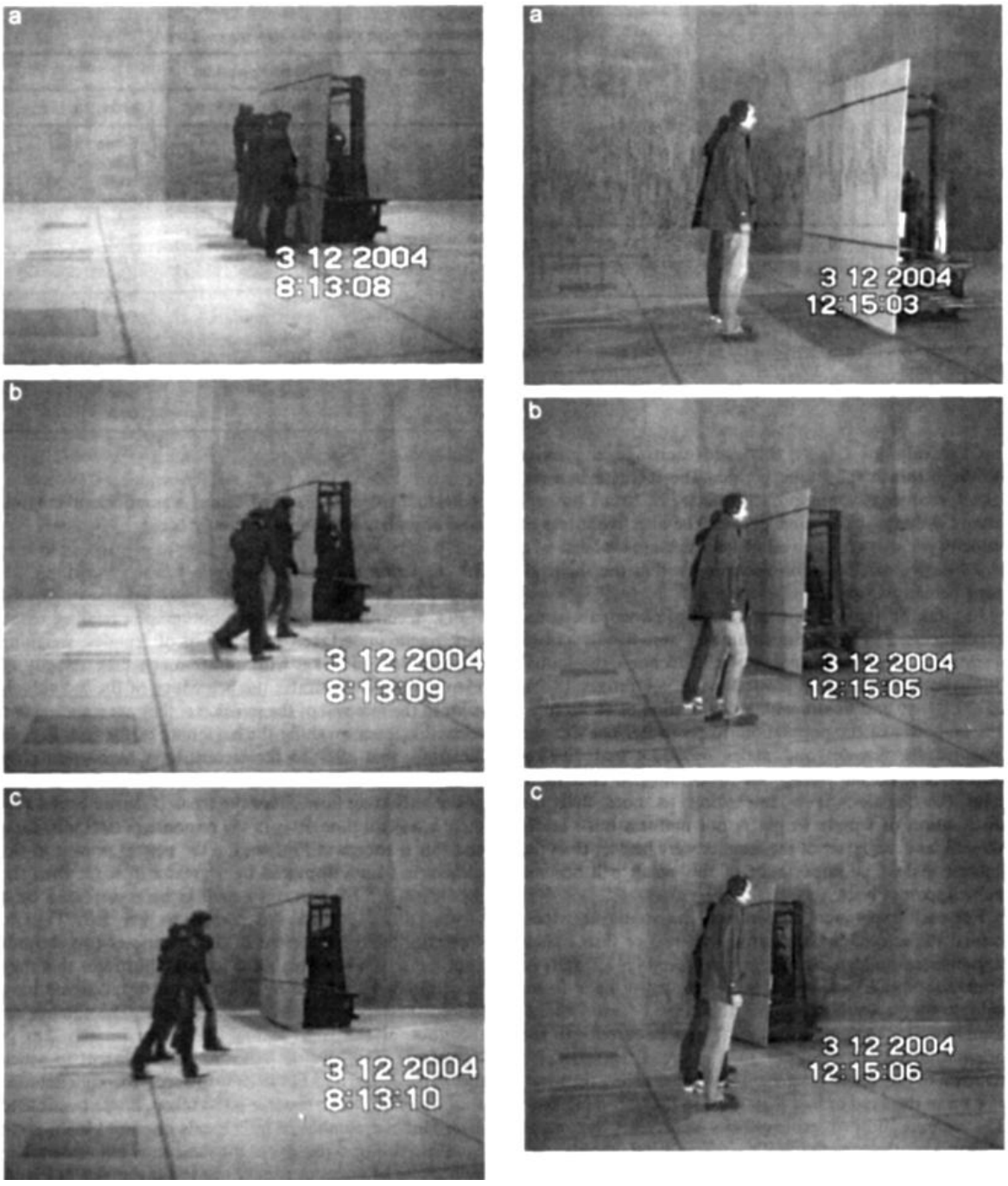


Abbildung 2.7: Auswirkung eines schnellen Windgeschwindigkeitsanstieges (von 0 m/s auf 15 m/s innerhalb 0,2 s) auf das Gleichgewicht zweiter Menschengruppen. Links: Gruppe von 44 kg – 56 kg- Rechts: Gruppe von 72 kg – 90 kg. Beide Gruppen erfahren deutliche Verschiebungen der Standposition, wobei die leichteren Menschen gegenüber den schweren Menschen signifikant weiter zurücktreten. Der Windgeschwindigkeitsanstieg wird erzeugt, in dem ein Gabelstapler mit einem hölzernen Windschutz durch Wegfahren die Menschen dem Wind aussetzt [73, 74].

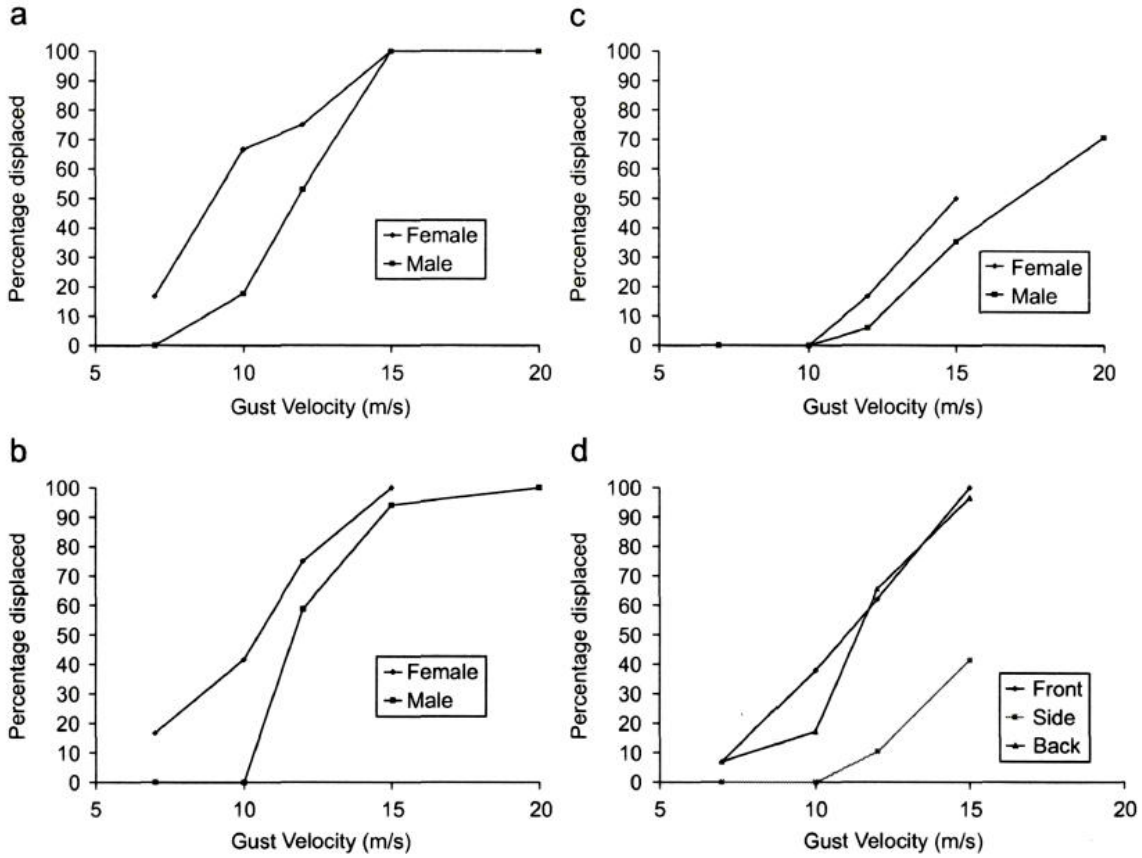


Abbildung 2.8: Prozentsatz der vom Windgeschwindigkeitsanstieg verschobenen Menschen als Funktion von der Windendgeschwindigkeit: (a) mit dem Gesicht gegen die Strömungsrichtung, (b) mit dem Rücken gegen die Strömungsrichtung, (c) seitlich zur Strömungsrichtung und (d) Prozentsatz aller verschobenen Menschen [74].

maßgeblich für das Ausmaß der Gleichgewichtsstörung, wobei der Einfluss der beiden Faktoren etwa gleich groß ist. Nach Peters sind aerodynamische Belastungen auf Menschen, hervorgerufen durch böigen Fahrtwind passierender Züge, dann tolerabel, wenn die mit einem Zeitintervall der Breite $\Delta t = 0{,}5\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Windgeschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}_{0{,}5}$ den Grenzwert von $12{,}5\,\mathrm{m/s}$ nicht überschreiten. Der Grenzwert von $12{,}5\,\mathrm{m/s}$ darf überschritten werden, wenn das Mittelungszeitintervall Δt kleiner wird. Diesbezüglich muss gelten, dass das Produkt aus gleitend gemittelter Windgeschwindigkeit $\bar{u}_{\Delta \mathrm{t}}$ und zugehörigem Mittelungszeitintervall Δt den Grenzwert von $6{,}25\,\mathrm{m}$ nicht überschreitet, wobei die gleitend gemittelte Windgeschwindigkeit $\bar{u}_{\Delta \mathrm{t}}$ den Grenzwert von $20\,\mathrm{m/s}$ nicht überschreiten darf. Formel (2.6) fasst dies zusammen:

$$\bar{u}_{0{,}5} \leq 12{,}5\,\mathrm{m/s} \qquad \text{oder} \qquad \bar{u}_{\Delta \mathrm{t}}\,\Delta t \leq 6{,}25\,\mathrm{m} \quad \text{mit} \quad \bar{u}_{\Delta t} \leq 20\,\mathrm{m/s} \tag{2.6}$$

Um die negativen Auswirkungen von Windrichtungswechsel, Windbeschleunigung und Turbulenz auf das menschliche Gleichgewicht zu berücksichtigen, legt Peters weiterhin fest, dass sich im Zeitintervall von $\Delta t = 0{,}5\,\mathrm{s}$ die Windgeschwindigkeit maximal um $10\,\mathrm{m/s}$ ändern darf. Neben der Begrenzung der Windgeschwindigkeit und der Schwankung in der Windgeschwindigkeit wird weiterhin gefordert, dass das Gelände, auf dem

die Menschen stehen, gut befahrbar, eben und nicht rutschig ist sowie keine Hindernisse, keine Löcher etc. vorhanden sind [94].

Im Jahre 2011 veröffentlichte das Schweizer **Bundesamt für Verkehr** [16] eine Studie über Gefahrenbereich auf Bahnsteigen. Im Rahmen der Studie wurden Untersuchungen der DB Systemtechnik AG herangezogen. In Letztgenannten wurde ebenfalls die Windgeschwindigkeit als Bewertungsgröße definiert und als Grenzwert $u_{\mathrm{g}} = 13{,}9\,\mathrm{m/s}$ abgeleitet. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass bei der Festlegung von Gefahrenbereichen der Zugtyp berücksichtigt werden muss oder – im Falle fester Gefahrenbereiche – die zulässige Zughöchstgeschwindigkeit je nach Zugtyp anzupassen ist. Wichtig ist weiterhin die in der Studie geäußerte Feststellung, dass der Schreck eines Menschen durch Überraschung aufgrund eins passierenden Zuges zu einer Schreckstarre führen kann, welche bis zu mehreren Sekunden anhalten kann. Die in Tabelle 2.2 angegebenen Reaktionsdauern sind in einem solchen Fall nicht mehr gültig bzw. werden deutlich überschritten. Ein solch langes Erstarren eines Menschen erhöht das Risiko eines Gleichgewichtsverlusts durch aerodynamische Belastungen beträchtlich weil der betroffene Mensch nicht auf die äußere Einwirkung reagieren kann. Als durchschnittliche Reaktionsdauer eines Menschen gibt die Studie den Wert $\Delta t = 0{,}5\,\mathrm{s}$ an.

Im aktuell gültigen Regelwerk TSI Loc & Pas von 2014 [42] und DIN EN 14067-4 von 2024 [32] für die Konformitätsbewertung von Personenzügen ist die Bewertungsgröße das arithmetische Mittel $\bar{u}_{\mathrm{max},1}$ über mindestens zwanzig Einzelwerte der maximalen Windgeschwindigkeit $\hat{u}_1$ plus zweimal der zugehörigen Standardabweichung $\sigma_{\hat{u}_1}$, multipliziert mit dem Faktor k. Pro Zugpassage wird ein $\hat{u}_1$ aus den Windgeschwindigkeitsmessdaten durch gleitende Mittelwertbildung unter Verwendung eines Zeitintervalls mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ Breite abgeleitet. Zur Berechnung der Bewertungsgröße werden folglich mindestens zwanzig Durchfahrten eines Zuges mit gleicher Geschwindigkeit und gleichen Rahmenbedingungen benötigt. k ist ein Faktor, der größer als 1 wird, wenn ein Zug aus mehreren Teilzügen besteht. Als Grenzwert ist $20\,\mathrm{m/s}$ angegeben, welcher in einem Abstand von $3\,\mathrm{m}$ zur Gleisachse und in einer Höhe von $0{,}2\,\mathrm{m}$ über Schienenoberkante nicht überschritten werden darf. Es gilt folglich:

$$k\,(\bar{u}_{\mathrm{max},1} + 2\,\sigma_{\hat{u}_1}) \leq 20\,\mathrm{m/s} \tag{2.7}$$

Wie bereits im Zusammenhang mit TSI Loc & Pas von 2002 erwähnt, gilt dieser Grenzwert ausschließlich für die Zulassung von Lokomotiven und Wagen von Personenzügen und kann nicht auf Beschäftige am Bahngleis übertragen werden [10, 60, 123]. Weiterhin ist in der DIN EN 14067-4 von 2024 [32] im Abschnitt zur Begrenzung von Strömungseffekten neben dem Gleis folgende Anmerkung enthalten: „Zum Schutz von Gleisarbeitern und von Passagieren auf Bahnsteigen sind zusätzlich betriebliche und infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich."

Diesen Abschnitt abschließen soll auch hier die bereits zuvor erwähnte Arbeit von Hong-Qi [67] aus dem Jahre 2019, denn in dieser gibt Hong auch einen Grenzwert für die maximale Windgeschwindigkeit in Höhe von $u_{\mathrm{g}} = 14{,}0\,\mathrm{m/s}$ an, welcher für Reisende und Beschäftigte am Gleis gleichermaßen gilt. Leider liefert Hong keine Informationen über die Definition der zugehörigen Bewertungsgröße, so dass nicht klar ist, auf was sich der angegebene Grenzwert bezieht.

2.3 Bewertungskriterium Druckwirkung

In einigen Arbeiten gehen die Autoren ganz allgemein auf die Wirkung von Druckwellen auf Menschen ein, ohne dabei den Gleichgewichtsverlust des Menschen im Blick zu haben. Dabei stehen zumeist die Druckbelastungen im Fokus, die von Schienenfahrzeugen auf Menschen ausgeübt werden, sei es als Fahrgast im Zug oder als am Gleis stehende Person. Im Rahmen der hier durchgeführten Literaturrecherche konnten sechs Literaturstellen ausfindig gemacht werden, in denen Bewertungsgrößen und Grenzwerte für von fahrenden Schienenfahrzeugen hervorgerufene Druckwellen angegeben werden. Es handelt sich dabei um die Schriften von **Gawthorpe** [52], **Lee** [78], **Liao** [81], **Schwanitz** [101], dem Schweizer Bundesamt für Verkehr [16] und den **Leitfaden Druckschutz/Druckkomfort** [4]. Ein weiteres Kriterium kommt hinzu, welches von **Lorenz** et al. [83] nach Vorgaben von **Hauff** [61] und **Fleischanderl** [62] im Rahmen der Entwicklung einer Mobilen Schnellbauwand (Abschnitt 3.3) festgelegt wurde.

Gawthorpe führte 1972 Versuche mit zahlreichen Probanden durch. Dabei wurden die Probanden in einer Druckkammer platziert und verschiedenen variablen Druckreizen aussetzte. Variiert wurden die Höhe der Schwingungsamplituden, die Druckanstiegsgeschwindigkeit und die Form des Druckverlaufs. Gawthorpe stellte fest, dass es individuell große Unterschiede bei den Probanden gibt, die Druckreize zu ertragen. Weiterhin kam er zu dem Ergebnis, dass alle oben genannten Parameter einen Einfluss auf das Empfinden der Probanden haben, insbesondere jedoch die Höhe der Druckamplitude und die Druckanstiegsgeschwindigkeit. Er definierte deshalb die Druckamplitude und die Druckanstiegsgeschwindigkeit als Bewertungsgrößen und gibt als Grenzwert $\Delta p_\mathrm{g} = 3\,\mathrm{mbar}$ für den Fall an, dass die Druckreize wiederholt auftreten. Dabei gilt als Grenzwert für die Druckanstiegsgeschwindigkeit $dp/dt_\mathrm{g} = 1\,\mathrm{mbar/s}$. Beide Grenzwerte dürfen nicht gleichzeitig überschritten werden.

1999 führe Lee [78] eine Literaturstudie zum Thema aerodynamische Belastungen durch fahrende Züge auf Menschen, Automobile und entgegenkommende Züge durch. In Bezug auf negative Auswirkungen der vom Zug erzeugten Druckwellen auf das menschliche Ohr fand Lee in **Carstens** [19] den Grenzwert $\Delta p_\mathrm{g} = 4{,}14\,\mathrm{mbar}$ für die Bewertungsgröße Druckamplitude. Lee fand weitere Grenzwerte: British Rail legte im Laufe der Zeit verschiedene Grenzwerte fest, wobei der Grenzwert für die Druckamplitude $\Delta p_\mathrm{g} = 10{,}0\,\mathrm{mbar}$ beträgt. Die gleichzeitig einzuhaltende maximal zulässige Druckanstiegsgeschwindigkeit wurde immer wieder angepasst. Die Spanne reicht von $dp/dt_\mathrm{g} = 2{,}0\,\mathrm{mbar/s}$ bis $dp/dt_\mathrm{g} = 6{,}25\,\mathrm{mbar/s}$. Gemäß Lee kam aus Japan der Vorschlag $dp/dt_\mathrm{g} = 5{,}0\,\mathrm{mbar/s}$. Eine Untersuchung des **European Rail Research Institute** [45], bei der menschliche Probanden in Druckkammern verschiedenen Druckreizen ausgesetzt wurden, lieferte $dp/dt_\mathrm{g} = 7{,}5\,\mathrm{mbar/s}$ als einen Schwellwert, unterhalb dem das Unbehagen bei den Probanden deutlich abnahm.
Für den Bereich des Infraschalls ($< 14\,\mathrm{Hz}$) verweist Lee auf eine Arbeit von **Harris** [58]. Letztgenannter gibt als Grenzwert für die Bewertungsgröße Schalldruckpegel den Wert $P_\mathrm{g} = 150\,\mathrm{dB}$ an, der unabhängig von der Expositionsdauer ist. Mit Hilfe der Zahlen von Harris und einer Tabelle aus [19] leitete Lee eine maximal tolerierbare Druckwellenamplitude von $\Delta p_\mathrm{gI} = 13{,}8\,\mathrm{mbar}$ für den Bereich des Infraschalls ab.

Im selben Jahr erschien eine sehr umfangreiche Studie von Liao [81] über die aerodynamischen Effekte auf Menschen und Gegenstände in Bahnhöfen bei Zugpassagen. In Bezug auf Grenzwerte für die Druckbelastung auf Menschen verweist Liao auf den von Lee bzw. Harris angegebenen Grenzwert von $\Delta p_\mathrm{g} = 4{,}14\,\mathrm{mbar}$ und gibt einen weiteren an, welcher aus dem „Subway Environmental Design Handbook“ der **Associated Engineers for the Urban Mass Transit Administration** [5] von 1976 stammt. Wie bei Gawthorpe werden auch hier die Druckamplitude und die Druckanstiegsgeschwindigkeit als Bewertungsgrößen verwendet. Als Grenzwert für die Druckamplitude werden $\Delta p_\mathrm{g} = 6{,}89\,\mathrm{mbar}$ angegeben. Wird dieser Wert moderat überschritten, darf die Druckanstiegsgeschwindigkeit nicht größer als $dp/dt_\mathrm{g} = 4{,}14\,\mathrm{mbar/s}$ sein. Gemäß Liao finden diese Grenzwerte seit vielen Jahrzehnten Anwendung bei der US-Untergrundbahn und -Flugzeugindustrie.

Schwanitz veröffentlichte 2012 ihre Dissertation, in der sie sich mit der Frage nach der Erträglichkeit von variablen Druckbelastungen im Eisenbahnverkehr auseinandersetzt. Kern der Arbeit war die Befragung von Personengruppen, welche drei verschiedenen Druckexpositionen (Zugfahrt, Druckkammer, Labor) ausgesetzt wurden. Es zeigte sich, dass besonders schnelle Druckanstiege als unangenehm empfunden wurden. Schwanitz gibt weiterhin verschiedene Grenzwerte aus Normung und nationalen Leitfäden an, unter anderem $dp/dt_\mathrm{g} = 5\,\mathrm{mbar/s}$ als komfortbezogenen Grenzwert für die Druckanstiegsgeschwindigkeit und $\Delta p_\mathrm{g} = 100\,\mathrm{mbar}$ als Grenzwert für gesundheitsgefährdende Druckamplituden. Schwanitz betont, dass diese Grenzwerte nur für gesunde Personen gelten. Problematisch können auch Druckschwankungen unter den genannten Grenzwerten für Personen sein, deren Druckausgleichssysteme durch Krankheit gestört sind.

In der bereits oben und im vorigen Abschnitt 2.2.2 erwähnten Studie des Schweizer Bundesamtes für Verkehr [16] findet sich auch eine Angabe zu einem Grenzwert für die Bewertungsgröße Druckamplitude. Die Studie zitiert das Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes, welches im Jahre 1985 einen Grenzwert von $\Delta p_\mathrm{g} = 30{,}0\,\mathrm{mbar}$ für die Bewertungsgröße Druckamplitude festgelegt hat. Grenzwerte für die Druckanstiegsgeschwindigkeit finden sich hier nicht.

Im aktuell gültigen Regelwerk TSI Loc & Pas von 2014 [42] und DIN EN 14067-4 von 2024 [32] für die Konformitätsbewertung von Personenzügen ist für die Bewertungsgröße Druckamplitude der Grenzwert $\Delta p_\mathrm{g} = 8{,}0\,\mathrm{mbar}$ genannt, der in 3 m Entfernung zur Gleisachse einzuhalten ist.

Im Leitfaden Druckschutz/Druckkomfort finden sich eine ganze Reihe Grenzwerte für variable Druckbelastungen, die situations- und berufsbedingt sind. Beispielsweise gelten für Lokführer in Hochgeschwindigkeitszügen die Grenzwerte $\Delta p_\mathrm{g} = 10\,\mathrm{mbar}$ und $dp/dt_\mathrm{g} = 4\,\mathrm{mbar/s}$.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung einer Mobilen Schnellbau durch die Firma HPZ GmbH (Abschnitt 3.3) wurden die Schutzanforderungen an die Wand durch die Unfallversicherungsträger definiert: Die aerodynamischen Belastungen hinter der Mobilen Schnellbauwand bei $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ dürfen nicht größer sein als bei $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ auf freiem Feld in $x_\mathrm{A} = 2{,}30\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse. Mit Hilfe von messtechnisch erfassten Güterzügen wurde gemäß dem genannten Kriterium ein Grenzwert von $\Delta p_\mathrm{g} = 3{,}96\,\mathrm{mbar}$ für die Bewertungsgröße Druckamplitude abgeleitet.

2.4 Zusammenfassender Überblick

Die in den Abschnitten Abschnitten 2.1 bis 2.3 vorgestellten Arbeiten sind lediglich ein Teil aus einer erheblich größeren Anzahl von einschlägigen Studien, wie ein Blick in das Literaturverzeichnis zeigt. Letztgenanntes erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Wie in den genannten Abschnitten dargelegt wurde, existiert eine Vielzahl von Grenzwerten für verschiedene Bewertungsgrößen zur Charakterisierung aerodynamischer Belastungen auf Menschen. Diese Grenzwerte streuen breit, was eindrucksvoll den bis heute bestehenden Dissens in dieser Frage untermauert. Zusammenfassend bestätigen **Baker** et al. – allesamt anerkannte Experten auf diesem Gebiet – in ihrem 2019 erschienenen Buch [11] sowie in persönlicher Mittelung [10], dass bis heute aufgrund der außerordentlichen Komplexität der Fragestellung kein wissenschaftlicher Konsens über zu verwendende Bewertungsgrößen und zugehörige Grenzwerte hinsichtlich menschlichem Gleichgewichtsverlust durch aerodynamische Belastungen besteht. Nach wie vor ist der Vorgang der durch turbulenten und böigen Wind induzierten Kraftentwicklung auf Menschen sowie die menschliche Reaktion darauf im Detail nicht verstanden. Dass bei genannter Kraftentwicklung nicht nur die Windgeschwindigkeit eine Rolle spielt, sondern auch die Windbeschleunigung bzw. der Druck, wird von den meisten Autoren anerkannt. Strittig ist diesbezüglich die Frage, welchen Anteil jede der genannten Größen an der Kraftentwicklung hat [10,73,74,123]. Diese Umstände führen dazu, dass auch gegenwärtig Forschungsarbeiten zu diesem Themenkomplex durchgeführt werden [123]. Ähnliches gilt für das Bewertungskriterium Druckwirkung in Bezug auf die allgemeine Wirkung der zuginduzierten Druckwellen auf Menschen.

Den Abschluss dieses Kapitels bilden die Tabellen 2.3 und 2.4, in der die insgesamt aufgefundenen Bewertungsgrößen mitsamt zugehörigen Grenzwerten aufgelistet sind.

Tabelle 2.3: Grenzwerte für äußere Einwirkungen, deren Überschreitung die Stabilität des menschlichen Gleichgewichts gefährden.

Bewertungsgröße	gültig für	Grenzwert	Bemerkungen
Kraft	alle	129,0 N – 336,6 N	Swearingen [114], körperpositionsabhängig
Kraft	Reisende	48,5 N	enthalten ist ein Sicherheitsfaktor 2, Durov [39]
Kraft	Reisende	43 N	Bonnema [13]
Kraft	alle	100 N	Montagné [87]
Kraft	alle	70 N	NMBS [64]
Kraft	Reisende	100 N	Hong-Qi [67]
Kraft	Gleisarbeiter	130 N	Hong-Qi [67]
Drehmoment	alle	43 Nm	im Sprunggelenk [64]
Beschleunigung	alle	$0{,}4\,\mathrm{m/s^2}$ – $0{,}7\,\mathrm{m/s^2}$	an den Füßen [25]

Ruckeln	alle	0,5 m/s – 0,6 m/s	an den Füßen [25]
Druck	alle	100 N/m^2	erhöhte Position [1]
Windgeschwindigkeit	alle	5 m/s – 10 m/s	Murakami, gleitender Mittelwert $\bar{u}_3$ [90]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter Reisende	17,0 m/s 11,0 m/s	British Railway, Deutsche Bahn, gleitender Mittelwert $\bar{u}_1$ [52, 64]
Windgeschwindigkeit	alle	15 m/s – 20 m/s	stetiger Wind [85]
Windgeschwindigkeit	alle	23 m/s	böiger Wind, Grenzwert bezieht sich auf $\hat{u} = \bar{u}\,(1 + 3{,}5\,u')$ [85]
Windgeschwindigkeit	alle	9 m/s	inhomogener Wind [69]
Windgeschwindigkeit	alle	13,0 m/s – 15 m/s	stetiger Wind [69]
Windgeschwindigkeit	alle	15,0 m/s	böiger Wind, Grenzwert bezieht sich auf $\hat{u} = \bar{u}\,(1 + 3\,u')$ [69]
Windgeschwindigkeit	Reisende	16,0 m/s	[64]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	8,0 m/s	U-Bahn London, stetiger Wind [64]
Windgeschwindigkeit	Reisende	8,0 m/s	Schweden [64]
Windgeschwindigkeit	Reisende	8,0 m/s	RIB [64]
Windgeschwindigkeit	alle	5,1 m/s	$u = \bar{u}/1{,}103$, $u = \bar{u}(1 + 1{,}5\,u')/1{,}434$ und $u = \hat{u}_3/1{,}875$ müssen unter Grenzwert bleiben. Messung in 1,5 m Höhe über dem Erdboden [29]
Windgeschwindigkeit	alle	14,4 m/s	mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}$ [108]
Windgeschwindigkeit		11,0 m/s	Holland Railconsult Best [64]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	5,0 m/s	Peters, gleitender Mittelwert $\bar{u}_3$ [64]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	10,0 m/s	Peters, Peak $\bar{u}_1$ [64]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	12,5 m/s	Peters, gleitender Mittelwert $\bar{u}_{0,5}$ [94]

Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	6,25 m/s	Peters, Produkt aus $\bar{u}_{\Delta t}$ und Mittelungszeitintervall Δt [94]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	20,0 m/s	Peters, gleitende Mittelung mit beliebigen Δt [94]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	16,5 m/s	Urban Development [64]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	17,0 m/s	ORE [64]
Windgeschwindigkeit	Gleisarbeiter	11,0 m/s	Freijs, Deutsche Bahn [49]
Windgeschwindigkeit	Arbeiter	12,7 m/s	AI-21, abgeleitet aus 100 N/m^2 Druck bei Rollgerüsten [96]
Windgeschwindigkeit	Arbeiter	13,9 m/s	AI-17, verschiedene Arbeitsbedingungen
Windgeschwindigkeit	Rad- und Motorradfahrer	8,2 m/s	Die Wetterzeitung [128]
Windgeschwindigkeit	Arbeiter	15,0 m/s	Arbeiten in erhöhter Position [1]
Windgeschwindigkeit	junge Menschen	20,0 m/s	Bottema, maximale Windgeschwindigkeit in Böen [14]
Windgeschwindigkeit	alte Menschen	15,0 m/s	Bottema, maximale Windgeschwindigkeit in Böen [14]
Windgeschwindigkeit	alle	10,0 m/s	Bottema, stetiger Wind [14]
Windgeschwindigkeit	Arbeiter	10,0 m/s – 18,2 m/s	Peters, abgeleitet aus Bottema und SNCF (100 N-Kriterium) [94]
Windgeschwindigkeit	Arbeiter	12,5 m/s	Van Zuylen
Windgeschwindigkeit	alle	14,0 m/s	Bewertungsgröße im Text nicht definiert [67]
Windgeschwindigkeit	alle	7 m/s – 10 m/s	Jordan, bei schneller Windgeschwindigkeitszunahme, frontale Anströmung, 7 m/s bei Frauen, 10 m/s bei Männern [73, 74]
Windgeschwindigkeit	Konformitätsprüfung von Zügen	20,0 m/s	TSI, DIN EN, gleitender Mittelwert $\bar{u}_1$ plus $2\,\sigma$ [32, 42]

Tabelle 2.4: Grenzwerte für äußere Druckeinwirkungen, deren Überschreitung die menschliche Gesundheit bzw. das menschliche Wohlempfinden negativ beeinflussen.

Bewertungsgröße	gültig für	Grenzwert	Bemerkungen
Druckamplitude und Druckanstiegsgeschwindigkeit	alle	3,0 mbar 1,0 mbar/s	Druckkammerversuche, Gawthorpe [52]
Druckamplitude und Druckanstiegsgeschwindigkeit	alle	10,0 mbar 2,0 mbar/s – 7,5 mbar/s	British Rail, Japanischer Vorschlag, Druckkammerversuche ERRI. Bei 7,5 mbar/s bestehen noch negative Empfingungen beim Menschen, nehmen darunter aber deutlich ab [78].
Druckamplitude und Druckanstiegsgeschwindigkeit	alle	6,98 mbar 4,14 mbar/s	Seit Jahrzehnten in den USA angewandt [5, 81]
Druckamplitude	alle	4,14 mbar	Carstens, Lee [19, 78]
Druckamplitude	Gleisarbeiter	30 mbar	1985 festgelegt vom Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes [16]
Druckamplitude	Gleisarbeiter	8,0 mbar	TSI Loc & PAS (2014), DIN EN 14067-4 (2024) [32, 42]
Druckamplitude	Gleisarbeiter	3,96 mbar	Lorenz et al. nach Vorgabe der Unfallversicherer [61, 62, 83]
Druckanstiegsgeschwindigkeit	alle	5 mbar/s	Schwanitz [101]
Druckamplitude und Druckanstiegsgeschwindigkeit	Lokführer	10 mbar 4 mbar/s	Leitfaden Druckschutz/Druckkomfort [4]

3 Gewinnung geeigneter Messdaten

Zur Erreichung der in Abschnitt 1.3 charakterisierten Projekt-Ziele ist eine Fahrtwind- und Druckdatenbasis erforderlich, gewonnen durch direkte Messungen am Gleis. Diese Daten dienen der Verifizierung von Computermodellen, welche zum Zwecke der Extrapolation auf weitere Situationen aufgebaut werden sollten. Gefahren auf Menschen am Gleis bei veränderten Zuggeschwindigkeit können damit identifiziert werden. Weil die Messdaten lediglich zur Verifizierung von Computermodellen dienen und der Messaufwand möglich klein gehalten werden sollte, wurden die Messungen nicht nach DIN EN 14067-4 [31] durchgeführt. Im Weiteren werden diese Messungen beschrieben.

3.1 Messort

Nach umfangreicher Suche nach einem geeigneten Messort wurde die in Abbildung 3.1 gezeigte Örtlichkeit nördlich von Ladenburg ausgewählt. Das Gelände ist völlig eben und frei von Hindernissen. Die Zugstrecke wird von allen Zugarten befahren und liegt nahe Mannheim, dem Hauptstandort der FSA. Damit ist dieser Messort hervorragend für die Messdatenaufnahme geeignet.



Abbildung 3.1: Ausgewählter Messort bei Ladenburg (Fotografie und Google Maps-Screenshot mit Messortkennzeichnung).

3.2 Messaufbau

Direkt neben dem Gleis wurde ein Array aus jeweils 9 Ultraschallanemometern mit angeschraubten Drucksensoren aufgebaut (Abbildung 3.2). Die Drucksensoren waren mit Kunststoffnachbildungen menschlicher Ohren verkleidet, um die Druckbelastung des Trommelfells bei der Zugvorbeifahrt messen zu können. Das Array wurde mit Hilfe eines Gerüstes aus Stahlstangen realisiert, welches mit Abspanngurten fest am Boden verankert war. Um Schwingungen innerhalb der Gerüstkonstruktion sicher zu unterbinden, wurde auch das Gestänge in sich mit Hilfe von Abspanngurten stabilisiert. An definierten Positionen am Gerüst waren die Ultraschallanemometer mitsamt der Drucksensoren montiert. Die Positionen in Relation zum Gleis werden aus Abbildung 3.3 ersichtlich. Der Aufbau für die Lärmmessungen ist in Anhang A beschrieben.
Die Zuggeschwindigkeit wurde von vier unabhängigen Systemen parallel und redundant erfasst. Eine Messung erfolgte mit Hilfe zweier Lichtschranken durch Quotientenbildung aus der Entfernung zwischen den Lichtschranken (Abbildung 3.4) und der Zeitspanne zwischen den Ansprechzeitpunkten. Am Gerüst war weiterhin ein Radar (Abbildung 3.5, links) zur direkten Messung der Zuggeschwindigkeit befestigt. Zur Verarbeitung der Radar-Messdaten und Steuerung des Messaufbaus war ein Mikrocomputer (Raspberry Pi) mit integrierter Kamera und selbst entwickelter Software (Abbildung 3.5, mitte) im Einsatz. Aus den Videodaten des Mikrocomputers lässt sich ebenfalls die Zuggeschwindigkeit ableiten. Das vierte System war eine Hochgeschwindigkeitskamera (Abbildung 3.5, rechts). Aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnte sowohl der exakte Zeitpunkt festgestellt werden, an welchem die Zugspitze die Messebene der Ultraschallanemometer erreichte als auch die Zuggeschwindigkeit bestimmt werden.
Mit einer Wetterstation (Abbildung 3.6, links) und einem kombinierten Temperatur- und Feuchtemessgerät (Abbildung 3.6, mitte) wurden die Wetterdaten redundant erfasst. Schließlich wurde die Lärmbelastung durch die passierenden Züge mit Hilfe von Schallpegelmessern (Abbildung 3.6, rechts) entfernungsabhängig gemessen.
Zur Bilddokumentation wurden die Zugpassagen mit einem Smartphone und einer Drohne videotechnisch erfasst.

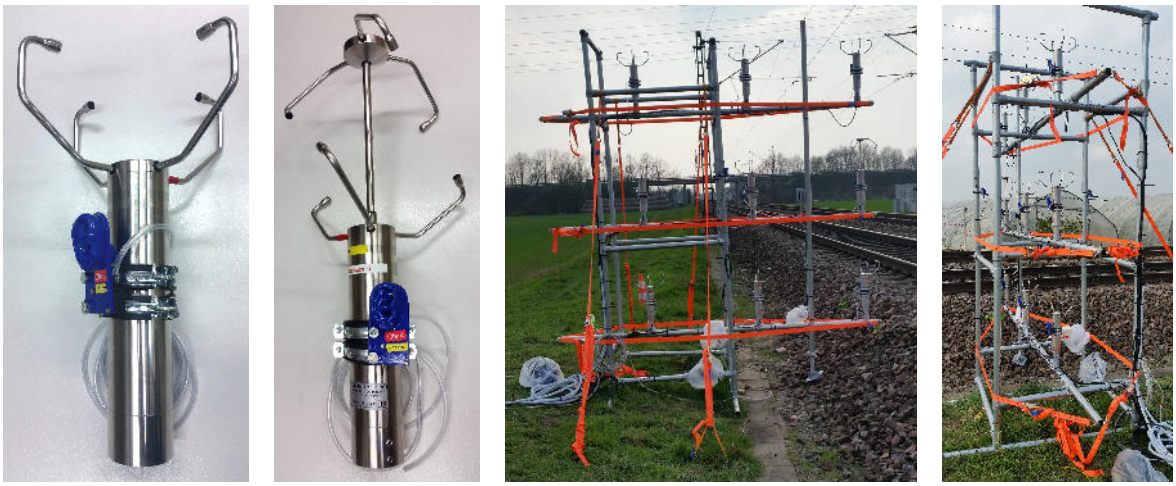


Abbildung 3.2: Links: 2D und 3D Ultraschallanemometer mit Drucksensor. Rechts: Mit Spanngurten stabilisiertes Gerüst mitsamt Messeinrichtungen (Array).

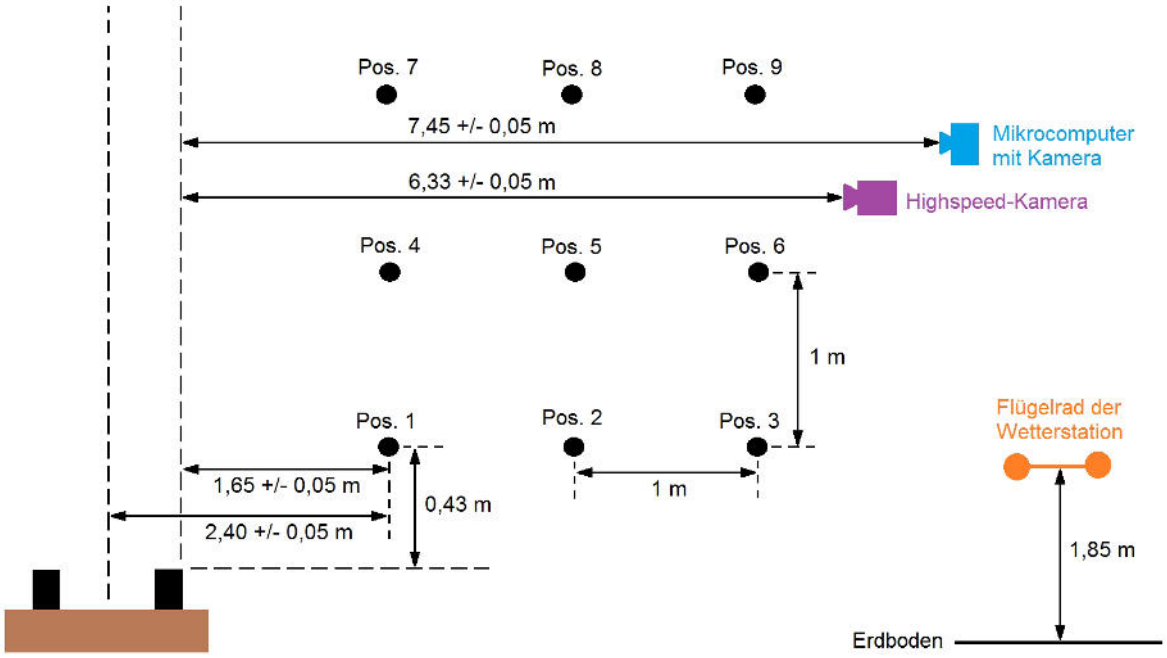


Abbildung 3.3: Oben: Positionen der 9 Ultraschallanemometer und Drucksensoren relativ zum Gleis. Alle 9 Messpositionen lagen in einer Ebene. Weiterhin sind folgende Abstände eingezeichnet: Linsenaußenfläche des Mikrocomputers mit Kamera – Gleisaußenkante, Linsenaußenfläche der Highspeed-Kamera – Gleisaußenkante, Höhe des Flügelrades der Wetterstation – Erdboden. Die Positionen der beiden Schallpegelmessgeräte (hier nicht eingezeichnet) sind in Anhang A beschrieben.

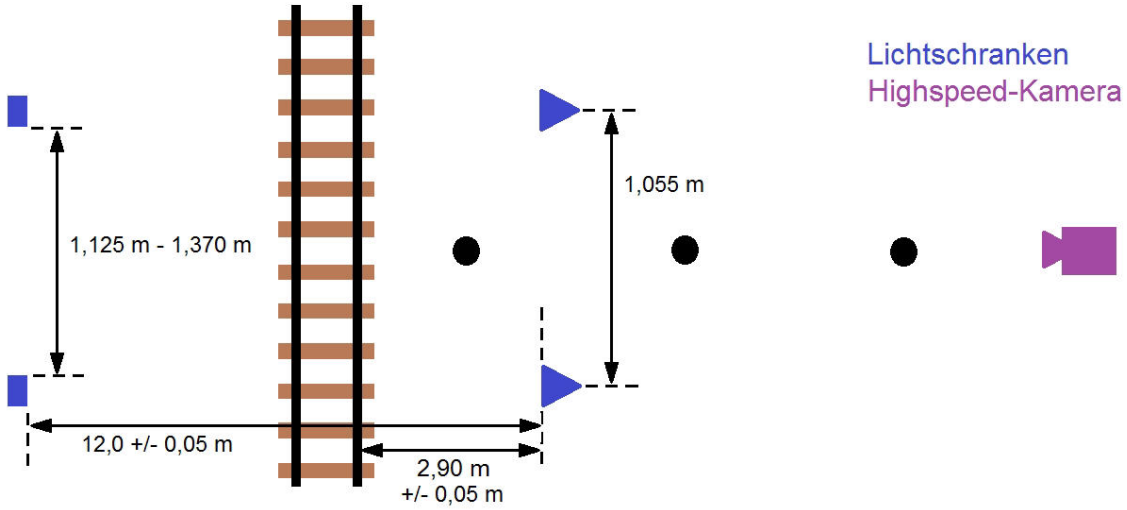


Abbildung 3.4: Positionen der Lichtschranken relativ zum Gleis. Die Positionen der Reflektoren (blaue Rechtecke) wurden mehrmals geprüft und die Reflektoren gegebenenfalls neu ausgerichtet.



Abbildung 3.5: Von links nach rechts: Radar, Mikrocomputer (Rasperry Pi) mit integrierter Kamera und Hochgeschwindigkeitskamera.



Abbildung 3.6: Von links nach rechts: Wetterstation, tragbares Klimamessgerät und Schallpegelmessgerät.

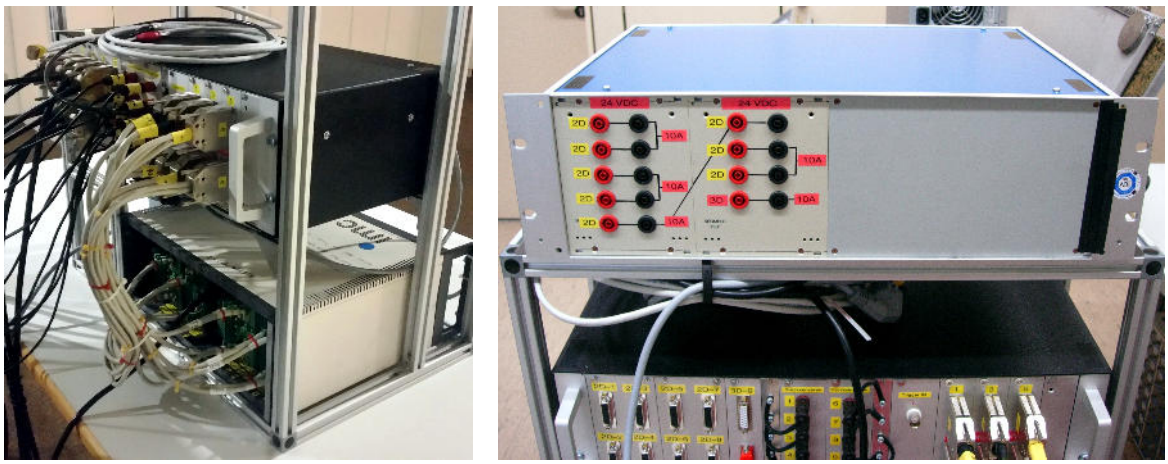


Abbildung 3.7: Links: Signalverteiler und Transientenrekorder. Rechts: Spannungsversorgung für die Ultraschallanemometer.



Abbildung 3.8: Messeinrichtungen im Zelt von links nach rechts: Steuerrechner, Datenlogger, Transientenrekorder, Signalverteiler und Spannungsversorung für die Ultraschallanemometer

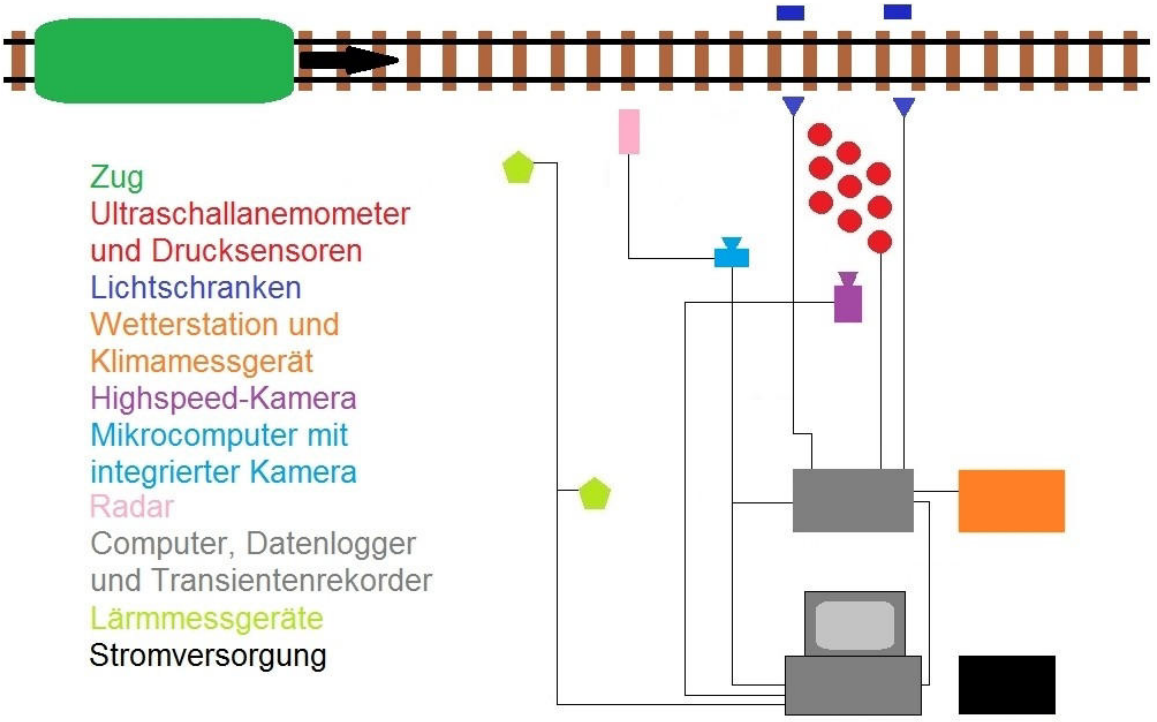


Abbildung 3.9: Blockbild des Messaufbaus.

Bis auf die Lärmmessdaten liefen alle anderen Messdaten in einem selbst aufgebauten Signalverteiler (Abbildung 3.7, links) zusammen und wurden von dort auf einen Transientenrekorder übermittelt. Im Transientenrekorder wurden bei jeder Zugpassage parallel 32 Messsignale mit einer Abtastrate von je 500 Hz aufgezeichnet. Die Daten der Wetterstation wurden permanent von einem Datenlogger und die Messdaten des tragbaren Temperatur- und Feuchtemessgerätes manuell erfasst.
Weil die Ultraschallanemometer über eingebaute Heizungen verfügen, benötigen sie Gleichspannungen mit hohen Strömen, weshalb der Aufbau einer speziellen Spannungsversorgung erforderlich war (Abbildung 3.7, rechts).
Um die feuchtigkeitsempfindlichen Teile der Messkette zu schützen, wurden diese in einem Zelt untergebracht, das vor Ort aufgebaut wurde (Abbildung 3.8). Der gesamte Messaufbau ist schematisiert in Abbildung 3.9 dargestellt.

3.3 Durchführung der Messungen

Am 16.03.2020 wurde der Messaufbau unter Einweisung und Aufsicht durch Mitarbeiter der Bahn und der HPZ GmbH montiert und eingerichtet (Abbildung 3.10). Der Ablauf einer Messung ging wie folgt: An der Signalstellung am Gleis konnte abgelesen werden, wann ein Zug passieren wird. Smartphone, Drohne und Schallpegelmessgeräte wurden bei grünem Signal entsprechend präpariert und bei Sichtung des Zuges die Kameras aktiviert. Der herannahende Zug wurde in einer Entfernung von rund 100 m vom Radar erfasst und die gemessenen Geschwindigkeitswerte an den Mikrocomputer weitergegeben. Oberhalb einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h startete der Mikrocomputer durch Ausgabe eines Triggersignals die gesamte weitere Messtechnik sowie seine integrierte Kamera. Dadurch begannen die Datenaufzeichnungen an Mikrocomputer, Transientenrekorder und Hochgeschwindigkeitskamera. Aufgezeichnet wurden die an den neun Punkten des Arrays gemessene Windgeschwindigkeit und -richtung, der Druckverlauf, die Lichtschrankensignale und das Triggersignal. Die Lärmmessungen erfolgten unabhängig von dieser Messkette und wurden manuell gestartet und beendet. Nach jeder Zugpassage wurden alle Messdaten auf die Steuerrechner übertragen. Die Wetterdaten aus dem tragbaren Klimamessgerät wurden manuell in das Messprotokoll eingetragen. Anschließend wurde die Messkette für die nächste Zugpassage präpariert.



Abbildung 3.10: Montage und Einrichtung des Messaufbaus am 16.03.2020.

Am Morgen des 17.03.2020 begannen die Messungen nach einem Test an einem Zug, der um 9:11 Uhr den Messort passierte. Gegen 11 Uhr begannen auch die Lärmmessungen.

Am 18.03.2020 wurde eine GoPro-Kamera zusätzlich für Videoaufnahmen der Züge eingesetzt. Das Barometer hatte während der sehr feuchten Nacht einen Defekt erlitten, so dass bis zur Wiederherstellung des Gerätes die Luftdruckdaten aus dem Internet abgerufen wurden.

Am 19.03.2020 wurde um kurz nach 7 Uhr mit dem Aufbau eines Prototypen einer sogenannten Mobilen Schnellbauwand der Firma HPZ GmbH begonnen. Diese bestand aus einer Festen Absperrungen, welche mit Hilfe von Klettbändern mit aufblasbaren Schallschutzmatten verkleidet wurde (Abbildung 3.11). Es sollte untersucht werden, ob eine solche Mobile Schnellbauwand prinzipiell funktioniert und wie stark die Schutzwirkung vor aerodynamischen Belastungen sowie Lärm ist. Die Positionen der Lichtschranken, des Radars und der Schallpegelmessgeräte wurden an die Anwesenheit der Mobilen Schnellbauwand angepasst.

Nach der Fotodokumentation des Zustandes der Mobilen Schnellbauwand am Morgen des 20.03.2020 wurde diese sowie der gesamte Messaufbau abgebaut, womit die Messkampagne beendet war. Aufgrund der, wegen der beginnenden Coronakrise erlassenen, Dienstreisesperre konnten keine weitere Messungen durchgeführt werden.



Abbildung 3.11: Prototyp einer Mobilen Schnellbauwand, bestehend aus einer Festen Absperrung, verkleidet mit aufblasbaren Schallschutzmatten.

3.4 Messergebnisse

Der untersuchte erste Prototyp einer Mobilen Schnellbauwand zeigte erhebliche Mängel. Zum einen war die Aufbaudauer von rund 4 Stunden erheblich länger als vorab geschätzt. Zum anderen zeigte die Schnellbauwand starke Ausschläge um bis zu ±30 cm während einer Zugpassage. Weiterhin wurde am Morgen des 20.03.2020 festgestellt, dass die Befestigungen der aufblasbaren Schallschutzmatten nicht ausreichend sind, denn die Schutzmatten waren an der Festen Absperrung verrutscht bzw. konnten ihre Position über Nacht nicht halten (Abbildung 3.12). Als Fazit wurde festgehalten, dass die Mobile Schnellbauwand in dieser Form nicht geeignet ist und weiterentwickelt werden muss, was aktuell im Rahmen des FSA-Projektes F 06-2201 geschieht.

Während der Messkampagne wurden insgesamt 63 Züge messtechnisch erfasst: 32 Doppelstockzüge Baureihe 446 verschiedener Wagenkombinationen, 15 S-Bahnen Baureihe



Abbildung 3.12: Verrutschte Schallschutzmatten am Morgen des 20.03.2020.

425, 7 InterCity-Express der Baureihen 401, 403, 407, 411 und 412, 5 Güterzüge, 2 Intercity, 1 Regionalbahn Baureihe 622 und 1 Bauzug. In den Tabellen 3.1 bis 3.3 sind die Zugtypen mitsamt Passagezeitpunkt, Umweltbedingungen und mittlerer Zuggeschwindigkeit aufgelistet. Die Bestimmung der mittleren Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_\mathrm{Z}$ geschah über die Mittelwertbildung der vier unabhängig voneinander gemessenen Zuggeschwindigkeiten mit Radar v_R, Lichtschranke v_L, Mikrocomputer v_M und Hochgeschwindigkeitskamera v_H. Dies ist in Anhang B.1 in der Tabelle B.1 dargelegt. Die beiden grundlegenden Wagenkombinationen K1 und K2 der Doppelstockzüge Baureihe 446 zeigt Abbildung 3.13. Die beiden Varianten können durch Kopplung weiter variiert werden, was in den Tabellen 3.1 bis 3.3 durch das Zeichen „+“ symbolisiert ist.

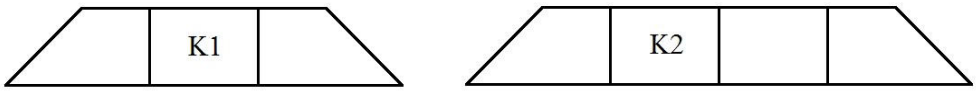


Abbildung 3.13: Wagenschemata K1 und K2 der Doppelstockzüge Baureihe 446.

Tabelle 3.1: Am 17.03.2020 ohne Mobile Schnellbauwand erfasste Züge mit Uhrzeit, Lufttemperatur T, Luftfeuchte F, Umgebungsdruck p_0, horizontaler Windgeschwindigkeit u_0 kurz vor der Zugpassage, Zugtyp und mittlerer Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_\mathrm{Z}$.

Zug Nummer 1:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
09:40	14,3	54,6	1.014	0,81	142,7	125,5 ± 1,94
Zug Nummer 2:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
10:01	17,6	57,1	1.014	1,33	105,6	140,4 ± 1,73
Zug Nummer 3:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
10:24	17,5	58,4	1.014	1,16	58,1	121,6 ± 1,83
Zug Nummer 4:	Doppelstock, Baureihe 446, K2+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
10:54	16,4	62,0	1.015	1,40	267,2	119,2 ± 1,81

Zug Nummer 5:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
11:24	18,2	58,1	1.015	0,22	160,6	139,0 ± 2,72

Zug Nummer 6:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
11:40	16,3	62,1	1.015	1,35	233,8	146,4 ± 2,40

Zug Nummer 7:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
12:04	16,6	60,6	1.015	1,18	271,6	112,8 ± 1,34

Zug Nummer 8:	Doppelstock, Baureihe 446, K1					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
12:26	18,3	55,4	1.015	2,27	288,3	123,7 ± 1,90

Zug Nummer 9:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:03	17,9	61,2	1.015	1,68	321,0	140,5 ± 1,74

Zug Nummer 10:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:24	18,7	64,3	1.014	0,16	26,4	137,7 ± 2,20

Zug Nummer 11:	Güterzug, Lok: Siemens Vectron					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:28	19,3	61,2	1.014	1,75	190,2	69,2 ± 0,97

Zug Nummer 12:	Doppelstock, Baureihe 446, K1+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:40	18,3	57,7	1.014	2,66	345,8	144,9 ± 2,36

Zug Nummer 13:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:03	17,6	62,0	1.014	0,64	312,8	126,7 ± 1,54

Zug Nummer 14:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:25	17,2	61,6	1.014	1,04	322,6	156,2 ± 2,63

Zug Nummer 15:	Doppelstock, Baureihe 446, K2+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:42	16,2	62,9	1.014	1,38	321,1	111,3 ± 1,65

Zug Nummer 16:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
15:07	16,3	65,8	1.014	1,26	26,4	136,4 ± 1,67

Zug Nummer 17:	Doppelstock, Baureihe 446, K1					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
15:34	16,9	63,4	1.014	1,03	5,0	126,7 ± 1,97
Zug Nummer 18:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
15:41	16,2	65,8	1.014	0,95	17,3	155,1 ± 2,60
Zug Nummer 19:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
16:02	16,6	65,4	1.014	1,31	37,3	119,1 ± 2,21
Zug Nummer 20:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
16:24	15,5	63,0	1.014	1,69	10,6	134,4 ± 2,01
Zug Nummer 21:	Doppelstock, Baureihe 446, K1+K1					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
16:41	17,0	55,8	1.014	1,40	6,4	131,5 ± 2,07

Tabelle 3.2: Am 18.03.2020 ohne Mobile Schnellbauwand erfasste Züge mit Uhrzeit, Lufttemperatur T, Luftfeuchte F, Umgebungsdruck p_0, horizontaler Windgeschwindigkeit u_0 kurz vor der Zugpassage, Zugtyp und mittlerer Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_\mathrm{Z}$.

Zug Nummer 22:	InterCity-Express, Baureihe 411					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
07:56	9,0	92,0	1.018	0,56	239,6	138,9 ± 23,98
Zug Nummer 23:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
08:24	9,7	88,1	1.018	0,63	213,4	111,5 ± 1,67
Zug Nummer 24:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
09:02	11,6	79,8	1.018	0,38	225,1	123,1 ± 0,75
Zug Nummer 25:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
09:37	13,0	81,6	1.018	2,62	143,3	155,2 ± 2,61
Zug Nummer 26:	Doppelstock, Baureihe 446, K2+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
09:41	12,9	79,7	1.018	1,94	152,0	124,0 ± 1,91
Zug Nummer 27:	InterCity-Express, Baureihe 407					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
09:52	13,5	79,3	1.018	1,15	158,8	148,3 ± 2,42

Zug Nummer 28:	InterCity-Express, Baureihe 412					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
09:55	13,5	78,4	1.018	0,67	148,5	155,7 ± 2,48

Zug Nummer 29:	InterCity 1, Lok: Baureihe 101					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
10:01	14,0	77,0	1.018	1,32	122,2	149,8 ± 2,82

Zug Nummer 30:	InterCity-Express, Baureihe 403					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
10:03	13,8	76,9	1.018	1,91	148,3	138,7 ± 2,09

Zug Nummer 31:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
10:09	13,7	76,2	1.018	1,33	101,3	138,8 ± 2,20

Zug Nummer 32:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
10:26	14,5	73,4	1.018	0,51	125,5	157,2 ± 2,65

Zug Nummer 33:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
11:04	16,1	67,9	1.016	0,87	201,9	141,0 ± 4,27

Zug Nummer 34:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
11:26	16,9	66,6	1.016	1,19	143,4	141,3 ± 2,29

Zug Nummer 35:	Güterzug, Lok: Baureihe 152					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:15	18,7	56,1	1.013	0,84	262,2	70,6 ± 0,99

Zug Nummer 36:	InterCity 1, Lok: Baureihe 101					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:29	18,5	55,5	1.012	0,83	286,8	157,7 ± 3,03

Zug Nummer 37:	InterCity-Express, Baureihe 403					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:13	17,1	51,1	1.012	2,07	311,4	158,6 ± 2,67

Zug Nummer 38:	InterCity-Express, Baureihe 401					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:16	17,2	53,1	1.011	1,80	296,7	153,2 ± 2,81

Zug Nummer 39:	InterCity-Express, Baureihe 403					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:24	17,7	49,1	1.012	1,57	13,0	155,1 ± 2,58

Zug Nummer 40:	Güterzug, Lok: Siemens Vectron					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
14:39	17,8	49,7	1.011	0,98	352,7	99,4 ± 1,57
Zug Nummer 41:	Doppelstock, Baureihe 446, K1+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
15:49	17,8	49,1	1.010	2,37	348,7	146,7 ± 2,40
Zug Nummer 42:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
16:06	15,8	65,5	1.011	0,95	3,8	121,8 ± 1,47
Zug Nummer 43:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
16:41	16,1	65,3	1.010	1,56	2,4	154,6 ± 2,59
Zug Nummer 44:	Doppelstock, Baureihe 446, K2+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
16:45	16,2	61,4	1.010	1,58	306,5	141,7 ± 2,30
Zug Nummer 45:	Regionalbahn, Baureihe 622					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
17:09	16,2	60,8	1.010	1,26	302,2	137,6 ± 1,77

Tabelle 3.3: Am 19.03.2020 mit Mobiler Schnellbauwand erfasste Züge mit Uhrzeit, Lufttemperatur T, Luftfeuchte F, Umgebungsdruck p_0, horizontaler Windgeschwindigkeit u_0 kurz vor der Zugpassage, Zugtyp und mittlerer Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_\mathrm{Z}$.

Zug Nummer 46:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
11:28	15,3	63,0	1.009	1,04	33,4	134,8 ± 2,55
Zug Nummer 47:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
11:40	15,4	60,7	1.009	1,40	8,1	137,0 ± 2,74
Zug Nummer 48:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
12:02	15,8	56,9	1.009	0,72	341,0	116,3 ± 1,48
Zug Nummer 49:	Bauzug					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
12:08	16,4	57,5	1.009	0,44	341,1	90,7 ± 1,31
Zug Nummer 50:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_\mathrm{Z}$ [km/h]
12:24	16,5	56,0	1.009	0,94	186,3	141,2 ± 2,72

Zug Nummer 51:	Doppelstock, Baureihe 446, K2+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
12:40	16,7	54,3	1.009	1,36	104,5	115,9 ± 2,04
Zug Nummer 52:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:01	16,9	46,6	1.009	0,62	288,0	144,2 ± 1,96
Zug Nummer 53:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:24	16,8	50,3	1.008	0,33	203,0	128,0 ± 2,32
Zug Nummer 54:	Güterzug, Lok: Siemens Vectron					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:30	16,5	54,5	1.008	0,48	135,8	99,3 ± 1,86
Zug Nummer 55:	Doppelstock, Baureihe 446, K1+K1					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
13:40	16,6	57,1	1.008	0,62	356,2	152,5 ± 3,57
Zug Nummer 56:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:03	17,2	50,6	1.008	0,81	351,4	114,2 ± 1,51
Zug Nummer 57:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:24	17,7	52,2	1.008	0,64	229,3	102,4 ± 1,74
Zug Nummer 58:	Güterzug, Lok: Siemens Vectron					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:31	17,8	55,8	1.008	0,50	158,3	102,9 ± 1,96
Zug Nummer 59	Doppelstock, Baureihe 446, K2+K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
14:40	17,3	57,8	1.007	0,30	123,9	134,3 ± 2,50
Zug Nummer 60:	S-Bahn, Baureihe 425					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
15:05	17,6	54,2	1.007	0,96	136,3	138,9 ± 1,77
Zug Nummer 61:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
15:23	18,1	47,7	1.007	0,90	20,0	146,5 ± 2,91
Zug Nummer 62:	Doppelstock, Baureihe 446, K2					
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
15:40	18,1	47,3	1.007	0,77	352,0	152,4 ± 3,55

Zug Nummer 63: S-Bahn, Baureihe 425						
Uhrzeit	T [°C]	F [%]	p_0 [mbar]	u_0 [m/s]	φ_0 [°]	$\bar{v}_Z$ [km/h]
16:01	17,5	50,8	1.007	0,38	259,2	109,0 ± 1,39

In Anhang B.2.2 sind alle Messkurven, welche an den neun Messpositionen sowie an der Wetterstation und den Lichtschranken gewonnen wurden, grafisch aufgearbeitet dargestellt. Für diese neun Messpositionen sind dies die zeitlichen Verläufe der Windgeschwindigkeit $u(t)$ (Position 4), der horizontalen Windgeschwindigkeit $u_{xy}(t)$, der Windrichtung $\varphi(t)$ und $\theta(t)$ (Position 4) sowie der Druckverlauf $p(t)$. Weiterhin ist für jede erfolgreiche Messung ein Foto des passierendes Zuges abgebildet.

An dieser Stelle sollen an ausgewählten Beispielen die Eigenheiten der gemessen zeitlichen Verläufe von Windgeschwindigkeit und Druck dargelegt werden. Abbildung 3.14 zeigt auf der linken Seite die während der Passage eines Doppelstockzuges (Zug 4) gemessenen zeitlichen Druckverläufe an den Messpositionen 1, 2 und 3, also sukzessive in 1 m-Schritten vom Gleis weg. Rechts sind die Verläufe an den Messpositionen 1, 4, und 7 gezeigt, also von unten nach oben in 1 m-Schritten im Abstand von 2,40 m zur Gleisachse. In grüner Farbe ist die Passageabfolge der Wagenblöcke dargestellt.
Man erkennt deutlich, dass die größten Ausschläge während der Passage des Zugbuges ($t \approx 0\,\mathrm{s}$) auftreten und zwar in $d = 2{,}4\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse sowie in relativ geringer Höhe bei $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante. Beim Zug 4 wurden $\Delta p \approx 3\,\mathrm{mbar}$ erreicht. Weil der Fokus auf der Bugdruckwelle liegt, wird der nadelartige Ausschlag nach der Bugdruckwelle nicht berücksichtigt. Mit zunehmender Entfernung von der Gleisachse fällt Δp deutlich ab über circa 1,5 mbar in $d = 3{,}40\,\mathrm{m}$ auf schließlich rund 1 mbar in $d = 4{,}40\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse. Die Abhängigkeit der Δp von z ist deutlich schwächer ausgeprägt als die Abhängigkeit von d, was auch für die Zugtypen mit niedrigerer Bauweise als der des Doppelstockzugs der Baureihe 446 gilt. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erfahrungen anderer Autoren, z. B. [39, 87].

Abbildung 3.15 zeigt die zeitlichen Verläufe der gemessenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an den Messpositionen 1, 2 und 3 (links) sowie 1, 4 und 7 (rechts). Ebenso wie beim Druck wurden die höchsten Windgeschwindigkeiten an Messpostion 1 festgestellt, also in $d = 2{,}4\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse und $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante. Der Doppelstockzug Baureihe 446 mit rund 120 km/h Geschwindigkeit erzeugte an dieser Messpostion knapp 12 m/s maximale Windgeschwindigkeit. Mit zunehmenden Abstand zur Gleisachse fallen diese Maximalwerte deutlich ab. Während der Passage des Zugbuges ändert sich die Windrichtung stark, oftmals dreht sie einmal um 360°. Danach ist die Windrichtung mehr oder weniger parallel zur Fahrtrichtung des Zuges. Letztgenanntes gilt umso strenger, je näher am Zug gemessen wird. Nach Passage des Zughecks treten Luftwirbel bzw. Turbulenzen auf, wobei die Dauer zwischen Zugheckpassage und Auftreten der Wirbel mit dem Abstand von der Gleisachse wächst. Die Höhenabhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Windrichtung ist deutlich geringer ausgeprägt als die Abhängigkeit von der Entfernung zur Gleisachse. Auch diese Sachverhalte wurden von anderen Autoren so festgestellt, z. B. [39, 87].

Die Abbildungen 3.16 und 3.17 zeigen die für die fünf Zugtyen charakteristischen zeitlichen Verläufe von Druck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Beispiel der Messposition 1.

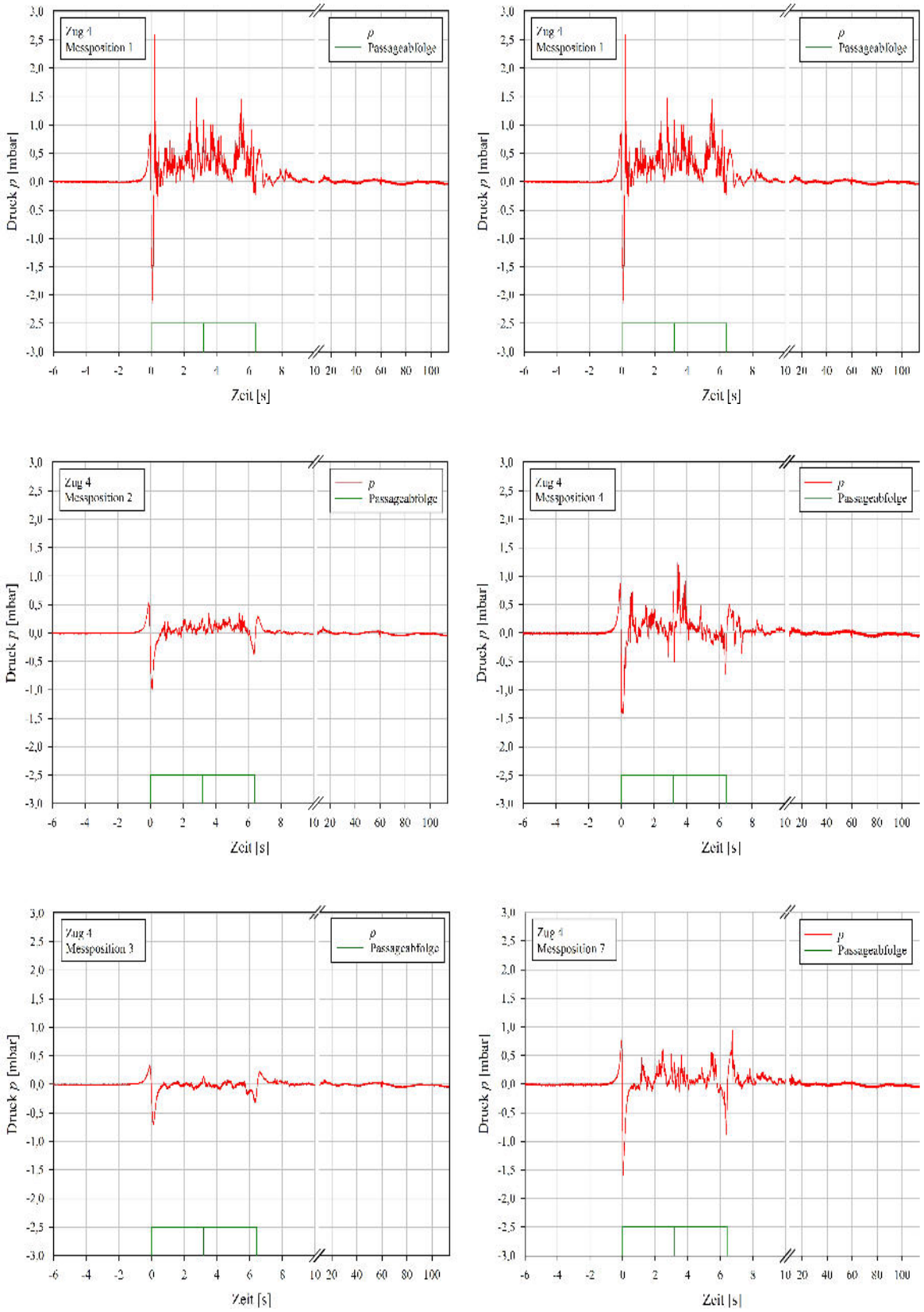


Abbildung 3.14: Druckmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 1, 2 und 3 (links) und 1, 4 und 7 (rechts). Zug 4 ist ein Doppelstockzug Baureihe 446 mit der Wagenkombination K2 + K2 und der Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_Z = 119{,}2 \pm 1{,}81\,\mathrm{km/h}$.

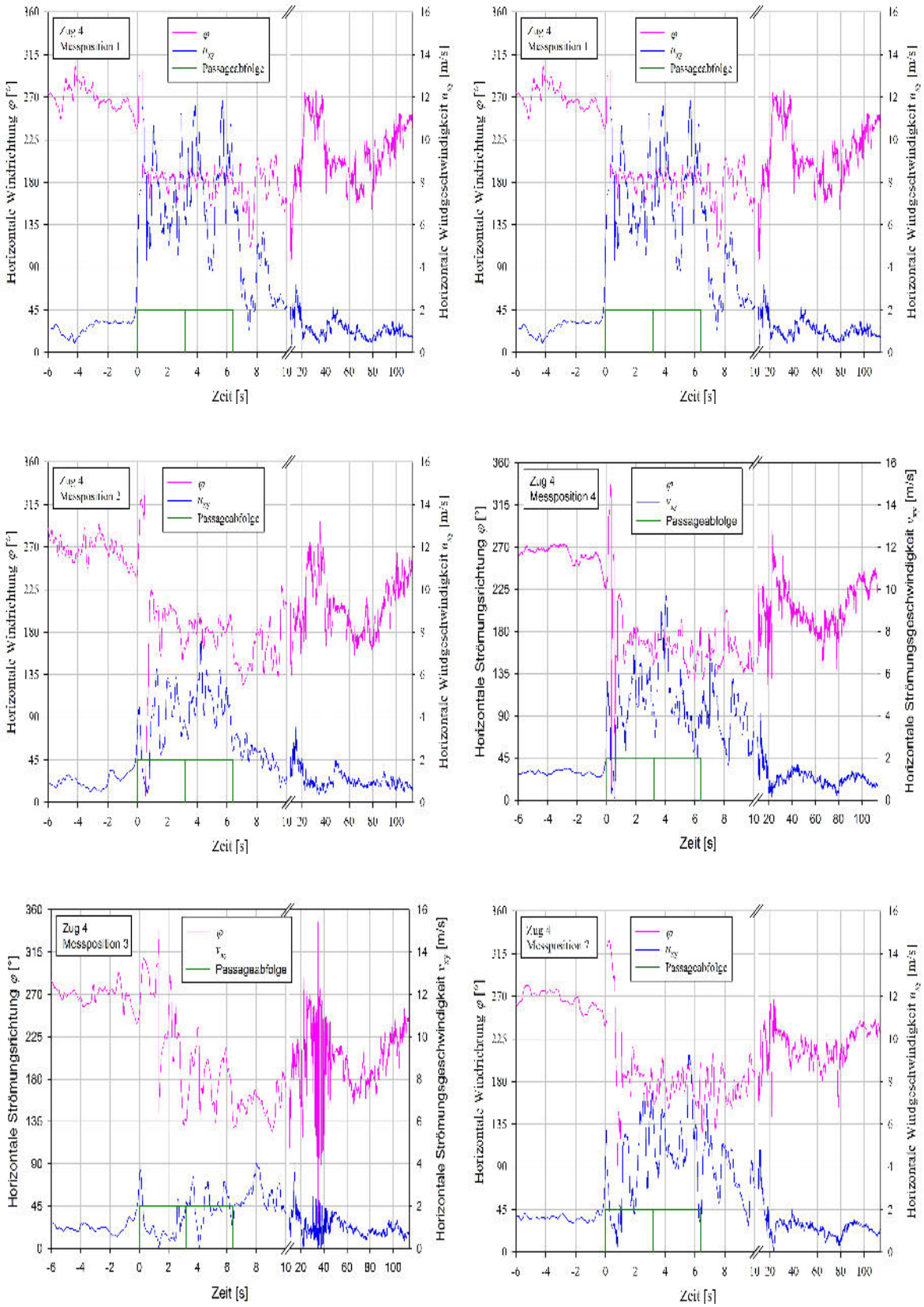
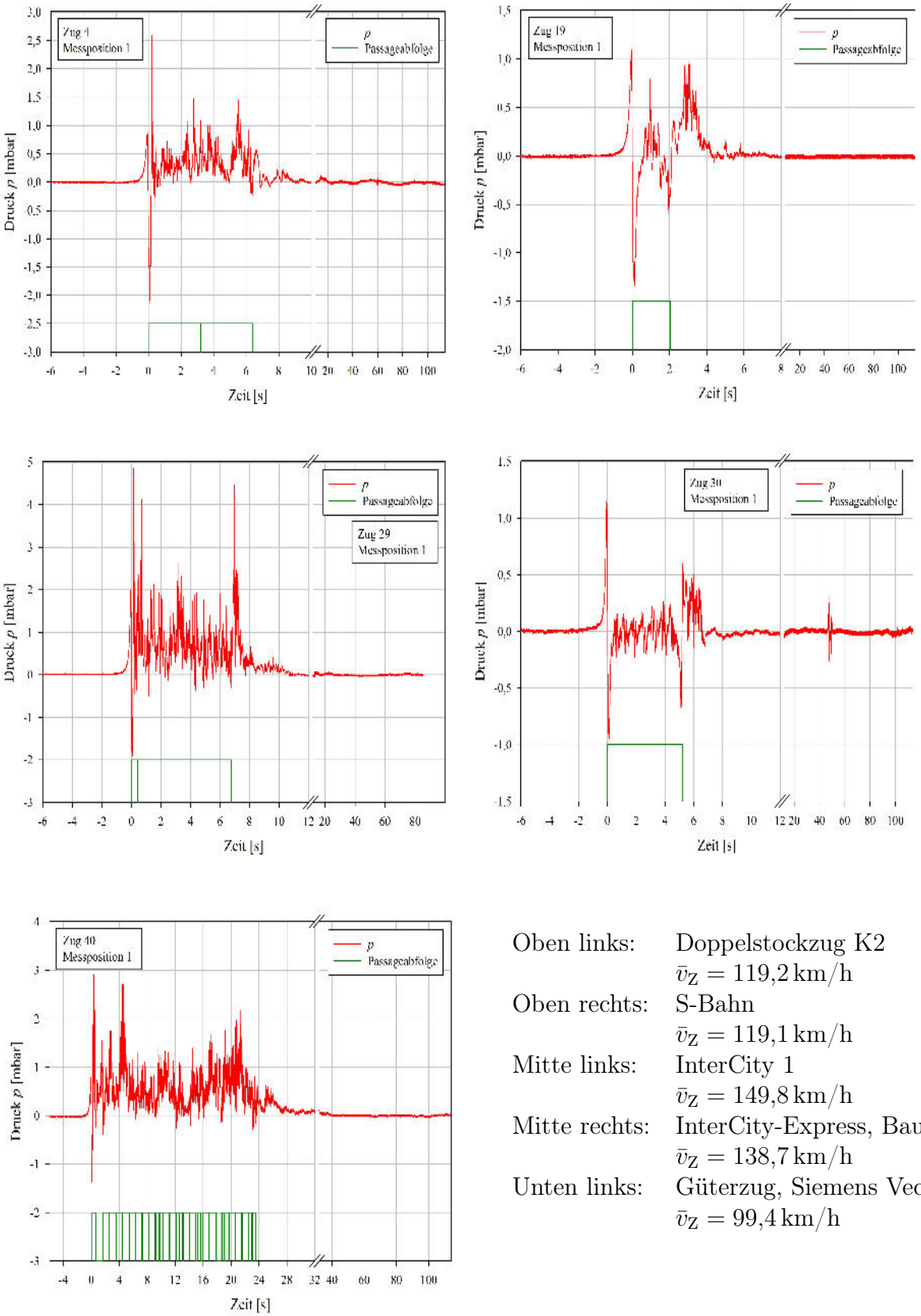


Abbildung 3.15: Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 1, 2 und 3 (links) und 1, 4 und 7 (rechts). Daten zum Zug siehe Abbildung 3.14.



Oben links: Doppelstockzug K2
$\bar{v}_Z = 119{,}2\,\mathrm{km/h}$

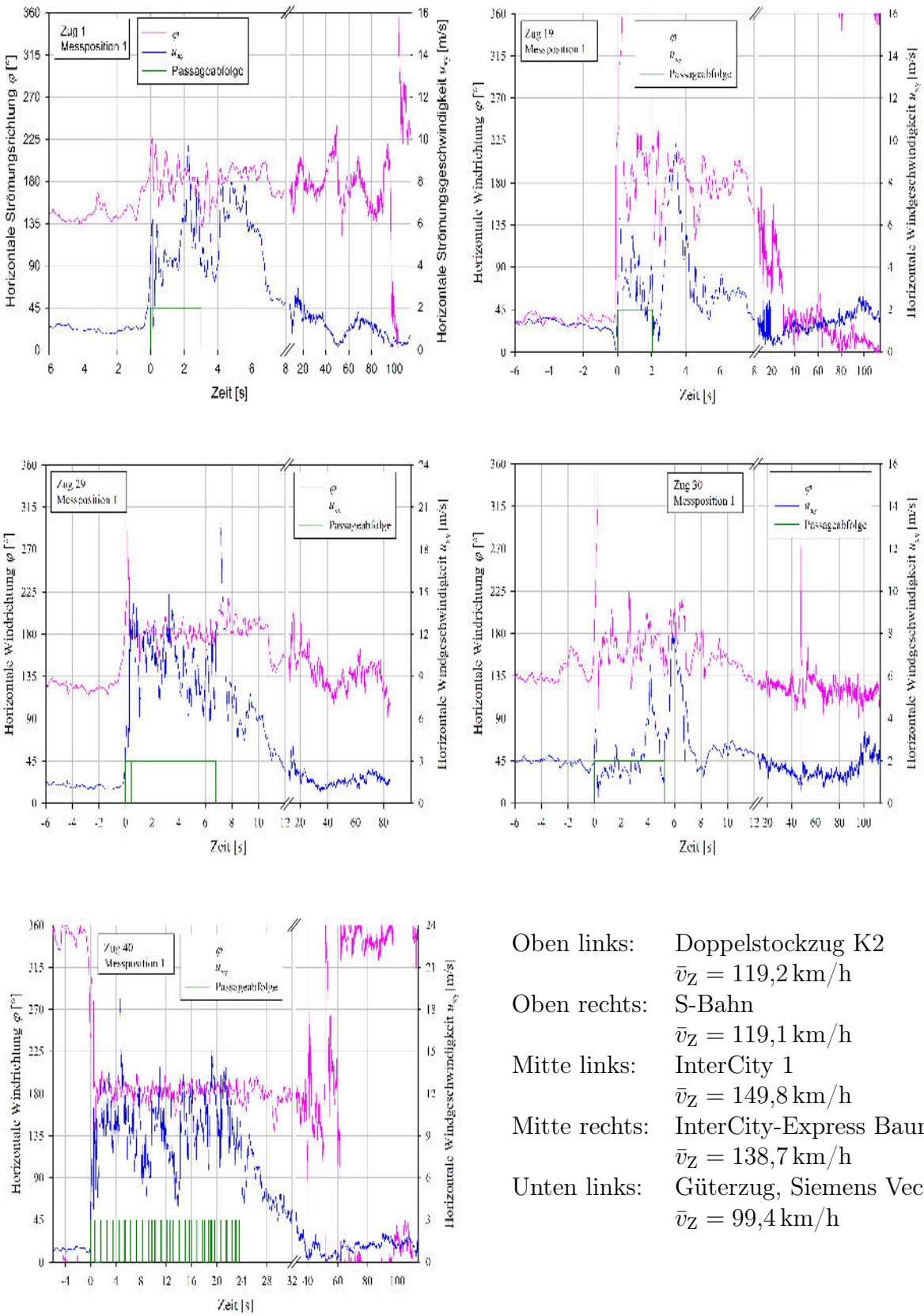
Oben rechts: S-Bahn
$\bar{v}_Z = 119{,}1\,\mathrm{km/h}$

Mitte links: InterCity 1
$\bar{v}_Z = 149{,}8\,\mathrm{km/h}$

Mitte rechts: InterCity-Express, Baureihe 403
$\bar{v}_Z = 138{,}7\,\mathrm{km/h}$

Unten links: Güterzug, Siemens Vectron
$\bar{v}_Z = 99{,}4\,\mathrm{km/h}$

Abbildung 3.16: An Messposition 1 registrierte zeitliche Druckverläufe während der Passage von fünf verschiedenen Zugtypen.



Oben links:	Doppelstockzug K2
	$\bar{v}_Z = 119{,}2\,\mathrm{km/h}$
Oben rechts:	S-Bahn
	$\bar{v}_Z = 119{,}1\,\mathrm{km/h}$
Mitte links:	InterCity 1
	$\bar{v}_Z = 149{,}8\,\mathrm{km/h}$
Mitte rechts:	InterCity-Express Baureihe 403
	$\bar{v}_Z = 138{,}7\,\mathrm{km/h}$
Unten links:	Güterzug, Siemens Vectron
	$\bar{v}_Z = 99{,}4\,\mathrm{km/h}$

Abbildung 3.17: An Messposition 1 registrierte zeitliche Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsverläufe während der Passage von fünf verschiedenen Zugtypen.

Die Druckbelastung, welche der ausgewählte Doppelstockzug Baureihe 446 (Zug 4) bei gleicher Zuggeschwindigkeit ($v_z \approx 120\,\mathrm{km/h}$) erzeugt, liegt um etwa 50 % über der der ausgewählten S-Bahn Baureihe 425 (Zug 19). Dies ergibt der Vergleich der beiden oberen Diagramme in Abbildung 3.16. Dieses Phänomen erklärt sich mit der gegenüber der S-Bahn größeren Frontfläche des Doppelstockzuges.
Die von beiden Zugtypen generierten Windgeschwindigkeiten liegen bei gleicher Geschwindigkeit etwa in gleicher Höhe, wobei in Abbildung 3.17 oben rechts der große Peak auffällt, der unmittelbar nach Passage der S-Bahn auftritt.

Weil keine andern Zugtypen im Geschwindigkeitsbereich um $v_Z \approx 120\,\mathrm{km/h}$ erfasst werden konnten, ist ein direkter zugtypspezifischer Vergleich der aerodynamischen Belastungen mit dem oben genannten Doppelstockzug bzw. der oben genannten S-Bahn nicht möglich. Dennoch zeigt ein Blick auf die mittig angeordneten Diagramme in den Abbildungen 3.16 und 3.17 einige Charakteristika der aerodynamischen Belastungen, die während der Passagen von InterCity (Diagramme mitte, links) und InterCity-Express (Diagramme mitte, rechts) auftreten. Obwohl beide Züge mit ähnlicher Geschwindigkeit ($v_Z \approx 144\,\mathrm{km/h}$) den Messort passiert haben, traten während der Passage des InterCity rund fünfmal höhere Druckpeaks auf als während der Passage des InterCity-Express. Zeigt sich der zeitliche Druckverlauf während der Passage des InterCity – bis auf hohe Peaks bei Passage von Zugbug und -heck – weitgehend chaotisch, erscheint im zeitlichen Druckverlauf während der Passage des InterCity-Express ein charakteristisches Druckwellenmuster, welches mit der Passageabfolge der Waggons korreliert Auch beim InterCity-Express treten Druckpeaks bei der Passage von Zugbug- und Heck auf. Obwohl der InterCity-Express rund 20 km/h schneller unterwegs war als der oben genannte Doppelstockzug und die oben genannte S-Bahn, ist die vom InterCity-Express induzierte Druckbelastung kleiner oder gleich derjenigen von Doppelstockzug und S-Bahn.
Bezüglich der Windgeschwindigkeit zeigt der InterCity (Zug 29) besonders hohe Werte bis maximal $\hat{u} \approx 20\,\mathrm{m/s}$. Damit ist dessen $\hat{u}$ rund doppelt zu groß wie beim InterCity-Express mit ähnlicher Geschwindigkeit sowie doppelt so groß wie bei Doppelstockzug und S-Bahn mit rund 20 km/h geringerer Fahrtgeschwindigkeit. Beim InterCity-Express zeigt sich ein ausgeprägter Windgeschwindigkeitspeak nach der Passage des Zugbuges. Abgesehen vom Doppelstockzug traten bei allen anderen Personenzugtypen an Messposition 1 häufig ausgeprägte Windgeschwindigkeitspeaks nach der Passage des Zugbuges auf.

Qualitativ ähnliche aerodynamische Belastungen wie der des InterCitys zeigen offenbar Güterzüge, wie der Vergleich der jeweils unteren Diagramme (Zug 40, Güterzug) mit den Diagrammen mitte, links (Zug 29, InterCity) in den Abbildungen 3.16 und 3.17 nahelegt. Weil Zug 29 rund 50 km/h schneller unterwegs war als Zug 40 und keiner der beiden Zugtypen mit ähnlicher Zuggeschwindigkeit erfasst werden konnte, ist ein direkter quantitativer Vergleich ihrer generierten aerodynamischen Belastungen an dieser Stelle nicht möglich. Grob lässt sich festhalten, dass die vom schnelleren InterCity erzeugten Druckbelastungen etwa doppelt so groß sind wie die des deutlich langsameren Güterzuges. Der zeitliche Druckverlauf unterscheidet sich in seiner Form kaum.
Bei der Windgeschwindigkeit zeigt sich bei beiden genannten Zügen ein ähnliches oberes Niveau bei rund 12 m/s, wobei vereinzelte Peaks bis in den Bereich um 20 m/s

auftreten. Beim InterCity tritt dieser Peak nach Passage des Zugbuges auf. Auch hier unterscheidet sich der zeitliche Windgeschwindigkeitsverlauf wenig.

3.5 Auswertung

Für die Auswertung wurde eine spezielle Software entwickelt. Diese verfügt über verschiedene Datenbearbeitungsalgorithmen und ist dazu in der Lage, beispielsweise Maxima und Minima aufzusuchen, zeitliche Ableitungen zu bilden oder Datenfilterungen bzw. -mittelungen vorzunehmen. Auf diese Weise wurden aus den gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeiten $u_{\mathrm{xy}}(t)$ die zeitlichen Ableitungen $a_{\mathrm{xy}}(t)$, also die horizontalen Windbeschleunigungen, gebildet und die Maxima $\hat{u}$ und $\hat{a}$ in allen Kurven bestimmt. Außerdem wurden gleitende Mittelwerte für alle Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungskurven mit Zeitintervallen von 0,4 s (in Anlehnung an die menschliche Reaktionsdauer, Tabelle 2.2) und 1,0 s berechnet und daraus die jeweiligen Maxima $\hat{u}_{0,4}$, $\hat{u}_1$, $\hat{a}_{0,4}$ und $\hat{a}_1$ ermittelt. Bei der Auswertung der Druckkurven wurde der Abstand zwischen Maxima und Minima der Bugdruckwellen bestimmt und die Beträge der zeitlichen Druckentwicklung zwischen Passage von Bug und Heck der Züge gemittelt und so die mittlere Druckbelastung berechnet.
Die gleitende Mittelung der Windgeschwindigkeit mit einem Zeitintervall von 1,0 s ist in der DIN EN 14067-4 [32] beschrieben. In Kapitel 2 des vorliegenden Berichts wird an verschiedenen Stellen die menschliche Reaktionsdauer auf äußere Störungen mit etwa 0,3 s bis 0,5 s beziffert, z. B. [39, 51, 70, 73, 74, 87]. Aus diesem Grund wurden die Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungsdaten neben einem Zeitintervall von 1,0 s auch mit einem Zeitintervall von $\Delta t = 0{,}4$ s gemittelt. Im Folgenden werden sowohl die Rohdaten als auch die mit verschiedenen Zeitintervallen gemittelten Daten betrachtet. Je kleiner das Mittelungszeitintervall ist, desto größer sind die Minima und Maxima. Dies wirkt sich zum einen über die Windreibung auf die Höhe berechneter Drehmomente auf Menschen aus, zum anderen tritt der zweite Term in Gleichung (2.2) mit kleiner werdender Zeitintervallbreite zunehmend in Erscheinung. Die maximalen Windgeschwindigkeiten, Windbeschleunigungen und Drücke sind in den Tabellen B.2 bis B.8 für jede Messposition (Abbildung 3.3) und Mittelung in Anhang B aufgelistet.

Aufgrund der starken Messwertstreuung ist laut Regelwerk für gesicherte messwertbasierte Aussagen die Erfassung von mindestens 10 Zügen gleichen Typs bei gleichen Bedingungen erforderlich. Diese Forderung erfüllen bei der hier durchgeführten Messkampagne die Doppelstockzüge Baureihe 446 und die S-Bahnen Baureihe 425, weshalb lediglich für diese beiden Zugtypen eine detaillierte Messdatenauswertung vorgenommen wurde. Zusammen mit den Messdaten aus den Passagen der restlichen Zugtypen ergibt sich eine Datenbasis, welche für die Verifizierung von CFD-Simulationen ausreichend ist.

3.5.1 Windgeschwindigkeit

Bei der Untersuchung aerodynamischer Belastungen wird in der Regel das Hauptaugenmerk auf die Windgeschwindigkeit gelegt, wie in Kapitel 2 und auch in der Norm DIN EN 14067-4 [31, 32] nachzulesen ist.

3.5.1.1 Doppelstockzug Baureihe 446

Der häufigste Zugtyp, der während der Messkampagne erfasst wurde, ist der Doppelstockzug Baureihe 446. In den Abbildungen 3.18 bis 3.19 sind die gemessenen maximalen Windgeschwindigkeiten $\hat{u}$ für alle diese Züge, berechnet aus den ungemittelten Messdaten, grafisch dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte können den Tabellen 3.1, 3.2 und B.2 entnommen werden. Man entnimmt den Grafiken, dass die gemessenen maximalen Windgeschwindigkeiten stark streuen, was den Erfahrungen anderer Autoren entspricht, z. B. [7–11, 70]. Um die Abhängigkeiten analysieren zu können, wurde mit Hilfe von Regressionsrechnungen eine möglichst simple, aber sehr gut geeignete Funktion in die jeweiligen $\hat{u}$ eingepasst:

$$\begin{aligned} z = 0{,}43\,\text{cm}: &\qquad \hat{u} = \exp\left(5{,}2587 - 58{,}046\, v_\text{Z}^{-1} - 1{,}5298\,\sqrt{d}\right) \\ z = 1{,}43\,\text{cm}: &\qquad \hat{u} = \exp\left(3{,}8958 - 65{,}012\, v_\text{Z}^{-1} - 0{,}8842\,\sqrt{d}\right) \\ z = 2{,}43\,\text{cm}: &\qquad \hat{u} = \exp\left(4{,}4249 - 68{,}073\, v_\text{Z}^{-1} - 1{,}2019\,\sqrt{d}\right) \end{aligned} \tag{3.1}$$

In Abbildung 3.20 sind die Funktionen (3.1) vergleichend dargestellt. Man erkennt, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten $\hat{u}$ bis zu einem gewissen Niveau mit zunehmender Höhe z über der Schienenoberkante abnehmen. Auch die Abhängigkeit der $\hat{u}$ vom Abstand zur Gleisachse d sinkt mit größer werdendem z.

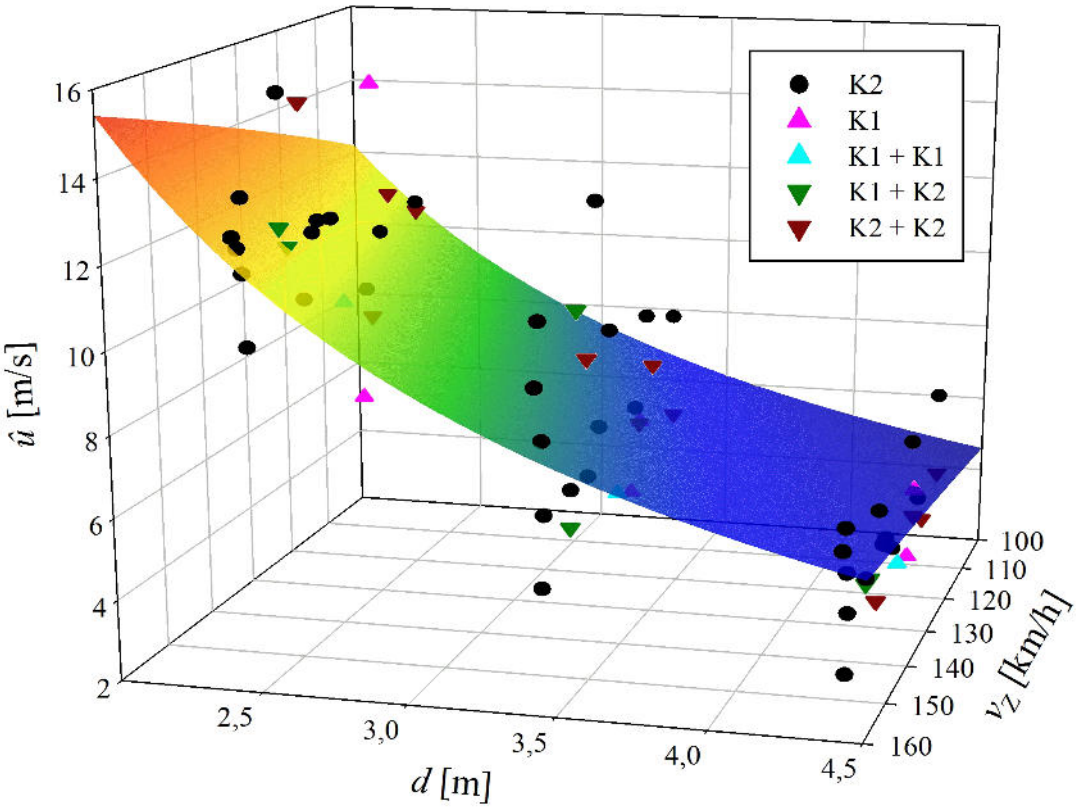


Abbildung 3.18: $\hat{u}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\text{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}719$.

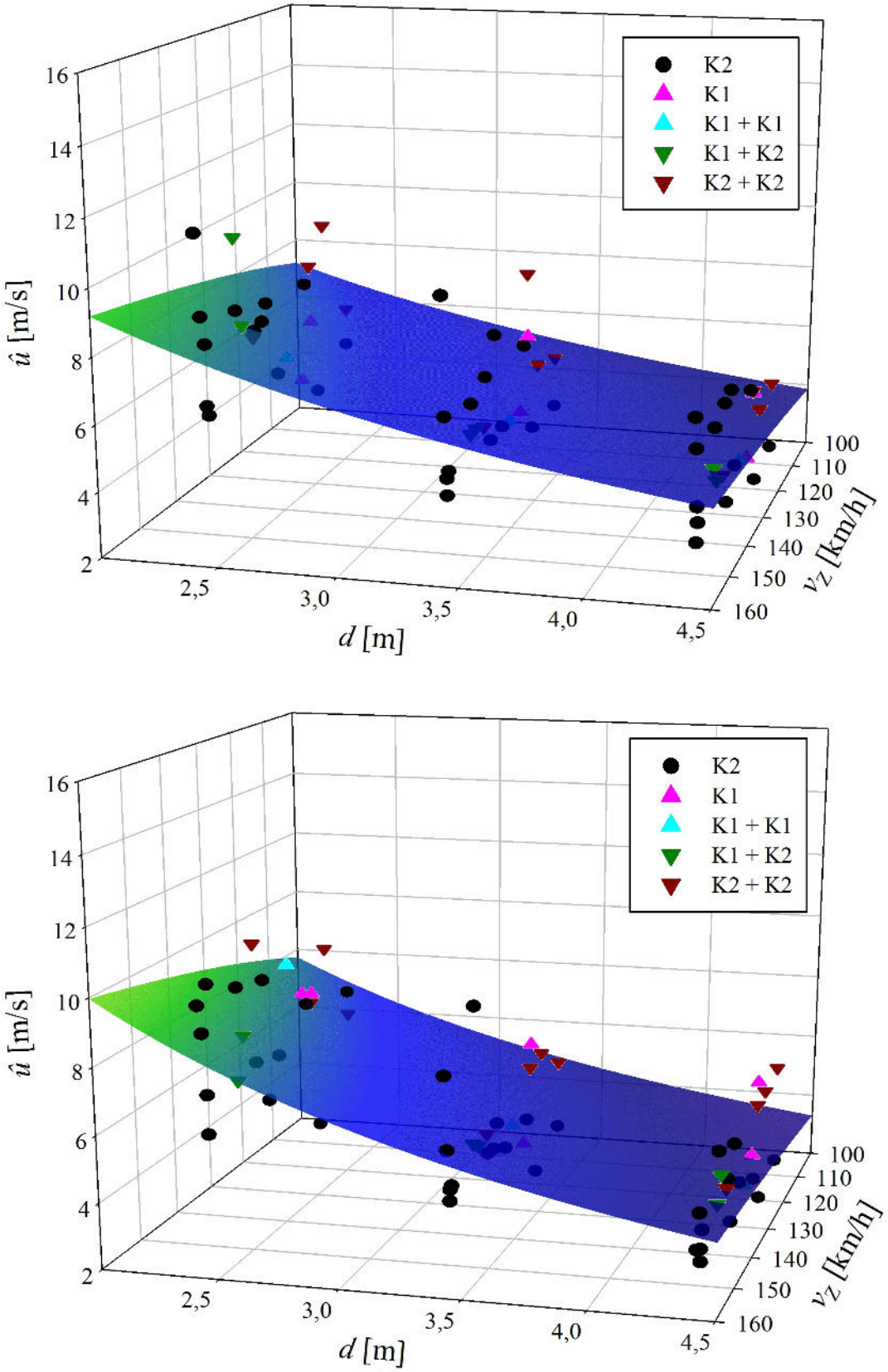


Abbildung 3.19: $\hat{u}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}430$. Unten: $R^2 = 0{,}564$.

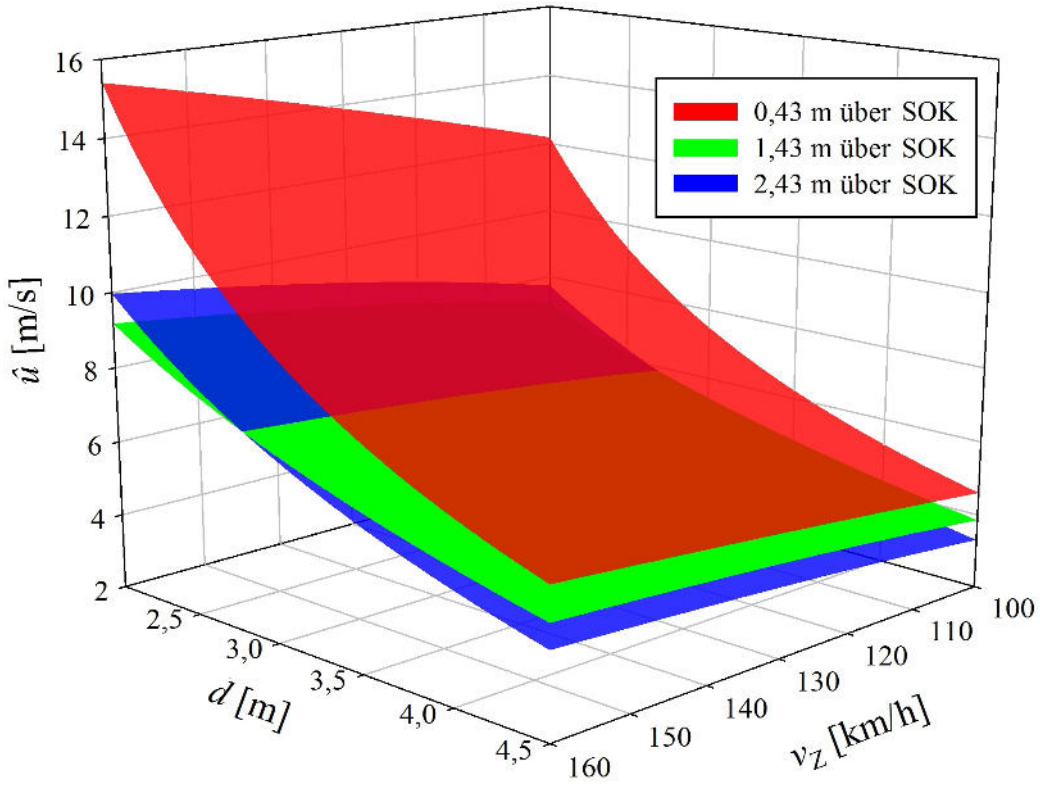


Abbildung 3.20: $\hat{u}$ als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die ungemittelten Messdaten.

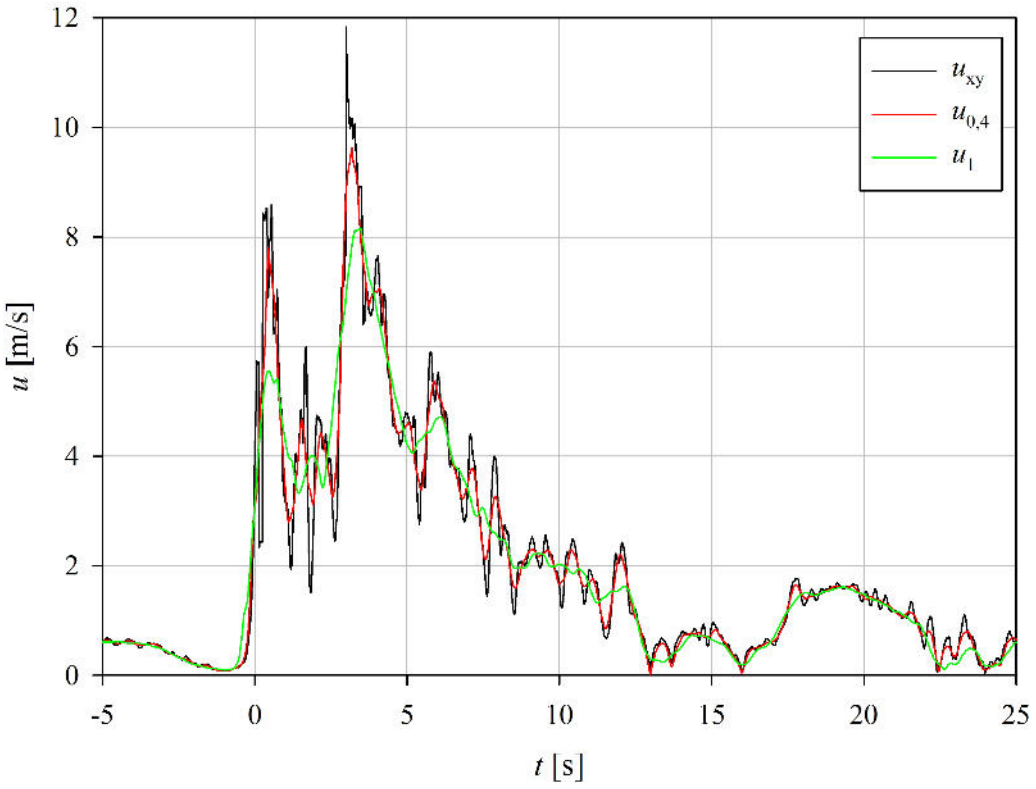


Abbildung 3.21: Auswirkung der Messdatenfilterung am Beispiel der gemessenen Windgeschwindigkeit an Messposition 1 während der Passage von Zug Nr. 5.

Zwischen $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ sind unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Messwerte keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Die Grafiken zeigen insbesondere, dass die Abhängigkeit der $\hat{u}$ von v_Z mit zunehmenden d sinkt.
Im folgenden werden die maximalen Windgeschwindigkeiten untersucht, die sich aus den gleitend gemittelten Windgeschwindigkeitsmessdaten der Doppelstockzüge ergeben. Abbildung 3.21 illustriert, wie sich die gemessenen Windkurven verändern wenn sie mit Hilfe der eingangs erwähnten Software gleitend gemittelt werden. Im Diagramm ist deutlich erkennbar, wie sich die Maxima der Kurven mit breiter werdendem Mittelungszeitintervall abflachen.
Bei der Mittelwertbildung wurden die Messdaten mit den Zeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelt. Die abgeleiteten $\hat{u}_{0,4}$ und $\hat{u}_1$ sind in den Tabellen B.3 und B.4 aufgelistet sowie in den Abbildungen B.1 bis B.2 visualisiert. Der Übersichtlichkeit halber befinden sich diese Grafiken im Anhang B.2.1.
Erneut wurden Regressionsgleichungen vom gleichen Typus wie in (3.1) in die Daten eingepasst:

$$\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \hat{u}_{0,4} = \exp\left(4{,}7139 - 33{,}688\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}4271\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \hat{u}_{0,4} = \exp\left(3{,}3443 - 45{,}003\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}7649\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \hat{u}_{0,4} = \exp\left(4{,}0212 - 49{,}290\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}1448\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \hat{u}_1 = \exp\left(4{,}3357 - 22{,}596\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}3582\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \hat{u}_1 = \exp\left(3{,}1806 - 35{,}002\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}7953\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \hat{u}_1 = \exp\left(3{,}4532 - 38{,}014\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}9565\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Die Graphen zu diesen Gleichungen den Abbildungen können B.1 bis B.2 entnommen werden. Eine vergleichende Darstellung der Graphen findet sich in Abbildung 3.22. Der besseren Vergleichbarkeit wegen ist die Skalierung der Ordinate in den Abbildungen 3.20 und 3.22 identisch. Beim Blick auf die genannten Abbildungen wird deutlich, dass sich die Graphen mit breiter werdendem Mittelungszeitintervall abflachen sowie näher zusammen rücken. Erneut wird deutlich, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten mit wachsender Höhe über der Schienenoberkante bis zu einer gewissen Höhe sinken und ab dort stagnieren und dass die Abhängigkeit der maximalen Windgeschwindigkeiten von der Zuggeschwindigkeit mit wachsender Entfernung von der Gleisachse sinkt.

3.5.1.2 S-Bahn Baureihe 425

Auch von der S-Bahn Baureihe 425 konnten 10 Zugpassagen ohne Anwesenheit der Mobilen Schnellbauwand messtechnisch erfasst werden, so dass eine grafische Auswertung bzw. Darstellung noch sinnvoll ist. Analog zu den Doppelstockzügen sind die gemessenen maximalen Windgeschwindigkeiten $\hat{u}$ für die oben genannten S-Bahnen in den Abbildungen 3.23 und 3.24 dargestellt. Die Grafiken für $\hat{u}_{0,4}$ und $\hat{u}_1$ finden sich in den Abbildungen B.4 bis B.7 im Anhang. Die zugehörigen Zahlenwerte können den Tabellen 3.1, 3.2 und B.2 entnommen werden. Die Darstellung der Abhängigkeiten $\hat{u}(v_\mathrm{z},d,z)$, $\hat{u}_{0,4}(v_\mathrm{z},d,z)$ und $\hat{u}_1(v_\mathrm{z},d,z)$ sind in den Abbildungen 3.24, unten und 3.25 zu sehen.

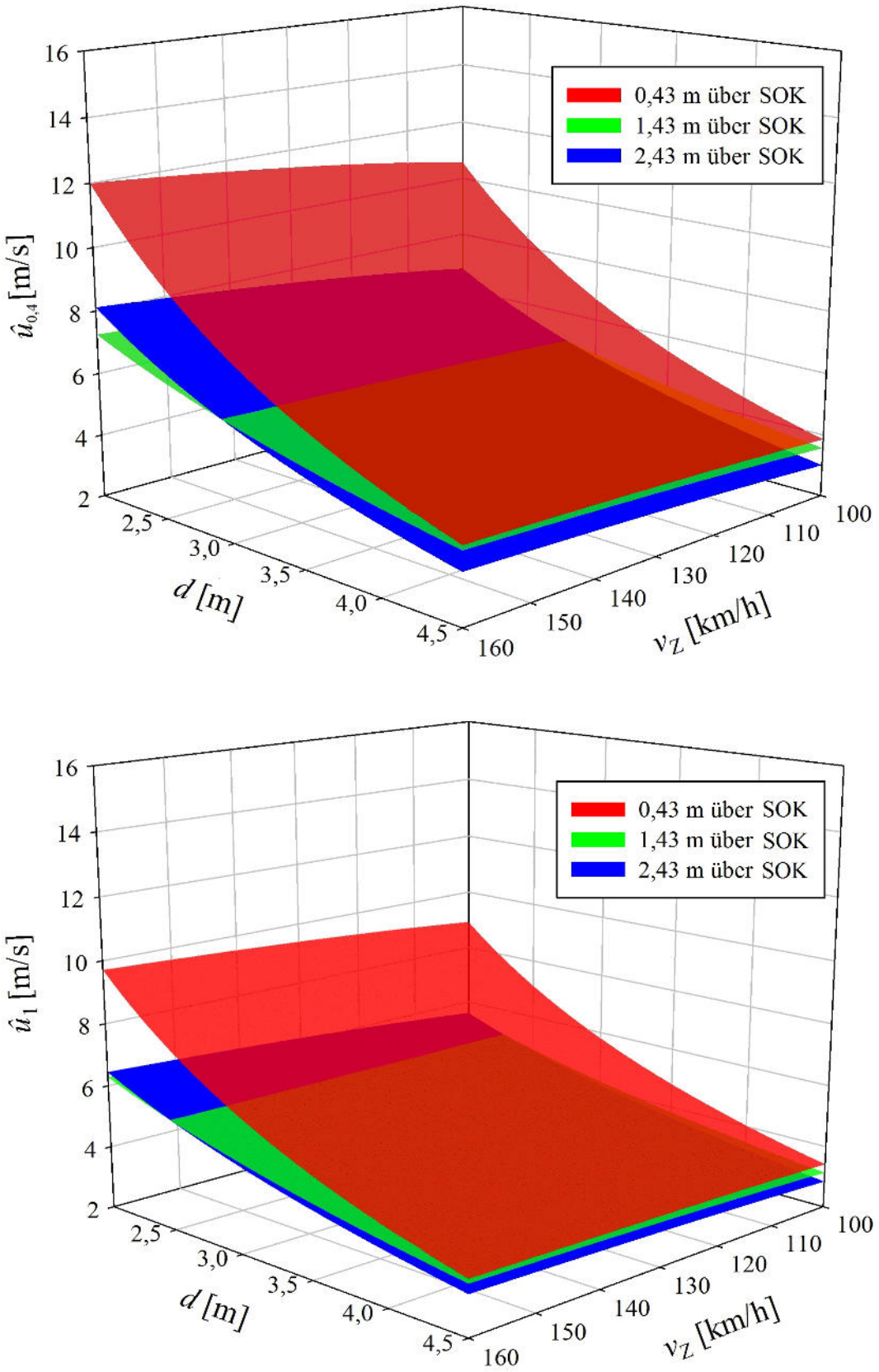


Abbildung 3.22: $\hat{u}_{0,4}$ (oben) und $\hat{u}_1$ (unten) als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten.

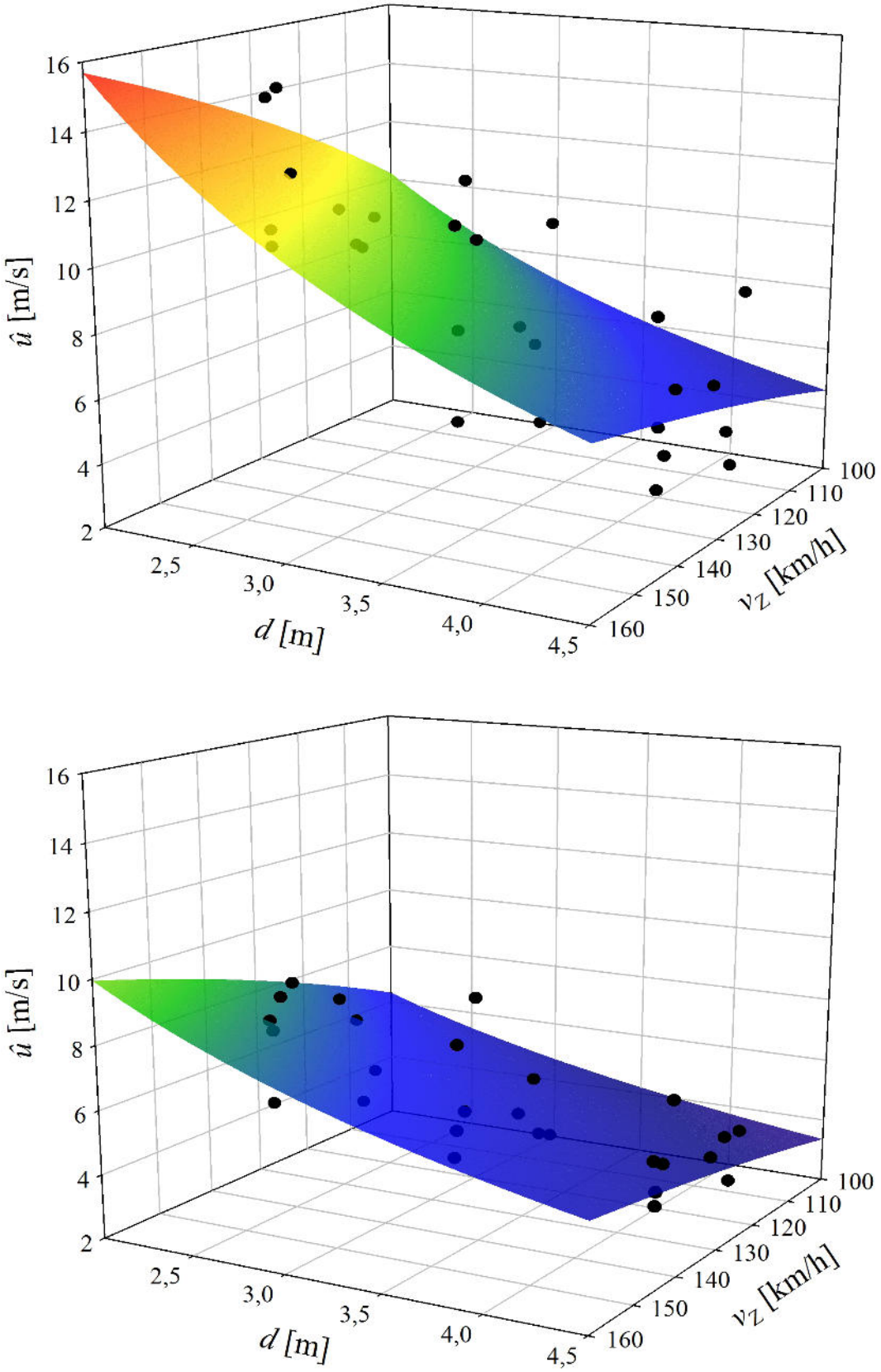


Abbildung 3.23: $\hat{u}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}530$. Unten: $R^2 = 0{,}287$.

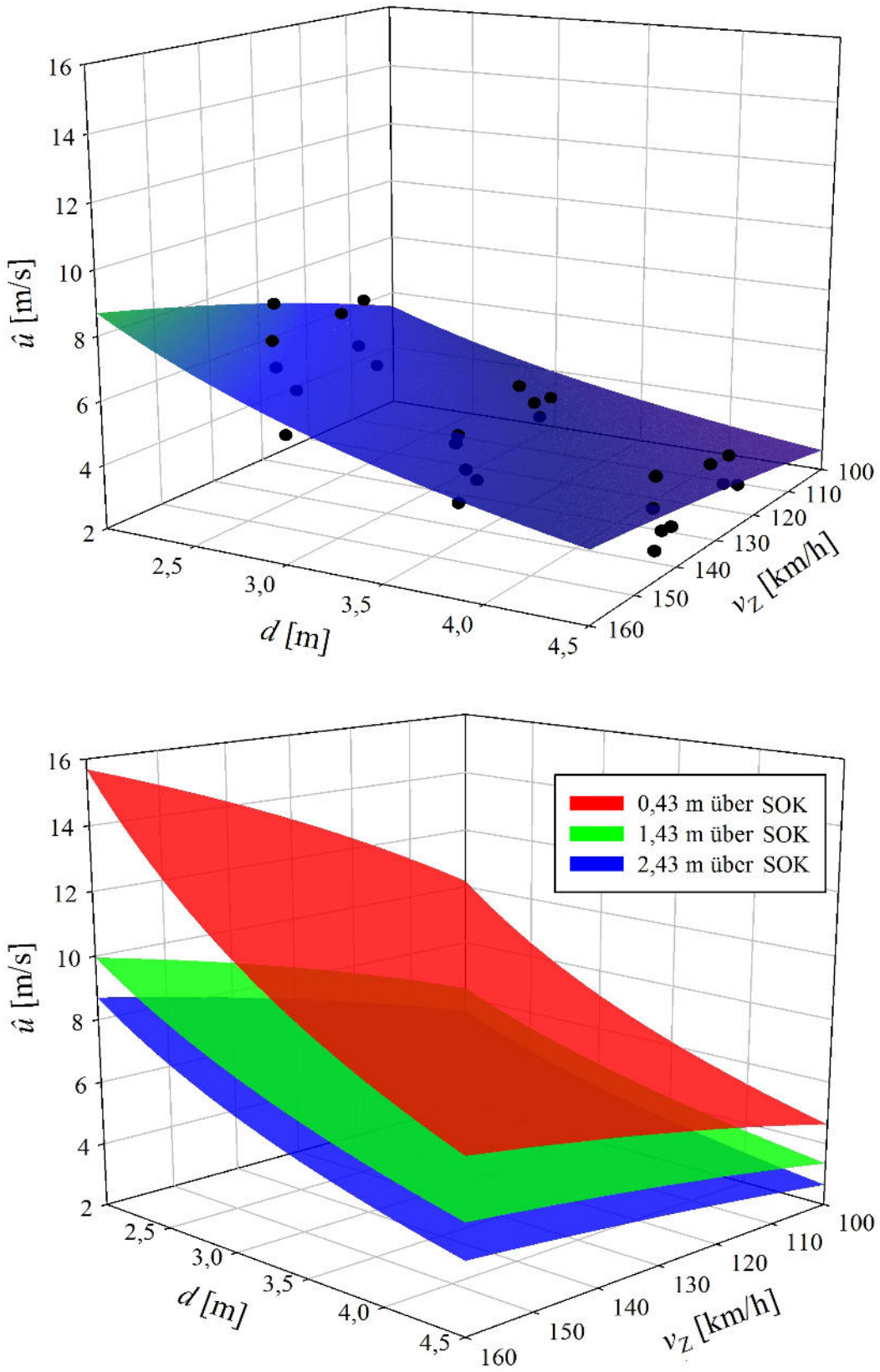


Abbildung 3.24: $\hat{u}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten, $R^2 = 0{,}530$ (oben). Regressionsfunktionen für $\hat{u}$ aus den Abbildungen 3.23 und 3.24, oben (unten).

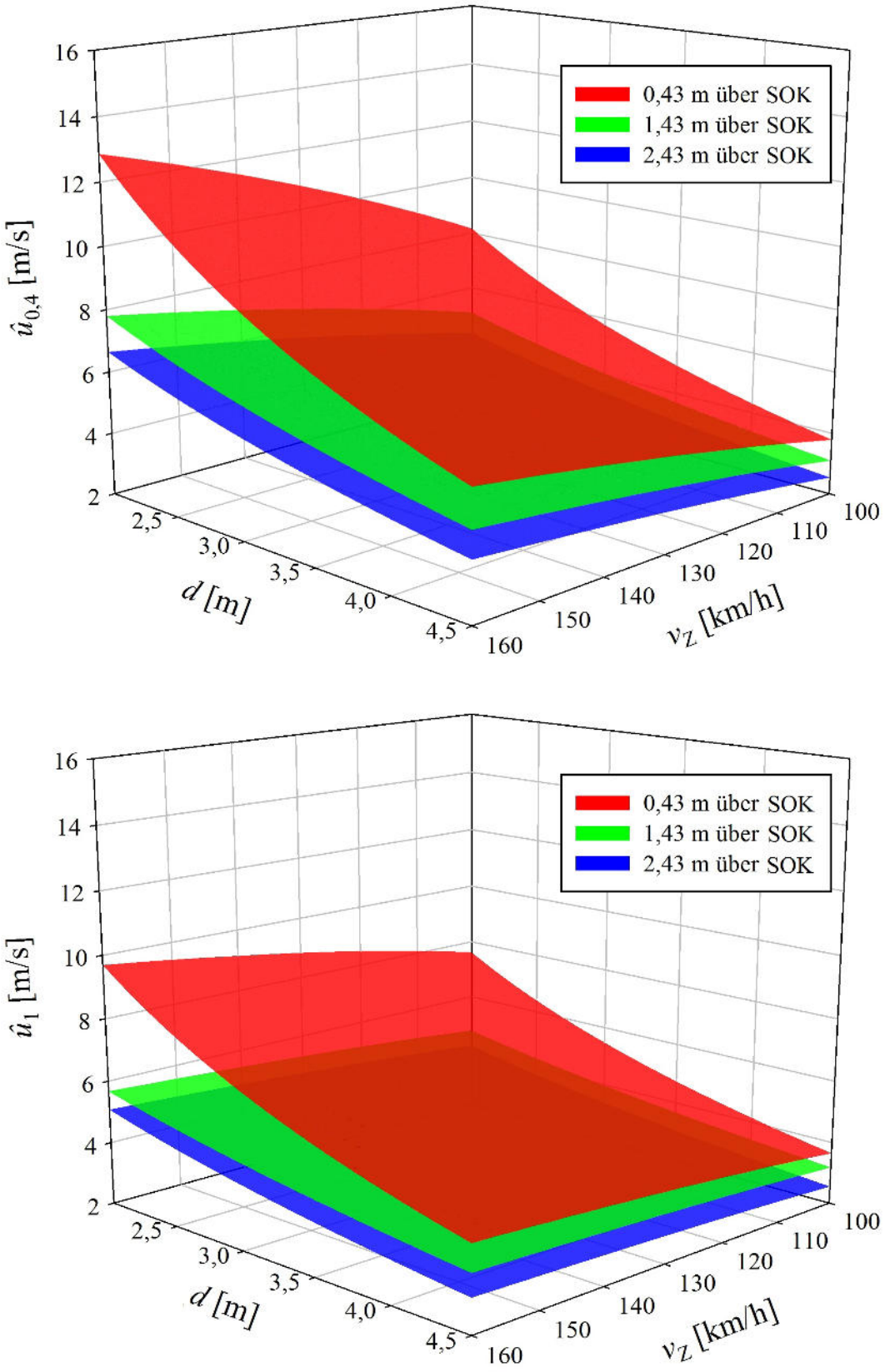


Abbildung 3.25: $\hat{u}_{0,4}$ (oben) und $\hat{u}_1$ (unten) als Funktion von d, v_Z und z für die S-Bahnen Baureihe 425 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten.

Die Gleichungen zu den Graphen der Regressionsfunktionen in den Abbildungen 3.24 und 3.25 lauten:

$$\begin{aligned} z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u} = \exp\left(5{,}0496 - 114{,}682\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}1171\,\sqrt{d}\right) \\ z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u} = \exp\left(4{,}3235 - 120{,}350\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}9010\,\sqrt{d}\right) \\ z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u} = \exp\left(4{,}3875 - 122{,}040\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}0337\,\sqrt{d}\right) \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned} z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u}_{0,4} = \exp\left(4{,}8487 - 121{,}335\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}0860\,\sqrt{d}\right) \\ z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u}_{0,4} = \exp\left(3{,}7575 - 114{,}023\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}7010\,\sqrt{d}\right) \\ z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u}_{0,4} = \exp\left(3{,}7762 - 115{,}034\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}7516\,\sqrt{d}\right) \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned} z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u}_1 = \exp\left(4{,}1458 - 64{,}399\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}0403\,\sqrt{d}\right) \\ z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u}_1 = \exp\left(2{,}8315 - 46{,}997\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}5673\,\sqrt{d}\right) \\ z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{u}_1 = \exp\left(2{,}9385 - 51{,}175\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 0{,}7027\,\sqrt{d}\right) \end{aligned} \tag{3.6}$$

Die Aussagen zu den Graphen für die Doppelstockzüge gelten im Wesentlichen auch für die Graphen in den Abbildungen 3.23 bis 3.25 sowie B.4 bis B.7. Im Vergleich zu den Doppelstockzügen ist bei den S-Bahnen der Unterschied der maximalen Windgeschwindigkeiten zwischen den Messhöhen $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ etwas höher, was in den unterschiedlichen Zughöhen begründet liegt.

3.5.2 Windbeschleunigung

Wie in Kapitel 2 ausgeführt wurde, spielt auch die Windbeschleunigung eine Rolle bei der Entstehung aerodynamisch induzierter Kräfte auf Menschen. Die durch die Windbeschleunigung induzierte Kraft liefert einen merklichen Beitrag zur gesamten aerodynamischen Belastung und kann deshalb nicht vernachlässigt werden.

3.5.2.1 Doppelstockzug Baureihe 446

Die Auswertung der Windbeschleunigung erfolgt analog zur Auswertung der Windgeschwindigkeit, d. h. es werden die Maxima $\hat{a}$ in den abgeleiteten Windbeschleunigungskurven aufgesucht und über den Größen v_Z und d aufgetragen. Die Windbeschleunigungskurven werden durch zeitliche Ableitung der Windgeschwindigkeitskurven gewonnen, wobei erneut die in Abschnitt 3.5.1 genannte gleitende Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ ($\hat{a}_{0,4}$) und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ ($\hat{a}_1$) angewandt werden. Die Beschleunigungskurven, welche sich aus den ungemittelten Windgeschwindigkeitskurven ergaben, wurden nicht verwendet, da hier extreme Ausreißer durch Signalstörungen auftreten. In den Abbildungen 3.26 und 3.27, oben sind die $\hat{a}_{0,4}$ als Funktion von d und v_Z inklusive Regressionsfunktionen dargestellt. In Abbildung 3.27, unten sind diese Regressionsfunktionen vergleichend dargestellt sowie in Abbildung 3.28 für die $\hat{a}_1$. Die

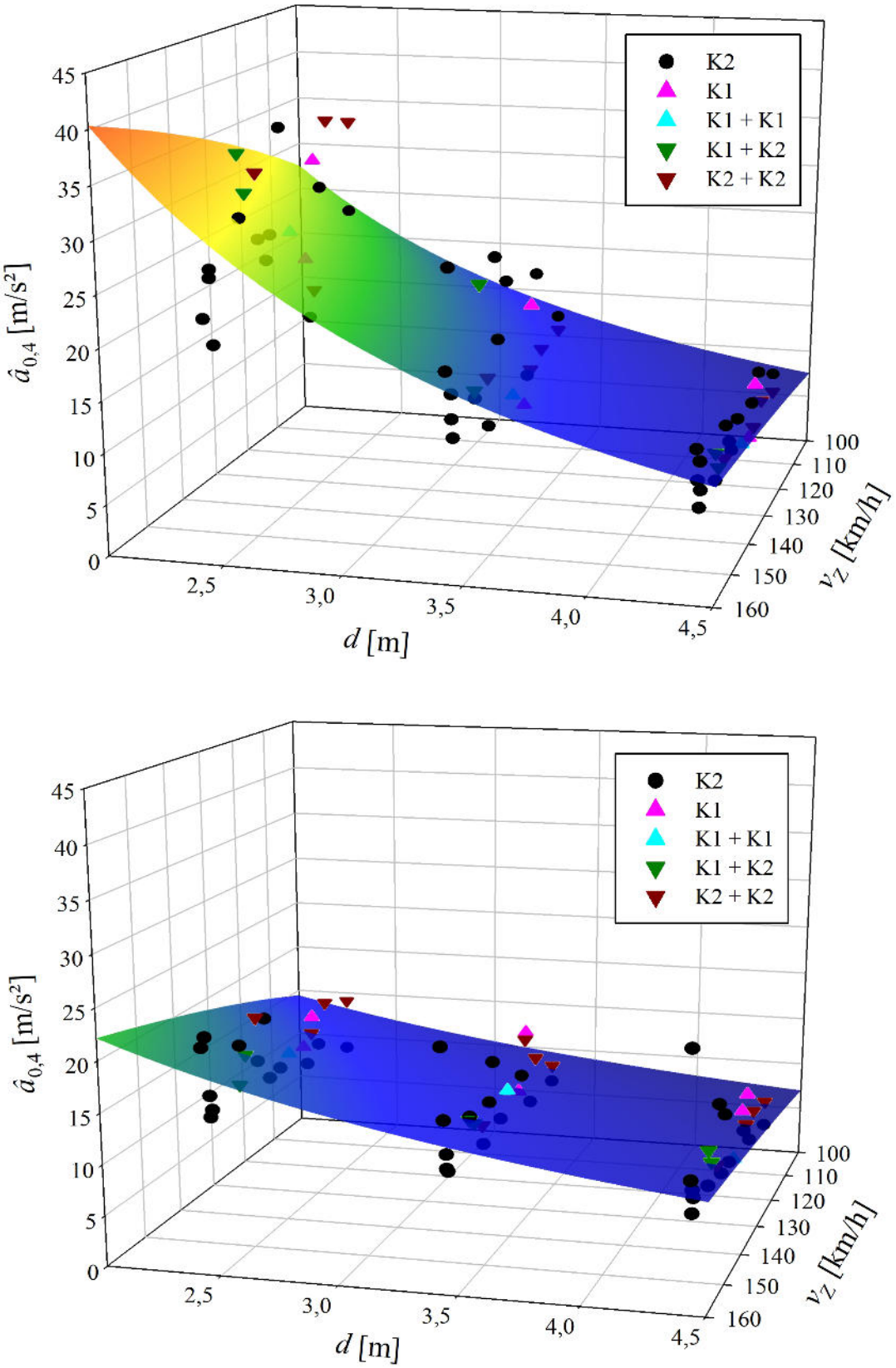


Abbildung 3.26: $\hat{a}_{0,4}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}700$. Unten: $R^2 = 0{,}450$.

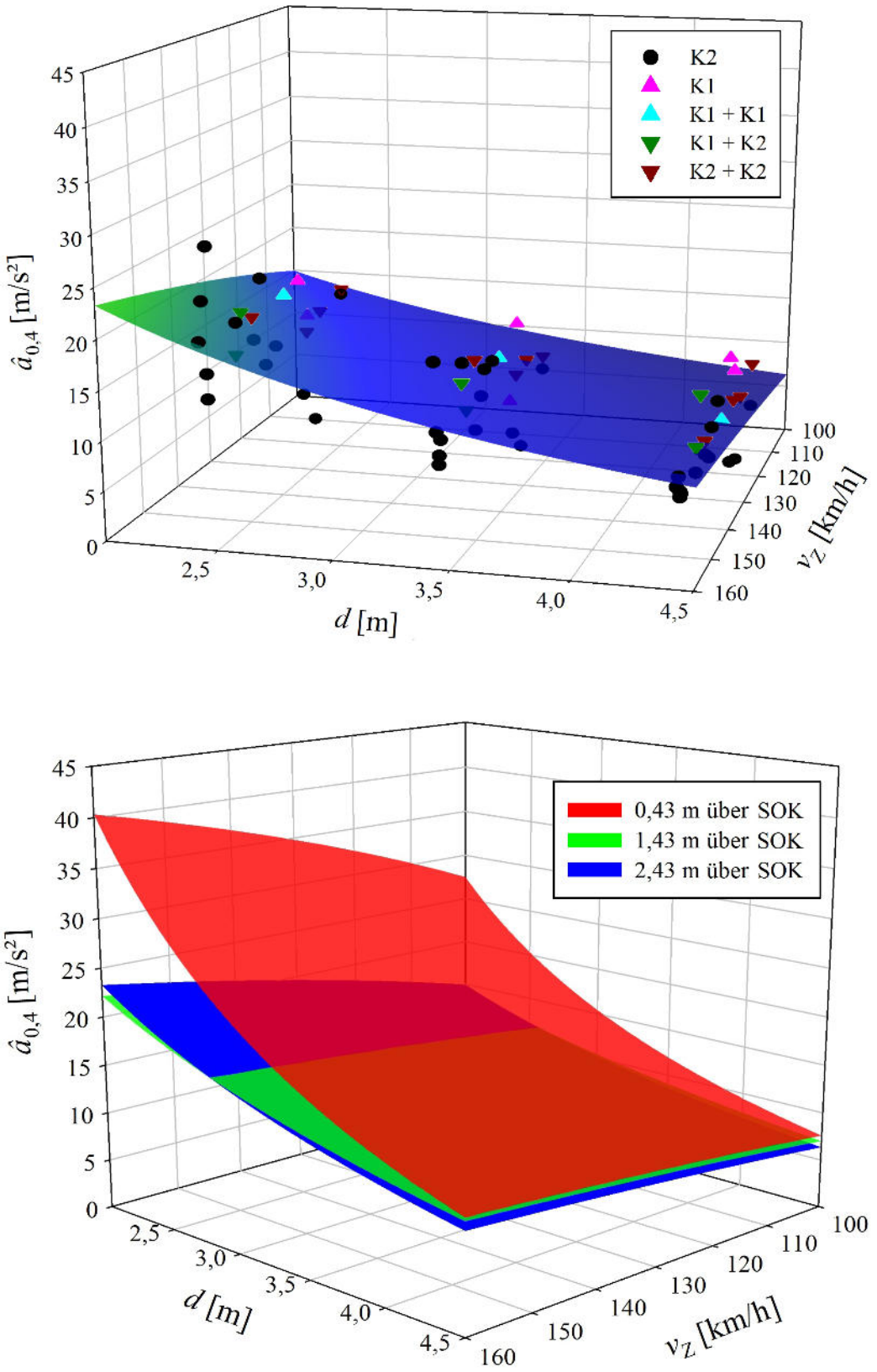


Abbildung 3.27: Oben: $\hat{a}_{0,4}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}612$. Unten: $\hat{a}_{0,4}$ als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten.

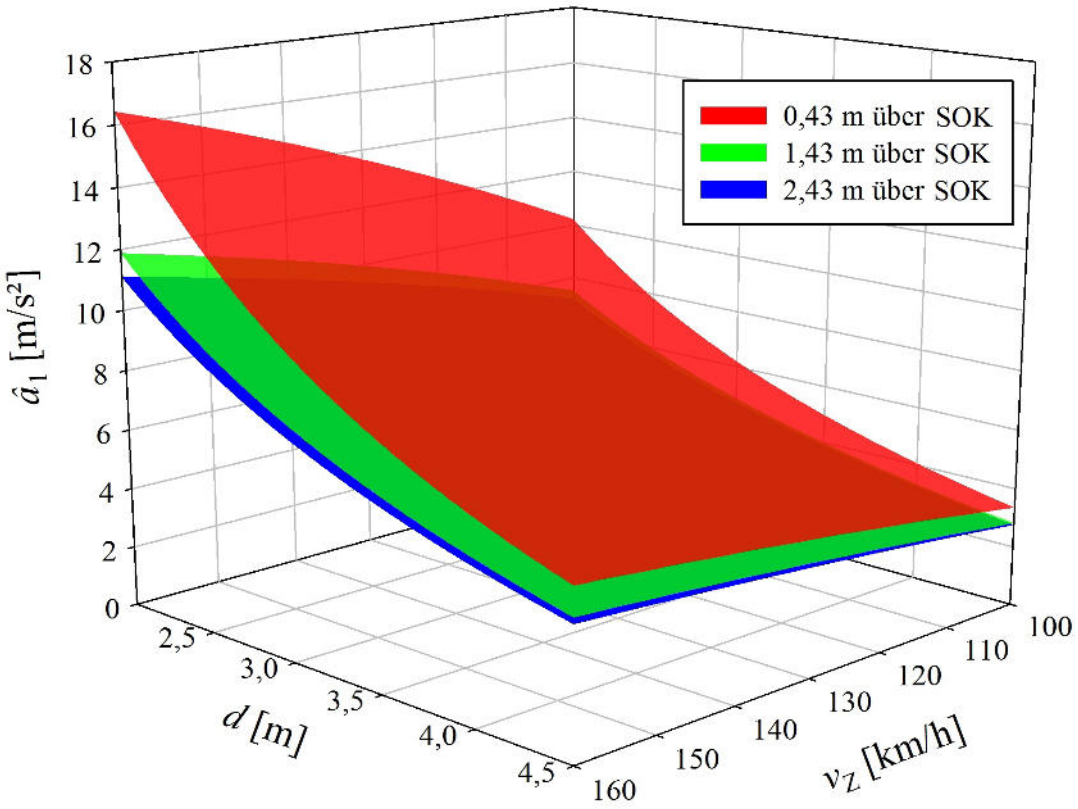


Abbildung 3.28: $\hat{a}_1$ als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten.

zugehörigen Gleichungen sind in (3.7) und (3.8) angegeben. Die Darstellung der $\hat{a}_1$ als Funktion von d und v_Z finden sich im Anhang in den Abbildungen B.7, unten und B.8.

$$\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{0,4} = \exp\left(6{,}9107 - 102{,}010\, v_Z^{-1} - 1{,}8214\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{0,4} = \exp\left(5{,}2556 - 114{,}396\, v_Z^{-1} - 1{,}0203\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{0,4} = \exp\left(5{,}5968 - 118{,}231\, v_Z^{-1} - 1{,}2092\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_1 = \exp\left(5{,}8185 - 126{,}937\, v_Z^{-1} - 1{,}5738\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_1 = \exp\left(5{,}1998 - 122{,}445\, v_Z^{-1} - 1{,}3854\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_1 = \exp\left(5{,}0456 - 115{,}923\, v_Z^{-1} - 1{,}3538\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Wie man (3.7) und (3.8) entnimmt, lassen sich auch die $\hat{a}_{0,4}$ und $\hat{a}_1$ sehr gut mit dem in (3.1) verwendeten Funktionstyp beschreiben. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Windgeschwindigkeiten. Die Maxima zeigen eine deutliche Streuung, insbesondere in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante. In dieser Höhe über der Schienenoberkante ist die Abhängigkeit der Maxima vom Abstand zur Gleisachse stark ausgeprägt, d. h. sie steigt signifikant bei Annäherung an das Gleis. Für $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ ist kein signifikanter Unterschied in den maximalen Windbeschleunigungen bei gleichem v_Z und d festzustellen. Die Höhe der Windbeschleunigung sinkt stark mit zunehmender Breite des Mittelungszeitintervalls.

3.5.2.2 S-Bahn Baureihe 425

Ein sehr ähnliches Bild zeigt sich für die S-Bahnen Baureihe 425, wie die Abbildungen 3.29 bis 3.31 sowie B.9 und B.10 im Anhang B.2.1 demonstrieren. (3.9) und (3.10) sind die Gleichungen zu den Regressionsfunktionen in den Abbildungen.
Auch bei den maximalen Windbeschleunigungen ist der Unterschied zwischen den Messhöhen $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ bei den S-Bahnen etwas höher als bei den Doppelstockzügen. Wie bereits erwähnt, ist der Grund dafür die unterschiedliche Zughöhe

$$\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{0,4} = \exp\left(7{,}1344 - 111{,}932\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}8224\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{0,4} = \exp\left(6{,}1061 - 142{,}540\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}4020\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{0,4} = \exp\left(5{,}9887 - 149{,}349\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}3938\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{1} = \exp\left(5{,}0337 - 137{,}729\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}0222\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{1} = \exp\left(4{,}5851 - 72{,}5360\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}3001\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\quad \hat{a}_{1} = \exp\left(4{,}5400 - 70{,}0231\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}3636\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned} \tag{3.10}$$

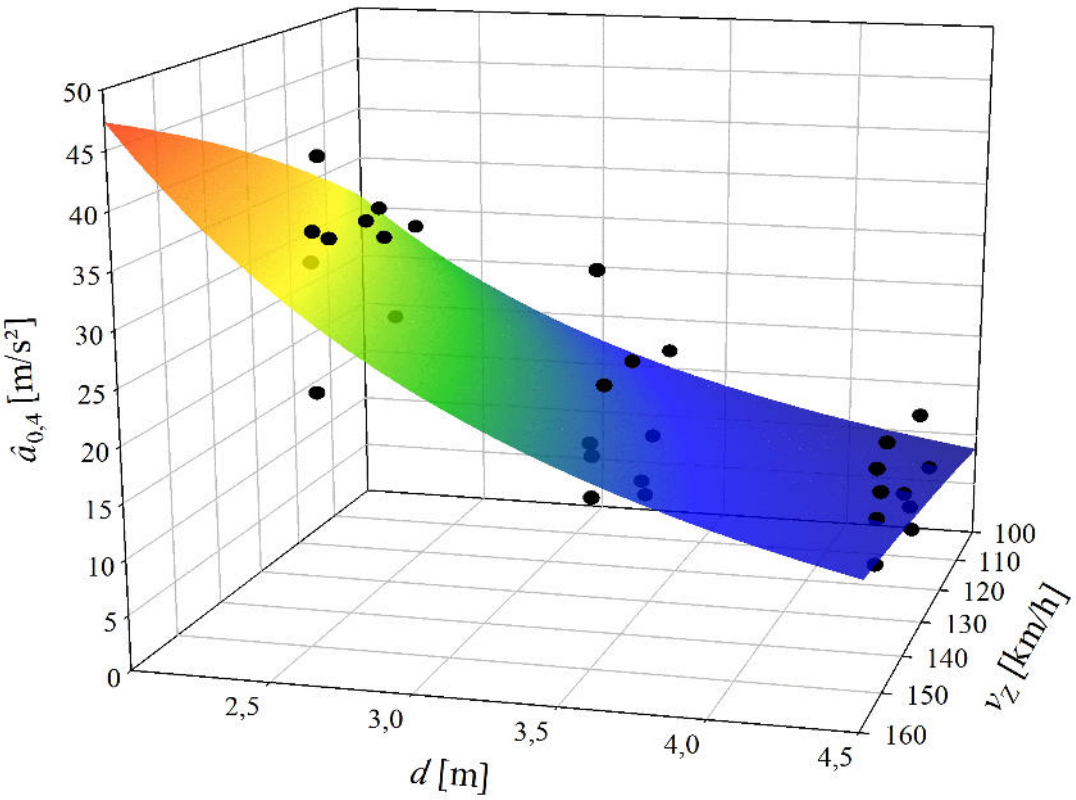


Abbildung 3.29: $\hat{a}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}696$.

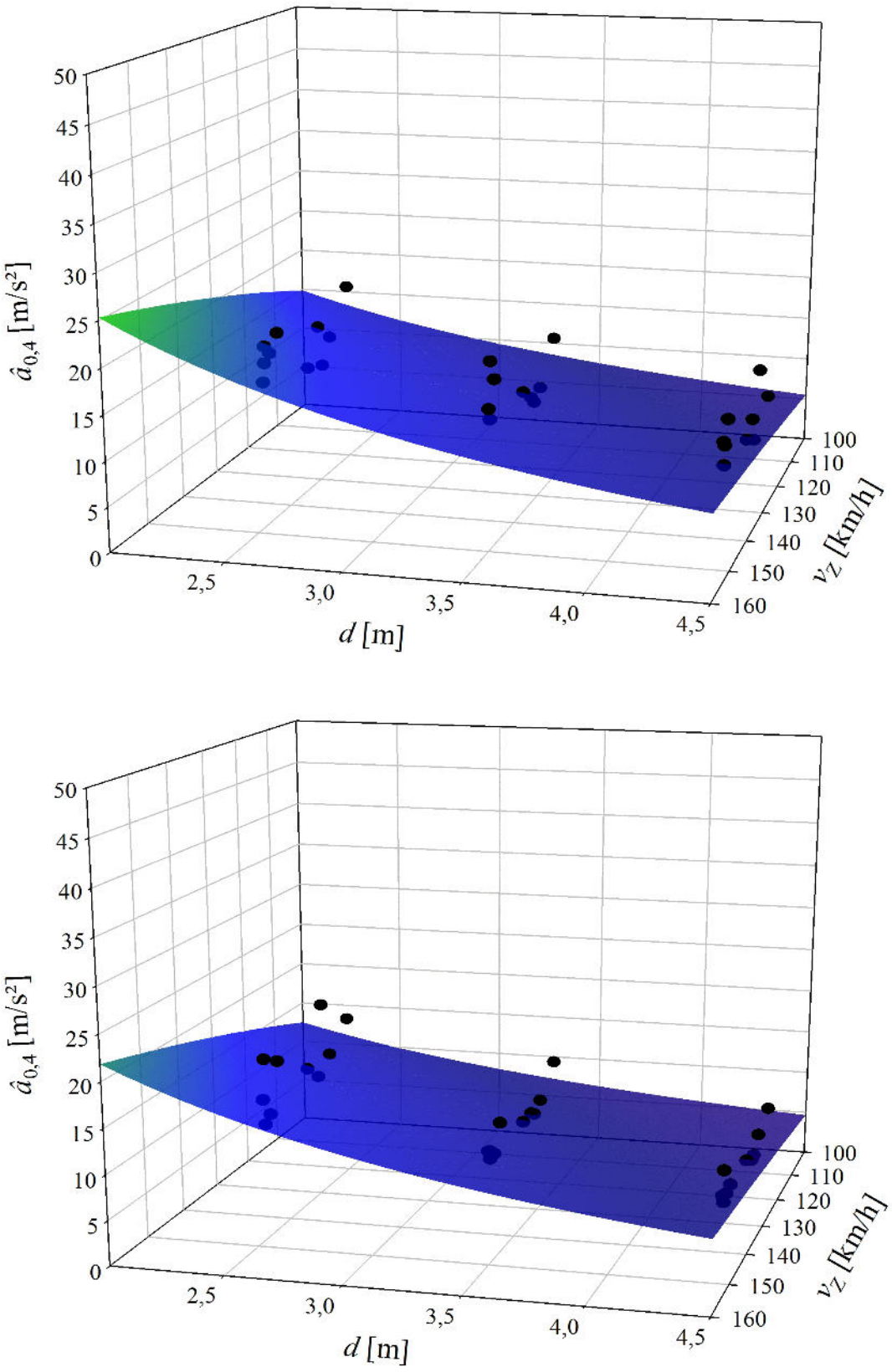


Abbildung 3.30: $\hat{a}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}360$. Unten: $R^2 = 0{,}603$.

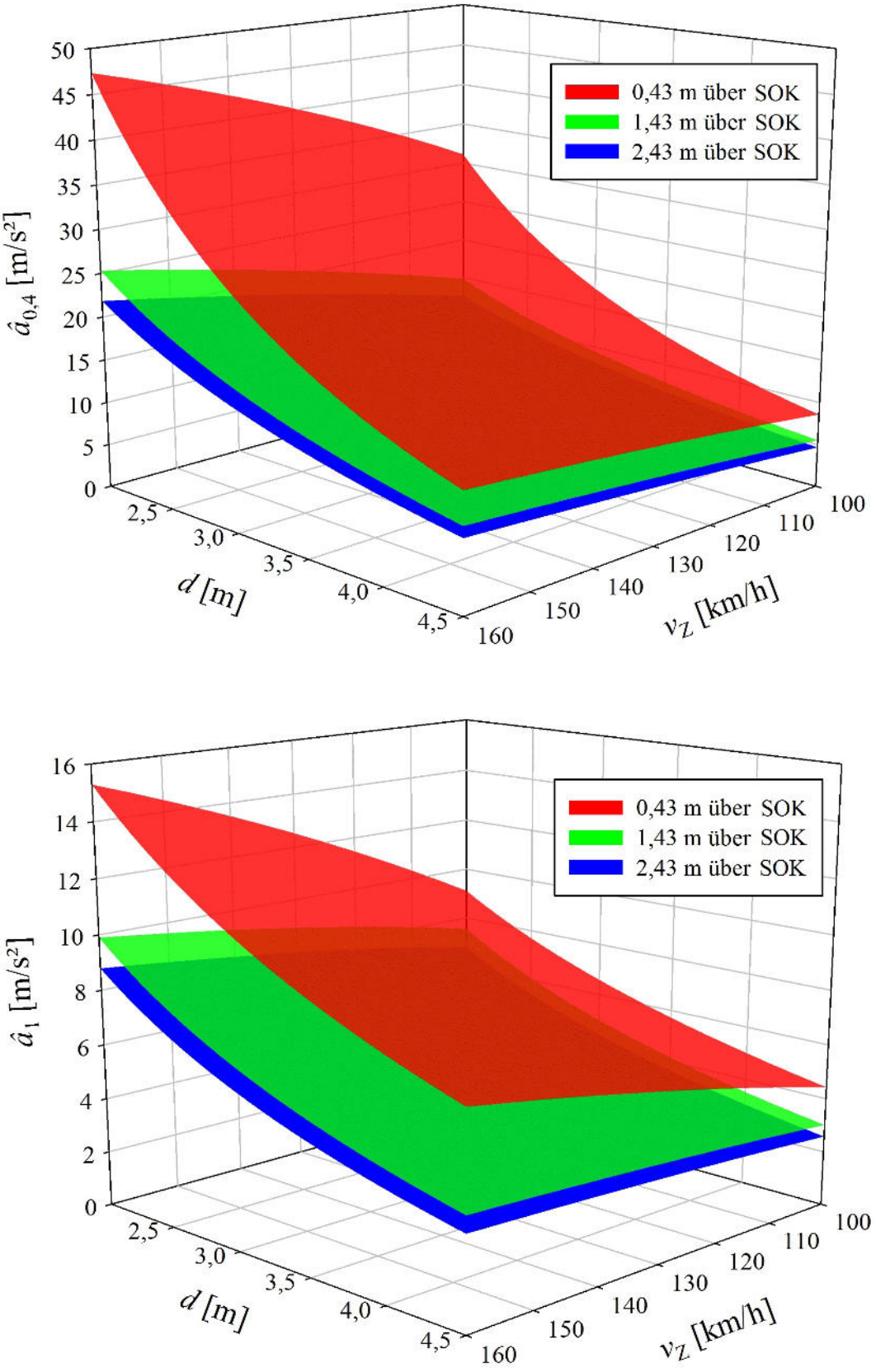


Abbildung 3.31: $\hat{a}_{0,4}$ (oben) und $\hat{a}_1$ (unten) als Funktion von d, v_Z und z für die S-Bahnen Baureihe 425 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten.

3.5.3 Druck

Ähnliches wie für die Windbeschleunigung gilt auch für Druckwellen, die primär bei der Passage von Zugbug und -heck auftreten. In der Regel ist die Druckwelle bei Passage des Zugbuges am höchsten, weshalb diese im Folgenden im Fokus steht. Ebenso wie die Windbeschleunigung wirken auch Druckwellen auf Menschen am Gleis und damit auf deren Gleichgewicht. Im Regelwerk sind 8 mbar als Grenzwert angegeben, jedoch finden sich in der Literatur auch signifikant geringere Grenzwerte im Bereich von 3 mbar bis 6 mbar [5, 19, 52, 58, 78, 92].

3.5.3.1 Doppelstockzug Baureihe 446

Analog zur maximalen Windgeschwindigkeit und -beschleunigung wurden die während der Passagen der Doppelstockzugbuge gemessenen Druckamplituden Δp über der Zuggeschwindigkeit und dem Abstand zur Gleisachse aufgetragen. Die Abbildungen 3.32 bis 3.34 zeigen das Ergebnis mitsamt der Graphen von Regressionsfunktionen.
Auffallend ist, dass sich die gemessenen Δp außergewöhnlich gut mit dem Funktionstyp aus (3.1) beschreiben lassen. Die Streuungen der Δp ist im Vergleich zu den Streuungen von $\hat{u}$ und $\hat{a}$ sehr klein. Es lässt sich praktisch keine Höhenabhängigkeit – also von z – feststellen, wie man aus Abbildung 3.34 ersieht. Die Gleichungen für die Regressionsfunktionen entnimmt man (3.11).

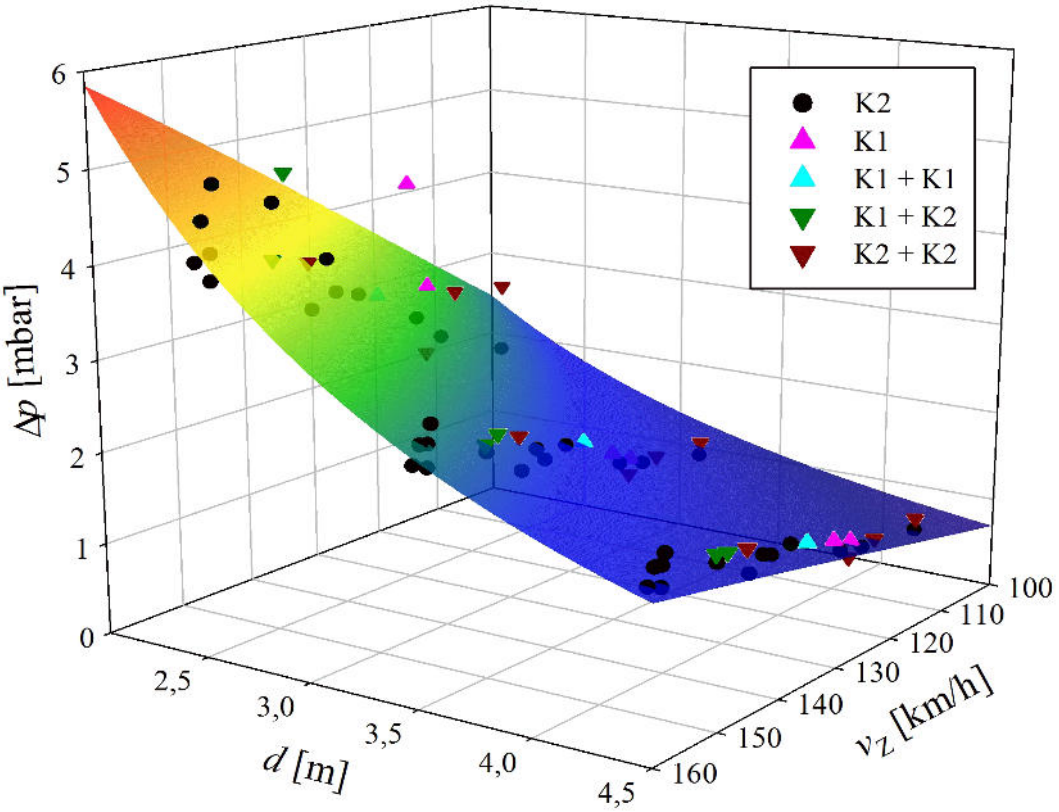


Abbildung 3.32: Δp für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. $R^2 = 0{,}926$.

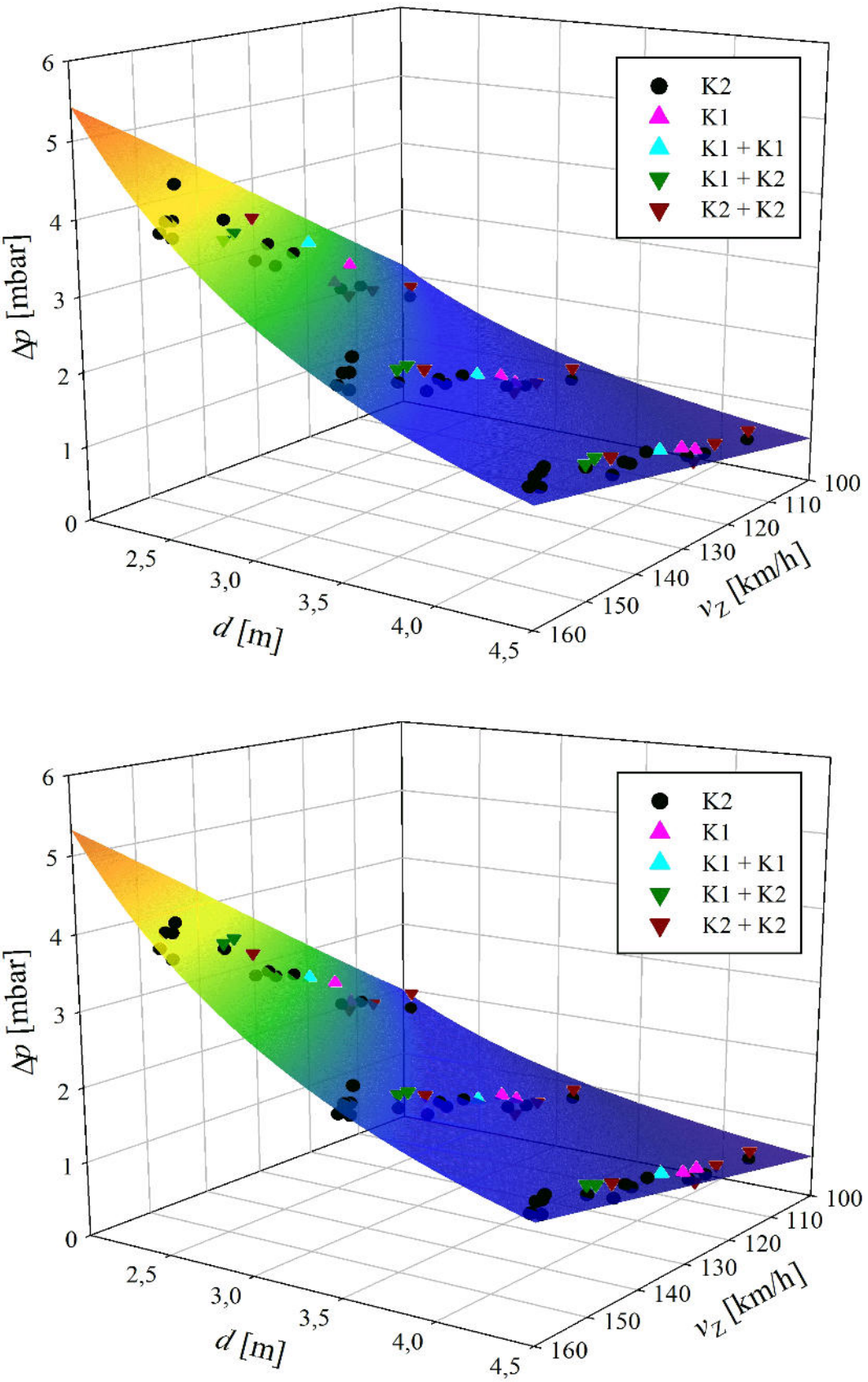


Abbildung 3.33: Δp für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. Oben: $R^2 = 0{,}969$. Unten: $R^2 = 0{,}983$.

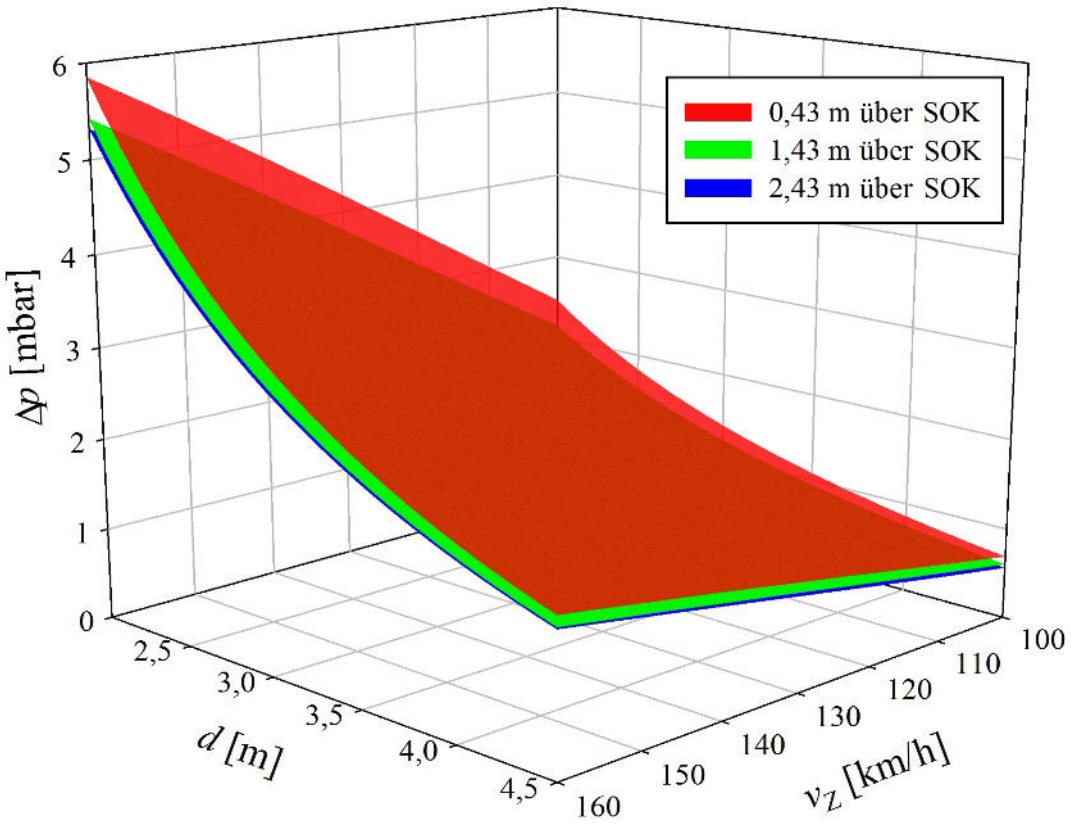


Abbildung 3.34: Δp als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446.

$$
\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \Delta p = \exp\left(5{,}7573 - 230{,}499\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}8025\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \Delta p = \exp\left(5{,}7801 - 246{,}812\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}8010\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \Delta p = \exp\left(5{,}8420 - 261{,}634\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}7920\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned}
\tag{3.11}
$$

3.5.3.2 S-Bahn Baureihe 425

Nahezu das gleiche Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Δp, hervorgerufen durch die S-Bahnen Baureihe 425. Hier fällt lediglich auf, dass das Niveau der Δp geringfügig niedriger ist als bei den Doppelstockzügen Baureihe 446, was in den kleineren Frontflächen der S-Bahnen begründet liegt. Die graphische Aufarbeitung der Messergebnisse ist in den Abbildungen 3.35 und 3.36 mitsamt Regressionsgleichungen dargestellt. (3.12) sind die zu den Graphen gehörigen Gleichungen.

$$
\begin{aligned}
z = 0{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \Delta p = \exp\left(5{,}6646 - 232{,}047\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}8203\,\sqrt{d}\right)\\
z = 1{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \Delta p = \exp\left(5{,}6004 - 236{,}521\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}7723\,\sqrt{d}\right)\\
z = 2{,}43\,\mathrm{cm}: &\qquad \Delta p = \exp\left(5{,}6805 - 228{,}185\, v_\mathrm{Z}^{-1} - 1{,}8500\,\sqrt{d}\right)
\end{aligned}
\tag{3.12}
$$

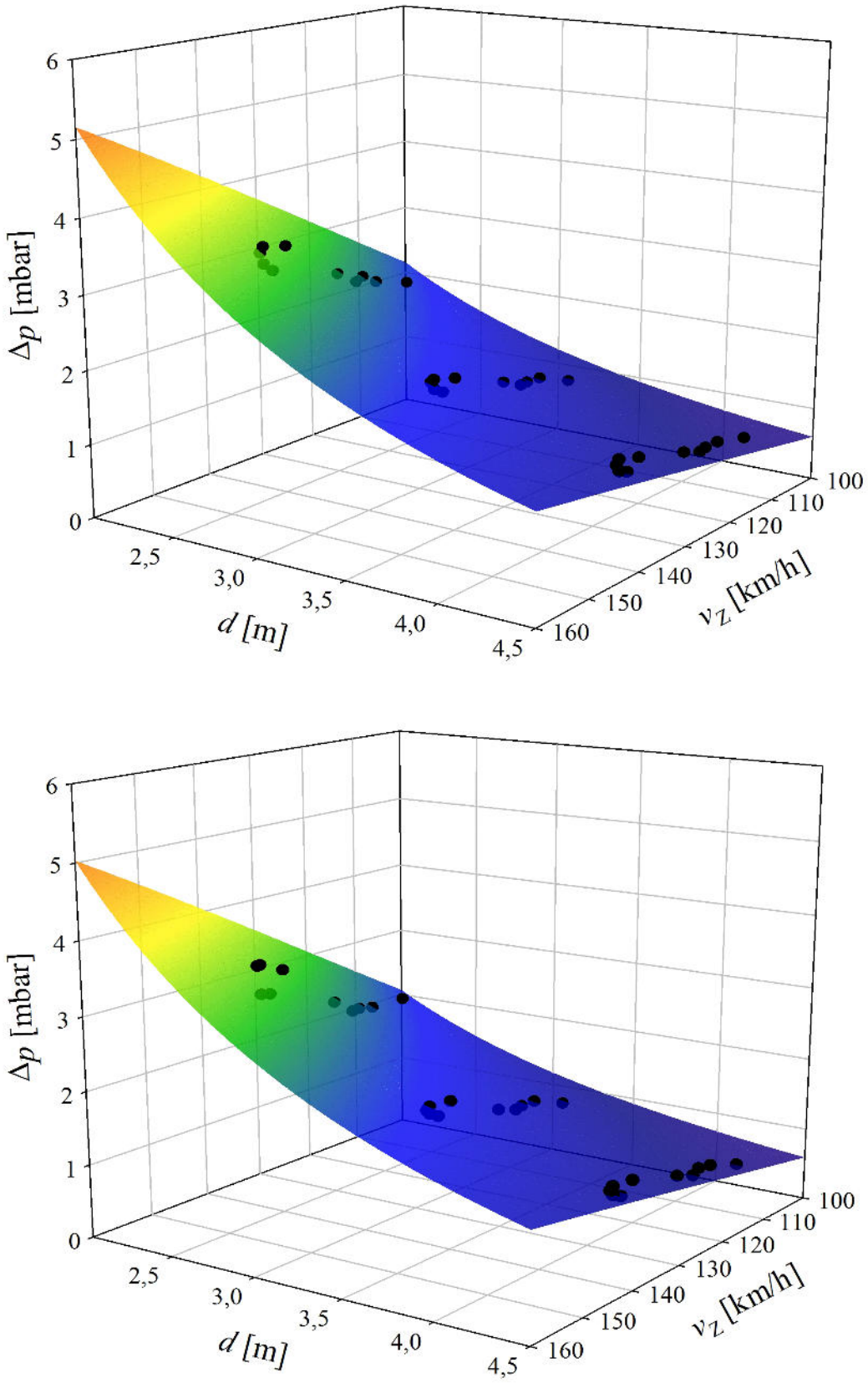


Abbildung 3.35: Δp für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. Oben: $R^2 = 0{,}983$. Unten: $R^2 = 0{,}979$.

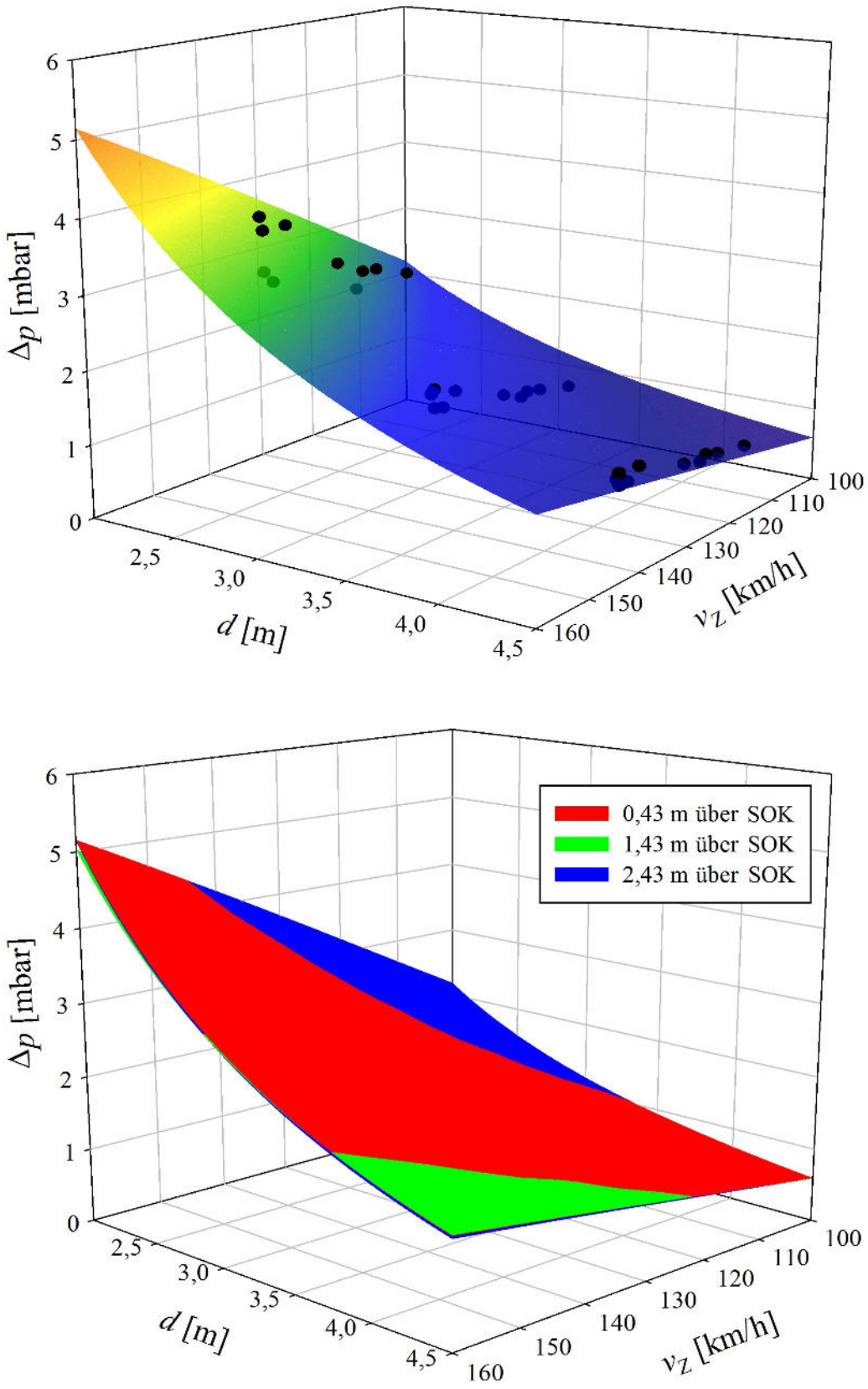


Abbildung 3.36: Oben: Δp für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. $R^2 = 0{,}949$. Unten: Δp als Funktion von d, v_Z und z für die S-Bahnen Baureihe 425.

4 Modellierung

Zur detaillierten Erfassung der auftretenden Strömungsfelder wurden die Zugvorbeifahrten mit OpenFOAM, einem Softwarepaket für numerische Strömungsdynamik (auch computational fluid dynamics, kurz CFD genannt), simuliert. Die Erstellung der Simulationen orienierte sich an [32] und [43]. Eine detaillierte Beschreibung der Simulation erfolgt in Abschnitt 4.1. Die Simulationen wurden für fünf Zugtypen, die in Abschnitt 4.2 näher beschrieben werden, durchgeführt. Für jeden Zugtyp wurden Passagen mit Fahrtgeschwindigkeiten von $v_\mathrm{Z} = 100\,\mathrm{km/h}$ bis zu den jeweils zugelassenen Höchstgeschwindigkeiten in Schritten von $\Delta v_\mathrm{Z} = 20\,\mathrm{km/h}$ erfasst. Aus den erzeugten Simulationen wurden die Daten für die zeitlichen Windgeschwindigkeits-, Windbeschleunigungs- und Luftdruckverläufe in der Umgebung des Zuges entnommen. Diese Verläufe wurden mit den experimentell gewonnenen Daten verglichen, um die Simulationen zu validieren und das Maß der Präzision der Modellvorhersagen zu bestimmen.

4.1 Strömungsmodell und Simulationsgeometrie

Die computergestützte Simulation der Zugströmung beruht auf der Lösung der beteiligten strömungsmechanischen Differentialgleichungen, insbesondere der Navier-Stokes Gleichung. Ein Verfahren zur analytischen Lösung der turbulenten Navier-Stokes Gleichung ist nach wie vor nicht bekannt, weswegen auf numerische, iterative Lösungsverfahren zurückgegriffen wird. Die verwendete Simulationssoftware wendet hierbei das Finite-Volumen-Verfahren an.
Das Kernprinzip dieses Verfahrens ist die Diskretisierung des Fluidvolumens, der Zeit und der beteiligten physikalischen Größen. Dies bedeutet, dass das zu berechnende Fluidvolumen in zahlreiche Teilvolumina, auch Zellen genannt, unterteilt wird. Jedem dieser Teilvolumina wird ein Wert für jede zu berechnende physikalische Größe, wie beispielsweise Druck oder Strömungsgeschwindigkeit, zugeordnet.
Zu Beginn der Simulation werden die physikalischen Größen durch nutzerdefinierte Werte initialisiert. Das Programm errechnet dann, wie sich die physikalischen Größen innerhalb eines kleinen Zeitschrittes δt, vorgegeben durch die Strömungsgleichungen, entwickeln. Während der Zugpassagen liegt die Länge des Zeitschrittes δt in der Größenordnung von etwa $10\,\mu\mathrm{s}$ bis etwa $100\,\mu\mathrm{s}$. Die gesamte simulierte Zeitspanne der Strömung pro Zugpassage liegt, je nach Zugtyp, im Bereich von 10 s bis 20 s.
Die Simulation der Strömungsturbulenzen erfordern ein gesondertes Vorgehen. Der Grund dafür ist, dass es zur direkten Berechnung turbulenter Wirbel nötig ist, auch die kleinsten vorkommenden Wirbel aufzulösen. Dies würde es erfordern, die räumliche Auflösung, und damit die Größe der Zellen, in Teilen der *Simulationsgeometrie* auf ca. $10\,\mu\mathrm{m}$ bis $100\,\mu\mathrm{m}$ zu setzen. Auch δt müsste erheblich feiner gewählt werden. Eine Strömungssimulation eines kompletten Zuges mit diesen Auflösungsanforderungen ist beim derzeitigen technischen Stand elektronischer Rechensysteme nicht realisierbar.

Um dennoch turbulente Strömung mit aktuell verfügbaren Rechenmitteln simulieren zu können, werden die Turbulenzen der Strömung modellhaft beschrieben. Hier wird das realizable k-ϵ Modell verwendet. Dabei handelt es sich um ein RANS[1]-Turbulenz-Modell, welches die Strömung in einen Mittelwert und eine turbulente Schwankung um diesen Mittelwert aufgeteilt. Die Schwankung wird durch die beiden Größen k für die turbulente kinetische Energiedichte und ϵ für dessen Dissipationsrate beschrieben. Das realizable k-ϵ Modell ist eine Weiterentwicklung des Standard k-ϵ Modells. Auf die detaillierten Hintergründe der Turbulenzmodelle soll hier aufgrund ihrer Komplexität nicht näher eingegangen werden.

Die Simulationsgeometrie ist im Ruhesystem des fahrenden Zuges aufgebaut, die Position des Zuges innerhalb der Geometrie verändert sich nicht (Abbildung 4.1). Ruhende Luft bewegt sich in diesem System mit einer Fahrtgeschwindigkeit v_Z des Zuges auf den Zug zu. Dementsprechend ist an der Stirnfläche der Simulationsgeometrie auf Seite des Zugbugs eine Strömungsgeschwindigkeit mit der Geschwindigkeit $u_0 = v_\mathrm{Z}$ angesetzt. Hierdurch wird in der Simulationsgeometrie ein Fahrtwind erzeugt. Der Fahrtwind entweicht der Simulationsgeometrie auf der rückseitigen Stirnfläche. Die Dachfläche und die Seitenflächen der Simulationsgeometrie sind nach außen offen. Dies wurde durch sogenannte „slip“ Randbedinungen umgesetzt. Der Boden der Umgebung sowie das Schotterbett bewegen sich mit der Geschwindigkeit v_Z im Verhältnis zum Zug. Dies ist durch die Wahl entsprechender Randbedingungen an den betreffenden Flächen gewährleistet.
In Anlehnung an die DIN EN 14067-4 [32] ist die Simulationsgeometrie $d_\mathrm{Sim} = 100\,\mathrm{m}$ breit und $h_\mathrm{Sim} = 50\,\mathrm{m}$ hoch. Abhängig von der Länge des jeweiligen Zuges beträgt die Länge der Simulationsgeometrie l_Sim zwischen 750 m und 1000 m.

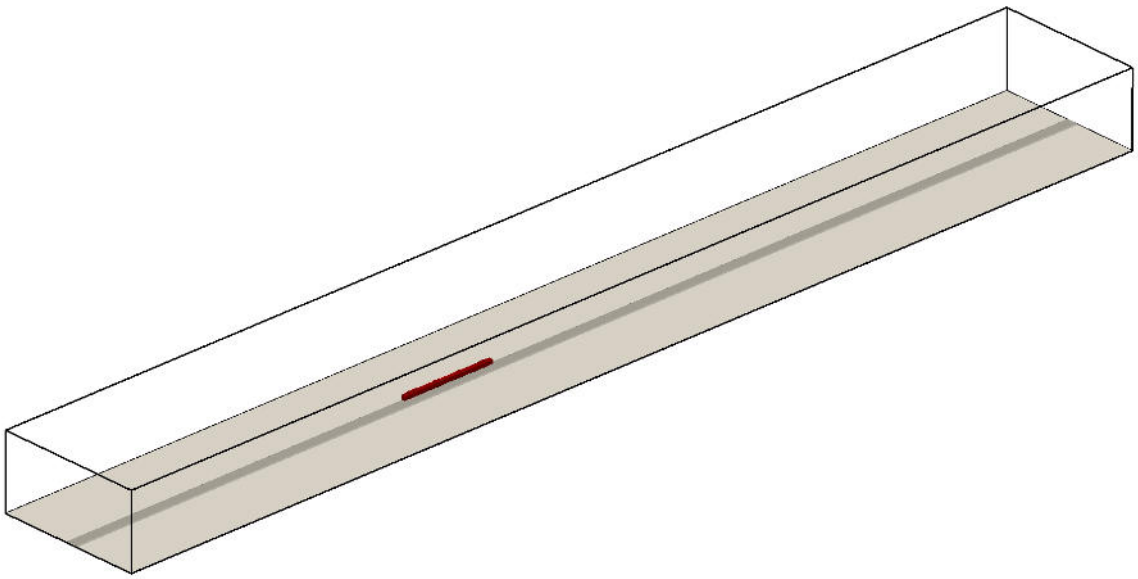


Abbildung 4.1: Darstellung der Simulationsgeometrie mit eingefügter S-Bahn Baureihe 425 (rot). Boden und Gleisbett sind grau eingefärbt. Die transparenten Grenzflächen des Volumens sind strömungsoffen.

[1] RANS = **R**eynolds **A**veraged **N**avier **S**tokes

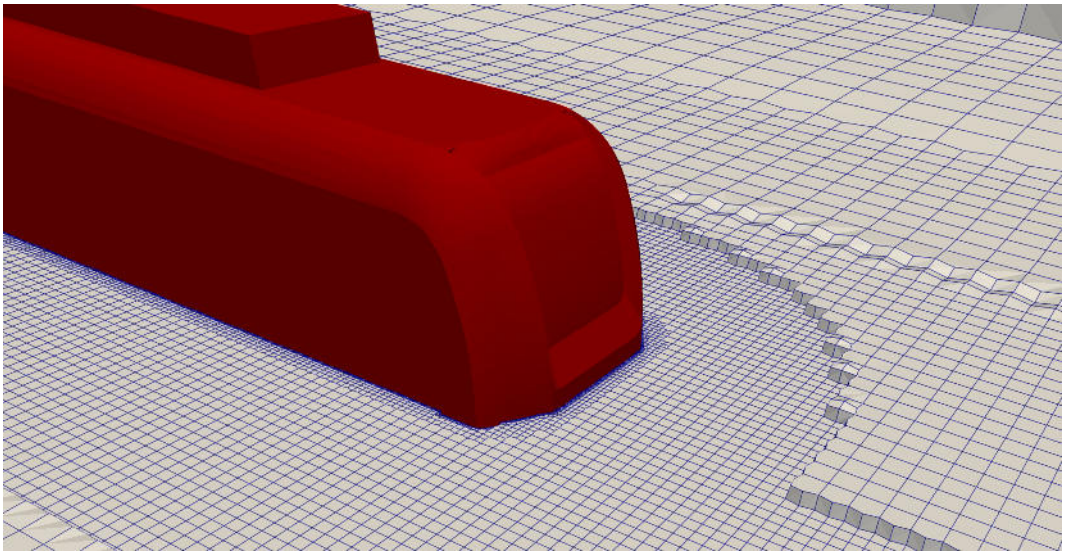


Abbildung 4.2: Darstellung der Gitterzellen in einem horizontalen Schnitt um den Kopf der simulierten S-Bahn.

Anhand von technischen Zeichnungen wurden 3D Computermodelle der verschiedenen Zugtypen angefertigt. Diese Modelle wurden anschließend in die Simulationsgeometrie eingefügt. Das den Zug umgebende Luftvolumen wurde vernetzt, das heißt in zahlreiche Teilvolumina, sogenannte Gitterzellen, unterteilt (Abbildung 4.2). Dies ist auch als „meshing“ bekannt. Die Größe der einzelnen Gitterzellen ist variabel. Insbesondere in Zugnähe sind die Gitterzellen klein, um die Ortsabhängigkeit der Strömung und die beteiligten Strömungsprozesse korrekt wiedergeben zu können. Hierfür wurde die Geometrie vernetzt, eine vorläufige und vereinfachte Simulation durchgeführt, sowie die Größe der Gitterzellen entsprechend der Simulationsergebnisse angepasst.

Bei einigen der simulierten Zugtypen sind Drehgestelle nicht oder nur teilweise verblendet. In diesen Fällen hat die Geometrie der Drehgestelle, oder einzelner Komponenten, wie beispielsweise Stoßdämpfern, einen Einfluss auf die erzeugte Zugströmung. Die Geometrie der Drehgestelle ist im Regelfall sehr komplex. In Abbildung 4.3 ist als Beispiel die simulierte Geometrie eines der Drehgestelle der S-Bahn Baureihe 425 dargestellt.

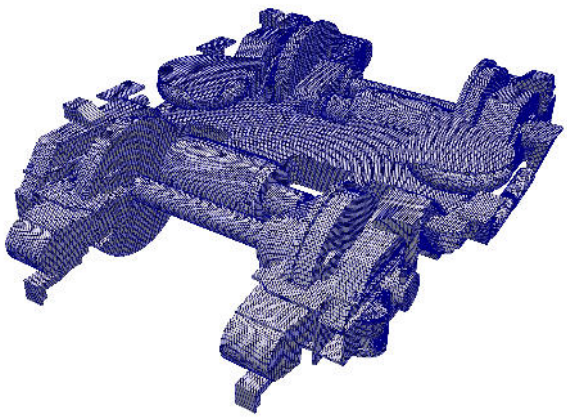


Abbildung 4.3: Vernetztes Jakobsdrehgestell der S-Bahn Baureihe 425.

Das Einfügen solch komplexer Drehgestellgeometrien in die Simulation des gesamten Zuges würde die benötigte Rechenzeit enorm erhöhen, so dass die Simulation nicht mehr praktikabel wäre. Um dies zu umgehen, wurde in den betreffenden Fälle, der Strömungseinfluss des Drehgestelles oder seiner Komponenten per Simulation bestimmt und anschließend durch einen Strömungswiderstand an der Stelle der jeweiligen Komponente in die Simulation des gesamten Zuges eingefügt.

4.2 Charakterisierung der Zugmodelle

In diesem Abschnitt werden die mit Hilfe von CAD-Software erstellten virtuellen Nachbauten der verschiedenen Zugtypen charakterisiert. Die Länge des Zuges und der erstellten Simulationsgeometrie, sowie die Anzahl der Gitterzellen wird für jeden Zug beziffert und es wird beschrieben, ob und welche Komponenten des Zuges durch den in Abschnitt 4.1 dargelegten Ansatz vereinfacht wurden.

4.2.1 InterCity-Express Baureihe 403

Der InterCity-Express 3 Baureihe 403 (ICE) ist $l_{\mathrm{ICE}} = 201\,\mathrm{m}$ lang und die Länge der Simulationsgeometrie ist für den ICE auf $l_{\mathrm{Sim}} = 1000\,\mathrm{m}$ gesetzt. Die Stoßdämpfer der Drehgestelle des ICE's ragen aus der Verkleidung heraus und wurden über den oben beschriebenen Ansatz durch Strömungswiderstände dargestellt. Das erstellte Gitternetz besteht aus 11,9 Millionen Zellen.

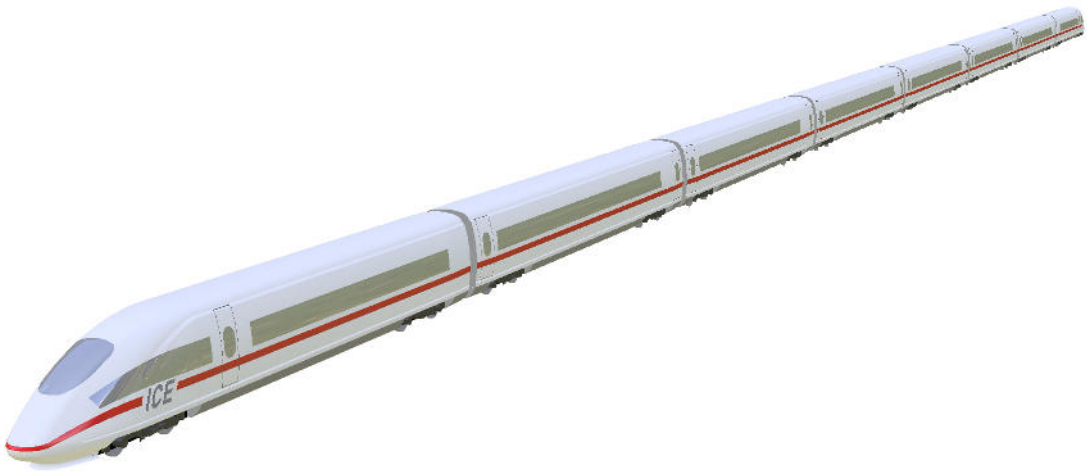


Abbildung 4.4: CAD-Modell des InterCity-Express 3 Baureihe 403.

4.2.2 InterCity

Der InterCity (IC) ist $l_{\mathrm{IC}} = 256{,}6\,\mathrm{m}$ lang und die Länge der Simulationsgeometrie wurde auf $l_{\mathrm{Sim}} = 1000\,\mathrm{m}$ gesetzt. Das erstellte Gitternetz besteht aus 15,5 Millionen Zellen. Der InterCity fuhr in Messung und Simulation mit einer elektrischen Lokomotive Baureihe 101 voran.

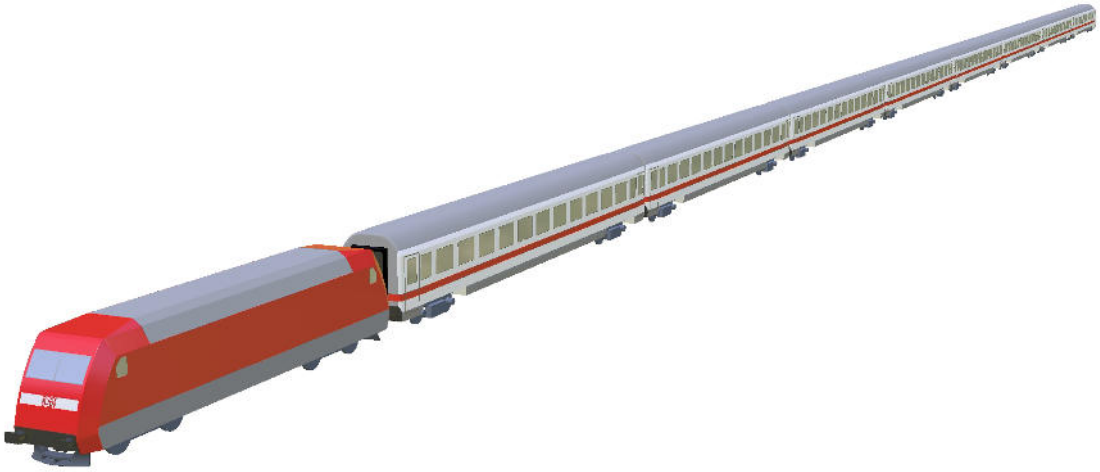


Abbildung 4.5: CAD-Modell des InterCitys mit elektrischer Lokomotive Baureihe 101.

4.2.3 S-Bahn Baureihe 425

Die S-Bahn Baureihe 425 ist $l_{\mathrm{SB}} = 67{,}5\,\mathrm{m}$ lang und die Länge der Simulationsgeometrie wurde auf $l_{\mathrm{Sim}} = 500\,\mathrm{m}$ gesetzt. Das erstellte Gitternetz besteht aus 8,5 Millionen Zellen. Die S-Bahn verfügt über drei verschiedene Drehgestelltypen, die über den oben genannten Ansatz durch einen für jeden Drehgestelltyp spezifischen Strömungswiderstand dargestellt wurden.



Abbildung 4.6: CAD-Modell der S-Bahn Baureihe 425.

4.2.4 Doppelstockzug Baureihe 446

Der Doppelstockzug Baureihe 446 in der **Konfiguration K2 ist** $l_{\mathrm{DS}} = 105{,}6\,\mathbf{m}$ lang und die Länge der Simulationsgeometrie ist für den Doppelstockzug auf $l_{\mathrm{Sim}} = 750\,\mathrm{m}$ gesetzt. Das erstellte Gitternetz besteht aus 7,8 Millionen Zellen.

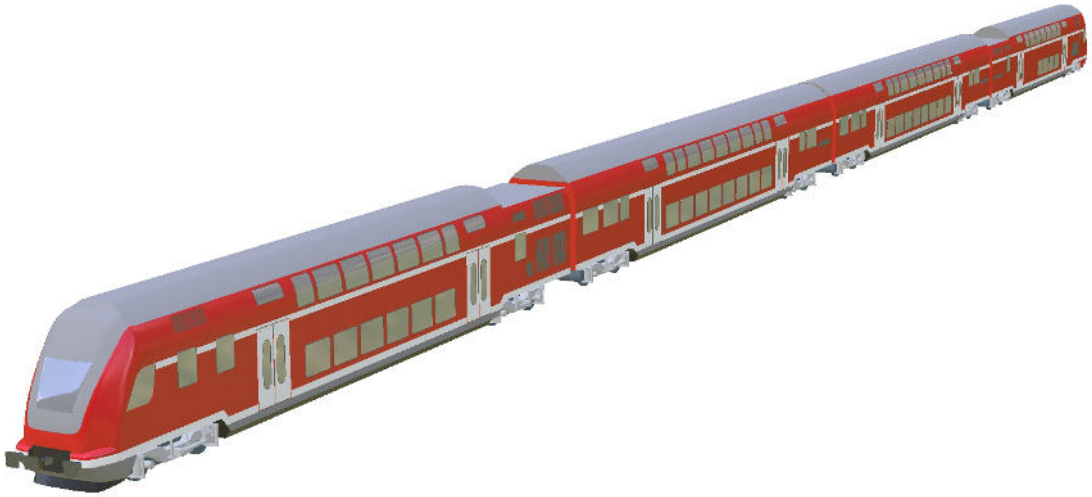


Abbildung 4.7: CAD-Modell des Doppelstockzuges Baureihe 446 in der Konfiguration K2.

4.2.5 Güterzug

Der Güterzug fährt mit einer elektrischen Lokomotive Siemens Vectron voran. Der erste Wagen war ein unbeladener Trailer, die darauf folgenden Wägen waren mit Containern beladene Trailer. Es wurden die Lokomotive und die ersten 3 Trailer dargestellt mit einer Gesamtlänge von $l_{\mathrm{GZ}} = 96{,}8\,\mathrm{m}$. Die Länge der Simulationsgeometrie wurde auf $l_{\mathrm{Sim}} = 500\,\mathrm{m}$ gesetzt. Das erstellte Gitternetz besteht aus 17,9 Millionen Zellen.

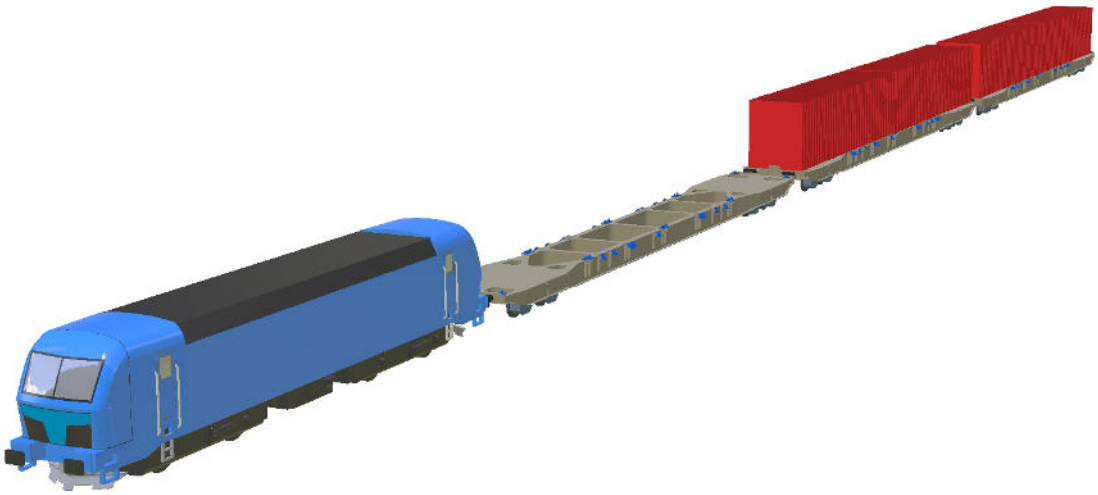


Abbildung 4.8: CAD-Modell des Güterzuges mit der elektrischen Lokomotive Siemens Vectron.

4.3 Durchführung der Simulationen

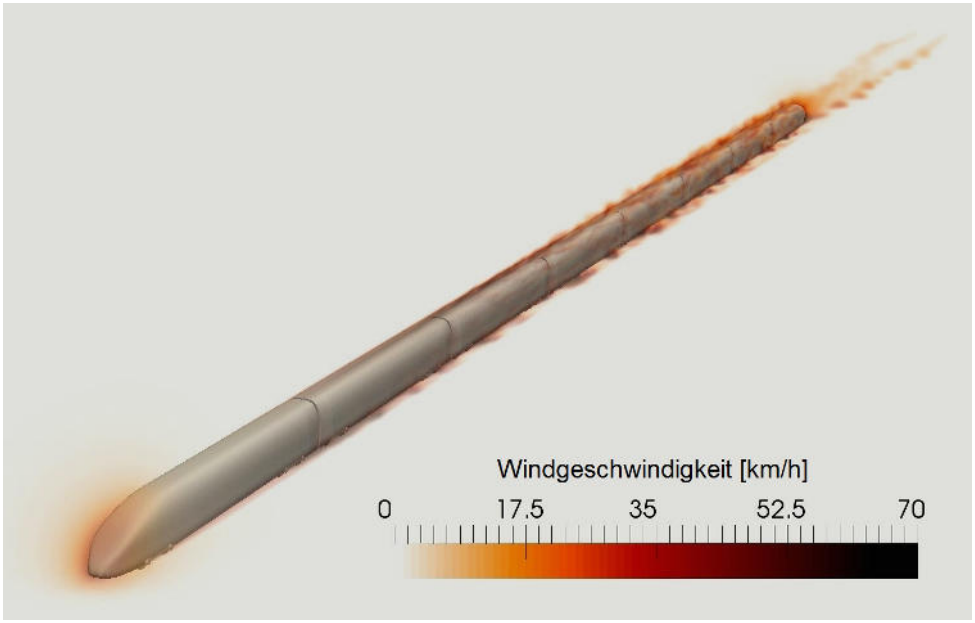
Das Aufbauen der Modelle, Durchführen von Testläufen und die Simulation der Zugpassagen bei unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten dauerte insgesamt rund 2 Jahre, wobei Letztgenanntes circa 1,5 Jahre in Anspruch nahm. Die extrem rechenintensiven Simulationen der Zugpassagen wurde auf dem Rechnerverbund (Cluster) ISABEL der FSA (Abbildung 4.9) durchgeführt. Auf dem zentralen Kontrollserver des Verbundes wird der Anweisungssatz für eine zu rechnende Simulation erstellt. Dieser Anweisungssatz wird dann auf sogenannte Blades verteilt, welche dem Kontrollserver unterstellt sind. Die Blades sind einzelne Rechner, welche jeweils einen Teil der Simulation bearbeiten. Die Blades sind unten in Abbildung 4.9 zu sehen. Durch den Datenaustausch zwischen den einzelnen Rechnern kann so eine, für einen einzelnen Rechner zu aufwändige, Simulation bearbeitet werden. ISABEL besteht aus einem Kontrollserver und 32 Blades, was zusammen 384 Prozessorkerne und rund 2 TB Arbeitsspeicher ergibt.



Abbildung 4.9: Vorder- (links) und Rückseite (rechts) des Clusters ISABEL der FSA.

4.4 Auswertung

Die Simulationen der Zugpassagen lieferten ein vollständiges Strömungsfeld um die verschiedenen Zugtypen für unterschiedliche Zuggeschwindigkeiten. Abbildung 4.10 zeigt exemplarisch Momentaufnahmen des Windgeschwindigkeitsfeldes um den InterCity-Express 3 und um den Güterzug. Das Vektorfeld der Windgeschwindigkeit mit und ohne Druckfeld um den Güterzug mit ist in Abbildung 4.11 dargestellt. In Abbildung 4.12 sind vergleichend vertikale Schnitte durch das Windgeschwindigkeitsfeld um die S-Bahn Baureihe 425, den InterCity-Express 3 Baureihe 403 und den InterCity mit Lokomotive Baureihe 101 bei einer Zuggeschwindigkeit von $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$ gezeigt.



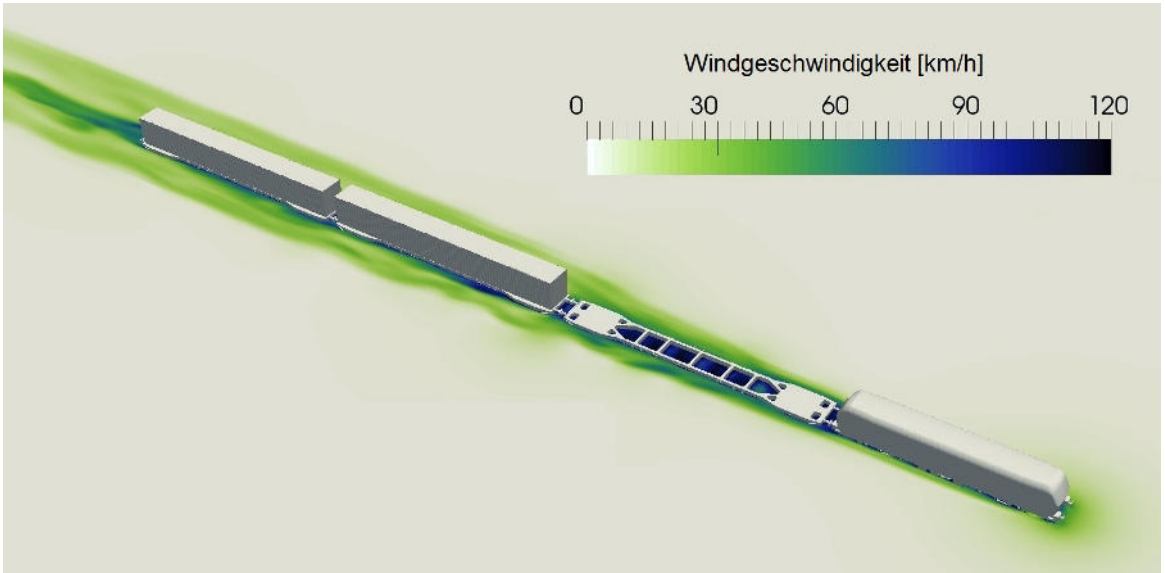


Abbildung 4.10: Grafische Darstellung der simulierten Windgeschwindigkeit um den InterCity-Express 3 und den Güterzug. Letztgenannter fährt mit $v_Z = 100\,\mathrm{km/h}$.

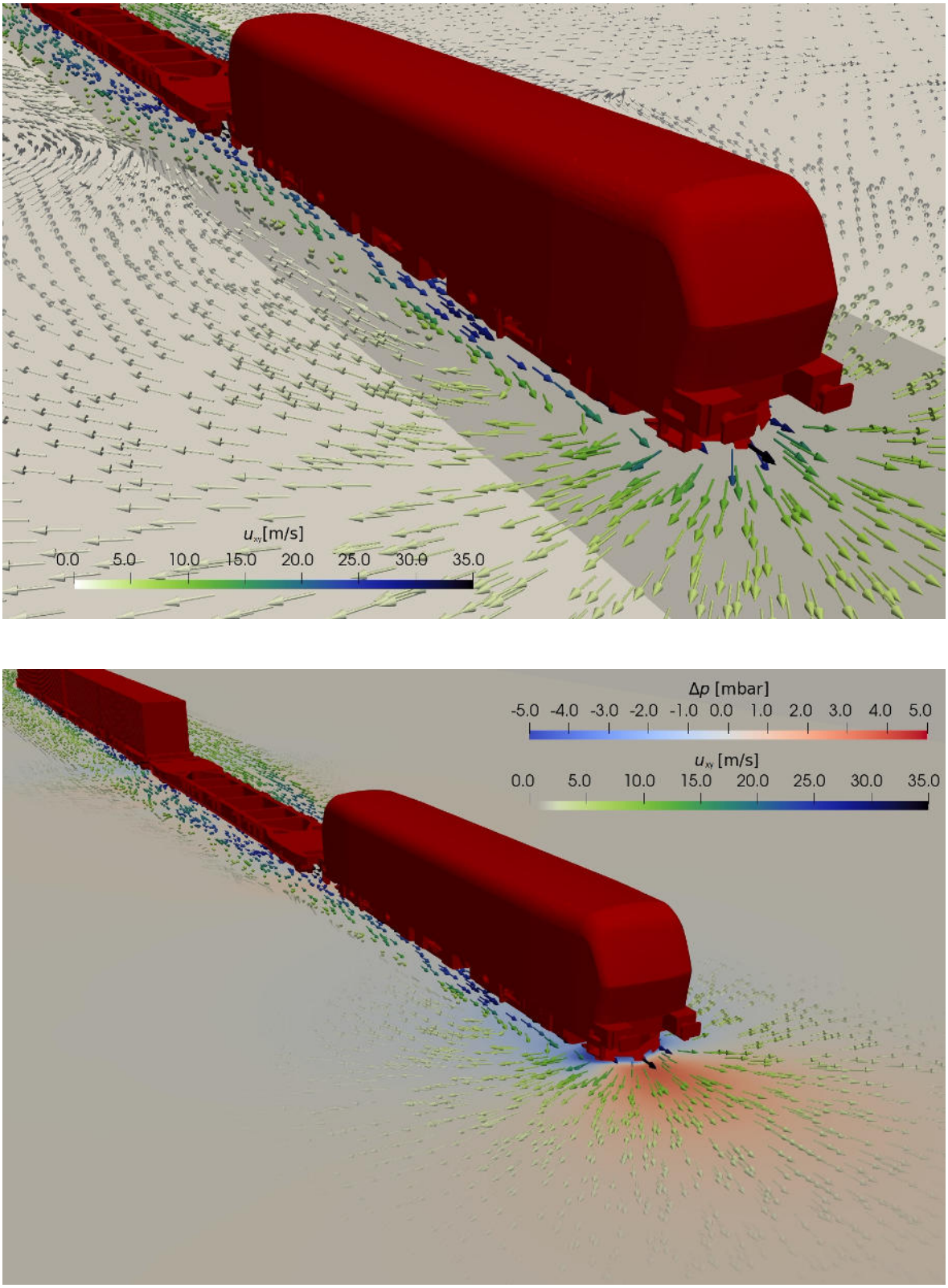


Abbildung 4.11: Oben: Vektorfeld der Windgeschwindigkeit um den fahrenden Güterzuges mit Siemens Vectron Lokomotive in einer horizontalen Ebene in 10 cm Höhe über der Schienenoberkante. Unten: Vektorfeld der Windgeschwindigkeit bei oben genannten Bedingungen in Kombination mit dem Druckfeld. $v_{\mathrm{Z}} = 120\,\mathrm{km/h}$.

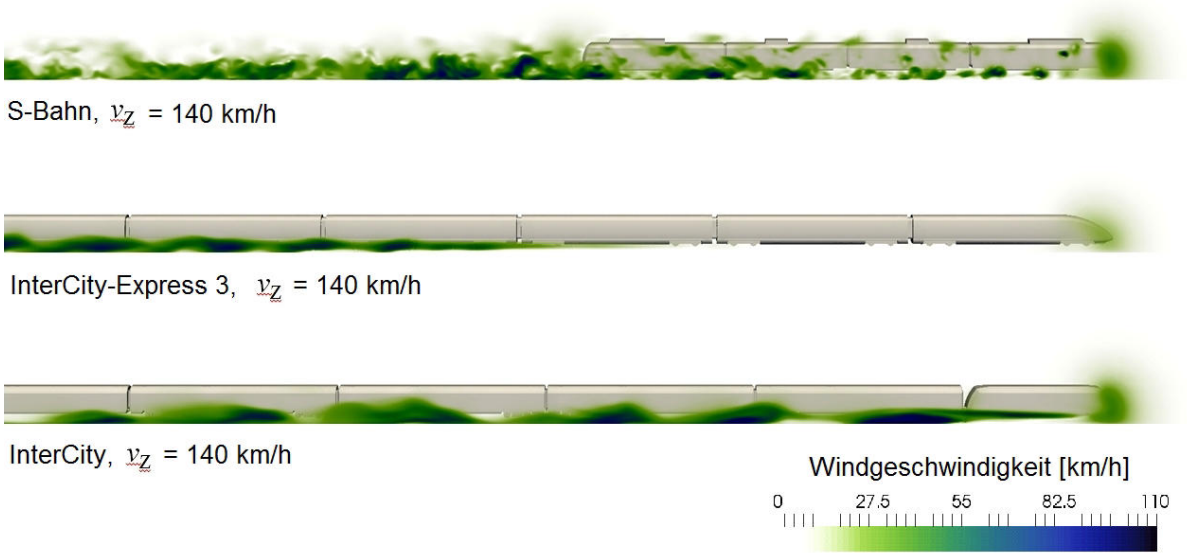


Abbildung 4.12: Vergleich der Windgeschwindigkeitsfelder der S-Bahn Baureihe 425, des InterCity-Express 3 Baureihe 403 und des InterCity mit Lokomotive Baureihe 101 in einem vertikalen Schnitt durch die Ebene in der sich die Messposition 1, 4 und 7 befinden.

Zum Zwecke der Datenauswertung wurden um den Zug herum Linien gelegt, welche parallel zur Fahrtrichtung orientiert sind. Um die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Beschäftige am Gleis möglichst gut beschreiben zu können, wurden die Linien in einem Raster mit einer horizontalen und vertikalen Distanz von 10 cm angeordnet. In der Horizontalen wurden Abstände von der Gleisachse von $d = 1{,}9\,\mathrm{m}$ bis $d = 3{,}5\,\mathrm{m}$ abgedeckt. In der Vertikalen wurde der Bereich $z = -0{,}6\,\mathrm{m}$ bis $z = 1{,}6\,\mathrm{m}$ erfasst, wobei $z = 0\,\mathrm{m}$ die Höhe der Schienenoberkante ist. Zur Validierung der Simulationen wurden weiterhin Linien parallel zur Fahrtrichtung gelegt, welche durch die neun Messpositionen, charakterisiert in Abschnitt 3.2 und Abbildung 3.3, laufen.

Entlang dieser Linien wurden schließlich die Windgeschwindigkeit u und der Luftdruck p ausgelesen.

Die Simulationsdaten wurden anschließend analog zu den Messdaten aufbereitet. Es wurden, wie in der DIN EN 14067, Teil 4 [32] beschrieben, zeitlich gleitende Mittelwerte gebildet. Dabei wurden Mittelungszeitintervalle von $\Delta t = 0{,}1\,\mathrm{s}$ bis $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ in einer Schrittweite von 0,1 s untersucht. Aus den zeitlichen Verläufen der ungefilterten und gefilterten Windgeschwindigkeiten wurden mittels zeitlicher Ableitung die jeweiligen Windbeschleunigungen a berechnet.

Für jeden Rasterpunkt wurden für jedes Mittelungszeitintervall die zugehörigen maximalen Windgeschwindigkeiten $\hat{u}$ und maximalen Windbeschleunigungen $\hat{a}$ aus den Verläufen bestimmt. Darüber hinaus wurde die Amplitude Δp des Luftdrucks in der Bugwelle des Zuges bestimmt. Die zeitlichen Verläufe der Druckamplituden wurden keiner Mittelwertbildung unterzogen.

4.5 Prüfung der Simulationspräzision

Um zu sehen, wie gut die Computersimulationen der Zugpassagen die Realität wiedergeben, werden sowohl die zeitlichen Verläufe als auch die Maxima von Druck und Betrag der horizontalen Windgeschwindigkeit, welche für die neun Messpositionen berechnet wurden, mit den korrespondierenden Messdaten verglichen. Dabei wird bewusst auf gleitende Mittelung verzichtet oder die Breite des Mittelungszeitintervall klein gehalten ($\Delta t = 0{,}2\,\mathrm{s}$), um Unterschiede zwischen Simulation und Messung nicht zu verschleiern.

4.5.1 Zeitlicher Verlauf der horizontalen Windgeschwindigkeit

Weil die gemessenen zeitlichen Verläufe bei verschiedenen Passagen des gleichen Zugtyps stark streuen (Abschnitt 3.5), muss für den Vergleich eine möglichst große Anzahl von Passagen eines Zugtyps bei möglichst gleichen Randbedingungen herangezogen werden. Darüber hinaus sollten der messtechnisch erfasste und simulierte Zugtyp geometrisch möglichst identisch sein. Die genannten Forderungen treffen gut bis befriedigend auf den Doppelstockzug Baureihe 446 und die S-Bahn Baureihe 425 zu.
Für den Vergleich der simulierten und gemessenen Daten der horizontalen Windgeschwindigkeit wurden die gemessenen Daten mit $\Delta t = 0{,}2\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelt. Hintergrund dafür ist, dass die Turbulenz in den Simulationen modelliert ist und deswegen ein statistischer Erwartungswert ausgegeben wird, was einer gleitenden Mittelung ähnelt. Als ideal hat sich eine gleitende Mittelung mit $\Delta t = 0{,}1\,\mathrm{s}$ bis $0{,}2\,\mathrm{s}$ herausgestellt.

4.5.1.1 Doppelstockzug Baureihe 446

In den Abbildungen 4.13 und 4.14 sind die Vergleiche der simulierten und gemessenen zeitlichen Verläufe der horizontalen Windgeschwindigkeit an den neun Messpostionen dargestellt. Während die simulierten Daten aus der Simulation eines mit $v_\mathrm{Z} = 140\,\mathrm{km/h}$ fahrenden K2-Doppelstockzuges entnommen wurden, stammen die Messdaten von den Passagen der Züge 5, 6, 10, 20 und 34. Bei diesen Zügen handelt es sich durchweg um die Variante K2, welche den Messort mit $\bar{v}_\mathrm{Z} \approx 140\,\mathrm{km/h}$ passierten. Die an den verschiedenen Messpositionen erfassten Druckverläufe sind als grau eingefärbte Einhüllende dargestellt. Weiterhin sind in schwarzer Farbe die Messkurven des Zuges 5 gezeigt sowie in rot der zeitliche Druckverlauf aus der Simulation.
Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, stimmen simulierte und gemessene horizontale Windgeschwindigkeiten in der untersten Messebene bei $z \approx 0{,}4\,\mathrm{m}$ im Rahmen der Messwertstreuung gut überein. Mit zunehmender Höhe über der Schienenoberkante wachsen die Abweichungen zwischen Simulation und Messung, wobei die Simulation zur Unterschätzung der horizontalen Windgeschwindigkeit neigt. Die Unterschätzung der Windgeschwindigkeit durch die Simulation bei größeren z liegt darin begründet, dass die im oberen seitlichen Bereich dieses Zugtyps integrierten windinduzierenden Lüftungsgitter im Modell aus technischen Gründen fehlen und darüber hinaus sämtliche Dachaufbauten wie z. B. Stromabnehmer des Zuges. Auch wächst der Einfluss des Seitenwindes mit z. Während der Messung trat wiederholt leichter Seitenwind auf, welcher in der Simulation nicht berücksichtigt ist. Der Seitenwind erhöht die gemessenen

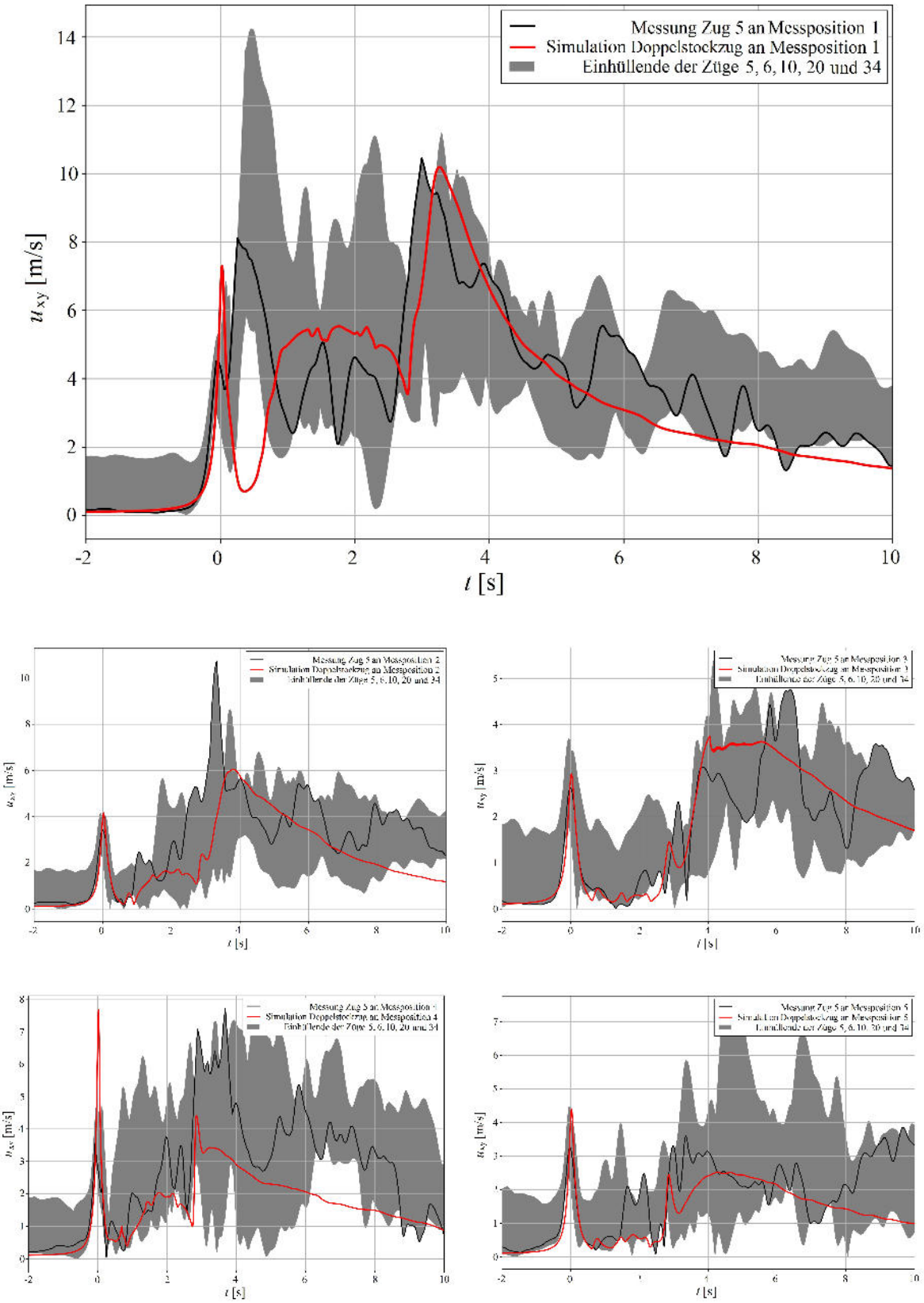


Abbildung 4.13: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit $u_{\mathrm{xy}}(t)$ an den Messpositionen 1 bis 5 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_{\mathrm{Z}} = 140\,\mathrm{km/h}$.

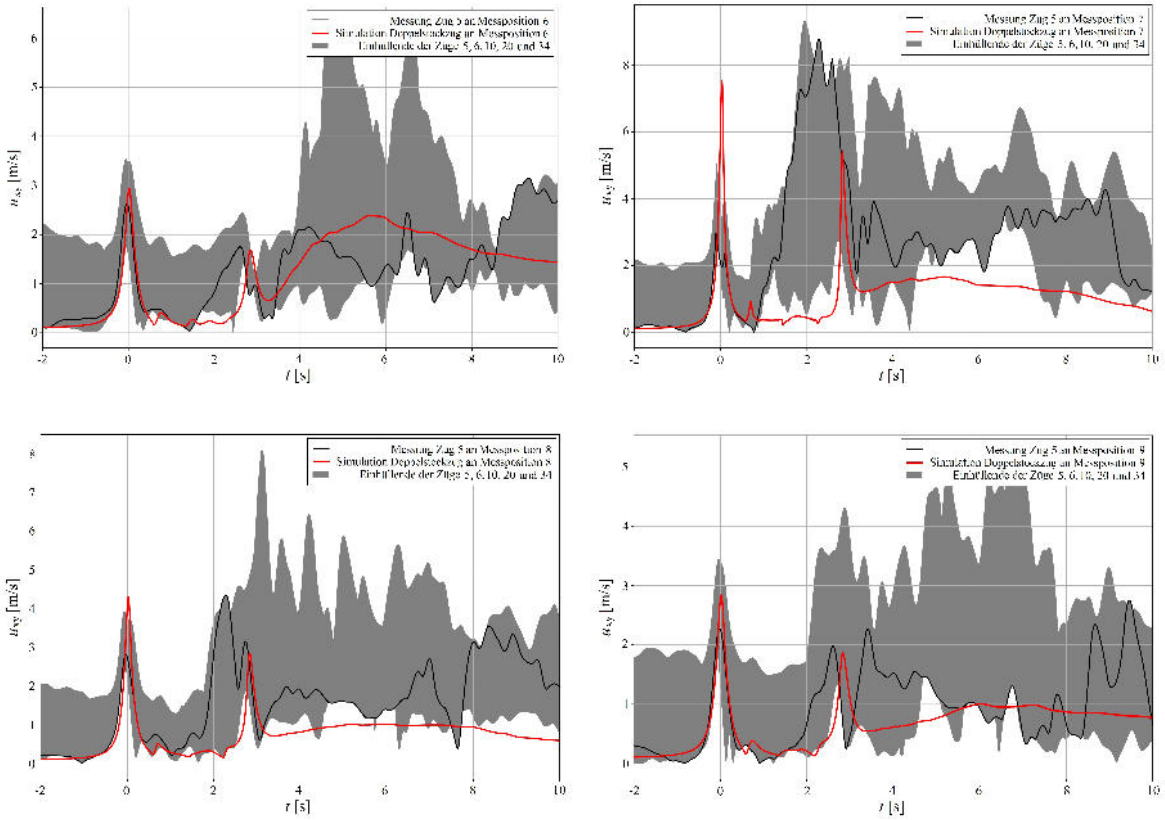


Abbildung 4.14: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 6 bis 9 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$.

Windgeschwindigkeiten gegenüber dem Zustand absoluter Windstille. Weil jedoch ein aufrecht neben dem Gleis stehender Mensch mit seinem Scheitel die Höhe $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ bei weitem nicht erreicht, sind die simulierten horizontalen Windgeschwindigkeitsdaten gut dazu geeignet, um sie für Belastungsbetrachtungen am Menschen heranzuziehen.
Sehr gut wiedergegeben wird an fast allen Messpositionen die Windgeschwindigkeitswelle bei Passage des Zugbuges, wobei an den Messpositionen 4 und 7 eine Überschätzung dieser Welle durch die Simulation aufzutreten scheint. Einiges spricht dafür, dass an diesen Messpositionen besonders scharfe Windgeschwindigkeitspeaks auftraten, die messtechnisch nicht erfasst werden konnten, z. B. weil das 3D-Ultraschallanemometer an Messposition 4 mit einer niedrigeren Abtastrate als die anderen acht Anemometer betrieben wurde. Weiterhin darf nicht außer Acht gelassen werden, dass sehr scharfe Peaks in den gemessenen Kurven durch die gleitende Mittelung merklich abgeflacht werden. Wie jedoch bereits erwähnt, befinden sich genannte Messpositionen oberhalb eines aufrecht am Gleis stehenden Menschen und spielen deshalb für die angestrebten Betrachtungen eine untergeordnete Rolle.
Insbesondere an den oberen Messpostionen, die sich weiter entfernt von der Gleisachse befanden, neigt die Simulation zur Unterschätzung der horizontalen Windgeschwindigkeit ab etwa 3 s bis 4 s nach Passage des Zugbuges.

4.5.1.2 S-Bahn Baureihe 425

Für den Vergleich der simulierten und gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeit bei der S-Bahn Baureihe 425 wurden die Züge 2, 9, 16, 31 und 45 ausgewählt. Genannte fünf Züge fuhren während der Passage des Messortes mit etwa $\bar{v}_Z \approx 140\,\mathrm{km/h}$. Daraus folgt, dass als Zuggeschwindigkeit für die S-Bahn in der Simulation ebenfalls $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$ angesetzt wurde. Die an den verschiedenen Messpositionen erfassten zeitlichen Verläufe der horizontalen Windgeschwindigkeit sind in den Abbildungen 4.15 und 4.16 zusammen mit den entsprechenden Simulationen dargestellt. Die Farbkodierung ist äquivalent zu derjenigen im vorigen Abschnitt 4.5.1.1.
Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, werden die stark streuenden zeitlichen Verläufe der gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeit durch die Simulation gut abgebildet. An allen Messpositionen tritt ein Geschwindigkeitspeak während der Passage des Zugbuges auf, gefolgt von höheren Windgeschwindigkeitsmaxima zu späteren Zeitpunkten. Wie auch beim Doppelstockzug weicht die Simulation an den Messpostionen 4 und 7 etwas stärker von den Messergebnissen ab und zwar ebenfalls zum Zeitpunkt der Passage des Zugbuges. Auch an Messposition 8 tritt ein überhöhter Peak in der Simulation auf. Dieser verschwindet jedoch weitgehend, wenn die Rohdaten der Messung zum Vergleich herangezogen werden.

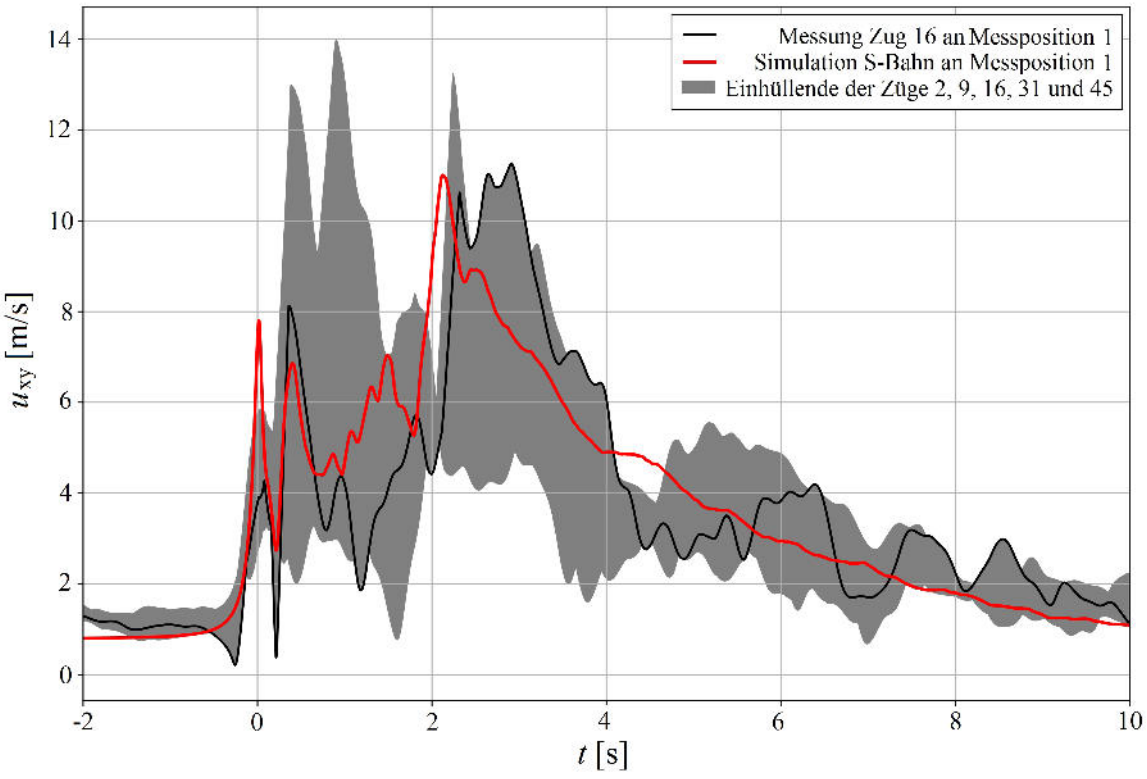


Abbildung 4.15: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit $u_{xy}(t)$ an Messposition 1 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$.

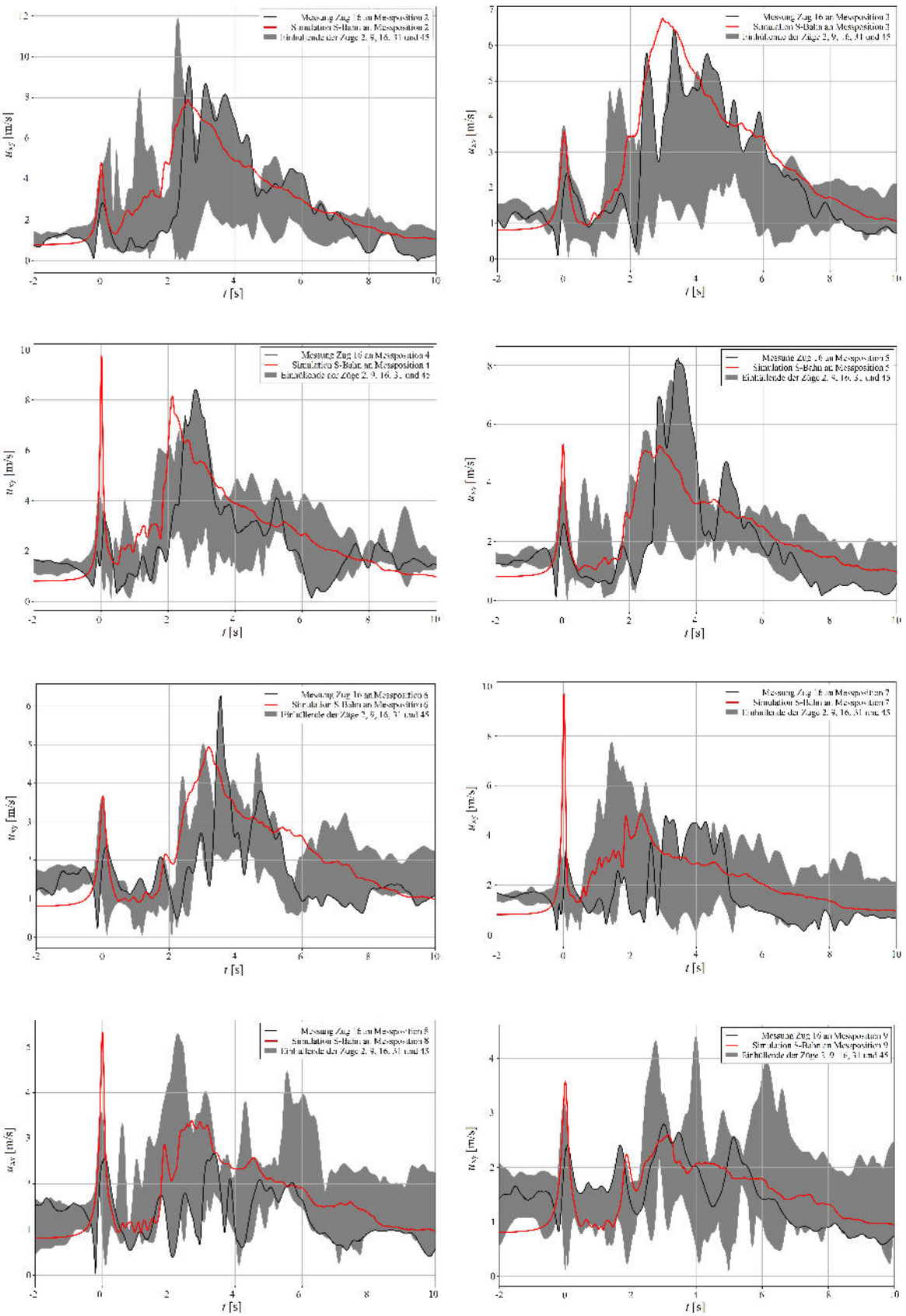


Abbildung 4.16: Vergleich der gemessenen und simulierten zeitlichen horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 2 bis 9 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$.

Dass die nadelartigen Peaks während der Passage des Zugbuges in der Simulation an den Messpositionen 4 und 7 so hoch ausfallen, könnte neben den bereits in Abschnitt 4.5.1.1 erwähnten Ursachen auch darin begründet liegen, dass die Aufbauten rund um den Stromabnehmer der S-Bahn als massive Körper modelliert wurden, welche einen gegenüber der Realität stärkeren virtuellen Luftschwall während der Passage erzeugen. Alles in allem sind die simulierten horizontalen Windgeschwindigkeiten für die S-Bahn Baureihe 425 gut dafür geeignet, um windinduzierte Belastungen auf Menschen zu untersuchen.

4.5.1.3 Güterzug, InterCity und InterCity-Express

Die in den vorigen Abschnitten 4.5.1.1 und 4.5.1.2 durchgeführten Vergleiche können für die drei Zugtypen Güterzug, InterCity und InterCity-Express mangels ausreichender Anzahl messtechnisch erfasster Züge in dieser Art und Weise nicht durchgeführt werden. Deshalb kann für die genannten Zugtypen lediglich exemplarisch dargelegt werden, wie gut Simulation und Messung übereinstimmen.
In den nachfolgenden Abbildungen 4.17 und 4.18 sind die simulierten und die an den neun Messpositionen gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeiten für einen Güterzug dargestellt. Als Referenz wurde der Zug 40 herangezogen, der den Messort mit $\bar{v}_Z \approx 100\,\mathrm{km/h}$ passierte. Weil nur ein Güterzug zum Vergleich herangezogen werden kann, können keine Schwankungsbreiten angegeben werden.

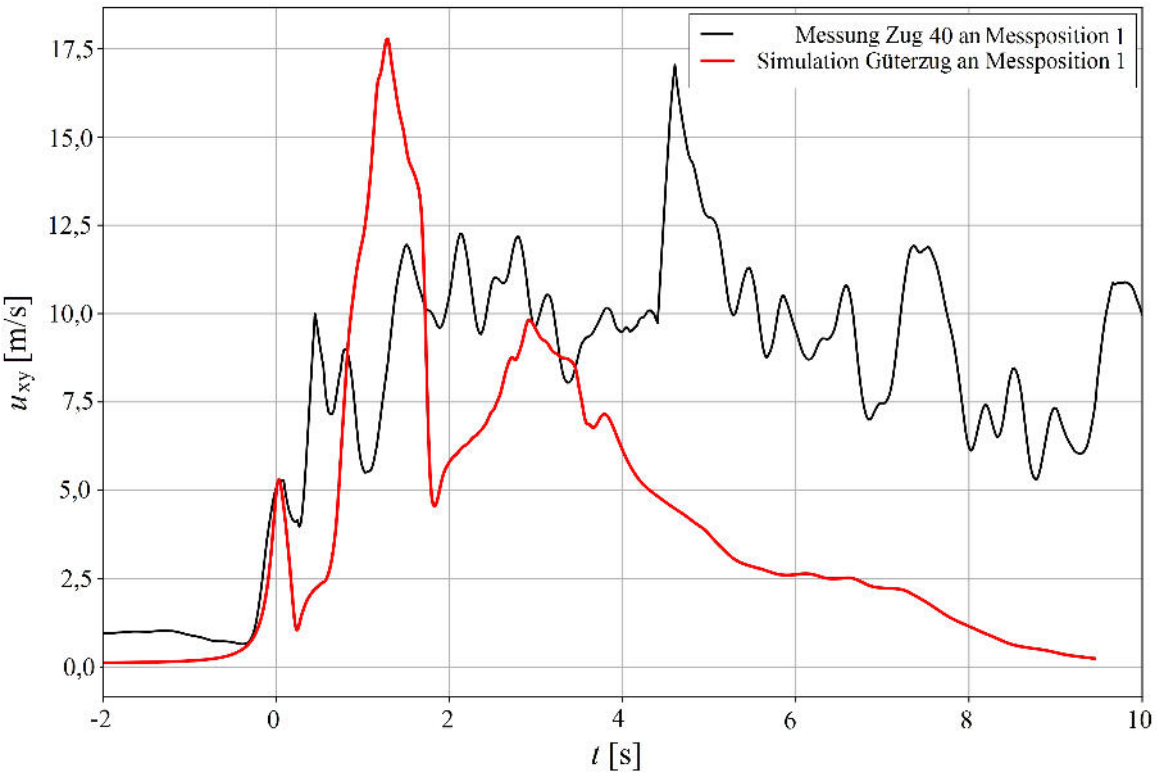


Abbildung 4.17: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit $u_{xy}(t)$ an Messposition 1 für einen Güterzug mit $v_Z = 100\,\mathrm{km/h}$.

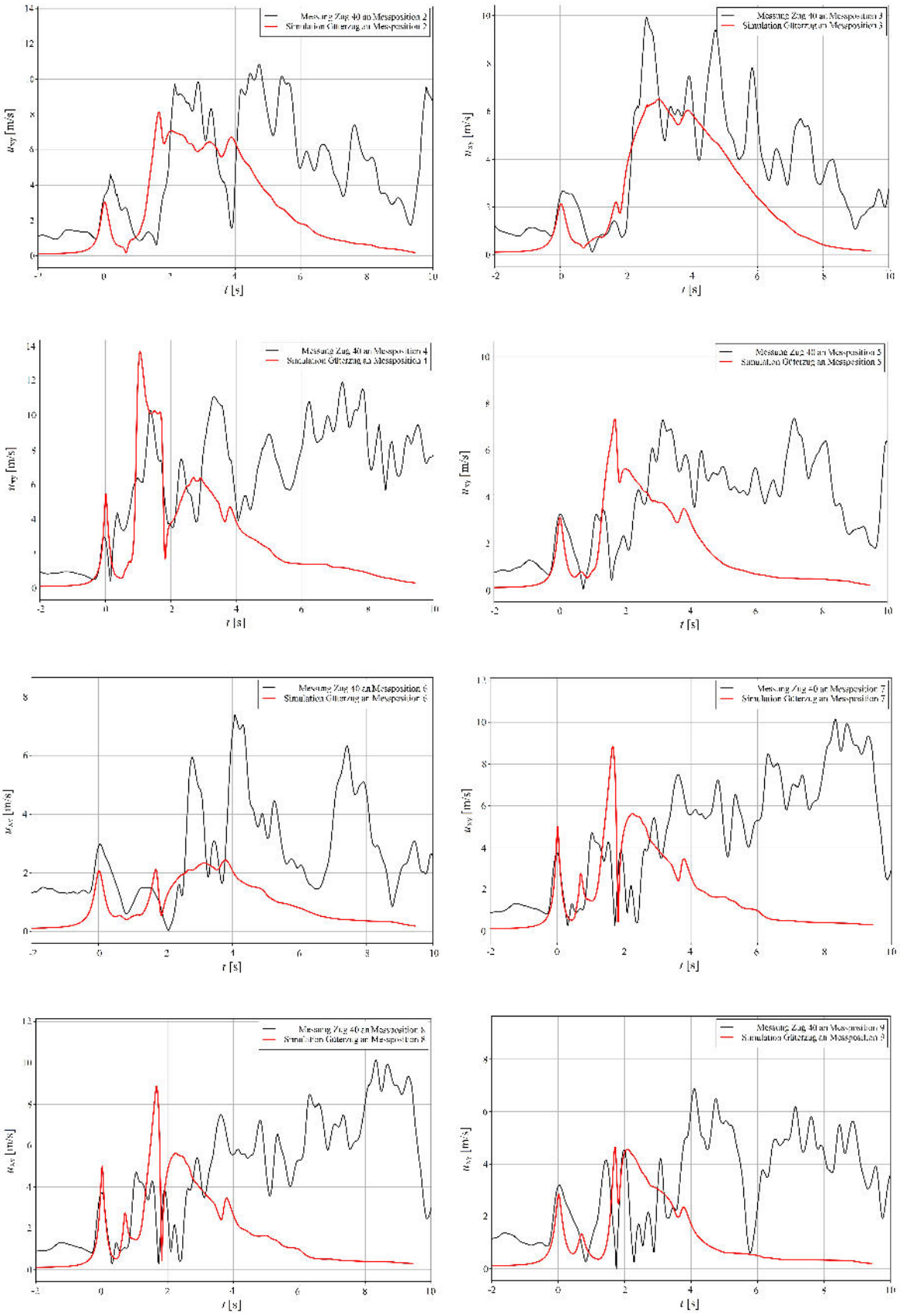


Abbildung 4.18: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 2 bis 9 für einen Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 100\,\mathrm{km/h}$.

Die Abbildungen zeigen, dass die Simulation die Messung recht gut wiedergibt. Da Zug 40 siebenundzwanzig Wagen zog, der Güterzug in der Simulation jedoch aufgrund limitierter Rechenkapazitäten lediglich drei, fallen die simulierten gegenüber den gemessenen Windgeschwindigkeiten ab etwa 3 s bis 4 s nach Passage des Zugbuges ab.

In Abbildung 4.19 sind die simuliertne und die an sechs Messpositionen gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeiten für einen InterCity dargestellt. Zug 36, der den Messort mit $\bar{v}_Z \approx 160\,\mathrm{km/h}$ passierte, dient hier dem Vergleich. Wie beim Güterzug können auch für den InterCity keine Schwankungsbreiten angegeben werden.
Im Großen und Ganzen gibt auch hier die Simulation die Messergebnisse gut wieder, sofern man diese Aussage mit nur einem Vergleichszug tätigen kann. In der Messebene

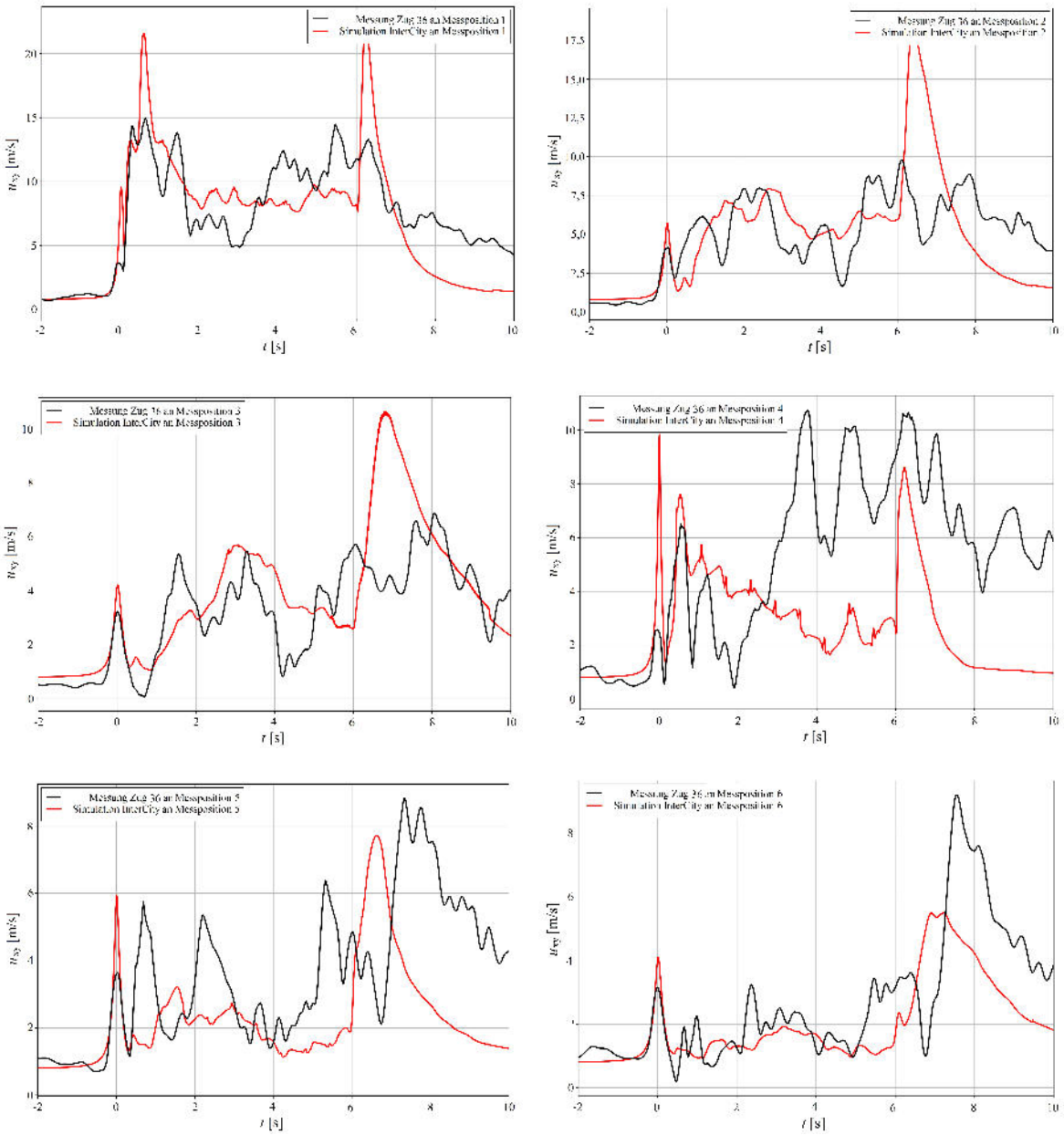


Abbildung 4.19: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 1 bis 6 für einen InterCity mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$.

bei $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante zeigt die Simulation Windgeschwindigkeitspeaks, welche kurz nach der Heckpassage auftreten. In den Messkurven sind diese Peaks in dieser Höhe nicht zu sehen, jedoch bei $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$. In letztgenannter Messebene gibt die Simulation die Windgeschwindigkeitspeaks sehr gut wieder. Bei $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ treten erneut die sehr scharfen Windgeschwindigkeitspeaks während der Passage des Zugbuges auf. Vor allem an Messposition 4 wurden diese aufgrund der langsamen Abtastrate nicht vollständig erfasst. An dieser Messposition sind in der simulierten Kurve anhand von kleinen Schwankungen die Passagen der Lücken zwischen den Wagen zu erkennen.

Abbildung 4.20 zeigt die simulierten und die an sechs Messpositionen gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeiten für einen InterCity-Express 3 Baureihe 403. Für diesen

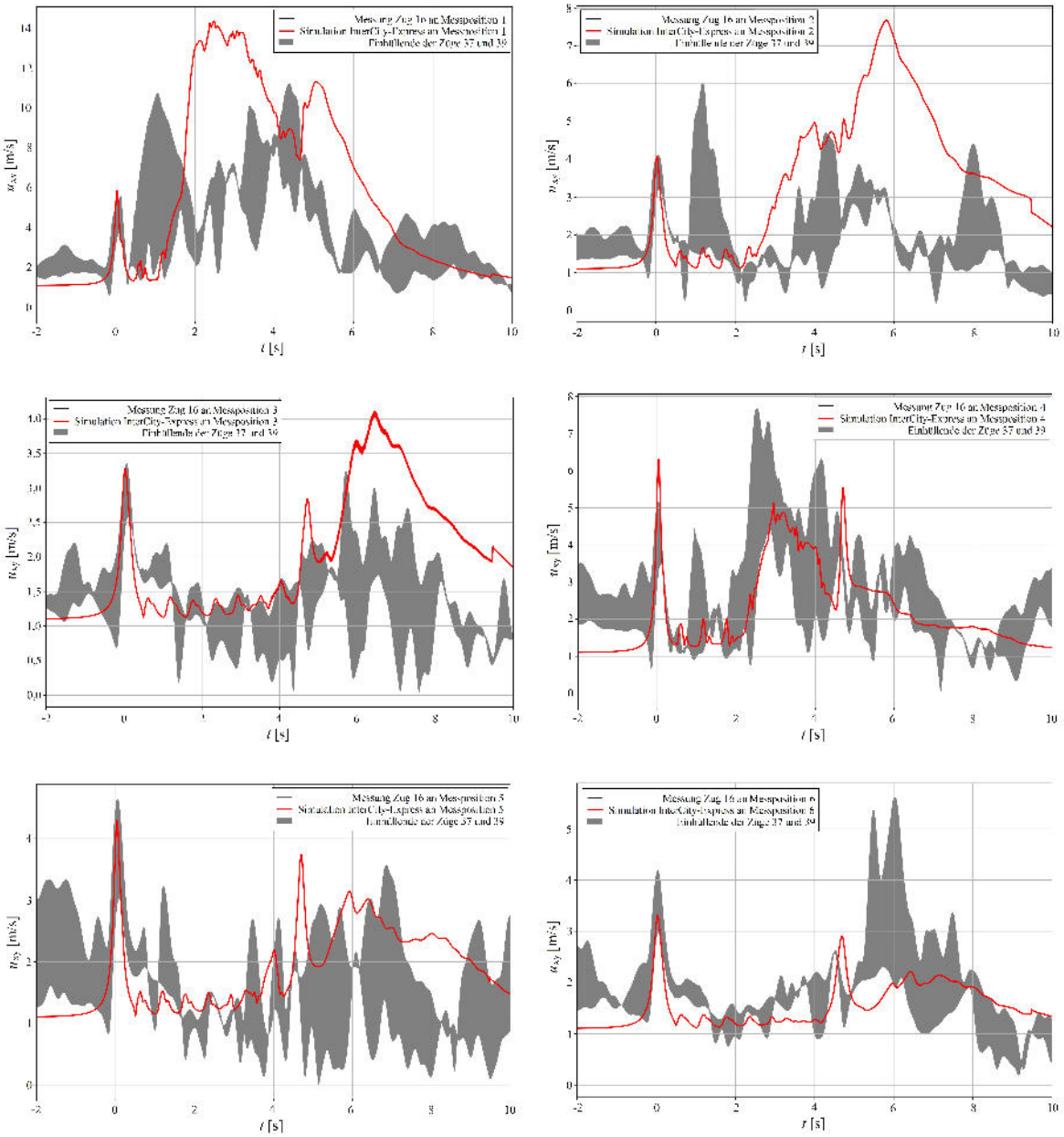


Abbildung 4.20: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 1 bis 6 für einen InterCity-Express 3 Baureihe 403 mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$.

Vergleich wurden die Züge 37 und 39 aus Tabelle 3.1 herangezogen. Beide Züge fuhren zum Zeitpunkt der Messortpassage etwa mit der Geschwindigkeit $\bar{v}_Z \approx 160\,\mathrm{km/h}$.
In der Messebene bei $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ scheint die Simulation die gemessenen maximalen horizontalen Windgeschwindigkeiten etwas zu überschätzen. Der Windgeschwindigkeitspeak, welcher während der Passage des Zugbuges auftritt, wird sehr gut wiedergegeben. An den drei Messpositionen 4, 5 und 6, also bei $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$, zeigt sich gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Auf Diagramme für die obere Messebene bei $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ wurde hier verzichtet, weil der InterCity-Express an diesen Messorten kaum Wind erzeugte, wie den entsprechenden Grafiken im Anhang B.2.2 entnommen werden kann. Die Simulation gibt dies gut wieder.

4.5.2 Zeitlicher Druckverlauf

Wie bereits in Abschnitt 3.5.3 wird der Fokus auf die Druckwelle gelegt, welche während der Passage des Zugbuges entsteht. Die Datenaufbereitung und der Vergleich des simulierten und gemessenen Druckverlaufs erfolgt analog zu den Vergleichen im vorigen Abschnitt 4.5.1, wobei hier jedoch auf jegliche Messdatenbearbeitung verzichtet wurde.

4.5.2.1 Doppelstockzug Baureihe 446

Für den Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs bei Doppelstockzügen Baureihe 446 wurden erneut die Züge 5, 6, 10, 20 und 34 ausgewählt. Die fünf K2-Doppelstockzüge waren mit $\bar{v}_Z \approx 140\,\mathrm{km/h}$ unterwegs.

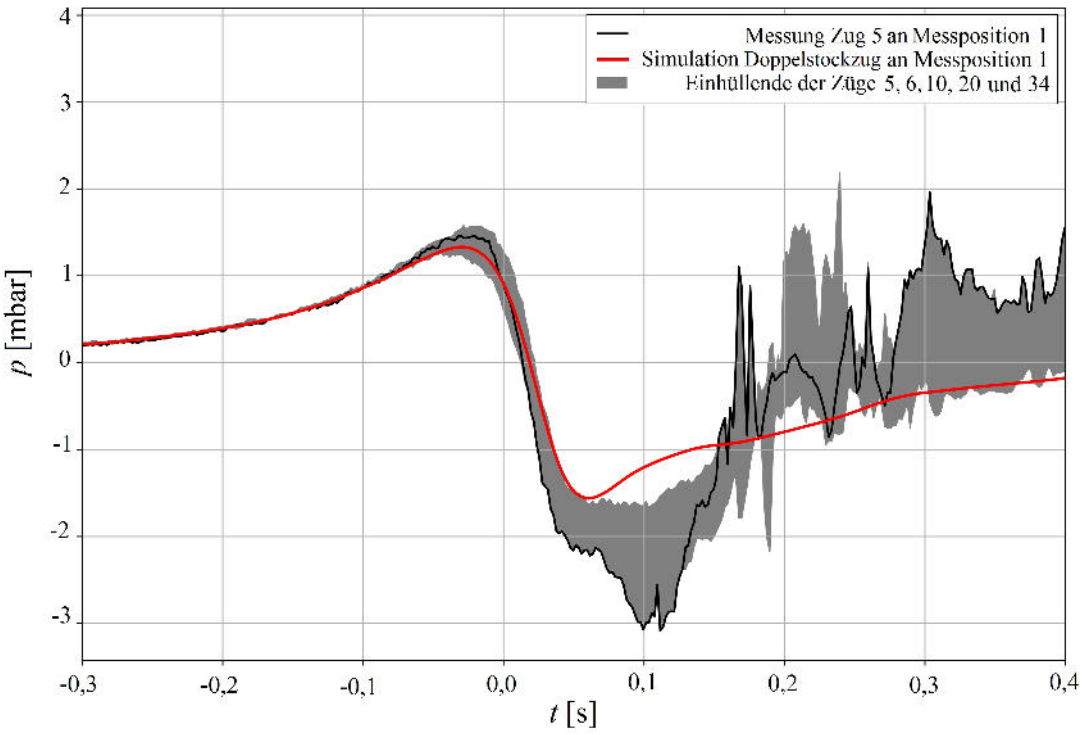


Abbildung 4.21: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an der Messposition 1 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$.

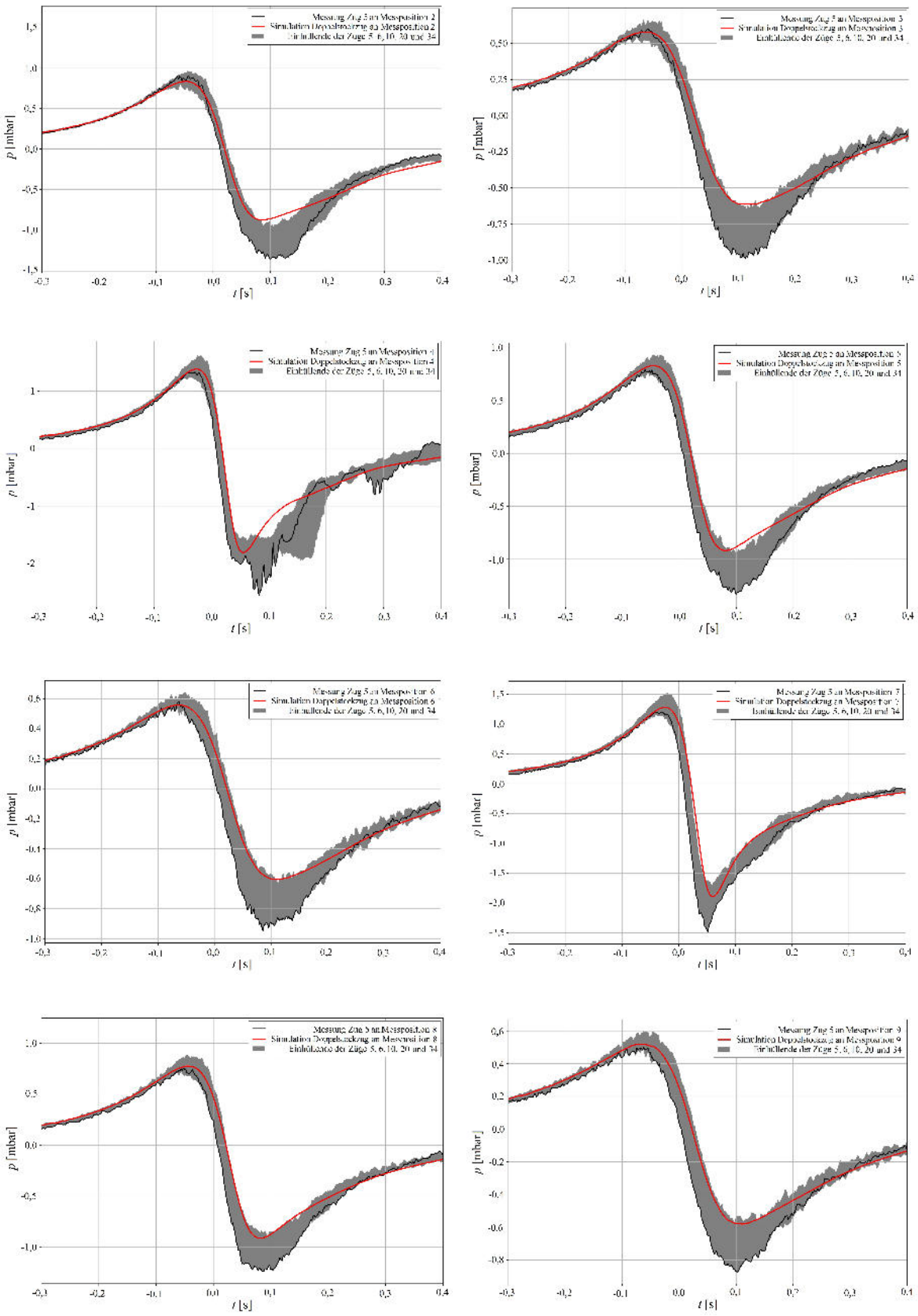


Abbildung 4.22: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 2 bis 9 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$.

Die zeitlichen Druckverläufe aus den Simulationen und Messungen sind in den Abbildungen 4.21 und 4.22 dargestellt. Man erkennt, dass die zeitlichen Druckverläufe aus Simulation und Messungen im Rahmen der Messwertstreuung übereinstimmen, wobei die Verläufe aus der Simulation dazu neigen, die messtechnisch erfassten Verläufe mit den geringsten Ausschlägen wiederzugeben. Die hochfrequenten Druckschwankungen, welche vor allem an Messpostion 1 unmittelbar nach der Bugwelle auftreten, stammen von Turbulenzen und dem von ihnen erzeugten Staudruck auf die Ohrattrappe mit Drucksensor (Abbildung 3.2, links). In allen Abbildungen zum Druckverlauf stellen die simulierten Daten lediglich den statischen Druckanteil dar. Aus diesem Grund und weil darüber hinaus aufgrund der Modellierungsart der Turbulenz in der Simulation die turbulenzinduzierten Druckschwankungen nicht voll aufgelöst wiedergegeben werden können, fehlen die hochfrequenten Druckschwankungen bei den simulierten Druckverläufen.

4.5.2.2 S-Bahn Baureihe 425

Für den Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs bei S-Bahnen Baureihe 425 wurden die Züge 2, 9, 16, 31 und 45 ausgewählt. Genannte fünf Züge fuhren während der Passage des Messortes mit $\bar{v}_Z \approx 140\,\mathrm{km/h}$.
Die Abbildungen 4.23 und 4.24 zeigen die an den verschiedenen Messpositionen erfassten sowie die simulierten Druckverläufe. Man entnimmt den Abbildungen, dass die Simulation die gemessenen Druckverläufe im Rahmen der Streuung sehr gut wiedergibt. An den Messpositionen 4 und insbesondere 7, d. h. in $d = 2{,}4\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse bei $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante,

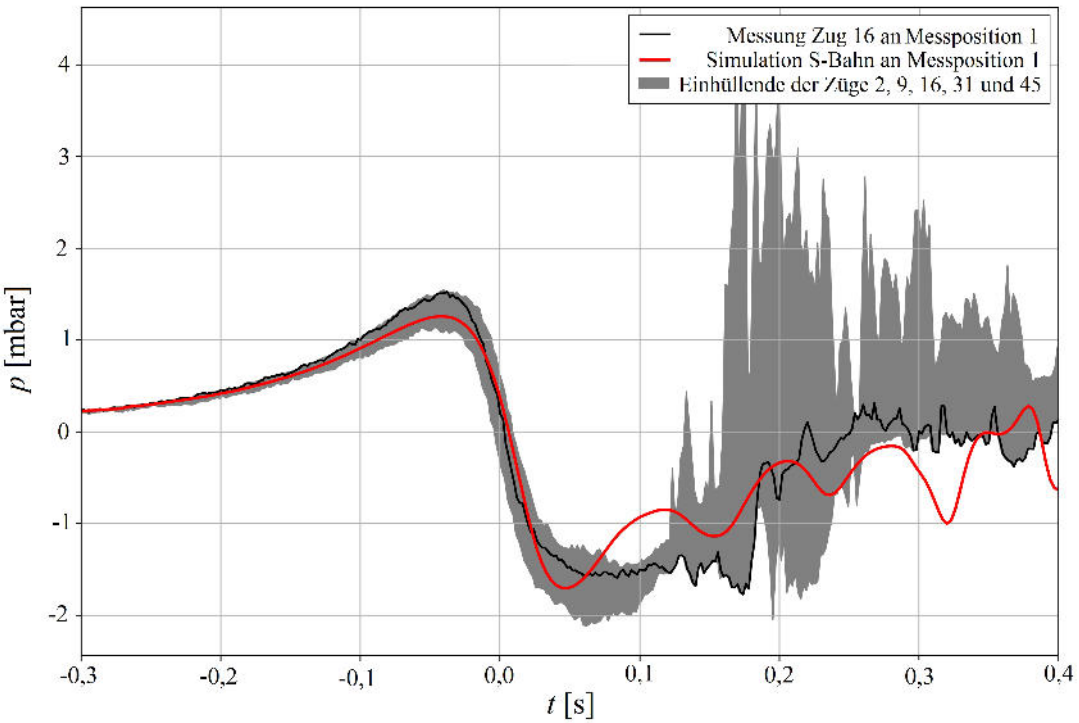


Abbildung 4.23: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs $p(t)$ an Messposition 1 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$.

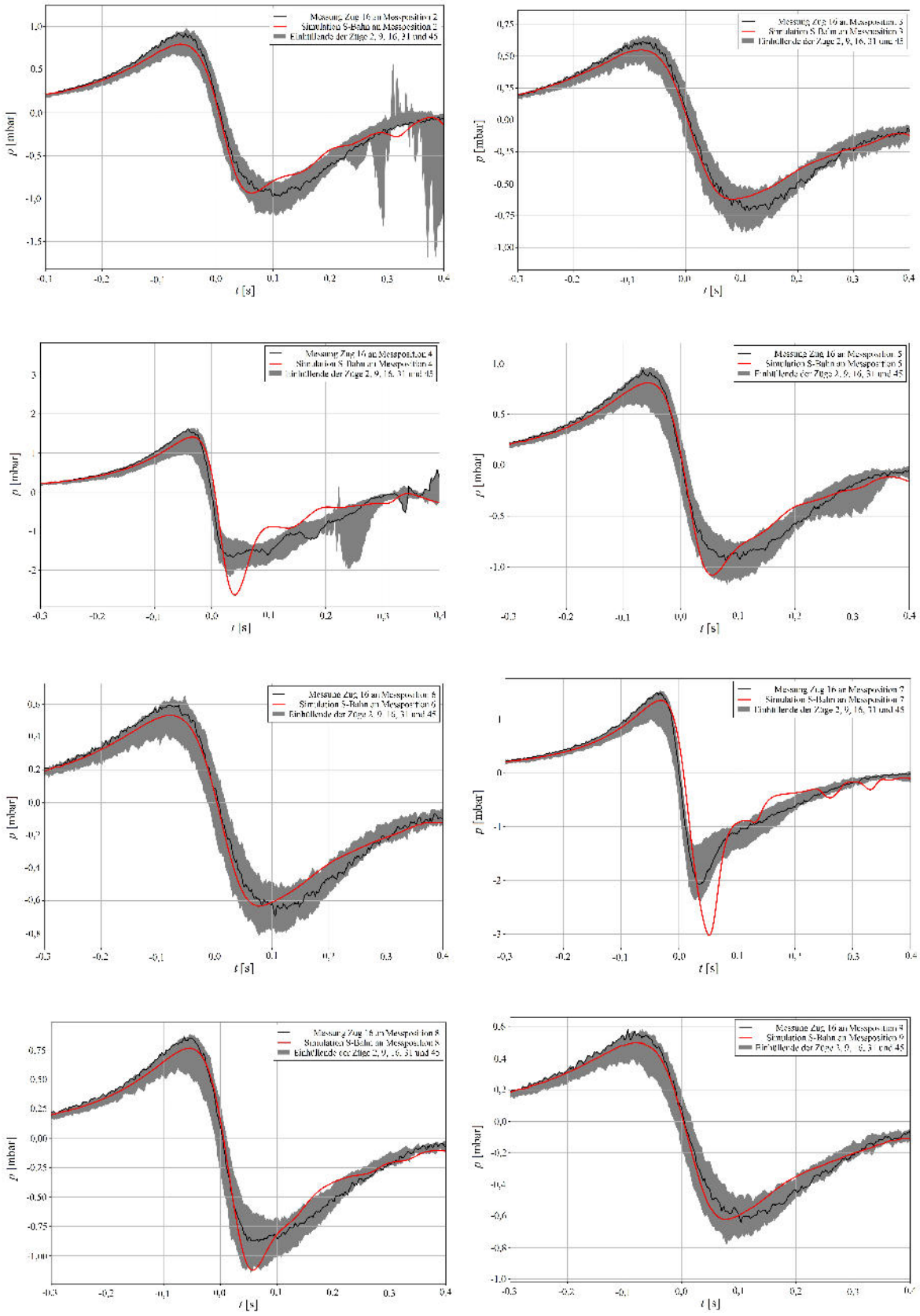


Abbildung 4.24: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 2 bis 9 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$.

kommt es zu einer geringfügigen Überschätzung der zweiten Halbwelle und damit auch zu einer geringfügigen Überschätzung der Größe von Δp. Diese Überschätzung fällt mit der Entfernung d zur Gleisachse und steigt mit z. Die Vermutung liegt nahe, dass die Ursache für diese Überschätzung in der Vereinfachung der Dachaufbauten der virtuellen S-Bahn liegt. Diese Dachaufbauten sind im Modell der S-Bahn als rechteckige, völlig luftundurchlässige Kästen mit scharfen Kanten ausgeführt (Abbildung 4.6). Mit rund 20 % ist diese Überschätzung nicht vernachlässigbar, jedoch befinden sich in dieser Höhe in der Regel keine Menschen und sind deswegen keinen Druckwellen ausgesetzt, weshalb die Diskrepanz als unkritisch eingestuft werden kann.

4.5.2.3 Güterzug, InterCity und InterCity-Express

In Abbildung 4.25 sind die simulierten und gemessenen zeitlichen Druckverläufe an den Messpostionen 1, 2, 4 und 5 zu sehen, welche die Bugpassage eines Güterzug mit $v_Z = 100\,\mathrm{km/h}$ hervorruft, wobei die Messergebnisse des Zug 40 Verwendung fanden. Abgesehen von den Messposition 1 und 4 zeigen die Druckverläufe an allen neun Messpositionen unmittelbar nach der Bugwelle kaum hochfrequente Schwankungen und ähneln sich stark. Weil diese Ähnlichkeit auch für die simulierten Kurven zutrifft, wird hier auf die vergleichende Darstellung der Druckverläufe an den Messpostionen 3, 6 sowie 7 bis 9 verzichtet. Grundsätzlich werden die Druckverläufe durch die Simulation gut wiedergegeben, wobei die Größe von Δp durchweg geringfügig unterschätzt wird.

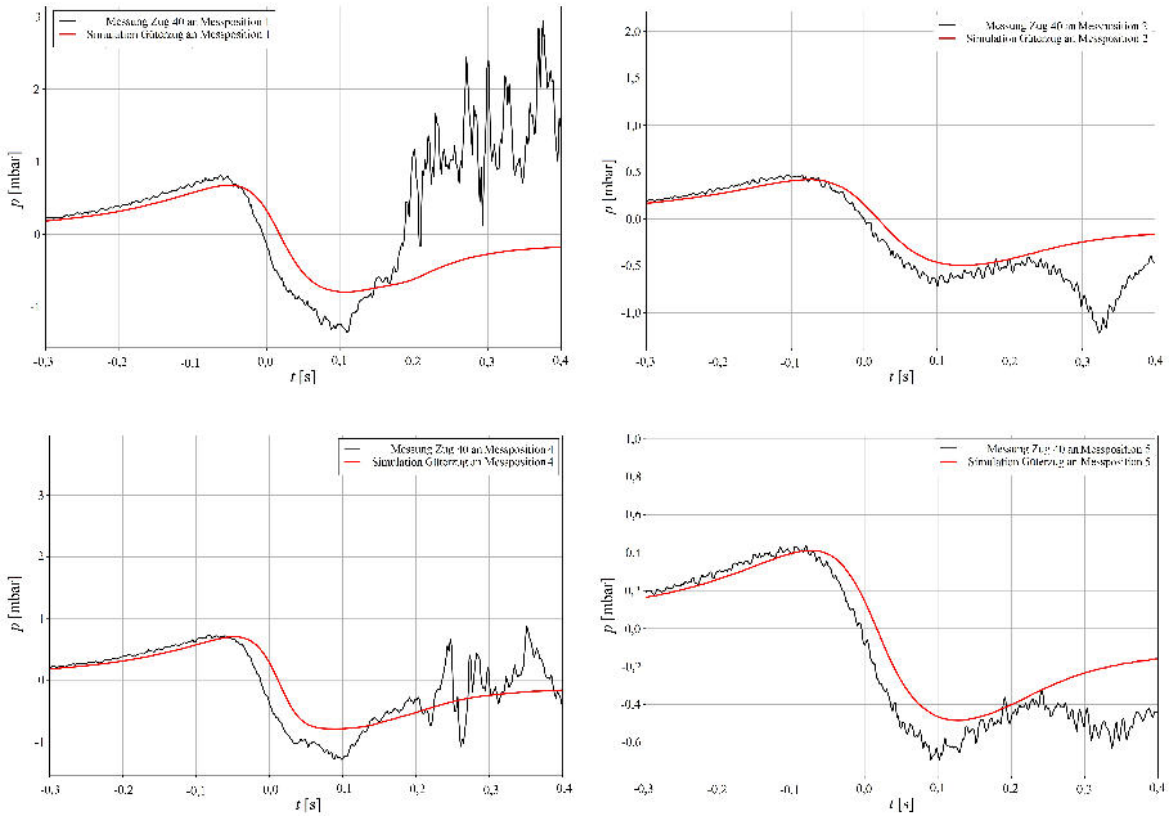


Abbildung 4.25: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 1, 2, 4 und 5 für einen Güterzug mit $v_Z = 100\,\mathrm{km/h}$.

Der Vergleich der simulierten und gemessenen zeitlichen Druckverläufe für einen passierenden InterCity mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ ähnelt qualitativ dem des passierenden Güterzuges. Weil der InterCity deutlich schneller unterwegs war als der Güterzug, sind die Δp entsprechend größer. Die Simulationen geben die Messergebnisse von Zug 36 sehr gut wieder, wobei auch hier eine leichte, aber vernachlässigbare Unterschätzung durch die Simulation auftritt.

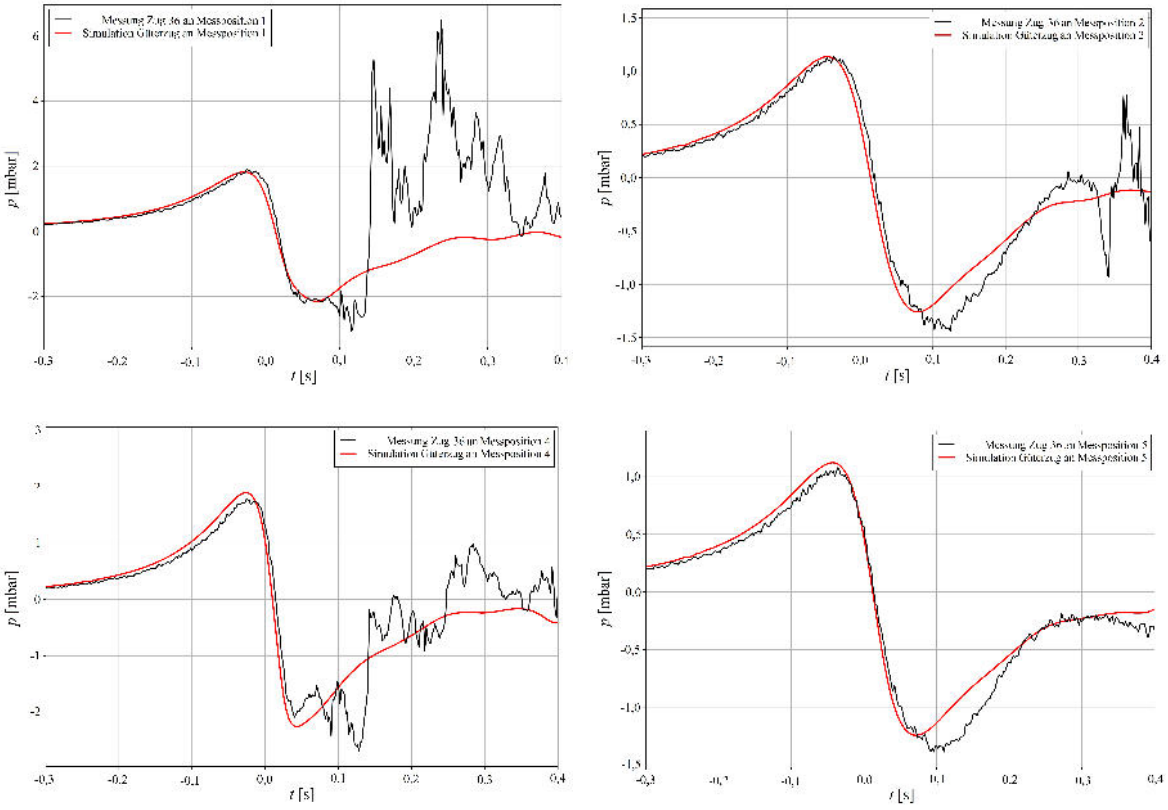


Abbildung 4.26: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 1, 2, 4 und 5 für einen InterCity mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$.

Den Vergleich der simulierten und gemessenen zeitlichen Druckverläufe an den Messpositionen 1 bis 6 für einen passierenden InterCity-Express 3 Baureihe 403 mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ zeigt Abbildung 4.27. Für den Vergleich wurden die Messdaten der Züge 37 und 39 verwendet. Der qualitative Verlauf der simulierten und gemessenen Druckkurven an den Messpostionen 7 bis 9 entspricht den Verläufen an den Messpositionen 5 und 6, weshalb auf Diagramme für die Messpostionen 7 bis 9 verzichtet wird.
Die gemessenen zeitlichen Druckverläufe werden gut wiedergegeben, wobei generell eine Unterschätzung von Δp im Bereich von maximal rund 20 % festzustellen ist. An den Messpositionen 1 und 4 zeigen die simulierten Kurven eine positive Welle im Maximum der zweiten Halbwelle. Die Ursache dafür ist aktuell nicht bekannt und wird später untersucht werden. Möglicherweise ist die Vereinfachung der Fahrgestelle im Modell ungünstig gewählt. Weil die durch den InterCity-Express erzeugten Δp deutlich unter denen der anderen Zugtypen liegen, spielt die oben genannte Diskrepanz zwischen Simulation und Messergebnissen bei der in Abschnitt 5.3 durchgeführten Bewertung der aerodynamischen Belastungen auf Menschen nur eine untergeordnete Rolle.

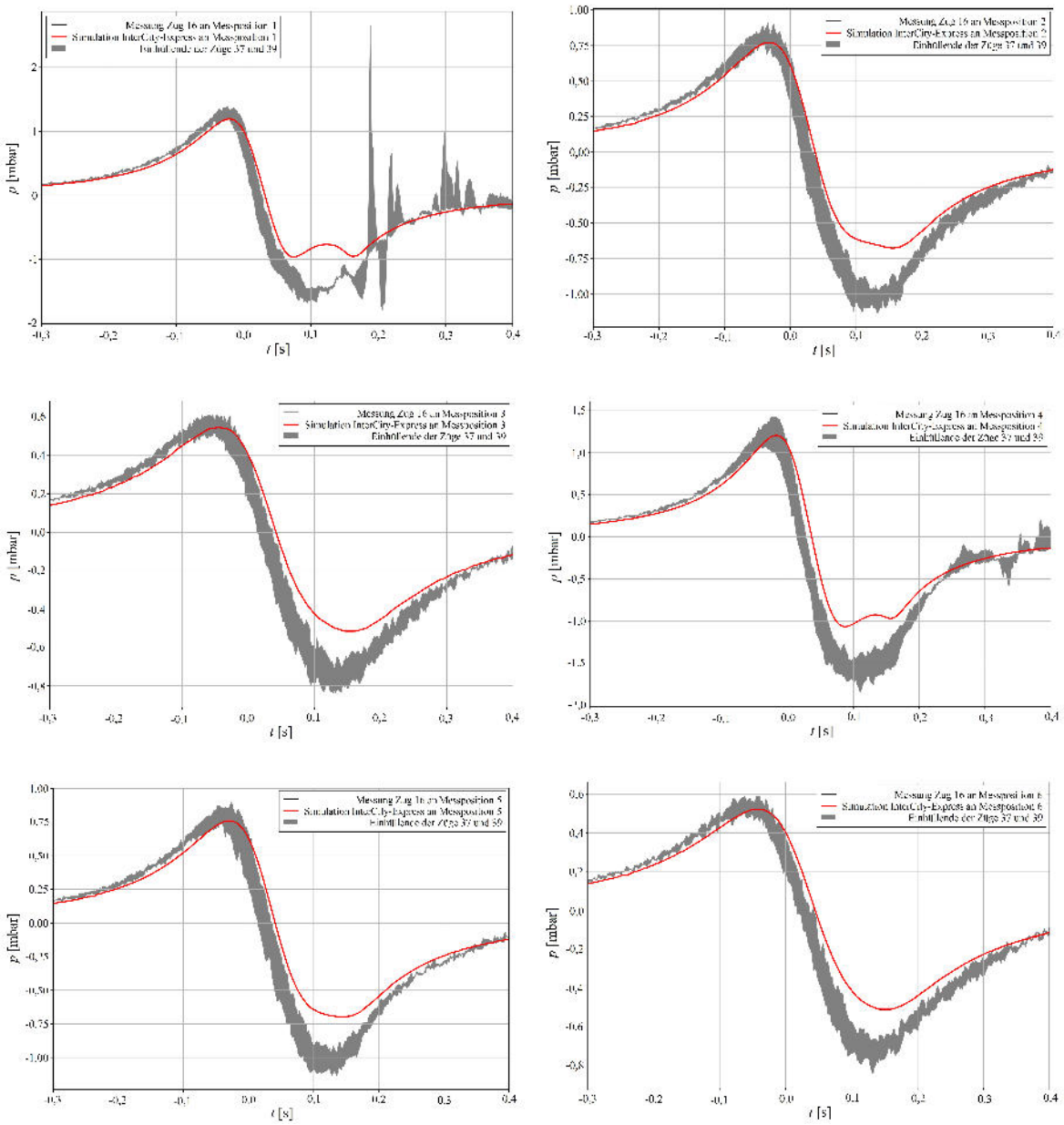


Abbildung 4.27: Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 1 bis 6 für einen InterCity-Express 3 Baureihe 403 mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$.

4.5.3 Maxima der Windgeschwindigkeit

Zusätzlich zum direkten Vergleich zwischen simulierten und gemessenen zeitlichen Verläufen von Druck und horizontaler Windgeschwindigkeit wurden die Maxima der genannten Größen miteinander verglichen. Zu diesem Zweck wurden die mit $\Delta t = 0{,}2\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten gemäß Abschnitt 3.5.1 aufgearbeitet und Regressionsgleichungen vom Typ (3.1) abgeleitet. Letztgenanntes wurde auch für die Maxima aus den Simulationen durchgeführt. Weil für diese Art des Vergleichs eine Mindestanzahl messtechnisch erfasster Züge erforderlich ist, können hier nur der Doppelstockzug Baureihe 446 und die S-Bahn Baureihe 425 betrachtet werden.

4.5.3.1 Doppelstockzug Baureihe 446

In den Abbildungen 4.28 und 4.29 ist der grafische Vergleich zwischen den simulierten und gemessenen Maxima der horizontalen Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ in Abhängigkeit von d und v_Z für den Doppelstockzug Baureihe 446 dargestellt. Die für die simulierten $\hat{u}$ verwendete Regressionsfunktion ist durchweg vom Typ (3.1), wobei stets $R^2 \approx 0{,}99$ galt. Die erheblichen Streubreiten für die Regressionsfunktionen der gemessenen $\hat{u}$ sind aus Übersichtsgründen nicht eingezeichnet. Gezeigt ist stets die Regressionsfunktion mit dem maximalen R^2 (Abschnitt 3.5.1.1).

Wie man den Abbildungen entnimmt, zeigt sich eine gute Übereinstimmung in den simulierten und gemessenen $\hat{u}(d,v_Z)$. Generell ist die Abhängigkeit der simulierten Windgeschwindigkeitsmaxima vom Abstand zur Gleisachse d etwas größer als bei den gemessenen Windgeschwindigkeitsmaxima, was insbesondere für die größeren Höhen über der Schienenoberkante $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ zu gelten scheint. Die Diskrepanz zwischen Simulation und Messung bei größeren d liegt darin begründet, dass der Einfluss des (geringen) Seitenwindes auf die gemessenen $\hat{u}$ mit wachsender Entfernung zum Gleis steigt. Relativ nahe am Gleis bzw. Zug und in Standhöhe eines Menschen gibt die Simulation die gemessenen $\hat{u}$ sehr gut wieder.

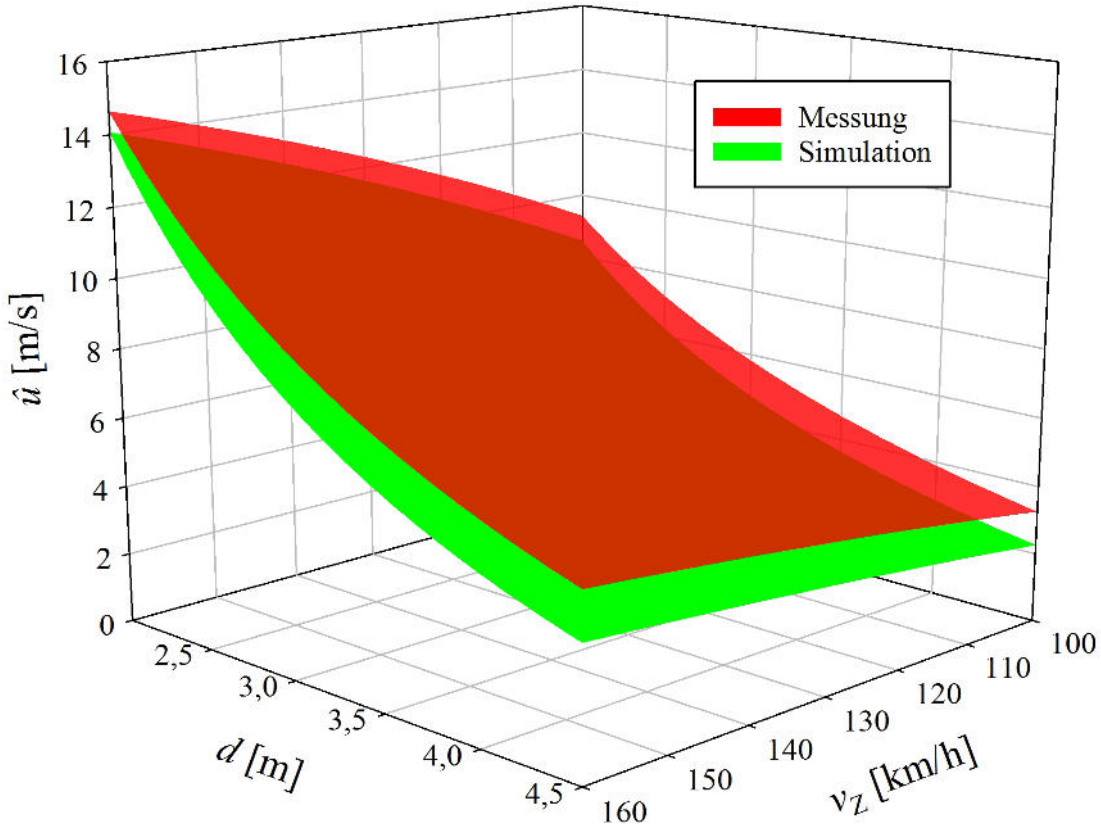


Abbildung 4.28: Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante.

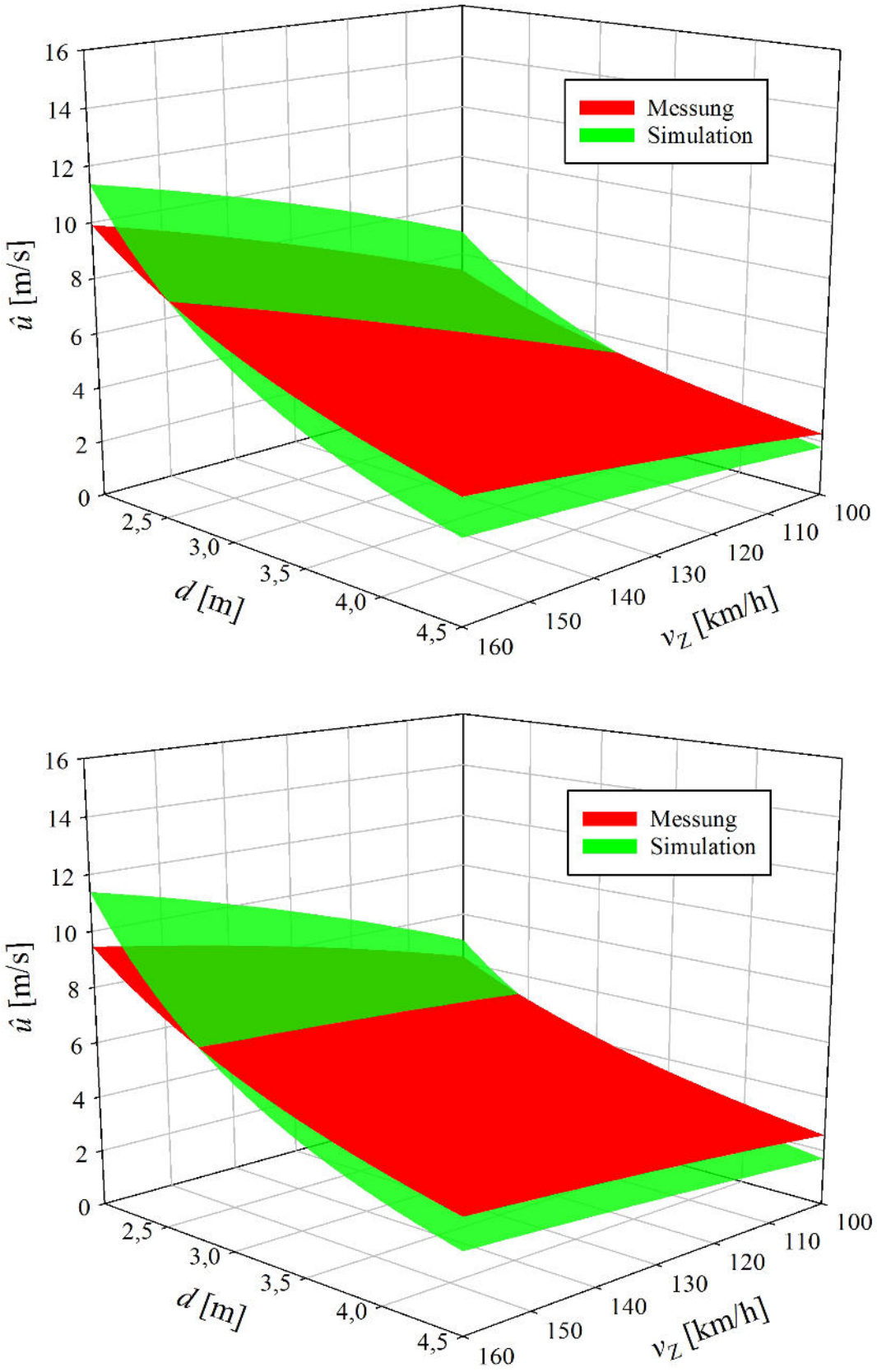


Abbildung 4.29: Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in den Höhen $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ (unten) über der Schienenoberkante.

4.5.3.2 S-Bahn Baureihe 425

In den Abbildungen 4.30 und 4.31 ist der grafische Vergleich zwischen den simulierten und gemessenen Maxima der horizontalen Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ in Abhängigkeit von d und v_Z für die S-Bahn Baureihe 425 dargestellt. Die für die simulierten $\hat{u}$ verwendete Regressionsfunktion ist erneut vom Typ (3.1), wobei für alle Regressionsfunktionen $R^2 \approx 0{,}95$ erzielt wurde. Die erheblichen Streubreiten für die Regressionsfunktionen der gemessenen $\hat{u}$ sind aus Übersichtsgründen nicht eingezeichnet. Gezeigt ist stets die Regressionsfunktion mit dem maximalen R^2 (Abschnitt 3.5.1.2).

Wie auch beim Doppelstockzug zeigt sich eine hervorragende Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante, wie Abbildung 4.30 illustriert. Mit zunehmenden z kommt es zu einer Überschätzung der $\hat{u}$ durch die Simulation je näher man der Gleisachse kommt (Abbildung 4.31). Auch hängen die aus der Simulation stammenden $\hat{u}$ stärker von d ab als die $\hat{u}$ aus den Messungen. Die Abhängigkeit von $\hat{u}$ von der Zuggeschwindigkeit v_Z ist bei Simulation und Messung nahezu identisch. Diese Phänomene wurde bereits in Abschnitt 4.5.1.2 festgestellt. Als Fazit bleibt festzuhalten, dass die Simulation in Standhöhe eines Menschen die gemessenen $\hat{u}$ sehr gut wiedergibt.

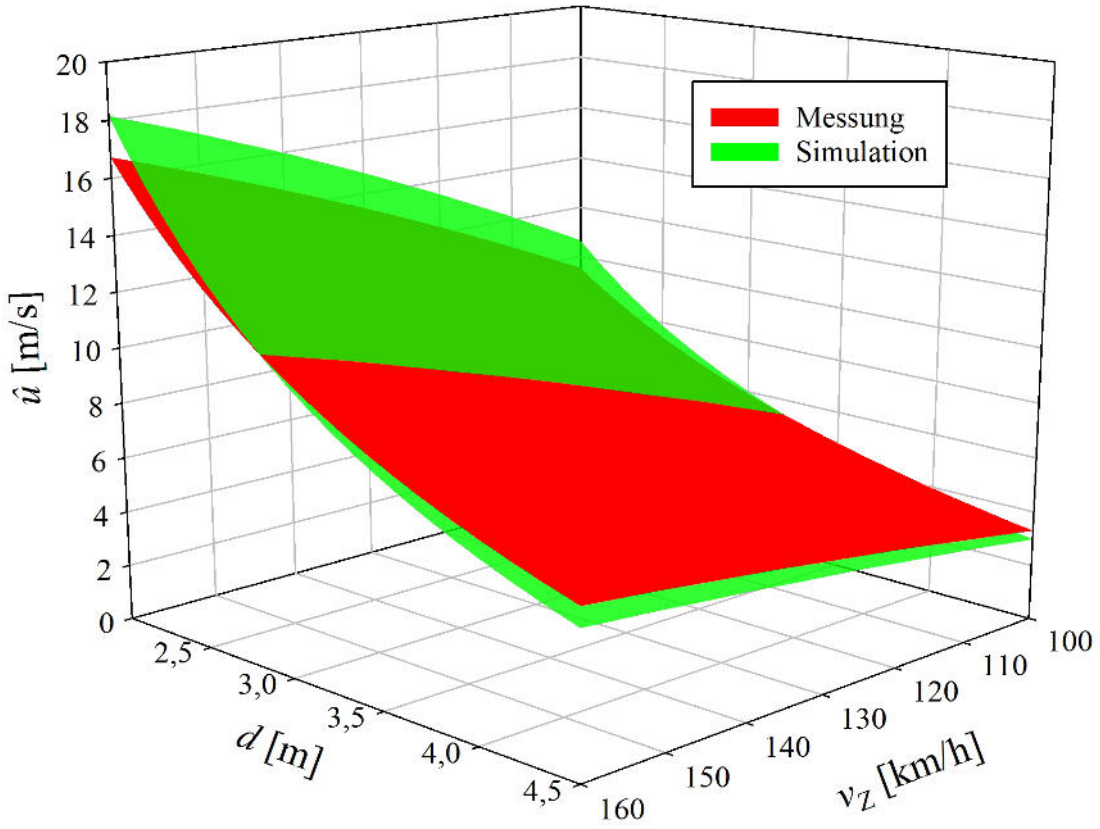


Abbildung 4.30: Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante.

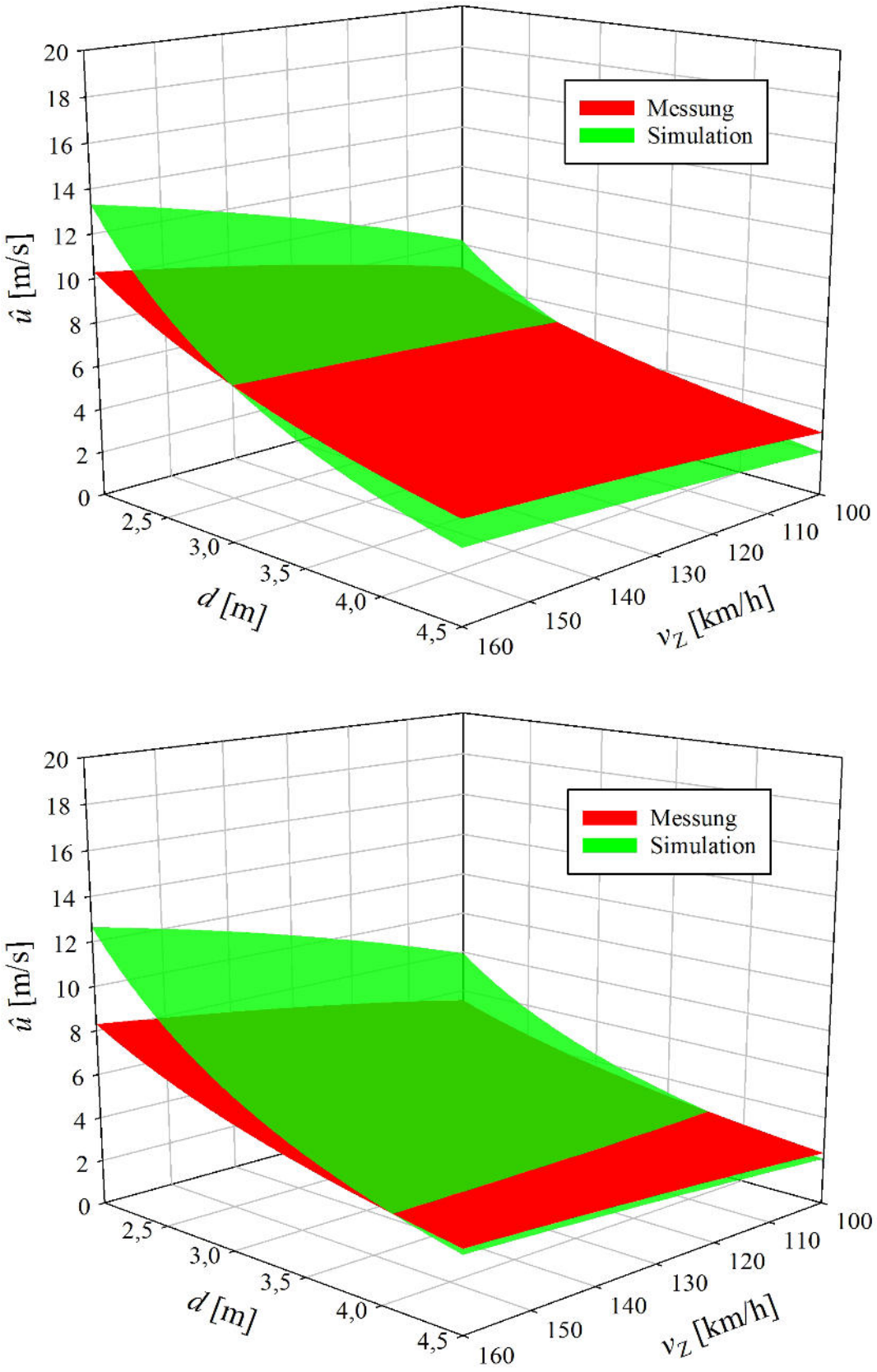


Abbildung 4.31: Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ (unten) über der Schienenoberkante.

4.5.4 Amplitude der Bugdruckwelle

In diesem Abschnitt werden die aus Simulation und Messung stammenden Amplituden Δp der Bugdruckwelle miteinander verglichen. Zu diesem Zweck wurden zum einen die Daten aus Abschnitt 3.5.3 übernommen und zum anderen mit den Δp an den Messpostionen 1 bis 9 aus der Simulation Regressionsfunktionen abgeleitet. Für die Regression wurde wieder der Funktionstyp (3.1) angewandt. Die ermittelten Regressionsfunktionen stimmen sehr gut mit den Δp aus der Simulation überein, wie $R^2 \approx 0{,}99$ demonstriert. Auf jegliche Messdatenbearbeitung wurde verzichtet.

4.5.4.1 Doppelstockzug Baureihe 446

Die Abbildungen 4.32 und 4.33 zeigen den Vergleich der Regressionsfunktionen für die $\Delta p(d,v_\mathrm{Z})$ aus Simulation und Messung. Man entnimmt Abbildung 4.32, dass in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante $\Delta p(d,v_\mathrm{Z})$ aus der Messung vollständig über $\Delta p(d,v_\mathrm{Z})$ aus er Simulation liegt. Dies deckt sich mit dem Ergebnis der Analyse aus Abschnitt 4.5.2.1. Die Abweichung beträgt maximal rund 20 %, liegt aber noch innerhalb der Streubreite der Messung, wie aus Abschnitt 4.5.2.1 hervorgeht. Sehr gut stimmen die $\Delta p(d,v_\mathrm{Z})$ aus Simulation und Messung für die Höhen $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ überein, wie aus Abbildung 4.33 ersichtlich wird. Die Abhängigkeiten der Δp von d und v_Z stimmen bei Simulation und Messung nahezu überein.

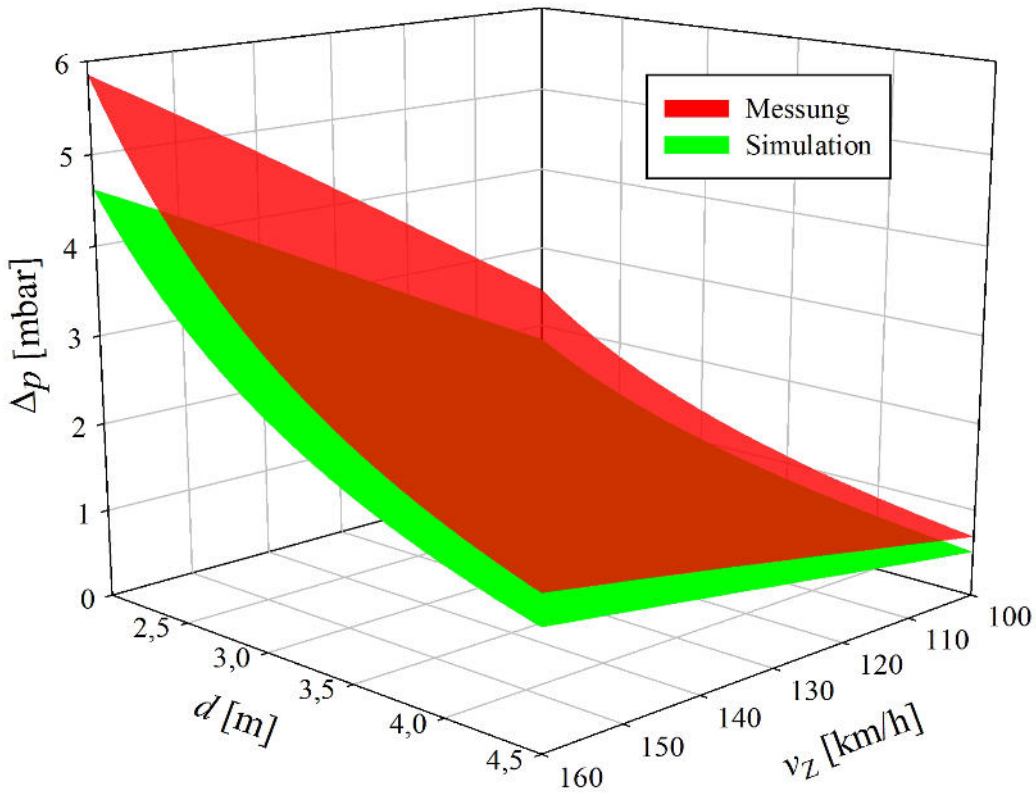


Abbildung 4.32: Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für einen Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante.

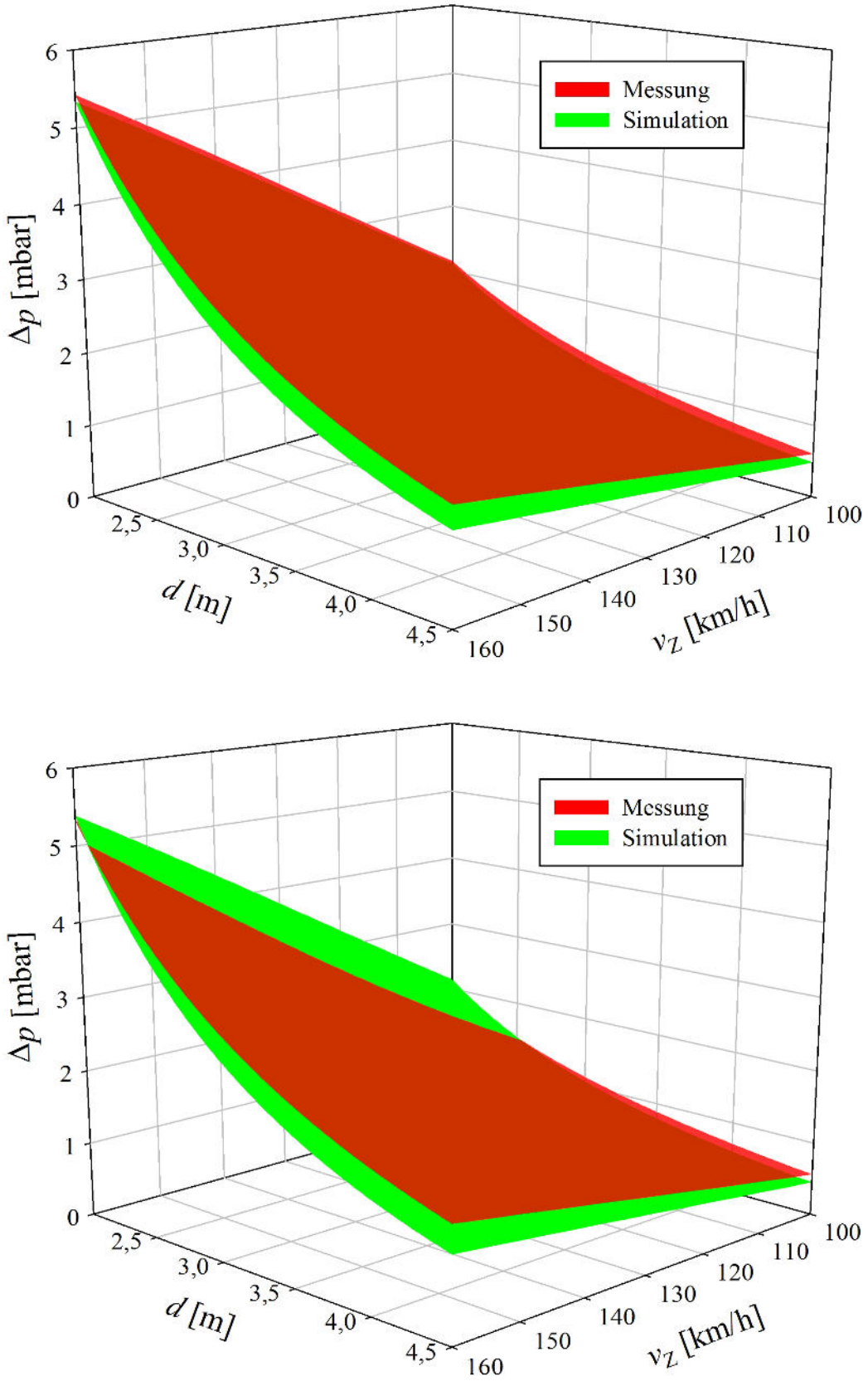


Abbildung 4.33: Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für einen Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ (unten) über der Schienenoberkante.

4.5.4.2 S-Bahn Baureihe 425

Abschließend zeigen die Abbildungen 4.34 und 4.35 den grafischen Vergleich zwischen den simulierten und gemessenen Amplituden der Bugdruckwellen Δp in Abhängigkeit von d und v_Z für die S-Bahn Baureihe 425. Abbildung 4.34 illustriert eindrucksvoll die fast vollständige Übereinstimmung der beiden Funktionen $\Delta p(d,v_Z)$ aus Simulation und Messung in der der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante. Abbildung 4.35 bestätigt das Ergebnis aus Abschnitt 4.5.2.2, dass Δp mit kleiner werdendem Abstand d zur Gleisachse durch die Simulation zunehmend überschätzt wird. Nahe am Gleis steigt dann die Diskrepanz zwischen Simulation und Messung mit größer werdender Zuggeschwindigkeit v_Z. Dieses Phänomen ist umso stärker ausgeprägt, je größer die Höhe z über der Schienenoberkante ist. Wie bereits in Abschnitt 4.5.2.2 erwähnt, ist der Grund dafür vermutlich in der Ausführung der virtuellen Dachaufbauten der modellierten S-Bahn zu sehen. Dies wird zu einem späteren Zeitpunkt detailliert untersucht werden. Für Risikoanalysen in Bezug auf aerodynamische Belastungen auf stehende Menschen am Gleis sind die Simulationsergebnisse sehr gut geeignet, weil in diesem Bereich die Simulation die Messdaten hervorragend wieder gibt.

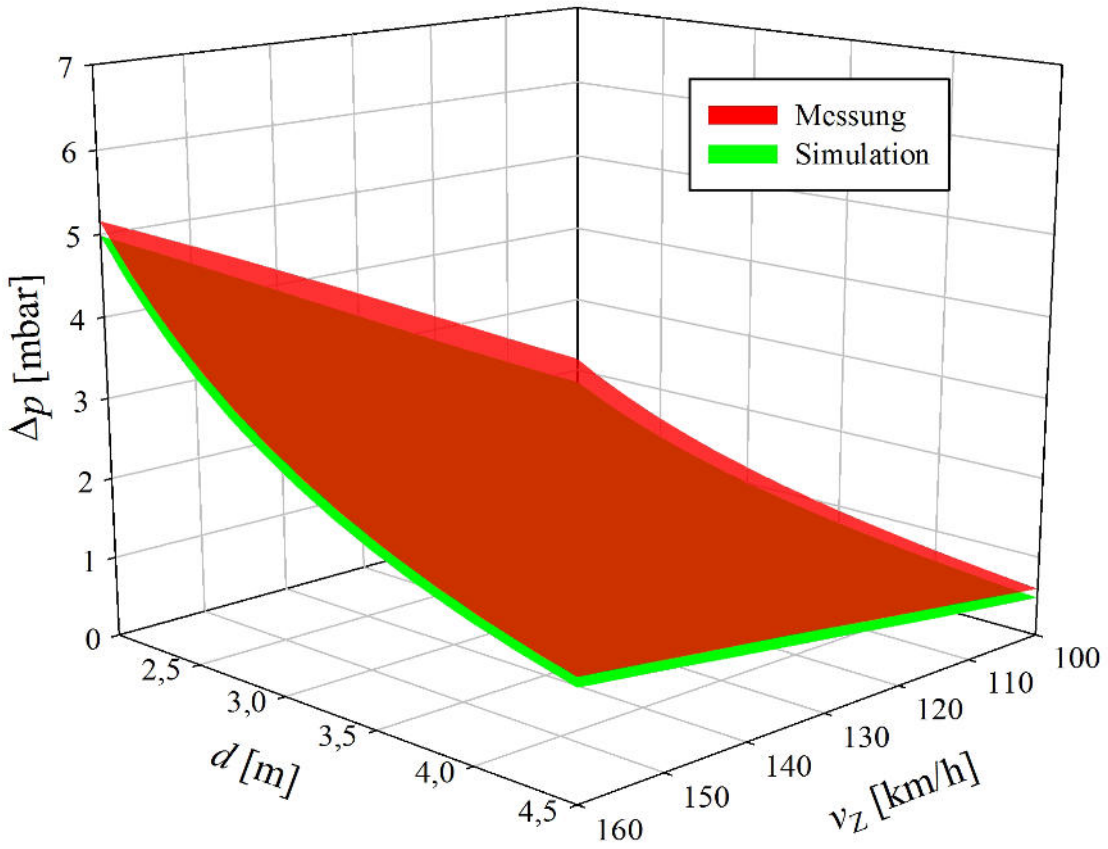


Abbildung 4.34: Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante.

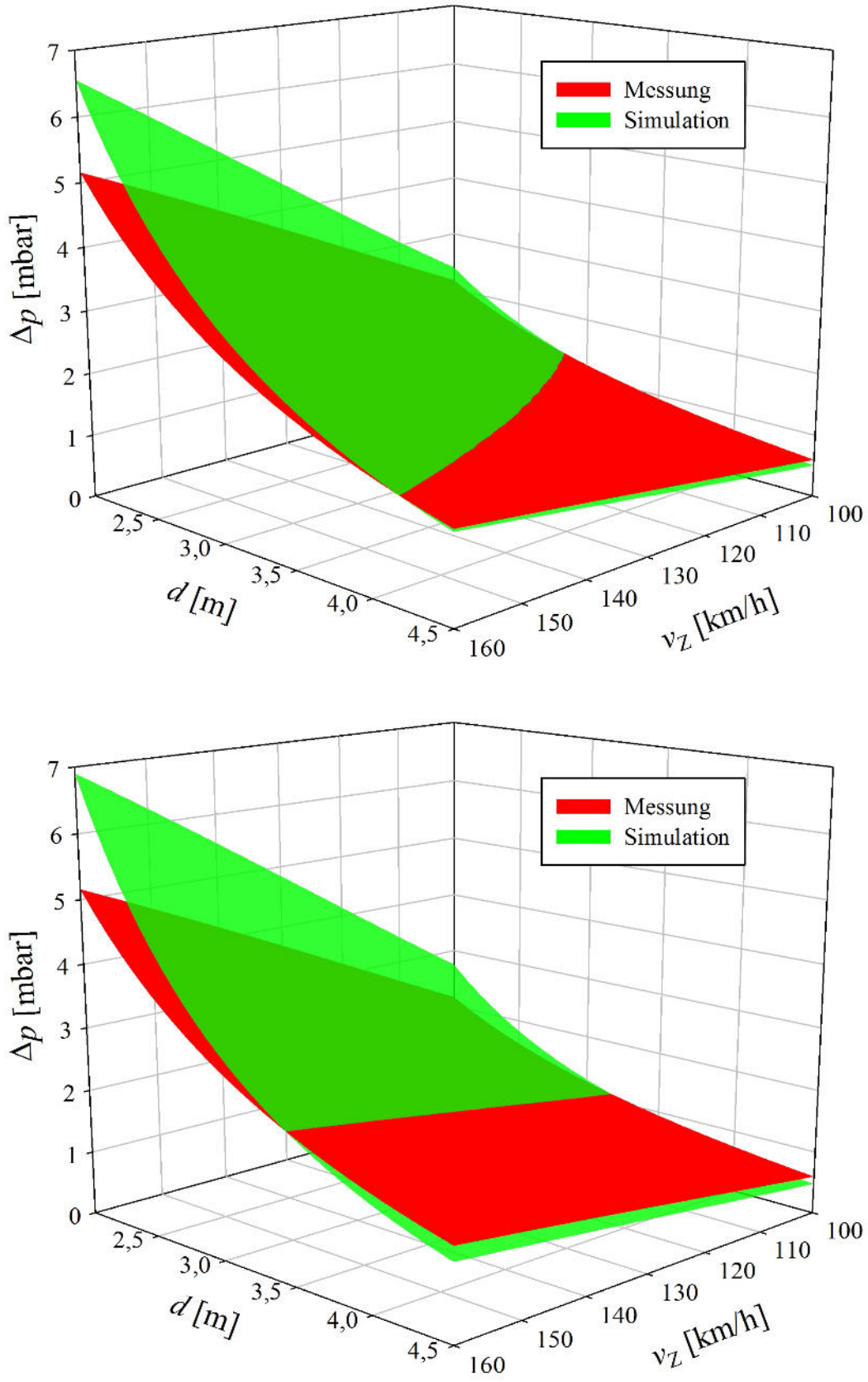


Abbildung 4.35: Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ (unten) über der Schienenoberkante.

4.6 FSAero

Zum Darstellen und Vergleichen der Daten aus den Computersimulationen wurde eine spezielle Software mit der Bezeichnung FSAero entwickelt. Die Software verfügt über drei verschiedene Darstellungsmodi. Weiterhin besitzt die Software eine Funktion zur Abschätzung der Wirkung von aerodynamischen Belastungen auf Menschen am Gleis.

4.6.1 Schar-Modus

Durch Doppelklick auf das Icon  startet das Programm und öffnet standardmäßig das Fenster für die Scharstellungsart (Abbildung 4.36). Bei dieser Darstellungsart kann einer der Paramenter Zugtyp, Zuggeschwindigkeit v_Z, Mittelungszeitintervall Δt, Höhe über der Schienenoberkante z oder Abstand von der Gleisachse d als x-Achse eines Diagramms ausgewählt werden. Der y-Achse wird – je nach zu untersuchender aerodynamischen Größe – entweder die maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}$, die maximale Windbeschleunigung $\hat{a}$ oder die Druckamplitude bei Zugbugpassage Δp zugeordnet. Angezeigt wird dann eine Kurvenschar, welche den aktivierten Kästchen im Feld des ausgewählten Scharparameters entspricht. In Abbildung 4.36 ist beispielsweise der Zugtyp als Scharparameter gewählt und im zugehörigen Auswahlfeld darüber sind alle fünf Zugtypen aktiv. Deshalb werden im Diagramm fünf Kurven angezeigt, welche für jeden Zugtyp die Abhängigkeit der (zuvor ausgewählten) maximalen Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ vom (ebenfalls zuvor ausgewählten) Parameter d anzeigen.

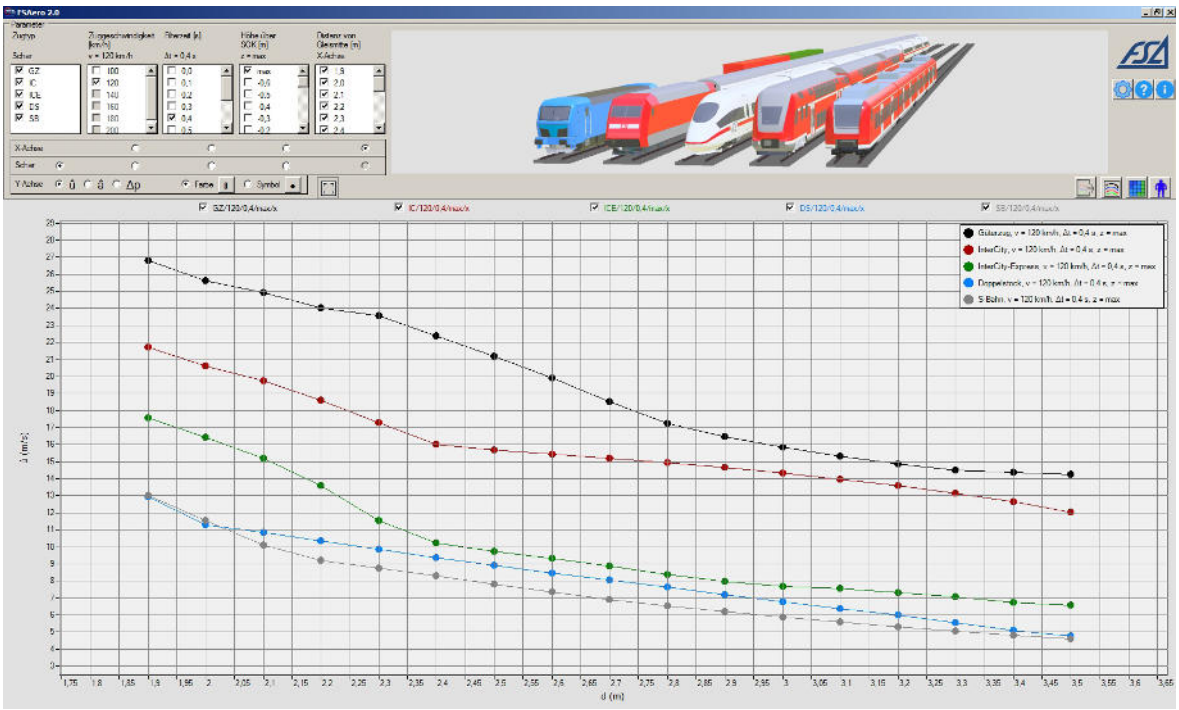


Abbildung 4.36: Fenster für die Schardarstellung der Software FSAero.

4.6.2 Vergleichs-Modus

Zum direkten Vergleich ausgewählter Parameterkombinationen verfügt die Software FSAero über den Vergleichs-Modus. Dieser wird durch Anklicken des Buttons  gestartet (Abbildung 4.37). Durch Klick auf den Button  werden die Kurven im linken Diagramm dem rechten Diagramm hinzugefügt. In Abbildung 4.37 sind beispielsweise im rechten Diagramm die Abhängigkeiten $\hat{u}(d)$ für die fünf verschiedenen Zugtypen in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante gezeigt, wobei die zugrunde liegenden Daten über das Zeitintervall $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelt wurden. Die Geschwindigkeit des Güterzugs beträgt $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$, die der anderen Zugtypen $160\,\mathrm{km/h}$. Man entnimmt diesem Beispiel, dass der InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ bei diesem Vergleich die höchsten Windgeschwindigkeitsmaxima erzeugt.

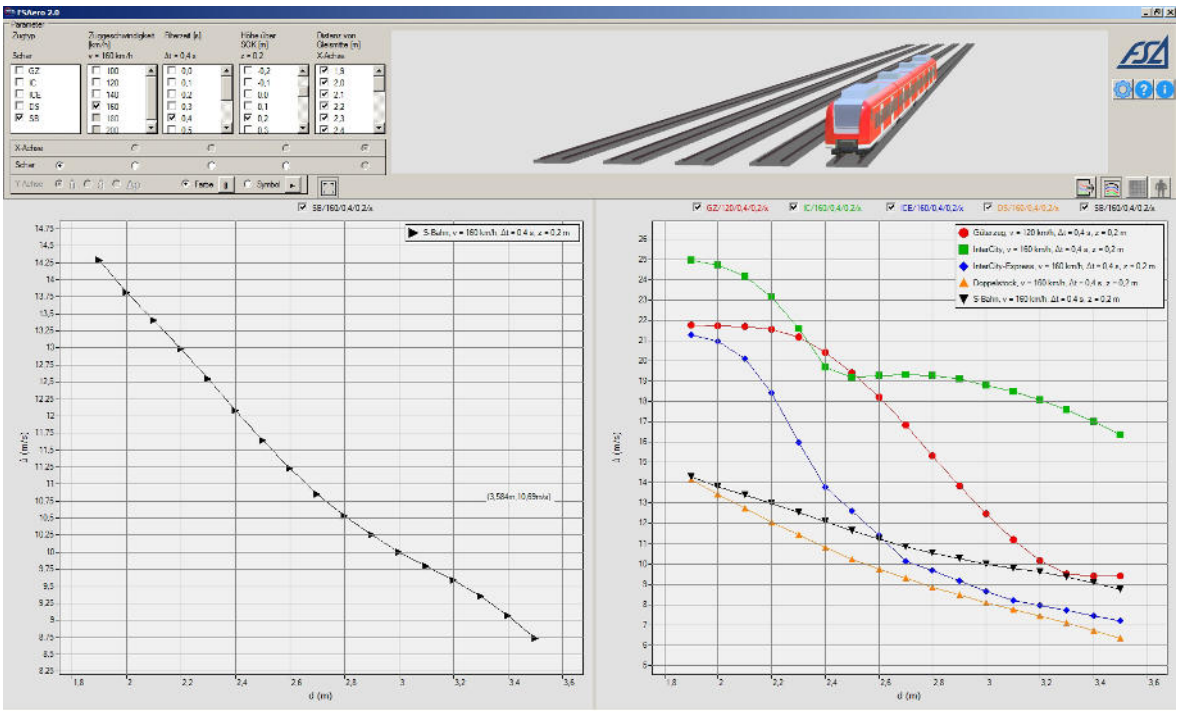


Abbildung 4.37: Fenster für den direkten Vergleich ausgewählter Parameterkombinationen der Software FSAero.

4.6.3 Heatmap-Modus

Um sich ein Bild über die räumliche Verteilung der verschiedenen maximalen aerodynamischen Belastungen $\hat{u}$, $\hat{a}$ und Δp neben dem Gleis machen zu können, verfügt FSAero über den sogenannten Heatmap-Modus. Dieser wird aktiviert durch Klick auf den Button  . Je nach ausgewählter aerodynamischer Größe, Zugtyp, Zuggeschwindigkeit und Mittelungszeitintervall erscheint im rechten Grafikfeld ein Heatmap-Diagramm, welches die Höhe der aerodynamischen Belastung als Funktion von d und z farblich kodiert darstellt (Abbildung 4.38). Dabei bestimmt die ausgewählte aerodynamische Größe die Farbpalette der Kodierung. Werden nun bestimmte Höhen z über der Schienenoberkante ausgewählt, wird dieser Bereich durch ein farbiges Rechteck in der Heat-

map markiert sowie die Wertepaare aus dem Rechteck im linken Grafikfeld in Form eines Funktionsgraphen angezeigt. Das Beispiel in Abbildung 4.38 zeigt die Heatmap für die maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ für einen InterCity mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ und Mittelungszeitintervall $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$. Ausgewählt sind die Höhen über Schienenoberkante $z = -0{,}1\,\mathrm{m}$, $0{,}2\,\mathrm{m}$ und $0{,}5\,\mathrm{m}$, wie unschwer an den roten Rechtecken in der Heatmap zu erkennen ist. Jedes der Rechtecke ist rechts außen mit dem Symbol markiert, welches im Diagramm links zur Darstellung des zugehörigen Funktionsgraphen verwendet wird.

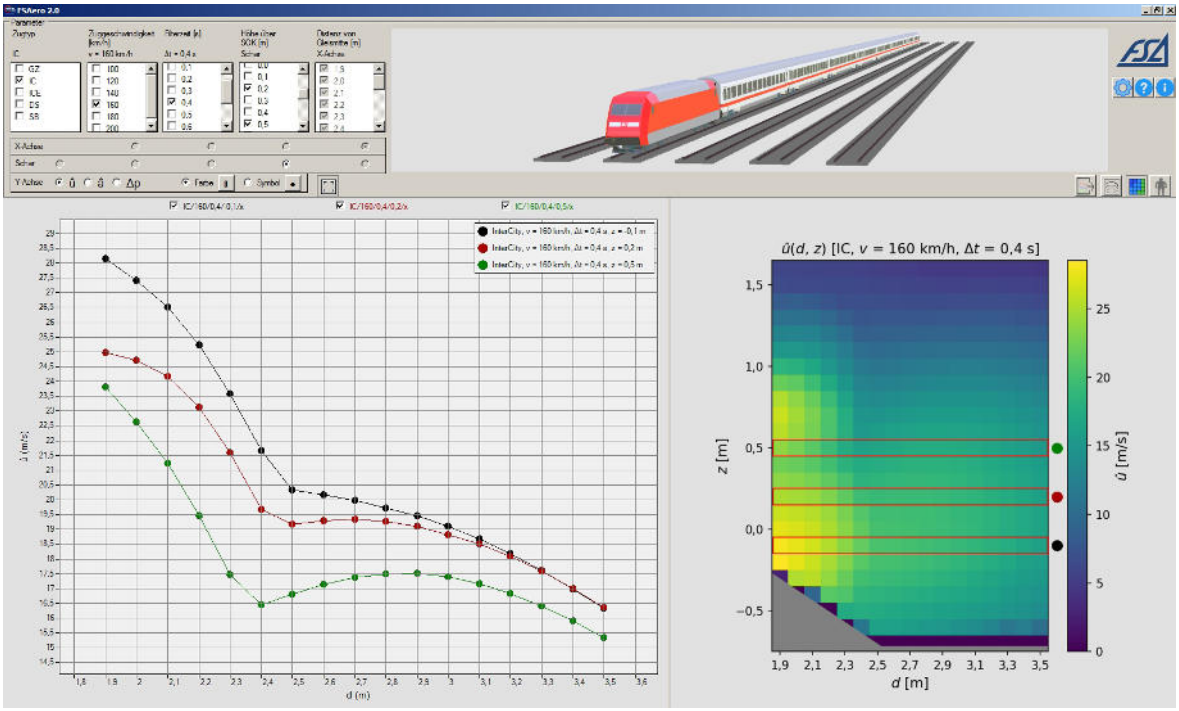
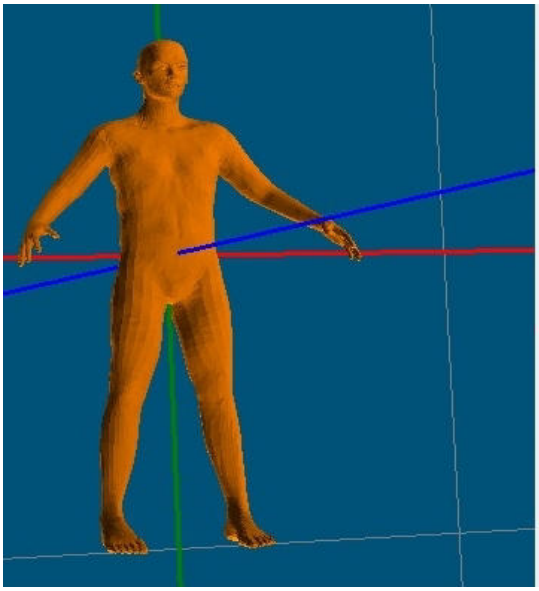


Abbildung 4.38: Fenster zum Anzeigen einer Heatmap-Darstellung verschiedener aerodynamischen Belastungen in FSAero.

4.6.4 Belastungs-Modus

In Abschnitt 2.2.2 ist ein einfaches Modell dargelegt, mit dem es möglich sein soll, das Risiko des Gleichgewichtsverlusts eines aufrecht stehenden Menschen aufgrund aerodynamischer Belastungen in guter Näherung abschätzen zu können. Im Modell wird ein Quader angeströmt, mit (2.1) die auf den Quader wirkende Kraft berechnet und durch Lösung von (2.6) die Bewegung des Quaders abgeleitet. Überschreitet der etwas oberhalb der Quadermitte positionierte Schwerpunkt des Quaders die Drehachse, herrscht Gleichgewichtsverlust. Dieses Modell wurde in abgewandelter Form in FSAero implementiert. Anstelle von (2.1) zur Kraftberechnung wird (2.2) verwendet und damit auch die Windbeschleunigung berücksichtigt. Der Quader wurde durch ein virtuelles 3D-Modell eines Menschen wie in Abbildung 4.39 ersetzt, welches mit dem MakeHuman Plugin der OpenSource Software Blender erstellt wurde. Mit Hilfe dieses Modells werden alle menschlichen Parameter, welche für die Berechnung mit (2.2) und (2.5) erforderlich sind, aus der Körpergröße und des Body Mass Index (BMI) des Menschen



```
Name    : Man.25.50.150.170
Masse   : 74,775 kg
Typ     : Mesh (#83196)
MeshSize: (1.1282475149,1.7312988714,0.4800988973) m
MeshOffs: (-0.5645853431,-0.9876162874,-0.1490463614) m
Oberfl. : 1,962041 m²
Dichte  : 983 kg/m³
Volumen : 0,076069 m³
Position: (0,0,0) m
Drehung : (0,0,0) °
Icm     :
M(3x3)
11,2547965745  0,0002745581  0,0001203004
 0,0002745581  2,0340310288  0,0546114967
 0,0001203004  0,0546114967 12,7512760374

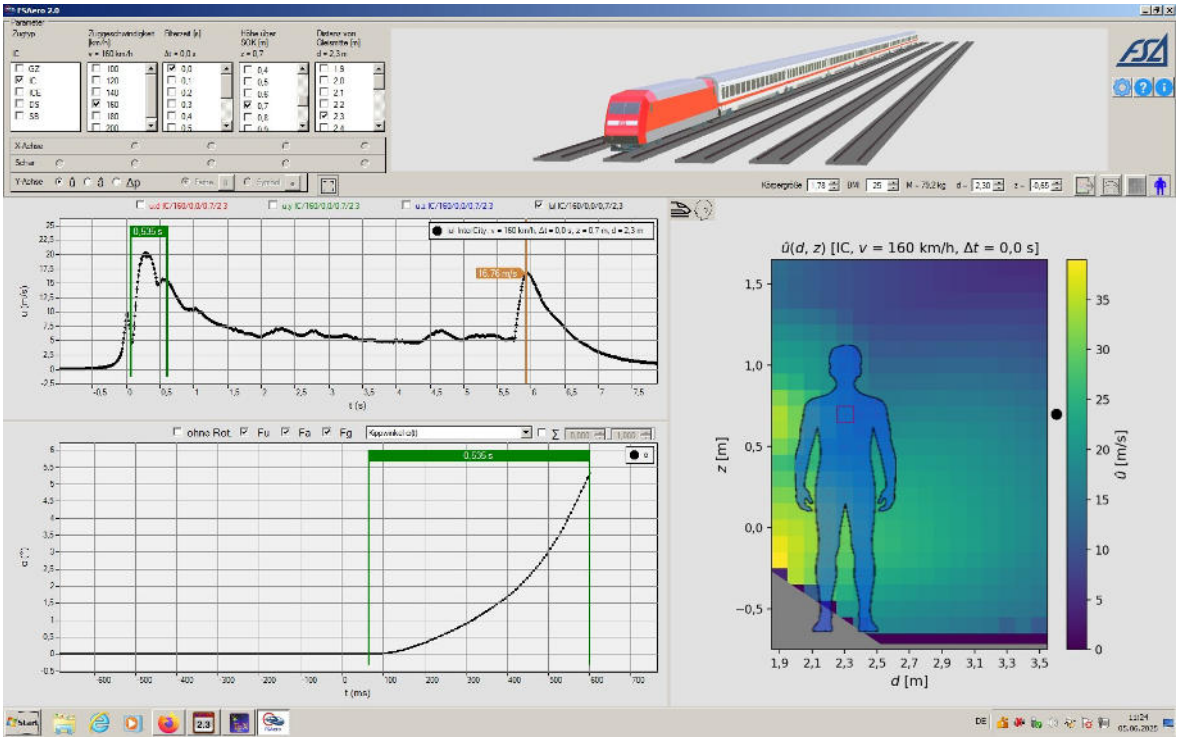
invIcm  :
M(3x3)
 0,0888510065 -0,0000119722  -0,000000787
-0,0000119722  0,4916911254 -0,0021058274
 -0,000000787 -0,0021058274  0,0784325427

R       :
M(3x3)
1 0 0
0 1 0
0 0 1
```

Abbildung 4.39: Virtuelles 3D-Modell eines Menschen zur numerischen Berechnung des menschlichen Trägheitsmoments J_{M} sowie weiterer Parameter wie der Körpermasse und der Körperquerschnittsfläche. Vorgegeben werden die Körpergröße und der BMI.

abgeleitet. Weiterhin werden Informationen aus der Arbeit von Jordan [73] über die physikalischen Eigenschaften des menschlichen Körpers verwendet. In dieser Arbeit findet man, dass sich der Schwerpunkt eines Menschen in einer Höhe von 55 % seiner Körpergröße befindet, die Fußlänge 15 % seiner Körpergröße beträgt und der Abstand zwischen der Senkrechten durch den Körperschwerpunkt und der Rotationsachse an der Ferse des Menschen 1/3 der Fußlänge misst. Das Drehmoment auf den virtuellen Menschen ist die Summe über alle Drehmomente innerhalb des menschlichen Umrisses in Abbildung 4.40.

Durch Anklicken des Buttons  wird das Fenster für den Belastungs-Modus (Abbildung 4.40) geöffnet, mit dem beispielsweise die Abschätzung eines Gleichgesichtsverlustes eines Menschen aufgrund aerodynamischer Belastungen durchgeführt werden kann. Wie Abbildung 4.40 zeigt, ist in der rechten Grafik die Heatmap für die Windgeschwindigkeit dargestellt, in welcher ein schematisierter Mensch mit Hilfe der Auswahlfelder über der Grafik definiert und positioniert werden kann. Durch Mausklick auf den Menschen wird ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 10 cm ausgewählt, für welches die dort herrschenden zeitlichen Verläufe der Windgeschwindigkeit oder wahlweise auch der Windbeschleunigung für alle drei Koordinaten y, d und z im oberen der beiden Diagramm links angezeigt werden. Im unteren Diagramm kann die zeitliche Entwicklung verschiedener Parameter zur Darstellung gebracht werden. In Abbildung 4.40, oben ist beispielsweise der Rotationswinkel Θ des Modell-Menschen über der Zeit dargestellt. Überschreitet Θ innerhalb der Zeitspanne t_{g} den Winkel, bei dem der Schwerpunkt des Menschen über die Rotationsachse hinaus wandert ($\approx 5°$), ist per Definition Gleichgewichtsverlust eingetreten und der grüne Balken im Diagramm mit der Zeitanzeige färbt sich rot. Gemäß Jordan gilt $0{,}375\,\mathrm{s} \leq t_{\mathrm{g}} \leq 0{,}476\,\mathrm{s}$, je nach Konstitution des Menschen [73]. Im Beispiel in Abbildung 4.40, oben wird der kritische Winkel in 0,535 s erreicht. Weil $t_{\mathrm{g}} = 0{,}4\,\mathrm{s}$ eingestellt ist, bleibt der Balken mit der Zeitangabe grün.



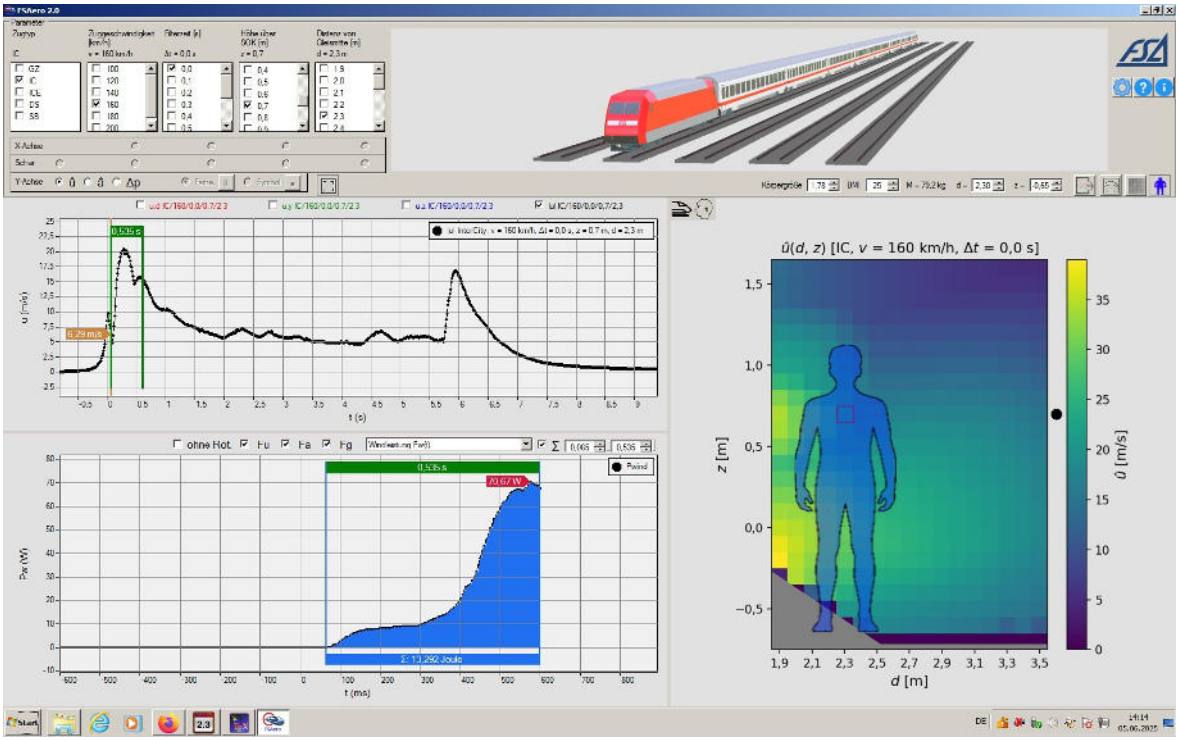


Abbildung 4.40: Oben: Fenster zur Abschätzung des Gleichgesichtsverlusts eines Menschen am Gleis aufgrund aerodynamischer Belastung. Unten: Fenster zur Berechnung der vom Menschen aufgenommenen windinduzierten Arbeit während der Gleichgewichtsverlustdauer.

Im Belastungs-Modus kann der zeitliche Verlauf weitere Parameter durch Auswahl im Pulldown-Menü des unteren Diagramms untersucht werden. Beispielsweise können Größen wie das Drehmoment M, der aufgenommene Drehimpuls L, die Leistung P und einige andere Größen analysiert werden, wobei die Möglichkeit besteht, die Beiträge aus Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Gravitation zur Kraft bzw. zum Drehmoment separat ein- und auszuschalten.

Darüber hinaus beinhaltet das untere Diagramm die Möglichkeit, über Teile der Kurve zu integrieren, wodurch sich weitere relevante physikalische Größen berechnen lassen. Integriert man beispielsweise über die am virtuellen Menschen wirkende Windleistung mit den Grenzen der *Stabilitätsverlustdauer*, erhält man die vom Wind geleistete Arbeit E_{W}, die der virtuelle Mensch bis zum Zeitpunkt des Gleichgewichtsverlust aufgenommen hat. Die vom Wind geleistete Arbeit kann als Maß für die aufgenommene aerodynamische Belastung in einem definierten Zeitfenster herangezogen werden. In Abbildung 4.40, unten nimmt der virtuelle Mensch beispielsweise $E_{\mathrm{W}} = 13{,}3\,\mathrm{J}$ während der Passage eines InterCity mit $v_{\mathrm{Z}} = 160\,\mathrm{km/h}$ auf, wobei die senkrechte Symmetrieachse des Menschen $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ von der Gleisachse entfernt ist. Betrachtet wird das Zeitintervall von $0{,}065\,\mathrm{s}$ bis $0{,}6\,\mathrm{s}$, wobei $t = 0{,}065\,\mathrm{s}$ den Zeitpunkt markiert, ab dem die Fußspitzen des virtuellen Menschen den Kontakt zum Erdboden verlieren.

5 Belastungsanalyse mit FSAero

Die zentrale Fragestellung dieser Untersuchung ist, mit welcher Geschwindigkeit verschiedene Zugtypen Baustellen mit fester Absperrung ohne akustische Warnung und Arbeitsunterbrechung passieren können, ohne dass das gegenwärtig geltende Arbeitssicherheitsniveau in Bezug auf aerodynamische Belastungen auf Beschäftigte am Gleis abgeschwächt wird. Gemäß Abschnitt 1.1 ist ausreichende Arbeitssicherheit bei fester Absperrung und ohne akustische Warnung in einem Abstand $d \geq 2{,}30\,\mathrm{m}$ von der Gleisachse dann gewährleistet, wenn die Zuggeschwindigkeit allgemein nicht größer als $120\,\mathrm{km/h}$ ist. Gemäß Literatur erzeugt ein Güterzug in Relation zu allen anderen Zugtypen die größten aerodynamischen Belastungen. Aus diesem Grund wird für eine vergleichende Untersuchung der Windgeschwindigkeit, der Windbeschleunigung und des Drucks mit FSAero der Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ als Referenz herangezogen. Der Parameter z, also die Höhe über der Schienenoberkante, wird auf die Werte $z = 0{,}2\,\mathrm{m/s}$ (DIN EN 14067-4), $0{,}7\,\mathrm{m}$ und auf „max“ gesetzt. $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ ist etwa die Brusthöhe eines stehenden Menschen, weshalb die angreifenden aerodynamischen Belastungen hier von besonderem Interesse sind. Die Einstellung „max“ bedeutet, dass automatisch die Maximalwerte aus allen z für die Darstellung ausgewählt werden. Der Grund für diese z-Auswahl ist die Feststellung, dass die Maximalwerte der verschiedenen aerodynamischen Belastungen mitnichten stets in einer Höhe von $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ auftreten, sondern dass die Höhe der Maximalbelastung abhängig ist von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Letztgenanntes ist leicht erkennbar, wenn die verschiedenen aerodynamischen Belastungen im Heatmap-Modus von FSAero dargestellt werden (Abbildungen 5.4, 5.8 und 5.11). Die Windgeschwindigkeit und die Windbeschleunigung werden bei dieser Analyse mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ (DIN EN 14067-4) gleitend gemittelt. Anschließend wird der zeitliche Verlauf der Kraft auf das menschliche Modell in FSAero im Hinblick auf Einhaltung der Grenzwerte aus Tabelle 2.3 untersucht. Weiterhin wird ein möglicher Gleichgewichtsverlust geprüft. Auch der zeitliche Druckverlauf wird analysiert und dabei die Einhaltung der Grenzwerte aus Tabelle 2.4 kontrolliert. Abschließend wird der vom menschlichen Modell aufgenommene Drehimpuls in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit untersucht.

5.1 Windgeschwindigkeit

Den Vergleich der maximalen Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ für alle Zugtypen bei $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$, $0{,}7\,\mathrm{m}$ und „max“ für die gleitende Mittelung mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $1{,}0\,\mathrm{s}$ zeigen die Abbildung 5.1 bis 5.4. Gemäß der Ausführungen in Kapitel 2 ist insbesondere das Mittelungszeitintervall $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ wichtig, weshalb es hier Beachtung findet. Die Geschwindigkeit des Güterzuges beträgt $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. Alle anderen Züge fahren mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$. Die rote Kurve mit runden Punkten ist jeweils die vom Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ hervorgerufene maximale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand d zur Gleisachse. Die Legende der Diagramme charakterisiert die zugehörigen Parameter.

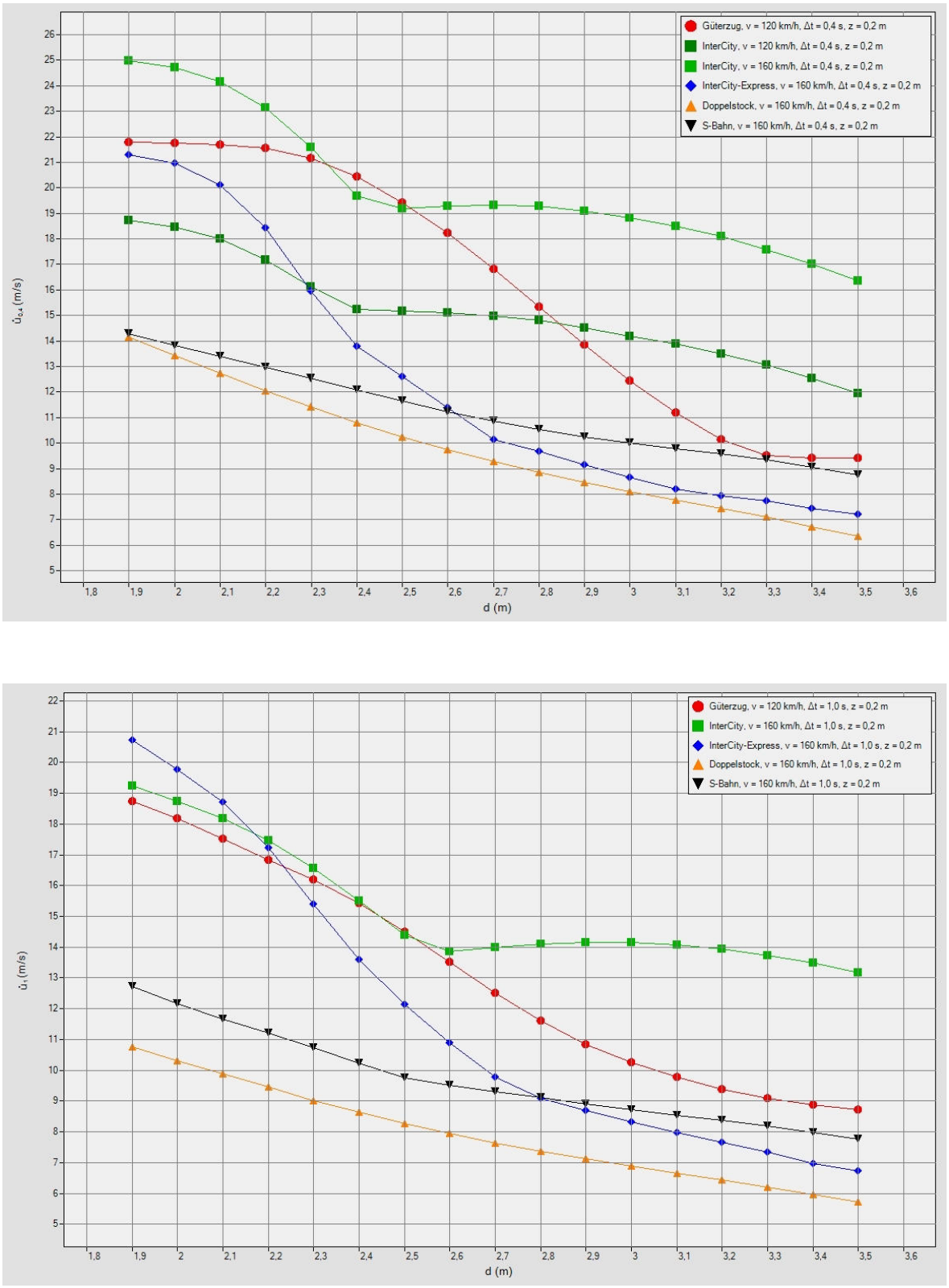
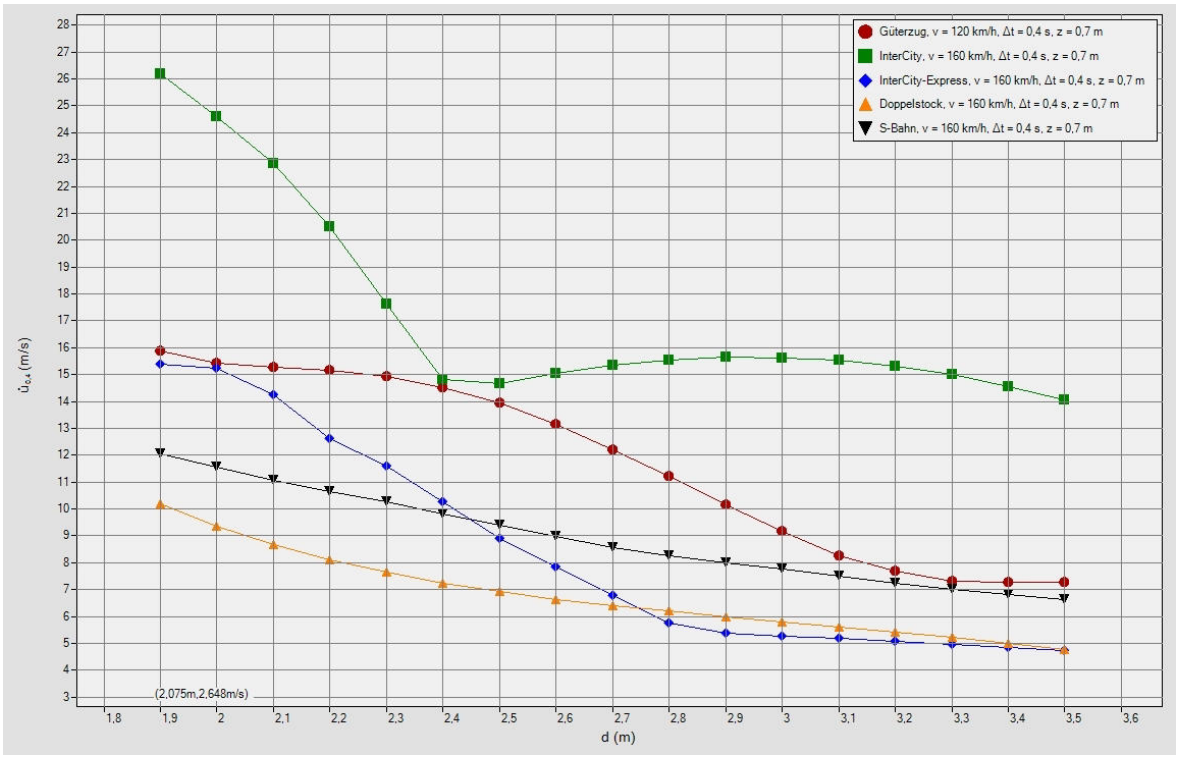


Abbildung 5.1: Vergleich der in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.



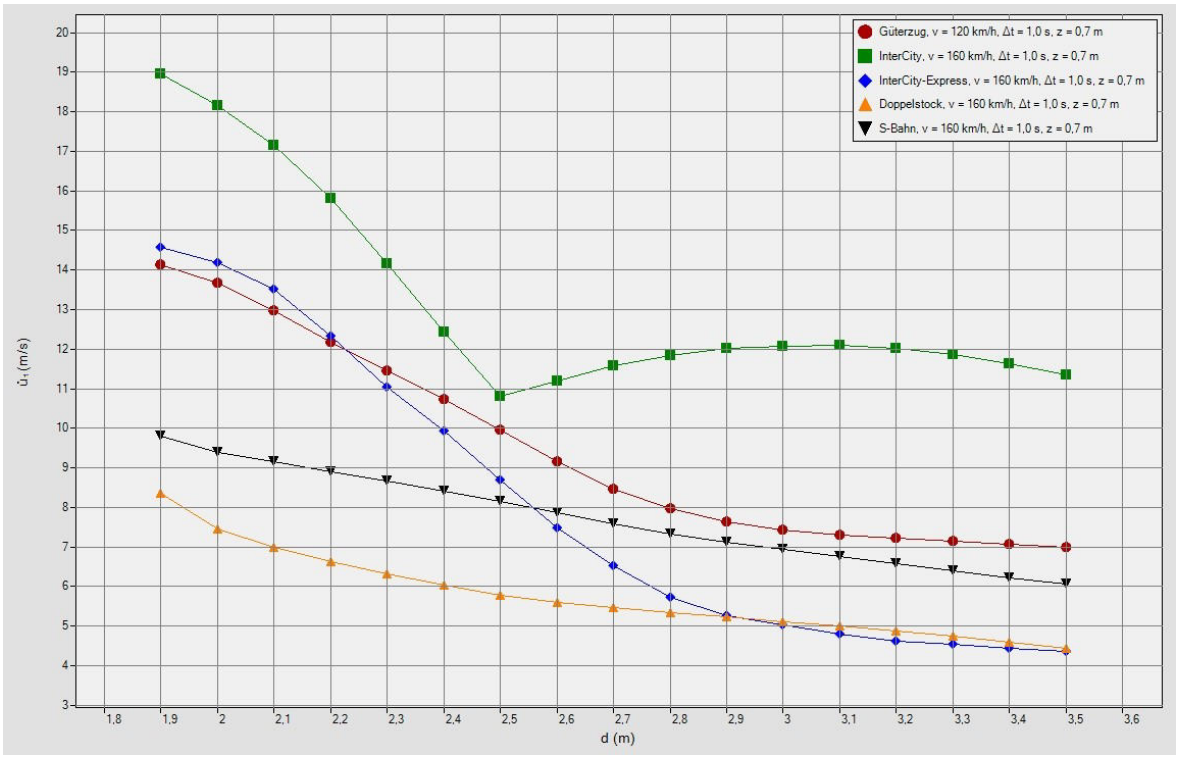


Abbildung 5.2: Vergleich der in $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

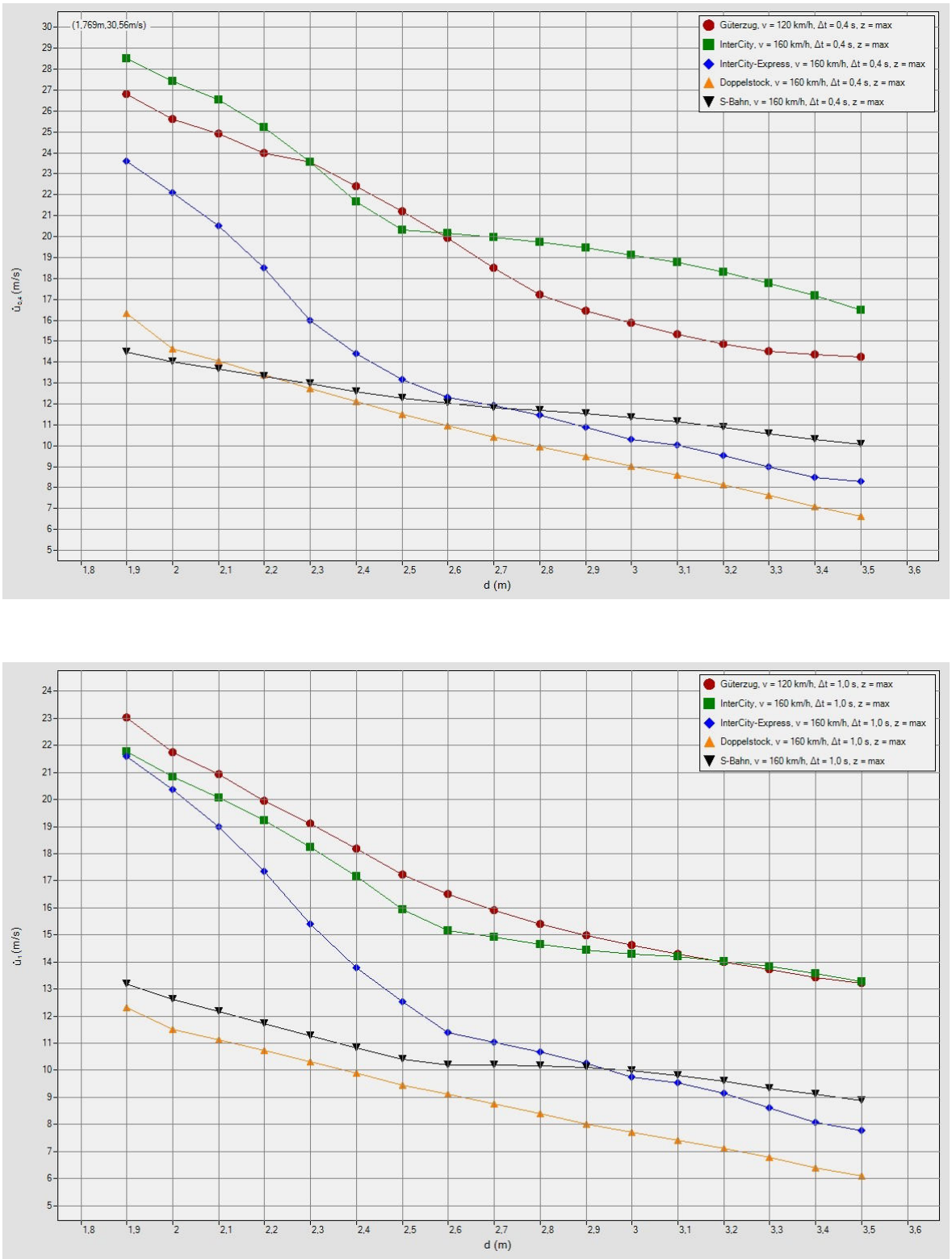


Abbildung 5.3: Vergleich der z-unabhängigen maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

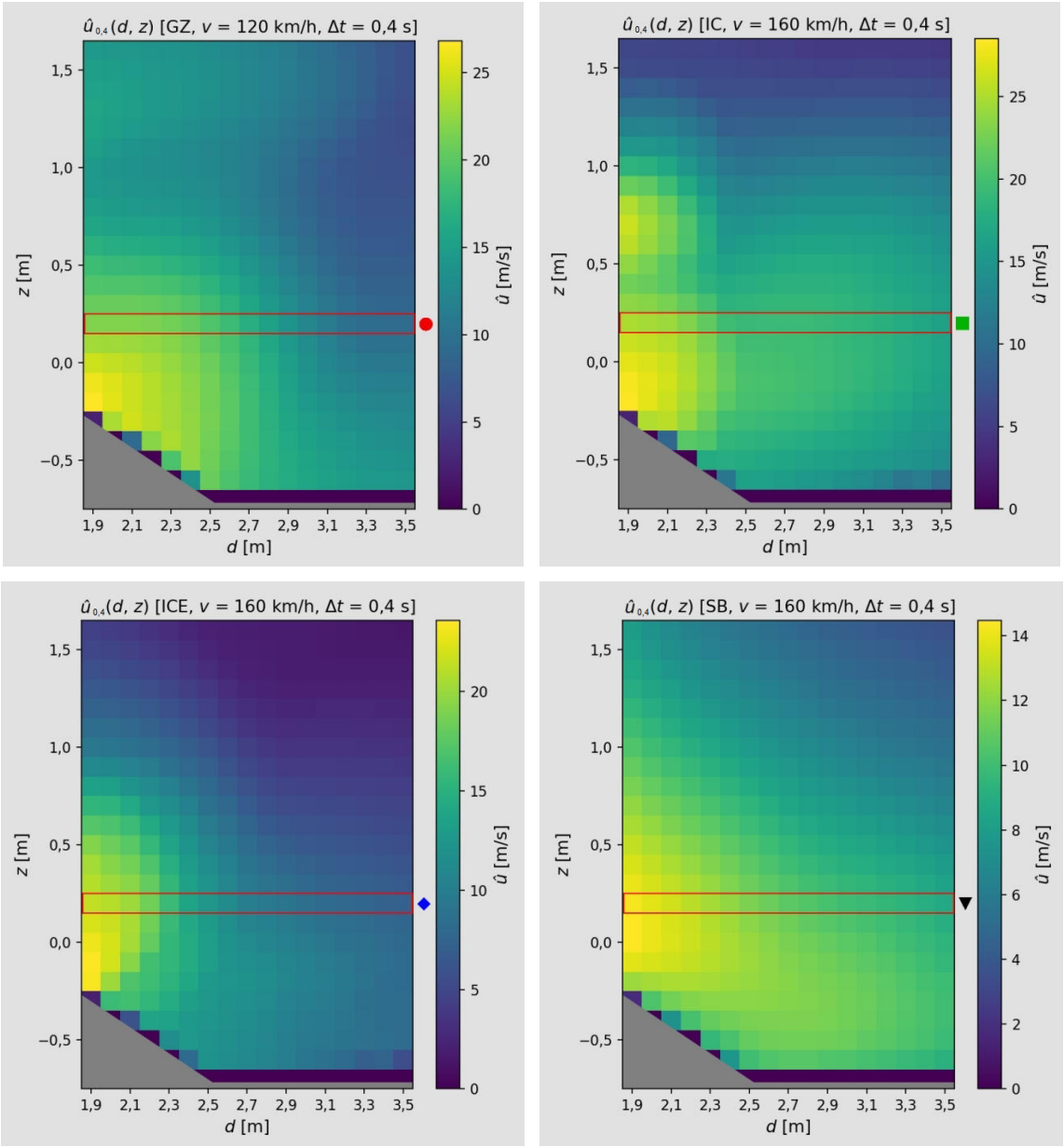


Abbildung 5.4: Heatmaps für die maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}_{0,4}$ eines Güterzuges mit $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ (oben, links), eines InterCity (oben, rechts), eines InterCity-Express (unten, links) und einer S-Bahn Baureihe 425 (unten, rechts). Letztgenannte drei Züge fahren mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$. Man beachte die unterschiedliche Farbskalierung. $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ ist mit einem roten Rahmen markiert. $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$.

Man entnimmt Abbildung 5.1, dass in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante der InterCity mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ im Entfernungsbereich $2{,}30\,\mathrm{m} < d < 2{,}60\,\mathrm{m}$ in etwa die gleichen maximalen Windgeschwindigkeiten wie der Güterzug mit $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ hervorruft und zwar unabhängig vom verwendeten Mittelungszeitintervall. Bei allen anderen d überschreiten die maximalen Windgeschwindigkeiten des InterCitys die des Güterzuges bei genannten Parametern. Dabei werden für $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ bei $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ einige der Windgeschwindigkeitsgrenzwerte aus Tabelle 2.3 überschritten, z. B. der von Peters [94]. Dass die $\hat{u}$ des Güterzuges für $d \geq 2{,}40\,\mathrm{m}$ stärker mit wachsendem d abfallen als diejenigen des InterCity, liegt vermutlich in der Kürze des Güterzuges begründet.

Fährt der InterCity mit $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$, liegen die $\hat{u}_{0,4}$ für $d \leq 2{,}80\,\mathrm{m}$ deutlich unter denjenigen des Güterzuges (Abbildung 5.1, oben). Ein ähnliches Bild ergibt sich bei gleitender Mittelung mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$, wobei für Abstände $d \leq 2{,}20\,\mathrm{m}$ auch die vom InterCity-Express mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ hervorgerufenen $\hat{u}_1$ diejenigen des Güterzuges mit $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ übersteigen. Auch hier gibt es Grenzwerte aus Tabelle 2.3, die für $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ nicht eingehalten werden.
Bei $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ übersteigen die maximalen Windgeschwindigkeiten des InterCity die des Güterzuges deutlich (Abbildung 5.2). Jedoch ist in der Höhe $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ das allgemeine Windgeschwindigkeitsniveau geringer als bei $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$, so dass für $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ nur wenige der Grenzwerte aus Tabelle 2.3 überschritten werden.
Durch Auftragung der auftretenden Windgeschwindigkeitsmaxima über d unabhängig von der Höhe z über der Schienenoberkante, ergeben sich die Diagramme in Abbildung 5.3. Man entnimmt dem oberen Diagramm, dass bei gleitender Mittelung mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ die maximalen Windgeschwindigkeiten von Güterzug und InterCity in etwa auf dem gleichen Niveau liegen. Die meisten der Windgeschwindigkeitsgrenzwerte aus Tabelle 2.3 werden für $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ beim Güterzug und InterCity überschritten. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei gleitender Mittelung mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$, wobei hier das allgemeine Niveau der Windgeschwindigkeitsmaxima erwartungsgemäß sinkt. Grenzwertüberschreitungen verlagern sich dadurch näher ans Gleis, treten jedoch weiterhin auf.

Der Vergleich der Abbildungen 5.1 bis 5.3 zeigt, dass der Ort, an dem die maximalen Windgeschwindigkeiten auftreten, zugtypabhängig ist. Besser verdeutlicht dies die Abbildung 5.4, in der die Heatmaps der maximalen Windgeschwindigkeit für die Zugtypen Güterzug, InterCity, InterCity-Express und S-Bahn bei gleitender Mittelung mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ dargestellt sind. Man erkennt, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten beim Güterzug und beim InterCity in geringeren Höhen als $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ auftreten. Beim InterCity tritt darüber hinaus bei $z \approx 0{,}7\,\mathrm{m}$ ein Bereich mit vergleichsweise hohen Windgeschwindigkeiten auf. Beim InterCity-Express treten die maximalen Windgeschwindigkeiten knapp unterhalb von $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ auf. Das Windgeschwindigkeitsfeld des InterCity-Express hebt sich dadurch von den Windgeschwindigkeitsfeldern der anderen Züge ab, als dass hohe Windgeschwindigkeiten nur sehr nahe am Zug auftreten, d. h. die Werte der Windgeschwindigkeitsmaxima fallen schneller mit wachsenden Abstand von der Gleisachse als bei den anderen Zugtypen. Auch das zeitliche Auftreten der Maxima ist stark vom Zugtyp abhängig, wie Abbildung 5.2 illustriert.

Der oben geführte Vergleich zeigt, dass der InterCity mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse, abhängig von der Höhe z über der Schienenoberkante, größere Windgeschwindigkeiten als der Güterzug mit $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ erzeugen kann. Dabei werden verschiedene Grenzwerte aus der Literatur überschritten und zwar auch beim Güterzug. Es gibt Hinweise darauf, dass Letztgenanntes auch für den InterCity-Express mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ gelten kann.

Die hier getätigten Feststellungen sind als Indizien zu werten, denn die Simulationen des InterCity und InterCity-Express scheinen nahe am Gleis bei $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ zur Überschätzung der tatsächlich auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten zu neigen (Abschnitt 4.5.1.3). Als gesichert angesehen werden kann hingegen, dass die vom Güterzug hervorgerufenen maximalen Windgeschwindigkeiten für $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ einige der Windgeschwindigkeitsgrenzwerte aus Tabelle 2.3 überschreiten (Abschnitt 4.5.1.3). Auf einen grafischen Vergleich der maximalen Windgeschwindigkeiten mit den Grenzwerten

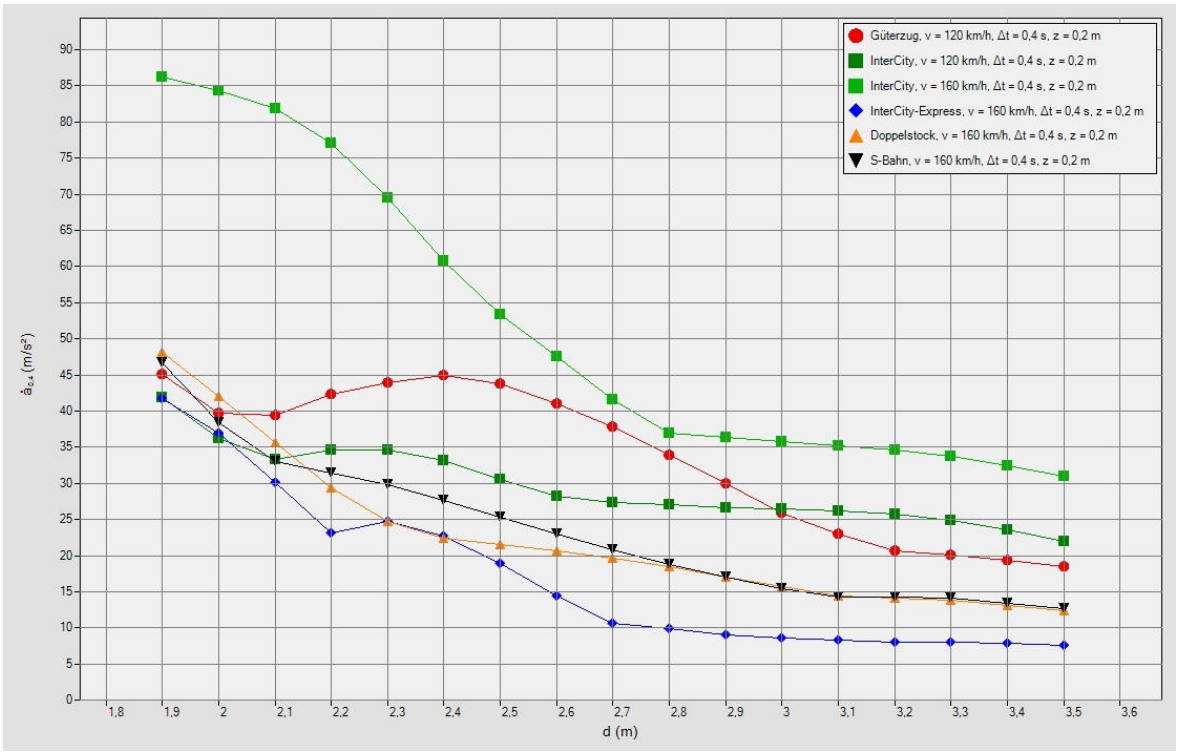
wird aufgrund der unterschiedlichen Defintionen der Bewertungsgrößen für die Windgeschwindigkeit verzichtet.

5.2 Windbeschleunigung

Analog zur maximalen Windgeschwindigkeit bzw. zum vorigen Abschnitt 5.1 wird die Belastungsanalyse in Bezug auf die maximale Windbeschleunigung $\hat{a}$ durchgeführt. In den Abbildungen 5.5 bis 5.8 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Die Maxima $\hat{a}_{0,4}$ der Windbeschleunigung, die aus der zeitlichen Ableitung der mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Windgeschwindigkeiten in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante stammen, liegen beim InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ generell und deutlich über den Werten des Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. Dies gilt für alle Abstände zur Gleisachse. Die Diskrepanz zwischen Güterzug und InterCity ist stärker ausgeprägt als bei der maximalen Windgeschwindigkeit. Auch für die gleitende Mittelung mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ liegen die $\hat{a}_1$ des InterCity für $d \leq 2{,}5$ über den Werten des Güterzuges, wenn auch das allgemeine Niveau aufgrund des größeren Mittelungszeitintervalls niedriger ist. Weil für die Bewertungsgröße Windbeschleunigung bisher keine Grenzwerte aufgefunden werden konnten, kann zum Thema Grenzwertüberschreitung an dieser Stelle keine Aussage getätigt werden.
Noch weiter auseinander liegen die maximalen Windbeschleunigungen des Güterzuges und des InterCity in der Höhe $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante, wenn die gleitende Mittelung mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ durchgeführt wird (Abbildung 5.6, oben). Insbesondere fallen die hohen Windbeschleunigungsmaxima auf, die nahe am InterCity auftreten, was von den dort auftretenden starken Turbulenzen herrühren dürfte. Auch hier sinkt das allgemeine Niveau der maximalen Windbeschleunigungswerte durch die gleitende Mittelung mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$, jedoch liegen auch in diesem Fall die $\hat{a}_1$ des InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ für $d \leq 2{,}30\,\mathrm{m}$ über denen des Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$.
Auch beim z-unabhängigen Vergleich erzeugt der Intercity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ höhere maximale Windbeschleunigungen als der Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. Dies gilt sowohl für gleitende Mittelung mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ als auch mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ für die Abstände $d \leq 2{,}50\,\mathrm{m}$ zur Gleisachse, wie aus Abbildung 5.7 ersichtlich wird.

Abbildung 5.8 zeigt die Heatmaps der maximalen Beschleunigungen für die Zugtypen Güterzug, InterCity, InterCity-Express und S-Bahn Baureihe 425 bei gleitender Mittelung mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$. Wie zuvor fährt der Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ und die drei Personenzüge mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$. Der Blick auf diese Heatmaps zeigt offensichtliche Ähnlichkeiten mit den Heatmaps für die maximale Windgeschwindigkeit (Abbildung 5.4). Auffällig ist erneut, dass beim InterCity in einer Höhe von rund 0,7 m über der Schienenoberkante nahe am Gleis einen Bereich mit vergleichsweise hohen Windbeschleunigungen vorhanden ist. Beim InterCity-Express ist der einzige und sehr begrenzte Bereich höherer Windbeschleunigungen nahe an den Fahrgestellen. Bei der S-Bahn treten nahe am Zug auch in größeren Höhen stärkere Windbeschleunigungen auf. Wie bereits in den Abschnitten 4.5.3.1 und 4.5.4.2 ausgeführt, ist hier nicht auszuschließen, dass die Simulation die maximalen Windbeschleunigungen mit zunehmender Höhe über der Schienenoberkante überschätzt aufgrund der massiven Kastengeometrien auf dem Dach der virtuellen S-Bahn.



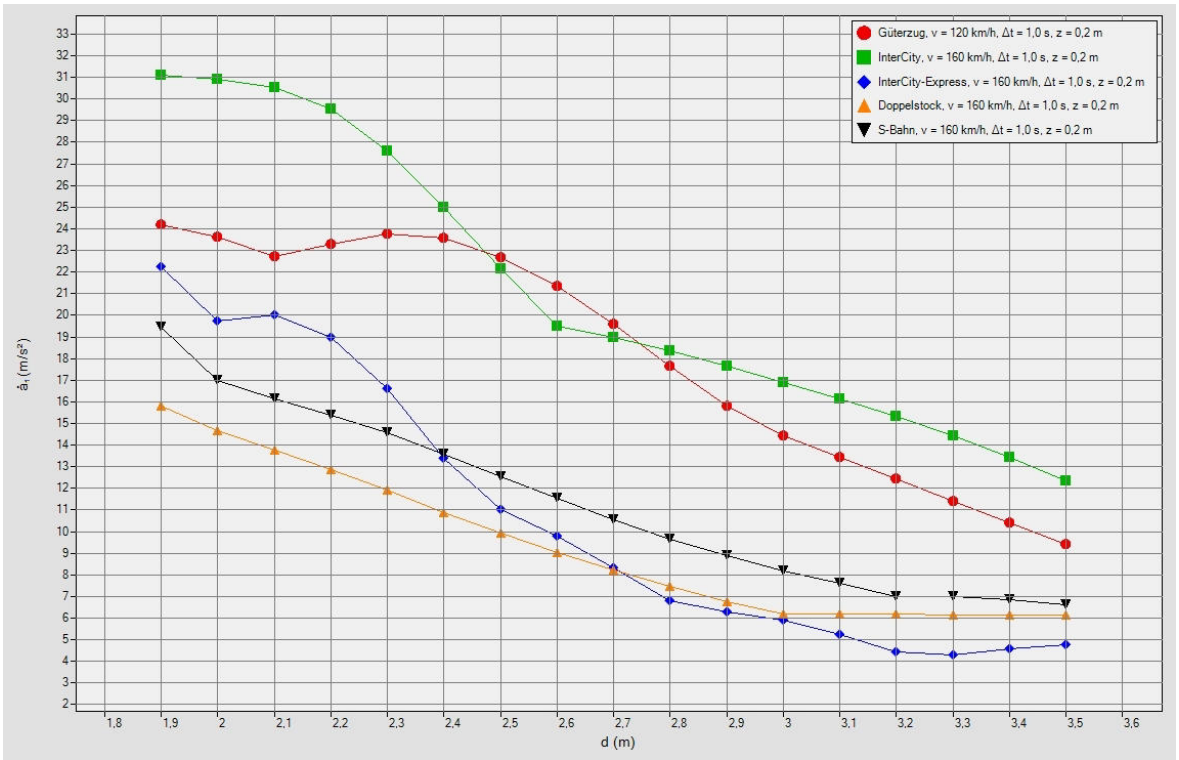


Abbildung 5.5: Vergleich der in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windbeschleunigungen für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

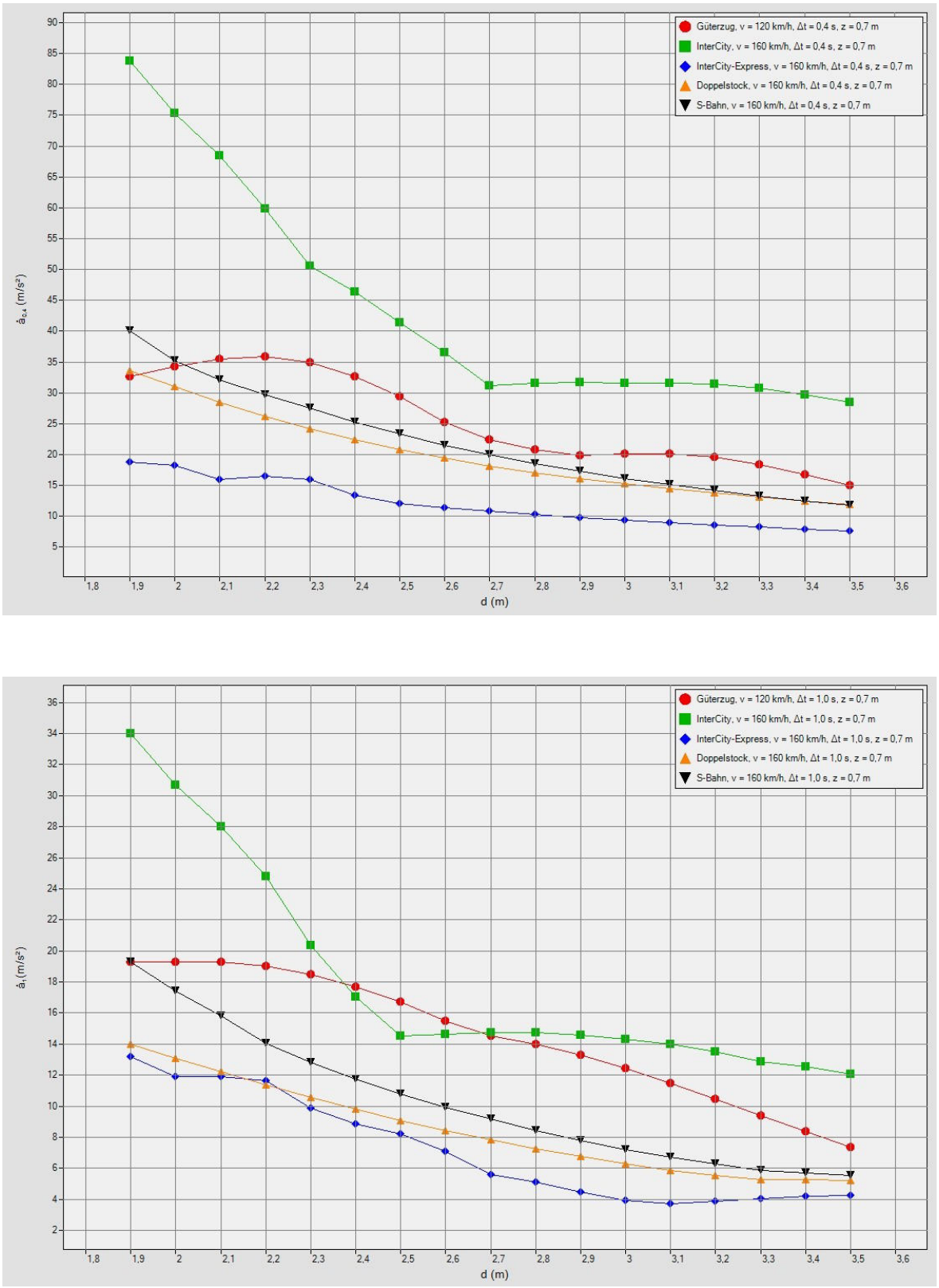


Abbildung 5.6: Vergleich der in $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windbeschleunigungen für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

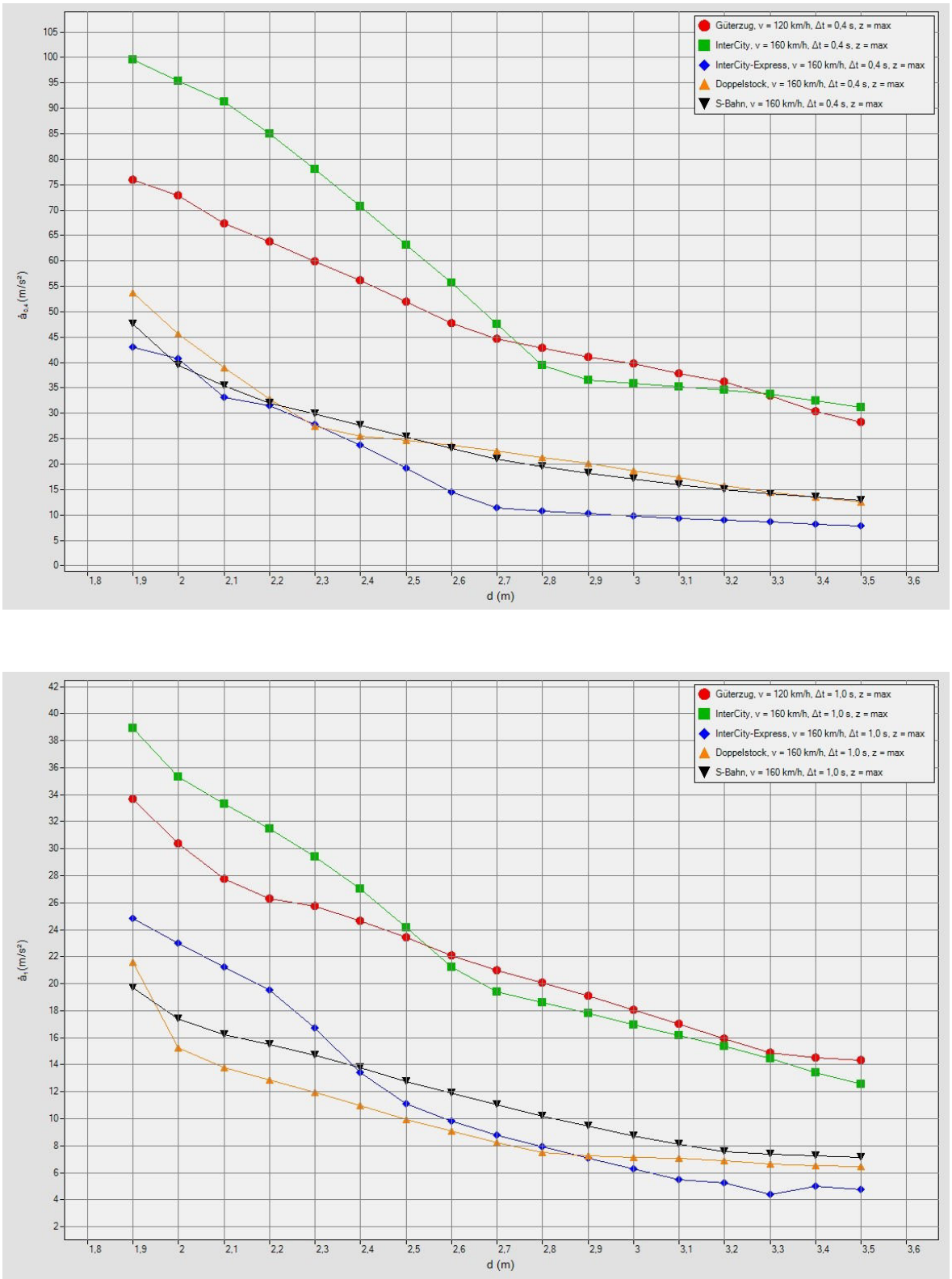


Abbildung 5.7: Vergleich der z-unabhängigen maximalen Windbeschleunigungen für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

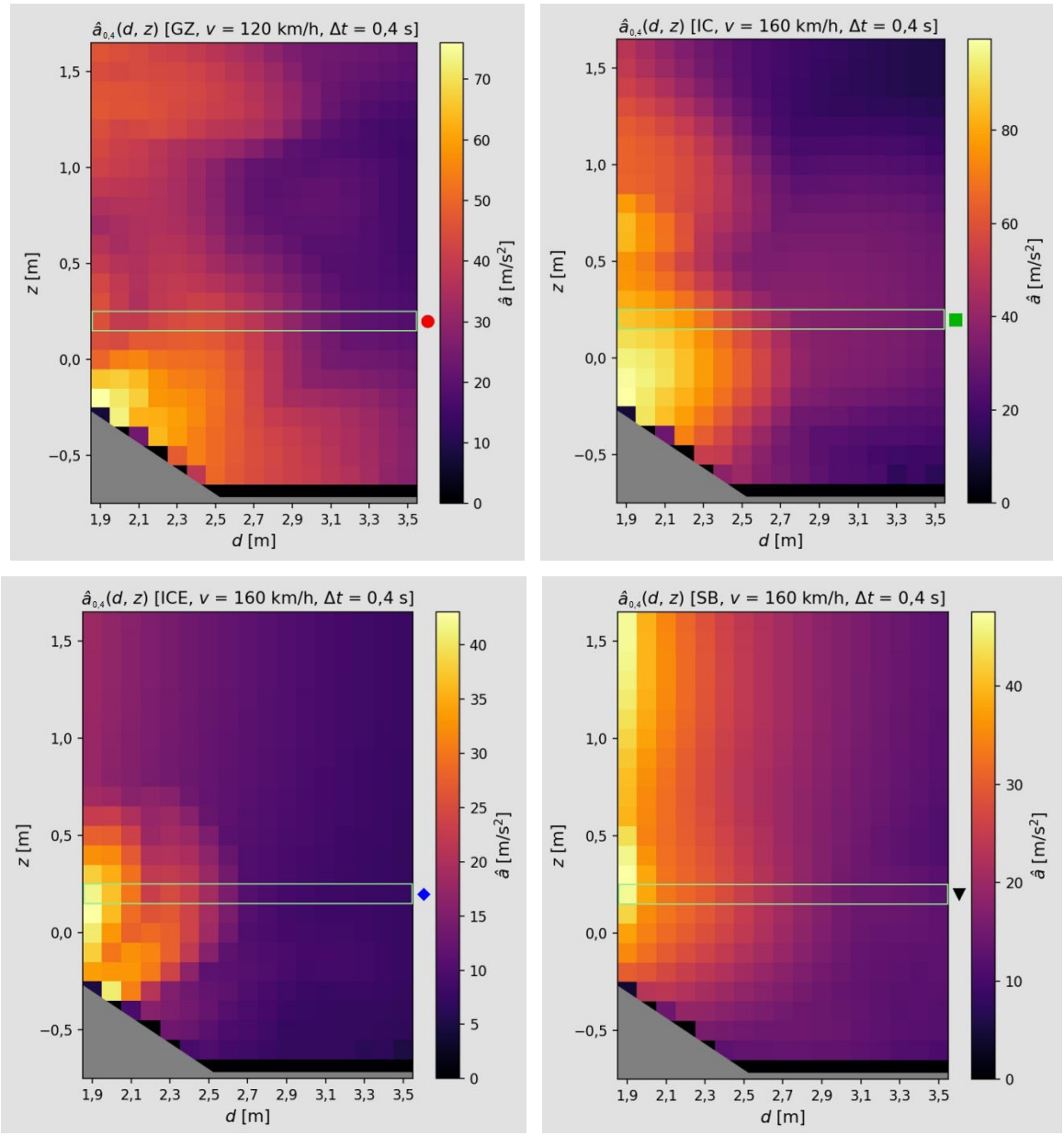


Abbildung 5.8: Heatmaps für die maximale Windbeschleunigung eines Güterzuges mit $v_Z = 120\,\text{km/h}$ (oben, links), eines InterCity (oben, rechts), eines InterCity-Express (unten, links) und einer S-Bahn Baureihe 425 (unten, rechts). Letztgenannte drei Züge fahren mit $v_Z = 160\,\text{km/h}$. Man beachte die unterschiedliche Farbskalierung. $z = 0{,}2\,\text{m}$ ist mit einem hellgrünem Rahmen markiert. $\Delta t = 0{,}4\,\text{s}$.

Der Vergleich der maximalen Windbeschleunigungen der verschiedenen Zugtypen zeigt, dass der InterCity mit $v_Z = 160\,\text{km/h}$ in $d = 2{,}3\,\text{m}$ Entfernung von der Gleisachse größere Windbeschleunigungen als der Güterzug mit $v_Z = 120\,\text{km/h}$ erzeugt. Die von allen anderen Personenzugtypen mit $v_Z = 160\,\text{km/h}$ erzeugten maximalen Windbeschleunigungen bleiben unter den Werten des Güterzuges. Wie in Abschnitt 2.2.1 ausgeführt wurde, ist die Windbeschleunigung nicht zu vernachlässigen, denn sie liefert gemäß (2.2) einen Beitrag zur Kraftentwicklung auf Menschen.

5.3 Druck

Eine gänzlich andere Situation als bei der maximalen Windgeschwindigkeit und Windbeschleunigung ergibt sich, wenn die Druckamplituden Δp betrachtet werden, die bei der Passage des Zugbuges entstehen. Die Abbildungen 5.9 bis 5.11 visualisieren den Vergleich der Δp als Funktion des Abstandes d von der Gleisachse für die Höhen $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$, $0{,}7\,\mathrm{m}$, $0{,}9\,\mathrm{m}$ (Höhe der Ohren) sowie z-unabhängig. Weil die Bugwellen relativ niederfrequent sind und im zeitlichen Verlauf bei festen Parametern wenig streuen, ist eine gleitende Mittelung nicht erforderlich.

In Abbildung 5.9, oben ist der Vergleich der Δp für $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass der Verlauf der Kurven für alle Zugtypen recht ähnlich ist, wobei zwei Kurvengruppen auftreten. Eine Kurvengruppe umfasst den Amplitudenbereich von rund 2 mbar bis 5,3 mbar. Dieses Kurven werden allesamt von Zügen hervorgerufen, die mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ unterwegs sind und einen strömungsungünstig geformten Bug aufweisen. Die andere Kurvengruppe, auf dem Niveau von rund 1,25 mbar bis 3,0 mbar, stammt vom InterCity-Express mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ und dem Güterzug sowie InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. Demnach erzeugt der InterCity-Express während der Passage des Zugbuges, trotz deutlich höherer Geschwindigkeit ($\Delta v_\mathrm{Z} = 40\,\mathrm{km/h}$), in etwa das gleiche Druckamplitudenniveau wie herkömmliche Züge. Die Niveaus der Kurven lassen sich eindeutig mit der Form des Zugbuges in Verbindung bringen. Weil der Doppelstockzug eine strömungsgünstigere Bugform (Abbildung 4.7) aufweist als der InterCity (Abbildung 4.5), erzeugt er trotz größerer Bugfläche etwas geringere Δp als der InterCity. Die S-Bahn Baureihe 425 (Abbildung 4.6) generiert aufgrund ihres strömungsungünstig geformten Buges bei gleicher Zuggeschwindigkeit höhere Δp als der Doppelstockzug Baureihe 446. Die Bugfläche der S-Bahn ist geringfügig kleiner als die des InterCity, weshalb die von der S-Bahn erzeugten Δp etwas unter denen liegen, die der InterCity hervorruft. Wie man Abbildung 5.9 entnimmt, liegen die Δp aller herkömmlichen Züge, welche mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ fahren, erheblich über denen, die der Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ erzeugt.
Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich wenn der Vergleich der Δp-Verläufe für die Höhe $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ durchgeführt wird (Abbildung 5.9, unten). In dieser Höhe sind die Druckbelastungen relativ nahe am Gleis, also für $d \leq 2{,}30\,\mathrm{m}$, generell etwas höher als bei $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$, was insbesondere für die S-Bahn Baureihe 425 gilt.
Dieser Trend verschärft sich, wenn die Δp in der Höhe der menschlichen Ohren bei einem stehenden Menschen, also der Höhe von $z = 0{,}9\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante sowie unabhängig von z betrachtet werden, wie Abbildung 5.10 zeigt. Sehr nahe am Zug erzeugt die S-Bahn ein Δp von bis zu 9,8 mbar. Dieser Wert wird in $z = 1{,}6\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante erreicht, wie man Abbildung 5.11, rechts, unten entnimmt. Wie zuvor erwähnt, generieren die besonders strömungsungünstige Bugform sowie die kastenförmigen Strukturen auf dem Dach der S-Bahn diese hohen Druckamplituden.

Die Heatmaps für die Zugtypen Güterzug, InterCity, InterCity-Express und S-Bahn in Abbildung 5.11 liefern einen Überblick über die räumliche Verteilung der Amplituden der Bugdruckwellen. Bei allen Zugtypen steigt die Amplitude der Bugdruckwelle mit fallenden d und steigenden z, wobei diese Abhängigkeit von z beim InterCity und insbesondere bei der S-Bahn stärker ausgeprägt ist als bei den anderen Zugtypen.

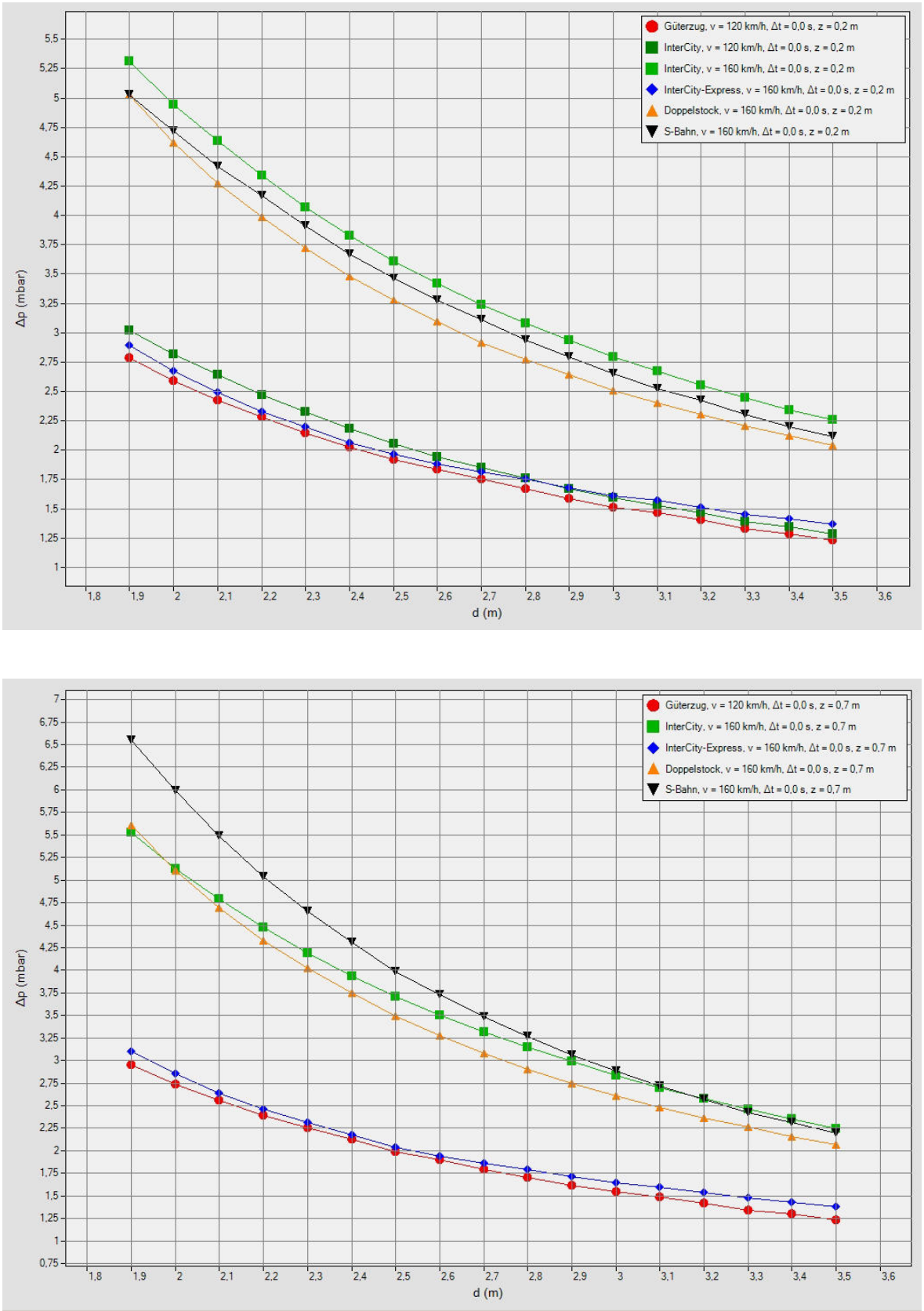


Abbildung 5.9: Vergleich der Amplituden der Bugdruckwellen Δp für die verschiedenen Zugtypen in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ (oben) und $0{,}7\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über Schienenoberkante. Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

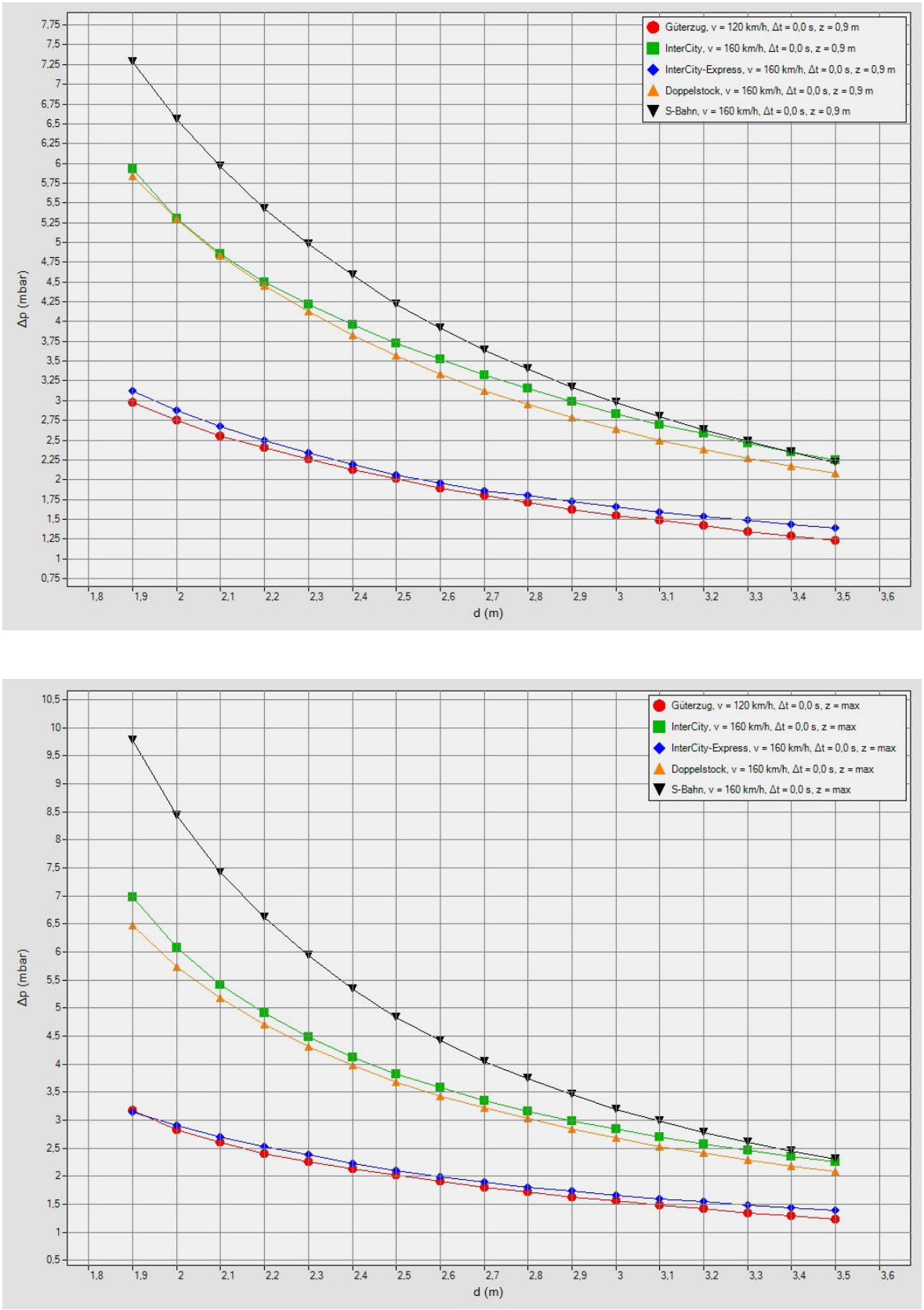


Abbildung 5.10: Vergleich der Bugdruckwellen Δp für die verschiedenen Zugtypen in $z = 0{,}9\,\mathrm{m}$ (oben) Höhe über Schienenoberkante und z-unabhängig (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

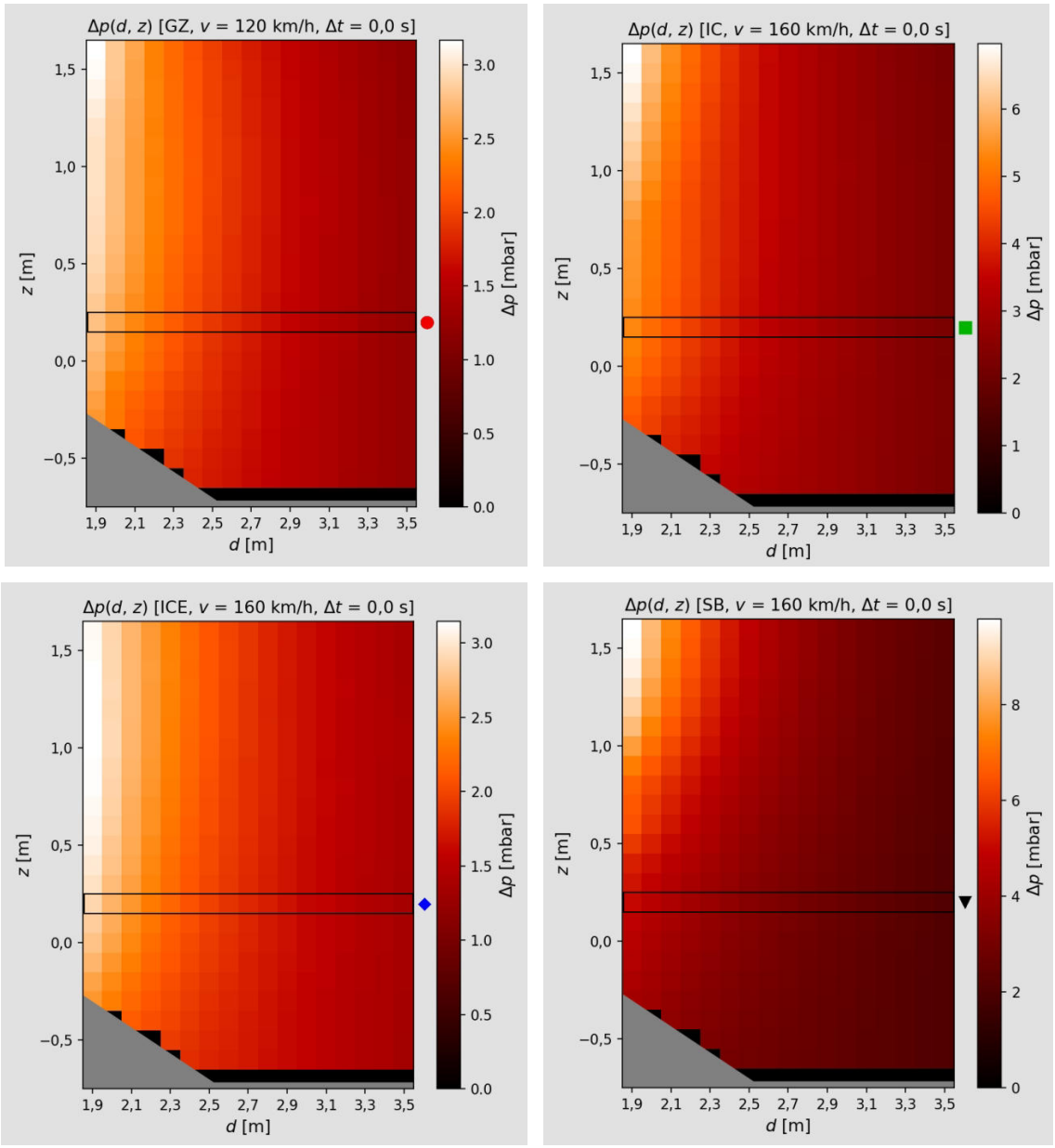


Abbildung 5.11: Heatmaps für die Amplituden der Bugdruckwellen Δp eines Güterzuges mit $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ (oben, links), eines InterCity (oben, rechts), eines InterCity-Express (unten, links) und einer S-Bahn Baureihe 425 (unten, rechts). Letztgenannte drei Züge fahren mit $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$. Man beachte die unterschiedliche Farbskalierung. $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ ist mit einem schwarzen Rahmen markiert.

Der Vergleich der Δp der verschiedenen Zugtypen zeigt, dass alle Personenzugtypen mit einer strömungsungünstigen Bugform bei einer Geschwindigkeit von $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse mehr als doppelt so hohe Druckamplituden erzeugen wie der Güterzug mit $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$. In der Literatur findet man die Information, dass zuginduzierte Druckbelastungen auf Menschen und Gegenstände wirken. Die Mehrheit der Autoren geht jedoch davon aus, dass diese Druckbelastungen von zu kurzer Dauer sind, als dass sie einen Menschen aus dem Gleichgewicht bringen können.

Wie bereits in Abschnitt 2.2 ausgeführt und beispielsweise von Baker [10] bestätigt, sind die Vorgänge um die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen bis heute nicht detailliert verstanden, weshalb nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, dass zuginduzierte Druckwellen nicht doch – im Zusammenspiel mit Windgeschwindigkeit und Windbeschleunigung – auf das Gleichgewicht eines Menschen einwirken.

Unbestritten ist, dass zuginduzierte Druckwellen im Allgemeinen auf Menschen wirken (Abschnitt 2.3). Deshalb wurde im Belastungs-Modus von FSAero der virtuelle Mensch so positioniert, dass er im eingeschnittenen Bereich einer Festen Absperrung steht, also mit der gleiszugewandten Schulter bei $d = 2{,}1\,\mathrm{m}$ (Abbildung 5.14). Dies entspricht etwa dem Abstand $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ für die Mitte des Menschen bzw. seines Kopfes. In dieser Entfernung zur Gleisachse und in der Höhe $z = 1{,}0\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante werden die zeitlichen Druckverläufe aus der Simulation für die fünf Zugtpyen bei $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ bzw. $160\,\mathrm{km/h}$ beleuchtet. Zu diesem Zweck wurden den Kurven für den statischen Druck (Abbildungen 4.21 bis 4.27) die Anteile aus dem Staudruck $1/2\,\rho\,v_\mathrm{Z}^2$ (v_Z aus Simulation) hinzu addiert, um auch Druckausschläge neben der Bugdruckwelle zu berücksichtigen. Damit können die am Gleis gemessenen Druckverläufe durch die Simulationen gut wiedergegeben werden, wie Abbildung 5.12 demonstriert. Die hochfrequenten Anteile der Druckschwankungen kann die Simulation nicht wiedergeben aufgrund der Modellierung der Turbulenz.

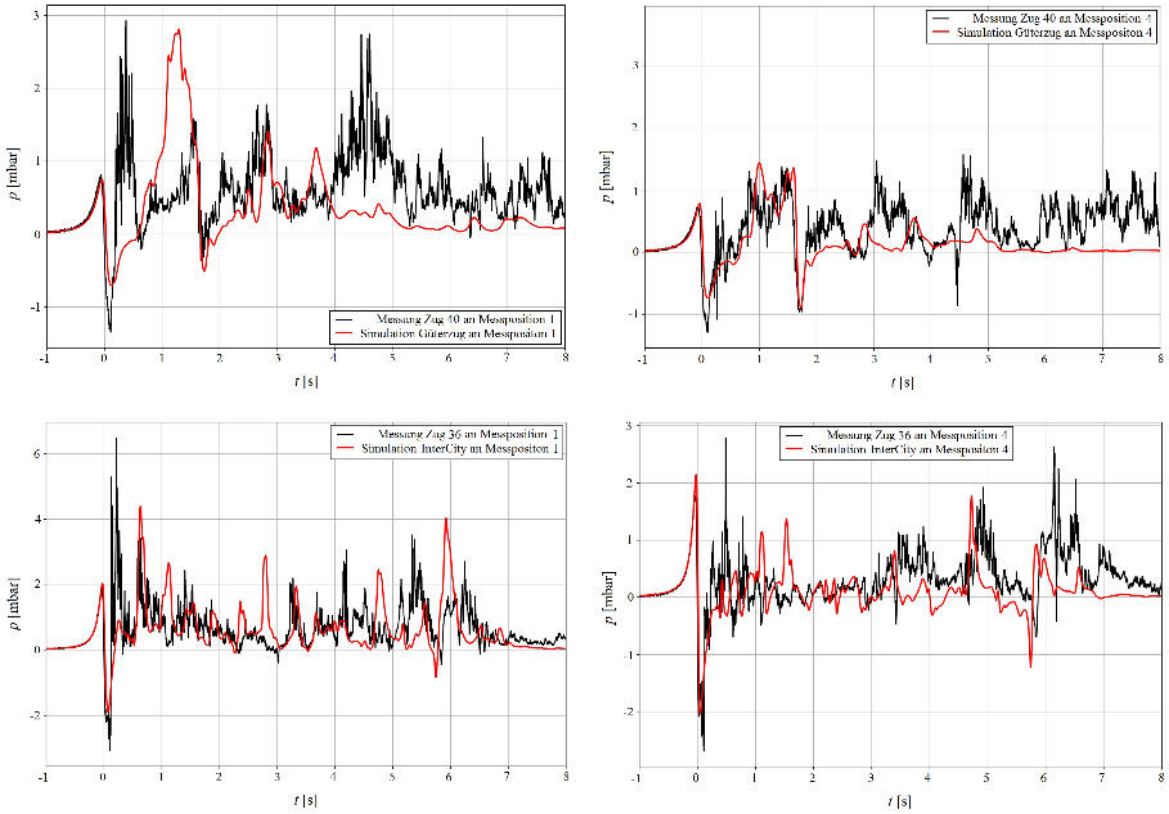


Abbildung 5.12: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverläufen für einen Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 100\,\mathrm{km/h}$ und einen InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ an den Messpositionen 1 und 4. Weil der simulierte Güterzug kürzer ist als Zug 40, weichen die Simulationsergebnisse ab circa 3 s zunehmend von den Messdaten ab.

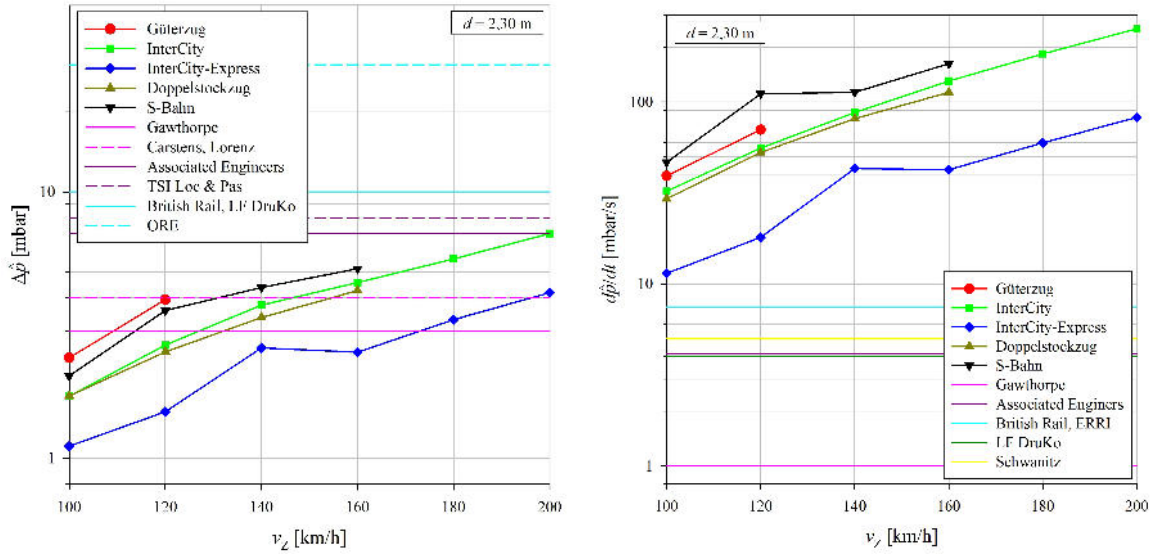


Abbildung 5.13: Maximale Druckamplitude (links) und maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit (rechts) auf die Ohren eines Modell-Menschen in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Der Körpermittelpunkt befindet sich in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse. Eingezeichnet sind die Grenzwerte aus Tabelle 2.4.

Von besonderem Interesse ist die Druckwirkung auf die menschlichen Ohren. Abbildung 5.12 zeigt, dass die Simulation die Messdaten, welche mit Sensoren gewonnen wurden, die mit Attrappen menschlicher Ohren verkleidet waren, gut abbildet. Aus diesem Grund ist ein direkter Vergleich mit den Grenzwerten möglich.

In Abbildung 5.13 sind die am Ort $z = 1{,}0\,\mathrm{m}$ und $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ auftretenden maximalen Druckamplituden und Druckanstiegsgeschwindigkeiten als Funktion von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit dargestellt. Zu Vergleichszwecken sind die Grenzwerte aus Tabelle 2.4 als Horizontalen eingezeichnet. Man entnimmt dem rechten Diagramm, dass die Grenzwerte für die Druckanstiegsgeschwindigkeit für alle Zuggeschwindigkeiten überschritten sind, zumeist sehr deutlich. Damit die drei angegebenen Grenzwerte von Gawthorpe, Associated Engineers und British Rail als endgültig überschritten angesehen werden können, müssen gleichzeitig die zugehörigen maximalen Druckamplituden überschritten sein. Wie das korrespondierende linke Diagramm zeigt, ist das für den Grenzwert von Gawthorpe der Fall für $v_\mathrm{Z} \geq 130\,\mathrm{km/h}$. Für Höhen über $z = 1{,}0\,\mathrm{m}$ kann auch der Grenzwert der Associated Engineers überschritten werden, wie man Abbildung 5.10, unten entnimmt. Gemäß Abbildung 5.13 dürfte lediglich der InterCity-Express mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ Gleisbaustellen passieren. Weiterhin wird der von Carstens und Lorenz (definiert über die Vorgaben von Hauff und Fleischanderl [83]) angegebene Grenzwert für die maximale Druckamplitude überschritten, wenn InterCity, Doppelstockzug und S-Bahn schneller als ca. $140\,\mathrm{km/h}$ fahren.

Aufgrund der genannten Grenzwertüberschreitungen und der enormen Breite der Grenzwertstreuung kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich Zugpassagen mit $v_\mathrm{Z} > 120\,\mathrm{km/h}$ nicht negativ auf das Gehör oder das Empfinden von Menschen auswirken, die sich in Abständen von $d \leq 2{,}30\,\mathrm{m}$ von der Gleisachse aufhalten.

5.4 Kraft

FSAero bietet die Möglichkeit, die Kraftentwicklung auf einen Modell-Menschen am Gleis zu berechnen. Zu diesem Zweck wurden im Belastungs-Modus von FSAero die im vorigen Abschnitt definierten Einstellungen für den Modell-Menschen (Abbildung 5.14) übernommen und die Berechnung der Kraft für jeden Zugtyp und jede vorhandene Zuggeschwindigkeit durchgeführt. Die Gravitationskraft wurde dabei vernachlässigt, um die rein windinduzierte Kraft auf den Menschen zu erhalten. Die Kraftanalyse wurde mit drei unterschiedlichen Mittelungszeitintervallen durchgeführt, nämlich mit $\Delta t = 0{,}0\,\mathrm{s}$, $0{,}2\,\mathrm{s}$ und $0{,}4\,\mathrm{s}$. Die Berechnung der Kraftmaxima mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}2\,\mathrm{s}$ und $0{,}4\,\mathrm{s}$ dient in erster Linie dazu, den Einfluss der gleitenden Mittelung auf die Kraftmaxima abschätzen zu können. Festzuhalten ist, dass die Berechnung der Kraft mit gemittelten oder anderweitig geglätteten Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungsdaten aufgrund der hochgradig nichtlinearen Zusammenhänge zu falschen Kraftwerten führt.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildungen 5.14 und 5.15 mitsamt der Grenzwerte für die Bewertungsgröße Kraft aus Tabelle 2.3 als Horizontalen dargestellt. Man entnimmt den Diagrammen aus Abbildung 5.14, dass der kleinste Grenzwert von Bonnema von allen Zügen oberhalb einer Zuggeschwindigkeit von $v_\mathrm{Z} \approx 135\,\mathrm{km/h}$ überschritten wird. Die vom Güterzug induzierte Kraft überschreitet alle eingezeichneten Grenzwerte oberhalb einer Zuggeschwindigkeit von $v_\mathrm{Z} \approx 108\,\mathrm{km/h}$. Beim InterCity

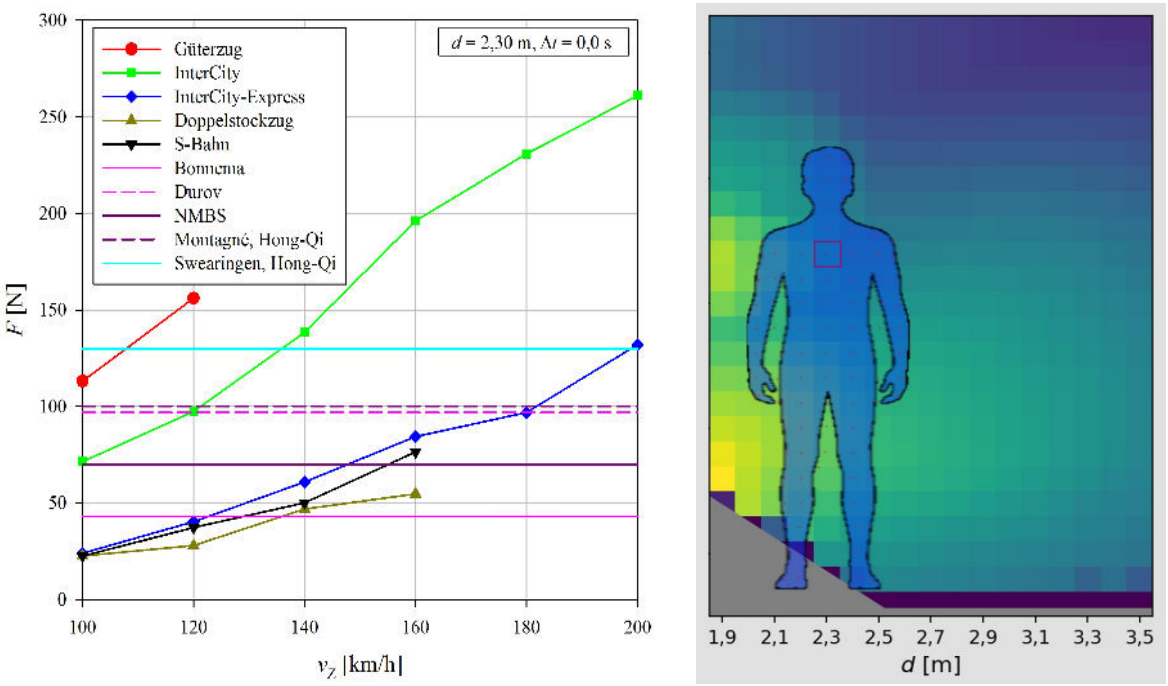


Abbildung 5.14: Maximale Kraft auf einen Modell-Menschen ($H_\mathrm{M} = 1{,}78\,\mathrm{m}$, $m = 79{,}2\,\mathrm{kg}$) aufgrund aerodynamischer Belastung in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Der Körpermittelpunkt befindet sich in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse. Berücksichtigt sind $u(t)$ und $a(t)$ bei $\Delta t = 0{,}0\,\mathrm{s}$. Eingezeichnet sind die Grenzwerte aus Tabelle 2.3 (Durov ohne Sicherheitszuschlag).

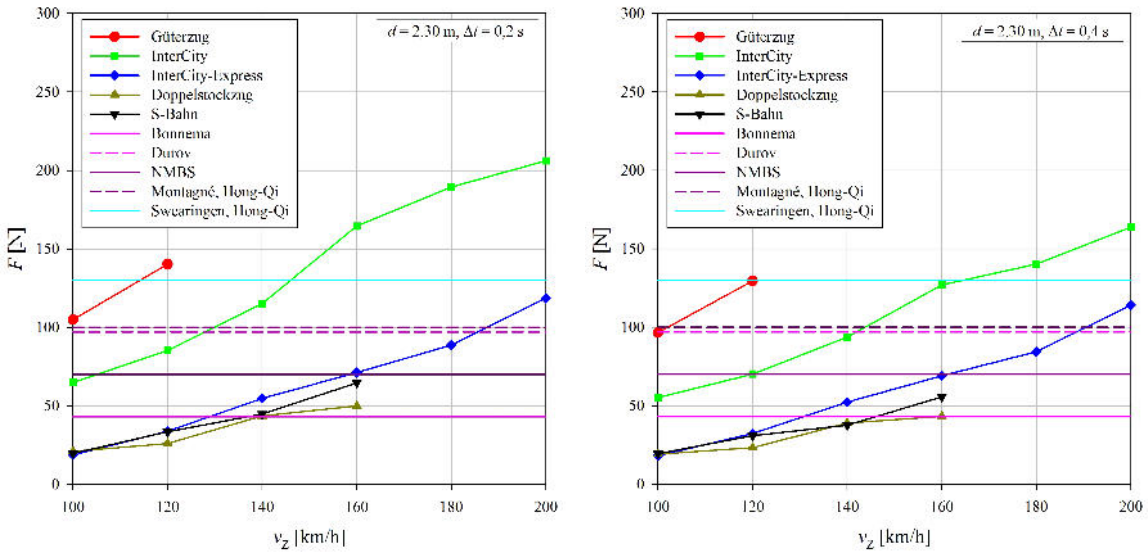


Abbildung 5.15: Maximale Kraft auf einen Modell-Menschen aufgrund aerodynamischer Belastung in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Bis auf die gleitende Mittelung mit $\Delta t = 0{,}2\,\mathrm{s}$ (links) und $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (rechts) entspricht alles Weitere der Beschreibung in Abbildung 5.14.

tritt diese vollständige Grenzwertüberschreitung bei Geschwindigkeiten oberhalb von rund 135 km/h auf.

Ein Blick auf die Diagramme in Abbildung 5.15 zeigt, dass die berechneten Kraftmaxima mit größer werdendem Mittelungszeitintverall sinken. Wächst Δt um 0,2 s, so sinken die Werte der Kraftmaxima, zwischen 5 % und 20 %, je nach Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Trotz Absenkung der Kraftmaxima überschreiten die Werte, die vom Güterzug oberhalb 100 km/h und vom InterCity oberhalb von 140 km/h hervorgerufen werden, noch immer alle bzw. die meisten der Grenzwerte.

Die hier durchgeführte Analyse der windinduzierten Kraft auf Menschen, welche mit dem Rücken in Zugfahrtrichtung stehen, weist darauf hin, dass bei Menschen mit einem Abstand von $d \leq 2{,}30\,\mathrm{m}$ zur Gleisachse ein Gleichgewichtsverlust nicht sicher ausgeschlossen werden kann, wenn Güterzuge schneller als $v_\mathrm{Z} \approx 108\,\mathrm{km/h}$ und InterCity schneller als $v_\mathrm{Z} \approx 135\,\mathrm{km/h}$ passieren. Diese Aussage basiert darauf, dass bei den angegebenen Zuggeschwindigkeiten alle Grenzwerte für die maximale Kraft auf Menschen überschritten werden. Von InterCity-Express, Doppelstockzug Baureihe 446 und S-Bahn Baureihe 425 gehen ähnlich große Gefahren erst bei Zuggeschwindigkeiten oberhalb $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ aus. Nichtsdestotrotz überschreiten auch die von letztgenannten Zugtypen windinduzierten Kraftmaxima die beiden kleinsten Grenzwerte oberhalb von $v_\mathrm{Z} \approx 130\,\mathrm{km/h}$ bzw. $v_\mathrm{Z} \approx 150\,\mathrm{km/h}$.

5.5 Gleichgewichtsstabilität

Wie in Abschnitt 4.6.4 dargelegt wurde, kann mit FSAero grob abgeschätzt werden, bei welchen aerodynamischen Belastungen ein Gleichgewichtsverlust von Menschen am Gleis droht. Zur Durchführung der Stabilitätsanalyse wurden die gleichen Parameter

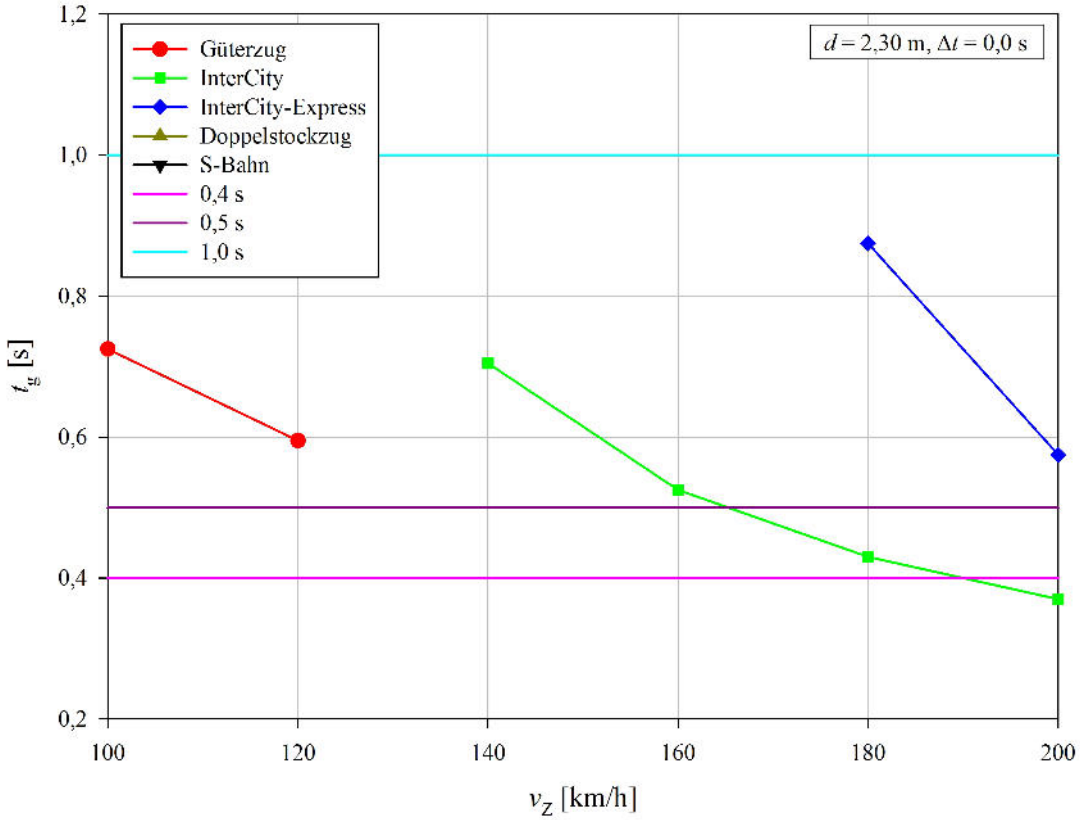


Abbildung 5.16: Prüfung der Gleichgewichtsstabilität in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Gemäß zugrunde gelegtem Modell [70, 73, 74] führen Menschen Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung aus, wenn der Schwerpunkt des Modell-Menschen in weniger als rund 0,5 s (Ältere) bzw. rund 0,4 s (Jüngere) über seine Rotationsachse hinaus wandert.

wie im vorigen Abschnitt 5.4 verwendet (Abbildung 5.14). Eine gleitende Mittelung der Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungsdaten wurde für diese Analyse aus oben genannten Gründen nicht vorgenommen und weil die Trägheit des Modell-Menschen physikalisch korrekt berücksichtigt ist sowie der gesamte Vorgang des Kippens durch das numerische Lösen der Diffentialgleichung (2.5) exakt beschrieben wird.

Abbildung 5.16 zeigt das Ergebnis der Stabilitätsanalyse für die Entfernung $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ der Mitte des Modell-Menschen zur Gleisachse. Dem Diagrammen entnimmt man, dass der von Doppelstockzug und S-Bahn induzierte Wind nicht ausreicht, um den Modellmenschen umzukippen. Das gilt für alle untersuchten Zuggeschwindigkeiten bis $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Analyse der windinduzierten Kraft auf Personen, wenn die beiden kleinsten Grenzwert in Abbildung 5.14 vernachlässigt werden.
Beim InterCity-Express tritt ein Umkippen des Modell-Menschen oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 180\,\mathrm{km/h}$ auf, beim InterCity oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 140\,\mathrm{km/h}$ und beim Güterzug oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 100\,\mathrm{km/h}$. Vergleicht man diese Ergebnisse mit dem Diagramm in Abbildung 5.14, links, so weisen sie auf einen Grenzwert bei rund 100 N hin. Weil der Fahrtwind des InterCity gemäß Abbildung 5.14 diesen Wert bereits bei $v_\mathrm{Z} \approx 120\,\mathrm{km/h}$ erreicht, ist

anzunehmen, dass bereits eine Zuggeschwindigkeit im Bereich von $v_Z \approx 130\,\mathrm{km/h}$ den Modell-Menschen zum Umkippen bringen kann. Dies ist in Abbildung 5.16 nicht zu sehen weil keine Simulationsdaten für $v_Z = 130\,\mathrm{km/h}$ verfügbar sind.

Daraus folgt, dass Güterzüge mit Geschwindigkeiten oberhalb $v_Z \approx 100\,\mathrm{km/h}$ und InterCity oberhalb $v_Z \approx 130\,\mathrm{km/h}$ das Potential haben, Menschen aus dem Gleichgewicht zu bringen, so dass letztgenannte in irgendeiner Form von Körperreaktionen auf die äußere Krafteinwirkung reagieren müssen, um nicht das Gleichgewicht zu verlieren. Weil beim InterCity die Stabilitätsverlustdauer von 0,5 s oberhalb von $v_Z \approx 160\,\mathrm{km/h}$ unterschritten wird, müssen bei diesen Zuggeschwindigkeiten Personen Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung ausführen.
In der in Abschnitt 2.2.2 erwähnten Studie des Bundesamtes für Verkehr [16] heißt es, dass es durch heran nahende schnelle Züge auch zu Schrecksituationen kommen kann, was häufig zu länger anhaltenden Schreckstarren bei den betroffenen Personen führt. Es werden Zeitintervalle in der Größenordnung eine bis mehrere Sekunden (!!) genannt. Eine solch lange Schreckstarre kann gemäß [74] dazu führen, dass Menschen aufgrund windinduzierter Drehmomente bereits bei niedrigeren als den oben genannten Zuggeschwindigkeiten Korrekturschritte zur Gleichgewichterhaltung durchführen müssen, wie die im Diagramm in Abbildung 5.16 eingezeichnete Horizontale bei $t_g = 1{,}0\,\mathrm{s}$ demonstrieren soll. Solche Schreckstarren können durch den Einsatz von Warnsystemen sicher verhindert werden. Die Studie empfiehlt darüber hinaus, die maximale Passagegeschwindigkeit von Güterzügen auf $v_Z = 100\,\mathrm{km/h}$ abzusenken.
Dass der Doppelstockzug und die S-Bahn bei dieser Analyseart nicht nicht in Erscheinung treten liegt daran, dass für diese beiden Zugtypen aktuell keine Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungsdaten für Zuggeschwindigkeiten oberhalb $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ vorliegen.

Betrachtet man die Windbeschleunigung, die gemäß (2.2) einen Beitrag zur Kraft auf den Menschen liefert, so fällt auf, dass diese insbesondere während der Passage des Zugbuges sehr hohe Werte annimmt und stark variiert. Die hohen Ausschläge der beiden horizontalen Komponenten der Windbeschleunigung sind dabei zeitversetzt (Abbildung 5.17). Dies ist gleichbedeutend mit der Feststellung zahlreicher Autoren, dass die Richtung der Kraft auf einen Menschen während der Passage des Zugbuges einmal um den Menschen herum läuft [39, 87, 100]. Wie man Abbildung 5.17, unten entnimmt, treten dabei auch starke Windbeschleunigungen in Richtung der Senkrechten zur Gleisachse auf, insbesondere in Richtung zum Gleis (negative Werte der x-Komponente). Seinerzeit und auch heute noch werden die in dieser Richtung auftretenden Kräfte verbreitet als Folge der Druckwirkung („Sog- und Zugkräfte“) angesehen. Gemäß [100] sind sie jedoch eine Folge der Windbeschleunigung.
Die Windbeschleunigung – und damit auch die Kraft in Richtung Gleis – kann vergleichsweise hohe Werte annehmen. Bereits die Windbeschleunigungsverläufe in Abbildung 5.17, unten weisen deutlich darauf hin, obwohl deren Maxima aufgrund der Ableitung aus simulierten Windgeschwindigkeitsdaten sowie einer nachgeschalteten gleitenden Mittelung mit $\Delta t = 0{,}01\,\mathrm{s}$ zur Beseitigung von Datenartefakten merklich kleiner als in der Realität sind. Weil die Dauer dieser Kraftspitze in Richtung Gleis nicht länger als ca. 0,1 s ist, wird sie überwiegend als nicht gefährlich für Menschen aufgrund deren Massenträgheit angesehen. Die Windbeschleunigung wirkt jedoch nicht allein auf

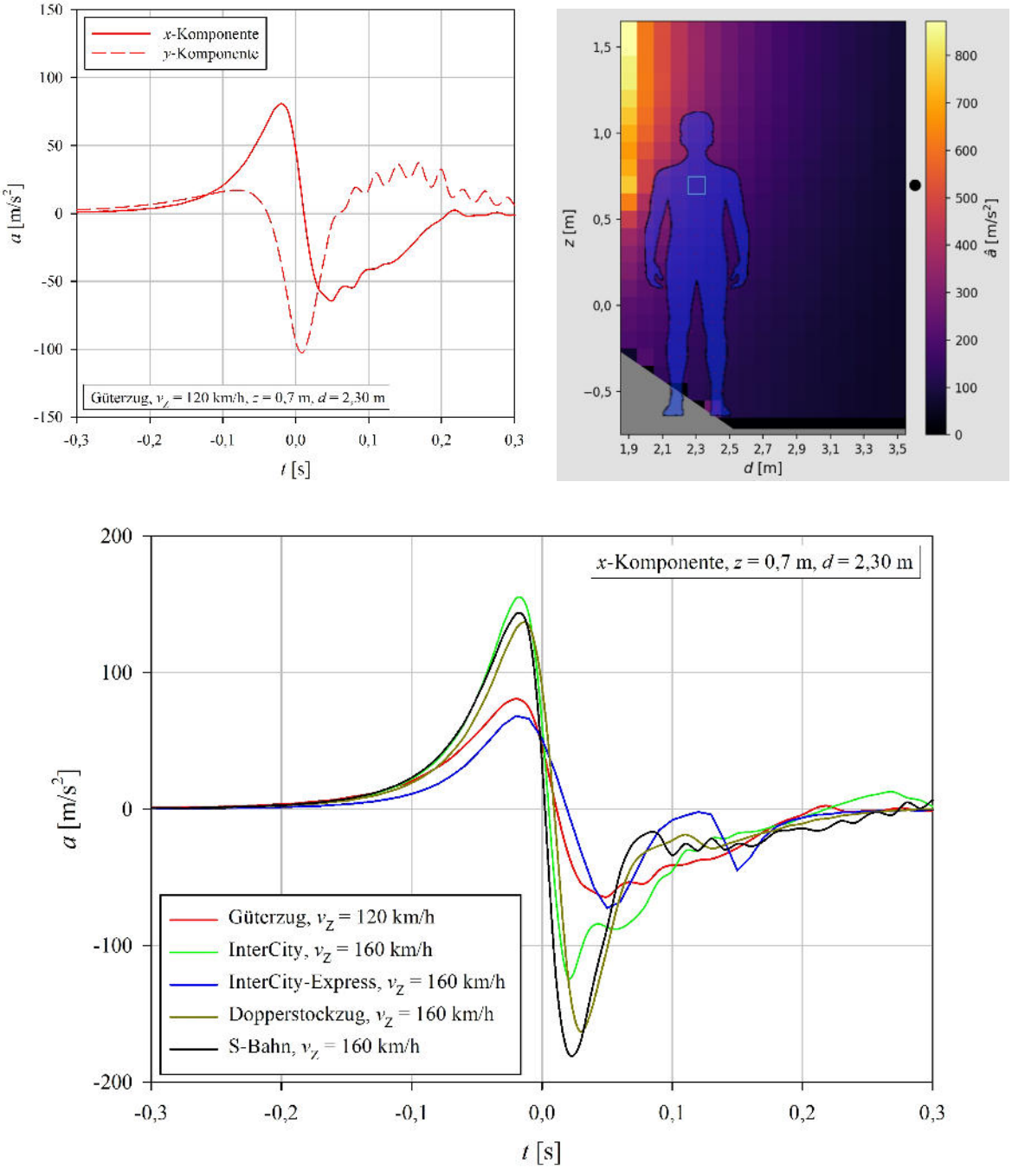


Abbildung 5.17: Oben: Zeitlicher Verlauf der horizontalen Windbeschleunigungskomponenten am Ort $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$, $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ während der Passage des Buges eines Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. Unten: Zeitlicher Verlauf der x-Komponente der Windbeschleunigung während der Passage verschiedener Zugbuge.

einen Menschen am Gleis, sondern in Kombination mit der Windreibungskraft, welche quadratisch von der Windgeschwindigkeit abhängt. Beide Kräfte superpositionieren in der Regel konstruktiv, weshalb Windbeschleunigung und Windgeschwindigkeit einen gemeinsamen Beitrag zur Kraft in Richtung Gleis liefern. Aus diesem Grund verfügt FSAero im Belastungs-Modus über die Funktion, den Modell-Menschen um 90° so zu drehen, so dass dieser mit dem Rücken zum Gleis steht.

Eine in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse durchgeführte Analyse zeigt, dass es bei keinen Zugtyp möglich ist (auch nicht bei $v_\mathrm{Z} = 200\,\mathrm{km/h}$), den Modell-Menschen in dieser Orientierung umzukippen. Zwar beginnt bei einigen Zugtypen der Kippvorgang des Modell-Menschen, die aerodynamische Belastung ist jedoch zu gering, um den Schwerpunkt des Modell-Menschen über die Rotationsachse hinaus zu befördern.

Die hier durchgeführte Analyse zeigt, dass Beschäftigte am Gleis in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse dem Risiko ausgesetzt sind, Korrekturbewegungen zur Gleichgewichtserhaltung durchführen zu müssen, wenn Güterzüge schneller als mit $v_\mathrm{Z} \approx 100\,\mathrm{km/h}$ und InterCity schneller als mit $v_\mathrm{Z} \approx 130\,\mathrm{km/h}$ Baustellen passieren. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass Schreckstarren bei Beschäftigen am Gleis nicht sicher auszuschließen sind, wenn keine Warnsysteme eingesetzt werden. Sperrige Kleidung, Seitenwind, allgemein vorhandener stetiger Wind in Fallrichtung oder statistische Ausreißer erhöhen das Risiko [47, 74, 104, 117]. Hingegen ist das Risiko eines aerodynamisch induzierten Gleichgewichtsverlusts eines Menschen, der bei $d \geq 2{,}30\,\mathrm{m}$ mit dem Rücken zum Gleis steht, bei Zuggeschwindigkeiten $v_\mathrm{Z} \leq 160\,\mathrm{km/h}$ sehr gering.

5.6 Drehimpuls, Drehmoment, Arbeit und Leistung

In den Abschnitten 4.6.4 und 5.5 wurde dargelegt, dass der in FSAero modellierte Kippvorgang eines starren Menschen durch eine hinreichend große aeordynamische Belastung erfolgt. Die Stabilitätsverlustdauer t_g ist dabei ein Maß für das Ausmaß der erforderlichen Korrekturbewegung zur Gleichgewichtserhaltung. Naturgemäß wird die Stabilitätsverlustdauer umso kleiner, je größer die aerodynamische Belastung ist. Letztgenannte lässt sich durch verschiedene physikalische Größen ausdrücken, etwa den aufgenommenen Drehimpuls, das wirkende Drehmoment, die auftretende Leistung oder die geleistete Arbeit der windinduzierten Kraft.

In Abbildung 5.18 ist beispielsweise der vom Modell-Menschen aufgenommene Drehimpuls über der Stabilitätsverlustdauer bei den mit FSAero festgestellten Kippvorgängen bei $d = 2{,}20\,\mathrm{m}$, $2{,}30\,\mathrm{m}$, $2{,}40\,\mathrm{m}$ und $2{,}50\,\mathrm{m}$ aufgetragen. Man erkennt, dass sich für den Bereich $0{,}3 \leq t_\mathrm{g} \leq 0{,}8\,\mathrm{s}$ ein nahezu linearer Zusammenhang ergibt. Die eingezeichneten Gleichgewichtsverlustkriterien nach Jordan ergeben, dass oberhalb eines aufgenommenen Drehimpulses von rund $L = 40\,\mathrm{Nms}$ ältere Menschen Korrekturschritte zur Aufrechterhaltung ihres Gleichgewichts ausführen müssen. Bei jüngeren Menschen beträgt dieser Wert rund $L = 46\,\mathrm{Nms}$.

Arbeitet man für die Kippvorgänge aus Abbildung 5.18 die simulierten Windgeschwindigkeiten gemäß Norm auf bzw. leitet daraus die jeweilige Bewertungsgröße $\hat{u}_1$ ab und trägt diese über den aufgenommenen Drehimpulsen L auf, so ergibt sich das Diagramm in Abbildung 5.19. Es zeigt, dass die durch Messung an nur einem Ort gewonnene Bewertungsgröße $\hat{u}_1$ als Maß für das Drehmoment auf einen Menschen am Gleis ungeeignet ist, denn der Zusammenhang $\hat{u}_1(L)$ ist augenscheinlich abhängig vom Zugtyp. Dies leuchtet ein, wenn man die Abbildungen 5.4, 5.8 und 5.20 betrachtet: Jeder Zugtyp führt ein für ihn charakteristisches Windfeld mit sich. Dabei ist nicht nur die räumliche Verteilung der auftretenden Maxima zugtypabhängig, sondern auch die Dauer der Windböen und der Zeitpunkt ihres Auftretens.

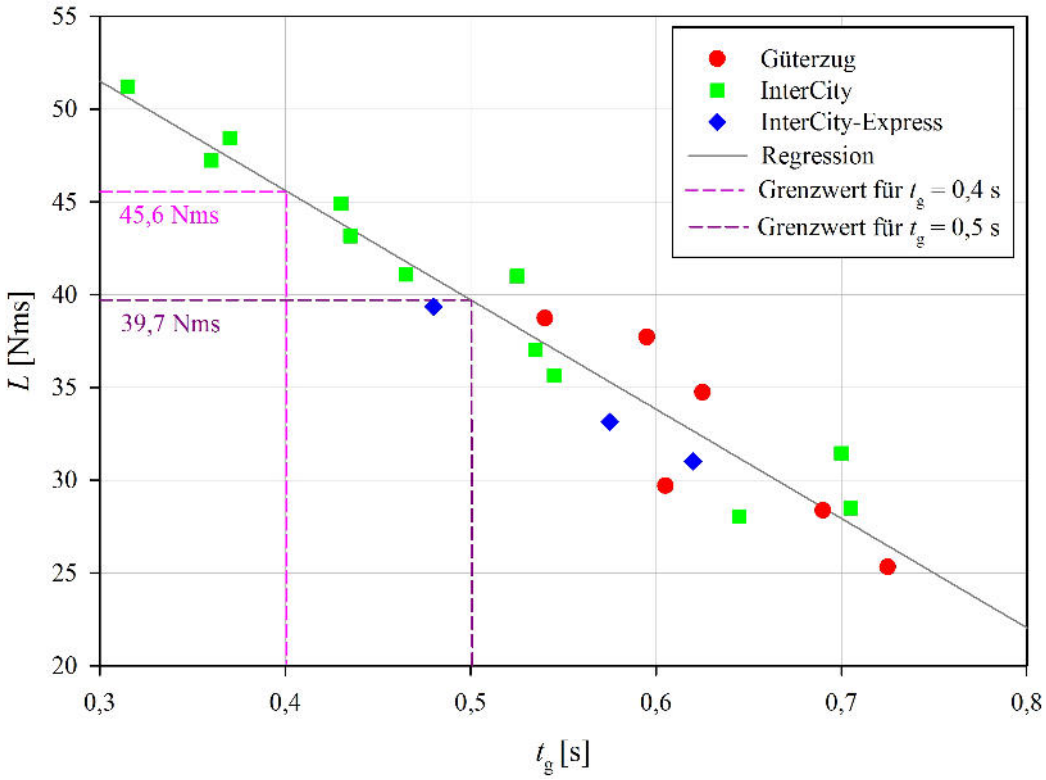


Abbildung 5.18: Vom Modell-Menschen ($H_M = 1{,}78\,\mathrm{m}$, $\mathrm{BMI} = 25\,\mathrm{kg/m^2}$) bei Kippvorgängen aufgenommener Drehimpuls über der Stabilitätsverlustdauer. Variiert wurden Zugtyp, v_Z und d.

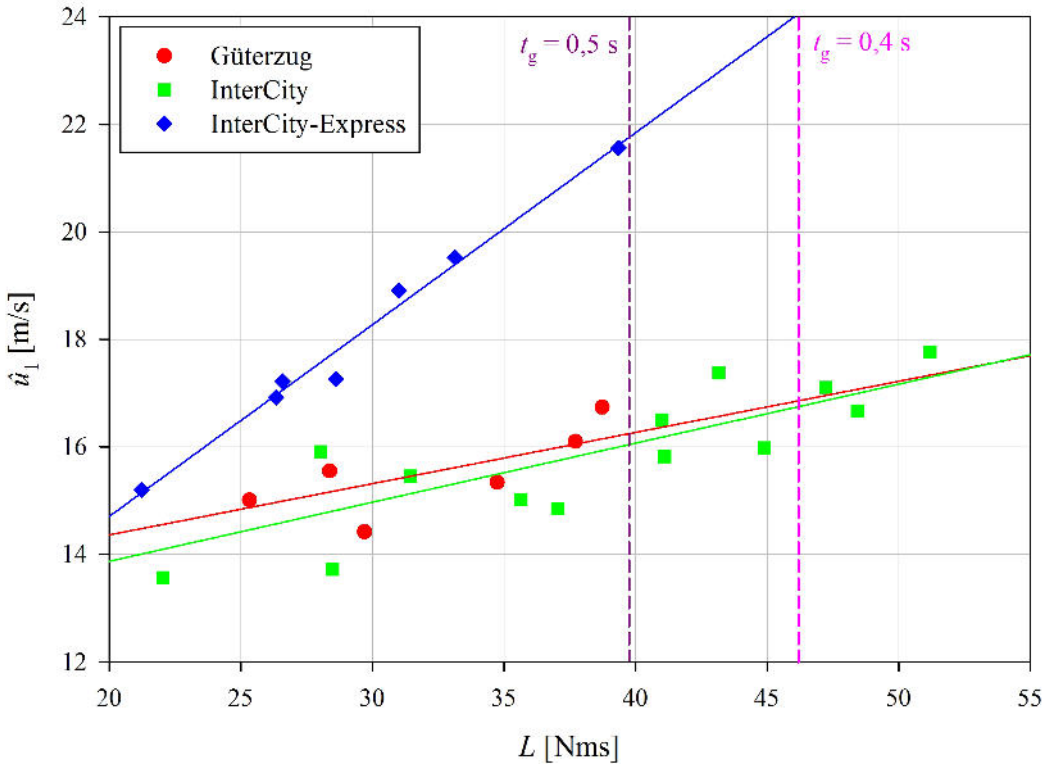


Abbildung 5.19: Maxima der mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Windgeschwindigkeit in Zugfahrtrichtung über den Drehimpulsen der Kippvorgänge aus Abbildung 5.18.

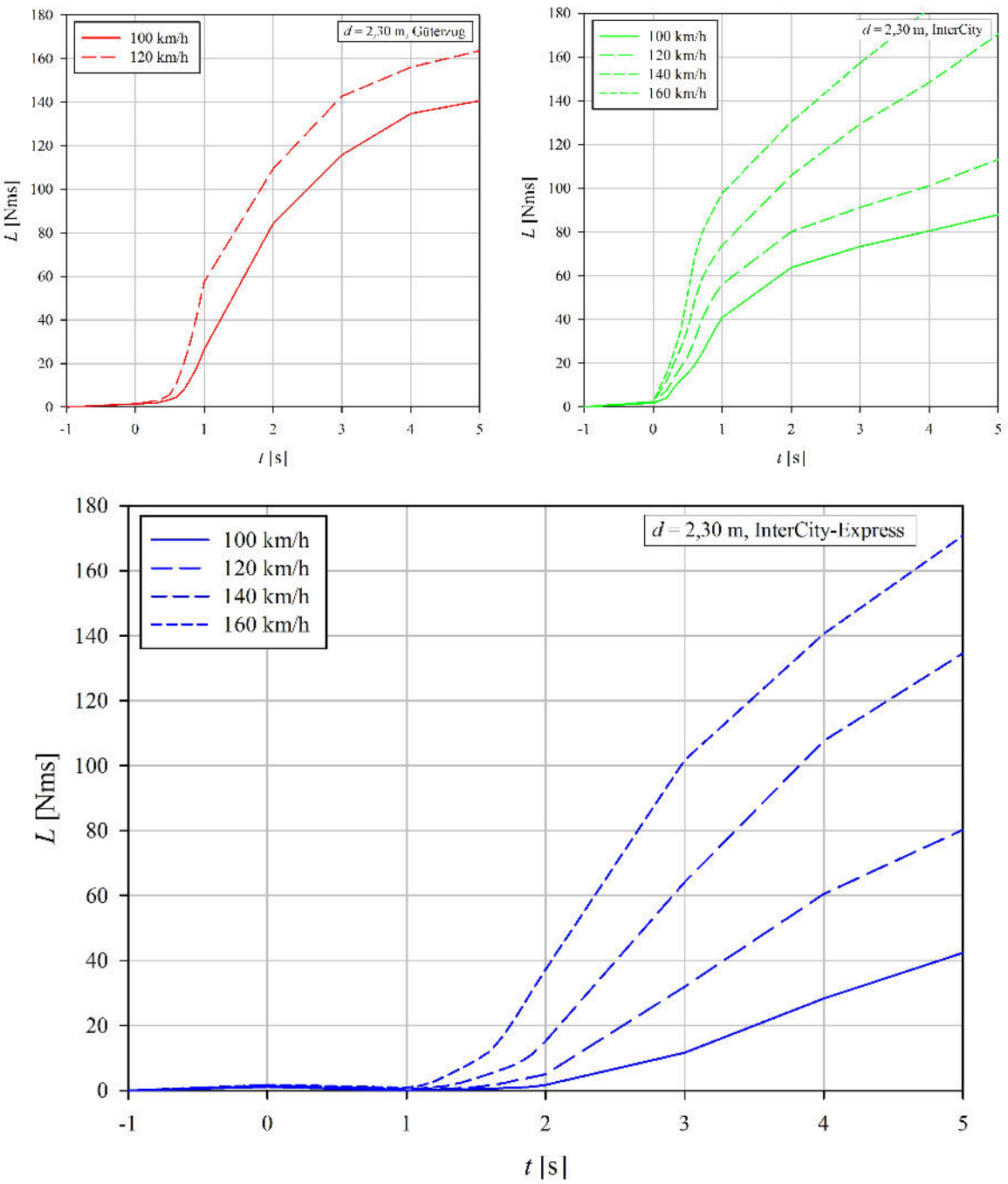


Abbildung 5.20: Vom Modell-Menschen aufgenommener Drehimpuls als Funktion der Zeit in einer Entfernung von $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ zur Gleisachse in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit.

Die unterschiedlichen Windböendauern sind der Grund dafür, warum sich die gleitende Mittelung von Windgeschwindigkeitsdaten für verschiedene Zugtypen unterschiedlich stark auswirkt. Es ist folglich nicht möglich, durch normgerechtes Messen der Windgeschwindigkeit an nur einem Punkt neben dem Gleis und anschließender gleitender Mittelung mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ auf die Auswirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen am Gleis bzw. deren Gleichgewichtsstabilität zu schließen.

In Abbildung 5.20 ist der vom Modell-Menschen aufgenommene Drehimpuls über der Zeit in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse für den simulierten Güterzug, InterCity und InterCity-Express als Funktion der Zuggeschwindigkeit aufgetragen. Man entnimmt der Abbildung, dass der während der Vorbeifahrt des Güterzuges und des InterCitys aufgenommene Drehimpuls kurz nach Passage des Zugbuges ($t = 0$) sehr steil und stark ansteigt. Beim InterCity-Express geschieht dieser Anstieg rund 1 s später und ist erheblich flacher. Auch daran ist die Verschiedenheit der von den Zugtypen mitgeführten Windfelder und deren Wirkung auf Menschen am Gleis zu erkennen.

Subtrahiert man von den Drehimpulsen L aus Abbildung 5.18 den gravitationsinduzierten Anteil L_G und dividiert diese Differenz anschließend durch die dazugehörigen Stabilitätsverlustdauern t_g, ergeben sich die mittleren windinduzierten Drehmomente $\bar{M}_\mathrm{W}$, die während der Stabilitätsverlustdauern herrschen. In Abbildung 5.21 sind diese mittleren windinduzierten Drehmomente als Funktion der Stabilitätsverlustdauer dargestellt. Weiterhin sind die Gleichgewichtsverlustkriterien von Jordan eingezeichnet. Man entnimmt der Abbildung, dass ein eindeutiger nichtlinearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen besteht. Mit dessen Hilfe und den Kriterien von Jordan ergeben sich die Grenzwerte $\bar{M}_\mathrm{Wg} = 94\,\mathrm{Nm}$ bzw. $\bar{F}_\mathrm{Wg} = 96\,\mathrm{N}$, oberhalb der ältere Menschen Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung durchführen müssen. Für jüngere Menschen gilt $\bar{M}_\mathrm{Wg} = 134\,\mathrm{Nm}$ bzw. $\bar{F}_\mathrm{Wg} = 137\,\mathrm{N}$. Gefahren für das menschliche Gleichgewicht treten aber bereits unterhalb dieser Werte auf.

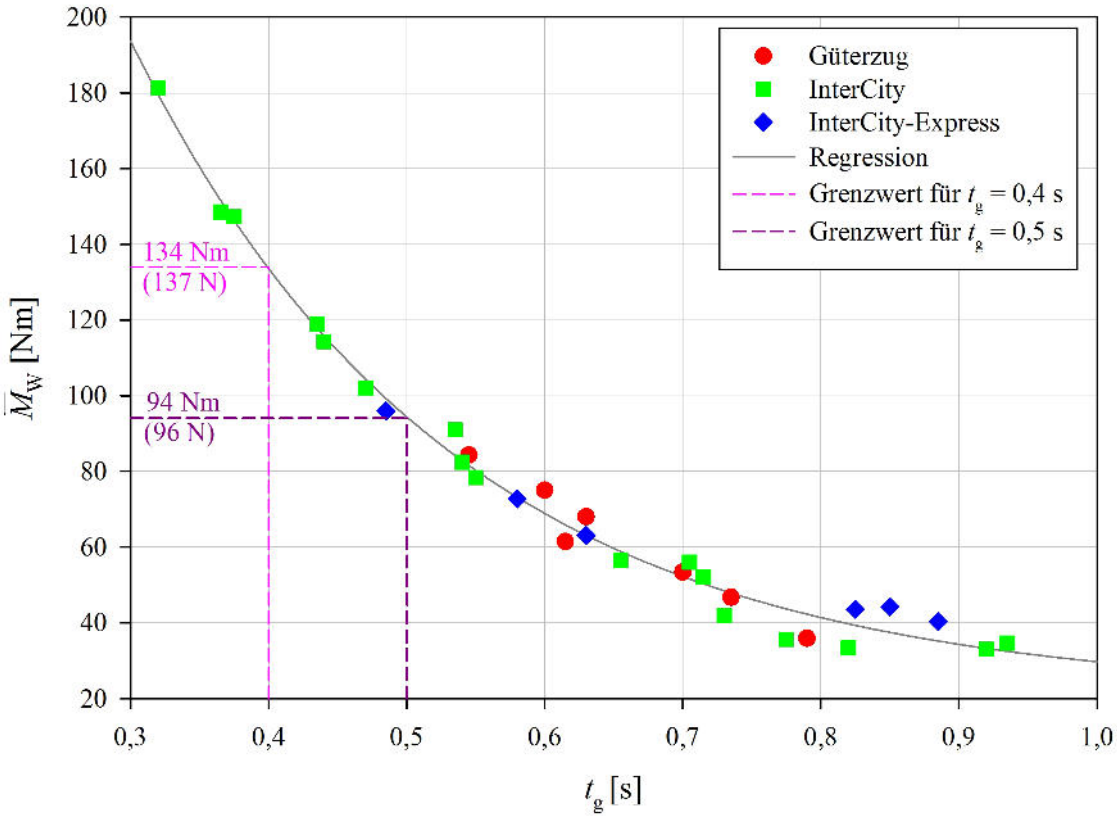


Abbildung 5.21: Mittleres windinduziertes Drehmoment über der Stabilitätsverlustdauer für die Kippvorgänge aus den Abbildungen 5.19 und 5.20.

Mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.5 folgt damit, dass in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse Gefahr für das menschliche Gleichgewicht besteht, wenn Kraftspitzen von mehr als rund 100 N auftreten und Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung ausgeführt werden müssen, wenn die mittlere Kraft während der Stabilitätsverlustdauer den Wert von rund 96 N übersteigt.

Auch die Höhe der auf den Menschen wirkenden mittleren Windleistung $\bar{P}_\mathrm{W}$ sowie die Höhe der am Menschen geleisteten Windarbeit E_W während des Kippvorgangs lässt sich eindeutig mit der Gleichgewichtsverlustdauer t_g verknüpfen (Abbildung 5.22). Demnach müssen in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse ältere Menschen Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung durchführen wenn die am Menschen geleistete Windarbeit den Wert von $E_\mathrm{Wg} = 12{,}9\,\mathrm{J}$ überschreitet. Gleiches gilt, wenn die am Menschen wirkende mittlere Leistung größer als $\bar{P}_\mathrm{Wg} = 24{,}9\,\mathrm{W}$ wird. Für jüngere Menschen ergeben sich die Grenzwerte $E_\mathrm{Wg} = 15{,}7\,\mathrm{J}$ und $\bar{P}_\mathrm{Wg} > 39{,}8\,\mathrm{W}$. Wie auch bei den Grenzwerten für die wirkenden Kräfte und Drehimpulse, können bereits unterhalb dieser Werte Gefahren für das menschliche Gleichgewicht auftreten.

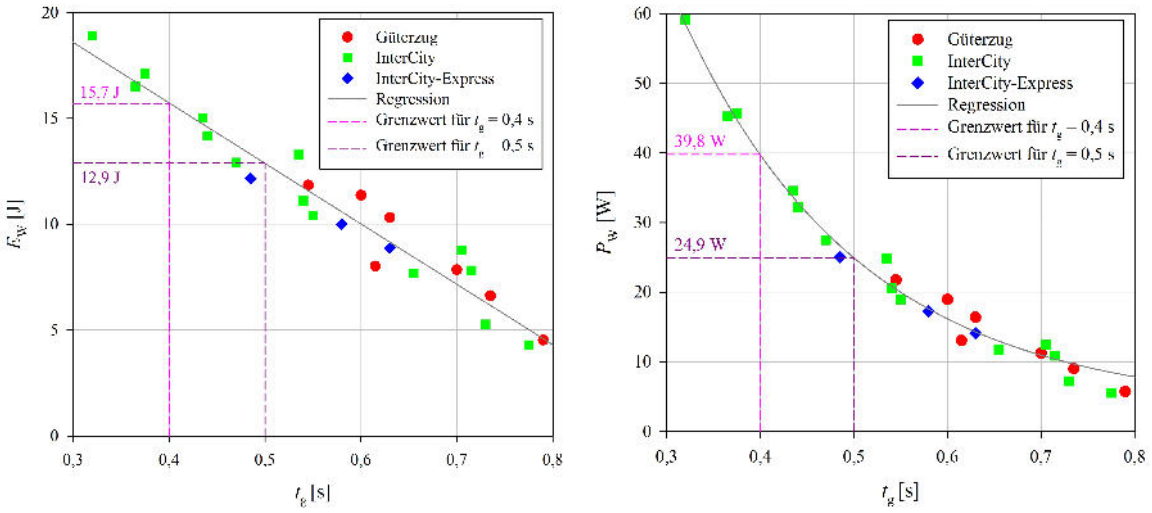


Abbildung 5.22: Während der Stabilitätsverlustdauer vom Fahrtwind geleistete Arbeit am Modell-Menschen (links) sowie die zugehörige mittlere Leistung (rechts) als Funktion von der Stabilitätsverlustdauer. Betrachtet wurden erneut die Kippvorgänge aus den Abbildungen 5.19 und 5.20.

6 Ergebnisdiskussion und Ausblick

6.1 Diskussion der Ergebnisse

Zielsetzung des Projektes war, die aerodynamischen und akustischen Belastungen auf Beschäftigte am Gleis bei Zugpassagen zu untersuchen, wobei der Schwerpunkt auf den aerodynamischen Belastungen lag. Insbesondere stand die Frage im Fokus, wie sich diese aerodynamischen Belastungen bzw. die dadurch resultierenden Gefahren auf die Beschäftigen am Gleis in einem Abstand von $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ von der Gleisachse erhöhen, wenn Züge schneller als mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ passieren. Hintergrund dieser Fragestellung ist das Bestreben der Deutschen Bahn AG, zukünftig auf die aktuell noch vorgeschriebene akustische Warnung der Beschäftigten am Gleis zu verzichten, wenn Züge schneller als $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ an festen Absperrungen vorbei fahren.

Zur Zielerreichung sollte zunächst eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt werden, um auf den Stand der Forschung zu gelangen. Anschließend war der Aufbau einer Messapparatur sowie die Durchführung einer Kampagne zur Messdatengewinnung am Gleis vorgesehen, um mit den gewonnenen Daten die Ergebnisse aus Computersimulationen der Zugvorbeifahrten zu verifizieren. Mit Hilfe der Computersimulationen sollten die aerodynamischen Belastungen neben dem Gleis zugtypabhängig sowie räumlich und zeitlich aufgelöst dargestellt werden. Durch Extrapolation auf höhere Zuggeschwindigkeiten sollten die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der aerodynamischen Belastungen analysiert werden. Optionales Ziel war, Aussagen über die Auswirkungen der ermittelten aerodynamischen Belastungen auf die Beschäftigen zu ermöglichen.

6.1.1 Literaturrecherche

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde umfangreiche Literaturarbeit betrieben. Mehr als 140 Veröffentlichungen aller Art von 1954 bis heute wurden zusammengetragen und großteils durchgearbeitet. Ursprünglich war vorgesehen, diesem Bericht eine vollständige und ausführliche Literaturübersicht beizufügen. Dies wurde wegen des enormen Umfangs wieder verworfen und stattdessen ein kurzer Abriss über die wesentlichen Erkenntnisse bzw. ausgewählte Arbeiten in Kapitel 2 präsentiert. Das erarbeitete Wissen über aerodynamische Belastungen auf Menschen reichte aus, um alle gesetzten Ziele dieses Projektes zu erreichen. Folglich war auch das Teilziel, eine umfangreiche Literaturrecherche durchzuführen, erfolgreich. Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Literaturarbeit sind:

- Unterschiedliche Zugtypen erzeugen unterschiedliche starke aerodynamischen Belastungen, welche mit der Zuggeschwindigkeit und kleiner werdendem Abstand zur Gleisachse wachsen.

- Die höchsten Windgeschwindigkeiten treten in der Regel im Bereich der Fahrgestelle auf.
- Die Windgeschwindigkeit wächst bis zu zugtypischen oberen Grenzen moderat mit der Zuglänge, was insbesondere für größere Abstände von der Gleisachse und den Windnachlauf nach Passage des Zuges gilt.
- Bei gleicher Zuggeschwindigkeit erzeugt der Güterzug die größten Windgeschwindigkeiten, gefolgt von InterCity, anderen Personenzügen und InterCity-Express. Die erzeugten Windgeschwindigkeiten bei Güterzügen hängen stark von Art und Reihenfolge der Waggons ab, wobei Waggons für den Autotransport [116] die höchsten Windgeschwindigkeiten erzeugen.
- Während bei klassischen Zugtypen die aerodynamische Belastung mit der Passage des Zugbuges sehr schnell auf ein gewisses Niveau ansteigt, steigen bei strömungsgünstig geformten Zugtypen die aerodynamischen Belastungen langsam an und erreichen die größten Werte nach der Passage des Zughecks.
- Während der Passage von Zugbug und -heck wandert die Richtung der durch die aerodynamische Belastung hervorgerufenen Kraft einmal um 360° um den Menschen am Gleis herum. Als Ursache dieser Kraft wird die Druckwirkung bzw. die Windbeschleunigung angenommen.
- Die Windreibungskraft auf den Menschen wirkt während der Zugpassage im Wesentlichen parallel zur Zugfahrtrichtung.
- Wird bei gleichen Randbedingungen die Windgeschwindigkeit bei mehreren Passagen des gleichen Zugtyps messtechnisch erfasst, so streuen diese Windgeschwindigkeitskurven und deren Maxima stark.
- Es besteht kein Konsens hinsichtlich Bewertungsgröße und zugehörigem Grenzwert für aerodynamische Belastungen auf Menschen durch Zugvorbeifahrten:
  - Weil die bei Zugpassagen gemessenen Windgeschwindigkeiten und ihre Maximalwerte stark streuen, werden als Bewertungsgröße zumeist verschiedene Mittelungsverfahren verwendet oder anderweitig aufbereitete Größen. Die Grenzwerte bewegen sich von 5 m/s bis 23 m/s.
  - Für die Zulassung von Zügen wird in der Europäischen Normung als Bewertungsgröße der Mittelwert der maximalen Windgeschwindigkeit aus 20 Einzelmessungen plus zweimal der Standardabweichung verwendet. Die maximale Windgeschwindigkeit wird dabei aus der mit einem Mittelungszeitintervall von 1,0 s gleitend gemittelten Windgeschwindigkeit berechnet. Als Grenzwert werden 20 m/s angesetzt. Diese Regelung gilt ausdrücklich nicht in Bezug auf die Arbeitssicherheit von Beschäftigen am Gleis.
  - Für die Windbeschleunigung finden sich keine Grenzwerte.
  - Für Druckwellenamplituden wurden Werte oberhalb 100 mbar als gesundheitsschädlich festgelegt. Für die Beeinträchtigung des Wohlempfindens besteht kein Konsens hinsichtlich Grenzwerte. Bezogen auf die Druckamplitude

bewegen sich die Grenzwerte von 3 mbar bis 30 mbar. Für die Druckanstiegsgeschwindigkeit werden Grenzwerte von 1 mbar/s bis 7,5 mbar/s genannt.

– Auch hinsichtlich eines Grenzwertes für die Kraft auf Menschen aufgrund aerodynamischer Belastungen besteht kein Konsens. Die Grenzwerte streuen von 43 N bis 130 N.

- Bei der Berechnung der windinduzierten Kraft auf Menschen wird das Newton'sche Reibungsgesetz (2.1) angesetzt. Es wurden Abweichungen zwischen direkt gemessener Kraft und den Kraftberechnungen nach Newton festgestellt, was auf einen zusätzlichen Einfluss des Drucks bzw. der Windbeschleunigung zurückgeführt wird.

- Seitenwind bezogen auf die Zugfahrtrichtung kann die aerodynamischen Belastungen auf Beschäftige im Gleisbereich auf der Lee-Seite des Zuges erheblich erhöhen. Dazu wird gegenwärtig noch immer geforscht.

- Die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen hängt in gewissem Rahmen von dessen Kleidung ab. Beispielsweise kann Arbeitskleidung im Vergleich zu leichter Kleidung die windinduzierte Kraft auf Menschen um etwa 15 % erhöhen.

- Gegenwärtig laufen weiterhin Forschungsprojekte, welche die Bewertung von zuginduzierten aerodynamischen Belastungen auf Beschäftige am Gleis und Fahrgästen auf dem Bahnsteig zum Gegenstand haben.

6.1.2 Aufbau einer Messapparatur

Ein weiteres Teilziel dieses Projektes war der Aufbau einer Messapparatur, mit der aerodynamische sowie akustische Messdaten zug-, orts- und zeitabhängig neben dem Gleis aufgenommen werden können. Zu diesem Zweck wurde ein Array aus neun Messpunkten aufgebaut. Der horizontale und vertikale Abstand zwischen den Messpunkten betrug jeweils 1 m. An jedem Messpunkt befand sich ein Ultraschallanemometer sowie ein Drucksensor, verkleidet mit einer Attrappe einer menschlichen Ohrmuschel. Die Zuggeschwindigkeit wurde vierfach redundant gemessen mit Hilfe von Radar, Lichtschranken und Kamerasystemen. Weiterhin kamen Lärmpegelmesser und Wettermessgeräte zum Einsatz. Wie in Kapitel 3 dargelegt, hat der Messaufbau während der einwöchigen Messkampagne hervorragend funktioniert, so dass dieses Teilziel erreicht wurde.

6.1.3 Gewinnung von Messdaten

Mit der entwickelten Messapparatur sollten zug-, orts- und zeitabhängige aerodynamische sowie akustische Messdaten in unmittelbarer Nähe am Gleis gewonnen werden. Mit Hilfe der aerodynamischen Daten sollten die angestrebten Computersimulationen der Zugpassagen verifiziert werden.

Wie in Abschnitt 3.3 gezeigt, wurden insgesamt 63 Züge (32 Doppelstockzüge, 15 S-Bahnen, 7 InterCity-Express, 5 Güterzüge, 2 Intercity, 1 Regionalbahn, 1 Bauzug)

messtechnisch erfasst. Die Anzahl der erfassten Doppelstockzüge und S-Bahnen erlaubte eine statistische Auswertung. Es zeigte sich, dass die Windgeschwindigkeit und deren Maxima stark streuen. Gleiches gilt für die Windbeschleunigung, welche durch zeitliche Ableitung der Windgeschwindigkeitsdaten bestimmt wurde. Während der Passage des Zugbuges läuft die Richtung der Windgeschwindigkeit und -beschleunigung einmal um 360° um die gleisnahen Messorte herum. Beide Größen nehmen im Bereich der Fahrgestelle die größten Werte an, wobei die Ausdehnung dieses Bereichs zugtypabhängig ist. Während Windgeschwindigkeit und -beschleunigung mit der Höhe über dem Gleis sinkt, lässt sich beim Druck keine Höhenabhängigkeit im Bereich der Messabtastung feststellen.

Die aerodynamischen Belastungen insgesamt sind zugtypabhängig und steigen mit abnehmender Entfernung zur Gleisachse und mit wachsender Zuggeschwindigkeit. Diese Befunde bestätigen die Angaben aus der Literatur. Die Abhängigkeiten $\hat{u}(v_\mathrm{Z}, d)$, $\hat{a}(v_\mathrm{Z}, d)$ und $\Delta p(v_\mathrm{Z}, d)$ lassen sich in guter Näherung mit Gleichungen des Typs von Formel (3.1) beschreiben.

Für die Zugtypen Güterzug, InterCity und InterCity-Express konnten nur wenige Vorbeifahrten messtechnisch erfasst werden, weshalb keine statistische Auswertung möglich ist. Weil – wie oben ausgeführt – die Untersuchung der aerodynamischen Belastungen auf Beschäftigte am Gleis nicht messdatenbasiert durchgeführt werden sollte, stellt die geringe Messdatenbasis für Güterzug, InterCity und InterCity-Express kein Hindernis für die Zielerreichung als Ganzes dar. Zwar ist eine größere Messdatenbasis zur vertieften Absicherung der Computersimulationen der Vorbeifahrten oben genannter Zugtypen wünschenswert, jedoch nicht zwingend erforderlich. Insofern wurde auch das Teilziel der Messdatengewinnung erreicht. Nichtsdestotrotz werden im Abschnitt 6.2 weitere Messdatenerhebungen in vorgeschlagenen Folgeprojekten empfohlen.

6.1.4 Modellierung

Um die Frage nach der Belastung auf Beschäftigten am Gleis in Abhängigkeit von Zugtyp, Zuggeschwindigkeit und Abstand von der Gleisachse beantworten zu können, wurden Züge, die während der Messkampagne erfasst wurden, mit Hilfe der CAD-Software Autodesk Inventor nachgebildet. Der Güterzug musste dabei aufgrund seiner Komplexität gegenüber dem realen Zug auf Lok plus drei Waggons gekürzt werden (Abschnitt 4.2). Diese virtuellen Züge wurden in die freie CFD-Software OpenFOAM importiert und die Fahrt der Züge dadurch simuliert, dass die Züge ruhen und vom Wind mit der Zuggeschwindigkeit v_Z angeströmt werden. Dabei kam das realizable k-ε-Turbulenzmodell zum Einsatz, um eine turbulente Strömung abbilden zu können. Die bei CFD-Simulationen übliche Zerlegung des betrachteten Volumens in Teilvolumina (Zellen) wurde so durchgeführt, dass die Zerlegung mit Annäherung an die Zugwand feiner wurde. Insgesamt wurde mit Zellenanzahlen bis zu rund 18 Millionen gerechnet.

Simuliert wurden Vorbeifahrten mit verschiedenen Zuggeschwindigkeiten, gestaffelt in 20 km/h-Schritte. Die Daten für die richtungsabhängige Windgeschwindigkeit sowie den Druck wurden entlang gleisparalleler Linien ausgelesen, wobei der horizontale sowie vertikale Abstand der Linien jeweils 10 cm betrug. Aus den Windgeschwindigkeitsdaten wurden durch zeitliche Ableitungen die Windbeschleunigungsdaten berechnet.

Der Vergleich mit den Messdaten zeigte, dass die Simulationen die Realität gut wiedergeben. Schwankungen auf sehr kurzen Zeitskalen, die von Turbulenzen herrühren, können von der Simulation aufgrund der Turbulenzmodellierung nicht wiedergegeben werden. Aufgrund der zeitlichen Kürze dieser Schwankungen und weil diese in der Regel mit schnellen Richtungsänderungen verbunden sind, haben sie kaum Auswirkungen auf die Gleichgewichtsstabilität von Beschäftigen am Gleis. Sie können deshalb in Bezug auf die zentrale Fragestellung des Projektes vernachlässigt werden.

Beim Doppelstockzug Baureihe 446 liegen die simulierten Windgeschwindigkeitskurven an den Messpositionen im Streubereich der gemessenen Windgeschwindigkeitskurven, wobei die Simulation die Messungen mit zunehmendem Abstand vom Gleis und zunehmender Höhe über der Schienenoberkante unterschätzt. In Bezug auf die Bugdruckwelle wird der gemessene zeitliche Verlauf durch die Simulation sehr gut wiedergegeben. Auch hier neigt die Simulation zur geringfügigen Unterschätzung der Realität, insbesondere in geringer Höhe über der Schienenoberkante.

Bei der S-Bahn Baureihe 425 stimmen simulierte und gemessene Windgeschwindigkeiten an den Messpositionen in $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante sehr gut überein. Die Simulation überschätzt zunehmend die Realität mit wachsender Höhe über der Schienenoberkante und sinkendem Abstand zur Gleisachse. Ähnliches gilt für die Bugdruckwelle der S-Bahn. Da der Normabstand zwischen Boden und Schienenoberkante 0,7 m beträgt, bedeutet $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ eine Höhe von 1,10 m beim stehenden Menschen. Folglich sind die simulierten aerodynamischen Belastungen im Bereich von Interesse sehr gut und damit anwendbar.

Bezüglich Güterzug, InterCity und InterCity-Express ist die Messdatenbasis nicht ausreichend, um eine statistisch vollständig abgesicherte Verifikation der Simulationen zu gewährleisten. Jedoch wurde die Einstellung der Modellparameter durch die zahlreichen Messdaten von Doppelstockzug und S-Bahn gesichert verifiziert und auf die Simulation von Güterzug, InterCity und InterCity-Express übertragen. Deshalb stimmen beim Güterzug die vorhandenen Messdaten äußerst gut mit den Daten aus der Simulation überein und zwar sowohl hinsichtlich Windgeschwindigkeit als auch hinsichtlich Bugdruckwelle. Dass Simulation und Messung nach der Passage des dritten Waggons auseinanderdriften liegt darin begründet, dass der virtuelle Güterzug deutlich kürzer ist als der reale Vergleichszug. Für die Abschätzung der Auswirkungen aerodynamischer Belastungen auf Personen nahe am Gleis spielt dies eine untergeordnete Rolle.

Beim InterCity stimmen die simulierten Windgeschwindigkeiten gut mit den gemessenen Windgeschwindigkeiten überein. Bei den Positionen in $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ Höhe scheint die Simulation die Realität etwas zu überschätzen, wobei die Überschätzung in zeitlich kurzen Windgeschwindigkeitspeaks an Zugbug und -heck besteht. Die simulierten Bugdruckwellen stimmen sehr gut mit den gemessenen Werten überein. Aufgrund der kurzen Dauer der leicht überhöhten Windgeschwindigkeitspeaks ist ihre Wirkung in Bezug auf Impulsübertrag auf Menschen am Gleis vergleichsweise gering, so dass die Daten aus der Simulation für Belastungsanalysen verwendet werden können.

Wie beim InterCity stimmen auch beim InterCity-Express die simulierten Windgeschwindigkeiten gut mit den gemessenen Windgeschwindigkeiten überein, wobei auch hier eine Überschätzung bei den Positionen in $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ Höhe aufzutreten scheint.

Im Vergleich zum InterCity sind die Überschätzungen geringer ausgeprägt, jedoch von längerer Dauer. Sie treten bei Passage des Zughecks und im Nachlauf auf. Im Gegensatz dazu neigen die simulierten Bugdruckwellen zur geringfügigen Unterschätzung der Realität. Aufgrund der zeitlichen Länge der Windgeschwindigkeitsüberschätzung kann es beim InterCity-Express zu einer geringfügigen Überschätzung der abgeleiteten Kraftwirkung bzw. Impulsübertragung auf Menschen am Gleis kommen.

Das Kapitel 4 zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Simulation der Wind- und Druckfelder um fahrende Züge verschiedenen Typs erfolgreich durchgeführt wurde. Dabei ist eine Besonderheit, dass die Simulationen – neben den Maxima – auch die zeitabhängigen Wind- und Druckfelder liefern bzw. geliefert haben. Mit der Einschränkung, dass es orts- und zugtypabhängig zu moderaten Abweichungen zwischen Simulation und Messung kommt und die Messdatenbasis für Güterzug, InterCity und InterCity-Express keine vollständig statistisch abgesicherte Verifikation dieser Simulationen erlaubt, ist die Güte der Simulationen nachweislich von ausreichender Qualität für weiterführende Analysen und Vergleiche. Das Ziel, die Wind- und Druckfelder fahrender Züge sinnvoll zu simulieren, wurde damit erreicht.

6.1.5 Darstellung der Ergebnisse

Der ursprüngliche Ansatz, die Simulationsergebnisse mit Hilfe umfangreicher Regressionsrechnungen in analytischen Formeln abzubilden, wurde aufgrund der hohen Variablenanzahl verworfen. Stattdessen wurde die in Abschnitt 4.6 beschriebene Software namens FSAero entwickelt, mit der die Simulationsergebnisse wahlweise in unterschiedlichen Darstellungsweisen visualisiert werden können. Somit wurde auch eine Lösung für die Ergebnisdarstellung gefunden und dieses Teilziel damit erreicht.

6.1.6 Analyse von Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck

Mit Hilfe der gewonnenen Simulationsergebnisse und ihrer Darstellungsmethode sollte untersucht werden, wie sich die Maximalwerte der aerodynamischen Größen Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, insbesondere der Zuggeschwindigkeit, verändern. Wie im Folgenden gezeigt wird, wurde auch dieses Teilziel erreicht.

6.1.6.1 Bewertung der Windgeschwindigkeit

Die vergleichende Untersuchung der maximalen Windgeschwindigkeit wurde in Abschnitt 5.1 dargelegt. Wie zu erwarten und wie exemplarisch am Beispiel des InterCitys in Abbildung 5.1, oben gezeigt wurde, steigt die maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ aller Züge deutlich mit wachsender Zuggeschwindigkeit v_Z, also auch dann, wenn v_Z von 120 km/h auf 160 km/h angehoben wird. Dies gilt mindestens für den Entfernungsbereich $1{,}9\,\mathrm{m} \leq d \leq 3{,}5\,\mathrm{m}$ von der Gleisachse und den Höhenbereich $-0{,}7\,\mathrm{m} \leq z \leq 1{,}6\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante. Sowohl die Literatur als auch die eigenen Messergebnisse und Simulationen bestätigen dieses Ergebnis übereinstimmend.

Uneinigkeit in der Fachwelt besteht indessen bei der Bewertung der Wirkung der Windgeschwindigkeit auf Menschen, wie Tabelle 2.3 eindrucksvoll demonstriert. Aufgrund der starken Streuung der gemessenen maximalen Windgeschwindigkeit bei der Passage desselben Zugtyps bei gleicher Zuggeschwindigkeit ist Mittelung über eine gewisse Zuganzahl ein häufiger Ansatz, eine Bewertungsgröße zu definieren, wobei die gemessenen Windgeschwindigkeitskurven zuvor bereits geglättet bzw. gleitend gemittelt werden. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist der Wunsch, eine messtechnisch einfach zugängliche Bewertungsgröße zur Verfügung zu haben. Im Europäischen Regelwerk heißt es aktuell, dass über die in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante und in $d = 3{,}0\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse gemessenen Maximalwerte von 20 Zugpassagen zu mitteln ist, wobei zuvor die Windgeschwindigkeitskurven zu glätten sind durch gleitende Mittelung mit einem Mittelungszeitintervall von 1,0 s. Der Grenzwert von $20\,\mathrm{m/s}$ darf nicht überschritten werden, wenn die doppelte Standardabweichung hinzu addiert wird.

Dieser Ansatz ist nicht dazu geeignet, die Wirkung der Größe Windgeschwindigkeit auf Menschen zu bewerten. Die Gründe dafür sind:

- Es liegen keine öffentlich zugänglichen Studien vor, welche die oben definierte Größe eindeutig mit der Reaktion von Menschen auf zuginduzierte aerodynamische Belastungen verknüpfen.

- Wenige Studien (z. B. [91, 123]), in denen versucht wurde, gleitend gemittelte Windgeschwindigkeitskurven mit der Reaktion von Menschen auf das Windfeld zu verknüpfen, berichten übereinstimmend, dass sich umso besser eine Korrelation herstellen lässt, je kleiner das Mittelungszeitintervall ist.

- Untersuchungen zur menschlichen Reaktionsdauer (z. B. [23, 51]) zeigten, dass Menschen – je nach subjektiven Eigenschaften – innerhalb einer Zeitspanne von rund 0,2 s bis 0,5 s auf eine äußere Krafteinwirkung reagieren. Im Vergleich zu dieser Zeitspanne ist das zur Datenglättung verwendete Mittelungszeitintervall von 1,0 s deutlich zu groß.

- Wie in Abschnitt 5.1 dargelegt wurde, erzeugt jeder Zugtyp sein eigenes, für ihn charakteristisches Windfeld. Es ist deshalb nicht möglich, durch Messung der Windgeschwindigkeit an nur einem Ort neben dem Gleis auf die Wirkung des Fahrtwindes auf Menschen zu schließen.

- Bei böigem Wind trägt auch die Windbeschleunigung zur Kraftentwicklung auf Menschen bei (z. B. [18, 99, 100]). Da die Höhe der windbeschleunigungsinduzierten Kraft nicht von der Windgeschwindigkeit abhängt, kann sie nicht mit der Windgeschwindigkeit verknüpft werden.

- Das Regelwerk gilt für die Zulassung von Personenzügen und hat keine Relevanz in Bezug auf die Arbeitssicherheit von Beschäftigten am Gleis.

- Güterzüge sind von obiger Regelung ausgenommen. Diese überschreiten darüber hinaus den Grenzwert von $20\,\mathrm{m/s}$ unterhalb $d = 3{,}0\,\mathrm{m}$ von der Gleismitte bei $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ [35].

- Für Zuggeschwindigkeiten unter 160 km/h sind keine Anforderungen im Regelwerk definiert.

Angesichts der Komplexität der Vorgänge verwundert die breite Streuung von Grenzwerten in Bezug auf die Bewertungsgröße Windgeschwindigkeit nicht. Soll dennoch die Windgeschwindigkeit als Bewertungsgröße herangezogen werden und scheut man dabei die möglichst exakte physikalische Beschreibung des Kippvorganges von Menschen in einem zeitabhängigen Windfeld inklusive der möglichst exakten Modellierung der menschlichen Reaktion, bleibt als Behelfslösung zur Bewertung der Risiken durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit aufgrund Anhebung der Zuggeschwindigkeit nur der Bezug auf bereits bestehende Sicherheitsrichtlinien. Im Folgenden werden die aus den Simulationen gewonnenen maximalen Windgeschwindigkeiten unter Bezug auf bestehende Regelwerke diskutiert.

Literatur, eigene Messungen und Simulationen zeigen, dass bei gleicher Zuggeschwindigkeit Güterzüge hinsichtlich Erzeugung hoher Windgeschwindigkeiten den worst case darstellen. Die Höhe der maximalen Windgeschwindigkeit ist bei gegebener Zuggeschwindigkeit in gewissem Rahmen abhängig von der Art der Waggons, der Waggonabfolge und der Zuglänge, wobei letztgenannte eine untergeordnete Rolle spielt. Weil gemäß Tabelle 1.1 keine akustischen Warnsysteme und Arbeitsniederlegungen erforderlich sind, wenn Züge mit $v_\mathrm{Z} \leq 120\,\mathrm{km/h}$ Baustellen passieren, kann der Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ zur Defintion eines Grenzwertes für die maximale Windgeschwindigkeit herangezogen werden. Basierend darauf wurden in Abschnitt 5.1 die maximalen Windgeschwindigkeiten des simulierten Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ mit denen der vier simulierten Personenzugtypen mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ miteinander vergleichen. Wie im Regelwerk vorgeschrieben wurden die Windgeschwindigkeitsdaten in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante betrachtet und die Daten vor der Maximabestimmung mit dem Mittelungszeitintervall $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.1, unten zu sehen.
Im Entfernungsbereich von 1,9 m bis 2,6 m von der Gleisachse liegen die maximalen Windgeschwindigkeiten von Güterzug und InterCity in etwa gleichauf. Wie in Abschnitt 6.1.4 dargelegt, neigt die Simulation des InterCity in niedrigen Höhen über der Gleisachse zur Überschätzung der Windgeschwindigkeit. Deshalb und weil der simulierte Güterzug keine Autowaggons enthält, die laut [116] den worst case darstellen, ist davon auszugehen, dass die durch den InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ erzeugten maximalen Windgeschwindigkeiten diejenigen des Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ nicht übersteigen. Dieses Ergebnis deckt sich mit demjenigen eines Berichtes der DB Systemtechnik GmbH [35]. Überraschend ist, dass die maximale Windgeschwindigkeit des InterCity-Express diejenigen des Güterzuges und InterCitys geringfügig übersteigt für $d < 2{,}2\,\mathrm{m}$. Der Grund hierfür ist, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten beim InterCity-Express – im Gegensatz zu den anderen Zugtypen – im Nachlauf auftreten und die Windböen hier zeitlich relativ lang sind. Bei der gleitenden Mittelung mit dem großen Mittelungszeitintervall $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ werden die Maxima langer Böen weniger stark abgesenkt als die Maxima der kürzeren Böen herkömmlicher Zugtypen. Der Vergleich mit Abbildung 5.1, oben ($\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$) veranschaulicht dies. Weiterhin neigen auch die Simulationen des InterCity-Express in niedrigen Höhen über der Gleisachse zur geringfügigen Überschätzung der Windgeschwindigkeit (Abschnitt 6.1.4).

Werden die Windgeschwindigkeitsmaxima in einer Höhe von $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante betrachtet, also etwa in Brusthöhe eines aufrecht stehenden Menschen, ergibt sich ein gänzlich anderes Bild. Wie Abbildung 5.2 verdeutlicht, übersteigen in dieser Höhe die vom InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ erzeugten Windgeschwindigkeitsmaxima deutlich diejenigen des Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ für alle d und zwar unabhängig vom verwendeten Mittelungszeitintervall. Dies und auch Abbildung 5.4 zeigen, dass das Ergebnis eines Vergleichs der maximalen Windgeschwindigkeiten verschiedener Zugtypen nicht nur von der Zuggeschwindigkeit und der Entfernung von der Gleisachse abhängen, sondern maßgeblich auch von der Höhe über der Schienenoberkante und vom Mittelungszeitintervall. Aufgrund dessen und der räumlichen Ausdehnung eines stehenden Menschen sowie der Tatsache, dass der Wind auf den gesamten Körper wirkt, eignet sich die an nur einem Ort gemessene maximale Windgeschwindigkeit nur bedingt, um die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen zu charakterisieren. Der Nachweis, dass die vom Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ hervorgerufene maximale Windgeschwindigkeit von den anderen Zugtypen mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ am Ort $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ und $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ bei $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ nicht überschritten wird, ist deshalb nicht ausreichend, um eine Gefährdung der Beschäftigen am Gleis durch eine Zuggeschwindigkeitserhöhung sicher auszuschließen. Dieses Ergebnis gilt auch vor dem Hintergrund, dass Abweichungen zwischen Simulationen und Messwerten existieren. In Abschnitt 6.2 erfolgen diesbezüglich Verbesserungsvorschläge.

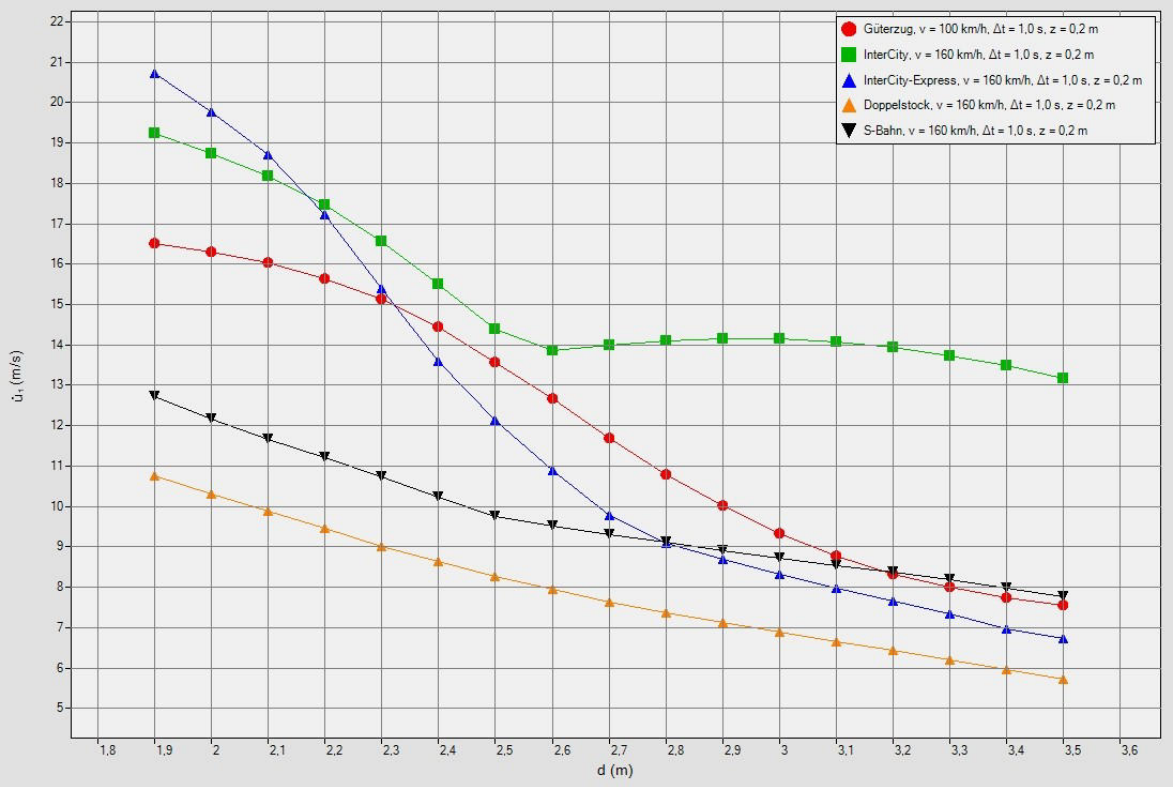


Abbildung 6.1: Vergleich der in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$. Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben.

In den Abschnitten 5.4 und 5.5 wurden Indizien dafür gefunden, dass $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ für Güterzüge in Gleisbaustellen zu hoch ist und auf $v_\mathrm{Z} = 100\,\mathrm{km/h}$ abgesenkt werden sollte. Wird dies bei einem Vergleich wie in Abbildung 5.1 berücksichtigt, ergibt sich Abbildung 6.1. Für $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ überschreitet $\hat{u}_1$ des InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ nun den Wert des Güterzuges $v_\mathrm{Z} = 100\,\mathrm{km/h}$.

6.1.6.2 Bewertung der Windbeschleunigung

In der Literatur wird übereinstimmend festgestellt, dass böiger Wind stärker destabilisierend auf das menschliche Gleichgewicht wirkt als stetiger Wind. Zum einen liegt dies darin begründet, dass der Mensch eine gewisse Zeit zum Reagieren auf die Änderung äußerer Krafteinwirkungen benötigt. Zum anderen liefert auch die Windbeschleunigung, welche bei böigem Wind auftritt, einen Beitrag zur windinduzierten Kraft auf Menschen (Abschnitt 2.2.1). Der Kraftbeitrag, den die Windbeschleunigung im Falle passierender Züge liefert, ist geringer als der Beitrag, welcher durch die Windreibung (über die Windgeschwindigkeit) entsteht. Dennoch kann der windbeschleunigungsinduzierte Anteil der maximalen windinduzierten Kraft auf den Menschen gemäß Berechnungen mit FSAero mehr als 20 % erreichen, weshalb eine Vernachlässigung auszuschließen ist.

In der Literatur finden sich keinerlei Grenzwerte für eine maximal zulässige Windbeschleunigung auf Beschäftige am Gleis oder Fahrgäste auf dem Bahnsteig. Aus diesem Grund bleibt zur Bewertung der Windbeschleunigung nur die gleiche Vorgehensweise wie im vorigen Abschnitt 6.1.6.1: Die möglichst exakte physikalische Modellierung des Verhaltens von Menschen in einem zeitabhängigen Windfeld oder der Bezug auf bereits bestehende Sicherheitsrichtlinien. Im Folgenden werden die aus den Simulationen gewonnenen maximalen Windbeschleunigungen unter Bezug auf bestehende Regelwerke diskutiert, d. h. der Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ stellt wieder den worst case dar und definiert damit den Grenzwert. Die Windbeschleunigungen wurden aus den zeitlichen Ableitungen der Windgeschwindigkeiten berechnet, wobei Letztgenannte vor dem Ableiten gleitend gemittelt wurden.

Betrachtet wird erneut die Höhe $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante bei gleitender Mittelung mit dem Mittelungszeitintervall von $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$. Das in Abbildung 5.5, unten dargestellte Ergebnis zeigt, dass die vom InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ erzeugten maximalen Windbeschleunigungen für $d < 2{,}5\,\mathrm{m}$ diejenigen des Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ übersteigen, nahe am Zug deutlich. Diese Diskrepanz verschärft sich, wenn kleinere Mittelungszeitintervalle verwendet werden, wie Abbildung 5.5, oben illustriert. Weil sich die Windbeschleunigung als zeitliche Ableitung der Windgeschwindigkeit darstellt, beeinflusst eine Glättung bzw. gleitende Mittelung der Windgeschwindigkeitsdaten sehr stark die abgeleiteten Windbeschleunigungen. Deshalb bewirkt ein Mittelungszeitintervall von $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ eine sehr starke Absenkung – und damit Verfälschung (!!) – der Windbeschleunigungskurven und -maxima.

Wie auch bei der Windgeschwindigkeit führt die Anhebung des Betrachtungsortes auf $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante dazu, dass die Maxima der Windbeschleunigung zwischen InterCity und Güterzug noch weiter auseinanderdriften. Ein InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ überschreitet folglich klar die durch den Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ definierten Grenzwerte für die maximale Windbeschleunigung. Es sind also weitgehend

die gleichen Schlussfolgerungen zu ziehen wie bei der Bewertung der Windgeschwindigkeit: Das Ergebnis eines Vergleichs von von verschiedener Zugtypen hervorgerufenen maximalen Windbeschleunigungen hängt nicht nur von der Zuggeschwindigkeit und der Entfernung von der Gleisachse ab, sondern maßgeblich auch von der Höhe über der Schienenoberkante und vom gewählten Mittelungszeitintervall (Abbildung 5.8). Deshalb und weil die Windbeschleunigung auf den ganzen menschlichen Körper wirkt, reicht der Vergleich der maximalen Windbeschleunigung an nur einem Messort nicht aus, um eine Gefährdung der Beschäftigen sicher zu bewerten. Dieses Ergebnis ist auch dann richtig, wenn die Abweichungen zwischen Simulation und Messung berücksichtigt werden.

6.1.6.3 Bewertung des Drucks

Wie auch bei der Bewertung der Windgeschwindigkeit besteht kein Konsens hinsichtlich Grenzwerten für die maximal zulässigen Druckamplituden und Druckanstiegsgeschwindigkeiten, welche auf Personen wirken (Tabelle 2.4). Der Begriff Druckamplitude bezieht sich hier auf die Druckwelle, die bei der Passage des Zugbuges entsteht. Dass sich Druckwellen negativ auf das Wohlempfinden und Gesundheit von Menschen auswirken können, ist indes unstrittig.
In [101] wird ein (politisch festgelegter) Grenzwert von $\Delta p_{\mathrm{g}} = 100\,\mathrm{mbar}$ für Druckamplituden genannt, oberhalb dessen Gesundheitsschäden beim Menschen auftreten. Die von Zugpassagen generierten Druckamplituden sind erheblich kleiner als dieser Grenzwert, so dass durch zuginduzierte Druckwellen keine unmittelbaren negativen Folgen für die Gesundheit der Beschäftigten am Gleis zu erwarten sind.
Wie in Abschnitt 5.3 gezeigt, bewegen sich die zuginduzierten Druckamplituden und Druckanstiegsgeschwindigkeiten jedoch in der gleichen Größenordnung wie die in Tabelle 2.4 angegebenen Grenzwerte für das menschliche Wohlempfinden. Weil dem so ist und weil Unsicherheit bei den Grenzwerten besteht, kann folglich nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die durch Anhebung der Zuggeschwindigkeit hervorgerufene Erhöhung der Druckbelastung sich nicht negativ auf das Wohlempfinden von Beschäftigten am Gleis auswirkt. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass es sich hier um Dauerbelastungen handelt.

Auf Grund dieser Unsicherheiten kann auch zur Bewertung der zuginduzierten Druckbelastung von Menschen der Güterzug mit $v_{\mathrm{Z}} = 120\,\mathrm{km/h}$ als Referenz herangezogen werden. Der Vergleich mit den von den Personenzügen mit $v_{\mathrm{Z}} = 160\,\mathrm{km/h}$ induzierten Druckamplituden ist in den Abbildungen 5.9 und 5.10 grafisch dargestellt und zwar für die Höhen $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$, $0{,}7\,\mathrm{m}$ und $0{,}9\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante.
Der Vergleich ergibt, dass sich die Druckamplituden herkömmlicher Personenzüge (InterCity, Doppelstockzug, S-Bahn) durch die Geschwindigkeitsanhebung von $v_{\mathrm{Z}} = 120\,\mathrm{km/h}$ auf $v_{\mathrm{Z}} = 160\,\mathrm{km/h}$ in etwa verdoppeln (!). Der strömungsgünstig geformte InterCity-Express ist von dieser Erhöhung nicht betroffen. Dieses Ergebnis hat auch dann Bestand, wenn auftretende Abweichungen zwischen Messung und Simulation berücksichtigt werden.

Wird nicht nur die Bugdruckwelle betrachtet, sondern alle auftretenden Druckschwankungen während der Zugpassage (Abbildung 5.13), so übersteigen die maximalen

Druckamplituden und die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten aller herkömmlichen Züge mit $v_Z = 160\,km/h$ diejenigen des Güterzuges mit $v_Z = 120\,km/h$, in Bezug auf die Druckanstiegsgeschwindigkeit sogar um mehr als das Doppelte. Der InterCity-Express mit $v_Z = 160\,km/h$ erzeugt deutlich geringere Druckbelastungen als der Güterzug mit $v_Z = 120\,km/h$.

Weil es aufgrund einer Zuggeschwindigkeitserhöhung in Baustellen bei herkömmlichen Personenzügen nachweislich zu einer deutlichen Erhöhung der Druckbelastungen auf Beschäftigte am Gleis kommt und dadurch die vom Güterzug mit $v_Z = 120\,km/h$ definierten sowie die in der Literatur genannten Grenzwerte für das menschliche Wohlempfinden bei Druckexpositionen teilweise (Druckamplitude) oder vollständig (Druckanstiegsgeschwindigkeit) überschritten werden, können negative Auswirkungen auf das Wohlempfinden von Beschäftigen am Gleis nicht sicher ausgeschlossen werden. Dies gilt nicht für den InterCity-Express.

6.1.7 Auswirkung windinduzierter Kraft auf Menschen

Wie in Kapitel 5 dargelegt, konnten auch die beiden in Abschnitt 1.3 definierten Maximalziele – nämlich die Bestimmung der aerodynamisch induzierten Kraft auf Personen sowie die Bewertung derselben hinsichtlich ihrer Wirkung auf Personen – durch eine Kombination eines vergleichsweise simplen Modells zur Beschreibung der Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen [70, 73, 74] mit der Software FSAero erreicht werden. Gegenwärtig existieren auch komplexere, biomechanische Modelle zur Beschreibung der Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen [13, 73, 123], deren Verwendung jedoch äußerst aufwendig ist (z. B. Messungen am Gleis mit verschiedenen Probanden zur Modellkalibrierung), weshalb sie in dieser Untersuchung nicht zur Anwendung kamen.

Durch Einbringen eines starren, virtuellen Menschen an einen wählbaren Ort im orts- und zeitaufgelösten Windfeld neben dem Zug und Anwendung von Formel 2.2 mit $c_W = 1{,}17$ und $c_A = 2{,}5$, wird das zeitabhängige Drehmoment auf den virtuellen Menschen exakt berechnet. Dieses Drehmoment auf den Menschen stellt sich dabei als Summe von Teildrehmomenten dar, die von der windinduzierten Kraft aufgrund Windreibung und Windbeschleunigung sowie der Gravitationskraft herrühren. Das windinduzierte Drehmoment auf den virtuellen Menschen ist dabei die Summe über die Drehmomente, welche jedes Flächen- und Volumenelement des virtuellen menschlichen Körpers beisteuert. Der Schwerpunkt des virtuellen Menschen befindet sich in einer Höhe von 55 % seiner Körpergröße, die Fußlänge beträgt 15 % seiner Körpergröße und der horizontale Abstand zwischen der Senkrechten durch den Körperschwerpunkt und der Rotationsachse an der Ferse des Menschen misst 1/3 der Fußlänge. Die Differentialgleichungen, welche den Kippvorgang des virtuellen Menschen im Windfeld beschreiben, werden numerisch gelöst. Wenn der Schwerpunkt des virtuellen Menschen beim Kippvorgang den Ort der Rotationsachse überschreitet, ist das windinduzierte Drehmoment groß genug, den Modell-Menschen vollständig umzukippen. Auf diese Situation muss ein realer Mensch körperlich reagieren, um sein Gleichgewicht zu erhalten. Ist die Zeitspanne bis zur Überschreitung der Rotationsachse kleiner als $t_g = 0{,}4\,s$

(jüngere Menschen) bzw. 0,5 s (ältere Menschen), müssen Menschen zur Gleichgewichtserhaltung gemäß Jordan [73, 74] Korrekturschritte ausführen. Die Zeitspanne t_g kann sich z. B. durch Erschrecken deutlich erhöhen.

Die Berechnung des zeitlichen Verlaufs der windinduzierten Kraft auf den Modell-Menschen sowie die Untersuchung ihrer Wirkung hinsichtlich Gleichgewichtsverlust ergab, dass in erster Linie Gefahren von Güterzügen und InterCity für die Beschäftigten am Gleis ausgehen. Es zeigte sich, dass der Modell-Mensch in einer Entfernung von $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse umkippt, wenn virtuelle der Güterzug schneller als $v_Z \approx 100\,\mathrm{km/h}$ und der virtuelle InterCity schneller als $v_Z \approx 140\,\mathrm{km/h}$ fahren. Weil die Ergebnisse der Abschnitte 5.4 und 5.5 darauf hinweisen, dass der Grenzwert für die windinduzierte Kraft in der Größenordnung von 100 N liegt und der Fahrtwind des InterCity gemäß Abbildung 5.14 diesen Wert bereits bei $v_Z \approx 120\,\mathrm{km/h}$ erreicht, ist anzunehmen, dass bereits eine Zuggeschwindigkeit im Bereich von $v_Z \approx 130\,\mathrm{km/h}$ den Modell-Menschen zum Umkippen bringen kann. Aktuell kann dies nicht geprüft werden, weil für die letztgenannte Zuggeschwindigkeit keine Simulationsdaten vorliegen. Folglich haben Güterzüge mit $v_Z > 100\,\mathrm{km/h}$ und InterCity mit $v_Z > 130\,\mathrm{km/h}$ das Potential, Menschen zu Korrekturbewegungen zur Gleichgewichtserhaltung zu veranlassen. Passieren InterCity Menschen am Gleis in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse schneller als mit $v_Z \approx 160\,\mathrm{km/h}$, führen Menschen Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung aus.
Wird in Betracht gezogen, dass Erschrecken körperliche Starren von Dauern in der Größenordnung Sekunden (die sprichwörtliche Schrecksekunde) hervorrufen kann, so sinken die oben angegebenen Geschwindigkeitsgrenzen für die Zuggeschwindigkeiten in Bezug auf das Ausführen von Korrekturschritten beträchtlich. In diesem Falle können bereits $v_Z \approx 100\,\mathrm{km/h}$ bei Güterzügen und $v_Z \approx 130\,\mathrm{km/h}$ bei InterCity Korrekturschritte von Beschäftigten am Gleis provozieren. Um das Phänomen des Erschreckens während oder unmittelbar vor der Zugpassage wirkungsvoll zu unterbinden, sollte nicht auf Warnsysteme verzichtet werden.

Die Analyse der windinduzierten Kraft auf Menschen sowie deren Gleichgewichtsstabilität mit Hilfe des in FSAero implementierten Modells lieferte Indizien dafür, dass die heute für Güterzüge zugelassene Höchstgeschwindigkeit von $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$ bei der Passage von Gleisbaustellen zu hoch ist. Dieses Ergebnis deckt sich mit einer Studie des Schweizer Bundesamtes für Verkehr [16], an der auch die DB Systemtechnik GmbH maßgeblich beteiligt war. Das Bundesamt für Verkehr empfahl eine Absenkung der Passagegeschwindigkeit auf $v_Z = 100\,\mathrm{km/h}$. Dieser Empfehlung schließen sich die Autoren der vorliegenden Untersuchung an.

Obwohl die von S-Bahn, Doppelstockzug und InterCity-Express windinduzierte maximale Kraft auf Menschen in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ zur Gleisachse bei Zuggeschwindigkeiten bis $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ unterhalb der Mehrzahl der Grenzwerte bleibt, ist nicht gänzlich auszuschließen, dass vom Fahrtwind dieser Züge bei Geschwindigkeiten $v_Z > 120\,\mathrm{km/h}$ Gefahren für Beschäftige am Gleis ausgehen. Denn durch schwere Arbeitskleidung, Seitenwind und statistische Ausreißer können deutlich höhere Kraftspitzen als diejenigen in Abbildung 5.14 auftreten. Dies kann dazu führen, dass die genannten Zugtypen in Abbildung 5.16 in Erscheinung treten.

Trotz der Einfachheit des Modells liefert es Hinweise darauf, dass ein Risiko für

Gleichgewichtsverluste bei Beschäftigen am Gleis besteht, wenn Personenzüge mit $v_Z > 120\,\mathrm{km/h}$ und Güterzüge mit $v_Z > 100\,\mathrm{km/h}$ Feste Absperrungen mit $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ passieren. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass auf Warnsysteme verzichtet wird.

6.1.8 Fazit

Alle zu Beginn des Projektes gesetzten Ziele wurden erreicht. Mit Hilfe von am Gleis gewonnenen Messdaten wurden Computermodelle von Zugvorbeifahrten erstellt, welche aerodynamische Lasten neben dem Gleis räumlich und zeitlich aufgelöst berechnen können. Es wurde eine Software zur Darstellung der Simulationsergebnisse entwickelt, welche darüber hinaus erlaubt, die Wirkung der berechneten aerodynamischen Belastungen auf Menschen abzuschätzen.
Die Simulationsergebnisse stimmen im allgemeinen gut mit den Messergebnissen überein. Im Bereich von Interesse treten zugtyp- und ortsabhängig moderate Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Belastungskurven auf. Diese Abweichungen in den Kurvenmaxima bleiben unter 30 %. Die Einstellung der Modellparameter wurde an der breiten Messdatenbasis für den Doppelstockzug Baureihe 446 und die S-Bahn Baureihe 425 verifiziert und für alle Simulationen übernommen. Für eine direkte, statistisch vollständig abgesicherte Verifizierung der Simulationsergebnisse für InterCity-Express, InterCity und Güterzug reicht die Messdatenbasis nicht aus. Die Simulationsergebnisse sind dennoch von ausreichender Güte, um zu folgenden gesicherten Schlussfolgerungen zu kommen:

1. Die Messung der maximalen Windgeschwindigkeit an nur einem Ort neben dem Gleis ist nicht ausreichend, um damit die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen am Gleis charakterisieren zu können. Züge führen komplexe orts- und zeitabhängige Windfelder mit sich, die sich zugtypabhängig signifikant unterscheiden können.

2. Die gleitende Mittelung von Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungskurven verfälscht die Berechnung der windinduzierten Drehmomente auf Menschen am Gleis. Dies gilt umso mehr, je größer die Mittelungszeitintervalle sind. Mittelungszeitintervalle sollten nicht länger als die menschliche Reaktionsdauer sein: $\Delta t \leq 0{,}5\,\mathrm{s}$.

3. Die Windbeschleunigung darf bei der Bestimmung von windinduzierten Drehmomenten auf Menschen am Gleis nicht vernachlässigt werden. Sie tritt stets in Kombination mit der Windreibungskraft auf und superpositioniert zumeist konstruktiv mit dieser. Kraftspitzen aufgrund Windreibungskraft können sich durch Berücksichtigung der Windbeschleunigung um mehr als 20 % erhöhen.

4. Rechnungen mit dem Belastungs-Modus in FSAero weisen auf einen Grenzwert für die windinduzierte Kraft von $F_g = 90 \pm 20\,\mathrm{N}$ hin. Bei der Kraftberechnung sind die Windgeschwindigkeits- und Windbeschleunigungskurven nicht gleitend gemittelt. Die angegebene Schwankungsbreite liegt zum einen in der zugtypenabhängigen Böendauer und zum anderen in der Unsicherheit in den Simulationsdaten begründet.

5. In $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung zur Gleisachse erzeugen der simulierte Güterzug mit Geschwindigkeit oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 100\,\mathrm{km/h}$ und der InterCity mit Zuggeschwindigkeit oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 130\,\mathrm{km/h}$ windinduzierte Kräfte, welche den Modell-Menschen in FSAero vollständig umkippen. Der Grenzwert für die Stabilitätsverlustdauer von $t_\mathrm{g} = 0{,}5\,\mathrm{s}$ bzw. $t_\mathrm{g} = 0{,}4\,\mathrm{s}$ wird dabei nicht unterschritten, d. h. Menschen führen gemäß Modelldefinition keine Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung aus. Aufgrund möglichen Erschreckens bei Entfernung von Warnsystemen führt die auftretende Schreckstarre zur signifikanten Vergrößerung von t_g, weshalb Menschen in solchen Fällen bereits bei Zuggeschwindigkeiten oberhalb $v_\mathrm{Z} \approx 100\,\mathrm{km/h}$ bzw. $v_\mathrm{Z} \approx 130\,\mathrm{km/h}$ zur Ausführung von Korrekturschritten gezwungen sein können. Deshalb sollte nicht auf ein Warnsystem beim Einsatz von Festen Absperrungen verzichtet werden.

6. Schwere Arbeitskleidung, vorhandener stetiger Wind, Seitenwind und statistische Ausreißer können zur signifikanten Erhöhung der windinduzierten Drehmomente auf Menschen am Gleis führen. Aus diesem Grund sollten Sicherheitszuschläge bei der Aufstellung von Grenzwerten einkalkuliert werden.

7. Aufgrund der Feststellungen 5. und 6. und weil die windinduzierte maximale Kraft des simulierten Güterzuges alle bekannten Grenzwerte überschreitet, erscheint die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit des Güterzuges von $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ in Gleisbaustellen zu hoch. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Ergebnis einer Studie des Schweizer Bundesamts für Verkehr, an der die DB Systemtechnik GmbH maßgeblich beteiligt war. Das Bundesamt für Verkehr empfahl die Absenkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Güterzuge in Gleisbaustellen auf $v_\mathrm{Z} = 100\,\mathrm{km/h}$.

8. Werden die maximalen Windgeschwindigkeiten für den Güterzug mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ in $z = 0{,}2$,m Höhe über der Schienenoberkante aus den simulierten Daten normgerecht ermittelt und als Referenz definiert, so übersteigen die maximalen Windgeschwindigkeiten der anderen simulierten Züge mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ diese Werte im Rahmen der Unsicherheit nicht.

9. Feststellung 8. gilt nicht mehr für den InterCity wenn von der normgerechten Datenaufarbeitung abgewichen wird, insbesondere dann nicht, wenn z vergrößert und/oder das Mittelungszeitintervall Δt verkleinert wird.

10. Aufgrund der Feststellungen 1. bis 7. sowie 9. und 12. ist Feststellung 8. nicht hinreichend, um eine für Beschäftigte am Gleis gefahrlose Passage von Personenzügen mit $v_\mathrm{Z} > 120\,\mathrm{km/h}$ bei gleichzeitigem Verzicht auf Warnsysteme nachzuweisen.

11. Die vom simulierten Doppelstockzug Baureihe 446 und von der S-Bahn Baureihe 425 hervorgerufenen maximalen Windgeschwindigkeiten bei $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ liegen bei ansonsten gleichen Parametern generell unter den Werten des simulierten Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$.

12. Die maximale Windbeschleunigung des simulierten InterCity mit $v_\mathrm{Z} = 160\,\mathrm{km/h}$ überschreitet bei $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ diejenige des Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$ für $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ und $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ sowie für $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ und $0{,}4\,\mathrm{s}$.

13. Die zuginduzierten maximalen Druckamplituden und maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten der simulierten herkömmlichen Personenzüge mit $v_Z = 160\,km/h$ sind mindestens doppelt so groß wie die des simulierten Güterzuges mit $v_Z = 120\,km/h$. Sie überschreiten dadurch einige bzw. alle Grenzwerte für maximal zulässige Druckamplituden bzw. Druckanstiegsgeschwindigkeiten für das menschliche Wohlbefinden. Aufgrund dessen sowie der großen Anzahl und Streuung dieser Grenzwerte kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich diese Art der Druckbelastung auf Dauer nicht negativ auf die Konzentration oder Gesundheit von Beschäftigten am Gleis auswirkt. Die vom simulierten InterCity-Express mit $v_Z = 160\,km/h$ generierten Druckbelastungen liegen in etwa gleichauf mit denjenigen des simulierten Güterzuges mit $v_Z = 120\,km/h$.

14. Es existieren zahlreiche Grenzwerte für zuginduzierte maximale Windgeschwindigkeiten, Kraft- und Druckspitzen in Bezug auf die Gleichgewichtsstabilität von Menschen am Gleis. Diese Grenzwerte streuen in einem weiten Bereich. Daraus folgt, dass bis heute kein Konsens darüber besteht, wie sich zuginduzierte aerodynamische Belastungen auf Beschäftigte am Gleis auswirken.

15. Das Europäische Regelwerk, welches eine Messvorschrift sowie einen Grenzwert für die maximal zulässige Windgeschwindigkeit enthält, gilt lediglich für die Zulassung von Personenzügen und gibt keinen Grenzwert in Bezug auf die Arbeitssicherheit von Beschäftigten am Gleis vor.

16. Für Zuggeschwindigkeiten unter $160\,km/h$ sind keine Anforderungen im Regelwerk definiert.

17. Güterzüge sind vom genannten Europäischem Regelwerk ausgenommen. Diese überschreiten darüber hinaus den genannten Grenzwert unterhalb $d = 3{,}0\,m$ von der Gleismitte bei $v_Z = 120\,km/h$.

Die aufgezählten Feststellungen führen zu zwei fundamentalen Schlussfolgerungen:

- Passieren Personenzüge mit $v_Z > 120\,km/h$ Baustellen mit Festen Absperrungen ohne Warnsysteme verringert sich die Arbeitssicherheit der Beschäftigen am Gleis.
- Die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit von $v_Z = 120\,km/h$ für Güterzüge bei der Passage von Gleisbaustellen mit Festen Absperrungen ohne Warnsysteme ist allem Anschein nach zu hoch.

6.2 Ausblick

Im vorliegenden Bericht wurde dargelegt, dass die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Beschäftigte am Gleis nicht mit Hilfe einer punktuellen Messung der Windgeschwindigkeit neben dem Gleis bestimmt werden kann. Alternative Lösungswege wurden aufgezeigt, welche einer Optimierung bedürfen, um zu vertiefter und besser abgesicherter Erkenntnis zu gelangen. Diese Optimierung kann mit Hilfe des nachfolgend skizzierten Ansatzes erreicht werden.

6.2.1 Optimierter Forschungsansatz

Um die Wirkung aerodynamischer Belastungen auf Menschen am Gleis mit der einfach zu messenden Größe Windgeschwindigkeit verknüpfen zu können, muss das zeitabhängige Windgeschwindigkeitsfeld neben dem Gleis räumlich gut aufgelöst erfasst werden. Unter „räumlich gut aufgelöst“ ist eine Messortrasterung mit horizontalem und vertikalem Abstand von 0,2 m zu verstehen, wie in Abbildung 6.2 skizziert. Weil Ultraschallanemometer (Abbildung 3.2) eine gewisse räumliche Ausdehnung haben, können die fünfzig Messorte nicht in einer Messebene realisiert werden, ohne die zu messende Strömung durch die Anwesenheit der Messgeräte merklich zu stören. Deshalb wird vorgeschlagen, die fünfzig Ultraschallanemometer auf fünf Messebenen zu je zehn Messgeräten aufzuteilen, wobei die Messebenen mindestens 10 m voneinander entfernt sind.

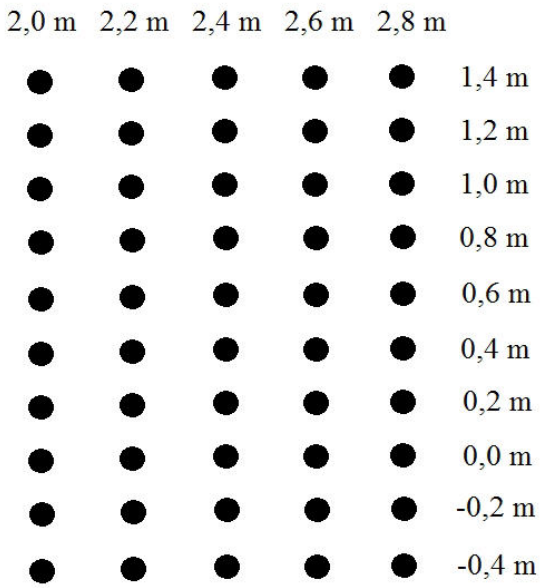


Abbildung 6.2: Vorgeschlagene Messpositionen neben dem Gleis zur Erfassung räumlich gut aufgelöster Windgeschwindigkeitsdaten.

Idealerweise werden parallel zur Messung des Windgeschwindigkeitsfeldes verschiedene Menschen in sogenannten Xsens-Anzügen (Abbildung 6.3) den aerodynamischen Belastungen ausgesetzt. Mit Xsens-Anzügen können kleinste Bewegungen der Anzugträger – also auch Korrekturbewegungen zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts – computergestützt erfasst und analysiert werden.

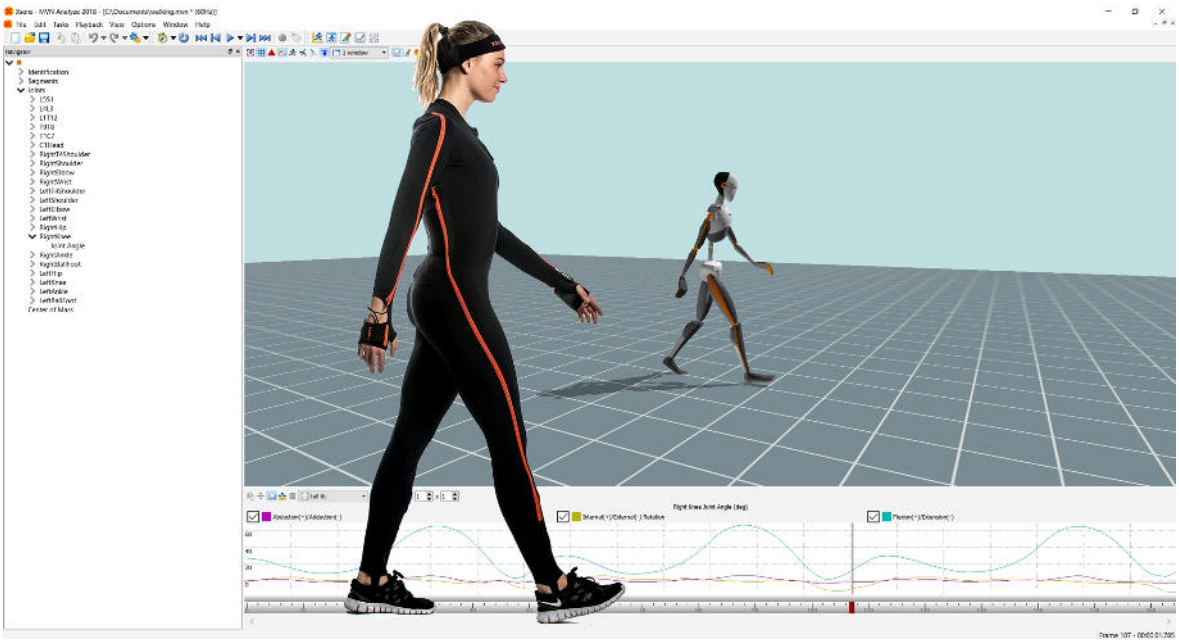


Abbildung 6.3: Werbebild für Xsens-Anzüge und Software der Firma Movella [138].

Mit diesem Messaufbau muss für verschiedene Zugtypen oder Zugtypgruppen eine hinreichend große Messdatenbasis bei unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten geschaffen werden, z. B. mindestens zwanzig Einzelmessungen für einen Zugtyp. Die gewonnene Messdatenbasis dient anschließend der Verifizierung und Kalibrierung verbesserte CFD-Simulationen, welche auf Höchstleistungsrechnerverbünden wie beispielsweise dem HLRN[1] oder dem HLRS[2] gerechnet werden. Die simulierten Windgeschwindigkeiten und Windbeschleunigungen fließen dann in FSAero ein, um damit das Drehmoment auf den implementierten Modell-Menschen zu berechnen. Der Vergleich mit den zu den Messdatensätzen gehörigen Reaktionen der Probanden am Gleis liefert schließlich die Stabilitätsverlustdauern t_g, welche den Grenzwert für ein windinduziertes maximales Drehmoment M_g bzw. für die windinduzierte maximale Kraft F_g auf einen Menschen am Gleis festlegen.

Für den Fall, dass das in FSAero implementierte Modell zur Abschätzung eines möglichen Gleichgewichtsverlustes zu simpel ist, um den Zusammenhang zwischen aerodynamischer Belastung und menschlicher Reaktion eindeutig zu beschreiben, kann dieses Modell erweitert oder ein komplexeres Modell verwendet werden. Zunächst wird jedoch der Grundsatz „keep it simple“ angewandt.

Anstelle von Daten aus Computersimulationen können auch Messdaten direkt in FSAero verwendet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die örtliche und zeitliche Auflösung hoch genug ist. Dies bedeutet, dass die horizontalen und vertikalen Abstände der Messorte nicht größer sein dürfen als maximal 0,2 m.

Eine Alternative zur Untersuchung der Reaktionen von Probanden mit Xsens-Anzügen am Bahngleis könnte eine ähnliche Untersuchung im Spezial-Windkanal der Universität Oldenburg sein. Dieser Windkanal verfügt über eine Ebene, in der zahlreiche, Alumini-

[1] Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen.
[2] Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart.

umrauten drehbar aufgehängt sind, welche sich über Computer und Motoren ansteuern lassen. Mit dieser Einrichtung können nahezu beliege Winde erzeugt werden. Verwendet man die am Gleis gemessenen Windgeschwindigkeiten zur Ansteuerung der Rauten, müssten sich in diesem Windkanal ähnliche Verhältnisse wie am Bahngleis erzeugen lassen. Ein solcher Ansatz bietet die Möglichkeit, die Reaktionen von verschiedenen Personen auf definierte aerodynamische Belastungen statistisch zu untersuchen.

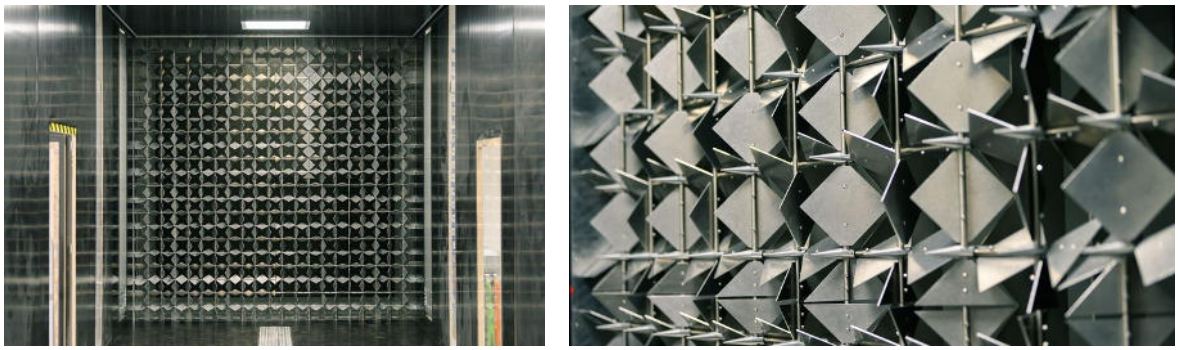


Abbildung 6.4: Computergesteuerte Aluminiumrauten zur Erzeugung verschiedener Winde im Windkanal der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen. Bildrechte: ForWind – Zentrum für Windenergieforschung [127].

6.2.2 Sichere Vorbeifahrt an Gleisbaustellen ohne Warnsysteme

Die im vorigen Abschnitt 6.2.1 vorgeschlagene Untersuchung ist außerordentlich zeit- und ressourcenaufwendig. Wird eine solche Untersuchung gemieden oder soll die Sicherheit von Beschäftigten am Gleis auf Baustellen mit Festen Absperrungen ohne Warnsysteme auch bei Passagegeschwindigkeiten $v_Z > 120\,\mathrm{km/h}$ gewährleistet sein, besteht die Möglichkeit eine neuartige Mobile Schutzwand einzusetzen. Dieses Schutzsystem ist eine Weiterentwicklung der in Abschnitt 3.3 erwähnten Mobilen Schnellbauwand und befindet sich aktuell in der Zulassungsphase. Die Mobile Schutzwand schirmt Beschäftigte am Gleis wirkungsvoll vor aerodynamischen Belastungen bei Zuggeschwindigkeiten bis zu $v_Z = 160\,\mathrm{km/h}$ ab [83].



Abbildung 6.5: Neuartige Mobile Schutzwand der Firma HPZ GmbH [59].

Literaturverzeichnis

[1] Aboma + Keboma B.V.: *Heben im Wind*, Aboma Veröffentlichung 3.07, Aboma + Keboma B.V., Ede, Niederlande, 1998.

[2] Andersson, T., Aronson, L., Pettersson. B.: *Train Wind Force Caused by Passing Trains*, Schwedisches Prüf- und Forschungsinstitut für Mechanik, SP Rapport 1994:23, ISBN-91-7848-482-0, Borås, Schweden, 1994.

[3] Arbeitskreis Aerodynamik: *Bestimmung aerodynamischer Lasten für Schienenfahrzeuge*, 2019.

[4] Arbeitskreis Aerodynamik: *Leitfaden Druckschutz/Druckkomfort*, 2024.

[5] Assiciated Engineers: *Subway Environmental Design Handbook*, Second Edition, Urban Mass Transit Administration, Washington D.C., USA, 1976.

[6] Baker, C. J., Sterling, M.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix D1- The Effects of Cross Winds on Train Slipstreams*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K., 2006.

[7] Baker, C. J., Quinn, A., Sima, M., Hoefener, L., Licciardello, R.: *Full-scale measurement and analysis of train slipstreams and wakes: Part 1 Ensemble averages*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 228, No. 5, S. 451-467., Birmingham, U.K., 2014.

[8] Baker, C. J., Quinn, A., Sima, M., Hoefener, L., Licciardello, R.: *Full-scale measurement and analysis of train slipstreams and wakes. Part 2 Gust analysis*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 228, No. 5, S. 468-480., Birmingham, U.K., 2014.

[9] Baker, C. J., Dalley, S. J., Johnson, T., Quinn, A., Wright, N. G.: *The Splipstream and Wake of High-Speed Train*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 215 Part F, S. 83-99, SAGE Publishing, Newbury Park, U.S.A., 2001.

[10] Baker, C., J.: *Persönliche Mittelung*, Birmingham Centre for Railway Research and Education, University of Birmingham, , U. K., 2024.

[11] Baker, C., Johnson, T. Flynn, D., Hemida, H., Quinn, A., Soper, D., Sterling, M.: *Train Aerodynamics – Fundamentals and Applications*, Butterworth-Heinemann, Oxford, U. K., 2019.

[12] Baumann, C.: *Aerodynamische Einwirkungen auf Lärmschutzgalerien*, Forschungsbericht 2018-09 im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes, DB Systemtechnik GmbH, München, 2018.

[13] Bonnema, D. R. T.: *Stabilität der wartenden Fahrgäste auf dem Bahnsteig*, Berichts-Entwurfs (Übersetzung aus dem Niederländischen), Ergo-Design, Enschede, Niederlande, 1992.

[14] Bottema, M.: *Wind Climate and Urban Geometry*, Dissertation, Technische Universität Eindhoven, Eindhoven, Niederlande, 1993.

[15] Bottema, M., Leene, J. A., Wisse, J. A.: *Towards Forecasting of Wind Comfort*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, S. 2365-2376, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 1992.

[16] Bundesamt für Verkehr: *Abstände auf Perrons*, Forschungsbericht, Bern, Schweiz, 2011.

[17] Bell, J. R., Burton, D., Thompson, M. C., Herbst, A. H., Sheridan, J.: *Flow Topology and Unsteady Features of the Wake of a Generic High-Speed Train*, Journal of Fluid and Structures, 61, S. 168-183, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2016.

[18] Brennen, C. E.: *A Review of Added Mass and Fluid Inertial Forces*, Naval Cicil Engineering Laboratory, Sierra Madre, U.S.A., 1982.

[19] Carstens, J. P., Kresge, D.: *Literature Survey of Passenger Comfort Limitations of High-Speed Ground Transports*, United Aircraft Corporation, Report D-910353, East Hartfort, U.S.A., 1965.

[20] Chowdhury, H., Alam, F.: *An Experimental Investigation on the Aerodynamic Drag Coefficient and Surface Roughness Properies of Sport Textiles*, The Journal of the Textile Institute, Vol. 105, 4, S. 414-422, Taylor & Francis, London, U.K., 2012.

[21] Crouch, T. N., Burton, D., LaBry, Z. A., Blair, K, B.: *Riding Against the Wind: A Review of Competition Cycling Aerodynamics*, Sports Engineering, 20, S. 81–110, Springer, Heidelberg, 2017.

[22] D'Auteuil, A., Larose, G. L., Zan, S. J.: *The Effect of Motion on Wind Tunnel Drag Measurement for Athletes*, 9th Conference of the International Sports Engineering Association, Procedia Engineering, 34, S. 62–67, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2012.

[23] Decker, J. L.: *The Human Pilot and the High-Speed Airplane*, Journal of the Aeronautical Sciences, Institute of the Aeronautical Science, New York, U.S.A., 1956.

[24] Deeg, P., Dumitra, M.: *Spezifikation aerodynamischer Lastannahmen für Feste Absperrungen*, Dok.-Nr. 12-17470-T.TVI21(2)-T1, DB Systemtechnik GmbH, München, 2012.

[25] De Graaf, B., Van Weperen, W.: *The Retention of Balance: An Exploratory Study into the Limits of Acceleration the Human Body Can Withstand without Losing Equilibrium*, Human Factors and Ergonomics Societey, 39(1), S. 111-118, Washington, U.S.A., 1997.

[26] Derkowski, P., Clark, S., Sturt, R., Keylin, A., Baker, C., Vardy, A., Wilson, N.: *High-Speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington D. C., U.S.A., 2015.

[27] DuBois D., DuBois E. F.: *A Formular to Estimate the Approximate Surface Area if Heigth and Weight be Known*, Arch. Int. Med., 17, S. 863, U.S.A., 1916.

[28] Dumitra, M.: *Spezifikation aerodynamischer Lastannahmen für Feste Absperrungen - Übersicht über Strömungsgeschwindigkeiten neben dem Gleis*, Präsentaion DB Systemtechnik GmbH, München, 2012.

[29] Durgin, F. H.: *Pedestrian Level Wind Criteria Using the Equivalent Average*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 66, S. 215-226, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 1997.

[30] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN 14067-2: Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 2: Aerodynamik auf offener Strecke*, Beuth Verlag, Berlin, 2003.

[31] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN 14067-4: Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke*, Beuth Verlag, Berlin, 2019.

[32] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN 14067-4: Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke*, Beuth Verlag, Berlin, 2024.

[33] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN 14067-6: Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren zur Bewertung von Seitenwind*, Beuth Verlag, Berlin, 2019.

[34] DB Systemtechnik GmbH: *Spezifikation aerodynamischer Lastannahmen für Feste Absperrungen*, Dok.-Nr. 12-17470-T.TVI32(2)-T1, München, 2012.

[35] DB Systemtechnik GmbH: *Sichere Vorbeifahrtgeschwindigkeit an Festen Absperrungen*, Dok.-Nr. 70910-001-TT.TVP33-RB-V1.0-Feste Absperrung, München, 2024.

[36] DGUV Vorschrift 78: *Arbeiten im Bereich von Gleisen*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, 1999.

[37] DGUV Regel 101-024: *Sicherungsmaßnahmen bei Arbeiten im Gleisbereich von Eisenbahnen*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, 2008.

[38] DGUV Information 781: *Sicherheitshinweise für Arbeiten im Gleisbereich von Eisenbahnen*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, 2013.

[39] Durov, A. V.: *Aerodynamische Probleme des Schnellverkehrs von Zügen*, Zeleznodor. Transp., 49, S. 51-53, Moskau, U.d.S.S.R., 1967.

[40] Europäische Union: *Richtlinie 96/48/EG des Rates vom 23. Juli 1996 über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems*, Amtsblatt Nr. L 235, S. 6-24, 1996.

[41] Europäische Union: *2002/735/EG: Entscheidung der Kommission vom 30. Mai 2002 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge" des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems gemäß Artikel 6 Absatz 1 der Richtlinie 96/48/EG, Aktenzeichen K(2002) 1952*, Amtsblatt Nr. L 245, S. 402-506, 2002.

[42] Europäische Union: *Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 Der Kommission vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lokomotiven und Menschenwagen" des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union*, Amtsblatt Nr. L 356/228, 2014.

[43] European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion: Best Practice Guidelines, Bushey, Vereinigtes Königreich, 2000.

[44] European Rail Research Institute: *Passenger Rolling Stock: Pressure Wave Stresses When Passing Through Tunnels at High Speed: Synthesis of the Results of On-Line and Pressure-Chamber Tests*, European Rail Research Institute, Report No. EERRI B 106/RP 29, 1995.

[45] European Rail Research Institute: *Staudrücke und Sog infolge Zugfahrten, Druck-Sog-Einwirkungen aus Zugverkehr auf Bauwerke in Gleisnähe*, Bericht D189/RP 1, Utrecht, Niederlande, 1994.

[46] Figura-Hardy, G. I.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix B- Analysis of Existing Experimental Data on Train Slipstreams Including the Effects on Pushchairs*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K.,2007.

[47] Flynn, D., Hemida, H., Baker, C.: *On the Effect of Crosswinds on the Slipsteam of a Freight Train and Associated Effects*, Journalk of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 156, S. 14-18, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2016.

[48] Free, P.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix A1- Commentary on Existing GB Position and Risk Appraisal of Mitigation Measures*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K.,2007.

[49] Freijs, F.: *HSL-Messungen bei Zulassungsfahrten*, Messbericht CCE Sicherheit und Umwelt Nr. MB80103, Brüssel, Belgien, 1998.

[50] Fröschl, T., Meschke, H., Müller, F.: *Untersuchung der Beanspruchung von Menschen, die sich während Vorbeifahrten des ICE 3 mit Geschwindigkeiten bis zu 300 km/h im Sicherheitsraum neben dem Gleis aufhalten*, DB GesundheitsService GmbH, Berlin 2003.

[51] Fukuchi, G.: *Field Measurement of Train Drafts*, Permanent Way Nr. 11 (Vol. 4, Nr. 2), Permanent Way Society of Japan, 1961.

[52] Gawthorpe, R. G.: *Aerodynamic Problems of High Speed Trains Running onm Conventional Tracks*, Karman Institut For Fluid Dynamics, Lecture Series 48, High Speed Ground Vehicles, Sint-Genesius-Rode, Belgien, 1972.

[53] Gerhardt, H. J., Krüger, O.: *Wind and Train Driven Air Movements in Train Stations*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76, S. 589-597, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 1998.

[54] Gjeta, A., Malka, L., Hasanaj, A., Alcani, M.: *The Wind Gusts Effects on Human Body Based on CFD Simulations*, International Scientific Journal Trans & Motauto World, Vol. 5, 4, S. 138-142, Varna, Bulgarien, 2020.

[55] Glück, H.: *Aerodynamik der Schienenfahrzeuge*, TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1985.

[56] Guo, D., Shang, K., Zhang, Y., Yang, G., Sun, Z.: *Influences of Affiliated Components and Train Length on the Train Wind*, acta mechanica sinica journal, 32, S. 191-205, Springer, Berlin, 2016.

[57] Hammitt, A. G.: *The Aerodynamics of High Speed Ground Transportation*, Western Periodicals Company, North Hollywood, U.S.A., 1973.

[58] Harris, C. M.: *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*, McGraw-Hill, New York, U.S.A., 1991.

[59] Harter, U.: *Persönliche Mittelung*, HPZ GmbH, Gengenbach, 2024.

[60] Hauff, C., Pardey, A.: *Gleisbaustellensicherung - aktuelle Regelungen*, Bauportal 5, Seiten 2-7, Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Berlin, 2016.

[61] Hauff, C.: *Persönliche Mitteilung*, Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Berlin, 2022.

[62] Fleischanderl, H.: *Persönliche Mittelung*, Unfallversicherung Bund und Band, Wilhelmshaven, 2022.

[63] Hertle, R.: *Ermittlungen des Lastbilds an Lärmschutzwänden*, Gutachten G144/2004 im Auftrag der DB AG, Gräfelfing, 2004.

[64] Himbergen, A. F. W.: *Tunnelbahnsteige - Sicherheit und Komfort von Menschen auf dem Bahnsteig*, NS Material Engineering, Bericht RD/AH/98/8371/01, Utrecht, Niederlande, 1998.

[65] Hoerner, S. F.: *Fluid Dynamic Drag*, New Jersey, U.S.A., 1965.

[66] Holmes, S., Schroeder, M.: *Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington D. C., U.S.A., 2002.

[67] Hong-Qi, T.: *Review of Research on High-Speed Railway Aerodynamics in China*, Transportation Safety and Environment, Vol. 1, No. 1, S. 1-21. Oxfort University Press, Oxford, U.K., 2019.

[68] Hunt, J. C. R., Poulton, E. C.: *Some Effects of Wind on People*, Symp. on External Flows, University of Bristol, Bristol, U.K., 1972.

[69] Hunt, J. C. R., Poulton, E. C., Mumford, J. C.: *The Effects of Wind on People – New Criteria Based On Wind Tunnel Experiments*, Building and Environment, Vol. 11, S. 15-28, Pergamon Press, Oxfort, U.K., 1976.

[70] Johnson, T., Dalley, S., Temple, J.: *Recent Studies of Train Slipstreams, The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol. 19, Springer, Berlin, 2004.

[71] Johnson, T.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix E2 - A Parametric Study of Human Loss of Balance Due to Wind Gusts*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K., 2007.

[72] Jongkees, L., B., W., Groen, J., J.: *De standvastigheid van de mens (The Stability of the Human Body)*, Tiidschrift voor Geneeskunde, 86, S. 1401-1407, Bohn Stafleu van Loghum Vereniging, Amsterdam, Niederlande, 1942.

[73] Jordan, S. C.: *An Investigation of the Slipstream and Wakes of trains and the Associated Effects an Trackside Peolpe and Objects*, PhD Thesis, University of Birmingham, Birmingham, U.K., 2008.

[74] Jordan, S. C., Johnson, T. Sterling, M., Baker, C. J.: *Evaluating and Modelling the Response of an Invidual to a Sudden Change in Wind Speed*, Building And Environment, Vol. 43, S. 1531-1534, Pergamon Press, Oxfort, U.K., 2008.

[75] Kreplin, H.-P., Denecke, H., Hübner, D., Loose, S.: *Messung von Strömungsgeschwindigkeiten am Bahnsteig während Zugvorbeifahrten im Bahnhof Bardowick*, Bericht IB 224-2004 C 19, Institut für Aerodynamik und Strömungsmechanik, DLR, Göttingen, 2005.

[76] Koo, M. H., Al-Obaidi, A. S. M.: *Calculation of Aerodynamic Drag of Human Being in Various Positions*, 1st EURECA 2013, Taylor's Univerity, Subang Jaya, Malaysia, 2013.

[77] Lawson, T. V., Penwarden, A. D.: *The Effects of Wind on People in the Vicinity of Buildings*, Proceedings 4th International Conference on Buildings and Structures, S. 605-622, Heathrow, U.K., 1975.

[78] Lee, H. S.-H.: *Assessment of Potential Aeordynamic Effects On Personnel and Equipment in Proximity To High-Speed Train Operations*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington D. C., U.S.A., 1999.

[79] Li, R., Zhao, J., Zhang, S.: *A Study of the Influence of Aerodynamic Forces on a Human Body near a High-Speed Train*, The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Busses and Trains, S. 243-258, Springer, Berlin, 2009.

[80] Liang, X.-F., Zhang, X., Chen, G., Li, X.-B.: *Effect of the Ballast Height on the Slipstream and Wake Flow of High-Speed Train*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 207, 104404, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2020.

[81] Liao, S., Mosier, P., Kennedy, W., Andrus, D.: *The Aerodynamic Effects of High-Speed Trains on People and Property at Stations in the Northeast Corridor*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington D. C., U.S.A., 1999.

[82] Lorenz, D.: *Persönliche Mitteilung*, Zentrallabor, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Mannheim, 2025.

[83] Lorenz, D., Nissle, S., Schiebler, H., Schupin, P., Tödt, J.-N.: *Weiterentwicklung einer Mobilen Schnellbauwand zur räumlichen Trennmnung der Beschäftigten im Gleisbereich von der Gefahrenquelle Zug*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2024.

[84] Manteuffel, J.: *Risikobetrachtung von Sicherungsmaßnahmen für spezielle Tätigkeiten im Gleisbereich unter Berücksichtigung signifikanter Risiken und Parameter*, Kurzbericht (Teil 1), Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Potsdam, 2017.

[85] Melbourne, W. H.: *Criteria for Environmental Wind Conditions*, Journal of Industrial Aerodynamics, 3, S. 241-249, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 1978.

[86] Miyachi, T., Kikuchi, K, Tebbutt, J. A.: *Modeling Pressure Variations Generated by Short Train Passing in Open Air*, Journal of Sound and Vibration, 485, 115543, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2020.

[87] Montagné, M. S.: *Messung der Windbelastung, die durch die Fahrt des Zuges TGV 001 bei hoher Geschwindigkeit verursacht wird*, Informations Techniques – SNCF-Equipment, 12, S. 60-62, Paris, Frankreich, 1973.

[88] Müller, J.: *Wie wirken Strömungskräfte vorbeifahrender Fahrzeuge auf Menschen?*, Die Eisenbahntechnik 21, 5, Verlag Technik, Berlin, 1973.

[89] Munley, G.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix A2- Human Factors Assessment of Mitigation Measures*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K.,2007.

[90] Murakami, S., Uehara, K., Deguchi, K.: *Wind Effects on Pedestrians: New Criteria Based on Outdoor Observation of Over 2000 Persons*, Wind Engineering, Vol. 1, Proceedings of the Fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, U.S.A., 1979, Pages 277-288, Pergamon Press, Oxford, U.K., 1980.

[91] Murakami, S., Zeng, J., Hayashi, T.: *CFD Analysis of Wind Environment Around a Human Body*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 83, S. 393-408, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 1999.

[92] Neppert, H., Sanderson, R.: *Untersuchungen zur Zugbegegnung, Bauwerk- und Menschenpassage im Wasserkanal*, Seminar Schnellbahnaerodynamik am 07. und 08. Juni 1978 im DFVLT-Forschungszentrum AVA-Göttingen, Messerschnitt-Bölkow-Blohm GmbH, Ottobrunn, 1978.

[93] Penwarden, A. D.: *Acceptable Wind Speeds in Towns*, Building Science, Vol. 8, S. 259-267, Pergamon Press, Oxford, U.K., 1973.

[94] Peters, J., W., H.: *Air Movements and Human Postural Stability*, Arbo Management Groep \ Ergonomics, Report 2109-E, Utrecht, Niederlande, 1999.

[95] Pope, C. W.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms - Safety of Slipstream Effects Produced by Trains*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K.,2007.

[96] Rademaker, P. J., Knegt, J. A.: *Rollgerüste Informationsblatt für Gesundheit und Sicherheit AI-21*, Ministeriums für soziale Angelegenheiten und Beschäftigung, SDU Verlag, Den Haag, Niederlande, 1998.

[97] Rail Safety and Standards Board: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms - Research Brief*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K., August, 2008.

[98] Sabapathy, P., N'Kaoua, J.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix D2 - Pilot CFD Analysis of the Effect of Cross Winds on Train Slipstreams*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K., 2005.

[99] Sanz-Andrés, A., Laveron, A., Cuerva, A., Baker, C.: *Vehicle-Induced Force on Pedestrians*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92, S. 185-198, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2004.

[100] Sanz-Andrés, A., Santiago-Prowald, J.: *Train-Induced Pressure on Pedestrians*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, S. 1007-1015, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2002.

[101] Schwanitz, S.: *Der Einfluss von Luftdruckschwankungen im Zug auf den Passagierkomfort*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2012.

[102] Schulte-Werning, B., Gregoire, R., Johnson, T.: *RAPIDE: A Projekt of Joint Aerodynamics Research of the European High-Speed Rail Operators*, 4th World Congress on Railway Research, Tokio, Japan, 1999.

[103] Schulte-Werning, B.: *Persönliche Mitteilung*, Business Line Instandhaltungstechnik (TT.TVI), Maintenance Systems Business Line, DB Systemtechnik GmbH Brandenburg-Kirchmöser, 2023.

[104] Schmitt, T. J.: *Wind-Tunnel Investigation of Air Loads on Human Beings*, Navy Department, The David W. Taylor Model Basin Aerodynamics Laboratory, Washington DC, U.S.A., 1954.

[105] Shirato, H., Maeta, K., Kato, Y., Takasugi, Y.: *Transient Drag Force on 2-D Bluff Bodies under Gusty Wind Condition*, The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan, 2009.

[106] Siemens AG: *Detailed Definition and Clarification of Open Points in the Aerodynamic Requirements of TSI HS RST 2008 and TSI CR LOC&PAS 2011 in 4.2.6.2.1 Passengers on Platform, 4.2.6.2.2 Workers at the Track Side and 4.2.6.2.3 Head Pressure Pulse*, Arbeitskreis Aerodynamik und Lenkungskreis Fahrzeuge, Siemens AG, München, 2013.

[107] Sockel, H.: *Aerodynamics of Trains*, Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinary, Vol. III, S. 1721-1741, Wiley, New York, U.S.A., 1996.

[108] Soligo, M. J., Irwin, P. A., Williams, C. J., Schuyler, G, D.: *A Comprehensive Assessment of Pedestrian Comfort Including Therman Effects*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 77, 78, S. 753-766, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 1998.

[109] Steinheuer, J.: *Aerodynamische Wirkungen von schnellfahrenden Schienenfahrzeugen auf die Umgebung*, Forschungsbericht, Institut für Entwurfsaerodynamik, Braunschweig, 1981.

[110] Sterling, M., Baker, C. J., Jordan, S. C.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix C- Theoretical Modelling of the Effects of Train Slipstreams on a Standing Person*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K., 2006.

[111] Sterling, M., Baker, C. J., Jordan, S. C., Johnson, T.: *A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 22 Part F, S. 177-193, SAGE Publishing, Newbury Park, U.S.A., 2008.

[112] Sterling, M., Baker, C. J., Jordan, S. C., Johnson, T., Figura-Hardy, G.: *Effective Management of Risk From Slipstreams Effects at Trackside and Platforms, Appendix E1 - A Review of Existing Data of Gust Effects on Standing People*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K., 2005.

[113] Stockwell, C. W., Koozekanani, S. H., Barin, K.: *A Physical Model of Human Postural Dynamics*, Annals New York Academy of Sciences, Vol. 374, Issue 1, Wiley, Hoboken, U.S.A., 1981.

[114] Swearingen, J. J., McFadden, E. B.: *Studies of Air Loads on Man*, Civil Aeromedical Research Institute, Oklahoma City, U.S.A., 1963.

[115] Terra, W., Sciacchitano, A., Shah, Y. H.: *Aerodynamic Drag Determination of a Full-Scale Cyclist Mannequin from Large-Scale PTV Measurements*, Experiments in Fluids, Springer, Berlin, 2019.

[116] Thielkes, T.: *Persönliche Mitteilung*, Leiter Kompetenzzentrum Akustik, Erschütterungen, Aerodynamik, Klimatechnik, Deutsche Bahn Systemtechnik, München, 2025.

[117] Tödt, J.-N.: *Persönliche Mitteilung*, Zentrallabor, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Mannheim, 2025.

[118] Thomas, P. J.: *Persönliche Mitteilung*, Fluid Dynamics Research Centre, School of Engineering, University of Warwick, U.K., 2021.

[119] Temple, J., Johnson, T.: *Review of Slipstreams Effects on Platforms*, Rail Safety and Standards Board, London, U.K.,2003.

[120] Tsai, T.: *Aerodynamic Effects of High-Speed Trains*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, RR 03-07, Washington D.C., U.S.A., 2003.

[121] Suzuki, H., Akutsu, K., Fukushima, N., Tezuka, K.: *Pressure Change in Tunnel and Complaints of Aural Discomfort by Railway Passengers*, Quarterly Report of RTRI, Vol. 38, No. 3, Railway Technical Research Institute, Tokyo, Japan, 1997.

[122] Van Bogaert, L., J.: *The Relation Between Height, Foot Length, Pelvic Adequacy and Mode of Delivery*, European Journal of Obstetrics and Gynecology and Reproductive Biology, 82, S. 195-199, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 1999.

[123] Van der Weide, R.: *Persönliche Mitteilung*, International Centre for Safety, Ergonomics & Human Factors, Amersfoort, Niederlande, 2023-2025.

[124] Zaïda, H., Fohanno, S., Taïar, R., Polidori, G.: *Turbulence Model Choise for the Calculation of Drag Forces When Using the CFD Method*, Journal of Biomechanics, 43, S. 405-411, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2010.

[125] Zuylen, E. van: *Turm-Mobile, Hubarbeitsbühnen, Fahrzeugmontagewagen, Telefonkommunikation*, Structon Railinfra Materieel, Den Bosch, Niederlande, 1998.

[126] Xue, F., Han, Y., Zou, Y., He, X., Chen, S.: *Effects of Wind-Barrier Parameters on Dynamic Responses of Wind-Road Vehicle–Bridge System*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 206, Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 2020.

[127] Universität Oldenburg: https://uol.de/aktuelles/artikel/sturm-im-windkanal-4514.

[128] De Weercourant: http://www.dsa.nl/weer/weerverk, Wetter im Verkehr, Die Wetterzeitung, Internetwebsite, 1998.

[129] Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Amfleet

[130] Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Acela

[131] Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Beaufortskala

[132] Wikipedia: https://wiki.3rail.nl/index.php/Bouwserie_NS_1600/1800

[133] Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/NS-Baureihe_DD-IRM

[134] Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/NS_Intercity_Materieel

[135] Wikipedia: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:TEP60?uselang=de

[136] Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/SJ_X2

[137] Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Intercity

[138] Bing: https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=CPCWlYo%2b&id=ADF9DF06B7B86953A5643255AD2CEC424460C04B&thid=OIP.CPCWlYo-neTBE3ayAGedNwHaEB&mediaurl=https%3a%2f%2fwww.xsens.com%2fhubfs%2fImages%2fWebpages%2fProducts%2fMVN+Analyze%2fanalyze-walking.png&cdnurl=https%3a%2f%2fth.bing.com%2fth%2fid%2fR.08f096958a3e9de4c11376b200679d37%3frik%3dS8BgRELsLK1VMg%26pid%3dImgRaw%26r%3d0&exph=1055&expw=1941&q=xsense+anzug+bilder&FORM=IRPRST&ck=B33930598229E9324E75210A8B1A071A&selectedIndex=0&itb=0&idpp=overlayview&ajaxhist=0&ajaxserp=0

Abbildungsverzeichnis

1.1 Oben: Definiton des personenbezogenen Gefahrenbereichs um ein Gleis. Unten: Raum für das Ablegen von Geräten, Baustoffen und Bauteilen. In den mit Punkten gekennzeichneten Raum dürfen Geräte, Baustoffe und Bauteile nur abgelegt werden, wenn die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen getroffen sind [36, 37]. 8

1.2 Links: Feste Absperrung mit Einschneidungen (Juliane Manteuffel, 2015). Rechts: Feste Absperrung ohne Einschneidungen (HPZ GmbH). 10

2.1 Zylinderförmiger Dummy zur direkten Messung der aeordynamisch induzierten Kraft auf Menschen am Bahngleis [41, 119]. 15

2.2 Modellierung des Gleichgewichtsverlustes eines Menschen. 15

2.3 Biodynamisches Modell des Menschen (links) und dessen Kalibrierung durch Druck- und Bewegungsmessungen an menschlichen Probanden am Bahngleis (rechts). Im zweidimensionalen biomechanischen Modell wird der Mensch in die 5 Abschnitte Kopf, Rumpf, Ober- und Unterschenkel sowie Fuß gegliedert, welche über Gelenke beweglich miteinander verbunden sind. Wie das Modell auf äußere Kräfte reagiert, wird mit Hilfe der Variation von Feder- und Dämpfungskonstanten gesteuert. Diese Konstanten regeln die in den Gelenken wirksamen Kräfte [13]. 16

2.4 Wind wirkt auf eine Probandin, die entlang einer gerade Linie gehen soll (unten). Resultierende Schrittfolge bei Einwirkung von gleichmäßigem (oben links) und ungleichmäßigem (oben rechts) Wind. [90]. . . 18

2.5 Auswirkungen von böigem Wind auf Fußgänger. Oben ist eine Instabilität Grad 3 mit zugehörigen Windgeschwindigkeitsverlauf gezeigt. Unten ist eine Grad 5-Instabilität zu sehen [90]. 19

2.6 Ergebnisse von Murakami et al. im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Autoren [90]. Zu beachten sind die unterschiedlichen Mittelwertbildungen bei der Windgeschwindigkeit. 20

2.7 Auswirkung eines schnellen Windgeschwindigkeitsanstieges (von 0 m/s auf 15 m/s innerhalb 0,2 s) auf das Gleichgewicht zweiter Menschengruppen. Links: Gruppe von 44 kg – 56 kg- Rechts: Gruppe von 72 kg – 90 kg. Beide Gruppen erfahren deutliche Verschiebungen der Standposition, wobei die leichteren Menschen gegenüber den schweren Menschen signifikant weiter zurücktreten. Der Windgeschwindigkeitsanstieg wird erzeugt, in dem ein Gabelstapler mit einem hölzernen Windschutz durch Wegfahren die Menschen dem Wind aussetzt [73, 74]. . . 22

2.8 Prozentsatz der vom Windgeschwindigkeitsanstieg verschobenen Menschen als Funktion von der Windendgeschwindigkeit: (a) mit dem Gesicht gegen die Strömungsrichtung, (b) mit dem Rücken gegen die Strömungsrichtung, (c) seitlich zur Strömungsrichtung und (d) Prozentsatz aller verschobenen Menschen [74]. 23

3.1 Ausgewählter Messort bei Ladenburg (Fotografie und Google Maps-Screenshot mit Messortkennzeichnung). 31
3.2 Links: 2D und 3D Ultraschallanemometer mit Drucksensor. Rechts: Mit Spanngurten stabilisiertes Gerüst mitsamt Messeinrichtungen (Array). 32
3.3 Oben: Positionen der 9 Ultraschallanemometer und Drucksensoren relativ zum Gleis. Alle 9 Messpositionen lagen in einer Ebene. Weiterhin sind folgende Abstände eingezeichnet: Linsenaußenfläche des Mikrocomputers mit Kamera – Gleisaußenkante, Linsenaußenfläche der Highspeed-Kamera – Gleisaußenkante, Höhe des Flügelrades der Wetterstation – Erdboden. Die Positionen der beiden Schallpegelmessgeräte (hier nicht eingezeichnet) sind in Anhang A beschrieben. 33
3.4 Positionen der Lichtschranken relativ zum Gleis. Die Positionen der Reflektoren (blaue Rechtecke) wurden mehrmals geprüft und die Reflektoren gegebenenfalls neu ausgerichtet. 33
3.5 Von links nach rechts: Radar, Mikrocomputer (Rasperry Pi) mit integrierter Kamera und Hochgeschwindigkeitskamera. 34
3.6 Von links nach rechts: Wetterstation, tragbares Klimamessgerät und Schallpegelmessgerät. 34
3.7 Links: Signalverteiler und Transientenrekorder. Rechts: Spannungsversorgung für die Ultraschallanemometer. 34
3.8 Messeinrichtungen im Zelt von links nach rechts: Steuerrechner, Datenlogger, Transientenrekorder, Signalverteiler und Spannungsversorung für die Ultraschallanemometer 35
3.9 Blockbild des Messaufbaus. 35
3.10 Montage und Einrichtung des Messaufbaus am 16.03.2020. 36
3.11 Prototyp einer Mobilen Schnellbauwand, bestehend aus einer Festen Absperrung, verkleidet mit aufblasbaren Schallschutzmatten. 37
3.12 Verrutschte Schallschutzmatten am Morgen des 20.03.2020. 38
3.13 Wagenschemata K1 und K2 der Doppelstockzüge Baureihe 446. . . . 38
3.14 Druckmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 1, 2 und 3 (links) und 1, 4 und 7 (rechts). Zug 4 ist ein Doppelstockzug Baureihe 446 mit der Wagenkombination K2 + K2 und der Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_Z = 119{,}2 \pm 1{,}81\,\mathrm{km/h}$. 45
3.15 Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 1, 2 und 3 (links) und 1, 4 und 7 (rechts). Daten zum Zug siehe Abbildung 3.14. 46
3.16 An Messposition 1 registrierte zeitliche Druckverläufe während der Passage von fünf verschiedenen Zugtypen. 47

3.17 An Messposition 1 registrierte zeitliche Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsverläufe während der Passage von fünf verschiedenen Zugtypen. 48
3.18 $\hat{u}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}719$. 51
3.19 $\hat{u}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}430$. Unten: $R^2 = 0{,}564$. 52
3.20 $\hat{u}$ als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die ungemittelten Messdaten. 53
3.21 Auswirkung der Messdatenfilterung am Beispiel der gemessenen Windgeschwindigkeit an Messposition 1 während der Passage von Zug Nr. 5. 53
3.22 $\hat{u}_{0,4}$ (oben) und $\hat{u}_1$ (unten) als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. 55
3.23 $\hat{u}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}530$. Unten: $R^2 = 0{,}287$. 56
3.24 $\hat{u}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die ungemittelten Messdaten, $R^2 = 0{,}530$ (oben). Regressionsfunktionen für $\hat{u}$ aus den Abbildungen 3.23 und 3.24, oben (unten). 57
3.25 $\hat{u}_{0,4}$ (oben) und $\hat{u}_1$ (unten) als Funktion von d, v_Z und z für die S-Bahnen Baureihe 425 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. 58
3.26 $\hat{a}_{0,4}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}700$. Unten: $R^2 = 0{,}450$. 60
3.27 Oben: $\hat{a}_{0,4}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}612$. Unten: $\hat{a}_{0,4}$ als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. 61
3.28 $\hat{a}_1$ als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446 für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. 62
3.29 $\hat{a}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}696$. 63
3.30 $\hat{a}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}360$. Unten: $R^2 = 0{,}603$. 64

3.31 $\hat{a}_{0,4}$ (oben) und $\hat{a}_1$ (unten) als Funktion von d, v_Z und z für die S-Bahnen Baureihe 425 für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ und $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. 65
3.32 Δp für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. $R^2 = 0{,}926$. 66
3.33 Δp für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. Oben: $R^2 = 0{,}969$. Unten: $R^2 = 0{,}983$. 67
3.34 Δp als Funktion von d, v_Z und z für die Doppelstockzüge Baureihe 446. 68
3.35 Δp für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. Oben: $R^2 = 0{,}983$. Unten: $R^2 = 0{,}979$. 69
3.36 Oben: Δp für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d. $R^2 = 0{,}949$. Unten: Δp als Funktion von d, v_Z und z für die S-Bahnen Baureihe 425. . . . 70

4.1 Darstellung der Simulationsgeometrie mit eingefügter S-Bahn Baureihe 425 (rot). Boden und Gleisbett sind grau eingefärbt. Die transparenten Grenzflächen des Volumens sind strömungsoffen. 72
4.2 Darstellung der Gitterzellen in einem horizontalen Schnitt um den Kopf der simulierten S-Bahn. 73
4.3 Vernetztes Jakobsdrehgestell der S-Bahn Baureihe 425. 73
4.4 CAD-Modell des InterCity-Express 3 Baureihe 403. 74
4.5 CAD-Modell des InterCitys mit elektrischer Lokomotive Baureihe 101. 75
4.6 CAD-Modell der S-Bahn Baureihe 425. 75
4.7 CAD-Modell des Doppelstockzuges Baureihe 446 in der Konfiguration K2. 76
4.8 CAD-Modell des Güterzuges mit der elektrischen Lokomotive Siemens Vectron. 76
4.9 Vorder- (links) und Rückseite (rechts) des Clusters ISABEL der FSA. 77
4.10 Grafische Darstellung der simulierten Windgeschwindigkeit um den InterCity-Express 3 und den Güterzug. Letztgenannter fährt mit $v_Z = 100\,\mathrm{km/h}$. 78
4.11 Oben: Vektorfeld der Windgeschwindigkeit um den fahrenden Güterzuges mit Siemens Vectron Lokomotive in einer horizontalen Ebene in 10 cm Höhe über der Schienenoberkante. Unten: Vektorfeld der Windgeschwindigkeit bei oben genannten Bedingungen in Kombination mit dem Druckfeld. $v_Z = 120\,\mathrm{km/h}$. 79
4.12 Vergleich der Windgeschwindigkeitsfelder der S-Bahn Baureihe 425, des InterCity-Express 3 Baureihe 403 und des InterCity mit Lokomotive Baureihe 101 in einem vertikalen Schnitt durch die Ebene in der sich die Messposition 1, 4 und 7 befinden. 80
4.13 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit $u_{xy}(t)$ an den Messpositionen 1 bis 5 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_Z = 140\,\mathrm{km/h}$. 82

4.14 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 6 bis 9 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_Z = 140\,km/h$. 83
4.15 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit $u_{xy}(t)$ an Messposition 1 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,km/h$. 84
4.16 Vergleich der gemessenen und simulierten zeitlichen horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 2 bis 9 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,km/h$. 85
4.17 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit $u_{xy}(t)$ an Messposition 1 für einen Güterzug mit $v_Z = 100\,km/h$. 86
4.18 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 2 bis 9 für einen Güterzug mit $v_Z = 100\,km/h$. 87
4.19 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 1 bis 6 für einen InterCity mit $v_Z = 160\,km/h$. 88
4.20 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Verlaufs der horizontalen Windgeschwindigkeit an den Messpositionen 1 bis 6 für einen InterCity-Express 3 Baureihe 403 mit $v_Z = 160\,km/h$. 89
4.21 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an der Messposition 1 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_Z = 140\,km/h$. 90
4.22 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 2 bis 9 für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 mit $v_Z = 140\,km/h$. 91
4.23 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs $p(t)$ an Messposition 1 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,km/h$. . 92
4.24 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 2 bis 9 für eine S-Bahn Baureihe 425 mit $v_Z = 140\,km/h$. 93
4.25 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 1, 2, 4 und 5 für einen Güterzug mit $v_Z = 100\,km/h$. 94
4.26 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 1, 2, 4 und 5 für einen InterCity mit $v_Z = 160\,km/h$. 95
4.27 Vergleich des gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverlaufs an den Messpositionen 1 bis 6 für einen InterCity-Express 3 Baureihe 403 mit $v_Z = 160\,km/h$. 96
4.28 Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,m$ über der Schienenoberkante. 97
4.29 Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für einen K2-Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in den Höhen $z = 1{,}4\,m$ (oben) und $z = 2{,}4\,m$ (unten) über der Schienenoberkante. 98

4.30 Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante. 99
4.31 Vergleich von gemessenen und simulierten $\hat{u}$ für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ (unten) über der Schienenoberkante. 100
4.32 Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für einen Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante. 101
4.33 Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für einen Doppelstockzug Baureihe 446 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ (unten) über der Schienenoberkante. 102
4.34 Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 0{,}4\,\mathrm{m}$ über der Schienenoberkante. 103
4.35 Vergleich von gemessenen und simulierten Δp für eine S-Bahn Baureihe 425 in Abhängigkeit von v_Z und d in der Höhe $z = 1{,}4\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}4\,\mathrm{m}$ (unten) über der Schienenoberkante. 104
4.36 Fenster für die Schardarstellung der Software FSAero. 105
4.37 Fenster für den direkten Vergleich ausgewählter Parameterkombinationen der Software FSAero. 106
4.38 Fenster zum Anzeigen einer Heatmap-Darstellung verschiedener aerodynamischen Belastungen in FSAero. 107
4.39 Virtuelles 3D-Modell eines Menschen zur numerischen Berechnung des menschlichen Trägheitsmoments J_M sowie weiterer Parameter wie der Körpermasse und der Körperquerschnittsfläche. Vorgegeben werden die Körpergröße und der BMI. 108
4.40 Oben: Fenster zur Abschätzung des Gleichgesichtsverlusts eines Menschen am Gleis aufgrund aerodynamischer Belastung. Unten: Fenster zur Berechnung der vom Menschen aufgenommenen windinduzierten Arbeit während der Gleichgewichtsverlustdauer. 109

5.1 Vergleich der in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 112
5.2 Vergleich der in $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 113
5.3 Vergleich der z-unabhängigen maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (oben) und $1{,}0\,\mathrm{s}$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 114

5.4 Heatmaps für die maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}_{0,4}$ eines Güterzuges mit $v_Z = 120\,km/h$ (oben, links), eines InterCity (oben, rechts), eines InterCity-Express (unten, links) und einer S-Bahn Baureihe 425 (unten, rechts). Letztgenannte drei Züge fahren mit $v_Z = 160\,km/h$. Man beachte die unterschiedliche Farbskalierung. $z = 0{,}2\,m$ ist mit einem roten Rahmen markiert. $\Delta t = 0{,}4\,s$. 115

5.5 Vergleich der in $z = 0{,}2\,m$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windbeschleunigungen für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,s$ (oben) und $1{,}0\,s$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 118

5.6 Vergleich der in $z = 0{,}7\,m$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windbeschleunigungen für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,s$ (oben) und $1{,}0\,s$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 119

5.7 Vergleich der z-unabhängigen maximalen Windbeschleunigungen für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit den Mittelungszeitintervallen $\Delta t = 0{,}4\,s$ (oben) und $1{,}0\,s$ (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 120

5.8 Heatmaps für die maximale Windbeschleunigung eines Güterzuges mit $v_Z = 120\,km/h$ (oben, links), eines InterCity (oben, rechts), eines InterCity-Express (unten, links) und einer S-Bahn Baureihe 425 (unten, rechts). Letztgenannte drei Züge fahren mit $v_Z = 160\,km/h$. Man beachte die unterschiedliche Farbskalierung. $z = 0{,}2\,m$ ist mit einem hellgrünem Rahmen markiert. $\Delta t = 0{,}4\,s$. 121

5.9 Vergleich der Amplituden der Bugdruckwellen Δp für die verschiedenen Zugtypen in $z = 0{,}2\,m$ (oben) und $0{,}7\,m$ (unten) Höhe über Schienenoberkante. Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 123

5.10 Vergleich der Bugdruckwellen Δp für die verschiedenen Zugtypen in $z = 0{,}9\,m$ (oben) Höhe über Schienenoberkante und z-unabhängig (unten). Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. . . . 124

5.11 Heatmaps für die Amplituden der Bugdruckwellen Δp eines Güterzuges mit $v_Z = 120\,km/h$ (oben, links), eines InterCity (oben, rechts), eines InterCity-Express (unten, links) und einer S-Bahn Baureihe 425 (unten, rechts). Letztgenannte drei Züge fahren mit $v_Z = 160\,km/h$. Man beachte die unterschiedliche Farbskalierung. $z = 0{,}2\,m$ ist mit einem schwarzen Rahmen markiert. 125

5.12 Vergleich zwischen gemessenen und simulierten zeitlichen Druckverläufen für einen Güterzug mit $v_Z = 100\,km/h$ und einen InterCity mit $v_Z = 160\,km/h$ an den Messpositionen 1 und 4. Weil der simulierte Güterzug kürzer ist als Zug 40, weichen die Simulationsergebnisse ab circa 3 s zunehmend von den Messdaten ab. 126

5.13 Maximale Druckamplitude (links) und maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit (rechts) auf die Ohren eines Modell-Menschen in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Der Körpermittelpunkt befindet sich in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse. Eingezeichnet sind die Grenzwerte aus Tabelle 2.4. 127

5.14 Maximale Kraft auf einen Modell-Menschen ($H_\mathrm{M} = 1{,}78\,\mathrm{m}$, $m = 79{,}2\,\mathrm{kg}$) aufgrund aerodynamischer Belastung in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Der Körpermittelpunkt befindet sich in $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ Entfernung von der Gleisachse. Berücksichtigt sind $u(t)$ und $a(t)$ bei $\Delta t = 0{,}0\,\mathrm{s}$. Eingezeichnet sind die Grenzwerte aus Tabelle 2.3 (Durov ohne Sicherheitszuschlag). 128

5.15 Maximale Kraft auf einen Modell-Menschen aufgrund aerodynamischer Belastung in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Bis auf die gleitende Mittelung mit $\Delta t = 0{,}2\,\mathrm{s}$ (links) und $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ (rechts) entspricht alles Weitere der Beschreibung in Abbildung 5.14. 129

5.16 Prüfung der Gleichgewichtsstabilität in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. Gemäß zugrunde gelegtem Modell [70, 73, 74] führen Menschen Korrekturschritte zur Gleichgewichtserhaltung aus, wenn der Schwerpunkt des Modell-Menschen in weniger als rund $0{,}5\,\mathrm{s}$ (Ältere) bzw. rund $0{,}4\,\mathrm{s}$ (Jüngere) über seine Rotationsachse hinaus wandert. 130

5.17 Oben: Zeitlicher Verlauf der horizontalen Windbeschleunigungskomponenten am Ort $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$, $z = 0{,}7\,\mathrm{m}$ während der Passage des Buges eines Güterzuges mit $v_\mathrm{Z} = 120\,\mathrm{km/h}$. Unten: Zeitlicher Verlauf der x-Komponente der Windbeschleunigung während der Passage verschiedener Zugbuge. 132

5.18 Vom Modell-Menschen ($H_\mathrm{M} = 1{,}78\,\mathrm{m}$, $\mathrm{BMI} = 25\,\mathrm{kg/m^2}$) bei Kippvorgängen aufgenommener Drehimpuls über der Stabilitätsverlustdauer. Variiert wurden Zugtyp, v_Z und d. 134

5.19 Maxima der mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Windgeschwindigkeit in Zugfahrtrichtung über den Drehimpulsen der Kippvorgänge aus Abbildung 5.18. 134

5.20 Vom Modell-Menschen aufgenommener Drehimpuls als Funktion der Zeit in einer Entfernung von $d = 2{,}3\,\mathrm{m}$ zur Gleisachse in Abhängigkeit von Zugtyp und Zuggeschwindigkeit. 135

5.21 Mittleres windinduziertes Drehmoment über der Stabilitätsverlustdauer für die Kippvorgänge aus den Abbildungen 5.19 und 5.20. 136

5.22 Während der Stabilitätsverlustdauer vom Fahrtwind geleistete Arbeit am Modell-Menschen (links) sowie die zugehörige mittlere Leistung (rechts) als Funktion von der Stabilitätsverlustdauer. Betrachtet wurden erneut die Kippvorgänge aus den Abbildungen 5.19 und 5.20. . . 137

6.1 Vergleich der in $z = 0{,}2\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen bei gleitender Mittelung mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$. Die Zuggeschwindigkeiten sind in der Legende angegeben. 146

6.2 Vorgeschlagene Messpositionen neben dem Gleis zur Erfassung räumlich gut aufgelöster Windgeschwindigkeitsdaten. 154
6.3 Werbebild für Xsens-Anzüge und Software der Firma Movella [138]. . 155
6.4 Computergesteuerte Aluminiumrauten zur Erzeugung verschiedener Winde im Windkanal der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen. Bildrechte: ForWind – Zentrum für Windenergieforschung [127]. 156
6.5 Neuartige Mobile Schutzwand der Firma HPZ GmbH [59]. 156

B.1 $\hat{u}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}688$. 248
B.2 $\hat{u}_{0,4}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}281$. Unten: $R^2 = 0{,}563$. 249
B.3 $\hat{u}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}714$. Unten: $R^2 = 0{,}273$. 250
B.4 $\hat{u}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten, $R^2 = 0{,}406$ (oben). $\hat{u}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten, $R^2 = 0{,}563$ (unten). 251
B.5 $\hat{u}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}211$. Unten: $R^2 = 0{,}354$. 252
B.6 $\hat{u}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}551$. Unten: $R^2 = 0{,}256$. 253
B.7 $\hat{u}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $\hat{a}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Gleis- oberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}346$ (oben), $R^2 = 0{,}599$ (unten). 254
B.8 $\hat{a}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}553$ (oben), $R^2 = 0{,}654$ (unten). 255
B.9 $\hat{a}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}512$ (oben), $R^2 = 0{,}432$ (unten). 256

B.10 $\hat{a}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}636$. 257
B.11 Defintion der horizontalen und vertikalen Strömungsrichtung. 258
B.12 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 1 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 259
B.13 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 1 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 260
B.14 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 1 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 261
B.15 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 1 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 1 ($\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$). 262
B.16 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 2 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8{,}6 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 263
B.17 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 2 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 264
B.18 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 2 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 265
B.19 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 2 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 2 ($\bar{v} = 139{,}8 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$). 266
B.20 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 3 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 267
B.21 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 3 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 268
B.22 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 3 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 269
B.23 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 3 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 3 ($\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$). 270
B.24 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 271
B.25 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 272
B.26 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 273
B.27 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 4 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 4 ($\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 274

B.28 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 5 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 275
B.29 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 5 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 276
B.30 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 5 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 277
B.31 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 5 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Drohnen-Kamera von Zug 5 ($\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$). 278
B.32 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 6 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$. 279
B.33 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 6 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$. 280
B.34 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 6 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$. 281
B.35 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 6 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 6 ($\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$). 282
B.36 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 7 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 283
B.37 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 7 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 284
B.38 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 7 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 285
B.39 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 7 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 7 ($\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$). 286
B.40 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 8 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 287
B.41 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 8 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 288
B.42 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 8 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 289
B.43 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 8 an der Messposition 4. Unten: Foto der Mikrocomputer-Kamera von Zug 8 ($\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$). 290
B.44 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 9 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 291
B.45 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 9 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 292
B.46 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 9 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 293

B.47 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 9 an der Messposition 4. Unten: Foto der Mikrocomputer-Kamera von Zug 9 ($\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 294
B.48 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$. 295
B.49 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$. 296
B.50 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$. 297
B.51 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 10 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 10 ($\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$). 298
B.52 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 11 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 299
B.53 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 11 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 300
B.54 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 301
B.55 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 11 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 11 ($\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$). . . . 302
B.56 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 12 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$. 303
B.57 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 12 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$. 304
B.58 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 12 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$. 305
B.59 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 12 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 12 ($\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$). 306
B.60 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 13 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 307
B.61 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 13 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 308
B.62 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 13 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 309

B.63 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 13 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 13 ($\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$). 310
B.64 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 14 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 311
B.65 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 14 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 312
B.66 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 14 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 313
B.67 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 14 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 14 ($\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$). 314
B.68 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 15 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 315
B.69 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 15 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 316
B.70 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 15 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 317
B.71 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 15 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 15 ($\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$). 318
B.72 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 16 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 319
B.73 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 16 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 320
B.74 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 16 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 321
B.75 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 16 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 16 ($\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$). 322
B.76 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 17 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 323
B.77 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 17 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 324

B.78 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 17 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 325
B.79 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 17 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 17 ($\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 326
B.80 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 18 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$. 327
B.81 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 18 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$. 328
B.82 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 18 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$. 329
B.83 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 18 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 18 ($\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$). 330
B.84 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 19 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$. 331
B.85 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 19 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$. 332
B.86 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 19 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$. 333
B.87 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 19 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 19 ($\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$). 334
B.88 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 20 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$. 335
B.89 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 20 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$. 336
B.90 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 20 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$. 337
B.91 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 20 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 20 ($\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$). 338
B.92 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 21 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 339

B.93 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 21 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 340
B.94 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 21 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 341
B.95 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 21 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 21 ($\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$). 342
B.96 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 22 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$. 343
B.97 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 22 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$. 344
B.98 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 22 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$. 345
B.99 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 22 an der Messposition 4. Unten: Foto der Highspeed-Kamera von Zug 22 ($\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$). 346
B.100 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 23 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 347
B.101 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 23 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 348
B.102 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 23 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 349
B.103 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 23 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 23 ($\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 350
B.104 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 24 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$. 351
B.105 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 24 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$. 352
B.106 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 24 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$. 353
B.107 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 24 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 24 ($\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$). 354

B.108 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 25 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 355
B.109 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 25 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 356
B.110 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 25 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 357
B.111 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 25 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 25 ($\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 358
B.112 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 26 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 359
B.113 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 26 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 360
B.114 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 26 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 361
B.115 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 26 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 26 ($\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$). 362
B.116 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 27 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 147{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 363
B.117 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 27 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 147{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 364
B.118 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 27 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 147{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 365
B.119 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 27 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 27 ($\bar{v} = 147{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 366
B.120 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 28 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 367
B.121 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 28 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 368
B.122 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 28 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 369

B.123 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 28 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 28 ($\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 370
B.124 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 29 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 371
B.125 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 29 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 372
B.126 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 29 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 373
B.127 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 29 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 29 ($\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$). 374
B.128 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 30 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 375
B.129 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 30 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 376
B.130 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 30 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 377
B.131 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 30 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 30 ($\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$). 378
B.132 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 31 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 379
B.133 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 31 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 380
B.134 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 31 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 381
B.135 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 31 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 31 ($\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$). 382
B.136 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 32 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 383
B.137 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 32 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 384

B.138 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 32 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 385
B.139 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 32 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 32 ($\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$). 386
B.140 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 33 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$. 387
B.141 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 33 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$. 388
B.142 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 33 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$. 389
B.143 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 33 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 33 ($\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$). 390
B.144 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 34 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 391
B.145 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 34 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 392
B.146 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 34 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 393
B.147 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 34 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 34 ($\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$). 394
B.148 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 35 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 395
B.149 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 35 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 396
B.150 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 35 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 397
B.151 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 35 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 35 ($\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$). 398
B.152 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 36 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}9{,}1 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 399
B.153 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 36 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 400

B.154 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 36 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 401
B.155 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 36 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 36 ($\bar{v} = 156{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$). 402
B.156 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 37 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 403
B.157 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 37 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 404
B.158 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 37 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 405
B.159 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 37 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 37 ($\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$). 406
B.160 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 38 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 407
B.161 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 38 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 408
B.162 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 38 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$. 409
B.163 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 38 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 38 ($\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$). 410
B.164 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 39 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 411
B.165 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 39 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 412
B.166 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 39 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 413
B.167 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 39 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 39 ($\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 414
B.168 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 415

B.169 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 416
B.170 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 417
B.171 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 40 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 40 ($\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$). 418
B.172 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 419
B.173 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 420
B.174 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 421
B.175 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 40 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 40 ($\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$). 422
B.176 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 41 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 146{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 423
B.177 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 41 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 146{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 424
B.178 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 41 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 146{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 425
B.179 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 41 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 41 ($\bar{v} = 146{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 426
B.180 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 42 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 427
B.181 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 42 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 428
B.182 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 42 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 429
B.183 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 42 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 42 ($\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$). 430
B.184 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 43 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 431

B.185 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 43 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 432
B.186 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 43 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 433
B.187 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 43 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 43 ($\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$). 434
B.188 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 44 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 435
B.189 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 44 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 436
B.190 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 44 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 437
B.191 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 44 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 44 ($\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$). 438
B.192 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 45 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 439
B.193 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 45 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 440
B.194 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 45 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 441
B.195 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 45 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Mikrocomputer-Kamera von Zug 45 ($\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$). 442
B.196 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 46 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 443
B.197 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 46 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 444
B.198 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 46 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 445

B.199 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 46 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Drohnen-Kamera von Zug 46 ($\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$). 446
B.200 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 47 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 447
B.201 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 47 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 448
B.202 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 47 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$. 449
B.203 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 47 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 47 ($\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$). 450
B.204 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 48 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 451
B.205 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 48 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 452
B.206 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 48 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 453
B.207 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 48 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 48 ($\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$). 454
B.208 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 49 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 455
B.209 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 49 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 456
B.210 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 49 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 457
B.211 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 49 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 49 ($\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$). 458
B.212 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 50 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 459
B.213 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 50 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 460

B.214 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 50 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 461
B.215 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 50 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 50 ($\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 462
B.216 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 51 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 463
B.217 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 51 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 464
B.218 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 51 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 465
B.219 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 51 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 51 ($\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$). 466
B.220 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 52 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 467
B.221 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 52 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 468
B.222 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 52 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$. 469
B.223 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 52 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 52 ($\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$). 470
B.224 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 53 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 471
B.225 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 53 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 472
B.226 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 53 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 473
B.227 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 53 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 53 ($\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$). 474

B.228 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 54 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 475
B.229 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 54 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 476
B.230 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 54 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 477
B.231 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 54 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 54 ($\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$). 478
B.232 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 55 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 479
B.233 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 55 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 480
B.234 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 55 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 481
B.235 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 55 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 55 ($\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 482
B.236 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 56 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}2 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$. 483
B.237 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 56 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}5 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 484
B.238 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 56 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}5 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$. 485
B.239 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 56 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 56 ($\bar{v} = 110{,}5 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$). 486
B.240 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 57 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 487
B.241 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 57 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 488
B.242 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 57 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$. 489

B.243 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 57 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 57 ($\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$). 490
B.244 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 58 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 491
B.245 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 58 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 492
B.246 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 58 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$. 493
B.247 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 58 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 58 ($\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$). 494
B.248 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 59 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 495
B.249 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 59 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 496
B.250 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 59 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$. 497
B.251 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 59 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 59 ($\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$). 498
B.252 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 60 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 499
B.253 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 60 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 500
B.254 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 60 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 501
B.255 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 60 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 60 ($\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 502
B.256 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 61 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 503

B.257 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 61 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 504
B.258 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 61 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 505
B.259 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 61 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 61 ($\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 506
B.260 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 62 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 507
B.261 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 62 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 508
B.262 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 62 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$. 509
B.263 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 62 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 62 ($\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$). 510
B.264 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 63 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 511
B.265 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 63 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 512
B.266 Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 63 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$. 513
B.267 Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 63 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 63 ($\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$). 514

Tabellenverzeichnis

1.1 Regelungen zum Einsatz von Kombinationen aus Festen Absperrungen und automatischen Warnsystemen [60]. 9

2.1 Gradeinteilung von Gang-Instablitäten durch Murakami et al. [90]. . . . 20

2.2 Abschätzung der Dauer, während der die Muskeln des menschlichen Körpers nicht auf äußere Krafteinwirkungen reagieren. 21

2.3 Grenzwerte für äußere Einwirkungen, deren Überschreitung die Stabilität des menschlichen Gleichgewichts gefährden. 27

2.4 Grenzwerte für äußere Druckeinwirkungen, deren Überschreitung die menschliche Gesundheit bzw. das menschliche Wohlempfinden negativ beeinflussen. 30

3.1 Am 17.03.2020 ohne Mobile Schnellbauwand erfasste Züge mit Uhrzeit, Lufttemperatur T, Luftfeuchte F, Umgebungsdruck p_0, horizontaler Windgeschwindigkeit u_0 kurz vor der Zugpassage, Zugtyp und mittlerer Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_\mathrm{Z}$. 38

3.2 Am 18.03.2020 ohne Mobile Schnellbauwand erfasste Züge mit Uhrzeit, Lufttemperatur T, Luftfeuchte F, Umgebungsdruck p_0, horizontaler Windgeschwindigkeit u_0 kurz vor der Zugpassage, Zugtyp und mittlerer Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_\mathrm{Z}$. 40

3.3 Am 19.03.2020 mit Mobiler Schnellbauwand erfasste Züge mit Uhrzeit, Lufttemperatur T, Luftfeuchte F, Umgebungsdruck p_0, horizontaler Windgeschwindigkeit u_0 kurz vor der Zugpassage, Zugtyp und mittlerer Zuggeschwindigkeit $\bar{v}_\mathrm{Z}$. 42

B.1 Mit Radar, Lichtschranken und Videos aus Mikrocomputer und Highspeed-Kamera ermittele Geschwindigkeiten der erfassten Züge Nr. 1 bis 63. 232

B.2 An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ in m/s während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die Maxima wurden aus ungemittelten Daten bestimmt. 234

B.3 An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}_{0,4}$ in m/s während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 0,4 s bearbeitet. 236

B.4 An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}_1$ in m/s während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 1,0 s bearbeitet. 238
B.5 An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windbeschleunigung $\hat{a}$ in m/s^2 während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die Maxima wurden aus ungemittelten Daten bestimmt. 240
B.6 An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windbeschleunigung $\hat{a}_{0,4}$ in m/s^2 während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 0,4 s bearbeitet. 242
B.7 An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windbeschleunigung $\hat{a}_1$ in m/s^2 während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 1,0 s bearbeitet. 244
B.8 An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Druckdifferenz Δp in mbar während der Passage der Spitzen der Züge Nr. 1 bis 63. Die maximalen Druckdifferenzen wurden aus ungemittelten Daten bestimmt. . . 246
B.9 Definition der Messpositionen 1 bis 9. Die Messpositionen befinden sich vollständig in einer vertikalen Ebene, die orthogonal zur Fahrtrichtung der Züge ist. Die Werte in der Tabelle sind mit einer Unsicherheit von $\pm 0{,}05$ m behaftet. 258

A Lärmmessung am Bahngleis

Lärmmessung am Bahngleis

Ladenburg

F 06-1402

Messdurchführung Ronny Herzog und Janna Lamprecht

Auswertung Janna Lamprecht

Bericht Ronny Herzog und Janna Lamprecht

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Inhaltsverzeichnis

1. Anlass und Umfang der Untersuchungen 3

2. Messaufbau 4
   Messpositionen 5

3. Messung 8

4. Auswertung 9

5. Messergebnisse 10
   5.1 Einfluss der Geschwindigkeit 11
   5.2 Einfluss der Lärmschutzwand (LSW) 13
   5.3 Einfluss des Abstandes zum Gleis 16

Abschließende Bemerkungen 18

Literatur: 19

Anhang - Diagramme 20

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

1. Anlass und Umfang der Untersuchungen

Der Fachbereich Physik, Systementwicklung und Modellierung der FSA e.V. befasst sich im Rahmen des Projektes F 06-1402 mit der Fragestellung, wie stark Arbeiter im nahen Gleisbereich durch Luftbewegungen, die von vorbeifahrenden Zügen erzeugt werden, betroffen sind. Im Mittelpunkt steht die Frage, welchen aerodynamische Lasten bzw. Gefahren diese Personen ausgesetzt sind.

Die Arbeiter am Gleis sind zusätzlich Lärmbelastungen ausgesetzt. Um die Lärmbelastung auf die Arbeiter einzuschätzen, wurden begleitend zu dem Projekt F 06-1402 die Schalldruckpegel am Gleis messtechnisch erfasst.

Vom 17. bis 19.03.2020 wurden diese Messungen am Bahngleis in Ladenburg durchgeführt.

Die Messung umfasste die Aufnahme von Schalldruckpegeln in zwei unterschiedlichen Abständen zum Gleis (3,2 m und 7,5 m). Nach zwei Messtagen wurde eine mobile Lärmschutzwand aufgestellt, so dass die Pegel mit und ohne Lärmschutzwand aufgenommen und verglichen werden konnten.

Während der drei Messtage wurden unterschiedliche Zugtypen mit individueller Geschwindigkeit gemessen. Wegen des coronabedingt geringen Verkehrsaufkommens fuhren an den drei Messtagen deutlich weniger Züge als gewöhnlich. Es konnte trotzdem eine Anzahl erfasst werden, die eine aussagekräftige Analyse ermöglicht.

Ausgewertet wurden neben dem Einfluss der Geschwindigkeit auf die Schalldruckpegel der Einfluss des Abstandes zum Gleis. Des Weiteren konnte die Wirksamkeit der Lärmschutzwand ausgewertet werden.

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

2. Messaufbau

Messaufbau - Draufsicht:

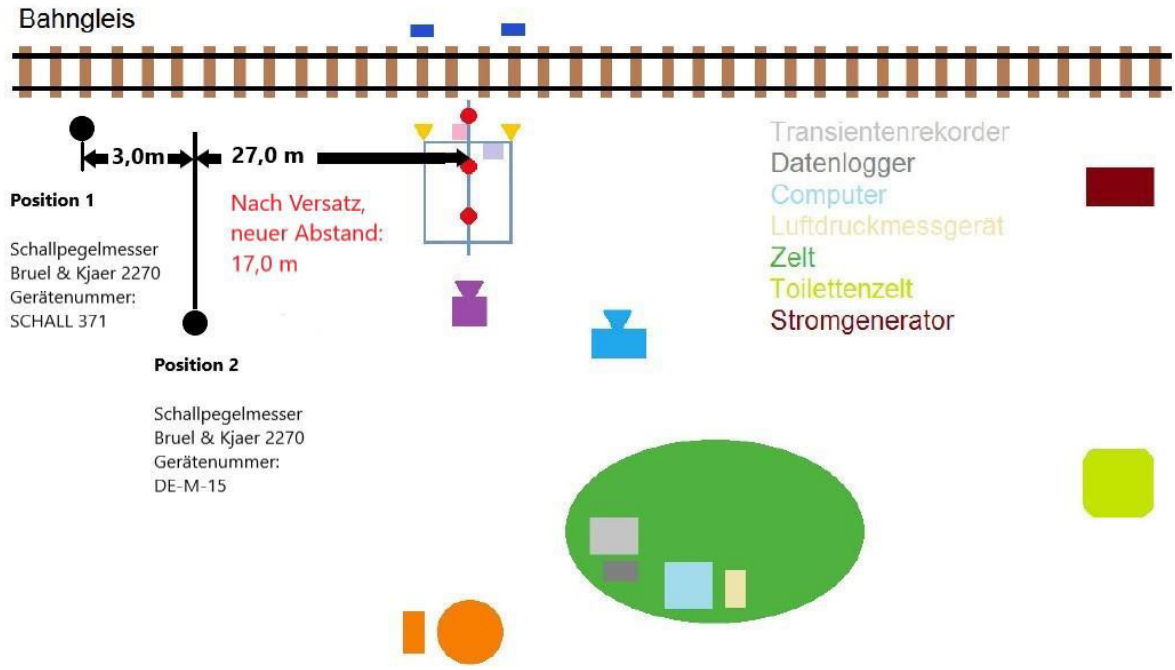


Abbildung 1: Grundlegender Messaufbau mit beiden Positionen der Schallpegelmessgeräten in definiertem Abstand linksseitig des Messgerüsts

Messaufbau – Seitenansicht von links:

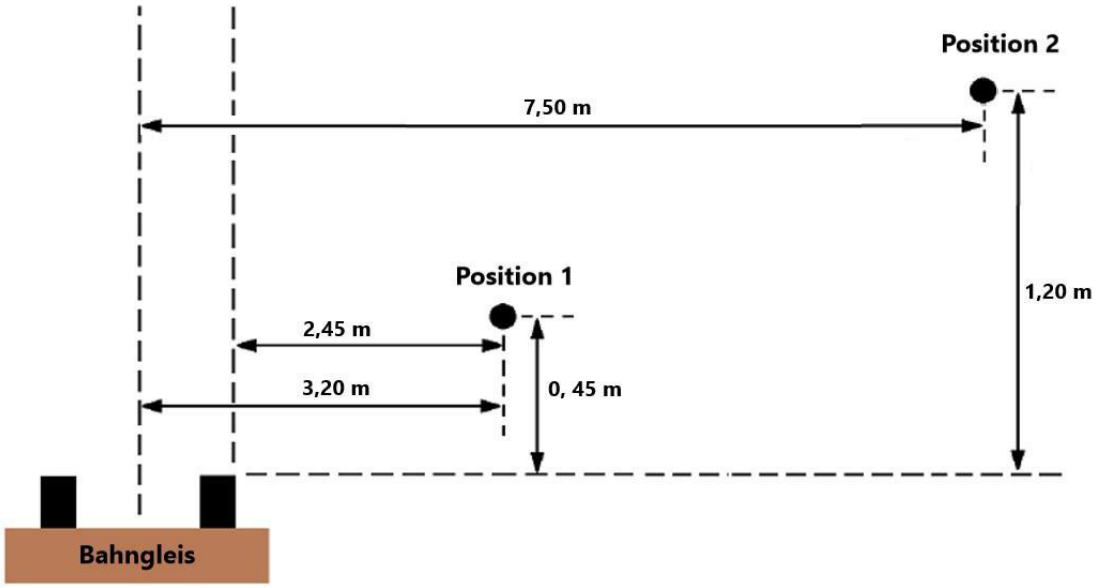


Abbildung 2: Messaufbau der Schallpegelmessgeräte in beiden Positionen mit definierten Abständen zur Gleismitte sowie Gleisoberkante (ohne mobilen Schallschutz HPZ II)

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Messpositionen

Das Schallpegelmessgerät der Position 1 wurde auf Höhe der Ultraschallanemometer und Drucksensoren des Aufbaus entsprechend der unteren Positionsdaten des Messgerüsts angebracht. Aufgrund der zu erwarteten Luftbewegung wurde dieses an einer Stahlstrebe eines in der Nähe befindlichen Strommastes fixiert. Diese Messposition dient als Ergänzung zur normgerechten Abstandsmessung von Position 2 und soll insbesondere beim Einsatz des mobilen Schallschutzes HPZ II 2.2 als Referenz für weitere Messdaten fungieren.

Der Messaufbau der Position 2 orientiert sich orientiert sich an der DIN EN ISO 3095 – Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von Spurgebundenen Fahrzeugen - Juli 2014 - (Abschnitt 6.4 Messpositionen).

Gegenüber dieser Norm, wurden folgende, der in der ISO 3095 festgelegten Parameter nicht berücksichtigt bzw. konnten aus gegebenem Anlass nicht validiert und umgesetzt werden:

- Einheitlich definierte Zuggeschwindigkeiten
- Dynamische Eigenschaften der Teststrecke
- Bestimmung der akustischen Schienenrauheit der Teststrecke
- Fahrzeugzustände
- Last- & Betriebszustände

Die Gleisqualität unterlag einer Sichtprüfung. Die Teststrecke war frei von erkennbaren Stoßstellen oder sichtbaren Oberflächenbeschädigungen.

Am dritten Messtag wurde die mobile Schallschutzwand HPZ II 2.2 zwischen den Position 1 und 2 und dem Bahngleis aufgebaut. Zuerst wurde wie auch an den Tagen davor die gleichen Positionen der Messgeräte Messpunkt 1 (MP1) gewählt. Allerdings befanden sich die Positionen der Messgeräte am Rand der Schallschutzwand. Um eventuelle Randeffekte auszuschließen, wurden nach einem halben Tag die Positionen 10 m verschoben. So ergaben sich eine neue Position für den Messpunkt 2 (MP2).

Alle Messungen wurden mit geeichten Schallpegelmessgeräten der Klasse 1 inkl. Windschirm durchgeführt.

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Messaufbau – Seitenansicht von links (inklusive mobilem Schallschutz)

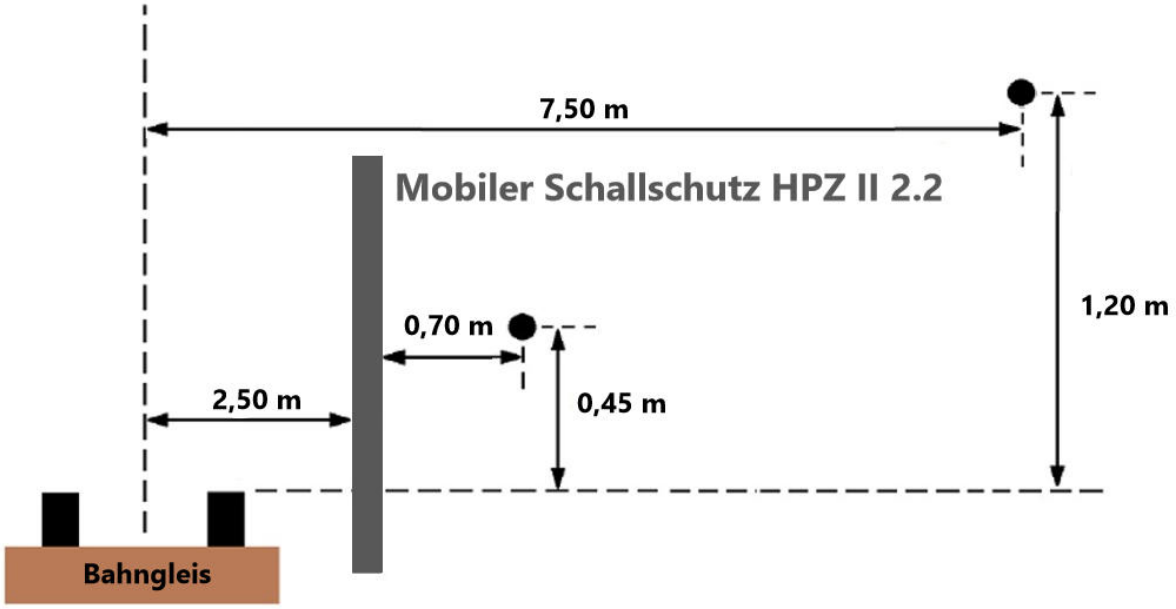


Abbildung 3: Messaufbau der Schallpegelmessgeräte in beiden Positionen mit definierten Abständen zur Gleismitte sowie Gleisoberkannte (mit mobilen Schallschutz HPZ II 2.2).



Abbildung 4: Messaufbau MP1 vor Ort mit mobiler Schallschutzwand HPZ II 2.2. Das Schallpegelmessgerät an Position 2 war zur besseren Bedienbarkeit zwischenzeitlich abgesenkt.

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Versatz der Messgeräte um **10 m nach rechts**, aufgrund möglicher Randeffekte



Abbildung 5: Neue Position der beiden Schallpegelmesser MP2 nach Verlegung um 10 m. Erkennbar ist bereits hier die Lückenbildung und Versatz der festen Absperrung HPZ II 2.2.



Abbildung 6: Position der Messgeräte (MP2) hinter der mobilen Schallschutzwand HPZ II 2.2

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

3. Messung

An drei Tagen, 17.-19.03.2020, wurden an den oben genannten Messpositionen unterschiedliche Züge schalltechnisch erfasst. Aufgrund der startenden Coronakrise war der Zugverkehr an diesen Tagen deutlich geringer als normalerweise üblich.

Am 17.03.2020 wurden 11 Personenzüge (4 S-Bahnen der Baureihe 425, 7 Doppelstockzüge der Baureihe 446) sowie ein Güterzug aufgenommen.

Am 18.03.2020 konnten 4 Personenzüge (1 S-Bahn der Baureihe 425, 3 Doppelstockzüge 446) gemessen werden.

Insgesamt wurden 15 Personenzüge (5 S-Bahnen der Baureihe 425, 10 Doppelstockzüge der Baureihe 446) und ein Güterzug ohne mobilen Schallschutz messtechnisch festgehalten.

Am dritten Tag wurde der mobile Schallschutz (HPZ II 2.2) zwischen Gleis und den Messpositionen aufgebaut.

Es wurden an der Messposition1 (MP1) 9 Personenzüge (3 S-Bahnen der Baureihe 425, 6 Doppelstockzüge der Baureihe 446), ein Güterzug sowie ein Bauzug (Gleisbau-Lok DGU) gemessen.

Aufgrund der Nähe der Messpositionen zum linken Randbereich der Lärmschutzwand (ca. 5 m) und möglicher strömungsbedingter Folgen (Beuge-, Kanteneffekte), wurde die Messposition beider Schallpegelmessgeräte nachfolgend um 10 m in Richtung Messgerüst verlegt (MP2).
Hier wurden 6 Personenzüge (2 S-Bahnen der Baureihe 425, 4 Doppelstockzüge der Baureihe 446) und ein Güterzug erfasst.

Insgesamt wurden mit mobiler Lärmschutzwand 15 Personenzüge (5 S-Bahnen der Baureihe 425, 10 Doppelstockzüge der Baureihe 446), zwei Güterzüge, sowie eine Lok gemessen.

Bei der Messung wurde zusätzlich zwischen einfachen und zweifachen (zwei aneinandergehängte) Personenzügen unterschieden.

Die Wetterparameter waren während der drei Messtage stabil:

	Ohne Lärmschutzwand	Mit Lärmschutzwand
Mittlere Temperatur in °C	17,2	16,9
Mittlere Feuchte in %	61,5	54,1
Mittlerer Luftdruck in mbar	1013	1008

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

4. Auswertung

Die wesentlichen Messgrößen nach DIN EN ISO 3095 – Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von Spurgebundenen Fahrzeugen - Juli 2014 sind der

L_{AFmax}: Höchstwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, der während der Messdauer T bei Anwendung der Zeit-bewertung F (Fast) bestimmt wird

L_{Aeq}: A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel

Der L_{AFmax}: wurde direkt bei der Messung durch das Messgerät aufgenommen.
Der L_{Aeq}: wurde nach der Messung anhand des Schallpegelverlaufs aus dem Protokoll ermittelt.

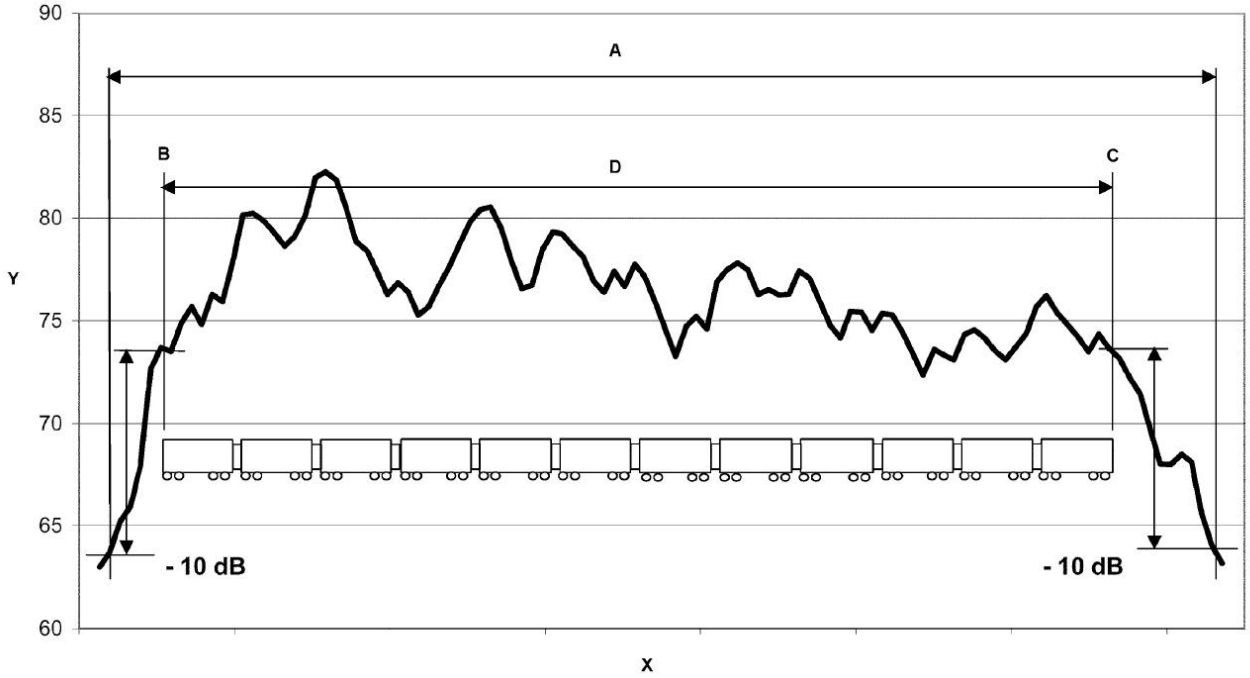


Abbildung 7 Quelle DIN EN ISO 3095 Ermittlung des L_{Aeq}

Legende
Y A-bewerteter Schalldruckpegel, dB
X Zeit
A Aufzeichnungsdauer
B T1 Beginn des Zuges
C T2 Ende des Zuges
D Dauer der Vorbeifahrt

Alle Messwerte des Pegelverlaufs innerhalb der Anfangs-(**B**) und Endwerte (**C**) je -10 dB wurden berücksichtigt. Es ergibt sich der A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel über den Zeitraum **A**.

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

5. Messergebnisse

Ergebnisse **ohne mobile Lärmschutzwand (LSW)**:

Zugtyp	**v [km/h]**	**L_{AFmax} 3,2 m [dB(A)]**	**L_{Aeq} 3,2 m [dB(A)]**	**L_{AFmax} 7,5 m [dB(A)]**	**L_{Aeq} 7,5 m [dB(A)]**
Doppelstockzug	124	89,01	84,40	82,62	78,91
Doppelstockzug (einfach)	139	89,58	86,24	83,35	80,60
Doppelstockzug (einfach)	159	92,24	89,29	86,25	82,98
Doppelstockzug (einfach)	137	90,45	85,91	87,81	81,57
Doppelstockzug (einfach)	156	92,06	89,20	86,47	83,23
Doppelstockzug (einfach)	154	92,05	89,03	85,92	83,04
Doppelstockzug (zweifach)	149	91,12	87,71	84,77	82,27
Doppelstockzug (zweifach)	114	86,58	83,97	81,17	78,32
Doppelstockzug (zweifach)	150	92,11	87,65		
Doppelstockzug (zweifach)	142	89,43	87,17	85,78	81,59
Güterzug	72	95,89	86,06	88,73	79,44
S-Bahn (einfach)	114	85,01	80,57	79,07	74,78
S-Bahn (einfach)	142	88,53	83,11	82,00	78,77
S-Bahn (einfach)	129	86,36	82,97	79,74	75,83
S-Bahn (einfach)	137	87,37	84,56	81,74	78,31
S-Bahn (zweifach)	122	86,86	84,50	80,98	77,85

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

5.1 Einfluss der Geschwindigkeit

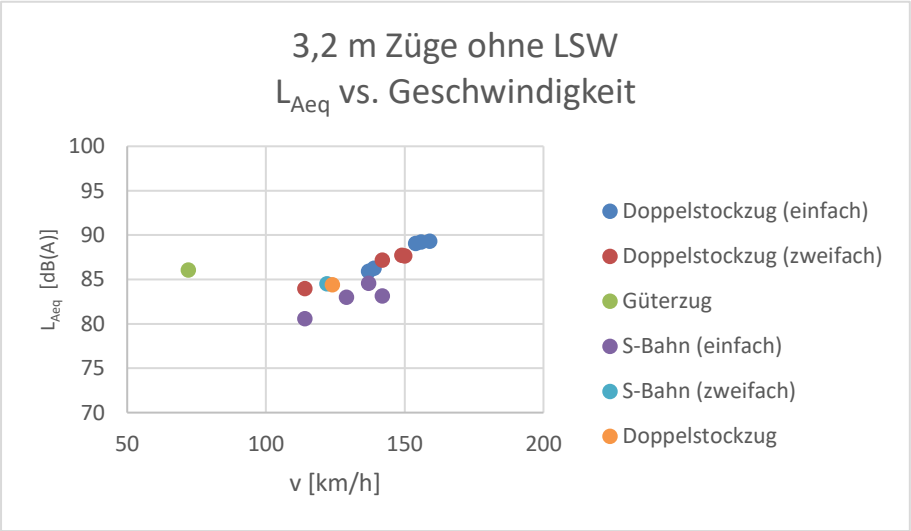


Abbildung 8 Übersicht über alle gemessenen Züge an der Position 3,2 m; L_{Aeq} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

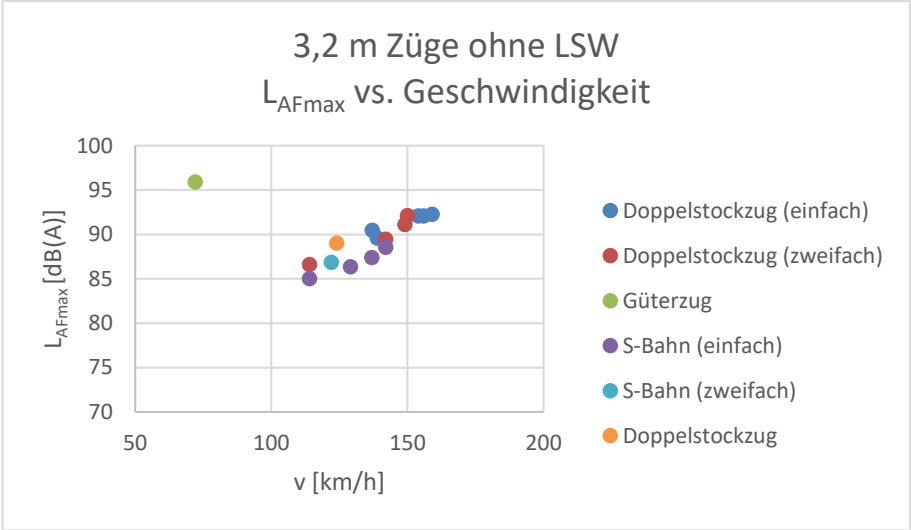


Abbildung 9 Übersicht aller gemessenen Züge an der Position 3,2 m; L_{AFmax} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

Bei allen Zügen lag der L_{Aeq} während der Vorbeifahrt des Zuges am Messpunkt 3,2 m Abstand zur Gleismitte über 85 dB(A) (s. **Abbildung 8**). Sowohl der L_{AFmax} als auch der L_{Aeq} erhöhten sich mit steigender Geschwindigkeit. Die Doppelstockzüge mit einer Geschwindigkeit ab 150 km/h erreichten alle einen L_{AFmax} von mindestens 91 dB(A) in einer Entfernung von 3,2 m (s. **Abbildung 9**) und einen L_{AFmax} von mindestens 85 dB(A) in einer Entfernung von 7,5 m (s. **Abbildung 10**).

Besonders der Güterzug wies trotz einer Geschwindigkeit von nur 72 km/h einen Höchstwert des A-bewerteten Schalldruckpegels L_{AFmax} von über 95 dB(A) auf (s. **Abbildung 9**.).

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

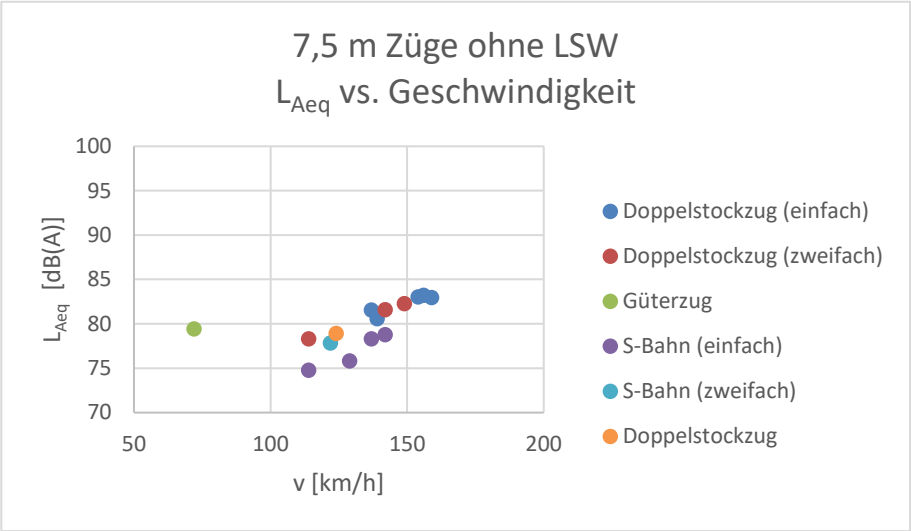


Abbildung 10 Übersicht über alle gemessenen Züge an der Position 7,5 m; L_{Aeq} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

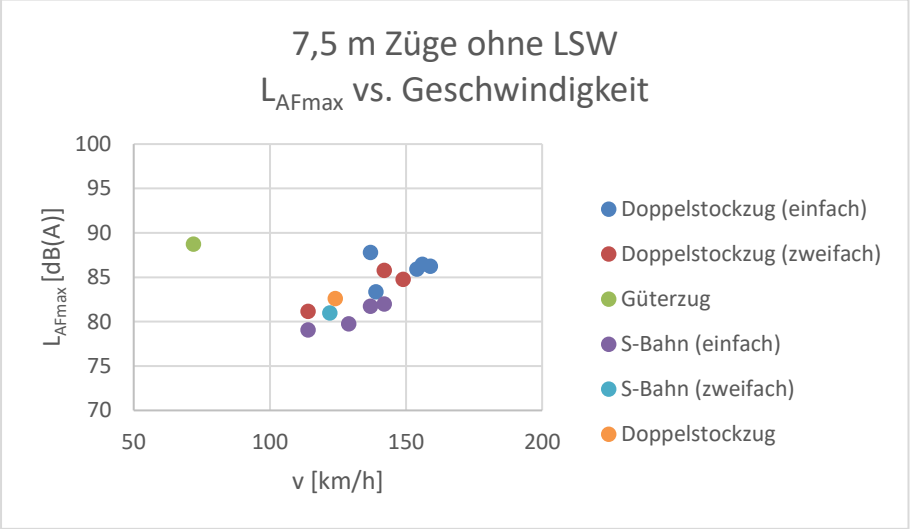


Abbildung 11 Übersicht aller gemessenen Züge an der Position 7,5 m; L_{AFmax} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

Wie zu erwarten ist, sank der Schalldruckpegel mit wachsendem Abstand zum Gleis für alle Züge vergleichbar. Folglich stieg auch im Abstand 7,5 m der Schalldruckpegel mit wachsender Geschwindigkeit bei jedem Zugtyp innerhalb der individuellen Streuung. Der L_{Aeq} der Züge am Messpunkt mit 7,5 m Abstand zur Gleismitte lag nur noch über 75 dB(A) (s. **Abbildung 10**). Zur genaueren Untersuchung der Abnahme des Schalldruckpegels mit dem Abstand siehe **Abschnitt 5.3**.

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

5.2 Einfluss der Lärmschutzwand (LSW)

Ergebnisse **mit mobiler Lärmschutzwand** am MP1 (entspricht den Messpositionen ohne Lärmschutzwand):

Zugtyp	**v [km/h]**	**L_{AFmax} 3,2 m [dB(A)]**	**L_{Aeq} 3,2 m [dB(A)]**	**L_{AFmax} 7,5 m [dB(A)]**	**L_{Aeq} 7,5 m [dB(A)]**
Bauzug	91	86,37	82,36	84,67	80,29
Doppelstockzug (einfach)	135	83,39	76,23	78,14	74,14
Doppelstockzug (einfach)	136	82,46	76,46	81,52	75,34
Doppelstockzug (einfach)	141	82,84	77,19	84,14	76,93
Doppelstockzug (einfach)	116	79,17	73,68	76,22	72,18
Doppelstockzug (einfach)	128	85,85	77,29	78,46	73,41
Doppelstockzug (zweifach)	151	86,79	78,94	82,05	77,85
Güterzug	100	86,06	79,70	82,7	77,59
S-Bahn (einfach)	114	77,73	72,81	75,84	70,53
S-Bahn (einfach)	145	82,91	76,68	78,64	73,96
S-Bahn (einfach)	118	80,85	74,20	76,22	71,60

Ergebnisse **mit mobiler Lärmschutzwand** am MP2 (10m versetzt):

Zugtyp	**v [km/h]**	**L_{AFmax} 3,2 m [dB(A)]**	**L_{Aeq} 3,2 m [dB(A)]**	**L_{AFmax} 7,5 m [dB(A)]**	**L_{Aeq} 7,5 m [dB(A)]**
Doppelstockzug (einfach)	103	75,81	70,65	72,53	69,88
Doppelstockzug (einfach)	147	84,53	77,79	82,43	75,53
Doppelstockzug (einfach)	152	85,8	78,59	81,14	75,41
Doppelstockzug (zweifach)	134	85,25	77,72	85,3	76,58
Güterzug	104	81,22	75,23	79,45	73,50
S-Bahn (einfach)	109	78,81	72,63	73,58	69,24
S-Bahn (zweifach)	140	81,5	74,88	77,38	71,96

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

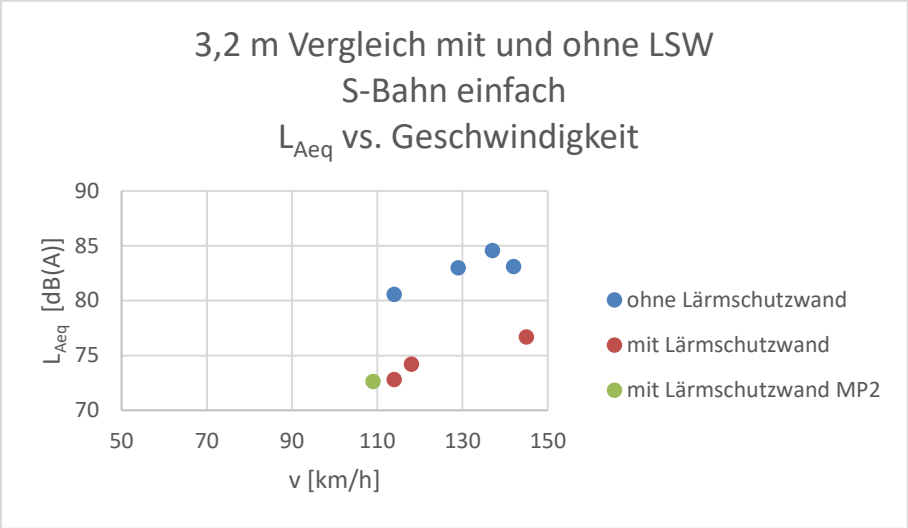


Abbildung 12 Vergleich der S-Bahnen an der Position 3,2 m ohne und mit Lärmschutzwand; L_{Aeq} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

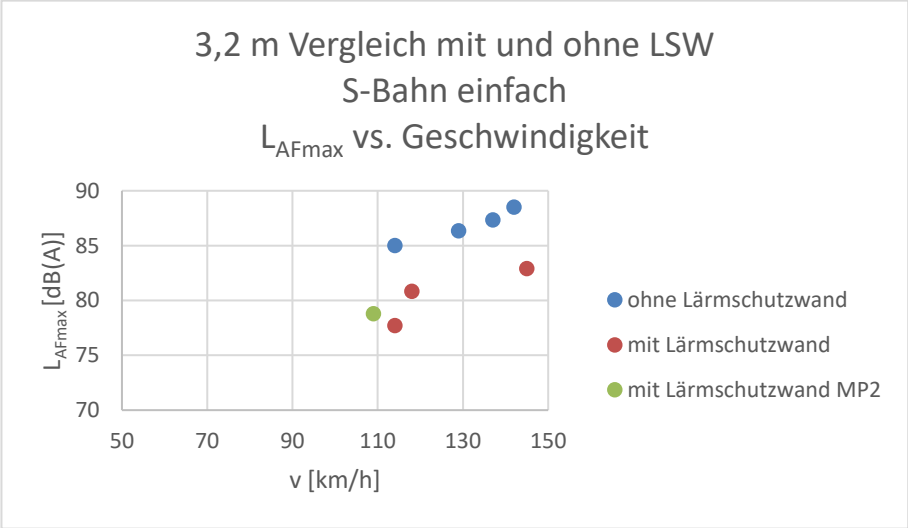


Abbildung 13 Vergleich der S-Bahnen an der Position 3,2 m ohne und mit Lärmschutzwand; L_{AFmax} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

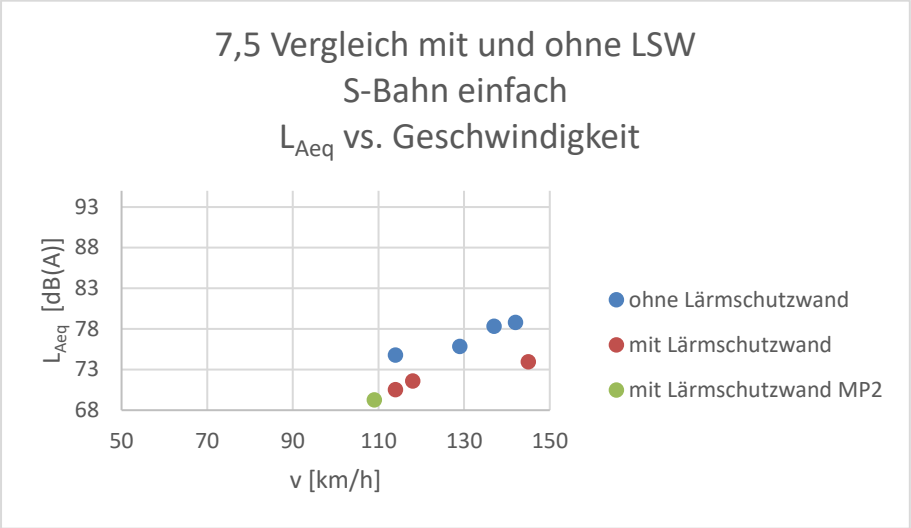


Abbildung 14 Vergleich der S-Bahnen an der Position 7,5 m ohne und mit Lärmschutzwand; L_{Aeq} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

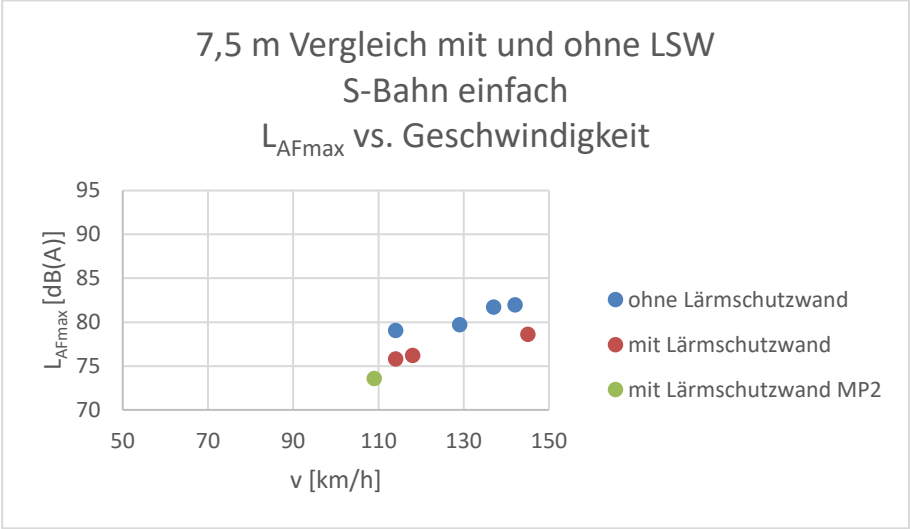


Abbildung 15 Vergleich der S-Bahnen an der Position 7,5 m ohne und mit Lärmschutzwand; L_{AFmax} in dB(A) gegen die Geschwindigkeit in km/h

Man erkennt deutlich, dass der Einfluss der Lärmschutzwand am nahen Messpunkt (3,2 m zur Gleismitte) größer war (s. **Abbildung 12** und **Abbildung 13**), als beim entfernten Messpunkt (s. **Abbildung 14** und **Abbildung 15**). Der L_{Aeq} während der Vorbeifahrt lag mit Lärmschutzwand am Messpunkt 3,2 m Abstand zur Gleismitte bei allen Zügen unter 80 dB(A) (der Bauzug bildete eine Ausnahme, allerdings konnte kein Bauzug ohne Lärmschutzwand zum Vergleich gemessen werden). Ohne Lärmschutzwand lag der L_{Aeq} bei allen Zügen über 80 dB(A) (siehe **Abschnitt 5.1**).
Der L_{AFmax} zeigte eine ähnliche Abnahme.
Bei den S-Bahnen konnte man eine deutliche Abnahme des Schalldruckpegels beobachten. Am Messpunkt mit 3,2 m Abstand zum Gleis lagen die Werte des L_{AFmax} mit Lärmschutzwand alle zwischen 77 dB(A) und 83 dB(A). Selbst die schnellen S-Bahnen wiesen einen L_{AFmax} unter 83 dB(A) auf. Ohne Lärmschutzwand lag der L_{AFmax} aller S-Bahnen je nach Geschwindigkeit zwischen 85 dB(A) und 87 dB(A) (s. **Abbildung 12** und **Abbildung 13**).

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Die schnellen Doppelstockzüge (v ≈ 150 km/h), bei denen allen ein hoher L_{AFmax} ohne Lärmschutzwand gemessen wurde (L_{AFmax} > 91 dB(A) bei 3,2 m Abstand), hatten mit Lärmschutzwand einen L_{AFmax} unter 87 dB(A) bei 3,2 m Abstand (siehe Messwerttabellen).

Die geringere Wirksamkeit der Lärmschutzwand beim entfernten Messpunkt (7,5 m) liegt vermutlich hauptsächlich an der Beugung der Schallwellen. Je höher die Lärmschutzwand ist, umso besser wird auch der Bereich weiter weg geschützt.

5.3 Einfluss des Abstandes zum Gleis

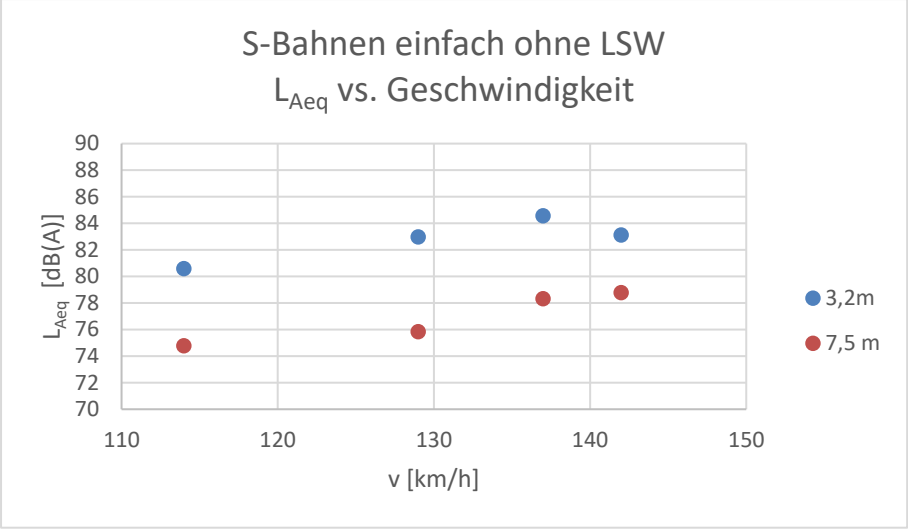


Abbildung 16 L_{Aeq} in dB(A) der S-Bahnen an der Position 3,2 m und 7,5 m gegen die Geschwindigkeit in km/h

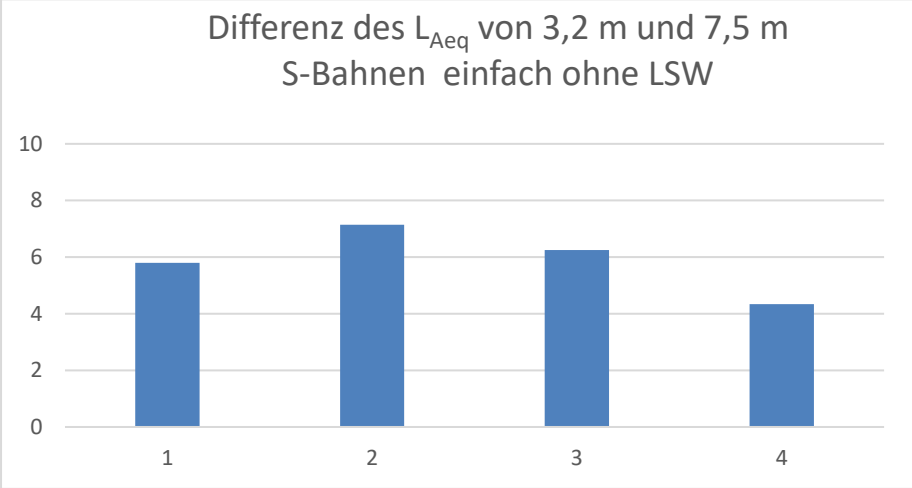


Abbildung 17 Differenz zwischen dem L_{Aeq} in dB(A) der S-Bahnen an der Position 3,2 m und dem L_{Aeq} in dB(A) der S-Bahnen an der Position 7,5 m

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

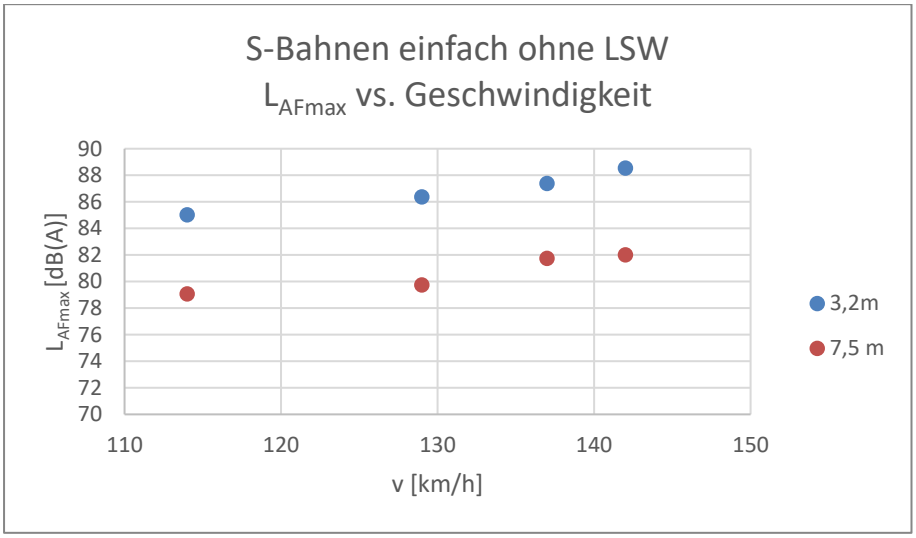


Abbildung 18 L_{AFmax} in dB(A) der S-Bahnen an der Position 3,2 m und 7,5 m gegen die Geschwindigkeit in km/h

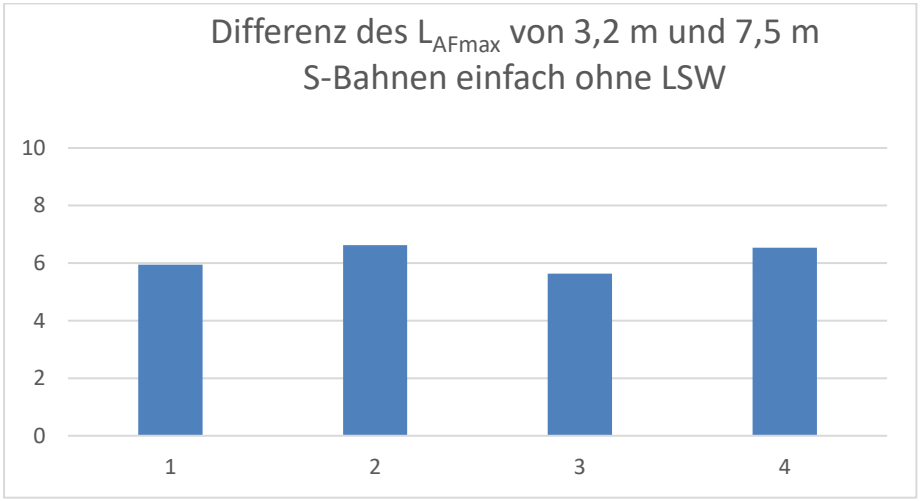


Abbildung 19 Differenz zwischen dem L_{AFmax} in dB(A) der S-Bahnen an der Position 3,2 m und dem L_{AFmax} in dB(A) der S-Bahnen an der Position 7,5 m

Die Abnahme des Schalldruckpegels mit dem Abstand lag im Bereich von 6 dB. Unter Annahme eines Freifeldes würde man bei einer Abstandsänderung von 3,2 m auf 7,5 m für eine Punktquelle eine Abnahme von 6,6 dB erwarten. Für eine ausgedehnte Linienquelle erwartet man eine Abnahme von 3,3 dB. Man kann dadurch schließen, dass die Wagons durch bewegte Punktquellen angenähert werden können.

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Abschließende Bemerkungen

Die Hauptfaktoren für die Lärmbelastung bei Arbeiten an einer Bahnstrecke sind, neben äußeren Umständen und Streckenbeschaffenheit der Abstand zum Gleis, die Geschwindigkeit des Zuges und der Zugtyp.

Je näher am Gleis gearbeitet wird, umso stärker ist die Lärmbelastung gerade durch schnelle Züge. Durch Verringerung der Zuggeschwindigkeit kann der Schalldruckpegel gesenkt werden.
Gibt es die Möglichkeit eine mobile Lärmschutzwand zwischen Arbeiter und Gleis zu installieren, so ist dies eine effektive Maßnahme, um die Lärmbelastung der Personen zu reduzieren.

Die Spitzenschalldruckpegel der vorbeifahrenden Züge liegen unterhalb der Grenzwerte der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrationsArbSchV. Das Erreichen der Tagesexpositionspegel hängt von der Häufigkeit, der Länge der Züge und ihrer Durchfahrtsdauer ab.
Zum Beispiel würde der untere Auslösewert des Tagesexpositionspegels der LärmVibrationsArbSchV $L_{EX,8h}$ erreicht werden, wenn an einem Arbeiter, der sich an Messposition 3,2 m befindet, 240 Güterzüge vorbeifahren würden (das entspricht einem Güterzug alle zwei Minuten und einer Durchfahrtsdauer von 30 s). Um die genauen Schallpegelbelastungen einzelner Arbeiter am Gleis zu erfassen, können Dosimeter-Messungen eingesetzt werden.

Heidelberg, 28.08.2020



i.A. Janna Lamprecht

FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Literatur:

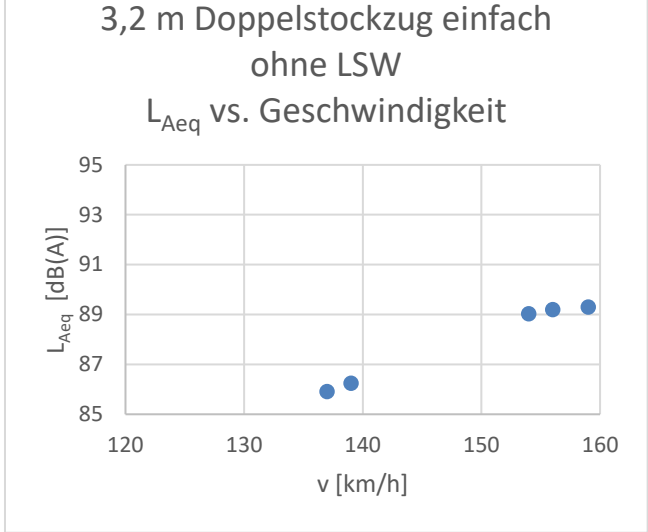
Die Ausführungen stützen sich auf folgende **wesentliche Regelwerke** sowie allgemeine Erfahrungswerte:

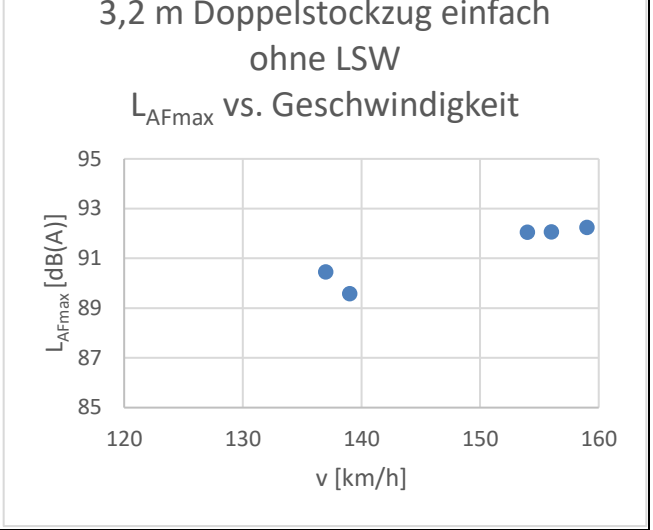
DIN EN ISO 3095 – Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von Spurgebundenen Fahrzeugen - Juli 2014

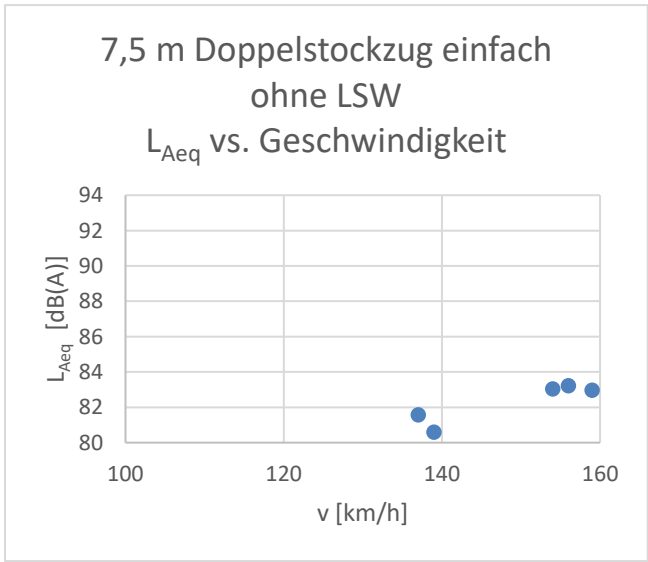
Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - LärmVibrationsArbSchV

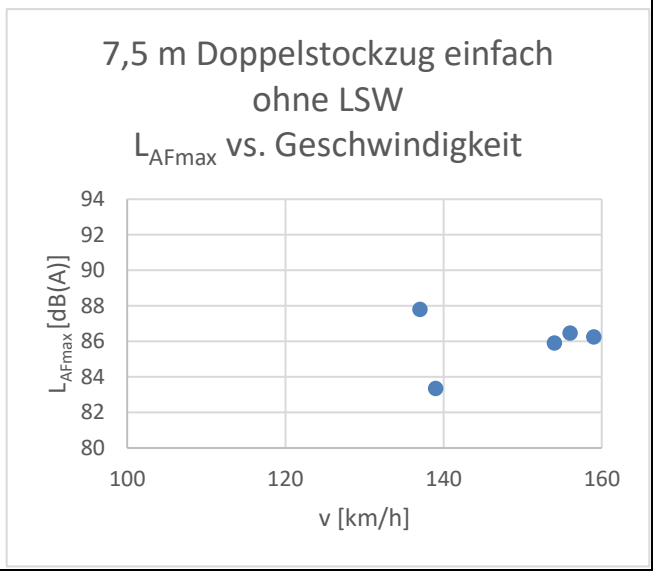
FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

Anhang - Diagramme

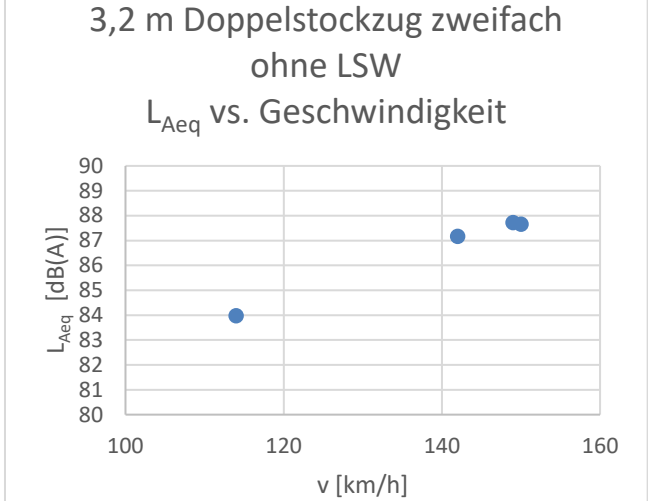


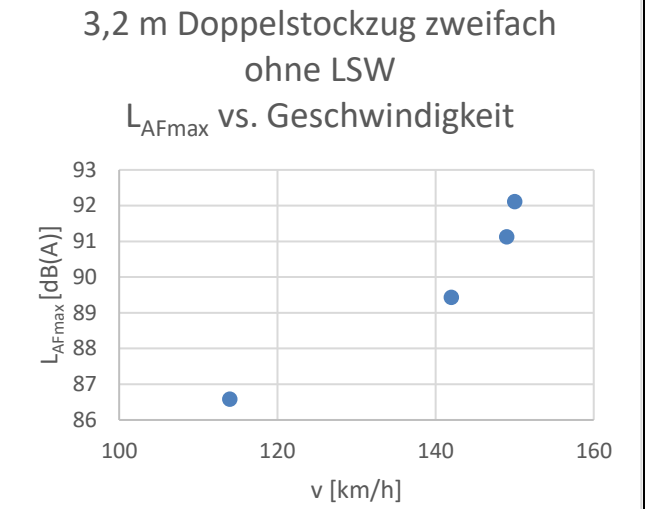


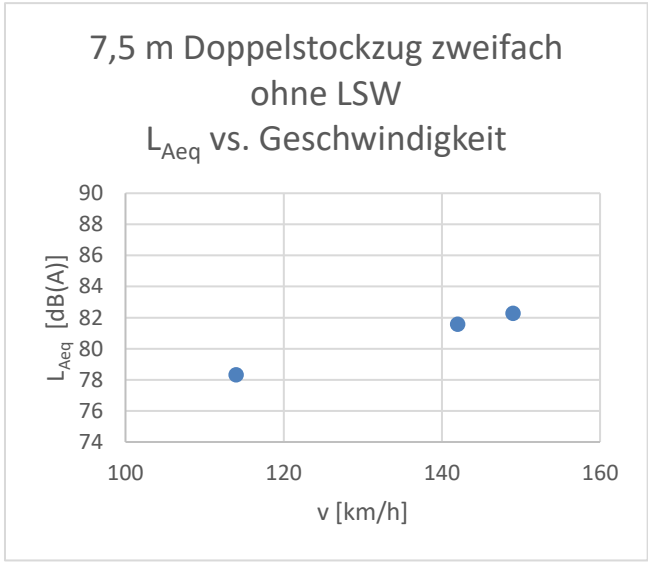


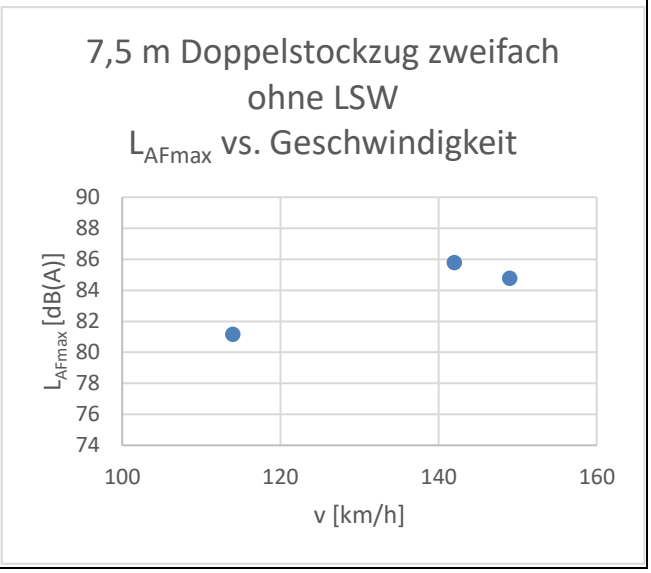


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

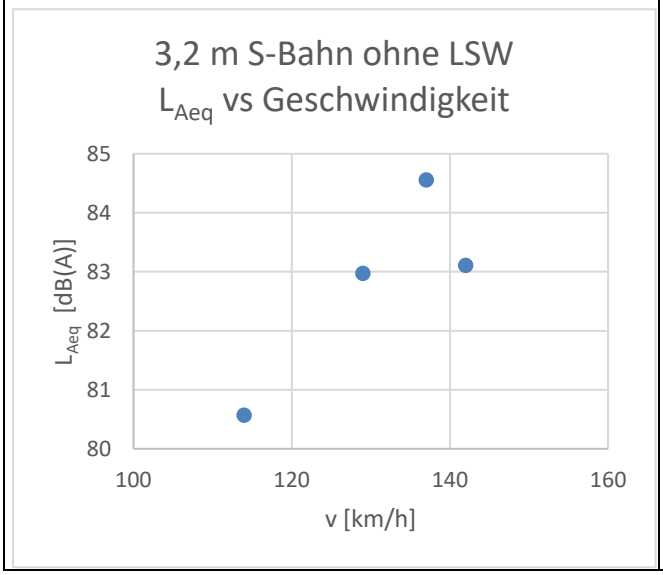


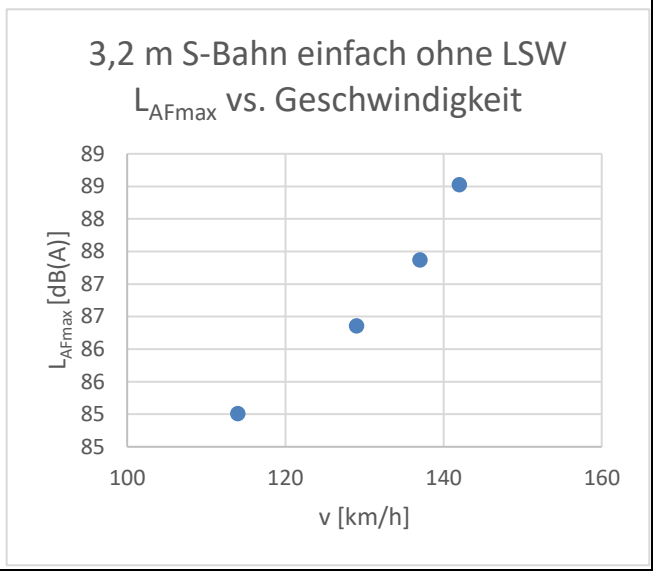


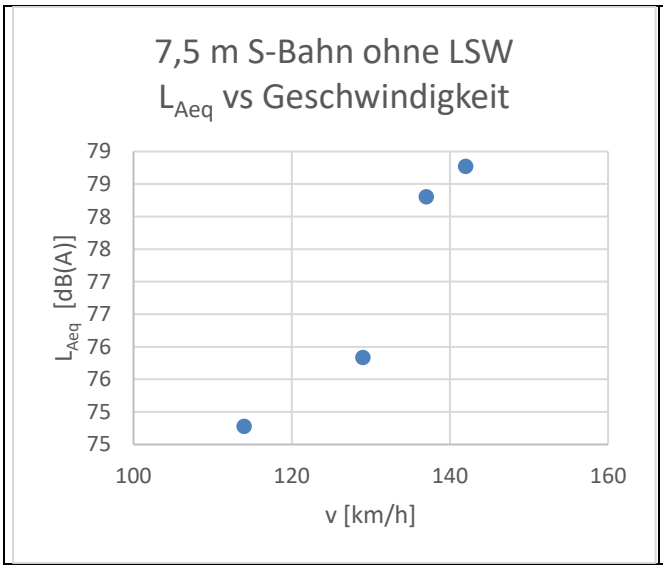


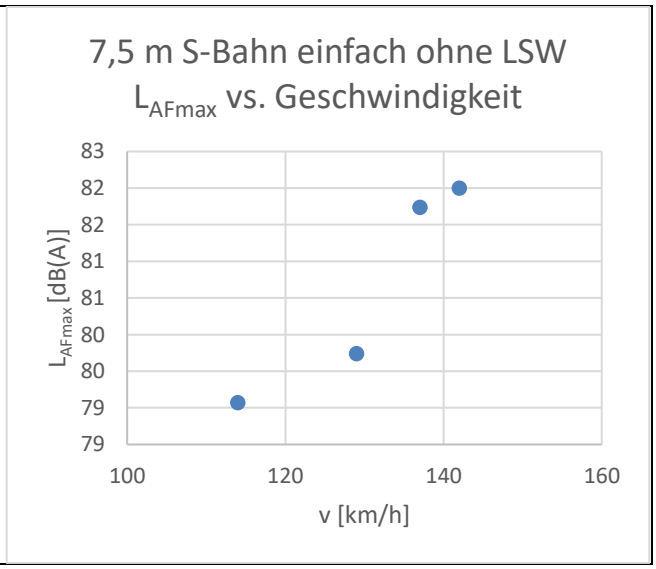


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

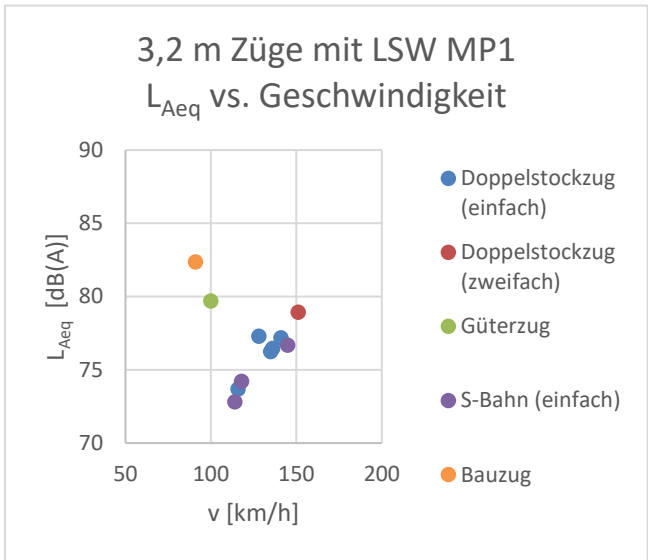


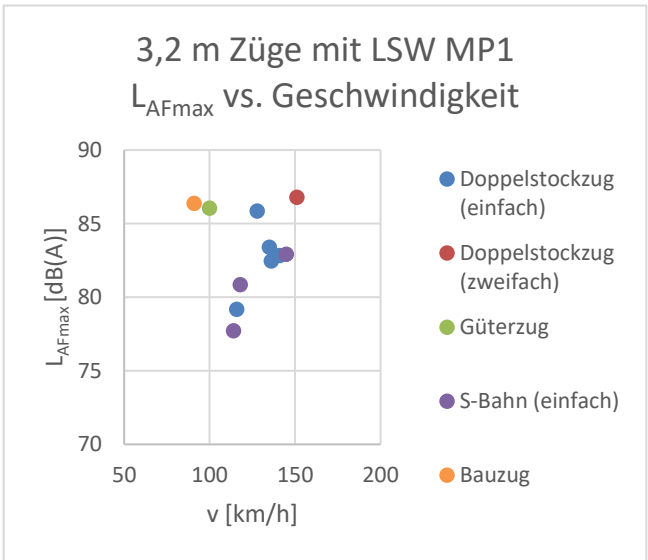


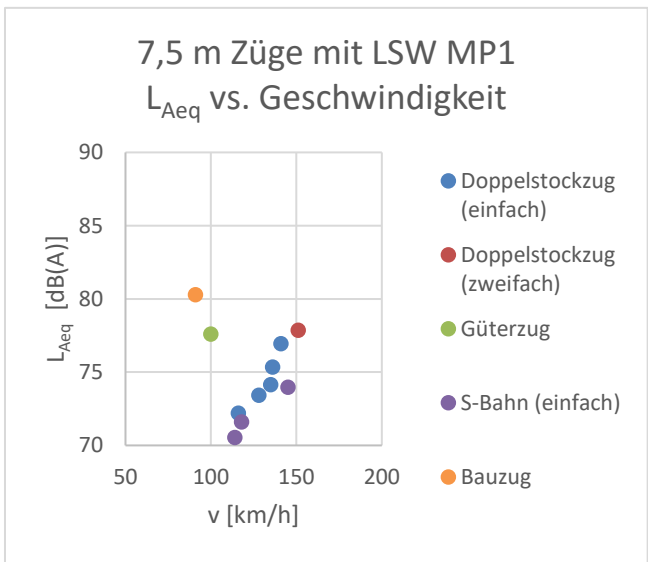


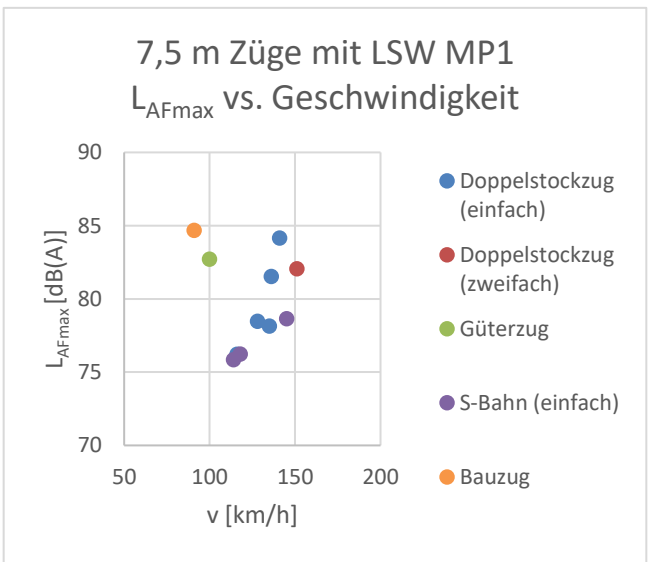


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

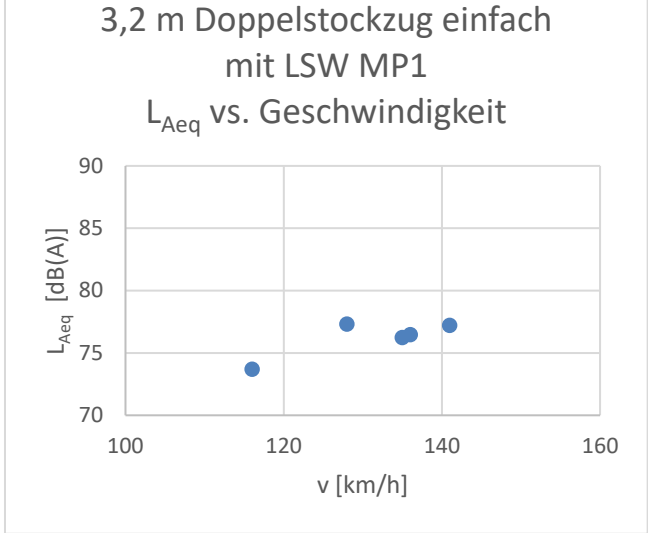


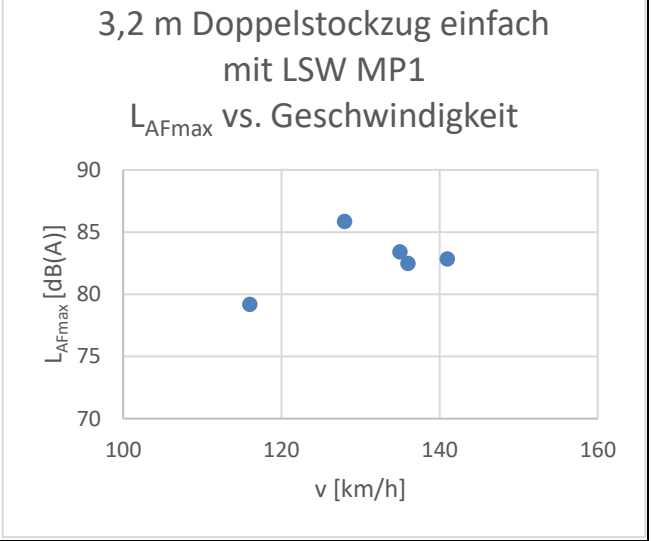


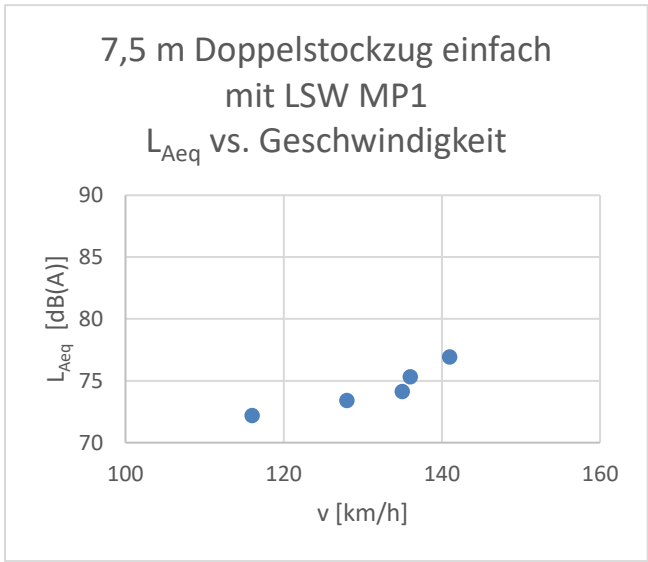


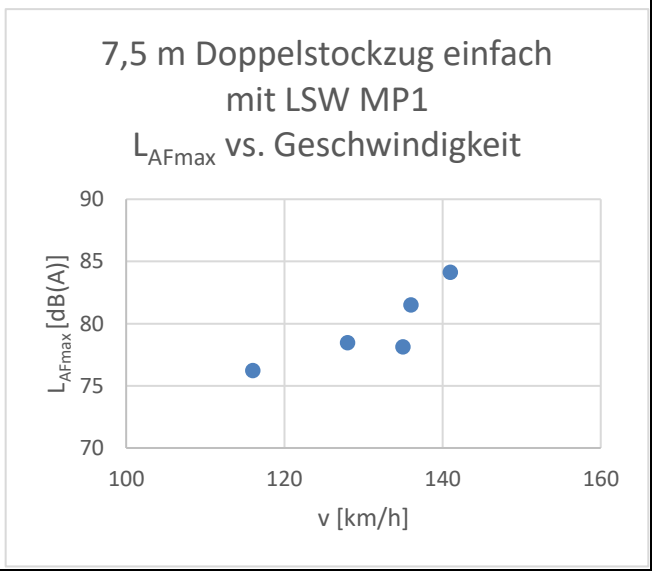


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

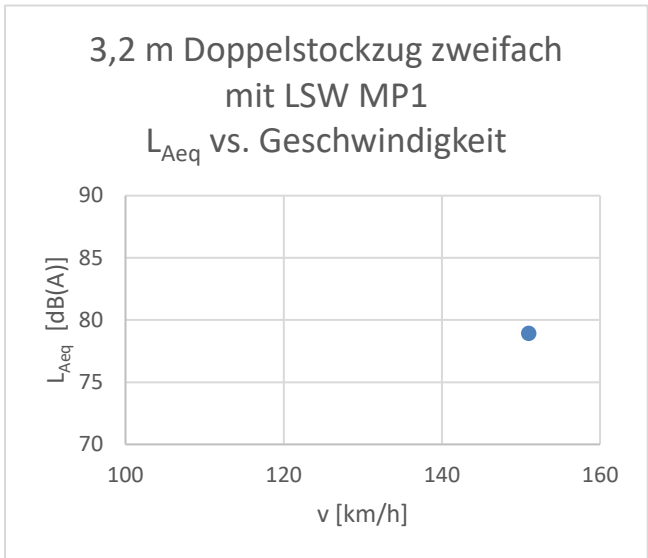


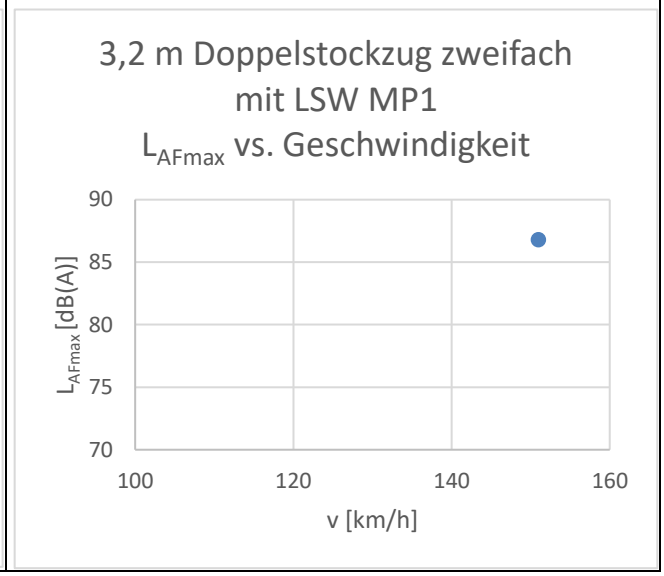


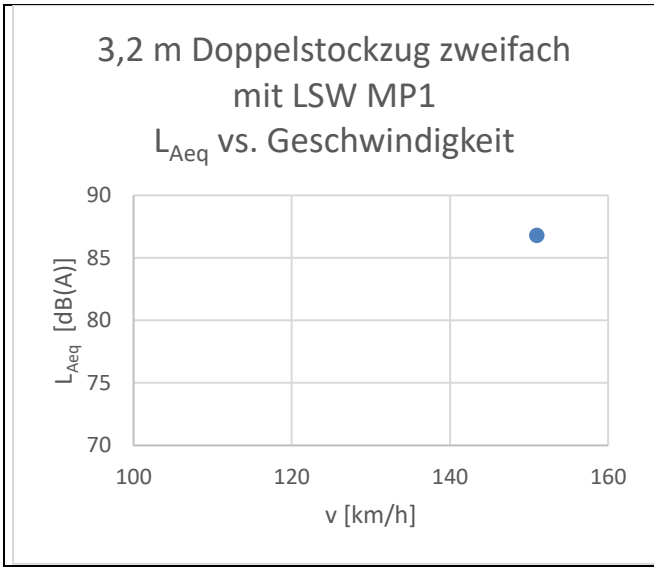


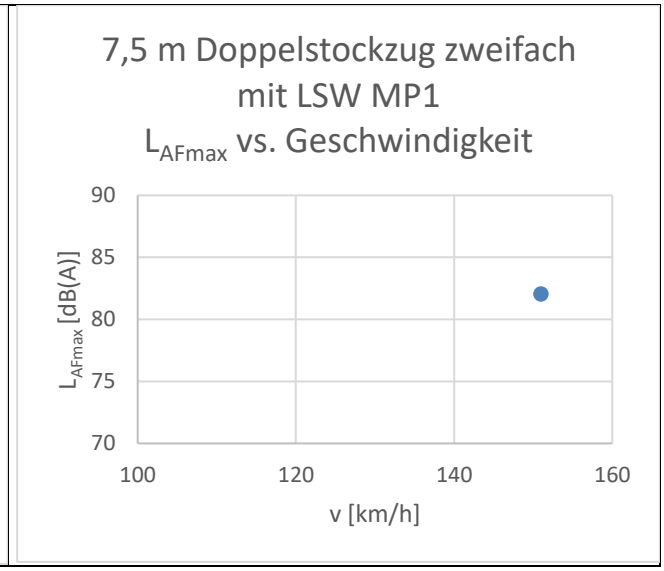


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

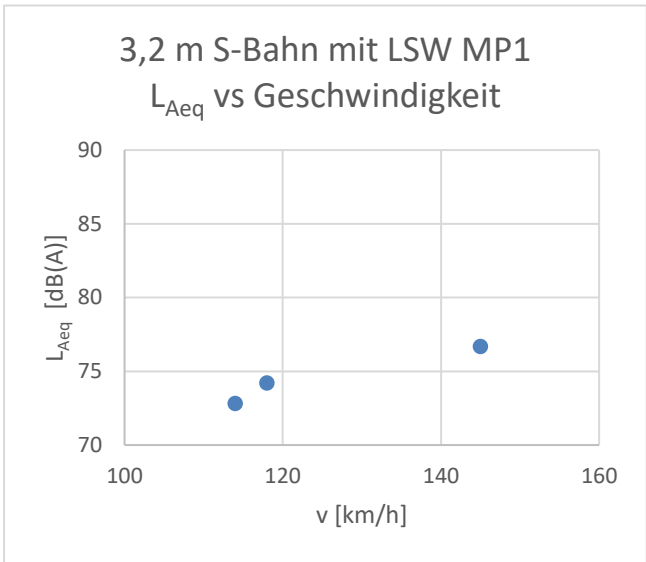


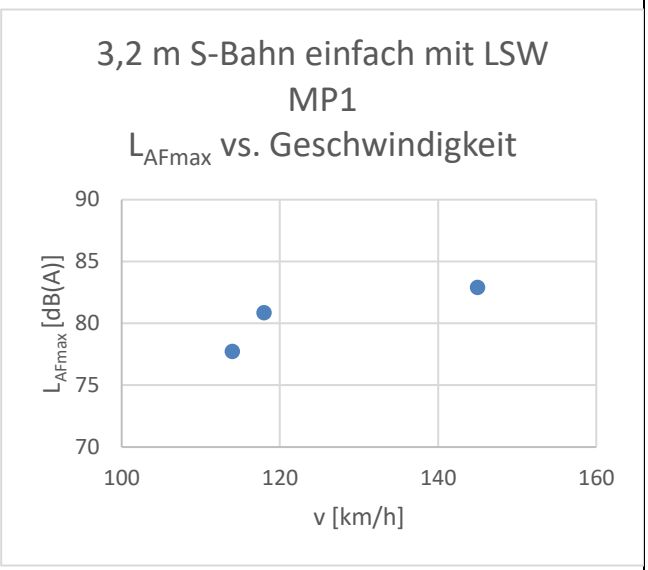


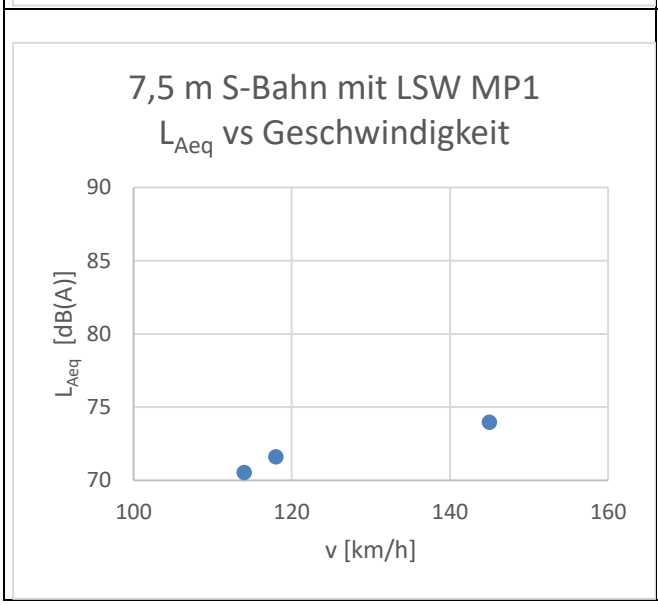


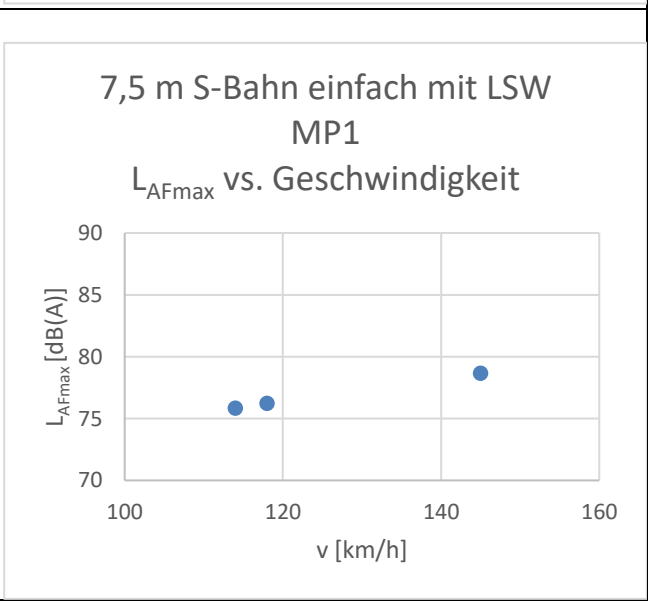


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

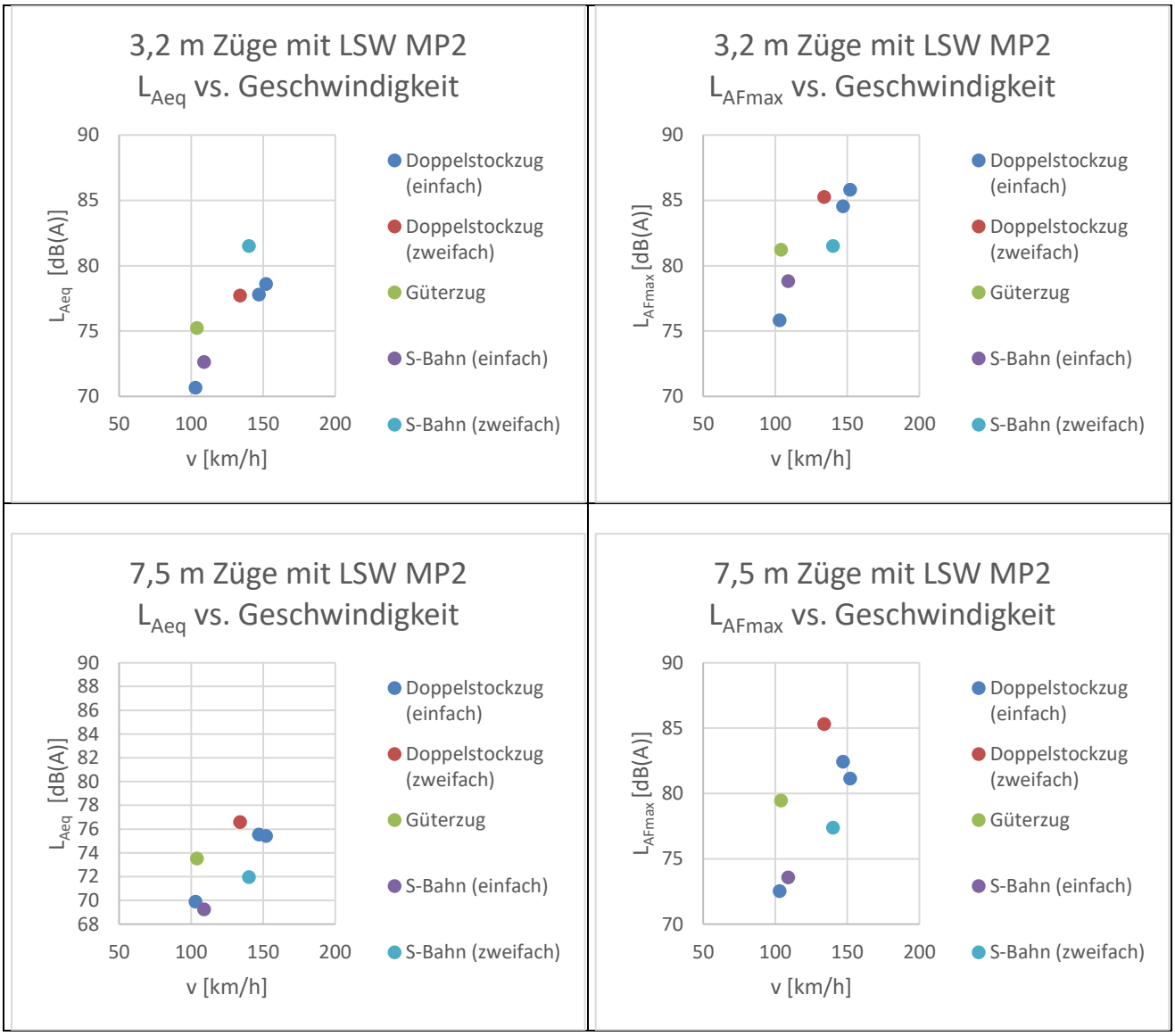




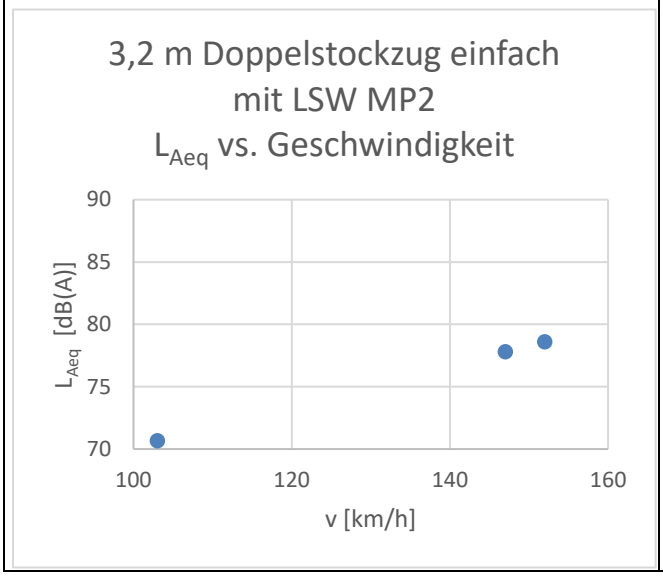


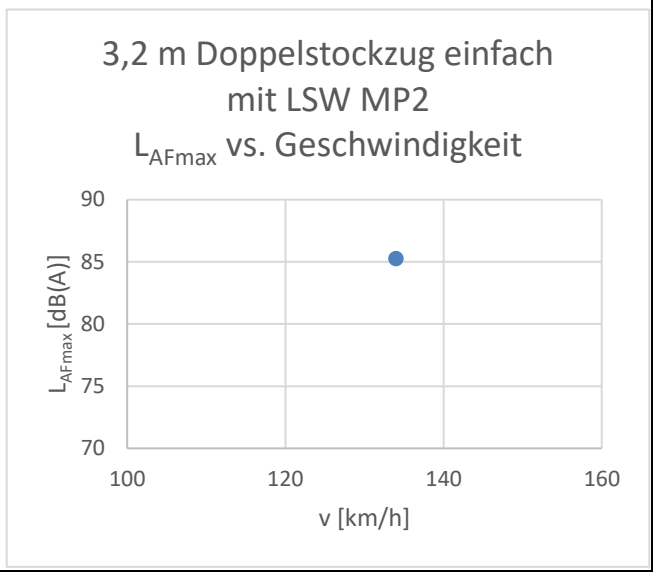


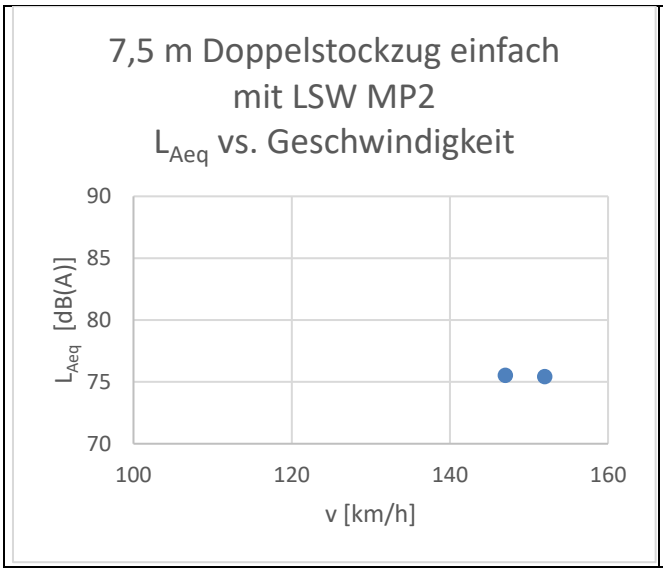
FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

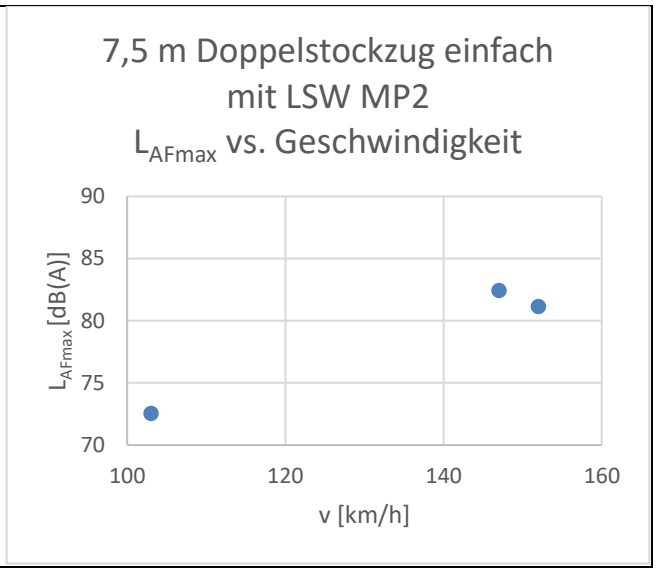


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

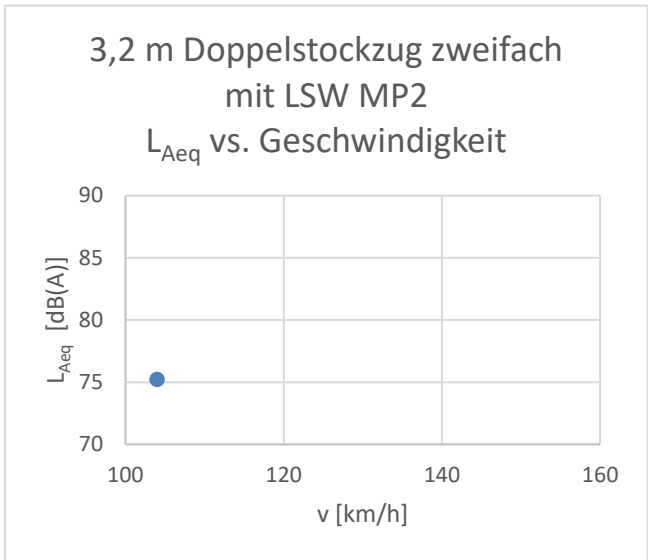


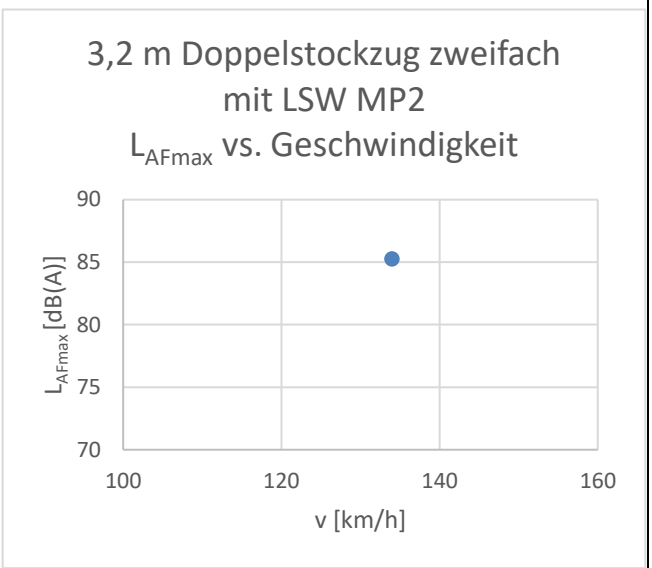


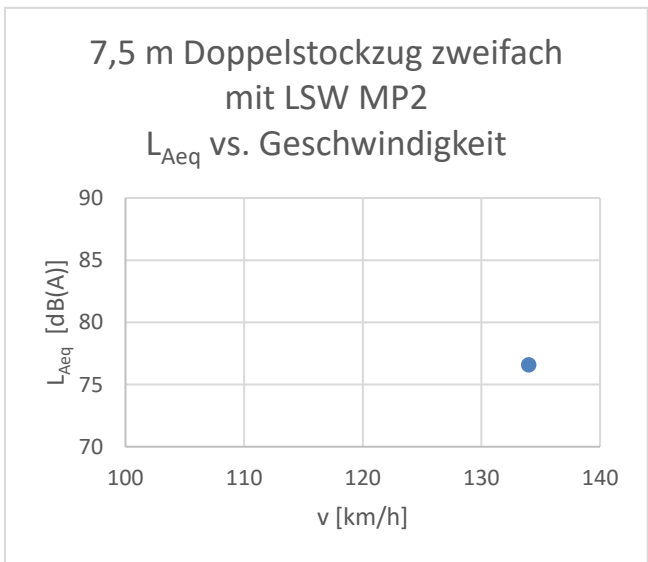


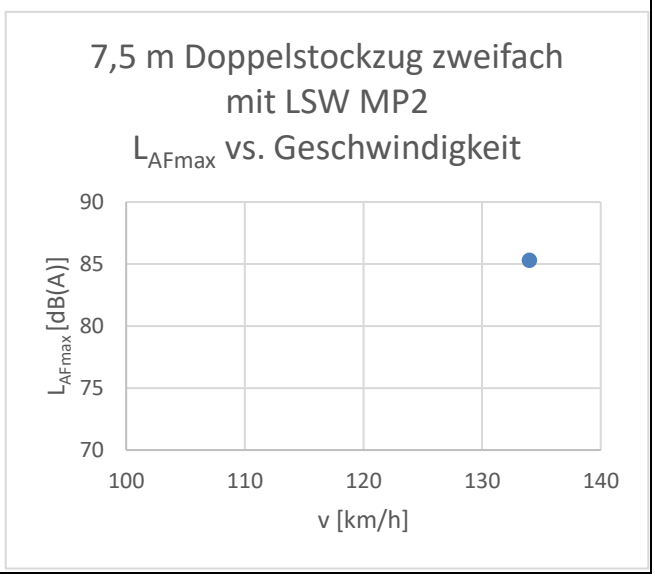


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

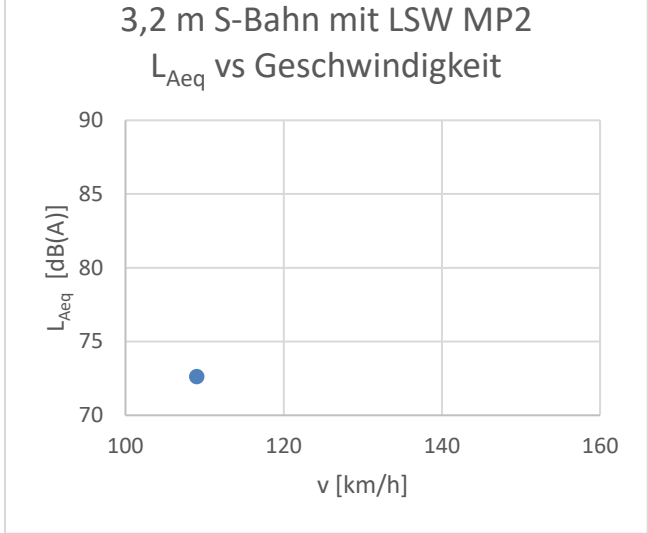


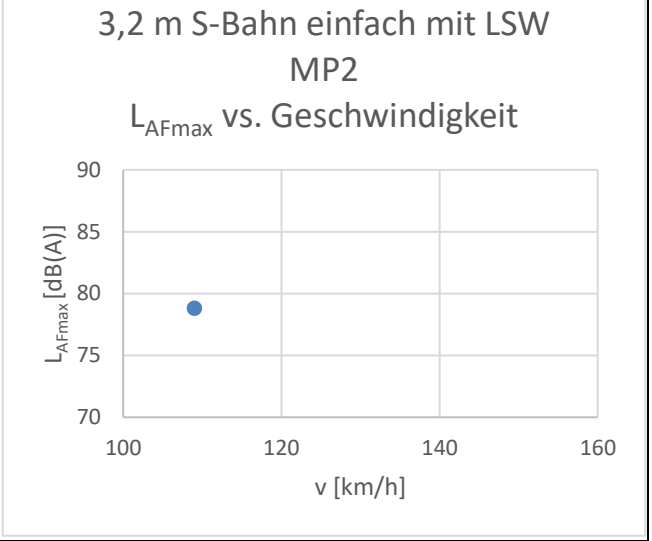


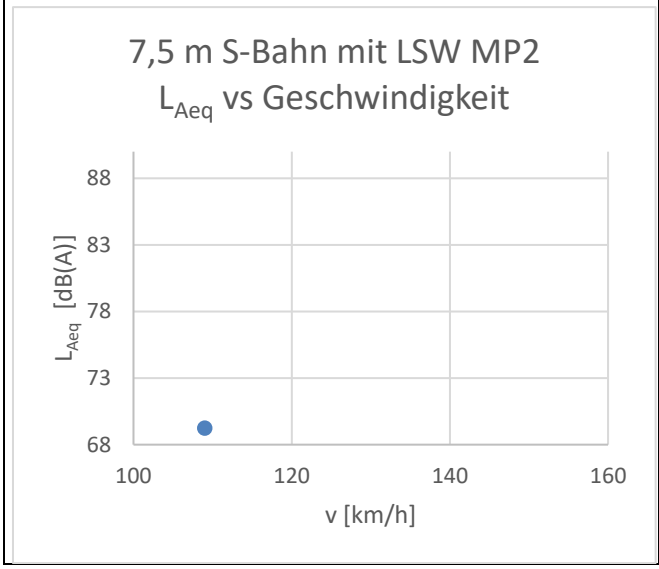


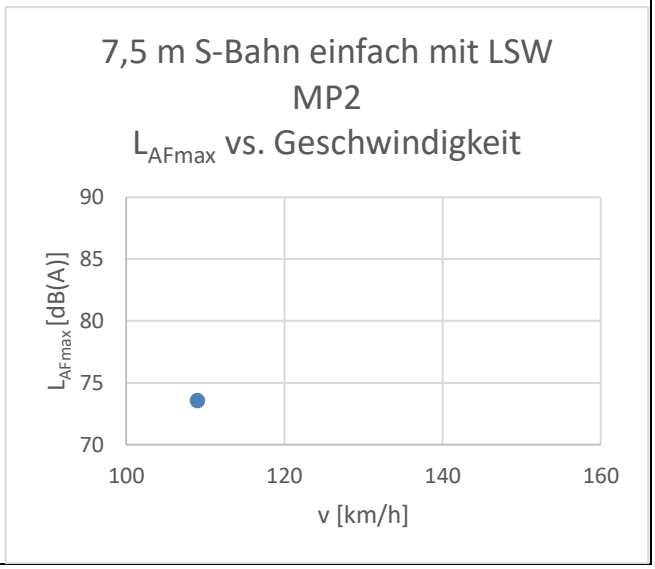


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

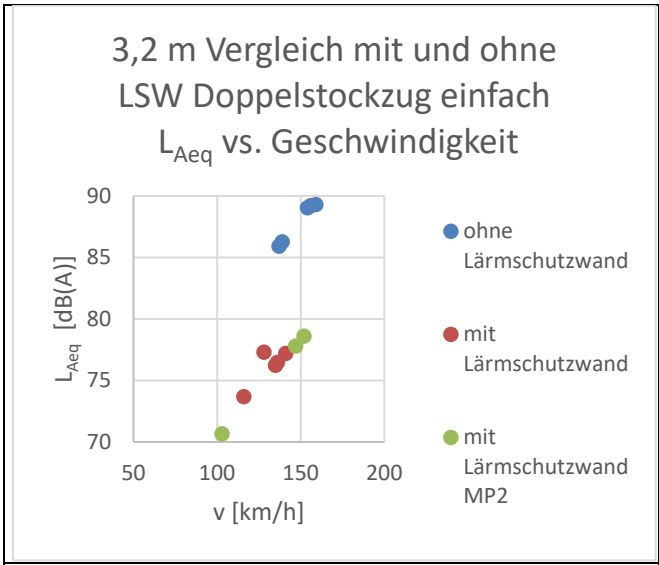


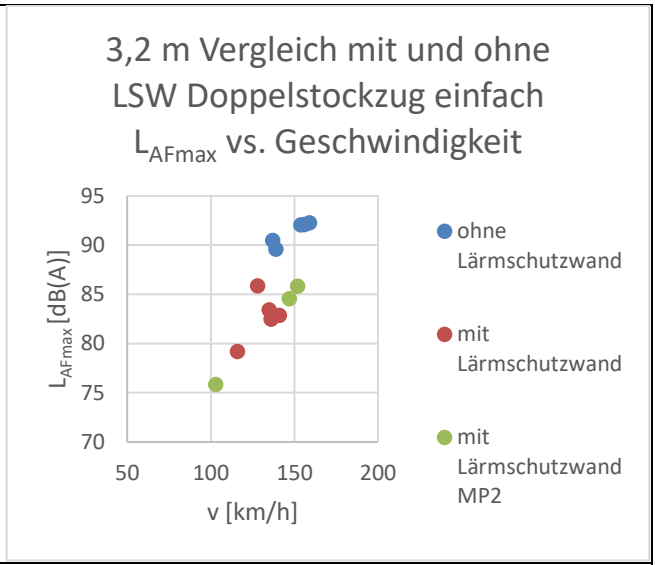


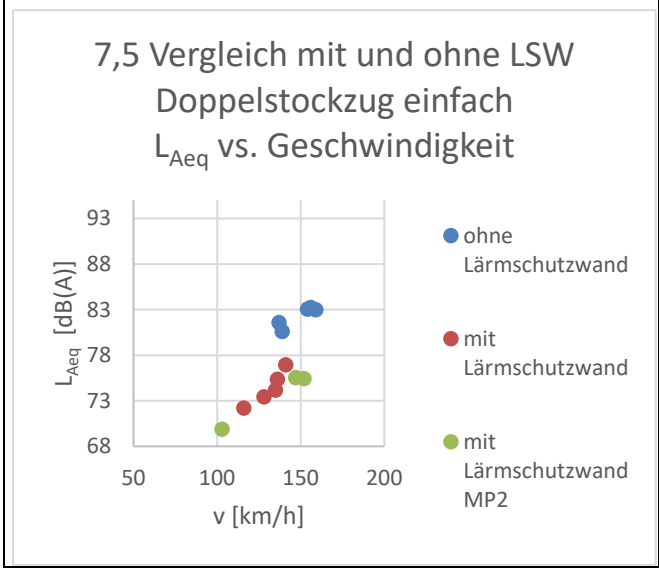


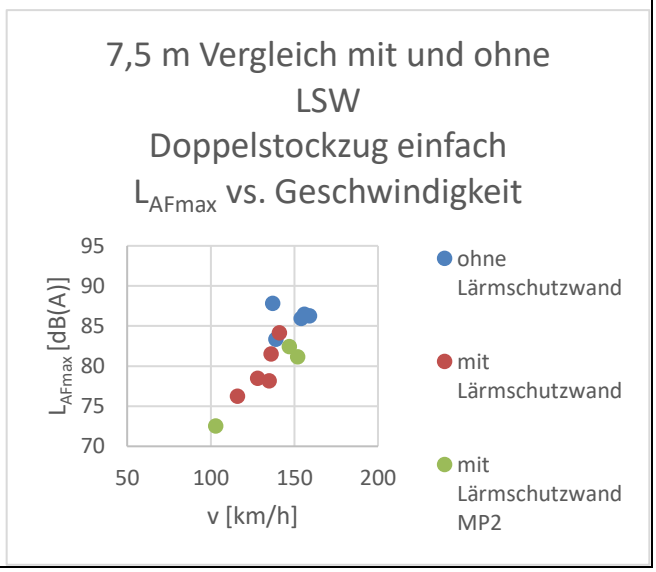


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

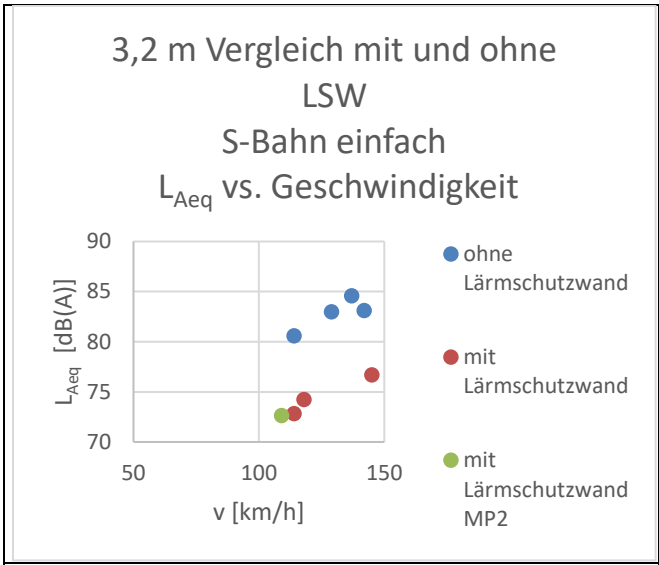


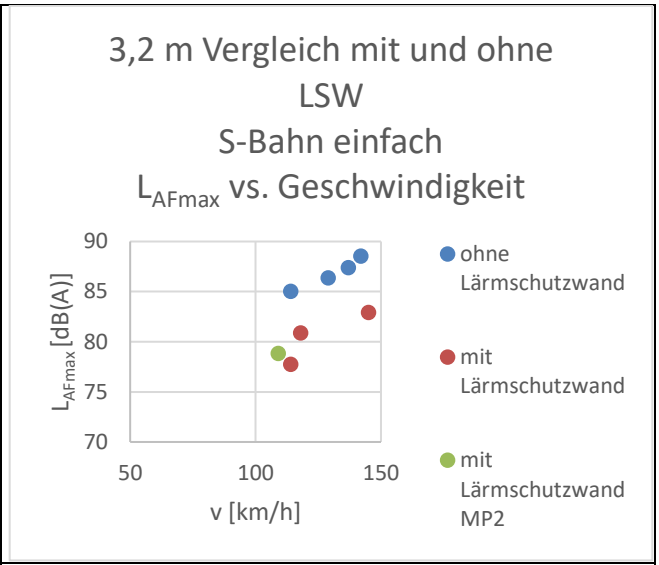


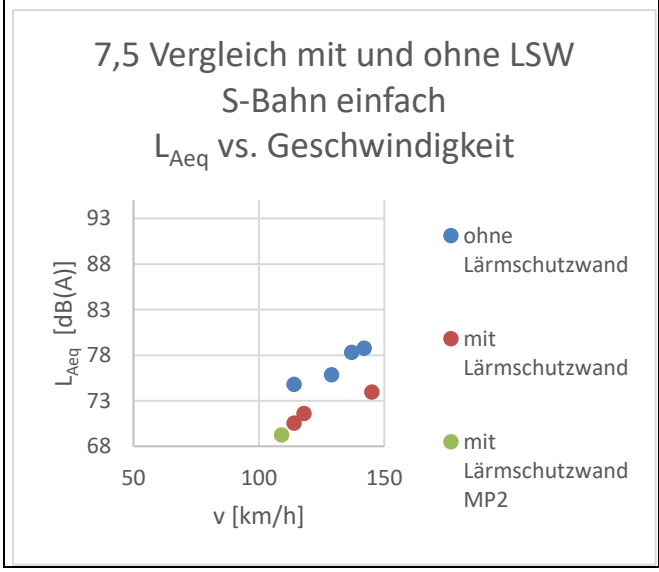


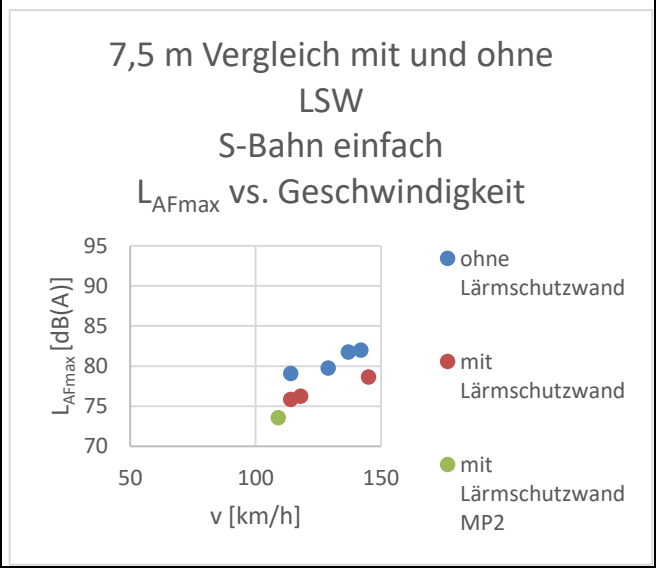


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

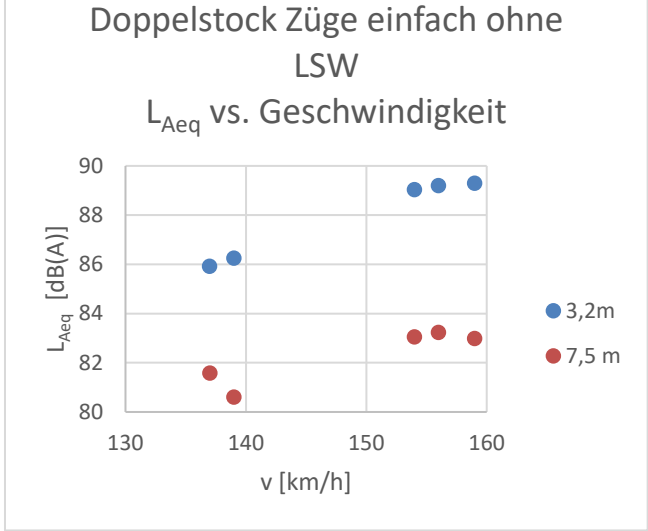


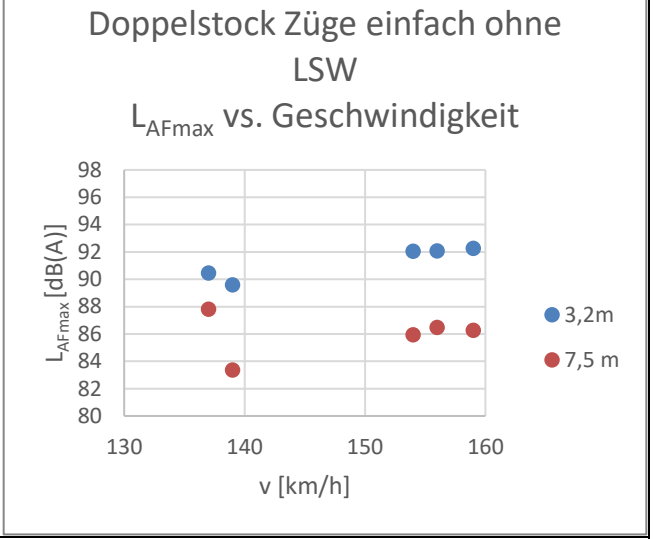


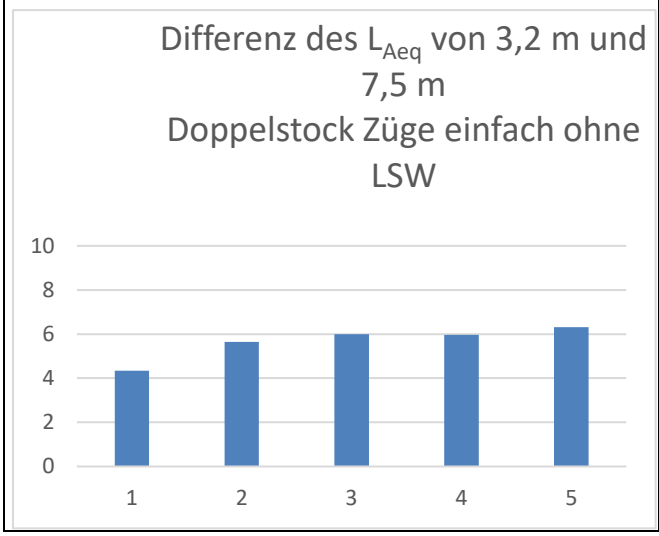


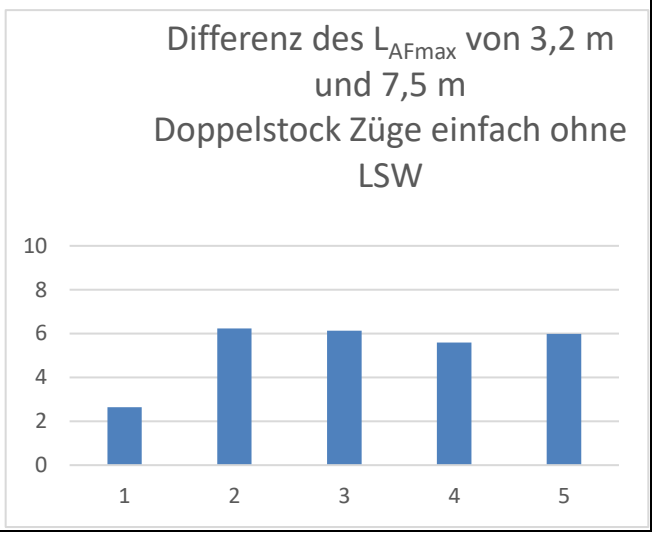


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim

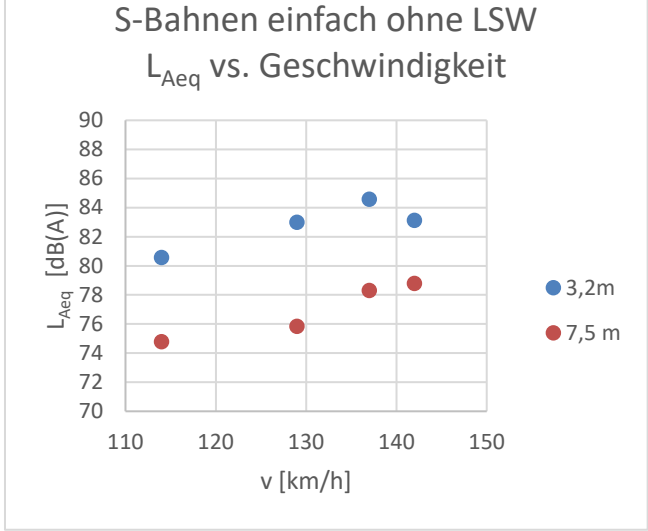


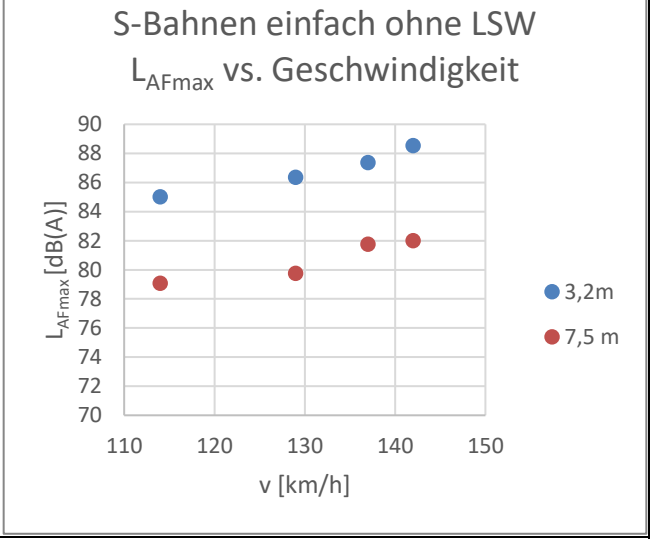


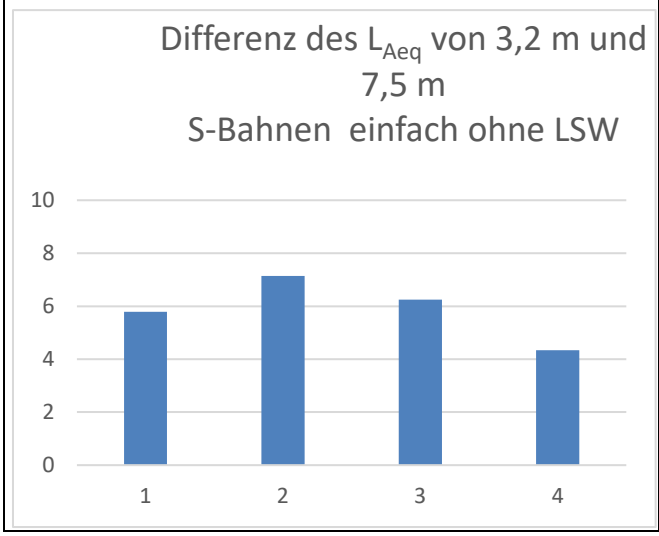


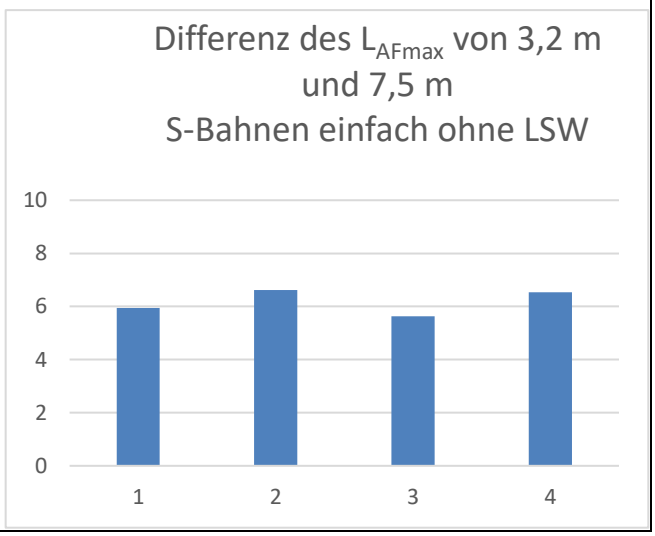


FSA
Dynamostr. 7-11, 68165 Mannheim









B Messdaten

B.1 Tabellen

B.1.1 Messdatenauswertung

Tabelle B.1: Mit Radar, Lichtschranken und Videos aus Mikrocomputer und Highspeed-Kamera ermittele Geschwindigkeiten der erfassten Züge Nr. 1 bis 63.

Zug	v_R [km/h]	v_L [km/h]	v_M [km/h]	v_H [km/h]	$\bar{v}$ [km/h]
1	125,0 ± 2,50	121,2 ± 3,64	126,4 ± 1,26	125,1 ± 2,06	125,5 ± 1,94
2	142,0 ± 2,84	55,0 ± 85,0	139,4 ± 1,39	139,8 ± 0,97	140,4 ± 1,73
3	122,0 ± 2,44	–	121,2 ± 1,21	–	121,6 ± 1,83
4	120,0 ± 2,40	114,9 ± 4,60	119,4 ± 1,19	118,1 ± 1,84	119,2 ± 1,81
5	138,0 ± 2,76	137,5 ± 4,13	140,7± 1,41	139,9 ± 2,58	139,0 ± 2,72
6	146,0 ± 2,92	141,4 ± 4,42	147,3 ± 1,47	146,0 ± 2,81	146,4 ± 2,40
7	114,0 ± 2,28	107,5 ± 3,23	112,3 ± 1,12	112,1 ± 0,62	112,8 ± 1,34
8	124,0 ± 2,48	119,4 ± 3,58	124,2 ± 1,24	122,9 ± 1,99	123,7 ± 1,90
9	142,0 ± 2,84	134,3 ± 4,03	139,8 ± 1,40	139,6 ± 0,97	140,5 ± 1,74
10	137,0 ± 2,74	133,8 ± 4,01	138,8 ± 1,39	137,2 ± 2,48	137,7 ± 2,20
11	70,0 ± 1,40	91,9 ± 22,0	69,1 ± 0,69	68,6 ± 0,83	69,2 ± 0,97
12	144,0 ± 2,88	140,9 ± 4,23	146,3 ± 1,46	144,3 ± 2,75	144,9 ± 2,36
13	128,0 ± 2,56	120,5 ± 3,62	126,2 ± 1,26	126,0 ± 0,79	126,7 ± 1,54
14	155,0 ± 3,10	184,6 ± 30,0	157,5 ± 1,57	156,0 ± 3,21	156,2 ± 2,63
15	111,0 ± 2,22	109,0 ± 3,27	112,1 ± 1,12	110,9 ± 1,62	111,3 ± 1,65
16	137,0 ± 2,74	131,2 ± 3,94	136,2 ± 1,36	136,1 ± 0,92	136,4 ± 1,67
17	127,0 ± 2,54	122,7 ± 3,68	127,3 ± 1,27	125,8 ± 2,09	126,7 ± 1,97
18	154,0 ± 3,08	151,1 ± 4,53	156,3 ± 1,56	154,9 ± 3,17	155,1 ± 2,60
19	120,0 ± 2,40	113,6 ± 3,41	118,6 ± 1,19	118,8 ± 3,03	119,1 ± 2,21
20	134,0 ± 2,68	129,5 ± 3,89	134,8 ± 1,35	–	134,4 ± 2,01
21	132,0 ± 2,64	128,5 ± 3,86	131,9 ± 1,32	130,7 ± 2,25	131,5 ± 2,07
22	–	–	–	138,9 ± 24,0	138,9 ± 24,0
23	111,0 ± 2,22	102,6 ± 8,60	112,0 ± 1,12	–	111,5 ± 1,67
24	–	117,7 ± 5,98	–	123,1 ± 0,75	123,1 ± 0,75
25	153,0 ± 3,1	143,4 ± 11,5	155,5 ± 1,6	155,2 ± 1,6	155,4 ± 1,0
26	120,0 ± 2,4	114,0 ± 9,1	124,7 ± 1,2	123,4 ± 1,0	123,5 ± 0,9
27	144,0 ± 2,9	140,9 ± 11,3	147,7 ± 1,5	148,1 ± 1,4	147,4 ± 1,0

28	154,0 ± 3,1	146,5 ± 11,7	154,2 ± 1,5	155,0 ± 1,6	154,5 ± 1,0
29	149,0 ± 3,0	140,4 ± 11,2	148,7 ± 1,5	150,8 ± 2,0	149,3 ± 1,1
30	139,0 ± 2,8	137,0 ± 1,4	137,4 ± 1,4	–	137,4 ± 0,9
31	140,0 ± 2,8	130,7 ± 10,5	140 ± 1,4	–	139,8 ± 1,2
32	154,0 ± 3,1	143,9 ± 11,5	157,7 ± 1,6	156,0 ± 1,6	156,4 ± 1,1
33	–	133,8 ± 10,7	–	140,2 ± 2,2	139,9 ± 2,2
34	140,0 ± 2,8	129,9 ± 10,4	141,7 ± 1,4	140,2 ± 1,3	140,7 ± 0,9
35	72,0 ± 1,4	(85,5 ± 6,8)	69,8 ± 0,7	70,1 ± 0,42	70,1 ± 0,4
36	158,0 ± 3,2	146,0 ± 11,7	156,4 ± 1,6	157,7 ± 2,20	156,9 ± 1,2
37	160,0 ± 3,2	148,5 ± 11,9	157,1 ± 1,6	158,7 ± 1,64	158,0 ± 1,1
38	154,0 ± 3,1	143,7 ± 11,5	151,9 ± 1,5	153,6 ± 1,9	152,6 ± 1,1
39	156,0 ± 3,1	146,3 ± 11,7	155,0 ± 1,6	154,2 ± 1,55	154,7 ± 1,0
40	100,0 ± 2,0	93,8 ± 7,5	98,3 ± 1,0	99,0 ± 1,0	98,8 ± 0,6
41	143,0 ± 2,9	136,3 ± 10,9	148,0 ± 1,5	146,0 ± 1,42	146,4 ± 1,0
42	118,0 ± 2,4	114,8 ± 9,2	120,9 ± 1,2	121,4 ± 0,37	121,2 ± 0,4
43	150,0 ± 3,0	144,2 ± 11,5	155,8 ± 1,6	154,1 ± 1,58	154,3 ± 1,2
44	142,0 ± 2,8	130,5 ± 10,4	141,6 ± 1,4	141,4 ± 1,3	141,5 ± 0,9
45	139,0 ± 2,8	129,7 ± 10,4	137,5 ± 1,4	136,3 ± 0,57	136,5 ± 0,5
46	134,0 ± 2,7	132,5 ± 1,3	–	134,5 ± 1,2	133,6 ± 0,8
47	134,0 ± 2,7	133,9 ± 1,3	–	–	133,9 ± 1,2
48	114,0 ± 2,3	112,7 ± 1,1	–	114,6 ± 0,4	114,4 ± 0,4
49	91,0 ± 1,8	89,8 ± 0,9	–	90,3 ± 0,4	90,2 ± 0,4
50	138,0 ± 2,8	138,7 ± 1,4	–	141,4 ± 1,3	139,9 ± 1,0
51	116,0 ± 2,3	114,7 ± 1,1	–	115,7 ± 0,9	115,4 ± 0,7
52	145,0 ± 2,9	141,3 ± 1,4	–	143,4 ± 0,5	143,2 ± 0,5
53	126,0 ± 2,5	126,4 ± 1,3	–	127,0 ± 1,1	126,7 ± 0,8
54	99,0 ± 2,0	97,3 ± 1,0	–	98,6 ± 0,9	98,1 ± 0,6
55	151,0 ± 3,0	152,5 ± 1,5	–	154,1 ± 1,6	153,0 ± 1,0
56	118,0 ± 2,4	110,4 ± 1,1	–	110,4 ± 0,3	110,5 ± 0,7
57	103,0 ± 2,1	100,9 ± 1,0	–	101,8 ± 0,7	101,6 ± 0,6
58	104,0 ± 2,1	100,3 ± 1,0	–	101,7 ± 0,9	101,3 ± 0,8
59	132,0 ± 2,6	132,1 ± 1,3	–	134,5 ± 1,2	133,3 ± 0,9
60	130,0 ± 2,6	135,3 ± 1,4	–	137,7 ± 0,5	137,2 ± 1,0
61	147,0 ± 3,0	145,0 ± 1,5	–	146,0 ± 1,4	145,7 ± 1,0
62	150,0 ± 3,0	151,9 ± 1,5	–	153,3 ± 1,6	152,3 ± 1,0
63	109,0 ± 2,2	107,0 ± 1,1	–	108,9 ± 0,3	108,7 ± 0,4

Tabelle B.2: An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}$ in m/s während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die Maxima wurden aus ungemittelten Daten bestimmt.

Zug	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9
1	9,68	6,97	6,53	8,15	6,59	5,64	7,84	4,56	3,16
2	9,94	8,11	6,09	7,63	8,01	4,49	6,15	2,80	2,41
3	10,98	9,12	4,77	4,41	3,66	2,47	3,64	2,58	2,24
4	11,84	7,67	4,03	9,67	5,53	4,55	9,24	6,25	5,48
5	11,84	12,92	4,93	7,83	4,61	3,22	9,41	4,68	2,97
6	15,53	6,37	4,71	8,65	6,30	6,09	9,64	9,50	5,72
7	13,75	7,09	5,37	7,56	6,46	5,70	9,04	7,38	7,08
8	14,88	6,49	5,15	6,82	6,78	5,42	8,06	6,85	6,08
9	10,46	5,32	4,23	5,33	5,38	4,07	8,20	4,94	4,69
10	12,07	7,31	4,99	8,31	7,76	6,54	5,61	5,36	5,24
11	16,33	8,23	7,53	13,92	9,96	8,32	13,62	12,74	8,84
12	11,79	10,62	4,56	8,09	5,42	4,38	8,09	5,24	4,88
13	10,44	7,42	6,45	7,88	4,98	4,55	7,09	5,57	4,04
14	12,33	11,02	6,69	9,09	6,65	6,24	8,90	5,98	4,72
15	11,02	5,83	4,67	6,43	5,20	4,82	6,61	5,41	5,67
16	12,01	10,64	6,96	8,94	9,22	6,97	5,15	3,22	2,83
17	6,91	4,83	3,64	5,11	4,56	3,57	8,24	3,88	4,02
18	13,46	4,34	3,13	6,39	4,25	3,43	5,87	4,75	3,21
19	9,83	10,29	8,87	5,03	3,77	4,86	4,88	4,69	2,81
20	11,95	9,51	4,48	5,88	4,67	3,97	6,78	4,35	3,79
21	9,68	5,16	3,85	6,19	4,64	3,89	9,43	4,83	3,47
22	15,46	5,46	5,87	7,25	6,18	5,54	9,60	6,73	5,69
23	11,27	8,52	6,79	5,27	3,62	2,73	7,38	3,29	2,64
24	9,13	6,64	4,76	6,98	5,87	4,94	5,79	4,78	3,14
25	11,69	8,16	5,55	8,22	4,77	4,49	7,04	4,42	3,59
26	8,88	6,45	4,49	8,63	8,78	5,50	7,79	6,11	5,38
27	8,42	5,36	4,59	6,24	4,63	2,98	7,14	3,50	2,78
28	13,21	7,69	4,63	8,99	6,62	2,93	6,23	4,56	2,98
29	20,15	12,17	11,31	14,50	9,15	10,63	8,65	9,31	8,12
30	7,97	3,35	3,78	4,83	3,83	4,01	4,74	3,41	3,87
31	14,72	12,51	5,14	8,61	5,86	5,22	3,85	3,73	2,90
32	12,64	9,55	6,22	11,55	10,18	7,20	9,76	8,19	3,75
33	14,51	11,28	9,37	7,99	4,57	5,45	7,04	4,72	3,75
34	10,31	6,32	5,95	7,69	6,72	6,41	7,04	4,72	4,46

35	15,46	12,27	8,31	14,83	9,84	7,80	11,65	8,53	7,83
36	15,72	10,25	7,51	11,91	9,48	9,46	10,09	8,63	8,63
37	13,54	6,78	3,74	8,55	5,27	5,96	7,70	6,72	6,34
38	14,22	13,09	7,34	12,38	6,29	5,27	8,46	7,54	5,61
39	9,42	4,53	2,84	4,84	4,07	3,37	6,55	3,97	3,45
40	18,78	14,46	10,47	13,60	10,68	8,54	12,43	9,67	8,24
41	12,34	5,44	4,58	10,84	5,38	4,89	6,85	5,42	4,16
42	8,96	4,01	3,62	4,15	4,00	3,47	7,26	4,23	3,95
43	9,93	6,36	4,55	6,08	4,93	3,98	10,22	4,83	4,10
44	15,10	9,24	3,73	7,50	5,23	4,27	10,66	5,34	4,20
45	14,73	10,42	5,20	6,96	5,92	5,35	8,52	5,85	4,46
46	11,55	6,11	2,09	11,13	4,22	2,53	5,89	5,48	2,59
47	13,31	3,67	3,01	10,94	5,02	3,10	7,02	6,81	3,32
48	11,32	5,68	2,05	12,96	4,86	3,03	5,87	4,26	3,24
49	13,16	2,62	2,12	13,31	3,95	2,86	9,81	6,47	4,26
50	16,95	2,28	2,32	17,09	4,86	3,93	7,56	6,50	5,37
51	2,86	2,70	2,29	3,11	3,05	2,81	3,84	3,62	3,32
52	15,46	3,45	2,41	12,60	3,45	3,12	9,30	6,27	4,08
53	14,73	2,95	2,93	13,88	4,60	3,54	10,71	7,48	6,56
54	16,29	7,91	7,93	19,02	11,02	8,97	15,20	13,05	10,51
55	14,91	4,57	2,66	12,96	5,12	3,59	8,76	6,48	3,99
56	13,01	5,97	2,00	8,89	4,84	2,39	6,94	5,02	3,99
57	2,27	4,07	2,60	12,04	5,16	3,65	7,88	6,97	4,93
58	16,48	7,31	6,64	16,73	9,43	7,60	12,87	10,23	7,77
59	13,69	2,79	1,74	14,34	4,32	2,08	10,46	3,85	2,45
60	12,34	3,42	2,47	10,34	5,96	1,96	7,74	7,27	2,55
61	12,30	5,24	2,89	13,80	6,35	3,64	8,93	8,25	4,37
62	13,17	6,21	2,60	13,46	6,20	3,91	7,92	8,09	5,24
63	11,36	3,93	1,74	11,86	4,41	2,29	6,57	5,73	2,68

Tabelle B.3: An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}_{0,4}$ in m/s während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 0,4 s bearbeitet.

Zug	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9
1	7,80	6,58	5,68	6,98	5,14	4,60	6,99	4,33	2,89
2	8,90	7,52	5,21	6,04	7,07	3,90	4,09	2,52	2,27
3	9,75	7,74	4,25	2,21	3,08	2,32	3,29	1,92	2,17
4	10,35	6,20	3,78	8,27	4,64	4,05	8,23	5,33	5,13
5	9,63	9,20	4,73	6,66	3,67	3,07	8,19	4,07	2,48
6	13,50	5,11	4,18	6,83	5,51	5,63	8,87	7,00	5,09
7	8,78	5,61	4,93	6,27	5,98	5,32	8,19	6,71	6,65
8	12,29	6,10	4,31	5,96	5,77	4,95	6,92	5,44	4,80
9	9,42	3,52	3,13	4,82	4,53	3,63	6,90	4,09	3,86
10	9,54	6,44	4,65	7,35	7,30	6,16	5,19	4,96	4,73
11	13,02	7,48	7,06	12,87	8,08	7,91	12,68	10,60	7,95
12	9,44	8,92	3,47	5,79	3,85	3,71	6,84	4,28	4,44
13	8,73	5,88	5,43	6,23	4,29	4,17	5,81	4,80	3,62
14	10,89	8,70	6,02	7,55	5,89	5,99	6,92	5,33	4,30
15	8,90	5,23	3,89	3,83	4,03	4,14	5,72	4,76	4,70
16	11,05	8,08	5,74	7,91	8,07	5,11	4,62	2,60	2,65
17	5,39	4,56	3,38	4,68	4,21	3,46	6,02	3,57	3,60
18	9,46	3,71	2,71	5,14	3,50	3,10	5,24	4,39	2,73
19	8,77	9,18	7,13	3,54	2,88	4,23	4,04	4,34	2,75
20	9,70	7,80	3,85	3,71	3,15	2,92	5,36	3,52	2,91
21	8,93	4,38	3,39	5,74	3,35	2,85	8,27	4,09	2,70
22	11,56	4,99	4,99	5,40	5,86	5,40	8,81	6,22	4,92
23	9,90	6,60	5,49	4,32	2,73	2,54	5,95	2,97	2,50
24	7,82	5,96	4,44	5,99	5,37	4,11	5,25	4,13	2,90
25	8,41	6,08	4,75	7,02	4,16	3,88	5,76	3,49	3,50
26	7,20	5,37	3,90	7,81	8,05	5,07	6,87	5,60	4,38
27	6,76	5,19	4,31	5,44	3,95	2,84	5,71	2,66	2,48
28	8,97	7,18	3,84	7,70	5,63	2,75	5,37	3,80	2,67
29	15,40	9,79	9,90	11,88	8,70	9,84	7,67	8,17	7,50
30	7,45	3,16	3,64	3,78	3,75	3,96	3,96	3,29	3,80
31	11,14	10,08	3,87	5,62	5,49	4,22	3,27	3,29	2,81
32	11,37	7,97	5,86	10,54	8,46	6,17	8,29	5,86	3,65
33	10,37	8,91	7,84	6,91	4,22	4,90	5,86	4,23	3,63
34	6,94	5,70	4,83	7,20	6,51	5,28	6,48	4,18	3,49

35	13,40	10,30	6,96	12,65	8,12	6,40	9,68	7,59	6,74
36	13,90	8,94	6,60	10,51	8,12	8,72	9,37	7,59	7,75
37	10,91	5,63	3,52	7,35	3,89	5,25	6,60	6,05	4,82
38	12,49	11,63	6,00	10,16	5,22	4,62	7,14	6,76	4,67
39	7,67	4,10	2,27	4,15	3,76	2,50	5,31	3,50	2,67
40	15,67	12,62	9,55	11,38	9,57	7,74	10,82	8,66	6,95
41	9,59	4,73	4,00	9,39	4,79	4,60	5,44	4,97	3,29
42	7,78	3,38	3,34	3,59	3,42	3,21	3,55	3,89	3,64
43	7,89	5,17	3,70	4,63	4,11	3,87	7,28	3,92	3,88
44	11,94	7,72	3,17	5,75	4,07	3,29	8,28	4,02	3,73
45	12,72	6,99	4,49	5,96	5,55	4,66	6,33	5,03	4,06
46	9,76	3,00	1,60	9,46	2,48	2,13	5,02	4,56	2,12
47	10,80	2,37	2,25	9,04	3,01	2,25	6,17	5,32	2,90
48	9,47	2,97	1,58	10,52	3,16	2,38	5,31	3,83	2,81
49	11,19	1,67	1,53	12,04	3,44	2,37	6,54	4,59	4,00
50	14,49	2,12	2,27	14,87	4,26	3,56	6,40	4,80	4,72
51	2,76	2,64	2,19	2,86	2,77	2,58	3,52	3,37	2,99
52	12,89	1,97	1,93	11,11	2,85	2,96	8,56	4,41	3,60
53	12,74	2,38	2,58	12,13	3,09	3,00	6,64	5,44	5,53
54	14,33	7,26	7,70	17,25	8,93	8,62	12,93	10,95	9,29
55	13,70	2,03	2,26	11,65	3,33	3,10	7,18	5,24	3,69
56	11,21	3,55	1,50	7,96	3,88	2,13	5,56	4,32	3,65
57	11,31	2,12	2,27	10,28	3,06	3,01	6,12	5,18	3,93
58	14,36	7,00	6,17	15,60	8,12	7,04	12,05	8,54	7,15
59	12,47	1,45	1,70	12,56	3,56	1,97	8,01	2,42	2,32
60	9,89	2,01	2,16	9,53	3,05	1,40	6,41	5,84	1,77
61	11,63	2,09	1,94	12,11	4,79	3,18	7,52	6,42	3,92
62	12,17	3,86	2,13	10,45	4,52	3,38	6,17	5,58	4,49
63	10,59	2,73	1,24	10,35	3,29	2,14	5,84	4,20	2,13

Tabelle B.4: An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windgeschwindigkeit $\hat{u}_1$ in m/s während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 1,0 s bearbeitet.

Zug	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9
1	7,21	5,76	4,80	6,60	4,85	4,16	6,33	3,61	2,32
2	7,69	6,28	4,87	5,00	4,72	3,12	3,30	2,41	2,16
3	6,19	5,60	3,61	2,13	1,95	2,19	2,42	1,66	2,05
4	9,42	5,53	3,39	7,18	4,01	3,78	6,23	4,88	5,00
5	8,16	6,75	4,31	6,29	3,36	2,83	7,66	3,21	2,02
6	10,96	4,67	3,77	6,19	4,79	4,93	7,45	5,70	4,54
7	8,39	5,11	4,31	5,10	5,55	5,11	7,72	6,18	6,08
8	9,69	5,20	3,60	4,75	4,11	4,23	6,21	4,96	4,07
9	6,99	3,39	2,98	4,61	3,69	3,31	6,29	3,75	3,68
10	7,37	5,82	4,41	6,55	6,83	5,73	4,49	4,45	4,46
11	10,77	6,97	6,24	12,05	7,43	7,59	10,44	8,90	6,58
12	7,74	5,28	2,88	4,59	3,38	3,35	5,97	3,85	3,64
13	6,27	5,21	4,26	5,65	3,74	3,99	4,89	3,79	3,33
14	8,99	6,06	5,73	6,26	5,44	5,46	5,87	4,76	3,33
15	7,77	4,68	3,17	3,58	3,36	3,73	3,97	4,53	4,23
16	10,33	7,68	5,12	6,71	6,72	3,25	4,04	2,20	2,50
17	4,66	3,63	3,29	4,33	3,75	3,31	5,24	3,48	3,33
18	6,80	3,18	2,52	4,94	2,99	2,94	4,84	3,57	2,59
19	7,66	7,45	5,66	3,01	2,68	2,74	3,77	3,63	2,69
20	8,08	5,38	3,62	3,20	2,25	2,24	4,07	2,69	2,12
21	7,55	4,20	3,08	4,84	2,79	2,22	7,34	3,23	2,18
22	9,52	4,58	4,59	5,18	5,49	4,84	7,62	5,30	4,08
23	8,99	5,02	4,76	3,84	2,57	2,30	4,90	2,46	2,31
24	6,71	5,49	4,08	5,13	4,00	3,68	4,53	3,53	2,63
25	7,51	5,28	4,32	6,54	3,35	3,09	4,32	3,44	3,33
26	6,62	5,07	3,62	7,42	7,13	4,67	5,71	5,08	3,75
27	6,00	4,41	3,88	5,05	3,31	2,72	4,55	2,57	2,40
28	7,82	5,84	3,03	6,97	4,63	2,63	5,09	3,41	2,64
29	12,42	8,67	8,71	9,19	7,92	8,06	5,89	6,65	5,83
30	6,45	3,01	3,52	3,52	3,61	3,79	3,40	3,23	3,75
31	7,65	6,70	2,76	4,53	4,29	3,31	2,92	2,68	2,61
32	9,83	6,88	5,25	8,19	5,84	4,33	5,97	3,83	3,40
33	8,86	6,72	5,76	5,34	3,87	3,83	4,60	3,73	3,39
34	6,14	5,26	3,75	6,35	5,67	4,08	5,63	3,71	2,95

35	11,45	8,23	5,57	11,39	7,43	5,08	9,28	6,50	5,85
36	12,62	8,25	6,17	9,26	7,95	7,90	7,26	7,39	6,90
37	9,47	3,98	3,37	6,47	3,63	4,76	6,18	5,62	4,53
38	11,08	7,79	4,39	8,08	4,24	3,89	6,24	6,39	4,09
39	6,66	3,35	1,97	3,69	3,58	2,29	4,96	3,27	2,38
40	13,13	10,32	7,46	11,12	8,82	7,19	10,04	7,73	5,73
41	7,91	4,07	3,61	8,70	3,99	3,62	4,40	3,92	2,90
42	5,87	2,96	3,18	3,43	3,33	2,97	3,40	3,53	3,43
43	6,82	4,41	3,54	3,75	3,92	3,72	5,72	3,81	3,73
44	9,67	6,21	3,00	4,44	3,18	3,15	6,50	3,40	3,35
45	11,77	5,51	3,90	4,69	4,78	3,87	5,02	3,94	3,42
46	8,67	1,53	1,42	7,71	1,77	1,75	4,53	3,31	1,88
47	9,84	2,02	2,02	7,66	2,24	2,14	5,65	5,02	2,33
48	9,22	1,51	1,50	9,52	1,95	2,04	4,60	3,33	2,42
49	10,60	1,52	1,34	10,52	2,51	2,12	5,62	3,94	3,76
50	12,91	2,06	2,17	12,45	3,74	3,13	6,02	4,43	4,42
51	2,63	2,48	2,11	2,65	2,54	2,42	3,07	3,13	2,82
52	12,20	1,79	1,75	9,47	2,02	2,61	6,72	3,98	3,19
53	11,16	1,79	2,48	11,10	2,18	2,56	4,33	4,26	3,60
54	13,08	6,59	6,67	15,78	7,40	8,07	11,14	9,57	8,97
55	11,94	1,94	2,02	9,56	2,65	2,14	4,77	3,94	3,11
56	10,19	1,93	1,28	7,50	3,40	1,74	4,33	3,92	3,40
57	10,46	1,73	1,97	9,25	2,51	2,59	5,19	4,44	3,60
58	13,58	6,53	5,75	14,75	7,86	6,68	11,04	8,16	6,81
59	9,68	1,33	1,64	10,23	3,15	1,78	5,39	1,80	2,08
60	8,20	1,25	1,87	8,12	1,56	1,31	5,38	4,08	1,55
61	10,76	1,68	1,39	10,82	3,88	2,51	6,63	5,06	3,70
62	10,70	2,32	1,77	9,09	2,37	2,57	4,64	4,67	3,96
63	8,55	1,98	1,15	8,41	2,17	1,98	5,48	3,47	1,79

Tabelle B.5: An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windbeschleunigung $\hat{a}$ in m/s^2 während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die Maxima wurden aus ungemittelten Daten bestimmt.

Zug	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9
1	256,44	41,13	31,88	131,81	74,40	27,16	83,38	32,03	24,65
2	352,75	82,70	217,67	317,19	47,32	35,51	93,43	29,89	16,71
3	277,47	132,55	41,48	131,56	29,31	16,50	291,63	25,91	34,38
4	718,69	43,82	41,07	248,33	61,65	26,07	314,85	37,15	27,21
5	364,66	279,86	65,71	341,56	44,61	22,60	331,62	41,41	20,84
6	533,90	58,66	25,91	287,09	70,26	25,18	372,91	95,22	23,51
7	692,34	327,73	23,94	312,43	97,73	32,59	146,18	45,28	32,22
8	568,00	94,86	33,60	308,56	151,42	35,93	314,22	53,07	41,38
9	468,86	102,89	30,30	392,31	44,24	25,37	363,32	38,92	26,18
10	676,08	167,92	38,27	218,90	42,05	34,37	323,03	40,13	26,66
11	427,36	377,15	43,20	279,11	132,40	48,34	335,59	81,79	56,67
12	364,54	255,81	143,16	378,48	181,56	139,79	348,88	105,47	284,69
13	399,78	228,28	29,61	147,56	37,67	26,81	300,86	33,43	36,49
14	826,21	223,34	61,62	407,37	123,36	39,27	328,26	48,22	30,10
15	583,11	85,88	56,85	223,21	166,40	33,82	348,52	36,03	30,77
16	530,18	309,94	170,36	331,12	347,86	193,67	351,94	40,50	20,53
17	352,95	168,74	75,75	162,63	68,55	211,12	331,74	30,30	259,86
18	482,65	52,67	69,98	363,01	46,68	109,45	349,72	121,03	103,81
19	280,67	106,39	80,83	142,53	45,68	229,22	229,83	79,03	132,05
20	502,89	182,89	151,67	301,42	43,66	21,67	334,01	48,11	139,96
21	572,91	39,19	48,77	289,86	37,01	20,08	342,18	40,84	178,55
22	340,42	31,27	32,06	197,73	35,12	28,06	53,91	35,09	24,02
23	159,41	63,59	37,85	122,08	72,17	16,20	157,76	29,89	16,06
24	340,14	32,95	25,24	167,21	35,38	23,55	141,72	32,22	16,98
25	345,75	104,05	52,60	260,19	36,30	37,37	153,87	32,94	25,52
26	153,63	54,31	22,56	273,88	30,74	27,34	84,14	34,49	31,94
27	72,94	26,76	17,55	76,10	26,64	17,25	67,07	22,19	13,56
28	316,25	70,61	33,70	137,78	35,31	21,39	85,13	30,25	16,19
29	476,58	198,62	129,98	411,00	239,50	64,24	272,84	44,41	52,42
30	154,38	25,61	14,79	121,74	23,02	15,60	42,16	20,96	12,23
31	526,31	321,70	73,11	234,93	141,09	36,23	97,29	31,84	20,41
32	373,86	103,56	54,70	347,01	150,91	203,64	317,62	89,78	36,98
33	671,93	131,27	81,69	189,45	268,88	49,43	310,09	38,61	22,80
34	385,54	42,28	40,16	153,84	34,77	40,16	297,54	33,36	21,90

35	638,72	103,96	191,29	219,98	101,22	50,52	302,74	169,13	45,25
36	556,51	136,51	50,08	300,23	417,12	71,52	326,04	48,33	142,94
37	364,36	62,65	20,93	263,14	49,83	54,45	159,56	51,40	229,99
38	623,79	351,33	185,30	303,31	88,74	28,71	200,41	179,83	40,46
39	100,90	37,90	28,16	124,49	28,86	160,57	69,78	32,16	129,02
40	566,63	278,51	140,31	296,23	70,70	120,16	184,58	159,86	54,55
41	556,73	165,15	59,35	312,50	40,27	202,69	315,92	52,60	30,00
42	380,15	74,48	43,53	203,56	142,65	15,96	312,32	85,85	54,12
43	417,89	64,16	162,30	366,48	106,42	46,41	350,34	126,64	152,08
44	446,69	91,68	29,97	301,46	176,09	138,91	370,63	153,63	54,65
45	551,52	627,68	99,56	203,23	51,70	27,85	322,47	44,96	21,88
46	515,51	418,93	18,75	328,17	106,83	131,23	226,35	58,73	20,55
47	586,99	149,66	129,78	419,45	132,78	18,21	304,51	147,58	61,72
48	261,44	57,48	23,84	250,15	256,69	17,81	268,19	26,96	16,26
49	132,29	48,43	29,09	353,47	261,25	102,07	212,87	44,30	28,83
50	359,44	53,52	51,34	311,04	126,34	23,36	310,74	45,04	31,42
51	15,66	10,62	11,97	21,99	21,11	13,10	20,04	41,60	213,46
52	334,97	115,40	74,08	425,67	110,28	79,45	286,65	249,94	22,14
53	239,81	56,76	20,32	282,58	310,55	22,16	537,03	178,16	142,09
54	311,20	42,69	24,63	332,88	230,50	138,09	357,77	276,03	49,22
55	384,81	90,08	24,81	349,20	229,01	22,10	260,25	315,68	24,43
56	201,34	59,02	13,06	386,16	145,56	16,20	116,39	50,94	37,06
57	402,25	67,64	18,10	478,62	65,00	33,82	184,30	53,06	47,26
58	465,85	81,78	21,35	532,56	291,64	31,06	132,47	243,23	56,98
59	336,77	52,80	18,13	266,74	193,88	18,26	316,33	161,44	18,36
60	552,35	56,17	55,04	429,75	116,22	17,20	257,32	61,51	31,82
61	697,95	379,04	147,05	288,08	392,36	38,22	313,19	82,64	31,24
62	500,87	352,34	25,79	346,15	349,98	25,40	346,59	63,13	39,96
63	126,09	52,35	12,81	342,70	241,66	13,09	83,73	67,23	18,71

Tabelle B.6: An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windbeschleunigung $\hat{a}_{0,4}$ in m/s^2 während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 0,4 s bearbeitet.

Zug	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9
1	16,26	11,59	10,25	12,69	12,86	8,60	15,47	8,63	8,14
2	20,66	16,45	12,48	18,12	18,09	10,56	10,82	8,74	5,78
3	29,04	21,27	12,51	13,95	9,20	6,72	12,78	8,10	6,08
4	35,52	12,93	8,98	17,87	13,30	9,15	14,74	10,80	8,32
5	24,73	26,25	9,75	20,24	13,23	7,72	22,25	11,60	6,97
6	30,18	14,22	7,95	19,14	13,61	8,52	19,33	16,73	7,47
7	30,75	19,81	9,85	18,72	13,93	8,58	16,46	12,71	8,73
8	32,13	18,46	11,72	17,29	17,00	11,96	15,20	15,73	12,18
9	35,25	12,68	8,37	16,26	11,64	8,40	18,23	9,62	9,31
10	27,01	17,97	8,57	13,94	16,98	13,24	13,04	14,05	9,70
11	33,23	20,65	11,47	20,17	16,90	18,00	23,85	19,11	16,18
12	32,26	24,80	8,74	17,84	12,53	10,35	20,00	11,61	14,73
13	33,76	21,92	11,01	12,21	11,06	7,27	13,72	9,14	6,46
14	45,90	28,53	10,57	21,99	15,58	11,56	23,46	12,26	9,71
15	34,27	13,26	8,03	16,51	10,72	8,25	15,55	9,36	9,99
16	33,88	21,90	18,30	18,70	24,40	22,31	17,02	11,66	6,54
17	22,54	8,82	7,00	14,73	11,48	10,95	19,57	8,09	14,18
18	26,90	14,31	7,71	14,07	10,69	8,17	13,62	9,70	7,42
19	23,13	12,94	16,51	14,06	9,56	13,30	13,63	9,68	7,32
20	36,95	23,03	10,84	14,22	10,46	7,66	14,25	14,16	11,55
21	26,18	10,95	7,58	15,08	12,68	7,24	19,01	13,79	8,88
22	24,22	9,65	12,55	14,28	11,34	8,78	12,84	14,86	7,89
23	24,91	14,77	10,01	11,41	9,09	5,82	15,06	8,03	5,45
24	34,32	9,56	8,79	16,20	9,43	8,64	11,90	9,22	5,45
25	26,12	16,69	12,06	16,15	12,10	10,41	16,14	8,83	8,03
26	18,79	11,84	7,39	15,59	16,27	8,88	13,48	10,28	9,12
27	18,16	8,29	6,34	11,71	7,44	5,53	13,07	7,05	6,13
28	21,19	16,70	12,04	15,85	14,18	10,41	15,34	11,47	5,89
29	34,37	19,88	18,44	30,83	23,11	18,83	16,30	13,94	15,39
30	15,57	7,18	5,45	11,57	8,03	5,92	13,83	6,97	6,17
31	41,66	32,76	14,47	16,98	15,68	13,01	11,56	8,82	6,26
32	22,72	19,26	13,72	21,21	22,69	23,95	19,70	19,27	9,01
33	32,61	17,75	17,14	14,21	12,94	11,11	13,76	9,71	6,66
34	27,20	10,26	11,89	16,44	9,60	15,12	16,44	8,69	7,87

35	29,70	22,44	17,26	19,58	20,12	13,62	22,62	17,53	12,22
36	33,36	20,60	11,54	22,14	22,33	16,34	22,50	11,58	18,10
37	30,64	16,32	7,66	14,37	16,80	11,72	14,88	14,02	12,65
38	36,72	30,10	19,50	19,20	17,77	9,87	20,23	15,54	12,96
39	17,14	11,80	6,05	14,41	9,15	10,00	15,96	8,31	7,12
40	36,77	26,68	20,48	24,74	16,02	15,74	20,92	17,03	14,52
41	36,27	14,99	10,61	15,26	13,29	11,94	16,09	14,77	10,02
42	31,34	7,86	6,27	11,31	8,56	5,89	20,16	8,76	5,69
43	19,70	12,42	9,22	14,67	10,31	9,54	28,40	11,13	7,63
44	33,68	15,07	8,78	20,86	11,54	9,24	18,83	15,91	9,34
45	34,61	31,13	14,38	17,23	16,48	9,96	19,22	12,32	8,42
46	27,94	16,20	5,93	16,95	16,55	7,32	14,08	16,68	6,95
47	23,24	11,65	7,17	22,12	18,33	7,94	16,73	18,97	8,22
48	24,96	12,94	5,63	21,12	16,81	6,73	12,13	8,22	7,92
49	17,38	9,60	6,39	21,71	16,27	8,35	23,74	12,72	12,05
50	26,98	9,18	6,67	23,79	17,52	7,39	17,92	14,28	9,31
51	5,46	6,15	4,33	6,47	5,08	5,91	6,61	6,79	10,89
52	26,13	8,91	7,12	22,03	13,42	11,44	23,33	14,75	7,41
53	22,48	12,59	7,11	18,55	17,56	8,06	28,22	14,61	13,48
54	28,53	8,99	9,12	36,06	19,71	18,50	18,70	18,51	11,70
55	24,39	14,69	7,29	24,52	21,97	8,48	19,31	20,16	7,60
56	32,64	15,93	4,97	29,49	14,58	6,18	17,93	11,77	9,28
57	24,59	12,22	7,87	34,55	12,24	8,75	18,16	12,46	8,87
58	36,76	13,41	6,82	28,85	21,50	13,39	21,37	23,09	13,45
59	22,45	8,89	6,28	23,40	13,21	7,03	22,45	12,24	6,47
60	24,38	11,86	8,33	22,75	15,44	6,32	22,02	18,21	11,31
61	32,15	17,05	9,50	22,04	26,58	10,53	23,10	21,53	9,32
62	35,16	17,38	8,75	27,98	24,78	9,95	15,24	18,16	10,96
63	16,67	9,55	6,04	18,06	15,84	6,36	15,44	17,54	7,18

Tabelle B.7: An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Windbeschleunigung $\hat{a}_1$ in m/s^2 während der Passage der Züge Nr. 1 bis 63. Die zugrunde liegenden Daten wurden durch gleitende Mittelwertbildung mit einem Zeitintervall von 1,0 s bearbeitet.

Zug	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9
1	7,21	6,09	5,56	5,96	5,54	4,42	7,20	4,30	4,45
2	7,46	10,37	6,57	7,24	10,28	5,35	5,32	3,29	2,41
3	11,15	10,12	5,26	5,88	3,69	2,69	5,77	3,25	2,33
4	14,64	7,49	3,33	8,07	6,51	4,31	8,19	4,03	3,58
5	8,65	11,73	4,21	7,68	5,12	3,61	8,23	5,59	2,77
6	14,57	5,79	4,23	9,38	7,01	3,56	8,03	5,91	4,30
7	12,59	6,66	4,78	9,93	6,53	3,88	6,97	6,53	3,90
8	14,87	7,35	6,01	7,64	9,19	6,37	9,08	7,94	4,69
9	11,15	7,58	4,45	5,13	3,81	3,46	9,44	5,19	4,67
10	8,36	6,68	4,53	8,47	9,47	6,86	6,34	5,72	5,09
11	11,95	6,84	7,14	10,12	7,10	6,75	9,09	7,97	8,37
12	13,72	11,13	3,79	8,97	5,49	4,15	11,04	5,57	6,09
13	10,28	7,17	4,86	7,62	4,70	3,63	7,45	5,29	3,58
14	14,98	9,39	5,16	10,34	6,39	5,03	7,72	6,90	5,33
15	14,76	7,91	4,27	8,07	5,00	3,82	6,09	5,03	4,79
16	10,72	11,59	7,53	10,38	10,50	8,83	6,12	4,14	2,52
17	9,49	4,14	2,87	7,04	4,37	4,90	10,73	3,42	5,76
18	12,49	5,64	3,31	8,15	4,27	3,35	7,28	4,16	3,14
19	9,53	9,13	8,91	5,89	4,88	5,61	5,21	5,77	2,88
20	13,26	10,01	5,38	10,04	4,63	3,25	8,25	5,84	4,82
21	12,29	5,72	3,48	6,30	5,01	3,04	7,66	5,27	3,54
22	9,48	4,33	5,02	6,11	4,44	3,69	7,27	6,57	3,50
23	7,90	7,79	5,93	5,96	3,20	2,58	5,78	3,05	2,25
24	11,09	4,85	3,02	6,81	4,51	3,94	5,56	4,08	2,32
25	7,97	9,24	4,61	7,51	4,25	4,13	9,10	3,51	2,92
26	8,44	5,18	3,35	9,09	8,19	3,70	6,49	4,86	3,34
27	7,71	3,39	2,90	5,37	3,19	2,38	6,56	2,93	2,14
28	8,13	7,33	4,84	6,23	6,43	3,49	6,19	5,43	2,55
29	14,38	9,06	8,95	12,01	8,81	9,00	9,75	7,41	6,24
30	7,20	3,17	2,32	4,73	3,28	2,29	4,26	3,08	2,22
31	13,04	13,25	6,39	8,39	5,36	5,16	5,77	4,14	2,50
32	10,71	10,15	6,92	12,17	10,65	8,57	8,43	7,90	3,95
33	12,42	10,27	8,27	6,30	4,28	5,49	6,50	4,14	3,24

34	7,79	7,21	6,55	8,33	5,75	5,19	7,40	4,85	3,13
35	14,15	12,63	8,61	12,49	7,60	7,28	7,53	6,46	4,67
36	15,83	9,73	6,34	8,71	7,97	7,85	8,24	7,17	8,10
37	14,36	8,91	3,39	8,81	7,70	7,51	9,94	6,18	6,20
38	13,53	10,64	8,86	8,73	7,32	4,98	9,78	8,50	4,51
39	8,93	5,52	2,93	7,11	5,22	3,96	6,60	3,51	3,28
40	11,49	11,08	11,37	9,32	8,12	7,53	9,38	7,08	6,70
41	16,04	5,95	4,05	8,74	6,11	4,57	7,76	7,14	4,13
42	9,55	4,29	3,51	5,40	4,75	2,51	7,31	3,29	2,23
43	9,39	6,97	4,06	10,57	6,47	3,16	13,06	5,85	2,82
44	14,45	8,43	3,49	7,20	6,34	3,56	9,77	6,69	4,51
45	15,18	12,23	7,13	7,61	8,26	6,88	8,89	6,68	3,74
46	10,34	6,72	2,33	6,86	5,40	2,70	6,73	7,22	2,95
47	12,32	3,51	2,54	8,69	6,66	2,82	9,95	7,33	2,87
48	10,78	5,55	2,18	8,07	5,48	2,99	6,44	4,16	2,72
49	9,43	3,22	2,72	10,69	5,22	3,33	9,15	7,25	5,27
50	13,64	3,26	2,85	10,40	4,45	3,96	7,19	5,85	5,18
51	2,55	2,58	2,17	2,53	2,44	2,35	3,14	3,12	4,42
52	16,79	3,98	2,87	11,55	4,28	3,73	13,10	8,47	4,29
53	12,07	3,99	2,52	8,43	4,78	3,96	9,85	7,68	6,40
54	12,72	4,68	4,50	12,55	9,16	6,14	9,92	8,10	6,65
55	14,70	5,09	2,85	12,16	6,25	3,63	8,36	8,25	3,49
56	10,45	5,72	2,13	9,31	5,77	2,42	7,15	5,29	4,07
57	11,75	4,93	3,11	11,49	6,51	3,50	9,47	6,46	3,79
58	12,98	5,57	3,71	13,03	8,97	4,55	9,39	8,63	4,30
59	11,09	2,90	2,28	11,64	5,90	2,98	9,95	4,12	2,58
60	13,71	4,32	3,13	6,69	6,24	2,46	8,39	7,62	3,54
61	13,69	5,08	3,78	9,80	7,78	4,00	10,73	8,73	4,67
62	15,45	6,11	3,39	11,72	7,79	4,67	10,22	7,54	5,63
63	8,62	3,55	2,17	8,37	5,25	2,82	7,52	7,29	2,43

Tabelle B.8: An den Positionen 1 bis 9 gemessene maximale Druckdifferenz Δp in mbar während der Passage der Spitzen der Züge Nr. 1 bis 63. Die maximalen Druckdifferenzen wurden aus ungemittelten Daten bestimmt.

Zug	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9
1	2,87	1,60	1,10	2,49	1,53	1,05	2,49	1,45	0,95
2	3,13	1,86	1,26	3,02	1,81	1,21	3,03	1,61	1,09
3	2,57	1,51	1,02	2,44	1,44	0,97	2,44	1,37	0,89
4	3,04	1,51	1,04	2,33	1,41	1,03	2,35	1,35	0,95
5	3,80	2,11	1,45	3,40	1,98	1,37	3,23	1,88	1,28
6	4,55	2,27	1,59	3,87	2,14	1,53	3,68	2,00	1,38
7	2,28	1,25	0,91	2,36	1,23	0,81	2,42	1,17	0,80
8	3,20	1,61	1,15	2,79	1,53	1,08	2,49	1,52	1,03
9	3,37	1,99	1,42	3,43	1,91	1,33	3,59	1,86	1,25
10	3,41	1,96	1,41	3,08	1,88	1,31	3,14	1,78	1,20
11	1,17	0,55	0,39	0,97	0,54	0,37	0,81	0,51	0,37
12	4,83	2,42	1,64	3,67	2,31	1,60	3,79	2,17	1,45
13	2,71	1,59	1,11	2,61	1,50	1,06	2,86	1,42	0,96
14	4,52	2,59	1,83	4,04	2,51	1,70	4,08	2,31	1,58
15	2,94	1,47	1,04	2,20	1,41	0,98	2,33	1,32	0,91
16	3,30	1,90	1,33	3,28	1,87	1,29	3,58	1,74	1,22
17	4,41	1,74	1,24	2,61	1,71	1,19	2,81	1,65	1,07
18	4,16	2,57	1,81	4,02	2,48	1,73	4,05	2,29	1,57
19	2,43	1,45	1,03	2,37	1,42	0,98	2,62	1,29	0,88
20	3,32	2,03	1,43	3,18	1,91	1,36	3,09	1,79	1,23
21	3,25	1,99	1,35	3,27	1,84	1,30	2,99	1,71	1,20
22	2,35	1,56	1,12	2,31	1,48	1,06	2,30	1,39	0,98
23	2,20	1,34	0,93	2,06	1,25	0,87	2,12	1,21	0,81
24	2,52	1,46	1,01	2,41	1,40	0,96	2,42	1,29	0,88
25	3,87	2,33	1,59	3,80	2,26	1,54	3,72	2,14	1,40
26	2,42	1,44	0,97	2,36	1,41	0,93	2,37	1,32	0,86
27	2,44	1,54	1,08	2,51	1,51	1,07	2,26	1,43	0,98
28	2,55	1,64	1,16	2,70	1,62	1,13	2,54	1,55	1,07
29	3,94	2,22	1,60	4,31	2,19	1,50	3,61	2,09	1,44
30	2,18	1,34	0,95	2,14	1,33	0,90	1,96	1,23	0,84
31	3,01	1,78	1,21	2,99	1,73	1,15	2,86	1,58	1,09
32	4,11	2,41	1,66	3,91	2,38	1,61	3,90	2,21	1,47
33	3,30	1,97	1,36	3,42	1,87	1,29	3,79	1,81	1,18
34	3,29	1,93	1,32	3,22	1,88	1,27	3,22	1,77	1,17

35	1,26	0,56	0,39	0,80	0,54	0,38	0,80	0,50	0,33
36	4,99	2,58	1,83	4,47	2,47	1,75	4,13	2,32	1,54
37	2,90	1,90	1,36	2,92	1,88	1,35	2,90	1,82	1,26
38	3,12	1,89	1,33	3,09	1,87	1,30	3,13	1,89	1,24
39	2,86	1,89	1,32	2,90	1,86	1,28	2,71	1,76	1,16
40	2,17	1,68	0,83	2,02	1,14	0,84	1,73	1,04	0,71
41	3,93	2,34	1,67	3,61	2,31	1,57	3,76	2,17	1,50
42	2,56	1,47	1,03	2,42	1,43	1,02	2,64	1,34	0,94
43	4,87	2,77	1,92	4,48	2,67	1,77	4,18	2,50	1,62
44	3,81	2,31	1,59	3,81	2,18	1,51	3,52	2,04	1,38
45	3,26	1,80	1,27	2,84	1,67	1,20	2,75	1,61	1,09
46	3,40	1,95	1,14	3,70	1,93	1,12	3,13	1,72	1,09
47	3,39	2,16	1,19	3,29	1,99	1,17	3,09	1,71	1,10
48	2,41	1,35	0,76	2,40	1,33	0,77	2,24	1,13	0,73
49	2,04	0,98	0,63	2,40	1,21	0,67	2,52	1,18	0,70
50	3,83	1,81	1,18	3,58	1,95	1,20	3,38	1,82	1,19
51	2,74	1,25	0,81	2,47	1,42	0,04	0,08	0,07	0,03
52	3,83	1,98	1,23	3,89	1,99	1,18	3,71	1,85	1,17
53	3,30	1,62	1,03	3,06	1,78	1,03	2,85	1,59	0,99
54	2,37	0,96	0,62	2,26	1,13	0,64	1,72	0,99	0,57
55	4,47	2,21	1,45	4,17	2,84	1,44	3,93	2,17	1,36
56	2,30	1,27	0,69	2,25	1,30	0,71	2,14	1,08	0,69
57	2,35	1,04	0,65	2,09	1,59	0,66	1,84	1,05	0,59
58	2,31	1,10	0,64	2,12	1,70	0,66	1,77	0,95	0,62
59	3,43	1,68	1,08	3,26	1,79	1,07	2,98	1,63	1,02
60	3,31	1,67	1,06	3,16	1,72	1,07	3,13	1,60	1,00
61	4,00	2,26	1,39	3,89	3,07	1,39	3,65	1,98	1,28
62	4,45	3,05	1,53	4,25	3,12	1,52	3,82	2,25	1,45
63	2,19	1,10	0,63	2,13	1,16	0,62	1,94	0,97	0,61

B.2 Grafiken

B.2.1 Messdatenauswertung

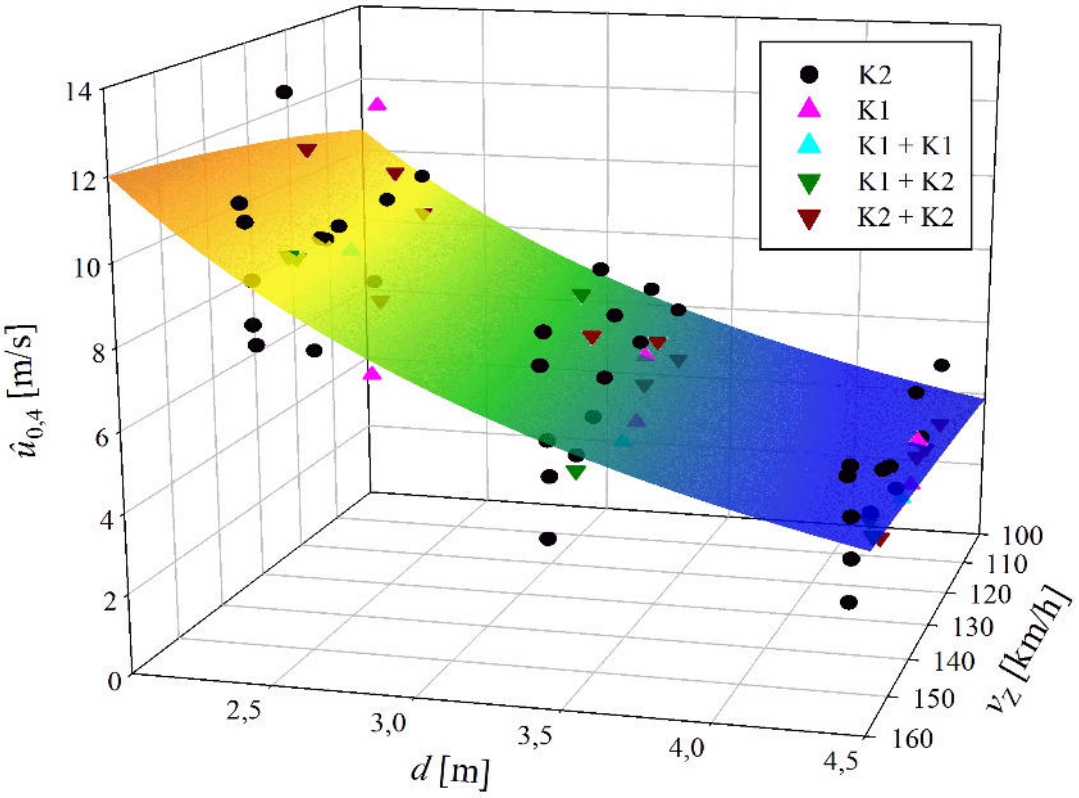


Abbildung B.1: $\hat{u}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}688$.

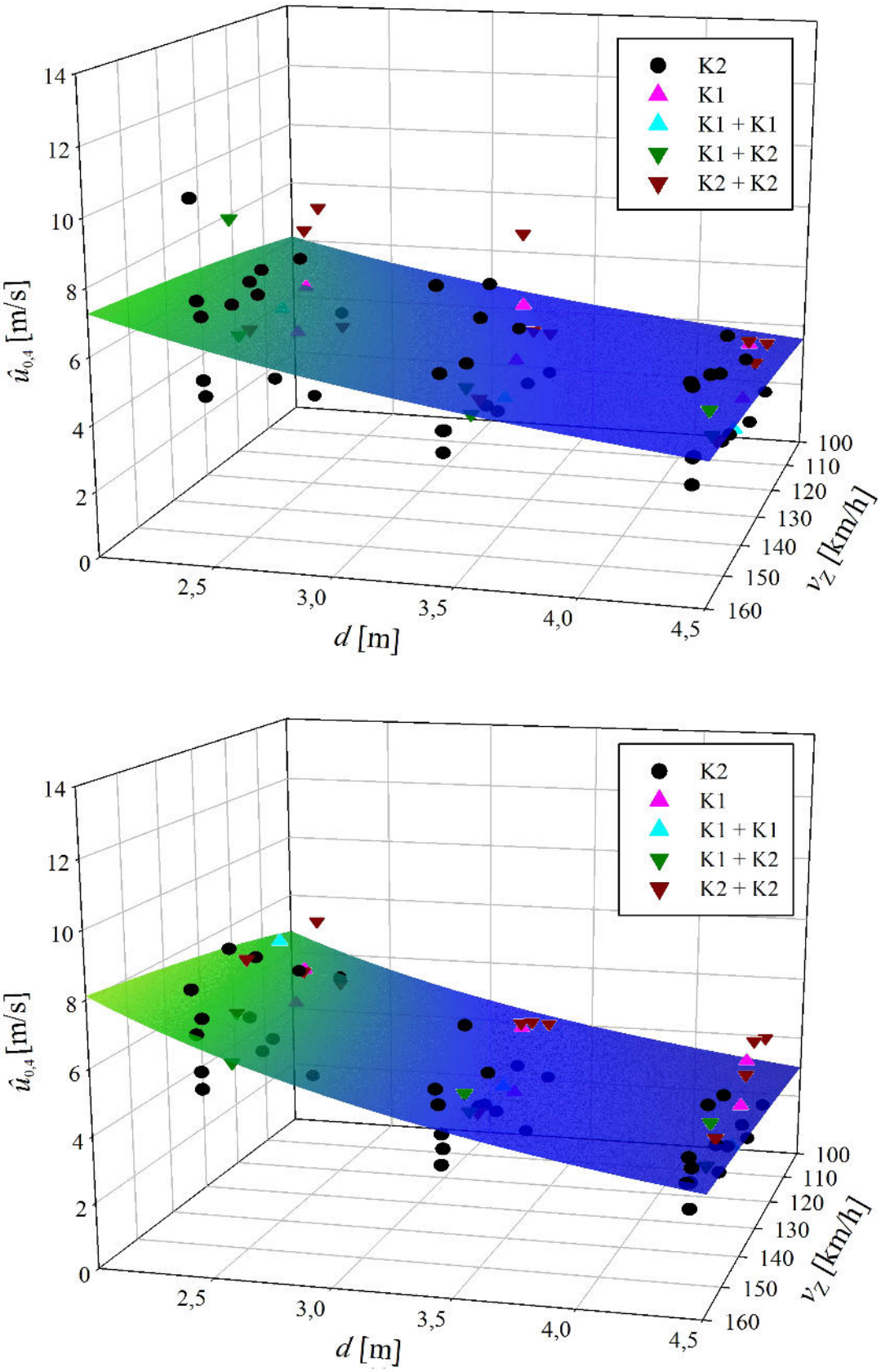


Abbildung B.2: $\hat{u}_{0,4}$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}281$. Unten: $R^2 = 0{,}563$.

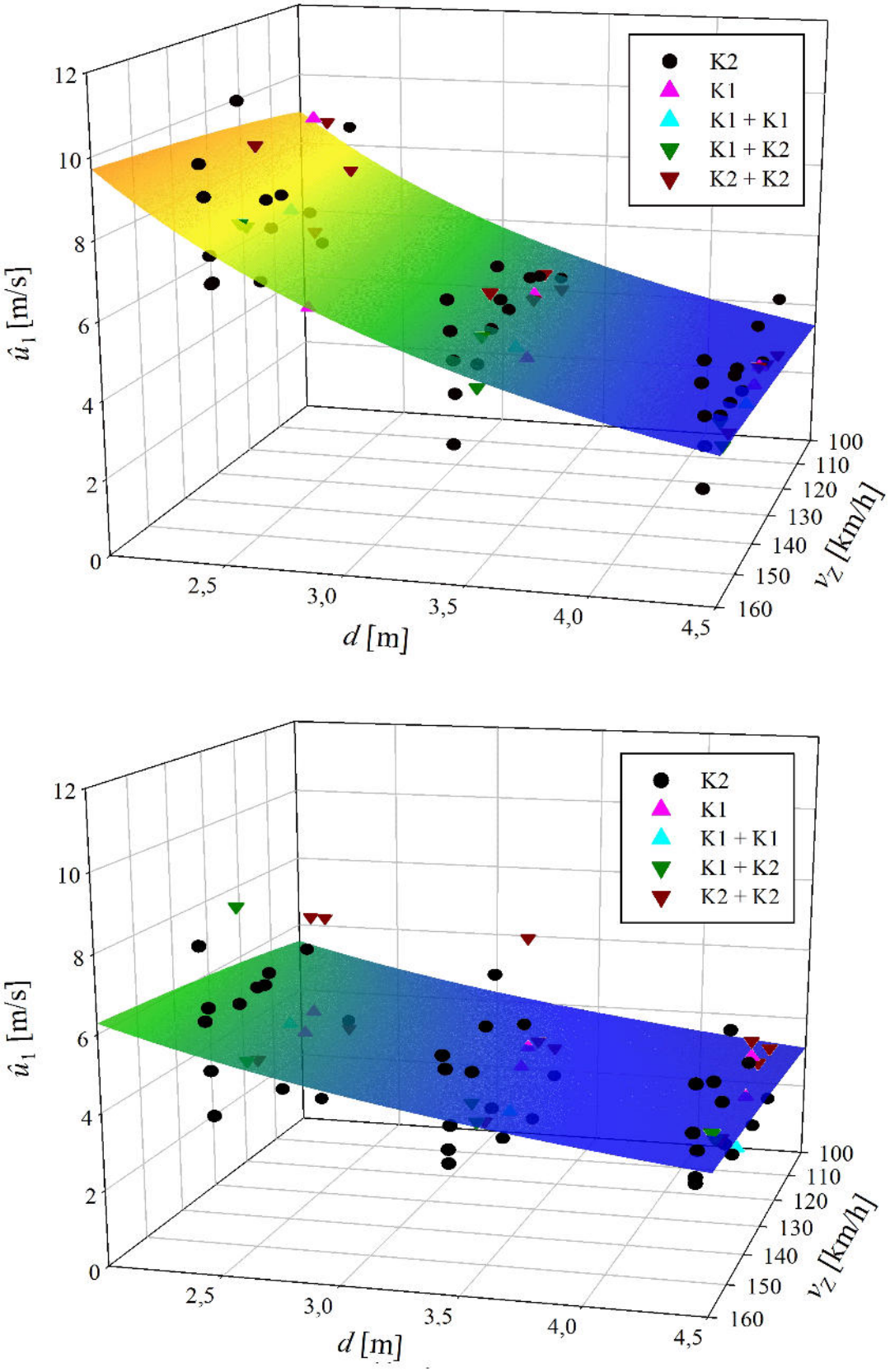


Abbildung B.3: $\hat{u}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}714$. Unten: $R^2 = 0{,}273$.

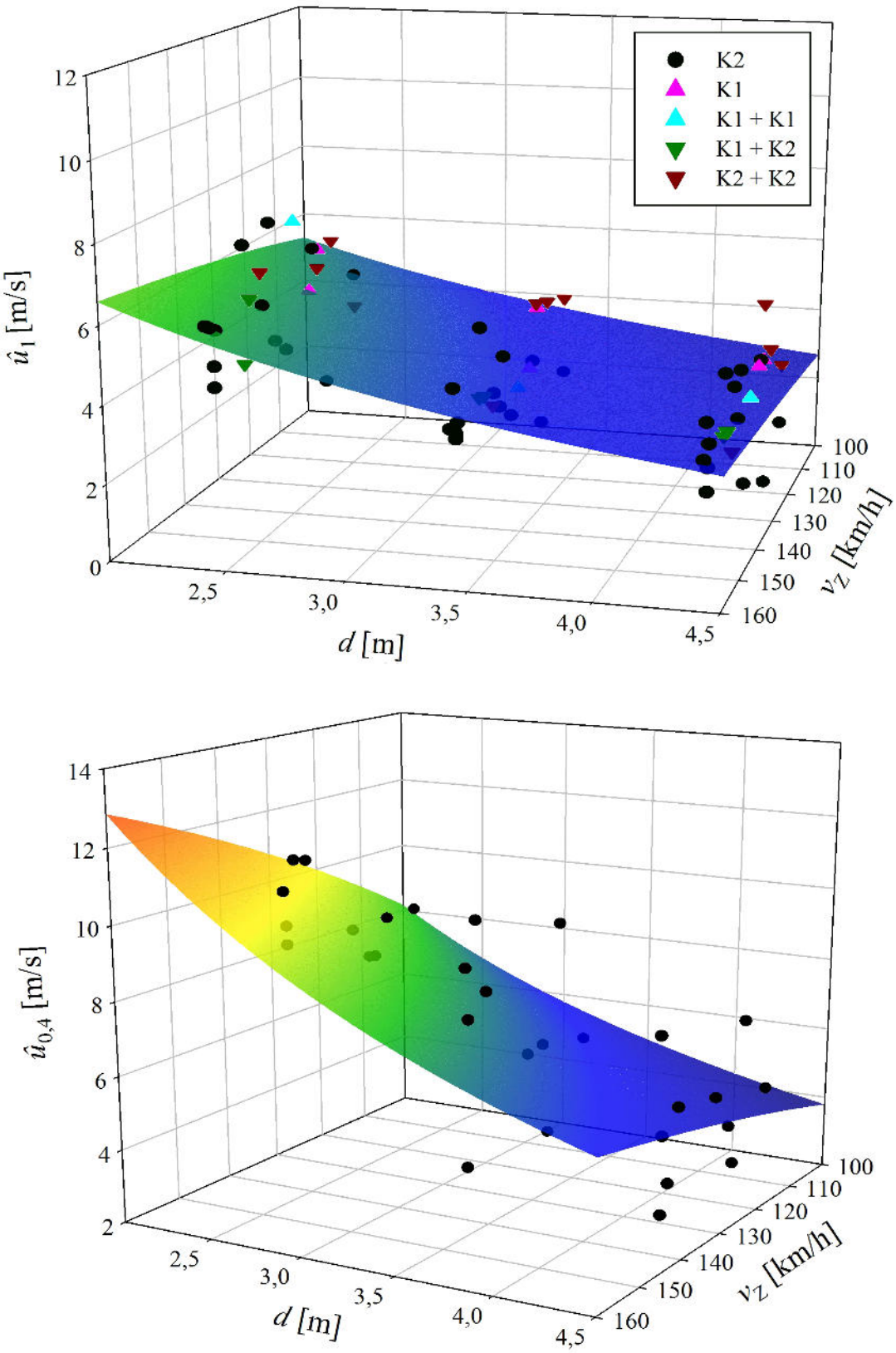


Abbildung B.4: $\hat{u}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten, $R^2 = 0{,}406$ (oben). $\hat{u}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten, $R^2 = 0{,}563$ (unten).

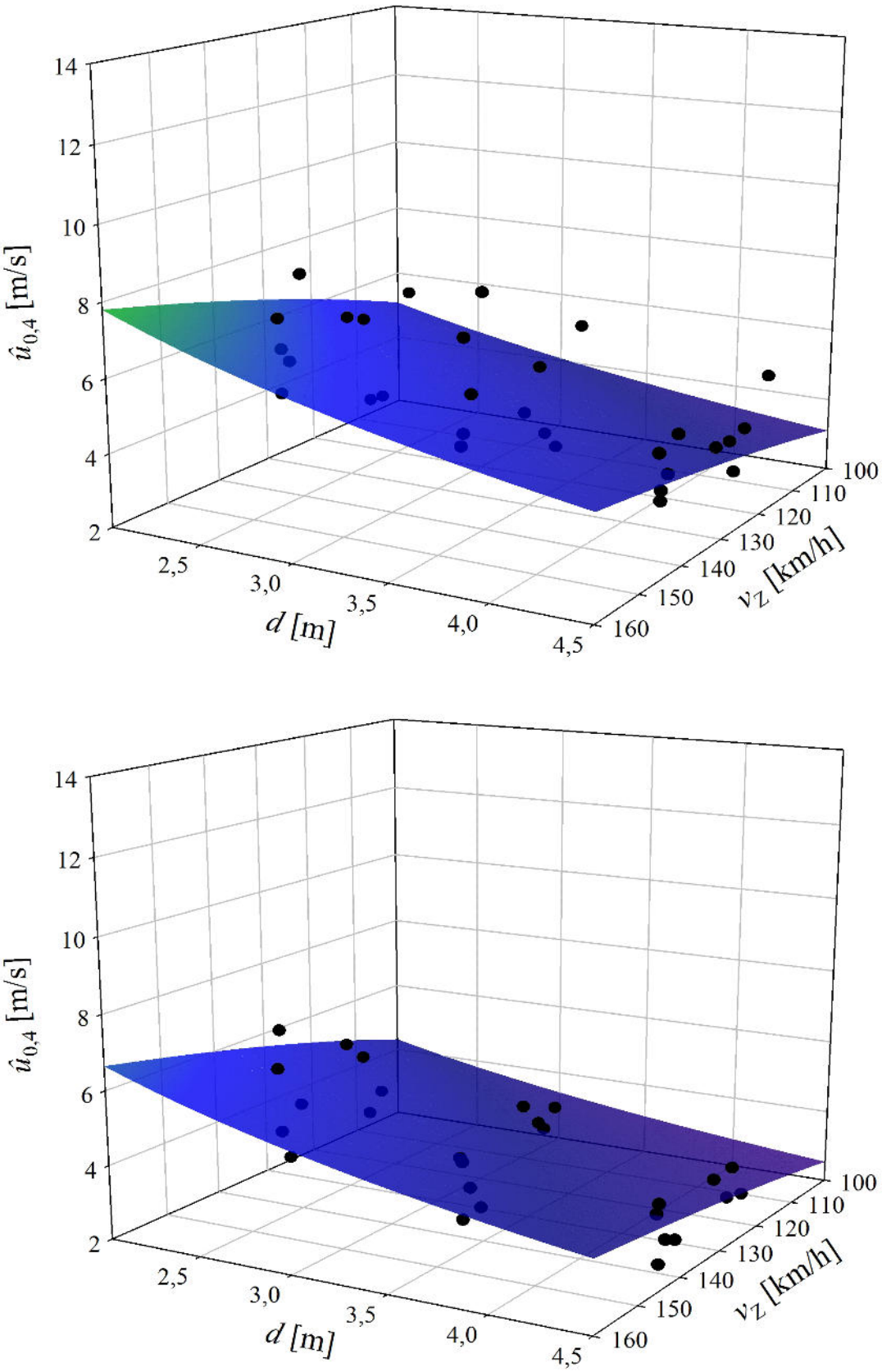


Abbildung B.5: $\hat{u}_{0,4}$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 0{,}4\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}211$. Unten: $R^2 = 0{,}354$.

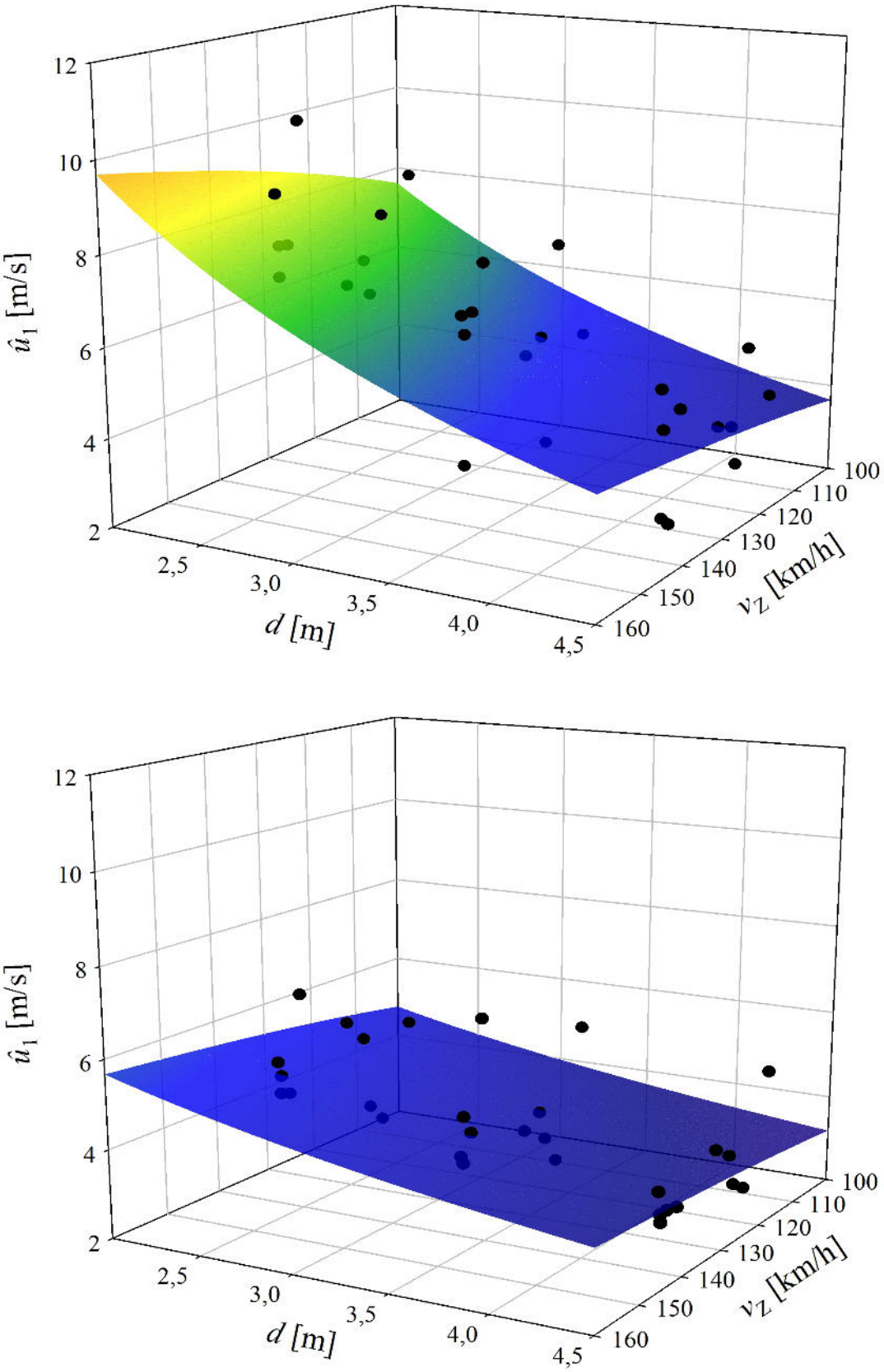


Abbildung B.6: $\hat{u}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. Oben: $R^2 = 0{,}551$. Unten: $R^2 = 0{,}256$.

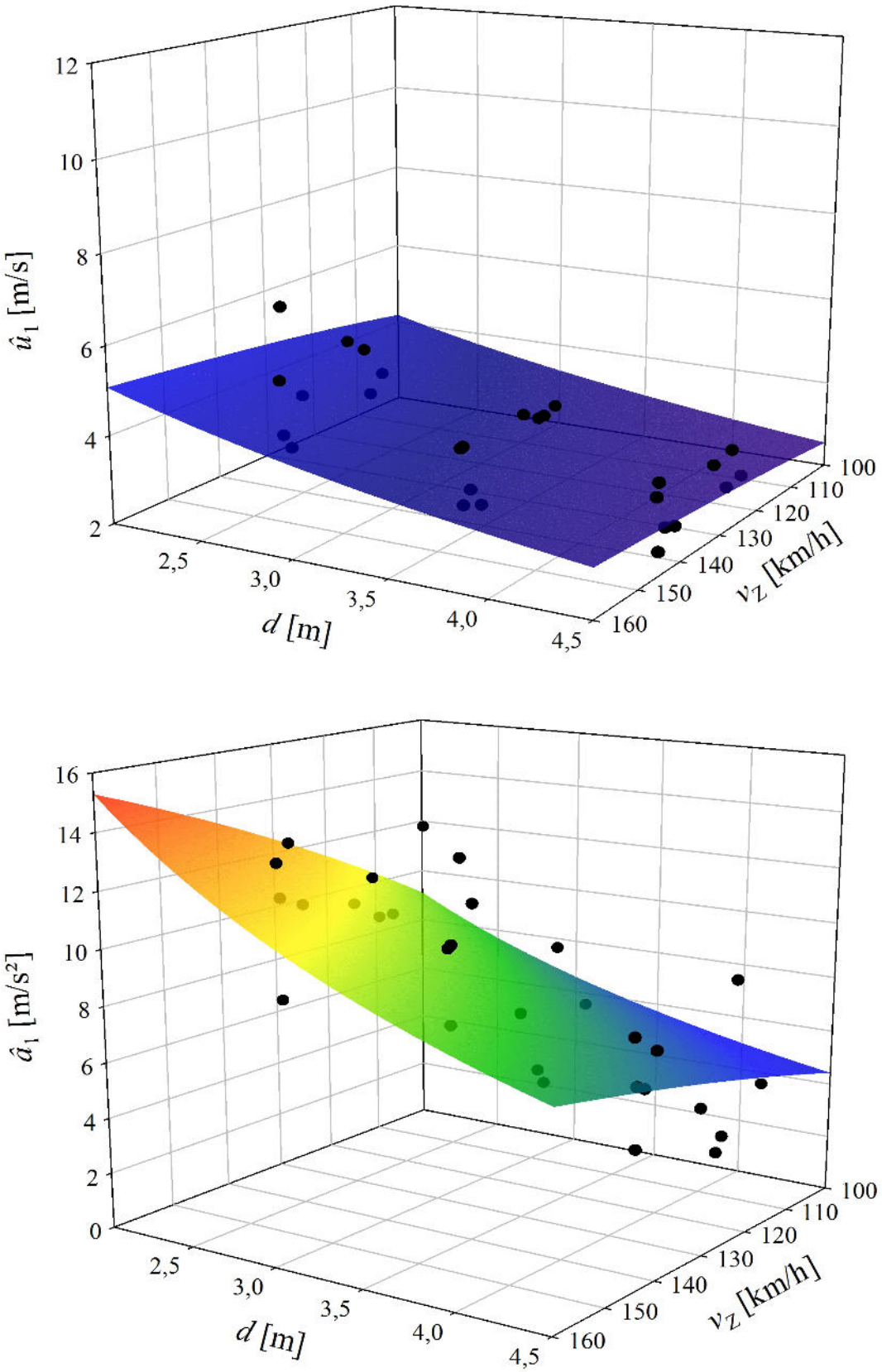


Abbildung B.7: $\hat{u}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $\hat{a}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 0{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Gleis- oberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}346$ (oben), $R^2 = 0{,}599$ (unten).

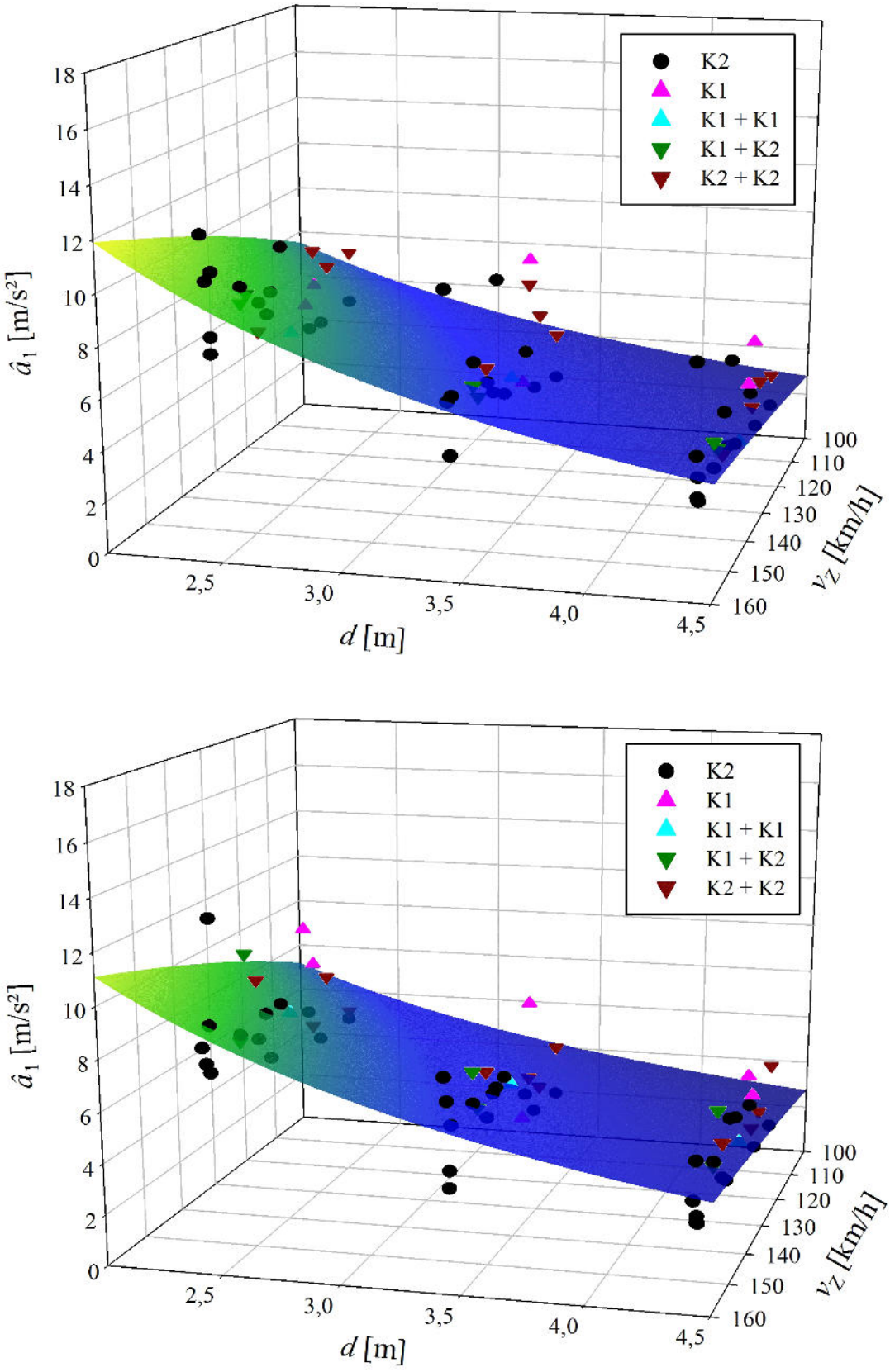


Abbildung B.8: $\hat{a}_1$ für die Doppelstockzüge Baureihe 446 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}553$ (oben), $R^2 = 0{,}654$ (unten).

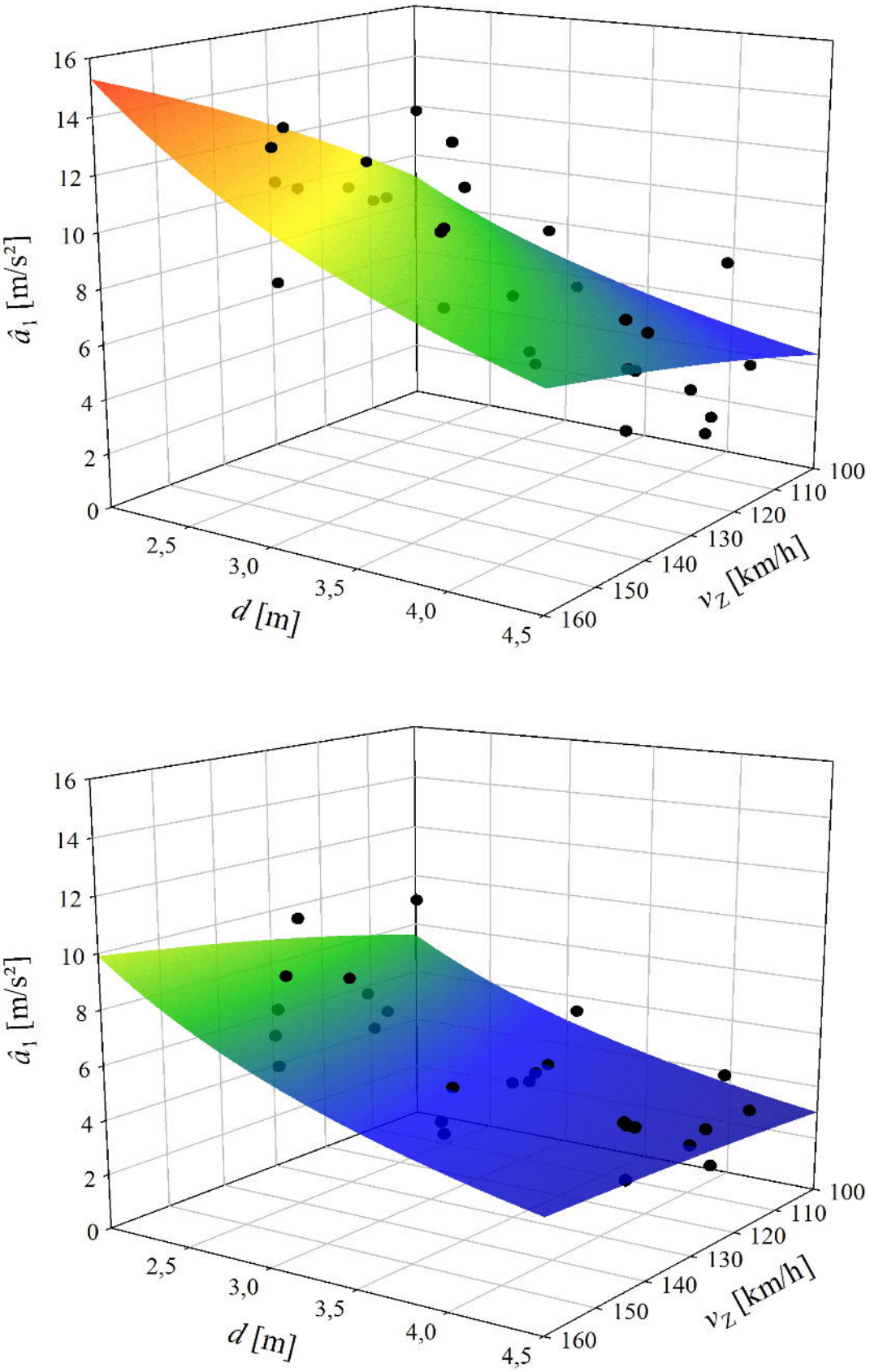


Abbildung B.9: $\hat{a}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 1{,}43\,\mathrm{m}$ (oben) und $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ (unten) Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}512$ (oben), $R^2 = 0{,}432$ (unten).

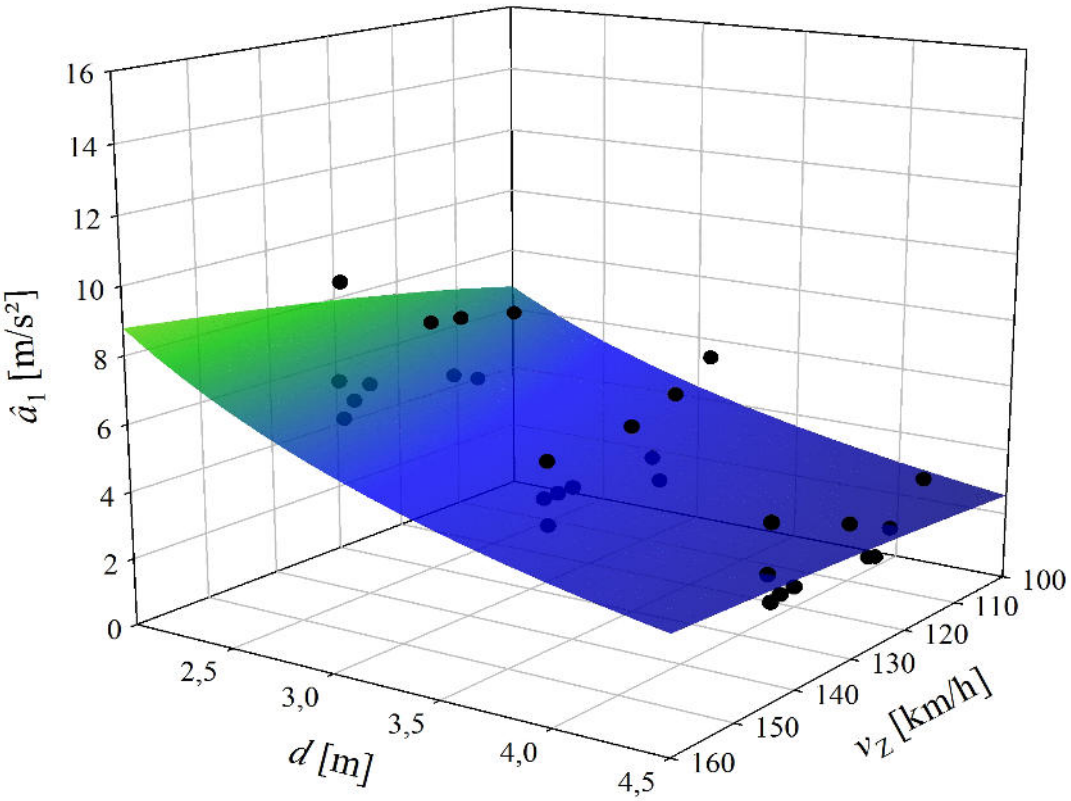


Abbildung B.10: $\hat{a}_1$ für die S-Bahnen Baureihe 425 in $z = 2{,}43\,\mathrm{m}$ Höhe über der Schienenoberkante in Abhängigkeit von v_Z und d für die mit $\Delta t = 1{,}0\,\mathrm{s}$ gleitend gemittelten Messdaten. $R^2 = 0{,}636$.

B.2.2 Messdatendiagramme

Messposition	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z [m]	0,43	0,43	0,43	1,43	1,43	1,43	2,43	2,43	2,43
d [m]	2,40	3,40	4,40	2,40	3,40	4,40	2,40	3,40	4,40

Tabelle B.9: Definition der Messpositionen 1 bis 9. Die Messpositionen befinden sich vollständig in einer vertikalen Ebene, die orthogonal zur Fahrtrichtung der Züge ist. Die Werte in der Tabelle sind mit einer Unsicherheit von ±0,05 m behaftet.

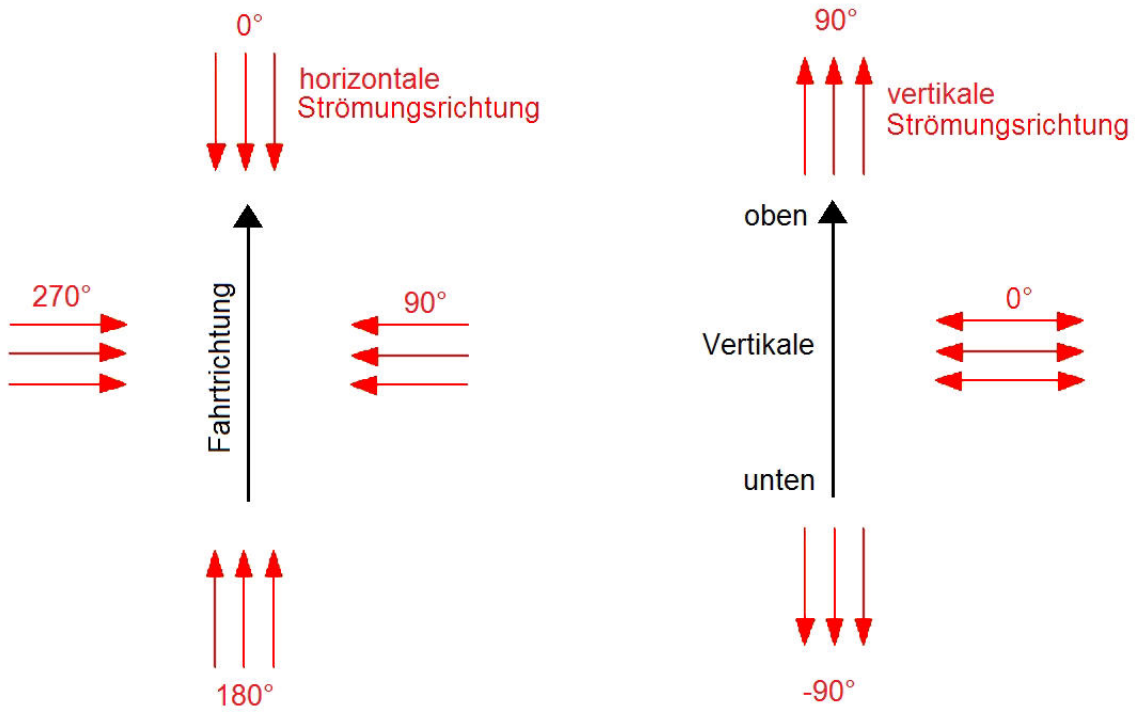


Abbildung B.11: Defintion der horizontalen und vertikalen Strömungsrichtung.

B.2.2.1 Ohne Feste Absperrung

Zug 1: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

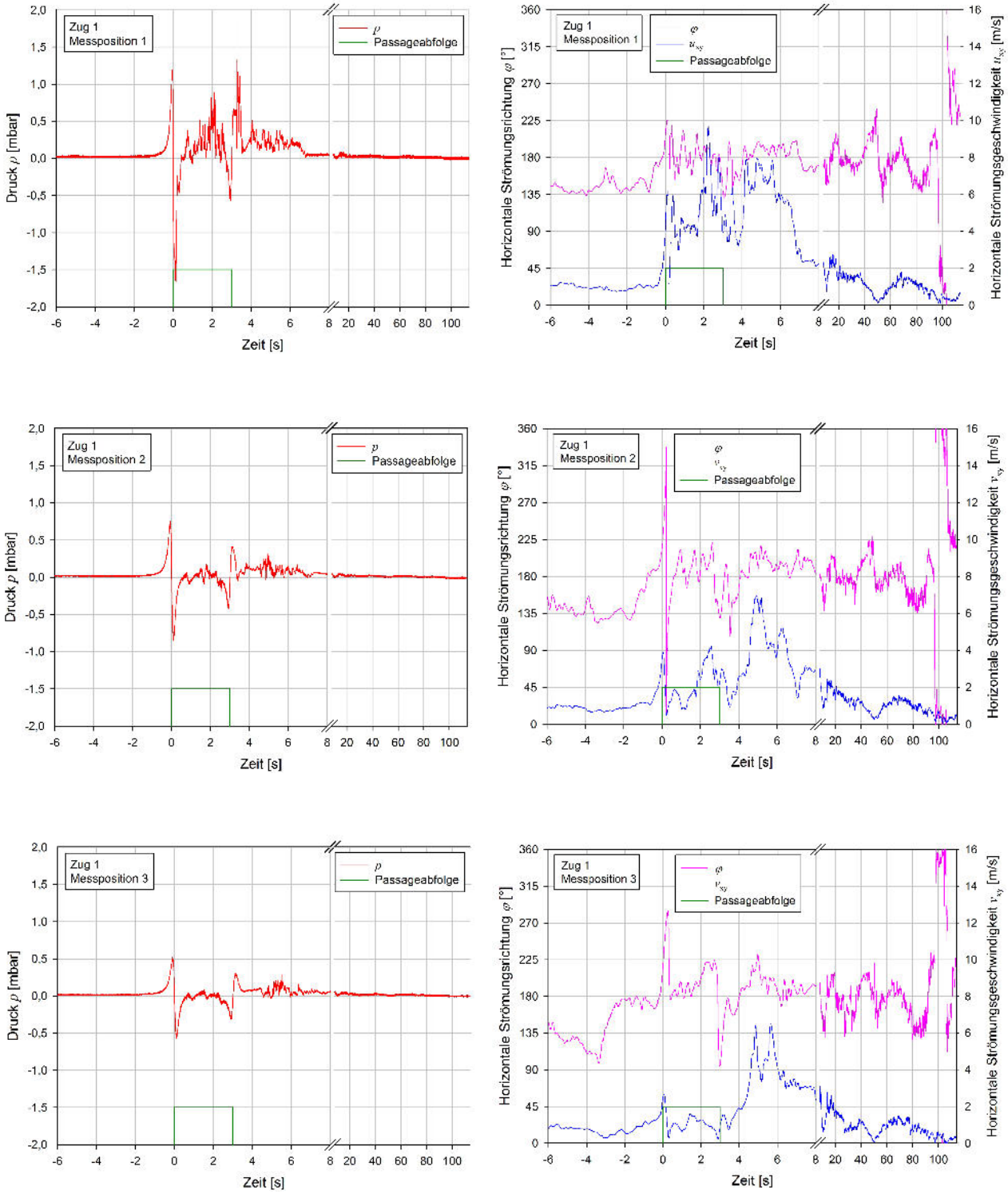


Abbildung B.12: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 1 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

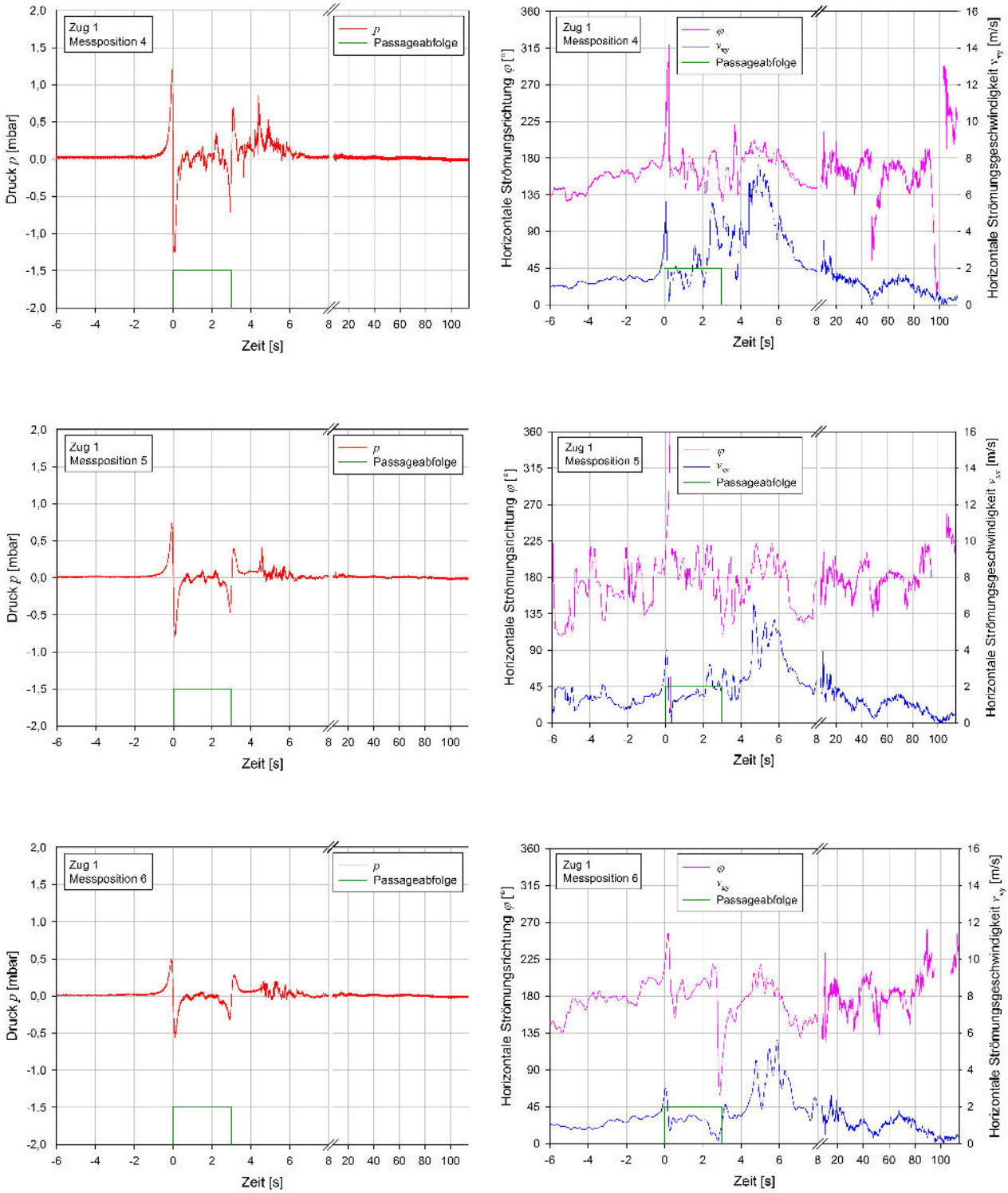


Abbildung B.13: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 1 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

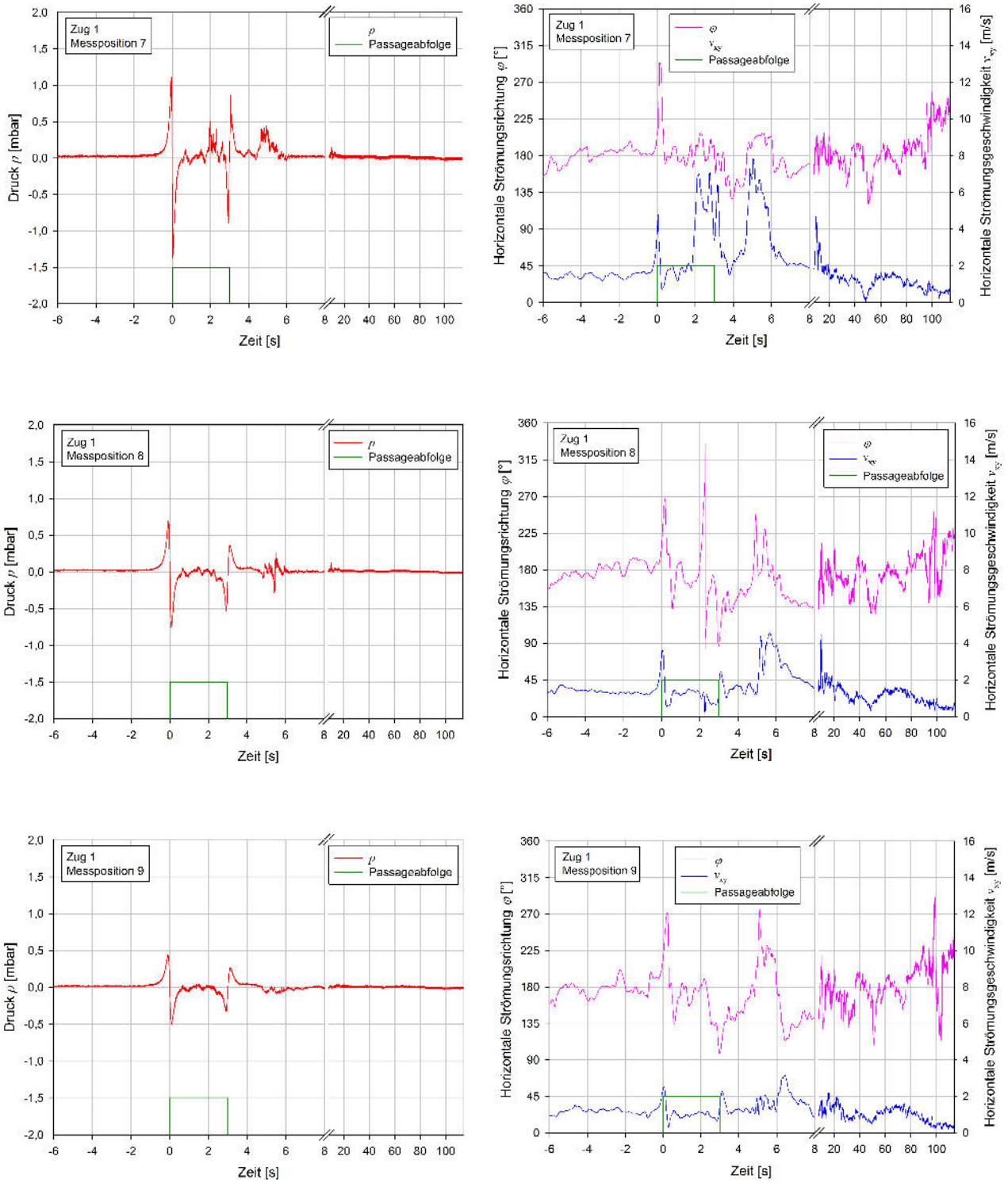
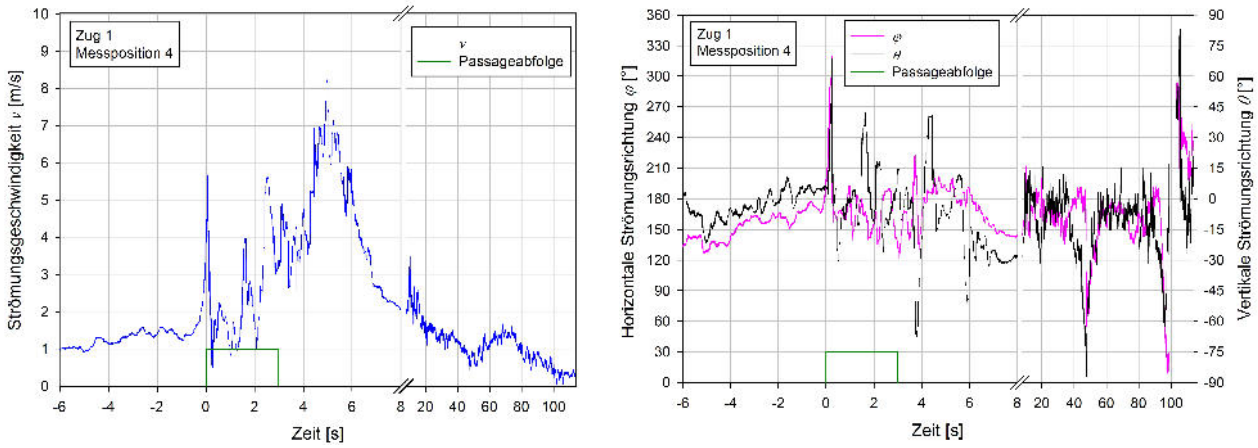


Abbildung B.14: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 1 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.



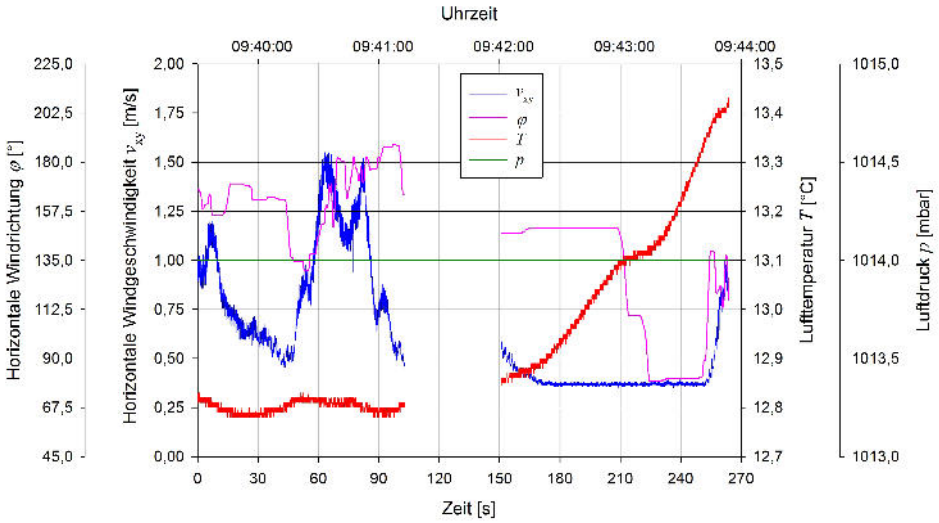




Abbildung B.15: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 1 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 1 ($\bar{v} = 124{,}2 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$).

Zug 2: S-Bahn (Baureihe 425)

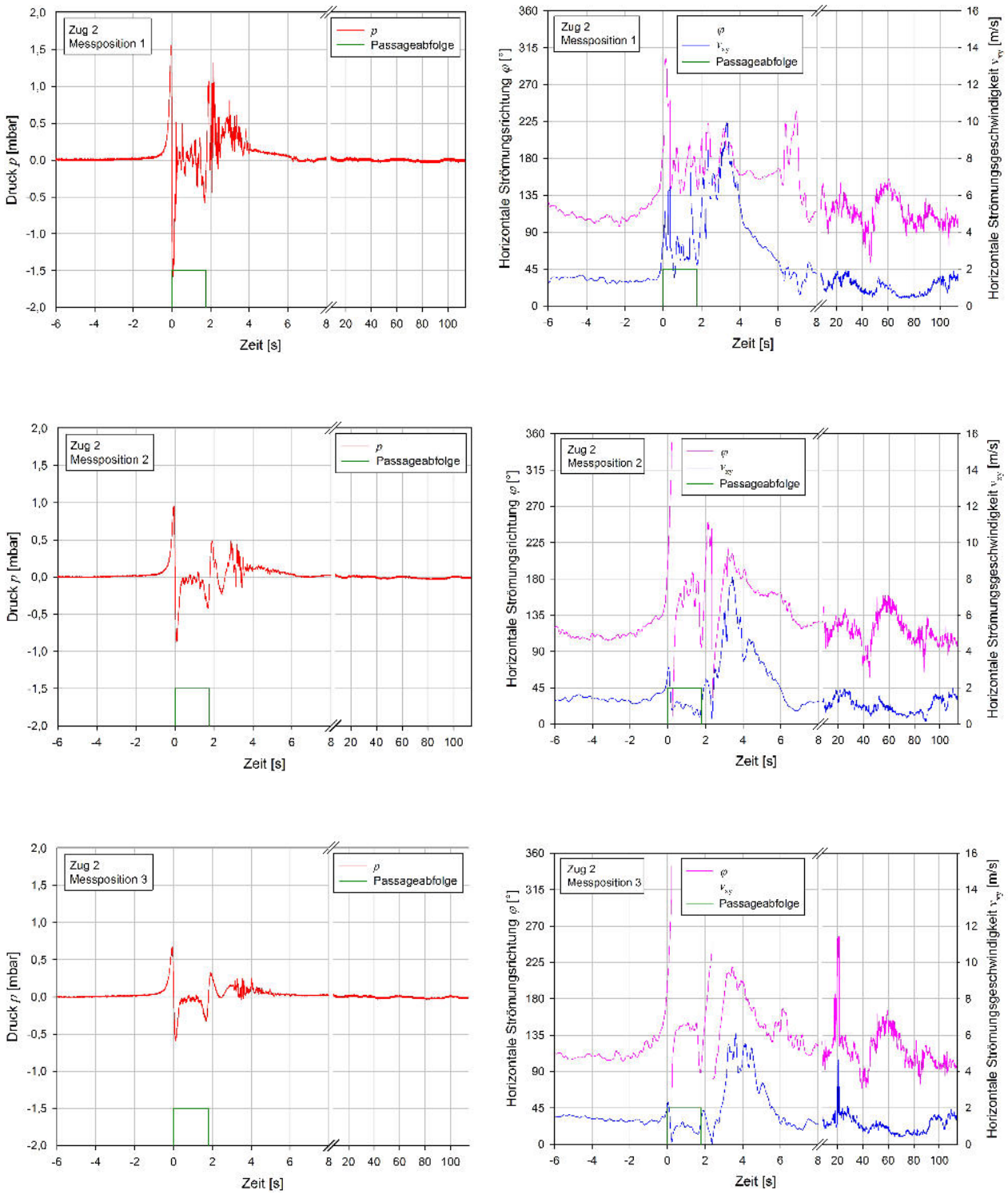


Abbildung B.16: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 2 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8{,}6 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

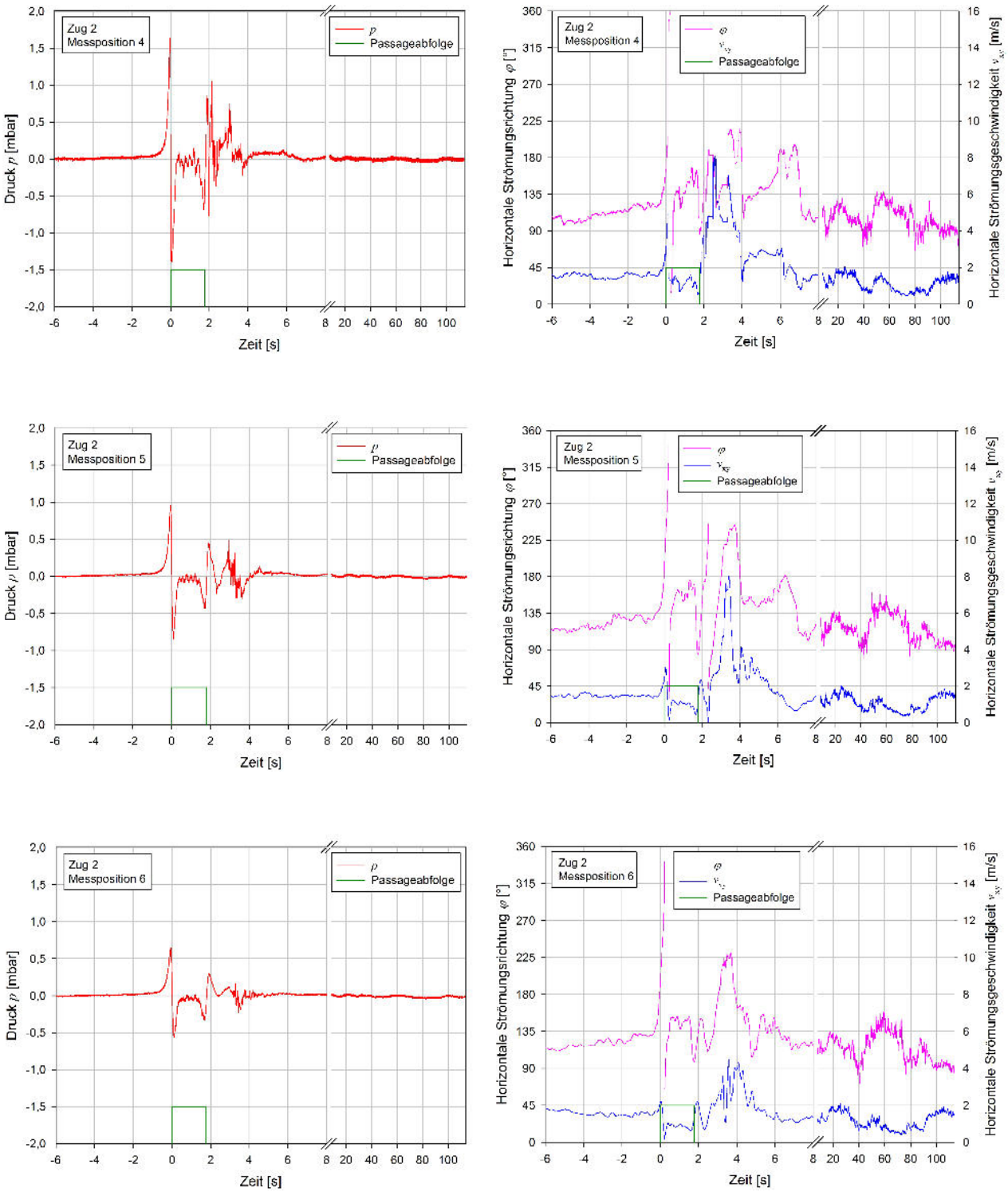


Abbildung B.17: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 2 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

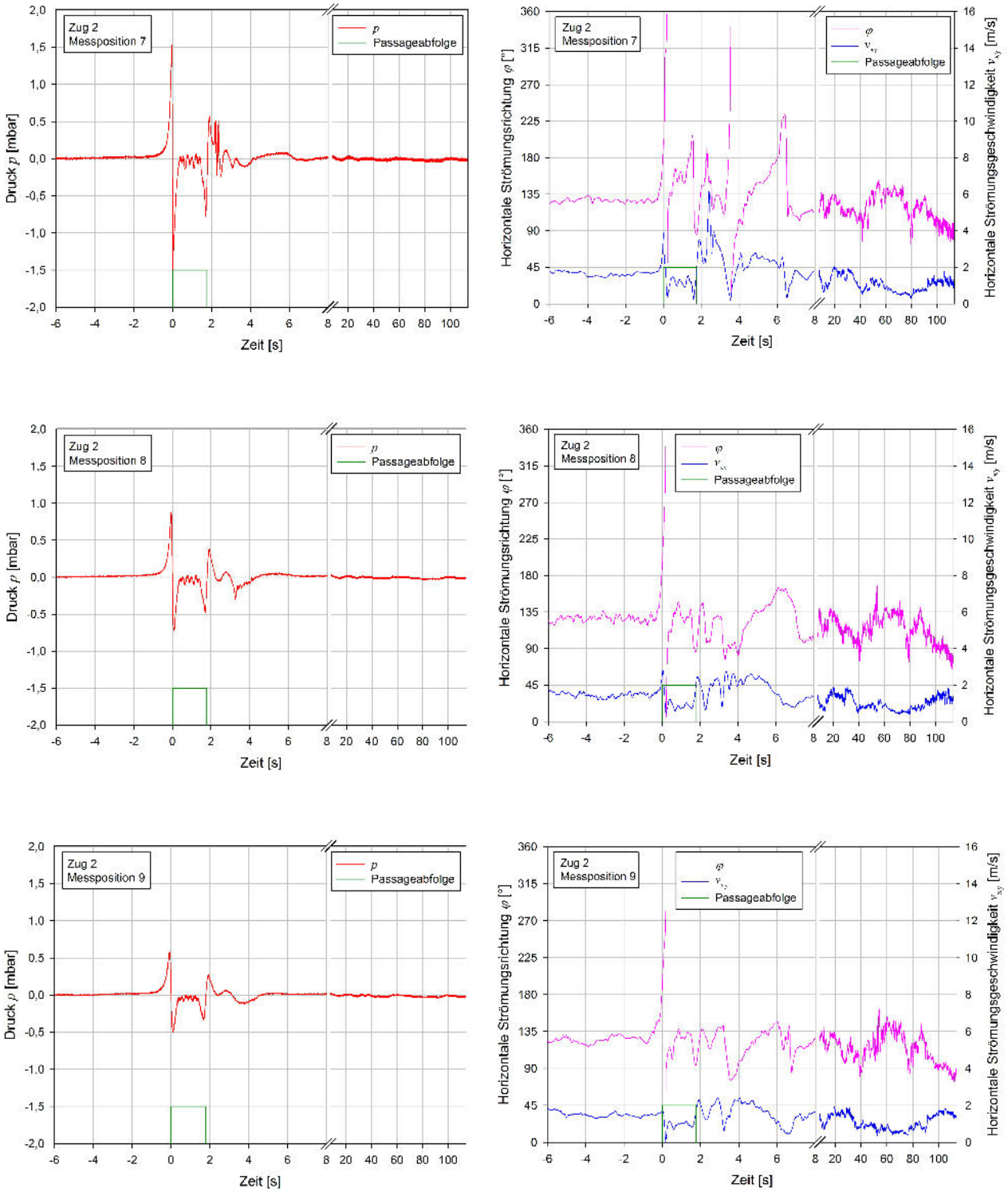
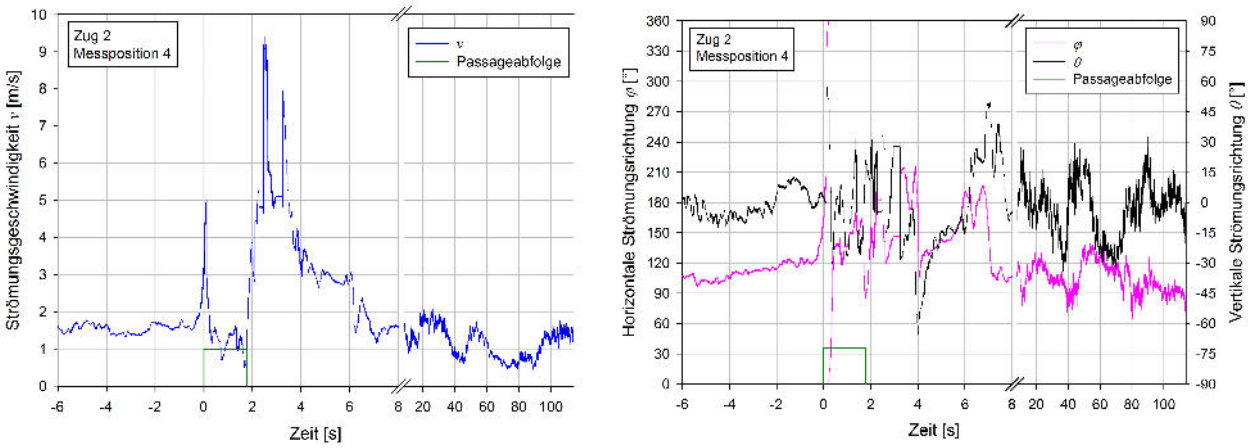


Abbildung B.18: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 2 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.



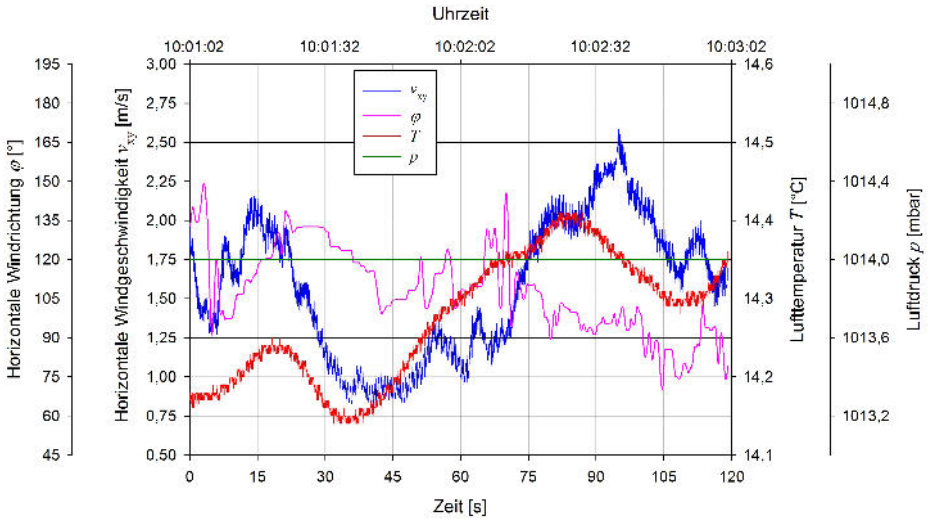




Abbildung B.19: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 2 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 2 ($\bar{v} = 139{,}8 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$).

Zug 3: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

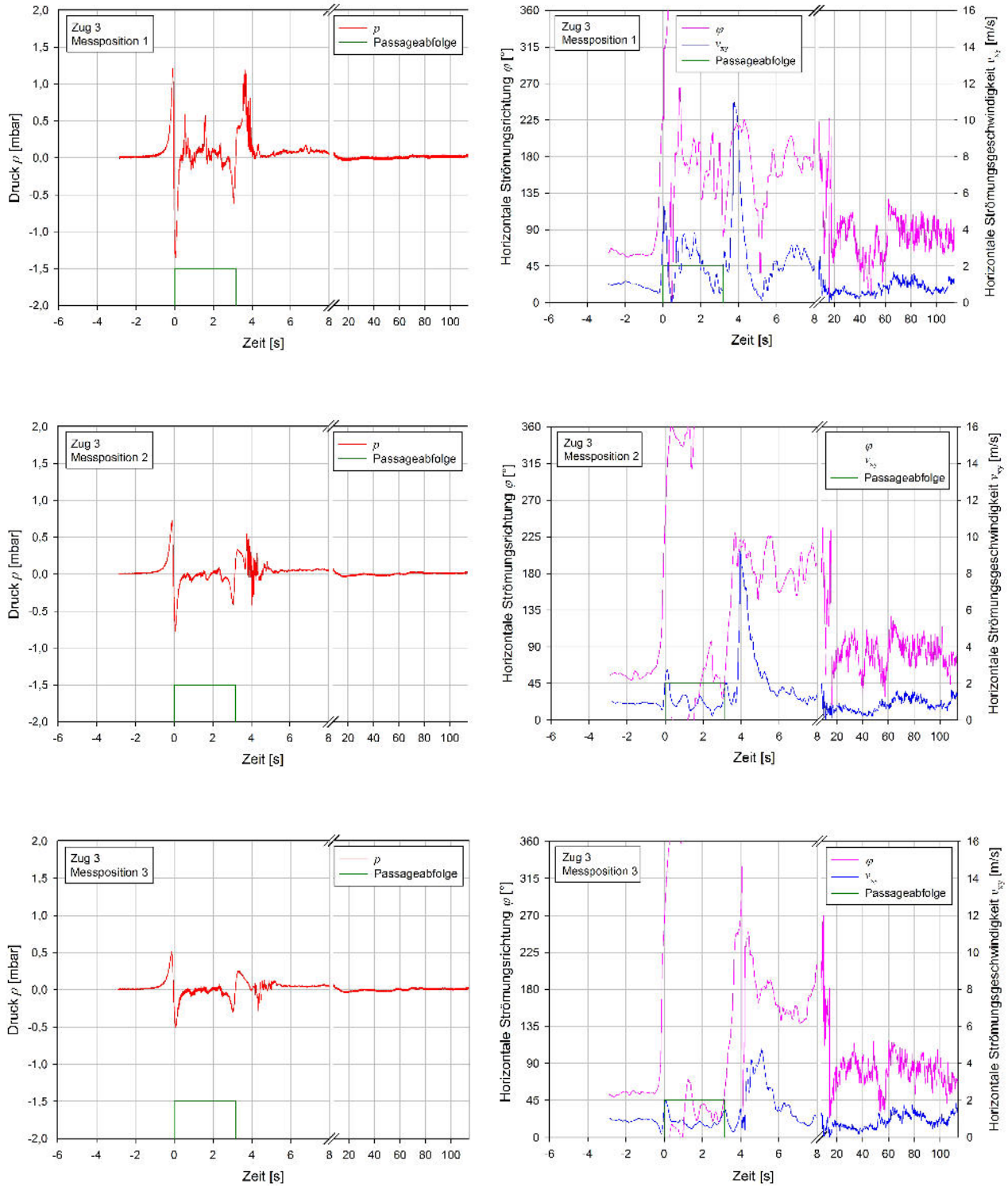


Abbildung B.20: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 3 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

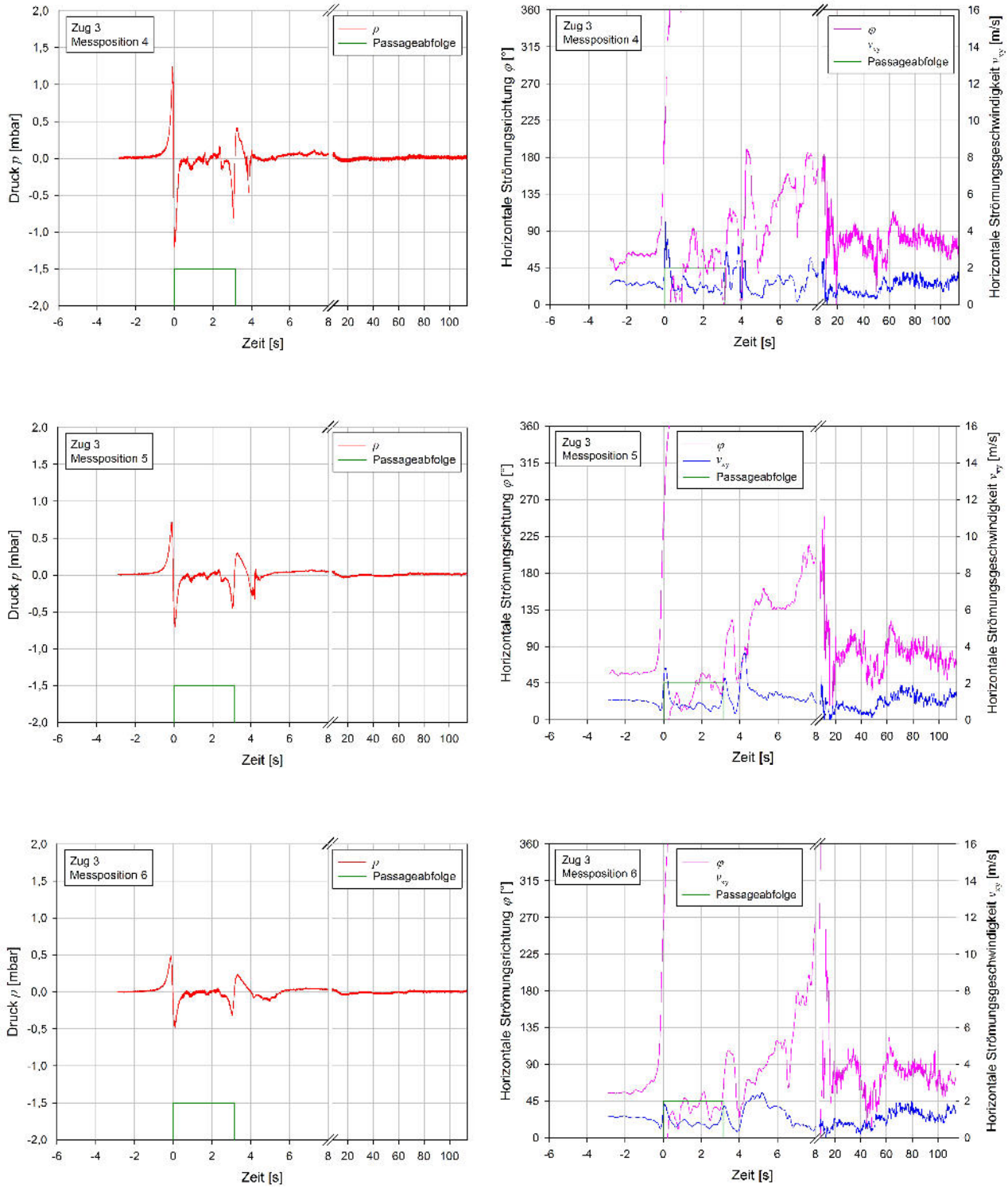


Abbildung B.21: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 3 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

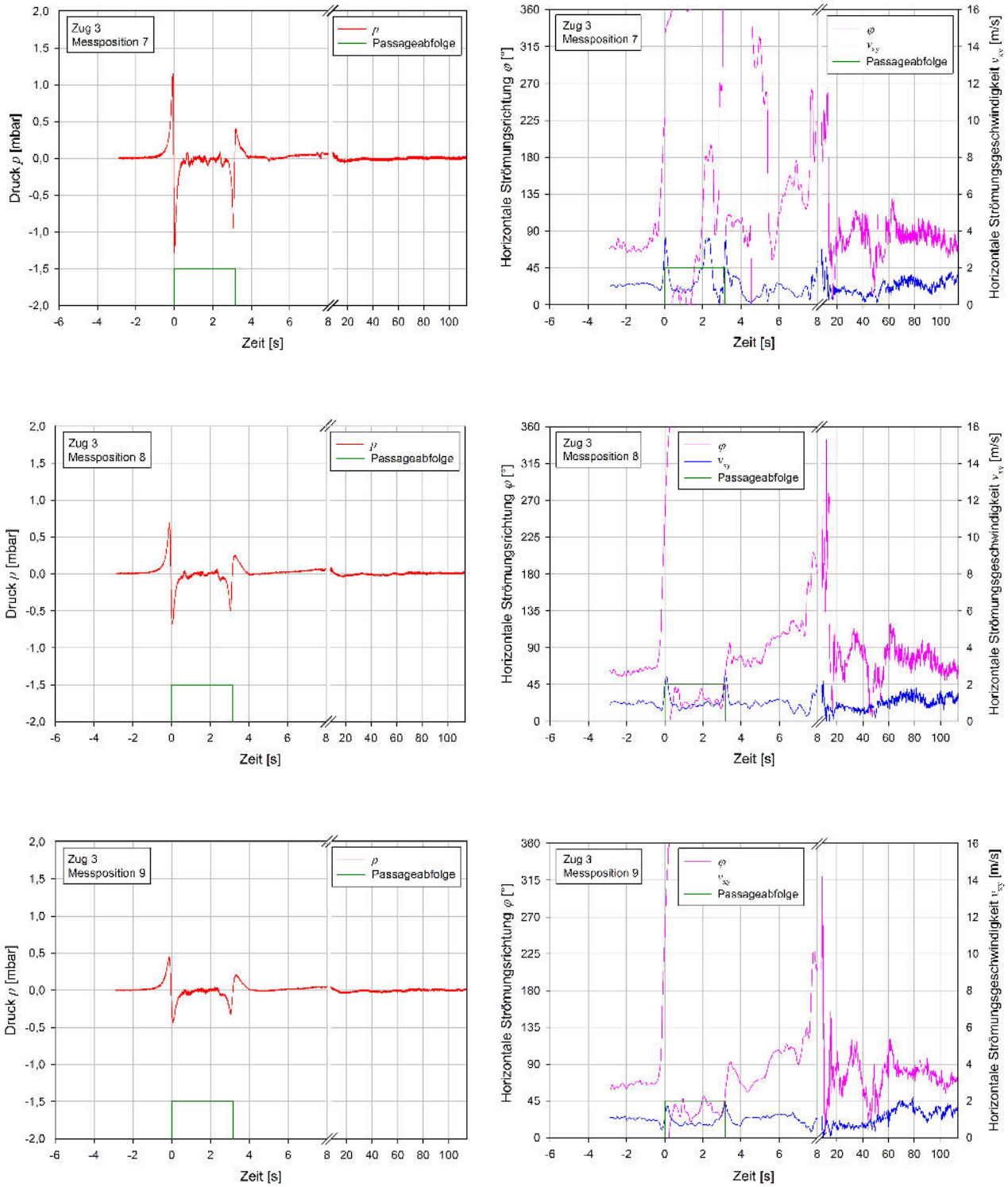
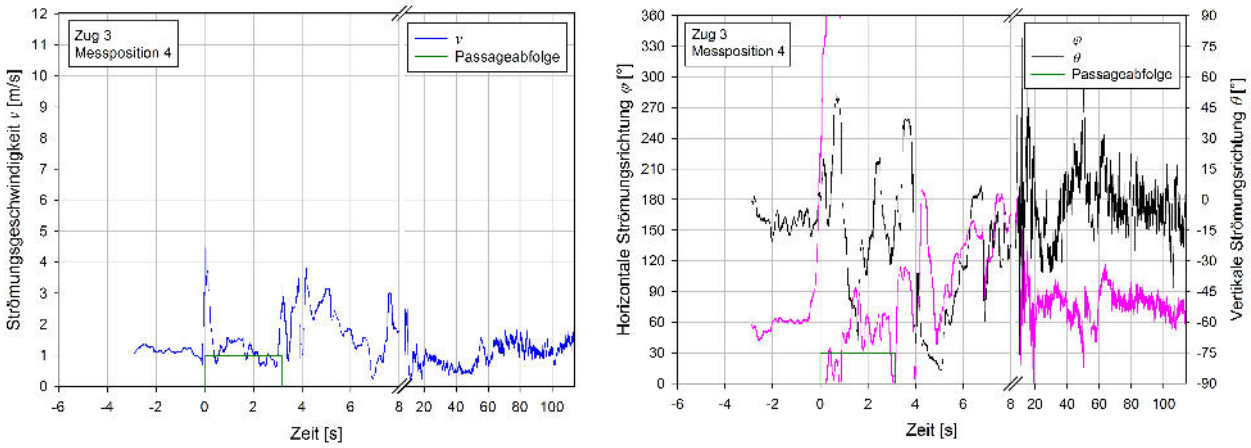


Abbildung B.22: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 3 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.



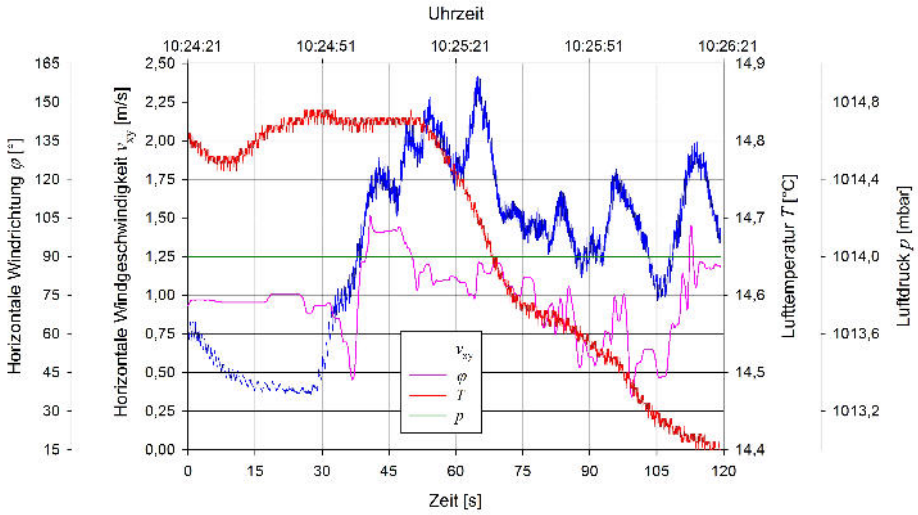




Abbildung B.23: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 3 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 3 ($\bar{v} = 120{,}9 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$).

Zug 4: Doppelstockzug K2 + K2 (4 Wagen + 4 Wagen)

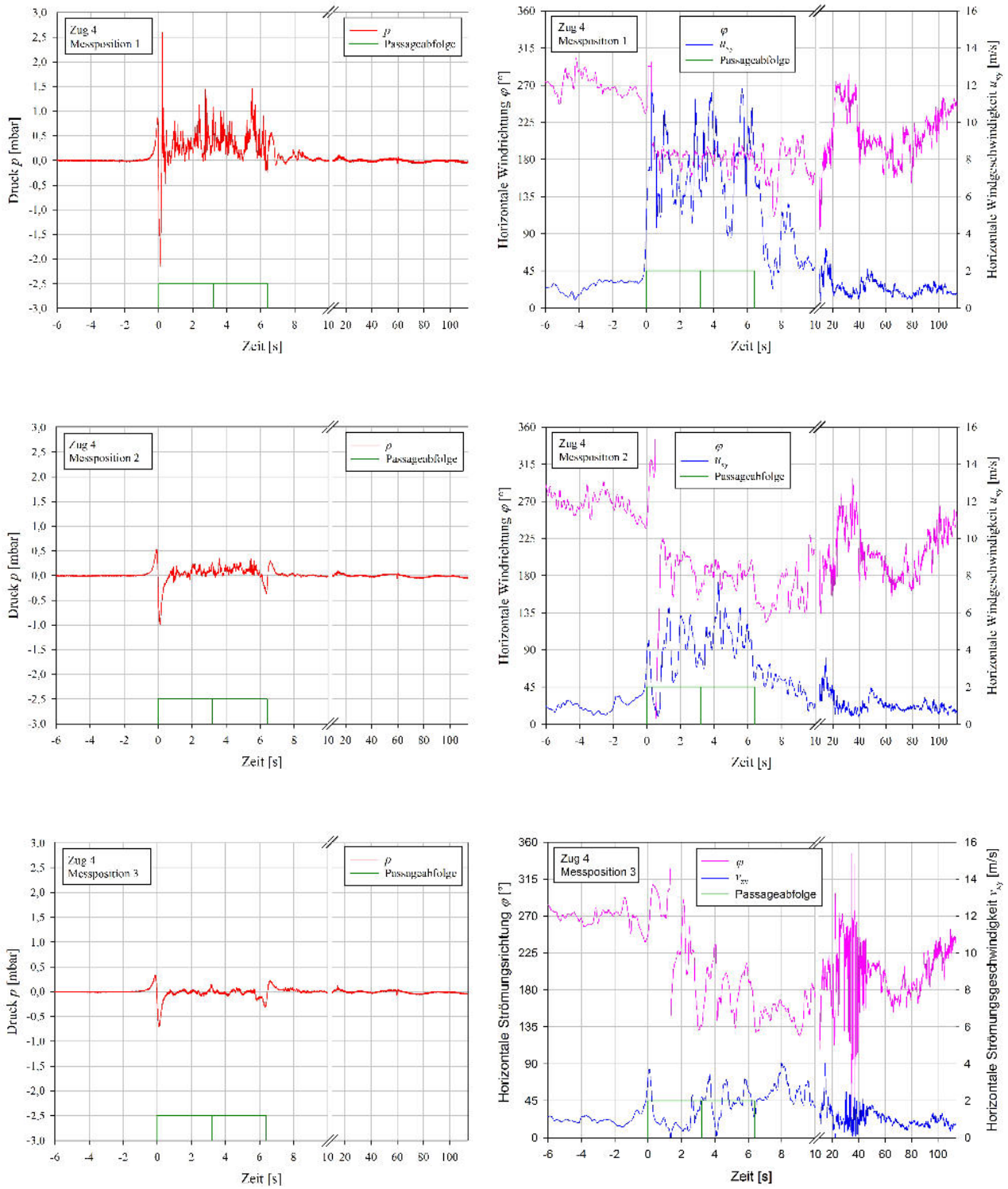


Abbildung B.24: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

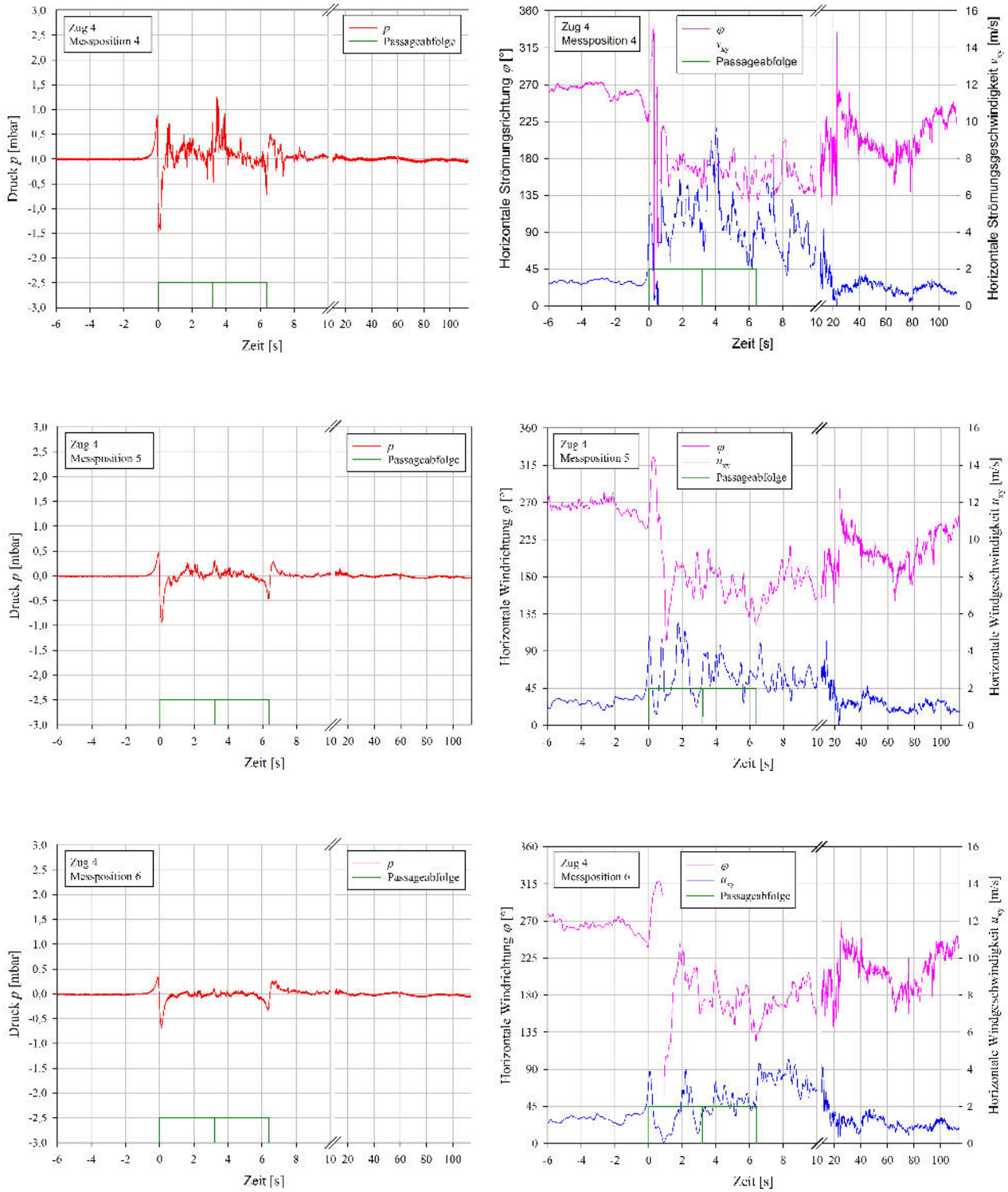


Abbildung B.25: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

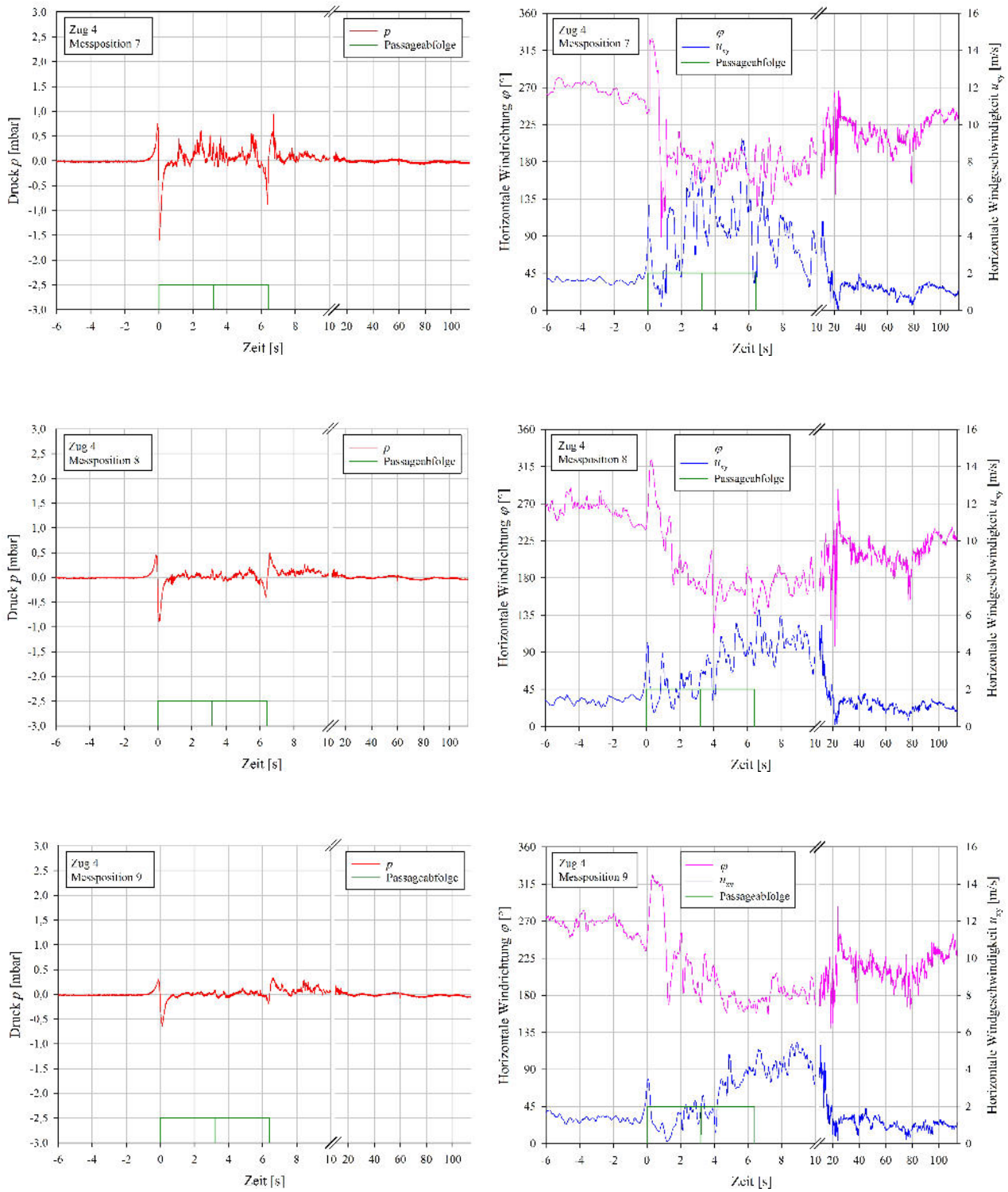


Abbildung B.26: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 4 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

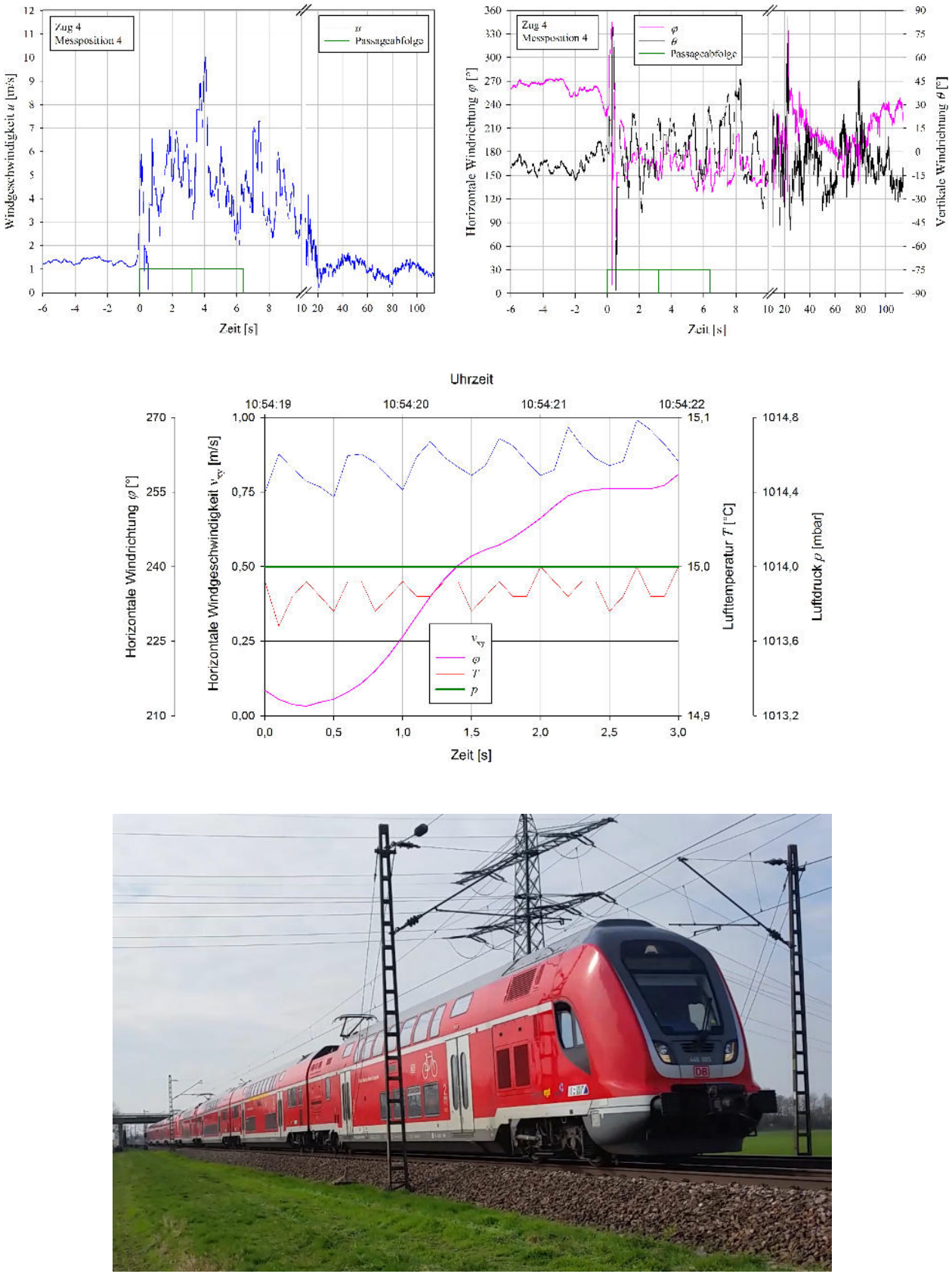


Abbildung B.27: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 4 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 4 ($\bar{v} = 117{,}6 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 5: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

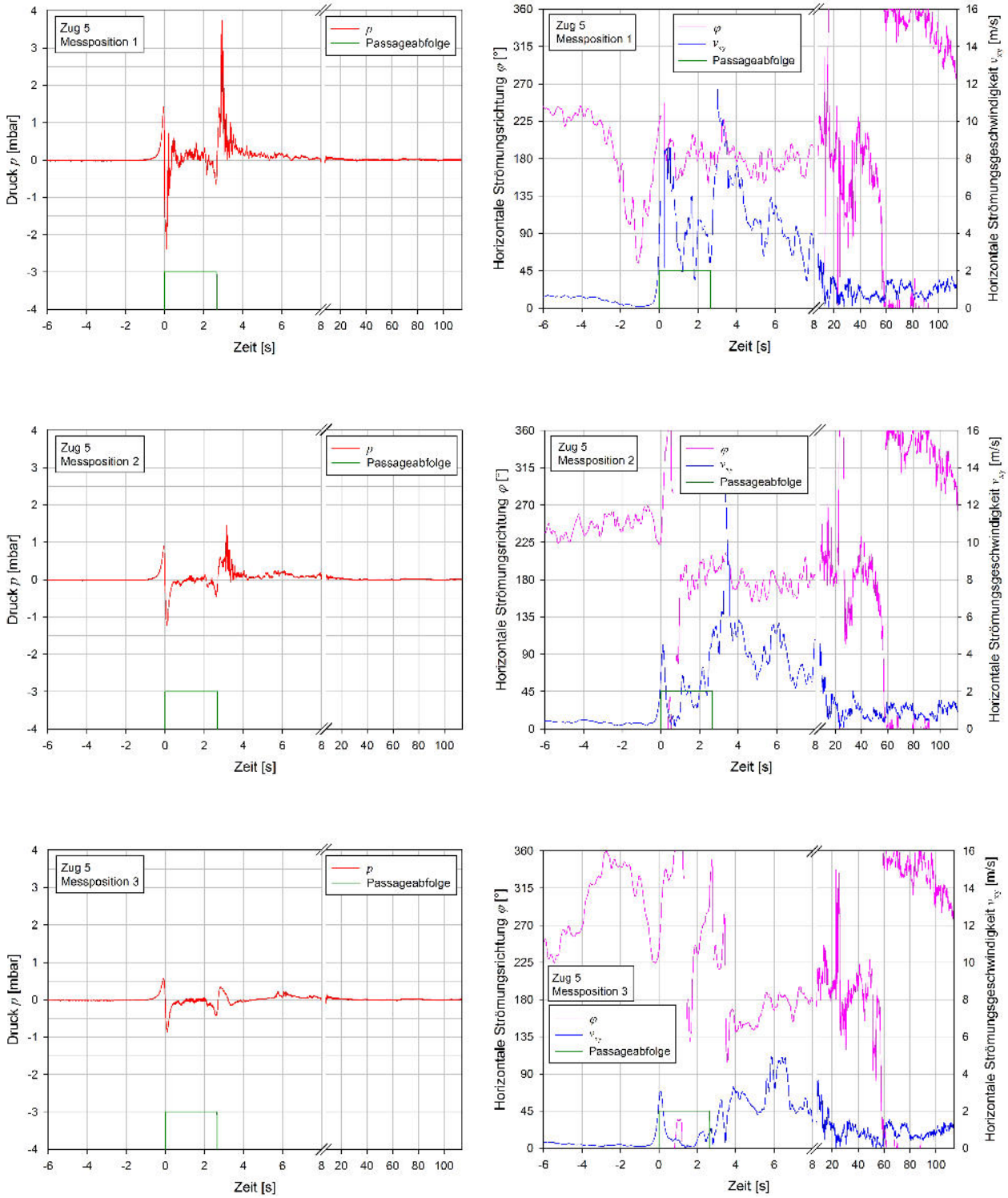


Abbildung B.28: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 5 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

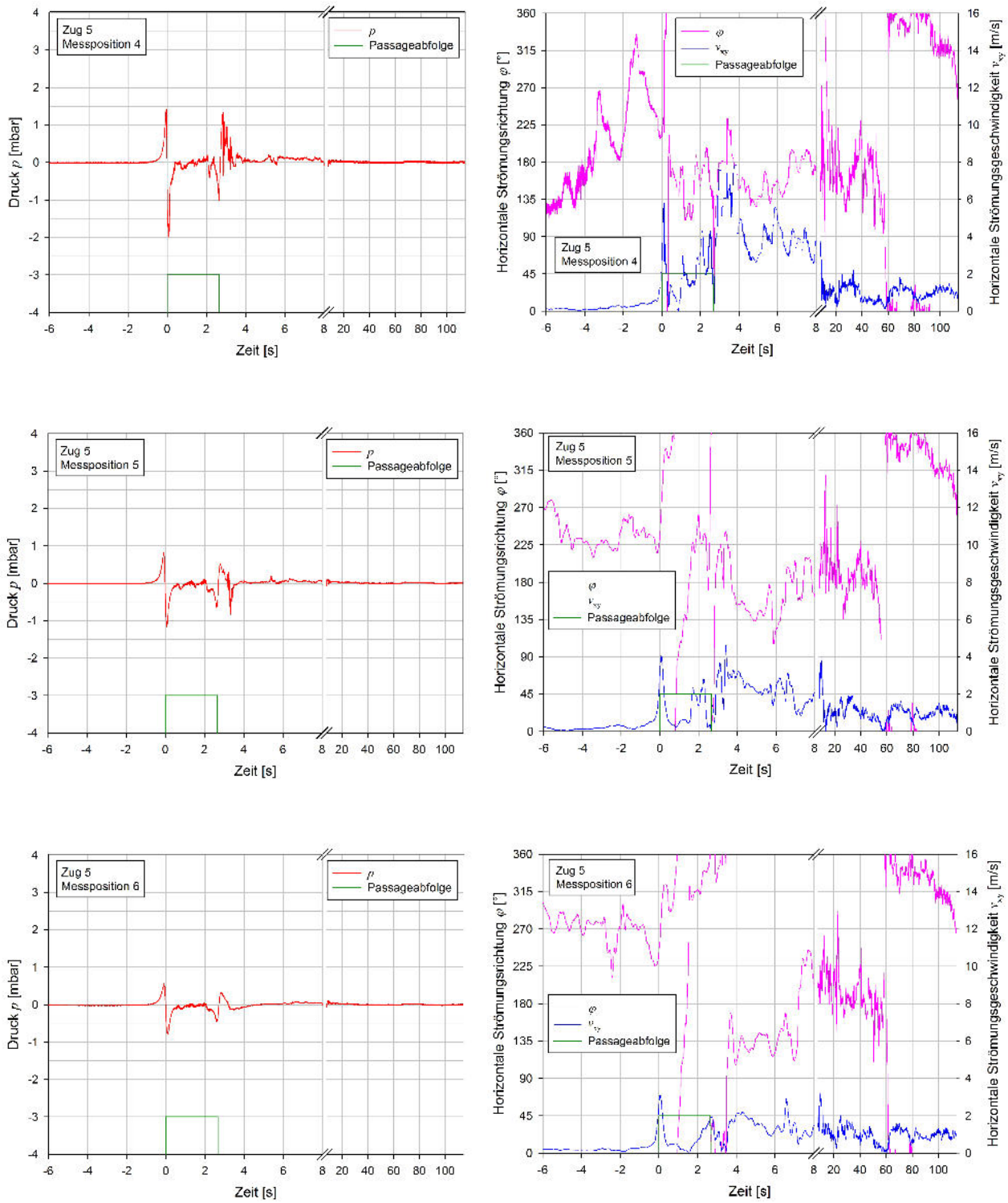


Abbildung B.29: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 5 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

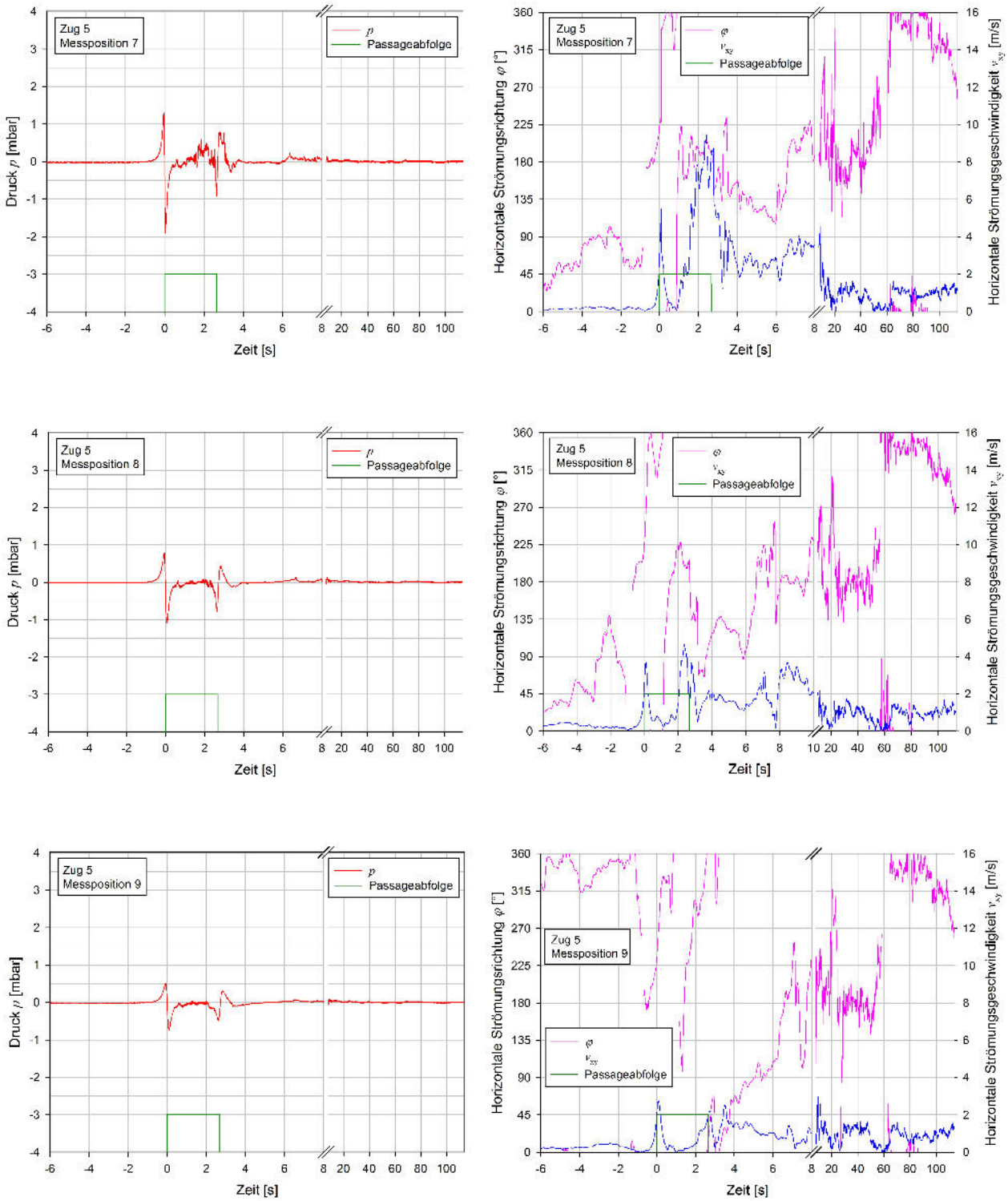


Abbildung B.30: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 5 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

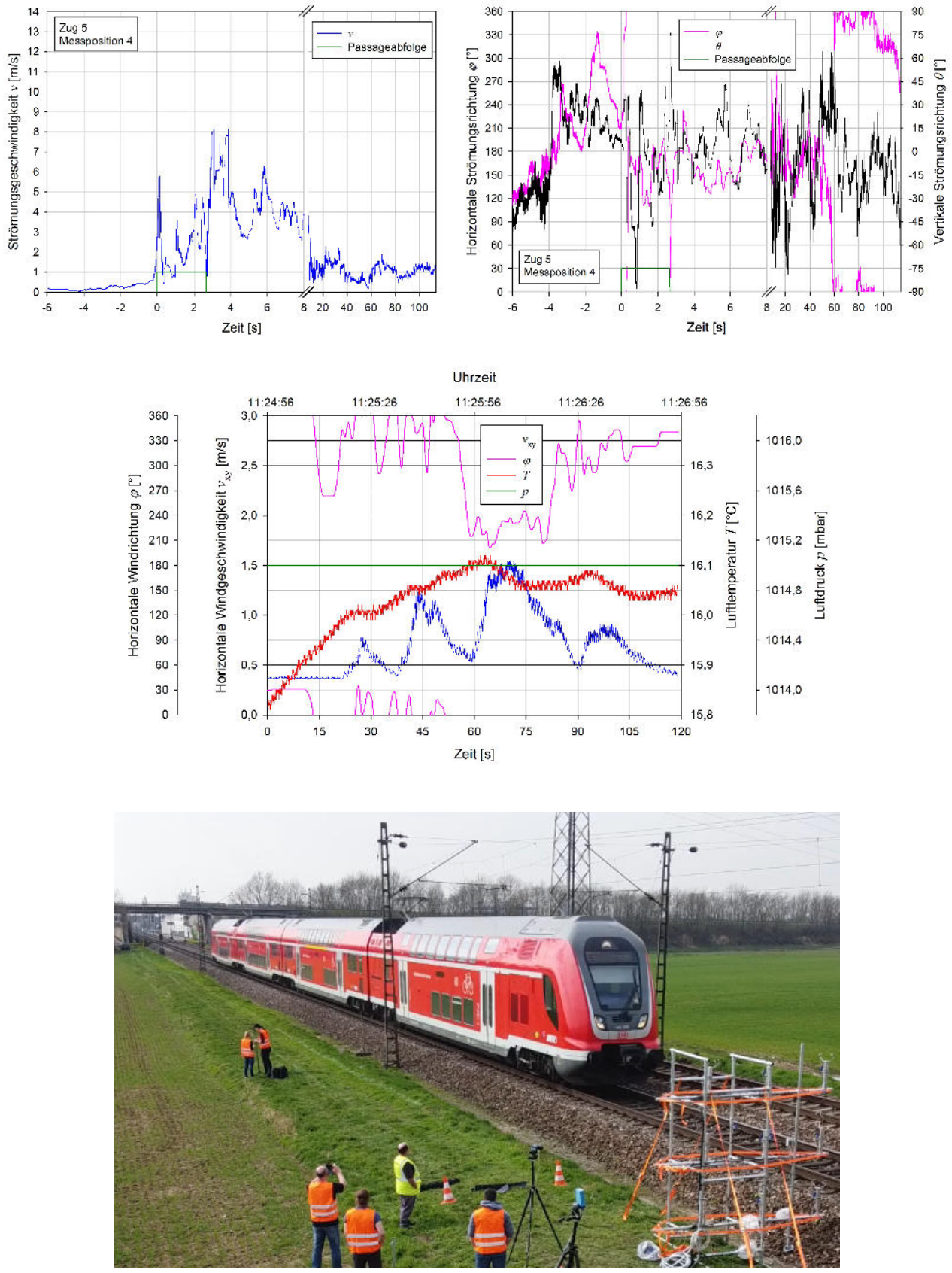


Abbildung B.31: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 5 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Drohnen-Kamera von Zug 5 ($\bar{v} = 139{,}2 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$).

Zug 6: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

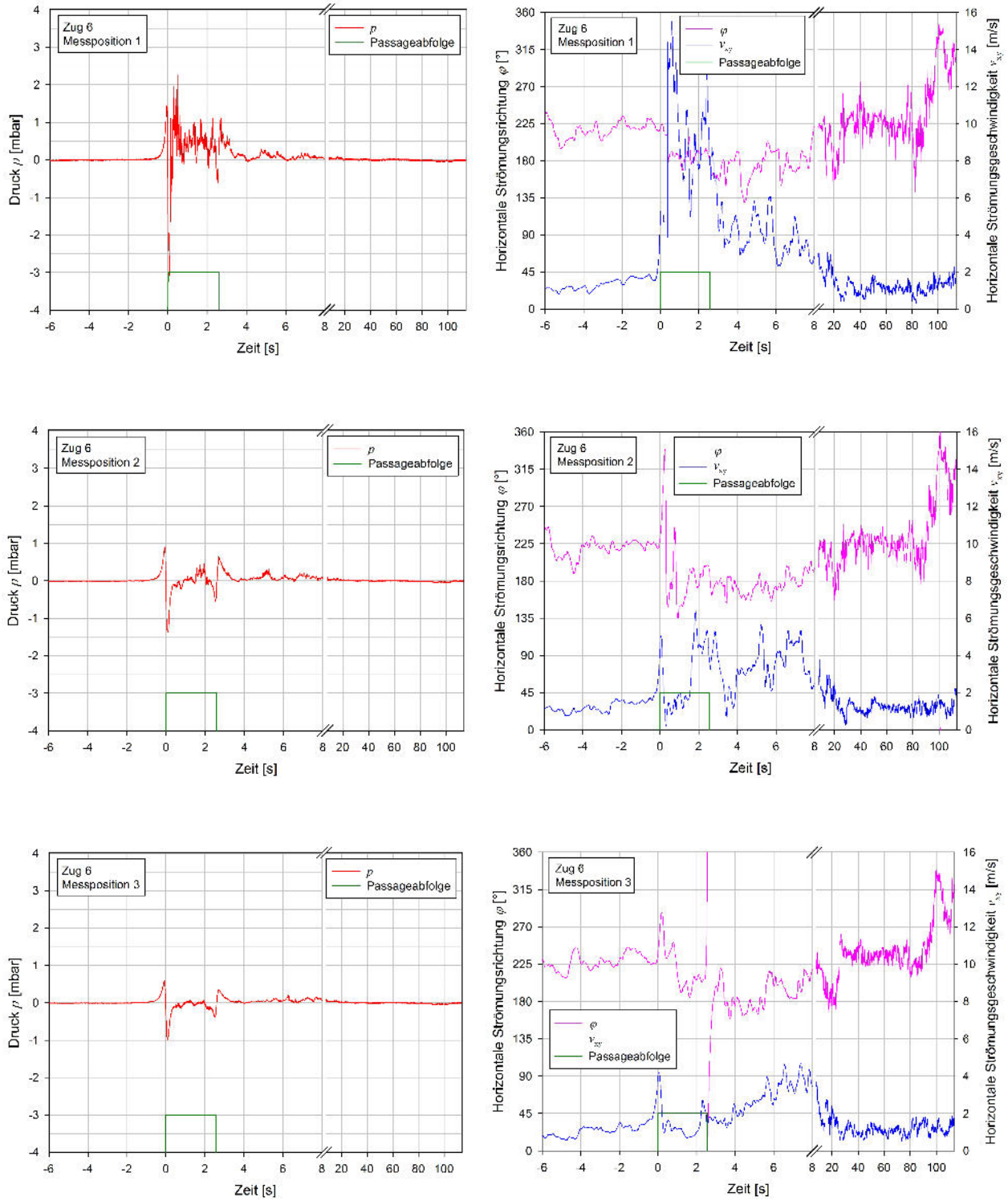


Abbildung B.32: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 6 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$.

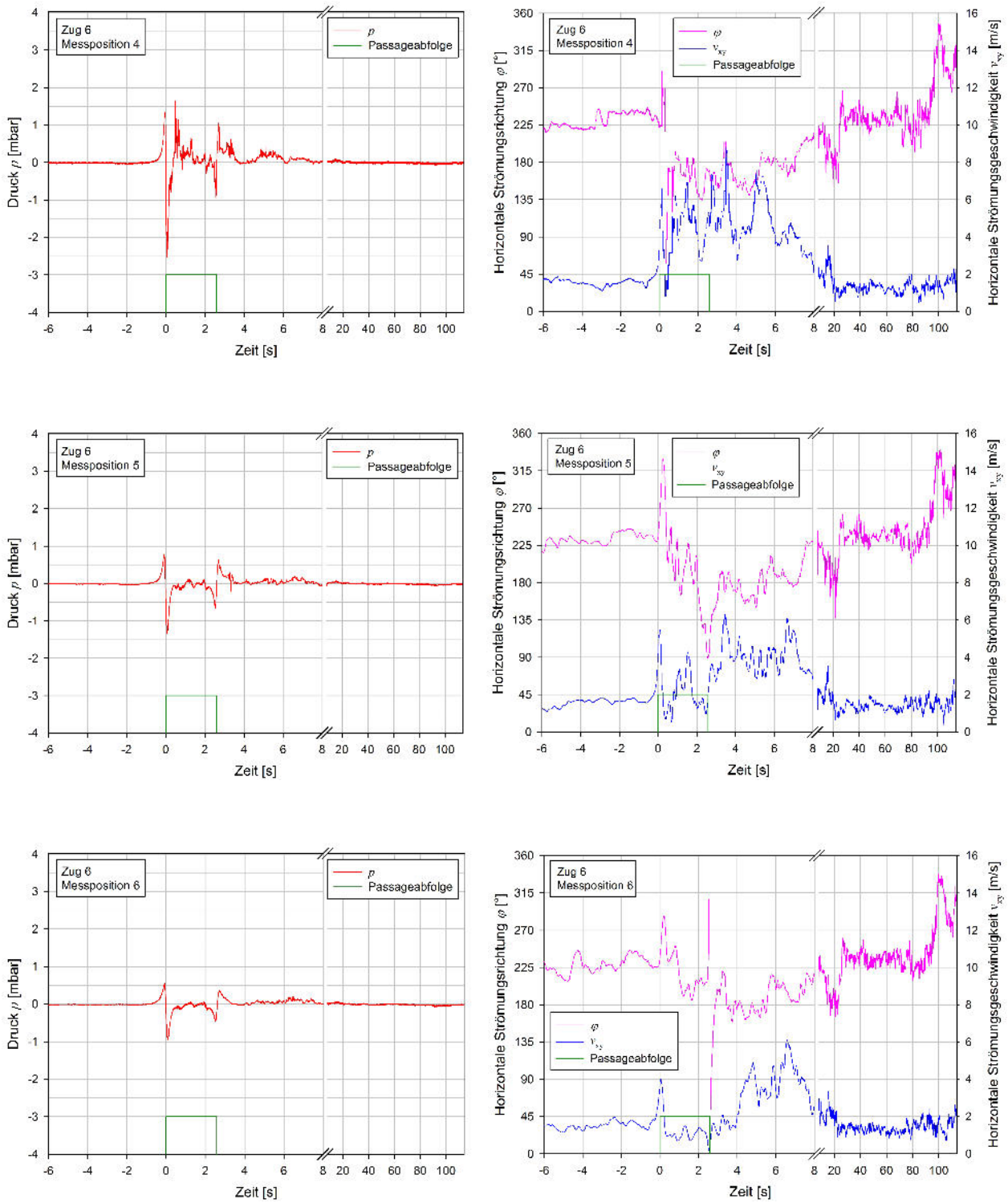


Abbildung B.33: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 6 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$.

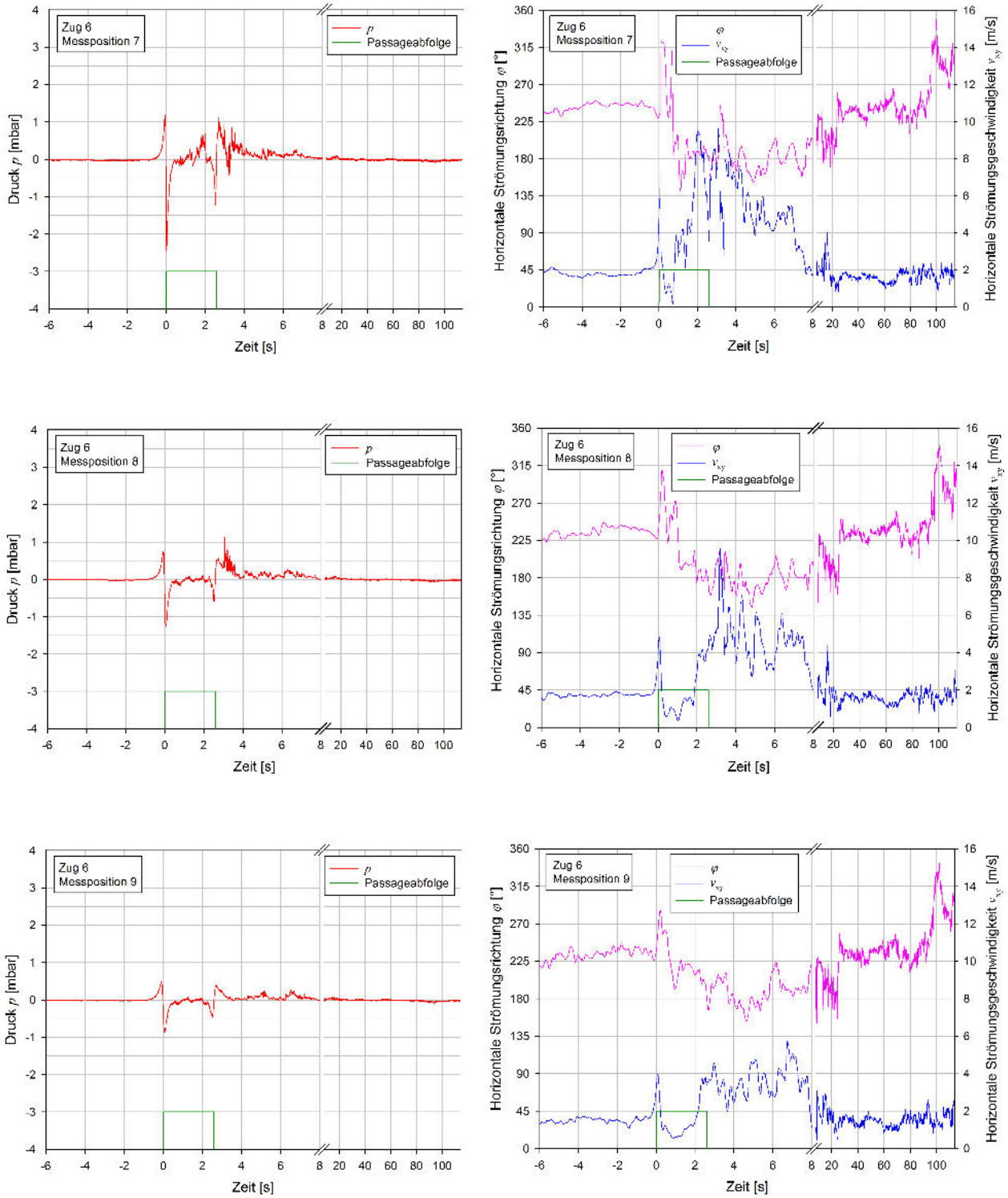
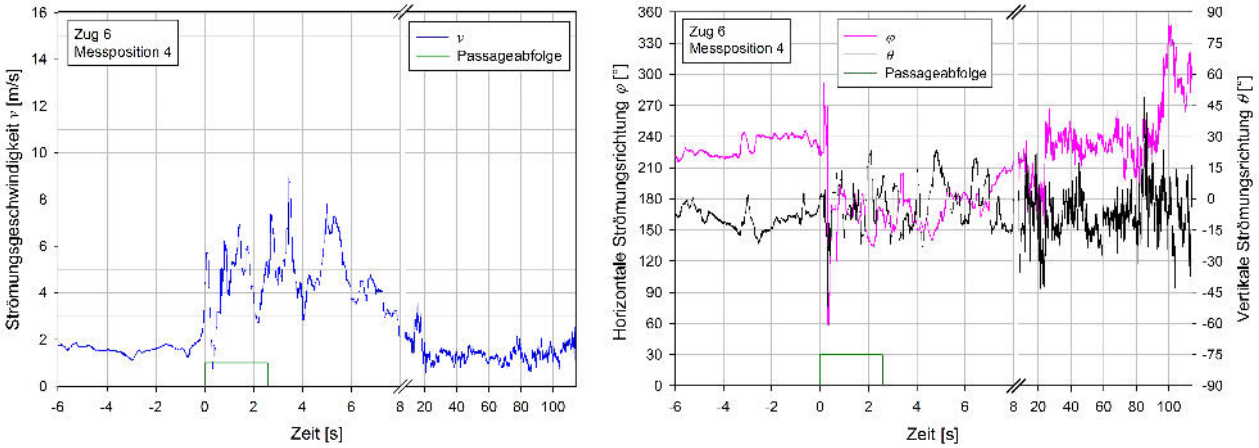


Abbildung B.34: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 6 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$.



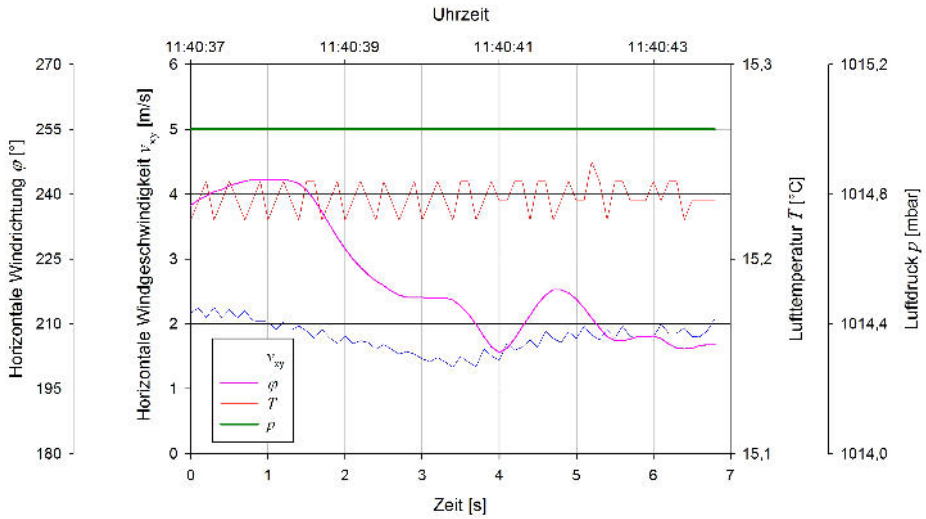




Abbildung B.35: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 6 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 6 ($\bar{v} = 144{,}6 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$).

Zug 7: S-Bahn (Baureihe 425)

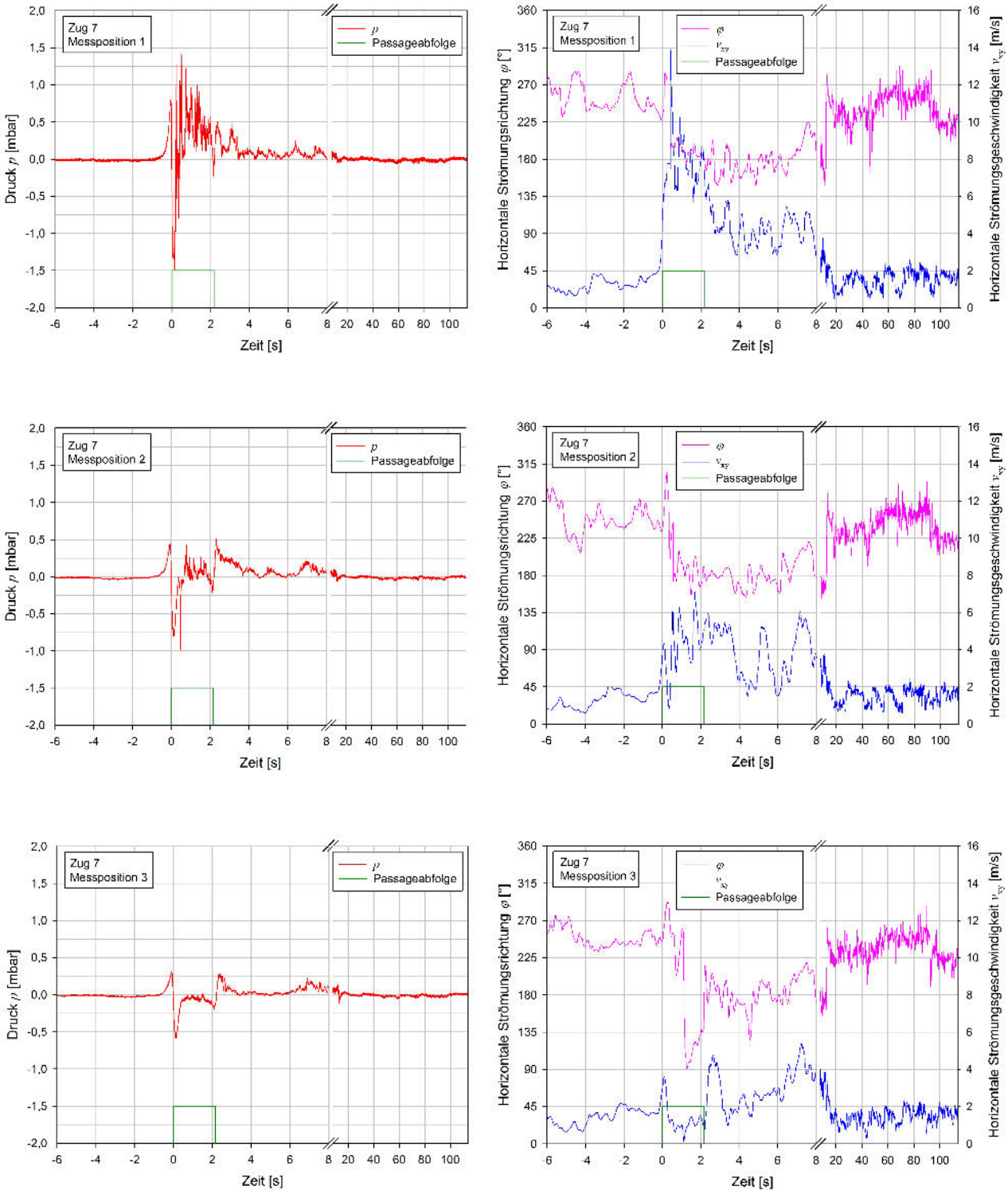


Abbildung B.36: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 7 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

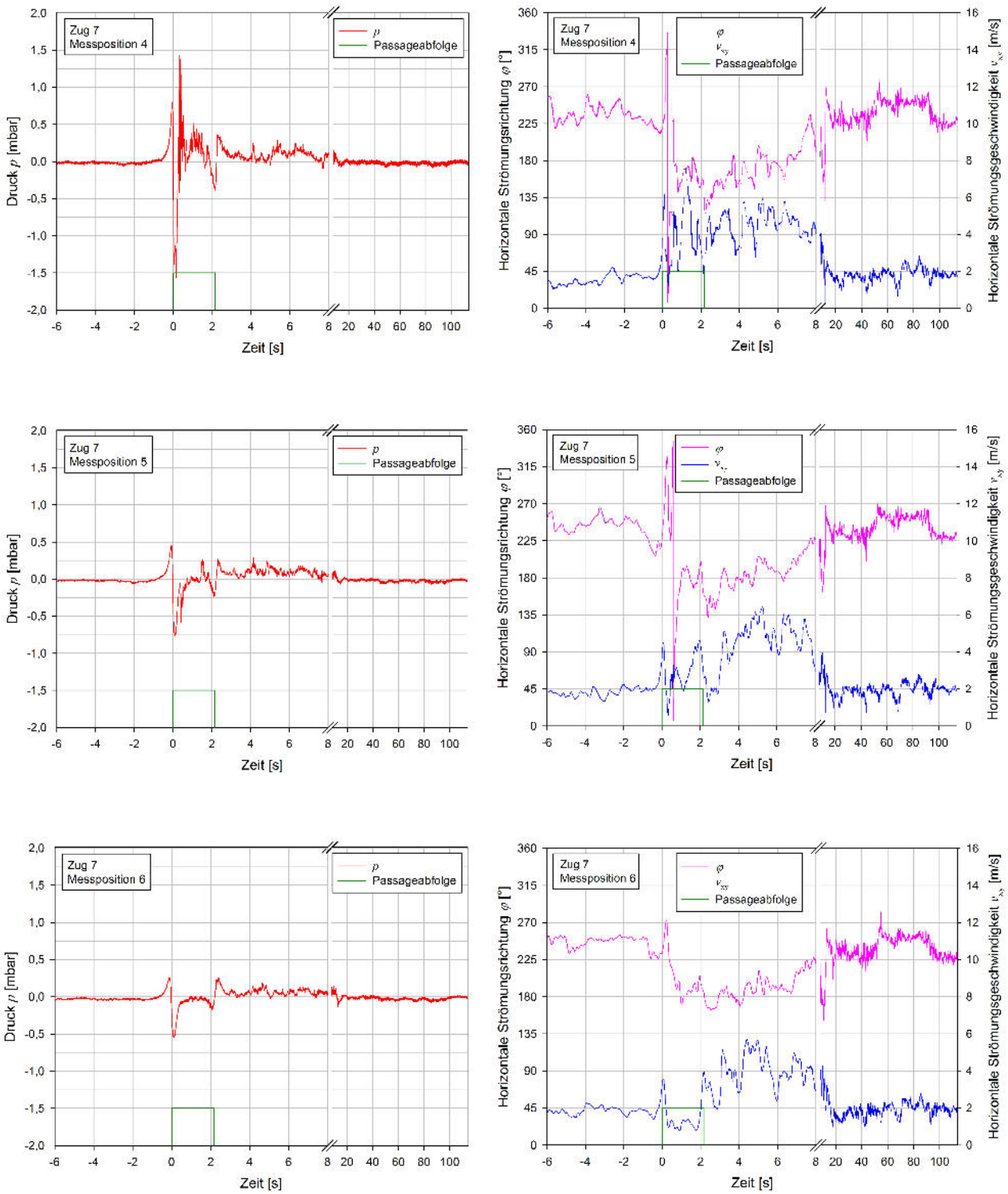


Abbildung B.37: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 7 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

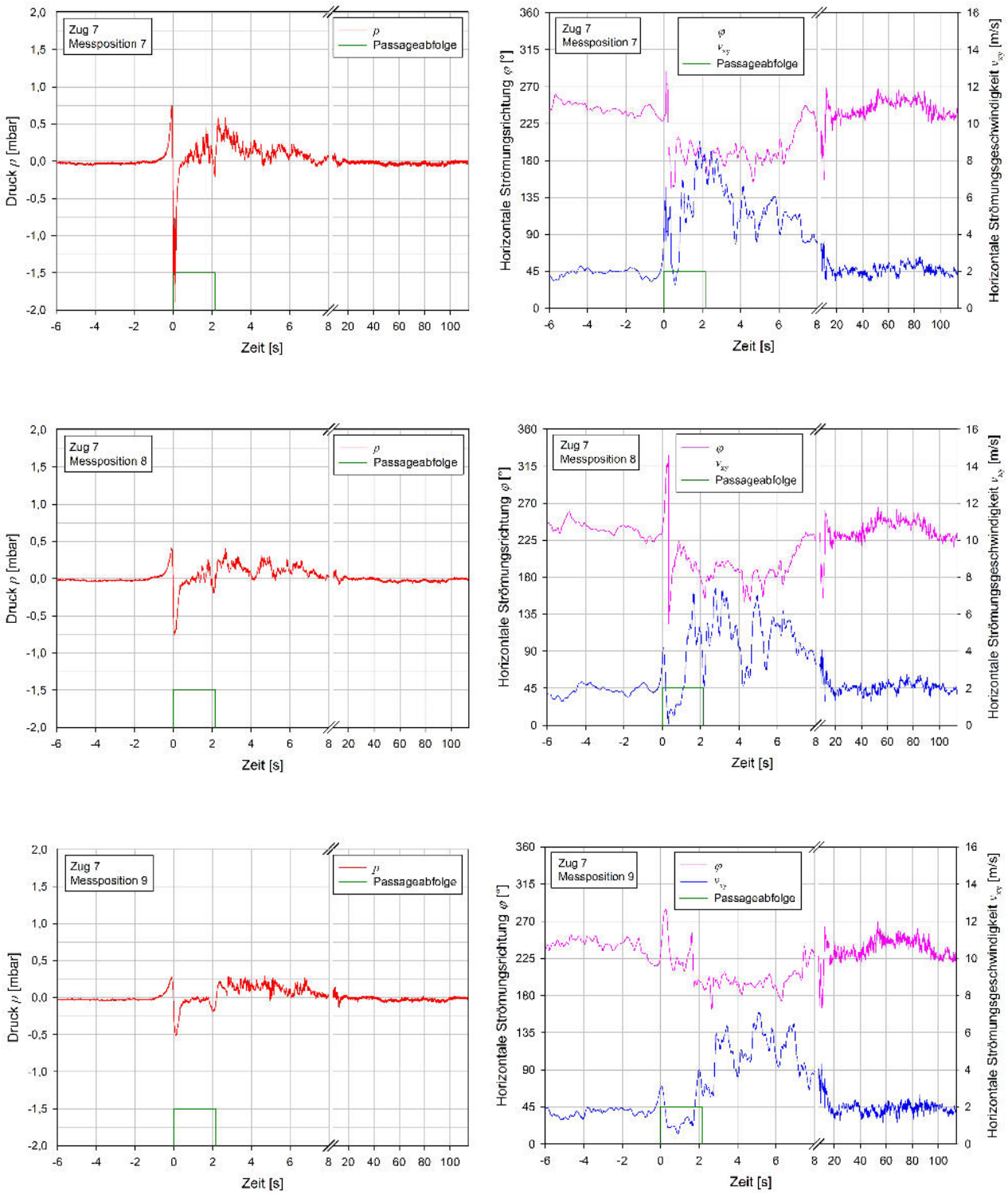
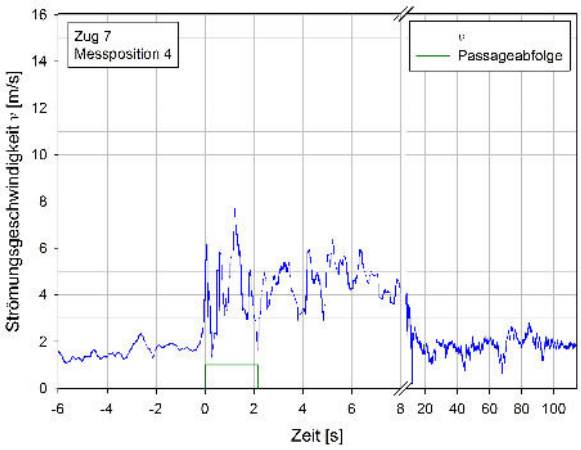


Abbildung B.38: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 7 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.



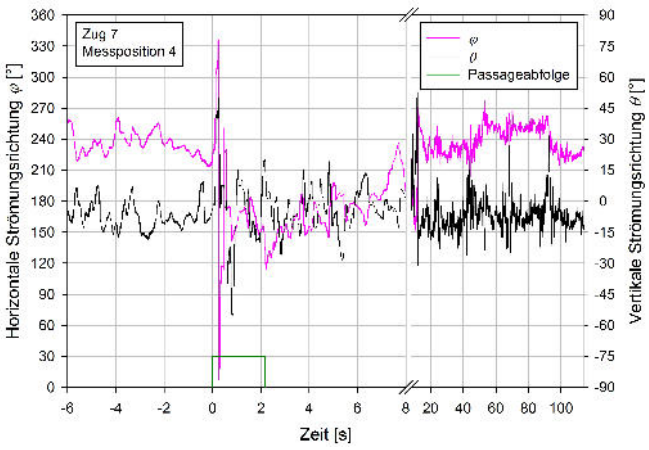






Abbildung B.39: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 7 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 7 ($\bar{v} = 111{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$).

Zug 8: Doppelstockzug K1 (3 Wagen)

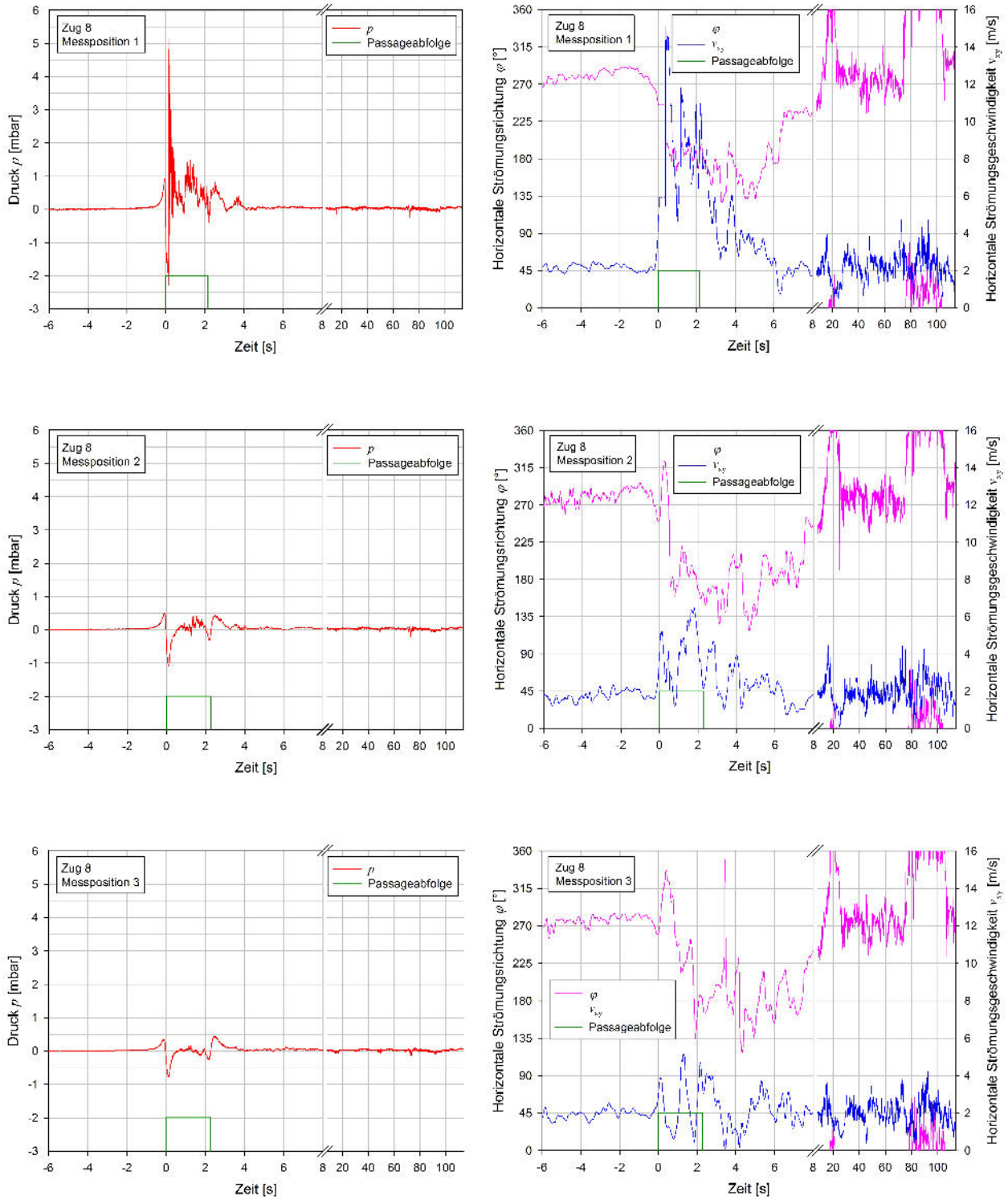


Abbildung B.40: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 8 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

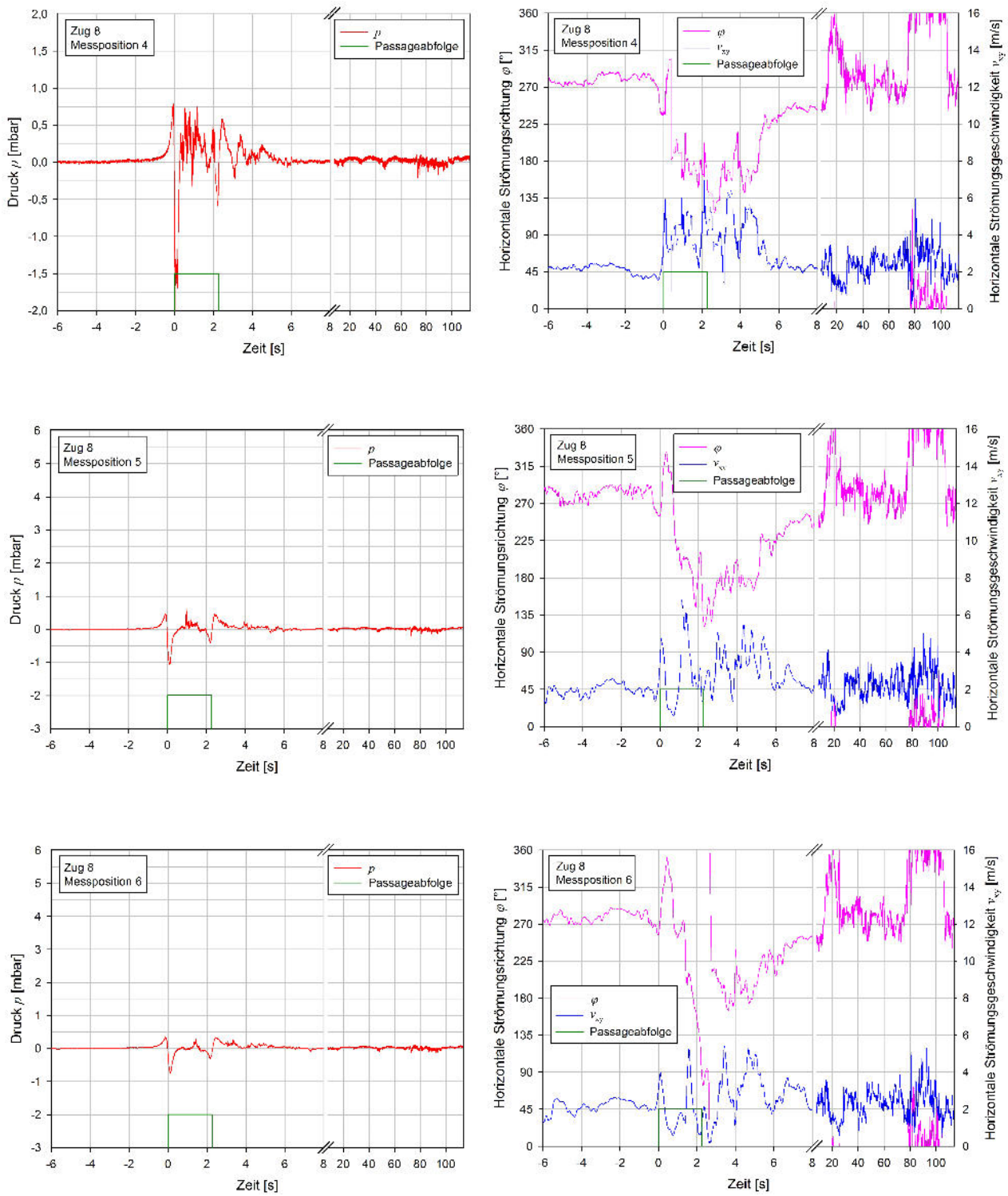


Abbildung B.41: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 8 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

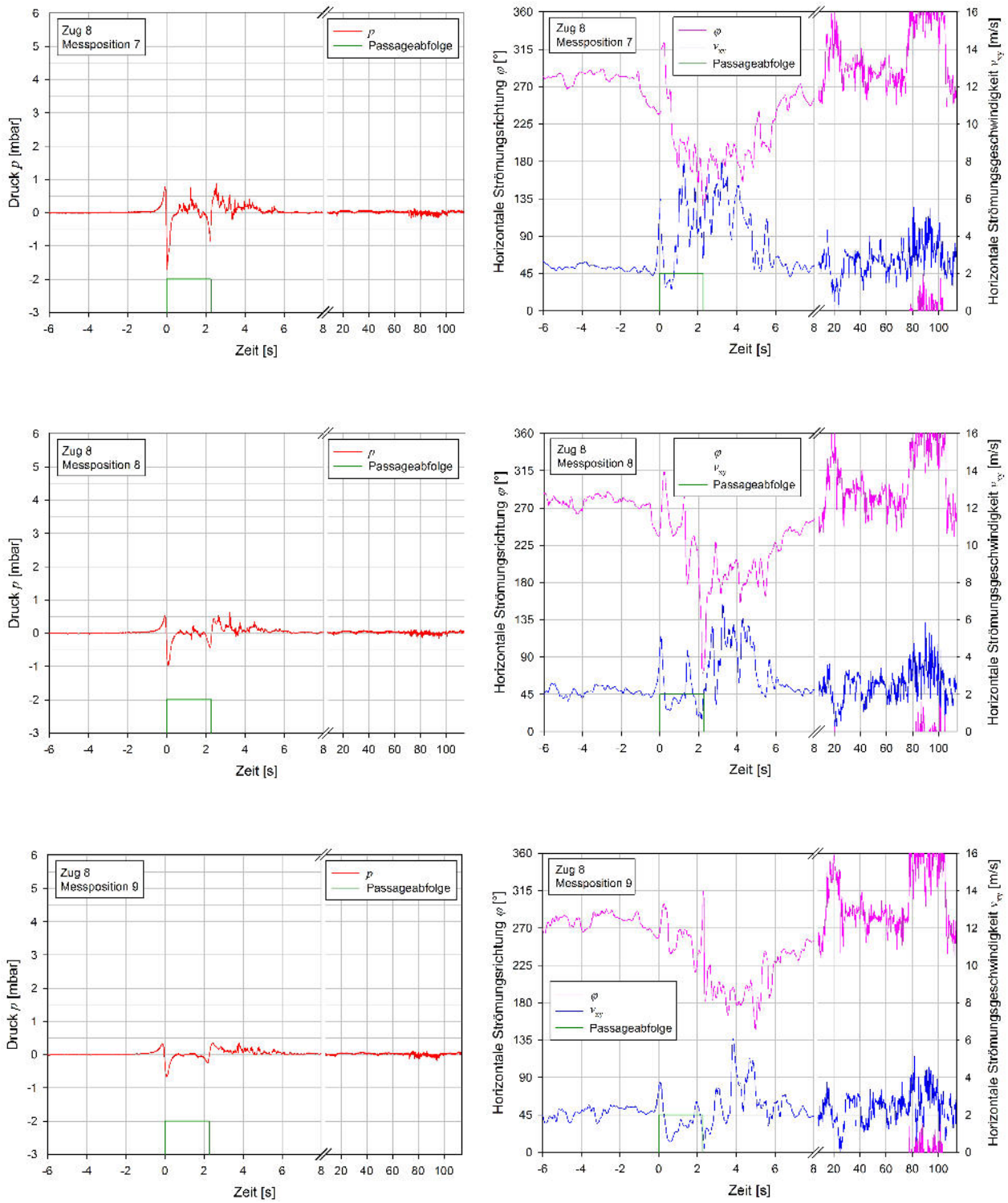


Abbildung B.42: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 8 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

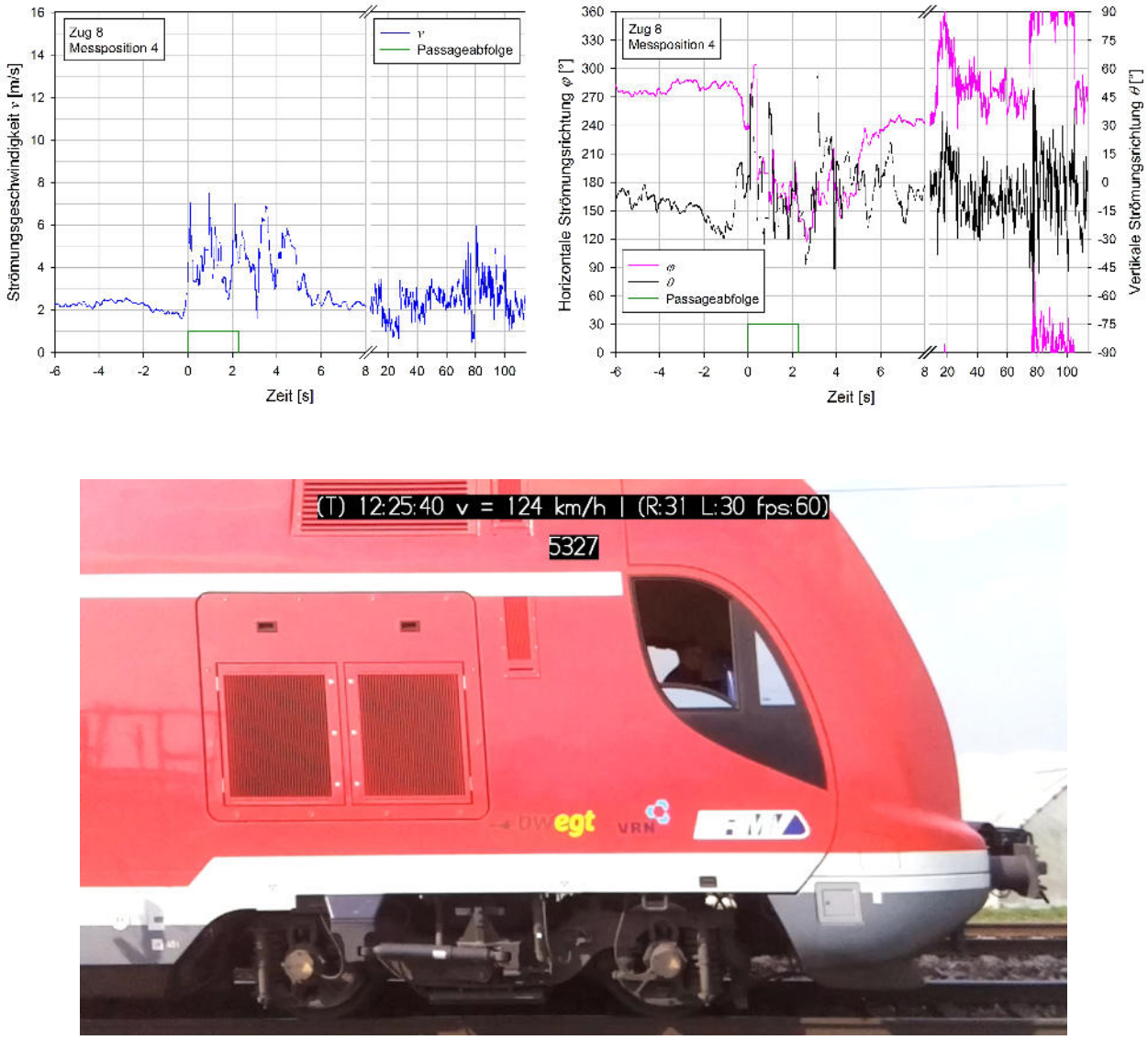


Abbildung B.43: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 8 an der Messposition 4. Unten: Foto der Mikrocomputer-Kamera von Zug 8 ($\bar{v} = 122{,}2 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$).

Zug 9: S-Bahn (Baureihe 425)

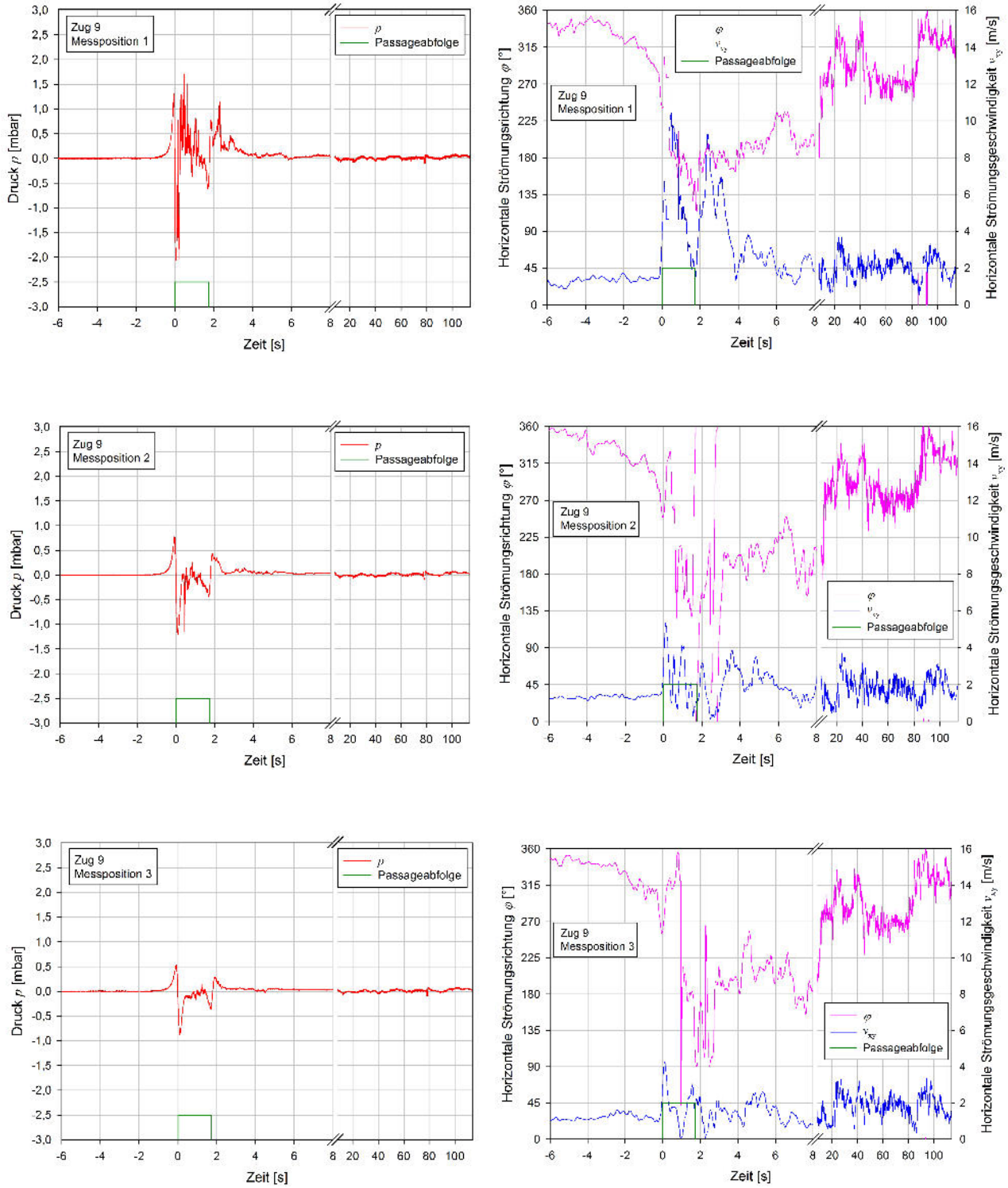


Abbildung B.44: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 9 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

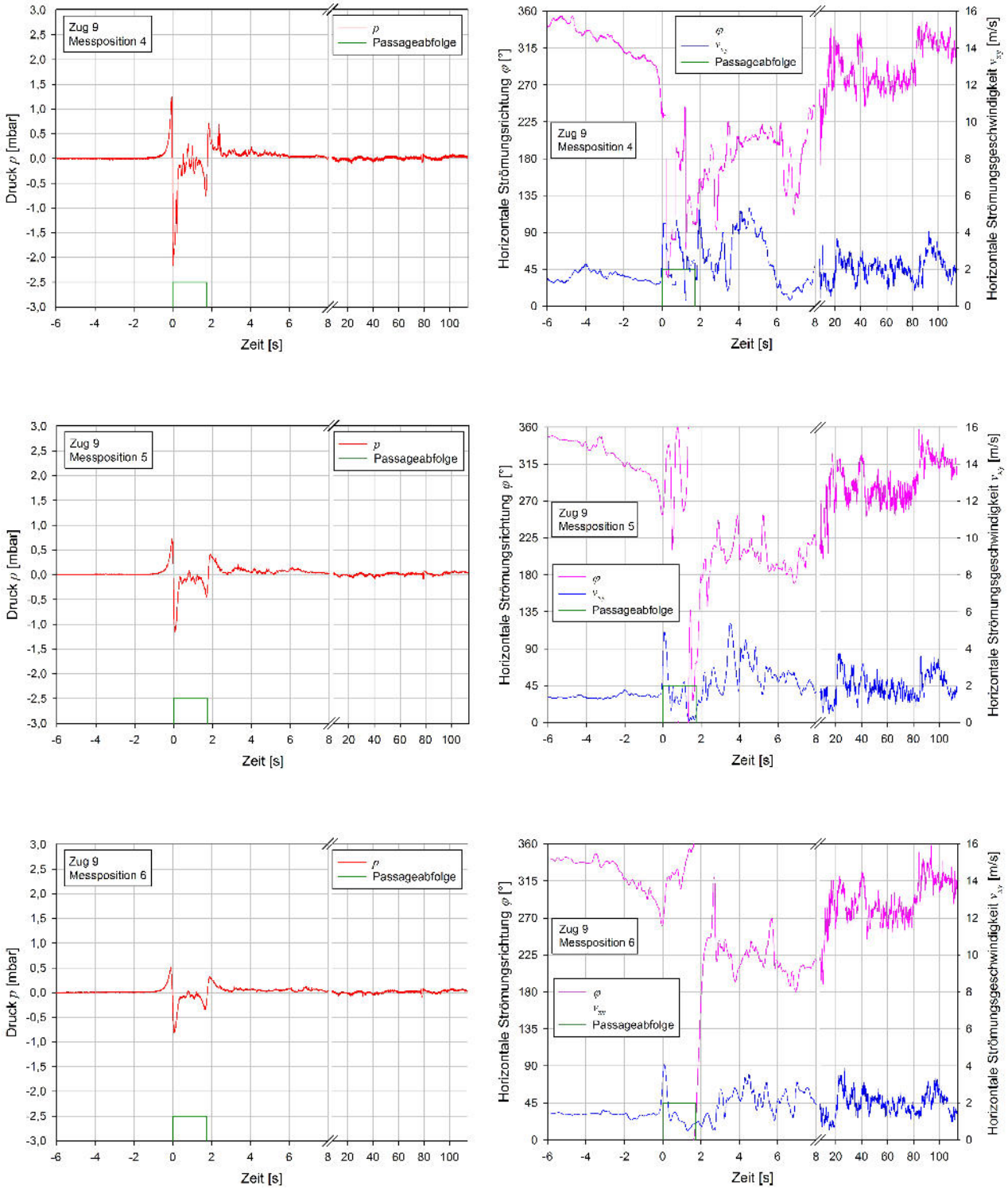


Abbildung B.45: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 9 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

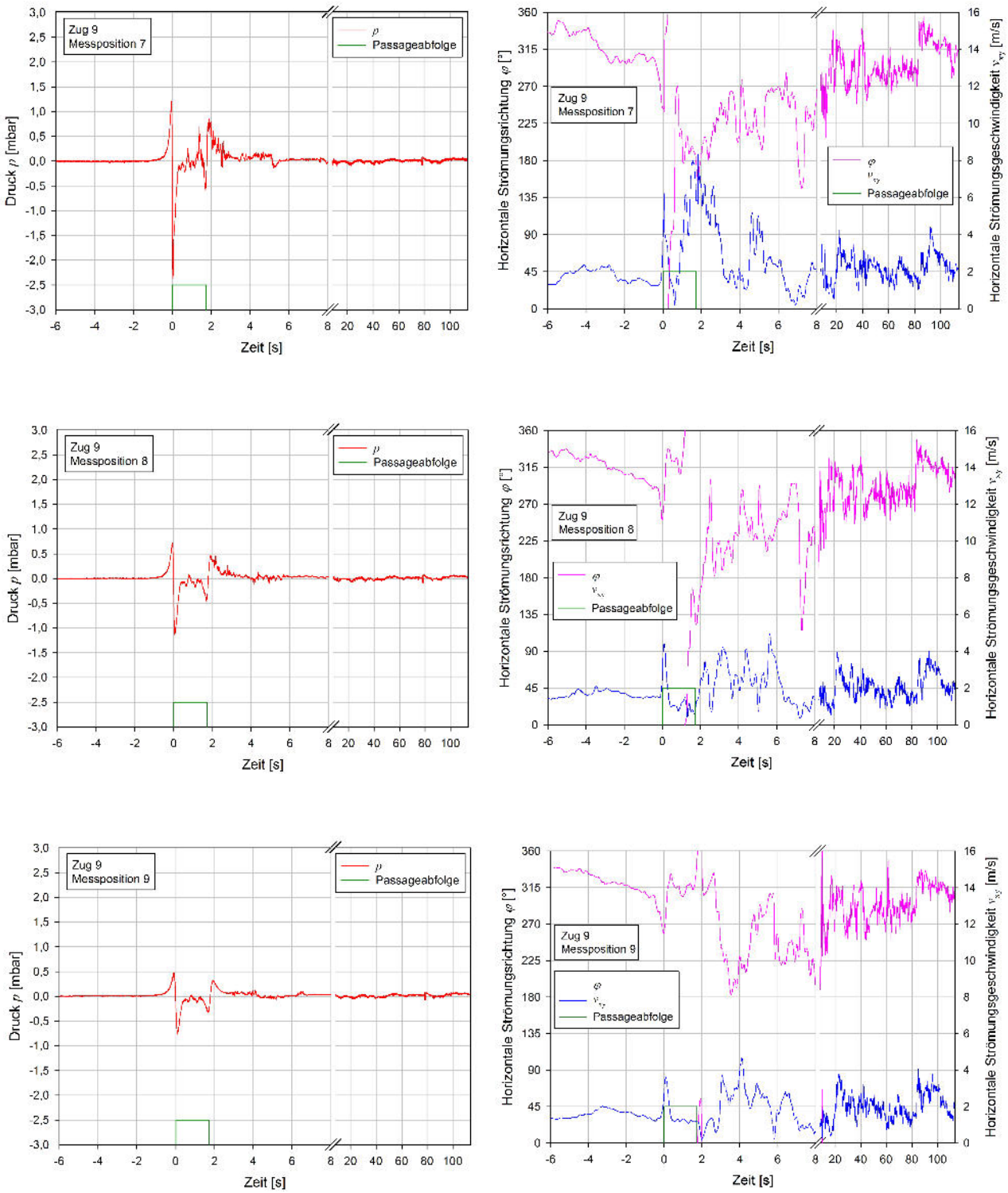


Abbildung B.46: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 9 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

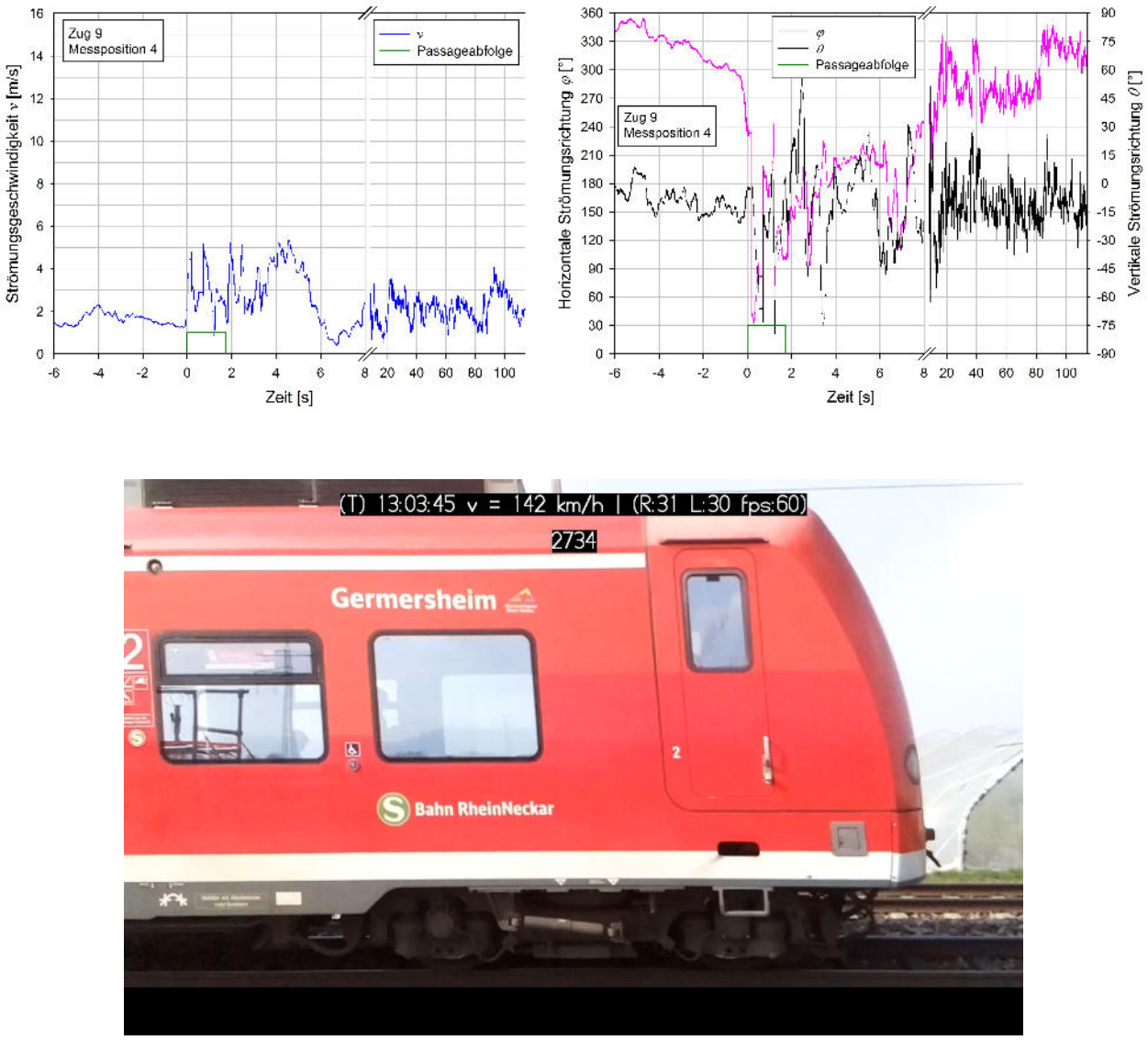


Abbildung B.47: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 9 an der Messposition 4. Unten: Foto der Mikrocomputer-Kamera von Zug 9 ($\bar{v} = 139{,}1 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 10: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

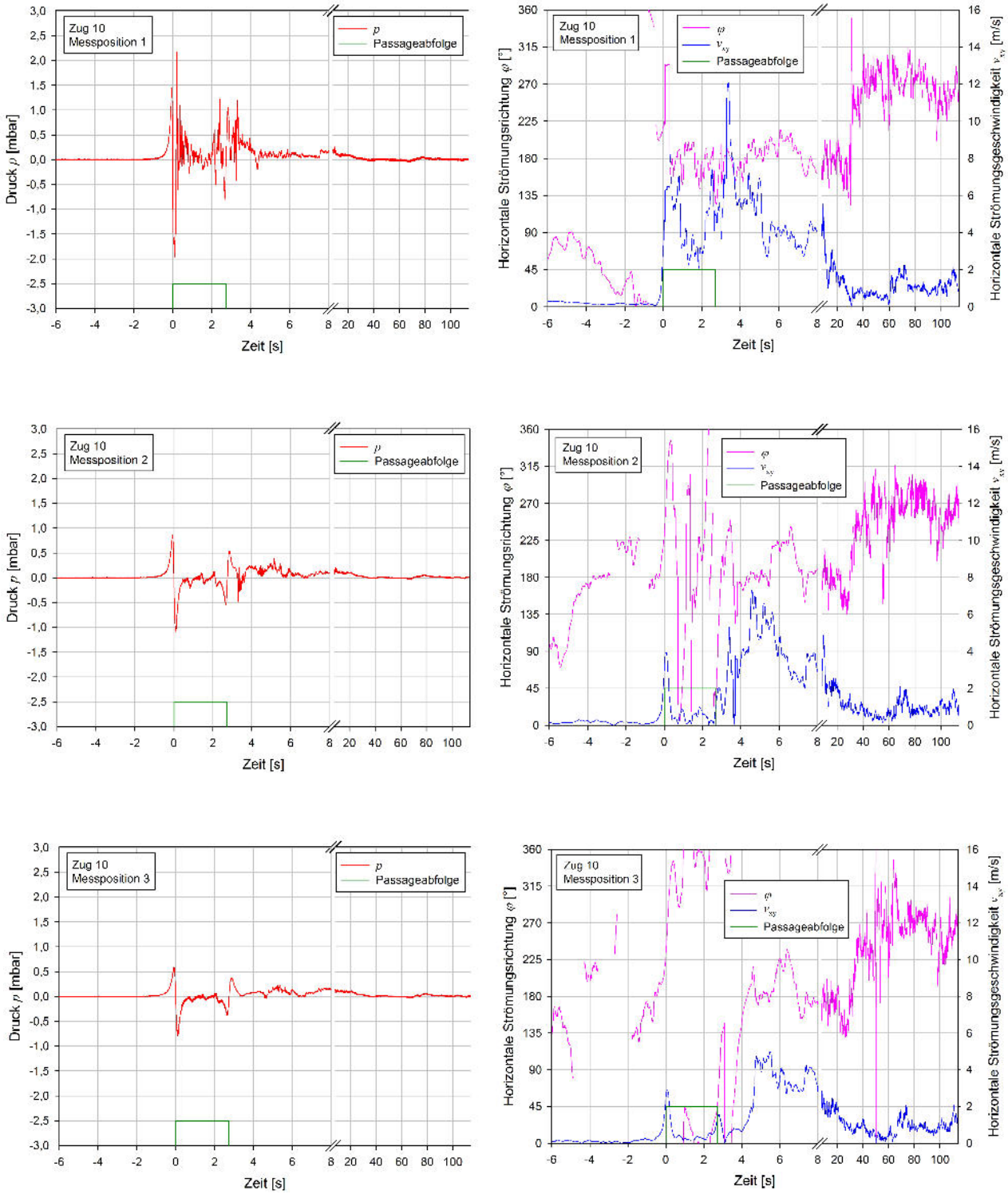


Abbildung B.48: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$.

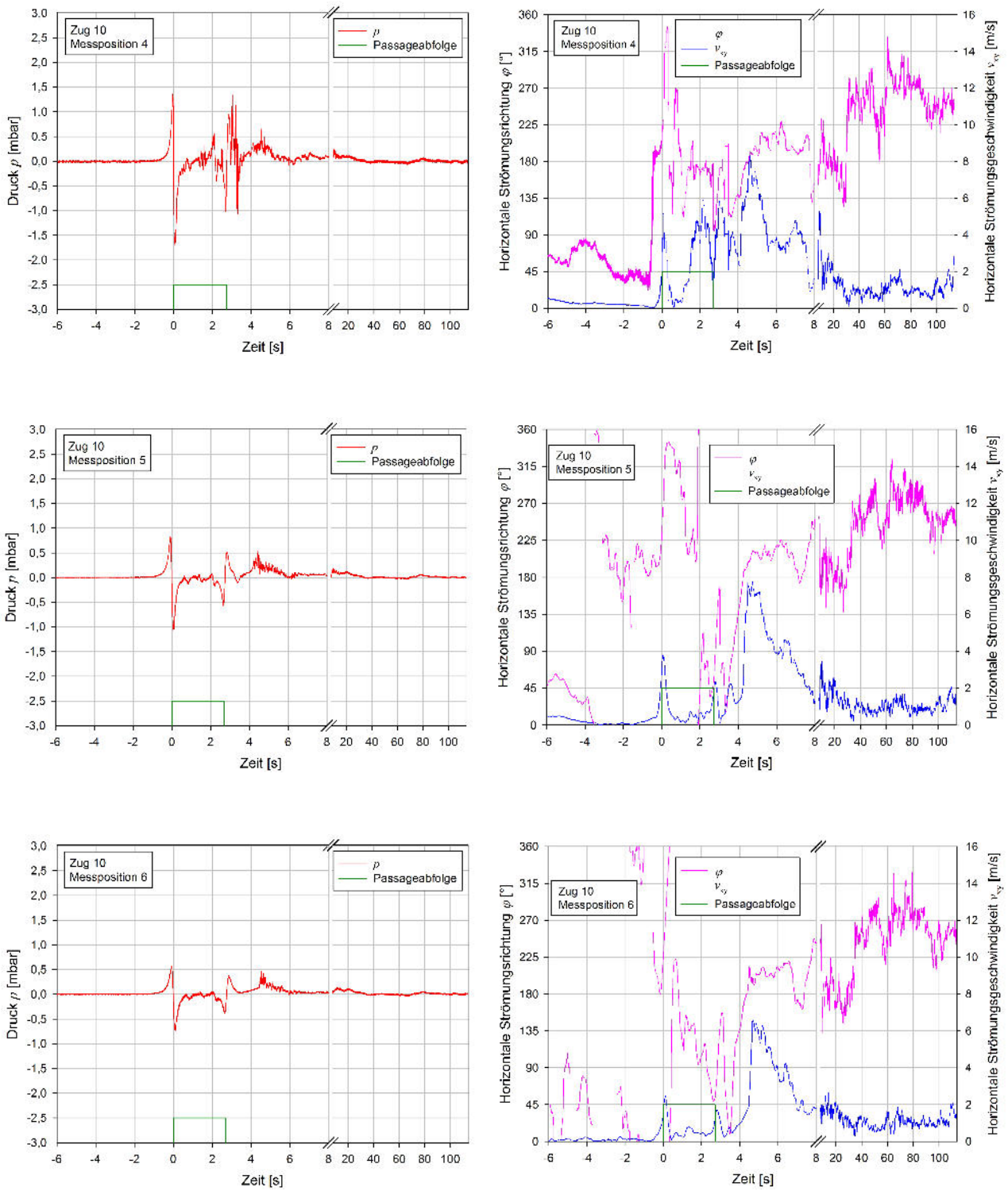


Abbildung B.49: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$.

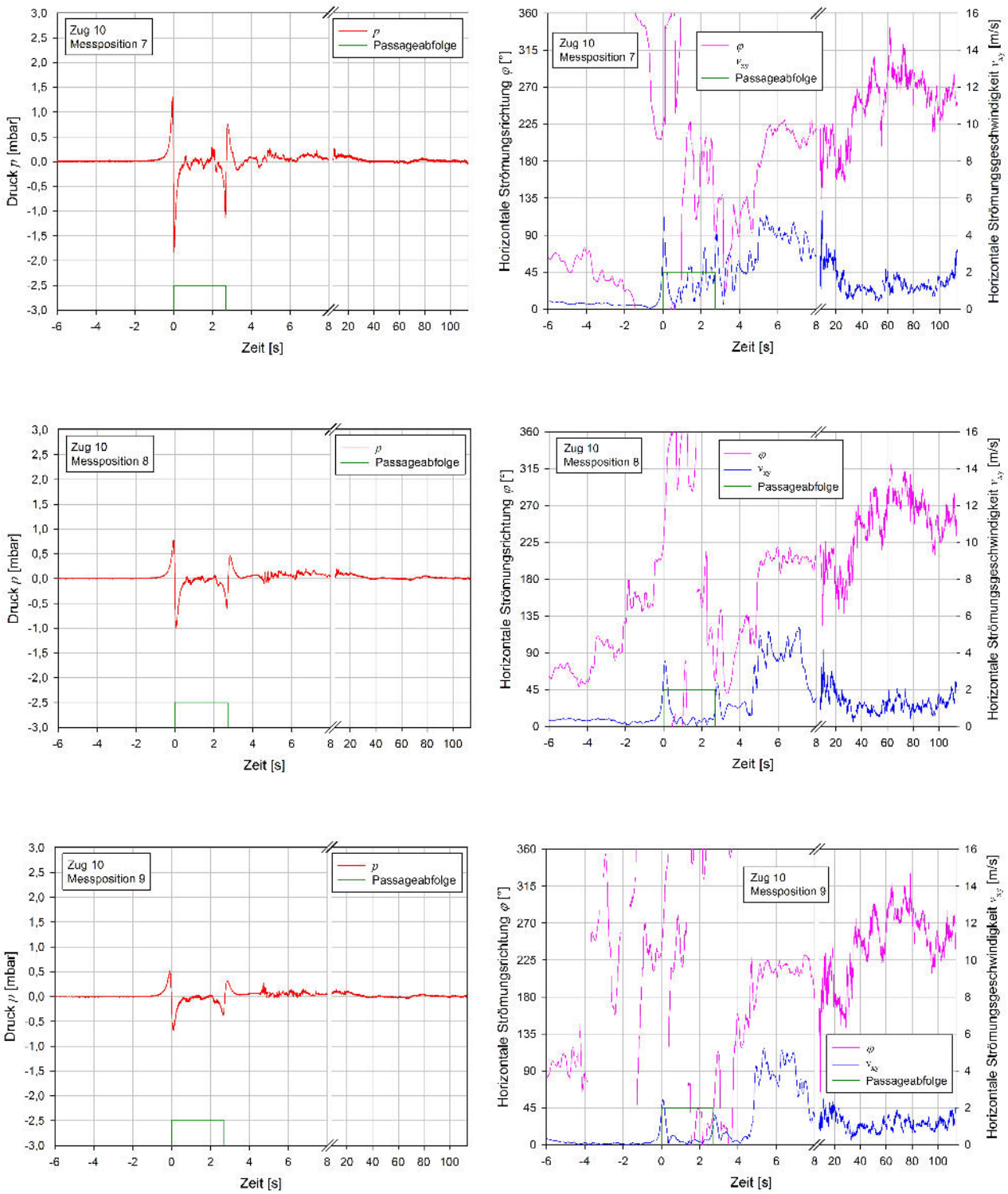


Abbildung B.50: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$.

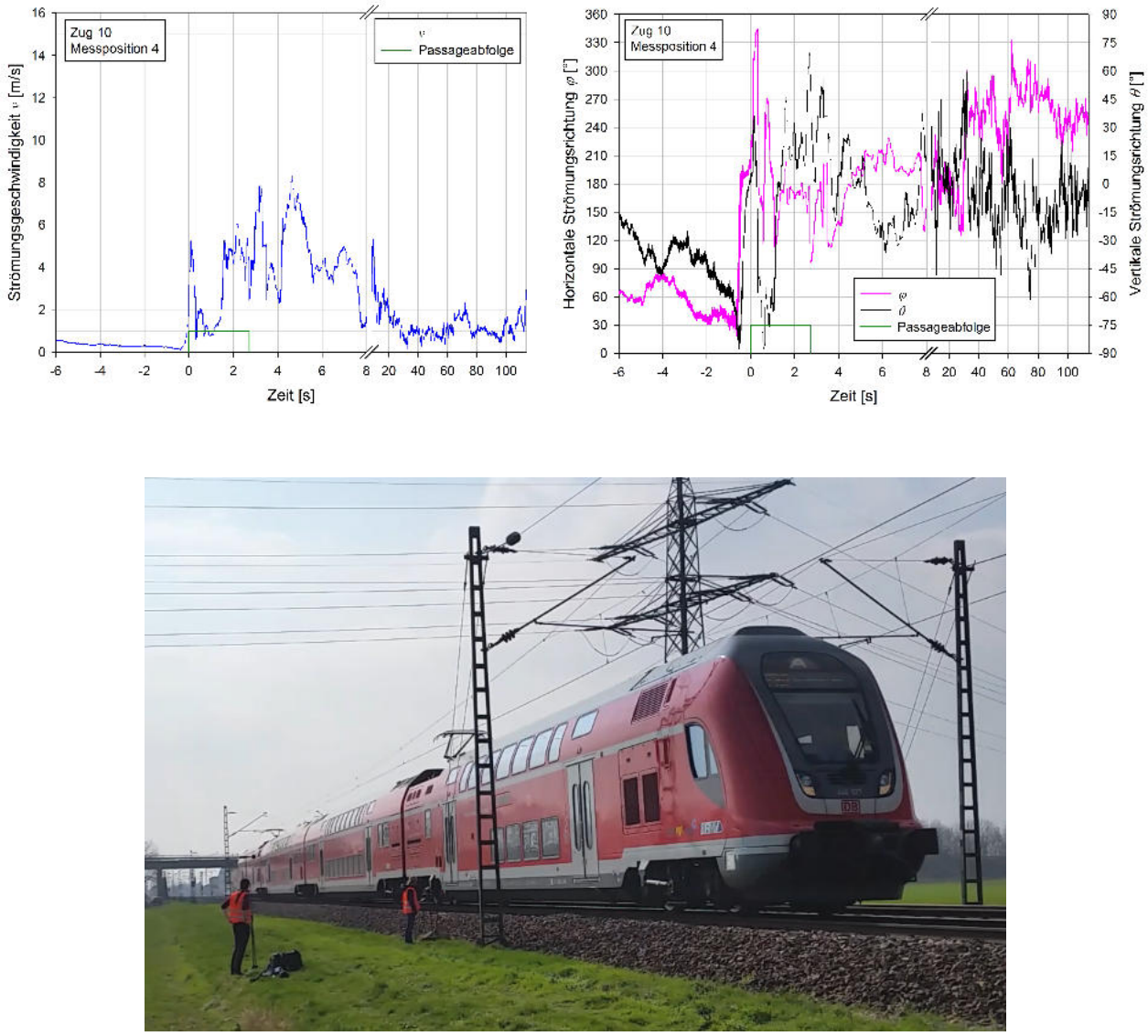


Abbildung B.51: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 10 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 10 ($\bar{v} = 136{,}1 \pm 1{,}4\,\mathrm{km/h}$).

Zug 11: Güterzug (Lok mit 24 Wagen)

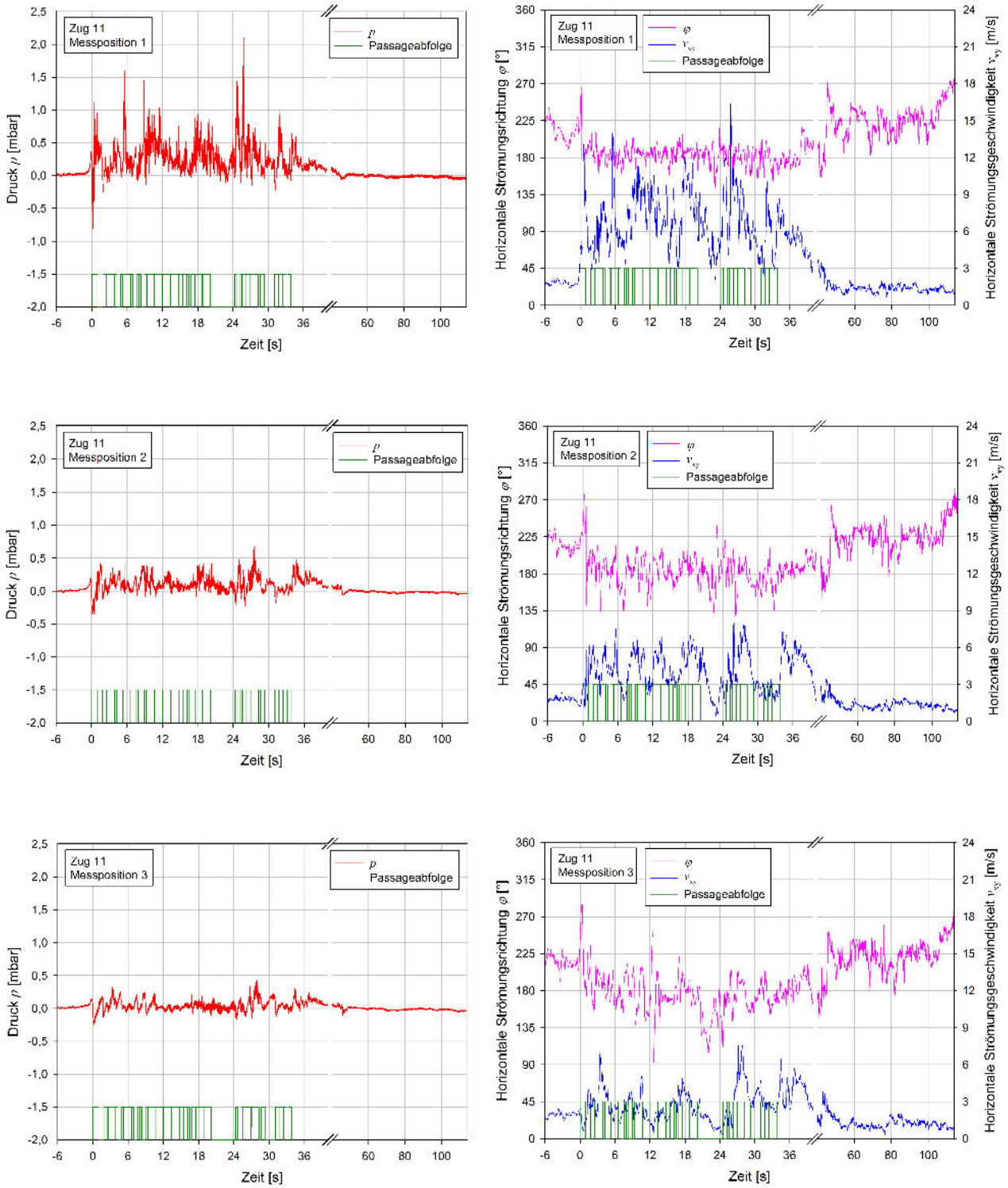


Abbildung B.52: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 11 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

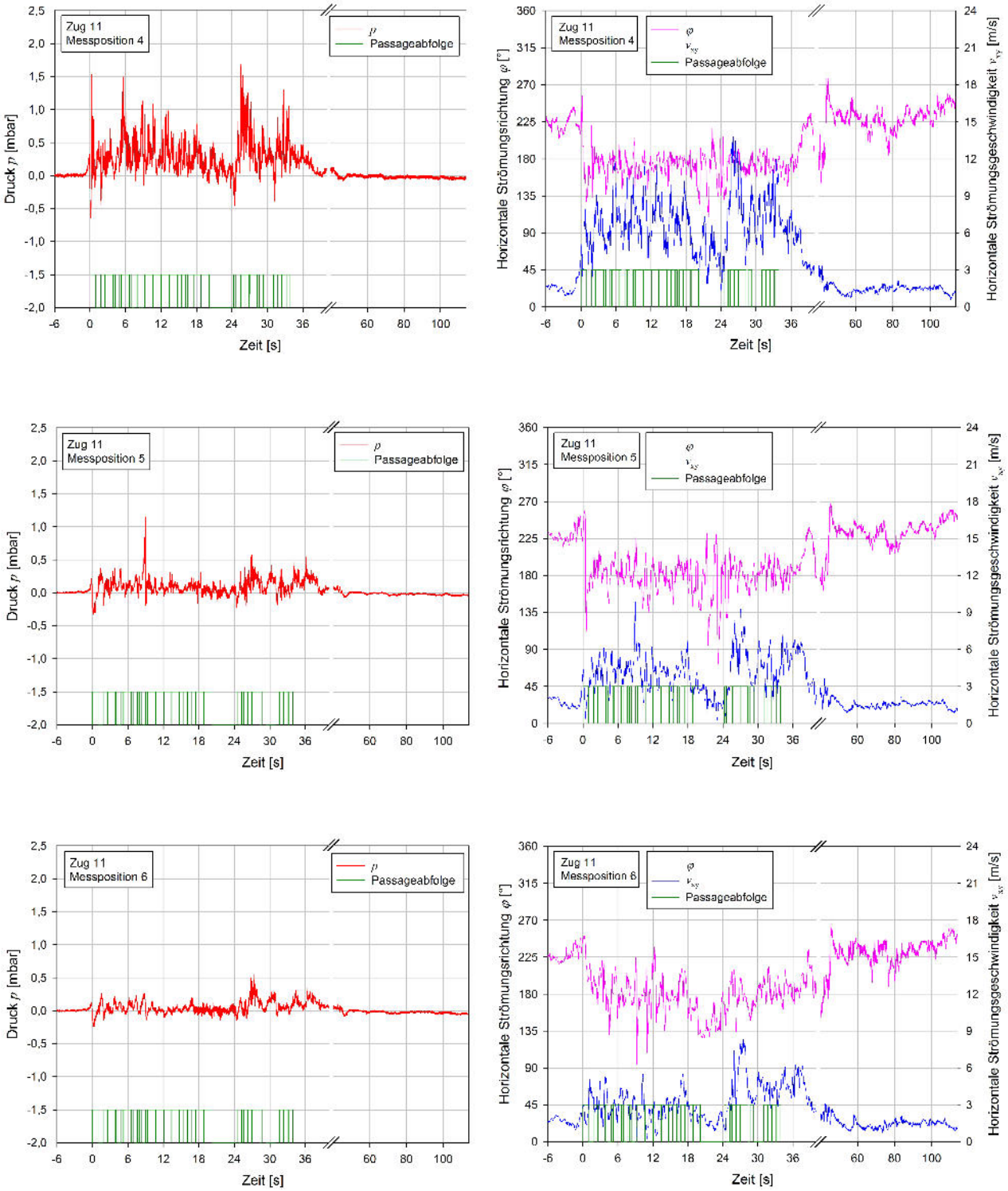


Abbildung B.53: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 11 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

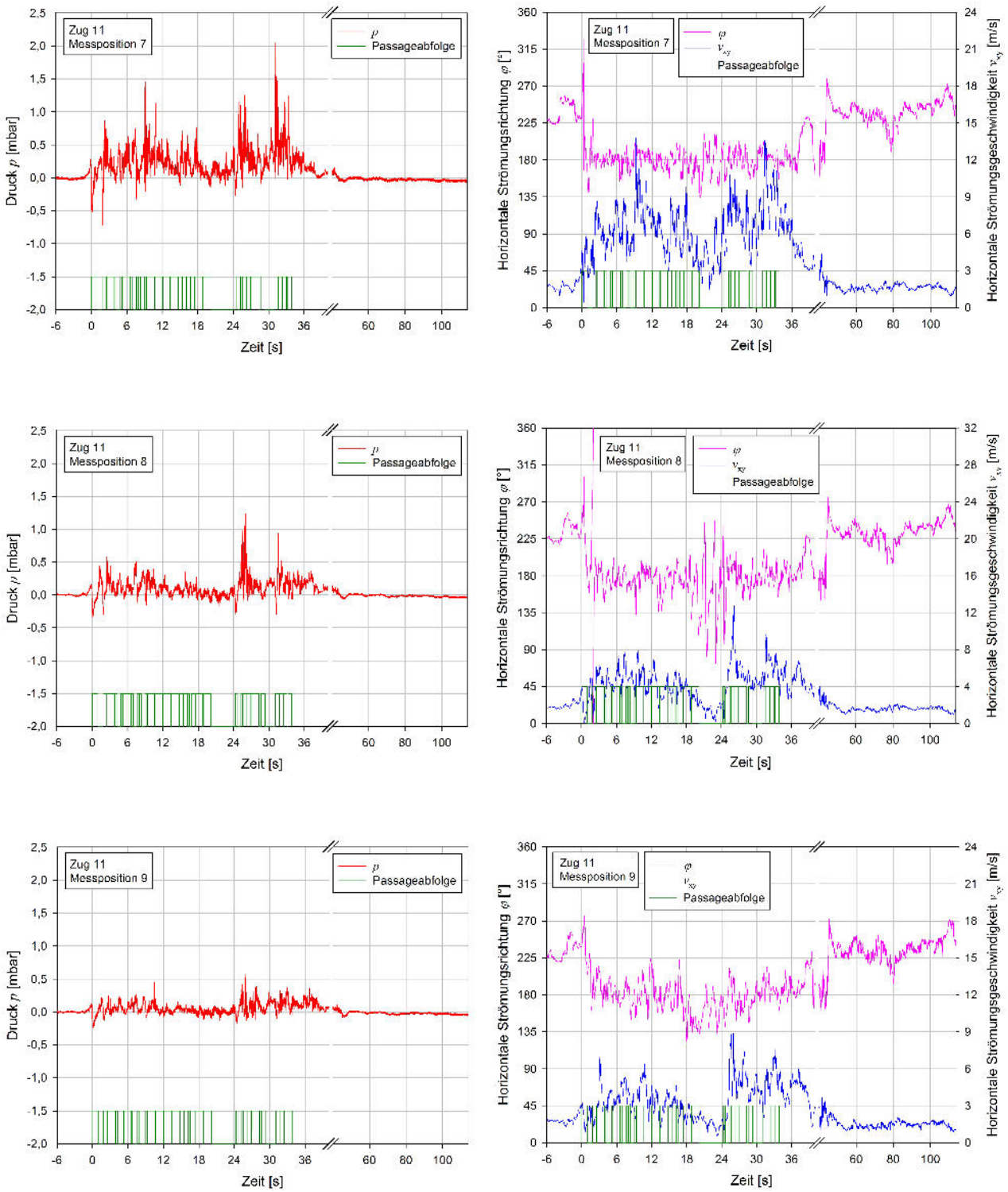
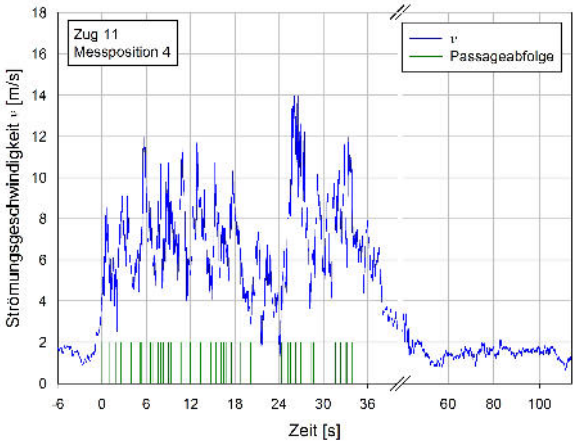


Abbildung B.54: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 10 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.



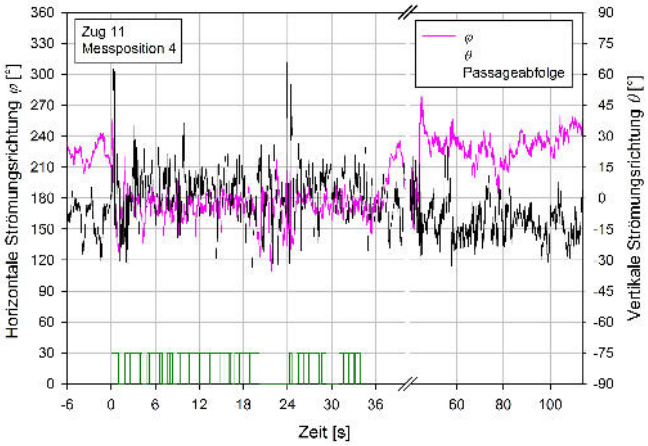






Abbildung B.55: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 11 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 11 ($\bar{v} = 68{,}8 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$).

Zug 12: Doppelstockzug K1 + K2 (3 Wagen + 4 Wagen)

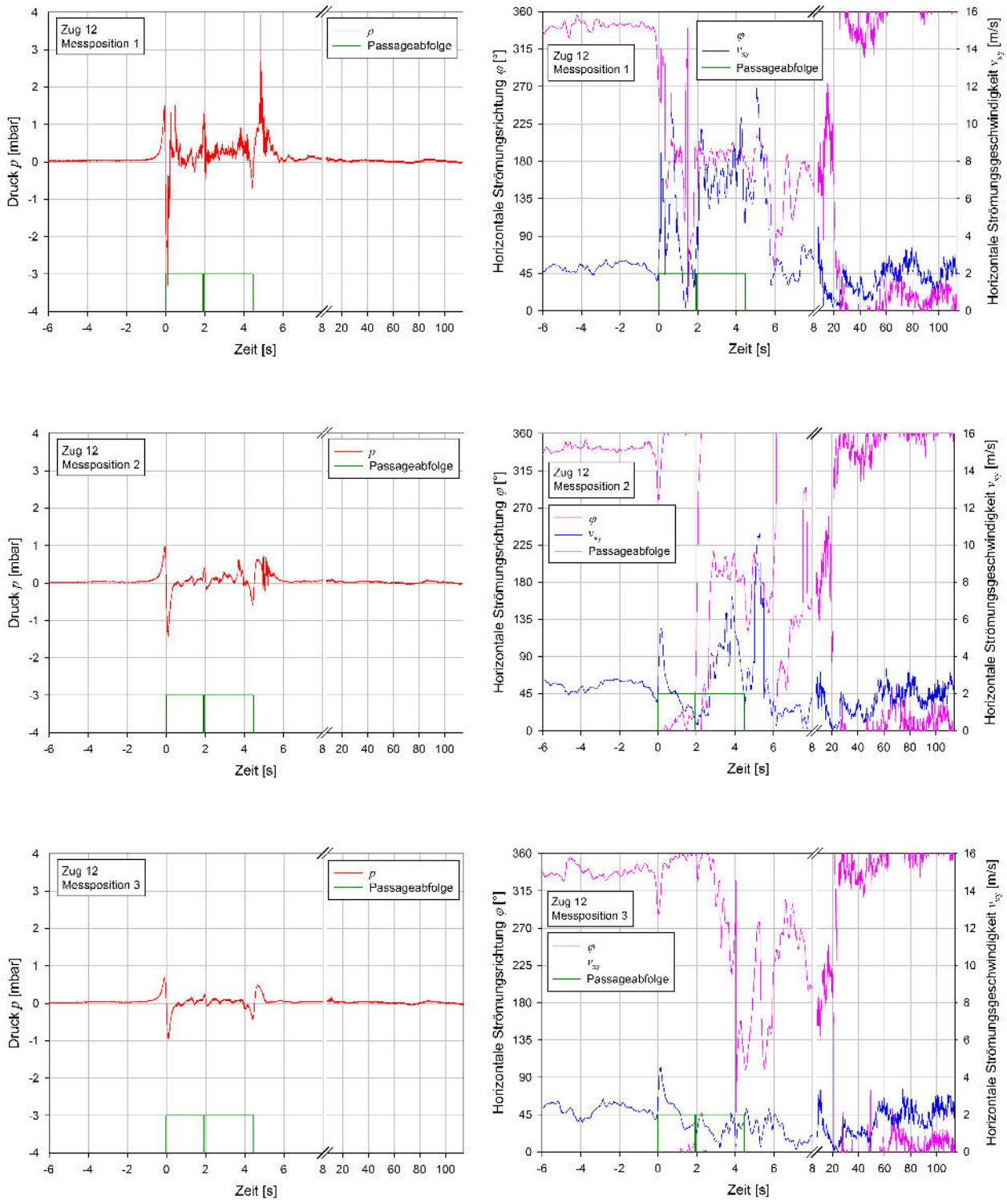


Abbildung B.56: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 12 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$.

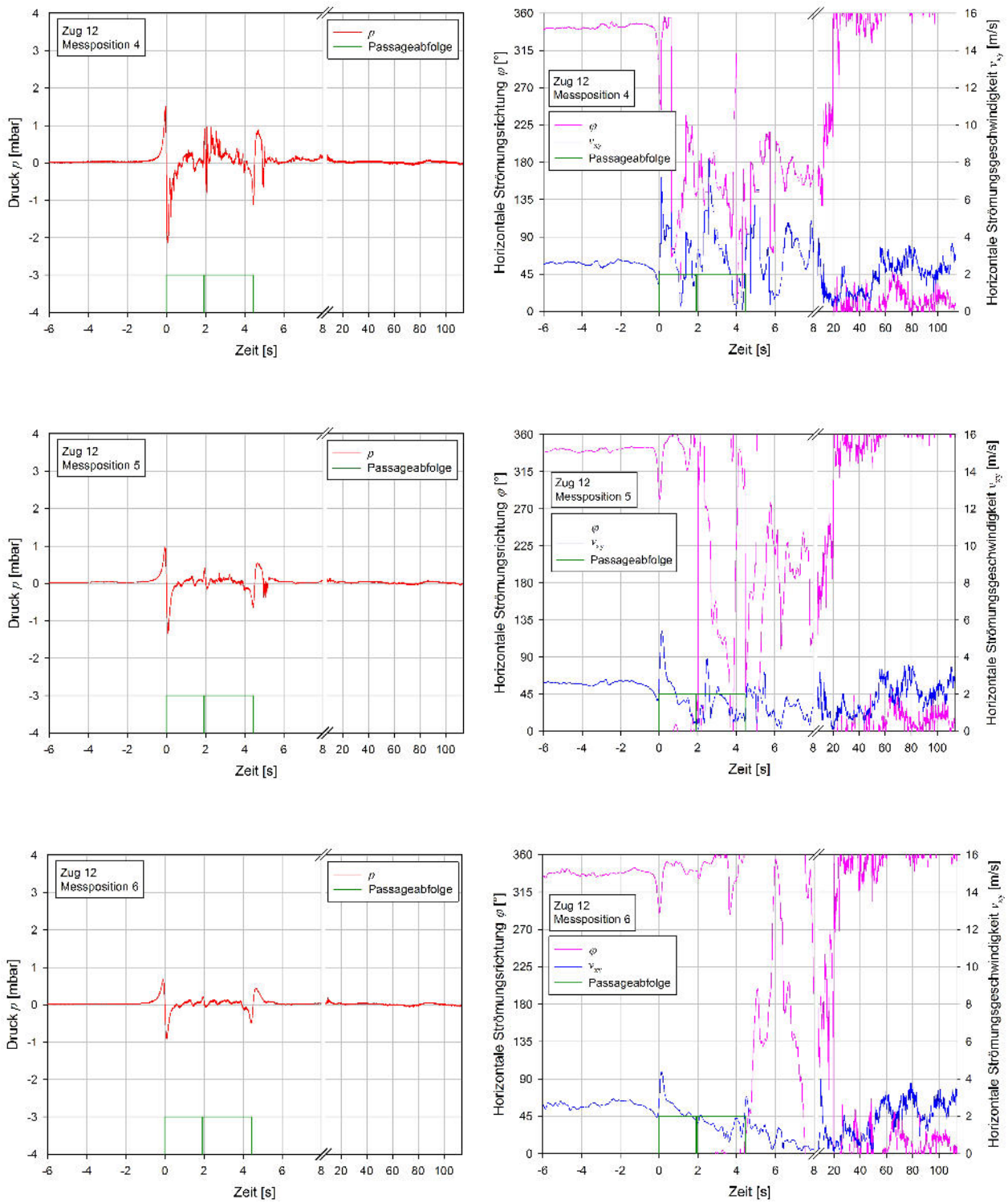


Abbildung B.57: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 12 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$.

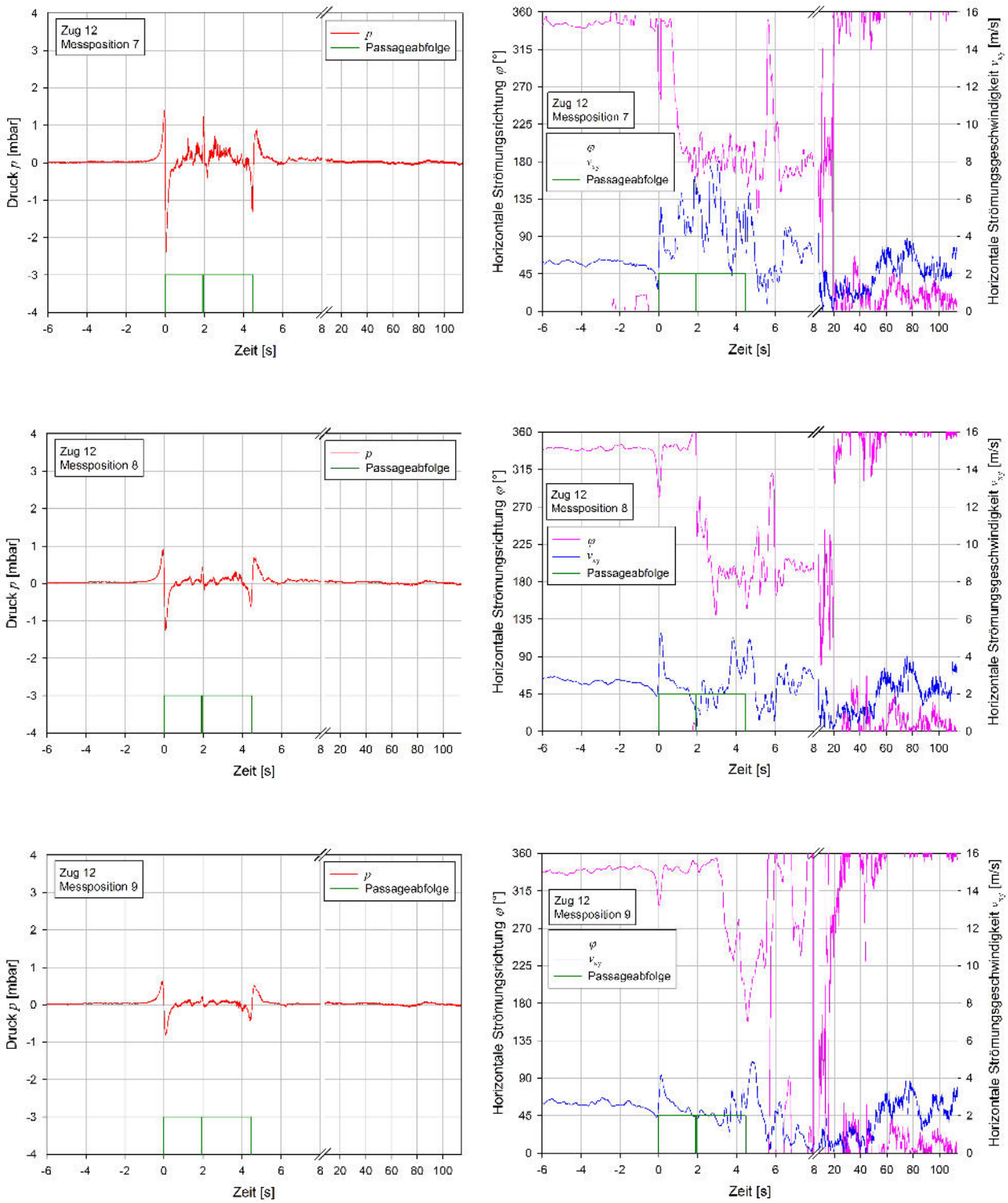


Abbildung B.58: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 12 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$.

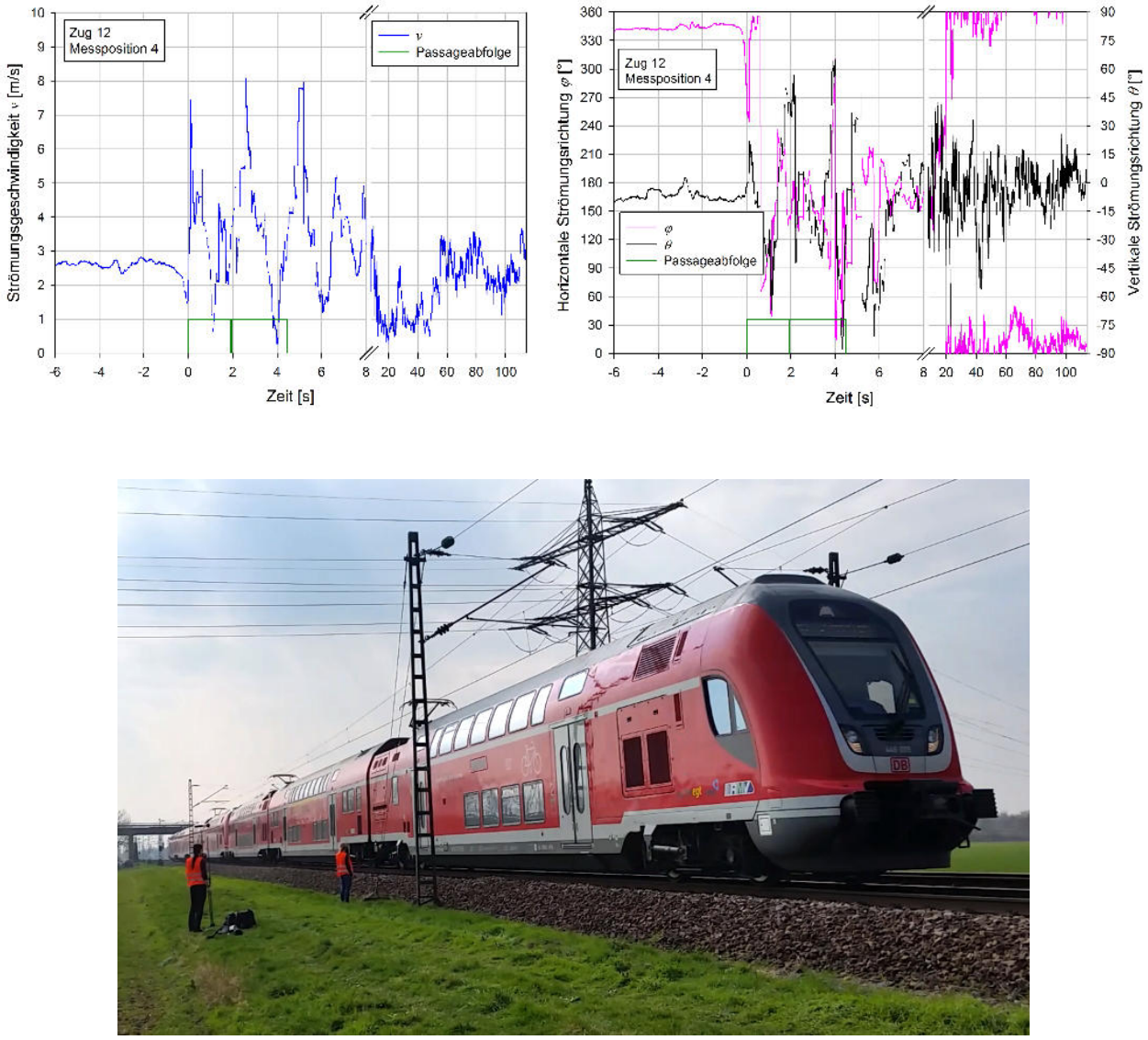


Abbildung B.59: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 12 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 12 ($\bar{v} = 143{,}6 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$).

Zug 13: S-Bahn (Baureihe 425)

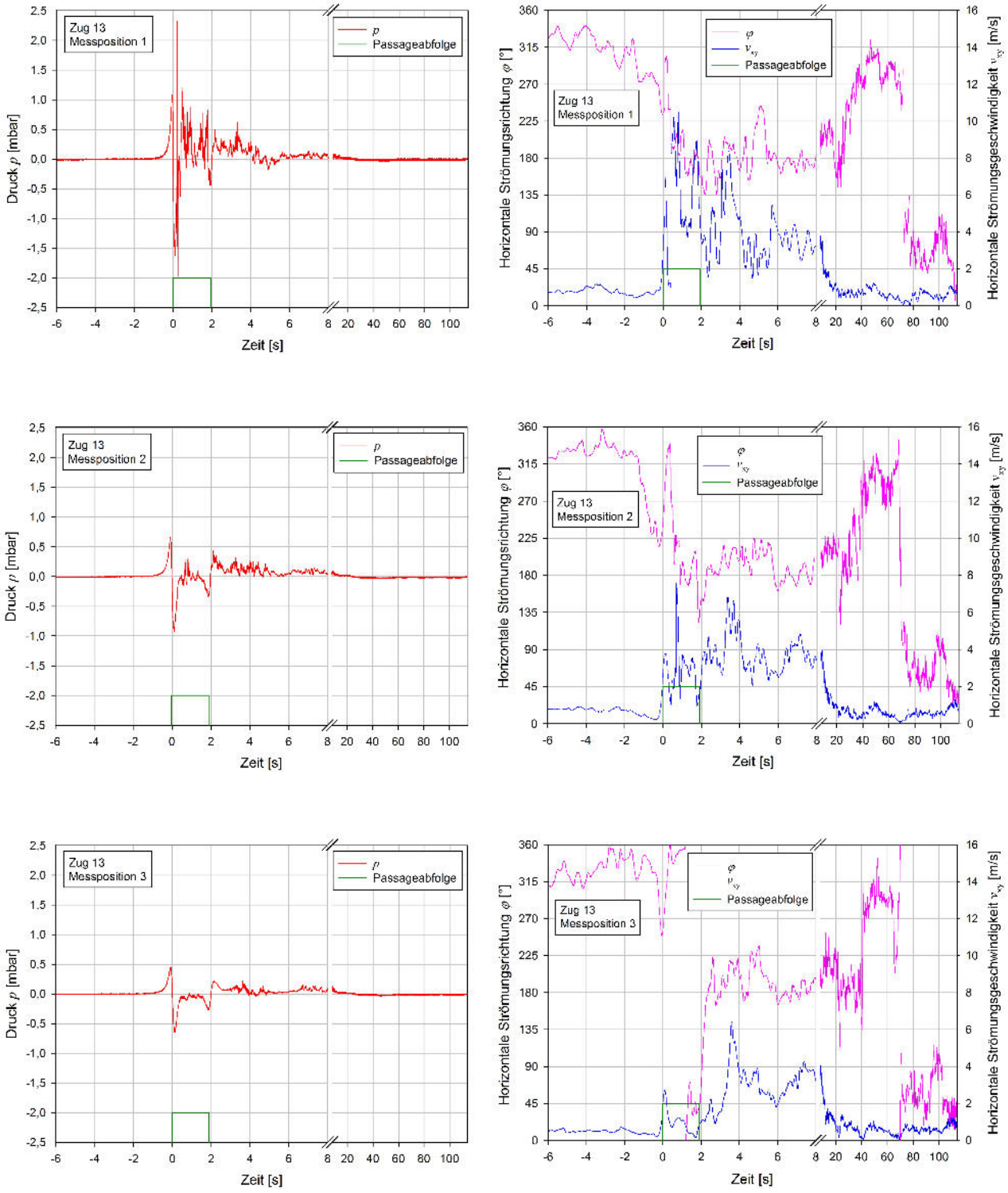


Abbildung B.60: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 13 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

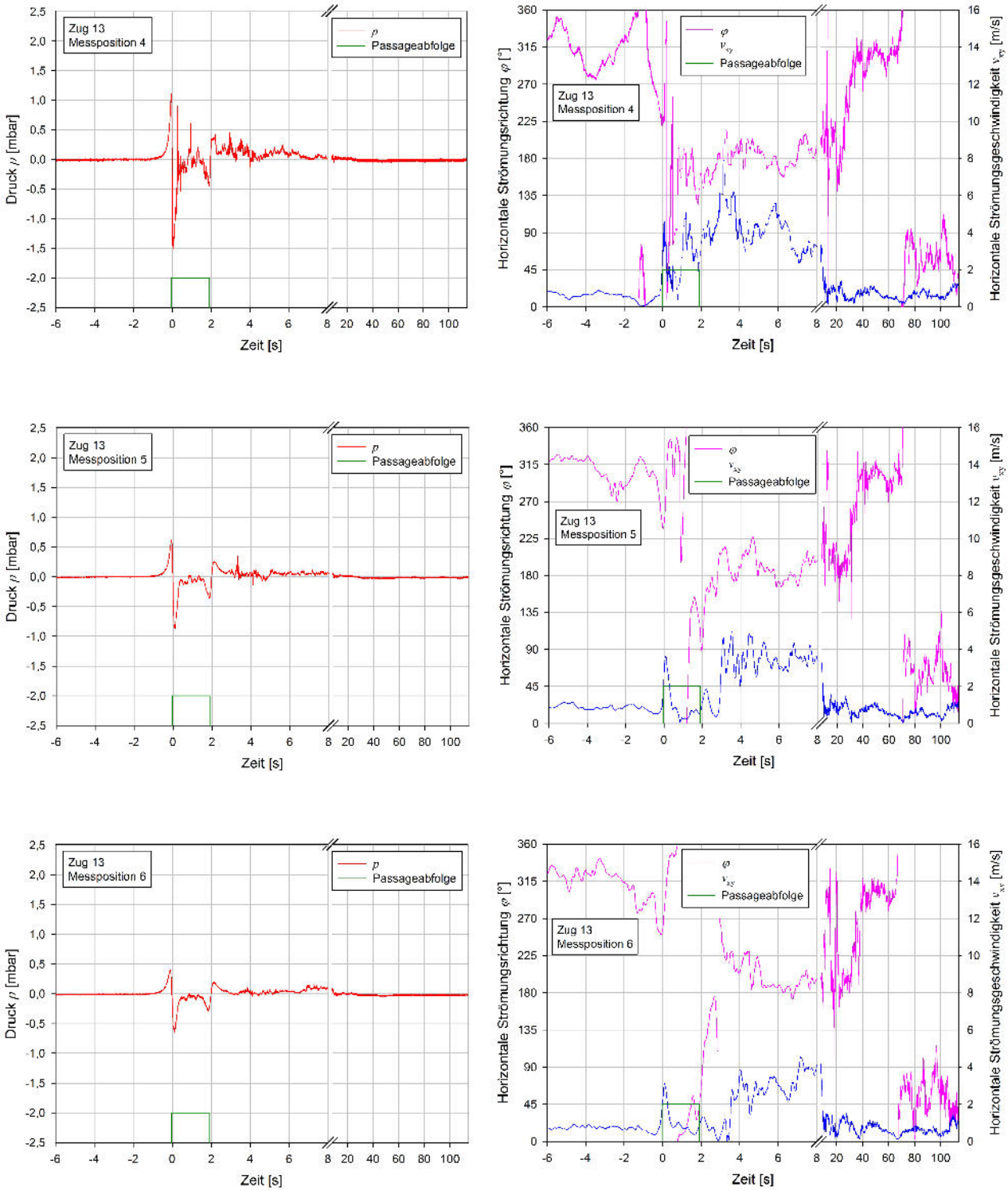


Abbildung B.61: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 13 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

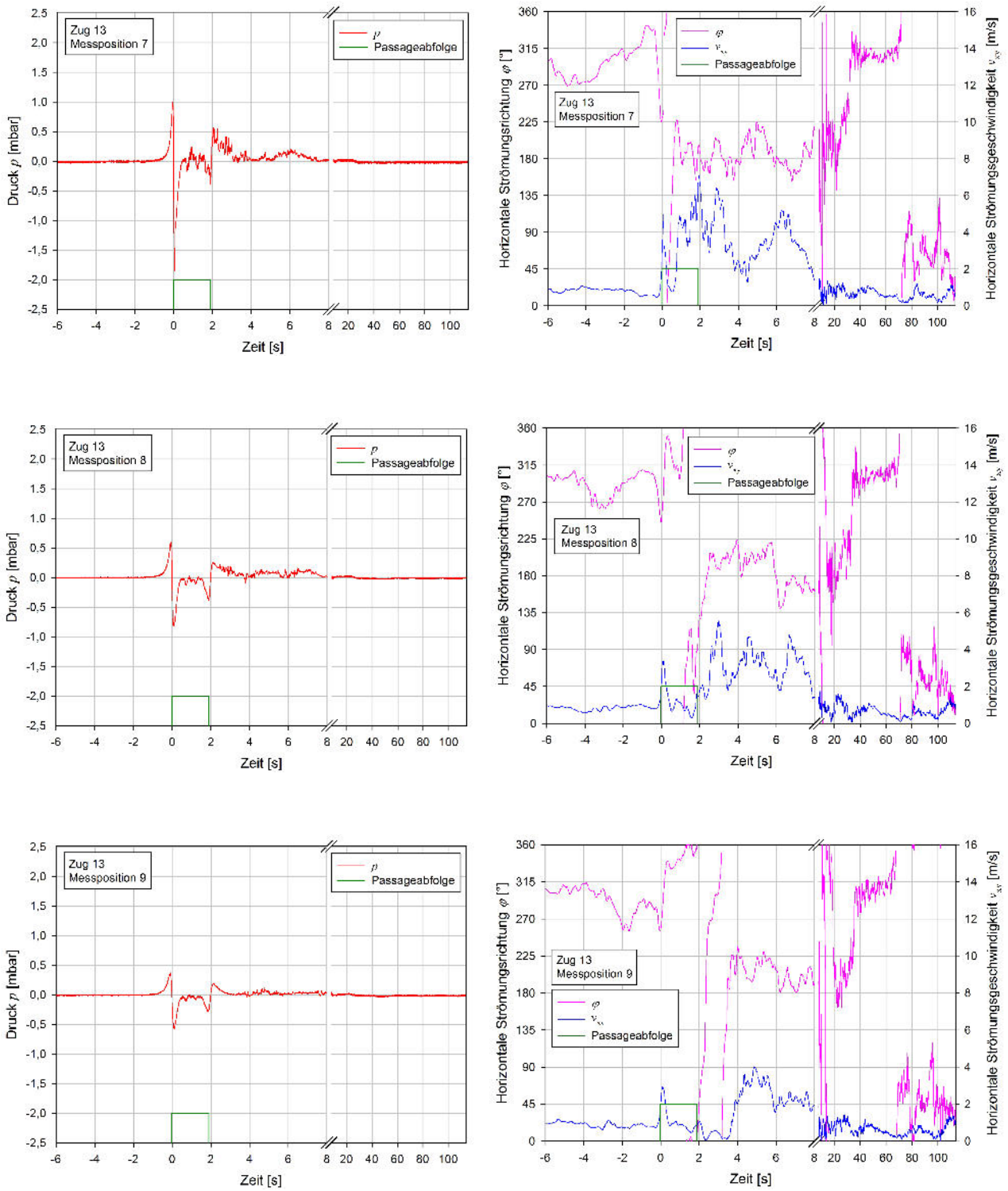


Abbildung B.62: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 13 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

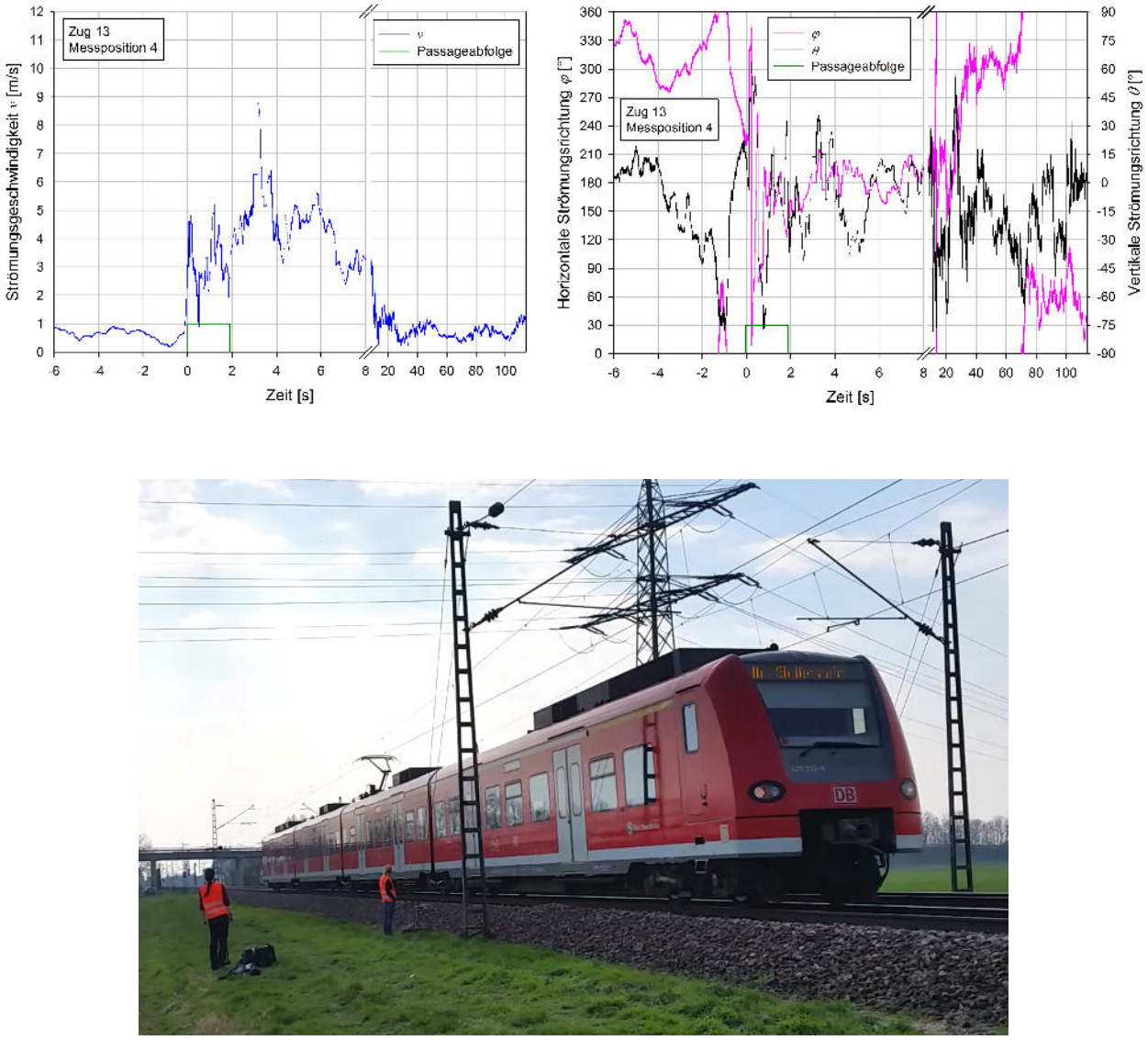


Abbildung B.63: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 13 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 13 ($\bar{v} = 125{,}6 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 14: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

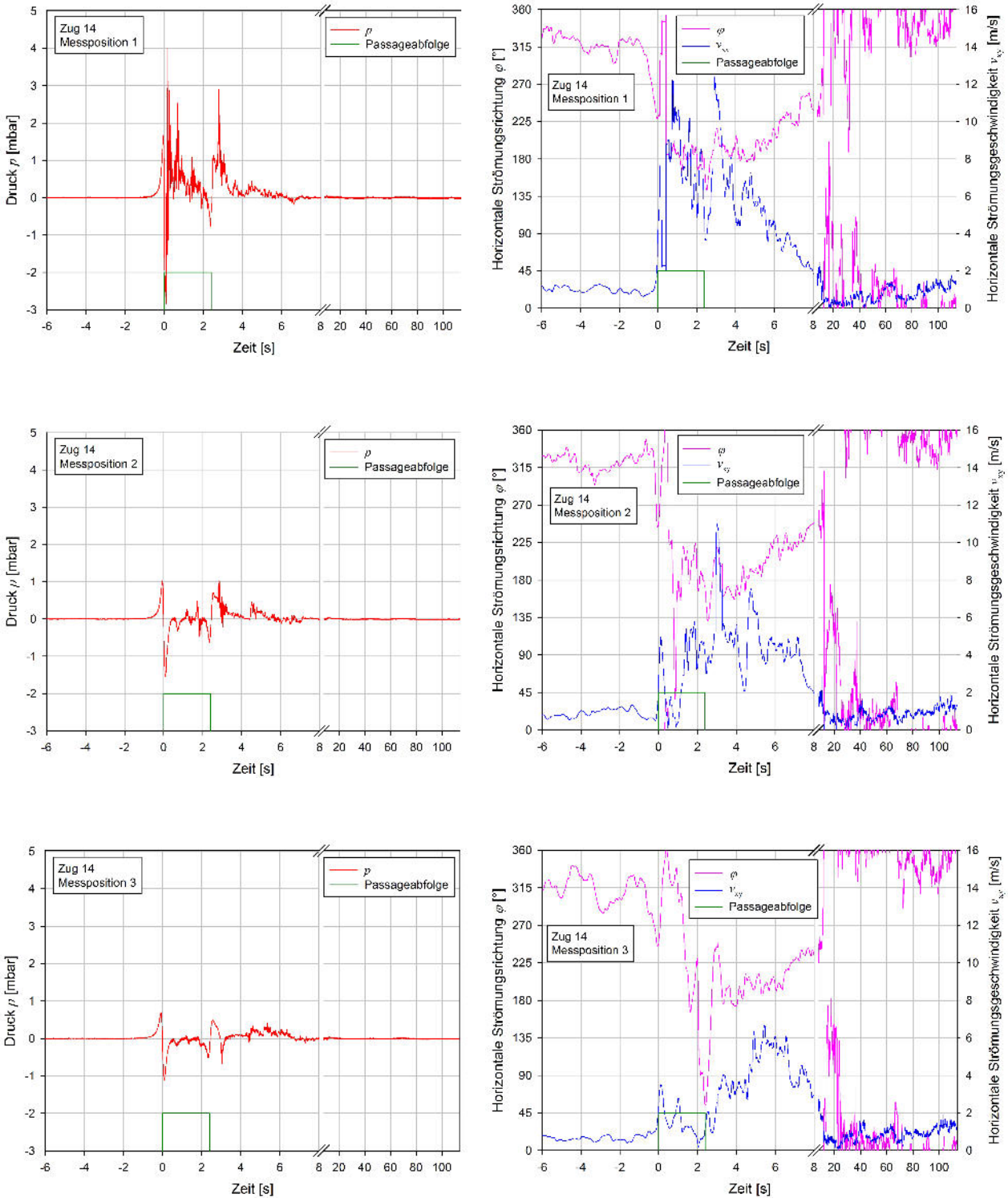


Abbildung B.64: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 14 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

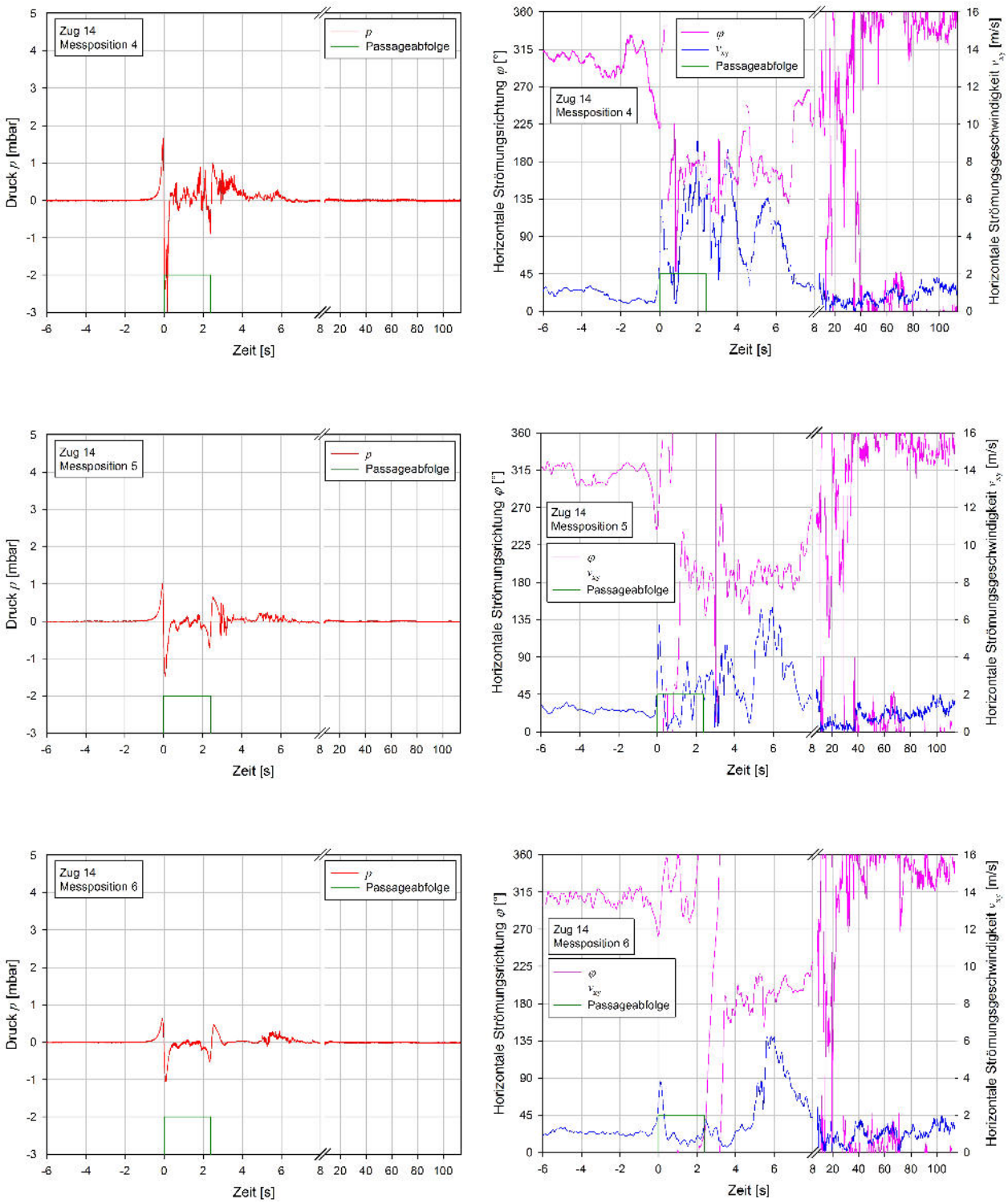


Abbildung B.65: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 14 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

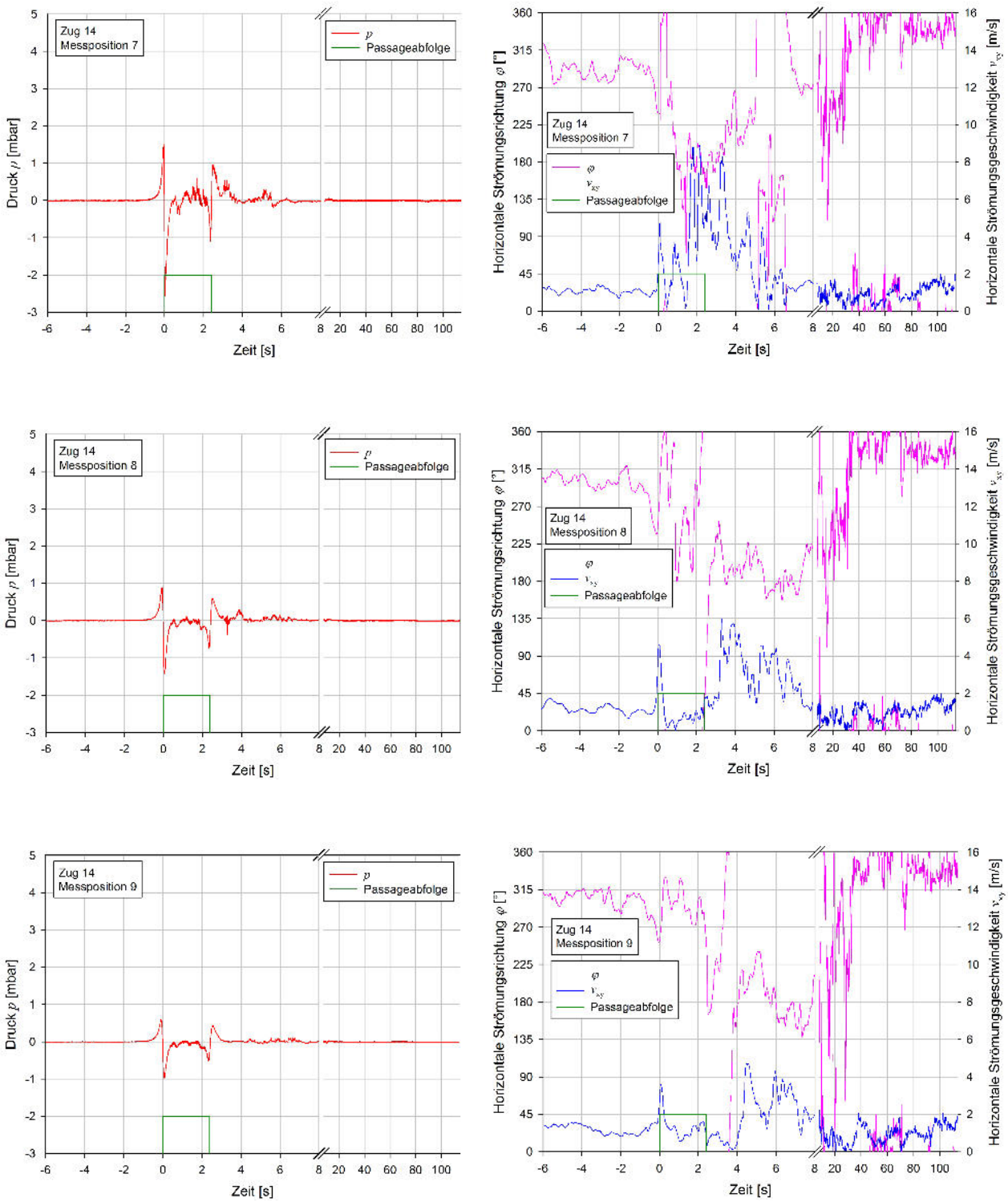


Abbildung B.66: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 14 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

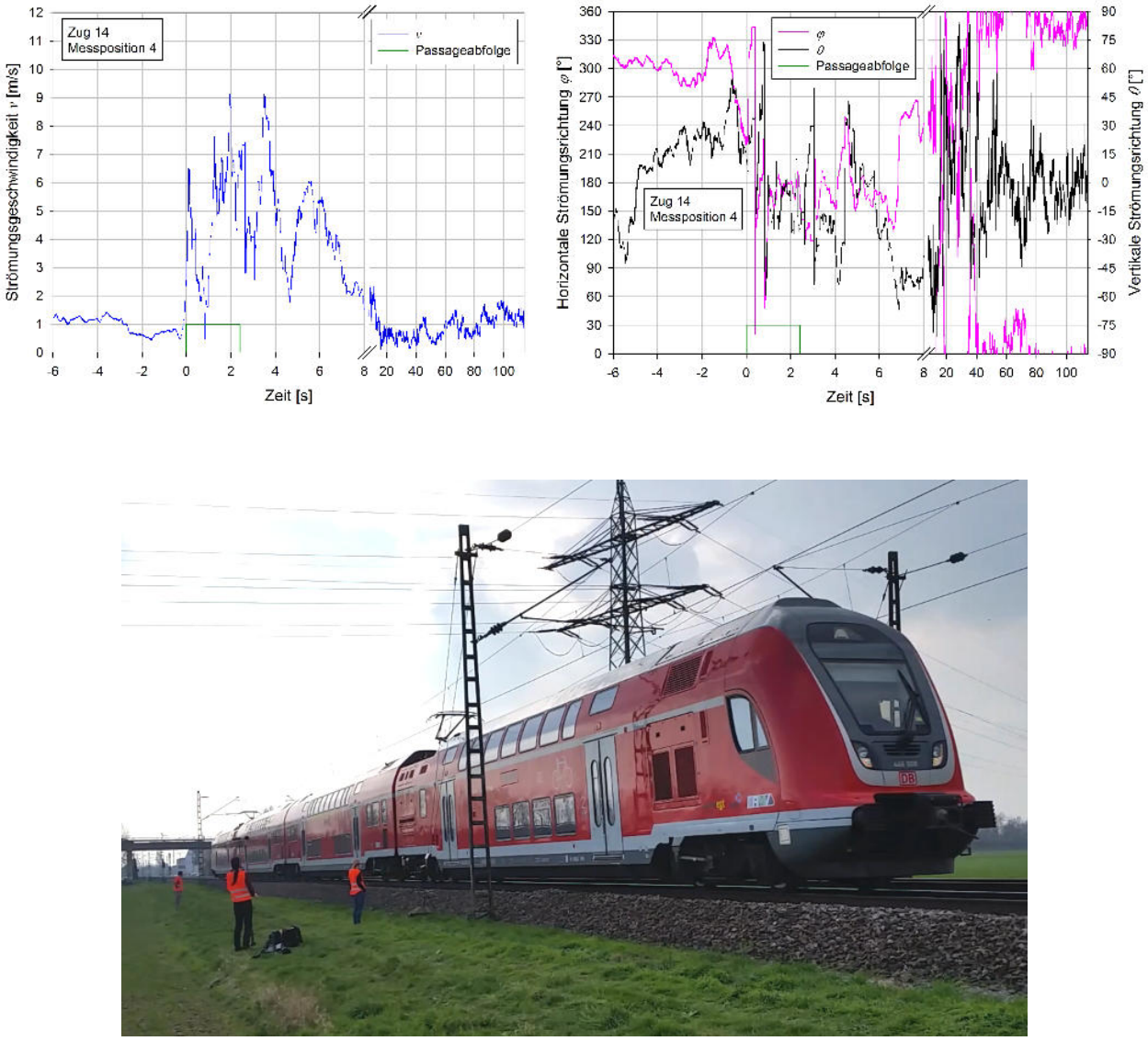


Abbildung B.67: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 14 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 14 ($\bar{v} = 156{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$).

Zug 15: Doppelstockzug K2 + K2 (4 Wagen + 4 Wagen)

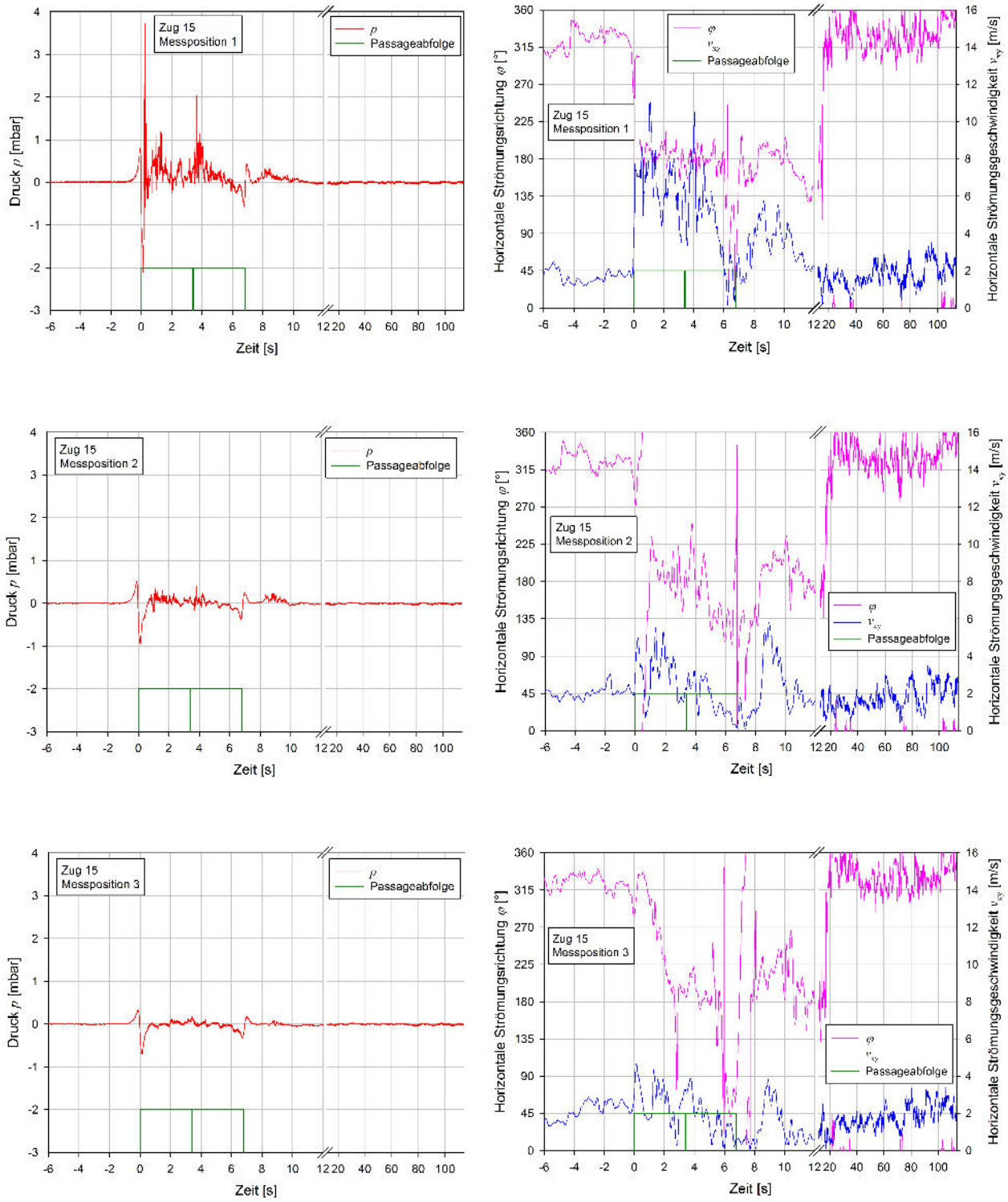


Abbildung B.68: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 15 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

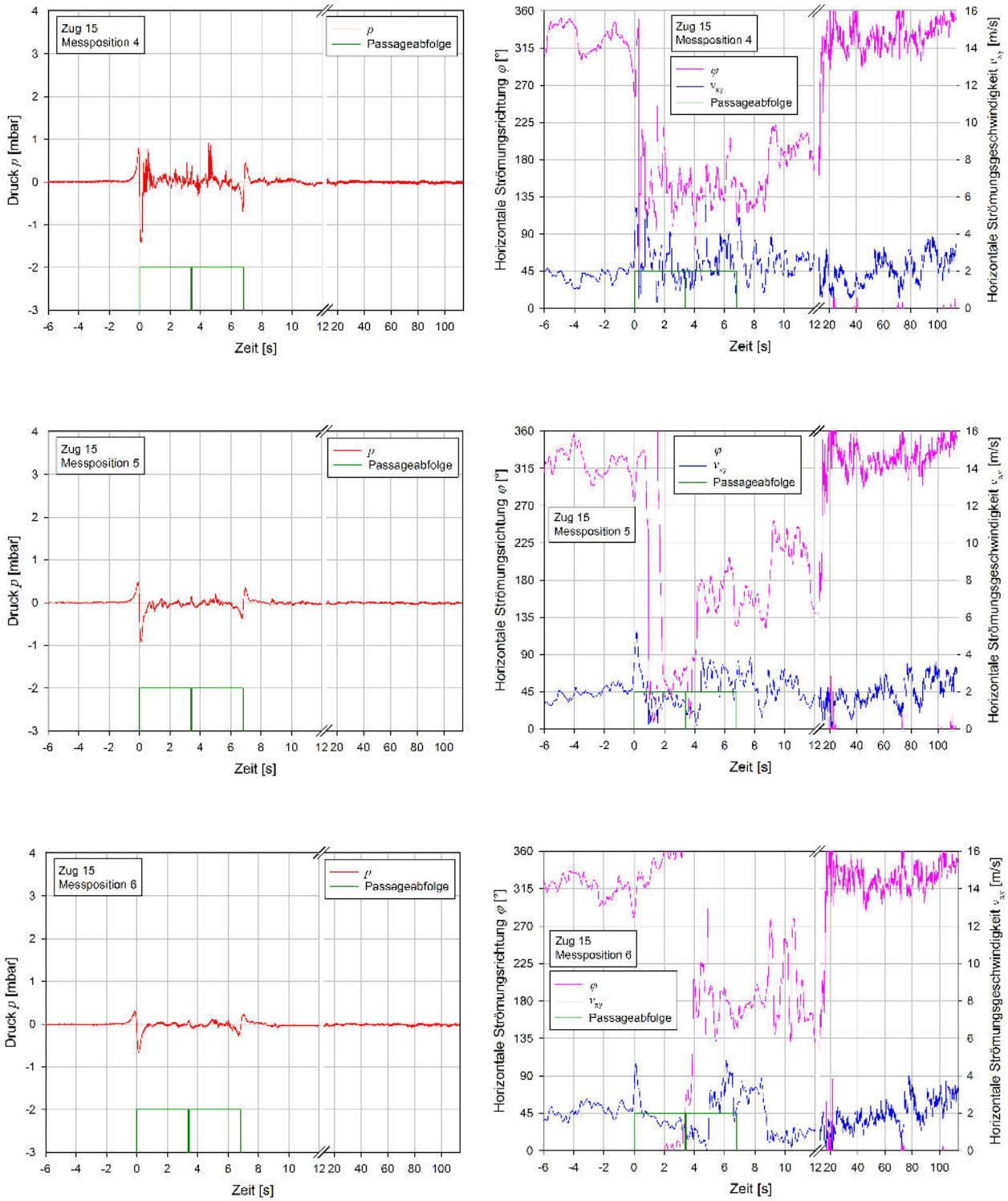


Abbildung B.69: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 15 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

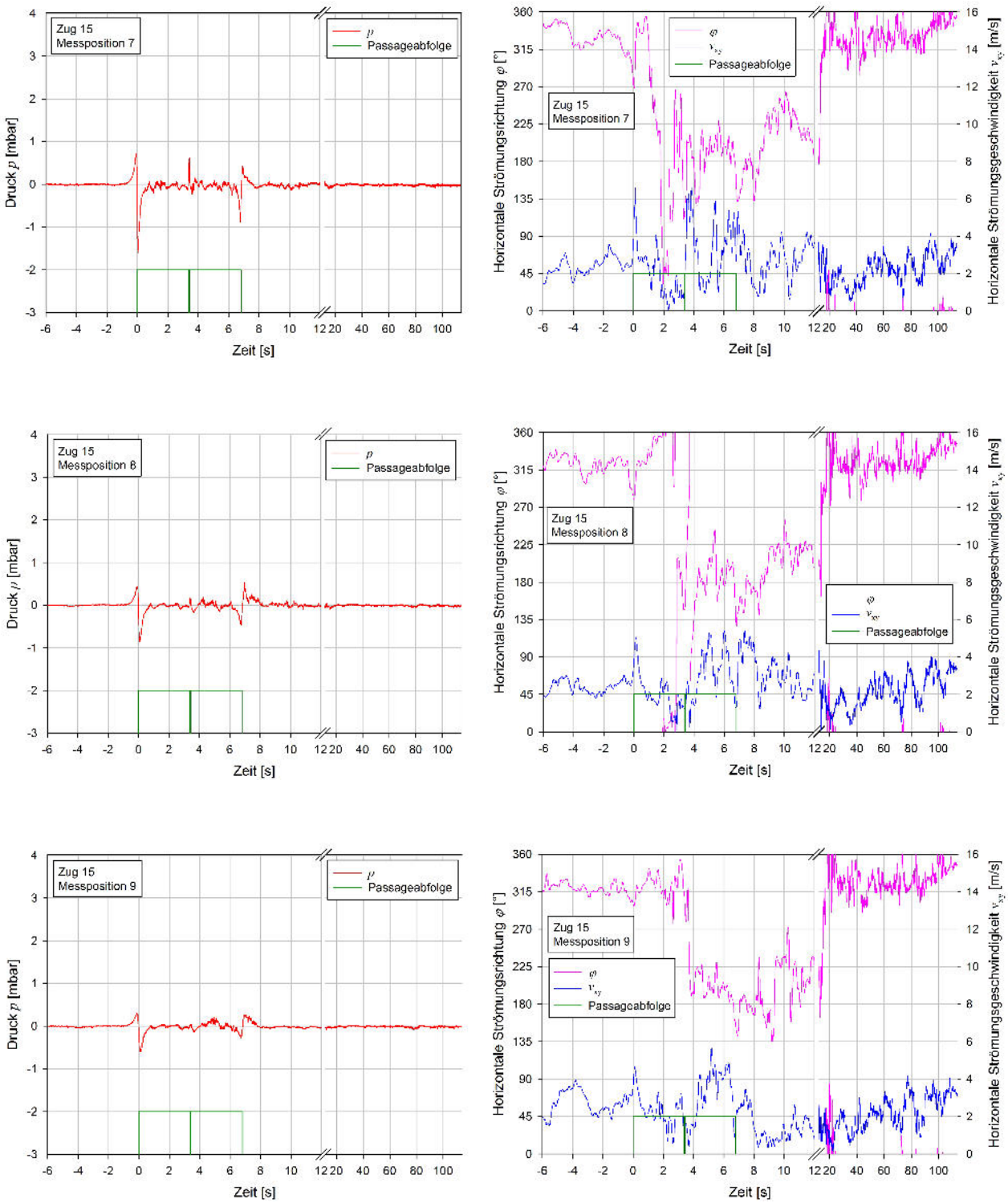


Abbildung B.70: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 15 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

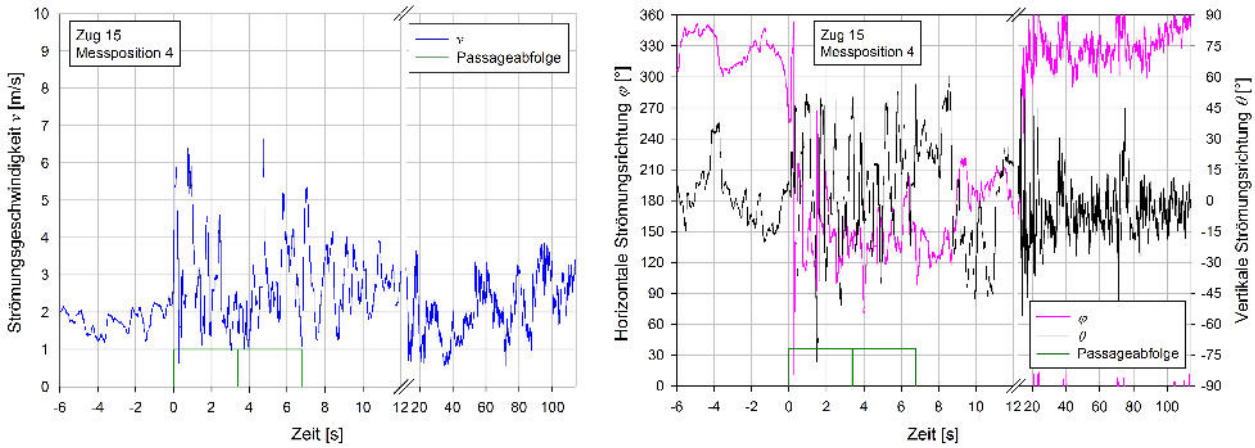




Abbildung B.71: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 15 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 15 ($\bar{v} = 110{,}7 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$).

Zug 16: S-Bahn (Baureihe 425)

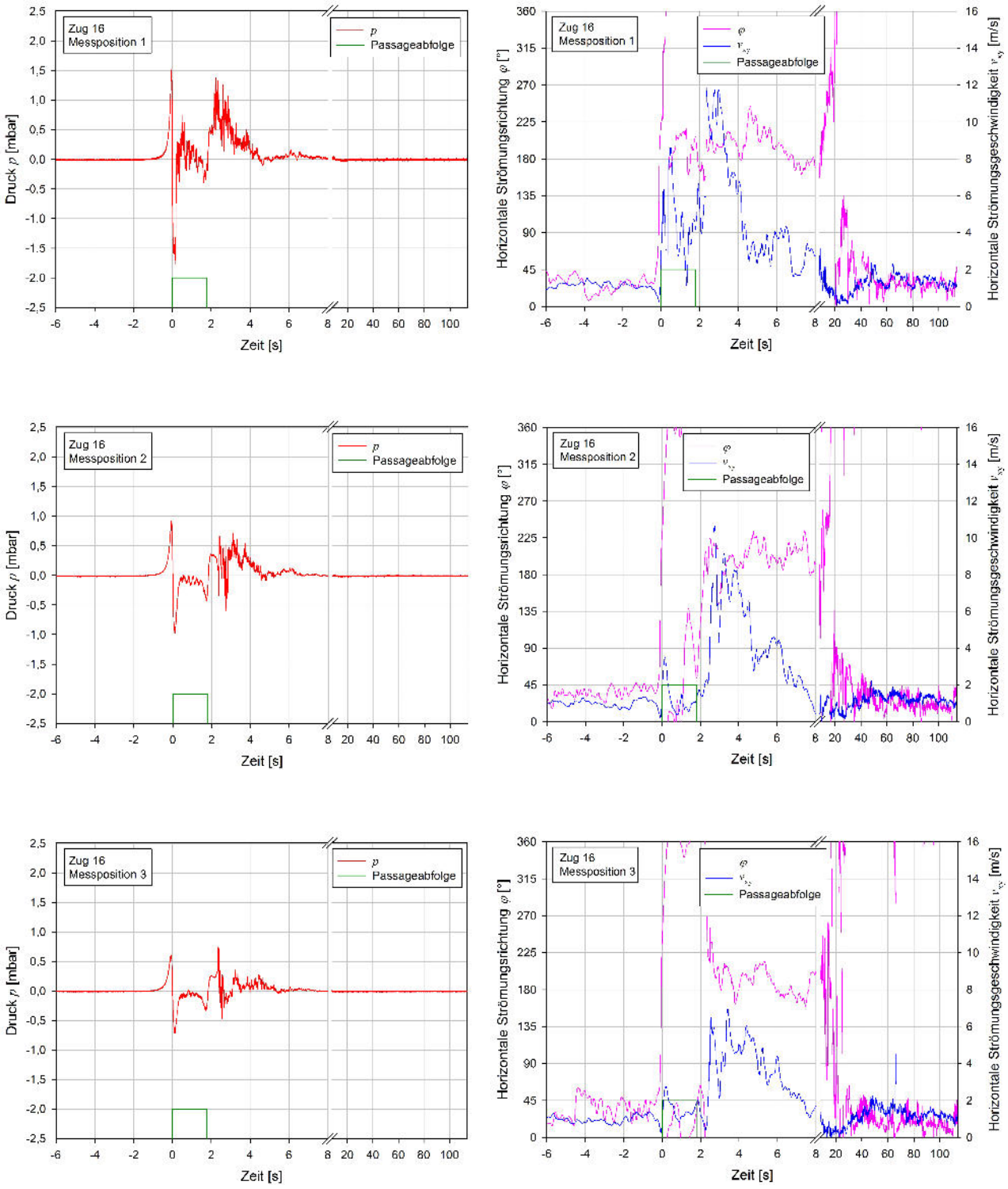


Abbildung B.72: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 16 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

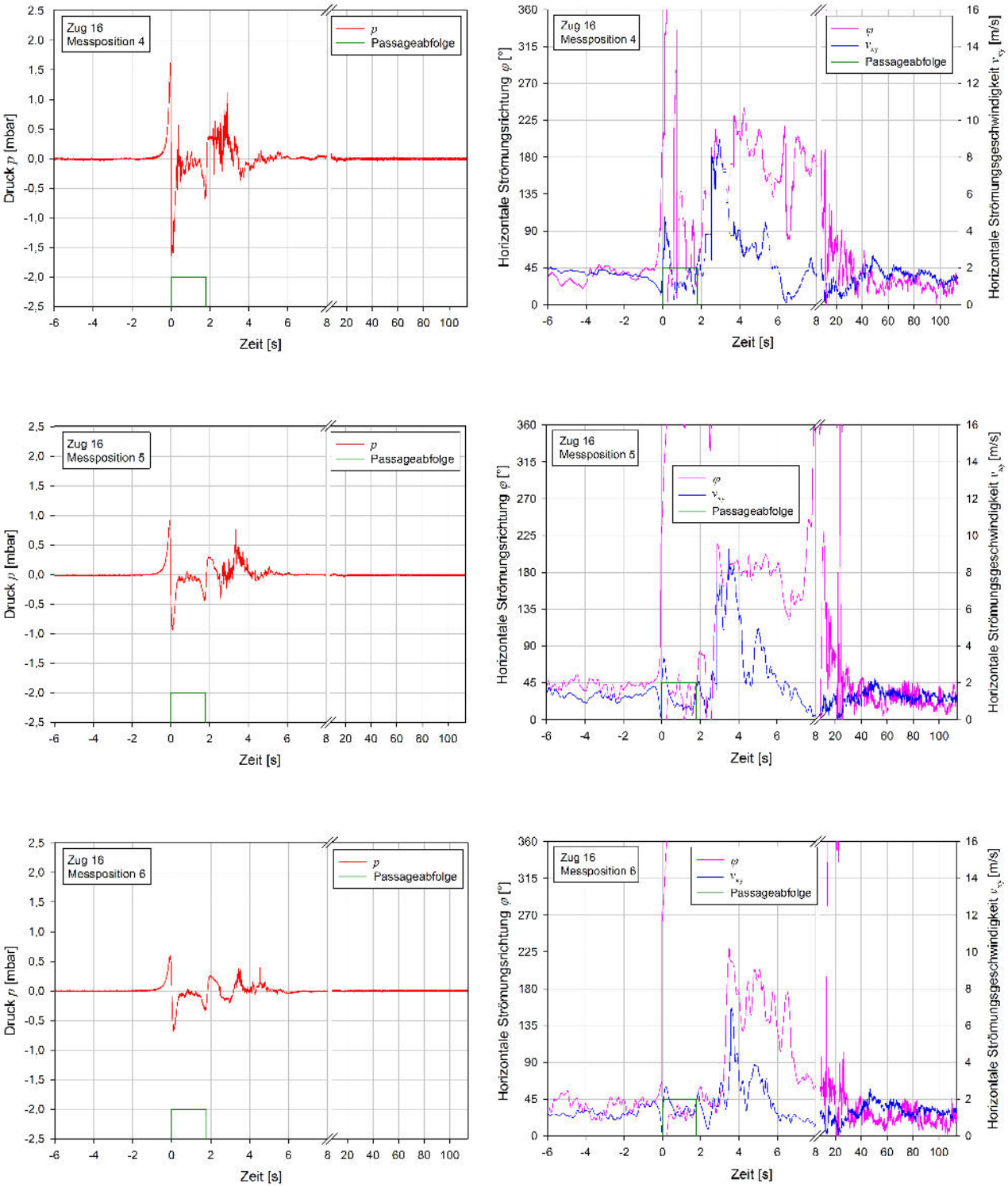


Abbildung B.73: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 16 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

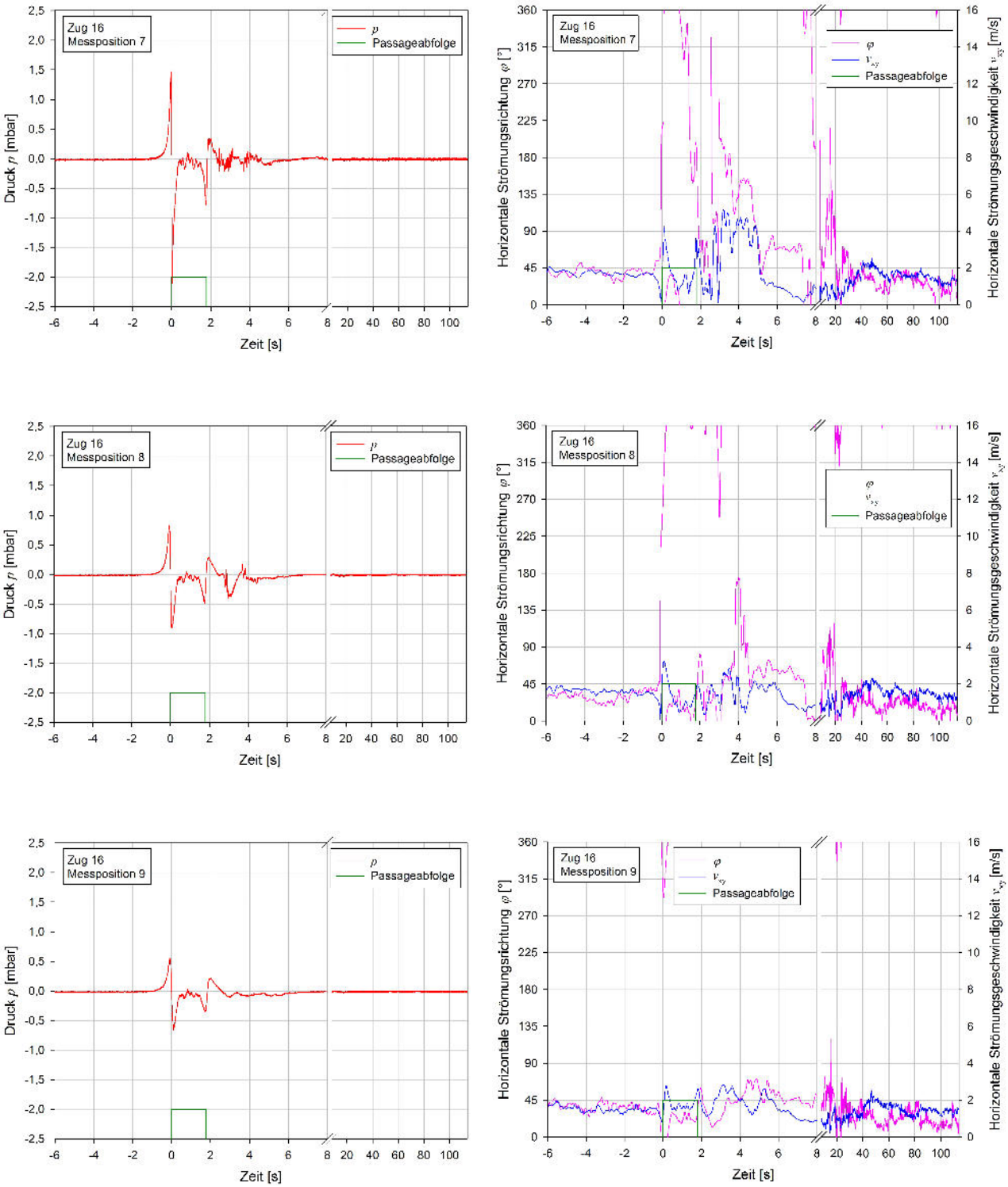


Abbildung B.74: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 16 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

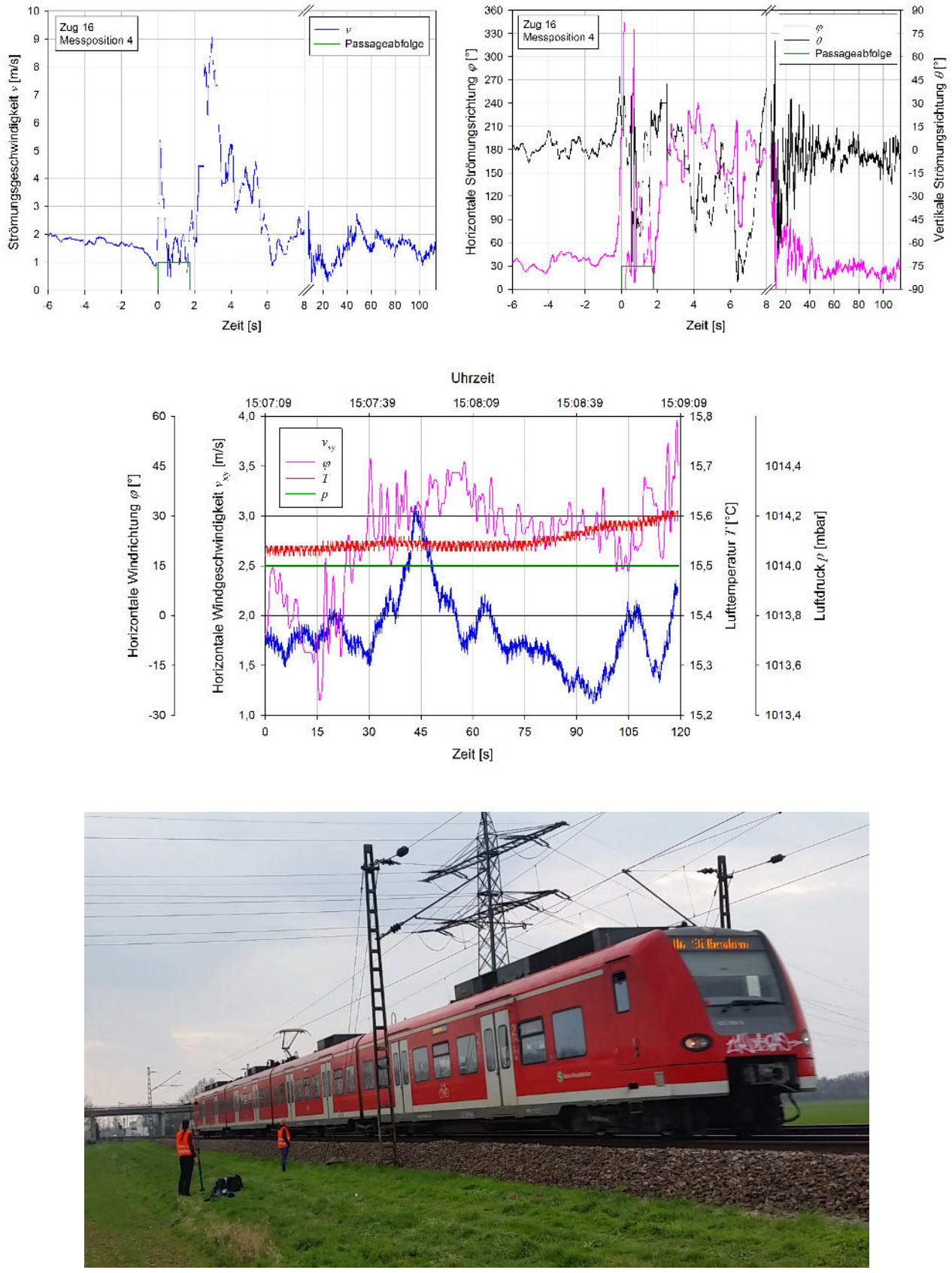


Abbildung B.75: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 16 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 16 ($\bar{v} = 135{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 17: Doppelstockzug K1 (3 Wagen)

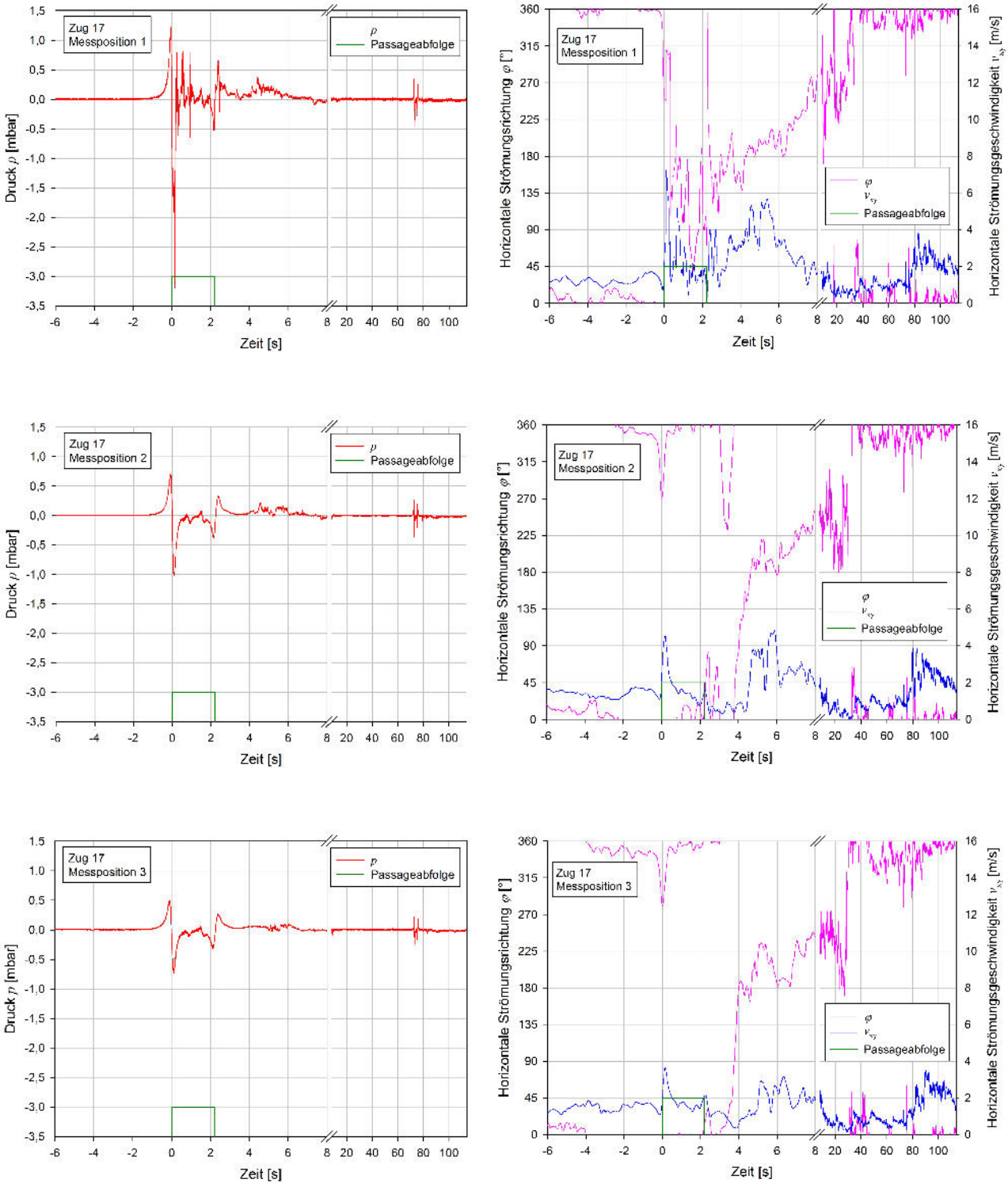


Abbildung B.76: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 17 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

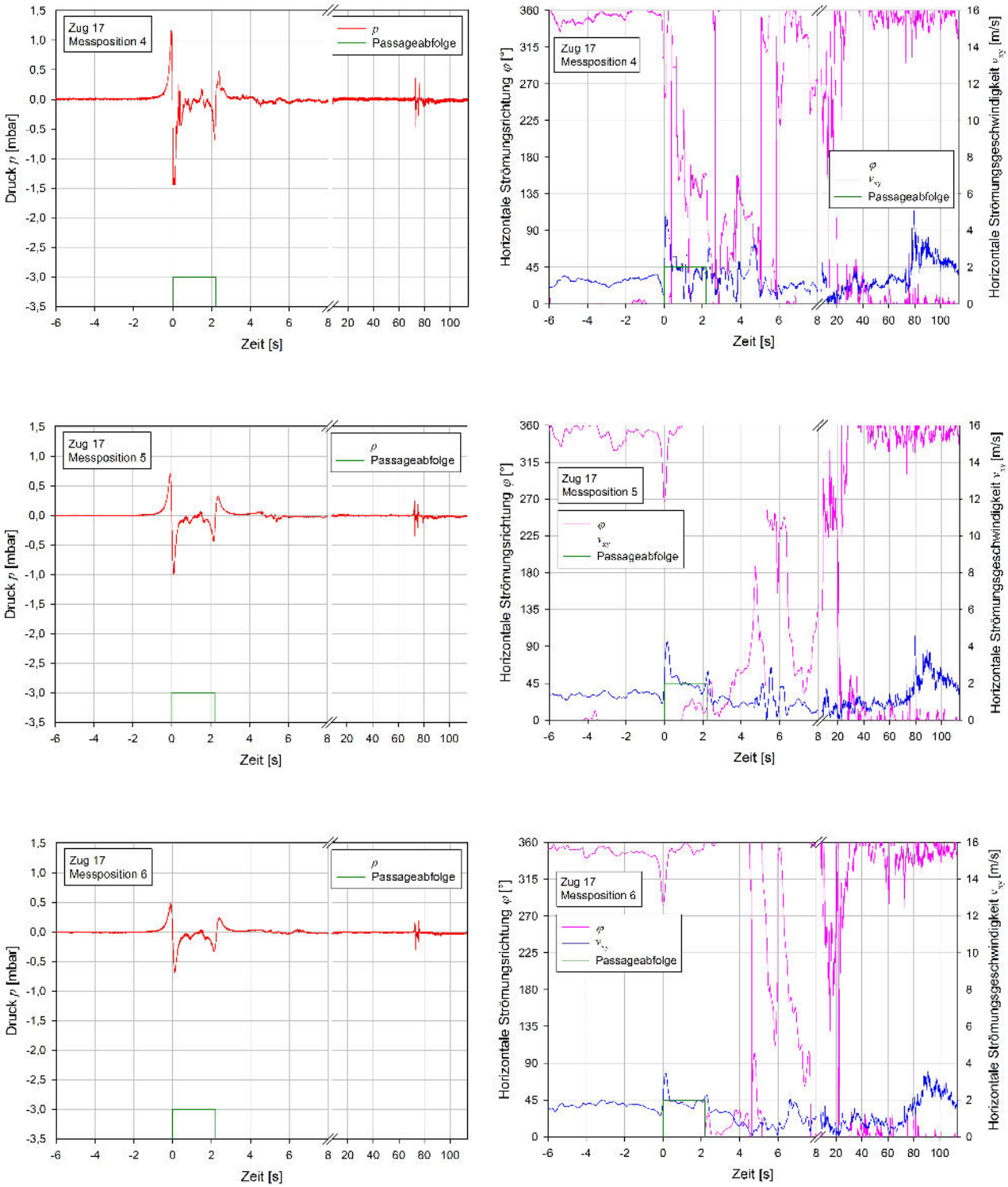


Abbildung B.77: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 17 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

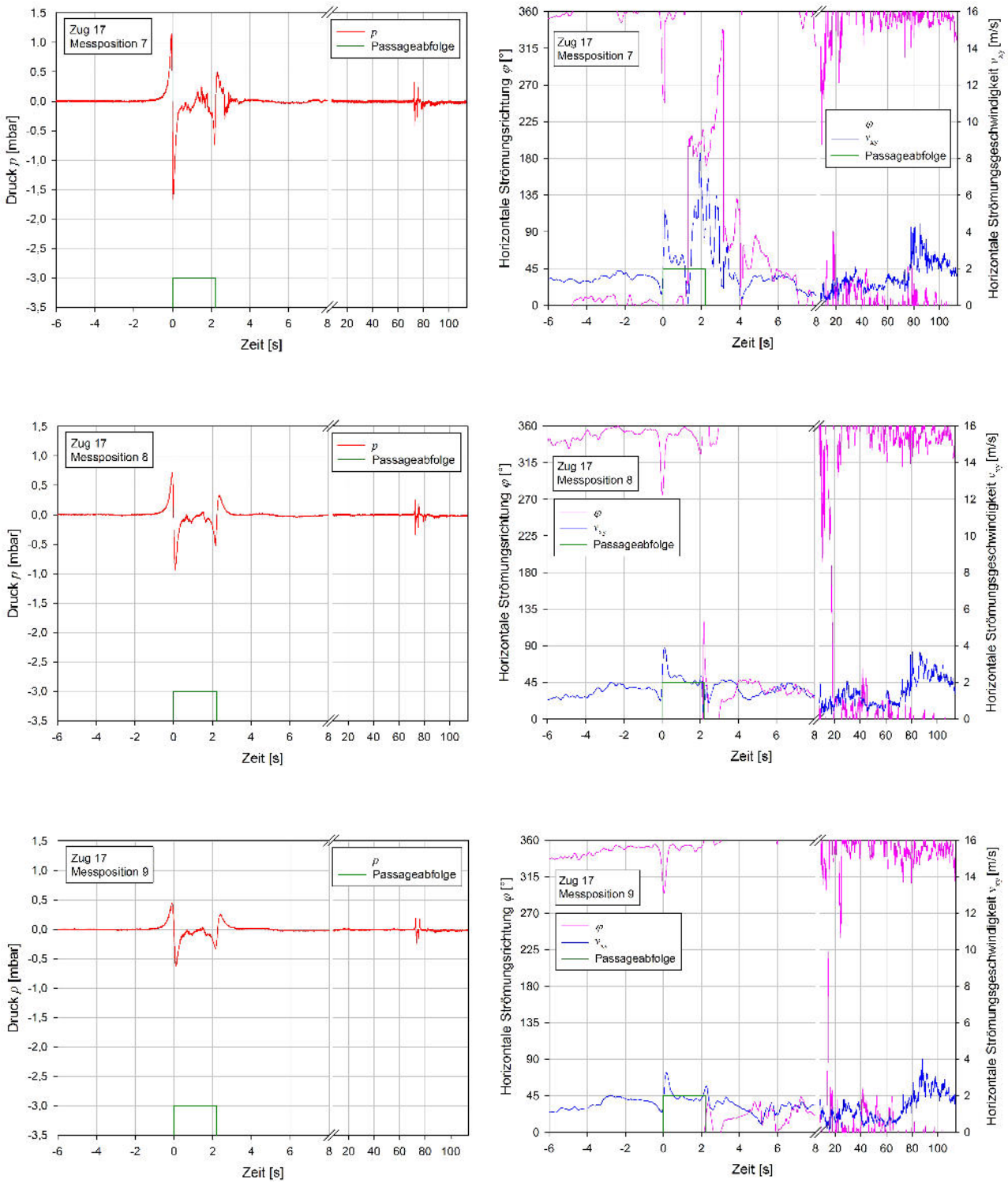


Abbildung B.78: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 17 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

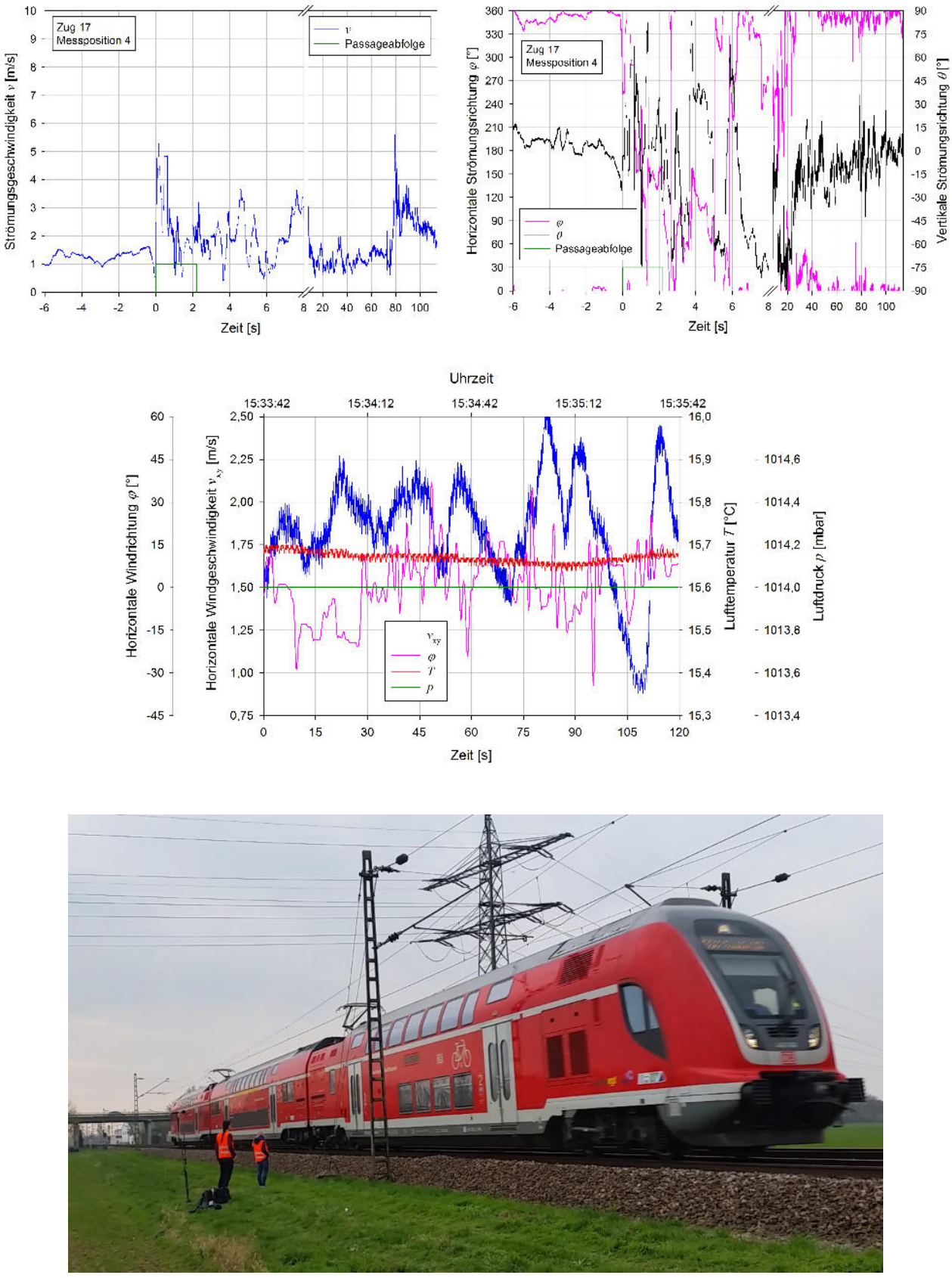


Abbildung B.79: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 17 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 17 ($\bar{v} = 125{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 18: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

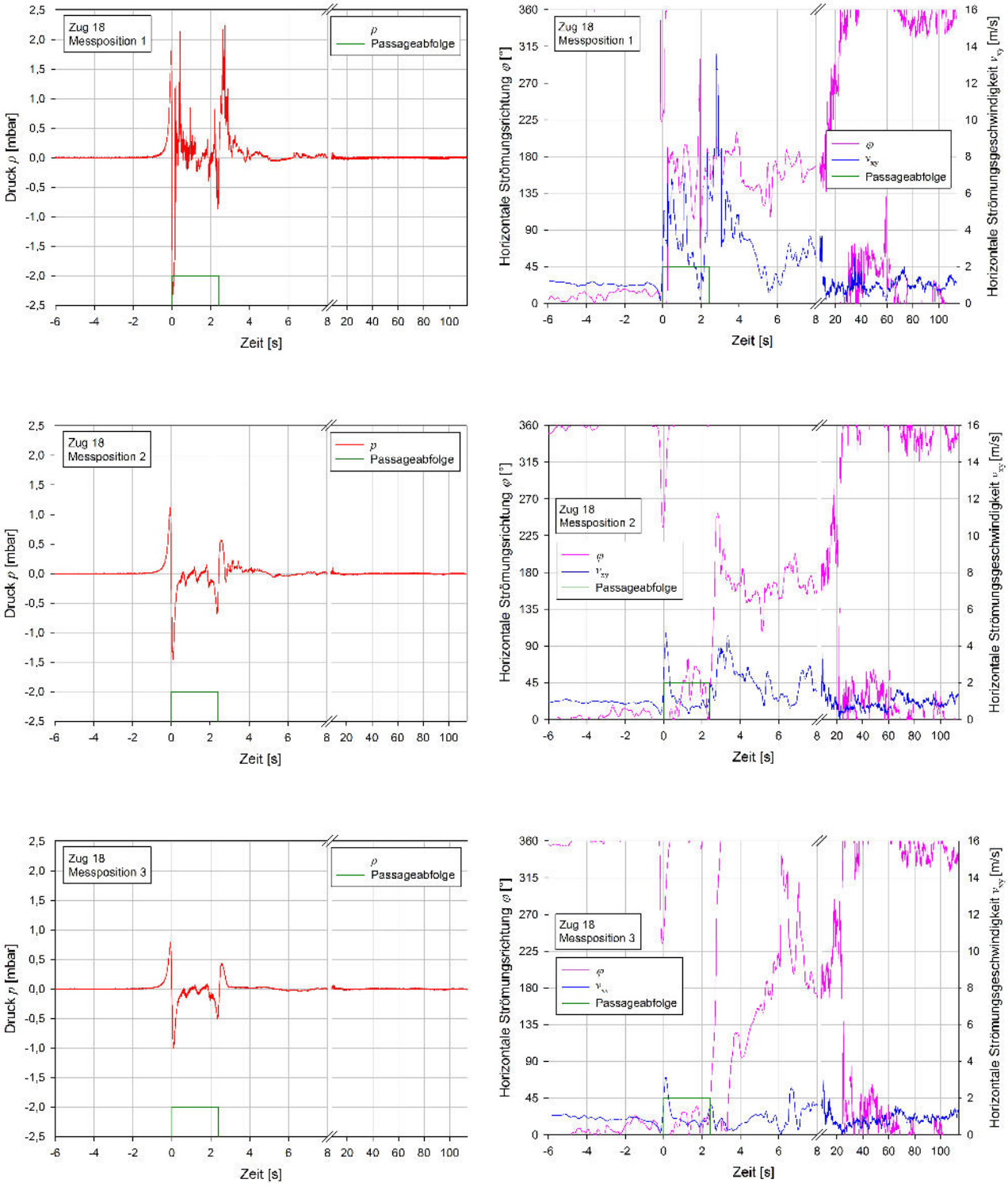


Abbildung B.80: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 18 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$.

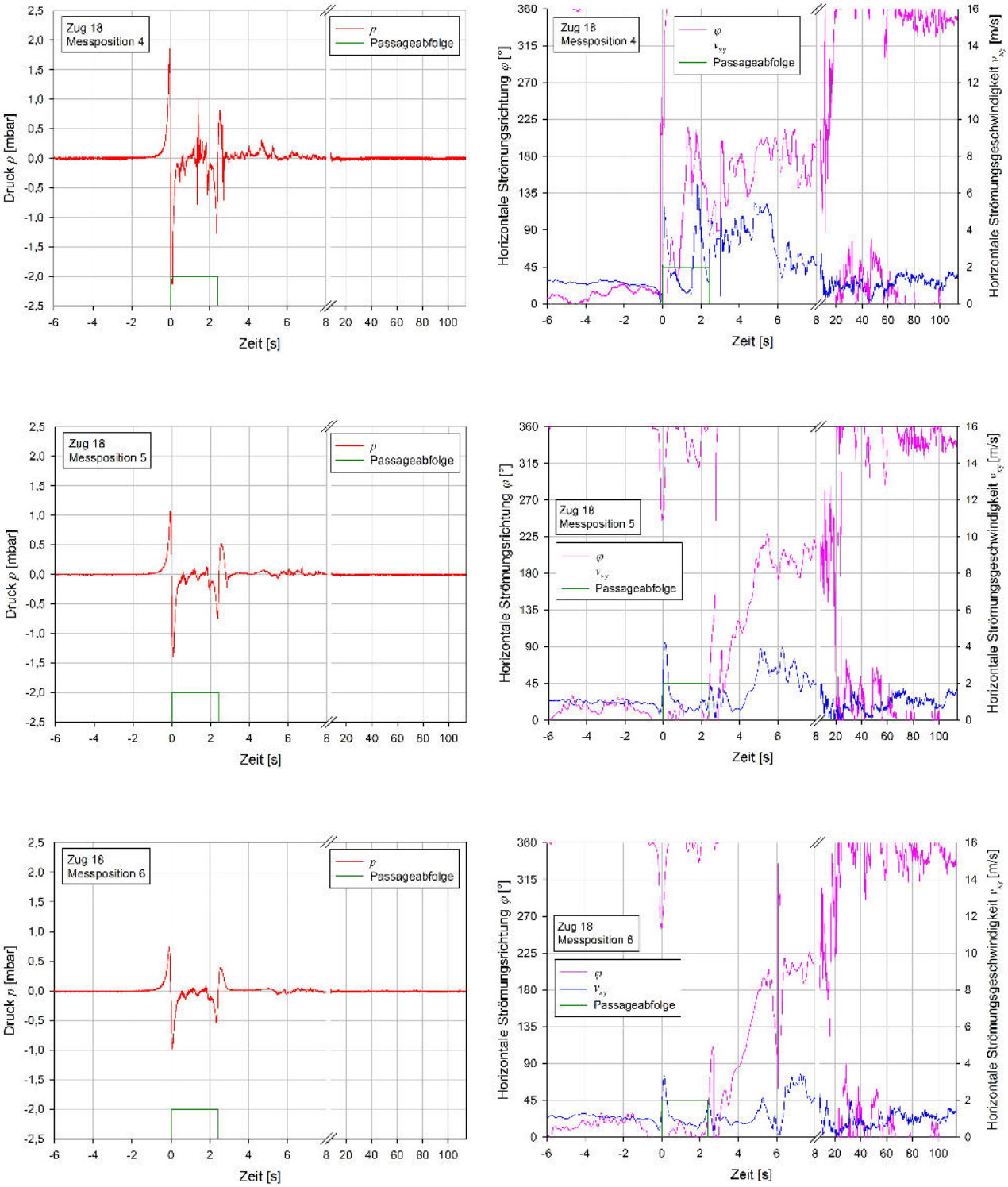


Abbildung B.81: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 18 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$.

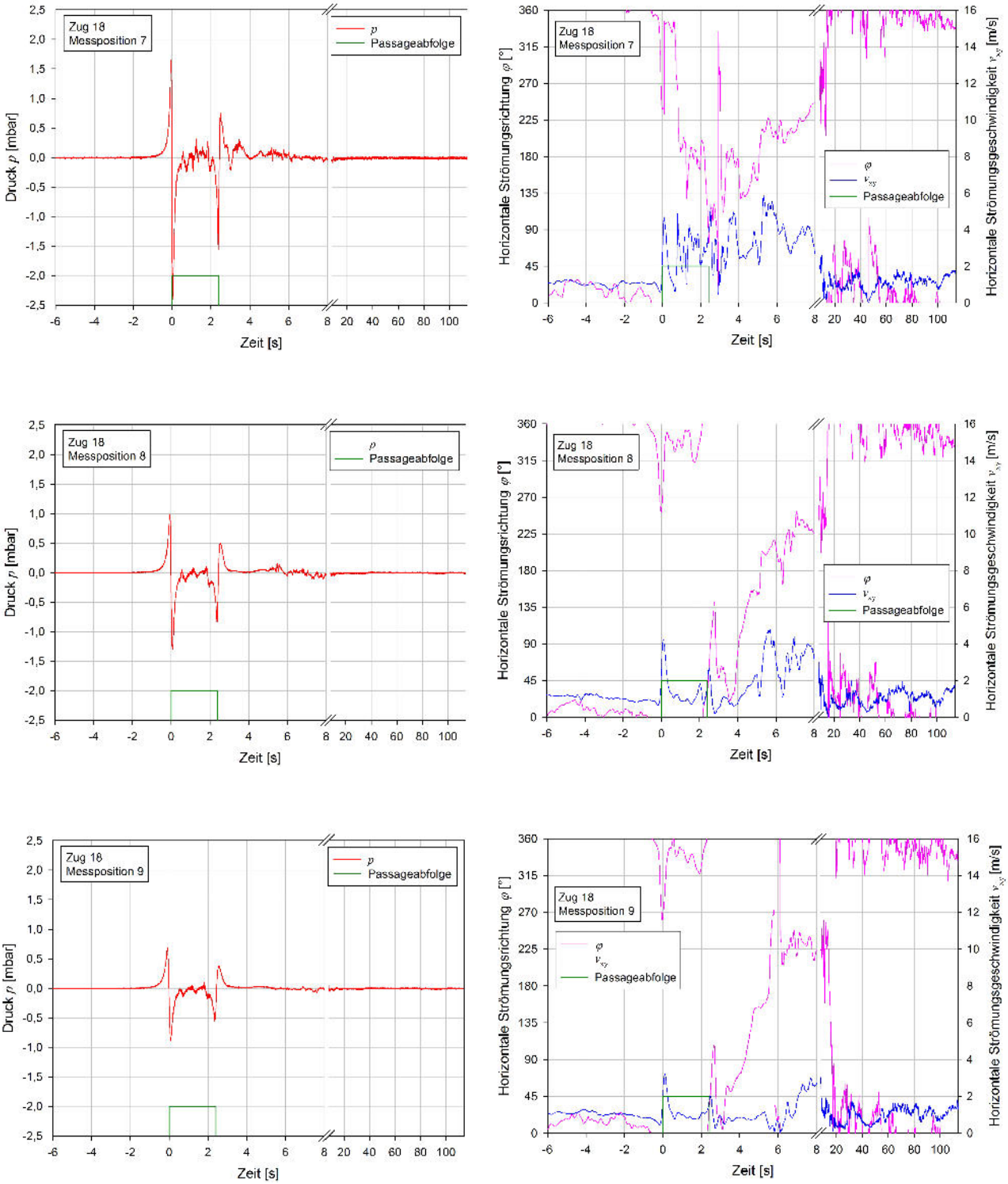


Abbildung B.82: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 18 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$.

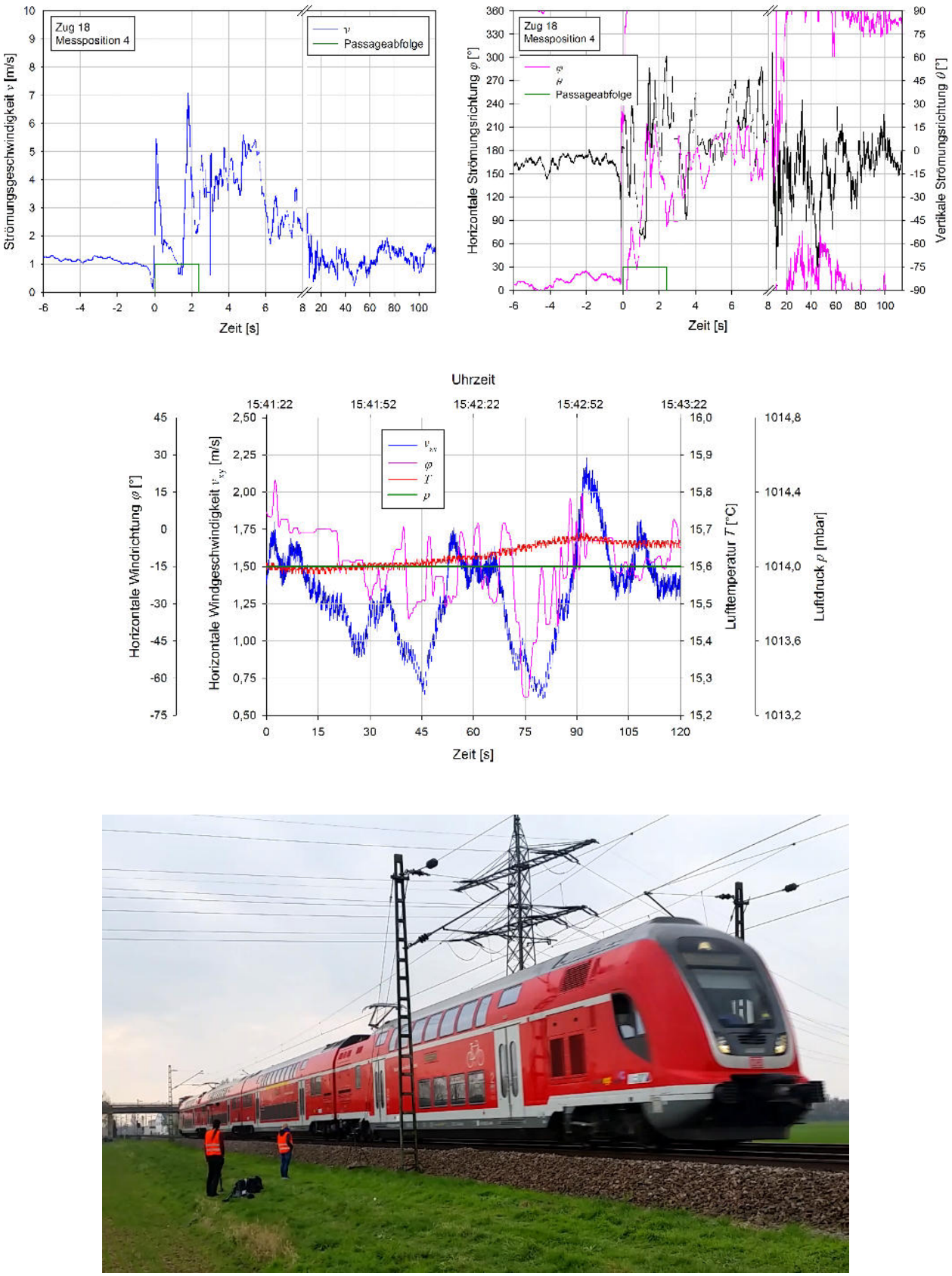


Abbildung B.83: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 18 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 18 ($\bar{v} = 153{,}8 \pm 1{,}3\,\mathrm{km/h}$).

Zug 19: S-Bahn (Baureihe 425)

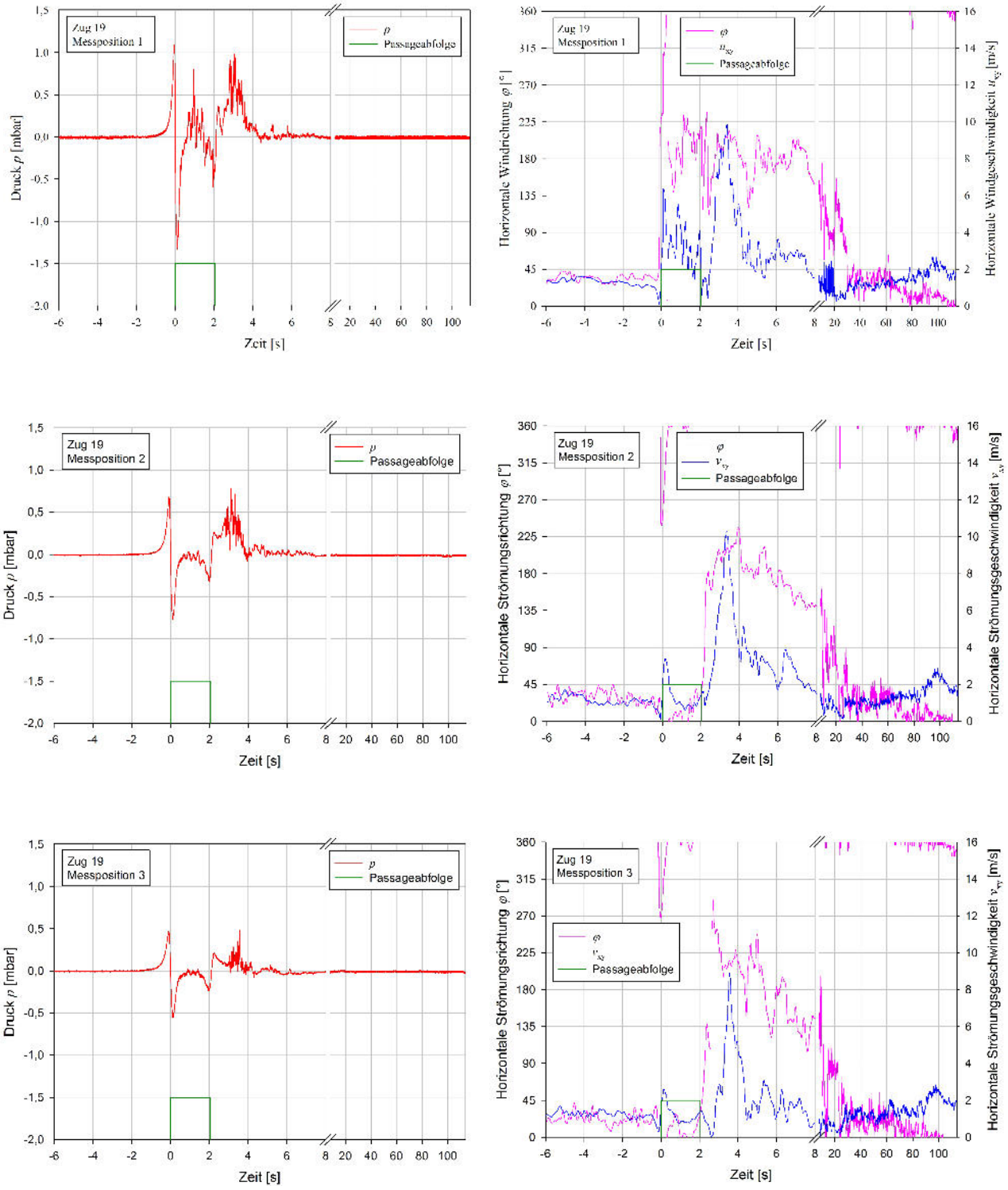


Abbildung B.84: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 19 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$.

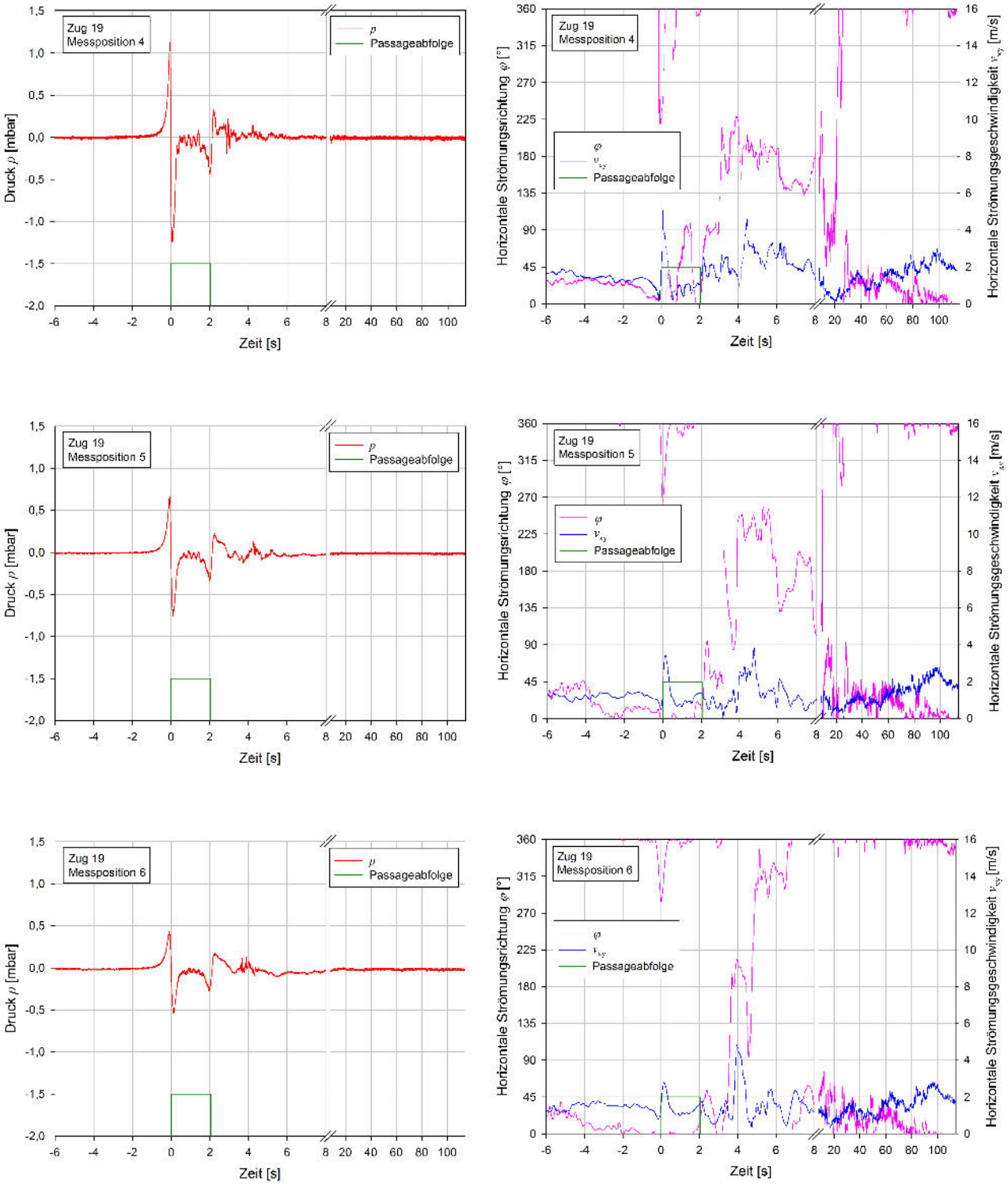


Abbildung B.85: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 19 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$.

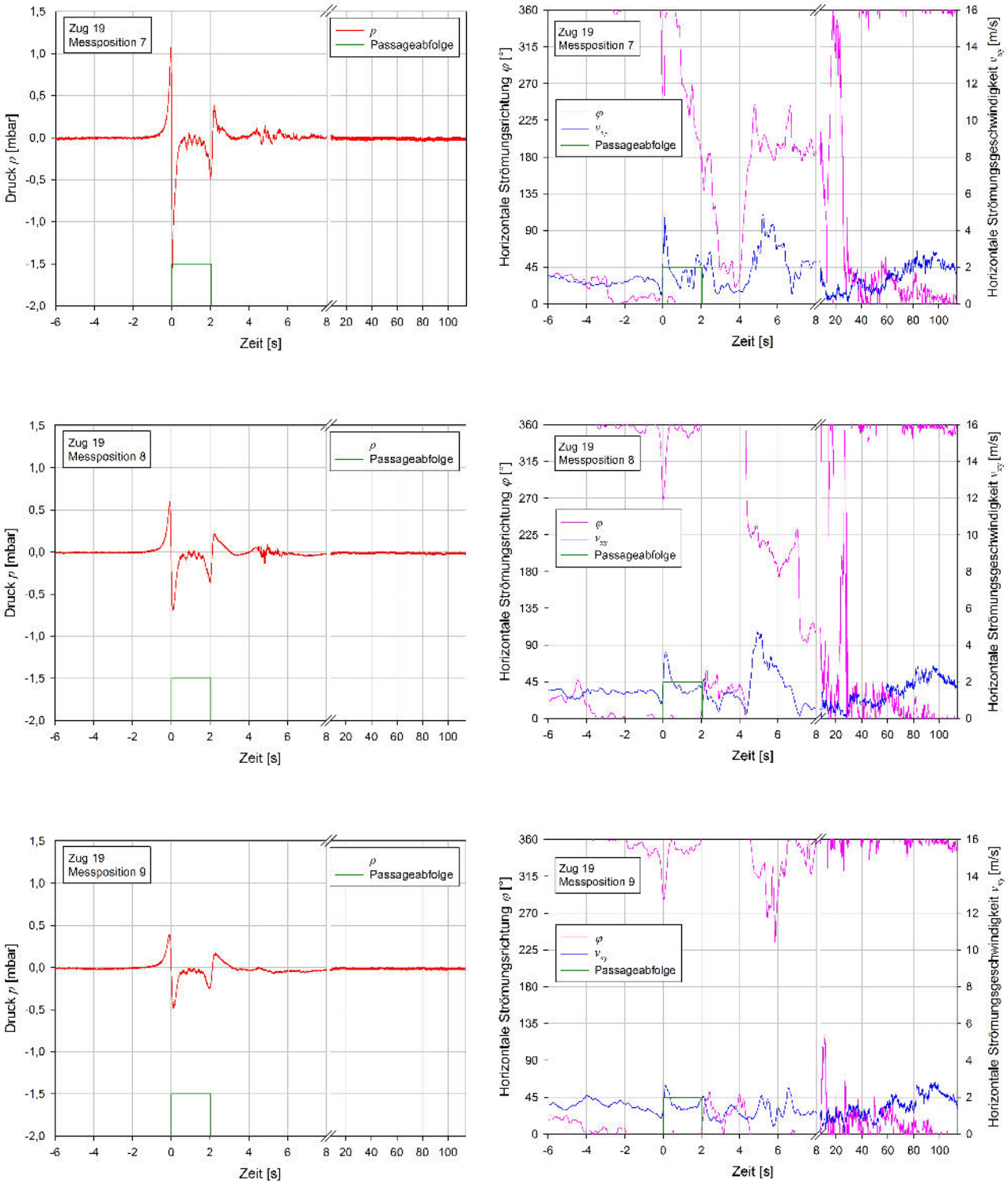
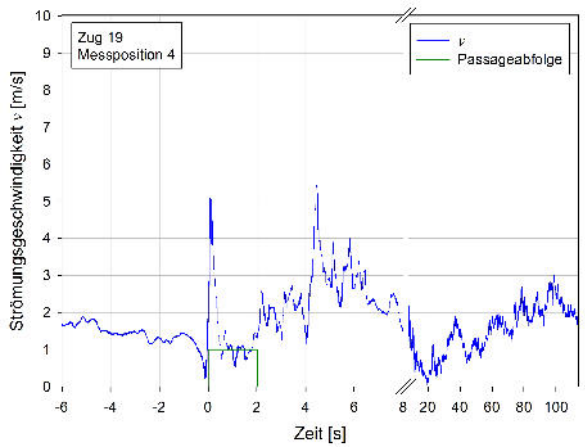
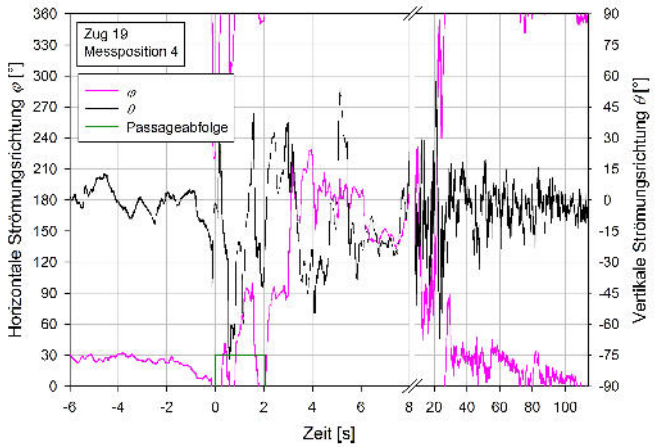


Abbildung B.86: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 19 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$.





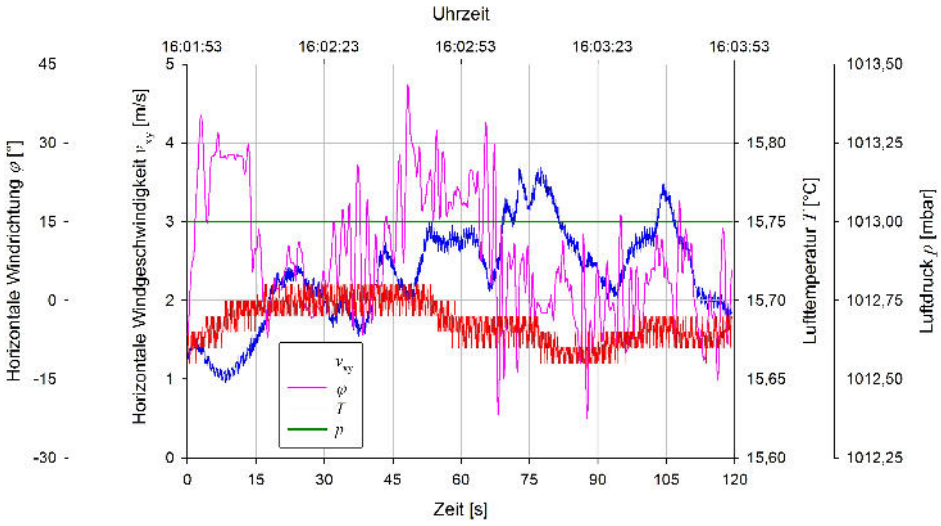




Abbildung B.87: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 19 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 19 ($\bar{v} = 116{,}9 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$).

Zug 20: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

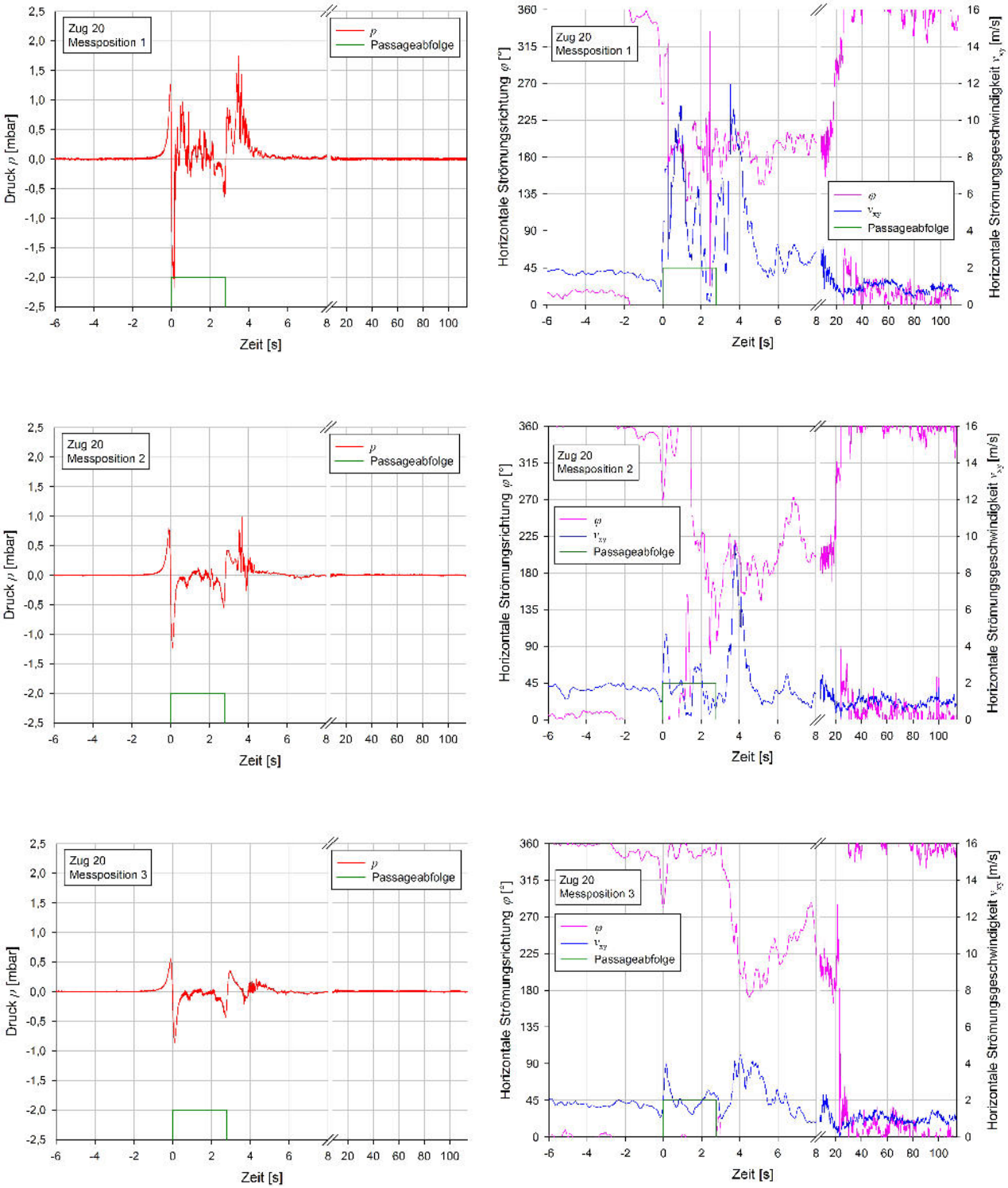


Abbildung B.88: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 20 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$.

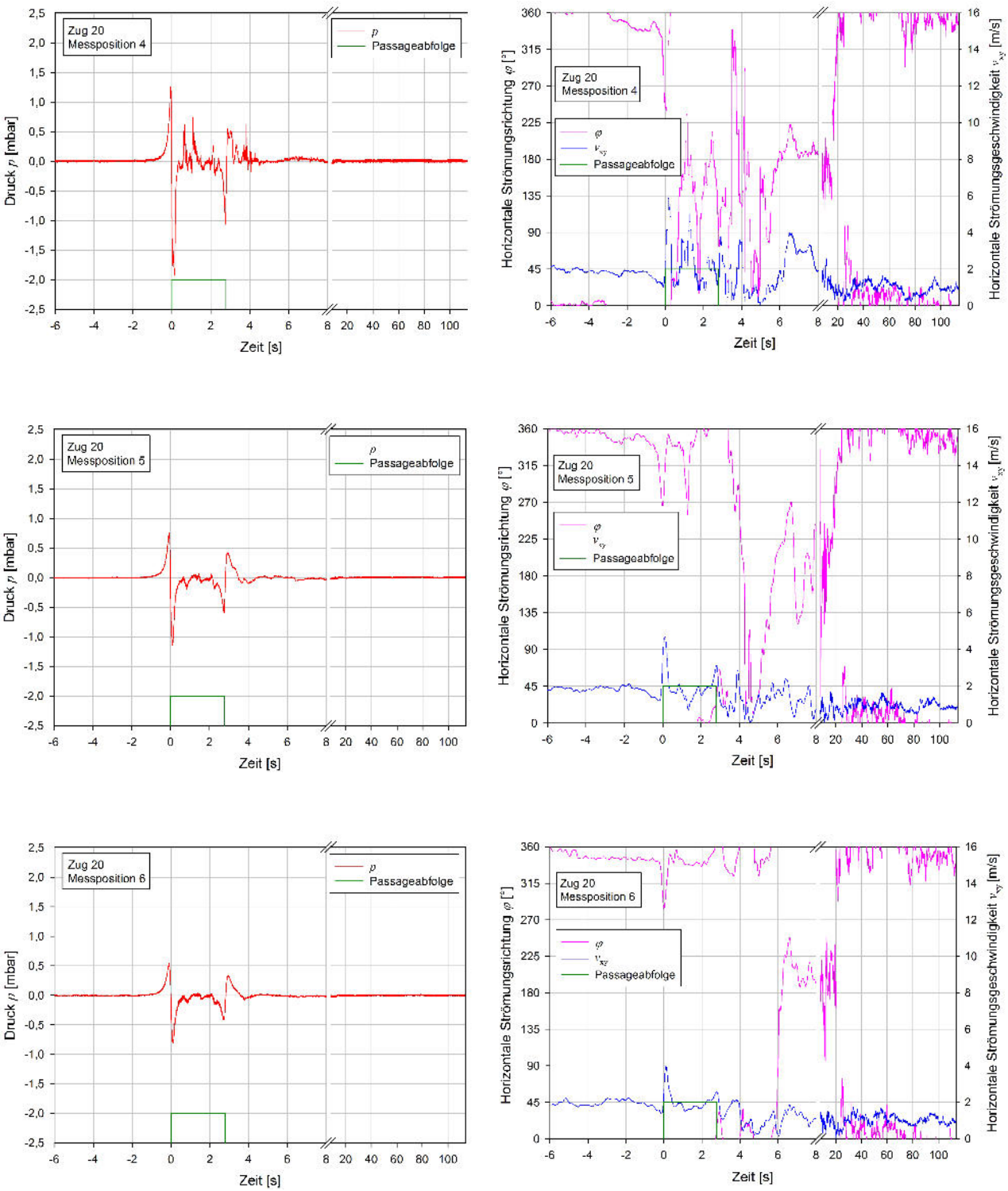


Abbildung B.89: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 20 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$.

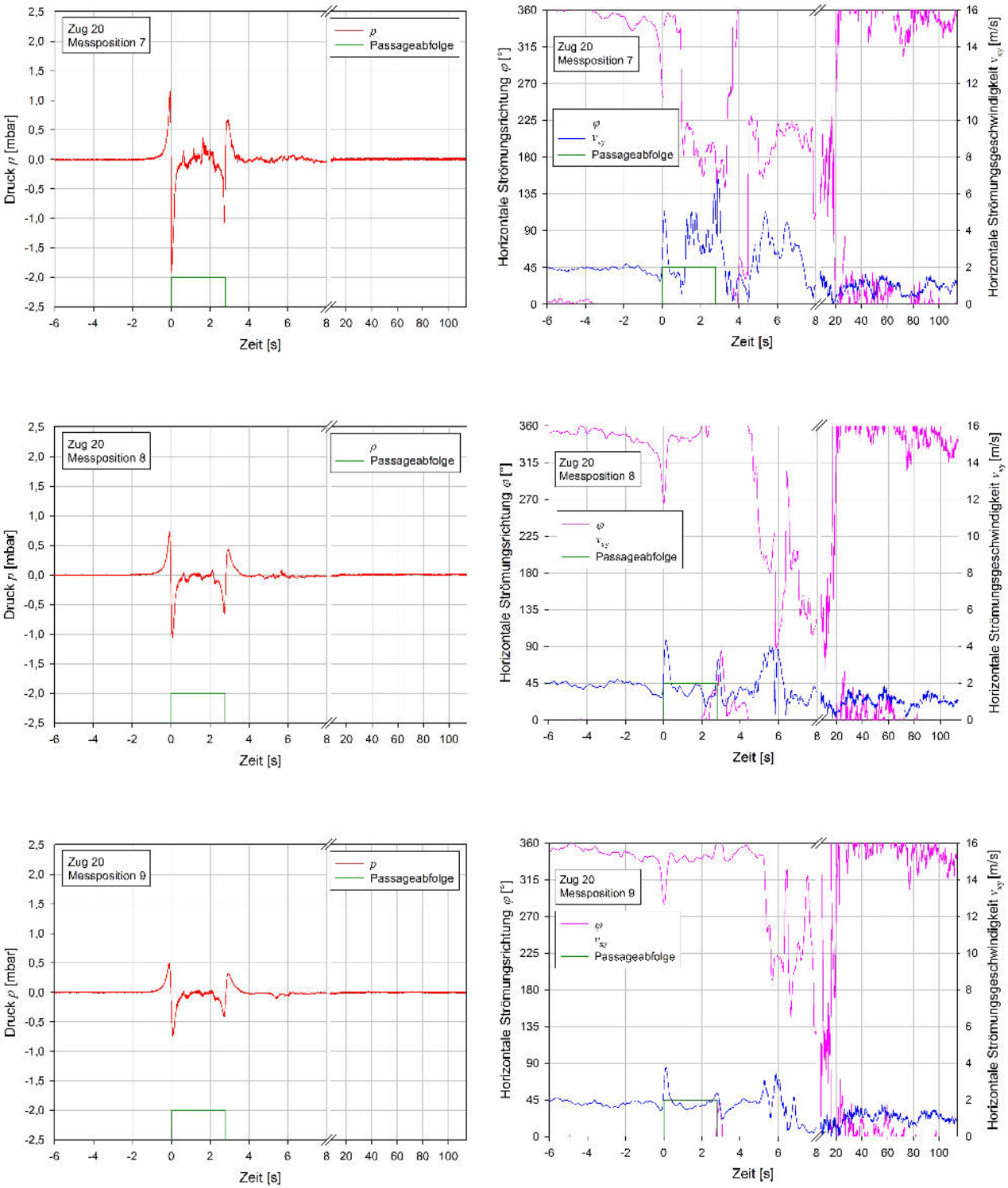


Abbildung B.90: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 20 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$.

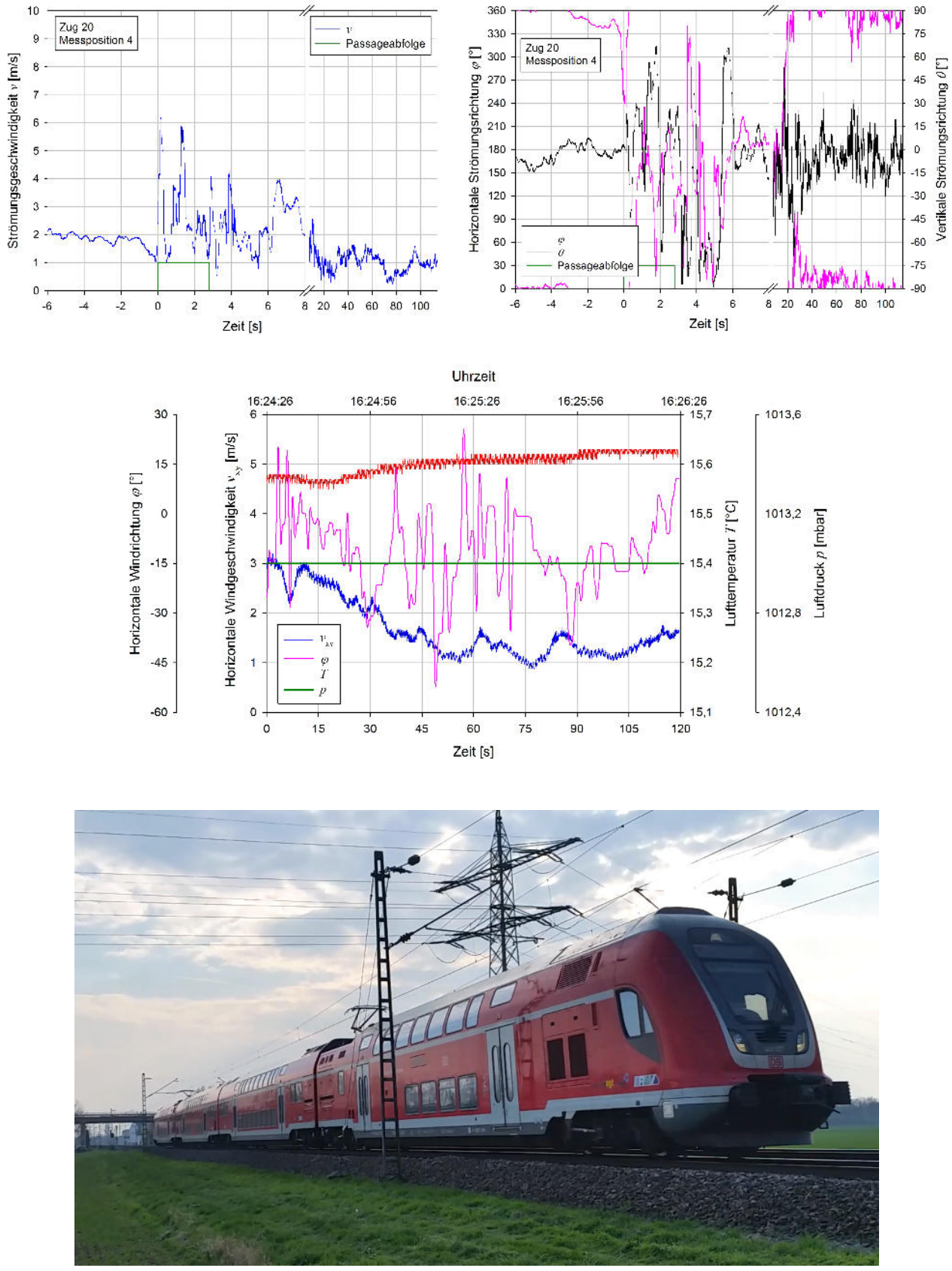


Abbildung B.91: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 20 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 20 ($\bar{v} = 131{,}7 \pm 1{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 21: Doppelstockzug K1 + K1 (3 Wagen + 3 Wagen)

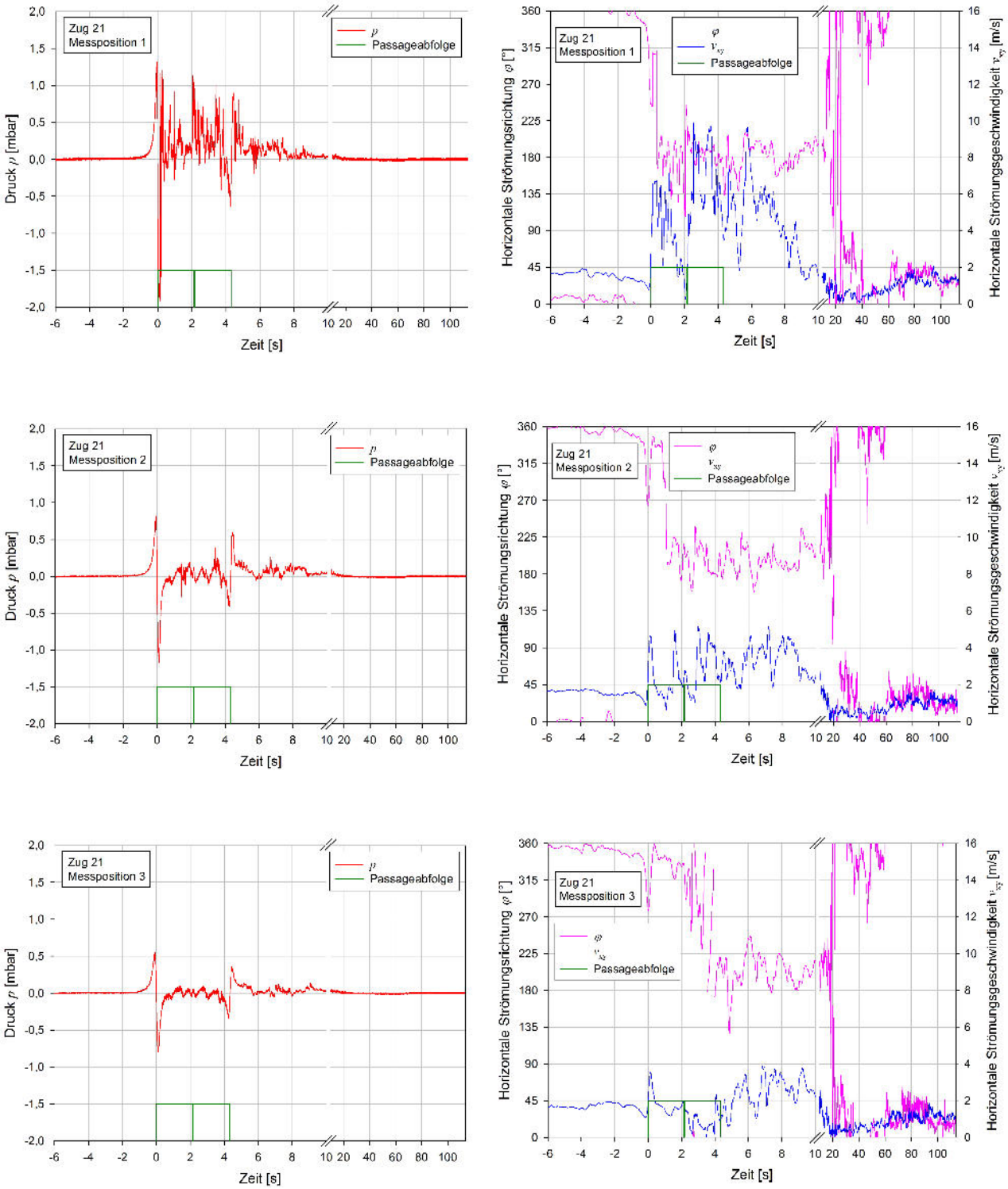


Abbildung B.92: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 21 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

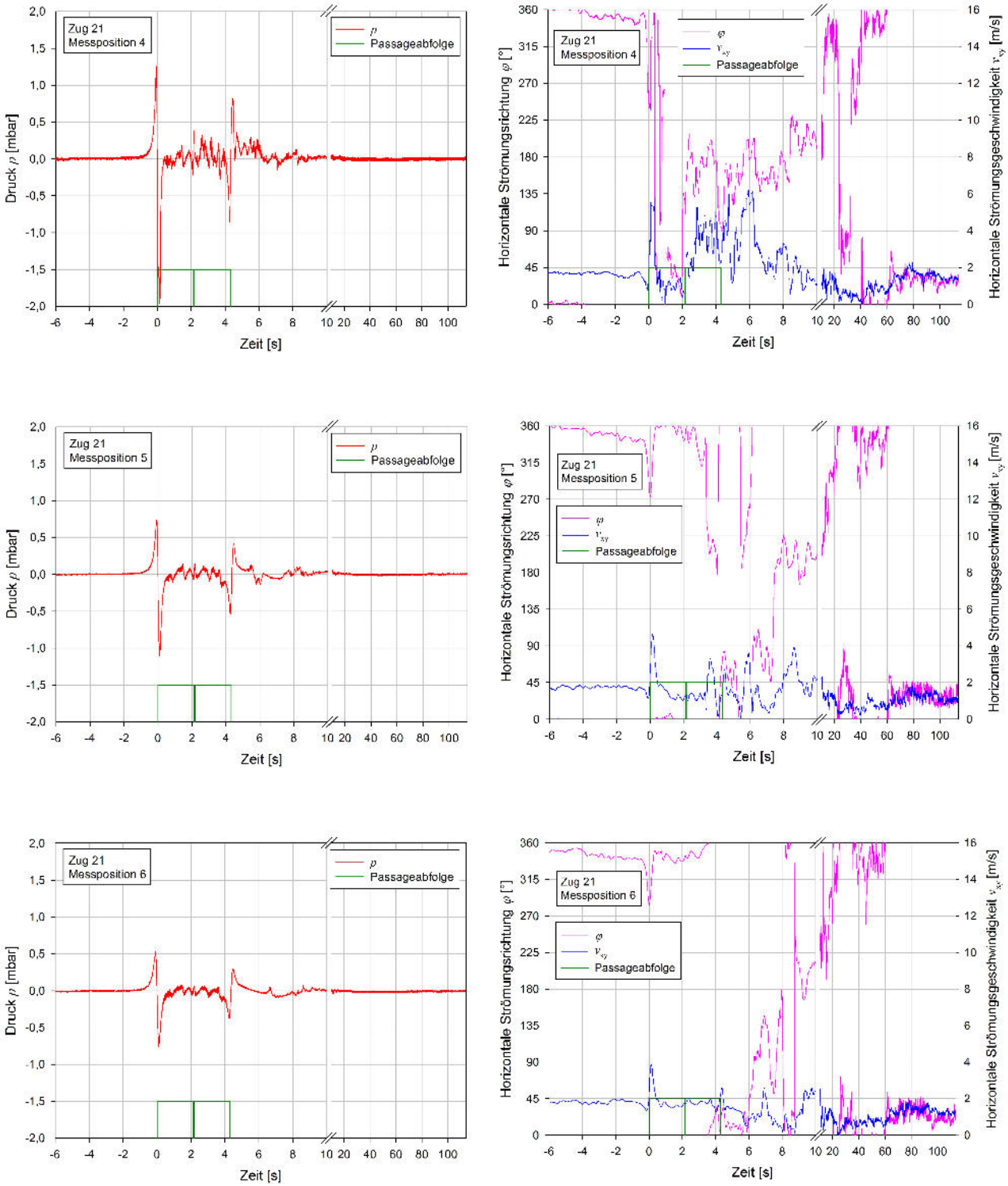


Abbildung B.93: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 21 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

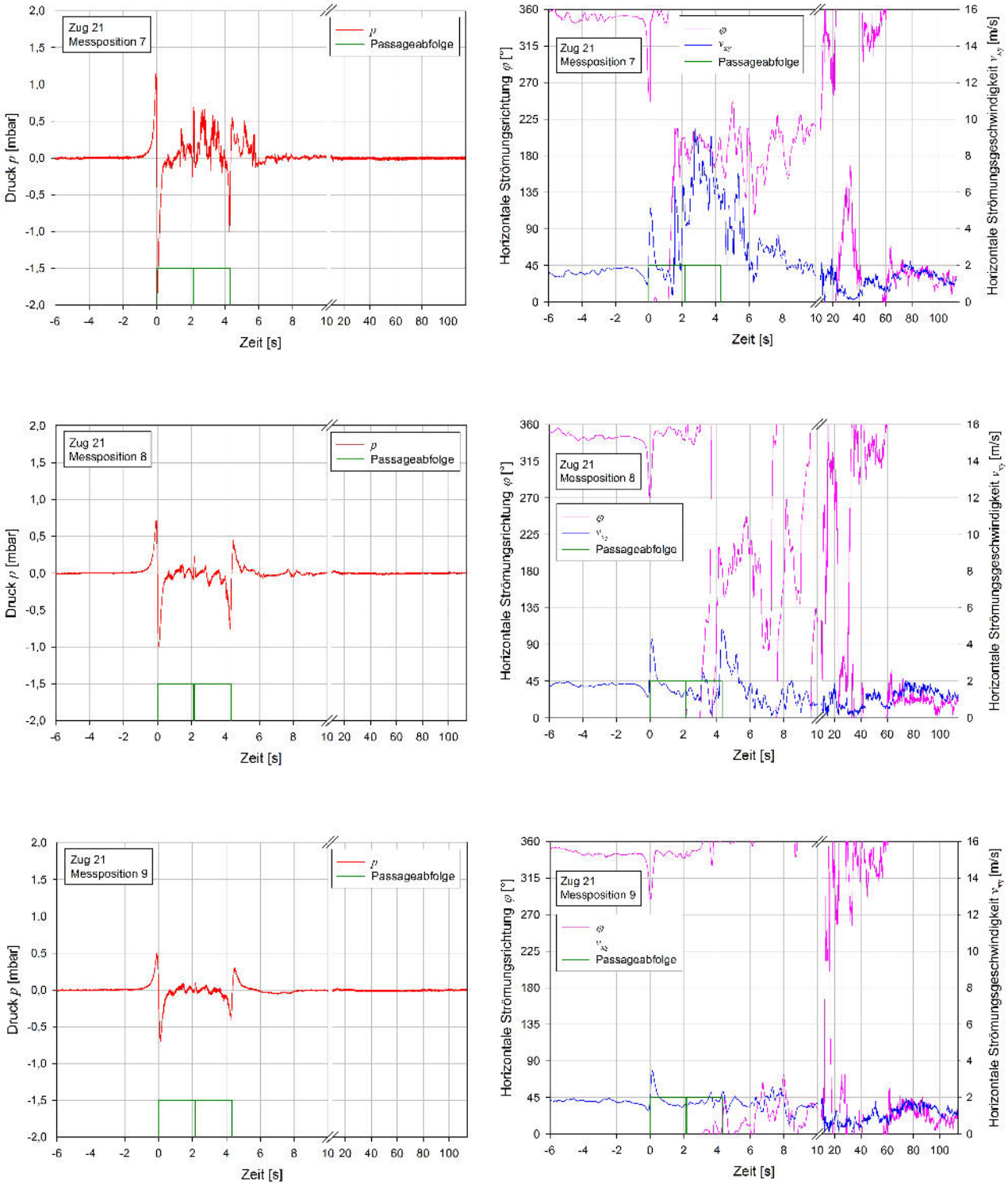


Abbildung B.94: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 21 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

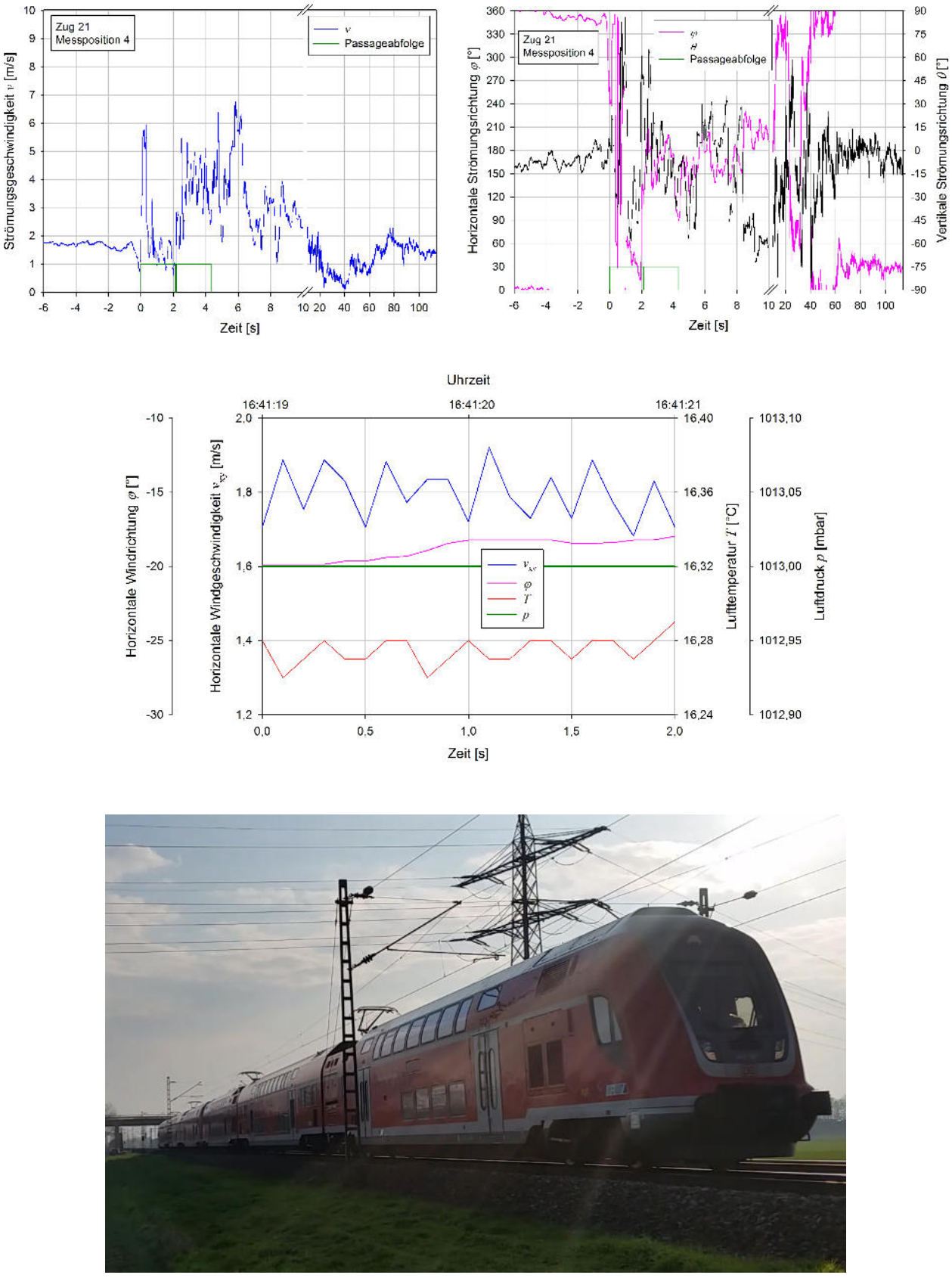


Abbildung B.95: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 21 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 21 ($\bar{v} = 130{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$).

Zug 22: ICE (Baureihe T, 133 m Länge)

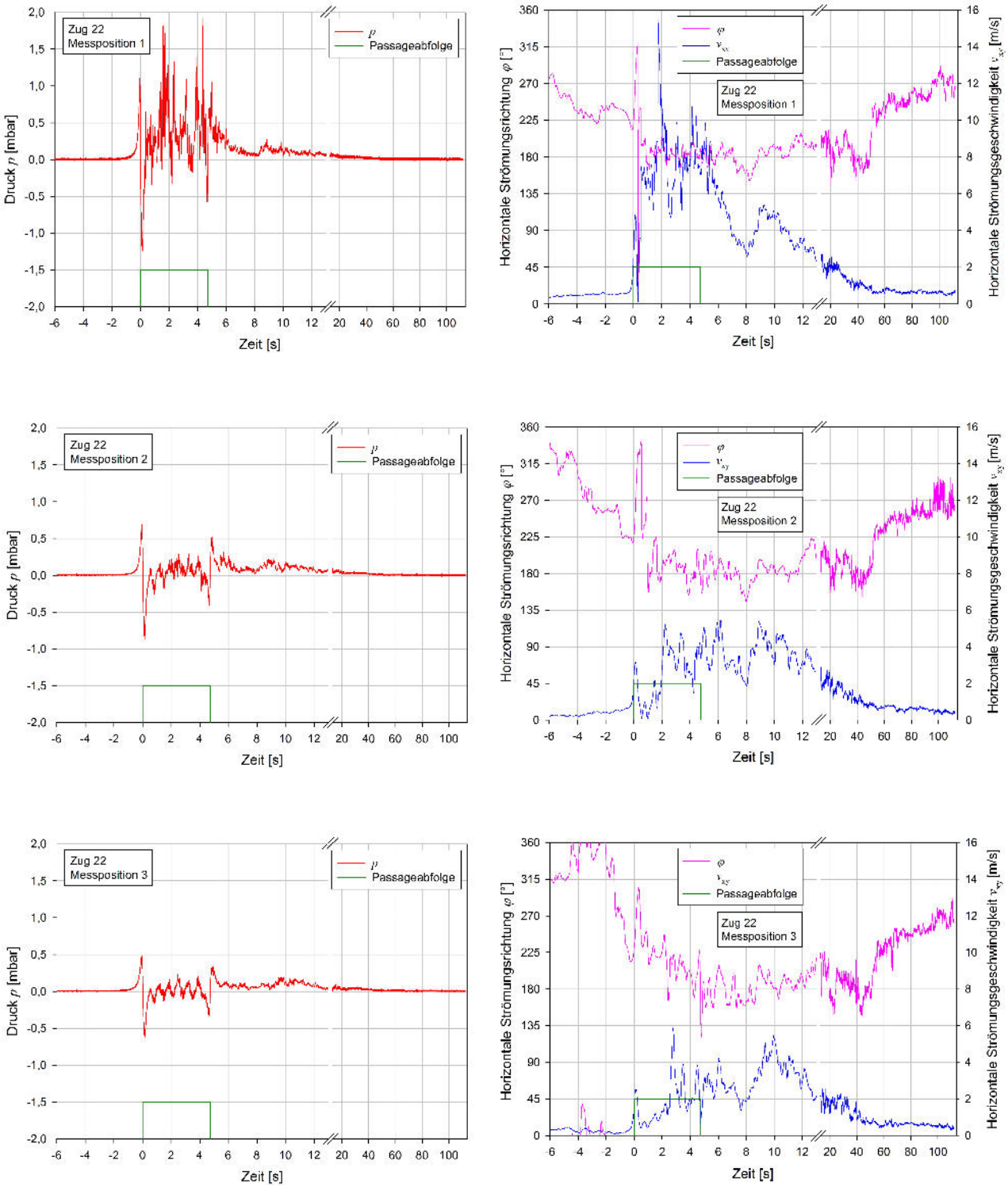


Abbildung B.96: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 22 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$.

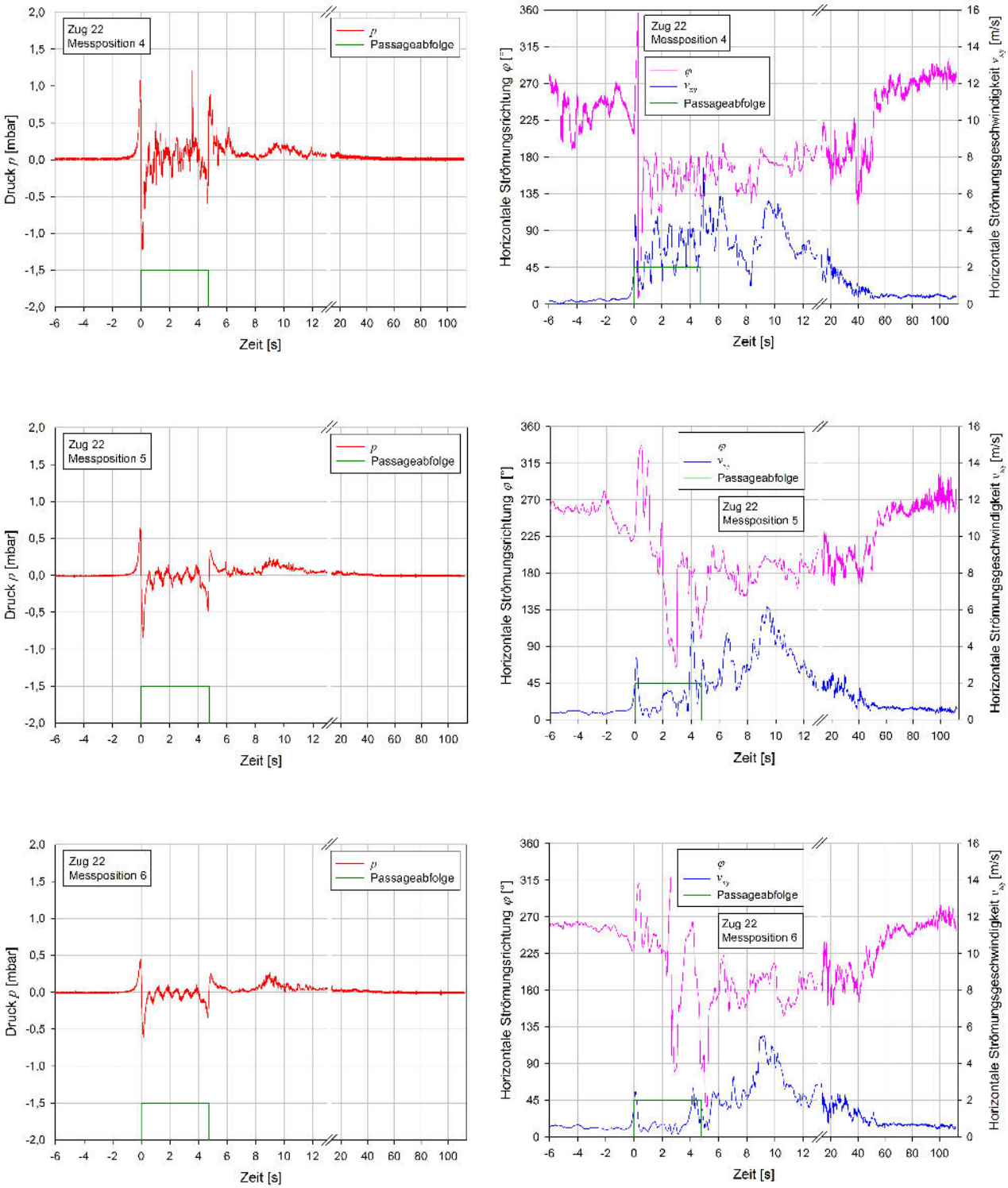


Abbildung B.97: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 22 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$.

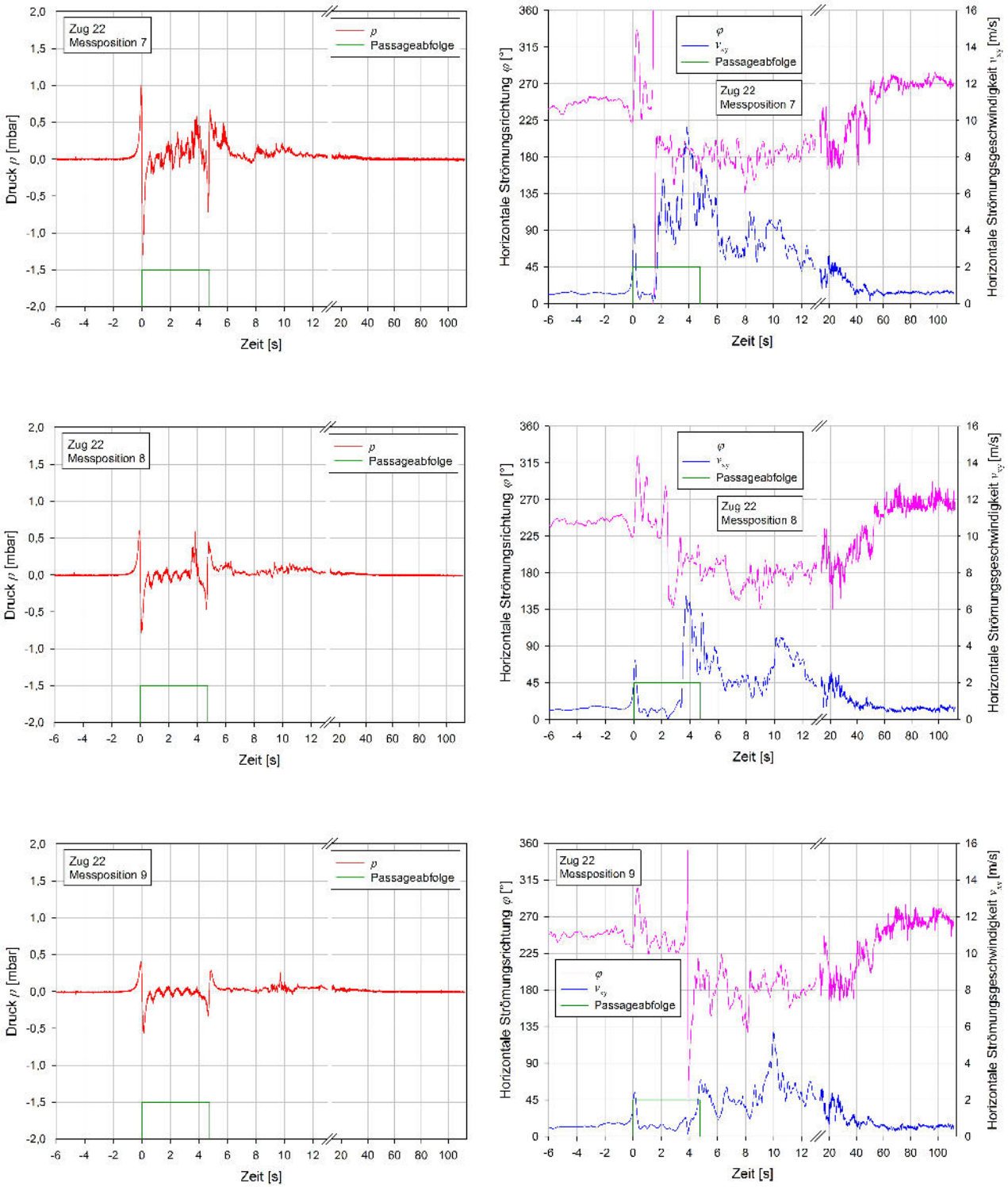


Abbildung B.98: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 22 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$.

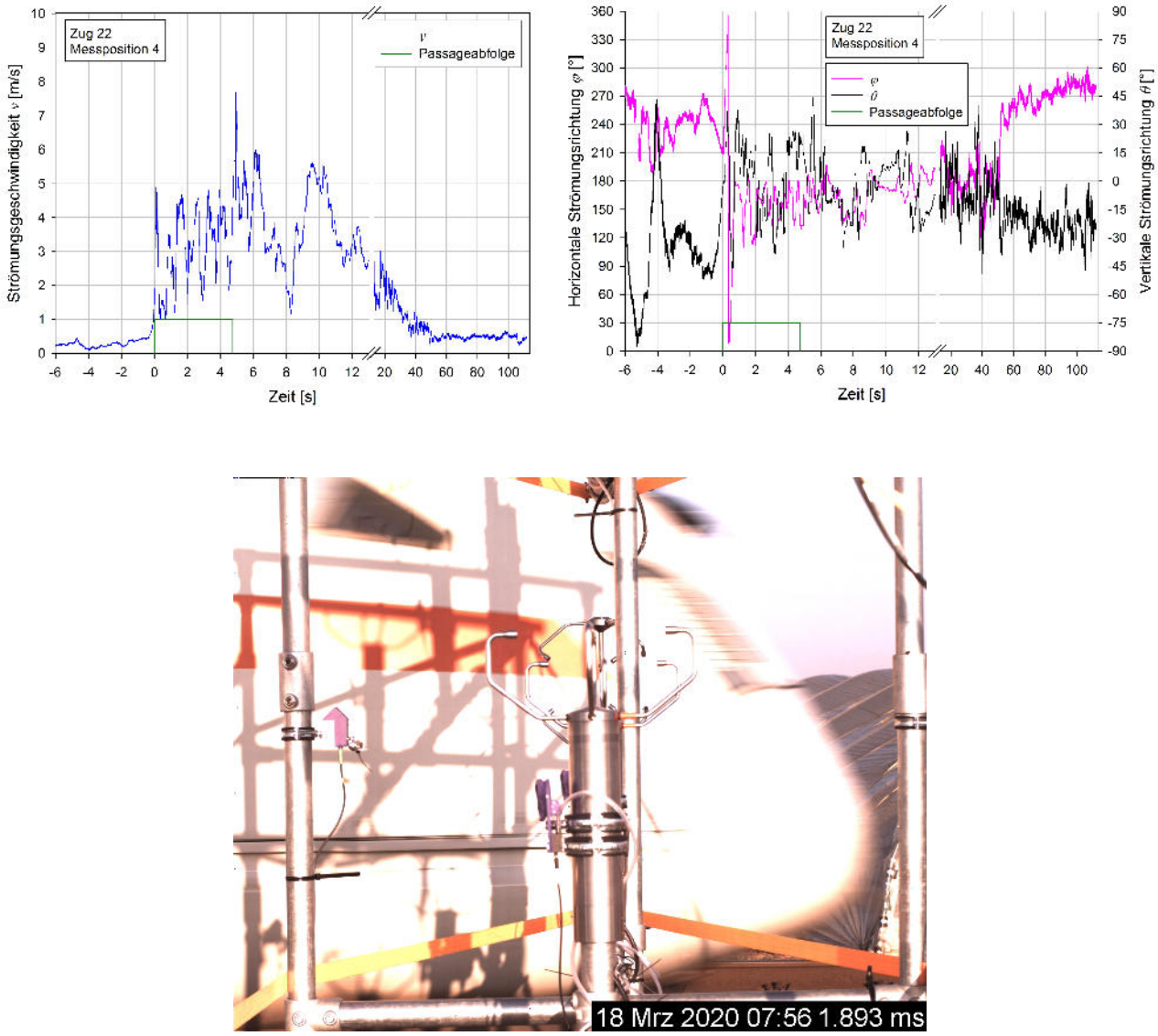


Abbildung B.99: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 22 an der Messposition 4. Unten: Foto der Highspeed-Kamera von Zug 22 ($\bar{v} = 138{,}9 \pm 13{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 23: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

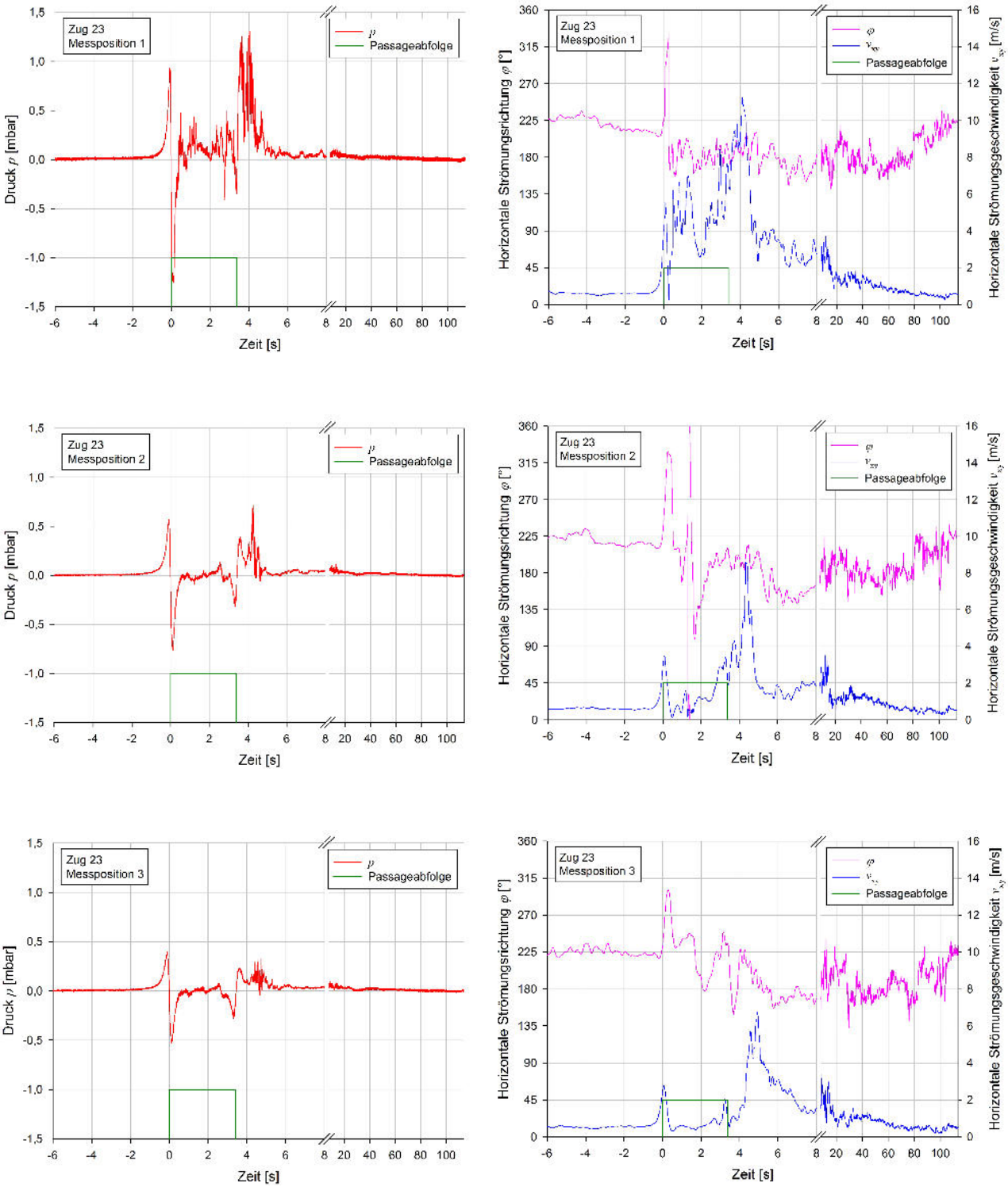


Abbildung B.100: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 23 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

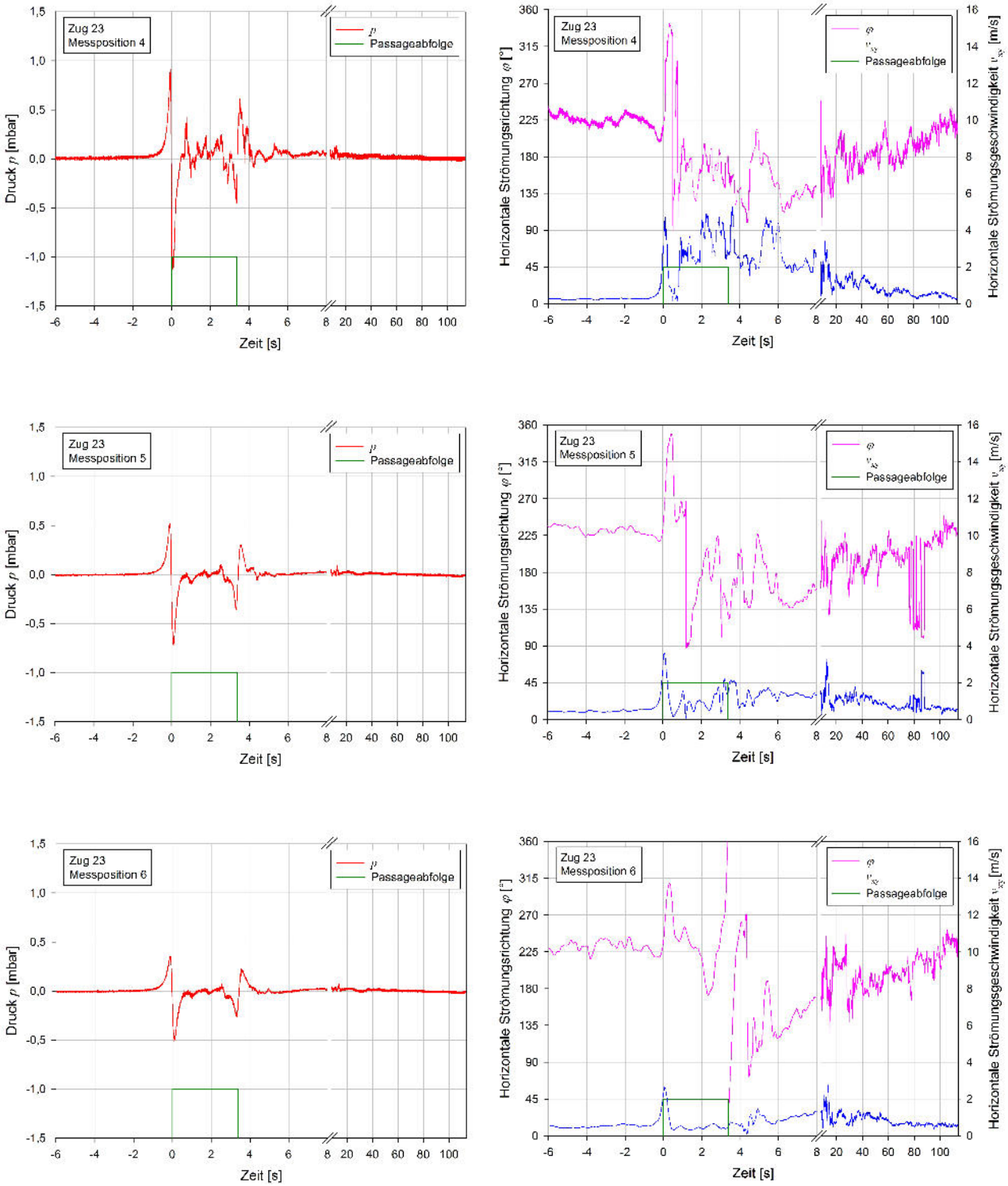


Abbildung B.101: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 23 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

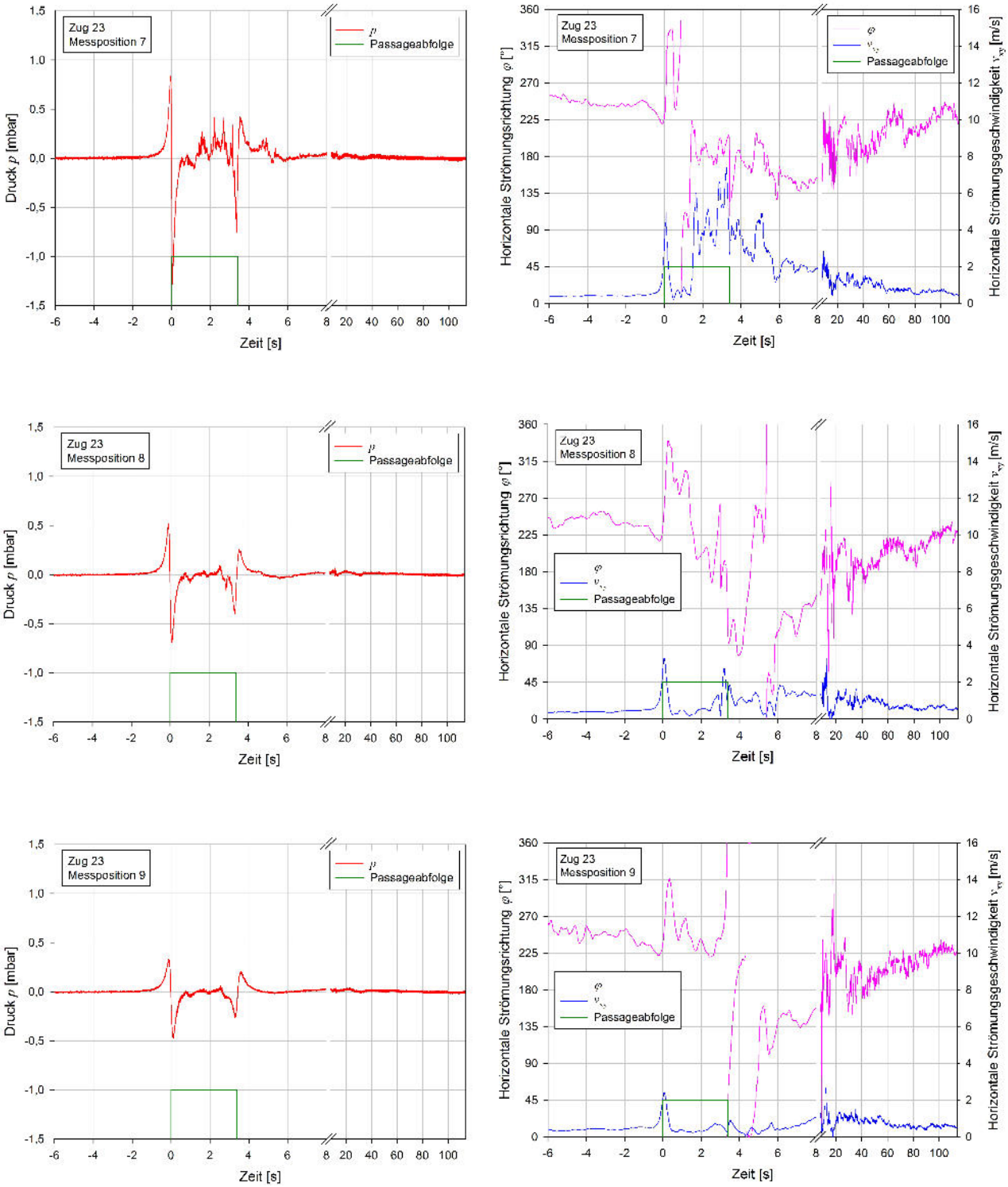


Abbildung B.102: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 23 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

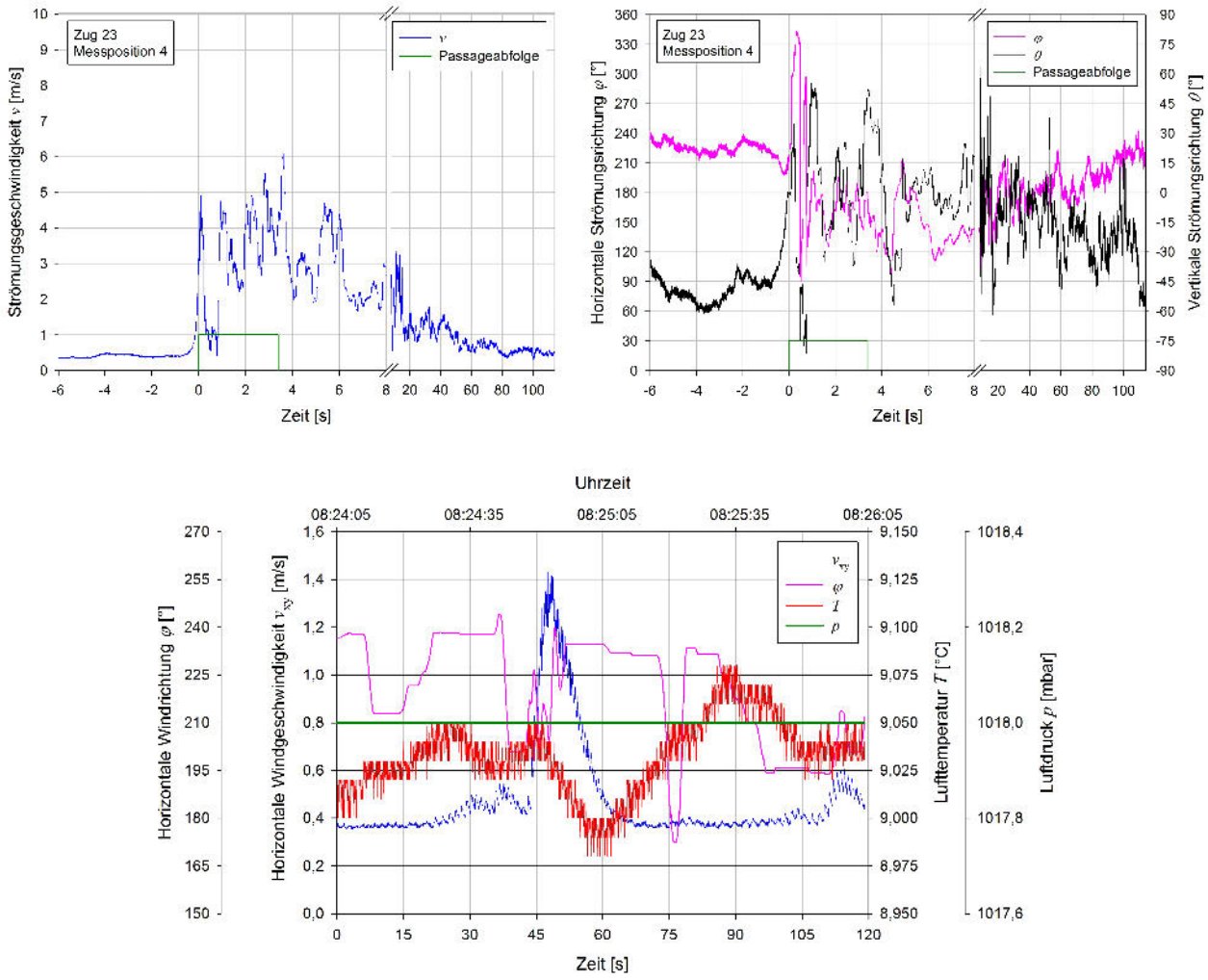




Abbildung B.103: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 23 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 23 ($\bar{v} = 111{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 24: S-Bahn (Baureihe 425)

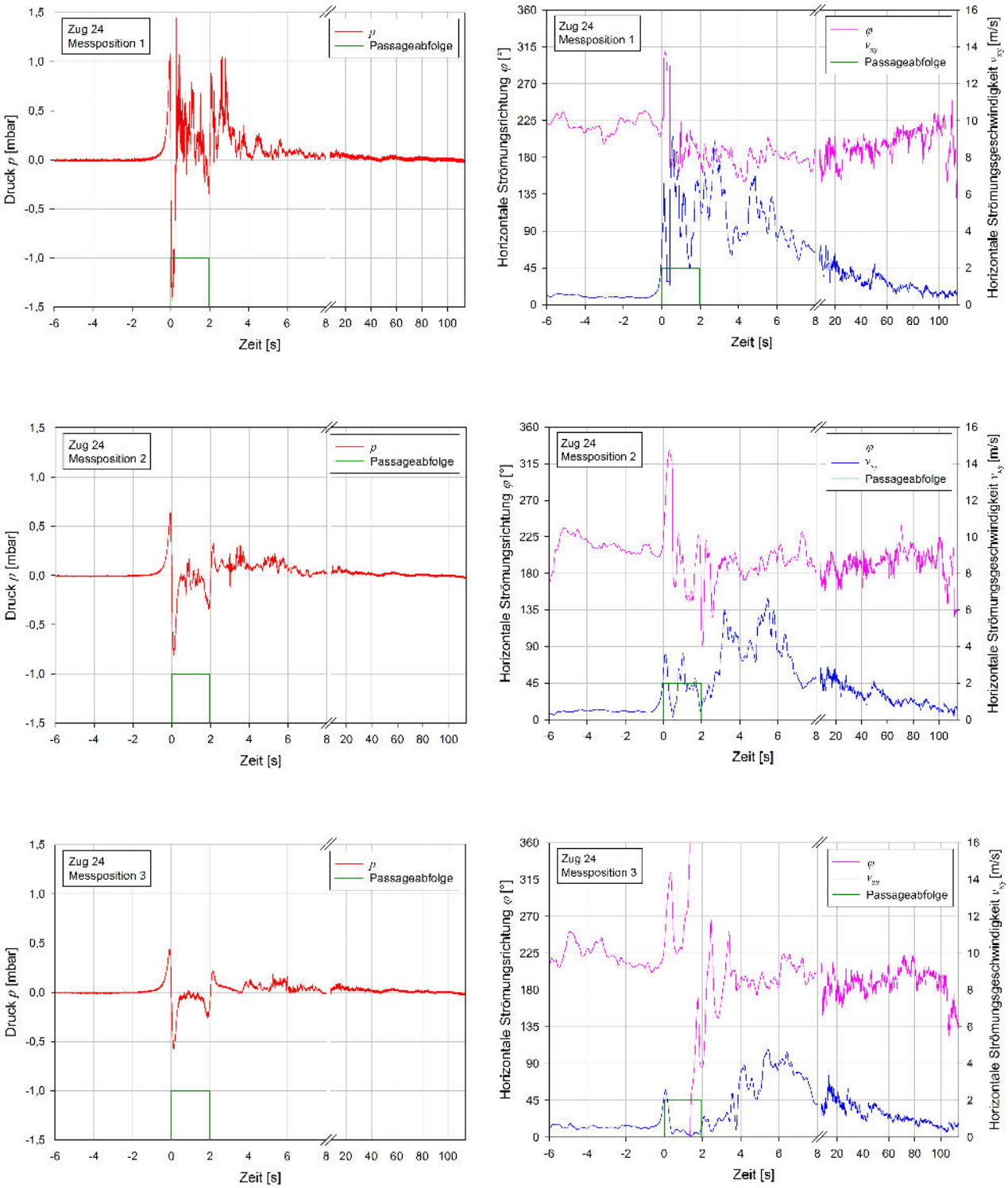


Abbildung B.104: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 24 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$.

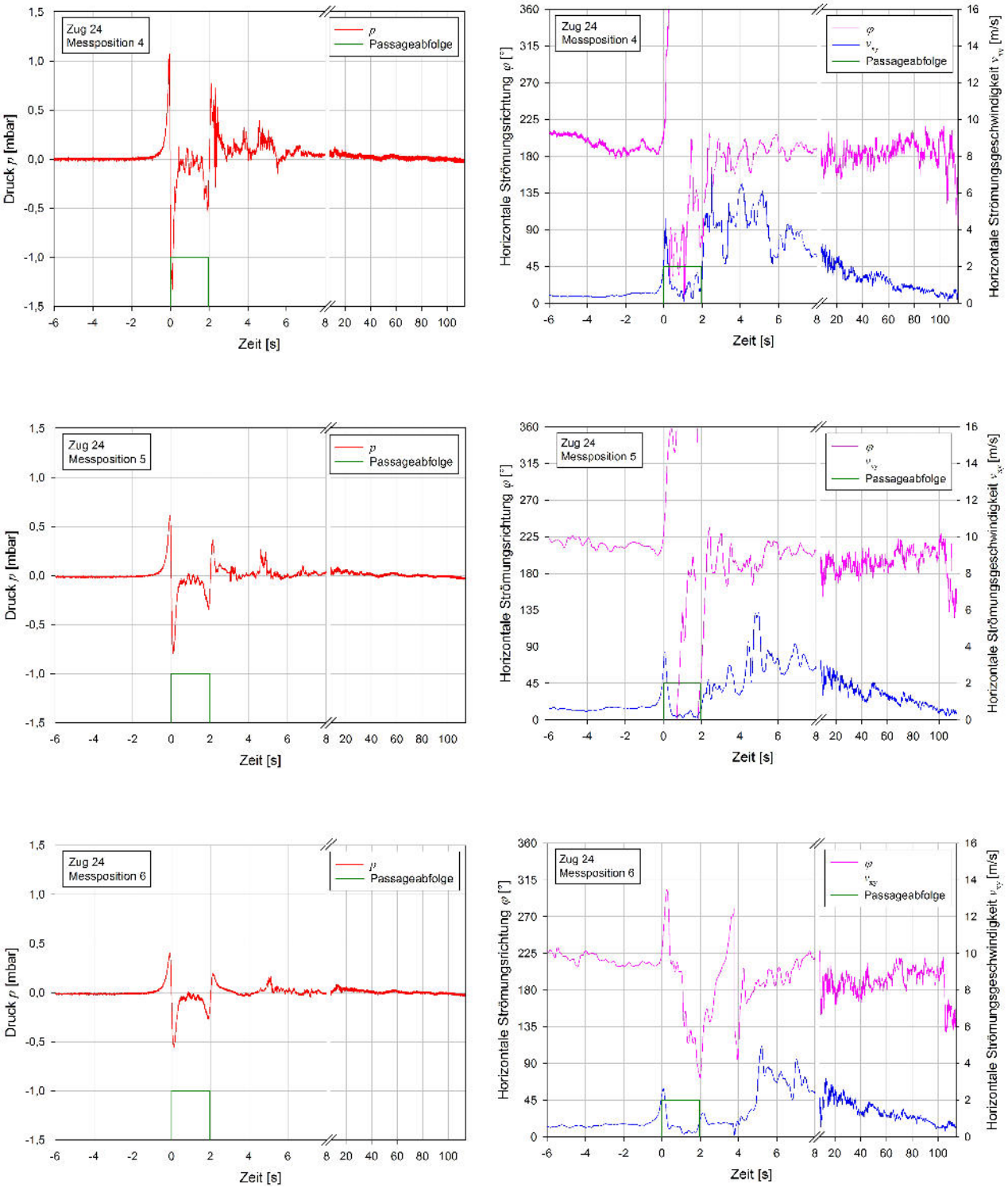


Abbildung B.105: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 24 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$.

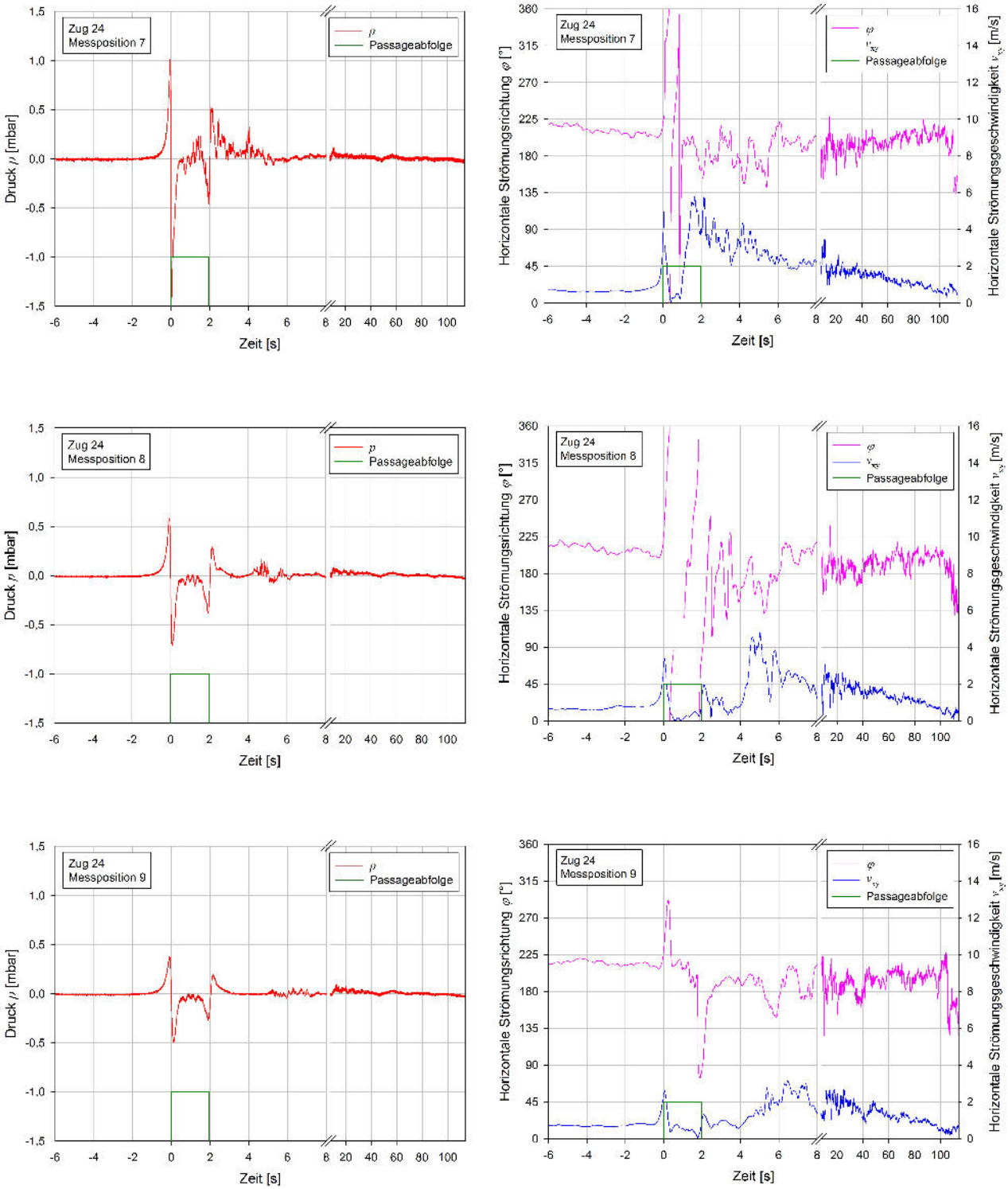


Abbildung B.106: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 24 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$.

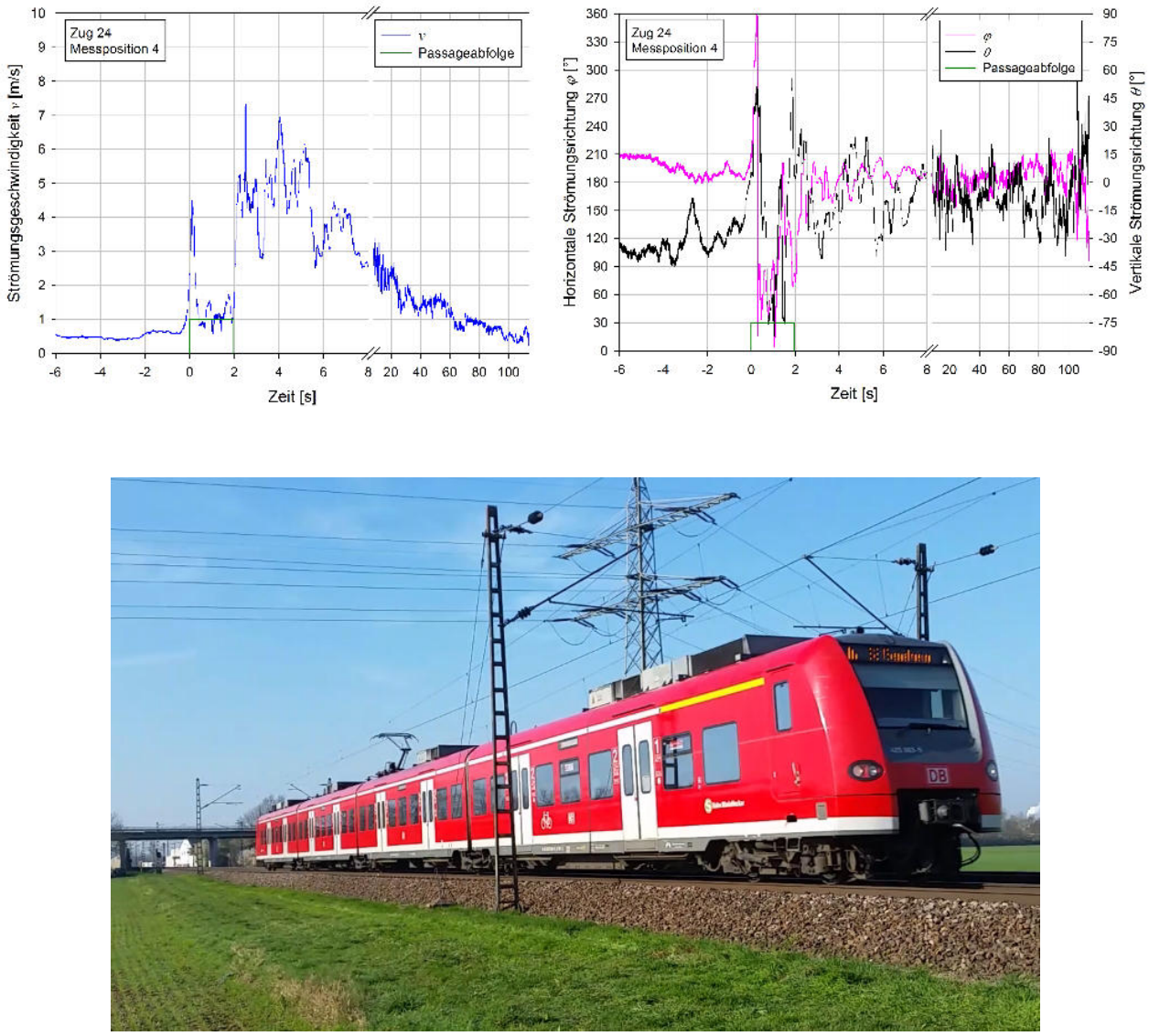


Abbildung B.107: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 24 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 24 ($\bar{v} = 122{,}6 \pm 1{,}6\,\mathrm{km/h}$).

Zug 25: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

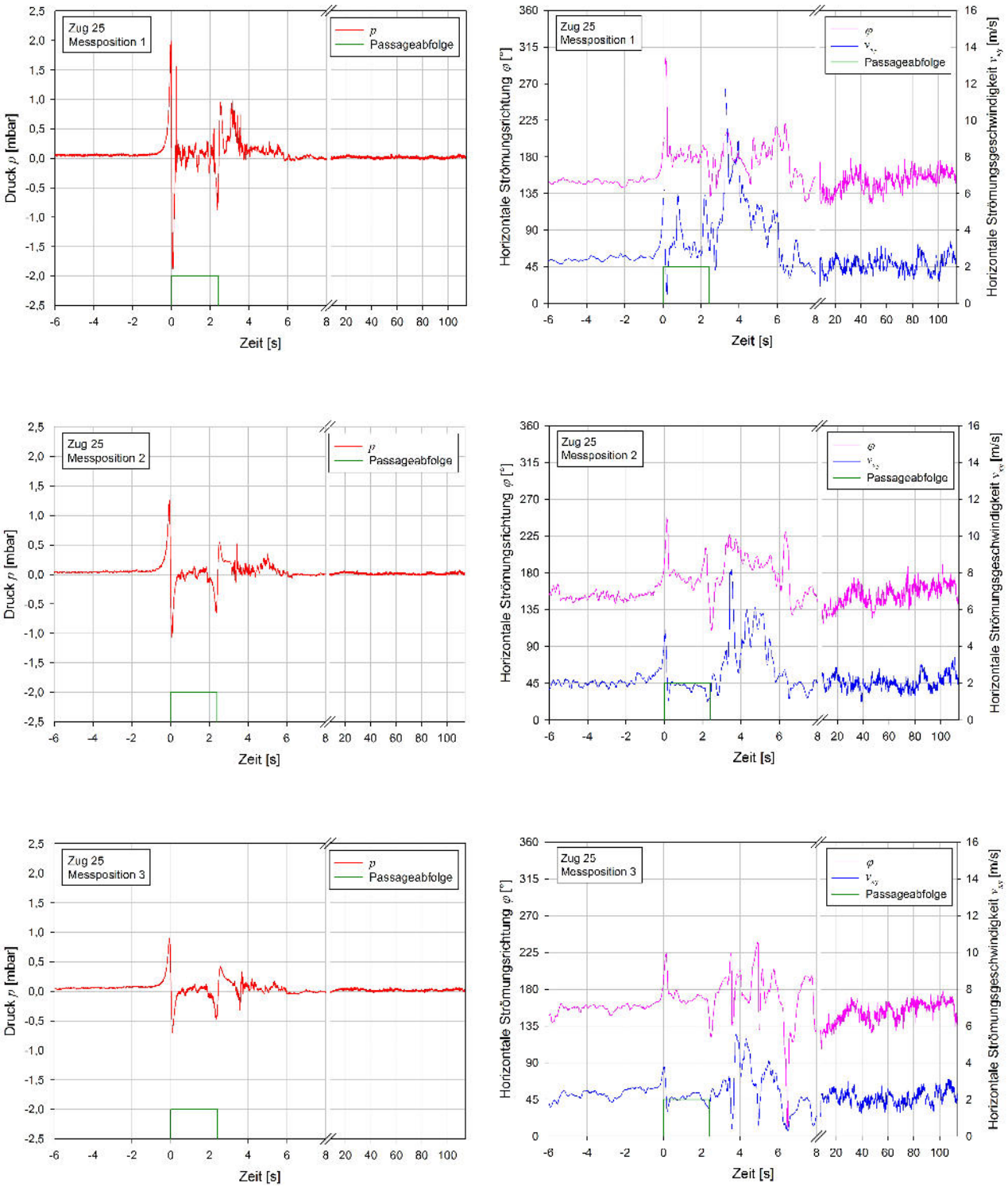


Abbildung B.108: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 25 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

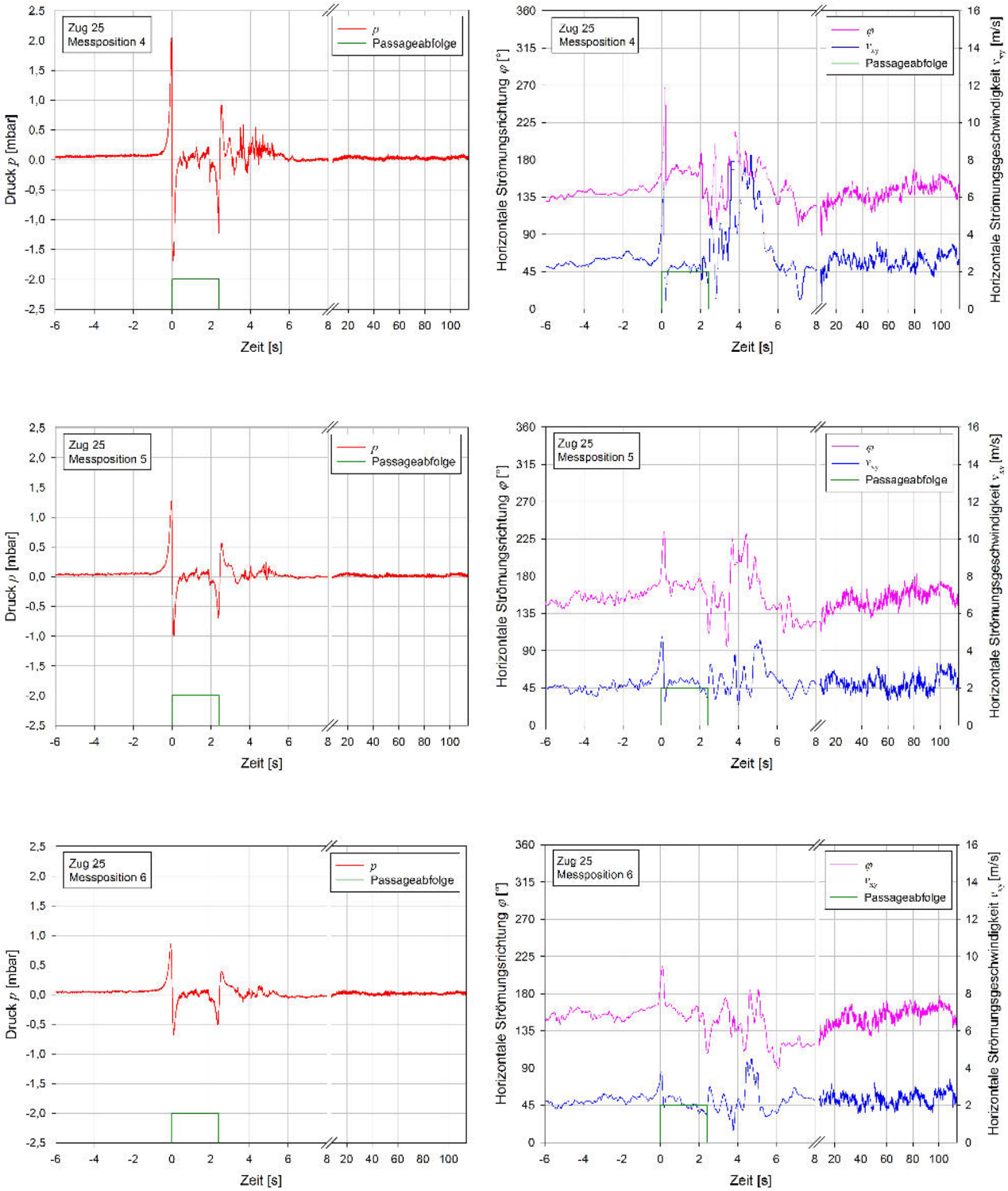


Abbildung B.109: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 25 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

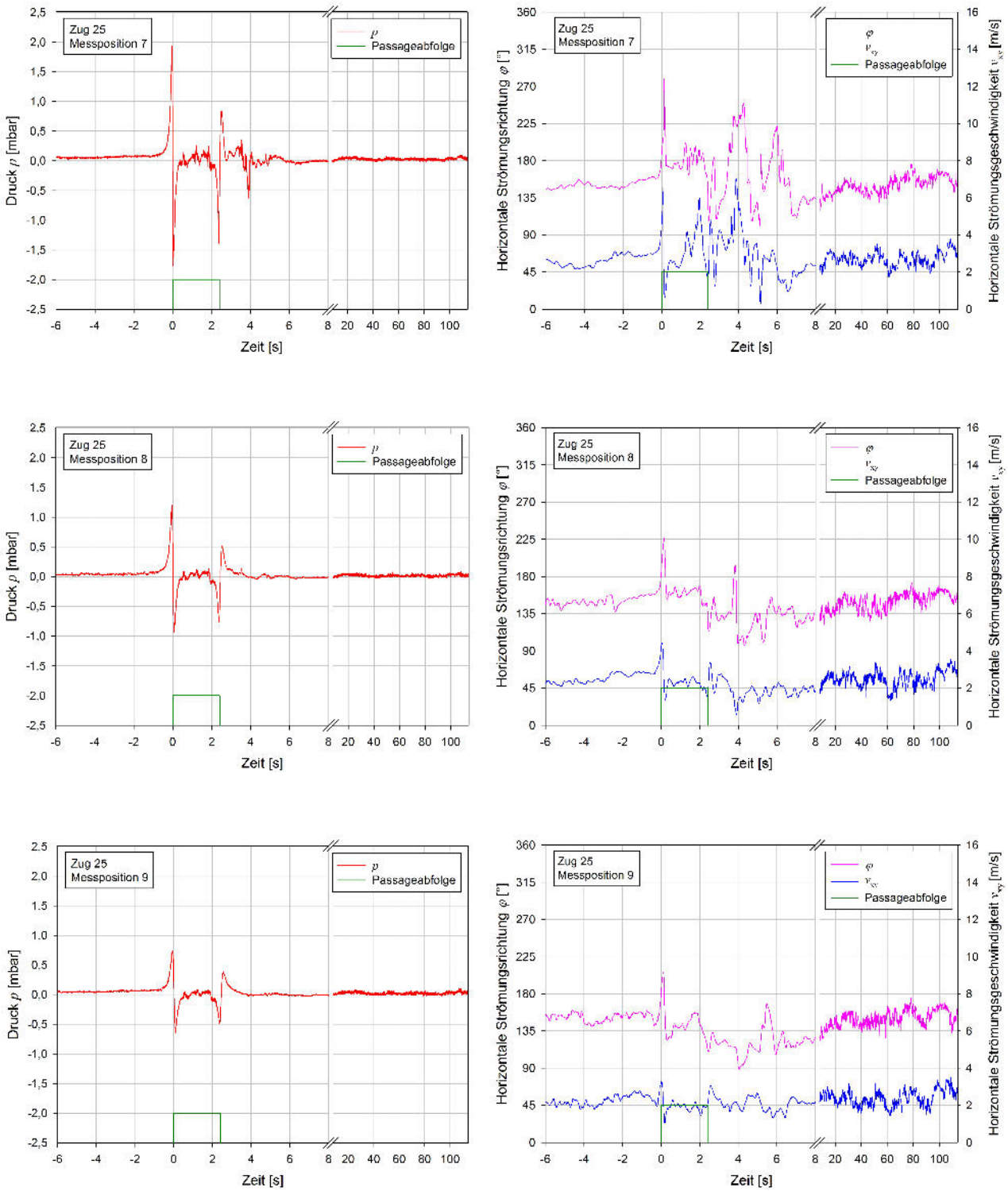


Abbildung B.110: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 25 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

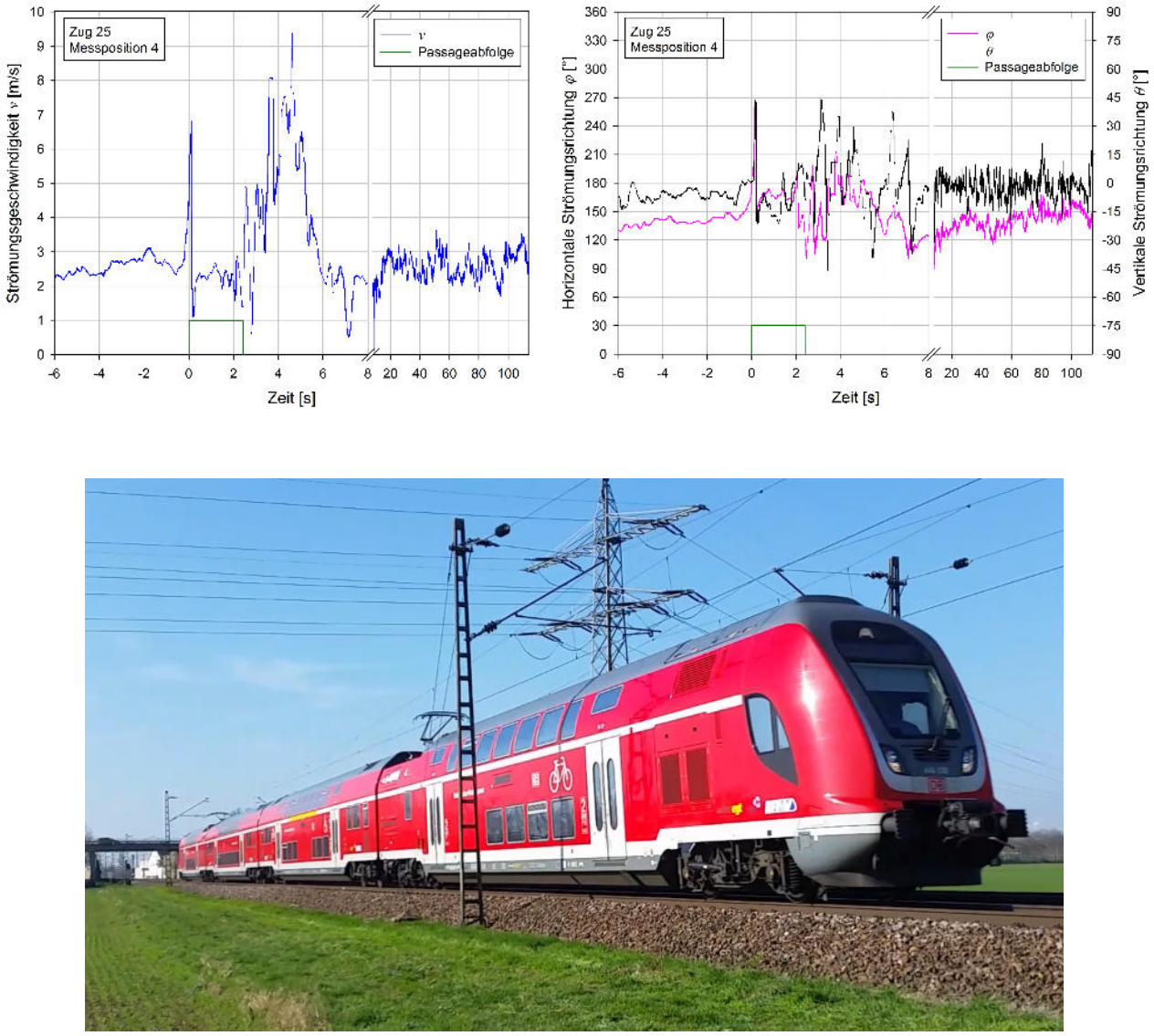


Abbildung B.111: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 25 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 25 ($\bar{v} = 155{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 26: Doppelstockzug K2 + K2 (4 Wagen + 4 Wagen)

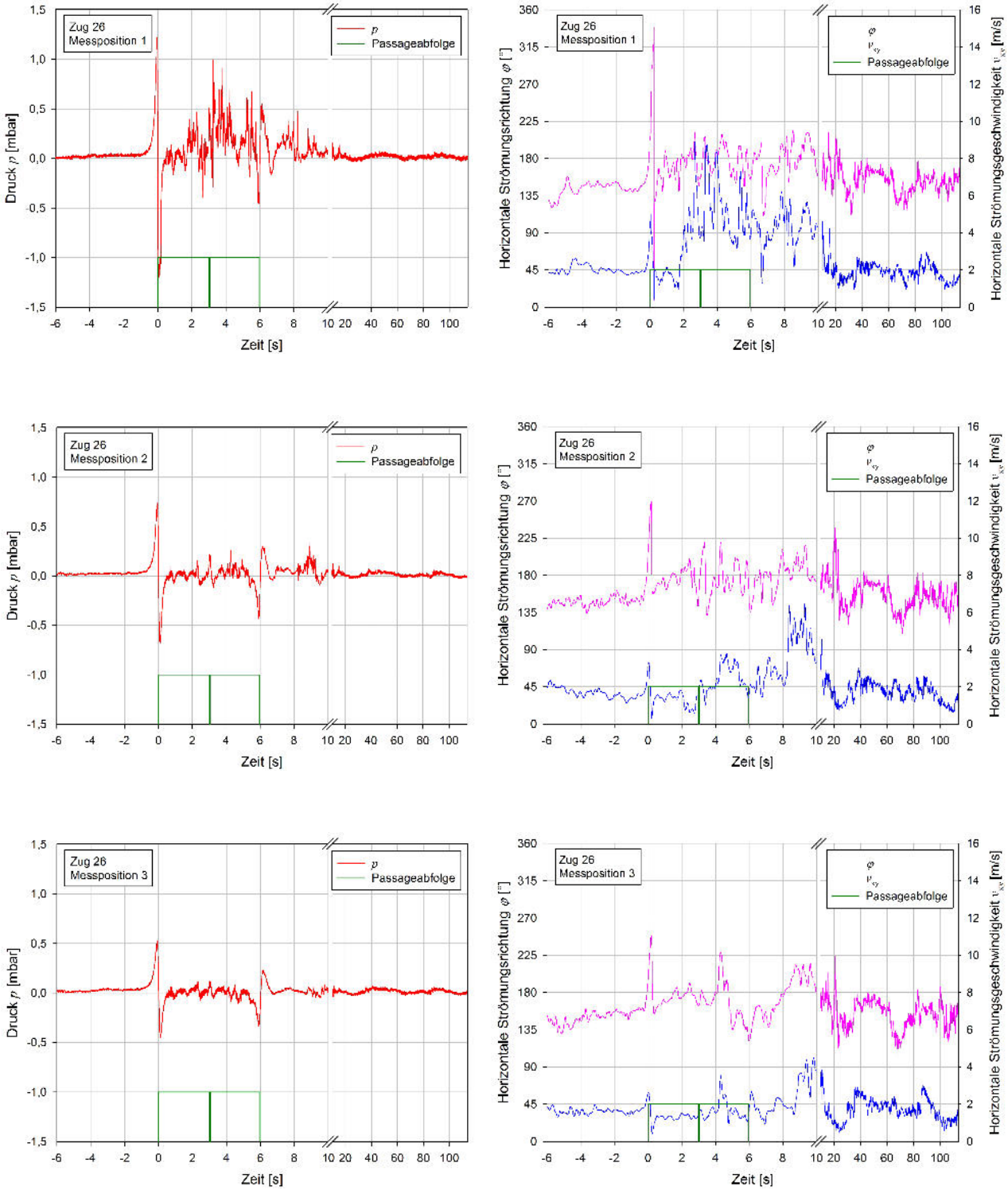


Abbildung B.112: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 26 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

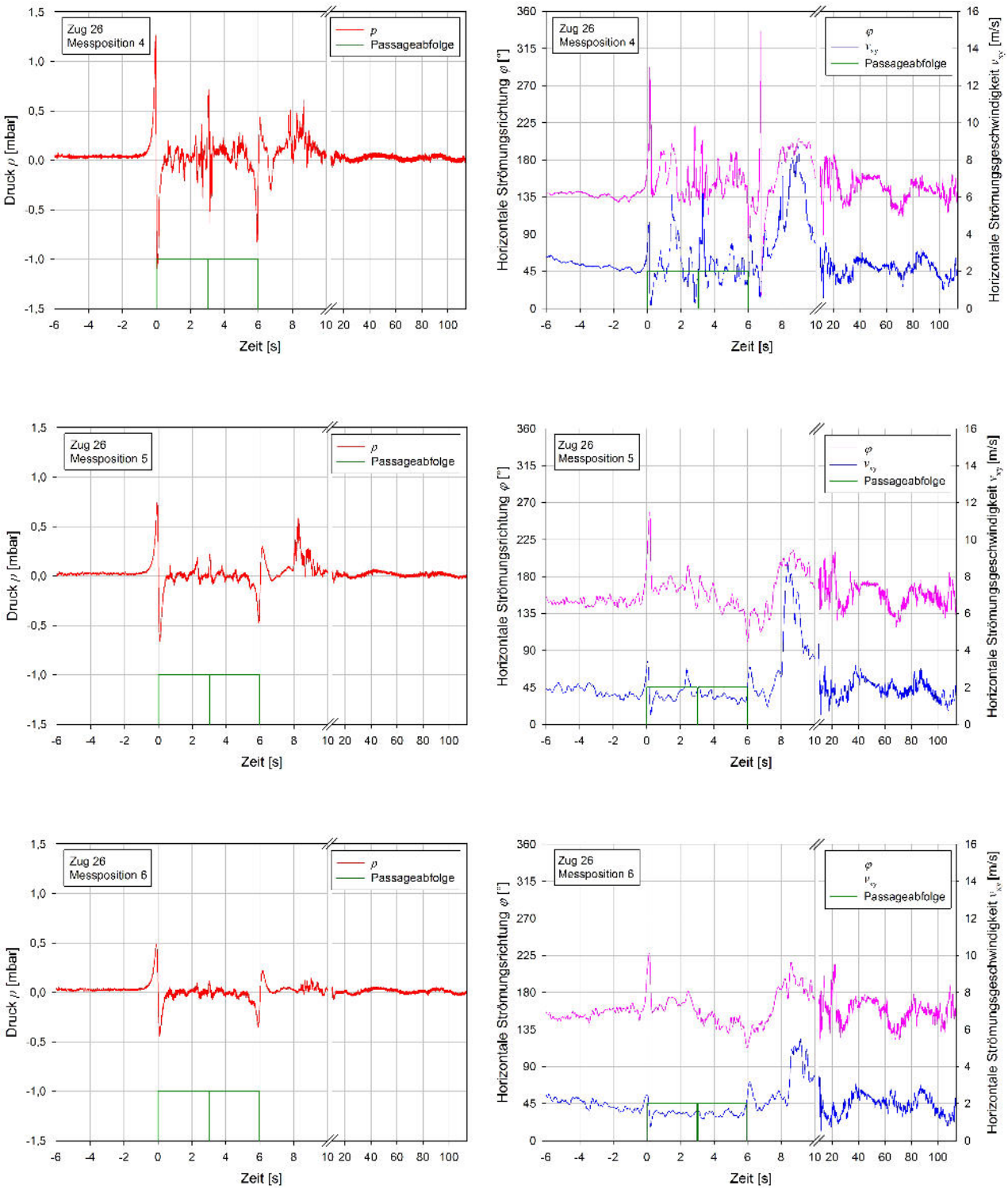


Abbildung B.113: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 26 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

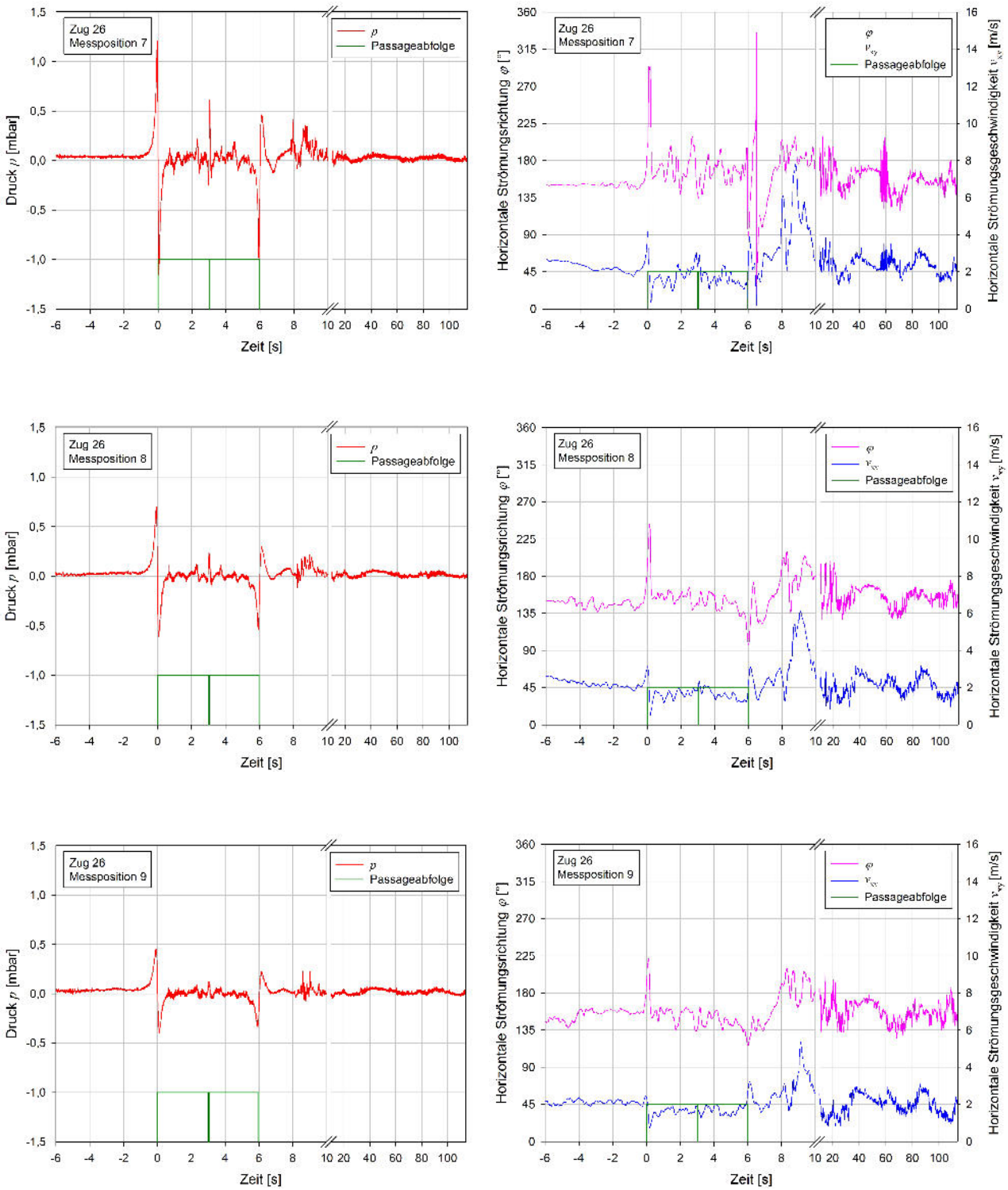


Abbildung B.114: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 26 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

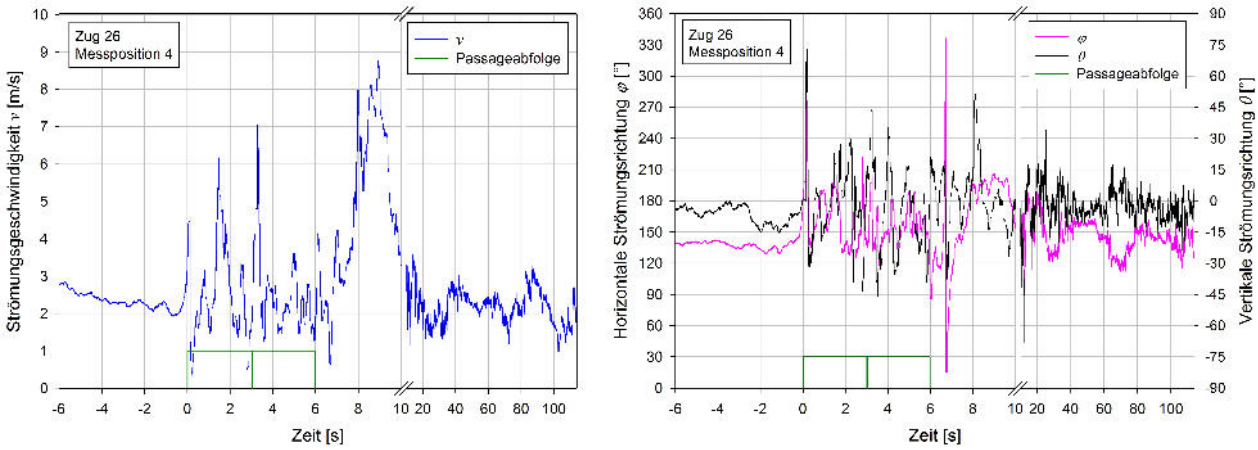




Abbildung B.115: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 26 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 26 ($\bar{v} = 123{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 27: ICE 3 (Baureihe 407)

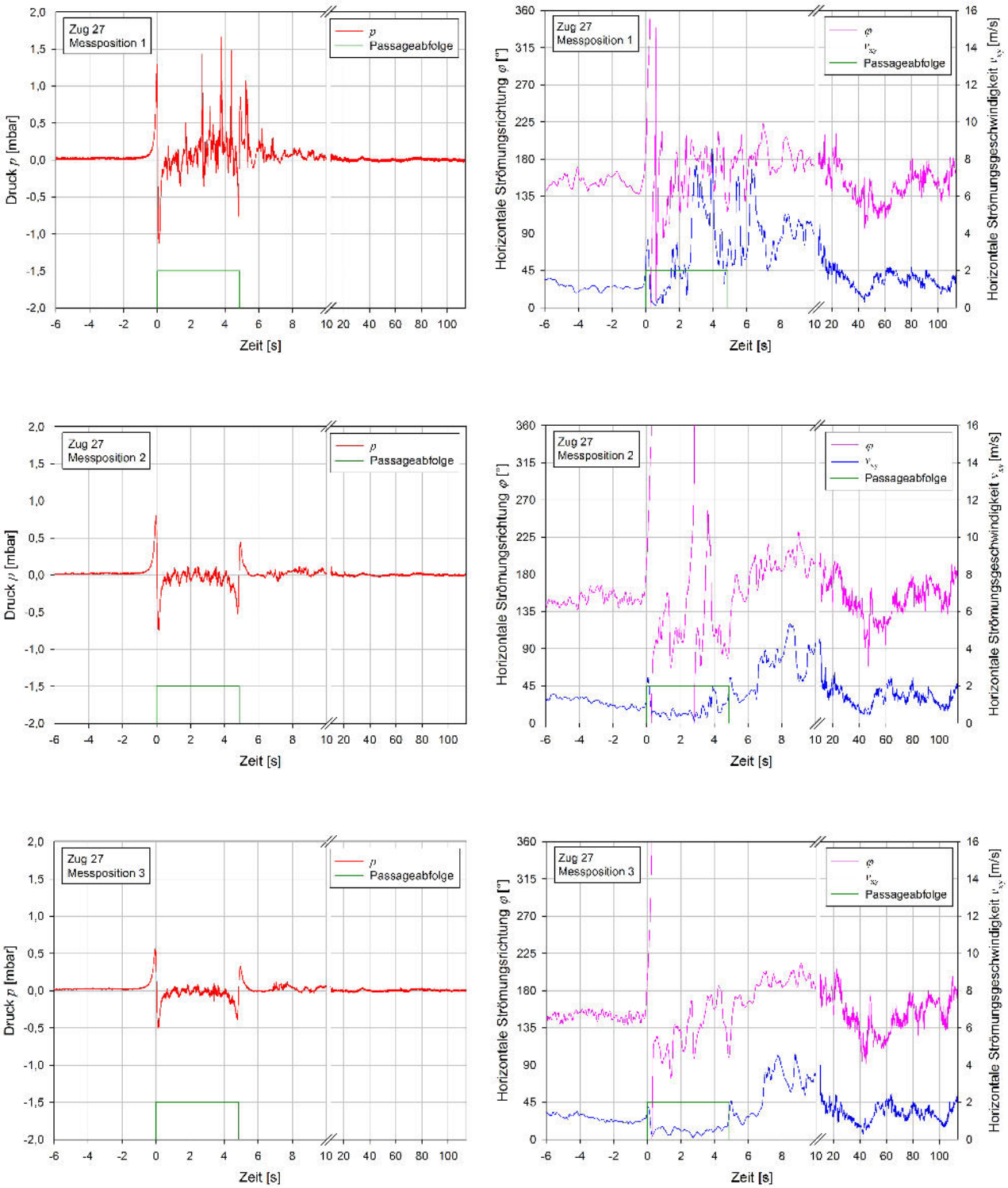


Abbildung B.116: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 27 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 147{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

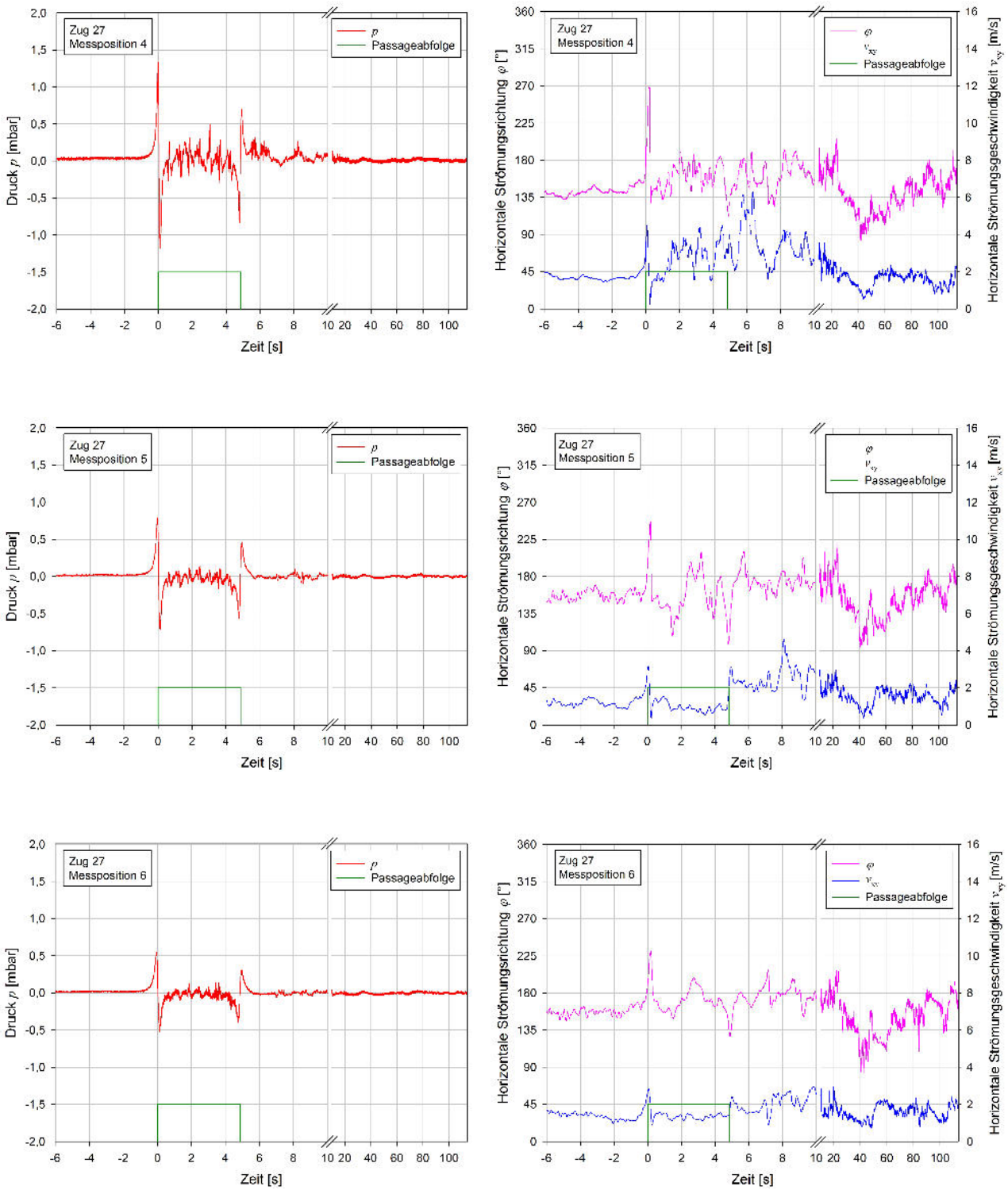


Abbildung B.117: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 27 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 147{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

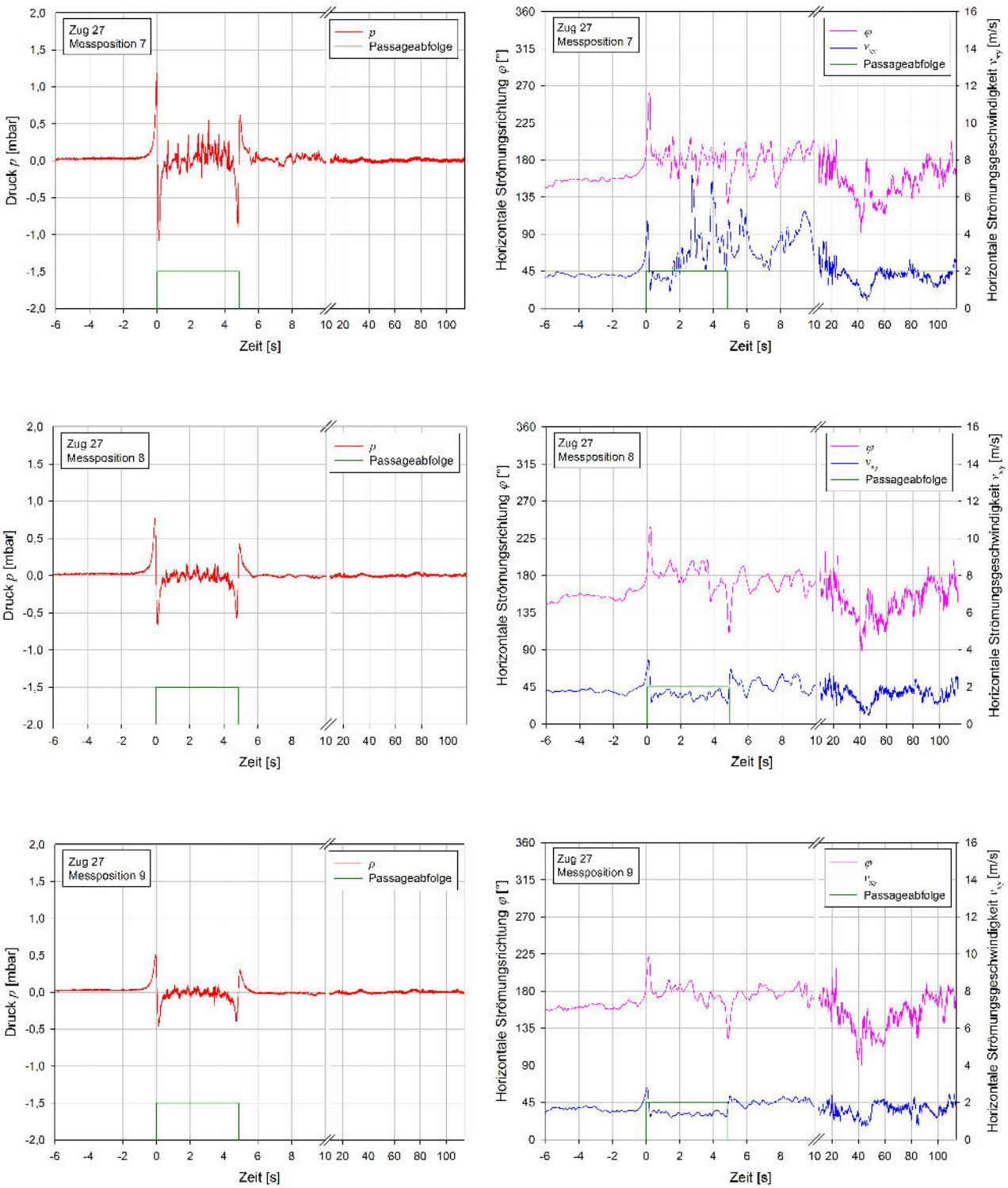


Abbildung B.118: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 27 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 147{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

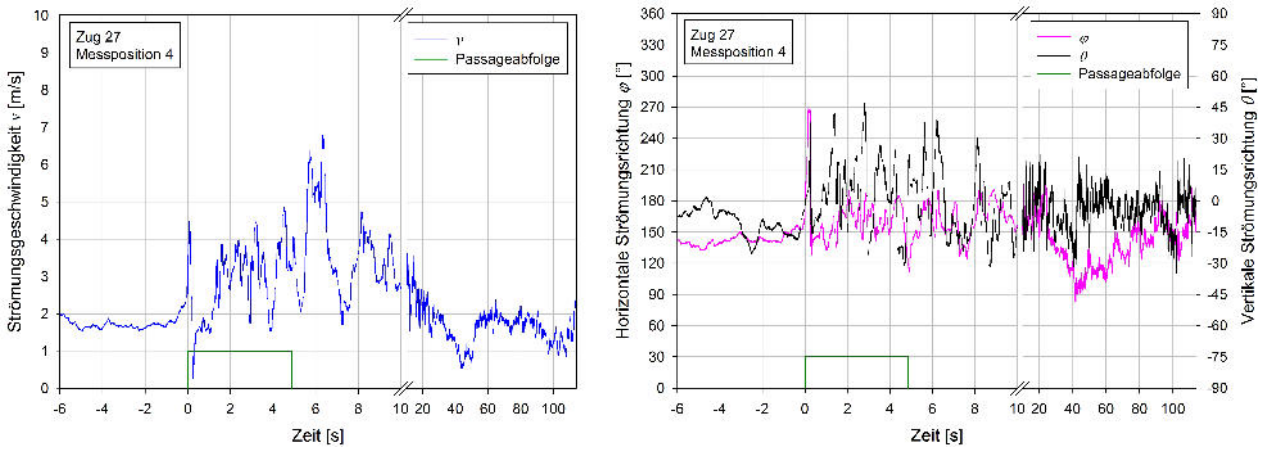




Abbildung B.119: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 27 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 27 ($\bar{v} = 147{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 28: ICE 4 (Baureihe 412)

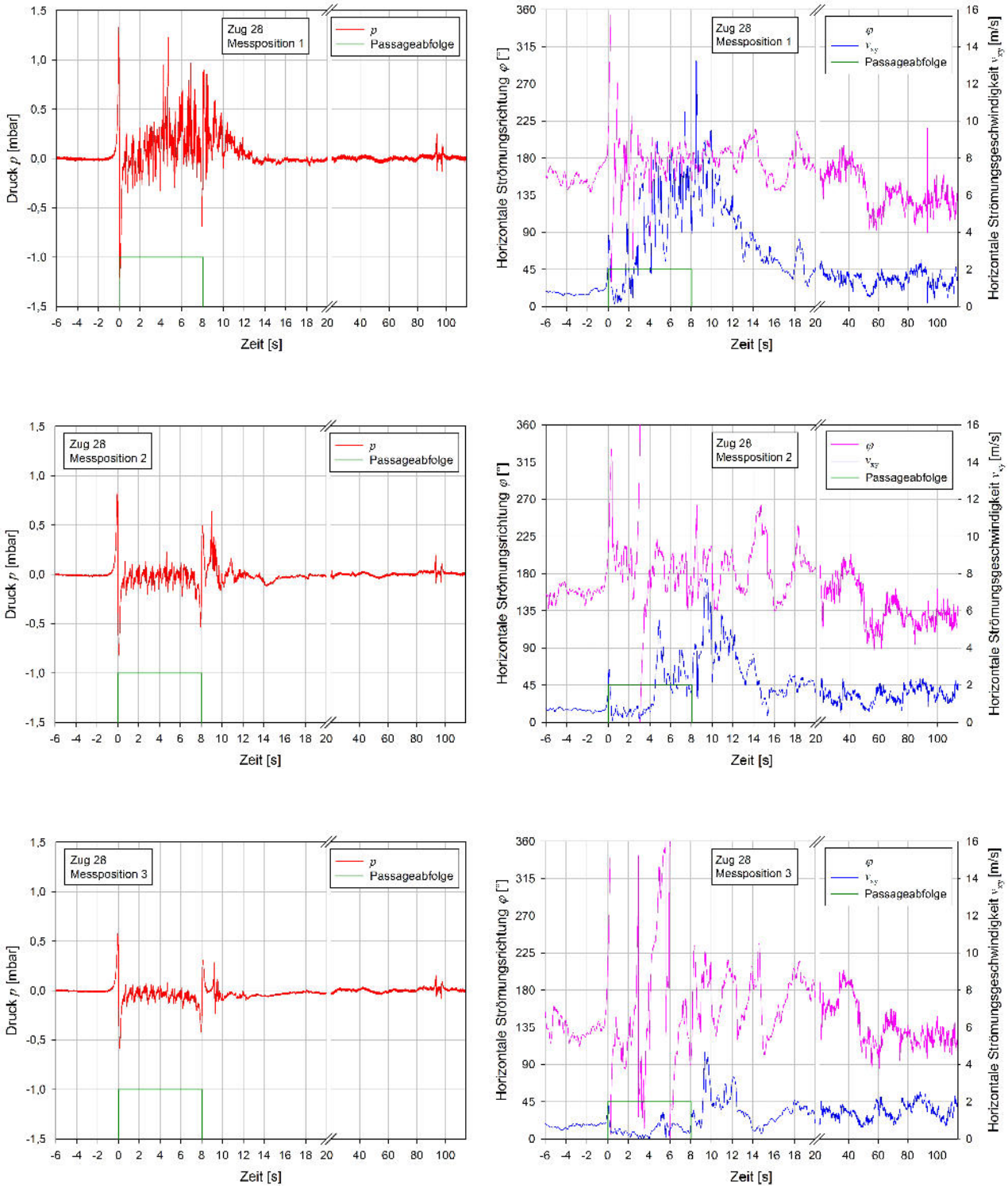


Abbildung B.120: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 28 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

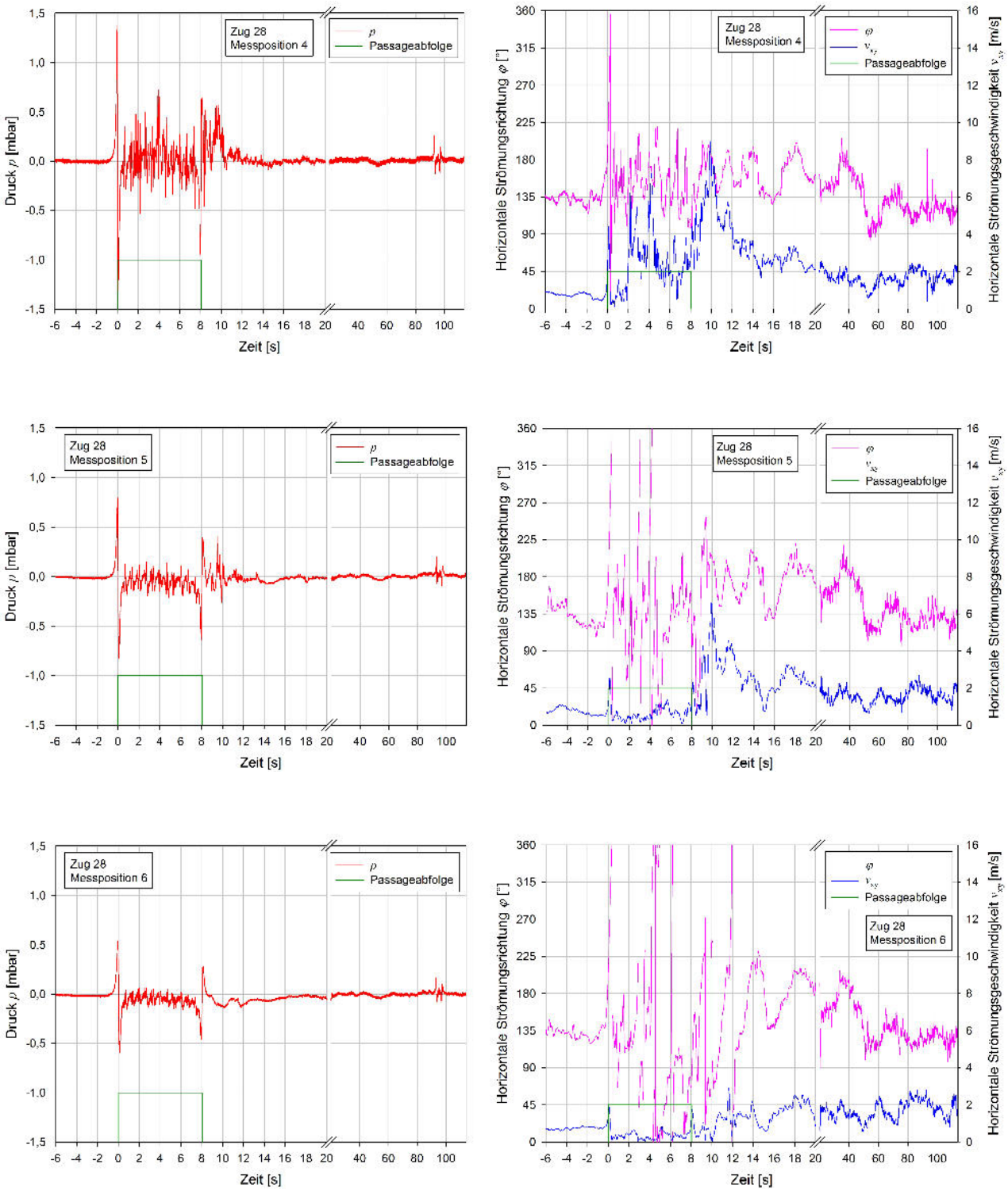


Abbildung B.121: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 28 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

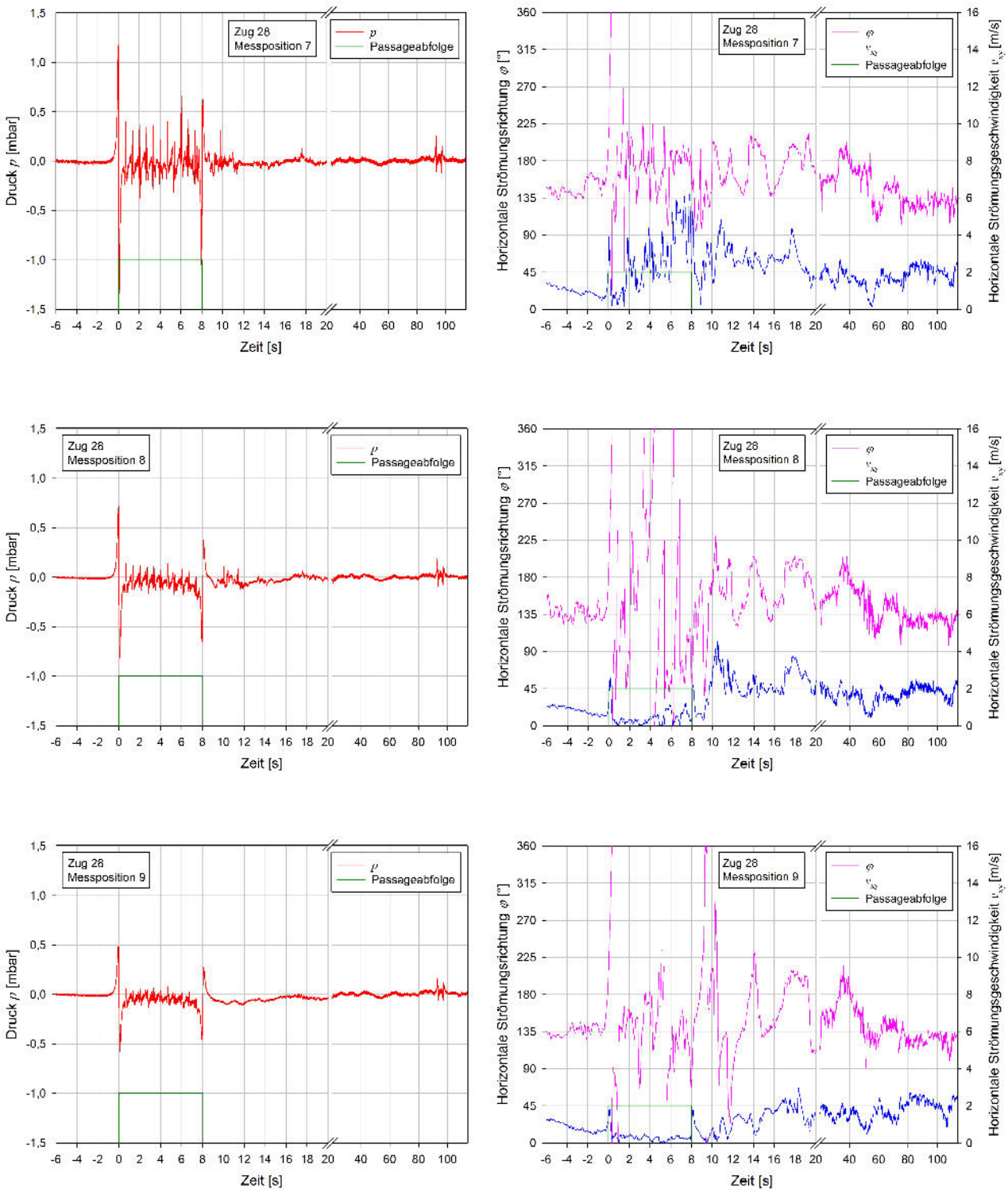


Abbildung B.122: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 28 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

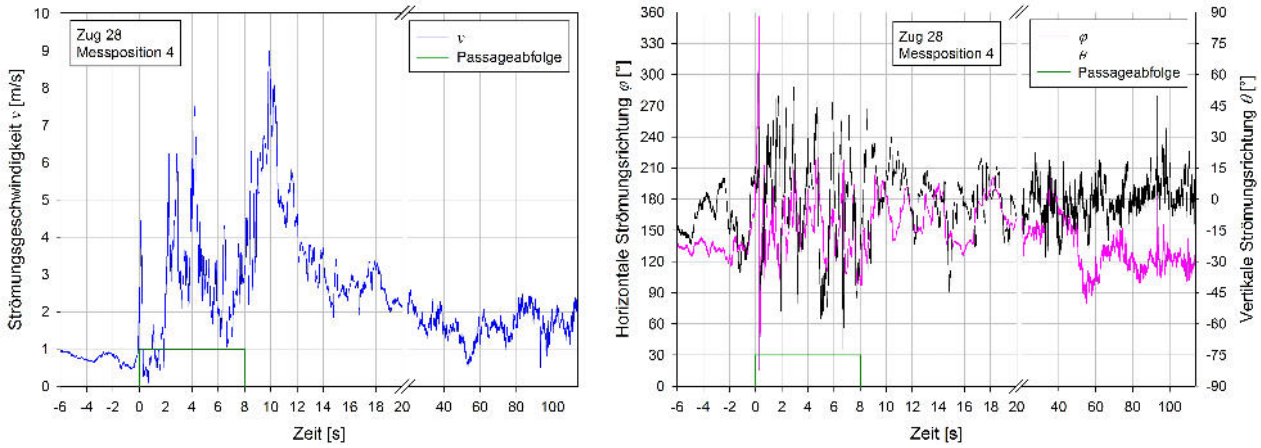




Abbildung B.123: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 28 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 28 ($\bar{v} = 154{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 29: IC

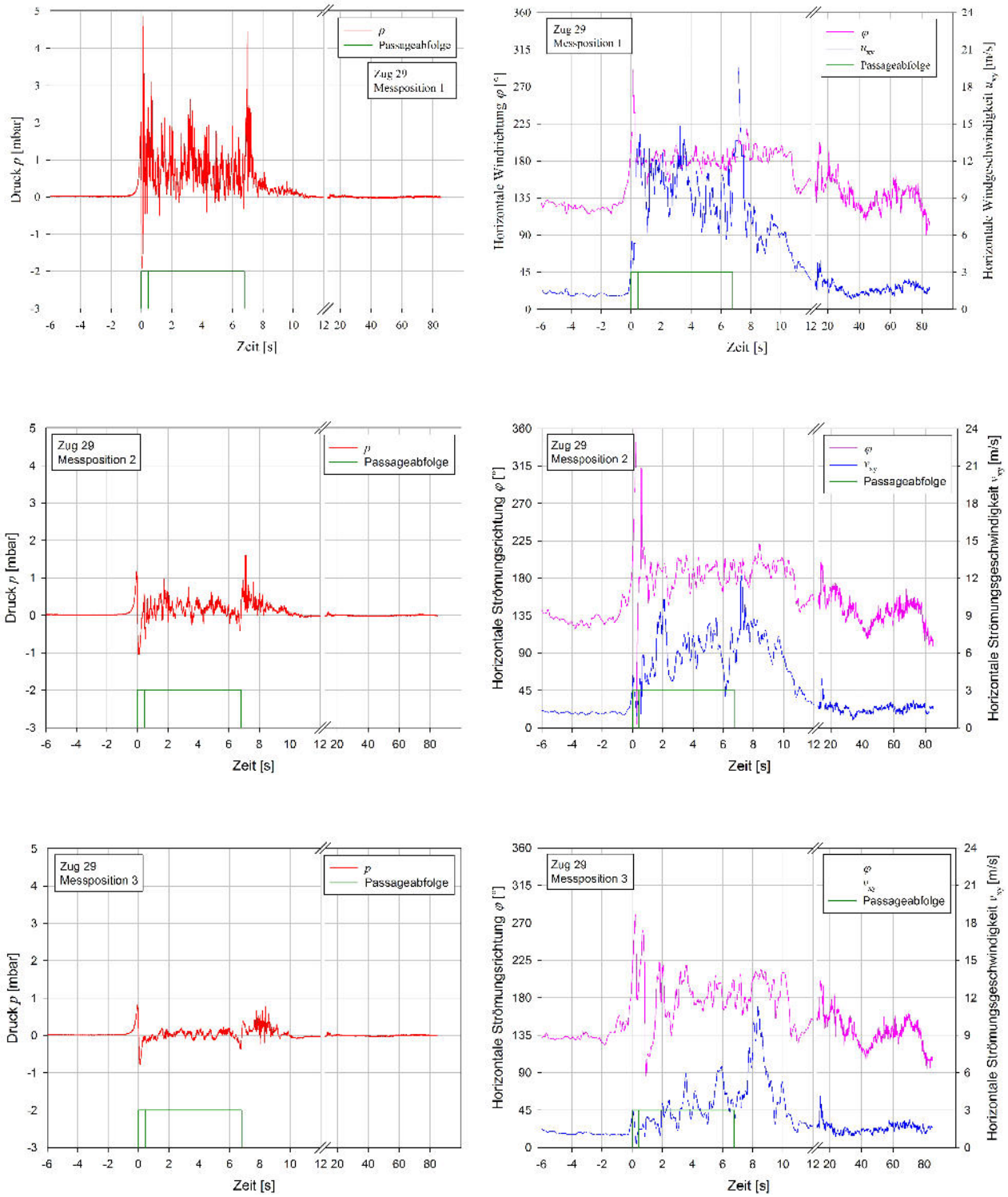


Abbildung B.124: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 29 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

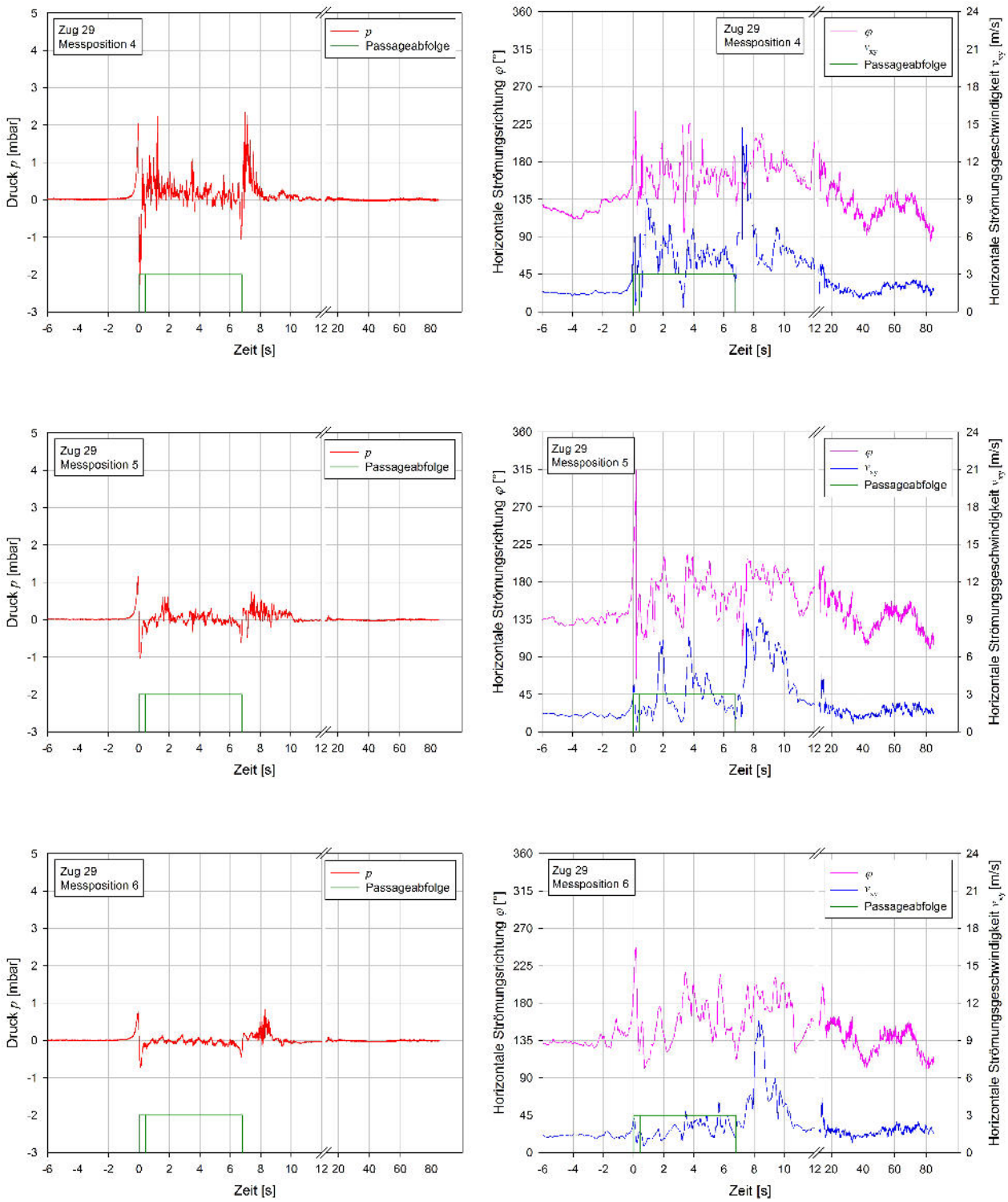


Abbildung B.125: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 29 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

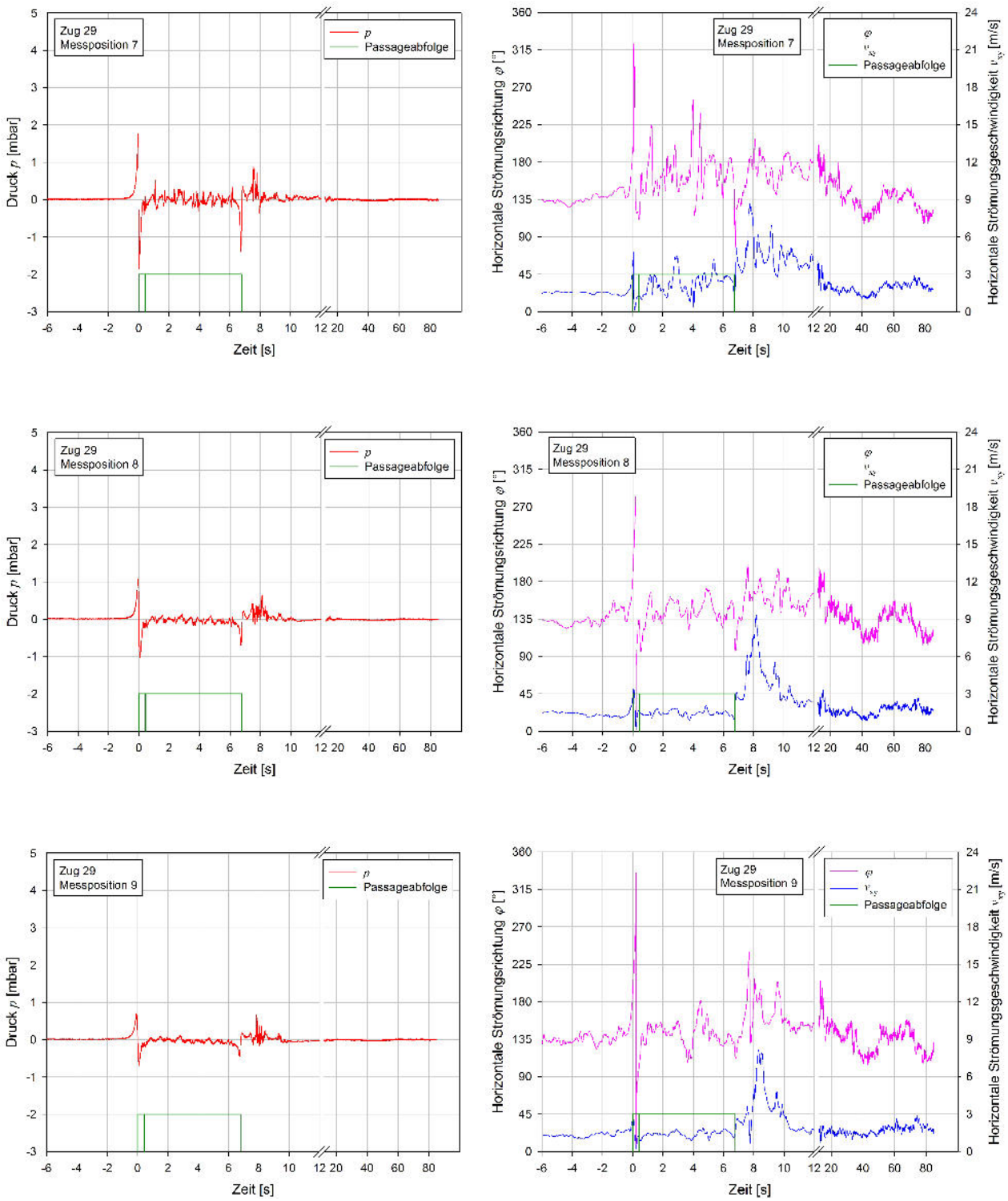


Abbildung B.126: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 29 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

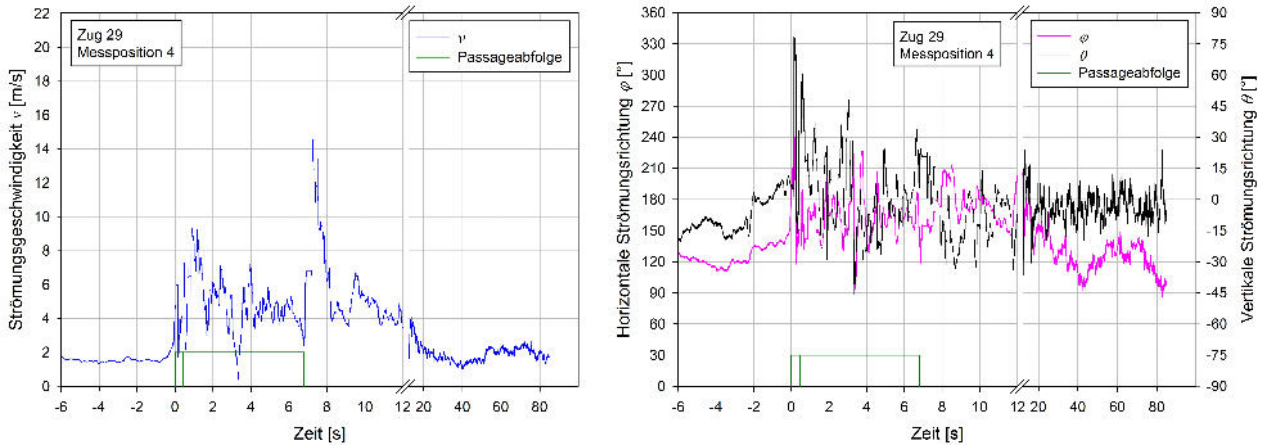




Abbildung B.127: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 29 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 29 ($\bar{v} = 149{,}3 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$).

Zug 30: ICE 3 (Baureihe 403)

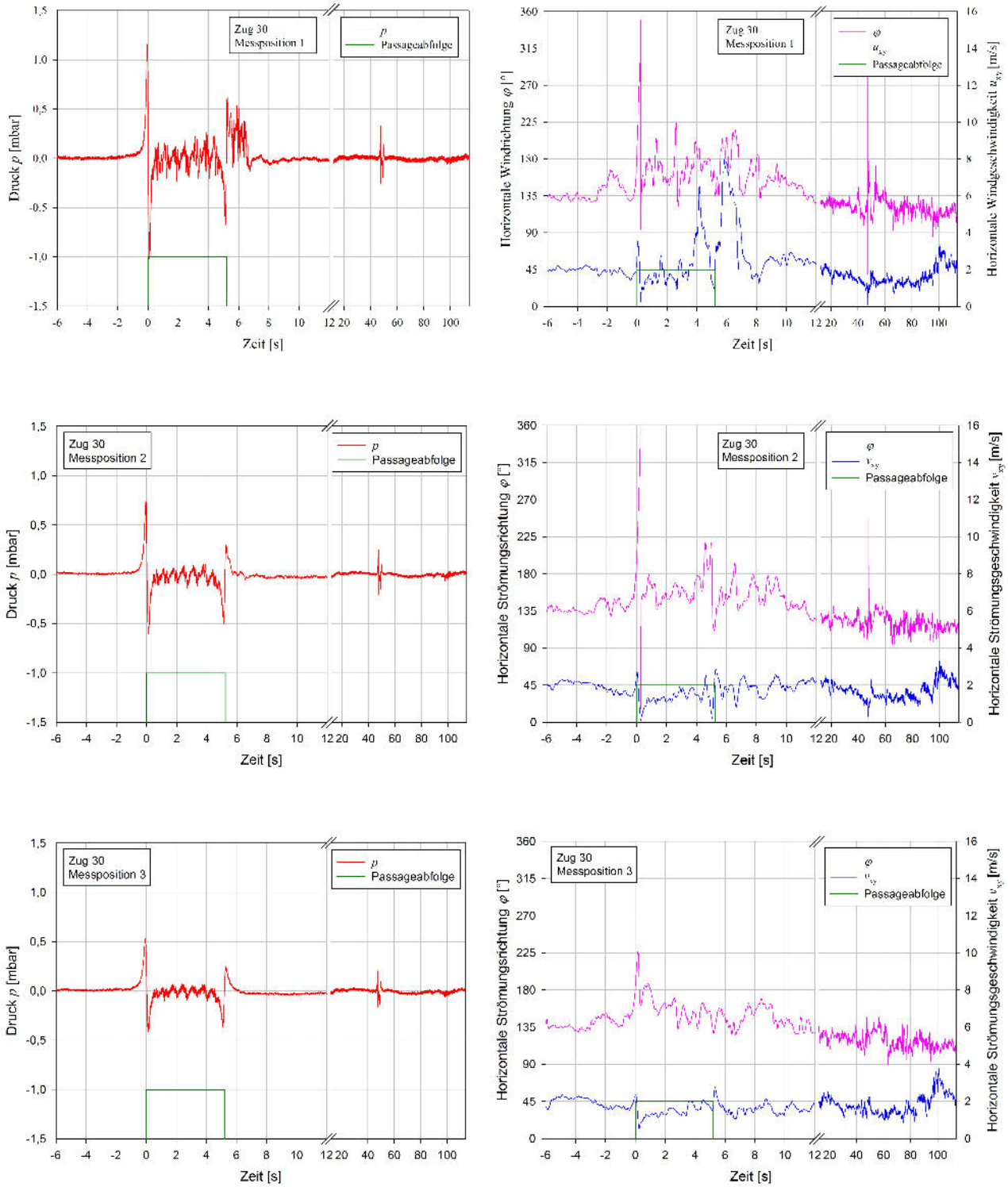


Abbildung B.128: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 30 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

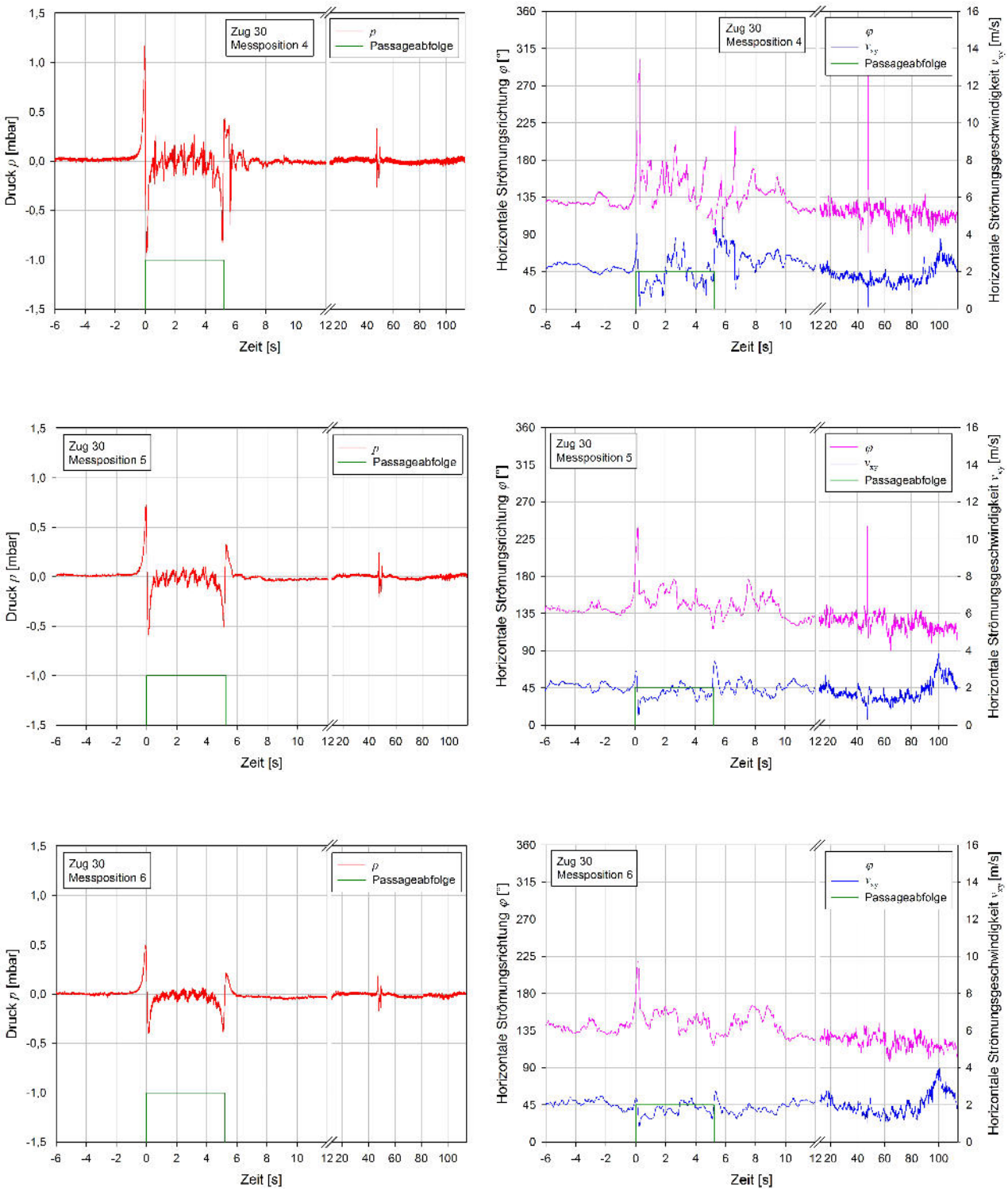


Abbildung B.129: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 30 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

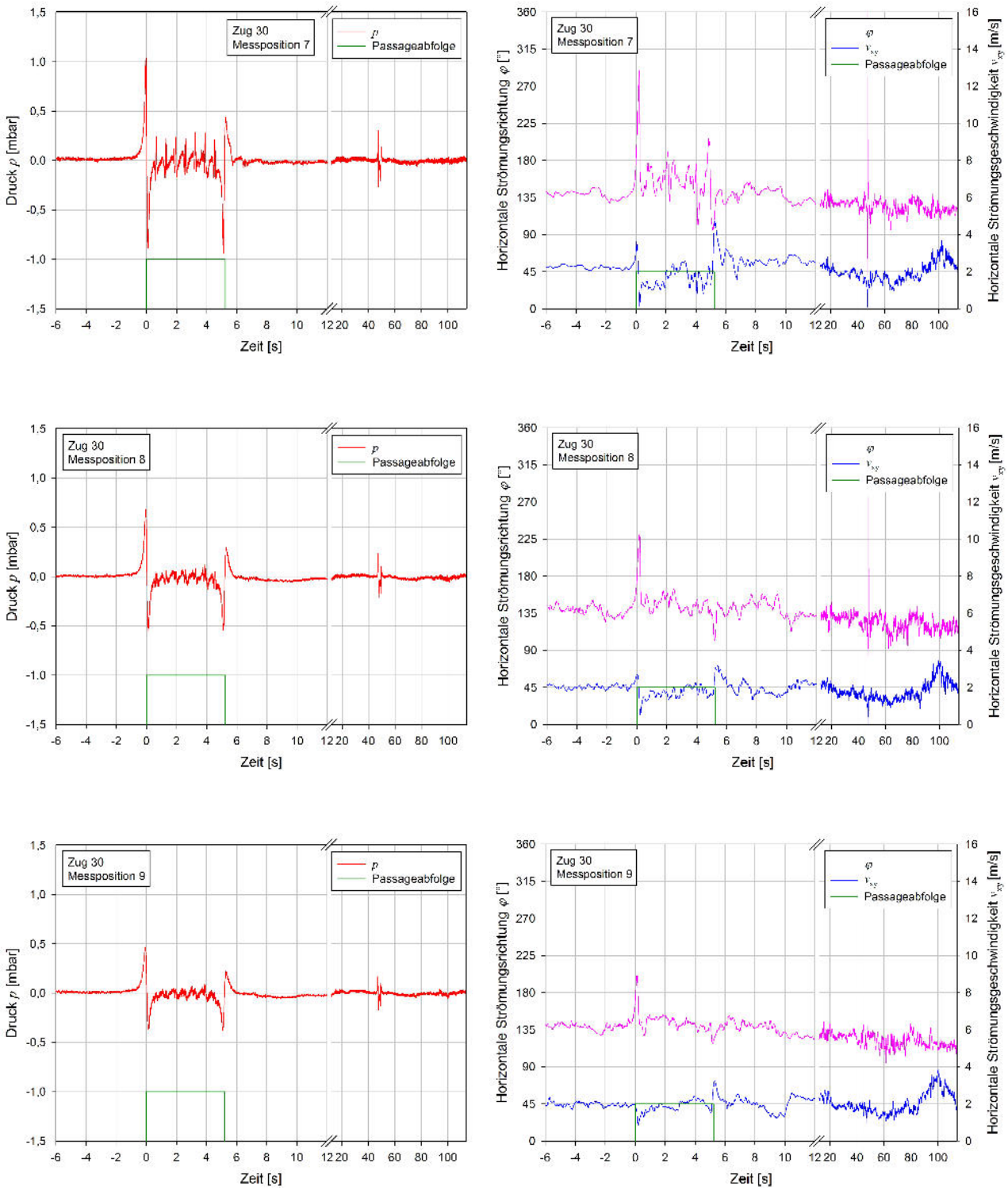
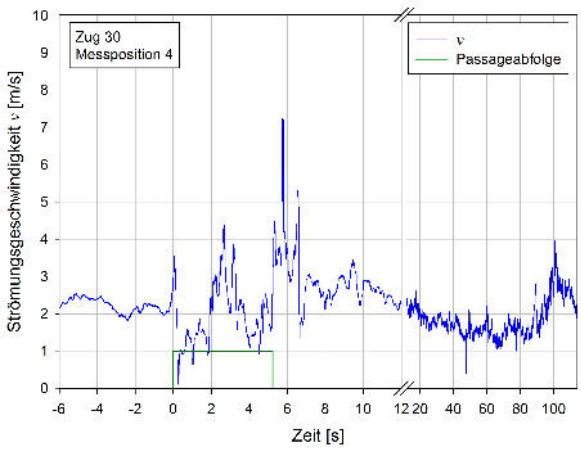


Abbildung B.130: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 30 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.



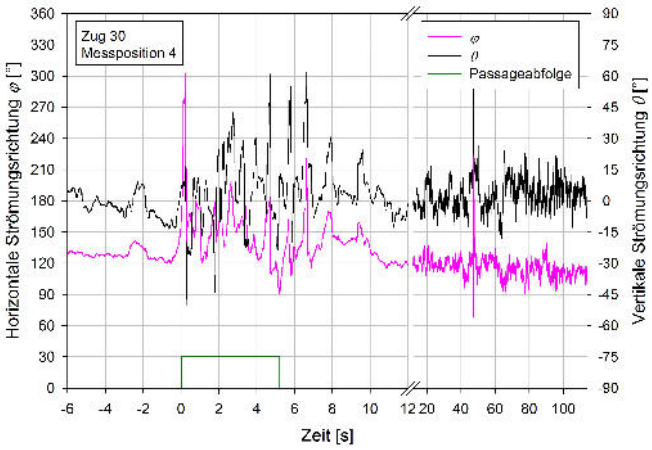






Abbildung B.131: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 30 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 30 ($\bar{v} = 137{,}4 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 31: S-Bahn (Baureihe 425)

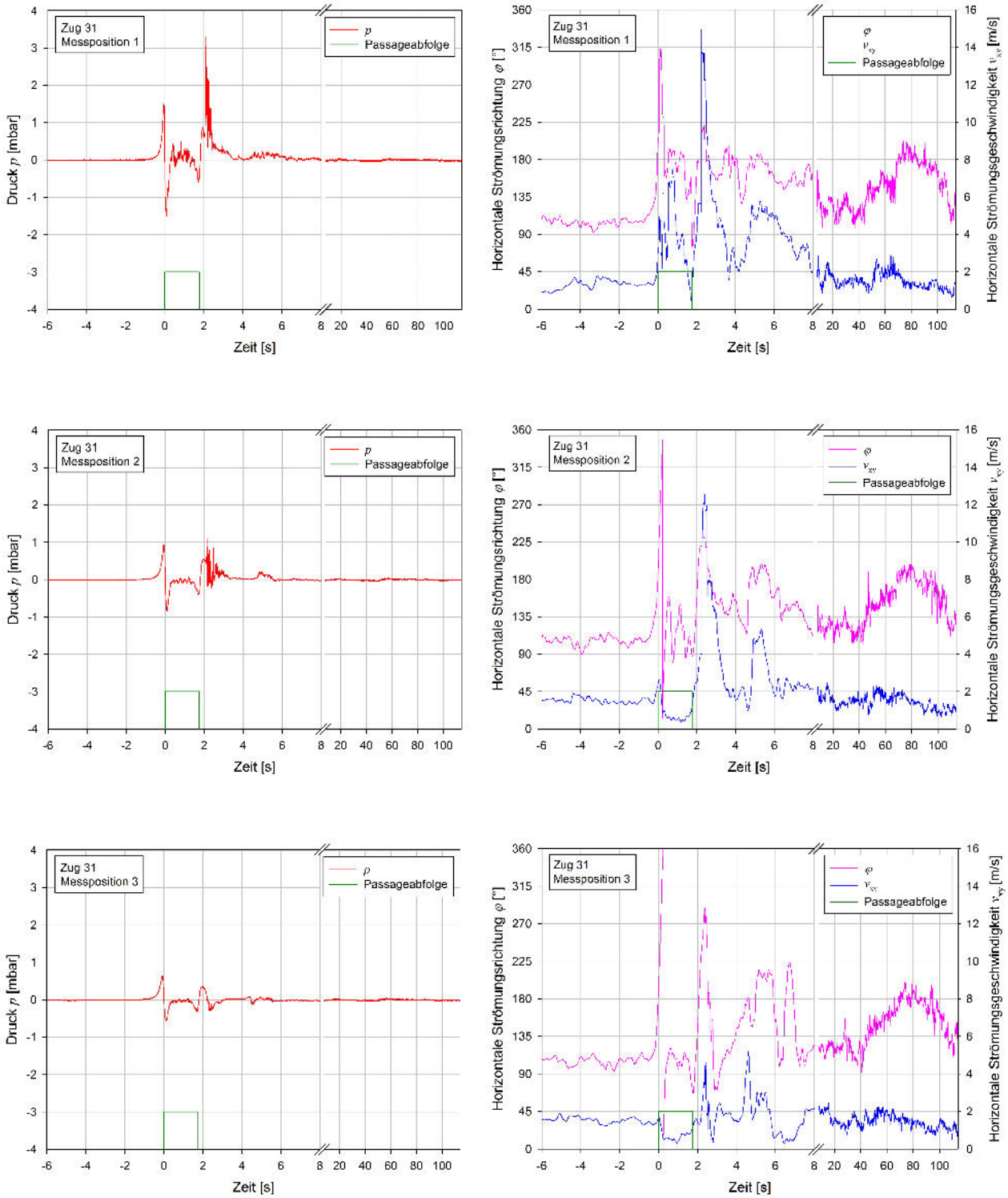


Abbildung B.132: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 31 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

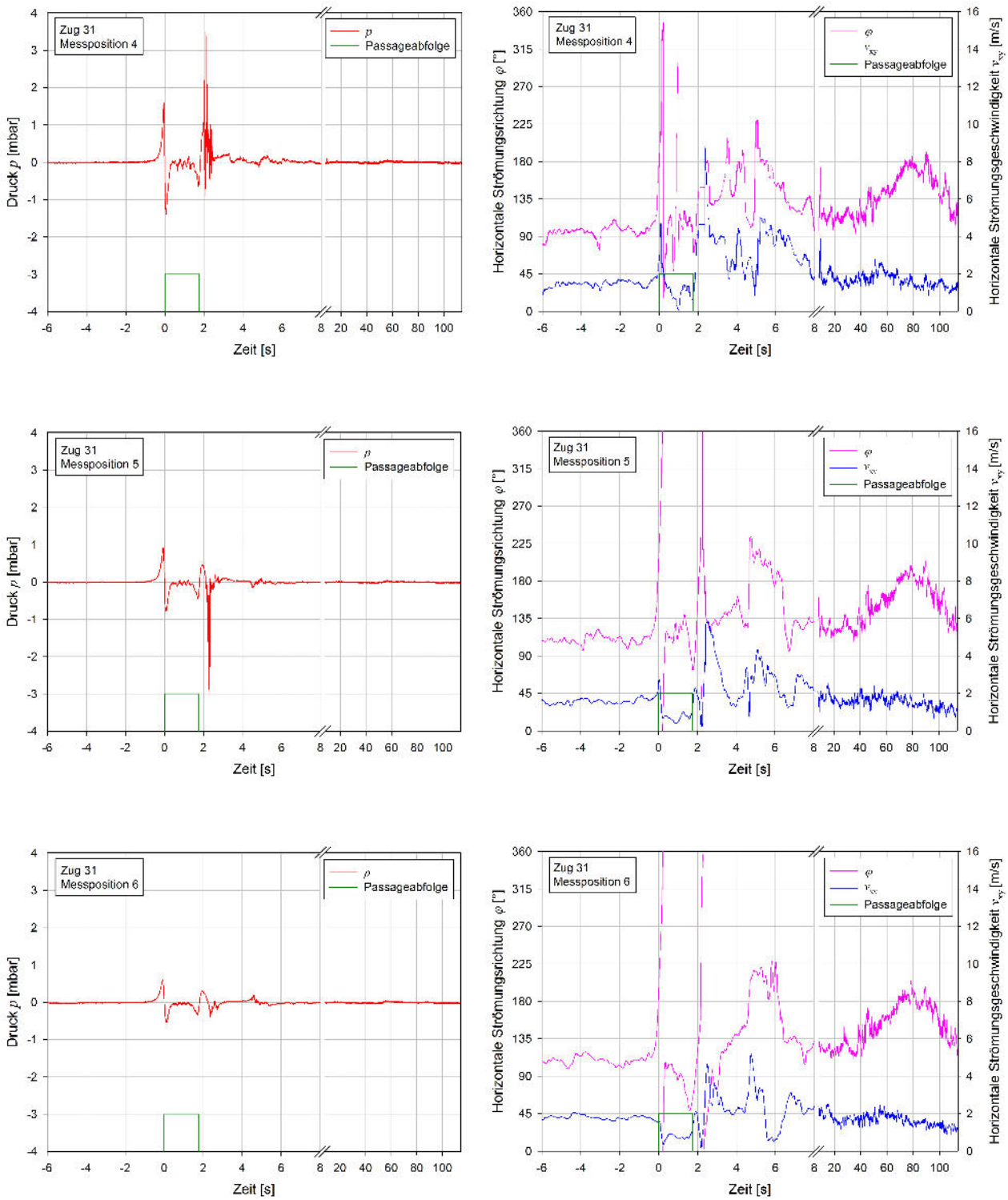


Abbildung B.133: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 31 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

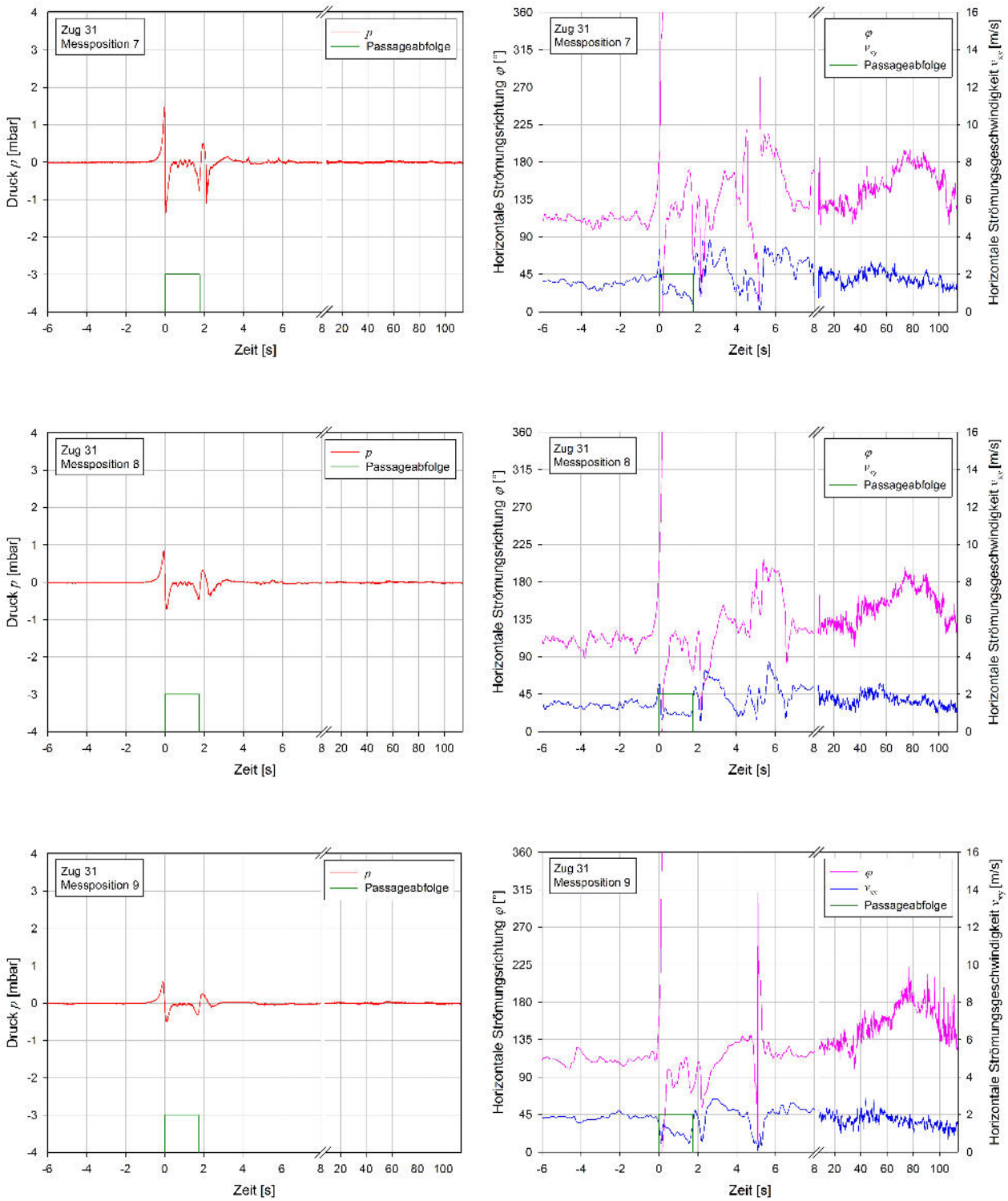


Abbildung B.134: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 31 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

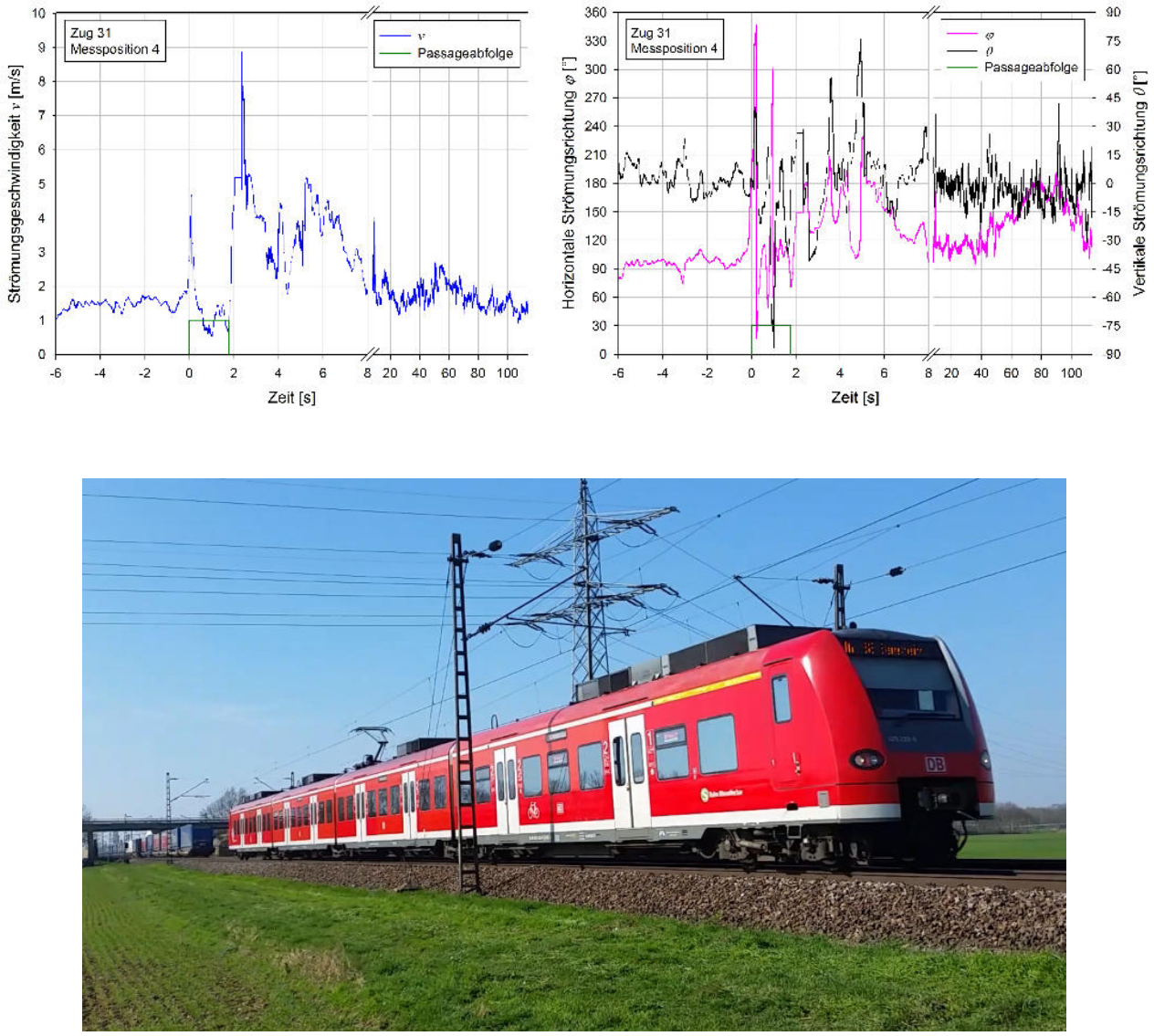


Abbildung B.135: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 31 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 31 ($\bar{v} = 139{,}8 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$).

Zug 32: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

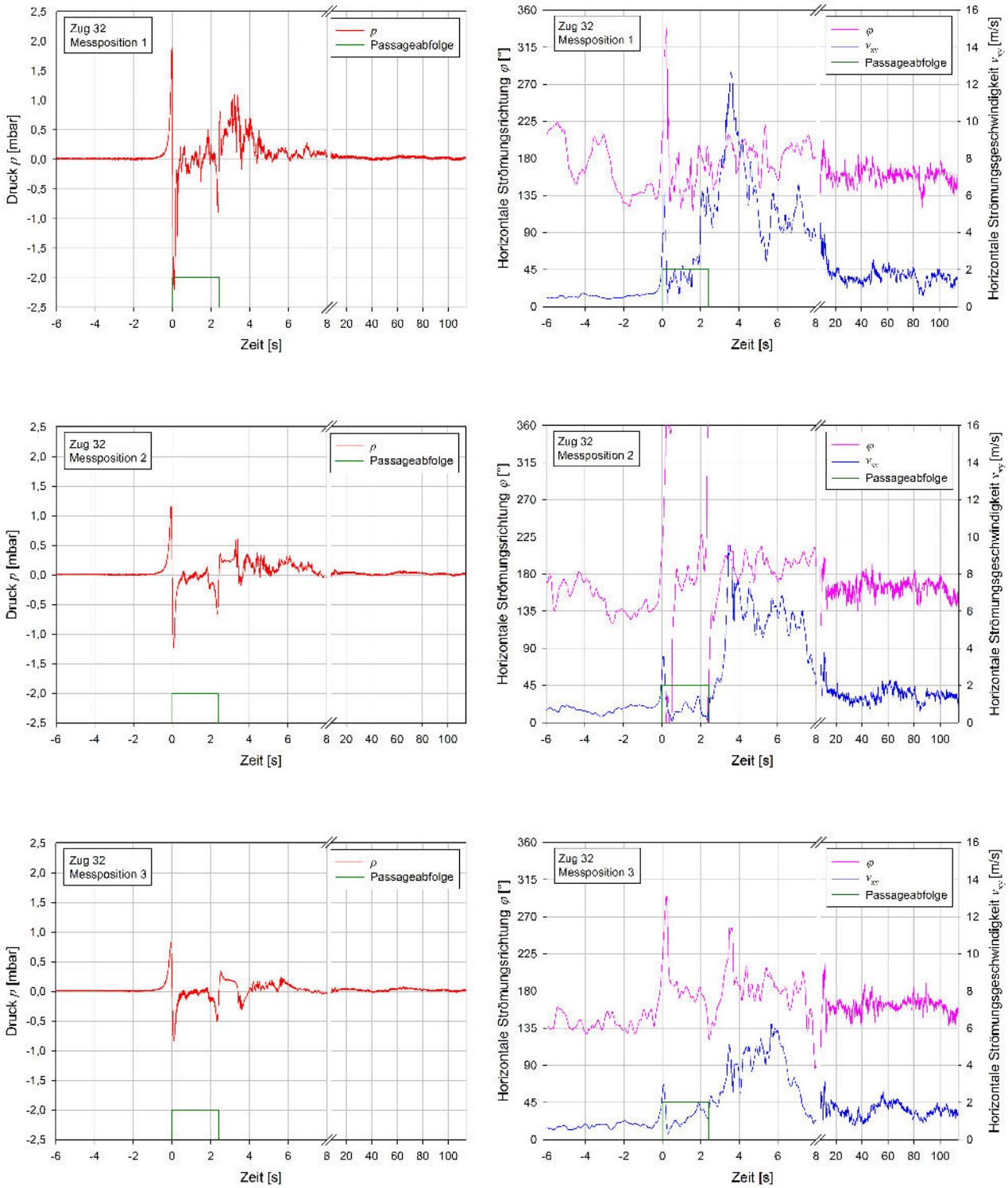


Abbildung B.136: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 32 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

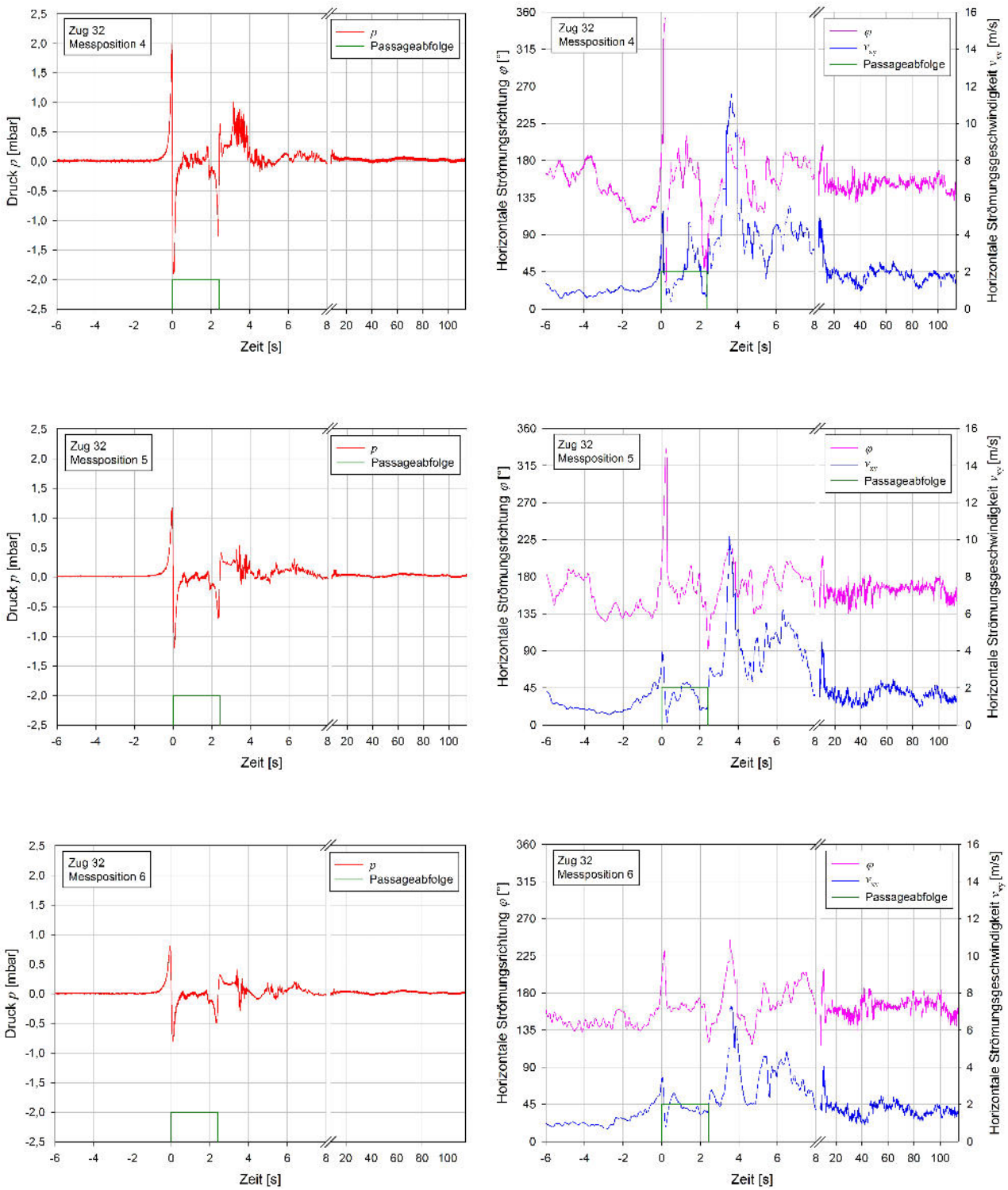


Abbildung B.137: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 32 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

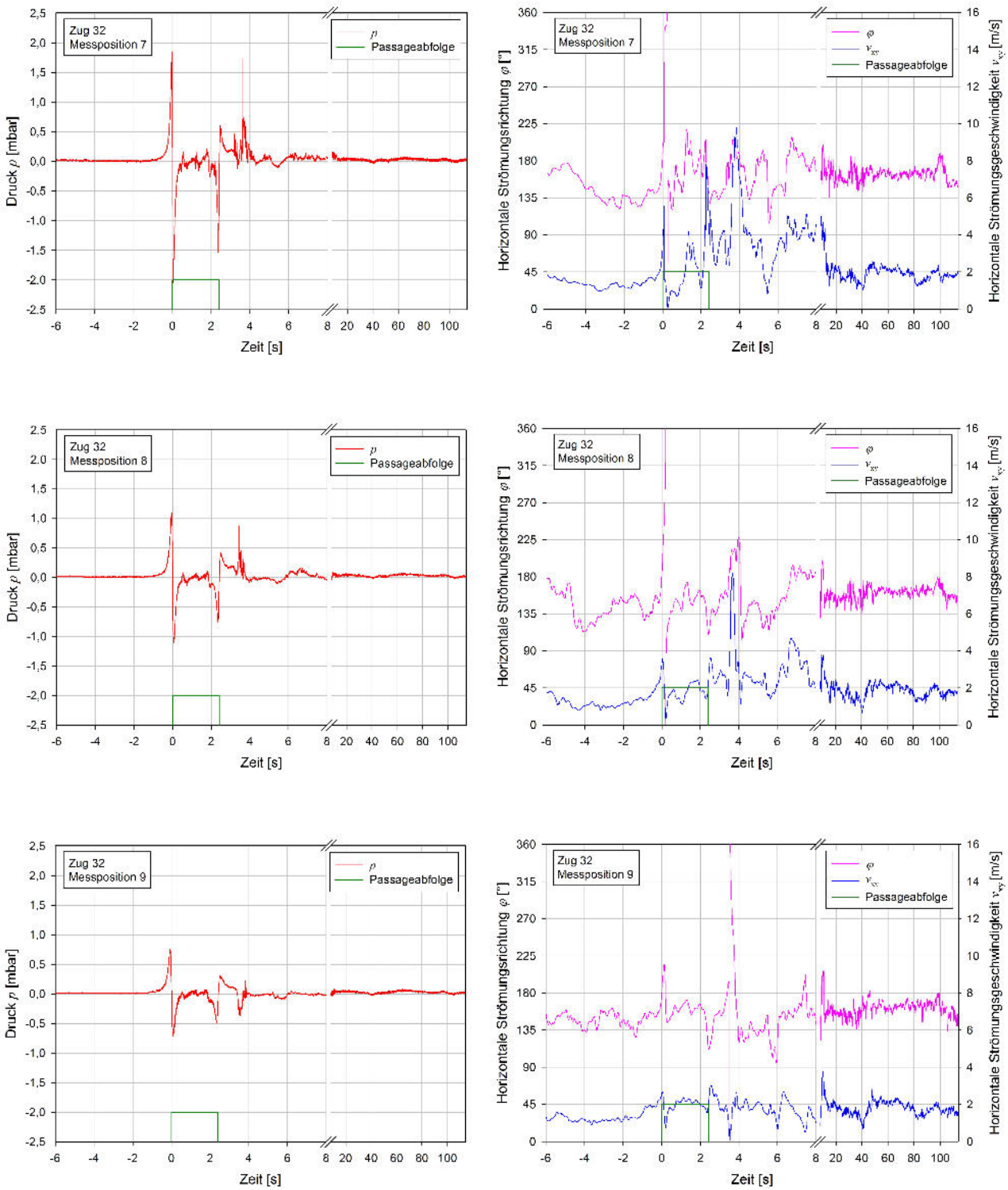


Abbildung B.138: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 32 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.



Abbildung B.139: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 32 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 32 ($\bar{v} = 156{,}4 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$).

Zug 33: S-Bahn (Baureihe 425)

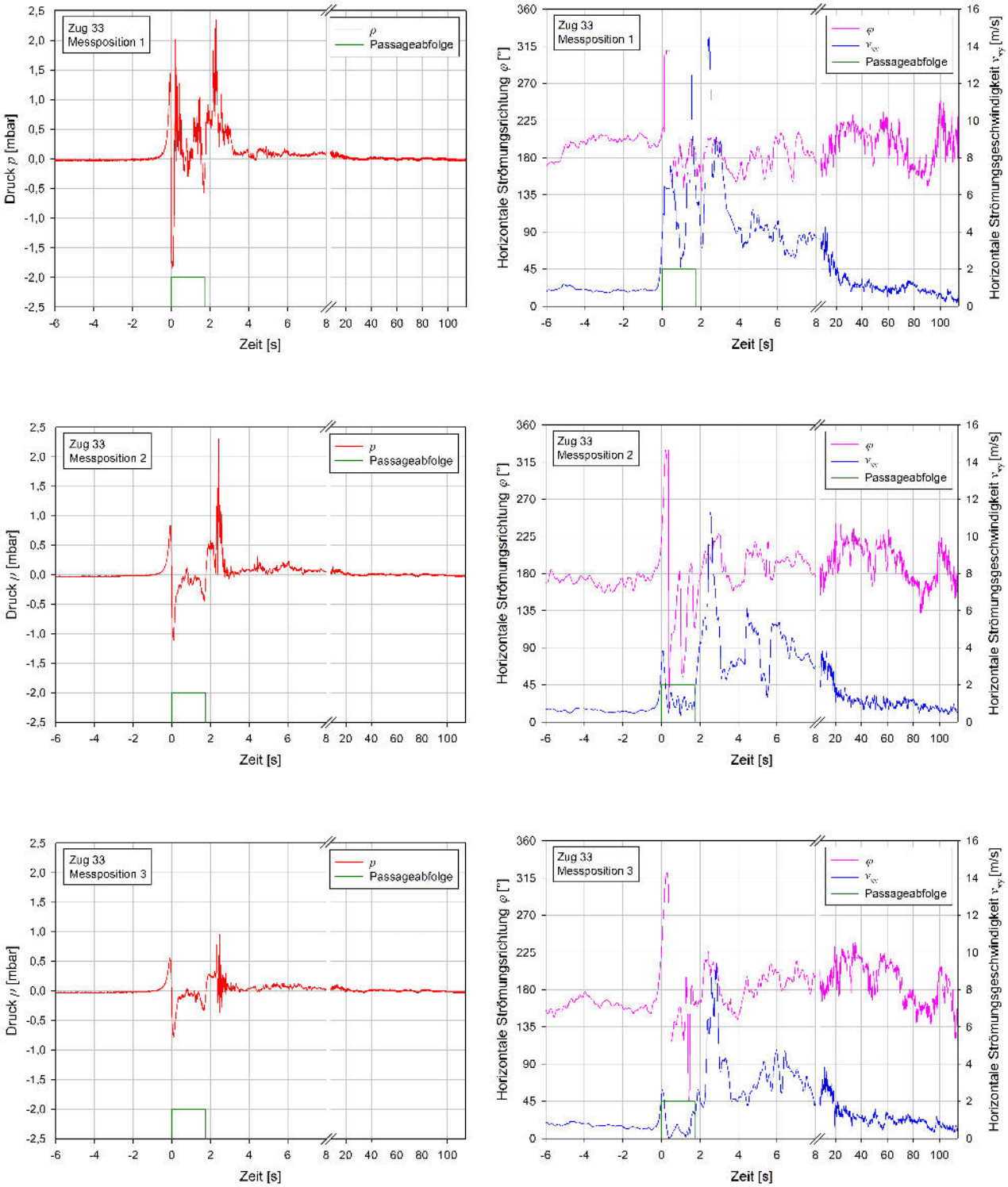


Abbildung B.140: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 33 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$.

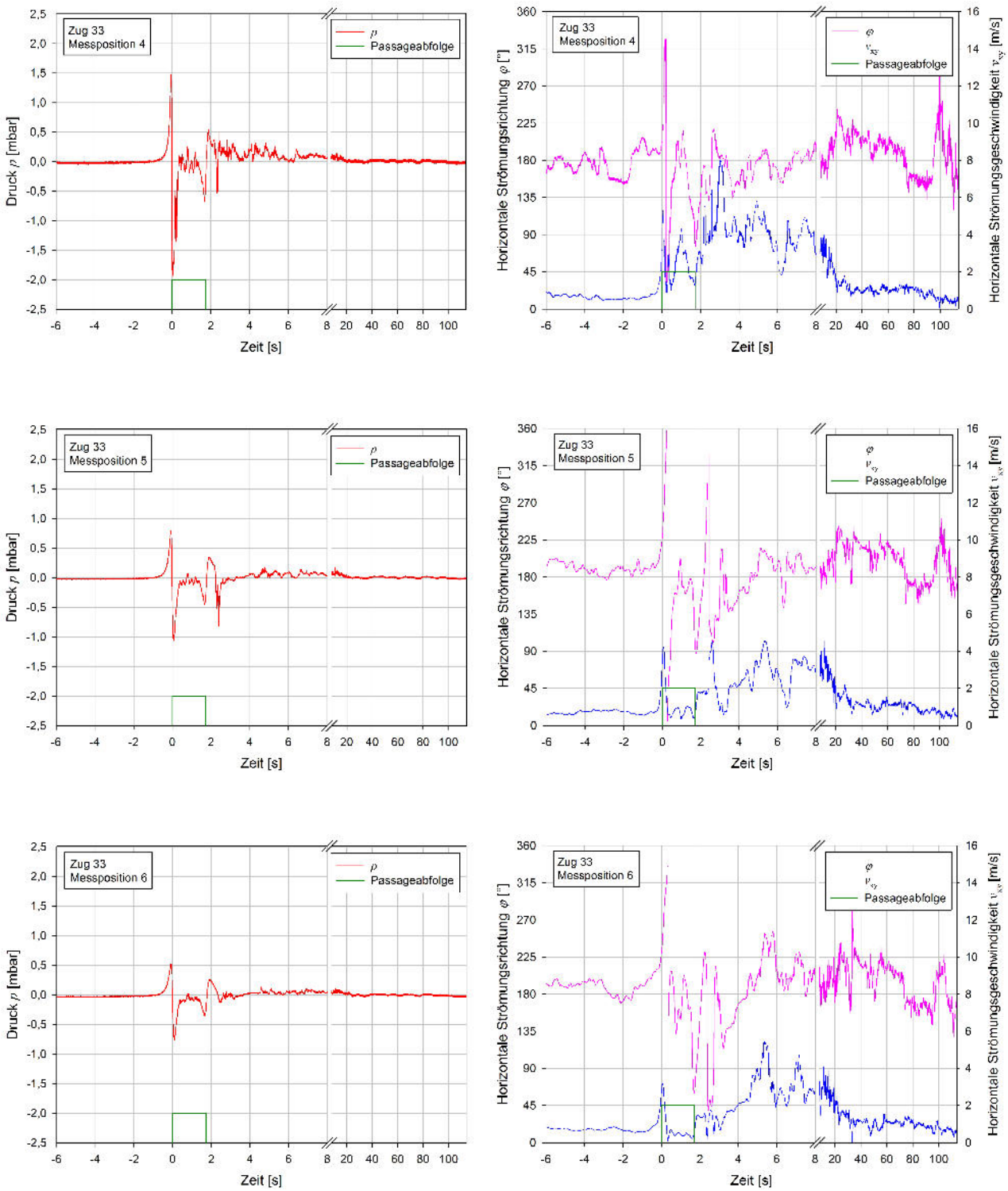


Abbildung B.141: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 33 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$.

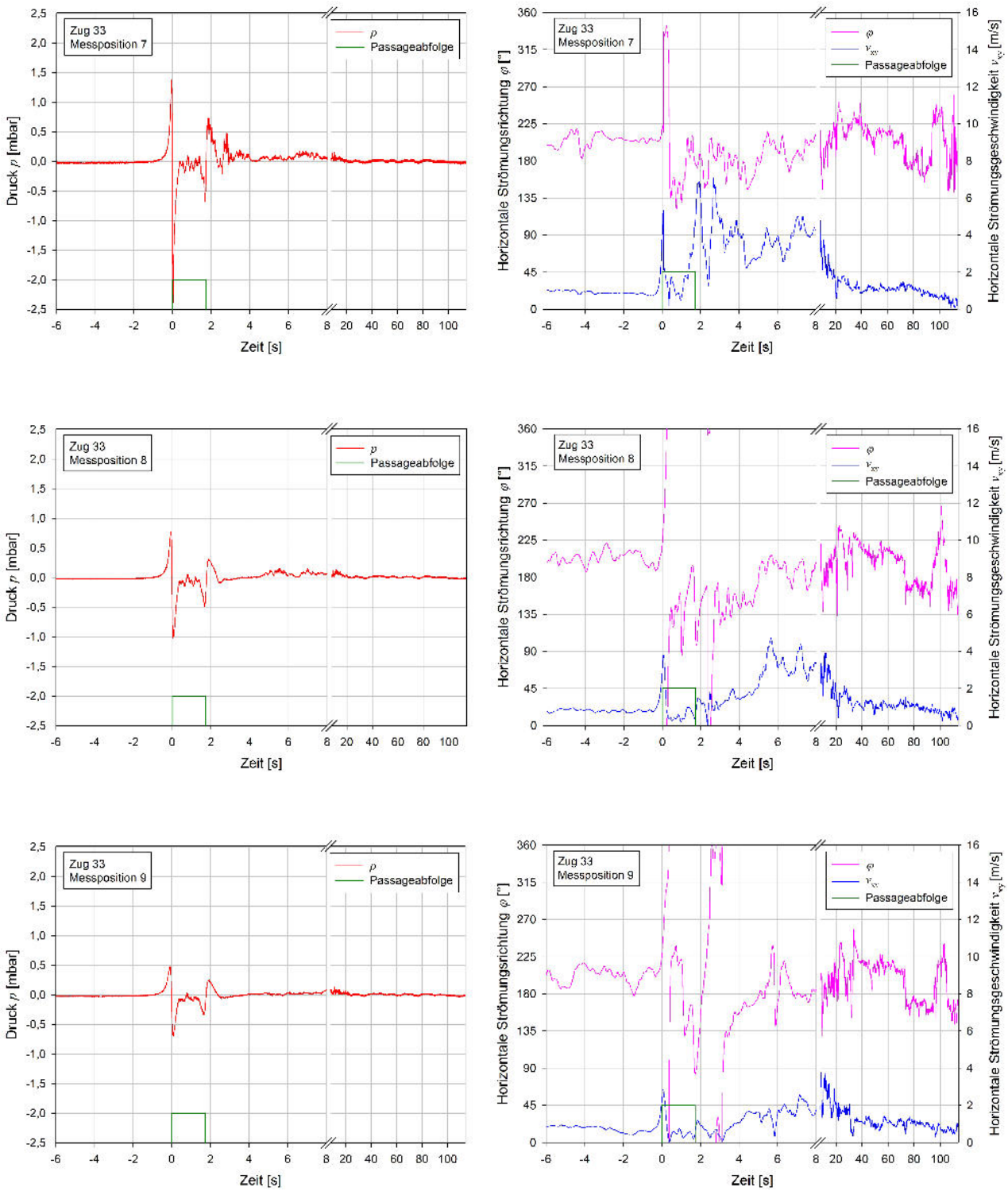
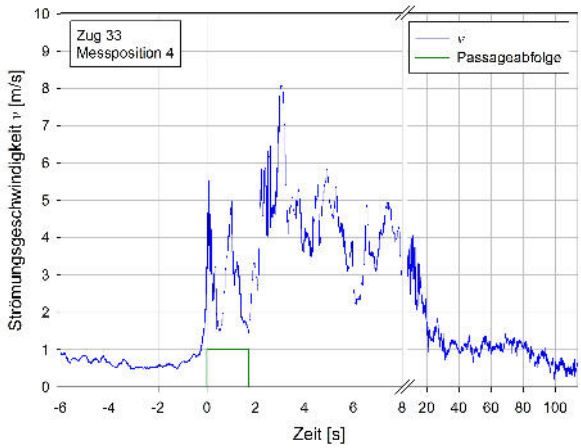


Abbildung B.142: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 33 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$.



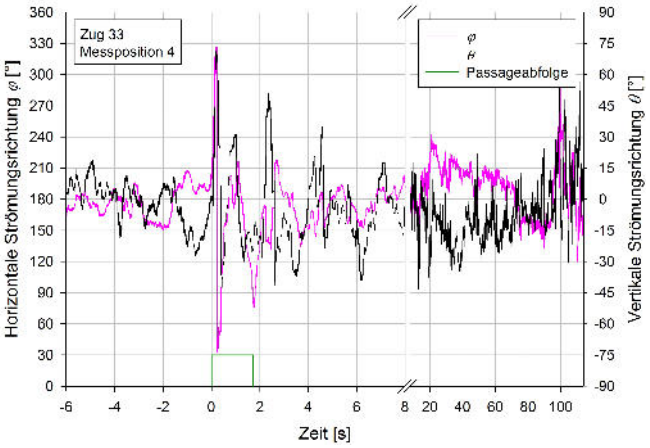




Abbildung B.143: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 33 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 33 ($\bar{v} = 139{,}9 \pm 2{,}2\,\mathrm{km/h}$).

Zug 34: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

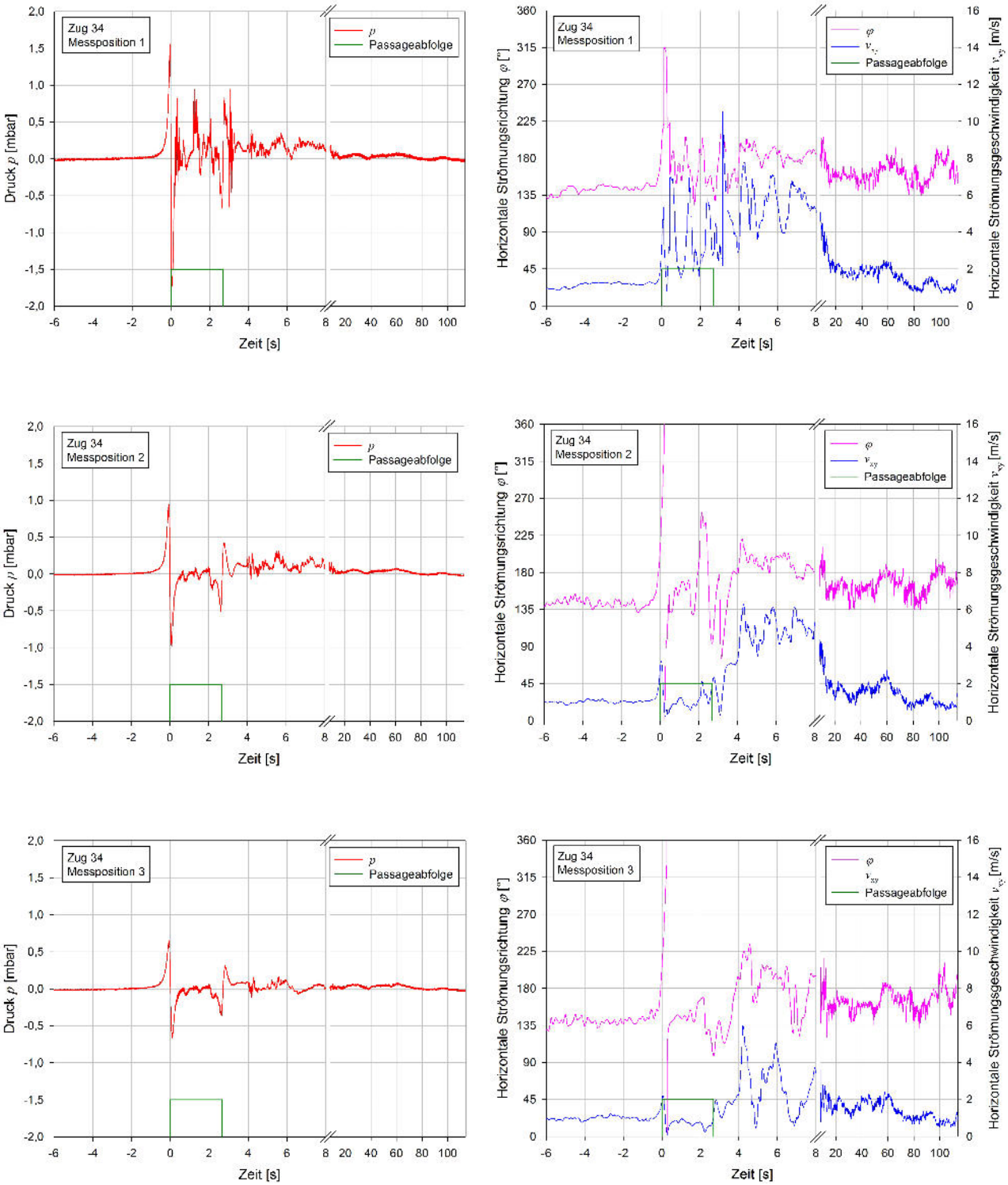


Abbildung B.144: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 34 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

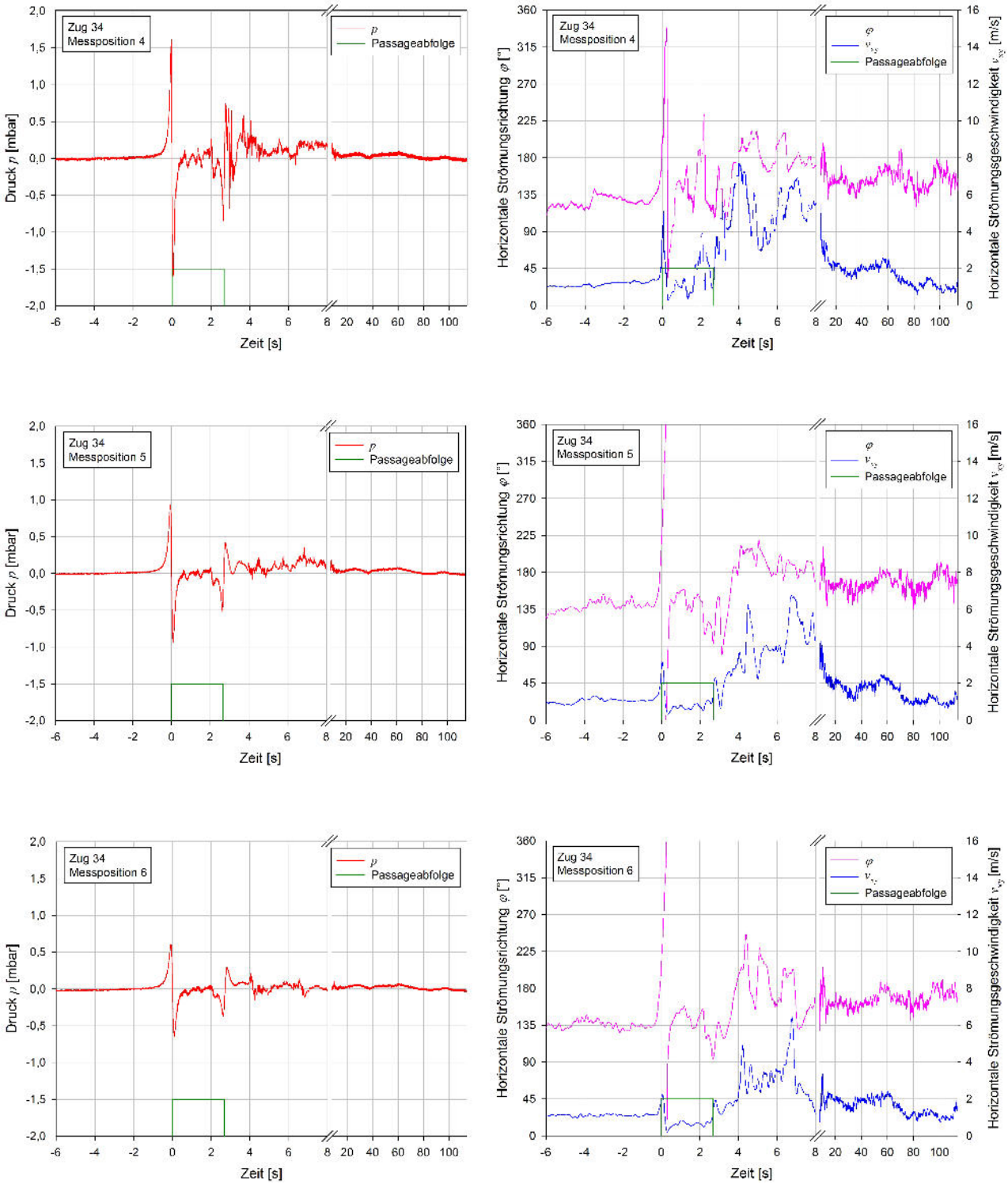


Abbildung B.145: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 34 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

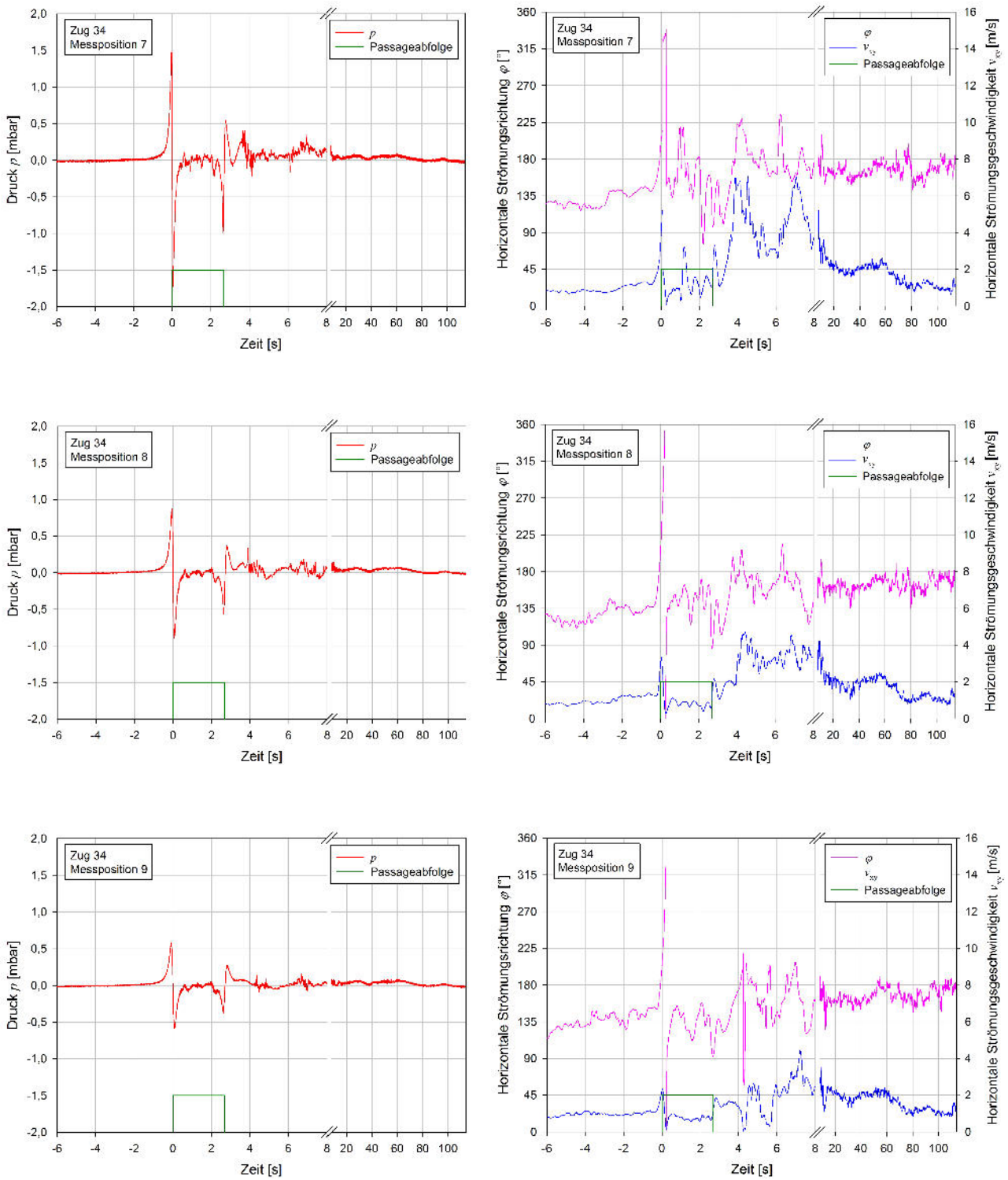


Abbildung B.146: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 34 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.



Abbildung B.147: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 34 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 34 ($\bar{v} = 140{,}7 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 35: Güterzug

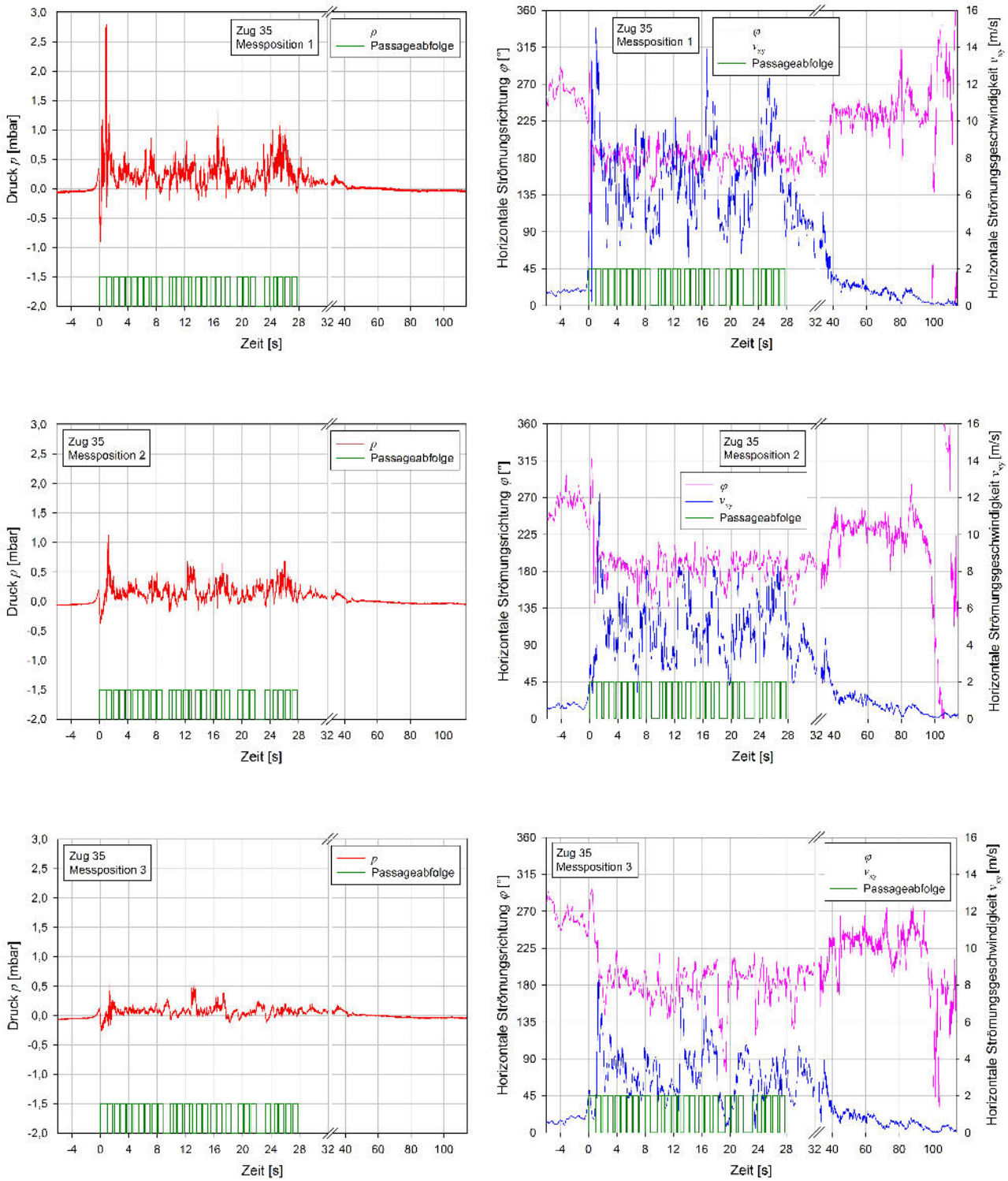


Abbildung B.148: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 35 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

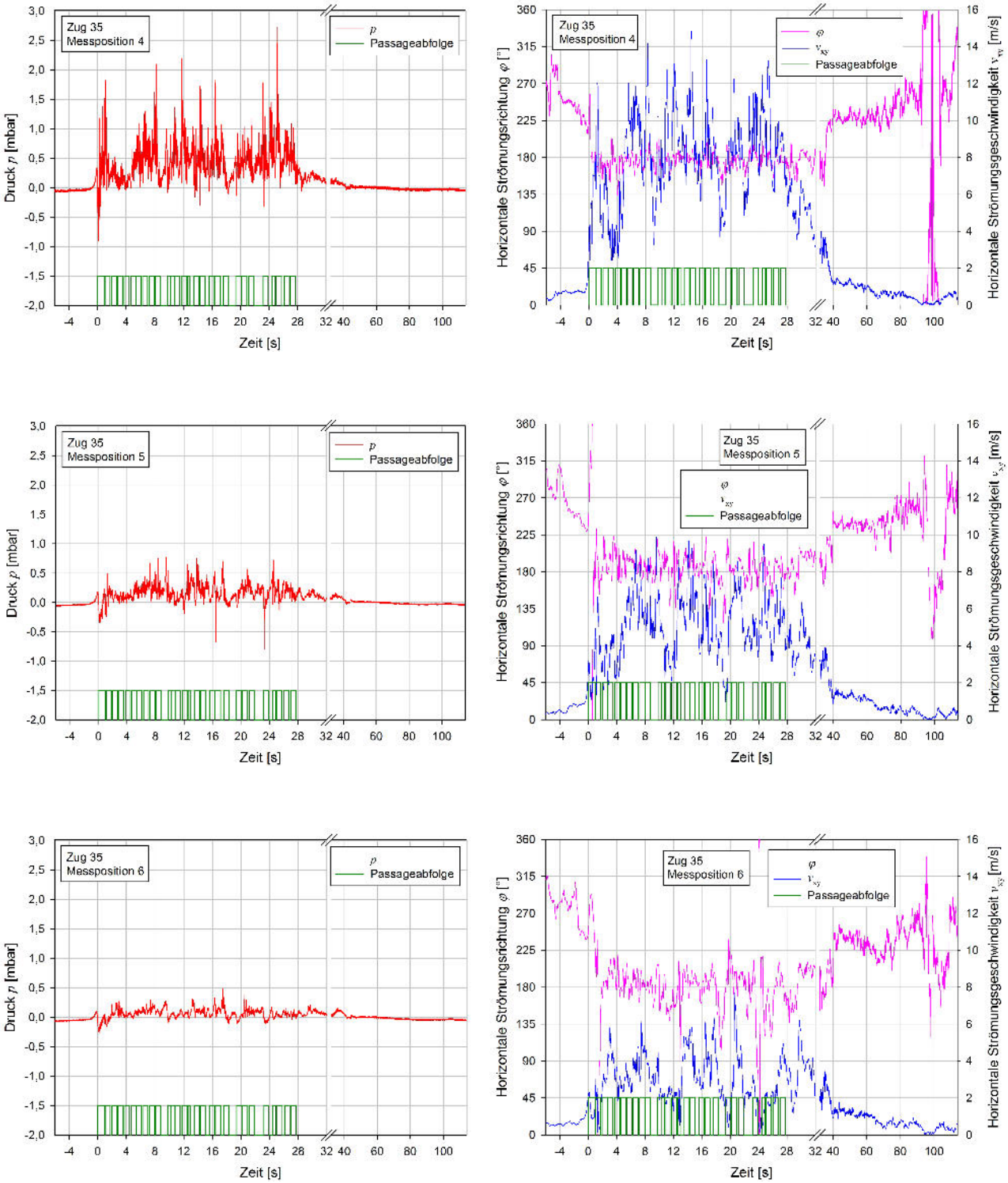


Abbildung B.149: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 35 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

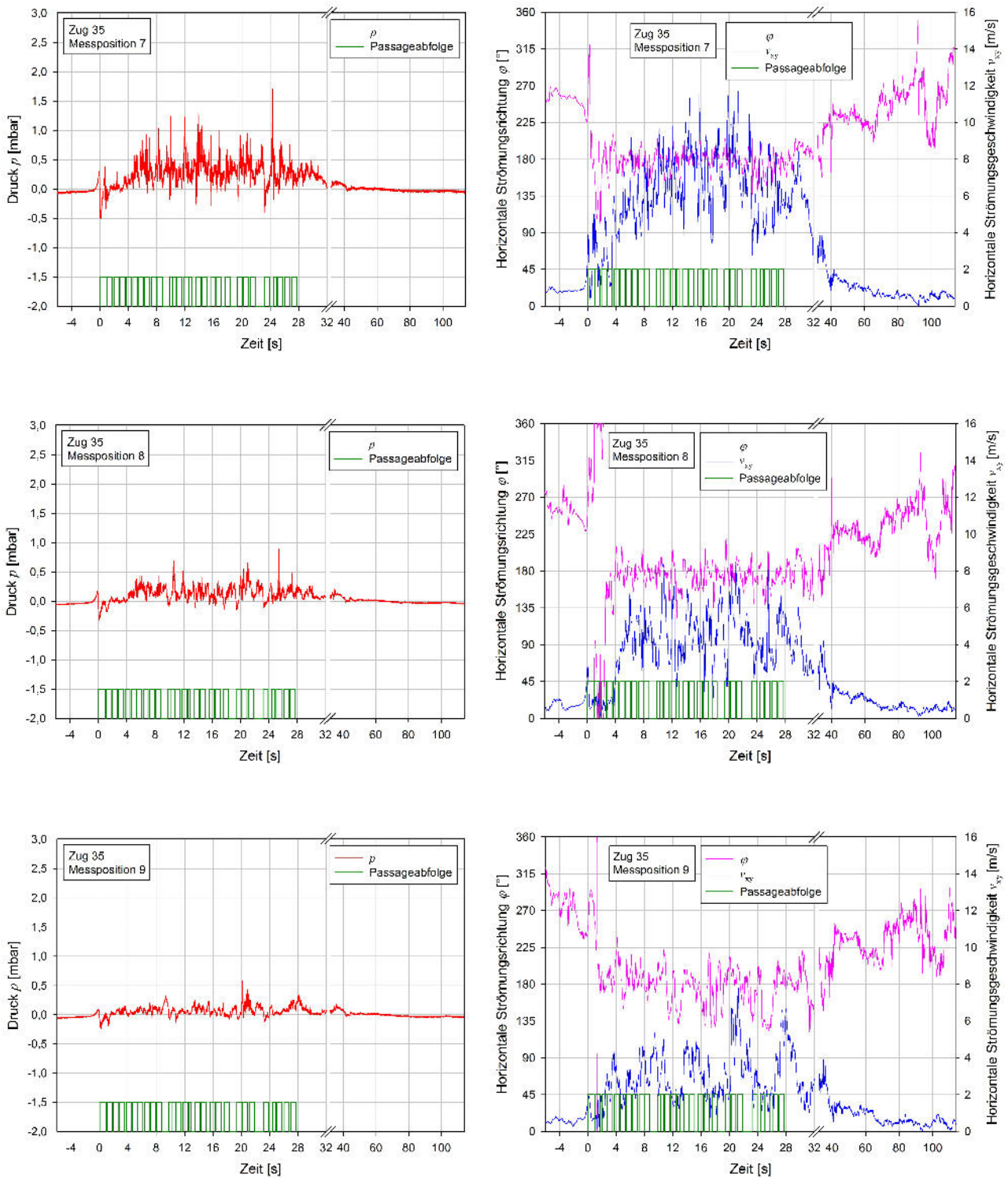


Abbildung B.150: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 35 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.



Abbildung B.151: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 35 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 35 ($\bar{v} = 70{,}1 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$).

Zug 36: IC

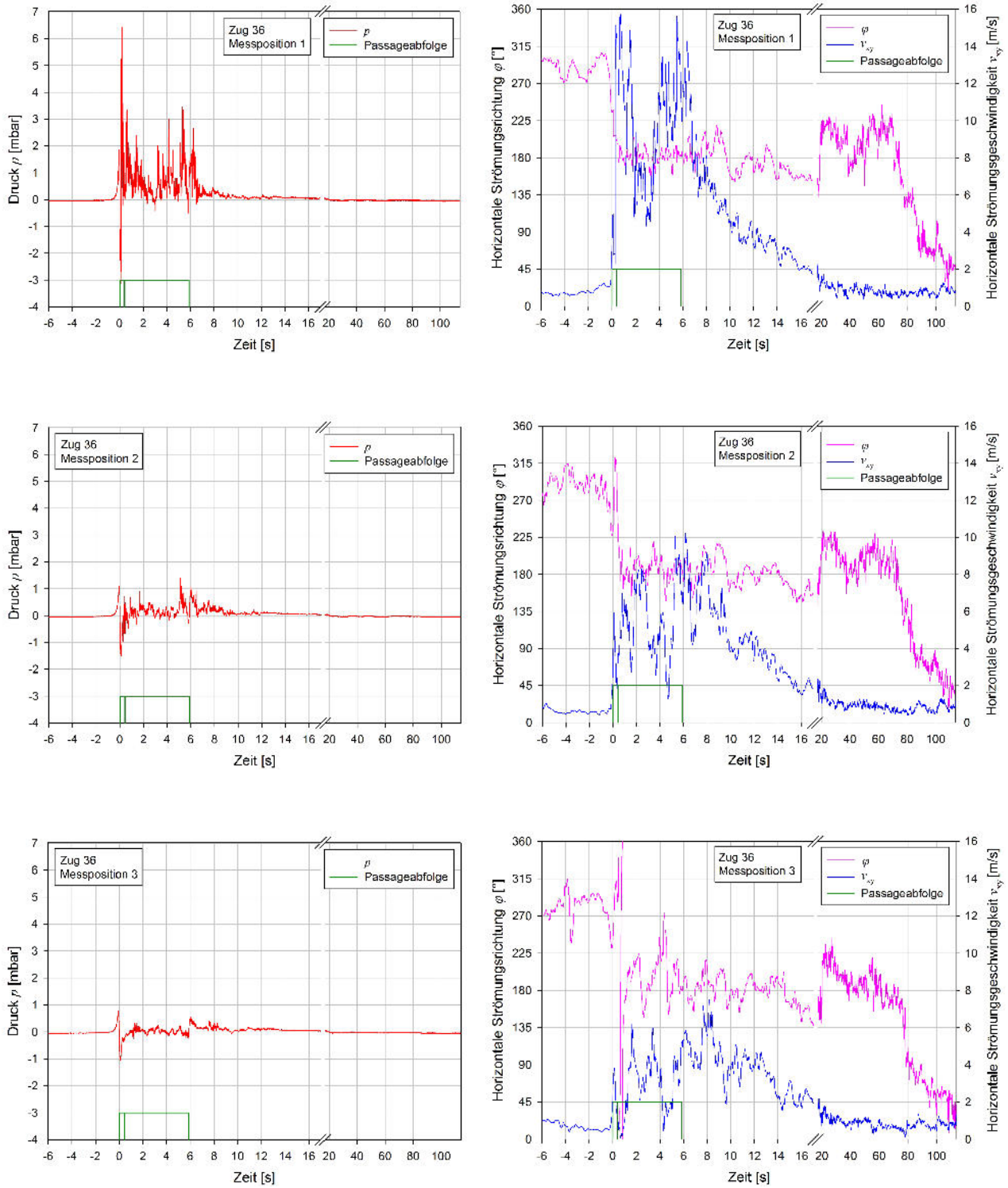


Abbildung B.152: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 36 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}9{,}1 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

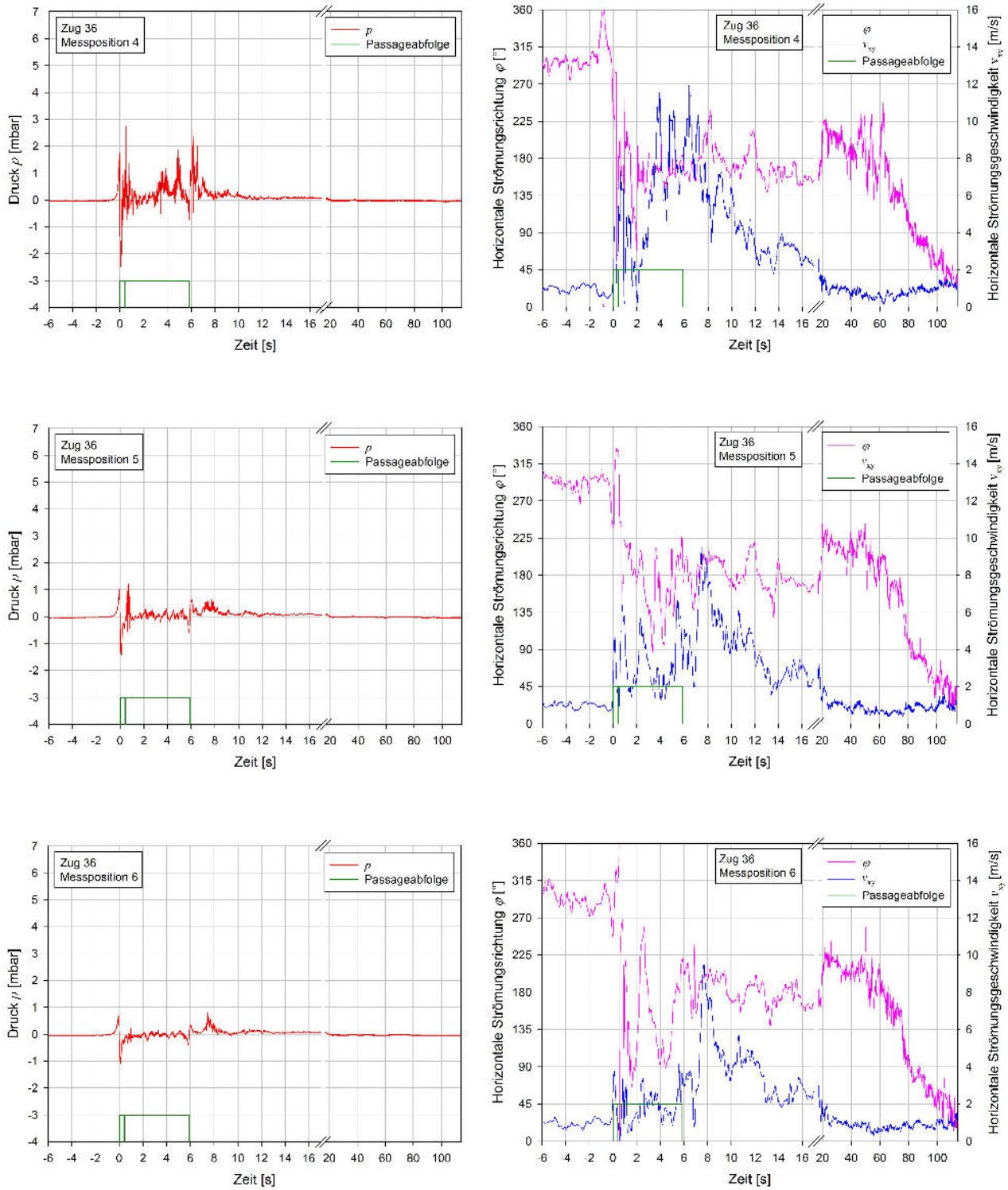


Abbildung B.153: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 36 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

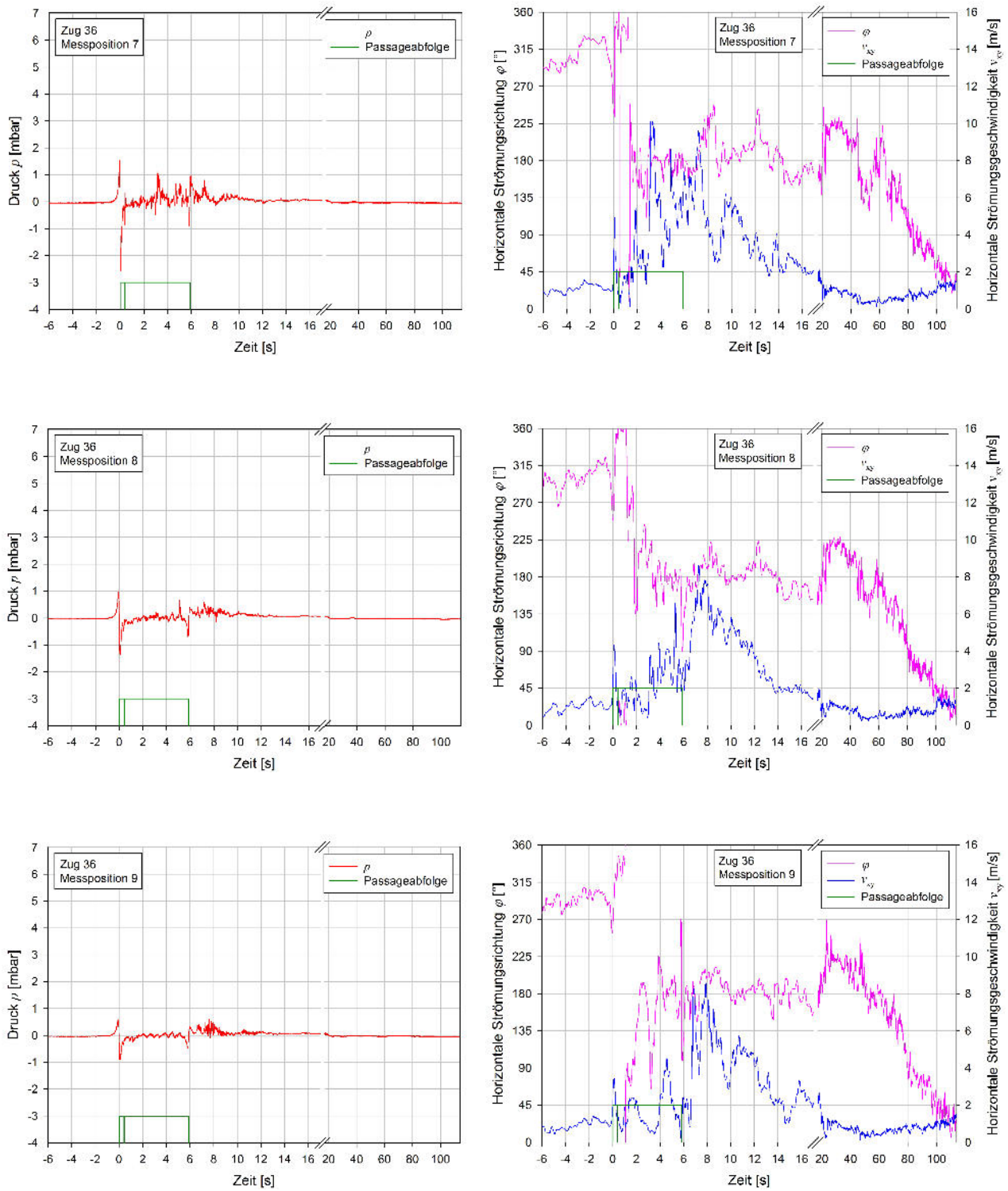


Abbildung B.154: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 36 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 156{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

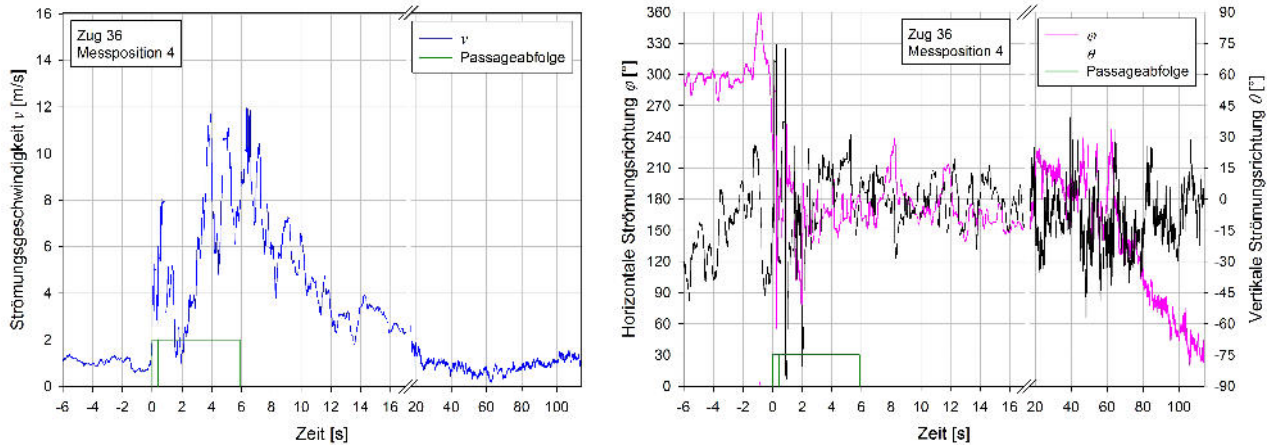




Abbildung B.155: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 36 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 36 ($\bar{v} = 156{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$).

Zug 37: ICE 3 (Baureihe 403)

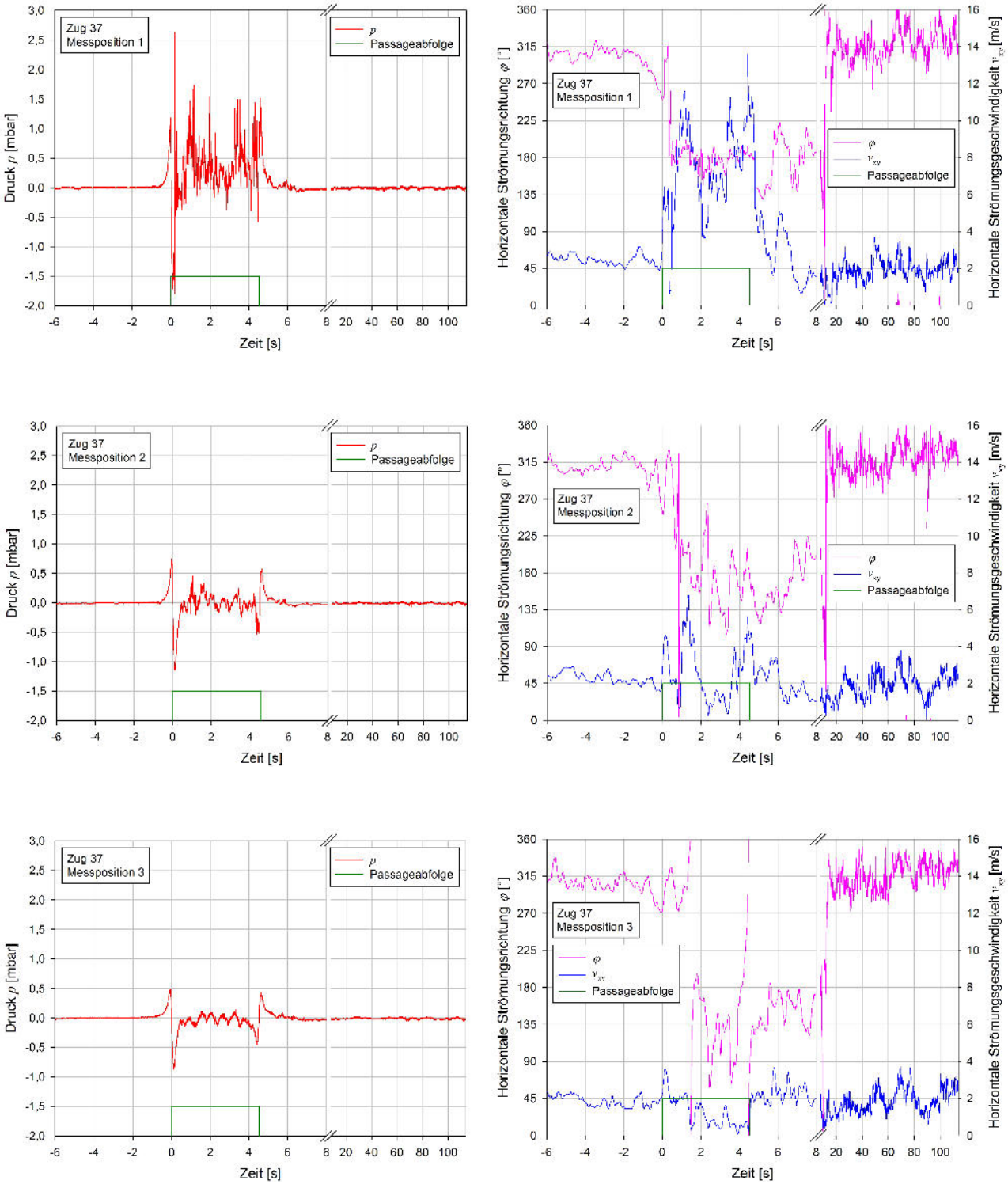


Abbildung B.156: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 37 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

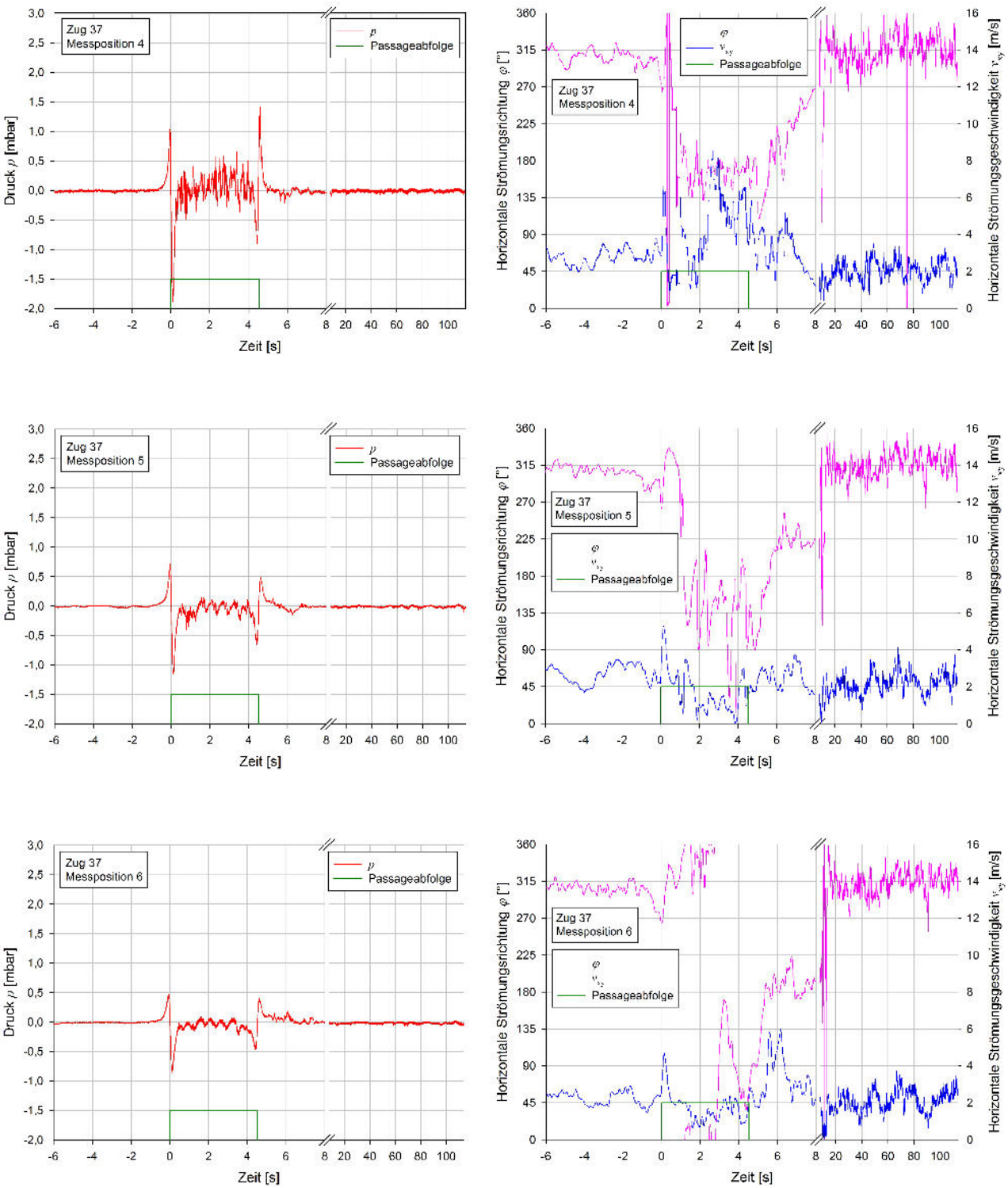


Abbildung B.157: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 37 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

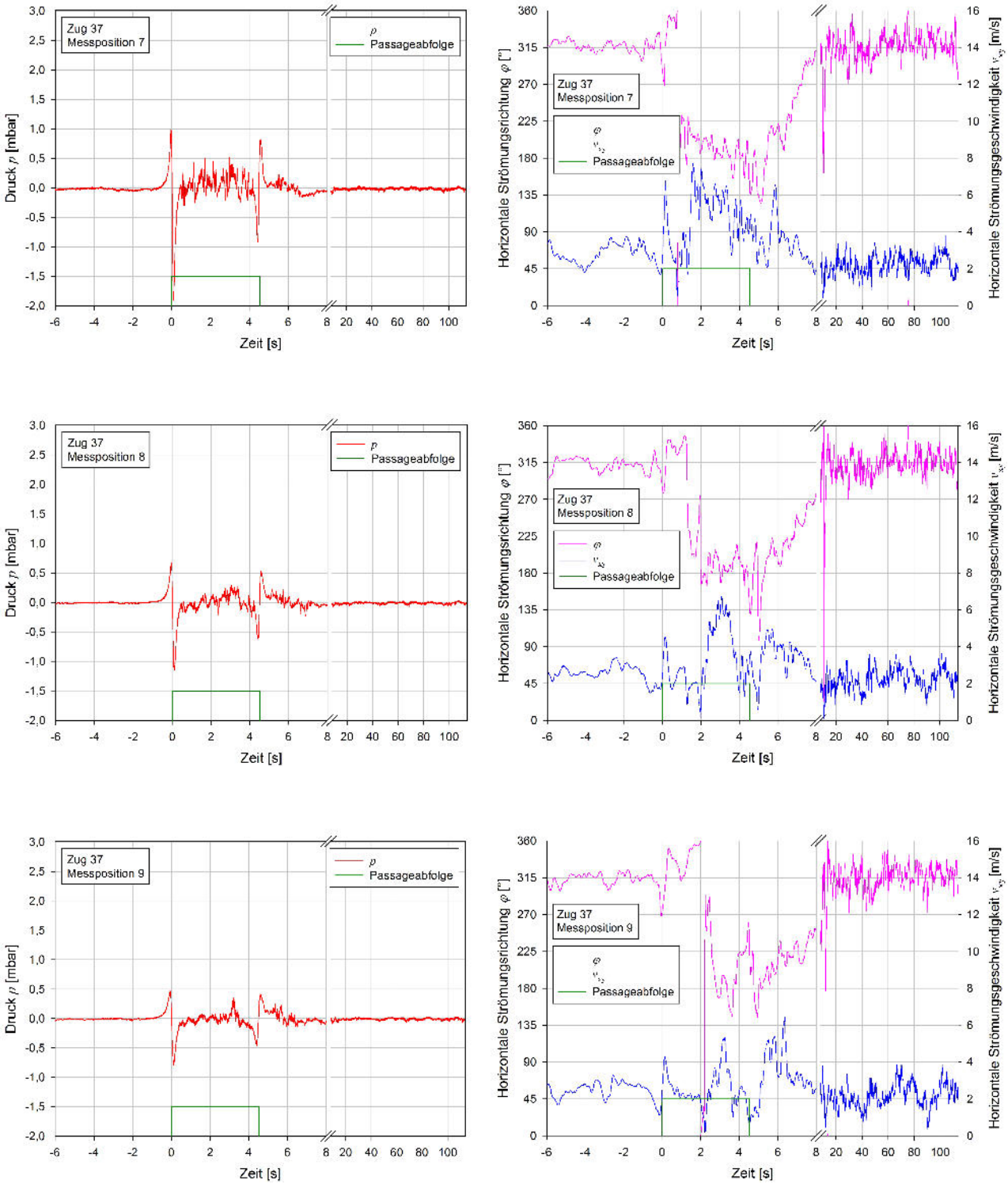


Abbildung B.158: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 37 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.



Abbildung B.159: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 37 an der Messposition 4. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 37 ($\bar{v} = 158{,}0 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$).

Zug 38: ICE 1

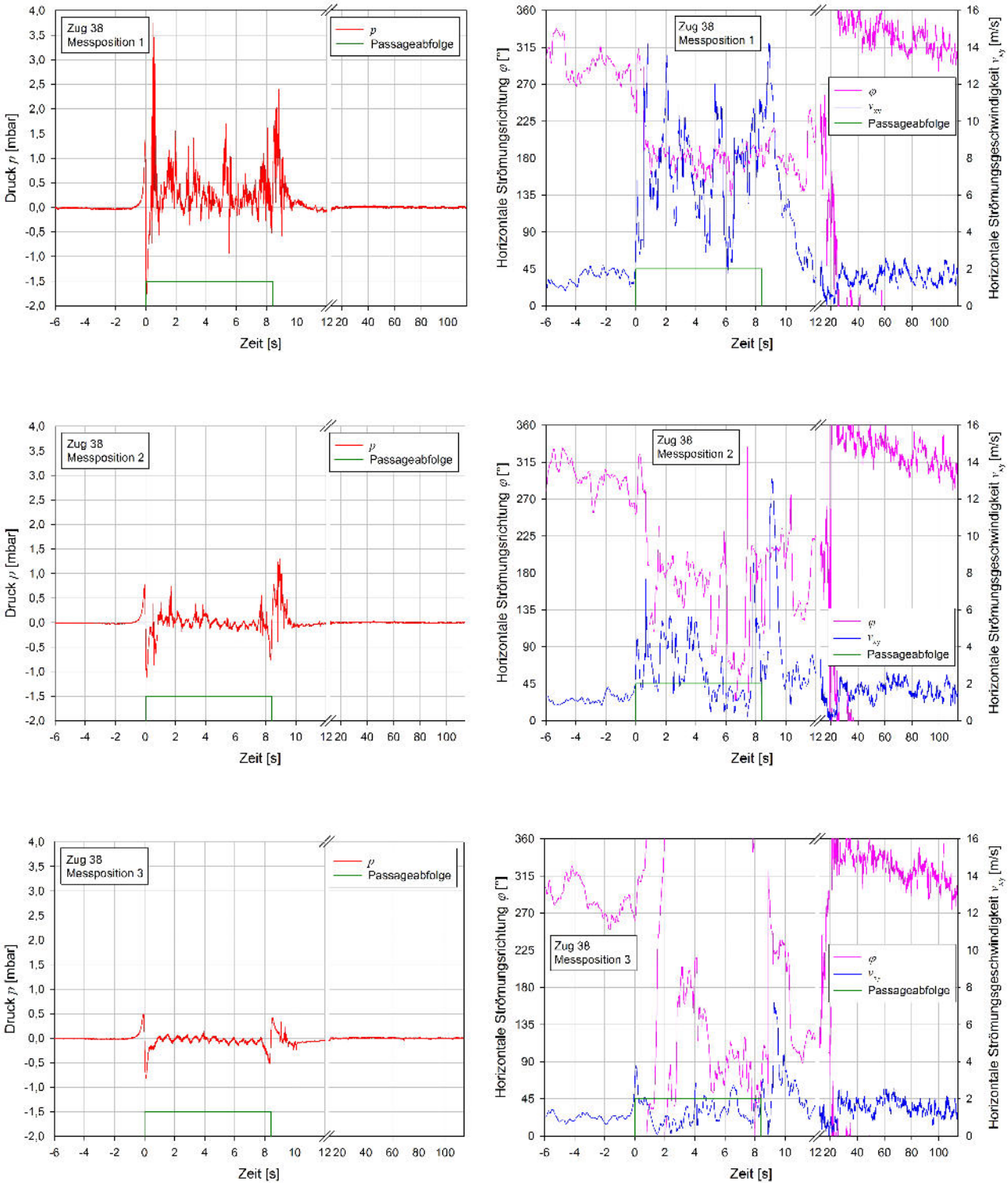


Abbildung B.160: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 38 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

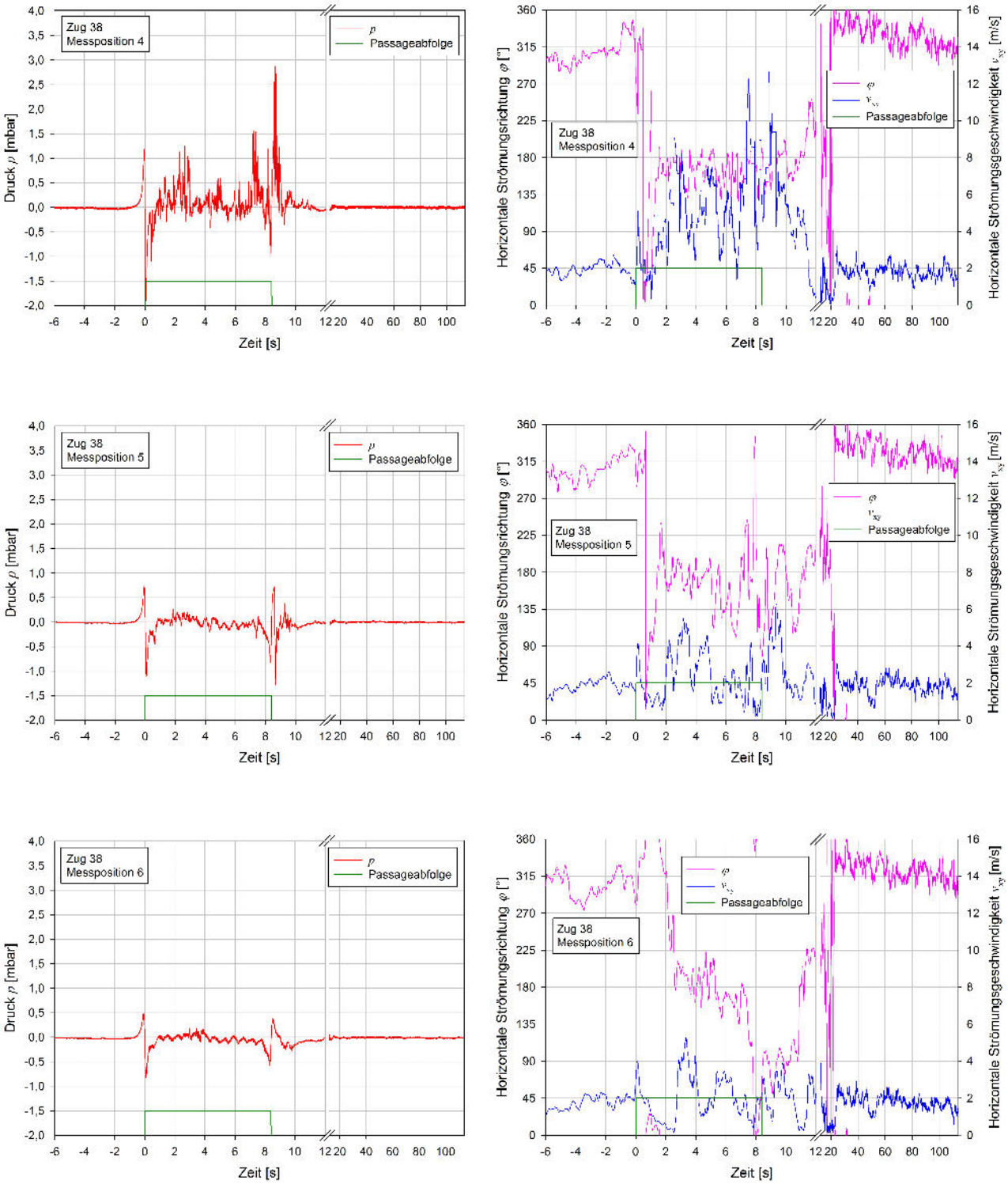


Abbildung B.161: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 38 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

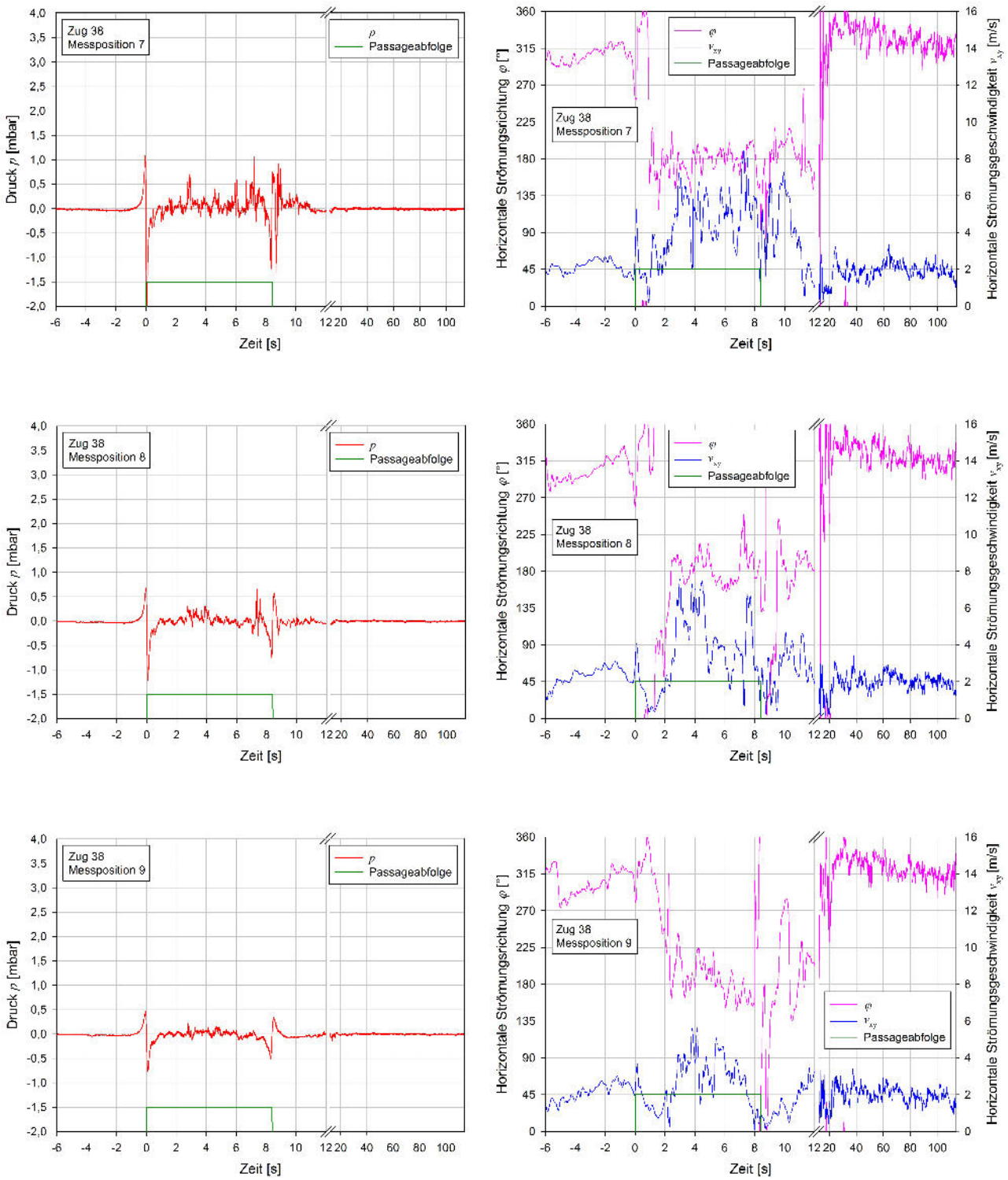


Abbildung B.162: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 38 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$.

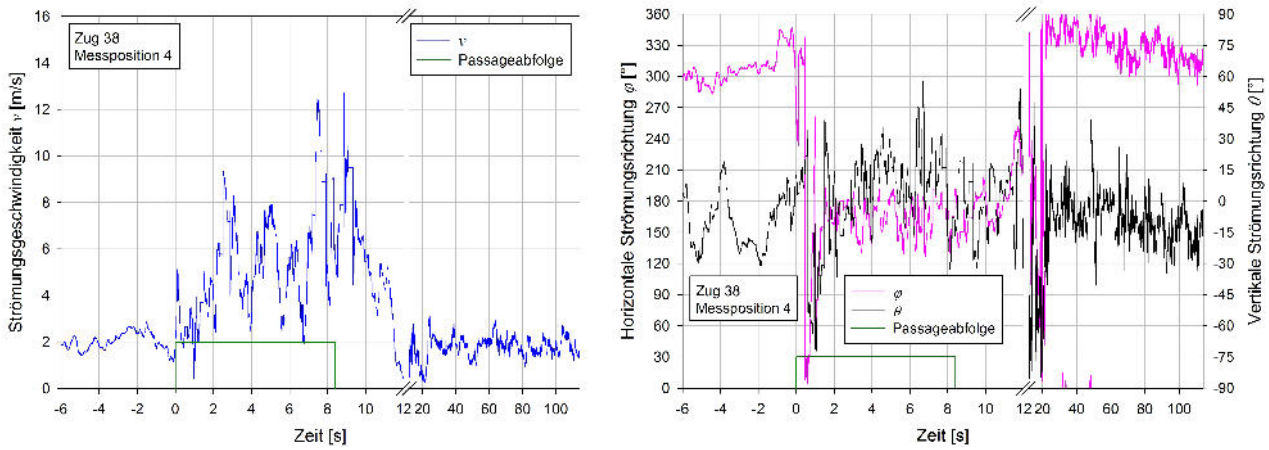






Abbildung B.163: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 38 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 38 ($\bar{v} = 152{,}6 \pm 1{,}1\,\mathrm{km/h}$).

Zug 39: ICE 3 (Baureihe 403)

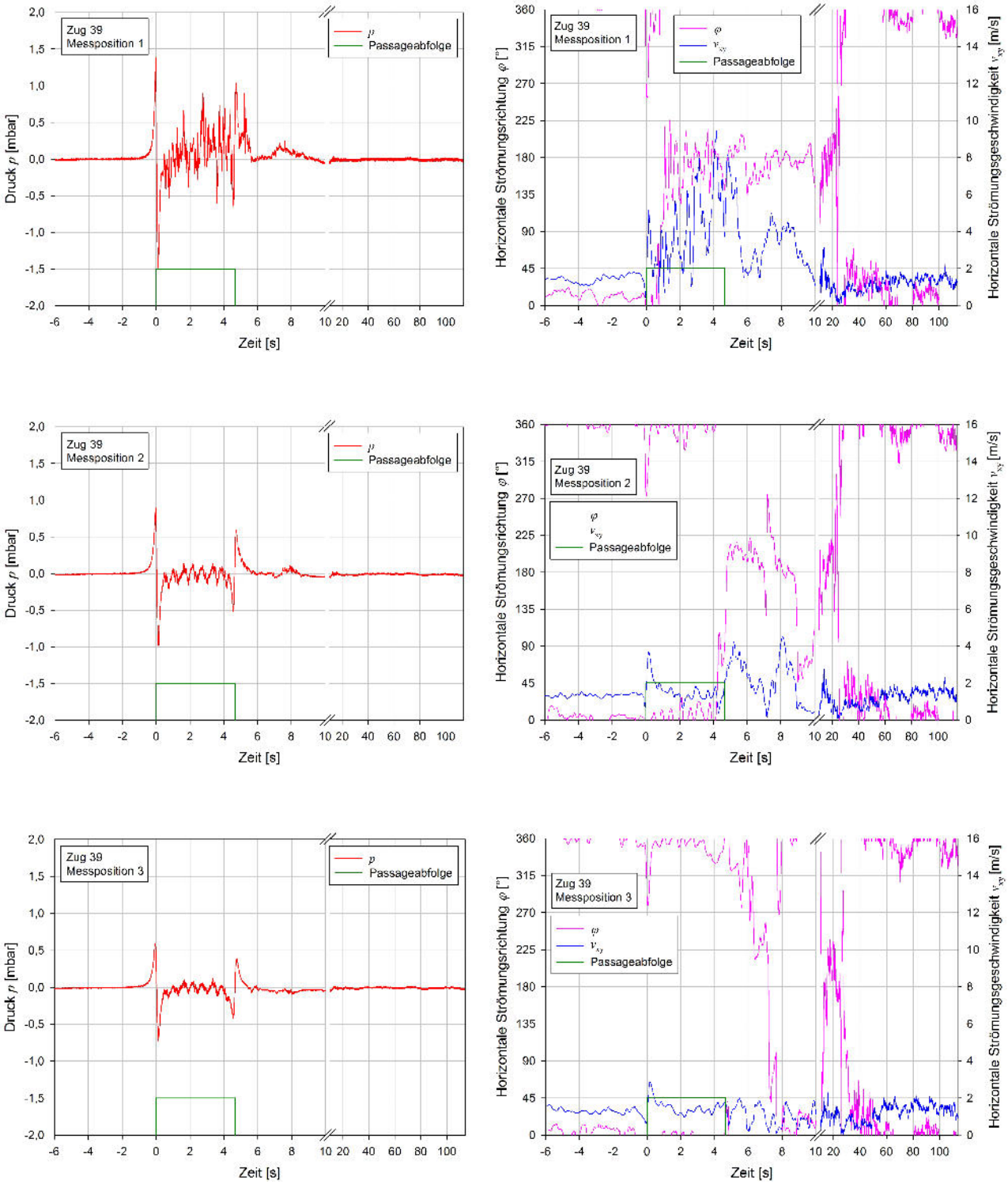


Abbildung B.164: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 39 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

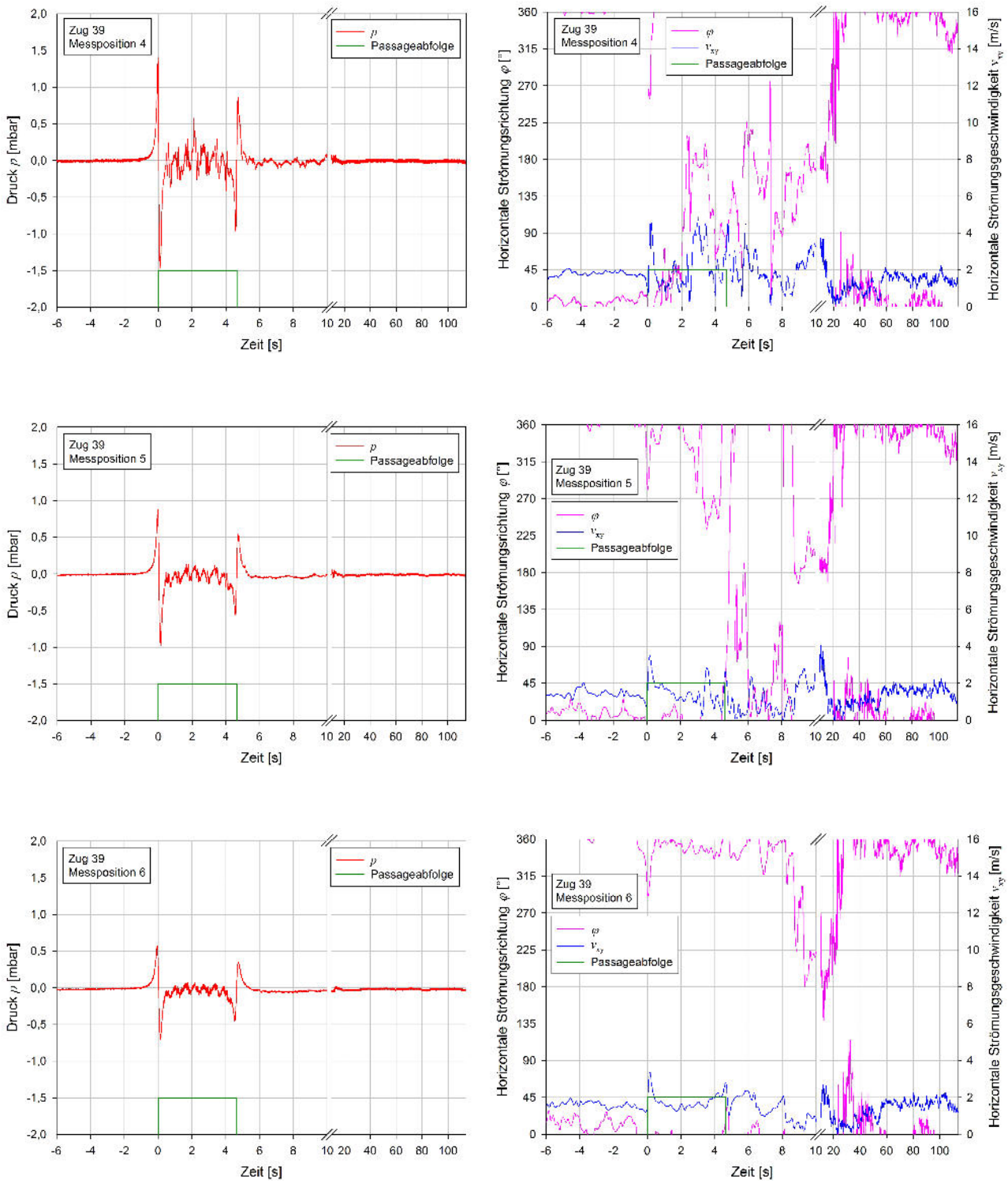


Abbildung B.165: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 39 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

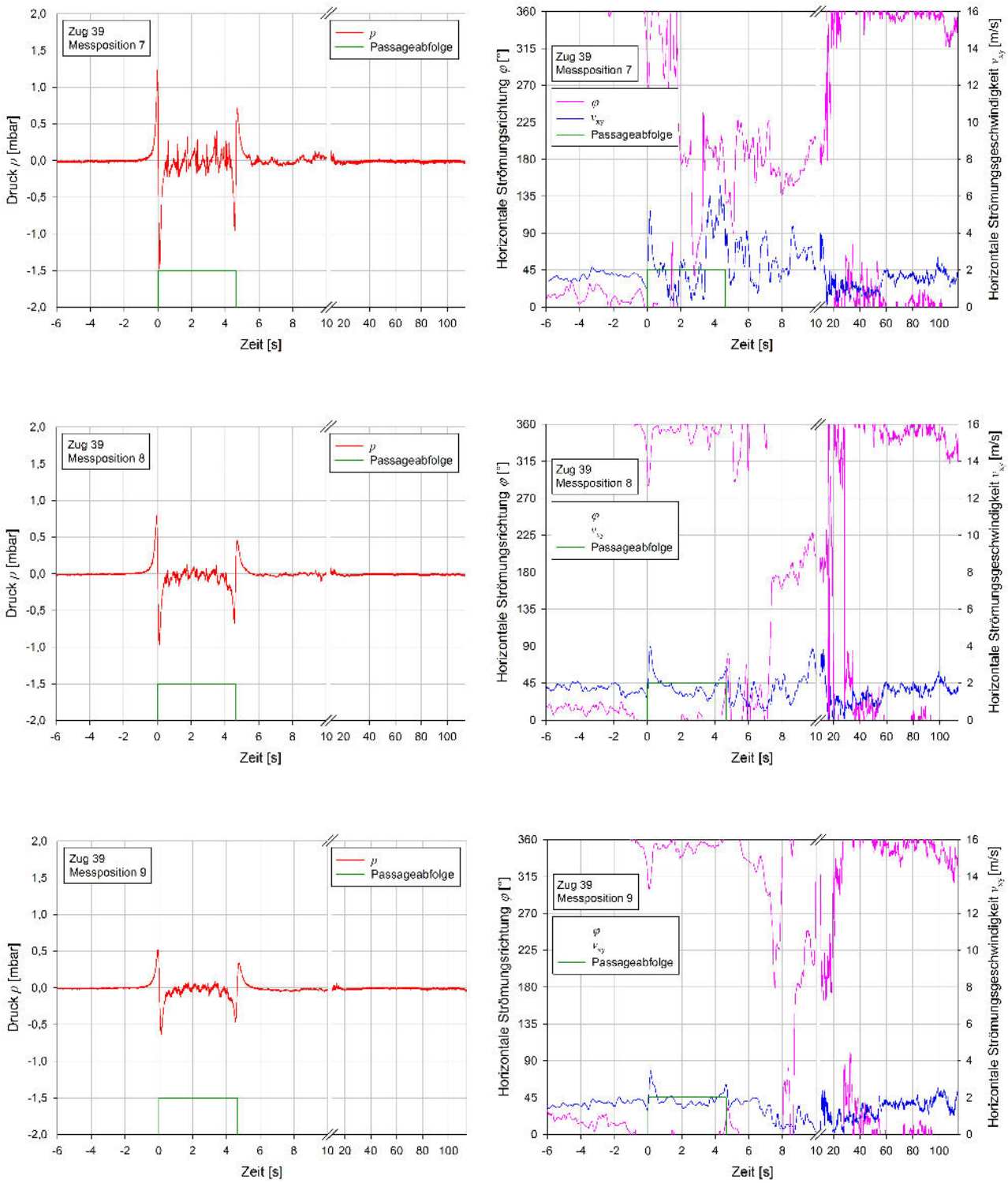
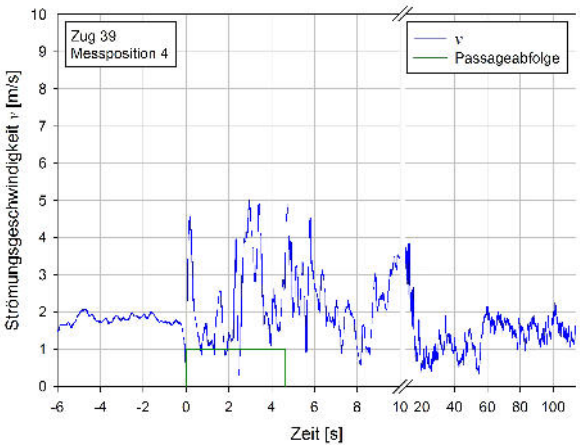


Abbildung B.166: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 39 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.



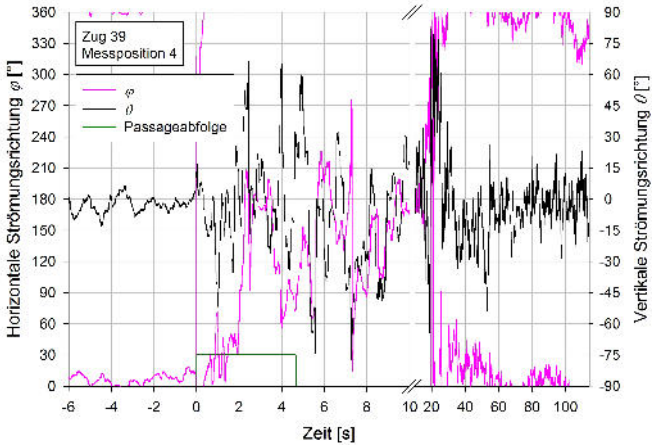






Abbildung B.167: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 39 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 39 ($\bar{v} = 154{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 40: Güterzug

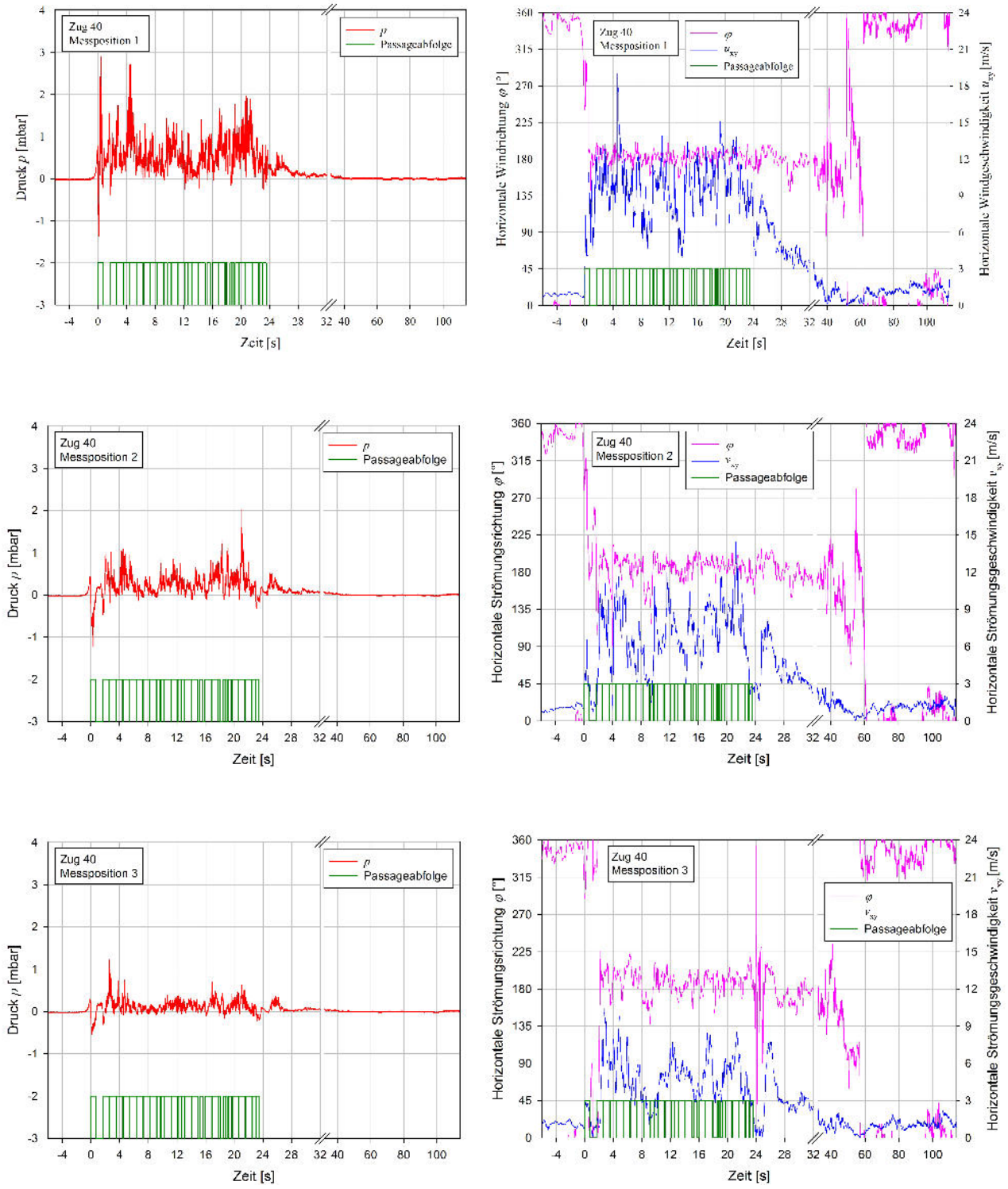


Abbildung B.168: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

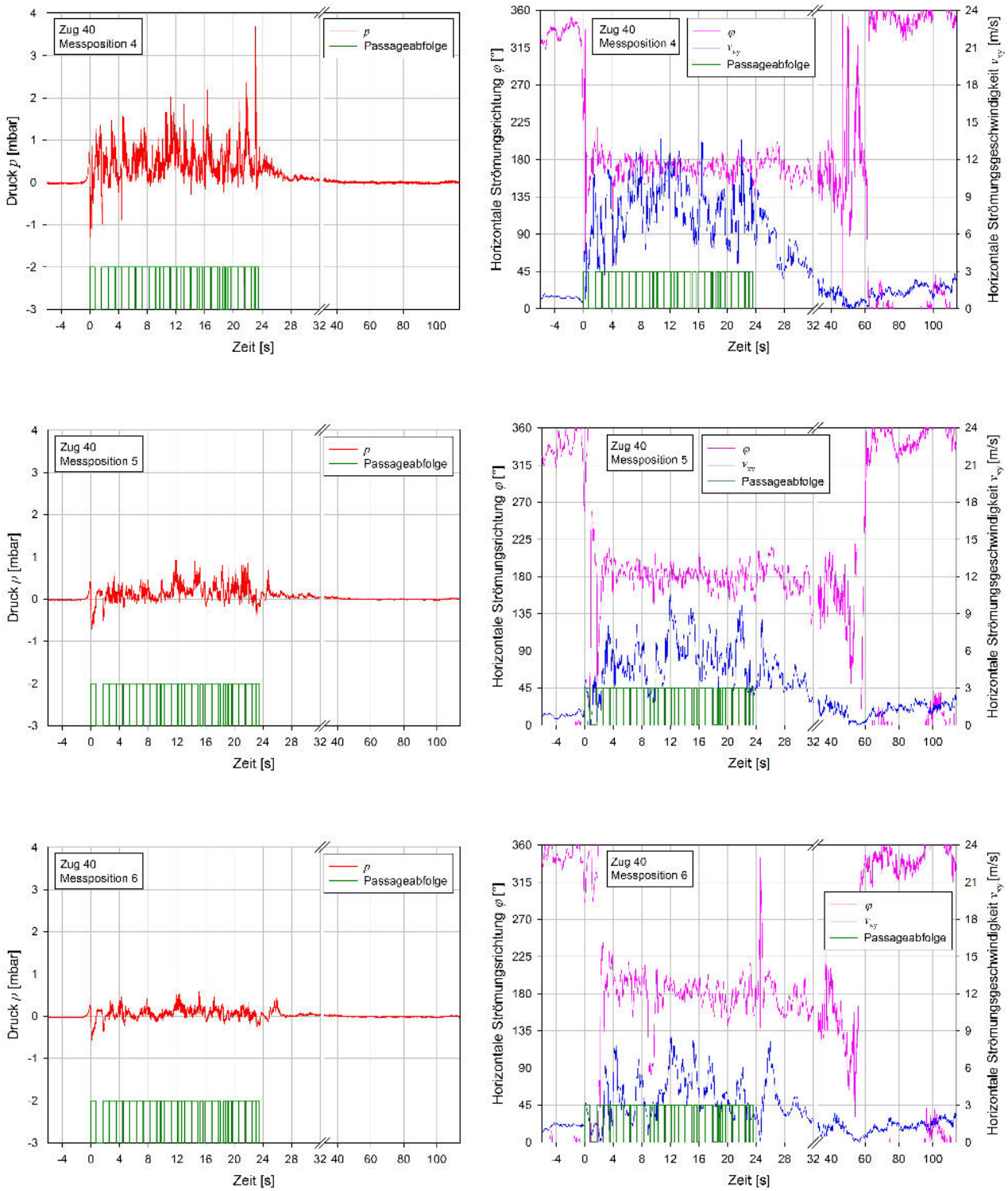


Abbildung B.169: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

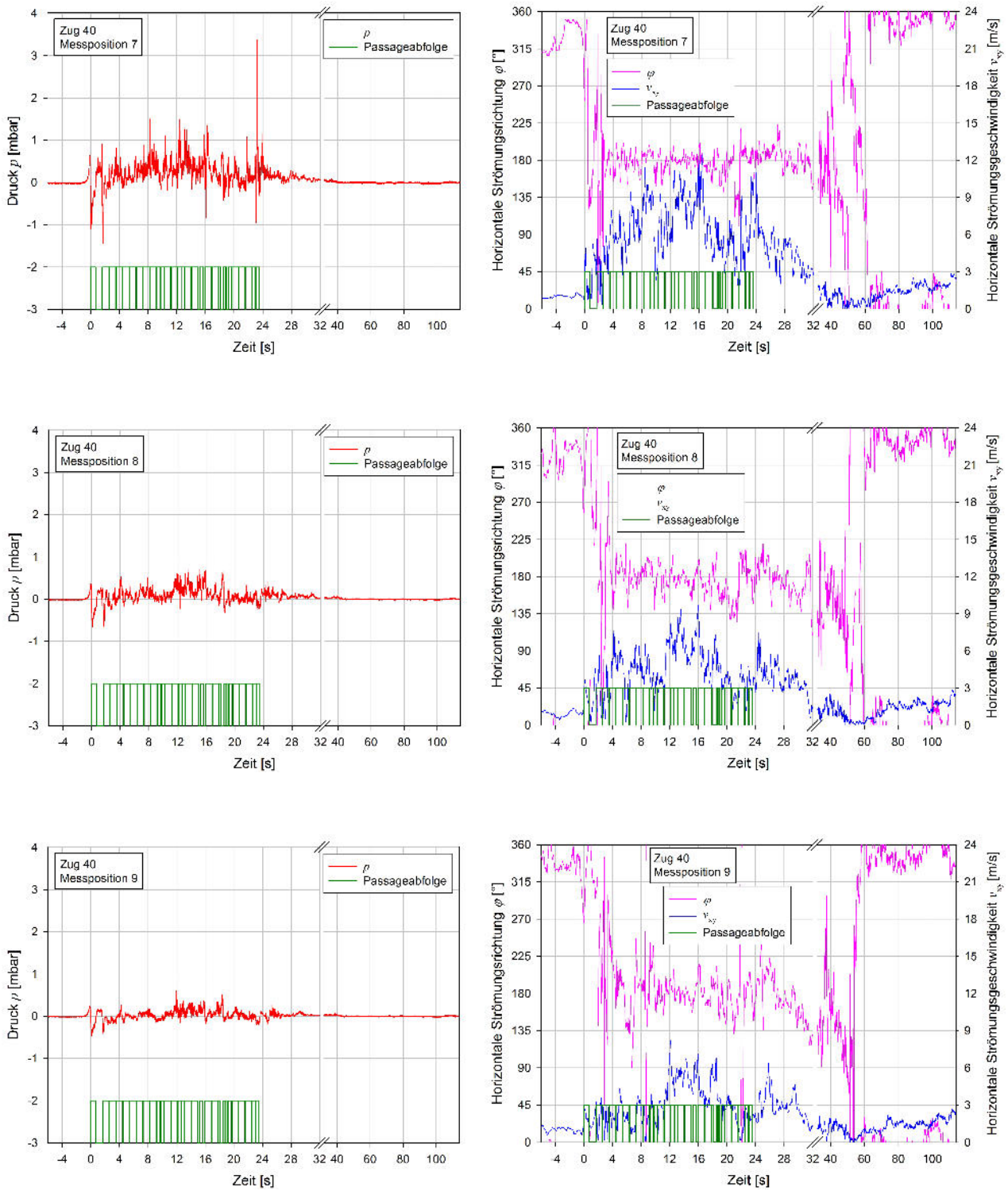
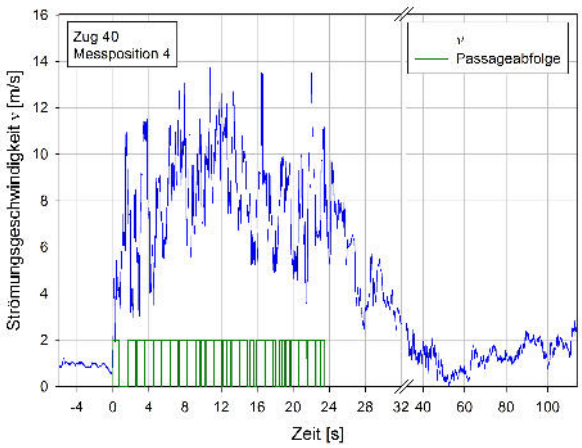


Abbildung B.170: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.



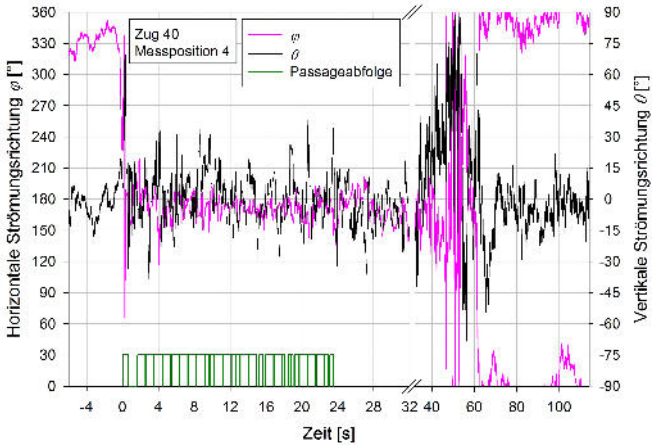






Abbildung B.171: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 40 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 40 ($\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$).

Zug 40: Güterzug

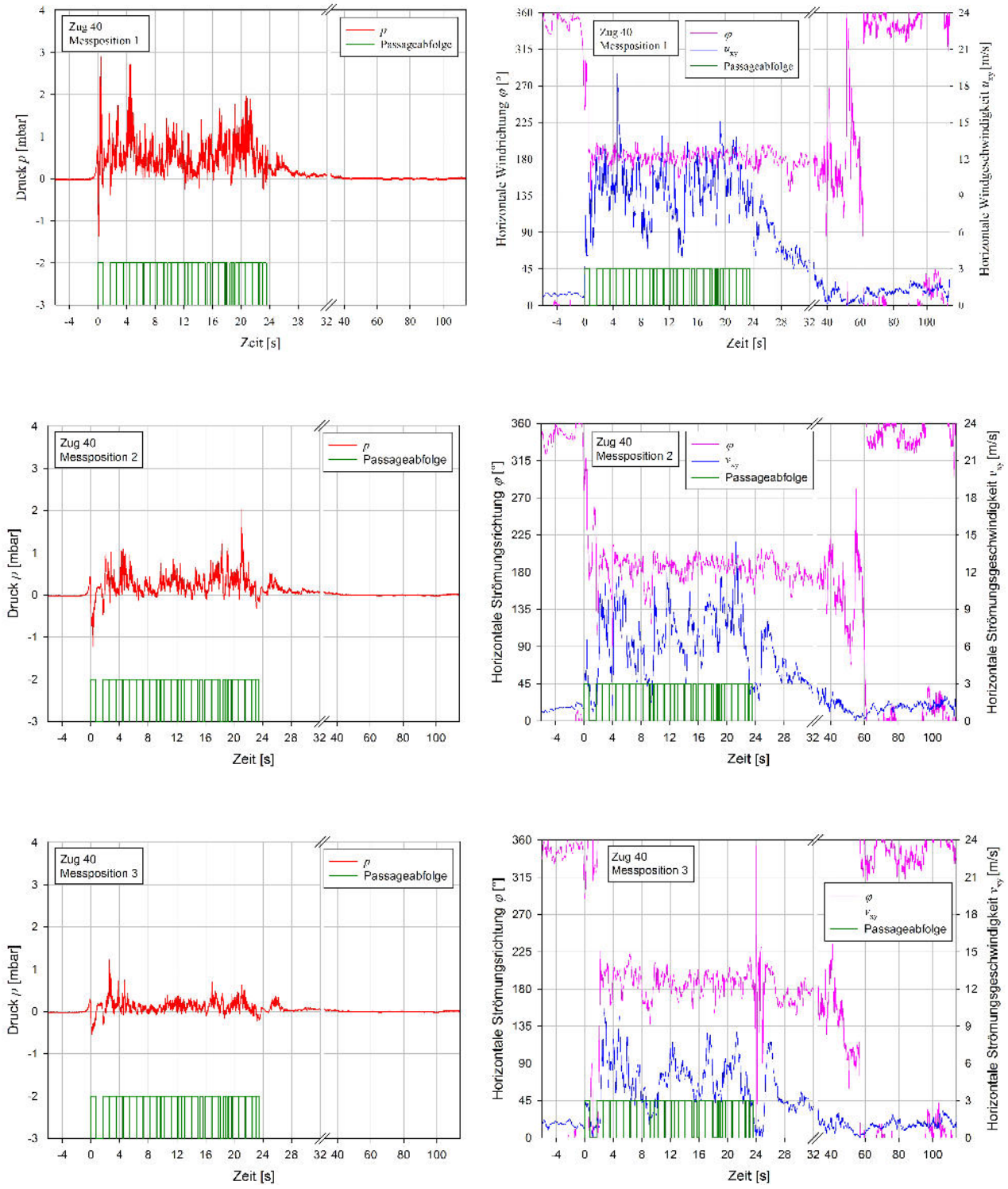


Abbildung B.172: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

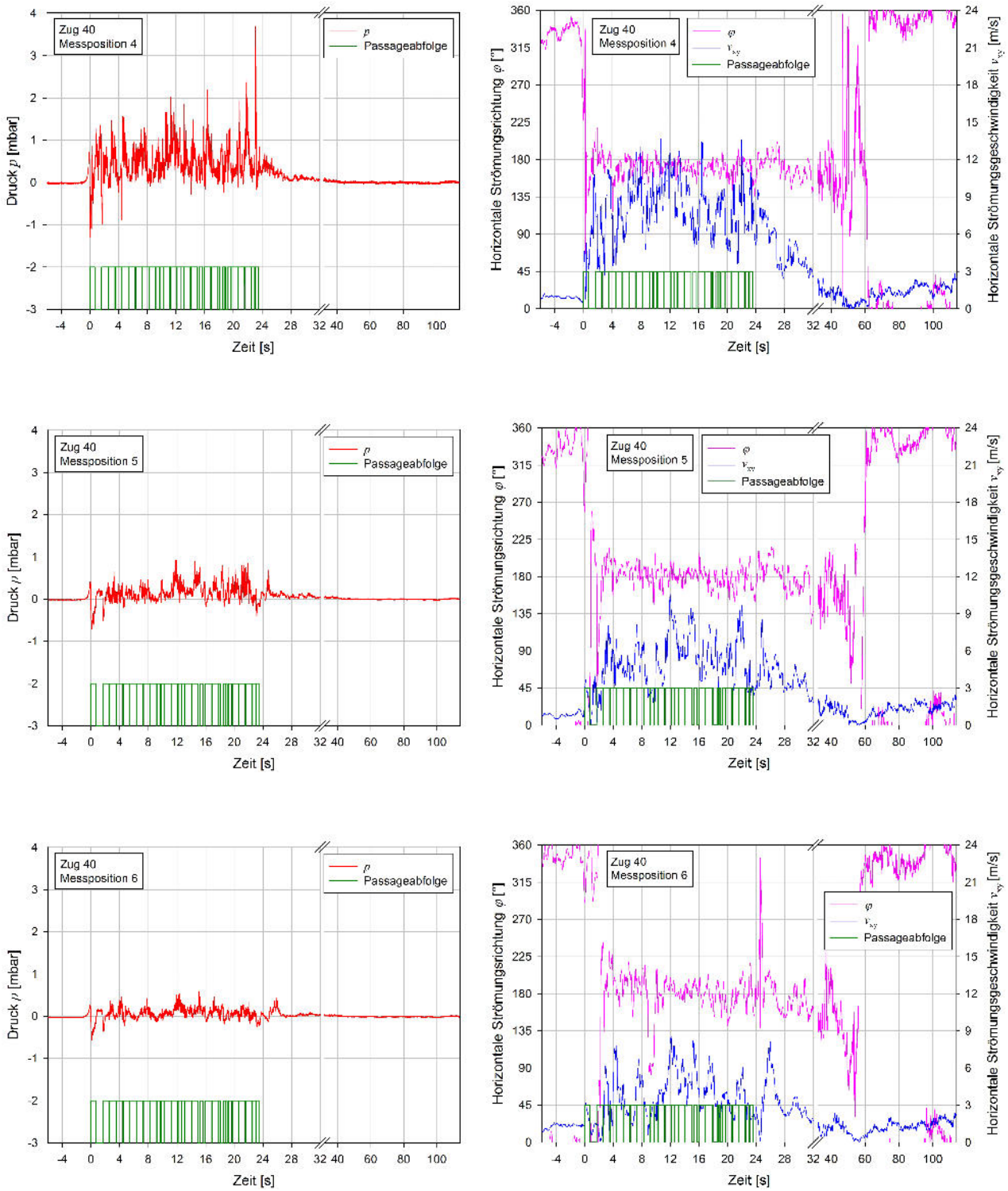


Abbildung B.173: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

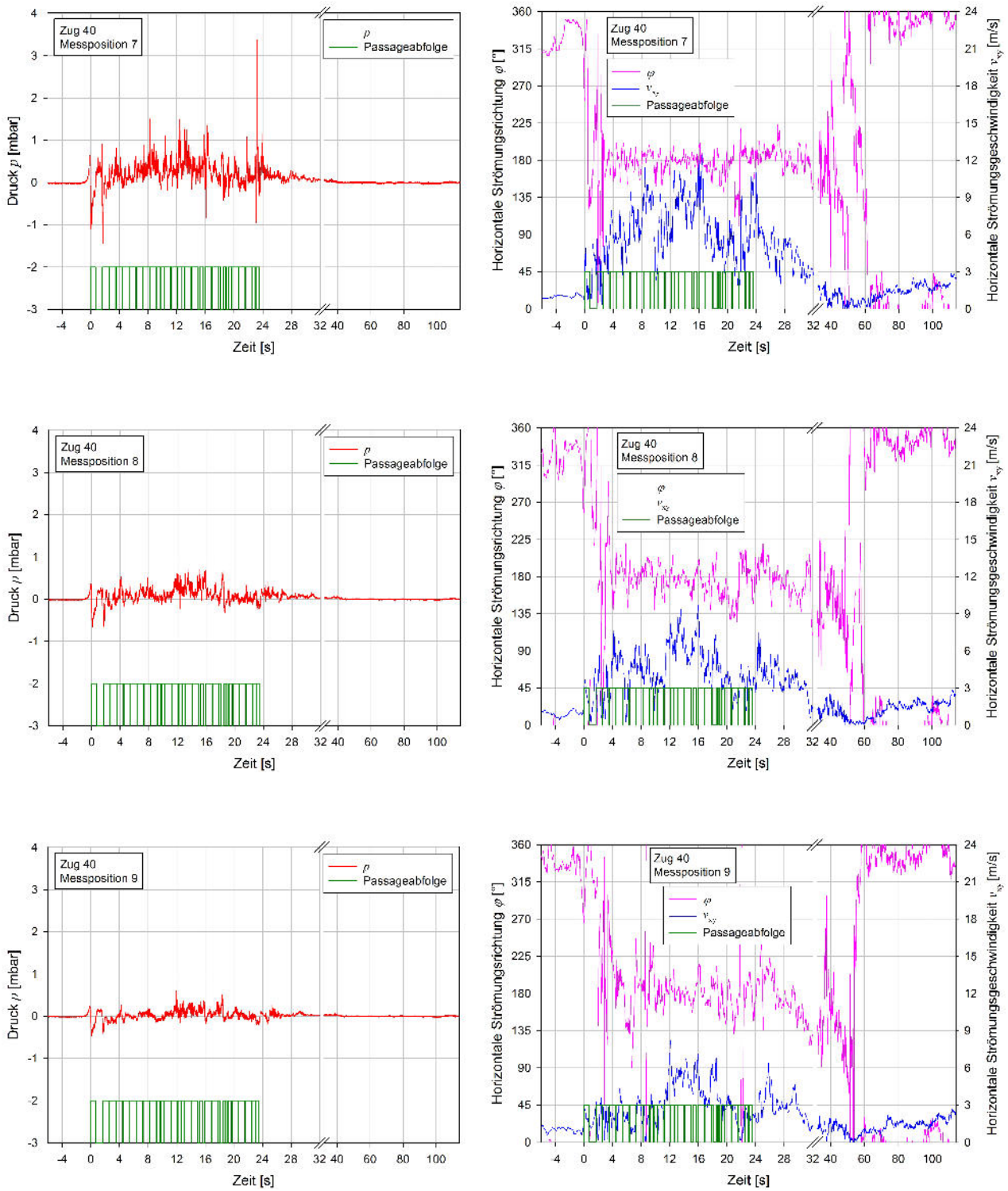
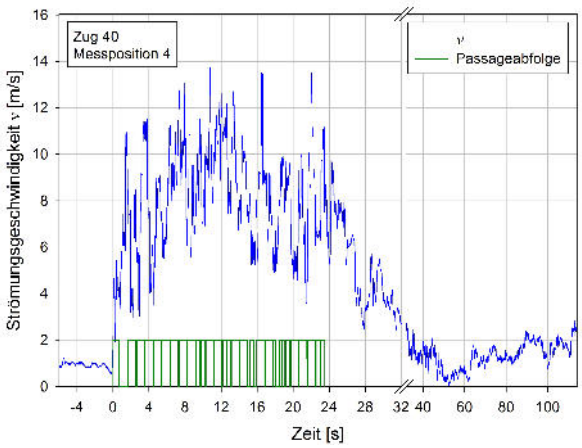


Abbildung B.174: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 40 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.



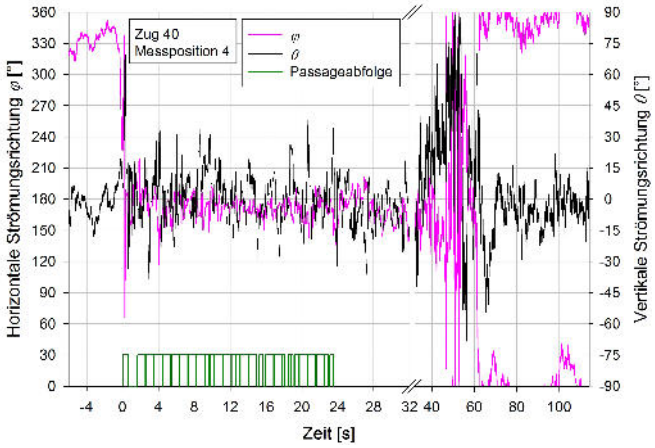






Abbildung B.175: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 40 an der Messposition 4. Mitte und unten: Foto der Handy- und Drohnen-Kamera von Zug 40 ($\bar{v} = 98{,}8 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$).

Zug 41: Doppelstockzug K2 + K1 (4 Wagen + 3 Wagen)

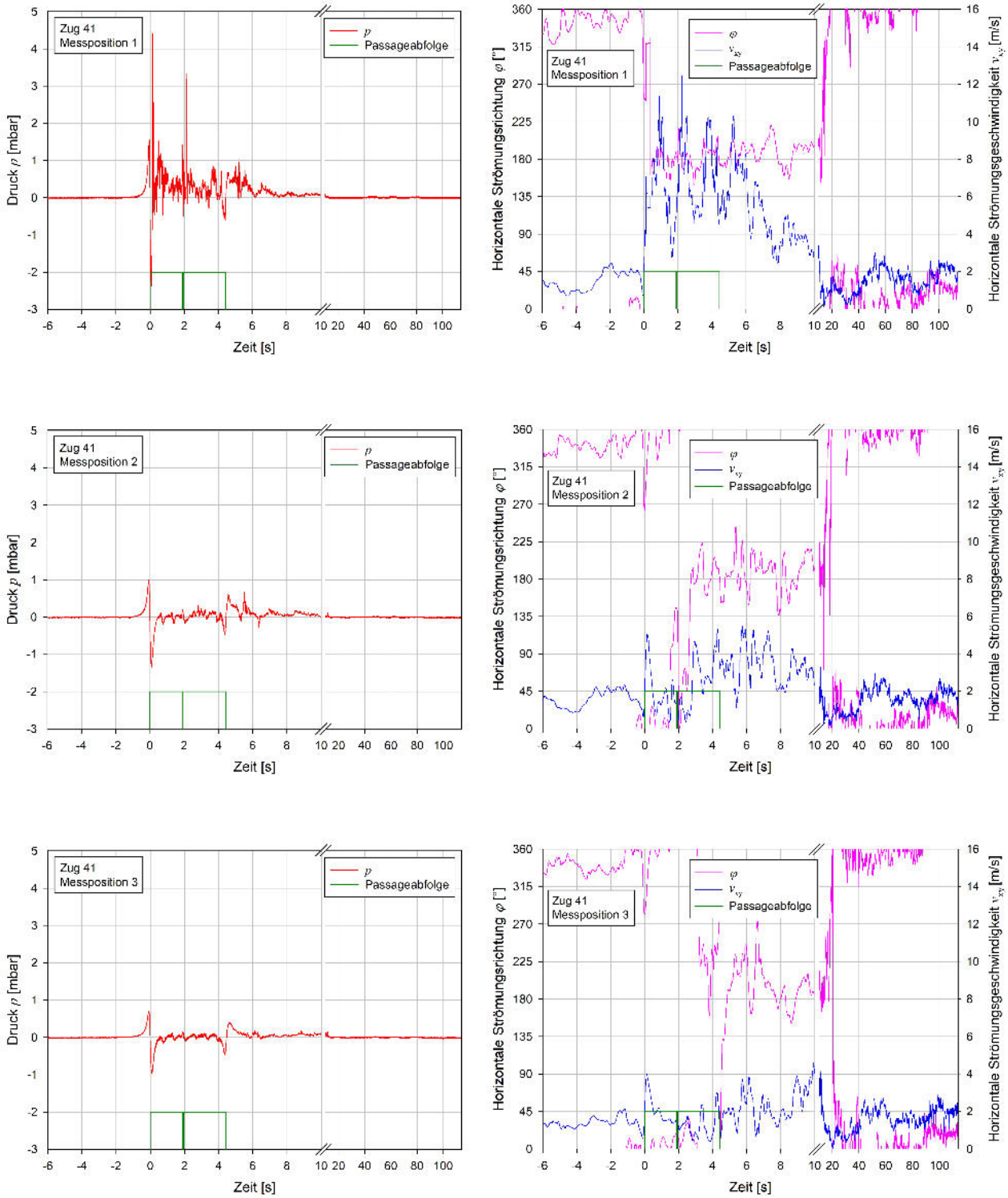


Abbildung B.176: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 41 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 146{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

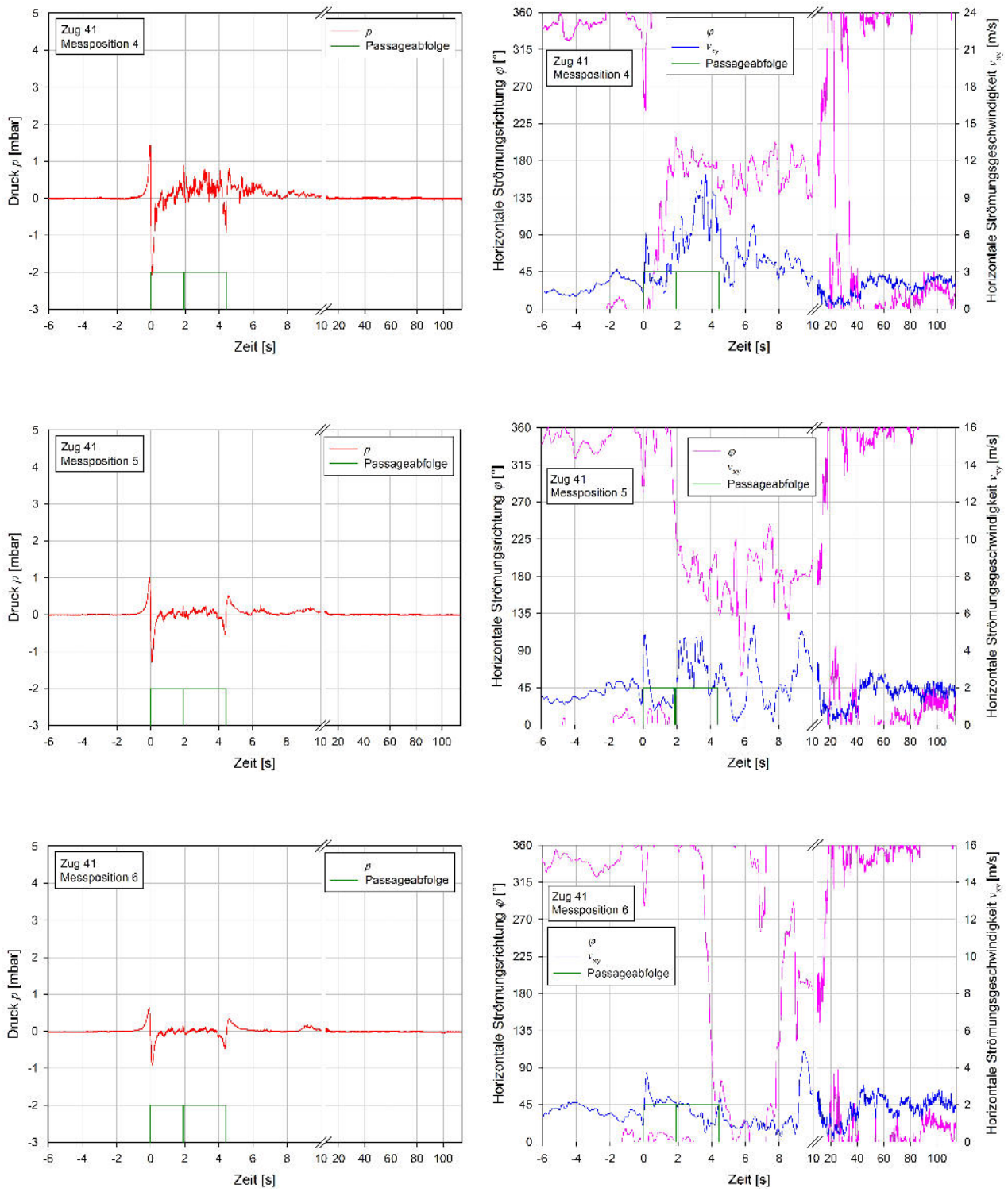


Abbildung B.177: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 41 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 146{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

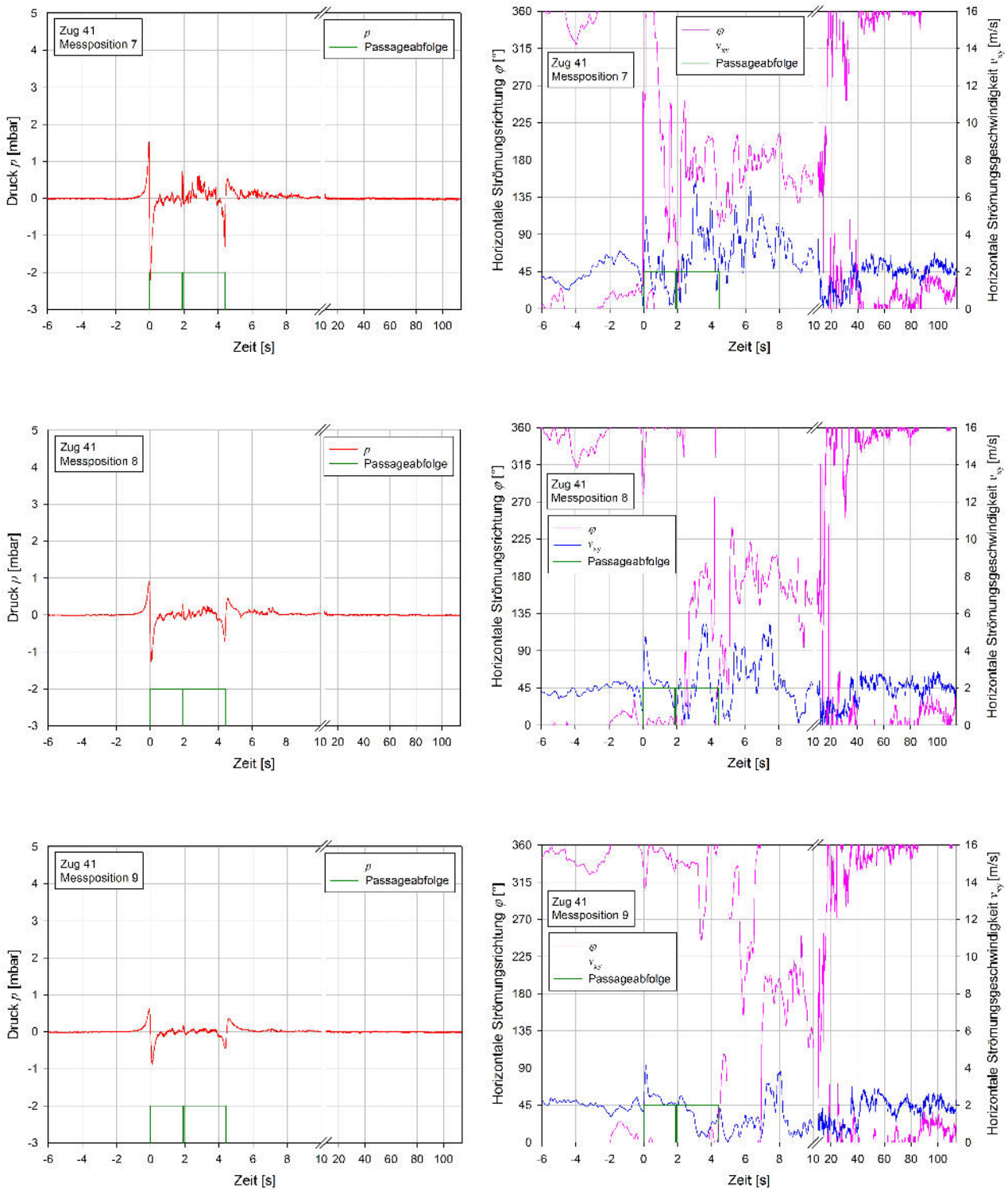


Abbildung B.178: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 41 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 146{,}5 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

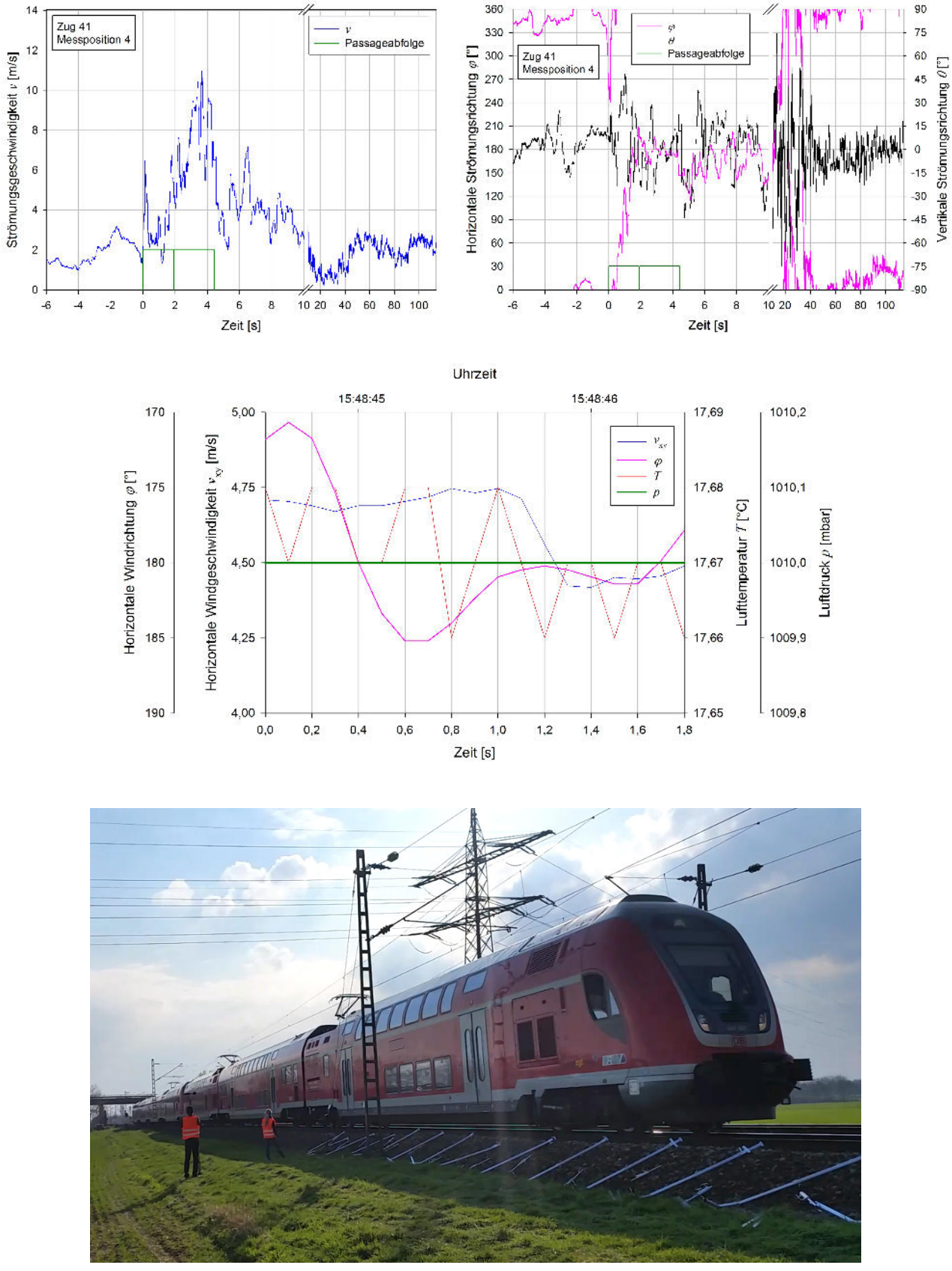


Abbildung B.179: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 41 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 41 ($\bar{v} = 146{,}4 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 42: S-Bahn (Baureihe 425)

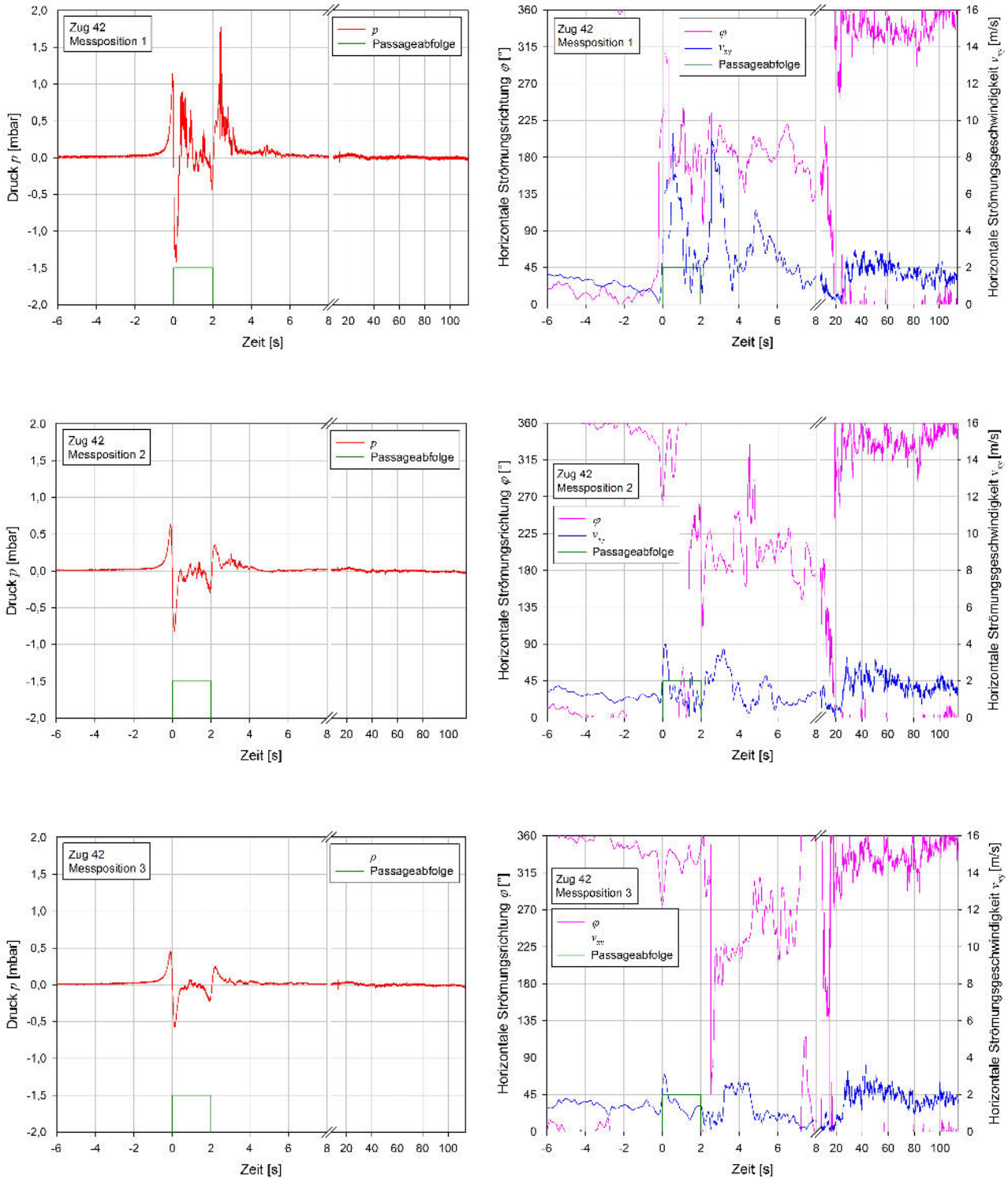


Abbildung B.180: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 42 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

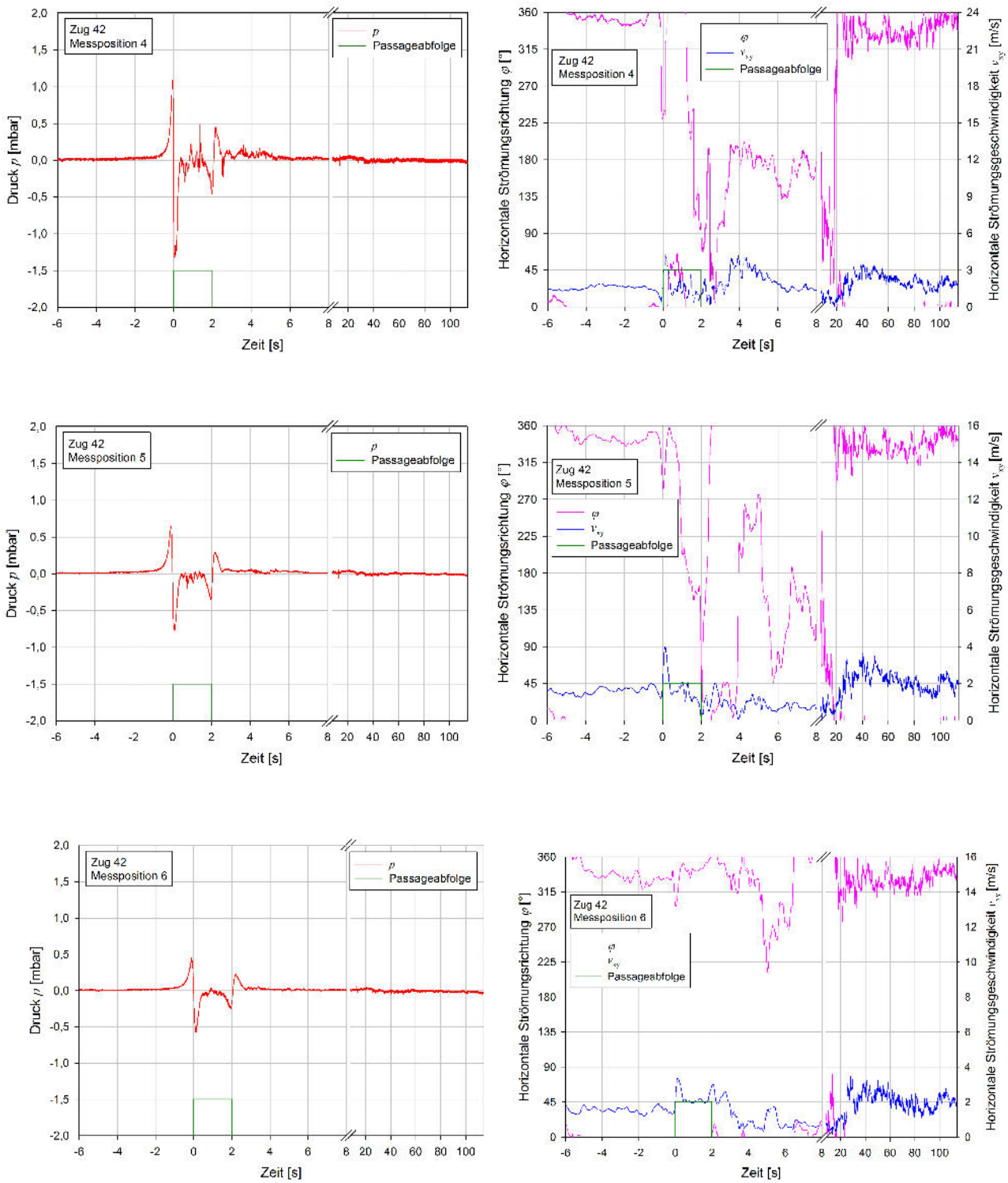


Abbildung B.181: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 42 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

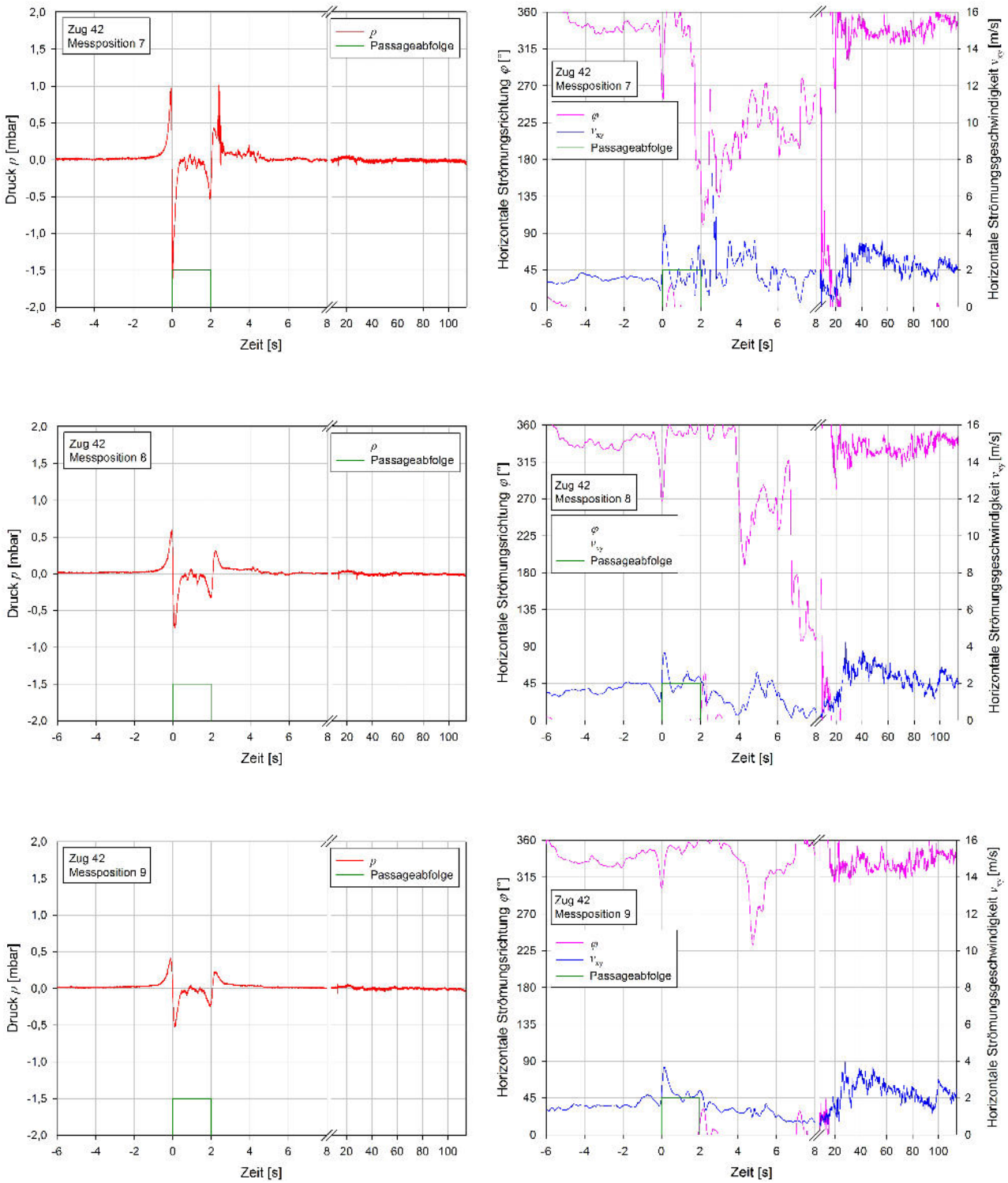


Abbildung B.182: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 42 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

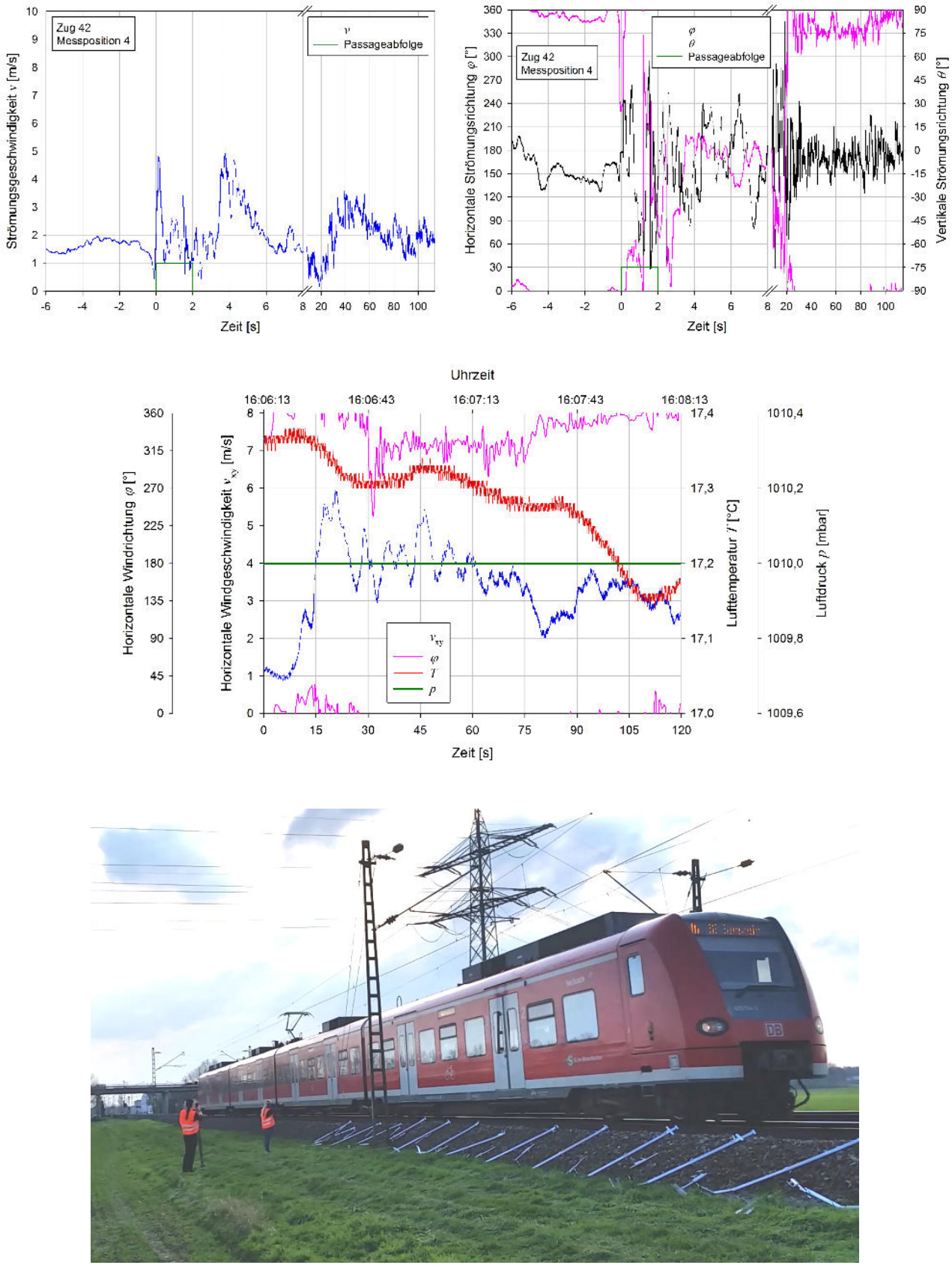


Abbildung B.183: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 42 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 42 ($\bar{v} = 121{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$).

Zug 43: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

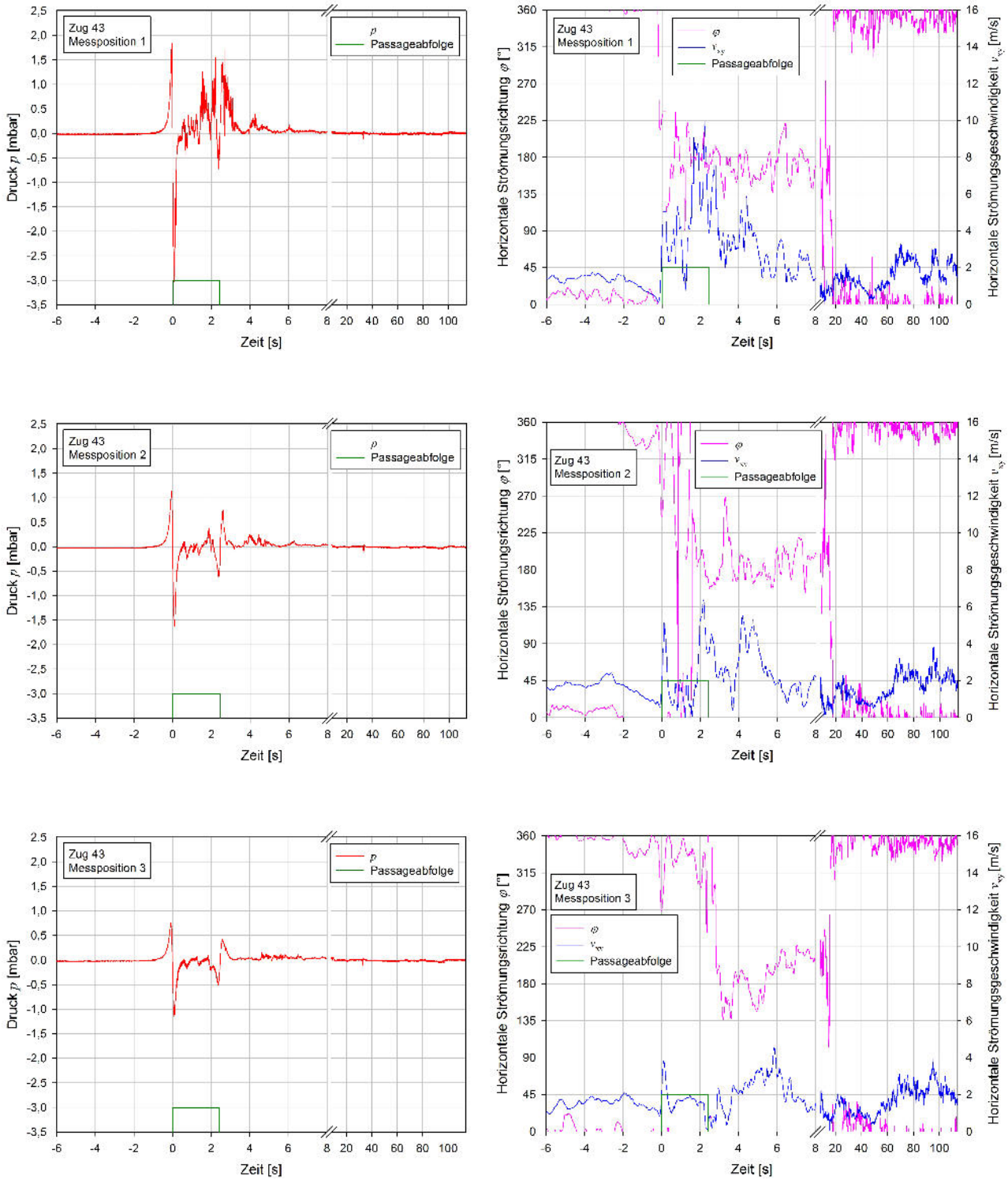


Abbildung B.184: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 43 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

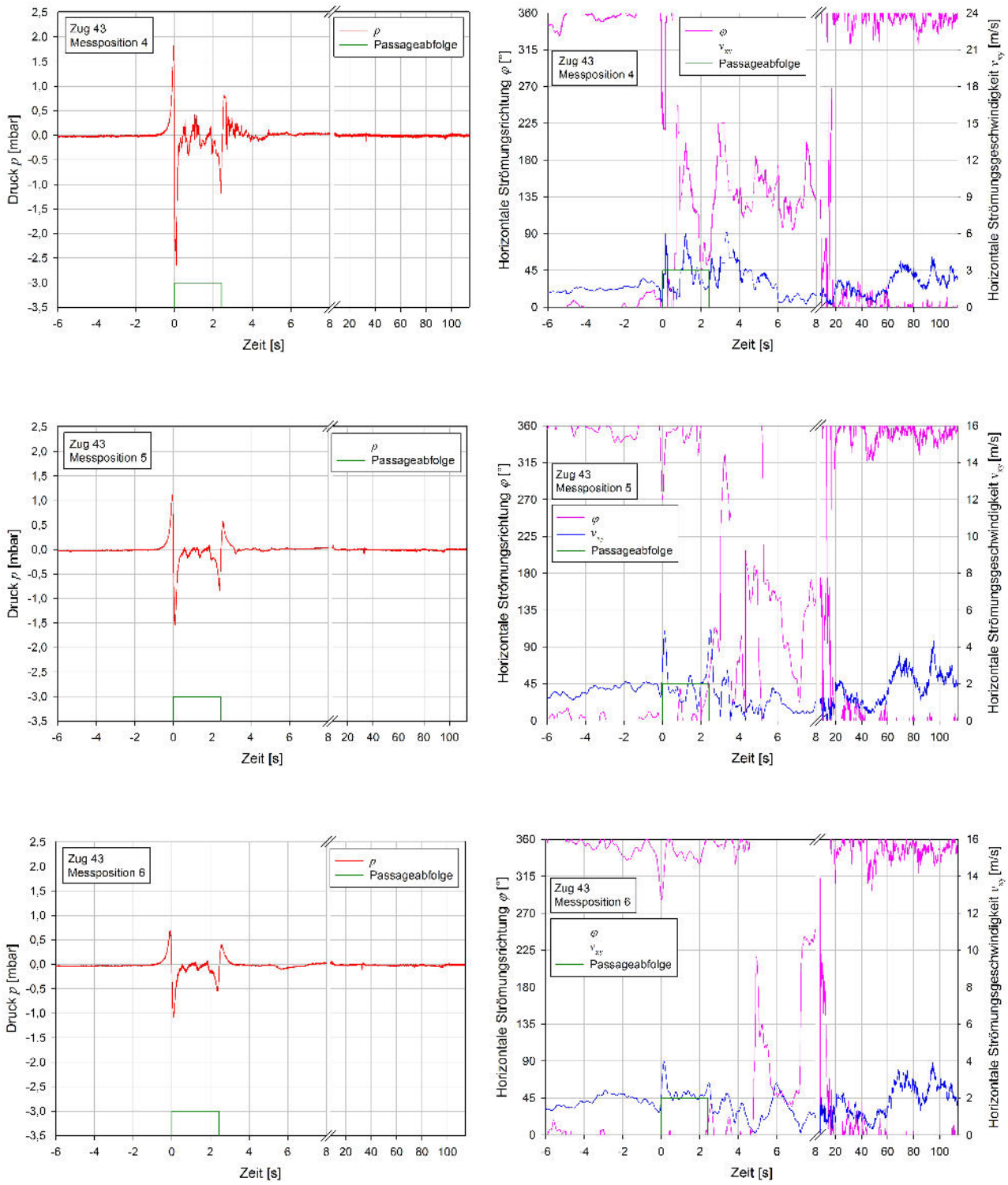


Abbildung B.185: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 43 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

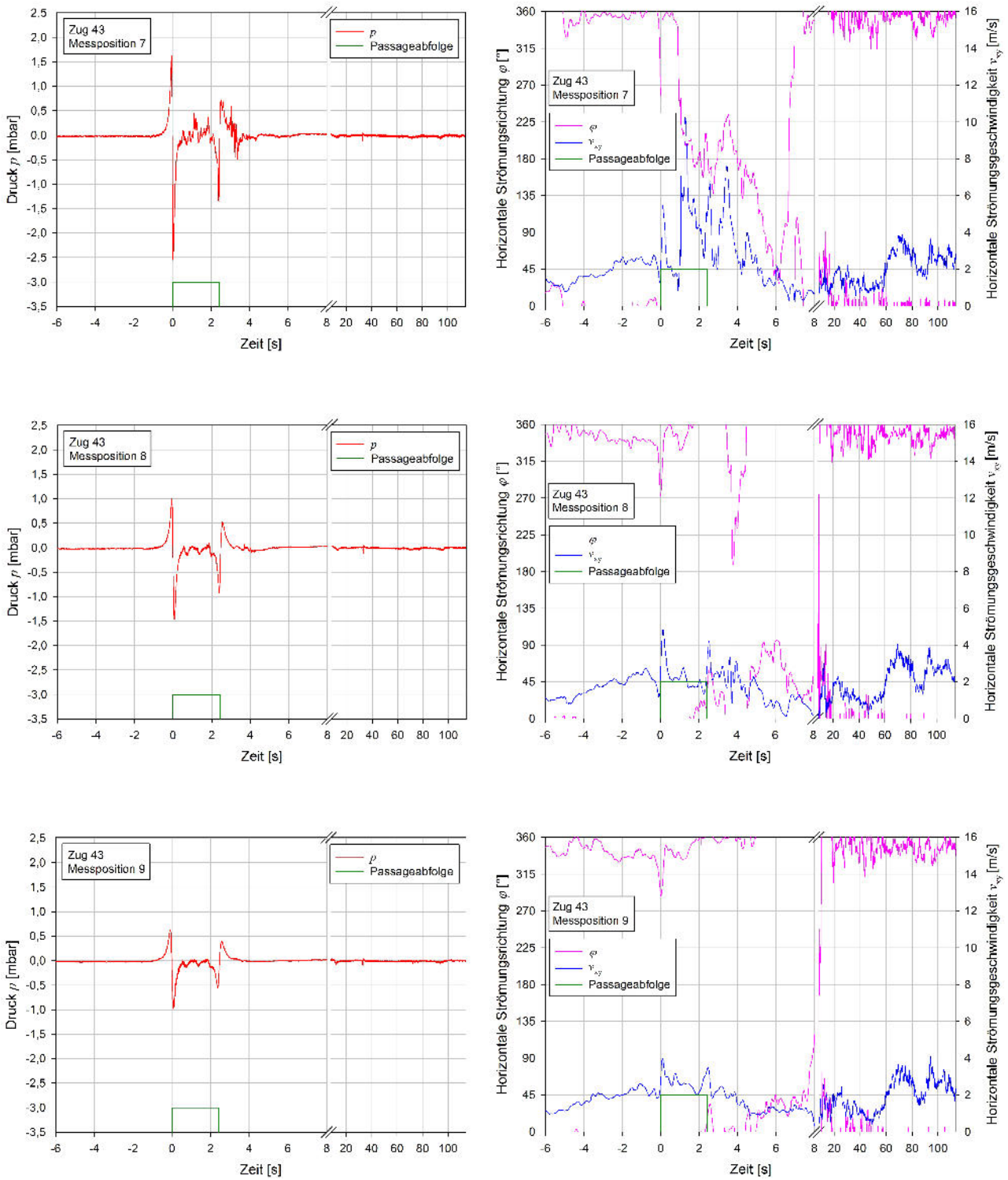


Abbildung B.186: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 43 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

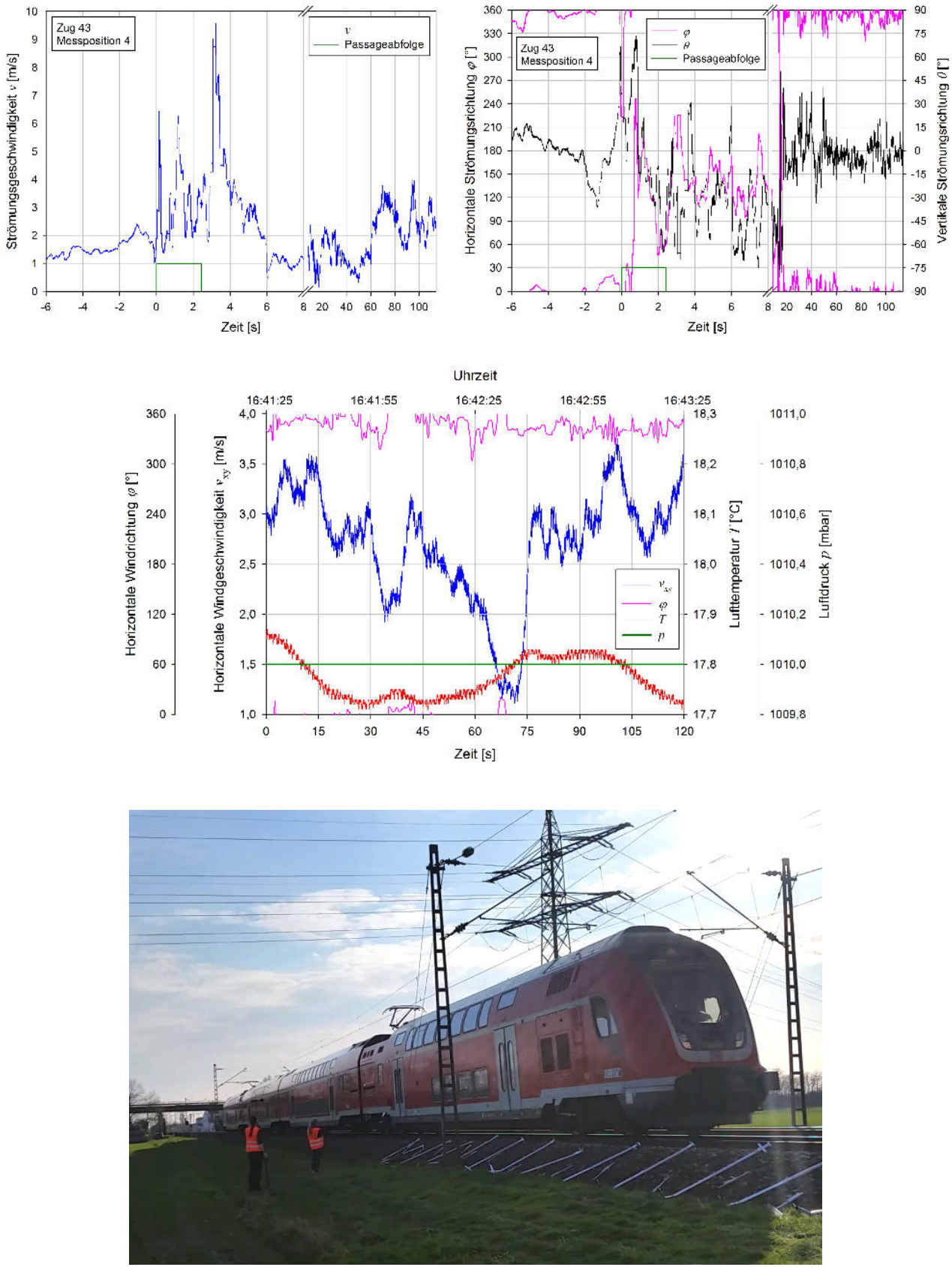


Abbildung B.187: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 43 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 43 ($\bar{v} = 154{,}3 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$).

Zug 44: Doppelstockzug K2 + K2 (4 Wagen + 4 Wagen)

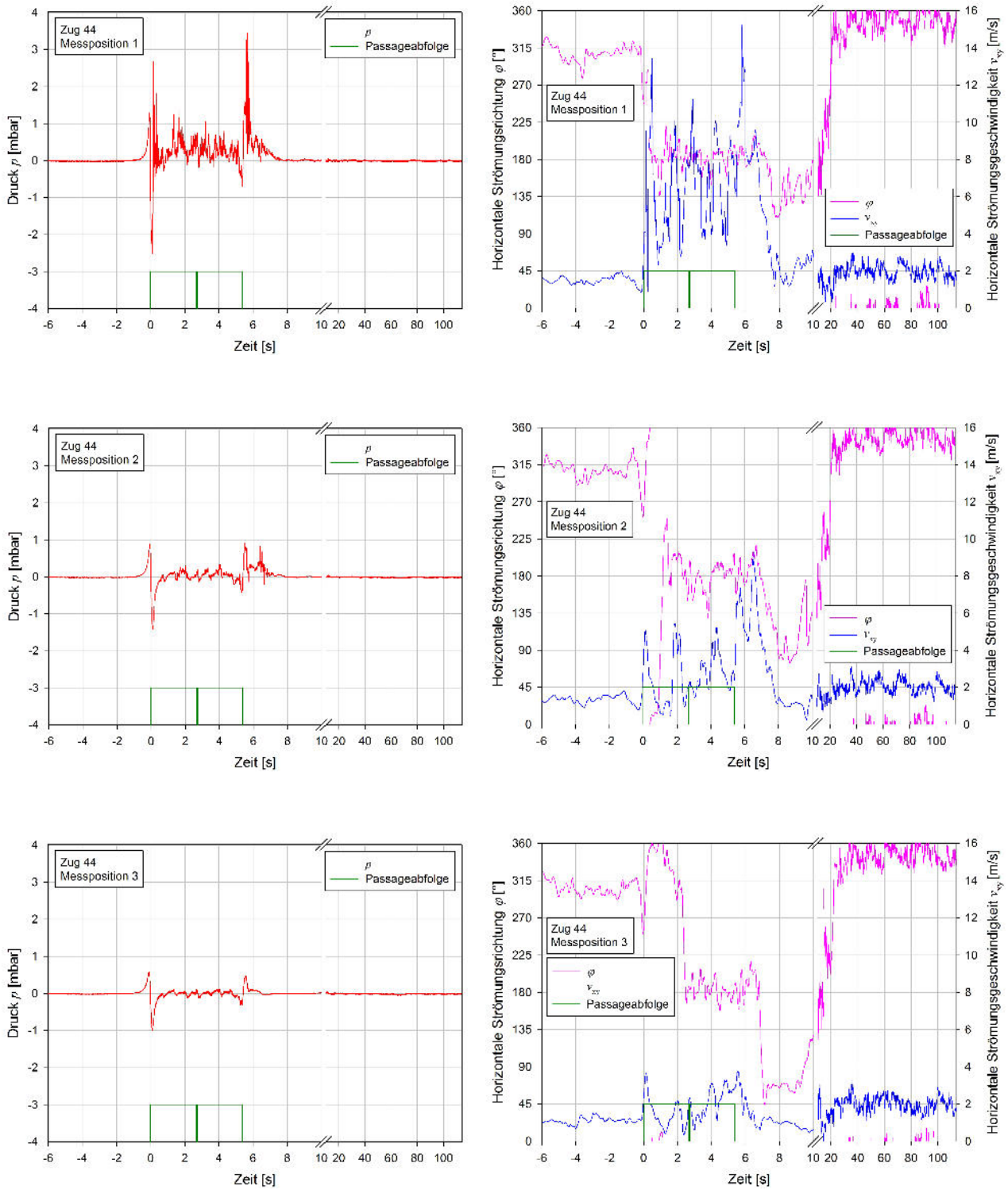


Abbildung B.188: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 44 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

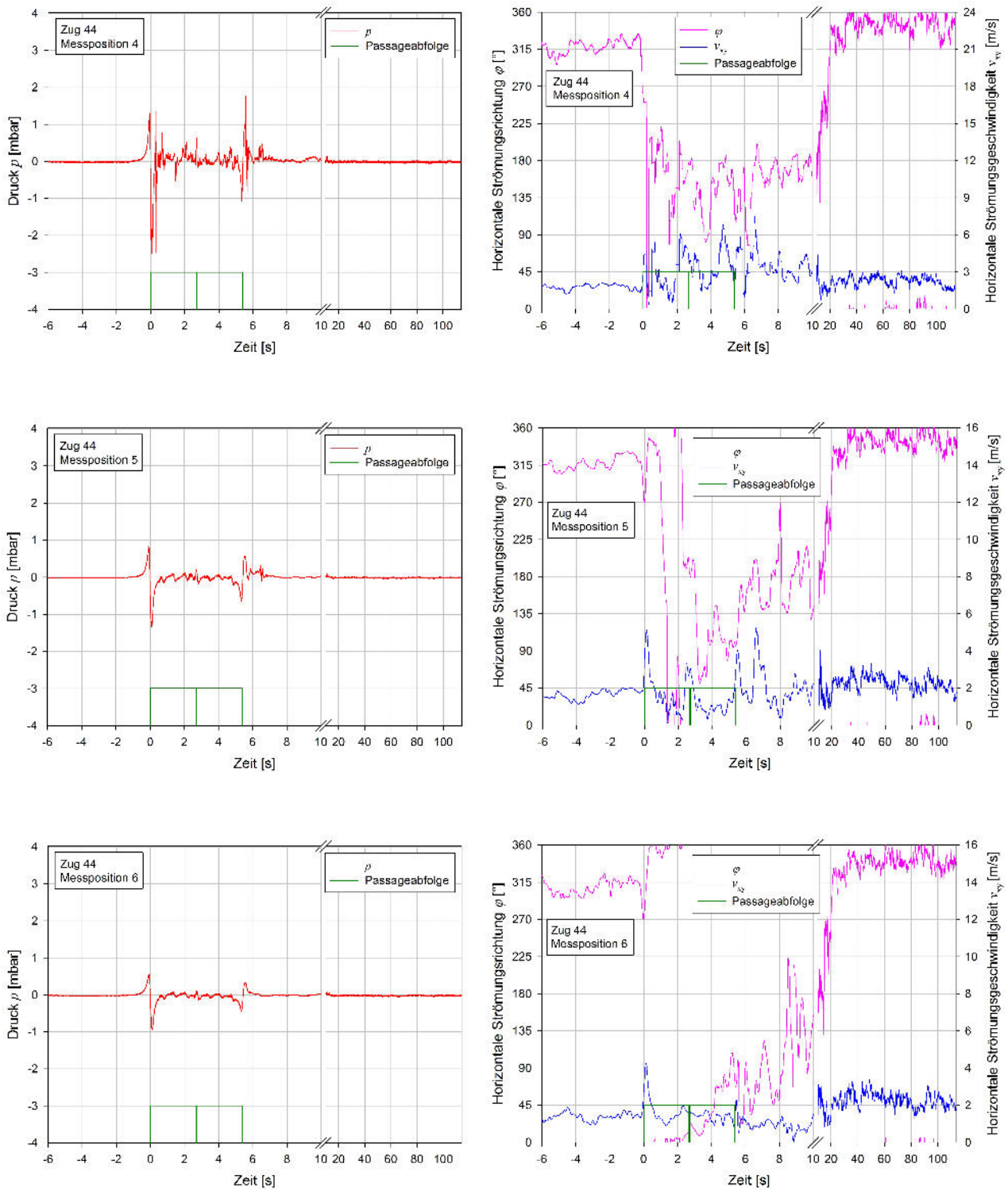


Abbildung B.189: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 44 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

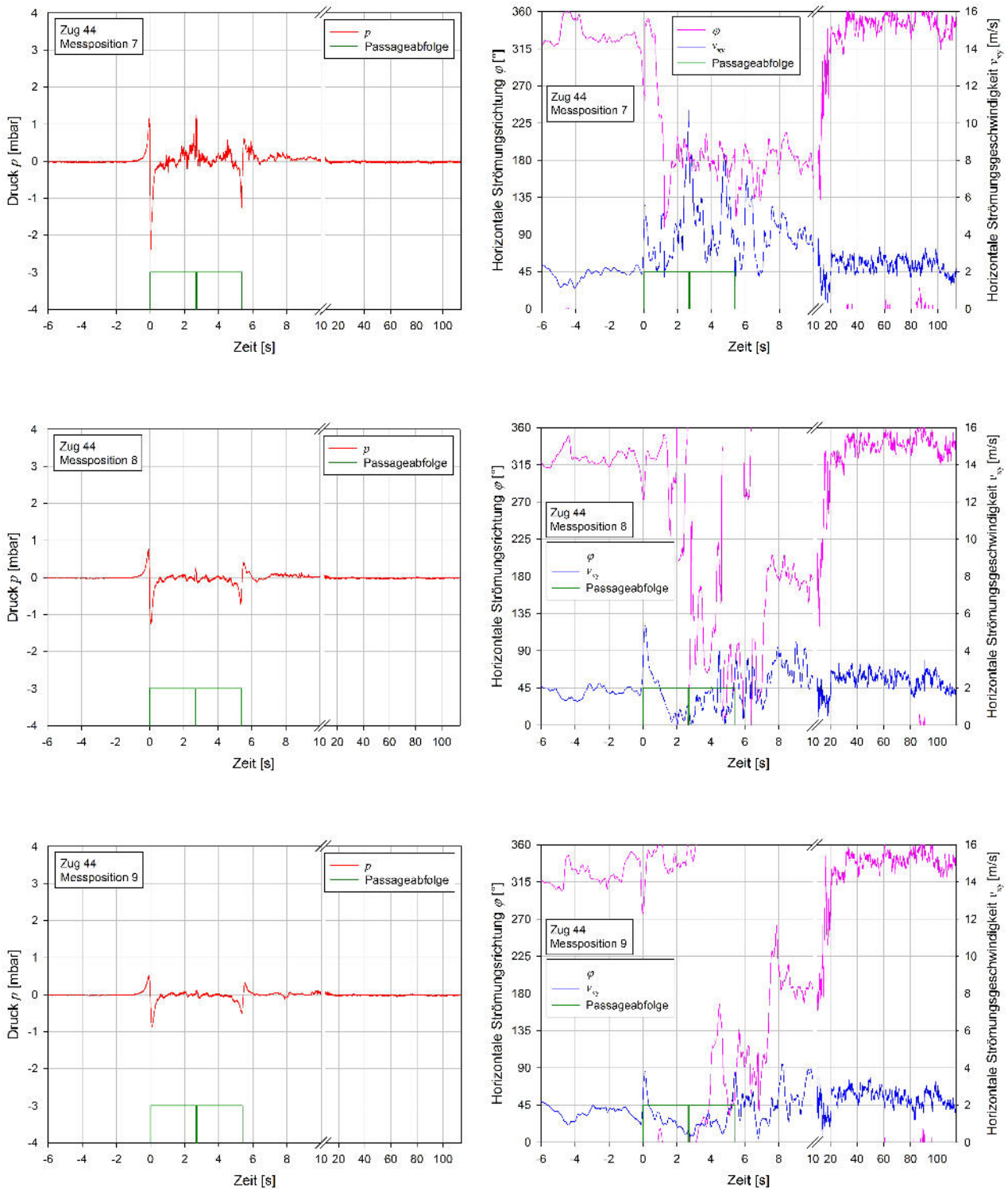
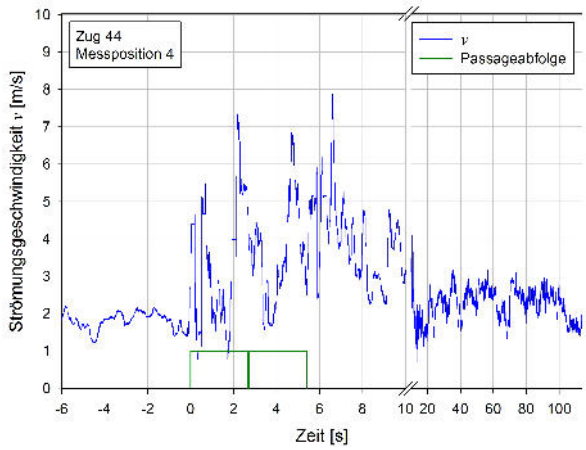
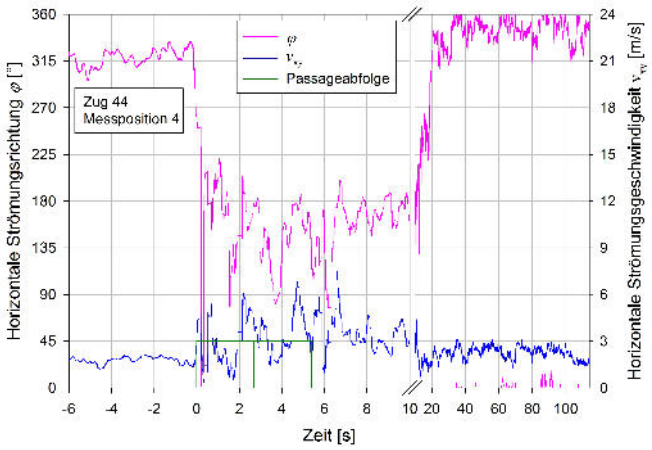


Abbildung B.190: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 44 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.





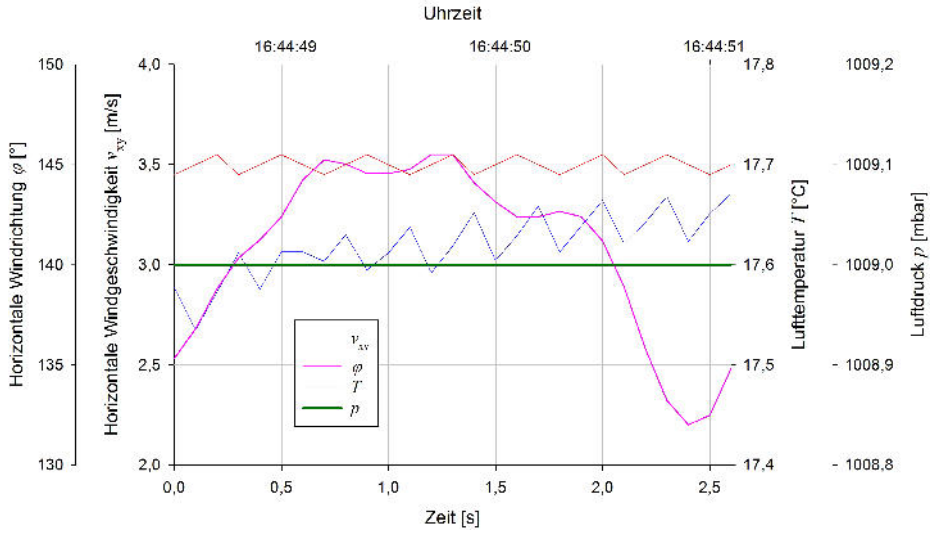




Abbildung B.191: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 44 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 44 ($\bar{v} = 141{,}5 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 45: Regionalbahn (Baureihe 622)

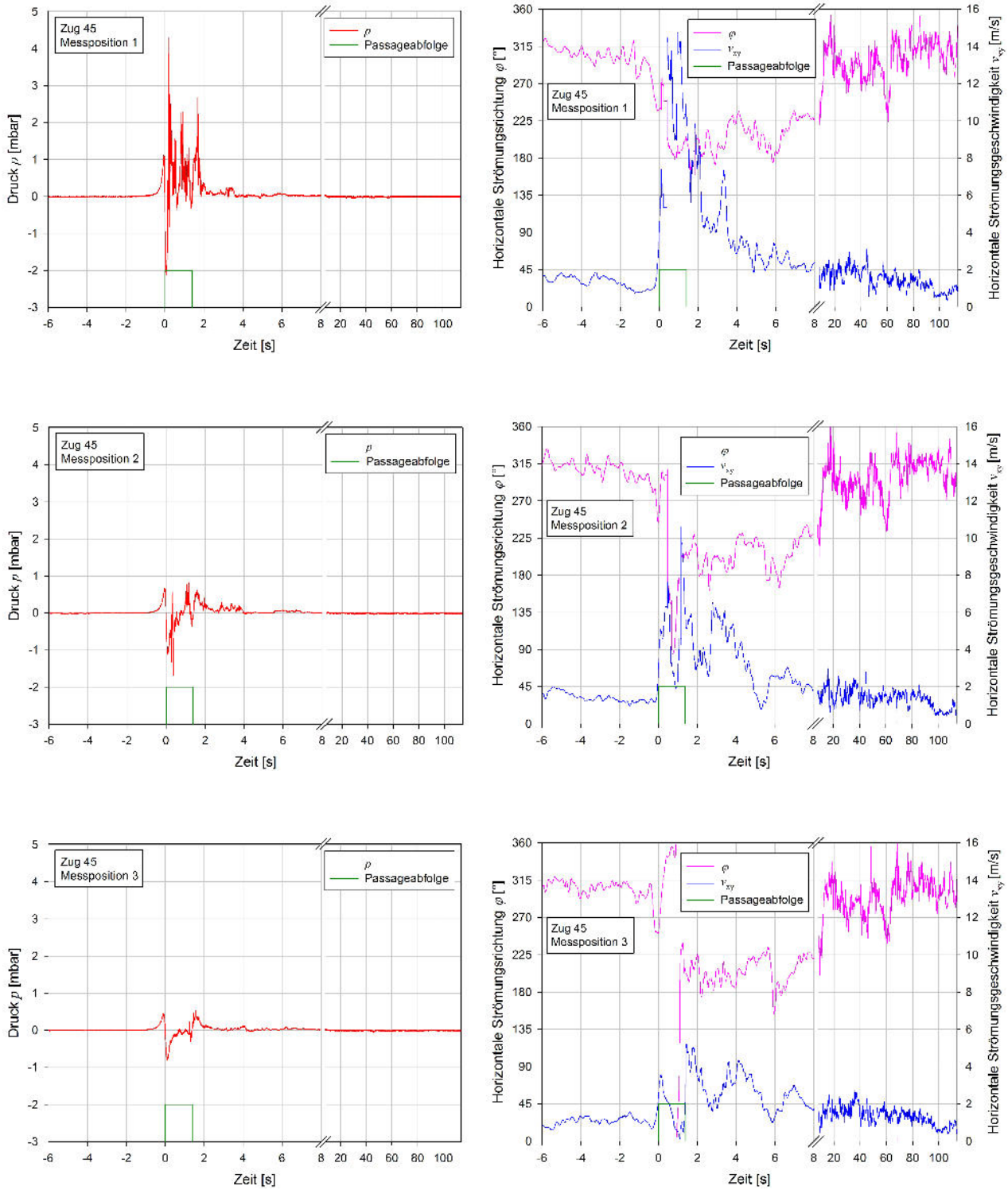


Abbildung B.192: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 45 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

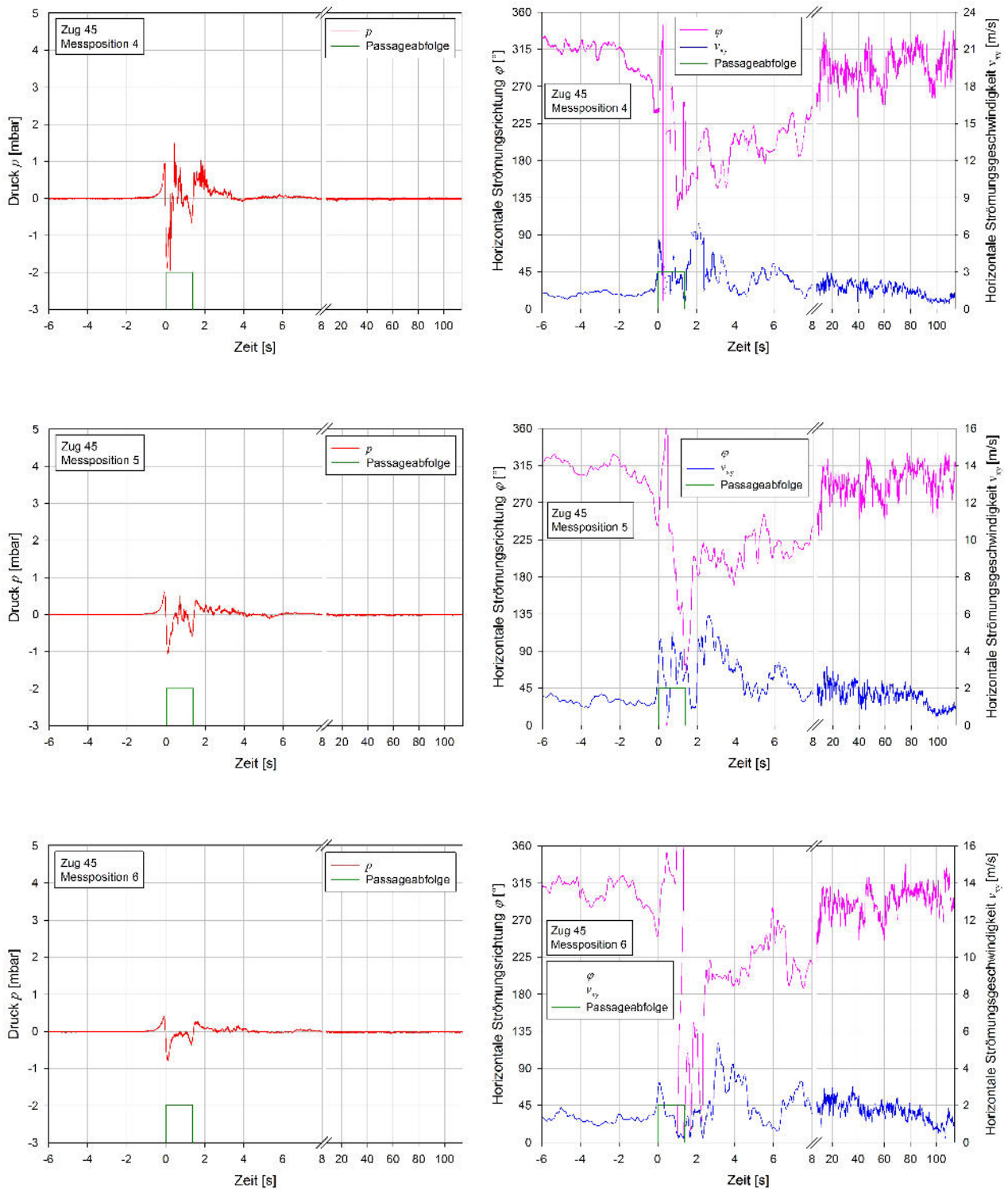


Abbildung B.193: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 45 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

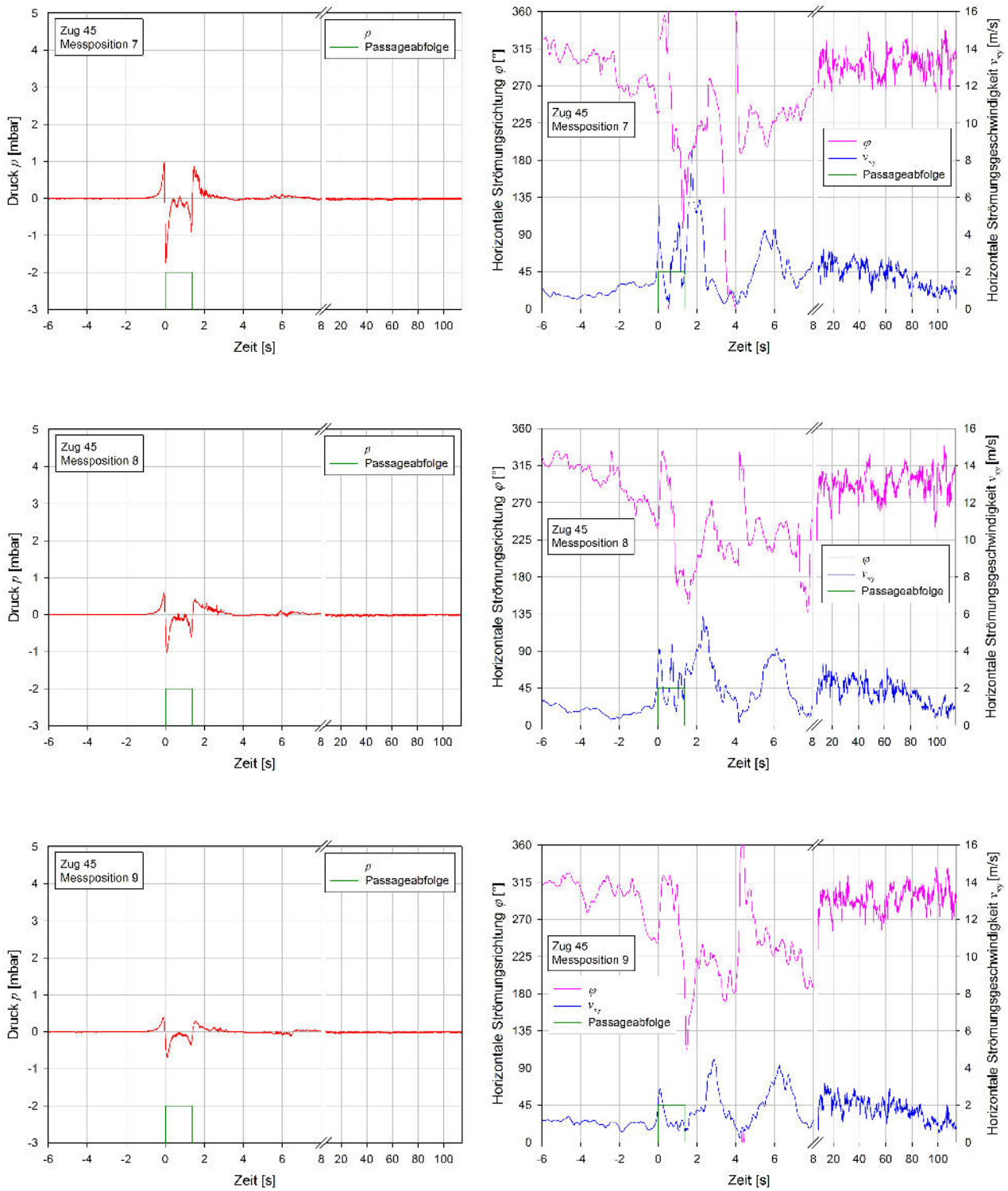


Abbildung B.194: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 45 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

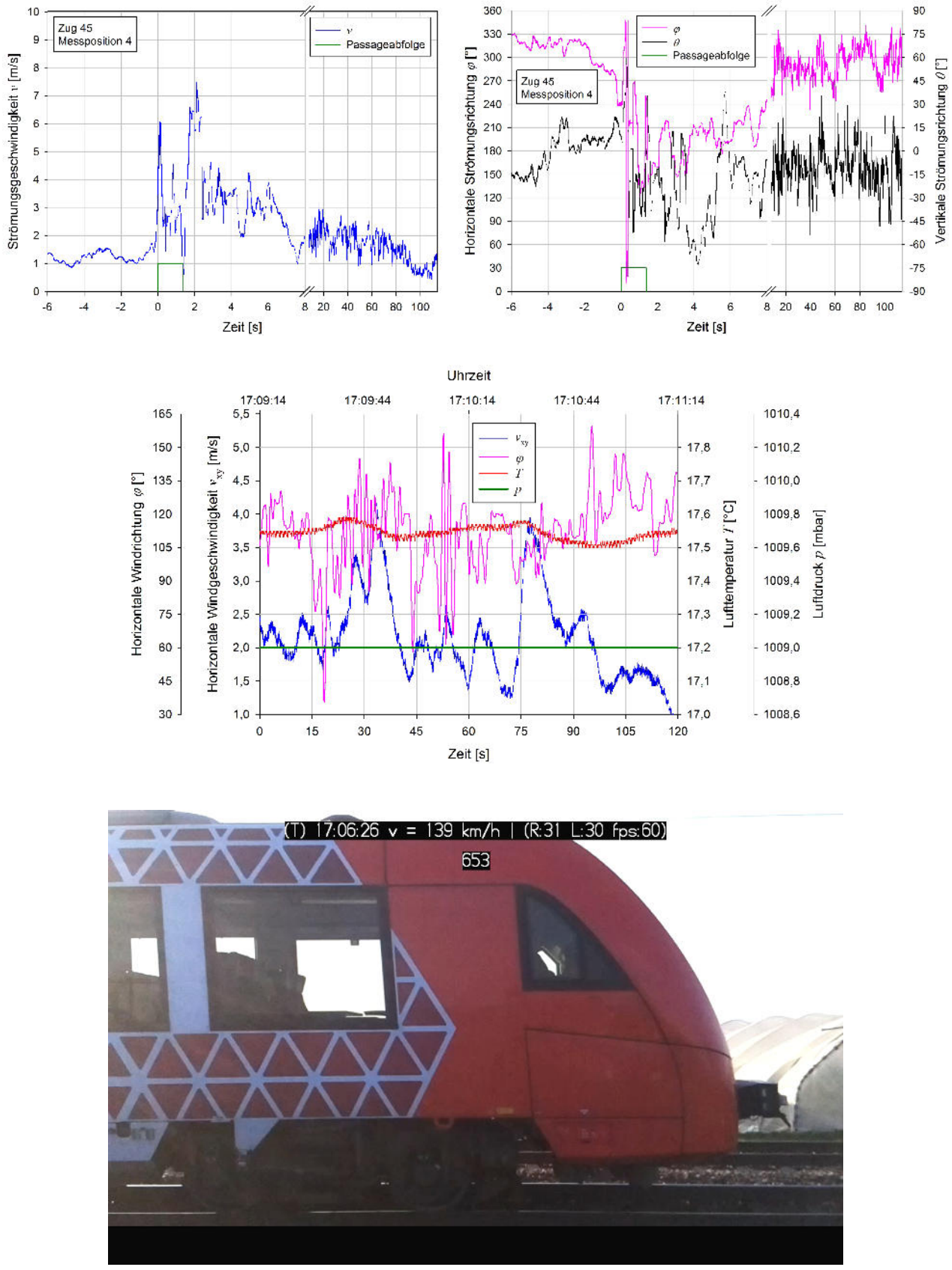


Abbildung B.195: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 45 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Mikrocomputer-Kamera von Zug 45 ($\bar{v} = 136{,}5 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$).

B.2.2.2 Mit fester Absperrung und Schallschutzmatten

Zug 46: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

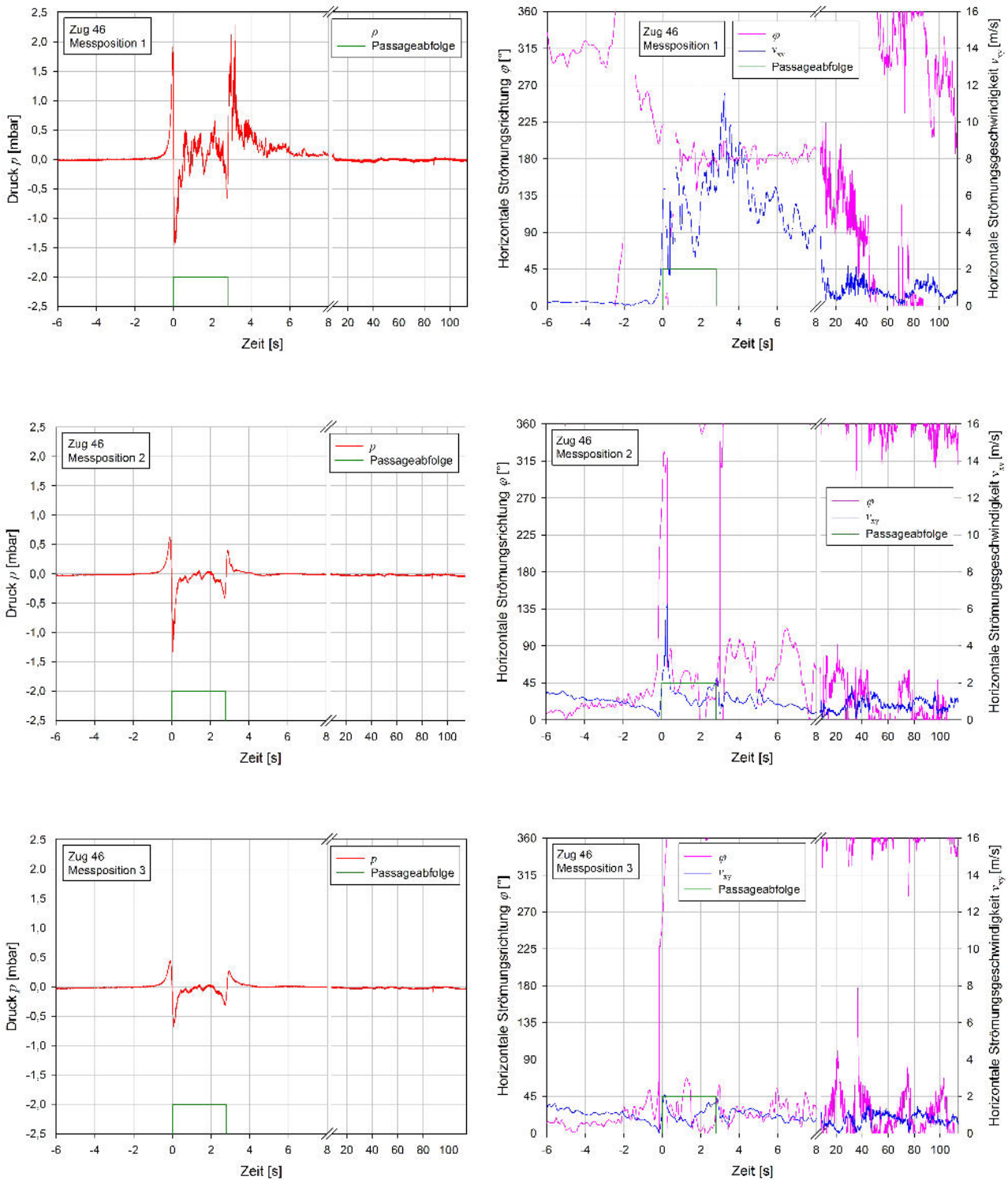


Abbildung B.196: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 46 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

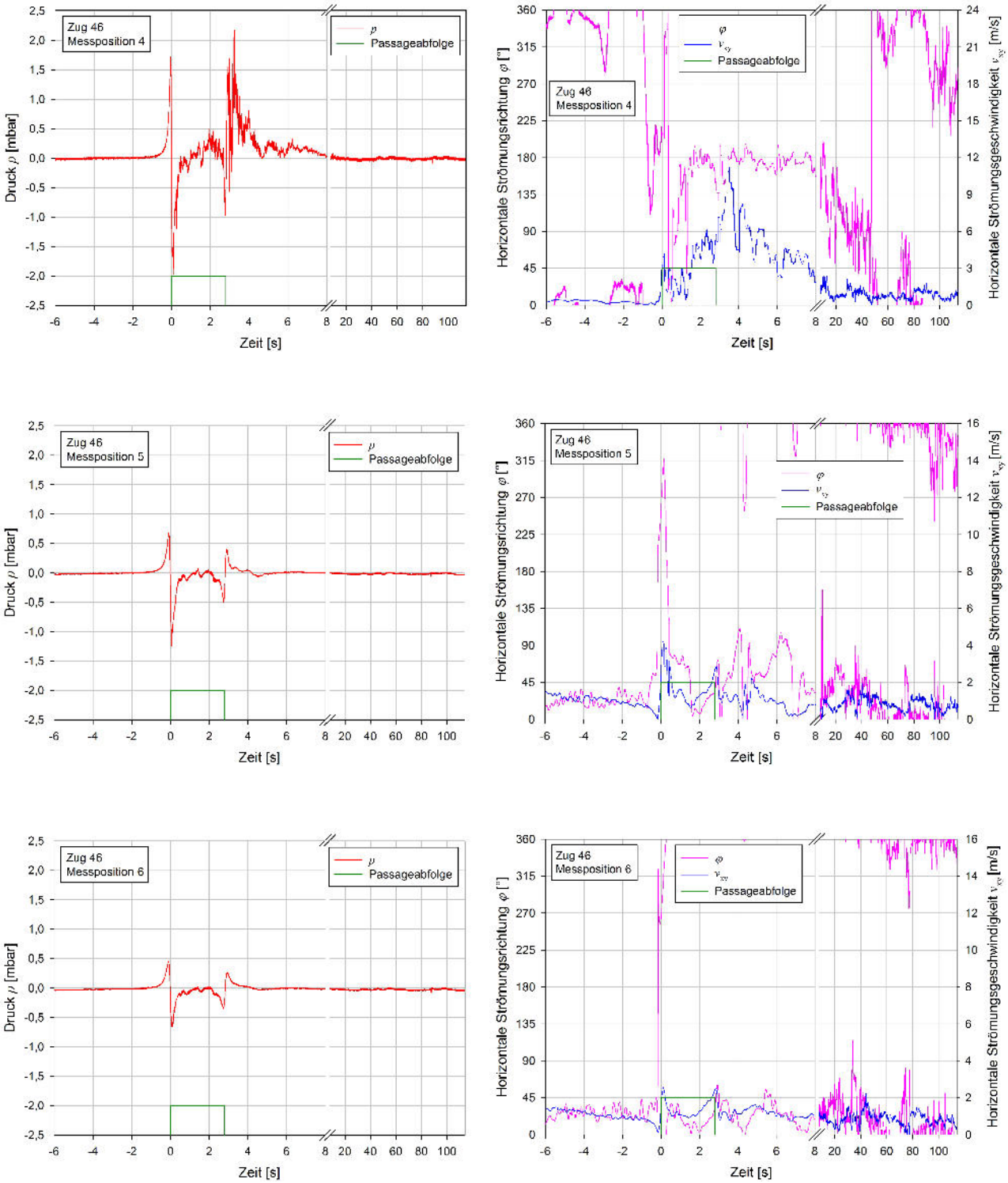


Abbildung B.197: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 46 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

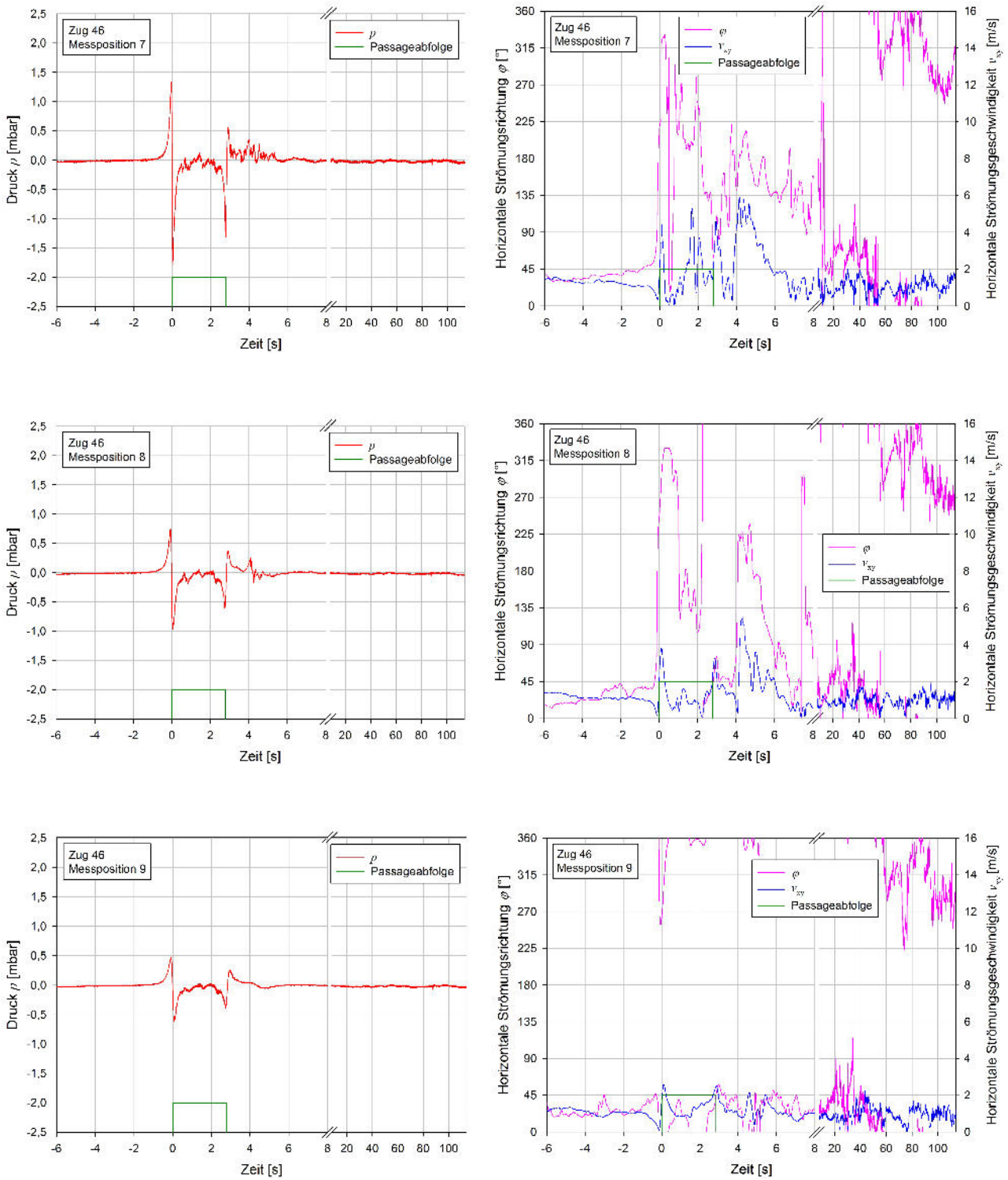


Abbildung B.198: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 46 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

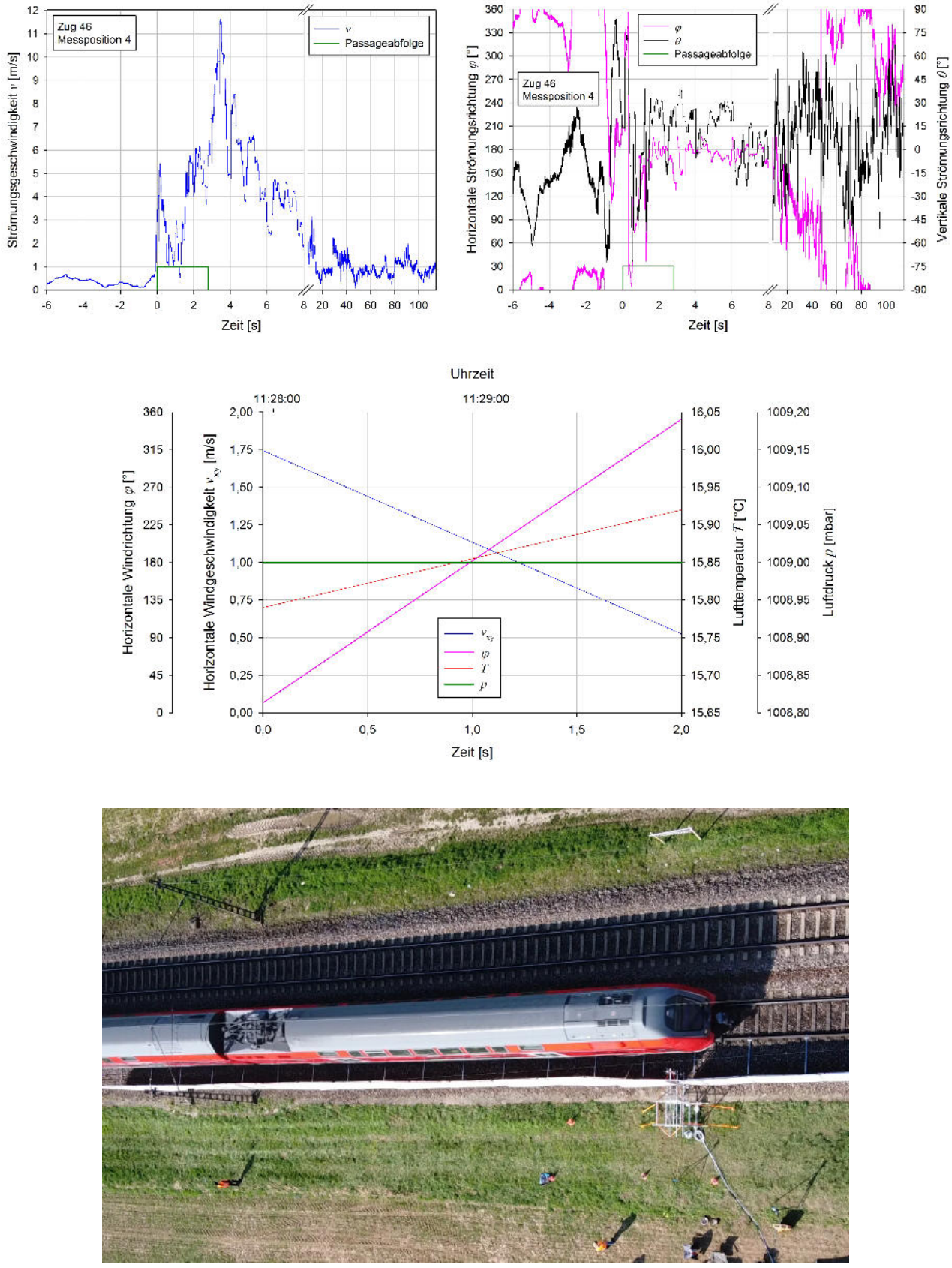


Abbildung B.199: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 46 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Drohnen-Kamera von Zug 46 ($\bar{v} = 133{,}6 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$).

Zug 47: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

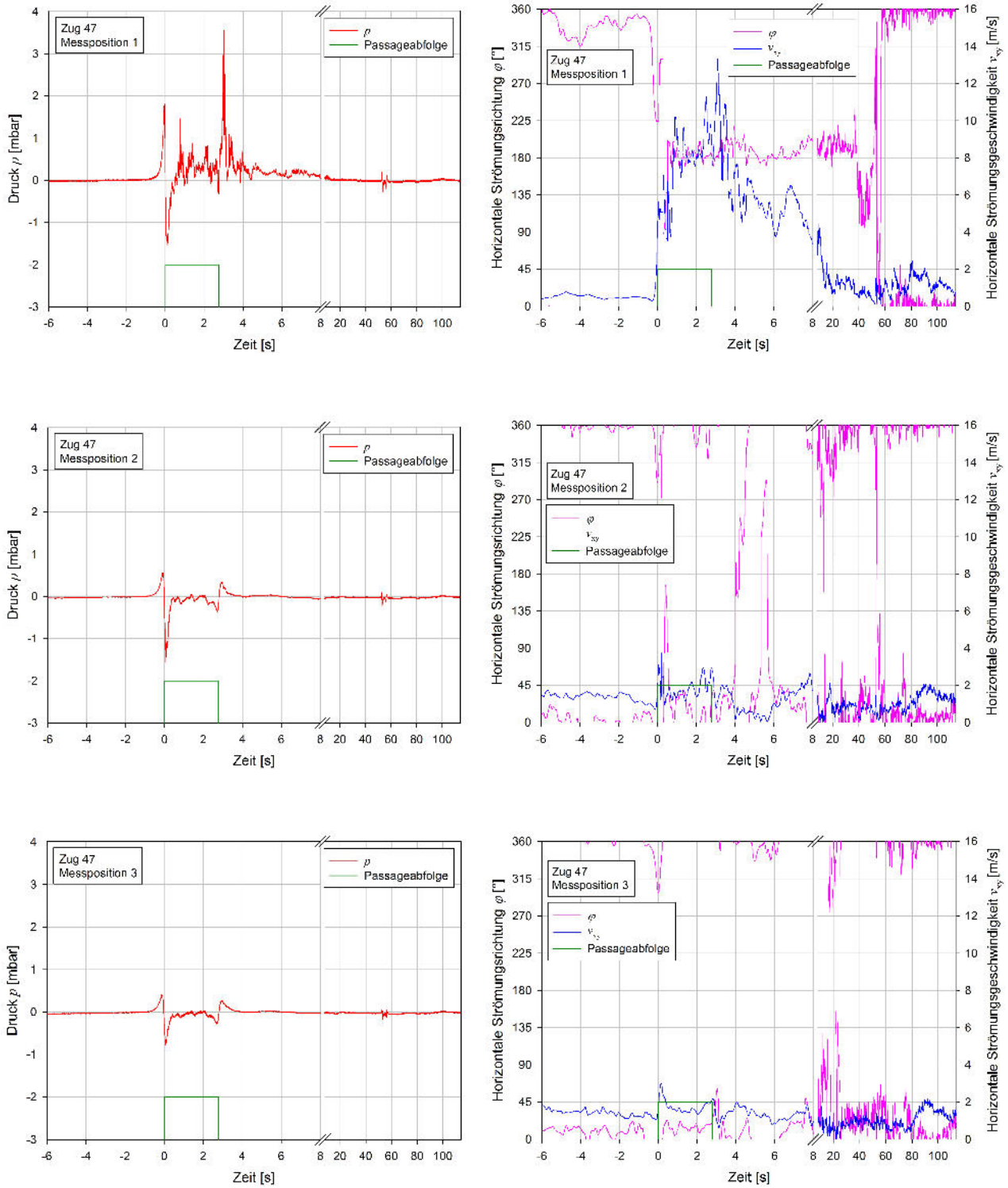


Abbildung B.200: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 47 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

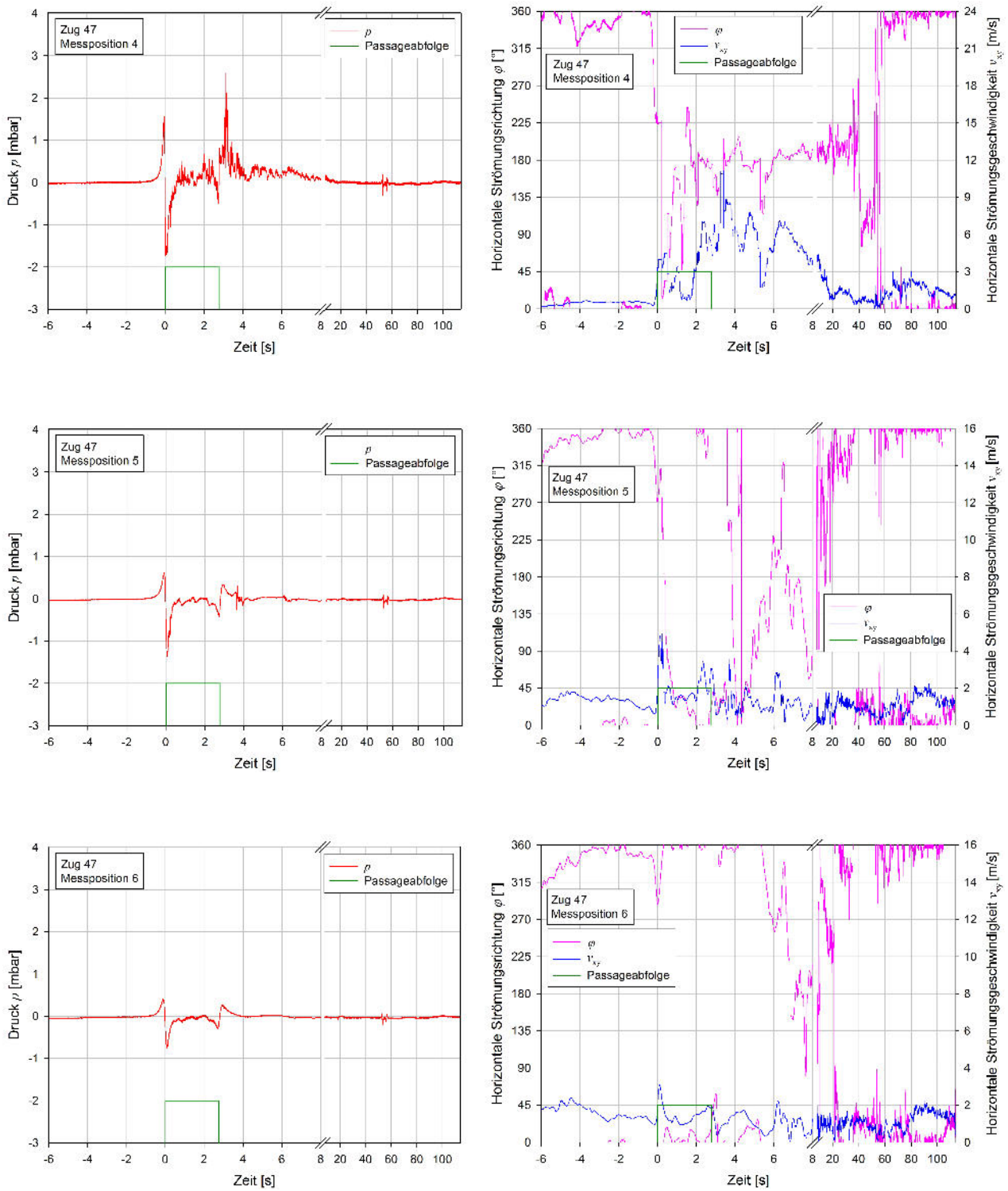


Abbildung B.201: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 47 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

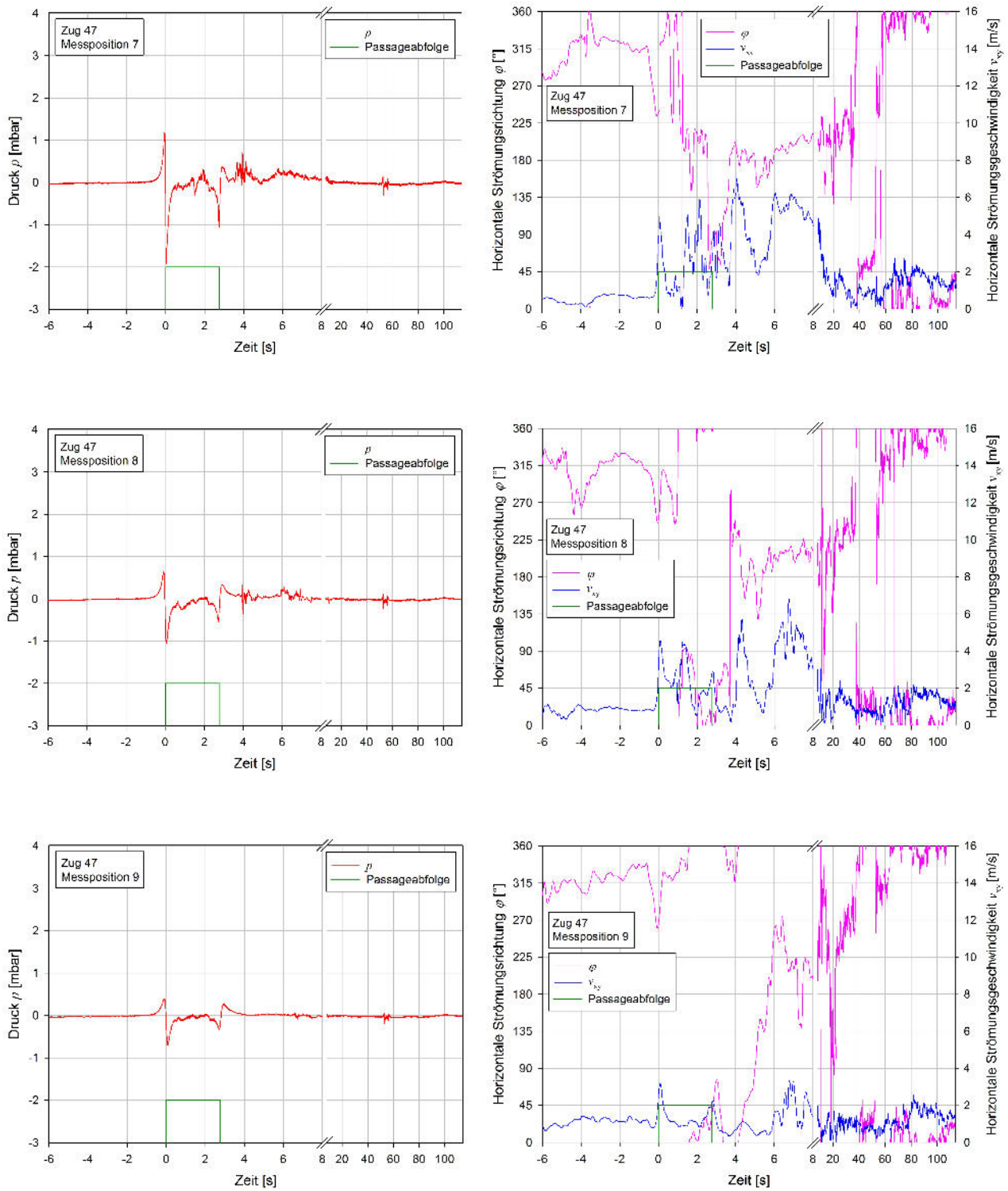


Abbildung B.202: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 47 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$.

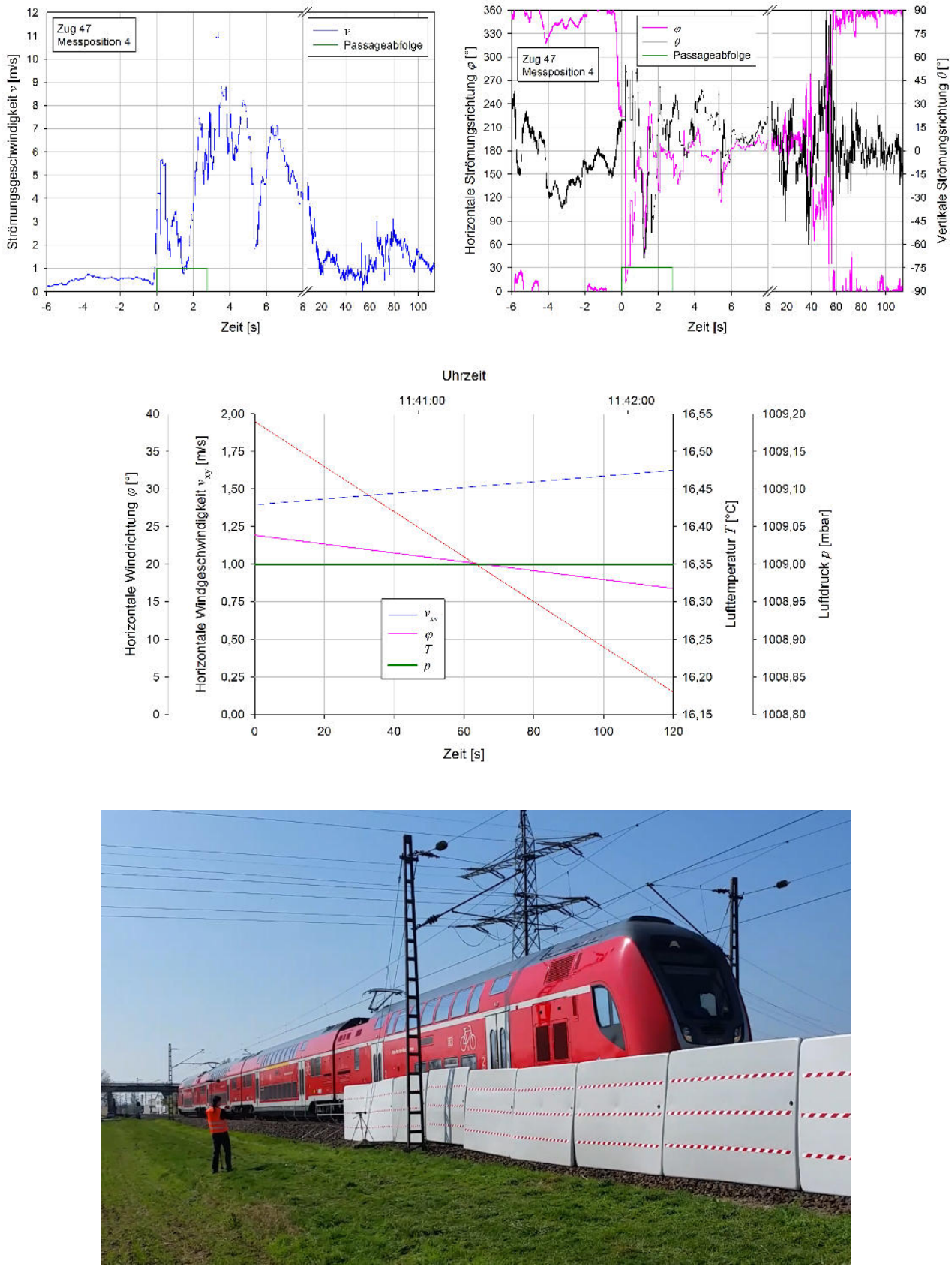


Abbildung B.203: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 47 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 47 ($\bar{v} = 133{,}9 \pm 1{,}2\,\mathrm{km/h}$).

Zug 48: S-Bahn (Baureihe 425)

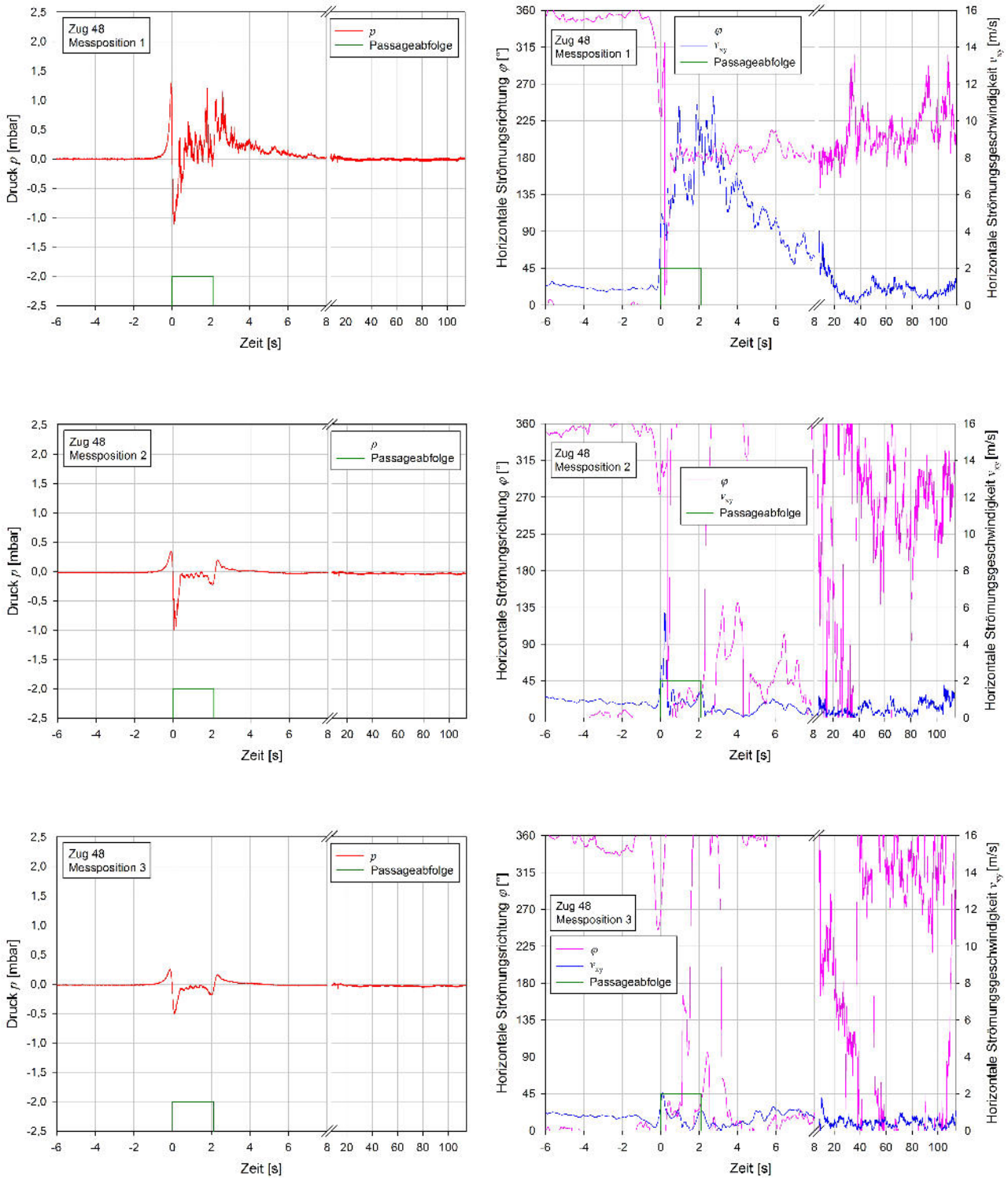


Abbildung B.204: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 48 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

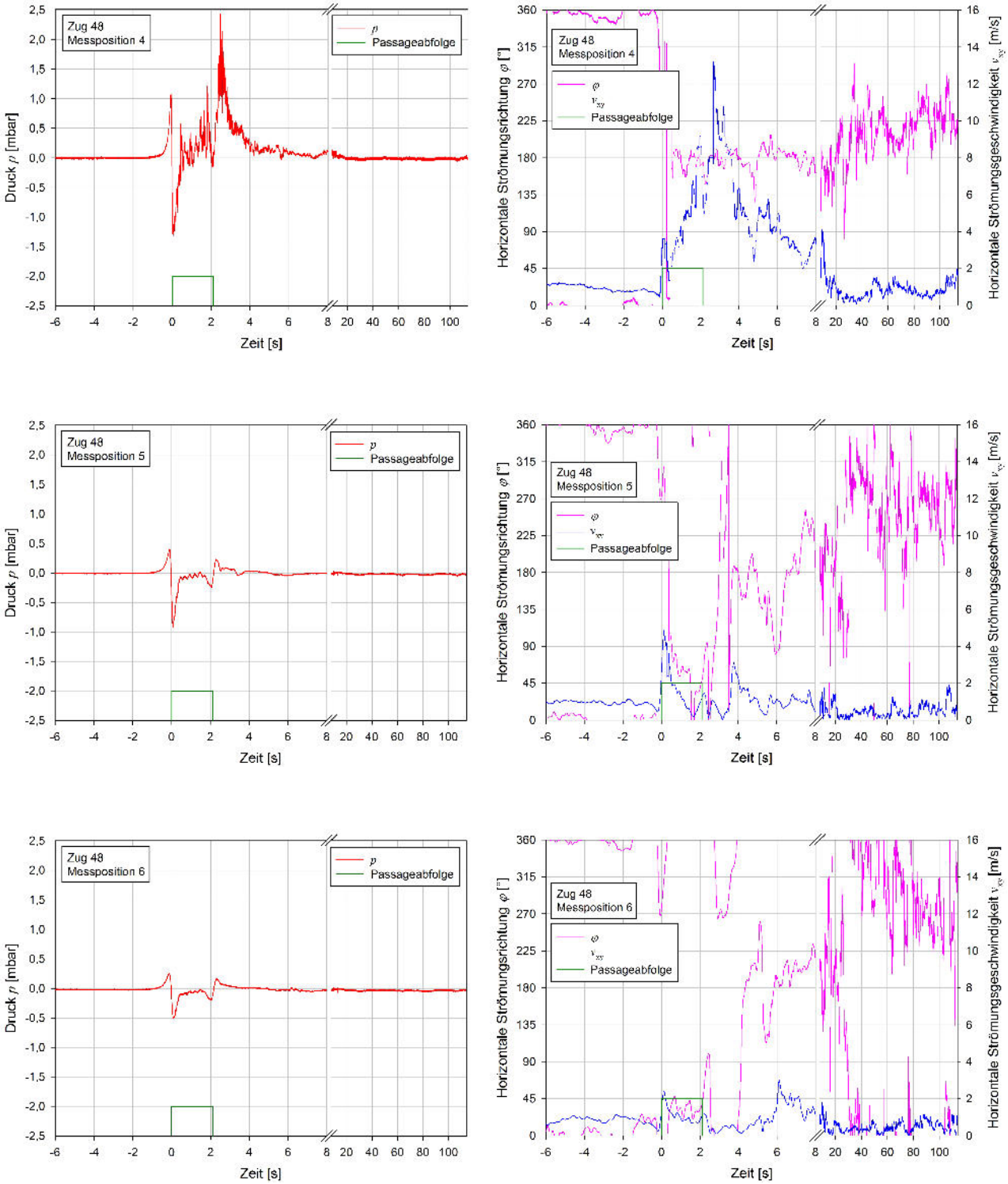


Abbildung B.205: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 48 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

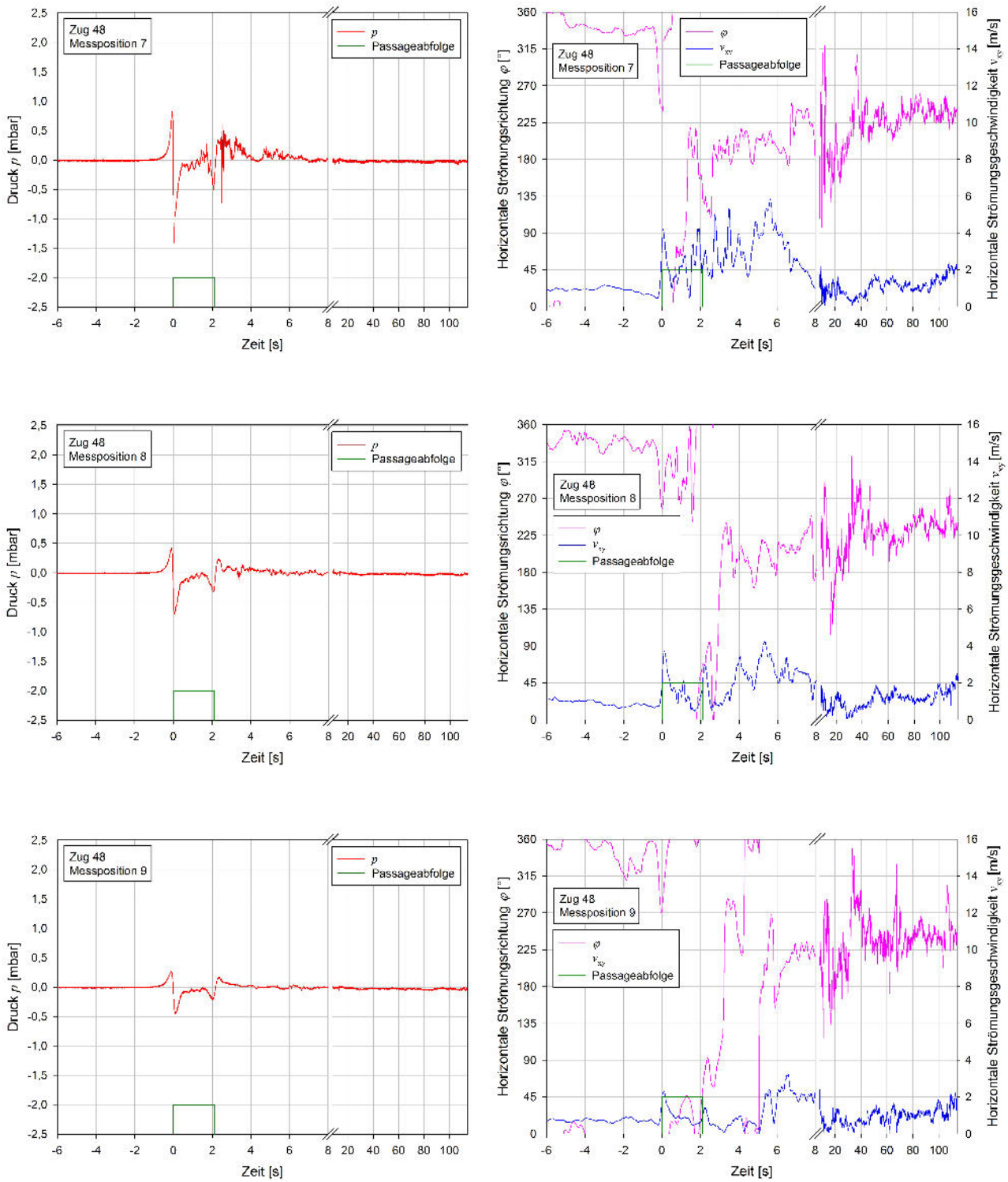


Abbildung B.206: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 48 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

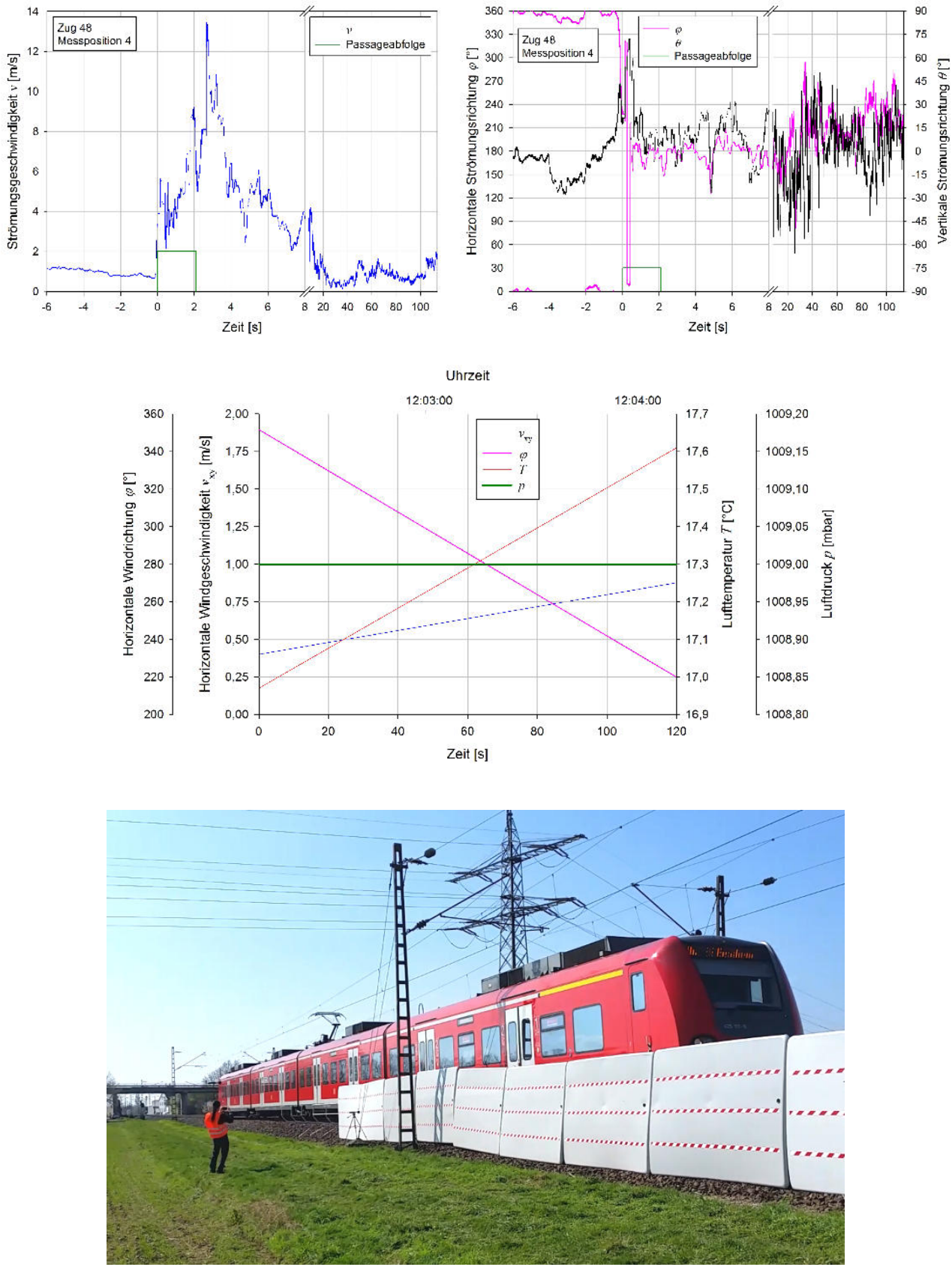


Abbildung B.207: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 48 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 48 ($\bar{v} = 114{,}4 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$).

Zug 49: Bauzug

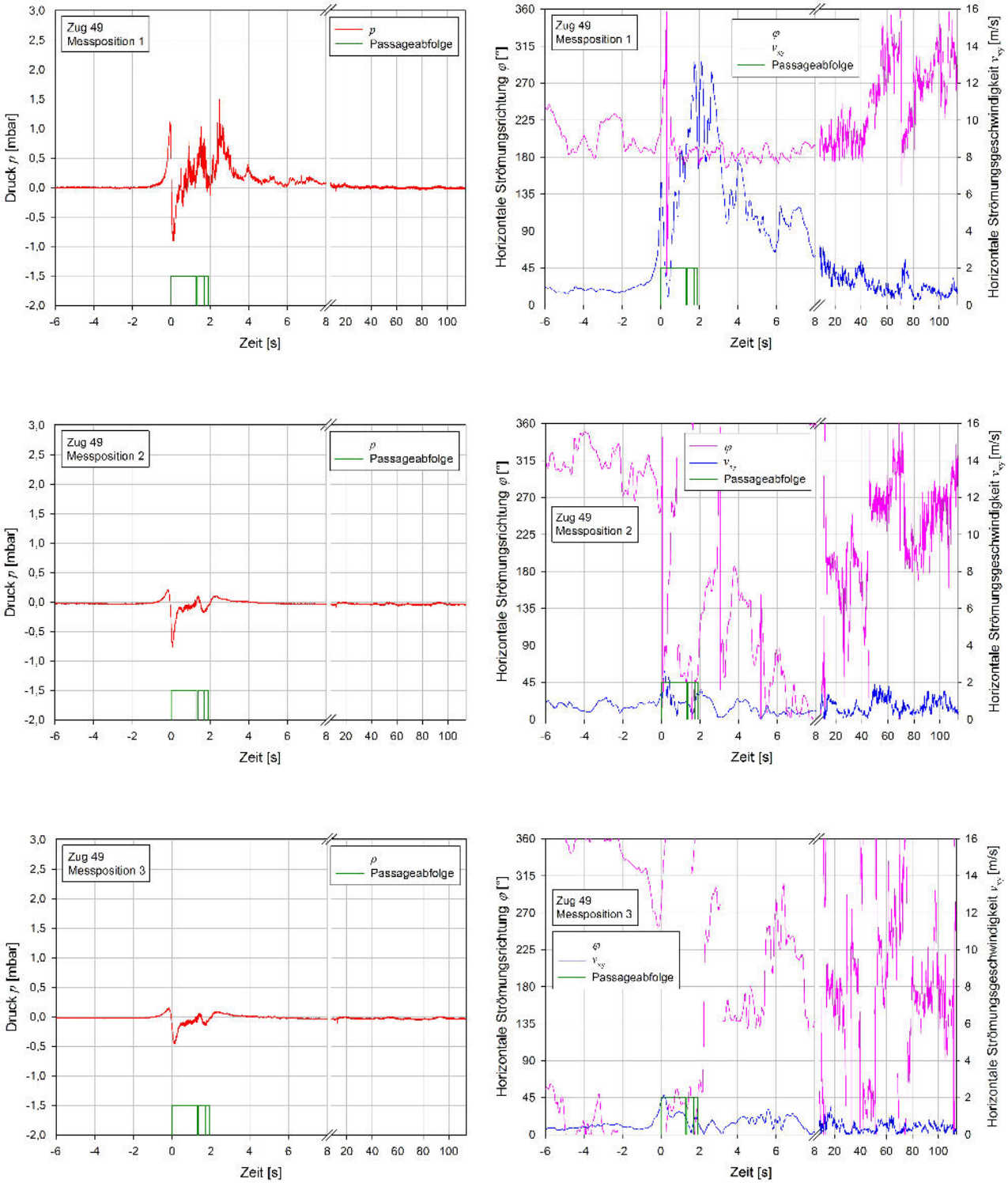


Abbildung B.208: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 49 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

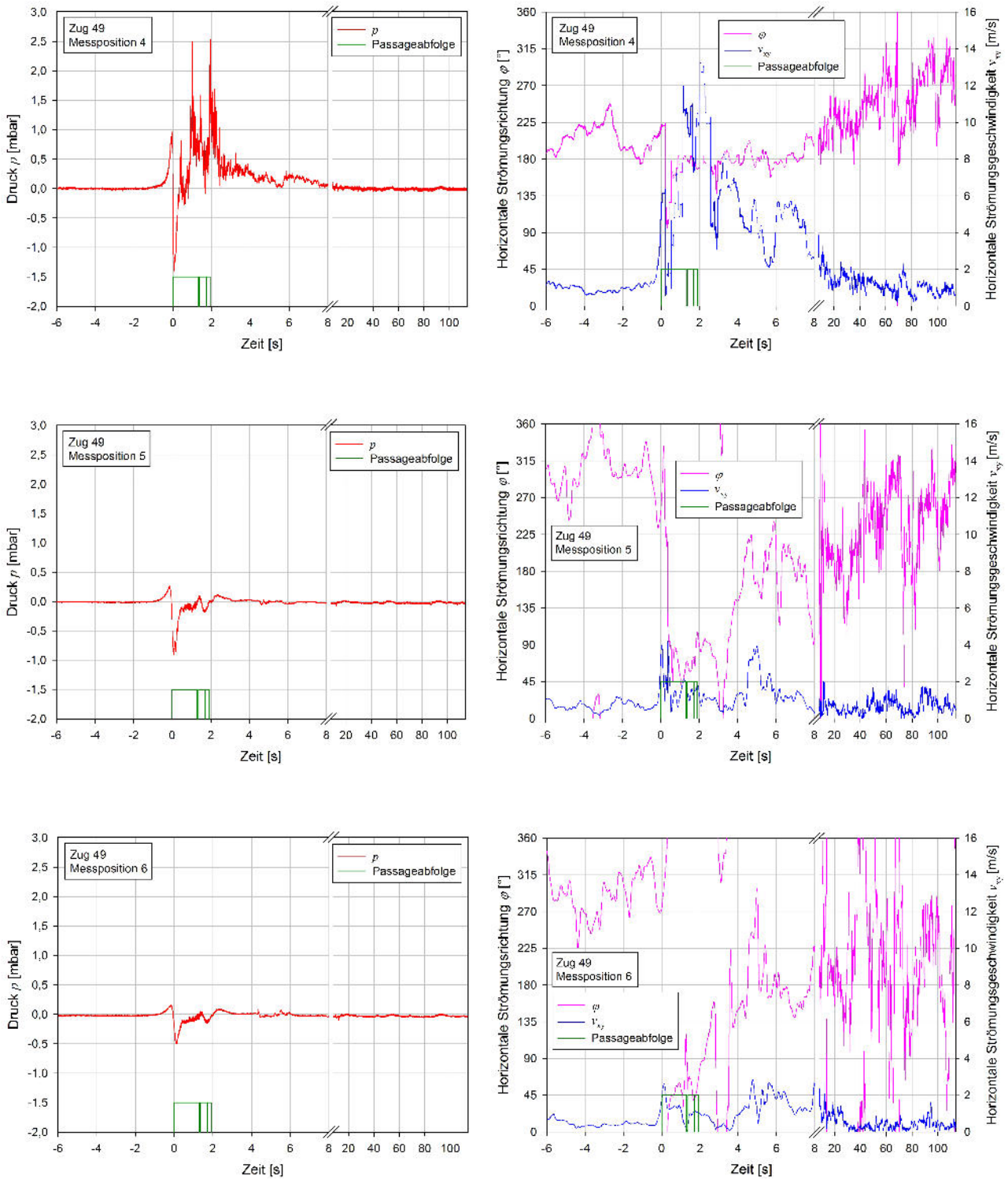


Abbildung B.209: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 49 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

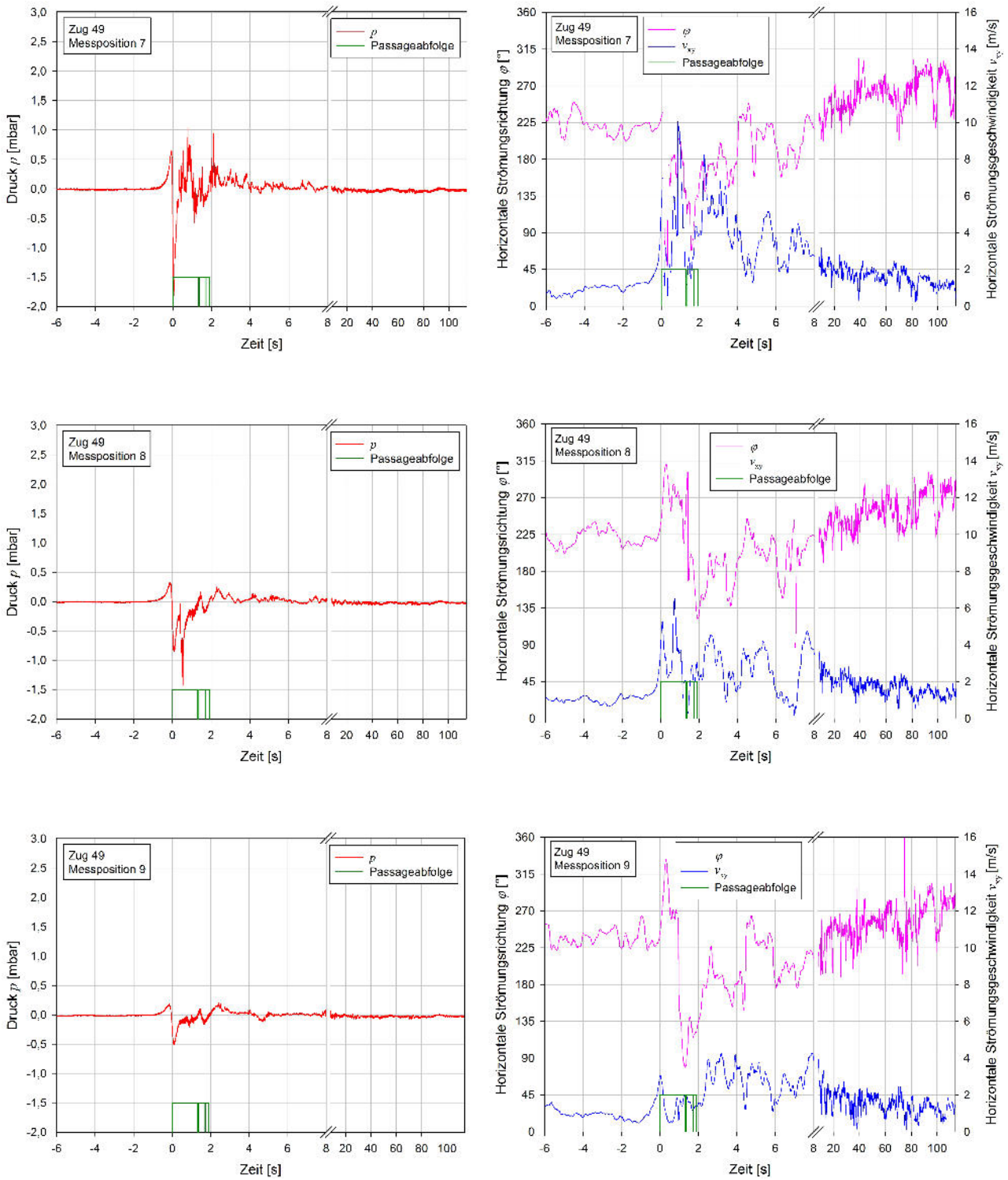


Abbildung B.210: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 49 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

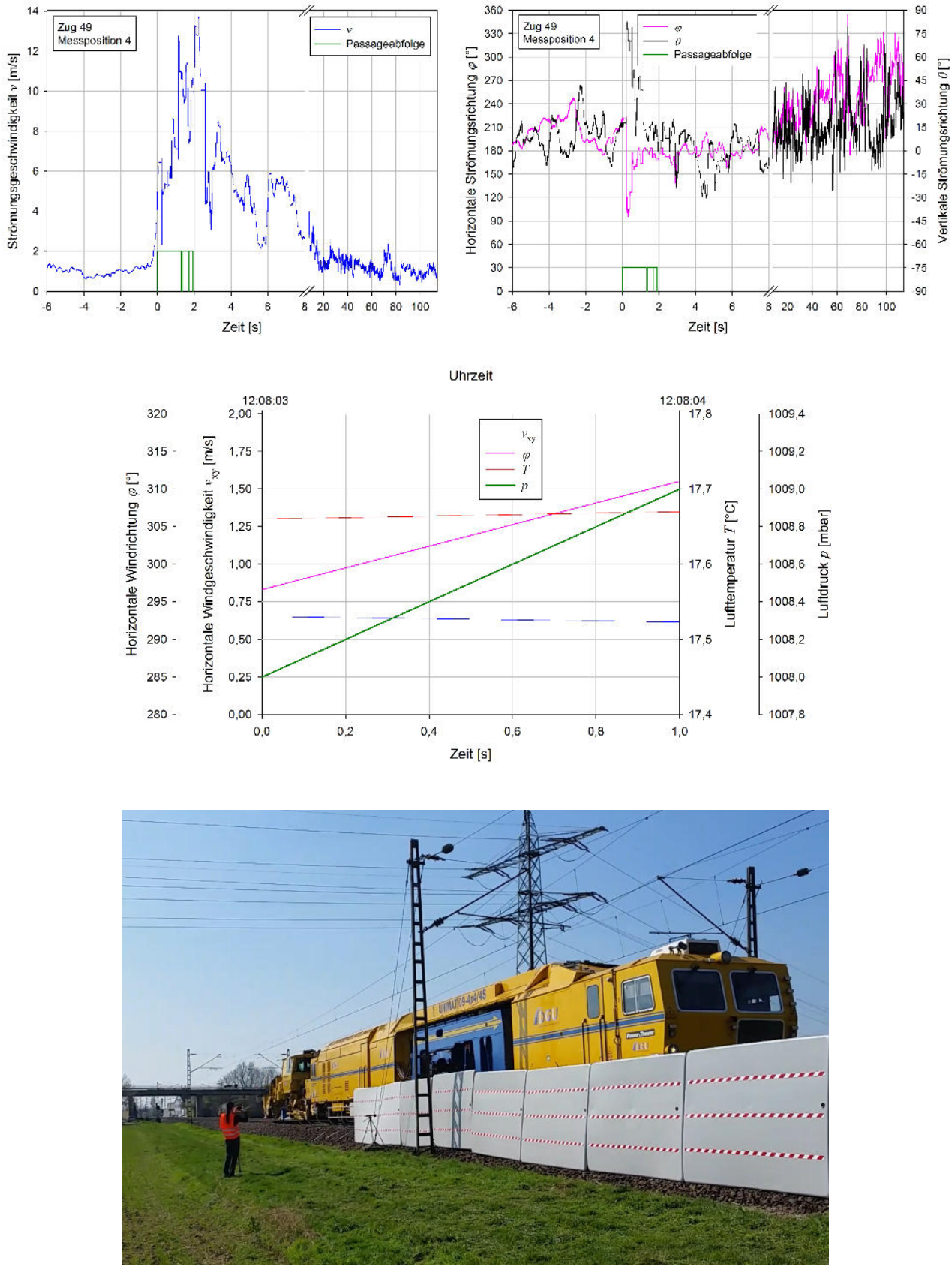


Abbildung B.211: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 49 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 49 ($\bar{v} = 90{,}2 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$).

Zug 50: Doppelstock K2 (4 Wagen)

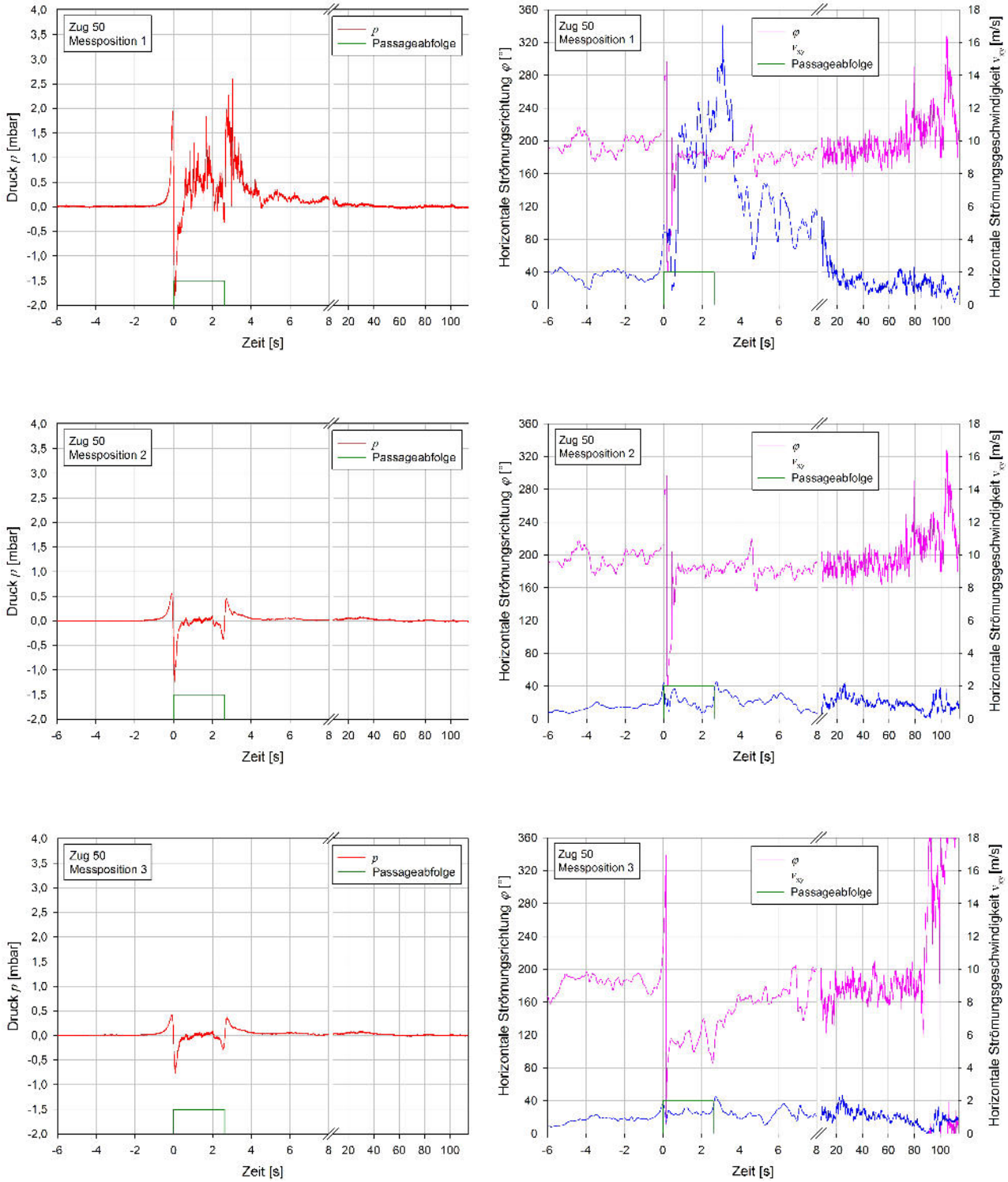


Abbildung B.212: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 50 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

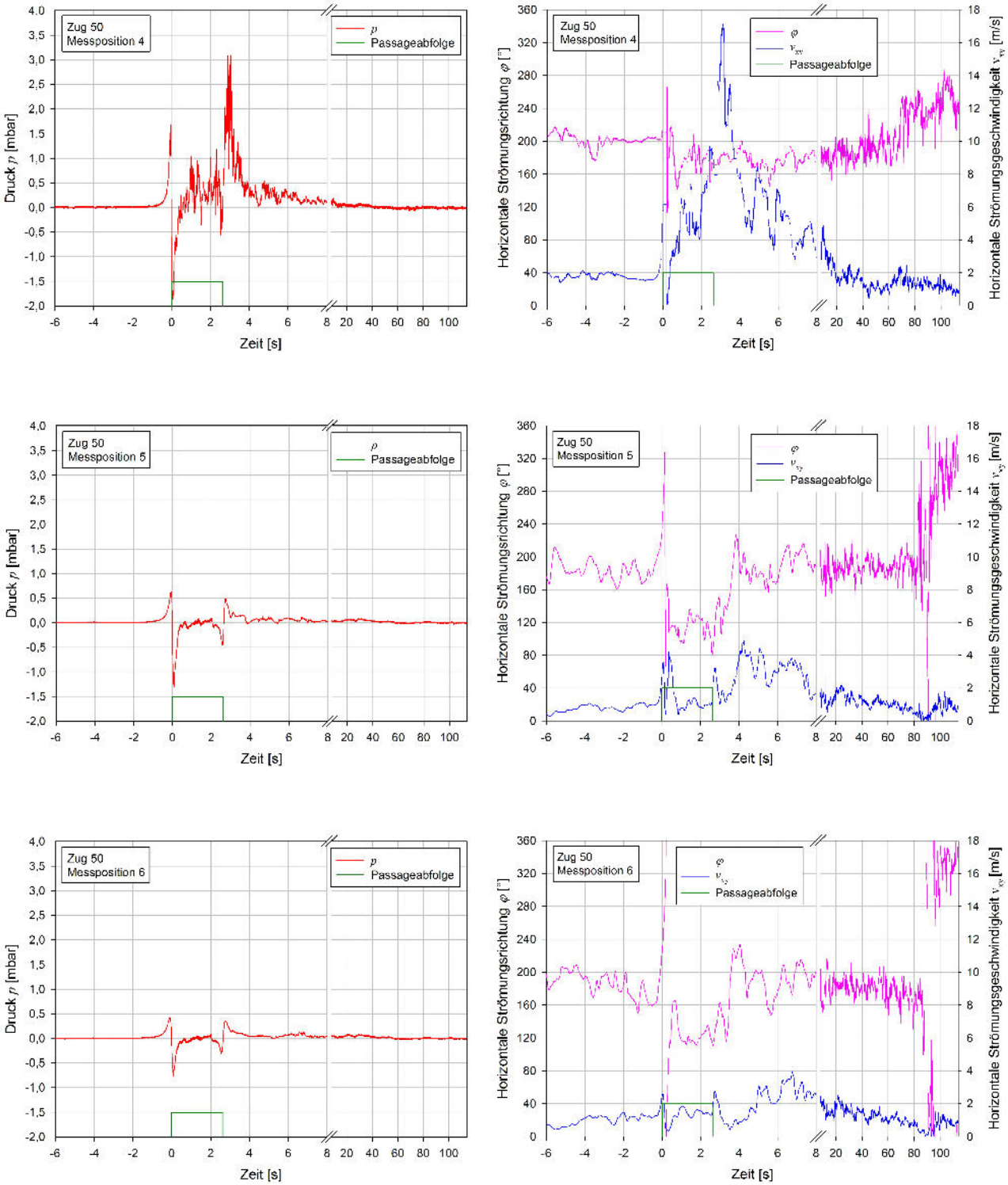


Abbildung B.213: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 50 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

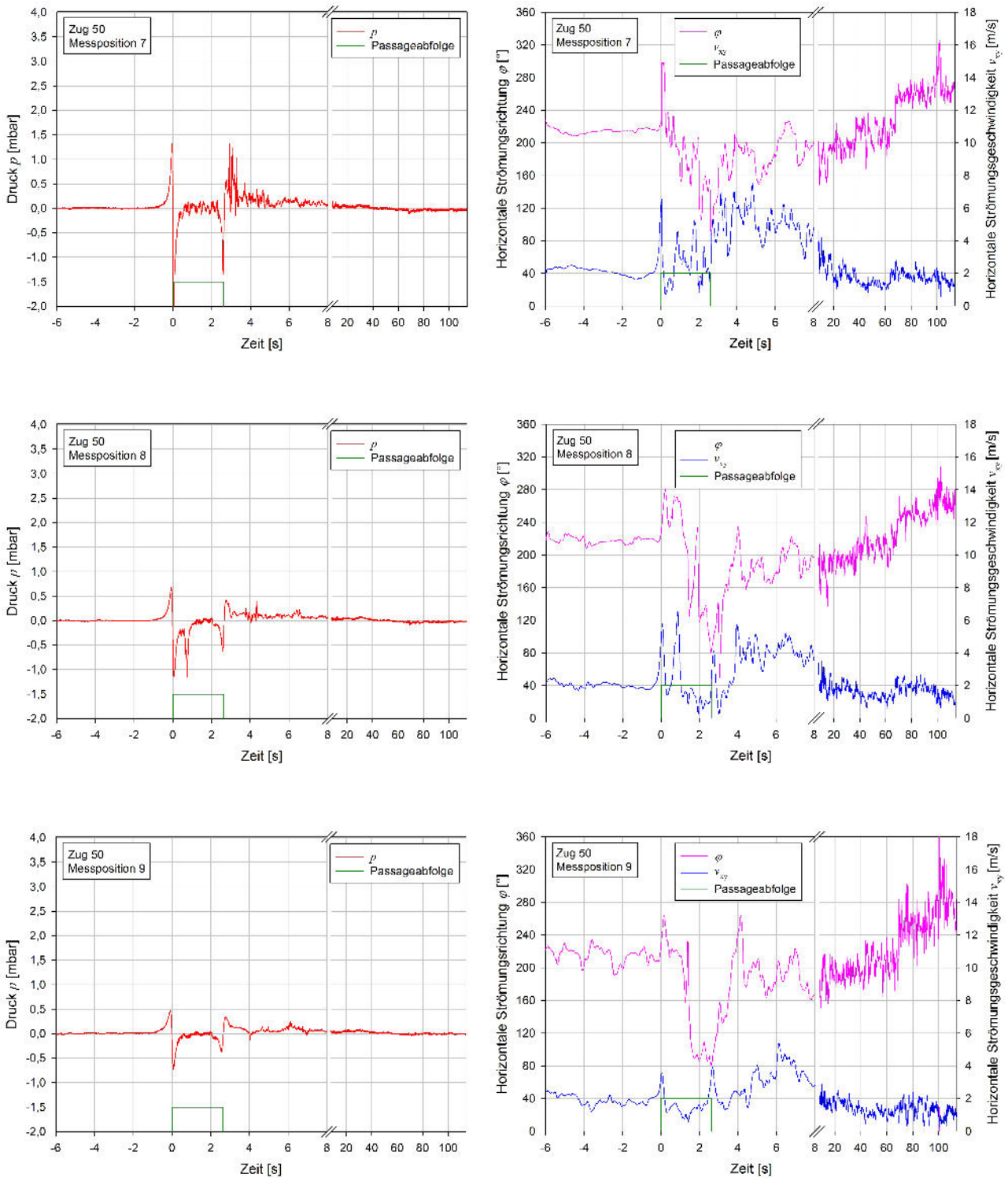


Abbildung B.214: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 50 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

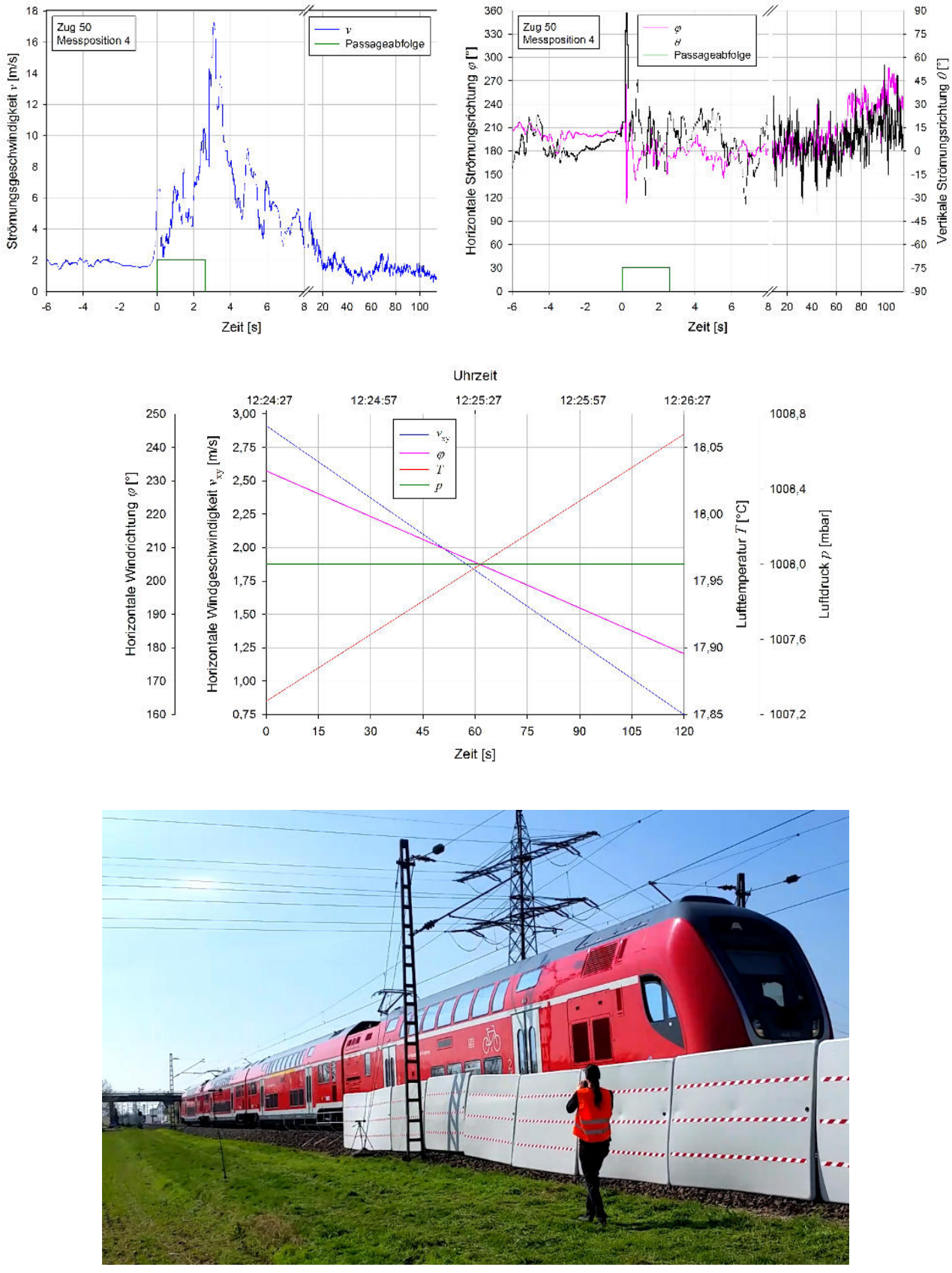


Abbildung B.215: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 50 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 50 ($\bar{v} = 139{,}9 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 51: Doppelstock K2 + K2 (4 Wagen + 4 Wagen)

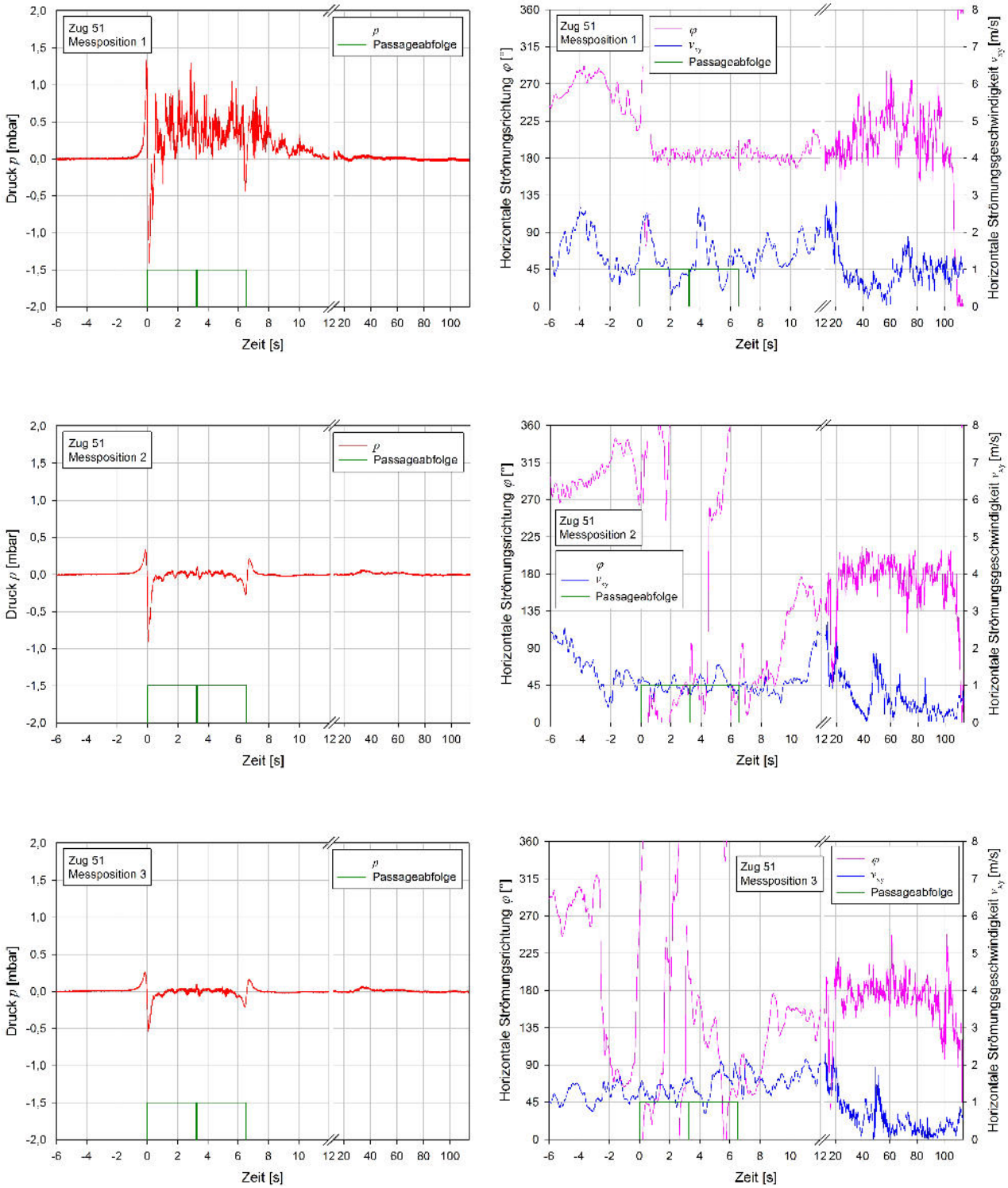


Abbildung B.216: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 51 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

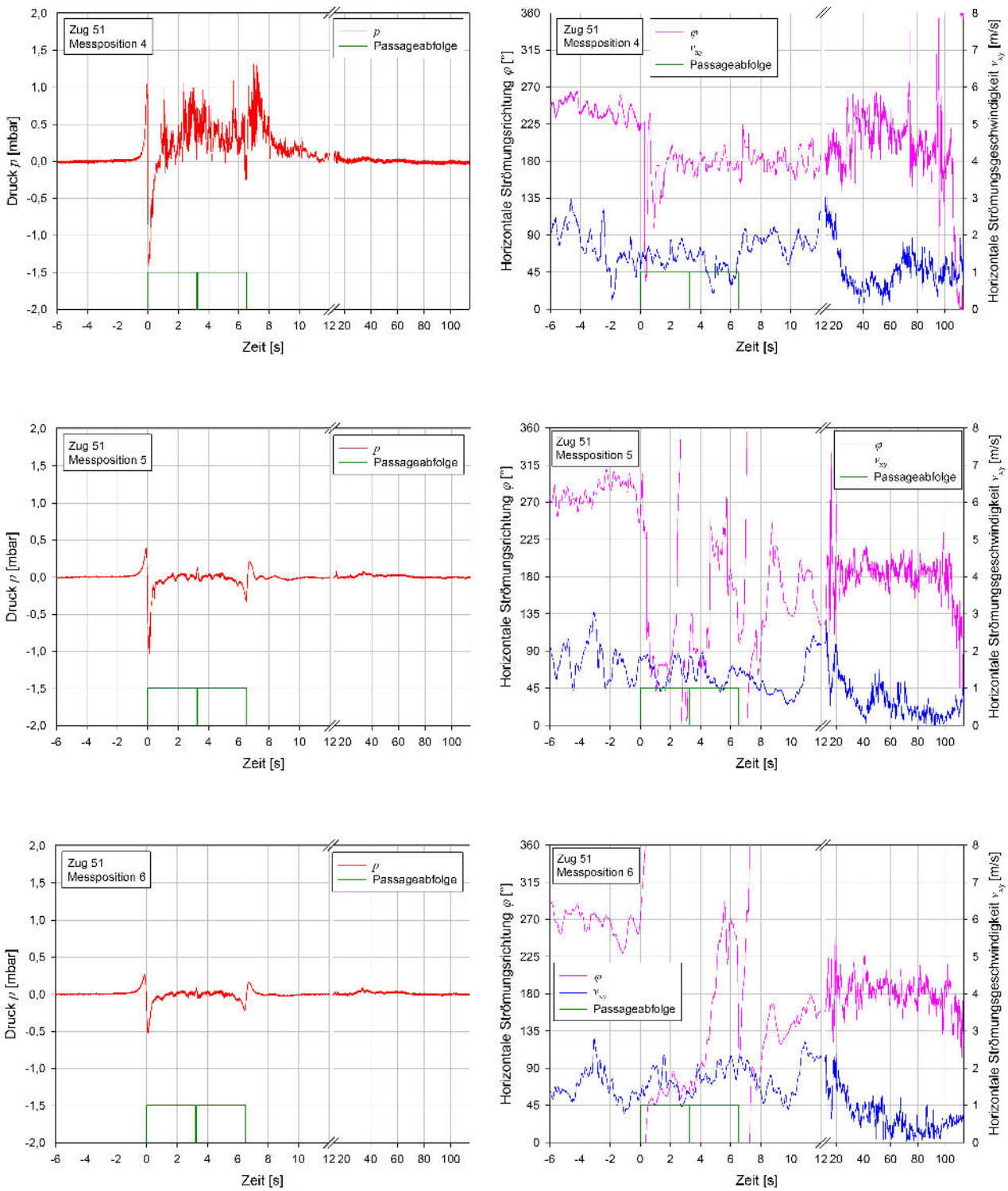


Abbildung B.217: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 51 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

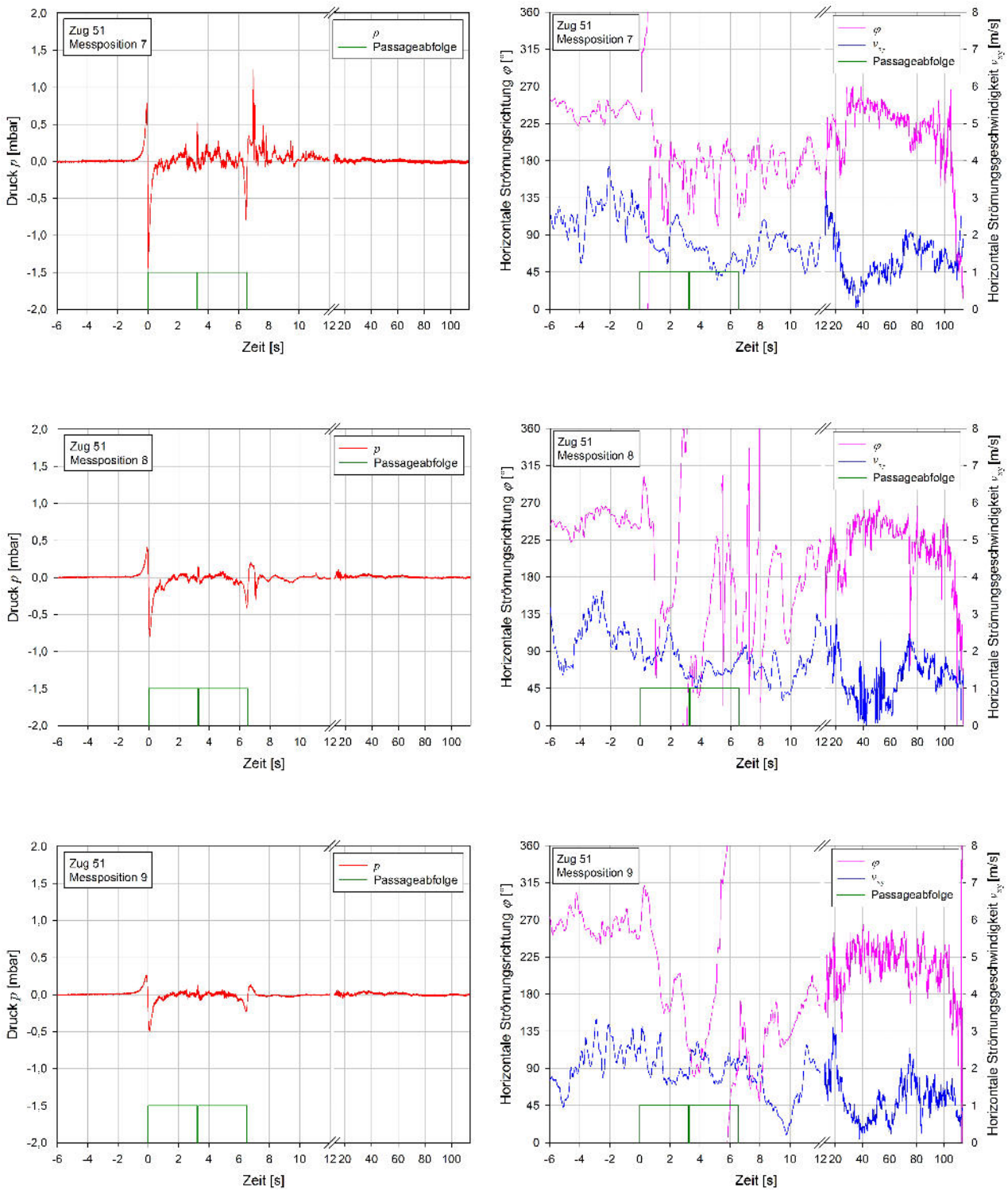
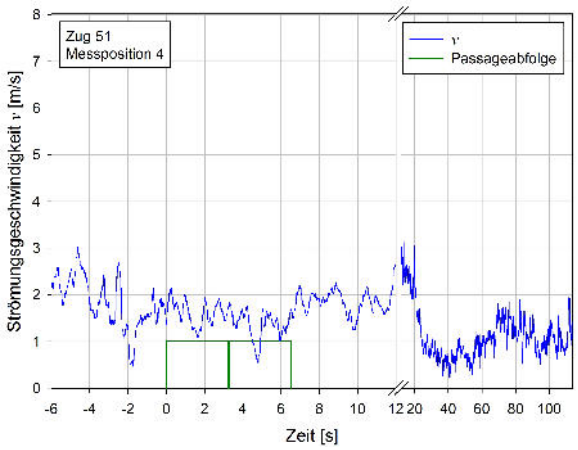
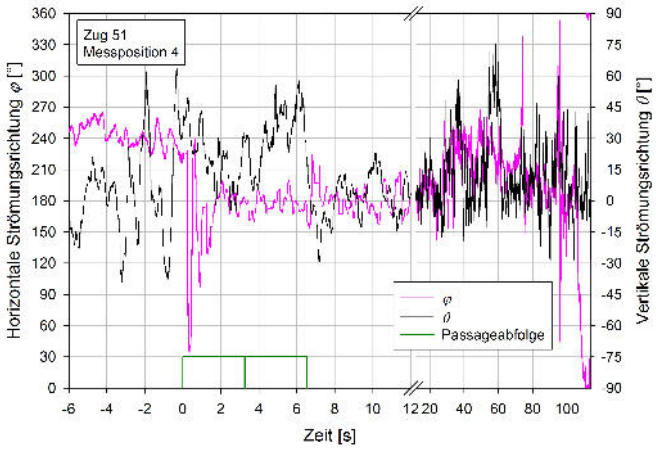


Abbildung B.218: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 51 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.





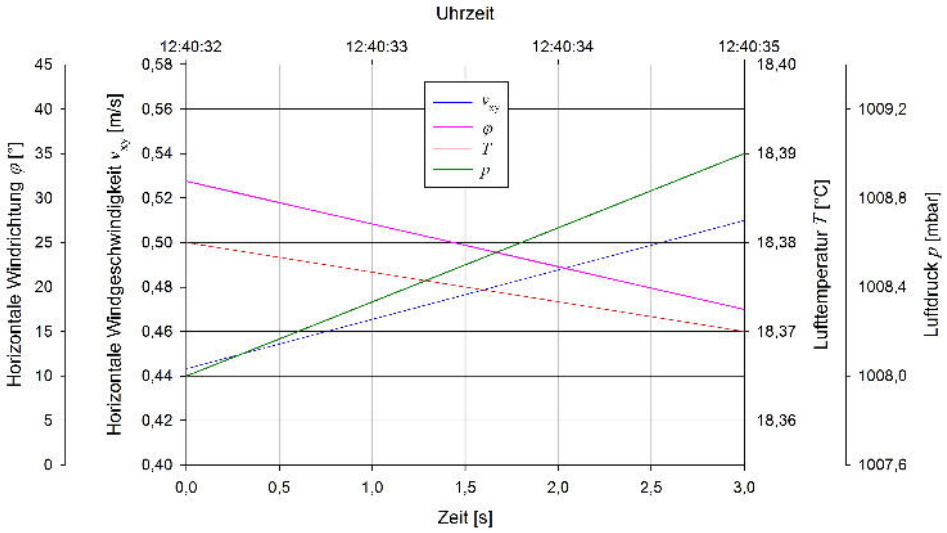




Abbildung B.219: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 51 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 51 ($\bar{v} = 115{,}4 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$).

Zug 52: S-Bahn (Baureihe 425)

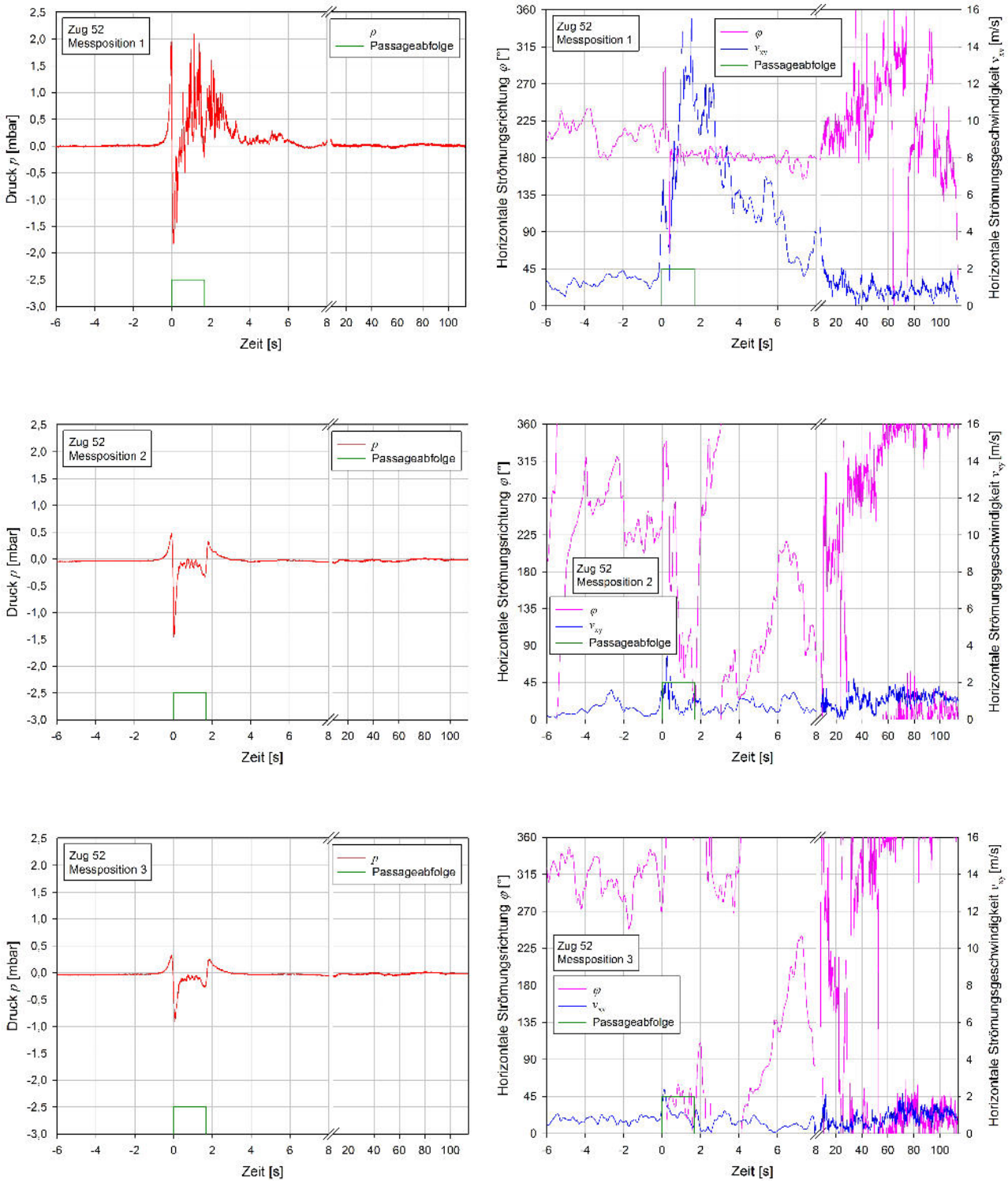


Abbildung B.220: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 52 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

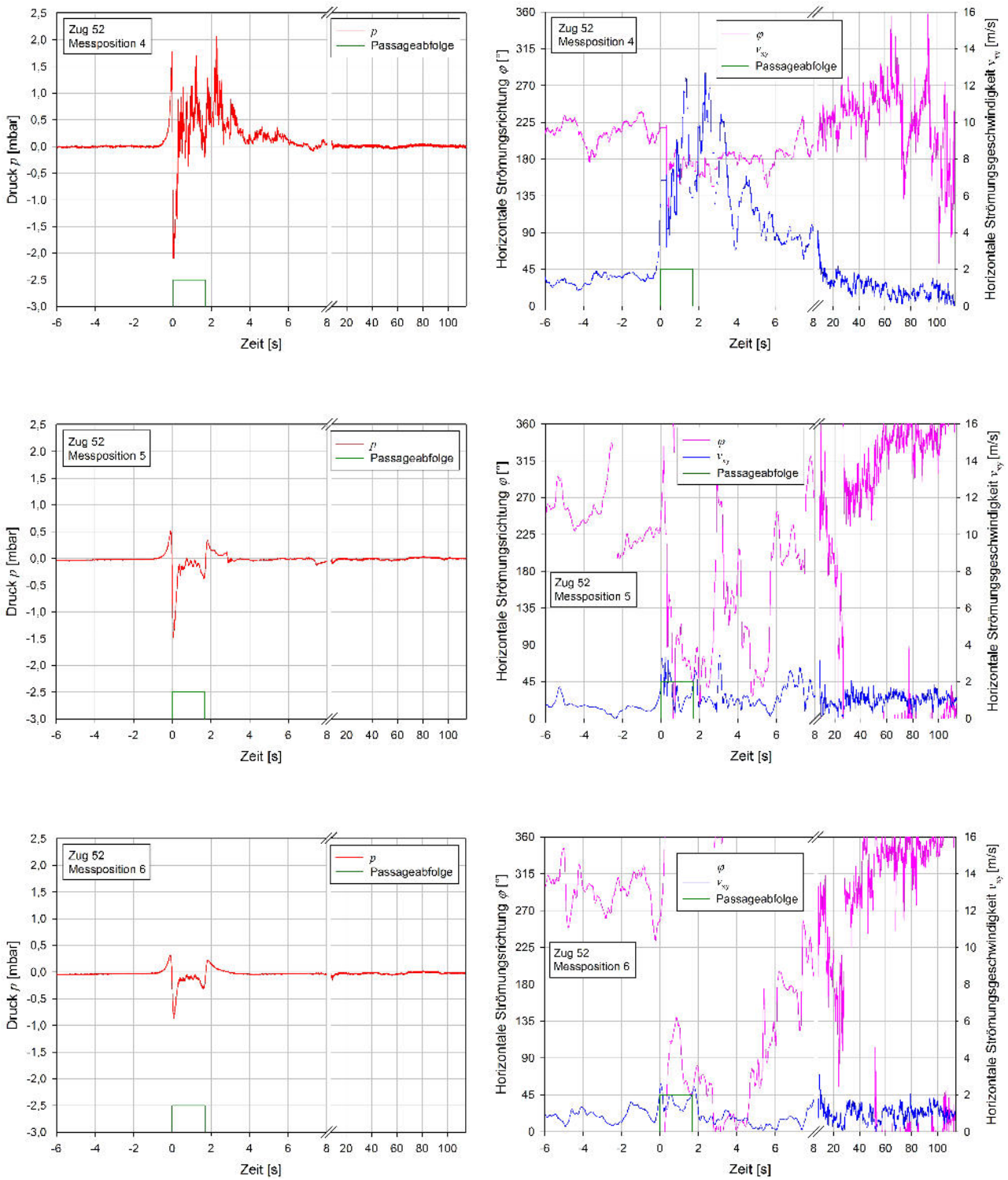


Abbildung B.221: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 52 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

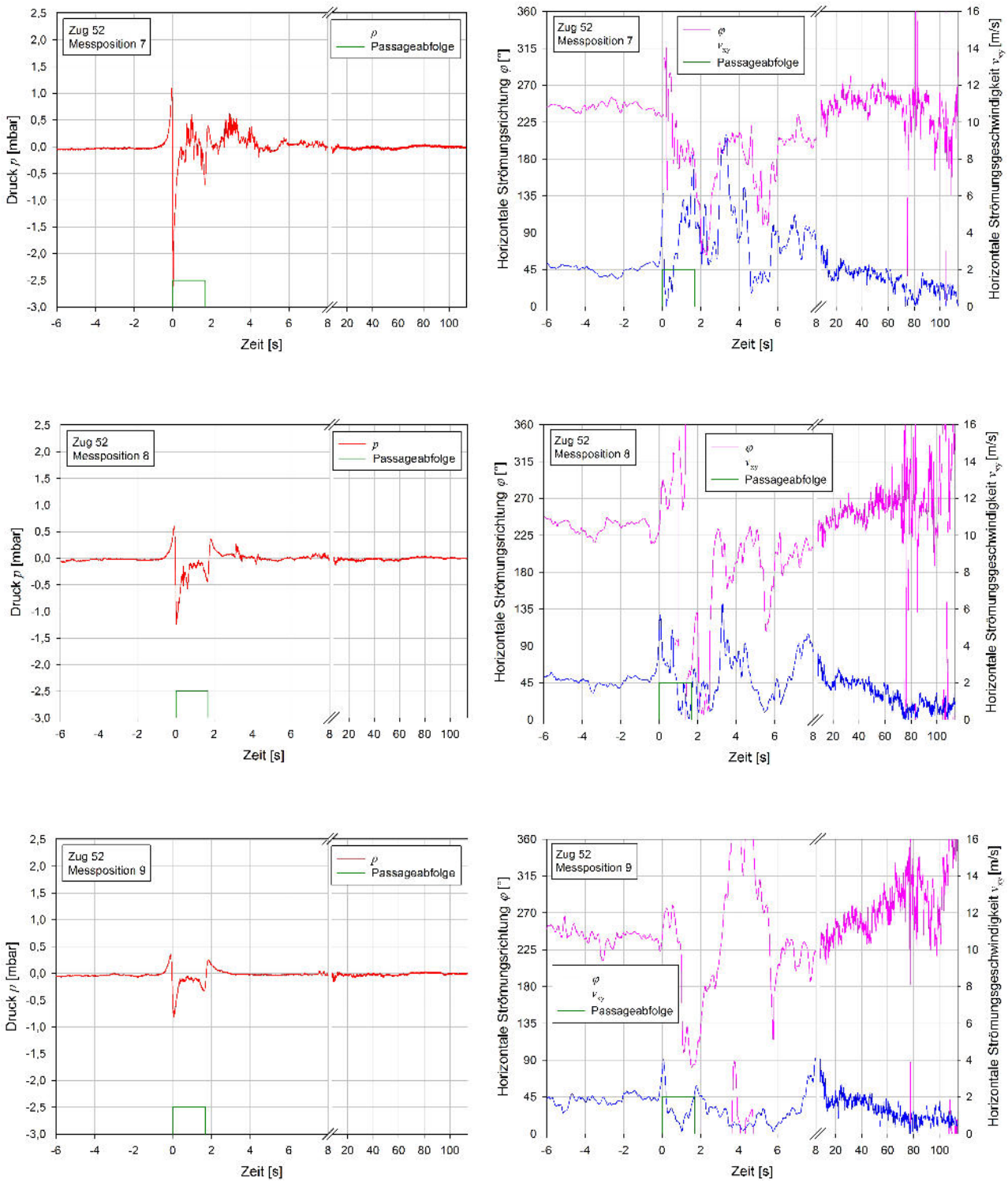


Abbildung B.222: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 52 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$.

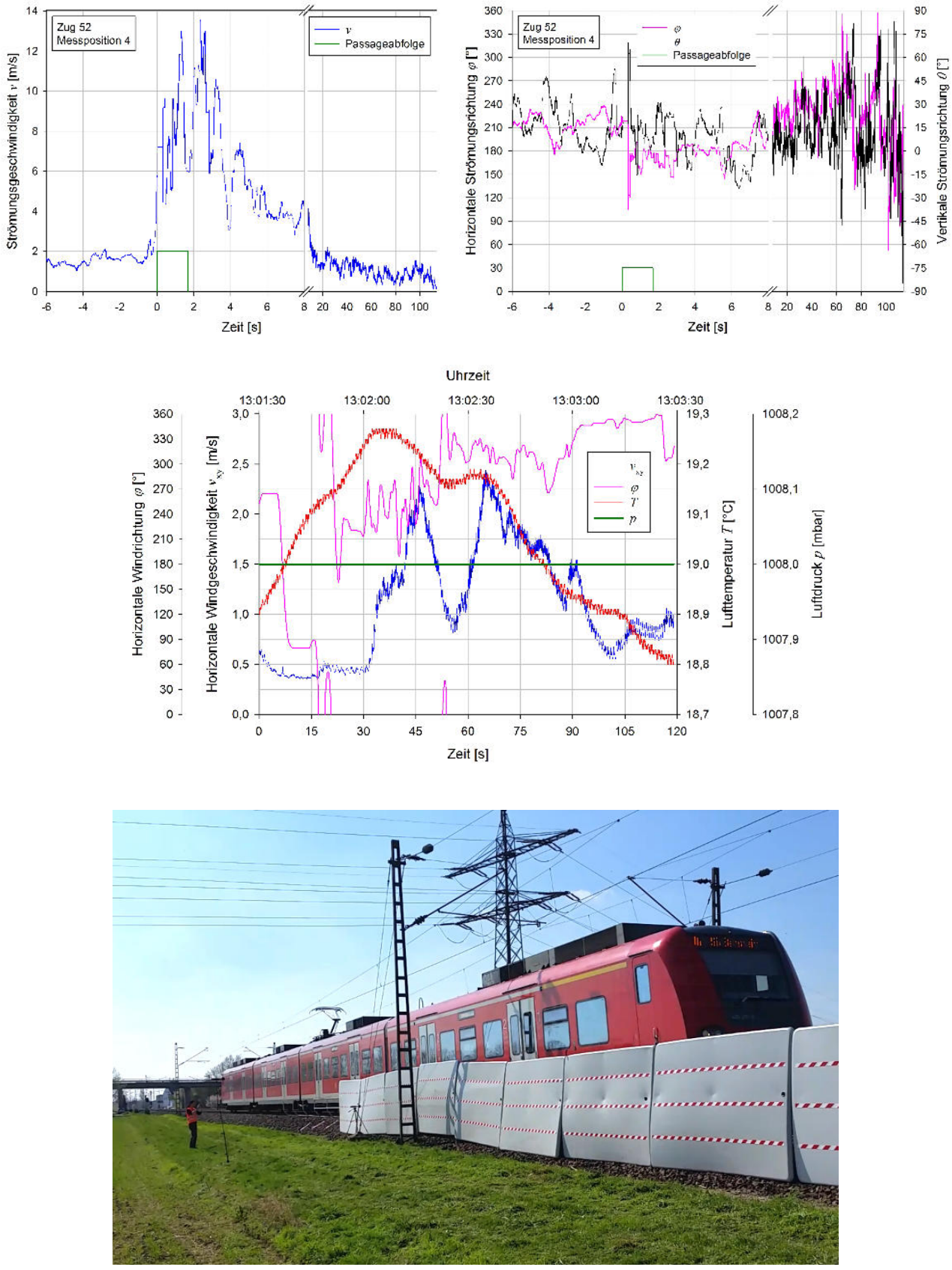


Abbildung B.223: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 52 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 52 ($\bar{v} = 143{,}2 \pm 0{,}5\,\mathrm{km/h}$).

Zug 53: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

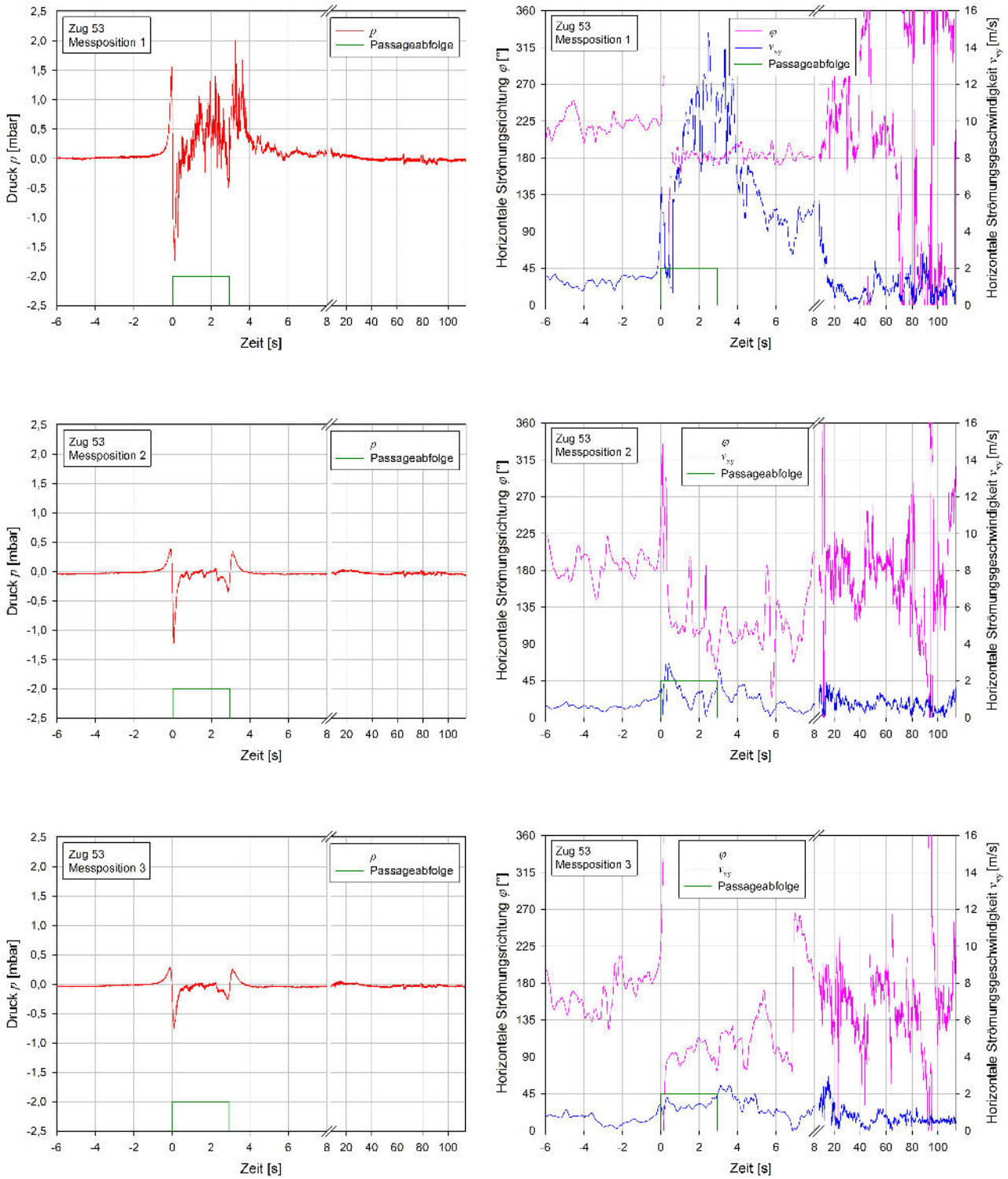


Abbildung B.224: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 53 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

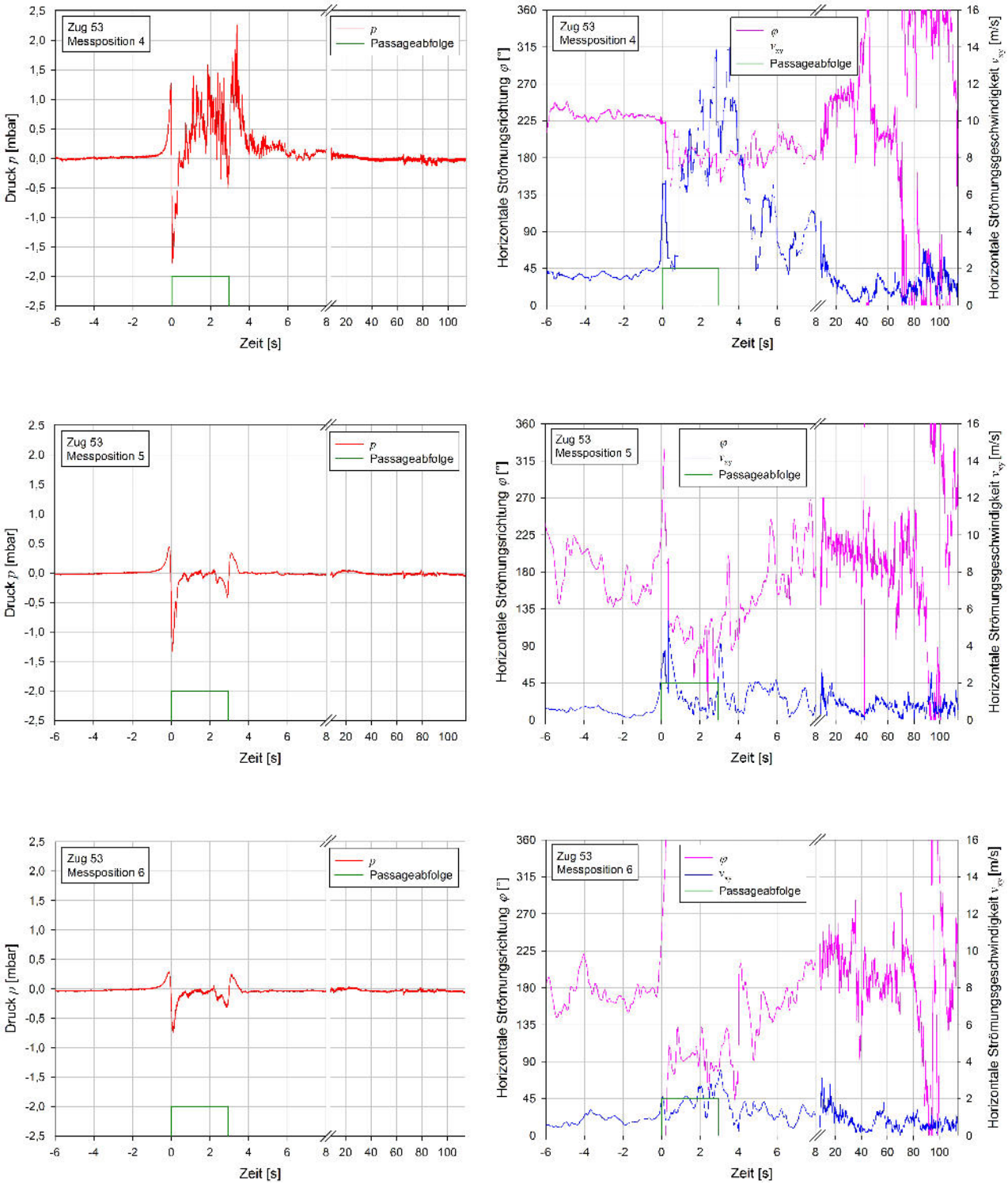


Abbildung B.225: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 53 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

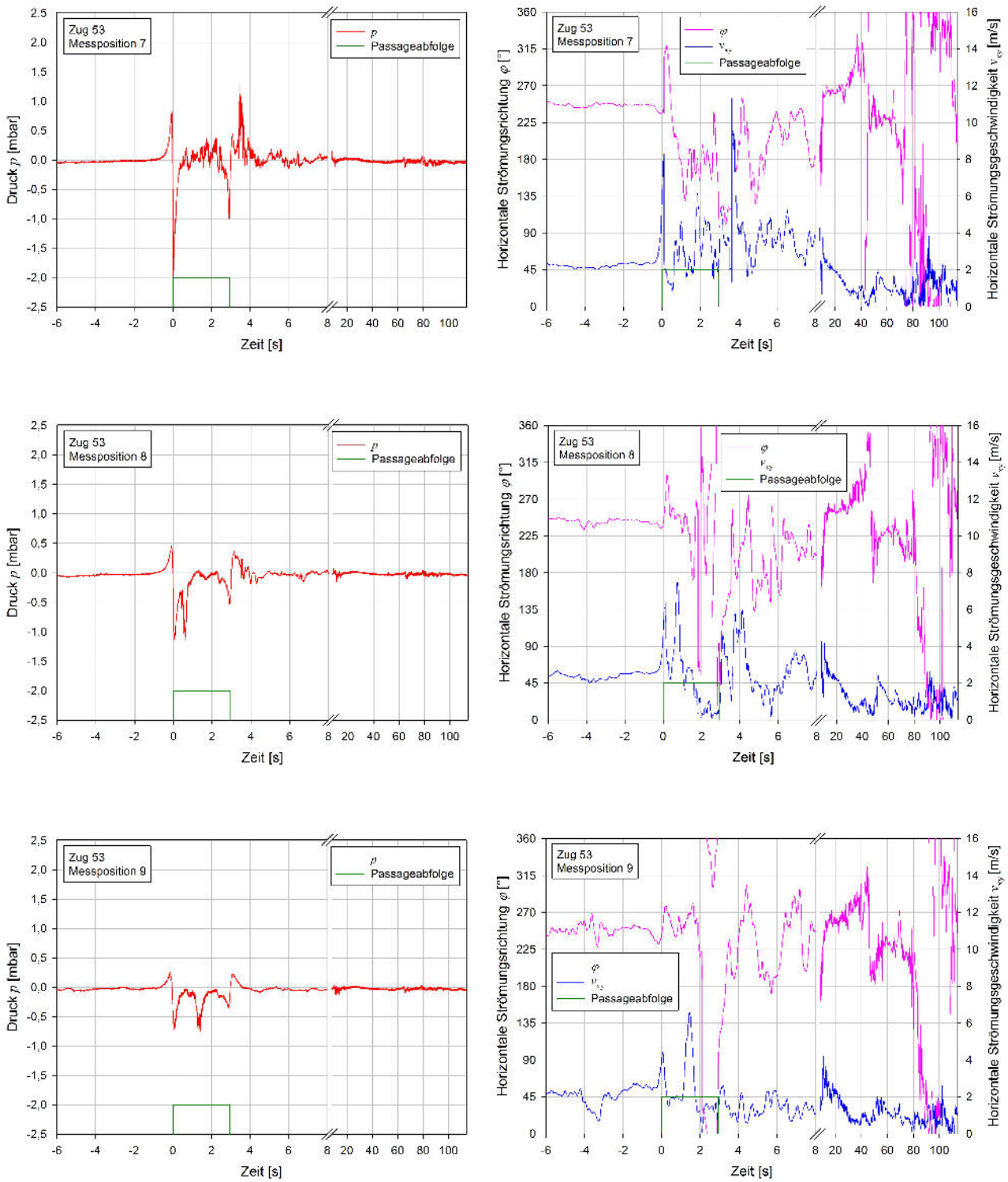


Abbildung B.226: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 53 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

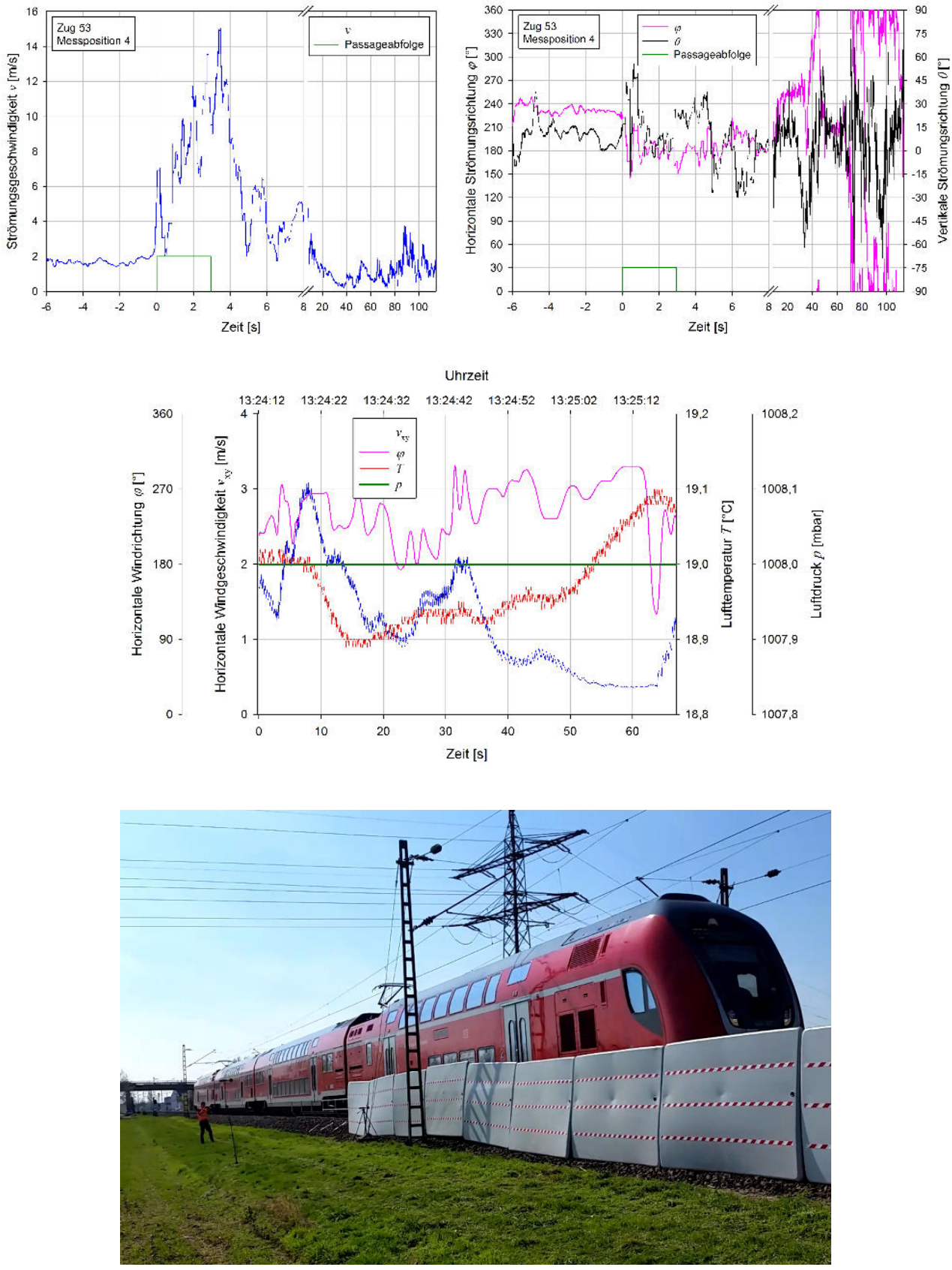


Abbildung B.227: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 53 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 53 ($\bar{v} = 126{,}7 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$).

Zug 54: Güterzug

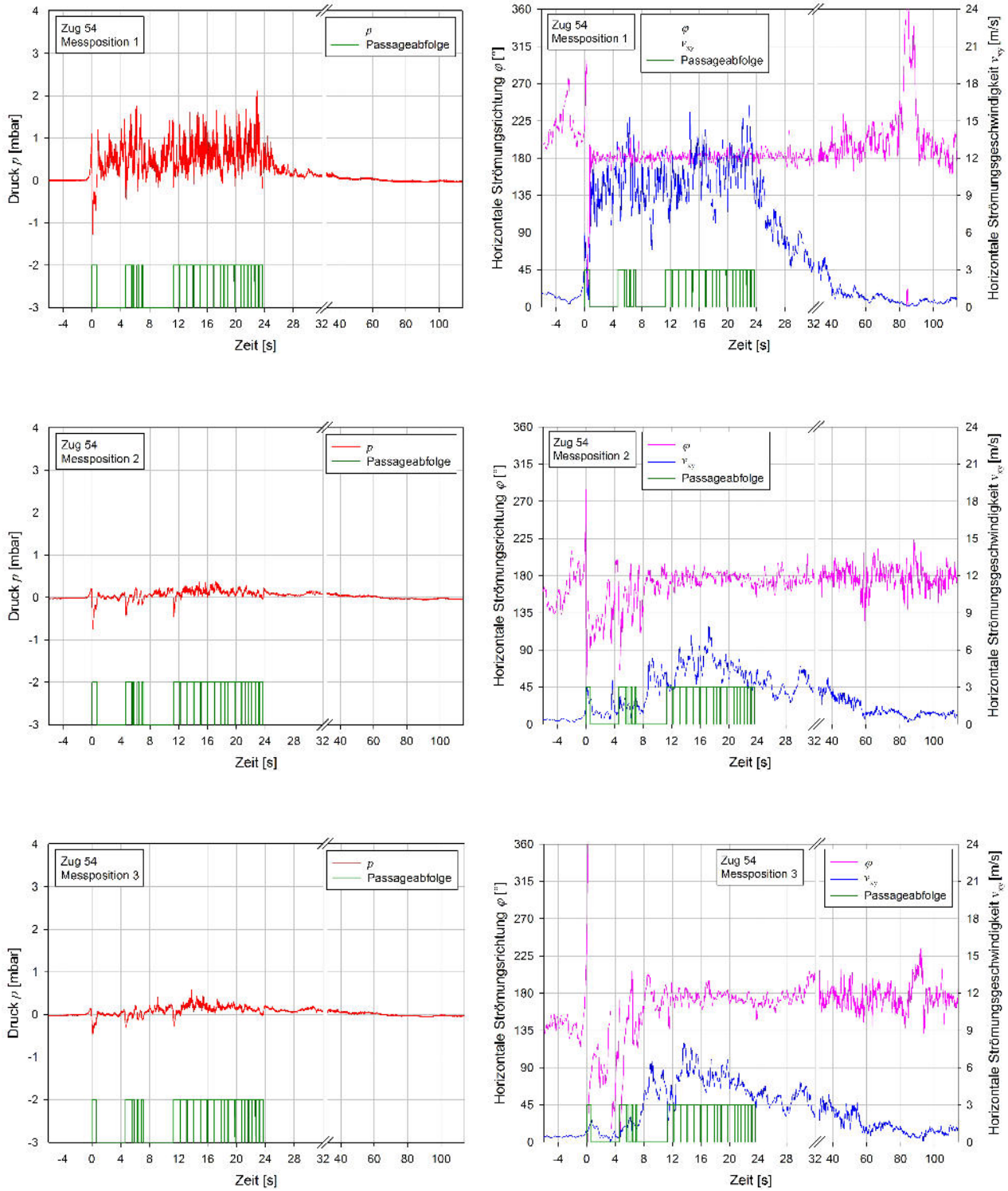


Abbildung B.228: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 54 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

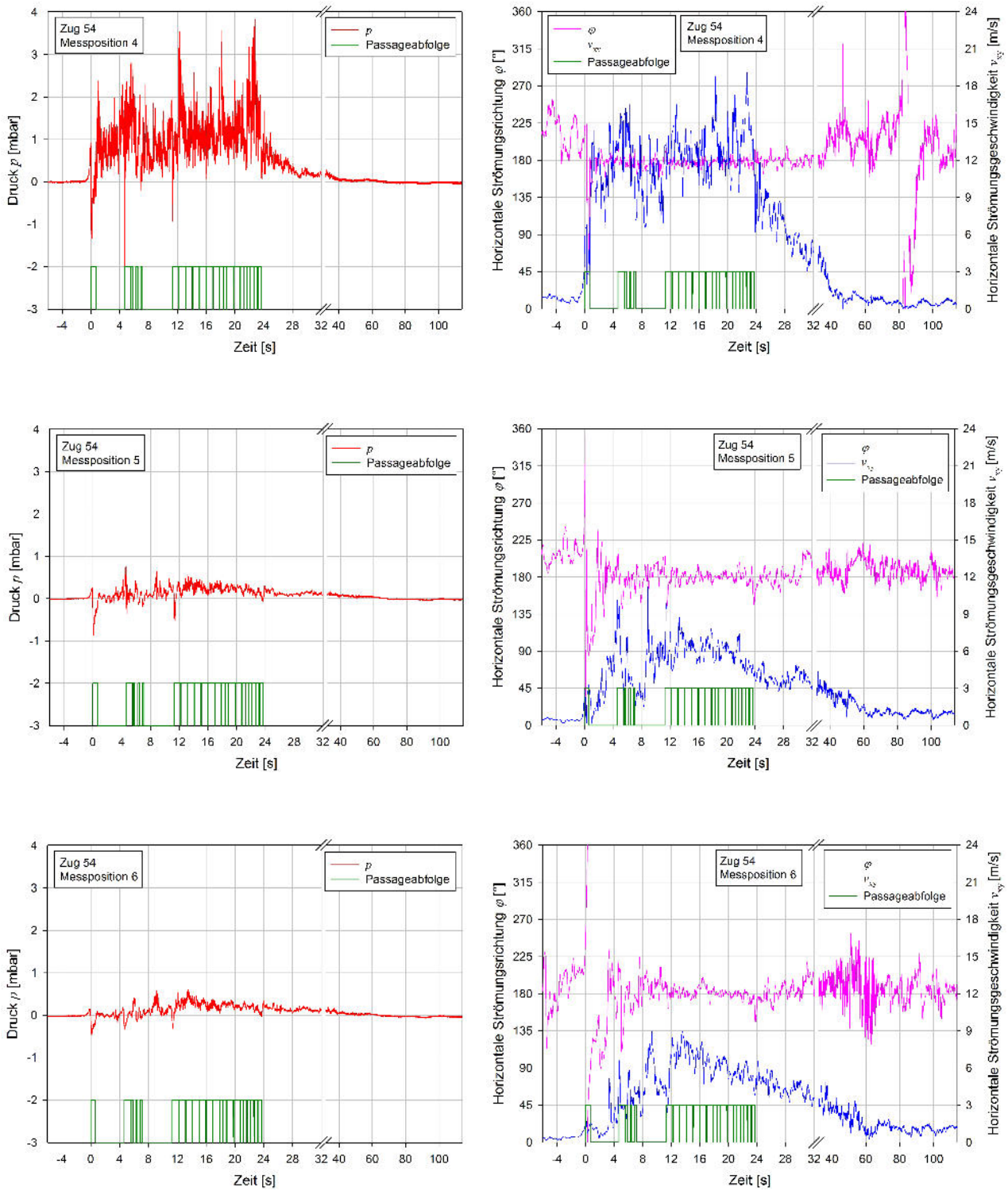


Abbildung B.229: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 54 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

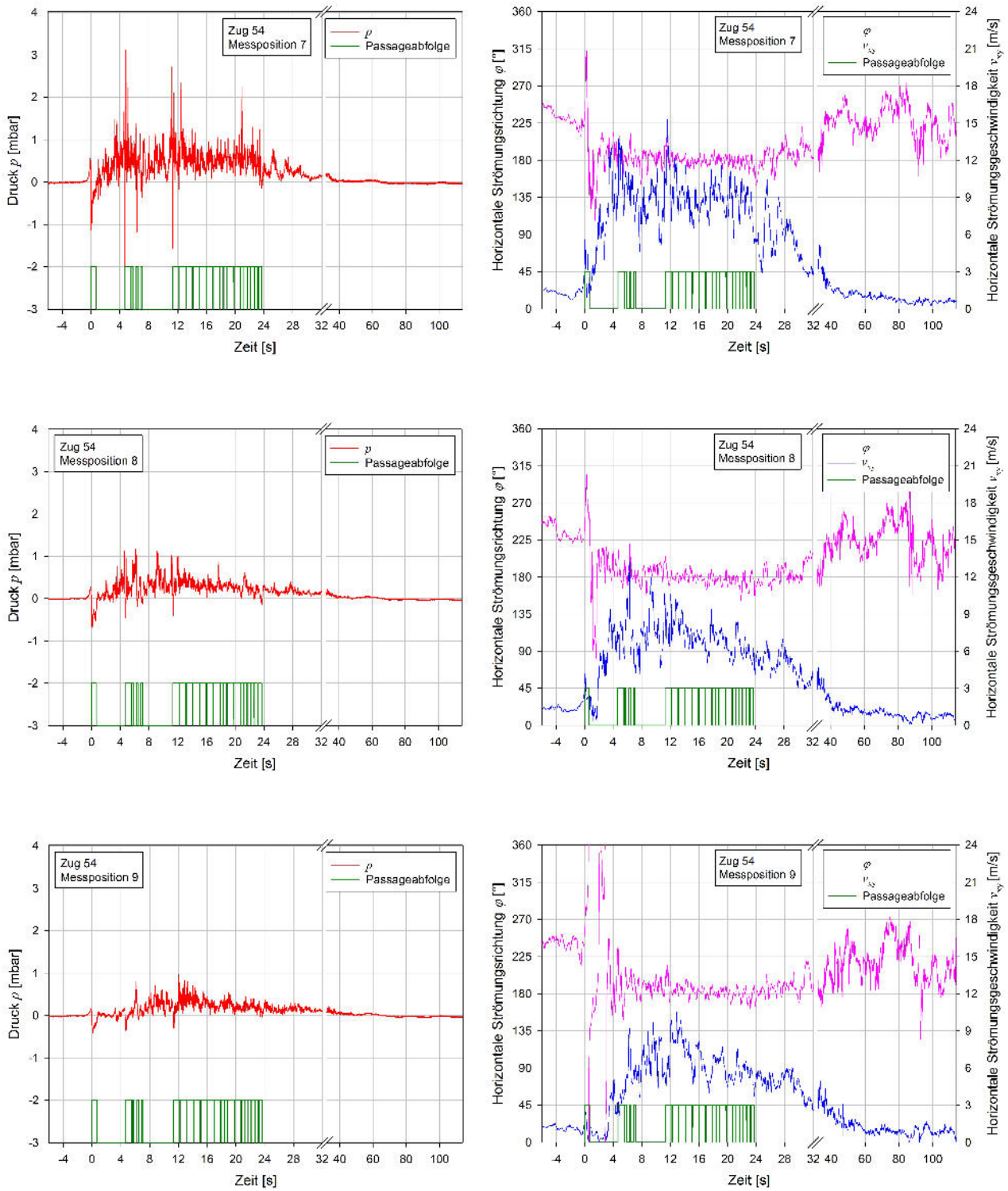


Abbildung B.230: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 54 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

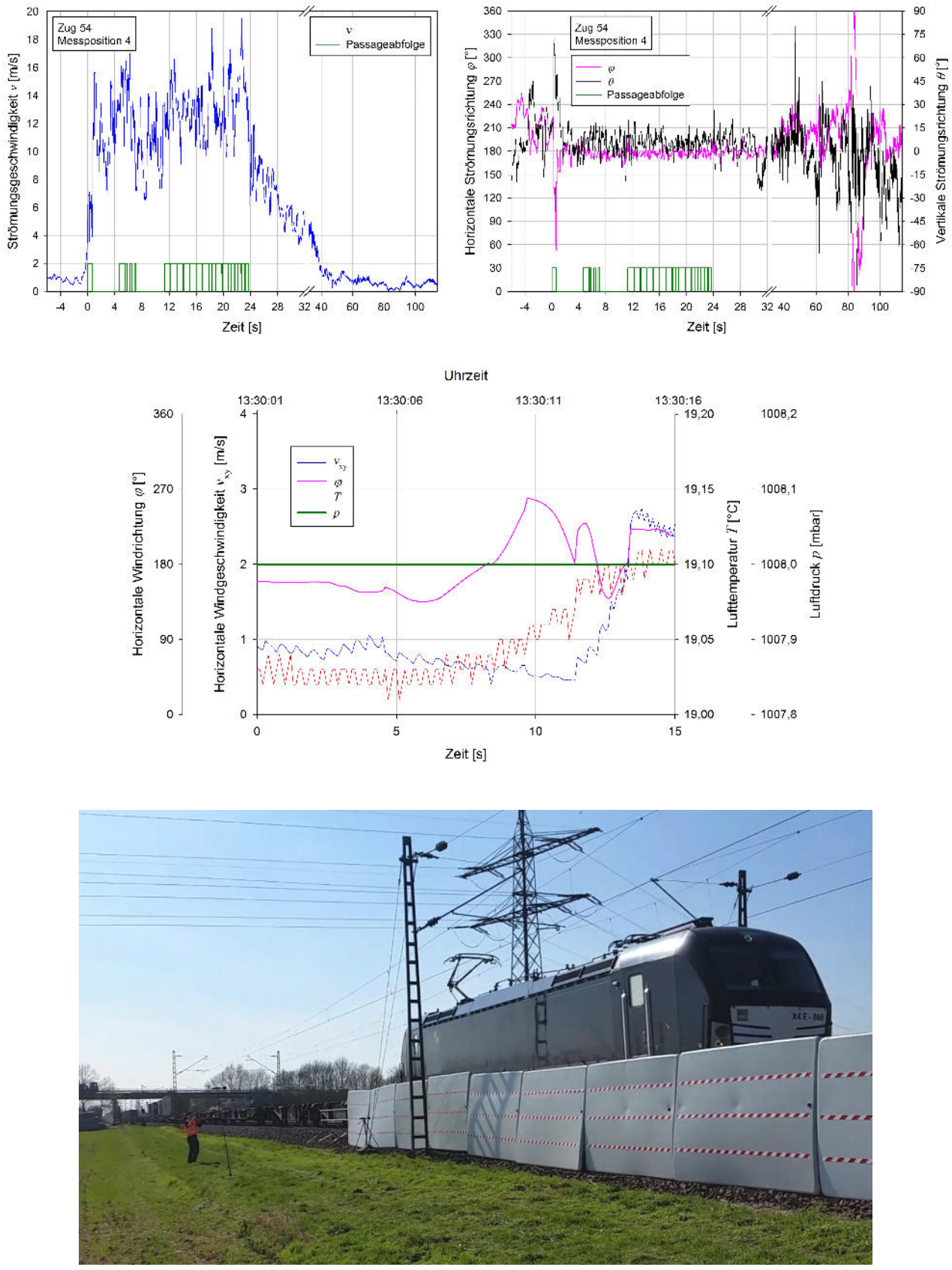


Abbildung B.231: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 54 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 54 ($\bar{v} = 98{,}1 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$).

Zug 55: Doppelstockzug K1 + K1 (3 Wagen + 3 Wagen)

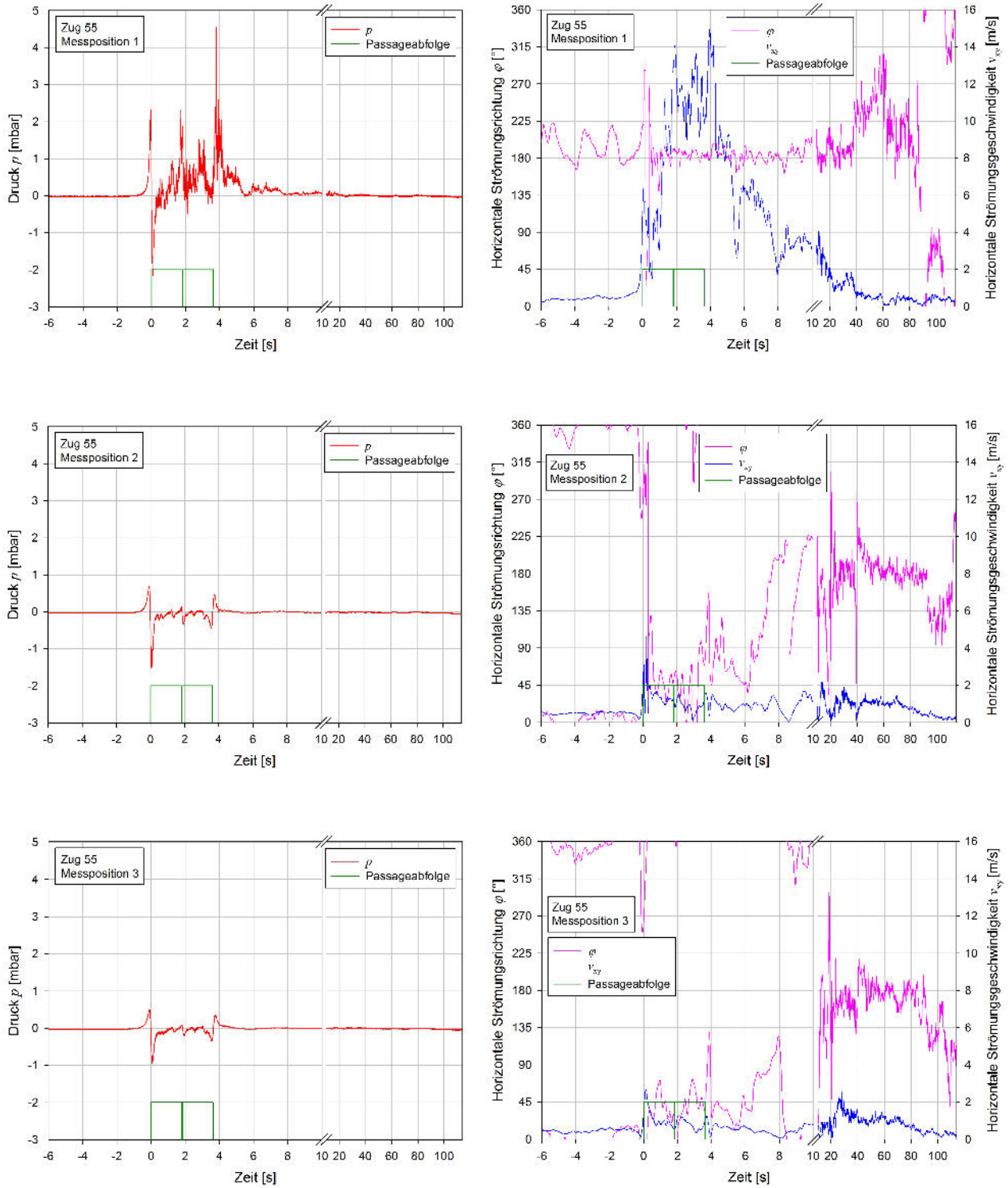


Abbildung B.232: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 55 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

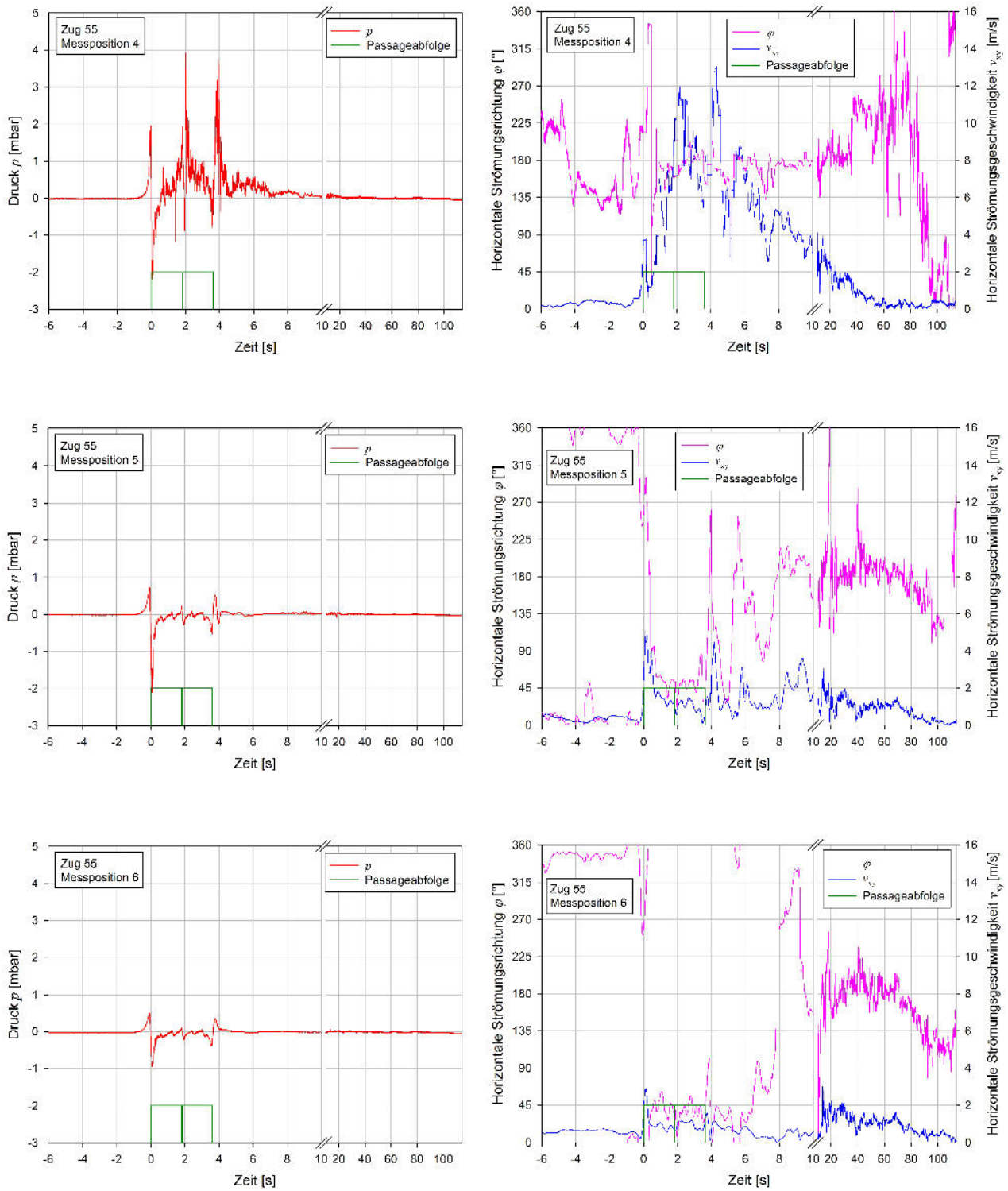


Abbildung B.233: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 55 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

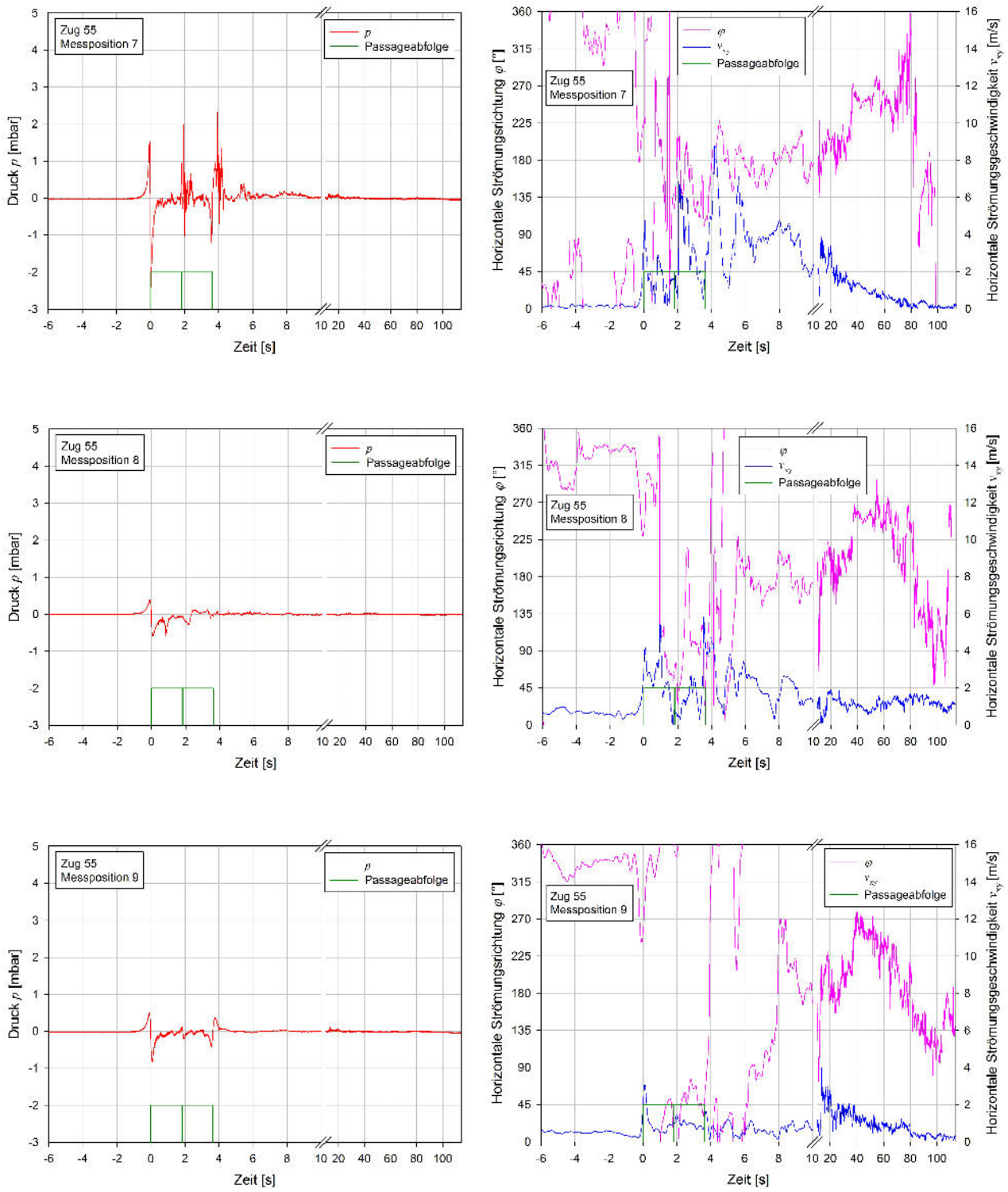


Abbildung B.234: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 55 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

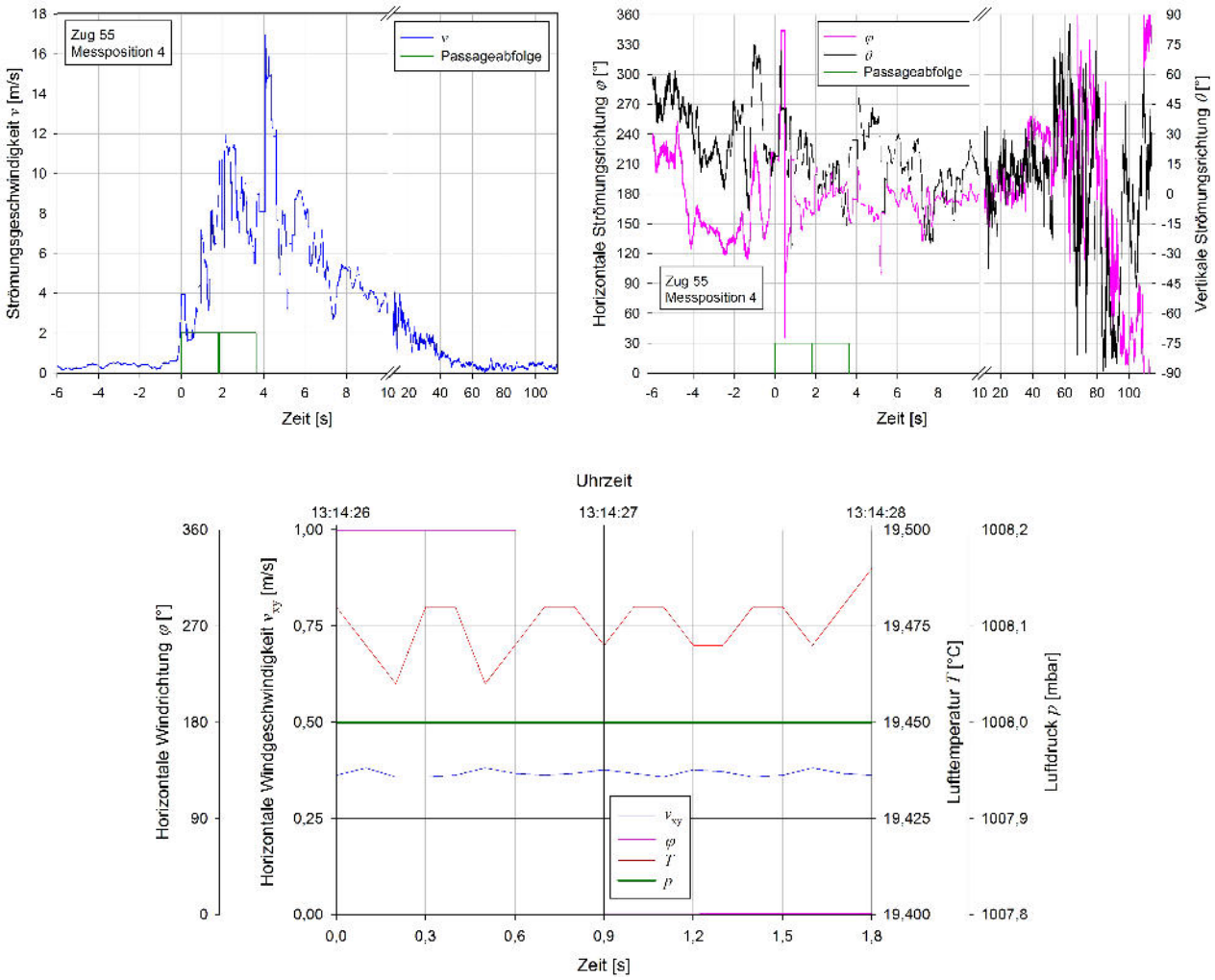




Abbildung B.235: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 55 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 55 ($\bar{v} = 153{,}0 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 56: S-Bahn (Baureihe 425)

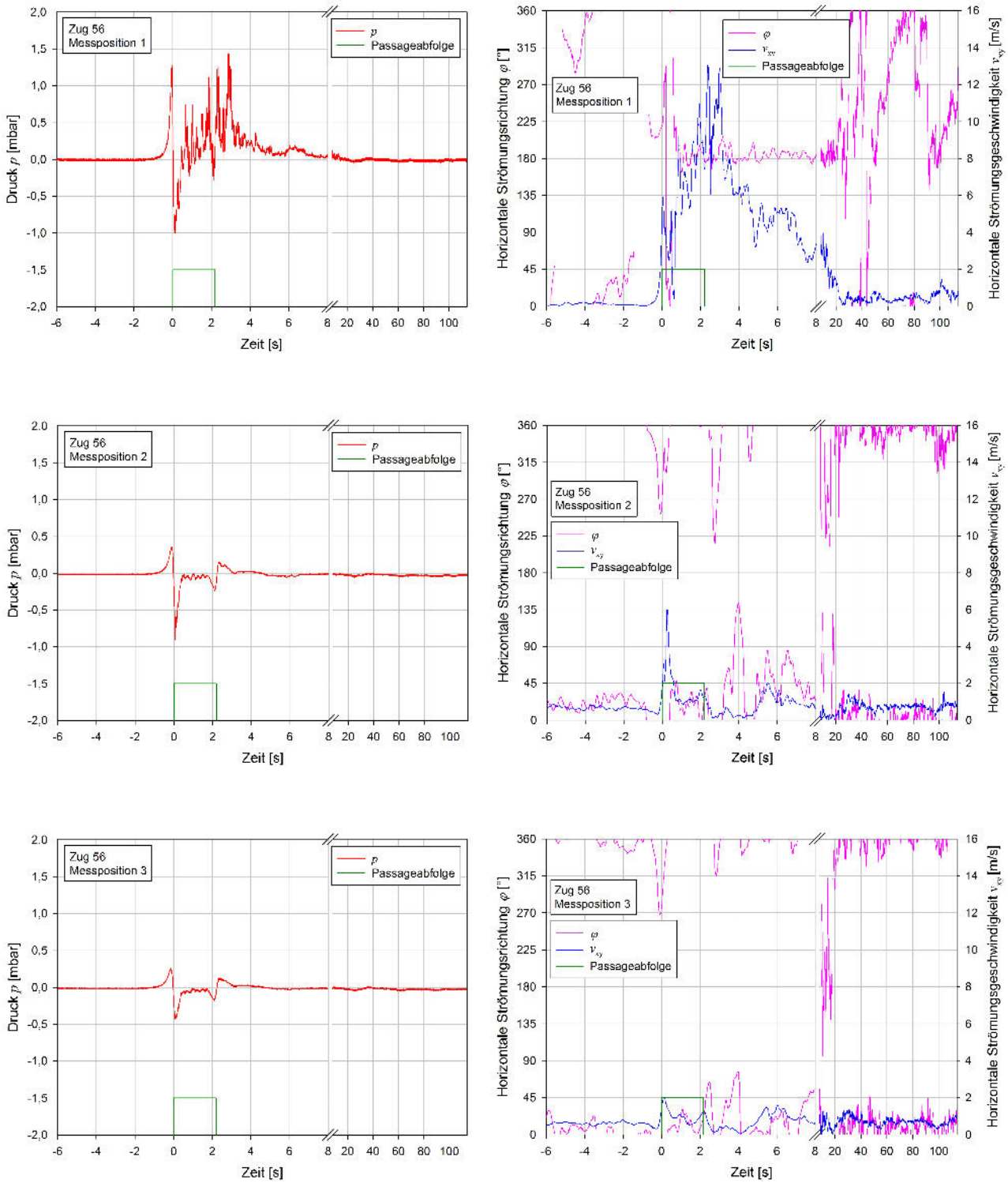


Abbildung B.236: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 56 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 114{,}2 \pm 1{,}5\,\mathrm{km/h}$.

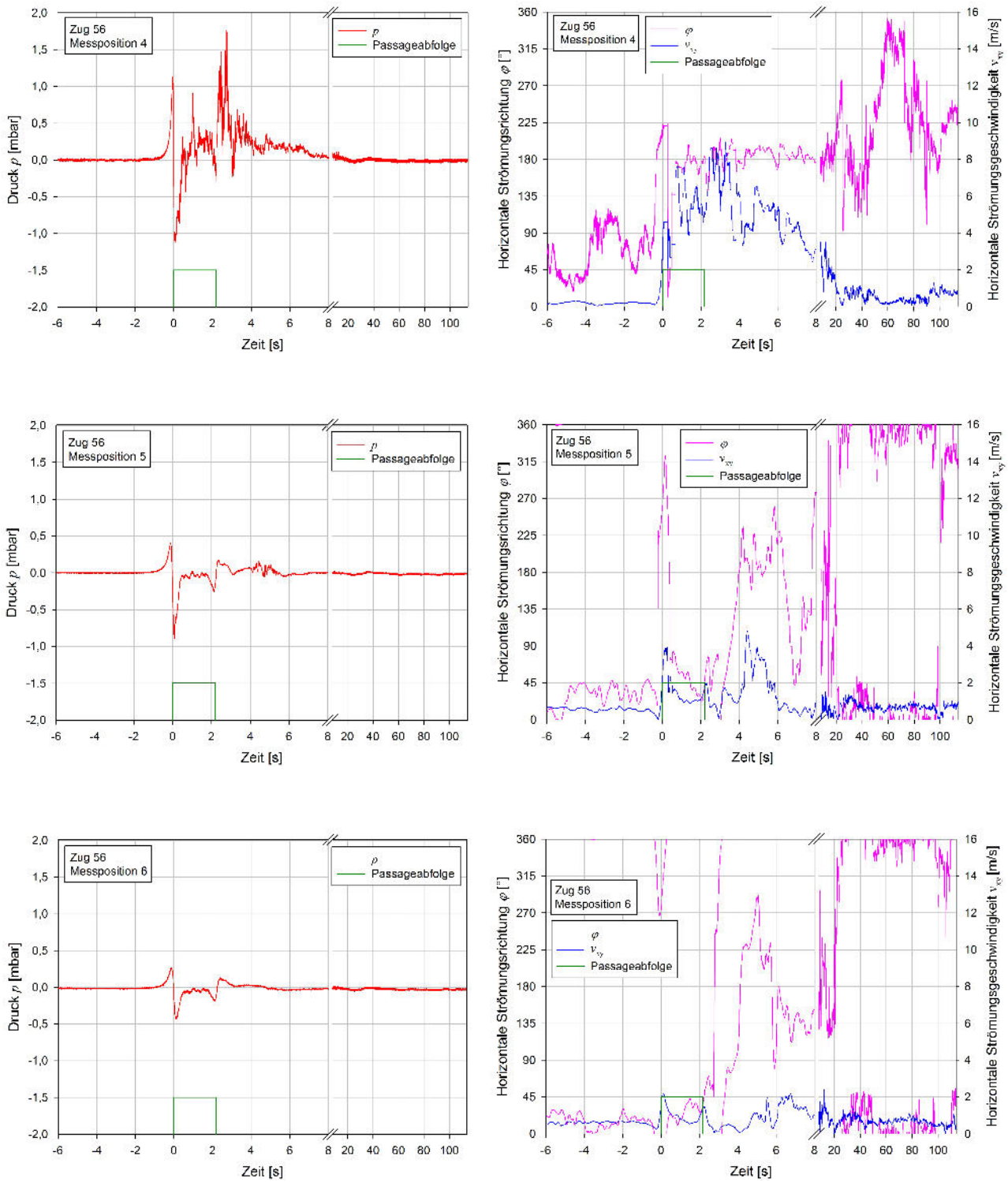


Abbildung B.237: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 56 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}5 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

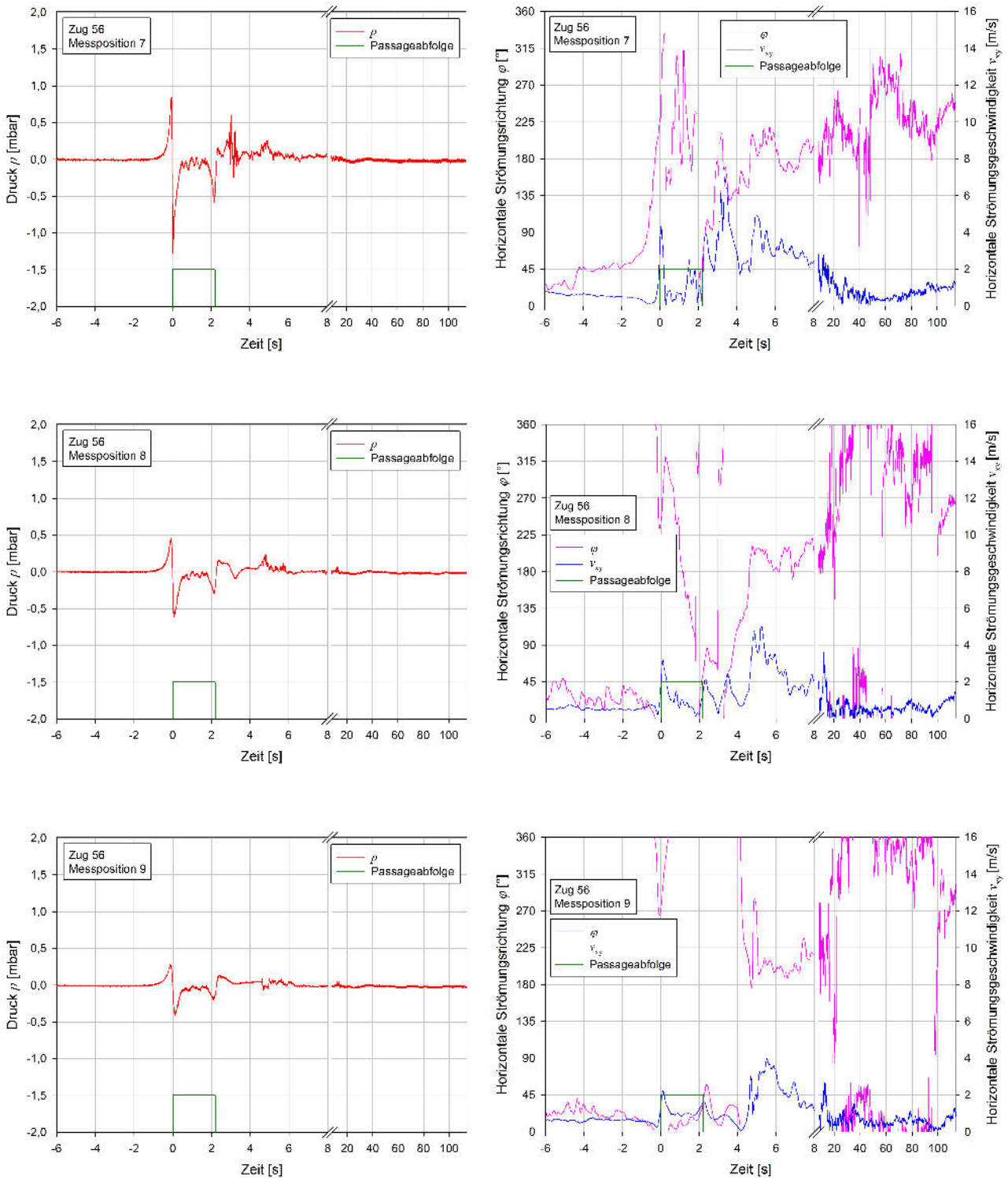


Abbildung B.238: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 56 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 110{,}5 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$.

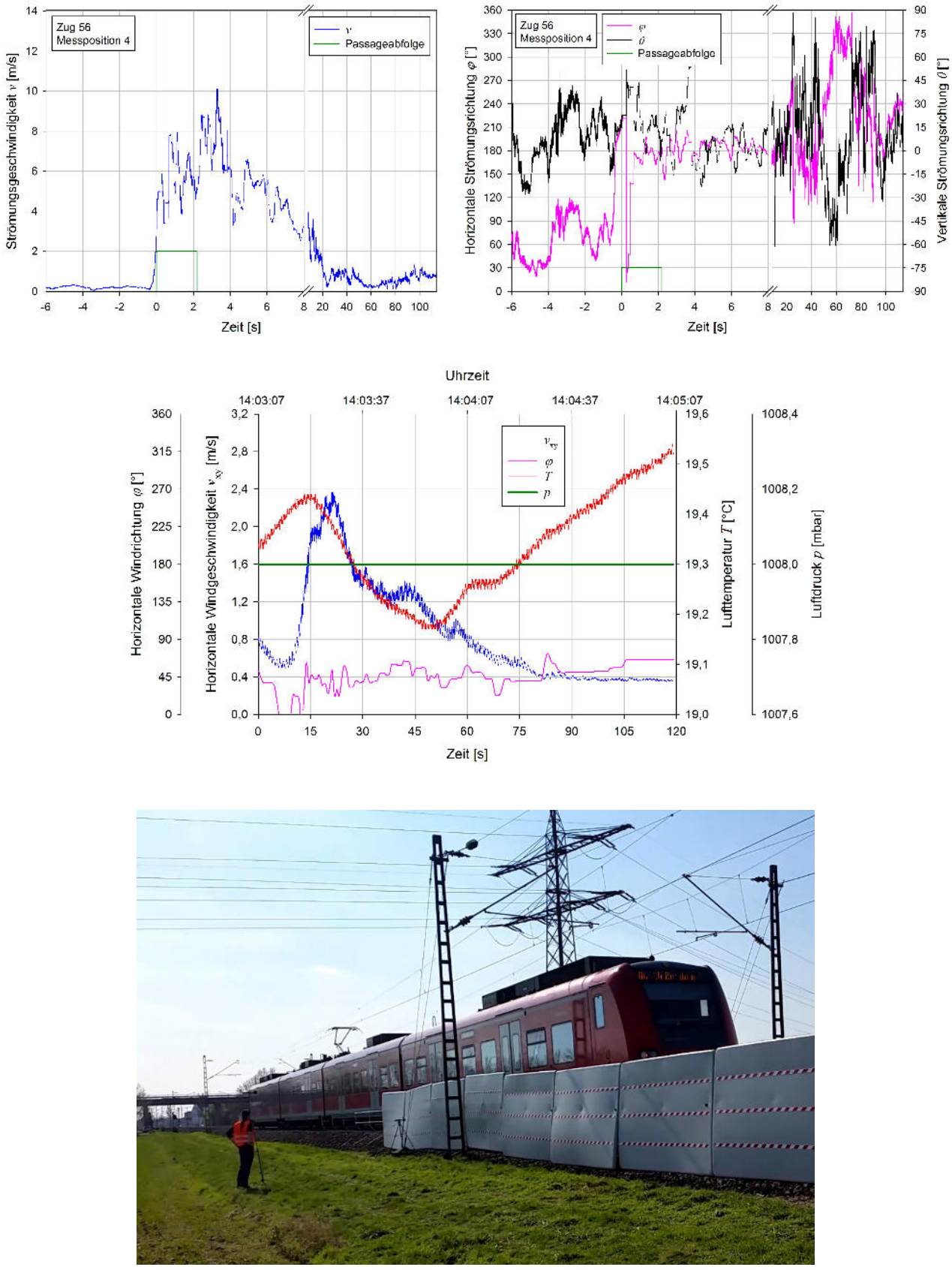


Abbildung B.239: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 56 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 56 ($\bar{v} = 110{,}5 \pm 0{,}7\,\mathrm{km/h}$).

Zug 57: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

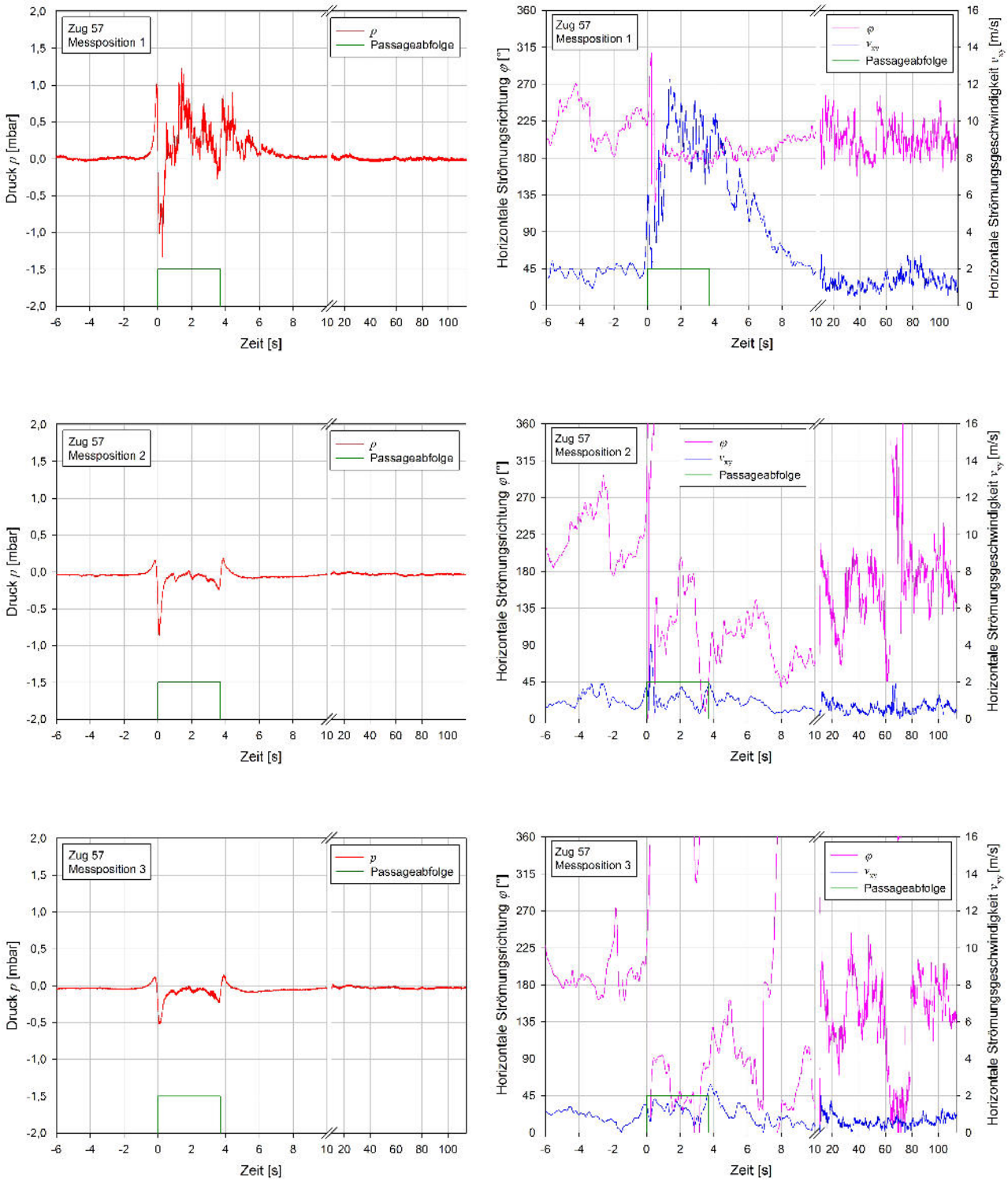


Abbildung B.240: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 57 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

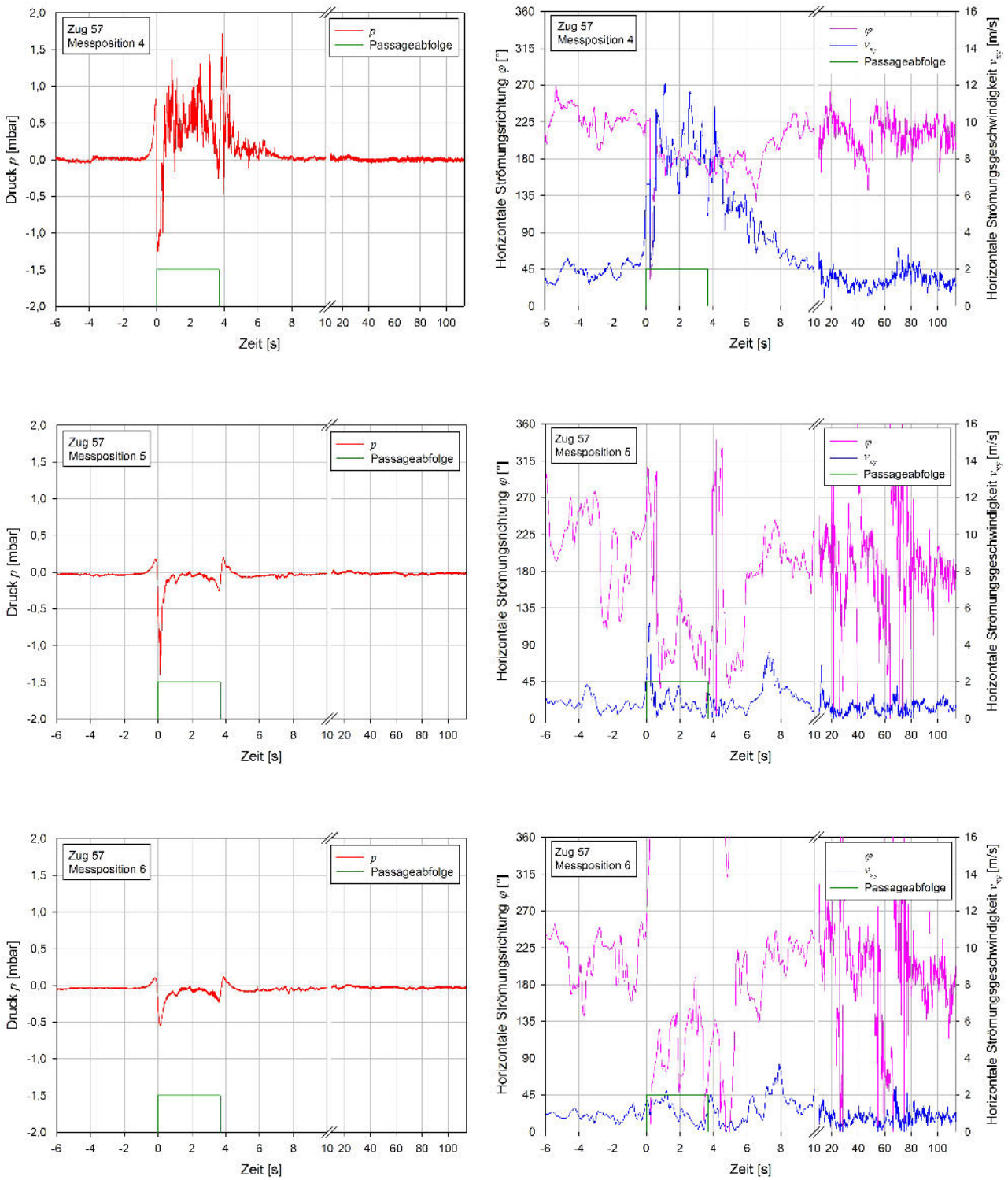


Abbildung B.241: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 57 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

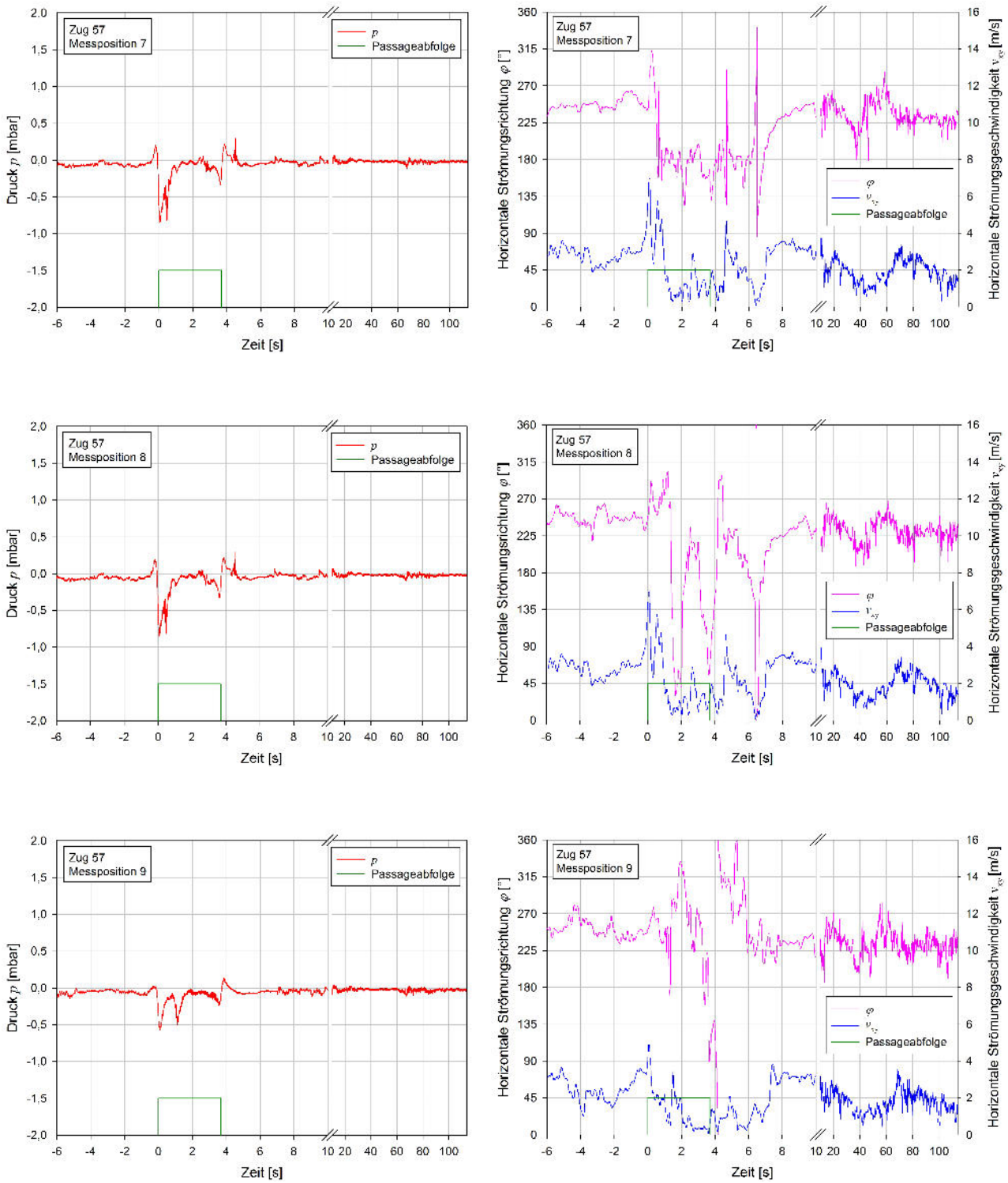


Abbildung B.242: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 57 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$.

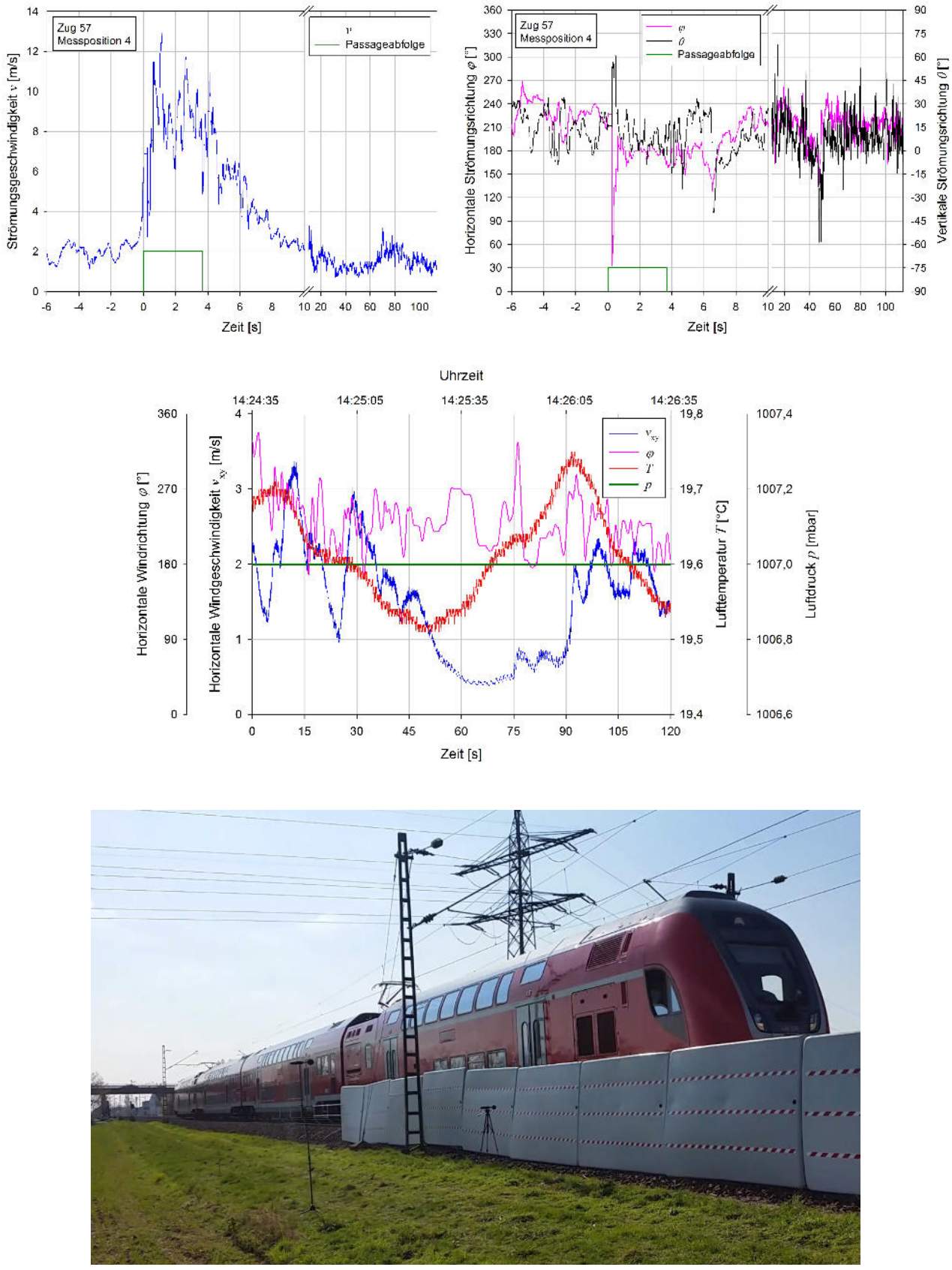


Abbildung B.243: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 57 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 57 ($\bar{v} = 101{,}6 \pm 0{,}6\,\mathrm{km/h}$).

Zug 58: Güterzug

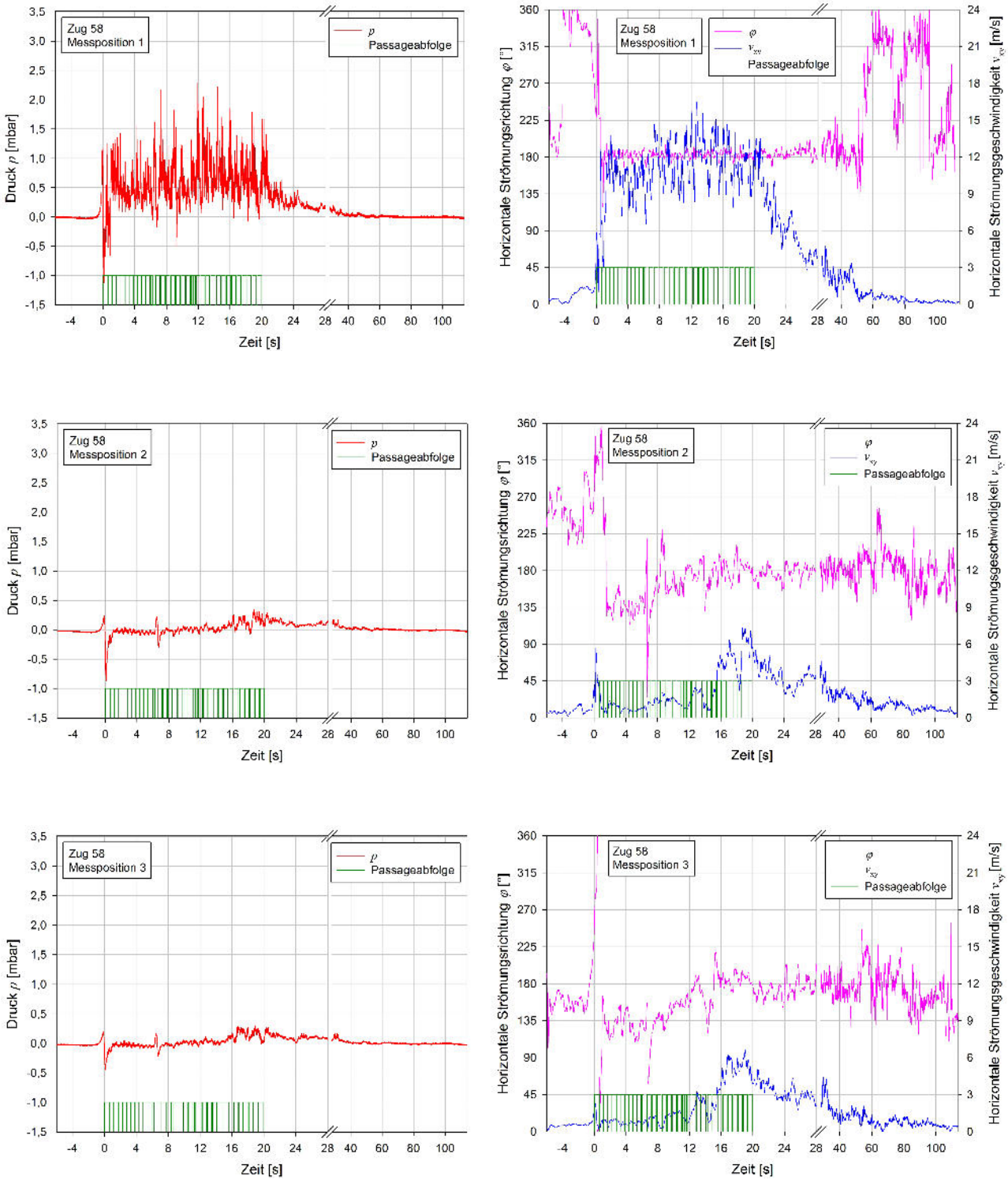


Abbildung B.244: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 58 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

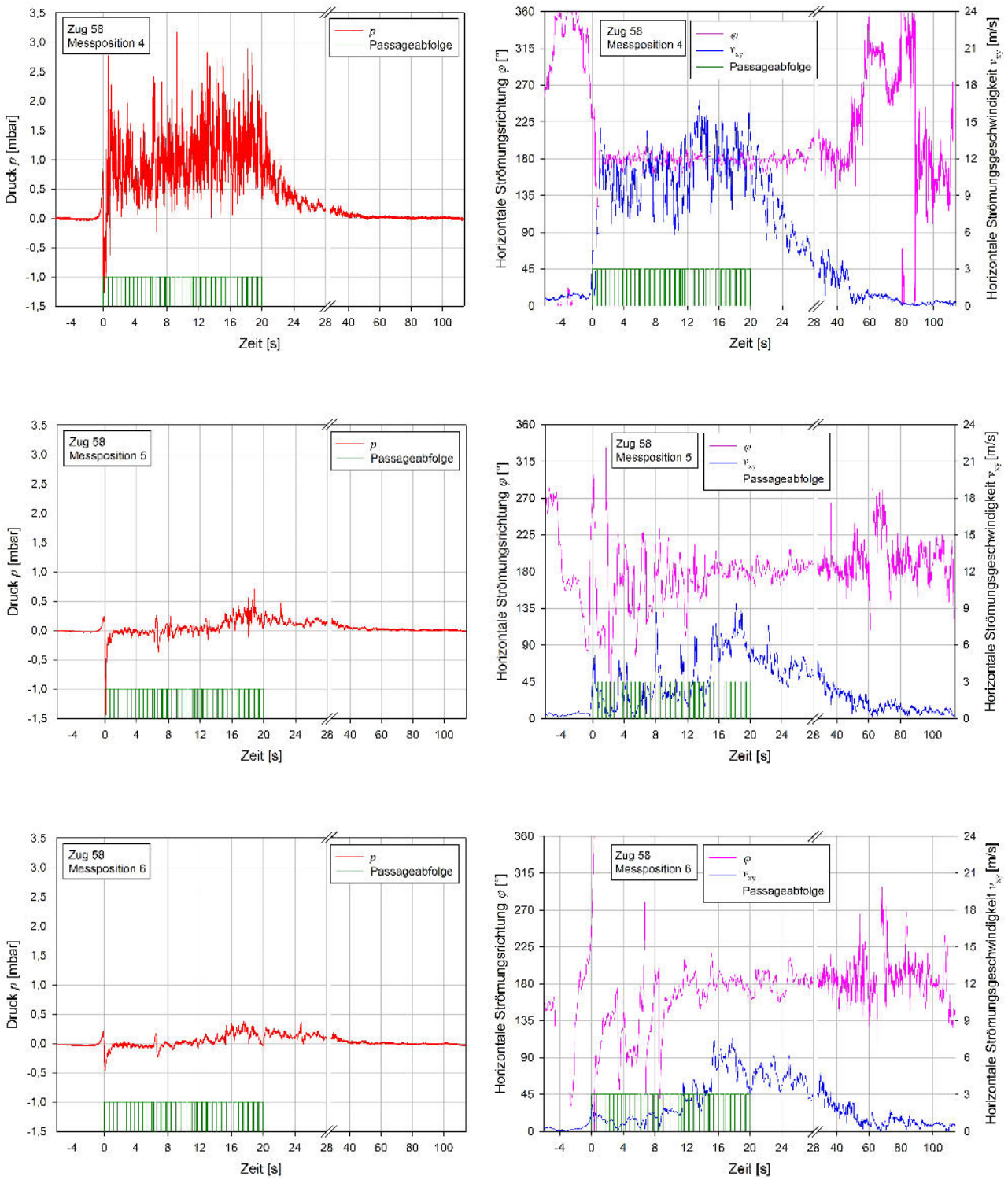


Abbildung B.245: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 58 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

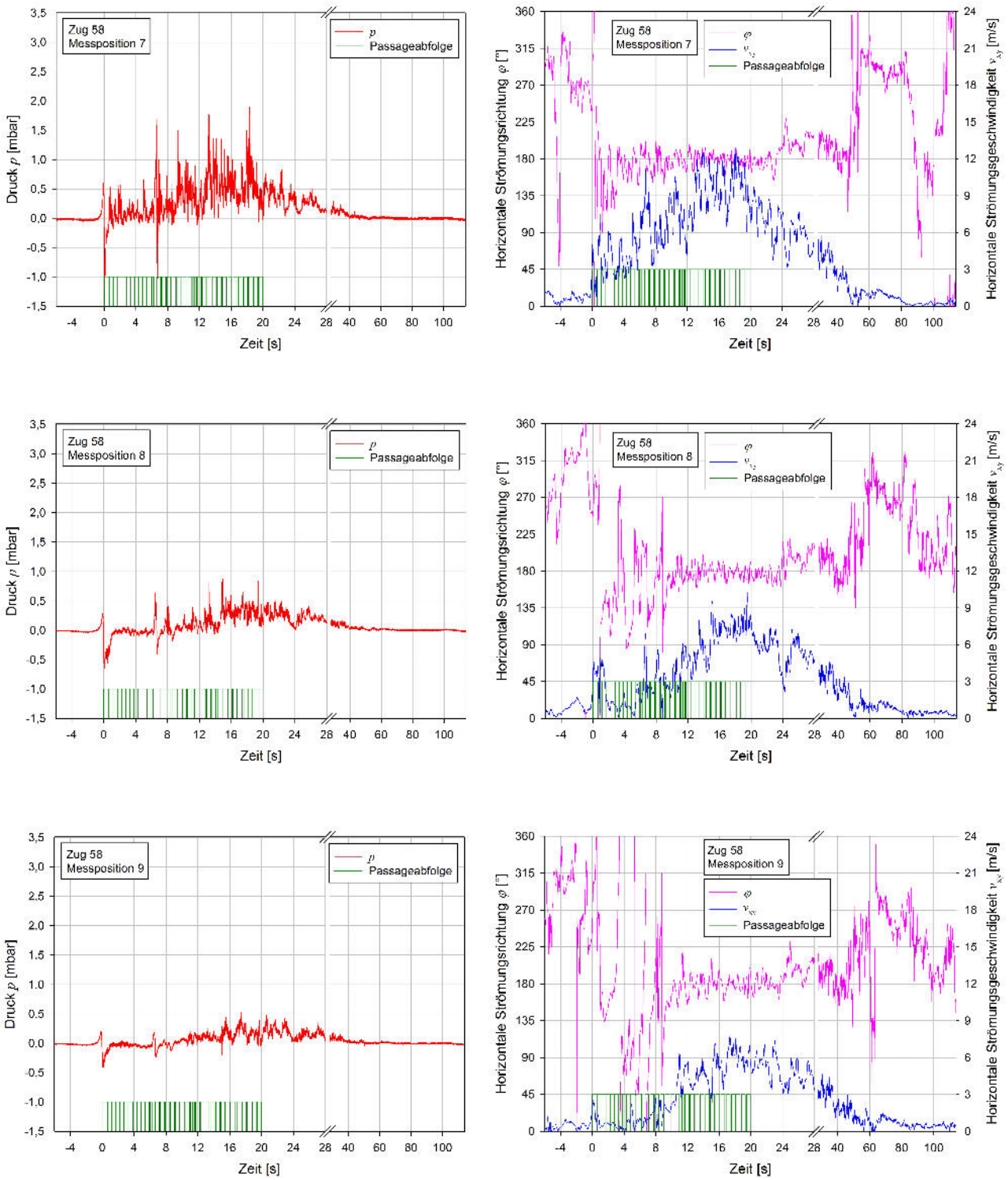


Abbildung B.246: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 58 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$.

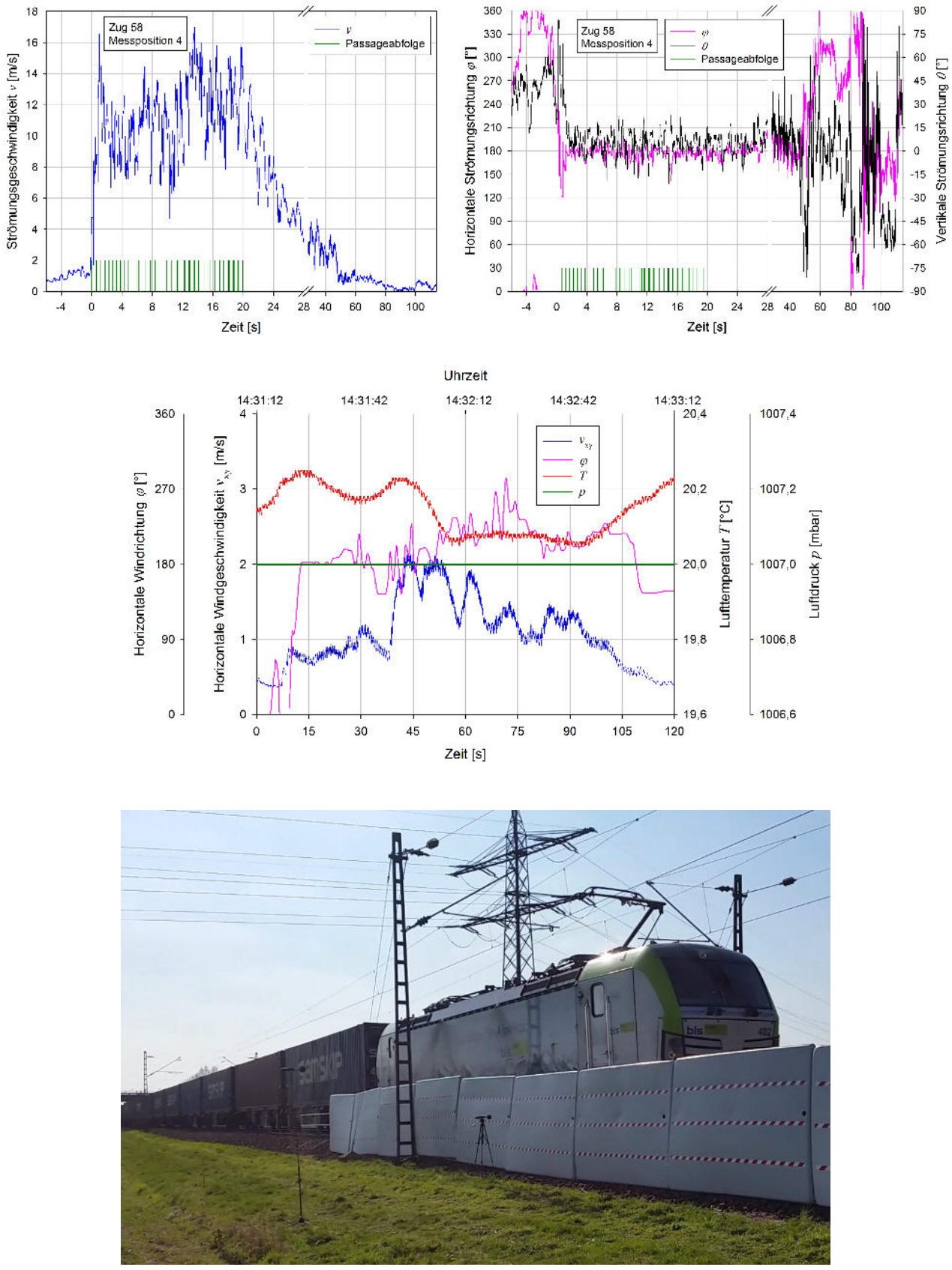


Abbildung B.247: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 58 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 58 ($\bar{v} = 101{,}3 \pm 0{,}8\,\mathrm{km/h}$).

Zug 59: Doppelstockzug K2 + K2 (4 Wagen + 4 Wagen)

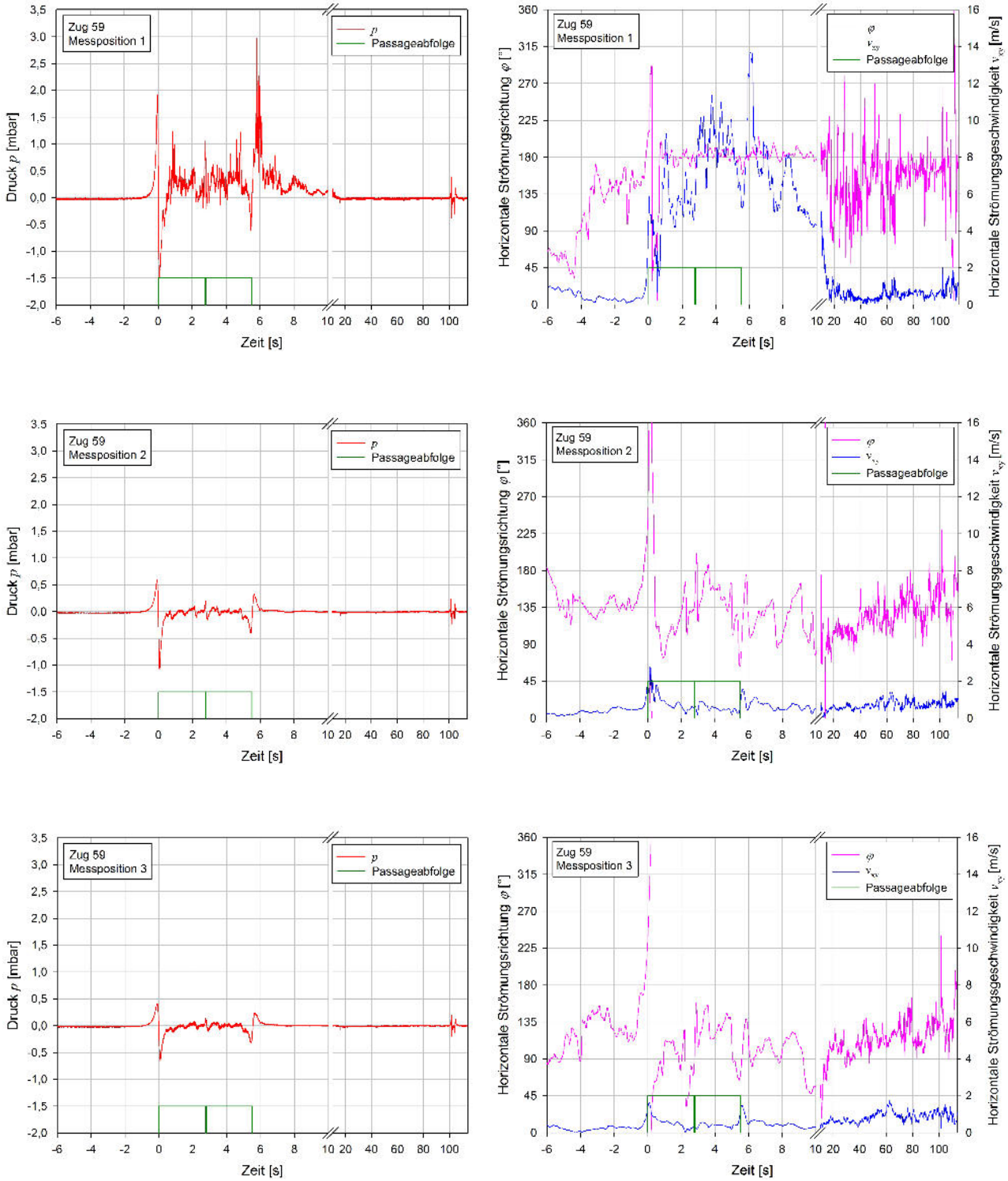


Abbildung B.248: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 59 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

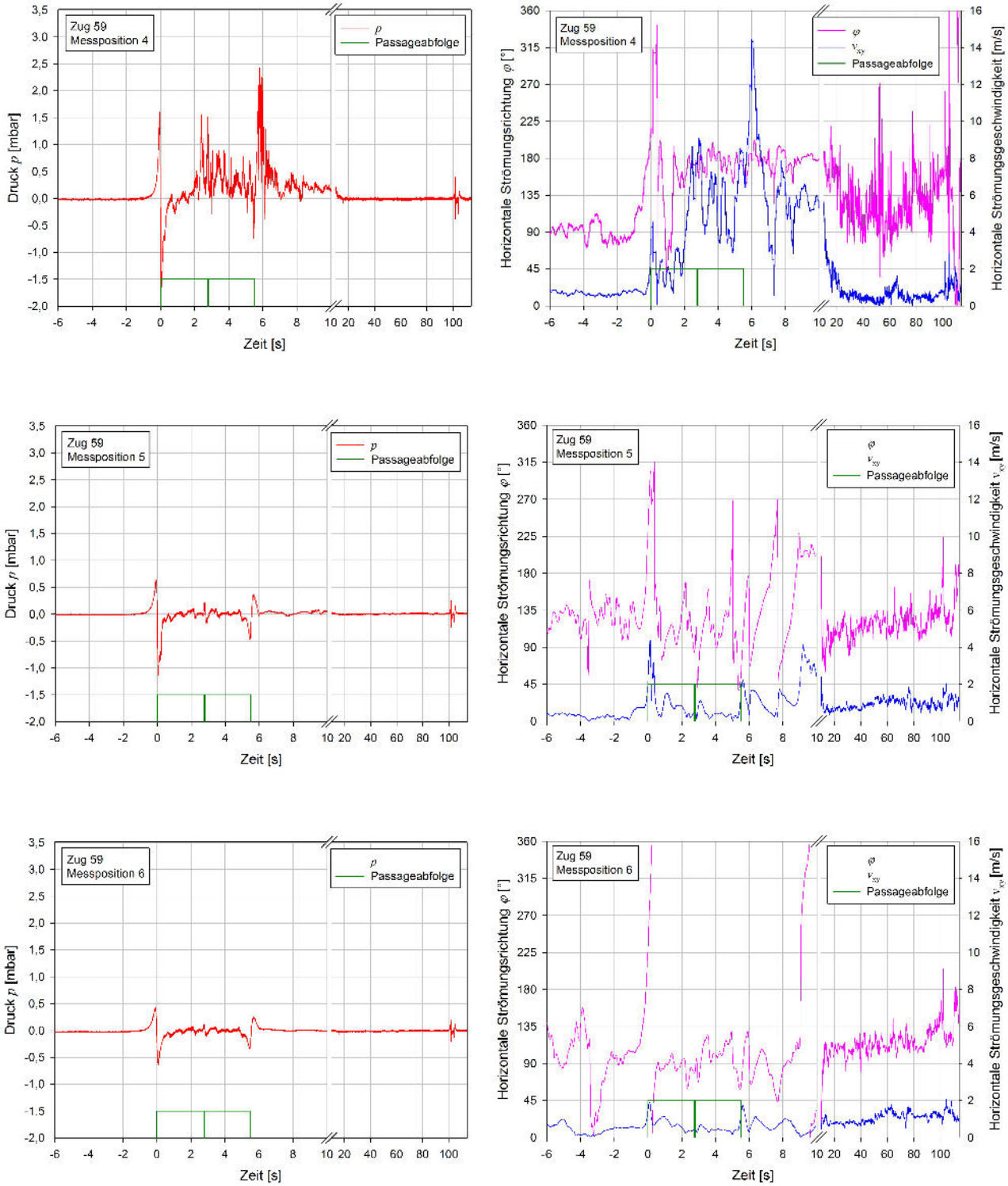


Abbildung B.249: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 59 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

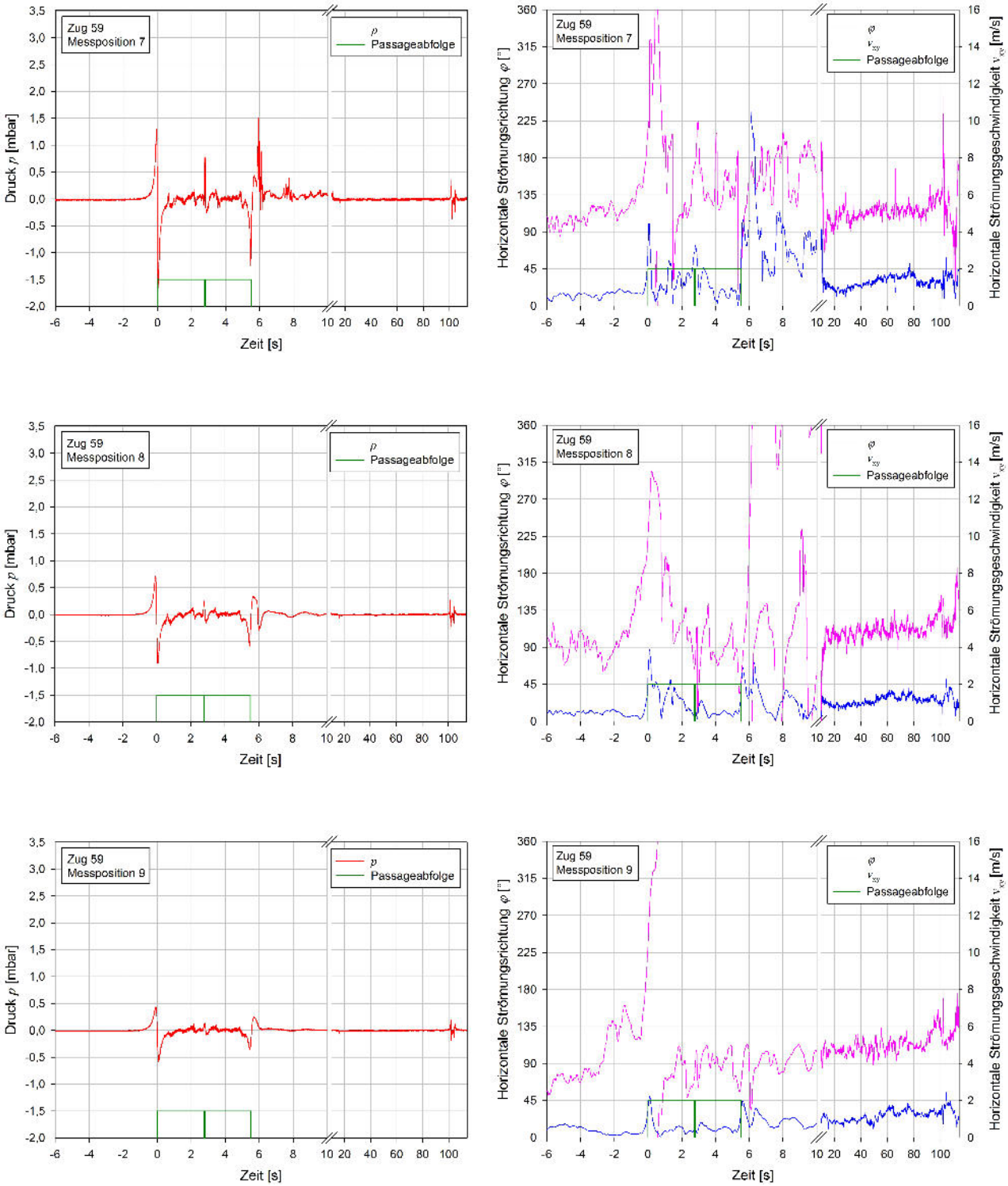


Abbildung B.250: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 59 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$.

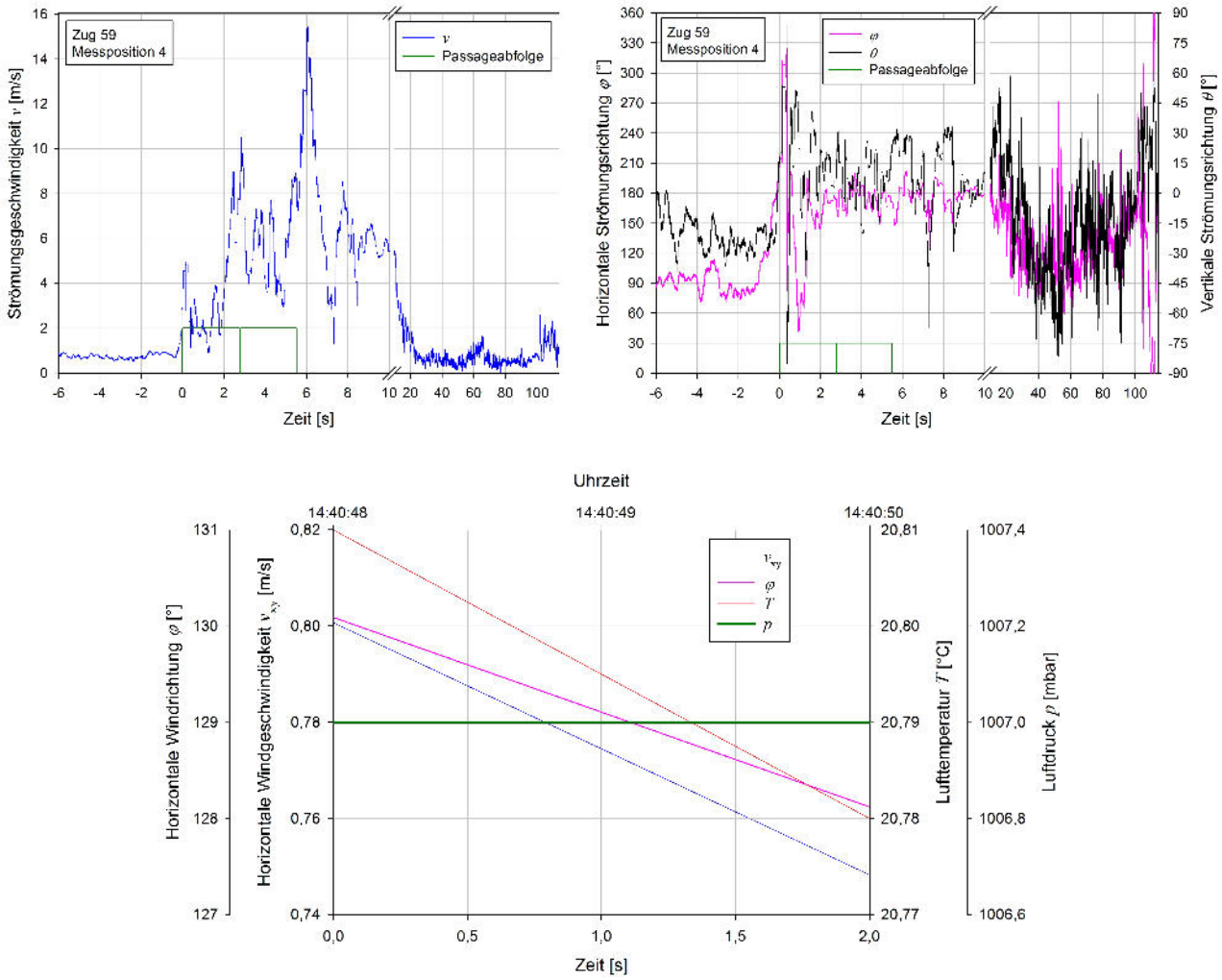




Abbildung B.251: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 59 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 59 ($\bar{v} = 133{,}3 \pm 0{,}9\,\mathrm{km/h}$).

Zug 60: S-Bahn (Baureihe 425)

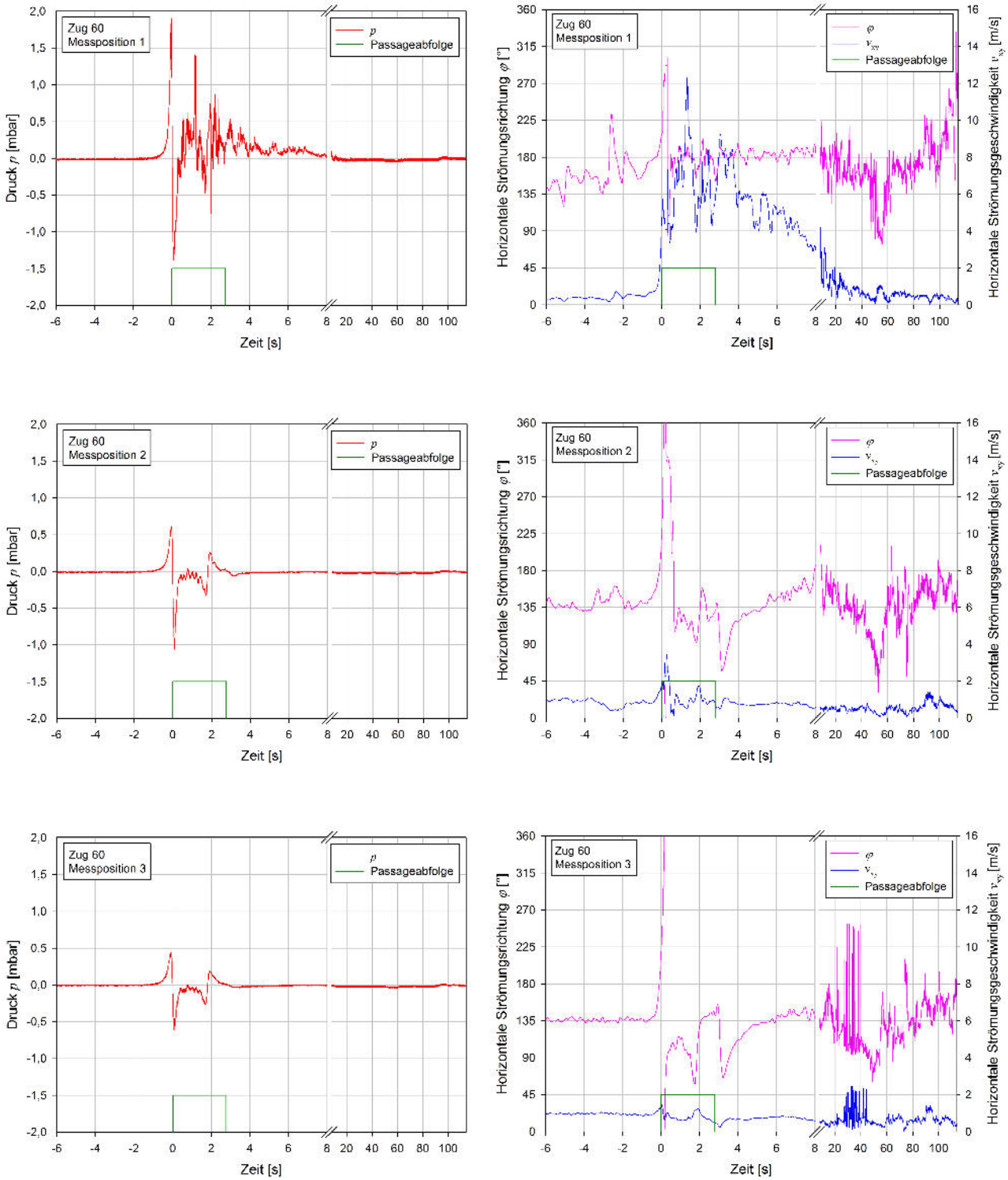


Abbildung B.252: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 60 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

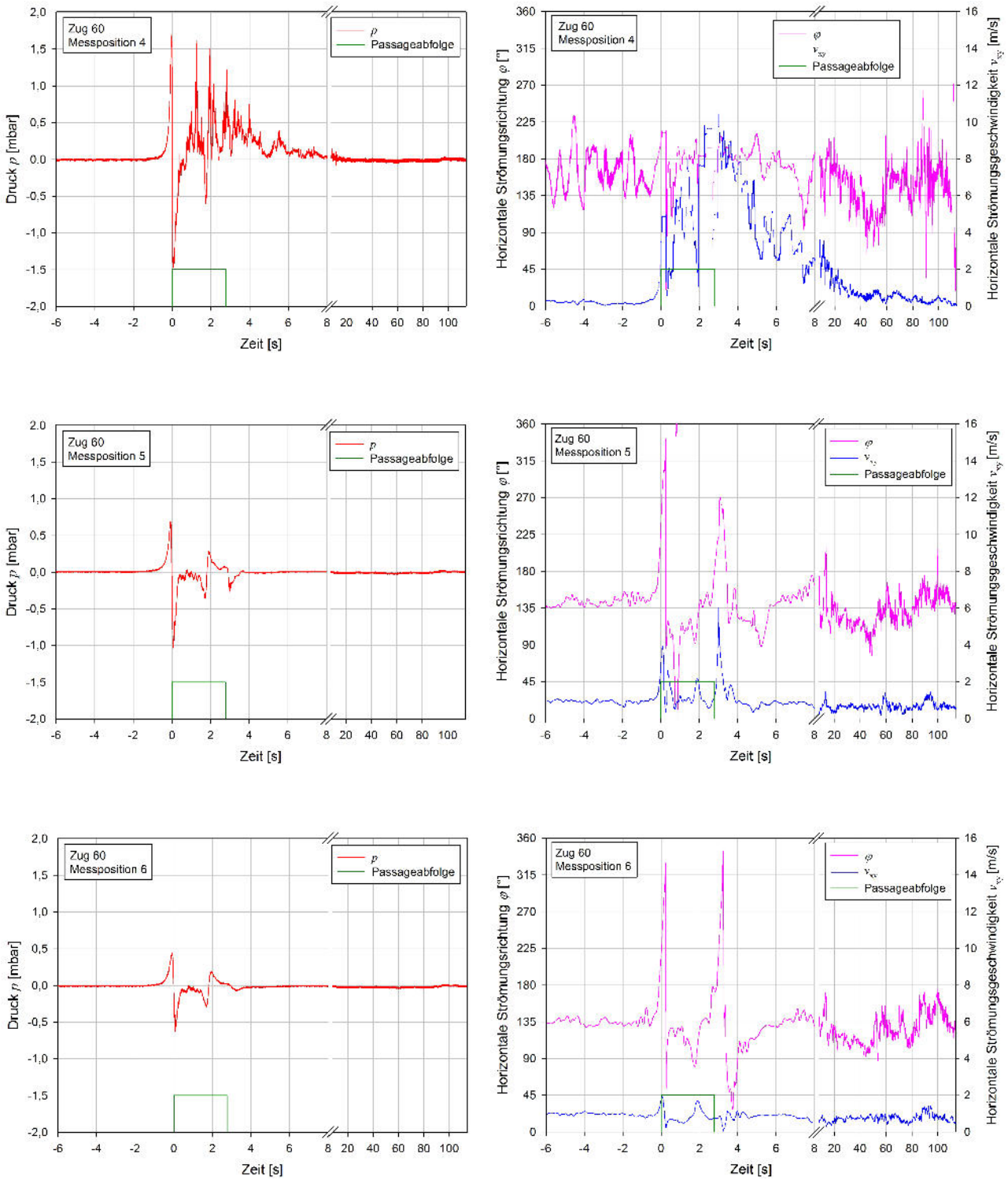


Abbildung B.253: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 60 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

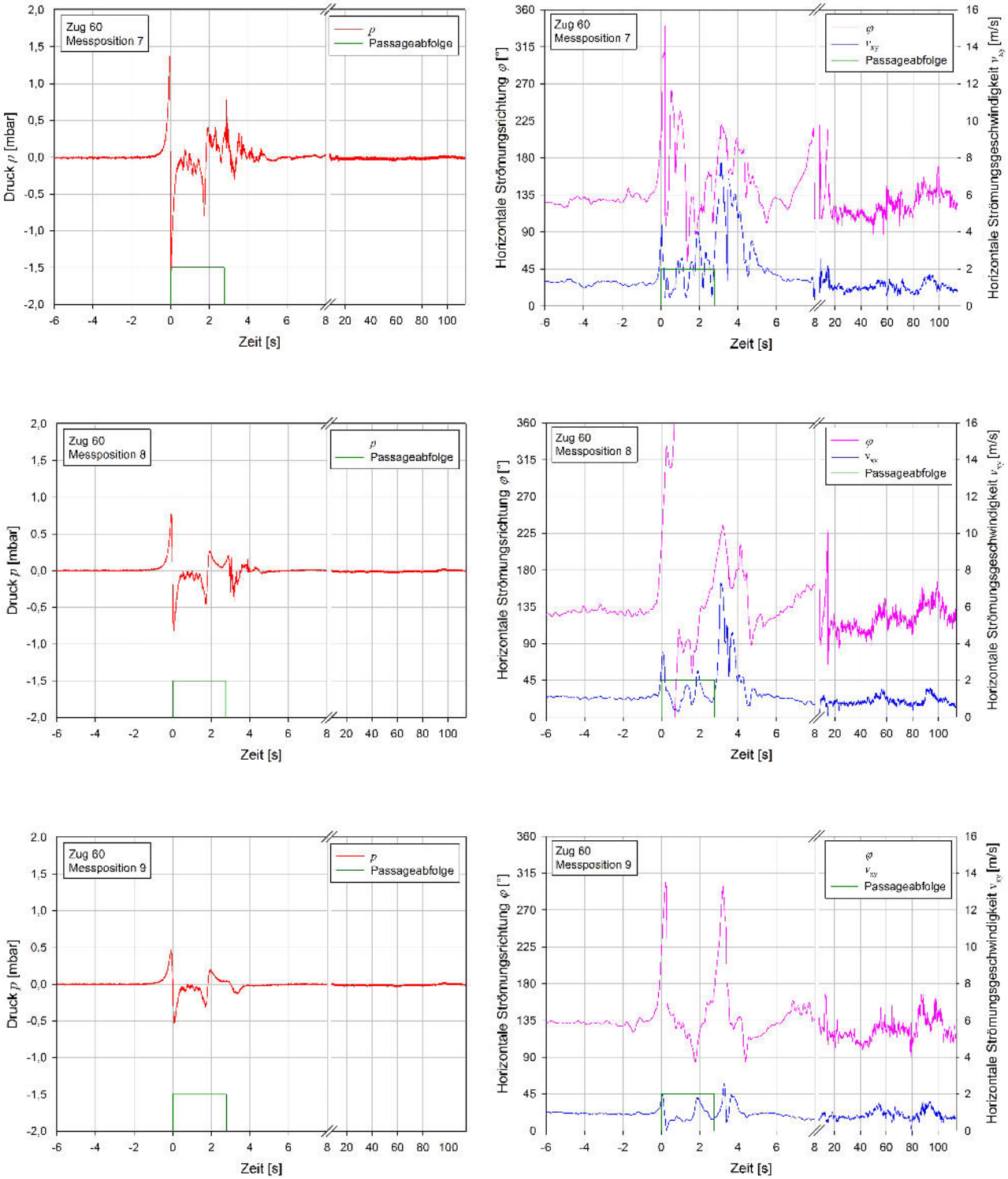


Abbildung B.254: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 60 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

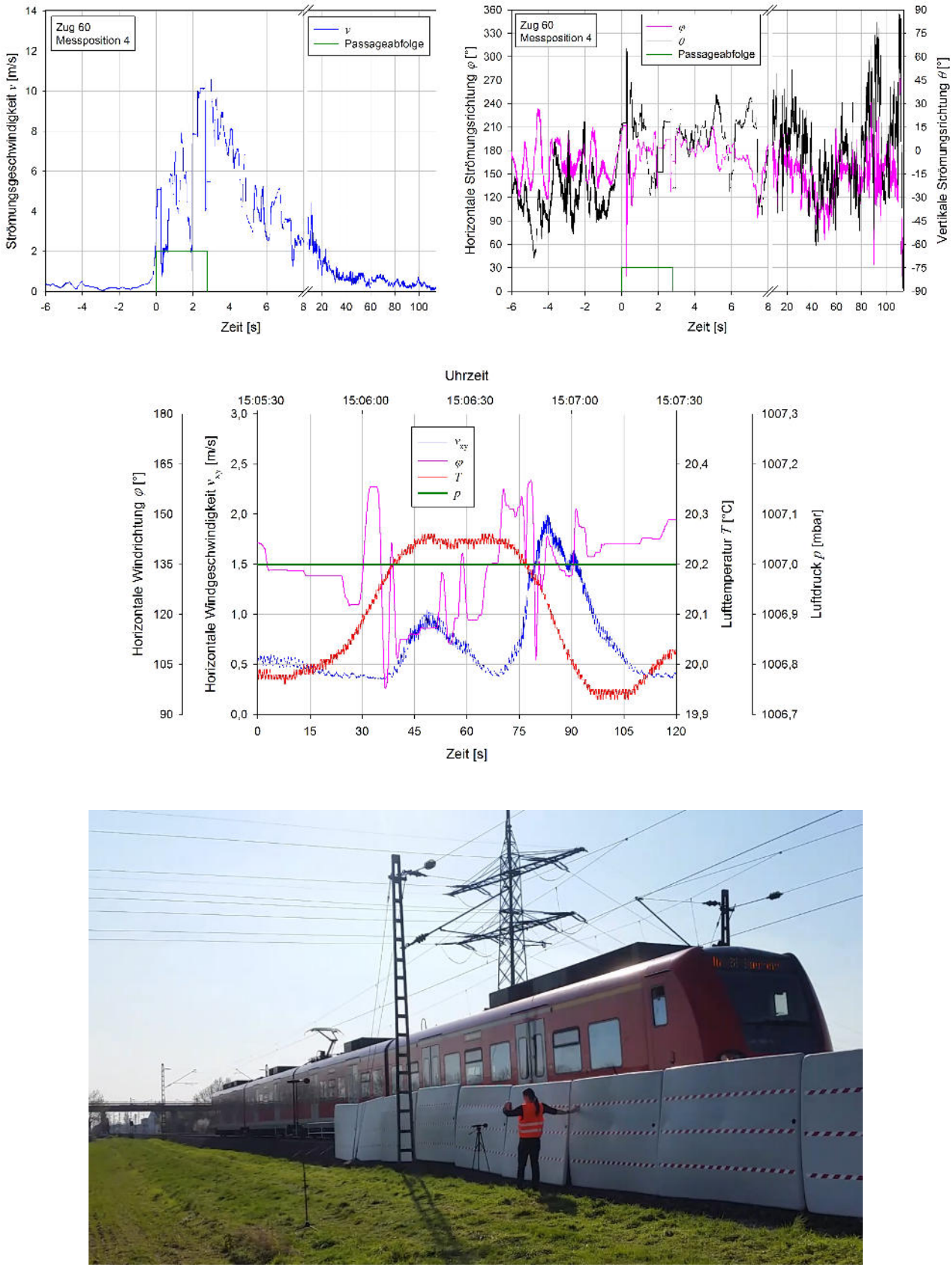


Abbildung B.255: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 60 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 60 ($\bar{v} = 137{,}2 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 61: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

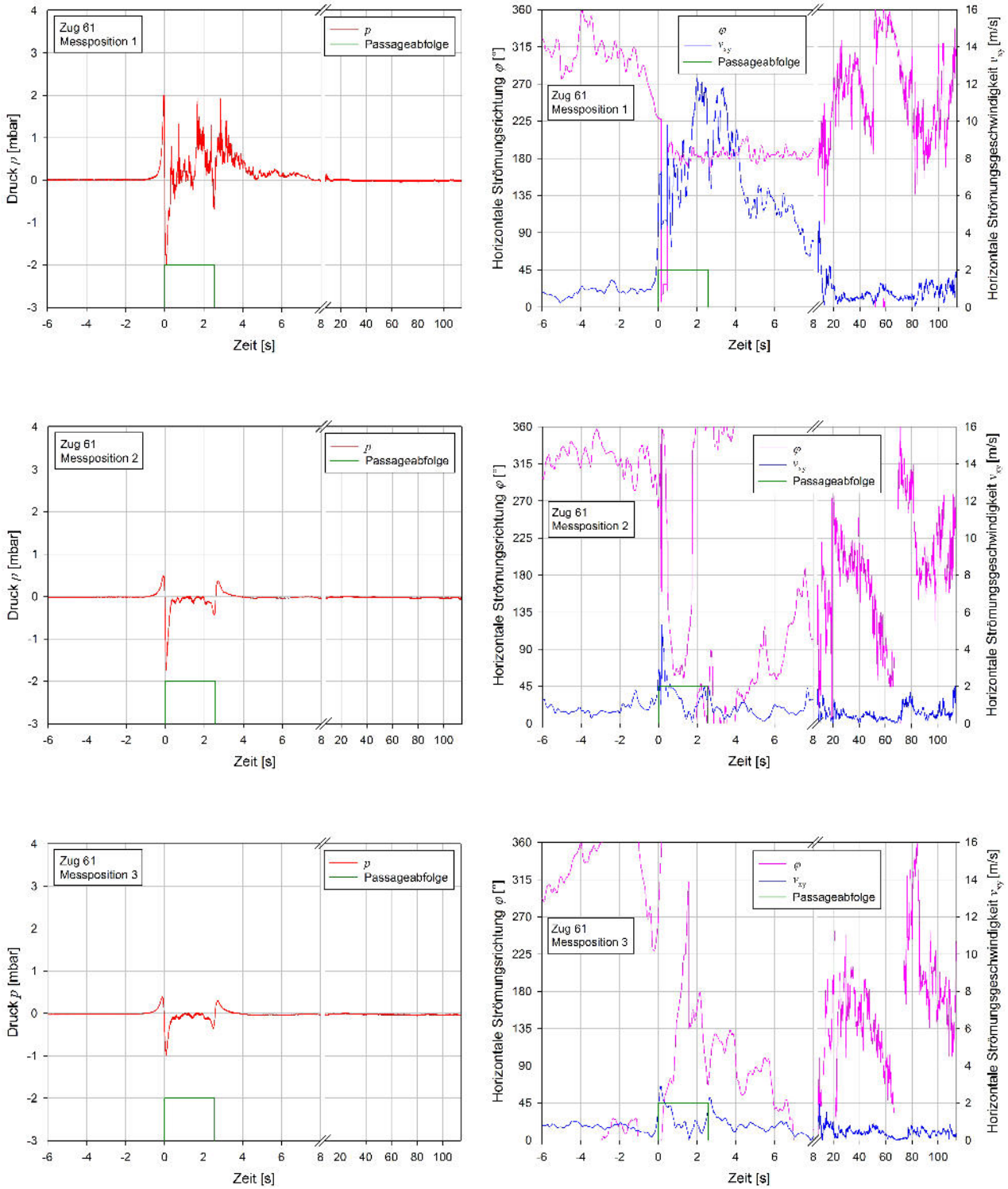


Abbildung B.256: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 61 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

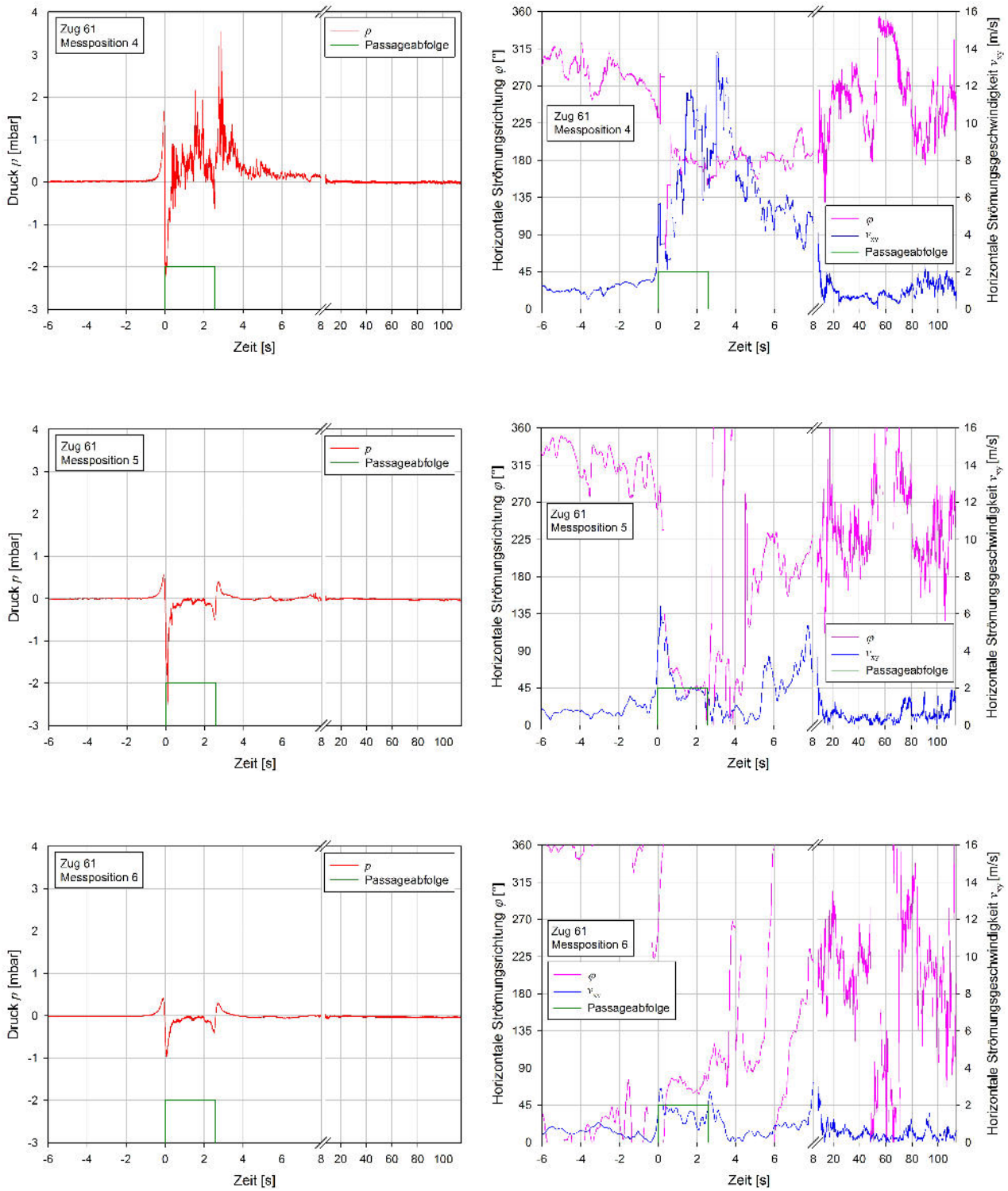


Abbildung B.257: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 61 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

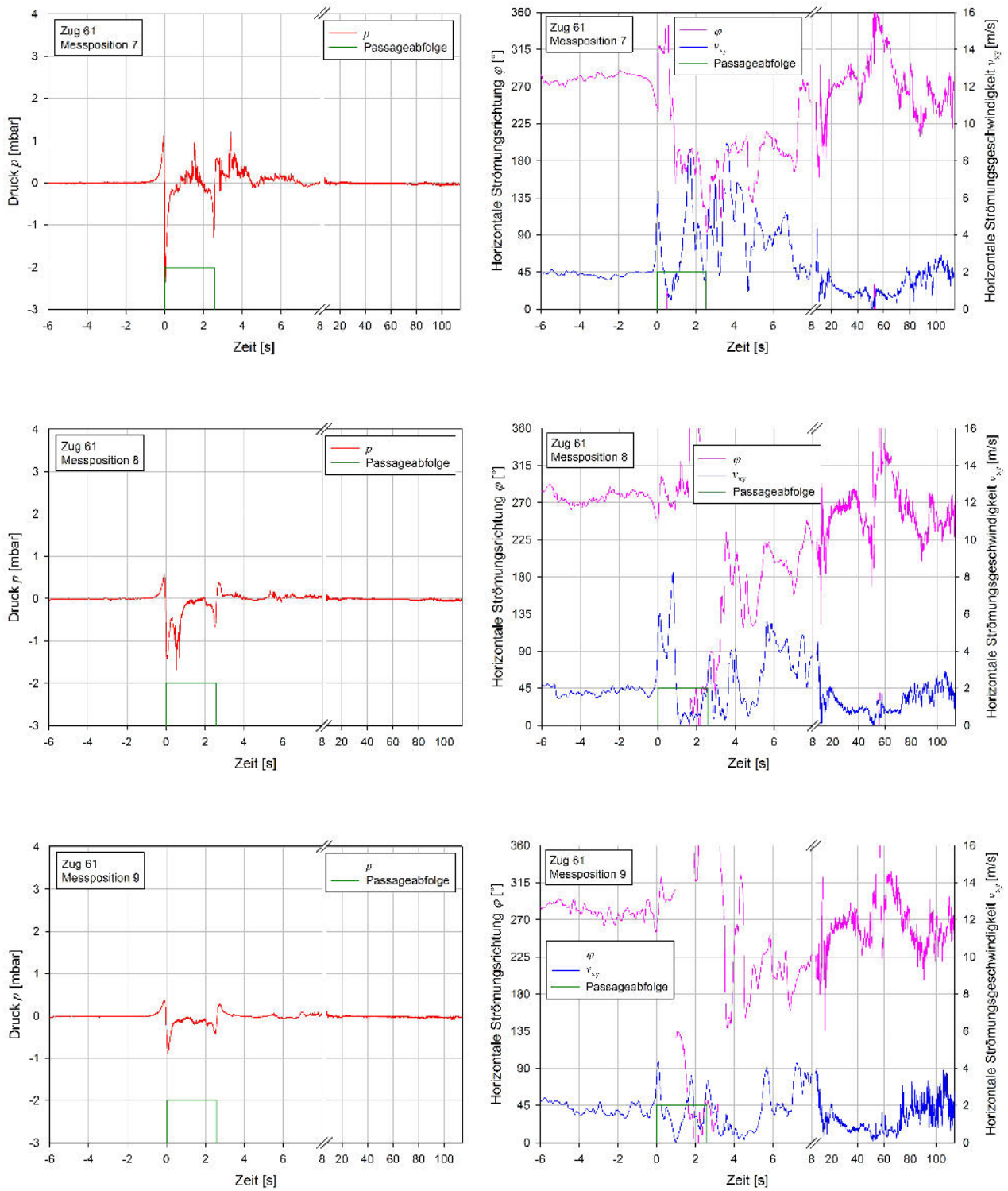
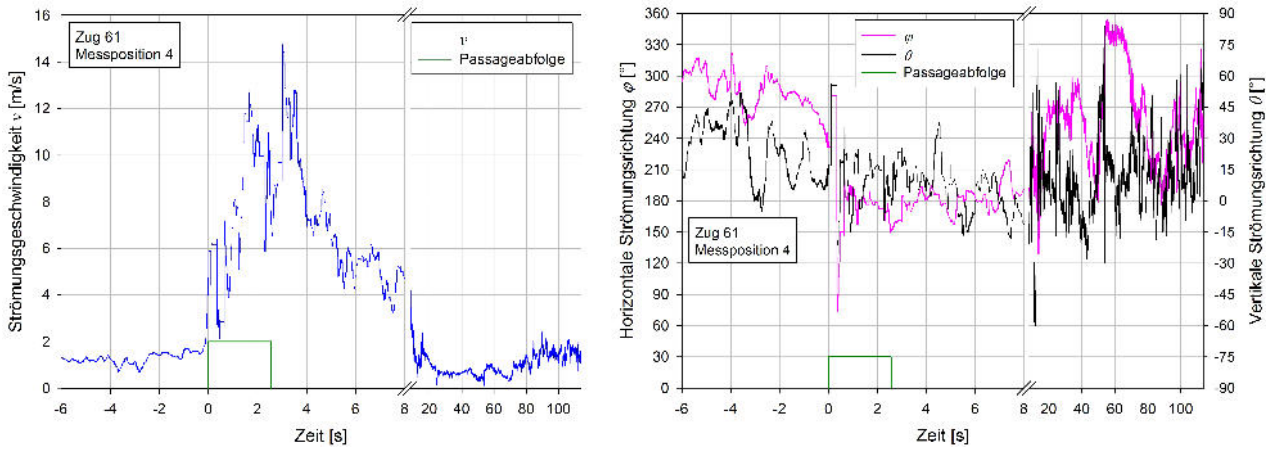


Abbildung B.258: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 61 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.



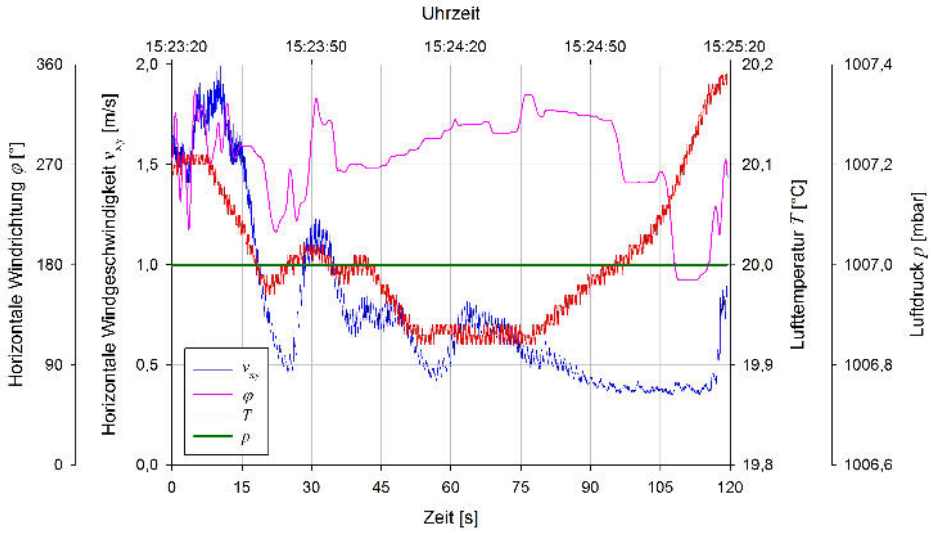




Abbildung B.259: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 61 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 61 ($\bar{v} = 145{,}7 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 62: Doppelstockzug K2 (4 Wagen)

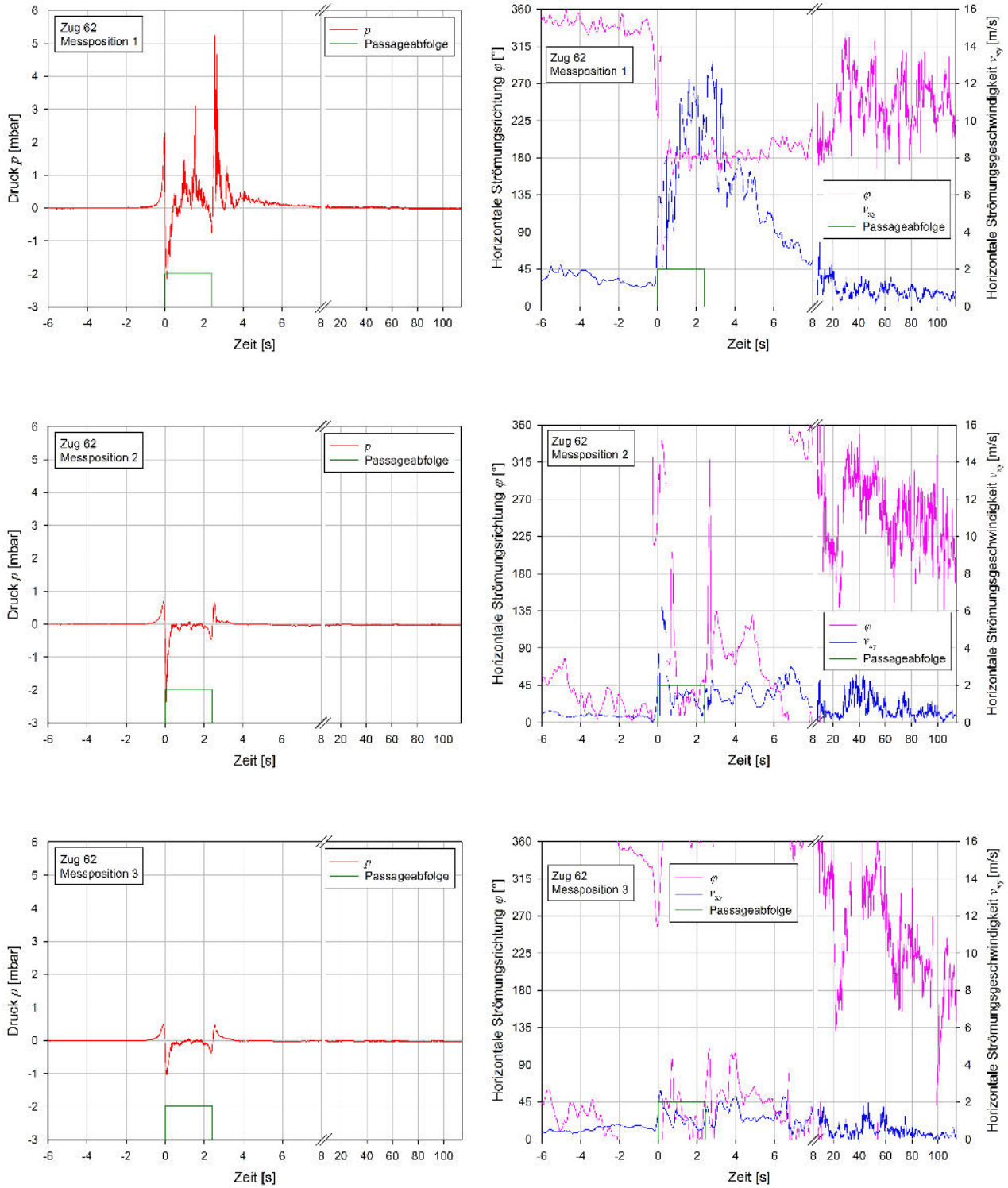


Abbildung B.260: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 62 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

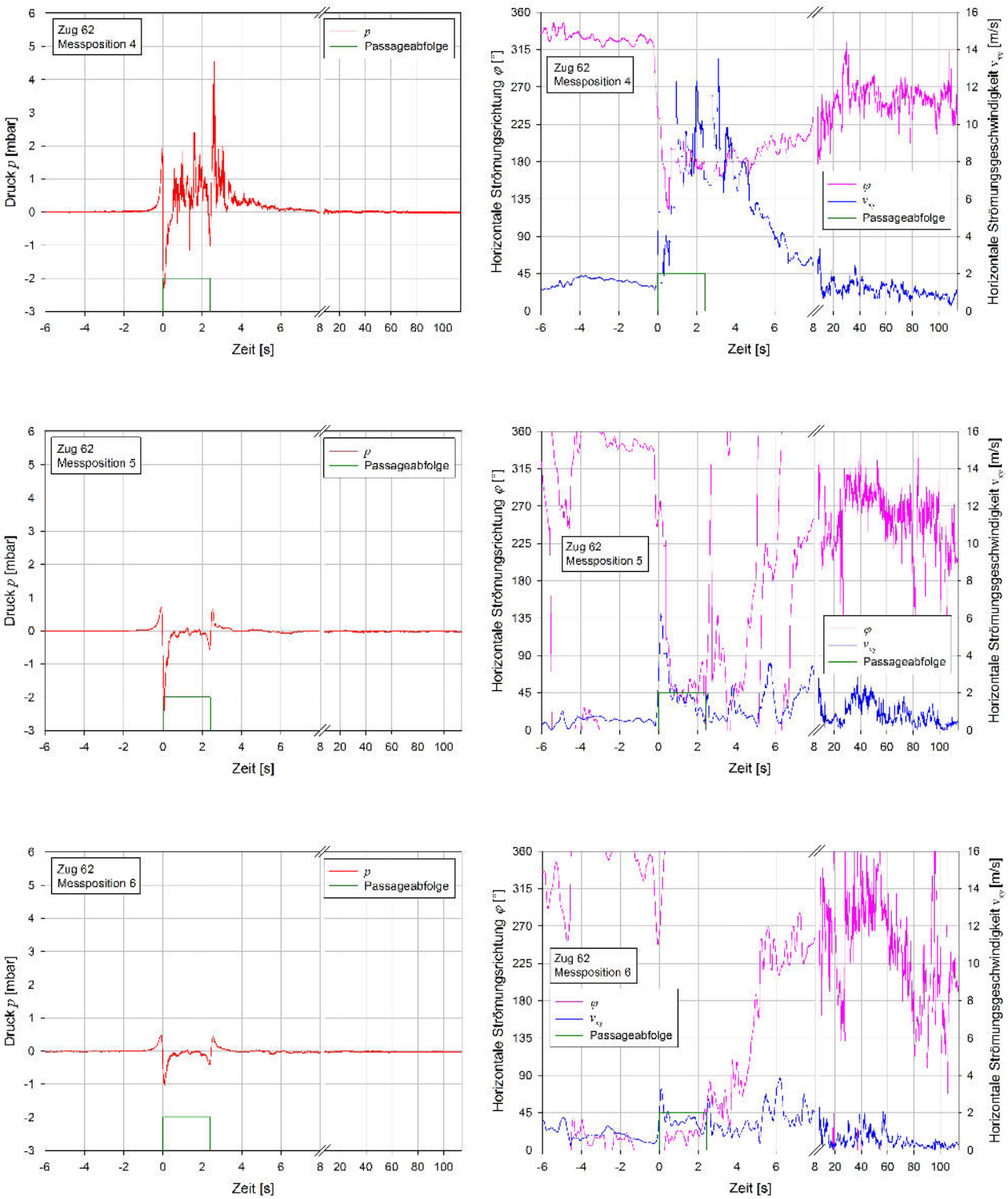


Abbildung B.261: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 62 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

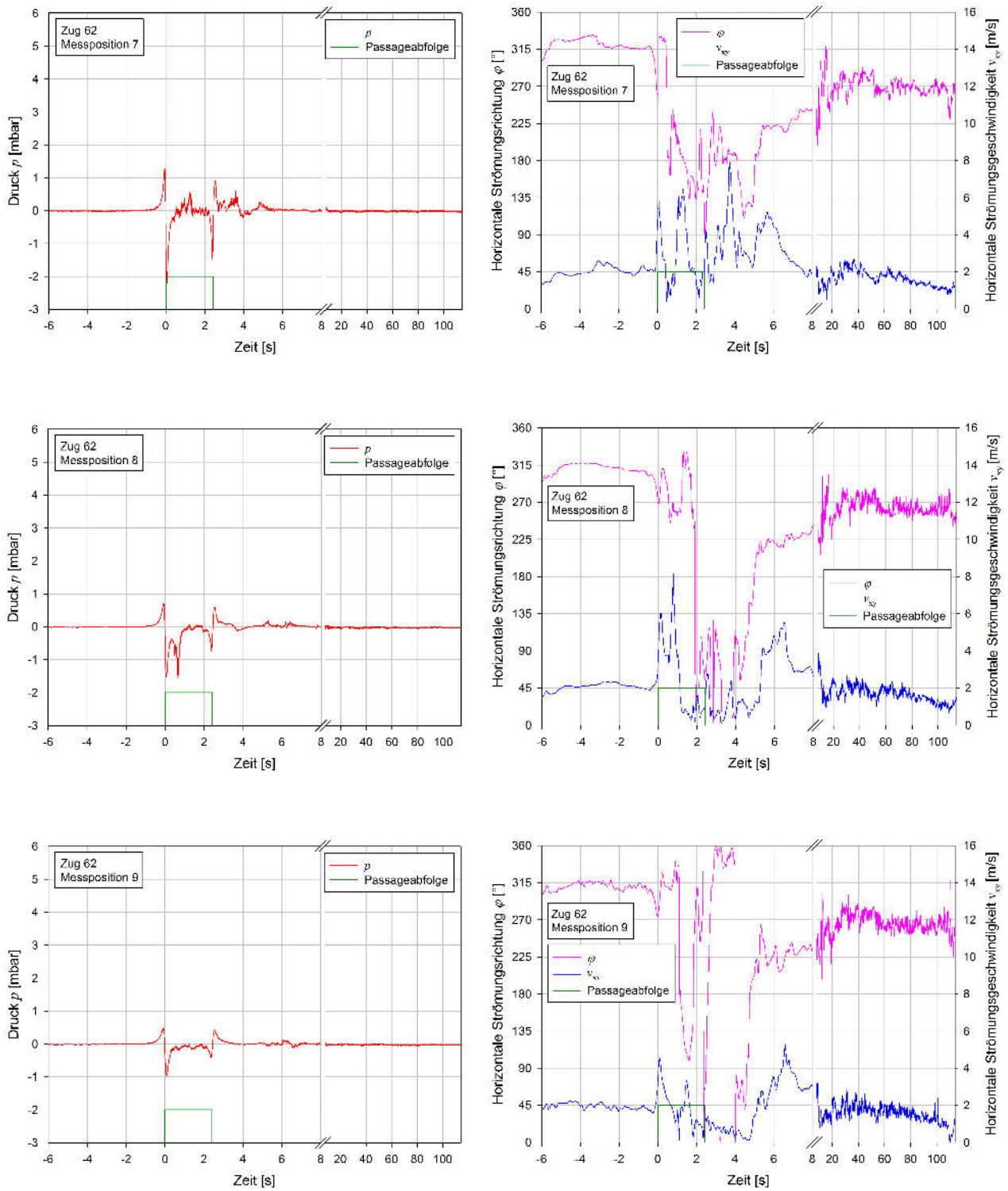


Abbildung B.262: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 62 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$.

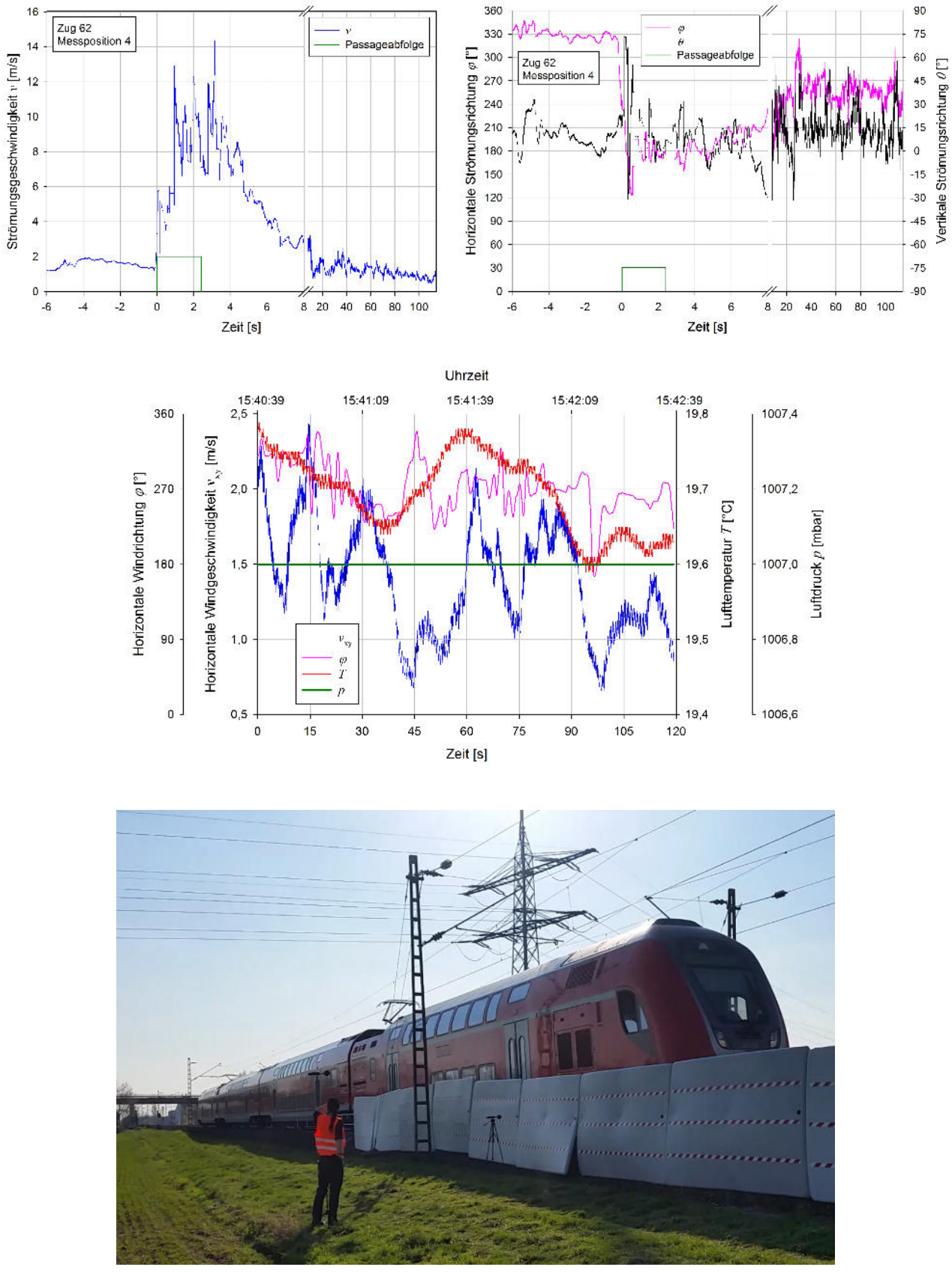


Abbildung B.263: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 62 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 62 ($\bar{v} = 152{,}3 \pm 1{,}0\,\mathrm{km/h}$).

Zug 63: S-Bahn (Baureihe 425)

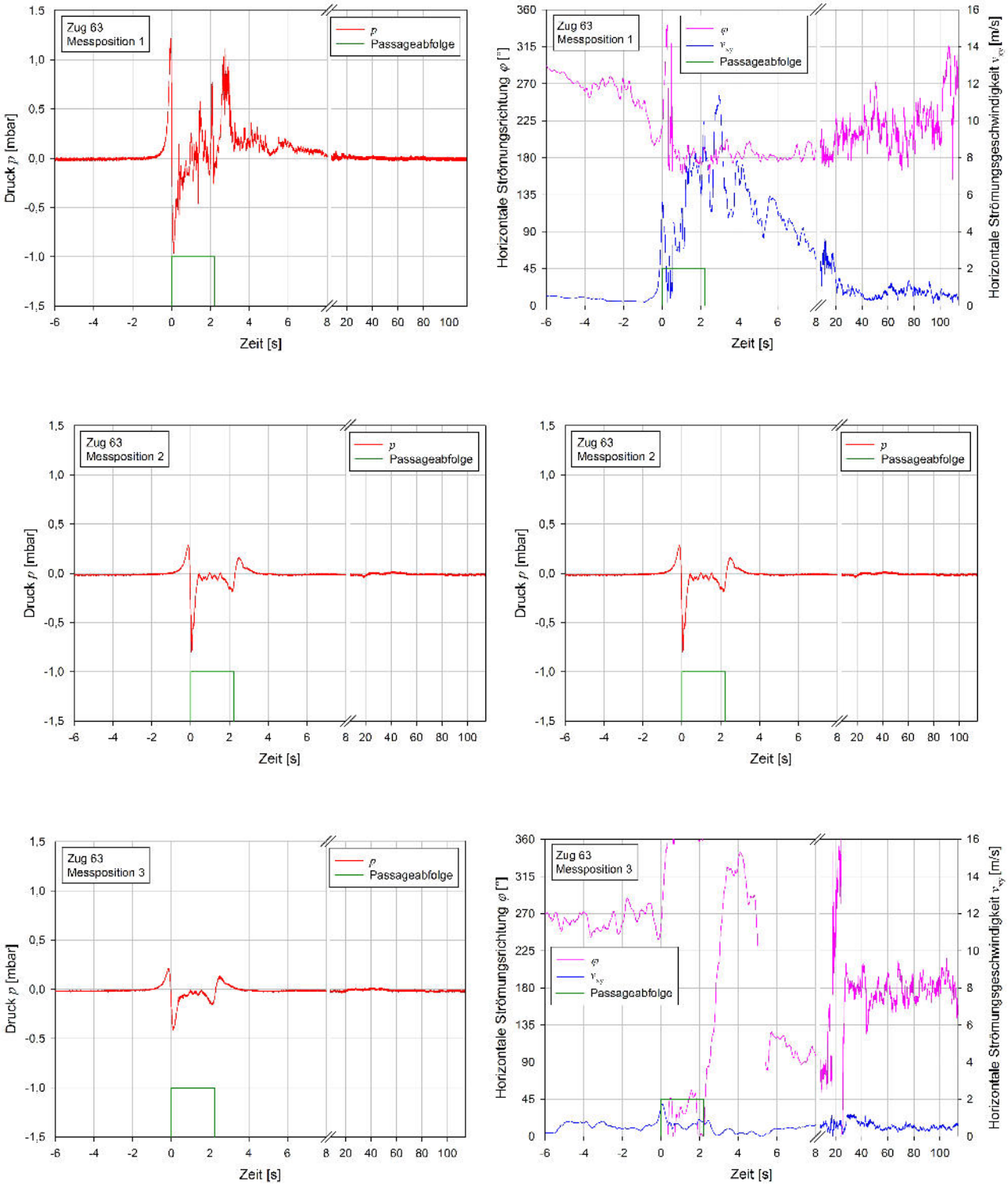


Abbildung B.264: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 63 an den Messpositionen 1, 2 und 3. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

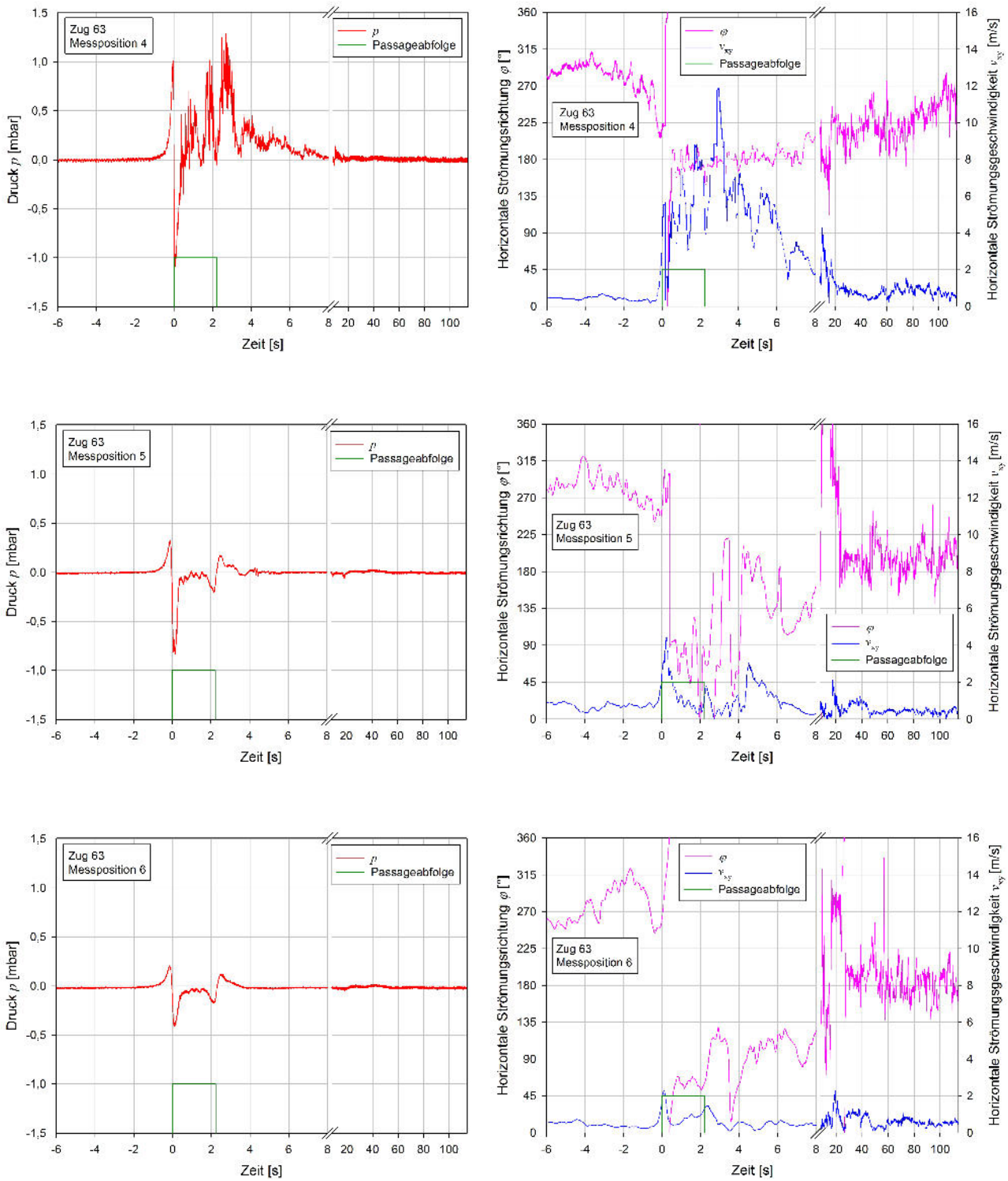


Abbildung B.265: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 63 an den Messpositionen 4, 5 und 6. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

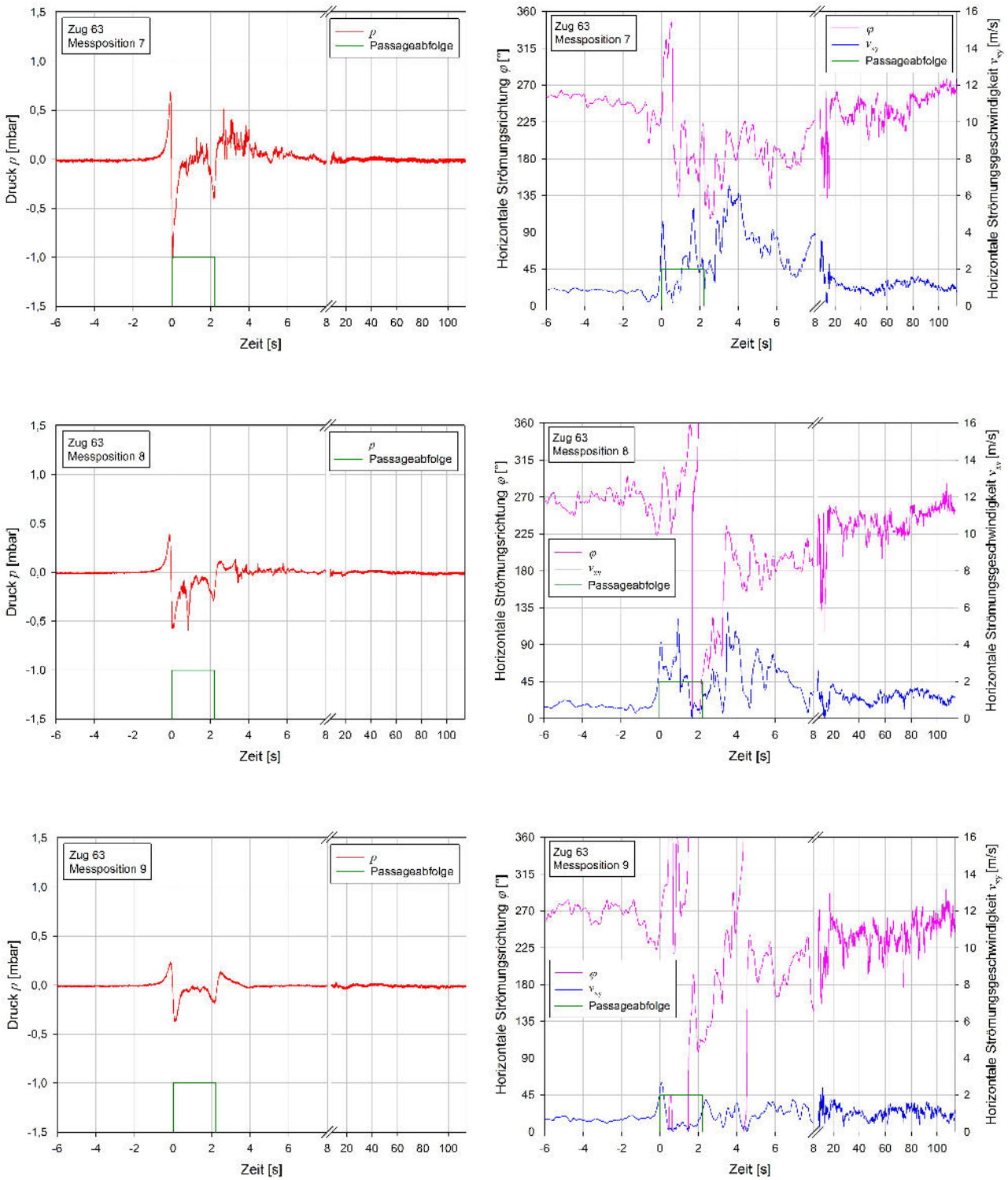


Abbildung B.266: Druck- und horizontale Strömungsmesswerte bei Zug 63 an den Messpositionen 7, 8 und 9. Die Zuggeschwindigkeit betrug $\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$.

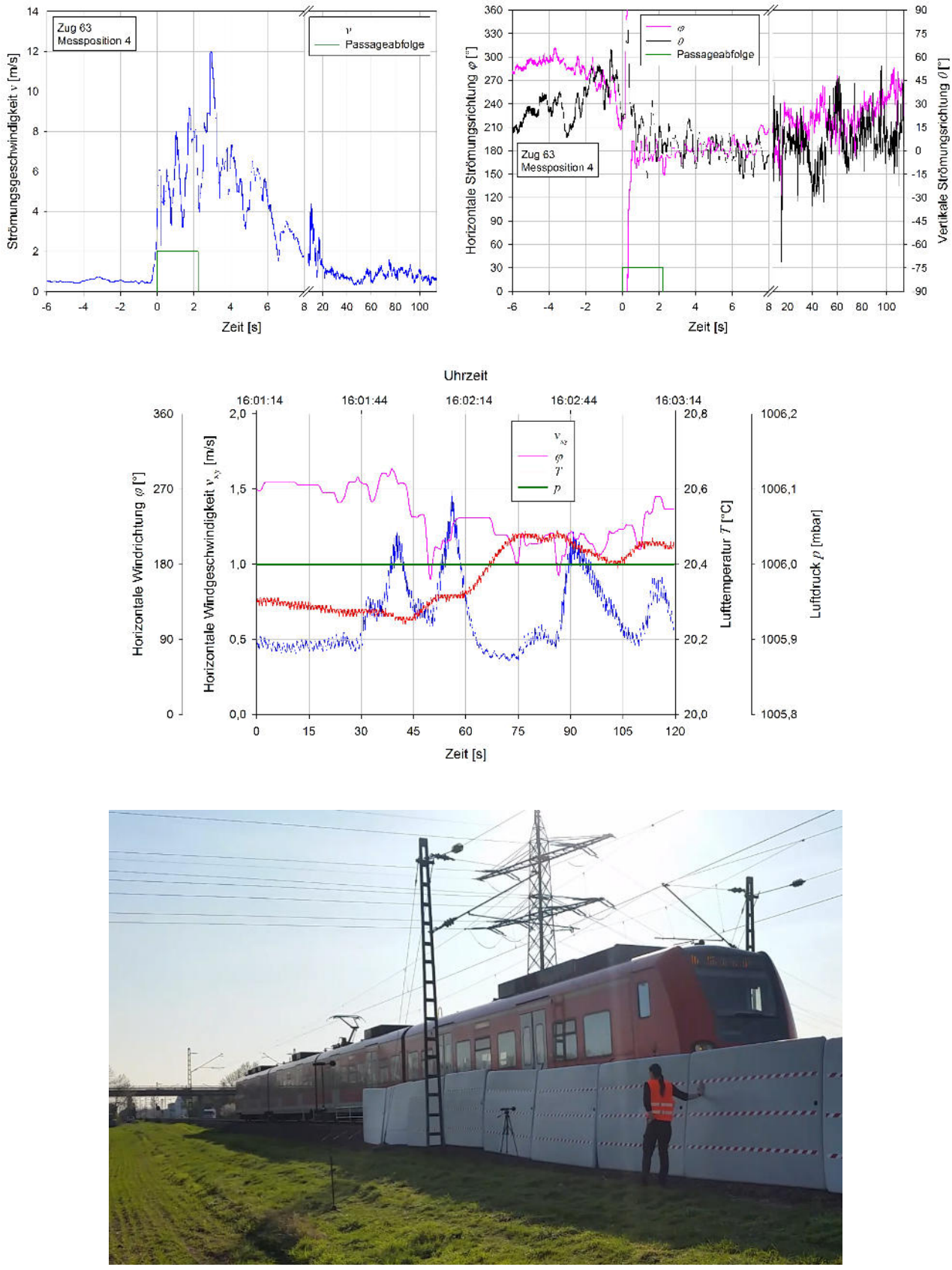


Abbildung B.267: Oben: 3D-Strömungsgeschwindigkeit sowie horizontale und vertikale Strömungsrichtung bei Zug 63 an der Messposition 4. Mitte: Messdaten der Wetterstation während der Zugpassage. Unten: Foto der Handy-Kamera von Zug 63 ($\bar{v} = 108{,}7 \pm 0{,}4\,\mathrm{km/h}$).