



Weiterentwicklung einer mobilen Schnellbauwand zur räumlichen Trennung der Beschäftigten im Gleisbereich von der Gefahrenquelle Zug

– Zweiter Zwischenbericht –

F-06-2201

Projekt Nr. F-06-2201

Weiterentwicklung einer mobilen
Schnellbauwand zur räumlichen Trennung
der Beschäftigten im Gleisbereich von der
Gefahrenquelle Zug

– Zweiter Zwischenbericht –

Dr. Dirk Lorenz, Hermann Schiebler, Dr. Jan-Niklas Tödt
Diplom-Physiker

Dr. Sebastian Nissle
Diplom-Ingenieur Maschinenbau

Paul Schupin
Master of Science Chemieingenieurwesen
Bachelor of Engineering Elektro- und Informationstechnik

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit
und Arbeitsmedizin e. V.

Mannheim, Juli 2024

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	2
1.1 Gefahrenbereich und feste Absperrung	2
1.2 Mobile Schnellbauwand	5
1.3 Ziel	5
2 Grundlagen und Grenzwerte	6
2.1 Grundlagen	6
2.2 Grenzwerte	7
2.2.1 Grenzwerte aus Literatur und Regelwerk	7
2.2.2 Grenzwerte für die mobile Schnellbauwand	8
3 Entwicklungsstand der mobilen Schnellbauwand	11
3.1 Prototyp 1	11
3.2 Prototyp 2	11
3.3 Prototyp 3	12
3.4 Prototyp 4	14
4 Untersuchung der Funktionalität des vierten Prototyps der mobilen Schnellbauwand	15
4.1 Messaufbau und -ablauf	15
4.1.1 Messaufbau	15
4.1.2 Messablauf	17
4.2 Messergebnisse	18
4.3 Auswertung	19
4.3.1 Prototyp 4 mit dem Boeglitex 140	19
4.3.1.1 Windgeschwindigkeit	19
4.3.1.2 Windbeschleunigung	22
4.3.1.3 Druck	25
4.3.2 Prototyp 4 mit dem Boeglitex 665	29
4.3.2.1 Windgeschwindigkeit	29

4.3.2.2	Windbeschleunigung	29
4.3.2.3	Druck	34
5	Diskussion der Ergebnisse	37
	Literaturverzeichnis	40
A	Kenndaten der Netzstoffe	41
B	Tabellen	44
C	Diagramme	60

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
$a, a(t)$	m/s^2	Windbeschleunigung
A	%	Abschwächung
\bar{A}	%	mittlere Abschwächung
\bar{A}_G	%	mittlere Abschwächung bezüglich maximaler Windgeschwindigkeit
\bar{A}_B	%	mittlere Abschwächung bezüglich maximaler Windbeschleunigung
\bar{A}_D	%	mittlere Abschwächung bezüglich mittlerer Druckbelastung
\bar{A}_{DP}	%	mittlere Abschwächung bezüglich Bug-Druckwellen
\bar{a}	m/s^2	mittlere Windbeschleunigung
\bar{a}_i	m/s^2	mittlere Windbeschleunigung an Messposition $i = 1 - 6$
a_{\max}	m/s^2	maximale Windbeschleunigung
a_g	m/s^2	Grenzwert für die Windbeschleunigung
A_M	m^2	maximale Querschnittsfläche eines Menschen
b	m	Breite des Gefahrenbereichs um ein Gleis
c_a	-	Koeffizient zur Bestimmung der zusätzlichen Masse
c_w	-	Reibungskoeffizient im Newton'schen Reibungsgesetz
h_O	m	Höhe über Gleisoberkante
H	m	Größe eines Menschen
m	kg	Masse eines Menschen
$p, p(t)$	mbar	Druck
\bar{p}	mbar	mittlere Druckbelastung
\bar{p}_g	mbar	Grenzwert für die mittlere Druckbelastung
\bar{p}_i	mbar	mittlerer Druck an Messposition $i = 1 - 6$
\bar{u}	m/s	mittlere Windgeschwindigkeit
\bar{u}_i	m/s	mittlere Windgeschwindigkeit an Messposition $i = 1 - 6$
dp/dt	mbar/s	Druckanstiegsgeschwindigkeit
S	%	Schutzwirkung
\bar{S}	%	mittlere Schutzwirkung
\bar{S}_G	%	mittlere Schutzwirkung bezüglich maximaler Windgeschwindigkeit
\bar{S}_B	%	mittlere Schutzwirkung bezüglich maximaler Windbeschleunigung
\bar{S}_D	%	mittlere Schutzwirkung bezüglich mittlerer Druckbelastung
\bar{S}_{DP}	%	mittlere Schutzwirkung bezüglich Bug-Druckwellen

$u, u(t)$	m/s	Windgeschwindigkeit
u_{\max}	m/s	maximale Windgeschwindigkeit
u_g	m/s	Grenzwert für die Windgeschwindigkeit
v	km/h	Zuggeschwindigkeit
V_M	m ³	Volumen eines Menschen
x_A	m	Distanz zwischen Gleisachse und einer Postion neben dem Gleis
x_{FA}	m	Distanz zwischen Gleisachse und äußerem Rand einer festen Absperrung
Δp	mbar	maximaler Druckunterschied, welcher bei der Passage eines Zug-Bugs oder -Hecks auftritt
Δp_g	mbar	Grenzwert für die Druckamplitude
Δp_i	mbar	maximale Druckunterschied, welcher bei der Passage eines Zug-Bugs oder -Hecks an den Messpositionen $i = 1-6$ auftritt
Δt	s	Breite eines Zeitfensters
ρ	kg/m ³	Luftdichte
σ	%	Standardabweichung

Glossar

Begriff	Definition
Absenkung	Prozentsatz, auf den eine aerodynamische Belastung wie Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung oder Druck durch die Anwesenheit der mobilen Schnellbauwand abgesenkt wird.
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.
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 Beschäftigte durch bewegte Schienenfahrzeuge gefährdet werden können.
Gleisoberkante	Höchster Punkt des Schienenprofils bezogen auf die Horizontale, auf der das Schienenprofil ruht.
Nachbargleis	Gleis neben dem Arbeitsgleis, wobei der Sicherheitsraum zwischen den Gefahrenbereichen beider Gleise weniger als 0,8 m beträgt.
Mobile Schnellbauwand	Eine schnell am Gleis montierbare zaunartige Vorrichtung zur klaren Trennung des Menschen von der Gefahrenquelle Zugpassage.

Schutzwirkung	Prozentsatz, um den eine aerodynamische Belastung wie Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung oder Druck durch die Anwesenheit der mobilen Schnellbauwand abgesenkt wird.
Sicherheitsraum	Der an den Gefahrenbereich anschließende Raum für den sicheren Aufenthalt der Beschäftigten bei der Vorbeifahrt von Schienenfahrzeugen.
Windsperre	Winddichte, senkrecht stehende Wand, bestehend aus aufblasbaren Schallschutzmatten.
Zugpassage	Vorbeifahrt eines Zuges an einem definierten Ort.

Zusammenfassung

Der im März 2024 existierende Prototyp 4 der *mobilen Schnellbauwand*¹ der Pfeil Sicherung GmbH wird am 11.04.2024 in seinen beiden Varianten einer Eignungsprüfung unterzogen. Die Varianten unterscheiden sich durch die Art der Bespannung mit verschiedenen Netzgeweben, nämlich dem Boeglitex 140 und dem Boeglitex 665 vom Schweizer Hersteller Boegli Wagatex Engineering. Untersucht wird die Fragestellung, ob die *Schutzwirkung* der mobilen Schnellbauwand gegenüber aerodynamischen Belastungen (Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck) bei Zugpassagen mit einer Zuggeschwindigkeit bis zu $v = 160$ km/h ausreichend ist. Die Schutzwirkung ist hinsichtlich aerodynamischer Belastungen auf Beschäftigte am Gleis genau dann ausreichend, wenn das folgende, von den Unfallversicherern geforderte Kriterium eingehalten wird: Die aerodynamischen Belastungen hinter der mobilen Schnellbauwand bei $v = 160$ km/h dürfen nicht größer sein als bei $v \leq 120$ km/h auf freiem Feld in $x_A = 2,30$ m Entfernung von der *Gleisachse*.

Die Untersuchung ergibt, dass der Prototyp 4 das genannte Kriterium hinsichtlich Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und mittlerer Druckbelastung erfüllt.

Ausreichender Schutz im Sinne des Kriteriums ist hingegen für die physikalische Größe Druck in Bezug auf Bug-Druckwellen von Zügen beim Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 nicht sicher gegeben. Der Grenzwert wird hier zwar eingehalten, jedoch passierten beim Test dieser Variante keine schnellen InterCity die mobile Schnellbauwand. Schnelle InterCity sind der worst case hinsichtlich aerodynamischer Belastungen. Es kann folglich nicht sicher ausgeschlossen werden, dass bei der Passage von schnellen InterCity der Grenzwert beim Einsatz des Prototypen 4 mit Boeglitex 140 moderat überschritten wird.

Dennoch kommt der Autor zu dem Schluss, dass auch der Prototyp 4 mit dem Boeglitex 140 die Anforderungen an die Schutzwirkung prinzipiell erfüllt weil die Bug-Druckwellen weit unter den Grenzwerten liegen, die in der Literatur genannt werden. Weiterhin sind diese Druckwellen nicht relevant für die Gleichgewichtsstabilität von Menschen. Darüber hinaus sind auch heute Beschäftigte am Gleis Druckwellen dieser Höhe ausgesetzt wenn sie an festen Absperrungen arbeiten und Züge mit Geschwindigkeiten über 120 km/h passieren.

Weil der Prototyp 4 mit dem Boeglitex 140 das Kriterium der Unfallversicherer nicht sicher erfüllt und eine bessere Alternative existiert, wird empfohlen, den Prototypen 4 in Kombination mit dem Boeglitex 665 als mobile Schnellbauwand einzusetzen. Dessen Schutzwirkung ist signifikant höher als bei Verwendung des Boeglitex 140 und erfüllt das Kriterium der Unfallversicherer.

¹ *Kursiv* gestellte Begriffe sind im Glossar erläutert.

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. Aufgrund der Verschiedenheit der Arbeitsaufgaben im Gleisbereich und Geländetypen um Gleisanlagen existiert nicht eine einzige Sicherungsmaßnahme, sondern ein Set. Beispiele aus diesem Set sind die Gleissperrung, die feste Absperrung (FA), automatische Warnsysteme (AWS, ATWS) oder Streckenposten [10]. Im Folgenden werden gängige Begriffe und aktuell gültige Regelungen am Beispiel der FA erläutert.

1.1 Gefahrenbereich und feste Absperrung

Um einige der gängigen Sicherungsmaßnahmen sinnvoll anwenden zu können, wird auf den *Gefahrenbereich* links und rechts neben einem Gleis zurückgegriffen. In [3, 4] ist dieser definiert und in Abbildung 1.1, oben dargestellt. Man entnimmt der Abbildung, dass die Breite b des Gefahrenbereichs von der Zuggeschwindigkeit v abhängt, jedoch nicht vom Zugtyp. Letzterer hat aufgrund verschiedener Zugfrontformen einen signifikanten Einfluss auf die Höhe aerodynamischer Belastungen.

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 *Gleisoberkante*. Er ist nicht abhängig von der Zuggeschwindigkeit, dem Zugtyp oder der Art der Gegenstände. 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.

Die 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 und verhindert ein unbeabsichtigtes Betreten des Gefahrenbereichs des Nachbargleises. 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 [10].

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 $x_{\text{FA}} = 1,90 \text{ m}$ darf dabei keinesfalls unterschritten werden. Ob neben der FA weitere Sicherungsmaßnahmen wie Arbeitsunterbrechung, Gefahrenbereichsräumung oder automatische Warnsysteme (AWTS) erforderlich sind, hängt von der Zuggeschwindigkeit und vom Montageort der FA ab. Seit Januar 2016 gilt das in Tabelle 1.1 dargestellte Schema [8].

v (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

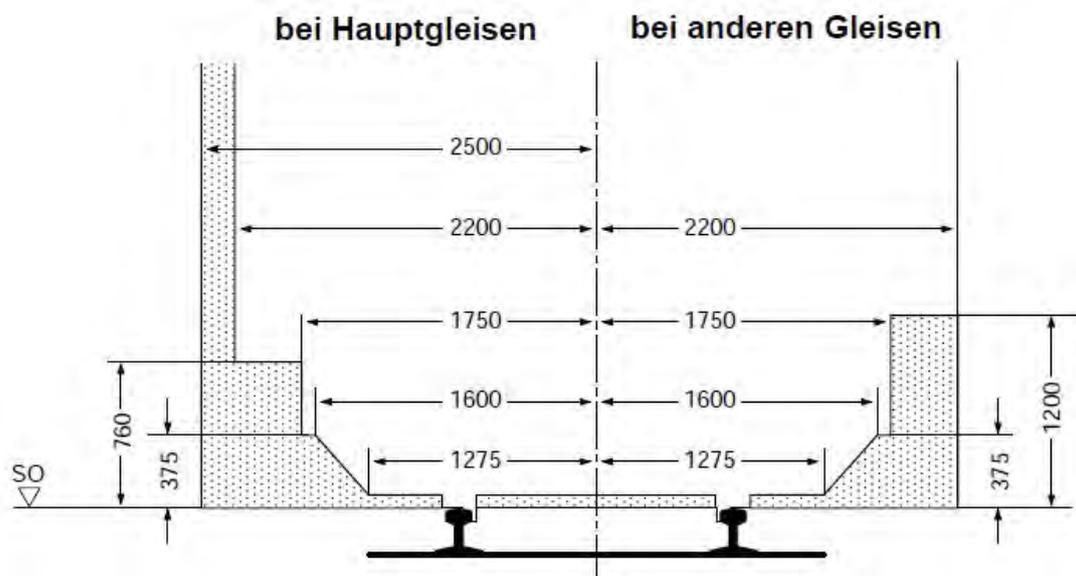
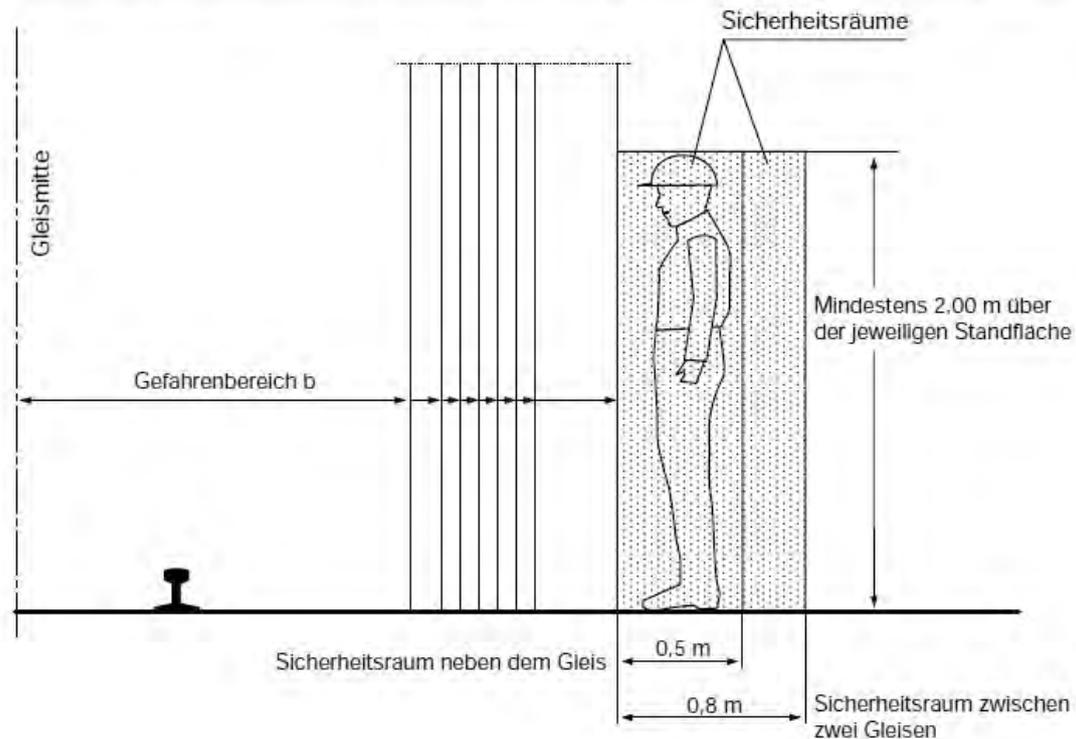


Abbildung 1.1: Oben: Definition des personenbezogenen Gefahrenbereichs um ein Gleis. Unten: Raum für das Ablegen von Geräten, Baustoffen und Bauteilen. In den mit Punkten gekennzeichneten Raum dürfen Geräte, Baustoffe und Bauteile nur abgelegt werden, wenn die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen getroffen sind [3, 4].

Tabelle 1.1: Regelungen zum Einsatz von Kombinationen aus festen Absperrungen und automatischen Warnsystemen [9].

v [km/h]	Sicherungsmaßnahmen
$v \leq 120$	<ul style="list-style-type: none"> – FA auf Grenze Gefahrenbereich – Einschneiden in Gefahrenbereich bis 0,2 m zulässig – Kein AWTS – Weiterarbeit bei Zug
$120 < v \leq 160$	<ul style="list-style-type: none"> – FA auf Grenze Gefahrenbereich – Einschneiden in Gefahrenbereich nicht zulässig – Einsatz von AWTS – Arbeitsunterbrechung bei Zug
$120 < v \leq 160$	<ul style="list-style-type: none"> – Gefahrenbereich überschreitet FA in den Arbeitsbereich hinein um maximal 0,6 m, wobei $x_{FA} \geq 1,90$ m einzuhalten ist – Einsatz von AWTS – Arbeitsunterbrechung bei Zug – Räumung des Gefahrenbereichs neben der FA bei Zug im Nachbargleis

Aus Tabelle 1.1 entnimmt man, dass bei Sicherung mit FA bis zu einer Geschwindigkeit von $v = 120$ 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 $v > 120$ km/h ist zusätzlich zur FA eine Warnung erforderlich. Bei $v > 120$ km/h müssen die Arbeiten darüber hinaus für die Zugvorbeifahrt unterbrochen werden [8, 10]. Wenn die FA um mehr als 20 cm innerhalb des Gefahrenbereichs steht, muss dieser vor der Zugpassage geräumt werden wenn gilt $v > 120$ km/h.



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

1.2 Mobile Schnellbauwand

All diesen Sicherungsmaßnahmen ist gemein, dass sie den Beschäftigten physikalisch nicht vollständig von der Gefahr des fahrendes Zuges trennen. Aus diesem Grund muss – wie bereits im vorigen Abschnitt ausgeführt – bei der Passage von schnell fahrenden Zügen ($v > 120$ km/h) akustisch gewarnt, die Arbeit niedergelegt oder der Gefahrenbereich verlassen werden. Dies kostet Kapazitäten der Bahn, verlängert Bauarbeiten und birgt Fehlerquellen bei der Sicherung der Beschäftigten.

Aus diesem Grund entwickelt die Firma Pfeil Sicherung GmbH eine mobile Schnellbauwand, welche als erste Sicherungsmaßnahme überhaupt den Beschäftigten vollständig physikalisch von der Gefahrenquelle Zug trennt. Eine funktionierende mobile Schnellbauwand bringt einige Vorteile mit sich:

- Beschäftigte am Gleis müssen dem Bahnbetrieb keine Beachtung mehr schenken und können sich vollständig auf die Bautätigkeit konzentrieren.
- Die Gefahr für Arbeitsunfälle und Berufserkrankung sinkt weil das Gleis bzw. Nachbargleis nicht mehr betretbar ist und aerodynamische Belastungen reduziert werden.
- Sicherungsfirmen schonen ihre Personalressourcen und können so eine höhere Anzahl an Baustellen betreuen. Fehler bei der Sicherung werden unwahrscheinlicher.
- Die Bahn kann die Anzahl von Langsamfahrstellen vermindern und bei Vorbeifahrten mit $120 \text{ km/h} < v \leq 160 \text{ km/h}$ auf den Einsatz akustischer Warnungen verzichten.
- Das System ist simpel und erspart dem Eisenbahnbundesamt Kontrollen.

1.3 Ziel

Ziel dieses Projektes ist es, eine mobile Schnellbauwand bis zur Einsatzreife zu entwickeln, um damit die klare Trennung von Beschäftigten und der Gefahrenquelle Zug zu ermöglichen. Die Aufgabe der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V. (FSA) ist dabei, Optimierungsvorschläge zu unterbreiten sowie durch Messung und Simulationen den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der mobilen Schnellbauwand im Hinblick auf die Sicherheit der Beschäftigten zu erbringen. Der Schutz der Beschäftigten am Gleis vor aerodynamischen Belastungen gilt per Definition durch die Unfallversicherer als gewährleistet, wenn die aerodynamischen Belastungen hinter der mobilen Schnellbauwand bei der Passage eines Zuges mit $v = 160$ km/h stets kleiner oder gleich denjenigen sind, welche Züge mit einer Geschwindigkeit von $v = 120$ km/h in einer Entfernung von 2,30 m zur Gleisachse auf freiem Feld erzeugen [9, 11].

2 Grundlagen und Grenzwerte

2.1 Grundlagen

Der Autor dieses Berichts hat im Rahmen eines parallel laufenden FSA-Forschungsprojektes, welches sich mit den aerodynamischen Belastungen auf Beschäftigte am Bahn-
gleis befasst, eine äußerst umfangreiche Literaturstudie durchgeführt. Dabei wurde ein-
schlägige Literatur der letzten 70 Jahre gesichtet [12]. Aus dieser Studie konnte die
Lehre gezogen werden, dass 3 verschiedene physikalische Größen auf Menschen wirken
wenn Züge diese passieren: Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck. Bis
heute wird in der Fachwelt diskutiert, wie diese Größen im Detail auf Menschen wirken
und welche Grenzwerte gelten sollten.

Eine Mehrheit der Autoren sieht die Druckimpulse Δp (Spitze-Spitze-Druckänderung),
welcher in erster Linie bei der Passage des Zug-Bugs und -Hecks entstehen, aufgrund ih-
rer zeitlichen Kürze als vergleichsweise wenig relevant für Gleichgewichtsstörungen bei
Menschen an. Die dabei auftretenden Druckamplituden sind in der Regel zu gering, um
Schäden am menschlichen Trommelfell hervorzurufen. Die Druckimpulse können sich
aber auf Dauer negativ auf Bauwerke und Ähnliches auswirken. Aus diesem Grund
taucht die Größe Druck im Europäischen Regelwerk bei der Bewertung von aerody-
namischen Belastungen nur im Zusammenhang mit der Zulassung von Lokomotiven
auf und dort erst bei Zuggeschwindigkeiten oberhalb 160 km/h. Druckbelastungen, die
zwischen der Passage von Zug-Bug und -Heck auftreten, sind höherfrequent als die Δp
und werden darum als unbedenklich eingestuft.

Der Betrag der Kraft, die durch strömende Luft auf Menschen ausgeübt wird, kann
mit der Formel (2.1) abgeschätzt werden:

$$F_R = \frac{1}{2} c_w \rho A_M u^2 + c_a \rho V_M a \quad (2.1)$$

In (2.1) stellt der erste Term die Windreibung dar und der zweite Term den Anteil
der Kraft, der durch die Windbeschleunigung hervorgerufen wird. $c_w \approx 1,2$ und c_a
sind Koeffizienten, $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ die Luftdichte, $A_M \approx 0,65 \text{ m}^2$ und $V_M \approx 0,073 \text{ m}^3$
die Querschnittsfläche und das Volumen eines Standard-Menschen ($H = 1,80 \text{ m}$, $m =$
 75 kg) und u sowie a stehen für die Windgeschwindigkeit und die Windbeschleunigung.
Der Zahlenwert von c_a ist bis heute für Menschen unbekannt, dürfte aber im Bereich
 $1,5 \pm 1$ liegen [12]. Einig ist sich die Fachwelt darüber, dass die Windbeschleunigung
einen Beitrag zur aerodynamisch induzierten Kraft auf einen Menschen liefert. Dieser
wird jedoch im aktuellen Regelwerk vernachlässigt. Das Argument hierfür ist erneut,
dass der zweite Term in (2.1) bei Zugpassagen zwar merkliche Werte annehmen kann,
diese windbeschleunigungsinduzierte Kraft jedoch vergleichsweise kurz ansteht, so dass
sie aufgrund der Trägheit des Menschen kaum Wirkung auf dessen Gleichgewicht zeigt.
Die detaillierte Wirkung der Windbeschleunigung auf Menschen bei einer Zugpassage
ist bis heute unbekannt.

Das Argument der menschlichen Trägheit gilt auch in Bezug auf die Wirkung der Windreibungskraft, hervorgerufen durch die Windgeschwindigkeit gemäß des ersten Terms in (2.1). Um dieser Trägheit in Bezug auf die gleichgewichtsrelevante Windreibungskraft Rechnung zu tragen, schreibt die DIN EN 14067-4 „Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke“ [6] die Filterung der gemessenen Windgeschwindigkeit vor und zwar durch die Bildung des gleitenden Mittelwertes mit einer Zeitfensterbreite von $\Delta t = 1$ s. Durch diese Filterung werden schnelle Windgeschwindigkeitsänderungen stark abgeflacht. Weil die Windbeschleunigung die zeitliche Ableitung der Windgeschwindigkeit ist, sinkt die Windbeschleunigung durch die Filterung so stark, dass der zweite Term in (2.1) keinen relevanten Beitrag mehr liefert. Aus diesem Grund wird im Regelwerk für die Bewertung aerodynamischer Belastungen durch Zugpassagen lediglich die Windgeschwindigkeit herangezogen.

Zur Stützung der obigen Aussagen hat der Autor einen der großen Experten dieses Themas, Prof. Dr. Chris J. Baker von der University of Birmingham, per eMail kontaktiert und die Frage gestellt, wie die Größen Windgeschwindigkeit, Windbeschleunigung und Druck im Zusammenhang mit aerodynamischen Belastungen auf Personen am Gleis bei Zugpassagen einzuordnen sind. Baker schreibt: “Die Windgeschwindigkeit ist ein Stellvertreter für alle physikalischen Prozesse, die sich auf die Menschen in der Nähe eines Zuges auswirken. [...] Ich glaube nicht, dass der Druck für die Stabilität von Personen von großer Bedeutung ist. Die einzigen Bereiche mit hohem Druck sind die Bereiche um den Bug und das Heck der Züge, und diese erzeugen Druckimpulse, die in der Regel von sehr kurzer Dauer sind (0,1 bis 0,2 Sekunden) und den Körper in keiner Weise belasten. Für den Rest der Zugpassage sind die Druckbelastungen gering. [...] Die Windbeschleunigung kann sich auf die Stabilität des Menschen auswirken, aber man muss bedenken, dass der menschliche Körper die Rolle eines räumlichen/zeitlichen Filters spielt, so dass Veränderungen über einen Zeitraum von etwa einer Sekunde wichtig sind und nicht kurzfristige Veränderungen, d. h. es dauert eine gewisse Zeit, bis sich die windinduzierten Kräfte auf den Menschen aufbauen. Bei Änderungen der Windgeschwindigkeit über diesen Zeitraum hat der Körper natürlich Zeit, sich anzupassen, so dass die Sache noch komplexer ist. Alles in allem denke ich, dass die Windgeschwindigkeit ein gutes Stellvertreterinstrument für alles andere ist, was vor sich geht.“ [2]

Die Aussagen von Baker unterstützen die weiter oben gemachten Aussagen.

2.2 Grenzwerte

2.2.1 Grenzwerte aus Literatur und Regelwerk

In der Literatur findet man zahlreiche Vorschläge für Grenzwerte bezüglich der Windgeschwindigkeit. Diese beziehen sich mal auf stetigen Wind, mal auf Mittelwerte über Windböen, mal auf Maximalwerte und weitere komplexere Größen per Definition. Gemein ist allen, dass die Rohdaten der gemessenen Windgeschwindigkeit gefiltert werden, zumeist durch Bildung eines gleitenden Mittelwertes mit einem Zeitfenster gewisser Breite. Diese Fensterbreite kann Werte zwischen 0,3 s bis hin zu Minuten annehmen. In der EU gelten aktuell die Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven

und Personenwagen“ (TSI) [7] sowie die DIN EN 14067-4 [6]. Während Erstgenannte Grenzwerte beinhaltet, beschreibt Zweitgenannte die Messverfahren und Messdatenaufbereitung. Laut Baker gelten die in der TSI angegebenen Werte streng genommen zwar nur für die Zulassung von Lokomotiven und Personenwagen, jedoch gelten die Zahlen in der EU als gesichert ungefährlich für das menschliche Gleichgewicht [2]. Der kleinste dort angegebene Wert ist eine maximale Windgeschwindigkeit von 15,5 m/s für Beschäftigte am Gleis. Zur Prüfung, ob gemessene Windgeschwindigkeiten diesen Grenzwert einhalten, müssen Messdaten gemäß

$$u_{\max} = \bar{u} + 2\sigma \quad (2.2)$$

aufbereitet werden. Dabei ist \bar{u} der gleitende Mittelwert über ein Zeitfenster von $\Delta t = 1$ s Breite und σ die Standardabweichung über alle erfassten Züge gleicher Bauart und Zuggeschwindigkeit bei gleichen Windbedingungen [6].

Bezüglich eines Grenzwertes für die Bug- und Heck-Druckwellen heißt in der DIN EN 14067-4, dass in 2,5 m Entfernung von der Gleismitte und einer Höhe von 1,50 m bis 3,00 m über der Schienenoberkante die Spitze-Spitze-Druckänderung Δp einen Wert von 8 mbar nicht überschreiten darf. Ebenso wie bei der Windgeschwindigkeit bezieht sich dieser Grenzwert auf die Zulassung von Lokomotiven und gilt für eine Zuggeschwindigkeit größer als 160 km/h. In den USA gilt bereits seit den 1970er Jahren ein Grenzwert von 6,89 mbar als für den Menschen unbedenklich. Der Wert von 6,89 mbar darf moderat überschritten werden wenn gilt $dp/dt < 4,14$ mbar/s [1]. Dieser Wert stellt einen plausiblen Mittelwert dar im Feld der Angaben anderer Autoren, welche von 4,14 mbar bis 13,8 mbar reichen.

Für die Windbeschleunigung findet sich kein Grenzwert in der Literatur.

2.2.2 Grenzwerte für die mobile Schnellbauwand

Aufgrund der speziellen Aufgabenstellung und weil der Messaufwand möglichst klein gehalten werden sollte, wurde bei der Untersuchung der mobilen Schnellbauwand auf Funktionalität bezüglich Messprozedere vom Regelwerk abgewichen, dieses jedoch als Orientierung genutzt. Um zu garantieren, dass der Prototyp 4 der mobilen Schnellbauwand die in Abschnitt 1.3 formulierten aerodynamischen Schutzanforderungen sicher erfüllt, wurde nicht nur die Größe Windgeschwindigkeit untersucht, sondern auch die Windbeschleunigung, die Bug-Druckwellen und die mittlere Druckbelastung.

Um das in Abschnitt 1.3 formulierte Kriterium in numerischen Grenzwerten ausdrücken zu können, wurde auf Messungen und Computersimulationen (Abbildung 2.1) zurück gegriffen, welche während des eingangs erwähnten parallel laufenden FSA-Projektes entstanden. Bei diesem Projekt wurden die aerodynamischen Größen von 63 passierenden Zügen verschiedenster Bauart messtechnisch erfasst und zur Kalibration von Computersimulationen der Zugpassagen genutzt [12]. Aus diesen Computersimulationen wurden die Fahrtwindgeschwindigkeiten in 2,30 m Entfernung zur Gleisachse in der Messhöhe von 0,72 m über Gleisoberkante (Abschnitt 4.1.1) für alle relevanten Zugtypen entnommen (Tabelle 2.1). Die höchste Windgeschwindigkeit verursacht der InterCity, weshalb der InterCity als Referenzzug ausgewählt wurde.

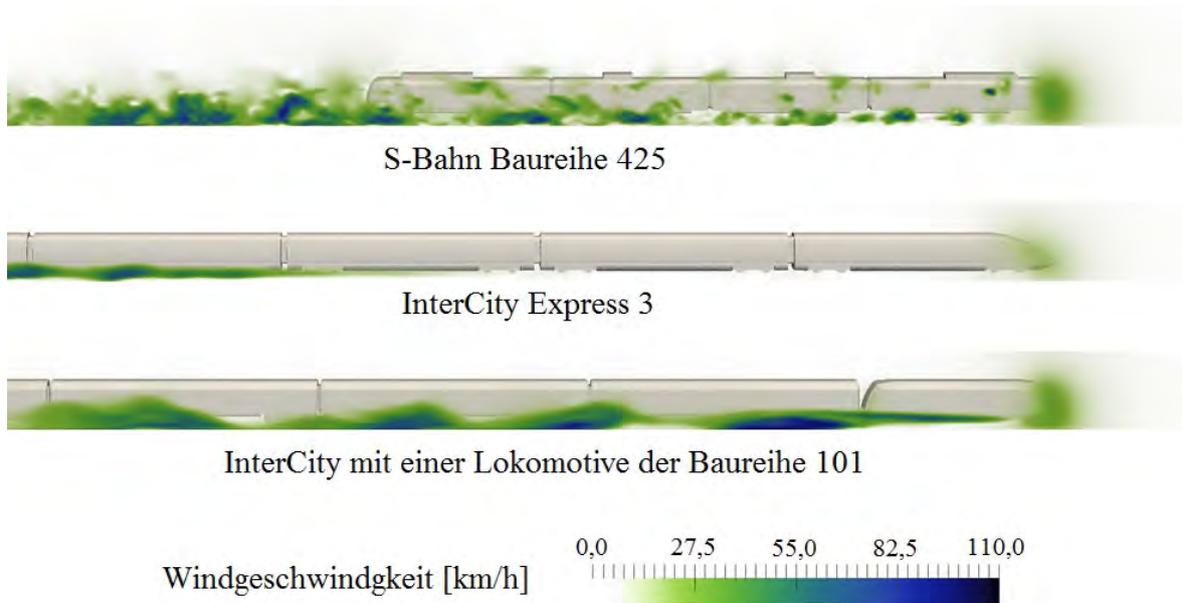


Abbildung 2.1: Simulation der Fahrtwindgeschwindigkeit von verschiedenen Zügen mit einer Geschwindigkeit von $v = 140 \text{ km/h}$.

Weil Grenzwerte für die Windgeschwindigkeit in Bezug auf Gleichgewichtsstörungen beim Menschen in Forschung und Normung noch immer diskutiert werden, wurde die Funktionalität der mobilen Schnellbauwand vor aerodynamischen Belastungen für verschiedene Grenzwerte untersucht, welche aus der Wahl verschiedener Zeitfensterbreiten bei der Messdatenaufbereitung entstehen. Naheliegender ist zunächst, die ungefilterten Daten sowie die gemäß Regelwert gefilterten Daten ($\Delta t = 1 \text{ s}$) zu betrachten. In der Literatur findet man vielfach die Aussage, dass die menschliche Reaktionsdauer zwischen $0,2 \text{ s}$ und $0,4 \text{ s}$ liegt. Das legt den Ansatz nahe, auch eine Datenfilterung mit einer Zeitfensterbreite von $\Delta t = 0,4 \text{ s}$ durchzuführen. Mit diesen Zeitfensterbreiten für die Messdatenmittelung ergeben sich die Grenzwerte aus Tabelle 2.2.

Tabelle 2.1: Maximale simulierte Windgeschwindigkeit für verschiedene Zugtypen bei $v = 120 \text{ km/h}$, $2,30 \text{ m}$ Entfernung zur Gleisachse und $0,72 \text{ m}$ Höhe über der Gleisoberkante. Vor Bestimmung der Maxima fand keine Datenfilterung statt.

InterCity	InterCity Express	Regionalbahn (Doppelstock)
13,93 m/s	7,68 m/s	9,36 m/s

Tabelle 2.2: Grenzwerte für die Windgeschwindigkeit und -beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeitfensterbreite bei der Datenfilterung. Grundlage sind simulierte Windgeschwindigkeiten in $2,30 \text{ m}$ Entfernung zur Gleisachse und $0,72 \text{ m}$ Höhe über der Gleisoberkante für einen InterCity mit $v = 120 \text{ km/h}$.

Δt [s]	u_g [m/s]	a_g [m/s ²]
0,0	13,93	118,0
0,4	13,30	42,8
1,0	11,05	15,0

Aus den Computersimulationen können prinzipiell auch Grenzwerte für die Bug- und Heck-Druckwellen Δp sowie die mittlere Druckbelastung \bar{p} abgeleitet werden, jedoch sind diese nicht auf die Messwerte anwendbar weil bei den Messungen die Nachbildung eines menschlichen Ohres vor den Drucksensoren montiert und dieses entgegen der Fahrtrichtung des Zuges ausgerichtet war (Abschnitt 4.1.1 und Abbildung 4.3). Im Computermodell ist die Berücksichtigung dieser Ohr-Nachbildungen nicht möglich. Dies hat zur Folge, dass durch den Zugfahrtwind ein zusätzlicher Staudruck aufprägte wird, was die Druckmesswerte im Vergleich zu den simulierten Druckwerten erhöht.

Um dennoch einen Grenzwert für den Druck zur Bewertung der mobilen Schnellbauwand abzuleiten, wird auf einen Messwert zurückgegriffen, der im Rahmen dieser Untersuchung erfasst wurde: Ein Güterzug erfüllte die Bedingung $v \approx 120$ km/h und $x_A \approx 2,30$ m. Weil der Sensor an Position 1 in $x_A = 2,23$ m und nicht in $x_a = 2,30$ m und der Zug mit $v = 122$ km/h anstatt mit $v = 120$ km/h unterwegs war, wurde der betreffende Messwert von 4,277 mbar mit dem Korrekturfaktor $f = 0,925$ zum Grenzwert

$$\Delta p_g = 3,96 \text{ mbar} \quad (2.3)$$

nach unten korrigiert. Der Korrekturfaktor wurde aus den Messdaten des eingangs genannten parallel laufenden FSA-Projektes abgeleitet [12]. Aus diesen Messdaten und auch aus der Literatur ist bekannt, dass Güterzüge und InterCity die größten aerodynamischen Belastungen erzeugen. Deshalb stellt (2.3) einen plausiblen Grenzwert dar.

Auch für die mittlere Druckbelastung wurde ein Grenzwert abgeleitet. Dabei wurde bei der Passage des oben genannten Güterzuges über die an Position 1 gemessene zeitliche Druckentwicklung (Betrag) zwischen Passage des Zug-Buges und des -Hecks gemittelt. Zur Korrektur des Abstandes zur Gleisachse und der Zuggeschwindigkeit wurde oben genannter Korrekturfaktor angewandt. Es ergab sich

$$\bar{p}_g = 0,54 \text{ mbar} \quad (2.4)$$

3 Entwicklungsstand der mobilen Schnellbauwand

3.1 Prototyp 1

Die erste Prototyp der mobilen Schnellbauwand bestand aus aufblasbaren Schallschutzmatten mit $2\text{ m} \times 3\text{ m} = 6\text{ m}^2$ Fläche. Diese wurden einseitig in regelmäßigen Abständen mit Laschen aus Klettband versehen, so dass sie auf einfache Art und Weise an den Querstangen der klassischen FA befestigt werden konnten. Die klassische FA wurde durch weitere Querstangen ergänzt, um die Stabilität zu verbessern. Abbildung 3.1 zeigt einen Aufbau dieser Variante zu Demonstrationszwecken. Im Test erwies sich diese Art der mobilen Schnellbauwand als ungeeignet. Die Wände zeigten bei schnellen Zugpassagen Ausschläge von bis zu $\pm 30\text{ cm}$ Auslenkung. Weiterhin verrutschten die Matten nach wenigen Zugpassagen.



Abbildung 3.1: Erster Prototyp einer mobilen Schnellbauwand.

3.2 Prototyp 2

Die genannten Mängel konnten durch Varianten des ersten Prototypen nicht beseitigt werden, so dass unter Mitarbeit der FSA die Aufhängung der Wände am Gleis neu konstruiert wurde. Daraus entstand der zweite Prototyp der mobilen Schnellbauwand,



Abbildung 3.2: Zweiter Prototyp der mobilen Schnellbauwand.

bei der speziell dafür angefertigte Matten als Trennwände verwendet wurden (Abbildung 3.2). Die Aufhängung wurde durch Stützen im Gleisbett und Querverstrebungen so weit stabilisiert, dass nur noch geringe Ausschläge (maximal ± 5 cm) der Wände bei Zugpassagen auftraten. Durch die Gleisbettstützen der Wände nimmt der Aufbau dieses Prototypen vergleichsweise viel Zeit in Anspruch. Darüber hinaus verlieren die Stützen mit zunehmender Standdauer der Schnellbauwand an Standfestigkeit weil sich der Schotter bewegt. Die dadurch erforderliche Konstruktion einer automatischen Nachstellvorrichtung für die Stützen wurde als zu aufwendig erachtet. Wegen der obendrein langen Aufbaudauer wurde dieser Prototyp schließlich wieder verworfen.

3.3 Prototyp 3

Der dritte Prototyp kommt ohne die oben genannten Gleisbettstützen aus, wie man Abbildung 3.3 entnimmt. Stattdessen wird die mobile Schnellbauwand nun auf den Gleisschwellen abgestützt. Um die Windbelastung auf die mobilen Schnellbauwände abzusenken, verwenden diese Wände anstelle der geschlossenen Matten Netzgewebe aus Kunststoff. Eine Abschätzung aus Druck- und Fahrtwind-Messdaten, welche die FSA Anfang 2020 am Bahngleis gewinnen konnte, ergab, dass die Schnellbauwände aerodynamische Belastungen auf etwa 57% der Werte ohne Schnellbauwand absenken müssen wenn die Schutzvorgaben der Unfallversicherer eingehalten werden sollen (siehe letzter Absatz des vorigen Abschnitts 1.3). Durch eine Messkampagne am 07.12.2022 wurde festgestellt, dass diese Variante der mobilen Schnellbauwand die Windgeschwindigkeit auf mindestens 43% und die Bug-Druckwellen auf mindestens 87% der Werte absenkt, welche ohne die Anwesenheit der mobilen Schnellbauwand auf freiem Feld auftreten. Dadurch wird das Kriterium gemäß Abschnitt 1.3 für die Windgeschwindigkeit

sehr gut erfüllt, jedoch nicht das für die Bug-Druckwellen [12]. Wie in Kapitel 2 ausgeführt wird, ist jedoch eine Druckbelastung in dieser Höhe und Dauer nicht relevant für Gleichgewichtsstörungen bei Menschen.



Abbildung 3.3: Prototyp 3 der mobilen Schnellbauwand.

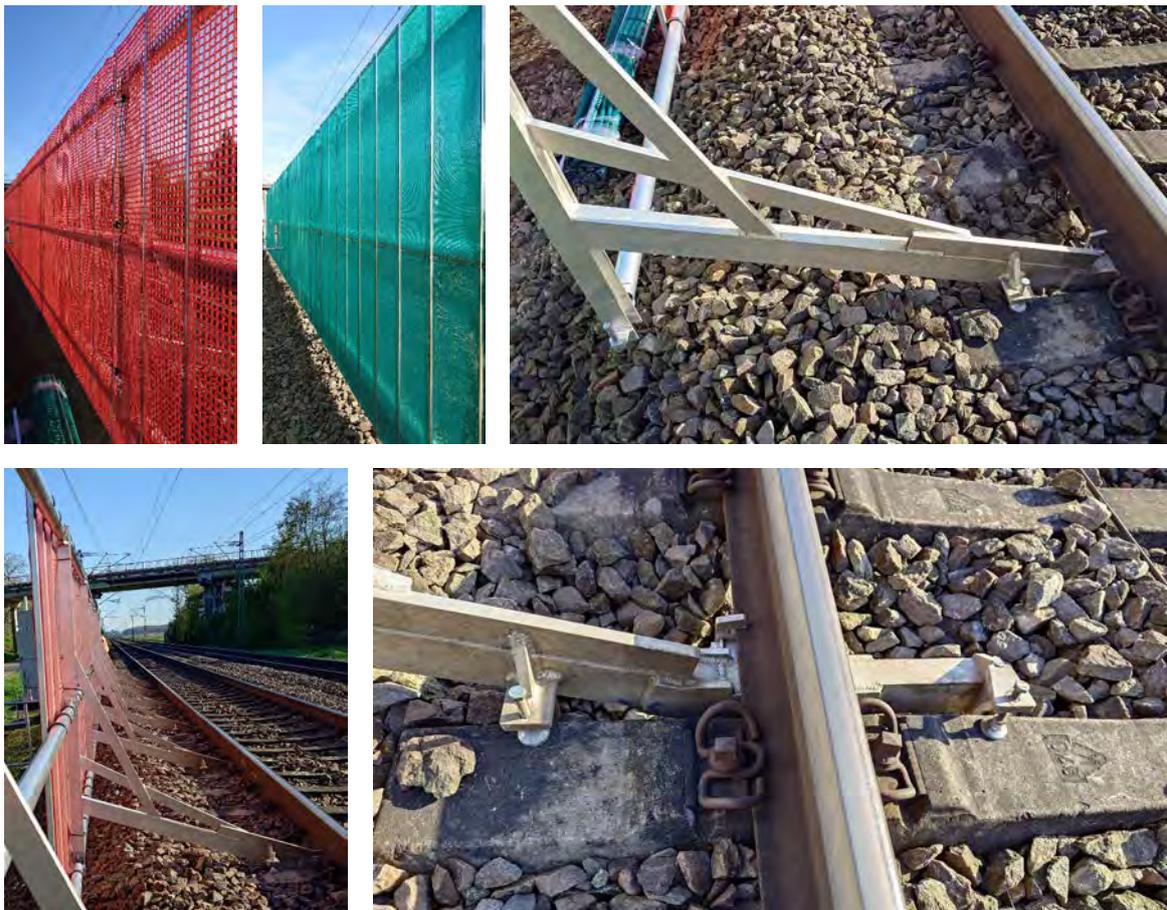


Abbildung 3.4: Prototyp 4 der mobilen Schnellbauwand mit zwei verschiedenen Netzvarianten und einer Aufhängung zur Einstellung des Neigungswinkels.

3.4 Prototyp 4

Seit Anfang des Jahres 2024 existiert ein vierter Prototyp, bei dem gegenüber der dritten Variante im Wesentlichen die mechanische Konstruktion weiter verstärkt und optimiert wurde (Abbildung 3.4). Die neue Konstruktion soll Verbiegen der Stangen durch Druckwellen besser entgegenwirken und ermöglicht das Einstellen des Neigungswinkel der mobilen Schnellbauwand gegenüber der Gleisebene. Weiterhin können die Netze nun leicht aus- und eingehängt werden. Zwei neue Netzarten des Herstellers Boegli Wagatex Engineering kommen zum Einsatz, nämlich das Boeglitex 140 (Abbildung 3.4, rotes Netz) und das Boeglitex 665 (Abbildung 3.4, grünes Netz). Die technischen Daten der Netze entnimmt man den Abbildungen A.1 und A.2 im Anhang.

Ebenso wie bei früheren Messkampagnen muss auch der vierte Prototyp darauf hin untersucht werden, ob seine Funktionalität ausreichend ist, um das von den Unfallversicherern gesetzte Kriterium zu erfüllen (siehe letzter Absatz des vorigen Abschnitts 1.3). Nachfolgend wird die Untersuchung im Detail dargelegt.

4 Untersuchung der Funktionalität des vierten Prototyps der mobilen Schnellbauwand

4.1 Messaufbau und -ablauf

Um die Schutzwirkung der mobilen Schnellbauwand der vierten Generation gegenüber aerodynamischen Belastungen auf Beschäftigte am Gleis zu überprüfen, wurden am 11.04.2024 Messungen am Bahngleis in der Nähe von Gengenbach durchgeführt.

4.1.1 Messaufbau

Für die Messungen wurden 10 m der mobilen Schnellbauwand entlang des Gleises aufgebaut. Dabei war die Wand aus Netzgewebe vom Typ Boeglitex 140 rund 2,14 m von der Gleisachse entfernt. Weil nur 10 m der mobilen Schnellbauwand zur Verfügung standen, wurde zusätzlich am Beginn der Schnellbauwand eine *Windsperre* in einem Winkel von 60° zum Gleis hinzugefügt, um den Messaufbau hinter der mobilen Schnellbauwand vor ungewolltem Zugfahrtwind und Druckwellen zu schützen (Abbildungen 4.2 und 4.3). Um zu vermeiden, dass die Sensoren hinter der Schnellbauwand aufgrund der Windsperre in einer Unterdruckblase positioniert werden, wurde auf Simulationen des Druck- und Windgeschwindigkeitsfeldes zurückgegriffen. Aus den Simulationsergebnissen (Abbildung 4.1) wurden die Positionen der Wind- und Drucksensoren abgeleitet, wie sie in den Abbildung 4.2 und 4.3 zu sehen sind. In 10 m Entfernung vor Beginn der Windsperre wurden 3 Ultraschallanemometer mit je einem Drucksensor mit Ohrverkleidung in Position 1: 2,23 m, Position 2: 2,50 m und Position 3: 2,98 m Entfernung zur Gleisachse in einer Höhe von 0,72 m über der Gleisoberkante montiert. In einer

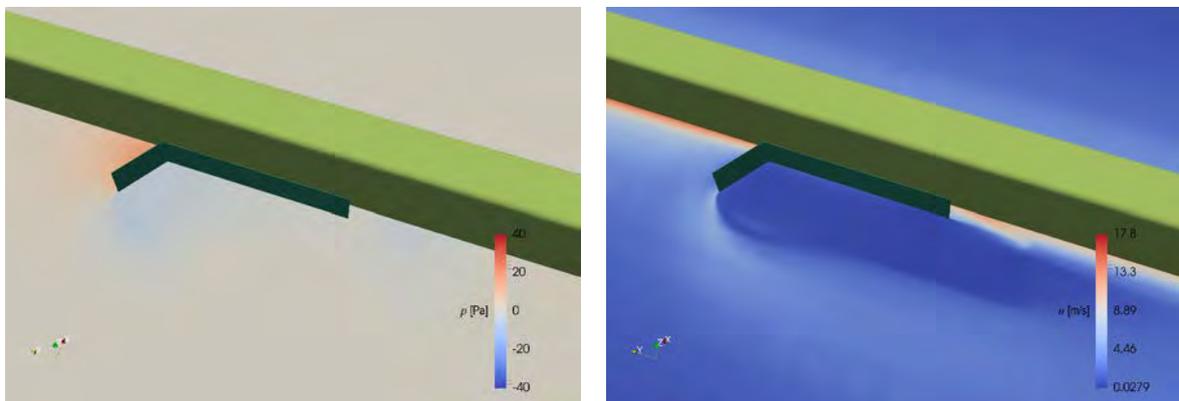
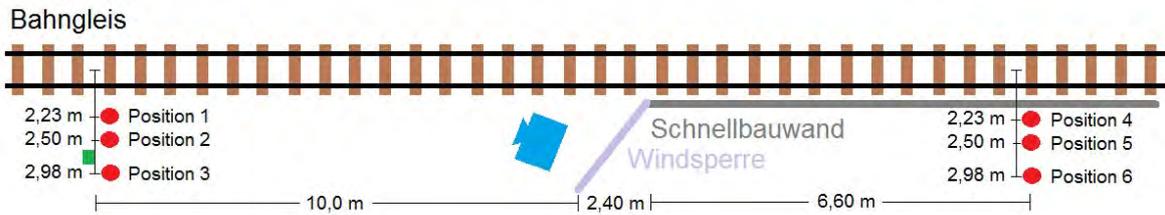


Abbildung 4.1: Simulation der Druck- (links) und Windgeschwindigkeitsverhältnisse (rechts) an der aufgebauten mobilen Schnellbauwand mit Windsperre.



Ultraschallanemometer und Drucksensoren mit Ohr
Radar
Mikrocomputer mit Kamera

Abbildung 4.2: Schematisierter Messaufbau.



Abbildung 4.3: Oben von links nach rechts: Ultraschallanemometer mit Drucksensoren vor der Windsperre mit Radar, hinter der mobilen Schnellbauwand, Mikrocomputer mit Kamera, Paul Schupin mit Spannungsversorgung und Transientenrekorder. Unten: Gesamtüberblick.

Entfernung von 6,60 m nach Beginn der mobilen Schnellbauwand wurden 3 Ultraschallanemometer mit einem Drucksensor mit Ohrverkleidung in Position 4: 2,23 m, Position 5: 2,50 m und Position 6: 2,98 m Entfernung zur Gleisachse in einer Höhe von 0,72 m über der Gleisoberkante montiert. Die Positionen der Sensoren auf freiem Feld bzw. vor dem Beginn der Schnellbauwand korrespondieren folglich mit den Positionen der Sensoren hinter der mobilen Schnellbauwand.

Die Höhe von 0,72 m über Gleisoberkante wurde gewählt weil sich in dieser Höhe das Brustbein einer stehenden, erwachsenen Person mit einer Körpergröße von 1,80 m befindet. Aus Erfahrung ist bekannt, dass eine Gleichgewichtsstörung einer Person am einfachsten durch einen Stoß in dieser Körperhöhe zu erreichen ist. Zwar schreibt die Norm DIN EN 14067-4 „Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke“ [6] die Messung der Windgeschwindigkeit in 0,2 m Höhe über der Gleisoberkante vor weil dort die höchsten Windgeschwindigkeiten durch fahrende Züge auftreten, jedoch ist a) der Angriffshebel durch die geringere Höhe über dem Erdboden kleiner, b) der aus Simulationen gewonnene Grenzwert (Kapitel 2) in 0,2 m entsprechend größer und c) aus früheren Untersuchungen die enorme Abschirmwirkung der verwendeten Netzstoffe in Bezug auf die Windbelastung bereits bekannt.

4.1.2 Messablauf

Bei Annäherung eines Zuges wird dieser durch das Radar erfasst. Die Zuggeschwindigkeit wird an den Mikrocomputer ausgegeben, der oberhalb einer vorab eingestellten Geschwindigkeitsschwelle von $v = 60 \text{ km/h}$ die Datenaufzeichnung an Transientenrekorder und Kamera (Abbildung 4.4) startet. Nach definierter Zeitdauer schaltet die



Abbildung 4.4: Screenshot eines vom Mikrocomputer-Kamerasystem erfassten Güterzuges mit Personen- und Güterwagen-Kombination (Zug 4).

Datenaufzeichnung automatisch ab. Zeitpunkt der Zugankunft, Zugtyp, Zuggeschwindigkeit und Besonderheiten werden notiert. Anschließend ist die Apparatur bereit für einen erneuten Messzyklus. Gegen 12:30 Uhr wurde das Boeglitex 140-Netz gegen das Boeglitex 665 ausgetauscht.

4.2 Messergebnisse

Messtechnisch vollständig erfasst wurden 20 Züge, bestehend aus Güterzügen, Inter-City, InterCity Express und Regionalbahnen. Nach 10 Zügen wurde das Netzmaterial getauscht. Die wichtigsten Daten dazu sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Alle relevanten gemessenen und abgeleiteten Daten sind in den Anhängen B und C aufgelistet sowie grafisch dargestellt. Die Züge und deren Passage wurden video- und bildtechnisch erfasst, um das Verhalten der mobilen Schnellbauwand bei der Zugpassage zu dokumentieren. Mit einer Drohne wurden Luftaufnahmen aufgezeichnet.

Tabelle 4.1: Wichtigste Daten der messtechnisch erfassten Züge.

Nr.	Uhrzeit	Zugtyp	v [km/h]	Anmerkung
1	11:13	Regionalbahn BR 463	160	Netzkanten- und Drohnen-Video
2	11:20	Güterzug	122	kein Video
3	11:39	ICE 4	162	
4	11:45	Güterzug	102	2 Personenwagen zu Beginn
5	11:52	Regionalbahn BR 463	153	
6	12:02	ICE 4	161	kein Video
7	12:05	Regionalbahn BR 463	155	
8	12:16	Güterzug	100	
9	12:31	Regionalbahn BR 463	153	
10	12:38	ICE 4	163	nur Drohnen-Video und Fotos
11	13:05	IC	161	ab hier Netz Boeglitex 665
12	13:16	Regionalbahn BR 463	141	Drohnen-Video
13	13:25	Güterzug	91	
14	13:52	Regionalbahn RB 463	155	
15	14:04	ICE 3	164	Netzkanten-Video
16	14:10	Regionalbahn BR 463	163	
17	14:15	ICE 4	154	
18	14:34	Güterzug	101	Drohnen-Video
19	14:42	ICE 4	164	Drohnen-Video
20	14:45	Regionalbahn BR 463	162	Drohnen-Video

4.3 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 vorzunehmen. Auf diese Weise wurden aus den gemessenen Windgeschwindigkeitskurven $u(t)$ die jeweiligen Maxima u_{\max} ermittelt sowie die zeitlichen Ableitungen $a(t)$ gebildet. Letztere sind die Windbeschleunigungen, für die ebenfalls die Maxima a_{\max} ausfindig gemacht wurden. Bei der Auswertung der Druckkurven wurden die Bug-Druckwellen ermittelt sowie die Beträge der zeitlichen Druckentwicklung zwischen Passage von Bug und Heck der Züge gemittelt und so die mittlere Druckbelastung berechnet. Die Wind-Messdaten wurden sowohl nach DIN EN 14067-4 als auch mit einer alternativen Filterung mit $\Delta t = 0,4\text{s}$ aufgearbeitet. Auch eine direkte Betrachtung der Rohdaten wurde durchgeführt, um den worst case abzubilden, denn je kleiner das Filter-Zeitfenster, desto größer sind die Minima und Maxima. Die maximalen Windgeschwindigkeiten, Windbeschleunigungen und Drücke sind in den Tabellen B.1 bis B.7 für jede Messposition (Abbildung 4.2) und Filterung in Anhang B aufgelistet.

Gemäß der in Abschnitt 1.3 formulierten Zieldefinition, sollen die aerodynamischen Belastungen hinter der mobilen Schnellbauwand bei der Passage von Zügen mit $v = 160\text{ km/h}$ stets kleiner oder gleich denjenigen sein, welche Züge mit einer Geschwindigkeit von $v = 120\text{ km/h}$ in einer Entfernung von $x_A = 2,30\text{ m}$ zur Gleisachse auf freiem Feld erzeugen. Grenzwerte, welche die letztgenannten Bedingungen repräsentieren, wurden in Abschnitt 2.2.2 abgeleitet. Nachfolgend werden die hinter der mobilen Schnellbauwand gemessenen Maxima mit den Grenzwerten durch gemeinsame Auftragung in Diagrammen miteinander verglichen.

4.3.1 Prototyp 4 mit dem Boeglitex 140

4.3.1.1 Windgeschwindigkeit

In den Abbildungen 4.5 bis 4.7 sind die maximal gemessenen Windgeschwindigkeitswerte für die Messorte 4-6, also hinter dem Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140, mit verschiedenen Filterungen dargestellt. Eingetragen sind weiterhin die in Abschnitt 2.2.2 abgeleiteten und in Tabelle 2.2 dargestellten Grenzwerte.

Man entnimmt den Abbildungen, dass die gemessenen Windgeschwindigkeitsmaxima deutlich unterhalb des geforderten Grenzwertes liegen und zwar unabhängig von der Art der Datenaufarbeitung bzw. Datenfilterung. Gut erkennbar ist, dass die Werte für die u_{\max} sinken mit zunehmender Breite des Zeitfensters für die Filterung, d. h. von Abbildung 4.5 ($\Delta t = 0\text{ s}$) hin zu Abbildung 4.7 ($\Delta t = 1,0\text{ s}$).

Um die Absenkung A bzw. die Schutzwirkung S des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 in Bezug auf die Windgeschwindigkeit numerisch ausdrücken zu können, wurden die Mittelwerte gebildet über alle Daten, die zwischen der Passage von Zugbug und -heck liegen. Anschließend wurden die Quotienten aus den Mittelwerten der korrespondierenden Sensorpositionen gebildet, also \bar{u}_4/\bar{u}_1 , \bar{u}_5/\bar{u}_2 und \bar{u}_6/\bar{u}_3 .

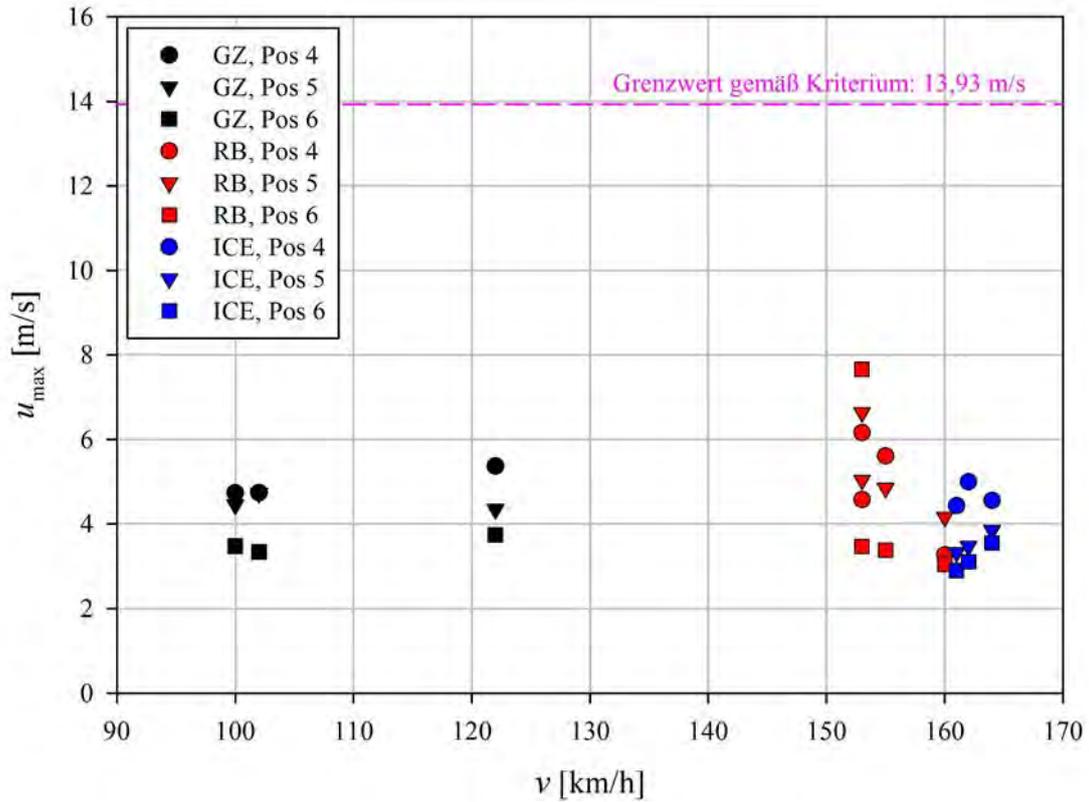


Abbildung 4.5: Windgeschwindigkeitsmaxima ohne Datenfilterung an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

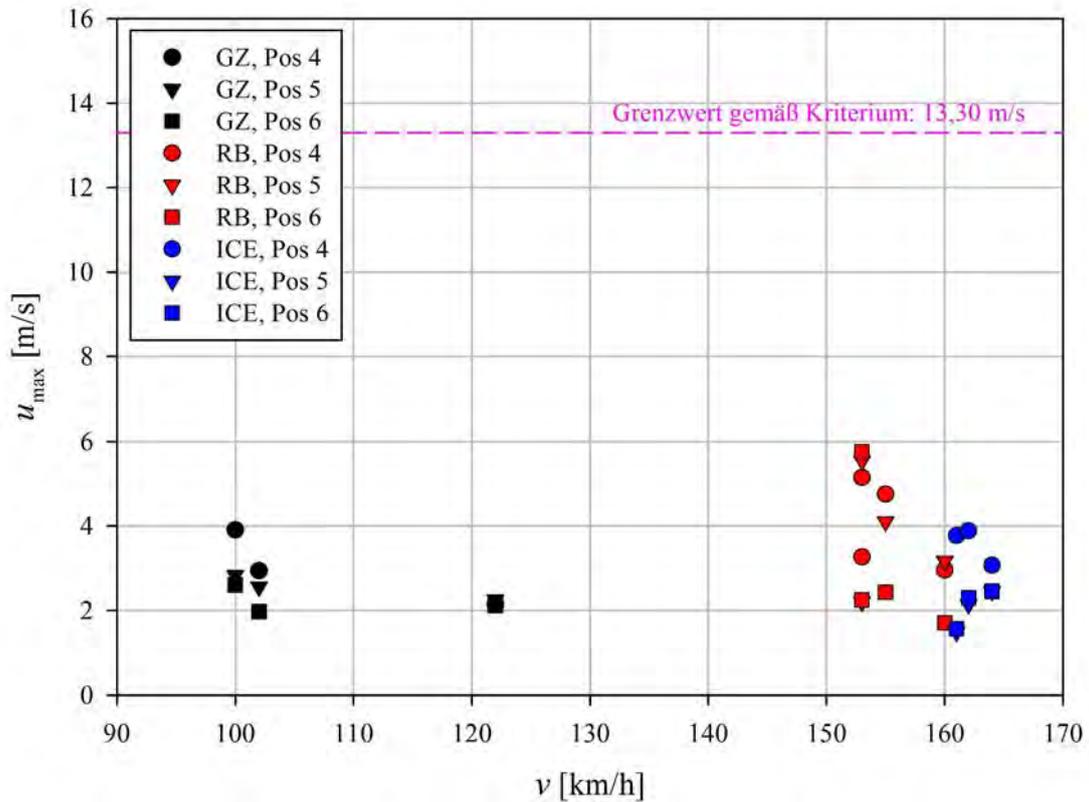


Abbildung 4.6: Windgeschwindigkeitsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4\text{s}$ an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

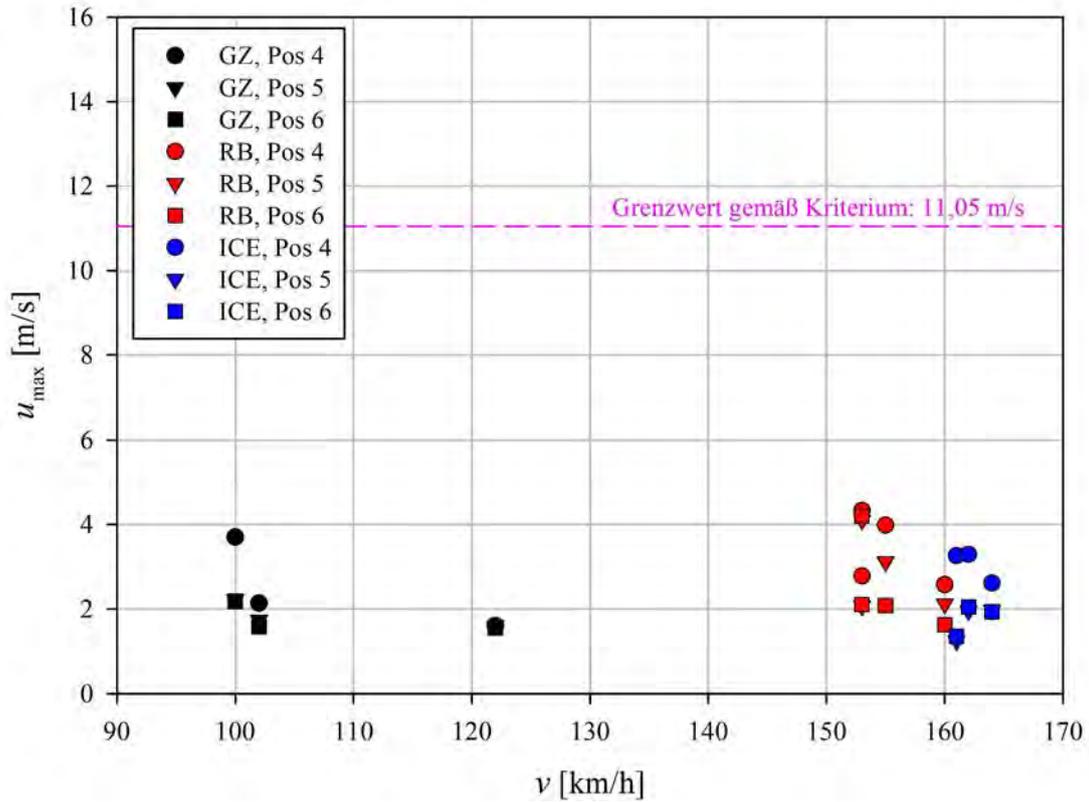


Abbildung 4.7: Windgeschwindigkeitsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 1,0 \text{ s}$ an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

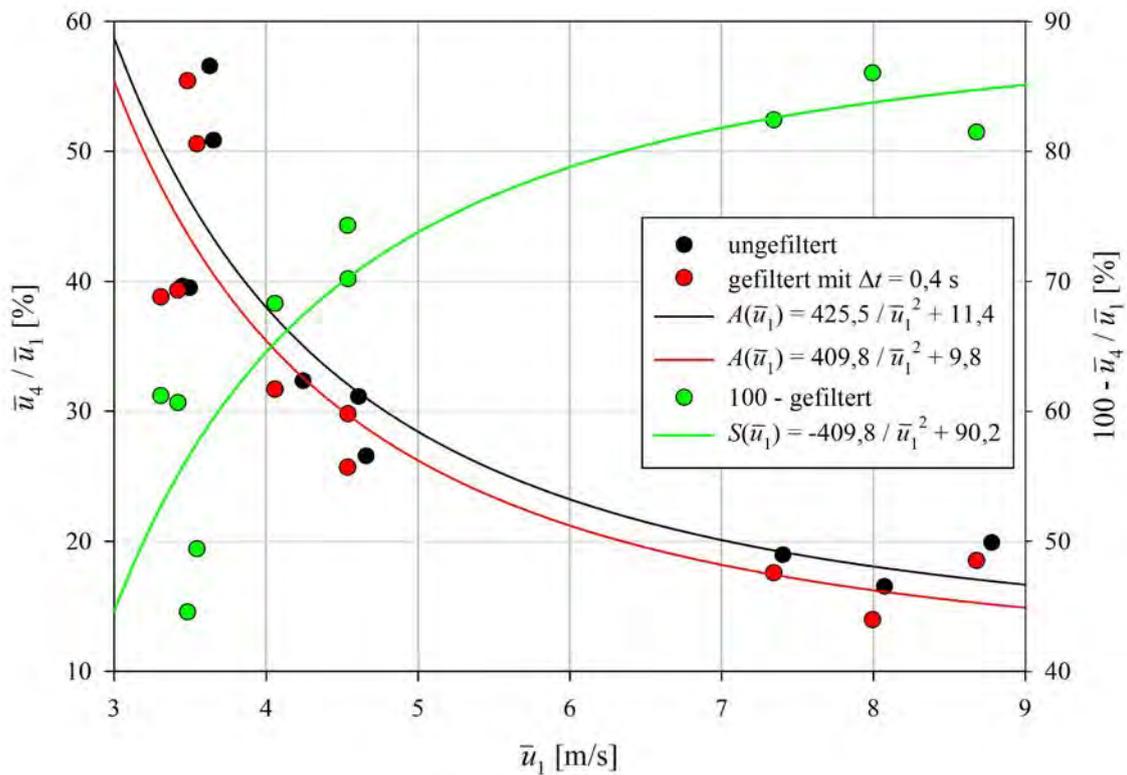


Abbildung 4.8: Absenkung (schwarz, rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 hinsichtlich Windgeschwindigkeit.

Die Mittelwerte für $\Delta t = 0$ bis $\Delta t = 0,4$ s sowie die daraus gebildeten Quotienten sind in den Tabellen B.9 bis B.14 zusammengestellt. Die Quotienten \bar{u}_4/\bar{u}_1 , also das Verhältnis der mittleren Windgeschwindigkeiten bei $x_A = 2,23$ m und $h_O = 0,72$ cm hinter und vor der Schnellbauwand mit Boeglitex 140, sind in Abbildung 4.8 als Diagramm über der mittleren Windgeschwindigkeit \bar{u}_1 aufgetragen. Das Diagramm stellt folglich die Absenkung A (Definition siehe Glossar) dar, welche durch den Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Netz Boeglitex 140 in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit an Messposition 1 erreicht wird. Zusätzlich ist die Schutzwirkung S (Definition siehe Glossar) in grüner Farbe eingezeichnet.

Man entnimmt der Abbildung 4.8, dass die Absenkung bzw. die Schutzwirkung mit der Windgeschwindigkeit steigt bzw. die Windgeschwindigkeit umso mehr abgesenkt wird, je höher die ursprüngliche mittlere Windgeschwindigkeit ist. Das bedeutet, dass die Absenkung bzw. Schutzwirkung mit zunehmender Zuggeschwindigkeit steigt und umgekehrt. Dieses Verhalten erklärt, warum die maximalen Windgeschwindigkeiten hinter der Schnellbauwand kaum abhängig sind von der Zuggeschwindigkeit, wie in den Abbildungen 4.5 bis 4.7 zu sehen ist. Weiterhin folgt, dass die Absenkung bzw. Schutzwirkung mit sinkendem Abstand von der Gleisachse steigt weil die Windgeschwindigkeit mit kleiner werdendem Abstand steigt. Gleiches gilt umgekehrt.

Zur Angabe einer Kenngröße des Prototypen 4 mit Boeglitex 140 wird über alle \bar{u}_4/\bar{u}_1 gemittelt, wobei die mit $\Delta t = 0,4$ s gefilterten Daten zu Grunde gelegt wurden. Es ergeben sich für die mittlere Absenkung bzw. Schutzwirkung bezüglich Windgeschwindigkeit:

$$\bar{A}_G = 32,1\% \quad \bar{S}_G = 67,9\% \quad (4.1)$$

4.3.1.2 Windbeschleunigung

Noch stärker als bei der Windgeschwindigkeit wirkt sich bei der Windbeschleunigung die Filterung bzw. Mittelung der Daten aus, wie man Abbildung 4.9 entnimmt. Zeigen

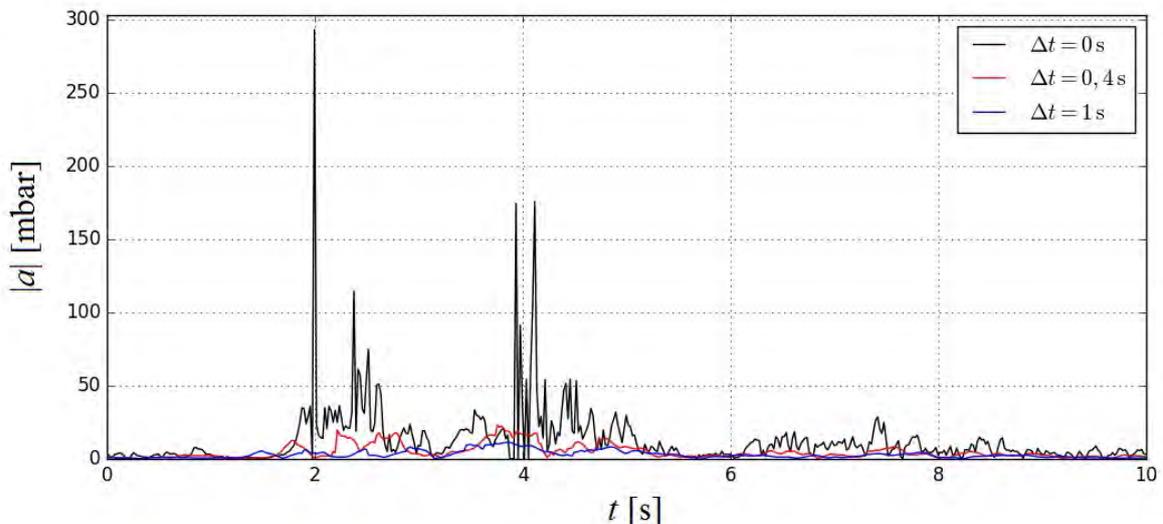


Abbildung 4.9: Windbeschleunigung ungefiltert und gefiltert.

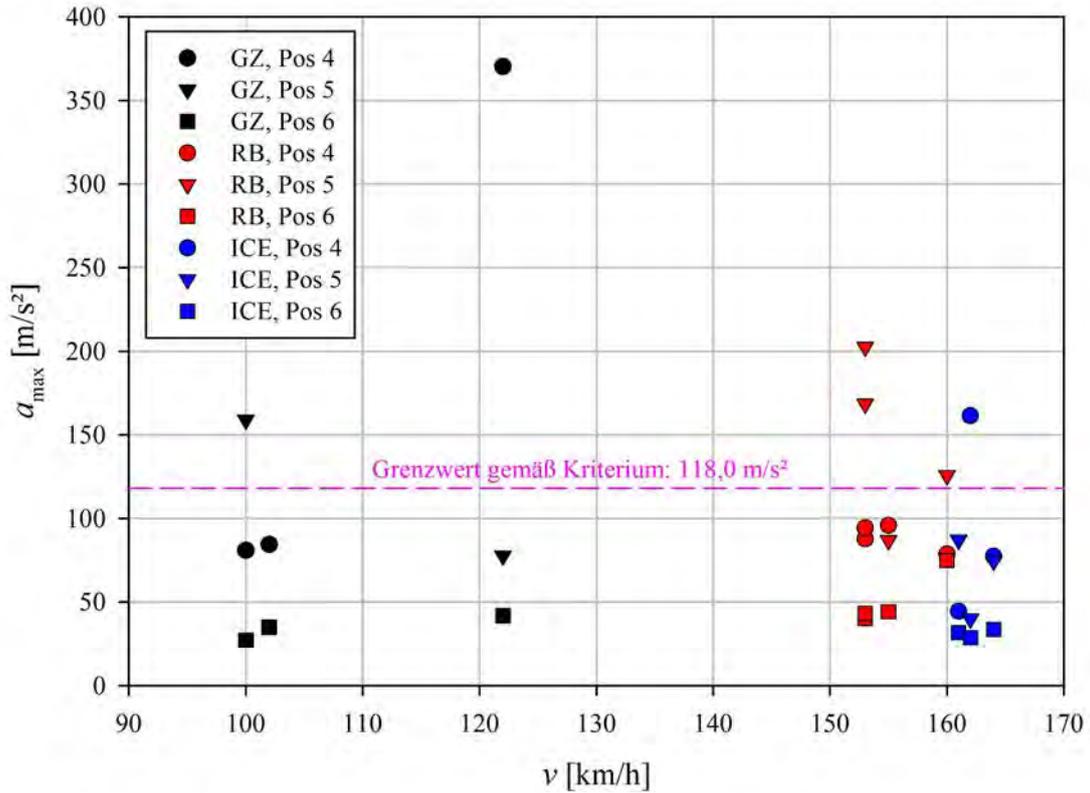


Abbildung 4.10: Windbeschleunigungsmaxima ohne Datenfilterung an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

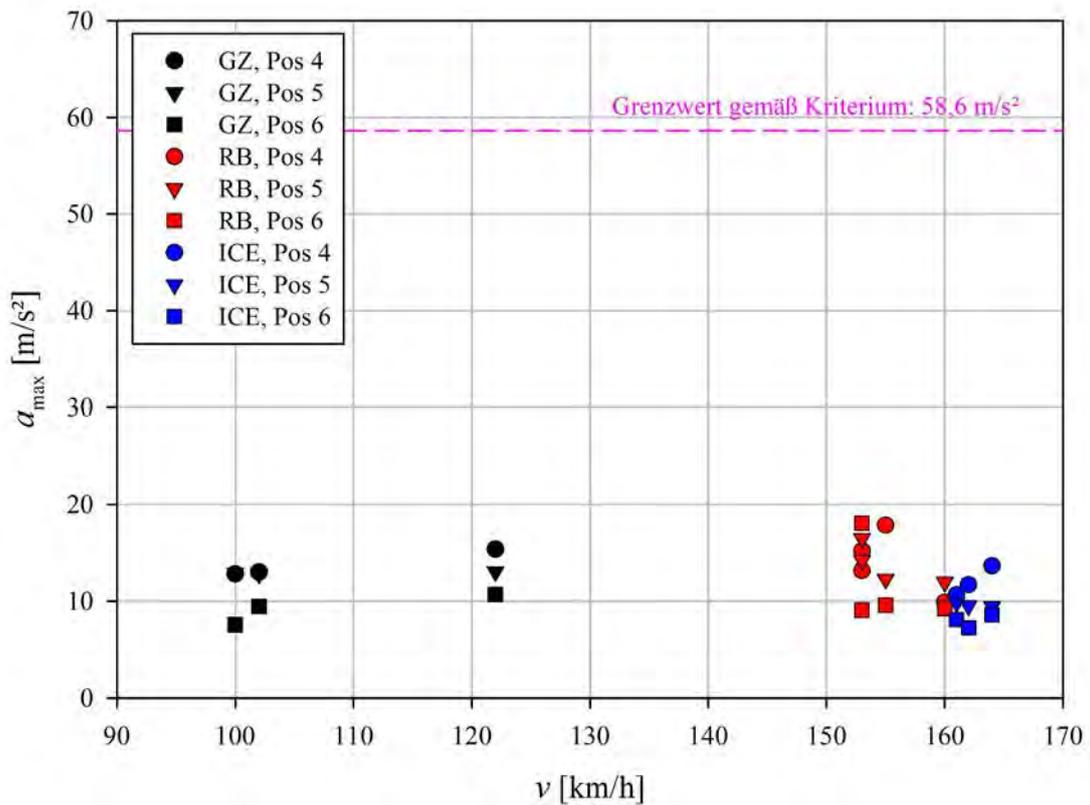


Abbildung 4.11: Windbeschleunigungsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4\text{s}$ an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

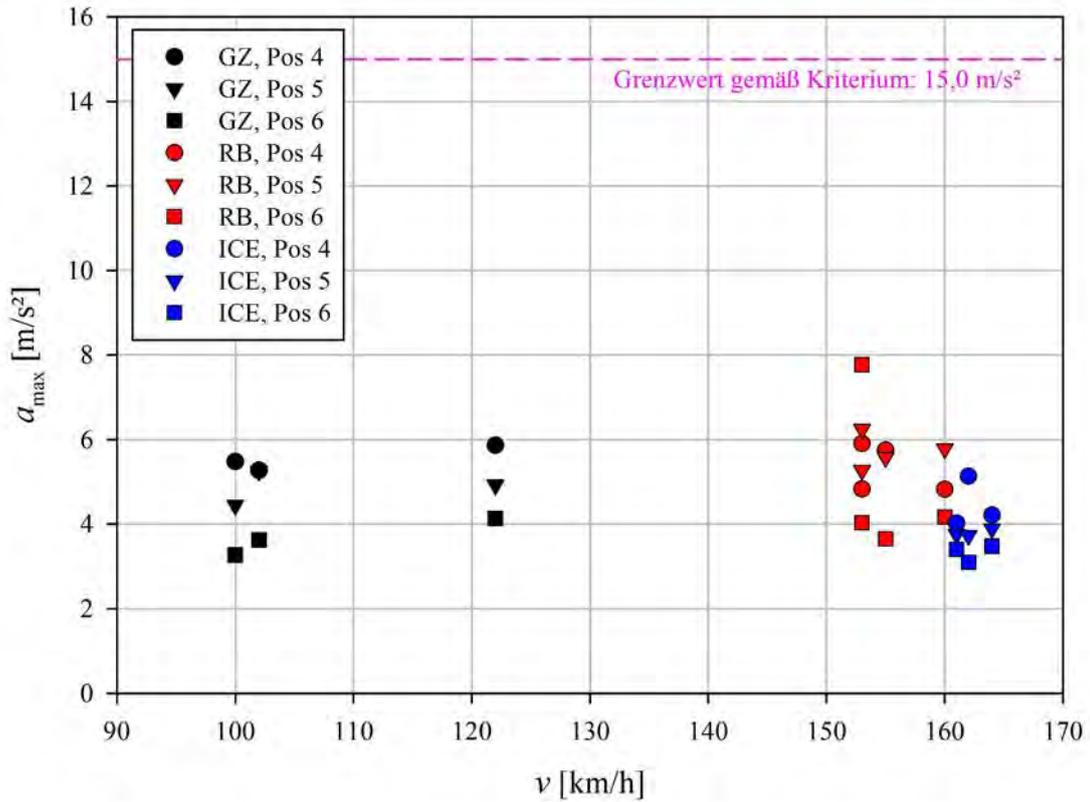


Abbildung 4.12: Windbeschleunigungsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 1,0 \text{ s}$ an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

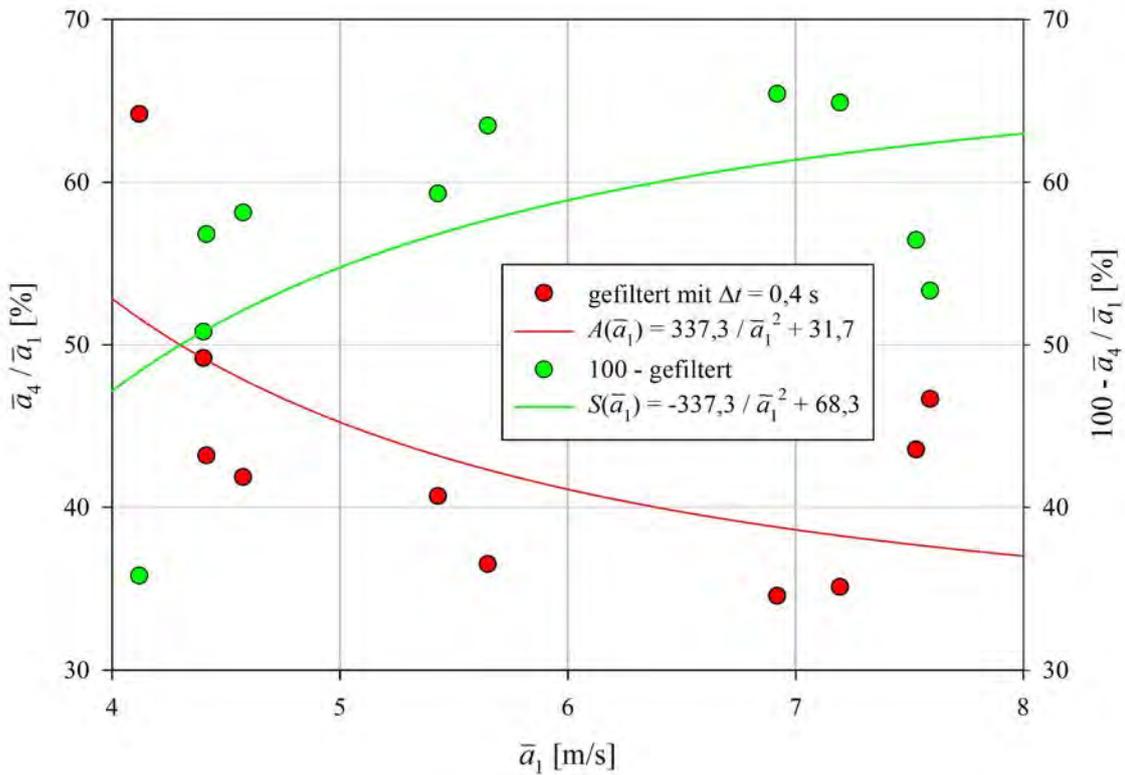


Abbildung 4.13: Absenkung (rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 hinsichtlich Windbeschleunigung.

sich in den ungefilterten Daten enorme Ausreißer, erscheinen diese im gefilterten Zustand nicht mehr. Die Begründung liegt in der Methode der Windbeschleunigungsbestimmung als zeitliche Ableitung der gemessenen Windgeschwindigkeit. Zeitliche Ableitungen reagieren sehr sensibel auf kleinste Sprünge in der Stammfunktion. Da mit hoher Abtastrate gemessen wurde und so kleinste Turbulenzzellen von Dauern im Bereich weniger Millisekunden und auch kurze Störsignale erfasst wurden, existieren vereinzelt genannte Sprünge in den gemessenen Windgeschwindigkeiten.

In den Abbildungen 4.10 bis 4.12 sind die maximalen Windbeschleunigungswerte für die Messorte 4-6, also hinter dem Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140, mit verschiedenen Filterungen dargestellt. Eingetragen sind weiterhin die in Abschnitt 2.2.2 abgeleiteten und in Tabelle 2.2 dargestellten Grenzwerte.

Das oben Ausgeführte ist der Grund dafür, warum die in Abbildung 4.10 dargestellten maximalen Windbeschleunigungen, welche aus den ungefilterten Windgeschwindigkeitsmessdaten abgeleitet wurden, so stark streuen und insgesamt sechs Ausreißer den Grenzwert überschreiten. Weil in Computermodellen so kleine Turbulenzzellen nicht mehr simuliert werden können aufgrund der begrenzten Rechnerleistung und weil dort keine Störsignale auftauchen, ist der abgeleitete Grenzwert von $118,0 \text{ m/s}^2$ zu klein, um dieses Phänomen vollständig mit zu berücksichtigen. Weil diese Art von Turbulenzen nur sehr kurzzeitig auf Beschäftigte am Gleis wirken ($\sim 10 \text{ ms}$), spielen sie für das Gleichgewicht der Beschäftigten ganz sicher keine Rolle (siehe Kapitel 2).

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, bei den Windbeschleunigungen den Schwerpunkt auf die gefilterten Daten zu legen. Wie man den Abbildungen 4.11 und 4.12 entnimmt, wird hier der Grenzwert leicht eingehalten und zwar unabhängig von der Breite des Zeitfensters bei der Datenfilterung.

Zur Quantifizierung der Absenkung des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 gegenüber Windbeschleunigung wurden wieder die Mittelwerte über alle Daten berechnet, die zwischen der Passage von Zug-Bug und -Heck liegen und anschließend die Quotienten aus den Mittelwerten der korrespondierenden Sensorpositionen gebildet, also \bar{a}_4/\bar{a}_1 , \bar{a}_5/\bar{a}_2 und \bar{a}_6/\bar{a}_3 . Es wurden die mit $\Delta t = 0,4 \text{ s}$ gefilterten Daten zugrunde gelegt. Die Mittelwerte und Quotienten sind in den Tabellen B.13 und B.14 zusammengestellt. In Abbildung 4.12 findet sich die grafische Darstellung von \bar{a}_4/\bar{a}_1 über \bar{a}_1 .

Man entnimmt der Abbildung, dass die Absenkung des Prototypen mit Boeglitex 140 – wie bei der Windgeschwindigkeit – mit steigender mittlerer Windbeschleunigung zunimmt. Für die Windbeschleunigung folgen daraus die gleichen Schlussfolgerungen wie in Abschnitt 4.3.1.1 für die Windgeschwindigkeit beschrieben.

Analog zur Windgeschwindigkeit liefert die Mittelwertbildung über alle \bar{a}_4/\bar{a}_1 folgende Kenngrößen für die mittlere Absenkung bzw. Schutzwirkung bezüglich Windbeschleunigung:

$$\bar{A}_B = 43,6 \% \quad \bar{S}_B = 56,4 \% \quad (4.2)$$

4.3.1.3 Druck

Wie bereits erwähnt, wurden beim Druck keine Datenfilterungen vorgenommen, sondern lediglich die Δp an allen 6 Messpostionen bestimmt, die während der Passage des Buges eines Zuges auftraten. Weiterhin wurden die Quotienten $\Delta p_4/\Delta p_1$, $\Delta p_5/\Delta p_2$

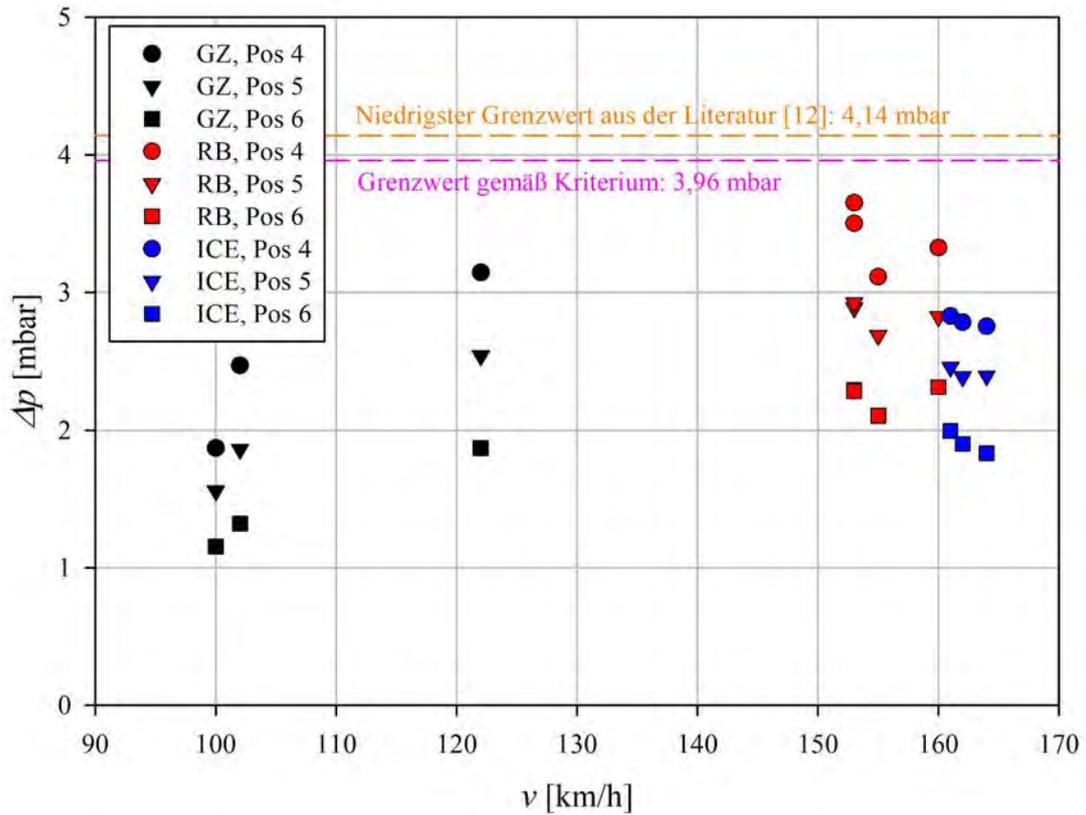


Abbildung 4.14: Maxima der Bug-Druckwellen an den Messpositionen hinter dem Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

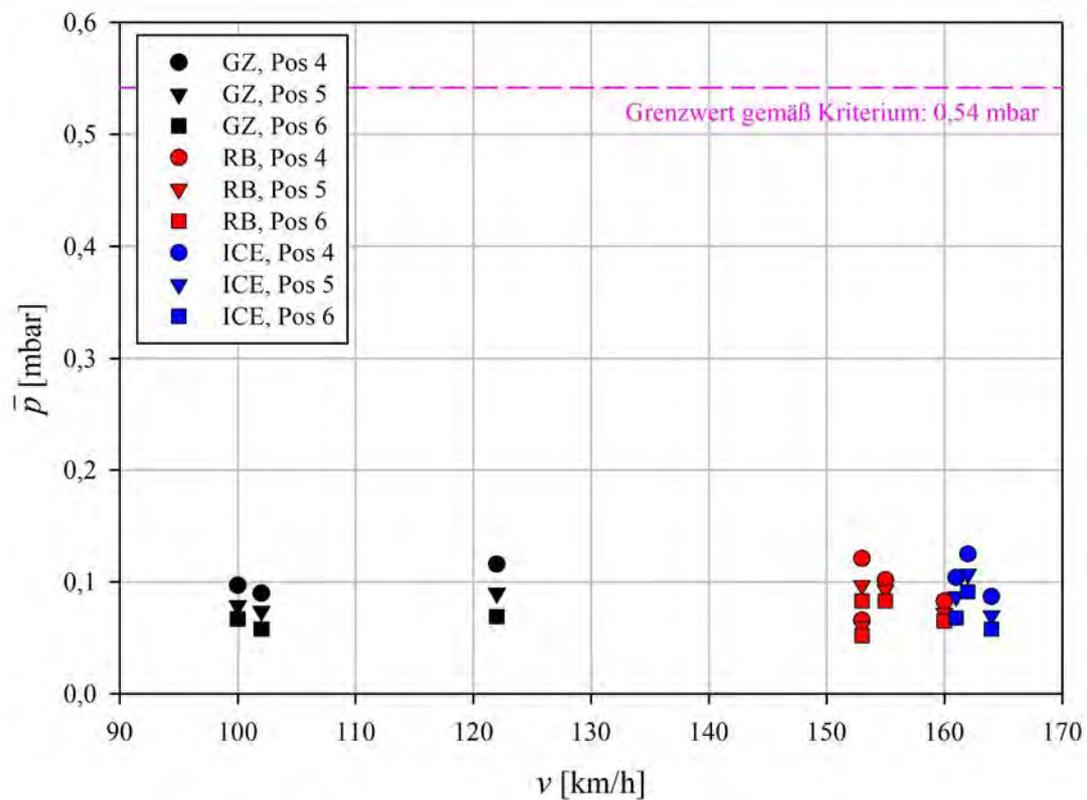


Abbildung 4.15: Mittlere Druckbelastung an den Messpositionen hinter dem Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140.

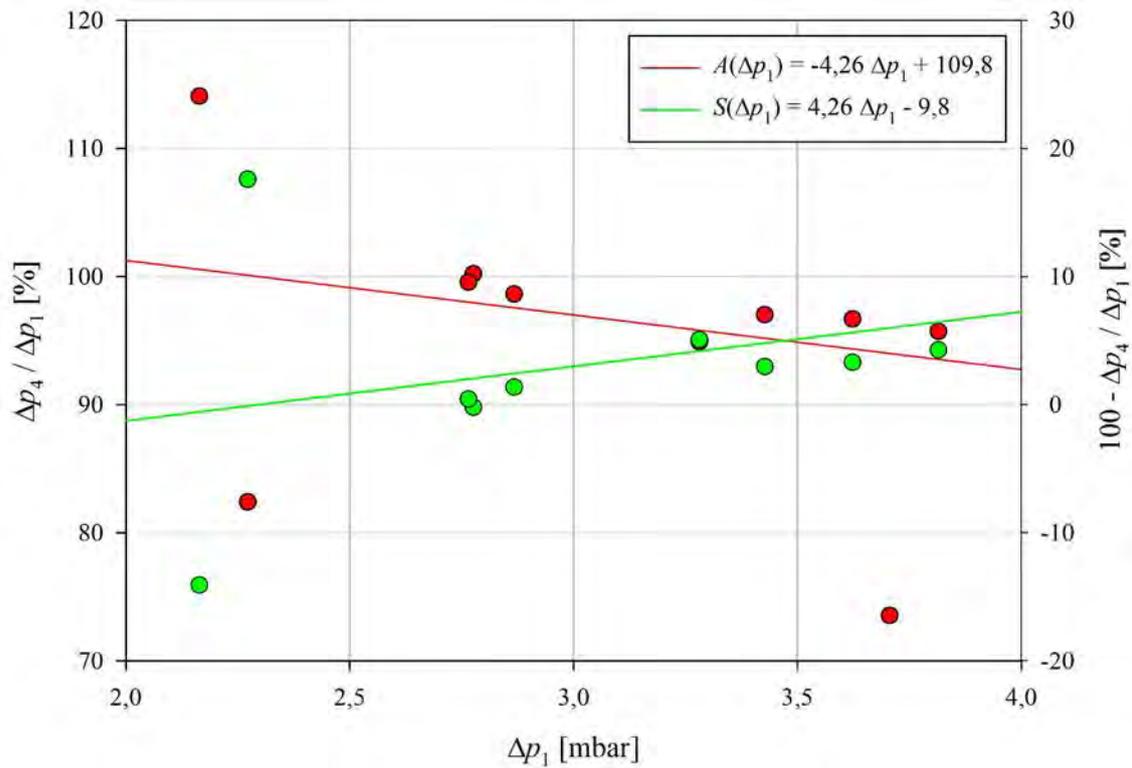


Abbildung 4.16: Absenkung (rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 hinsichtlich Bug-Druckwellen.

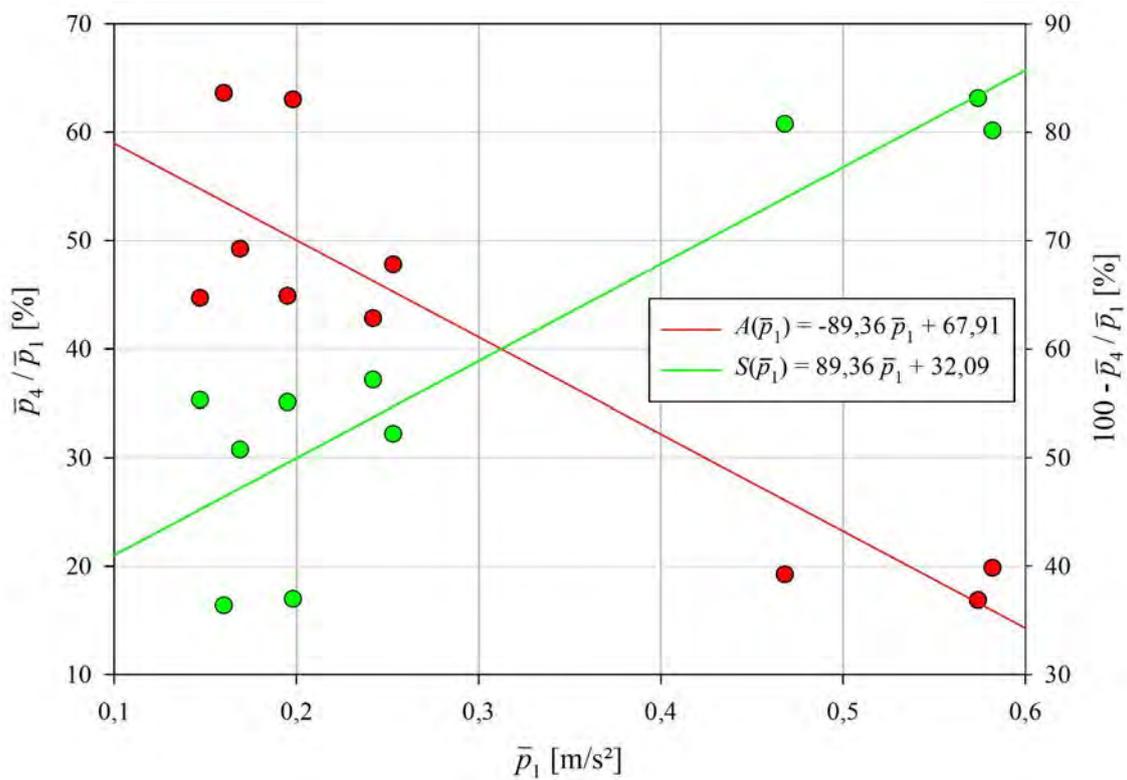


Abbildung 4.17: Absenkung (rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 hinsichtlich mittlerer Druckbelastung.

und $\Delta p_6/\Delta p_3$ gebildet sowie alle Druckverläufe in den Betrag genommen und – wie weiter oben beschrieben – über die Zeitspanne gemittelt, die zwischen der Passage von Bug und Heck des Zuges verging. Auch für letztgenannte Mittelwerte wurden die Quotienten \bar{p}_4/\bar{p}_1 , \bar{p}_5/\bar{p}_2 und \bar{p}_6/\bar{p}_3 berechnet. Zusammengetragen ist dies in den Tabellen B.7, B.8, B.15 und B.16 im Anhang.

In Abbildung 4.14 sind die maximalen Bug-Druckwellen über der Zuggeschwindigkeit aufgetragen und farblich nach Zugtyp kodiert. Eingezeichnet ist weiterhin der Grenzwert gemäß Kriterium der Unfallversicherer als auch der niedrigste Grenzwert, den der Autor in der Literatur ausfindig machen konnte. Man erkennt, dass zum einen die Kriterien eingehalten werden und dass die gemessenen Δp hinter der Schnellbauwand mit der Zuggeschwindigkeit ansteigen. Bestätigt wird dies durch die Abbildung 4.16, in der die Absenkung A bzw. die Schutzwirkung S bezüglich Bug-Druckwellen in Abhängigkeit von der an Position 1 gemessenen Δp dargestellt ist. Aus letztgenannter Abbildung ist ersichtlich, dass kein eindeutigen Trend oder maximal einen schwach ausgeprägter Trend existiert bei der Absenkung bzw. Schutzwirkung bezüglich Bug-Druckwellen. Das heißt, je größer die Bug-Druckwellen ohne den Prototypen 4 mit Boeglitex 140, desto größer die Bug-Druckwellen hinter demselben.

Durch Mittelung über die $\Delta p_4/\Delta p_1$ folgen für die mittlere Absenkung \bar{A}_{DP} bzw. Schutzwirkung \bar{S}_{DP} bezüglich Bug-Druckwellen:

$$\bar{A}_{DP} = 95,4\% \quad \bar{S}_{DP} = 4,6\% \quad (4.3)$$

Die Schutzwirkung des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 vor Bug-Druckwellen ist folglich nur gering. Dass das Kriterium bei der Untersuchung des Prototypen 4 mit Boeglitex 140 eingehalten wurde, liegt vermutlich auch daran, dass kein schneller InterCity passierte.

Werden hingegen die mittleren Drücke \bar{p}_i betrachtet, so zeigt sich ein gänzlich anderes Bild, wie man den Abbildungen 4.15 und 4.17 sowie beispielsweise C.11 im Anhang entnehmen kann. Der in Abbildung 4.15 eingezeichnete Grenzwert wurde wieder den Messdaten des Güterzuges entnommen, welcher während der Messkampagne die Messstelle mit $v = 122 \text{ km/h}$ passierte. Alle Druckimpulse, die zwischen der Bug- und Heck-Druckwelle liegen, werden durch den Prototypen 4 mit Boeglitex 140 stark gedämpft (Abbildung C.11 und andere in Anhang C). Weil die Absenkung bzw. Schutzwirkung bezüglich des mittleren Drucks stark steigt mit dem mittleren Druck an Messposition 1 (Abbildung 4.17), sind die mittleren Drücke hinter dem Prototypen 4 mit Boeglitex 140 nicht abhängig von der Zuggeschwindigkeit (Abbildung 4.15).

Es ergibt sich eine vergleichsweise hohe mittlere Absenkung \bar{A}_D bzw. eine vergleichsweise hohe mittlere Schutzwirkung \bar{S}_D bezüglich der mittleren Druckbelastung:

$$\bar{A}_D = 41,2\% \quad \bar{S}_D = 58,8\% \quad (4.4)$$

Der Prototyp 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 140 schützt folglich einerseits gut vor allgemeinen Druckentwicklungen, hervorgerufen durch passierende Züge, dämpft aber andererseits kaum die Druckwellen, die bei der Passage von Bug und Heck von Zügen auftreten.

4.3.2 Prototyp 4 mit dem Boeglitex 665

4.3.2.1 Windgeschwindigkeit

Die Aufarbeitung der Daten, die während der Untersuchung des Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665 gewonnen wurden, erfolgte analog zur Beschreibung in Abschnitt 4.3.1.1. Die Daten finden sich in den gleichen Tabellen, die eben dort genannt sind.

In den Abbildungen 4.18 bis 4.20 sind die maximalen Windgeschwindigkeitswerte, welche hinter dem Prototypen 4 mit Boeglitex 665 gemessen wurden, über der Zuggeschwindigkeit dargestellt, farblich kodiert nach Zugtypen. Eingezeichnet ist der Grenzwert gemäß Abschnitt 2.2.2. Das Zeitfenster, welches bei der Datenfilterung bzw. mittelung angewandt wurde, wächst mit der Nummer der Abbildung. Zur leichteren Vergleichbarkeit sind alle Achsenskalierungen gleich wie in Abschnitt 4.3.1.1.

Man entnimmt den Abbildungen, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten durch die Filterung im Allgemeinen leicht sinken. Der Grenzwert wird für alle Filterungen problemlos eingehalten. Die Quotienten der Windgeschwindigkeitsmittelwerte sind in Abbildung 4.21 über \bar{u}_1 aufgetragen. Auch beim Prototypen 4 mit Boeglitex 665 steigt die Absenkung bzw. die Schutzwirkung deutlich mit der mittleren Windgeschwindigkeit. Es ergeben sich die gleichen Schlussfolgerungen für beim Prototypen 4 mit Boeglitex 140, jedoch ist die Schutzwirkung des Boeglitex 665 höher als die des Boeglitex 140. Für die mittlere Absenkung \bar{A}_G bzw. mittlere Schutzwirkung \bar{S}_G (Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4\text{s}$) ergeben sich:

$$\bar{A}_G = 18,8\% \quad \bar{S}_G = 81,2\% \quad (4.5)$$

4.3.2.2 Windbeschleunigung

Auch hier gilt hinsichtlich Datenaufarbeitung analog das Geschriebene aus Abschnitt 4.3.1.2. Die aufgearbeiteten Daten finden sich in den oben genannten Tabellen.

In den Abbildungen 4.22 bis 4.24 sind die maximalen Windbeschleunigungen für die Positionen hinter der mobilen Schnellbauwand als Funktion der Zuggeschwindigkeit gemeinsam mit dem zugehörigen Grenzwert dargestellt. Das Zeitfenster, welches bei der Datenfilterung bzw. mittelung angewandt wurde, wächst wieder mit der Nummer der Abbildung. Zur leichteren Vergleichbarkeit sind alle Achsenskalierungen und Farbkodierungen identisch mit denen in Abschnitt 4.3.1.2.

Bei den ungefilterten maximalen Windbeschleunigungen kommt es auch beim Prototypen 4 mit Boeglitex 665 zu vereinzelt Ausreißern über den Grenzwert. Jedoch sind es hier nur 3 im Vergleich zu 6 beim Boeglitex 140. Sobald die Daten gefiltert werden, wird das Kriterium leicht eingehalten und zwar unabhängig von der Fensterbreite Δt .

Zur Charakterisierung von Absenkung und Schutzwirkung des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 665 gegenüber Windbeschleunigung wurden Mittelwerte analog zu Abschnitt 4.3.1.2 gebildet, also \bar{a}_4/\bar{a}_1 , \bar{a}_5/\bar{a}_2 und \bar{a}_6/\bar{a}_3 berechnet. Es wurden die mit $\Delta t = 0,4\text{s}$ gefilterten Daten zugrunde gelegt (Tabellen B.13 und B.14).

In Abbildung 4.25 sind die \bar{a}_4/\bar{a}_1 über \bar{a}_1 aufgetragen. Man erkennt, dass die Absenkung

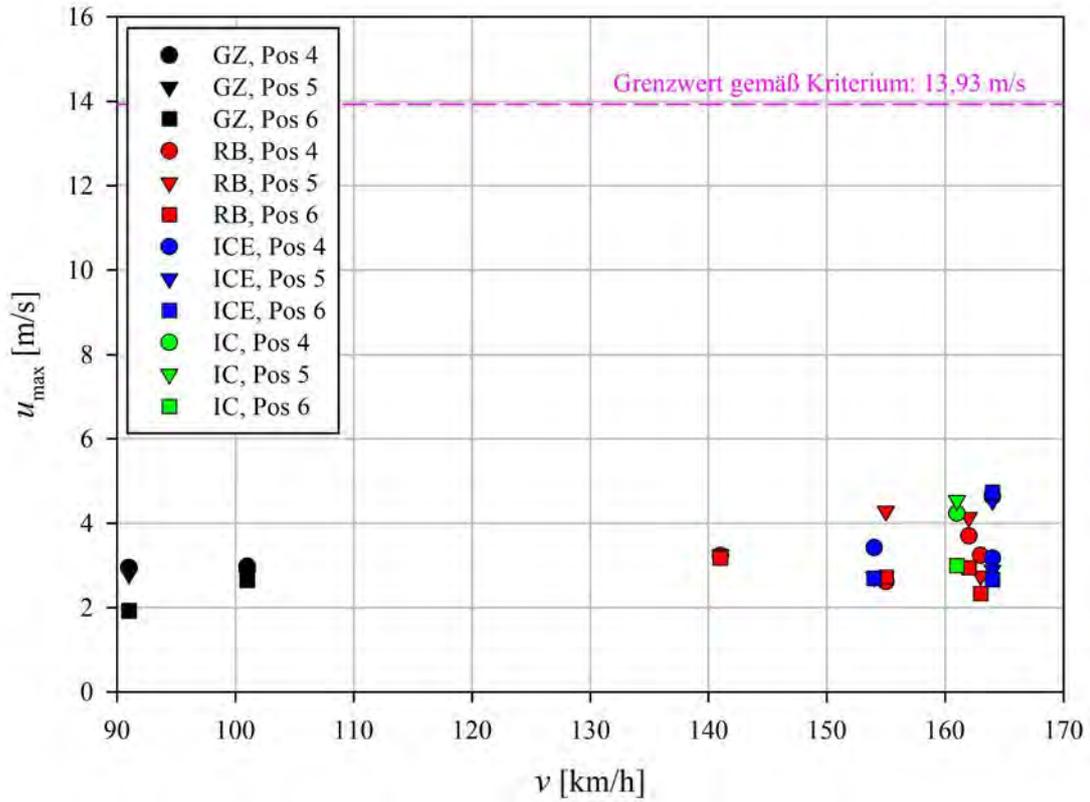


Abbildung 4.18: Windgeschwindigkeitsmaxima ohne Datenfilterung an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

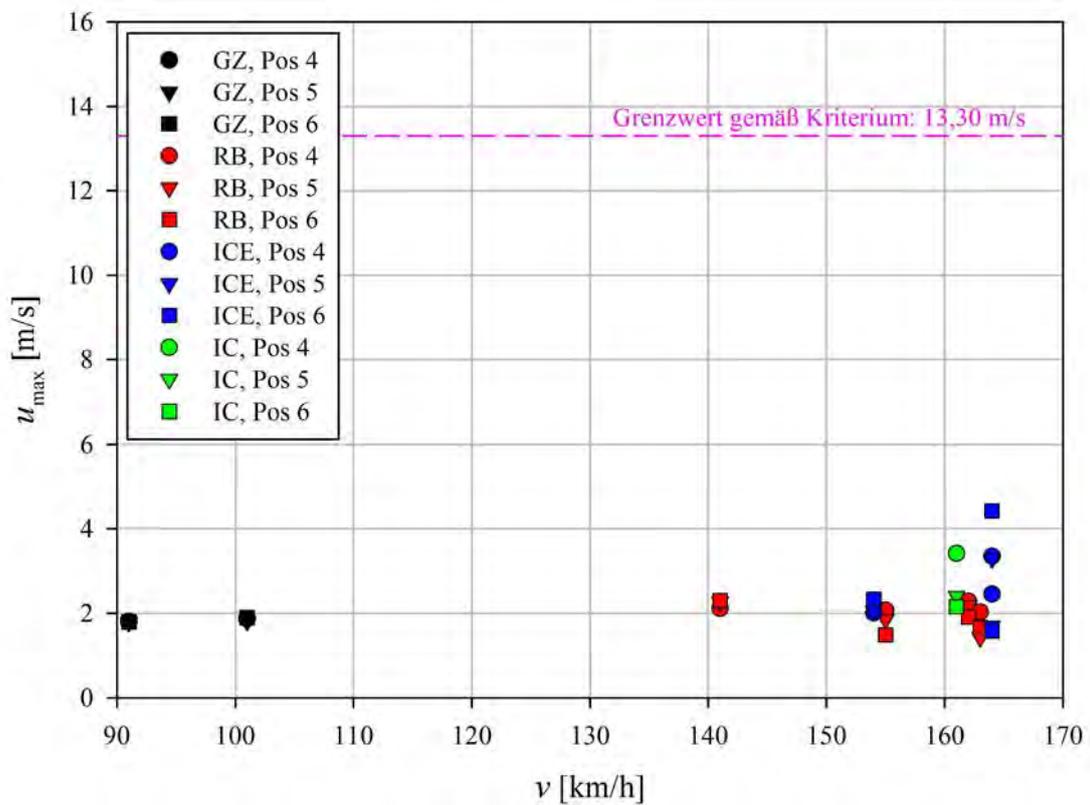


Abbildung 4.19: Windgeschwindigkeitsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4$ s an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

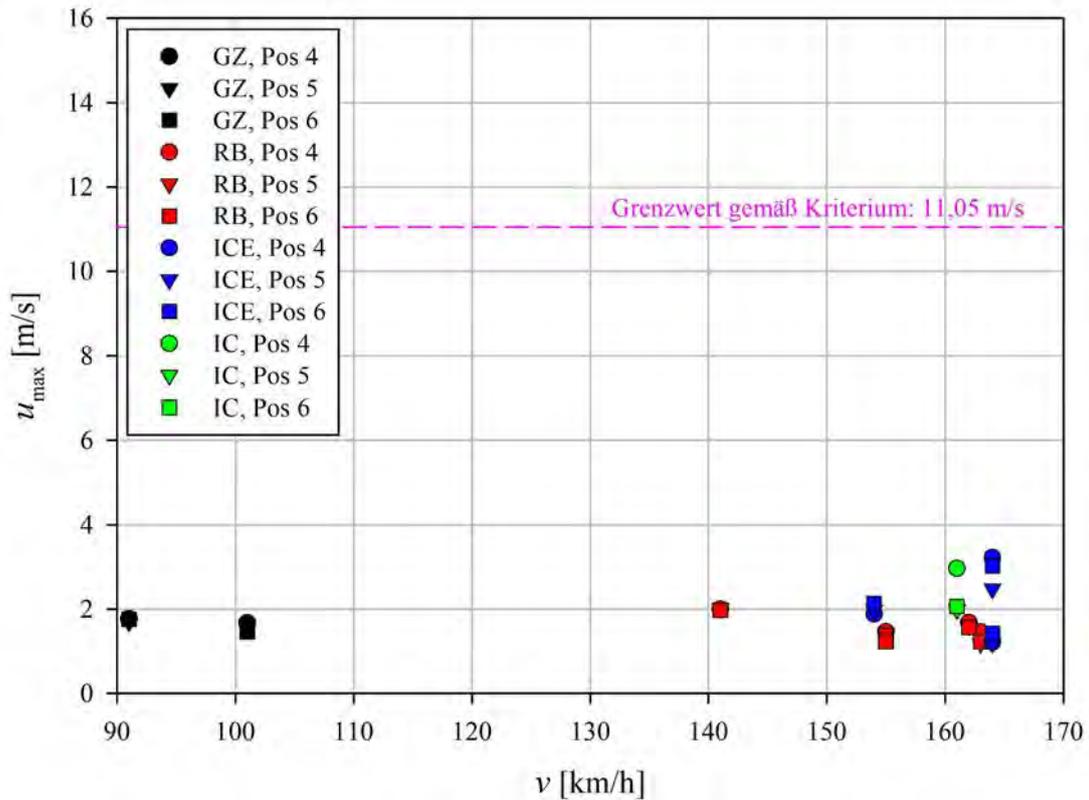


Abbildung 4.20: Windgeschwindigkeitsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 1,0$ s an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

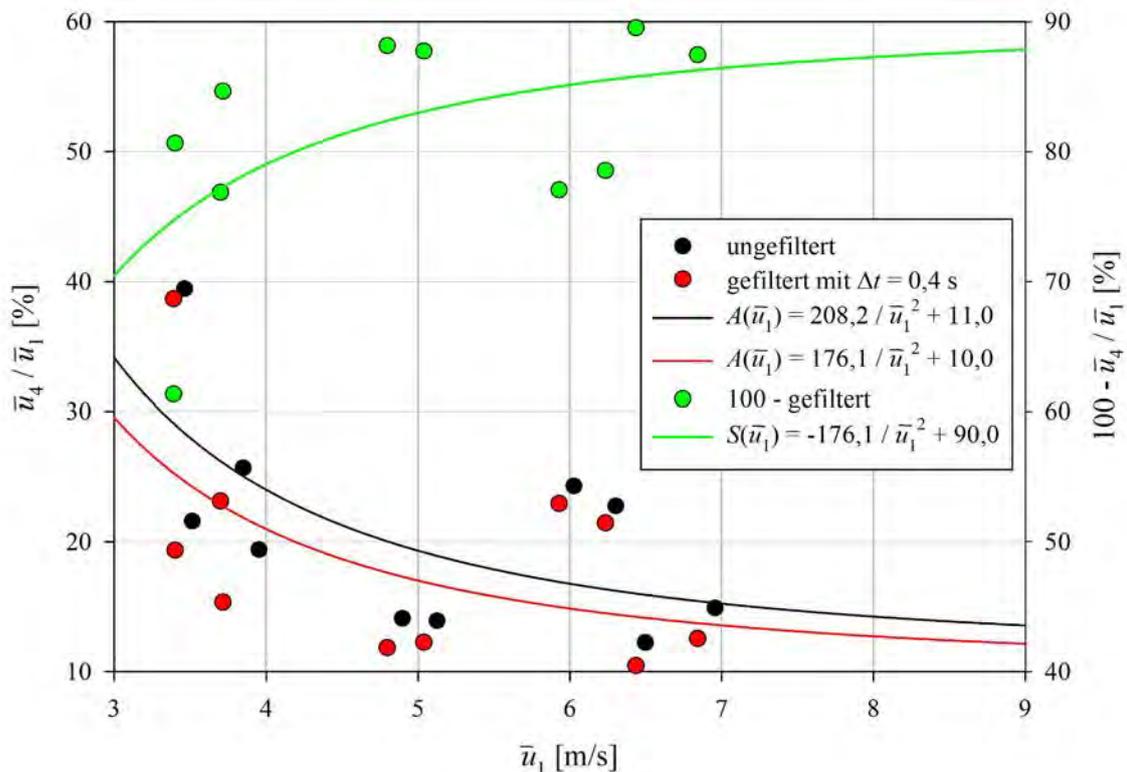


Abbildung 4.21: Absenkung (schwarz, rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 665 hinsichtlich Windgeschwindigkeit.

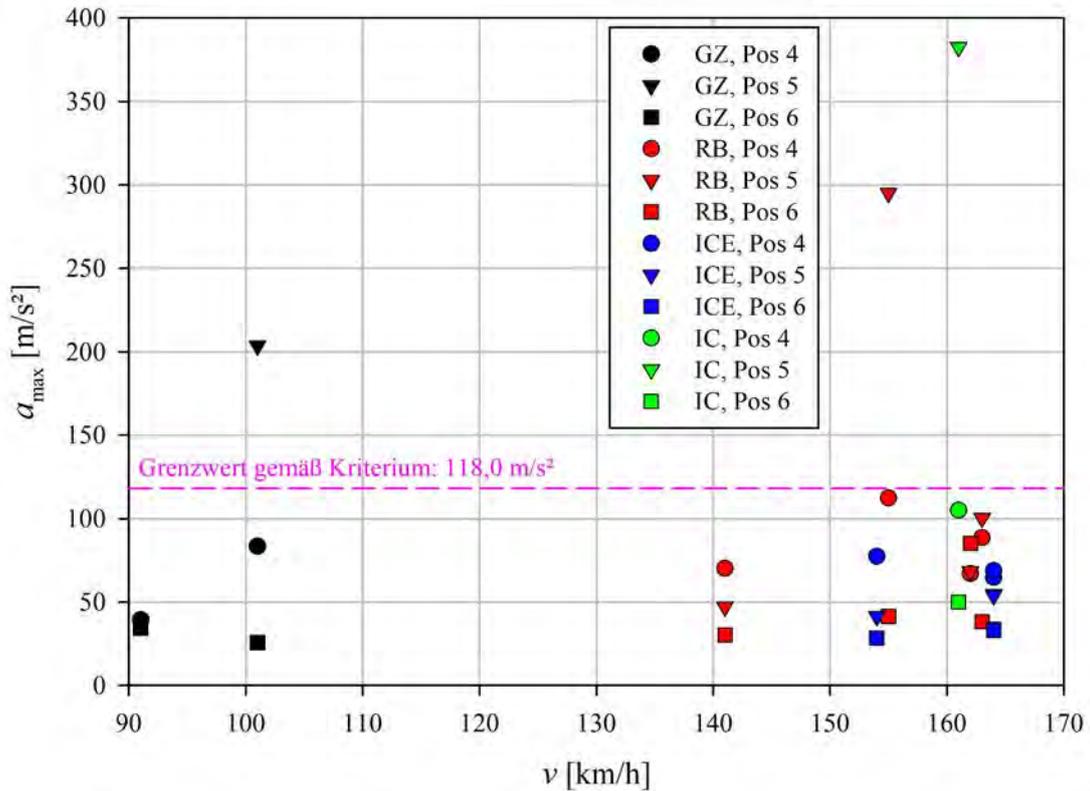


Abbildung 4.22: Windbeschleunigungsmaxima ohne Datenfilterung an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

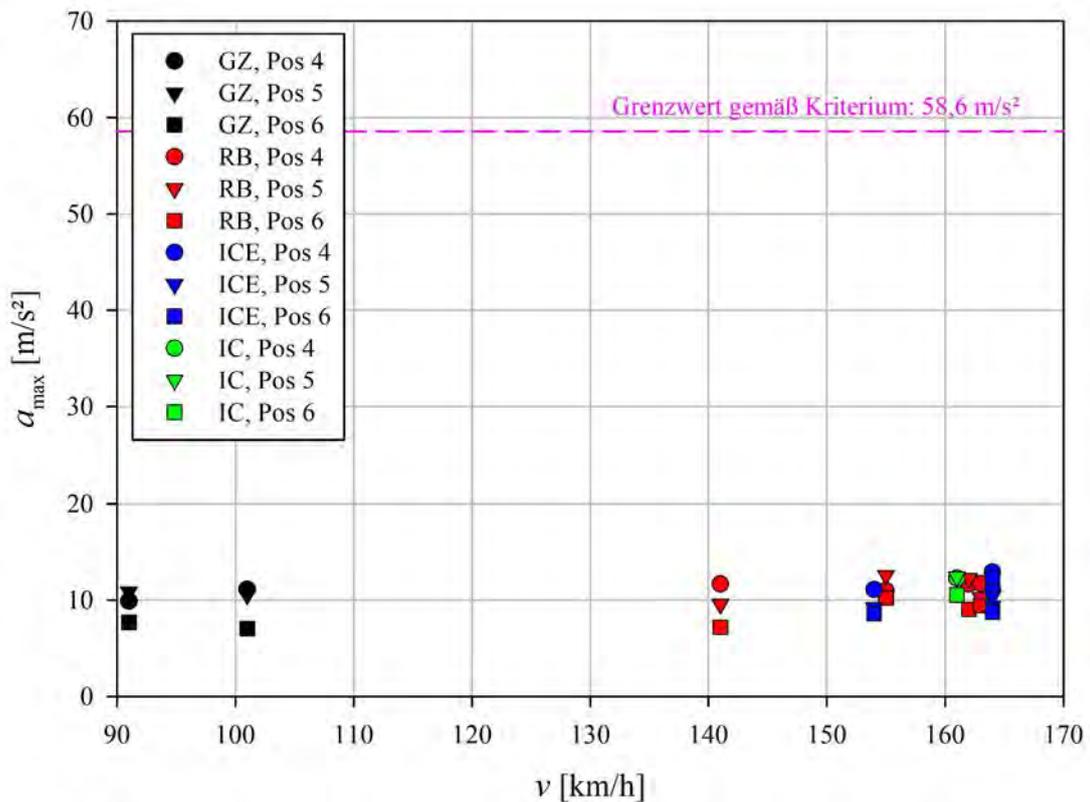


Abbildung 4.23: Windbeschleunigungsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4s$ an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

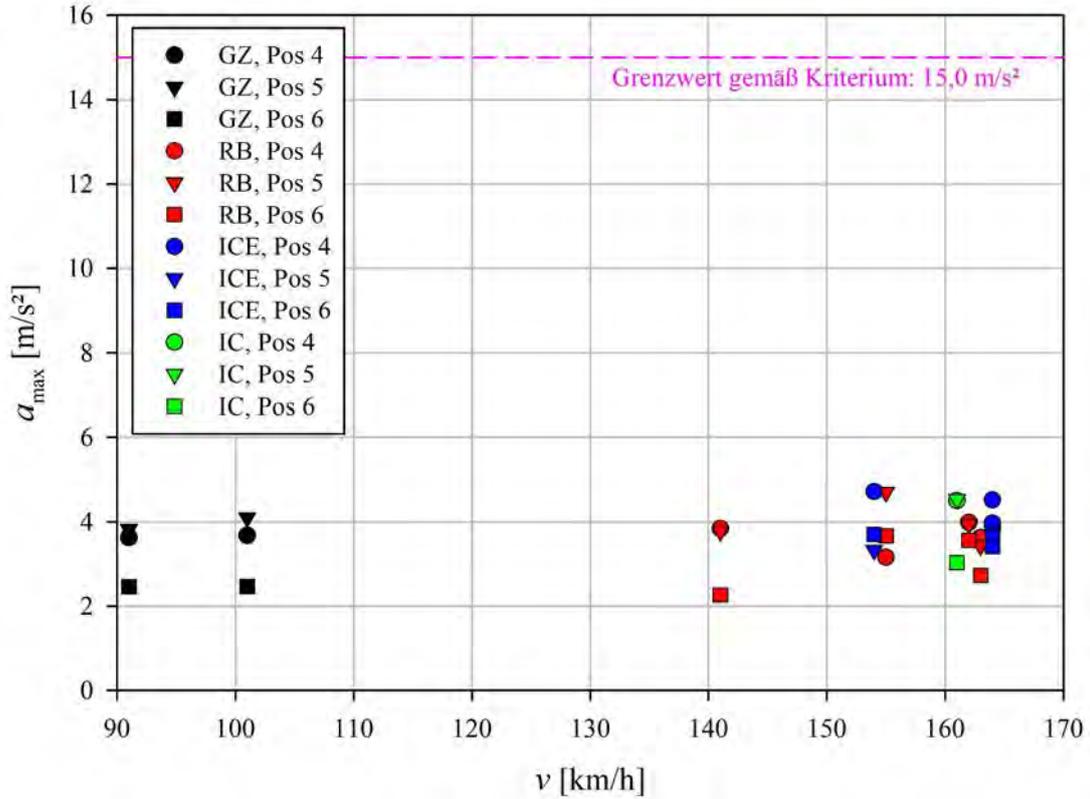


Abbildung 4.24: Windbeschleunigungsmaxima mit Datenfilterung mit $\Delta t = 1,0 \text{ s}$ an den Messpositionen hinter der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

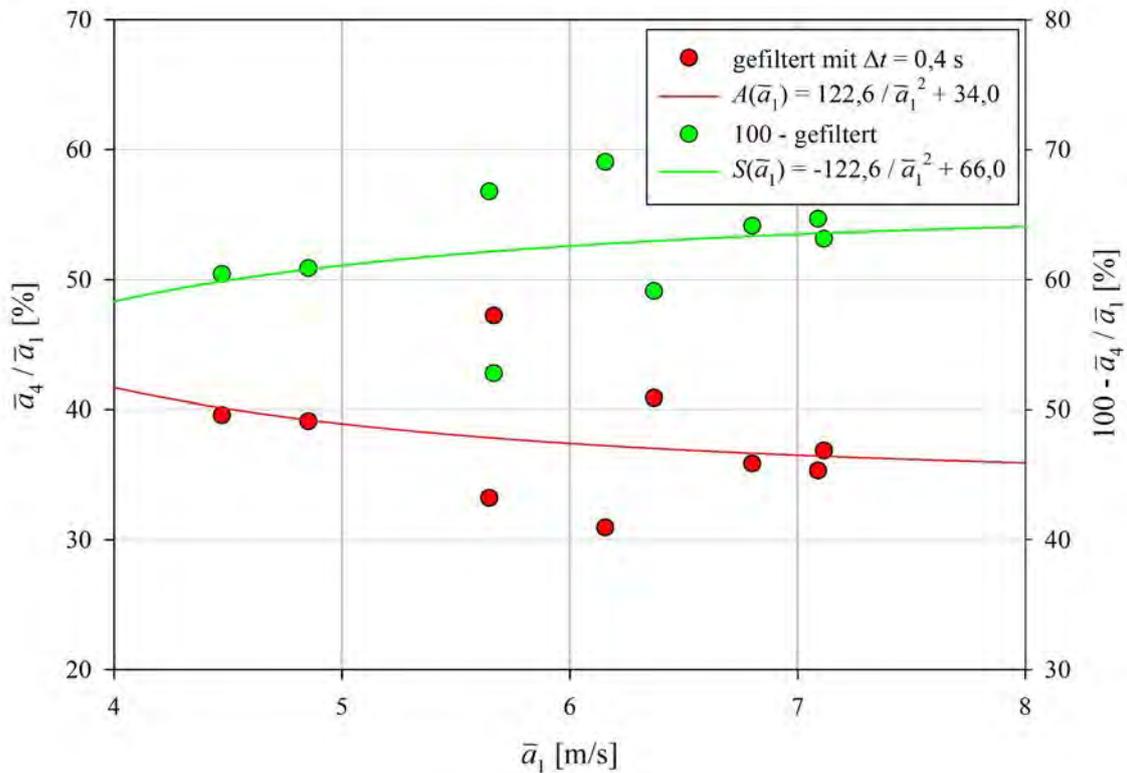


Abbildung 4.25: Absenkung (rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 665 hinsichtlich Windbeschleunigung.

bzw. die Schutzwirkung des Prototypen 4 mit Boeglitex 665 mit steigender mittlerer Windbeschleunigung wächst, jedoch schwächer als beim Boeglitex 140 (vgl. Abbildung 4.13). Für die Windbeschleunigung folgen dennoch die gleichen Schlussfolgerungen wie in Abschnitt 4.3.1.2.

Durch Mittelung über die \bar{a}_4/\bar{a}_1 folgt für die mittlere Absenkung \bar{A}_B und mittlere Schutzwirkung \bar{S}_B :

$$\bar{A}_B = 38,2\% \quad \bar{S}_B = 61,8\% \quad (4.6)$$

4.3.2.3 Druck

Auch beim Prototypen 4 mit Boeglitex 665 werden die Druckwellen bei der Passage des Zug-Buges beleuchtet sowie die Mittelwerte über die zeitlichen Druckverläufe, die während der Passage der Züge aufgenommen wurden. Zu diesem Zweck wurden erneut die Quotienten $\Delta p_4/\Delta p_1$, $\Delta p_5/\Delta p_2$ und $\Delta p_6/\Delta p_3$ gebildet sowie alle Druckverläufe in den Betrag genommen und über die Zeitspanne gemittelt, die zwischen der Passage von Bug und Heck des Zuges verging. Für letztgenannte Mittelwerte wurden wieder die Quotienten \bar{p}_4/\bar{p}_1 , \bar{p}_5/\bar{p}_2 und \bar{p}_6/\bar{p}_3 berechnet (Tabellen B.7, B.8, B.15 und B.16).

In Abbildung 4.26 sind die maximalen Bug-Druckwellen über der Zuggeschwindigkeit aufgetragen sowie der Grenzwert gemäß Kriterium. Aus der Abbildung geht hervor, dass der Grenzwert eingehalten wird, auch bei der Vorbeifahrt eines schnellen InterCitys. Wie zuvor beim Boeglitex 140 wachsen die maximalen Druckamplituden Δp hinter der Schnellbauwand mit der Zuggeschwindigkeit. Dies passt zu Abbildung 4.28, in der die Absenkung A bzw. die Schutzwirkung S bezüglich Bug-Druckwellen in Abhängigkeit von der an Position 1 gemessenen Δp dargestellt ist. Man entnimmt Abbildung 4.28, dass die Schutzwirkung des Prototypen 4 mit Boeglitex 665 bezüglich maximalen Bug-Druckwellen kaum mit der Zuggeschwindigkeit ansteigt. Das bedeutet auch für das Boeglitex 665, je größer die Bug-Druckwellen ohne mobile Schnellbauwand, desto größer die Bug-Druckwellen hinter derselben.

Für die mittlere Absenkung \bar{A}_{DP} bzw. Schutzwirkung \bar{S}_{DP} bezüglich Bug-Druckwellen errechnet sich:

$$\bar{A}_{DP} = 78,5\% \quad \bar{S}_{DP} = 21,5\% \quad (4.7)$$

Die Schutzwirkung des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 665 vor Bug-Druckwellen ist damit deutlich höher als die des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140.

Die Schutzwirkung des Prototypen 4 mit Boeglitex 665 bezüglich mittlerer Druckbelastung ergibt sich aus den Abbildungen 4.27 und 4.29. Zeigt die erstgenannte Abbildung, dass die mittleren Druckbelastungen hinter der mobilen Schnellbauwand signifikant unter dem Grenzwert liegen, so geht aus der zweitgenannten Abbildung hervor, dass die Absenkung bzw. Schutzwirkung ansteigt mit der mittleren Druckbelastung auf freiem Feld. Aus diesem Grund wächst die mittlere Druckbelastung hinter dem Prototypen 4 mit Boeglitex 665 nur moderat mit der Zuggeschwindigkeit.

Die mittlere Absenkung bzw. Schutzwirkung bezüglich der mittleren Druckbelastung für den Prototypen 4 mit Boeglitex 665 beziffert sich auf:

$$\bar{A}_D = 35,3\% \quad \bar{S}_D = 64,7\% \quad (4.8)$$

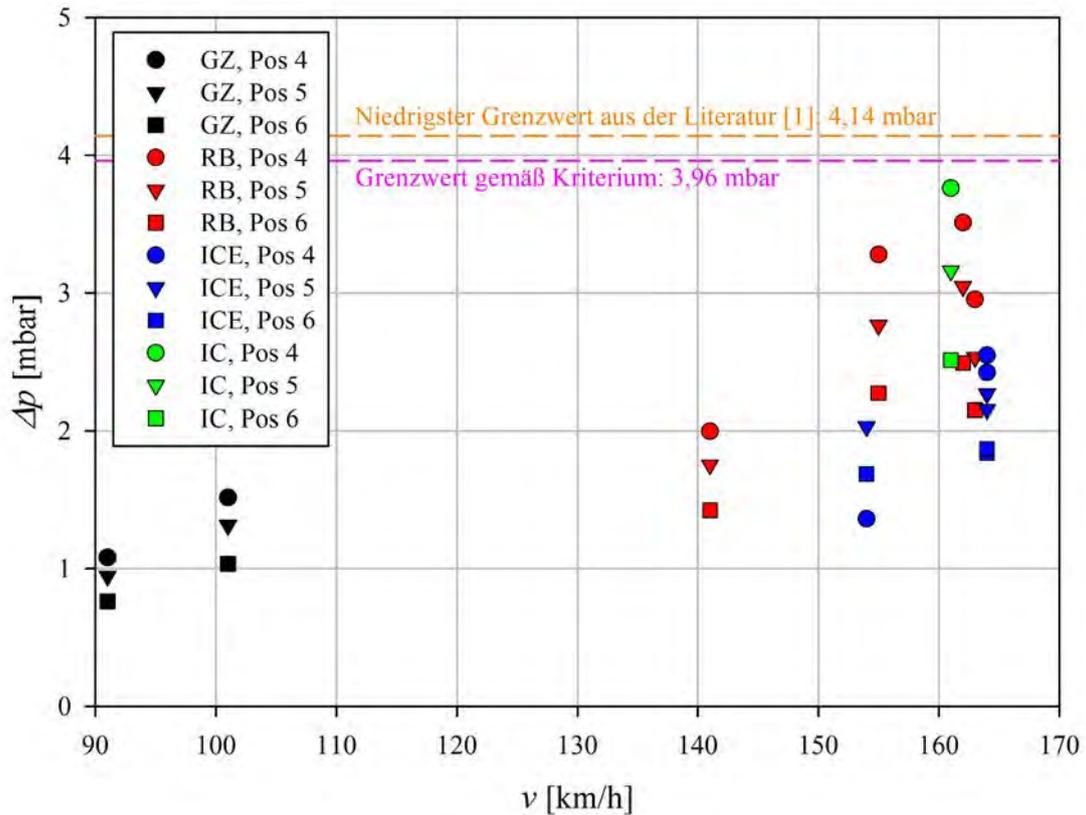


Abbildung 4.26: Maxima der Bug-Druckwellen an den Messpositionen hinter dem Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

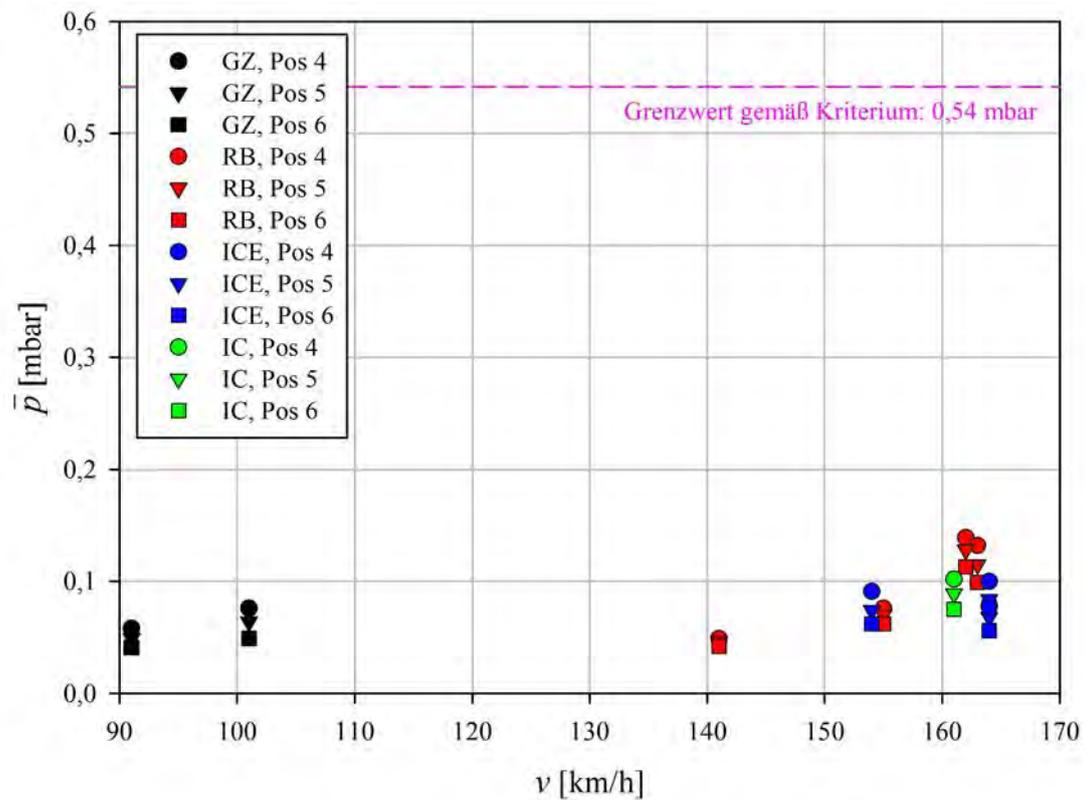


Abbildung 4.27: Mittlere Druckbelastung an den Messpositionen hinter dem Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit dem Boeglitex 665.

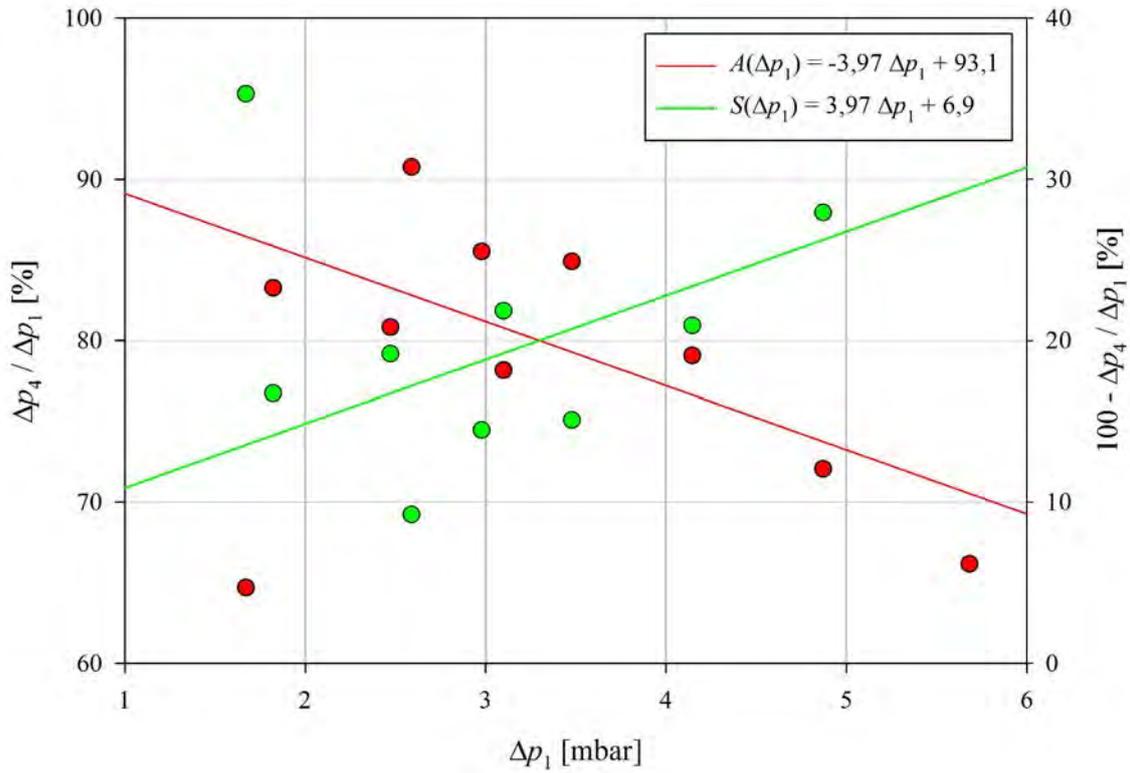


Abbildung 4.28: Absenkung (rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 665 hinsichtlich Bug-Druckwellen.

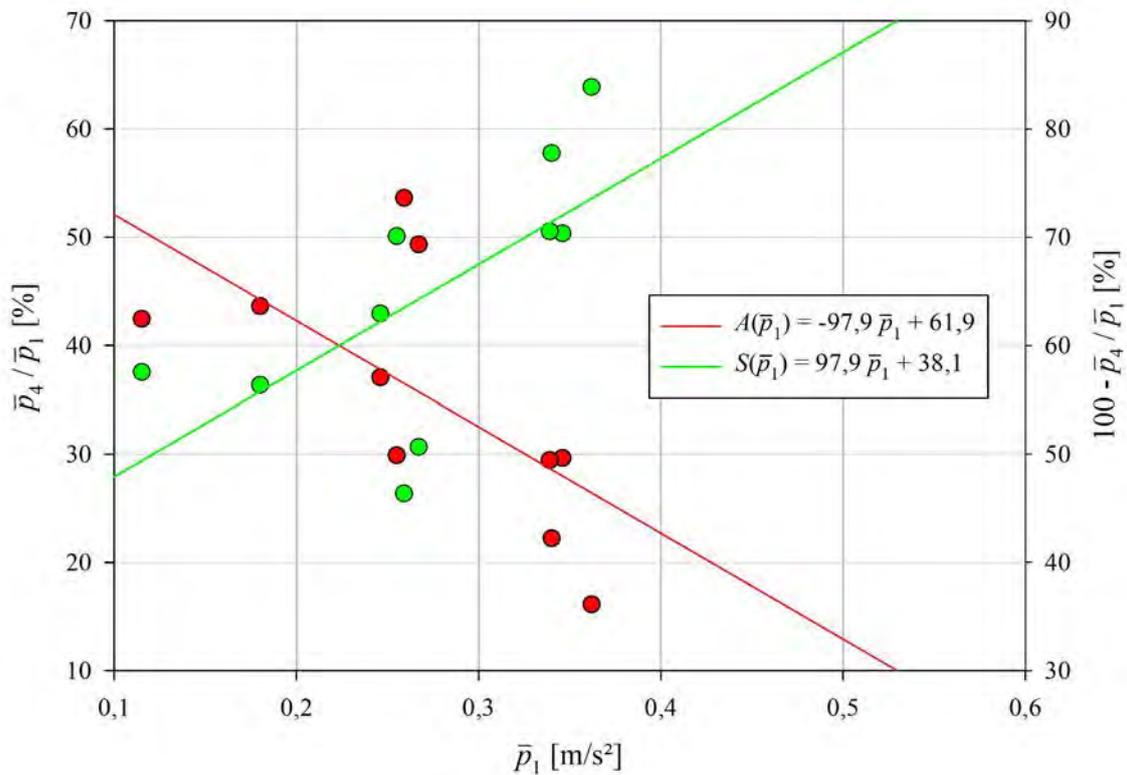


Abbildung 4.29: Absenkung (rot) und Schutzwirkung (grün) des Prototypen 4 mit dem Boeglitex 665 hinsichtlich mittlerer Druckbelastung.

5 Diskussion der Ergebnisse

Im vorigen Kapitel 4 wurde die Untersuchung des Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand im Hinblick auf ausreichende Schutzwirkung gegenüber aerodynamischen Belastungen auf Beschäftigte im Gleisbereich dargelegt. Dabei standen zwei Varianten des Prototypen 4 im Fokus, nämlich mit Bespannungen des Netzstoffes Boeglitex 140 und 665 des Schweizer Hersteller Boegli Wagatex Engineering. Untersucht wurde die Schutzwirkung gegenüber Fahrtwindgeschwindigkeit, Fahrtwindbeschleunigung, Bug-Druckwellen und mittlerer Druckbelastung.

Das Schutzkriterium wurde von den Unfallversicherern UVB (Unfallversicherung Bund und Bahn) und Bau BG definiert: Die Schutzwirkung ist hinsichtlich aerodynamischer Belastungen auf Beschäftigte am Gleis genau dann ausreichend, wenn die aerodynamischen Belastungen hinter der mobilen Schnellbauwand bei einer Zuggeschwindigkeit von $v = 160$ km/h nicht größer sind als bei $v \leq 120$ km/h auf freiem Feld in $x_A = 2,30$ m Entfernung von der Gleisachse (Abschnitt 1.3). Dem Kriterium wurden unter Verwendung von Computersimulationen und Messwerten Grenzwerte für die verschiedenen aerodynamischen Belastungen zugeordnet (Abschnitt 2.2.2).

Die Untersuchung ergab, dass der Prototyp 4 in beiden Varianten das genannte Kriterium hinsichtlich Windgeschwindigkeit voll erfüllt. Im Regelwerk ist die Windgeschwindigkeit die einzig relevante Größe.

In Bezug auf die Windbeschleunigung erfüllt der Prototyp 4 in beiden Varianten das genannte Kriterium für die gefilterten Messdaten und zwar unabhängig vom Grad der Filterung. Der Autor wertet das Kriterium der Unfallversicherer in Bezug auf die Windbeschleunigung als erfüllt weil die bei den ungefilterten Daten gelegentlich auftretenden extremen Maxima von so kurzer Dauer sind, dass sie mit Sicherheit keine Wirkung auf Personen entfalten können (Abschnitt 2.1). Darüber hinaus besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass diese extremen Maxima Störsignalen bei den gemessenen Windgeschwindigkeiten entspringen (Abschnitt 4.3.1.2). Dies ist auch der Grund dafür, warum im Regelwerk grundsätzlich gefilterte Messdaten für Betrachtungen herangezogen werden. Standardmäßig werden Messdaten dort mit $\Delta t = 1,0$ s gefiltert (Abschnitt 2.2.1). Im Rahmen dieser Untersuchung wurden für die Bewertungen Messdaten herangezogen, die mit $\Delta t = 0,4$ s gefiltert wurden, was ein strengeres Bewertungskriterium als das im Regelwerk darstellt.

Beide Varianten der mobilen Schnellbauwand erfüllen auch das Kriterium bezüglich der mittleren Druckbelastung. Höherfrequente Druckwellen, die während der Passage von Zügen auftreten, werden durch beide Varianten des Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand deutlich abgesenkt. Dies ist sehr gut in den grafischen Darstellungen der Druckmesskurven in Anhang C zu erkennen.

Ausreichender Schutz im Sinne des Kriteriums ist hingegen für die physikalische Größe Druck in Bezug auf Bug-Druckwellen von Zügen beim Prototypen 4 mit dem Boeglitex 140 nicht sicher gegeben. Der Grenzwert wird hier zwar eingehalten, jedoch passierten beim Test dieser Variante keine schnellen InterCity die mobile Schnellbauwand.

Schnelle InterCity sind der worst case hinsichtlich aerodynamischen Belastungen. Es kann folglich nicht sicher ausgeschlossen werden, dass bei der Passage von schnellen InterCity der Grenzwert beim Einsatz des Boeglitex 140 moderat überschritten wird. Trotz der Tatsache, dass der Prototyp 4 mit dem Boeglitex 140 das Kriterium der Unfallversicherer in Bezug auf die Bug-Druckwellen nicht sicher erfüllt, ist aus Sicht des Autors diese Variante der mobilen Schnellbauwand dennoch prinzipiell geeignet. Die Gründe dafür sind vielfältig. Zum einen liegen die hinter der mobilen Schnellbauwand gemessenen Bug-Druckwellen weit unter den Grenzwerten, die in der Literatur genannt werden. Dabei sind diese Grenzwerte nochmals deutlich niedriger als diejenigen, die im aktuell gültigen Regelwerk zu finden sind (Abschnitt 2.2.1). Weiterhin sind diese Druckwellen nicht relevant für die Gleichgewichtsstabilität von Menschen (Abschnitt 2.2). Darüber hinaus sind bereits gegenwärtig Beschäftigte am Gleis Druckwellen dieser Höhe ausgesetzt wenn sie an festen Absperrungen arbeiten und Züge mit Geschwindigkeiten über 120 km/h passieren [12]. Diese Tatsache besteht auch dann, wenn die Beschäftigten akustisch gewarnt werden und die Arbeit einstellen.

Der Prototyp 4 mit dem Boeglitex 665 erfüllt das Kriterium der Unfallversicherer in Bezug auf Bug-Druckwellen.

Grundsätzlich steigt die Schutzwirkung des Prototypen 4 mit zunehmender Zuggeschwindigkeit gegenüber den aerodynamischen Lasten, mit Ausnahme der Bug-Druckwellen. Diese steigen hinter dem Prototypen 4 der mobilen Schnellbauwand mit wachsender Zuggeschwindigkeit an, werden jedoch zumindest vom Prototypen 4 mit dem Boeglitex 665 in ihrem Niveau abgesenkt.

In Tabelle 5.1 sind die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Man erkennt, dass der Prototyp 4 mit dem Boeglitex 665 durchweg eine signifikant besser Schutzwirkung aufweist als der Prototyp 4 mit dem Boeglitex 140. Darüber hinaus erfüllt erstgenannter uneingeschränkt das Kriterium der Unfallversicherer. Aus diesem Grund wird empfohlen, den Prototypen 4 in Kombination mit dem Boeglitex 665 als mobile Schnellbauwand einzusetzen.

Tabelle 5.1: Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse. Die mit * gekennzeichneten Aussagen gelten nur für gefilterte Messdaten mit $\Delta t = 0,4\text{ s}$ und $\Delta t = 1,0\text{ s}$.

Belastungsart	Boeglitex 140		Boeglitex 665	
	\bar{S} [%]	Kriterium erfüllt	\bar{S} [%]	Kriterium erfüllt
Windgeschwindigkeit	67,9	ja	81,2	ja
Windbeschleunigung	56,4	ja*	61,8	ja*
Bug-Druckwellen	4,6	unsicher	21,5	ja
mittlere Druckbelastung	58,8	ja	64,7	ja

Offen bleibt die Frage, wie viele Meter der mobilen Schnellbauwand vor Beginn einer Baustelle erforderlich sind, um ausreichenden Schutz der Beschäftigten am Gleis vor aerodynamischen Belastungen zu gewährleisten. Diese Frage war nicht Gegenstand dieser Untersuchung und muss mit Hilfe einer weiteren Messkampagne beantwortet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] ASSOCIATED ENGINEERS: *Subway Environmental Design Handbook*, Second Edition, Urban Mass Transit Administration, Washington D.C., USA, 1976.
- [2] BAKER, C., J.: *Persönliche Mitteilung*, Birmingham Centre for Railway Research and Education, University of Birmingham, Birmingham, U.K., 2024.
- [3] DGUV VORSCHRIFT 78: *Arbeiten im Bereich von Gleisen*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, 1999.
- [4] DGUV REGEL 101-024: *Sicherungsmaßnahmen bei Arbeiten im Gleisbereich von Eisenbahnen*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, 2008.
- [5] DGUV INFORMATION 781: *Sicherheitshinweise für Arbeiten im Gleisbereich von Eisenbahnen*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin, 2013.
- [6] DIN EN 14067-4: *Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke*, Beuth Verlag, Berlin, 2019.
- [7] 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 Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union*, Amtsblatt Nr. L 356/228, 2014.
- [8] HAUFF, C.: *Persönliche Mitteilung*, Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Hannover, 2024.
- [9] HAUFF, C., PARDEY, A.: *Gleisbaustellensicherung - aktuelle Regelungen*, Bauportal 5, Seiten 2-7, Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Berlin, 2016.
- [10] 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.
- [11] FLEISCHANDERL, T.: *Persönliche Mitteilung*, Unfallversicherung Bund und Bahn, Minden, 2024.
- [12] LORENZ D., SCHUPIN, P., NISSLE, S., SCHIEBLER, H., TÖDT, J.-N.: *Aerodynamische Belastungen auf Beschäftigte im Gleisbereich durch Vorbeifahrt von Zügen in Abhängigkeit von Zuggeschwindigkeit, Zugtyp und Entfernung vom Gleis*, Forschungsbericht (in Vorbereitung), Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2024.

- [13] LORENZ D., SCHUPIN, P., NISSE, S., SCHIEBLER, H., TÖDT, J.-N.: *Weiterentwicklung einer mobilen Schnellbauwand zur räumlichen Trennung der Beschäftigten im Gleisbereich von der Gefahrenquelle Zug*, Erster Zwischenbericht, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V., Mannheim, 2023.

A Kenndaten der Netzstoffe

BOEGLITEX 140



EINSATZ ALS SPENGLERLAUFNETZ:

Unser speziell verstärktes BOEGLITEX 140 wurde extra für Dachdeckerschutzwände als Spenglerlaufnetz entwickelt. Das BOEGLITEX 140 darf als Dachdeckerschutzwand ausschliesslich nur mit Isilink-Leinen oder Gurtschnellverschlüssen befestigt werden. Jede Netzrolle erhält ein Sicherheits-Label, worauf alle wichtigen Informationen zum Netz enthalten sind, wie z.B. die Einsatzdauer, Fertigungsdatum etc. Die Montage muss genau nach unserer Aufbau- und Verwendungsanleitung (unter Downloads erhältlich) ausgeführt werden.

EINSATZ ALS SCHUTZNETZ:

Durch den speziell verstärkten Rand, kann das BOEGLITEX 140 auf jede Baustelle als Schutznetz montiert werden. Auch besonders gut geeignet für Arbeiten an Bahngleisen, um die Baustellen vom Gleis zu trennen. Das sehr robuste und dennoch winddurchlässige Netz, zeichnet sich durch eine starke Stabilität und Langlebigkeit aus.

WERKSTOFF

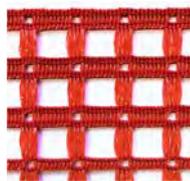
100% Polypropylen (PP)

TECHNISCHE DATEN

Winddurchlass	ca. 60%
Gewicht	265 g/m ²
Reissfestigkeit	840 N/5cm Breite
Maschenweite	20 x 20 mm
Ausführung	verstärkter Rand
Seitenschutz	SN EN 13374

BEDRUCKBAR

Ja - Grössen abhängig



Art.-Nr.:

140.000.200

Masse:

2.00m x 50m

ERHÄLTICHE FARBEN

- rot
- postgelb
- blau
- orange
- oliv

PREISE

1 Rolle	CHF 4.25/m ²
bis 1'000m ²	CHF 3.95/m ²
ab 1'000m ²	CHF 3.65/m ²
ab 2'000m ²	CHF 3.45/m ²

alle Preise verstehen sich exkl. MWST und Versand

für weitere Informationen besuchen Sie unsere Website



ANWENDUNGSBEREICHE



Boegli Wagatex Engineering AG
Hofmattstrasse 14
3360 Herzogenbuchsee

+41 (0)32 614 45 35

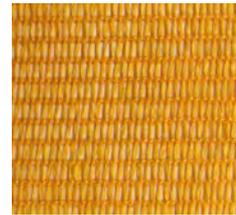
info@boegliwagatex.ch

ww.boegliwagatex.ch

BOEGLITEX 665



Das relativ blickdichte Netz dient vor allem als Sichtschutz und als Abschrankung. Trotz Blickdichte hat es einen genügenden Winddurchlass, damit sich das Netz nicht aufbläst. Sie können das Netz bei uns auch mit Ihrem Slogan, Sujet oder Logo bedrucken lassen.



WERKSTOFF

100% Polypropylen (PP)

TECHNISCHE DATEN

Winddurchlass ca. 20%
Schattierwert ca. 80%
Gewicht 200 g/m²
Ausführung Randverstärkung mit Knopflöchern
Maschenweite 5 x 1.2 mm

BEDRUCKBAR

Ja

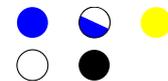
Art.-Nr.:

665.000.175
 665.000.200

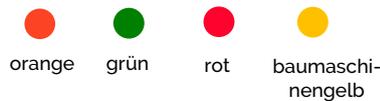
Masse:

1.75m x 100m
 2.00m x 100m

ERHÄLTICHE FARBEN



ERHÄLTICHE FARBEN AB EINER BESTELLMENGE VON 12 ROLLEN



ANWENDUNGSBEREICHE



für weitere Informationen besuchen Sie unsere Website



Abbildung A.2: Kenndaten des Netzstoffes Boeglitex 665.

B Tabellen

Tabelle B.1: Maximale Windgeschwindigkeiten ohne Datenfilterung.

Nr.	u_{\max} [m/s]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	9,533	10,430	10,969	3,270	4,168	3,040
2	14,616	15,049	11,243	5,373	4,347	3,743
3	14,159	11,064	5,874	4,999	3,476	3,109
4	17,242	15,389	13,250	4,743	4,732	3,340
5	15,693	14,638	12,807	4,578	5,039	3,468
6	11,811	13,005	10,548	4,435	3,329	2,897
7	9,178	6,453	7,347	5,611	4,849	3,388
8	14,832	14,140	13,452	4,739	4,457	3,479
9	13,100	11,086	13,785	6,160	6,643	7,665
10	11,676	9,683	7,350	4,560	3,849	3,556
11	20,447	18,282	9,797	4,237	4,538	2,996
12	10,046	9,269	7,024	3,238	3,248	3,172
13	14,572	13,353	12,419	2,948	2,805	1,923
14	17,696	16,136	14,836	2,615	4,281	2,714
15	14,792	13,646	11,177	4,633	4,538	4,739
16	11,785	8,240	7,709	3,241	2,754	2,329
17	12,844	11,390	10,200	3,421	2,728	2,692
18	13,547	11,884	10,610	2,977	2,765	2,648
19	11,441	11,555	5,691	3,175	2,893	2,663
20	13,199	11,928	7,358	3,699	4,135	2,941

Tabelle B.2: Maximale Windgeschwindigkeiten mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4$ s.

Nr.	u_{\max} [m/s]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	7,785	8,424	8,604	2,958	3,169	1,708
2	13,39	12,871	9,964	2,139	2,254	2,124
3	10,625	7,403	5,694	3,887	2,151	2,301
4	15,24	14,081	11,485	2,943	2,567	1,974
5	11,679	8,994	7,440	3,268	2,204	2,251
6	10,756	10,233	9,370	3,777	1,493	1,564
7	7,302	5,758	6,808	4,756	4,109	2,429
8	13,524	12,699	9,655	3,904	2,836	2,603
9	11,655	9,662	9,329	5,151	5,550	5,764
10	9,835	7,400	6,540	3,072	2,458	2,457
11	16,114	14,191	7,798	3,418	2,410	2,157
12	8,526	7,534	6,586	2,114	2,270	2,304
13	12,273	12,240	11,067	1,805	1,787	1,797
14	14,844	11,433	10,104	2,073	1,852	1,490
15	12,487	11,089	9,088	3,352	3,298	4,426
16	8,996	6,484	6,398	2,030	1,422	1,665
17	11,528	9,796	8,537	2,008	2,053	2,332
18	11,626	10,374	9,638	1,871	1,818	1,895
19	9,316	7,228	4,385	2,457	1,704	1,579
20	9,856	9,065	6,817	2,285	2,177	1,916

Tabelle B.3: Maximale Windgeschwindigkeiten mit Datenfilterung mit $\Delta t = 1,0$ s.

Nr.	u_{\max} [m/s]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	6,394	5,705	5,274	2,578	2,122	1,623
2	12,219	11,133	9,007	1,605	1,609	1,550
3	7,674	5,841	5,284	3,292	1,957	2,046
4	14,207	13,407	9,853	2,138	1,742	1,577
5	6,813	6,092	5,507	2,783	2,074	2,106
6	9,679	8,902	7,876	3,263	1,247	1,355
7	6,047	5,395	5,622	3,986	3,12	2,083
8	11,730	10,220	8,249	3,706	2,225	2,184
9	9,840	7,449	5,863	4,331	4,108	4,203
10	9,006	6,322	5,421	2,617	1,971	1,936
11	11,234	9,016	6,370	2,966	1,990	2,054
12	6,830	6,166	5,987	2,000	2,023	1,972
13	11,738	11,028	9,962	1,768	1,697	1,752
14	11,096	9,046	8,377	1,465	1,433	1,232
15	11,742	10,369	8,163	3,225	2,478	3,020
16	7,460	6,159	6,047	1,457	1,184	1,225
17	10,032	8,591	6,359	1,884	1,970	2,139
18	10,550	8,904	7,897	1,674	1,624	1,463
19	6,447	5,271	3,996	1,213	1,197	1,433
20	6,450	6,217	5,985	1,681	1,602	1,566

Tabelle B.4: Maximale Windbeschleunigungen ohne Datenfilterung.

Nr.	a_{\max} [m/s ²]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	293,317	367,568	252,923	78,715	125,827	74,846
2	497,162	315,535	260,387	370,289	77,761	41,917
3	224,063	189,526	31,494	161,406	39,995	28,645
4	259,822	300,937	285,418	84,453	321,459	35,075
5	572,170	237,322	500,606	87,814	202,624	39,992
6	332,118	194,057	231,061	44,473	87,150	31,699
7	312,287	108,059	44,266	95,834	86,919	44,201
8	331,659	201,311	136,598	80,951	158,997	27,289
9	336,681	390,855	432,103	94,357	168,501	43,300
10	315,449	61,900	41,971	77,401	74,675	33,686
11	573,582	707,110	311,389	105,020	382,624	49,955
12	211,977	159,266	51,502	70,151	47,240	30,263
13	250,663	129,531	78,391	39,314	38,420	34,311
14	444,610	462,983	363,437	112,337	295,178	41,423
15	382,111	224,063	153,961	64,697	54,746	33,786
16	393,072	285,768	188,816	88,593	100,277	38,239
17	275,921	185,231	228,416	77,402	41,431	28,349
18	229,65	383,446	243,788	83,402	203,790	25,628
19	325,135	200,354	53,772	68,849	53,918	33,095
20	361,021	354,781	89,920	67,022	68,241	85,058

Tabelle B.5: Maximale Windbeschleunigungen mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4$ s.

Nr.	a_{\max} [m/s ²]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	23,026	25,166	25,772	9,889	11,966	9,229
2	23,728	28,274	17,700	15,380	13,079	10,715
3	24,635	17,671	9,535	11,701	9,527	7,231
4	26,736	5,588	19,945	13,017	12,819	9,477
5	35,936	36,056	28,148	13,175	14,220	9,071
6	20,182	22,416	18,000	10,670	9,861	8,122
7	15,306	14,560	14,940	17,866	12,292	9,586
8	34,838	35,277	31,917	12,818	12,945	7,570
9	26,568	29,266	36,262	15,211	16,498	18,072
10	17,917	19,778	14,150	13,664	9,447	8,587
11	40,413	43,273	22,549	12,267	12,404	10,534
12	18,304	16,149	12,574	11,678	9,558	7,179
13	28,402	26,629	29,328	9,900	10,888	7,684
14	27,615	27,849	23,716	10,982	12,567	10,222
15	25,474	20,075	17,670	12,913	10,404	12,365
16	33,054	22,158	16,560	11,718	10,243	9,443
17	24,377	22,465	17,427	11,090	9,216	8,588
18	31,405	27,839	14,755	11,115	10,570	7,054
19	24,796	21,453	16,487	11,110	9,391	8,728
20	25,963	33,374	12,779	11,663	12,257	9,044

Tabelle B.6: Maximale Windbeschleunigungen mit Datenfilterung mit $\Delta t = 1,0$ s.

Nr.	a_{\max} [m/s ²]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	11,213	12,397	13,041	4,824	5,783	4,166
2	11,189	11,577	10,142	5,865	4,927	4,139
3	10,134	8,296	3,718	5,134	3,729	3,102
4	9,933	9,350	9,636	5,274	5,252	3,627
5	14,136	13,001	11,215	4,830	5,271	4,036
6	8,457	9,072	9,249	4,024	3,760	3,401
7	8,607	6,650	7,549	5,751	5,575	3,650
8	14,001	11,280	8,900	5,480	4,452	3,272
9	12,384	9,921	12,175	5,904	6,242	7,774
10	8,731	7,391	4,474	4,215	3,892	3,477
11	19,061	16,060	8,309	4,502	4,528	3,028
12	9,988	9,001	4,990	3,839	3,777	2,265
13	10,012	8,098	7,209	3,621	3,822	2,458
14	13,077	10,740	9,832	3,156	4,700	3,665
15	9,152	8,017	5,997	4,518	3,778	3,641
16	11,195	8,407	6,909	3,629	3,431	2,725
17	9,173	10,139	9,746	4,716	3,326	3,704
18	13,470	9,911	7,115	3,674	4,099	2,465
19	11,870	11,271	5,999	3,967	3,710	3,403
20	11,987	11,342	6,615	3,985	3,946	3,562

Tabelle B.7: Maximale Druckdifferenzen bei den Bug-Druckwellen.

Nr.	Δp [mbar]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	3,427	3,003	2,383	3,325	2,823	2,311
2	4,277	2,898	1,977	3,145	2,539	1,872
3	2,776	2,421	1,964	2,782	2,385	1,901
4	2,164	2,165	1,400	2,469	1,863	1,321
5	3,623	3,058	2,388	3,503	2,887	2,291
6	2,867	2,445	1,978	2,828	2,456	1,995
7	3,281	2,857	2,263	3,114	2,686	2,104
8	2,272	1,745	1,278	1,872	1,561	1,155
9	3,815	2,962	2,423	3,652	2,924	2,279
10	2,765	2,396	1,921	2,753	2,393	1,834
11	5,683	4,559	2,918	3,760	3,160	2,510
12	2,472	2,071	1,648	1,998	1,755	1,424
13	1,671	1,324	1,051	1,081	0,947	0,762
14	4,146	3,381	2,604	3,278	2,764	2,270
15	3,099	2,465	2,042	2,422	2,152	1,840
16	3,478	3,015	2,387	2,953	2,530	2,147
17	2,589	2,285	1,826	2,350	2,032	1,687
18	1,822	1,573	1,231	1,517	1,316	1,036
19	2,978	2,504	2,078	2,547	2,265	1,870
20	4,871	3,665	2,860	3,510	3,046	2,490

Tabelle B.8: Quotienten der maximalen Druckdifferenzen der Bug-Druckwellen.

Nr.	$\Delta p_4/\Delta p_1$ [%]	$\Delta p_5/\Delta p_2$ [%]	$\Delta p_6/\Delta p_3$ [%]
1	97,024	94,006	96,954
2	73,533	87,612	94,689
3	100,216	98,513	96,792
4	114,094	86,051	94,3571
5	96,688	94,408	95,938
6	98,640	100,450	100,859
7	94,911	94,015	92,974
8	82,394	89,456	90,376
9	95,727	98,717	94,057
10	99,566	99,875	95,471
11	66,162	69,313	86,018
12	80,825	84,742	86,408
13	64,692	71,526	72,502
14	79,064	81,751	87,174
15	78,154	87,302	90,108
16	84,905	83,914	89,946
17	90,769	88,928	92,388
18	83,262	83,662	84,159
19	85,527	90,455	89,990
20	72,059	83,111	87,069

Tabelle B.9: Mittlere Windgeschwindigkeit ohne Datenfilterung.

Nr.	\bar{u} [m/s]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	3,449	3,413	3,245	1,367		
2	8,072	7,037	5,738	1,334		
3	3,653	2,670	1,937	1,858		
4	7,404	6,137	4,348	1,403		
5	4,243	3,848	3,304	1,373	1,327	1,568
6	4,658	3,917	2,886	1,237		
7	3,628	3,284	2,801	2,052		
8	8,779	7,554	5,503	1,747		
9	3,495	3,055	2,605	1,381		
10	4,608	3,804	3,047	1,435		
11	6,027	5,061	3,844	1,464		
12	3,463	3,136	2,733	1,366		
13	6,498	5,618	4,575	0,795		
14	5,125	4,703	4,065	0,713		
15	6,303	5,613	4,386	1,434		
16	3,952	3,192	2,967	0,766	0,663	0,789
17	4,897	3,901	2,614	0,69		
18	6,957	5,571	3,873	1,037		
19	3,513	2,812	2,277	0,758		
20	3,848	3,638	2,760	0,988	1,144	1,048

Tabelle B.10: Quotienten der mittleren Windgeschwindigkeiten ohne Datenfilterung.

Nr.	\bar{u}_4/\bar{u}_1 [%]	\bar{u}_5/\bar{u}_2 [%]	\bar{u}_6/\bar{u}_3 [%]
1	39,63		
2	16,525		
3	50,864		
4	18,953		
5	32,353	34,477	47,464
6	26,567		
7	56,567		
8	19,898		
9	39,507		
10	31,135		
11	24,288		
12	39,446		
13	12,236		
14	13,917		
15	22,749		
16	19,389	20,784	26,586
17	14,094		
18	14,900		
19	21,589		
20	25,685	31,454	37,975

Tabelle B.11: Mittlere Windgeschwindigkeit mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4$ s.

Nr.	\bar{u} [m/s]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	3,306	3,262	3,153	1,283		
2	7,994	6,970	5,633	1,116		
3	3,544	2,573	1,875	1,793		
4	7,343	6,016	4,248	1,29		
5	4,057	3,685	3,155	1,286	1,191	1,515
6	4,536	3,797	2,773	1,166		
7	3,482	3,169	2,709	1,93		
8	8,679	7,439	5,417	1,607		
9	3,418	2,958	2,550	1,344		
10	4,539	3,737	3,005	1,352		
11	5,93	4,950	3,758	1,361		
12	3,390	3,067	2,683	1,311		
13	6,436	5,553	4,510	0,674		
14	5,038	4,606	4,005	0,617		
15	6,235	5,552	4,338	1,337		
16	3,715	3,022	2,821	0,570	0,516	0,698
17	4,797	3,785	2,511	0,568		
18	6,842	5,465	3,791	0,859		
19	3,400	2,667	2,176	0,658		
20	3,699	3,363	2,569	0,856	1,042	0,959

Tabelle B.12: Quotienten der mittleren Windgeschwindigkeiten mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4\text{s}$.

Nr.	\bar{u}_4/\bar{u}_1 [%]	\bar{u}_5/\bar{u}_2 [%]	\bar{u}_6/\bar{u}_3 [%]
1	38,804		
2	13,961		
3	50,585		
4	17,572		
5	31,693	32,327	48,008
6	25,695		
7	55,434		
8	18,519		
9	39,333		
10	29,8000		
11	22,946		
12	38,669		
13	10,467		
14	12,255		
15	21,449		
16	15,347	17,088	24,745
17	11,843		
18	12,547		
19	19,348		
20	23,137	30,990	37,323

Tabelle B.13: Mittlere Windbeschleunigungen mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4\text{s}$.

Nr.	\bar{a} [m/s]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	4,574	4,270	4,267	1,915		
2	7,591	7,175	6,987	3,543		
3	5,429	3,696	2,584	2,210		
4	7,195	6,865	6,039	2,526		
5	6,919	6,064	5,108	2,392	2,445	1,661
6	5,648	5,023	4,692	2,063		
7	4,118	3,753	3,806	2,644		
8	7,529	7,337	6,083	3,279		
9	4,413	3,862	3,545	1,906		
10	4,400	3,849	3,177	2,165		
11	6,801	6,379	4,595	2,439		
12	3,617	3,241	2,528	1,563		
13	5,646	5,255	4,553	1,876		
14	4,472	4,383	4,061	1,770		
15	5,666	5,181	4,036	2,675		
16	6,370	4,876	4,832	2,604	2,036	1,794
17	6,156	5,627	4,653	1,905		
18	7,090	6,284	4,698	2,505		
19	4,852	4,732	3,583	1,898		
20	7,116	7,466	4,685	2,623	2,319	2,004

Tabelle B.14: Quotienten der mittleren Windbeschleunigungen mit Datenfilterung mit $\Delta t = 0,4\text{s}$.

Nr.	\bar{a}_4/\bar{a}_1 [%]	\bar{a}_5/\bar{a}_2 [%]	\bar{a}_6/\bar{a}_3 [%]
1	41,867		
2	46,667		
3	40,698		
4	35,107		
5	34,567	40,313	32,520
6	36,527		
7	64,198		
8	43,556		
9	43,194		
10	49,193		
11	35,867		
12	43,220		
13	33,217		
14	39,581		
15	47,213		
16	40,887	41,747	37,122
17	30,949		
18	35,331		
19	39,121		
20	36,865	31,061	42,766

Tabelle B.15: Mittlere Druckbelastungen.

Nr.	\bar{p} [mbar]					
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
1	0,169	0,160	0,137	0,083	0,072	0,065
2	0,582	0,457	0,301	0,116	0,090	0,069
3	0,198	0,135	0,097	0,125	0,107	0,091
4	0,468	0,345	0,223	0,090	0,074	0,058
5	0,253	0,206	0,162	0,121	0,097	0,083
6	0,242	0,173	0,123	0,104	0,087	0,068
7	0,160	0,146	0,117	0,102	0,093	0,083
8	0,574	0,463	0,259	0,097	0,079	0,067
9	0,147	0,122	0,107	0,066	0,060	0,052
10	0,195	0,128	0,081	0,087	0,070	0,058
11	0,346	0,264	0,143	0,102	0,089	0,075
12	0,115	0,104	0,075	0,049	0,046	0,042
13	0,362	0,282	0,194	0,058	0,049	0,041
14	0,255	0,213	0,154	0,076	0,070	0,062
15	0,339	0,265	0,152	0,100	0,084	0,077
16	0,267	0,229	0,199	0,132	0,115	0,099
17	0,246	0,157	0,097	0,091	0,074	0,062
18	0,340	0,212	0,118	0,076	0,064	0,049
19	0,180	0,135	0,087	0,078	0,068	0,056
20	0,259	0,224	0,168	0,139	0,128	0,113

Tabelle B.16: Quotienten der mittleren Druckbelastungen.

Nr.	\bar{p}_4/\bar{p}_1 [%]	\bar{p}_5/\bar{p}_2 [%]	\bar{p}_6/\bar{p}_3 [%]
1	49,236	45,345	47,699
2	19,847	19,645	22,828
3	63,023	79,503	94,347
4	19,237	21,305	26,029
5	47,798	47,171	51,197
6	42,836	49,980	55,571
7	63,615	64,104	71,541
8	16,864	17,169	26,091
9	44,703	49,528	48,162
10	44,896	54,907	71,667
11	29,650	33,620	51,961
12	42,451	44,035	55,192
13	16,114	17,538	21,406
14	29,895	32,831	40,209
15	29,456	31,524	50,609
16	49,333	50,198	49,790
17	37,049	47,075	63,481
18	22,223	29,965	41,762
19	43,640	49,962	65,103
20	53,632	57,463	67,004

C Diagramme

Zug 1

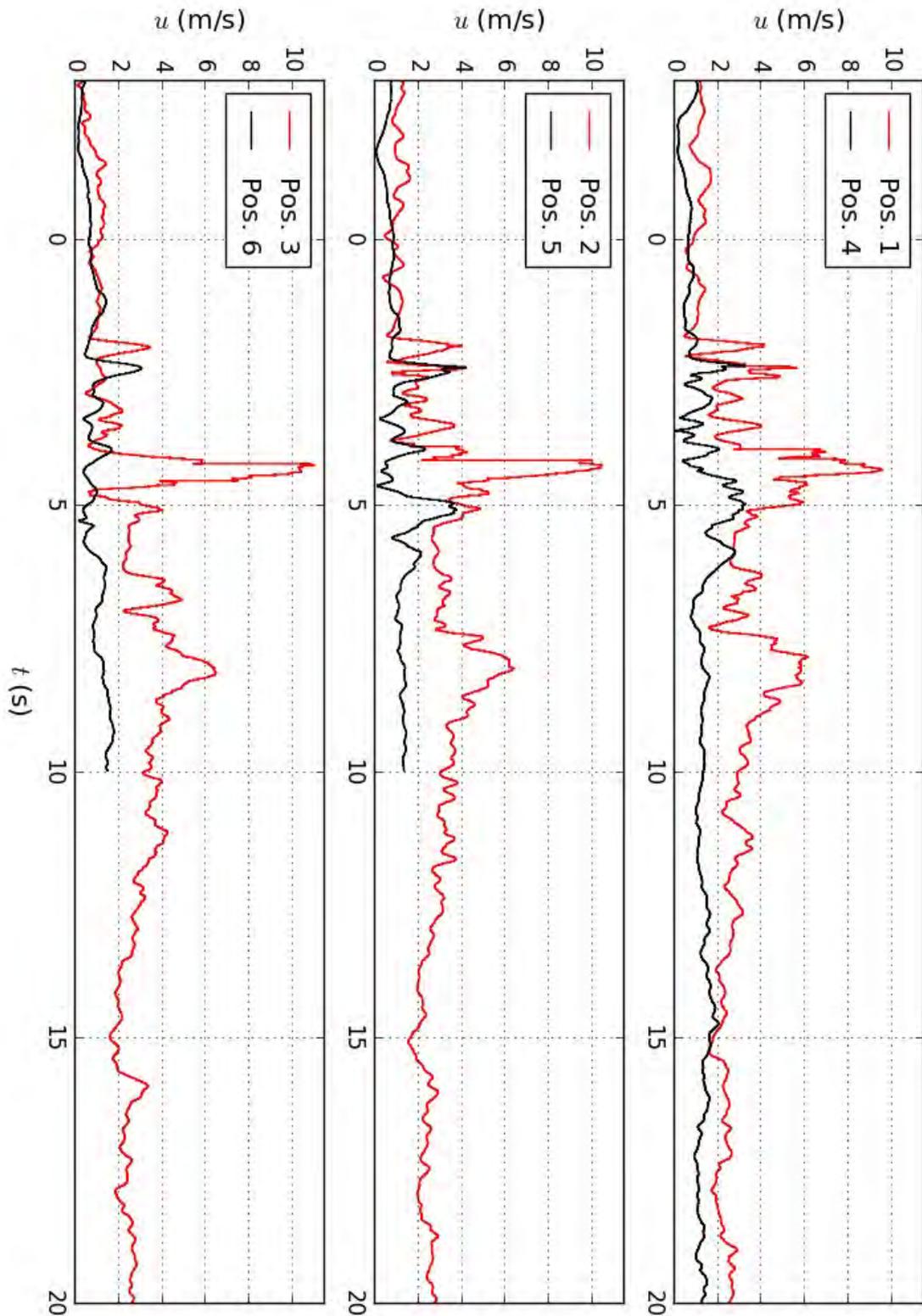


Abbildung C.1: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 1. Messdaten ungefiltert.

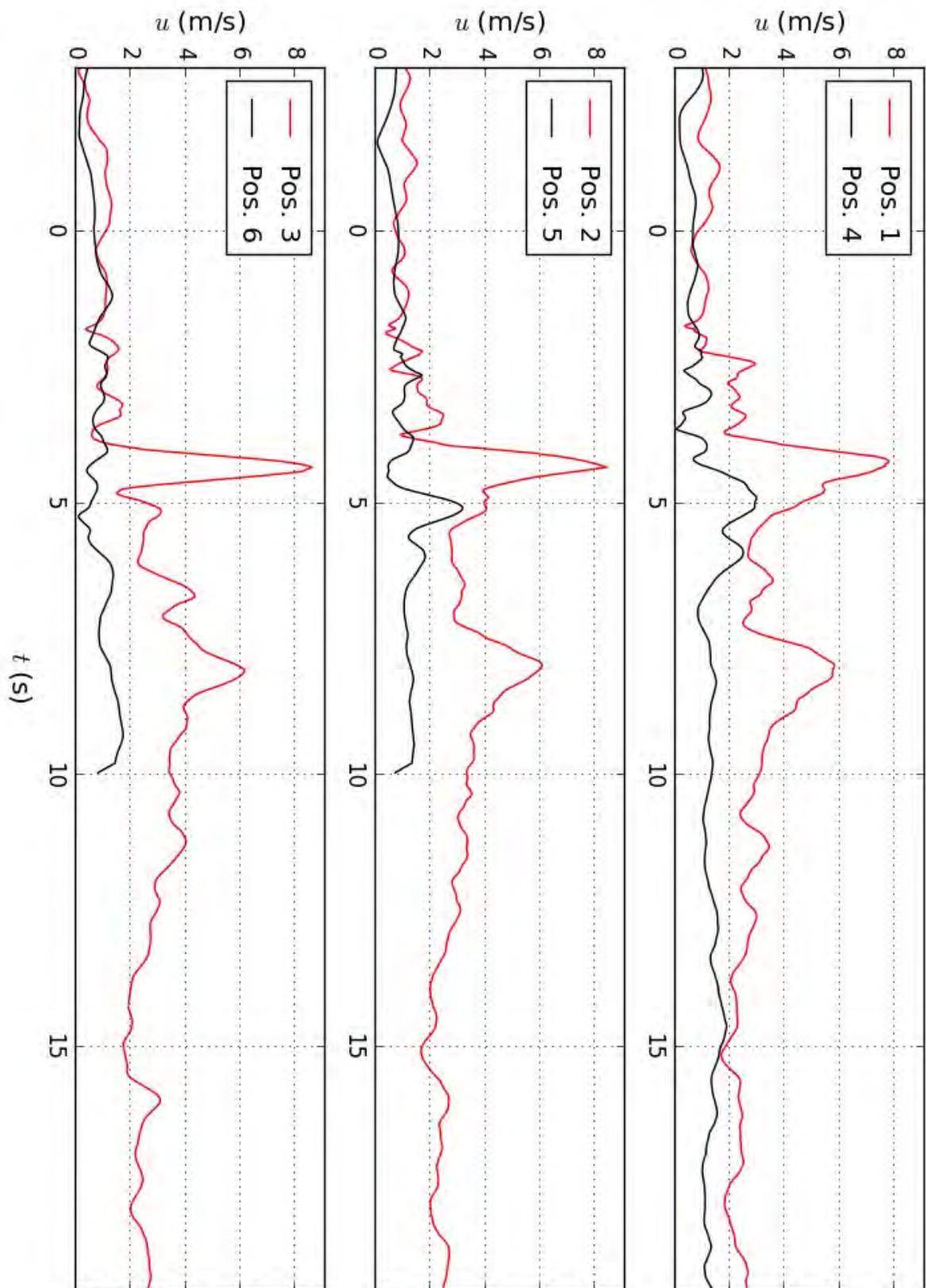


Abbildung C.2: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 1. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

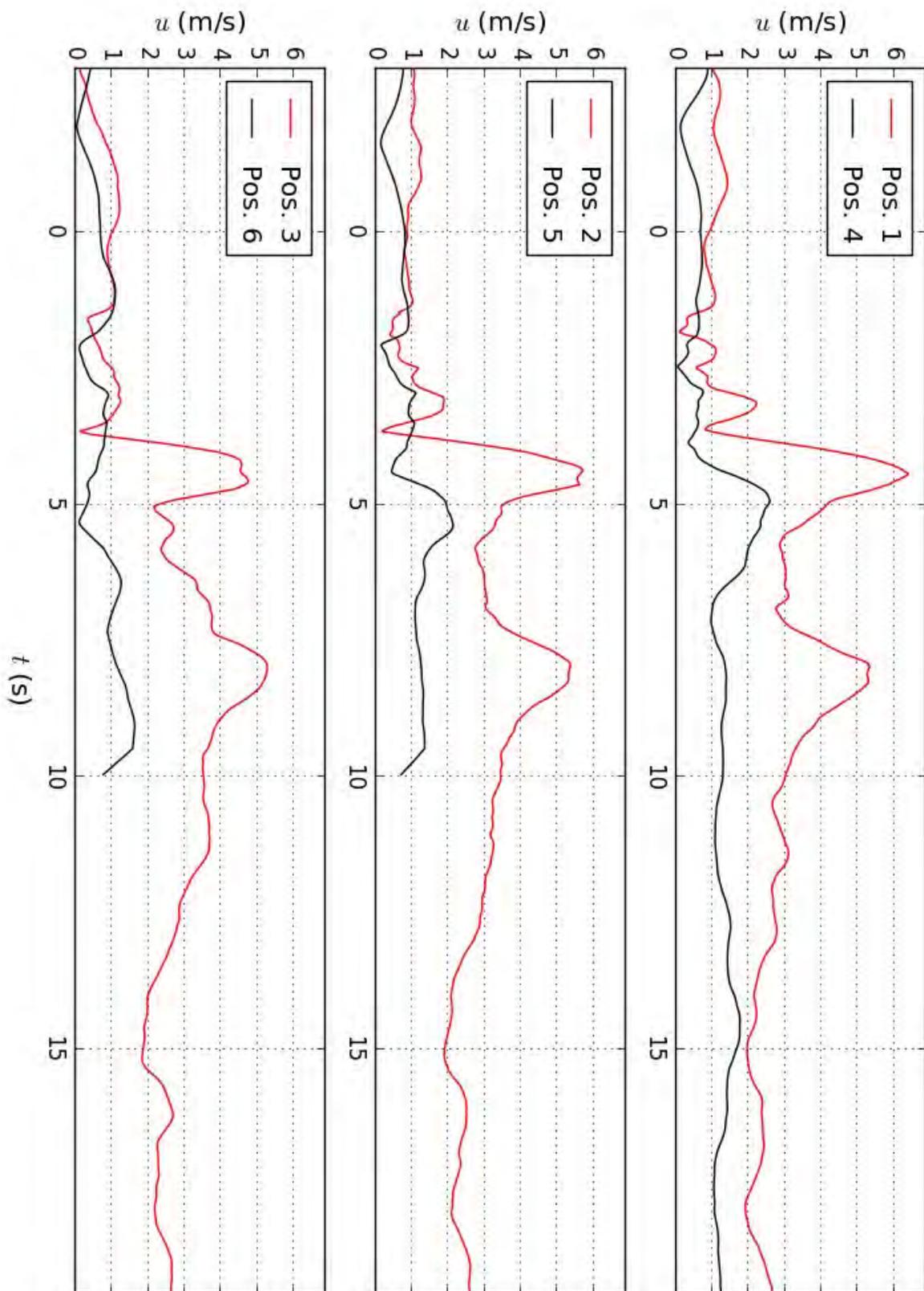


Abbildung C.3: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 1. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

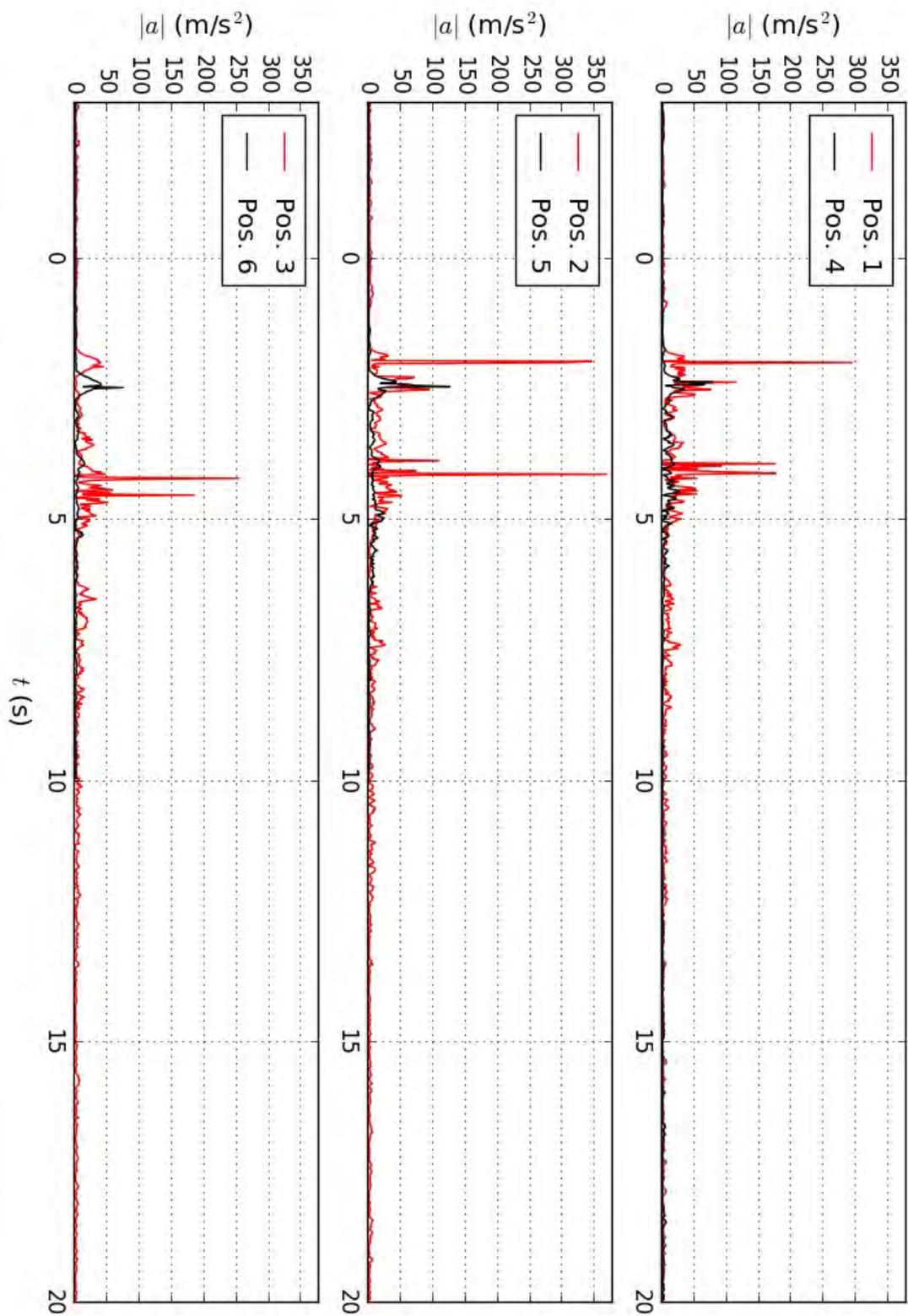


Abbildung C.4: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 1. Messdaten ungefiltert.

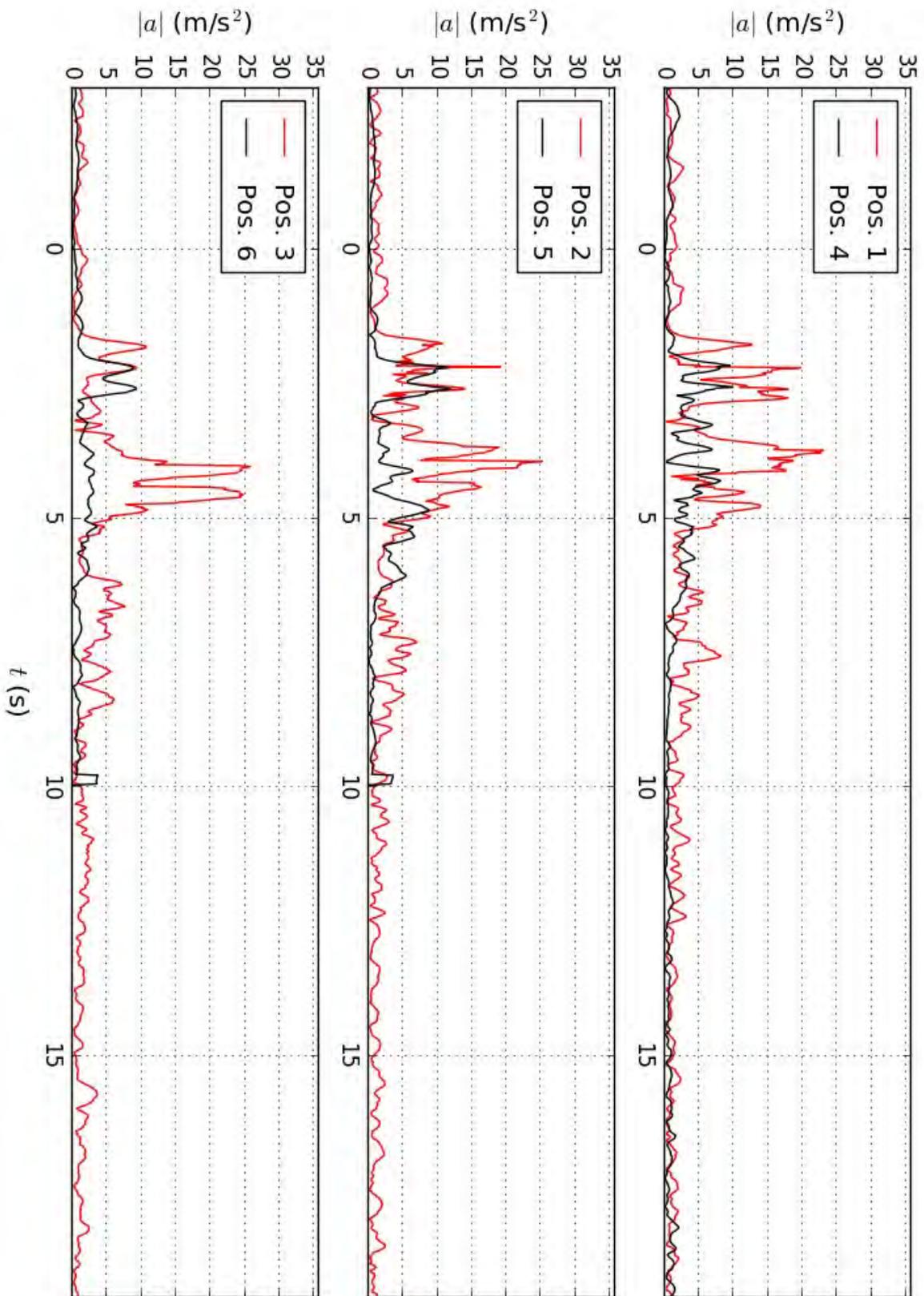


Abbildung C.5: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 1. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4 \text{ s}$.

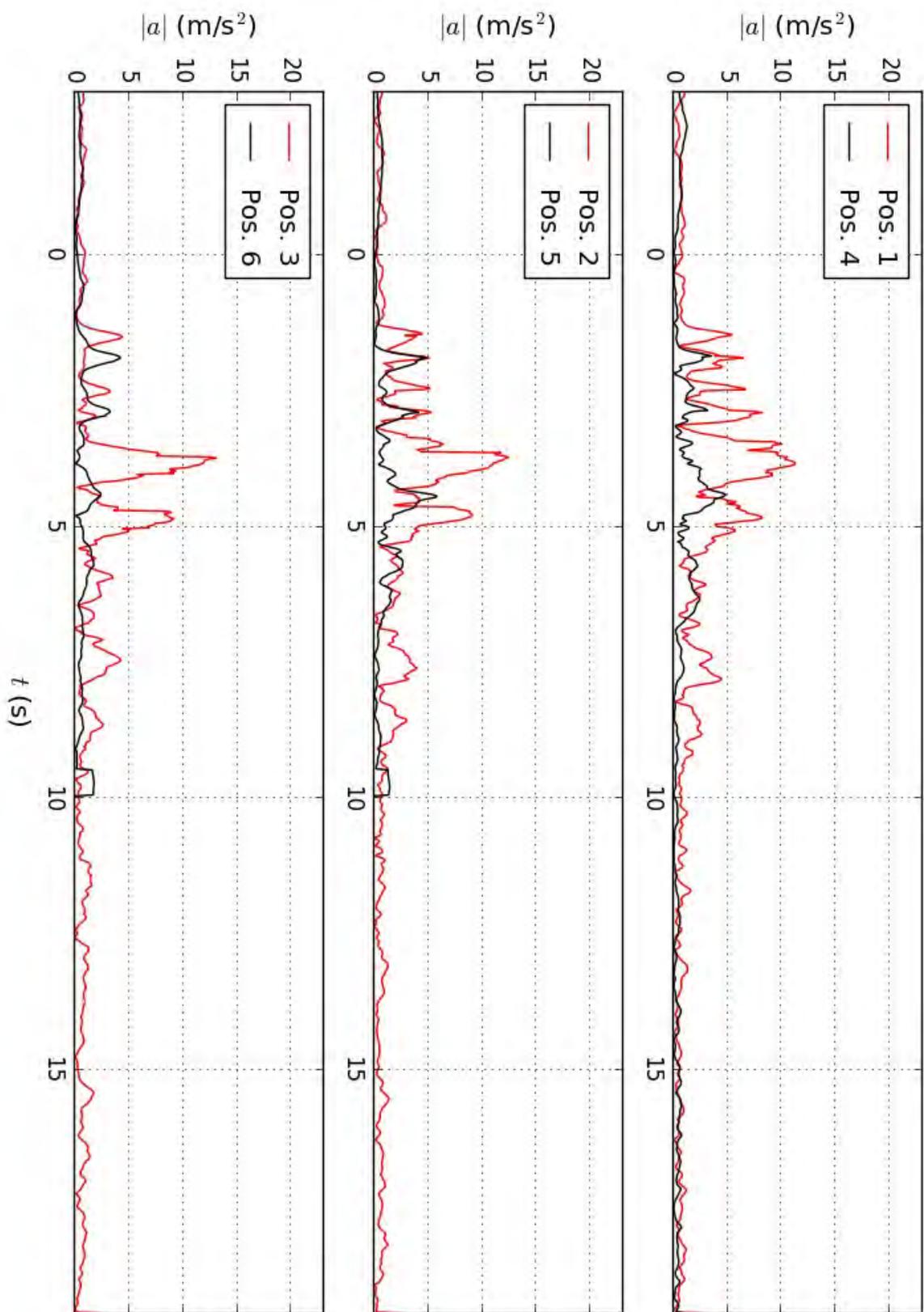


Abbildung C.6: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 1. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

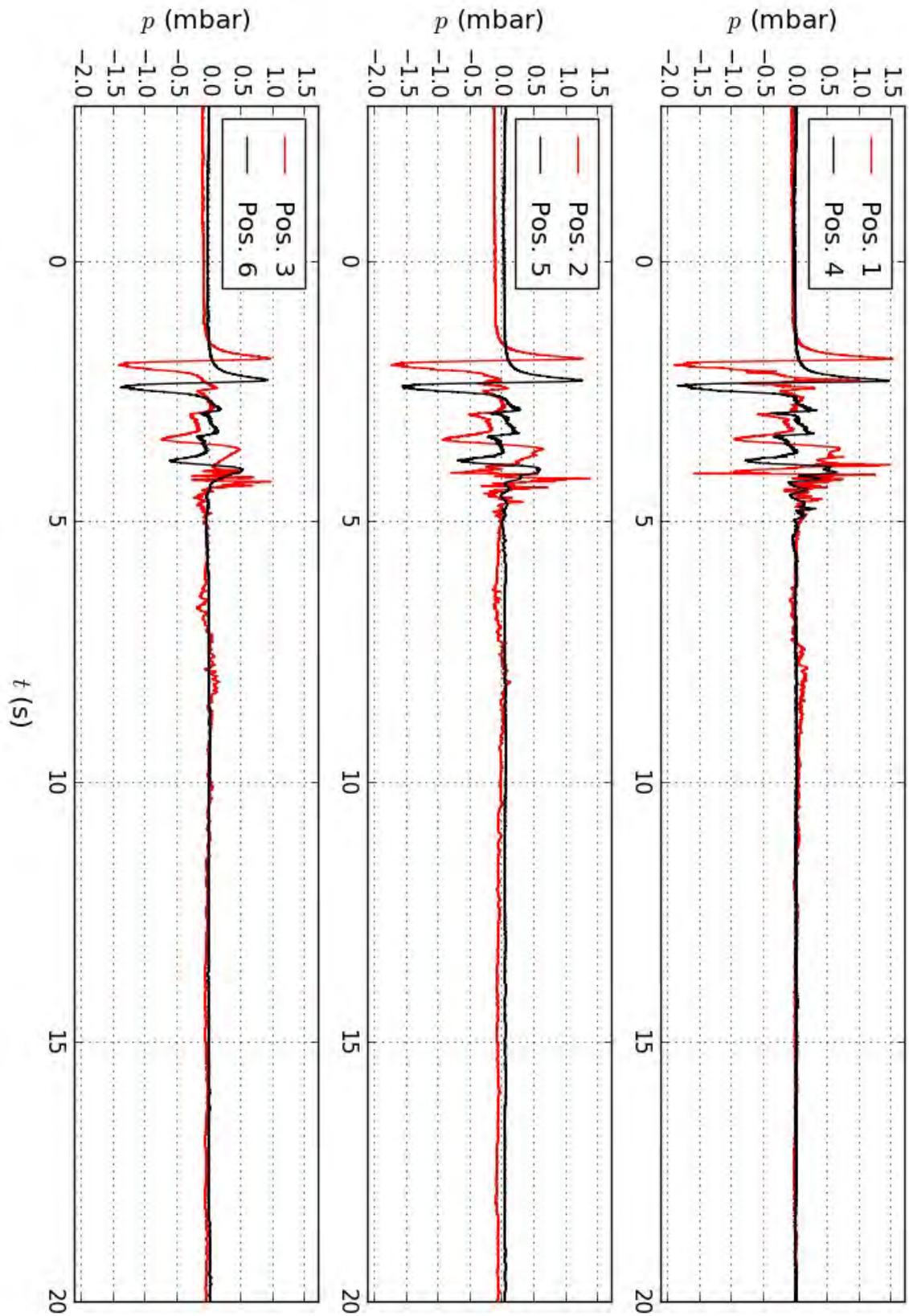


Abbildung C.7: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 1.

Zug 2

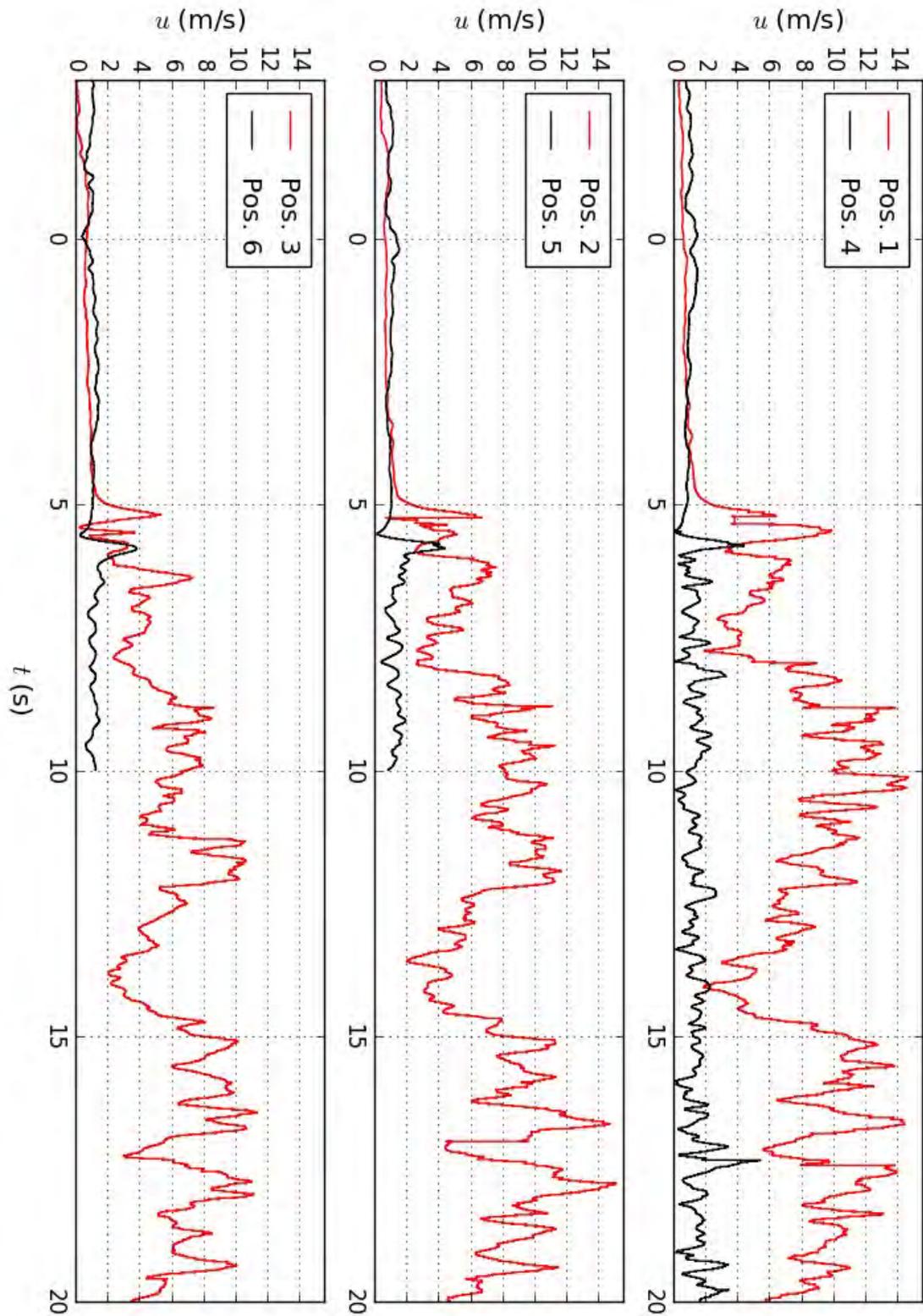


Abbildung C.8: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 2. Messdaten ungefiltert.

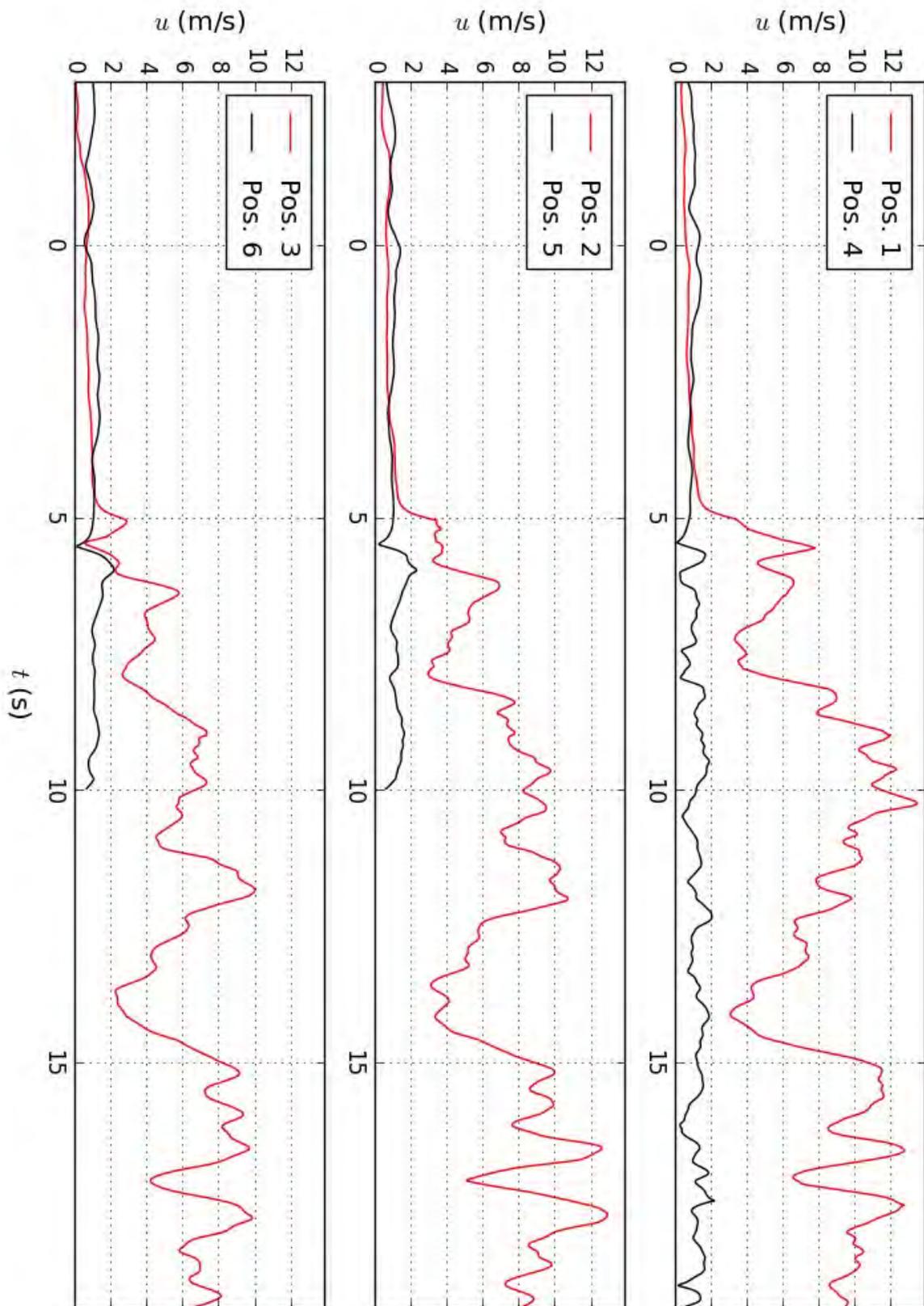


Abbildung C.9: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 2. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

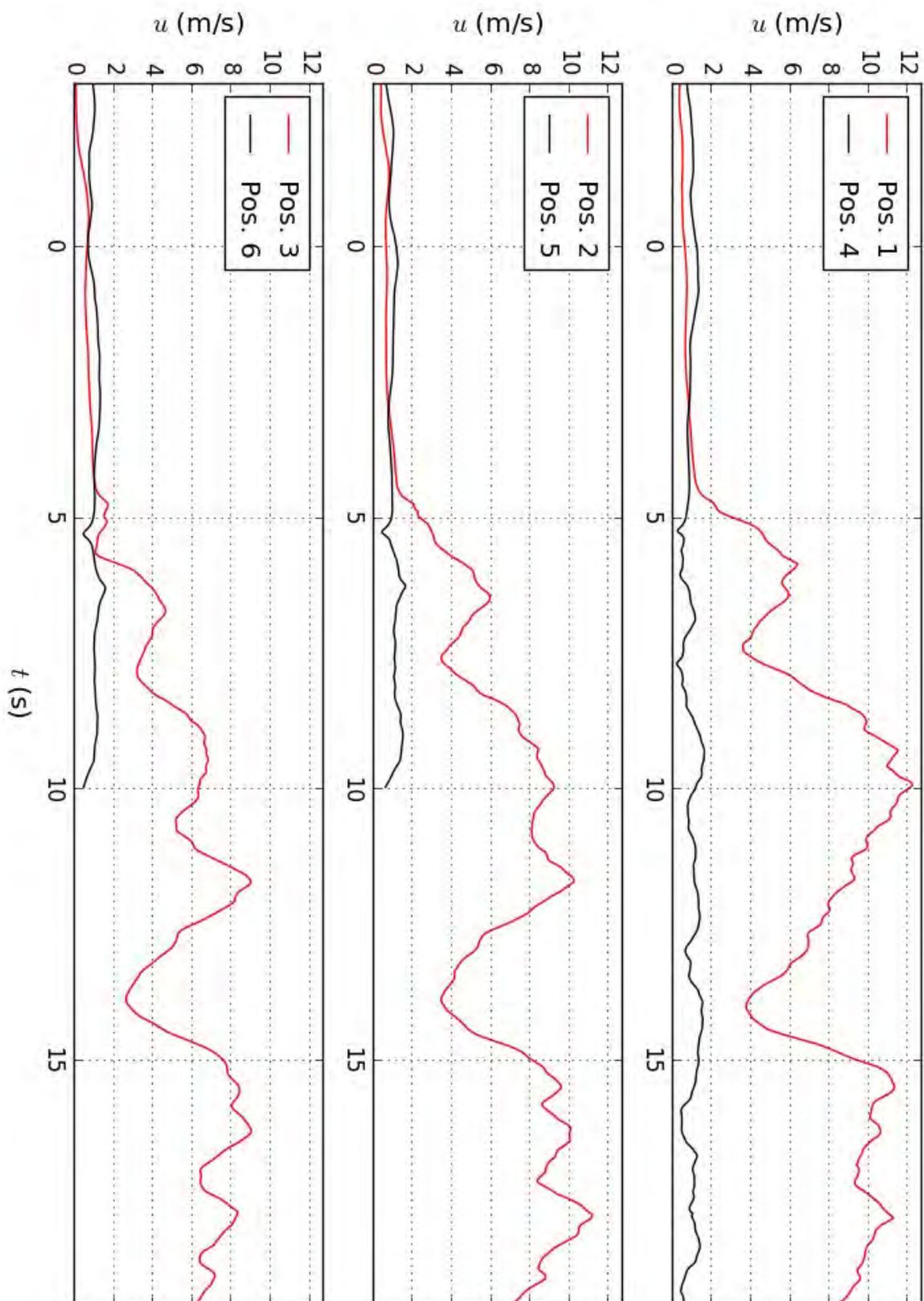


Abbildung C.10: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 2. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

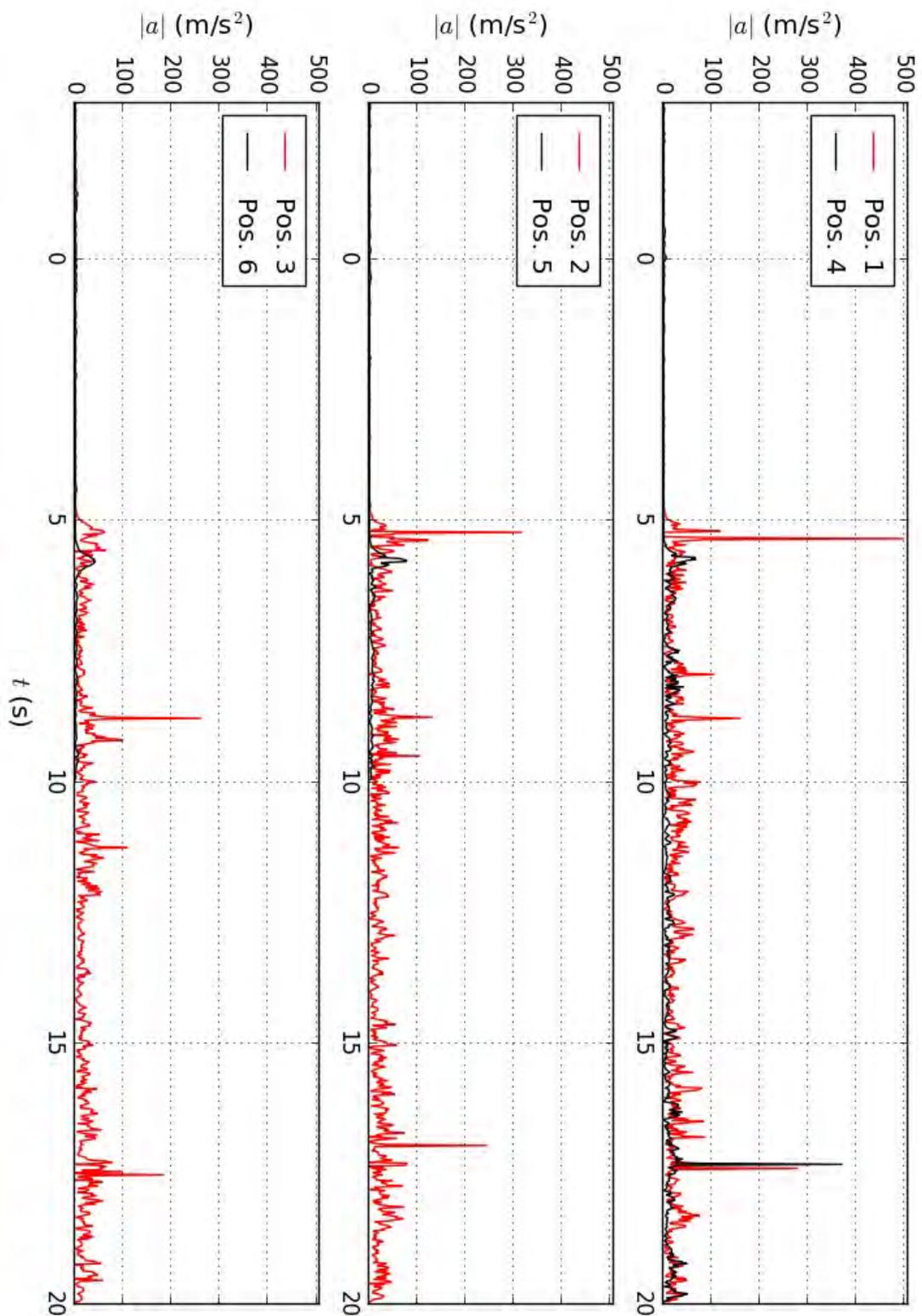


Abbildung C.11: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 2. Messdaten ungefiltert.

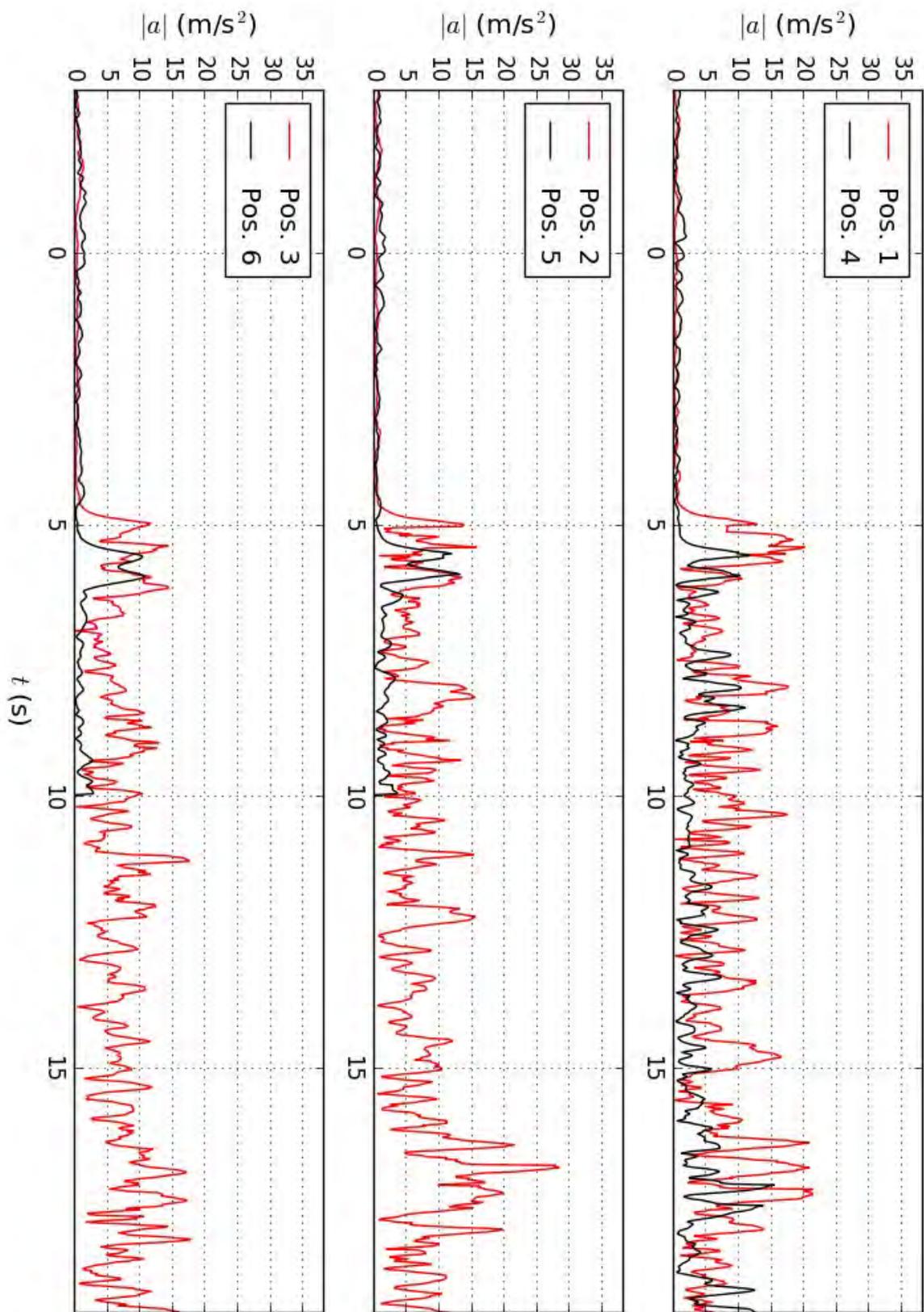


Abbildung C.12: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 2. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4 \text{ s}$.

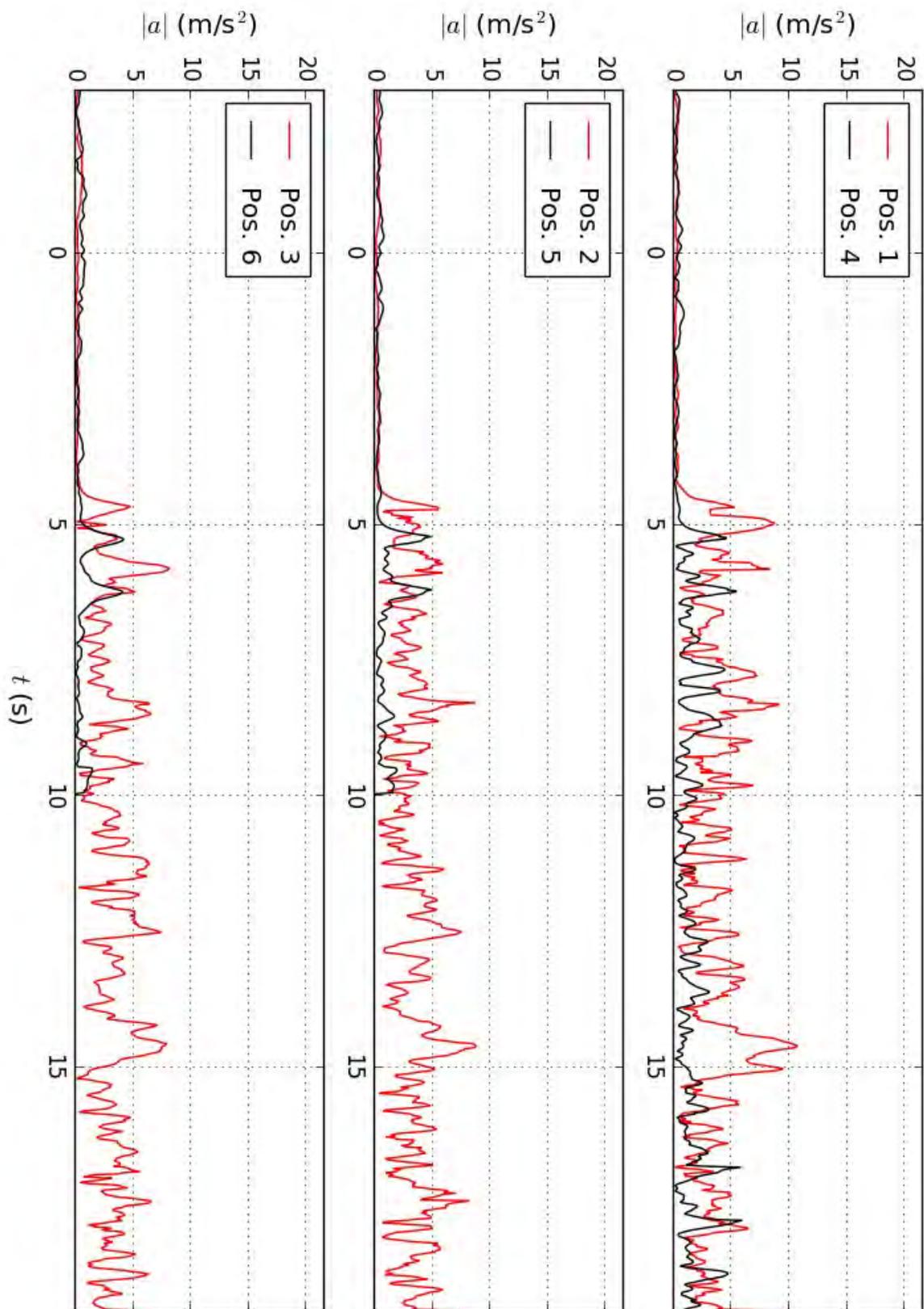


Abbildung C.13: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 2. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

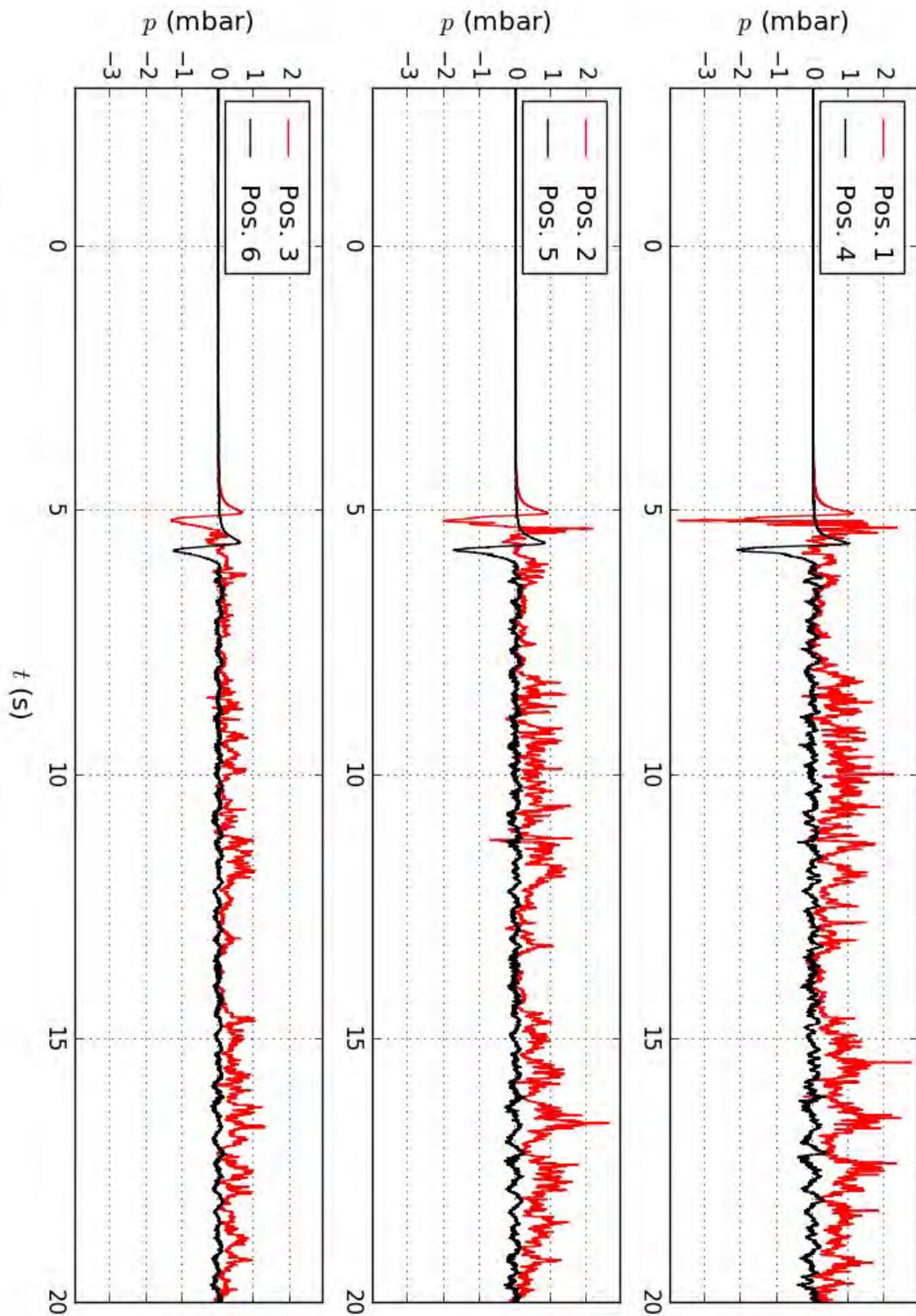


Abbildung C.14: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 2.

Zug 3

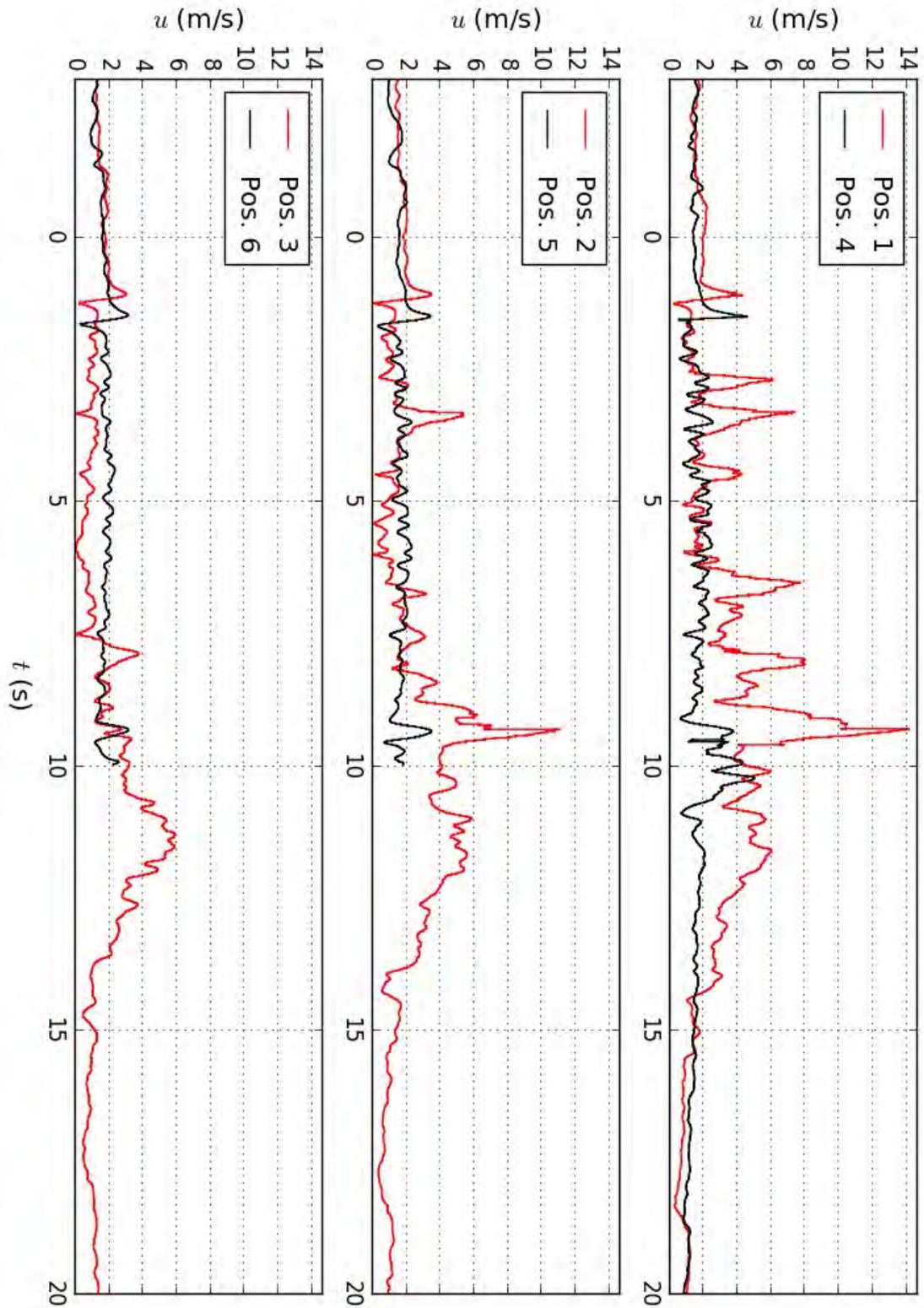


Abbildung C.15: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 3. Messdaten ungefiltert.

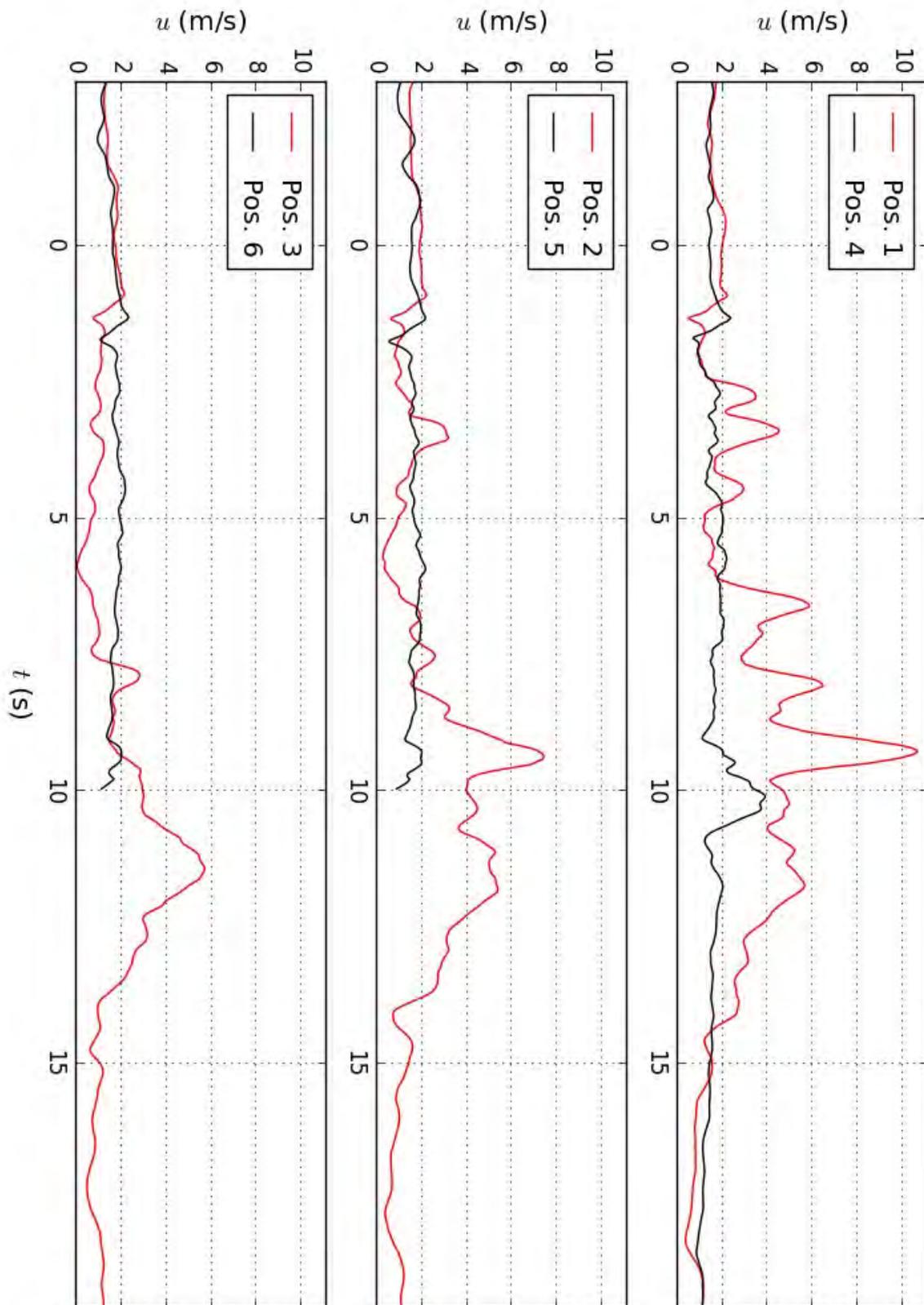


Abbildung C.16: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 3. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

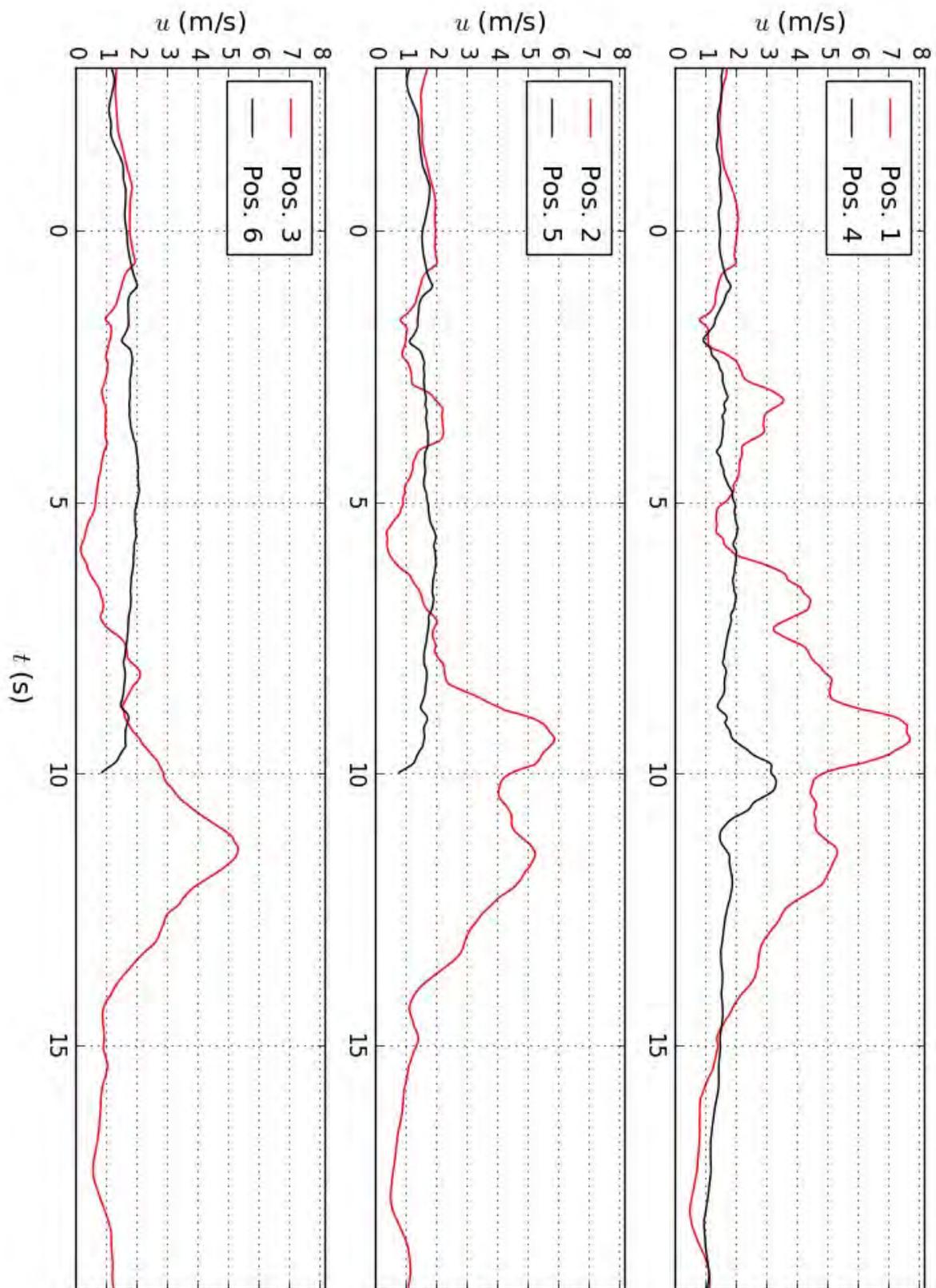


Abbildung C.17: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 3. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

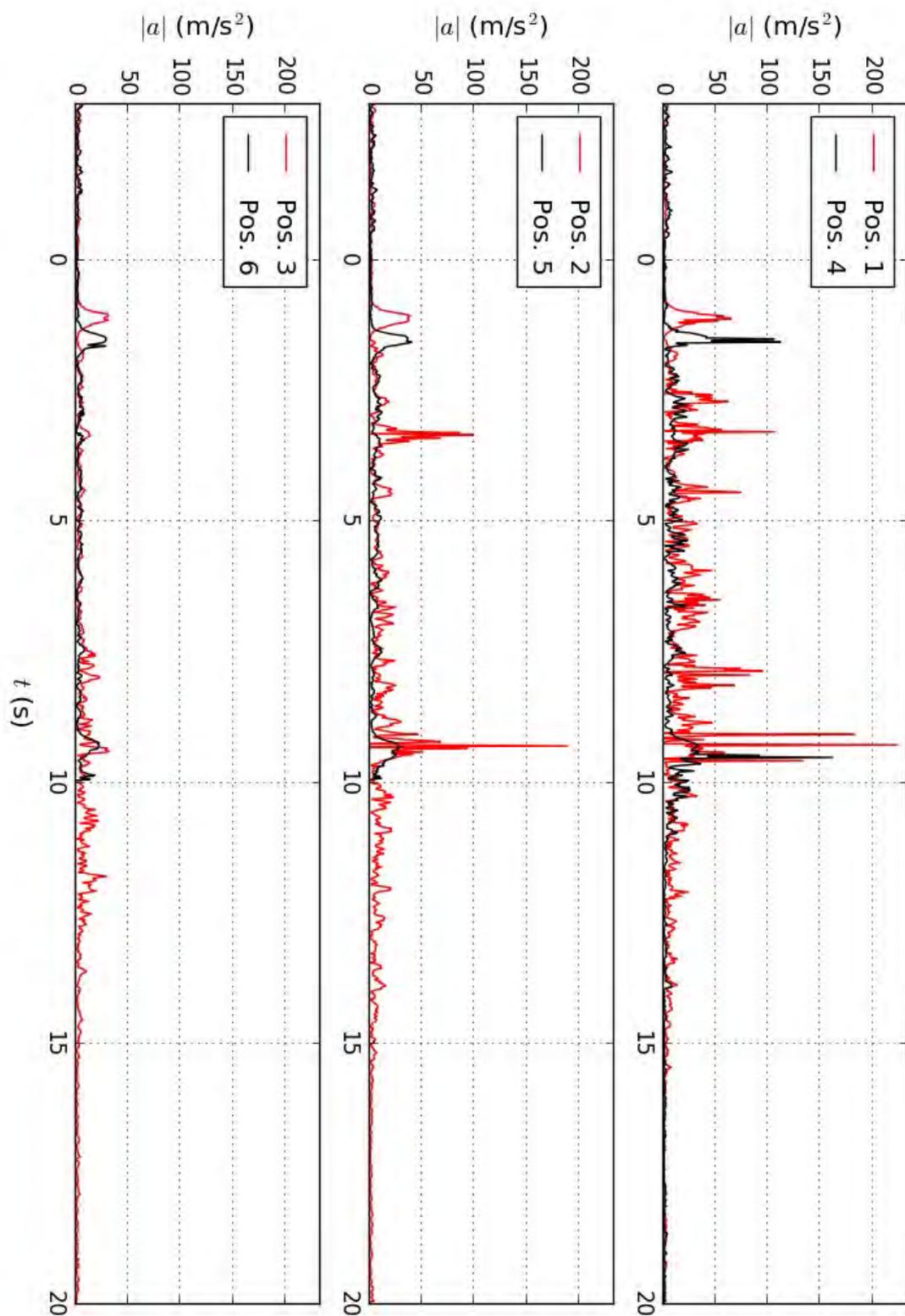


Abbildung C.18: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 3. Messdaten ungefiltert.

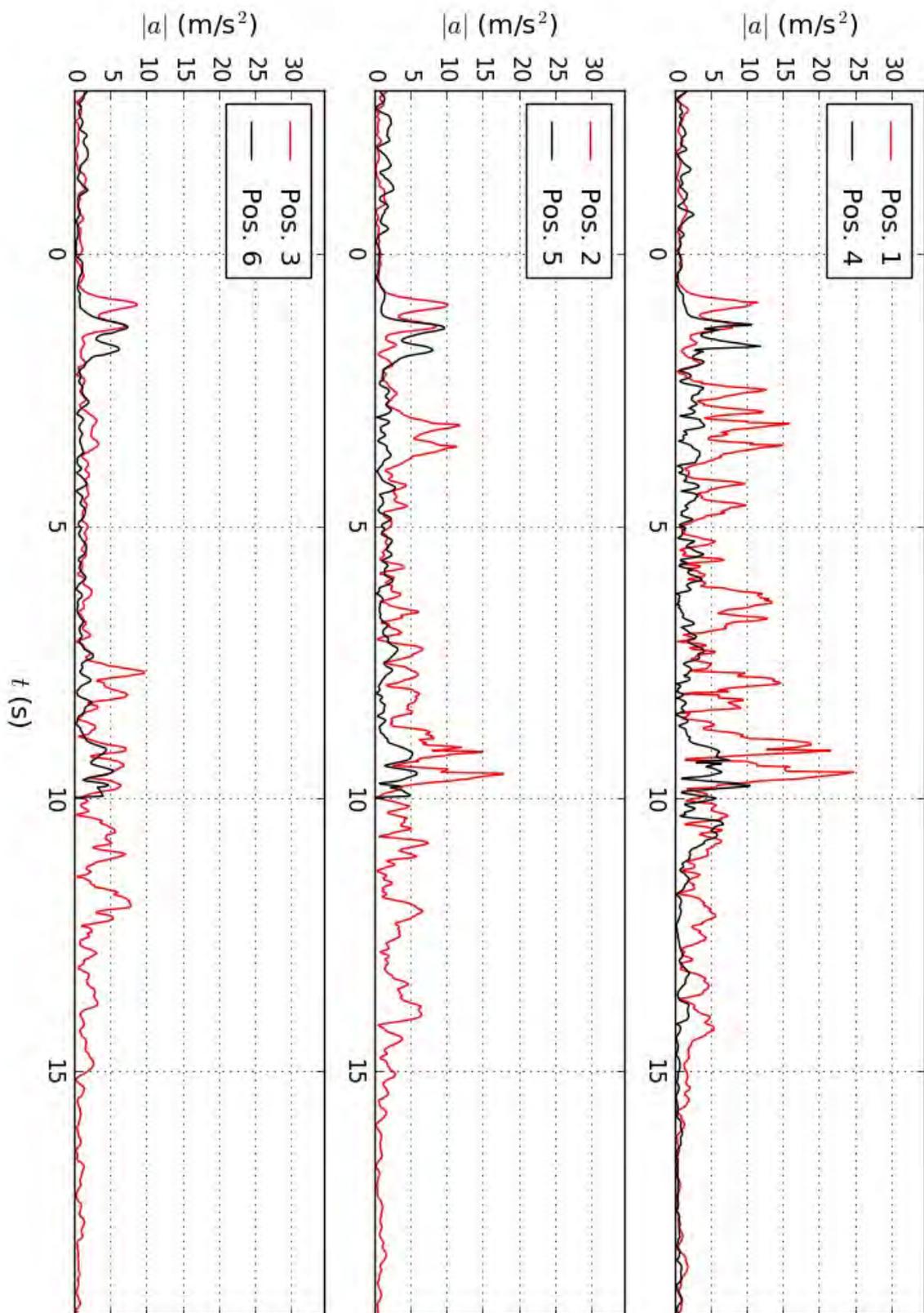


Abbildung C.19: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 3. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

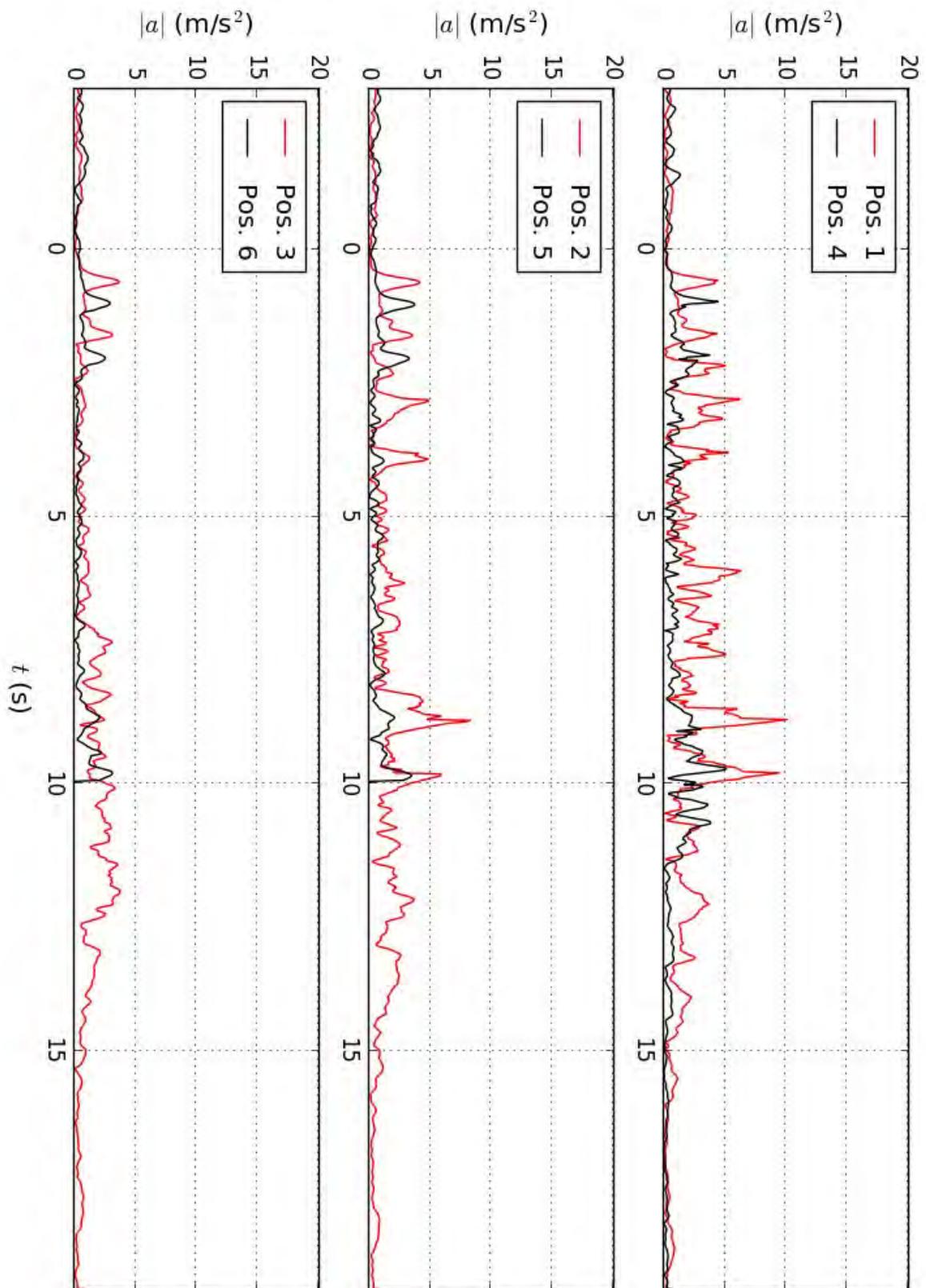


Abbildung C.20: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 3. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

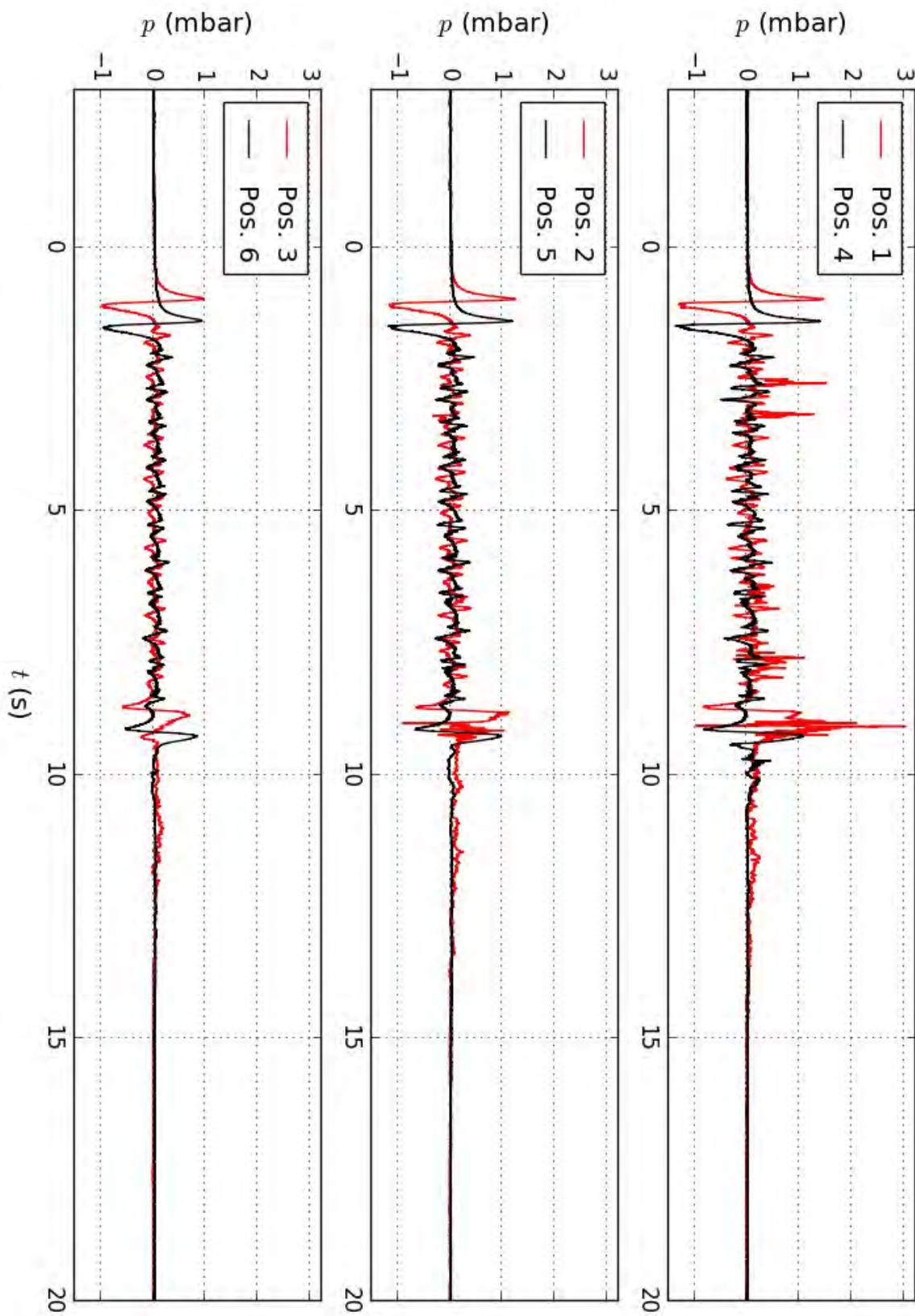


Abbildung C.21: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 3.

Zug 4

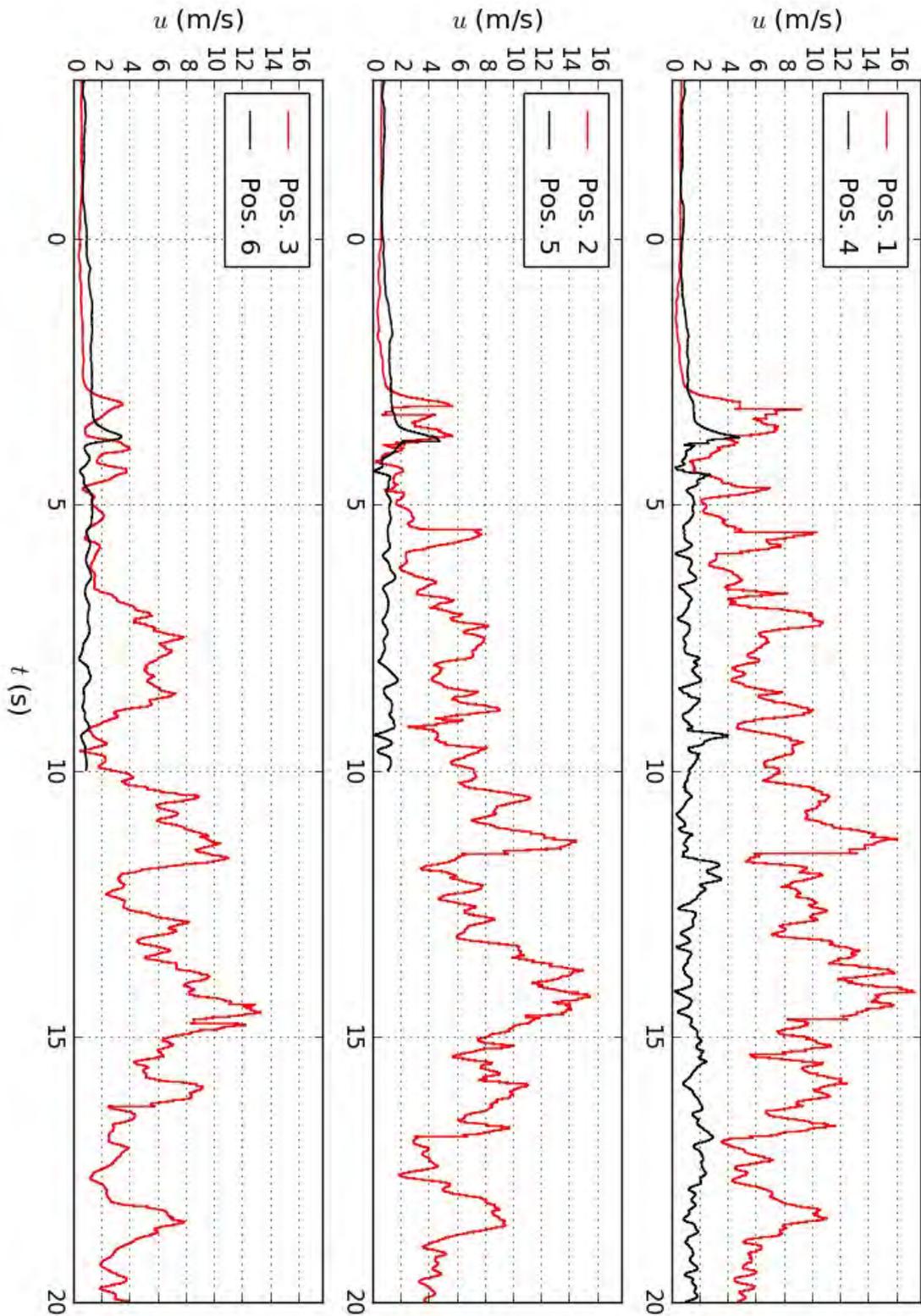


Abbildung C.22: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 4. Messdaten ungefiltert.

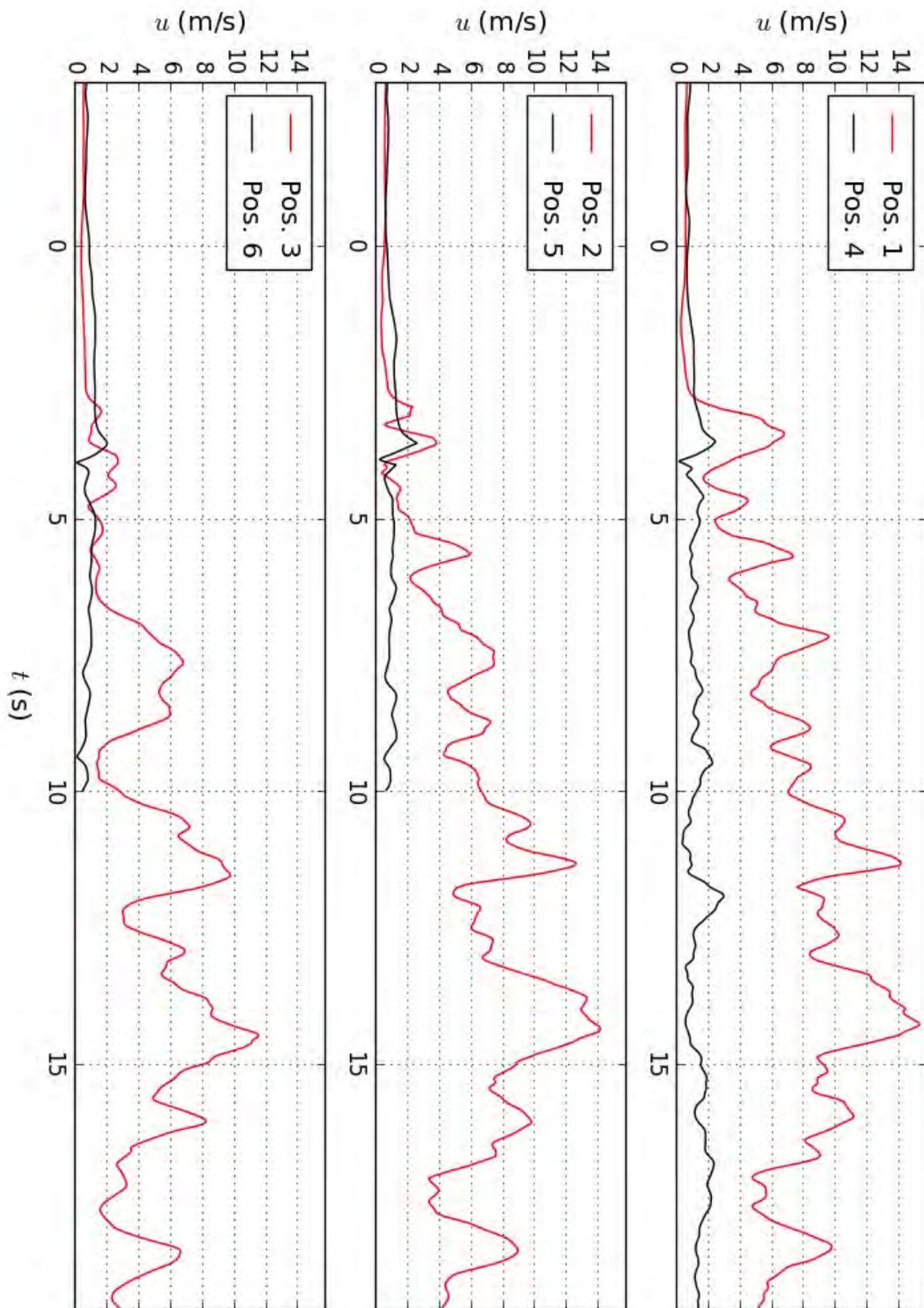


Abbildung C.23: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 4. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

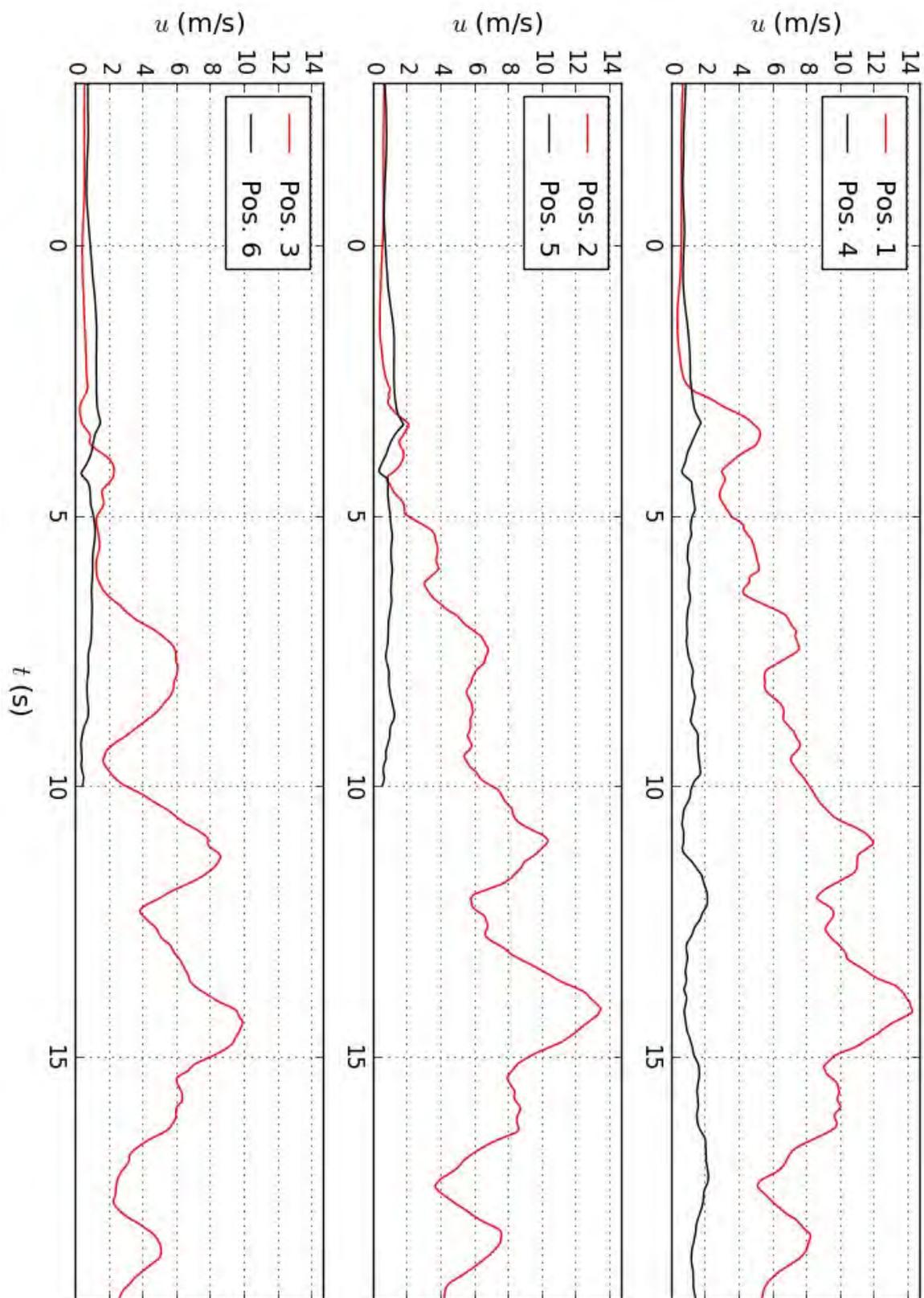


Abbildung C.24: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 4. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

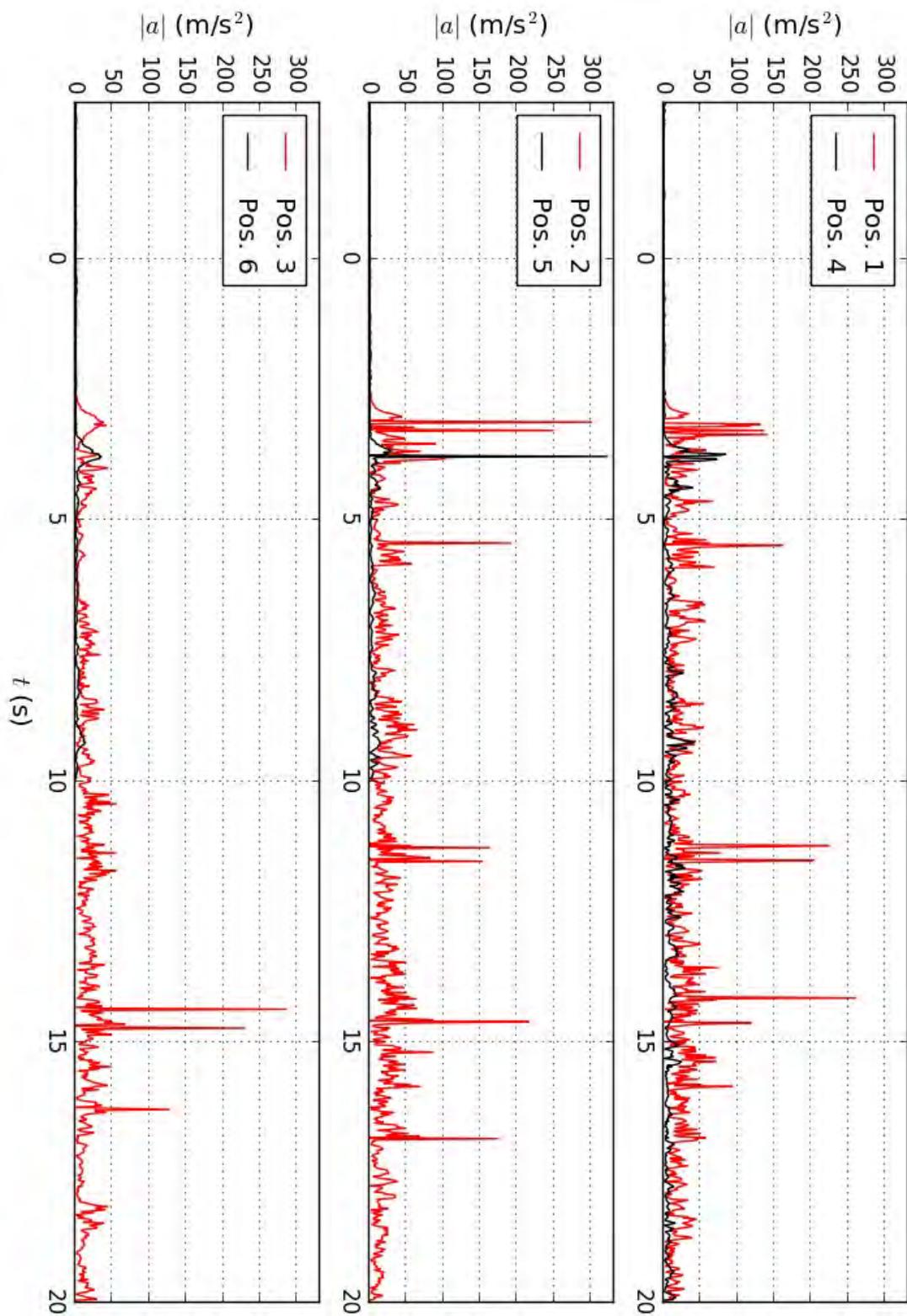


Abbildung C.25: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 4. Messdaten ungefiltert.

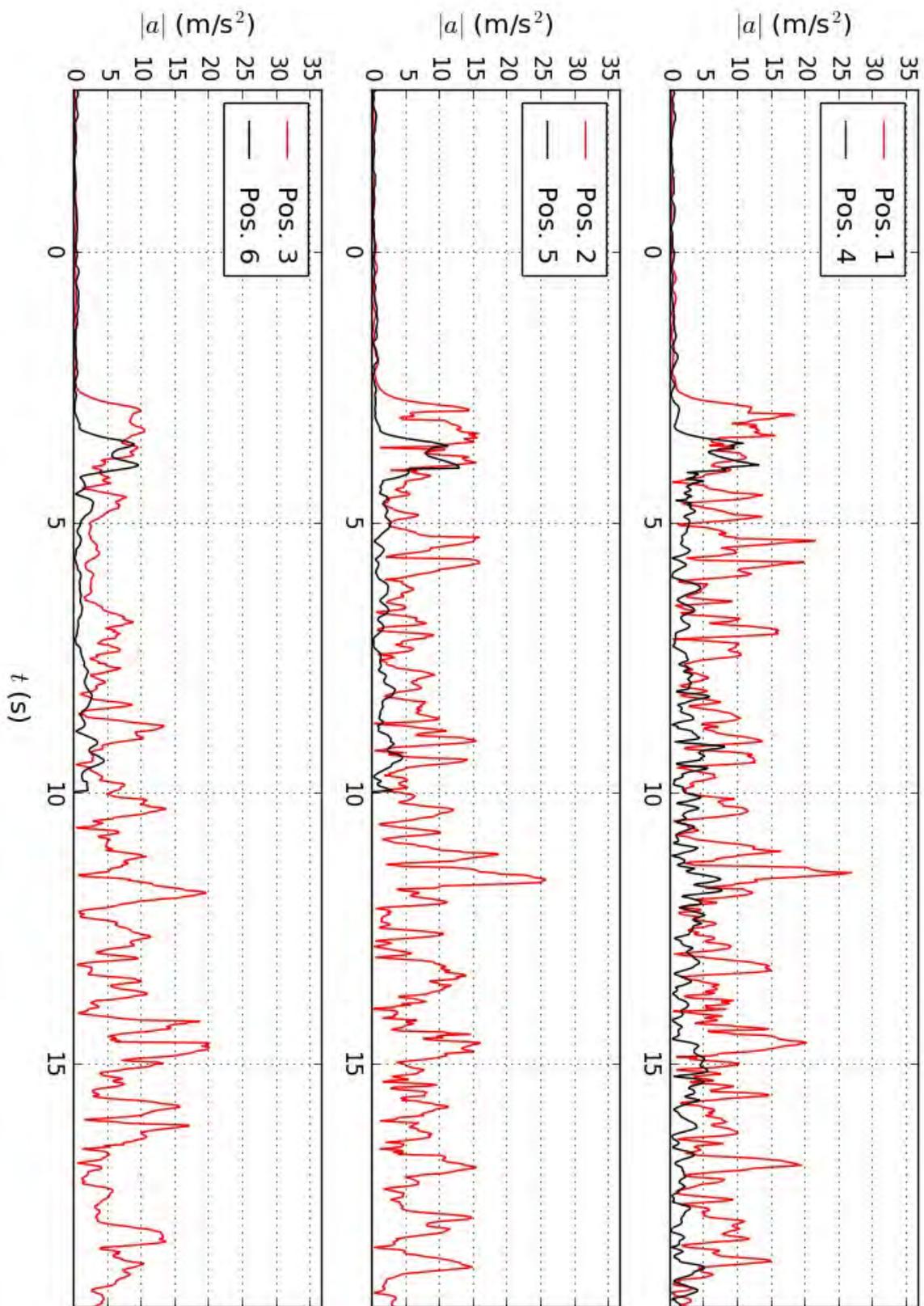


Abbildung C.26: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 4. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

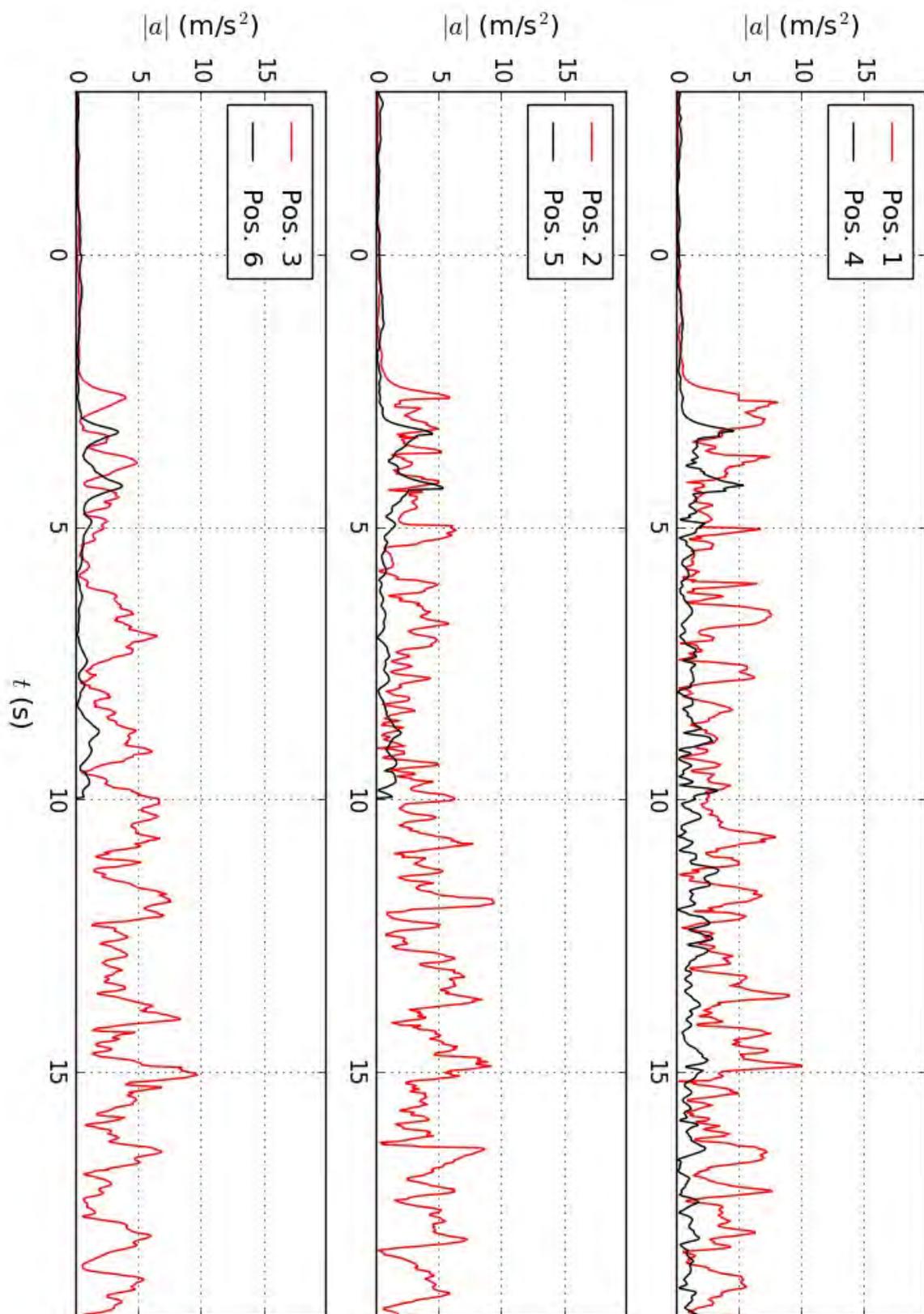


Abbildung C.27: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 4. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

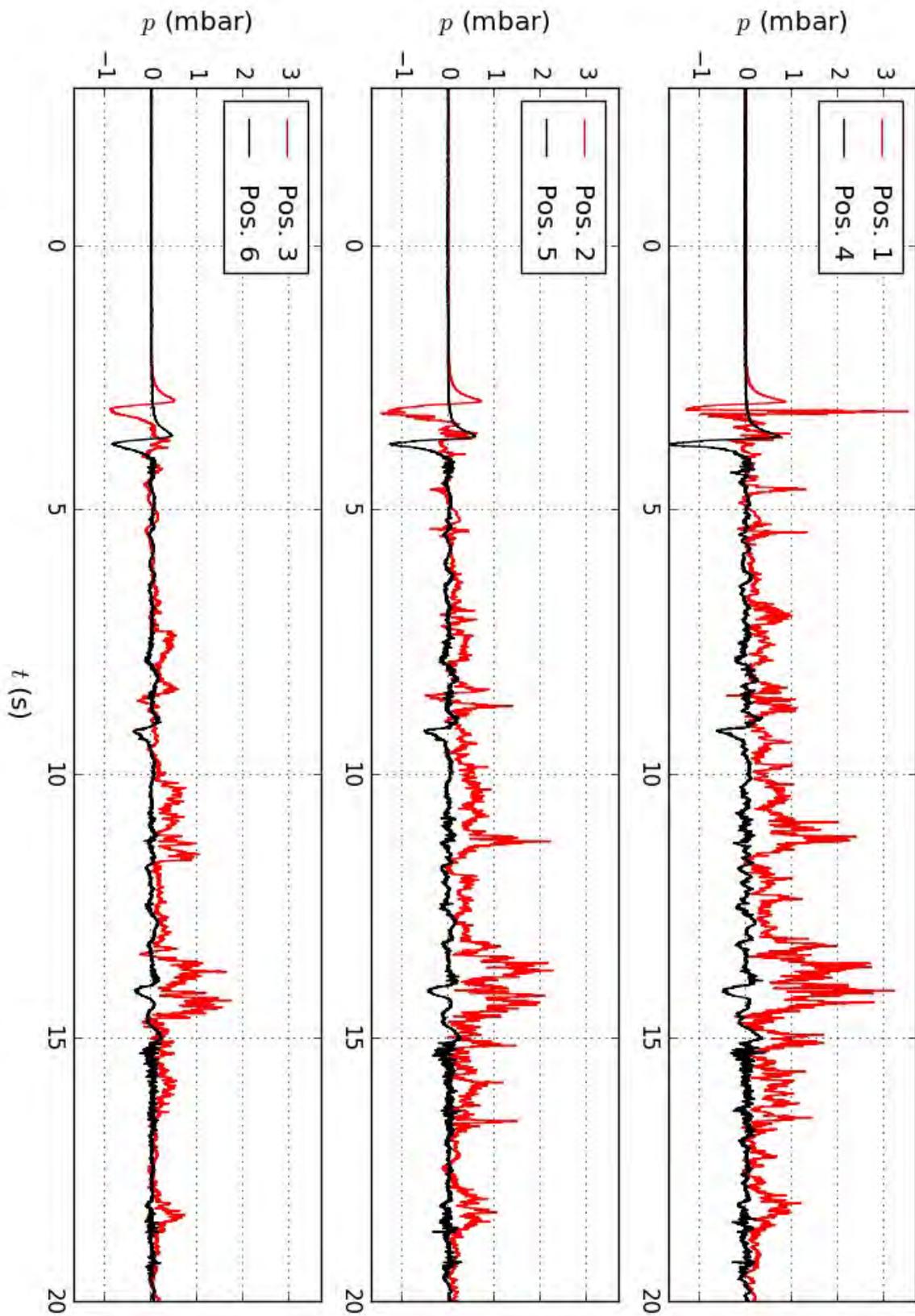


Abbildung C.28: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 4.

Zug 5

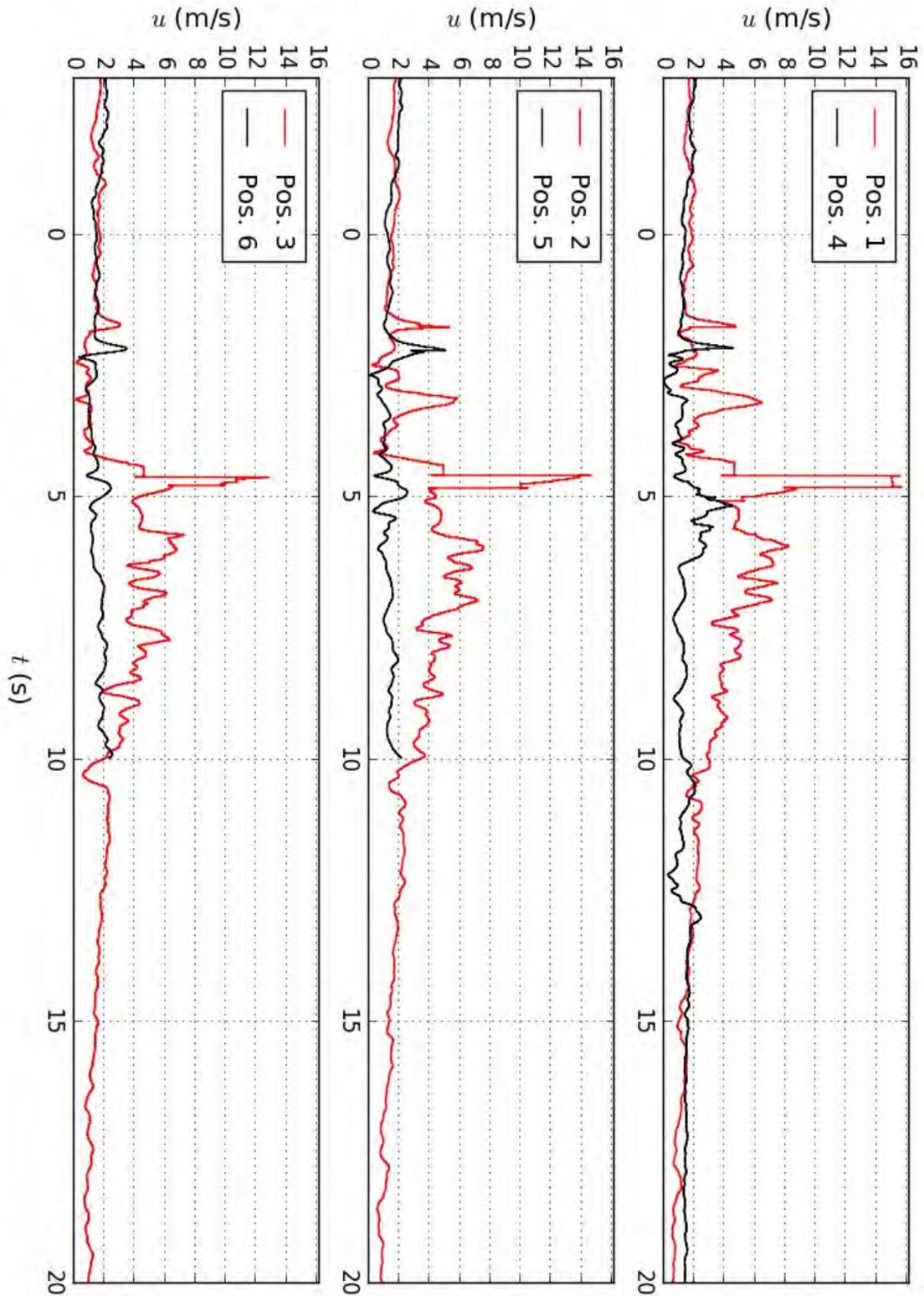


Abbildung C.29: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 5. Messdaten ungefiltert.

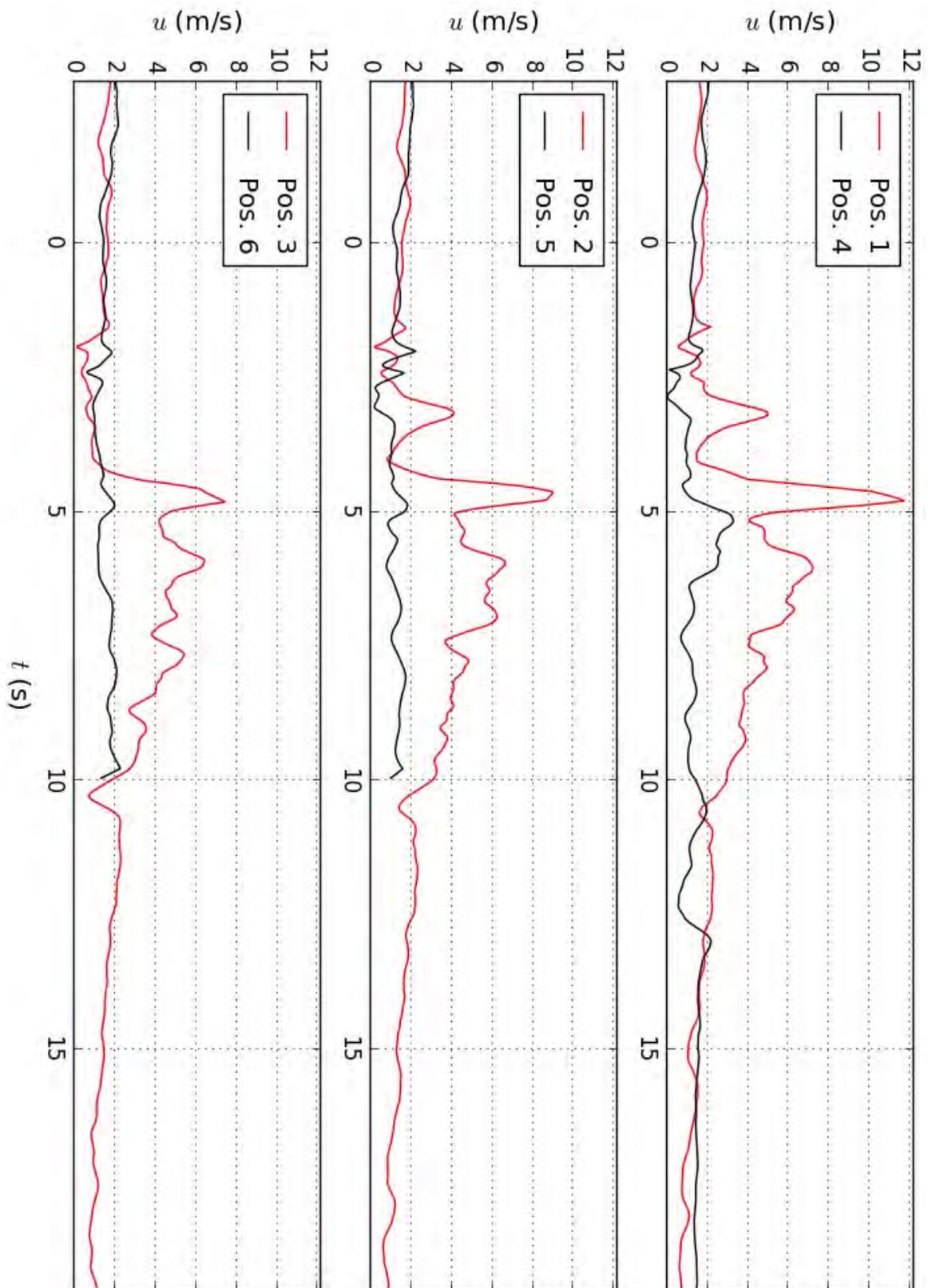


Abbildung C.30: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 5. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

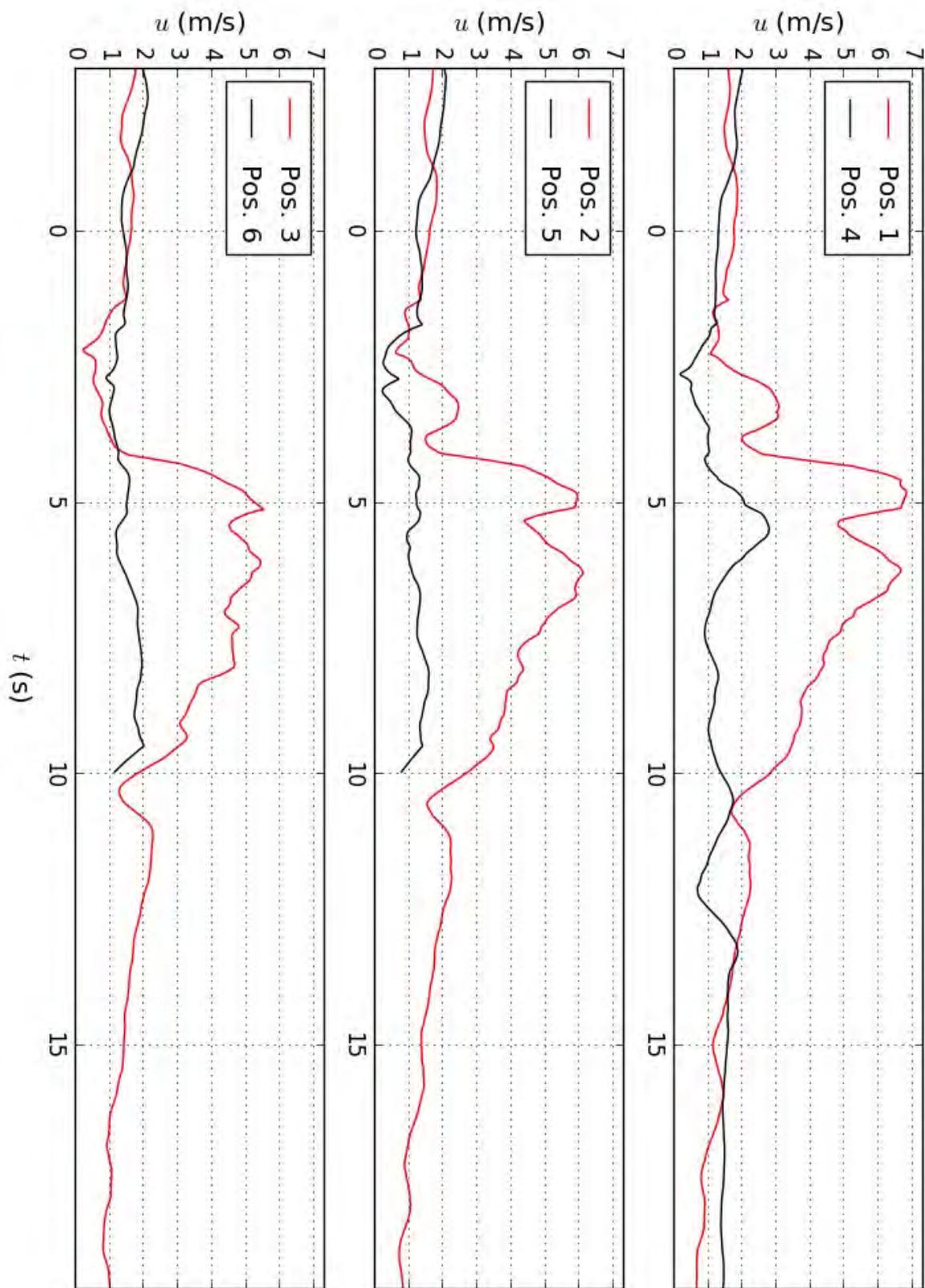


Abbildung C.31: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 5. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

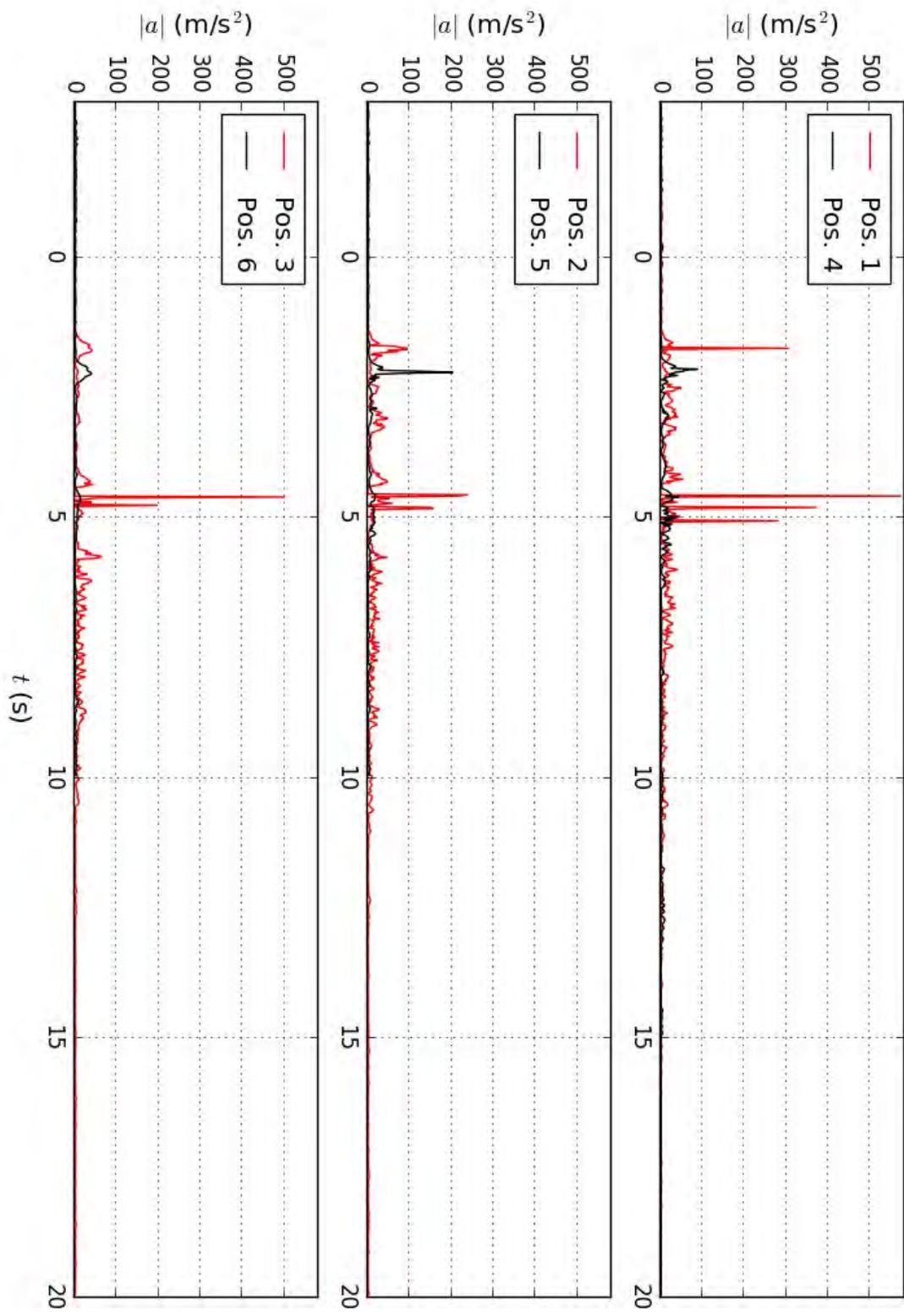


Abbildung C.32: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 5. Messdaten ungefiltert.

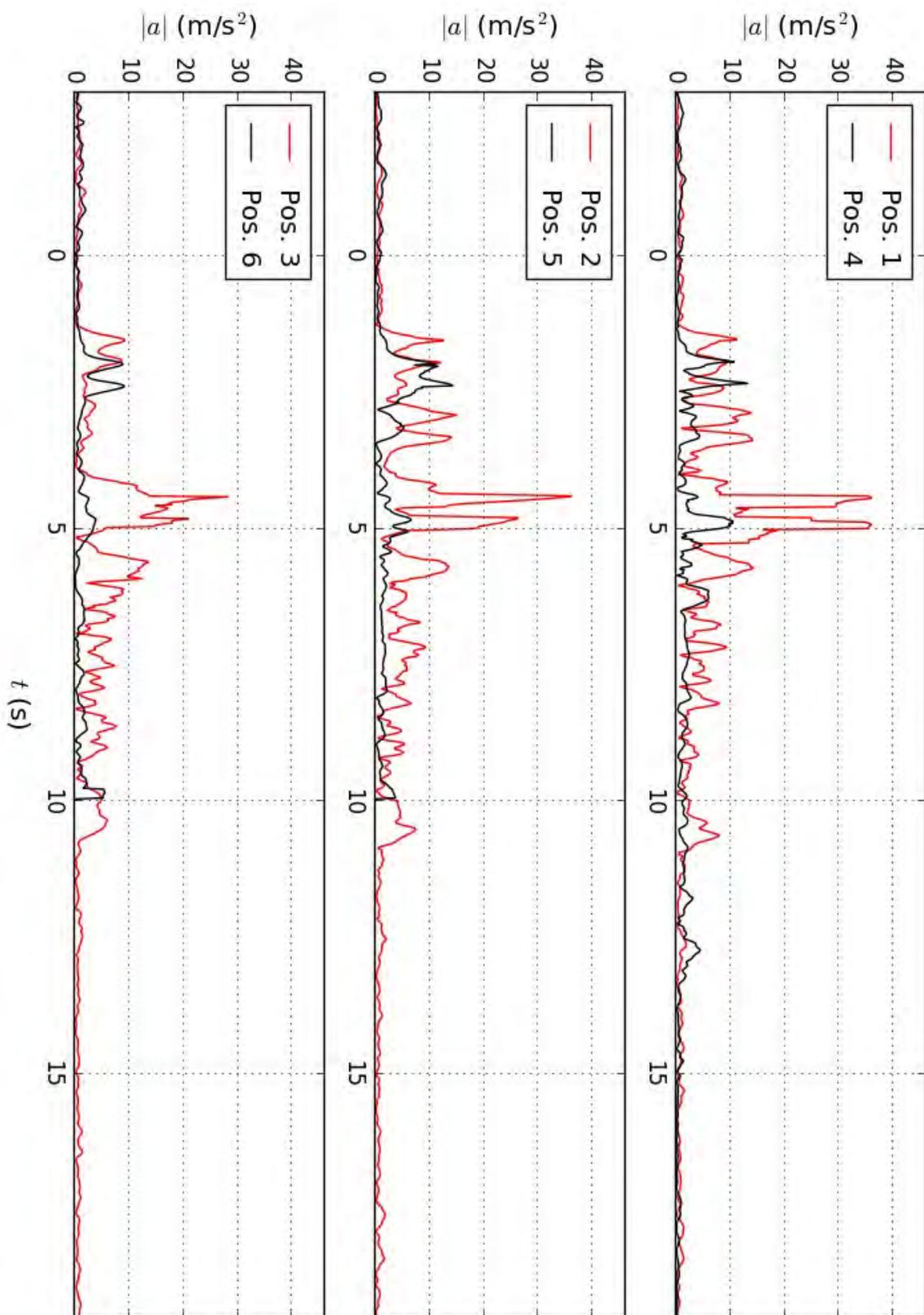


Abbildung C.33: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 5. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

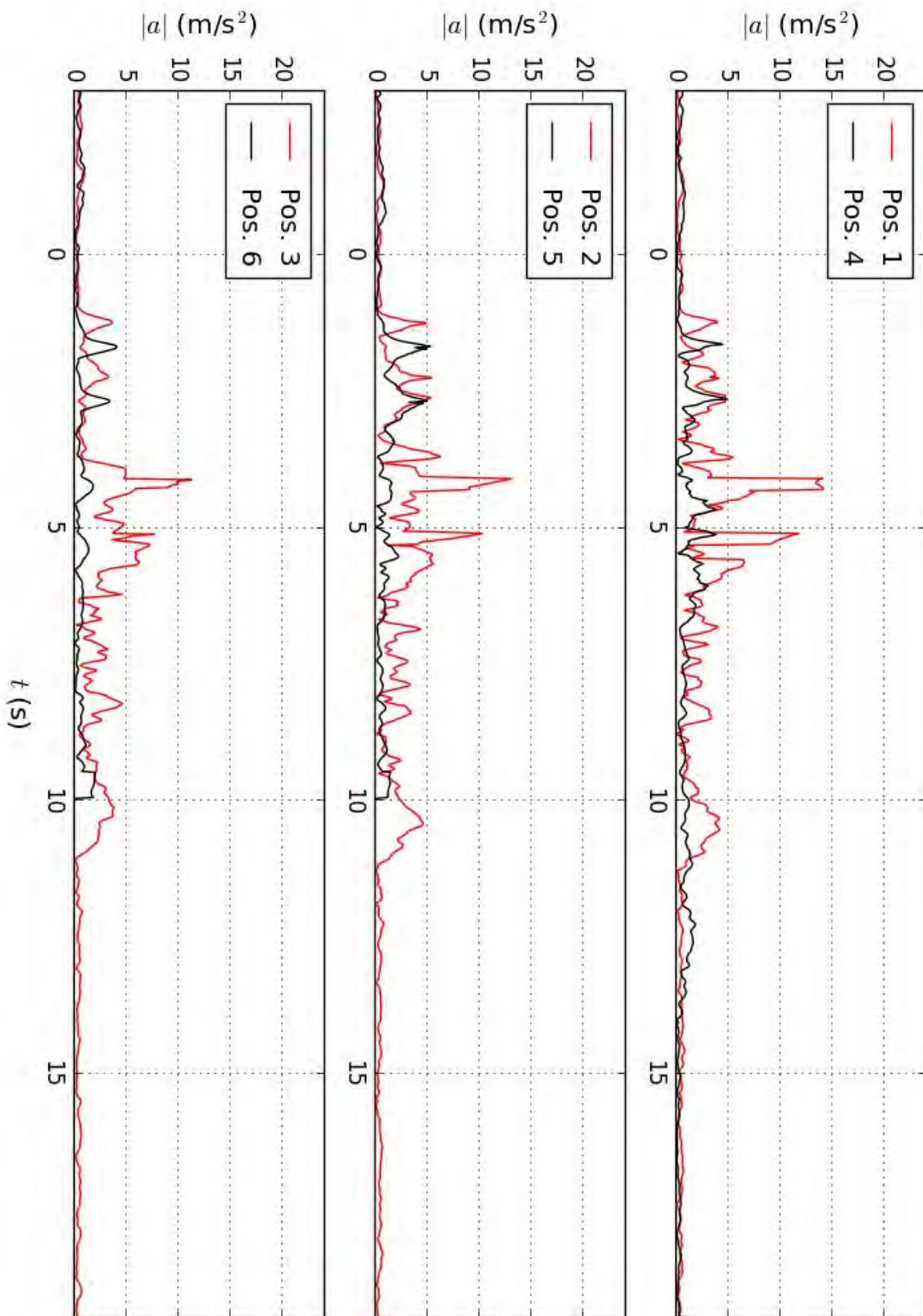


Abbildung C.34: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 5. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

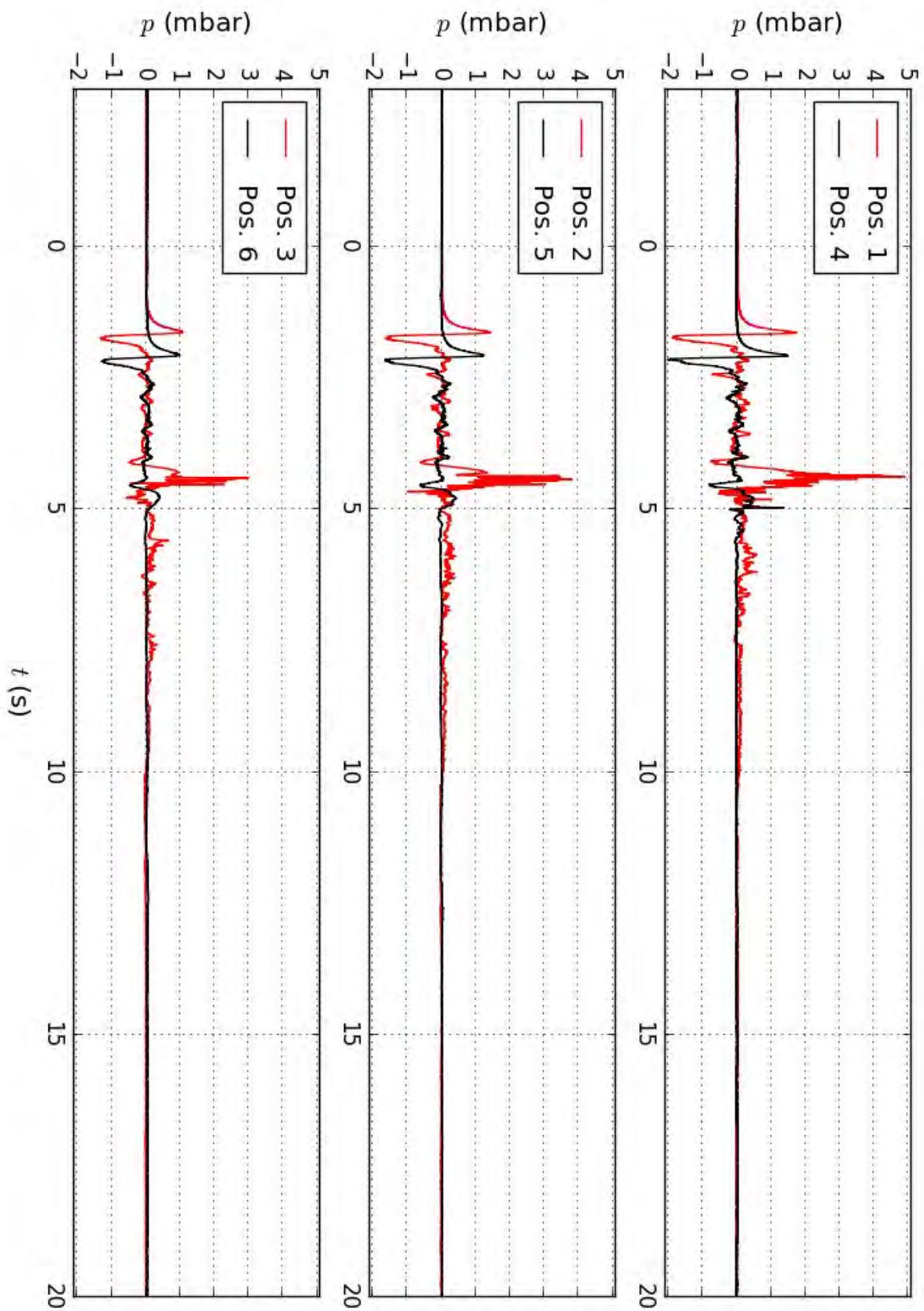


Abbildung C.35: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 5.

Zug 6

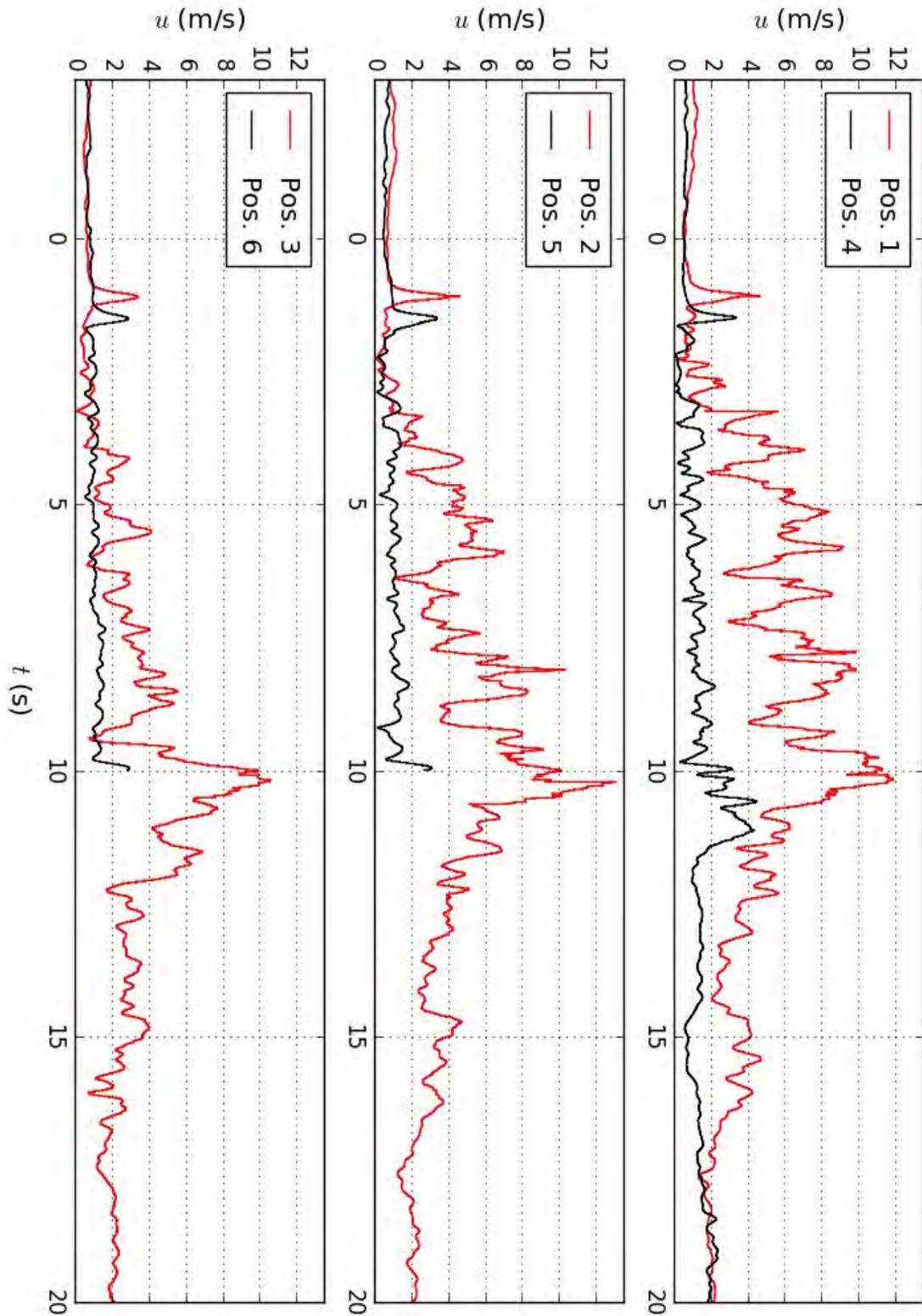


Abbildung C.36: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 6. Messdaten ungefiltert.

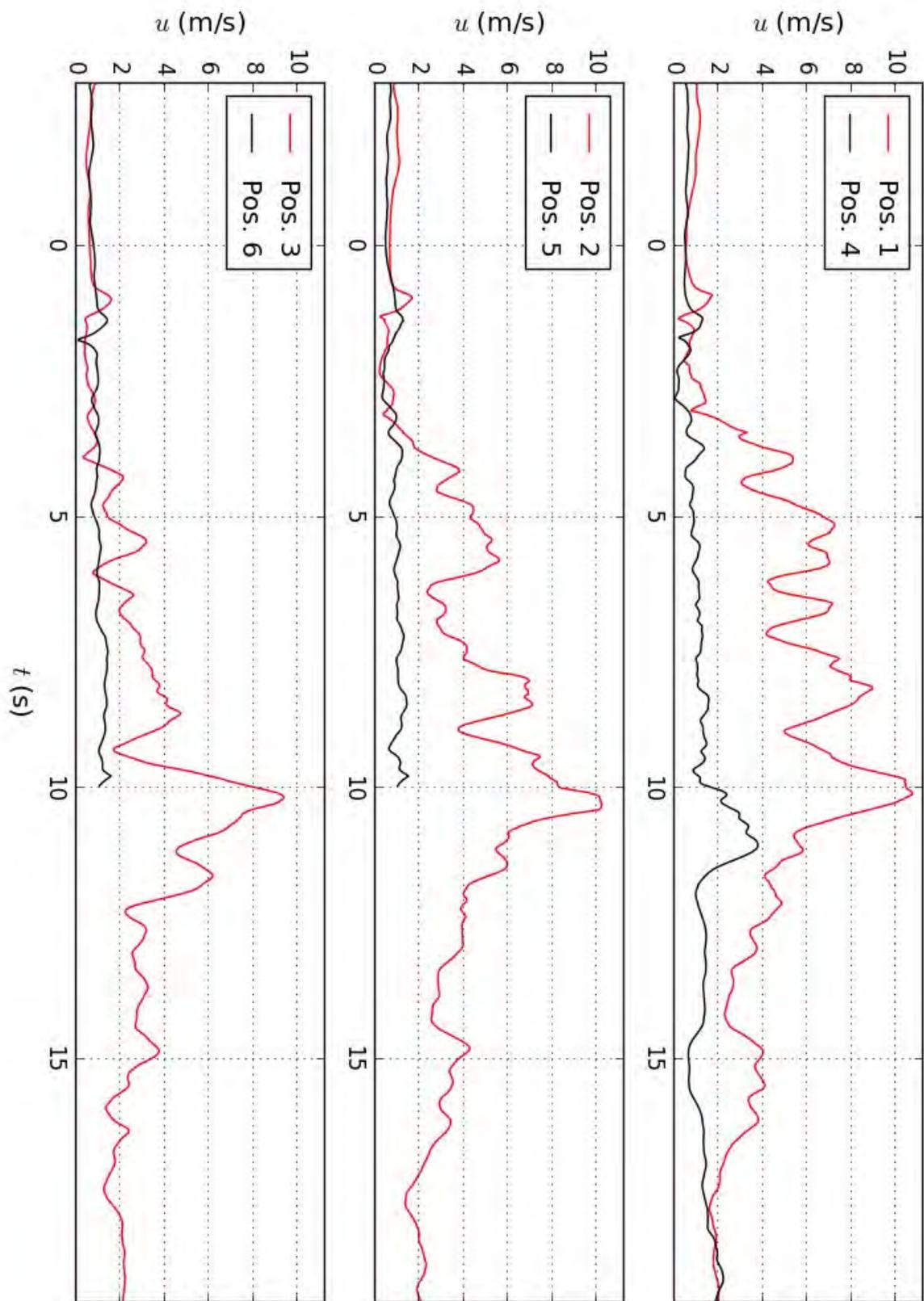


Abbildung C.37: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 6. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

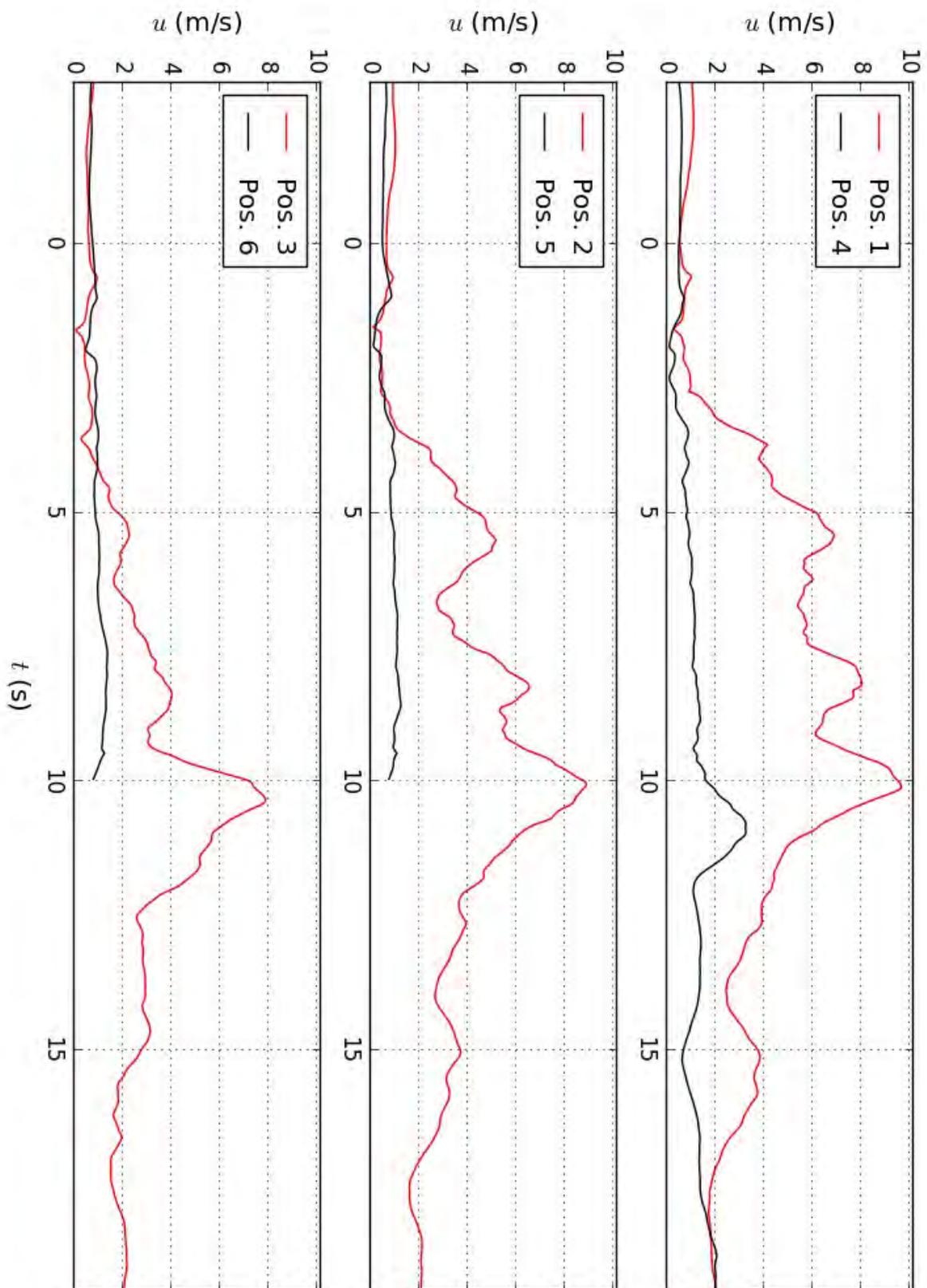


Abbildung C.38: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 6. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

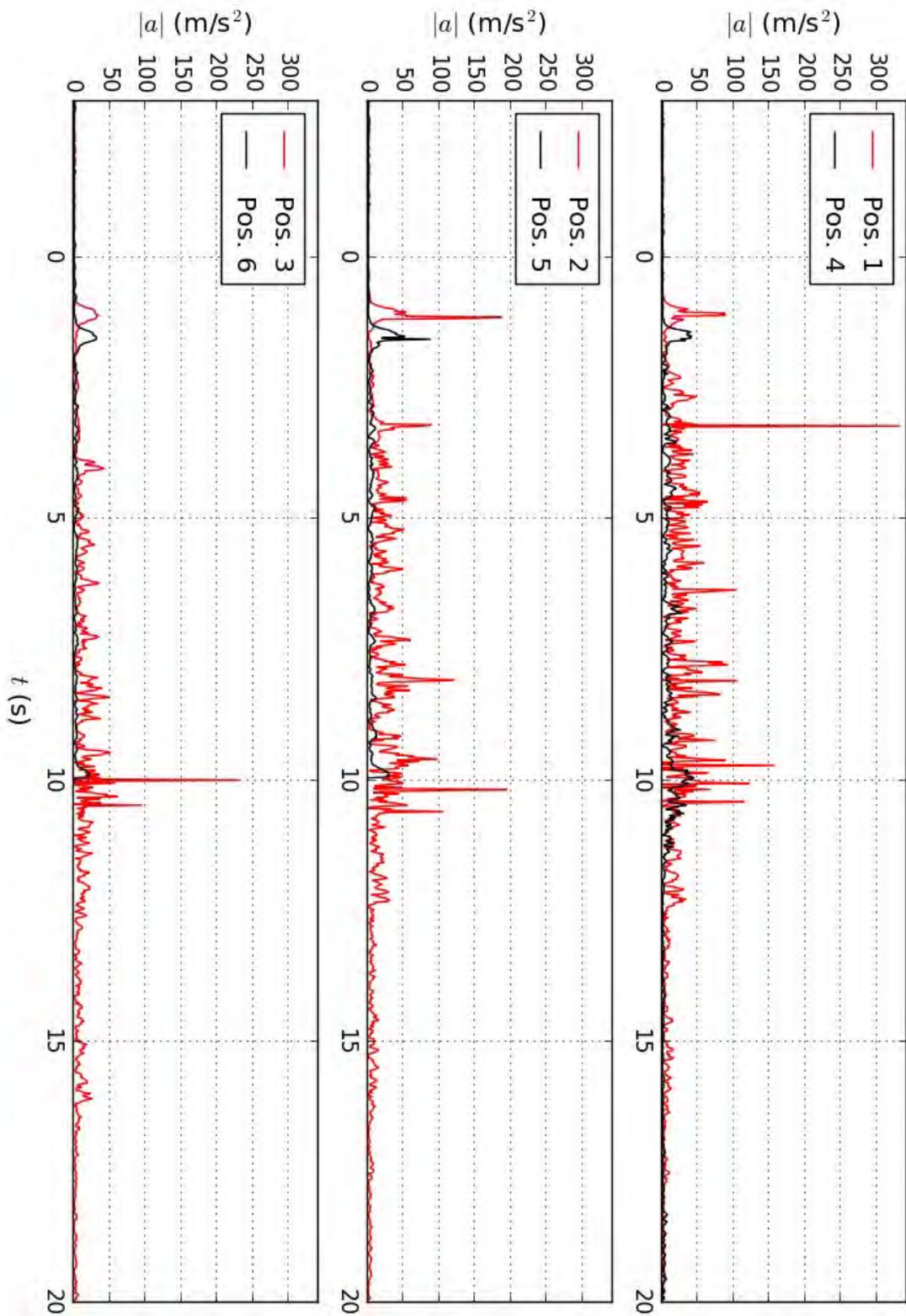


Abbildung C.39: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 6. Messdaten ungefiltert.

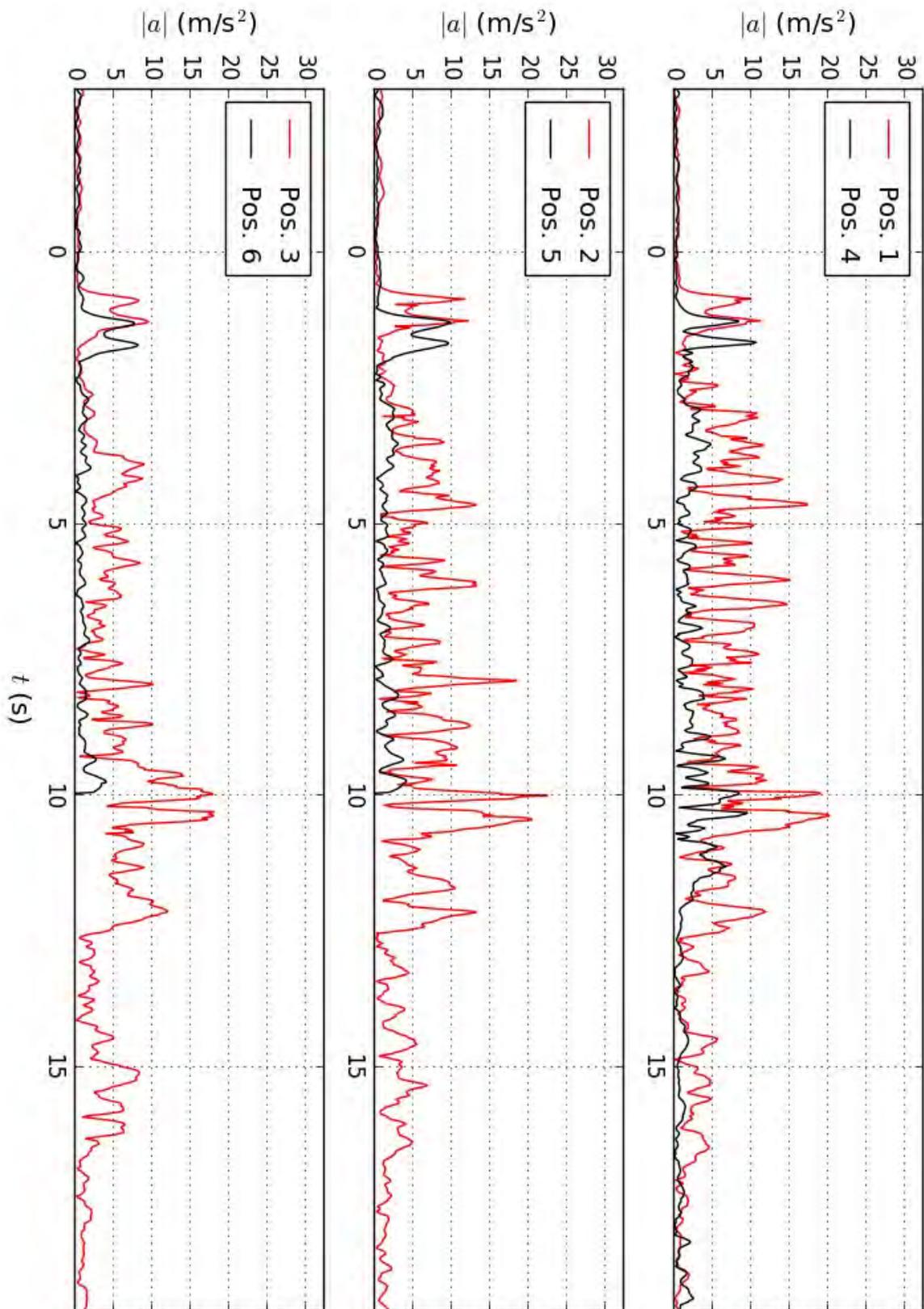


Abbildung C.40: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 6. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

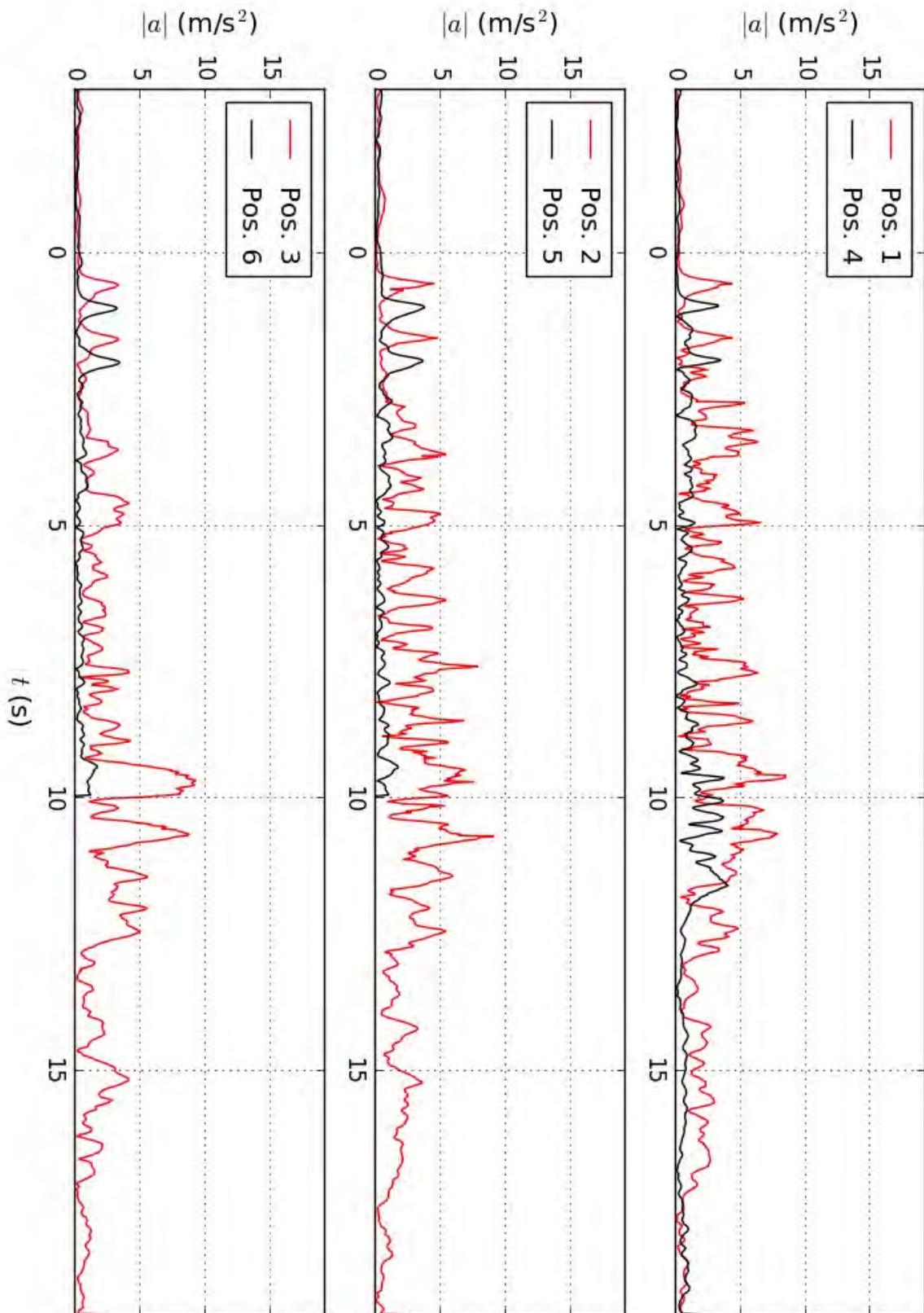


Abbildung C.41: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 6. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

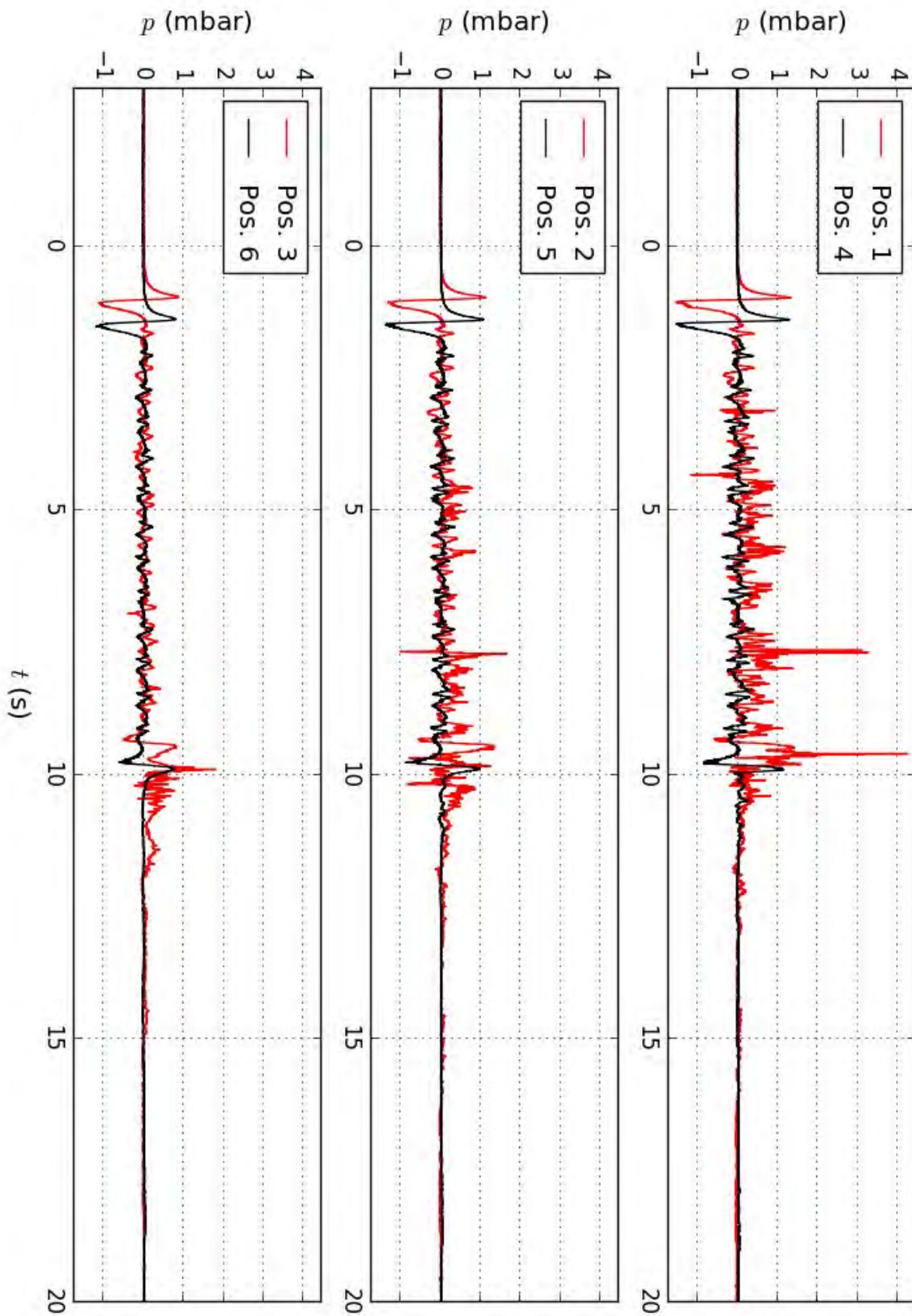


Abbildung C.42: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 6.

Zug 7

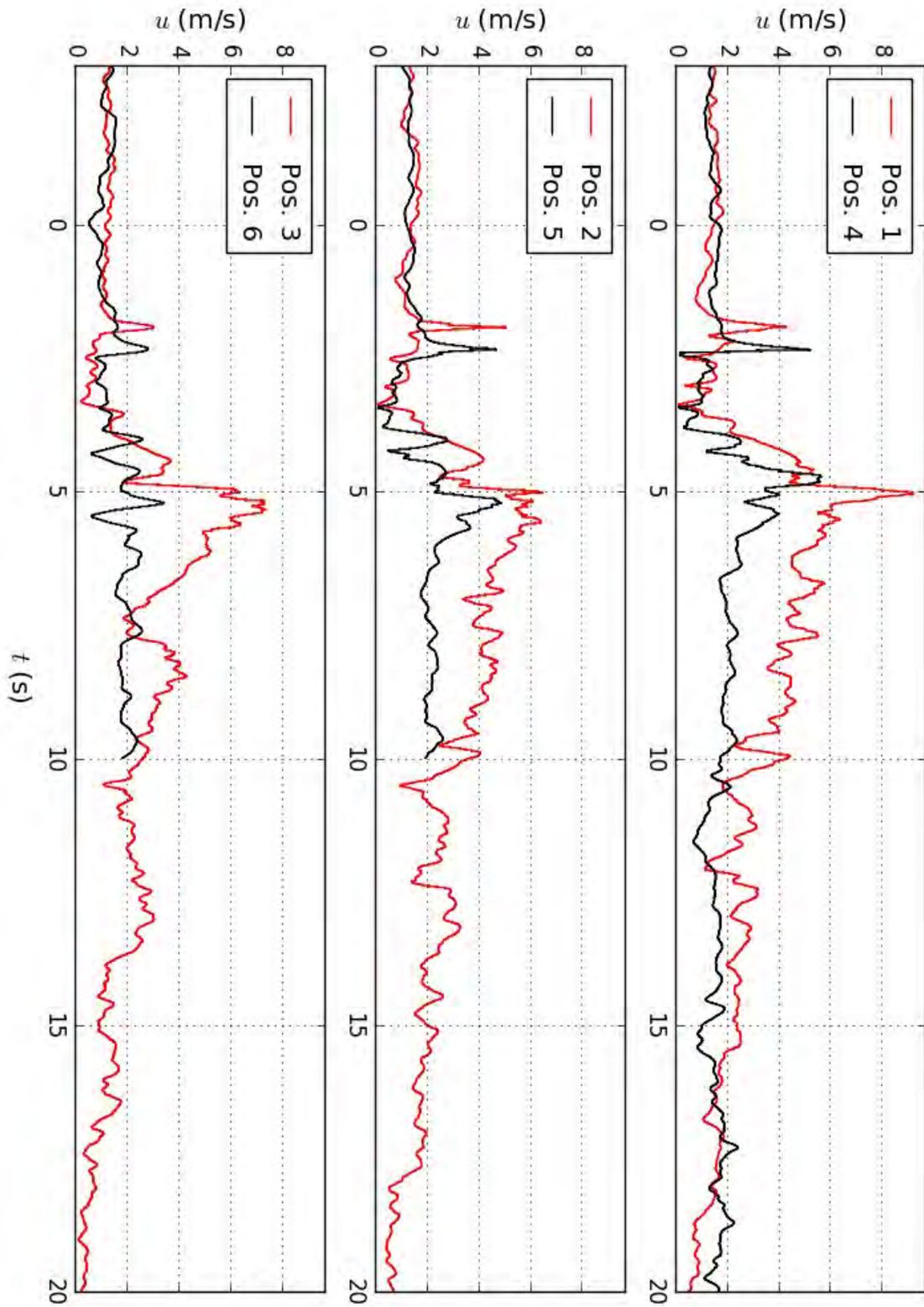


Abbildung C.43: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 7. Messdaten ungefiltert.

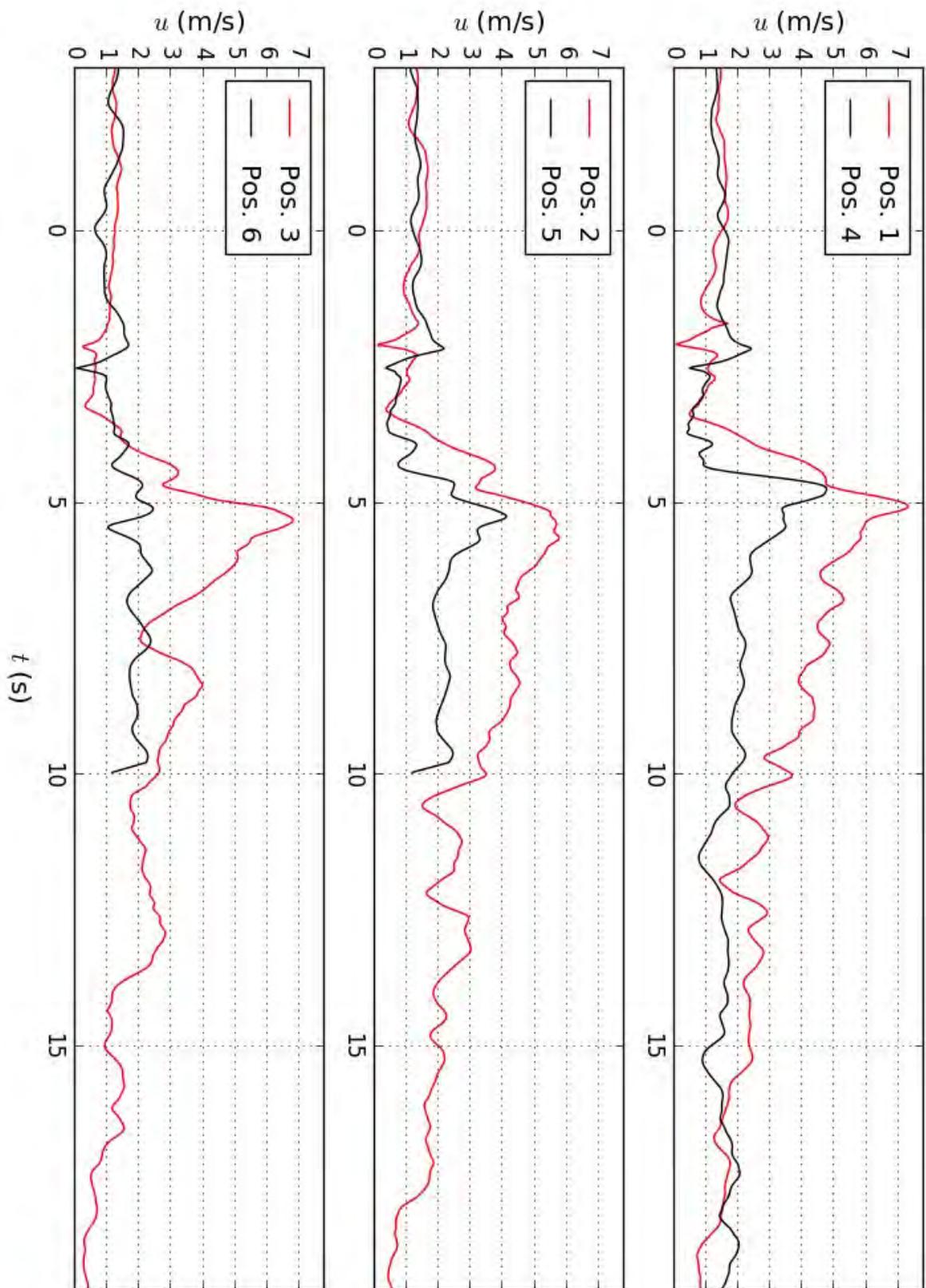


Abbildung C.44: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 7. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

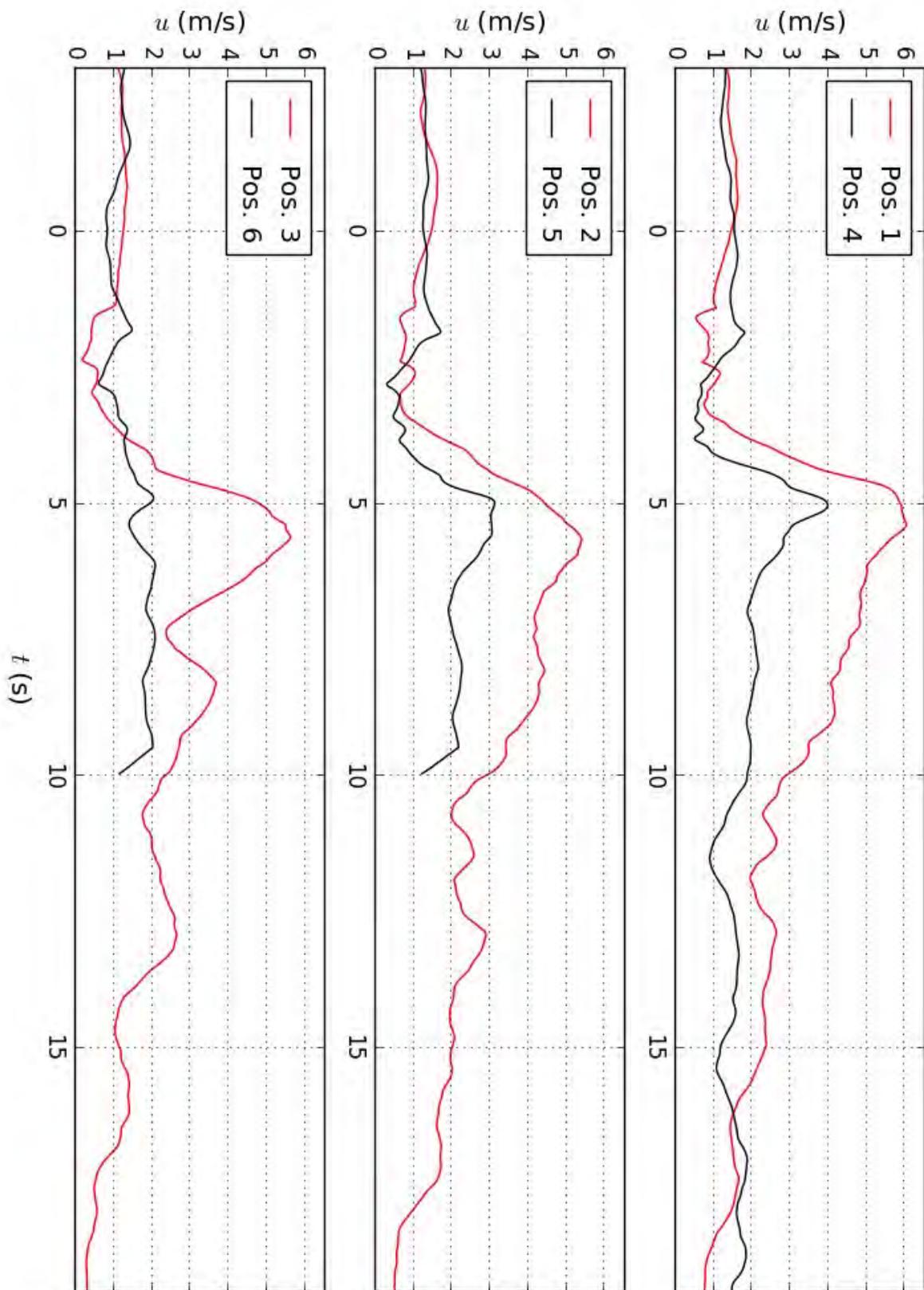


Abbildung C.45: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 7. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

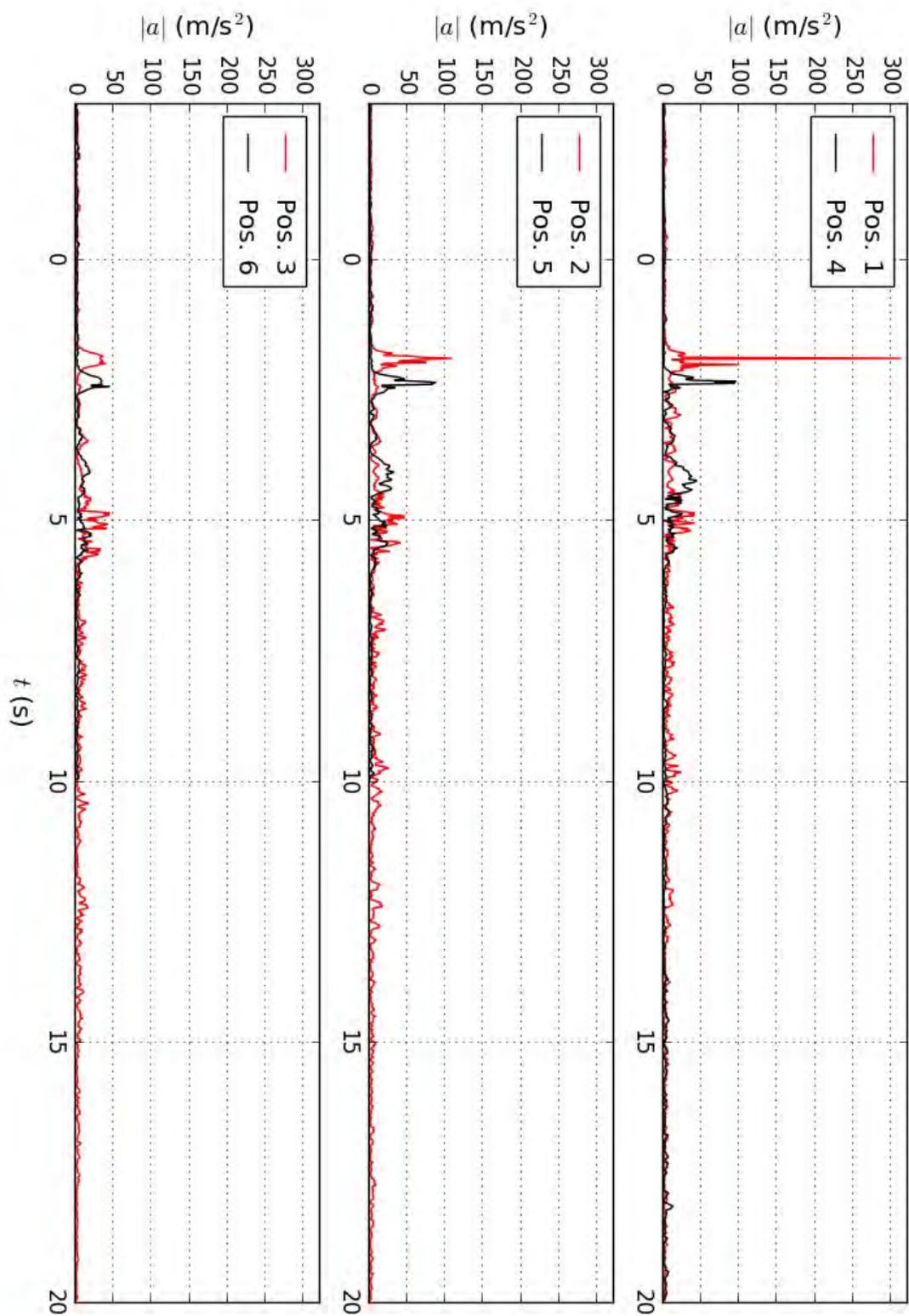


Abbildung C.46: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 7. Messdaten ungefiltert.

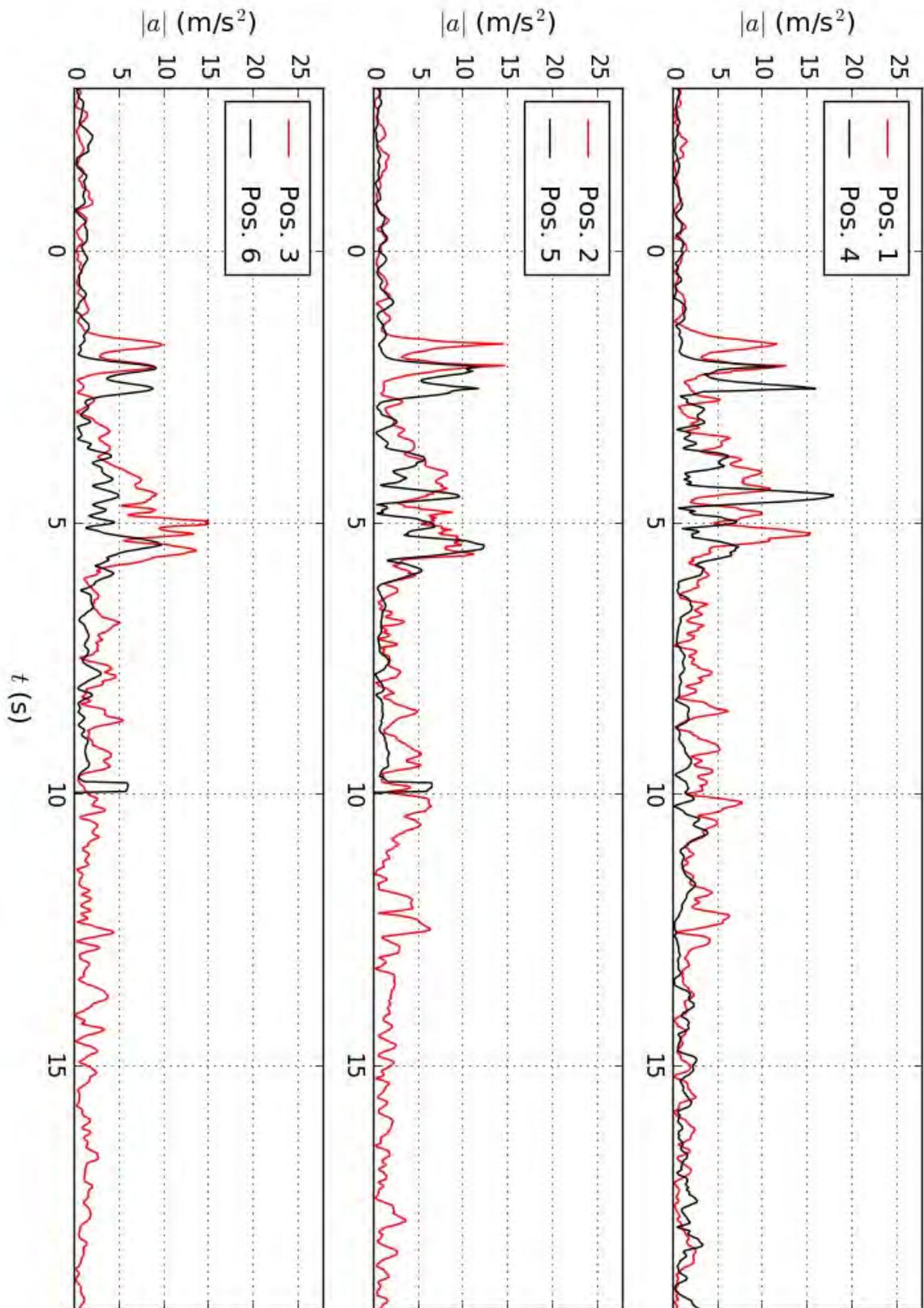


Abbildung C.47: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 7. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

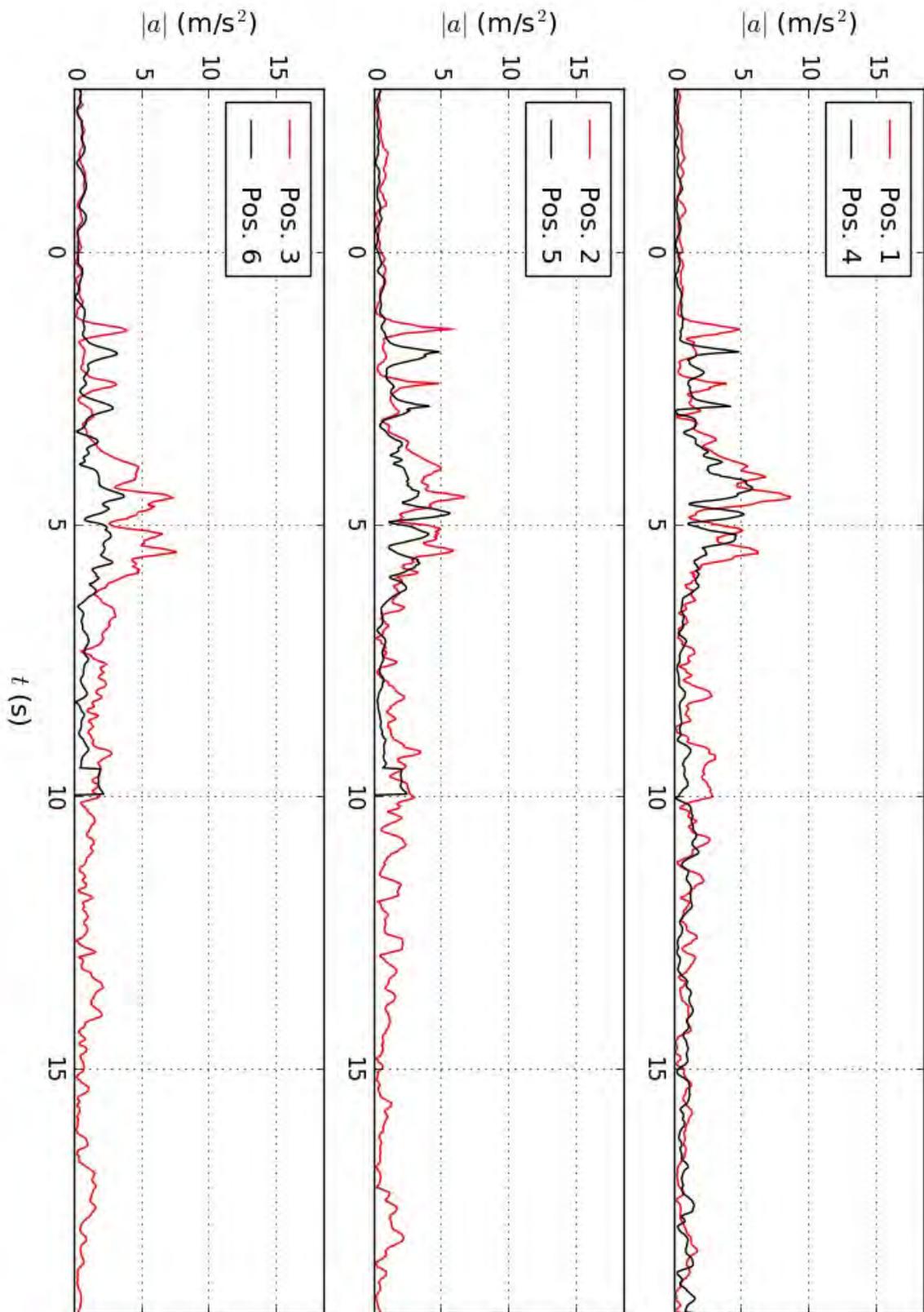


Abbildung C.48: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 7. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

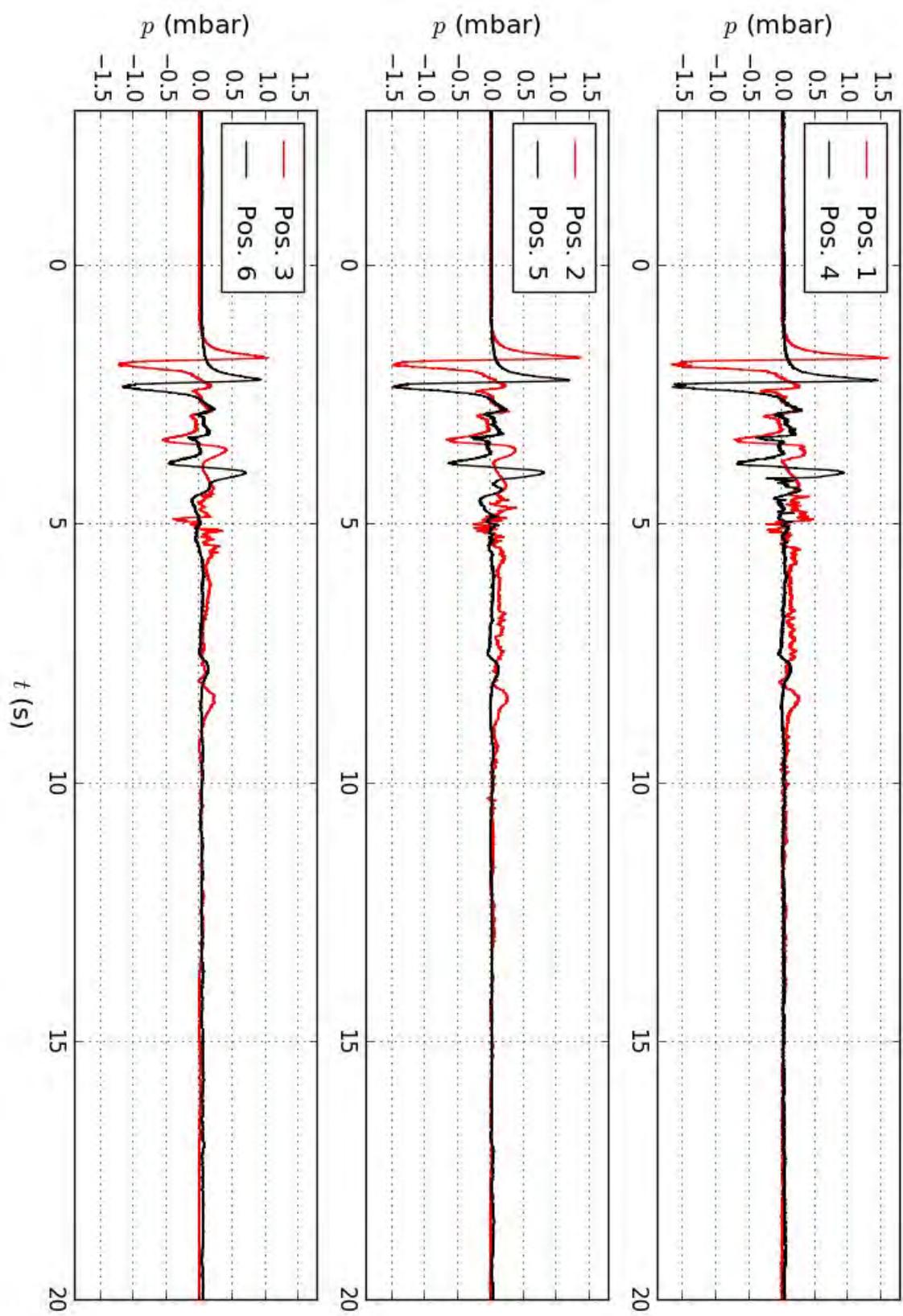


Abbildung C.49: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 7.

Zug 8

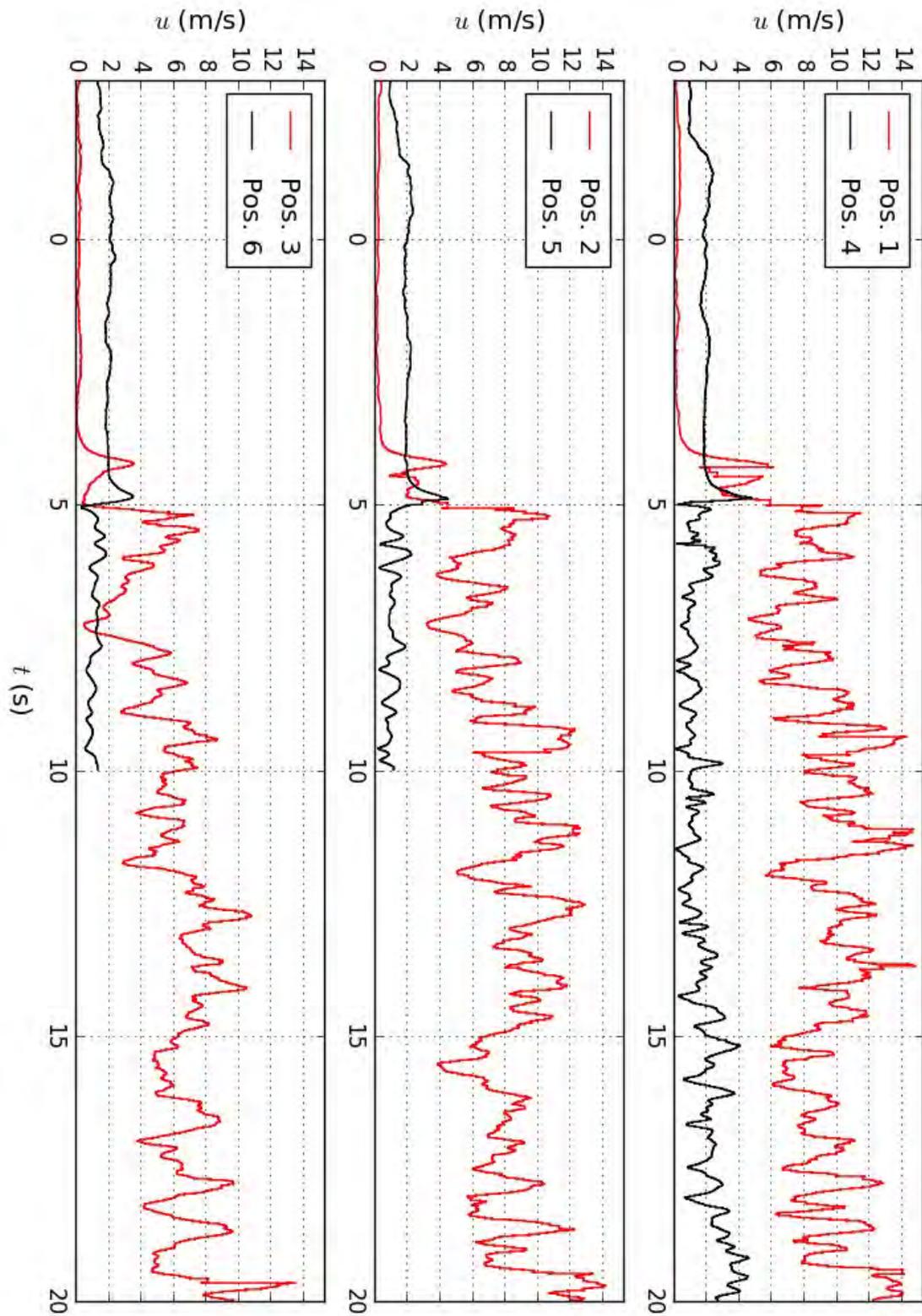


Abbildung C.50: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 8. Messdaten ungefiltert.

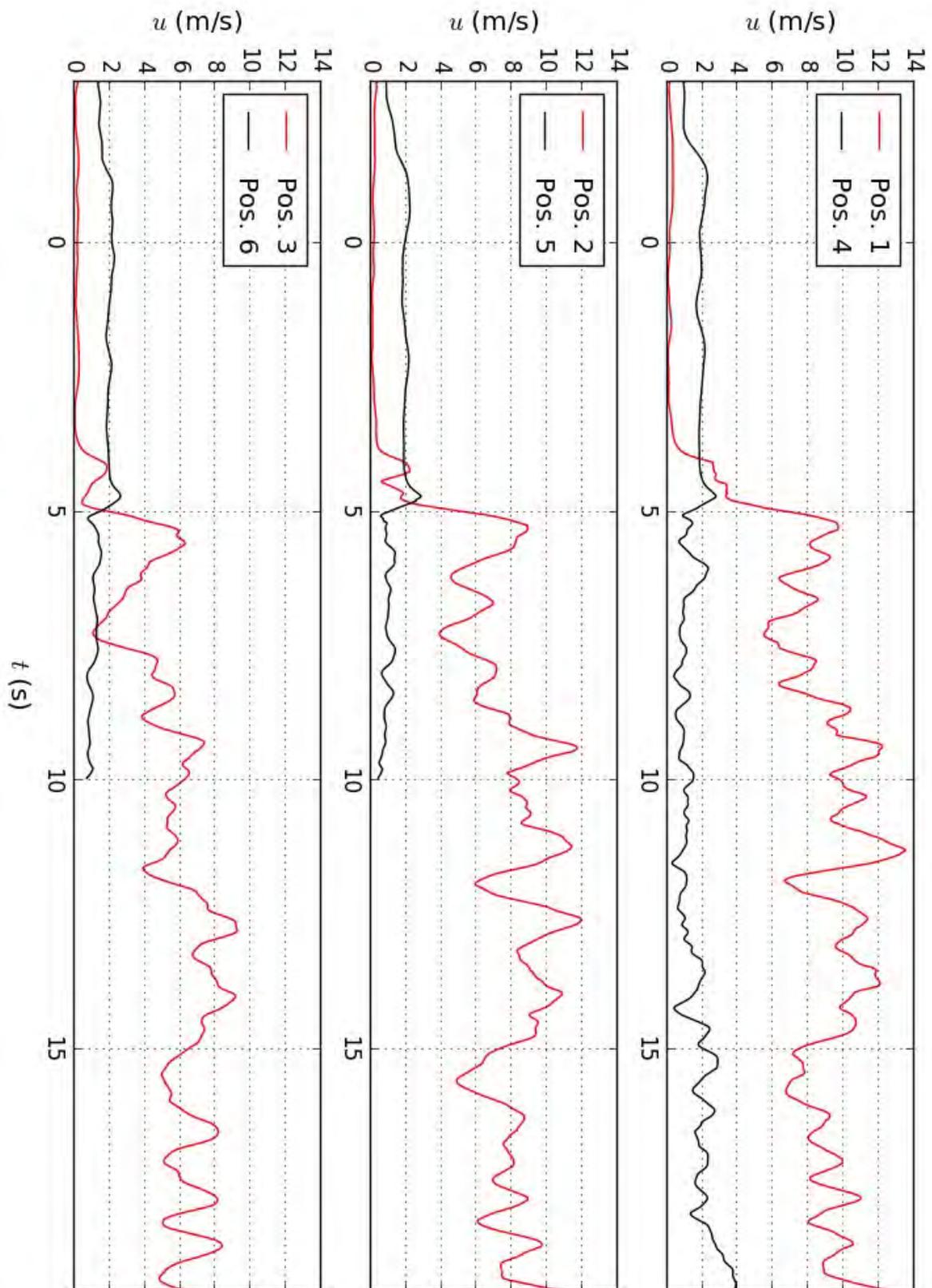


Abbildung C.51: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 8. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

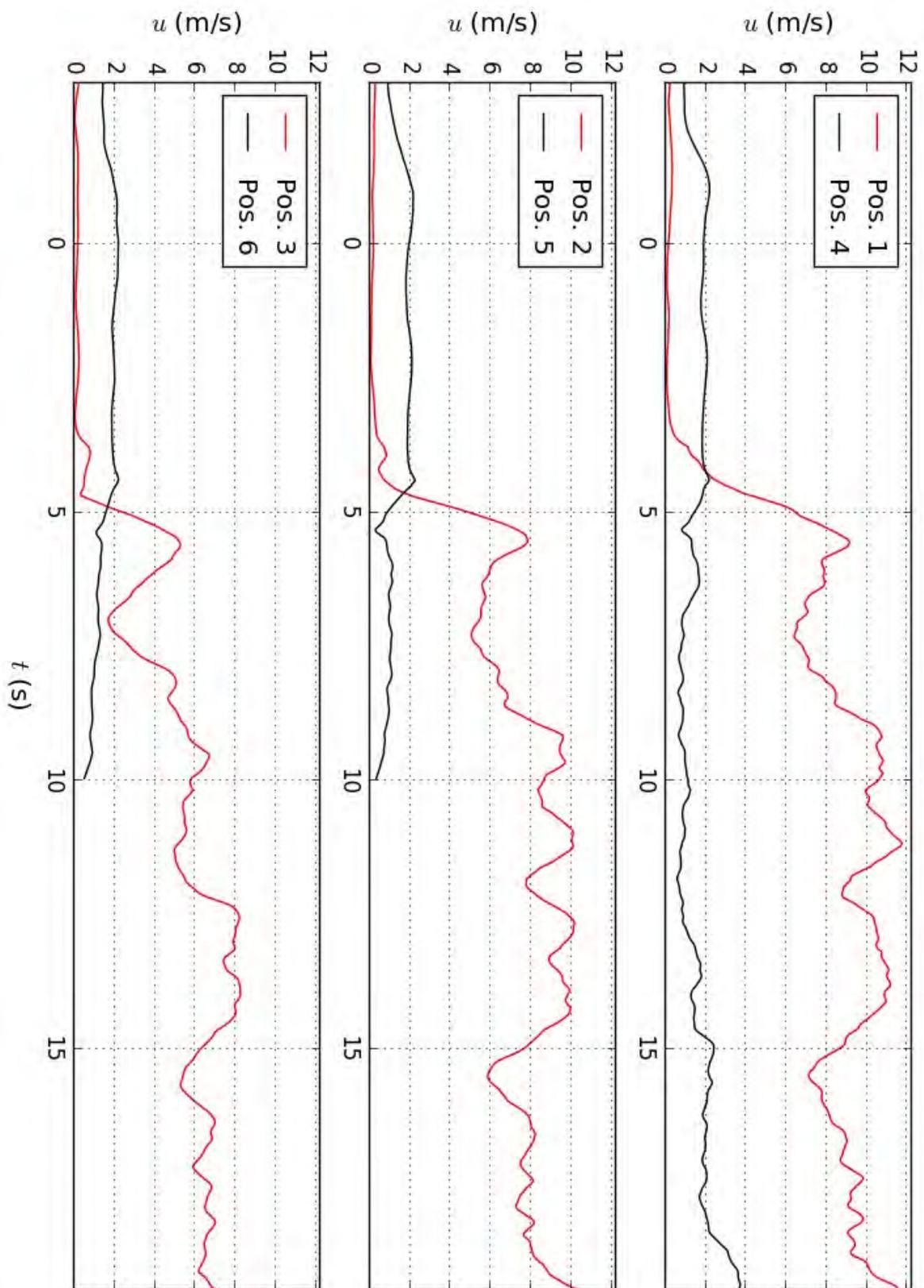


Abbildung C.52: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 8. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

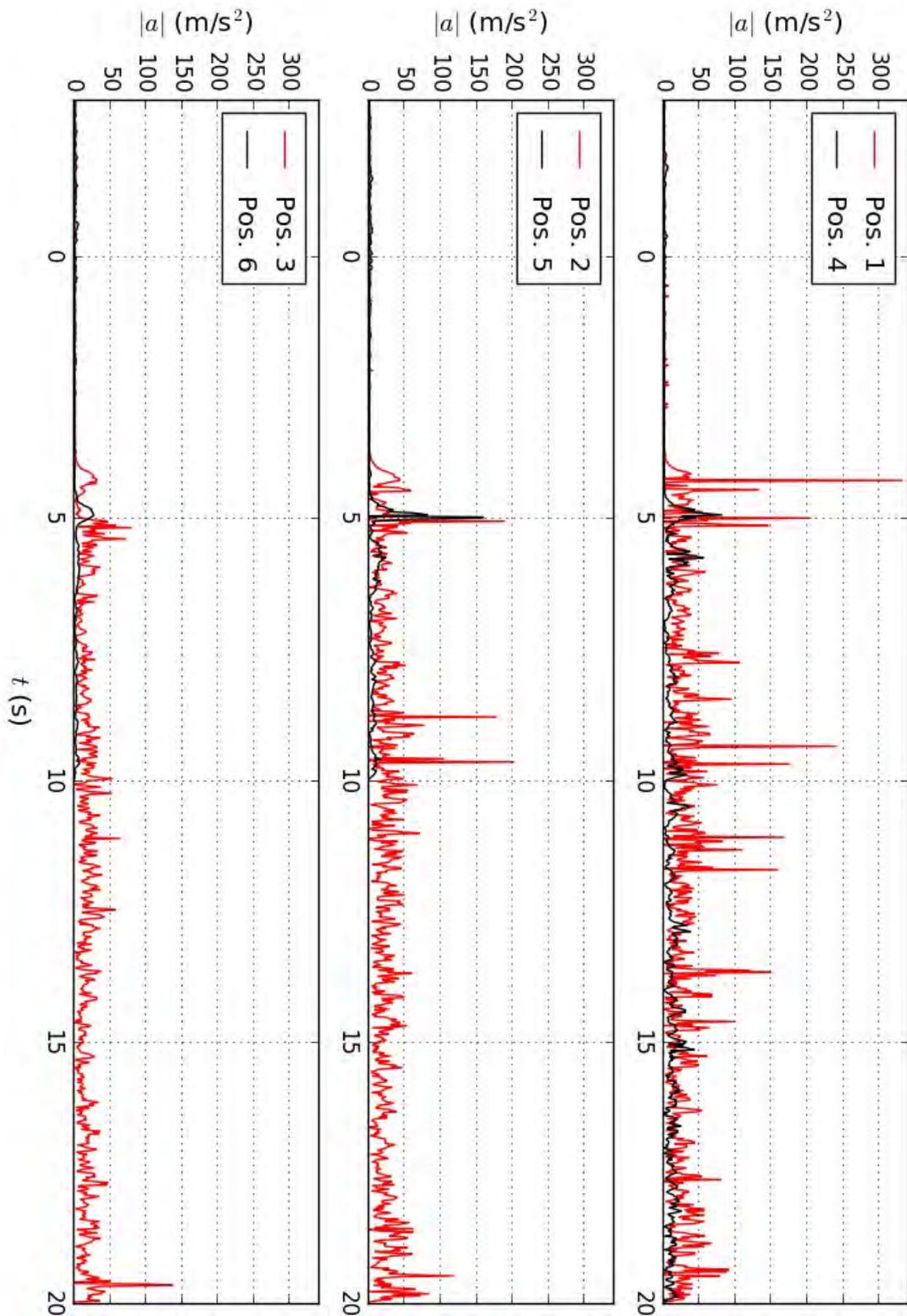


Abbildung C.53: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 8. Messdaten ungefiltert.

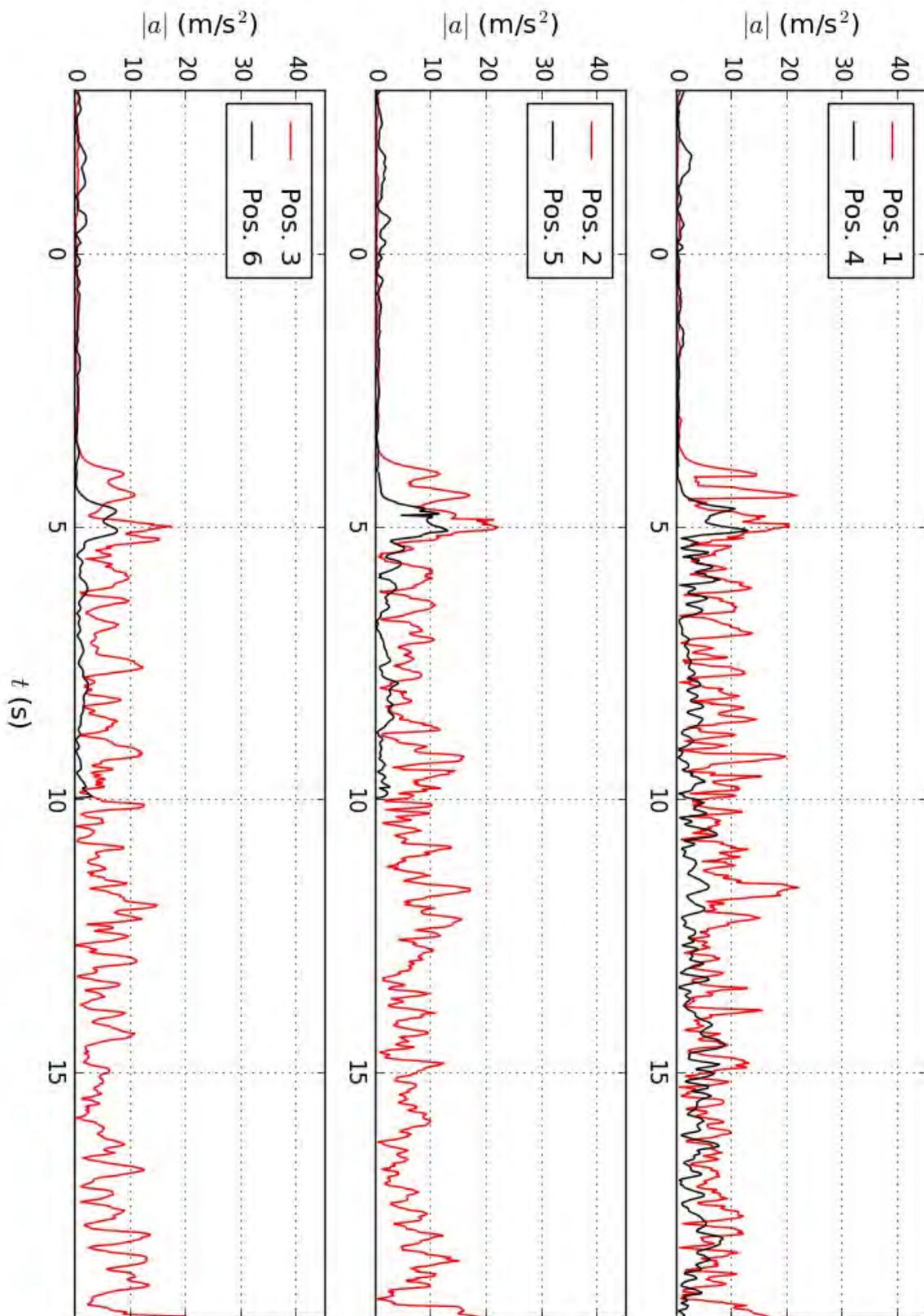


Abbildung C.54: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 8. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

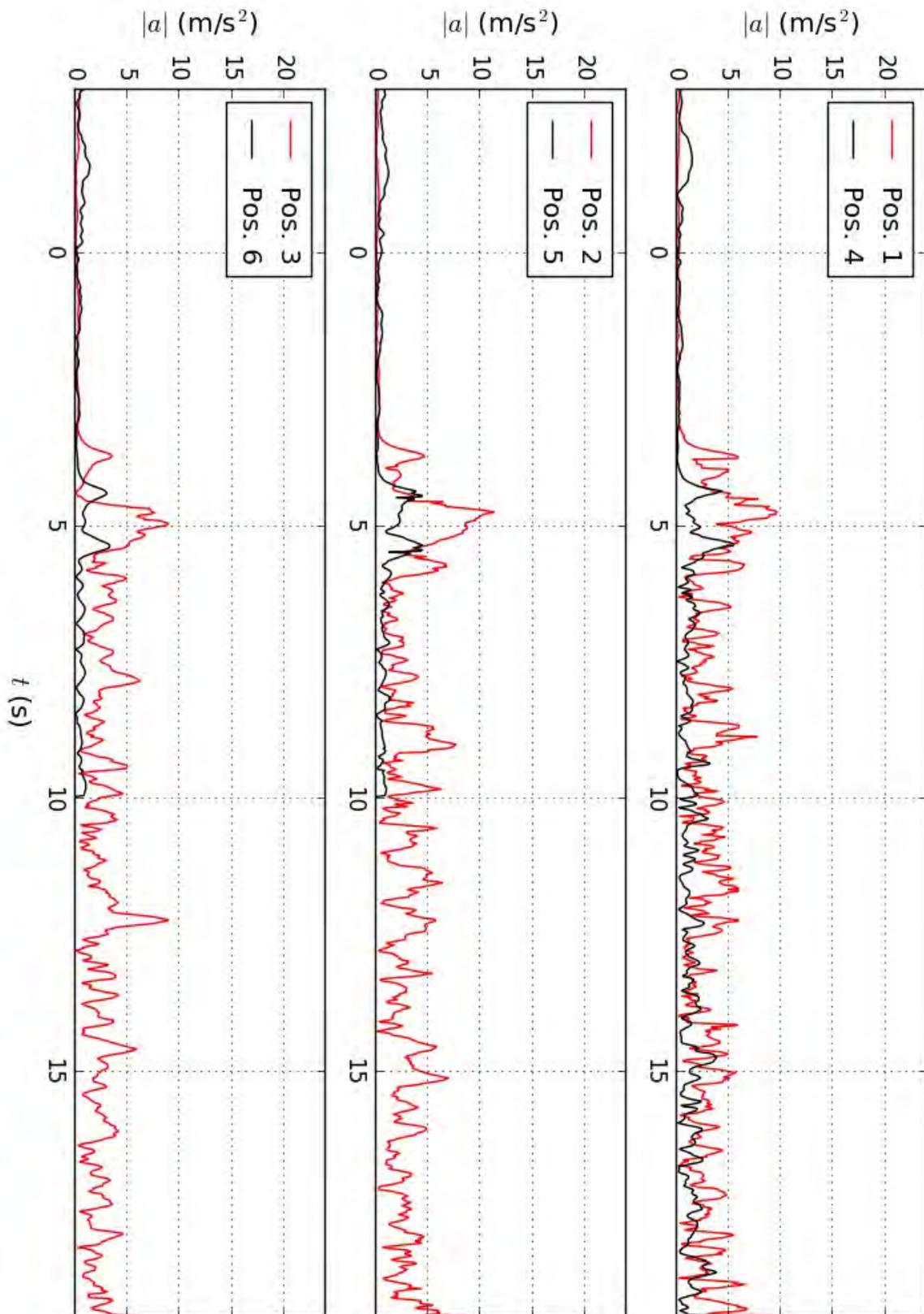


Abbildung C.55: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 8. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

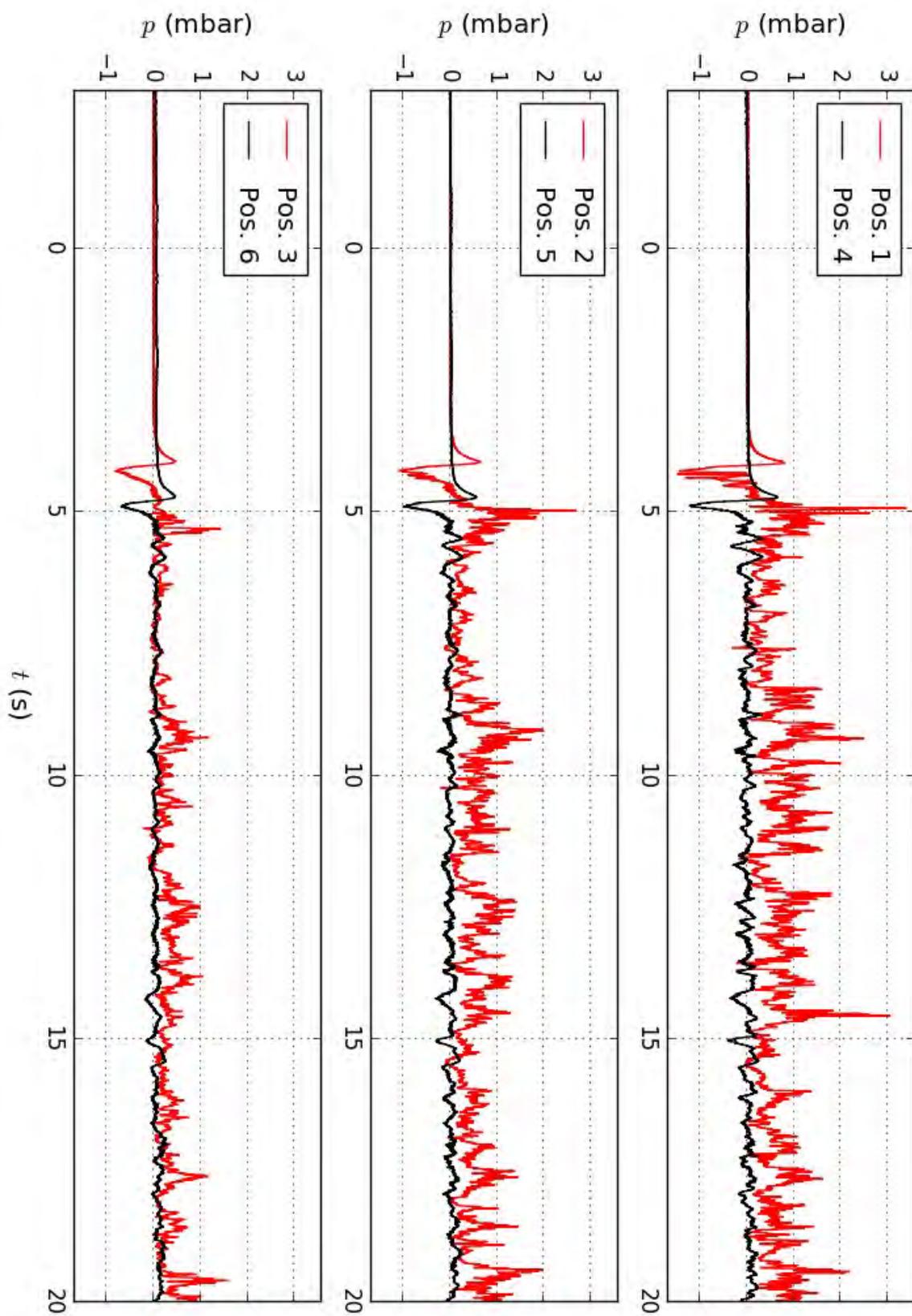


Abbildung C.56: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 8.

Zug 9

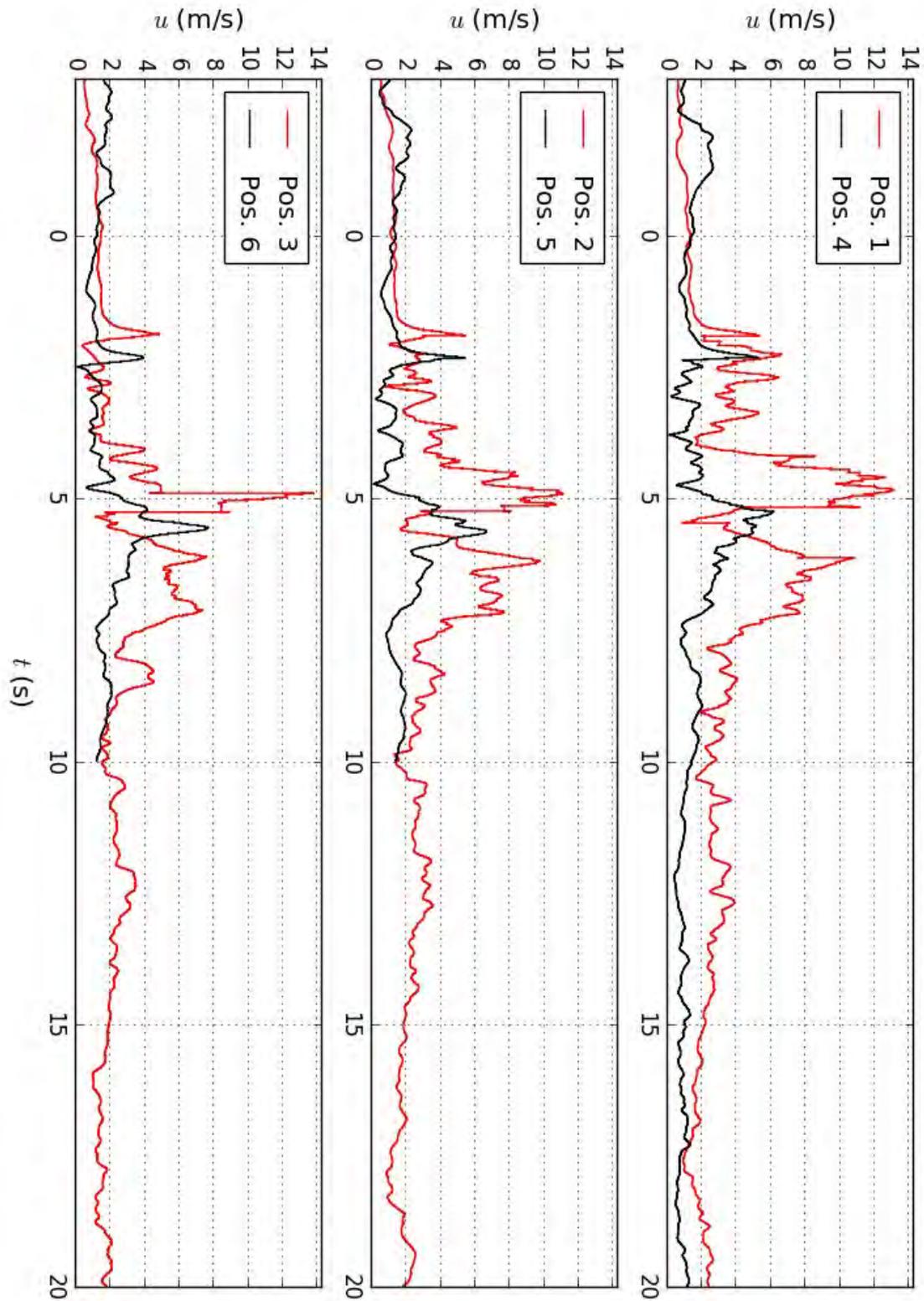


Abbildung C.57: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 9. Messdaten ungefiltert.

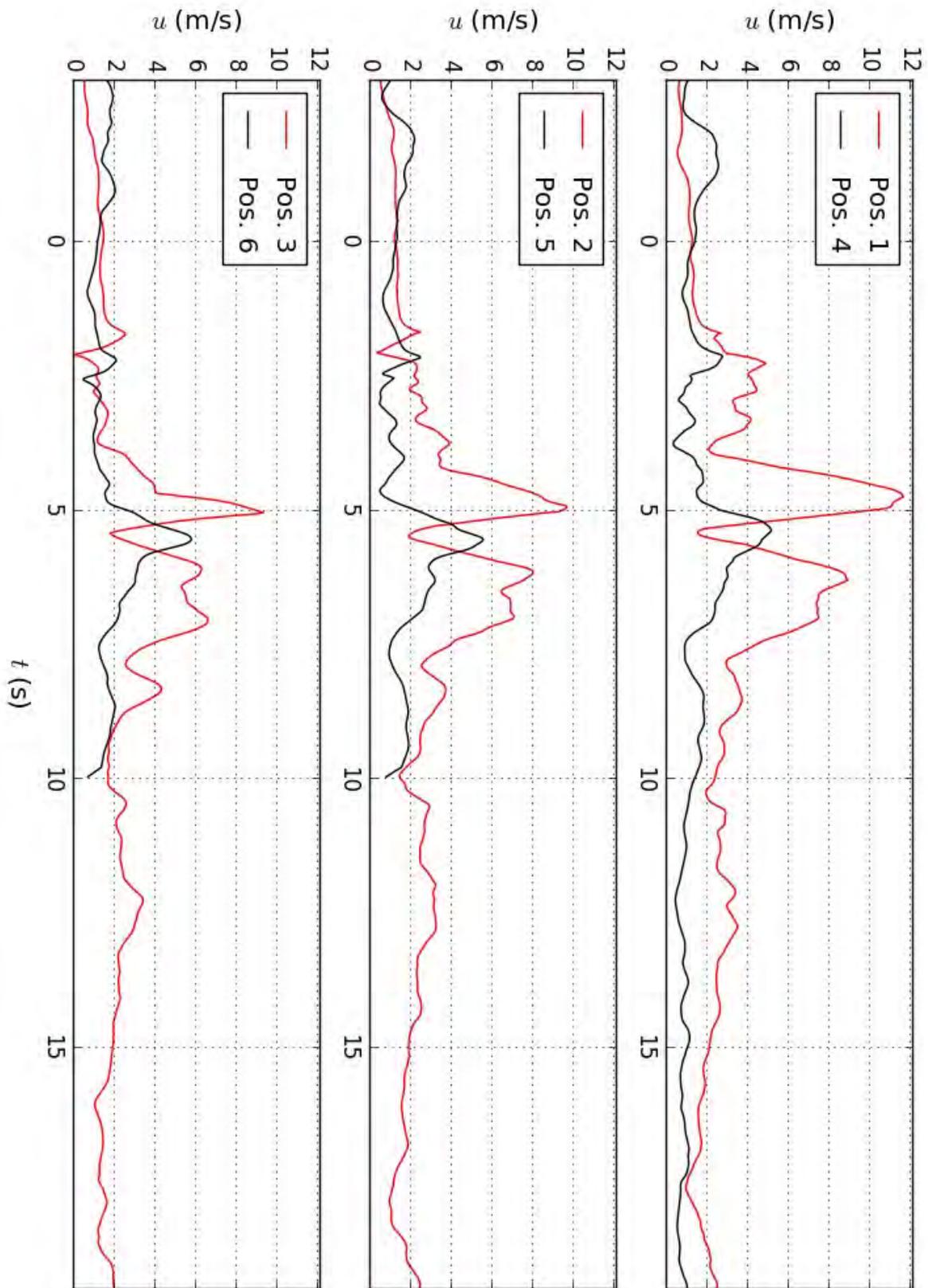


Abbildung C.58: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 9. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

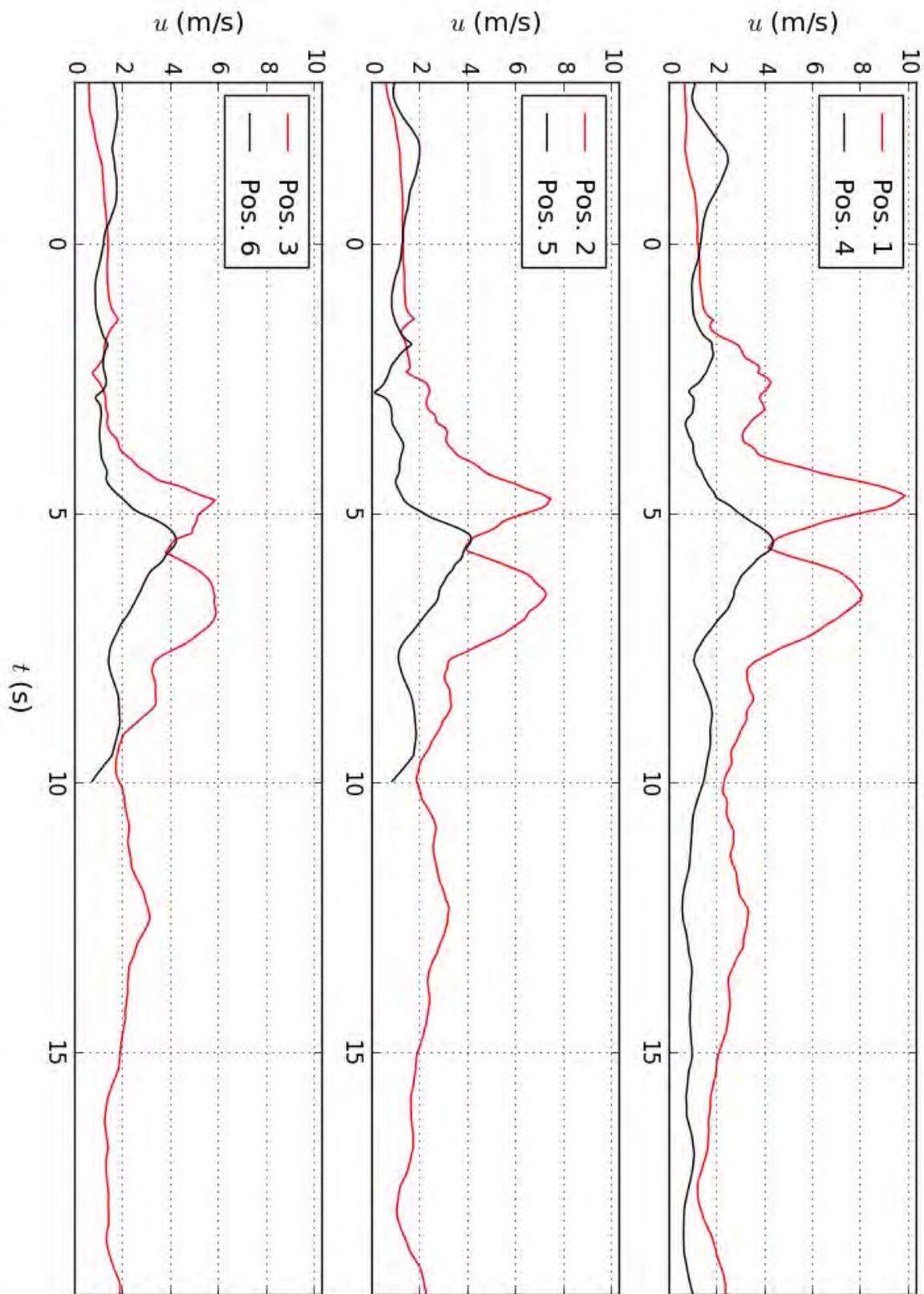


Abbildung C.59: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 9. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

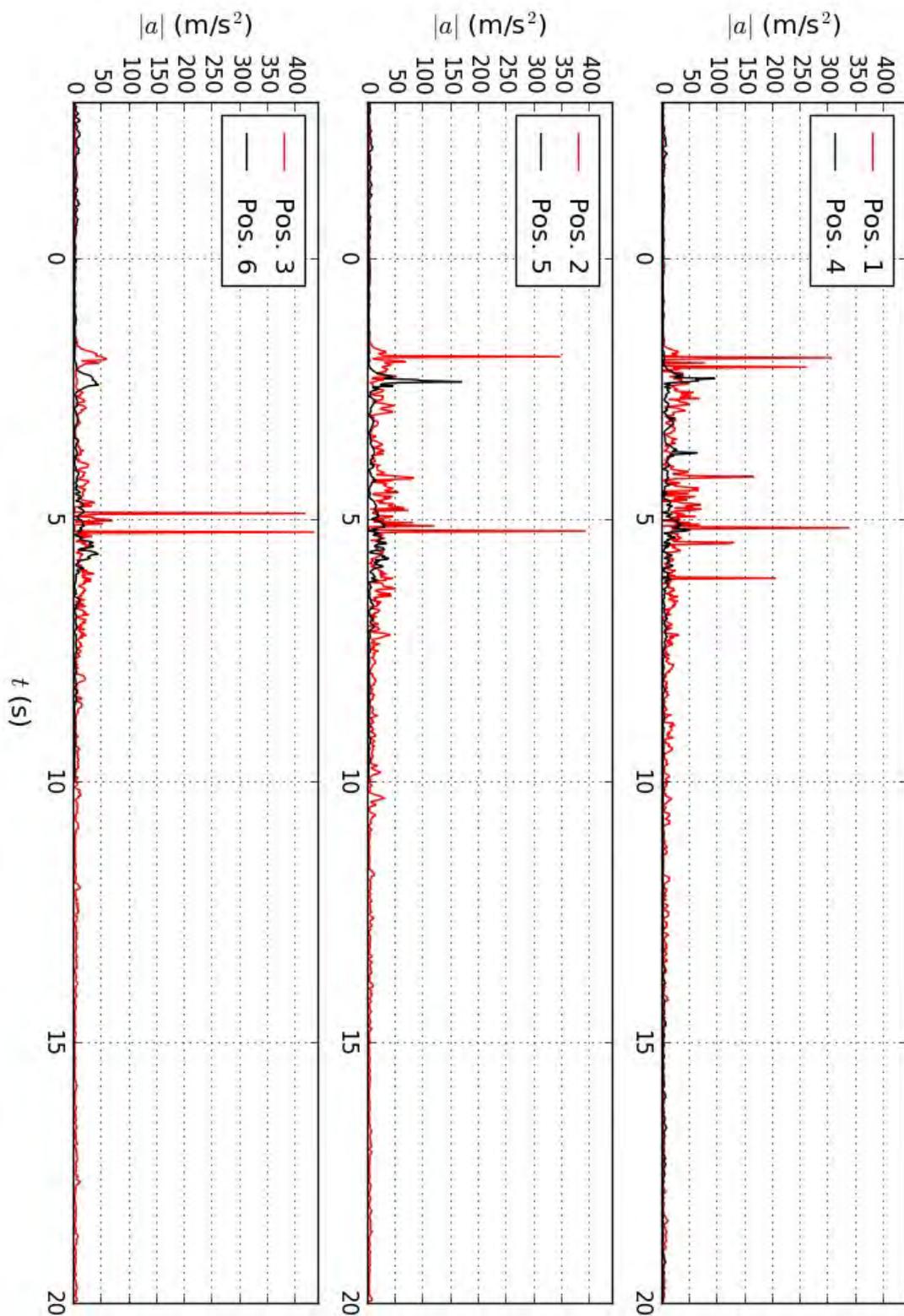


Abbildung C.60: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 9. Messdaten ungefiltert.

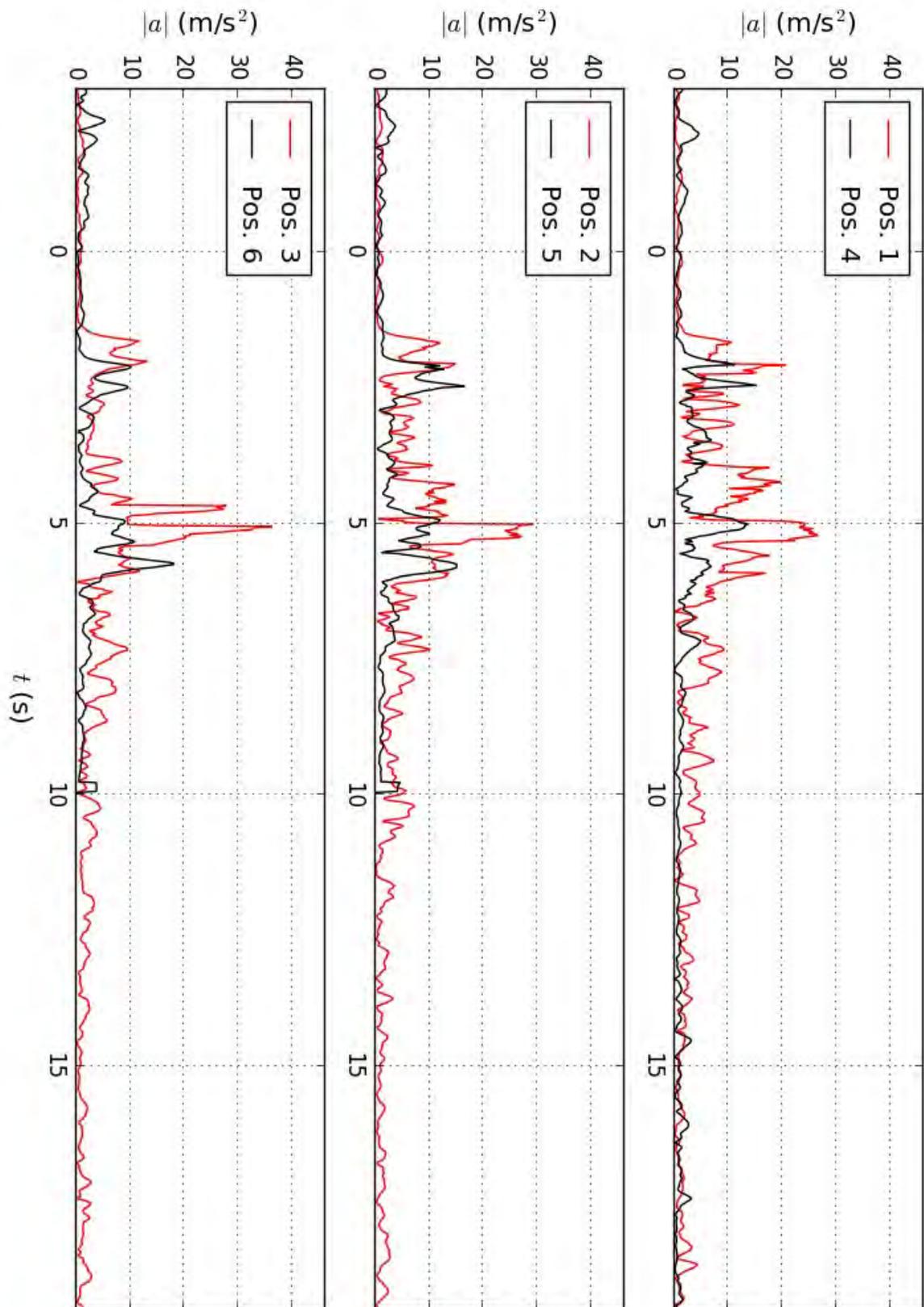


Abbildung C.61: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 9. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

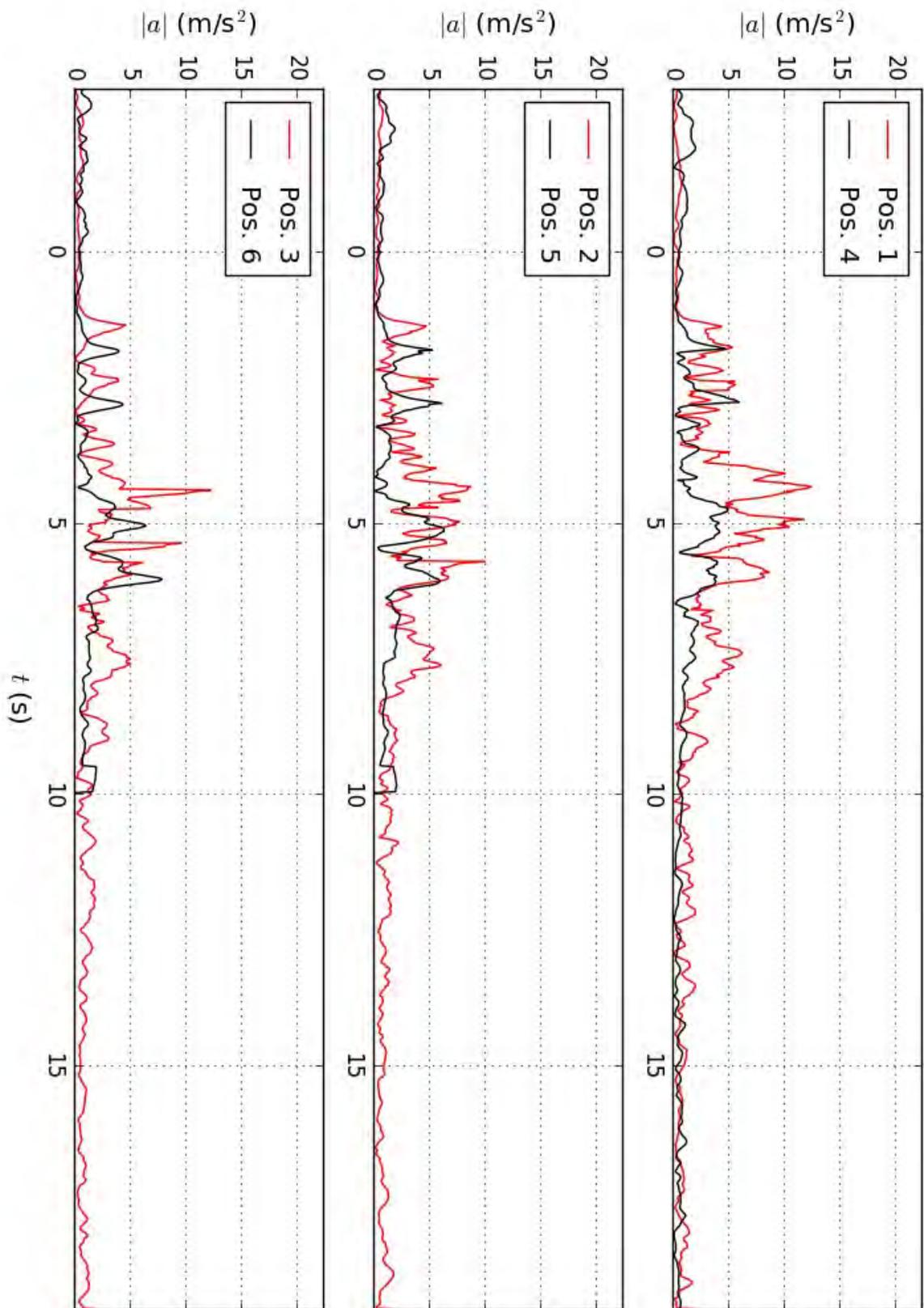


Abbildung C.62: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 9. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

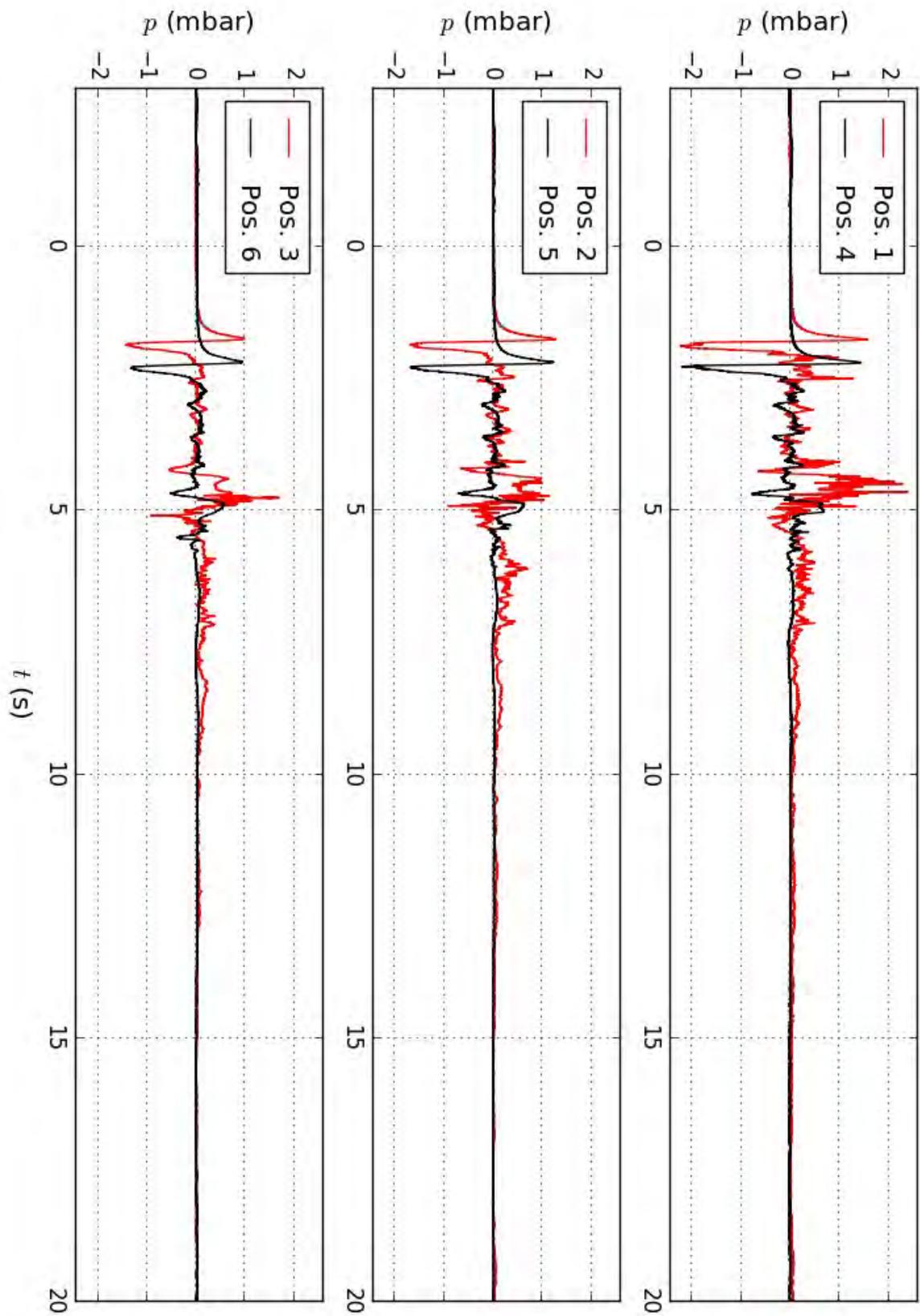


Abbildung C.63: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 9.

Zug 10

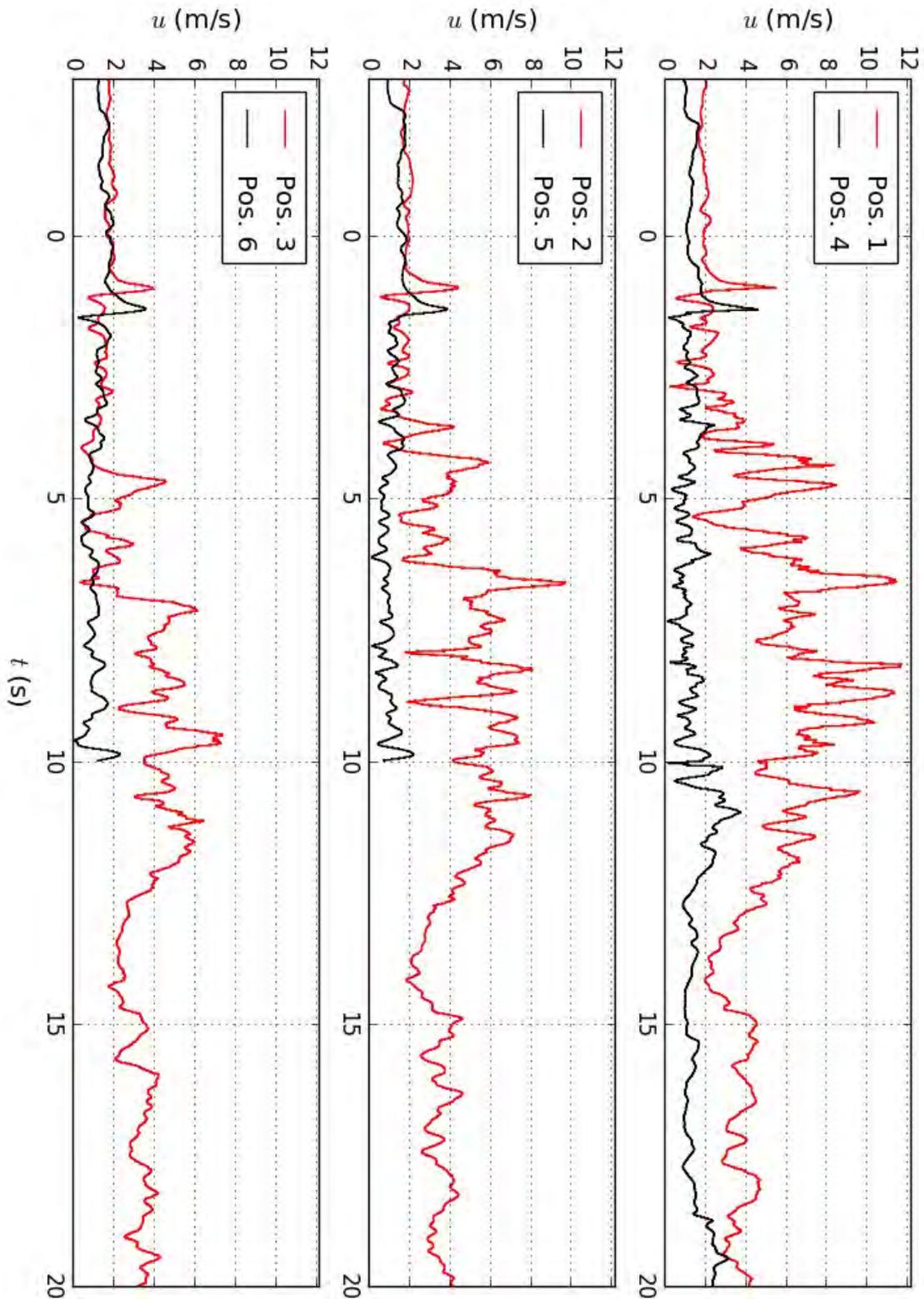


Abbildung C.64: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 10. Messdaten ungefiltert.

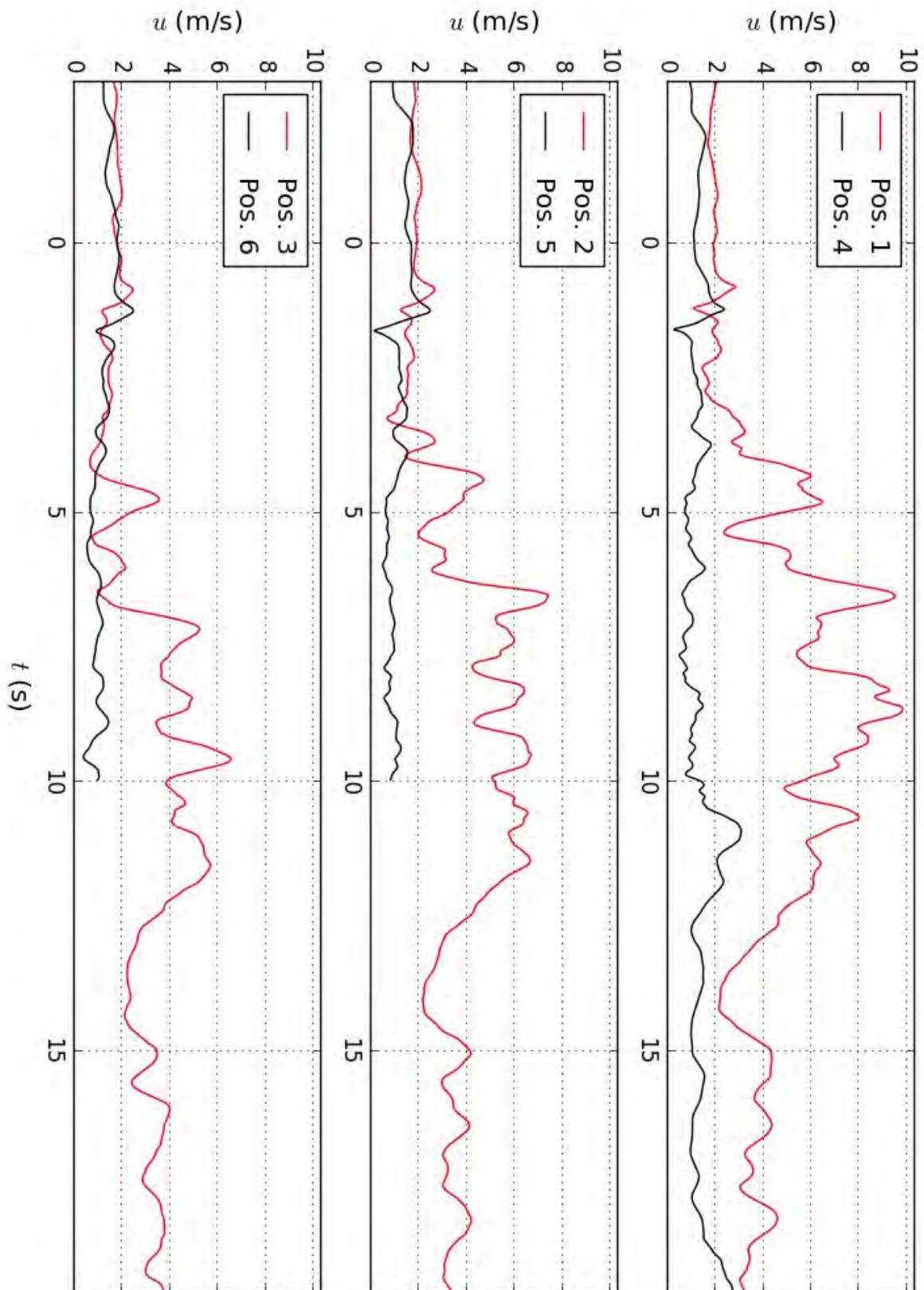


Abbildung C.65: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 10. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

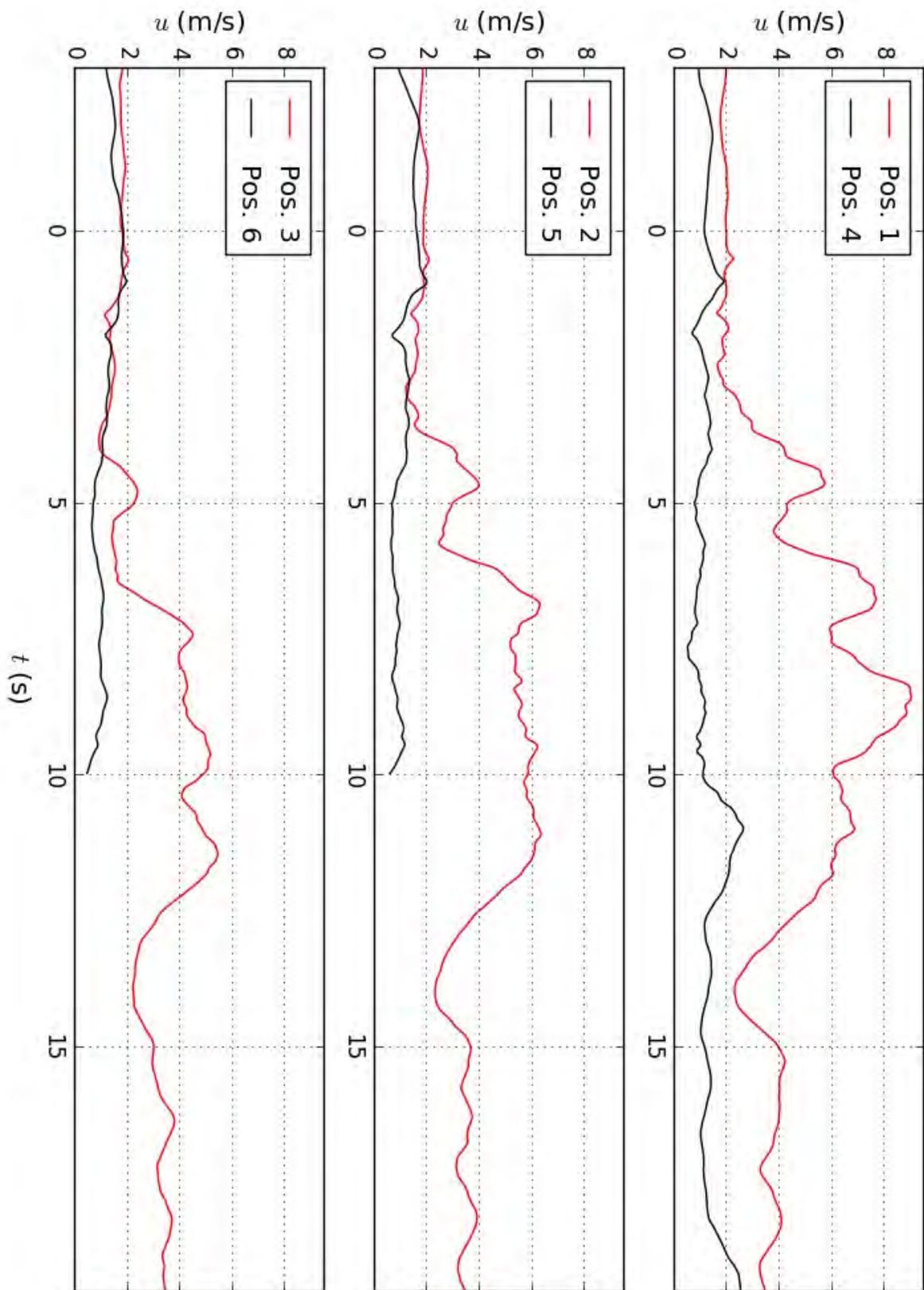


Abbildung C.66: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 10. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

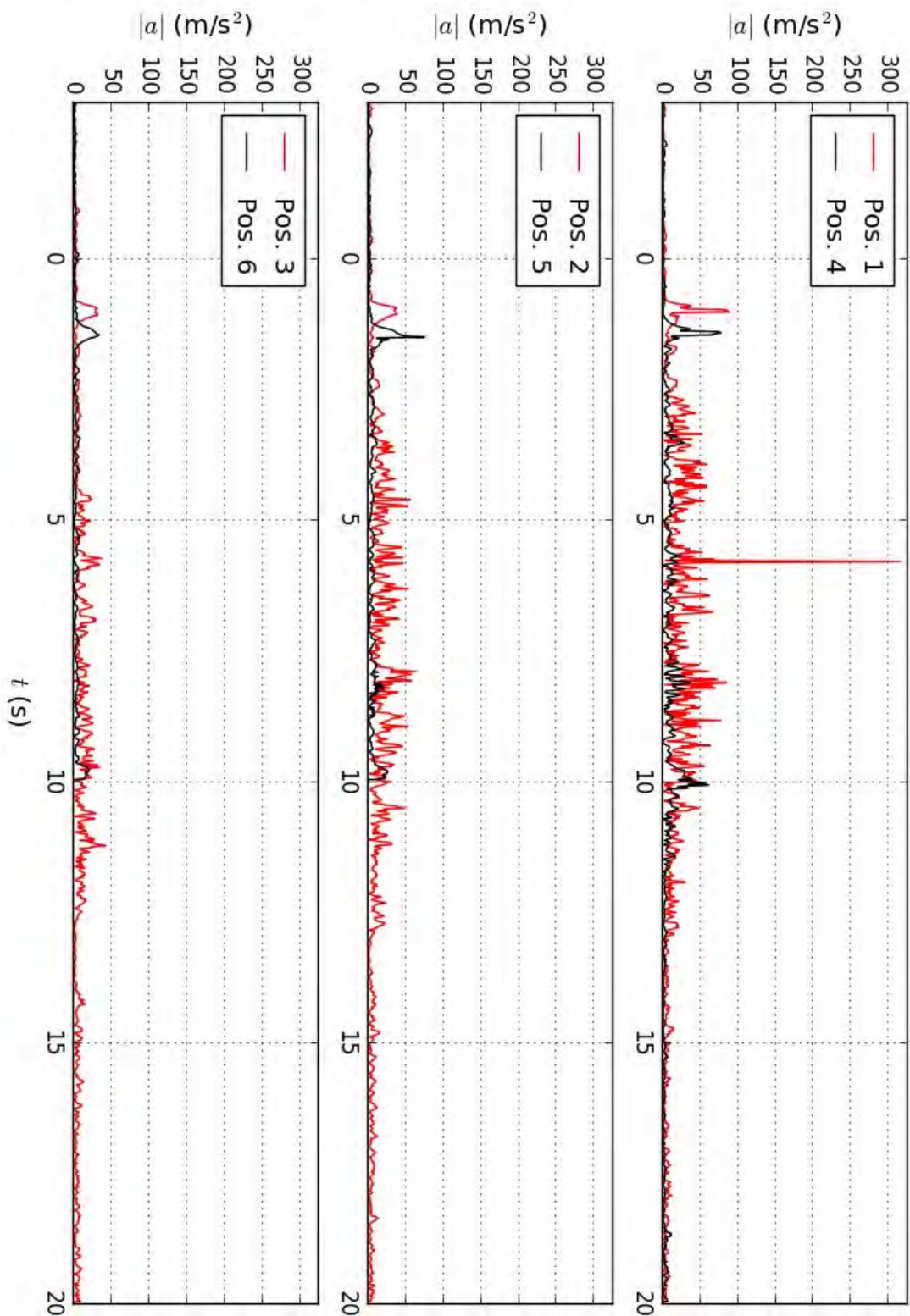


Abbildung C.67: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 10. Messdaten ungefiltert.

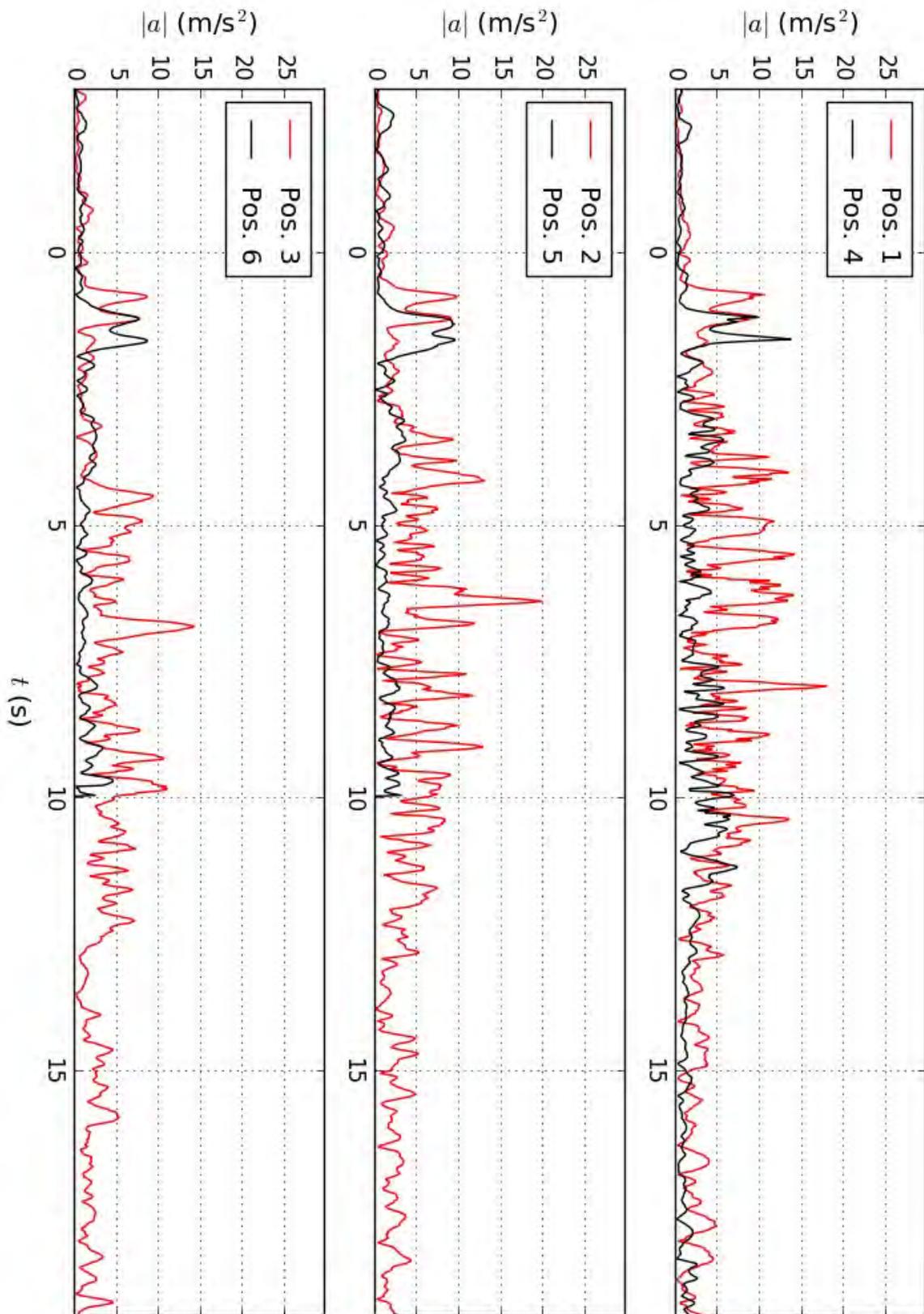


Abbildung C.68: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 10. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4 \text{ s}$.

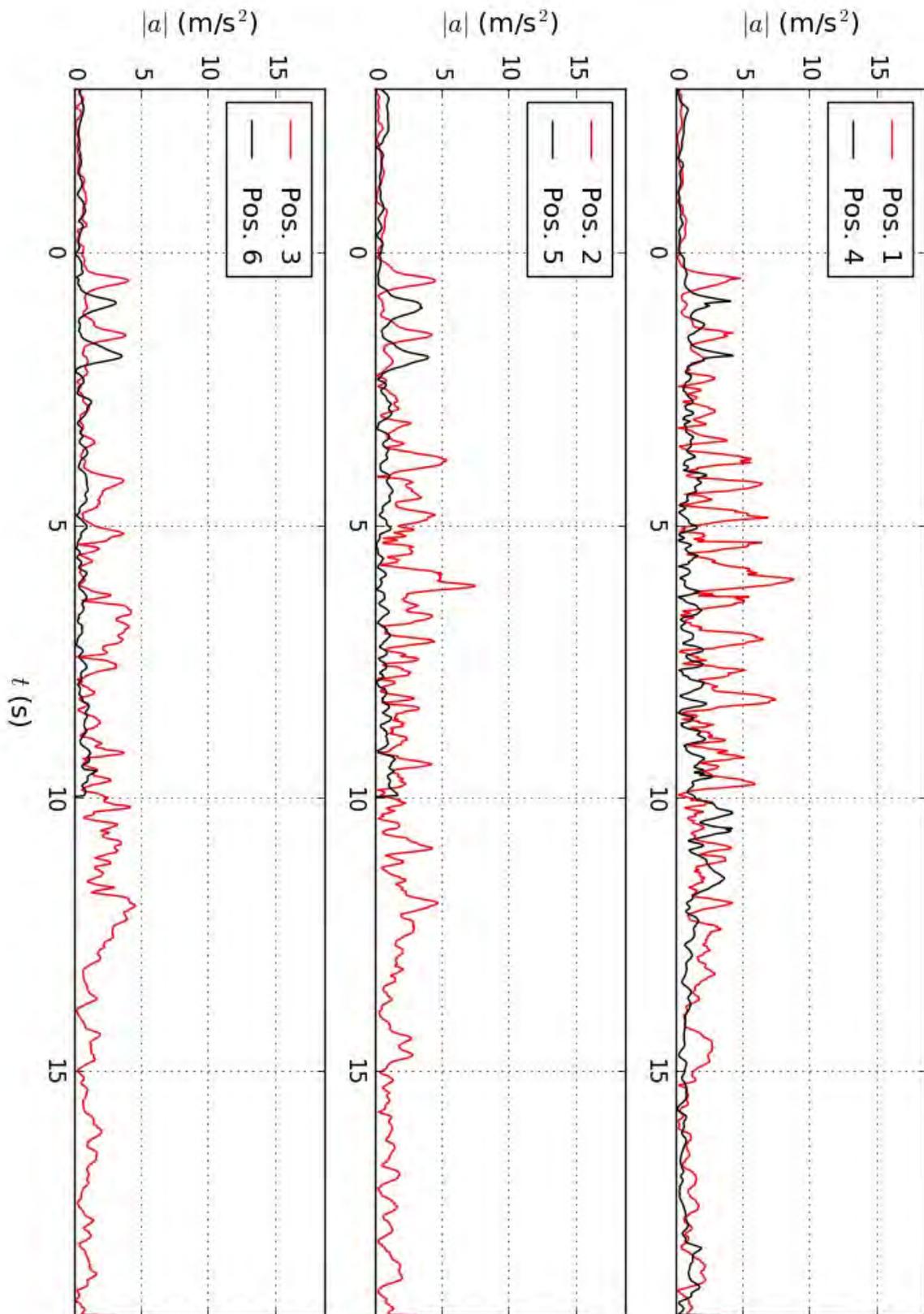


Abbildung C.69: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 10. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0\text{ s}$.

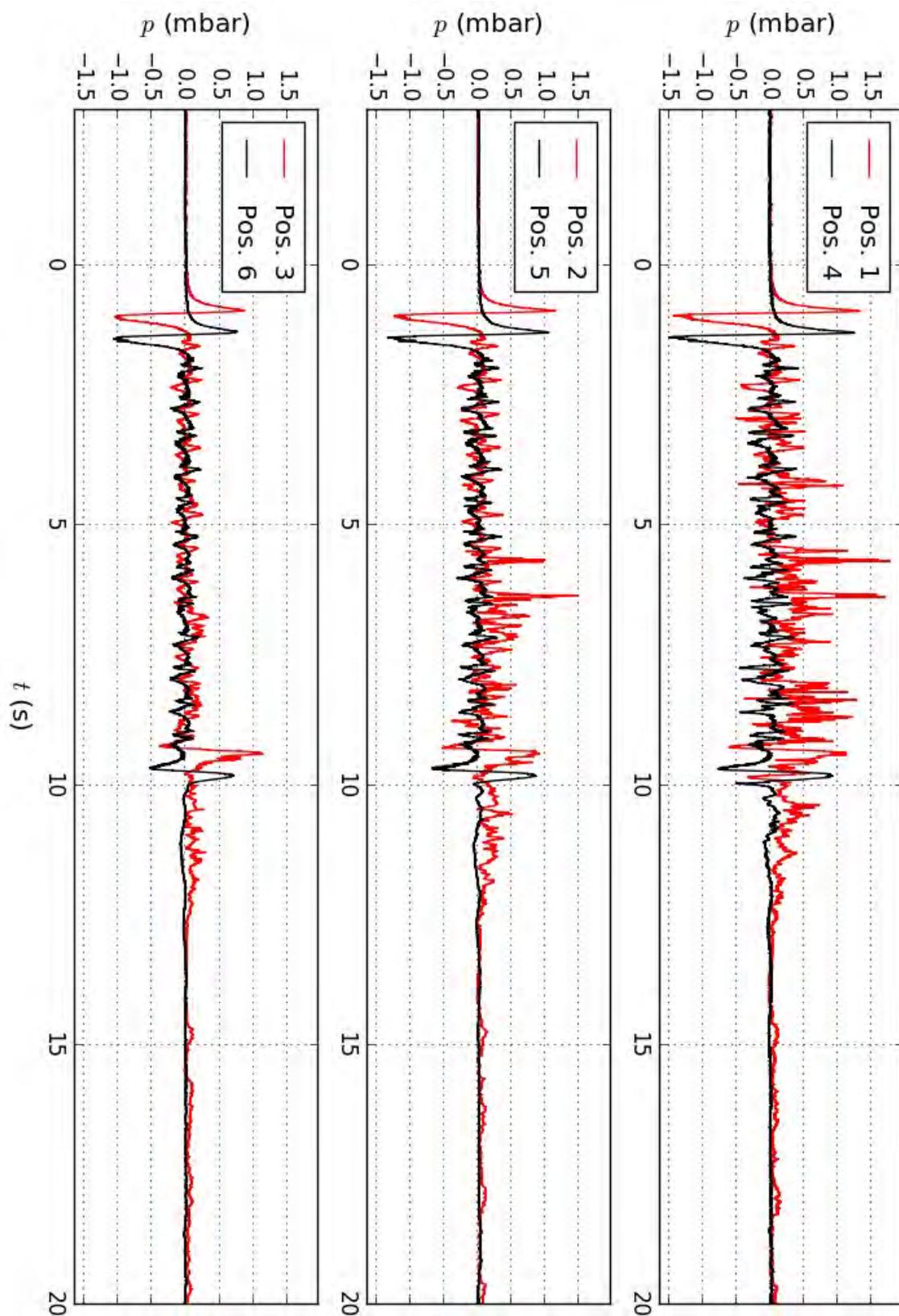


Abbildung C.70: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 10.

Zug 11

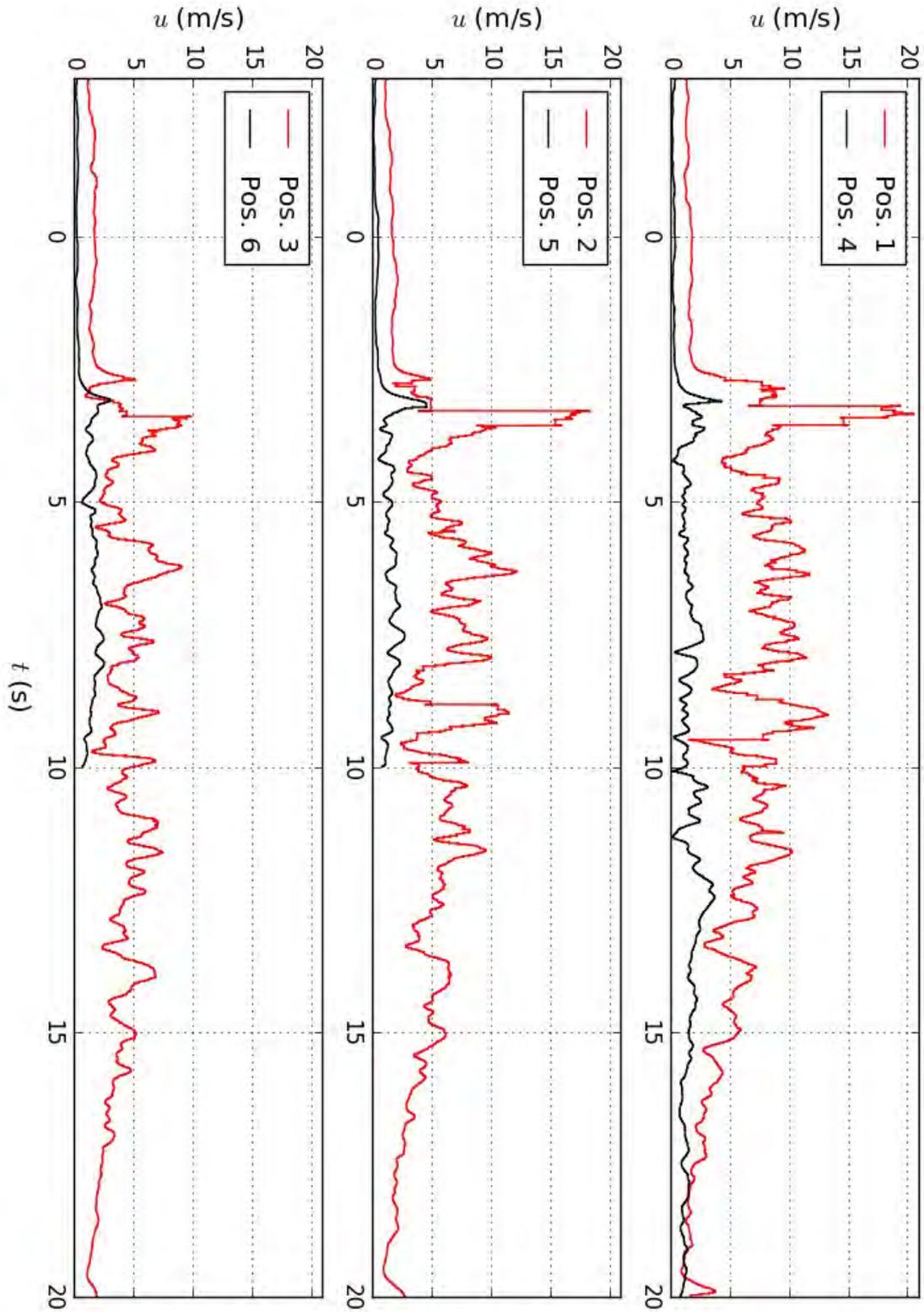


Abbildung C.71: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 11. Messdaten ungefiltert.

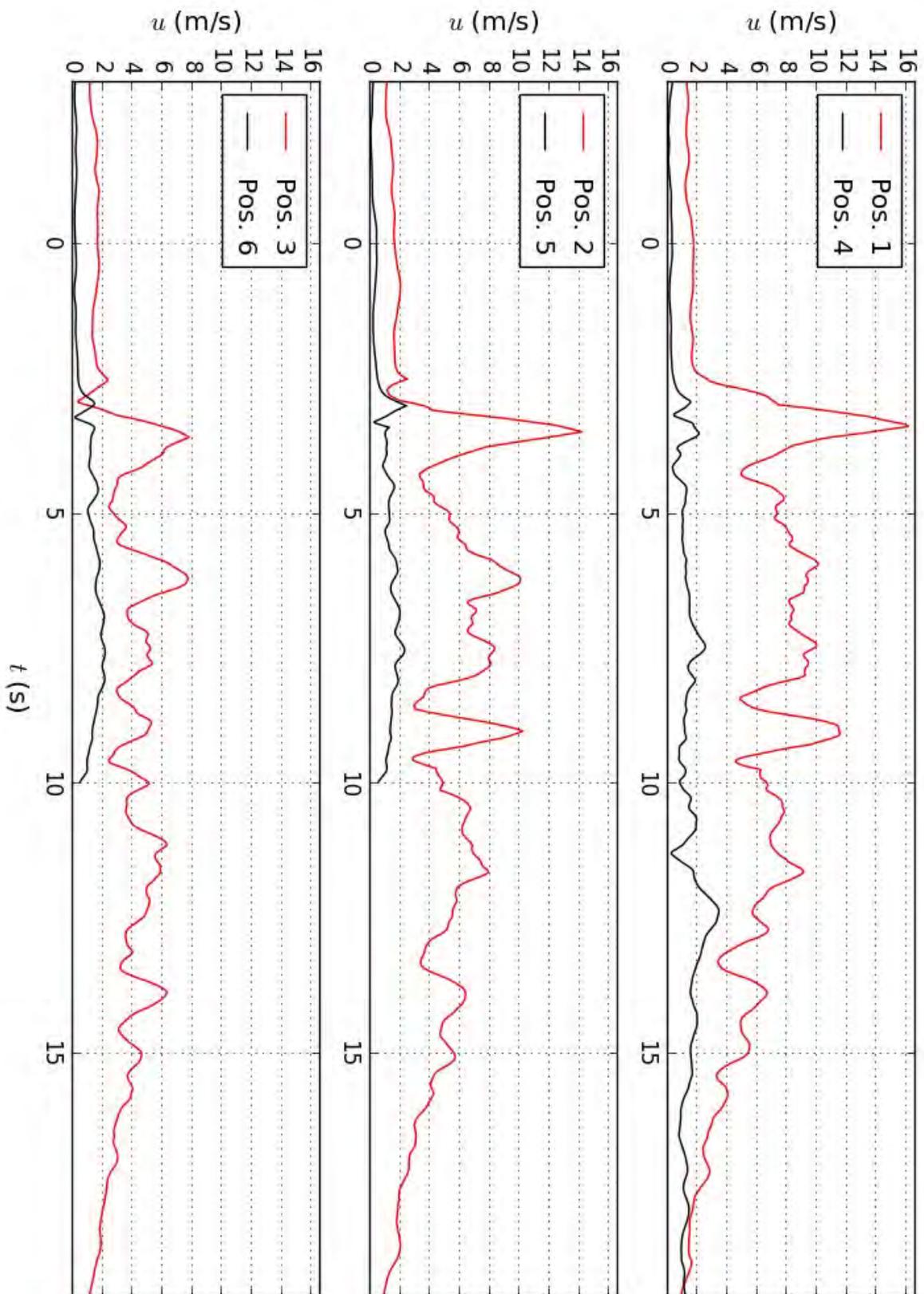


Abbildung C.72: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 11. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

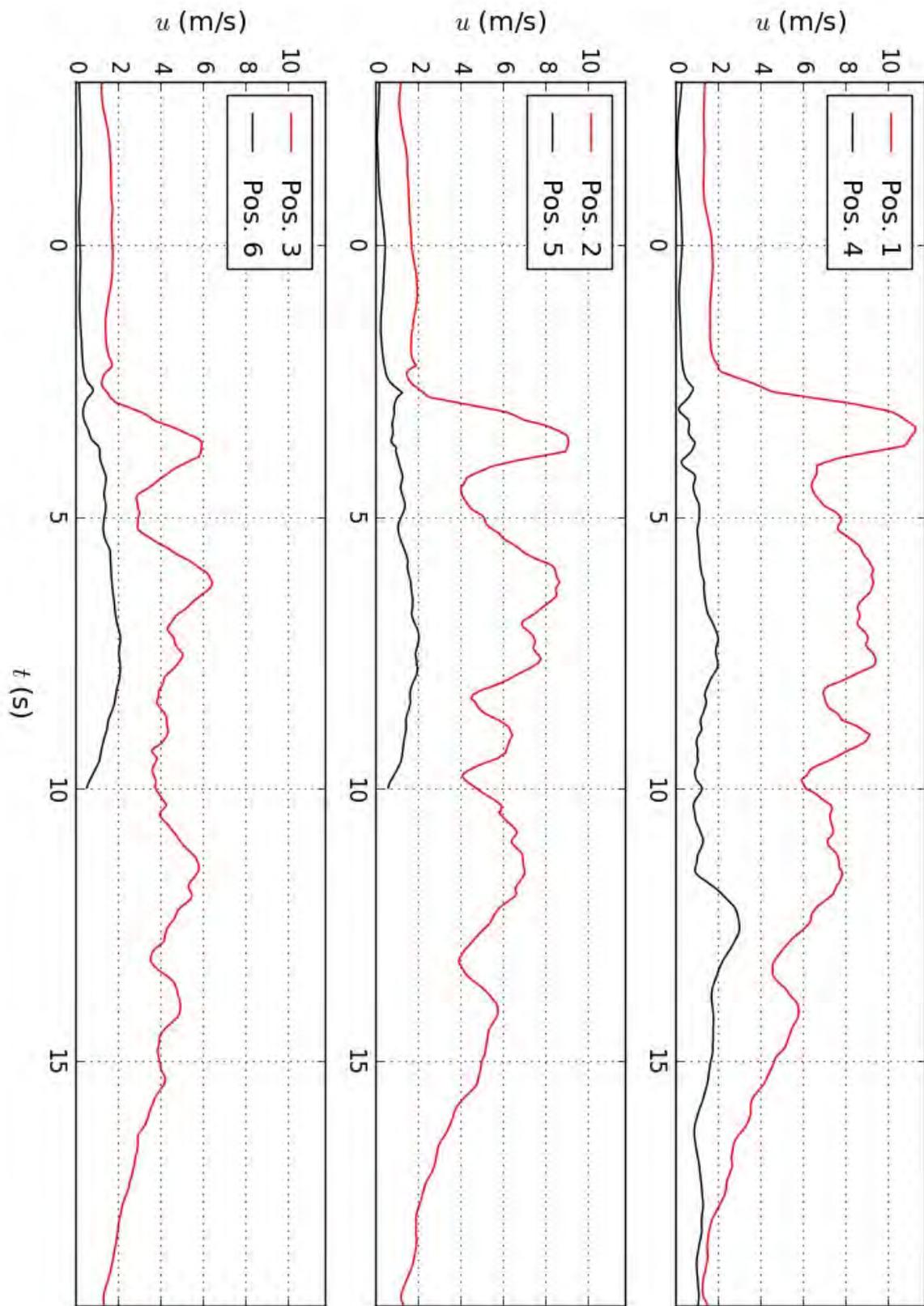


Abbildung C.73: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 11. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

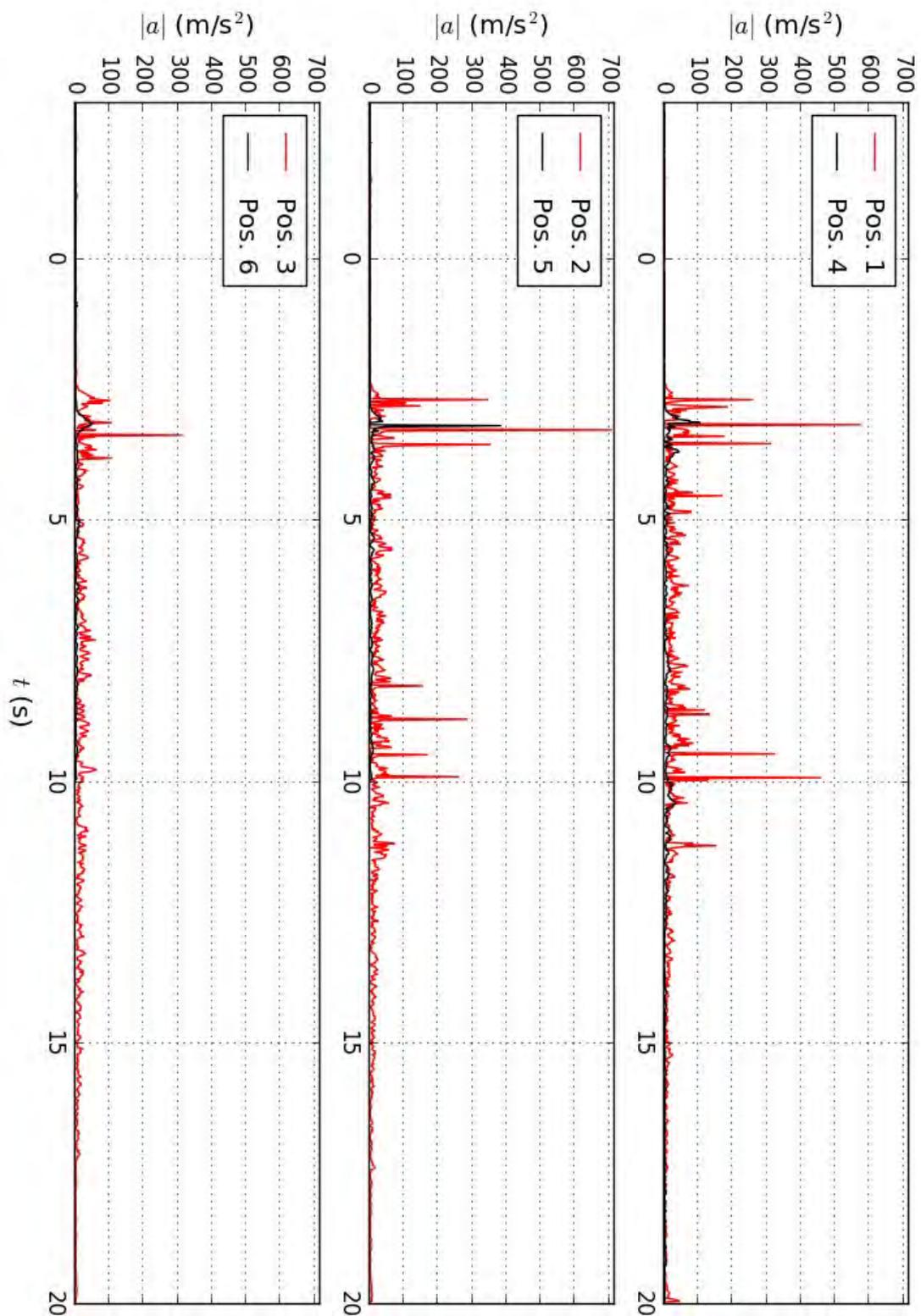


Abbildung C.74: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 11. Messdaten ungefiltert.

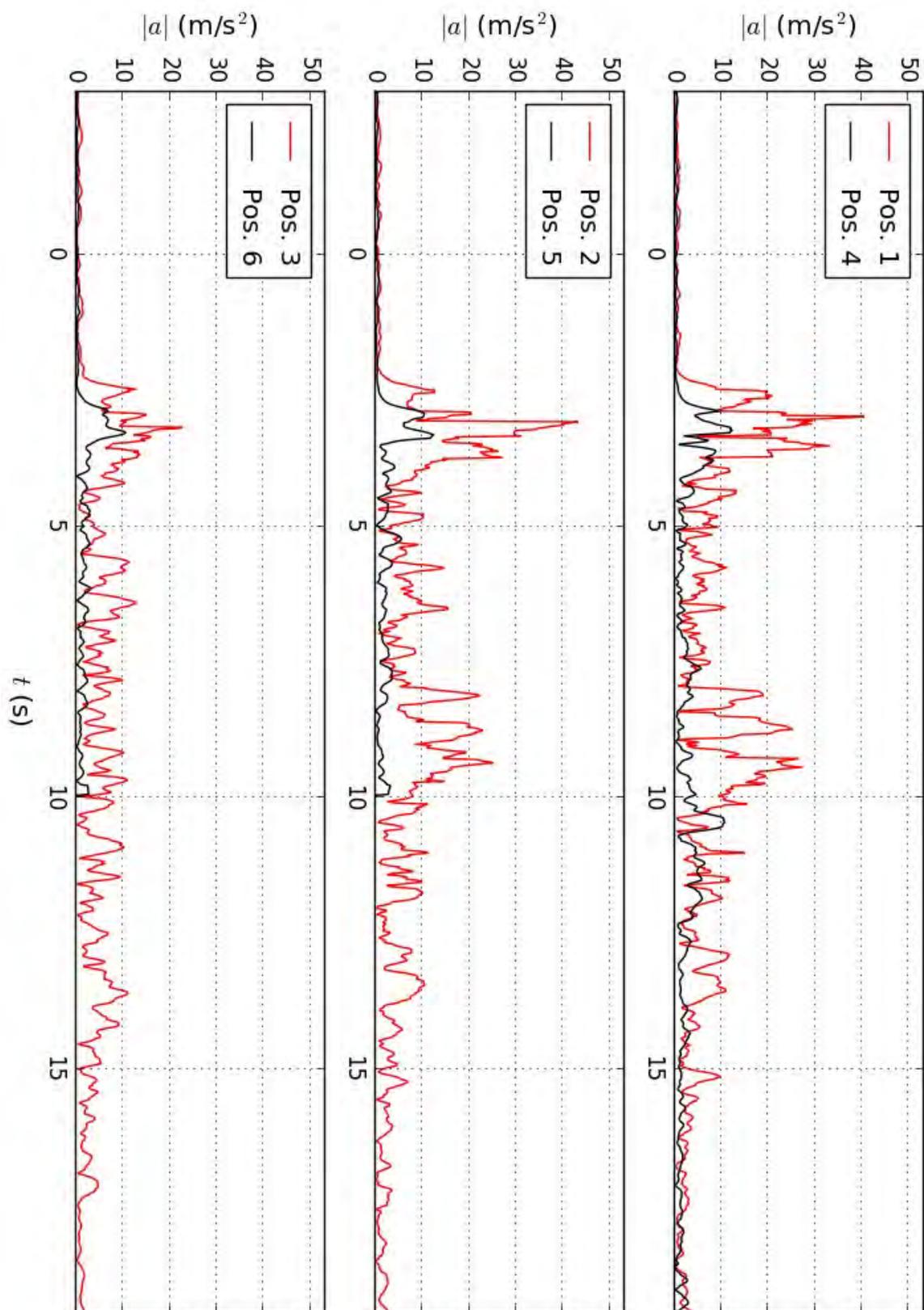


Abbildung C.75: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 11. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

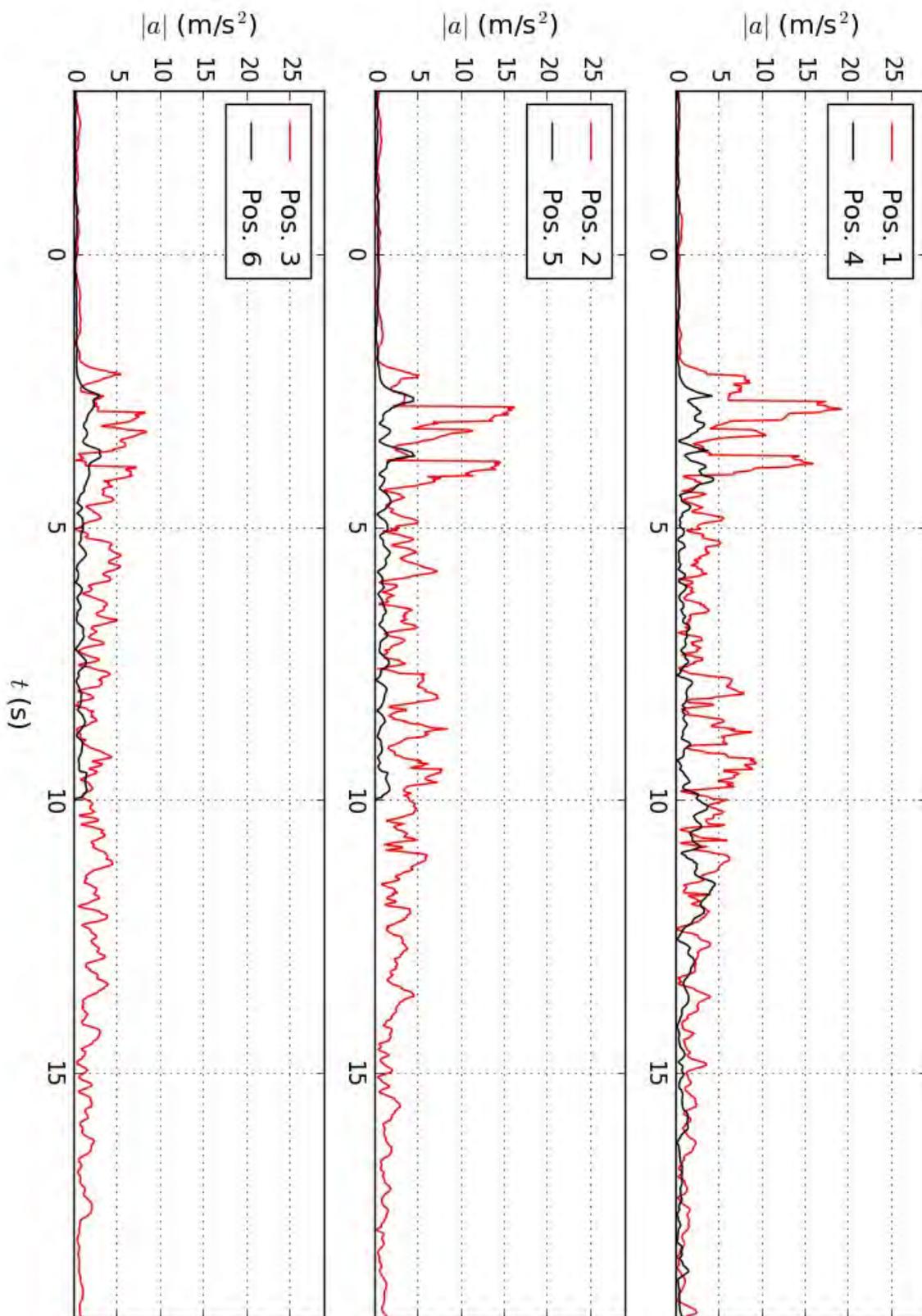


Abbildung C.76: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 11. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0\text{s}$.

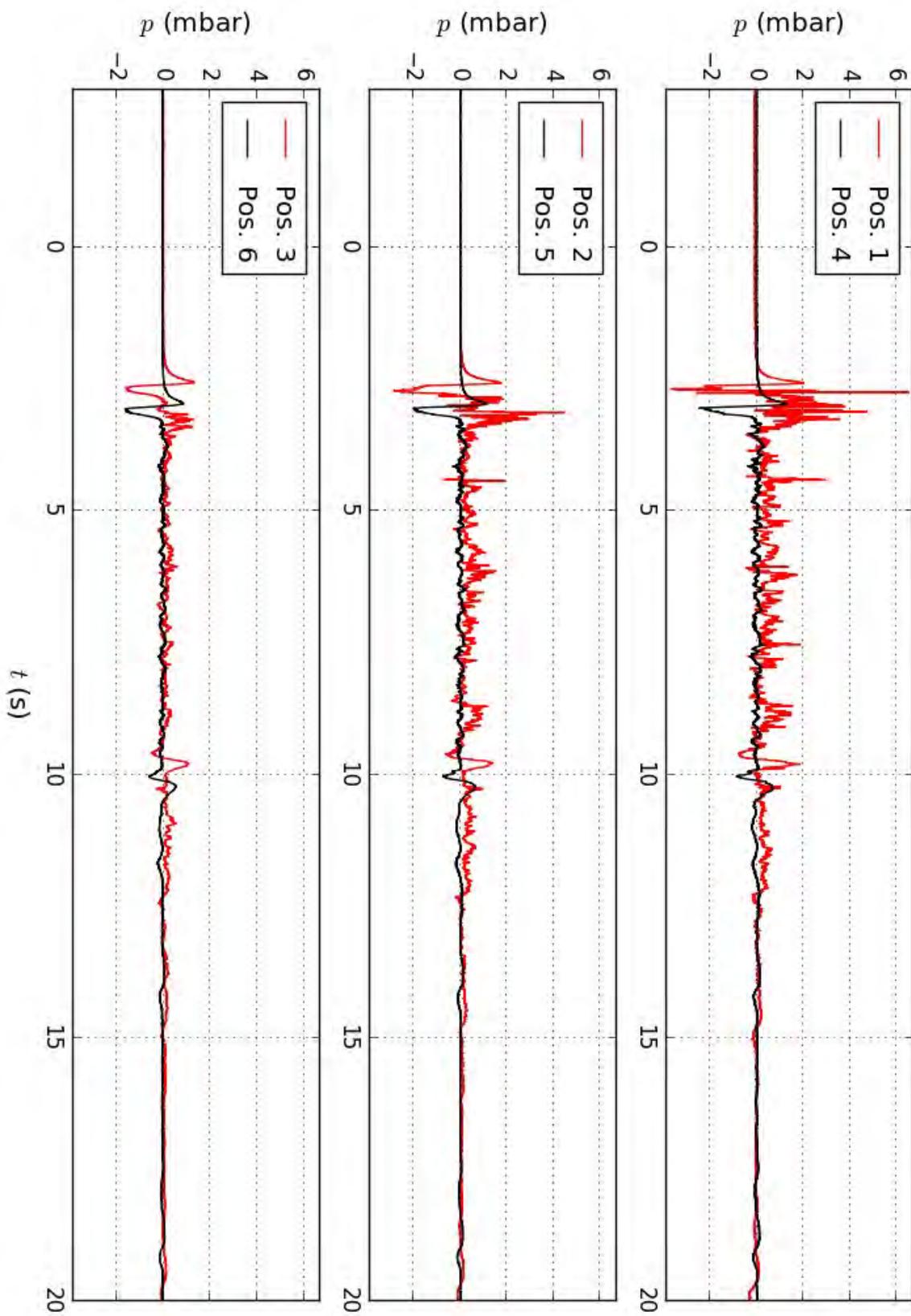


Abbildung C.77: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 11.

Zug 12

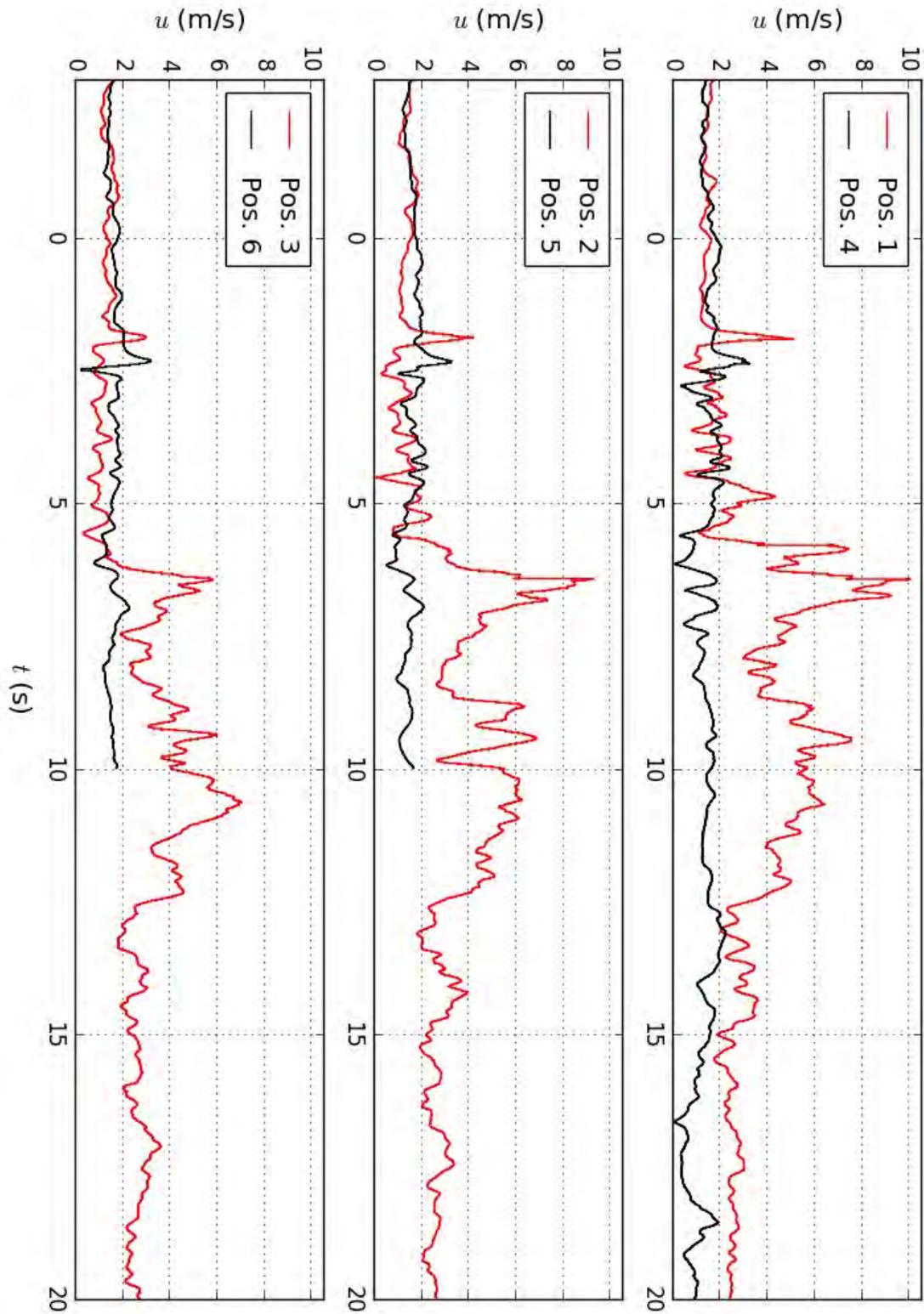


Abbildung C.78: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 12. Messdaten ungefiltert.

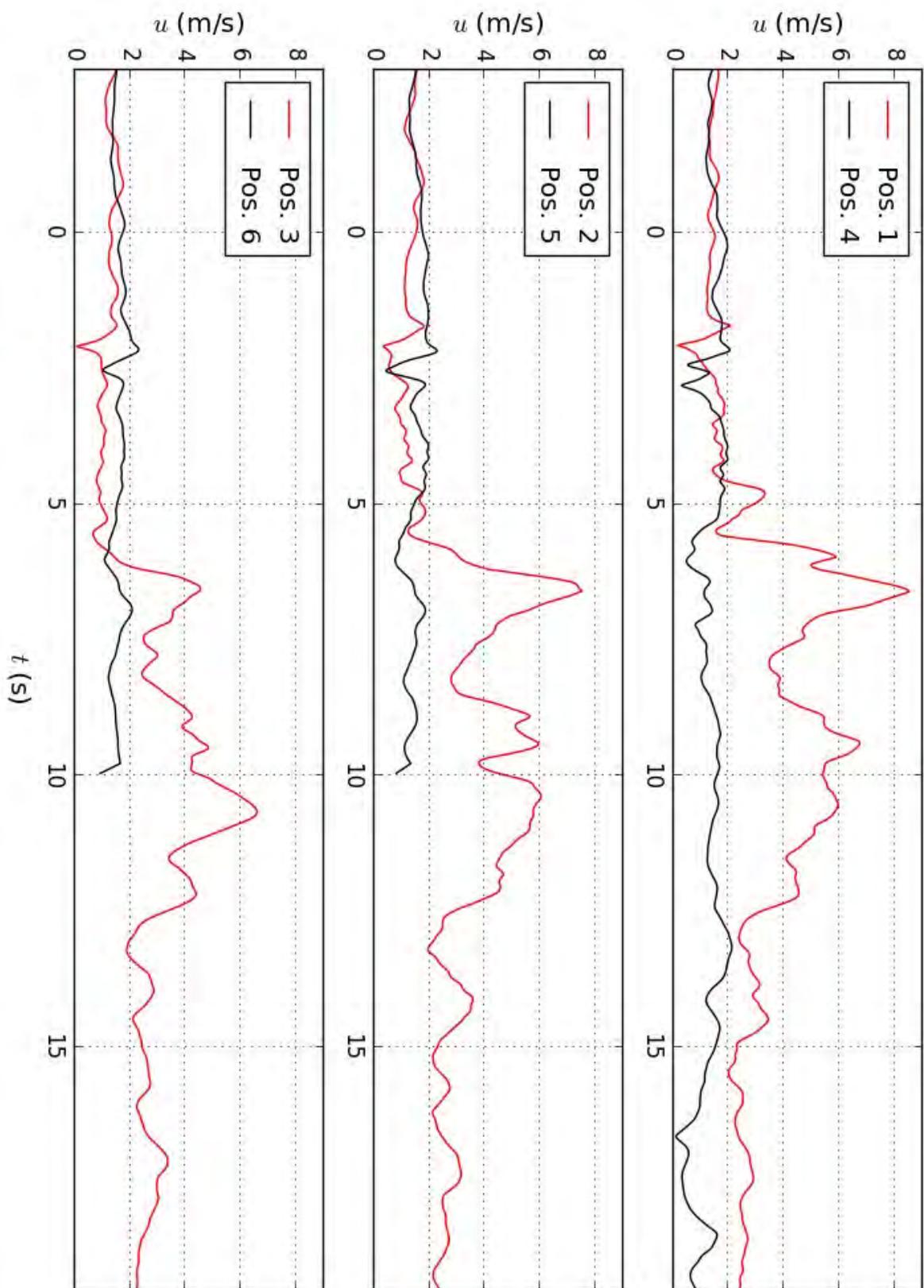


Abbildung C.79: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 12. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

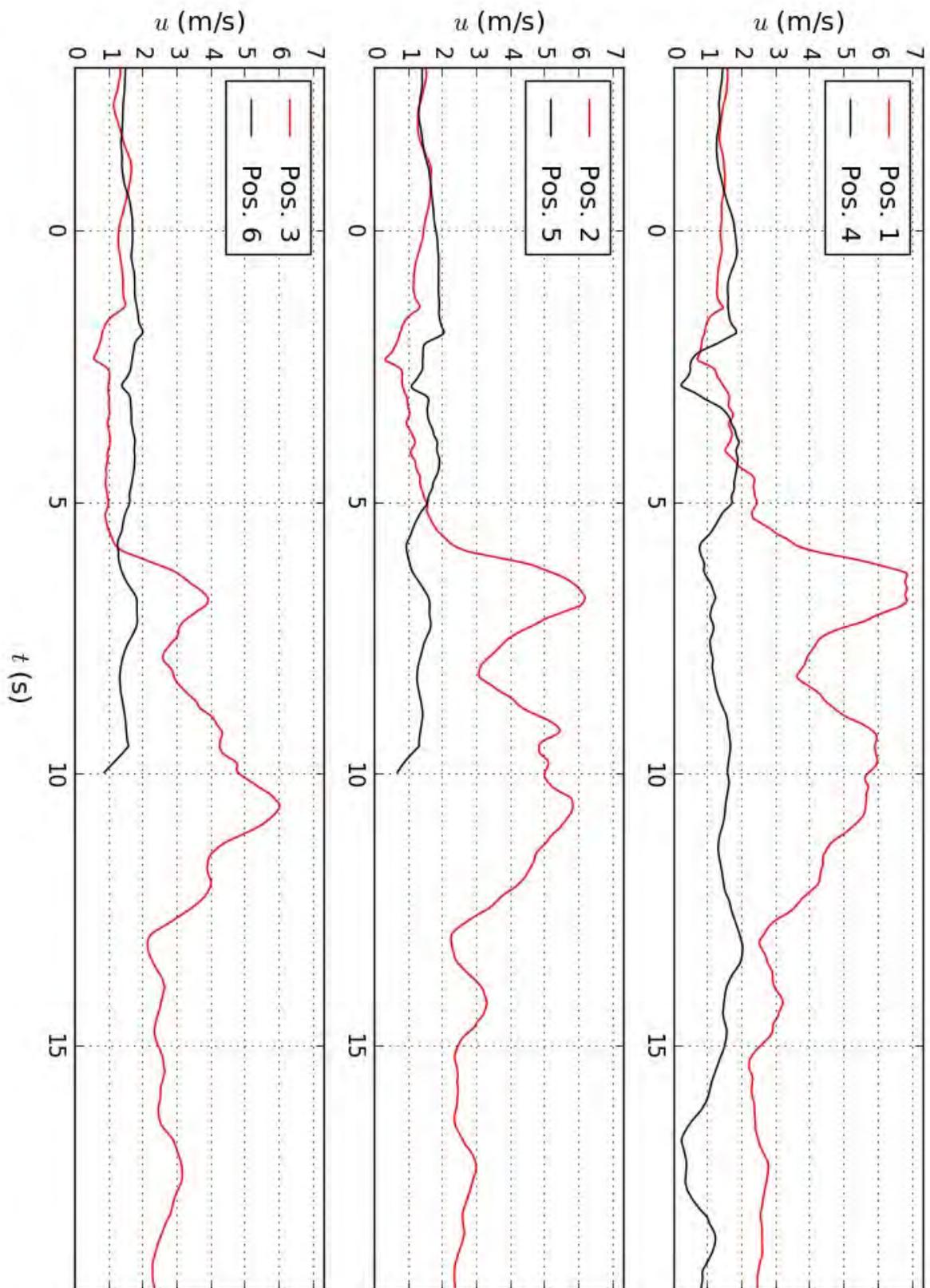


Abbildung C.80: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 12. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

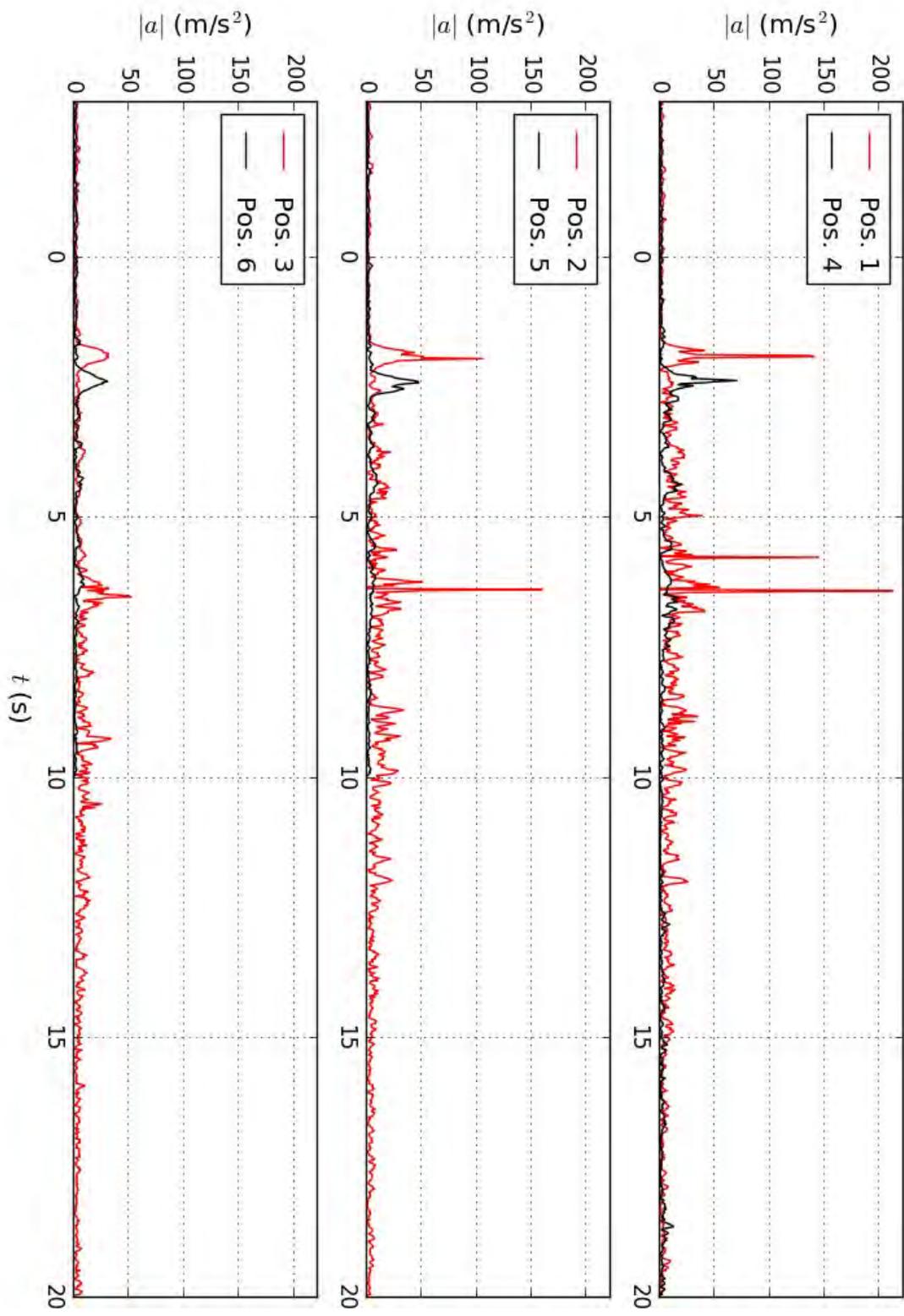


Abbildung C.81: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 12. Messdaten ungefiltert.

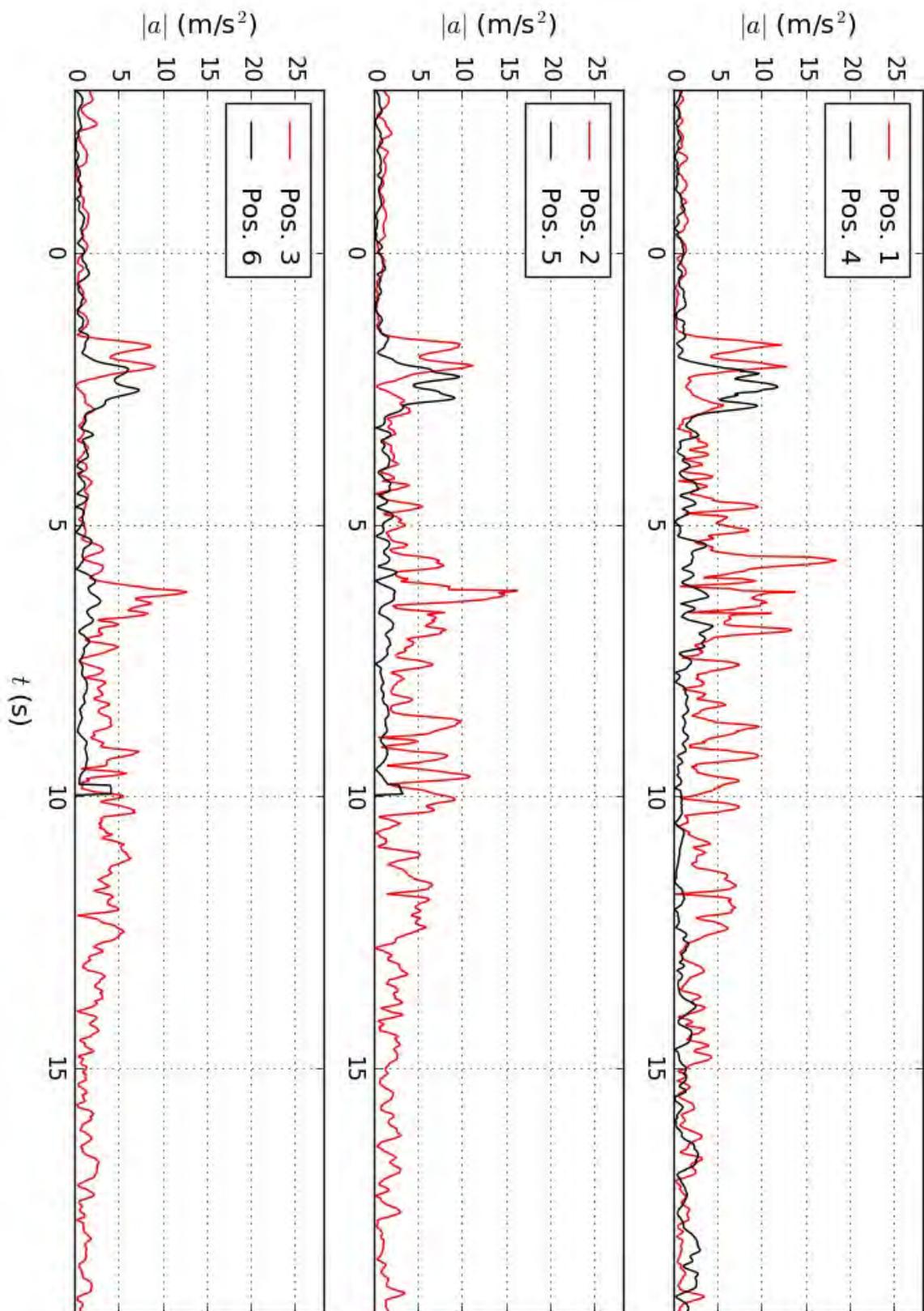


Abbildung C.82: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 12. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4 \text{ s}$.

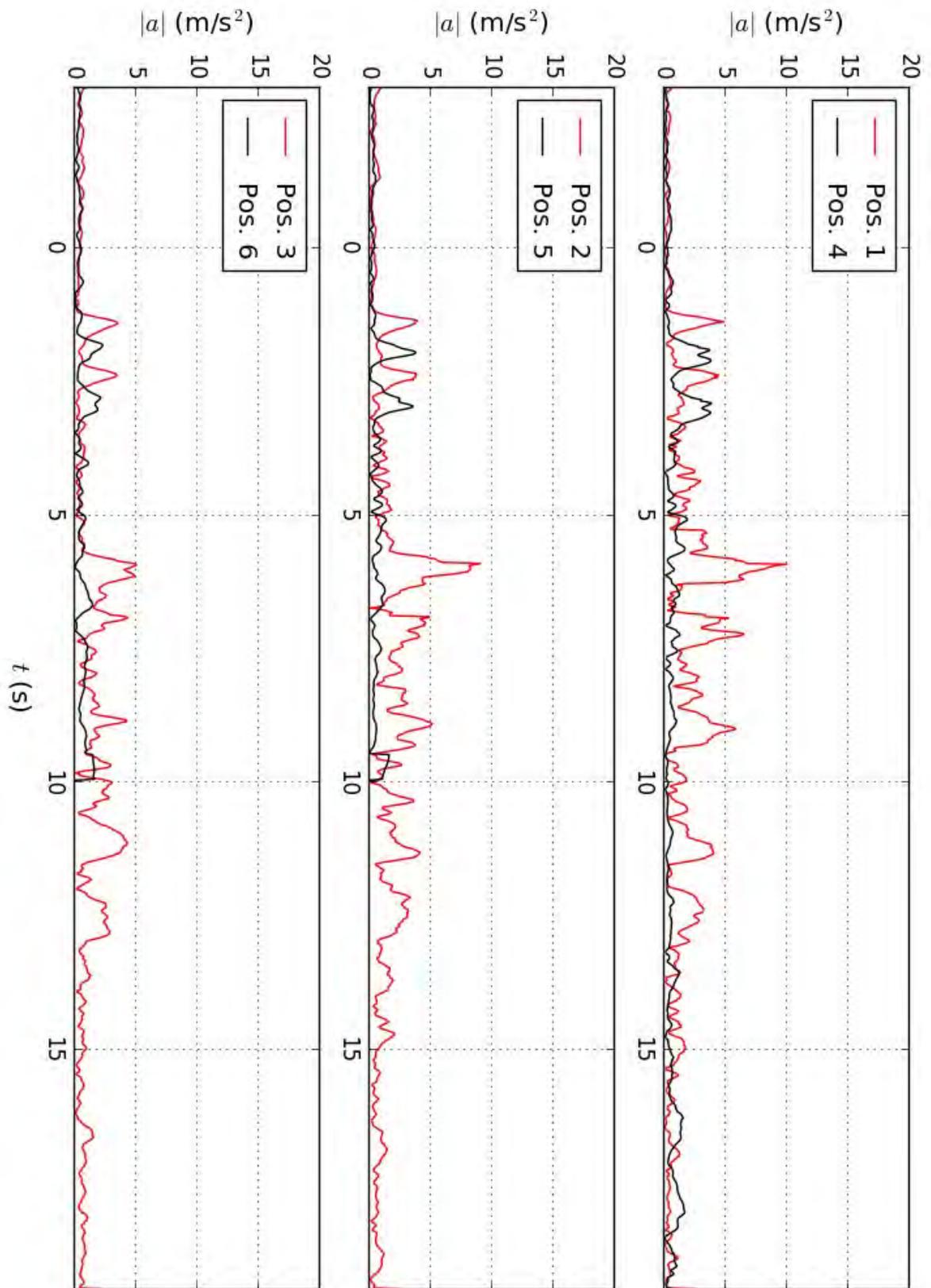


Abbildung C.83: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 12. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0\text{ s}$.

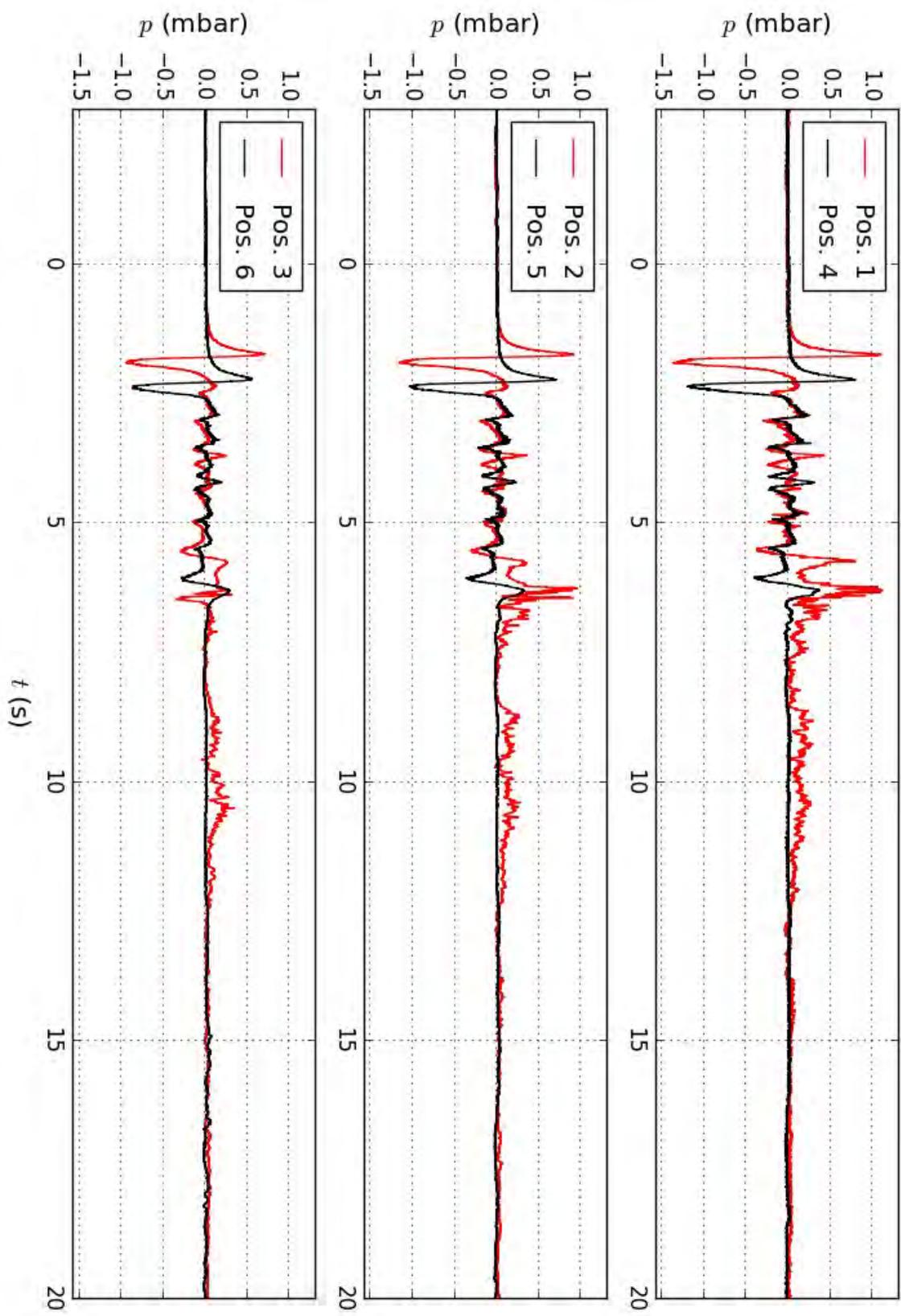


Abbildung C.84: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 12.

Zug 13

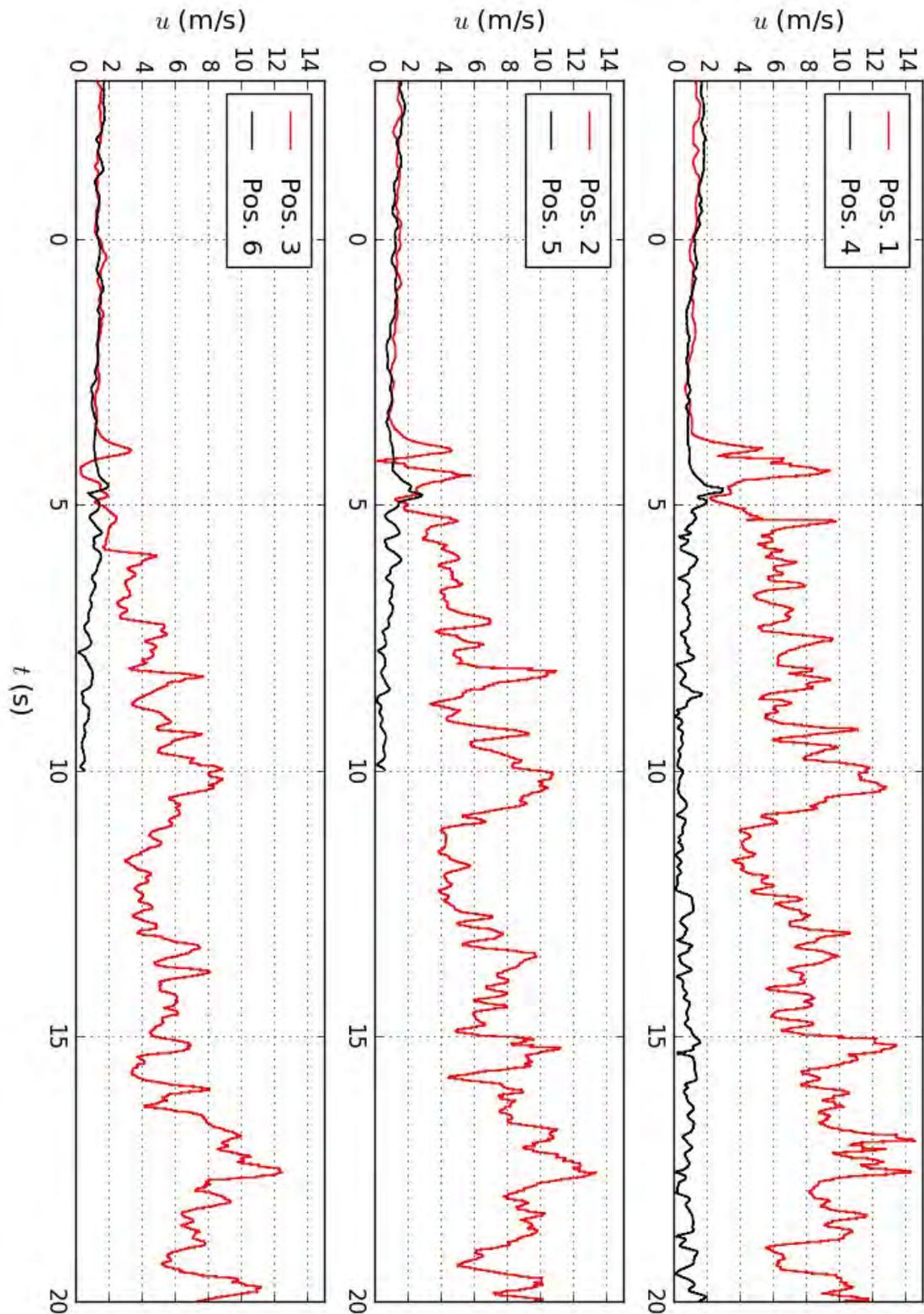


Abbildung C.85: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 13. Messdaten ungefiltert.

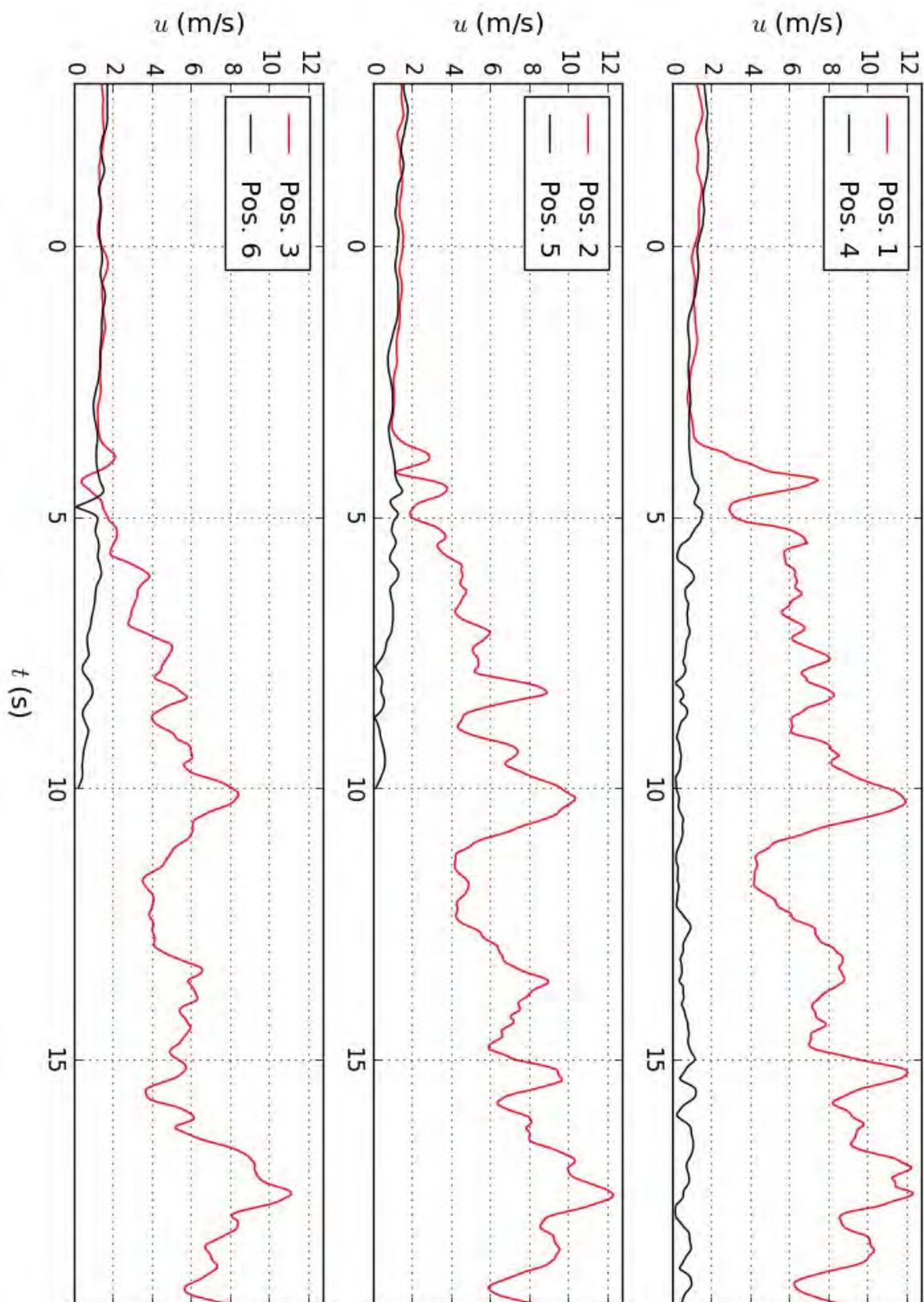


Abbildung C.86: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 13. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

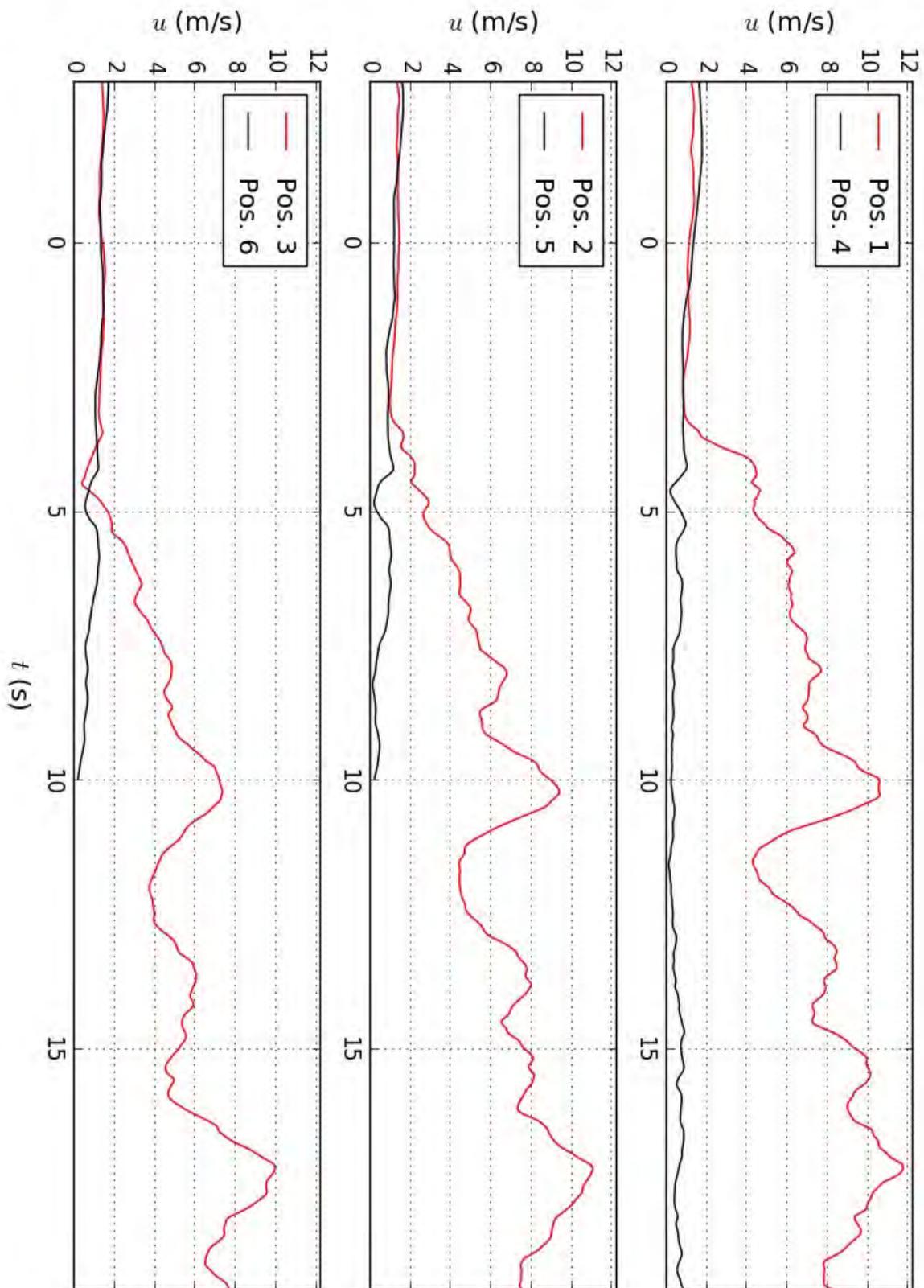


Abbildung C.87: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 13. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

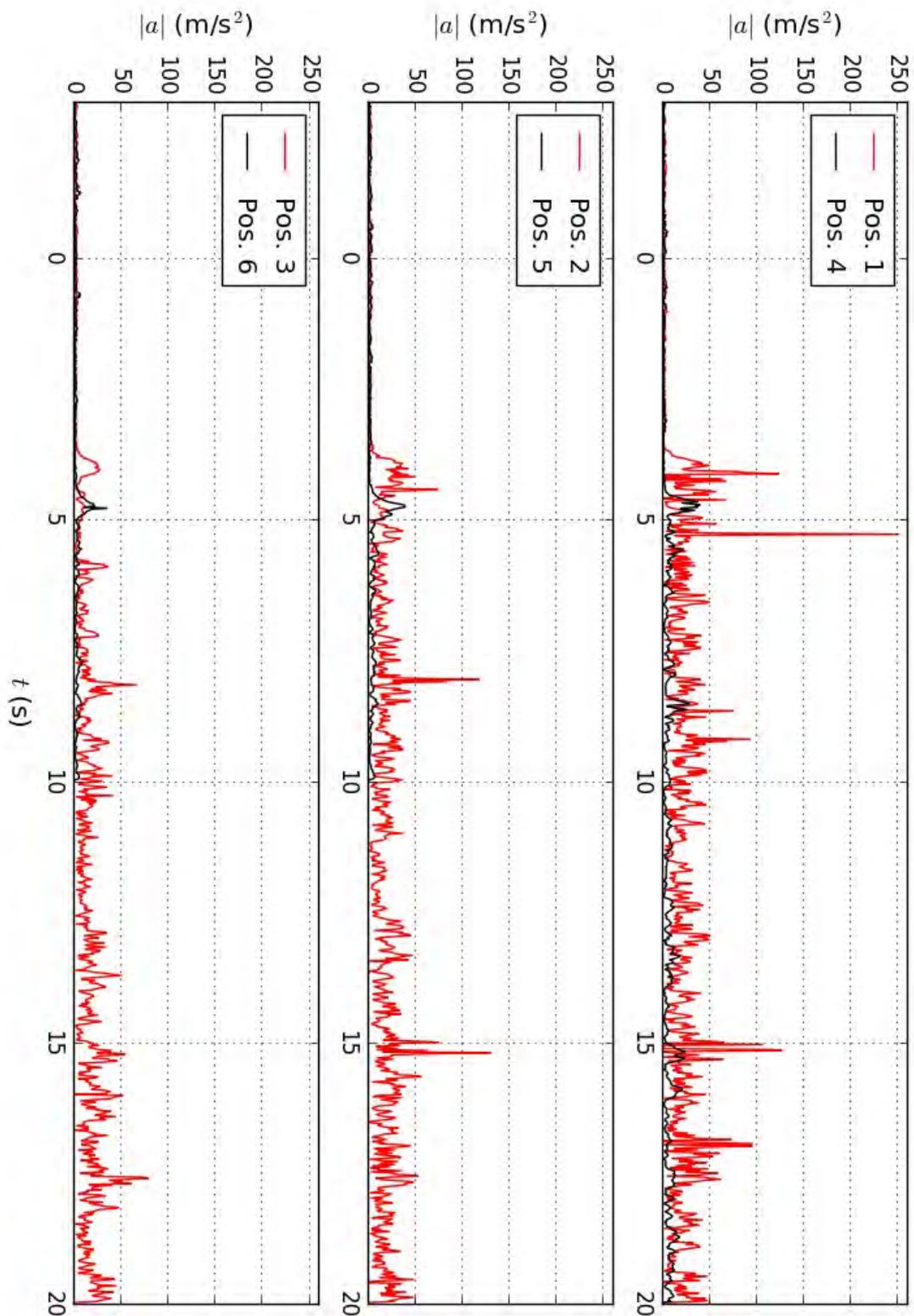


Abbildung C.88: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 13. Messdaten ungefiltert.

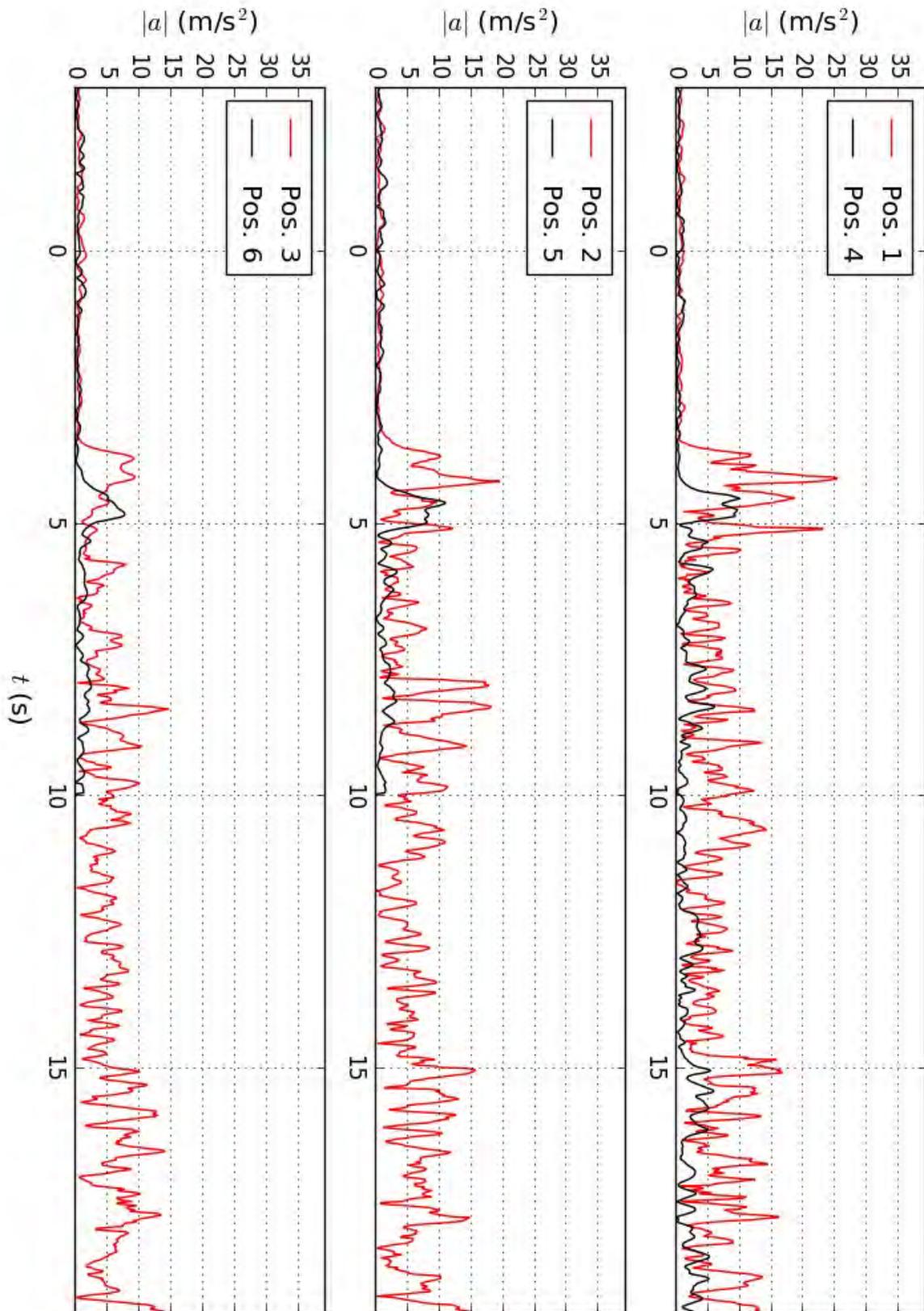


Abbildung C.89: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 13. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

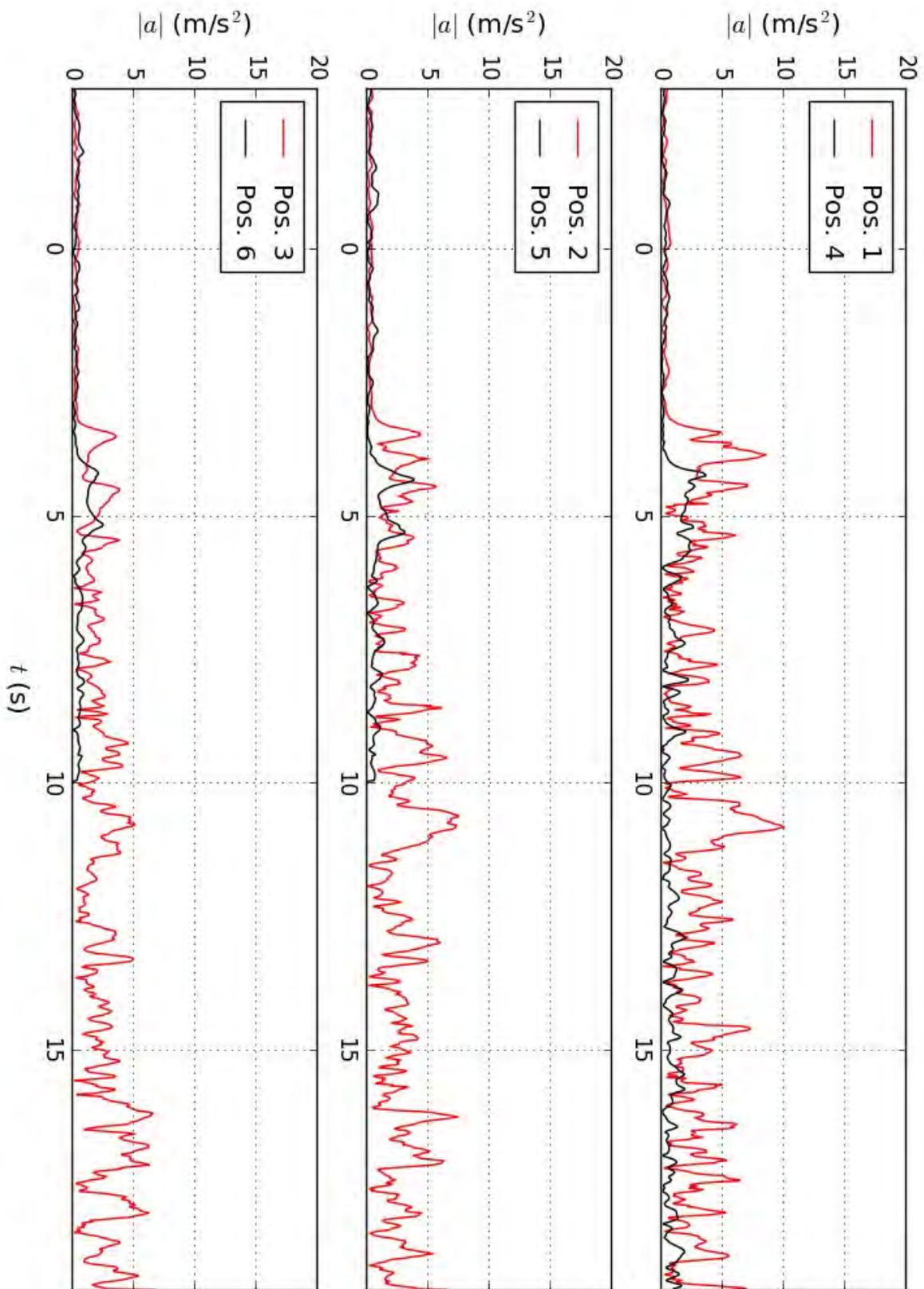


Abbildung C.90: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 13. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

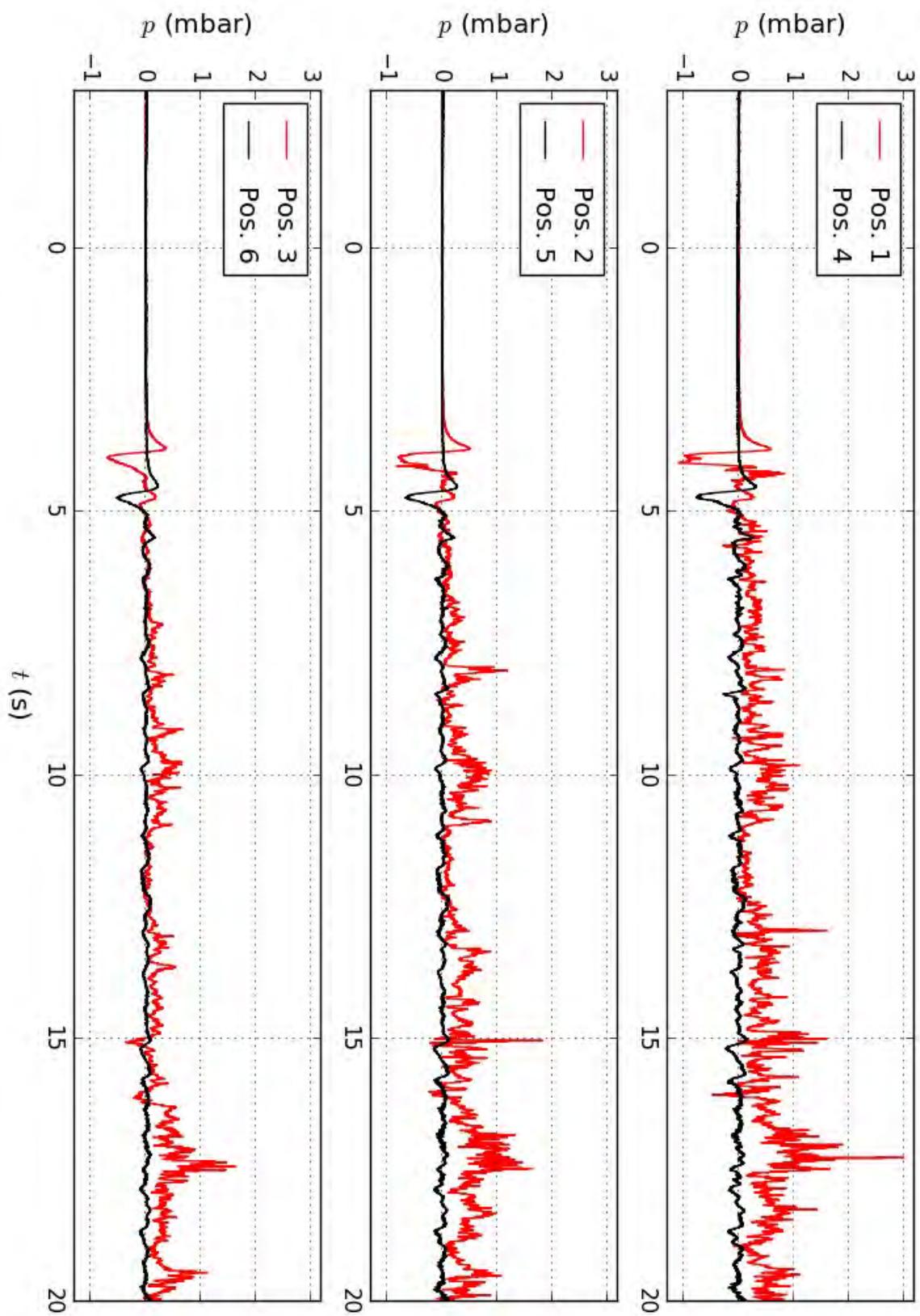


Abbildung C.91: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 13.

Zug 14

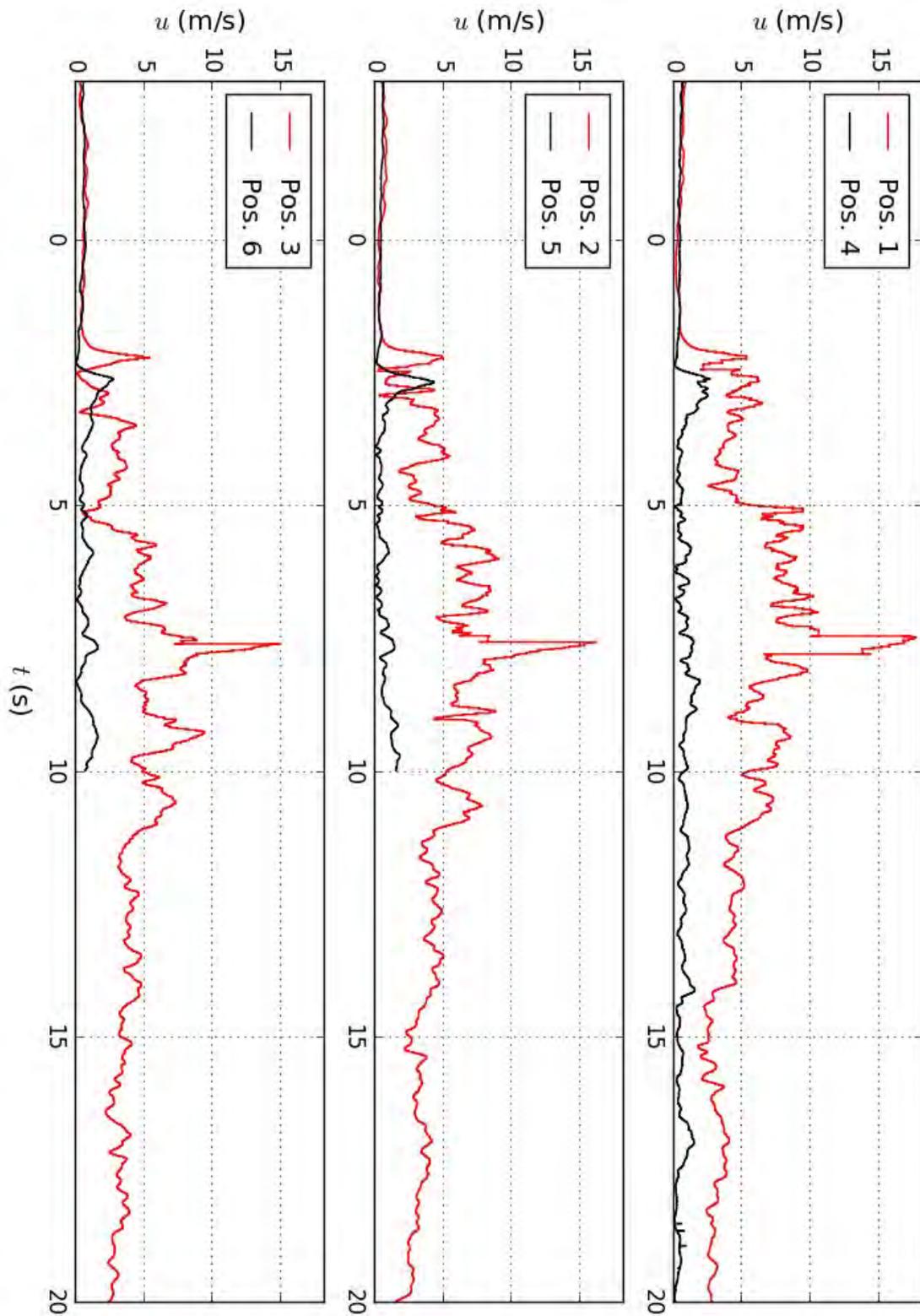


Abbildung C.92: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 14. Messdaten ungefiltert.

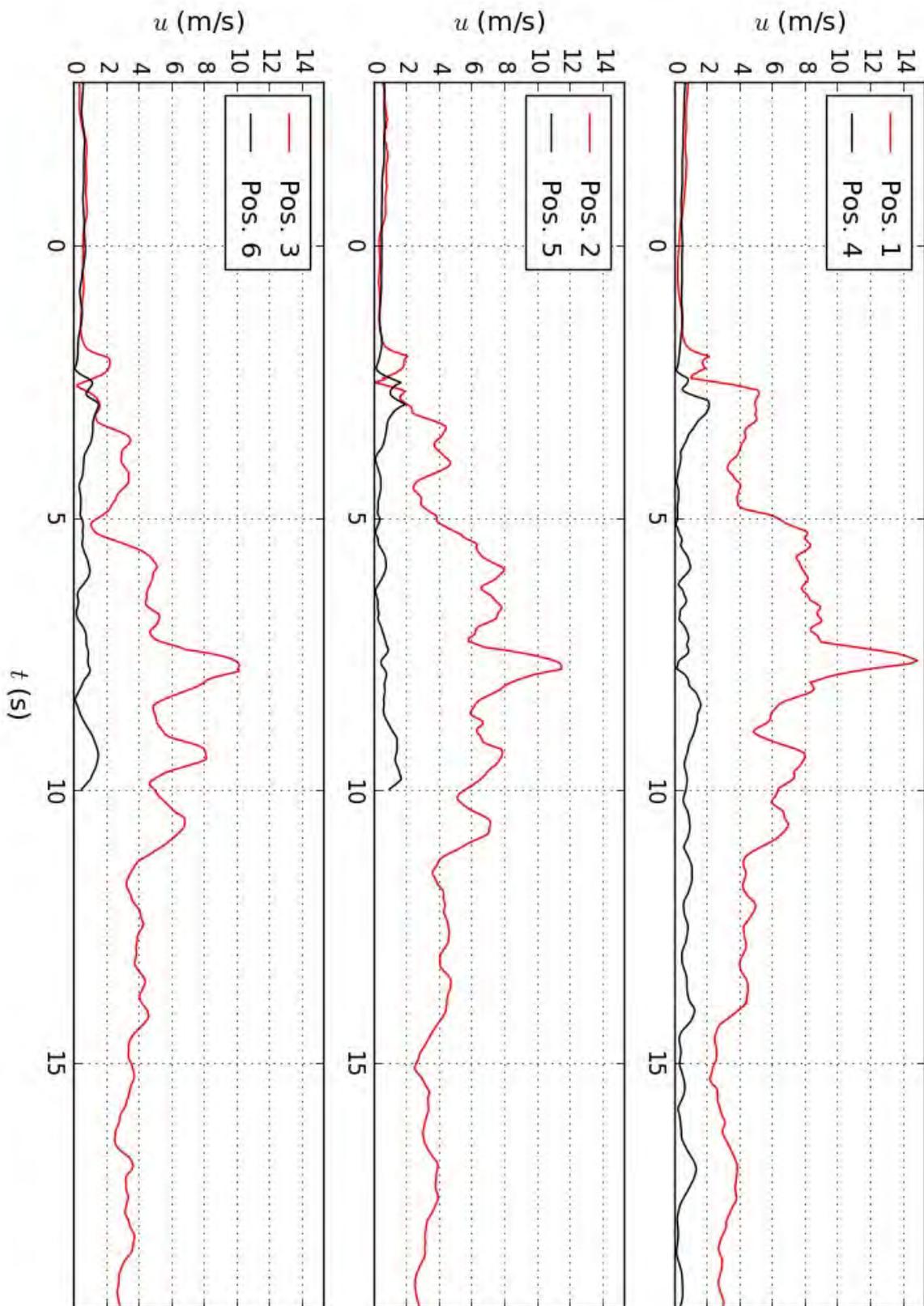


Abbildung C.93: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 14. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

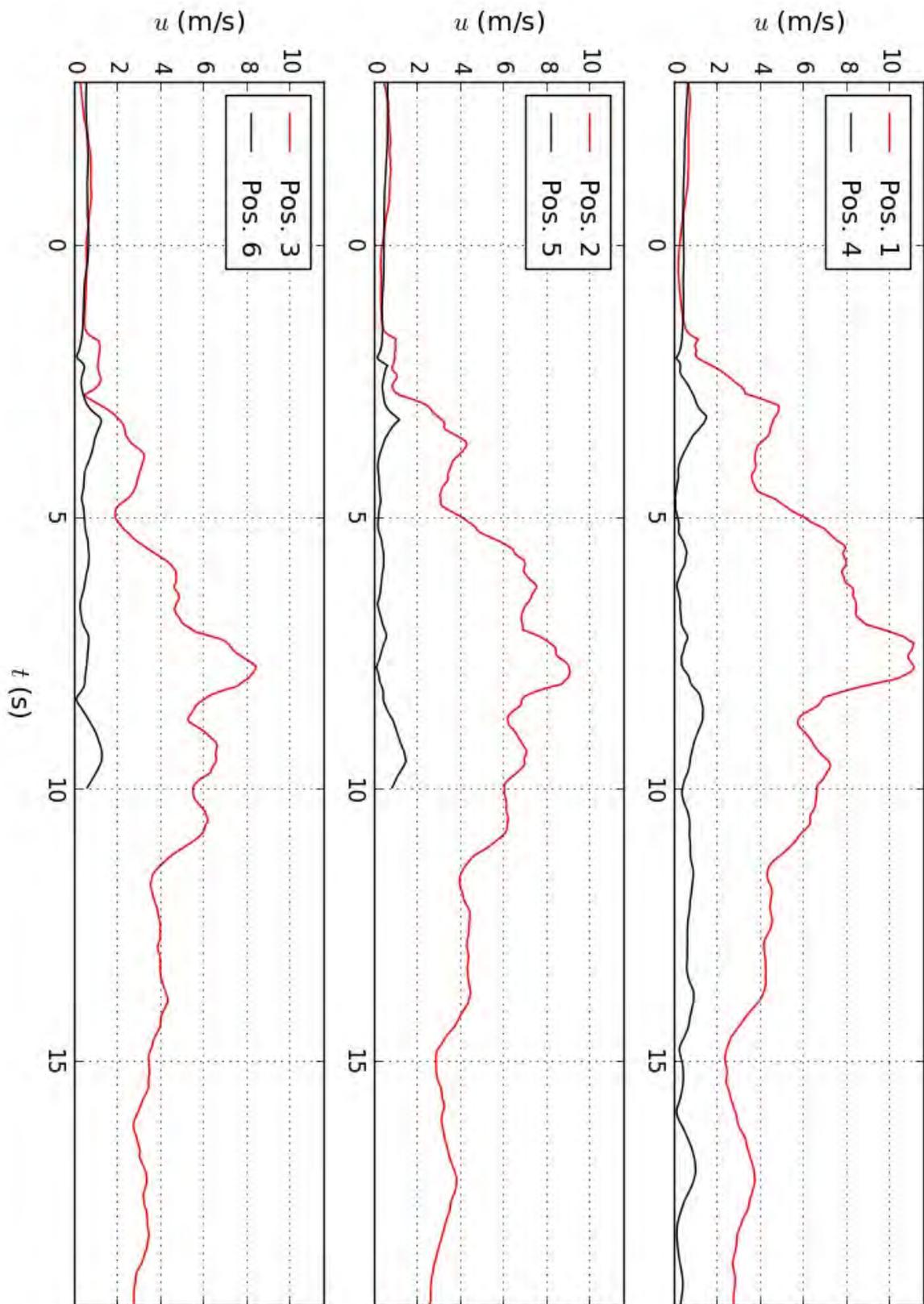


Abbildung C.94: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 14. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

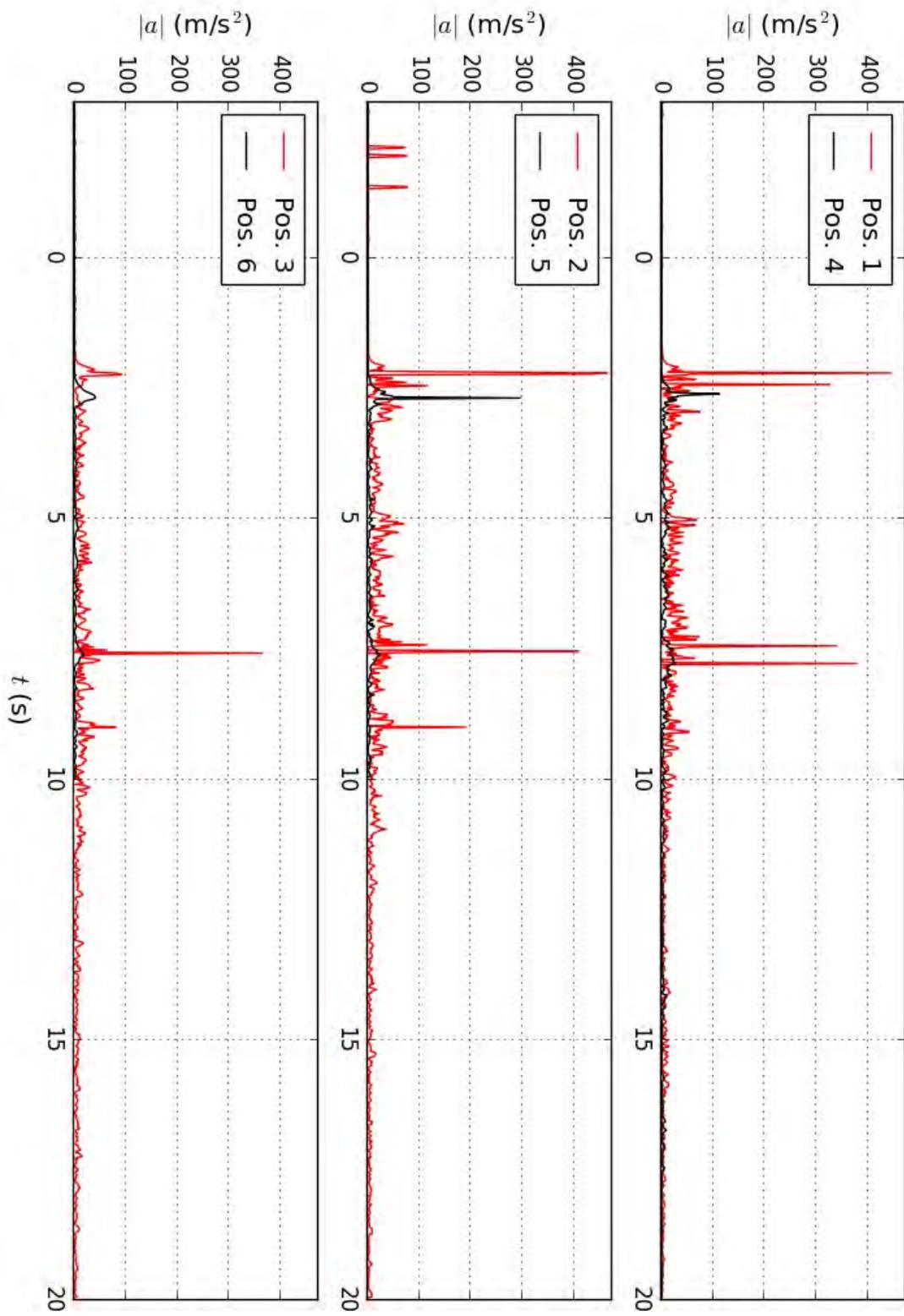


Abbildung C.95: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 14. Messdaten ungefiltert.

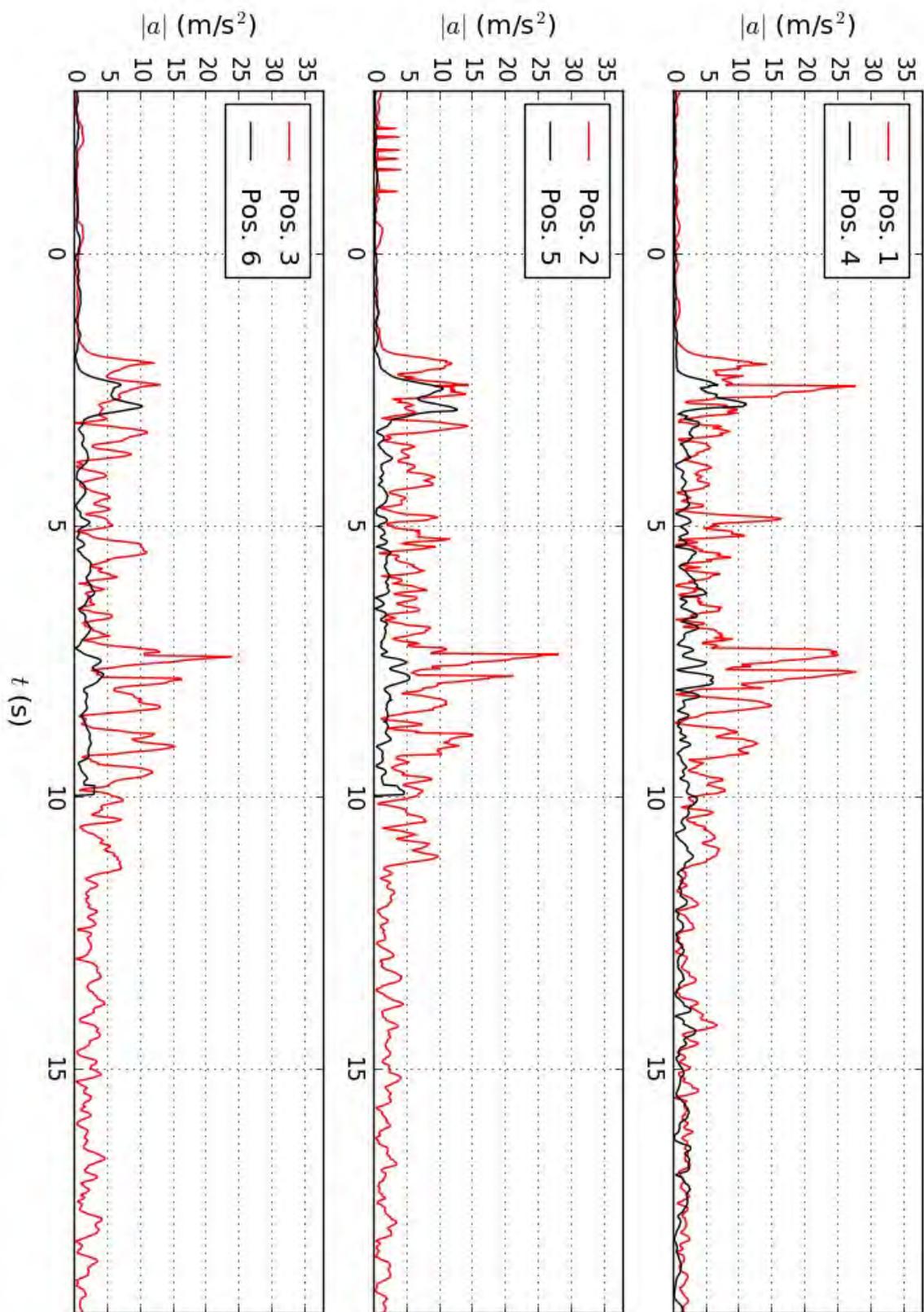


Abbildung C.96: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 14. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4\text{s}$.

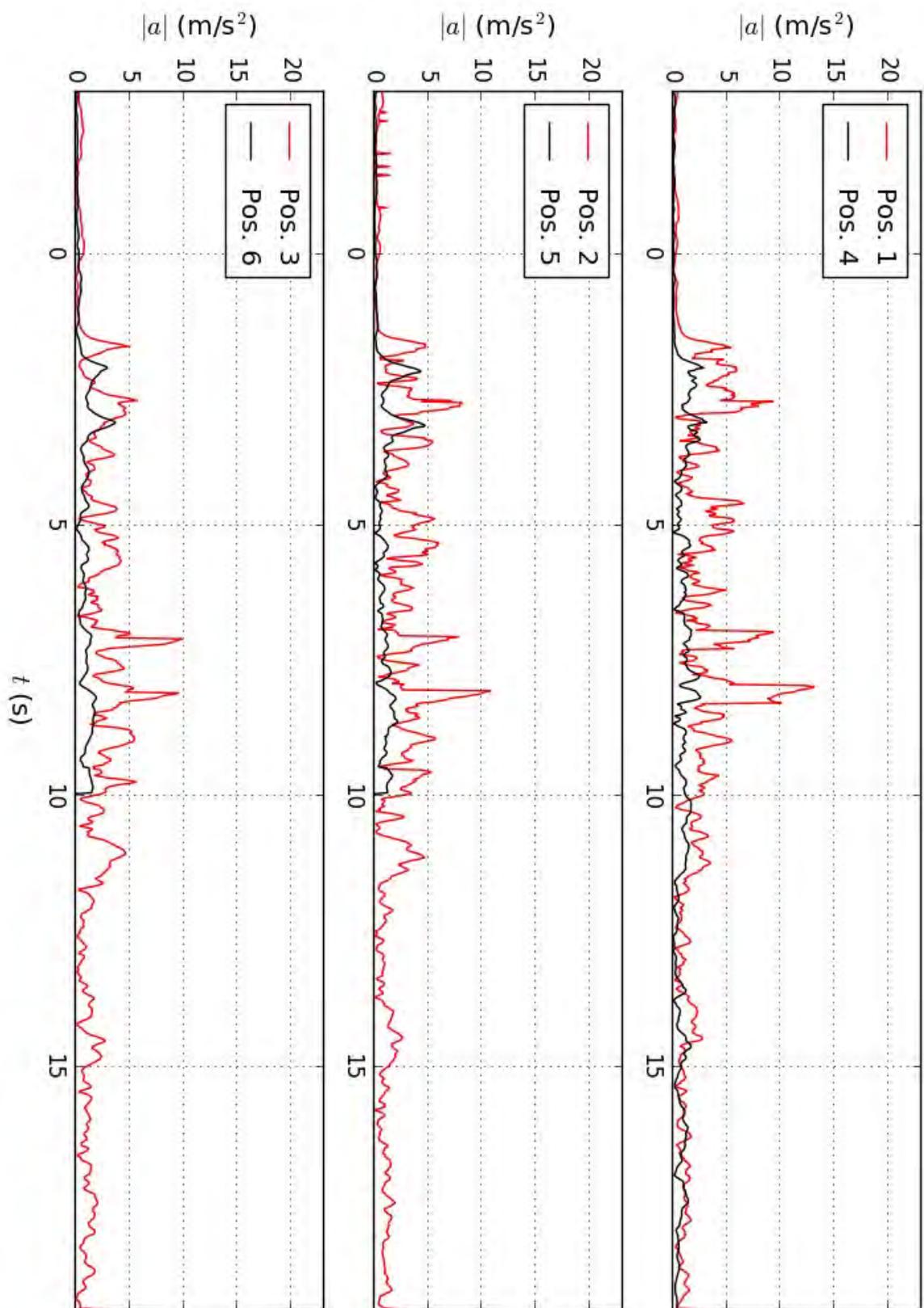


Abbildung C.97: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 14. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0\text{s}$.

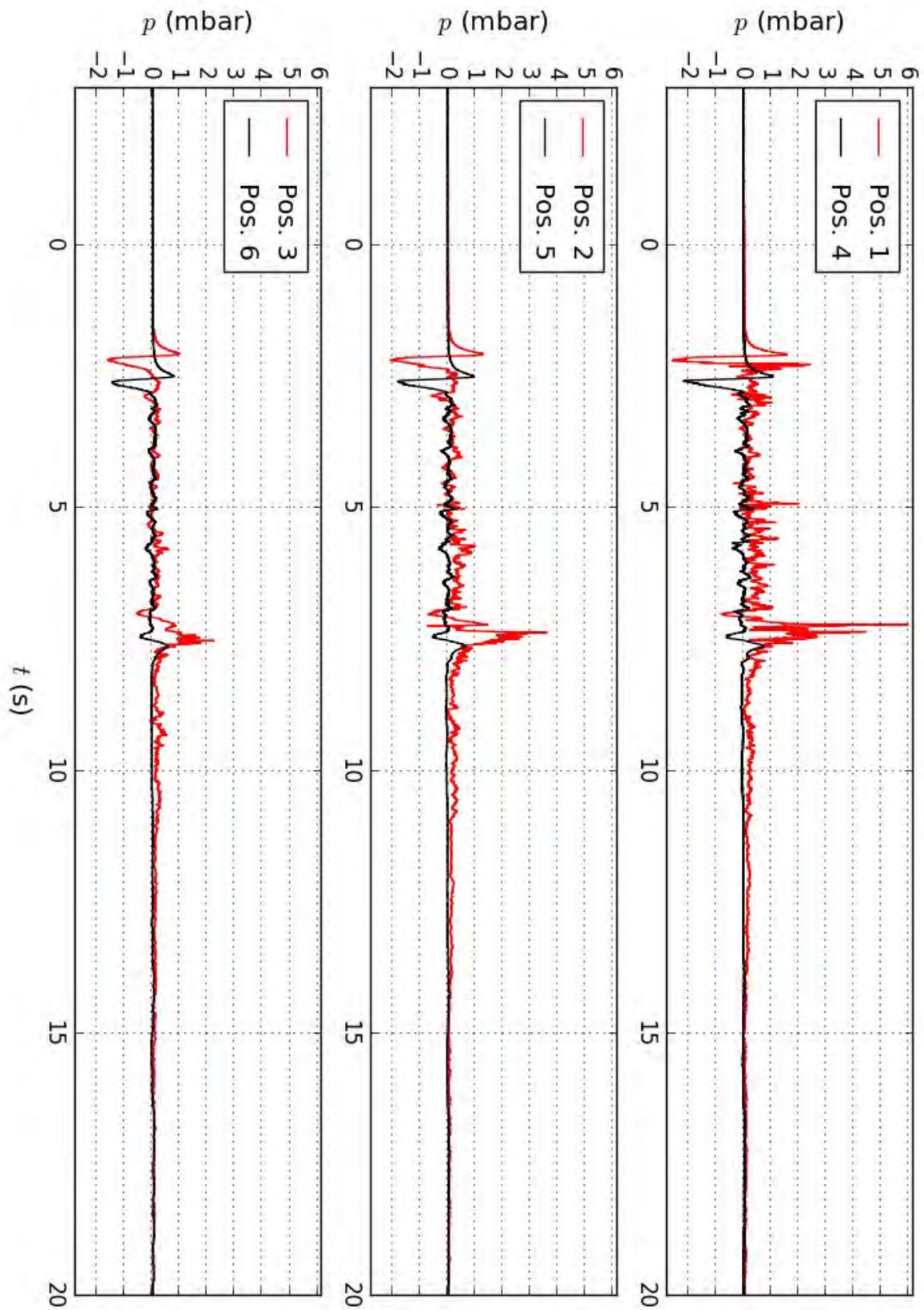


Abbildung C.98: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 14.

Zug 15

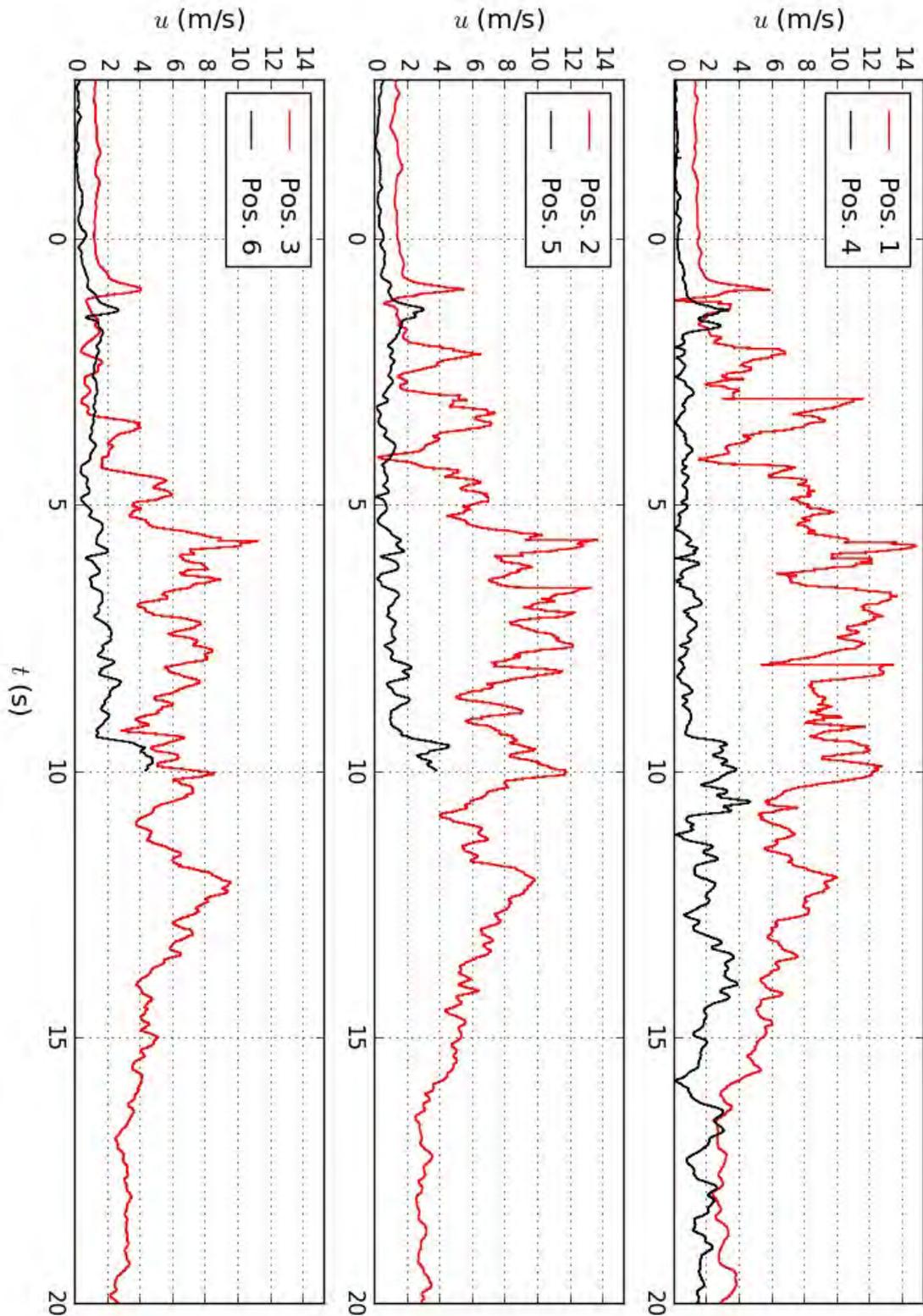


Abbildung C.99: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 15. Messdaten ungefiltert.

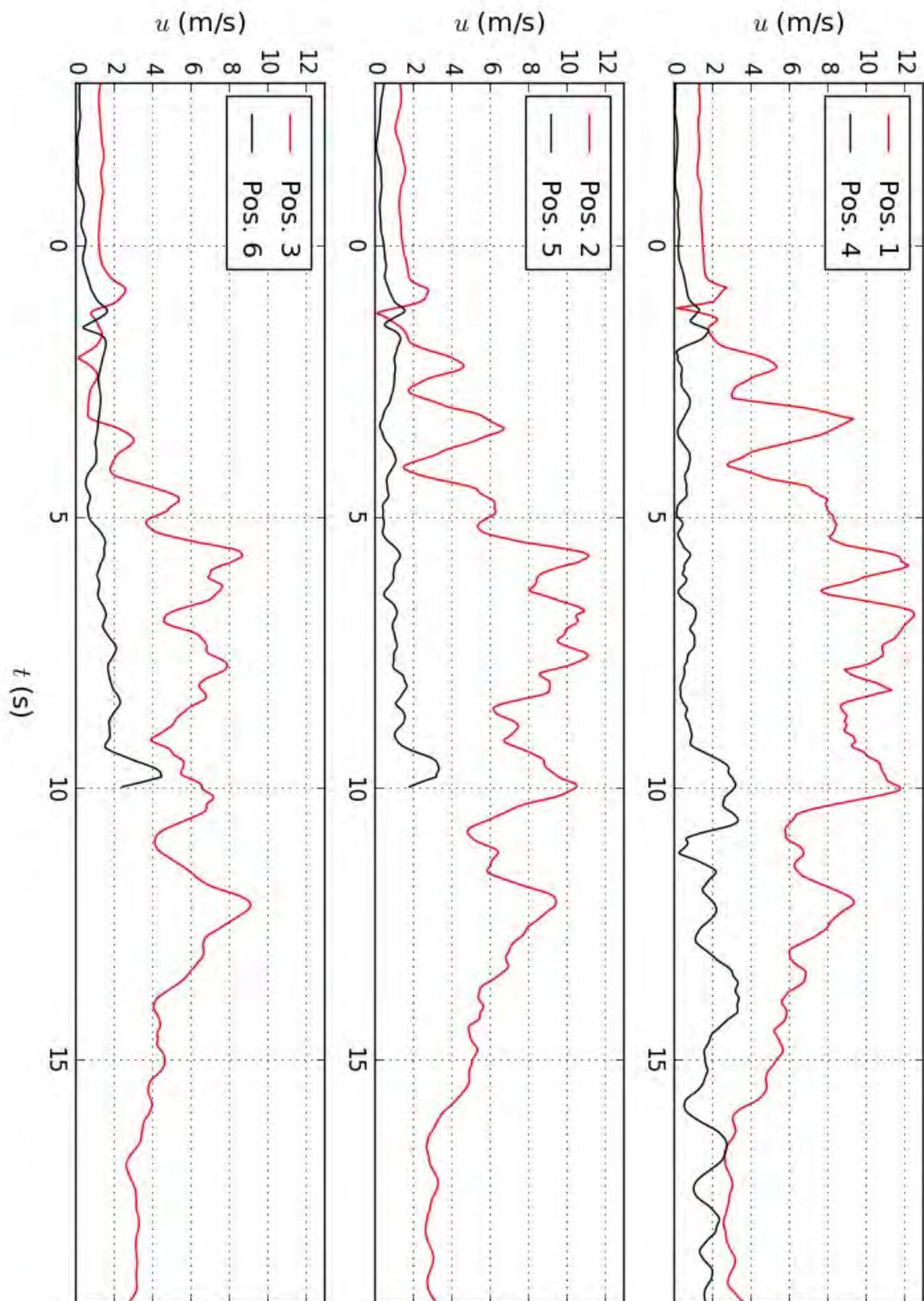


Abbildung C.100: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 15. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

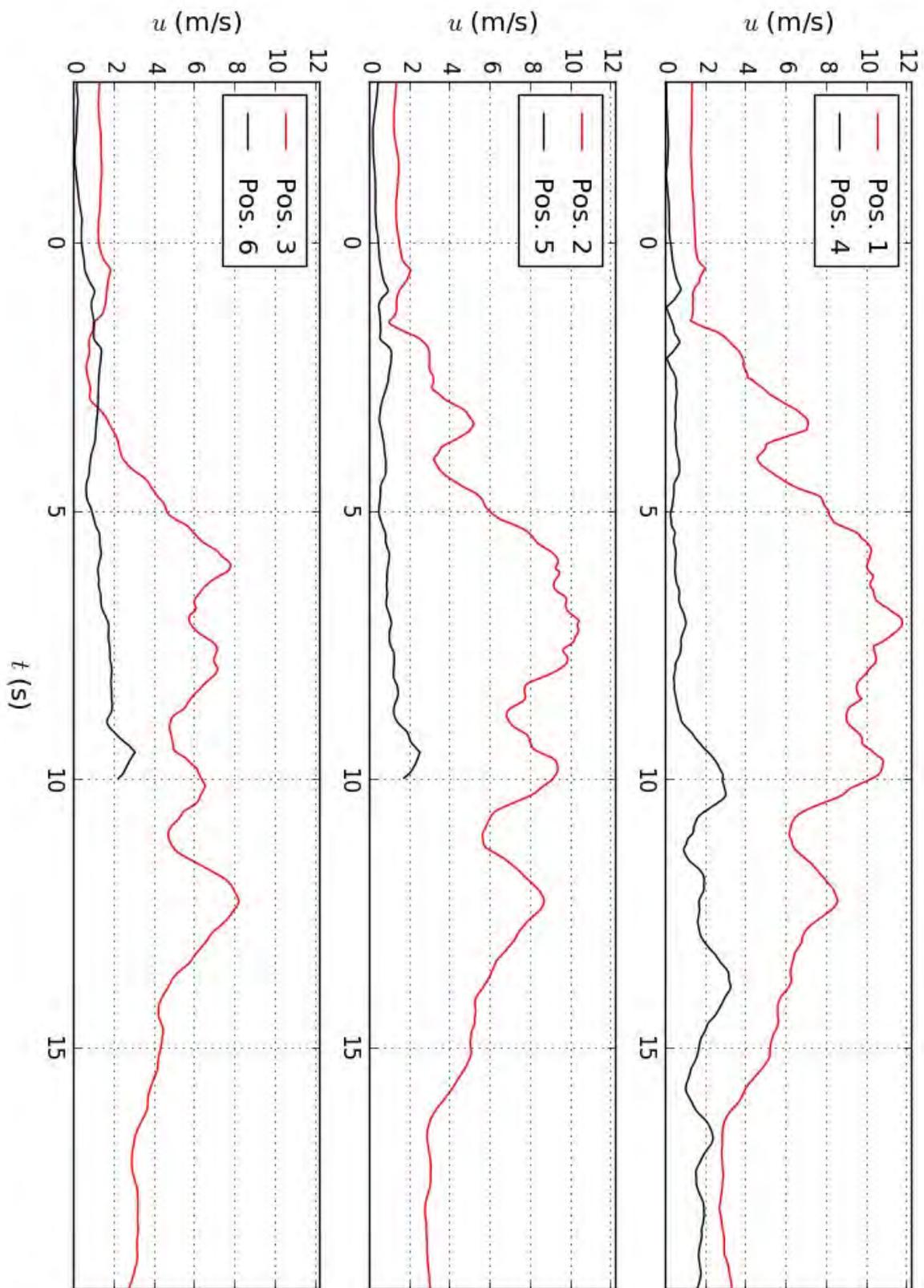


Abbildung C.101: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 15. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

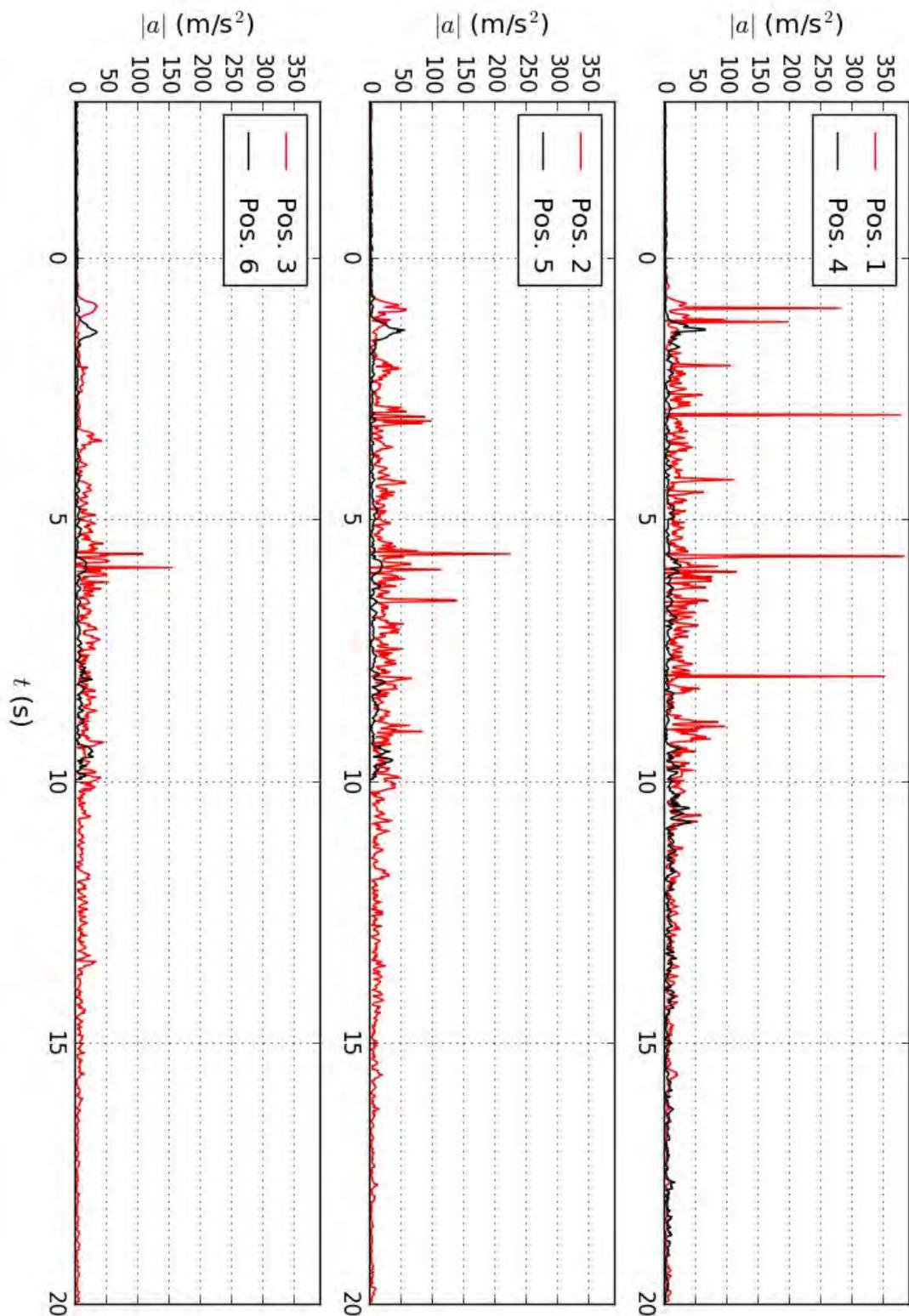


Abbildung C.102: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 15. Messdaten ungefiltert.

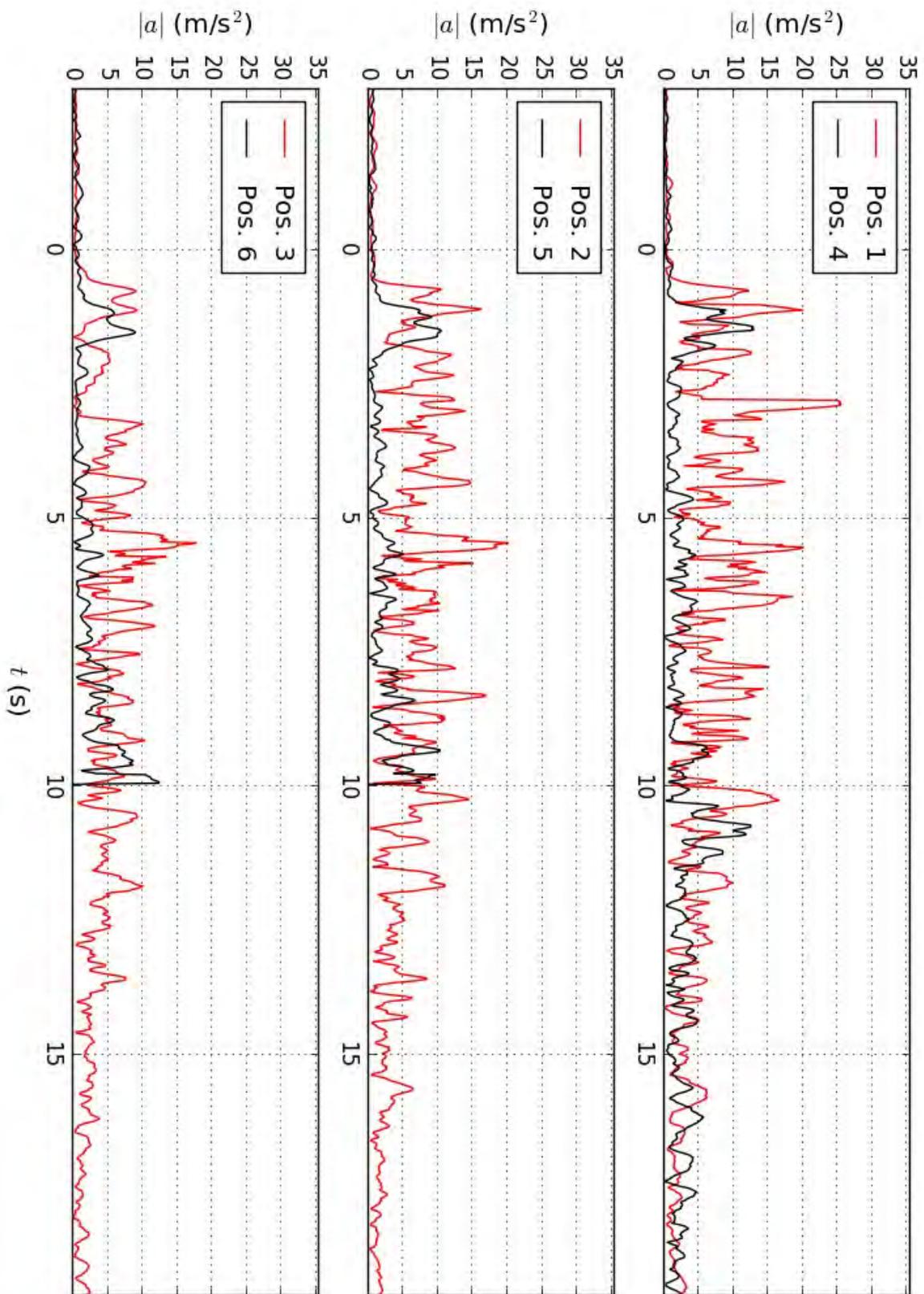


Abbildung C.103: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 15. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

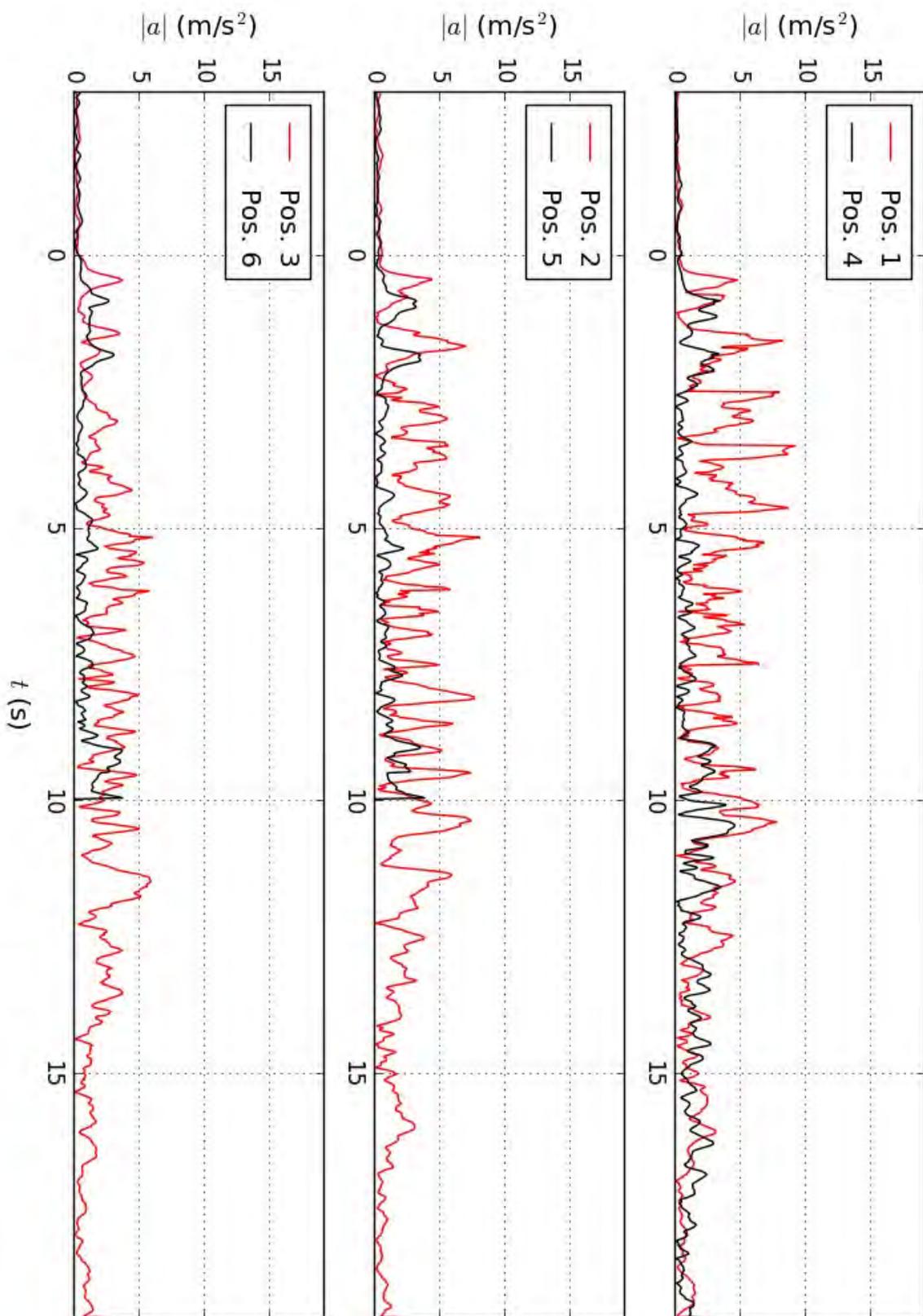


Abbildung C.104: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 15. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0 \text{ s}$.

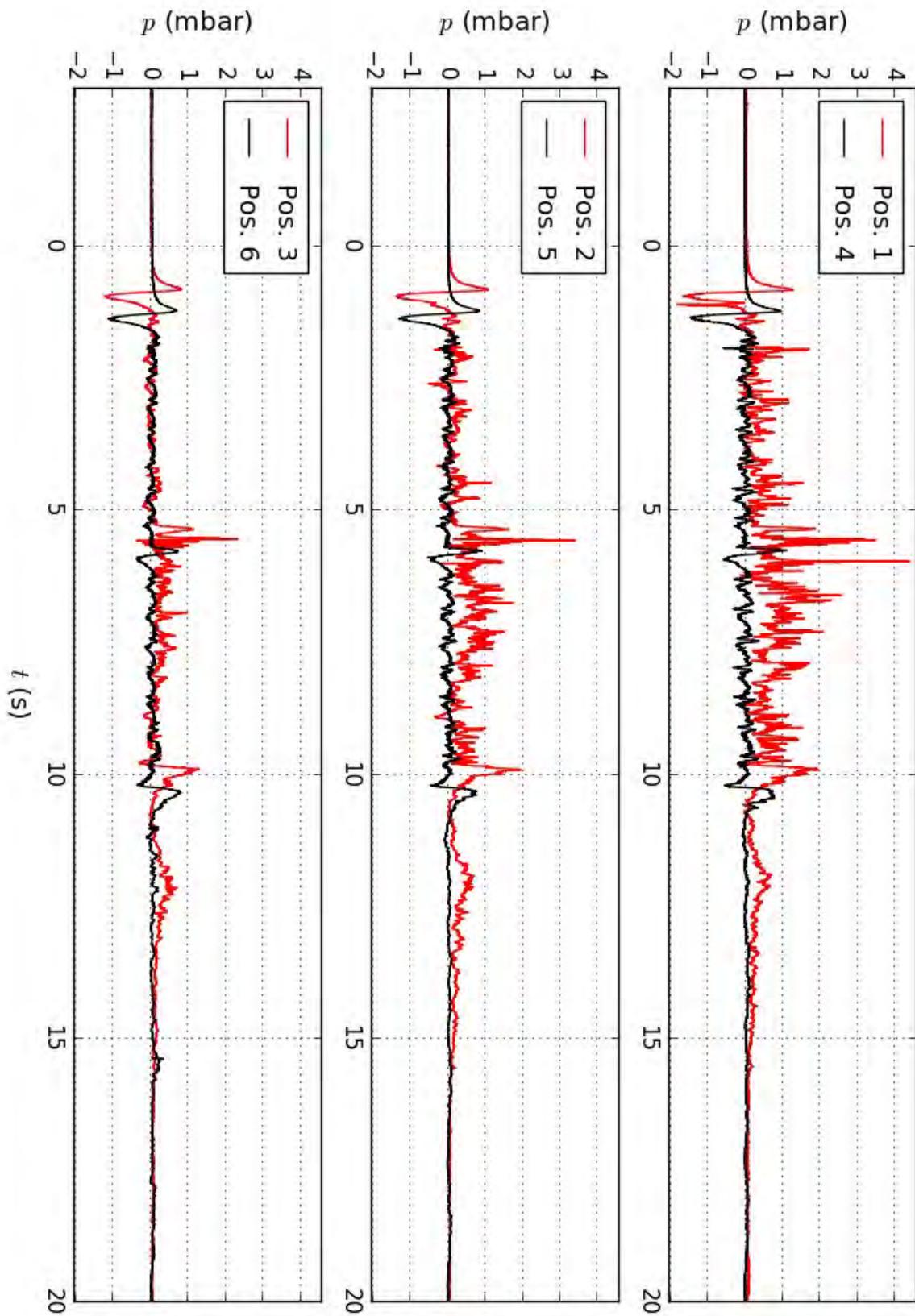


Abbildung C.105: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 15.

Zug 16

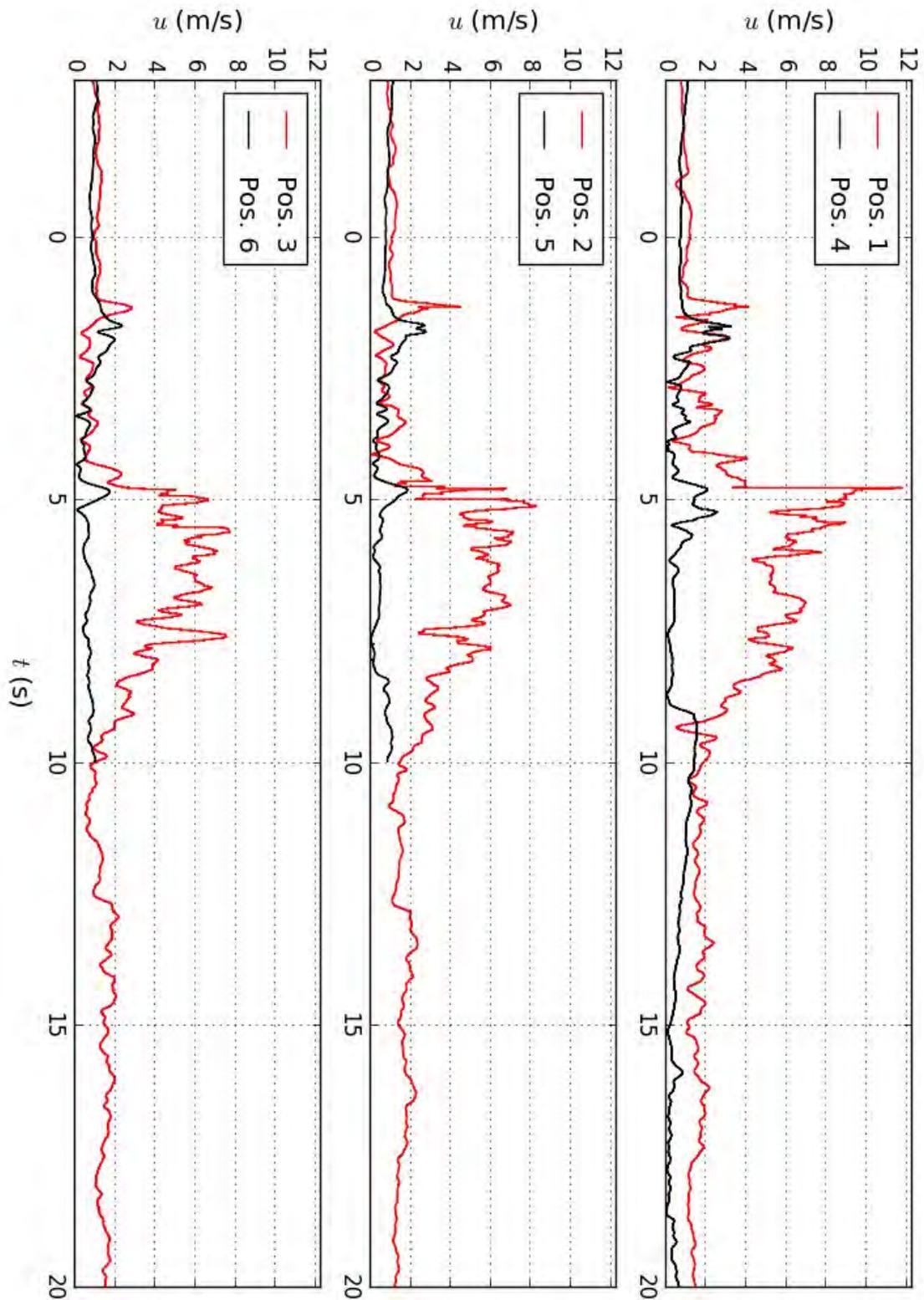


Abbildung C.106: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 16. Messdaten ungefiltert.

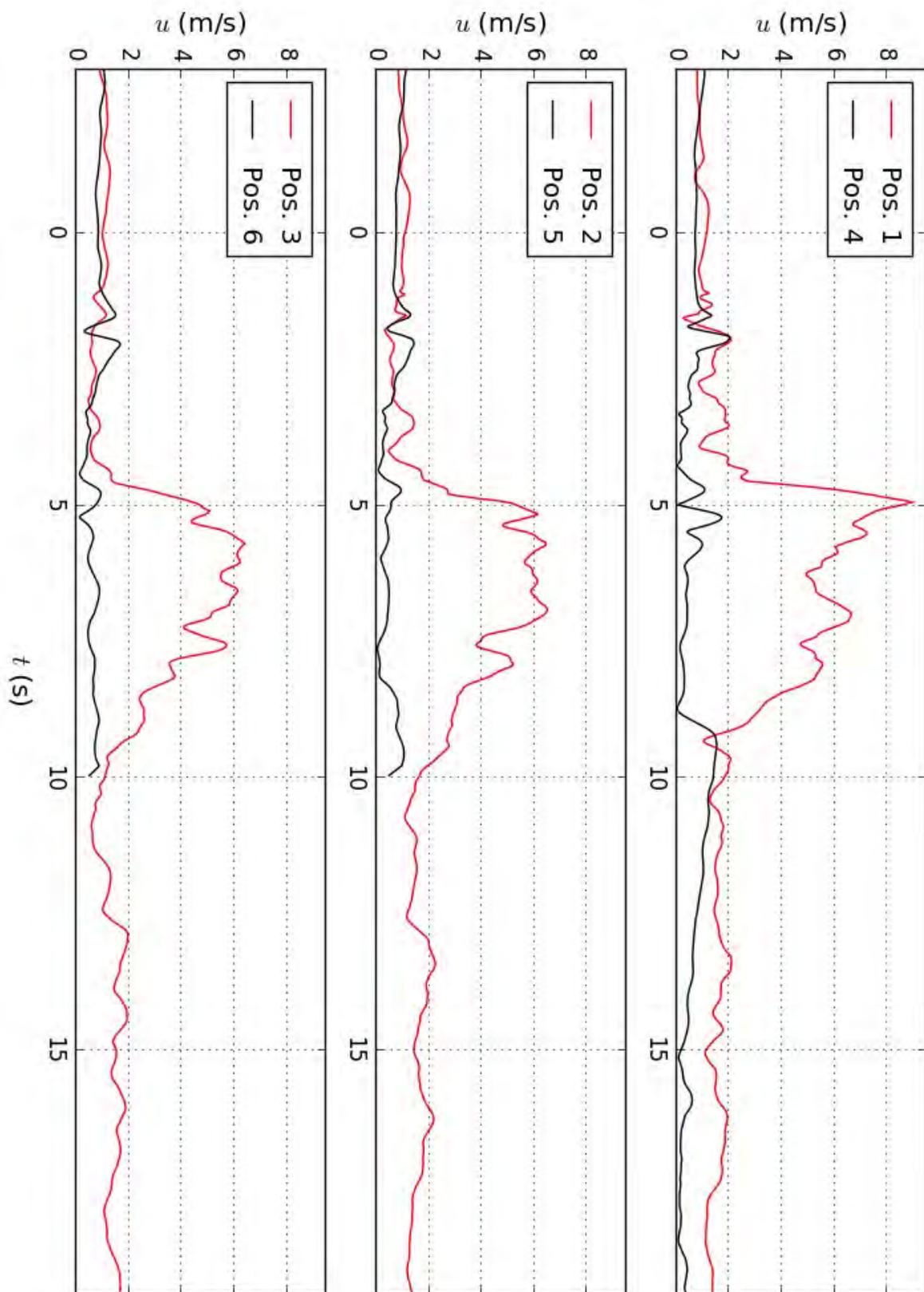


Abbildung C.107: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 16. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

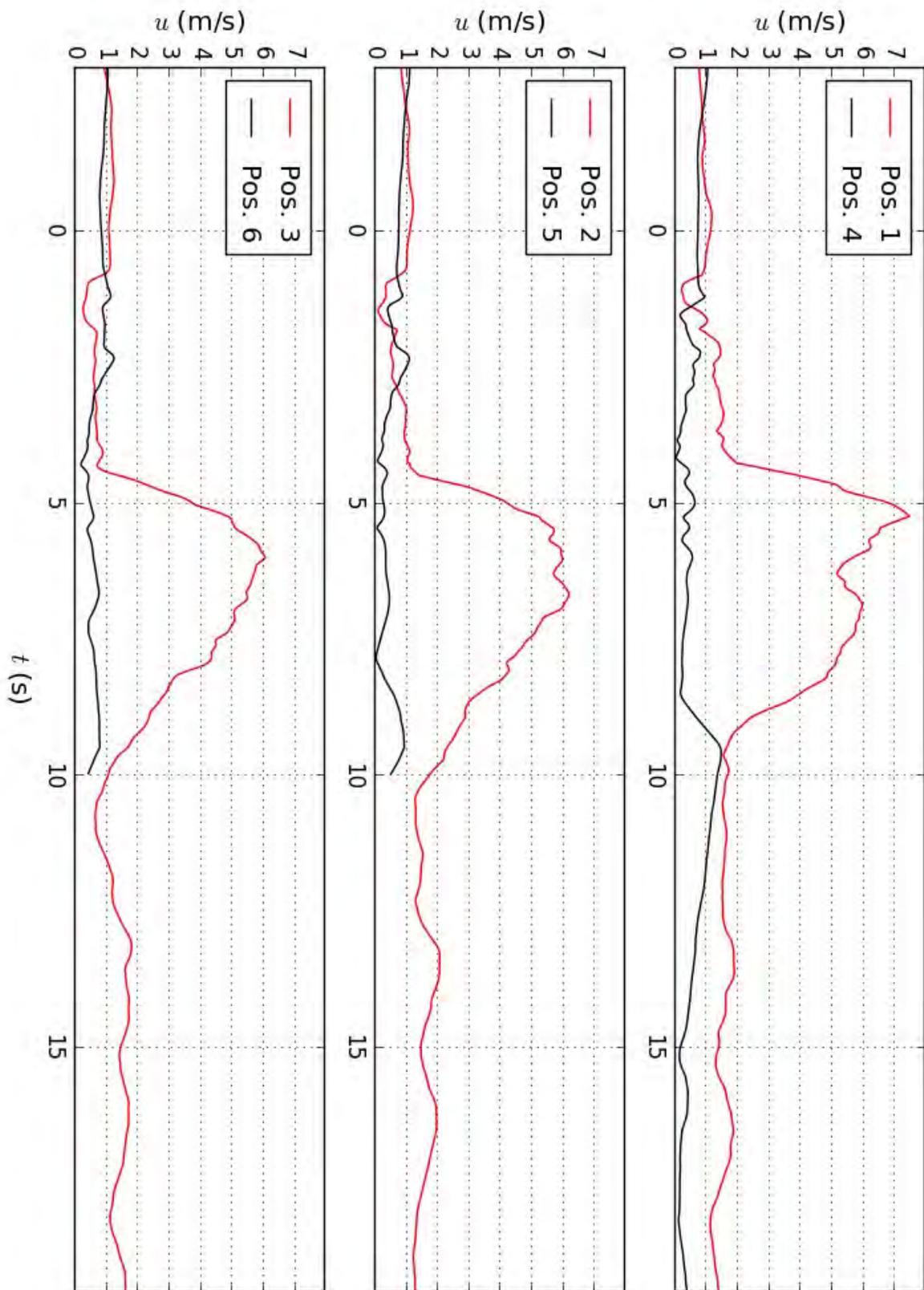


Abbildung C.108: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 16. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

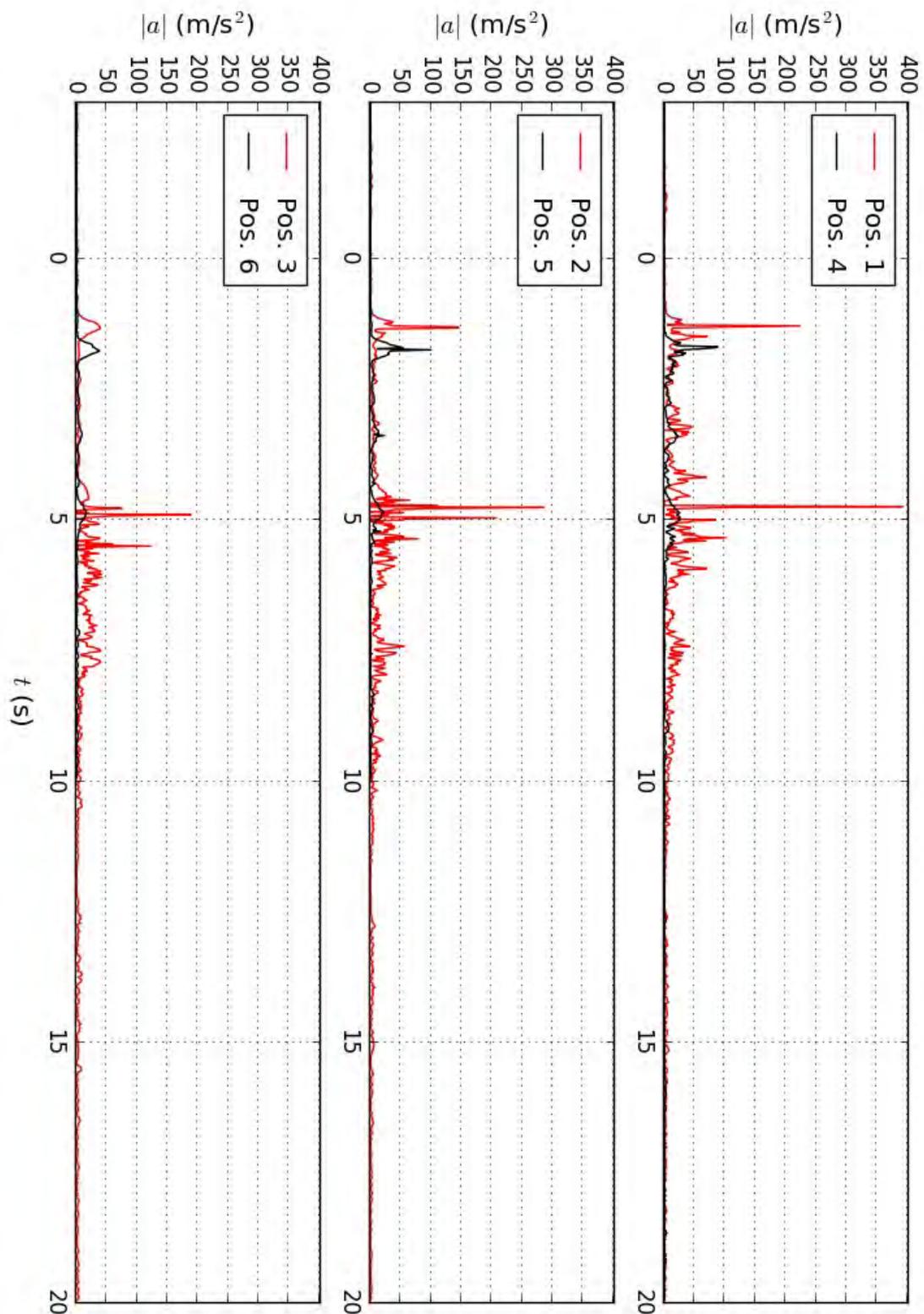


Abbildung C.109: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 16. Messdaten ungefiltert.

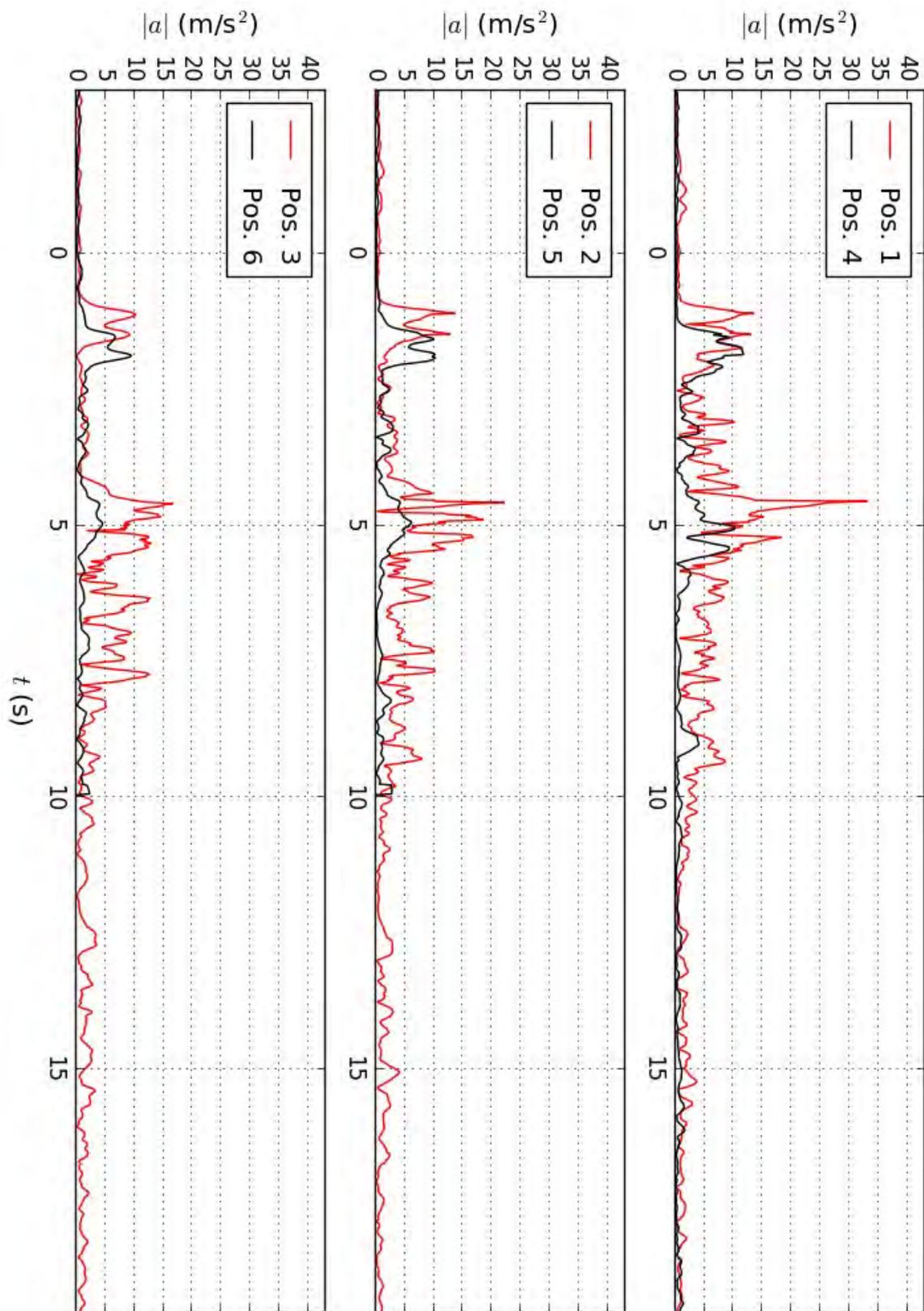


Abbildung C.110: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 16. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

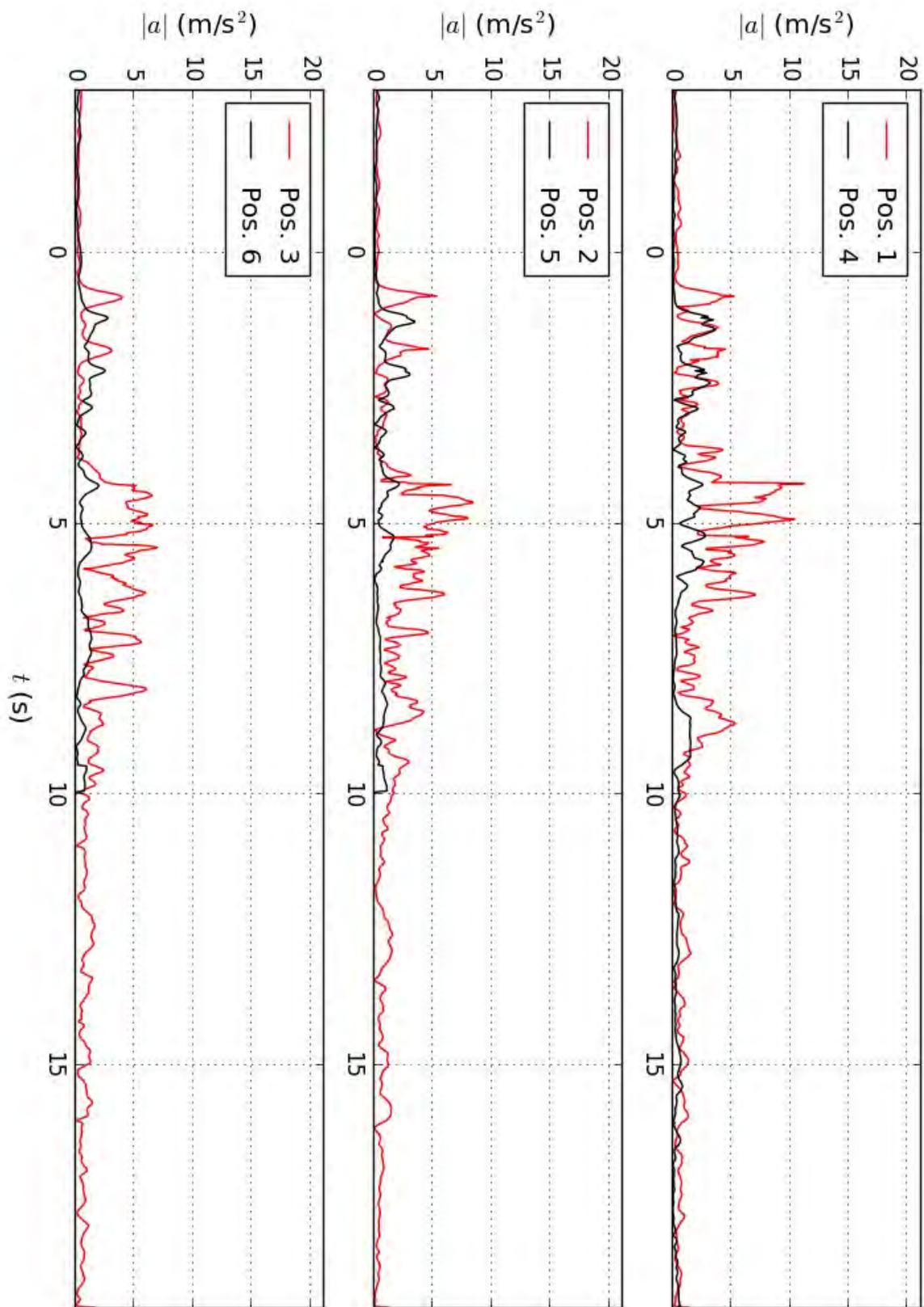


Abbildung C.111: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 16. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0\text{s}$.

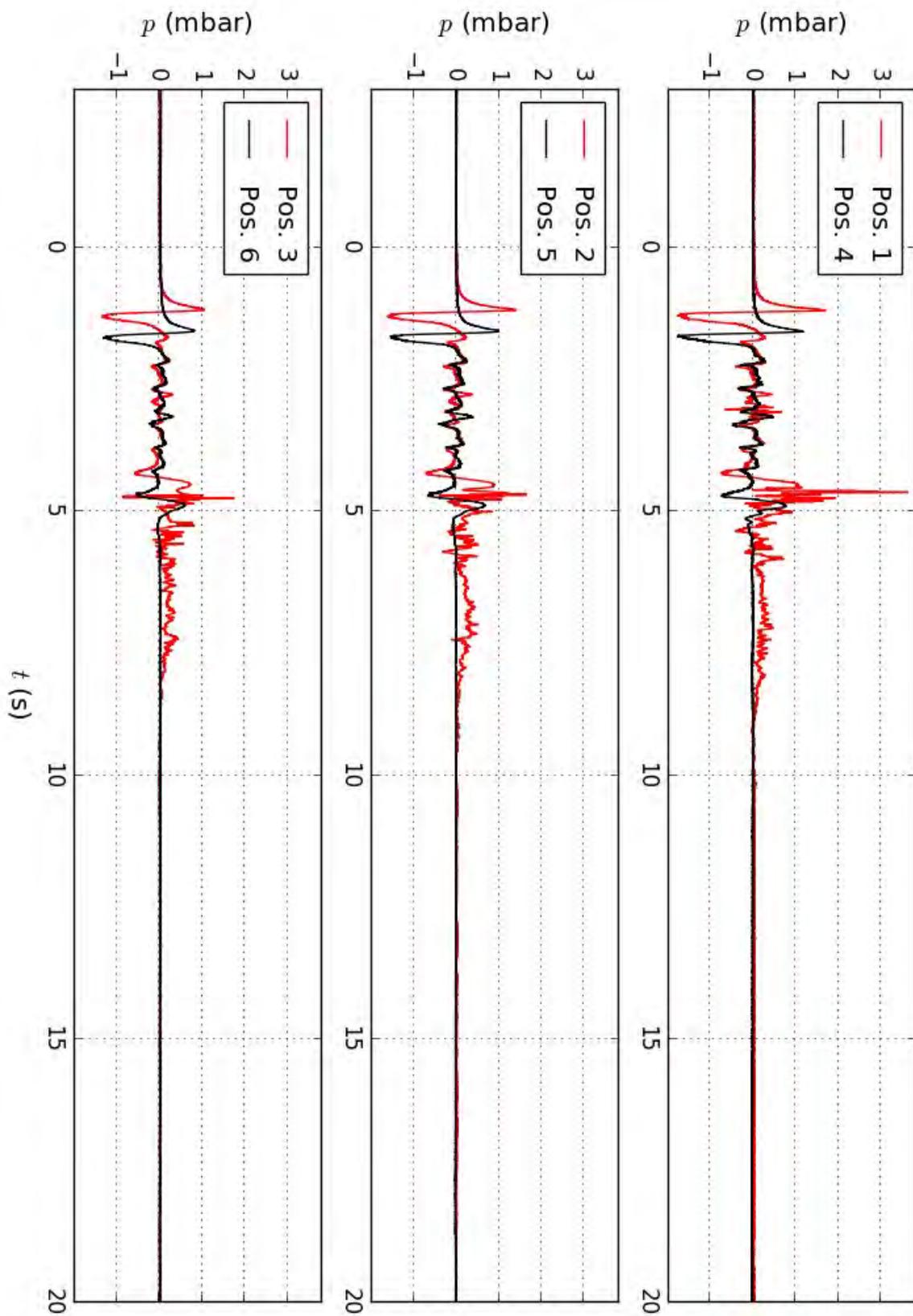


Abbildung C.112: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 16.

Zug 17

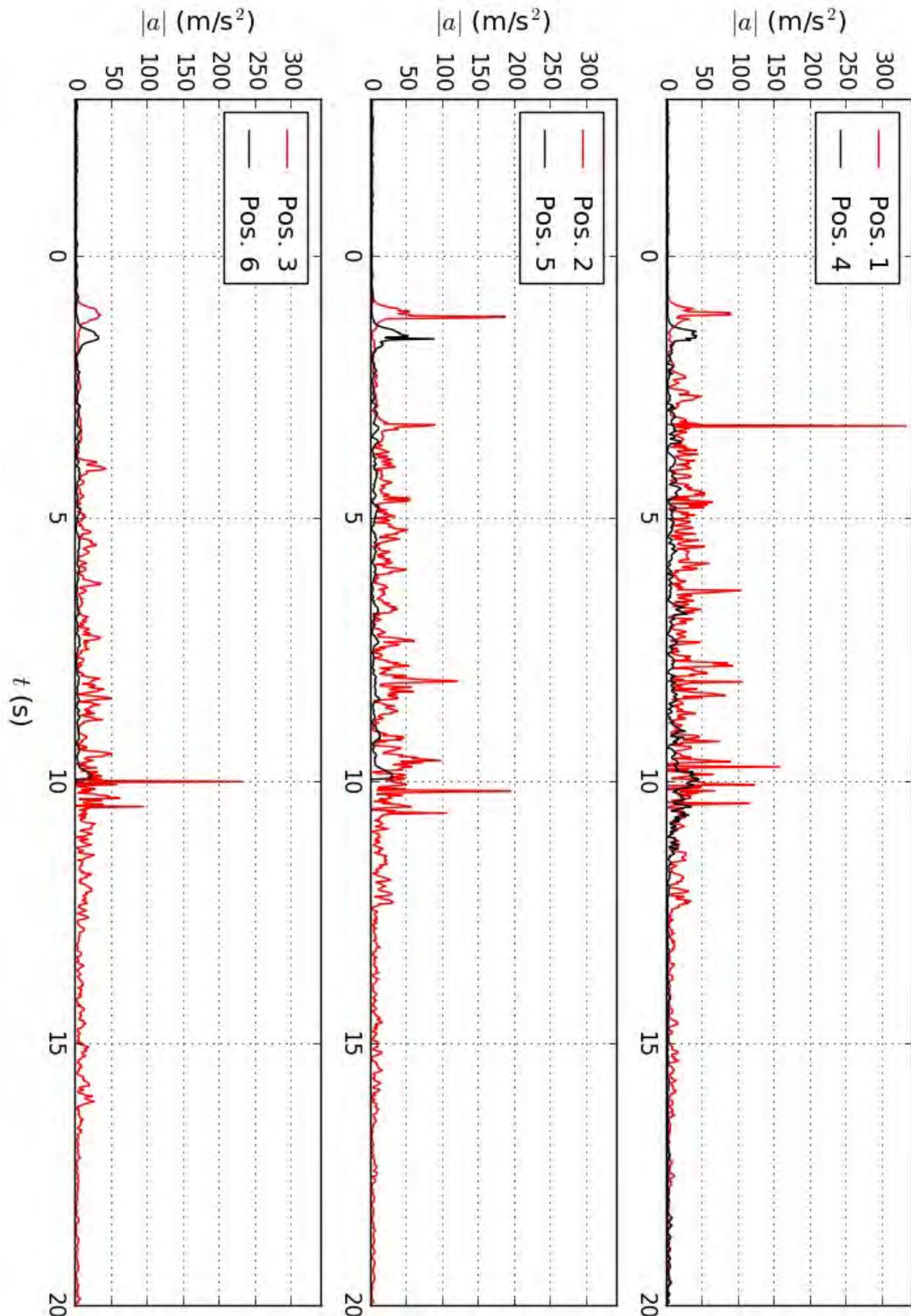


Abbildung C.113: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 17. Messdaten ungefiltert.

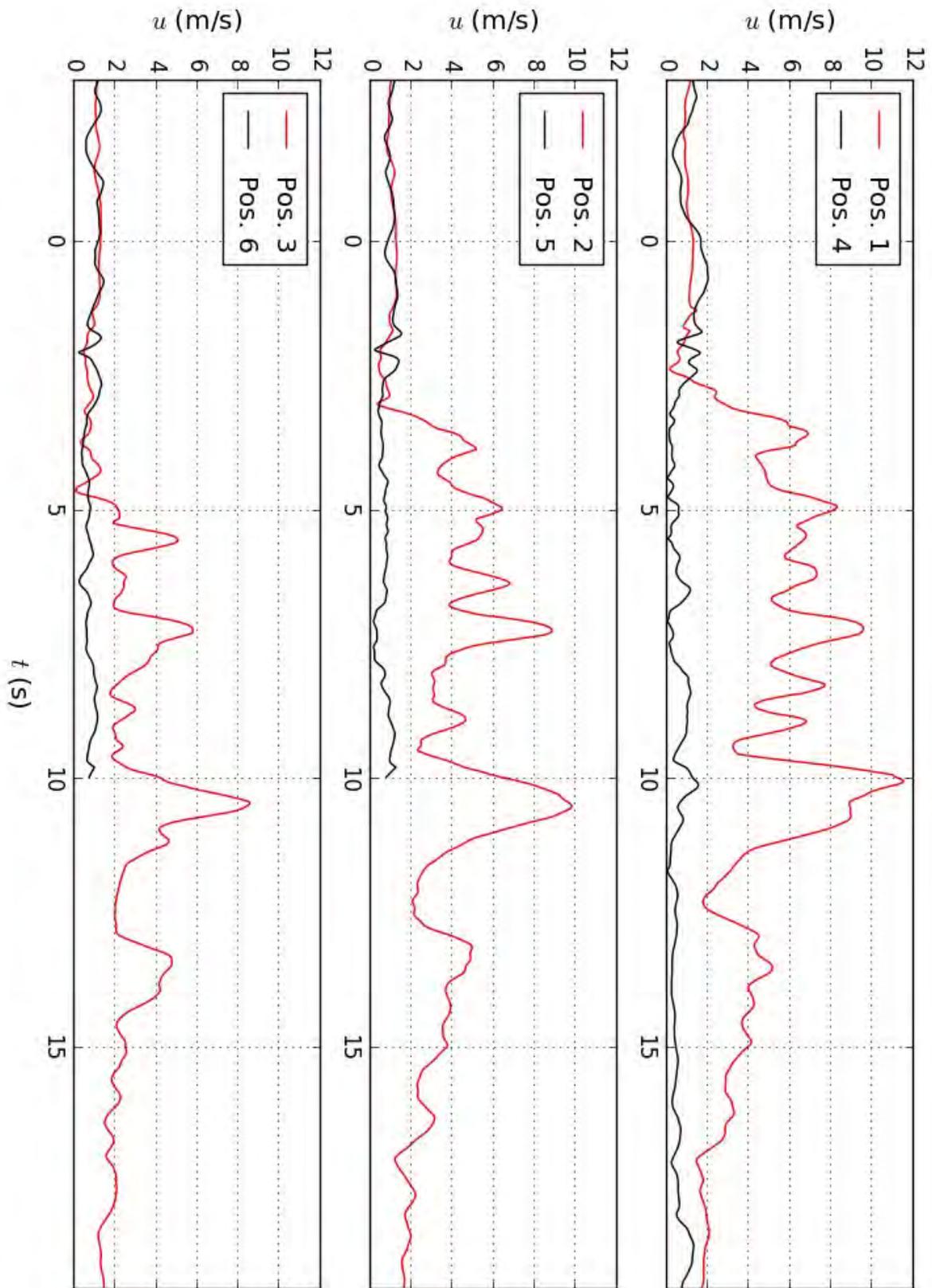


Abbildung C.114: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 17. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

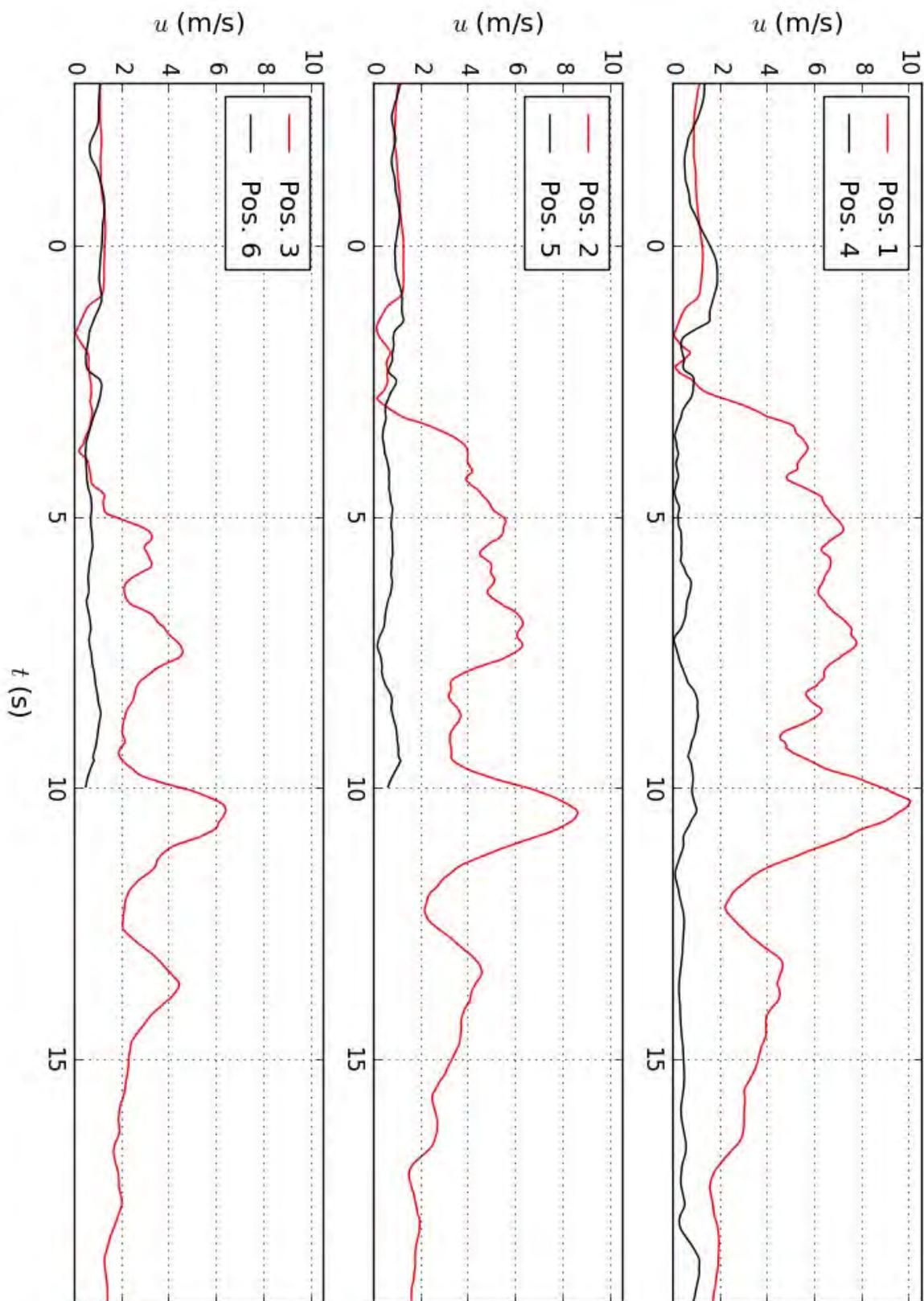


Abbildung C.115: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 17. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

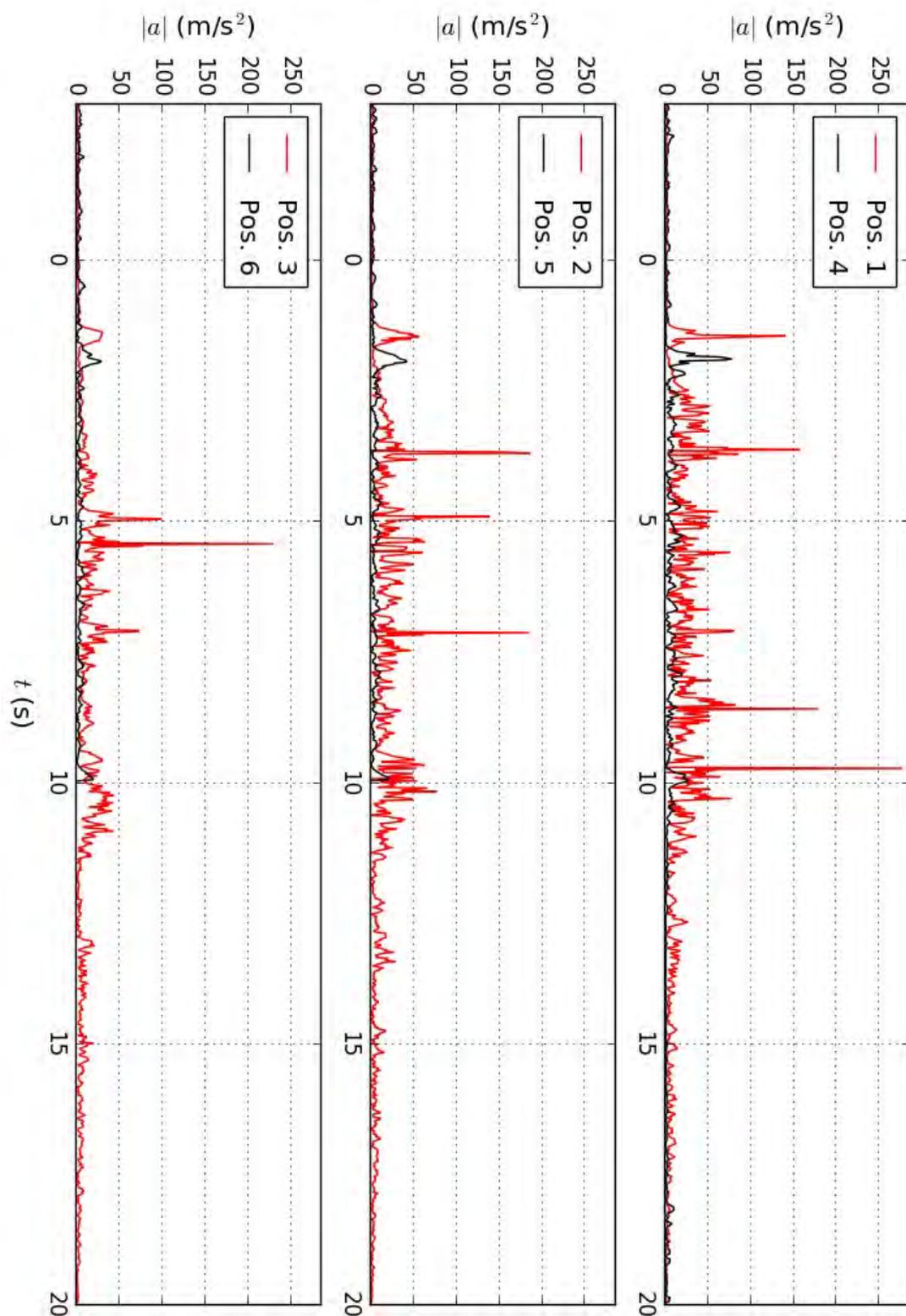


Abbildung C.116: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 17. Messdaten ungefiltert.

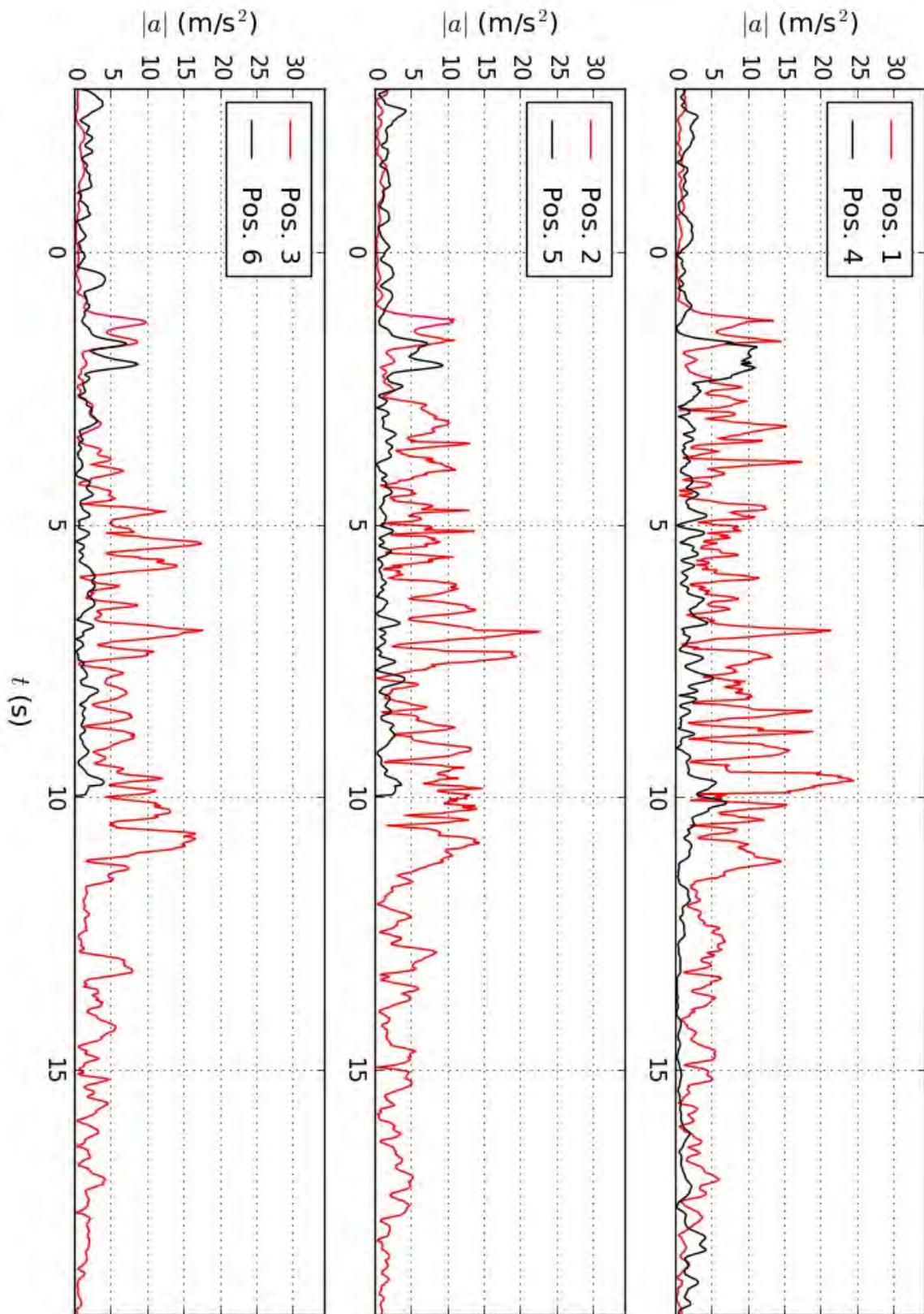


Abbildung C.117: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 17. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4 \text{ s}$.

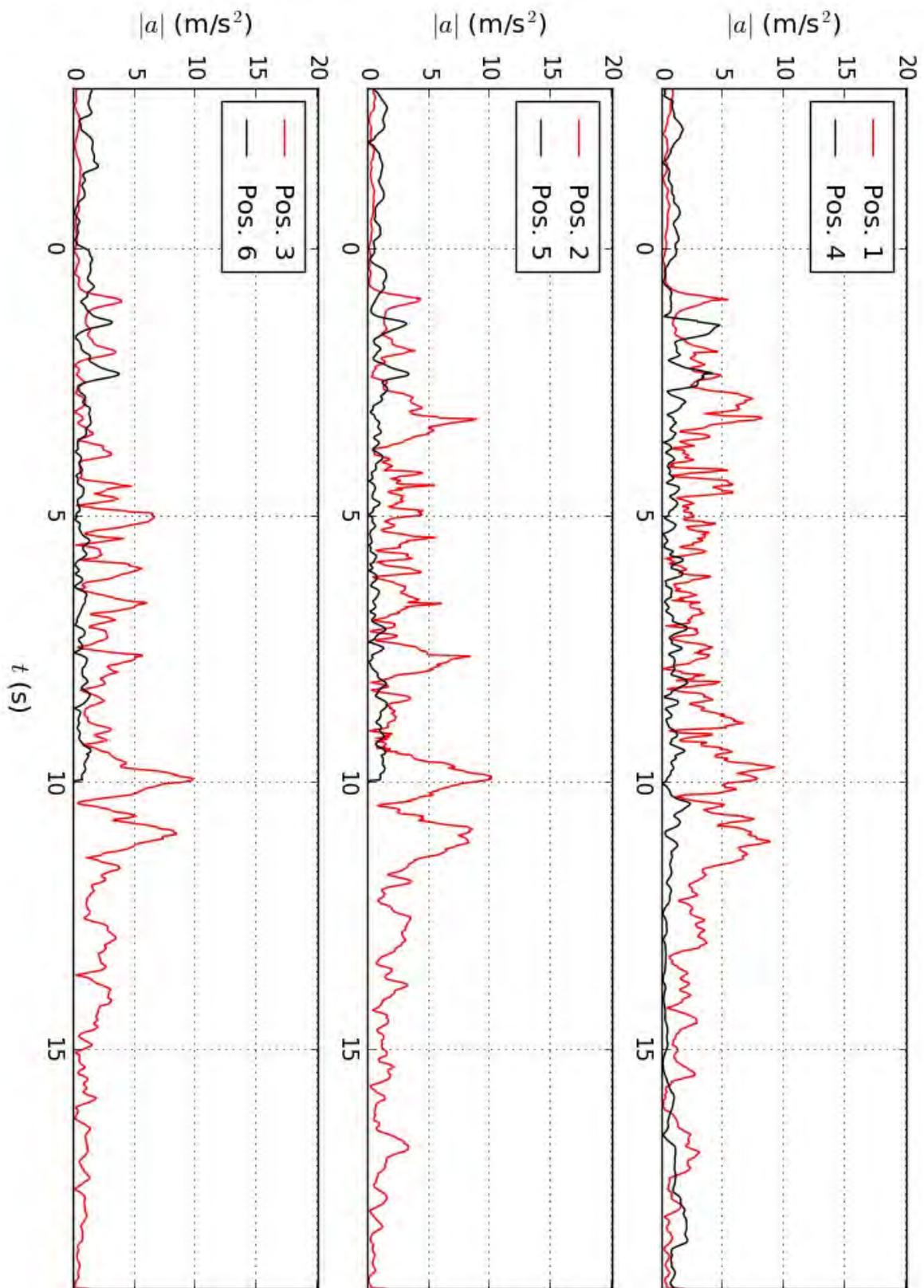


Abbildung C.118: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 17. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0\text{s}$.

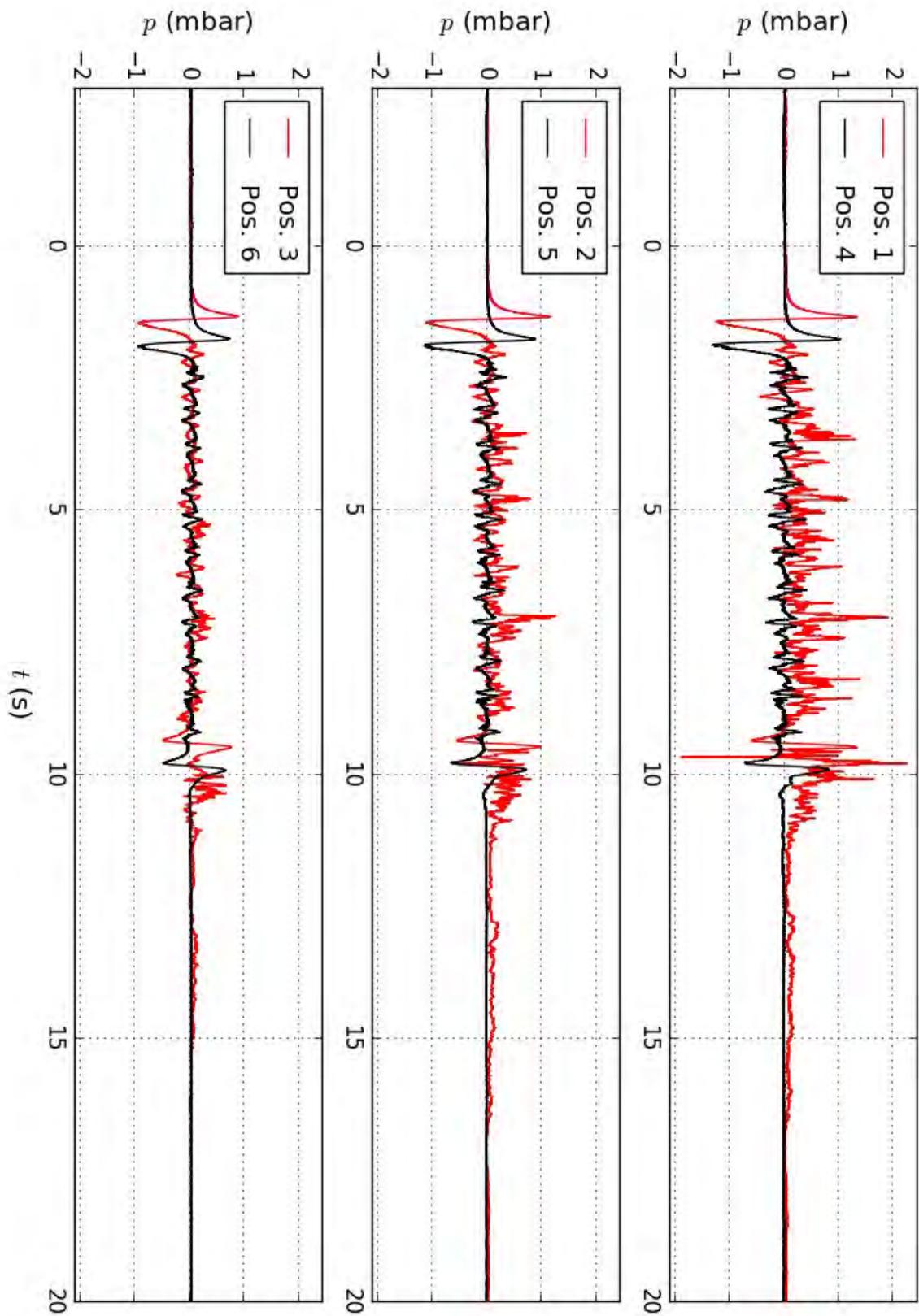


Abbildung C.119: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 17.

Zug 18

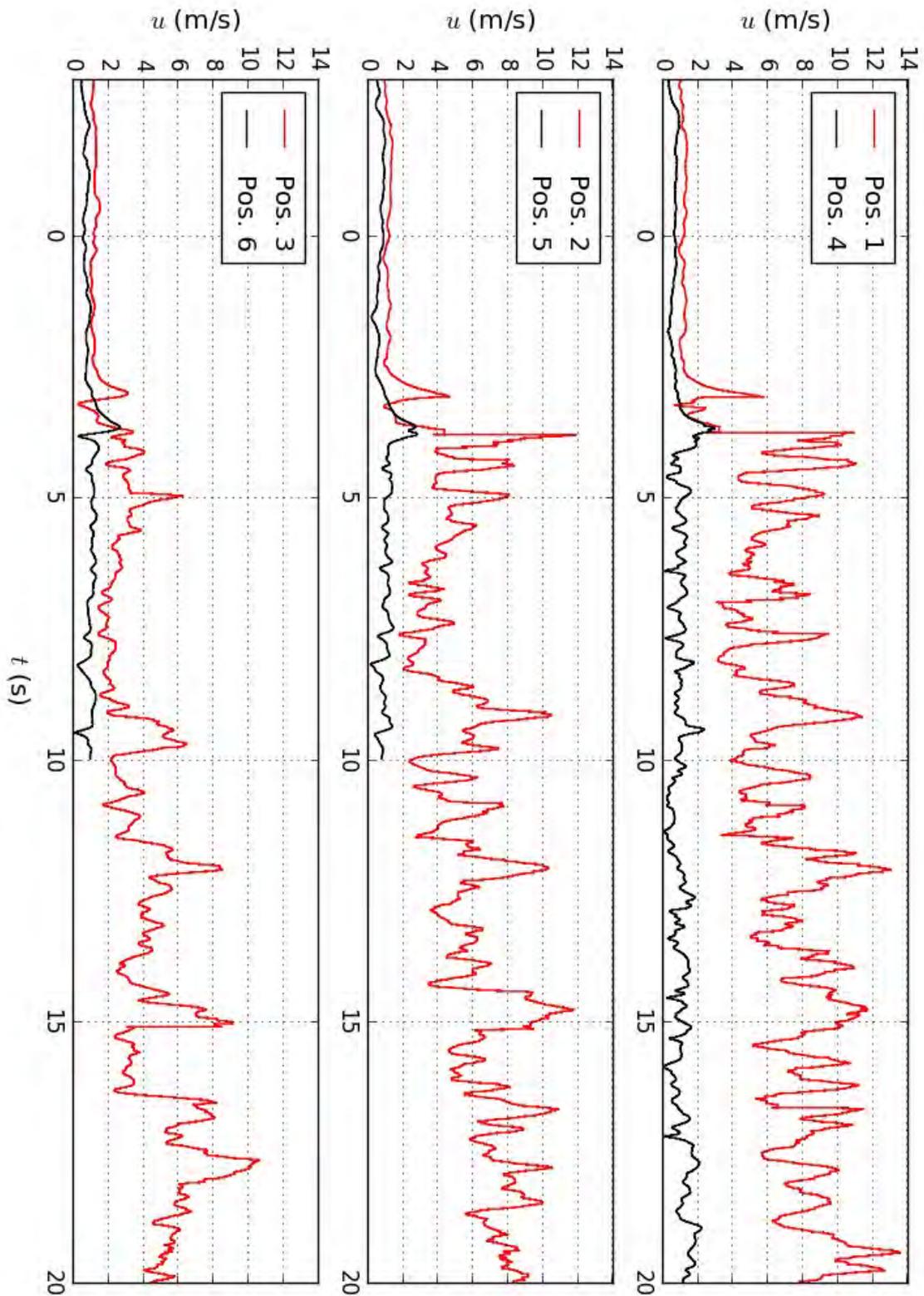


Abbildung C.120: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 18. Messdaten ungefiltert.

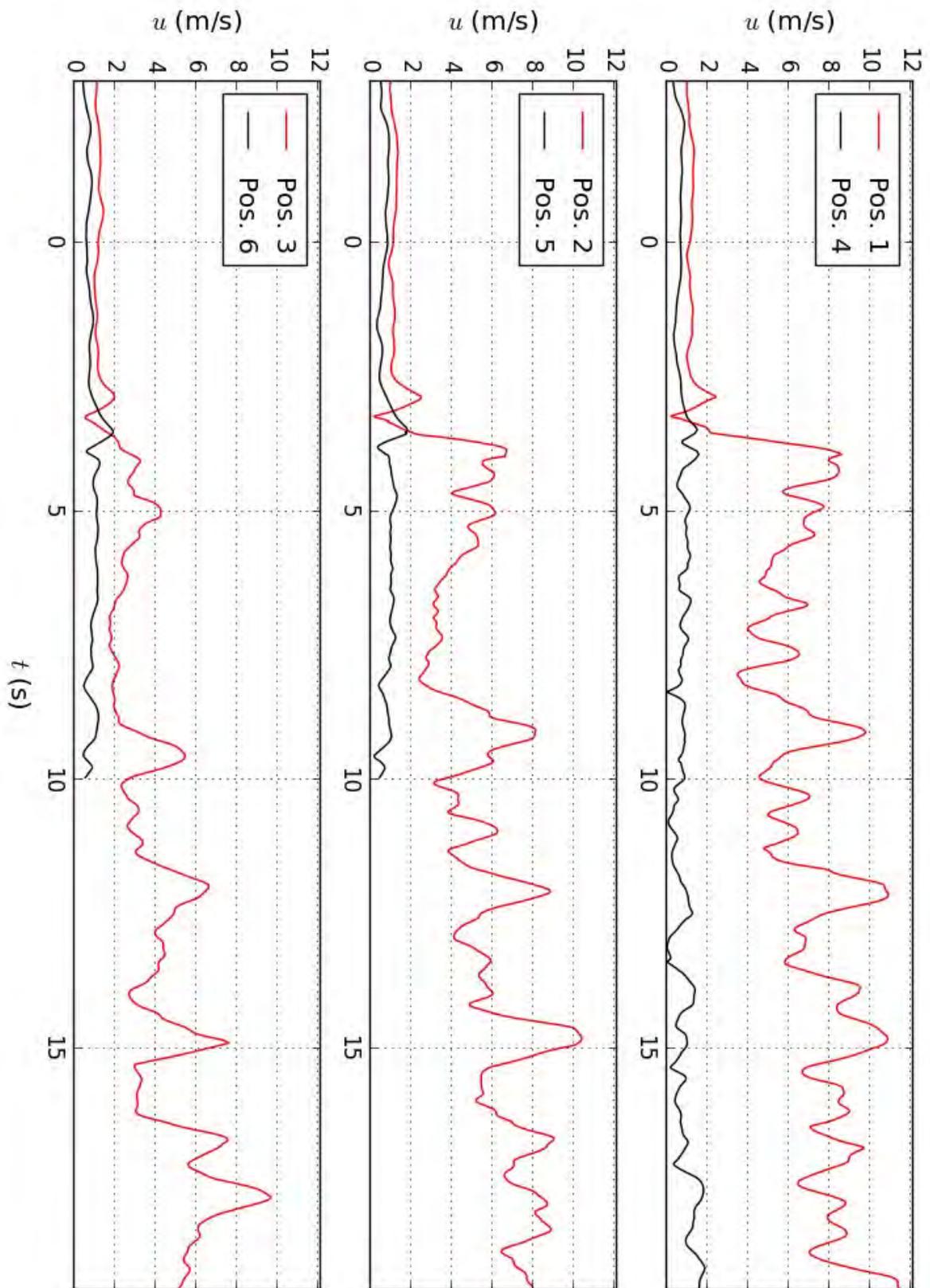


Abbildung C.121: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 18. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

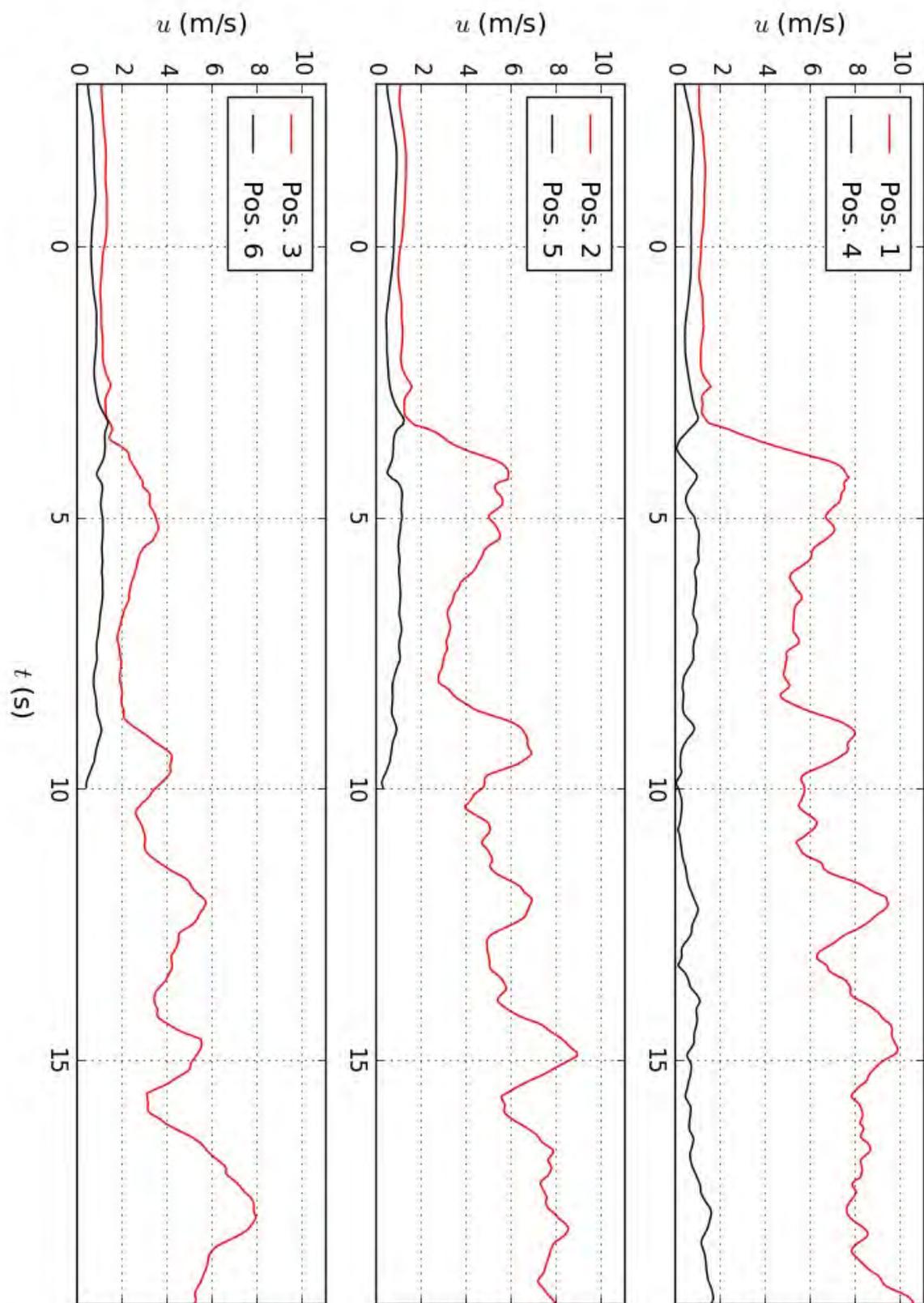


Abbildung C.122: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 18. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

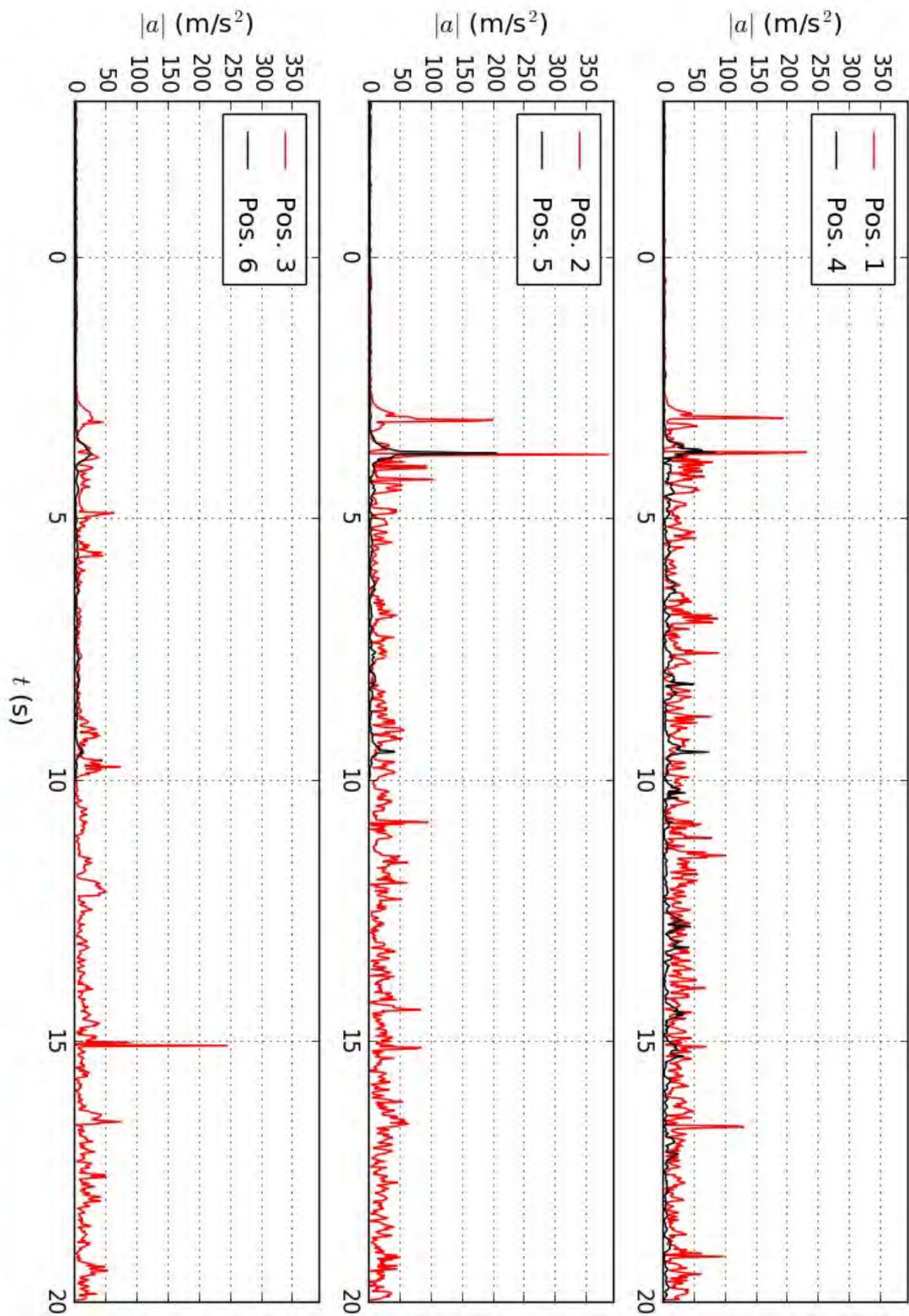


Abbildung C.123: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 18. Messdaten ungefiltert.

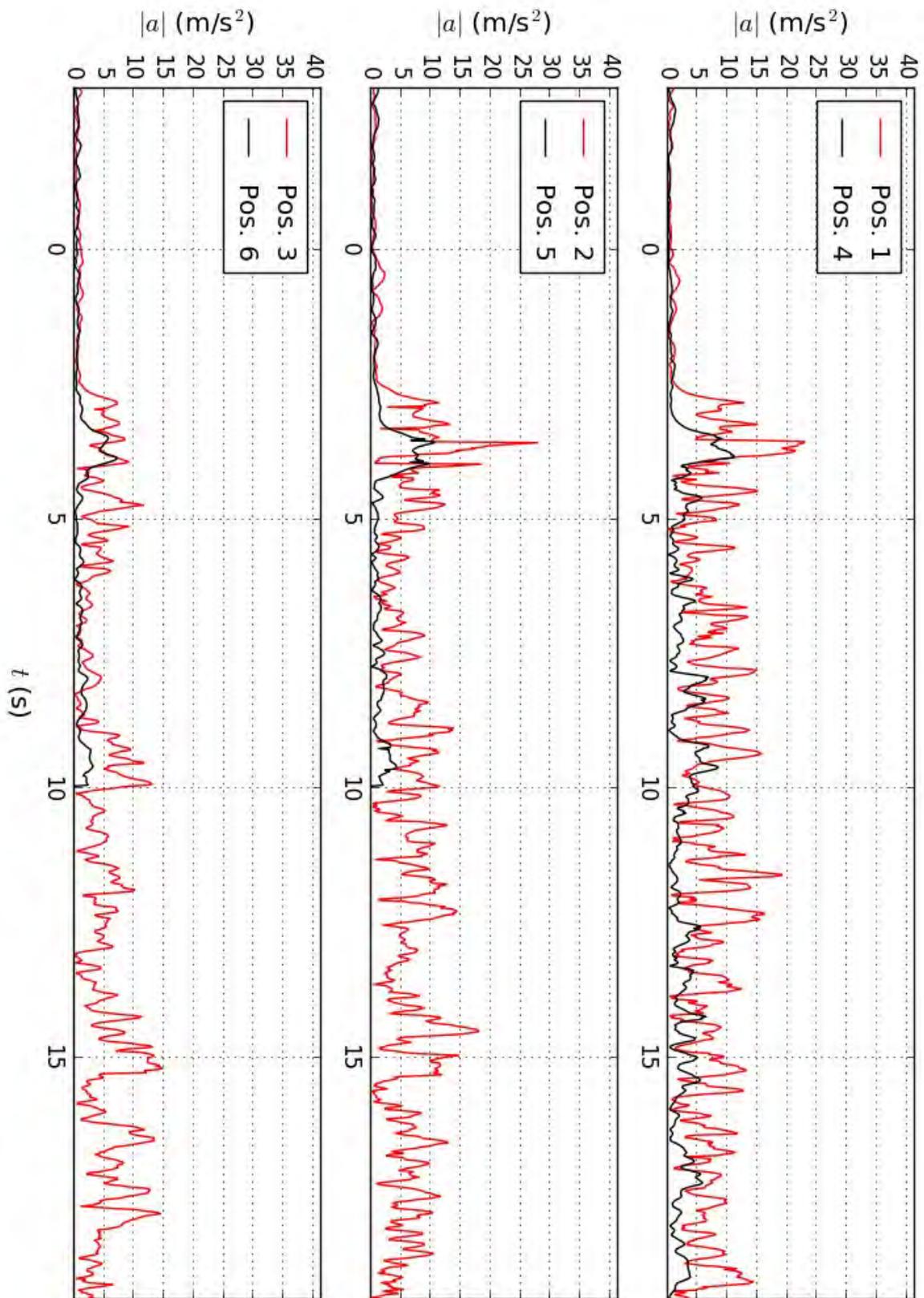


Abbildung C.124: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 18. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

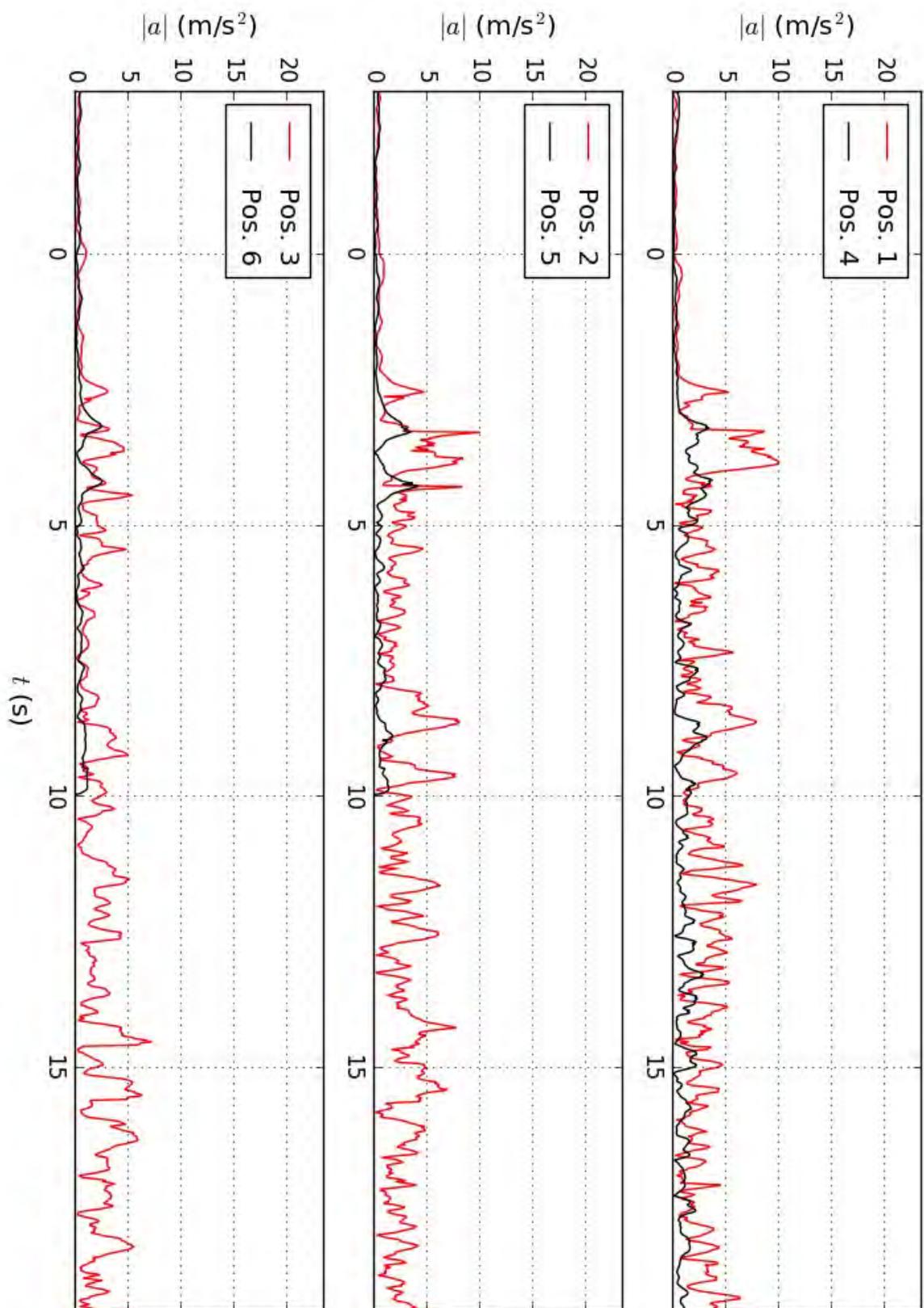


Abbildung C.125: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 18. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0\text{s}$.

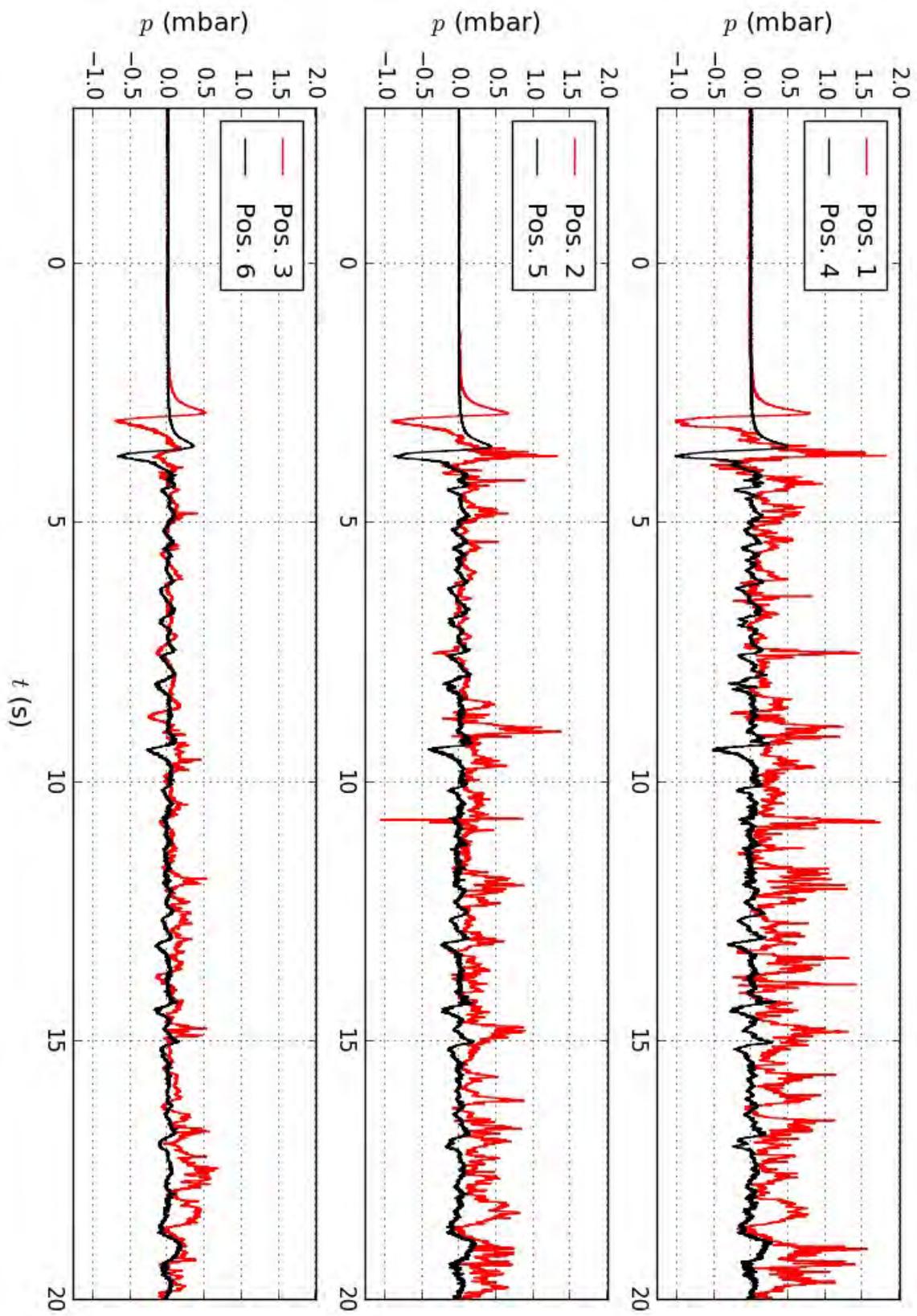


Abbildung C.126: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 18.

Zug 19

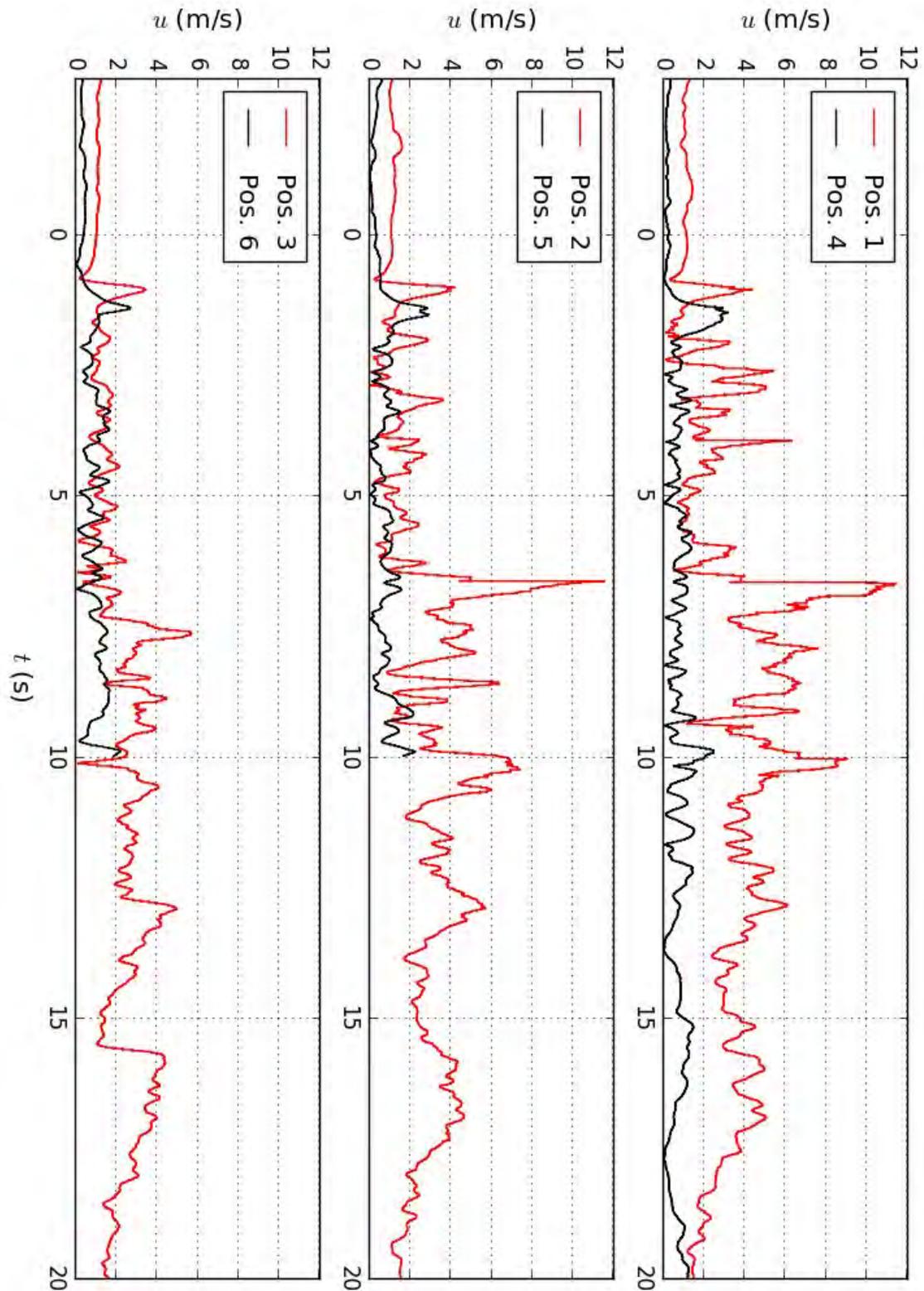


Abbildung C.127: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 19. Messdaten ungefiltert.

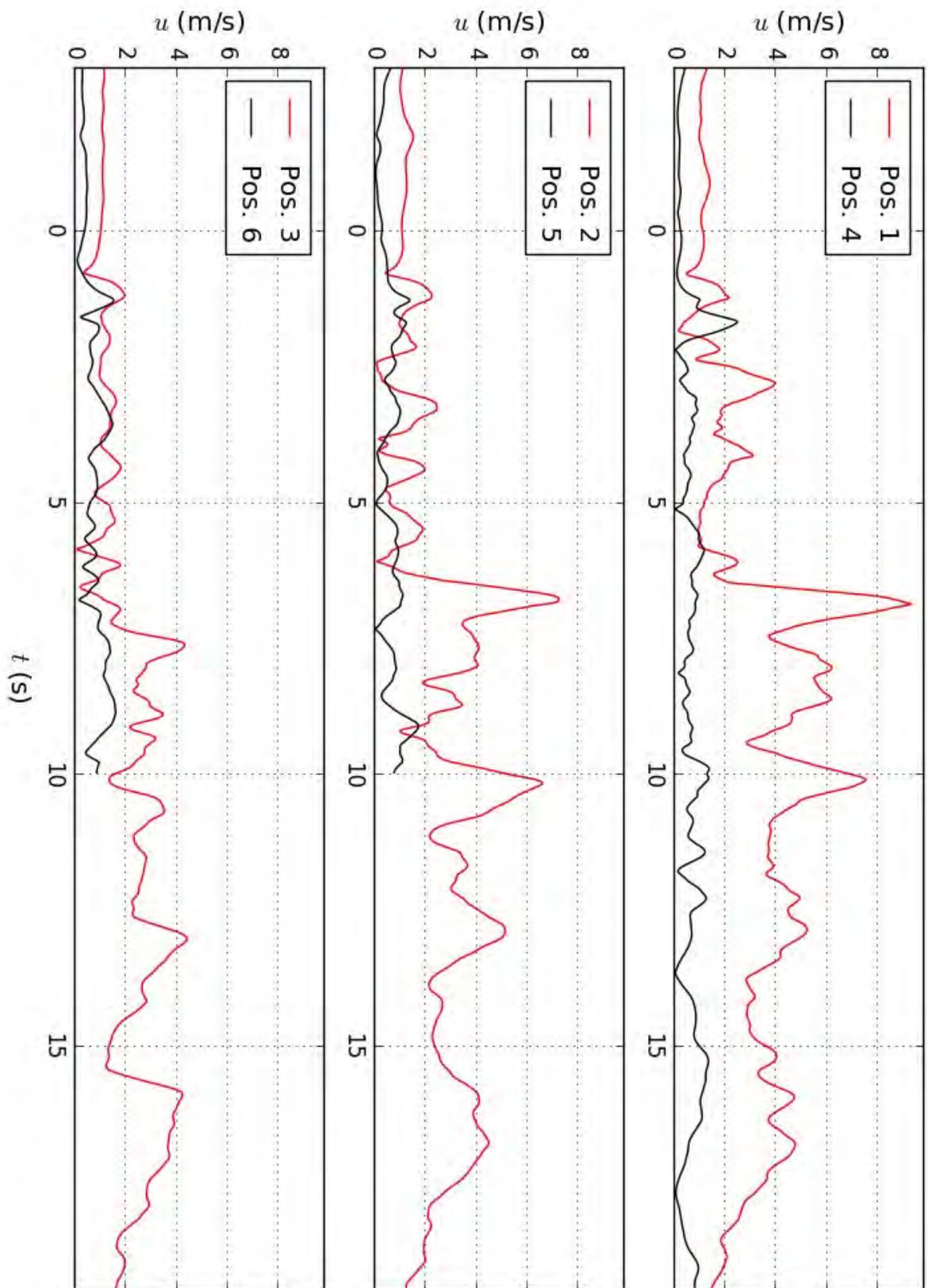


Abbildung C.128: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 19. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

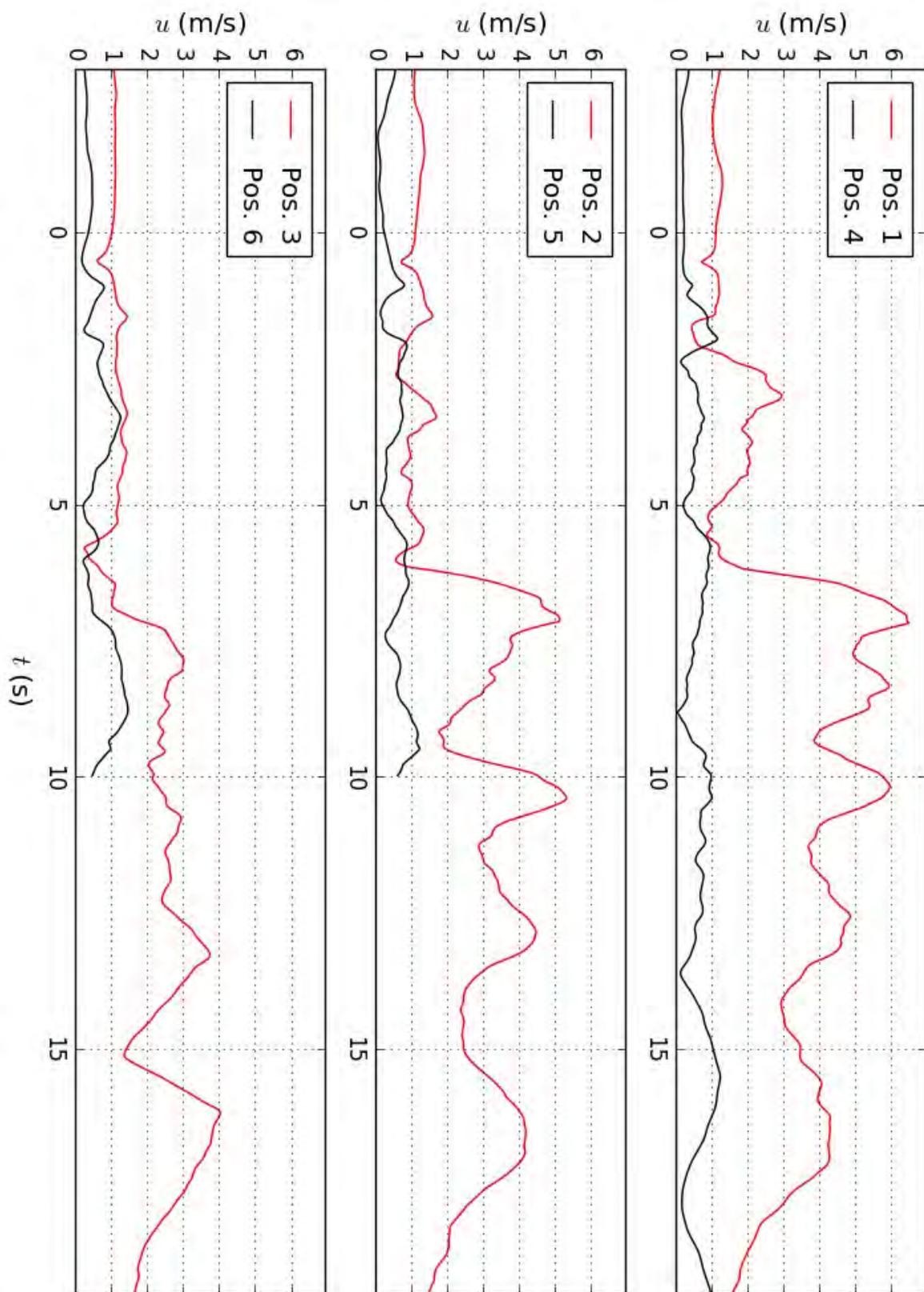


Abbildung C.129: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 19. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

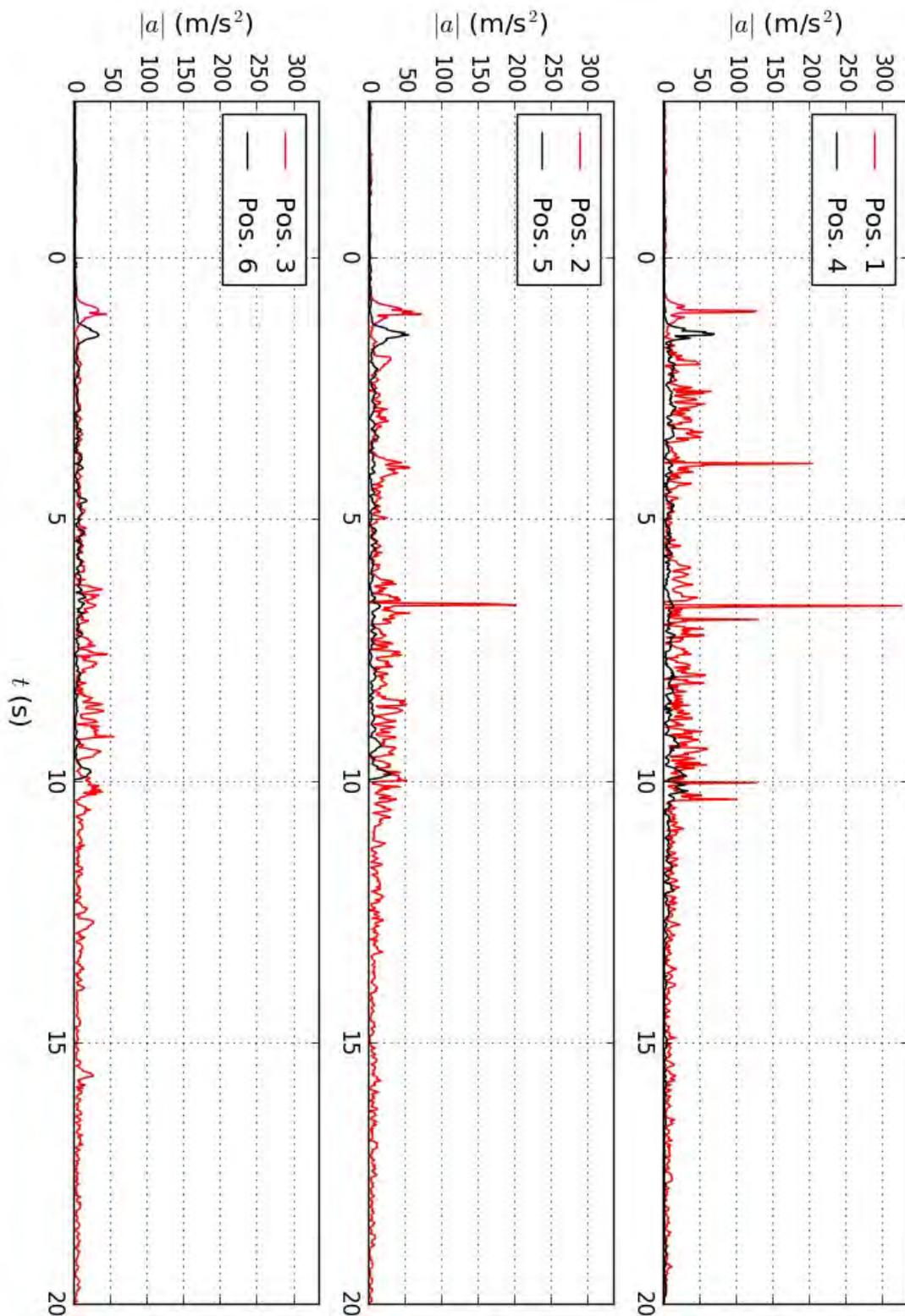


Abbildung C.130: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 19. Messdaten ungefiltert.

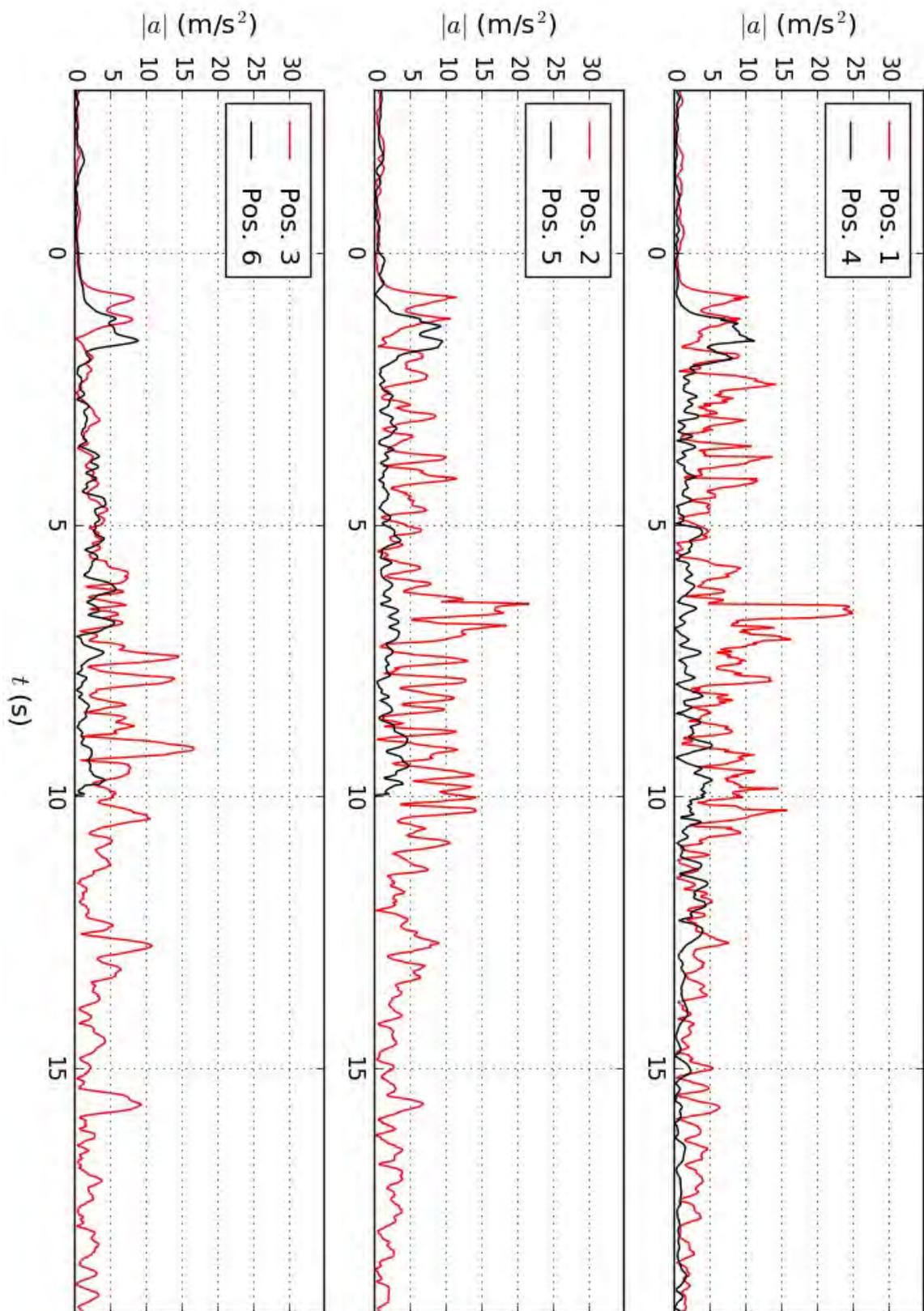


Abbildung C.131: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 19. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4 \text{ s}$.

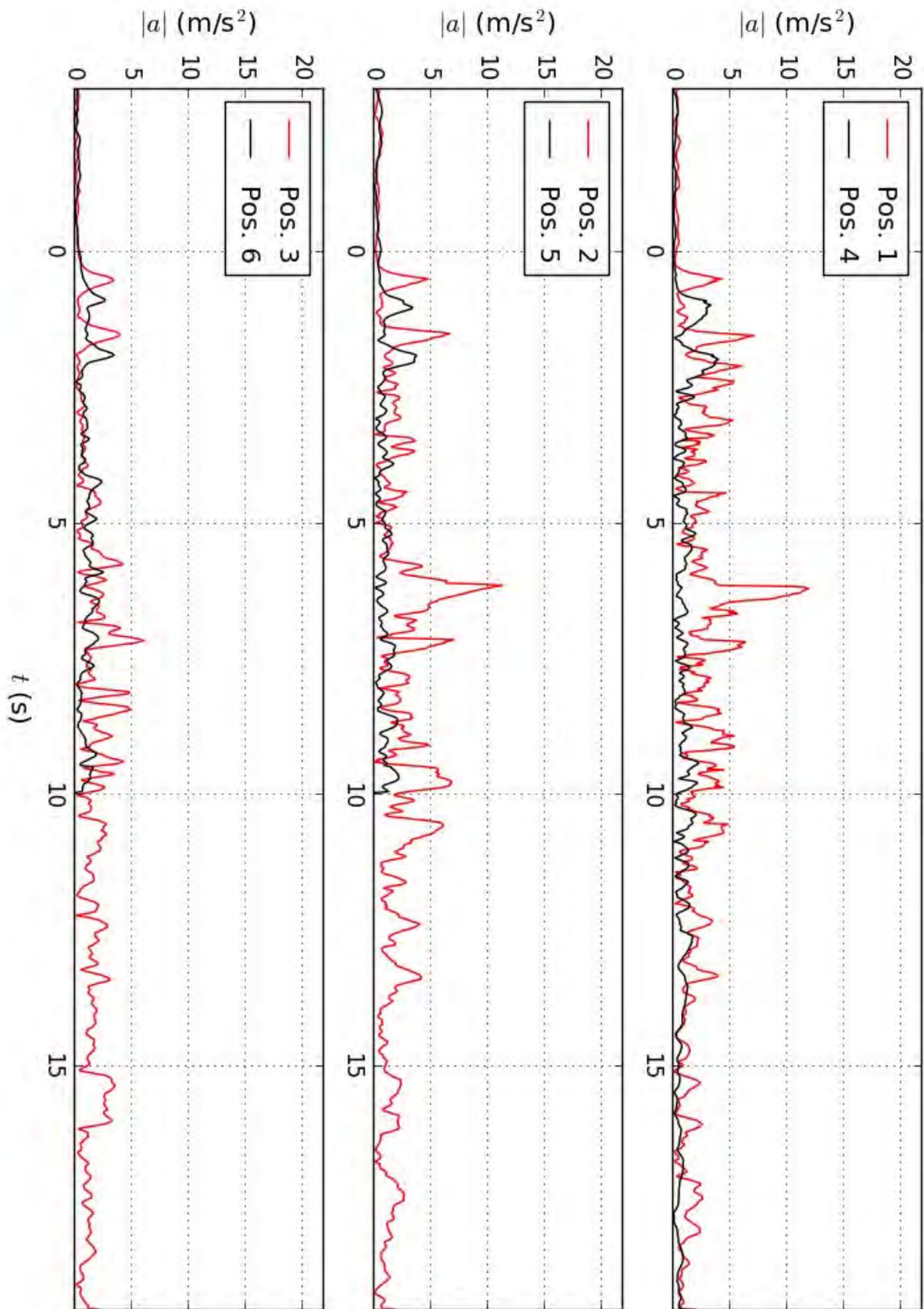


Abbildung C.132: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 19. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0 \text{ s}$.

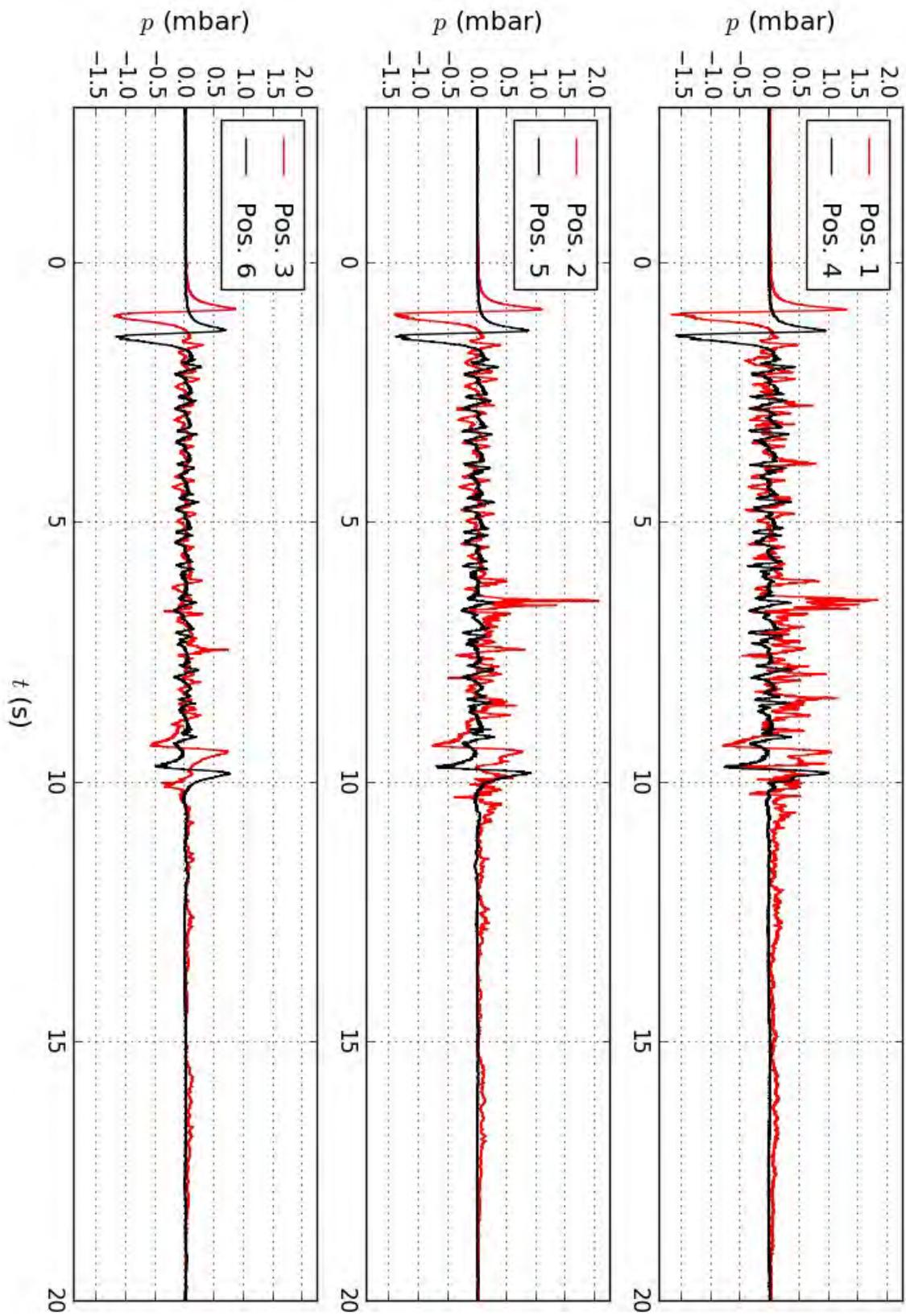


Abbildung C.133: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 19.

Zug 20

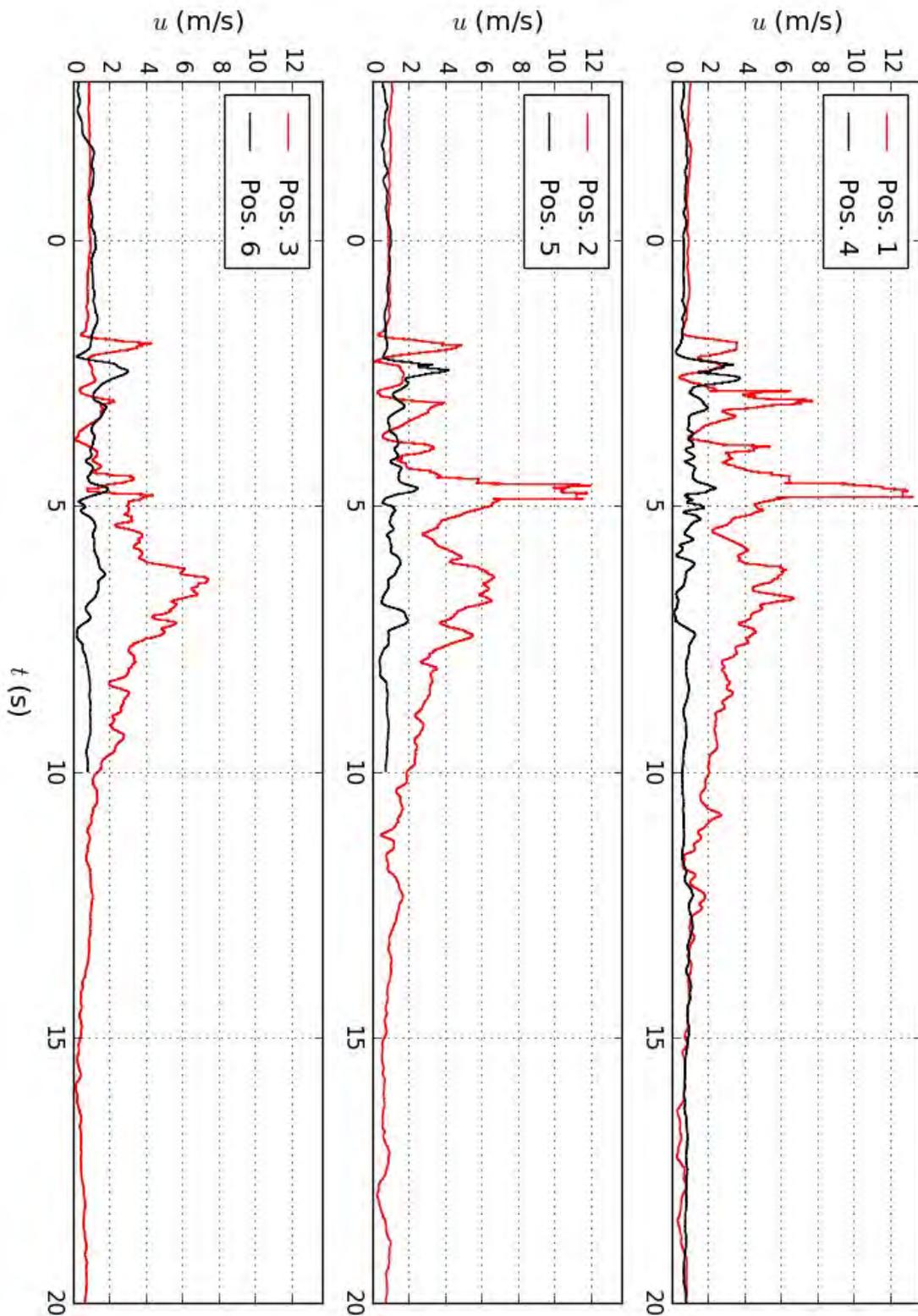


Abbildung C.134: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 20. Messdaten ungefiltert.

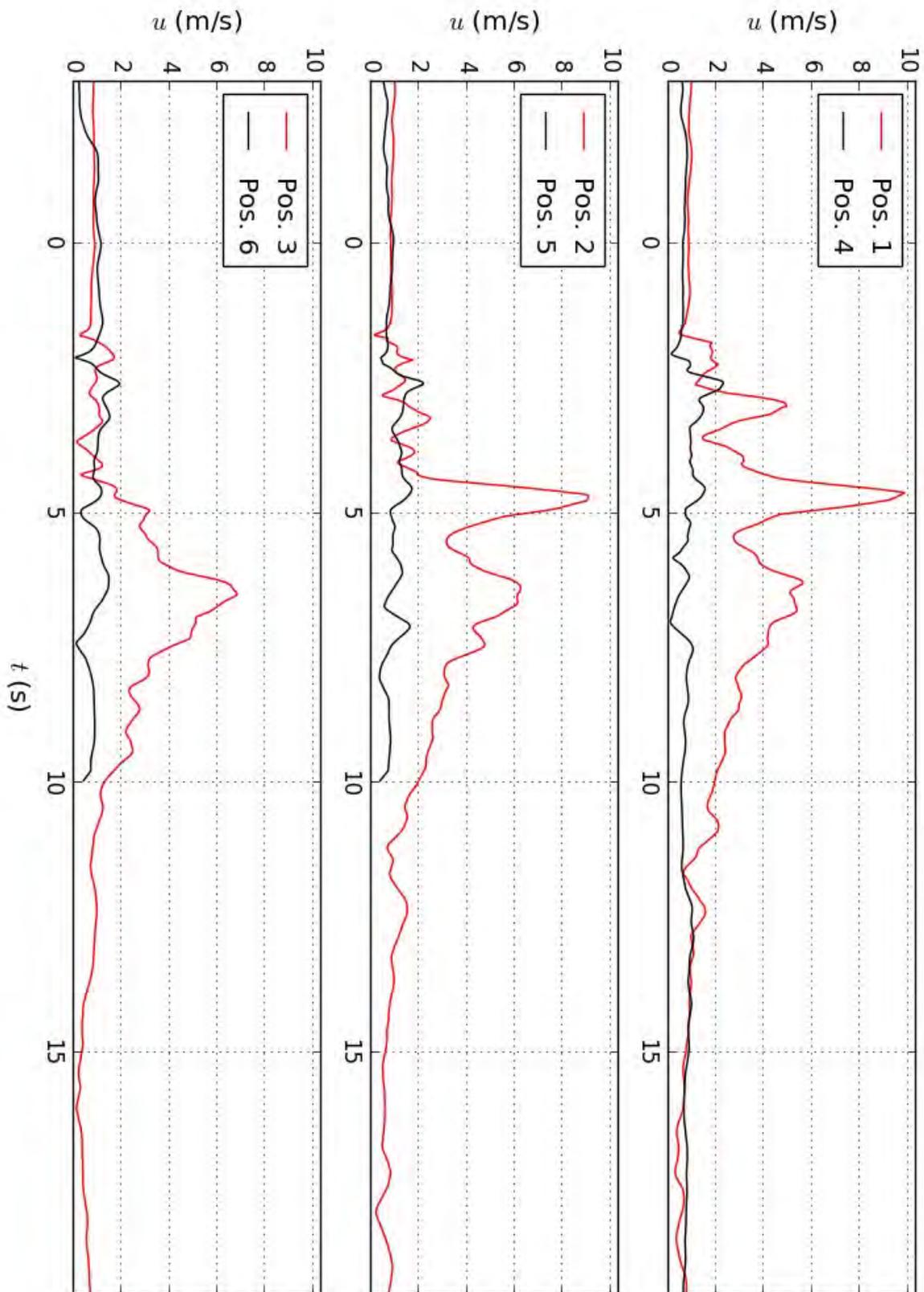


Abbildung C.135: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 20. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4$ s.

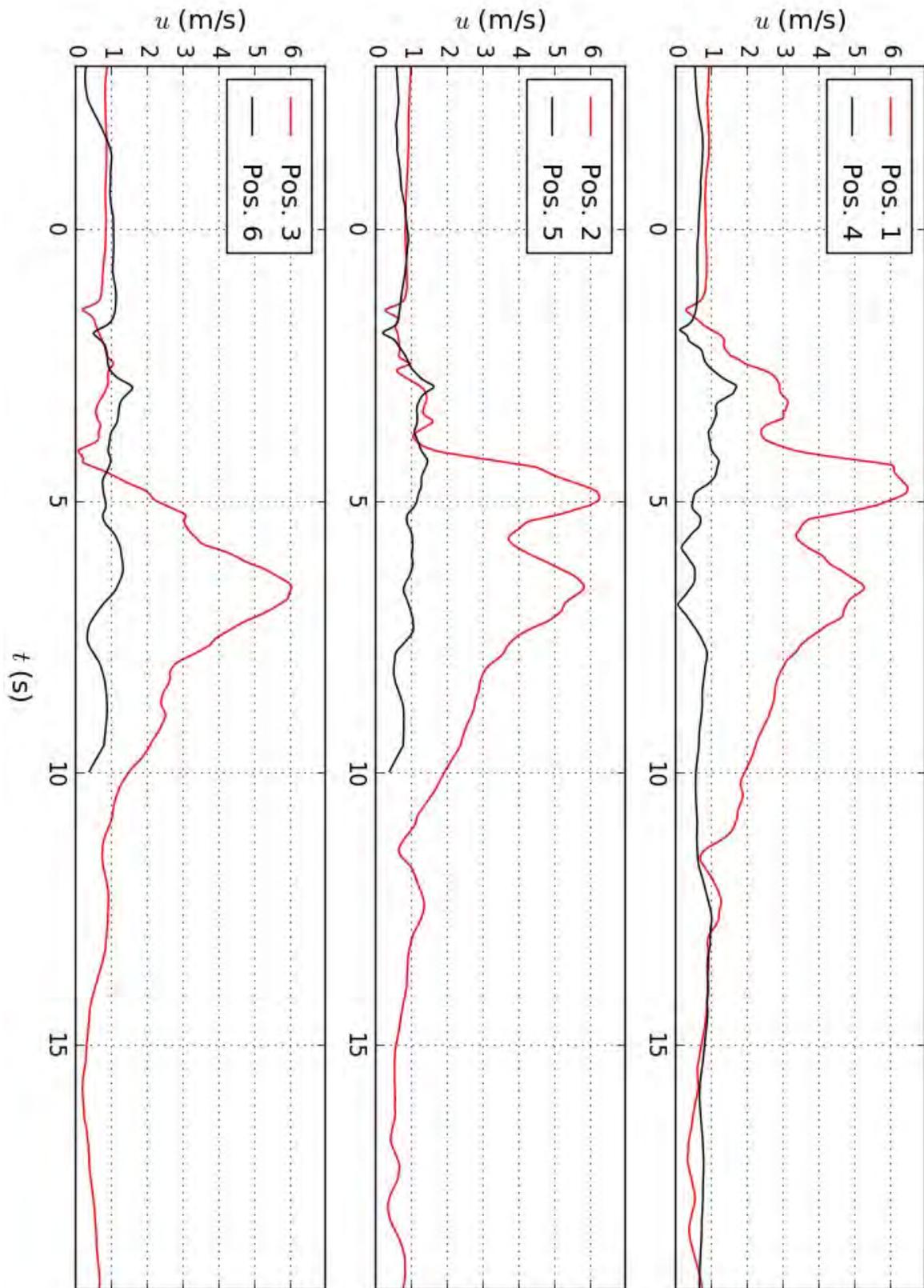


Abbildung C.136: Gemessene Fahrtwindentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 20. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

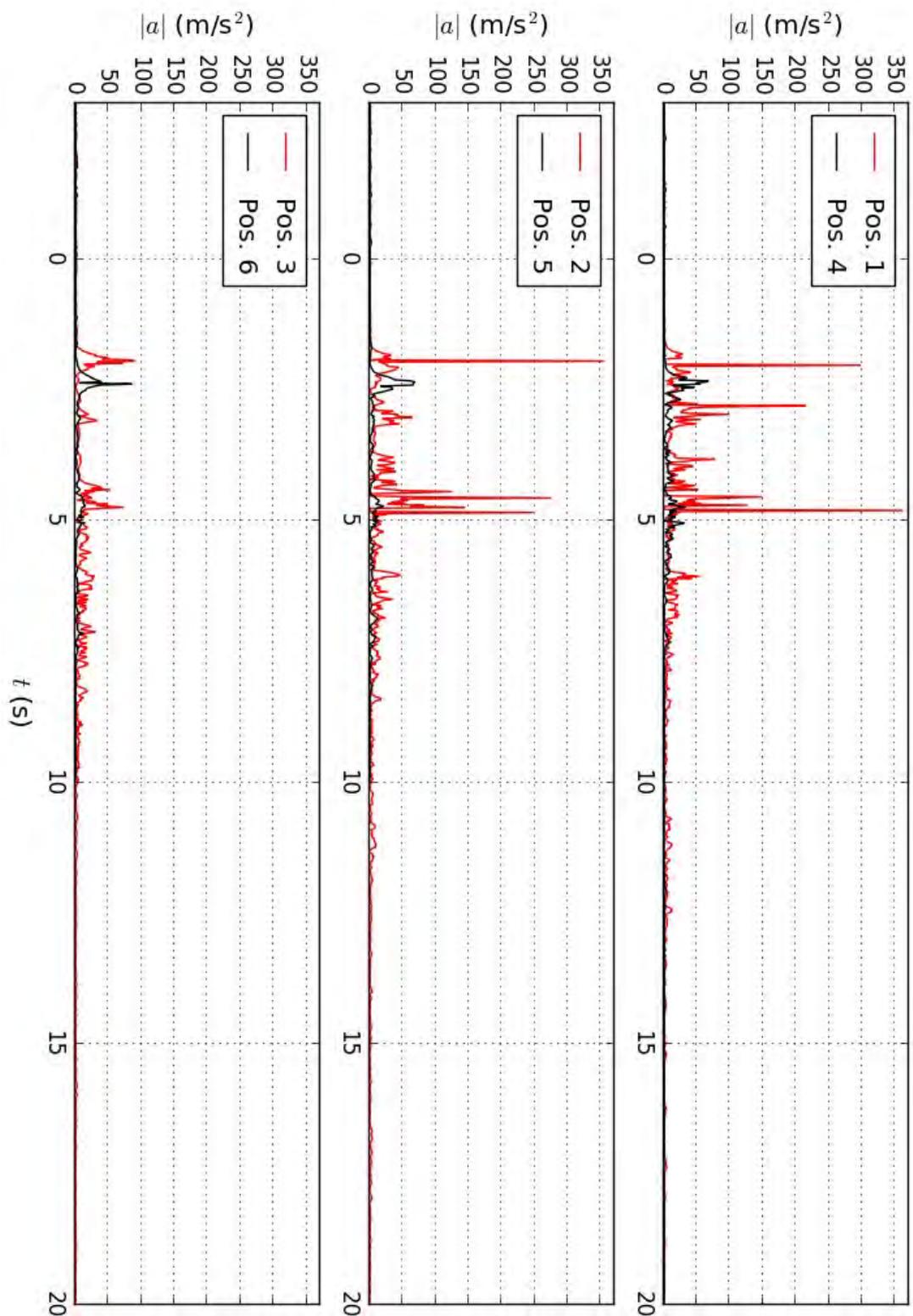


Abbildung C.137: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 20. Messdaten ungefiltert.

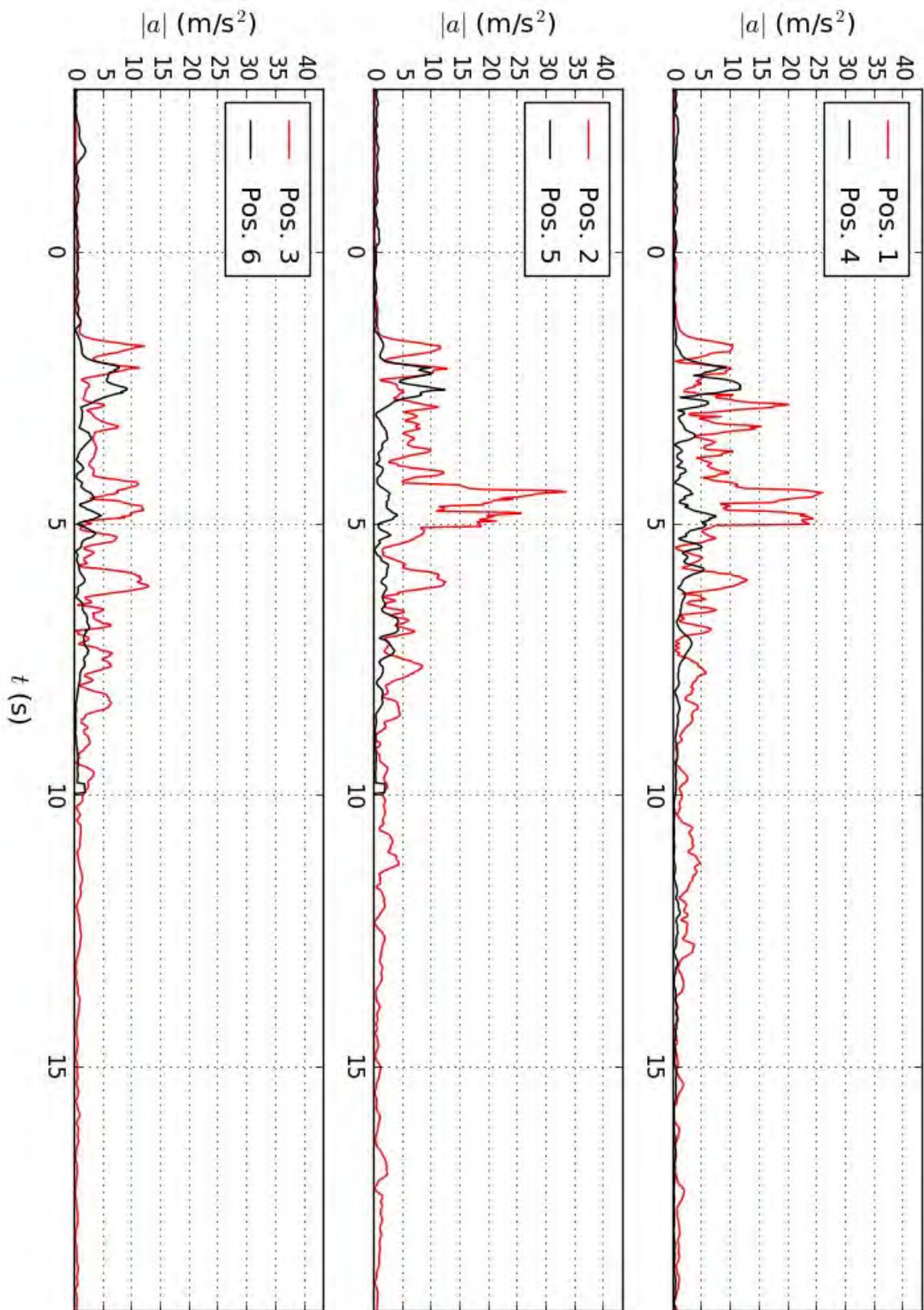


Abbildung C.138: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 20. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 0,4\text{s}$.

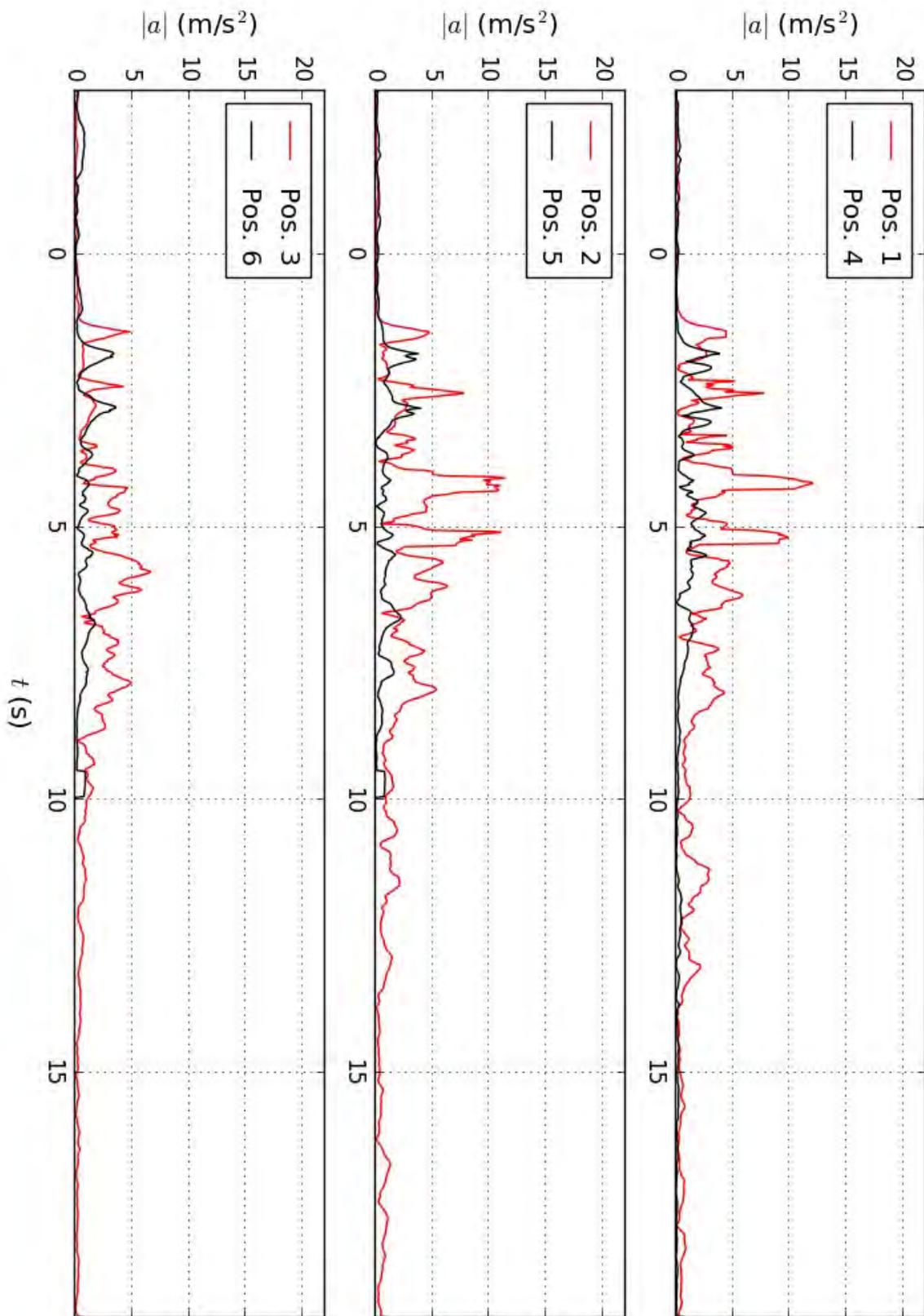


Abbildung C.139: Gemessene Windbeschleunigungsentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 20. Messdaten gefiltert mit $\Delta t = 1,0$ s.

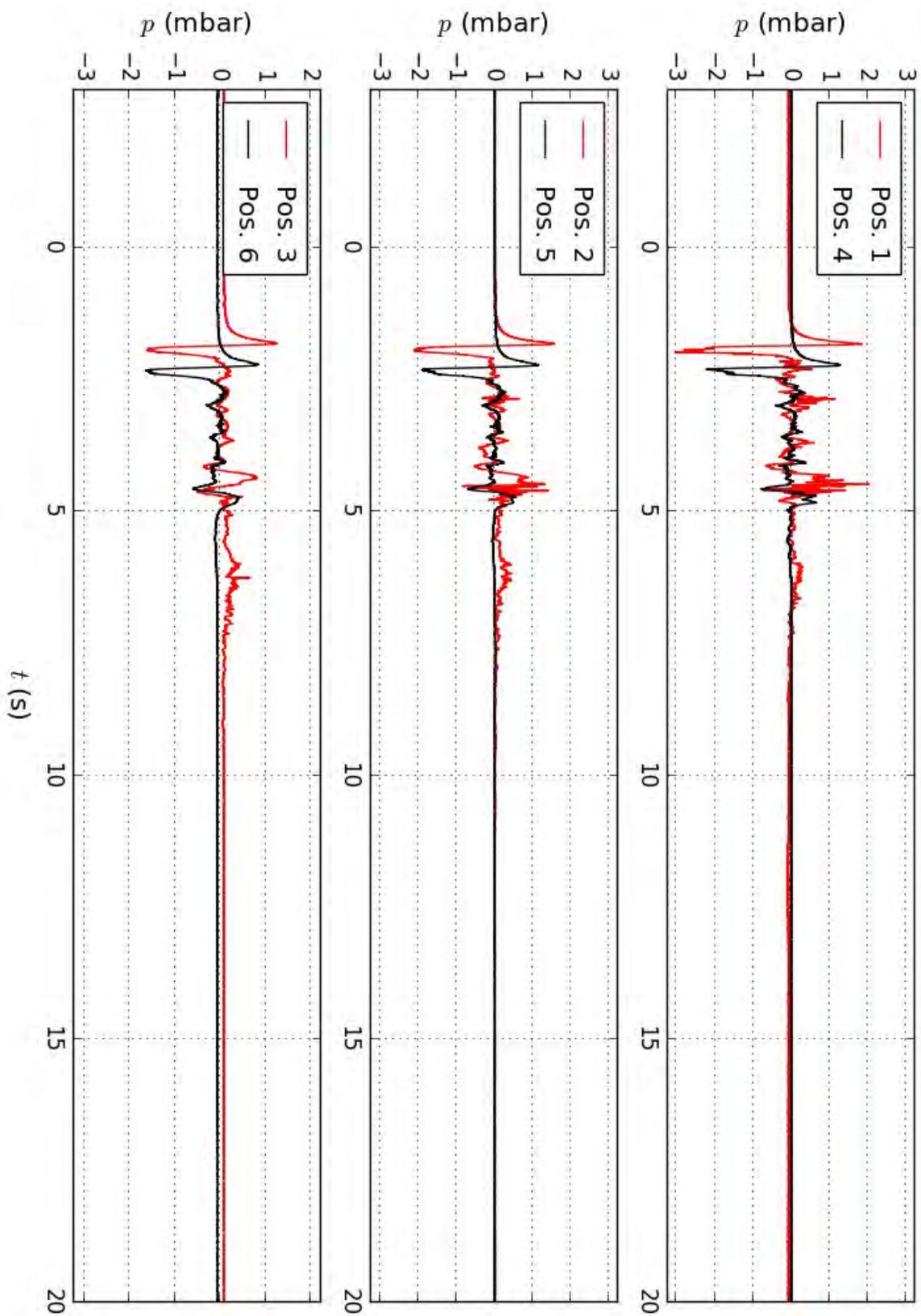


Abbildung C.140: Gemessene Druckentwicklung an den verschiedenen Messpositionen während der Passage von Zug 20.