

## **Frankenwaldbrücken (Hof-Lichtenberg, Deutschland)**


### **Windgutachten**

**Ermittlung der Bemessungswindlasten und Bewertung der  
aerodynamischen Stabilität des Brückendecks für die Konstellationen  
mit und ohne Eisansatz**

**Auftraggeber:** Landkreis Hof  
Schaumbergstraße 8  
95032 Hof

**Projektingenieur:** B. Eng. J. Lay  
M. Eng. T. Rudolph

Birkenfeld, 27. September 2019



Prof. Dipl.-Ing. J. Wacker  
Wacker Ingenieure

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1. PROBLEMSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2. METHODEN UND VORGEHENSWEISE .....</b>	<b>9</b>
2.1. Planunterlagen .....	9
2.2. Kraftmessungen am Sektionsmodell des Überbaus .....	10
2.3. Theoretische Bewertung der aerodynamischen Stabilität des Überbaus.....	15
2.4. Aeroelastische Untersuchungen am Sektionsmodell des Überbaus .....	17
2.5. Untersuchung böeninduzierter dynamischer Windlastanteile – Buffeting Analyse.....	23
2.6. Dreidimensionale numerische Strömungssimulation (CFD) – Topographieeinflüsse .....	26
<b>3. WINDKLIMA AM PROJEKTSTANDORT .....</b>	<b>29</b>
3.1. Extremwindanalyse und Bemessungsgrundlagen .....	29
3.2. Richtungsabhängigkeit $c_{dir}$ .....	33
3.3. Zugrunde gelegter Böenstaudruck zur Bemessung des Überbaus ohne Eisansatz.....	34
3.4. Zugrunde gelegter Böenstaudruck zur Bemessung des Überbaus mit Eisansatz .....	34
3.5. Nachweisgeschwindigkeit für Instabilitäten ohne Eisansatz.....	34
3.6. Nachweisgeschwindigkeit für Instabilitäten mit Eisansatz .....	35
<b>4. ERGEBNISSE DER NUMERISCHEN STRÖMUNGSSIMULATION .....</b>	<b>36</b>
4.1. Lohbachtalbrücke .....	36
4.2. Höllentalbrücke .....	40
<b>5. ERGEBNISSE DER WINDKANALUNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>45</b>
5.1. Statische Kraftbeiwerte .....	45
5.2. Sicherheit des Überbaus gegenüber Instabilitäten wie Galloping oder Flattern .....	65
<b>6. STATISCHE ERSATZWINDLASTEN FÜR DEN ÜBERBAU .....</b>	<b>77</b>
6.1. Windlasten aus Böenerregung .....	77
6.2. Windlasten in Längsrichtung des Brückendecks .....	93
<b>7. CHARAKTERISTISCHE WINDLASTEN FÜR DIE TRAG- UND HÄNGESEILE .....</b>	<b>93</b>
<b>8. VERWENDETE DOKUMENTE .....</b>	<b>94</b>

## **1. PROBLEMSTELLUNG**

Im Landkreis Hof in Bayern sollen zwei Hängeseilbrücken (Höllentalbrücke, Lohbachtalbrücke) realisiert werden. Die filigranen Hängeseilbrücken sind durch ihre exponierte Lage unmittelbar dem Wind ausgesetzt. Projektstandort und Geometrie werden durch Abb. 1.1 bis Abb. 1.7 verdeutlicht.

Es entspricht dem Stand der Technik, die Bemessungswindlasten, winderzeugte Schwingungen und die aerodynamische Stabilität (Galloping, Flattern) für derartige Brücken in einer Kombination von theoretischen, numerischen und experimentellen (Windkanalversuche) Untersuchungen zu ermitteln. Der Untersuchungsaspekt „aerodynamische Stabilität“ kommt dann zum Tragen, wenn im Rahmen der Planung bzw. der statischen Nachweise etwaige Schwingungsphänomene nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden können. Das Auftreten solcher Phänomene an der Großausführung muss jedoch mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden, da solche Schwingungen den Komfort beeinträchtigen können und/oder im Extremfall zum Versagen der Konstruktion führen.

Wacker Ingenieure, wurden im Zuge der weiteren Planungen für die Durchführung von theoretischen Voruntersuchungen, aerodynamischen Windkanaluntersuchungen sowie der Durchführung von dreidimensionalen numerischen Strömungssimulationen (CFD) beauftragt. Ziel der theoretischen Voruntersuchungen und der Windkanaluntersuchungen ist die Herleitung realistischer Windlastansätze sowie die Bewertung der aerodynamischen Eigenschaften der Hängeseilbrücken. Anhand der Strömungssimulationen erfolgt eine Bewertung des Topographieeinflusses aufgrund der exponierten Lage. Untersucht wurden dabei die Zustände ohne bzw. mit Eisansatz. Der für die Brücke zu beachtende Eisansatz wurde durch ein Gutachten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2019) definiert.

Zusammenfassend werden dabei folgende Aspekte betrachtet:

- Windklimaanalyse unter Berücksichtigung des Topographieeinflusses (CFD-Simulation)
- Experimentelle Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte des Brückendecks
- Theoretische bzw. numerische und experimentelle Untersuchung der windbedingten Schwingungsanfälligkeit der Brücke (Brückendeck)
- Buffeting-Analyse zur Ermittlung der statischen Ersatzwindlasten (Brückendeck)
- Charakteristische Windlasten auf die Seile

Im vorliegenden Bericht werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse erläutert.



**Abb. 1.1:** Illustration der Lohbachtalbrücke (SBP, 2019)



**Abb. 1.2:** Illustration der Höllentalbrücke (SBP, 2019)

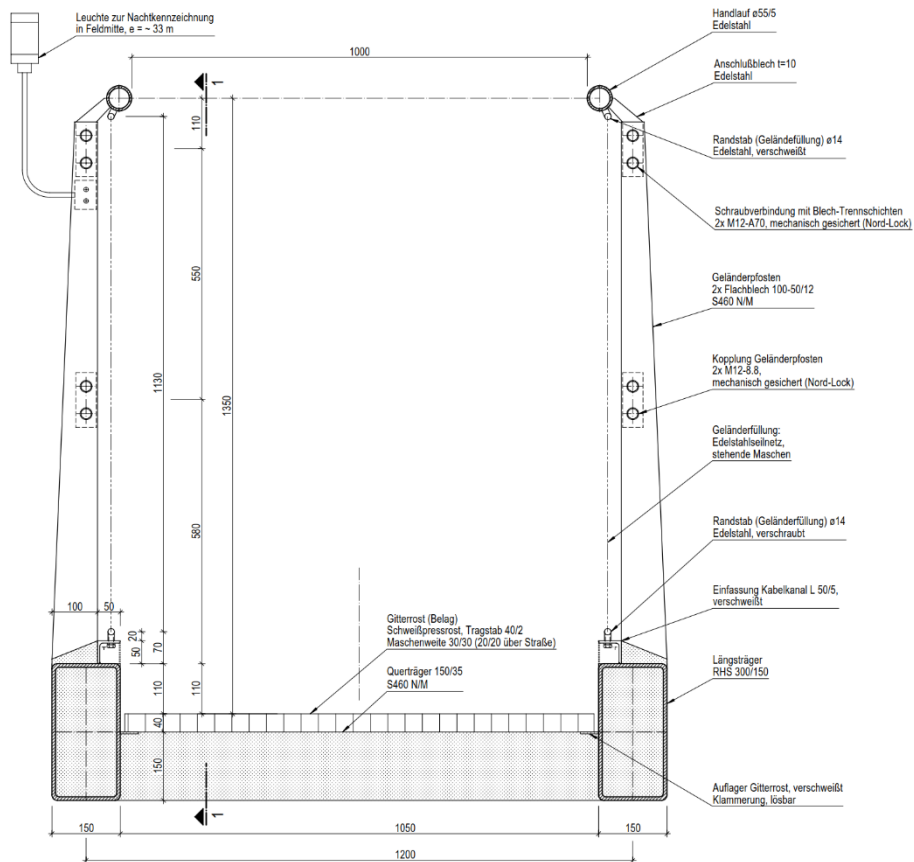
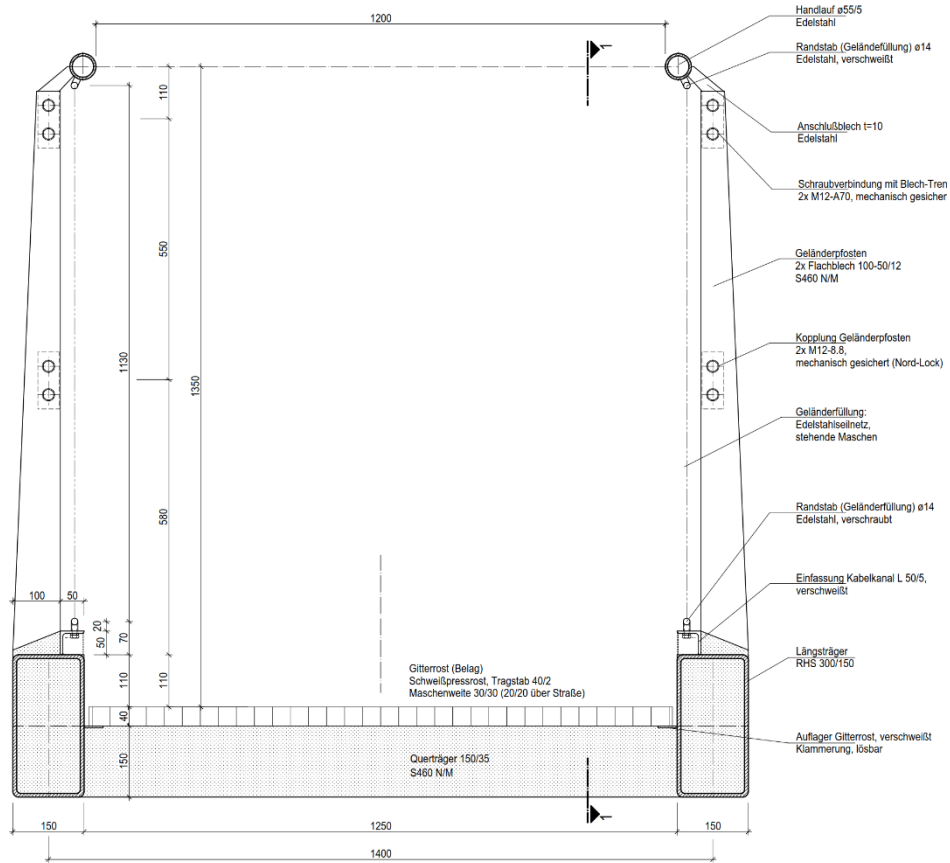


Abb. 1.3: Oben: Regelquerschnitt Lohbachtalbrücke; Unten: Regelquerschnitt Höllentalbrücke (SBP, 2019)

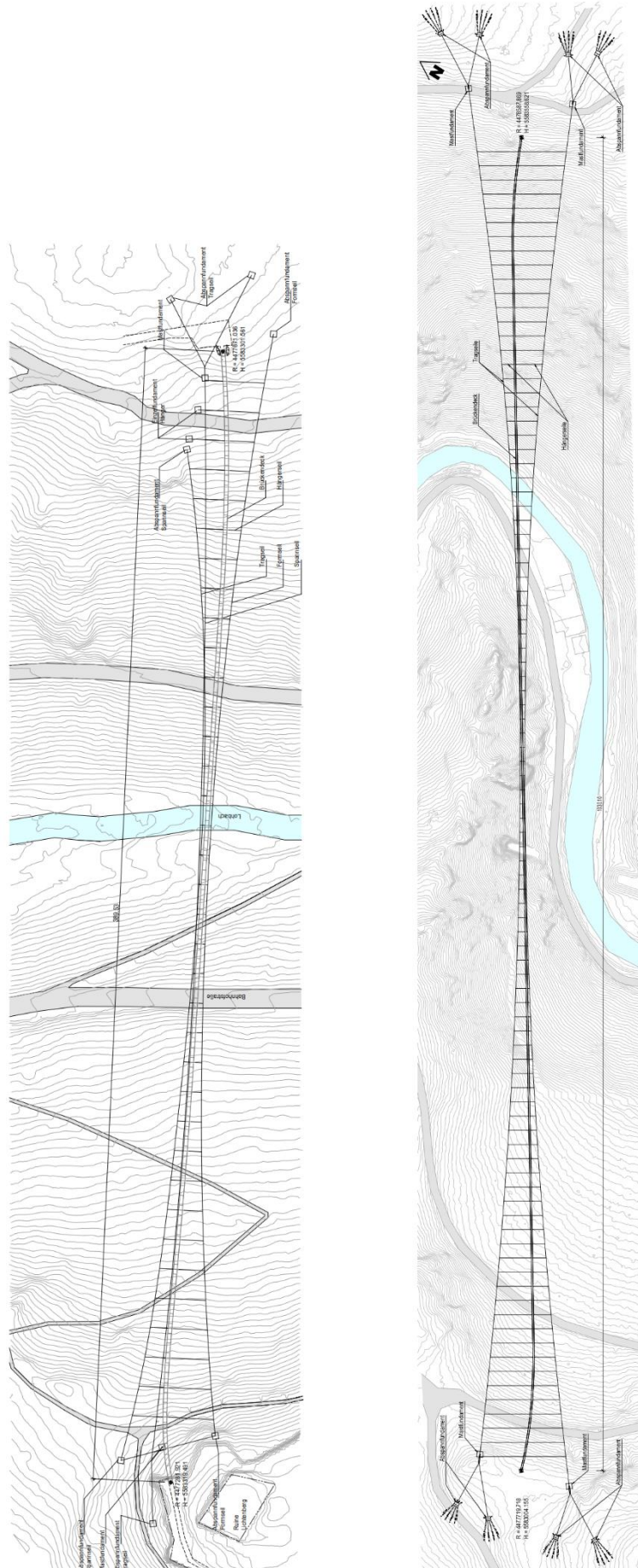


Abb. 1.4: Links: Draufsicht Lohbachtalbrücke; Rechts: Draufsicht Höllentalbrücke (SBP, 2019)



Abb. 1.5: Links: Seitensicht Lohbachtalbrücke; Rechts: Seitensicht Höllentalbrücke (SBP, 2019)



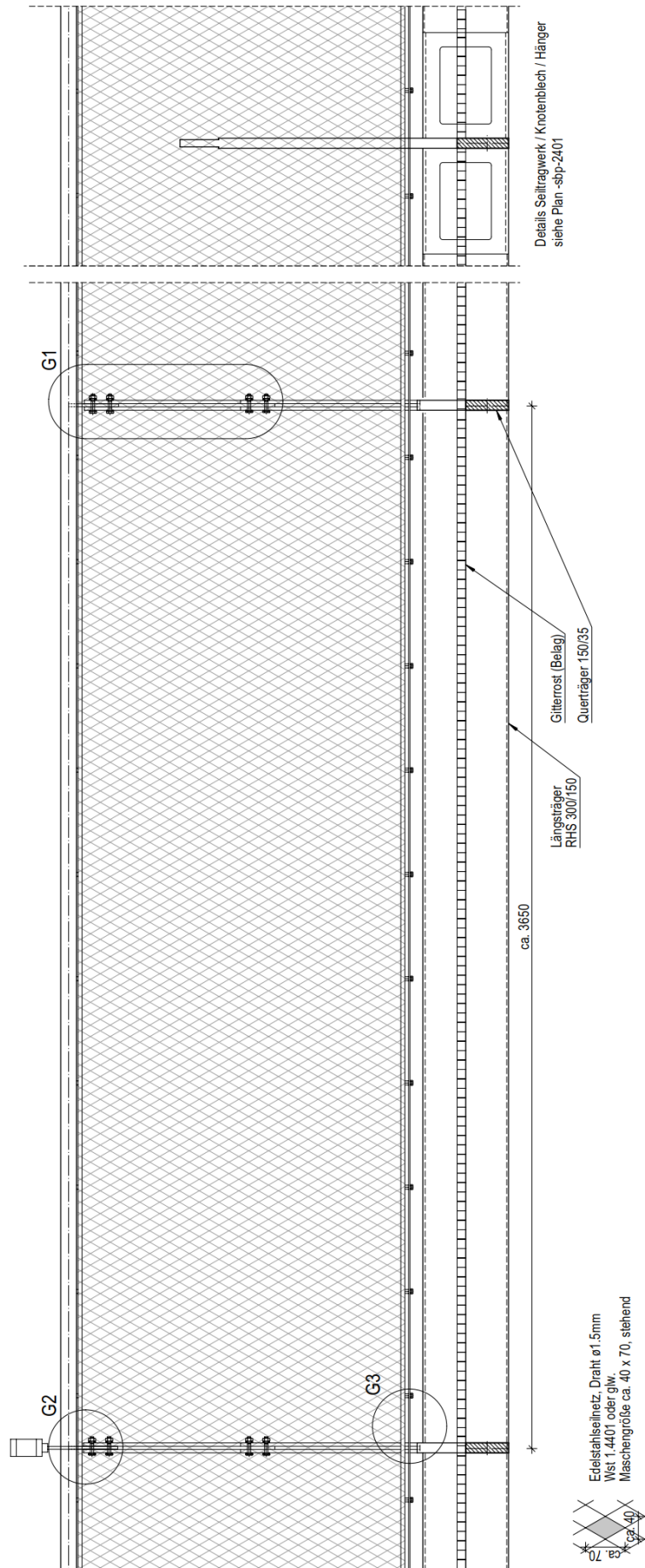


Abb. 1.6: Detailansicht Geländer (SBP, 2019)



Abb. 1.7: Projektstandort (Google Earth 2019)

## 2. METHODEN UND VORGEHENSWEISE

### 2.1. Planunterlagen

In Tab. 2.1 sind die verwendeten Planunterlagen aufgeführt.

Dateiname	Format	Quelle
2301_Übersicht Ansicht + Draufsicht 2401_Ausschnitt Seiltragwerk_Regelquerschnitte Seiltragwerk _ Deck 2402_Übersicht Seiltragwerk_Regeldetails Tragseil 2403_Regeldetails Hänger Formseil + Spannseil 2411_Regeldetails Geländer 2421_Regeldetails Mast 2501_Gründungen Übersicht 190906_EP-03721-sbp-3421_Höllentalbrücke_Mast 190909_EP-03721-sbp-3411_Höllentalbrücke_Regeldetails Geländer 190910_EP-03721-sbp-3301_Höllentalbrücke_Übersicht 190910_EP-03721-sbp-3402_Höllentalbrücke_Übersicht Seiltragwerk 190910_EP-03721-sbp-3403_Höllentalbrücke_Seilklemmen 190726_03721_ambr_Deckquerschnitt_mit_Spalt 190625_03721_ambr_Deckgewicht 190726_03721_Deckgewicht_Eis	PDF	SBP
190628_03721_HOE_Eigenformen 190628_03721_LOH_Eigenformen 190726_03721_HOE_Eigenformen_Eis 190726_03721_LOH_Eigenformen_Eis	XLSX	
hoe_v70_2 HOE_V70_EIG loh_V45 loh_V65_020	CDB	
689_5583t05dgm; 689_5584t05dgm; 689_5585t05dgm; 689_5586t05dgm 690_5583t05dgm; 690_5584t05dgm; 690_5585t05dgm; 690_5586t05dgm 691_5583t05dgm; 691_5584t05dgm; 691_5585t05dgm; 691_5586t05dgm 692_5583t05dgm; 692_5584t05dgm; 692_5585t05dgm; 692_5586t05dgm	TXT	LDBV

**Tab. 2.1:** Verwendete Planunterlagen

## 2.2. Kraftmessungen am Sektionsmodell des Überbaus

Die Ermittlung der Windkräfte und -momente wurde mittels Windkanalversuchen nach den aktuellen Richtlinien der WtG (1996), ASCE 2012, DIN EN 1991-1-4 (2010), DIN EN 1991-1-4/NA (2010) vorgenommen. Die geforderten Ähnlichkeitsbedingungen (geometrische Ähnlichkeit des Modells, Ähnlichkeit der Anströmung, Ähnlichkeit der Umströmung des Modells) wurden eingehalten.

Die Windkanalversuche wurden in einem ca. 7 m langen Windkanal mit einem 1.3 m x 1.3 m großen Messquerschnitt durchgeführt, welcher speziell für die Untersuchung von Brückensektionsmodellen konzipiert wurde. Die Anströmung stellt eine homogene turbulente Strömung ohne vertikale Gradienten dar. Dies entspricht einer turbulenten Strömung mit einer konstanten mittleren Geschwindigkeitsschwankung im gesamten Strömungsfeld. Im Gegensatz zu einer Grenzschichtströmung weißt die Strömung keine Geschwindigkeitsänderung über die Höhe des Windkanals auf.

Für die Windlastuntersuchungen wurden für die Messung von Windkräften geeignete starre Sektionsmodelle des Brückenquerschnittes in einem geometrischen Maßstab von typischerweise 1/10 - 1/100 gefertigt. Das Sektionsmodell stellt einen zweidimensionalen Ausschnitt der Brücke dar. Als Basis für den Modellbau dienen die übermittelten Pläne des Querschnitts. Alle strömungstechnisch relevanten Details der Brücke werden beim Modellbau berücksichtigt, insbesondere die scharfen Kanten sowie der geplante Übersteigschutz des Querschnitts.

Das Brücken-Sektionsmodell wurde auf einer 3 Komponenten Kraftwaage installiert, mit der die Windkräfte auf den Brückenquerschnitt (Widerstand, Auftrieb und Torsionsbelastung) direkt gemessen werden können. Die auf diese Weise gemessenen dimensionslosen Kraftbeiwerte - normiert mit dem dynamischen Druck der ungestörten Anströmung - sind wegen der weiter oben beschriebenen Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze direkt auf die Großausführung übertragbar.

Die quasistatischen aerodynamischen Kraftbeiwerte sind wie folgt definiert:

$$\text{Beiwert X-Richtung: } C_x = \frac{F_x}{1/2 * \rho * U_{ref}^2 * H}$$

$$\text{Beiwert Z-Richtung: } C_z = \frac{F_z}{1/2 * \rho * U_{ref}^2 * B}$$

$$\text{Widerstandsbeiwert: } C_{Drag} = \frac{F_{Drag}}{1/2 * \rho * U_{ref}^2 * H}$$

Auftriebsbeiwert: 
$$C_{Lift} = \frac{F_{Lift}}{1/2 * \rho * U_{ref}^2 * B}$$

Momentenbeiwert: 
$$C_{Mt} = \frac{M_t}{1/2 * \rho * U_{ref}^2 * B^2}$$

- Mit:
- $U_{ref}$  = mittlere Bezugsgeschwindigkeit
  - $B$  = Bezugsbreite des Querschnitts
  - $H$  = Bezugshöhe des Querschnitts
  - $\rho$  = Luftdichte

Die projektspezifischen Parameter der Kraftmessung sind in Tab. 2.2 dokumentiert.

Parameter	Wert
Geometrischer Modellmaßstab	1/10
Windkanalgeschwindigkeit	12 m/s
Anstellwinkel	-15° bis 15° in 1°-Schritten
Bezugsbreite des Querschnitts	siehe Koordinatensystem (Abb. 2.1)
Bezugshöhe des Querschnitts	1.49 m
Koordinatensystem	Abb. 2.1
Planunterlagen	Tab. 2.1
Versuchskonstellationen	Tab. 2.3

**Tab. 2.2:** Projektspezifische Parameter für die Kraftmessungen an den Sektionsmodellen

Nr.	Versuchskonstellation	Windkanalmodell
1	Ohne Eisansatz	Abb. 2.2
2	Vollständige Vereisung	Abb. 2.3
3	Vereisung Gitterrost	Abb. 2.4
4	Vereisung Geländernetz	Abb. 2.5
5	Vollständige Vereisung mit Spalt	Abb. 2.6

**Tab. 2.3:** Im Zuge der Kraftmessungen betrachtete Versuchskonstellationen

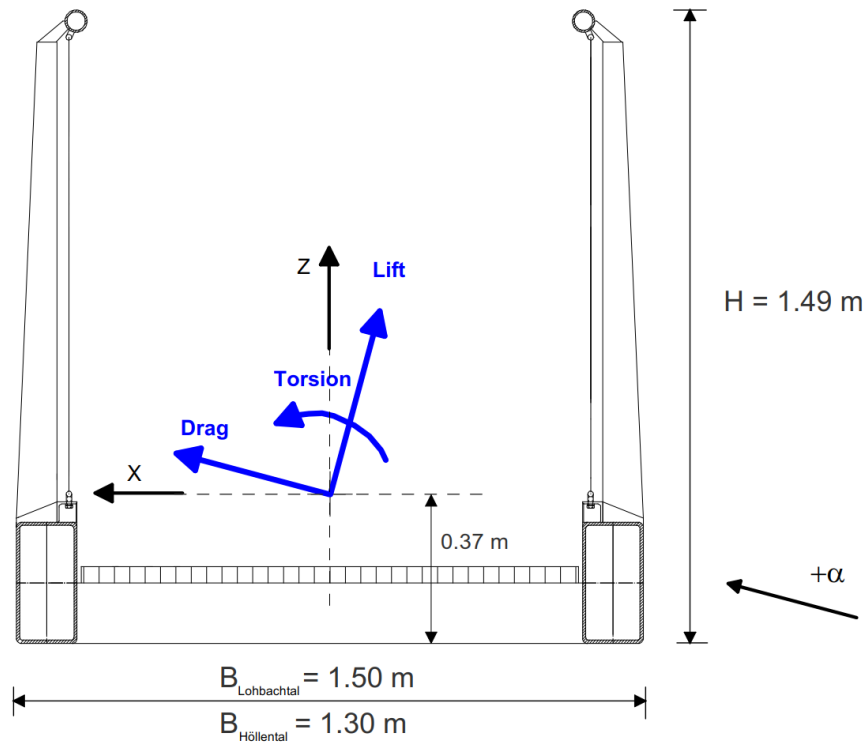


Abb. 2.1: Definition des Koordinatensystems, Bezugslängen und Anstellwinkel

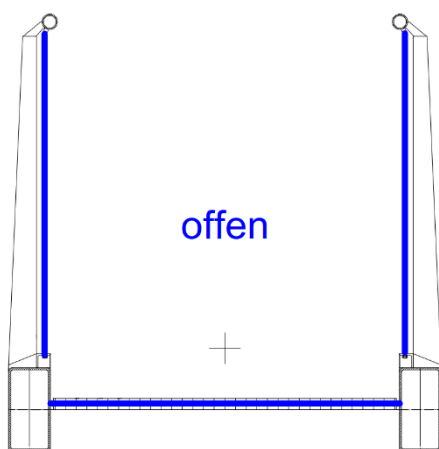
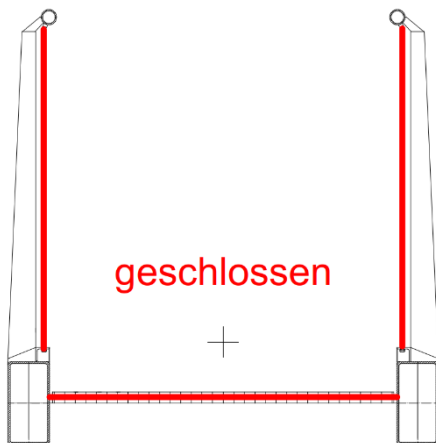
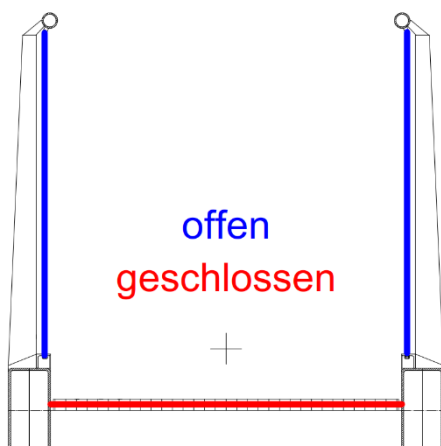


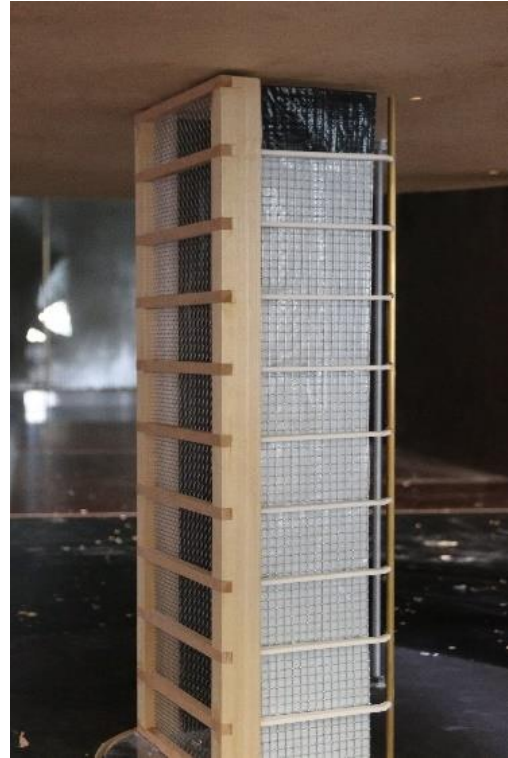
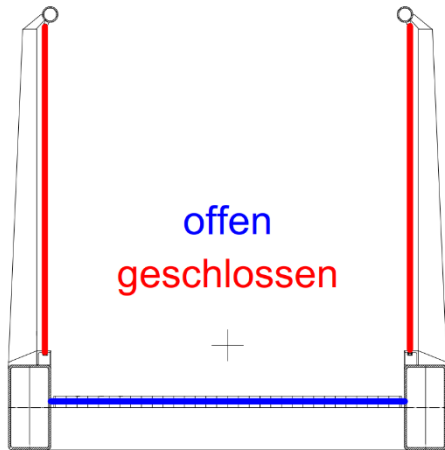
Abb. 2.2: Bild des Sektionsmodells für die Kraftmessung – Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“



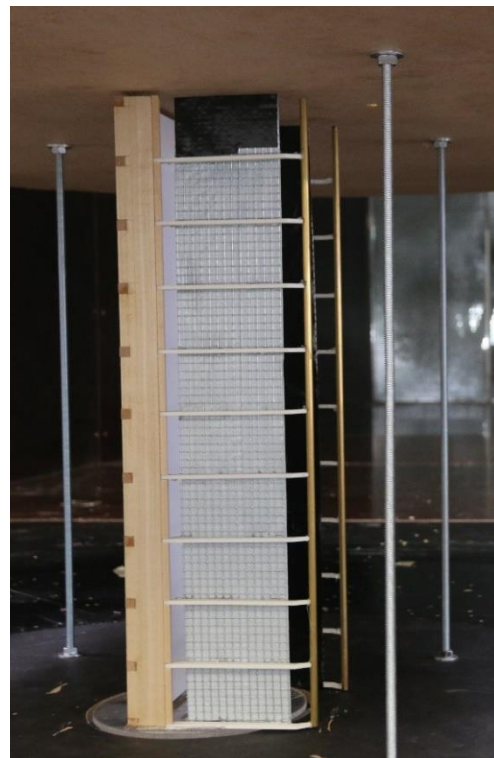
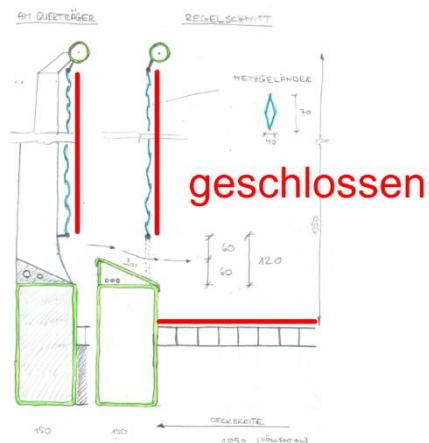
**Abb. 2.3:** Bild des Sektionsmodells für die Kraftmessung – Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“



**Abb. 2.4:** Bild des Sektionsmodells für die Kraftmessung – Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“



**Abb. 2.5:** Bild des Sektionsmodells für die Kraftmessung – Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“



**Abb. 2.6:** Bild des Sektionsmodells für die Kraftmessung – Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“



### 2.3. Theoretische Bewertung der aerodynamischen Stabilität des Überbaus

Zur theoretischen Bewertung der aerodynamischen Stabilität des Brückendecks wurde das Stabilitätskriterium nach „Den Hartog“ verwendet (u. a. RW, 1982). Das Stabilitätskriterium nach „Den Hartog“ wird durch folgenden Ausdruck beschrieben.

Der Querschnitt ist stabil, wenn

$$c_{drag} + \frac{d c_{lift}}{d \alpha} > 0$$

und ist instabil, wenn

$$c_{drag} + \frac{d c_{lift}}{d \alpha} < 0$$

Wenn das Stabilitätskriterium  $< 0$  ist gilt des Weiteren

$$c_{drag} + \frac{d c_{lift}}{d \alpha} = - a_G$$

Durch den Stabilitätsbeiwert  $a_G$  kann anhand des Eurocodes und unter Berücksichtigung der Strukturparameter die Einsetzgeschwindigkeit einer Gallopinginstabilität in Vertikalrichtung bestimmt werden. Eine Bewertung in Torsionsrichtung ist nicht möglich.

Die projektspezifischen Parameter zur theoretischen Bewertung der aerodynamischen Stabilität des Brückendecks sind in Tab. 2.4 dokumentiert.

Parameter	Wert
Betrachtete Anstellwinkel	-15° bis 15° in 1°-Schritten
Planunterlagen	Tab. 2.1
Versuchskonstellationen	Tab. 2.3
Strukturparameter Lohbachtalbrücke	Tab. 2.5
Strukturparameter Höllentalbrücke	Tab. 2.6

**Tab. 2.4:** Projektspezifische Parameter zur theoretischen Bewertung der aerodynamischen Stabilität des Brückendecks

Nr.	Versuchskonstellation	Masse [kg/m]	Strukturdämpfung (Logarithmisches Dekrement)	Vertikale Eigenfrequenz [Hz]
1	Ohne Eisansatz	210	0.03	0.33
2	Vollständige Vereisung	454	0.03	0.30
3	Vereisung Gitterrost	292	0.03	0.30
4	Vereisung Geländernetz	372	0.03	0.30
5	Vollständige Vereisung mit Spalt	454	0.03	0.30

**Tab. 2.5:** Projektspezifische Parameter zur theoretischen Bewertung der aerodynamischen Stabilität des Brückendecks – Lohbachtalbrücke

Nr.	Versuchskonstellation	Masse [kg/m]	Strukturdämpfung (Logarithmisches Dekrement)	Vertikale Eigenfrequenz [Hz]
1	Ohne Eisansatz	177	0.03	0.15
2	Vollständige Vereisung	352	0.03	0.15
3	Vereisung Gitterrost	235	0.03	0.15
4	Vereisung Geländernetz	294	0.03	0.15
5	Vollständige Vereisung mit Spalt	352	0.03	0.15

**Tab. 2.6:** Projektspezifische Parameter zur theoretischen Bewertung der aerodynamischen Stabilität des Brückendecks – Höllentalbrücke

#### **2.4. Aeroelastische Untersuchungen am Sektionsmodell des Überbaus**

Das Auftreten von aeroelastischen Effekten wie wirbelerregten Querschwingungen und/oder aerodynamische Instabilitäten (Galloping, Flattern) kann in Windkanalversuchen mit Sektionsmodellen nachgewiesen werden. Hierbei wird das Verhalten eines 2-dimensionalen Querschnitts des Brückendecks in zwei Freiheitsgraden (Vertikale und Torsionsbewegung) unter Einhaltung der relevanten Ähnlichkeitskennzahlen in einem Windkanal untersucht.

Das in sich starre Sektionsmodell wurde in einer speziellen Aufhängung mit Spiralfedern elastisch gelagert, so dass die geforderten Schwingungsbewegungen der Brücke (Vertikalbewegung, Rotation) nachgebildet werden können. Die Auflagerpunkte des Sektionsmodells sind drehbar ausgestaltet, so dass verschiedene Anström- bzw. Neigungswinkel simuliert werden können. Der Querschnitt des für die Untersuchungen benutzten Windkanals beträgt 1.30 m auf 1.30 m. Die Windgeschwindigkeitsmessungen erfolgen mit Prandtlrohren. Während des Kanalbetriebs wurde die Windgeschwindigkeit an einer festgelegten Referenzstelle ständig überwacht. Die Strömung stellt eine turbulente Anströmung ohne vertikalen Gradienten dar.

Das Sektionsmodell wurde anhand der übermittelten Pläne gefertigt. Der geometrische Maßstab wurde dabei so gewählt, dass zum einen die aerodynamischen Versuchsbedingungen eingehalten werden können (u.a. Modellierung von kleinen, aerodynamisch wichtigen Details; Versperrung des Windkanals) und zum anderen ein ausreichender Geschwindigkeitsmaßstab erreicht werden kann, so dass alle Windgeschwindigkeiten bis zur Nachweisgeschwindigkeit im Windkanal realisiert werden können. Die Massen und die Massenverteilung des Modells wurde so gewählt, dass das Sektionsmodell die dynamischen Ähnlichkeitsbedingungen erfüllt.

Der Testablauf für jeden Anstellwinkel ergibt sich folgendermaßen: Die Windgeschwindigkeit des Windkanals wird von 0 m/s bis zur maximalen Nachweisgeschwindigkeit in kleinen Schritten (1-2 m/s im Originalmaßstab) erhöht und jeweils die Reaktion, d.h. die Bewegungen des Querschnitts in vertikaler und in Torsionsrichtung aufgezeichnet. Die Bewegungen wurde mittels außerhalb des Windkanals platzierter Beschleunigungssensoren erfasst.

Das Ziel der Untersuchung liegt in der Feststellung, ob im für den Standort der Großausführung zu beachtenden Geschwindigkeitsbereich mit wirbelerregten Querschwingungen und/oder aerodynamischen Instabilitäten zu rechnen ist. Hierzu wurden die ermittelten Auslenkungen des Querschnitts (Standardabweichungen) über die reduzierte Geschwindigkeit  $U_{red}$  aufgetragen, welche wie folgt definiert ist:

$$U_{red} = \frac{U_{mittel}}{f_e * B} [-]$$

- Mit:  $U_{mittel}$  = mittlere Windgeschwindigkeit [m/s] in Höhe Brückendeck  
 $f_e$  = Vertikal- oder Torsionsfrequenz [Hz]  
 $B$  = Bezugsbreite Querschnitt [m]

Wirbelerregte Querschwingungen rufen eine harmonische Reaktion des Brückenquerschnitts in der Regel in Vertikalrichtung hervor. Die Amplitude dieser Schwingung ist bei einer kritischen Windgeschwindigkeit maximal und fällt bei größeren und kleineren Geschwindigkeiten schnell ab. Unter Berücksichtigung der Massen- und Dämpfungseigenschaften des Sektionsmodells wird die maximale Amplitude verwendet, um die zu erwartenden Amplituden, Beschleunigungen und Trägheitskräfte der Originalausführung zu prognostizieren.

Eine Instabilität des Brückenquerschnittes ist gekennzeichnet durch einen starken, überproportionalen Anstieg der Standardabweichungen der Verformungen. Ein gängiges Kriterium zur Abgrenzung der kritischen Windgeschwindigkeit einer Instabilität in Rotationsrichtung besagt, dass die kritische Windgeschwindigkeit in Sektionsmodelluntersuchungen bei einer Verdrehung des Querschnittes von  $1.5^\circ$  erreicht ist. Bei resonanten Schwingungsbedingungen dominiert im Antwortspektrum der Verformungen eine sinusförmige Reaktion, d.h. die maximale Verformung (Amplitude) ergibt sich näherungsweise aus der Multiplikation der Standardabweichung mit  $\sqrt{2}$ . Drückt man das o.g. Grenzkriterium als Standardabweichung aus, ergibt sich daher ein Wert von  $1.06^\circ$ . Diese Verdrehung (Standardabweichung, rms-Wert) wurde nachfolgend zur Abgrenzung einer Instabilität in Rotationsrichtung verwendet.

Die projektspezifischen Parameter der aeroelastischen Windkanalversuche sind in Tab. 2.7 zusammengefasst.

Parameter	Wert
Geometrischer Modellmaßstab	1/15
Windkanalgeschwindigkeit	0 - 22 m/s
Nachweisgeschwindigkeit	Kap. 3
Anstellwinkel	-3° bis +3° in 3°-Schritten
Planunterlagen	Tab. 2.1
Versuchskonstellationen	Tab. 2.8
Strukturparameter Lohbachtalbrücke	Tab. 2.9
Strukturparameter Höllentalbrücke	Tab. 2.10

**Tab. 2.7:** Versuchsparameter der aeroelastischen Windkanalversuche

Nr.	Versuchskonstellation	Windkanalmodell
2	Vollständige Vereisung	Abb. 2.8
3	Vereisung Gitterrost	Abb. 2.9
4	Vereisung Geländernetz	Abb. 2.10
5	Vollständige Vereisung mit Spalt	Abb. 2.11

**Tab. 2.8:** Im Zuge der aeroelastischen Untersuchungen betrachtete Versuchskonstellationen

Parameter		Originalgröße	Modellgröße
Masse	Vollständige Vereisung	454 kg/m	2.02 kg/m
	Vereisung Gitterrost	292 kg/m	1.30 kg/m
	Vereisung Geländernetz	372 kg/m	1.65 kg/m
	Vollständige Vereisung mit Spalt	454 kg/m	2.02 kg/m
Vertikale Eigenfrequenz	Vollständige Vereisung	$f_{e,V} = 0.30 \text{ Hz}$	$f_{e,V} = 2.57 \text{ Hz}$
	Vereisung Gitterrost		$f_{e,V} = 1.58 \text{ Hz}$
	Vereisung Geländernetz		$f_{e,V} = 2.25 \text{ Hz}$
	Vollständige Vereisung mit Spalt		$f_{e,V} = 2.58 \text{ Hz}$
Torsions-eigenfrequenz	Vollständige Vereisung	$f_{e,T} = 0.69 \text{ Hz}$	$f_{e,T} = 7.33 \text{ Hz}$
	Vereisung Gitterrost		$f_{e,T} = 4.40 \text{ Hz}$
	Vereisung Geländernetz		$f_{e,T} = 5.10 \text{ Hz}$
	Vollständige Vereisung mit Spalt		$f_{e,T} = 8.00 \text{ Hz}$
Strukturdämpfung (Logarithmisches Dekrement)		0.03	0.03

**Tab. 2.9:** Strukturparameter der Lohbachtalbrücke im Originalmaßstab und im Modellmaßstab

Parameter		Originalgröße	Modellgröße
Masse	Vollständige Vereisung	352 kg/m	1.56 kg/m
	Vereisung Gitterrost	235 kg/m	1.04 kg/m
	Vereisung Geländernetz	294 kg/m	1.31 kg/m
	Vollständige Vereisung mit Spalt	352 kg/m	1.56 kg/m
Vertikale Eigenfrequenz	Vollständige Vereisung	$f_{e,v} = 0.15 \text{ Hz}$	$f_{e,v} = 2.57 \text{ Hz}$
	Vereisung Gitterrost		$f_{e,v} = 1.58 \text{ Hz}$
	Vereisung Geländernetz		$f_{e,v} = 2.25 \text{ Hz}$
	Vollständige Vereisung mit Spalt		$f_{e,v} = 2.58 \text{ Hz}$
Torsions-eigenfrequenz	Vollständige Vereisung	$f_{e,T} = 0.41 \text{ Hz}$	$f_{e,T} = 7.33 \text{ Hz}$
	Vereisung Gitterrost		$f_{e,T} = 4.40 \text{ Hz}$
	Vereisung Geländernetz		$f_{e,T} = 5.10 \text{ Hz}$
	Vollständige Vereisung mit Spalt		$f_{e,T} = 8.00 \text{ Hz}$
Strukturdämpfung (Logarithmisches Dekrement)		0.03	0.03

Tab. 2.10: Strukturparameter der Höllentalbrücke im Originalmaßstab und im Modellmaßstab

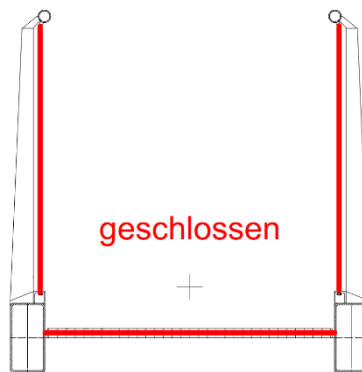


Abb. 2.8: Bild des Sektionsmodells für die aeroelastischen Windkanalversuche – Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“

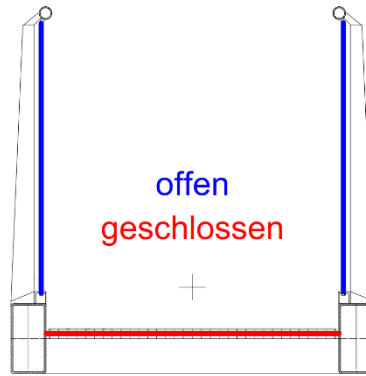


Abb. 2.9: Bild des Sektionsmodells für die aeroelastischen Windkanalversuche – Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“

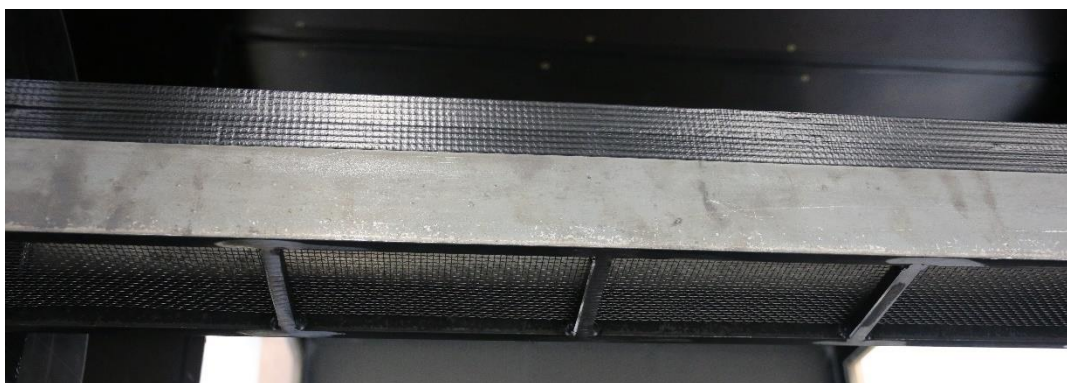
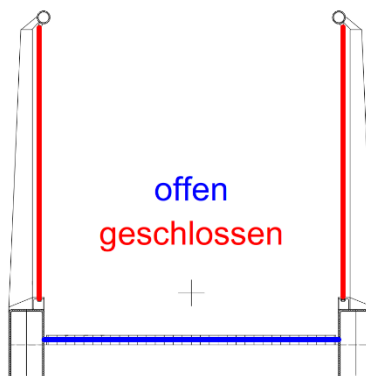
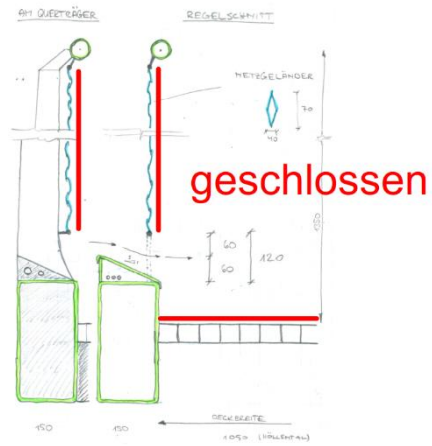


Abb. 2.10: Bild des Sektionsmodells für die aeroelastischen Windkanalversuche – Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“



**Abb. 2.11:** Bild des Sektionsmodells für die aeroelastischen Windkanalversuche – Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“



## **2.5. Untersuchung böeninduzierter dynamischer Windlastanteile – Buffeting Analyse**

Sowohl die Windturbulenz als auch die bauwerksbedingte Turbulenz infolge von Strömungsablösungen an den Bauwerkskanten - beide Vorgänge sind stochastische Prozesse - können zu sogenannten böeninduzierten Schwingungen eines Bauwerks bzw. Bauteils und zu damit verbundenen zusätzlichen dynamischen Lastanteilen führen.

Windböeninduzierte Schwingungen bzw. die dazugehörigen dynamischen Lastanteile treten bei derartigen Systemen häufig auf und werden in der Regel durch Lasterhöhungsfaktoren (Resonanzfaktoren, Böenreaktionsfaktoren, dynamische Lasterhöhungsfaktoren) berücksichtigt. Im Sinne der Normungen gilt ein Bauwerk dann als schwingungsanfällig bzw. sind dann dynamische Lastanteile zusätzlich zu den quasistatischen Windlasten zu berücksichtigen, wenn die Gesamtverformungen unter Berücksichtigung der dynamischen Windwirkung die entsprechenden Verformungen aus der statisch bzw. quasi-statisch angenommenen Windlast bei Zugrundelegung des Bemessungswindes um mehr als 10% überschreiten.

Üblicherweise wird zwischen böeninduzierten Schwingungen (Along-Wind-Response), Wirbelanregung (Wirbelresonanz, Across-Wind-Response) und bewegungsinduzierter Anregung (Galloping) unterscheiden.

Für die Hängeseilbrücken wird eine Anregung quer zum Wind (Across-Wind-Response) als vernachlässigbar eingestuft. Hintergrund hierfür ist die Tatsache, dass die Brücken aus einer Vielzahl von Einzelelementen bestehen, deren einzelne Wirbelabwurf Frequenzen weit über den eigenen Eigenfrequenzen der Gesamtkonstruktion liegen. Allerdings muss die durch Windböen induzierte Across-Wind-Response berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurde ein lineares stochastisches Modell der Struktur implementiert, für das zwei Arten von Eingaben benötigt werden:

### 1. Die projektspezifischen Parameter des Systems:

- die im Windkanal ermittelten aerodynamischen Kraftkoeffizienten
- die Massenverteilung
- die Eigenform entsprechenden Eigenfrequenzen
- das logarithmische Dämpfungsdekrement

### 2. Die statistische Struktur der Turbulenzfelder, denen die Hängeseilbrücken ausgesetzt sind

Die projektspezifischen Parameter sind in Tab. 2.11 dokumentiert.

Parameter		Wert
Planunterlagen		Tab. 2.1
Horizontale Eigenfrequenz Lohbachtalbrücke	Ohne Eisansatz	0.37 Hz
	Mit Eisansatz	0.35 Hz
Horizontale Eigenfrequenz Höllentalbrücke	Ohne Eisansatz	0.12 Hz
	Mit Eisansatz	0.12 Hz
Masse Lohbachtalbrücke	Ohne Eisansatz	210 kg/m
	Mit Eisansatz	454 kg/m
Masse Höllentalbrücke	Ohne Eisansatz	177 kg/m
	Mit Eisansatz	352 kg/m
Strukturdämpfung (log. Dekrement)		0.03

**Tab. 2.11:** Parameter zur Ermittlung dynamischer Windlastanteile

Ausgangspunkt für die Analyse ist die Bewegungsgleichung des gesamten Systems. Das System wurde dabei auf der Grundlage der zur Verfügung gestellten Modalformen verallgemeinert. Die Bewegungsgleichung wurde in den Spektralbereich übertragen wobei der resultierende Ausdruck für das Leistungsspektrum der generalisierten Verformung  $S_{vv}(f)$  folgendermaßen definiert wird:

$$S_{vv,i}(f) = \frac{1}{m_{gen,i}^2 \cdot (2\pi \cdot f_{e,i})^4} \cdot |H_i(f)|^2 \cdot S_{Fgen,i,Fgen,i}(f)$$

Die Admittanzfunktion  $H$  als Funktion der Frequenz  $f$  ist:

$$H(f) = \left( \left( 1 - \left( \frac{f}{f_{e,i}} \right)^2 \right) + i \cdot \frac{\delta}{\pi} \left( \frac{f}{f_{e,i}} \right) \right)^{-1}$$

- Mit:
- $S_{Fgen,i,Fgen,i}(f)$  = mittlere Windgeschwindigkeit [m/s] in Höhe Brückendeck
  - $m_{gen,i}$  = generalisierte Masse des Systems
  - $f_{e,i}$  = Eigenfrequenz der betrachteten Modalform
  - $f$  = Häufigkeit der Anregung
  - $H_i(f)$  = mechanische Admittanzfunktion
  - $\delta$  = logarithmisches Dämpfungsdekrement

Werden die auf die Hängeseilbrücken wirkenden Windkräfte um die mittlere Windgeschwindigkeit linearisiert, kann das Energiespektrum der generalisierten Kräfte auf Basis der turbulenten Spektren

berechnet werden. Diese können wiederum durch die turbulenten Einpunktspektren ausgedrückt werden, was zu folgendem Ausdruck führt:

$$S_{F_{gen,i},F_{gen,i}}(f) = (\rho \cdot c_f \cdot U \cdot A)^2 \cdot S_{uu}(f)$$

Mit:

$A$	= projizierte Fläche der Struktur
$c_f$	= aerodynamischer Kraftkoeffizient $dA$
$U$	= mittlere Windgeschwindigkeit in Brückendeckhöhe
$S_{uu}(f)$	= Einpunktspektrum der longitudinalen Windgeschwindigkeit

Als Resultat werden die generalisierten Kraftspektren erhalten, welche in den Zeitbereich zurücktransformiert werden und die Gesamtlasten auf die Tragstruktur darstellen. Die Gesamtlasten sind auf das jeweilige Koordinatensystem des Bauwerks bezogen.

## 2.6. Dreidimensionale numerische Strömungssimulation (CFD) – Topographieeinflüsse

### 2.6.1 Allgemein

Die Windbedingungen entlang der Brücken werden zum einen durch die großräumige Topographie (Verlauf der Täler und Bergkämme) als auch durch die lokale Geländegestaltung im Nahbereich der Brücken beeinflusst. Aufgrund der komplexen topographischen Struktur wurden mehrere dreidimensionale numerische Strömungssimulationen (CFD-Studie) durchgeführt. Hierzu wurde ein Ausschnitt des umgebenen Geländes digital nachgebildet. Für mehrere ausgesuchte Windrichtungen wurde das Strömungsfeld innerhalb des Modellgebietes simuliert, so dass sowohl Bereiche mit Strömungsbeschleunigungen als auch abschattende Effekte durch die Topographie detektiert werden konnten.

### 2.6.2 Numerisches Modell

Zur Bearbeitung der Fragestellung wurde das Open-Source-Programm OpenFOAM (Open Source Field Operation an Manipulation) verwendet. OpenFOAM ist ein allgemein programmierbares, auf C++ basiertes Softwaretool zur dreidimensionalen Strömungssimulation. Es bietet eine Vielzahl von Funktionen zur Lösung von komplexen Strömungsvorgängen wie chemischen Reaktionen, Turbulenzen, Wärmeübertragung und Magnetfeldern. Zusätzlich bietet es dem Anwender Tools für die Vorbereitung und Auswertung der numerischen Strömungssimulation und wurde von vielen Anwendern aus der Industrie und Forschung, aber auch an Universitäten weiterentwickelt.

Im vorliegenden Fall wurde das Tool *SimpleFOAM* (Semi Implizit Method for Pressure Linked Equations), ein stationärer inkompressibler Löser in Kombination mit dem  $\kappa$ - $\epsilon$  Turbulenzmodell angewendet. Für die numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen muss ein geeignetes dreidimensionales Rechengitter erzeugt werden. Bei den hier durchgeführten Simulationen wurden nur strukturierte Rechengitter benutzt. Bei der Gittergenerierung wurden die relevanten Bereiche feiner aufgelöst, dies bedeutet eine lokale Verfeinerung in Bodennähe. Für die jeweiligen Anströmrichtungen wurde jeweils ein neues Rechengitter mit ca. 24 Mio. Gitterzellen angefertigt.

### 2.6.3 Randbedingungen

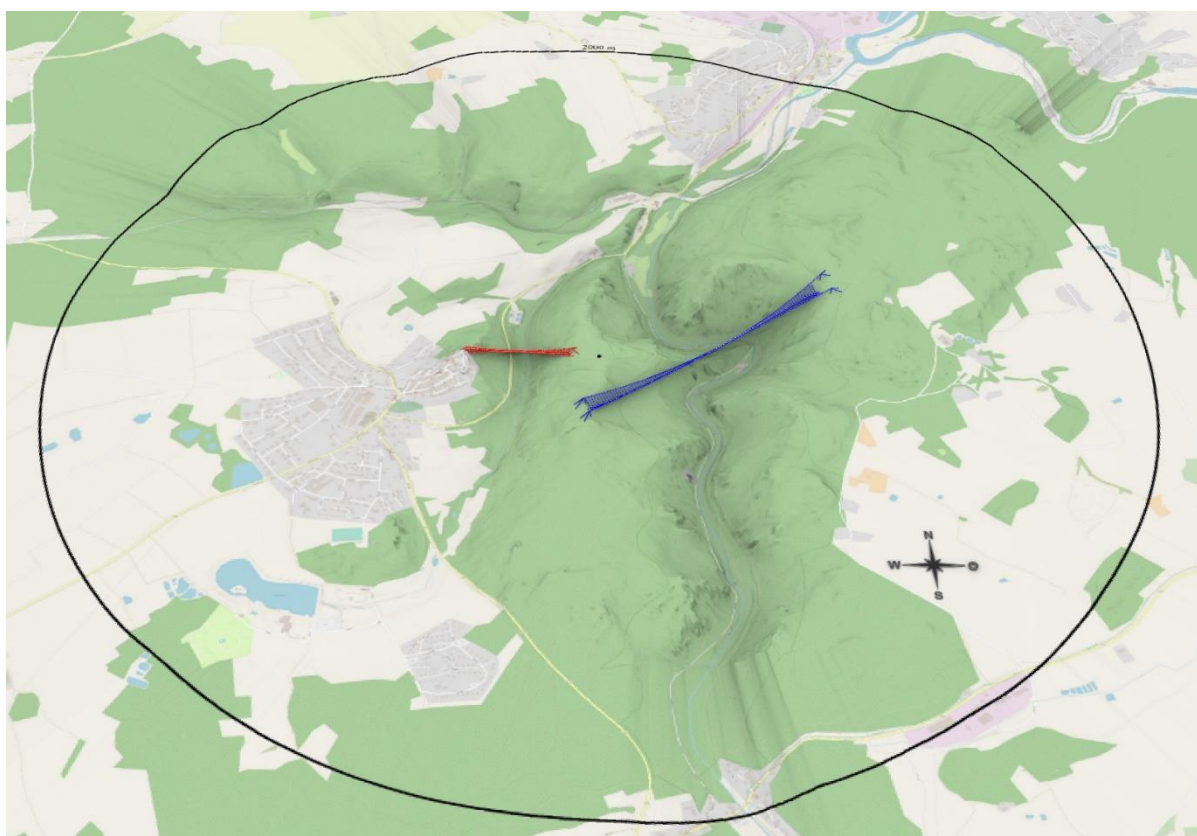
Das Windgeschwindigkeitsprofil in der bodennahen Prandtl-Schicht ändert sich in Abhängigkeit der Höhe in logarithmischer Art und kann als neutral geschichtet beschrieben werden. Die hierfür notwendigen Parameter zur Abbildung der atmosphärischen Grenzschicht sind in der Tab. 2.11 aufgeführt. In Abhängigkeit des Standorts wurde in Anlehnung an DIN EN 1991-1-4/NA die atmosphärische Rauheitslänge  $z_0$  (welche durch die Beschaffenheit der Umgebung und Untergrund beeinflusst wird) so gewählt, dass sie einer wenig bebauten Fläche entspricht.

Zur Bearbeitung der vorliegenden Problemstellung werden fünf relevante bzw. häufige Windrichtungen für die Strömungssimulation herangezogen (Abb. 2.12). Die Auswahl dieser Windrichtungen erfolgt auf Basis der Auftretenswahrscheinlichkeit (Hauptwindrichtungen) sowie aus Erfahrungen vergleichbarer Projekte.

Die im numerischen Modell verwendete Topographie im Radius von 2000 m um die Brücken ist in Abb. 2.11 dargestellt.

Parameter	Einheit	Wert
Atmosphärische Rauigkeitslänge $z_0$	[m]	0.05
Von-Karman-Konstante $\kappa$	[-]	0.41

**Tab. 2.11:** Parameter der atmosphärischen Grenzschicht im numerischen Modell



**Abb. 2.11:** Topographie im Nahbereich der Frankenwaldbrücken (Radius = 2000 m)

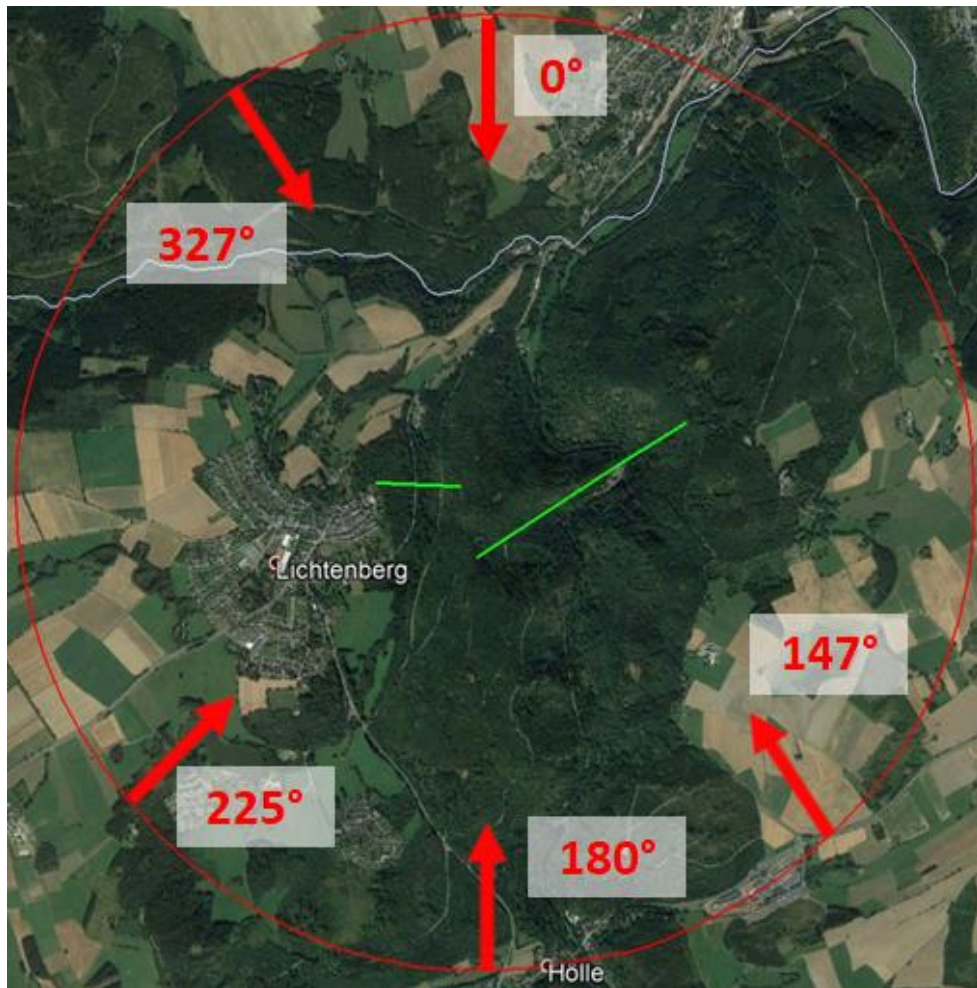


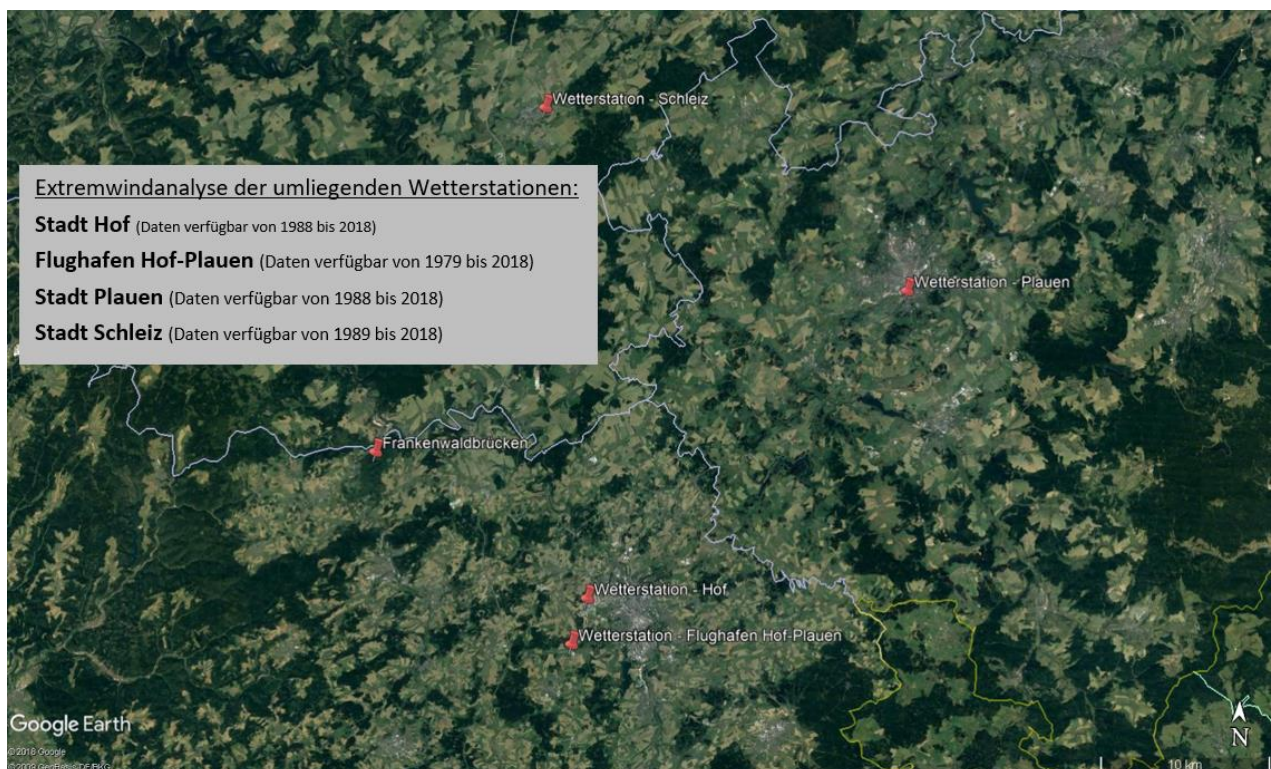
Abb. 2.12: Betrachtete Windrichtungen im Zuge der numerischen Strömungssimulation

### **3. WINDKLIMA AM PROJEKTSTANDORT**

#### **3.1. Extremwindanalyse und Bemessungsgrundlagen**

In Übereinstimmung mit den Normkennwerten für den Projektstandort gültige Norm DIN EN 1991-1-4 NA (2010) wurde den Berechnungen der Bemessungswindlasten eine Bemessungswindgeschwindigkeit bzw. ein Bemessungsstaudruck mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren (Überschreitungswahrscheinlichkeit  $p = 0.02$ ) zugrunde gelegt.

Die DIN EN 1991 NA (2010) trägt regionalen Unterschieden hinsichtlich der zu erwartenden Bemessungswindgeschwindigkeiten bzw. Bemessungsstaudrücken Rechnung. Der Standort Hof-Lichtenberg liegt gemäß der Norm in Windzone 1 (Bayern). Windzone 2 (Thüringen) liegt jedoch unmittelbar nördlich des Projektstandorts. Der Lastansatz für Windzone 1 ist ca. 20% günstiger als Windzone 2 und sollte deshalb abgesichert werden. Hierzu wurde eine Extremwertanalyse auf der Basis von langjährigen Windklimadaten an verschiedenen umliegenden Wetterstationen durchgeführt (siehe Abb. 3.1). Das Ergebnis der Extremwindanalyse ist in Tab. 3.1 dargestellt.



**Abb. 3.1:** Berücksichtigte Wetterstationen im Zuge der Extremwindanalyse

Stationsname	Windzone DIN EN 1991-1-4/NA	$v_{ref}$ [m/s] DIN EN 1991-1-4/NA	$v_{ref}$ [m/s] Extremwindanalyse	Hauptwindrichtung
Stadt Hof (Bayern)	1	22.5	21.2	West
Flughafen Hof-Plauen (Bayern)	1	22.5	21.4	West-Südwest
Stadt Plauen (Sachsen)	2	25.0	23.1	West-Südwest
Stadt Schleiz (Thüringen)	2	25.0	23.5	West

**Tab. 3.1:** Ergebnis der Extremwindanalyse

Fazit:

Die Extremwindanalyse liegt für die nächstgelegenen Wetterstationen (Stadt Hof, Flughafen Hof-Plauen) mit  $v_{ref} = 21.2$  m/s und  $v_{ref} = 21.4$  m/s unterhalb des normativen Ansatzes von  $v_{ref} = 22.5$  m/s. Die Wetterstationen Stadt Plauen und Stadt Schleiz liegen deutlich weiter nördlich wobei die Ergebnisse der Extremwertanalyse trotz dessen nur leicht über dem Ansatz für Windzone 1 liegen. Auf dieser Basis empfehlen wir für den Projektstandort den Ansatz nach Windzone 1 von

$$v_{ref} = 22.5 \text{ m/s}$$

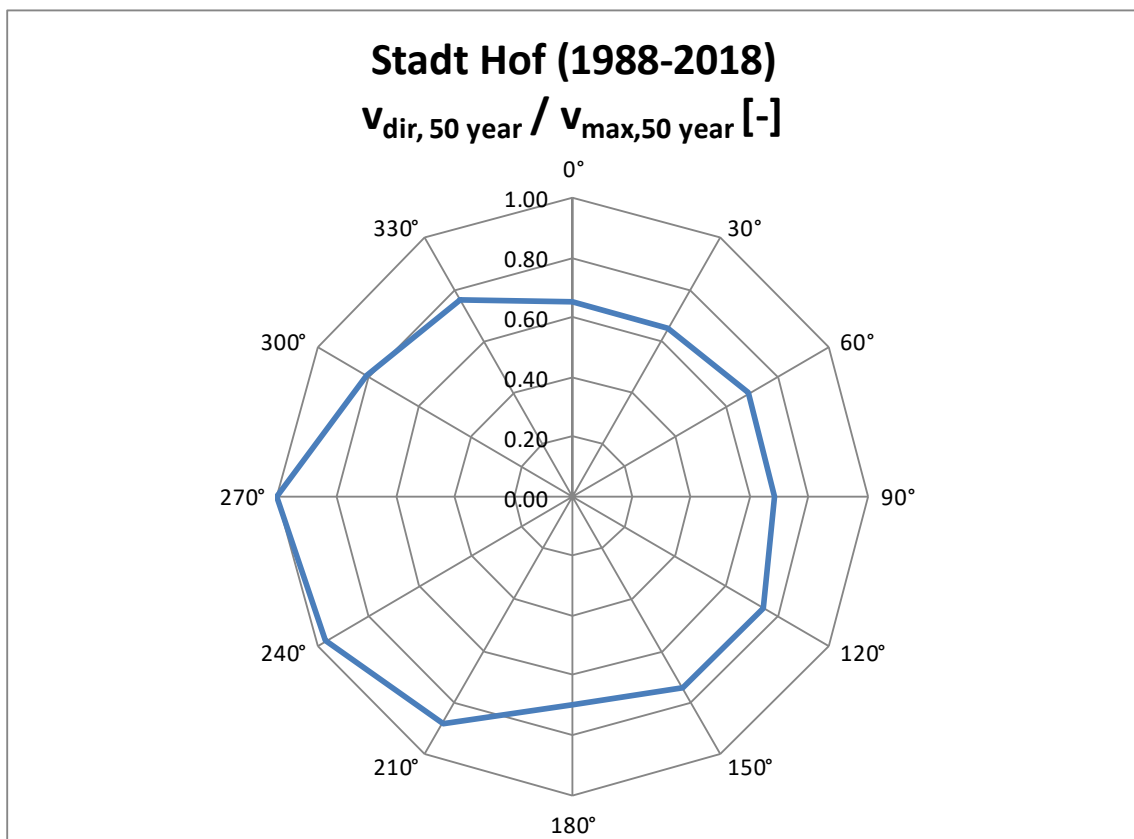
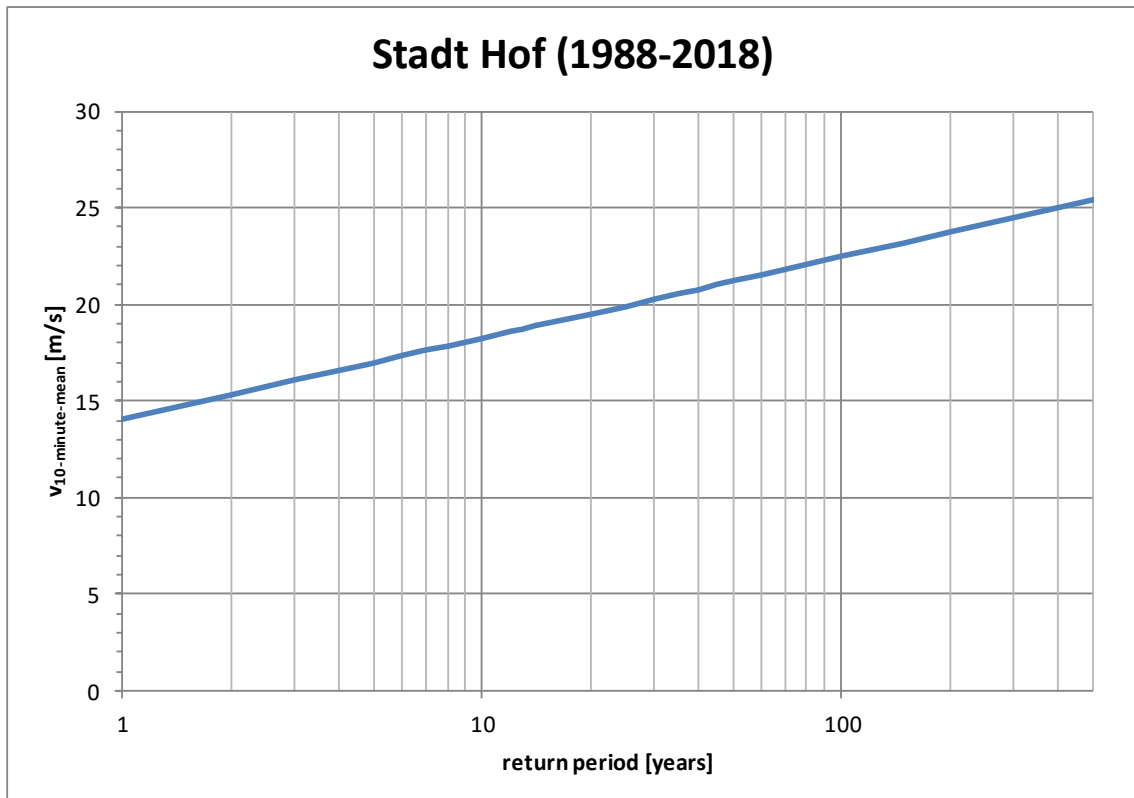
der zugehörige Referenzdruck gemäß DIN EN 1991 NA (2010) kann zu

$$q_{ref} = 0.32 \text{ kN/m}^2$$

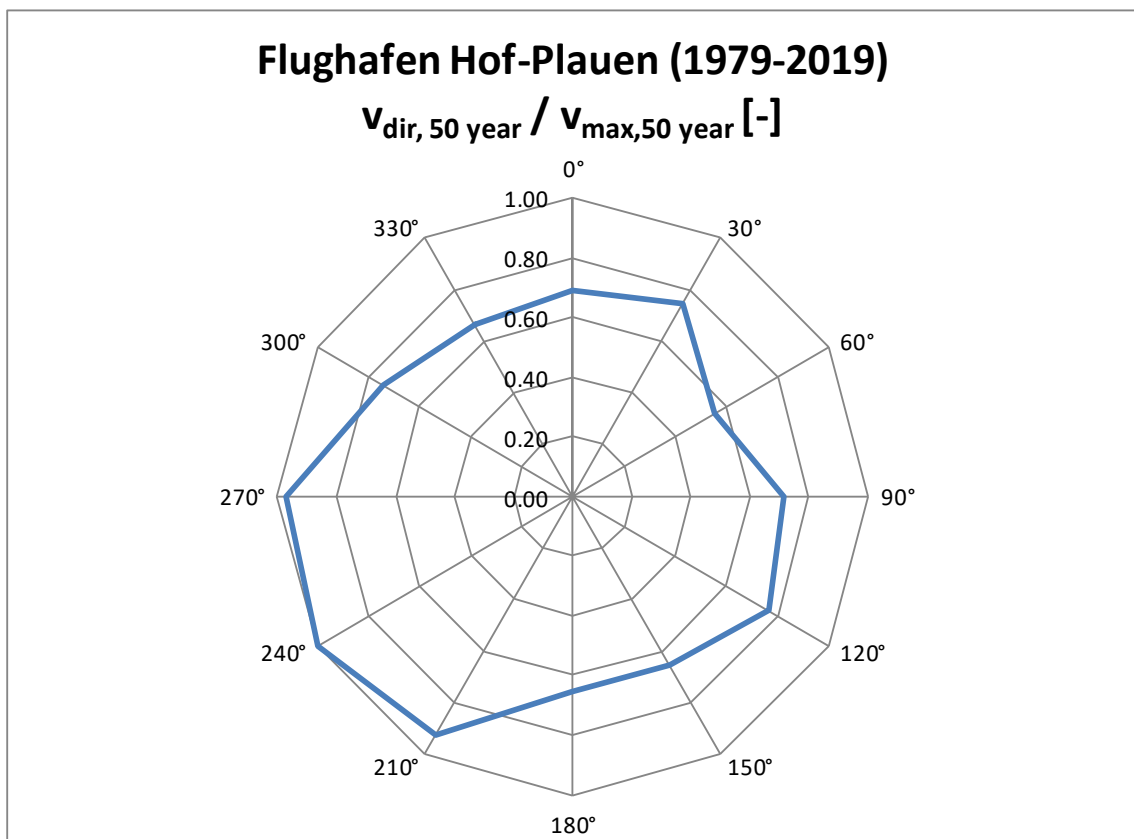
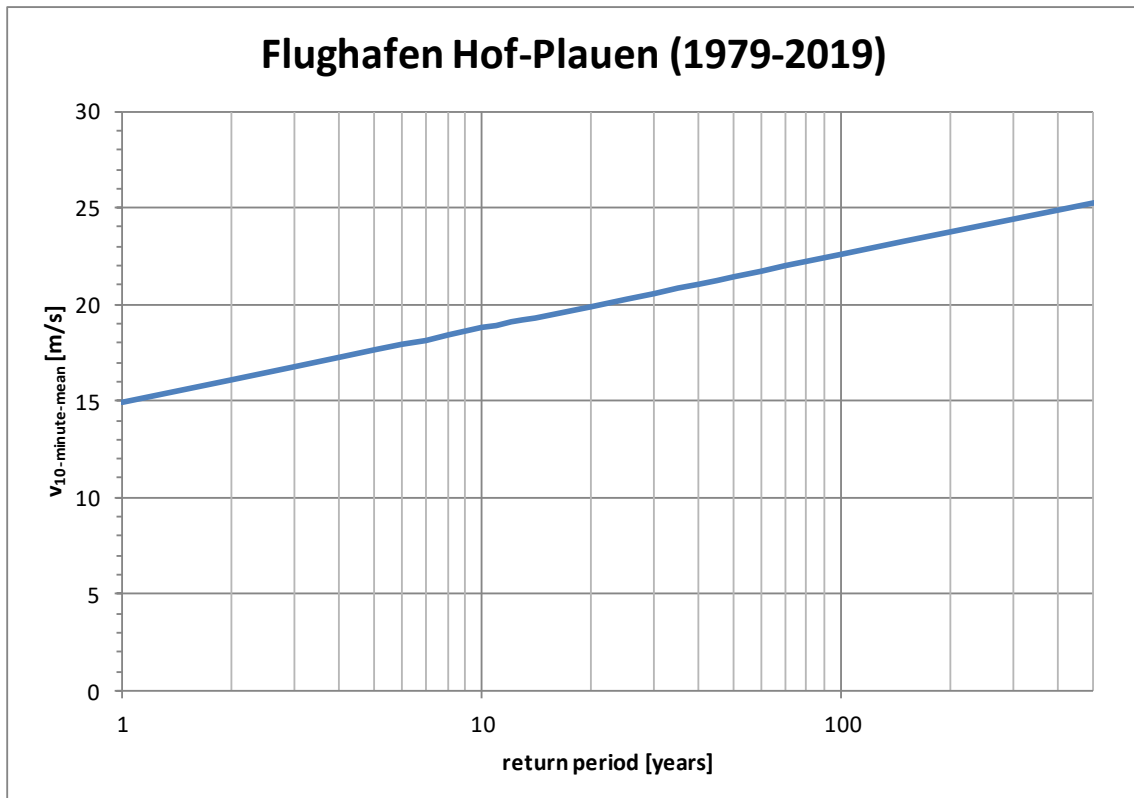
bestimmt werden. Diese Werte gelten für Windströmungen über freiem, d.h. unbebautem und nur niedrig bewachsenem Gelände. Für große Rauigkeiten, beispielsweise durch städtische oder vorstädtische Bebauung, wird die Windströmung im Vergleich zur Strömung über unbebautem Gelände deutlich verzögert. Aufgrund der Lage des Projektstandorts wurde für die Berechnung des Bemessungsböenstaudrucks die Geländerauigkeiten am Standort gemäß Kategorie II (offenes Gelände) angenommen.

Für weitere Berechnungen werden aufgrund der geringeren Entfernung, Höhe ü. NN (vgl. Projektstandort) und der Datenqualität nur die Wetterdaten Stadt Hof sowie Flughafen Hof-Plauen verwendet. Die Gumbel-Verteilung mit den zugehörigen Wiederkehrperioden sowie einer richtungsabhängigen Analyse der Extremwerte ist in Abb. 3.2 und Abb. 3.3 dargestellt.





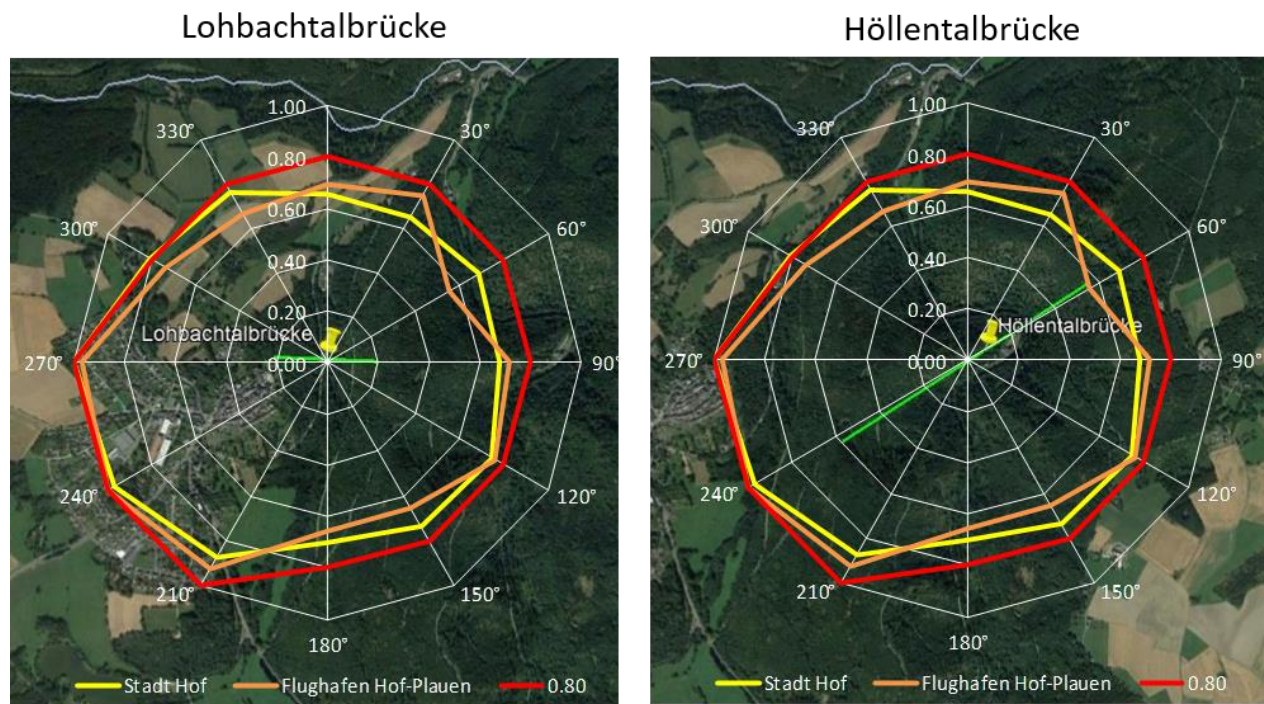
**Abb. 3.2:** Oben: Auf Basis der Extremwertanalyse der Winddaten an der Wetterstation Stadt Hof ermittelte Basiswindgeschwindigkeiten mit unterschiedlicher Wiederkehrperiode; Unten: Ergebnis der richtungsabhängigen der Extremwindanalyse für die Winddaten an der Wetterstation Stadt Hof



**Abb. 3.3:** Oben: Auf Basis der Extremwertanalyse der Winddaten an der Wetterstation Flughafen Hof-Plauen ermittelte Basiswindgeschwindigkeiten mit unterschiedlicher Wiederkehrperiode; Unten: Ergebnis der richtungsabhängigen der Extremwindanalyse für die Winddaten an der Wetterstation Flughafen Hof-Plauen

### 3.2. Richtungsabhängigkeit $c_{dir}$

Auf Basis der Extremwindanalyse kann folgende in Abb. 3.4 dargestellte Richtungsabhängigkeit der Bemessungswindgeschwindigkeit  $c_{dir}$  bestimmt werden.



**Abb. 3.4:** Auf Basis der Extremwertanalyse ermittelte Richtungsabhängigkeit der Bemessungswindgeschwindigkeit  $c_{dir}$  für die Lohbachtalbrücke bzw. die Höllentalbrücke

#### Lohbachtalbrücke:

Als relevante Windrichtungssektoren für Lohbachtalbrücke kann der Sektor (Nord) 330° bis 30° sowie der Sektor (Süd) 150° bis 210° identifiziert werden. Für die Windrichtung 210° kann der richtungsabhängige Faktor  $c_{dir}$  zu  $c_{dir} = 1.00$  [-] bestimmt werden. Die Berücksichtigung einer möglichen Abminderung aufgrund der richtungsabhängigen Extremwindanalyse führt daher für die Lohbachtalbrücke zu keinen günstigeren Ergebnissen.

#### Höllentalbrücke:

Die relevanten Windrichtungssektoren für die Höllentalbrücke sind der Sektor (Süd-Ost) 105° bis 165° sowie der Sektor (Nord-West) 285° bis 345°. Für die Windrichtung 285° kann der richtungsabhängige Faktor  $c_{dir}$  zu  $c_{dir} = 0.90$  [-] bestimmt werden. Für die Höllentalbrücke könnte demzufolge mit einer Abminderung der Bemessungswindgeschwindigkeit von  $c_{dir} = 0.90$  [-] berücksichtigt werden.

### **3.3. Zugrunde gelegter Böenstaudruck zur Bemessung des Überbaus ohne Eisansatz**

Die Bezugshöhe errechnet sich aus dem Abstand von Boden zur Höhe des Brückendecks. Eine Berücksichtigung der Windrichtungsabhängigkeit wird nicht in Rechnung gestellt.

#### **3.3.1 Lohbachtalbrücke**

Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_m(87\text{ m}) = 31.8\text{ m/s}$

Böengeschwindigkeitsdruck  $q_b(87\text{ m}) = 1.15\text{ kN/m}^2$

#### **3.3.2 Höllentalbrücke**

Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_m(124\text{ m}) = 33.7\text{ m/s}$

Böengeschwindigkeitsdruck  $q_b(124\text{ m}) = 1.25\text{ kN/m}^2$

### **3.4. Zugrunde gelegter Böenstaudruck zur Bemessung des Überbaus mit Eisansatz**

Die Bezugshöhe errechnet sich aus dem Abstand von Boden zur Höhe des Brückendecks. Zur Berücksichtigung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Eis und Wind wird der vom Tragwerksplaner zur Verfügung gestellte Kombinationsbeiwert  $\psi_{\text{Wind,Eis}} = 0.75$  [-] in Rechnung gestellt. Eine Berücksichtigung der Windrichtungsabhängigkeit wird nicht in Rechnung gestellt.

#### **3.4.1 Lohbachtalbrücke**

Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_m(87\text{ m}) = 27.5\text{ m/s}$

Böengeschwindigkeitsdruck  $q_b(87\text{ m}) = 0.86\text{ kN/m}^2$

#### **3.4.2 Höllentalbrücke**

Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_m(124\text{ m}) = 29.2\text{ m/s}$

Böengeschwindigkeitsdruck  $q_b(124\text{ m}) = 0.94\text{ kN/m}^2$

### **3.5. Nachweisgeschwindigkeit für Instabilitäten ohne Eisansatz**

Die Grenzgeschwindigkeit zum Nachweis der aerodynamischen Stabilität beträgt nach DIN EN 1991-1-4 (2010) das 1.25-fache der mittleren Windgeschwindigkeit  $v_m$  in Höhe des Querschnitts. Eine Berücksichtigung der Windrichtungsabhängigkeit wird nicht in Rechnung gestellt.

#### **3.5.1 Lohbachtalbrücke**

Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_{\text{Nachweis,Instabilität}}(87\text{ m}) = 1.25 * 31.8\text{ m/s} = 39.8\text{ m/s}$

#### **3.5.2 Höllentalbrücke**

Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_{\text{Nachweis,Instabilität}}(124\text{ m}) = 1.25 * 33.7\text{ m/s} = 42.1\text{ m/s}$

### **3.6. Nachweisgeschwindigkeit für Instabilitäten mit Eisansatz**

Die Grenzgeschwindigkeit zum Nachweis der aerodynamischen Stabilität beträgt nach DIN EN 1991-1-4 (2010) das 1.25-fache der mittleren Windgeschwindigkeit  $v_m$  in Höhe des Querschnitts. Zusätzlich wird der vom Tragwerksplaner zur Verfügung gestellte Kombinationsbeiwert für Wind/Eis von  $\psi_{\text{Wind,Eis}} = 0.75$  [-] sowie der Windrichtungsabhängigkeitsfaktor  $c_{\text{dir}} = 0.90$  [-] (nur Höllentalbrücke) berücksichtigt.

#### **3.6.1 Lohbachtalbrücke**

Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_{\text{Nachweis,Instabilität (87 m)}} = 34.1 \text{ m/s}$

#### **3.6.2 Höllentalbrücke**

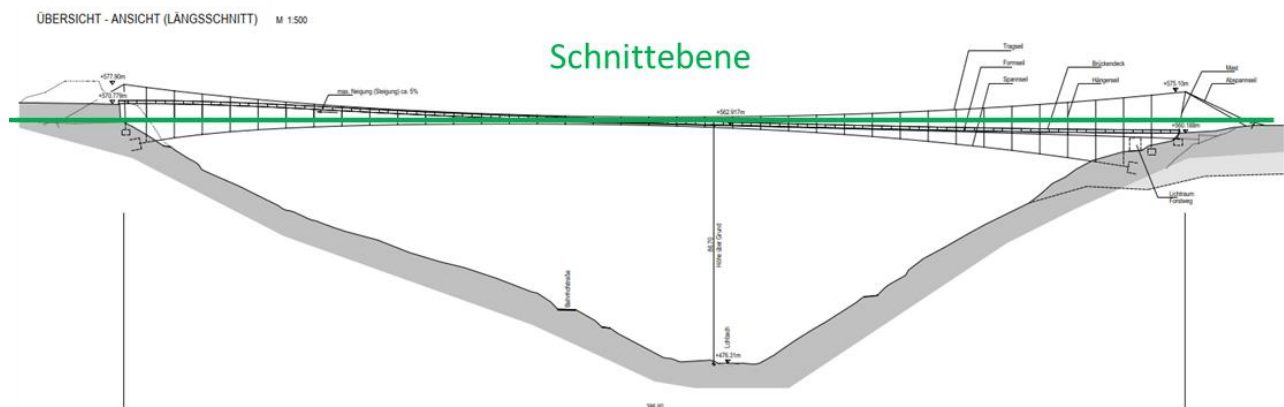
Zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $v_{\text{Nachweis,Instabilität (124 m)}} = 32.8 \text{ m/s}$

## 4. ERGEBNISSE DER NUMERISCHEN STRÖMUNGSSIMULATION

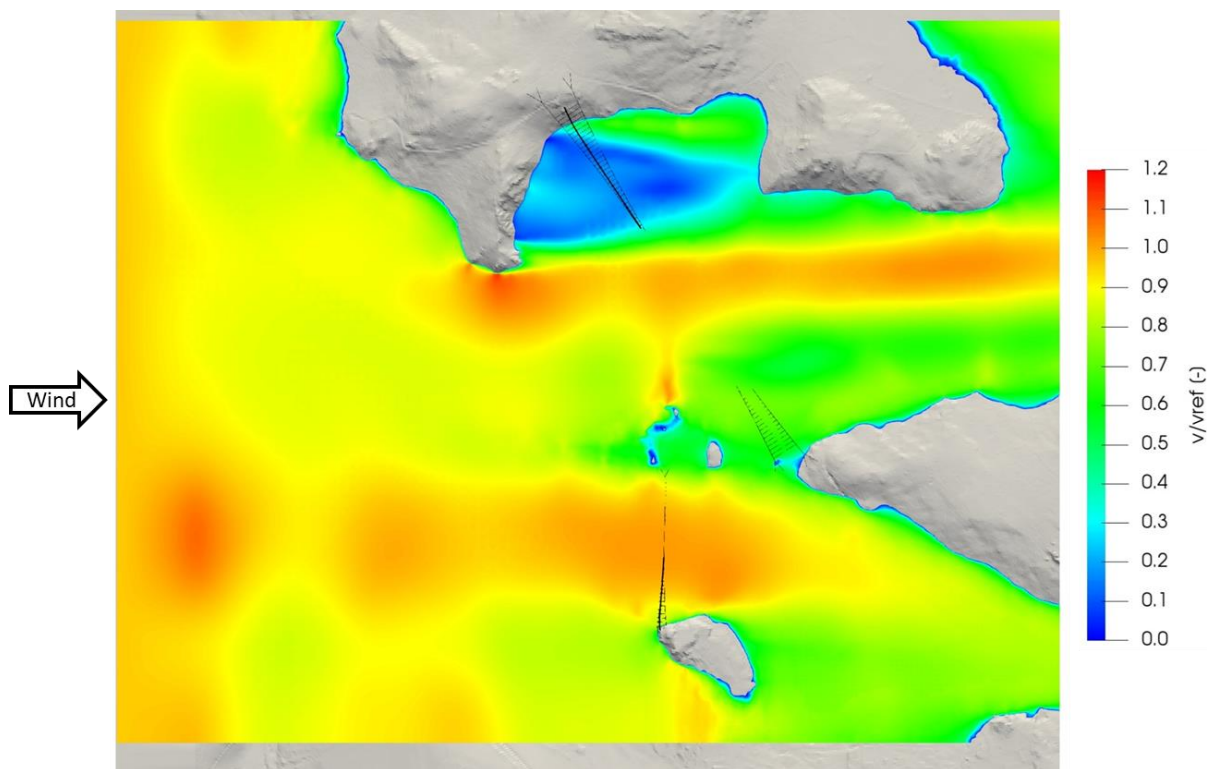
### 4.1. Lohbachtalbrücke

Nachfolgend werden die Ergebnisse der betrachteten Windrichtungen quantitativ in Form eines dimensionslosen Geschwindigkeitsbeiwertes ( $v/v_{ref}$ ) angegeben (Abb. 4.2 bis Abb. 4.6). Für das bessere Verständnis wird dabei die mittlere Geschwindigkeit ( $v$ ) normiert auf die mittlere Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $v_{ref}$ ) der Lohbachtalbrücke angegeben (87 m). Dadurch wird ersichtlich, in welchen Bereichen mit Beschleunigungen (Werte  $> 1$ ) bzw. Reduktionen (Werte  $< 1$ ) der Windgeschwindigkeiten aufgrund der Topographie zu rechnen ist.

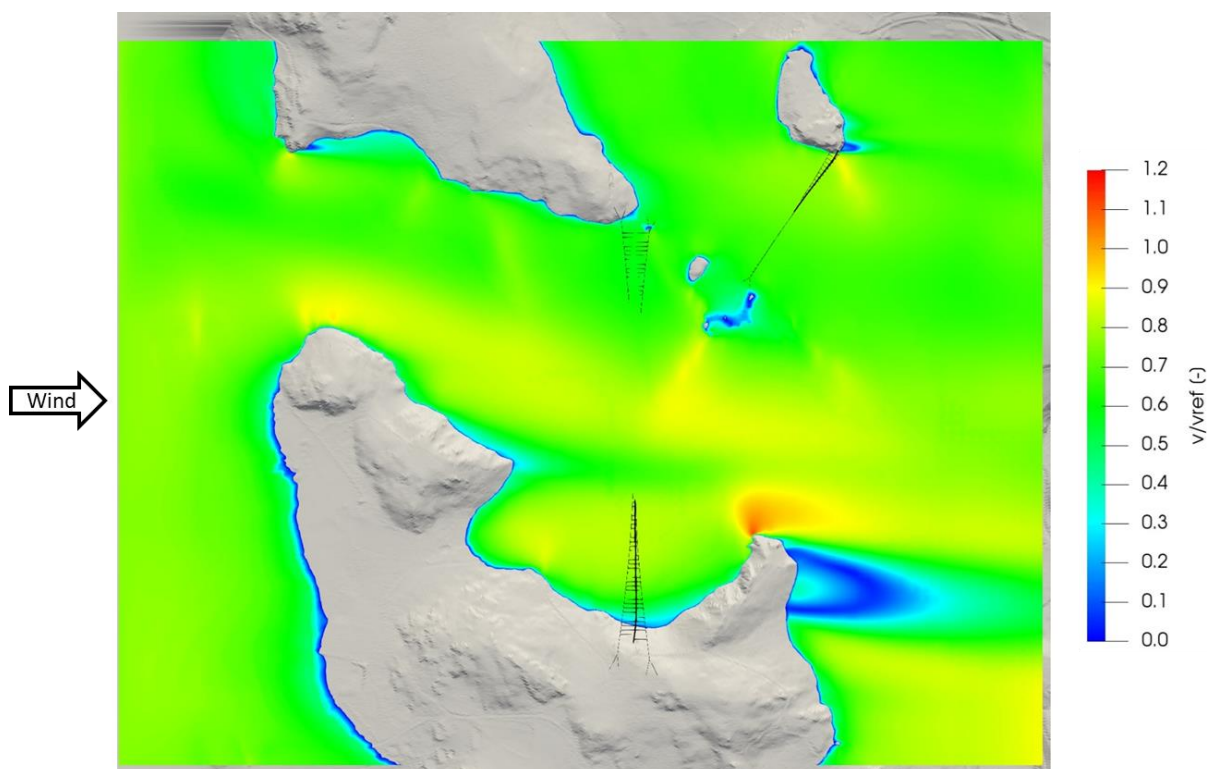
In Abb. 4.1 ist eine horizontale Schnittebene durch das dreidimensionale Rechengebiet auf Höhe des Brückendecks im Bereich der maximalen Brückenhöhe (87 m) dargestellt. Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen die fünf betrachteten Windrichtungen und orientieren sich an der unten dargestellte Schnittebene. Die Darstellungen sind repräsentativ für die Lohbachtalbrücke.



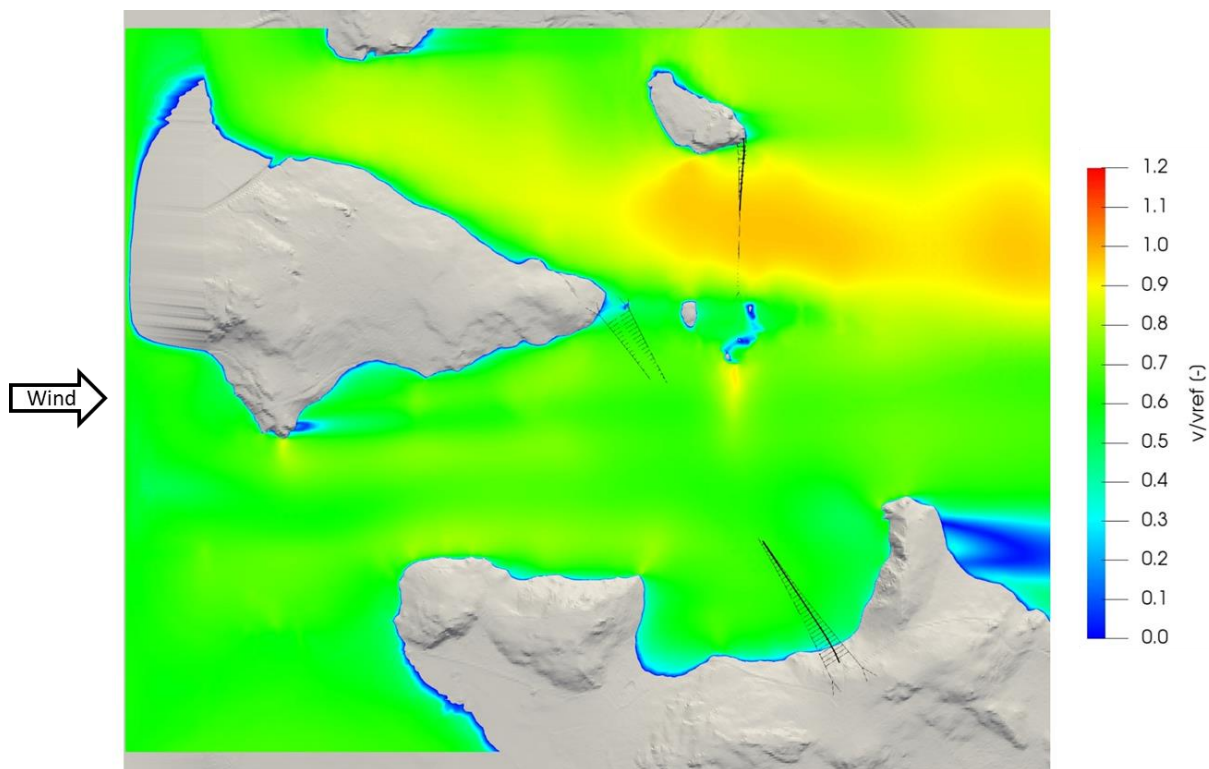
**Abb. 4.1:** Lage des horizontalen Schnittes der nachfolgenden Darstellungen in maximaler Brückenhöhe (87 m über Grund)



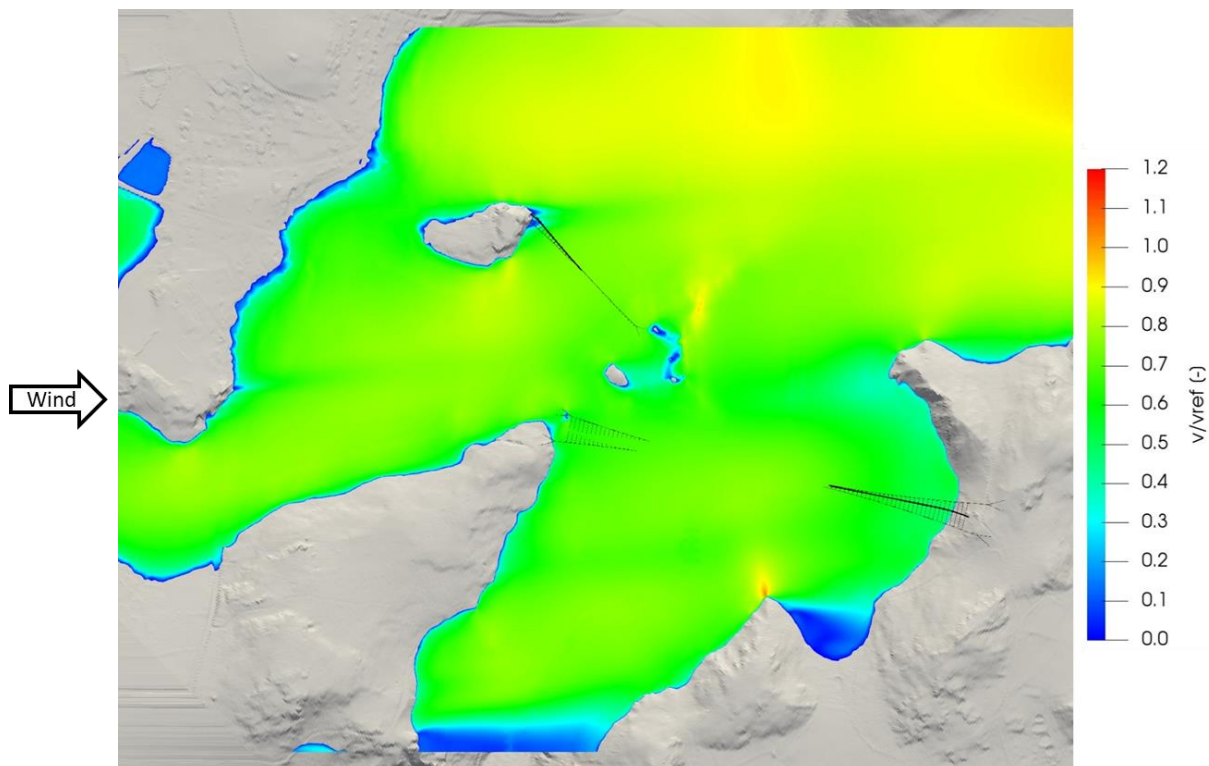
**Abb. 4.2:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 87$  m). Anströmrichtung  $0^\circ$ .



**Abb. 4.3:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 87$  m). Anströmrichtung  $147^\circ$ .

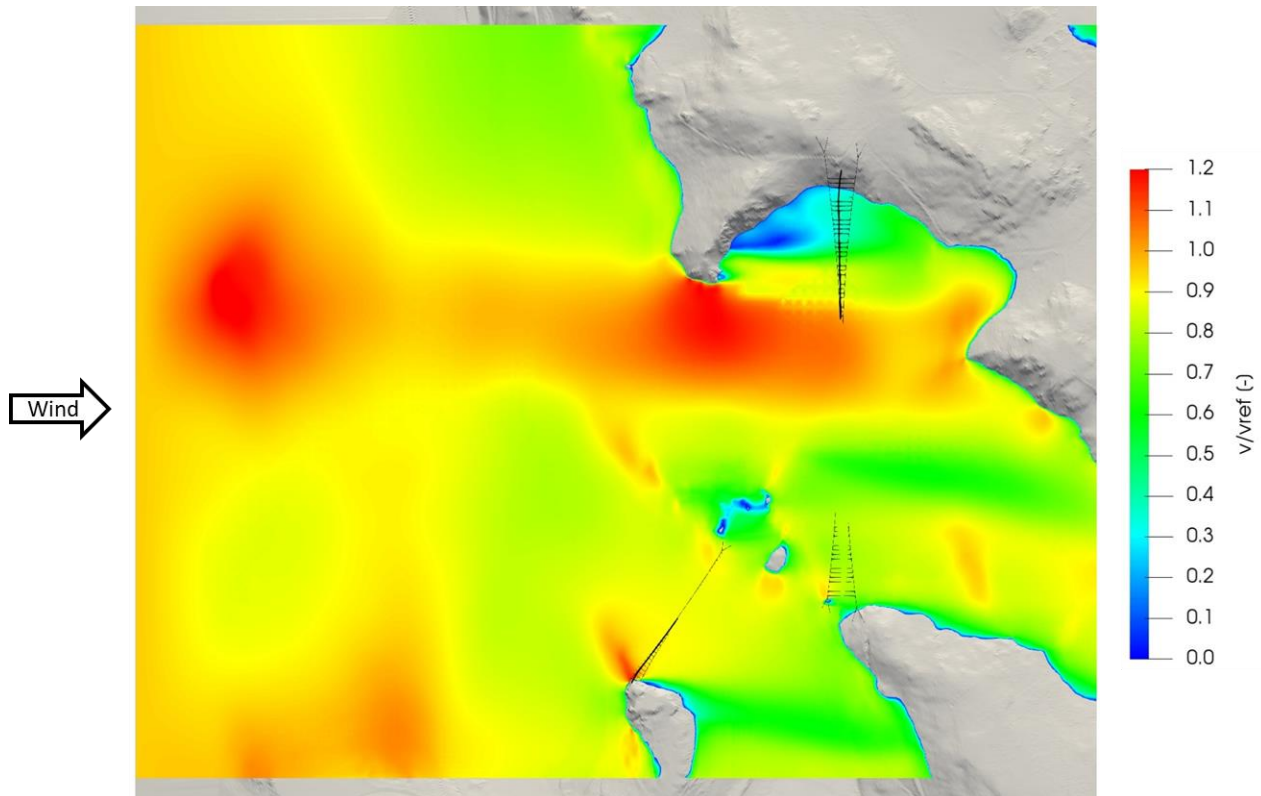


**Abb. 4.4:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 87$  m). Anströmrichtung  $180^\circ$ .



**Abb. 4.5:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 87$  m). Anströmrichtung  $225^\circ$ .





**Abb. 4.6:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 87$  m). **Anströmrichtung  $327^\circ$ .**

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei einer Anströmung aus dem Starkwindsektor ( $225^\circ$  bis  $245^\circ$ ) keine topographiebedingte Geschwindigkeitserhöhung auf Höhe des Brückendecks der Lohbachtalbrücke zu erwarten sind (im Vergleich zur ungestörten Windgeschwindigkeit in maximaler Brückendeckhöhe). Dies ist hauptsächlich auf die abschattende Wirkung der vorgelagerten höherliegenden Topographie zurückzuführen. Ferner stellt sich für diese Windrichtungen eine homogene Verteilung der Windgeschwindigkeitsverhältnisse entlang des Brückendecks der Höllentalbrücke ein.

Bei einer Anströmung quer zum Brückendeck der Lohbachtalbrücke ( $0^\circ$  und  $180^\circ$ ) kommt es topographiebedingt zu einer Kanalisierung der Strömung. Die damit verbundene Strömungsbeschleunigung führt im Vergleich zur ungestörten Windgeschwindigkeit in maximaler Brückendeckhöhe, jedoch zu keiner Geschwindigkeitserhöhung.

Auf Basis der Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation wurden die in Abb. 4.7 dargestellten (einhüllenden) Geschwindigkeitsfaktoren ermittelt. Diese werden im Zuge der Ermittlung der statischen Ersatzwindlasten herangezogen.

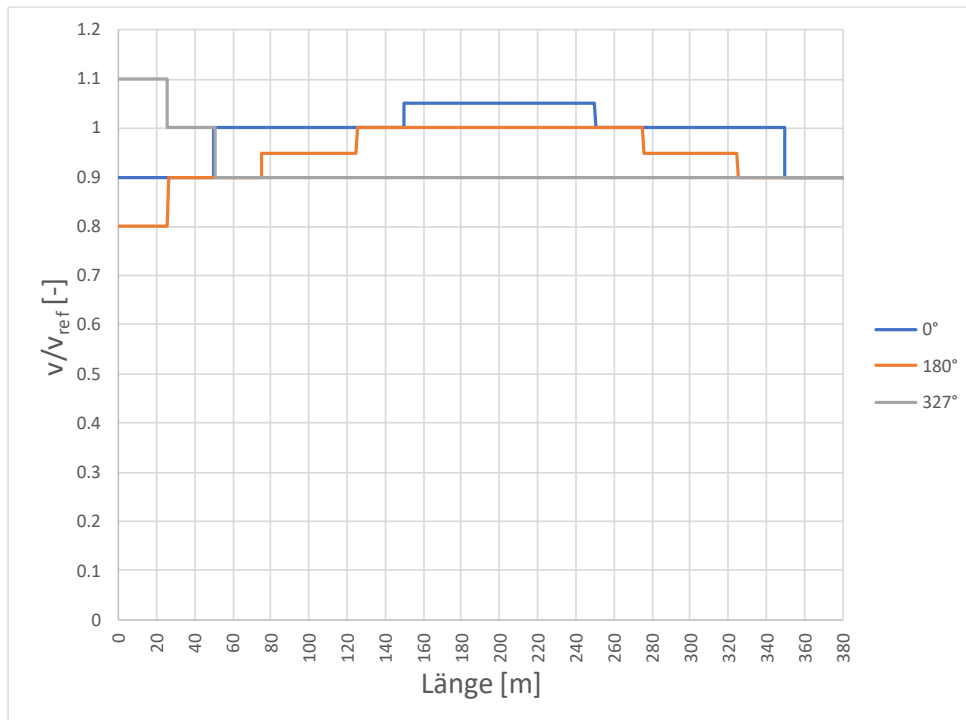


Abb. 4.7: Einhüllende Geschwindigkeitsfaktoren  $v/v_{ref}$  in Brückendeckhöhe - Lohbachtalbrücke

#### 4.2. Höllentalbrücke

Nachfolgend werden die Ergebnisse der betrachteten Windrichtungen quantitativ in Form eines dimensionslosen Geschwindigkeitsbeiwertes ( $v/v_{ref}$ ) angegeben (Abb. 4.9 bis Abb. 4.13). Für das bessere Verständnis wird dabei die mittlere Geschwindigkeit ( $v$ ) normiert auf die mittlere Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $v_{ref}$ ) der Höllentalbrücke angegeben (124m). Dadurch wird ersichtlich, in welchen Bereichen mit Beschleunigungen (Werte  $> 1$ ) bzw. Reduktionen (Werte  $< 1$ ) der Windgeschwindigkeiten aufgrund der Topographie zu rechnen ist.

In Abb. 4.8 ist eine horizontale Schnittebene durch das dreidimensionale Rechengebiet auf Höhe des Brückendecks im Bereich der maximalen Brückenhöhe (124 m) dargestellt. Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen die fünf betrachteten Windrichtungen und orientieren sich an der unten dargestellte Schnittebene. Die Darstellungen sind repräsentativ für die Höllentalbrücke.

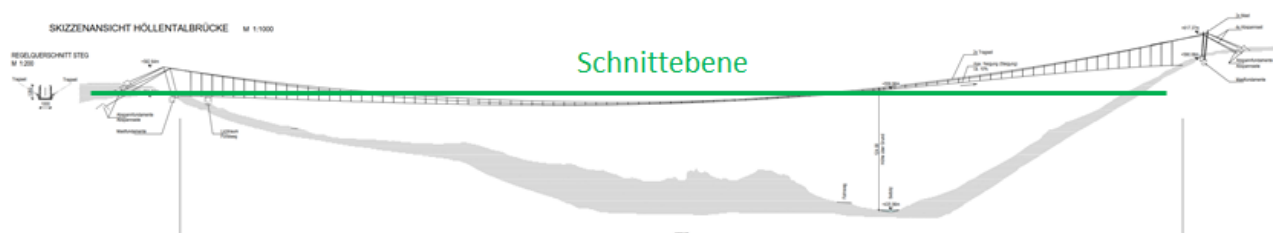
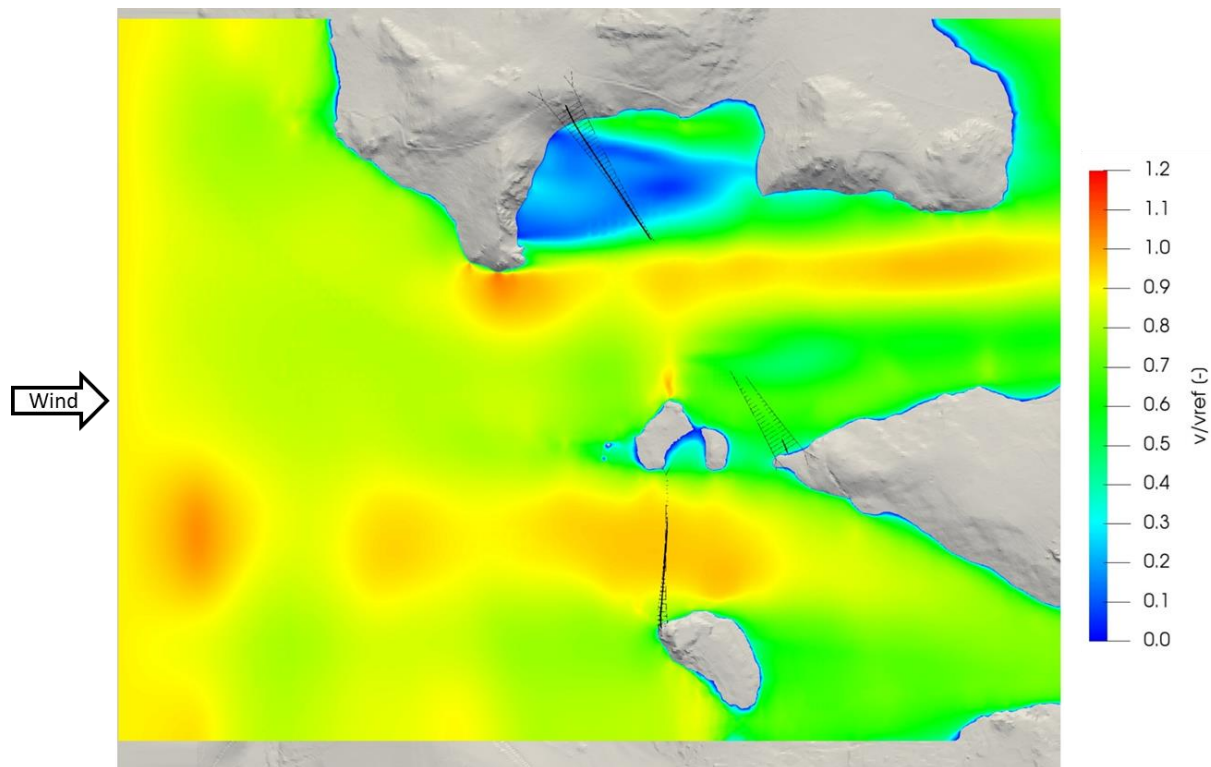
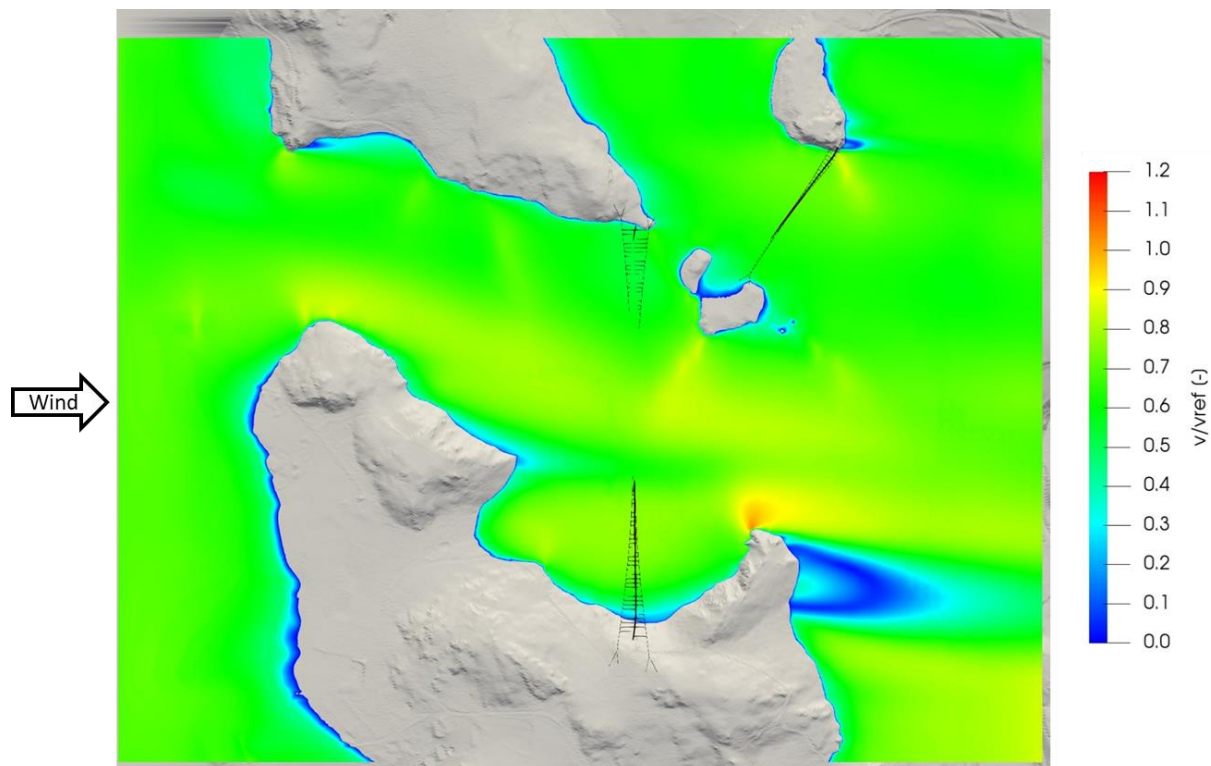


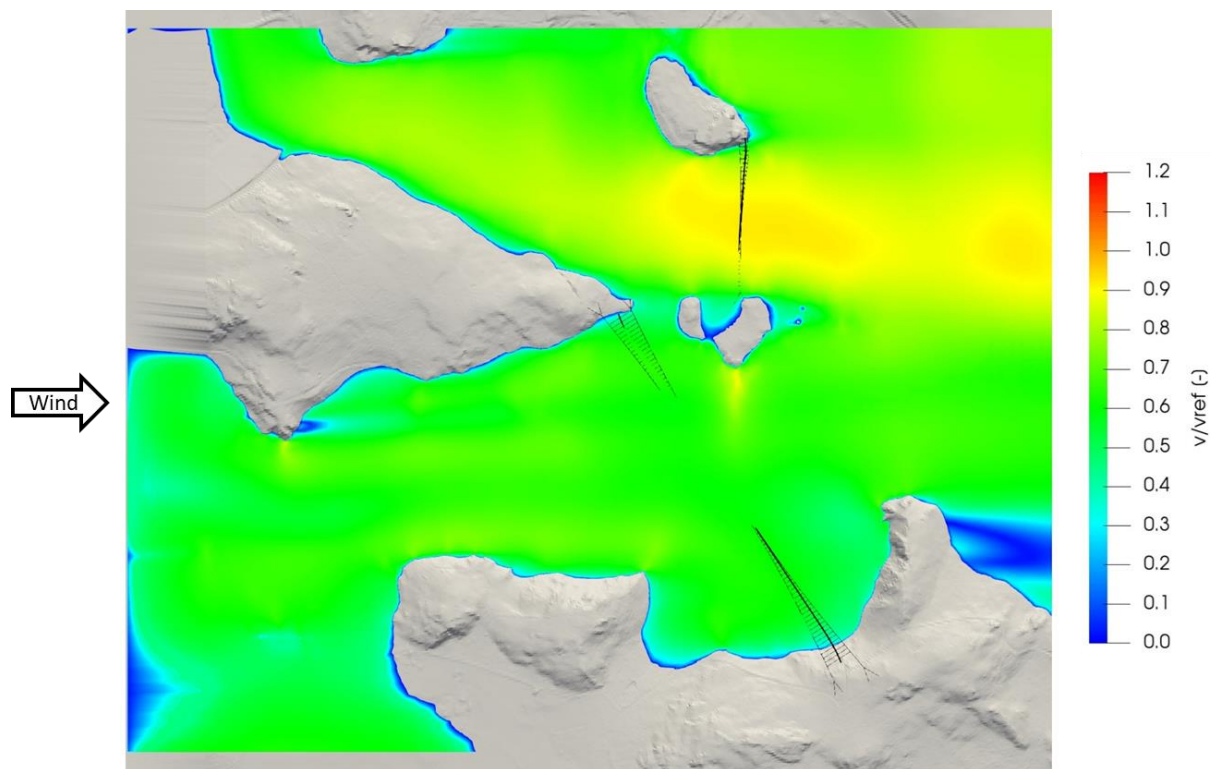
Abb. 4.8: Lage des horizontalen Schnittes der nachfolgenden Darstellungen in maximaler Brückenhöhe (124 m über Grund)



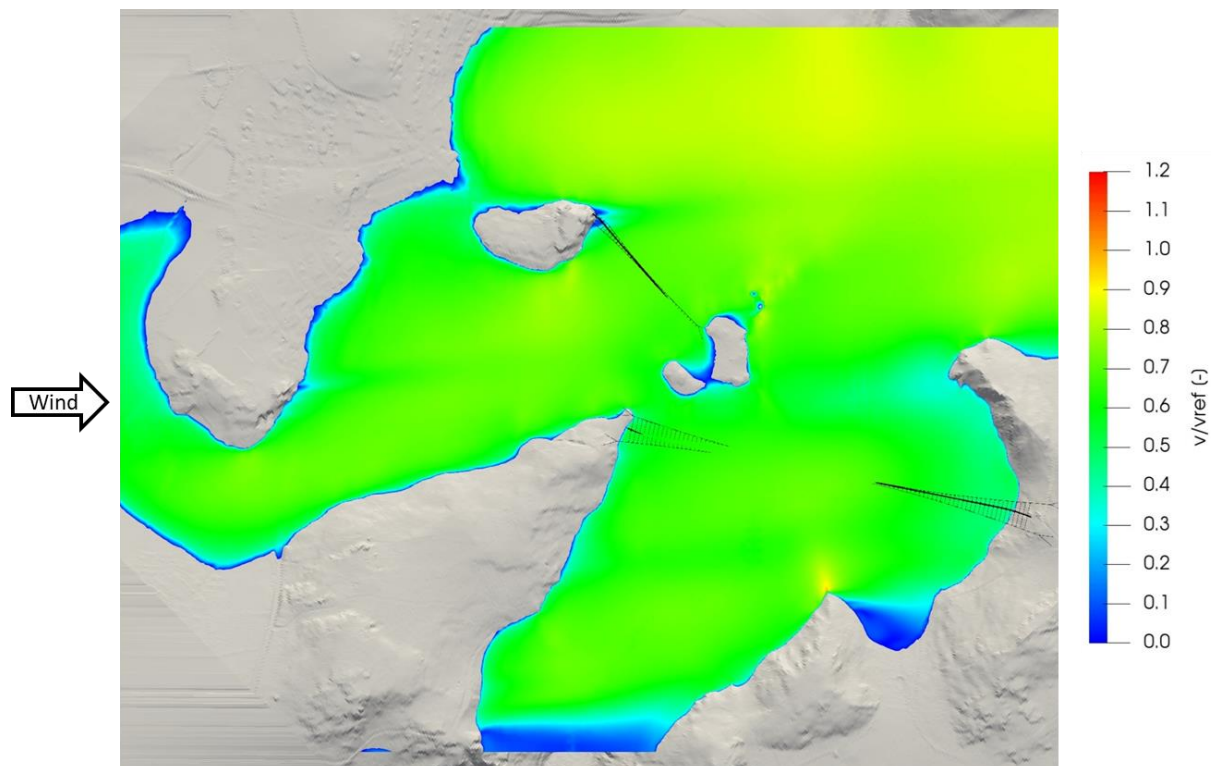
**Abb. 4.9:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 124$  m). Anströmrichtung  $0^\circ$ .



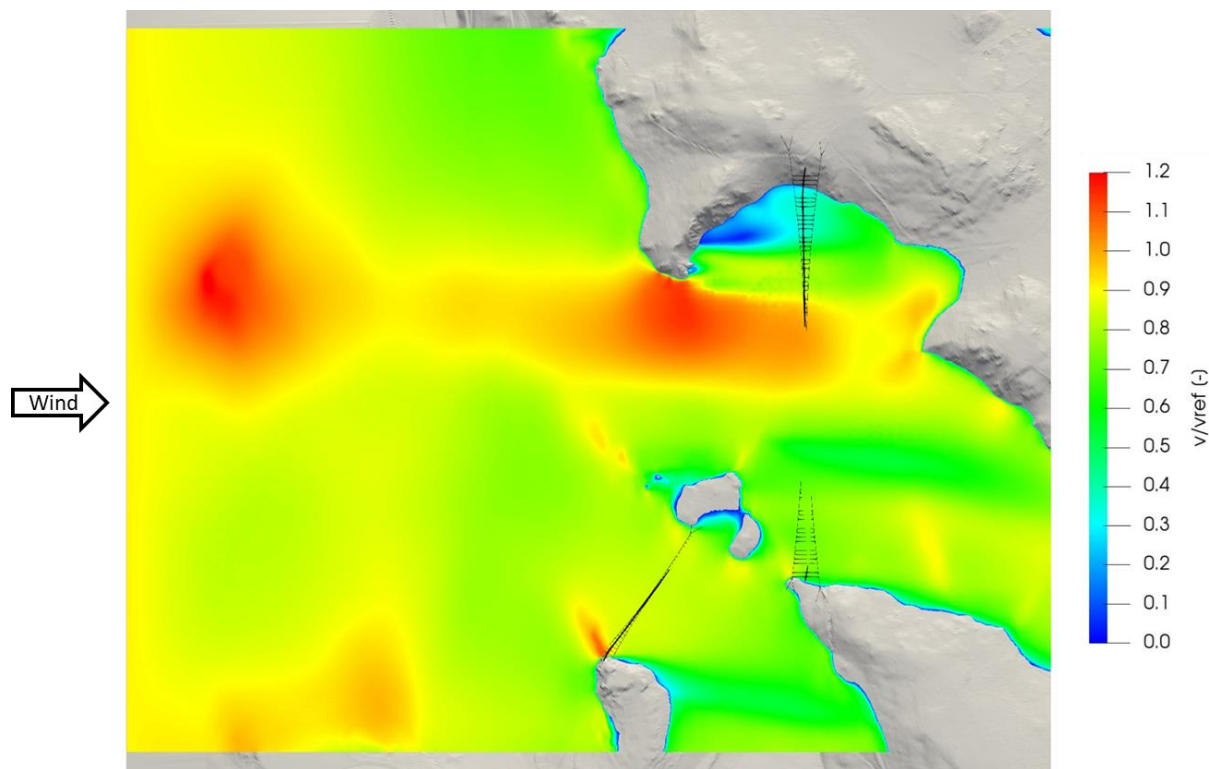
**Abb. 4.10:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 124$  m). Anströmrichtung  $147^\circ$ .



**Abb. 4.11:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 124$  m). Anströmrichtung  $180^\circ$ .



**Abb. 4.12:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{ref}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 124$  m). Anströmrichtung  $225^\circ$ .

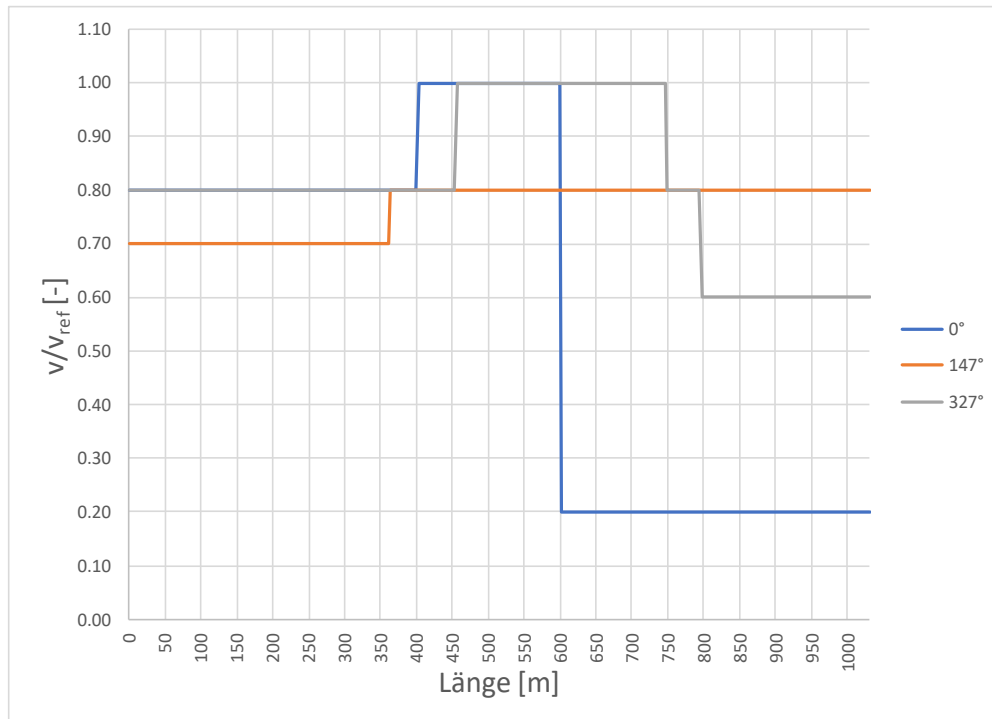


**Abb. 4.13:** Betrag der mittleren Geschwindigkeit  $v$  normiert auf die mittlere Geschwindigkeit  $v_{\text{ref}}$  in ungestörter Anströmung in maximaler Brückenhöhe ( $H = 124 \text{ m}$ ). **Anströmrichtung  $327^\circ$ .**

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei einer Anströmung aus dem Starkwindsektor ( $225^\circ$  bis  $245^\circ$ ) sowie aus den südlichen Richtungen ( $147^\circ$  und  $180^\circ$ ) keine topographiebedingte Geschwindigkeitserhöhung auf Höhe des Brückendecks der Höllentalbrücke zu erwarten sind (im Vergleich zur ungestörten Windgeschwindigkeit in maximaler Brückendeckhöhe). Dies ist hauptsächlich auf die abschattende Wirkung der vorgelagerten höherliegenden Topographie zurückzuführen. Ferner stellt sich für diese Windrichtungen eine homogene Verteilung der Windgeschwindigkeitsverhältnisse entlang des Brückendecks der Höllentalbrücke ein.

Bei einer Anströmung entgegen der Fließrichtung der Selbitz ( $0^\circ$ ) sowie bei einer Anströmung quer zum Brückendeck der Höllentalbrücke ( $327^\circ$ ) kommt es topographiebedingt zu einer Kanalisierung der Strömung im Höllental. Die damit verbundene Strömungsbeschleunigung führt im Vergleich zur ungestörten Windgeschwindigkeit in maximaler Brückendeckhöhe, jedoch zu keiner Geschwindigkeitserhöhung. Es gilt zu beachten, dass sich durch den lokalen Einfluss der Topographie entlang des Brückendecks der Höllentalbrücke ein inhomogenes Geschwindigkeitsfeld einstellt. Diese ungleichmäßige Belastung wurde im Zuge der Dimensionierung des Bauwerks berücksichtigt.

Auf Basis der Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation wurden die in Abb. 4.14 dargestellten (einhüllenden) Geschwindigkeitsfaktoren ermittelt. Diese werden im Zuge der Ermittlung der statischen Ersatzwindlasten herangezogen.



**Abb. 4.14:** Einhüllende Geschwindigkeitsfaktoren  $v/v_{ref}$  in Brückendeckhöhe - Höllentalbrücke

## 5. ERGEBNISSE DER WINDKANALUNTERSUCHUNGEN

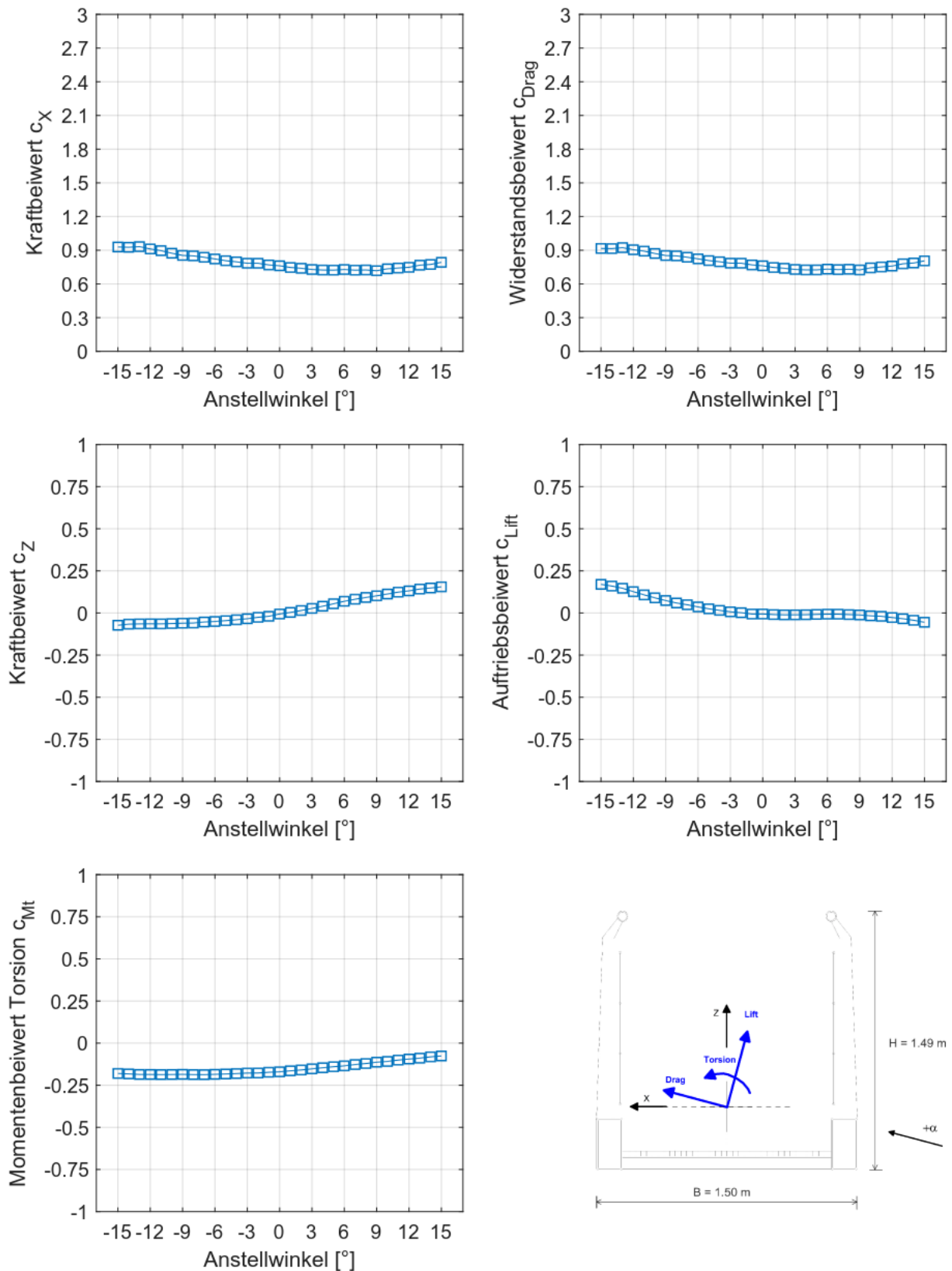
### 5.1. Statische Kraftbeiwerte

#### 5.1.1 Lohbachtalbrücke

Die mittleren quasistatischen aerodynamischen Kraft- und Momentenbeiwerte für den Brückenquerschnitt der Lohbachtalbrücke und die verschiedenen Versuchskonstellationen sind in Tab. 5.1 bis Tab. 5.5 bzw. Abb. 5.1 bis Abb. 5.5 angegeben. Das Koordinatensystem und die Referenzlängen sind in Kap. 2 beschrieben.

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	0.93	-0.07	0.92	0.17	-0.18
-14	0.93	-0.07	0.91	0.16	-0.18
-13	0.93	-0.06	0.92	0.15	-0.19
-12	0.91	-0.06	0.90	0.13	-0.19
-11	0.90	-0.06	0.89	0.11	-0.19
-10	0.87	-0.06	0.87	0.09	-0.19
-9	0.85	-0.06	0.85	0.07	-0.19
-8	0.85	-0.06	0.85	0.06	-0.19
-7	0.84	-0.05	0.84	0.05	-0.19
-6	0.82	-0.05	0.82	0.04	-0.19
-5	0.81	-0.05	0.81	0.02	-0.18
-4	0.80	-0.04	0.80	0.02	-0.18
-3	0.78	-0.03	0.78	0.01	-0.18
-2	0.78	-0.03	0.78	0.00	-0.18
-1	0.77	-0.02	0.77	-0.01	-0.17
0	0.76	-0.01	0.76	-0.01	-0.17
1	0.75	0.00	0.75	-0.01	-0.16
2	0.74	0.01	0.74	-0.01	-0.16
3	0.73	0.03	0.73	-0.01	-0.15
4	0.72	0.04	0.73	-0.01	-0.15
5	0.72	0.05	0.73	-0.01	-0.14
6	0.73	0.07	0.73	-0.01	-0.13
7	0.72	0.08	0.73	-0.01	-0.13
8	0.72	0.09	0.73	-0.01	-0.12
9	0.72	0.10	0.72	-0.01	-0.11
10	0.73	0.11	0.74	-0.02	-0.11
11	0.74	0.12	0.75	-0.02	-0.10
12	0.75	0.13	0.76	-0.03	-0.09
13	0.77	0.14	0.78	-0.03	-0.09
14	0.77	0.15	0.79	-0.04	-0.08
15	0.79	0.16	0.81	-0.06	-0.08

**Tab. 5.1:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

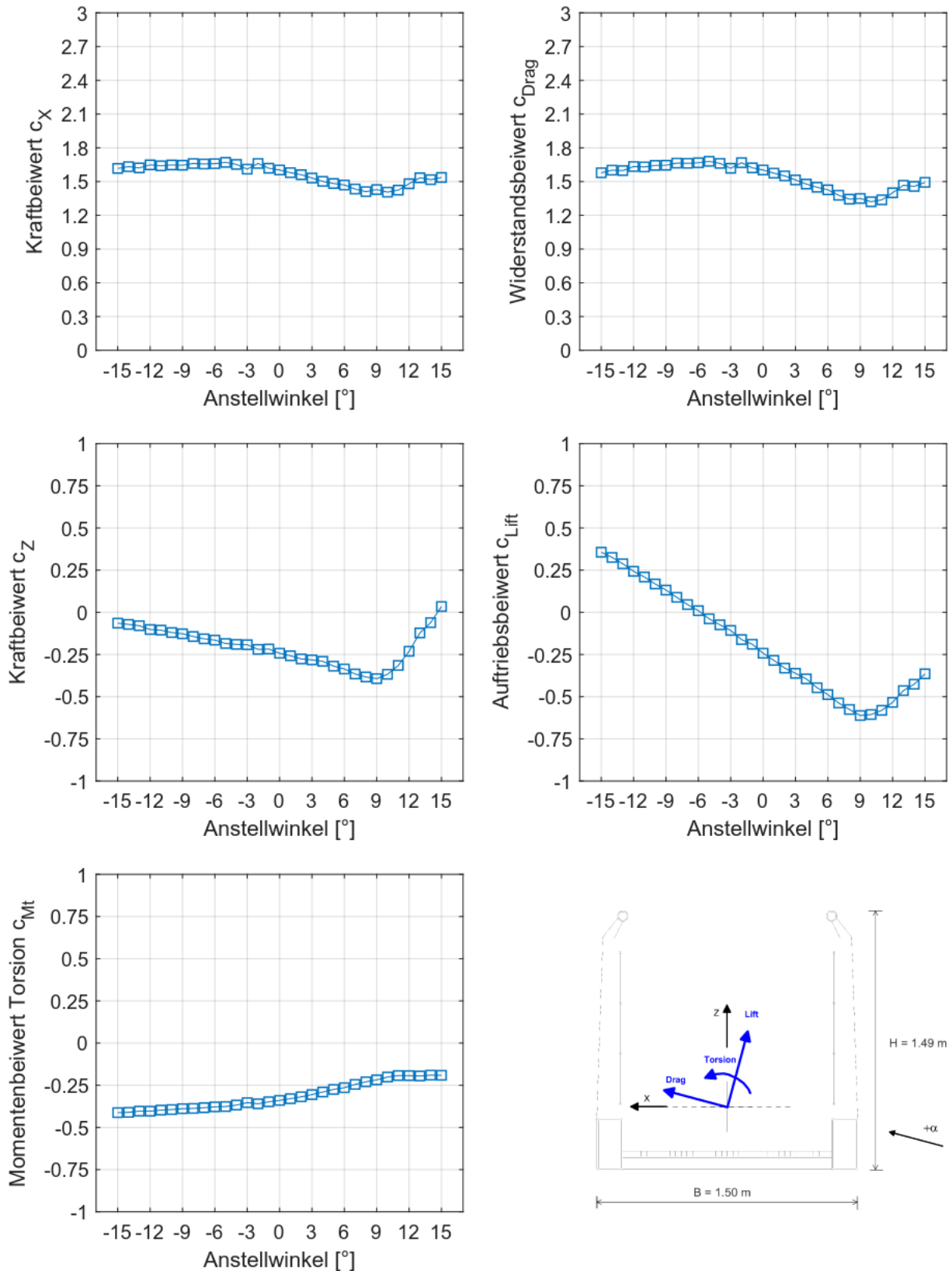


**Abb. 5.1:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	1.62	-0.06	1.58	0.36	-0.41
-14	1.63	-0.07	1.60	0.33	-0.41
-13	1.62	-0.08	1.60	0.29	-0.40
-12	1.65	-0.10	1.63	0.24	-0.40
-11	1.64	-0.11	1.63	0.21	-0.40
-10	1.65	-0.12	1.64	0.17	-0.39
-9	1.65	-0.13	1.64	0.13	-0.39
-8	1.66	-0.14	1.66	0.09	-0.39
-7	1.66	-0.16	1.66	0.05	-0.38
-6	1.66	-0.16	1.67	0.01	-0.38
-5	1.67	-0.18	1.68	-0.04	-0.38
-4	1.65	-0.19	1.66	-0.07	-0.37
-3	1.61	-0.19	1.62	-0.11	-0.35
-2	1.66	-0.22	1.67	-0.16	-0.36
-1	1.62	-0.22	1.62	-0.19	-0.35
0	1.60	-0.24	1.60	-0.24	-0.34
1	1.58	-0.26	1.57	-0.28	-0.33
2	1.56	-0.28	1.55	-0.33	-0.32
3	1.53	-0.28	1.51	-0.36	-0.31
4	1.50	-0.29	1.48	-0.39	-0.29
5	1.48	-0.32	1.45	-0.45	-0.28
6	1.47	-0.34	1.43	-0.49	-0.26
7	1.43	-0.37	1.38	-0.54	-0.25
8	1.41	-0.38	1.34	-0.58	-0.23
9	1.43	-0.39	1.35	-0.61	-0.22
10	1.41	-0.37	1.32	-0.61	-0.20
11	1.42	-0.31	1.34	-0.58	-0.19
12	1.48	-0.23	1.40	-0.53	-0.19
13	1.53	-0.12	1.47	-0.46	-0.19
14	1.52	-0.06	1.46	-0.43	-0.19
15	1.54	0.03	1.49	-0.36	-0.19

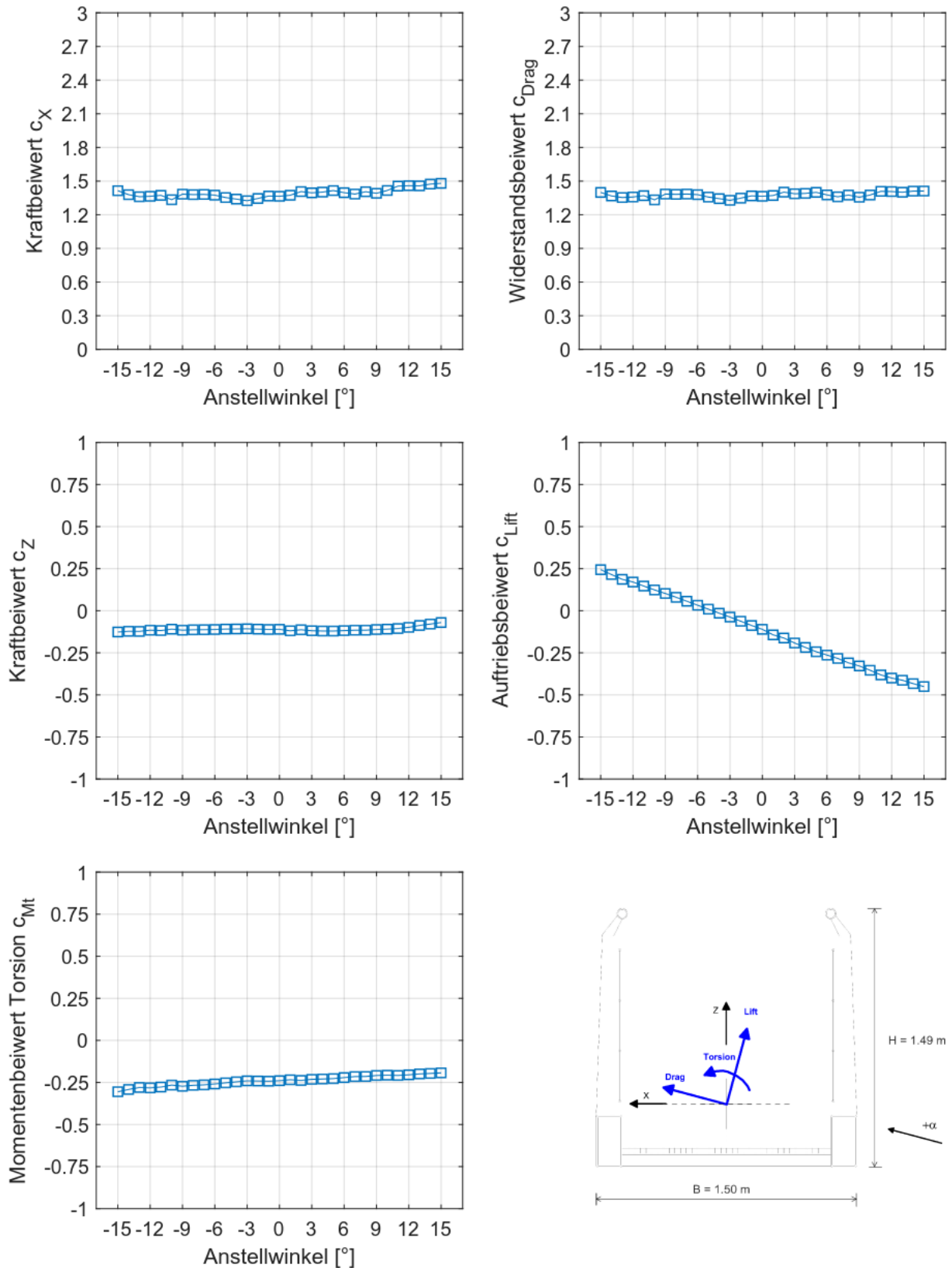
**Tab. 5.2:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



**Abb. 5.2:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“ - Anstellwinkel von -15° bis +15° in 1°-Schritten

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	1.41	-0.13	1.40	0.24	-0.31
-14	1.38	-0.12	1.37	0.22	-0.29
-13	1.36	-0.12	1.35	0.19	-0.28
-12	1.36	-0.12	1.36	0.17	-0.28
-11	1.37	-0.12	1.37	0.15	-0.28
-10	1.33	-0.11	1.33	0.12	-0.27
-9	1.38	-0.12	1.38	0.10	-0.27
-8	1.38	-0.11	1.38	0.08	-0.27
-7	1.38	-0.11	1.38	0.06	-0.26
-6	1.37	-0.11	1.38	0.03	-0.26
-5	1.35	-0.11	1.36	0.01	-0.25
-4	1.34	-0.11	1.34	-0.01	-0.25
-3	1.32	-0.11	1.33	-0.04	-0.24
-2	1.35	-0.11	1.35	-0.06	-0.24
-1	1.37	-0.11	1.37	-0.09	-0.24
0	1.36	-0.11	1.36	-0.11	-0.24
1	1.37	-0.12	1.37	-0.14	-0.23
2	1.41	-0.11	1.40	-0.16	-0.24
3	1.40	-0.12	1.39	-0.19	-0.23
4	1.40	-0.12	1.39	-0.22	-0.23
5	1.42	-0.12	1.40	-0.24	-0.23
6	1.40	-0.12	1.38	-0.26	-0.22
7	1.38	-0.12	1.36	-0.28	-0.22
8	1.41	-0.12	1.38	-0.31	-0.21
9	1.39	-0.11	1.36	-0.33	-0.21
10	1.42	-0.11	1.38	-0.35	-0.21
11	1.46	-0.11	1.41	-0.38	-0.21
12	1.46	-0.10	1.41	-0.40	-0.20
13	1.46	-0.09	1.40	-0.41	-0.20
14	1.47	-0.08	1.41	-0.43	-0.20
15	1.48	-0.07	1.41	-0.45	-0.19

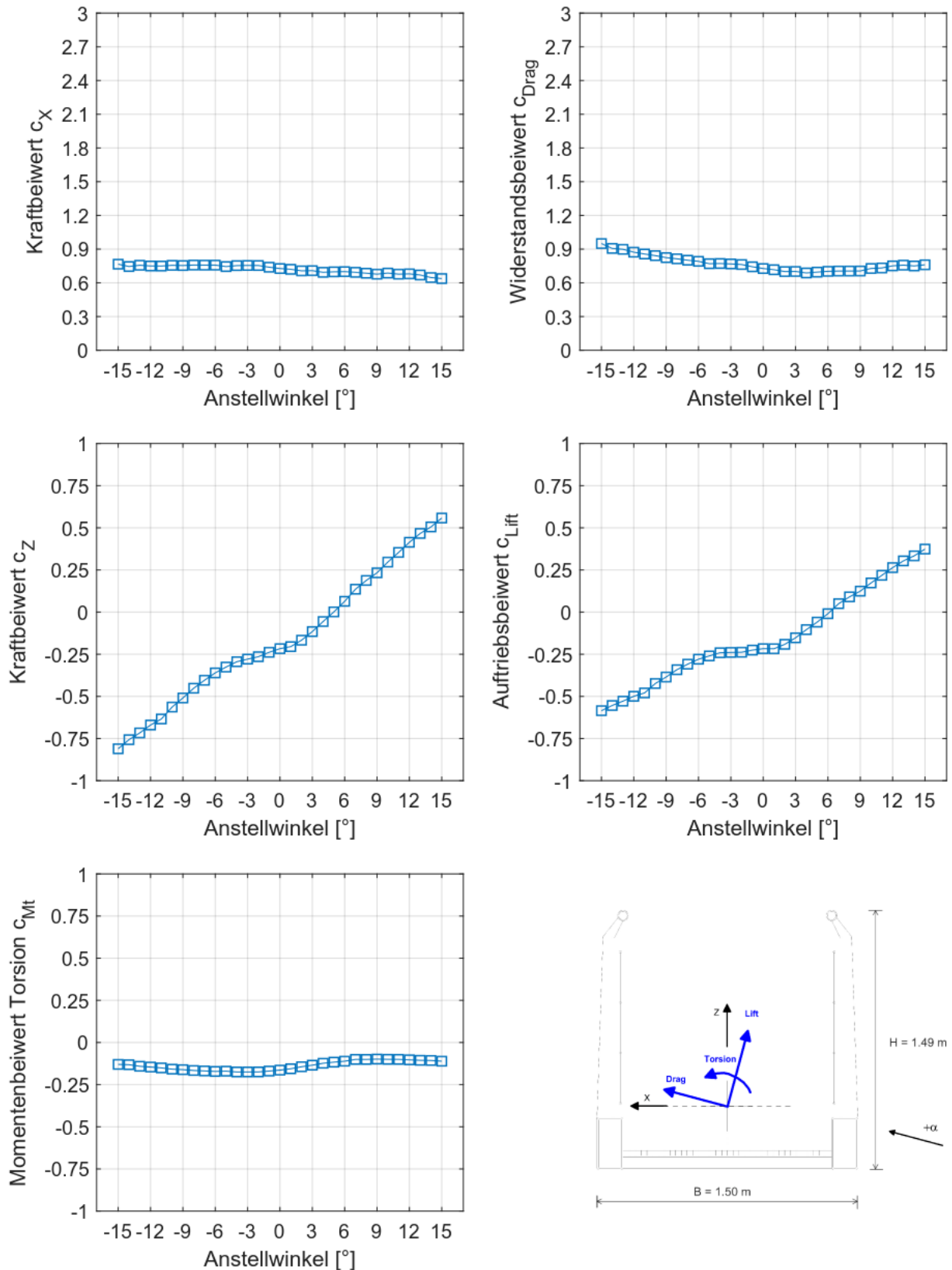
**Tab. 5.3:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



**Abb. 5.3:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	0.77	-0.81	0.95	-0.58	-0.13
-14	0.75	-0.76	0.91	-0.55	-0.13
-13	0.76	-0.72	0.90	-0.53	-0.14
-12	0.75	-0.67	0.87	-0.50	-0.15
-11	0.75	-0.63	0.86	-0.48	-0.15
-10	0.76	-0.56	0.84	-0.42	-0.16
-9	0.75	-0.51	0.82	-0.39	-0.16
-8	0.76	-0.45	0.81	-0.34	-0.17
-7	0.76	-0.40	0.80	-0.31	-0.17
-6	0.76	-0.36	0.79	-0.28	-0.17
-5	0.74	-0.33	0.77	-0.26	-0.17
-4	0.75	-0.29	0.77	-0.24	-0.17
-3	0.75	-0.28	0.77	-0.24	-0.17
-2	0.75	-0.26	0.76	-0.24	-0.17
-1	0.74	-0.24	0.74	-0.23	-0.17
0	0.73	-0.22	0.73	-0.22	-0.16
1	0.72	-0.20	0.72	-0.22	-0.16
2	0.71	-0.17	0.70	-0.19	-0.14
3	0.71	-0.12	0.70	-0.15	-0.13
4	0.69	-0.06	0.69	-0.10	-0.12
5	0.70	0.00	0.70	-0.06	-0.12
6	0.70	0.06	0.70	-0.01	-0.11
7	0.69	0.14	0.70	0.05	-0.10
8	0.69	0.19	0.71	0.09	-0.10
9	0.68	0.23	0.71	0.12	-0.10
10	0.69	0.30	0.73	0.17	-0.10
11	0.68	0.35	0.73	0.22	-0.10
12	0.68	0.41	0.75	0.26	-0.10
13	0.67	0.47	0.76	0.30	-0.11
14	0.65	0.51	0.75	0.33	-0.11
15	0.64	0.56	0.76	0.37	-0.11

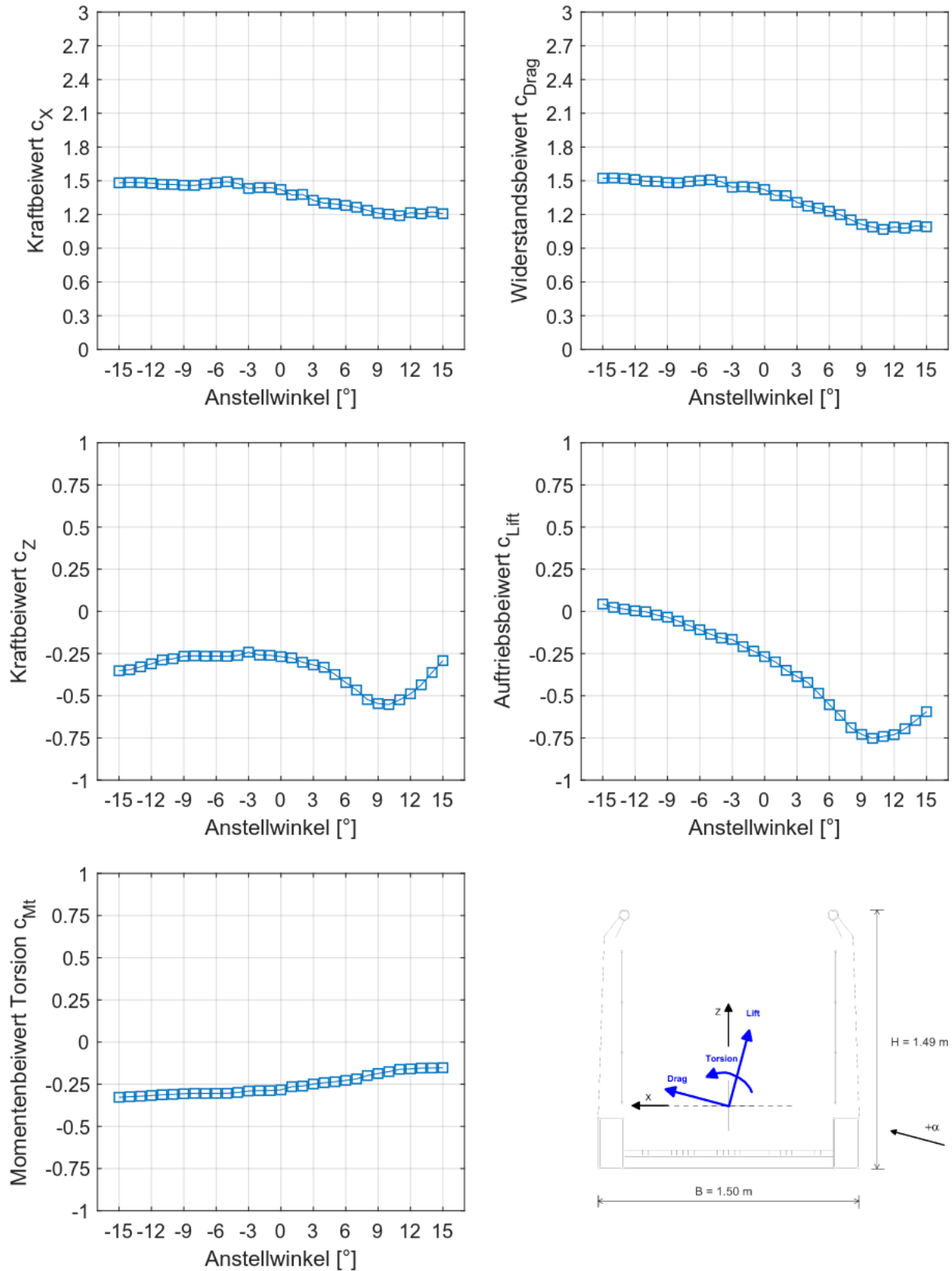
**Tab. 5.4:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



**Abb. 5.4:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	1.48	-0.35	1.52	0.04	-0.33
-14	1.49	-0.35	1.52	0.02	-0.32
-13	1.48	-0.33	1.52	0.01	-0.32
-12	1.48	-0.31	1.51	0.00	-0.32
-11	1.47	-0.29	1.50	0.00	-0.31
-10	1.47	-0.28	1.49	-0.02	-0.31
-9	1.46	-0.27	1.48	-0.03	-0.31
-8	1.46	-0.26	1.48	-0.06	-0.30
-7	1.47	-0.27	1.49	-0.08	-0.30
-6	1.48	-0.26	1.50	-0.11	-0.30
-5	1.49	-0.27	1.51	-0.14	-0.30
-4	1.48	-0.26	1.49	-0.16	-0.30
-3	1.43	-0.24	1.44	-0.17	-0.29
-2	1.44	-0.26	1.45	-0.21	-0.29
-1	1.44	-0.26	1.44	-0.24	-0.29
0	1.42	-0.27	1.42	-0.27	-0.28
1	1.37	-0.28	1.37	-0.30	-0.26
2	1.38	-0.30	1.37	-0.35	-0.26
3	1.33	-0.32	1.31	-0.39	-0.25
4	1.30	-0.33	1.27	-0.42	-0.24
5	1.29	-0.37	1.26	-0.48	-0.24
6	1.28	-0.42	1.23	-0.55	-0.23
7	1.26	-0.47	1.20	-0.62	-0.22
8	1.24	-0.52	1.15	-0.69	-0.20
9	1.21	-0.55	1.11	-0.73	-0.19
10	1.20	-0.55	1.09	-0.75	-0.18
11	1.19	-0.52	1.07	-0.74	-0.16
12	1.22	-0.49	1.09	-0.73	-0.16
13	1.21	-0.44	1.08	-0.70	-0.15
14	1.22	-0.36	1.10	-0.65	-0.15
15	1.21	-0.29	1.09	-0.59	-0.15

**Tab. 5.5:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



**Abb. 5.5:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

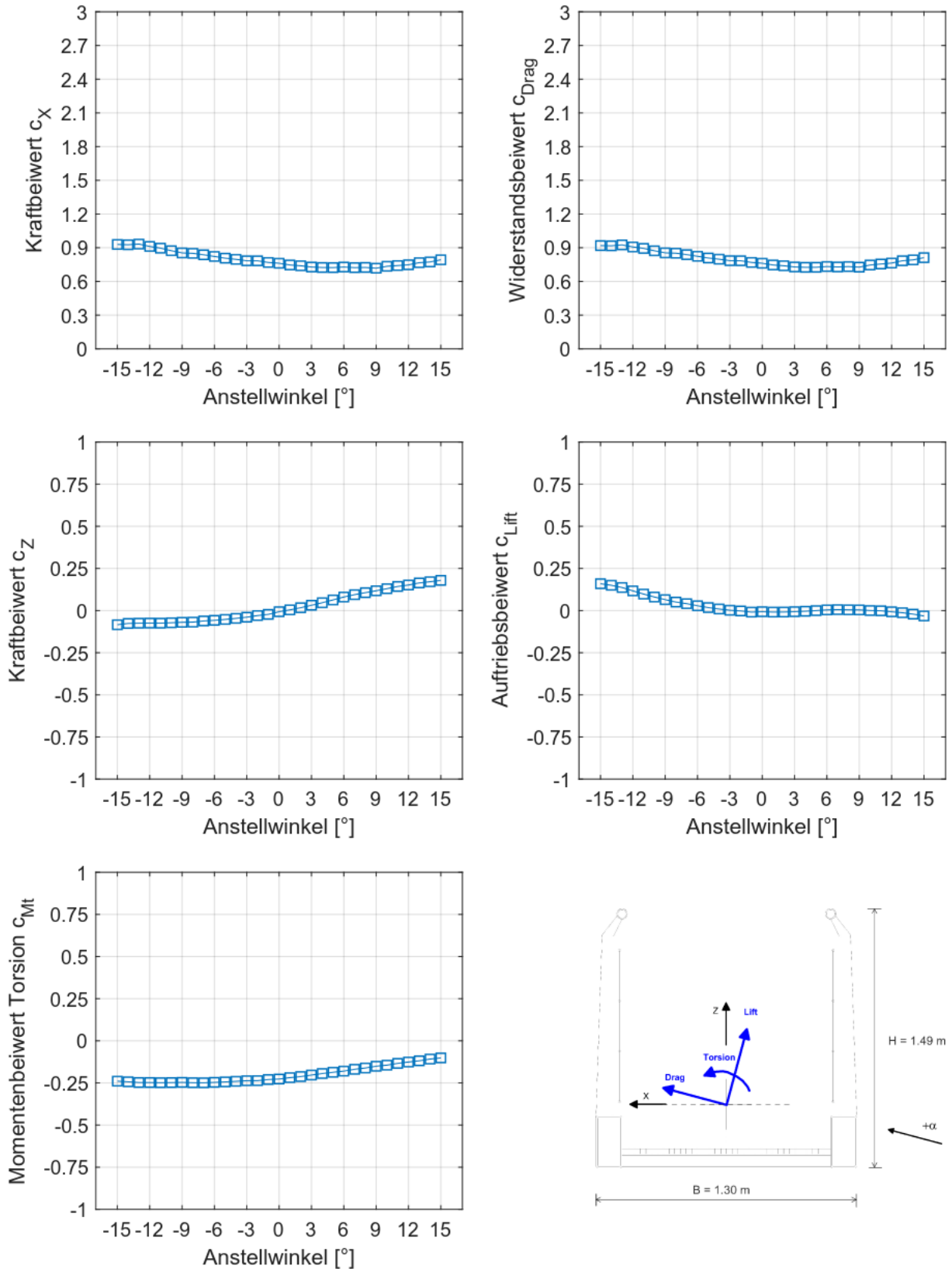


**5.1.2 Höllentalbrücke**

Die mittleren quasistatischen aerodynamischen Kraft- und Momentenbeiwerte für den Brückenquerschnitt der Höllentalbrücke und die verschiedenen Versuchskonstellationen sind in Tab. 5.6 bis Tab. 5.10 bzw. Abb. 5.6 bis Abb. 5.10 angegeben. Das Koordinatensystem und die Referenzlängen sind in Kap. 2 beschrieben.

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	0.93	-0.08	0.92	0.16	-0.24
-14	0.93	-0.08	0.92	0.15	-0.24
-13	0.93	-0.07	0.93	0.14	-0.25
-12	0.91	-0.07	0.91	0.12	-0.25
-11	0.90	-0.07	0.89	0.10	-0.25
-10	0.87	-0.07	0.87	0.08	-0.25
-9	0.85	-0.07	0.85	0.06	-0.25
-8	0.85	-0.07	0.85	0.05	-0.25
-7	0.84	-0.06	0.84	0.04	-0.25
-6	0.82	-0.06	0.82	0.03	-0.25
-5	0.81	-0.05	0.81	0.02	-0.24
-4	0.80	-0.05	0.80	0.01	-0.24
-3	0.78	-0.04	0.79	0.00	-0.24
-2	0.78	-0.03	0.78	0.00	-0.24
-1	0.77	-0.02	0.77	-0.01	-0.23
0	0.76	-0.01	0.76	-0.01	-0.23
1	0.75	0.00	0.75	-0.01	-0.22
2	0.74	0.02	0.74	-0.01	-0.21
3	0.73	0.03	0.73	-0.01	-0.20
4	0.72	0.05	0.73	0.00	-0.19
5	0.72	0.06	0.73	0.00	-0.19
6	0.73	0.08	0.73	0.00	-0.18
7	0.72	0.09	0.73	0.01	-0.17
8	0.72	0.11	0.73	0.00	-0.16
9	0.72	0.12	0.73	0.00	-0.15
10	0.73	0.13	0.75	0.00	-0.14
11	0.74	0.14	0.76	0.00	-0.13
12	0.75	0.15	0.76	-0.01	-0.13
13	0.77	0.16	0.78	-0.01	-0.12
14	0.77	0.17	0.79	-0.02	-0.11
15	0.79	0.18	0.81	-0.03	-0.10

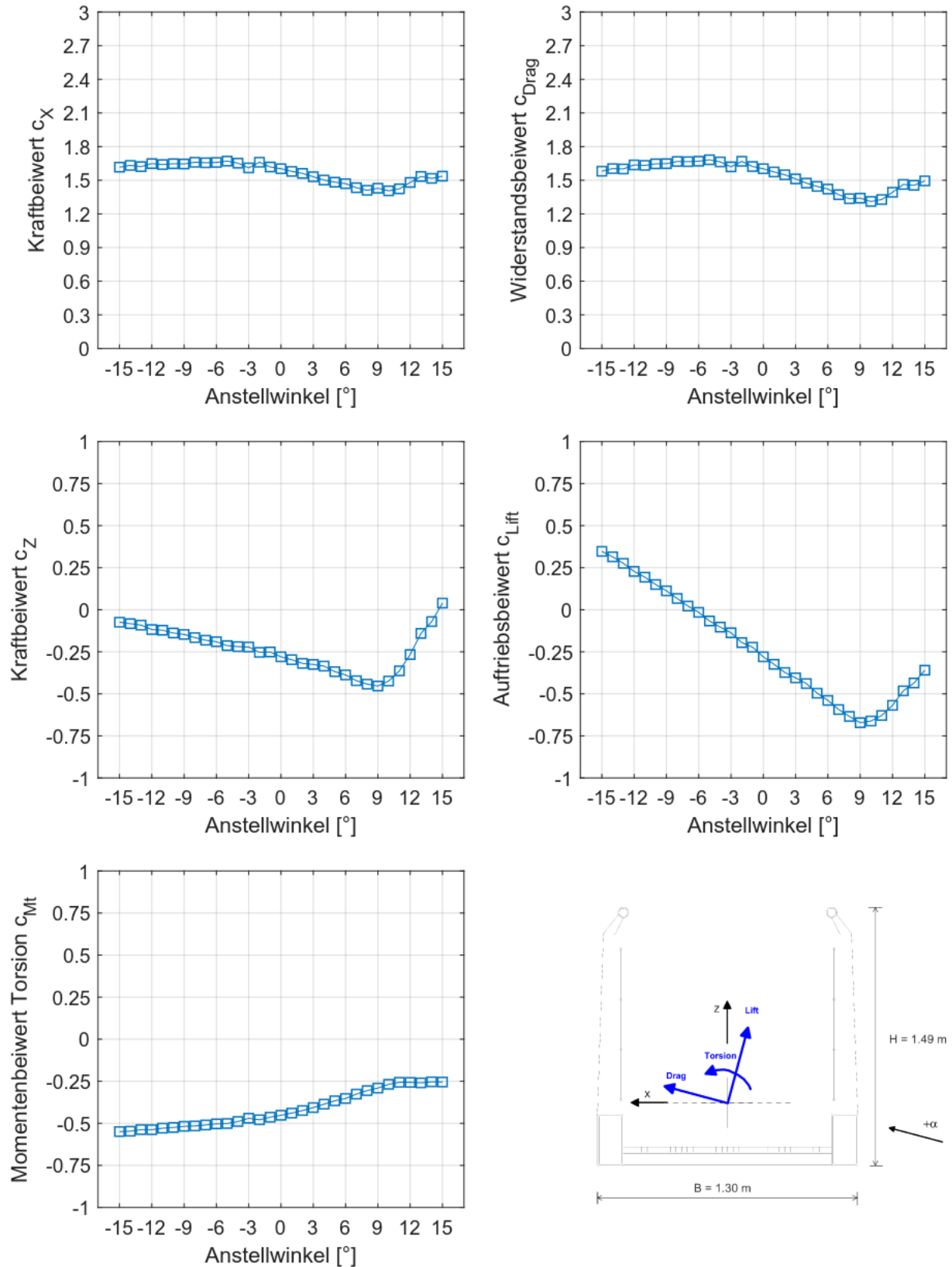
**Tab. 5.6:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ - Anstellwinkel von -15° bis +15° in 1°-Schritten



**Abb. 5.6:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ - Anstellwinkel von -15° bis +15° in 1°-Schritten

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	1.62	-0.07	1.58	0.35	-0.55
-14	1.63	-0.08	1.60	0.31	-0.55
-13	1.62	-0.09	1.60	0.28	-0.54
-12	1.65	-0.12	1.64	0.23	-0.54
-11	1.64	-0.12	1.63	0.19	-0.53
-10	1.65	-0.14	1.65	0.15	-0.52
-9	1.65	-0.15	1.65	0.11	-0.52
-8	1.66	-0.17	1.67	0.07	-0.52
-7	1.66	-0.18	1.67	0.02	-0.51
-6	1.66	-0.19	1.67	-0.02	-0.50
-5	1.67	-0.21	1.68	-0.07	-0.50
-4	1.65	-0.22	1.66	-0.10	-0.49
-3	1.61	-0.22	1.62	-0.14	-0.47
-2	1.66	-0.25	1.67	-0.20	-0.48
-1	1.62	-0.25	1.62	-0.22	-0.46
0	1.60	-0.28	1.60	-0.28	-0.45
1	1.58	-0.30	1.57	-0.32	-0.44
2	1.56	-0.32	1.55	-0.37	-0.42
3	1.53	-0.33	1.51	-0.40	-0.41
4	1.50	-0.34	1.47	-0.44	-0.39
5	1.48	-0.37	1.45	-0.50	-0.37
6	1.47	-0.39	1.42	-0.54	-0.35
7	1.43	-0.42	1.37	-0.59	-0.33
8	1.41	-0.44	1.34	-0.63	-0.31
9	1.43	-0.45	1.34	-0.67	-0.29
10	1.41	-0.42	1.31	-0.66	-0.27
11	1.42	-0.36	1.33	-0.63	-0.26
12	1.48	-0.27	1.39	-0.57	-0.26
13	1.53	-0.14	1.46	-0.48	-0.26
14	1.52	-0.07	1.45	-0.44	-0.25
15	1.54	0.04	1.49	-0.36	-0.25

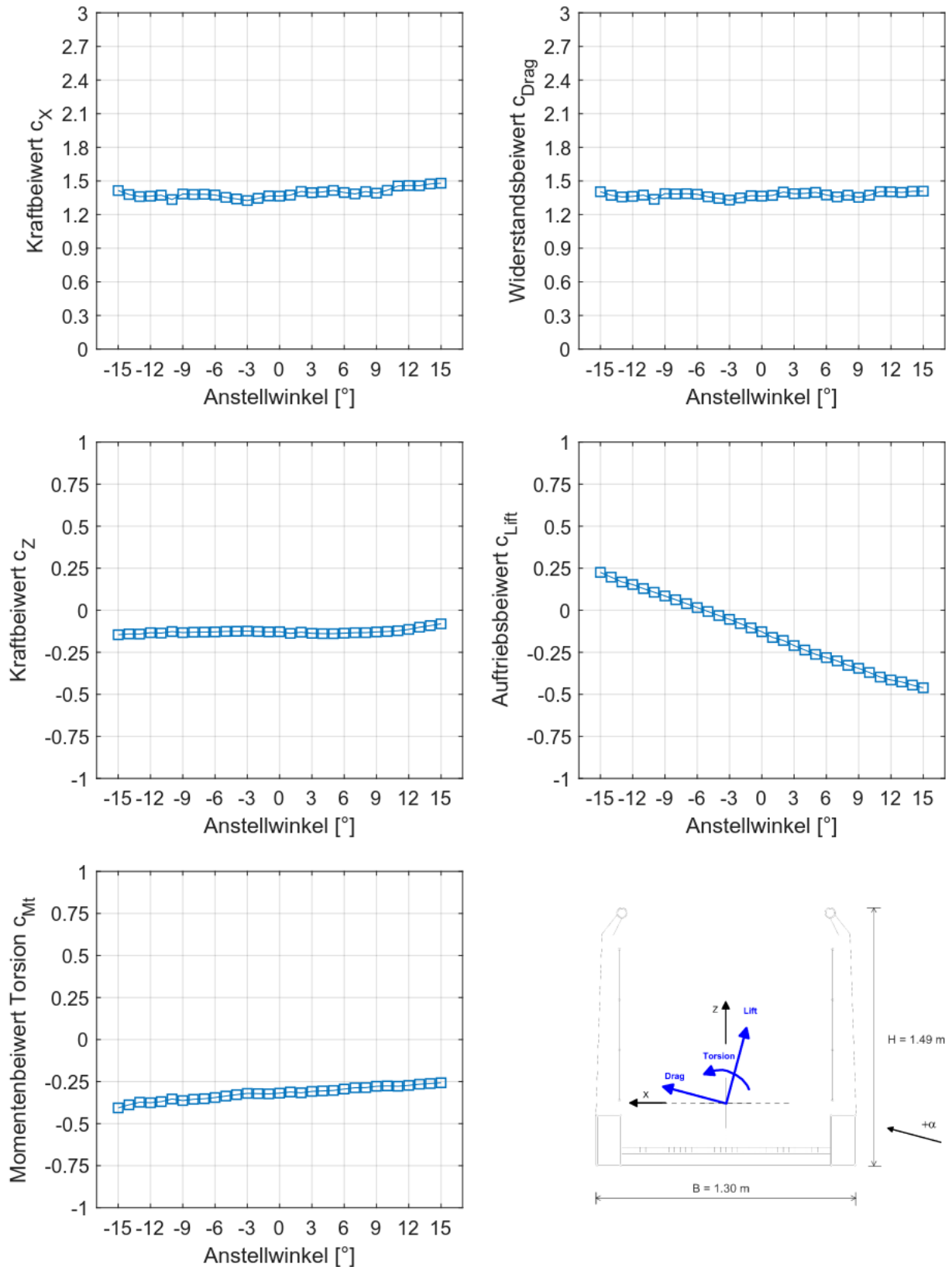
**Tab. 5.7:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



**Abb. 5.7:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	1.41	-0.15	1.40	0.23	-0.41
-14	1.38	-0.14	1.37	0.20	-0.39
-13	1.36	-0.14	1.36	0.17	-0.37
-12	1.36	-0.13	1.36	0.15	-0.38
-11	1.37	-0.14	1.37	0.13	-0.37
-10	1.33	-0.13	1.34	0.11	-0.35
-9	1.38	-0.13	1.39	0.08	-0.36
-8	1.38	-0.13	1.38	0.06	-0.36
-7	1.38	-0.13	1.39	0.04	-0.35
-6	1.37	-0.13	1.38	0.02	-0.34
-5	1.35	-0.13	1.36	-0.01	-0.34
-4	1.34	-0.12	1.34	-0.03	-0.33
-3	1.32	-0.12	1.33	-0.05	-0.32
-2	1.35	-0.13	1.35	-0.08	-0.32
-1	1.37	-0.13	1.37	-0.10	-0.32
0	1.36	-0.13	1.36	-0.13	-0.32
1	1.37	-0.14	1.37	-0.16	-0.31
2	1.41	-0.13	1.40	-0.18	-0.32
3	1.40	-0.14	1.39	-0.21	-0.31
4	1.40	-0.14	1.39	-0.24	-0.31
5	1.42	-0.14	1.40	-0.26	-0.30
6	1.40	-0.14	1.37	-0.28	-0.29
7	1.38	-0.13	1.36	-0.30	-0.29
8	1.41	-0.13	1.37	-0.33	-0.29
9	1.39	-0.13	1.35	-0.35	-0.28
10	1.42	-0.13	1.37	-0.37	-0.28
11	1.46	-0.12	1.41	-0.40	-0.28
12	1.46	-0.11	1.40	-0.41	-0.27
13	1.46	-0.10	1.40	-0.43	-0.27
14	1.47	-0.09	1.41	-0.45	-0.26
15	1.48	-0.08	1.41	-0.46	-0.26

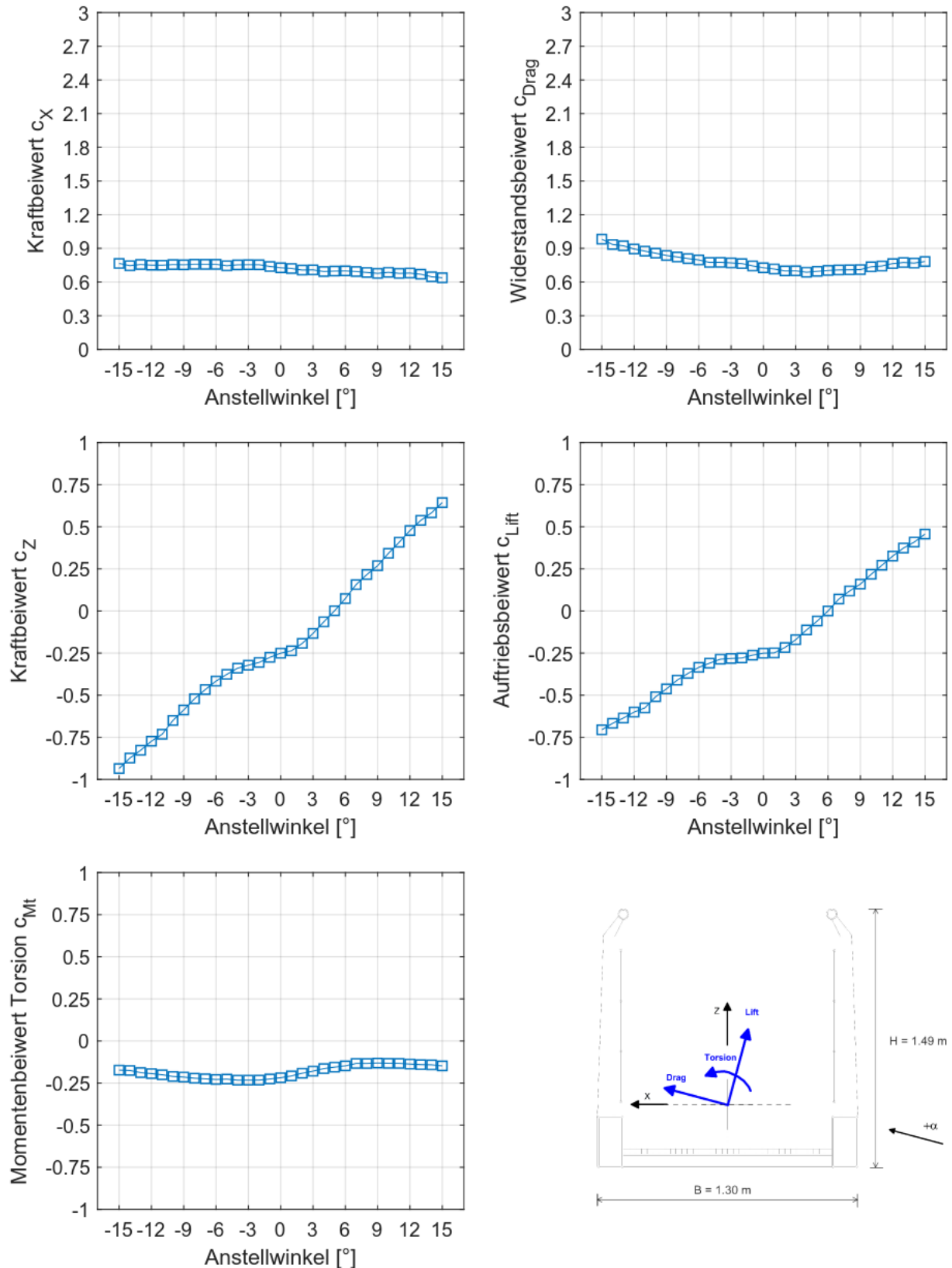
**Tab. 5.8:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



**Abb. 5.8:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	0.77	-0.94	0.98	-0.71	-0.17
-14	0.75	-0.87	0.93	-0.67	-0.18
-13	0.76	-0.83	0.92	-0.64	-0.19
-12	0.75	-0.77	0.89	-0.60	-0.19
-11	0.75	-0.73	0.88	-0.58	-0.20
-10	0.76	-0.65	0.86	-0.51	-0.21
-9	0.75	-0.59	0.84	-0.46	-0.21
-8	0.76	-0.52	0.82	-0.41	-0.22
-7	0.76	-0.47	0.81	-0.37	-0.22
-6	0.76	-0.42	0.80	-0.33	-0.23
-5	0.74	-0.38	0.77	-0.31	-0.23
-4	0.75	-0.34	0.78	-0.29	-0.23
-3	0.75	-0.32	0.77	-0.28	-0.23
-2	0.75	-0.31	0.76	-0.28	-0.23
-1	0.74	-0.28	0.74	-0.26	-0.23
0	0.73	-0.25	0.73	-0.25	-0.22
1	0.72	-0.24	0.72	-0.25	-0.21
2	0.71	-0.19	0.70	-0.22	-0.19
3	0.71	-0.13	0.70	-0.17	-0.18
4	0.69	-0.06	0.69	-0.11	-0.16
5	0.70	0.00	0.70	-0.06	-0.16
6	0.70	0.07	0.70	0.00	-0.15
7	0.69	0.16	0.71	0.07	-0.13
8	0.69	0.22	0.71	0.12	-0.13
9	0.68	0.27	0.71	0.16	-0.13
10	0.69	0.34	0.74	0.22	-0.13
11	0.68	0.41	0.74	0.27	-0.13
12	0.68	0.48	0.76	0.33	-0.14
13	0.67	0.54	0.77	0.37	-0.14
14	0.65	0.58	0.77	0.41	-0.14
15	0.64	0.64	0.78	0.46	-0.15

**Tab. 5.9:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

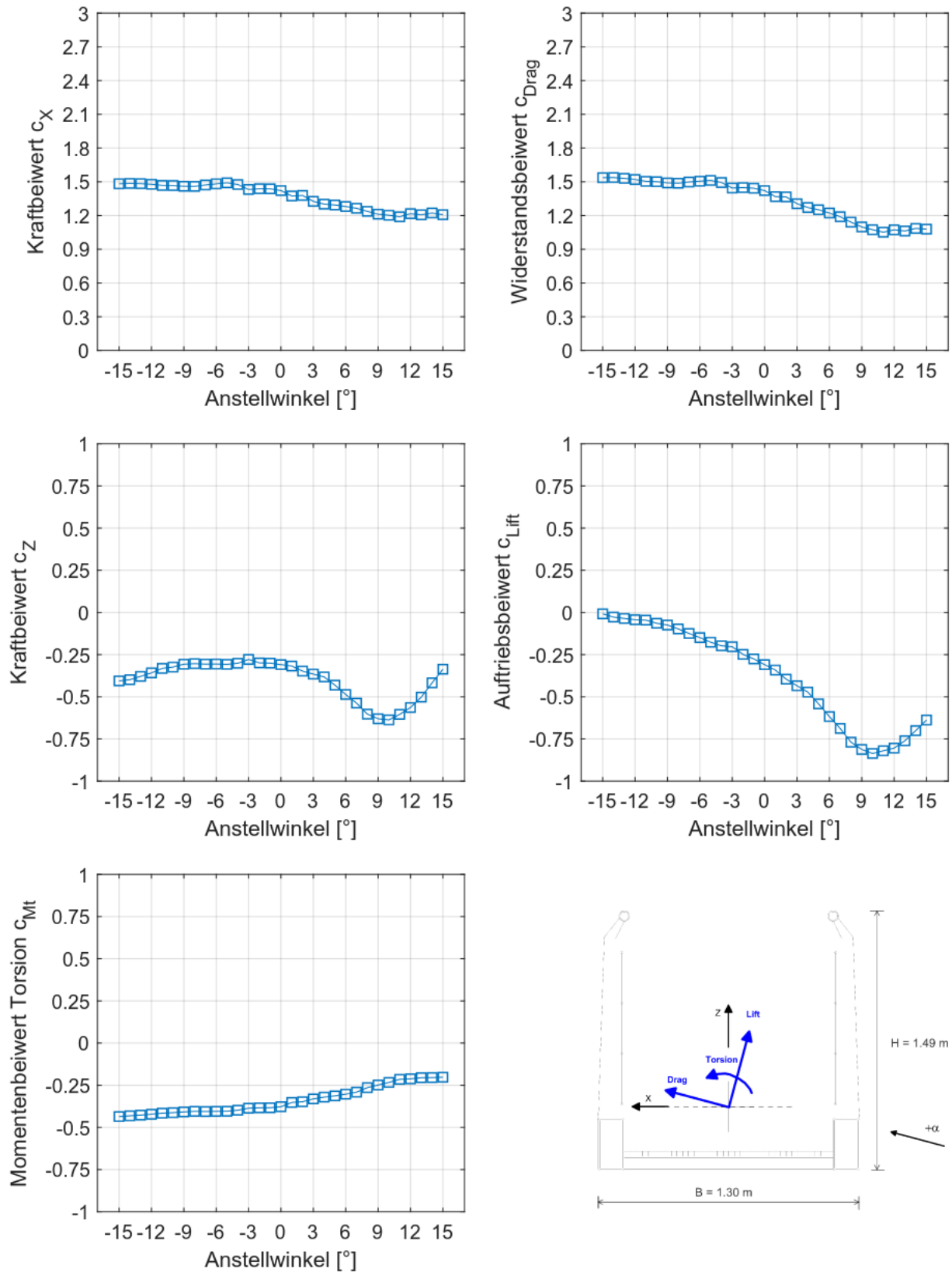


**Abb. 5.9:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten



Winkel [°]	$c_x$ [-]	$c_z$ [-]	$c_{\text{Drag}}$ [-]	$c_{\text{Lift}}$ [-]	$c_{\text{Mt}}$ [-]
-15	1.48	-0.41	1.54	-0.01	-0.44
-14	1.49	-0.40	1.54	-0.03	-0.43
-13	1.48	-0.38	1.53	-0.04	-0.43
-12	1.48	-0.36	1.52	-0.04	-0.42
-11	1.47	-0.33	1.50	-0.05	-0.42
-10	1.47	-0.32	1.50	-0.06	-0.41
-9	1.46	-0.31	1.49	-0.07	-0.41
-8	1.46	-0.30	1.49	-0.10	-0.40
-7	1.47	-0.31	1.50	-0.12	-0.41
-6	1.48	-0.31	1.51	-0.15	-0.40
-5	1.49	-0.31	1.51	-0.18	-0.40
-4	1.48	-0.30	1.49	-0.20	-0.40
-3	1.43	-0.28	1.44	-0.20	-0.39
-2	1.44	-0.30	1.45	-0.25	-0.38
-1	1.44	-0.30	1.44	-0.28	-0.38
0	1.42	-0.31	1.42	-0.31	-0.38
1	1.37	-0.32	1.37	-0.34	-0.35
2	1.38	-0.35	1.37	-0.40	-0.35
3	1.33	-0.37	1.31	-0.43	-0.33
4	1.30	-0.38	1.27	-0.47	-0.32
5	1.29	-0.43	1.25	-0.54	-0.31
6	1.28	-0.49	1.22	-0.62	-0.30
7	1.26	-0.54	1.19	-0.69	-0.29
8	1.24	-0.60	1.14	-0.77	-0.26
9	1.21	-0.63	1.10	-0.81	-0.25
10	1.20	-0.64	1.07	-0.84	-0.23
11	1.19	-0.60	1.05	-0.82	-0.21
12	1.22	-0.56	1.07	-0.80	-0.21
13	1.21	-0.50	1.06	-0.76	-0.21
14	1.22	-0.42	1.09	-0.70	-0.20
15	1.21	-0.34	1.08	-0.64	-0.20

**Tab. 5.10:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

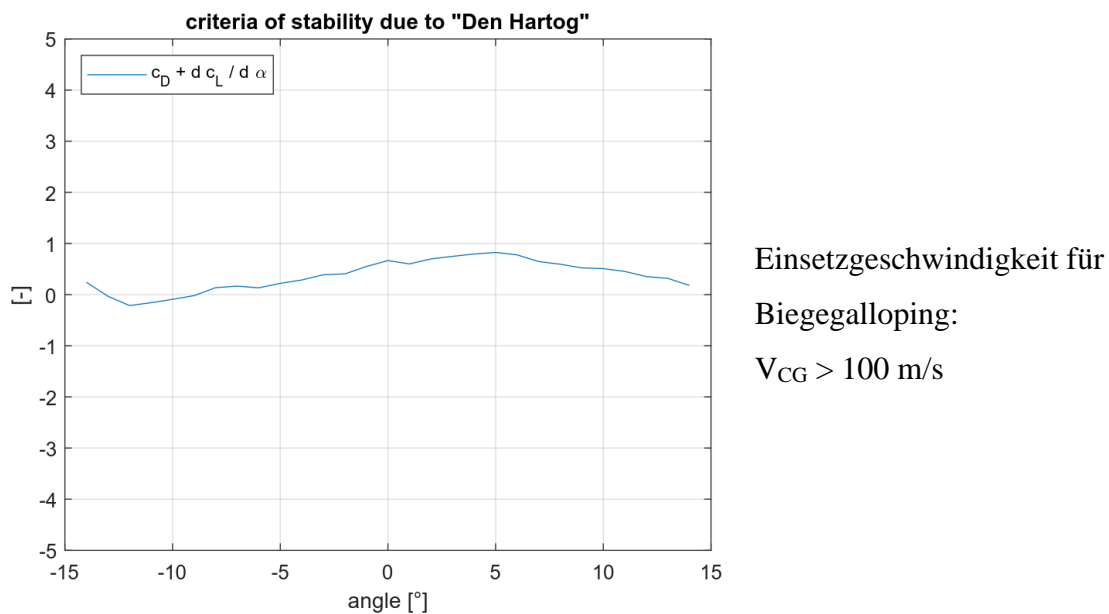


**Abb. 5.10:** Mittlere quasistatische aerodynamische Kraft- und Momentenbeiwerte für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“ - Anstellwinkel von  $-15^\circ$  bis  $+15^\circ$  in  $1^\circ$ -Schritten

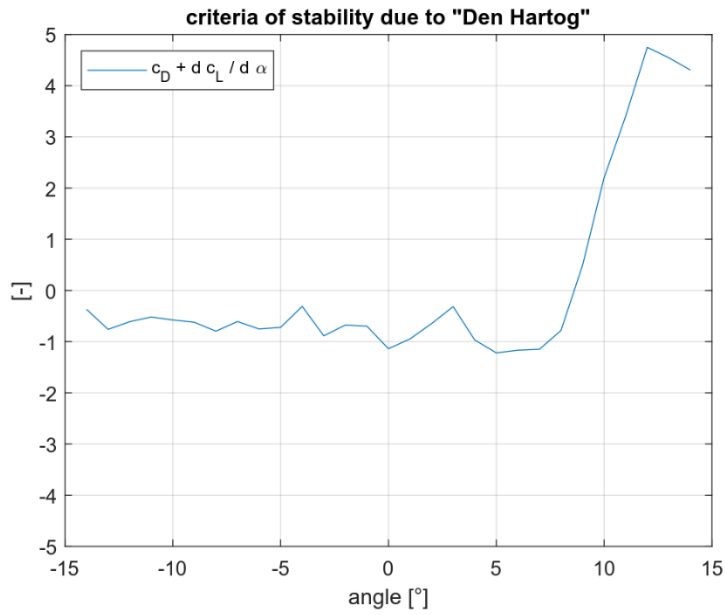
## 5.2. Sicherheit des Überbaus gegenüber Instabilitäten wie Galloping oder Flattern

### 5.2.1 Lohbachtalbrücke

Die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität des Brückenquerschnitts für die Lohbachtalbrücke sind in Abb. 5.11 bis Abb. 5.15 dargestellt. Die Ermittlung der Grenzgeschwindigkeiten  $U_{\text{Nachweis}}$  wird in Kap. 3 beschrieben.



**Abb. 5.11:** Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“



Einsetzgeschwindigkeit für  
Biegegalloping:  
 $V_{CG} = 26 \text{ m/s}$

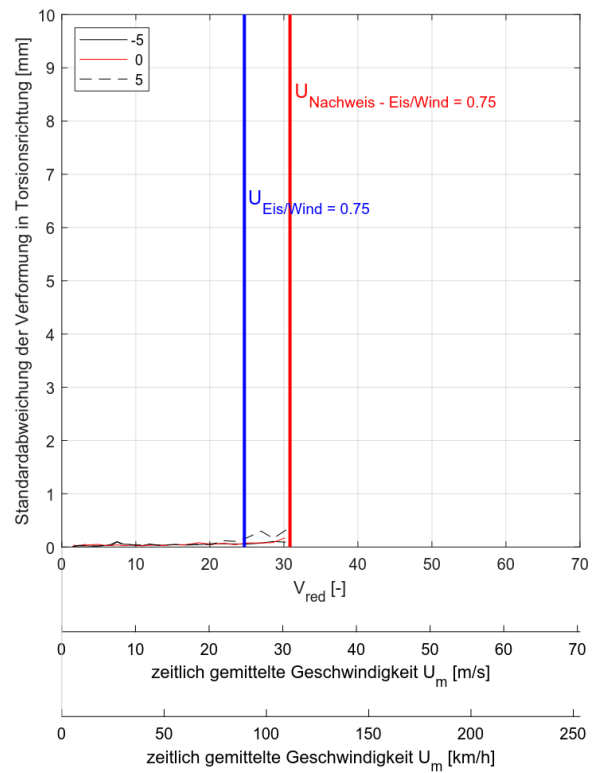
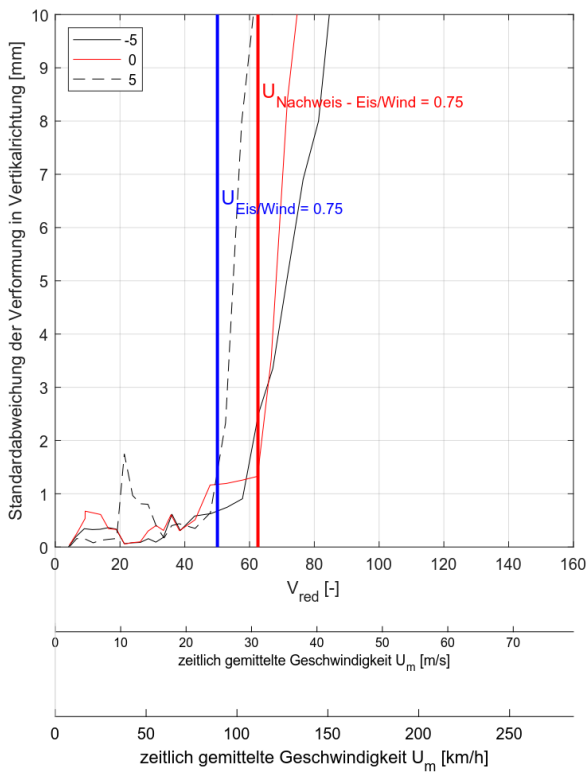
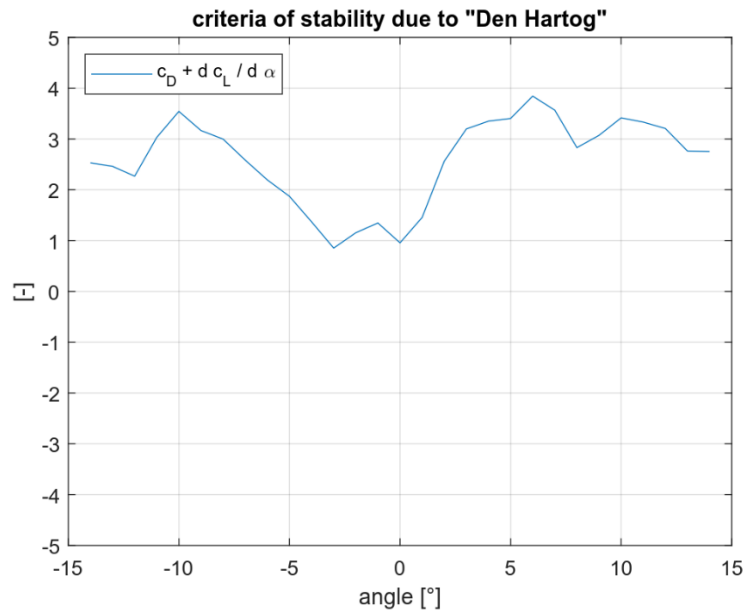


Abb. 5.12: Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“



Kein Biegegalloping

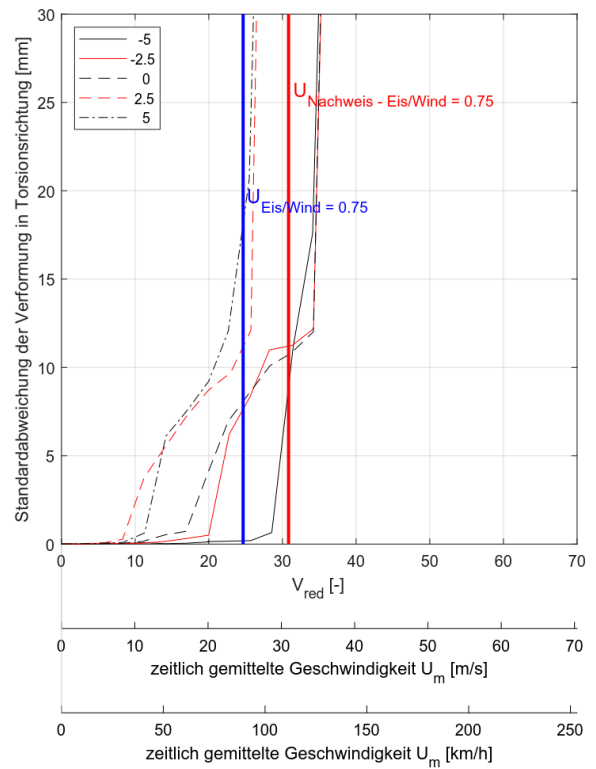
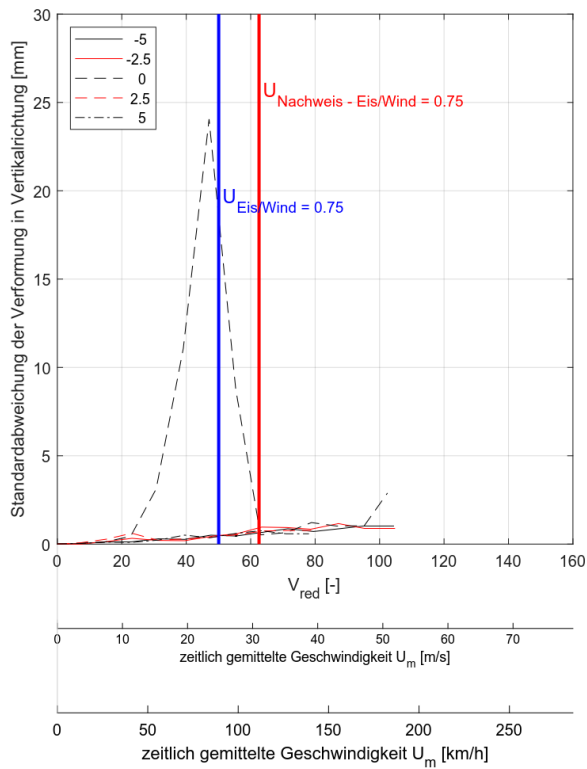
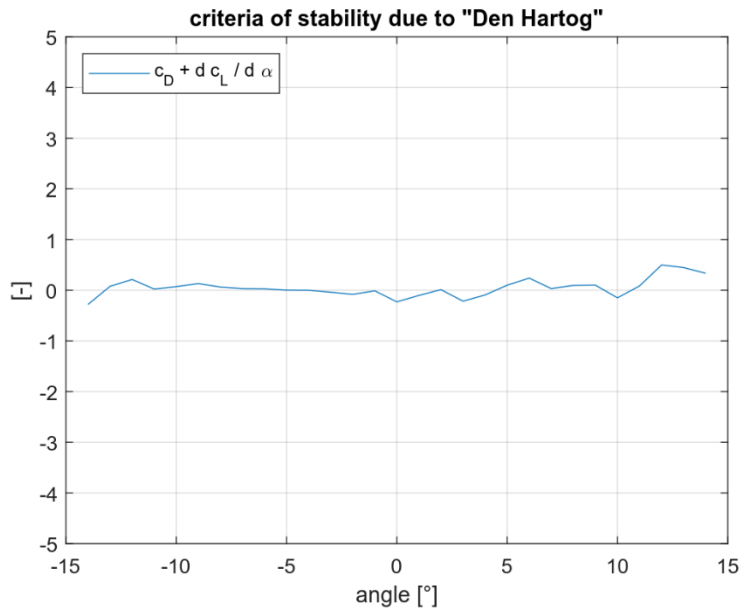
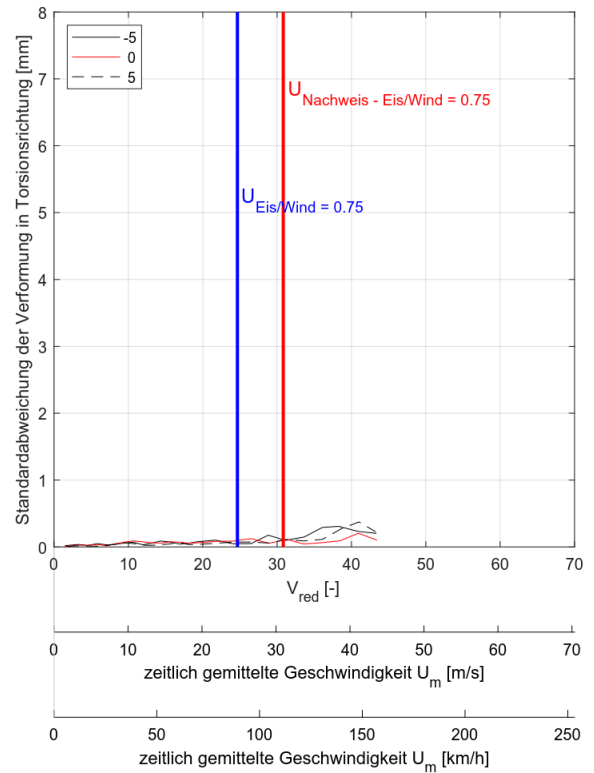
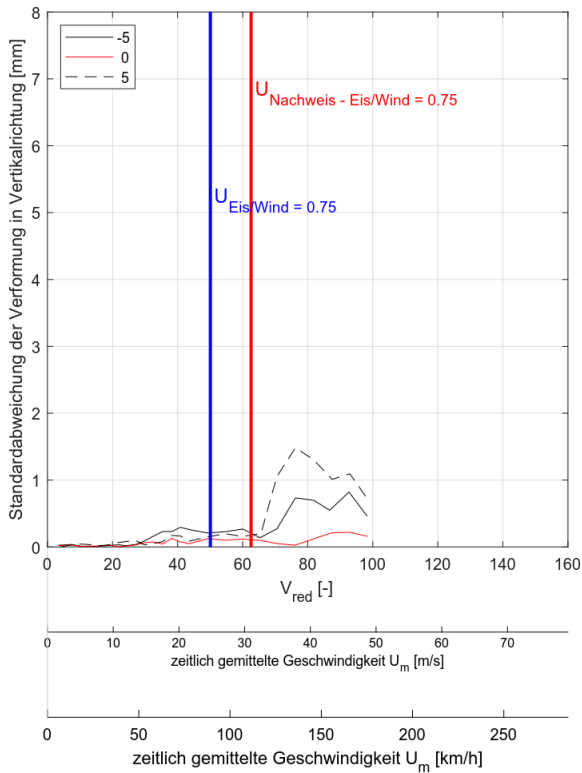


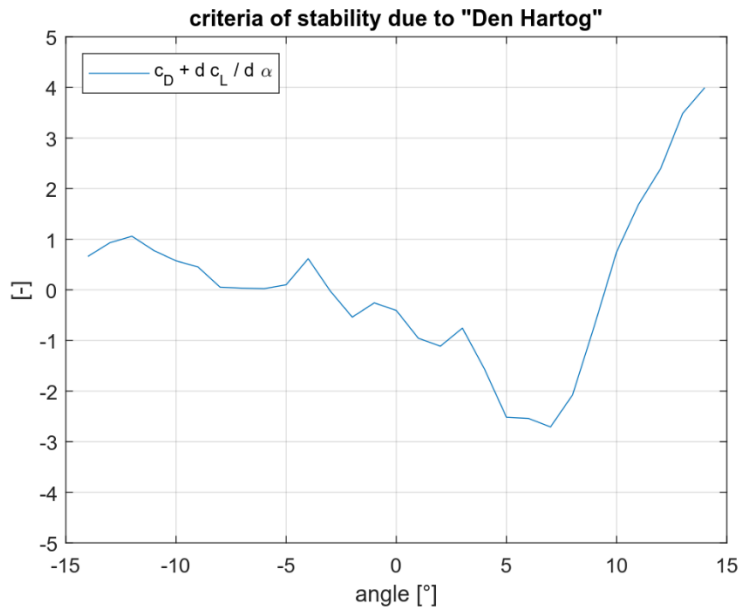
Abb. 5.13: Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“



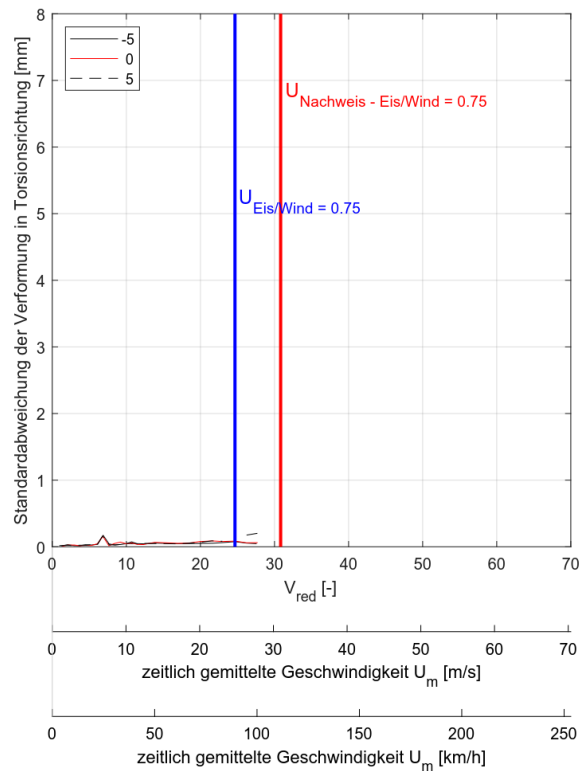
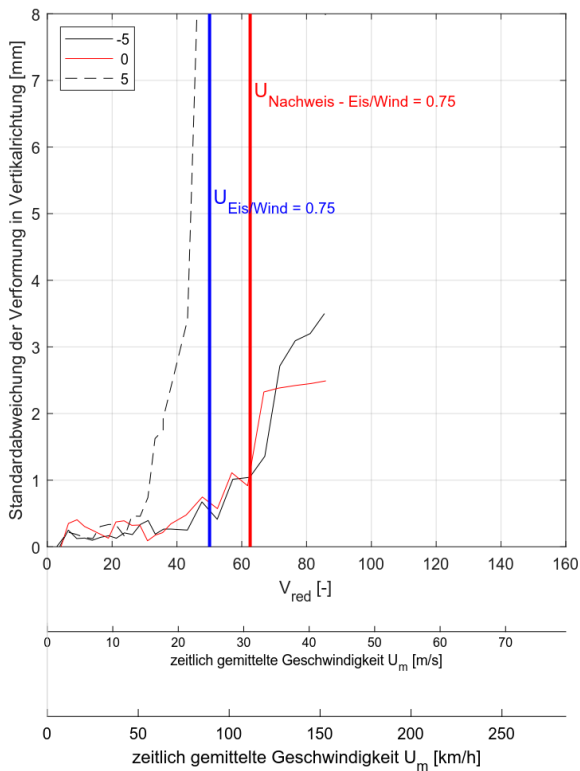
Einsetzgeschwindigkeit für  
Biegegalloping:  
 $V_{CG} > 100 \text{ m/s}$



**Abb. 5.14:** Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“



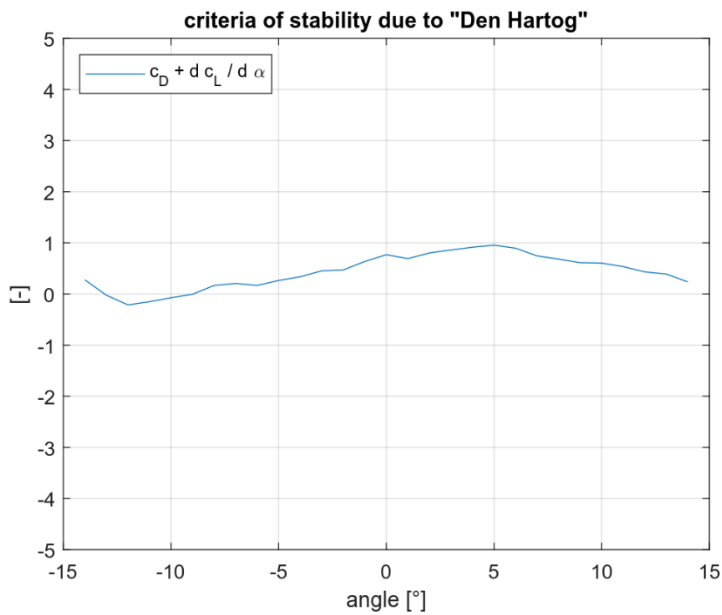
Einsetzgeschwindigkeit für  
Biegegalloping:  
 $V_{CG} = 12 \text{ m/s}$



**Abb. 5.15:** Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“

5.2.2 Höllentalbrücke

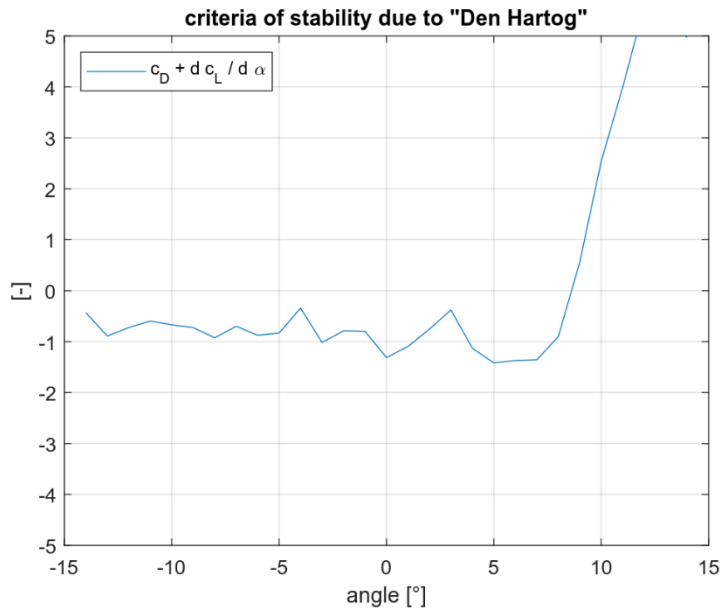
Die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität des Brückenquerschnitts für die Höllentalbrücke sind in Abb. 5.16 bis Abb. 5.20 dargestellt. Die Ermittlung der Grenzgeschwindigkeiten  $U_{\text{Nachweis}}$  wird in Kap. 3 beschrieben.



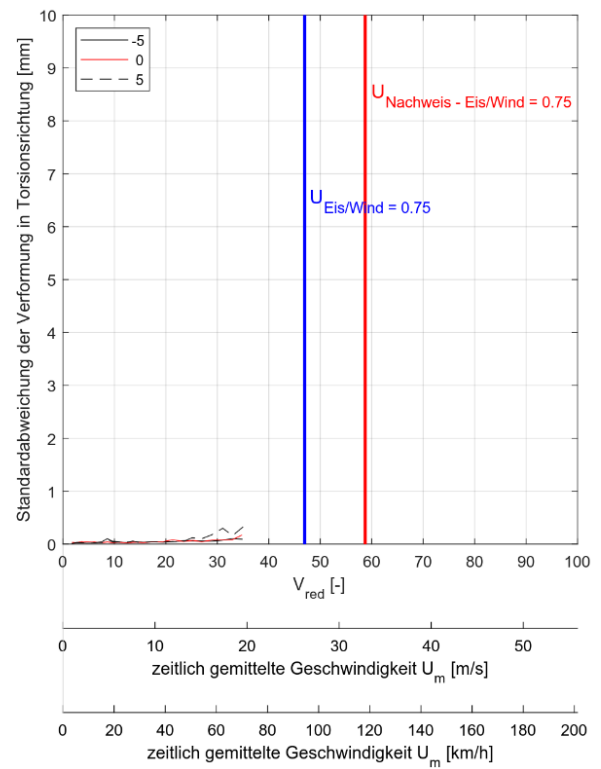
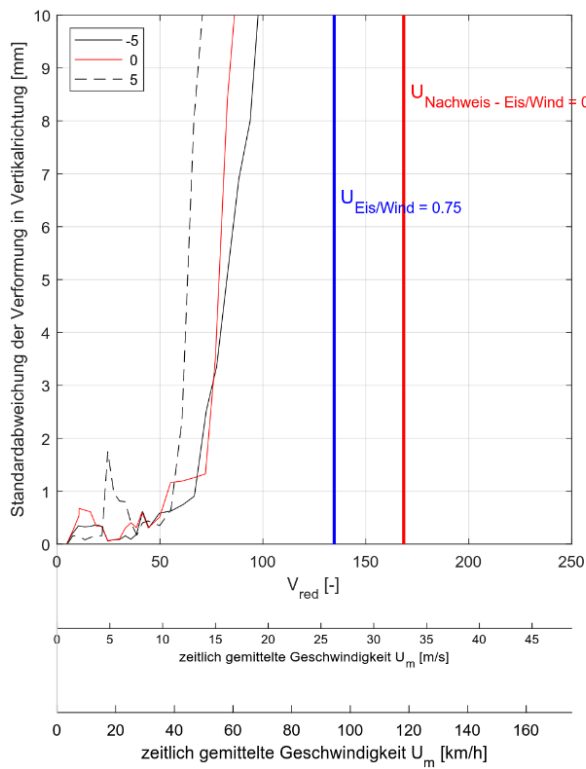
Einsetzgeschwindigkeit für  
Biegegalloping:  
 $V_{CG} = 52 \text{ m/s}$

**Abb. 5.16:** Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“

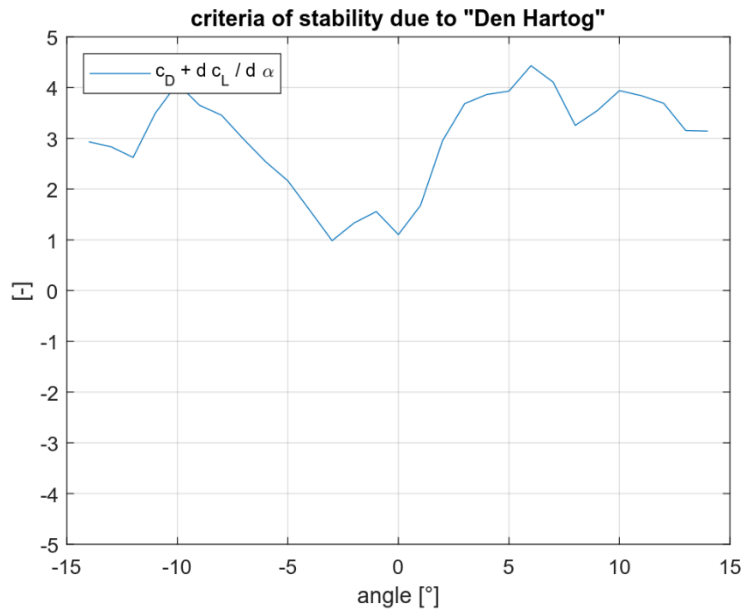




Einsetzgeschwindigkeit für  
Biegegalloping:  
 $V_{CG} = 9 \text{ m/s}$



**Abb. 5.17:** Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung“



Kein Biegegalloping

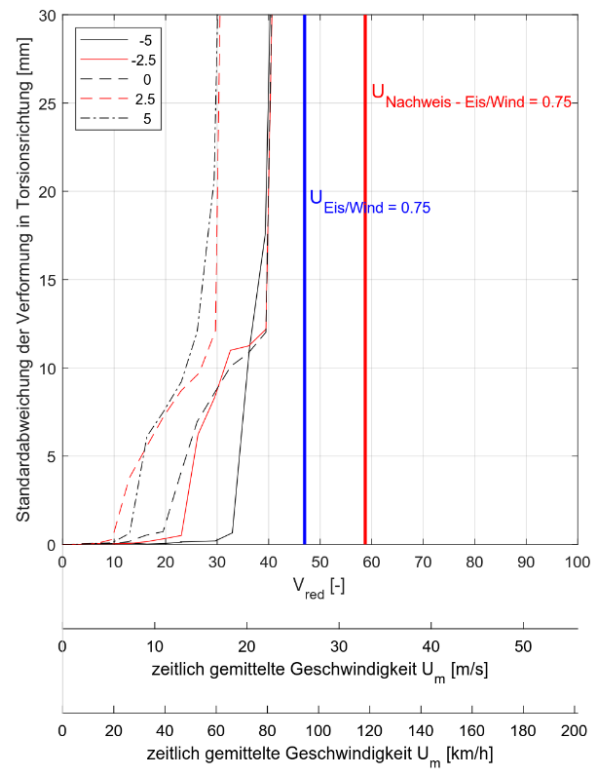
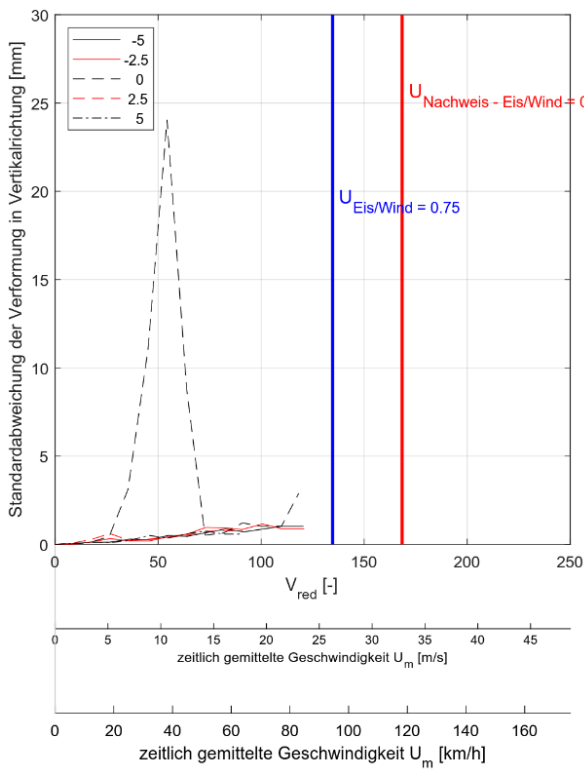
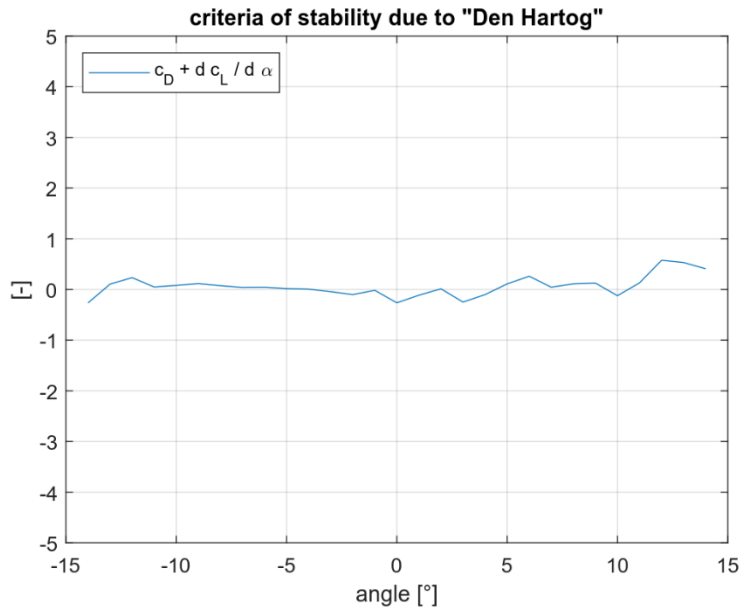


Abb. 5.18: Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Gitterrost“



Einsetzgeschwindigkeit für  
Biegegalloping:  
 $V_{CG} = 52 \text{ m/s}$

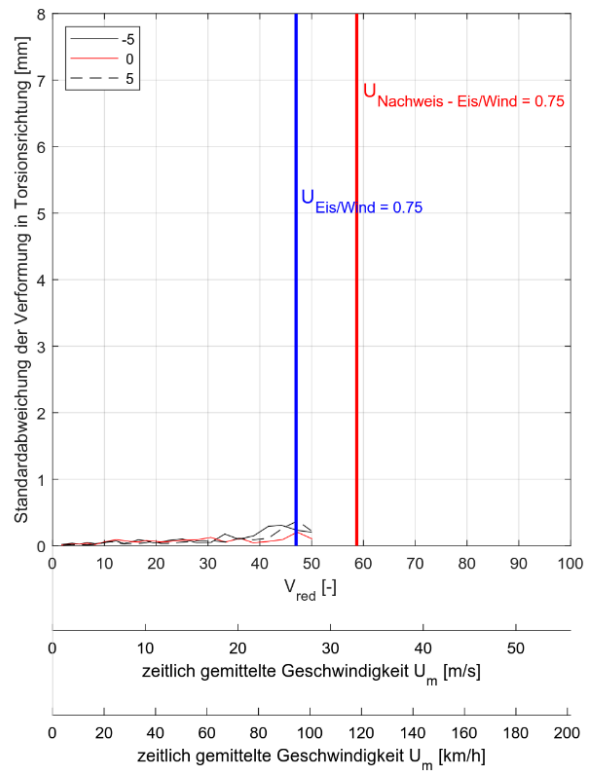
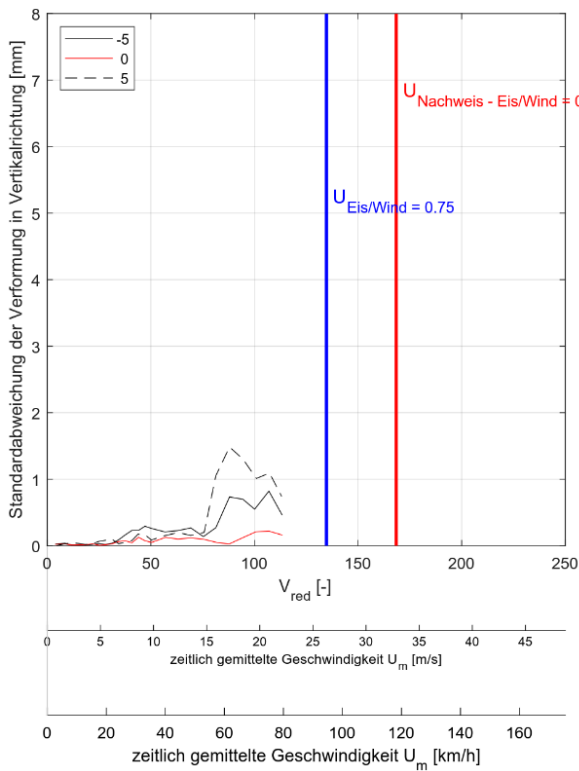
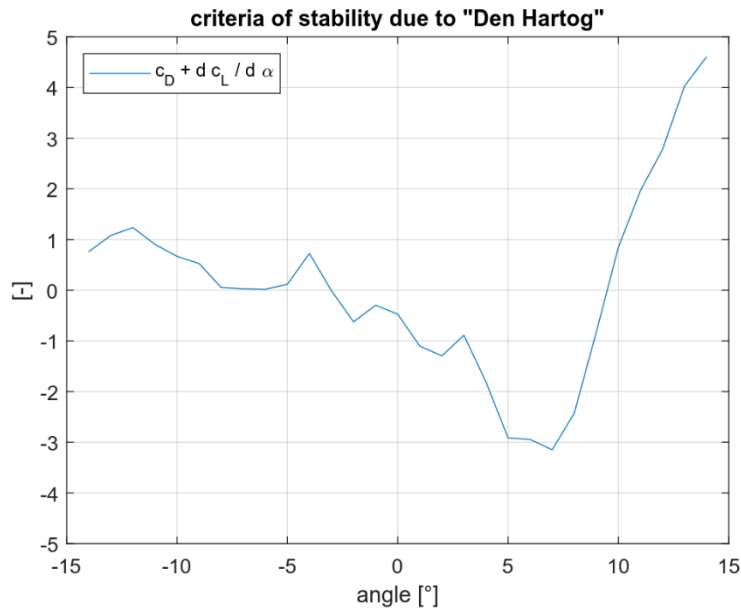


Abb. 5.19: Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“



Einsetzgeschwindigkeit für  
Biegegalloping:  
 $V_{CG} = 5 \text{ m/s}$

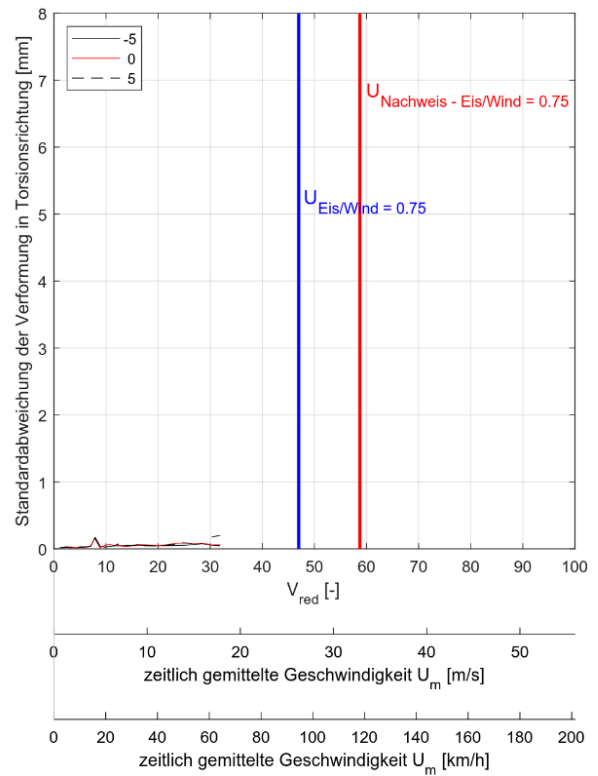
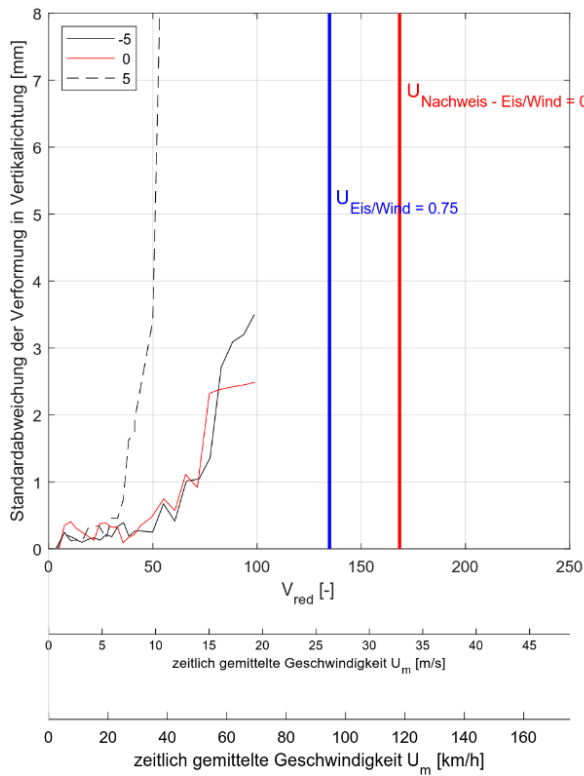


Abb. 5.20: Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aerodynamischen Stabilität für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Vollständige Vereisung mit Spalt“

5.2.3 *Fazit*

**Lohbachtalbrücke**

Aerodynamische Instabilitäten können auf Basis der Windkanalergebnisse und den theoretischen Bewertungen für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ und „Vereisung Geländernetz“ ausgeschlossen werden.

Für den vollständig vereisten Querschnitt sowie für den Zustand nur Boden/Gitterrost vereist traten im Nachweisbereich Instabilitäten auf. In Tab. 5.11 ist eine Übersicht der ermittelten Einsetzwindgeschwindigkeiten dargestellt.

Versuchs- konstellation	Einsetzwindgeschwindigkeiten gemäß der theoretischen Bewertungen nach „Den Hartog“		Einsetzwindgeschwindigkeiten gemäß der aeroelastischen Windkanalversuche	
	Biegegalloping	Torsionsgalloping	Biegegalloping	Torsionsgalloping
Ohne Eisansatz	> 100 m/s	N/A*	N/A**	N/A**
Vollständige Vereisung	26 m/s	N/A*	25 m/s	kein Torsionsgalloping
Vereisung Gitterrost	kein Biegegalloping	N/A*	kein Biegegalloping	25 m/s
Vereisung Geländernetz	> 100 m/s	N/A*	kein Biegegalloping	kein Torsionsgalloping
Vollständige Vereisung mit Spalt	12 m/s	N/A*	15 m/s	kein Torsionsgalloping

\* Stabilitätskriterium nach „Den Hartog“ kann ausschließlich zur Bewertung von Biegegalloping verwendet werden. Eine Ermittlung der Einsetzgeschwindigkeit in Torsionsrichtung ist nicht möglich.

\*\* Wird auf Basis von Erfahrungswerten ausgeschlossen

**Tab. 5.11:** Übersicht der ermittelten Einsetzwindgeschwindigkeiten (zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeiten in Höhe Brückendeck) für die verschiedenen Versuchskonstellationen

**Höllentalbrücke**

Aerodynamische Instabilitäten können auf Basis der Windkanalergebnisse und den theoretischen Bewertungen für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ ausgeschlossen werden.

Für die Versuchskonstellation „Vereisung Geländernetz“ können Instabilitäten bis 22 m/s ausgeschlossen werden. Für alle anderen Versuchskonstellationen traten im Nachweisbereich Instabilitäten auf. In Tab. 5.12 ist eine Übersicht der ermittelten Einsetzwindgeschwindigkeiten dargestellt.

Versuchs- konstellation	Einsetzwindgeschwindigkeiten gemäß der theoretischen Bewertungen nach „Den Hartog“ [m/s]		Einsetzwindgeschwindigkeiten gemäß der aeroelastischen Windkanalversuche [m/s]	
	Biegegalloping	Torsionsgalloping	Biegegalloping	Torsionsgalloping
Ohne Eisansatz	52 m/s	N/A*	N/A**	N/A**
Vollständige Vereisung	9 m/s	N/A*	12 m/s	<i>kein Torsionsgalloping bis 20 m/s</i>
Vereisung Gitterrost	<i>kein Biegegalloping</i>	N/A*	<i>kein Biegegalloping bis 23 m/s</i>	15 m/s
Vereisung Geländernetz	52 m/s	N/A*	<i>kein Biegegalloping bis 22 m/s</i>	<i>kein Torsionsgalloping bis 28 m/s</i>
Vollständige Vereisung mit Spalt	5 m/s	N/A*	15 m/s	<i>kein Torsionsgalloping bis 18 m/s</i>

\* Stabilitätskriterium nach „Den Hartog“ kann ausschließlich zur Bewertung von Biegegalloping verwendet werden. Eine Ermittlung der Einsetzgeschwindigkeit in Torsionsrichtung ist nicht möglich.

\*\* Wird auf Basis von Erfahrungswerten ausgeschlossen

**Tab. 5.12:** Übersicht der ermittelten Einsetzwindgeschwindigkeiten (zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeiten in Höhe Brückendeck) für die verschiedenen Versuchskonstellationen

## **6. STATISCHE ERSATZWINDLASTEN FÜR DEN ÜBERBAU**

### **6.1. Windlasten aus Böenerregung**

#### **6.1.1 Lohbachtalbrücke**

Die Windlasten aus Böenerregung wurden auf Basis der Buffeting Analyse (Kap. 2.5) errechnet. Des Weiteren wurden als Eingangsgrößen die Ergebnisse der Kraftmessungen (Kap. 5.1) und der numerischen Strömungssimulation (Kap 4) berücksichtigt. Dabei basiert der erste Lastfall auf dem Normansatz  $q_{böe}(z)$  über die komplette Brückenlänge und die nachfolgenden Lastfälle auf dem Ergebnis der numerischen Strömungssimulation. Die Windlasten als Ergebnis dieser Analyse inklusive dem Referenzkoordinatensystem sind für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ in den Abb. 6.1 bis Abb. 6.3 dargestellt und für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“ in den Abb. 6.4 bis Abb. 6.7. Die Eingangsparameter sowie die Vorgehensweise zur Ermittlung der Windlasten aus Böenerregung kann Kap. 2 entnommen werden. Der Bemessungsstaudruck wird in Kap. 3 beschrieben. Es handelt sich um einen 50-jährlichen Bemessungsansatz ohne die Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit  $c_{dir}$ .

# Lohbachtalbrücke - Standardlastfall Horizontal 1

Keine Berücksichtigung von Beschleunigungs- bzw. Abschattungseffekten

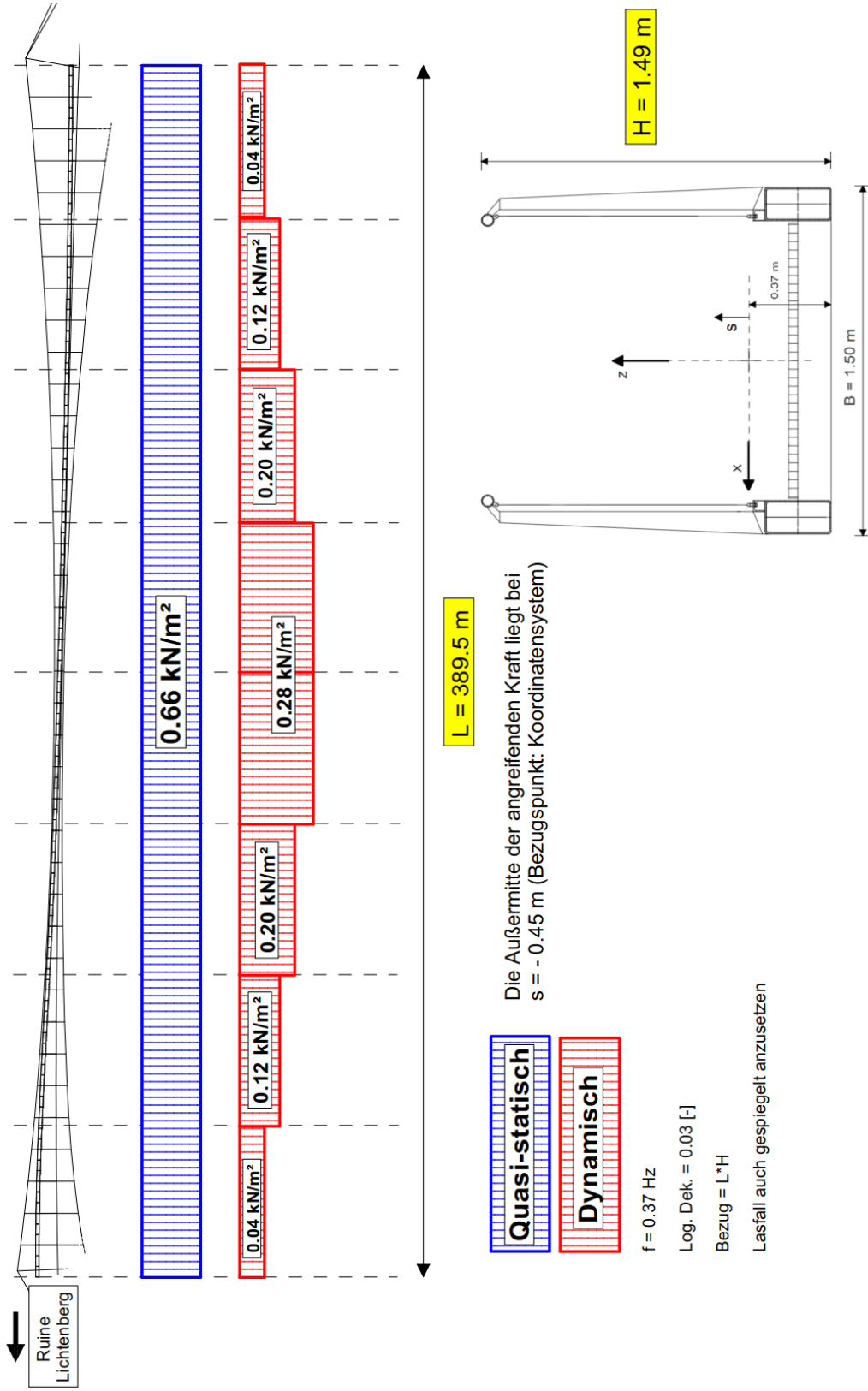


Abb. 6.1: Horizontallastfall 1 - Statische Ersatzwindlasten für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“



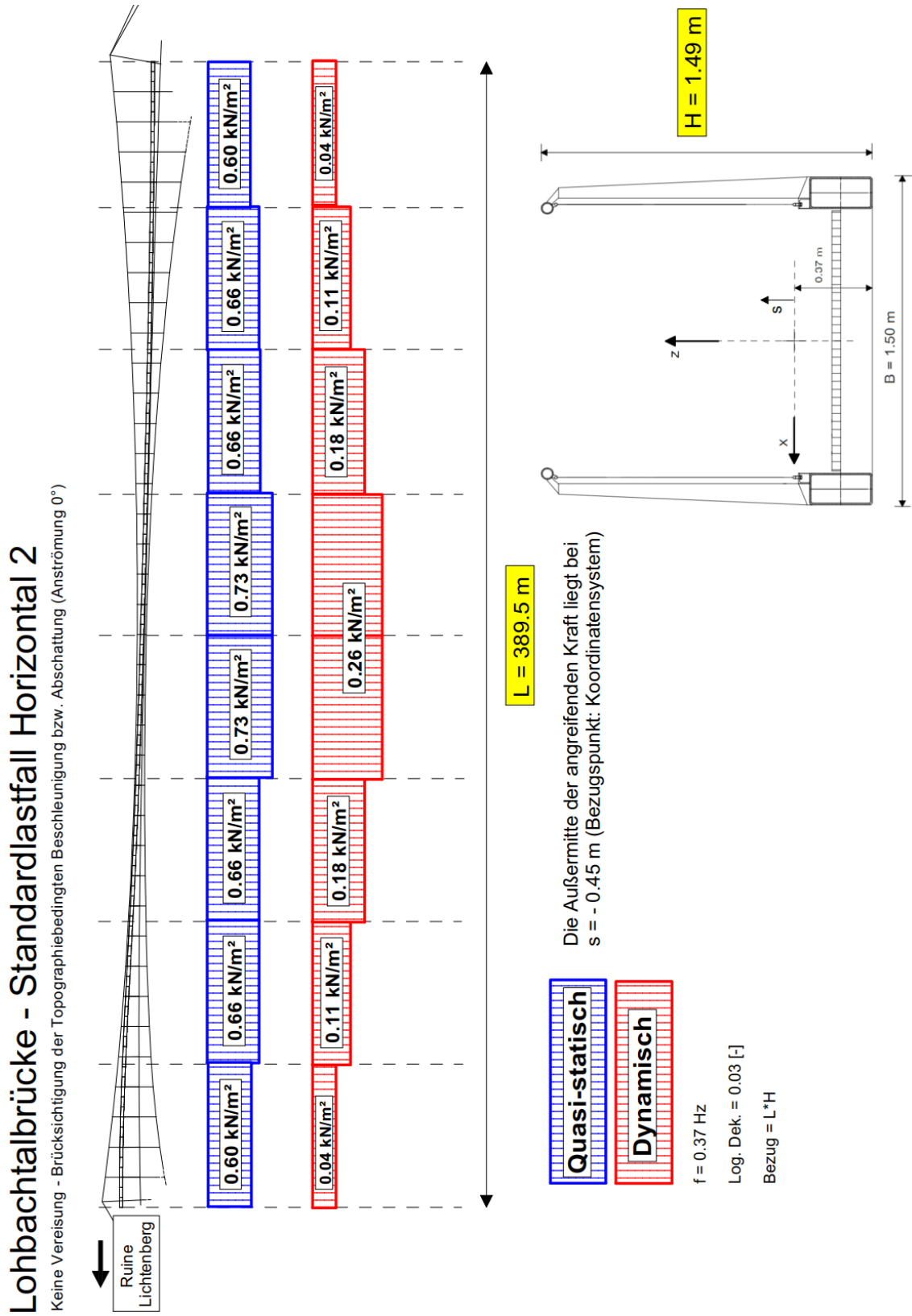


Abb. 6.2: Horizontallastfall 2 - Statische Ersatzwindlasten für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“

### Lohbachtalbrücke - Standardlastfall Horizontal 3

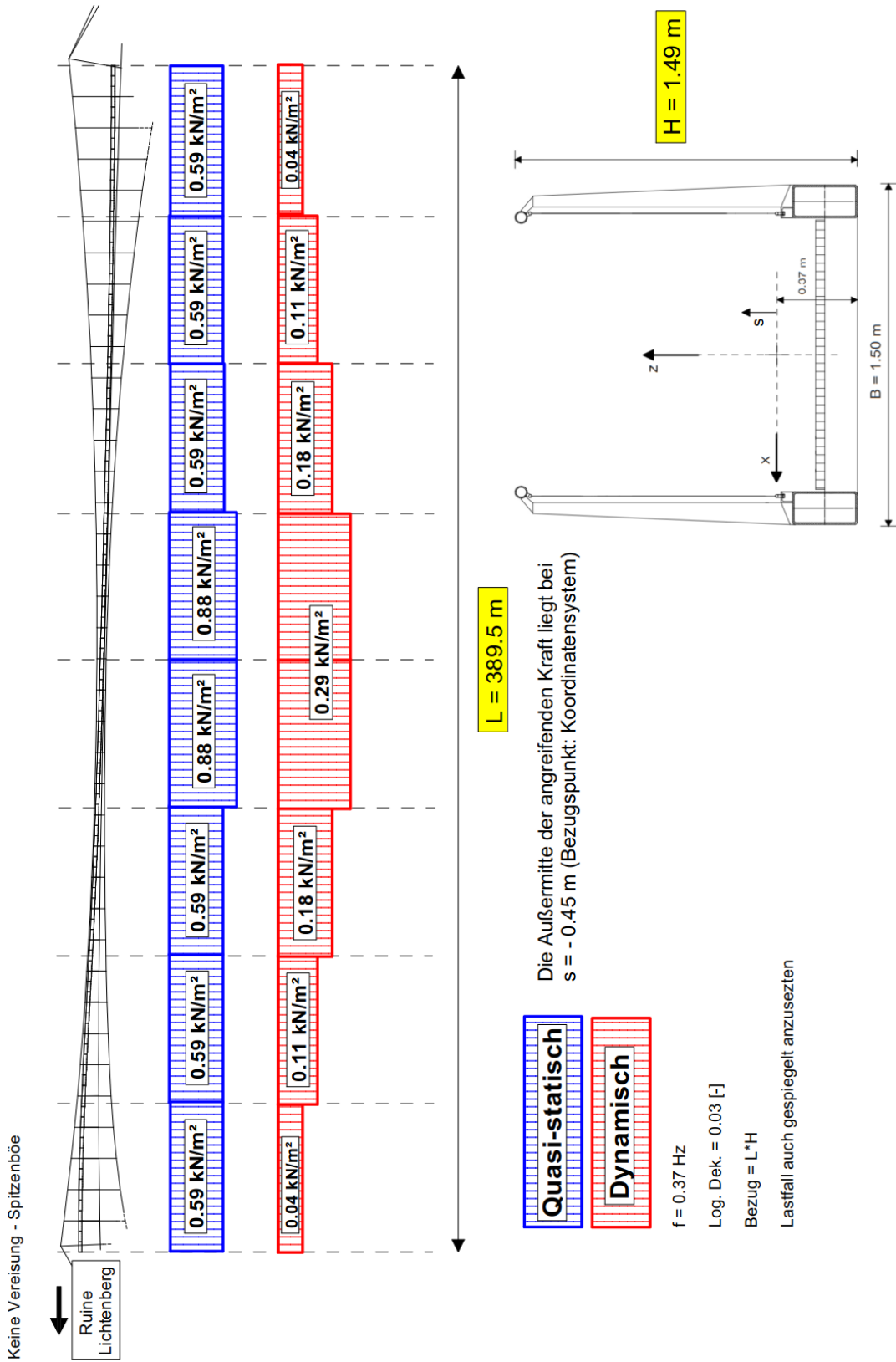
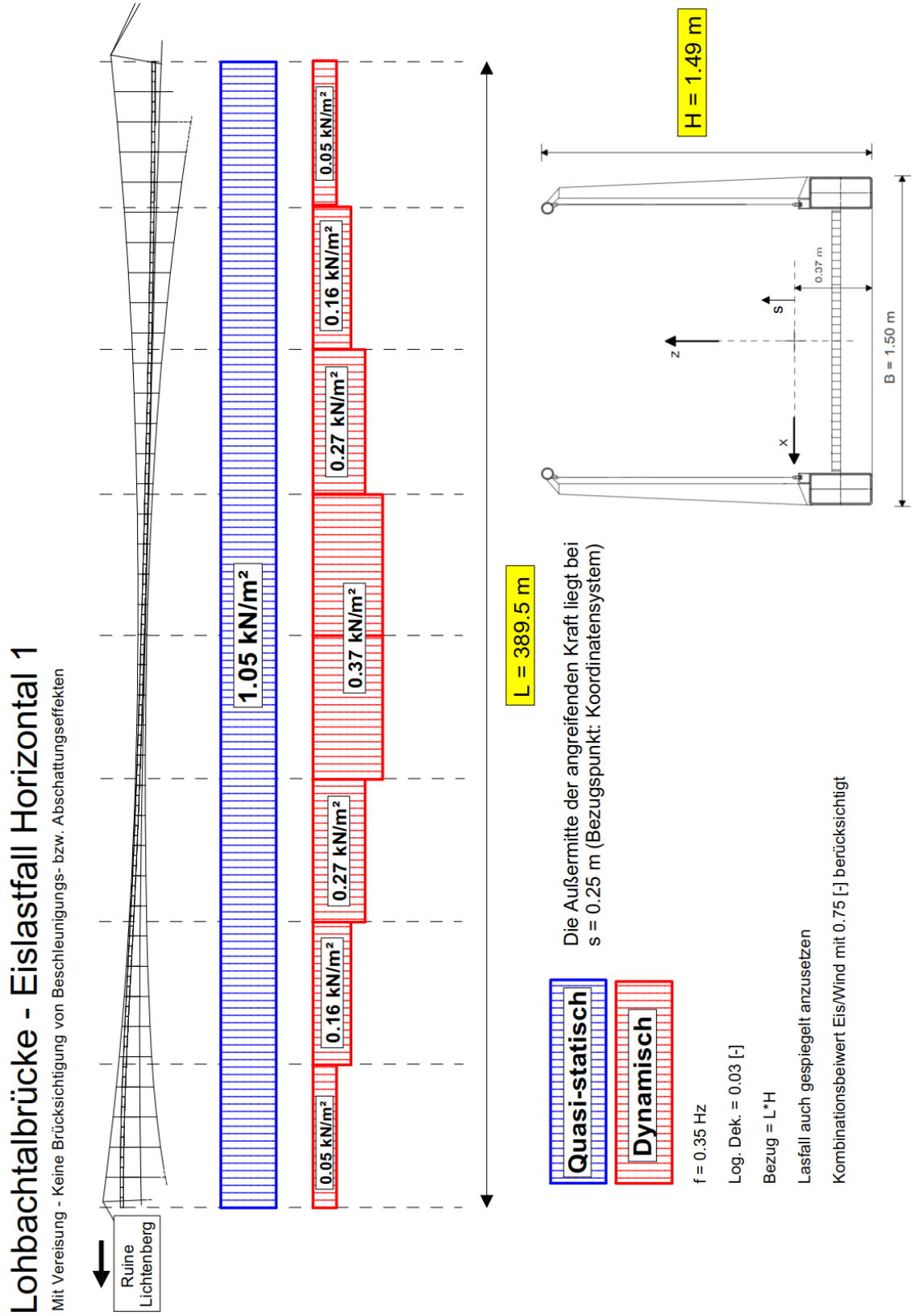


Abb. 6.3: Horizontallastfall 3 - Statische Ersatzwindlasten für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“



**Abb. 6.4:** Horizontallastfall 1 - Statische Ersatzwindlasten für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“

### Lohbachtalbrücke - Eislastfall Horizontal 2

Mit Vereisung - Berücksichtigung der Topographiebedingten Beschleunigung bzw. Abschattung (Anströmung 0°)

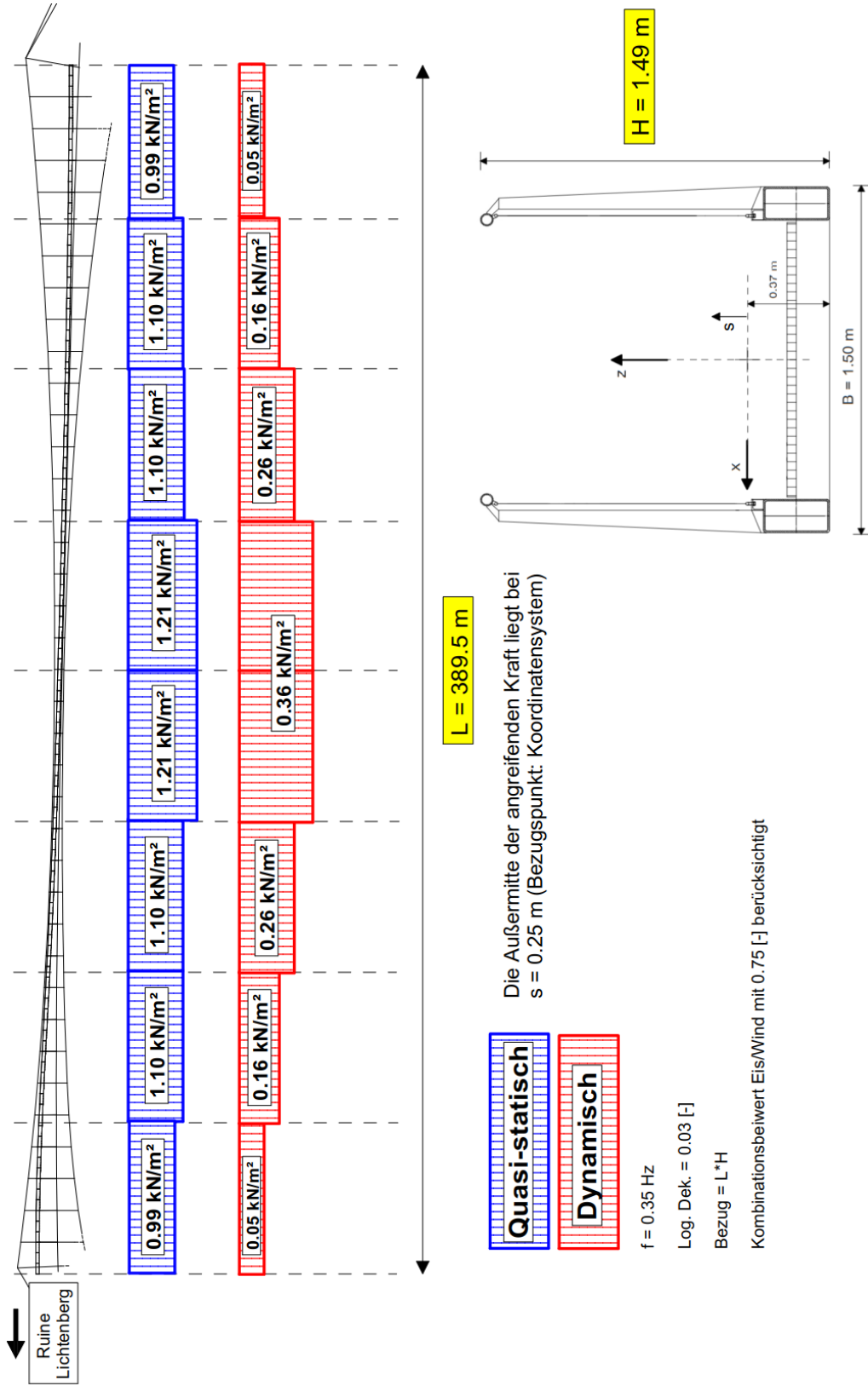
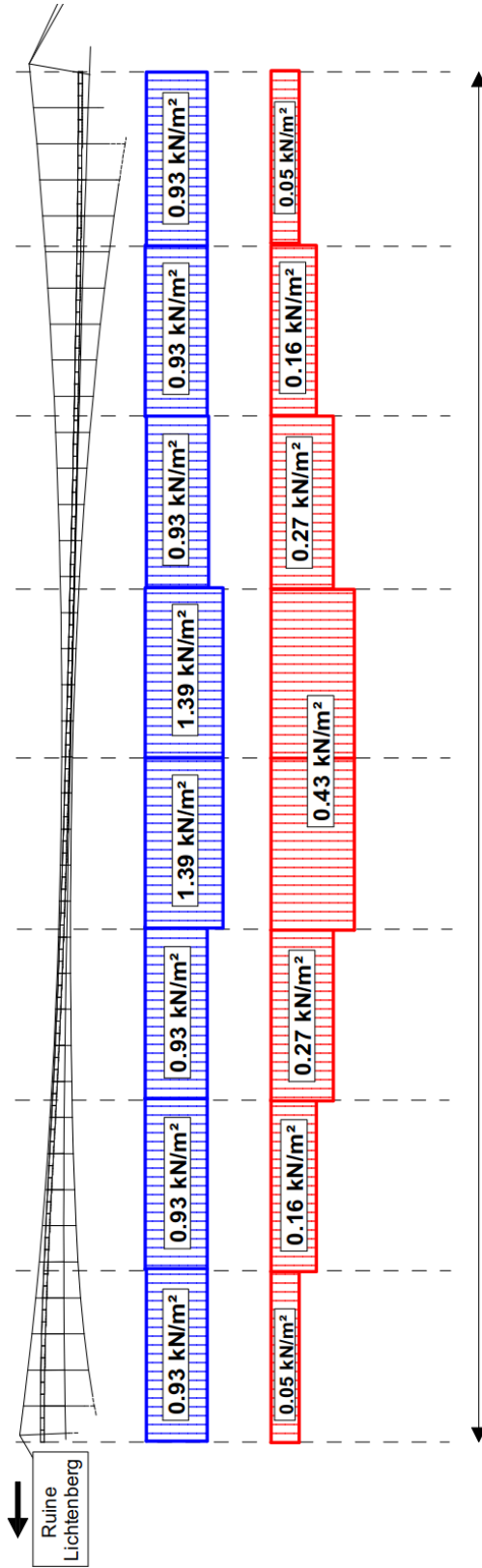


Abb. 6.5: Horizontallastfall 2 - Statische Ersatzwindlasten für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“

### Lohbachtalbrücke - Eislastfall Horizontal 3

Mit Vereisung - Spitzenböe



L = 389.5 m

Die Außermitte der angreifenden Kraft liegt bei  $s = 0.25$  m (Bezugspunkt: Koordinatensystem)

**Quasi-statisch**

**Dynamisch**

$f = 0.35$  Hz

Log. Dek. = 0.03 [-]

Bezug =  $L \cdot H$

Lastfall auch gespiegelt anzusetzen

Kombinationsbeiwert Eis/Wind mit 0.75 [-] berücksichtigt

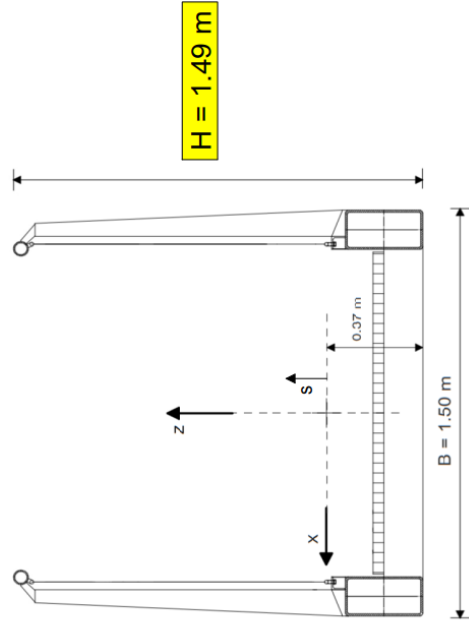


Abb. 6.6: Horizontallastfall 3 - Statische Ersatzwindlasten für die Lohbachtalbrücke für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“

### **6.1.2 Höllentalbrücke**

Die Windlasten aus Böenerregung wurden auf Basis der Buffeting Analyse (Kap. 2.5) errechnet. Des Weiteren wurden als Eingangsgrößen die Ergebnisse der Kraftmessungen (Kap. 5.1) und der numerischen Strömungssimulation (Kap 4) berücksichtigt. Dabei basiert der erste Lastfall auf dem Normansatz  $q_{b\ddot{o}e}(z)$  über die komplette Brückenlänge und die nachfolgenden Lastfälle auf dem Ergebnis der numerischen Strömungssimulation. Die Windlasten als Ergebnis dieser Analyse inklusive dem Referenzkoordinatensystem sind für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“ in den Abb. 6.8 bis Abb. 6.11 dargestellt und für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“ in den Abb. 6.12 bis Abb. 6.15. Die Eingangsparameter sowie die Vorgehensweise zur Ermittlung der Windlasten aus Böenerregung kann Kap. 2 entnommen werden. Der Bemessungsstaudruck wird in Kap. 3 beschrieben. Es handelt sich um einen 50-jährlichen Bemessungsansatz ohne die Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit  $c_{dir}$ .

# Höllentalbrücke - Lastfall Horizontal 1

Deck offen - keine Vereisung - keine Berücksichtigung von Beschleunigungs- bzw. Abschattungseffekten

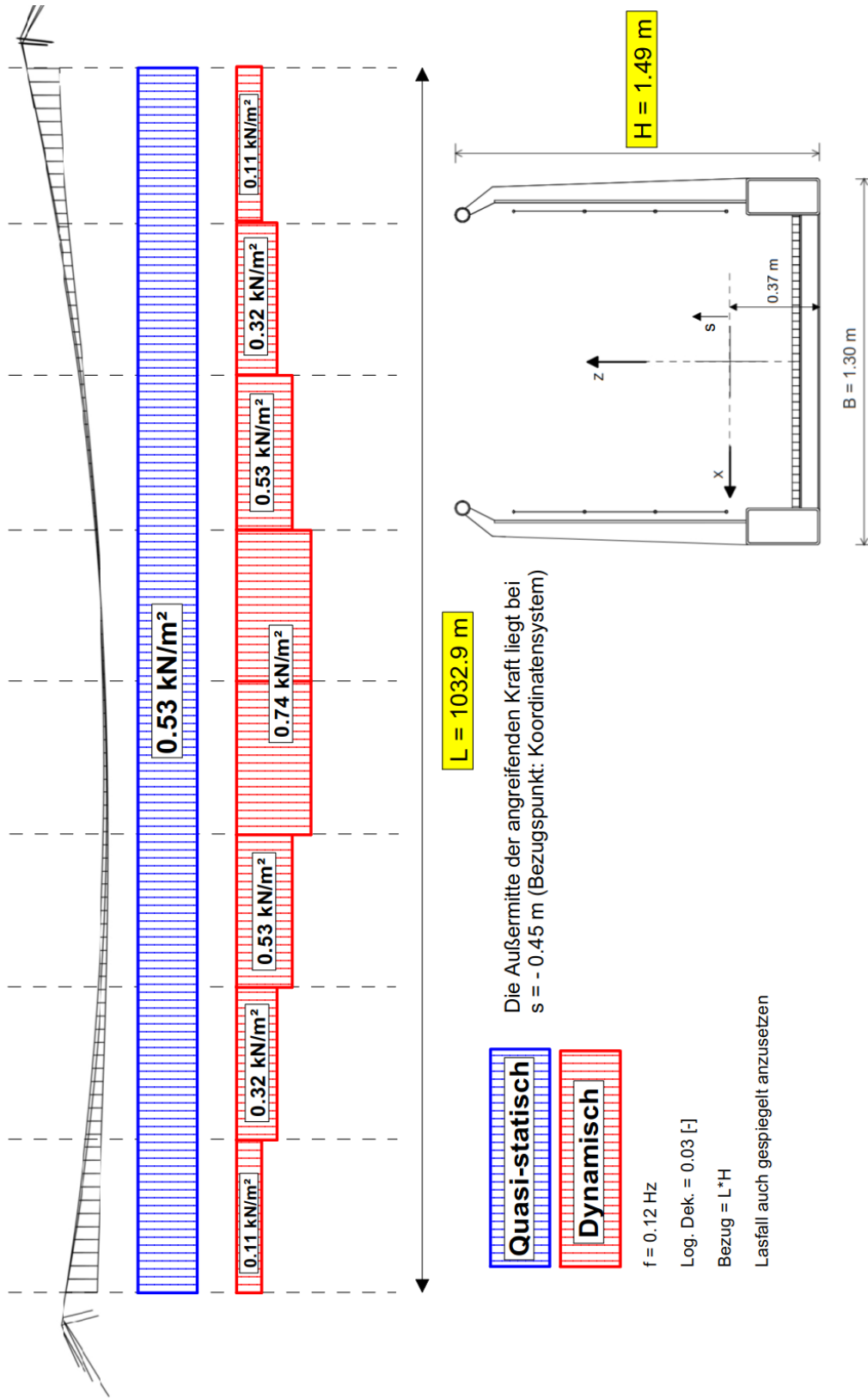


Abb. 6.8: Horizontallastfall 1 - Statische Ersatzwindlasten für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“

# Höllentalbrücke - Lastfall Horizontal 2

Deck offen - keine Vereisung - Berücksichtigung der Topographie (327°)

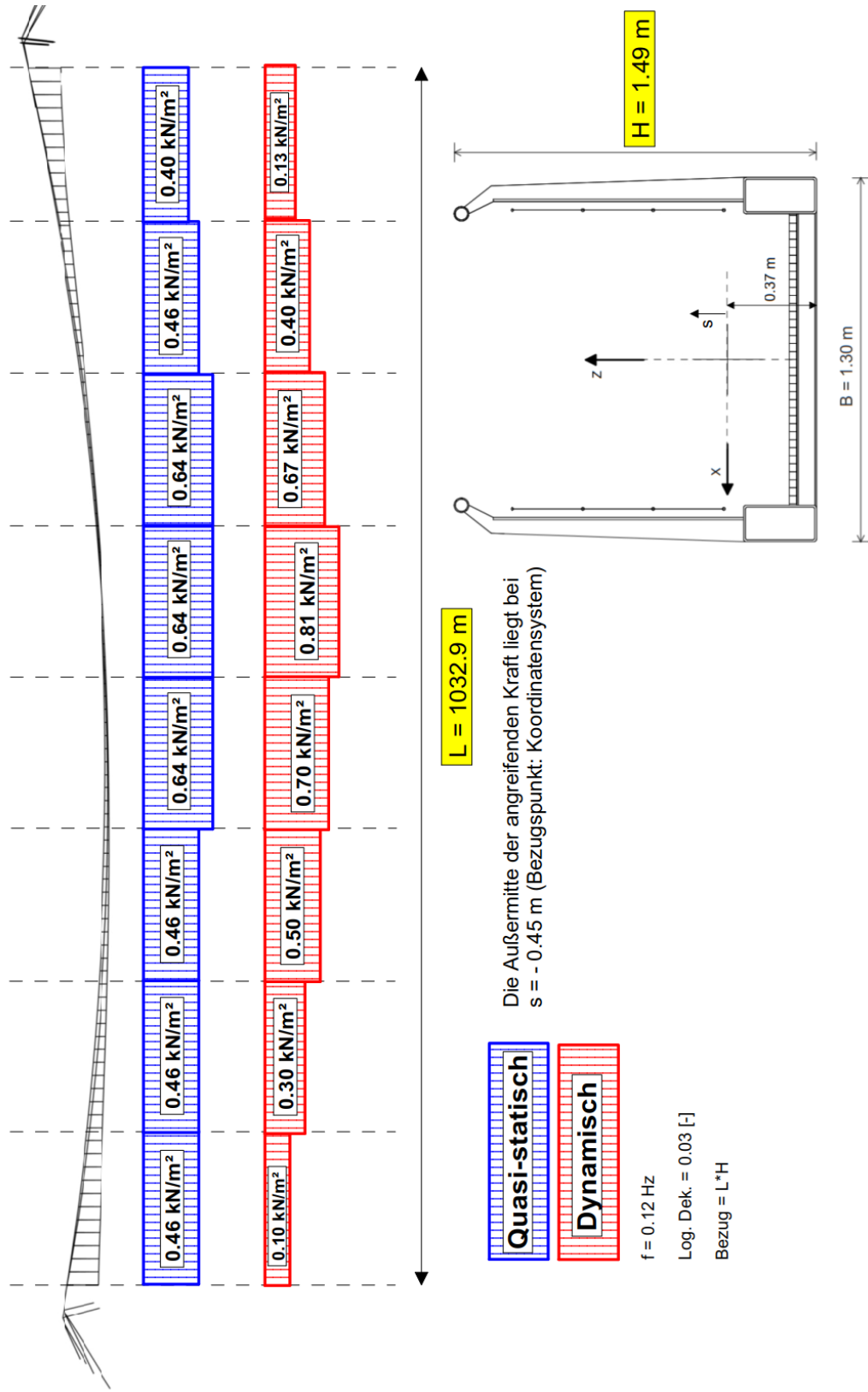


Abb. 6.9: Horizontallastfall 2 - Statische Ersatzwindlasten für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“



### Höllentalbrücke - Lastfall Horizontal 3

Deck offen - keine Vereisung - Berücksichtigung der Topographie (0°)

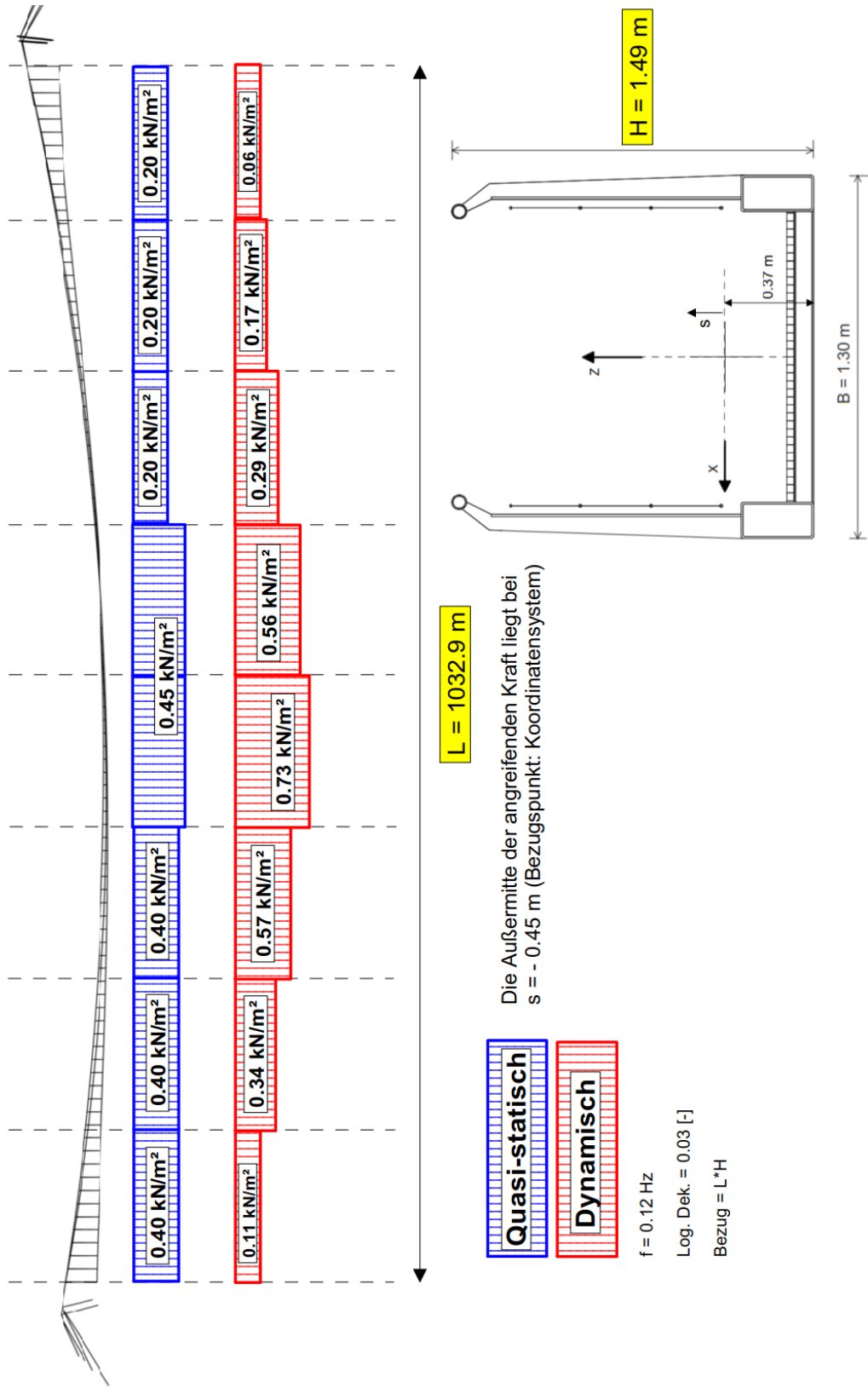


Abb. 6.10: Horizontallastfall 3 - Statische Ersatzwindlasten für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“

# Höllentalbrücke - Lastfall Horizontal 4

Deck offen - keine Vereisung - Spitzenböe

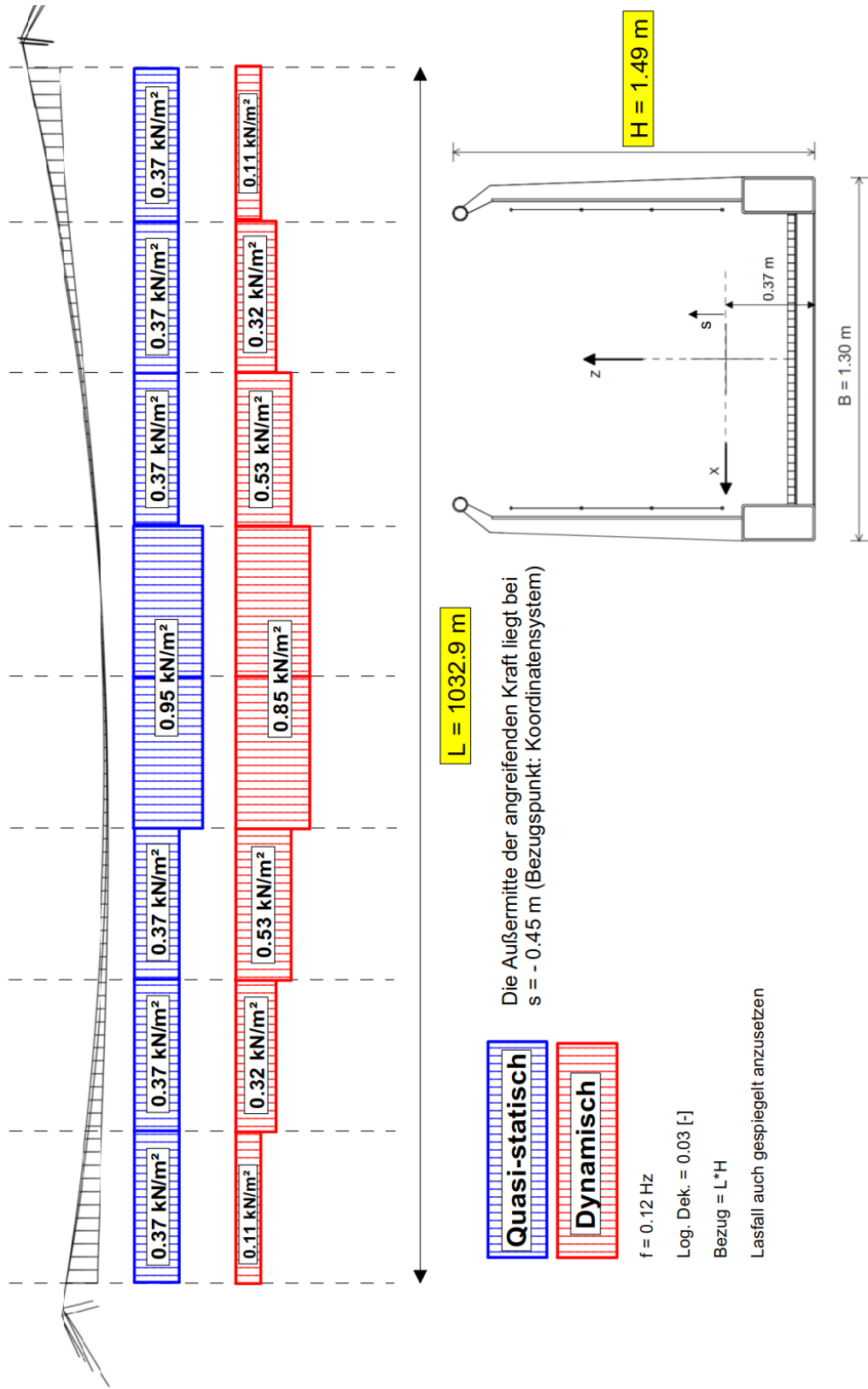
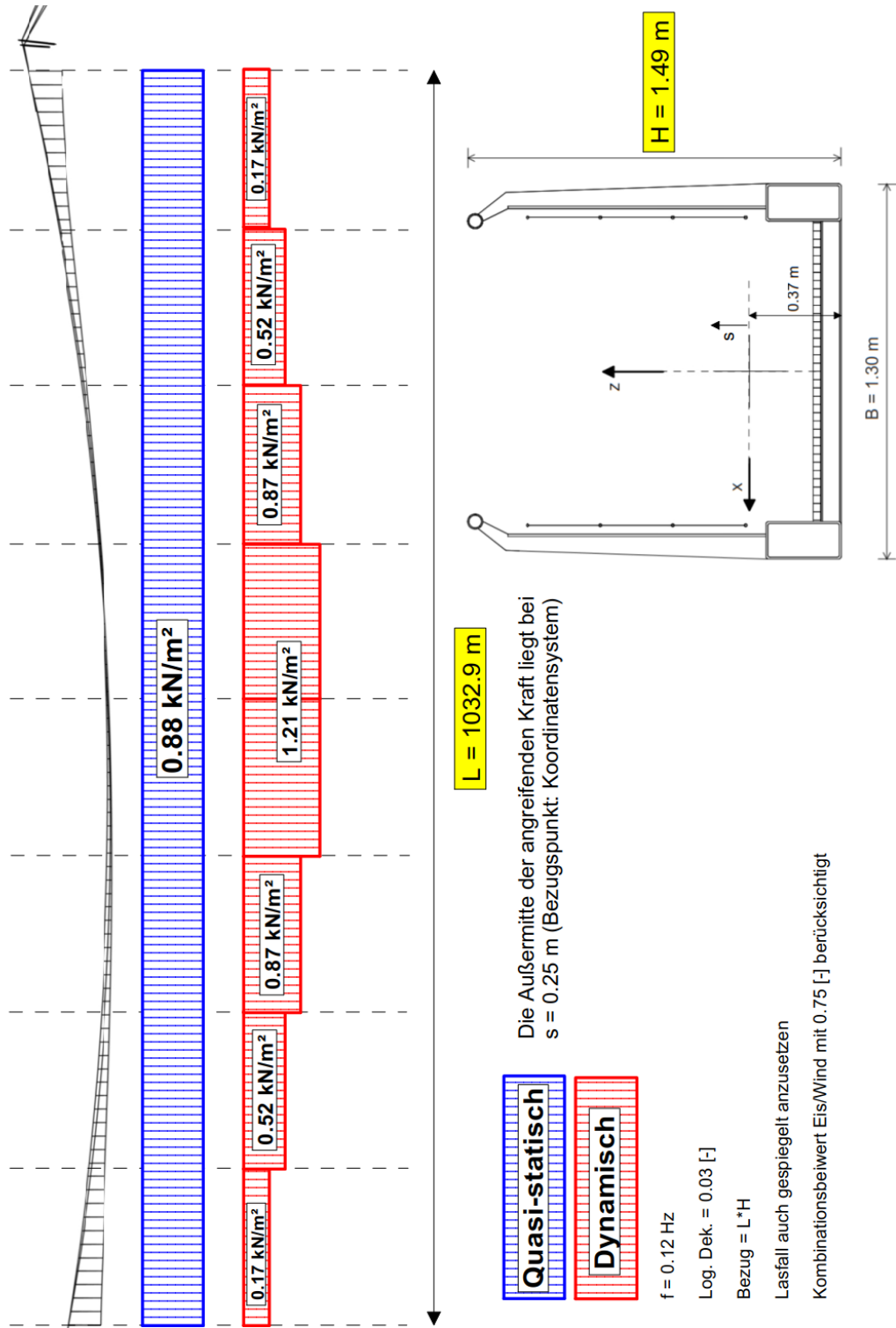


Abb. 6.11: Horizontallastfall 4 - Statische Ersatzwindlasten für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Ohne Eisansatz“

# Höllentalbrücke - Eislastfall Horizontal 1

Mit Vereisung - Keine Berücksichtigung von Beschleunigungs- bzw. Abschattungseffekten



**Quasi-statisch**

**Dynamisch**

$f = 0.12 \text{ Hz}$

Log. Dek. =  $0.03 [-]$

Bezug =  $L \cdot H$

Lasfall auch gespiegelt anzusetzen

Kombinationsbeiwert Eis/Wind mit  $0.75 [-]$  berücksichtigen

Die Außermitte der angreifenden Kraft liegt bei  $s = 0.25 \text{ m}$  (Bezugspunkt: Koordinatensystem)

**L = 1032.9 m**

**H = 1.49 m**

**B = 1.30 m**

Abb. 6.12: Horizontallastfall 1 - Statische Ersatzwindlasten für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“

# Höllentalbrücke - Eislastfall Horizontal 2

Mit Vereisung - Berücksichtigung der Topographie (327°)

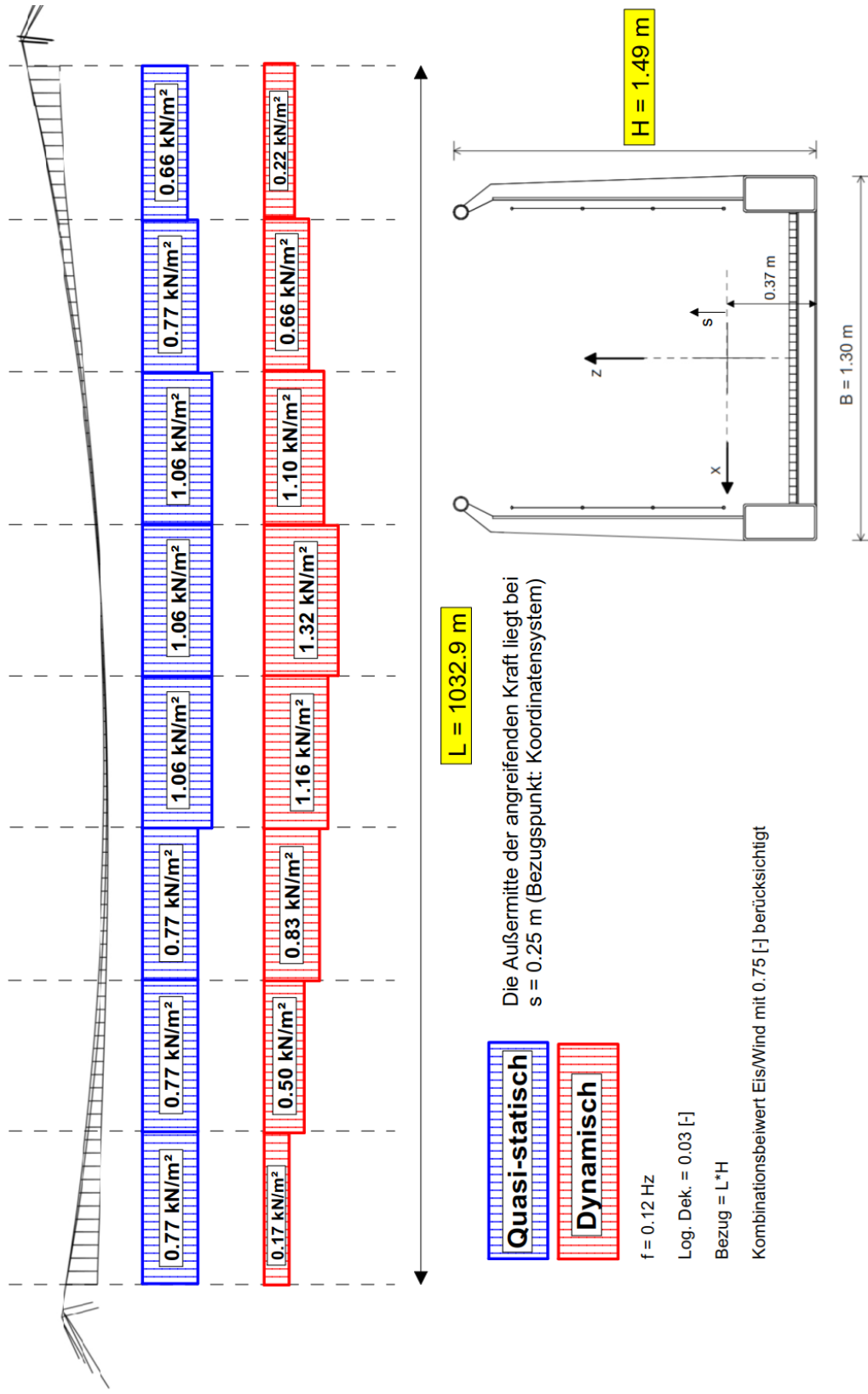


Abb. 6.13: Horizontallastfall 2 - Statische Ersatzwindlasten für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“

### Höllentalbrücke - Eislastfall Horizontal 3

Mit Vereisung - Berücksichtigung der Topographie (0°)

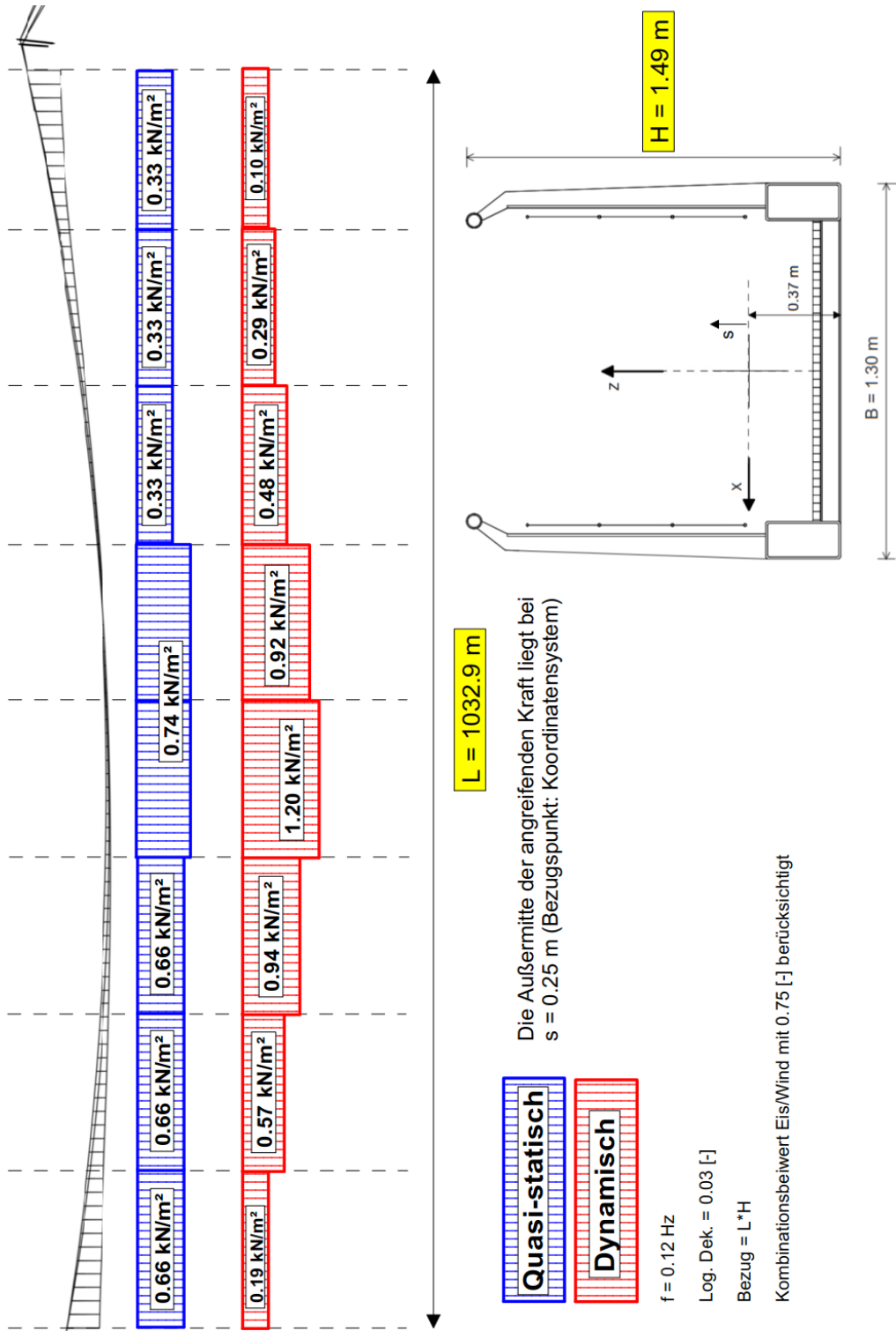


Abb. 6.14: Horizontallastfall 3 - Statische Ersatzwindlasten für die Höllentalbrücke für die Versuchskonstellation „Mit Eisansatz“



## **6.2. Windlasten in Längsrichtung des Brückendecks**

Gemäß der Norm werden für Windeinwirkungen in Längsrichtung des Brückendecks 25% der Querbelastung empfohlen.

## **7. CHARAKTERISTISCHE WINDLASTEN FÜR DIE TRAG- UND HÄNGESEILE**

Die 50-jährlichen charakteristischen Windlasten für die Trag- und Hängeseile sind in Tab. 7.1 dargestellt.

<b>Seiltyp</b>	<b>Abmessungen [mm]</b>	<b>Windlast w [kN/m<sup>2</sup>]</b>
Tragseile	105-135	0.65
Hängeseile	20-24	1.40

**Hinweis:** Zur Berücksichtigung von Eisansatz an den Seilen erhöht sich die Kraft auf Basis der durch Eis hervorgerufenen Vergrößerung des Seildurchmessers. Bei den Windlasten handelt es sich um 50-jährliche charakteristische Windlasten ohne die Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten.

**Tab. 7.1:** 50-jährlichen charakteristischen Windlasten für die Tragseile

## **8. VERWENDETE DOKUMENTE**

**DIN EN 1991-1-4 N/A (2010):** "Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten". Deutsches Institut für Normung.

**DIN EN 1990:2010-12:** "Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung", Deutsches Institut für Normung.

**SBP, 2019:** "Planunterlagen, Informationen, statische Berechnungen zum Bauvorhaben Frankenwaldbrücken", schlaich bergemann partner, Schwabstraße 43, 70197 Stuttgart.

**LDBV, 2019:** „Geoinformationen“, Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, Alexandrastr. 4, 80538 München

**RW, 1982:** „Dynamische Windwirkung an Bauwerken / Hans Ruscheweyh; 2: Praktische Anwendungen“, Ruscheweyh, Hans, Bauverlag, Wiesbaden 1982.

**DWD, 2019:** „E-Mail-Verkehr und Gutachten zum Thema Eisansatz und Kombinationsbeiwert Eis Wind“, Deutscher Wetterdienst – Abteilung Klima- und Umweltberatung, Stahnsdorf.