

SCHWINGUNGSREDUKTION VON ÜBERKOPFKONSTRUKTIONEN

Lange, schlanke Strukturen sind anfällig für windinduzierte Schwingungen. So auch die Überkopfkonstruktionen für die elektronische Mauterfassung auf Autobahnen und Schnellstraßen (Toll-Gantries), bei denen Vertikalschwingungen beobachtet wurden. Inhalt des Projekts war die Ursachenfindung, die physikalische und mathematische Beschreibung sowie die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen.

Zusammenfassung der Projektergebnisse

Die Querriegel elektronischer LKW-Mauterfassungssysteme (Abb. 1) sind unter bestimmten Umständen anfällig für windinduzierte Vertikalschwingungen, welche zu Schäden an der Konstruktion führen können. Im Zuge des Projekts konnten die kritischen Windgeschwindigkeiten, Amplituden und weitere charakteristische Größen für die zwei möglichen aerodynamischen Anregemechanismen – Vortex-Shedding und Galloping – für alle (ca. 450) Stationen in Österreich rechnerisch ermittelt werden. Weiters wurden aerodynamische und konstruktive Maßnahmen zur Schwingungsreduktion abgeleitet und vorgeschlagen. Die Berechnungen des Schwingungsverhaltens anhand von Regelwerken und eigenen mathematisch-physikalischen Ansätzen wurden von Messungen an Stationen und an Modellen im Windkanal unterstützt.



Abb. 1. Station an der A04, Kilometer 34,2

Facts:

- Laufzeit: 07/2013-06/2014
- Forschungseinrichtung: FH JOANNEUM GesmbH, Institut für Fahrzeugtechnik Alte Poststraße 149, 8020 Graz
- Auftraggeber: ASFINAG und BMVIT
- Projektleitung und -arbeit: Dr. M. Lengauer
- Studentische Unterstützung: F. Dicker, B. Gassner, Ch. Gsenger, D. Kindl, M. Stepan und S. Veit
- Ansprechpartner ASFINAG Maut Service GmbH: Ing. G. Meister, BSc, M.A.



Abb. 2. Station an der A09, Kilometer 117,81

Kurzzusammenfassung

Problem

LKW-Mauterfassungssysteme sind auf Stahlbaukonstruktionen (Toll-Gantries) montiert, die aus einem Querriegel und zwei seitlichen Steherprofilen bestehen (Abb. 2). Auch Ausführungen als Kragträger oder mit drei Stehern sind in Verwendung. Der Querriegel ist mittels Kippblechen und vier Schrauben quasigelenkig auf den Stehern gelagert. In Österreich befinden sich ca. 450 derartige Anlagen.

Vor allem bei den Konstruktionen mit zwei Stehern wurden bei Windbelastung Vertikalschwingungen mit Amplituden bis zu 400 mm beobachtet und gelockerte oder gebrochene Schrauben festgestellt.

Gewählte Methodik

Zur Berechnung der kritischen Windgeschwindigkeiten für Vortex-Shedding (wirbelinduziertes Schwingen) und Galloping (bewegungsinduziertes Schwingen) wurde die ÖNORM EN 1991-1-4 herangezogen. Damit lassen sich auch die Amplituden bei Vortex-Shedding abschätzen. Begleitend wurde in der Mathematik-Software MAPLE 17 das Problem in Form einer partiellen Differentialgleichung beschrieben, deren numerische Lösung die zeitliche Amplitudenentwicklung für beliebige Windgeschwindigkeiten und beide Anregemechanismen ergibt. Basierend auf den Amplituden bei Vortex-Shedding konnten die Schraubenbeanspruchungen und deren Lebensdauern abgeschätzt werden.

Ergebnisse

So gut wie alle Stationen mit zwei Stehern sind anfällig gegenüber Vortex-Shedding, viele auch gegenüber Galloping, bei dem es zu den höchsten Amplituden kommt. Die kritischen Windgeschwindigkeiten für beide Anregemechanismen konnten für alle ca. 450 Stationen ermittelt und die aufgetretenen Schäden an den Schraubverbindungen erklärt werden. Weiters konnten Maßnahmen zur Schwingungsreduktion und Erhöhung der Schraubenlebensdauer bzw. Erhalt der Vorspannkraft abgeleitet werden.

Schlussfolgerungen

Freistehende Konstruktionen mit hohem Schlankheitsgrad und einem aerodynamisch ungünstigen Querschnitt (bluff body) können anfällig gegenüber windinduzierten Schwingungen sein. Je nach Höhe der Amplitude und der Zyklenzahl kann dies Materialermüdung zur Folge haben oder zum Verlust der Spannkraft bei kraftschlüssigen Verbindungselementen führen. Diese aerodynamischen Effekte können bereits in der Entwicklungsphase rechnerisch quantifiziert und konstruktive und/oder aerodynamische Gegenmaßnahmen getroffen werden.

English Abstract

Cross beams of toll-gantry structures can be susceptible to wind-induced vertical vibrations under certain circumstances. This may result in harming the structural components by fatigue or loss of pretension in bolt-connections. Within the project the critical wind speeds, amplitudes and further characteristic parameters for the two possible aerodynamic excitation-mechanisms – vortex-shedding and galloping – for all toll-gantries in Austria (about 450) have been assessed calculational. Further, aerodynamic and structural measures could be derived and suggested. The calculations of the vibration behaviour based on standards and self-developed mathematical-physical approaches were confirmed by measurements on toll-gantries and wind channel-models.

Impressum:**Bundesministerium für Verkehr,
Innovation und Technologie**

DI Dr. Johann Horvatits,
Abt. IV/ST 2 Technik und
Verkehrssicherheit
johann.horvatits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,
Abt. III/14 Mobilitäts- und
Verkehrstechnologien
andreas.blust@bmvit.gv.at,
www.bmvit.gv.at

ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, ISM;
Leitung Forschung & Entwicklung
wolfgang.zottl@oebb.at,
www.oebb.at

ASFINAG

DI Eva Hackl,
Manager International Relations
und Innovation
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie, Internationales und Innovation
rene.moser@asfinag.at,
www.asfinag.at

Österreichische Forschungs-förderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda,
Programmleitung Mobilität
Sensengasse 1, 1090 Wien
christian.pecharda@ffg.at,
www.ffg.at

August, 2014

Dokumentation

der Recherchen und Berechnungen zu den *Toll-Gantries* der ASFINAG

im Rahmen des FFG-Projektes

Schwingungsreduktion von Überkopfkonstruktionen

finanziert von

BMVIT und ASFINAG

von

Dr. Markus Lengauer

Institut für Fahrzeugtechnik

FH JOANNEUM GesmbH

Alte Poststraße 149

8020 Graz

FH | JOANNEUM
Fahrzeugtechnik /
Automotive Engineering

Rev. 1.1

Graz, 28.08.2014

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	5
2	BESCHREIBUNG AUSGEWÄHLTER STATIONEN UND DER DORT AUFGETRETENEN PROBLEME	8
2.1	A01-_044,300_0_SKE.....	8
2.2	A01-_067,350_0_SKE.....	12
2.3	A04-_034,200_0_MAS	15
2.4	A09-_117,810_0_MAS	18
2.5	A21-_028,505_0_MAS	21
2.6	S06-_034,630_0_MAS	24
2.7	S31-_074,300_0_MAS	30
2.8	A04-_042,200_0_MAS	33
2.9	Übersicht und Vergleich charakteristischer Größen der acht Stationen	35
3	EXZERPTION DER LITERATUR ZUM THEMA	37
3.1	Wissenschaftliche Literatur	37
3.2	Normen und Regelwerke zu windbelasteten Strukturen	38
3.2.1	Nationale Regelungen / ÖNORM bzw. Euro-Norm	38
3.2.2	US-Regulatorien: FHWA (Federal Highway Administration), NCHRP (National Cooperative Highway Research) und AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)	39
3.2.3	Regulatorien in Deutschland	47
4	DISKUSSION DER STELLUNGNAHMEN DES HERSTELLERS SOWIE VOM HERSTELLER BEAUFTRAGTER ZIVILTECHNIKER	54
4.1	Stellungnahme der Fa. Forster vom 14. Aug. 2008 bez. Schraubenbruch bei A01_044,300_0_SKE [11] .	54
4.2	Statisches Gutachten vom 13. März 2009 von DI Dr. Baban für Fa. Forster [59]	63
5	FRAKTOGRAPHISCHE UNTERSUCHUNG DER GEBROCHENEN SCHRAUBEN	65
5.1	Schraube Nr. 1.....	65
5.2	Schraube Nr. 2.....	66

5.3	Schraube Nr. 3.....	67
6	RECHNERISCHE ERFASSUNG DER WINDINDUZIERTEN SCHWINGUNGEN	68
6.1	Berechnung nach ÖNORM EN 1991-1-4 und ÖNORM B 1991-1-4 in Excel	68
6.1.1	Einleitung	68
6.1.2	Anwendungsbereich	69
6.1.3	Bestimmung der zu verwendenden Parameter	70
6.1.4	Berechnung der Anfälligkeit gegenüber wirbelerregten Querschwingungen (vortex shedding) und Abschätzung der Schraubenlebensdauer	75
6.1.5	Berechnung der Anfälligkeit gegenüber bewegungserregten Querschwingungen (galloping)	81
6.2	Analytisch-numerische Berechnung in MAPLE 17	88
6.3	Diskussion der Ergebnisse für die betrachteten 8 Stationen.....	90
7	UNTERSUCHUNG VON IM EINSATZ BEFINDLICHEN SCHRAUBEN DURCH MU LEOBEN.....	93
8	MESSUNGEN.....	95
8.1	Messung 1: A09-_187,965_0_MAS bei Seiersberg	95
8.2	Messung 2: A03-_000,491_0_MAS bei Guntramsdorf	96
8.3	Messung 3: Versuche im Modellwindkanal	98
8.3.1	Validierung der Berechnungen	98
8.3.2	Erproben von aerodynamischen Verbesserungsmaßnahmen	100
9	BEURTEILUNG DER GEFAHR DES HERUNTERFALLENS DES QUERRIEGELS.....	101
10	ZUSAMMENFASSUNG UND VERBESSERUNGSMÖGLICHKEITEN....	103
10.1	Zusammenfassung.....	103
10.2	Verbesserungsmöglichkeiten.....	104
	REFERENZEN	105
	ANHANG A	113
	ANHANG B	115

1 Einleitung

Elektronische LKW-Mautanlagensysteme sind Überkopf-(ÜK)-Stahlbaukonstruktionen aus Profilträgern mit rechteckigem Hohlquerschnitt, bestehend aus einem Querriegel, der eine oder beide Richtungsfahrbahnen bei Autobahnen und Schnellstraßen überspannt, und zwei seitlichen Steherprofilen, auf denen der Querriegel mittels Kippblechen und 4 Schrauben quasigelenkig gelagert ist (Abb. 1-1). Ausnahmen davon bilden Ausführungen mit einem Mittelsteher oder kragträgerartige Konstruktionen mit nur einem Steher. In Österreich gibt es etwa 450 dieser Tragwerke. Die Planung und Fertigung dieser Stahlbaukonstruktionen wurde von der Fa. Forster Verkehrs- und Werbetechnik in Waidhofen an der Ybbs zwischen ca. 2001 und 2005 durchgeführt, die Ausrüstung mit den elektronischen Mauterfassungssystemen (die am Querriegel befestigt sind) erfolgten durch die Fa. Kapsch TrafficCom.



Abb. 1-1: Nichtbegehbare Station A04-_034,200_0_MAS [1]

Ab ca. 2005 wurden im Zuge der periodischen Anlagenkontrollen immer wieder gelockerte oder gebrochene Schrauben in den Riegel-Steher-Verbindungen entdeckt sowie ab spätestens 2003 Vertikalschwingungen der Querriegel unter Windeinfluss beobachtet. Im Raum stand dabei auch die Frage, ob die Gefahr des Herunterfallens eines Querriegels gegeben sei. Stellungnahmen von Kapsch TrafficCom und der Fa. Forster – bzw. von Forster beauftragte Gutachter – sagten aus, dass die Konstruktion gemäß dem zur Zeit der Planung geltendem Stand der Technik erfolgte und ein Herabfallen des Querriegels aufgrund des Zentrierrohres nicht möglich sei. Für eine unabhängige Analyse der Problematik sollte im Rahmen des FFG-Projekts „Schwingungsreduktion von Überkopfkonstruktionen“ zwischen ASFINAG, BMVIT und dem Institut für Fahrzeugtechnik der FH JOANNEUM von Juli 2013 bis Juni 2014 mittels Literaturrecherche, Nutzung von schadensanalytischen Methoden, analytischer Be-

rechnungen, Berechnungsvorschriften in geltenden Normen und Richtlinien sowie FEM-Simulationen die Ursachen der Schwingungen und aufgetretenen Schäden geklärt und Gegenmaßnahmen erarbeitet werden, die an den bestehenden Anlagen mit möglichst geringen Kosten implementiert werden können. Für zukünftige Anlagen sollen die Erkenntnisse als Grundlage für Konstruktionsverbesserungen dienen.

Diese vorliegende Dokumentation fasst die im Projektzeitraum (01.07.2013–30.06.2014) durchgeführten Arbeiten und Erkenntnisse zusammen.

Zu Beginn der Arbeiten war noch nicht klar, ob es sich bei der Ursache der Schwingungen um *vortex shedding*, *galloping* oder *traffic induced gusts* handelt. Ersteres verursacht Schwingungen, wenn sich bei relativ konstant wehendem Wind eine Kármán'sche Wirbelstraße hinter dem Profil ausbildet und so periodische Druckkräfte nach oben und unten auf das Profil erzeugt (Abb. 1-2a). Fällt die Ablösefrequenz der Wirbel mit der Biegeeigenfrequenz des Querriegels zusammen, kommt es zur Resonanz. Das zweite Phänomen – *galloping* – ist eine bewegungsinduzierte Schwingung. Hier muss die Struktur im Gegensatz zum *vortex shedding* bereits eine Bewegung in Vertikalrichtung vollführen, damit es bei horizontalem Wind zu einer – aus Profilsicht – schrägen Anströmung kommt (Abb. 1-2b), welche – je nach Anströmwinkel und Profilquerschnitt – die Bewegung der Struktur aufgrund deren Auftriebscharakteristik (Abb. 1-2c) verstärken kann. Prinzipiell sind rechteckige Profile für beide dieser windinduzierten Schwingungsphänomene anfällig [2]. *Traffic induced gusts* sind von den durchfahrenden LKW verursachte Drucklasten auf die Struktur, und spielen – wie in der weiteren Dokumentation gezeigt wird – für das gegenständliche Problem keine wichtige Rolle.

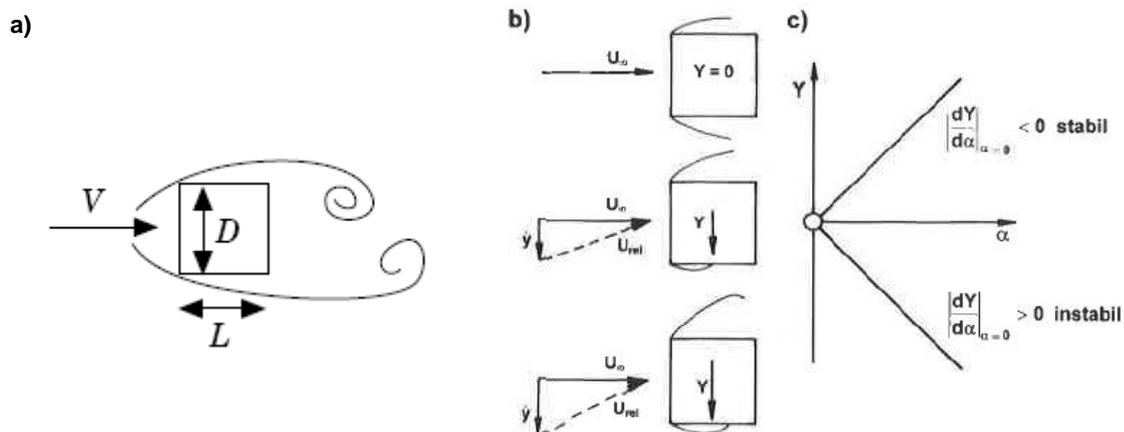


Abb. 1-2: Mechanismen bei *vortex shedding* [3] (links) und *galloping* [4] (rechts)

Um zu klären, welches der Phänomene zu den beobachteten Schwingungsanregungen führte, wurden zunächst in Form einer Bestandsaufnahme charakteristische Parameter von und Erfahrungen an acht Überkopfkonstruktionen, bei denen Probleme mit lockeren oder gebrochenen Schrauben auftraten, ermittelt und zusammengefasst. Dies ist in Kapitel 2 zu finden.

Danach wurde eine Literaturrecherche (US-Regulatorien, europäische und nationale Normen und Richtlinien, wissenschaftliche Literatur, Erfahrungen in den USA und Deutschland mit Schwingungen bei Überkopfkonstruktionen) durchgeführt, deren Zusammenfassung Kapitel 3 wiedergibt.

Kapitel 4 befasst sich mit den Stellungnahmen der Errichterfirma und einem von ihr beauftragten Gutachter und stellt die Aussagen dem jeweils vorliegenden Stand der Technik gegenüber.

In Kapitel 5 ist die fraktographische Untersuchung von drei gebrochenen Schrauben enthalten, welche qualitative Rückschlüsse auf Belastungsart, Belastungshöhe, Schwingspielzahl und Lockerung der Schraube im Betrieb erlaubt.

Kapitel 6 befasst sich mit der rechnerischen Erfassung der Querriegelschwingungen, also der Berechnung von kritischen Windgeschwindigkeiten für *vortex shedding* und *galloping* und der zu erwartenden Amplituden, Schraubenbeanspruchungen und einer qualitativen Reihung der Stationen hinsichtlich Schraubenlebensdauer. Dies wurde anhand der geltenden ÖNORM EN 1991-1-4 und ÖNORM B 1991-1-4 in Form eines Excel-Blattes (das mit dieser Dokumentation mitgesendet wird) für alle ca. 450 Stationen durchgeführt. Weiters wurde auch ein analytisch-numerischer Ansatz in der Mathematik-Software MAPLE 17 zu Kontrollzwecken und tiefergehender Analyse erstellt.

Kapitel 7 lässt die Schraubenuntersuchungen von G. Mori, MU Leoben in die Betrachtung einfließen.

In Kapitel 8 sind die Ergebnisse von zwei Beschleunigungsmessungen an zwei Mautstationen in der Steiermark und Niederösterreich zu finden, bei denen die aufgetretenen Querriegelbeschleunigungen den im Messzeitraum herrschenden Windverhältnissen gegenübergestellt werden. Diese Messungen dienten als Absicherung und Validierung der Berechnungen. Sie zeigten auch, dass LKW-Durchfahrten die Querriegel zu keinen nennenswerten Schwingungen anregten. Zusätzlich sind die Versuche im Modellwindkanal der FH JOANNEUM in diesem Abschnitt dokumentiert.

In Kapitel 9 wird die Gefahr des Herunterfallens des Querriegels untersucht.

Kapitel 10 fasst die Arbeit und die gewonnenen Erkenntnisse nochmals kurz zusammen und schlägt methodische und konstruktive Verbesserungsmöglichkeiten zur Schwingungsreduktion und Schraubenentlastung vor.

2 Beschreibung ausgewählter Stationen und der dort aufgetretenen Probleme

2.1 A01-_044,300_0_SKE

Standort:

Bei Sichelbach in NÖ, A1 Westautobahn (Abb. 2-1). Die Station, bei der die Schrauben gebrochen sind, befindet sich – aus Westrichtung gesehen – hinter einer baugleichen Anlage. Südlich der Anlage befindet sich eine sanfte Geländeerhebung, die evt. einen Düseneffekt bewirken kann. Ansonsten ist das Gelände über mehrere Kilometer hinweg flach und weist keine Hindernisse für Westwind auf.



Abb. 2-1. Standort A01-_044,300_0_SKE [5]

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 38,3 Meter, 3 Riegelemente 750×750×10 mm (Abb. 2-2). Der Außenradius beträgt 50 mm [6]. Auf den Querriegeln ist ein Gehsteg mit Geländer angebracht (Abb. 2-3), welcher die Umströmungsverhältnisse im Vergleich zu einem quadratischen Profil verändert. Hier wird später vereinfacht mit den Widerstands- und Auftriebskoeffizienten eines Rechteckprofils laut Literatur gerechnet werden.

Problem:

Der Querriegel war von Haus aus verdreht (lt. Ziviltechniker [9] evt. durch die Feuerverzinkung). Dies bewirkte einen großen Spalt (3 cm) auf einer Auflagerseite, der durch festes Anziehen der Schrauben geschlossen wurde. Die Errichtung fand 2005 statt, 2008 sind die Niro-Schrauben gerissen und der Spalt ging wieder auf 3 cm auf (Abb. 2-4).



Abb. 2-4. Schadensstelle. Links: Vorgefundene Situation bei Wartung. Rechts: Provisorische Lösung. Fotos: [10]

Die Fa. Forster macht neben diesen statischen Spannungen auch dynamische Windlasten (die im Regelwerk nicht berücksichtigt sein sollen lt. Fa. Forster) am langen Schilderbrückenriegel verantwortlich [11]. Als Abhilfe wurde lt. Vorschlag des ZT Raza Baban einseitig Distanzbleche (mit ca. 30 mm Höhenunterschied zwischen den beiden Verschraubungsseiten) vorgeschlagen und eingebaut [9], [12].

Schrauben an der Riegelverbindung:

Nach dem Bruch M20×130-Niro-Schrauben (Bezeichnungen: A4-70, 1.4401, X5CrNiMo 17-12-2, AISI Type 316) wurden diese (laut Aktenvermerk [13]) gegen hochfeste 10.9 Schrauben ersetzt. Das Nennanzugsmoment der A4-70-Schrauben beträgt laut [14] 280 Nm, die Vorspannkraft 71 kN bei einem μ von 0,12. Messungen des Lösemoments der Kontermutter an einer gebrochenen (allerdings 8.8-Schraube) an der FH JOANNEUM ergaben ca. 95 Nm. Mit einem handelsüblichen Gabelschlüssel mit 24 mm Maulweite sind bei vertikaler Schraubenausrichtung Anzugsmomente von geschätzt 60 Nm erreichbar.

Die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe sind in Tab. 2-1 dargestellt.

Tab. 2-1. Verwendete Werkstoffe

Teil	Werkstoff	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	E (GPa)	ν (-)
Riegel, Steher und Anschweißteile	S235JRG2 alle Werte aus [15]	235	360	26	210	0,30
Schrauben Riegelverbindung alt	A4-70 (1.4401, 316)	450 [14]	700 [14]	40 [16]	200 [16]	0,28 [17]
Schrauben Riegelverbindung neu	10.9 alle Werte aus [18]	900	1000	9	210	0,30

M20-10.9-Schrauben werden laut [15] mit 558 Nm (bei einem Reibungskoeffizient von 0,12) angezogen. Das entspricht einer Vorspannkraft von 173 kN. Zu bedenken ist bei vorgespannten hochfesten Schrauben allerdings die Gefahr einer Wasserstoffversprödung.

Weiters wurden in den Berichten zur Kontrolle vom 28.06.2011 sowohl bei der A01-_044,315_0_SKE [19] und der A01-_044,300_0_SKE [20] lockere Schrauben am Überbau festgestellt.

Aussagen zur Station im Aktenvermerk [13]:

Am 27.07.08 wurde an dieser Station festgestellt, dass 2 von 4 Schraubverbindungen zwischen Steher und Riegel auf RFB 2 gerissen waren. In Fahrtrichtung Wien (RFB 1) fehlte ebenfalls eine Schraube. Darüber hinaus entstand ein bis zu 3,5 cm breiter Spalt. Es wurden Sicherungsmaßnahmen gesetzt, die Mängel saniert und untersucht – mit folgendem Ergebnis:

Der Standort ist ungewöhnlich hohem Windangriff ausgesetzt – dies wird durch die Längstallage ohne bedeutende Windhindernisse begründet. Der starke Westwind in dieser Gegend sei bekannt. Weiters habe eine Verdrehung des Riegels um die Längsachse stattgefunden, die durch ein Anziehen der Schrauben „korrigiert“ wurde.

Die Niro Schrauben A4-70 wurden durch hochfeste Schrauben 10.9 getauscht.

Abschließend kommt der Hersteller (Fa. Forster) zu dem Schluss, dass der Riegel auch ohne Schrauben durch das Zentrierrohr gehalten wird. Es habe daher niemals Gefahr für die Verkehrsteilnehmer bestanden. Der Standort wurde/wird in weiterer Folge einer regelmäßigen Kontrolle, zusätzlich zu jener gemäß RVS, unterzogen.

2.2 A01-_067,350_0_SKE

Standort:

A1 Westautobahn (Abb. 2-5). Die Station befindet sich zusammen mit einer baugleichen Anlage (bei Kilometer 365) in der Nähe von Linsberg, NÖ. In mehreren Kilometern Umgebung ist das Gelände flach und weist keine Hindernisse für Wind auf.

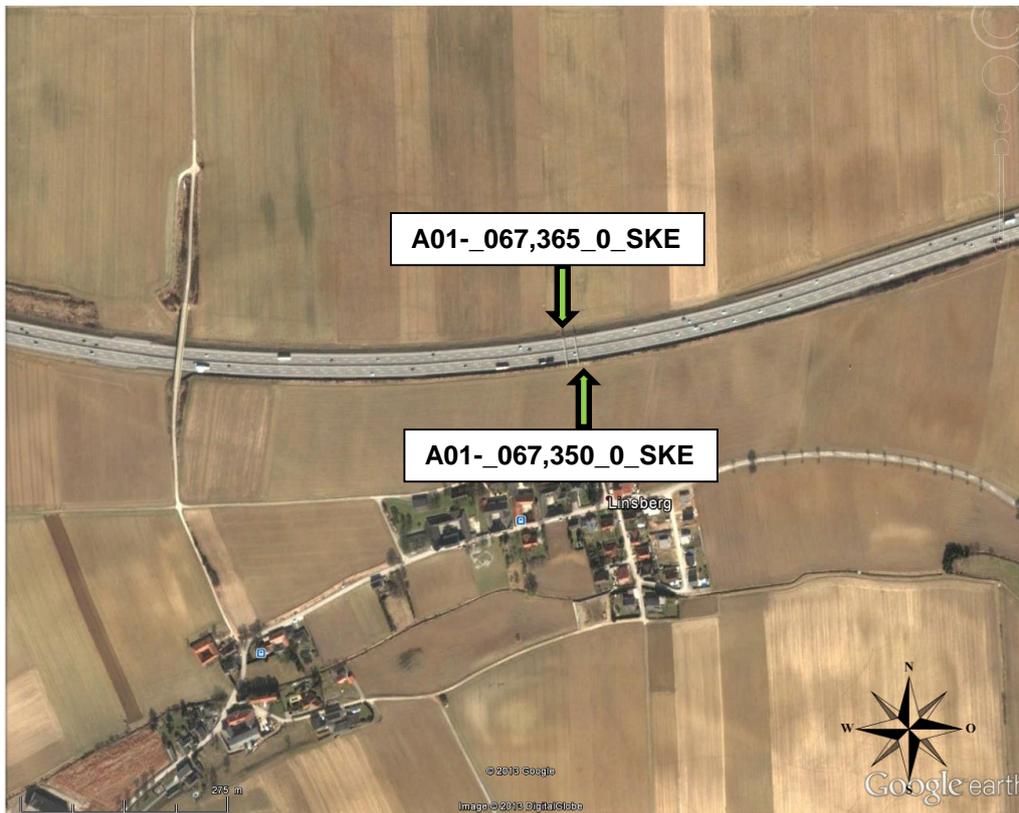


Abb. 2-5. Standort A01-_067,350_0_SKE [21]

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 36,3 Meter, 3 Riegelemente $750 \times 750 \times 10$ mm (Abb. 2-6). Der Außenradius beträgt 50 mm [22]. Auf den Querriegeln ist ein Gehsteig mit Geländer angebracht (Abb. 2-7), welcher die Umströmungsverhältnisse im Vergleich zu einem quadratischen Profil verändert. Hier wird später vereinfacht mit den Widerstands- und Auftriebskoeffizienten eines Rechteckprofils laut Literatur gerechnet werden.

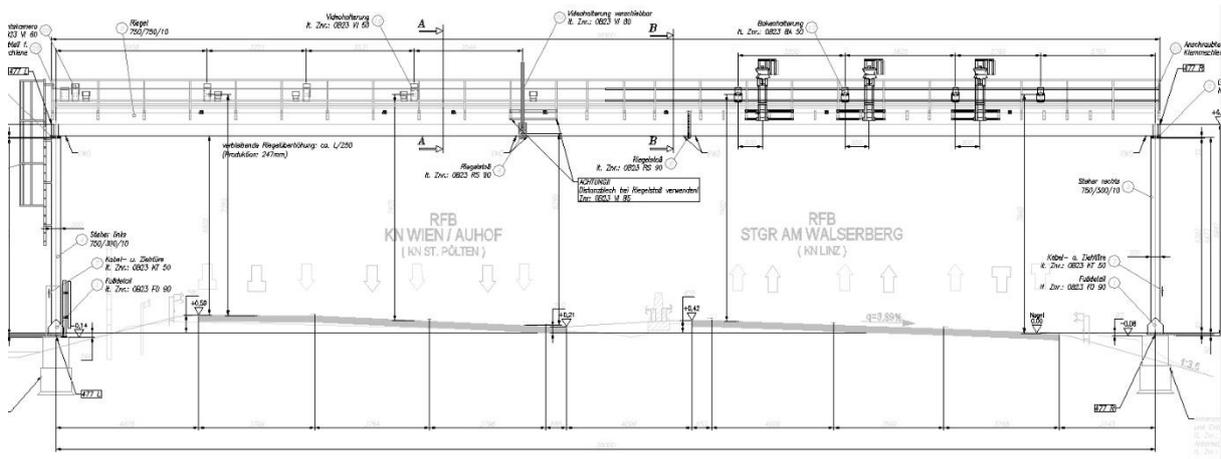


Abb. 2-6. Hauptabmessungen A01-_067,350_0_SKE [22]



Abb. 2-7. A01-_067,350_0_SKE mit Aufbau. Foto: [23]

Schrauben an der Riegelverbindung:

Vermutlich sind auch hier wie bei der A01-_044,300_0_SKE M20×130-Niro-Schrauben (A4-70) in Verwendung. Laut den Kontrollberichten vom 28.09.2011 [24] und 20.08.2011 [25] wurden lockere Schrauben am Überbau festgestellt.

Aussagen zur Station im Aktenvermerk [13]:

Im Zuge der RVS Kontrollen 2007 am 10.09.07 wurde auch an diesem Standort eine fehlende bzw. abgerissene Schraube festgestellt.

Auch dieser Standort „begegnete“ uns ein zweites Mal: Im Zuge einer Qualitätsmessung am 22./23.12.08 wurden durch unseren Kollegen G. Meister außerordentlich heftige Bewegungen der Anlage – insbesondere des Querträgers – beobachtet.

Er beschrieb die Bewegungen als ein „Schlingern“ von bis zu 40 cm in vertikaler und horizontaler Richtung. Es war noch keine Schraube gerissen, allerdings legten die Sicherungskörbe der Aufstiegsleiter durch ihre Verformung in Windrichtung ein eindeutiges Zeugnis über die starken Windeinflüsse auf diesem Standort. Auch hier wurden sofort Maßnahmen seitens des Herstellers getroffen: der Standort wurde unverzüglich überprüft und die deformierten Sicherungskörbe ausgetauscht.

2.3 A04_034,200_0_MAS

Standort:

Nördlich von Bruck an der Leitha, A4 Ostautobahn (Abb. 2-8). Die Anlage ist eine Einzelstation. In mehreren Kilometern Umgebung ist das Gelände flach und weist keine Hindernisse für Wind auf.

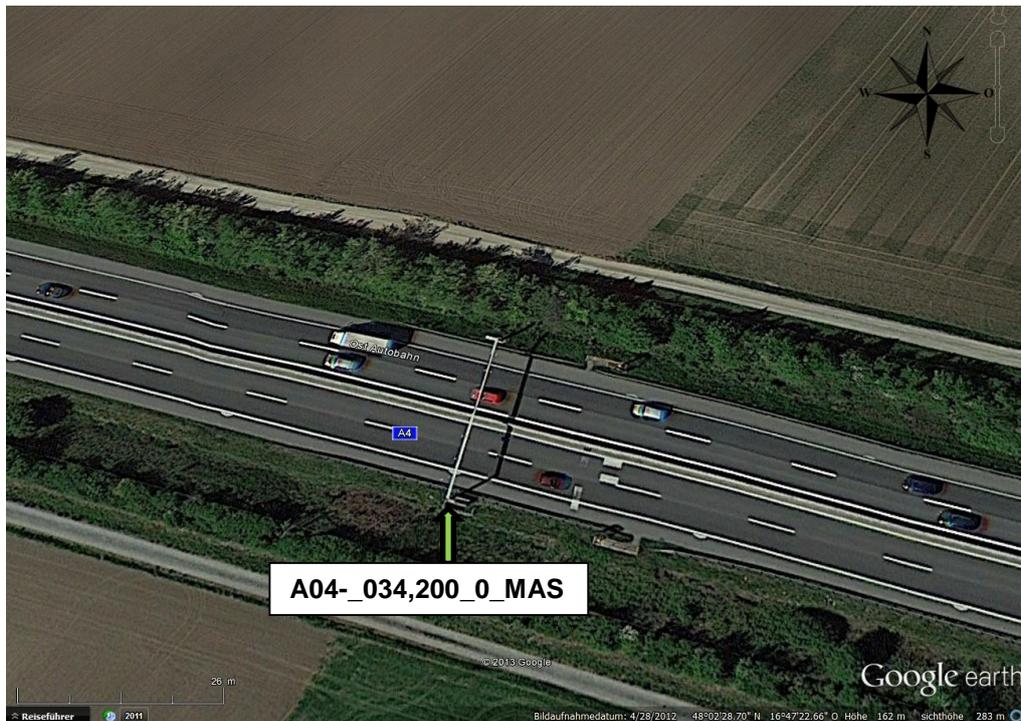


Abb. 2-8. Standort A04_034,200_0_MAS [21]

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 25,25 Meter, 2 Riegelemente 350×350×6 mm (Abb. 2-9). Der Außenradius des Profils beträgt 15 mm [26].

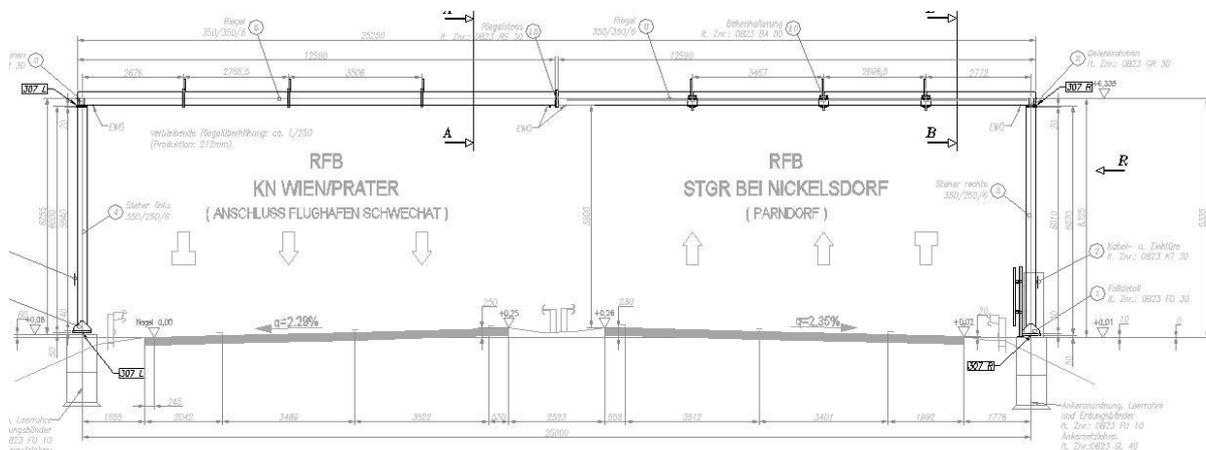


Abb. 2-9. Hauptabmessungen A04_034,200_0_MAS [26]

Die Querriegel waren im Jahre 2003 noch ohne nennenswerte aerodynamisch wirksame Aufbauten ausgestattet (Abb. 2-10) und wurden um 2004 mit Blechen an der Oberseite versehen (Abb. 2-11), wobei zwei Flügeltripel pro Richtungsfahrbahn gegengleich angeordnet wurden.



Abb. 2-10. A04-_034,200_0_MAS. Foto: [27]



Abb. 2-11. A04-_034,200_0_MAS mit Flügeln. Foto: [28]

Schrauben an der Riegelverbindung:

Aus den Unterlagen ging nicht hervor, um welchen Schraubentyp es sich hier handelt. Laut Kontrollbericht vom 28.11.2011 [29] gab es am Überbau lockere Schrauben.

Aussagen zur Station im Aktenvermerk [13]:

Noch vor Inbetriebnahme des LKW-Mautsystems, rund um den 6./7. Dezember 2003 wurden Schwingungen des Querriegels bei A04-_034,200_0_MAS in vertikaler Richtung von bis zu ± 20 cm beobachtet. Dies führte zu einer erstmaligen Auseinandersetzung mit dem Phänomen „Gallopings“. In seinem Gutachten vom 10. Dezember 2003 geht DI Eberhard Feilmayr davon aus, dass es sich hierbei „...um bewegungsinduzierte Biegeschwingungen (Gallopings) handelt.“ Er führt darin auch aus, dass sämtliche Bestimmungen eingehalten wurden, dass Amplituden in der Größe von ± 6 cm keinen nachteiligen Einfluss auf die Betriebsfestigkeit haben und auch, dass Anbauten sinnvoll sind, die eine Wirbelbildung nur einseitig ermöglichen könnten. Derartige Anbauten wurden in weiterer Folge an diesem Standort angebracht – ebenso wie ein Austausch sämtlicher Verbindungsschrauben des Riegelementes vorgenommen wurde.

Trotz dieser Maßnahmen wurde im Zuge der RVS Kontrolle 2005 wiederum eine abgerissene Schraube festgestellt – in RFB 1 RHA (Rechts hinten außen). Unmittelbar nach Feststellung dieses Mangels wurde die fehlende Schraube ersetzt.

Im Juni 2007 (21. und 22. Juni) wurde die Fa. VCE beauftragt vier ausgewählte Standorte zu überprüfen. Es waren dies Standorte, die bereits in der Vergangenheit auffällig waren, diese sollten mittels BRIMOS Technologie überprüft werden.

Und auch bei dieser Kontrolle wurden zwei fehlende Schrauben zwischen Riegel und Steher festgestellt. Diesmal an anderer Stelle – in RFB 2 LHI (Links hinten innen). Auch hier wurden die Schrauben ersetzt. Weiters fanden sich abgerissene Schrauben im Bereich des Fundamentes; ein Indiz dafür, dass hier bereits öfter Schrauben abgerissen und ersetzt bzw. getauscht wurden.

Die RVS Kontrolle am 28.08.07 – als knapp 2 Monate später – brachte keine Auffälligkeiten zu Tage. Ebenso wenig die Bauwerksprüfung am 29.04.09.

2.4 A09-_117,810_0_MAS

Standort:

Zwischen Mautern und Kammern in der Steiermark, A9 Pyhrnautobahn (Abb. 2-12). Die Anlage ist eine Einzelstation in Westnordwest-Ausrichtung und befindet sich in einer Art natürlichen Düse, wenn man die Gebiete um Mautern (links im Bild) und Kammern (rechts) als relativ breite Ein- und Auslaufzonen betrachtet.

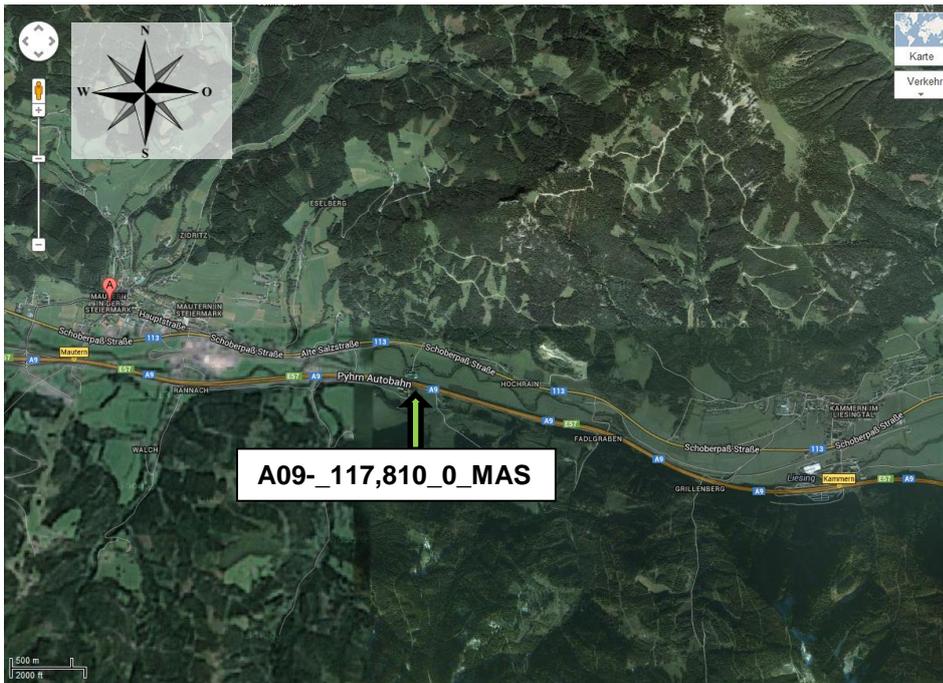


Abb. 2-12. Standort A09-_117,810_0_MAS [30]

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 26,85 Meter, 2 Riegelemente 400×400×8 mm (Abb. 2-13). Der Außenradius beträgt 15 mm [31].

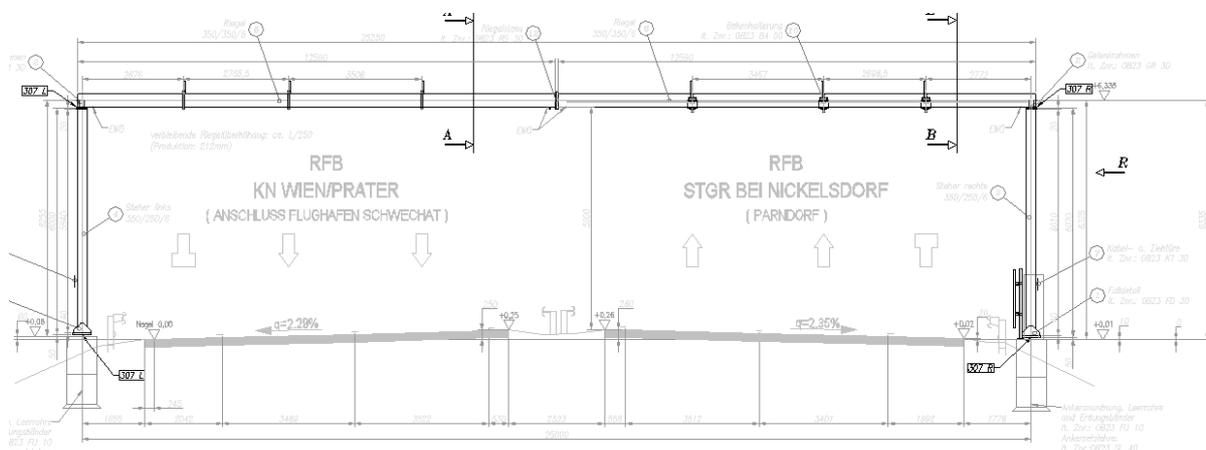


Abb. 2-13. Hauptabmessungen A09-_117,810_0_MAS [32]

Die Querriegel sind (bzw. waren zumindest im Jahr 2003) noch ohne nennenswerte aerodynamisch wirksame Aufbauten ausgestattet (Abb. 2-14).



Abb. 2-14. A09-_117,810_0_MAS. Foto: [33]

Irgendwann kam es zum Bruch von zumindest einer A4-70-M16-Schraube an der Verbindung Riegel-Steher. Eine in die Böschung gefallene Schraube wurde im Juni 2013 von Herrn Meister / ASFINAG gefunden (Abb. 2-15). Die Lebensdauer der Schraube betrug aufgrund der alle zwei Jahre durchgeführten Inspektionen somit unter zwei Jahren.



Abb. 2-15. Gebrochene Schraube. Fotos: [34]

Das Bruchbild zeigt eindeutig einen Schwingbruch für niedrige Nennspannung für einen umlaufenden Rundkerb unter Zug/Druck- und/oder Biegebeanspruchung [35]. Die Restbruchfläche ist äußerst klein. Eine eingehendere Analyse erfolgte später mittels Stereomikroskop (Kapitel 5).

Schrauben an der Riegelverbindung:

M16×90 aus A4-70. Das Nennanzugsmoment bei diesen Schrauben beträgt laut [14] 135 Nm, die Vorspannkraft 45 kN für eine Reibzahl von 0,12.

Untersuchung des Lösemoments der Kontermutter: Am 12.07.2013 wurde an der FH JOANNEUM mit einem auf 100 Nm eingestellten Drehmomentschlüssel die Kontermutter gelöst. Diese löste sich bereits vor Erreichen der 100 Nm. Der Werkstättenmeister schätzte das Losbrechmoment auf ca. 95 ... 98 Nm. Das erreichbare Anzugsmoment mit einem (kürzeren) handelsüblichen Gabelschlüssel (Schlüsselweite 24 mm für M16) bei der Montage im Feld schätzt er auf etwa 50 ... 60 Nm. Auch laut [36] lassen sich bei vertikaler Schraubenachse nur etwa 100 N Handzugkraft aufbringen, was bei einem kurzen Schraubenschlüssel mit 269 mm Länge [37] lediglich 26,9 Nm Anzugsmoment bedeuten würde.

Laut Kontrollbericht vom 12.12.2011 [38] gab es am Überbau lockere Schrauben. Aus dem Kontrollbericht geht auch hervor, dass die Überprüfungen alle 2 Jahre stattfinden.

Sonstiges:

Keine Anmerkungen zu dieser Station im Aktenvermerk.

2.5 A21-_028,505_0_MAS

Standort:

Wiener Außenringautobahn bei Hinterbrühl (Abb. 2-16). Die Anlage ist eine Einzelstation in Ostnordost-Ausrichtung. Die Lage erscheint bei erster Betrachtung aufgrund der umliegenden Hügel vor direktem Windangriff aus Westrichtung geschützt. Allenfalls vorstellbar wäre eine Kanalströmung entlang der Autobahnstrecke.

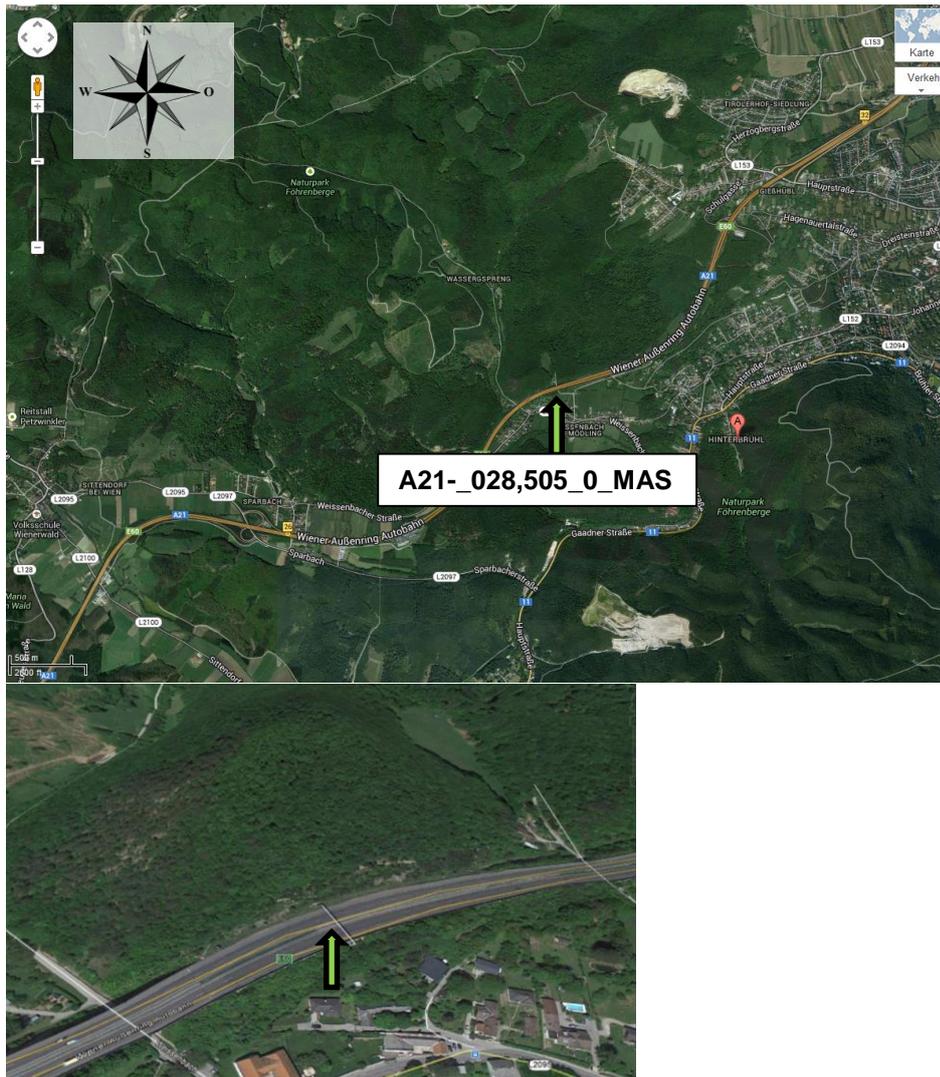


Abb. 2-16. Standort A21-_028,505_0_MAS [30]

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 35,92 Meter, 2 Riegelemente á 17,1 m, 650×600×10 mm (Abb. 2-17). Der Außenradius beträgt 25 mm [31].

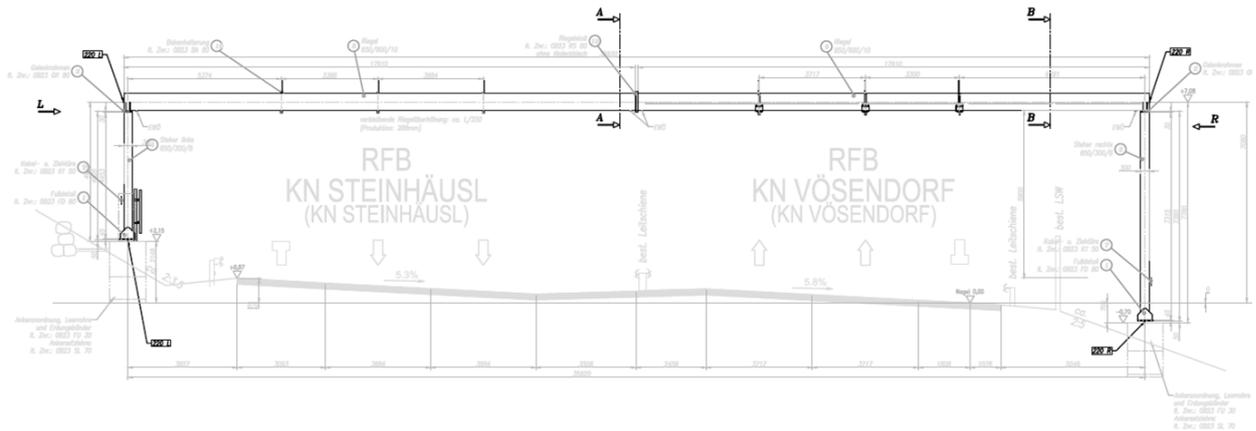


Abb. 2-17. Hauptabmessungen A21-_028,550_0_MAS [31]

Die Querriegel sind (bzw. waren zumindest im Jahr 2003) noch ohne nennenswerte aerodynamisch wirksame Aufbauten ausgestattet (Abb. 2-18).



Abb. 2-18. A21-_028,550_0_MAS. Foto: [39]

Schrauben an der Riegelverbindung:

Die Schraubengröße ist in den vorliegenden Unterlagen nicht angegeben, der Schraubenwerkstoff dürfte noch A4-70 sein. Laut Kontrollbericht vom 20.09.2011 [40] wurden lockere Schrauben am Überbau festgestellt.

Aussagen zur Station im Aktenvermerk [13]:

Im Zuge der RVS Kontrolle 2007 wurde am 13.08.07 festgestellt, dass „Querriegel augenscheinlich verspannt auf Steher RFB 2 aufliegt, da die Kopfplattenschraube durch die Spannungen abgerissen ist“. Es handelte sich dabei um die Schraube LVI (Links vorne

innen). Die Schraube wurde ebenfalls ersetzt – die Station erhielt die Zustandsnote 1,67. Im Zuge der RVS Prüfung vom 04.06.09 erhielt die Station die Zustandsnote 1,33 – es wurden keine abgerissenen Schrauben entdeckt.

In beiden Fällen waren Funktionsfähigkeit und Benutzbarkeit der Straße im Objektsbereich gegeben.

2.6 S06-_034,630_0_MAS

Standort:

Semmering-Schnellstraße zwischen Müzzzuschlag und Spital am Semmering (Abb. 2-19). Die Anlage ist eine Einzelstation in Nordost-Ausrichtung in einer ebenso ausgerichteten Tallage und befindet sich ca. 80 m vor dem Semmeringtunnel.

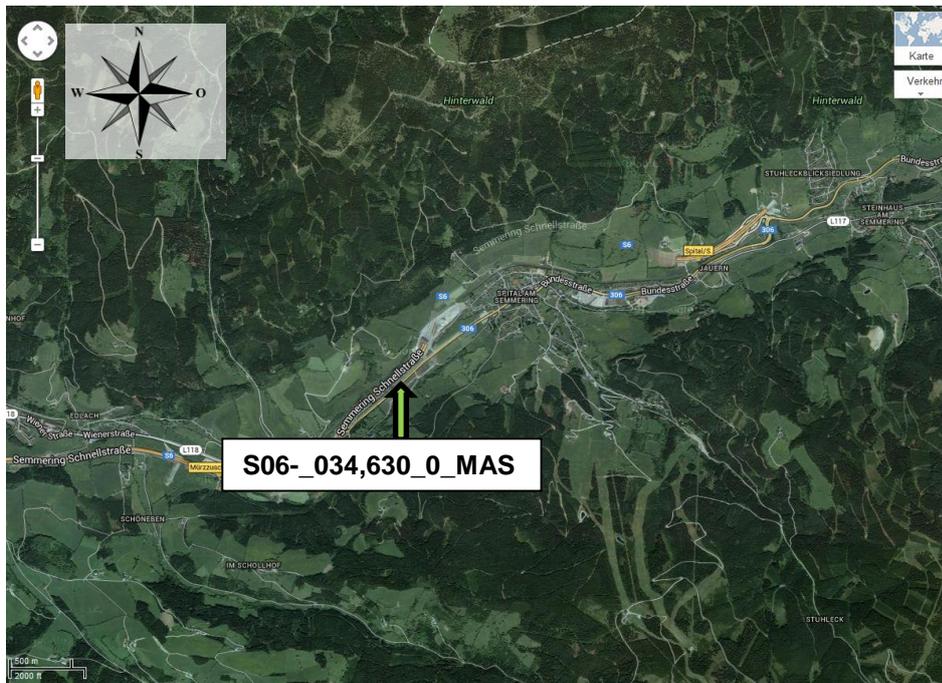


Abb. 2-19. Standort S06-_034,630_0_MAS [41]. Aufnahme vom Mai 2003, noch vor dem Bau der Anlage.

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 26,61 Meter, 2 Riegelemente á 13,305 m, 400×400×8 mm (Abb. 2-19). Der Außenradius beträgt 15 mm [42].

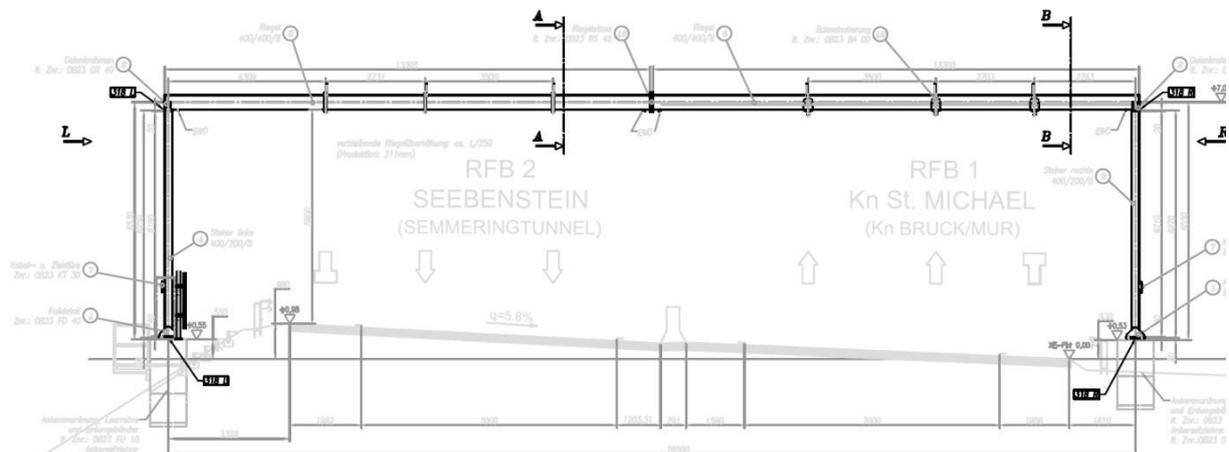


Abb. 2-20. Hauptabmessungen S06-_034,630_0_MAS [42]

Die Querriegel besitzen (bzw. besaßen zumindest im Jahr 2005) noch keine nennenswerte Aufbauten, die aerodynamisch wirksam wären (Abb. 2-21).



Abb. 2-21. S06-_034,630_0_MAS. Foto: [43]

Schrauben an der Riegelverbindung:

Vermutlich M16×90 mm, da der Profilquerschnitt jenem der ÜK-Konstruktion von A09-_117,810_0_MAS entspricht. Der Schraubenwerkstoff ist A4-70. Laut Kontrollbericht vom 06.12.2011 [44] wurden lockere Schrauben am Überbau festgestellt.

Sonstiges:

Aus dem Jahr 2005 gibt es ein Video, das die schwingende Station zeigt [45]. Allerdings mit Schnee- bzw. Eisbedeckung, d.h. mit etwas höherer Masse und leicht veränderter Aerodynamik (Abb. 2-22).

Die Schwingfrequenz beträgt laut Videoanalyse 1,56 Hz¹. Da sich die Amplitude im betrachteten Zeitbereich nicht hochschaukelt, deutet dies auf *vortex shedding* hin, also kein *galloping*. Möglicherweise reicht aber auch die Lager- und Schraubendämpfung aus, um die Amplitude in dieser Grenze zu halten. Die doppelte Amplitude am mittigen Riegelstoß beträgt anhand der Videoauswertung grob geschätzt 40 bis 50 mm. Die Schneeauflage hat eine Höhe von etwa 150 mm. Die Querschnittsform der Schneeauflage ist nicht sehr gut erkennbar, sie scheint jedoch zumindest an der Vorderseite mit einem Radius von ca. 150 mm abgerundet zu sein. Nachdem weder am Boden noch am Querriegel Schneeverwirbelungen erkennbar sind,

¹ Siehe Excel-Blatt Schwingfrequenz laut Video.xlsx

könnte es sich um besonders schweren, feuchten oder angetautem und wieder gefrorenem Schnee handeln [46].



Abb. 2-22. S06_034,630_0_MAS. Screenshot mit Referenzlinien zur Vermessung aus [45].

Aufgrund der Schneeeauflage ist die Aerodynamik des Profils verändert, dies muss also in den Berechnungen berücksichtigt werden, um das Verhalten laut Video auf rechnerischem Weg reproduzieren zu können.

Bezüglich der damals herrschenden Windbedingungen wurde Herr Sudy von der ZAMG in Graz angeschrieben (E-Mail vom 25.07.2013). Es konnten zwar keine Daten (Windrichtung und Windgeschwindigkeit) für genau diesen Standort geliefert werden, aber von der ZAMG wurden die Morgen-, Mittags- und Abenddaten aus dem nur 5 km westlich gelegenen Müritzschlag und die im 10-min-Intervall aufgezeichneten Daten der 7 km östlich liegenden Station am Semmeringpass für den 19.12.2005 übermittelt.

Für die Mautstation und Mürzzuschlag liegen die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten laut Windatlas [47] unter 3,5 m/s. Auf der Passhöhe (990 m ü. M.) ist verglichen mit dem Stationsstandort (765 m ü. M.) mit etwas höheren Windgeschwindigkeiten zu rechnen, was sich auch anhand von Abb. 2-23 bestätigt.

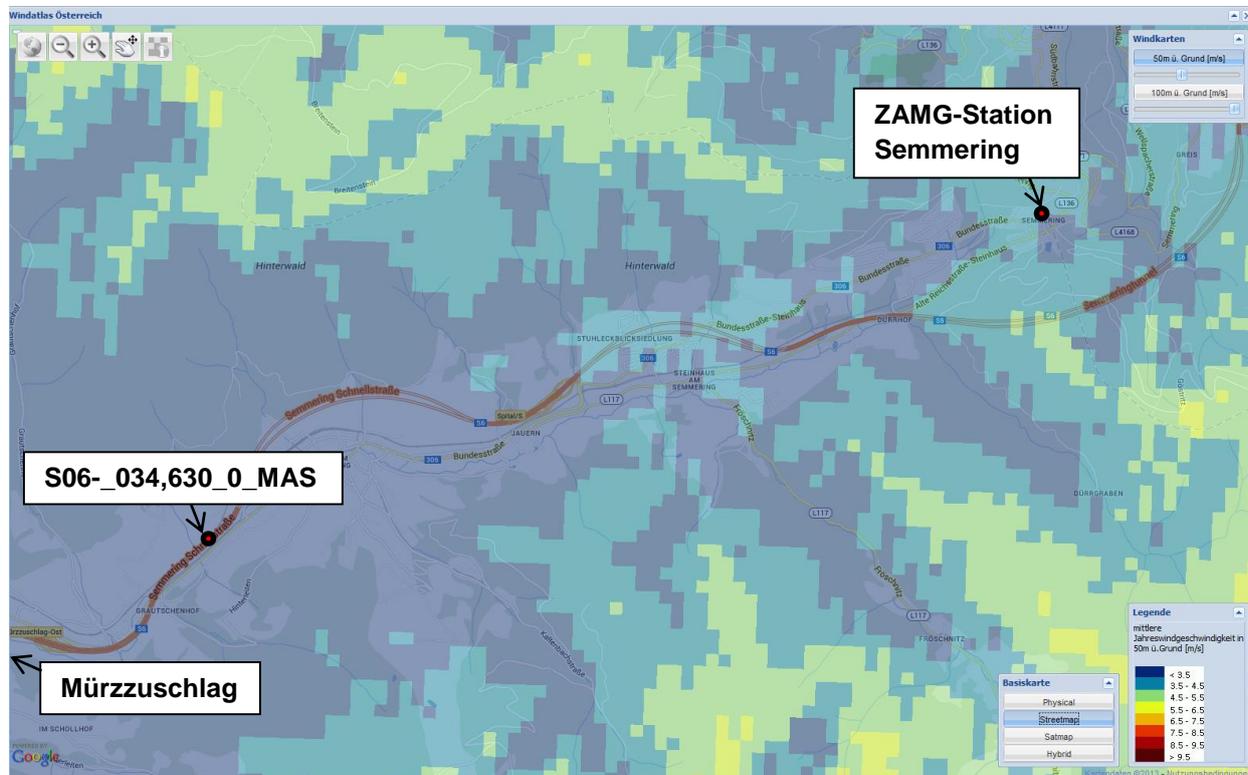


Abb. 2-23. Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 50 m ü. Grund in m/s [47]

Die Messstation am Semmeringpass liegt exakt im Grenzgebiet zwischen den Bereichen „< 3,5 m/s“ und „3,5 – 4,5 m/s“. Es wird deshalb ein Skalierungsfaktor von 0,9 angenommen, mit dem die Windgeschwindigkeitsdaten der Passhöhe multipliziert werden, um auf jene an der Station zu schließen. Falls man vereinfachend eine Kanalströmung zwischen dem Standort der Überkopfkonstruktion und der ca. 7,1 km entfernten Messstation am Semmering annimmt (Abb. 2-24), müssten die Variationen in den Windgeschwindigkeiten gleichzeitig und auch gleiche (bis auf den Skalierungsfaktor) Windgeschwindigkeiten zu gleichen Zeiten auftreten.

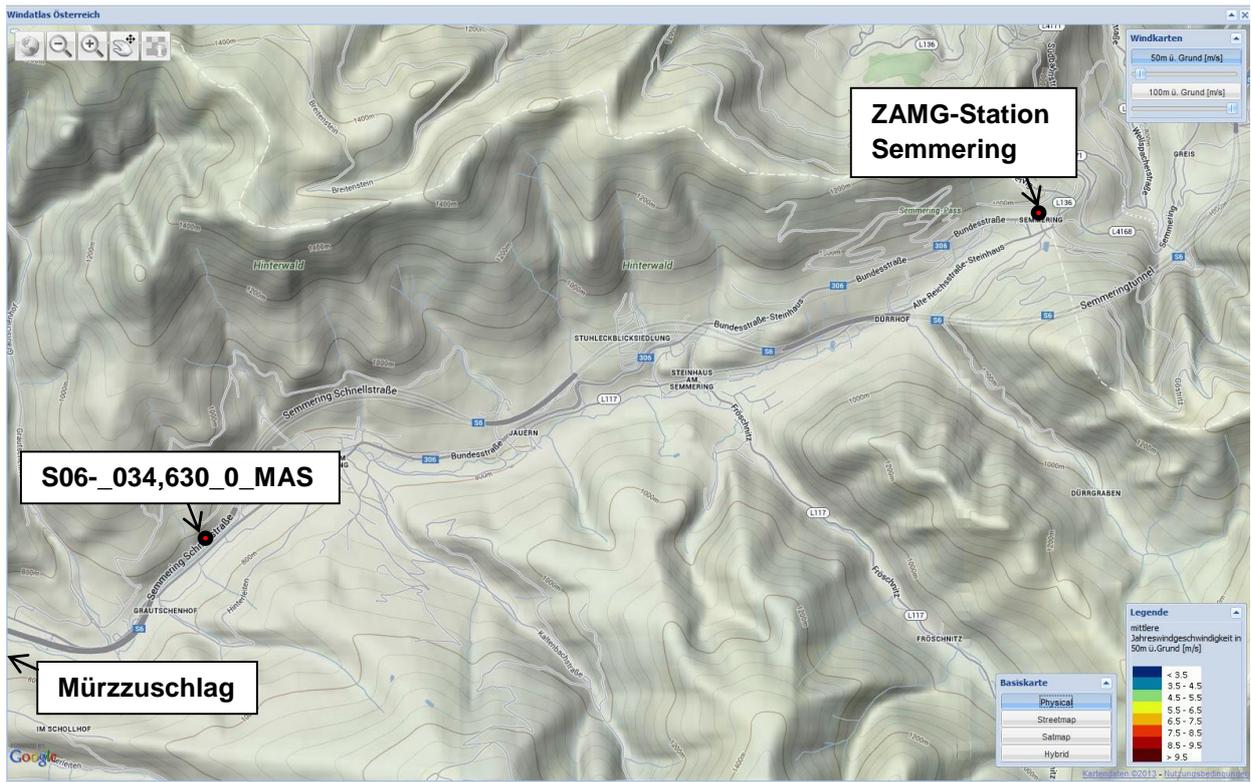


Abb. 2-24. Geländekarte des Gebiets [47]

Abb. 2-25 zeigt die (unskalierten) Messwerte der ZAMG an der Station am Semmeringpass. Die Windrichtung war vorwiegend Südwest (blaue Markierung in der Windrose). Für Mürzzuschlag werden für 7 Uhr 0 Beaufort gemeldet, also quasi Windstille.

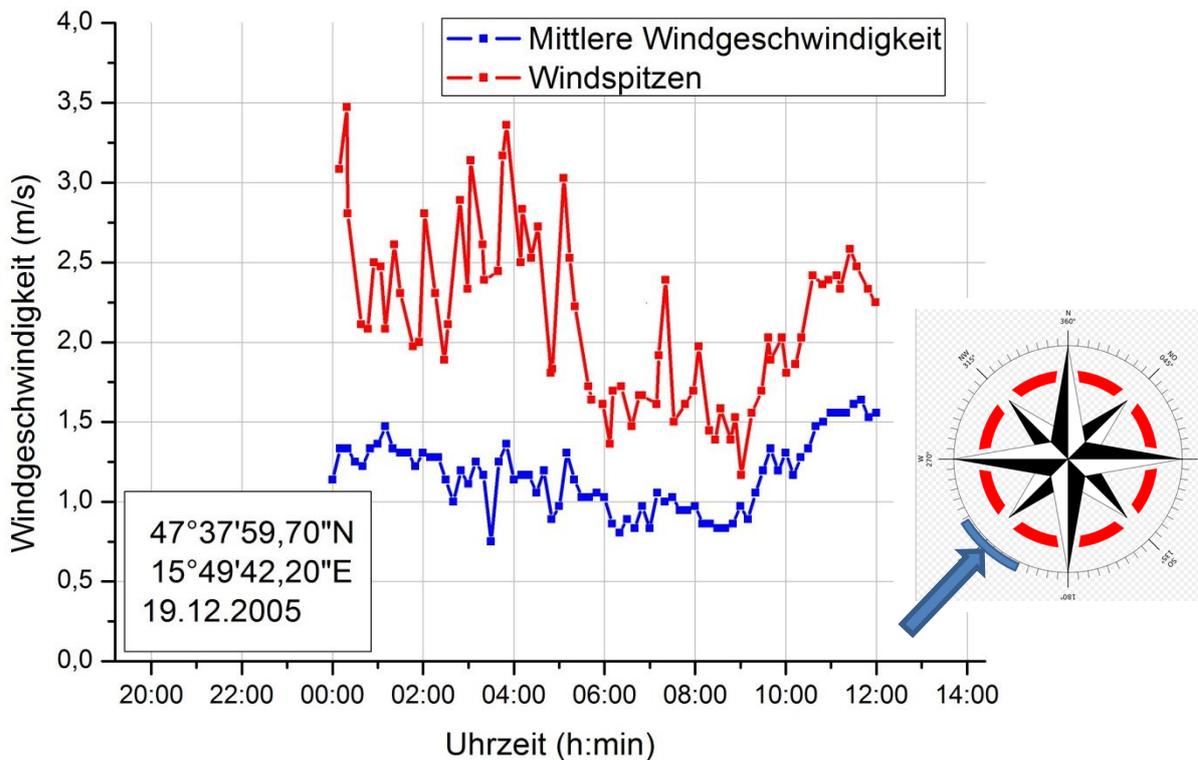


Abb. 2-25. Windmessung vom 19.12.2005 ZAMG-Station Semmeringpass. Bildquelle Windrose: [48]

Für die Zeit der Videoaufnahme vom schwingenden *Toll-Gantry* zwischen 04:01:34 und 04:02:47 Uhr betragen die Windspitzen etwa 2,5 m/s am 7 km entfernten Messort Semmeringpass. Wie spätere Berechnungen zeigten, beträgt die kritische Windgeschwindigkeit für Schwingungsanregung des schneebedeckten Querriegels 6,9 m/s. Die Messungen der ZAMG finden im 10-min-Intervall statt, es kann also sein, dass ein nur 60 s lang wehender Wind mit ca. 6,9 m/s in der Abb. 2-25 keinen Niederschlag fand.

2.7 S31-_074,300_0_MAS

Standort:

Die Station befindet sich an der Burgenland-Schnellstraße südöstlich von Markt St. Martin (Abb. 2-26), wo sie die L331-Brücke kreuzt. Die Anlage ist eine Einzelstation in Nordnordwest-Ausrichtung, das umgebende Gelände ist flach. Laut [49] ist die Hauptwindrichtung in Eisenstadt Nordwest mit häufigen Südostwinden. Für näher an der Station gelegene Orte waren keine Daten auffindbar. Zusätzlich liegt die Straße in diesem Bereich etwas tiefer als das umgebende Gelände und wird beiderseits von zwei Böschungen gesäumt, die möglicherweise einen guten Leitkanal für eine Windströmung bilden, aber – wie die Brücke daneben – bei entsprechender Windrichtung auch abschirmend wirken können.

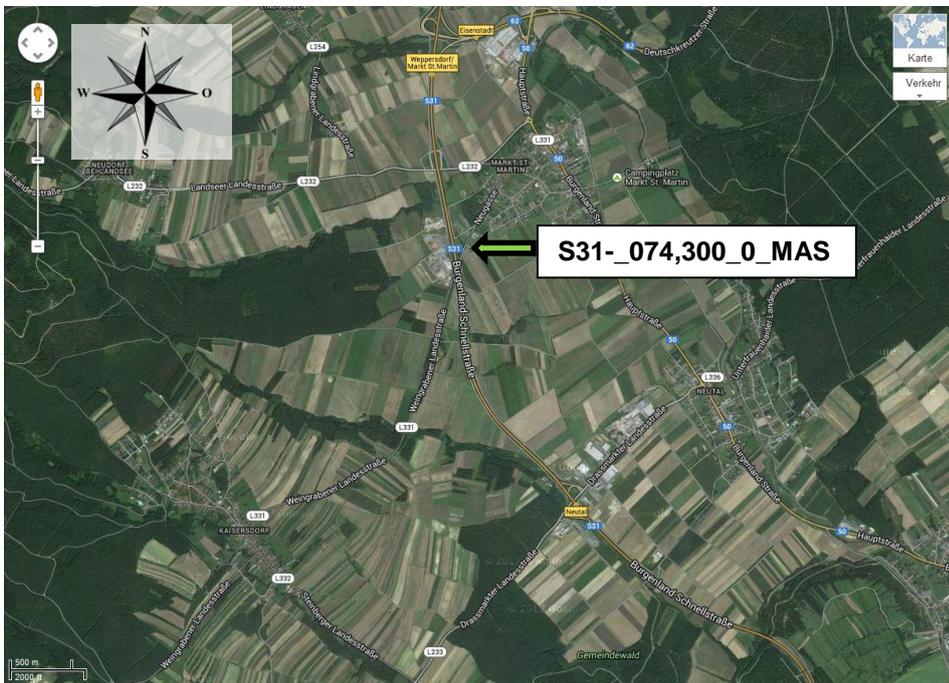


Abb. 2-26. Standort S31-_074,300_0_MAS [50]

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 19,47 Meter, 2 Riegelemente á 9,7 m, 350×350×6 mm (Abb. 2-27). Der Außenradius beträgt 15 mm [51].

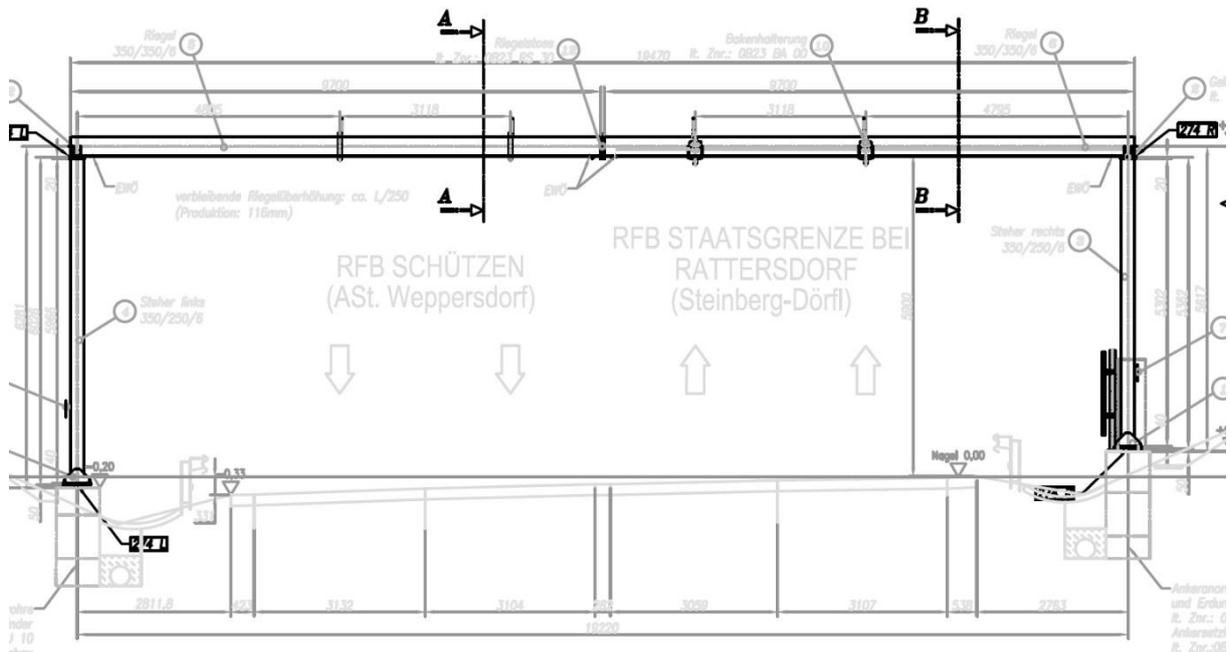


Abb. 2-27. Hauptabmessungen S31-074,300_0_MAS [51]

Die Querriegel sind (bzw. waren zumindest im Jahr 2003) noch ohne nennenswerte Aufbauten, die aerodynamisch wirksam wären (Abb. 2-28).



Abb. 2-28. S31-074,300_0_MAS. Foto: [52]

Schrauben an der Riegelverbindung:

Vermutlich M16×90 mm, da der Profilquerschnitt nur geringfügig kleiner ist als bei der ÜK-Konstruktion S06_038,876_2_MAS (400×400×8). Der Schraubenwerkstoff ist A4-70. Bei der letzten Kontrolle am 06.09.2011 [53] wurden lockere Schrauben am Überbau festgestellt.

Aussagen zur Station im Aktenvermerk [13]:

Im Zuge der RVS Kontrolle 2007, durchgeführt am 23.07.07, fehlte in RFB 1 eine Schraube zwischen Steher und Riegel, die Schraube RVI (Rechts vorne innen). Die Schraube wurde ersetzt – die Station ist seither unauffällig. Im Rahmen der RVS Prüfung 2009 am 20.04.09 wurde der Station die Gesamtnote 2,00 vergeben. Die schlechte Beurteilung ist jedoch nicht auf abgerissene Schrauben zurückzuführen sondern auf Korrosion- und Rosterscheinungen.

2.8 A04-_042,200_0_MAS

Standort:

Die Station befindet sich westlich von Parndorf (Abb. 2-26) und ist nach Nordnordwest ausgerichtet. Das umgebende Gelände ist flach. Laut [54] ist die Hauptwindrichtung in dieser Region Nordwest bis Nordnordwest.

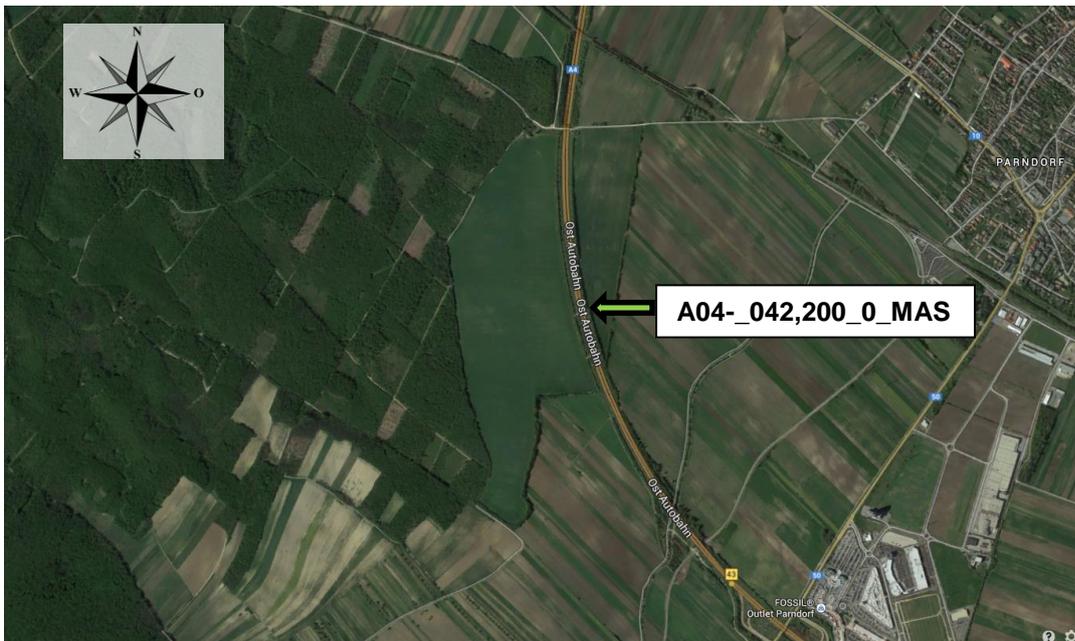


Abb. 2-29. Standort A04-_042,200_0_MAS [55]

Charakteristische Abmessungen:

Spannweite: 25,20 Meter, 2 Riegelemente á 12,565 m, 400×400×6 mm (Abb. 2-27). Der Außenradius beträgt 18 mm [51].

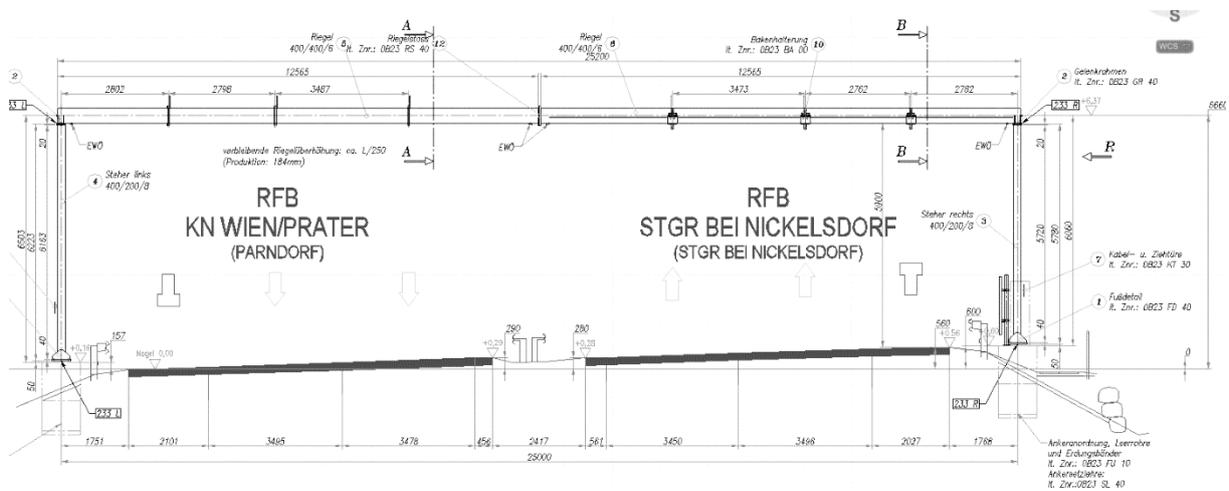


Abb. 2-30. Hauptabmessungen A04-_042,200_0_MAS [56]

Im Zuge der Kontrolle 2011 wurde bemerkt, dass der Querriegel bereits bei mäßigem Wind zu schwingen beginnt [57]. Diese Aussage ist im Einklang mit der rechnerischen Windgeschwindigkeit von 6,1 m/s für wirbelinduziertes Schwingen bei diesem Querriegel. Damals fehlten 2 M16-Schrauben (Kopf abgerissen – Abb. 2-31).



Abb. 2-31. A04-_042,200_0_MAS. Foto: [57]



Abb. 2-32. Gebrochene 8.8-Schraube bei A04-_042,200_0_MAS. Foto in: [58]

Bis 2011 handelte es sich vermutlich noch um A4-70-Schrauben. Gemäß dem Gutachten des Ziviltechnikers Dr. Baban [59] im Jahr 2009, in dem er den Tausch durch 10.9-er-Schrauben vorschlug, wurden dann 2011 die gebrochenen A4-70-Schrauben durch hochfeste Stahlschrauben – allerdings mit Festigkeitsklasse 8.8 – getauscht. Im Zuge der am 06.09. 2013 durchgeführten Kontrolle wurde das Fehlen von vier Schrauben festgestellt [58]. Drei der gebrochenen Schrauben (Abb. 2-32) wurden an der FH JOANNEUM fraktographisch untersucht (Beschreibung in Abschnitt 5).

2.9 Übersicht und Vergleich charakteristischer Größen der acht Stationen

In Abb. 2-33 ist die geographische Anordnung der acht genauer untersuchten Stationen in einer Karte mit der Verteilung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten in Österreich [47] dargestellt. Die Stationen wurden mit den Ziffern 1 bis 8 nummeriert. Die genaue Bezeichnung ist aus Tab. 2-2 ersichtlich.

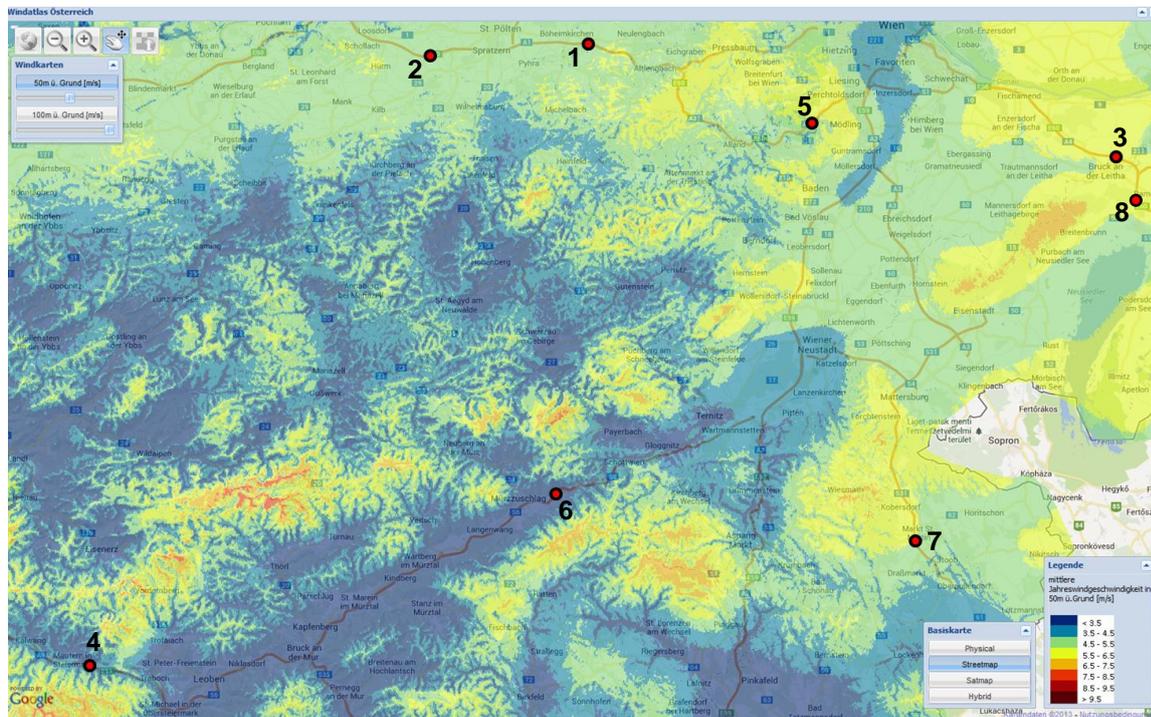


Abb. 2-33. Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 50 m ü. Grund in m/s [47]

Tab. 2-2. Vergleich charakteristischer Größen aller untersuchten Stationen

Nr.	Standort	Biege-länge (m)	Profil und Schrauben	Mittlere Jahres-windgeschwindig-keit 50 m ü. Grund (m/s)	Kritische Windge-schwindigkeit für vortex shedding (m/s)	Schwing-frequenz (Hz)	Amplitude in Querriegelmitte lt. ÖNORM (mm)
1	A01-_044,300	38,00	750×750×10 M20×130	4,5–5,5	8,7	1,69	30
2	A01-_067,350	36,00	750×750×10 M20×130	4,5–5,5	9,7	1,88	31
3	A04-_034,200	25,00	350×350×6 M16?	5,5–6,5	4,7	1,82	9
4	A09-_117,810	26,65	400×400×8 M16×90	< 3,5	5,3	1,83	12
5	A21-_028,505	35,62	650×600×10 M20?	4,5–5,5	6,4	1,54	16
6	S06-_034,630	26,50	400×400×8 M16×90?	< 3,5	5,4	1,84	9
	Wie 6, aber mit Schneeauflage	26,50	400×400×8 M16×90?	< 3,5	6,9	1,69	25
7	S31-_074,300	19,22	350×350×6 M16?	5,5–6,5	7,9	3,08	11
8	A04-_042,200	25,00	400×400×6 M16×95	5,5–6,5	6,1	2,08	13

Die Werte für die kritische Windgeschwindigkeit, Frequenz und Amplitude sind bereits ein Vorgriff auf die Berechnungsergebnisse in Kapitel 6. Aus der Tabelle geht hervor, dass jene Stationen, bei denen die kritische Windgeschwindigkeit in etwa im Bereich der mittleren Jahresdurchschnittsgeschwindigkeit liegt, naturgemäß häufiger zu Vertikalschwingungen angeregt werden. In Bezug auf die Schraubenbeanspruchung sagt die Amplitude alleine noch nichts aus, hierfür sind noch weitere geometrische Parameter ausschlaggebend, wie in Abschnitt 6 gezeigt wird. Die 12 mm bei Nr. 4 beanspruchen die Schrauben aufgrund der höheren Querriegellänge von 26,65 m weitaus weniger als die Amplitude von 11 mm bei Nr. 7 mit einem nur 19,2 m langen Riegel, da sich bei letzterem gemäß Biegebalkentheorie eine höhere Steigung am Kippblech einstellen muss, was zu einer größeren Schraubenlänge führt.

Interessant ist auch, dass eine Schneebedeckung wie bei Station S06-_034,630_MAS die Amplitude drastisch beeinflussen kann.

Hauptaussage aus der Übersicht ist, dass man jede der ca. 450 Stationen für sich betrachten muss. Es lassen sich keine einfachen Aussagen in der Form „Nur Stationen mit Querriegellängen über „x“ Meter sind anfällig für Schwingungen oder Schraubenbruch.“ treffen. Deshalb wurde entschieden, eine Excel-Liste mit allen Stationen zu erstellen, bei der die geometrischen Kennwerte als Eingabedaten dienen und daraus die kritischen Windgeschwindigkeiten, Frequenzen, Amplituden und Schraubenbeanspruchungen basierend auf den Normen [60] und [61] sowie eigener Überlegungen berechnet werden. Dies ist in Kapitel 6 dokumentiert.

3 Exzerption der Literatur zum Thema

3.1 Wissenschaftliche Literatur

Die wissenschaftliche Literatur zum Thema der windinduzierten Schwingungen von Tragwerken und Gebäuden ist sehr umfangreich, da man sich bereits seit den 30er-Jahren des vorigen Jahrhunderts damit beschäftigt. Für diese Arbeit waren vor allem folgende Arbeiten von großem Nutzen:

- ANDREAS RICHTER (1984): *Wind forces on square sections with various corner radii* [62]
- B. E. LEE (1974): *The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism* [63]
- G. V. PARKINSON und N. P. H. BROOKS (1961): *On the aeroelastic instability of bluff cylinders* [64]
- S. OKA und T. ISHIHARA (2009): *Numerical study of aerodynamic characteristics of a square prism in a uniform flow* [65]
- D. ZUO und CHRIS W. LETCHFORD (2010): *Wind-induced vibration of a traffic-signal-support structure with cantilevered tapered circular mast arm* [66]
- H. FÖRSCHING und V. MANEA (1973): *Zur analytischen Behandlung des nichtlinearen Galloping-Problems* [4]
- H. FÖRSCHING (1971): *Aeroelastisch instabile Widerstandsprofile* [67].

In diesen Arbeiten sind einerseits die physikalisch-mathematischen Beschreibungen der an einem umströmten Körper angreifenden Kräfte dargelegt und andererseits auch durch Messungen ermittelte Kennzahlen wie Strouhal-Zahlen, mittlere und fluktuierende Auftriebskoeffizienten in Abhängigkeit von Profilquerschnitt, Radius an den Profilecken, Turbulenzgrad, Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel zu finden. Damit konnte eine mathematische Beschreibung sowohl von wirbelinduzierten (*vortex shedding*) als auch bewegungsinduzierten (*galloping*) Schwingungen des Querriegels einer Mautstation erstellt werden, wie in Kapitel 6 dargestellt.

3.2 Normen und Regelwerke zu windbelasteten Strukturen

3.2.1 Nationale Regelungen / ÖNORM bzw. Euro-Norm

Für Ermittlung der Schwingungsanfälligkeit von Tragwerken durch Windeinwirkung gelten in Österreich derzeit die

- ÖNORM EN 1991-1-4:2011-05-15: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten (konsolidierte Fassung), Ausgabedatum 15.05.2011

und die

- ÖNORM B 1991-1-4:2013-05-01: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen. Ausgabedatum 01.05.2013.

Auf eine detaillierte Wiedergabe der Inhalte wird an dieser Stelle verzichtet, da die Berechnung anhand dieser Normen in Abschnitt 6.1 Schritt für Schritt dargestellt wird.

3.2.2 US-Regulatorien: FHWA (Federal Highway Administration), NCHRP (National Cooperative Highway Research) und AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

Der Text in diesem Abschnitt ist eine Zusammenfassung aus Publikationen der Federal Highway Administration (FHWA) des US-Departments of Transportation [68], des National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) [69], [70] und der American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) [71], die sich mit der windinduzierten Schwingungsproblematik bei Tragwerksstrukturen auf Highways und Schnellstraßen befassen.

Die Strukturen müssen nicht nur die maximal zu erwartenden statischen Windlasten (50-Jahre-Maximum) ertragen können, sondern auch gegen Ermüdung hinreichend ausgelegt sein [68]. Üblicherweise wird eine dauerfeste Auslegung (*infinite life approach*) empfohlen, da die für eine zeitfeste Auslegung benötigte Anzahl und Dauer verschiedener Windeinwirkungen über die geplante Lebensdauer kaum seriös prognostizierbar ist [71]. Die Eigenfrequenzen der Strukturen liegen meistens im Bereich von 1 Hz, die Strukturdämpfung ist im Allgemeinen sehr gering. In der 1998 herausgebrachten NCHRP-Richtlinie Nr. 412 [70] wurde 0,5 % Dämpfung als konservativer Wert angesehen, mittlerweile haben Messungen auch Werte von nur 0,13 % ergeben [69].

Zu Schwingungen und somit Ermüdung bei zweifach gelagerten Überkopfkonstruktionen mit Einfachträgern (*monotube bridge support*) können die folgenden Einwirkungen bzw. Mechanismen anregen [69]:

- Natürliche Windböen bzw. Fluktuationen der Windgeschwindigkeit,
- *Truck-induced wind gusts* (lastwageninduzierte Böen),
- *Vortex shedding* (wirbelinduzierte Schwingungen bei konstanter Windgeschwindigkeit) und
- *Galloping* (bewegungsinduzierte Schwingungen bei konstanter Windgeschwindigkeit).

Natürliche Windböen: Führen zu vorwiegend horizontalem Schwingen der Strukturen, es kann aber auch eine Vertikalkomponente auftreten. Der Ermüdungsprozess läuft hier typischerweise über einige Jahre. Für die gebrochenen Schrauben an der Verbindung Querriegel-Steher bei den Stationen in Österreich können diese Böen deshalb nicht hauptsächlich sein, da diese Schrauben durch eine Horizontalschwingung nicht beansprucht werden.

Lastwageninduzierte Böen: Diese werden bei der Durchfahrt von LKWs verursacht und bewirken primär vertikale aber auch – vernachlässigbare – horizontale Auslenkungen der Überkopfkonstruktionen. Die Druckwirkung ist proportional zum Vertikalabstand zwischen LKW-Oberseite und Überkopfstrukturunterseite, der Fahrtgeschwindigkeit sowie der Fläche der Strukturunterseite. In den USA haben die betroffenen *variable-message signs* (VMS) einerseits eine große Bautiefe und andererseits eine relativ geringe Bauhöhe (Abb. 3-1), wie man sie hierzulande – zumindest auf Autobahnen und Schnellstraßen – nicht kennt. Die FHWA-

Richtlinien sagen, dass ab einer Bauhöhe der Überkopfkonstruktionen von 10 m die LKW-be-dingten Einwirkungen vernachlässigbar sind. Dementsprechend gering sind bei den in dieser Arbeit betrachteten Querriegeln (6 bis 7 m über der Fahrbahn, maximale Breite von 900 mm) die Lasteinwirkungen aufgrund von LKW-Durchfahrten zu bewerten.



Abb. 3-1. LKW-Durchfahrt unter einem *overhead cantilever-supported VMS* [68]

Vortex shedding (wirbelinduzierte Schwingungen): Die Quelle [68] sagt, dass lediglich Beleuchtungsmasten und einfache Kragträgerstrukturen (auskragende Träger an *camera poles* etwa) aufgrund ihrer Symmetrie (da keine großen Befestigungselemente vorhanden sind) anfällig für wirbelinduzierte Schwingungen sind. Es wird nur von einigen Fällen gesprochen, in denen es zu Ermüdungsversagen aufgrund von wirbelinduzierten Schwingungen kam. Dies mag damit zusammenhängen, dass es in den USA keine kameragestützte Mauterfassung auf den – ohnehin wenigen – bemauteeten Straßen (*tolled highways*) gibt; die Abrechnung erfolgt meistens an Mautstationen bei der Ausfahrt. Damit fehlt in den USA der in dieser Arbeit untersuchte Typ von unbeschilderten und fahrbahnüberspannenden Stahlkonstruktionen weitestgehend. In Abb. 3-2 bis Abb. 3-5 sind einige der in den USA gängigen Systeme dargestellt.



Abb. 3-2. Überkopfkonstruktion im Straßenverkehr in den USA. *Tubular overhead, bridge supported.* [72]



Abb. 3-3. Überkopfkonstruktion im Straßenverkehr in den USA. *Two-chord truss style, bridge support.* [72]



Abb. 3-4. Überkopfkonstruktion im Straßenverkehr in den USA. *Monotube, cantilever supported.* [72]



Abb. 3-5. Überkopfkonstruktion im Straßenverkehr in den USA.. Roter Pfeil: In etwa mit den österr. Mauterfassungssystemen vergleichbare Konstruktion. [72]

Bis auf wenige Ausnahmen wie in Abb. 3-5 (wobei es hier auch so aussieht, als ob der Querriegel mit den Stehern starr verschweißt ist) sind in den USA kaum Überkopfkonstruktionen nach dem Konzept der Fa. Forster in Verwendung, weshalb man auch kaum Vergleiche bezüglich der Schwingungsanfälligkeit unter Windbelastung oder den geltenden Auslegerichtlinien in den USA und Europa anstellen kann.

Allerdings machte man in den USA die Erfahrung, dass *vortex shedding* auftrat, wenn Querträger auskragend an Masten oder brückenartig auf Stehern montiert wurden, bevor die Anbauteile (wie Schilder, elektronische Anzeigen) am Querträger montiert wurden. Nach der Montage gab es diesbezüglich keine Probleme mehr. Dies führte zur Empfehlung, dass die Anbauten am Querträger befestigt werden sollen, bevor dieser auf Steher bzw. an Masten montiert wird. Verwiesen wird auch auf den NCHRP-Report 469 [69] welcher *vortex shedding* bei „*long monotube bridge support structures*“, also langen, zweifach gestützten Einzelprofilen erwähnt. *Vortex shedding* mit signifikanten Amplituden tritt laut [68] zwischen ca. 5 und 15 m/s Windgeschwindigkeit auf und benötigt einen relativ gleichmäßig wehenden Wind (die Quelle spricht von 20 % Toleranzbreite). Für fachwerkartige Konstruktionsweisen auskragender Masten mit einem, zwei oder vier Gurten in Längsrichtung (zwischen denen die Verstrebungen eingeschweißt sind) wird keine Schwingungsanfälligkeit bezüglich *vortex shedding* dokumentiert. Dies kann damit zu tun haben, dass sich bei der Vielzahl an Einzelprofilen die Wirbelstraßen sehr unkoordiniert ablösen und sich deshalb nicht zu einer anregungsrelevanten Vertikalkraftresultierenden aufsummieren können, während sich bei Einfachprofilen über die gesamte Länge eine sehr gleichmäßige Kármán'sche Wirbelstraße mit entsprechender periodischer Kraftwirkung in Vertikalrichtung ausbilden kann. Quelle [69] sagt, dass man bei Beleuchtungsmasten nicht unnötig konservativ auf die zweite Eigenfrequenz hin dimensionieren soll, sondern beim Auftreten von Schwingungen aufgrund von *vortex shedding* einen Dämpfer einbauen soll.

Galloping (bewegungsinduzierte Schwingungen): Für das Auftreten von Galloping muss laut [68] ein unsymmetrisches Profil vorhanden sein². Also Strukturen mit Schildern oder Anzeigen etwa. Deshalb sind vor allem auskragende Träger mit Anzeigetafeln anfällig für Galloping, es wurden dort Amplituden von über einem Meter beobachtet. Laut NCHRP-Report 469 [69] ist ein großer Anteil der Schwingungsprobleme und Ermüdungsschäden bei auskragenden Überkopfwegweisern durch Galloping bedingt. Auch Galloping benötigt eine zeitlich gleichbleibende Windstärke, bei stark böigem Wind ist die Anregedauer für hohe Amplituden zu gering. Eine kritische Windgeschwindigkeit, mit ca. 20 % Toleranzbreite nach oben und unten wie beim *vortex shedding*, existiert beim Galloping nicht in dieser Form. Der Windgeschwindigkeitsbereich, in dem Galloping auftreten kann, wird in [68] als deutlich breiter angegeben. Auch hier liegen die beobachteten Frequenzen im Bereich von 1 Hz. Neben kreisförmigen Profilen ohne Befestigungselemente werden auch nichtauskragende (also beidseitig gelagerte) dreidimensionale Fachwerkskonstruktionen der Querträger mit 3 oder 4 Längsgurten (*bridge support structures where the sign bridge consists of three-dimensional, three-chord or four-chord trusses*) als nicht anfällig für Galloping beschrieben. Dies kann damit zusammenhängen, dass aufgrund der höheren Torsionssteifigkeit die Anzeigeschilder kaum eine Verdrehung erfahren und somit auch keine Auftriebswirkung entfalten. Bei Einfachprofilen (*monotube*) oder in einer Ebene angeordneten Längsgurten (*planar chord truss*) bei fachwerkartiger Bauweise ist die Nachgiebigkeit bei Torsionsbelastung deutlich höher.

Methoden zur Abschätzung der Schwingungsanfälligkeit

In den Ö-Normen [60] und [61] sind sehr detailliert einfache Berechnungsmethoden zur Abschätzung von kritischen Windgeschwindigkeiten und zu erwartenden Schwingungsmoden und -amplituden für *vortex shedding* und *galloping* bei Tragwerken dargestellt. Eine vergleichbar ausführliche Berechnungsrichtlinie ist in den derzeit geltenden US-Publikationen [68], [69] und [71] nicht enthalten, möglicherweise wäre eine solche in bauphysikalisch orientierten US-Normen auffindbar gewesen. Eine einfache Berechnung der kritischen Windgeschwindigkeit für *vortex shedding*, mittels groben Werten für die Strouhal-Zahlen unterschiedlicher Profilformen, ist jedoch in den zitierten US-Veröffentlichungen enthalten.

Dimensionierung hinsichtlich Schwingbeanspruchung

Die Auslegung hinsichtlich Ermüdung durch windinduzierte Schwingungen ist in [71], Kapitel 11 beschrieben. Hier werden für die Lastfälle *galloping*, *natural wind gust* und *truck-induced gust* äquivalente Druckwerte und Einflussfaktoren (*fatigue importance factors*) vorgegeben, die – teils unter Miteinbeziehung des aerodynamischen Widerstandsbeiwertes oder

² Tatsächlich kann Galloping auch bei symmetrischen und glatten (ohne Schilder) Profilen auftreten, die unter verschiedenen Anströmwinkeln unterschiedliche Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte aufweisen, wie etwa rechteckige Querschnitte. Es benötigt aber zur Galloping-Anregung entweder eine bereits vorhandene Vertikalbewegung – durch *vortex shedding* oder *truck-induced wind gusts* z. B. – oder eine Torsionsschwingung des Profils. Dann ergeben sich periodisch wirkende Vertikalkräfte, die die Amplitude im Resonanzbereich sukzessive erhöhen.

des Strukturdämpfungswerts – auf die Strukturen in einer z. B. FEM-Berechnung aufzubringen sind. Die sich daraus errechneten Spannungen in der Struktur werden dann mit zulässigen Spannungen für Dauer- oder Zeitfestigkeit (diese können für verschiedene Subelemente der Stahlkonstruktion aus Tabellen abgelesen werden) verglichen.

Maßnahmen zur Schwingungsvermeidung

Für diese Thematik findet man in den US-Publikationen eine Vielzahl an vorgeschlagenen Maßnahmen zur Schwingungsreduktion. Der FHWA-Report „*Reduction of Wind-Induced Vibrations in High-Mast Light Poles*“ [73] beschäftigt sich mit der Schwingungsdämpfung bei Masten. Die dort vorgestellten Methoden sind aber auch für horizontal ausgerichtete Träger anwendbar. Grundsätzlich können die schwingungsreduzierenden Maßnahmen in aerodynamische und mechanische eingeteilt werden.

Aerodynamische Maßnahmen zur Schwingungsverringering

In Abb. 3-6 sind drei Möglichkeiten zur Beeinflussung der Wirbelablösung dargestellt. Mittels der Spirale, den Störblechen und den Höckern wird erreicht, dass sich kein entlang der gesamten Länge des Bauteils ablösender Wirbel ausbilden kann, sondern Ablösungen an Ober- und Unterseite gleichzeitig – aber an verschiedenen Positionen – auftreten, welche sich gegenseitig in ihrer Kraftwirkung normal zur Windrichtung kompensieren.

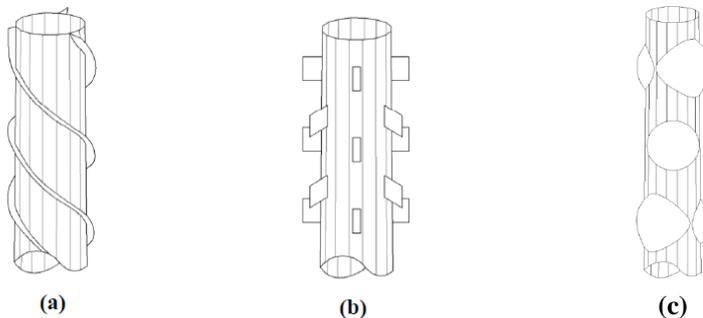


Abb. 3-6. (a) Spiralförmiges Blech, (b) Störbleche, (c) Verrundete Höcker [73]

Die Höhe der Bleche bei Version (a) beträgt etwa 10 % des Mastdurchmessers D und wird häufig wie ein dreigängiges Gewinde mit einer Steigung von $15 \cdot D$ ausgeführt. Es reicht, die Schraube nur an der oberen Hälfte des Masts anzubringen (oder entsprechend in der Mitte bei einem beidseitig gelagerten Riegel). Der Nachteil dieser Lösung ist ein erhöhter aerodynamischer Widerstandskoeffizient.

Die Störbleche in Version (b) führen laut [73] zu einer Reduktion der Anregung um etwa 70 %, erhöhen aber wieder den Luftwiderstand, was bei der Auslegung auf die statischen Windlasten zu berücksichtigen ist.

Die spiralförmig – zwischen 30 und 90° zueinander versetzt – angebrachten, halbkugelförmigen Höcker in Version (c) weisen eine Höhe von $0,2$ bis $0,5 \cdot D$ auf. Sie reduzieren die wirbel-

induzierten Schwingungen um bis zu 47 % und zugleich auch den Luftwiderstand um bis zu 25 %.

Eine weitere, in [73] beschriebene, Möglichkeit ist das Anbringen von Windbändern, welche die Bildung der Wirbelstraße stören. Die optimale Länge der Bänder muss experimentell bestimmt werden.

Quelle [69] beschreibt auch *louvered backplates*, das sind geschlitzte Bleche auf der windabgewandten Seite, die eine Wirbelstraßenbildung verhindern. In derselben Quelle wird der Wechsel von *monotubes* (Einfachprofilen) auf eine *truss configuration* (Fachwerk) vorgeschlagen, mit der Begründung, dass sich dadurch die Steifigkeit erhöht. Dies kann zweifelsfrei der Fall sein, es muss aber auch erwähnt werden, dass sich dadurch vor allem die aerodynamische Charakteristik des Systems ändert. Bei fachwerksartigen Konstruktionen ist die Ausbildung einer Wirbelstraße – in der Form, wie es bei einem Einfachprofil der Fall ist – nicht mehr zu erwarten.

Mechanische Maßnahmen zur Schwingungsverringerung

In [74] wurden eine Reihe verschiedener mechanischer Dämpfertypen hinsichtlich ihrer Dämpfungswirkung und ihrer Nachteile verglichen (Abb. 3-7).

TABLE 1: Damper Type Studied for Their Effectiveness in Increasing Vertical Damping of the Traffic Pole.

Type of Dampers	Variation	% Critical damping	% Increase	Disadvantage (as identified by prior research)
Tuned mass damper ¹	Traditional	8.71	32	Different natural frequency requires separate tuning
	Stockbridge	0.42	1.5	
	Batten	1.82	6.7	
Liquid damper ¹	Horizontal	0.38	1.4	Ineffective
	U- tube	0.40	1.5	
Friction damper ¹		6.49	23.9	Unattractive
Elastomeric pads ³	Pad at mast arm	0.28	1.9	Ineffective
	Pad at mast arm and base	0.43	2.9	
	Pad at base	0.39	2.6	
Arm Pole connection ¹	Belleville Spring	0.65	2.4	Ineffective
Strut ²		2.4-6.0	16-40	Requires luminary extension
Flat bar ²	Unconfined	1.1	7.3	Ineffective
	1.0 s period	0.30-1.1	2.0-7.3	
	1.2 s period	0.25-0.91	1.7-6.1	
	1.4 s period	0.30-0.37	2.0-2.5	
Strand ²	1.0 s period	0.54-1.3	3.6-8.7	Large size and noise
	1.2 s period	0.72-1.6	4.8-10.7	
	1.4 s period	0.97-1.4	6.5-9.3	
Alcoa Dumbbell ²		0.26	1.7	Ineffective
Shot-put ²	0 degree	0.20-0.29	1.3-1.9	Ineffective
	45 degree	0.20-0.28	1.3-1.9	
Hapco ²		0.31	2.1	Ineffective
Impact ²	Vertical Spring/mass impact dampers	6.79	25	High cost
	Horizontal Spring/mass impact dampers	0.78	2.9	Ineffective
	Spring/mass liquid impact dampers	6.12	22.5	High cost
	Tapered	4.01	14.7	Unattractive

1. Cook et al., (2001)

2. Hamilton et al., (2000)

Abb. 3-7. Tabelle mit Dämpfertypenvergleich aus [74]

Die höchste Wirksamkeit haben die klassischen Feder-Masse-Dämpfer (*traditional tuned mass damper, TMD*). Ihr Nachteil besteht darin, dass für jede schwingende Konstruktion – abhängig von ihrer Masse und Eigenfrequenz – ein separater Dämpfer (d. h. Masse und Federkonstante) ausgelegt und gefertigt werden muss.

3.2.3 Regulatorien in Deutschland

In Deutschland gelten für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauwerken seit zumindest Anfang der 90er-Jahre dieselben Normen und Vornormen wie in Österreich, d. h. die europäischen Normen in ihren nationalen Ausgaben. Zusätzlich gibt es in Deutschland die ZTV-VZB (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Verkehrszeichenbrücken), später der Teil 9 der ZTV-ING (ab 2003), welche weitere Richtlinien speziell für Verkehrszeichenbrücken enthalten. Im Folgenden soll kurz die Historie dieser Regelungen hinsichtlich der Riegel-Steher-Verbindung und der Schwingungsanfälligkeit bei Windbelastung dargestellt werden.

Regelung ZTV-VZB 1994

In der ZTV-VZB vom November 1994 [75] sind windinduzierte Schwingungen nicht explizit erwähnt, sondern lediglich Windlasten als veränderliche Einwirkungen. Dies könnte damit zusammenhängen, dass a) die Schilder auf Verkehrszeichenbrücken die Aerodynamik derart beeinflussen, dass sich bei überwiegend beschilterter Riegellänge keine schwingungsanregende Wirbelstraße auf der Rückseite der Anlage ausbilden kann (so wie bei den unbeschilderten österreichischen Mautanlagen, die eine vollkommen andere aerodynamische Charakteristik aufweisen) oder b) die ZTV-VZB 94 dies durch die referenzierten Normen und Vornormen als bereits berücksichtigt ansieht. Die ZTV-VZB 94 nimmt im Anhang 2 u. a. Bezug auf die ENV 1991-2-4 *Basis of Design and Actions on Structures - Wind Actions* [76] sowie die DIN-V ENV 1993 *Teil 1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Allgemeine Bemessungsregeln - Bemessungsregeln für den Hochbau* [77]. In beiden dieser referenzierten Normen wird empfohlen, dass schlanke bzw. nachgiebige Tragwerke auf böen- und wirbelinduzierte Schwingungen untersucht werden sollten.

Bezüglich der Schrauben schreibt die ZTV-VZB 94 vor, dass diese alle aus A4-70 oder feuerverzinkt sein müssen. Weiters wird für die Riegel-Stiel-Verbindung angegeben, dass die Schrauben dort für eine Bauwerkprüfung frei zugänglich und prüfbar sein müssen.

An verlangten Nachweisen heißt es in der ZTV-VZB 94 u. a.: *„Folgende Konstruktionsteile sind nachzuweisen: Die Tragkonstruktion einschließlich der Verbindungen und Verankerungen. Für die Bemessung und Nachweise der Tragkonstruktion gilt DIN 18800 Teile 1 bis 3 (Ausgabe November 1990).“* Die DIN 18800 Teil 1 [78] sagt, dass Ermüdungsnachweise geführt werden müssen, außer, es handelt sich bei den variablen Lasten um Schnee, Temperatur [...] und Windlasten ohne periodische Anregung. Auch sagt die Norm, dass periodische Einwirkungen üblicherweise einer dynamischen Analyse bedürfen, insbesondere, wenn die Gefahr von Resonanz besteht.

Regelung ZTV-ING (Teil 9) 2003

Die ZTV-ING Teil 9, Stand 01/2003 [79] definiert Verkehrszeichenbrücken als „*Tragkonstruktionen, an denen Schilder / Zeichengeber über dem Verkehrsraum befestigt werden*“. Sie gibt vor, dass *der Riegel vollflächig auf den Stehern (hier als „Stiel“ bezeichnet) aufliegen muss* (Abb. 3-8 links). Eine gelenkige Lagerung mit Kippblechen ist laut ZTV-ING 03 nicht vorgesehen. Als Schrauben für die Verbindung zwischen Riegel und Steher kommen laut ZTV-ING 03 *nur vollvorgespannte Schrauben der Güte 8.8 bzw. 10.9 in Frage*, jedoch keine austenitischen Schrauben wie z. B. A4-70 (rechtes Teilbild).

6.4 Verbindung zwischen Riegel und Stiel

(1) Die Schrauben der Rahmenecken sind so anzuordnen, dass sie bei den Bauwerksprüfungen zugänglich und prüfbar sind. Der Riegel muss vollflächig aufliegen.

(2) *Sofern die Schrauben nur außen liegen sollen, ist dies in der Leistungsbeschreibung vorzusehen.*

(8) Folgende Schrauben sind zu verwenden:

- am Fußpunkt feuerverzinkte Schrauben der Güte 5.6 nach DIN 267-3,
- in der Eckverbindung Riegel/Stiel und an Stößen im Riegel/Stiel voll vorgespannte Schrauben der Güte 8.8 bzw. 10.9 nach DIN 267-3,
- an den Befestigungselementen im Bereich des Riegels feuerverzinkte Schrauben der Güte 5.6 nach DIN 267-3,
- an den Rohrschellen und der Beschilderung sind auch Schrauben aus nicht rostendem Stahl A 5, Werkstoff-Nr. 1.4571 nach DIN EN ISO 3506 möglich.

Abb. 3-8. Vorgaben der ZTV-ING Teil 9, Stand 01/2003 [79]. Links: Auflage Riegel-Steher. Rechts: Schrauben.

Auch die ZTV-ING 03 fordert den Nachweis für die Tragkonstruktion einschließlich der Verbindungen und Verankerungen gemäß DIN 18800-1 bis -3 [78] und Änderung DIN 18800-1/A1:1996-02 [80]. Laut dieser ist ein Betriebsfestigkeitsnachweis zu führen, sofern es sich um ein bei Windbeanspruchung schwingungsanfälliges Bauwerk handelt.

Ankündigung von bevorstehenden Änderungen der ZTV-ING (Teil 9) im Jahr 2007

Die quartalsweise erscheinenden DVS-News [81] weisen in der 2. Ausgabe 2007 auf bevorstehende Änderungen der ZTV-ING 03 hin (die dann in der Fassung vom April 2010 erschienen sind [82]) und dass diese ab sofort als Stand der Technik anzusehen sind (Abb. 3-9).

Hinweise zu den ZTV-ING, Teil 9, Abschnitt 1 – Verkehrszeichenbrücken (VZB)

Bevorstehende Änderungen, die dem Stand der Technik entsprechen und daher bereits bei der Ausschreibung von VZB zu berücksichtigen sind

Vorbemerkung

Die ZTV-ING wurde 2003 eingeführt und löste mit dem Teil 9 Abschnitt 1 die bis dahin gültige ZTV-VZB ab.

Auf Grund der allgemeinen Entwicklung wird die ZTV-ING Teil 9 Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken zur Zeit von einer Arbeitsgruppe überarbeitet. Da die abschließende Neubearbeitung nicht kurzfristig abgeschlossen werden kann, werden nachfolgend entsprechend dem Stand der Technik vorab einige bevorstehende Änderungen zur Berücksichtigung in den Ausschreibungen bekannt gegeben.

Änderungen der ZTV-ING Teil 9 Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken

Zu 4 Werkstoffe:

Für die Tragkonstruktion aus Stahl muss die Stahlgüte unter Beachtung der Vorgaben der DIN 18800-7 entsprechend den auftretenden Beanspruchungen und Einsatzbedingungen gewählt werden. Als Mindestanforderung gilt für den Werkstoff S235 die Stahlgüte JRG2 (DIN EN 10025, Ausgabe 3-1994) oder JR (DIN EN 10025, Ausgabe 4-2005) Werkstoff Nr. 1.0038 und für den Werkstoff S355 die Stahlgüte J2G3 (DIN EN 10025, Ausgabe 4-2005) Werkstoff Nr. 1.0577.

Für Rohre sind die entsprechenden Werkstoffe nach DIN EN 10210 und 10219 zu verwenden. Bei der Auswahl der Stahlgüte ist darüber hinaus die Richtlinie DASt 009 (2005) zu beachten. Für schmelztauchverzinkte Konstruktionen muss die Zusammensetzung des Zinkbades vorgelegt werden. Folgende Grenzwerte dürfen nicht überschritten werden:

Zinn (Sn) $\leq 0,3\%$; Blei (Pb) $\leq 0,9\%$;
Wismut (Bi) $\leq 0,1\%$.

Für die Tragkonstruktion aus Aluminium sind ausschließlich folgende Werkstoffe nach DIN EN 573-3 zu wählen:

EN AW – 6082 T6 (EN AW-AISi1MgMn); EN AW – 5083 H111 (EN AW-ALMg4,5Mn0,7), EN AW – 5086 H24 (EN AW-ALMg4)

EN AW – 5086 H24 (EN AW-ALMg4)
Für Anbauteile wie Geländer und Leitern darf auch EN AW – 6060 T66 (EN AW-ALMgSi) verwendet werden. Bei Tragkonstruktionen aus Aluminium ist als Werkstoff für die Fußplatten der Stiele nur EN AW – 5083 H111 nach DIN EN 573-3 zugelassen.

Schweißnahtgestaltung

Schweißnähte müssen grundsätzlich der Bewertungsgruppe B für Stahl nach DIN EN ISO 5817 bzw. für Aluminium DIN EN 30042 entsprechen. Wenn Schweißnähte technisch nicht in Bewertungsgruppe B ausführbar sind, ist durch Einordnung in die Bewertungsgruppe C die Beanspruchung auf 75% der zulässigen Werte zu begrenzen. Die Einordnung bedarf der Zustimmung des AG und muss in den Ausführungsplänen gekennzeichnet sein. Generell sind feuerverzinkte Schraubverbindungen der Güte 5.6 nach DIN 267-3 zu verwenden.

In den biegesteifen Eckverbindungen Riegel/Stiel und an Stößen im Riegel bzw. Stiel sind jedoch voll vorgespannte Schraubverbindungen der Güte 10.9 nach DIN 267-3 zu verwenden. An Rohrschellen und Befestigungselementen sind auch Schraubverbindungen aus nicht rostendem Stahl A2 oder A4 nach DIN EN ISO 3506 möglich.

Zu 6 Konstruktion und Ausstattung:

Kehlnähte von angeschweißten Bauteilen (z. B. Schotte) sind rundum zu schweißen.

Einseitige Kehlnähte sind nicht zulässig. Bei einseitiger Zugänglichkeit sind HY- (maximal t/5 ungeschweißt) bzw. HV-Nähte auszuführen.

Eingeschweißte Schotte einschließlich Montageschotte sind nach Betriebsfestigkeitsgrundsätzen unter Vermeidung von Spannungsspitzen zu konstruieren.

Zu 6.4 Verbindung zwischen Riegel und Stiel:

Bei dem biegesteifen Riegel-Stiel-Anschluss muss der Riegel vollflächig aufliegen. Zum Erreichen des vollflächigen Aufliegens sind verbleibende Unebenheiten, die 2 mm zwischen den Abschlussplatten nicht überschreiten dürfen, mit geeignetem Spachtelmetall (z.B. mit Edelstahl gefülltes Material) auszufüllen.

Zu 6.5 Befestigungselemente:

Alle Schrauben sind gegen selbstständiges Lösen (z.B. durch Konterung, Sicherungsmutter (DIN 980, 982, 985, 7967) oder durch Flüssigklebstoffe usw.) lösbar zu sichern.

Weitere Hinweise

Weitere Hinweise zu bevorstehenden Änderungen sind in der Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S1056 Stand 07.11.2006 enthalten.

Mit der Änderung des Abschnittes 1 - Verkehrszeichenbrücken (VZB) werden zur Zeit auch die zugehörigen Richtzeichnungen in Bezug auf beanspruchungsgerechte Gestaltung überarbeitet.

Ansprechpartner:

Herr Scherer
Tel.: 06 81/5 88 23-34
E-Mail: scherer@slv-saar.de

Abb. 3-9. Hinweis auf bevorstehende Änderungen der ZTV-ING – Teil 9 in den GSI-News, Ausgabe 2/2007 [81]

Hier wird die Verbindung Riegel-Stiel als biegesteife Ausführung mit vollflächiger Auflage des Riegels auf dem Stiel definiert und die Schrauben zwischen Riegel und Stiel als voll vorgespannte Schrauben der Güte 10.9.

Anweisung des Bundesministeriums für Verkehr im Jänner 2009

In einem Schreiben [83] (Anhang B) des Leiters der Abteilung Straßenbau und Straßenverkehr an die Obersten Straßenbaubehörden der (deutschen) Länder werden Probleme an Verkehrszeichenbrücken mit elastisch ausgeführten Riegel-Stiel-Verbindungen bei Verkehrszeichenbrücken erörtert.

Die in Bezug auf die vorliegende Arbeit wichtigsten Passagen daraus werden im Folgenden zitiert (Hervorhebungen vom Autor):

Bei Bauwerksprüfungen wurden bundesweit Auffälligkeiten bei Verkehrszeichenbrücken festgestellt, die als Rahmenkonstruktion mit Gelenkausbildung bzw. elastischer Einspannung zwischen Riegel und Stiel ausgeführt wurden. Die Verbindung zwischen Riegel und Stiel erfolgt dabei über eine Auflagerleiste mit oftmals nur 2 oder 4 Schrauben.

Bei diesen Verbindungen werden die Schrauben zusätzlich zu den planmäßigen Beanspruchungen aus Zug und Abscheren auch unplanmäßig auf Biegung (Schaftbiegung) beansprucht. Für viele dieser Bauwerke wurde lediglich der Nachweis der Standsicherheit für eine biegesteife Eckverbindung geführt. Ein Nachweis der Betriebsfestigkeit für eine elastische Einspannung unter Einwirkung dynamischer Lasten wurde dabei im Regelfall nicht geführt. Um die Verkehrssicherheit der betroffenen Verkehrszeichenbrücken sicherzustellen werden folgende Untersuchungen und Sofortmaßnahmen empfohlen:

- Erfassung aller Verkehrszeichenbrücken mit gelenkiger Riegel-Stiel-Verbindung im Hinblick auf die vorhandene Schraubenanordnung und die Schraubenabstände (Konstruktionsmerkmale).
- Untersuchung der betroffenen Verkehrszeichenbrücken auf fehlende Ermüdungssicherheit der Riegel-Stiel-Verbindung.
- Ermittlung der Lebensdauer der Schraubenverbindungen.
- Sonderprüfungen nach DIN 1076 aller betroffenen Verkehrszeichenbrücken.

Bei der Errichtung neuer Verkehrszeichenbrücken ist im Vorgriff auf die überarbeitete ZTV-ING³ eine biegesteife Riegel-Stiel-Verbindung entsprechend den Richtzeichnungen auszuführen.

Bei den Verkehrszeichenbrücken ohne ausreichende rechnerische Dauerhaftigkeit der Schraubenverbindung sind bauliche Maßnahmen erforderlich. Die Auswahl der durchzuführenden Maßnahme ist dabei auf Grundlage einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchzuführen. In Übereinstimmung mit den Ländern (KoA-Erhaltung sowie die B/L-Dienstbesprechung Brücken- und Ingenieurbau vom 11./12.11.2008) wird die Vorgehensweise entsprechend der rheinland-pfälzischen Konzeption empfohlen.

1. Austausch der Schrauben vor Ablauf der rechnerischen Nutzungszeit:

Diese Lösung ist nur zu empfehlen, wenn die Schraubenverbindungen eine relativ hohe Dauerhaftigkeit aufweisen. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist zu berücksichtigen, dass zusätzliche Kosten für eine Verkehrssicherung und eine temporäre Sicherung der Riegel-Stiel-Verbindung anfallen. Sofern während der geplanten Nutzungsdauer der Verkehrszeichenbrücken ein mehrmaliger Schraubenaustausch erforderlich ist, wird diese Maßnahme unwirtschaftlich.

³ Hier ist die ZTV-ING vom April 2010 [80] gemeint (Anm.)

2. Sofortinstandsetzung und Sicherung der Riegel-Stiel-Verbindung durch eine Bügelkonstruktion:

Eine dauerhafte Instandsetzung der Riegel-Stiel-Verbindung wird durch die in der Anlage 1 dargestellte Bügelkonstruktion ermöglicht. Ziel dieser Konstruktion ist, die Riegel-Stiel-Verbindung so zu sichern, dass ein Versagen der Schrauben nicht zum Einsturz der VZB führt. Dazu soll ein bügelförmig über den Riegel geführtes Blech mit Hilfe von Gewindestäben gegen zwei kraftschlüssig mit den Stielen verbundene Lagerkonstruktionen verspannt werden. Die Konstruktion gewährleistet damit die Übertragung der Riegel-Torsionsmomente in die Stützen. Die aus der Windbelastung resultierenden Querkräfte können in diesem Zustand über das sich in der Riegel-/Stielachse befindliche Zentrierrohr bzw. über den Reibschluss zwischen Zentrierleiste und Riegel abgetragen werden.

Die für die Windlasten infolge der Schraubenanordnung vorhandene elastische Einspannung der Riegel in die Stützen wird i. d. R. in den Standsicherheitsnachweisen nicht berücksichtigt. Im Falle des Schraubenausfalls würde sich hier auch eine gelenkige Lagerung einstellen, die im statischen Sinne jedoch stabil ist.

Bei der Bemessung der Konstruktion wurde die volle zulässige Schildbelegung gemäß der ZTV-VZB (Ausgabe 1994) sowie der ZTV-ING Teil 9 Abschnitt 1 (Stand 01/2003) berücksichtigt. Bei Beachtung der nachfolgenden Anwendungsgrenzen wird hierdurch eine ausreichende Dauerhaftigkeit sichergestellt, so dass die Verkehrssicherheit für die ursprünglich eingeplante Lebensdauer (40 Jahre) wieder sichergestellt ist.

[...]

Anwendungsgrenzen:

Die Instandsetzungs konstruktion für Verkehrszeichenbrücken mit einer Schraubenanordnung nach System I darf nur unter Beachtung und verantwortlicher Prüfung der folgenden Anwendungsgrenzen eingesetzt werden:

- Stützweite des Riegels $L_{st} \leq 20,00$ m.
- Riegelbreite $B \geq 0,50$ m.
- Der bestehende VZB-Stiel muss eine Mindestblechdicke von 8 mm und eine Stahlgüte von mindestens S 235 aufweisen.
- ...

Regelung ZTV-ING (Teil 9) 2010

Im April 2010 erschien die überarbeitete ZTV-ING (Teil 9) [82]. Folgend aufgeführt sind für diese Arbeit relevante Passagen in wortwörtlicher Zitierung mit Hervorhebungen durch den Autor:

Die Riegel-Stiel-Verbindung ist biegesteif auszubilden.

In den biegesteifen Eckverbindungen Riegel / Stiel und an Stößen im Riegel / Stiel sind jedoch voll vorgespannte, feuerverzinkte Schraubverbindungen der Güte 10.9 nach DIN EN ISO 898 auszuführen.

Verbindung zwischen Riegel und Stiel:

(1) Es sind mindestens sechs Schrauben M16 anzuordnen.

(3) Der Riegel-Stiel-Anschluss ist so auszubilden, dass der Riegel vollflächig aufliegt. Von einer vollflächigen Verbindung kann ausgegangen werden, wenn ein Spaltmaß von 1 mm an keiner Stelle überschritten wird und das Spaltmaß über wenigstens 2/3 der Grundfläche kleiner als 0,5 mm ist.

Folgende Konstruktionsteile sind nachzuweisen:

- die Tragkonstruktion einschließlich der Verbindungen und Verankerungen

Nachweis der Betriebsfestigkeit:

(1) Für Ankerschrauben (SL-Verbindungen), Riegel-Stiel-Verbindungen (SLV-Verbindungen) und Befestigungselemente ist der Nachweis der Betriebsfestigkeit zu führen.

Regelung ZTV-ING (Teil 9) 2012

Die zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts geltende ZTV-ING (Teil 9) ist jene vom Dezember 2012 [84]. Wiederum sind im Folgenden relevante Zitate daraus angeführt, verglichen mit der vorhergehenden ZTV-ING gibt es nur kleine Änderungen:

Die Riegel-Stiel-Verbindung ist biegesteif auszubilden.

In den biegesteifen Eckverbindungen Riegel / Stiel und an Stößen im Riegel / Stiel sind jedoch voll vorgespannte, feuerverzinkte Schraubverbindungen der Güte 10.9 nach DIN EN ISO 898 auszuführen.

Verbindung zwischen Riegel und Stiel:

(1) Es sind mindestens sechs Schrauben M16 anzuordnen.

(3) Der Riegel-Stiel-Anschluss ist so auszubilden, dass der Riegel vollflächig aufliegt. Von einer vollflächigen Verbindung kann ausgegangen werden, wenn ein Spaltmaß von 1 mm an keiner Stelle überschritten wird und das Spaltmaß über wenigstens 2/3 der Grundfläche kleiner als 0,5 mm ist.

Folgende Konstruktionsteile sind nachzuweisen:

- die Tragkonstruktion einschließlich der Verbindungen und Verankerungen

Für die Bemessung und die Nachweise der Tragkonstruktion aus Stahl und der Befestigungselemente gilt DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-5 und DIN EN 1993-1-10 in Verbindung mit DIN EN 1090-2.

Nachweis der Betriebsfestigkeit:

(1) Für Ankerschrauben (SL-Verbindungen), Riegel-Stiel-Verbindungen (SLV-Verbindungen) und Befestigungselemente ist der Nachweis der Betriebsfestigkeit zu führen.

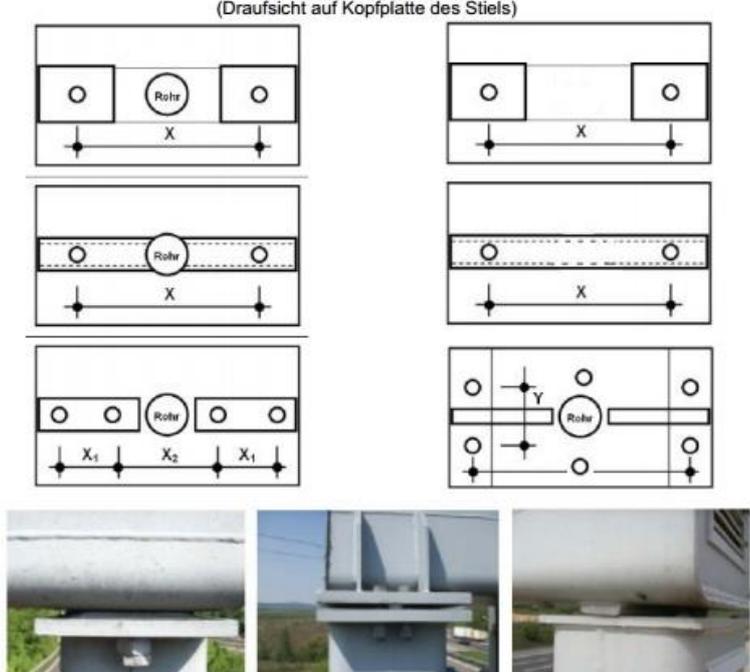
Aufgrund der Schraubenermüdungsbrüche bei gelenkigen Riegel-Stiel-Verbindungen in Deutschland wurden auch die Prüfrichtlinien überarbeitet. Abb. 3-10 zeigt einen Ausschnitt aus einer Prüfungsrichtlinie des Landes Sachsen-Anhalt [70].

Gelenkige Riegel-Stiel-Verbindungen bei Verkehrszeichenbrücken

Gemäß RIZ-ING VZB 10 ist die Verbindung zwischen Riegel und Stiel als biegesteife Rahmenecke auszuführen. Dabei liegen die Bauteile vollflächig auf (kein Spalt!) und sind kraftschlüssig mit vorgespannten Schrauben verbunden.

In der Vergangenheit wurden jedoch abweichend davon Konstruktionen mit gelenkigen Verbindungen errichtet. Bei einigen dieser Bauwerke kam es zu Ermüdungsbrüchen von Schrauben, wodurch die Standsicherheit des gesamten Bauwerks nicht mehr gegeben war.

Beispiele für gelenkige Riegel-Stiel-Verbindungen
(Draufsicht auf Kopfplatte des Stiels)



Liegt im Rahmen einer Bauwerksprüfung eine gelenkige Riegel-Stiel-Verbindung vor, dann muss Folgendes beachtet werden:

- Ist der Betriebsfestigkeitsnachweis für die Verbindung vorhanden?
 - Ja: Sind die Annahmen bzw. Forderungen des Nachweises erfüllt? (Schadensbewertung mindestens D=1)
 - Nein: Schadensbewertung mindestens S=2 und D=3
- Sind die Schrauben fest / locker / gebrochen?
- Gibt es Protokolle über regelmäßigen Schraubentausch?
- Ist der Spalt zwischen Riegel und Stiel gleichmäßig breit?
- Gibt es Änderungen an den Schildabmessungen?

Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt Prüfungshinweise	Blatt 14 Riegel-Stiel-Verbindung 2013-01
--	---

Abb. 3-10. Prüfhinweis für gelenkige Riegel-Stiel-Verbindungen der LSBB Sachsen-Anhalt [85]

4 Diskussion der Stellungnahmen des Herstellers sowie vom Hersteller beauftragter Ziviltechniker

4.1 Stellungnahme der Fa. Forster vom 14. Aug. 2008 bez. Schraubenbruch bei A01_044,300_0_SKE [11]

Es wird im Folgenden zu fünf Aussagen in der Stellungnahme [11] eingegangen:

1. „Die Statik entsprach den gültigen Vorschriften und dem technischen Standard der Berechnung von Schilderbrücken in Österreich und Deutschland zur Zeit der Erstellung, mit geringfügigen projektspezifischen Anpassungen.“

Sofern mit „*technischem Standard*“ der „Stand der Technik“ und mit „*gültigen Vorschriften*“ „alle zum Zeitpunkt der Planung publizierten anwendbaren Normen, Vornormen und Richtlinien“ gemeint sind, kann sich der Autor dieses Berichts dieser Einschätzung nicht anschließen. Die Gründe dafür sind im Folgenden ausgeführt.

Der Zeitpunkt der Errichtung der Station A01_044,300_0_SKE war im März 2005, wie das Typenschild der Anlage (Kontrollberichte [19] und [20]) zeigt. In Abb. 4-1 ist auch das leichter lesbare Typenschild der Nachbarstation bei Kilometer 44,315 abgebildet. Die zugehörige Technische Zeichnung trägt den 09.02.2005 als Bearbeitungsdatum (Abb. 4-2 [6]).



Abb. 4-1. Typenschilder an den Stationen A01_044,300_0_SKE (links) und A01_044,315_0_SKE (rechts)

Straßenhalter:		Bauwerber / Vertragspartner:		Planersteller: FORSTER FF <small>Verkehrs- und Werbetechnik GmbH A-3340 Waidhofen/Ybbs</small>	
[Projekt] LKW-Maut Austria			[PLZ]		
Bezeichnung und Abschnitt A01 West Autobahn AB km 044,300			Planerstellung		
				Datum	Name
			Bearbeitet	2005/02/09	R. Pitz
			Geprüft		
Plantitel Gantry Typ D1-Sonder (FF-Typ 20)			Genehmigt		
Maßstab	Plannummer	Projekt - Nr.			
1:50 (A0)	A01_044,300_0_SKE_V0.1				

Abb. 4-2. Schriftfeld der Technischen Zeichnung für die Station A01_044,300_0_SKE

Etwa ein Jahr vor der Zeichnungserstellung – am 01.04.2004 – wurde der Entwurf [86] für die am 01.11.2005 herausgegebene EN-1991-1-4: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten* [87] veröffentlicht. Bereits 1997 veröffentlicht wurde die ÖNORM ENV 1991-2-4: *Eurocode 1 - Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2-4: Einwirkungen auf Tragwerke - Windlasten* [88]. In diesen Vornormen bzw. Entwürfen wird auf wirbelinduzierte Schwingungen wie *vortex shedding* und *galloping* bei schlanken Strukturen sehr ausführlich eingegangen. Der *Stand der Technik* zur Zeit der konstruktiven Planung der Mautstationen (jene in Kapitel 2 tragen in den Technischen Zeichnungen die Jahre 2002 bis 2005 als Erstelldatum) wird durch diese Vornormen widerspiegelt und nicht durch die damals noch gültigen älteren Normen. Normen und Vornormen sind hinsichtlich der *anerkannten Regeln der Technik* gleich rechtswirksam, wie zwei Stellungnahmen von DKE (Abb. 4-3) und ZVEI (Abb. 4-4), zur Frage, ob eine zur Zeit der Planung bestehende Vornorm zu berücksichtigen sei oder nicht, zeigen [89].

Einleitung

Zum 1.11.2002 wurden gleichzeitig alle veralteten Normen, Vornormen und die bisher veröffentlichten Entwürfe der Blitzschutz-Reihe VDE 0185 zurückgezogen. Es wurde eine neue Vornormen-Reihe VDE V 0185 mit den Teilen 1-4 veröffentlicht. **Diese Reihe wird eine Gültigkeit bis mindestens Mitte 2006 haben**, da erst zu diesem Zeitpunkt die überarbeiteten internationalen Blitzschutznormen zur Verfügung stehen sollen.

In den folgenden Stellungnahmen der DKE und des ZVEI wird die rechtliche Gültigkeit der Vornormen behandelt.

Stellungnahme der DKE

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE
Deutsches Mitglied in IEC und CENELEC

Blitzschutz - Die neuen Vornormen DIN V VDE V 0185
Stellungnahme der DKE zur Rechtslage bei Werkverträgen

Auf Grund der Neustrukturierung der internationalen Blitzschutznormen hat das zuständige nationale Normungskomitee beschlossen, für die nationalen Marktbedürfnisse - bis zur erneuten Verfügbarkeit von internationalen und europäischen Normen - eine vollständig überarbeitete nationale Vornormenreihe zu veröffentlichen, die einen wesentlich verbesserten und aktualisierten technischen Standard repräsentiert. Aus diesem Grund wurden bisher veröffentlichte Normen, Vornormen und Normentwürfe gesamthaft zurückgezogen und durch eine Reihe von Vornormen ersetzt.

Im Folgenden sollen ohne den Anspruch auf Vollständigkeit die rechtlichen Auswirkungen solcher grundlegender Änderungen auf die Vertragsbeziehung Werkunternehmer/Auftraggeber skizziert werden.

Grundsätzlich haftet ein Werkunternehmer dafür, dass seine Werkleistung frei von Mängeln ist. Entscheidender Ansatzpunkt für die Mangelfreiheit einer Werkleistung ist die Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik. Einschlägige VDE- bzw. DIN-Normen werden dabei herangezogen, um das Tatbestandsmerkmal der "anerkannten Regeln der Technik" mit Leben zu füllen. Werden die einschlägigen Normen eingehalten, gilt die Vermutung, dass die Werkleistung mangelfrei ist. Die praktische Bedeutung eines solchen Anscheinsbeweises liegt darin, dass die Erfolgsaussichten der Klage eines Auftraggebers, der eine mangelhafte Leistung durch den Werkunternehmer (beispielsweise bei der Errichtung einer Blitzschutzanlage) geltend macht, grundsätzlich nicht hoch sind, wenn der Werkunternehmer darstellen kann, dass er die einschlägigen technischen Normen eingehalten hat. Hinsichtlich dieser Wirkung stehen sich Normen und Vornormen gleich.

Die Vermutungswirkung technischer Normen wird allerdings dadurch beseitigt, dass die Normen entweder zurückgezogen werden oder bewiesen wird, dass die konkreten Normen nicht mehr den Stand der Technik widerspiegeln. Normen, wie die VDE- oder die DIN-Normen, können nicht statisch den Stand der anerkannten Regeln der Technik festlegen, da sich die technischen Voraussetzungen und Möglichkeiten fortlaufend ändern. Werden also Normen zurückgezogen und durch die Veröffentlichung neuer Normen - oder Vornormen - ersetzt, sind es in erster Linie die neuen Bestimmungen, die dann dem Stand der Technik entsprechen.

Für die Frage der Mangelhaftigkeit der Werksleistung ist einzig der Stand der anerkannten Regeln der Technik zum Zeitpunkt der Abnahme entscheidend. Werke, die vorher nach den alten Normen erstellt und bereits abgenommen sind, werden daher nicht dadurch mangelhaft, dass durch die Normenaktualisierung ein "höherer technischer Standard" verlangt wird. Bei dem Abschluss neuer Verträge betreffend Blitzschutzanlagen wird sich der Unternehmer zukünftig jedoch zumindest an den Vornormen der Reihe VDE V 0185 orientieren müssen, um sicherzustellen, dass die von ihm erbrachten Leistungen mangelfrei sind. Dies gilt zumindest so lange, bis ggfs. durch neue Feststellungen an die "allgemein anerkannten Regeln der Technik" höhere Anforderungen gestellt werden.

Frankfurt, 09.12.2002

Dr. Beate Mand
VDE-Abteilung Recht und Personal

Abb. 4-3. Stellungnahme der DKE zur Anwendungen von Vornormen [89]

Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Abteilung Recht und öffentliche Aufträge

Die neuen Blitzschutz-Vornormen VDE V 0185
Auswirkungen auf die Vertragsbeziehungen

Im November 2002 werden nach Veröffentlichung der neuen Blitzschutz-Vornormen VDE V 0185 gleichzeitig die veralteten Blitzschutz-Normen zurückgezogen. Im Folgenden sollen ohne den Anspruch auf Vollständigkeit die rechtlichen Auswirkungen grob skizziert werden, die diese Entwicklung auf die Vertragsbeziehungen zwischen Unternehmer und Besteller haben kann.

Mangels besonderer Abrede vereinbaren der Unternehmer und der Besteller eines Werkes regelmäßig, dass das Werk dem allgemeinen Stand der Technik entsprechen muss. Weicht das Werk von diesem allgemeinen Stand der Technik negativ ab, ist es mangelhaft. Dies kann zur Folge haben, dass der Unternehmer nach den Regeln der Sachmängelhaftung in Anspruch genommen wird. Die Sachmängelhaftung wird jedoch nur ausgelöst, wenn das Werk bereits zum Zeitpunkt der Abnahme mit einem Mangel behaftet war! Nachträglich eintretende Umstände - wie etwa eine Weiterentwicklung des Standes der Technik - machen das bereits abgenommene mangelfreie Werk nicht nachträglich mangelhaft!

Auch wenn technische Normen - wie etwa die Blitzschutz-Normen - den Stand der Technik nicht verbindlich festsetzen, so spiegeln sie doch in aller Regel den Stand der Technik wider. Wird ein Werk daher unter Einhaltung solcher Normen erstellt, gilt die - allerdings widerlegbare - Vermutung, dass das Werk dem Stand der Technik entspricht und somit mangelfrei ist. Zwar reicht es nicht aus, dass der Unternehmer sein Werk normgemäß erstellt hat; denn er ist nicht der Norm, sondern dem Stand der Technik verpflichtet. Es wird jedoch vermutet, dass die normgemäße Erstellung gleichzeitig dem Stand der Technik entspricht und der Unternehmer insoweit seine Vertragspflichten erfüllt hat.

Diese Vermutungswirkung technischer Normen wird allerdings dadurch beseitigt, dass die Normen entweder zurückgezogen werden oder dass bewiesen wird, dass die konkreten Normen nicht mehr den Stand der Technik widerspiegeln. Spätestens mit der Veröffentlichung der neuen Blitzschutz-Vornormen und dem Zurückziehen der alten Normen im November 2002 kann sich ein Unternehmer nicht mehr darauf berufen, bei Einhaltung der alten Normen sein Werk nach dem Stand der Technik zu erstellen. Da es für die Beurteilung der Mangelhaftigkeit eines Werkes jedoch auf den Zeitpunkt der Abnahme ankommt, werden Werke, die vorher nach den alten Normen erstellt und bereits abgenommen worden sind, dadurch nicht nachträglich mangelhaft. Die Normenaktualisierung hat auf Altwerke grds. keinen Einfluss.

Etwas anderes gilt nur, wenn der Beweis geführt werden kann, dass das Werk bereits zum Zeitpunkt der Abnahme trotz der Normgemäßheit nicht mehr dem Stand der Technik entsprach. Angesichts der Veraltung der zurückgezogenen Blitzschutz-Normen könnten Besteller einen solchen Beweis bereits dann erfolgreich führen, wenn der Vertragsschluss unmittelbar vor der Normaktualisierung erfolgt ist. Aber hier kommt es entscheidend auf die Umstände des Einzelfalls an. Wie überhaupt die konkrete Gestaltung des Vertrages dazu führen kann, dass die neuen Vornormen auf schon bestehende Werkverträge einwirken. Man denke nur an einen Wartungsvertrag, der dazu verpflichtet, eine Anlage dauernd auf dem Stand der Technik zu halten...

Bei dem Abschluss neuer Verträge wird sich der Unternehmer zukünftig an den Vornormen der Reihe VDE V 0185 orientieren müssen, um für sich die Vermutung der Erstellung nach dem Stand der Technik in Anspruch zu nehmen. Unwesentlich ist, dass es sich hier "nur" um Vornormen handelt. Denn die VDE V 0185 wurden von Wissenschaftlern und Praktikern bereits als Dokumentation des Standes der Technik anerkannt und entsprechen auch den auf internationalem Niveau ausgehandelten und weitgehend festgelegten IEC-Papieren.

gez. RA Till Barleben
ZVEI-Abteilung Recht und öffentliche Aufträge

Abb. 4-4. Stellungnahme des ZVEI zur Anwendungen von Vornormen [89]

Die Anwendung gültiger Normen garantiert auch nicht, dass der Stand der Technik eingehalten wird. Dies zeigt folgender Absatz aus einem BGH-Urteil in Abb. 4-5 [90]. Die Rechtsprechungen in Österreich und Deutschland dürften sich hier nicht wesentlich unterscheiden.

Normen entsprechen nicht automatisch dem Stand der Technik. So sagt ein BGH Urteil vom Mai 1998: „DIN-Normen können die anerkannten Regeln der Technik wiedergeben oder hinter ihnen zurückbleiben“. Das Bundesverwaltungsgericht BVerwG stellt fest: „Normen haben nicht schon kraft ihrer Existenz die Qualität von anerkannten Regeln der Technik und begründen keinen Ausschließlichkeitsanspruch.“ Jeder der Normen anwendet ist gut beraten die inhaltliche Richtigkeit für seinen Fall zu prüfen.

Abb. 4-5. Normen und Stand der Technik [90]

Die von der Fa. Forster referenzierte Norm zur Dimensionierung der Stahlbauten war laut [11] die ÖNORM B 4300-1 (Ausgabe 1994) [91]. Diese führt auf Seite 4 „Windlasten“ unter den *Veränderlichen Einwirkungen* auf und sagt: „Die charakteristischen Werte der Einwirkungsgrößen sind den einschlägigen ÖNORMEN zu entnehmen.“ Eine dieser einschlägigen ÖNORMEN war ab 1994 die ÖNORM B 4014-2 *Belastungsannahmen im Bauwesen - Dynamische Windwirkungen - (schwingungsanfällige Bauwerke)* [92]. Diese – und auch deren Nachfolgenorm ÖNORM B 4014-2 (Ausgabe vom 01.05.2003) [93] – beschreibt Wirbelresonanzschwingungen für kreisförmige und annähernd kreisförmige Querschnitte. *Galloping* wird im Anhang C.1. behandelt. Anhang A der Norm gibt eine Übersicht über schwingungsanfällige Bauwerke und Bauteile. So können laut [92] und [93] erfahrungsgemäß böenerregte Schwingungen bei einem Höhen- zu Breitenverhältnis von größer 20 auftreten, Wirbelresonanzschwingungen bei einem Höhen- zu Breitenverhältnis von größer 10.

Die ÖNORM B 4300-1 [91], die laut Anlage 1 des Schreibens [11] für die Statikberechnung im Jahr 2002 angewendet wurde, wurde 2005 ersetzt durch die EN 1993-1-1 [94]. Stand der Technik waren jedoch bereits ab 1992 die diesbezüglichen Vornormen ENV 1993-1-1 [95] und [96]. In [94] steht (übersetzt): „Es ist vorgesehen, EN 1993 gemeinsam mit den Eurocodes EN 1990, *Grundlagen der Tragwerksplanung*, EN 1991, *Einwirkungen auf Tragwerke* sowie EN 1992 bis 1999, soweit hierin auf Tragwerke aus Stahl oder Bauteile aus Stahl Bezug genommen wird, anzuwenden.“ Weiters sagt [94] auf Seite 29 (übersetzt): „Normalerweise sind für Hochbauten keine Ermüdungsnachweise erforderlich, außer für Bauteile mit Beanspruchungen aus [...] c) windinduzierten Schwingungen.“ Die ÖNORM ENV 1993-1-1 [96] aus dem Jahr 1996 sagt auf Seite 52: „Außergewöhnlich nachgiebige Tragwerke [...] sowie außergewöhnlich nachgiebige Bauteile [...] müssen für dynamische Windlasten sowohl quer als auch längs der Windrichtung untersucht werden. Solche Tragwerke sollten untersucht werden auf böenerregte Schwingungen und wirbelresonanzerregte Schwingungen.“

Demnach ist auch die folgende Aussage in der Stellungnahme [11]

2. *„Die Brücke ist so aufgestellt, dass der Windangriff ungewöhnlich hoch ist, da sie sich in einer Längstallage ohne bedeutende Windhindernisse befindet. Hier sind dynamische Effekte wie winderregte Schwingungen eher möglich als in durchschnittlichen Lagen. Diese Effekte sind im Regelwerk nicht berücksichtigt, wo nur quasistatische Ersatzlasten angenommen werden.“*

nicht nachvollziehbar, da die ÖNORM B 4014-2 (Ausgabe 1994), die ENV 1993-1-1 (Ausgaben 1992 und 1996) und die ENV 1991-2-4 (engl. Ausgabe 1995, deutsche 1996 und österr. 1997) deutlich auf windinduzierte Schwingungen hinweisen – bzw. deren Berechnung behandeln – und ab deren Erscheinen den Stand der Technik widerspiegeln.

Neben der ÖNORM B 4300-1 [91] nimmt die Anlage 1 des Schreibens [11] auch Bezug auf die ZTV-VZB [75] (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Verkehrszeichenbrücken, Fassung vom November 1994). Abgesehen davon, dass eine vollbeschriebene Verkehrszeichenbrücke eine vollkommen andere Aerodynamik als ein gelenkig gelagerter Querriegel der hier behandelten Mautstationen aufweist, nimmt die ZTV-VZB 94, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, im Anhang 2 Bezug auf die ENV 1991-2-4 *Basis of Design and Actions on Structures - Wind Actions* [76] aus dem Jahr 1994 sowie die DIN-V ENV 1993-1-1 *Teil 1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Allgemeine Bemessungsregeln - Bemessungsregeln für den Hochbau* [77] aus dem Jahr 1993. In beiden dieser referenzierten Normen wird empfohlen, dass schlanke bzw. nachgiebige Tragwerke auf böen- und wirbelinduzierte Schwingungen untersucht werden sollten. An verlangten Nachweisen heißt es in der ZTV-VZB 94 u. a.: „*Folgende Konstruktionsteile sind nachzuweisen: Die Tragkonstruktion einschließlich der Verbindungen und Verankerungen. Für die Bemessung und Nachweise der Tragkonstruktion gilt DIN 18800 Teile 1 bis 3 (Ausgabe November 1990).*“ Die DIN 18800 Teil 1 [78] sagt, dass Ermüdungsnachweise geführt werden müssen, wenn es sich bei den variablen Lasten um Windlasten mit periodischer Anregung handelt. Auch sagt die Norm, dass periodische Einwirkungen üblicherweise einer dynamischen Analyse bedürfen, insbesondere, wenn die Gefahr von Resonanz besteht.

Es ist unbestritten, dass die Regelwerke für nicht schwingungsfähige Tragwerke mit quasistatischen Ersatzlasten arbeiten und dynamische Effekte nicht berücksichtigen, allerdings muss für deren Anwendbarkeit zunächst geprüft werden, ob das Tragwerk schwingungsfähig ist oder nicht. Diese Überprüfung wurde entgegen dem Stand der Technik zum Zeitpunkt der Planung nicht durchgeführt.

Etwas irritierend ist auch, dass in der Stellungnahme der Fa. Forster vom 14.08.2008 [11] die seit dem Planungszeitpunkt veränderten Richtlinien und Normen nicht erwähnt wurden, etwa dass seit 2003 laut ZTV-ING [79] die Verbindung Riegel-Stiel biegesteif mit vollflächiger Auflage des Riegels auf dem Stiel ausgeführt sein muss und dort keine A4-70-Schrauben mehr erlaubt sind, sondern ab 2003 nur noch voll vorgespannte Schrauben der Güte 8.8 oder 10.9 und ab 2007 laut [81] nur noch der Güte 10.9. Zu welchem Zeitpunkt zwischen 2007 und 2010 die Verwendung von sechs M16-Schrauben für die Riegel-Steher-Verbindung Stand der Technik wurde (die diesbezügliche ZTV-ING erschien 2010 [82]) konnte nicht eruiert werden.

Falls in der Aussage 1 der Stellungnahme [11] mit „*geringfügigen projektspezifischen Anpassungen*“ abweichend von der ZTV-VZB 1994 die gelenkige Lagerung der Riegel-Steher-Verbindung und die Verwendung von vier A4-70-Schrauben gemeint ist, handelt es sich keineswegs um geringfügige Anpassungen, sondern um eine grundlegende Änderung der Schwingungscharakteristik und Schraubenbeanspruchung. Bei einer gelenkigen Lagerung ist die erste Biegeeigenfrequenz des Querriegels nur ca. die Hälfte der Eigenfrequenz bei einer biegesteifen Ausführung. Wirbelinduziertes Schwingen setzt damit bereits bei der halben Windgeschwindigkeit verglichen mit einer biegesteifen Verbindung ein. Aufgrund der höheren Nachgiebigkeit sind auch die Amplituden des Querriegels größer und aufgrund des Sich-Drehen-Könnens der Querriegelenden über das Kippblech kommt es im Vergleich zu einer flächigen

Verbindung zwischen Riegel und Steher zu weitaus höheren Dehnungen der Verbindungsschrauben.

Die dritte Aussage in der Stellungnahme [11], auf die näher eingegangen wird, ist:

3. *„Aufgrund der Berechnung sind die Eckschrauben durch die im Regelwerk vorgesehene Belastung nur wenig ausgelastet: 33 % bei der Verwendung von Schrauben A4-70, 21 % bei Schrauben 10.9. In der Typenberechnung ist eine Ersatzfläche für Tafeln oder andere Aufbauten vorgesehen, die bei der gegenständlichen Brücke nicht in Anspruch genommen wird. Bei Berechnung ohne diese Ersatzfläche reduziert sich die Auslastung der A4-70-Schrauben auf 19 %.“*

Diese Aussage ist korrekt für die statischen Windlasten. Aufgrund der Schwingungsanfälligkeit der schilderlosen Querriegelprofile unter Windeinwirkung kommt es jedoch zu einer dynamischen Beanspruchung der Schrauben mit vielen Millionen Lastwechseln über wenige Jahre, die – wie die Schadensfälle gezeigt haben – zu einem Bruch der Schrauben führen können. Der statische Auslastungsgrad ist nur ein Bewertungskriterium hinsichtlich Schraubenversagen, aber nicht das einzige, und bei der Mehrzahl der Stationen in Österreich auch nicht das kritischste.

Aussage 4 in der Stellungnahme [11] bewertet die Gefahr des Herabfallens des Querriegels:

4. *„Auch bei völligem Entfall der Verschraubung in der Gelenkrahmenecke wird der Riegel durch ein Zentrierrohr gehalten, das die gesamten Querkräfte aufnimmt (Auslastung in der gegenständlichen Statik 23 %).“*

Hier wird der Fall angesprochen, dass der Querriegel aufgrund der maximalen statischen Windkräfte das Zentrierrohr in horizontaler Richtung absichert⁴. Der Autor stimmt dem zu, das wäre ein sehr unwahrscheinliches bzw. quasi auszuschließendes Szenario. Allerdings ist auch die Möglichkeit, dass der in Schwingung befindliche Querriegel unmittelbar nach dem Versagen der letzten Schraube auf einer Seite vom Zentrierrohr abhebt, vorstellbar. Dem wurde in einer FEM-Berechnung mit Abaqus/Explicit nachgegangen. Betrachtet wurde dabei die Station A07_000,853_2_SKE, da bei dieser das Verhältnis zwischen gespeicherter elastischer Energie bei der laut ÖNORM EN 1991-1-4:2011 [60] und ÖNORM B 1991-1-4:2013 [61] bestimmten Maximalamplitude y_{Fmax} und dem Eigengewicht des Querriegels von allen Stationen in Österreich am höchsten ist. Hier würde man sich die größte Rücksprunghöhe bei plötzlichem Lösen einer Lagerbedingung erwarten. Rohrdimensionen und -position wurde von einer Station mit ähnlichen Abmessungen übernommen [97].

⁴ Wie sich Tragstrukturen mit nur einem Steher (Kragträger) bei Versagen der Schrauben verhalten, wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Hier müssten zusätzliche Sicherungsmaßnahmen eingeplant sein, um ein Herabfallen des Riegels zu verhindern.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 4-6 dargestellt. Das Querriegelende schwingt aufgrund der Rückfederung 13 mm in die Höhe, was nicht ausreicht, damit die (graublau dargestellte) Kopfplatte über das Zentrierrohr gehoben wird. Dazu wären 50 mm Querriegelverschiebung nach oben notwendig.

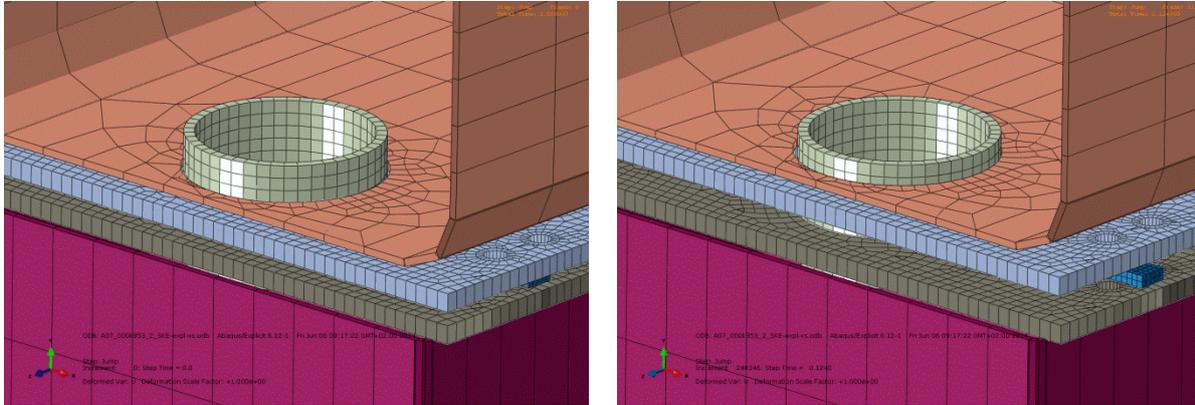


Abb. 4-6. FEM-Berechnung des Abhebens des schwingenden Riegels vom Steher nach Versagen der letzten Schraube auf einer Seite. Station A07_000,853_2_SKE. Situation um das Zentrierrohr vor Schraubenversagen (links) und maximale Vertikalbewegung des Querriegels mit angeschweißter Kopfplatte (rechts) nach Schraubenversagen.

Ein Versagen dieser Sicherung durch Abheben des Querriegels wäre unter folgenden Annahmen – bzw. ungünstigen Kombinationen dieser – noch vorstellbar:

- Der Abstand zwischen Zentrierrohroberkante und Kopfplattenunterseite beträgt nicht 50 mm, sondern ist fertigungs- und/oder montagebedingt deutlich geringer.
- Falls der Querriegel bereits durch die Montage eine Vorspannung aufweist (d. h. bei der Demontage der Schrauben müsste sich der Querriegel vom Steher heben).
- Falls der Querriegel sehr stark tordiert ist und ohne Distanzbleche durch die Schrauben niedergespannt wurde, dann könnte beim Hochspringen des Querriegels im Zuge des Schraubenversagen – und gleichzeitigem Windangriff von vorne – die Bohrungskante an der Kopfplattenunterseite über das Zentrierrohr geschoben werden.
- Falls der in der Konstruktion vorgesehene Überstand des Zentrierrohrs durch Distanzbleche zwischen den beiden Kopfplatten von Querriegel und Steher zu stark verringert wird wie in Abb. 4-7 schematisch dargestellt.

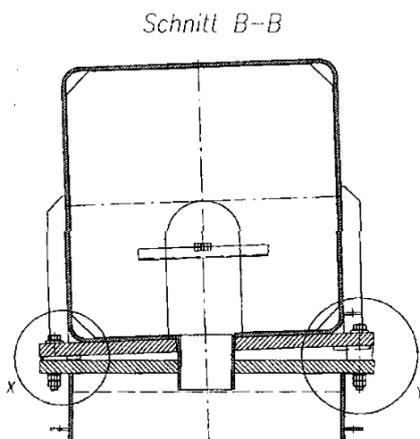


Abb. 4-7. Tordierter Riegel bei Station A01-_044,300_0_SKE mit Distanzblechen. [9]

- Falls die Steher eine Biegeschwingung in Windrichtung (gleich oder gegengleich) vollführen und dem hochspringenden Querriegel eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente aufprägen.
- Der Querriegel ist nach dem Schraubenbruch auf einer Seite teilweise als Kragträger zu betrachten und hat ein verändertes Schwingverhalten. Falls an dessen „freiem“ Ende durch windinduzierte Schwingungsanregung (*vortex-shedding* oder *galloping*) eine Amplitude > 50 mm auftritt, kann es zum Abheben vom Zentrierrohr kommen.
- Falls die Schwingamplitude vor dem Schraubenbruch größer ist als die mit [60] und [61] berechnete (aufgrund geringer Turbulenzintensität der Anströmung oder Vorliegen von *galloping* mit weitaus höheren Amplituden als bei *vortex shedding*).

Ein Herunterfallen des Querriegels bei Mautstationen mit zwei Stehern ist zwar als unwahrscheinlich einzustufen, aber zu 100 % ausgeschlossen kann es bei derzeitigem Kenntnisstand nicht werden.

Aussage 5 in der Stellungnahme [11] bezieht sich auf den Ersatz der A4-70-Schrauben durch 10.9-Schrauben:

5. *„Bei der gegenständlichen Brücke wurden die schadhafte Niro-Schrauben gegen hochfeste Schrauben 10.9 getauscht. Dieser Schraubenwerkstoff ist nach unserer Erfahrung für die an diesem Standort herrschende Belastungssituation besser geeignet.“*

Laut der zum Zeitpunkt der Stellungnahme geltenden ZTV-ING Teil 9, Stand 01/2003 [79] sind für die Verbindung zwischen Riegel und Steher entweder 8.8 oder 10.9-Schrauben zu verwenden, die Verbindung darf nicht gelenkig sein, sondern der Riegel muss vollflächig auf dem Steher aufliegen (siehe Abschnitt 3.2.3). Stand der Technik zum Zeitpunkt des Schreibens war auch bereits der vorhandene Entwurf der nachfolgenden ZTV-ING des Jahres 2010 [82], in der nur noch 10.9-Schrauben für diese Verbindung definiert sind. Nicht erklärbar ist, weshalb zwei von der ASFINAG übergebene gebrochene Schrauben die Festigkeitsklasse 8.8 hatten, obwohl der Einsatz von 10.9-Schrauben angekündigt war.

Weiters fordert die ZTV-ING 03 den Nachweis für die Tragkonstruktion einschließlich der Verbindungen und Verankerungen gemäß DIN 18800-1 bis -3 [78] und Änderung DIN 18800-1/A1:1996-02 [80]. Laut dieser ist ein Betriebsfestigkeitsnachweis zu führen, sofern es sich um ein bei Windbeanspruchung schwingungsanfälliges Bauwerk handelt. Auch die nachfolgende ZTV-ING des Jahres 2010 [82] verlangt einen Betriebsfestigkeitsnachweis der Verbindungsschrauben zwischen Riegel und Steher, sowie vollflächige Auflage, biegesteife Ausföhrung und mindestens 6 M16-Schrauben.

Zusammenfassende Beurteilung der Stellungnahme

Bei Berücksichtigung des Stands der Technik und somit Heranziehung der ab 01.04.1994 geltenden ÖNORM B 4014-2 [92] (oder einer ihrer Nachfolgenormen), der am 01.05.1997 veröffentlichten ÖNORM ENV 1991-2-4 [88], der gleichlautenden, im Dezember 1996 veröffentlichten DIN V ENV 1991-2-4 oder der im Mai 1995 veröffentlichten ENV 1991-2-4 und der ab 1992 publizierten Vornorm ENV 1993-1-1 [95] im Planungsstadium der Mautstationen (etwa ab 2001 bis 2005), hätte erkannt werden müssen, dass bei den Stationen eine Schwingungsanfälligkeit des Querriegels (nicht zuletzt aufgrund der abweichend von der ZTV-ING gelenkig ausgeführten Riegel-Stiel-Verbindung) hinsichtlich *vortex shedding* (bei manchen auch *galloping*) gegeben ist, dadurch eine Schwingbeanspruchung der Verbindungsschrauben zwischen Querriegel und Steher vorliegt und für die Schrauben ein Ermüdungsnachweis zu führen gewesen wäre. Dem Zentrierrohr kommt im Falle des Schraubenversagens eine zentrale Bedeutung zu, dieses Teil ist dann alleine verantwortlich, dass der Querriegel nicht auf die Fahrbahn fallen kann. Bereits eine Höhenabweichung von nur 3 bis 4 cm vom Bauplan beim Einschweißen des Rohres oder die Verwendung von Distanzblechen großer Dicke zum Ausgleich von Tordierungen des Querriegels könnten schwerwiegende Folgen haben.

4.2 Statisches Gutachten vom 13. März 2009 von DI Dr. Baban für Fa. Forster [59]

Es wird im Folgenden zu fünf Aussagen in der Stellungnahme [59] eingegangen:

1. *„Die der Zeit in Verwendung befindlichen Nirostaschrauben sind korrekt dimensioniert, weit verbreitet und seit Jahren in Verwendung. Jedoch scheint hier Verbesserungspotential zu sein, obwohl gültige Normen und Regelwerke hier bis jetzt keine Vorgaben machen.“*

Die Schrauben können nicht korrekt dimensioniert sein, denn sonst würden sie nicht innerhalb der zweijährigen Kontrollintervalle brechen. Die Schrauben wurden auch nie hinsichtlich der dynamischen Beanspruchung aufgrund der wirbelinduzierten Schwingungen der Querriegel dimensioniert, sondern nur gegen die statischen Windlasten. Weiters waren laut ZTV-ING 03 [79] Nirosta-Schrauben seit 2003 für die Riegel-Stiel-Verbindung nicht mehr vorgesehen. Die zum 13.03.2009 gültigen Regelwerke (die ZTV-ING ist nicht die einzige anzuwendende Richtlinie) schreiben sowohl eine Prüfung auf wirbelinduzierte Schwingung von schlanken Tragwerken vor als auch eine Betriebsfestigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter Komponenten dieser Tragwerke (siehe Abschnitte 3.2.1 und 4.1).

2. *„[...] Der Bruch ist eindeutig ein Dauerbruch. In derzeit einzigen produktspezifischen Regelwerk „ZTV-ING“ (früher ZTV-VZB) ist ein Betriebsfestigkeitsnachweis nur für Ankerschrauben und Befestigungselemente zu führen.“*

Die ZTV-ING ist vielleicht das einzige produktspezifische Regelwerk, aber deshalb nicht das einzige anzuwendende Regelwerk für die Auslegung von Tragwerken. Im Jahr 2009 war es bereits über ein Jahrzehnt Stand der Technik, dass schwingungsfähige Bauwerke als solche in der Planungsphase rechnerisch erkannt und deren dynamisch beanspruchte Komponenten einem Betriebsfestigkeitsnachweis unterworfen werden müssen. Auch die ZTV-ING und die alte ZTV-VZB verweisen auf die entsprechenden mitgeltenden Normen. Weiters widerspricht der Gutachter obiger Aussage im Punkt 3.6 des Gutachtens *„Der Betriebsfestigkeitsnachweis ist [laut ZTV-ING-Teil 9 - (Entwurf 11/2006), Anm.] auch für Riegel-Stiel-Verbindungen zu führen.“*

3. *„Querschwingungen sind in diesen Richtlinien [ZTV-ING-Teil 9 - (Entwurf 11/2006), Anm] nicht berücksichtigt.“*

In den zitierten ZTV-ING werden Querschwingungen des Riegels nicht explizit erwähnt, das ist korrekt. Allerdings unterscheiden sich die Verkehrszeichenbrücken gemäß ZTV-ING in einigen sehr ausschlaggebenden Punkten von den Mautanlagen in Österreich:

- An den Verkehrszeichenbrücken sind im Gegensatz zu den Mautanlagen Schilder befestigt, welche ein vollkommen anderes aerodynamisches Verhalten der Tragstruktur erzeugen. Für die Ausbildung einer Kármán'schen Wirbelstraße mit periodischer Anregung des Riegels sind angebrachte Schilder viel hinderlicher als es bei Profilen mit nur kleinen und wenigen Anbauten der Fall ist.

- Die zitierte ZTV-ING schreibt eine biegesteife Verbindung zwischen Riegel und Steher vor. Bei den Mautanlagen ist diese Verbindung über die Kippbleche aber biegeweich, was einerseits die Biegeeigenfrequenz herabsetzt, dies wirbelinduziertes Schwingen bereits bei geringeren Windgeschwindigkeiten bewirkt und die Nachgiebigkeit (Amplitude) erhöht. Auch werden die Schrauben bei der biegeweichen Ausführung über die Drehung des Riegelendes über das Kippblech gelängt, was bei einer ZTV-konformen flachen Auflage nicht in diesem Ausmaß der Fall ist.

Dies sind Faktoren, die die Gefahr des wirbelinduzierten Schwingens und Schraubenermüdung bei den deutschen Verkehrszeichenbrücken stark reduzieren und tatsächlich traten in Deutschland nur bei Verkehrszeichenbrücken mit (als unzulässig bezeichneter) gelenkiger Lagerung vorzeitige Ermüdungsbrüche bei Schrauben auf [83]. Bei derart einflussreichen Abweichungen der Bauausführung von den ZTV-Richtlinien darf man sich nicht auf diese Richtlinie alleine verlassen, sondern muss alle relevanten, dem Stand der Technik entsprechenden Richtlinien beachten, seien sie in der ZTV-ING referenziert oder nicht.

5 Fraktographische Untersuchung der gebrochenen Schrauben

5.1 Schraube Nr. 1

In Abb. 5-1 ist die Bruchfläche einer gebrochenen M16×90-Schaftschraube aus A4-70, die bei der Station A09-_117,810_0_MAS im Einsatz war, dargestellt. Der Bruch erfolgte direkt unterhalb des Schraubenkopfs, an den sich der zunächst gewindelose Schaft anschließt.

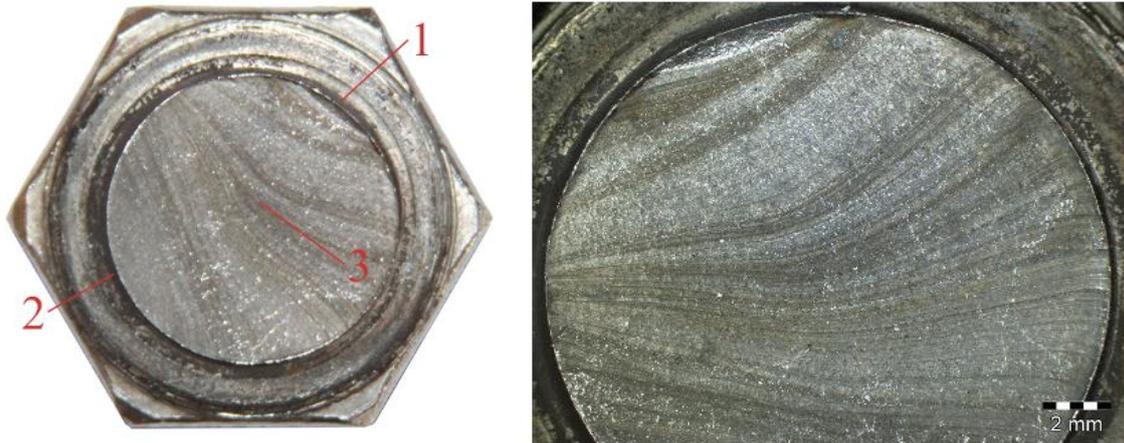


Abb. 5-1: Bruchfläche einer A4-70-M16-Schraube [98]. Links: Gesamtansicht, Rechts: Vergrößerte Darstellung

Die Charakteristik der Bruchfläche deutet zweifelsfrei auf einen Schwingbruch durch kombinierte Zug- und Biegebeanspruchung mit geringer Spannungsamplitude (aufgrund der sehr kleinen Restbruchfläche bei Pos. 1) hin. Der Anriss fand an Pos. 2 statt, an Pos. 3 ist eine Richtungsänderung der Rissausbreitung erkennbar, was darauf hindeutet, dass sich die Schraube in ihrem Sitz verdreht hat, was den Verlust der Vorspannkraft voraussetzt. Klar erkennt man im rechten Teilbild, dass der Riss in Folge des Verdrehens auf der rechten Seite zwischenzeitlich eine große Strecke zurücklegt, während er auf der linken Seite nur um ca. ein Drittel dieses Wegs fortschreitet. Der Bruchausgang liegt am Übergang zwischen Schraubenkopf und Schraubenschaft, also an einer Stelle, wo die Nennspannung durch den kleinen Radius eine Erhöhung erfährt (Kerbwirkung). Die Anzahl der Schwingspiele (also die Vertikalschwingungen des Querriegels) bis Bruch kann bei dieser Ausprägung der Schwingbruchfläche in den Größenordnungen 10^6 bis 10^7 verortet werden. Laut Berechnung nach [60] und [61] hat man dort statistisch mit $1,12 \cdot 10^7$ Schwingspielen pro Jahr zu rechnen, sofern der Querriegel normal zur Hauptwindrichtung orientiert ist.

5.2 Schraube Nr. 2

Die Schraube Nr. 2 (Abb. 5-2) ist eine M16×90-Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 mit Gewinde über den gesamten Schaft bis knapp unter den Schraubenkopf. Die Schraube stammt von der Station A04-_042,200_0_MAS (siehe Abschnitt 2.8). Diese Schraube sollte ein Ersatz für eine dort zuvor gebrochene A4-70-Schraube sein. Laut vorliegender Dokumentation [11] und [59] hätten dort 10.9-Schrauben zur Erprobung kommen sollen. Der Bruch erfolgte im Gewinde direkt über der Spannmutter. Die Festigkeitsklasse 8.8 ist an unverzinkten Stellen nicht korrosionsbeständig, beide Bruchflächen haben deshalb bereits zu rosten begonnen. Ein Stück der Bruchfläche ist am Rand um einen Gewindegang erhöht (1), dieses Stück bemisst sich auf ca. 9 mm². Es sind ganz feine Linien zu erkennen, die teilweise von dunkler gefärbten Teilflächen (2) überdeckt werden. [98]

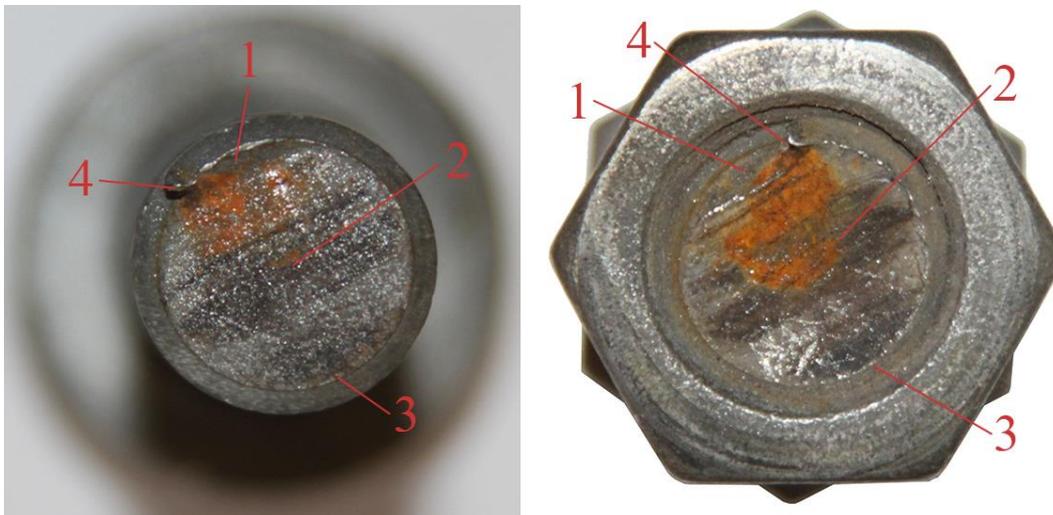


Abb. 5-2: Bruchfläche einer 8.8-M16-Schraube [98]. Links: Schraubenteil mit Kopf, Rechts: Schraubenteil mit Spann- und Kontermutter

Die festzustellenden Rastlinien weisen, wie bei Schraube Nr. 1, auf einen Schwingbruch hin. Es ist schwer ausfindig zu machen, wo sich der Anriss oder die Restbruchfläche befindet. Durch den Linienverlauf sieht es aber so aus, als ob der Schwingungsriß bei (3) gestartet hat und der Restbruch möglicherweise bei (4) passiert sein könnte. Die dunkleren Bereiche (2) der Bruchfläche sind möglicherweise Folgen von Witterungsverhältnissen, Amplituden- bzw. Spannungswechseln. Die vermutete Restbruchfläche (4) ist sehr klein, was wiederum auf den Verlust der Schraubenvorspannkraft im Zuge der Beanspruchung hindeutet. [98]

5.3 Schraube Nr. 3

Die Schraube Nr. 3 (Abb. 5-3) ist wie Nr. 2 eine M16×95-Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 mit Gewinde über den gesamten Schaft bis knapp unter den Schraubenkopf. Die Schraube stammt ebenfalls von der Station A04-_042,200_0_MAS (siehe Abschnitt 2.8). Diese Schraube sollte ein Ersatz für eine dort zuvor gebrochene A4-70-Schraube sein. Laut vorliegender Dokumentation [11], [12] und [59] hätten dort 10.9-Schrauben zur Erprobung kommen sollen. Die Schraube ist innerhalb der Spannmutter abgerissen, es ist bereits ein Gewindegang der Mutter zu erkennen. Wie Schraube Nr. 2, ist Schraube Nr. 3 nicht korrosionsbeständig und beide Bruchflächen weisen starken Rost auf. Außerdem sind auf den Flächen noch Ablagerungen von einer weißen Substanz erkennbar. Die Bruchfläche kann visuell in zwei Teilflächen, (1) und (2), unterteilt werden, wobei das Größenverhältnis der Flächen ca. 1:2 ist. Die Oberfläche der Bruchflächen ist rau und durchgehend matt. Bei genauerem Hinsehen kann man Linien in die Teilfläche (2), Bruchfläche 1 hineininterpretieren. [98]



Abb. 5-3: Bruchfläche einer 8.8-M16-Schraube [98]. Links: Schraubenteil mit Kopf, Rechts: Schraubenteil mit Spann- und (verdeckter) Kontermutter

Die rostigen Flächen sind bereits sehr groß und machen die Bruchflächen größtenteils sehr unkenntlich. Die nur leicht angedeuteten Linien, sichtbar auf der größeren der zwei Teilflächen (2), lassen vermuten, dass die Schraube durch einen Schwingbruch abgerissen ist. Ein möglicher Anriss für diesen Bruch könnte beim weißen Fleck (3), der auf Bruchfläche 1 sichtbar ist, sein. Die sichelförmige Fläche (1) könnte die Restbruchfläche sein, die Oberfläche sieht jedoch sehr atypisch für einen Gewaltbruch aus. Die weiße Substanz, die auf beiden Bruchflächen zu erkennen ist, könnte Salz sein. Dies würde die stark korrodierten Flächen erklären und die Vermutung stützen, dass beim weißen Fleck (3) der Anriss stattgefunden hat, da sich hier das Salz am „Eingang“ in das Schraubeninnere gesammelt hat. Es würde auch bedeuten, dass die Schraube während des Rissfortschritts zu rosten begann. [98]

6 Rechnerische Erfassung der windinduzierten Schwingungen

6.1 Berechnung nach ÖNORM EN 1991-1-4 und ÖNORM B 1991-1-4 in Excel

6.1.1 Einleitung

Wie in Abschnitt 2.9 dargestellt, muss jede Mautstation individuell betrachtet, d. h. hinsichtlich Schwingungsanfälligkeit, Amplituden, Frequenzen und der Schraubenbeanspruchungen berechnet werden. Dazu bietet sich eine Berechnung in einem Excel-Blatt basierend auf ÖNORM EN 1991-1-4 [60] und den nationalen Festlegungen nach ÖNORM B 1991-1-4 [61] an. Da [60] Werte für die Strouhal-Zahl (welche die Wirbelablösefrequenz bestimmt) lediglich für quadratische und rechteckige Profilquerschnitte mit scharfen Kanten angibt – die Querriegel aber verrundete Kanten aufweisen –, sind in der vorgestellten Berechnung auch Werte für abgerundete Profile aus der Publikation von A. RICHTER [62] eingearbeitet.

In der Berechnung werden ausgehend von geometrischen Parametern der Querriegel Biegeeigenfrequenz und die kritischen Windgeschwindigkeiten für *vortex shedding* und *galloping* ermittelt. Weiters werden die zu erwartende Amplitude des Querriegels und die zu erwartende Schwingenspielzahl pro Jahr (abgeleitet aus der standortbezogenen Basiswindgeschwindigkeit nach [61]) anhand der Norm berechnet. In Folge wird basierend auf geometrischen Überlegungen die Dehnung und die schwingungsbedingte – also die der Schraubenmontagevorspannung überlagerte – Zugspannungsamplitude der außen liegenden Verbindungsschraube zwischen Querriegel und Steher berechnet. Mit Hilfe einer synthetischen Bauteilwöhlerlinie für die Schraube kann mit der Oberspannung, dem R -Wert (Spannungsverhältnis) und den Schwingenspielen pro Jahr eine qualitative Reihung der ca. 450 betrachteten Stationen in Österreich hinsichtlich der Schraubenlebensdauer durchgeführt werden.

Die Schraube wird bei der Querriegelschwingung nicht nur gelängt, sondern auch gebogen. Dies führt auf einer Schraubenseite zu einer Erhöhung, auf der anderen zu einer Verringerung der schwingungsbedingten Zugspannung. In dieser Betrachtung wird der Einfachheit halber nur mit der gemittelten, über den Querschnitt gleichmäßigen, längungsbedingten Zugspannung gerechnet, da sich damit für die qualitative Reihung der Stationen nach dem Gefährdungspotential für Schraubenbrüche kein entscheidender Unterschied ergibt, und derart Schraubendurchmesser, Kopf- und Muttergeometrie nicht berücksichtigt werden müssen.

6.1.2 Anwendungsbereich

Die beschriebene Berechnungsmethodik gilt für:

- windinduzierte Schwingungen des Querriegels in Vertikalrichtung,
- quadratische und rechteckige Querriegelprofile mit oder ohne Radius an den Kanten,
- Stationen mit 2 oder 3 Stehern, bei 3 Stehern ist für die Spannweite L der Abstand zwischen seitlichem und Mittelsteher zu verwenden⁵,
- drehbare Lagerung des Querriegels auf den Stehern mittels Kippblechen und seitlich des Kippblechs angeordneten Schrauben.

Mautstationen mit Aufbauten (z. B. die begehbaren SKE oder Verkehrszeichenbrücken mit dem gleichen Tragwerkssystem), weisen im Vergleich zu Stationen, die lediglich mit Mautsystemkomponenten bestückt sind, ein aerodynamisch anderes Verhalten auf. Die Bildung einer sich periodisch an der Unter- und Oberseite des Querriegels ablösenden Wirbelstraße ist dort etwas gestört, die aerodynamischen Anregungskräfte in Vertikalrichtung somit kleiner als bei annähernd „glatten“ quadratischen und rechteckigen Profilquerschnitten. Für diese Fälle kann die Berechnung nur als grobe Abschätzung bzw. *upper bound*-Szenario verstanden werden.

Die synthetische Wöhlerkurve für die Lebensdauerabschätzung wurde an den A4-70 angelehnt, da dieser Schraubenwerkstoff hierzulande bis vor Kurzem noch den Standard für die Verbindungsschrauben zwischen Querriegel und Steher darstellte. Nicht berücksichtigt werden können Unterschiede zwischen Schrauben mit Gewinde bis kurz vor den Kopf und Schaftschrauben. Jedoch ist in beiden Fällen eine Kerbwirkung gegeben, entweder durch das Gewinde oder durch den Übergang zwischen Schraubenkopf und Schraubenschaft. Nicht berücksichtigt wird auch die Möglichkeit der plastischen Deformation der Beilagscheiben zwischen Schraubenkopf und Kopfplatte bzw. zwischen Spannmutter und Kopfplatte. Es wurde bei den Anlagenkontrollen teilweise festgestellt, dass sich die Beilagscheibe in das Durchgangsloch presst, was zu einer Entlastung der Schraube führt.

⁵ In der Excel-Liste sind der Vollständigkeit halber auch die Stationen mit einem Steher enthalten. Die Berechnungen und Ergebnisse hierzu sind noch zu ignorieren. Zu einem späteren Zeitpunkt kann bei Bedarf eine Erweiterung der Berechnung auch für diesen Konstruktionstyp erfolgen.

6.1.3 Bestimmung der zu verwendenden Parameter

6.1.3.1 Geometrische Parameter

Abb. 6-1 stellt schematisch eine Überkopfkonstruktion mit den für die Berechnung des Schwingverhaltens relevanten geometrischen Hauptabmessungen dar.

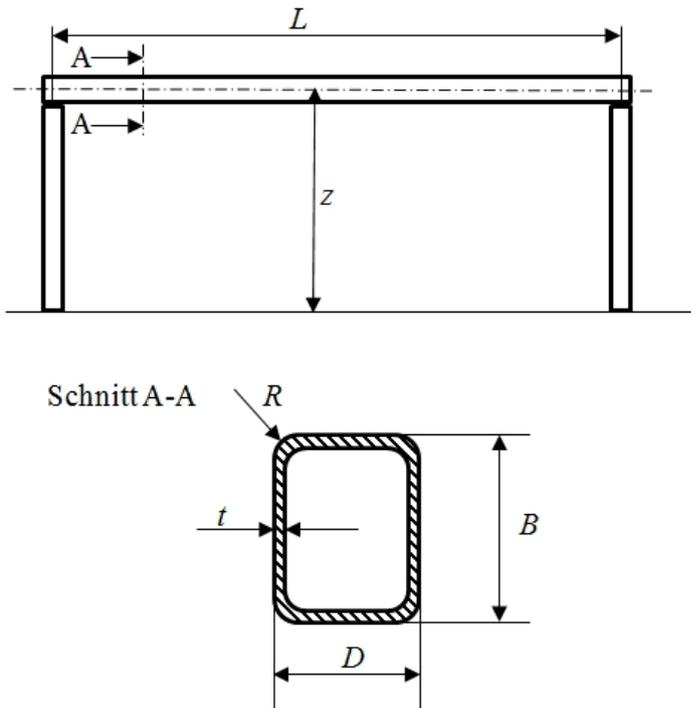


Abb. 6-1: Geometrische Parameter 1

Hierbei sind:

- L Querriegellänge zwischen den beiden Kippblechen, bzw. $L/2$ bei Stationen mit 3 Stehern,
- B Höhe des Querriegelprofils,
- D Breite des Querriegelprofils,
- R Radius an der Außenseite,
- t Wandstärke des Profils,
- z mittlere Höhe des Querriegelprofils über der Fahrbahn.

Aus diesen Parametern abgeleitete Größen sind die Querschnittsfläche A :

$$A = B \cdot D - R^2 \cdot (4 - \pi) - (B - 2 \cdot t) \cdot (D - 2 \cdot t) + (R - t)^2 \cdot (4 - \pi) \quad \text{Glg. 1}$$

sowie das für Biegung in Vertikalrichtung relevante Flächenträgheitsmoment I :

$$I = \frac{t}{12} \cdot \left(\begin{array}{l} 36 \cdot \pi \cdot R^3 - 24 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot B - 30 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot t + \\ 6 \cdot \pi \cdot R \cdot B^2 + 12 \cdot \pi \cdot R \cdot B \cdot t + 12 \cdot \pi \cdot R \cdot t^2 - \\ 3 \cdot \pi \cdot B^2 \cdot t - 3 \cdot \pi \cdot t^3 - 112 \cdot R^3 + 72 \cdot R^2 \cdot B + \\ 96 \cdot R^2 \cdot t - 24 \cdot R \cdot B^2 - 24 \cdot R \cdot B \cdot t - 48 \cdot R \cdot t^2 + \\ 2 \cdot B^3 + 6 \cdot B^2 \cdot D - 12 \cdot B \cdot D \cdot t + 16 \cdot B \cdot t^2 + 8 \cdot D \cdot t^2 \end{array} \right) \quad \text{Glg. 2}$$

Bei Einsetzen aller Längenmaße in m ergeben sich A in m^2 und I in m^4 .

In Abb. 6-2 sind die zwei für die Schraubenbeanspruchung relevanten geometrischen Parameter der Schraubverbindung markiert. Das ist zum einen der Abstand zwischen den Schraubenachsen L_{Schr} (im Bild 50 mm) und zum anderen die Verspannungslänge l_0 , die zwischen Schraubenkopf und Verspannmutter zu messen ist. Sie ergibt sich aus der Summe der Blechstärken von Kopfplatte Riegel und Kopfplatte Steher, der Stärke des Kippblechs plus der Höhe der Beilagscheiben.

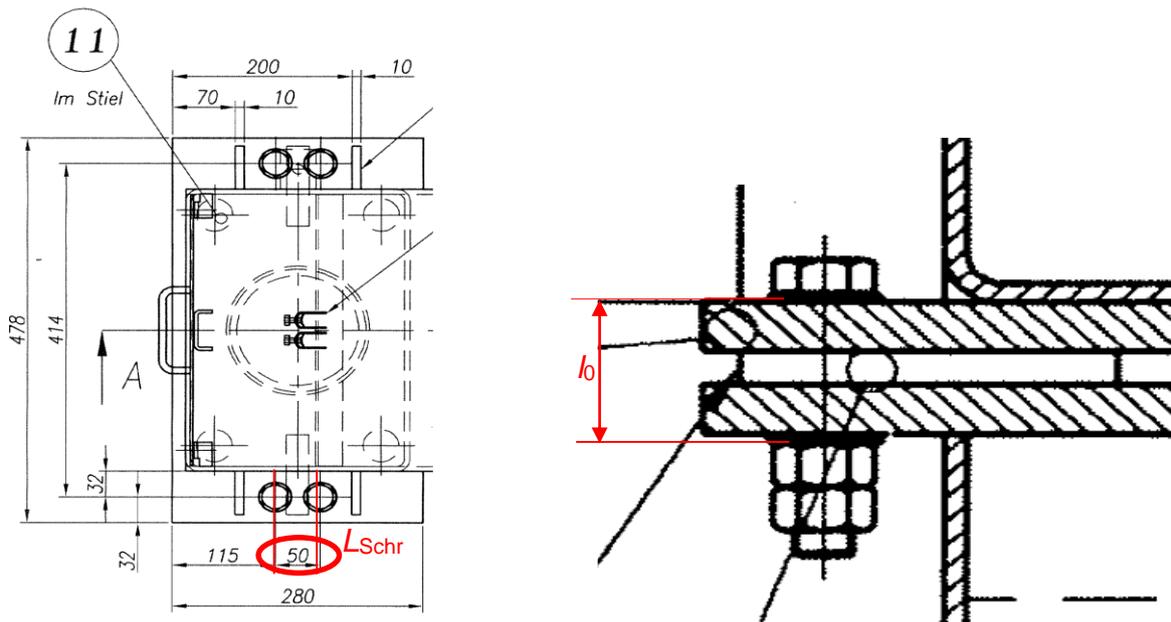


Abb. 6-2: Geometrische Parameter 2. Links: Grundriss Riegel-Steher-Verbindung. Rechts: Verschraubung [97]

6.1.3.2 Werkstoffparameter

Benötigt werden für die Berechnungen folgende Werkstoffkenngrößen:

- E E-Modul des Querriegelwerkstoffs (Stahl: $2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$)
- ρ Dichte des Querriegelwerkstoffs (Stahl: 7850 kg/m^3)
- δ_s Logarithmisches Dämpfungsdekrement der Konstruktion (kann mit $0,0377^6$ angenommen werden oder alternativ aus Messungen bestimmt werden).
- E_{Schr} E-Modul der Schraube (A4-70: $2,0 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$)

Die synthetische Bauteilwöhlerkurve für eine A4-70-Schraube wurde basierend auf den für diesen Werkstoff ermittelten Zeitfestigkeitswerten in [99] erstellt (Abb. 6-3). Berücksichtigt wird auch der Mittelspannungseinfluss (R -Wert). Die Wöhlerkurven wurden in MS-EXCEL parametrisiert eingebunden, um die Lebensdauer für beliebige R -Werte berechnen zu können.

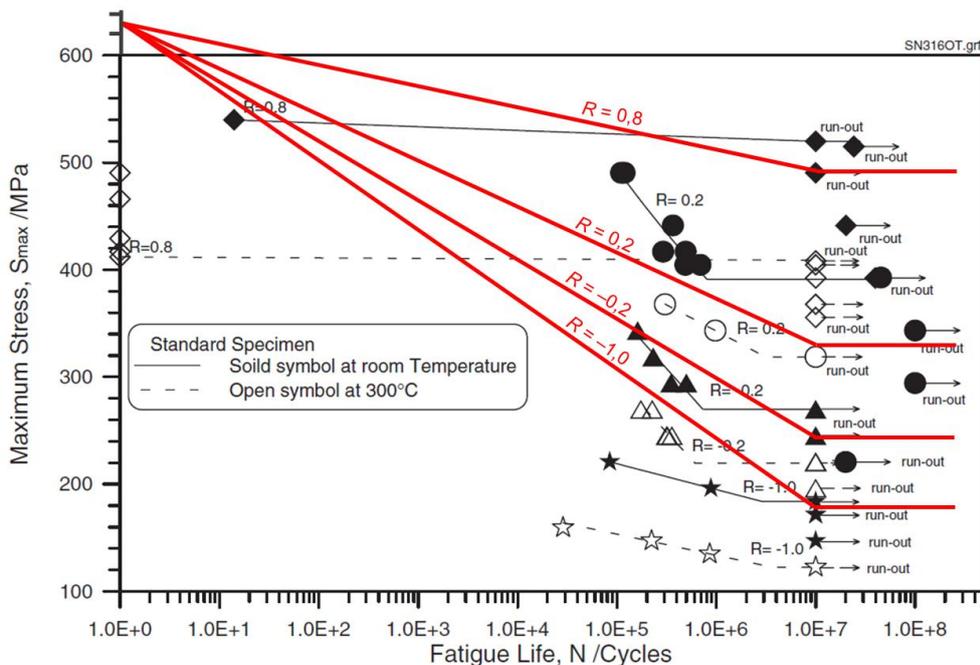


Abb. 6-3: Synthetische Wöhlerkurven für A4-70 (rot). Nach [99]

Die Zugfestigkeit der A4-70-Schrauben beträgt laut Norm mindestens 700 MPa [14]. Für die synthetischen Wöhlerlinien wurden 630 MPa gewählt, um eine konservative Abschätzung zu garantieren und da die damit berechneten Lebensdauern auch physikalisch realistische Werte liefern. Weiters wird vereinfachend angenommen, dass bei einer Beanspruchung unterhalb des Zeitfestigkeitswerts bei 10^7 Lastzyklen Dauerfestigkeit vorliegt. Tatsächlich treten bei ei-

⁶ Dieser Wert ist im Einklang mit dem log. Dämpfungsdekrement laut ÖNORM B 1991-1-4:2013, Tabelle 22 als auch mit der Nachrechnung der schwingenden Station S06-_034,630_0_MAS (Video vom 19.12.2005) mittels analytisch-numerischem Verfahren mit Maple 17.

nigen Stationen laut ÖNORM-Rechnung bis zu $2,2 \cdot 10^7$ Schwingenspiele pro Jahr auf und austenitische Werkstoffe weisen im Allgemeinen keine Dauerfestigkeit auf.

6.1.3.3 Berechnung der ersten Eigenfrequenz der Querriegelvertikalschwingung

Die erste Eigenfrequenz n in Hz (s^{-1}) für die halbsinusförmige Vertikalschwingung des Querriegels errechnet sich nach [100] wie folgt:

$$n = \frac{9,87}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \quad \text{Glg. 3}$$

Dabei sind L in m, E in N/m^2 , I in m^4 , ρ in kg/m^3 und A in m^2 einzusetzen.

6.1.3.4 Ähnlichkeitskennzahlen

Für die Betrachtung von windinduzierten Schwingungen werden die Strouhal-Zahl (St) und die Scruton-Zahl (Sc) benötigt. Die Strouhal-Zahl St ist ein Parameter, der u. a.⁷ von den Profilquerschnittsgrößen B , D und R bestimmt wird und ein dimensionsloses Maß für die Wirbelablösefrequenz hinter dem Profil darstellt. In der ÖNORM EN 1991-1-4:2011-05-15 wird der Profilkantenradius nicht berücksichtigt, sondern St nur in Abhängigkeit des Verhältnisses D/B angegeben (Abb. 6-4).

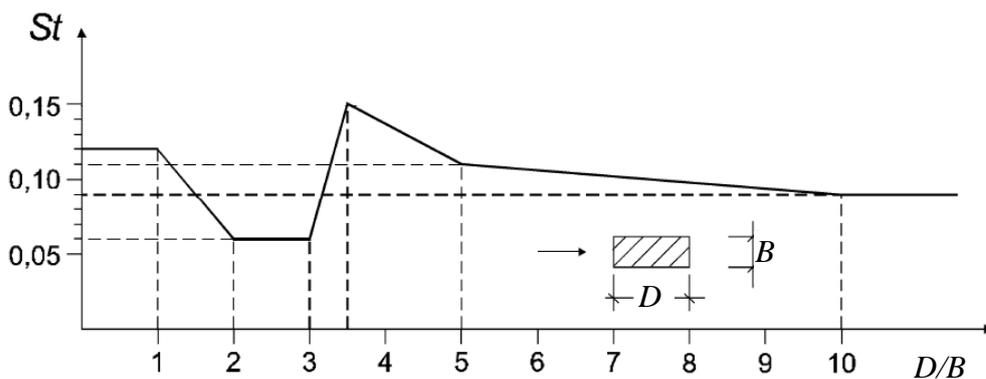


Abb. 6-4: Strouhal-Zahl für scharfkantige Rechteckprofile nach [60]

Für Profile mit abgerundeten Kanten und dem Fall, dass das Verhältnis D/B nicht größer als 1,1 ist, kann mit Abb. 6-5 die Strouhal-Zahl genauer bestimmt werden.

⁷ Die St -Zahl hängt darüber hinaus auch noch von der Reynoldszahl ab [60]. Sie steigt je nach R/B -Verhältnis ab einem Re von ca. $3 \cdot 10^5$ stark an. Da auch die Normen [58] [59] dies nicht erwähnen, wird der Einfachheit halber dieser Einfluss in dieser Berechnungsvorschrift ebenfalls nicht berücksichtigt.

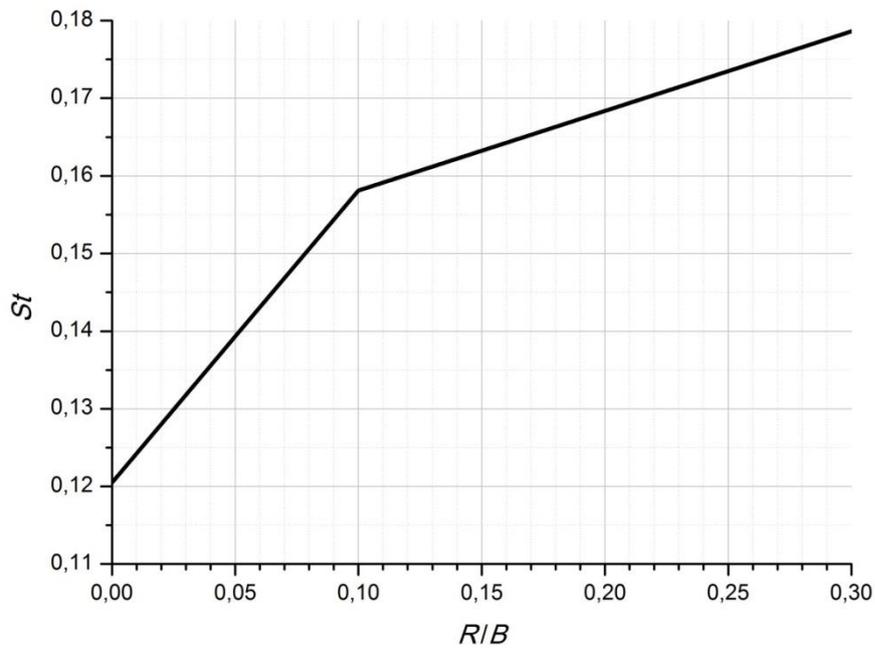


Abb. 6-5: Strouhal-Zahl für abgerundete quadratische Profile und Rechteckprofile für $D/B < 1,1$ in Abhängigkeit vom Verhältnis R/B nach [62]

Die Scruton-Zahl Sc ist ein Maß für die Schwingungsanfälligkeit und hängt von der Struktur-dämpfung und dem Verhältnis von Bauteilmasse zu Luftmasse ab [60]:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_e}{\rho_{\text{Luft}} \cdot B^2} \quad \text{Glg. 4}$$

Für die Luftdichte ρ_{Luft} ist laut [60] und [61] $1,25 \text{ kg/m}^3$ zu verwenden.

Im Falle einer halbsinusförmigen Schwingung und einem als homogen betrachteten Querriegel ist die äquivalente längenbezogene Masse m_e die Querriegelmasse pro Auflagerabstand:

$$m_e = \frac{\rho \cdot A \cdot L}{L} = \rho \cdot A \quad \text{Glg. 5}$$

mit A als der Profilquerschnittsfläche.

Je höher Sc ist, desto geringer ist die Schwingungsanfälligkeit der Struktur.

6.1.4 Berechnung der Anfälligkeit gegenüber wirbelerregten Querschwingungen (vortex shedding) und Abschätzung der Schraubenlebensdauer

Hierbei wird laut Normen [60] und [61] die kritische Windgeschwindigkeit v_{crit} (Glg. 6) berechnet, bei der die Wirbelablösefrequenz $f_w = \frac{St \cdot v}{B}$ auf der Rückseite des umströmten Profils (Kármán'sche Wirbelstraße) mit der Eigenfrequenz n (Glg. 3) der Vertikalschwingung zusammenfällt. In diesem Fall liegt vollkommene Resonanz vor und es kommt zu den höchsten Querriegelamplituden für diese Anregungsart.

$$v_{\text{crit}} = \frac{B \cdot n}{St} \quad \text{Glg. 6}$$

Bei Einsetzen von B in m, n in s^{-1} erhält man v_{crit} in m/s. Diese berechnete kritische Windgeschwindigkeit ist mit der örtlichen mittleren 10-Minuten-Windgeschwindigkeit v_m am Querschnittsbereich, an dem die Wirbelerregung auftritt, zu vergleichen. Diese berechnet sich in Abhängigkeit von der mittleren Querriegelhöhe z in m über der Fahrbahn wie folgt⁸:

$$v_m(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{z}{0,05}\right) \cdot v_{b,0} \quad \text{Glg. 7}$$

Die Werte für die Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ sind der Tabelle A.1 in den nationalen Festlegungen der ÖNORM B 1991-1-4:2013 [61] zu entnehmen. Es ist der der betrachteten Mautstation am nächsten gelegene Ort zu nehmen.

Laut [60] besteht die Gefahr von wirbelinduzierten Querschwingungen, wenn gilt:

$$v_{\text{crit}} \leq 1,25 \cdot v_m \quad \text{Glg. 8}$$

Ist dieses Kriterium erfüllt, also die örtliche mittlere 10-Minuten-Windgeschwindigkeit v_m 80 % der kritischen Windgeschwindigkeit v_{crit} oder mehr erreicht, ist mit dem Auftreten von wirbelinduzierten Vertikalschwingungen des Querriegels zu rechnen.

Für die Beurteilung, ob diese Schwingung in Folge auch zu unzulässig hohen Beanspruchungen der Schrauben führen kann, benötigt man zunächst die auftretende Schwingungsamplitude in Querriegelmitte. Die laut Normen [60] und [61] geben zwei Abschätzmethoden für die zu erwartende Schwingungsamplitude an, von denen nur eine für den vorliegenden Fall anwendbar ist. Die maximale Amplitude $y_{F,\text{max}}$ in der Mitte des Querriegels errechnet sich mit

$$y_{F,\text{max}} = 0,066 \cdot \frac{B}{St^2 \cdot Sc} \quad \text{Glg. 9}$$

⁸ Der in der Gleichung enthaltene Topographiebeiwert c_0 wurde mit 1 angenommen. Dieser Wert gilt für Anlagen, bei denen die Topographie keine lokale Erhöhung der Windgeschwindigkeit um mehr als 5 % bewirkt. Für z_0 (Rauigkeitslänge) wurde der Wert 0,05 m (Geländekategorie II) und für die Faktoren c_{dir} und c_{season} der von der Norm empfohlene Wert 1 verwendet.

In Glg. 9 wurden der aerodynamische Erregerkraftbeiwert c_{lat} , der Beiwert der Schwingungsform K und Wirklängenfaktor K_w der Norm bereits zum Wert 0,066 zusammengezogen. Dieser Wert gilt für Profile mit einem Höhen- zu Breitenverhältnis von $0,5 \leq B/D \leq 10$.

Aufgrund dieser Querriegeldurchbiegung stellt sich bei den Auflagern (Kippblechen) eine Verdrehung des Querriegels ein, welche vor allem die außen liegenden Schrauben dehnt und biegt. Die mittlere Verlängerung Δl_{Schr} der außen liegenden Schraube kann mit Glg. 10 abgeschätzt werden:

$$\Delta l_{Schr} \approx \frac{L_{Schr} \cdot y_{F,max} \cdot \pi}{2 \cdot L}, \quad \text{Glg. 10}$$

wobei L_{Schr} der Abstand zwischen den Schraubenachsen der Schrauben vor und hinter dem Kippblech in Querriegelrichtung ist.

Die damit induzierte mittlere Zugspannung bei Schwingung des Querriegels nach unten in der Schraube beträgt

$$\Delta \sigma_m \approx \frac{L_{Schr} \cdot y_{F,max} \cdot \pi}{2 \cdot L} \cdot \frac{E_{Schr}}{l_0}, \quad \text{Glg. 11}$$

mit l_0 als Länge des verspannten Schraubenabschnitts und E_{Schr} dem E-Modul des Schraubenwerkstoffs. Es sei hier hervorgehoben, dass die Querriegellänge L im Nenner steht, d. h. bei gleichem $y_{F,max}$, L_{Schr} , E_{Schr} und l_0 werden Schrauben bei Stationen mit geringerer Spannweite höher beansprucht als bei Stationen mit größerer Spannweite. Aus diesem Grund sind bei den Stationen, die aufgrund der hohen berechneten Schraubenbeanspruchung für eine erste Schraubeninspektion im Juni 2014 ausgewählt wurden, auch Stationen mit geringen Spannweiten enthalten.

Die Betriebsspannungsamplitude $\Delta \sigma_m$ addiert sich bei Schwingung des Querriegels nach unten zur Vorspannung der Schraube nach der Montage (bei M16 und M20 aus A4-70 sind das bei Nennvorspannkraft nach [14] $\sigma_v = 225 \text{ MPa}$) hinzu. Dies ist der Wert der Oberspannung $\sigma_{max} = \sigma_v + \Delta \sigma_m$, welcher im Wöhlerdiagramm in Abb. 6-3 auf der Ordinate aufgetragen ist. Bei Bewegung des Querriegels nach oben wird die außenliegende Schraube bis zur Unterspannung $\sigma_{min} = \sigma_v - \Delta \sigma_m$ entlastet. Das Spannungsverhältnis R berechnet sich aus

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}. \text{ Da im vorliegenden Fall die Schraube keine Druckspannungen aufnehmen kann,}$$

muss $\sigma_{min} \geq 0 \text{ MPa}$ gelten.

Mit den Werten σ_{max} und R lässt sich nun aus Abb. 6-3 die Anzahl der Schwingspiele bis Bruch N_f ablesen bzw. abschätzen⁹.

⁹ Im Excel-Blatt wurde dieser Vorgang automatisiert. Nicht berücksichtigt wurden bei dieser Abschätzung sich im Laufe der Zeit ändernde Parameter wie Entlastung der Schraube durch eine erhöhte Nachgiebigkeit (erhöhte *compliance* bei langem Riss) oder Eindringen der Beilagscheibe ins Durchgangsloch und somit Änderung des R -Werts bei Verlust der Vorspannung.

Die Anzahl der wirbelinduzierten Schwingspiele pro Jahr N_a lässt sich mit Glg. 12 [60] abschätzen¹⁰:

$$N_a = 1,92 \cdot 10^7 \cdot n \cdot \left(\frac{v_{crit}}{0,2 \cdot v_m} \right)^2 \cdot e^{-\left(\frac{v_{crit}}{0,2 \cdot v_m} \right)^2} \quad \text{Glg. 12}$$

Die ungefähre Schraubenlebensdauer in Jahren ergibt sich dann schließlich aus dem Verhältnis von N_f zu N_a . Diese Berechnung wurde für ca. 440 Stationen in einem Excelblatt durchgeführt. Ein Ausschnitt daraus ist in Abb. 6-6 gezeigt.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	D
Standort		Bl	Steher	Querriegel "L"	Höhe Querr. "B"	Breite Querr. "D"	Radius Außens. "R"	Abst. Schraubenachs. e Gelenk "L schr."	Länge versp. Schraubensch. "l0"	Wandstärk. e "T"	Höhe u. FB "Z"	Verhältnis "D/B"	Faktor für St ger we gen D/B-Verhältnis (gilt nur für 0<D/B<3)	Verhältnis "R/B"	Strouhal-Zahl scharf-kantig "St" k	Strouhal-Zahl abgerund. Kanten "St" ger	Quer-schweif-fläche "A"	Flächenträg. h. "T"	E-Modul "E"					
8	A01_015,891_0_MAS	N	3	34,261	250+250	0,25	0,25	0,015	0,05	40	0,006	5,95	1,00	1,00	0,060	0,12	0,143	0,00573239	5,62344E-05	2,1E+11				
7	A01_026,833_0_MAS	N	3	29,871	250+250	0,25	0,25	0,015	0,05	40	0,006	5,95	1,00	1,00	0,060	0,12	0,143	0,00573239	5,62344E-05	2,1E+11				
8	A01_033,195_0_MAS	N	2	38	750+750	0,75	0,75	0,05	0,06	80	0,01	5,9	1,00	1,00	0,067	0,12	0,145	0,02882749	0,002591929	2,1E+11				
9	hand. A01_037,810_0_MAS	N	3	32,25	250+250	0,25	0,25	0,015	0,05	40	0,006	5,9	1,00	1,00	0,060	0,12	0,143	0,00573239	5,62344E-05	2,1E+11				
10	hand. A01_044,300_0_SKE	N	2	38	750+750	0,75	0,75	0,05	0,06	80	0,01	5,95	1,00	1,00	0,067	0,12	0,145	0,02882749	0,002591929	2,1E+11				

Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	
Dichte "ρ"	Log. Dämpfungskoeffizient "δs"	Eigenfreq. "fn"	äqu. Längenbezogene Masse "me"	Scruton-Zahl "Sc"	kritische Windgeschw. "v_crit"	v0,max ortsbez. "v_m"	mittl. 10min Windgeschw. für v0,max=27 "v_m"	Gefahr wirbelind. Querschwing. "v_m"	Amplitude Querriegel "γ F,max"	Amplitude Querriegel "γ F,max"	mittl. Schraubenerlänger. "l_schr."	Zugspannung Schr. "σ_schr."	Anzahl Schwingung/Jahr "N"	Einsatzgeschw. Galloping "v_cg"	Annäherungsrech. aG<0,33D/B+2 "aG"	Einsatzgeschw. Galloping mit aG rech. "v_cg rech"	v_cg	v_cg	Gallopin Ja/Nein	Interferenzf. Vortex shedding/galloping	Nennwert M16 4 A4: Schraube
7850	0,0377	2,74	45,00	43,4	4,8	24,0	21,8	JA	2	2	0,00	26	1,90E+07	49,6	1,28	46,4	27,2	Nein	Nein		
7850	0,0377	3,61	45,00	43,4	6,3	24,0	21,8	JA	2	2	0,01	34	1,78E+07	65,3	1,28	61,0	27,2	Nein	Nein		
7850	0,0377	1,69	226,30	24,3	8,7	24,0	21,8	JA	30	30	0,07	194	2,37E+06	51,2	1,28	47,8	27,2	Nein	Nein		
7850	0,0377	3,09	45,00	43,4	5,4	24,0	21,8	JA	2	2	0,01	29	1,95E+07	56,0	1,28	52,3	27,2	Nein	Nein		
7850	0,0377	1,69	226,30	24,3	8,7	24,0	21,8	JA	30	30	0,07	194	2,39E+06	51,2	1,28	47,8	27,2	Nein	Nein		

AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ
Nennspannung in der M16 o. M20 A4-70 Schraube nach Anziehen	obere Nennspannung σ _s	untere Nennspannung σ _s	R-Wert (σ _s /σ _t)	Bruch/ Dauerfest/ Zeitfest wenn Vorspannung beibehalten wird	Lebensdauer in Monaten bis Bruch für gekerbt mit bleibender Vorspannung		
225	251	199	0,80	DAUERFEST	A01_015,891_0_MAS		
225	239	191	0,74	DAUERFEST	A01_026,833_0_MAS		
225	419	31	0,07	ZEITFEST	25 A01_033,195_0_MAS		
225	254	196	0,77	DAUERFEST	A01_037,810_0_MAS		
225	419	31	0,07	ZEITFEST	25 A01_044,300_0_SKE		

Abb. 6-6: Screenshots aus dem Excel-Berechnungsblatt. Aufgrund der großen Spaltenanzahl sind diese hier gruppenweise untereinander dargestellt.

¹⁰ Die Gleichung E.10 [58] wurde bereits mit den in der Norm vorgeschlagenen Werten zu Glg. 12 vereinfacht.

In Tab. 6-1 ist eine Reihung von ca. 100 Stationen nach absteigender Gefahr des Schraubenbruchs aufgrund von Schwingungen durch *vortex shedding* dargestellt. Annahme für diese Berechnung ist, dass bis zur Rissentstehung und nachher nur *vortex shedding* auftritt, d. h. kein *galloping* mit hohen Amplituden, das eine Plastifizierung der Schraube bewirken kann. Eine frühe Plastifizierung der Schraube kann Druckeigenstressungen erzeugen, die der Rissentstehung entgegenwirken. *Galloping*-Einwirkungen auf eine rissbehaftete Schraube hingegen würden den Riss rascher vorantreiben und zu einem Absinken der abgeschätzten Lebensdauern führen. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich nur um eine qualitative Reihung handelt, die Lebensdauer in Monaten ist nicht als belastbares Rechenergebnis zu verstehen. Weiters wurde dieser aus der synthetischen Wöhlerlinie für A4-70-Schrauben abgeleitet, für Stahlschrauben würden sich die Werte ändern, die Reihung bliebe aber unverändert. Von den in Abschnitt 2 beschriebenen Stationen mit Auffälligkeiten findet sich in dieser Liste nur die Station S31-_074,300 (fett dargestellt). Dies ist ein erster Hinweis darauf, dass die meisten Schraubenbrüche vermutlich nicht durch *vortex shedding*, sondern durch *galloping* verursacht wurden. Die Station S31-_074,300 hat eine Einsetzgeschwindigkeit für *galloping* von 52,8 m/s (190 km/h), der Schraubenbruch dort dürfte deshalb höchstwahrscheinlich durch *vortex shedding* verursacht worden sein.

Für eine Untersuchung von im Einsatz befindlichen Schrauben durch die Montanuniversität Leoben im Juni 2014 wurden aus dieser Liste vier Stationen (in der Tabelle grau hinterlegt) ausgewählt. Die Ergebnisse des Untersuchungsberichts dazu (vollständig im Anhang C) sind in Abschnitt 7 zusammengefasst und diskutiert.

Tab. 6-1. Reihung der Stationen nach Anfälligkeit für Schraubenermüdung bei *vortex shedding*

Standort	Bundesland	Anzahl Steher	Lebensdauer qualitativ („Bruch“ wäre sofortiges Versagen)
A01-_164,143_2_SKE	O	2	BRUCH
A01-_172,020_1_SKE	O	2	BRUCH
A02-_012,662_1_SKE	N	2	BRUCH
A04-_001,100_1_MAS	W	2	BRUCH
A04-_001,100_1_MAS	W	2	BRUCH
A04-_001,995_2_MAS	W	2	BRUCH
A05-_001,920_0_MAS	N	2	BRUCH
A09-_170,880_2_SKE	St	2	BRUCH
A10-_050,130_1_SKE	S	2	BRUCH
A14-_001,770_0_SKE	V	2	BRUCH
A21-_037,150_2_SKE	W	2	BRUCH
A041_000,355_1_MAS	W	2	0
S05-_034,425_0_SKE	N	2	0
A05-_004,005_0_SKE	N	2	0
A01-_127,559_0_SKE	N	2	0
A13-_006,900_1_SKE	T	2	0

A13-_005,444_0_SKE	T	2	0
A01-_067,350_0_SKE	N	2	0
A01-_289,550_0_SKE	S	2	0
S01-_037,612_0_SKE	N	2	0
A23-_009,068_1_MAS	W	2	0
A01-_044,300_0_SKE	N	2	0
A01-_145,880_2_SKE	N	2	0
A01-_293,720_0_SKE	S	2	0
A041_000,411_2_MAS	W	2	0
A221_002,020_0_MAS	W	2	0
A221_002,020_0_MAS	W	2	0
A07-_008,004_2_SKE	O	2	0
S03-_017,525_0_MAS	B	2	0
S03-_015,273_0_MAS	N	2	0
A10-_045,250_0_MAS	S	2	0
A13-_022,100_0_SKE	T	2	0
A13-_028,755_0_SKE	T	2	0
A12-_142,400_0_SKE	T	2	0
A07-_011,000_0_SKE	O	2	0
S16-_048,315_0_MAS	V	2	0
S33-_011,700_0_MAS	N	2	0
A08-_037,400_0_SKE	O	2	0
A10-_089,580_0_SKE	S	2	0
A22-_000,741_1_SKE	W	2	0
A25-_004,315_0_SKE	O	2	0
A25-_014,580_0_SKE	O	2	0
A22-_000,744_1_SKE	W	2	0
A08-_002,323_0_SKE	O	2	0
A02-_105,710_0_SKE	B	2	0
A01-_202,715_0_SKE	O	2	0
A01-_095,345_0_SKE	N	2	0
A23-_016,330_0_MAS	W	2	0
A10-_004,925_0_SKE	S	2	0
A12-_071,500_0_SKE	T	2	0
A22-_008,800_0_SKE	W	2	0
S31-_074,300_0_MAS	B	2	0
S16-_001,750_0_MAS	T	2	0
A13-_008,600_2_SKE	T	2	0
S06-_096,036_0_SKE	St	2	0
S04-_013,700_0_MAS	N	2	2
S35-_010,387_0_MAS	St	2	2
S16-_052,895_0_MAS	V	2	3
A07-_004,689_2_SKE	O	2	4
A122_007,620_0_MAS	T	2	4
S02-_001,200_0_MAS	W	2	5
S02-_002,170_0_MAS	W	2	5
A031_001,550_0_MAS	B	2	6
A14-_057,200_0_MAS	V	2	6
S31-_038,400_0_MAS	B	2	7

A02-_214,613_0_MAS	St	2	7
A14-_060,000_0_MAS	V	2	7
S31-_035,450_0_MAS	B	2	8
A06-_010,239_0_MAS	B	2	10
A01-_197,930_0_MAS	O	2	12
A07-_020,350_0_MAS	O	2	12
A10-_043,100_0_MAS	S	2	12
A05-_009,470_0_MAS	N	2	14
A05-_014,450_0_MAS	N	2	14
A05-_018,700_0_MAS	N	2	14
A05-_021,050_0_MAS	N	2	14
S31-_082,975_0_MAS	B	2	15
A02-_324,185_0_SKE	K	2	16
S011_000,650_0_MAS	N	2	16
A01-_296,290_0_MAS	S	2	18
S02-_002,883_0_MAS	N	2	20
A131_000,570_0_MAS	T	2	20
S33-_024,800_0_MAS	N	2	21
S16-_055,442_0_MAS	V	2	22
S01-_046,986_0_MAS	N	2	23
A14-_011,100_0_MAS	V	2	24
A22-_017,275_0_MAS	N	2	30
S02-_004,625_0_MAS	W	2	31
A07-_013,568_0_MAS	O	2	37
A09-_101,120_0_MAS	St	2	37
S01-_042,000_0_MAS	N	2	48
S01-_048,596_0_MAS	N	2	48
A01-_145,880_1_MAS	N	2	50
A13-_001,320_0_MAS	T	2	50
A25-_018,130_0_MAS	O	2	64
S16-_014,560_0_MAS	T	2	65
S02-_000,662_0_MAS	W	2	66
A02-_164,370_0_MAS	St	2	69
A01-_033,195_0_MAS	N	2	74
A01-_132,325_1_MAS	N	2	77
A02-_242,170_0_MAS	K	2	86
A102_000,636_0_MAS	K	2	102

6.1.5 Berechnung der Anfälligkeit gegenüber bewegungserregten Querschwingungen (galloping)

Es sei diesem Abschnitt vorangestellt, dass *galloping* bis dato noch nicht als Reihungskriterium für gefährdete Stationen herangezogen wurde. Grund dafür sind die im Vergleich zu *vortex shedding* viel höheren, und deshalb seltener auftretenden Windstärken, die für diese bewegungsinduzierte Schwingung nötig sind.

Die Einsetzgeschwindigkeit v_{CG} für *galloping* errechnet sich laut [60] aus Glg. 13:

$$v_{CG} = \frac{2 \cdot Sc}{a_G} \cdot n \cdot B \quad \text{Glg. 13}$$

Hierbei ist a_G der sogenannte Stabilitätsbeiwert, der je nach Verhältnis D/B aus Abb. 6-7 direkt ablesbar oder durch Interpolation zu ermitteln ist.

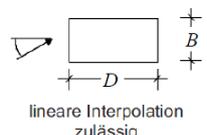
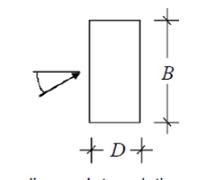
Querschnitt	Stabilitätsbeiwert a_G
	$D/B = 2$ 2
	$D/B = 1,5$ 1,7
	$D/B = 1$ 1,2
	$D/B = 2/3$ 1
	$D/B = 1/2$ 0,7
	$D/B = 1/3$ 0,4

Abb. 6-7: Stabilitätsbeiwert a_G [60]. Anmerkung: Die Interpolation des Wertes a_G ist zulässig, die Extrapolation nicht.

Alternativ (z. B. für das Excelblatt oder Berechnungsprogramme) kann a_G für $0,33 < D/B < 2$ auch mit folgender Gleichung ausreichend genau angenähert werden:

$$a_G = -0,28089 + 2,46472 \cdot \left(\frac{D}{B}\right) - 1,13972 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^2 + 0,23985 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^3 \quad \left\{ \left(\frac{D}{B}\right) \mid \frac{1}{3} \leq \left(\frac{D}{B}\right) \leq 2 \right\}$$

Glg. 14

Mit *galloping* ist zu rechnen, falls

$$v_{CG} \leq 1,25 \cdot v_m$$

Glg. 15

ist.

Sofern das Verhältnis zwischen v_{CG} und v_{crit} zwischen 0,7 und 1,5 liegt, wären Interferenzeffekte zwischen wirbelinduzierten und bewegungsinduzierten Schwingungen, also zwischen *vortex shedding* und *galloping* zu erwarten.

Bei den betrachteten ca. 440 Stationen liegt die kleinste Einsetzwindgeschwindigkeit für *galloping* bei 16 m/s bzw. 60 km/h (A02-_045,430_0_MAS). Derartige Windgeschwindigkeiten sind an diesem Standort nicht selten. Im Falle von *galloping* ist laut Berechnung in MAPLE bei dieser Station dennoch nicht mit hohen Amplituden zu rechnen, da aufgrund der geringen Eigenfrequenz des Querriegels (0,76 Hz) dessen Vertikalgeschwindigkeit in Relation zur Windgeschwindigkeit klein ist und sich so keine großen Auftriebskräfte einstellen können. Auch sind die Auftriebskräfte proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit und 60 km/h sind bei dieser Station noch zu wenig für sehr hohe Amplituden.

Anders stellt es sich aber bei beispielsweise den Stationen A04-_34,200_0_MAS, A04-_42,200_0_MAS und A09-_117,810_0_MAS dar. Bei diesen beträgt die kritische Windgeschwindigkeit für *galloping* zwischen 110 und 130 km/h. Tatsächlich wurden bei der A04-_34,200_0_MAS Schwingungen mit Amplituden von ± 200 mm an einem stürmischen Tag (siehe Abschnitt 2.3) beobachtet.

Tab. 6-2 reiht die Stationen nach aufsteigender Einsetzgeschwindigkeit für *galloping* bis zu einer Windgeschwindigkeit von 45 m/s. Es fällt auf, dass sich 7 der 8 in Abschnitt 2 behandelten Stationen mit Auffälligkeiten in dieser Liste befinden (fett dargestellt). Die noch ausständige Station S31-_074,300 hat eine Einsetzgeschwindigkeit für *galloping* von 52,8 m/s (190 km/h).

Für eine Untersuchung von im Einsatz befindlichen Schrauben durch die Montanuniversität Leoben im Juni 2014 wurden aus dieser Liste zwei Stationen (in der Tabelle grau hinterlegt) ausgewählt. Die Ergebnisse des Untersuchungsberichts dazu (vollständig im Anhang C) sind in Abschnitt 7 zusammengefasst und diskutiert.

Tab. 6-2. Reihung der Stationen nach Anfälligkeit für *galloping*

Standort	Bundesland	Anzahl Steher	Einsetzgeschw. Galloping v_{CG} (m/s)
A02-_045,430_0_MAS	N	2	16,3
A04-_064,824_0_MAS	B	2	24,2
S01-_013,580_0_MAS	N	2	29,0
S06-_086,796_0_MAS	St	2	29,3
S16-_021,150_0_MAS	T	2	29,4
A022_000,555_0_MAS	St	2	29,5
A09-_160,701_0_MAS	St	2	29,5
A10-_038,640_0_MAS	S	2	29,6
A09-_003,130_0_MAS	O	2	29,7
S35-_027,250_0_MAS	St	2	29,9
S01-_006,425_0_MAS	W	2	30,0
A08-_012,930_0_MAS	O	2	30,2
A09-_111,571_0_MAS	St	2	30,6
A09-_025,540_0_MAS	O	2	30,6
A09-_043,840_0_MAS	O	2	30,6
A09-_067,770_0_MAS	St	2	30,6
S35-_018,703_0_MAS	St	2	30,6
S35-_031,750_0_MAS	St	2	30,6
A02-_078,085_0_MAS	N	2	30,8
A02-_098,272_0_MAS	B	2	30,8
A08-_070,050_0_MAS	O	2	31,1
A10-_135,000_0_MAS	K	2	31,1
A25-_010,250_0_MAS	O	2	31,1
A01-_210,000_0_MAS	O	2	31,1
A04-_026,585_0_MAS	N	2	31,2
A04-_034,200_0_MAS	N	2	31,2
A04-_037,050_0_MAS	N	2	31,2
A07-_008,598_0_MAS	O	2	31,2
A09-_124,400_0_MAS	St	2	31,2
A09-_117,810_0_MAS	St	2	31,4

A02-_084,300_0_MAS	St	2	31,5
S35-_020,980_0_MAS	St	2	31,8
A02-_081,010_0_MAS	N	2	31,8
A022_002,830_0_MAS	St	2	31,8
S06-_100,716_0_MAS	St	2	31,8
A08-_060,184_0_MAS	O	2	32,0
A01-_249,800_0_MAS	O	2	32,4
A14-_058,002_0_MAS	V	2	32,7
A01-_104,546_0_MAS	N	2	33,0
A04-_039,700_0_MAS	B	2	33,0
A14-_000,751_0_MAS	V	2	33,3
A10-_019,350_0_MAS	S	2	33,4
A07-_023,500_0_MAS	O	2	33,6
A01-_044,300_0_SKE	N	2	33,7
S03-_008,400_0_MAS	N	2	33,8
S03-_012,780_0_MAS	N	2	33,8
S31-_043,960_0_MAS	B	2	33,8
A22-_028,500_0_MAS	N	2	33,8
A09-_129,920_0_MAS	St	2	33,9
A08-_017,680_0_MAS	O	2	34,0
A14-_044,670_0_MAS	V	2	34,1
A06-_020,963_0_MAS	B	2	34,2
S33-_016,640_0_MAS	N	2	34,3
A03-_000,491_0_MAS	N	2	34,5
A02-_254,000_0_MAS	K	2	34,5
S01-_015,160_0_MAS	N	2	34,6
S36-_035,007_0_MAS	St	2	34,7
A10-_064,700_0_MAS	S	2	35,0
S04-_005,526_0_MAS	B	2	35,1
A03-_006,900_0_MAS	N	2	35,1
A14-_013,648_0_MAS	V	2	35,1
A01-_229,150_0_MAS	O	2	35,1
A02-_236,485_0_MAS	K	2	35,1
A04-_015,850_0_MAS	N	2	35,1
A06-_004,050_0_MAS	B	2	35,1
A06-_015,389_0_MAS	B	2	35,1
A08-_021,805_0_MAS	O	2	35,1
A10-_009,550_0_MAS	S	2	35,1
A10-_174,240_1_MAS	K	2	35,3
A07-_009,204_0_MAS	O	2	35,4
A14-_033,100_0_MAS	V	2	35,7
A04-_042,200_0_MAS	B	2	35,7
A14-_025,000_0_MAS	V	2	35,7
A09-_054,001_0_MAS	O	2	35,7
S33-_001,281_0_MAS	N	2	35,8
A10-_122,830_0_MAS	K	2	35,9
A10-_070,250_0_MAS	S	2	36,1
A09-_131,510_0_MAS	St	2	36,2
A02-_131,600_0_MAS	St	2	36,3

A08-_048,700_0_MAS	O	2	36,3
A14-_053,240_0_MAS	V	2	36,3
S06-_090,836_0_MAS	St	2	36,3
S33-_004,423_0_MAS	N	2	36,3
S35-_034,100_0_MAS	St	2	36,3
S36-_016,970_0_MAS	St	2	36,3
A10-_058,650_0_MAS	S	2	36,5
A12-_132,225_0_MAS	T	2	36,5
A09-_190,198_0_MAS	St	2	36,5
A14-_037,050_0_MAS	V	2	36,6
S31-_041,200_0_MAS	B	2	36,6
A11-_001,350_0_MAS	K	2	36,8
A03-_025,900_0_MAS	B	2	36,9
A22-_026,497_0_MAS	N	2	36,9
A221_003,508_0_MAS	W	2	36,9
A02-_259,540_0_MAS	K	2	36,9
A09-_199,895_0_MAS	St	2	36,9
A03-_036,020_0_MAS	B	2	37,2
A02-_301,880_0_MAS	K	2	37,4
A02-_306,850_0_MAS	K	2	37,4
A102_003,600_0_MAS	K	2	37,4
S06-_043,686_0_MAS	St	2	37,4
A01-_067,350_0_SKE	N	2	37,5
S06-_061,756_0_MAS	St	2	37,6
A02-_144,200_0_MAS	St	2	37,6
S35-_023,232_0_MAS	St	2	37,6
A14-_015,691_0_MAS	V	2	37,7
A01-_297,237_0_MAS	S	2	37,7
S06-_003,090_0_MAS	N	2	37,9
S31-_037,200_0_MAS	B	2	38,0
A09-_090,350_0_MAS	St	2	38,2
A10-_012,900_0_MAS	S	2	38,2
A14-_029,780_1_MAS	V	2	38,4
A11-_008,020_0_MAS	K	2	38,4
A09-_010,060_0_MAS	O	2	38,5
A02-_091,100_0_MAS	St	2	38,6
S06-_047,826_0_MAS	St	2	38,6
A02-_294,000_0_MAS	K	2	38,6
A02-_329,850_0_MAS	K	2	38,6
A02-_336,600_0_MAS	K	2	38,6
A03-_003,000_0_MAS	N	2	38,6
A10-_024,850_0_MAS	S	2	38,6
A07-_011,000_0_SKE	O	2	38,7
A08-_037,400_0_SKE	O	2	38,7
A02-_019,460_0_MAS	N	2	38,7
A09-_079,970_0_MAS	St	2	38,8
A02-_121,000_0_MAS	St	2	38,9
A12-_107,885_0_MAS	T	2	38,9
A12-_135,000_0_MAS	T	2	39,1

A14-_027,650_0_MAS	V	2	39,3
A04-_048,000_0_MAS	B	2	39,5
A04-_054,300_0_MAS	B	2	39,6
A13-_001,320_0_MAS	T	2	39,7
S35-_013,050_0_MAS	St	2	39,9
A022_001,365_0_MAS	St	2	39,9
A13-_028,755_0_SKE	T	2	40,0
S06-_052,026_0_MAS	St	2	40,2
A222_000,320_0_MAS	N	2	40,2
A102_000,636_0_MAS	K	2	40,2
A09-_050,806_0_MAS	O	2	40,4
S06-_020,156_0_MAS	N	2	40,5
A12-_118,200_0_MAS	T	2	40,5
A02-_072,291_0_MAS	N	2	40,6
A09-_101,120_0_MAS	St	2	40,6
A02-_105,710_0_SKE	B	2	40,7
S31-_057,654_0_MAS	B	2	40,9
A14-_030,740_2_MAS	V	2	41,0
S36-_030,920_0_MAS	St	2	41,1
A02-_012,662_1_SKE	N	2	41,1
A131_000,570_0_MAS	T	2	41,3
S35-_024,587_0_MAS	St	2	41,3
A02-_153,449_0_MAS	St	2	41,3
S06-_046,116_0_MAS	St	2	41,4
S06-_062,896_0_MAS	St	2	41,4
S16-_014,560_0_MAS	T	2	41,4
A04-_060,660_0_MAS	B	2	41,4
A07-_008,004_2_SKE	O	2	41,5
S06-_096,036_0_SKE	St	2	41,5
A02-_010,200_0_MAS	N	2	41,7
S011_000,650_0_MAS	N	2	41,7
A13-_004,091_0_MAS	T	2	41,8
A02-_268,500_0_MAS	K	2	42,0
S06-_034,630_0_MAS	St	2	42,0
A01-_178,460_0_MAS	O	2	42,0
A10-_029,605_1_MAS	S	2	42,0
A10-_178,580_2_MAS	K	2	42,0
A141_001,825_0_MAS	V	2	42,0
S31-_051,600_0_MAS	B	2	42,0
A12-_125,680_0_MAS	T	2	42,1
S36-_021,110_0_MAS	St	2	42,4
S04-_015,175_0_MAS	N	2	42,8
A21-_028,505_0_MAS	N	2	42,8
A02-_332,670_0_MAS	K	2	43,1
S01-_009,392_0_MAS	W	2	43,6
S05-_005,474_0_MAS	N	2	43,6
S36-_001,940_0_MAS	St	2	43,6
A14-_060,000_0_MAS	V	2	43,7
A01-_257,800_0_MAS	O	2	43,8

A14-_057,200_0_MAS	V	2	44,0
A21-_016,000_0_MAS	N	3	44,1
S06-_028,625_0_MAS	St	2	44,5
A122_007,620_0_MAS	T	2	44,8
S01-_002,429_0_MAS	N	2	44,9
S01-_003,735_0_MAS	N	2	44,9
A02-_276,400_0_MAS	K	2	45,0

6.2 Analytisch-numerische Berechnung in MAPLE 17

Neben den einfachen analytischen Gleichungen aus der ÖNORM wurde auch ein mathematisch-physikalisches Modell in der Mathematiksoftware MAPLE 17 erstellt. Dieses geht von der Differentialgleichung eines schwingenden Biegebalkens [100], auf den aerodynamische Kräfte wirken, aus (Glg. 16).

$$E \cdot I \frac{\partial^4}{\partial x^4} u(x,t) + \frac{m}{L} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x,t) + d \cdot \frac{\partial}{\partial t} u(x,t) = \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot c_{Y,\text{fluc}} \cdot B \cdot K_W \cdot v^2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_W \cdot t) + \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot c_{Y,\text{mean}} \cdot B \cdot v^2 \quad \text{Glg. 16}$$

Dabei sind:

E der E-Modul des Querriegelwerkstoffs,

I das Flächenträgheitsmoment des Querriegelprofils,

u die vertikale Durchbiegung des Querriegels an der Stelle x zum Zeitpunkt t ,

x die x-Koordinate entlang der Querriegellänge,

t die Zeit,

m die Masse des Querriegels,

L die Länge des Querriegels zwischen den Kippblechen,

d der viskose längenbezogene Dämpfungskoeffizient, der sich aus $d = 2 \cdot \frac{m \cdot n}{L} \cdot \delta_s$ errechnet [101], wobei n die erste Biegeeigenfrequenz des Querriegels nach Glg. 3 ist und δ_s

das logarithmische Dämpfungsdekrement nach Abschnitt 6.1.3.2,

ρ_{Luft} die Dichte der Luft nach [60],

$c_{Y,\text{fluc}}$ der fluktuierende Auftriebskoeffizient nach Richter [62] und Lee [63],

$c_{Y,\text{mean}}$ der mittlere Auftriebskoeffizient nach Richter [62] und Lee [63],

B die Höhe des Querriegelprofils normal zur Windrichtung,

K_W der Wirklängenfaktor nach [60],

v die Windgeschwindigkeit und

f_W die Ablösefrequenz der Wirbel bei der Windgeschwindigkeit v gemäß $f_W = \frac{St \cdot v}{B}$.

Auf der linken Seite der Gleichung befinden sich die Terme für die auf den Balken wirkende Kraft aufgrund der elastischen Durchbiegung, die Massenkraft aufgrund der Beschleunigung und die geschwindigkeitsproportionale Dämpfungskraft. Der erste Term der rechten Seite beschreibt die periodisch wirkende Kraft aufgrund der Wirbelablösung, wodurch das Schwingen

durch *vortex shedding* bewirkt wird. Der zweite Term steht für die Auftriebskräfte bei (aus Balkensicht) schräger Anströmung, also wenn sich der Balken in Vertikalrichtung bewegt. Dies ist der *galloping*-Term.

Als Anfangsbedingung wird ein ruhender Balken ohne Anfangsauslenkung angenommen, als Randbedingung ein zweifach gelenkig gelagerter Balken mit einem Fest- und einem Loslager. Mit dieser Art der Lagerung ist man in sehr guter Übereinstimmung mit der realen Ausführung mit zwei langen, nachgiebigen Stehern und der gelenkigen Lagerung mittels Kippblechen.

Die numerische Lösung obiger Gleichung ergibt das zeitliche Schwingverhalten eines beliebigen, zu Anfang in Ruhe befindlichen Querriegels für beliebige Windstärken, also die Darstellung der Amplitudenentwicklung über der Zeit für eine gegebene Windgeschwindigkeit. Weiters lässt sich in Maple eine Schleife über einen Windgeschwindigkeitsbereich programmieren, bei der für jede Windgeschwindigkeit die maximale Amplitude nach einer bestimmten Zeit ausgelesen wird. Man erhält so ein Diagramm, in dem Amplitude über Windgeschwindigkeit dargestellt ist.

Diese Rechnung dient einerseits zur Kontrolle der Abschätzungen nach der ÖNORM, andererseits bietet sie auch detaillierteren Einblick in das Verhalten der Querriegel, da auch die zeitliche Dimension miteingeschlossen wird.

6.3 Diskussion der Ergebnisse für die betrachteten 8 Stationen

In Tab. 6-3 sind die Ergebnisse der Berechnung nach ÖNORM für die acht Stationen aus Abschnitt 2 dargestellt. Die Ergebnisse für alle Stationen sind in der Excel-Datei *Standortliste_Stahlbau_20140619_1_Daten.xlsx* enthalten.

Tab. 6-3. Berechnete kritische Windgeschwindigkeiten, Schraubenlebensdauern und weitere charakteristische Größen der Stationen aus Abschnitt 2, an denen Probleme mit den Schrauben auftraten und/oder Schwingungen beobachtet wurden

Nr.	Standort	Kritische Windgeschwindigkeit für <i>vortex shedding</i> (m/s)	Amplitude in Querriegelmitte bei <i>vortex shedding</i> (mm)	Abgeschätzte Schraubenlebensdauer, falls nur <i>vortex shedding</i> auftritt (Monate)	Beobachtungen im Rahmen der 2-jährigen Inspektionen	Kritische Windgeschwindigkeit für <i>galloping</i> mit (m) und ohne (o) Berücksichtigung des Gehtrags (m/s)
1	A01-_044,300_SKE	8,7	30	73	gerissene Schr.	(o):47,8 (172 km/h) (m):31 (112 km/h)
2	A01-_067,350_SKE	9,5	31	11	400 mm Amplitude, ger. Schrauben	(o): 53,3 (192 km/h) (m): 35 (126 km/h)
3	A04-_034,200_MAS	4,7	9	23974	200 mm Amplitude, ger. Schrauben	31,2 (112 km/h)
4	A09-_117,810_MAS	5,3	12	10103	gerissene Schr.	31,4 (113 km/h)
5	A21-_028,505_MAS	6,4	16	∞	gerissene Schr. aufgrund Verspannung	42,8 (154 km/h)
6	S06-_034,630_MAS	5,4	9	∞	lockere Schr.	42,0 (151 km/h)
	Wie 6, aber mit Schneeauflage	6,9	25	nicht berechnet	25 mm Amplitude	
7	S31-_074,300_MAS	7,9	11	0,3	gerissene Schr.	52,8 (190 km/h)
8	A04-_042,200_MAS	6,1	13	367	gerissene Schr.	35,7 (128 km/h)

Die abgeschätzten Schraubenlebensdauern basierend auf den geringen Amplituden beim *vortex shedding* sind für die Stationen 1, 2, 7 – und bedingt bei Station 8 – in plausiblen Größenordnungen. Bei den Stationen 3, 4, 5 und 6 hingegen kann die dynamische Beanspruchung durch *vortex shedding* kaum der alleinige bzw. der Hauptgrund für die dort beobachteten Schraubenbrüche oder -lockerungen sein. Bei diesen Stationen (und Station 8) liegt die Einsetzgeschwindigkeit v_{CG} für *galloping* mit 112 bis 150 km/h in einem Bereich, der bei starken Stürmen erreicht wird. Die Bruchfläche der Schraube von der Station 4 (Abb. 5-1) dürfte somit durch eine Kombination aus Phasen mit geringer Spannungsamplitude aus dem *vortex shedding* und Phasen mit höherer Amplitude im Zuge von *galloping* zustande gekommen sein. Dasselbe kann für die Stationen 3, 5, 6 und 8 angenommen werden.

Bei der Station 2 wurden Auslenkungen während des Schwingens von 400 mm, bei der Station 3 eine Vertikalamplitude von ± 200 mm beobachtet. Derartige Amplituden sind nur bei Einsetzen von *galloping* bei starkem Wind erreichbar.

Für den 23.12.2008, als bei der Station 2 (A01-_67,350_0_SKE zwischen St. Pölten und Loosdorf) die starken Schwingungen beobachtet wurden, konnte recherchiert werden, dass im ca. 40 km entfernten Felixdorf bei einer privaten Wetterstation Böen bis zu 93 km/h (26 m/s) gemessen wurden [102]. Nachdem sich diese Wetterstation östlich der Rax-Schneeberg-Gruppe befindet, ist anzunehmen, dass die Windstärken im freieren Gelände bei der A01-_67,350_0_SKE deutlich höher waren, geschätzt 30 bis 35 m/s. Allerdings dürften selbst die

rechnerischen 53,3 m/s nicht erreicht worden sein, derartige Sturmböen hätten in Monatsrückblicken der ZAMG Spuren hinterlassen. Die Station 2 ist jedoch begehbar und der Blechtrog erhöht die Windangriffsfläche um ca. 200 mm. Rechnet man bei den begehbaren Stationen 1 und 2 v_{CG} nach Glg. 4 und Glg. 13 mit dieser Gesamthöhe und einem um nur 20% erhöhten Stabilitätsbeiwert a_G^{11} , reduziert sich v_{CG} auf 31 (Station 1) und 35 m/s (Station 2)¹². Auch die MAPLE-Berechnung mit einer um 200 mm vergrößerten Riegelhöhe in den aerodynamischen Termen stützt diese Annahme, wie Abb. 6-8 zeigt. Damit können die beobachteten hohen Amplituden bei der Station 2 erklärt und auch ein berücksichtigenswerter *Galloping*-Anteil beim Schrauben-versagen bei Station 1 angenommen werden.

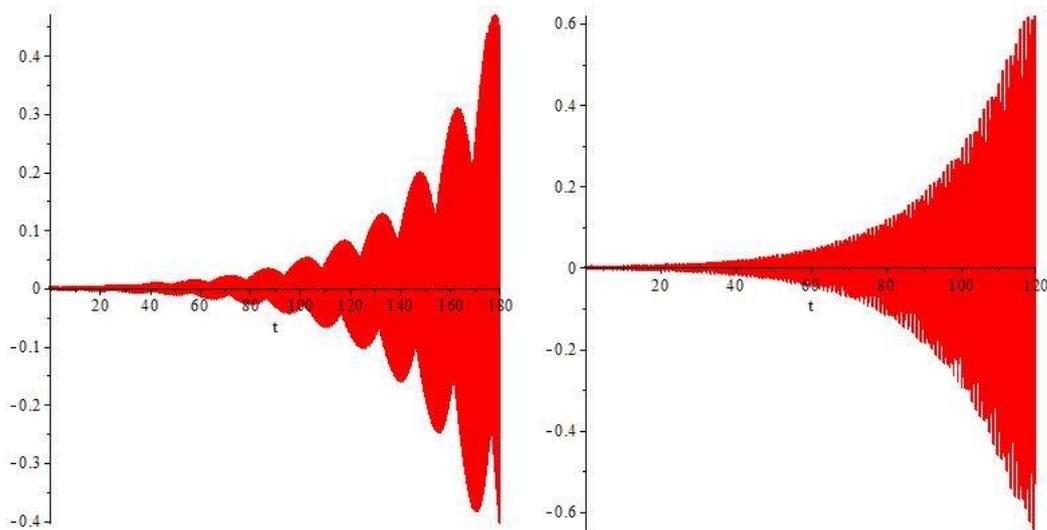


Abb. 6-8: Amplitudenentwicklung (Einheit m) bei Station 2 A01-_67,350_0_SKE laut MAPLE-Berechnung für 30 (links) und 35 m/s (rechts) in den ersten 180 bzw. 120 s bei Berücksichtigung des Gehtrogaufbaus.

Auch für die Station 3 (A04-_34,200_MAS mit Westnordwestausrichtung) konnte eine Recherche der Wetterverhältnisse am 6.12.2003, dem Tag, als dort die starken Schwingungen festgestellt wurden, die Annahme von *galloping* untermauern. Laut einem Eintrag im Alpinfoforum [103] wurde für den 6.12.2003 folgende Wetterprognose gegeben:

„Die Temperaturen liegen zwischen 0 Grad im Mühlviertel und 10 Grad im Grazer Becken. Vorsicht, besonders in Niederösterreich, Wien und im Nordburgenland weht stürmischer Nordwestwind mit Böen zwischen 70 und 90 Kilometer pro Stunde.“

Die Böen bei Station 3 haben also sehr wahrscheinlich die Geschwindigkeit $v_{CG} = 112$ km/h (31,2 m/s), bei der *galloping* rechnerisch einsetzt, erreicht. Dies bestätigt auch eine Berechnung in MAPLE für 31,2 m/s und 33,3 m/s (120 km/h), wie in Abb. 6-9 dargestellt. Die Amplituden gehen nach etwas mehr als einer Minute je nach Windstärke auf mehrere hundert Milli-

¹¹ Es werden statt der 1,2 für den quadratischen Querschnitt 1,44 angenommen. Die Norm [60] sagt sogar, dass für Profile mit unbekanntem Wert für a_G 10 verwendet werden soll.

¹² Grund dafür ist, dass die kritische Geschwindigkeit v_{CG} für *galloping* indirekt proportional zur Profilhöhe B (über die Scruton-Zahl) und dem Stabilitätsbeiwert a_G ist.

meter hoch, wobei der quasistationäre Zustand mit der Maximalamplitude noch gar nicht erreicht wird.

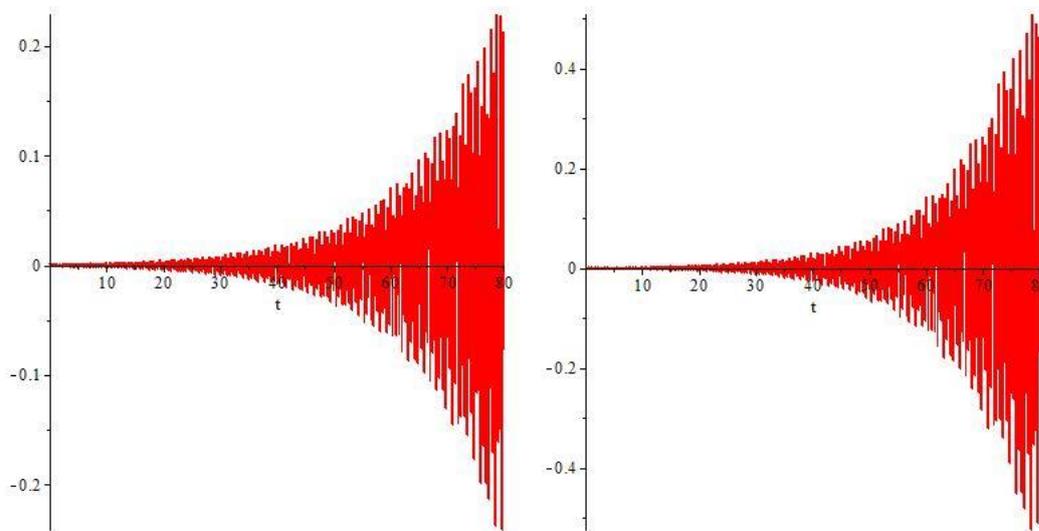


Abb. 6-9: Amplitudenentwicklung (Einheit m) bei Station 3 A04-_34,200_MAS laut MAPLE-Berechnung für 31,2 (links) und 33,3 m/s (rechts) in den ersten 80 s.

Bei der Station 5 wurde bei einer Kontrolle eine gerissene Schraube gefunden und dies der Verspannung des Querriegels zugeschrieben. Bei der folgenden Kontrolle zwei Jahre später waren alle Schrauben intakt. Wie die Abschätzung zeigt, ist *vortex shedding* dort auch nicht in der Lage, einen Schraubenermüdungsbruch hervorzurufen. Erst bei Windstärken von 42 m/s treten durch *galloping* hohe Amplituden auf, die eine Schraubenschädigung bewirken können. Dies könnte im ersten Inspektionsintervall der Fall gewesen sein, im zweiten dann nicht mehr.

Bei der nicht begehbaren Station 7 dürften die gerissenen Schrauben ausschließlich auf *vortex shedding* zurückzuführen sein. Die dort benötigten 52,8 m/s für *galloping* dürften selten bis nie auftreten.

7 Untersuchung von im Einsatz befindlichen Schrauben durch MU Leoben

Im Juni 2014 wurden 5 Stationen für eine Schraubenüberprüfung ausgesucht. Dazu wurden die Schrauben unter Messung des Lösemoments demontiert. Die Schrauben wurden im Anschluss an G. Mori, Montanuniversität Leoben zur Untersuchung auf Risse und plastischer Deformation übergeben. Der Untersuchungsbericht von G. Mori ist dem Anhang C beigelegt.

In Tab 7-1 sind die überprüften Stationen mit ihren Eigenschaften bezüglich *vortex shedding* und *galloping* dargestellt.

Tab. 7-1. Untersuchte Stationen

Station	Abgeschätzte A4-70-Schraubenlebensdauer ggü. <i>vortex shedding</i> in Monaten	Einsetzgeschwindigkeit von <i>galloping</i> in m/s	Bemerkung
A01-_145,880_0_SKE	0	45,2	C-Schrauben (vermutlich 8.8)
A01-_164,143_2_SKE	0	50,5	4 A4-70 und 4 C-Schrauben
A09-_101,120_0_MAS	37	40,6	C-Schrauben
A09-_117,810_0_MAS ¹³	10000	31,4	C-Schrauben. Hier kam es Mitte 2013 zu einem Bruch einer A4-70-Schraube.
S31-_074,300_0_SKE	0	52,8	A4-70-Schrauben, hier kam es bereits einmal zu einem Schraubenbruch

Die Untersuchung diente zur Klärung, ob die vier im Excelblatt als gering abgeschätzten Schraubenlebensdauern für A4-70-Schrauben bei wirbelinduzierten Schwingungen durch die Realität belegbar sind. In diesem Fall hätten sich zumindest bei einigen Schrauben erste Risse zeigen müssen, sofern während des bisherigen Einbauzeitraums die Windstärke lange genug im Bereich der kritischen Windgeschwindigkeit gelegen hat.

Die Farbeindringprüfung der MU Leoben zeigte an keiner der Schrauben Risse. Festgestellt werden konnten jedoch ein Verlust der Vorspannkraft (geringes Lösemoment) bei vielen Schrauben sowie plastische Deformationen.

Dieses Ergebnis schließt eine Rissentstehung und –ausbreitung durch *vortex shedding* noch nicht aus. Gerade bei der Station S31-_074,300_0_SKE ist das früher festgestellte Schraubenversagen aufgrund der hohen Einsetzgeschwindigkeit von 52,8 m/s nur äußerst unwahrscheinlich auf *galloping* zurückführbar. Sehr auffallend ist in der Auswertung der Lösemomente, dass gerade bei S31-_074,300_0_SKE das Lösemoment nur noch 10 bis 40 % des Nennan-

¹³ Im Bericht von G. Mori als A09-_117,118_0_MAS bezeichnet

zugsmoments betrug (Abb. 3.2. im Bericht G. Mori, Anhang C). Hier wurde im Betriebszeitraum entweder die Vorspannkraft abgebaut oder es wurde bei der Montage nicht mit dem Nennanzugsmoment angezogen. Beides führt zu einer starken Verringerung der mittleren Spannung in der Schraube, um welche die Amplitude bei Querriegelschwingung pendelt. Dies könnte eine Erklärung für das Nichtauftreten von Ermüdungsrissen dort sein. Die Verbiegung der Schraube (Tab. 3.1 im Bericht G. Mori, Anhang C) ist dort sehr gering, d. h. ein Vorspannungsabbau durch plastische Deformation im Zuge einer starken Querriegelschwingung ist nicht anzunehmen.

Die größte Deformation trat bei den Schrauben erst Mitte 2013 neu eingesetzten C-Schrauben der Station A09-_117,810_0_MAS mit bis zu 1,25 mm (Hälfte des Messuhrausschlags, Tab. 3.1 im Bericht G. Mori, Anhang C) auf. Diese Station weist von allen fünf untersuchten mit 31,4 m/s die geringste Einsetzgeschwindigkeit für *galloping* auf. Diese Windgeschwindigkeiten dürften in diesem Bereich häufig erreicht werden und die deutliche Schraubenverformung auf eine hohe *Galloping-Amplitude* zurückzuführen sein.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen treffen:

Vortex shedding kann zu Schraubenbrüchen führen, sofern das Nennanzugsmoment bei der Montage aufgebracht wird und es im Zuge des Betriebs zu keinem Lockern der Schrauben und somit Verringerung der Vorspannkraft kommt. In diesem Fall ist die Gefährdung der Stationen nach der Reihung in Tabelle 6-1 gegeben.

Sieben von acht der in Abschnitt 2 behandelten auffälligen Stationen zeigen eine Anfälligkeit gegen *galloping*, wie nach Tabelle 6-2 gereiht. Aufgrund der deutlich höheren Amplituden bei *galloping* ist hier auch eine geringere Vorspannkraft der Schrauben nicht sehr entlastend wirksam.

8 Messungen

8.1 Messung 1: A09-_187,965_0_MAS bei Seiersberg

In Abb. 8-1 ist die gemessene Absolutbeschleunigung in Vertikalrichtung in Querriegelmitte dargestellt [104]. Wie leicht erkennbar, fand innerhalb der 5 Messtage (Mittwoch, 05.02. bis Montag 10.02.2014) keine nennenswerte Schwingungsanregung des Querriegels (auch nicht in Fahrbahnrichtung) statt. Wirbelinduzierte Resonanz wäre bei dieser Anlage (ohne Geländer) bei einer Windgeschwindigkeit von 8,2 m/s mit einer Frequenz von 1,99 Hz, einer Amplitude von 18 mm und einer Beschleunigung von 0,28 g gegeben. Aufgrund der Windsituation während des Messzeitraums (um die 1 bis 3 m/s für die mittlere 10-min-Windgeschwindigkeit und nur einmal Böen mit ca. 6 m/s normal zum Querriegel laut den Wettermessstationen Straßgang und Thalerhof¹⁴) war mit dem Auftreten von Beschleunigungssignalen im Bereich von 0,28g somit nicht zu rechnen. Weiters ist diese Station begehbar, das heißt, sie weist eine für die Wirbelstraßenbildung eher ungünstige Aerodynamik auf.

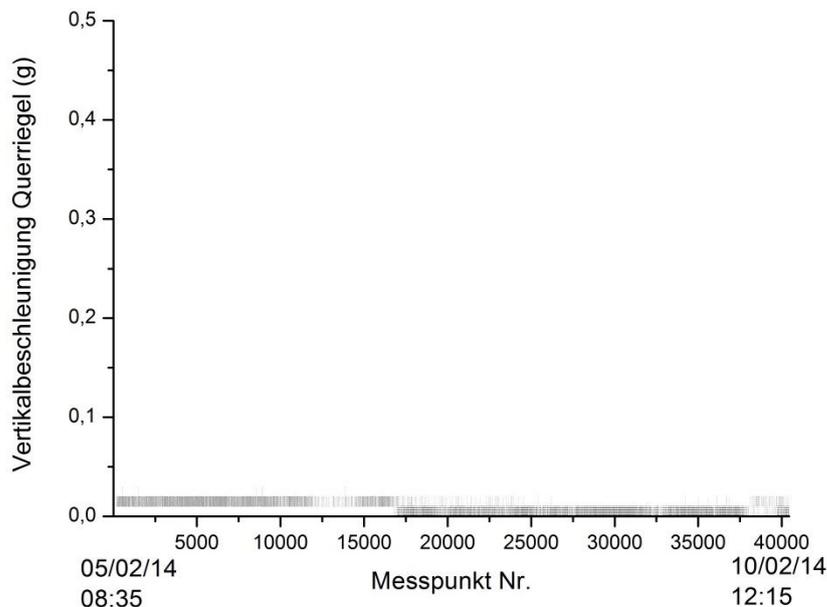


Abb. 8-1: Beschleunigungsmessung an der Station A09-_187,965_0_MAS

Wichtiges Ergebnis der Messung ist, dass der Verkehr zu keinen markanten Querriegelschwingungen führte. Die maximale Beschleunigung in Vertikalrichtung betrug 0,03g (ausgenommen die Schwingungen beim Begehen der Station für Montage und Demontage des Datenloggers), das entspricht einer Amplitude von ca. 2 mm. Auch die Messmethode konnte mit dem Versuch erfolgreich erprobt werden, die Aufzeichnung ist lückenlos, Zeitstempel korrekt mitgeloggt und weder Feuchtigkeit noch die Temperaturen unter 0 °C hatten negative Auswirkungen auf das Messsystem. Die Genauigkeit ist mit 0,01g ausreichend.

¹⁴ Messwerte und Prognosen konnten auf <http://de.windfinder.com> abgerufen werden.

8.2 Messung 2: A03-_000,491_0_MAS bei Guntramsdorf

Aufgrund günstiger Windprognosen im Bereich um die nicht begehbare Station A03-_000,491_0_MAS wurde der Beschleunigungssensor dort am 13.02.2014 montiert und am 15.02.2014 zur Auswertung wieder abgebaut. In Abb. 8-2 sind in Schwarz die Absolutwerte der Vertikalbeschleunigung in Querriegelmitte [104], in Blau die mittlere 10-min-Windgeschwindigkeit¹⁵ und in Violett die 2 s-Böen [105] dargestellt.

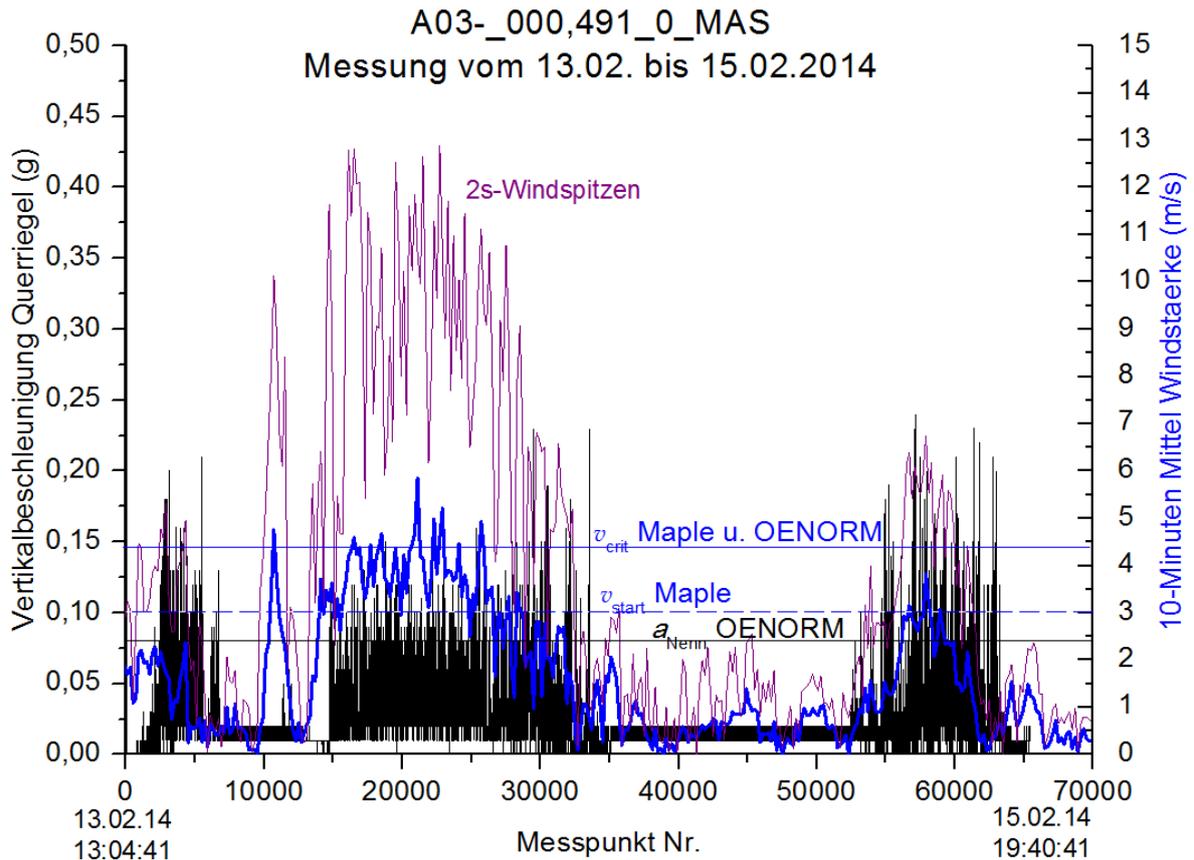


Abb. 8-2: Beschleunigungsmessung an der Station A03-_000,491_0_MAS (in Schwarz) und gemessene Winddaten (blau und violett).

Die kritische Windgeschwindigkeit des Querriegels beträgt laut ÖNORM und analytisch-numerischer MAPLE-Berechnung 4,4 m/s, die Amplitude 8 mm, die Eigenfrequenz 1,5 Hz und die Vertikalbeschleunigung bei Resonanz 0,08g.

Die gute Korrelation zwischen den von ÖNORM und MAPLE-Rechnung prognostizierten Werten und den Messwerten ist aus obigem Diagramm deutlich erkennbar. Das vorhergesagte Auftreten von wirbelinduzierten Schwingungen bei Windgeschwindigkeiten größer 3,5 m/s konnte durch die Messung bestätigt werden. Ebenso liegt der Großteil der Vertikalbeschleuni-

¹⁵ Die Messwerte (Windgeschwindigkeit und -richtung) stammen von der Wetterstation im 6 km südlich der Mautstation gelegenen Trumau (abgerufen über <http://de.windfinder.com>) und wurden auf die NO/SW-Ausrichtung der Mautstation projiziert sowie mittels logarithmischen Windprofils von 2 m Höhe (Messhöhe) auf 5,9 m (Querriegelhöhe) umgerechnet.

ungswerte im erwarteten Bereich um 0,08g, was einer Amplitude von 8 mm bei einer Schwingfrequenz von 1,5 Hz entspricht. Die Beschleunigungsspitzen mit bis zu 0,25g konnten mit Hilfe der MAPLE-Rechnung erklärt werden: Hier handelt es sich um Schwingungen des Querriegels bei Windgeschwindigkeiten zwischen 8 und 10 m/s (wie sie als Böen zwischenzeitlich auftreten können). Die Wirbelablösefrequenz beträgt dann 3 Hz, die dem zunächst noch mit 1,5 Hz schwingenden Querriegel nach und nach aufgezwungen wird und kurzzeitige höhere Beschleunigung hervorruft. Nach 20 s beträgt die Amplitude 7 mm, was eine Beschleunigung von 0,25g bedeutet. Dieser Vorgang ist in Abb. 8-3 visualisiert.

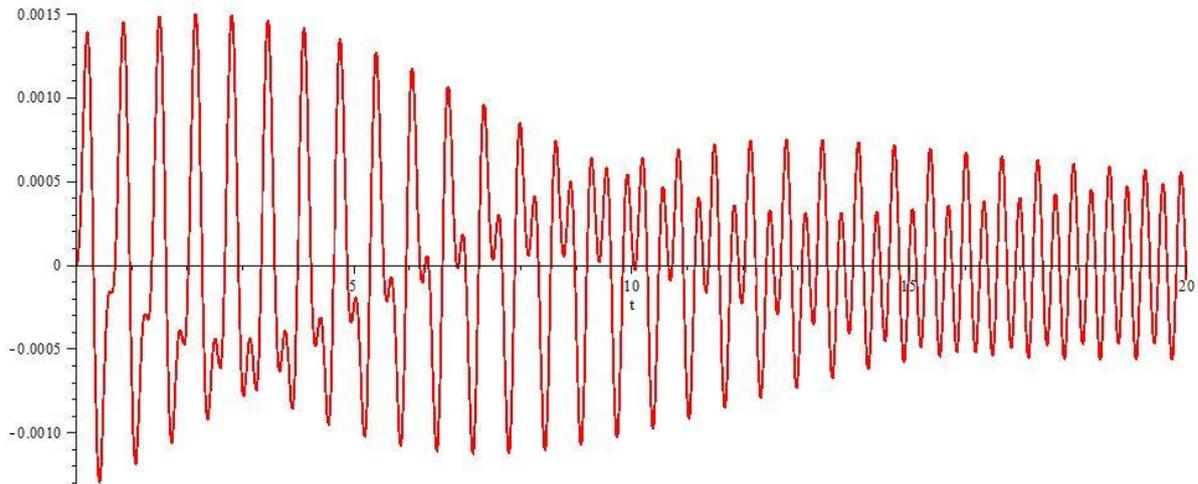


Abb. 8-3: Mit MAPLE berechnete zeitliche Amplitudenentwicklung des Querriegels (in m) bei A03-000,491_0_MAS bei Windeinwirkung mit 9 m/s

Abb. 8-4 zeigt die mit MAPLE berechnete Schwingungscharakteristik des Querriegels in Form von maximaler Amplitude nach 5 s Windeinwirkung über der Windgeschwindigkeit aufgetragen.

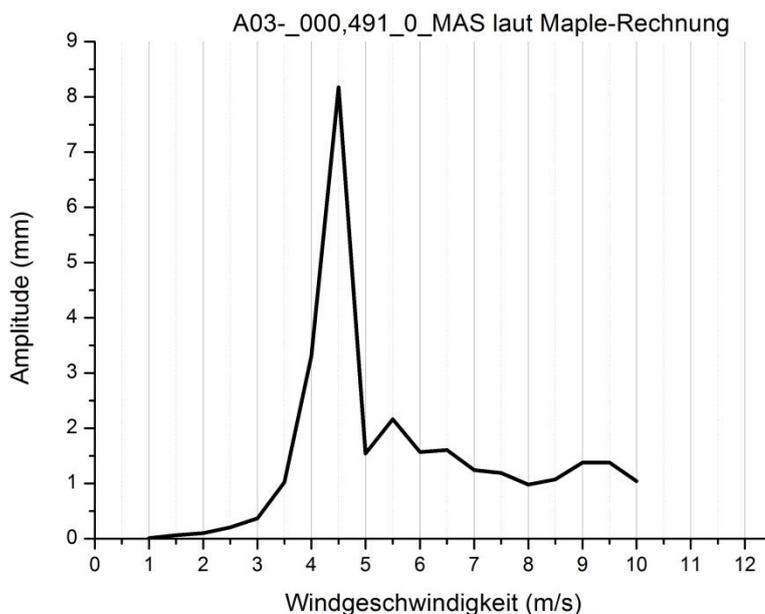


Abb. 8-4: Schwingungscharakteristik des Querriegels der Station A03-000,491_0_MAS

8.3 Messung 3: Versuche im Modellwindkanal

8.3.1 Validierung der Berechnungen

Zur Überprüfung, ob die Rechenmodelle nach ÖNORM in Abschnitt 6.1 und nach MAPLE in Abschnitt 6.2 die tatsächlichen Effekte bei windinduzierten Schwingungen hinreichend genau erfassen können, wurden im Modellwindkanal der FH JOANNEUM im Rahmen einer Bachelor-1-Arbeit Versuche mit Modellbalken durchgeführt. Zusätzlich wurde der Effekt von verschiedenen Störblechanordnungen (siehe Abb. 2-11 und Abb. 3-6 b) auf dem Balken zur Reduktion der Schwingungen untersucht. Im Folgenden eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit [106].

Der Modellbalkenwerkstoff und die Balkenabmessungen wurden so gewählt, dass im Bereich der möglichen Windgeschwindigkeiten des Windkanals (0 bis 30 m/s) sowohl *vortex shedding* als auch *galloping* mit leicht messbaren Amplituden (also im Bereich von zumindest einigen Millimetern) auftreten. So ergab sich ein Modellbalken aus Styrodur der Fa. Bachtl mit 500 mm Länge und einem 20×20 mm Querschnitt. Der E-Modul beträgt 31 MPa, die Dichte 35 kg/m³. Das logarithmische Dämpfungsdekrement δ_s wurde zu 0,3 gemessen. Der Balken wurde mittels Gummibändern gelenkig auf zwei Holzplatten gelagert (Abb. 8-5) und in 0,5 m/s-Schritten mit der Windströmung beaufschlagt. Die Amplitude in der Balkenmitte wurde gemessen. Zur Ermittlung der Schwingfrequenz wurde eine Stroboskoplampe verwendet.



Abb. 8-5: Versuchsaufbau im Modellwindkanal [106]

Laut ÖNORM-Rechnung sollte bei diesem Balken die kritische Windgeschwindigkeit v_{crit} für *vortex shedding* bei 5,6 m/s (mit einer Frequenz von 34 Hz und Amplitude von 3,24 mm) und v_{CG} für *galloping* bei 17,9 m/s liegen. Die Rechnung mit MAPLE ergab für v_{crit} 5,46 m/s, für die Frequenz 34,1 Hz, die Amplitude mit 3,3 mm und für v_{CG} 17,5 m/s. In Abb. 8-6 ist eine Gegenüberstellung der maximalen Amplitude über der Windgeschwindigkeit von Windkanalmessung und MAPLE-Rechnung dargestellt. In der MAPLE-Rechnung wurde dafür die maximale Amplitude zwischen 4 und 5 s Anströmung ausgelesen.

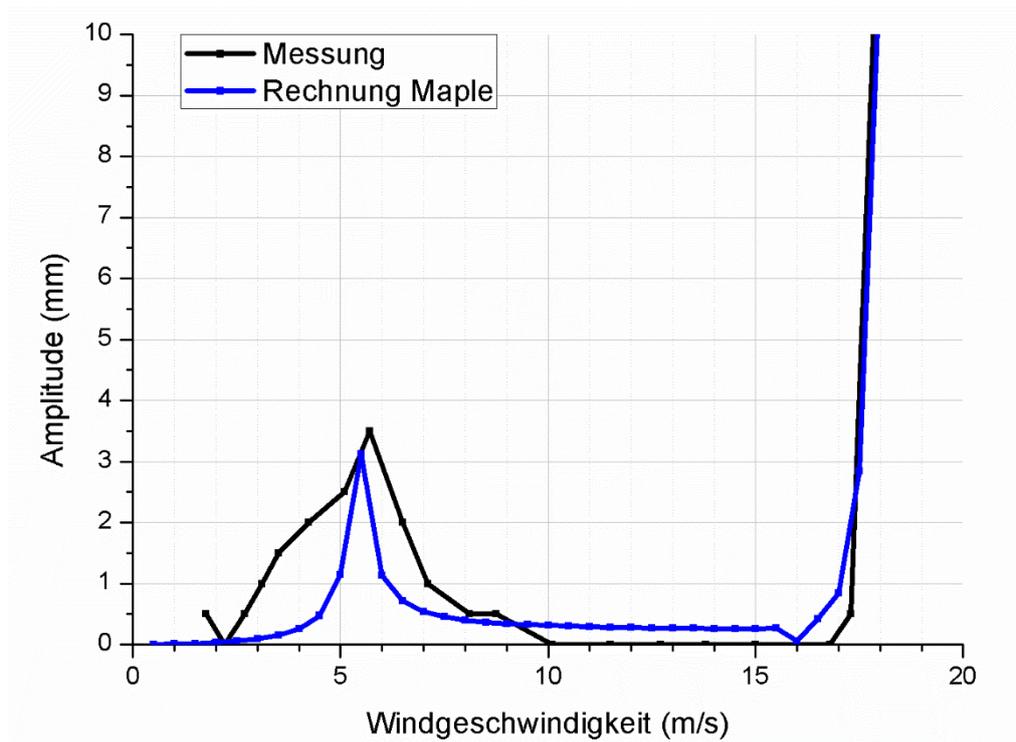


Abb. 8-6: Gegenüberstellung von Messung und Berechnung nach MAPLE

Bis auf die breitere Ausformung des gemessenen Amplitudengangs im *vortex shedding*-Bereich ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Versuch gegeben. In Abb. 8-7 sind die zeitlichen Verläufe bei v_{crit} und v_{CG} dargestellt. Man erkennt, dass sich bei v_{crit} nach etwa 0,5 s ein quasistationärer Zustand einstellt. Bei v_{CG} hingegen dauert es fast 15 s bis dieser Zustand erreicht wird.

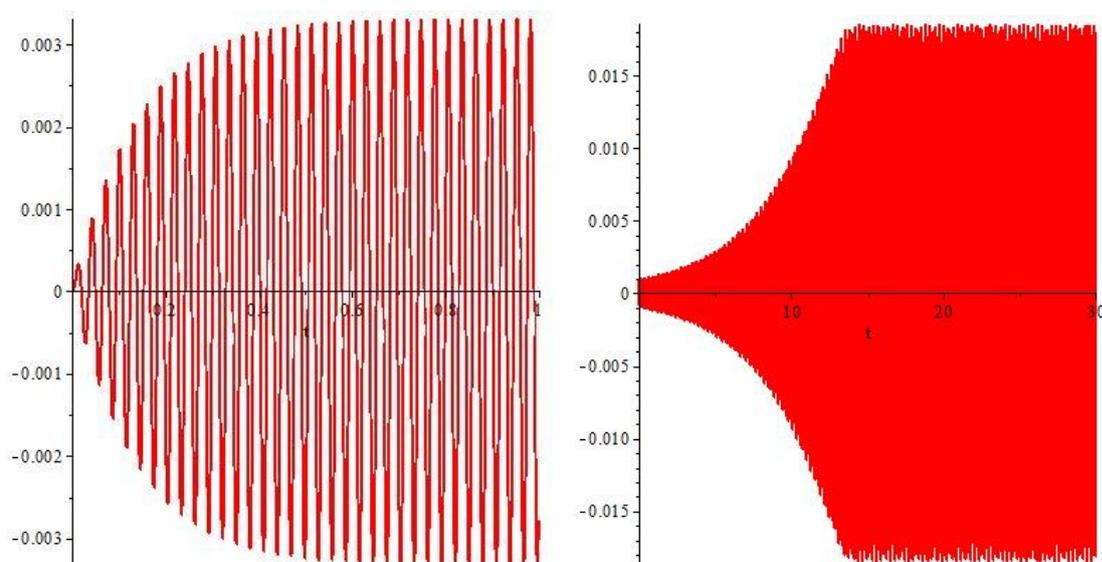


Abb. 8-7: Links: Zeitliche Entwicklung der Amplitude bei der kritischen Windgeschwindigkeit von 5,46 m/s für *vortex shedding* laut MAPLE-Rechnung (Amplitude in m). Rechts: Amplitudenentwicklung bei der kritischen Geschwindigkeit für *galloping* (17,5 m/s).

8.3.2 Erproben von aerodynamischen Verbesserungsmaßnahmen

Bei der A04-_034,200_0_MAS wurden an der Querriegeloberseite Störbleche zur Reduktion der Schwingungen angebracht (siehe Abschnitt 2.3). Diese Maßnahme sollte am Modellbalken im Windkanal auf ihre Wirksamkeit überprüft werden und weitere Anordnungen getestet werden. Diese sind in Abb. 8-8 dargestellt.

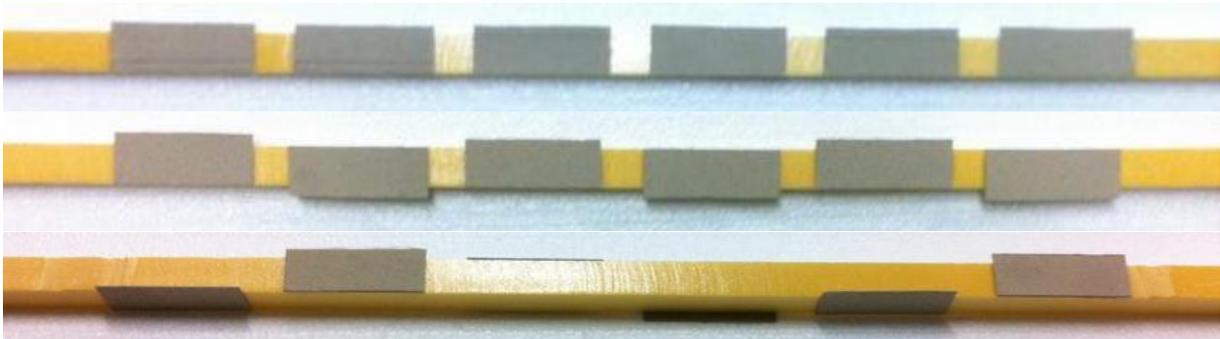


Abb. 8-8: Verschiedene Anordnungsvarianten von Störblechen. Oben: Störbleche nur an der Oberseite, Mitte: Störbleche oben und unten, Unten: Störbleche spiralförmig [106]

Abb. 8-9 zeigt die Auswirkungen der Störblechvarianten. In Schwarz ist zum Vergleich das Schwingungsverhalten des Balkens ohne Bleche dargestellt. Die rote Kurve entspricht der Blechanordnung bei der A04-_034,200_0_MAS, es zeigt sich, dass die Amplituden im *vortex shedding*-Bereich leicht reduziert werden und *galloping* tritt bis 22 m/s nicht mehr auf. Noch wirksamer ist eine Blechanordnung abwechselnd oben und unten, wie die grüne Kurve zeigt. Als beste der Varianten hat sich die spiralförmige Anordnung herausgestellt (blaue Kurve). Bei dieser Version traten im Messbereich von 0 bis 23 m/s überhaupt keine messbaren Schwingungen des Modellbalkens mehr auf.

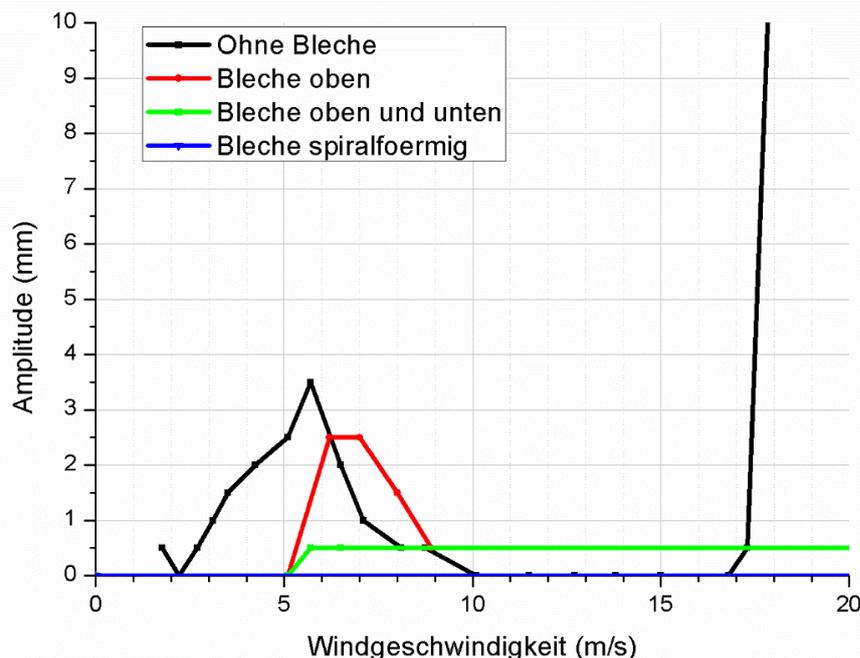


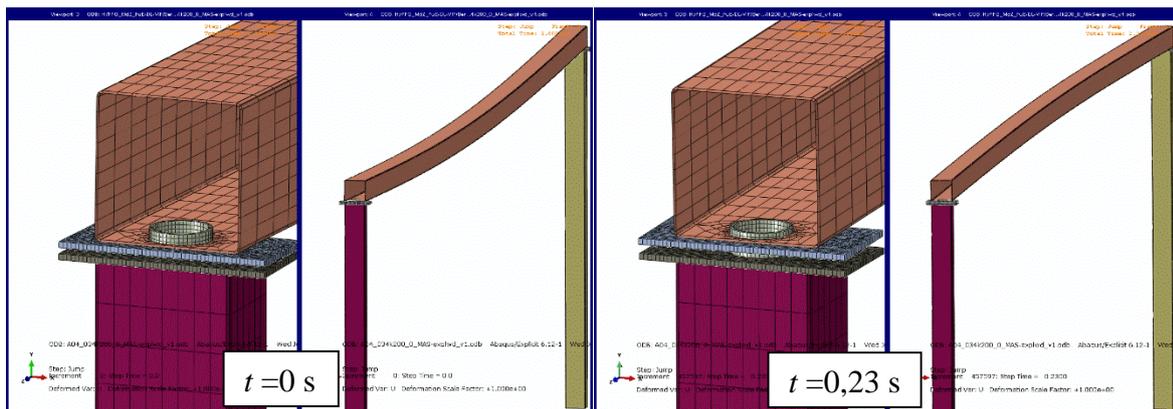
Abb. 8-9: Vergleich von aerodynamischen Maßnahmen zur Schwingungsreduktion [106]

9 Beurteilung der Gefahr des Herunterfallens des Querriegels

Eine zentrale Fragestellung des Auftraggebers war, ob die Gefahr des Herunterfallens des Querriegels besteht. Dies muss bejaht werden, allerdings müssen dafür mehrere ungünstige Umstände zusammenfallen:

1. Die Schrauben an einer Verbindung zwischen Querriegel und Steher müssen bereits stark vorgeschädigt sein.
2. Die Station ist anfällig für *galloping*, d. h. es können unterhalb der in Österreich möglichen Windstärken von ca. 45 m/s (160 km/h) bewegungsinduzierte Schwingungen auftreten, wie sie etwa bei den Stationen A04-_034,200_0_MAS und A01-_067,350_0_SKE beobachtet werden konnten. Von den ca. 340 Stationen mit zwei Stehern erfüllen etwa 180 dieses Kriterium.
3. Die auftretenden Amplituden bei *galloping* sind groß genug, dass es im Zuge der Schwingungen zum Versagen der Schrauben und beim Rückschwingen des Querriegels nach oben zum Abheben über das Zentrierrohr kommt.

Für die Station A04_034,200_0_MAS wurde dieses Szenario für die zum Beobachtungszeitpunkt herrschende Windstärke (31 m/s) und die beobachtete Amplitude von 200 mm in einer FEM-Berechnung in Abaqus nachgestellt. Der Balken wurde zunächst in die untere Schwingungsposition gebracht, die Schraubenelemente an einer Seite gelöscht und der Balken dann nach oben zurückfedern gelassen. Gleichzeitig wirkte von vorne die Windlast in horizontaler Richtung. Abb. 9-1 zeigt die damit berechnete Bewegungssequenz des Querriegels, der vom Steher abhebt, relativ weit über das Zentrierrohr steigt und vom Winddruck nach hinten gebogen wird, so dass nach dem erneuten Absenken die Kopfplatten von Riegel und Steher aufeinander schlagen.



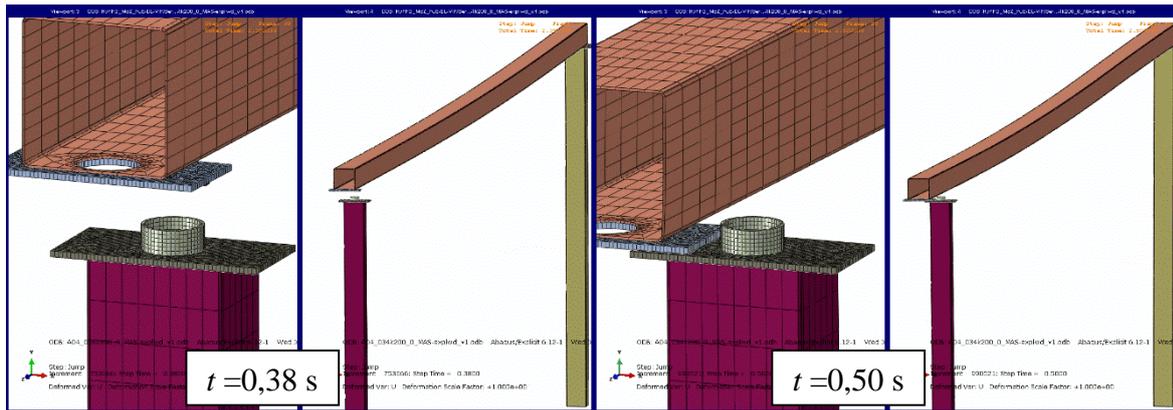


Abb. 9-1: Ablauf des Abhebens bei A04_034,200_0_MAS (von links oben nach rechts unten)

In der Realität würde es in diesem Fall vermutlich auf der anderen Verbindungsseite zwischen Riegel und Steher zum Abscheren der Schrauben kommen, was zu einer stärkeren horizontalen Auslenkung und dann tatsächlich zu einem Herunterfallen des Querriegels führen würde.

Untersucht wurde auch, ob ein Abheben im Zuge von wirbelinduziertem Schwingen unter sonst gleichen Voraussetzungen (Schraubenversagen auf einer Seite) möglich ist. Dies kann mit großer Sicherheit verneint werden, die gespeicherte elastische Energie im Querriegel ist bei den relativ geringen *vortex shedding*-Amplituden nicht groß genug, um ein Abheben über das Zentrierrohr hinaus zu ermöglichen. Darauf wurde bereits in Abschnitt 4.1 in der Stellungnahme zur Aussage 4 eingegangen.

Nicht betrachtet wurden die Beanspruchungen der Schrauben in den Verbindungsstößen der einzelnen Riegelemente. Hier werden vor allem die Schrauben, die weit von der neutralen Faser entfernt sind, bei den hohen *galloping*-Amplituden sehr stark beansprucht. Jene Schrauben, die in der Nähe der neutralen Faser platziert sind, müssten aber ein Auseinanderbrechen der Riegelemente verhindern können.

10 Zusammenfassung und Verbesserungsmöglichkeiten

10.1 Zusammenfassung

Fast alle Stationen in Österreich sind anfällig gegenüber *vortex shedding*, ca. 180 Stationen mit zwei Stehern auch gegen *galloping* bei Windstärken bis 150 km/h, bei dem Amplituden bis zu mehreren hundert Millimetern auftreten können. Beide Phänomene können für sich alleine oder in Kombination zur Ermüdung der Verbindungsschrauben zwischen Riegel und Steher führen (möglicherweise auch bei den Schrauben zwischen den Riegelementen) und in ungünstigen Fällen kann es im Zuge von *galloping* zum Herunterfallen des Querriegels kommen. Zu beachten ist auch eine mögliche negative Beeinflussung von Verkehrsteilnehmern durch stark schwingende Anlagen.

Wie in den Abschnitten 3 und 4 ausgeführt, wurde die Schwingungsanfälligkeit gegenüber *vortex shedding* und *galloping* bei der Planung der Mautstationen nicht berücksichtigt bzw. als vernachlässigbar eingeschätzt. Zum Zeitpunkt der Planung galten die ÖNORM B 4014-2 (Ausgabe 1994), die ENV 1993-1-1 (Ausgaben 1992 und 1996) und die ENV 1991-2-4 (engl. Ausgabe 1995, deutsche 1996 und österr. 1997), die auf windinduzierte Schwingungen hinweisen – bzw. deren Berechnung behandeln – und ab deren Erscheinen den Stand der Technik widerspiegelten.

Die Heranziehung der deutschen Regelwerke für Verkehrszeichenbrücken (ZTV-VZB und ZTV-ING) für die Dimensionierung durch den Hersteller ist nicht uneingeschränkt zulässig, da sich die aerodynamischen Charakteristika von beschilderten Verkehrszeichenbrücken und den Mautstationen grundlegend unterscheiden. Verkehrsschilder stören die Ausbildung von Wirbelstraßen, was zu einer im Allgemeinen geringeren Schwingungsanregung des Querriegels führt. Zudem gibt es bei den Mautstationen konstruktive Abweichungen von den deutschen Richtlinien, wie etwa die gelenkige Lagerung des Querriegels auf den Stehern, welche andere Schwingungseigenschaften der Querriegel bedingt (geringere Eigenfrequenz, höhere Amplituden) als bei der in Deutschland vorgeschriebenen steifen Verbindung zwischen Querriegel und Steher. Ebenso ist mittlerweile ein Betriebsfestigkeitsnachweis für die Schrauben in der Riegel-Steher-Verbindung in österreichischen und deutschen Normen und Richtlinien gefordert, der bislang nicht durchgeführt wurde, da ein Bruch der Schrauben vom Hersteller als nicht gefährlich eingestuft wird.

Tatsächlich kann die Gefahr des Herunterfallens des Querriegels nach Bruch aller Schrauben und Windeinwirkung als sehr gering eingeschätzt werden. Physikalisch unmöglich ist es, wie in Kapitel 9 gezeigt, jedoch nicht. In Deutschland wurden 2009 vom Bundesministerium für Verkehr Maßnahmen für Verkehrszeichenbrücken mit elastischer Lagerung (die entgegen der Vorgaben nach ZTV-ING errichtet wurden) und fehlendem Betriebsfestigkeitsnachweis der Schrauben vorgeschrieben (beschrieben in Abschnitt 3.2.3). Diese beinhalten die Berechnung der Schraubenlebensdauer bei den betroffenen Anlagen, regelmäßigen Austausch der Schrauben vor der berechneten Schraubenlebensdauer und Sicherung der Querriegel mit einer Bügelkonstruktion.

10.2 Verbesserungsmöglichkeiten

Im Folgenden werden Vorschläge für eine dem heutigen Stand der Technik entsprechende Berücksichtigung der Schwingungsproblematik aufgelistet:

- Auslegung von (neu zu planenden) Stationen nach allen anzuwendenden geltenden Normen und Richtlinien und Berücksichtigung des Stands der Technik auf eine Lebensdauer von 40 Jahren wie in Deutschland.
- Bei bestehenden Stationen mit zwei Stehern kann die Eigenfrequenz durch Einführen eines Mittelstehers erhöht werden.
- Die Verspannlänge der Schrauben könnte erhöht und der Abstand zur Kippachse der Querriegel auf den Stehern verkürzt werden. Dies reduziert die Schraubenbeanspruchung bei Riegelschwingungen.
- Schrauben mit Gewinde bis knapp unter den Kopf sind denkbar ungünstig, das Gewinde sollte nur dort sein, wo es benötigt wird, nicht an den biege- und zugbeanspruchten Zonen.
- Falls die gelenkige Lagerung auch zukünftig bei neu zu errichtenden Stationen beibehalten wird, ließe sich eine solche auch durch horizontal (in Fahrtrichtung) angeordnete Bolzen erreichen, die keine Momente in die Steher übertragen und auch nicht so ungünstig beansprucht werden wie die Schrauben in der derzeitigen konstruktiven Ausführung.
- Einführen aerodynamischer Maßnahmen (mit rechnerischem oder experimentellem Nachweis der Wirksamkeit) wie in Abschnitt 8.3.2 beschrieben.
- Treffen von Sicherungsmaßnahmen gegen einen Riegelabwurf wie z. B. in Deutschland (siehe Punkt 3.2.3 bzw. Anhang B) oder gleichwertige konstruktive Maßnahmen.
- Änderung der Konstruktion; weg von den per se schwingungsanfälligen Rechteckprofilen hin zu Gitterrohrrahmenkonstruktionen.

Referenzen

- [1] ASFINAG, „06040080.JPG“, 2003.
- [2] W.-H. Hucho, Aerodynamik der stumpfen Körper, Wiesbaden : Vieweg und Teubner, 2011.
- [3] S. Deniz und T. Staubli, „Oscillating rectangular and octagonal profile: Interactions of leading- and trailing-edge vortex formation,“ *Journal of Fluids and Structures*, Bd. 11, p. 3–31, 1997.
- [4] H. Försching und V. Manea, „Zur analytischen Behandlung des nichtlinearen Galloping-Problems,“ *Ingenieur-Archiv*, Bd. 42, p. 178–193, 1973.
- [5] Google Inc., „Google Maps,“ [Online]. Available: <https://maps.google.at/maps?q=VDLOAD&hl=de&ll=48.189551,15.788555&spn=0.051155,0.104284&t=h&z=14>. [Zugriff am 03 07 2013].
- [6] Forster GmbH, „P000049820.dwg,“ Waidhofen/Ybbs, 2005.
- [7] Kapsch TrafficCom AG, „A01-_044,300_0_SKE_DP_V1.0.dwg,“ Wien, 2005.
- [8] ASFINAG, „A01-_044,300_0_SKE-05-06-04-Foto06.jpg,“ 2005.
- [9] R. Baban, *Stellungnahme. Sanierung der Gelenkrahmenverschraubung. Mautkontrollbrücke SKE A01_44,300*, Graz, 2008.
- [10] ASFINAG, *Download[1] (4).jpg*, 2008.
- [11] R. Reichartzeder, *Schreiben der Fa. Forster an Hrn. G. Tinhofer, Fa. Kapsch TrafficCom AG zu Schadensfall A1_044,300_0_SKE*, Wien, 2008.
- [12] C. Heckel, *Schreiben von Kapsch TrafficCom mit Verbesserungsvorschlag Fa. Forster / R. Baban*, Wien, 2008b.
- [13] ASFINAG, MaStotte, „Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Mautgantries -- bisherige Erfahrungen und ein Ausblick,“ 2009.
- [14] Wegertseder GmbH, Ortenburg, D, „Technische Daten, Festigkeit von Edelstahlschrauben,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.wegertseder.com/pages/techdat/td4-werkstoffe-edelstahl.asp>. [Zugriff am 10 07 2013].
- [15] W. Matek, D. Muhs, H. Wittel, M. Becker und D. Jannasch, Roloff / Matek

Maschinenelemente. Tabellen., 15. Auflage Hrsg., Braunschweig: Vieweg, 2001.

- [16] The European Stainless Steel Association, „Euro Inox,“ [Online]. Available: <http://www.wegertseeder.com/pages/techdat/td4-werkstoffe-edelstahl.asp>. [Zugriff am 10 07 2013].
- [17] China jiangyou longhai Special Steel Co, Ltd, „SteelSS,“ [Online]. Available: <http://www.steelss.com/Stainless-Steel/x2crnimo17-12-2.html>. [Zugriff am 10 07 2013].
- [18] M. Prandl, „Festigkeitsklassen von Schrauben und Muttern,“ [Online]. Available: <http://www.schrauben-normen.de/festigkeitsklassen.html>. [Zugriff am 10 07 2013].
- [19] ASFINAG, „2011-Kontrolle A01-_044,315_0_SKE_S.pdf,“ 2011.
- [20] ASFINAG, „2011-Kontrolle A01-_044,300_0_SKE_Signatur.pdf,“ 2011.
- [21] Google Earth, 2012.
- [22] Forster GmbH, „P000022124.dwg,“ Waidhofen/Ybbs, 2003.
- [23] ASFINAG, „A01-_067,350_0_SKE_BauÜw_PEJ_V06_5_0002.jpg,“ 2004.
- [24] ASFINAG, „2011-Kontrolle A01-_067,350_0_SKE_S.pdf,“ 2011.
- [25] ASFINAG, „2011-Kontrolle A01-_067,365_0_SKE_S.pdf,“ 2011.
- [26] Forster GmbH, „P000024421.DWG,“ 2003.
- [27] ASFINAG, „06040016.JPG,“ 2003.
- [28] ASFINAG, „A04-_034,200_0_MAS-'Fluegel'-Foto1152.JPG,“ 2004.
- [29] ASFINAG, „Kontrollbericht A04-034,200.pdf,“ 2011.
- [30] Google Maps, „Google Maps,“ Google, [Online]. Available: <https://maps.google.at/maps?q=Mautern&hl=de&ll=47.396897,14.864244&spn=0.051942,0.104284&sll=48.041889,16.790886&sspn=0.003206,0.006518&t=h&hnear=Maute rn+in+der+Steiermark,+Leoben,+Steiermark&z=14>. [Zugriff am 12 07 2013].
- [31] Forster GmbH, „P000034945.dwg,“ 2002.
- [32] Forster GmbH, „P000024498.DWG,“ 2003.
- [33] ASFINAG, „A09-_117,810_0_MAS-Foto0375.JPG,“ 2003.
- [34] G. Meister, „IMG00017-20130628-0643.jpg,“ 2013.

- [35] G. Lange, Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle, 5. Auflage Hrsg., G. Lange, Hrsg., Weinheim: Wiley VCH, 2001.
- [36] Internationaler Eisenbahnverband, UIC-Kodex 566 VE: Beanspruchung von Reisezugwagenkästen und deren Anbauteilen, 3. Hrsg., Paris, 1990, p. 33.
- [37] HAZET-WERK Hermann Zerver GmbH & Co. KG, „Maulschlüssel,“ [Online]. Available: www.hazet.de/uploads/tx_d3mlinkedsources/kap03_42.pdf. [Zugriff am 30 07 2013].
- [38] ASFINAG, „Kontrolle_A09_117,810_MAS_MA_144.pdf,“ 2011.
- [39] ASFINAG, „A21-_028,505_0_MAS_Foto3.JPG,“ 2003.
- [40] ASFINAG, „2011 Kontrolle Mautgantry A21-028,505_0_MAS.pdf,“ 2011.
- [41] Google Inc., „GoogleMaps,“ [Online]. Available: <https://maps.google.at/maps?q=semmering&hl=de&ie=UTF8&ll=47.610734,15.747271&spn=0.05173,0.104284&sll=48.085763,16.210842&sspn=0.051259,0.104284&t=h&hnear=Semmering,+M%C3%BCrzzuschlag,+Steiermark&z=14>. [Zugriff am 25 07 2013].
- [42] Forster GmbH, „P000034719.dwg,“ 2003.
- [43] ASFINAG, „S06-_034,630_0_MAS_Gantry.JPG,“ 2003.
- [44] ASFINAG, „Kontrolle_S06_034,630_MAS_MA_310.pdf,“ 2011.
- [45] ASFINAG, „S06-_034,630_0_MAS-Schwingender Gantry_52_2005.12.19_03_01_34.01.avi,“ 2005.
- [46] Deutscher Wetterdienst, „Wetterlexikon - Schneedichte,“ [Online]. Available: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=S&DAT=Schneedichte>. [Zugriff am 31 07 2013].
- [47] Projektkonsortium Austrian Wind Potential Analysis, „AuWiPot - Windatlas und Potentialstudie,“ [Online]. Available: <http://www.windatlas.at/ergebnisse.html>. [Zugriff am 29 07 2013].
- [48] Vloeck, „Wikimedia Commons,“ [Online]. Available: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windrose.svg>. [Zugriff am 01 08 2013].
- [49] oe24 GmbH, „wetter.at,“ [Online]. Available: <http://www.wetter.at/wetter/oesterreich/burgenland/eisenstadt>. [Zugriff am 26 07 2013].
- [50] Google Inc., „Google Maps,“ [Online]. Available: <https://maps.google.at/maps?q=St.+Martin+Burgenland&hl=de&ll=47.548494,16.4208>

- 7&spn=0.051792,0.104284&sl=47.517896,16.482582&sspn=0.103644,0.208569&t=h
&hnear=Sankt+Martin+an+der+Raab,+Jennersdorf,+Burgenland&z=14. [Zugriff am 26
07 2013].
- [51] Forster GmbH, „P000035105.dwg,“ 2002.
- [52] ASFINAG, „S31-_074,300_0_MAS-Foto0112.JPG,“ 2003.
- [53] ASFINAG, „Kontrollbericht S31-074,300.pdf,“ 2011.
- [54] WindFinder.com GmbH & Co. KG, „Wind- & Wetterstatistiken Neusiedl,“ [Online].
Available: <http://de.windfinder.com/windstatistics/neusiedl>. [Zugriff am 18 06 2014].
- [55] Google Inc., „Google Maps,“ 2013. [Online]. Available:
<https://www.google.at/maps/place/Parndorf/@47.9854115,16.8357554,3441m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x476c5d9f5f94d68d:0x85bd9b9b7e40c10a>. [Zugriff am 18 06
2014].
- [56] Forster GmbH, „P000024427.dwg,“ 2002.
- [57] ASFINAG, „Kontrollbericht A04-042,200.pdf,“ 2011.
- [58] R. Rammler, *E-Mail vom 09.09.2013*.
- [59] R. Baban, *Statisches Gutachten*, Graz, 2009.
- [60] *ÖNORM EN 1991-1-4:2011-05-15: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten (konsolidierte Fassung), Ausgabedatum 15.05.2011.*
- [61] *ÖNORM B 1991-1-4:2013-05-01: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen. Ausgabedatum 01.05.2013.*
- [62] A. Richter, „Wind forces on square sections with various corner radii. Investigations and evaluations,“ Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1984.
- [63] B. Lee, „The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism,“ *Journal of Fluid Mechanics*, Bde. %1 von %269, part 2, p. 263–282, 1975.
- [64] G. Parkinson und N. Brooks, „On the aeroelastic instability of bluff cylinders,“ *Journal of Applied Mechanics*, p. 252–258, June 1961.
- [65] S. Oka und T. Ishihara, „Numerical study of aerodynamic characteristics of a square prism in a uniform flow,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Bd. Vol. 97, Nr. Issues 11–12, p. 548–559, December 2009.

- [66] D. Zuo und C. W. Letchford, „Wind-induced vibration of a traffic-signal-support structure with cantilevered tapered circular mast arm,“ *Engineering Structures*, Bd. 32, p. 3171–3179, 2010.
- [67] H. Försting, „Aeroelastisch instabile Widerstandsprofile,“ *Ingenieur-Archiv*, Bd. 40, pp. 68-80, 1971.
- [68] M. J. Garlich und E. T. Thorkildsen, „Guidelines for the Installation, Inspection, Maintenance and Repair of Structural Supports for Highway Signs, Luminaries, and Traffic Signals,“ Collins Engineers Inc., Chicago, IL, 2005.
- [69] R. Dexter und M. Ricker, „NCHRP-Report 469: Fatigue-Resistant Design of Cantilevered Signal, Sign, and Light Supports,“ National Academy Press, Washington, D.C., 2002.
- [70] M. Kaczinski, R. Dexter und J. Van Dien, „NCHRP Report 412: Fatigue-Resistant Design of Cantilevered Signal, Sign and Light Supports,“ National Academy Press, Washington, D.C., 1998.
- [71] American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals, Washington D.C., 2013.
- [72] UIS, „Sign Structures,“ [Online]. Available: <http://www.uisutah.com/uis2011/uis-product-line/sign-structures/>. [Zugriff am 13.05.2014].
- [73] E. B. Ahearn und J. A. Puckett, „Reduction of Wind-Induced Vibrations in High-Mast Light Poles,“ FHWA, Laramie, WY, 2010.
- [74] R. Christenson, „Reducing Fatigue in Wind-Excited Traffic Signal Support Structures using Smart Damping Technologies,“ Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.
- [75] Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, *ZTV-VZB Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Verkehrszeichenbrücken. Fassung vom November 1994.*, Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, 1994.
- [76] *ENV 1991-2-4:1994 Basis of Design and Actions on Structures - Wind actions.*, 1994.
- [77] *DIN V ENV 1993-1-1:1993-04: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, 1993.
- [78] *DIN 18800-1:1990-11 Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion*, 1990.
- [79] Bundesanstalt für Straßenwesen, *ZTV-ING Teil 9: Bauwerke, Abschnitt 1:*

- Verkehrszeichenbrücken*, Bergisch Gladbach, 2003.
- [80] *DIN 18800-1/A1:1996-02 Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion; Änderung A1*, 1996.
- [81] „GSI news 02/2007,“ 2007. [Online]. Available: http://www.slv-duisburg.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Ausg_GSI_News_02-2007.pdf. [Zugriff am 11 06 2014].
- [82] Bundesanstalt für Straßenwesen, *ZTV-ING Teil 9: Bauwerke, Abschnitt 1: Verkehrszeichenbrücken*, Bergisch Gladbach, 2010.
- [83] J. Kunz, „VFIB,“ 23 01 2009. [Online]. Available: www.vfib-ev.de/img/uploads/files/40_riegelstiel.pdf. [Zugriff am 02 06 2014].
- [84] Bundesanstalt für Straßenwesen, *ZTV-ING Teil 9: Bauwerke, Abschnitt 1: Verkehrszeichenbrücken*, Bergisch Gladbach, 2012.
- [85] L. Sachsen-Anhalt, 02 2013. [Online]. Available: www.lsbb.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/Landesbetriebe/LSBB/Bauwerksprüfung/Arbeitshilfen_Bauwerksprüfung_2013-02.pdf. [Zugriff am 02 06 2014].
- [86] *ÖNORM EN 1991-1-4:2004 04 01 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten (prEN 1991-1-4:2004)*.
- [87] *ÖNORM EN 1991-1-4:2005 11 01 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*.
- [88] *ÖNORM ENV 1991-2-4:1995 1997 05 01 Eurocode 1 - Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2-4: Einwirkungen auf Tragwerke - Windlasten*.
- [89] VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. , „Welche Gültigkeit haben die im November 2002 veröffentlichten Blitzschutz-Vornormen der Reihe VDE V 0185?,“ [Online]. Available: <http://www.vde.com/de/Ausschuesse/Blitzschutz/FAQ/bs/oeffentlich/Seiten/Welche%20Gueltigkeit.aspx>. [Zugriff am 22 05 2014].
- [90] P. Thomsen, „Technische Rechtsbegriffe Anwendung von Normen,“ Lannewehr + Thomsen GmbH & Co. KG, 19 01 2014. [Online]. Available: <http://www.flangevalid.com/uploads/allgemein/TechnischeRechtsbegriffeAnwendungVonNormen.pdf>. [Zugriff am 22 05 2014].
- [91] *ÖNORM B 4300-1: Stahlbau Berechnung und Konstruktion der Tragwerke. Bemessung nach Grenzzuständen. Ausgabedatum 1. März 1994*.

- [92] *ÖNORM B 4014-2: Belastungsannahmen im Bauwesen - Dynamische Windwirkungen - (schwingungsanfällige Bauwerke). Ausgabedatum 01.04.1994.*
- [93] *ÖNORM B 4014-2: Belastungsannahmen im Bauwesen – Dynamische Windwirkungen (schwingungsanfällige Bauwerke). Ausgabedatum 01.05.2003.*
- [94] *ÖNORM EN 1993-1-1, Ausgabe 2005-11-01. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau..*
- [95] *ENV 1993-1-1:1992 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.*
- [96] *ENV 1993-1-1:1996 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.*
- [97] ASFINAG Maut Service GmbH, *Technische Zeichnung, Ersteller: BM, Erstelldatum: 13.06.2007, Plannummer: S06-_038,876_Gelenkrahen_Typ 05_V1.0, Znr.: 0B23 GR 30, Einlagenummer: 031, 2007.*
- [98] M. Stepan, Erstellung eines Schadenberichts von drei gebrochenen Schrauben, Graz: FH JOANNEUM, Institut für Fahrzeugtechnik, 2014.
- [99] J.-Y. Huang, J.-J. Yeh, S.-L. Jeng, C.-Y. Chen und R.-C. Kuo, „High-Cycle Fatigue Behavior of Type 316L Stainless Steel,“ *Materials Transactions*, Bd. Vol. 47, Nr. No. 2, p. 409–417, 2006.
- [100] W. Weaver, S. Timoshenko und D. Young, *Vibration Problems in Engineering*, Fifth Edition Hrsg., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 1990.
- [101] U. Stelzmann, C. Groth und G. Müller, *FEM für Praktiker – Band 2: Strukturodynamik*, 5. Auflage Hrsg., Renningen: expert verlag, 2000, p. S. 69.
- [102] W. Eder, „Ingrids und Wolfgangs Wetterseiten,“ [Online]. Available: <http://wetter.mein-womo.eu/wswin/2008/y2008.html#wind>. [Zugriff am 22 06 2014].
- [103] U. "jul", „Alpinforum,“ 6 12 2003. [Online]. Available: <http://www.alpinforum.com/forum/viewtopic.php?t=3911>. [Zugriff am 22 06 2014].
- [104] B. Gassner, S. Veit und F. Dicker, *Programmierung, Applikation und Datenauswertung mit einem Extech VB300 3-Achsen-Beschleunigungsmess-Datenlogger*, Graz: FH JOANNEUM, Institut für Fahrzeugtechnik, 2014.
- [105] ZAMG, Fachabteilung Klima, „Daten_Wind_000745_xlsx.xlsx,“ 2014.
- [106] C. Gsenger und D. Kindl, *Dimensionierung, Herstellung und Erprobung im Windkanal*

eines durch Windanströmung schwingungsfähigen einfachen Balken, Graz: FH JOANNEUM, Institut für Fahrzeugtechnik, 2014.

ANHANG A

Schreiben von Hrn. Reichartzeder, Fa. Forster, an Hrn. Tinhofer, Fa. Kapsch TrafficCom, vom 14. August 2008. Ohne Anlagen.



Forster Verkehrs- und Werbetechnik GmbH
A-3340 Waidhofen/Ybbs
Weyrer Straße 135
Tel. (0 74 42) 501 - 0
Fax (0 74 42) 501 - 200
ISDN (0 74 42) 501 - 383
e-mail: forster@forster.at
<http://www.forster.at>



Verkehrstechnik • Metallbau • Siebdruck

Kapsch TrafficCom AG
Wagenseilgasse 1
A-1120 Wien

z.H.: Herr Gottfried Tinhofer

Waidhofen/Ybbs, den 14. Aug. 2008

Betreff: Schadensfall A1_044,300_0_SKE Ticket Nr.: 125276326
Stellungnahme zur statischen Berechnung

Sehr geehrter Tinhofer,

zu Ihrer Anfrage nehmen wir wie folgt Stellung:

Die Dimensionierung der gesamten Schilderbrücke erfolgte auf Grund der entsprechenden LKW-Maut-Typenstatik.

Die Statik entsprach den gültigen Vorschriften und dem technischen Standard der Berechnung von Schilderbrücken in Österreich und Deutschland zur Zeit der Erstellung, mit geringfügigen projektspezifischen Anpassungen.

Beim betroffenen Schilderbrückenriegel, der relativ lang ist, wurde es bei der Montage aufgrund einer Verdrehung um die Längsachse nötig, einen Spalt zwischen den Kopfplatten durch das Anziehen der Schrauben zu schließen. Dadurch wurden in die Verbindung zusätzliche, im Regelwerk nicht vorgesehene Lasten wirksam.

Die Brücke ist so aufgestellt, dass der Windangriff ungewöhnlich hoch ist, da sie sich in einer Längsallage ohne bedeutende Windhindernisse befindet. Hier sind dynamische Effekte wie winderregte Schwingungen eher möglich als in durchschnittlichen Lagen. Diese Effekte sind im Regelwerk nicht berücksichtigt, wo nur quasistatische Ersatzlasten angenommen werden. Auftretende Schwingungseffekte erhöhen die Wechselbelastung der Schrauben.



Forster Verkehrs- und Werbetechnik GmbH
A-3340 Waidhofen/Ybbs
Weyrer Straße 135
Tel. (0 74 42) 501 - 0
Fax (0 74 42) 501 - 200
ISDN (0 74 42) 501 - 383
e-mail: forster@forster.at
http://www.forster.at

FORSTER **FF**

Verkehrstechnik • Metallbau • Siebdruck

Aufgrund der Berechnung sind die Eckschrauben durch die im Regelwerk vorgesehene Belastung nur wenig ausgelastet: 33% bei Verwendung von Schrauben A4-70, 21% bei Schrauben 10.9.

In der Typenberechnung ist eine Ersatzfläche für Tafeln oder andere Aufbauten vorgesehen, die bei der gegenständlichen Brücke nicht in Anspruch genommen wird. Bei Berechnung ohne diese Ersatzfläche reduziert sich die Auslastung der A4-70-Schrauben auf 19%.

Auch bei völligem Entfall der Verschraubung in der Gelenkrahmenecke wird der Riegel durch ein Zentrierrohr gehalten, das die gesamten Querkräfte aufnimmt (Auslastung in der gegenständlichen Statik 23%).

Bei der gegenständlichen Brücke wurden die schadhafte Niro-Schrauben gegen hochfeste Schrauben 10.9 getauscht. Dieser Schraubenwerkstoff ist nach unserer Erfahrung für die an diesem Standort herrschende Belastungssituation besser geeignet.

Selbstverständlich sind wir bereit bzw. selbst daran interessiert, unsererseits den Standort einer Intervallüberprüfung zur Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahme zu unterziehen.

Mit freundlichen Grüßen

FORSTER
Verkehrs- und Werbetechnik GmbH
Robert Reichardt
A-3340 Waidhofen/Ybbs, Weyrer Str. 135
Tel. (074 42) 501-0, Fax (074 42) 501-352
Forster Verkehrs- und Werbetechnik GmbH

Anlagen:

- 1 Auszug aus der zutreffenden Typenstatik: Typ 20 - Gelenkrahmeneckberechnung.
- 2 Konstruktionszeichnung Gelenkrahmenecke
- 3 Erläuterung der Statik von DI Feilmayr - Gelenkrahmenecke

ANHANG B

Schreiben des Leiters der Abteilung Straßenbau und Straßenverkehr an die Obersten Straßenbaubehörden der Länder vom 23. Jänner 2009.



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung



Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung • Postfach 20 01 00, 53170 Bonn

Prof. Dr.-Ing. Josef Kunz
Leiter der Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr

Oberste Straßenbaubehörden
der Länder

HAUSANSCHRIFT Robert-Schuman-Platz 1, 53175 Bonn
POSTANSCHRIFT Postfach 20 01 00, 53170 Bonn
TEL 0228 300-5180
FAX 0228 300-1462
E-MAIL ref-s18@bmvbs.bund.de
INTERNET www.bmvbs.de

nachrichtlich:
Bundesanstalt für Straßenwesen

Bundesrechnungshof

DEGES Deutsche Einheit
Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH

BETREFF **Probleme an Verkehrszeichenbrücken mit elastisch eingespannter Riegel-Stiel-Verbindung**

AZ S 18/7192.70/11-976102
DATUM Bonn, 23.01.2009

Bei Bauwerksprüfungen wurden bundesweit Auffälligkeiten bei Verkehrszeichenbrücken festgestellt, die als Rahmenkonstruktion mit Gelenkausbildung bzw. elastischer Einspannung zwischen Riegel und Stiel ausgeführt wurden. Die Verbindung zwischen Riegel und Stiel erfolgt dabei über eine Auflagerleiste mit oftmals nur 2 oder 4 Schrauben.

Bei diesen Verbindungen werden die Schrauben zusätzlich zu den planmäßigen Beanspruchungen aus Zug und Abscheren auch unplanmäßig auf Biegung (Schaffbiegung) beansprucht. Für viele dieser Bauwerke wurde lediglich der Nachweis der Standsicherheit für eine



SEITE 2 VON 4

biegesteife Eckverbindung geführt. Ein Nachweis der Betriebsfestigkeit für eine elastische Einspannung unter Einwirkung dynamischer Lasten wurde dabei im Regelfall nicht geführt. Um die Verkehrssicherheit der betroffenen Verkehrszeichenbrücken sicherzustellen werden folgende Untersuchungen und Sofortmaßnahmen empfohlen:

- Erfassung aller Verkehrszeichenbrücken mit gelenkiger Riegel-Stiel-Verbindung im Hinblick auf die vorhandene Schraubenanordnung und die Schraubenabstände (Konstruktionsmerkmale).
- Untersuchung der betroffenen Verkehrszeichenbrücken auf fehlende Ermüdungssicherheit der Riegel-Stiel-Verbindung.
- Ermittlung der Lebensdauer der Schraubenverbindungen.
- Sonderprüfungen nach DIN 1076 aller betroffenen Verkehrszeichenbrücken.

Bei der Errichtung neuer Verkehrszeichenbrücken ist im Vorgriff auf die überarbeitete ZTV-ING eine biegesteife Riegel-Stiel-Verbindung entsprechend den Richtzeichnungen auszuführen.

Bei den Verkehrszeichenbrücken ohne ausreichende rechnerische Dauerhaftigkeit der Schraubenverbindung sind bauliche Maßnahmen erforderlich. Die Auswahl der durchzuführenden Maßnahme ist dabei auf Grundlage einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchzuführen. In Übereinstimmung mit den Ländern (KoA-Erhaltung sowie die B/L-Dienstbesprechung Brücken- und Ingenieurbau vom 11./12.11.2008) wird die Vorgehensweise entsprechend der rheinland-pfälzischen Konzeption empfohlen.

1. Austausch der Schrauben vor Ablauf der rechnerischen Nutzungszeit

Diese Lösung ist nur zu empfehlen, wenn die Schraubenverbindungen eine relativ hohe Dauerhaftigkeit aufweisen. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist zu berücksichtigen, dass zusätzliche Kosten für eine Verkehrssicherung und eine temporäre Sicherung der Riegel-Stiel-Verbindung anfallen. Sofern während der geplanten Nutzungsdauer der Verkehrszei-



chenbrücken ein mehrmaliger Schraubenaustausch erforderlich ist, wird diese Maßnahme unwirtschaftlich.

2. Sofortinstandsetzung und Sicherung der Riegel-Stiel-Verbindung durch eine Bügelkonstruktion

Eine dauerhafte Instandsetzung der Riegel-Stiel-Verbindung wird durch die in der Anlage 1 dargestellte Bügelkonstruktion ermöglicht.

Ziel dieser Konstruktion ist, die Riegel-Stiel-Verbindung so zu sichern, dass ein Versagen der Schrauben nicht zum Einsturz der VZB führt. Dazu soll ein bügelförmig über den Riegel geführtes Blech mit Hilfe von Gewindestäben gegen zwei kraftschlüssig mit den Stielen verbundene Lagerkonstruktionen verspannt werden. Die Konstruktion gewährleistet damit die Übertragung der Riegel-Torsionsmomente in die Stützen. Die aus der Windbelastung resultierenden Querkräfte können in diesem Zustand über das sich in der Riegel-/Stielachse befindliche Zentrierrohr bzw. über den Reibschluss zwischen Zentrierleiste und Riegel abgetragen werden.

Die für die Windlasten infolge der Schraubenanordnung vorhandene elastische Einspannung der Riegel in die Stützen wird i. d. R. in den Standsicherheitsnachweisen nicht berücksichtigt. Im Falle des Schraubenausfalls würde sich hier auch eine gelenkige Lagerung einstellen, die im statischen Sinne jedoch stabil ist.

Bei der Bemessung der Konstruktion wurde die volle zulässige Schildbelegung gemäß der ZTV-VZB (Ausgabe 1994) sowie der ZTV-ING Teil 9 Abschnitt 1 (Stand 01/2003) berücksichtigt. Bei Beachtung der nachfolgenden Anwendungsgrenzen wird hierdurch eine ausreichende Dauerhaftigkeit sichergestellt, so dass die Verkehrssicherheit für die ursprünglich eingeplante Lebensdauer (40 Jahre) wieder sichergestellt ist.



SEITE 4 VON 4

Hinweis:

Bei der Anwendung der Bügelkonstruktion sind die in **Anlage 1** genannten Anwendungsgrenzen zu beachten.

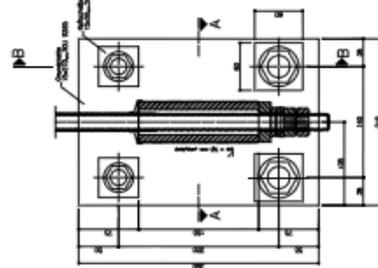
Über die von Ihnen veranlassten Maßnahmen bitte ich mir **bis zum 01.12.2009** zu berichten.

Im Auftrag

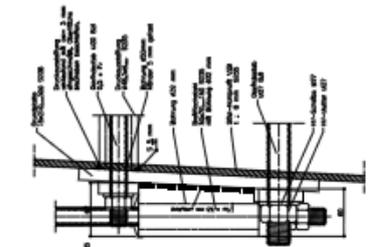
Prof. Dr.-Ing. Josef Kunz

Konstruktionsprinzip für VZB-System I und III
(Darstellung für die Neigung der Stieelseitenfläche) von 1:10

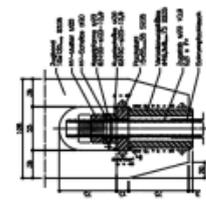
Detail II, M. 1:2,5



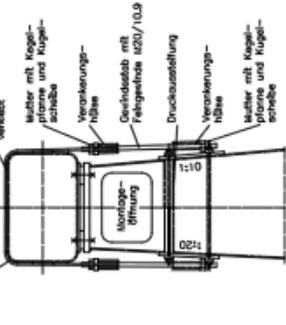
Schnitt B - B



Detail I, M. 1:2,5

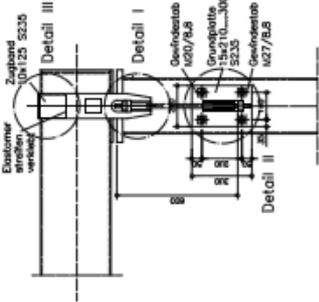


Seitenansicht VZB, M. 1:10

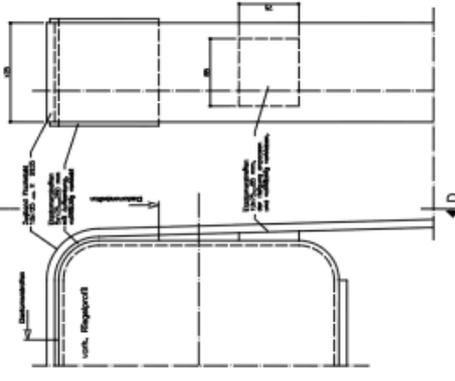


Übersicht gelenkige Riegel-Stiel-Verbindung

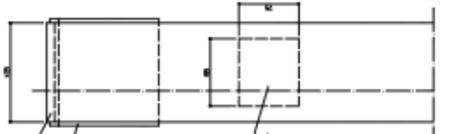
Ansicht VZB in Fahrtrichtung, M. 1:10



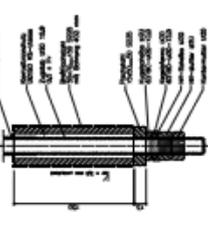
Detail III, M. 1:2,5



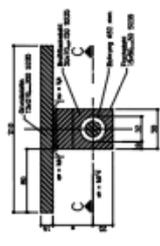
Ansicht D - D



Schnitt C - C



Schnitt A - A



Die im Standsicherheitsnachweis aufgeführten Anwendungsgrenzen sowie die Hinweise zur Montage der Hilfskonstruktionen sind zu beachten!

Die Werkstoffangaben sind zu beachten!
Das Flachmaterial und Profilstähle S235 sind mindestens mit einem Abmahnprüfzeugnis 3.1 nach DIN EN 10204 (2005) zu belegen!

Toleranzangaben nach DIN 18800-7:2002-09 beachten!
Schweißnähte allgemein nach ZTV-MIG Teil 4, Abschnitt 1, Abs. 4
Bewertungsgruppe B mit zus. Anforderungen nach Tab. 4.1.2.

KUJIP Kuppel- und Stahl-Technik Ober-Sonnen-Str. 15-17 68177 Rastatt/Alb. Tel. (0714) 918 09-0 Fax (0714) 918 09-1 Produkt an Stand, der 6122087 gen. Ständer	Schweißtechnische Prüfung SAW Heidestraße 28 68177 Rastatt Tel. (0714) 918 23-4 gen. Ständer bestellbar ab 04.02.2007	Projekt-Nr.: 07/1001	Blatt-Nr.: 10
		Blatt: 10/10 Stück: 10/10 Datum: 10/10	Auftrag: 8 Blatt-Nr.: 10
Landesarchiv Mährisch Rheinfeld - Pflanz	Bauwerkname: --- Standsicherstellung: --- Genehmigung: ---	Zeichner: --- Prüfer: --- Bearb.: --- Datum: ---	Auftrag: 8 Blatt-Nr.: 10
Bauwerk/Bauverfahren Instandsetzung gelenkiger Riegel-Stiel-Verbindungen von VZB	Bauwerksplan Übersicht Instandsetzung System I	Zeichner: --- Prüfer: --- Bearb.: --- Datum: ---	Auftrag: 8 Blatt-Nr.: 10
Gewerke: LBH - Rheinfeld-Platz		U.A.	

Hinweise zur Sofortinstandsetzung und Sicherung gelenkiger Riegel-Stiel-Verbindungen an ermüdungsgefährdeten Verkehrszeichenbrücken

1. Planungsgrundlagen

- [1] ZTV-ING, Teil 9 Bauwerke, Abschnitt 1, Verkehrszeichenbrücken; Stand 01/2003
- [2] DIN-Fachbericht 101; Einwirkungen auf Brücken; 2. Auflage 03/2003
- [3] Eurocode; EC1-Actions on structures, Part 1-4: Wind actions
DIN-Fachbericht 103; Stahlbrücken; 2. Auflage 03/2003
- [4] DIN 1055-4 / 2005-03; Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten
- [5] Eurocode; EC3-Design of steel structures, Part 1-9: Fatigue
- [6] DIN 4131 / 1991-11; Antennentragwerke aus Stahl

2. System

Für die gefährdeten Verkehrszeichenbrücken wird im folgenden zur Instandsetzung und Sicherung der gelenkigen Riegel-Stiel-Verbindung ein variabel einsetzbares Konstruktionsprinzip beschrieben.

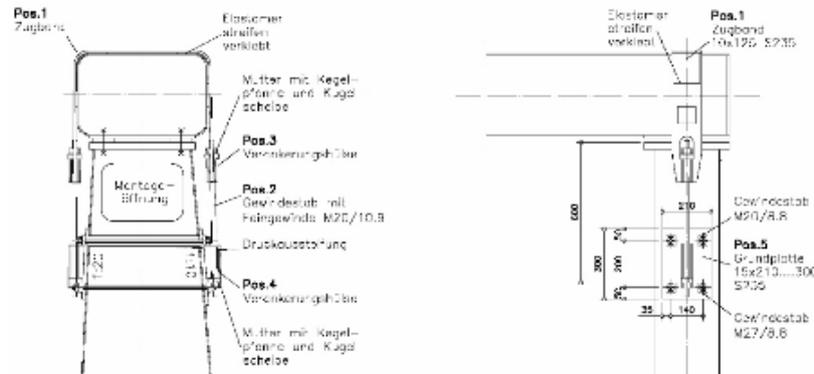


Bild: Konstruktionsprinzip zur Instandsetzung

Ziel der Instandsetzung ist, die Riegel-Stiel-Verbindung so zu sichern, dass ein Versagen der Schrauben nicht zu einem Einsturz der VZB führt. Dazu soll ein bügelartig über den Riegel geführtes Blech mit Hilfe von Gewindestäben gegen zwei kraftschlüssig mit den Stielen verbundene Lagerkonstruktionen verspannt werden. Die Konstruktion gewährleistet damit die Übertragung der Riegel-Torsionsmomente in die Stützen. Die aus der Windbelastung resultierenden Querkräfte können in diesem Zustand über das sich in der Riegel-/Stielachse

befindliche Zentrierrohr bzw. über den Reibschluss zwischen Zentrierleiste und Riegel abgetragen werden.

Die für die Windlasten infolge der Schraubenanordnung vorhandene elastische Einspannung der Riegel in die Stützen wird i. d. R. in den Standsicherheitsnachweisen nicht berücksichtigt. Im Falle des Schraubenausfalls würde sich hier auch eine gelenkige Lagerung einstellen, die im statischen Sinne jedoch stabil ist.

Zur Systematisierung der Nachweise werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die Torsionsmomente wurden an Rahmensystemen unter Berücksichtigung einer geschätzten **Stielhöhe von 6,00 m** ermittelt.
- Für die Ermittlung der Schnittgrößen wird von einer **vollen Schildbelegung (100%)** ausgegangen. Diese ergibt sich bei einem rechnerischen Abstand der Schildkanten von den Stielachsen von $a = c = 50 \text{ cm}$.
- Die Schildhöhe beträgt konstant $H = 4,00 \text{ m}$, der Abstand des Schildes von OK Fahrbahn wird mit $5,00 \text{ m}$ angenommen. Die Resultierende der Windlast greift dabei auf der Schwerlinie der Schildfläche an.
- Als Stützweite wird der Größtwert der in den Tabellen 1 und 2 aufgelisteten Bauwerke angenommen. $Lst = 20,00 \text{ m}$.

2.1 Aufbau der Konstruktion

• POS 1: Zugband

Das Zugband besteht mindestens aus einem Stahl der Güte S235. Um Biegebeanspruchungen im Zugband weitgehend auszuschließen ist dessen Krümmungsradius dem des vorhandenen Riegel-Hohlprofils anzupassen. **Vor der Herstellung des Zugbandes ist daher die Geometrie des Riegels örtlich durch den AN aufzunehmen.** Die Fertigung nach eventuell vorliegenden Bestandsplänen ist nicht ausreichend.

→ gewählt: **Fl. 10 x 125.... mm S235 JRG2**

Zum Ausgleich kleinerer Unebenheiten, wie z.B. Schweißnähte o. ä., werden zwischen dem Zugband und der Riegeloberfläche Elastomerstreifen (Fa. Calenberg) mit einer Dicke $\leq 5 \text{ mm}$ angeordnet. Die Elastomerstreifen werden vollflächig mit der Riegeloberfläche verklebt (Klebstoff Sika-Bond AT-14).

• POS 2: Zugstab

Für den Zugstab soll ein Schraubenmaterial 10.9 mit einem metrischen Gewinde M20 zur Anwendung kommen. Die Zugstäbe werden planmäßig nicht vorgespannt. Zum Ausgleich des Gewindeschlupfes und von Nachgiebigkeiten im System erhalten sie jedoch eine konstruktive Vorspannung von maximal der halben Vorspannkraft ($0,5 \cdot F_v = 80 \text{ kN}$) nach DIN 18800-7 (2002).

→ gewählt: **Zugstab M20 / 10.9 - 0,5 · F_v**

Die Schrauben erhalten zusätzlich eine Sicherungsmutter.

Die Vorspannkraft ist abwechselnd an jeder Seite in mindestens vier Schritten aufzubringen.

An beiden Enden des Zugstabes wird eine Paarung aus Kugelscheiben und Kegelpfannen angeordnet. Sie dienen zum Ausgleich von Toleranzen bzw. zur Übertragung von Spannkraften in den Fällen, in denen Spannelemente sich an unebene Spannflächen anpassen sollen. Die Paarung von Kugelscheiben bzw. Muttern DIN 6330 mit Kegelpfannen ermöglicht ein Ausschwenken des zugehörigen Spannbolzens um 3°.

• POS 3: Verankerungshülse am Zugband

Die Lasteinleitung der Zugkräfte aus dem Zugband in den Zugstab erfolgt über eine eingeschweißte Verankerungshülse. Vorgesehen ist ein rundes Hohlprofil $\varnothing 48,3 \times 8$ mm aus S235.

Der Anschluss an das Zugband erfolgt über vier Schweißnähte mit einer Länge von je 75 mm und einer Nahtstärke von $a_w = 4$ mm.

→ gewählt: **Verankerungshülse $\varnothing 48,3 \times 8$ S235**

→ gewählt: **Anschlussnaht $4 \times a_w = 4 \times 75$ mm**

• POS 4: Verankerungshülse an der Grundplatte

Die Lastausleitung der Zugkräfte aus dem Zugstab in die Grundplatte erfolgt über eine aus einem Vollmaterial BFL 50 x 70 150 mm hergestellte und mit einer Bohrung $\varnothing 32$ mm versehene, eingeschweißte Verankerungshülse aus S235.

Der Anschluss zwischen Verankerungshülse und Anschlussblechen erfolgt über zwei Schweißnähte mit einer Länge von je 150 mm und einer Nahtstärke von $a_w = 5,5$ mm.

→ gewählt: **Anschlussnaht $2 \times a_w = 5,5 \times 150$ mm**

• POS 5: Grundplatte

Die Verankerung der Zugkräfte erfolgt über zwei seitlich an den Stielen montierte Grundplatten.

→ gewählt: **Grundplatte 15×210 300 S235**

Zum Anschluss der Grundplatten an den Stiel der VZB werden insgesamt vier Gewindestäbe Güte 8.8 eingesetzt.

Da die oberen beiden Gewindestangen innerhalb der zur Druckaussteifung in den Stiel eingeschweißten Rohre $\varnothing 48,3 \times 8$ verlaufen, d.h. das Lochspiel hier deutlich über dem der unteren beiden Gewindestangen liegt, können hier nur die Druckkräfte

aus dem Versatzmoment übertragen werden. Die Querkräfte sowie die Zugkräfte aus dem Versatzmoment werden allein über die unteren Gewindestangen abgetragen.

Für den Nachweis der Lochleibung wird die kleinere Blechstärke des VZB-Stieles maßgebend. Es wird dabei von einer **Blechdicke $t = 8 \text{ mm}$** und einer **Stahlgüte von mindestens S 235** ausgegangen. **Diese Annahmen müssen bei jeder einzelnen Instandsetzungsmaßnahme überprüft werden.**

Die obere Reihe der Verankerungen bilden Gewindestangen M20 der Güte 8.8. Die Gewindestäbe werden konstruktiv mit der halben nach DIN 18800-7 (2002) zulässigen Kraft vorgespannt ($0,5 \cdot F_v = 55 \text{ kN}$).

Die eingeschweißten Rohre werden auf Druck und Biegung beansprucht.

Für die untere Verankerungsreihe werden Gewindestangen M27 der Güte 8.8 eingesetzt.

Für die Anschlussnaht wird von einem wirksamen Querschnitt von 5 mm (bei einer Wandstärke des Stiels von 8 mm) ausgegangen.

→ gewählt: **Gewindestäbe in der unteren Reihe M27 / 8.8**

→ gewählt: **Gewindestäbe in der oberen Reihe M20 / 8.8**

→ gewählt: **Druckaussteifung $\varnothing 48,3 \times 8 \text{ S235}$**

→ gewählt: **Anschlussnaht $a_w = 5 \text{ mm}$ umlaufend**

2.2 Anwendungsgrenzen

Die Instandsetzungs konstruktion für Verkehrszeichenbrücken mit einer Schraubenanordnung nach System I darf nur unter Beachtung und verantwortlicher Prüfung der folgenden Anwendungsgrenzen eingesetzt werden:

- Einsatz nur bei stählernen Verkehrszeichenbrücken.
- Schildhöhe $H \leq 4,00 \text{ m}$, mittig befestigt.
- Stützweite des Riegels $L_{st} \leq 20,00 \text{ m}$.
- Riegelbreite $B \geq 0,50 \text{ m}$.
- Der bestehende VZB-Stiel muss eine **Mindestblechdicke von 8 mm** und eine **Stahlgüte von mindestens S 235** aufweisen.
- Neigung der Stielseitenflächen bis max. $n = 1:10$.
- Anpassung des Zugbandes an die Krümmung des Riegels mit einer Toleranz von $\pm 1 \text{ mm}$ zur theoretischen Sollform. Wobei die Dicke des Elastomerstreifens zu berücksichtigen ist.
- Abstand zwischen OK Grundplatte und Achse Zugstab $\leq 5 \text{ cm}$.
- Die zulässige Abweichung der Bohrungen im Stiel beträgt für deren globale Lage $\pm 2 \text{ mm}$ und untereinander $\pm 1 \text{ mm}$.

- Lastannahmen nach ZTV-ING, Teil 9, Abschnitt 1, Verkehrszeichenbrücken (Stand 01/2003) für das Eigengewicht der Schilder und die Windlast.
- Die untersuchte VZB muss sich in Windlastzone I befinden.
- Maximaler Abstand zwischen der Schwerlinie der Schildfläche und der Riegelachse $z_r \leq 0,40 \text{ m}$.
- Maximaler Versatz zwischen der Schwerlinie der Schildfläche und der Riegelunterkante $d \leq 0,67 \text{ m}$.

3. Herstellerqualifikation und Werkstoffgütern

- Herstellerqualifikation nach DIN 18800-7 (9/2002) Klasse E.
- Herstellungstoleranzen sind entsprechend den Toleranzgrenzen nach DIN 18800-7 (9/2002) einzuhalten.
- Als Mindestanforderung für den Werkstoff S235 gilt die Stahlgüte JRG2 nach DIN EN 10025 (03/1994) oder JR nach DIN EN 10025 (04/2005) Werkstoff Nr. 1.0038, und für den Werkstoff S355 die Stahlgüte J2G3 nach DIN EN 10025 (03/1994) oder J2+N nach DIN EN 10025 (04/2005) Werkstoff Nr. 1.0577. Für Rohre und Hohlprofile sind die entsprechenden Werkstoffe nach DIN EN 10210 (01/2006) und 10219 (01/2006) zu verwenden.
- Alle Flach- und Profilstähle S235 sind mindestens mit einem Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach DIN EN 10204 (01/2005) zu belegen.
- Für Schweißnähte sind allgemein gemäß ZTV-ING Teil 4, Abschnitt 1, Abs. 4 die Anforderungen der Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817 (10/2006) mit den zus. Anforderungen nach Tab. 4.1.2 der ZTV-ING einzuhalten.
- Die Konstruktion ist feuerverzinkt herzustellen.

ANHANG C

Untersuchungsbericht MU Leoben



Untersuchungsbericht

über

Schrauben von Überkopfkonstruktionen der Asfinag-Mautanlagen

Auftraggeber: Asfinag Maut Service GmbH,
Am Europaplatz 1
A-1120 Wien
vertreten durch Herrn Ing. Günter Meister, BSc, M.A.

Auftragseingang: Mai 2014

Auftrag-Nr.: 1779/2014

Proben-Nr.: 7497: 40 Stk. Schrauben

Leoben, den 7.8.2014

Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Allgemeine und Analytische Chemie
Ao. Univ.-Prof. Dr. Gregor Mori
Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben, Austria
Tel.: +43 864 923 7315, Fax: +43 3842 402 1252
Email: mori@unileoben.ac.at



1. Feststellungen

Der Lehrstuhl für Allgemeine und Analytische Chemie, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben, wurde von der Fa. Asfinag Maut Service GmbH, A-1120 Wien, vertreten durch Herrn Ing. Günter Meister, BSc. M.A., beauftragt, Untersuchungen an übersandten Schrauben durchzuführen.

An Überkopfkonstruktionen der Asfinag-Mautanlagen wurden durch den Auftraggeber insgesamt 40 Schrauben entnommen. Diese waren, wie folgt bezeichnet:

1. A01-_145.880_0_SKE, Schrauben S1 bis S8 (Abb. 0.1),
2. A01-_164.143_2_SKE, Schrauben S1 bis S8 (Abb. 0.2),
3. A09-_101.120_0_MAS, Schrauben S1 bis S8 (Abb. 0.3),
4. A09-_117.118_0_MAS, Schrauben S1 bis S8 (Abb. 0.4),
5. S31-_074.300_0_SKE, Schrauben S1 bis S8 (Abb. 0.5).

Weiters waren die Anzugs- und Lösemomente der Schrauben in gesonderten Protokollen übersandt worden (Tab. 0.1). Die Schrauben S5 bis S8, A01-_164.143_2_SKE, sowie S1 bis S8, S31-_074.300_0_SKE, waren Edelstahlschrauben, die übrigen Schrauben aus C-Stahl.

Die Schrauben S5 bis S8, A01-_164.143_2_SKE, stammen im Unterschied zu den Schrauben S1 bis S4, A01-_164.143_2_SKE, von einer 20 m weiter östlich liegenden Überkopfbrücke.

Es sollte geklärt werden, ob Risse und welche Art von Rissen in den Schrauben vorliegen. Weiters waren die Korrosionsprodukte/Ablagerungen auf den Schraubengewinden zu charakterisieren sowie eine allfällige Verbiegung der Schrauben zu dokumentieren.

2. Untersuchungen

2.1 Rissprüfung mittels Farbeindringprüfung

Von allen übersandten Schraubengruppen wurden Korrosionsprodukte bzw. anhaftende Ablagerungen im trockenen Zustand für Analysezwecke entnommen. Danach wurden die Schrauben einzeln zuerst mit einer Kunststoffbürste und anschließend in Ethanol in einem Ultraschallbad gereinigt und danach eine Farbeindringprüfung durchgeführt.

Die einzelnen Schrauben sind nach der Farbeindringprüfung nach Entnahmeort geordnet in den Abb. 1.1 bis 1.5 wiedergegeben. An keiner Schraube war ein Riss vorhanden. Sämtliche Schrauben sind sowohl in den Gewinden als auch an den Schraubenköpfen bzw. -schäften rissfrei.

2.2 Röntgenfluoreszenzanalyse

Die entnommenen Ablagerungen/Korrosionsprodukte wurden je Entnahmestelle für die Schrauben S1 bis S8 zusammengemischt und mittels Röntgenfluoreszenzanalyse chemisch bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 2.1 zusammengestellt. Alle Proben bestehen überwiegend aus ZnO und Fe₂O₃. Die Edelstahlschrauben von der S31 enthalten auf ihrer Oberfläche hohe Anteile von TiO₂, vermutlich Weißpigment eines Anstrichs. Überwiegend liegen daher Korrosionsprodukte von C-Stahl bzw. verzinktem C-Stahl vor (im Falle der Edelstahlschrauben von den verschraubten C-Stahl-Profilen).

Weiters sind stets hohe Gehalte von aggressiven Spezies (Cl und SO₃) in den Korrosionsprodukten auf den Schrauben vorhanden.

2.3 Vermessung der Schrauben

In weiterer Folge wurde die plastische Deformation der Schrauben (Verbiegung) gemessen. Dazu wurden die letzten 15 Gewindegänge der Schrauben in ein vierbackiges Spannfutter einer Drehbank eingespannt und mittels einer Messuhr die

Exzentrizität am Schaft in unmittelbarer Nähe des Schraubenkopfes gemessen. Der gemessene Wert entspricht dabei dem maximalen Ausschlag der Messuhr minus dem minimalen Ausschlag (also der Amplitude Oberwert - Unterwert).

Die Tab. 3.1 gibt die Amplituden (Maximalwert – Minimalwert) bei einer Umdrehung der Schraube in der Drehbank, festgestellt mittels Messuhr, wieder. Die tatsächliche radiale Verbiegung der Schraube ist ungefähr halb so groß wie die in Tab. 3.1 angegeben.

In weiterer Folge wurde die Verbiegung der Schrauben gegen die Lösemomente (Abb. 3.1) aufgetragen. Es zeigt sich, dass ein großes Lösemoment tendenziell eine kleinere Verbiegung nach sich zieht bzw. dass eine hohe Verbiegung dann vorliegt, wenn kleinere Lösungsmomente vorliegen. Eine gewisse Ausnahme stellen die Edelstahlschrauben der S31 dar, welche kleine Verbiegungen bei niedrigen Lösemomenten aufweisen.

Da die Schrauben unterschiedliche Anzugsmomente aufwiesen, wurde der prozentuelle Anteil des Lösemoments am Anzugsmoment in einer zweiten Darstellung anstelle der Lösemomente herangezogen. Die Darstellung der Verbiegung als Funktion der prozentuellen Abnahme der Anzugsmomente (Abb. 3.2) ergibt ein ähnliches Bild wie Abb. 3.1. Es ist bei einem hohen Anteil des Lösemoments am Anzugsmoment die Verbiegung der Schrauben eher klein und umgekehrt.

3. Zusammenfassung

Die vorliegenden Untersuchungen kommen zu den folgenden Ergebnissen:

1. Keine der untersuchten Schrauben weist einen Riss auf.
2. Die Ablagerungen auf den Schraubengewinden sind Korrosionsprodukte des Zinks bzw. von Fe. Teilweise liegen hohe Anzeigen von Titanweiß vor. Stets sind hohe Konzentrationen aggressiver Spezies (Cl, SO₃) vorhanden.

3. Jene Schrauben, die geringe Lösemomente aufweisen, zeigen eine gewisse Verbiegung und somit eine plastische Deformation. Die Edelstahlschrauben sind davon weniger betroffen, zeigen jedoch insgesamt kleine Lösemomente.

Leoben, den 7.8.2014



(Ao. Univ.-Prof. Dr. Gregor Mori)

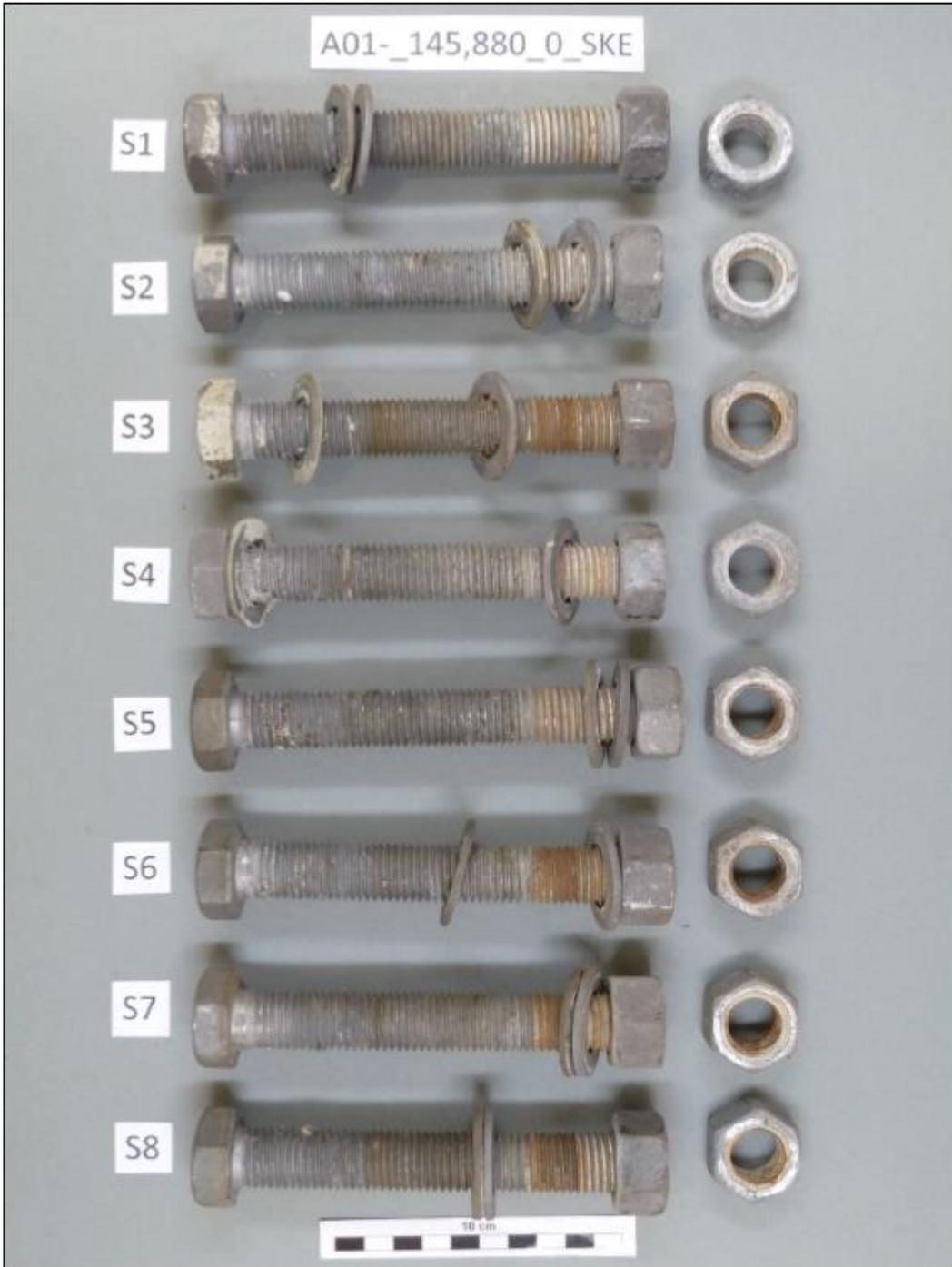
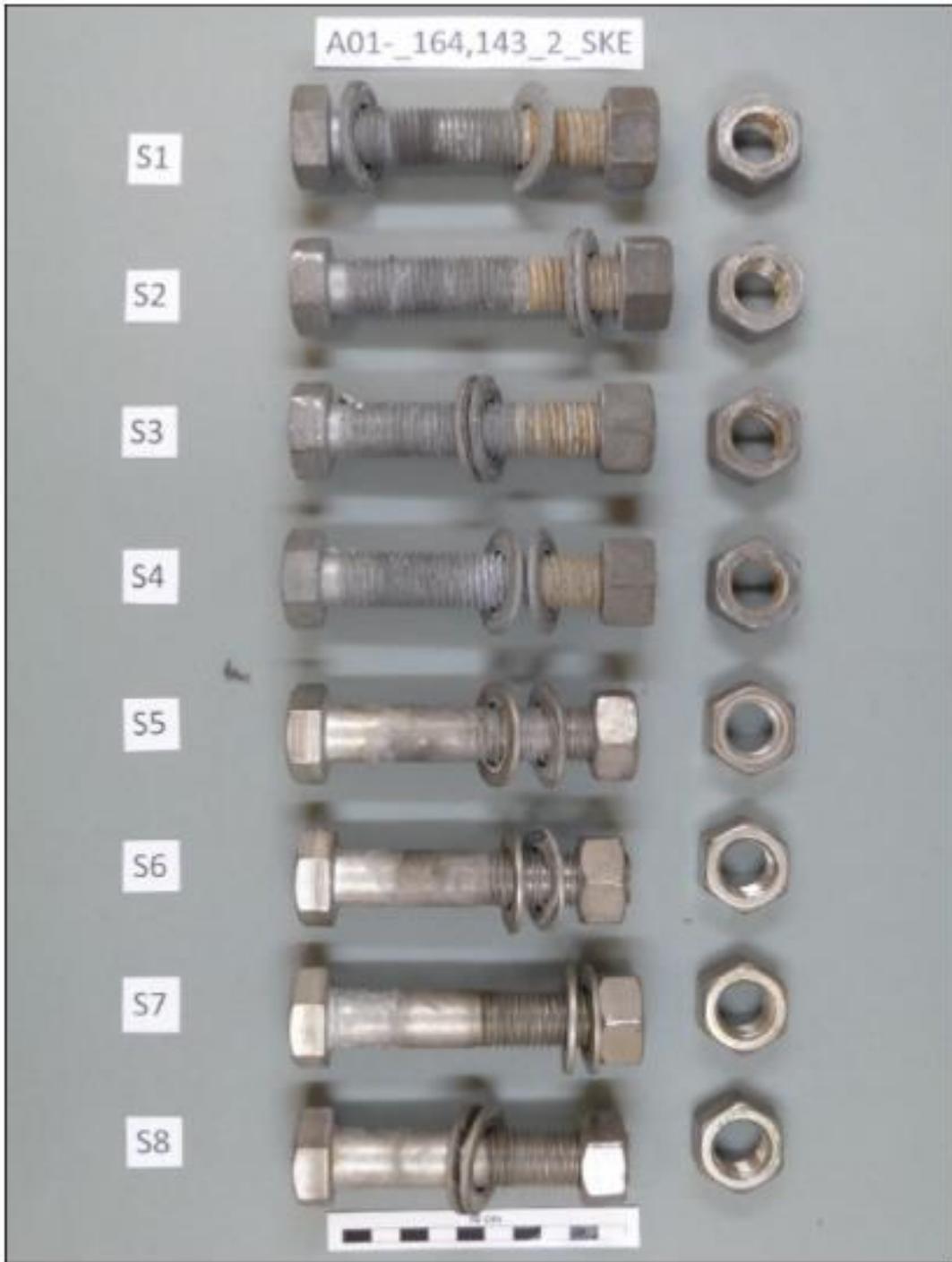


Abb. 0.1



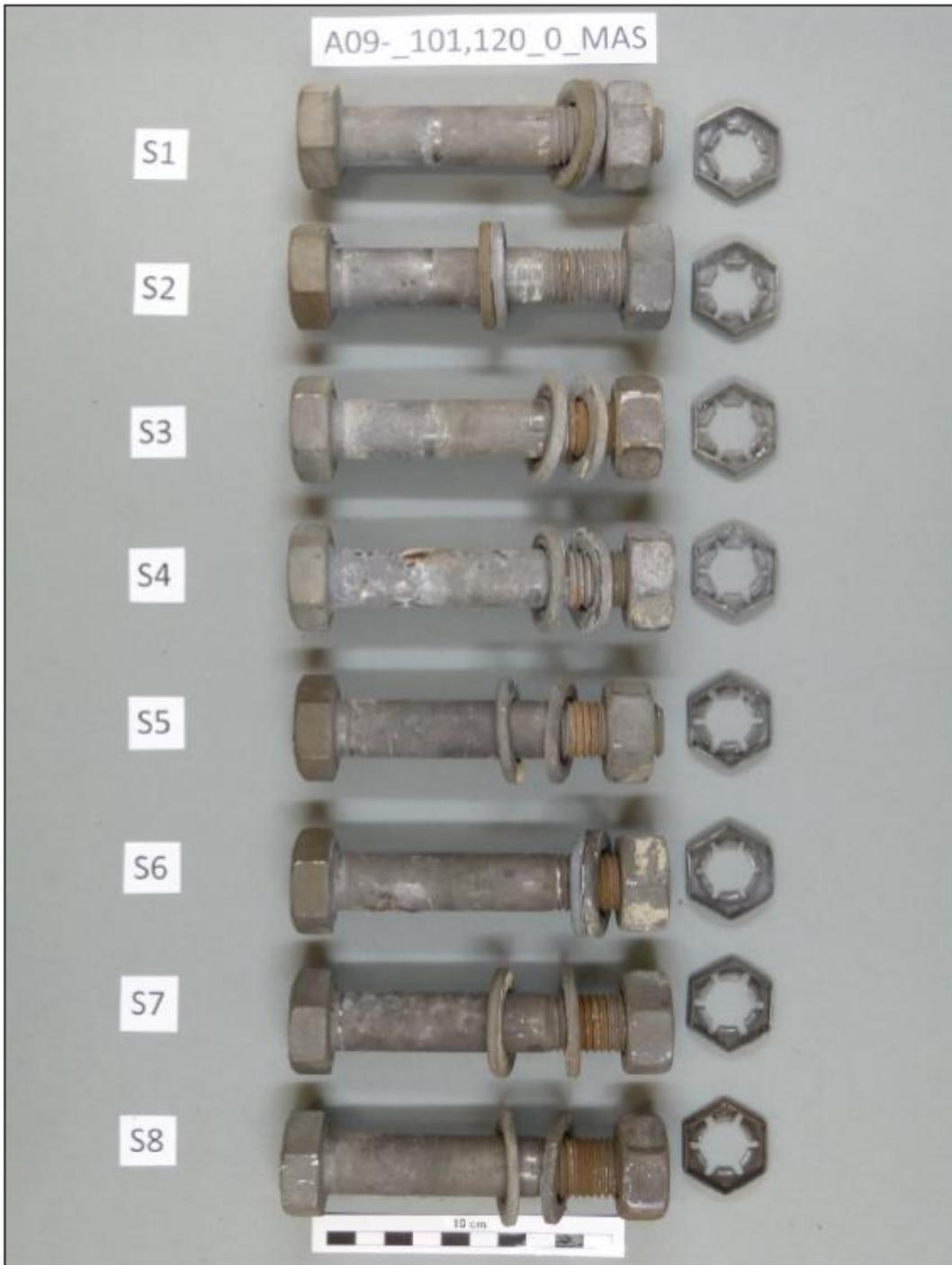


Abb. 0.3

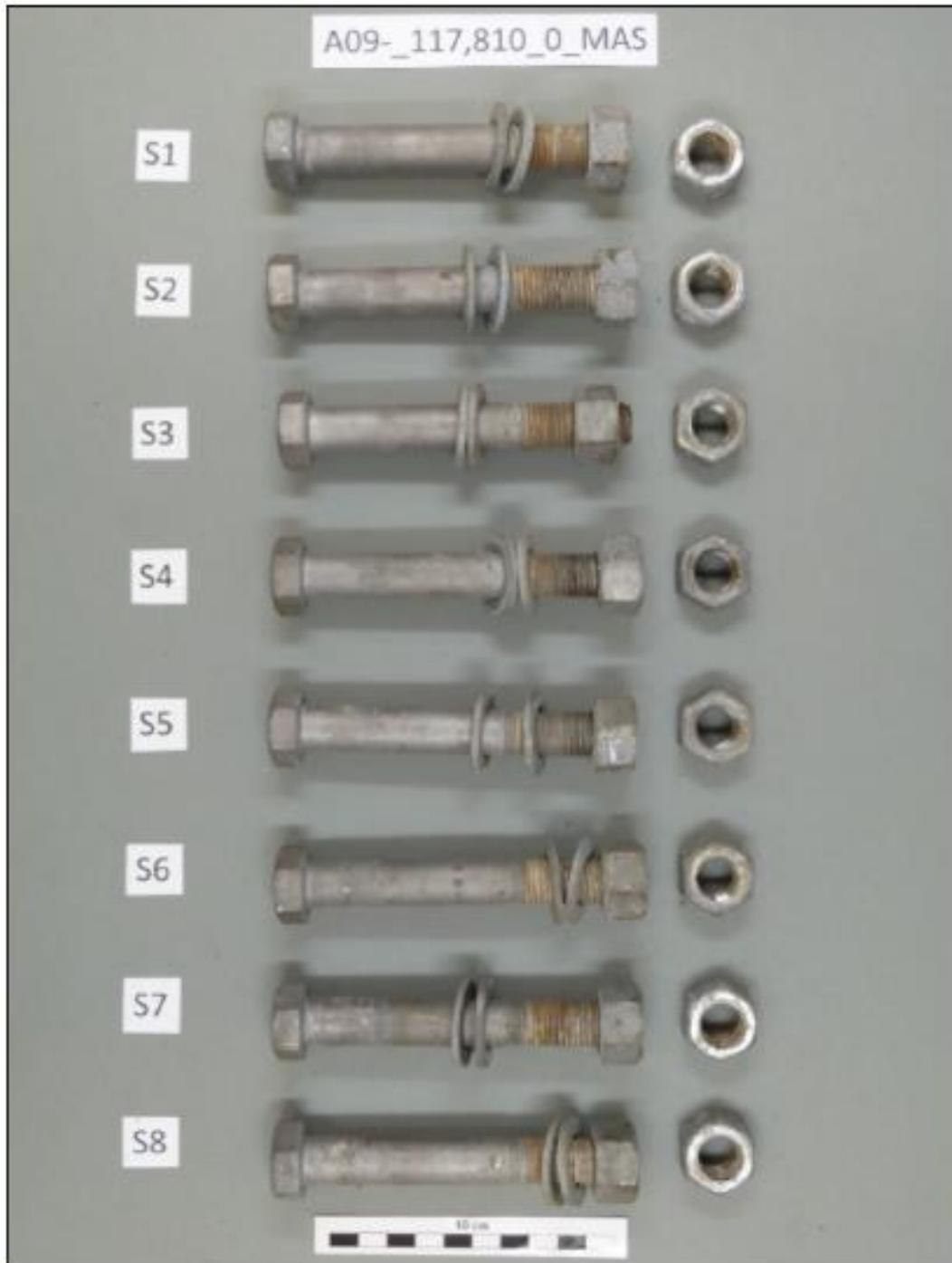


Abb. 0.4

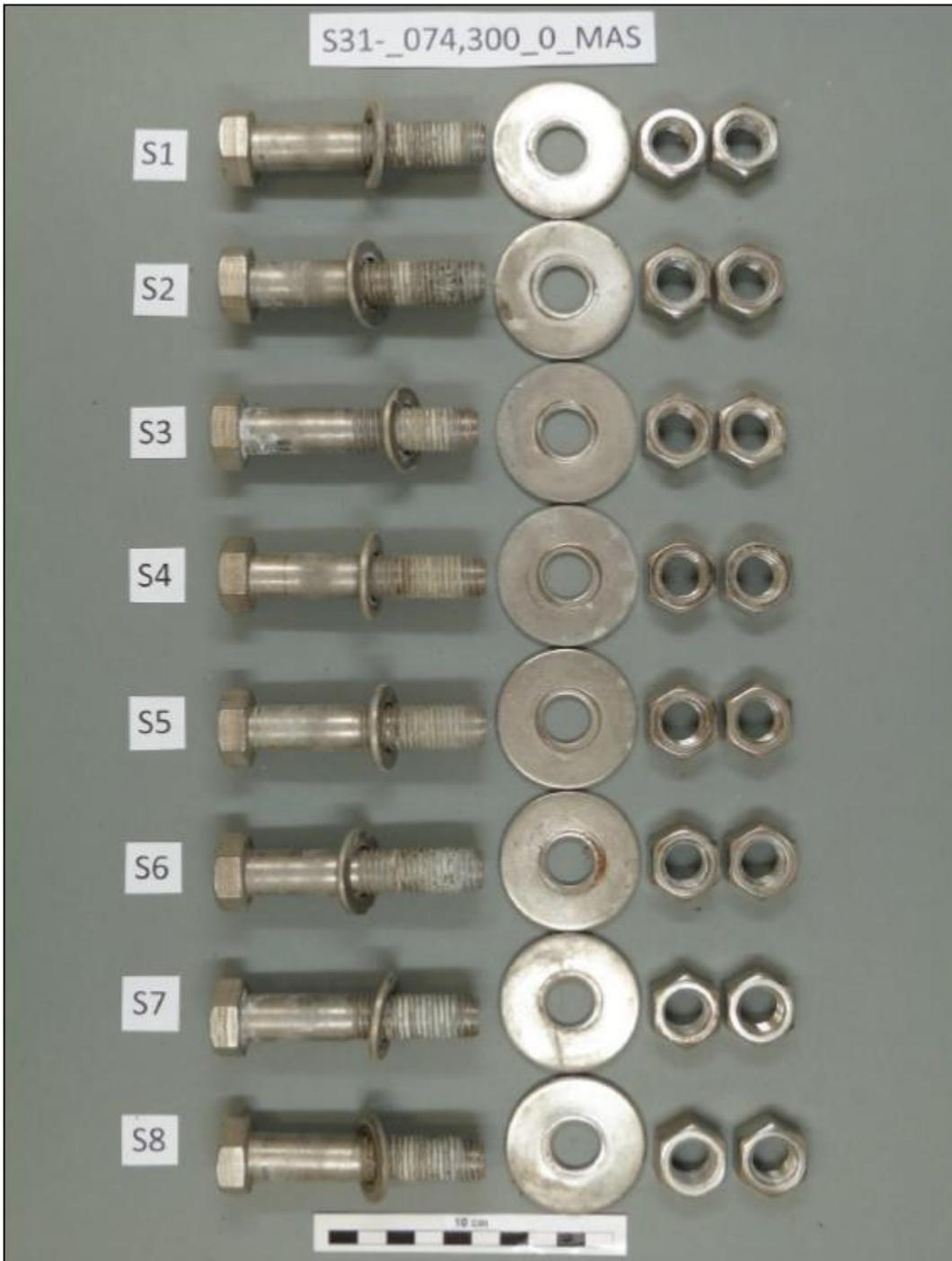


Abb. 0.5

Tab. 0.1: Anzugs- und Lösemomente der übersandten Schrauben [in Nm]

Schraube Nr.	A01_145,880_0_SKE	A01_164,143_2_SKE	A09_101,120_1_MAS	A09_117,810_1_MAS	S31_074,300_1_MAS				
Schraube Nr.	Anzugs- moment	Löse- moment	Anzugs- moment	Löse- moment	Anzugs- moment	Löse- moment	Anzugs- moment	Löse- moment	
S1	300	515	400	310	140	170	140	170	<20
S2	300	310	300	410	180	170	170	170	<20
S3	300	480	300	400	280	170	40	170	45
S4	300	320	300	240	420	170	65	170	60
S5	300	440	300	200	240	170	40	170	20
S6	300	500	300	140	400	170	140	170	60
S7	300	540	300	20	380	170	120	170	<20
S8	300	500	300	140	310	170	120	170	40

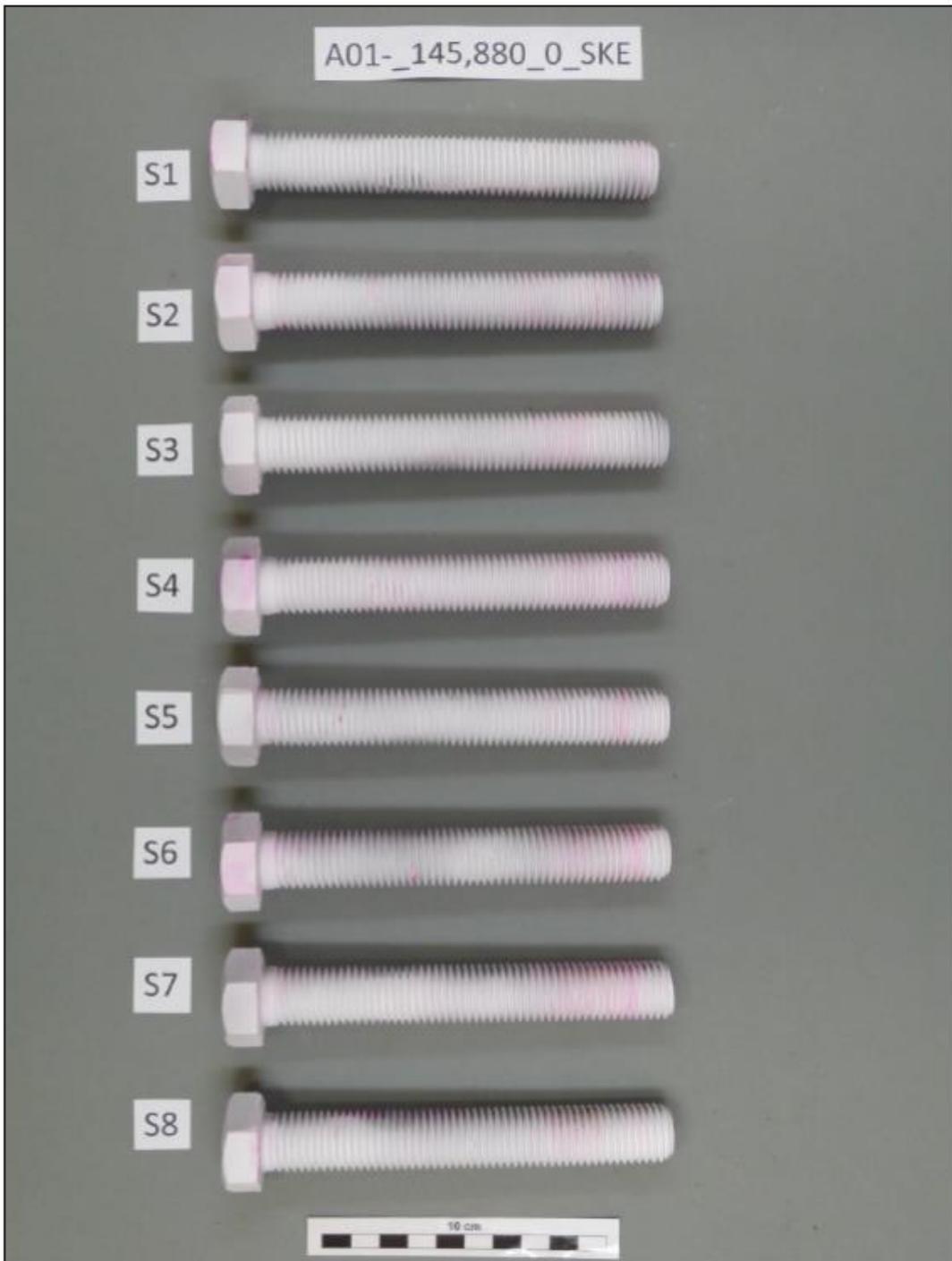


Abb. 1.1

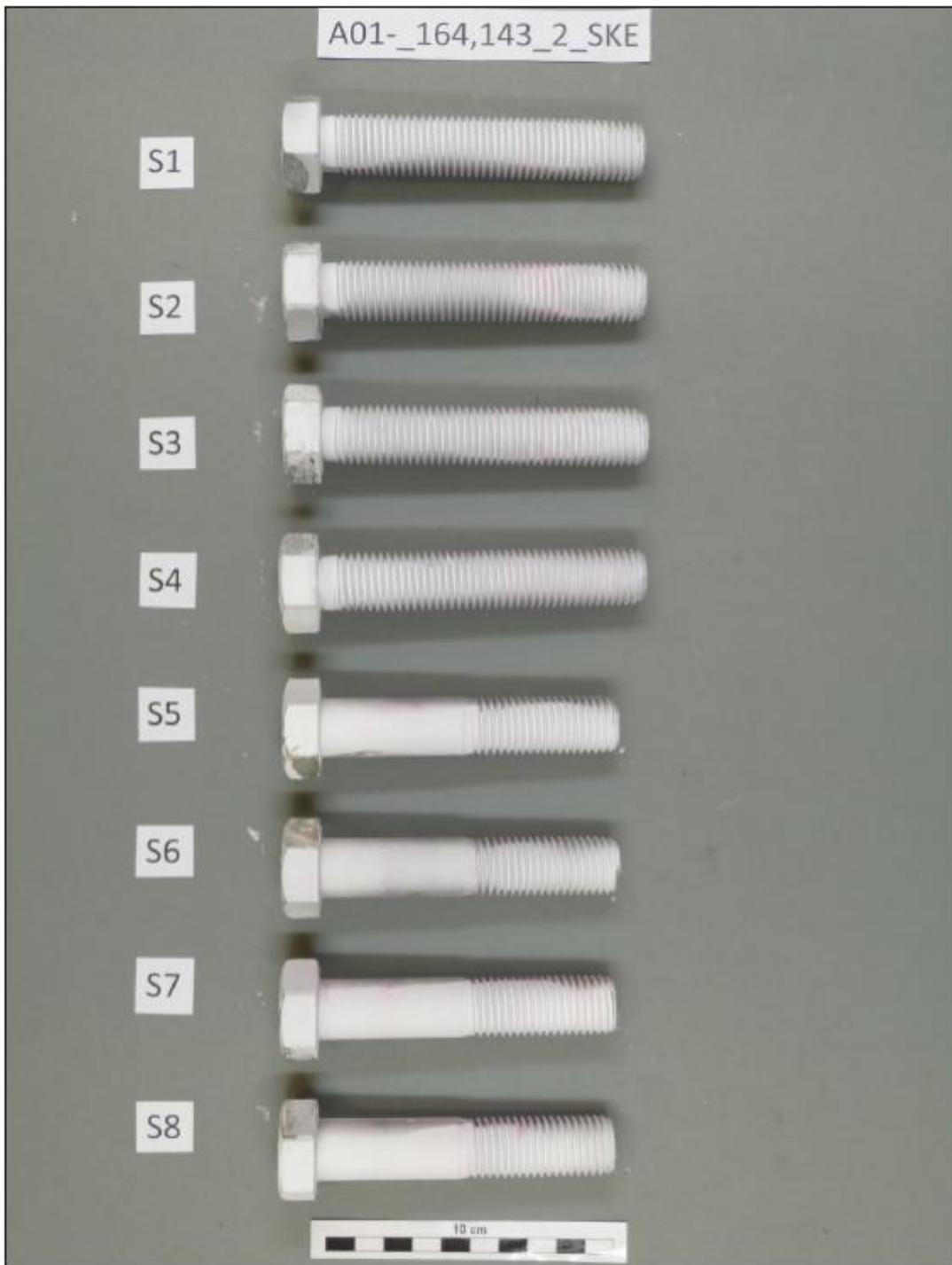


Abb. 1.2

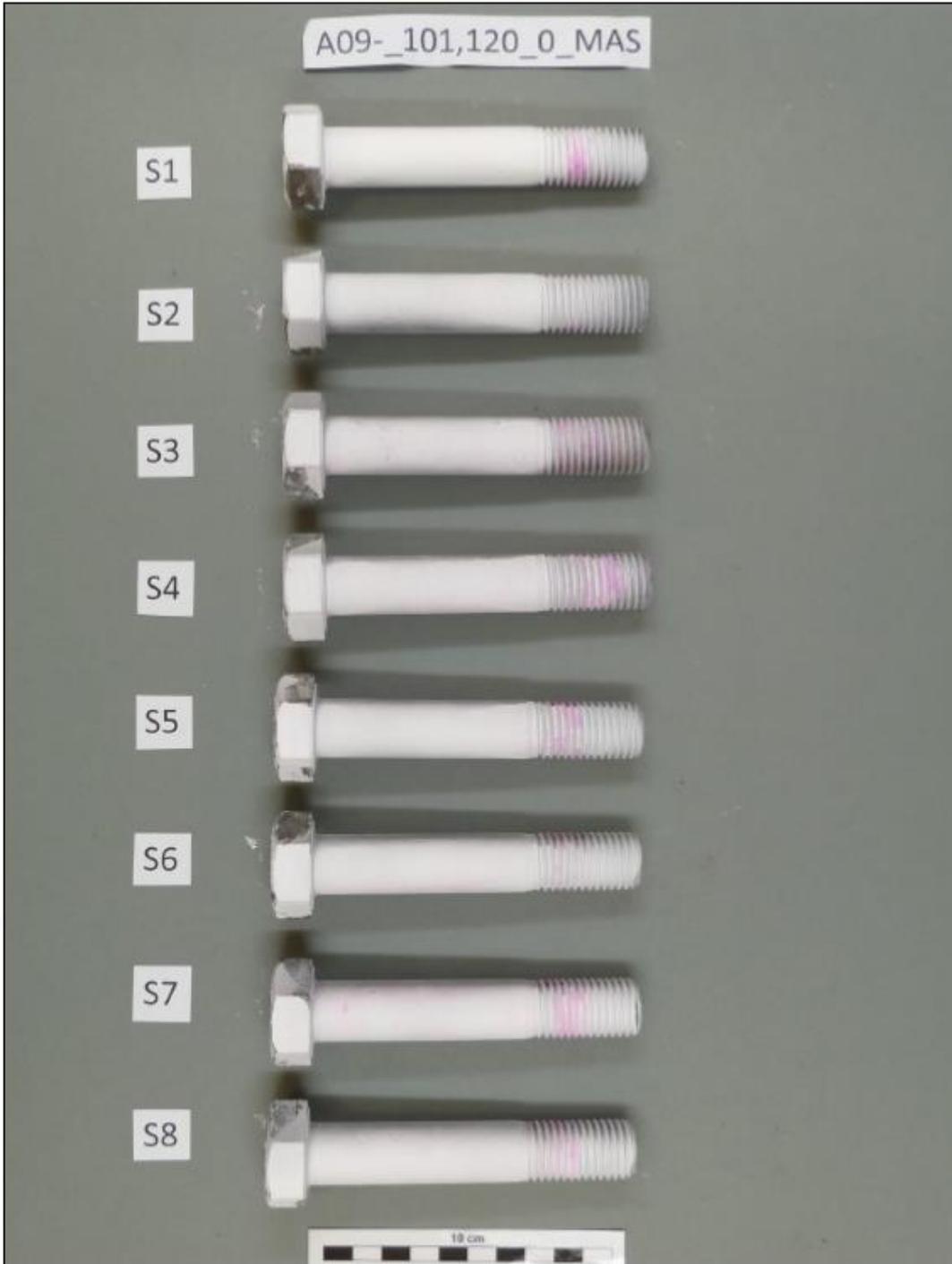


Abb. 1.3



Abb. 1.4



Abb. 1.5

Tab. 2.1: Chemische Zusammensetzung der Ablagerungen bzw. Korrosionsprodukte auf den Gewindeflanken [in wt%]

Spezies	A01_145,880_0_SKE	A01_164,143_2_SKE	A09_101,120_1_MAS	A09_117,810_1_MAS	S31_074,300_1_MAS
ZnO	65,96	69,92	62,54	77,68	27,49
Fe ₂ O ₃	23,94	14,22	25,05	12,77	6,14
SiO ₂	3,91	6,25	3,64	3,09	5,82
TiO ₂	1,88	1,43	1,05	0,979	31,84
CaO	1,28	3,57	2,85	0,808	6,33
Al ₂ O ₃	0,871	1,46	0,849	0,845	2,85
Cl	0,639	1,28	0,353	0,259	-
SO ₃	0,418	0,396	0,746	2,29	4,19
MgO	0,316	0,915	0,794	0,499	0,963
P ₂ O ₅	0,263	-	0,739	0,201	11,84
K ₂ O	0,238	0,234	0,165	0,179	0,339
MnO	0,184	-	0,214	-	-
PbO	-	-	0,201	0,175	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0,686
MoO ₃	-	-	0,587	-	-
NiO	-	-	-	-	0,282

Tab. 3.1: Amplitude der Verbiegung der Schrauben am kopfnahen Ende des Schaftes (gemessen über Einspannung in eine Drehbank) [in mm]

Schraube Nr.	A01_145,880_0_SKE	A01_164,143_2_SKE	A09_101,120_1_MAS	A09_117,810_1_MAS	S31_074,300_1_MAS
S1	0,5	0,4	0,5	0,9	0,1
S2	0,2	0,1	0,4	1,8	0,45
S3	0,6	0,3	0,1	1,7	0,1
S4	0,05	0,3	0,15	1,6	0,2
S5	0,5	0,6	0,15	1,8	0,35
S6	0,25	0,8	0,2	0,2	0,35
S7	0,25	1,0	0,1	0,4	0,4
S8	0,55	1,0	0,15	2,5	0,4

Amplitude = maximaler Ausschlag der Messuhr – minimaler Ausschlag der Messuhr

Die Verbiegung der Schraube ist daher näherungsweise halb so hoch wie in Tab. 3.1 angegeben.

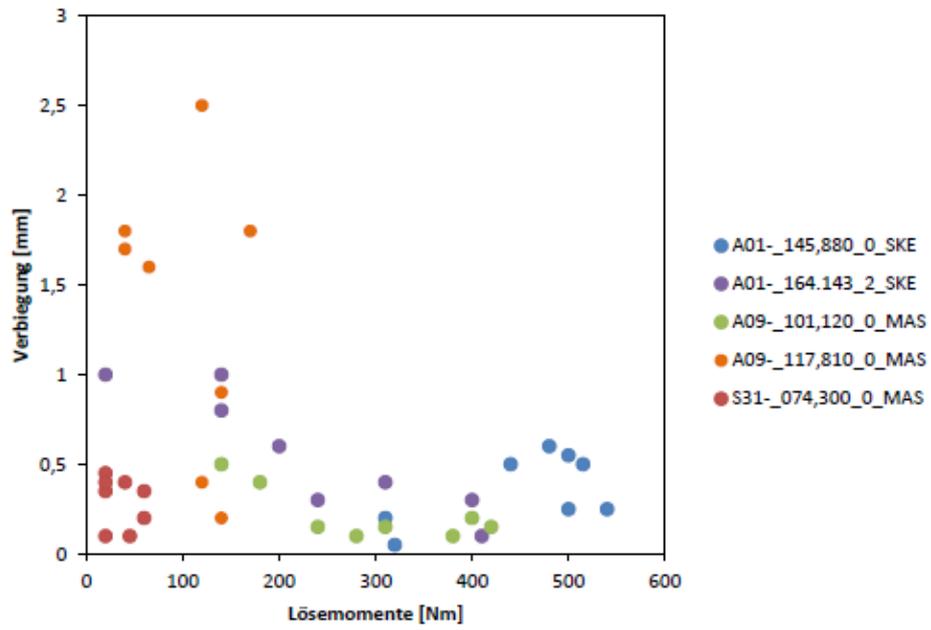


Abb. 3.1

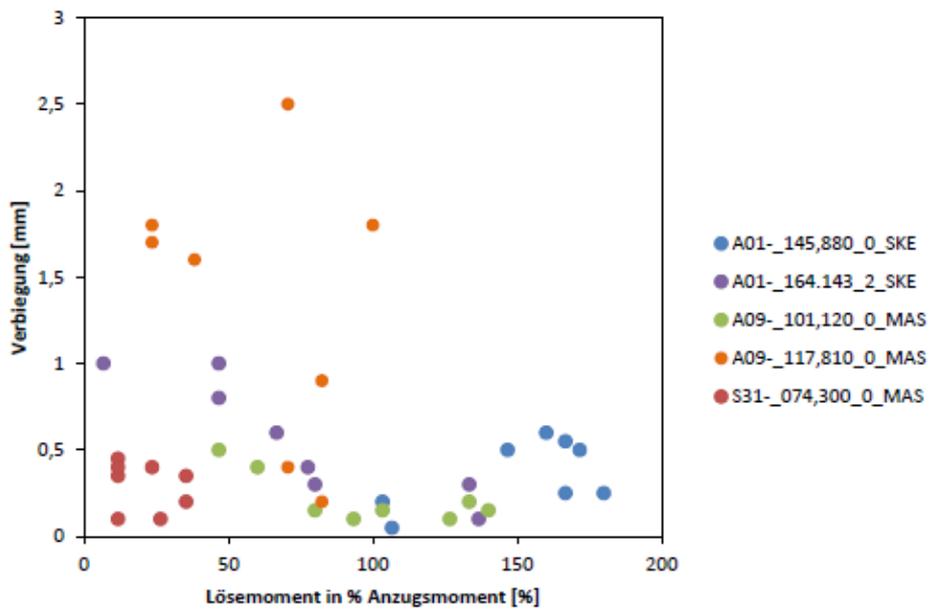


Abb. 3.2