

Willkommen
Welcome
Bienvenue



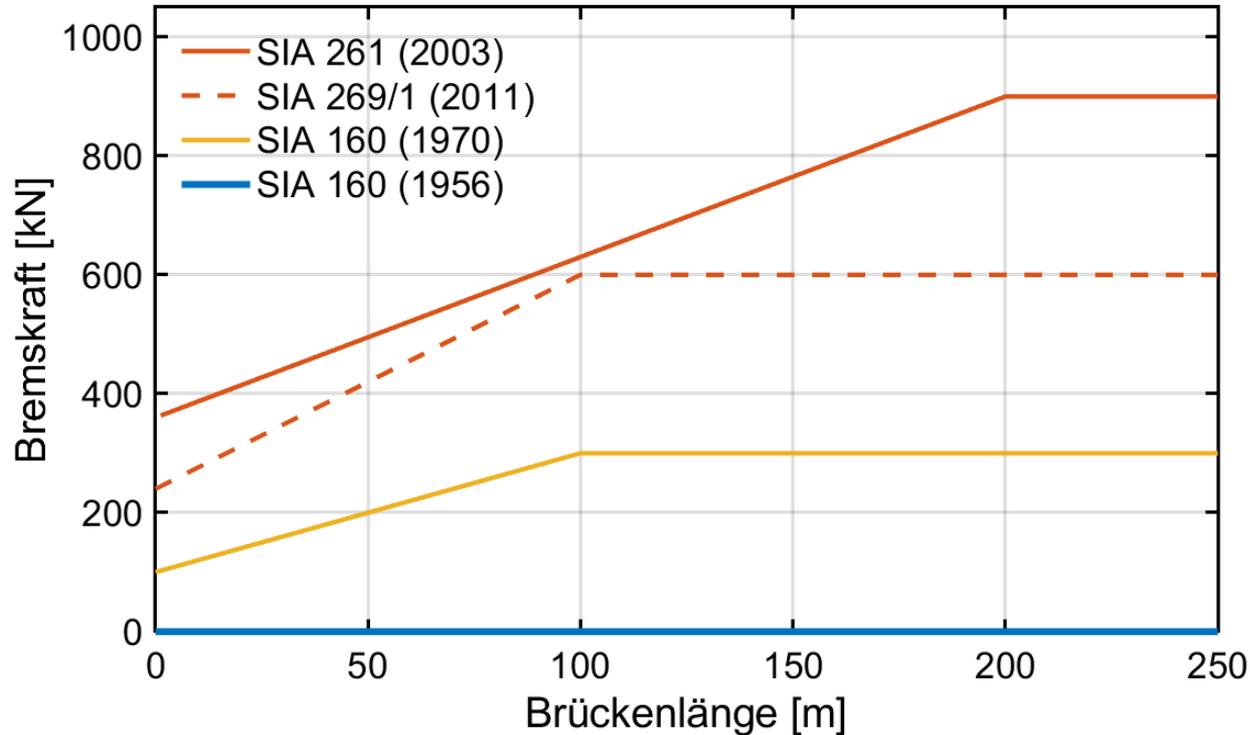
Bremsversuche auf einer Autobahnbrücke

23. Symposium für Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessung
10. Juni 2022, Dübendorf, Schweiz

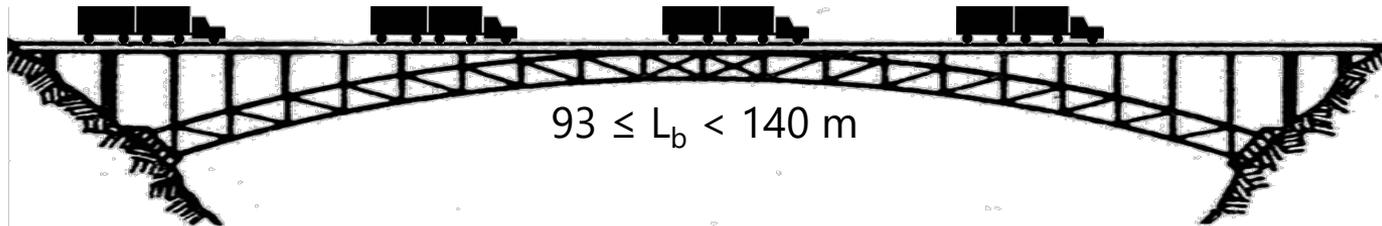
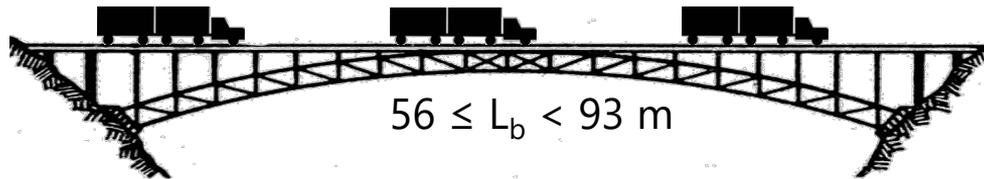
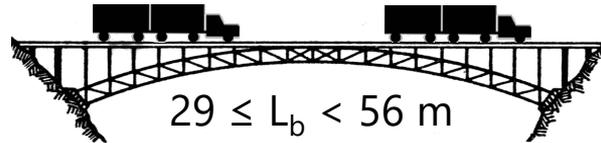
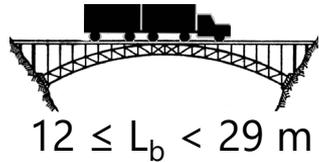
Glauco Feltrin

glauco.feltrin@empa.ch

Bremskräfte in den SIA-Tragwerksnormen (Charakteristischer Wert)



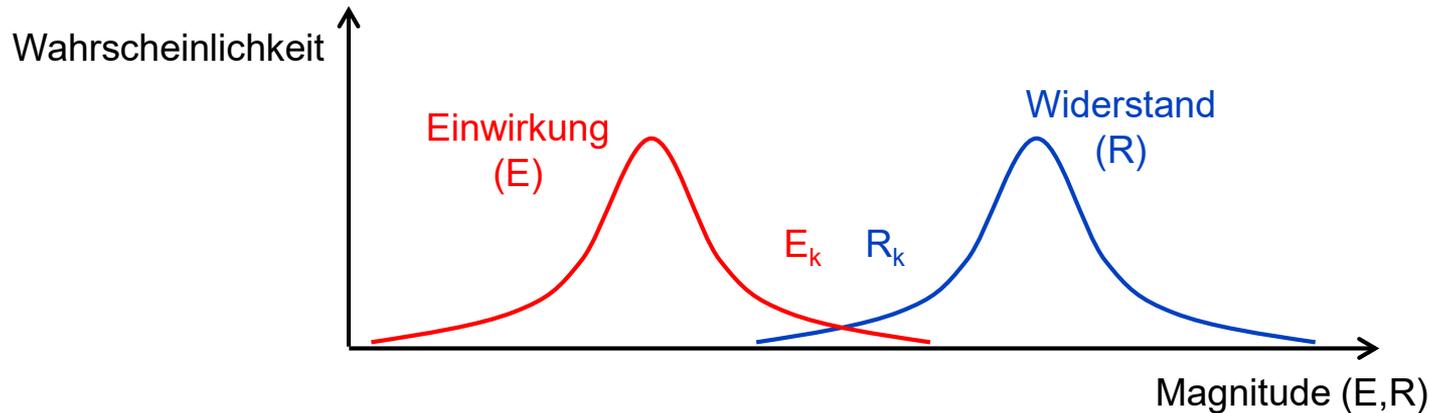
Deterministisches Modell Bremskräfte



[1] Merzenich, G., Sedlacek, G., 1995, *Hintergrundbericht zum Eurocode 1 – Teil 3.2: "Verkehrslasten auf Straßenbrücken"*, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg, Germany.

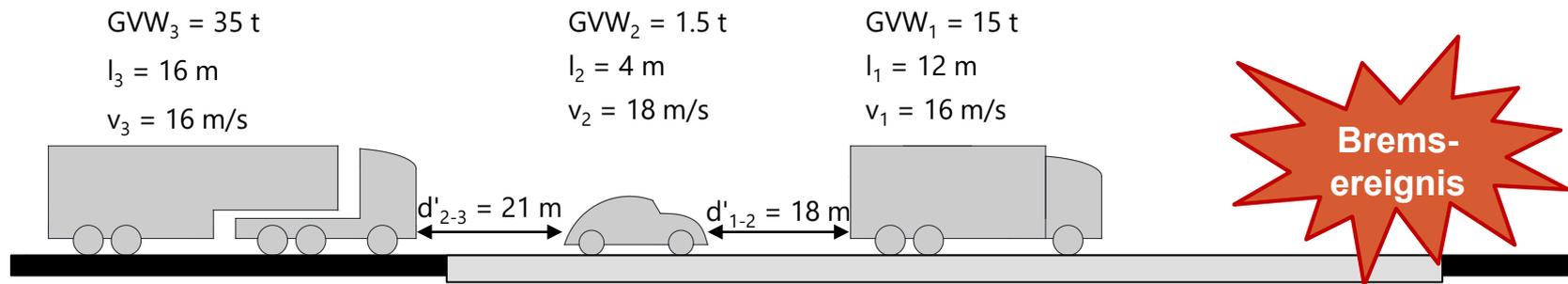
Problematik deterministisches Modell

- Moderne Tragwerksnormen basieren auf Konzepte der Zuverlässigkeitstheorie (Versagenswahrscheinlichkeit)



- Deterministische Bremskräfte erlauben keine realistische Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit
- Keine Verknüpfung zu Wiederkehrperiode möglich (bestehende Brücken)

- Experimentelle Bestimmung aufwendig und teuer (Instrumentierung von Brücken, Kalibrierung durch Versuche, sehr lange Messdauer)
- Verkehrsdaten / Gewichtsdaten → realistische Verkehrssituationen
- Fahrstudien → Häufigkeit und Dynamik der Bremsereignisse
- Monte Carlo Simulation → Häufigkeitsverteilung der Bremskräfte → charakteristischer Wert der Bremskraft

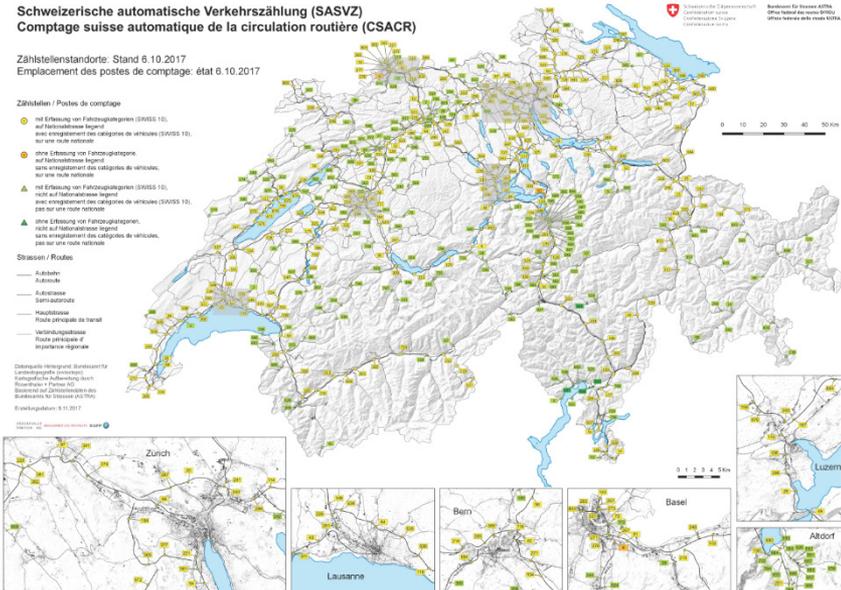


Verkehrsdaten

- Automatische Verkehrszählung (ASTRA)
- Informationen zu Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit, Abstand, etc.



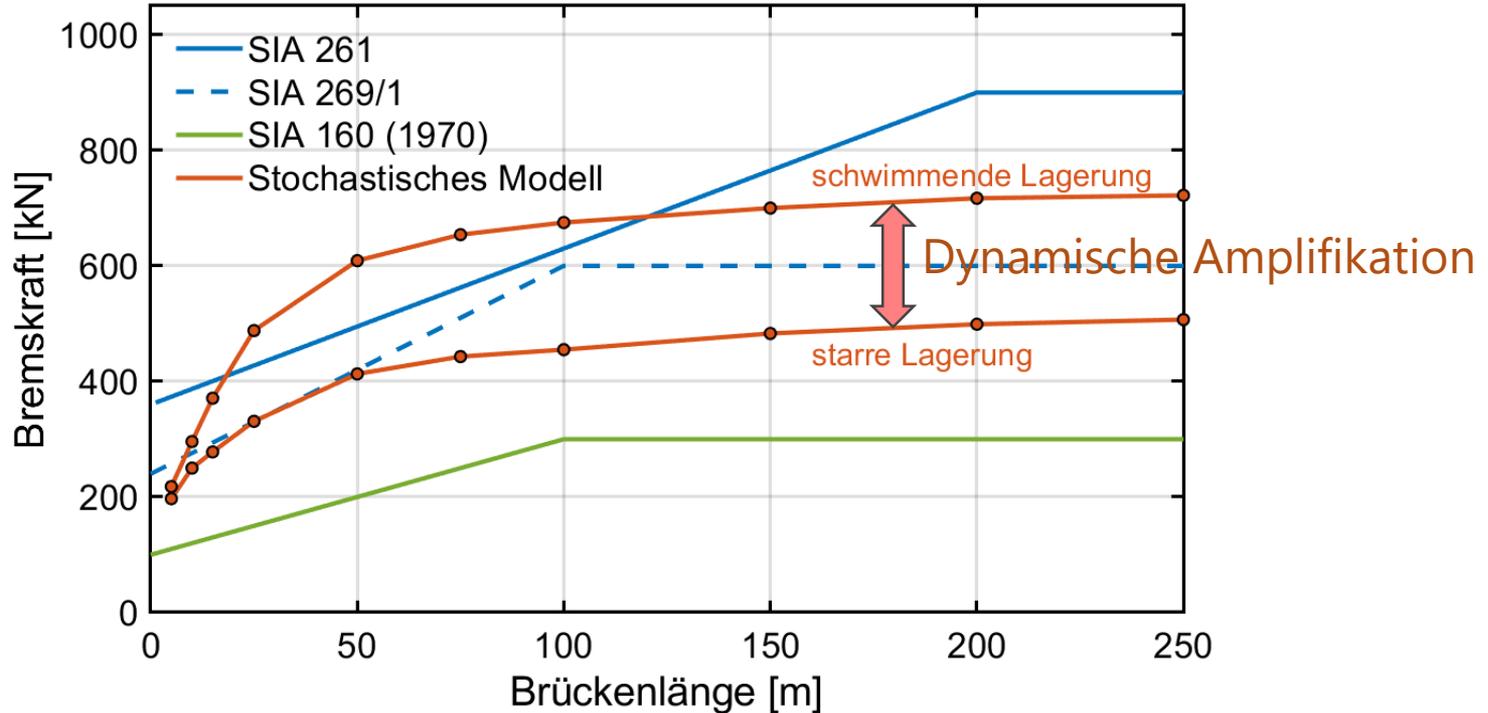
005174	010618	0000	01	10	000000	5	2	10.8	10.7	98	508	3	L
005175	010618	0000	03	40	000000	2	1	12.4	12.2	114	406	3	L
005176	010618	0000	05	25	000000	3	1	22.7	22.6	106	269	2	H
005177	010618	0000	05	20	000000	2	1	1.8	1.6	103	449	3	H
005178	010618	0000	07	99	000000	3	1	2.7	2.6	102	448	3	H
005179	010618	0000	07	97	000000	2	1	2.7	2.6	103	571	5	H
005180	010618	0000	09	43	000000	3	1	1.4	1.2	118	529	5	VL
005181	010618	0000	13	40	000000	2	1	5.4	5.2	87	448	3	L
005182	010618	0000	13	95	000000	5	2	12.8	12.6	80	485	3	L
005183	010618	0000	14	50	000000	3	1	5.0	4.9	118	427	3	VL
005184	010618	0000	16	13	000000	3	1	1.6	1.5	133	529	5	M
005185	010618	0000	16	32	000000	2	1	2.9	2.7	93	486	3	VL
005186	010618	0000	16	65	000000	5	2	2.6	2.4	96	425	3	L
005187	010618	0000	17	54	000000	2	1	1.2	1.0	115	429	3	H
005188	010618	0000	17	55	000000	3	1	1.4	1.2	127	543	5	H
005189	010618	0000	20	22	000000	3	1	2.6	2.5	123	466	3	VL
005190	010618	0000	20	53	000000	2	1	2.9	2.8	116	477	3	L
005191	010618	0000	23	88	000000	5	2	7.2	7.0	105	494	3	L
005192	010618	0000	26	58	000000	5	2	2.7	2.5	114	386	3	L
005193	010618	0000	27	04	000000	2	1	6.5	6.3	117	469	3	L
005194	010618	0000	30	05	000000	2	1	3.0	2.8	122	473	3	VL
005195	010618	0000	31	58	000000	5	2	5.0	4.8	101	491	3	L
005196	010618	0000	38	71	000000	2	1	8.6	8.5	109	492	3	L
005197	010618	0000	39	76	000000	5	2	8.1	8.0	105	485	3	L
005198	010618	0000	41	26	000000	2	1	2.5	2.3	117	524	5	L
005198	010618	0000	48	46	000000	5	2	8.7	8.5	88	314	2	M



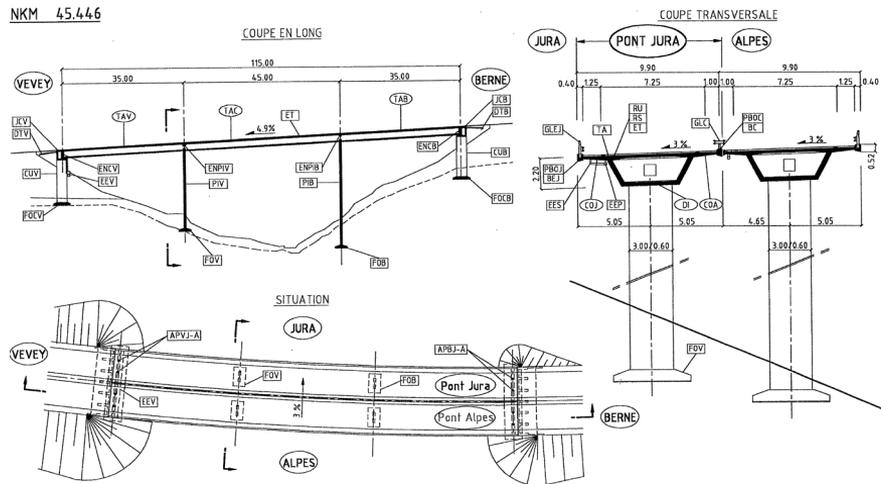
- Sehr wenig Daten vorhanden
- Feldversuche mit instrumentierten Fahrzeugen
 - *The 100-Car Naturalistic Driving Study (2003-2004, USA, PW)*
 - *AOS Field Operational Test (2008-2009, NL, LKW mit Fahrassistenzsystemen)*
- Feldversuche nicht zur Untersuchung von Bremsereignissen geplant (Verkehrssicherheit, Unfallforschung)

Charakteristischer Wert der Bremskraft

Wiederkehrperiode: 1000 Jahre



- Validierung lineares Brückenmodell (Einmassenschwinger)
- Bremsversuche an einer schwimmend gelagerten Brücke
 - Viaduc de Matran (115 m, 3-Felder, Elastomer-Blocklager)
 - max. aufgebrauchte Kräfte ca. 470 kN



Messsystem an den Fahrzeugen



- 2 Messstellen
- Beschleunigung
 - In Fahrrichtung
 - Senkrecht

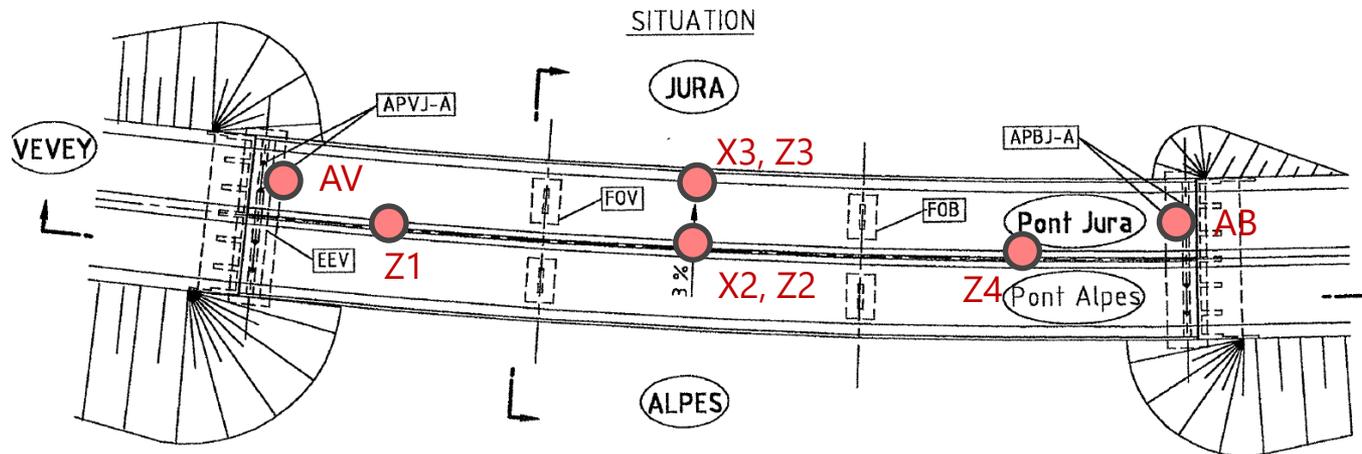
Messsystem an der Brücke

- 2 Längsverschiebungen
- 1 Querverschiebung
- 3 vertikale Verschiebungen



Beschleunigungen

- Längsschwingungen (X2 und X3)
- Biegeschwingungen (Z1, Z2, Z3 und Z4)
- Längsschwingungen Widerlager (AB und AV)



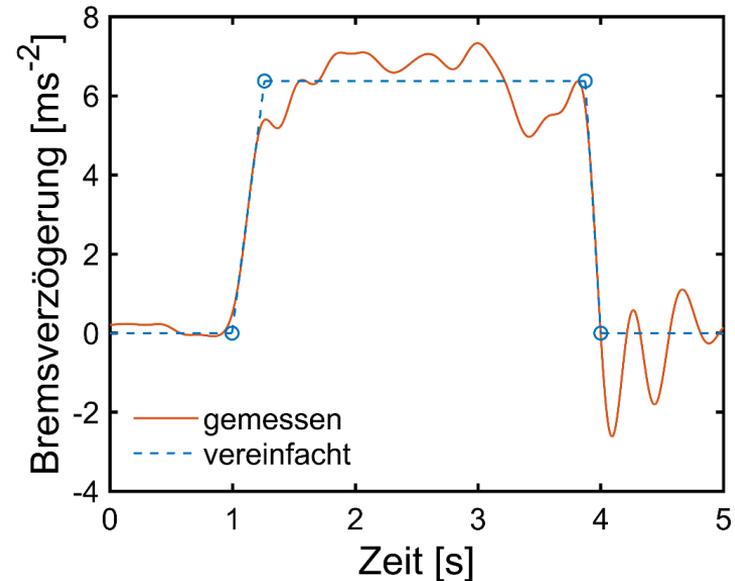
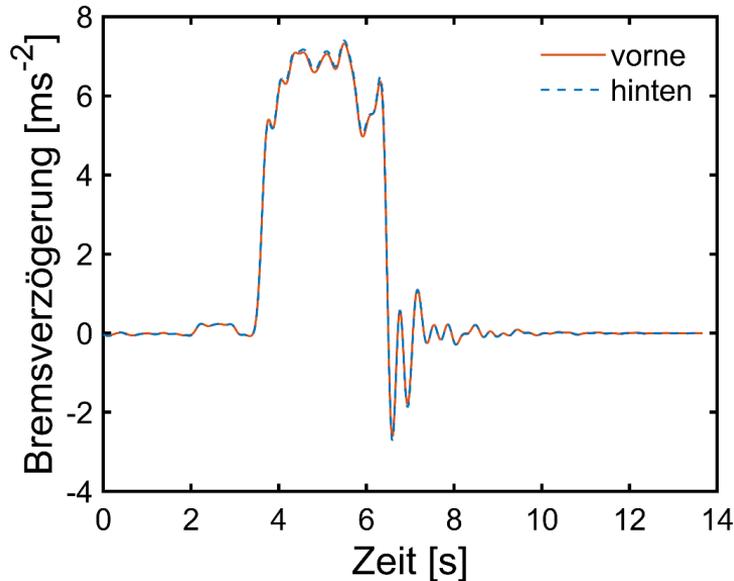
Übersicht Versuche

- 11 Bremsversuche (5 Richtung Bern, 6 Richtung Vevey)

Versuch	Fahrzeuge	d _{max} Vevey [mm]	d _{max} Bern [mm]	Geschwindigkeit [km/h]	Verzögerung [ms ⁻²]
1	20t	2.93	2.84	42.7	8.25
2	40t	4.05	3.90	46.6	7.00
3	40t	4.08	4.16	58.1	6.44
4	40t + 20t	4.36	4.30	51.0 / 50.3	7.41 / 7.51
5	40t + 20t	4.92	4.99	46.7 / 46.8	7.15 / 8.05
6	20t	3.28	3.38	65.4	6.88
7	40t	5.41	5.59	60.4	6.51
8	40t	5.98	6.11	60.6	6.38
9	40t + 20t	7.83	7.74	61.2 / 63.1	6.52 / 6.40
10	40t + 20t	9.13	9.01	61.6 / 63.9	6.07 / 6.91
11	40t	6.27	6.42	70.7	6.31

Bremsverzögerung

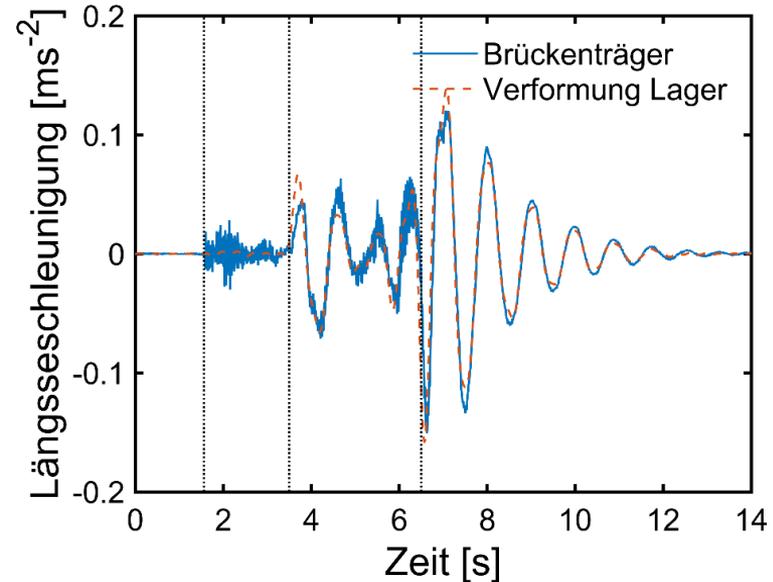
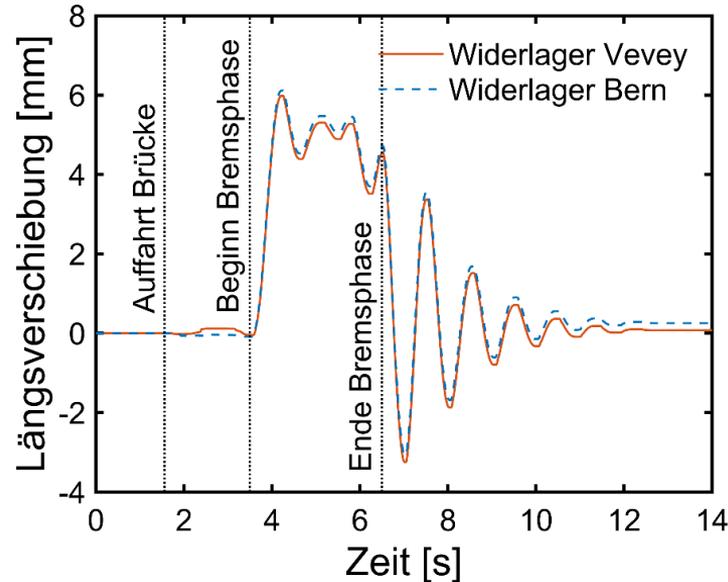
- Schneller Anstieg Bremsverzögerung
- Phase mit hoher, nahezu konstanter Bremsverzögerung
- Schneller Abfall Bremsverzögerung und Ausschwingen des Fahrzeugs nach Halt



Antwort der Brücke

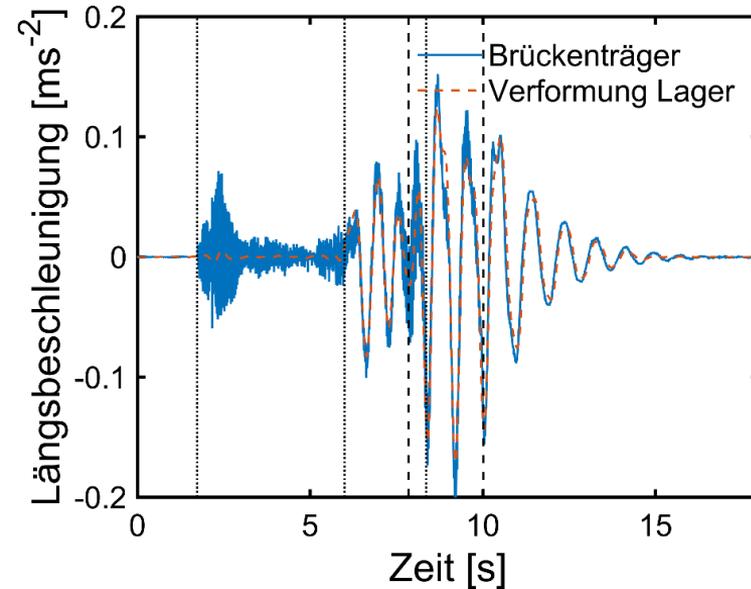
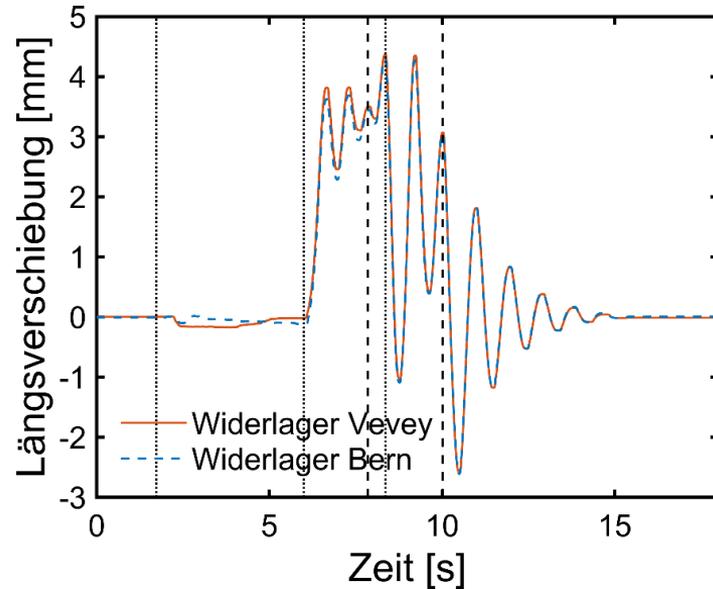
40t-Fahrzeug

- Während Bremsphase analog Bremsverzögerung
- Ausschwingen nach Halt des Fahrzeugs
- Dynamik beim Ausschwingen stärker als während Bremsphase



Antwort der Brücke 40t + 20t Fahrzeuge

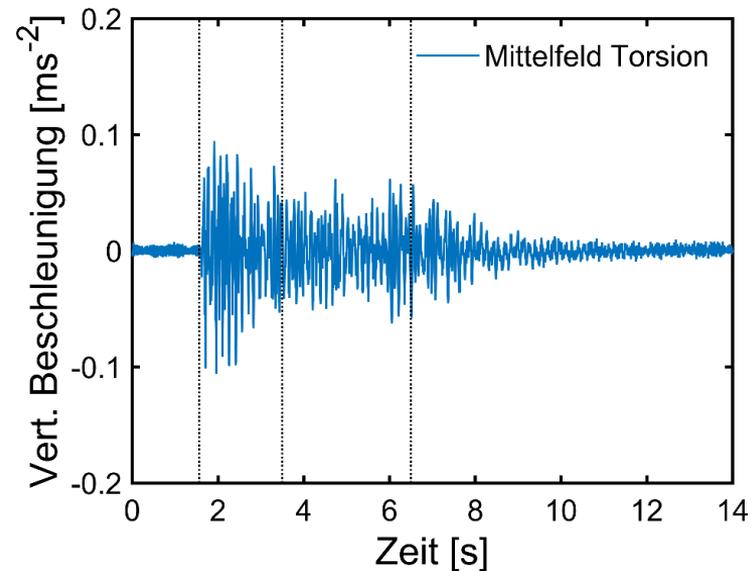
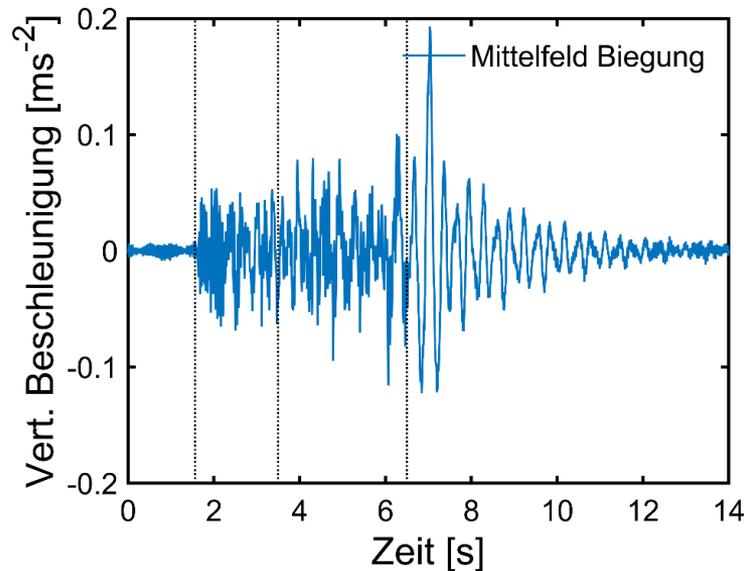
- Bei zwei Fahrzeugen hängt Antwort von Zeitintervall von Bremsmanövers der Fahrzeuge ab



Antwort Brücke

Biege- und Torsionsschwingungen

- Starke Biegeschwingungen nach Ende Bremsmanöver (Endruck)



Vergleich Versuch-Modell

- Bremskraft: Übereinstimmung lineares Modell (Einmassenschwinger) gut bei moderater Nichtlinearität
- Lineares Modell (Einmassenschwinger) unterschätzt Längsverschiebungen

Versuch	Fahrz.	Versuch			Lineares Modell		
		d_{\max} [mm]	$F_{B,\max}$ [kN]	D_v	d_{\max} [mm]	$F_{B,\max}$ [kN]	D_v
6	20t	3.33	188	1.19	3.15	204	1.36
7	40t	5.50	308	1.09	4.68	302	1.07
8	40t	6.04	352	1.27	5.45	353	1.27
9	40t+20t	7.79	438	1.05	6.68	430	1.03
10	40t+20t	9.07	474	1.13	7.12	462	1.11
11	40t	6.35	352	1.29	5.65	366	1.34

d_{\max} : max. Längsverschiebung

$F_{B,\max}$: max. Bremskraft

D_v : dyn. Amplifikation

- Die Brücke verhielt sich nichtlinear und deutlich steifer als erwartet.
- Verhalten der Brücke war richtungsabhängig
- Widerlager bewegten sich nur geringfügig
- Ein lineares Brückenmodell (Einmassenschwinger) ist eine gute Näherung zur Bestimmung der Bremskräfte, sofern das nichtlineare Verhalten moderat bleibt. Es unterschätzt jedoch die Längsverformungen.
- Das lineare Brückenmodell (Einmassenschwinger) liefert bei einem starken nichtlinearen Verhalten keine zuverlässigen Resultate (unterschätzt dynamische Kräfte).

- Die Untersuchungen zu den Bremskräften auf Strassenbrücken wurden vom Bundesamt für Strassen ASTRA gefördert.
 - Forschungsprojekt AGB 2011/003, Aktualisierte Bremskräfte zur Überprüfung von Strassenbrücken (<https://www.mobilityplatform.ch/de/research-data-shop/product/682>)
 - Forschungsprojekt AGB 2017/002, Validierung des Modells zur Berechnung der dynamischen Einwirkung der Bremskraft auf Strassenbrücken (<https://www.mobilityplatform.ch/de/research-data-shop/product/704>)