

H875 Institut für Konstruktiver Ingenieurbau
Leiter: Assoc. Prof. Dr. Alfred Strauss



FAHRBAHNÜBERGANGSKONSTRUKTIONEN: ANALYSE DER DYNAMISCHEN BEANSPRUCHUNGEN

Masterarbeit zur Erlangung des Diplomingenieurs
an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von
Michael Berghammer

Betreuer:
A. Strauss (Universität für Bodenkultur Wien)
S. Lachinger (Austrian Institute of Technology)

SS2015

Abstract/Kurzfassung

Fahrbahnübergangskonstruktionen dienen zur Überbrückung von Fugen an Brückenbauwerken und sind dynamisch hoch beanspruchte Bauteile. Diese hohe Beanspruchung bedingt bisher einen hohen Wartungsaufwand, dem mit dem Forschungsprojekt „Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergangskonstruktionen“ (EVAF) entgegen getreten wird. Aufbauend auf diesem Forschungsprojekt werden die dynamischen Achslasten eines LKWs mittels dynamischer Finite Elemente Analyse an idealisierten und gemessenen Höhenverläufen ermittelt. Zur Anwendung kommen drei unterschiedliche Simulationsprogramme mit unterschiedlichen LKW – und Reifenmodellen, die einander gegenübergestellt werden. Die Simulationsergebnisse der dynamischen Lasten und der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren werden mit der Normung (RVS 15.04.51, ETAG 032 und B4031) verglichen, wobei die simulierten dynamischen Lasten unter den Vorgaben der Normen, die Werte der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren jedoch zum Teil deutlich über jenen der Normen liegen. Des Weiteren wird der Einfluss der Höhe der statischen Last und der Geschwindigkeit auf die Höhe der dynamischen Last wird betrachtet.

Bridge expansion joints are used to span joints on bridges and they are high stressed components by dynamic forces. These high stresses cause high maintenance costs. For this reason, the research project “Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergangskonstruktionen“ (EVAF) was launched. Based on this research Project, the dynamic axle loads of a Truck on idealized and measured longitudinal sections are determined, using dynamic finite element analysis. Three different simulation software packages with different truck – and tire – models are used and the results are compared to each other. The simulated dynamic loads and dynamic load factors are compared to allowance of the bridge design codes (RVS 15.04.51, ETAG 032 and B4031), at which the simulated dynamic loads are lower than the allowance of the codes, but the simulated dynamic load factors can be easily higher than the codes expected. The influence of the height of the static load and the speed on the height of the dynamic load is also considered.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Fahrbahnübergangskonstruktionen	2
2.1	Allgemeines	2
2.2	Übersicht über die Konstruktionsarten nach RVS 15.04.51	2
2.2.1	Profilkonstruktionen P mit einem Dichtelement	2
2.2.2	Profilkonstruktionen PZ mit mehreren Dichtelementen (Modulare Dehnfuge)	2
2.2.3	Mattenkonstruktion M ohne Zwischenprofil	3
2.2.4	Mattenkonstruktionen MZ mit Zwischenprofil(en)	3
2.2.5	Fingerkonstruktionen FK auskragend (Kragfingerkonstruktion)	4
2.2.6	Fingerkonstruktionen FL aufliegend (Gleitfingerkonstruktion)	4
2.2.7	Elastische Belagsdehnfugen BD	5
2.2.8	Mittelbar befahrene Konstruktionen – Unterflurkonstruktionen U	5
3	Forschungsprojekt „Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergänge“ (EVAF)	6
3.1.1	Allgemeines	6
3.1.2	Projektbeschreibung	6
3.1.3	RoadSTAR	7
4	Zielsetzung und Methode	9
5	Datengrundlagen, Material und Methoden	11
5.1	Österreichische Normung	11
5.1.1	RVS 15.04.51 Brückenausrüstung [17]	11
5.1.2	ETAG 032 [7]	12
5.1.3	ÖNORM B4031 [4]	14
5.1.4	Gegenüberstellung der Normen	15
5.2	US-amerikanische Normung	16
5.2.1	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [1]	16
5.3	Straßenlängsprofile	18
5.3.1	Idealisierte Höhenverläufe	18
5.3.2	Gemessene Höhenverläufe	20
6	Modelle und Simulation	21
6.1	ANSYS	21
6.1.1	Aufbau des Reifenmodells	21
6.1.2	LKW Modell	22
6.1.3	Straßenmodelle	24
6.1.4	Simulation	24
6.2	FTire	25
6.2.1	Aufbau des Reifenmodells	25
6.2.2	LKW Modell	26
6.2.3	Straßenmodelle	26
6.2.4	Simulation	27
6.3	DYMOLA	27
6.3.1	Aufbau des Reifenmodells	27
6.3.2	LKW Modell	29
6.3.3	Simulation	32

7	Simulationsergebnisse	33
7.1	Ergebnisübersicht.....	33
7.1.1	Ergebnisübersicht der idealisierten Höhenverläufe	33
7.1.2	Ergebnisübersicht der gemessenen Höhenverläufe	35
7.2	Idealisierte Höhenverläufe	38
7.2.1	Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut	38
7.2.2	Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm erhöht eingebaut	39
7.2.3	Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut.....	40
7.2.4	Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm vertieft eingebaut.....	41
7.2.5	Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut 42	
7.2.6	Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut 43	
7.2.7	Mulde 10 mm tief	44
7.2.8	Sprung +5 mm	45
7.2.9	Sprung +10 mm	46
7.2.10	Sprung -5 mm.....	47
7.2.11	Sprung -10 mm.....	48
7.3	Gemessene Höhenverläufe	49
7.3.1	A23L1_B0214_1_MD_s8498.....	49
7.3.2	A23L1_B0329_1_GF_s12419.....	50
7.3.3	A10R1_A10.098_2_MD_s40145	51
7.3.4	A2L1_A2.75_1_KF_s43315.....	52
7.3.5	A4R1_07011_1_UF_s44054	53
7.4	Verschiedene Geschwindigkeiten an ausgewählten Höhenverläufen	54
7.4.1	Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut	54
7.4.2	Mulde 10 mm tief	55
7.5	Verschiedene Gewichte an ausgewählten Höhenverläufen	56
7.5.1	Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut	56
7.5.2	Mulde 10 mm tief	57
8	Auswertung der Simulationen.....	58
8.1	Statistische Auswertung gemessene Höhenverläufe [6]	58
8.1.1	Simulationsergebnisse ohne Aufteilung nach Bautypen.....	58
8.1.2	Simulationsergebnisse mit Aufteilung nach Bautypen	64
8.1.3	Horizontalkräfte	80
8.2	Entfernung des maximalen dynamischen Lasterhöhungsfaktors von der Fahrbahnübergangskonstruktion	84
8.3	Vergleich der Ergebnisse mit der aktuellen Normung	87
8.3.1	Dynamische Lasterhöhungsfaktoren.....	87
8.3.2	Dynamische Lasterhöhung	88
8.4	Vergleich Höhenverläufe mit der aktuellen Normung	89
8.5	Einfluss der Längsneigung der Fahrbahn auf die dynamische Lasterhöhung.....	91
8.6	Vergleich der einzelnen Simulationsergebnisse.....	93
8.6.1	ANSYS – Dymola	94
8.6.2	FTire – ANSYS	98
8.6.3	Dymola – FTire	103

8.7	Einfluss der Geschwindigkeit auf die dynamische Lasterhöhung	106
8.8	Einfluss der statischen Last auf die dynamische Lasterhöhung	107
9	Untersuchungen zu den dynamischen Eigenschaften von Fahrbahnübergangskonstruktionen in der Literatur	108
9.1	Roeder, C. W., Fatigue and dynamic load measurements on modular expansion joints [16]	108
9.2	Steenbergen, M. J. M. M.; Dynamic response of expansion joints to traffic loading [19]	109
9.3	Coelho, B. et al.; Dynamics of modular expansion joints: The Martinus Nijhoff Bridge [5]	110
9.4	Zi, G. und Zhu, X.; Asymmetric vibration of finger-type bridge expansion joint for design consideration [20]	111
9.5	Gunacker, D.; Innovative Fahrbahnübergangskonstruktionen: Bemessungskonzepte numerische Verifikation [11]	112
10	Zusammenfassung	113
10.1	Einführung	113
10.2	LKW- und Reifenmodelle	113
10.3	Simulationsergebnisse	115
10.3.1	ANSYS	115
10.3.2	FTire	116
10.3.3	Dymola	117
10.3.4	Dynamischer Lasterhöhungsfaktor nach Konstruktionstypen	119
10.4	Vergleich der Ergebnisse mit der aktuellen Normung	121
10.4.1	Dynamische Lasterhöhungsfaktoren	121
10.4.2	Dynamische Lasterhöhung	122
10.5	Einfluss der Längsneigung der Fahrbahn auf die dynamische Lasterhöhung	123
10.6	Vergleich der einzelnen Simulationsergebnisse	124
10.7	Einfluss der Geschwindigkeit auf die dynamische Lasterhöhung	125
10.8	Einfluss der statischen Last auf die dynamische Lasterhöhung	126
11	Schlussfolgerungen	127
12	Ausblick	129
13	Literaturverzeichnis	130
13.1	Verzeichnis Anhang	131
13.2	Verzeichnis CD	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Dynamischer Lastzuschlag IM, Tabelle 3.6.2.1-1 aus [1]	16
Tabelle 2 Anzahl der Fahrbahnübergangskonstruktionen nach Autobahnen	20
Tabelle 3 Übersicht über die Anzahl der durchgeführten Simulationen.....	33
Tabelle 4 Ergebnisübersicht des dynamischen Lasterhöhungsfaktors idealisierte Höhenverläufe.....	34
Tabelle 5 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren an gemessenen Höhenverläufe.....	35
Tabelle 6 Ergebnisübersicht der gemessenen Höhenverläufe	36
Tabelle 7 Ergebnisse FÜK +5 mm.....	38
Tabelle 8 Ergebnisse FÜK +10 mm.....	39
Tabelle 9 Ergebnisse FÜK -5 mm.....	40
Tabelle 10 Ergebnisse FÜK -10 mm.....	41
Tabelle 11 Ergebnisse Mulde -10mm und FÜK +5 mm	42
Tabelle 12 Ergebnisse Mulde -10 mm und FÜK -5 mm	43
Tabelle 13 Ergebnisse Mulde -10 mm	44
Tabelle 14 Ergebnisse Sprung +5 mm	45
Tabelle 15 Ergebnisse Sprung +10 mm.....	46
Tabelle 16 Ergebnisse Sprung -5 mm	47
Tabelle 17 Ergebnisse Sprung -10 mm	48
Tabelle 18 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498	49
Tabelle 19 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419	50
Tabelle 20 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145.....	51
Tabelle 21 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315	52
Tabelle 22 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054	53
Tabelle 23 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten FÜK +5mm	54
Tabelle 24 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten Mulde 10mm.....	55
Tabelle 25 Ergebnisse Vergleich verschiedener Gewichte FÜK +5mm	56
Tabelle 26 Ergebnisse Vergleich verschiedener Gewichte Mulde 10 mm tief	57
Tabelle 27 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ..	58
Tabelle 28 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren.....	58
Tabelle 29 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS	58
Tabelle 30 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire.....	59
Tabelle 31 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola	59
Tabelle 32 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ..	64
Tabelle 33 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren.....	64
Tabelle 34 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS	64
Tabelle 35 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire.....	65
Tabelle 36 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola	65
Tabelle 37 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ..	66
Tabelle 38 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren.....	66
Tabelle 39 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS	67

Tabelle 40 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire	67
Tabelle 41 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola	67
Tabelle 42 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ..	69
Tabelle 43 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren.....	69
Tabelle 44 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS	69
Tabelle 45 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire	70
Tabelle 46 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola	70
Tabelle 47 Parameter der angepassten Weibullverteilung	73
Tabelle 48 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ..	76
Tabelle 49 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren.....	76
Tabelle 50 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS	76
Tabelle 51 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire	77
Tabelle 52 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola	77
Tabelle 53 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS.....	80
Tabelle 54 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire	80
Tabelle 55 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola.....	80
Tabelle 56 Mittelwert und Standardabweichung der Horizontalkräfte.....	81
Tabelle 57 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten Horizontalkräfte	81
Tabelle 58 Daten Histogramm der Horizontalkräfte FTire	81
Tabelle 59 Daten Histogramm der Horizontalkräfte Dymola	81
Tabelle 60 Koeffizienten der linearen Regression.....	84
Tabelle 61 Mittelwert und Standardabweichung der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen	84
Tabelle 62 Daten Histogramm der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen ANSYS	85
Tabelle 63 Daten Histogramm der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen FTire	85
Tabelle 64 Daten Histogramm der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen Dymola	85
Tabelle 65 Koeffizienten der linearen Regression Gefälle - Lasterhöhungsfaktor	92
Tabelle 66 Lagemaße der Simulationsergebnisse in Prozent, bezogen auf ANSYS.....	93
Tabelle 67 Lagemaße der Simulationsergebnisse in Prozent, bezogen auf Dymola.....	93
Tabelle 68 Koeffizienten der linearen Regression.....	95
Tabelle 69 Koeffizienten der linearen Regression.....	99
Tabelle 70 Koeffizienten der linearen Regression.....	104
Tabelle 71 Dynamic Amplification Factor for lamella and crossbeam response for different number of lamellas at 90 km/h, Tabelle aus [19].....	110
Tabelle 72 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS.....	120
Tabelle 73 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire	120
Tabelle 74 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola.....	120
Tabelle 75 Koeffizienten der linearen Regression Gefälle - Lasterhöhungsfaktor	123
Tabelle 76 Koeffizienten der linearen Regression.....	124

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Kragfingerübergang	1
Abbildung 2 Modulare Dehnfuge	1
Abbildung 3 Profilkonstruktion mit einem Dichtelement	2
Abbildung 4 Querschnitt außerhalb TK und STK	3
Abbildung 5 Querschnitt bei TK und STK	3
Abbildung 6 Mattenkonstruktion ohne Zwischenprofil	3
Abbildung 7 Mattenkonstruktion mit einem Zwischenprofil.....	4
Abbildung 8 Auskragende Fingerkonstruktion mit Dichtfunktion	4
Abbildung 9 Aufliegende Fingerkonstruktion mit Dichtfunktion.....	4
Abbildung 10 Elastische Belagsdehnfuge.....	5
Abbildung 11 Unterflurkonstruktion.....	5
Abbildung 12 RoadSTAR AIT	7
Abbildung 13 Dynamische Lasterhöhung im Bereich einer FÜK; geändert nach EN 1991-2 [8]	12
Abbildung 14 Zugelassene Höhendifferenzen, Abbildung aus ETAG 032 [7]; (1) Ideale Verbindungsline; (2) Oberfläche des Fahrbahnüberganges; (3) Bereich Fahrbahnübergang	14
Abbildung 15 Design Truck (übernommen aus [1], Figure 3.6.1.2.2-1).....	17
Abbildung 16 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut	18
Abbildung 17 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm erhöht eingebaut	18
Abbildung 18 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut.....	18
Abbildung 19 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm vertieft eingebaut.....	18
Abbildung 20 Höhenverlauf Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut	18
5.3.1.1 Abbildung 21 Höhenverlauf Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut	19
Abbildung 22 Höhenverlauf Mulde 10 mm tief	19
Abbildung 23 Höhenverlauf Sprung +5 mm	19
Abbildung 24 Höhenverlauf Sprung +10 mm	19
Abbildung 25 Höhenverlauf Sprung -5 mm.....	19
Abbildung 26 Höhenverläufe Sprung -10 mm	19
Abbildung 27 LKW Modell ANSYS, (Abbildung aus [14]).....	22
Abbildung 28 a) Steifigkeit in Ebene des Gurtes; b) Steifigkeit normal zu Gurt; c) Torsions- steifigkeit (rot) und Verdrehsteifigkeit (blau); d) Querbiegesteifigkeit; alle Abbildungen übernommen aus Präsentation FTire [9]	25
Abbildung 29 Simulationsfenster FTire mit Masse-Feder-System.....	26
Abbildung 30 Kontaktpunkt an unebenen Straßen; Kontaktpunkt (P), Straßenpunkte (Q ₁ - Q ₄); Abbildung übernommen aus [12].....	28
Abbildung 31 lineare Feder- und Dämpferelemente (Längs- und Querelastizität) des Reifenmodells TMeasy; Abbildung übernommen aus [12].....	28
Abbildung 32 LKW Modell Dymola	29
Abbildung 33 Aufbau Kabine	30
Abbildung 34 Schema Zugmaschine Dymola	30
Abbildung 35 Schema Achse Dymola.....	31
Abbildung 36 Trailer Dymola	31

Abbildung 37 Profil Mulde 10 mm Tiefe und FÜK 5 mm vertieft.....	34
Abbildung 38 Vergleich dynamischer Lasterhöhungsfaktor idealisierte Höhenverläufe.....	34
Abbildung 39 Box-Plot gemessene Höhenverläufe, Whisker 1,5-facher Interquartilsabstand	35
Abbildung 40 Ergebnisse FÜK +5 mm.....	38
Abbildung 41 Ergebnisse FÜK +10 mm.....	39
Abbildung 42 Ergebnisse FÜK -5 mm.....	40
Abbildung 43 Ergebnisse FÜK -10 mm.....	41
Abbildung 44 Ergebnisse Mulde -10mm und FÜK +5 mm	42
Abbildung 45 Ergebnisse Mulde -10 mm und FÜK -5 mm	43
Abbildung 46 Ergebnisse Mulde -10 mm	44
Abbildung 47 Ergebnisse Sprung +5 mm	45
Abbildung 48 Ergebnisse Sprung +10 mm	46
Abbildung 49 Ergebnisse Sprung -5 mm	47
Abbildung 50 Ergebnisse Sprung -10 mm	48
Abbildung 51 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498	49
Abbildung 52 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419.....	50
Abbildung 53 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145.....	51
Abbildung 54 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315	52
Abbildung 55 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054.....	53
Abbildung 56 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten FÜK +5mm	54
Abbildung 57 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten Mulde 10mm.....	55
Abbildung 58 Ergebnisse Vergleich verschiedener Gewichte FÜK +5mm	56
Abbildung 59 Vergleich verschiedener Gewichte Mulde 10 mm tief.....	57
Abbildung 60 Histogramm ANSYS	58
Abbildung 61 Histogramm FTire	59
Abbildung 62 Histogramm Dymola	59
Abbildung 63 Q-Q Plot Ansys; Vergleich Normalverteilung.....	60
Abbildung 64 Q-Q Plot Ftire; Vergleich Normalverteilung	60
Abbildung 65 Q-Q Plot Dymola; Vergleich Normalverteilung	60
Abbildung 66 Verteilungsfunktionen, die empirische Verteilungsfunktionen liegen innerhalb der 5% Signifikanzgrenzen der Normalverteilung, a) ANSYS, b) FTire, c) Dymola	61
Abbildung 67 Q-Q Plot Ansys; Vergleich Lognormalverteilung	62
Abbildung 68 Q-Q Plot Ftire; Vergleich Lognormalverteilung	62
Abbildung 69 Q-Q Plot Dymola; Vergleich Lognormalverteilung	62
Abbildung 70 Verteilungsfunktionen Kragfinger, die empirische Verteilungsfunktionen liegen innerhalb der 5% Signifikanzgrenzen der Lognormalverteilung, a) ANSYS, b) FTire, c) Dymola	63
Abbildung 71 Histogramm ANSYS	64
Abbildung 72 Histogramm FTire	65
Abbildung 73 Histogramm Dymola	65
Abbildung 74 Histogramm ANSYS	67
Abbildung 75 Histogramm FTire	67
Abbildung 76 Histogramm Dymola	67
Abbildung 77 Histogramm ANSYS	69
Abbildung 78 Histogramm FTire	70

Abbildung 79 Histogramm Dymola	70
Abbildung 80 Verteilungsfunktionen Kragfinger, die empirische Verteilungsfunktionen liegen ausserhalb der 5% Signifikanzgrenzen der Normalverteilung, a) ANSYS, b) FTire, c) Dymola	71
Abbildung 81 Verteilungsfunktionen Kragfinger, die empirische Verteilungsfunktionen liegen ausserhalb der 5% Signifikanzgrenzen der Lognormalverteilung, a) ANSYS, b) FTire, c) Dymola.....	72
Abbildung 82 QQ-Plots dynamische Lasterhöhungen ANSYS Kragfingerkonstruktionen, Normalverteilung, Lognormalverteilung und Weibullverteilung.....	74
Abbildung 83 QQ-Plots dynamische Lasterhöhungen FTire Kragfingerkonstruktionen, Normalverteilung, Lognormalverteilung und Weibullverteilung.....	74
Abbildung 84 QQ-Plots dynamische Lasterhöhungen Dymola Kragfingerkonstruktionen, Normalverteilung, Lognormalverteilung und Weibullverteilung.....	74
Abbildung 85 Verteilungsfunktionen ANSYS	75
Abbildung 86 Verteilungsfunktionen FTire	75
Abbildung 87 Verteilungsfunktionen Dymola	75
Abbildung 88 Histogramm ANSYS	76
Abbildung 89 Histogramm FTire	77
Abbildung 90 Histogramm Dymola	77
Abbildung 91 Vergleich dynamische Lasterhöhungsfaktoren der Konstruktionstypen; ANSYS: a); FTire: b); Dymola: c); Modulardehnfuge (MD), Gleitfingerkonstruktion (GF), Kragfingerkonstruktion (KF), Sonstige Typen (Rest).....	79
Abbildung 92 Histogramm Horizontalkräfte FTire	81
Abbildung 93 Histogramm Horizontalkräfte Dymola.....	81
Abbildung 94 QQ Plot Horizontalkräfte FTire - Dymola mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)	83
Abbildung 95 Verteilungen Entfernung maximale Lasterhöhung von FÜK.....	84
Abbildung 96 Histogramm Entfernung ANSYS	85
Abbildung 97 Histogramm Entfernung ANSYS	85
Abbildung 98 Histogramm Entfernung ANSYS	85
Abbildung 99 Dynamische Lasterhöhungsfaktoren und ihr Auftretungsort, a) ANSYS, b) FTire; Volllinie: dynamischer Lasterhöhungsfaktor nach ETAG 032	86
Abbildung 100 Dynamische Last und ihr Auftretungsort, a) ANSYS, b) FTire; Volllinie: dynamische Last nach ETAG 032	87
Abbildung 101 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren im Vergleich zur Normung	88
Abbildung 102 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasten im Vergleich zur Normung ..	89
Abbildung 103 FÜK mit den größten dyn. Lasten, a) Höhenverlauf un stetig, b) Sprung am Anschluss zur Fahrbahn.....	90
Abbildung 104 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren und Längsneigung; a) ANSYS , b) FTire, c) Dymola mit Regressionsgeraden (dick), 95% Konfidenzintervallen (strichliert) und den 99% Konfidenzintervallen (dünn).....	91
Abbildung 105 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS - Dymola mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)	94
Abbildung 106 Vergleich Bildung Kontaktpunkte und der dazugehörigen Steigung im Kontaktpunkt der Reifenmodelle ANSYS und Dymola; P Kontaktpunkt, Q ₁ und Q ₂ Straßenpunkt.....	95
Abbildung 107 größte Abweichungen Vergleich ANSYS - Dymola; ANSYS größer als Dymola	96

Abbildung 108 größte Abweichungen Vergleich ANSYS - Dymola; Dymola größer als ANSYS	97
Abbildung 109 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS – FTire mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)	98
Abbildung 110 Vergleich Lasterhöhungsfaktor FTire / ANSYS	99
Abbildung 111 größte Abweichungen Vergleich FTire – ANSYS; ANSYS größer als FTire	100
Abbildung 112 größte Abweichungen Vergleich FTire – ANSYS; FTire größer als ANSYS	101
Abbildung 113 FTire physikalisches Reifenmodell: a), b) und c); Abbildungen a) – c) übernommen aus Präsentation FTire [10]; ANSYS Reifenmodell: ebene Kontaktfläche mit angepasster Steifigkeitsverteilung d)	102
Abbildung 114 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren Dymola – FTire mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)	103
Abbildung 115 größte Abweichungen Vergleich FTire – Dymola; Dymola größer als FTire	104
Abbildung 116 größte Abweichungen Vergleich FTire – Dymola; FTire größer als Dymola	105
Abbildung 117 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	106
Abbildung 118 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor und der dynamischen Lasterhöhung in Abhängigkeit der statischen Last; FÜK +5 mm und Mulde 10 mm.....	107
Abbildung 119 Dynamic amplification of loading, übernommen aus [16]	109
Abbildung 120 Global computer model for finite element analysis, übernommen aus [16]..	109
Abbildung 121 Model of the joint with axle loading, übernommen aus [19]	110
Abbildung 122 Fingerplatte mit einreihiger Verschraubung, übernommen aus [20]	112
Abbildung 123 Failure of the finger-joint in Young-Bong bridge II, Korea in which the right plate popped up because of the failure of the anchor bolts, übernommen aus [20].....	112
Abbildung 124 behavior of an asymmetric pendulum, übernommen aus [20]	112
Abbildung 125 Kragfingerkonstruktion mit zweiter Schraubenreihe	112
Abbildung 126 LKW Modell ANSYS und Dymola, (aus [14]).....	114
Abbildung 127 LKW-Modell FTire	114
Abbildung 128 FTire Reifenmodell: a) Steifigkeit in Ebene des Gurtes; b) Steifigkeit normal zu Gurt; c) Torsions-steifigkeit (rot) und Verdrehsteifigkeit (blau); d) Querbiegesteifigkeit; alle Abbildungen übernommen aus Präsentation FTire [10].....	114
Abbildung 129 Vergleich Bildung Kontaktpunkte und der dazugehörigen Steigung im Kontaktpunkt der Reifenmodelle ANSYS und Dymola; P Kontaktpunkt, Q ₁ und Q ₂ Straßenpunkt.....	115
Abbildung 130 Vergleich dyn. Lasterhöhungsfaktor ANSYS mit Normung.....	116
Abbildung 131 Vergleich dyn. Lasterhöhung ANSYS mit Normung	116
Abbildung 132 Vergleich dyn. Lasterhöhungsfaktor FTire mit Normung	117
Abbildung 133 Vergleich dyn. Lasterhöhung FTire mit Normung	117
Abbildung 134 Vergleich dyn. Lasterhöhungsfaktor Dymola mit Normung.....	118
Abbildung 135 Vergleich dyn. Lasterhöhung Dymola mit Normung	118
Abbildung 136 Vergleich dynamische Lasterhöhungsfaktoren der Konstruktionstypen; ANSYS: a); FTire: b); Dymola: c); Modulardehnfuge (MD), Gleitfingerkonstruktion (GF), Kragfingerkonstruktion (KF), Sonstige Typen (Rest).....	119
Abbildung 137 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren im Vergleich zur Normung	121
Abbildung 138 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasten im Vergleich zur Normung	122
Abbildung 139 QQ-Plot dynamischer Lasterhöhungsfaktor gegenüber Längsgefälle; Regressionsgeraden (dick), 95% Konfidenzintervallen (strichliert) und den 99% Konfidenzintervallen (dünn).....	123

Abbildung 140 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS - Dymola mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)	124
Abbildung 141 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS – FTire mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)	124
Abbildung 142 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	125
Abbildung 143 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor und der dynamischen Lasterhöhung in Abhängigkeit der statischen Last; FÜK +5 mm und Mulde 10 mm.....	126

1 Einleitung

Fahrbahnübergangskonstruktionen dienen zur Überbrückung von notwendigen Fugen zwischen Tragwerken und Widerlagern an Brückenbauwerken [17]. Aufgrund von Fertigungstoleranzen, fehlerhaftem Einbau, Beschädigungen an Fahrbahnbelägen usw. ergeben sich an den Übergängen von Widerlagern und Brücken Unstetigkeiten im Längsprofil, die sich in einer höheren dynamischen Last widerspiegeln. Für die, immer an dieser exponierten Position sitzenden, Fahrbahnübergangskonstruktionen bedeutet dies eine erhöhte dynamische Beanspruchung, die sich auf die tatsächliche Lebensdauer der Konstruktion negativ auswirkt und somit zu einem erhöhtem Wartungsaufwand für den Betreiber führt. Aus diesem Grund wurde ein Forschungsprojekt (EVAF – Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergänge) ins Leben gerufen, um Ansätze für robustere und wartungsärmere Fahrbahnübergänge zu finden. Aufsetzend auf dieses Projekt wurden im Rahmen einer Masterarbeit die dynamischen Lasterhöhungen an den Konstruktionen mit zwei verschiedenen Programmen simuliert, des Weiteren wurde auf eine bereits durchgeführten Simulation des Projektes [14] „EVAF“ zurückgegriffen. Grundlage der Simulationen waren idealisierte, vereinfachte Längsprofile und vermessene, reale Profile. Diese realen Profile wurden durch das mobile Straßenzustandserfassungssystem RoadSTAR (siehe 3.1.3) aufgenommen. Ziel ist es, die Ergebnisse der dynamischen Lasterhöhung untereinander und mit der aktuellen Normung zu vergleichen.

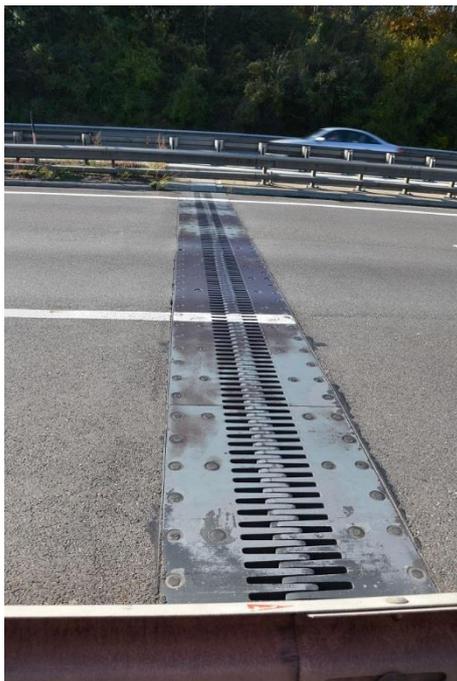


Abbildung 1 Kragfingerübergang

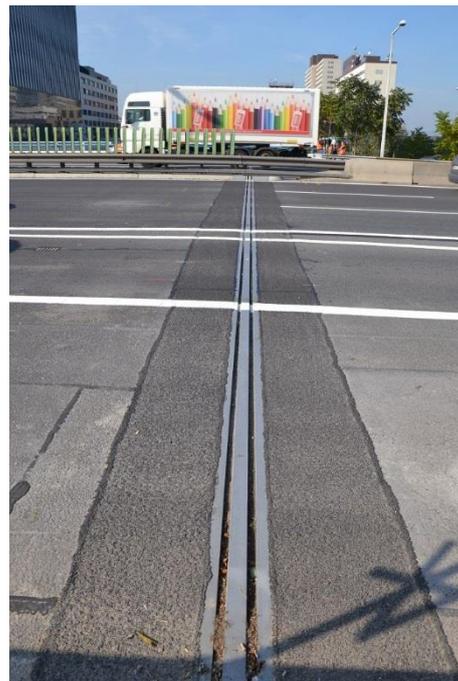


Abbildung 2 Modulare Dehnfuge

2 Fahrbahnübergangskonstruktionen

2.1 Allgemeines

>>Fahrbahnübergangskonstruktionen (FÜK) dienen der Überbrückung von Fugen zwischen Tragwerk und Widerlagern oder zwischen zwei Tragwerken. Alle planmäßigen Bewegungen dieser benachbarten Bauteile sind von der FÜK möglichst zwängungsfrei aufzunehmen. Die FÜK ist verkehrssicher, wartungsarm und die Gesamtkonstruktion in der Regel wasserdicht auszubilden und soll beim Befahren einen hohen Fahrkomfort bei möglichst geringer Lärmentwicklung bieten.<< [17]

2.2 Übersicht über die Konstruktionsarten nach RVS 15.04.51

Texte und Abbildungen aus RVS 15.04.51 Brückenausrüstung 2011, S. 3-6. [17]

2.2.1 Profilkonstruktionen P mit einem Dichtelement

Die Konstruktion umfasst außer einem Dichtelement nur Randprofile RP und deren Verankerungen V (s. Abbildung 3). Sie enthält keine beweglichen Teile.

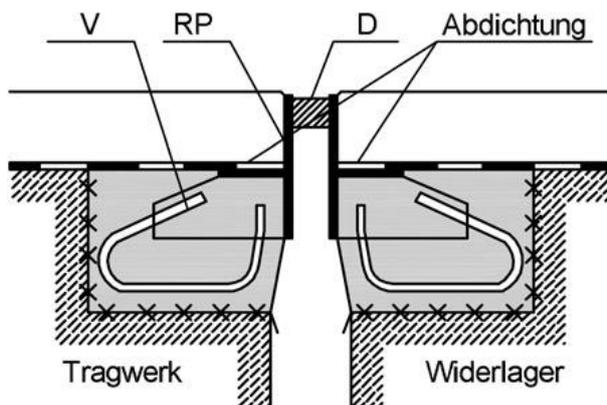


Abbildung 3 Profilkonstruktion mit einem Dichtelement

2.2.2 Profilkonstruktionen PZ mit mehreren Dichtelementen (Modulare Dehnfuge)

Durch Aneinanderreihen von zwei oder mehr Dichtelementen gemäß Abbildung 3 können größere Dehnwege aufgenommen werden. Neben den Randprofilen RP sind Zwischenprofile ZP, unterstützt von besonderen Tragkonstruktionen TK, sowie Steuerkonstruktionen STK notwendig (s. Abbildung 4 und Abbildung 5).

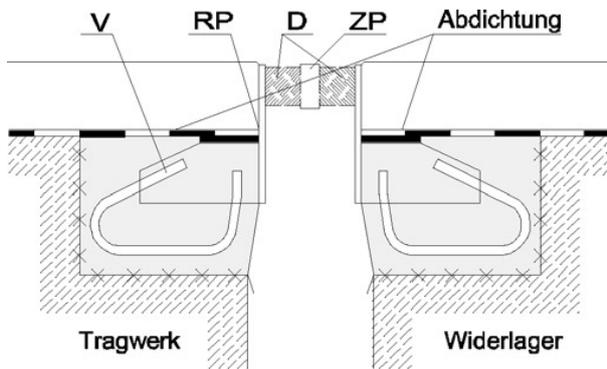


Abbildung 4 Querschnitt außerhalb TK und STK

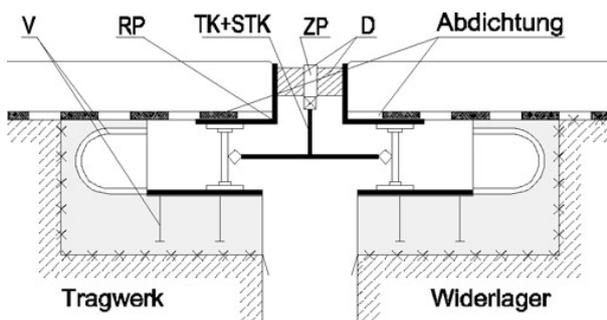


Abbildung 5 Querschnitt bei TK und STK

2.2.3 Mattenkonstruktion M ohne Zwischenprofil

Mattenförmige Dichtelemente aus Elastomer oder ähnlichem mit oder ohne Stahleinlagen überbrücken den Dehnungsspalt. Das Dichtelement übernimmt eine Lastabtragungsfunktion. Der Konstruktionsaufbau entspricht jenem gemäß Abbildung 3. An die Stelle des Dichtelementes D tritt das mattenförmige Dichtelement M (s. Abbildung 6).

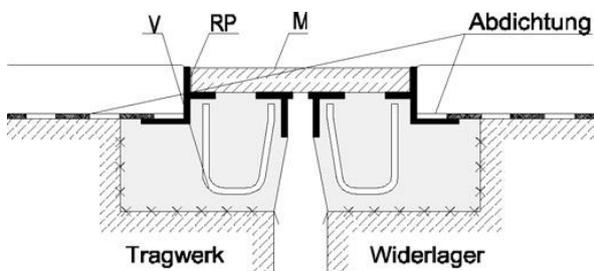


Abbildung 6 Mattenkonstruktion ohne Zwischenprofil

2.2.4 Mattenkonstruktionen MZ mit Zwischenprofil(en)

Bei größeren Dehnwegen können Zwischenprofile ZP zur Unterteilung des Dehnungsspaltens notwendig werden. Der Konstruktionsaufbau entspricht jenem gemäß Abbildung 3. An die Stelle der Dichtelemente D treten mattenförmige Dichtelemente M.

Die Funktion der Steuerkonstruktion STK kann auch durch die mattenförmigen Dichtelemente M wahrgenommen werden (s. Abbildung 7).

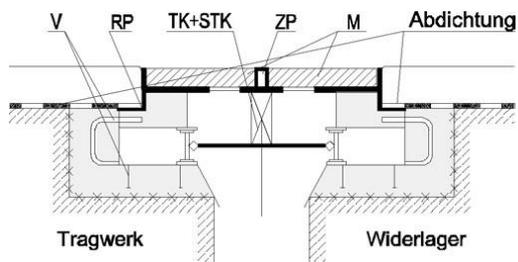


Abbildung 7 Mattenkonstruktion mit einem Zwischenprofil

2.2.5 Fingerkonstruktionen FK auskragend (Kragfingerkonstruktion)

Die auskragende Fugenkonstruktion ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt. Die Ableitung des Tagwassers ist durch Entwässerungsrinnen oder ähnliches zu gewährleisten.

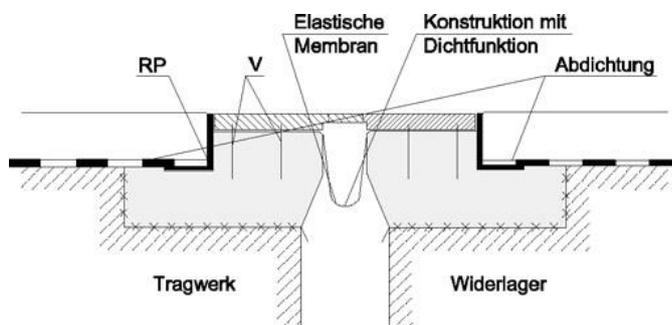


Abbildung 8 Auskragende Fingerkonstruktion mit Dichtfunktion

2.2.6 Fingerkonstruktionen FL aufliegend (Gleitfingerkonstruktion)

Durch besondere Maßnahmen (elastomere Umhüllung der Metallteile, elastische Membrane usw.) wird die Konstruktion abgedichtet (s. Abbildung 9).

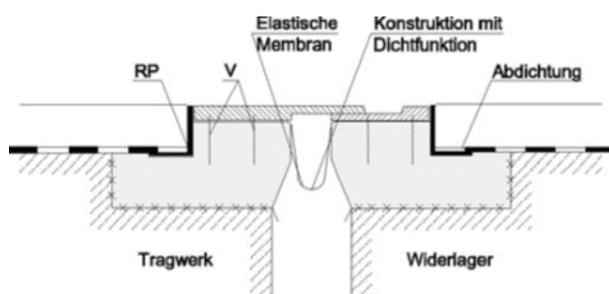


Abbildung 9 Aufliegende Fingerkonstruktion mit Dichtfunktion

2.2.7 Elastische Belagsdehnfugen BD

Der Dehnungsspalt wird durch einen Belagsstreifen BS mit besonderen Materialeigenschaften überbrückt (s. Abbildung 10). Der Fugenspalt wird durch ein Abdeckblech A mit Zentrierung überbrückt. Die elastische Belagsdehnfuge ist auf Tragwerksebene bis auf die Außenkante des Tragwerkes einzubauen.

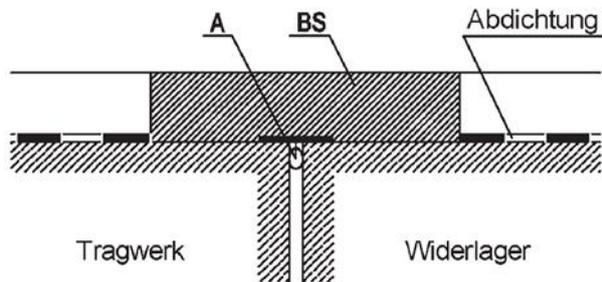


Abbildung 10 Elastische Belagsdehnfuge

2.2.8 Mittelbar befahrene Konstruktionen – Unterflurkonstruktionen U

Die Fahrbahndecke wird unmittelbar über die Konstruktion geführt (s. Abbildung 11).

Das Dichtelement D liegt zwischen Randprofilen RP in bzw. unter der Abdichtungsebene des Brückenbauwerkes. Das Abdeckblech A ist an einem der Randprofile befestigt.

Das elastische Dichtelement D besteht aus Elastomer und ist im Regelfall als Band ausgebildet.

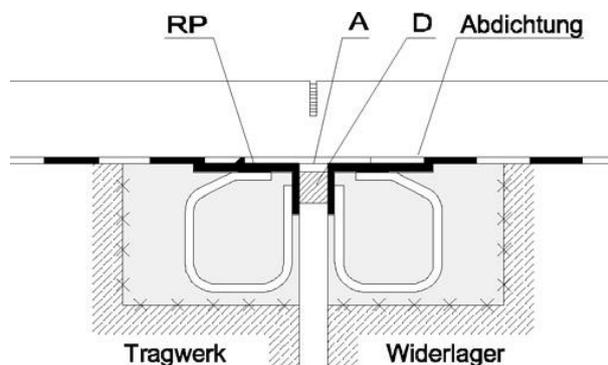


Abbildung 11 Unterflurkonstruktion

3 Forschungsprojekt „Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergänge“ (EVAF)

3.1.1 Allgemeines

Das Forschungsprojekt „Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergänge“ (EVAF) wurde von der MAGEBA GmbH (Hersteller Fahrbahnübergänge), der Universität für Bodenkultur (BOKU) und dem Österreichischem Forschungs- und Prüfzentrum GesmbH. – AIT Mobility ins Leben gerufen. Die Finanzierung des von 01.06.2012 bis 31.01.2014 laufenden Projektes wird Großteils von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) im Rahmen der Pilotinitiative „Verkehrsinfrastrukturforschung“ (VIF 2011) unter dem Schwerpunkt „Infrastruktur für Schiene & Straße“ übernommen. Einen Anteil an der Finanzierung leistet auch die MAGEBA GmbH.

3.1.2 Projektbeschreibung

>>Fahrbahnübergangskonstruktionen (FÜK) stellen zum einen aufgrund ihrer durch die Lage im Bauwerk hochdynamische Belastung, zum anderen aufgrund ihrer Bauweise zur Aufnahme von Bewegungen, hochsensible Bauteile innerhalb der Verkehrsinfrastruktur dar.

Instandsetzungen und Behebungen von Schäden/Mängeln sind in der Regel mit hohen Kosten verbunden und wirken sich negativ auf die Streckenverfügbarkeit und die Verkehrsführung aus.

Dieses Forschungsvorhaben hat zum Ziel, neue Lösungen für wartungsarme FÜK zu finden. Als Ausgangspunkt dient eine Kategorisierung der FÜK anhand der Baudatenbank Austria BAUT sowie der möglichen Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit, sodass in Expertengesprächen die maßgebenden Kombinationen aus FÜK-System und Randbedingungen definiert und mittels einer Sensitivitätsbetrachtung deren Relevanz bewertet werden kann.

Ausgehend von den gewonnenen Ergebnissen können aus der Straßendatenbank VIABASE sowie AIT-RoadSTAR (näheres zu RoadSTAR siehe 3.1.3) gezielt Daten zu den geometrischen Randbedingungen sowie dem Zustand der FÜK gewonnen werden. Hierfür wird ein automatisches Auswerteverfahren zur Dokumentation des optischen Bildnachweises entwickelt, um eine visuelle Kontrolle der zeitlichen Entwicklung von FÜK-Systemen zu ermöglichen und detaillierte Aussagen bezüglich vorhandener Unstetigkeit zu erhalten.

In einer Sensitivitätsanalyse sollen diese Daten mit kategorisierten Informationen aus der Baudatenbank hinsichtlich Konstruktionstyp und Zustandsentwicklung abgeglichen werden, um den Zusammenhang zwischen Zustandsverhalten und definierten Randbedingungen zu erhalten.

Es erfolgt eine Analyse des Energieeintrags von Fahrzeugen auf den Fahrbahnübergang, welcher im Wesentlichen von der Geschwindigkeit und dem Gewicht der Fahrzeuge sowie oben genannten geometrischen Randbedingungen im Bereich FÜK und insbesondere deren Veränderung im zeitlichen Verlauf bestimmt wird.

Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen werden lebensdaueroptimierte Lösungsansätze, die bereits am internationalen Markt umgesetzt wurden, gezielt ausgewählt. Diese werden hinsichtlich ihres Wartungsumfanges beschrieben und mithilfe einer Bewertungsmatrix beurteilt, welche die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen als entsprechend gewichtete Faktoren berücksichtigt. Dadurch soll die unter den spezifischen Randbedingungen bei den relevanten FÜK-Systemen derzeit im Bereich Instandsetzung angewandten sogenannten „best-practice“ definiert werden.

Mit Berücksichtigung der untersuchten und beurteilten, bereits umgesetzten Systemen sollen aufbauend auf die erfassten und quantifizierten Randbedingungen und Einwirkungen optimierte Lösungsansätze für robuste und wartungsarme FÜK entwickelt und auf ihre Umsetzbarkeit hin überprüft werden<< [13]

3.1.3 RoadSTAR



Abbildung 12 RoadSTAR AIT

>>Straßenerhaltung ist eine aufwändige und zumeist kostenintensive Angelegenheit. Da die notwendigen Finanzmittel für eine umfassende Straßenerhaltung niemals zur Gänze vorliegen, ist es umso wichtiger, die begrenzt zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel effizient und zielgerichtet einzusetzen.

Die netzweite, periodische Erfassung des Straßenzustandes ist der erste Schritt für eine wirtschaftliche Erhaltung eines Straßennetzes. Denn das Ziel einer modernen Erhaltungsplanung muss es sein, mit periodisch erfassten, objektiven Messdaten festzulegen, zu welchem Zeitpunkt auf welchen Teilen des zu betreuenden Straßennetzes welche Erhaltungsmaßnahmen getroffen werden müssen. Gleichzeitig bilden diese Daten auch eine wertvolle Basis für die Hebung der Verkehrssicherheit, denn bei Kenntnis von Schwachstellen in der Infrastruktur können gezielte Sanierungen von Unfallstellen vorgenommen werden.

Die durch das Hochleistungsmessfahrzeug RoadSTAR erhobenen Straßeninfrastrukturdaten sind in Qualität, Auflösung und Flächendeckung europaweit einzigartig und ermöglichen gesamtheitliche Analysen, beispielsweise die Betrachtung von Zusammenhängen zwischen Straßeninfrastruktur und Unfallgeschehen. Durch die permanente Weiterentwicklung des RoadSTARs konnten im Laufe der Zeit immer genauere Erkenntnisse über die Oberflächenbeschaffenheit von Straßen bzw. deren Geometrie gewonnen werden. Mit dem RoadSTAR werden einerseits die sicherheitsrelevanten Fahrbahneigenschaften wie Griffigkeit und Spurrinnen, andererseits auch die erhaltungsrelevanten Parameter wie Oberflächenschäden, Risse und Ebenheit erhoben. Beispielsweise wurde das System zur Messung der Fahrbahngriffigkeit so konzipiert, dass es die Bedingungen eines Pkw im Zuge einer Vollbremsung abbildet. Die so gewonnenen Griffigkeitsdaten haben einen realitätsnahen Bezug zum „echten“ Fahrmanöver bzw. zu den tatsächlich von Pkw erreichbaren Bremsverzögerungen. Dieser Zusammenhang konnte im Zuge von zahlreichen Pkw-Bremsversuchen dokumentiert werden. Somit gilt das österreichische Griffigkeitsmessverfahren auch unter internationalen Straßenexperten als eines der weltweit besten<< [15]

4 Zielsetzung und Methode

In Kapitel 5 werden die aktuellen österreichischen bzw. europäischen Normen betreffend der dynamischen Lasterhöhung an Fahrbahnübergangskonstruktionen zusammengefasst und gegenübergestellt, um den aktuellen Stand der Technik darzustellen. Einen Blick über den Tellerrand bietet noch die kurze Zusammenfassung der amerikanischen Brückenbaunorm. Des Weiteren werden in diesem Kapitel die zur Simulation verwendeten Straßenlängsprofile angeführt.

Kapitel 6 beschreibt die verschiedenen Reifenmodelle und LKW – Modelle, die bei den unterschiedlichen Simulationsprogrammen verwendet wurden. Dies dient dem Zweck, das Verhalten der Modelle bei den Simulationen an den Höhenprofilen zu verstehen.

Eine Auswahl der Simulationsergebnisse sind in Kapitel 7 angeführt, wobei die restlichen Ergebnisverläufe im Anhang zu finden sind. Um den dynamischen Lasterhöhungsfaktor zu bestimmen, wurde die maximale dynamische Last im Bereich von 4 m vor und hinter der Fahrbahnübergangskonstruktion herangezogen. Weiter entfernte, eventuell höhere Werte wurden nicht berücksichtigt, da sie nicht der Übergangskonstruktion zuzuordnen sind.

In Kapitel 8 werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und statistisch analysiert. Es wird versucht, die statistische Verteilungsfunktion der Ergebnisse der unterschiedlichen Programme zu bestimmen, um sie vergleichen zu können. Des Weiteren werden die Ergebnisse der einzelnen Bautypen der Fahrbahnübergangskonstruktionen gegenübergestellt, um Unterschiede festzustellen. Da ein Teil der Normung den zusätzlichen dynamischen Lasterhöhungsfaktor in Abhängigkeit der Entfernung zu den Fahrbahnübergang setzt, behandelt ein Unterkapitel die Entfernung der simulierten maximalen dynamischen Lasterhöhung von der Konstruktion. Die Lastmodelle der Normen werden den Ergebnissen hinsichtlich der dynamischen Lasterhöhung und des dynamischen Lasterhöhungsfaktor gegenübergestellt, um die Angaben der Normen zu prüfen. Ein weiterer Punkt ist die Überprüfung der Annahme, dass Konstruktionen bei hohen Längsgefälle aufgrund der Belastung durch Bremsmanöver stärkere Schäden am Fahrbahnbelag aufweisen und somit höhere dynamische Lasten generieren. Um die Unterschiede in Ergebnissen der einzelnen Simulationsprogramme bzw. deren Reifenmodelle zu verstehen, werden die größten und die kleinsten Abweichungen der dynamischen Lasterhöhung gegenübergestellt und versucht, die Ursachen darzustellen. Der Einfluss der Geschwindigkeit und der statischen Last auf die dynamische Lasterhöhung und den Lasterhöhungsfaktor wird in den letzten beiden Unterkapiteln behandelt.

Das Ergebnis der Literaturrecherche wird in Kapitel 9 dargestellt. Es werden Arbeiten zur dynamischen Lasterhöhung an Fahrbahnübergangskonstruktionen vorgestellt, wobei sich alle Arbeiten auf die dynamische Lasterhöhung durch die Antwort der Konstruktion auf eine periodische Belastung beziehen und nicht durch die Lasterhöhung aufgrund des Höhenprofils der anschließenden Fahrbahn.

Kapitel 10 bietet eine Zusammenfassung sämtlicher vorhergehender Kapitel und Kapitel 11 die Schlussfolgerungen aus der vorliegenden Arbeit.

Ein Ausblick und Anstöße für weitere Arbeiten sind in Kapitel 12 angeführt.

5 Datengrundlagen, Material und Methoden

5.1 Österreichische Normung

5.1.1 RVS 15.04.51 Brückenausrüstung [17]

Die RVS 15.04.51 wird nach dem Erscheinen der Normen B4031 und B4032 durch Ebendiese und durch ETAG 032 ersetzt.

Für die wirklichkeitsnahe Abbildung der Einwirkungen werden für den Nachweis der Ermüdung folgende Radlasten festgelegt (vgl. [17] Kap. 4.1.2 Ermüdung):

5.1.1.1 Radlasten ohne Schwingbeiwert nach RVS 15.04.51:

$$\begin{array}{ll} R_v = 65 \text{ kN} & \text{Vertikalradlast} \\ R_h = R_v \times 0,2 = 13 \text{ kN} & \text{Horizontalradlast} \end{array}$$

Zusätzlich sind diese Radlasten mit einem **Schwingbeiwert** $\phi_v = 1,4$ und $\phi_h = 1,4$ zu erhöhen.

5.1.1.2 Radlasten mit Schwingbeiwert:

$$\begin{array}{ll} R_{v,d} = R_v \times \phi_v = 91 \text{ kN} & \text{Vertikalradlast mit Schwingbeiwert} \\ R_v = 65 \text{ kN und } \phi_v = 1,4 & \end{array}$$

$$R_{h,d} = R_{v,d} \times 0,2 = 18,2 \text{ kN} \quad \text{Horizontalradlast mit Schwingbeiwert}$$

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis ist nach ÖNORM EN 1993-1-9 zu führen. Die Anzahl der Schwingungsspiele ist mit $N = 100$ Mio. anzunehmen. Dies entspricht bei einem DTLV-Wert von 4500 Kfz/24h je Fahrtrichtung mit 4 Achsen pro LKW einer 15-jährigen Liegedauer.

5.1.1.3 Zugelassene Höhendifferenzen im Bereich des Fahrbahnüberganges

Zum Einbau der Fahrbahnübergangskonstruktion wird angemerkt, dass die Oberkante des Fahrbahnüberganges keinesfalls höher liegen darf als die Oberkante der Fahrbahn, jedoch bei bituminösen Deckschichten maximal 3 mm (Betonfahrbahn 2 mm) tiefer liegen kann. (vgl. [17] Kap. 6.3 Einbau und Deckenanschluss)

5.1.2 ETAG 032 [7]

Die in der Norm angeführten Ermüdungslastmodelle (Fatigue Load Modell 1, FLM1_{EJ} und Fatigue Load Modell 2, FLM2_{EJ}) basieren auf FLM1 und FLM4, beschrieben in EN 1991-2 [8]. Eine dynamische Lasterhöhung für gute Oberbauverhältnisse $\phi_{\text{fat}} = 1,2$ [8] ist in den Lastmodellen der EN 1991-2 bereits berücksichtigt. Die Unebenheit der Fahrbahnübergänge und Resonanzen sind durch einen zusätzlichen dynamischen Faktor $\Delta\phi_{\text{fat}} = 1,3$ zu berücksichtigen, der bis zum Abstand von 6 Meter, bezogen auf den Fahrbahnübergang, linear auf $\Delta\phi_{\text{fat}} = 1,0$ abnimmt.

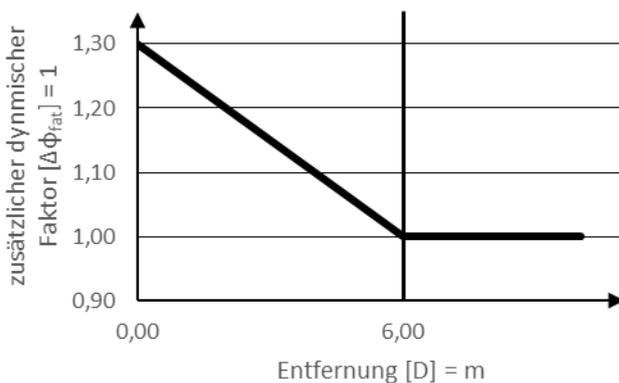


Abbildung 13 Dynamische Lasterhöhung im Bereich einer FÜK; geändert nach EN 1991-2 [8]

5.1.2.1 FLM1_{EJ} (ETAG 032 [7]) basierend auf FLM1 (EN 1991-2 [8])

Für den Nachweis der Ermüdungssicherheit ist nach ETAG 032 FLM1_{EJ} zu verwenden. Gelingt der Nachweis, so ist nach ETAG 032 eine unbegrenzte Lebensdauer gegeben.

Vertikale Achslast mit zusätzlichen dynamischen Faktor:

$$Q_{1k,\text{fat}} = \Delta\phi_{\text{fat}} \times Q_{1k} \times 0,7 = 273 \text{ kN}$$

Vertikalachslast mit zusätzlichen dyn. Faktor

$$Q_{1k} = 300 \text{ kN} (\phi_{\text{fat}} = 1,2 \text{ bereits enthalten}) \text{ und } \Delta\phi_{\text{fat}} = 1,3$$

Q_{1k} wird bei einem Ermüdungsnachweis um den Faktor 0,7 abgemindert [8].

Horizontale Achslast bei einem Längsgefälle $\leq 4\%$:

$$Q_{1k,\text{fat}} = 0,2 \times \Delta\phi_{\text{fat,h}} \times Q_{1k} \times 0,7 = 42 \text{ kN}$$

Horizontalachslast mit zusätzlichen dyn. Faktor

$$\Delta\phi_{\text{fat,h}} = 1,0$$

Horizontale Achslast bei einem Längsgefälle $> 4\%$:

$$Q_{1lk,fat} = (7,0x + 14) \text{ kN}$$

**Horizontalachslast mit zusätzlichen
dyn. Faktor**

x = Längsgefälle in %

5.1.2.2 FLM2_{EJ} (ETAG 032) basierend auf FLM4 (EN 1991-2)

Als Alternative zu FLM1_{EJ} kann das FLM2_{EJ} herangezogen werden. Dieses Lastmodell besteht aus einem Set von Achsen mit unterschiedlichen Abmessungen und Lasten, die die Achsen von „häufigen“ Lastkraftwagen repräsentieren. Die Anzahl der LKW pro Jahr kann aus [8], Table 4.5; die den LKW-Typen zugeordneten Achsen und die Häufigkeitsverteilung der LKW-Typen nach Verkehrstyp aus [8], Table 4.7, entnommen werden.

5.1.2.3 Dynamische Lasterhöhung φ_{fat} nach EN1991-2

Die Lastmodelle der ETAG 032 basieren auf jenen der EN1991-2. In ebendiesen Modellen ist ein dynamischer Lasterhöhungsfaktor φ_{fat} für gute Oberbauverhältnisse bereits enthalten. Folgende Faktoren werden im Annex B [8] angeführt:

- $\varphi_{fat} = 1,2$ für gute Oberbauverhältnisse
- $\varphi_{fat} = 1,4$ für mittlere Oberbauverhältnisse

Die Klassifikation der Oberbauverhältnisse kann nach den Vorgaben der ISO 8608 durchgeführt werden. Für eine schnelle Abschätzung sind zusätzlich folgende Richtwerte angegeben:

- Die Oberbauverhältnisse von neuen Fahrbahnbelägen, z. Bsp. Asphalt oder Beton, können als gut oder sogar als sehr gut angenommen werden.
- Die Oberbauverhältnisse von alten und nicht gewarteten Fahrbahnbelägen können als mittel angenommen werden,
- Fahrbahnbeläge aus Kopfstein oder ähnlichem Material können als mittel, schlecht oder sehr schlecht angenommen werden.

Annex B der EN1991-2 [8] dient zur Lebensdauerabschätzung von Straßenbrücken auf Basis des beobachteten Verkehrs.

5.1.2.4 Zugelassene Höhendifferenzen im Bereich des Fahrbahnüberganges

Als maximal zulässige Höhendifferenz im Bereich des Fahrbahnüberganges und im unbelasteten Zustand wird in der ETAG 032 [7] ein Wert von 5 mm angegeben. Sprünge im Längsprofil dürfen maximal 3 mm betragen, siehe Abbildung 14. Bei Belastung dürfen die Abweichungen nicht größer als 12 mm sein, bzw. nicht größer als die Abweichungen bei Belastung mit der Designlast.

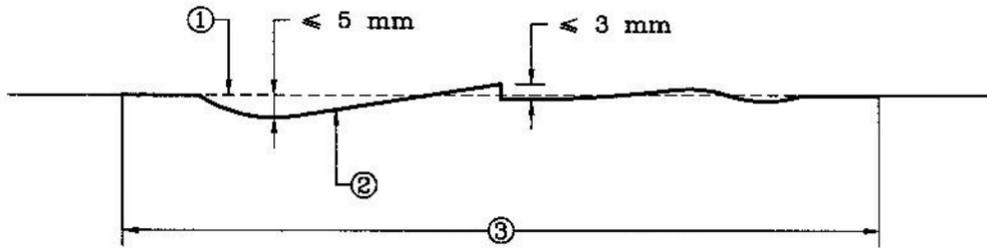


Abbildung 14 Zugelassene Höhendifferenzen, Abbildung aus ETAG 032 [7]; (1) Ideale Verbindungslinie; (2) Oberfläche des Fahrbahnüberganges; (3) Bereich Fahrbahnübergang

5.1.3 ÖNORM B4031 [4]

Diese Norm beinhaltet nationale Ergänzungen zur ETAG 032 [7] und ersetzt gemeinsam mit dieser die RVS 15.04.51 [17]. Es werden keine zusätzlichen Vorgaben bezüglich Lastmodelle und zulässige Höhendifferenzen gemacht.

5.1.4 Gegenüberstellung der Normen

5.1.4.1 Vertikallast

	RVS 15.04.51	ETAG 032 FLM1 _{EJ}	ÖNORM B4031
Achslast (Radlast) ohne zus. dyn. Faktor in kN	130 (65)	210 (105)	-
dynamischer Faktor (in Achslast enthalten)	-	1,2	-
zusätzlicher dynamischer Faktor	1,4	1,3	-
Achslast (Radlast) mit zus. dyn. Faktor in kN	182 (91)	273 (136,5)	-
Bemessungslebensdauer in Jahre	15	8	-

5.1.4.2 Horizontallast

	RVS 15.04.51	ETAG 032 FLM1 _{EJ}	ÖNORM B4031
Achslast (Radlast) ohne zus. dyn. Faktor in kN	26 (13)	42 (21)	-
zusätzlicher dynamischer Faktor	1,4	1,0	-
Achslast (Radlast) mit zus. dyn. Faktor in kN	36,4 (18,2)	42 (21)	-
Bemessungslebensdauer in Jahre	15	8	-

5.1.4.3 Zulässige Höhendifferenzen

	RVS 15.04.51 Werte in Klammer bei Betontfahrbahn	ETAG 032 FLM1 _{EJ} Werte in Klammer im belasteten Zustand	ÖNORM B4031
Maximal zulässige Sprünge in mm	3 (2)	3 (12)	-
Maximal zulässige Abweichung von der idealen Verbindungsline in mm	-	5 (12)	-

5.2 US-amerikanische Normung

5.2.1 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [1]

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ist eine Vereinigung der Transportministerien der 50 US-amerikanischen Bundestaaten, des District of Columbia und Puerto Rico, mit dem Ziel, die Entwicklung, den Betrieb und die Wartung der nationalen Verkehrssysteme (Luft, Wasser, Schiene, Straße und Öffentlicher Verkehr) zu fördern. [2]

Zu diesem Zweck wurden die „AASHTO LRFD Bridge Design Specifications“ herausgegeben, deren Anwendung von der Federal Highway Administration bei allen Brücken, die mit Bundesmitteln errichtet werden, vorgeschrieben ist. Diese Norm ist im Wesentlichen vergleichbar mit den europäischen Normen des Eurocodes bezüglich des Brückenbaus. Zusätzlich sind noch Ausführungsbestimmungen zu den einzelnen Bauteilen einer Brücke angeführt, vergleichbar zum Beispiel mit der europäischen ETAG 032 „Road Expansion Joints“. Das Sicherheitskonzept entspricht mit einem semi-probabilistischen Ansatz (LRFD: load and resistance factor design oder auch LSD: limit state design) jenem der Eurocodes.

Tabelle 1 zeigt den in „AASHTO LRFD Bridge Design Specifications“ angegebenen dynamischen Lastzuschlag [1]. Dieser Zuschlag beträgt bezüglich der Fahrbahnübergangskonstruktionen (Deck Joints) 75% auf die statische Last eines LKWs und beinhaltet die Lasterhöhung durch Diskontinuitäten der Fahrbahn und die Lasterhöhung durch Resonanzen der Fahrbahnübergangskonstruktion. Dies bedeutet, der dynamische Lasterhöhungsfaktor an Fahrbahnübergängen wird mit 1,75 angegeben. Die statische Last des LKWs ist in Abbildung 15 dargestellt, wobei bei orthotropen Platten die 32,0 kip – Achsen auf zwei Achsen mit jeweils 16,0 kip aufgeteilt werden. 32,0 kip (Kilopound-force) entsprechen ungefähr 142,34 kN. Daraus ergibt sich mit dem dynamischen Lastzuschlag von 1,75 eine dynamische Last von 249,10 kN für die Antriebsachse bzw. die Trailerachse.

Tabelle 1 Dynamischer Lastzuschlag IM, Tabelle 3.6.2.1-1 aus [1]

Component	IM
Deck Joints—All Limit States	75%
All Other Components:	
• Fatigue and Fracture Limit State	15%
• All Other Limit States	33%

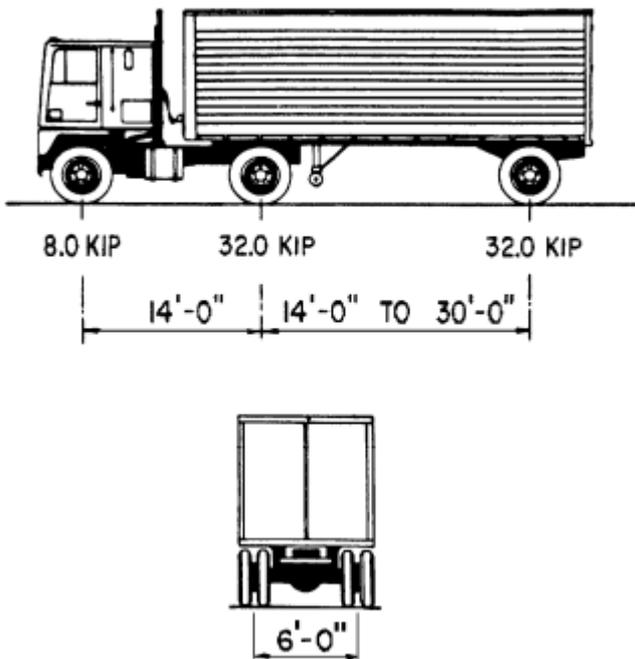


Abbildung 15 Design Truck (übernommen aus [1], Figure 3.6.1.2.2-1)

Zum Verhalten des dynamischen Lasterhöhungsfaktors wird folgendes angemerkt:

- Bei steigender Fahrzeuglast sinkt der Lasterhöhungsfaktor.
- Eine Reihe von hintereinander folgenden Fahrzeugen haben einen niedrigeren Lasterhöhungsfaktor als ein einzelnes Fahrzeug.
- Eine größere Anzahl von Achsen resultiert in einem niedrigeren Lasterhöhungsfaktor.

5.3 Straßenlängsprofile

5.3.1 Idealisierte Höhenverläufe

Die idealisierten Höhenverläufe dienen dazu, das Verhalten der Simulationsergebnisse an vereinfachten Geometrien zu veranschaulichen und wurden in den ANSYS-Simulationen [14] festgelegt. Im Folgenden werden diese Längsschnitte dargestellt.

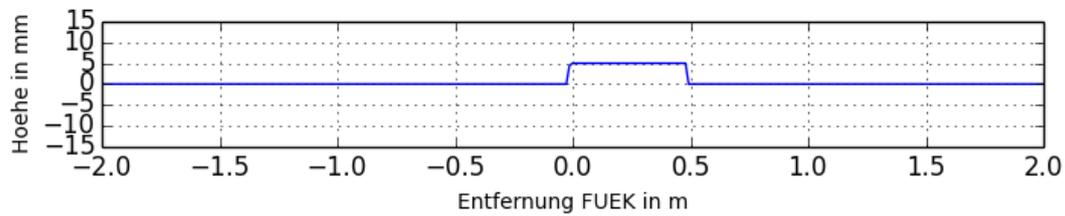


Abbildung 16 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut

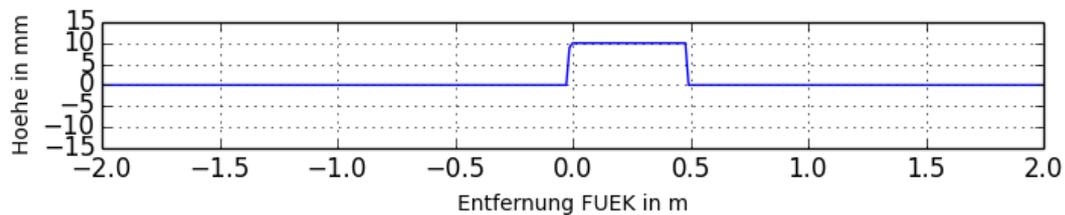


Abbildung 17 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm erhöht eingebaut

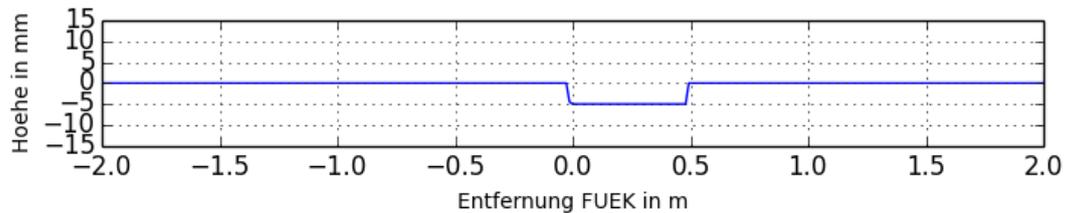


Abbildung 18 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut

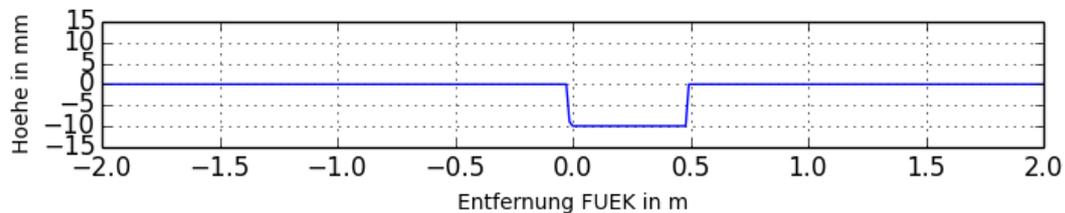


Abbildung 19 Höhenverlauf Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm vertieft eingebaut

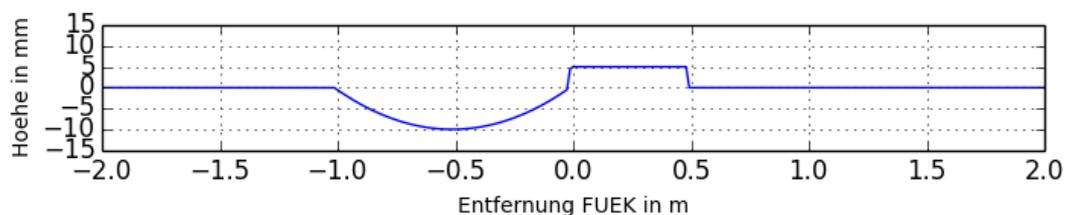
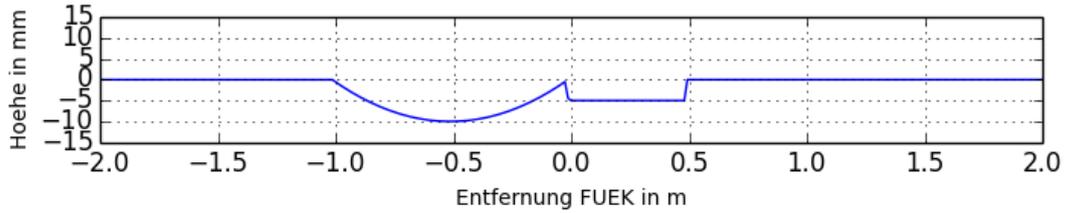


Abbildung 20 Höhenverlauf Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut



5.3.1.1 **Abbildung 21 Höhenverlauf Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut**

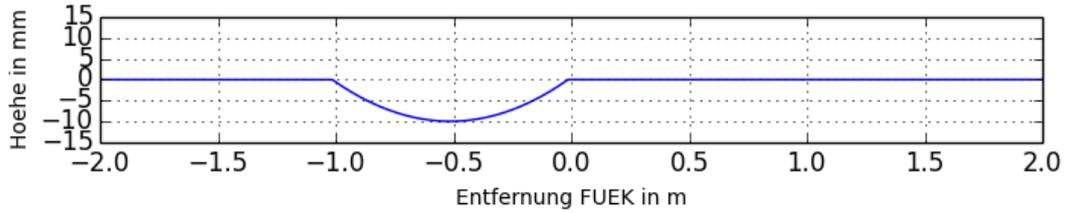


Abbildung 22 Höhenverlauf Mulde 10 mm tief

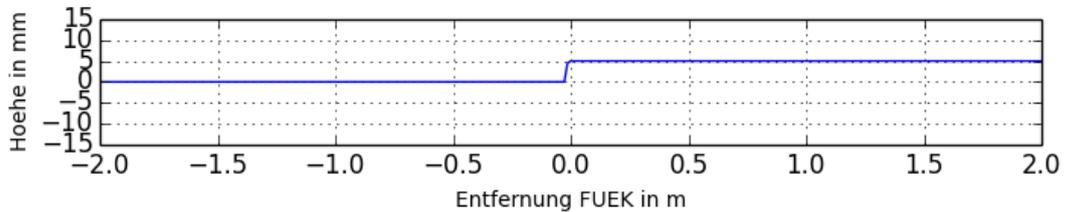


Abbildung 23 Höhenverlauf Sprung +5 mm

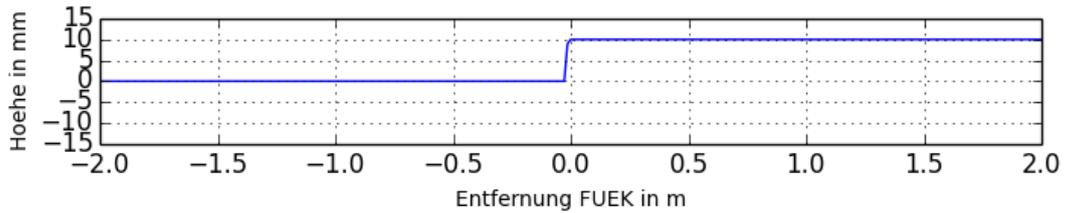


Abbildung 24 Höhenverlauf Sprung +10 mm

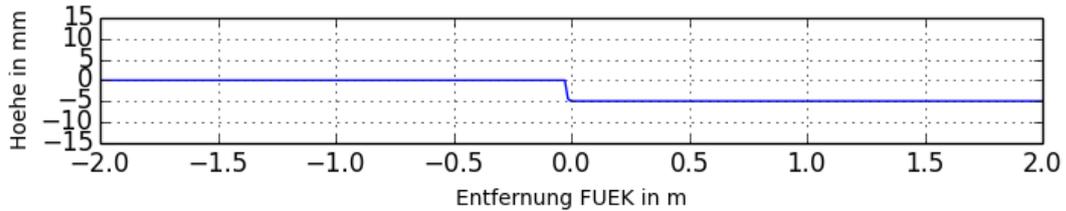


Abbildung 25 Höhenverlauf Sprung -5 mm

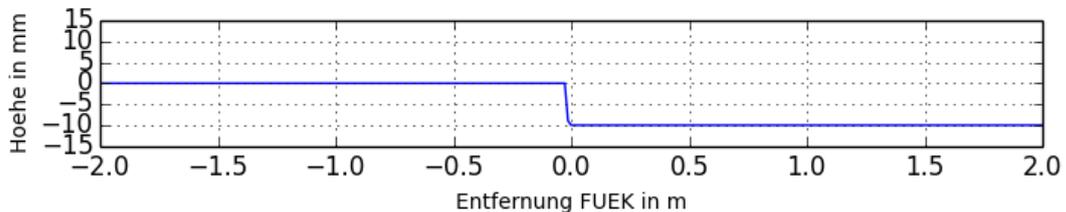


Abbildung 26 Höhenverläufe Sprung -10 mm

5.3.2 Gemessene Höhenverläufe

Diese 102 Höhenprofile (linke und rechte Reifenspur des rechten Fahrstreifens) von 51 Fahrbahnübergangskonstruktionen resultieren aus Messfahrten des RoadSTAR und stellen eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Vermessung dar, welche im Jahre 2009 durchgeführt wurde. Tabelle 2 zeigt die Anzahl der Konstruktionen aufgeteilt nach Autobahnen.

Tabelle 2 Anzahl der Fahrbahnübergangskonstruktionen nach Autobahnen

Autobahn	Anzahl
A2 Süd Autobahn	16
A4 Ost Autobahn	7
A10 Tauern Autobahn	5
A13 Brenner Autobahn	10
A23 Autobahn Südosttangente	12

6 Modelle und Simulation

Es werden die Simulationsergebnisse von dynamischen FE-Simulationen, unter der Verwendung von drei verschiedenen Programmen (ANSYS, FTire und Dymola), miteinander verglichen. Als Vergleichskriterium dient der dynamische Lasterhöhungsfaktor an einem Rad der Antriebsachse des Zugfahrzeuges, nachdem diese Achse im Forschungsprojekt „EVAF“ [14] als jene mit der höchsten Belastung identifiziert wurde. Die Simulationen mit FTire und Dymola sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellt, die ANSYS – Ergebnisse sind aus dem Forschungsprojekt „EVAF“ [14] entnommen.

Alle Straßenhöhenverläufe sind ebenfalls dem Forschungsprojekt „EVAF“ [14] entnommen und sind entweder Ergebnisse theoretischer Überlegungen („Idealisierte Höhenverläufe“), oder Ergebnisse einer Vermessung aus dem Jahr 2009 („Gemessene Höhenverläufe“) mittels RoadSTAR (siehe 3.1.3). Insgesamt liegen 113 unterschiedliche Profile vor, aufgeteilt auf 11 idealisierte Höhenverläufe, 102 gemessene Höhenverläufe (jeweils linke und rechte Reifenspuren an 51 FÜK).

Als Grundlage für die LKW – Modelle dient ein für „Mitteleuropa typisches Sattelfahrzeug mit guter Ausstattung für den Fernverkehr“ [14] mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 40 to, wobei dreidimensionale (ANSYS und Dymola) und eindimensionale Modelle (FTire) erstellt wurden.

6.1 ANSYS

Das FE-Programm ANSYS ist ein Produkt des gleichnamigen Herstellers ANSYS. Alle ANSYS - Simulationen wurden im Rahmen des Projektes „EVAF“ [14] durchgeführt.

6.1.1 Aufbau des Reifenmodells

Wie im Forschungsprojekt „EVAF“ [14] beschrieben, wird die Radaufstandsfläche durch ein Kontaktelement mit den Abmessungen 40 x 15 cm diskretisiert. Um die Kontaktkräfte wirklichkeitsgetreuer abzubilden, ist die Steifigkeitsverteilung derart angepasst, dass die Kontaktkräfte von der Mitte hin zum Rand abnehmen. Ein daraus zu beachtender Effekt ist jener, dass Höhenänderungen von der gesamten modellierten Radaufstandsfläche mitgemacht werden. Ein Abrolleffekt, der die dynamischen Lasten dämpfen würde, ist im Modell nicht berücksichtigt, somit liefern die Simulationen mit ANSYS eher höhere Werte als dies in der Realität der Fall ist. Das Reifenmodell besteht somit aus einem ungedämpften Federelement und einer Radaufstandsfläche fixer Größe mit Steifigkeitsverteilung. Die Steifigkeiten der Federelemente sind in 6.1.2 angeführt.

6.1.2 LKW Modell

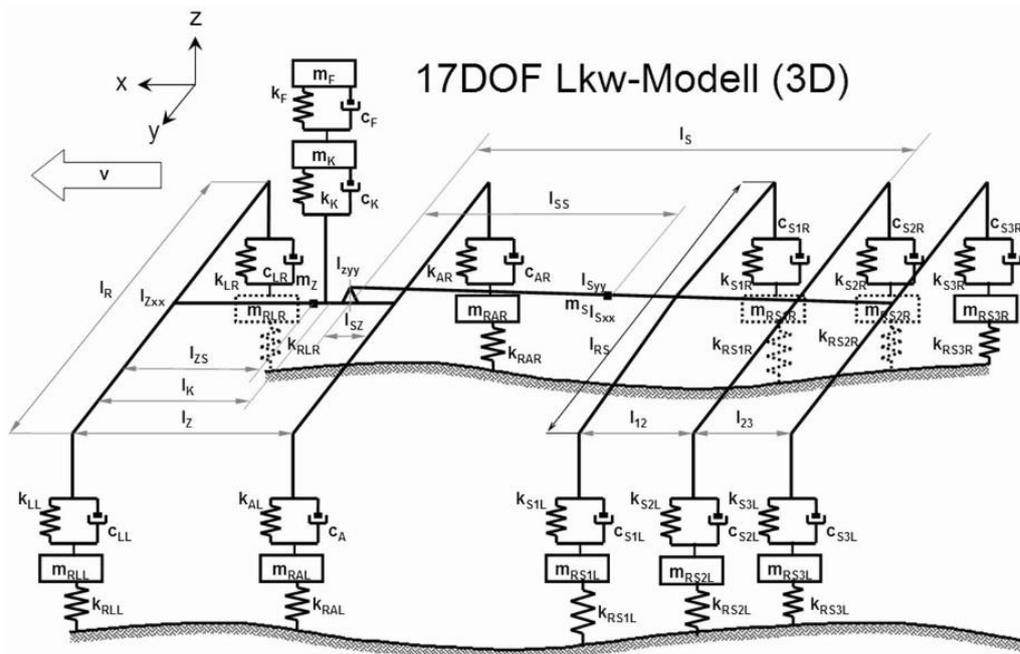


Abbildung 27 LKW Modell ANSYS, (Abbildung aus [14])

Das LKW – Modell besteht aus einem dreidimensionalen, gedämpften Masse-Federsystem, dessen Elemente, mit Ausnahme der Kupplung zwischen Fahrzeug und Trailer, starr miteinander verbunden sind. Insgesamt besteht das Modell aus 172 Elementen [14].

Auflistung aller Parameter (aus[14]):

Lenkachse Zugmaschine

k_{rll}	=	1.260.000 N/m	Steifigkeit (linker) Reifen von Lenkachse
k_{ll}	=	138.000 N/m	auf (linkes) Rad reduzierte Steifigkeit von Lenkachse
c_{ll}	=	13.000 Ns/m	auf (linkes) Rad reduzierte Dämpfung von Lenkachse
m_{rll}	=	425 kg	ungefederte (linke) Masse der Lenkachse
k_{rlr}	=	1.260.000 N/m	Steifigkeit (rechter) Reifen von Lenkachse
k_{lr}	=	138.000 N/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Steifigkeit von Lenkachse
c_{lr}	=	13.000 Ns/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Dämpfung von Lenkachse
m_{rlr}	=	425 kg	ungefederte (rechte) Masse der Lenkachse

Antriebsachse Zugmaschine

kral	=	2.440.000	N/m	Steifigkeit (linker) Reifen von Antriebsachse
kal	=	217.000	N/m	auf (linkes) Rad reduzierte Steifigkeit von Antriebsachse
cal	=	21.000	Ns/m	auf (linkes) Rad reduzierte Dämpfung von Antriebsachse
mral	=	735	kg	ungefederte (linke) Masse der Antriebsachse
krar	=	2.440.000	N/m	Steifigkeit (rechter) Reifen von Antriebsachse
kar	=	217.000	N/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Steifigkeit von Antriebsachse
car	=	21.000	Ns/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Dämpfung von Antriebsachse
mrar	=	735	kg	ungefederte (rechte) Masse der Antriebsachse

Erste Achse Anhänger

krs1l	=	1.900.000	N/m	Steifigkeit (linker) Reifen von Sattelachse vorne
ks1l	=	145.000	N/m	auf (linkes) Rad reduzierte Steifigkeit von Sattelachse vorne
cs1l	=	23.000	Ns/m	auf (linkes) Rad reduzierte Dämpfung von Sattelachse vorne
mrs1l	=	320	kg	ungefederte (linke) Masse der Sattelachse vorne
krs1r	=	1.900.000	N/m	Steifigkeit (rechter) Reifen von Sattelachse vorne
ks1r	=	145.000	N/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Steifigkeit von Sattelachse vorne
cs1r	=	23.000	Ns/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Dämpfung von Sattelachse vorne
mrs1r	=	320	kg	ungefederte (rechte) Masse der Sattelachse vorne

Zweite Achse Anhänger

krs2l	=	1.900.000	N/m	Steifigkeit (linker) Reifen von Sattelachse hinten
ks2l	=	145.000	N/m	auf (linkes) Rad reduzierte Steifigkeit von Sattelachse mitte
cs2l	=	23.000	Ns/m	auf (linkes) Rad reduzierte Dämpfung von Sattelachse mitte
mrs2l	=	320	kg	ungefederte (linke) Masse der Sattelachse mitte
krs2r	=	1.900.000	N/m	Steifigkeit (rechter) Reifen von Sattelachse hinten
ks2r	=	145.000	N/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Steifigkeit von Sattelachse mitte
cs2r	=	23.000	Ns/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Dämpfung von Sattelachse mitte
mrs2r	=	320	kg	ungefederte (rechte) Masse der Sattelachse mitte

Dritte Achse Anhänger

krs3l	=	1.900.000	N/m	Steifigkeit (linker) Reifen von Sattelachse hinten
ks3l	=	145.000	N/m	auf (linkes) Rad reduzierte Steifigkeit von Sattelachse hinten
cs3l	=	23.000	Ns/m	auf (linkes) Rad reduzierte Dämpfung von Sattelachse hinten
mrs3l	=	320	kg	ungefederte (linke) Masse der Sattelachse hinten
krs3r	=	1.900.000	N/m	Steifigkeit (rechter) Reifen von Sattelachse hinten
ks3r	=	145.000	N/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Steifigkeit von Sattelachse hinten
cs3r	=	23.000	Ns/m	auf (rechtes) Rad reduzierte Dämpfung von Sattelachse hinten
mrs3r	=	320	kg	ungefederte (rechte) Masse der Sattelachse hinten

Massen, Trägheitsmomente und Kabine + Fahrersitz

mz	=	2*2865	kg	gefedert Masse Sattelzugmaschine
lzyy	=	8.098	kgm ²	Trägheit gefederte Masse Sattelzugmaschine um y-Achse
lzxx	=	4.436	kgm ²	Trägheit gefederte Masse Sattelzugmaschine um x-Achse
kk	=	2*47.000	N/m	Steifigkeit der Fahrerinnenlagerung
ck	=	11.200	Ns/m	Dämpfung der Fahrerinnenlagerung
mk	=	2*535	kg	Masse der Fahrerinnenkabine
kf	=	2*12.000	N/m	Steifigkeit Sitz
cf	=	360	N/m	Dämpfung Sitz
mf	=	106	kg	Masse Sitz mit Menschenteil
ms	=	29.389	kg	gefederte Masse Sattelanhängers
lsyy	=	208.172	kgm ²	Trägheit gefederte Masse Sattelanhängers um y-Achse
lsxx	=	22.752	kgm ²	Trägheit gefederte Masse Sattelanhängers um x-Achse
lz	=	3,6	m	Radstand Sattelzugmaschine
ls	=	7,56	m	Abstand Sattelauflage zur Mitte Achsgruppe Sattelanhängers
lrz	=	2,3	m	Spurbreite Zugmaschine
lrs	=	2,3	m	Spurbreite Sattelanhängers
lzs	=	1,55	m	Abstand Schwerpunkt Sattelzugmaschine von Lenkachse
lk	=	0,44	m	Abstand Lenkachs-Mitte zu Fahrerinnenlagerung
lss	=	6,16	m	Abstand Schwerpunkt Sattelanhängers von Sattelauflage
lsz	=	0,6	m	Abstand Antriebsachse zu Sattelauflage
l12	=	1,31	m	Abstand zwischen vorderer und mittlerer Sattelachse
l23	=	1,31	m	Abstand zwischen mittlerer und hinterer Sattelachse

6.1.3 Straßenmodelle

Die Höhenverläufe liegen als x- und y-Koordination in Textform dar. Die Profile wurden aus den RoadSTAR – Daten extrahiert.

6.1.4 Simulation

Die räumlichen Abstände der Berechnungsschritte betragen 10 cm.

6.2 FTire

FTire (**F**lexible **S**tructure **T**ire **M**odel) ist ein nichtlineares Reifensimulationsmodell für hochfrequente und kurzweilige Anregung [9] des Herstellers cosin scientific software.

6.2.1 Aufbau des Reifenmodells

Der Reifen wird durch ein vollständig nicht-lineares 3D – Modell dargestellt, dessen Komponenten, wie Reifenwulst, Karkasse und Gürtel, in bis zu 360 Segmente unterteilt sind. Verbunden sind diese miteinander und auch mit der Felge, über nichtlineare, druckabhängige Steifigkeits – und Dämpferelemente (Abbildung 28). Das Reifenprofil wird durch 1000 bis 10.000 Kontakt – und Reibungselemente modelliert, welche mit den Gürtelsegmenten verbunden sind.

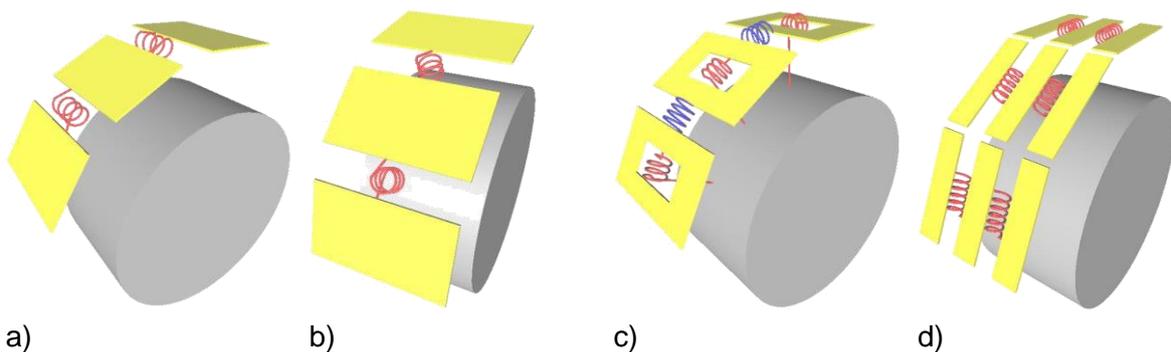


Abbildung 28 a) Steifigkeit in Ebene des Gurtes; b) Steifigkeit normal zu Gurt; c) Torsionssteifigkeit (rot) und Verdrehsteifigkeit (blau); d) Querbiegesteifigkeit; alle Abbildungen übernommen aus Präsentation FTire [9]

Für die Simulationen wurde ein LKW – Standardreifen in der Dimension 380/65R22.5, mit einem Reifendruck von 7 bar, verwendet. Dieser Reifen ist im Programmpaket FTire enthalten und wurde nicht verändert.

6.2.2 LKW Modell

Das Modell ist ein einfaches Masse – Feder – System, welches durch Abänderung eine programminternen Vorlage (sog. Quarter – Car – Modell) erstellt wurde. Es besteht aus dem physikalischen Reifenmodell, einer Feder mit Dämpfer, einer gefederten Masse und einer ungedeperten Masse (Abbildung 29). In diesem LKW – Modell ist nur ein Rad der Antriebsachse der Zugmaschine berücksichtigt, um die Rechenzeit der Simulationen auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Die Antriebsachse wurde in den ANSYS – Simulationen des Projekt „EVAF“ als [14] wesentlich identifiziert, d. h. als jene mit der größten dynamischen Belastung.

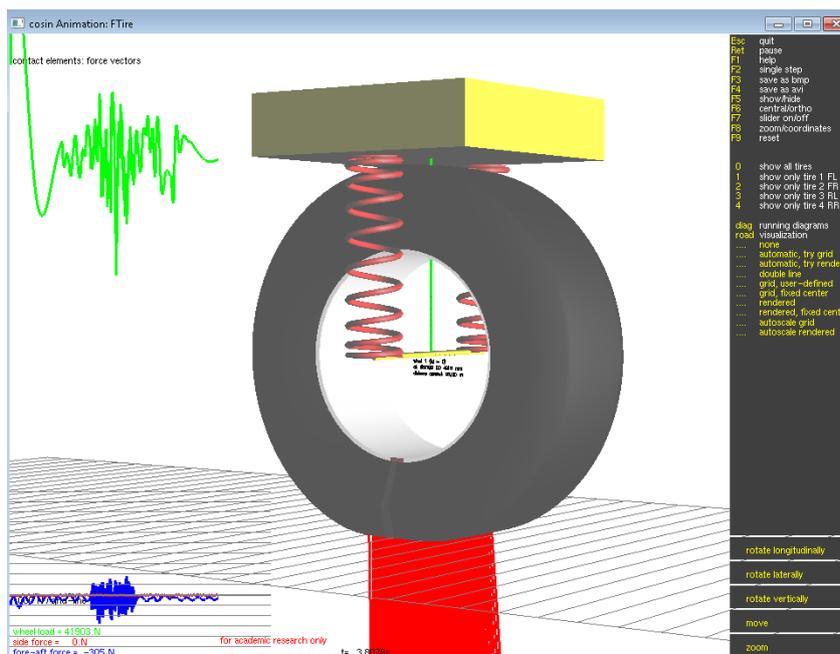


Abbildung 29 Simulationsfenster FTire mit Masse-Feder-System

Parameter Antriebsachse Zugmaschine

217000	N/m	auf Rad reduzierte Steifigkeit von Antriebsachse
21000	Ns/m	auf Rad reduzierte Dämpfung von Antriebsachse
735	kg	auf Rad reduzierte ungedeperte Masse der Antriebsachse
3546	kg	auf Rad reduzierte gefederte Gesamtmasse

6.2.3 Straßenmodelle

Zur Simulation werden Straßenmodelle im RGR Format (Regular Grid Road Data Files) benötigt. Diese Datei ist dermaßen aufgebaut, dass ein Header die regelmäßigen Abstände zwischen den Gitterpunkten Δx und Δy , die Anzahl der x – bzw. y – Werte n_x und n_y , die Startwerte x_0 und y_0 und den Reibungsbeiwerte μ enthält. Unterhalb des Headers sind nun die z – Werte eines jeden Gitterpunktes aufgelistet. Dies bietet den bei großen Straßenmodellen

den Vorteil, die Datenmenge um 2/3 zu reduzieren, jedoch sind nur regelmäßige Gitter möglich.

Beispiel eines Headers:

```
$RGR_data xmin=0 dx=0,1 nx=500 ymin=-1000 dy=5 ny=1 mu=1.0
```

Die gemessenen Höhenverläufe wurden mittels einem, in der Programmiersprache Python erstellten, Skriptes automatisiert von einem XY-Format in das RGR Format umgewandelt.

Die idealisierten Höhenverläufe wurden durch ein programminternes Tool erstellt, welches es ermöglicht, einfache Profile im RGR Format zu generieren.

6.2.4 Simulation

Die zeitlichen Abstände der FE – Berechnungen betragen 0,5 ms oder 2000Hz, dies entspricht bei 80 km/h bzw. 22,222 m/s eine räumliche Auflösung von ca. 1,1 cm. Diese Werte sind ein Kompromiss aus Rechenzeit und räumlicher Auflösung. Bei einer größeren räumlichen Auflösung besteht die Gefahr, dass Hochpunkte bzw. Extremwerte der Höhenverläufe nicht berücksichtigt werden.

6.3 DYMOLA

Dymola ist ein auf der Modelliersprache Modelica basierende Simulationssoftware des Herstellers Dassault Systèmes AB.

Als Grundlage des LKW-Modells diente ein in Dymola enthaltenes LKW-Modell, das an das ANSYS-Modell in Parametern und Abmessungen angepasst ist.

6.3.1 Aufbau des Reifenmodells

Das verwendete Reifenmodell TMeasy, in der Simulationssoftware als RILL 05 bezeichnet, basiert auf einen semi-physikalischen Ansatz. Als Grundlage dienen geeignete Funktionen oder Messungen, die das stationäre Verhalten des Reifens beschreiben. Berücksichtigt man nun die Verformung, können diese stationären Reifenmodelle dahingehend erweitert werden, dass auch dynamische Reifenkräfte in 1. Näherung (1. Ordnung) nachgebildet werden können[18]. Der Kontaktpunkt P (siehe Abbildung 30) und der Normalvektor \mathbf{e}_n werden durch vier Punkte, Q1 bis Q4, des Straßenmodells gebildet. Durch diesen Ansatz werden wie in der

Realität scharfe Kanten und Diskontinuitäten geglättet. [12].

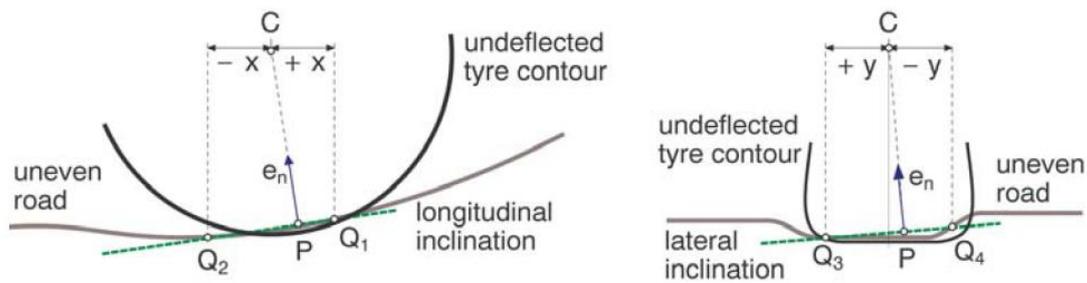


Abbildung 30 Kontaktpunkt an unebenen Straßen; Kontaktpunkt (P), Straßenpunkte (Q₁ - Q₄); Abbildung übernommen aus [12]

Unter der Annahme, dass die Verformung des Reifens aus einer Gürtel- und Flankenverformung besteht, wird die Länge der Kontaktfläche des Reifens mit der Straße berechnet. Dieser Wert stellt eine realistische Näherung der tatsächlichen Länge dar. Die Radial-, Quer- und Längselastizität werden durch lineare Feder- und Dämpferelemente modelliert (siehe Abbildung 31)

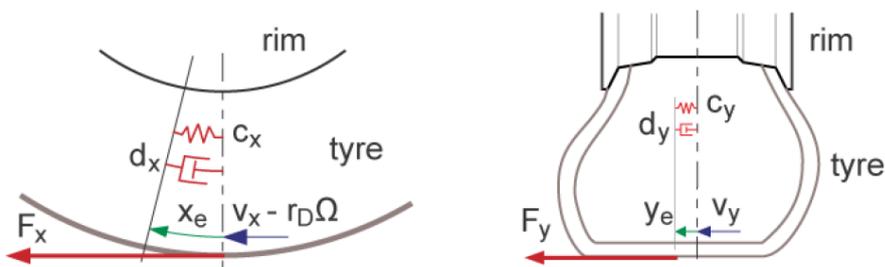


Abbildung 31 lineare Feder- und Dämpferelemente (Längs- und Querelastizität) des Reifenmodells TMeasy; Abbildung übernommen aus [12]

Unten sind die verwendeten Werte der einzelnen Parameter des TMeasy Reifenmodelles angeführt. Sofern nicht anders angegeben sind alle Werte dem Vorlagereifenmodell der Simulationssoftware Dymola entnommen, und entsprechen einem durchschnittlichem LKW-Reifen in der Dimension 380/65R22.5. Die Federsteifigkeit (c_z) und die Dämpfung (d_z) in z-Richtung (Radial) ist dem ANSYS-Modell angepasst. Die Longitudinalkraft- und Lateralkraftcharakteristiken werden nur der Vollständigkeit halber angeführt und nicht näher erläutert, da diese den Schlupf bei Beschleunigungs-, Brems- und Lenkmanöver beschreiben, in den FE-Simulationen jedoch nur gleichförmige Bewegungen simuliert wurden.

Parameter TMeasy

Nominallast der Parameter

22,77 kN F_nom_z; Nominale Normalkraft

Longitudinalkrafteigenschaften

543,4 kN dFds0_x

0,095 - s_max_x

18,7 kN F_max_x

0,350 - s_slide_x

18,15 kN F_slide_x

Lateralkrafteigenschaften

553,8 kN dFds0_y

0,190 - s_max_y

24,0 kN F_max_y

0,620 - s_slide_y

6,375 kN F_slide_y

Steifigkeit und Dämpfung

1.521.000 N/m c_x; Federkonstante in x-Richtung (longitudinal bzw. längs des Reifenumfangs)

1.131.000 N/m c_y; Federkonstante in y-Richtung (lateral bzw. quer zum Reifenumfang)

1.900.000* N/m c_z; Federkonstante in z-Richtung Anhänger (normal auf Reifenumfang)

1.260.000* N/m c_z; Federkonstante in z-Richtung Lenkachse Zugmaschine (normal auf Reifenumfang)

2.440.000* N/n c_z; Federkonstante in z-Richtung Antriebsachse Zugmaschine (normal auf Reifenumfang)

8.800 Nm/rad c_t; Torsionsteifigkeit um z-Achse

6.400 Ns/m d_x; Dämpfung in x-Richtung (longitudinal bzw. längs des Reifenumfangs)

1.320 Ns/m d_y; Dämpfung in y-Richtung (lateral bzw. quer zum Reifenumfang)

0* Ns/m d_z; Dämpfung in z-Richtung (normal auf Reifenumfang)

1.320 Nms/rad d_t; Dämpfung Torsion um z-Achse

*... diese Werte wurden dem ANSYS-Modell angepasst

6.3.2 LKW Modell

Das LKW Modell besteht aus den Komponenten Zugmaschine und Trailer. Gekoppelt sind diese mittels einer drehbaren Kupplung. In den Eigenschaften entspricht es dem ANSYS LKW Modell.

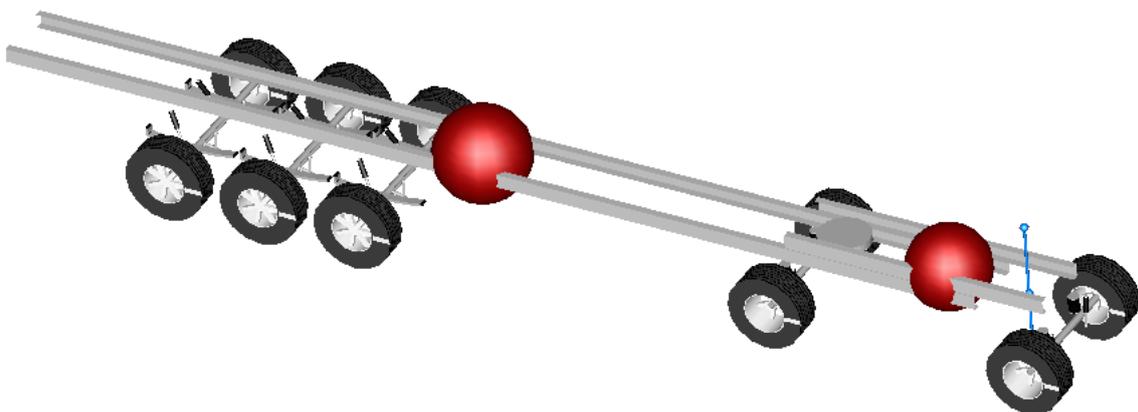
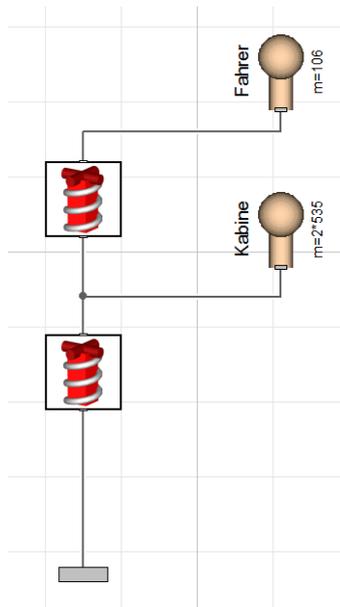


Abbildung 32 LKW Modell Dymola

6.3.2.1 Fahrerkabine



Die Fahrerkabine ist als Masse – Feder – System mit Dämpfung aufgebaut, wobei eine Bewegung nur in z-Richtung möglich ist. Alle anderen Bewegungsmöglichkeiten sind gesperrt, um dem ANSYS-Modell zu entsprechen. Sämtliche Massen, Federn und Dämpfer sind in einer vertikalen Achse angeordnet. Folgende Werte der einzelnen Parameter sind im Modell der Achse berücksichtigt:

Masse Fahrer und Sitz:	106 kg
Steifigkeit Sitz:	24.000 N/m
Dämpfung Sitz:	360 kg/s
Masse Kabine:	1.070 kg
Steifigkeit Kabine:	94.000 N/m
Dämpfung Kabine:	11.200 kg/s

Abbildung 33 Aufbau Kabine

6.3.2.2 Zugmaschine

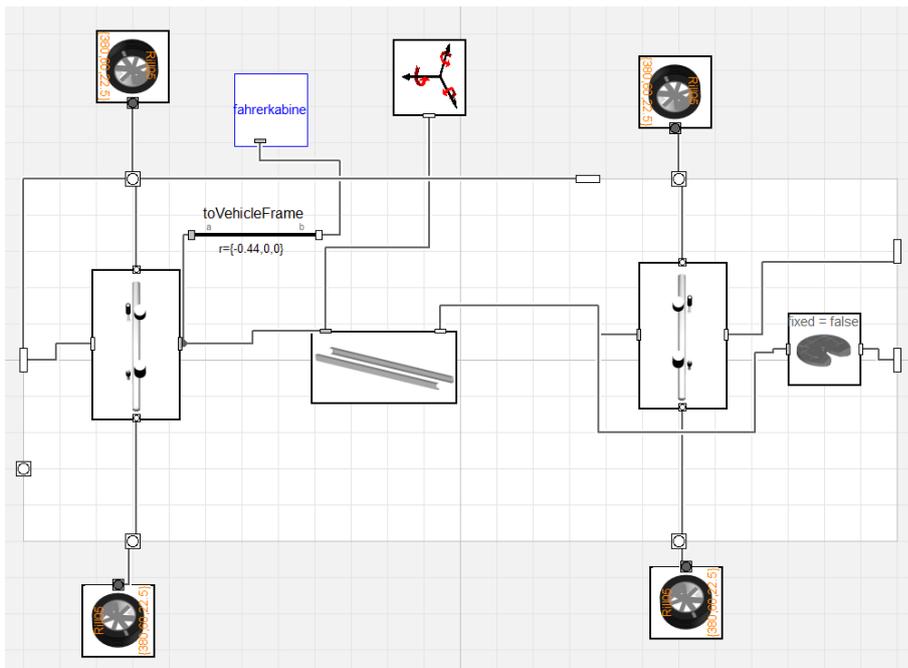


Abbildung 34 Schema Zugmaschine Dymola

Die Zugmaschine besteht aus den Komponenten Reifen, Achse, Rahmen, Fahrerkabine und der Sattelkupplung. Um das ANSYS-Modell nachzubilden, ist die gefederte Gesamtmasse der Zugmaschine von 5.730 kg als eigenes Massenelement angeordnet, dies bedeutet, der Rahmen und die Achsen sind masselos. Die ungefederte Massen von 425 kg (vorne) und 725

kg (hinten) je Rad sind in den Reifen berücksichtigt. Alle Abmessungen entsprechen dem ANSYS-Modell. Die Steifigkeit des Fahrzeugrahmens ist als unendlich angenommen, um eine größtmögliche Gleichheit der Modelle zu gewährleisten.

6.3.2.3 Achse

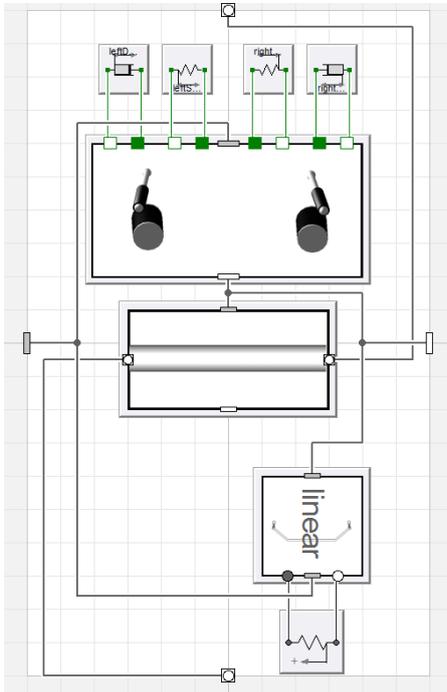


Abbildung 35 Schema Achse Dymola

Alle Achsen sind aufgrund der nicht notwendigen Lenkung als Starrachsen modelliert. Als Hauptelemente der Achse sind Dämpfer und Feder zu nennen. Die Masse aller Bauteile der Achse sind entweder im Reifenmodell (ungefederte Masse) oder in der Gesamtmasse des Zugfahrzeuges (gefederte Masse) berücksichtigt. Folgende Werte der einzelnen Parameter sind im Modell der Achse berücksichtigt:

Vorderachse Zugmaschine

Steifigkeit (links, rechts): 138.000 N/m
 Dämpfung (links, rechts): 13.000 kg/s

Hinterachse Zugmaschine

Steifigkeit (links, rechts): 217.000 N/m
 Dämpfung (links, rechts): 21.000 kg/s

Achse Auflieger

Steifigkeit (links, rechts): 145.000 N/m
 Dämpfung (links, rechts): 23.000 kg/s

6.3.2.4 Trailer

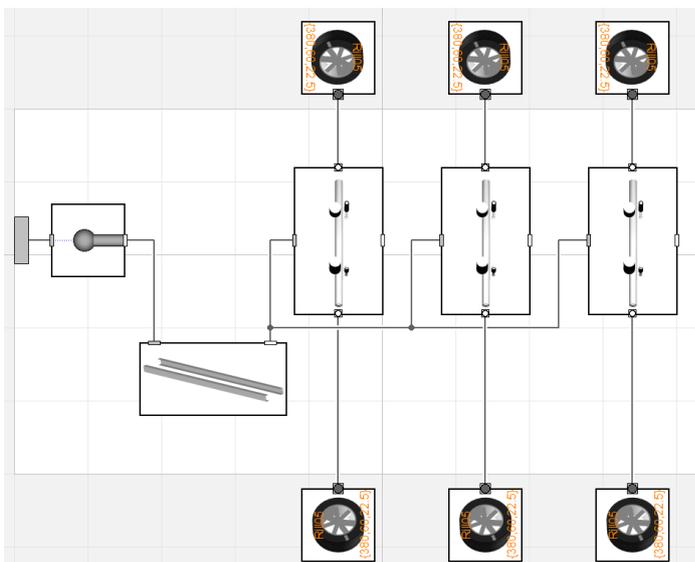


Abbildung 36 Trailer Dymola

Der Trailer bzw. Auflieger besteht aus der Kupplung, dem Rahmen und den drei Achsen mit Reifen. Um das ANSYS-Modell nachzubilden, ist die gefederte Gesamtmasse des Trailers von 29.389 kg als eigenes Massenelement angeordnet, dies bedeutet, der Rahmen und die Achsen sind masselos. Die ungefederte Masse von 320 kg je Rad ist in den Reifenmodellen berücksichtigt.

6.3.3 Simulation

Die zeitlichen Abstände der FE – Berechnungen betragen 0,5 ms oder 2000Hz, dies entspricht bei 80 km/h bzw. 22,222 m/s eine räumliche Auflösung von ca. 1,1 cm. Diese Werte wurden gewählt, um die Vergleichbarkeit mit den FTire – Simulationen zu verbessern. Die Rechenzeit spielte keine Rolle, die Simulation lief ca. in Echtzeit durch.

7 Simulationsergebnisse

Insgesamt wurden 375 Simulation durchgeführt, wobei 113 Ergebnisverläufe aus dem Forschungsprojekt „EVAF“ [14]übernommen wurden. Die Simulationen erfolgte getrennt für die linke und rechte Spur. Es liegen 367 verwertbare Simulationsergebnisse vor, da offensichtlich falsche Datensätze (8 von gesamt 375) ausgeschieden wurden. Dies ist bei den jeweiligen Fahrbahnübergängen vermerkt. Die Maximalwerte wurden in einem Bereich von +-4m den Fahrbahnübergangskonstruktionen zugeordnet, Maximalwerte in größerer Entfernung wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 3 Übersicht über die Anzahl der durchgeführten Simulationen

	ANSYS		FTire		Dymola	
	durchgeführte Simulationen	plausible Ergebnisse	durchgeführte Simulationen	plausible Ergebnisse	durchgeführte Simulationen	plausible Ergebnisse
Idealisierte Höhenverläufe	11	9	11	11	11	9
Gemessenen Höhenverläufe	102	102	102	102	100	96
Variation Geschwindigkeiten und Gewichte	-	-	36	36	-	-
Summe	113	111	149	149	113	107
Gesamtsumme	375 simuliert / 367 verwendbar					

7.1 Ergebnisübersicht

7.1.1 Ergebnisübersicht der idealisierten Höhenverläufe

Die Maximalwerte der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind in Tabelle 4 und Abbildung 38 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Programme ANSYS und Dymola sehr ähnliche Ergebnisse liefern; die Mittelwerte betragen jeweils 1,52 (Ansys und Dymola), der Median 1,55 (Ansys) und 1,52 (Dymola). Die Ausnahme bildet das Profil „Mulde 10 mm Tiefe und FÜK 5 mm vertieft“. Aufgrund der besonderen, in 6.3.1 beschriebenen, Bildung des Kontaktpunktes zwischen Reifen und Fahrbahn, wird die Spitze am Übergang der Mulde zu dem vertieft eingebauten Fahrbahnübergang (siehe Abbildung 37) geglättet. Dieser Effekt tritt jedoch nur an sehr ausgeprägten Diskontinuitäten auf und spielt an allen anderen idealisierten

Höhenverläufen keine Rolle. Die Ergebnisse der FTire – Simulationen, mit einem Mittelwert und Median von 1,33, weichen erheblich von beiden anderen Programmen ab. Als Hauptgrund ist hier das in 6.2.1 beschriebene physikalische Reifenmodell zu nennen, welches den Abrolleffekt am detailliertesten nachbildet.

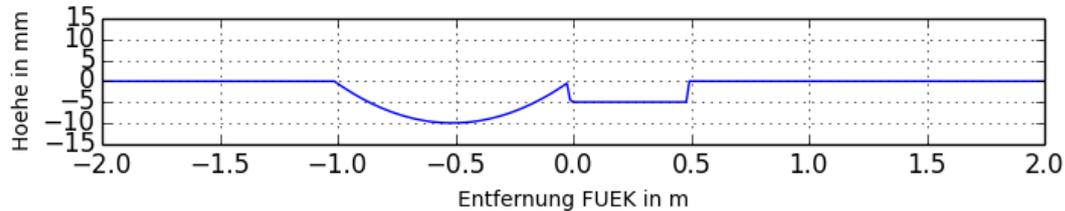


Abbildung 37 Profil Mulde 10 mm Tiefe und FÜK 5 mm vertieft

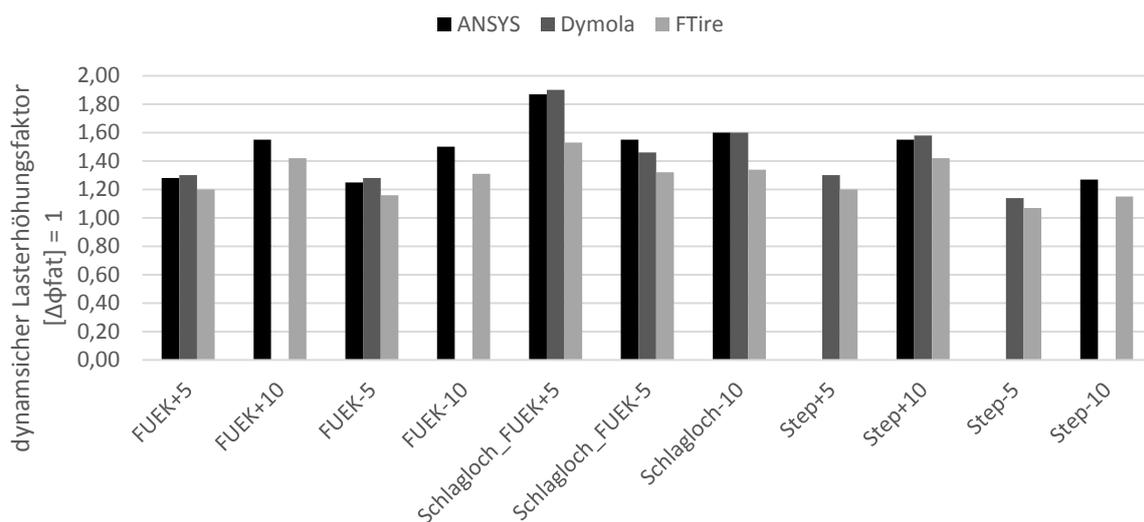


Abbildung 38 Vergleich dynamischer Lasterhöhungsfaktor idealisierte Höhenverläufe

Tabelle 4 Ergebnisübersicht des dynamischen Lasterhöhungsfaktors idealisierte Höhenverläufe

	ANSYS	FTire	Dymola
FÜK 5 mm erhöht eingebaut	1,28	1,20	1,30
FÜK 10 mm erhöht eingebaut	1,55	1,42	- *
FÜK 5 mm vertieft eingebaut	1,25	1,16	1,28
FÜK 10 mm vertieft eingebaut	1,50	1,31	- *
Mulde 10 mm Tiefe und FÜK 5 mm erhöht	1,87	1,53	1,90
Mulde 10 mm Tiefe und FÜK 5 mm vertieft	1,55	1,32	1,46
Mulde 10 mm tief	1,60	1,34	1,60
Sprung +5 mm	- *	1,20	1,30
Sprung +10 mm	1,55	1,42	1,58
Sprung -5 mm	- *	1,07	1,14
Sprung -10 mm	1,27	1,15	- *
Mittelwert (nur vollständige Datensätze einbezogen)	1,52	1,33	1,52
Median (nur vollständige Datensätze einbezogen)	1,55	1,33	1,52

*... Daten fehlerhaft, nicht in die Auswertung aufgenommen

7.1.2 Ergebnisübersicht der gemessenen Höhenverläufe

Die Maximalwerte der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind in Tabelle 6 und die Lagemaße in Tabelle 5 angeführt. Wie auch bei den idealisierten Höhenverläufen, sind die ANSYS – und Dymola – Simulationen mit einem Median von 1,46 (ANSYS) und 1,48 (Dymola) ähnlich in den Ergebnissen und weichen von den FTire – Simulationen mit einem Median von 1,30 ab. Die Dymola – Ergebnisse sind, wie bei den idealisierten Höhenverläufen, durchwegs geringfügig höher als jene der ANSYS – Simulation, eine Ausnahme bilden jedoch wieder Höhenverläufe mit Spitzen im Profil. Diese Spitzen werden durch das Dymola – Reifenmodell geglättet. Die Lagemaße sind auch in Abbildung 39 dargestellt; die Whisker stellen den 1,5 – fachen Interquartilsabstand dar. Alle Ergebnisse sind zur Übersicht in Tabelle 6 angeführt.

Tabelle 5 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren an gemessenen Höhenverläufe

	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum
ANSYS	1,06	1,29	1,46	1,68	2,28
FTire	1,01	1,18	1,30	1,42	1,81
Dymola	1,06	1,30	1,48	1,67	2,38

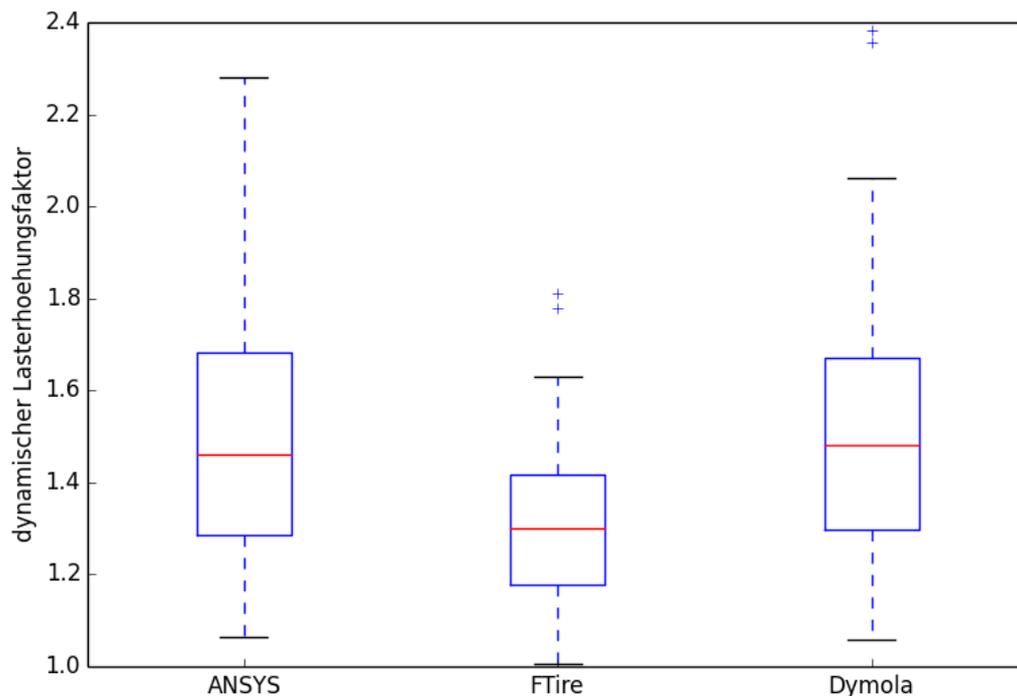


Abbildung 39 Box-Plot gemessene Höhenverläufe, Whisker 1,5-facher Interquartilsabstand

Tabelle 6 Ergebnisübersicht der gemessenen Höhenverläufe

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
A4L1_A4.09_2_KF_s436	1,65	1,61	1,34	1,39	1,65	1,67
A2L1_V41_2_KF_s605	1,33	1,36	1,23	1,22	1,31	1,34
A2R1_A2.65_1_KF_s2539	1,14	1,22	1,13	1,15	1,15	1,21
A2R1_A2.65_2_KF_s2691	1,28	1,29	1,16	1,18	1,32	1,32
A2L1_V38_2_KF_s2887	1,27	1,22	1,04	1,01	1,19	1,16
A22L1_B1911_1_MD_s3543	1,45	1,46	1,37	1,38	-*	-*
A2R1_A2.68_1_KF_s4589	1,77	1,73	1,43	1,40	1,78	1,74
A2R1_A2.69_1_KF_s5060	1,25	1,19	1,09	1,04	1,25	1,17
A13L1_BB56_1_GF_s5347	1,40	1,44	1,24	1,30	1,45	1,51
A2R1_A2.69_2_KF_s5520	1,41	1,45	1,27	1,30	-*	-*
A23L1_B2276_1_MD_s7060	1,61	1,59	1,46	1,41	1,65	1,61
A23L1_B2277_1_KF_s7371	1,38	1,51	1,19	1,39	1,39	1,45
A23L1_B2277_2_KF_s7582	1,65	1,56	1,51	1,50	1,66	1,58
A23L1_B0214_1_MD_s8498	2,26	2,28	1,81	1,78	2,38	2,36
A23L1_B0214_2_MD_s8911	1,85	1,89	1,52	1,58	1,87	1,94
A13R1_BB23a_2_MD_s11432	1,39	1,36	1,29	1,20	1,39	1,31
A2R1_V31_1_KF_s11502	1,40	1,31	1,28	1,25	1,37	1,31
A2R1_V53_1_KF_s11712	1,25	1,24	1,16	1,12	1,26	1,25
A23L1_B0333_2_KF_s11857	1,66	1,67	1,37	1,38	1,67	1,68
A2R1_V53_2_KF_s11941	1,23	1,21	1,03	1,01	1,19	1,18
A13R1_BB23d_1_MD_s12302	1,59	1,60	1,34	1,34	1,61	1,56
A23L1_B0329_1_GF_s12419	2,05	1,97	1,60	1,46	2,06	1,99
A23L1_B0324_1_GF_s12587	1,28	1,18	1,19	1,16	1,31	1,23
A13R1_BB23e_1_MD_s12857	1,27	1,25	1,18	1,24	1,25	1,30
A23L1_B0315_2_GF_s13021	1,77	1,80	1,53	1,57	1,80	1,85
A13R1_BB23e_2_MD_s13174	1,47	1,45	1,15	1,17	1,38	1,40
A23L1_B1032_1_GF_s13353	1,45	1,55	1,33	1,36	1,42	1,52
A23R1_B2277_1_KF_s14021	1,15	1,17	1,01	1,15	1,14	1,24
A23R1_B2277_2_KF_s14238	1,34	1,31	1,19	1,22	1,37	1,34
A2R1_V41_2_KF_s19546	1,57	1,57	1,42	1,38	1,63	1,60
A10L1_A10.099_2_MD_s20369	1,50	1,53	1,28	1,30	1,47	1,52
A13L1_BB23e_5_MD_s22593	1,61	1,57	1,30	1,30	1,58	1,58
A4L1_06050_1_MD_s22646	1,81	1,83	1,49	1,39	1,87	1,77
A13L1_BB23e_6_MD_s22911	1,72	1,72	1,40	1,44	1,65	1,70
A10L1_A10.091_2_MD_s24623	1,91	1,93	1,51	1,57	1,85	1,91
A13L1_BB14_1_GF_s27536	1,82	1,89	1,41	1,55	-*	-*
A4R1_06053_1_PK_s28013	1,33	1,29	1,37	1,33	1,32	1,34
A4R1_06053_2_PK_s28066	1,31	1,30	1,24	1,21	1,34	1,29
A13L1_BB14_2_GF_s28190	1,67	1,68	1,51	1,52	1,78	1,78
A13R1_BB56_1_GF_s29993	1,83	1,82	1,61	1,54	1,86	1,70
A10R1_A10.091_1_BD_s36015	1,65	1,68	1,26	1,24	1,65	1,61
A10R1_A10.098_2_MD_s40145	1,69	1,75	1,28	1,28	1,64	1,66

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
A10R1_A10.099_1_MD_s40279	1,53	1,44	1,35	1,30	1,53	1,49
A2L1_A2.75_1_KF_s43315	1,06	1,06	1,04	1,05	1,06	1,07
A2L1_A2.75_2_KF_s43433	1,08	1,10	1,07	1,08	1,08	1,09
A4R1_07011_1_UF_s44054	1,95	2,00	1,58	1,63	1,88	1,94
A4R1_07011_2_UF_s44098	1,51	1,45	1,38	1,35	1,52	1,48
A2L1_A2.68_2_KF_s46959	1,10	1,10	1,06	1,06	1,11	1,10
A4L1_A4.09_1_KF_s47169	1,70	1,64	1,49	1,47	1,72	1,67
A2L1_A2.65_1_KF_s48853	1,29	1,31	1,18	1,20	1,29	1,31
A2L1_A2.65_2_KF_s49003	1,10	1,09	1,06	1,07	1,10	1,10
Mittelwert	1,50		1,31		1,50	
Median	1,46		1,30		1,48	

*... Daten fehlerhaft, nicht in die Auswertung aufgenommen

7.2 Idealisierte Höhenverläufe

7.2.1 Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut

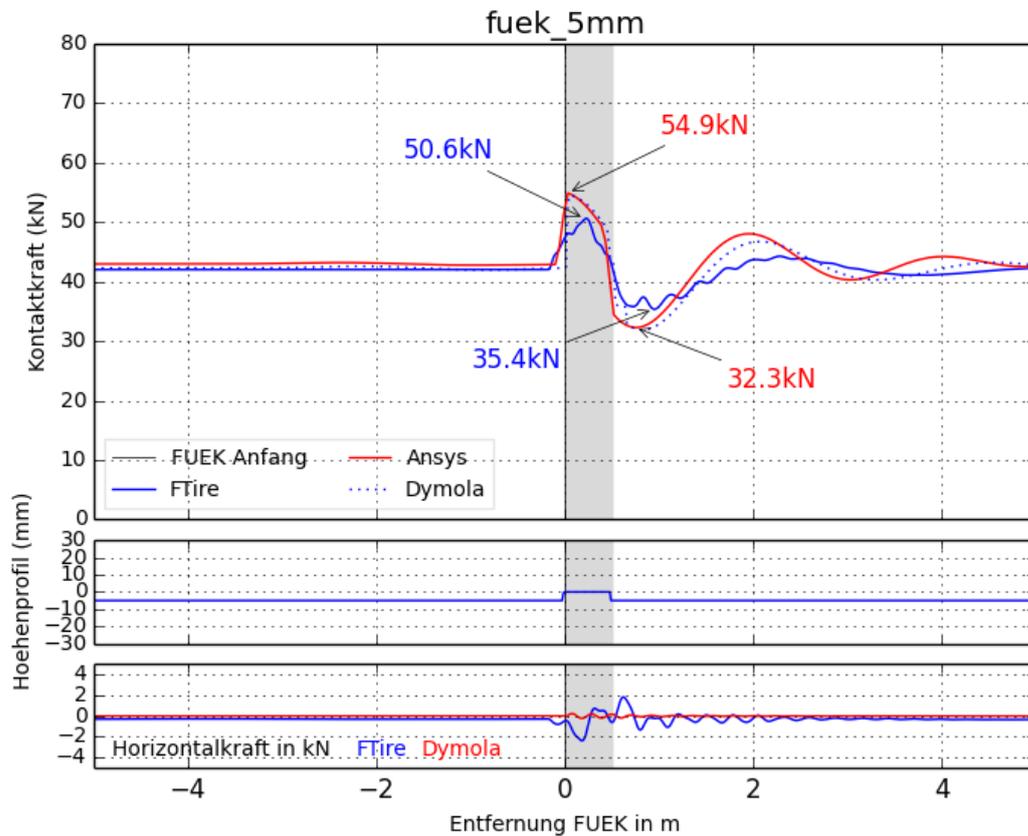


Abbildung 40 Ergebnisse FÜK +5 mm

Anmerkungen:

Der erhöhte Einbau ist der schlechteste Fall für die Konstruktion, da hier das Maximum der Belastung auf dem Übergang auftritt.

Tabelle 7 Ergebnisse FÜK +5 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	54,9 kN	50,6 kN	54,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,28	1,20	1,30
Minimale dynamische Last	32,3 kN	35,4 kN	31,9 kN
Maximale Horizontalkraft	-	2,4 kN	0,2 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.2 Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm erhöht eingebaut

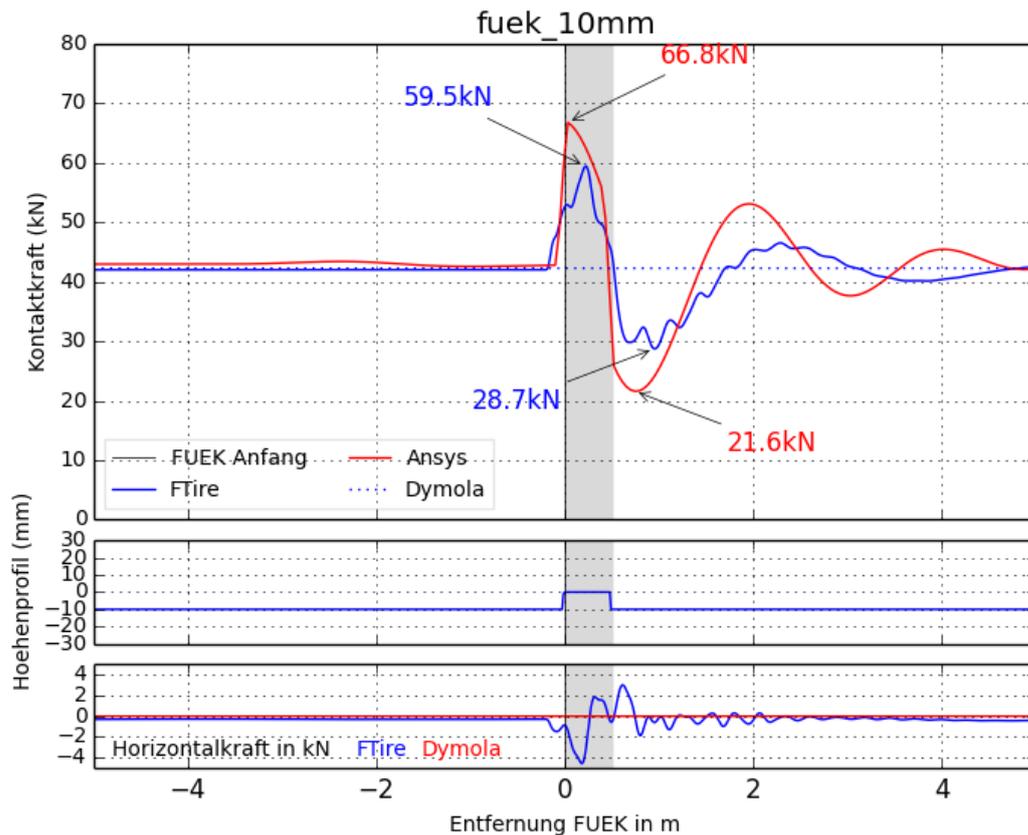


Abbildung 41 Ergebnisse FÜK +10 mm

Anmerkungen:

Der erhöhte Einbau ist der schlechteste Fall für die Konstruktion, da hier das Maximum der Belastung auf dem Übergang auftritt.

Die Daten der Dymola-Simulation sind fehlerhaft.

Tabelle 8 Ergebnisse FÜK +10 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	66,8 kN	59,5 kN	-
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,55	1,42	-
Minimale dynamische Last	21,6 kN	28,7 kN	-
Maximale Horizontalkraft	-	4,6 kN	-
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.3 Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut

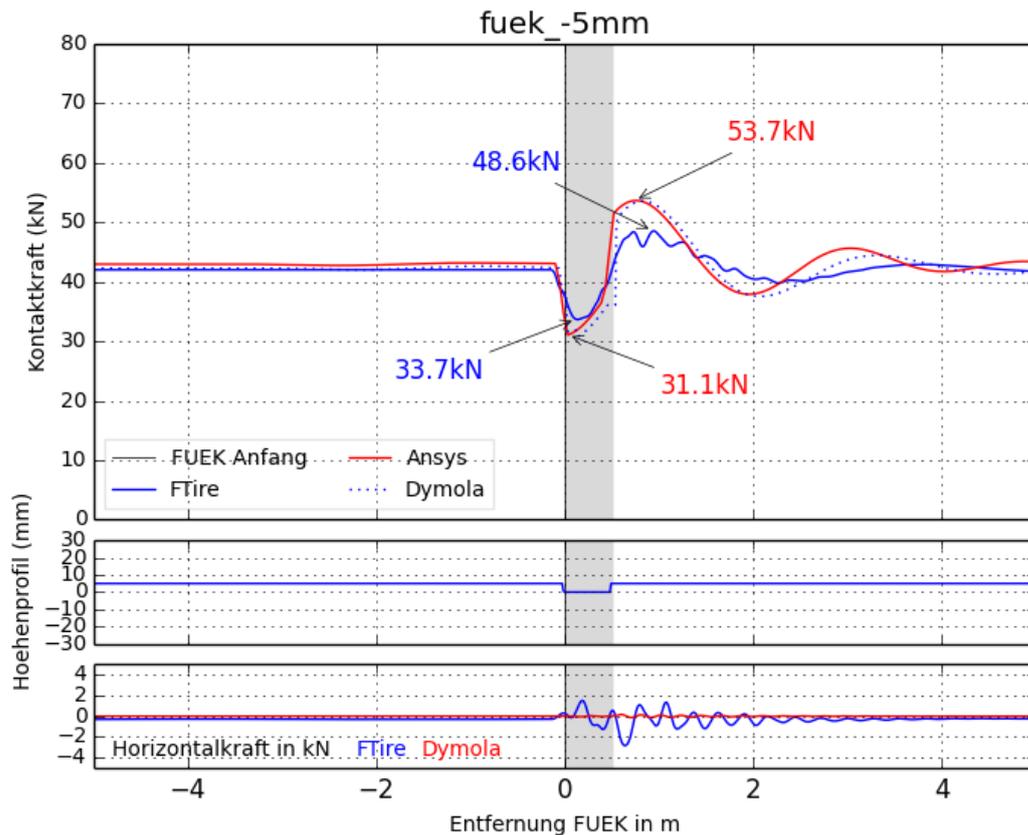


Abbildung 42 Ergebnisse FÜK -5 mm

Anmerkungen:

Bei vertieftem Einbau des Überganges tritt das Maximum der dynamischen Last erst nach der Konstruktion auf. Dies gilt ungefähr bis zu einer Länge des Fahrbahnüberganges von ca. 1,5m bei 80 km/h (siehe 7.2.10 und 7.2.11).

Tabelle 9 Ergebnisse FÜK -5 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	53,7 kN	48,6 kN	53,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,25	1,16	1,28
Minimale dynamische Last	31,1 kN	33,7 kN	30,9 kN
Maximale Horizontalkraft	-	2,8 kN	0,2 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.4 Fahrbahnübergangskonstruktion 10 mm vertieft eingebaut

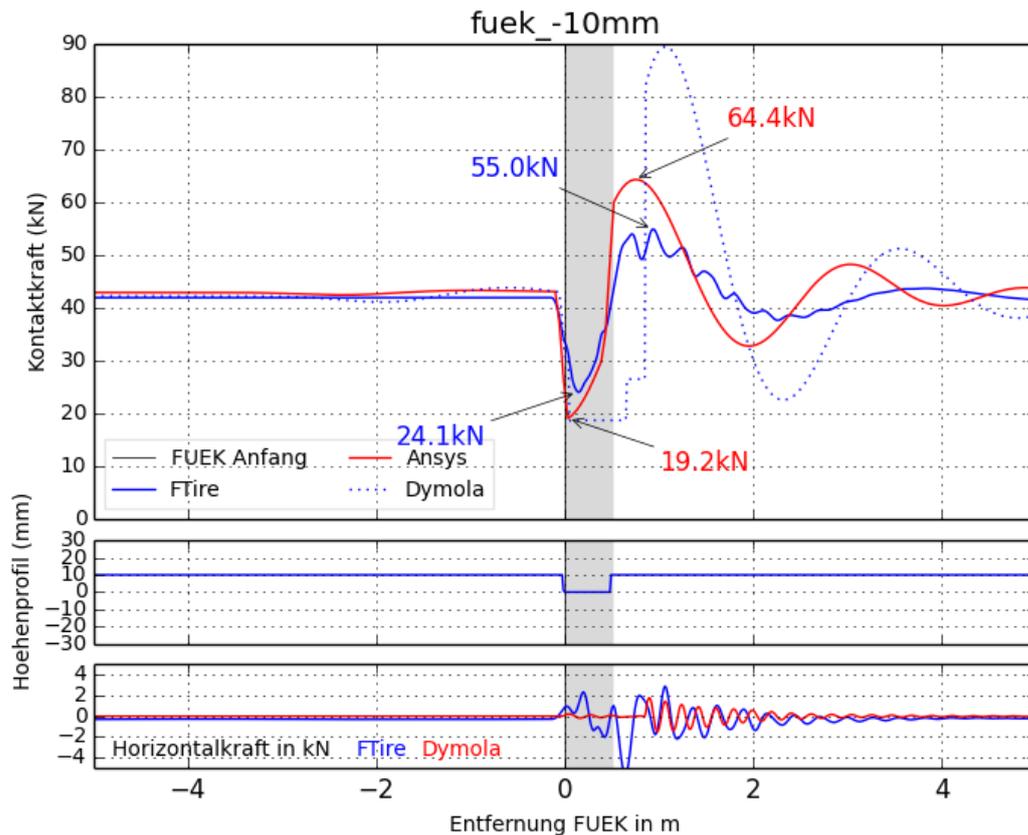


Abbildung 43 Ergebnisse FÜK -10 mm

Anmerkungen:

Die Werte der Dymola-Simulation erscheinen auffällig hoch, des Weiteren ist der treppenförmige Verlauf der Werte im Bereich der FÜK nicht plausibel. Diese Daten werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 10 Ergebnisse FÜK -10 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	64,4 kN	55,0 kN	89,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,50	1,31	2,13
Minimale dynamische Last	19,2 kN	24,1 kN	18,7 kN
Maximale Horizontalkraft	-	5,6 kN	1,8 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.5 Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut

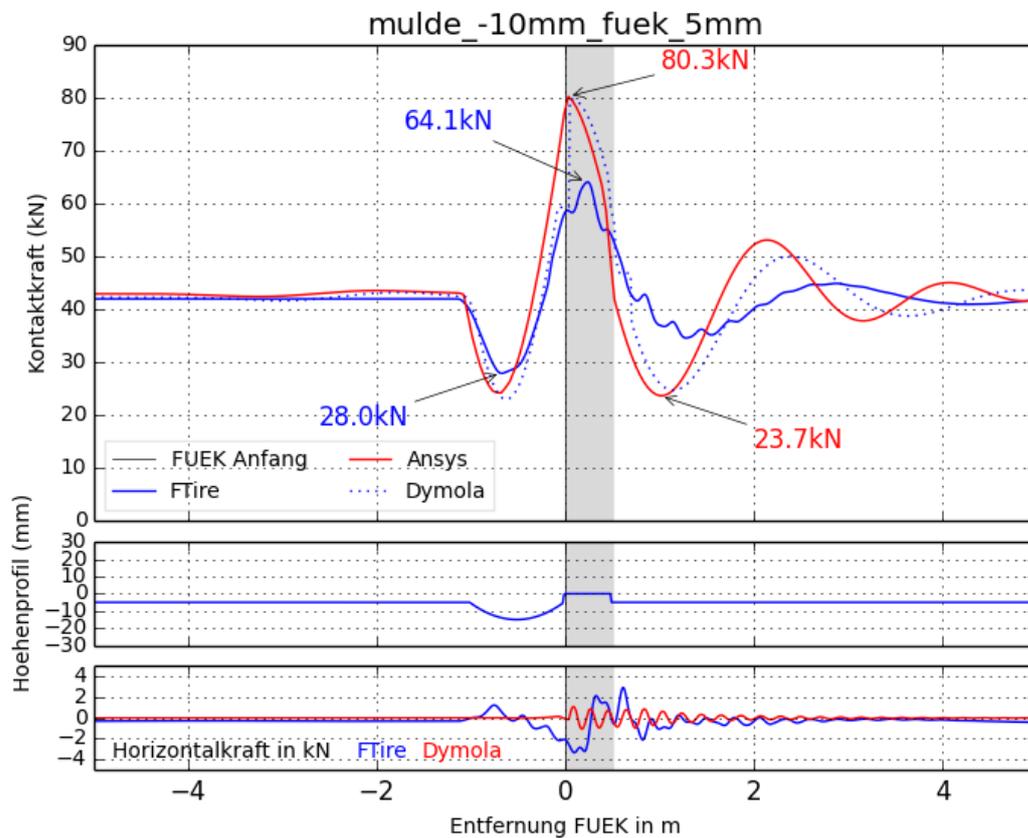


Abbildung 44 Ergebnisse Mulde -10mm und FÜK +5 mm

Anmerkungen:

Diese Kombination ist die schlechtest mögliche und auf jeden Fall zu vermeiden.

Tabelle 11 Ergebnisse Mulde -10mm und FÜK +5 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	80,3 kN	64,1 kN	79,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,87	1,53	1,90
Minimale dynamische Last	23,7 kN	28,0 kN	23,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-	3,3 kN	1,1 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.6 Mulde 10 mm Tiefe und Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm vertieft eingebaut

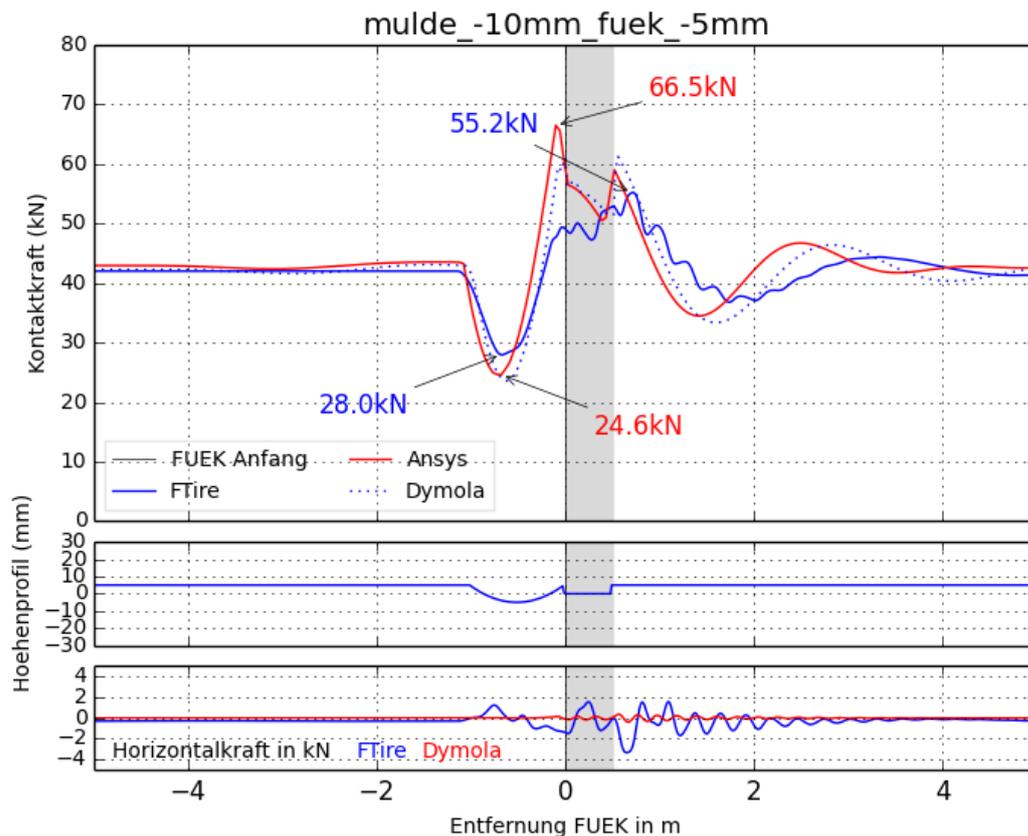


Abbildung 45 Ergebnisse Mulde -10 mm und FÜK -5 mm

Anmerkungen:

Durch den vertieften Einbau wird die Konstruktion ein wenig vor den dynamischen Lasten, hervorgerufen durch die Mulde, geschützt. Eine Mulde vor dem Übergang ist aber generell zu vermeiden.

Tabelle 12 Ergebnisse Mulde -10 mm und FÜK -5 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	66,5 kN	55,3 kN	61,2 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,55	1,32	1,46
Minimale dynamische Last	24,6 kN	28,0 kN	23,6 kN
Maximale Horizontalkraft	-	3,3 kN	0,4 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.7 Mulde 10 mm tief

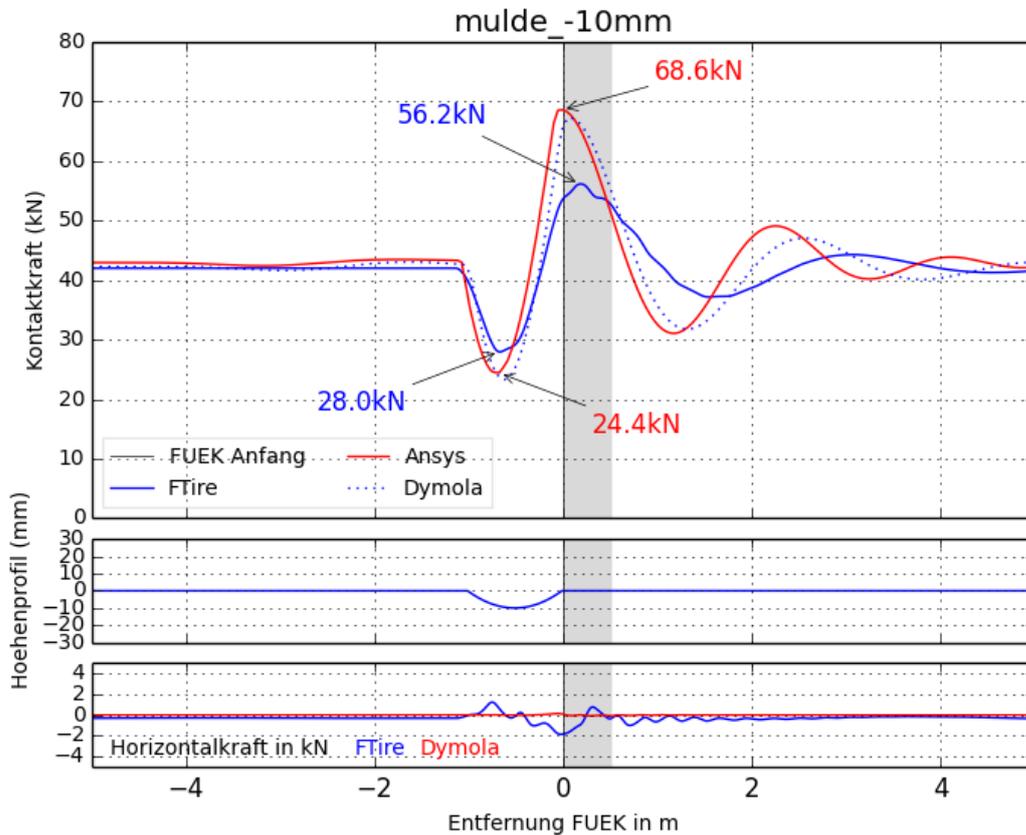


Abbildung 46 Ergebnisse Mulde -10 mm

Anmerkungen:

Durch die Mulde vor der Konstruktion treten die Maximalwerte auf dem Fahrbahnübergang auf. Ungefähr 4m nach der Mulde sind die dynamischen Lastenerhöhungen abgeklungen, Ab 1,0 m hinter der Mulde beträgt der dynamische Lasterhöhungsfaktor weniger als 1,2 (ANSYS und Dymola) bzw. weniger als 1,1 (FTire).

Tabelle 13 Ergebnisse Mulde -10 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	68,6 kN	56,2 kN	67,3 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,60	1,34	1,60
Minimale dynamische Last	24,4 kN	28,0 kN	23,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-	1,9 kN	0,2 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.8 Sprung +5 mm

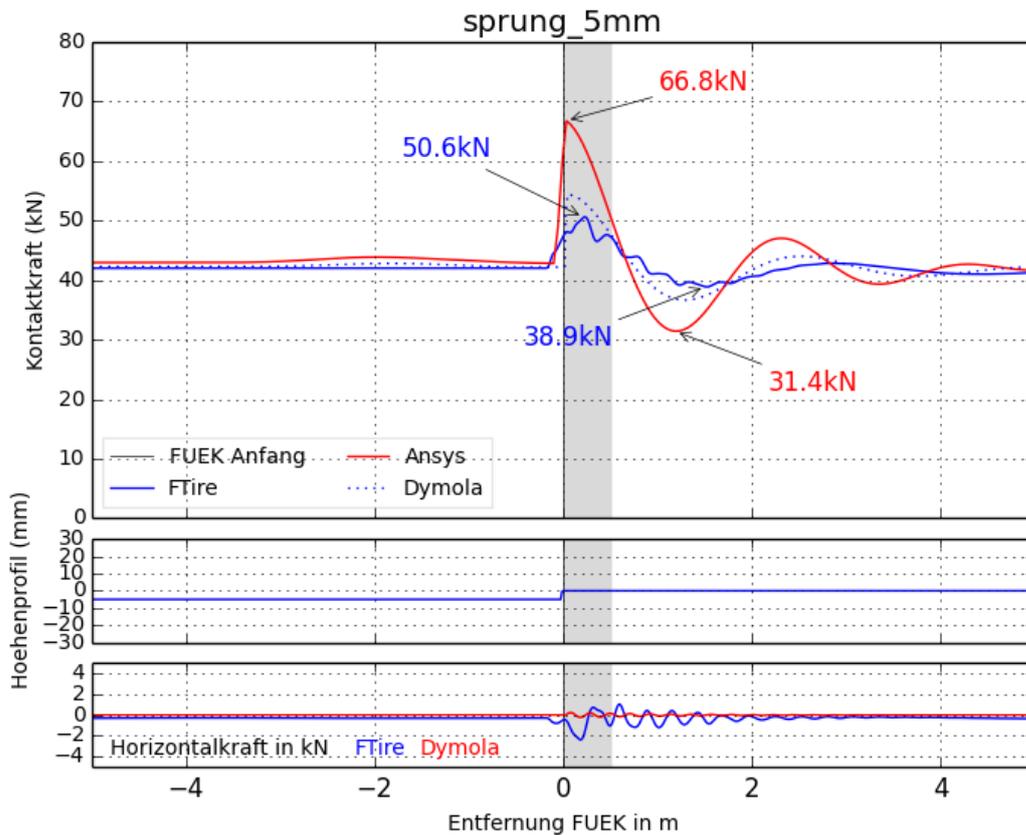


Abbildung 47 Ergebnisse Sprung +5 mm

Anmerkungen:

Aufgrund des Sprunges, z. Bsp. durch Spurrinnen, tritt das Maximum ebenfalls auf der Konstruktion auf und ist zu vermeiden.

Die Werte der ANSYS-Simulation erscheinen zu hoch und werden in der Auswertung somit nicht berücksichtigt.

Tabelle 14 Ergebnisse Sprung +5 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	66,8 kN	50,6 kN	54,4 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,55	1,20	1,30
Minimale dynamische Last	31,4 kN	38,9 kN	36,7 kN
Maximale Horizontalkraft	-	2,4 kN	0,2 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.9 Sprung +10 mm

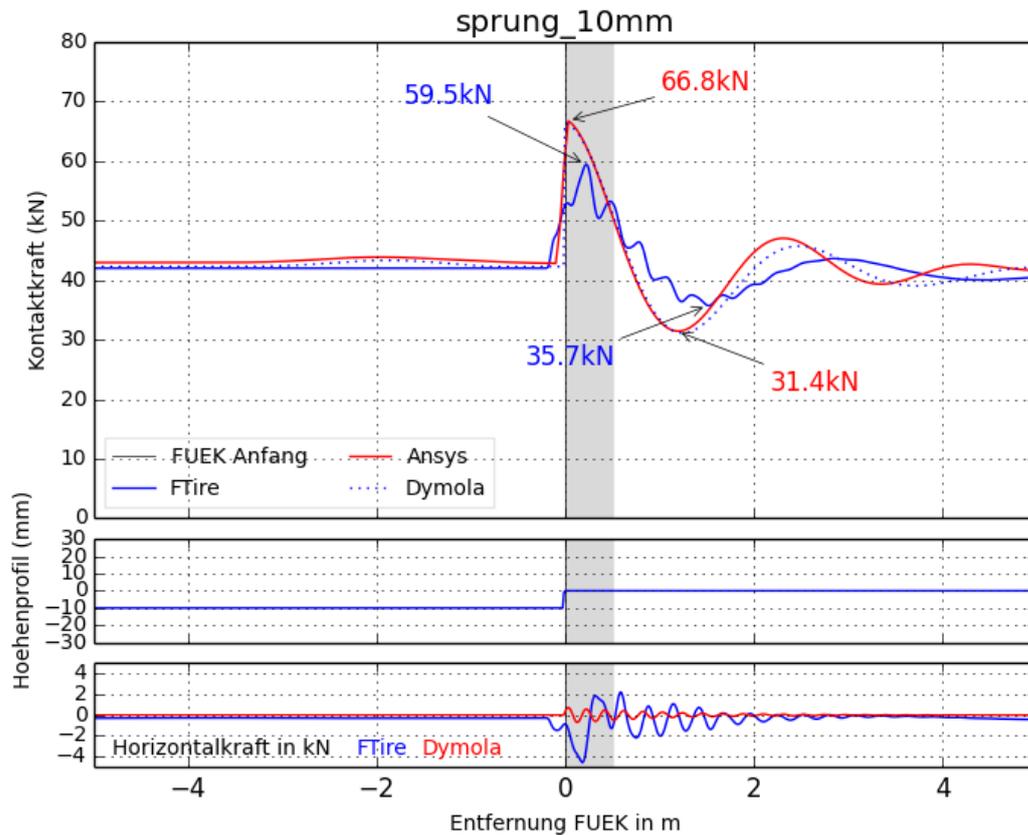


Abbildung 48 Ergebnisse Sprung +10 mm

Anmerkungen:

Aufgrund des Sprunges, z. Bsp. durch Spurrinnen, tritt das Maximum ebenfalls auf der Konstruktion auf und ist zu vermeiden.

Tabelle 15 Ergebnisse Sprung +10 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	66,8 kN	59,5 kN	66,3 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,55	1,42	1,58
Minimale dynamische Last	31,4 kN	35,7 kN	31,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-	4,5 kN	0,7 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.10 Sprung -5 mm

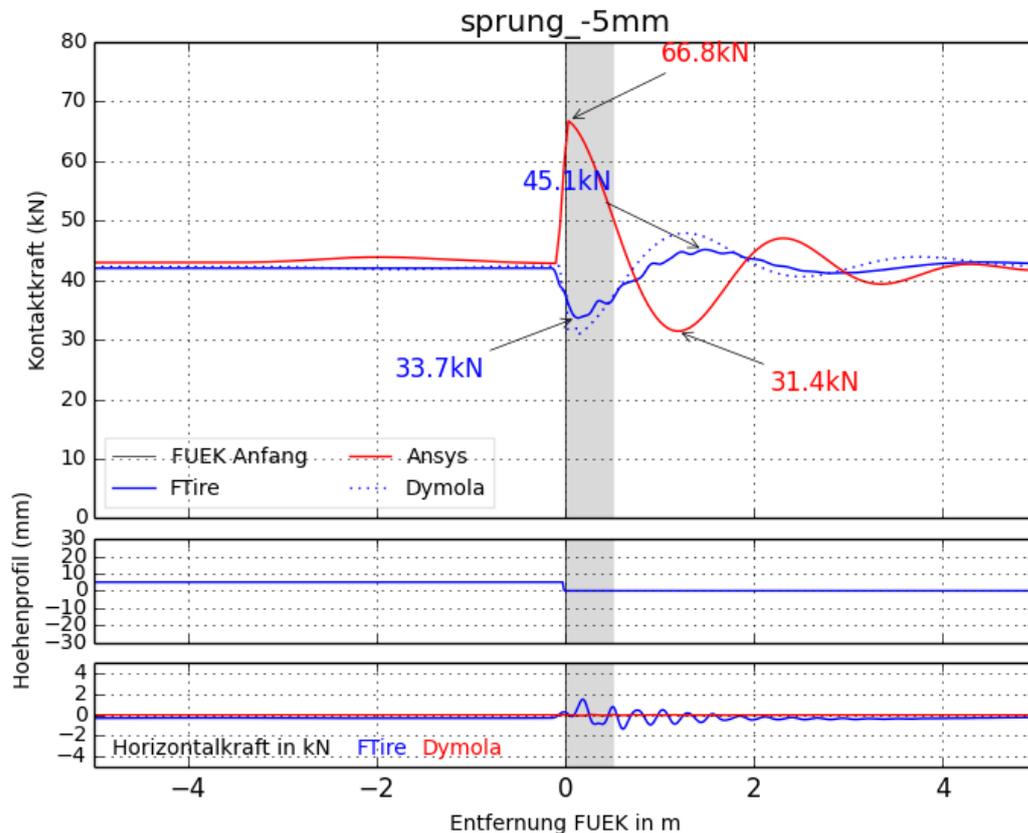


Abbildung 49 Ergebnisse Sprung -5 mm

Anmerkungen:

Dieser Fall schützt den Fahrbahnübergang vor der dynamischen Belastung, wobei dies für andere Geschwindigkeiten noch überprüft werden muss. Das Maximum der dynamischen Last tritt ca. 1,5m hinter dem Beginn der Konstruktion auf und ist relativ gering.

Die Werte der ANSYS-Simulation erscheinen nicht plausibel und werden in der Auswertung somit nicht berücksichtigt.

Tabelle 16 Ergebnisse Sprung -5 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	66,8 kN	45,1 kN	47,9 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,55	1,07	1,14
Minimale dynamische Last	31,4 kN	33,7 kN	31,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-	1,5 kN	0,0 kN
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.2.11 Sprung -10 mm

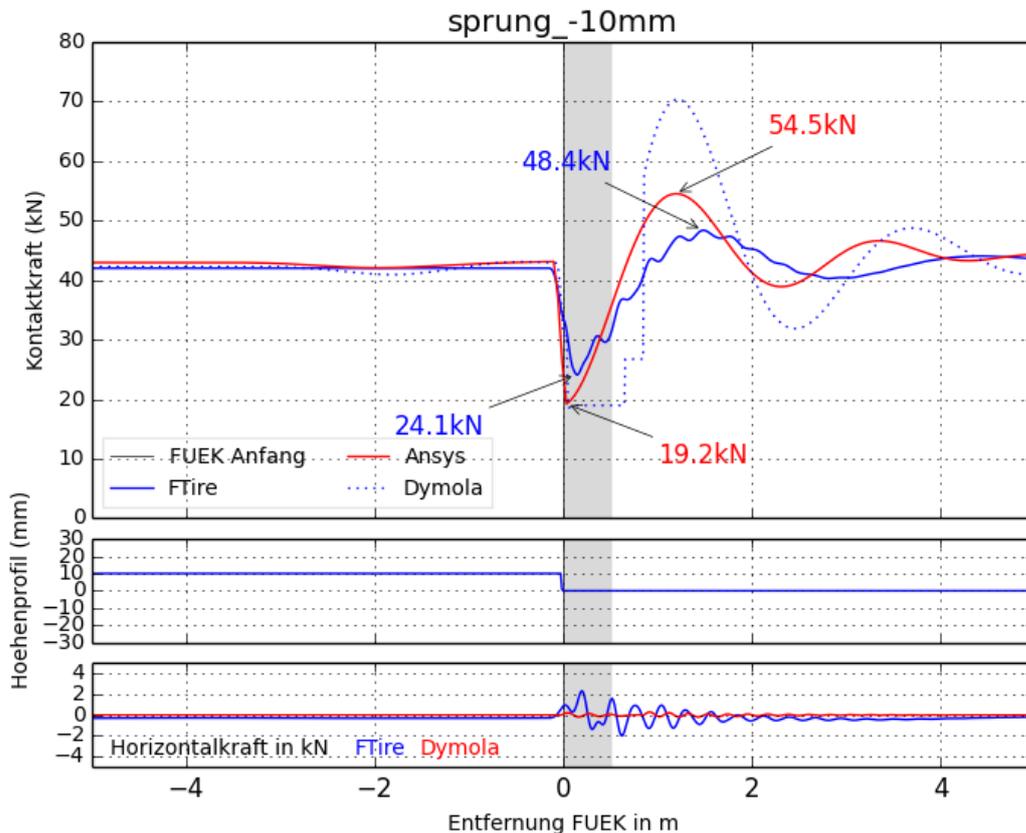


Abbildung 50 Ergebnisse Sprung -10 mm

Anmerkungen:

Dieser Fall schützt den Fahrbahnübergang vor der dynamischen Belastung, wobei dies für andere Geschwindigkeiten noch überprüft werden muss. Das Maximum der dynamischen Last tritt ca. 1,5m hinter dem Beginn der Konstruktion auf und ist relativ gering. Generell ist ein Sprung abwärts günstiger als ein Sprung aufwärts.

Die Werte der Dymola-Simulation erscheinen auffällig hoch, des Weiteren ist der treppenförmige Verlauf der Werte im Bereich der FÜK nicht plausibel.

Tabelle 17 Ergebnisse Sprung -10 mm

	ANSYS	FTire	Dymola
Statische Last	43,0 kN	42,0 kN	42,3 kN
Maximale dynamische Last	54,5 kN	48,4 kN	70,4 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,27	1,15	1,68
Minimale dynamische Last	19,2 kN	24,1 kN	18,6 kN
Maximale Horizontalkraft	-		
Geschwindigkeit	80 km/h		

7.3 Gemessene Höhenverläufe

Dieses Kapitel zeigt ausgewählte Höhenverläufe. Die restlichen Ergebnisse befinden sich im Anhang.

7.3.1 A23L1_B0214_1_MD_s8498

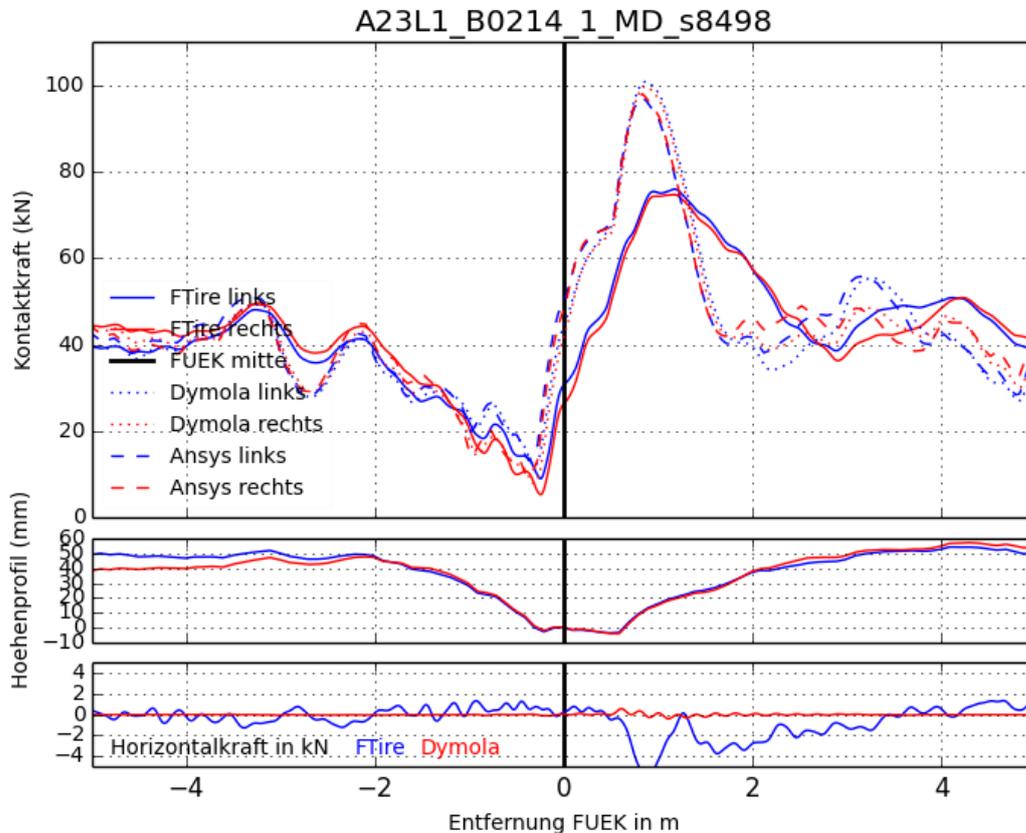


Abbildung 51 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498

Anmerkungen:

Hier dürfte bei der Erneuerung der Fahrbahn der Anschluss an den Fahrbahnübergang nicht ordnungsgemäß hergestellt worden sein. Dies bedingt große dynamische Lasten, wenn auch das Maximum nicht an der Konstruktion auftritt.

Tabelle 18 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	97,2 kN	98,0 kN	76,0 kN	74,7 kN	100,8kN	99,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	2,26	2,28	1,81	1,78	2,38	2,36
Position max. dynamische Last	0,8 m	0,8 m	1,2 m	1,2 m	0,9 m	0,9 m
Minimale dynamische Last	13,1 kN	9,4 kN	9,1 kN	5,4 kN	12,1 kN	8,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		6,6 kN		0,6 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

7.3.2 A23L1_B0329_1_GF_s12419

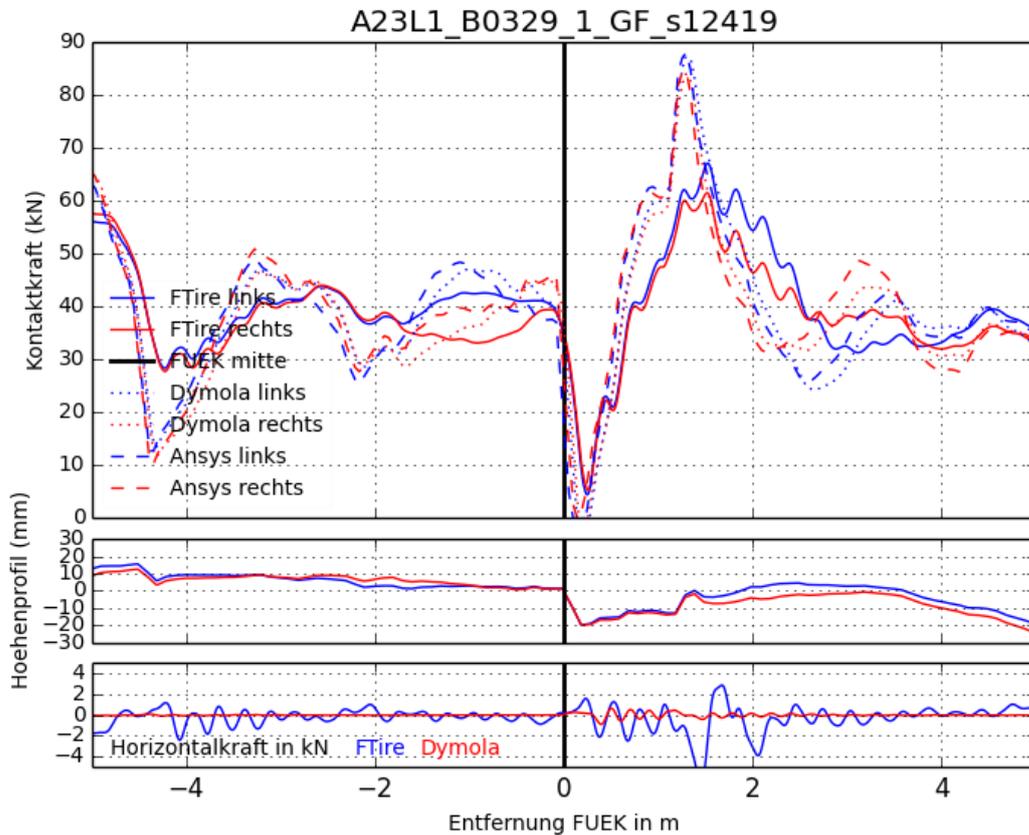


Abbildung 52 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419

Anmerkungen:

keine

Tabelle 19 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	88,0 kN	84,5 kN	67,0 kN	61,5 kN	87,2 kN	84,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	2,05	1,97	1,60	1,46	2,06	1,99
Position max. dynamische Last	1,3 m	1,3 m	1,5 m	1,5 m	1,3 m	1,3 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	4,4 kN	5,3 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		6,5 kN		0,9 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

7.3.3 A10R1_A10.098_2_MD_s40145

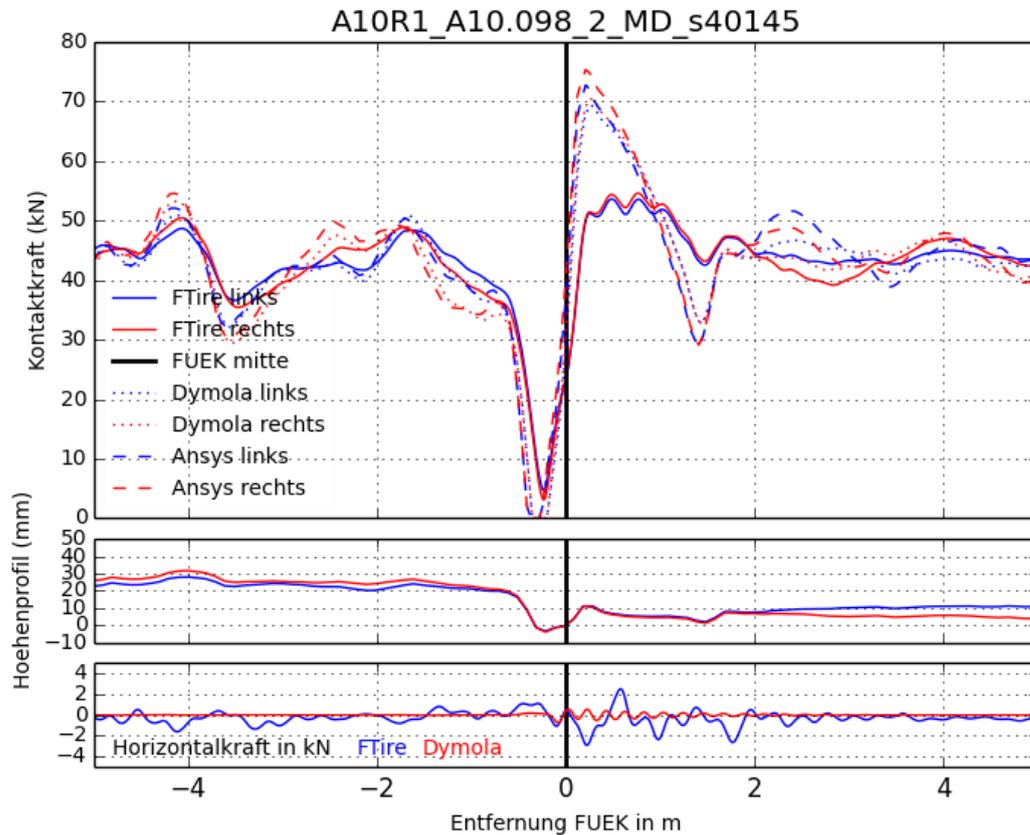


Abbildung 53 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145

Anmerkungen:

FTire kappt durch das Reifenmodell die ausgeprägte Spitze der beiden anderen Simulationsprogramme.

Tabelle 20 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	72,8 kN	75,4 kN	53,6 kN	53,6 kN	69,4 kN	70,4 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,69	1,75	1,28	1,28	1,64	1,66
Position max. dynamische Last	0,2 m	0,2 m	0,8 m	0,8 m	0,3 m	0,3 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	4,7 kN	3,1 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,9 kN		0,7 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

7.3.4 A2L1_A2.75_1_KF_s43315

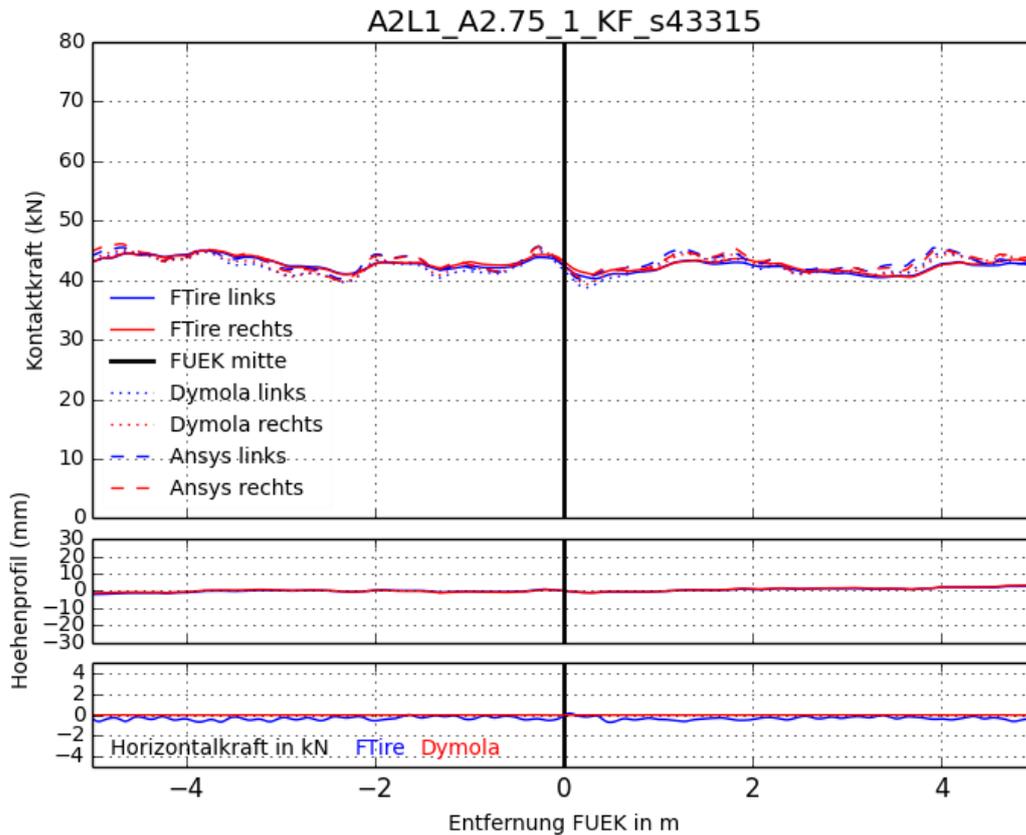


Abbildung 54 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315

Anmerkungen:

Bei guter Ebenheit treten nur sehr geringe dynamische Lasten auf.

Tabelle 21 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	45,7 kN	45,7 kN	43,8 kN	44,3 kN	44,8 kN	45,1 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,06	1,06	1,04	1,05	1,06	1,07
Position max. dynamische Last	-0,3 m	-0,3 m	-0,2 m	-0,2 m	-0,2 m	-0,2 m
Minimale dynamische Last	39,9 kN	40,1 kN	40,3 kN	40,9 kN	38,7 kN	39,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		0,7 kN		0,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

7.3.5 A4R1_07011_1_UF_s44054

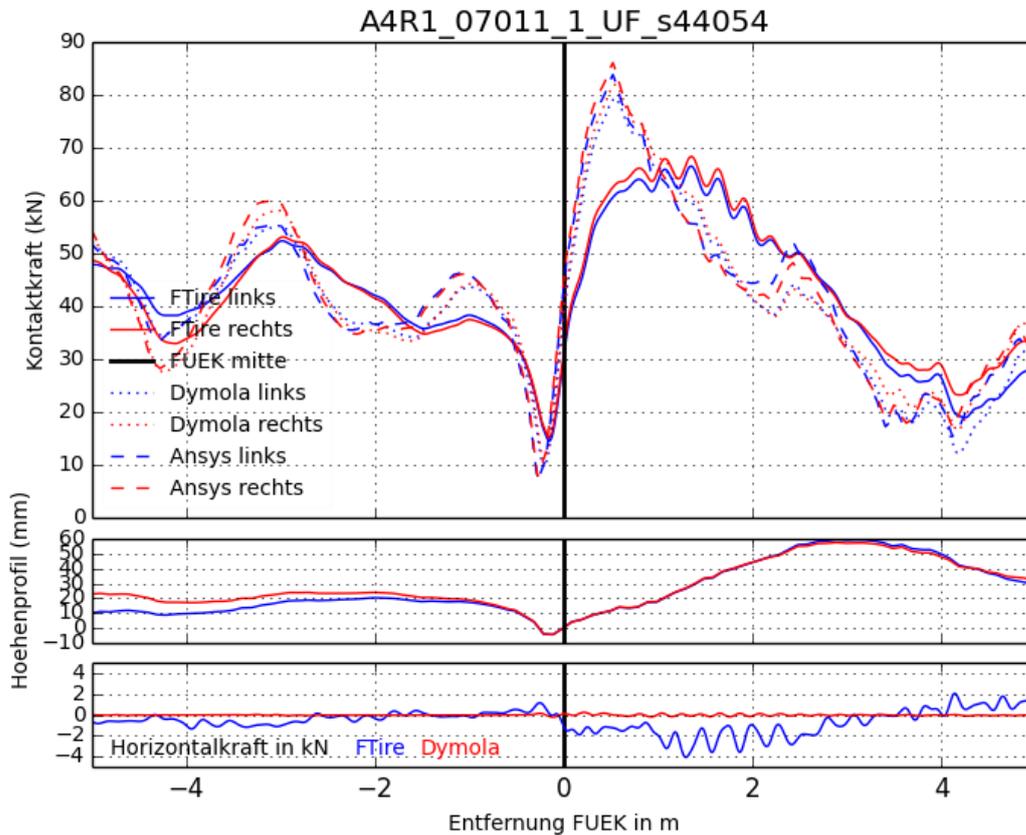


Abbildung 55 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054

Anmerkungen:

Nicht nur an ausgeprägten Spitzen im Höhenverlauf können hohe dynamische Lasten auftreten, auch eine Kombination aus einem Höhengsprung und einer relativ starken Steigung erzeugt hohe Werte.

Tabelle 22 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	83,8 kN	86,1 kN	66,5 kN	68,4 kN	79,4 kN	81,9 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,95	2,00	1,58	1,63	1,88	1,94
Position max. dynamische Last	0,5 m	0,5 m	1,4 m	1,4 m	0,5 m	0,5 m
Minimale dynamische Last	7,2 kN	8,0 kN	14,6 kN	15,4 kN	9,6 kN	11,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-		4,2 kN		0,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

7.4 Verschiedene Geschwindigkeiten an ausgewählten Höhenverläufen

7.4.1 Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut

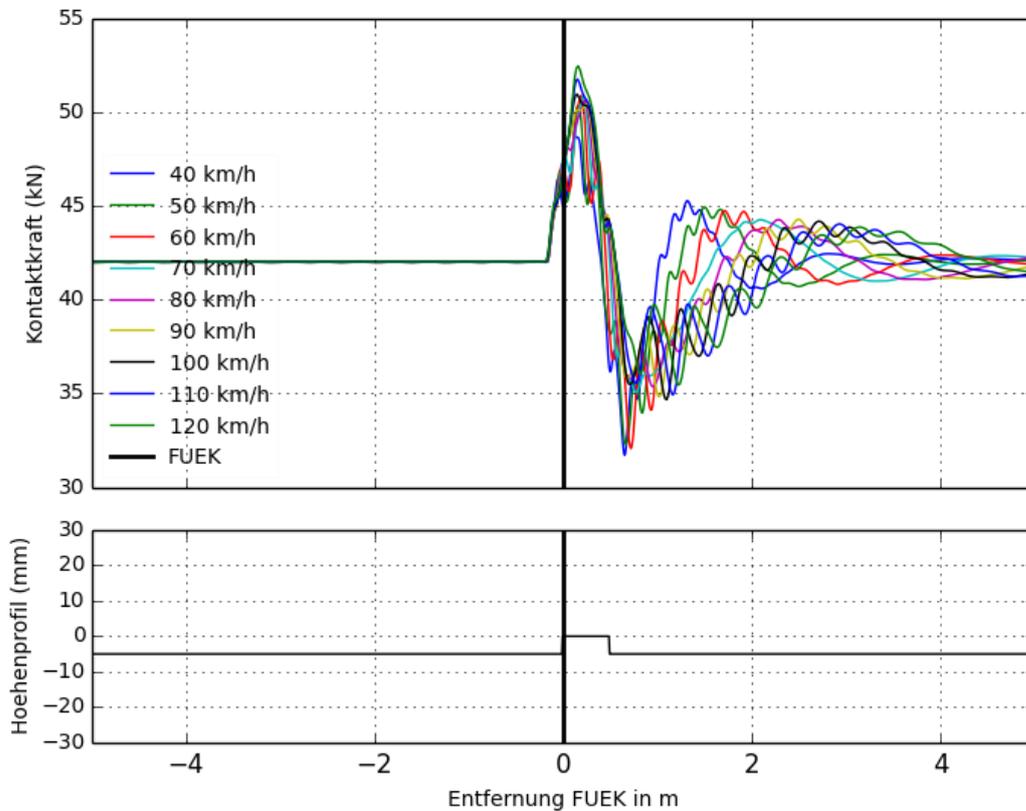


Abbildung 56 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten FÜK +5mm

Anmerkungen:

Es ist auffällig, dass die dynamische Last in einem Bereich von 50 bis 100 km/h nahezu konstant ist.

Tabelle 23 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten FÜK +5mm

	FTire								
	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h	110 km/h	120 km/h
Statische Last	42,0 kN								
Maximale dynamische Last	48,7 kN	50,4 kN	50,9 kN	50,9 kN	50,6 kN	50,5 kN	51,0 kN	51,8 kN	52,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,16	1,20	1,21	1,21	1,20	1,20	1,21	1,23	1,25
Minimale dynamische Last	31,7 kN	32,3 kN	32,1 kN	35,1 kN	35,4 kN	34,8 kN	34,7 kN	34,9 kN	35,5 kN

7.4.2 Mulde 10 mm tief

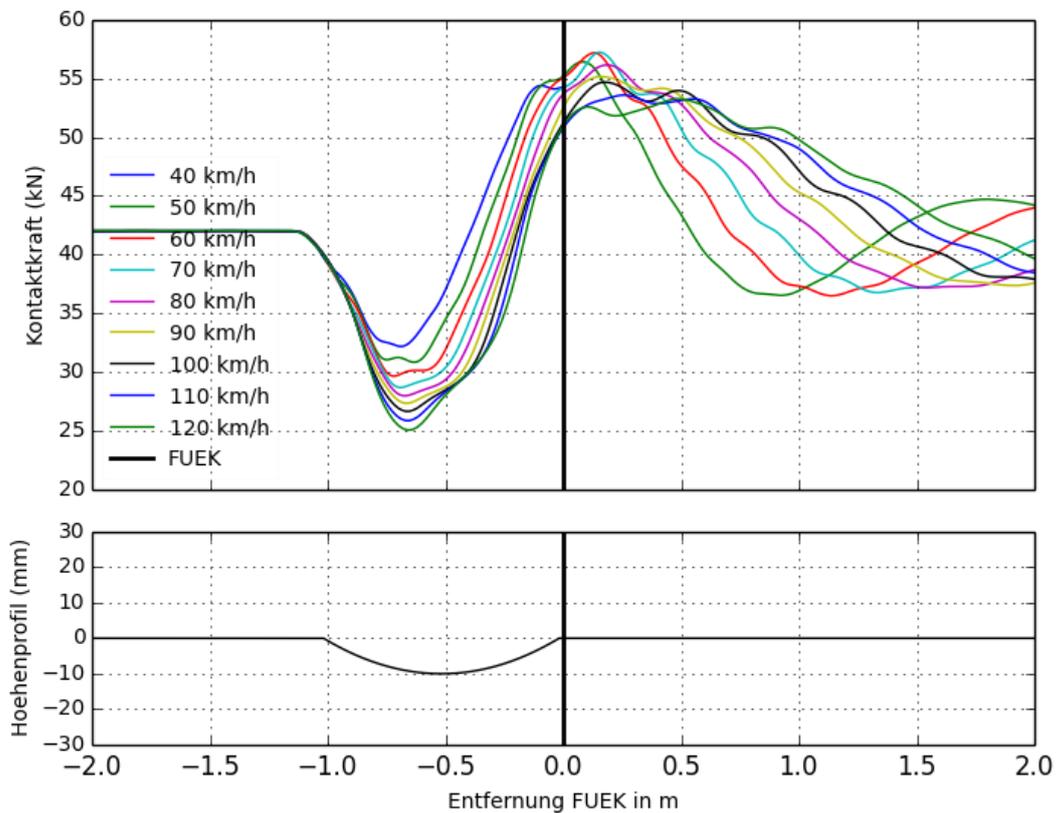


Abbildung 57 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten Mulde 10mm

Anmerkungen:

Die dynamische Last ist in einem Bereich von 50 bis 80 km/h relativ konstant. Auffällig ist die sinkende Last bei höheren Geschwindigkeiten.

Tabelle 24 Ergebnisse Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten Mulde 10mm

	FTire								
	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h	110 km/h	120 km/h
Statische Last	42,0 kN								
Maximale dynamische Last	54,4 kN	56,4 kN	57,2 kN	57,2 kN	56,2 kN	55,2 kN	54,7 kN	53,6 kN	53,3 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,30	1,34	1,36	1,36	1,34	1,31	1,30	1,28	1,27
Minimale dynamische Last	32,2 kN	30,8 kN	29,6 kN	28,7 kN	28,0 kN	27,2 kN	26,6 kN	25,8 kN	25,0 kN

7.5 Verschiedene Gewichte an ausgewählten Höhenverläufen

7.5.1 Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut

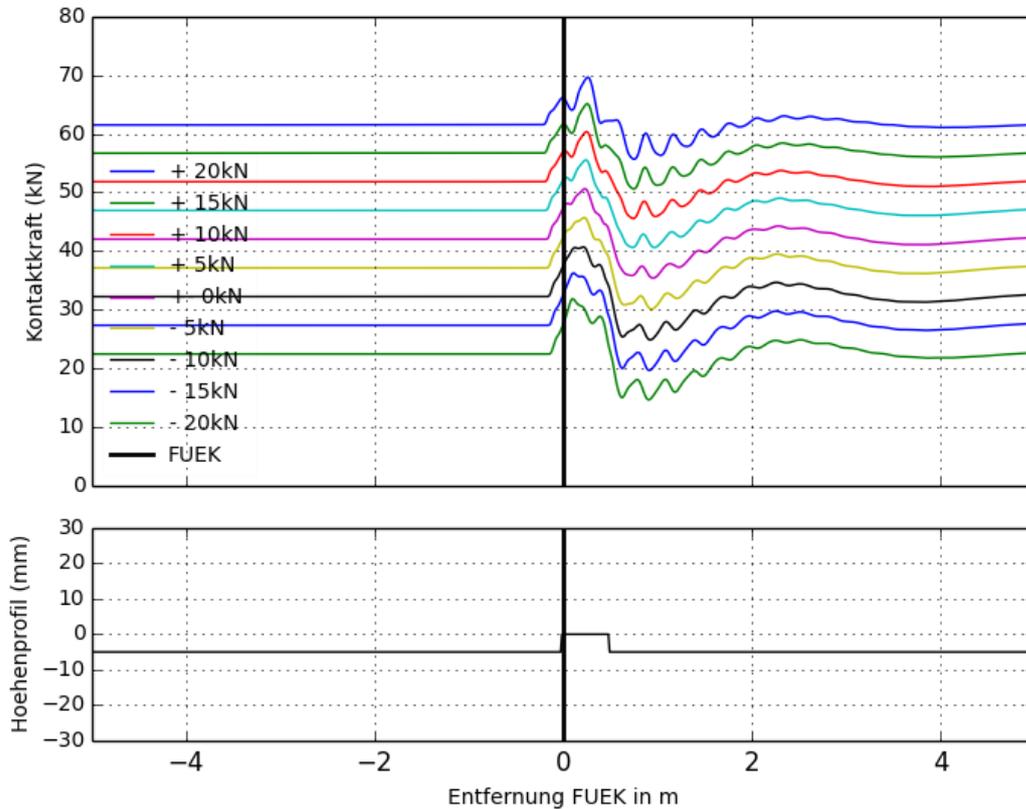


Abbildung 58 Ergebnisse Vergleich verschiedener Gewichte FÜK +5mm

Anmerkungen:

Mit steigender statischer Last sinken die dynamische Lasterhöhungsfaktoren und auch die dynamische Lasterhöhung, die gesamte dynamische Last steigt erwartungsgemäß.

Tabelle 25 Ergebnisse Vergleich verschiedener Gewichte FÜK +5mm

	FTire								
	42 -20kN	42 -15kN	42 -10kN	42 -5kN	42 +0kN	42 +5kN	42 +10kN	42 +15kN	42 +20kN
Statische Last	22,0 kN	27,0 kN	32,0 kN	37,0 kN	42,0 kN	47,0 kN	52,0 kN	57,0 kN	62,0 kN
Maximale dynamische Last	31,8 kN	36,2 kN	40,7 kN	45,7 kN	50,6 kN	55,5 kN	60,4 kN	65,1 kN	69,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,45	1,34	1,27	1,24	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12
Minimale dynamische Last	14,6 kN	19,6 kN	25,2 kN	30,6 kN	35,4 kN	40,6 kN	45,6 kN	50,7 kN	55,7 kN

7.5.2 Mulde 10 mm tief

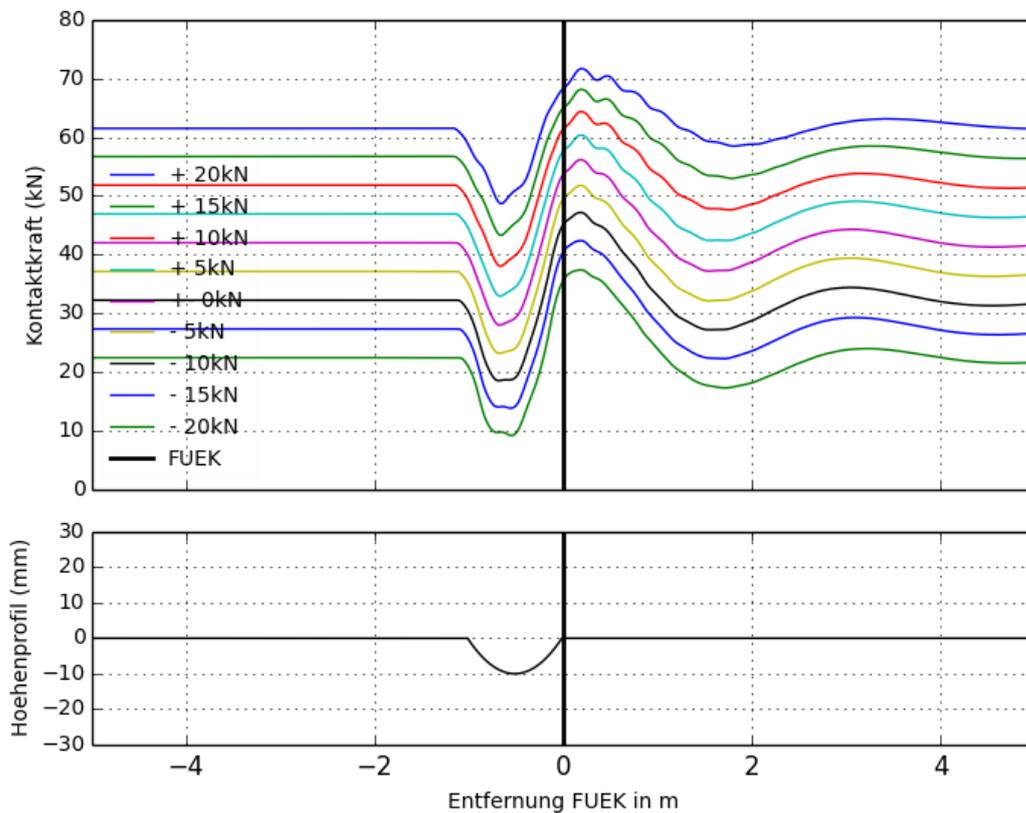


Abbildung 59 Vergleich verschiedener Gewichte Mulde 10 mm tief

Anmerkungen:

Mit steigender statischer Last sinken die dynamische Lasterhöhungsfaktoren und auch die dynamische Lasterhöhung, die gesamte dynamische Last steigt erwartungsgemäß.

Tabelle 26 Ergebnisse Vergleich verschiedener Gewichte Mulde 10 mm tief

	FTire								
	42 -20kN	42 -15kN	42 -10kN	42 -5kN	42 +0kN	42 +5kN	42 +10kN	42 +15kN	42 +20kN
Statische Last	22,0 kN	27,0 kN	32,0 kN	37,0 kN	42,0 kN	47,0 kN	52,0 kN	57,0 kN	62,0 kN
Maximale dynamische Last	37,4 kN	42,4 kN	47,1 kN	51,7 kN	56,2 kN	60,3 kN	64,3 kN	68,2 kN	71,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,70	1,57	1,47	1,40	1,34	1,28	1,24	1,20	1,16
Minimale dynamische Last	9,1 kN	13,8 kN	18,5 kN	23,2 kN	28,0 kN	32,9 kN	38,1 kN	43,3 kN	48,7 kN

8 Auswertung der Simulationen

8.1 Statistische Auswertung gemessene Höhenverläufe [6]

8.1.1 Simulationsergebnisse ohne Aufteilung nach Bautypen

In Tabelle 29 bis Tabelle 31 sind die Daten der in Abbildung 60 bis Abbildung 62 dargestellten Histogramme angeführt. Die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind sieben Klassen der Breite $b_j = 0,2$ zugeordnet, wobei die Klassenbreite nach Scott ermittelt wurde. Den Histogrammen sind die Dichtefunktionen einer Normalverteilung und einer Lognormalverteilung, mit den aus der Stichprobe (siehe Tabelle 27 und Tabelle 28) gewonnenen Schätzer für den Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit, überlagert. Die Form der Histogramme deutet bei allen Programmen auf eine rechtsschiefe Verteilung hin. Eine Besonderheit ist die bimodale Verteilung der Dymola – Simulation im Histogramm (siehe Abbildung 62), die jedoch bei Variation der Klassengrenzen verschwindet. Bei den Ergebnissen der ANSYS – Simulationen taucht dieser Effekt bei Halbierung der Klassenbreite auf. Diese Bimodalität könnte ein Hinweis auf die Überlagerung zweier Verteilungen (z. Bsp. verschiedene Konstruktionsarten) mit unterschiedlichen Parametern sein.

Tabelle 27 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	1,50	1,31	1,50
Standardabweichung	s	0,273	0,177	0,282

Tabelle 28 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	0,39	0,26	0,39
Standardabweichung	s	0,180	0,135	0,184

Tabelle 29 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS

Nr. j	Klasse K_j	Häufigkeiten $n(K_j)$	$f(K_j)$	Klassenbreite b_j	Klassenhöhe h_j
1	[1,0; 1,2]	13	0,127	0,2	0,635
2	[1,2; 1,4]	28	0,275	0,2	1,375
3	[1,4; 1,6]	23	0,225	0,2	1,125
4	[1,6; 1,8]	21	0,206	0,2	1,030
5	[1,8; 2,0]	13	0,127	0,2	0,635
6	[2,0; 2,2]	2	0,020	0,2	0,100
7	[2,2; 2,4]	2	0,020	0,2	0,100

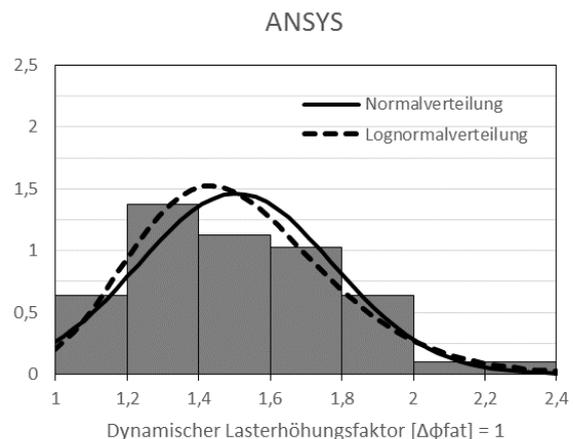


Abbildung 60 Histogramm ANSYS

Tabelle 30 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire

Nr.	Klasse	Häufigkeiten	Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,0; 1,2]	32	0,2	1,570
2	[1,2; 1,4]	40	0,2	1,960
3	[1,4; 1,6]	26	0,2	1,275
4	[1,6; 1,8]	3	0,2	1,450
5	[1,8; 2,0]	1	0,2	0,050
6	[2,0; 2,2]	0	0,2	0,000
7	[2,2; 2,4]	0	0,2	0,000

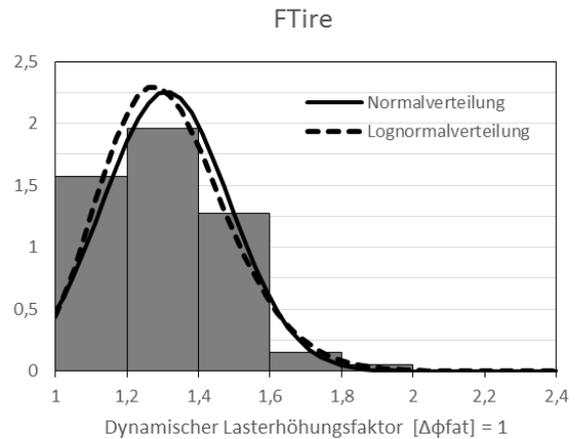


Abbildung 61 Histogramm FTire

Tabelle 31 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola

Nr.	Klasse	Häufigkeiten	Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,0; 1,2]	15	0,2	0,780
2	[1,2; 1,4]	27	0,2	1,405
3	[1,4; 1,6]	16	0,2	0,835
4	[1,6; 1,8]	24	0,2	1,250
5	[1,8; 2,0]	11	0,2	0,575
6	[2,0; 2,2]	1	0,2	0,050
7	[2,2; 2,4]	2	0,2	0,105

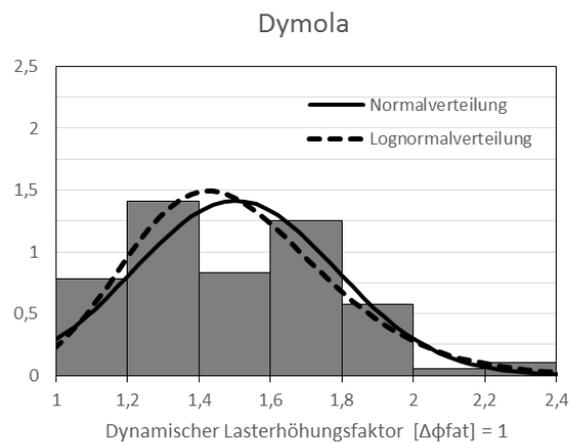


Abbildung 62 Histogramm Dymola

8.1.1.1 Test auf Normalverteilung der Ergebnisse

8.1.1.1.1 QQ-Plot

In den in Abbildung 63 bis Abbildung 65 dargestellten Q-Q Plots werden die Werte der Simulationen den Erwartungswerten einer Normalverteilung mit den in Tabelle 27 angeführten Parametern gegenübergestellt. Diese Plots zeigen, dass eine Normalverteilung der Daten gegeben sein kann. Im Randbereich nimmt jedoch die Abweichung zu.

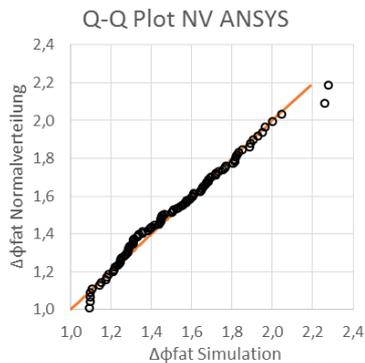


Abbildung 63 Q-Q Plot Ansys; Vergleich Normalverteilung

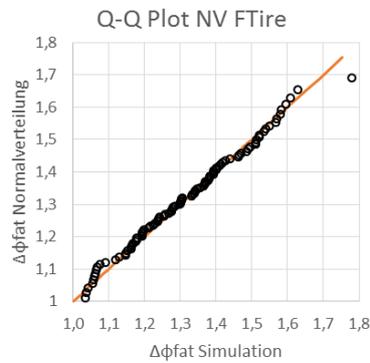


Abbildung 64 Q-Q Plot Ftire; Vergleich Normalverteilung

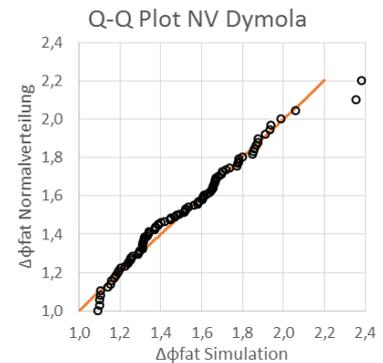


Abbildung 65 Q-Q Plot Dymola; Vergleich Normalverteilung

8.1.1.1.2 KS-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 27 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels KS – Test ermittelte Wert der Teststatistik d_n kleiner als der kritische Wert $d_{\alpha=0,05}$ ist. In Abbildung 66 sind die empirischen Verteilungsfunktionen und die Verteilungsfunktionen der geschätzten Normalverteilung mit den 5% Signifikanzgrenzen dargestellt.

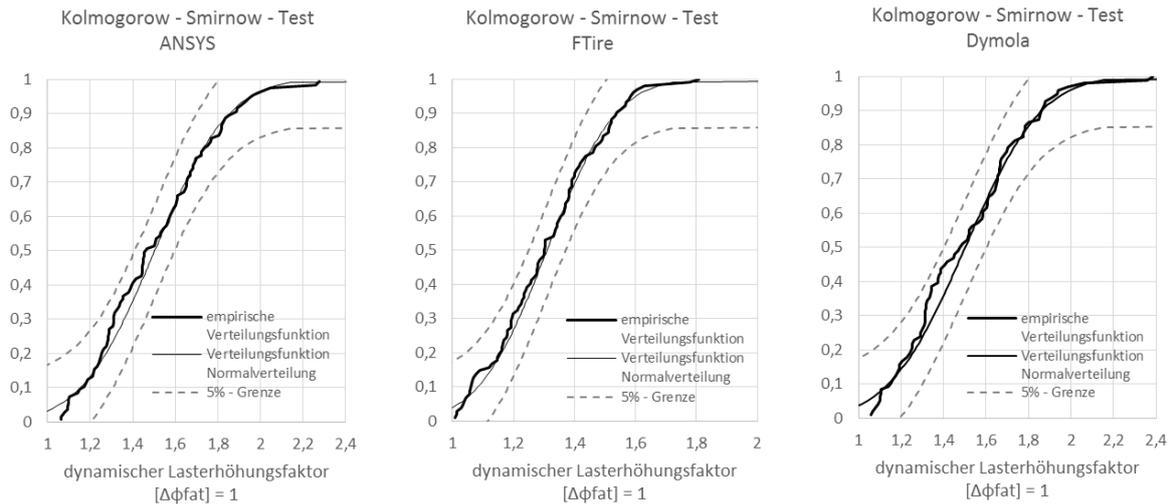


Abbildung 66 Verteilungsfunktionen, die empirische Verteilungsfunktionen liegen innerhalb der 5% Signifikanzgrenzen der Normalverteilung, a) ANSYS, b) FTire, c) Dymola

ANSYS	FTire	Dymola
$d_n: 0,0802 < d_{\alpha=0,05}: 0,1345$	$d_n: 0,0615 < d_{\alpha=0,05}: 0,1345$	$d_n: 0,1091 < d_{\alpha=0,05}: 0,1386$
H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.

Auf Basis des KS – Tests wird die Nullhypothese, eine Normalverteilung der Daten, nicht abgelehnt. Die Ablehnungsgrenzen sind mit ca. +- 13% Abweichung von der angenommenen Verteilungsfunktion jedoch relativ weit gesteckt, somit wird zusätzlich ein Shapiro-Wilk-Test durchgeführt.

8.1.1.1.3 Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 27 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: $0,0223 < \alpha: 0,05$	p-Wert: $0,0899 > \alpha: 0,05$	p-Wert: $0,0045 < \alpha: 0,05$
H₀ wird abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird abgelehnt.

Aufgrund des p-Wertes, der niedriger als das gewählte Signifikanzniveau ist, wird die Nullhypothese, eine Normalverteilung der Ergebnisse, bei den ANSYS- und Dymola-

Simulationen abgelehnt. Im Gegensatz dazu kann eine Normalverteilung der FTire – Simulation bei gegebenen Signifikanzniveau nicht ausgeschlossen werden.

8.1.1.2 Test auf Normalverteilung der logarithmierten Ergebnisse

8.1.1.2.1 QQ-Plot

In den in Abbildung 67 bis Abbildung 69 dargestellten Q-Q Plots werden die logarithmierten Werte der Simulationen den logarithmierten Erwartungswerten einer Lognormalverteilung mit den in Tabelle 28 angeführten Parametern gegenübergestellt. Diese Plots zeigen, dass eine Lognormalverteilung der Daten gegeben sein kann.

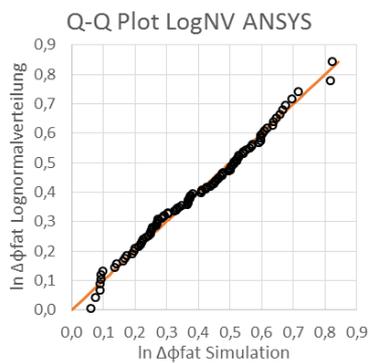


Abbildung 67 Q-Q Plot Ansys; Vergleich Lognormalverteilung

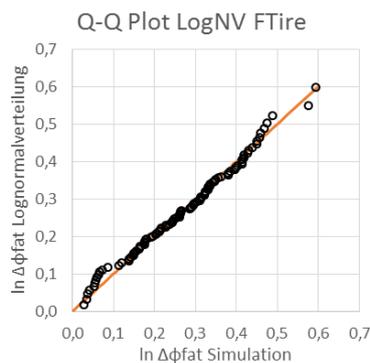


Abbildung 68 Q-Q Plot Ftire; Vergleich Lognormalverteilung

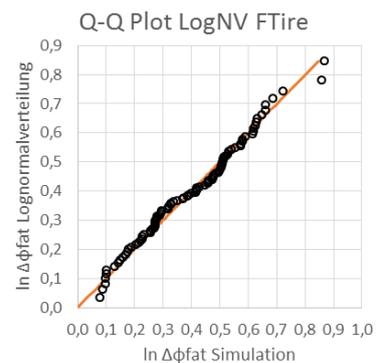


Abbildung 69 Q-Q Plot Dymola; Vergleich Lognormalverteilung

8.1.1.2.2 KS-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 28 angeführten Parametern lognormalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht lognormalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels KS – Test ermittelte Wert der Teststatistik d_n kleiner als der kritische Wert $d_{\alpha=0,05}$ ist. In Abbildung 70 sind die empirischen Verteilungsfunktionen und die Verteilungsfunktionen der geschätzten Normalverteilung mit den 5% Signifikanzgrenzen dargestellt.

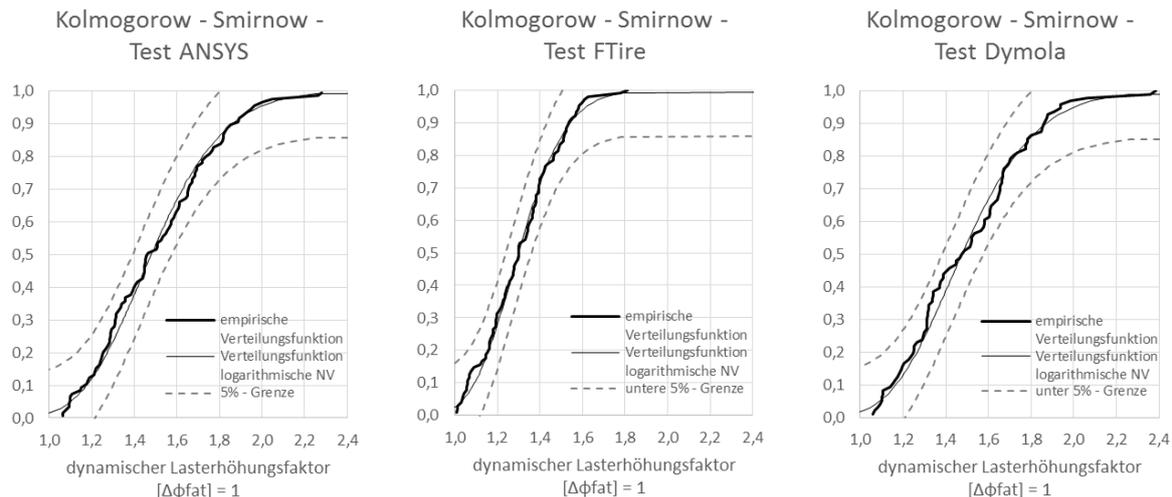


Abbildung 70 Verteilungsfunktionen Kragfinger, die empirische Verteilungsfunktionen liegen innerhalb der 5% Signifikanzgrenzen der Lognormalverteilung, a) ANSYS, b) FTire, c) Dymola

ANSYS	FTire	Dymola
$d_n: 0,0694 < d_{\alpha=0,05}: 0,1345$	$d_n: 0,0655 < d_{\alpha=0,05}: 0,1345$	$d_n: 0,0923 < d_{\alpha=0,05}: 0,1386$
H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.

Auf Basis des KS – Tests wird die Nullhypothese, eine Lognormalverteilung der Daten, nicht abgelehnt. Die Ablehnungsgrenzen sind mit ca. +- 13% Abweichung von der angenommenen Verteilungsfunktion jedoch relativ weit gesteckt, somit wird zusätzlich ein Shapiro-Wilk-Test durchgeführt.

8.1.1.2.3 Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 28 angeführten Parametern lognormalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht lognormalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: $0,1799 > \alpha: 0,05$	p-Wert: $0,1867 > \alpha: 0,05$	p-Wert: $0,0934 > \alpha: 0,05$
H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei keiner Simulationsreihe abgelehnt. Die p-Werte sind im Vergleich zur Annahme einer Normalverteilung durchwegs höher und somit ein Hinweis auf die bessere Beschreibung der Daten durch eine Lognormalverteilung.

8.1.2 Simulationsergebnisse mit Aufteilung nach Bautypen

8.1.2.1 Modulare Dehnfuge

In Tabelle 34 bis Tabelle 36 sind die Daten der in Abbildung 71 bis Abbildung 73 dargestellten Histogramme angeführt. Die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind sieben Klassen zugeordnet, wobei die Klassenbreiten jeweils nach Scott ermittelt wurde. Den Histogrammen sind die Dichtefunktionen einer Normalverteilung und einer Lognormalverteilung, mit den aus der Stichprobe (siehe Tabelle 32 und Tabelle 33) gewonnenen Schätzer für den Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit, überlagert. Insgesamt sind 30 (ANSYS und FTire) bzw. 28 (Dymola) Datensätze dieses Konstruktionstypes vorhanden.

Tabelle 32 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	1,64	1,38	1,65
Standardabweichung	s	0,250	0,166	0,276

Tabelle 33 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	0,49	0,32	0,49
Standardabweichung	s	0,146	0,111	0,158

Tabelle 34 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS

Nr. j	Klasse K_j	Häufigkeiten $n(K_j)$	$f(K_j)$	Klassenbreite b_j	Klassenhöhe h_j
1	[1,0; 1,3]	2	0,067	0,3	0,222
2	[1,3; 1,6]	13	0,433	0,3	1,444
3	[1,6; 1,9]	11	0,367	0,3	1,222
4	[1,9; 2,2]	2	0,067	0,3	0,222
5	[2,2; 2,5]	2	0,067	0,3	0,222
6	[2,5; 2,8]	0	0,000	0,3	0,000
7	[2,8; 3,1]	0	0,000	0,3	0,000
Σ		30			

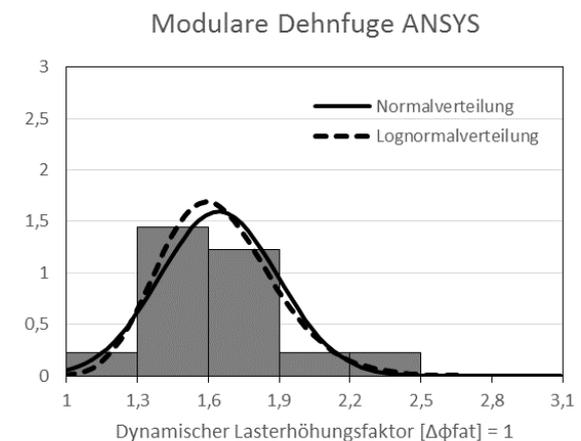


Abbildung 71 Histogramm ANSYS

Tabelle 35 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	$f(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,0; 1,2]	4	0,133	0,2	0,667
2	[1,2; 1,4]	15	0,500	0,2	2,500
3	[1,4; 1,6]	9	0,300	0,2	1,500
4	[1,6; 1,8]	1	0,033	0,2	0,167
5	[1,8; 2,0]	1	0,033	0,2	0,167
6	[2,0; 2,2]	0	0,000	0,2	0,000
7	[2,2; 2,4]	0	0,000	0,2	0,000
Σ		30			

Modulare Dehnfuge FTire

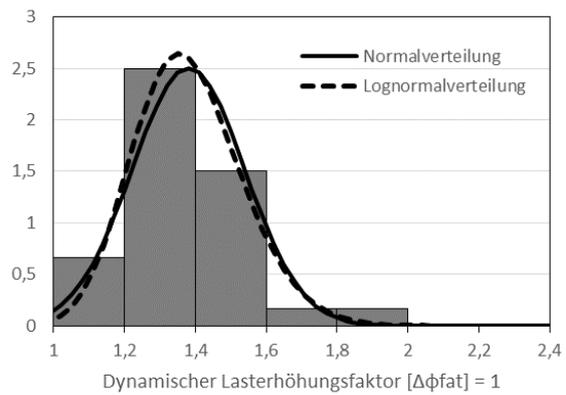


Abbildung 72 Histogramm FTire

Tabelle 36 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	$f(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,0; 1,3]	1	0,036	0,3	0,119
2	[1,3; 1,6]	12	0,429	0,3	1,429
3	[1,6; 1,9]	11	0,393	0,3	1,310
4	[1,9; 2,2]	2	0,071	0,3	0,238
5	[2,2; 2,5]	2	0,071	0,3	0,238
6	[2,5; 2,8]	0	0,000	0,3	0,000
7	[2,8; 3,1]	0	0,000	0,3	0,000
Σ		28			

Modulare Dehnfuge Dymola

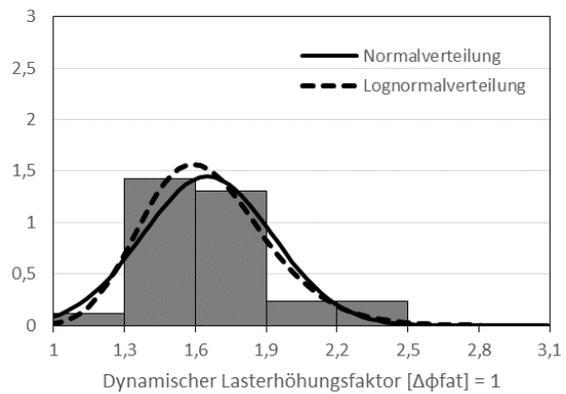


Abbildung 73 Histogramm Dymola

8.1.2.1.1 Test auf Normalverteilung der Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 32 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: 0,0754 > α : 0,05	p-Wert: 0,0215 < α : 0,05	p-Wert: 0,0181 < α : 0,05
H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird abgelehnt.	H_0 wird abgelehnt.

Aufgrund des p-Wertes, der niedriger als das gewählte Signifikanzniveau ist, wird die Nullhypothese, eine Normalverteilung der Ergebnisse, bei den FTire- und Dymola-

Simulationen abgelehnt. Im Gegensatz dazu kann eine Normalverteilung der ANSYS – Simulation bei gegebenen Signifikanzniveau nicht ausgeschlossen werden.

8.1.2.1.2 Test auf Normalverteilung der logarithmierten Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 33 angeführten Parametern lognormalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht lognormalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: 0,4928 > α : 0,05	p-Wert: 0,1380 > α : 0,05	p-Wert: 0,2342 > α : 0,05
H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei keiner Simulationsreihe abgelehnt. Die p-Werte sind im Vergleich zur Annahme einer Normalverteilung durchwegs höher und somit ein Hinweis auf die bessere Beschreibung der Daten durch eine Lognormalverteilung.

8.1.2.2 Gleitfingerkonstruktion

In Tabelle 39 bis Tabelle 41 sind die Daten der in Abbildung 74 bis Abbildung 76 dargestellten Histogramme angeführt. Die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind sieben Klassen zugeordnet, wobei die Klassenbreiten jeweils nach Scott ermittelt wurde. Den Histogrammen sind die Dichtefunktionen einer Normalverteilung und einer Lognormalverteilung, mit den aus der Stichprobe (siehe Tabelle 37 und Tabelle 38) gewonnen Schätzer für den Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit, überlagert. Insgesamt sind 16 (ANSYS und FTire) bzw. 14 (Dymola) Datensätze dieses Konstruktionstypes vorhanden.

Tabelle 37 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	1,66	1,43	1,66
Standardabweichung	s	0,252	0,147	0,255

Tabelle 38 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	0,50	0,35	0,50
Standardabweichung	s	0,159	0,106	0,158

Tabelle 39 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS

Nr.	Klasse	Häufigkeiten	Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,0; 1,3]	2	0,3	0,417
2	[1,3; 1,6]	4	0,3	0,833
3	[1,6; 1,9]	8	0,3	1,667
4	[1,9; 2,2]	2	0,3	0,417
5	[2,2; 2,5]	0	0,3	0,000
6	[2,5; 2,8]	0	0,3	0,000
7	[2,8; 3,1]	0	0,3	0,000
Σ		16		

Gleitfingerkonstruktion ANSYS

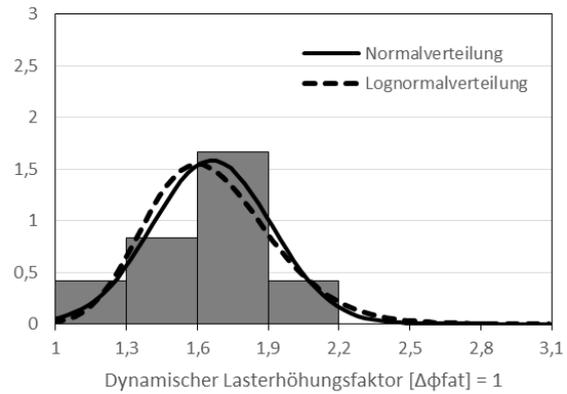


Abbildung 74 Histogramm ANSYS

Tabelle 40 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire

Nr.	Klasse	Häufigkeiten	Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,0; 1,2]	2	0,2	0,625
2	[1,2; 1,4]	4	0,2	1,250
3	[1,4; 1,6]	9	0,2	2,813
4	[1,6; 1,8]	1	0,2	0,313
5	[1,8; 2,0]	0	0,2	0,000
6	[2,0; 2,2]	0	0,2	0,000
7	[2,2; 2,4]	0	0,2	0,000
Σ		16		

Gleitfingerkonstruktion FTire

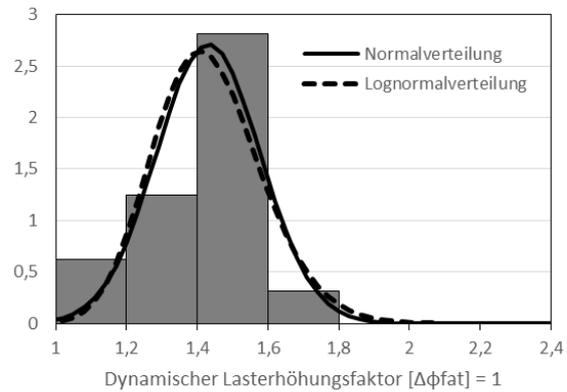


Abbildung 75 Histogramm FTire

Tabelle 41 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola

Nr.	Klasse	Häufigkeiten	Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,0; 1,3]	1	0,3	0,238
2	[1,3; 1,6]	5	0,3	1,190
3	[1,6; 1,9]	6	0,3	1,429
4	[1,9; 2,2]	2	0,3	0,476
5	[2,2; 2,5]	0	0,3	0,000
6	[2,5; 2,8]	0	0,3	0,000
7	[2,8; 3,1]	0	0,3	0,000
Σ		14		

Gleitfingerkonstruktion Dymola

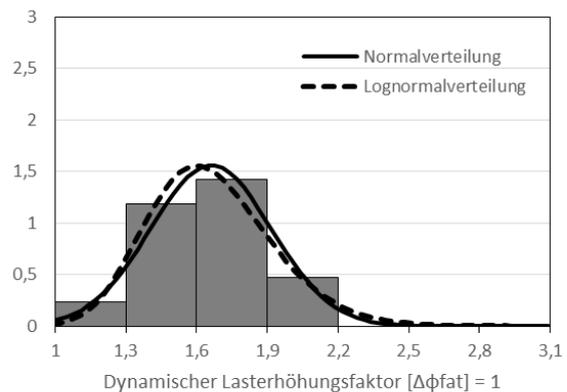


Abbildung 76 Histogramm Dymola

8.1.2.2.1 Test auf Normalverteilung der Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 37 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: 0,5263 > α : 0,05	p-Wert: 0,1130 > α : 0,05	p-Wert: 0,6287 > α : 0,05
H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei keiner Simulationsreihe abgelehnt. Die p-Werte sind im Vergleich zur Annahme einer Lognormalverteilung durchwegs höher und somit ein Hinweis auf die bessere Beschreibung der Daten durch eine Lognormalverteilung. Diese Annahme spiegelt sich auch in den Histogrammen (Abbildung 74 bis Abbildung 76) wieder.

8.1.2.2.2 Test auf Normalverteilung der logarithmierten Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 38 angeführten Parametern lognormalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht lognormalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: 0,2808 > α : 0,05	p-Wert: 0,0766 > α : 0,05	p-Wert: 0,4932 > α : 0,05
H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei keiner Simulationsreihe abgelehnt. Es wird also eine Lognormalverteilung bei gegebenen Signifikanzniveau von 5% nicht ausgeschlossen. Die p-Werte liegen jedoch unter jener der Normalverteilung.

8.1.2.3 Kragfingerkonstruktion

In Tabelle 44 bis Tabelle 46 sind die Daten der in Abbildung 77 bis Abbildung 79 dargestellten Histogramme angeführt. Die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind sieben Klassen zugeordnet, wobei die Klassenbreiten jeweils nach Scott ermittelt wurde. Den Histogrammen sind die Dichtefunktionen einer Normalverteilung und einer Lognormalverteilung, mit den aus der Stichprobe (siehe Tabelle 42 und Tabelle 43) gewonnenen Schätzer für den Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit, überlagert. Insgesamt sind 46 (ANSYS und FTire) bzw. 44 (Dymola) Datensätze dieses Konstruktionstypes vorhanden.

Tabelle 42 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	1,28	1,19	1,29
Standardabweichung	s	0,228	0,161	0,241

Tabelle 43 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	0,23	0,17	0,35
Standardabweichung	s	0,172	0,130	0,179

Tabelle 44 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS

Nr. j	Klasse K_j	Häufigkeiten		Klassenbr. b_j	Klassenhöhe h_j
		$n(K_j)$	$f(K_j)$		
1	[1,00; 1,25]	19	0,413	0,25	1,652
2	[1,25; 1,50]	14	0,304	0,25	1,217
3	[1,50; 1,75]	12	0,261	0,25	1,043
4	[1,75; 2,00]	1	0,022	0,25	0,087
5	[2,00; 2,25]	0	0,000	0,25	0,000
6	[2,25; 2,50]	0	0,000	0,25	0,000
7	[2,50; 2,75]	0	0,000	0,25	0,000
Σ		46			

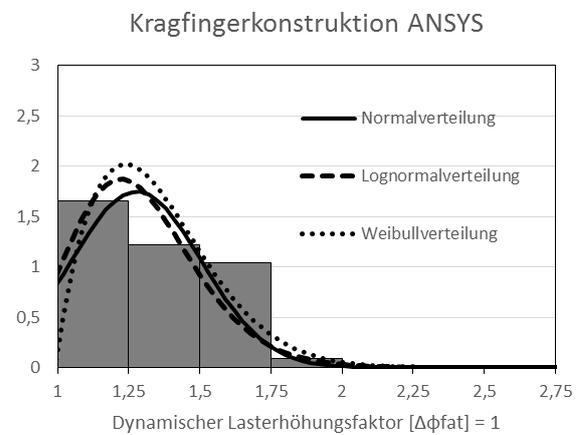


Abbildung 77 Histogramm ANSYS

Tabelle 45 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbr.	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	$f(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,00; 1,15]	19	0,413	0,15	2,754
2	[1,15; 1,30]	13	0,283	0,15	1,884
3	[1,30; 1,45]	10	0,217	0,15	1,449
4	[1,45; 1,60]	4	0,087	0,15	0,580
5	[1,60; 1,75]	0	0,000	0,15	0,000
6	[1,75; 1,90]	0	0,000	0,15	0,000
7	[1,90; 2,05]	0	0,000	0,15	0,000
Σ		46			

Kragfingerkonstruktion FTire

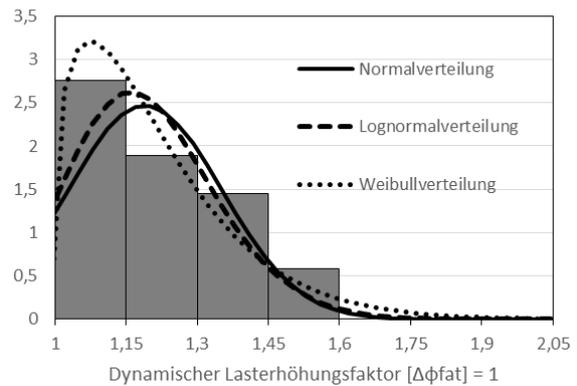


Abbildung 78 Histogramm FTire

Tabelle 46 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbr.	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	$f(K_j)$	b_j	h_j
1	[1,00; 1,25]	18	0,409	0,25	1,636
2	[1,25; 1,50]	14	0,318	0,25	1,273
3	[1,50; 1,75]	11	0,250	0,25	1,000
4	[1,75; 2,00]	1	0,023	0,25	0,091
5	[2,00; 2,25]	0	0,000	0,25	0,000
6	[2,25; 2,50]	0	0,000	0,25	0,000
7	[2,50; 2,75]	0	0,000	0,25	0,000
Σ		44			

Kragfingerkonstruktion Dymola

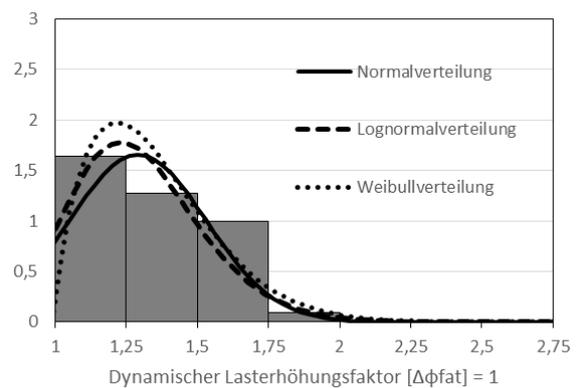


Abbildung 79 Histogramm Dymola

8.1.2.3.1 Test auf Normalverteilung der Ergebnisse

8.1.2.3.1.1 KS-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 42 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels KS – Test ermittelte Wert der Teststatistik d_n kleiner als der kritische Wert $d_{\alpha=0,05}$ ist. In Abbildung 80 sind die empirischen Verteilungsfunktionen und die Verteilungsfunktionen der geschätzten Normalverteilung mit den 5% Signifikanzgrenzen dargestellt. Da die empirische Verteilungsfunktion zum Teil außerhalb der Signifikanzgrenzen liegt, ist eine Normalverteilung abzulehnen.

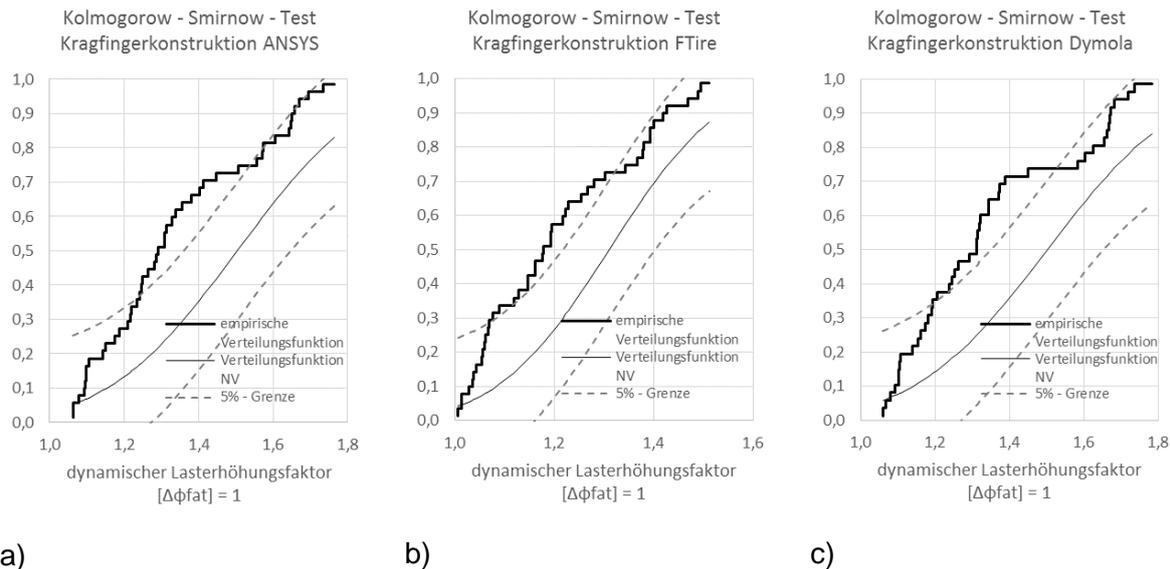


Abbildung 80 Verteilungsfunktionen Kragfinger, die empirische Verteilungsfunktionen liegen ausserhalb der 5% Signifikanzgrenzen der Normalverteilung, a) ANSYS, b) FTire, c) Dymola

ANSYS	FTire	Dymola
$d_n: 0,3250 > d_{\alpha=0,05}: 0,2002$	$d_n: 0,2969 > d_{\alpha=0,05}: 0,2002$	$d_n: 0,3715 > d_{\alpha=0,05}: 0,2047$
H₀ wird abgelehnt.	H₀ wird abgelehnt.	H₀ wird abgelehnt.

Auf Basis des KS – Tests wird die Nullhypothese, eine Normalverteilung der Daten, verworfen.

8.1.2.3.1.2 Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 42 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: $0,0052 < \alpha: 0,05$	p-Wert: $0,0049 < \alpha: 0,05$	p-Wert: $0,0007 < \alpha: 0,05$
H₀ wird abgelehnt.	H₀ wird abgelehnt.	H₀ wird abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei allen Simulationsreihen abgelehnt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des KS – Tests.

8.1.2.3.2 Test auf Normalverteilung der logarithmierten Ergebnisse

8.1.2.3.2.1 KS-Test

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: 0,0174 < α : 0,05	p-Wert: 0,0102 < α : 0,05	p-Wert: 0,0029 < α : 0,05
H₀ wird abgelehnt.	H₀ wird abgelehnt.	H₀ wird abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei allen Simulationsreihen abgelehnt. Es ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse einer anderen Verteilung folgen.

8.1.2.3.3 Verteilungsanpassung Weibull

Aufgrund der Tatsache, dass die Verteilung linksseitig bei Eins begrenzt sein muss, da der kleinste dynamische Lasterhöhungsfaktor nicht unter eins fallen kann, und die in Abbildung 77 bis Abbildung 79 dargestellten Histogramme auf eine Konzentration der Werte nahe bei Eins vermuten lassen, wird an die Simulationsergebnisse der Kragfingerkonstruktionen eine Weibullverteilung mittels der Maximum – Likelihood Schätzung angepasst. Da die Weibullverteilung bei Null und nicht bei Eins begrenzt ist, wird von den Simulationsergebnissen Eins abgezogen um die Parameter (Tabelle 47) der Verteilung zu bestimmen.

Tabelle 47 Parameter der angepassten Weibullverteilung

	ANSYS	FTire	Dymola
Formparameter	1,7368	1,2963	1,6367
Skalenparameter	0,3908	0,2288	0,3893

8.1.2.3.4 Test Weibullverteilung

8.1.2.3.4.1 QQ-Plot

In Abbildung 82 bis Abbildung 84 sind sämtliche Q-Q-Plots der Simulationsergebnisse dargestellt. Unter Annahme einer Weibull-verteilten Grundgesamtheit (siehe Abbildung 82 c); Abbildung 83 c) und Abbildung 84 c)) sinken die Abweichungen der Stichprobe im niedrigen und mittleren Wertebereich im Vergleich zur Annahme einer normalverteilten (siehe Abbildung 82 a); Abbildung 83 a) und Abbildung 84 a)) oder lognormalverteilten (siehe Abbildung 82 b); Abbildung 83 b) und Abbildung 84 b)) Grundgesamtheit. Bei hohen Werten bleibt eine relativ große Abweichung bestehen.

sind die empirischen Verteilungsfunktionen und die Verteilungsfunktionen der geschätzten Normalverteilung mit den 5% Signifikanzgrenzen des KS-Tests dargestellt. Die empirische Verteilungsfunktion liege innerhalb der 5% - Signifikanzgrenzen. Somit ist eine Weibullverteilung der Daten nicht zu verwerfen.

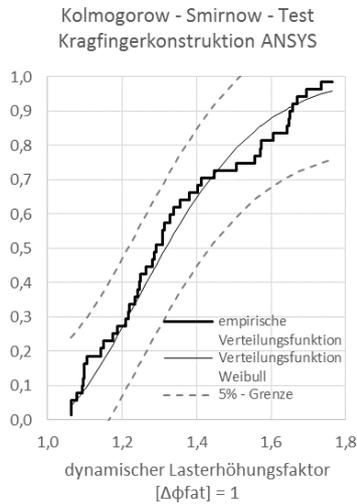


Abbildung 85
Verteilungsfunktionen
ANSYS

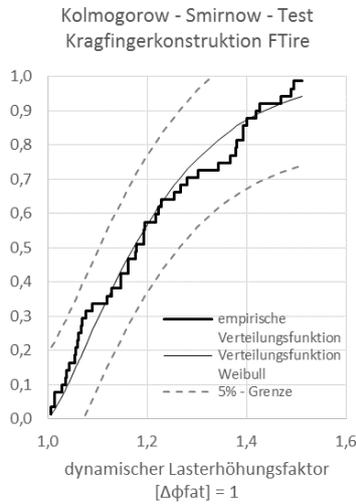


Abbildung 86
Verteilungsfunktionen FTire

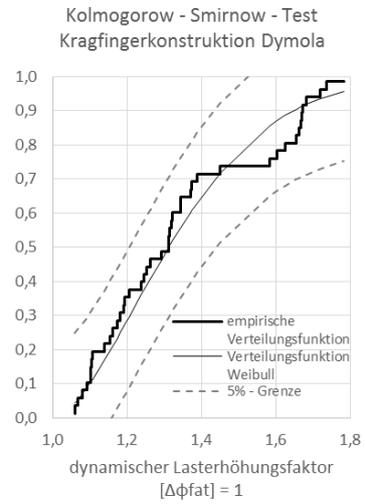


Abbildung 87
Verteilungsfunktionen
Dymola

ANSYS	FTire	Dymola
$d_n: 0,1147 < d_{\alpha=0,05}: 0,2002$	$d_n: 0,1146 < d_{\alpha=0,05}: 0,2002$	$d_n: 0,1192 < d_{\alpha=0,05}: 0,2047$
H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.	H₀ wird nicht abgelehnt.

Auf Basis des KS – Tests wird die Nullhypothese, eine Weibullverteilung der Daten, nicht abgelehnt. Die Ablehnungsgrenzen sind mit ca. +- 20% Abweichung von der angenommenen Verteilungsfunktion jedoch relativ weit gesteckt.

8.1.2.4 Sonstige Typen

Aufgrund der geringen Anzahl von Belagsdehnfugen, Profil- und Unterflurkonstruktion sind diese in einer Gruppe zusammengefasst. Die Stichprobe umfasst zehn Profile. In Tabelle 50 bis Tabelle 52 sind die Daten der in Abbildung 88 bis Abbildung 90 dargestellten Histogramme angeführt. Die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind sieben Klassen zugeordnet, wobei die Klassenbreiten jeweils nach Scott ermittelt wurde. Den Histogrammen sind die Dichtefunktionen einer Normalverteilung und einer Lognormalverteilung, mit den aus der Stichprobe (siehe Tabelle 48 und Tabelle 49) gewonnenen Schätzer für den Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit, überlagert

Tabelle 48 Mittelwert und Standardabweichung der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	1,55	1,36	1,54
Standardabweichung	s	0,266	0,144	0,232

Tabelle 49 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	0,42	0,30	0,42
Standardabweichung	s	0,165	0,102	0,147

Tabelle 50 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbr.	Klassenhöhe
		$n(K_j)$	$f(K_j)$		
j	K_j			b_j	h_j
1	[1,0; 1,4]	4	0,400	0,4	1,000
2	[1,4; 1,8]	4	0,400	0,4	1,000
3	[1,8; 2,2]	2	0,200	0,4	0,500
4	[2,2; 2,6]	0	0,000	0,4	0,000
5	[2,6; 3,0]	0	0,000	0,4	0,000
6	[3,0; 3,4]	0	0,000	0,4	0,000
7	[3,4; 3,8]	0	0,000	0,4	0,000
		Σ	10		

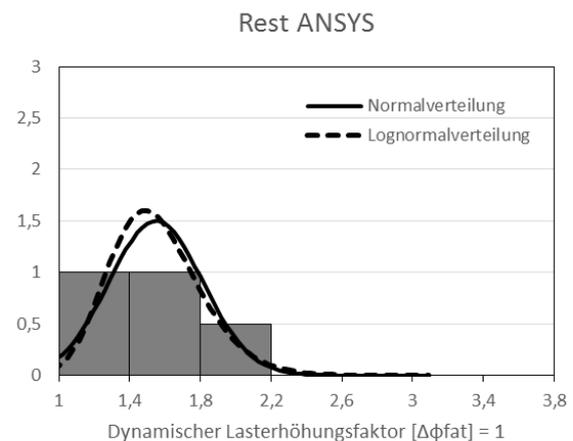


Abbildung 88 Histogramm ANSYS

Tabelle 51 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbr.	Klassenhöhe
j	K _j	n(K _j)	f(K _j)	b _j	h _j
1	[1,00; 1,25]	3	0,300	0,25	1,200
2	[1,25; 1,50]	5	0,500	0,25	2,000
3	[1,50; 1,75]	2	0,200	0,25	0,800
4	[1,75; 2,00]	0	0,000	0,25	0,000
5	[2,00; 2,25]	0	0,000	0,25	0,000
6	[2,25; 2,50]	0	0,000	0,25	0,000
7	[2,50; 2,75]	0	0,000	0,25	0,000
Σ		10			

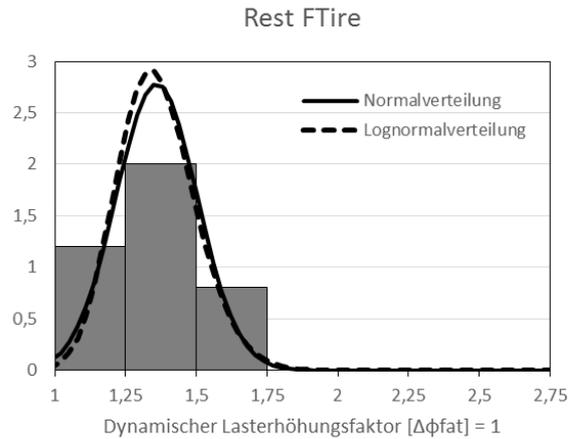


Abbildung 89 Histogramm FTire

Tabelle 52 Daten Histogramm der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbr.	Klassenhöhe
j	K _j	n(K _j)	f(K _j)	b _j	h _j
1	[1,00; 1,25]	4	0,400	0,25	1,000
2	[1,25; 1,50]	4	0,400	0,25	1,000
3	[1,50; 1,75]	2	0,200	0,25	0,500
4	[1,75; 2,00]	0	0,000	0,25	0,000
5	[2,00; 2,25]	0	0,000	0,25	0,000
6	[2,25; 2,50]	0	0,000	0,25	0,000
7	[2,50; 2,75]	0	0,000	0,25	0,000
Σ		10			

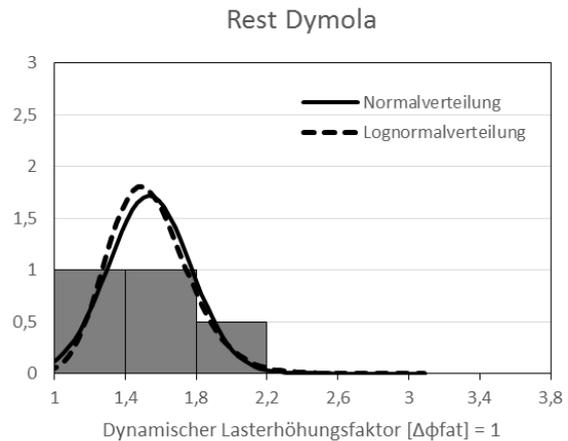


Abbildung 90 Histogramm Dymola

8.1.2.4.1 Test auf Normalverteilung der Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 48 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: 0,0867 > α : 0,05	p-Wert: 0,0698 > α : 0,05	p-Wert: 0,1662 > α : 0,05
H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei keiner der Simulationsreihen abgelehnt.

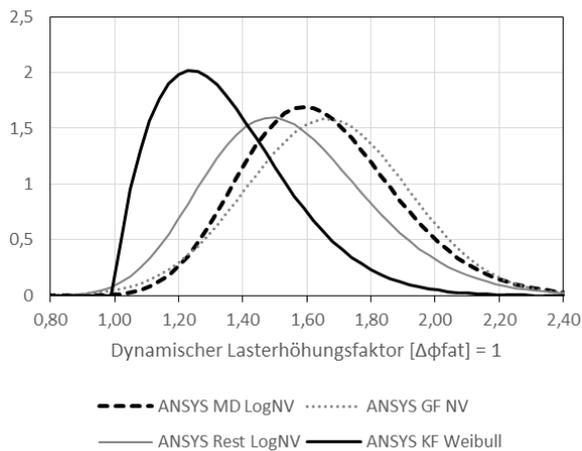
8.1.2.4.2 Test auf Normalverteilung der logarithmierten Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 49 angeführten Parametern lognormalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht lognormalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

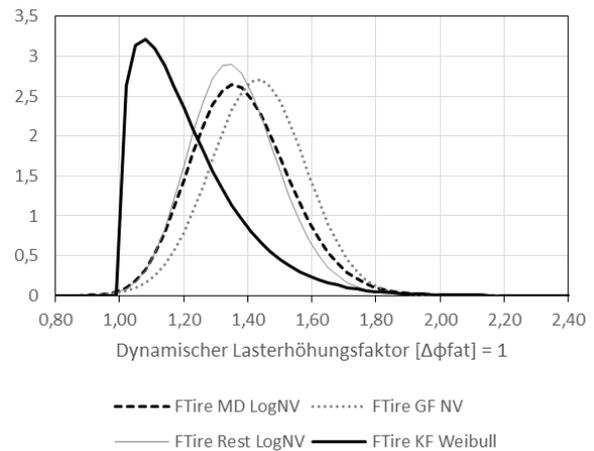
ANSYS	FTire	Dymola
p-Wert: 0,1272 > α : 0,05	p-Wert: 0,1180 > α : 0,05	p-Wert: 0,2379 > α : 0,05
H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.	H_0 wird nicht abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei keiner Simulationsreihe abgelehnt. Die p-Werte sind im Vergleich zur Annahme einer Normalverteilung durchwegs höher und somit ein Hinweis auf die bessere Beschreibung der Daten durch eine Lognormalverteilung, wenn auch der Stichprobenumfang relativ klein ist.

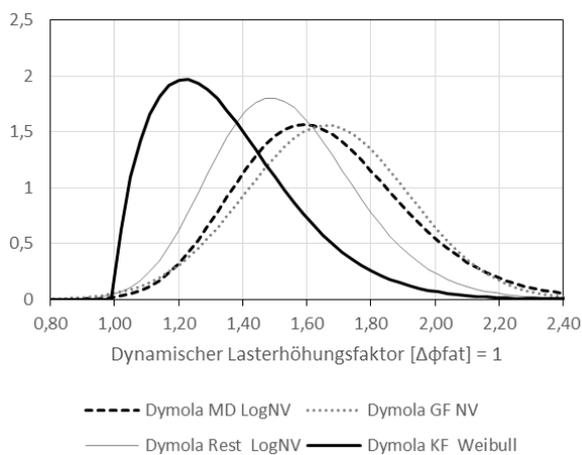
8.1.2.5 Vergleich aller Konstruktionstypen



a) ANSYS



b) FTire



c) Dymola

Abbildung 91 Vergleich dynamische Lasterhöhungsfaktoren der Konstruktionstypen; ANSYS: a); FTire: b); Dymola: c); Modulardehnfuge (MD), Gleitfingerkonstruktion (GF), Kragfingerkonstruktion (KF), Sonstige Typen (Rest)

In Abbildung 91 sind die Verteilungen der Simulationsergebnisse (Lagemaße siehe Tabelle 53 bis Tabelle 55), getrennt nach der verwendeten Simulationssoftware, der einzelnen Konstruktionstypen dargestellt. Es zeigt sich, dass Kragfingerübergänge deutlich niedrigere dynamische Lasterhöhungsfaktoren und somit dynamische Lasten aufweisen, als die restlichen Kostruktionstypen, wie Gleitfingerkonstruktionen und Modulardehnfugen. Ein möglicher Grund für das bessere Abschneiden der Kragfingerkonstruktion im Vergleich zur Modulardehnfuge könnte die glattere Oberfläche sein, die bei Überfahrt den nachfolgenden Fahrbahnbelag mit einer geringeren dynamischen Last beansprucht und somit zu geringeren Verformungen der Deckschicht führt. Diese Verformungen des Fahrbahnbelages führen zu höheren dynamischen Lasten. Eine weitere Möglichkeit könnte eine unterschiedliche Altersstruktur der Konstruktionstypen sein. Da die Baujahre der Konstruktionen nicht vollständig vorliegen, ist hier keine Aussage möglich.

Tabelle 53 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS

	Anzahl	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum	Verteilung
Modular Dehnfuge	30	1,25	1,46	1,60	1,80	2,28	Lognormal
Gleifingerkonstruktion	14	1,18	1,45	1,73	1,82	2,05	Normal
Kragfingerkonstruktion	46	1,06	1,19	1,30	1,54	1,77	Weibull
Restliche Konstruktionsarten	10	1,29	1,32	1,48	1,68	2,00	Lognormal

Tabelle 54 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire

	Anzahl	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum	Verteilung
Modular Dehnfuge	30	1,15	1,28	1,35	1,46	1,81	Lognormal
Gleifingerkonstruktion	14	1,16	1,33	1,49	1,54	1,61	Normal
Kragfingerkonstruktion	46	1,01	1,07	1,19	1,36	1,51	Weibull
Restliche Konstruktionsarten	10	1,21	1,24	1,34	1,38	1,63	Lognormal

Tabelle 55 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola

	Anzahl	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum	Verteilung
Modular Dehnfuge	28	1,25	1,48	1,61	1,79	2,38	Lognormal
Gleifingerkonstruktion	14	1,23	1,46	1,74	1,84	2,06	Normal
Kragfingerkonstruktion	44	1,06	1,17	1,31	1,59	1,78	Weibull
Restliche Konstruktionsarten	10	1,29	1,34	1,50	1,64	1,94	Lognormal

8.1.3 Horizontalkräfte

In Tabelle 58 und Tabelle 59 sind die Daten der in Abbildung 92 und Abbildung 93 dargestellten Histogramme angeführt. Die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind sieben Klassen der Breite $b_j = 1,0$ kN (FTire) bzw. $b_j = 0,2$ kN (Dymola) zugeordnet, wobei die Klassenbreite nach Scott ermittelt wurde. Den Histogrammen sind die Dichtefunktionen einer Normalverteilung und einer Lognormalverteilung, mit den aus der Stichprobe (siehe Tabelle 56 und Tabelle 57) gewonnenen Schätzer für den Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit, überlagert. Da die Simulationen mittels ANSYS keine Horizontalkräfte liefern, sind nur die FTire – und Dymola – Ergebnisse angeführt, des Weiteren ist pro Fahrbahnübergang nur die Horizontalkraft der linken Spur berücksichtigt, da die Horizontalkräfte der linken und rechten Spur so gut als wie identisch sind. Die FTire – Simulationen lieferten 50 Ergebnisse, die Dymola – Simulationen 47 Ergebnisse.

Tabelle 56 Mittelwert und Standardabweichung der Horizontalkräfte

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	-	3,00 kN	0,32 kN
Standardabweichung	s	-	1,513 kN	0,307 kN

Tabelle 57 Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten Horizontalkräfte

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	-	0,94	-1,41
Standardabweichung	s	-	0,682	0,832

Tabelle 58 Daten Histogramm der Horizontalkräfte FTire

Nr. j	Klasse K_j	Häufigkeiten $n(K_j)$	$f(K_j)$	Klassenbreite b_j	Klassenhöhe h_j
1	[0,0; 1,0]	2	0,040	1,0	0,040
2	[1,0; 2,0]	10	0,200	1,0	0,200
3	[2,0; 3,0]	18	0,360	1,0	0,360
4	[3,0; 4,0]	7	0,140	1,0	0,140
5	[4,0; 5,0]	7	0,140	1,0	0,140
6	[5,0; 6,0]	3	0,060	1,0	0,060
7	[6,0; 7,0]	3	0,060	1,0	0,060
Σ		50			

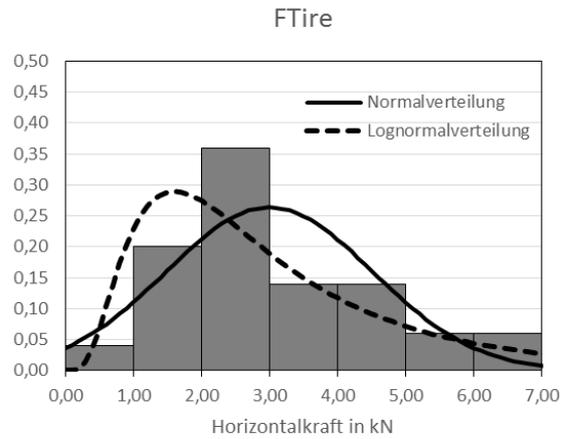


Abbildung 92 Histogramm Horizontalkräfte FTire

Tabelle 59 Daten Histogramm der Horizontalkräfte Dymola

Nr. j	Klasse K_j	Häufigkeiten $n(K_j)$	$f(K_j)$	Klassenbreite b_j	Klassenhöhe h_j
1	[0,0; 0,2]	20	0,426	0,2 kN	2,128
2	[0,2; 0,4]	13	0,277	0,2 kN	1,383
3	[0,4; 0,6]	5	0,106	0,2 kN	0,532
4	[0,6; 0,8]	3	0,064	0,2 kN	0,319
5	[0,8; 1,0]	3	0,064	0,2 kN	0,319
6	[1,0; 1,2]	2	0,043	0,2 kN	0,213
7	[1,2; 1,4]	1	0,021	0,2 kN	0,106
Σ		47			

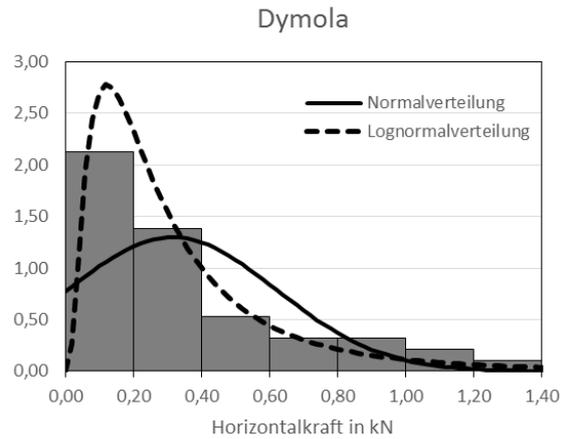


Abbildung 93 Histogramm Horizontalkräfte Dymola

8.1.3.1 Test auf Normalverteilung der Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 56 angeführten Parametern normalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
_____	p-Wert: 0,0449 < α : 0,05	p-Wert: <0,0001 < α : 0,05
	H_0 wird abgelehnt.	H_0 wird abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei allen Simulationsreihen unter gegebenen Signifikanzniveau abgelehnt.

8.1.3.2 Test auf Normalverteilung der logarithmierten Ergebnisse mittels Shapiro-Wilk-Test

Die Nullhypothese H_0 lautet, die Grundgesamtheit der dynamischen Lasterhöhungen ist mit den in Tabelle 57 angeführten Parametern lognormalverteilt. Die Alternativhypothese H_1 lautet, die Grundgesamtheit ist nicht lognormalverteilt. Das Signifikanzniveau α ist mit 5% festgelegt. Die Nullhypothese H_0 wird nicht abgelehnt, wenn der mittels Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau ist.

ANSYS	FTire	Dymola
_____	p-Wert: <0,0001 < α : 0,05	p-Wert: 0,0002 < α : 0,05
	H_0 wird abgelehnt.	H_0 wird abgelehnt.

Die Nullhypothese wird bei allen Simulationsreihen unter gegebenen Signifikanzniveau abgelehnt. Die Daten folgen einer anderen Verteilung, auf deren Bestimmung verzichtet wird.

8.1.3.3 Regressionsanalyse Dymola – FTire

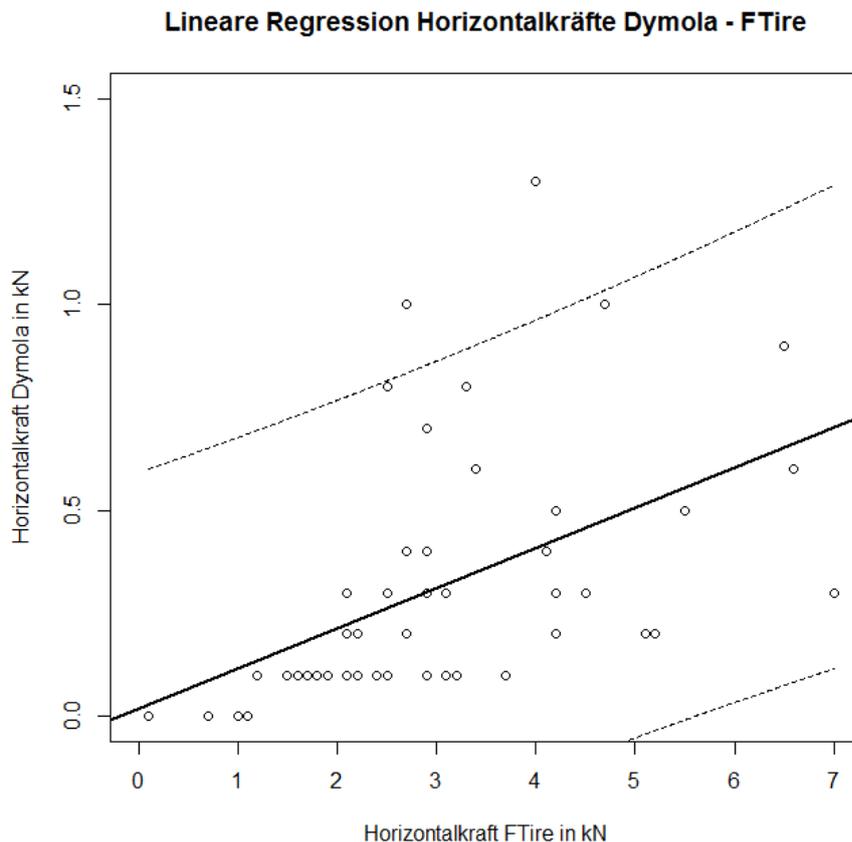


Abbildung 94 QQ Plot Horizontalkräfte FTire - Dymola mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)

Abbildung 94 zeigt den QQ – Plot der Horizontalkräfte und die Regressionsgerade (dicke Linie) mit den Grenzen des 95% Konfidenzintervalls (strichlierte Linie). Folgendes Regressionsmodell wurde angenommen:

$$F_{Dymola} = \alpha + \beta * F_{FTire} + \epsilon$$

Wobei α und β die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 60), ϵ den Fehler, F_{Dymola} die Horizontalkraft Dymola und F_{FTire} die Horizontalkraft FTire darstellen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 24% (siehe Tabelle 60), man kann also nur 24% der Varianz der Horizontalkraft F_{Dymola} durch das verwendete Regressionsmodell erklären. Als Grund für den niedrigen Wert sind die Unterschiede in den LKW – Modellen bzw. den Reifen – Modellen zu nennen, die verschiedenen Ansätzen folgen (siehe Kapitel 6) und unterschiedlich auf die Höhenverläufe reagieren.

Tabelle 60 Koeffizienten der linearen Regression

	α	β	R^2
FTire – Dymola	0,01984	0,09752	0,243

8.2 Entfernung des maximalen dynamischen Lasterhöhungsfaktors von der Fahrbahnübergangskonstruktion

Abbildung 96 bis Abbildung 98 zeigen die in Tabelle 62 bis Tabelle 64 angeführten Histogramme der Entfernungen der maximalen Lasterhöhungen von den Fahrbahnübergängen. Abbildung 95 stellt die Ergebnisse der Simulationen, unter Annahme einer Normalverteilung der Daten (siehe Tabelle 61), einander gegenüber. Es zeigt sich, dass der Großteil der Maxima hinter den Fahrbahnübergängen liegen, also nicht unbedingt an den Konstruktionen auftreten müssen. Die Maximalwerte wurden in einem Bereich von +/- 4m den Fahrbahnübergangskonstruktionen zugeordnet, Maximalwerte in größerer Entfernung wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 61 Mittelwert und Standardabweichung der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen

		ANSYS	FTire	Dymola
Mittelwert	m	0,950	1,18	1,07
Standardabweichung	s	1,296	1,402	1,267

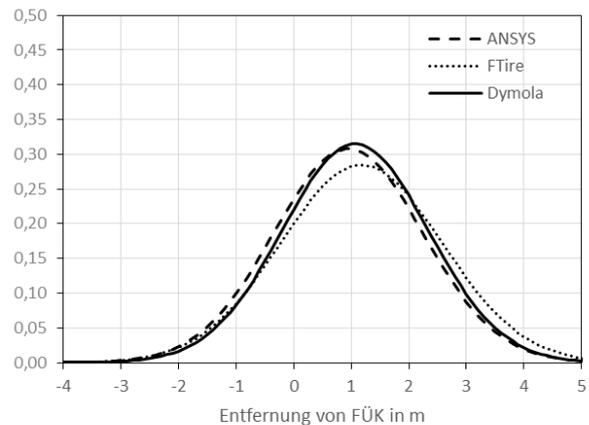


Abbildung 95 Verteilungen Entfernung maximale Lasterhöhung von FÜK

Tabelle 62 Daten Histogramm der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen ANSYS

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	$f(K_j)$	b_j	h_j
1	[-4; -3]	0	0,000	1,0	0,000
2	[-3; -2]	2	0,020	1,0	0,020
3	[-2; -1]	5	0,049	1,0	0,049
4	[-1; 0]	15	0,147	1,0	0,147
5	[0; 1]	31	0,304	1,0	0,304
6	[1; 2]	28	0,275	1,0	0,275
7	[2; 3]	13	0,127	1,0	0,127
8	[3; 4]	8	0,078	1,0	0,078
9	[4; 5]	0	0,000	1,0	0,000

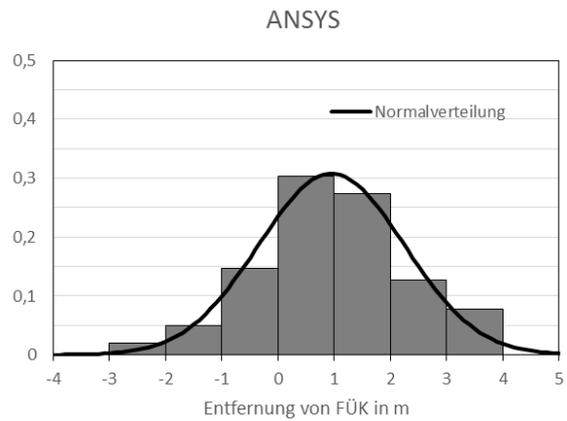


Abbildung 96 Histogramm Entfernung ANSYS

Tabelle 63 Daten Histogramm der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen FTire

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	$f(K_j)$	b_j	h_j
1	[-4; -3]	0	0,000	1,0	0,000
2	[-3; -2]	4	0,039	1,0	0,039
3	[-2; -1]	2	0,020	1,0	0,020
4	[-1; 0]	13	0,127	1,0	0,127
5	[0; 1]	23	0,225	1,0	0,225
6	[1; 2]	37	0,363	1,0	0,363
7	[2; 3]	13	0,127	1,0	0,127
8	[3; 4]	10	0,098	1,0	0,098
9	[4; 5]	0	0,000	1,0	0,000

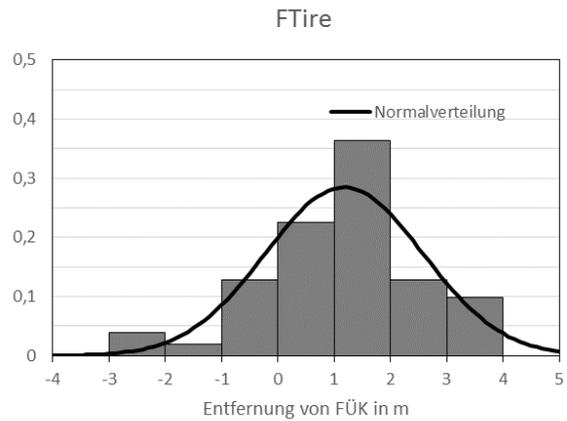


Abbildung 97 Histogramm Entfernung ANSYS

Tabelle 64 Daten Histogramm der Entfernungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren von den Fahrbahnübergängen Dymola

Nr.	Klasse	Häufigkeiten		Klassenbreite	Klassenhöhe
j	K_j	$n(K_j)$	$f(K_j)$	b_j	h_j
1	[-4; -3]	0,00	0,000	1,0	0,000
2	[-3; -2]	2,00	0,021	1,0	0,021
3	[-2; -1]	4,00	0,042	1,0	0,042
4	[-1; 0]	10,00	0,104	1,0	0,104
5	[0; 1]	27,00	0,281	1,0	0,281
6	[1; 2]	32,00	0,333	1,0	0,333
7	[2; 3]	13,00	0,135	1,0	0,135
8	[3; 4]	8,00	0,083	1,0	0,083
9	[4; 5]	0,00	0,000	1,0	0,000

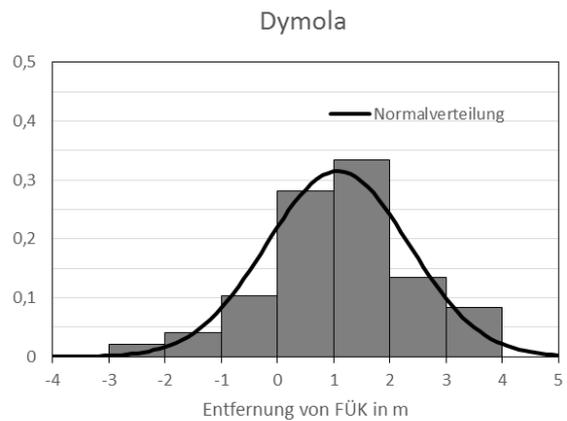
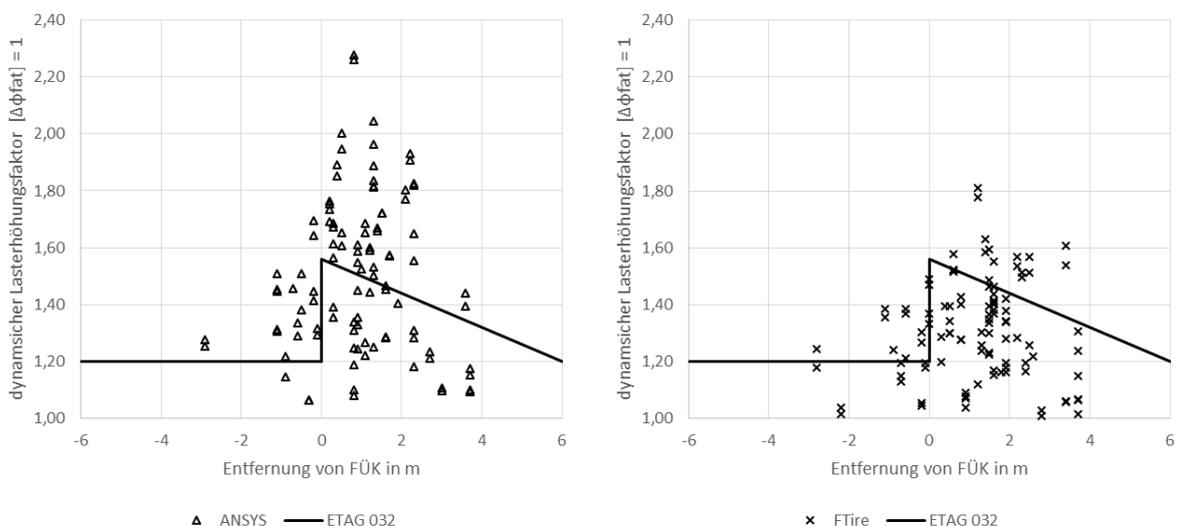


Abbildung 98 Histogramm Entfernung ANSYS

Abbildung 99 zeigt die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren und deren Auftretungsort der ANSYS (a) und der FTire (b) Simulationen. Bei dieser Abbildungen entspricht die Volllinie den Vorgaben der ETAG 032 [7], die den zusätzlichen dynamischen Lasterhöhungsfaktor ($\Delta\varphi_{fat} = 1,3$) in Abhängigkeit zur Entfernung von den Fahrbahnübergängen setzt, der zusätzlich zu einen dynamischen Lasterhöhungsfaktor ($\varphi_{fat} = 1,2$, bereits im Lastmodell enthalten und gültig für gute Fahrbahnqualität) zur Anwendung kommt.

Abbildung 100 hingegen zeigt die dynamische Last und den Auftretungsort, wieder jeweils für die ANSYS (a) und der FTire (b) Simulationen. In diesem Fall entspricht die Volllinie der dynamischen Last des Lastmodells FLM1_{EJ} der ETAG 032 [7] unter Berücksichtigung der oben genannten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren.

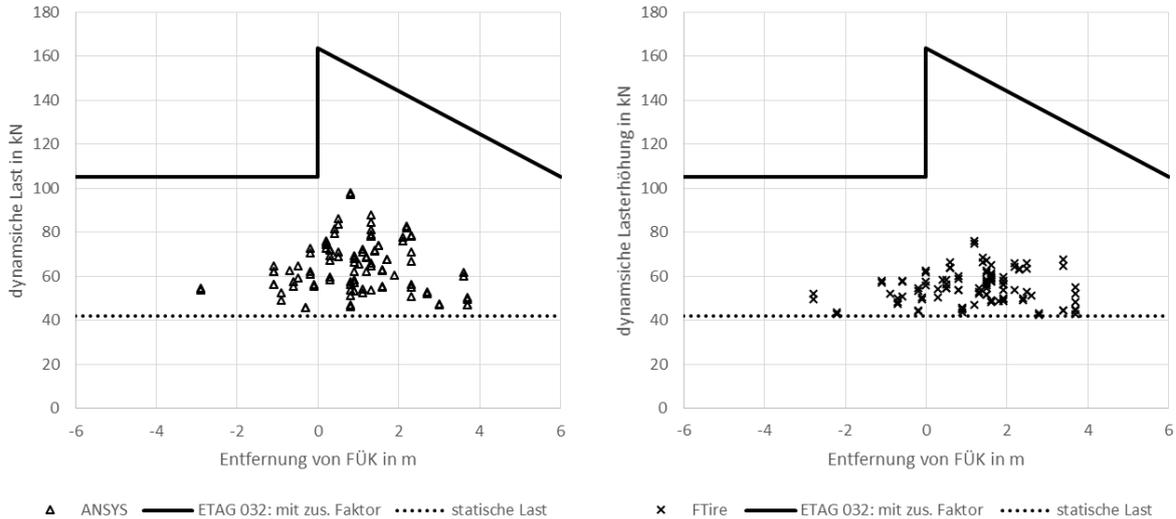
Der Ansatz der ETAG 032 [7], einen variablen zusätzlichen dynamischen Lasterhöhungsfaktor, Abhängig von der Entfernung zur Fahrbahnübergangskonstruktion, einzuführen, ist ein guter Ansatz und kann in den Simulationsergebnissen wiedergefunden werden. Die Annahme, dass der zusätzliche dynamische Faktor ab einer Entfernung von 6 m zur Konstruktion auf $\Delta\varphi_{fat} = 1,0$ sinkt, kann bestätigt werden, da ab dieser Entfernung die dynamischen Lasten mit Sicherheit nicht mehr dem Fahrbahnübergang zuzuordnen sind. Wie bei den Simulationen an idealisierten Höhenverläufen (siehe 7.2) gezeigt, wirken heftige Diskontinuitäten im Profil maximal ca. 4,0 m nach, der Großteil der dynamischen Lasterhöhung ist bereits nach 1,5 m abgeklungen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Dymola – Ergebnisse mit den ANSYS – Simulationen wurde auf die Darstellung der Dymola – Simulationen in der Abbildung 99 und der Abbildung 100 verzichtet.



a)

b)

Abbildung 99 Dynamische Lasterhöhungsfaktoren und ihr Auftretungsort, a) ANSYS, b) FTire; Volllinie: dynamischer Lasterhöhungsfaktor nach ETAG 032



a)

b)

Abbildung 100 Dynamische Last und ihr Auftretensort, a) ANSYS, b) FTire; Volllinie: dynamische Last nach ETAG 032

8.3 Vergleich der Ergebnisse mit der aktuellen Normung

8.3.1 Dynamische Lasterhöhungsfaktoren

Es werden die vorgegebenen dynamischen Lasterhöhungsfaktoren der Normen mit den an die Simulationsergebnisse angepassten (siehe 8.1.1) Lognormalverteilungen verglichen. In Abbildung 101 sind die Verteilungsfunktionen der an die empirischen Lasterhöhungsfaktoren angepassten Lognormalverteilung und die Vorgaben der Normung dargestellt. Die Vorgabe der ETAG 032 [7] (siehe Kapitel 5.1.2) für den Faktor ($\varphi_{fat} * \Delta\varphi_{fat} = 1,2 * 1,3 = 1,56$) wird von 39% (ANSYS), 9% (FTire) und 38% (Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten. Auch die Vorgabe der RVS 15.04.51 (siehe 5.1.1) von 1,4 für den Faktor wird von 62% (ANSYS), 29% (FTire) und 61% (Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten. Legt man zur Bestimmung des Design – Wertes der dynamischen Last zur Auslegung einer Fahrbahnübergangskonstruktion einen dynamischen Lasterhöhungsfaktor zugrunde, der von 95% der Fahrbahnübergangskonstruktionen unterschritten wird, so muss ein Wert des Lasterhöhungsfaktors von 2,00 (ANSYS und Dymola) bzw. 1,62 (FTire) herangezogen werden.

Der Vergleich der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ist jedoch problematisch, da eine starke Abhängigkeit des Betrages der Faktoren von der Höhe der statischen Last besteht. Bei steigender statischer Last sinkt der dynamische Lasterhöhungsfaktor (siehe Kapitel 8.8, [1], [16], [3]). Da die statischen Lasten der Ermüdungslastmodelle der Normen mit +22 kN (RVS 15.04.51) und +62 kN (ETAG 032) wesentlich über jenen der simulierten LKW-Modelle liegen, ist rein der Vergleich der Lasterhöhungsfaktoren wenig aussagekräftig.

Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

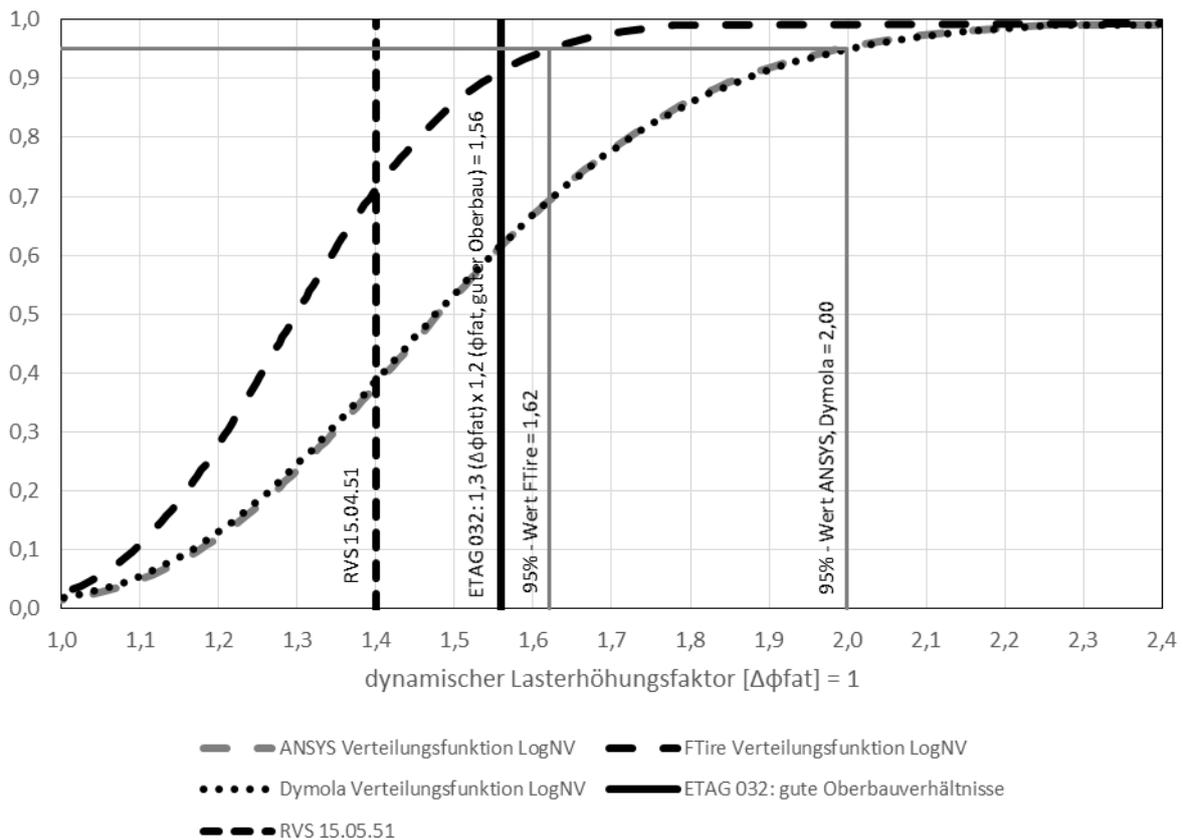


Abbildung 101 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren im Vergleich zur Normung

8.3.2 Dynamische Lasterhöhung

In Abbildung 102 sind die Verteilungsfunktionen der an die empirischen Lasterhöhungsfaktoren angepassten Lognormalverteilung (siehe Kapitel 8.1.1), multipliziert mit den statischen Lasten und die Vorgaben der Normung dargestellt. Die Vorgabe der ETAG 032 [7] von 136,5 kN für die dynamische Last wird von weniger als 0,1% (ANSYS, FTire und Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten. Auch die Vorgabe der RVS 15.04.51 [17] von 91 kN für die dynamische Last wird von 2% (ANSYS), weniger als 0,1% (FTire) und 2% (Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten. Die höheren Vertikallasten des FLM1_{EJ} Lastmodells der ETAG 032 [7] sollten bei Verwendung eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer hervorrufen.

Die dynamischen Lasten der Simulationen ergeben sich rein aus dem Verlauf des Höhenprofils, welches als starr angenommen wurde. Etwaige Dämpfungen aufgrund von Verformungen der Fahrbahnübergangskonstruktionen oder zusätzliche dynamische Lasten aufgrund von Resonanzen ([19], [16], [20]) konnten nicht simuliert werden.

Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasten

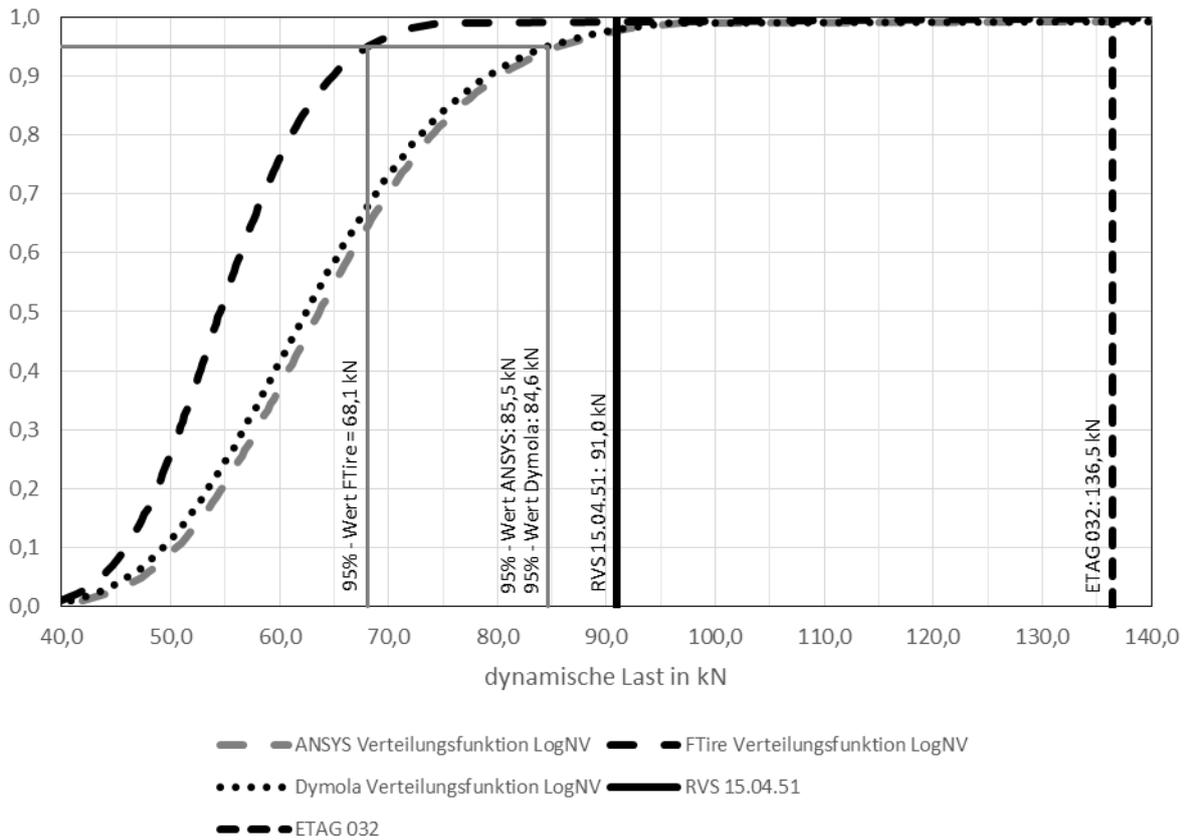
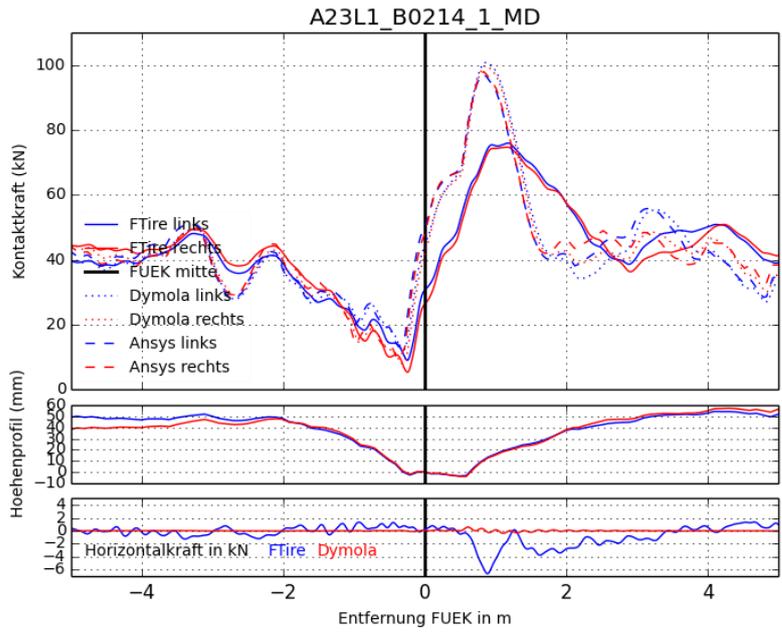


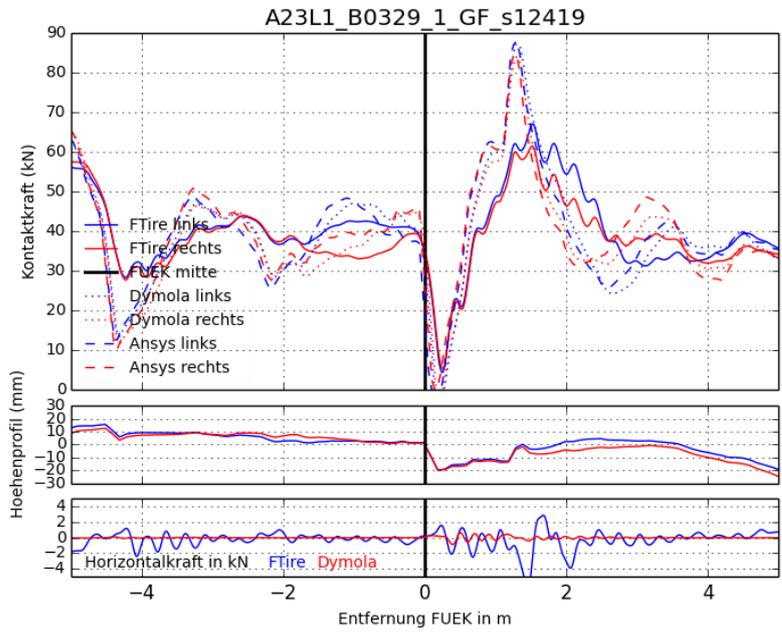
Abbildung 102 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasten im Vergleich zur Normung

8.4 Vergleich Höhenverläufe mit der aktuellen Normung

Da die exakten Grenzen der Fahrbahnübergangskonstruktionen in den Höhenprofilen nicht bekannt sind, kann über die Einhaltung der in den Normen festgehaltenen Grenzen keine Aussage getroffen werden. Generell ist anzumerken, dass bei Konstruktionen mit sehr hohen dynamischen Lasten bzw. Lasterhöhungsfaktoren die Höhenverläufe der anschließenden Fahrbahnen sehr unstetig sind (siehe Abbildung 103 a)) oder Höhensprünge am Anschluss zur Fahrbahnübergangskonstruktion (siehe Abbildung 103 b)) aufweisen. Im Vergleich zu diesen Verläufen sind die Abweichungen der Höhenverläufe an den Konstruktionen zu vernachlässigen.



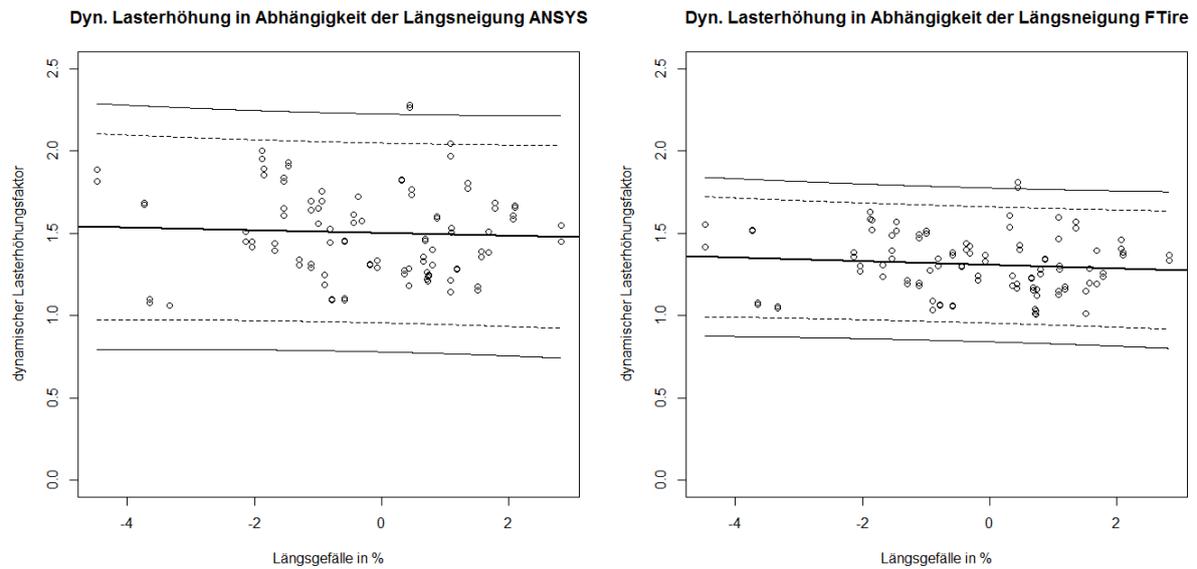
a)



b)

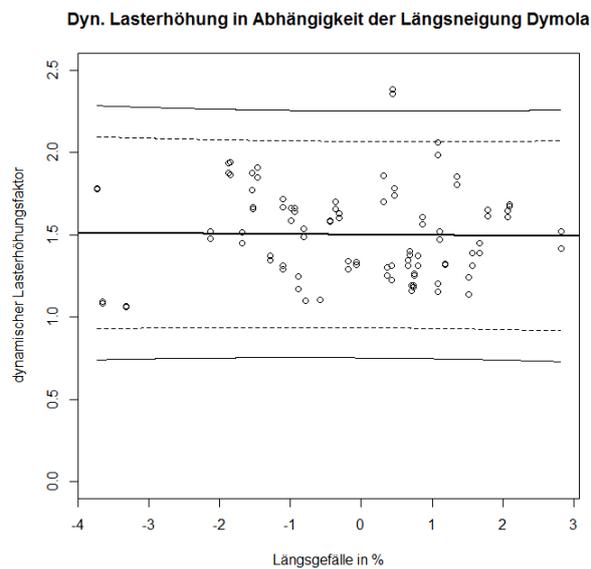
Abbildung 103 FÜK mit den größten dyn. Lasten, a) Höhenverlauf unstetig, b) Sprung am Anschluss zur Fahrbahn

8.5 Einfluss der Längsneigung der Fahrbahn auf die dynamische Lasterhöhung



a)

b)



c)

Abbildung 104 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren und Längsneigung; a) ANSYS , b) FTire, c) Dymola mit Regressionsgeraden (dick), 95% Konfidenzintervallen (strichliert) und den 99% Konfidenzintervallen (dünn)

Abbildung 104 zeigt den QQ Plot der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren und dem Längsgefälle und ebenso die Regressionsgerade (dicke Linie) mit den Grenzen des 95% Konfidenzintervalls (strichlierte Linie). Folgende Regressionsmodelle wurden angenommen:

$$\begin{aligned}\varphi_{ANSYS} &= \alpha + \beta * I + \epsilon \\ \varphi_{FTire} &= \alpha + \beta * I + \epsilon \\ \varphi_{Dymola} &= \alpha + \beta * I + \epsilon\end{aligned}$$

Wobei α und β die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 65), ϵ den Fehler, φ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor und I das Längsgefälle in Prozent darstellen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,3% (ANSYS), 1% (FTire) und 0,02% (Dymola) (siehe Tabelle 65), man kann also nur einen sehr kleinen Teil der Varianz des dynamischen Lasterhöhungsfaktors $\Delta\varphi$ durch die verwendeten Regressionsmodelle erklären. Es kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Längsneigung und dem dynamischen Lasterhöhungsfaktors festgestellt werden.

Tabelle 65 Koeffizienten der linearen Regression Gefälle - Lasterhöhungsfaktor

	α	β	R^2
ANSYS	1,5014	-0,0086	0,0025
FTire	1,3074	-0,0111	0,0099
Dymola	1,5012	-0,0028	0,0002

8.6 Vergleich der einzelnen Simulationsergebnisse

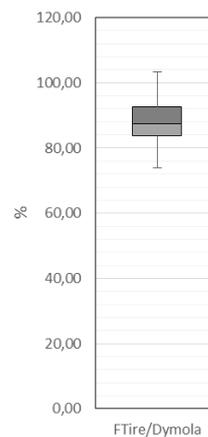
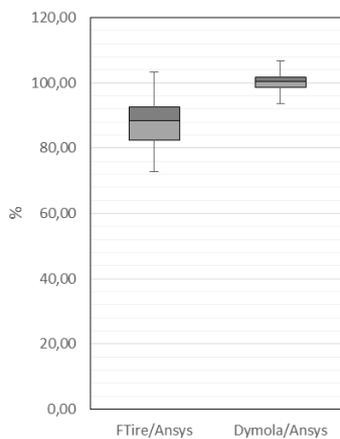
In diesem Vergleich werden die Ergebnisse der Simulationen gegenübergestellt und auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede der einzelnen Simulationsprogramme bzw. Simulationsmodelle eingegangen.

Tabelle 66 Lagemaße der Simulationsergebnisse in Prozent, bezogen auf ANSYS

	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum
Dymola	93,60	98,55	100,42	101,80	106,60
FTire	72,78	82,49	88,45	92,52	103,30

Tabelle 67 Lagemaße der Simulationsergebnisse in Prozent, bezogen auf Dymola

	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum
FTire	73,74	83,68	87,33	92,65	103,97



8.6.1 ANSYS – Dymola

8.6.1.1 Regressionsanalyse

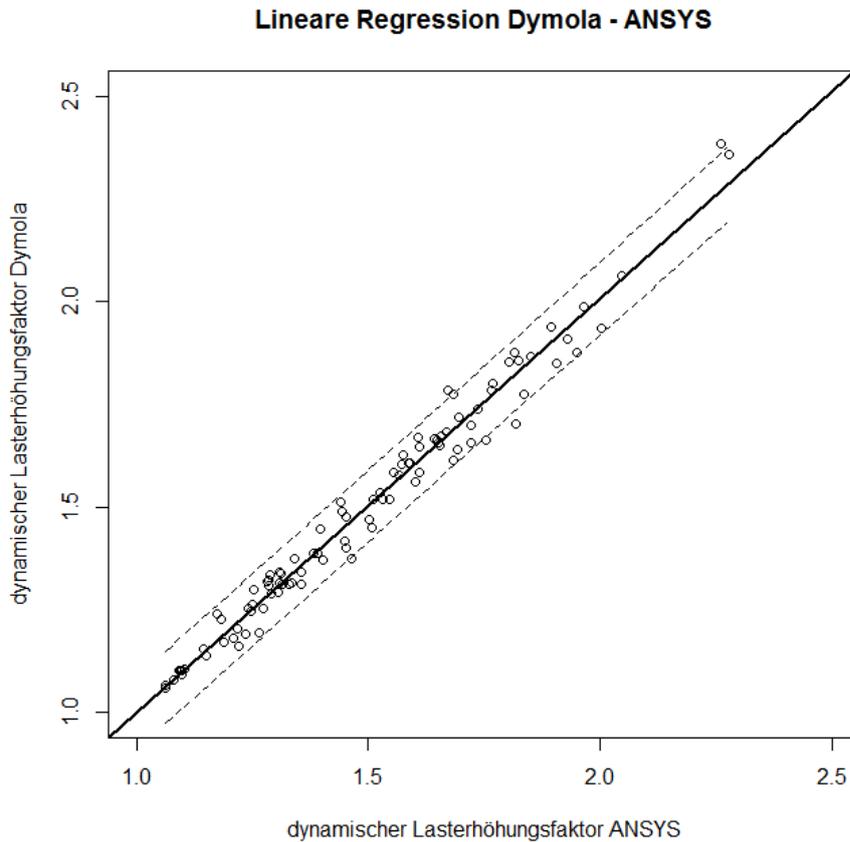


Abbildung 105 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS - Dymola mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)

Abbildung 106 zeigt den QQ – Plot der Horizontalkräfte und die Regressionsgerade (dicke Linie) mit den Grenzen des 95% Konfidenzintervalls (strichlierte Linie). Folgendes Regressionsmodell wurde angenommen:

$$\Delta\varphi_{Dymola} = \alpha + \beta * \Delta\varphi_{ANSYS} + \epsilon$$

Wobei α und β die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 68), ϵ den Fehler, $\Delta\varphi_{Dymola}$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor Dymola und $\Delta\varphi_{ANSYS}$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor ANSYS darstellen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 98% (siehe Tabelle 68), man kann also 98% der Varianz des dynamischen Lasterhöhungsfaktors $\Delta\varphi_{Dymola}$ durch das verwendete Regressionsmodell erklären.

Tabelle 68 Koeffizienten der linearen Regression

	α	β	R^2
ANSYS – Dymola	-0,01075	1,00889	0,9763

Die Werte der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren sind aufgrund des ähnlichen LKW – Modells ähnlich in der Größe. Die Abweichungen resultieren zum Großteil aus den Reifenmodellen, die unterschiedlich auf charakteristische Merkmale, wie ausgeprägte Spitzen oder konvexer / konkaver Verlauf, der Höhenprofile reagieren. Abbildung 106 zeigt die Grundprinzipien der Bildung des Kontaktpunktes und der Steigung der Kontaktfläche im Kontaktpunkt P und das Verhalten der Steigung bei typischen Elementen des Höhenverlaufs. Daraus ergeben sich unterschiedliche Werte der Steigung am gleichen Kontaktpunkt. Da jedoch das Höhenprofil in einer Auflösung von 10 cm vorliegt und somit bereits gedämpft ist, tritt dieser Effekt nur in einem geringen Umfang zutage. Bei 95% der durchgeführten Simulationen liegen die Abweichungen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren innerhalb eines Bereiches von $\pm 5,4 \%$; die maximalen Abweichungen betragen $-6,4 \%$ und $+6,6 \%$, jeweils bezogen auf ANSYS.

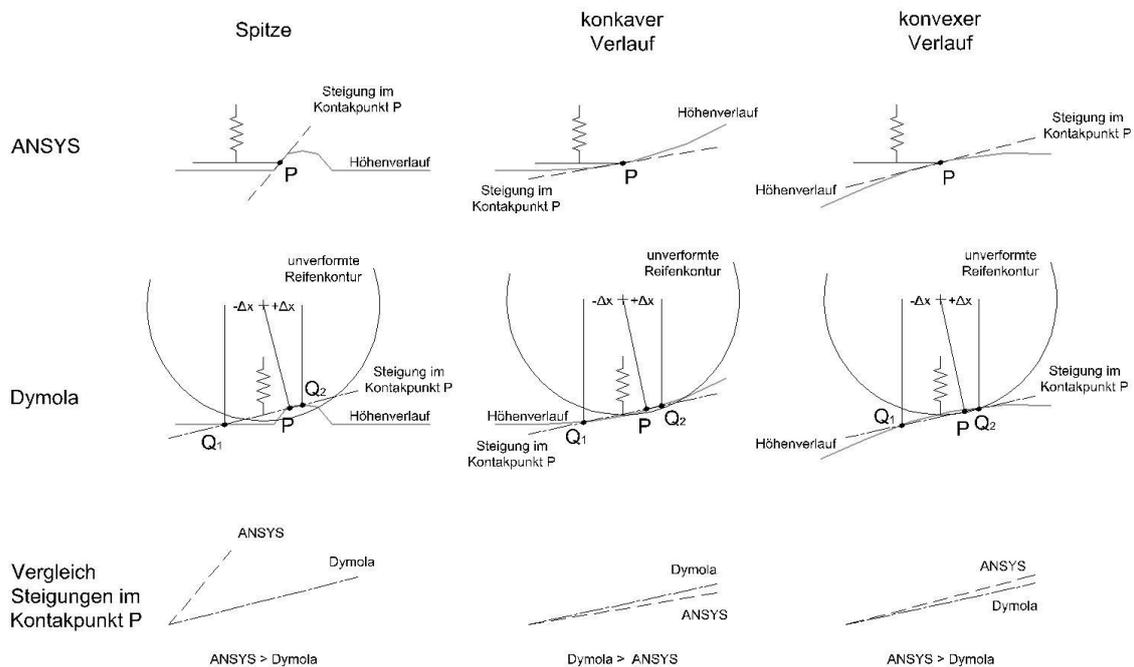
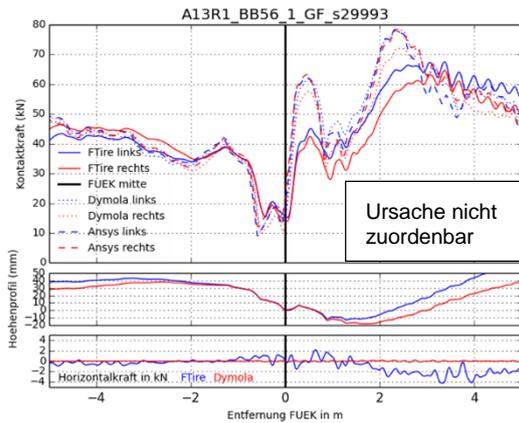
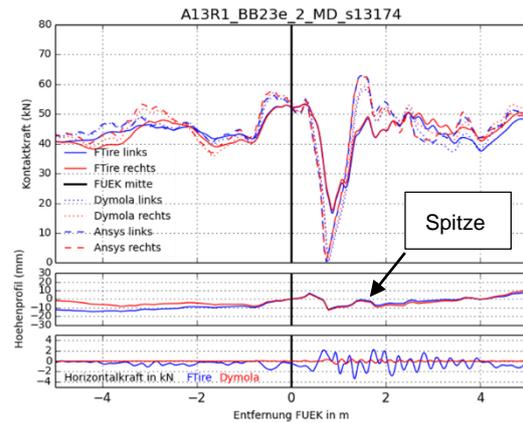


Abbildung 106 Vergleich Bildung Kontaktpunkte und der dazugehörigen Steigung im Kontaktpunkt der Reifenmodelle ANSYS und Dymola; P Kontaktpunkt, Q₁ und Q₂ Straßenpunkt

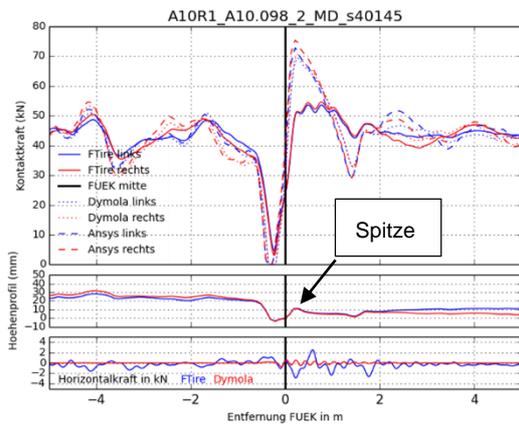
8.6.1.2 Profile mit den größten Abweichungen, ANSYS größer als Dymola



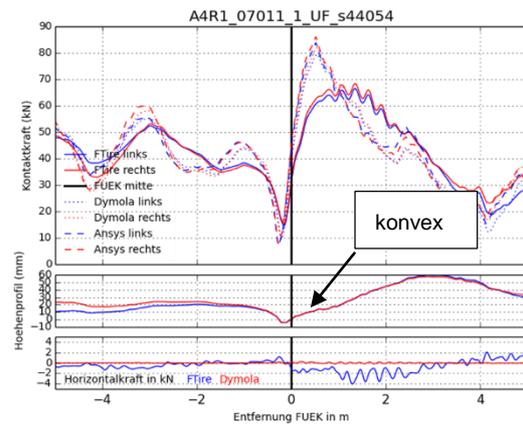
a) linke Spur: 1,83 (ANSYS); 1,86 (Dymola)
rechte Spur: 1,82 (ANSYS); 1,70 (Dymola)



b) linke Spur: 1,47 (ANSYS); 1,38 (Dymola)
rechte Spur: 1,45 (ANSYS); 1,40 (Dymola)



c) linke Spur: 1,69 (ANSYS); 1,64 (Dymola)
rechte Spur: 1,75 (ANSYS); 1,66 (Dymola)



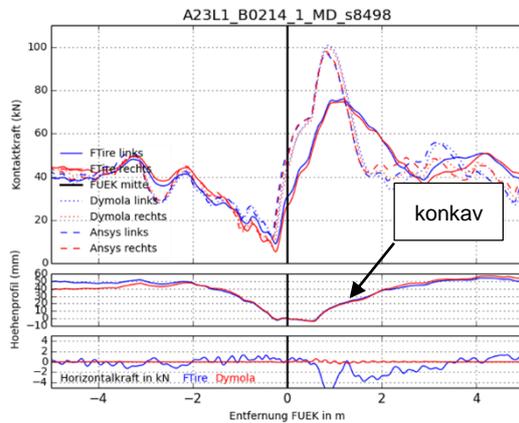
d) linke Spur: 1,95 (ANSYS); 1,88 (Dymola)
rechte Spur: 2,00 (ANSYS); 1,94 (Dymola)

Abbildung 107 größte Abweichungen Vergleich ANSYS - Dymola; ANSYS größer als Dymola

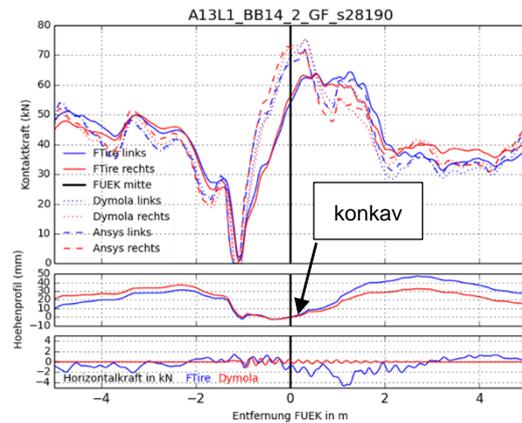
In Abbildung 107 sind die Ergebnisverläufe derjenigen Fahrbahnübergangskonstruktionen mit den dynamischen Lasterhöhungsfaktoren dargestellt, die die größten Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen von ANSYS und Dymola aufweisen und bei denen ANSYS den größeren Wert lieferte. Das Dymola – Reifenmodell führt zu einem gedämpften Ergebnisverlauf bei Spitzen und bei konvexen Höhenverläufen (siehe Abbildung 107 b) und c)) aufgrund der in Absatz 6.3.1 beschriebenen und in Abbildung 106 dargestellten Bildung des Kontaktpunktes und der dazugehörigen Steigung im Kontaktpunkt der Kontaktfläche. Die Unterschiede sind jedoch gering, der mit Dymola ermittelte dynamische Lasterhöhungsfaktor liegt maximal 6,4% unter jenem mit ANSYS ermittelten. Die Ursache für die größte Abweichung (siehe Abbildung 107 a)) ist nicht eine der angeführten Besonderheiten im Höhenverlauf zuzuordnen. Auffallend ist, dass die ANSYS – Ergebnisverläufe der linken und

rechten Spur nahezu ident sind, im Gegensatz dazu aber sowohl Dymola, als auch FTire deutlich niedrigere Werte für die rechte Spur liefern.

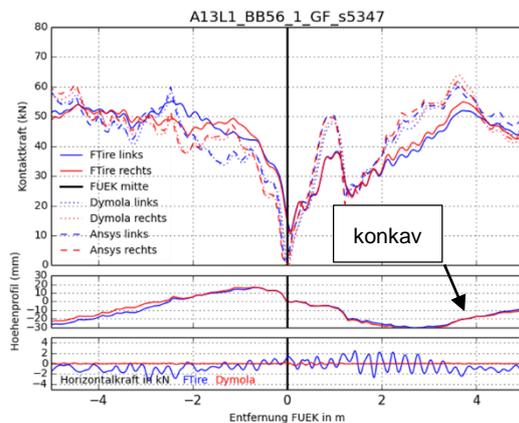
8.6.1.3 Profile mit den größten Abweichungen, ANSYS kleiner als Dymola



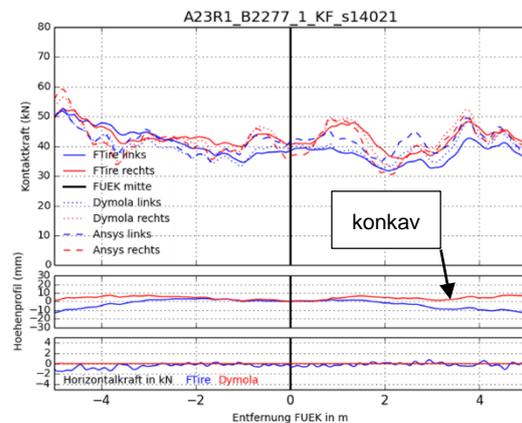
a) linke Spur: 2,26 (ANSYS); 2,38 (Dymola)
rechte Spur: 2,28 (ANSYS); 2,36 (Dymola)



b) linke Spur: 1,67 (ANSYS); 1,78 (Dymola)
rechte Spur: 1,68 (ANSYS); 1,78 (Dymola)



c) linke Spur: 1,40 (ANSYS); 1,45 (Dymola)
rechte Spur: 1,44 (ANSYS); 1,51 (Dymola)



d) linke Spur: 1,15 (ANSYS); 1,14 (Dymola)
rechte Spur: 1,17 (ANSYS); 1,24 (Dymola)

Abbildung 108 größte Abweichungen Vergleich ANSYS - Dymola; Dymola größer als ANSYS

In Abbildung 108 sind die Ergebnisverläufe derjenigen Fahrbahnübergangskonstruktionen mit den dynamischen Lasterhöhungsfaktoren dargestellt, die die größten Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen von ANSYS und Dymola aufweisen und bei denen Dymola den größeren Wert lieferte. Als Ursache für die höheren dynamischen Lasterhöhungsfaktoren der Dymola – Simulation ist der konkave Verlauf des Höhenprofils zu nennen. Dieser konkave Verlauf muss nicht ausgeprägt sein, um sich auf die Ergebnisse niederzuschlagen. Die Unterschiede sind jedoch abermals gering, der mit Dymola ermittelte dynamische Lasterhöhungsfaktor liegt maximal 6,6% über jenem mit ANSYS ermittelten.

8.6.2 FTire – ANSYS

8.6.2.1 Regressionsanalyse

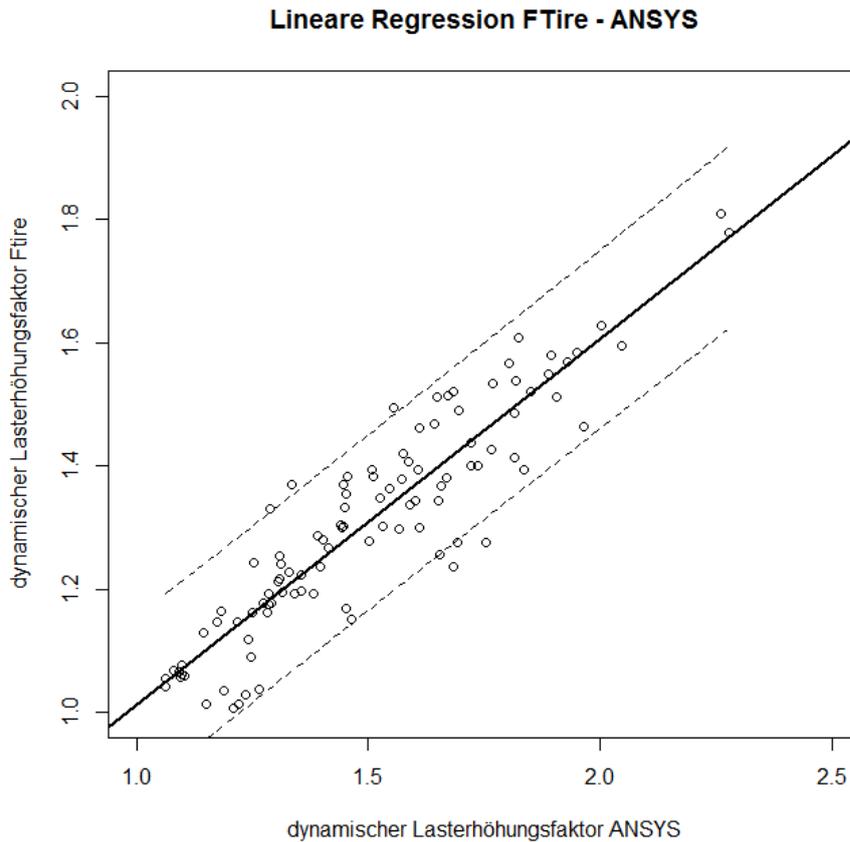


Abbildung 109 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS – FTire mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)

Abbildung 109 zeigt den QQ – Plot der Horizontalkräfte und die Regressionsgerade (dicke Linie) mit den Grenzen des 95% Konfidenzintervalls (strichlierte Linie). Folgendes Regressionsmodell wurde angenommen:

$$\Delta\varphi_{FTire} = \alpha + \beta * \Delta\varphi_{ANSYS} + \epsilon$$

Wobei α und β die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 69), ϵ den Fehler, $\Delta\varphi_{FTire}$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor FTire und $\Delta\varphi_{ANSYS}$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor ANSYS darstellen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 84% (siehe Tabelle 69), man kann also 84% der Varianz des dynamischen Lasterhöhungsfaktors $\Delta\varphi_{FTire}$ durch das verwendete Regressionsmodell erklären. Es besteht immer noch ein Zusammenhang, aber der Fehler nimmt im Vergleich zur ANSYS – Dymola Regression zu. Dies ist durch die Unterschiede in den Reifenmodellen und LKW Modellen zu erklären (siehe 6 Modelle und Simulation)

Tabelle 69 Koeffizienten der linearen Regression

	α	β	R^2
FTire – ANSYS	0,4172	0,5940	0,8385

In Abbildung 109 sind die Ergebnisse der FTire – und ANSYS – Simulation als Streudiagramm dargestellt. Es ist ein annähernd linearer Zusammenhang zu erkennen, wobei die Streuung deutlich größer als bei Vergleich ANSYS – Dymola ist. Abbildung 110 zeigt die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren der FTire – Simulationen als Prozentwert der Ergebnisse der ANSYS – Simulationen. Bei geringen Lasterhöhungsfaktoren nahe 1,00 sind die FTire – Ergebnisse beinahe 100% der ANSYS – Ergebnisse, jedoch fällt FTire bei Anstieg der Lasterhöhungsfaktoren auf ca. 80% von ANSYS. Die Abweichungen sind nicht konstant, sondern steigen mit höheren dynamischen Lasterhöhungsfaktoren.

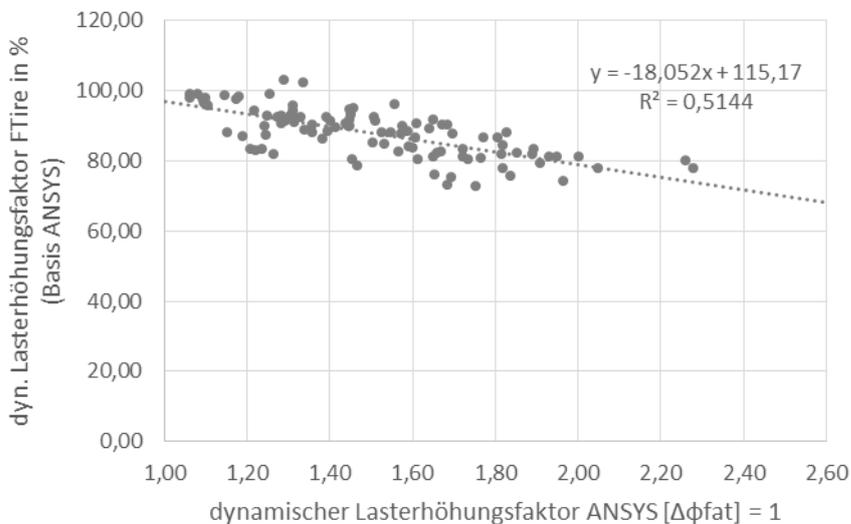
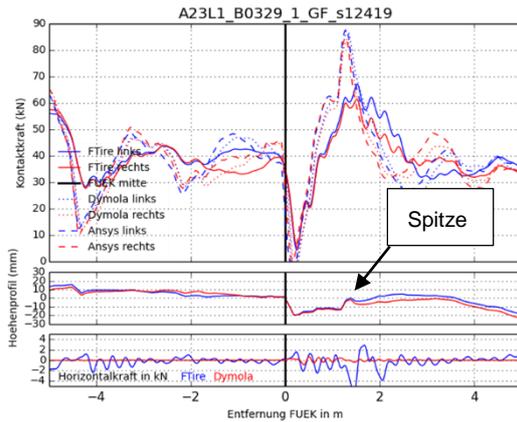
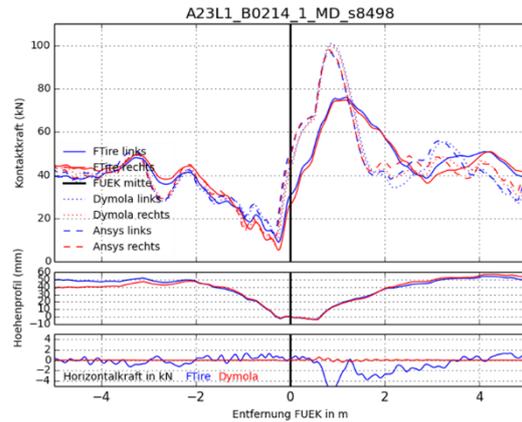


Abbildung 110 Vergleich Lasterhöhungsfaktor FTire / ANSYS

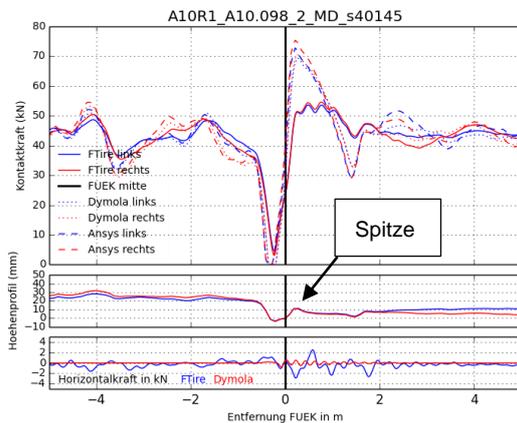
8.6.2.2 Profile mit den größten Abweichungen, ANSYS größer als FTire



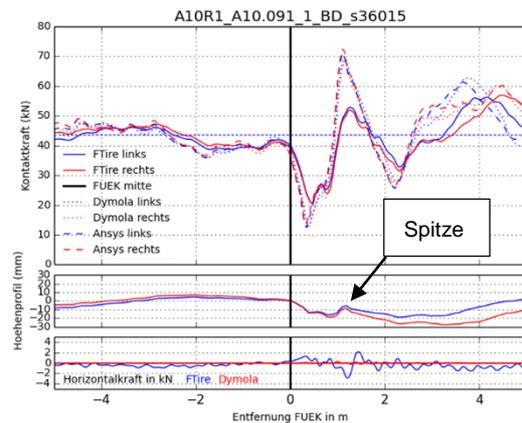
a) linke Spur: 2,05 (ANSYS); 1,60 (FTire)
rechte Spur: 1,97 (ANSYS); 1,46 (FTire)



b) linke Spur: 2,26 (ANSYS); 1,81 (FTire)
rechte Spur: 2,28 (ANSYS); 1,78 (FTire)



c) linke Spur: 1,69 (ANSYS); 1,28 (FTire)
rechte Spur: 1,75 (ANSYS); 1,28 (FTire)

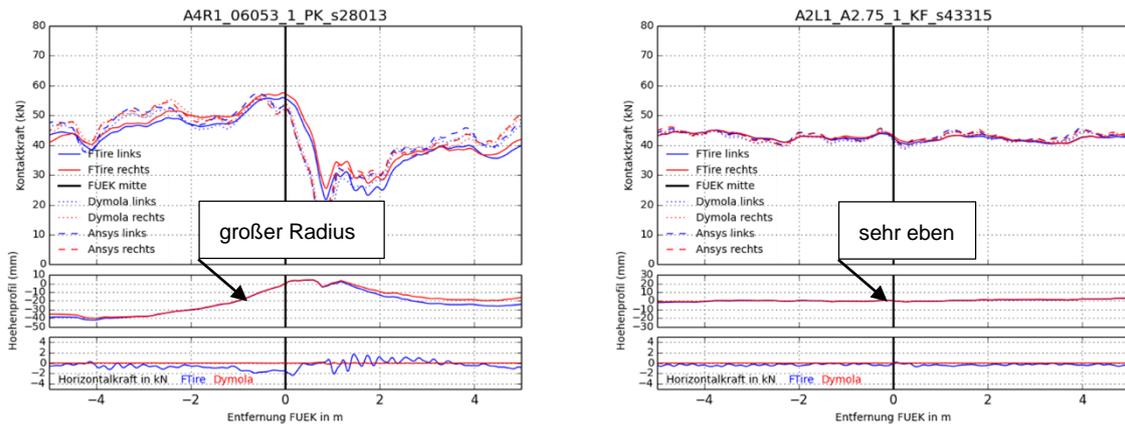


d) linke Spur: 1,65 (ANSYS); 1,26 (FTire)
rechte Spur: 1,68 (ANSYS); 1,24 (FTire)

Abbildung 111 größte Abweichungen Vergleich FTire – ANSYS; ANSYS größer als FTire

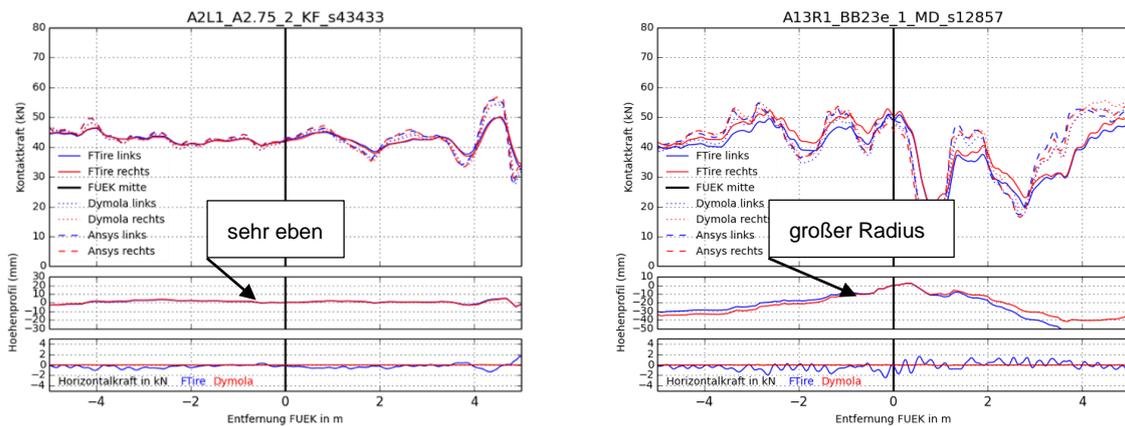
In Abbildung 111 sind die Ergebnisverläufe derjenigen Fahrbahnübergangskonstruktionen mit den dynamischen Lasterhöhungsfaktoren dargestellt, die die größten Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen von ANSYS und FTire aufweisen und bei denen ANSYS den größeren Wert lieferte. Aufgrund des physikalischen FTire – Reifenmodells, welches Abrolleffekte nachbildet, werden die Ergebnisse bei Höhenverläufen mit Spitzen (siehe Abbildung 111 a), c) und d)) und mit abrupten Steigungsänderungen (siehe Abbildung 111 b)) gedämpft und liegen somit unter jenen der ANSYS – Simulationen. Die mit FTire ermittelten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren liegen bis zu 27,22% unter jenen der ANSYS – Simulationen; im Mittel beträgt die Abweichung 11,55%.

8.6.2.3 Profile mit den größten Abweichungen, ANSYS kleiner als FTire



a) linke Spur: 1,33 (ANSYS); 1,37 (FTire)
rechte Spur: 1,29 (ANSYS); 1,33 (FTire)

b) linke Spur: 1,06 (ANSYS); 1,04 (FTire)
rechte Spur: 1,06 (ANSYS); 1,05 (FTire)



c) linke Spur: 1,08 (ANSYS); 1,07 (FTire)
rechte Spur: 1,10 (ANSYS); 1,08 (FTire)

d) linke Spur: 1,27 (ANSYS) ; 1,18 (FTire)
rechte Spur: 1,25 (ANSYS); 1,24 (FTire)

Abbildung 112 größte Abweichungen Vergleich FTire – ANSYS; FTire größer als ANSYS

In Abbildung 112 sind die Ergebnisverläufe derjenigen Fahrbahnübergangskonstruktionen mit den dynamischen Lasterhöhungsfaktoren dargestellt, die die größten Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen von ANSYS und FTire aufweisen und bei denen FTire den größeren Wert lieferte, bzw. nur geringfügig kleiner als der ANSYS – Wert ist. Bei sehr ebenen Profilen mit niedrigen dynamischen Lasterhöhungen und auch bei Profilen mit großen Radien im Höhenverlauf sind die Unterschiede der Programme gering, da hier Abrolleffekte des FTire Reifenmodells (Abbildung 113 a), b) und c) eine kleinere Rolle spielen und somit die Differenz zum ANSYS – Modell (Abbildung 113 d)) kleiner sind.

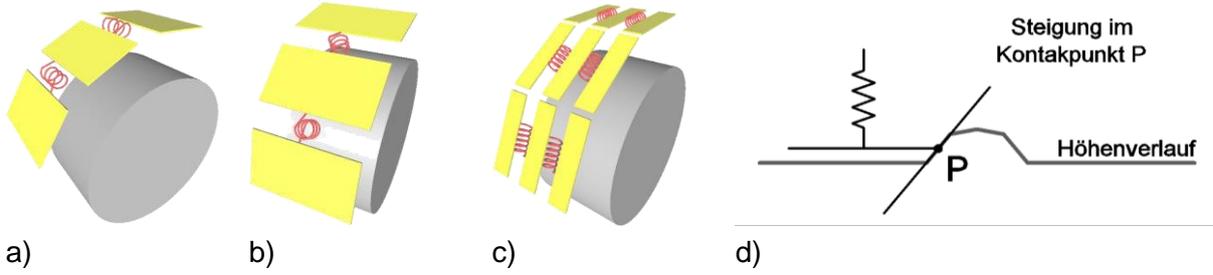


Abbildung 113 FTire physikalisches Reifenmodell: a), b) und c); Abbildungen a) – c) übernommen aus Präsentation FTire [10]; ANSYS Reifenmodell: ebene Kontaktfläche mit angepasster Steifigkeitsverteilung d)

8.6.3 Dymola – FTire

8.6.3.1 Regressionsanalyse

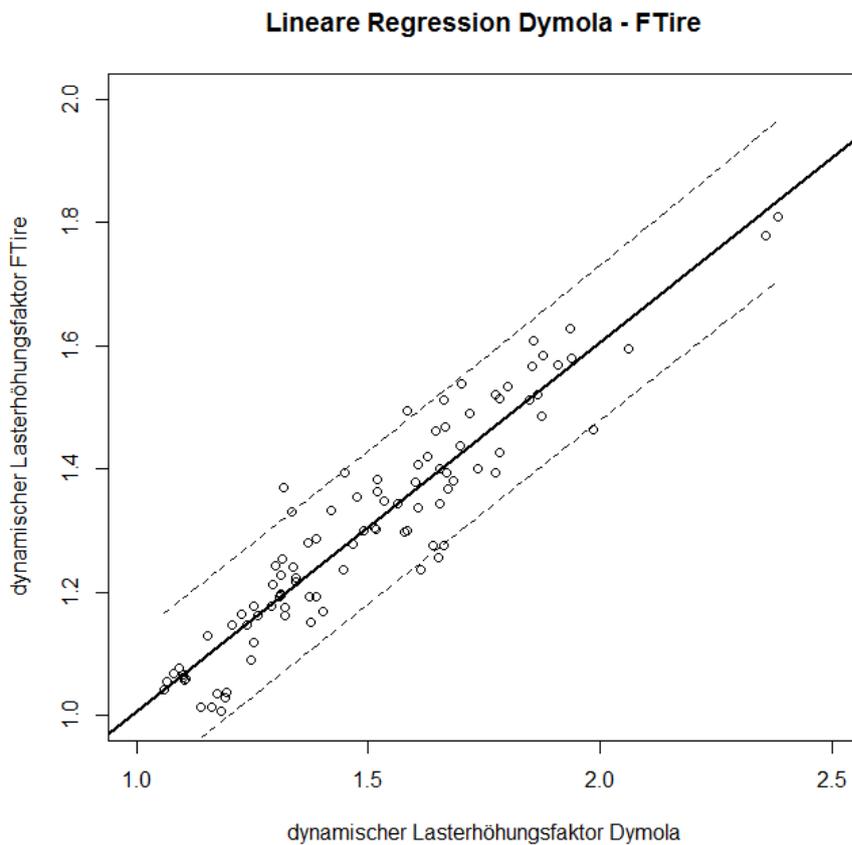


Abbildung 114 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren Dymola – FTire mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)

Abbildung 114 zeigt den QQ – Plot der Horizontalkräfte und die Regressionsgerade (dicke Linie) mit den Grenzen des 95% Konfidenzintervalls (strichlierte Linie). Folgendes Regressionsmodell wurde angenommen:

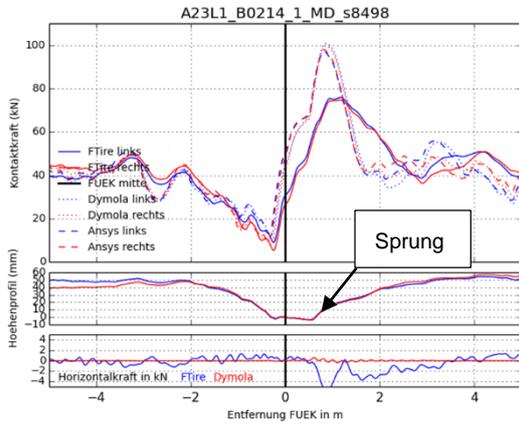
$$\Delta\varphi_{FTire} = \alpha + \beta * \Delta\varphi_{Dymola} + \epsilon$$

Wobei α und β die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 70), ϵ den Fehler, $\Delta\varphi_{FTire}$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor FTire und $\Delta\varphi_{Dymola}$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor Dymola darstellen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 88% (siehe Tabelle 70), man kann also 88% der Varianz des dynamischen Lasterhöhungsfaktors $\Delta\varphi_{FTire}$ durch das verwendete Regressionsmodell erklären. Es besteht immer noch ein Zusammenhang, aber der Fehler nimmt im Vergleich zur ANSYS – Dymola Regression zu, ist aber ähnlich dem Vergleich FTire – ANSYS. Dies ist durch die großen Unterschiede in den Reifenmodellen und LKW Modellen zu erklären.

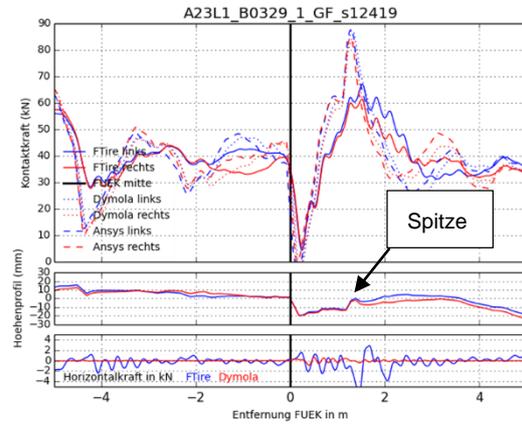
Tabelle 70 Koeffizienten der linearen Regression

	α	β	R^2
FTire – Dymola	0,4054	0,5997	0,8823

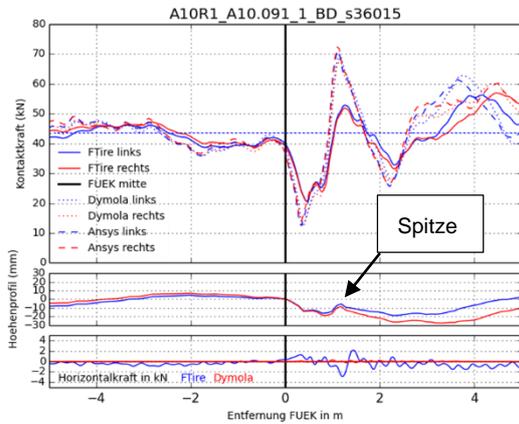
8.6.3.2 Profile mit den größten Abweichungen, Dymola größer als FTire



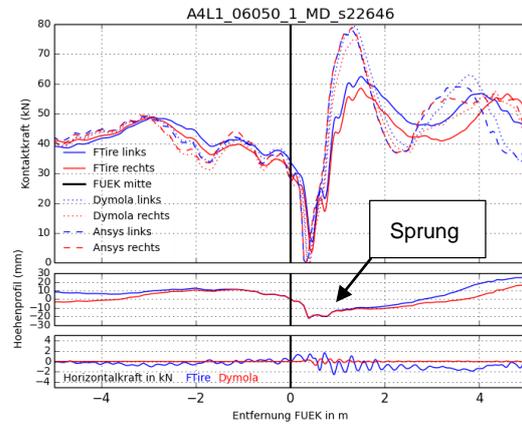
**a) linke Spur: 2,38 (Dymola); 1,81 (FTire)
rechte Spur: 2,36 (Dymola); 1,78 (FTire)**



**b) linke Spur: 2,06 (Dymola); 1,60 (FTire)
rechte Spur: 1,99 (Dymola); 1,46 (FTire)**



**c) linke Spur: 1,65 (Dymola); 1,26 (FTire)
rechte Spur: 1,61 (Dymola); 1,24 (FTire)**

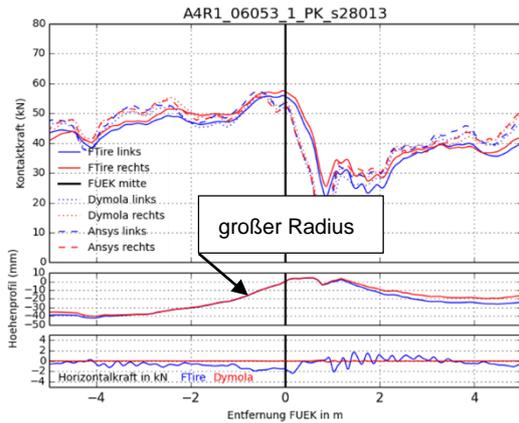


**d) linke Spur: 1,87 (Dymola); 1,49 (FTire)
rechte Spur: 1,77 (Dymola); 1,39 (FTire)**

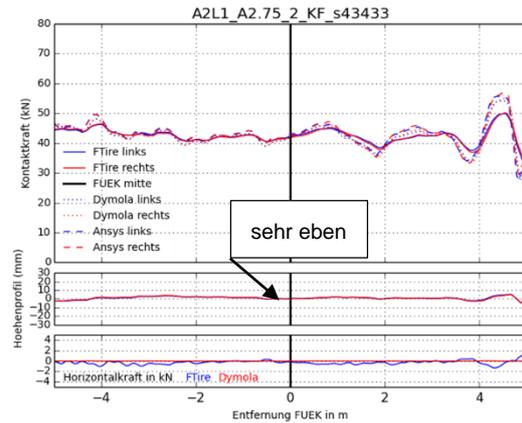
Abbildung 115 größte Abweichungen Vergleich FTire – Dymola; Dymola größer als FTire

In Abbildung 115 sind die Ergebnisverläufe derjenigen Fahrbahnübergangskonstruktionen mit den dynamischen Lasterhöhungsfaktoren dargestellt, die die größten Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen von Dymola und FTire aufweisen und bei denen Dymola den größeren Wert lieferte. Aufgrund des physikalischen FTire – Reifenmodells, welches Abrolleffekte nachbildet, werden die Ergebnisse bei Höhenverläufen mit Spitzen (siehe Abbildung 115 b) und c) und mit abrupten Steigungsänderungen (siehe Abbildung 115 a) und d) gedämpft und liegen somit unter jenen der Dymola – Simulationen. Die mit FTire ermittelten dynamischen Lasterhöhungsfaktoren liegen bis zu 26,26% unter jenen der Dymola – Simulationen; im Mittel beträgt die Abweichung 12,67%.

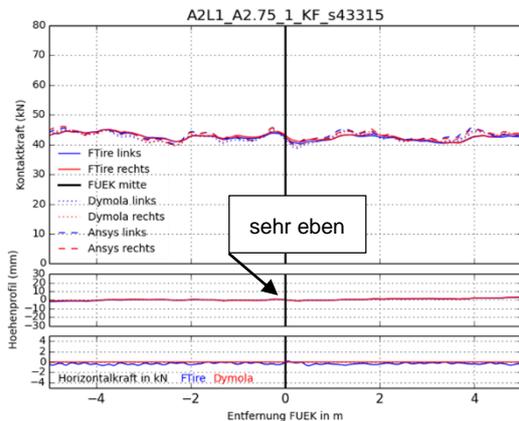
8.6.3.3 Profile mit den größten Abweichungen, Dymola kleiner als FTire



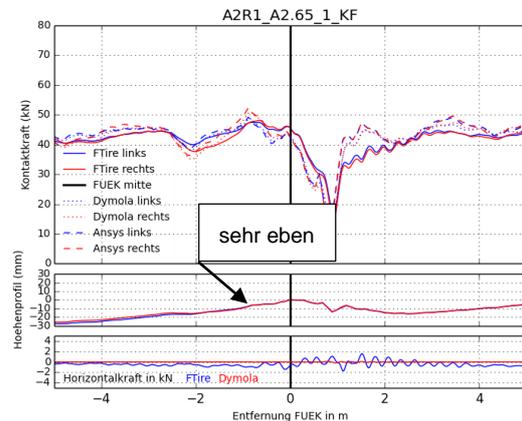
a) linke Spur: 1,32 (Dymola); 1,37 (FTire)
rechte Spur: 1,34 (Dymola); 1,33 (FTire)



b) linke Spur: 1,08 (Dymola); 1,07 (FTire)
rechte Spur: 1,09 (Dymola); 1,08 (FTire)



c) linke Spur: 1,06 (Dymola); 1,04 (FTire)
rechte Spur: 1,07 (Dymola); 1,05 (FTire)



d) linke Spur: 1,15 (Dymola); 1,13 (FTire)
rechte Spur: 1,21 (Dymola); 1,15 (FTire)

Abbildung 116 größte Abweichungen Vergleich FTire – Dymola; FTire größer als Dymola

In Abbildung 116 sind die Ergebnisverläufe derjenigen Fahrbahnübergangskonstruktionen mit den dynamischen Lasterhöhungsfaktoren dargestellt, die die größten Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen von Dymola und FTire aufweisen und bei denen FTire den größeren Wert lieferte, bzw. nur geringfügig kleiner als der Dymola – Wert ist. Bei sehr ebenen Profilen (Abbildung 116 b), c) und d) mit niedrigen dynamischen Lasterhöhungen und auch bei Profilen mit großen Radien im Höhenverlauf (Abbildung 116 a) sind die Unterschiede der Programme gering, da hier Abrolleffekte des FTire Reifenmodells (Abbildung 113 a), b) und c) eine kleinere Rolle spielen und somit die Differenz zum ANSYS – Modell (Abbildung 113 d)) kleiner sind.

8.7 Einfluss der Geschwindigkeit auf die dynamische Lasterhöhung

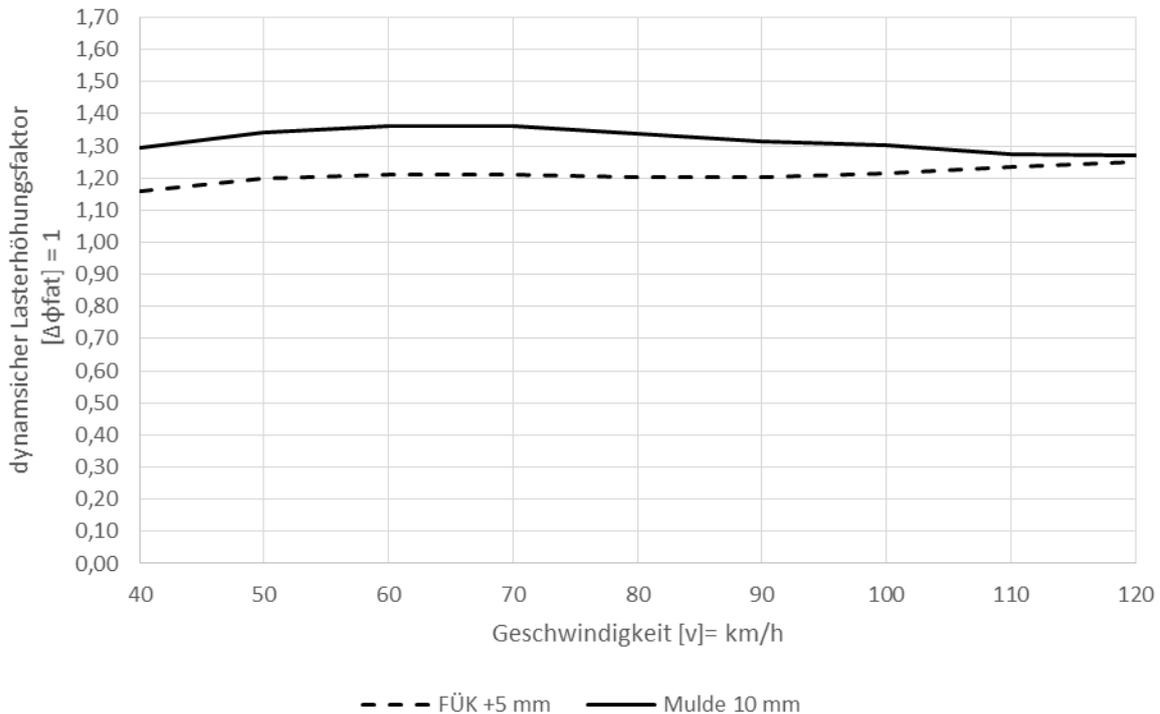


Abbildung 117 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Abbildung 117 zeigt die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren in Abhängigkeit der Geschwindigkeit an den idealisierten Höhenverläufen „Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut“ und „Mulde 10 mm tief“, wobei die Simulation mittels FTire erfolgte.

Der Lasterhöhungsfaktor am Höhenverlauf „FÜK +5 mm“ ist über einen weiten Geschwindigkeitsbereich stabil, so beträgt der Faktor von 50 km/h bis 100 km/h 1,20 bis 1,21. Betrachtet man den gesamten simulierten Geschwindigkeitsbereich von 40 km/h bis 120 km/h, so schwankt der Faktor von 1,16 bis 1,25.

Der Lasterhöhungsfaktor am Höhenverlauf „Mulde 10 mm“ ist ebenso relativ stabil. Über den gesamten Geschwindigkeitsbereich von 40 km/h bis 120 km/h schwankt der Faktor von 1,27 bis 1,36, wobei das Maximum bei einer Geschwindigkeit von 60 bis 70 km/h auftritt. Ashebo et al. [3] stellen in ihrer Studie fest, dass der Zusammenhang des dynamischen Lasterhöhungsfaktor an Brücken mit der Geschwindigkeit ab 55 km/h nicht klar ist, darunter steigt der Faktor mit der Geschwindigkeit.

8.8 Einfluss der statischen Last auf die dynamische Lasterhöhung

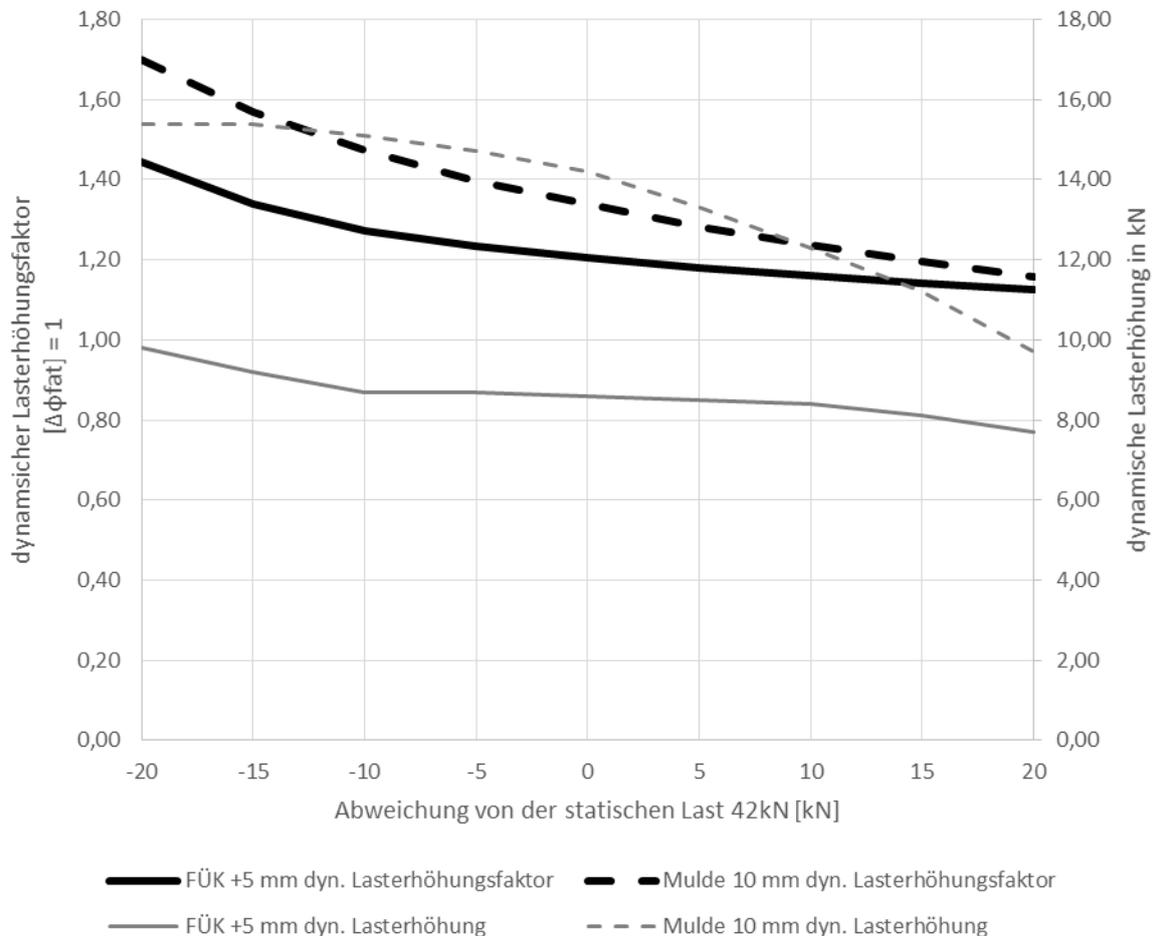


Abbildung 118 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor und der dynamischen Lasterhöhung in Abhängigkeit der statischen Last; FÜK +5 mm und Mulde 10 mm

Abbildung 118 zeigt die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren in Abhängigkeit der gefederten Masse an den idealisierten Höhenverläufen „Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut“ und „Mulde 10 mm tief“, wobei die Simulation mittels FTire erfolgte.

Es besteht eine starke Abhängigkeit des dynamischen Lasterhöhungsfaktors und auch der dynamischen Lasterhöhung von der statischen Last. Mit zunehmender statischen Last sinkt bei gleichbleibenden Feder – Dämpfer – System sowohl der Lasterhöhungsfaktor als auch die dynamische Lasterhöhung. So nimmt der Lasterhöhungsfaktor von 1,45 (FÜK +5 mm) bzw. 1,70 (Mulde 10 mm) auf 1,12 (FÜK +5 mm) bzw. 1,16 (Mulde 10 mm) ab. Die dynamische Lasterhöhung nimmt von 9,8 kN (FÜK +5 mm) bzw. 15,4 kN (Mulde 10 mm) auf 7,7 kN (FÜK +5 mm) bzw. 9,7 kN (Mulde 10 mm) ab. Dies deckt sich auch mit der US-amerikanischen Norm „AASHTO LRFD Bridge Design Specifications“ [1], wo ebendies angemerkt wird. Ashebo et al. [3] stellen in ihrer Studie fest, dass der dynamische Lasterhöhungsfaktor an Brücken mit der Last des Fahrzeuges sinkt.

9 Untersuchungen zu den dynamischen Eigenschaften von Fahrbahnübergangskonstruktionen in der Literatur

In diesem Kapitel werden Arbeiten, die sich mit den dynamischen Eigenschaften von Fahrbahnübergangskonstruktionen beschäftigen, vorgestellt. Es zeigt sich, dass zusätzlich zu den dynamischen Lasten aufgrund der Rauigkeit bzw. Diskontinuitäten der Fahrbahn, welche in der vorliegenden Arbeit betrachtet werden, noch zusätzliche dynamische Lasten aufgrund von Resonanzen in den Fahrbahnübergangskonstruktionen und anderer Konstruktionsmerkmale vorhanden sind.

9.1 Roeder, C. W., Fatigue and dynamic load measurements on modular expansion joints [16]

Roeder [16] stellte durch Finite-Elemente-Berechnungen (Modell siehe Abbildung 120) an einer Modulardehnfuge fest, dass durch Resonanzen der simulierten Konstruktion im schlimmsten Fall die Lasten um über 50% steigen können. Abbildung 119 zeigt den Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktors der Simulation gegenüber dem Verhältnis der Belastungszeit zur Periode der Eigenfrequenz. Dieser Verlauf ist nur für die betrachtete Fahrbahnübergangskonstruktion gültig und entspricht der Antwort des statischen Systems auf eine dynamische Belastung. Bei Überrollversuchen (Achslast ca. 90 kN) am selben Typ lag die Steigerung bei 20 bis 30%, wobei über den Höhenverlauf der Fahrbahn vor der Konstruktion keine Angaben gemacht werden. Dieser Höhenverlauf hat jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die dynamische Last, welche wiederum nochmals durch die dynamischen Eigenschaften der Fahrbahnübergangskonstruktion verstärkt werden kann. Somit ist nicht klar, welcher Anteil der gemessenen Lasterhöhung aus der Rauigkeit der Fahrbahn vor der Konstruktion oder aus den dynamischen Eigenschaften (Resonanzen) der Konstruktion auf eine dynamische Belastung kommt.

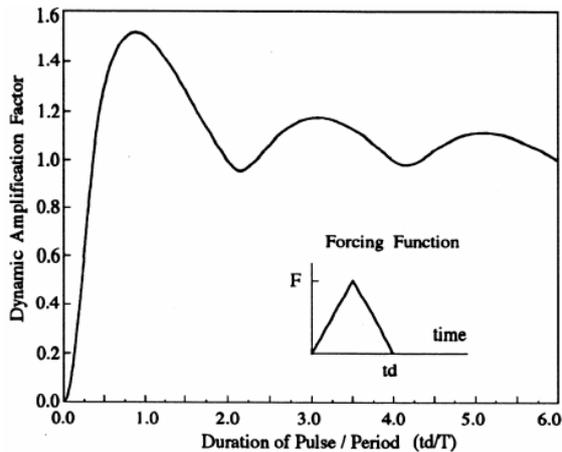


Abbildung 119 Dynamic amplification of loading, übernommen aus [16]

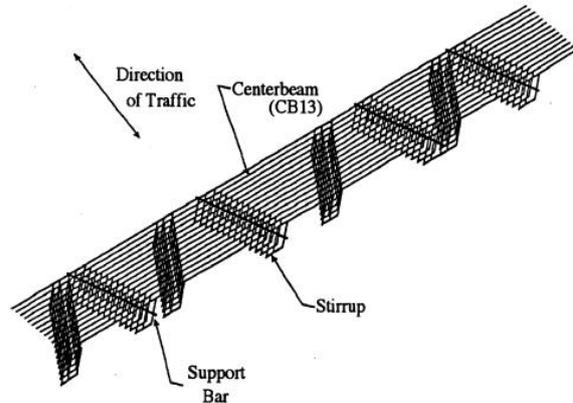


Abbildung 120 Global computer model for finite element analysis, übernommen aus [16]

9.2 Steenbergen, M. J. M. M.; Dynamic response of expansion joints to traffic loading [19]

Steenbergen [19] erstellte in seiner Arbeit ein mathematisches Modell (siehe Abbildung 121) von Modulardehnfugen des Herstellers Maurer (Typen D160 – D640), um das dynamische Verhalten dieser Konstruktionen unter Verkehrslast zu analysieren. Die statische Radlast wurde mit 60,0 kN, und die Fahrbahn als eben angenommen. Um das Modell zu verifizieren, wurden Messungen an einer Modulardehnfuge herangezogen, wobei Messungen anderer Typen und bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten fehlen. Es wurden folgende Zusammenhänge gefunden:

- Je breiter die Konstruktion bzw. je mehr Lamellen sie besitzt, desto größer wird der dynamische Faktor
- Der dynamische Faktor der Lamellen ist kleiner als jener der Querträger
- Die mittlere Lamelle weist den größten dynamischen Faktor auf
- Je größer der Spalt zwischen den Lamellen, desto größer der Faktor
- Der dynamische Lasterhöhungsfaktor ist von der Geschwindigkeit abhängig, je größer die Geschwindigkeit, desto größer der Faktor. Der Schwankungsbereich am Typ D400 liegt zwischen 1,0 bei 60 km/h und 1,4 (Lamelle) bzw. 1,7 (Querträger) bei 110 km/h

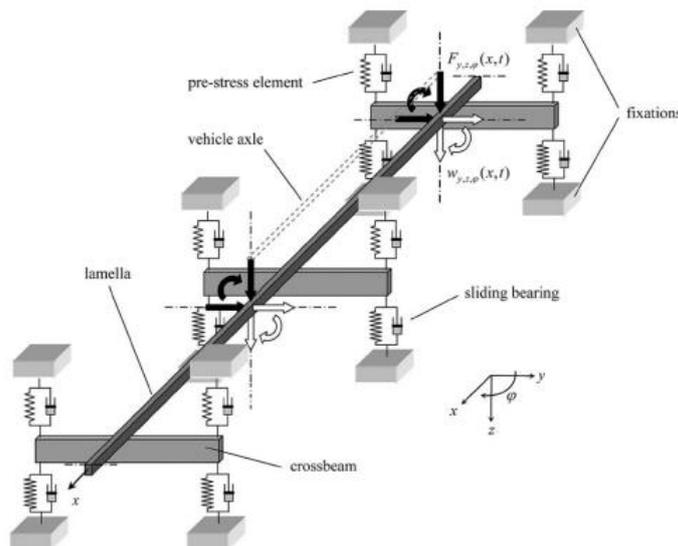


Abbildung 121 Model of the joint with axle loading, übernommen aus [19]

Tabelle 71 zeigt die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren der Lamellen und Querträger der verschiedenen Baugrößen der Modulardehnfugen bei 90 km/h. Bei den Lamellen steigt der Lasterhöhungsfaktor bis 1,4, bei den Querträgern bis 1,7. Diese Faktoren ergeben sich rein aus der Antwort der Konstruktion auf eine dynamische Belastung unter der Annahme, die Fahrbahn vor dem Übergang und der Anschluss der Konstruktion ist eben bzw. ohne Diskontinuitäten. In der Realität ist dies nicht der Fall (siehe 7.3), es treten noch zusätzliche dynamische Lasten auf. Das Verhalten des dynamischen Faktors bei Variation der statischen Last wurde nicht untersucht. Die starke Abhängigkeit des dynamischen Lasterhöhungsfaktors von der Geschwindigkeit kommt dadurch zustande, dass sich bei höherer Geschwindigkeit die Dauer der Belastung der Periodendauer der ersten Eigenfrequenz annähert, wobei dies nicht durch Messungen verifiziert ist. Diese Abhängigkeit wurde auch von Roeder [16] (siehe 9.1 und Abbildung 119) bei seinem Modell gefunden. Coelho et.al. [5] konnten bei Überrollversuchen keine Abhängigkeit feststellen.

Tabelle 71 Dynamic Amplification Factor for lamella and crossbeam response for different number of lamellas at 90 km/h, Tabelle aus [19]

	D160	D240	D320	D400	D480	D560	D640
Number of lamellas	1	2	3	4	5	6	7
Lamellas	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4
Crossbeams	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.7

9.3 Coelho, B. et al.; Dynamics of modular expansion joints: The Martinus Nijhoff Bridge [5]

Coelho et al. [5] führten an einer Modulardehnfuge des Herstellers Maurer der Martinus Nijhoff Brücke in Holland Überrollversuche durch. Diese Tests wurden nach den Empfehlungen der ETAG 032 [7] mit Geschwindigkeiten von ca. 5 km/h (quasi statische Last), 50 km/h, 70 km/h und 90 km/h durchgeführt, wobei ein 3-Achs LKW verwendet wurde. Die Radlast der

betrachteten Achse (Frontachse) beträgt 36,5 kN. Des Weiteren wurde ein numerisches Modell der Fahrbahnübergangskonstruktion erstellt und validiert. Folgendes wurde festgestellt:

- Bei den Überrollversuchen mit 50, 70 und 90 km/h hat die Geschwindigkeit keinen Einfluss auf die Höhe des dynamischen Lasterhöhungsfaktors
- Der größte Wert des dynamischen Lasterhöhungsfaktors beträgt ca. 1,4 am untersuchten Übergang
- Entfernt man die Lager eines Querträgers (häufiger Fehler an dieser Brücke), steigt der Faktor auf über 6,0 aufgrund von Resonanzen
- Das mathematische Modell sagt aus, dass unterhalb von 40 km/h keine signifikante dynamische Lasterhöhung auftritt

Bei den Überrollversuchen ist ebenso wie bei Roeder [16] nicht klar zuzuordnen, welcher Anteil des maximalen dynamischen Lasterhöhungsfaktors von 1,4 den dynamischen Eigenschaften der Konstruktion und der Lasterhöhung aufgrund der Rauigkeit der Fahrbahn vor dem Übergang zuzuordnen sind.

9.4 Zi, G. und Zhu, X.; Asymmetric vibration of finger-type bridge expansion joint for design consideration [20]

Zi und Zhu [20] untersuchten in ihrer Arbeit das Versagen der Verschraubung (siehe Abbildung 123) an einer Fingerplatte. Die Fahrbahnübergangskonstruktion ist an der Young-Bong bridge II in Korea eingesetzt. Als Besonderheit und auch Schwachstelle dieser Konstruktion ist die einreihige Ausführung der Verankerung zu nennen. Die Autoren stellten fest, dass nach vertikaler Belastung die Finger asymmetrisch vibrieren; in Abbildung 124 am Beispiel eines Pendels verdeutlicht. Aufgrund der ungünstigen Konstruktionsart für eine nach oben gerichtete Belastung (nur eine Schraubenreihe), werden durch das Moment sehr hohe Kräfte an den Ankerschrauben erreicht. Diese Kräfte wurden in der Auslegung um ein Vielfaches unterschätzt und sind schließlich auch der Grund für das Versagen der Schrauben. Als Abhilfe bietet sich die Anordnung einer zweiten Schraubenreihe in fingernähe an (Abbildung 125), wie dies bei manchen Herstellern üblich ist.

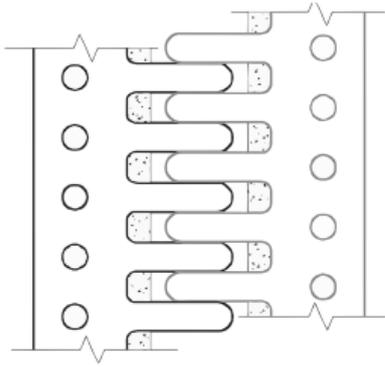


Abbildung 122 Fingerplatte mit einreihiger Verschraubung, übernommen aus [20]



Abbildung 123 Failure of the finger-joint in Young-Bong bridge II, Korea in which the right plate popped up because of the failure of the anchor bolts, übernommen aus [20]

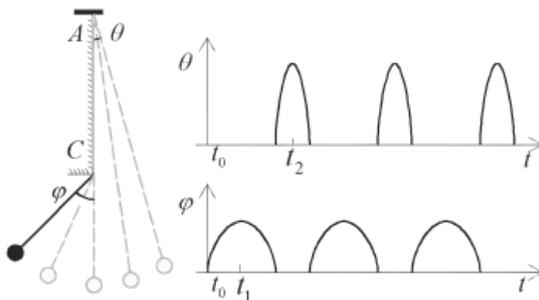


Abbildung 124 behavior of an asymmetric pendulum, übernommen aus [20]



Abbildung 125 Kragfingerkonstruktion mit zweiter Schraubenreihe

9.5 Gunacker, D.; Innovative Fahrbahnübergangskonstruktionen: Bemessungskonzepte numerische Verifikation [11]

In dieser Arbeit werden die Bemessungskonzepte eines Kragfingerüberganges analysiert, mit Blick auf aktuelle Schadensproblematiken. Ein weiterer Fokus liegt auf der erweiterten Nachweisführung für Tragsicherheit und Ermüdung der Schraubenverbindungen. Zum Abschluss werden die erhöhten dynamischen Beanspruchungen durch Unregelmäßigkeit in der Konstruktion und deren Behebung analysiert. [11]. Durch Modellierung der Konstruktion mit der nichtlinearen FE – Methode wird gezeigt, dass Unebenheiten im Auflagerbereich der Fingerplatten zu erhöhten Schraubenkräften führen kann und in weiterer Folge zum vorzeitigen Versagen durch Ermüdung.

10 Zusammenfassung

10.1 Einführung

Fahrbahnübergangskonstruktionen dienen zur Überbrückung von notwendigen Fugen zwischen Tragwerken und Widerlagern an Brückenbauwerken [17]. Aufgrund von Fertigungstoleranzen, fehlerhaftem Einbau, Beschädigungen an Fahrbahnbelägen usw. ergeben sich an den Übergängen von Widerlagern und Brücken Unstetigkeiten im Längsprofil, die sich in einer höheren dynamischen Last widerspiegeln. Für die, immer an dieser exponierten Position sitzenden, Fahrbahnübergangskonstruktionen bedeutet dies eine erhöhte dynamische Beanspruchung, die sich auf die tatsächliche Lebensdauer der Konstruktion negativ auswirkt und somit zu einem erhöhtem Wartungsaufwand für den Betreiber führt. Ausgehend von 102 gemessenen Höhenverläufen an 51 Fahrbahnübergangskonstruktionen (jeweils linke und rechte Spur des rechten Fahrstreifens), sind die dynamischen Lasterhöhungen mittels dynamischer Finite-Elemente-Simulation, unter Verwendung von drei unterschiedlichen Simulationsprogrammen, ermittelt worden. Die Ziele dieser Simulationen sind das Ermitteln der Höhe der dynamischen Lasterhöhung an realen Höhenprofilen, der Vergleich dieser Lasterhöhung mit den Vorgaben der Normen (ETAG 032 [7], RVS 15.04.51 [17] und ÖNORM B4031 [4]) und der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Simulationsprogramme untereinander. Des Weiteren werden der Einfluss der Geschwindigkeit, der Höhe der statischen Last und der Längsneigung des Straßenabschnittes betrachtet. Es ist darauf hinzuweisen, dass die simulierten Lasterhöhungen nur jene der Einwirkungen darstellen und sich rein aus dem Höhenverlauf der Fahrbahn im Bereich der Fahrbahnübergangskonstruktion ergeben. Wie Roeder [16], Steenbergen [19], Coelho et al. [5] und Zi und Zhu [20] in ihren Arbeiten zeigen, können aufgrund der dynamischen Eigenschaften der Konstruktionen zusätzliche dynamische Lasterhöhungen auftreten und sind für jedes Bauteil eines Konstruktionstyps gesondert zu betrachten.

10.2 LKW- und Reifenmodelle

Es werden die Simulationsergebnisse von dynamischen FE-Simulationen, unter der Verwendung von drei verschiedenen Programmen (ANSYS, FTire und Dymola), miteinander verglichen. Als Vergleichskriterium dient der dynamische Lasterhöhungsfaktor an einem Rad der Antriebsachse des Zugfahrzeuges, nachdem diese Achse im Forschungsprojekt „EVAF“ [14] als jene mit der höchsten Belastung identifiziert wurde. Die Simulationen mit FTire und Dymola sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellt, die ANSYS – Ergebnisse sind aus dem Forschungsprojekt „EVAF“ [14] entnommen.

Alle Straßenhöhenverläufe sind ebenfalls dem Forschungsprojekt „EVAF“ [14] entnommen und sind entweder Ergebnisse theoretischer Überlegungen („Idealisierte Höhenverläufe“), oder Ergebnisse einer Vermessung aus dem Jahr 2009 („Gemessene Höhenverläufe“) mittels RoadSTAR (siehe Kapitel 3.1.3).

Als Grundlage für die LKW – Modelle dient ein für „Mitteleuropa typisches Sattelfahrzeug mit guter Ausstattung für den Fernverkehr“ [14] mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 40 to, wobei dreidimensionale (ANSYS und Dymola, siehe Abbildung 126) und eindimensionale Modelle (FTire, siehe Abbildung 127) erstellt wurden.

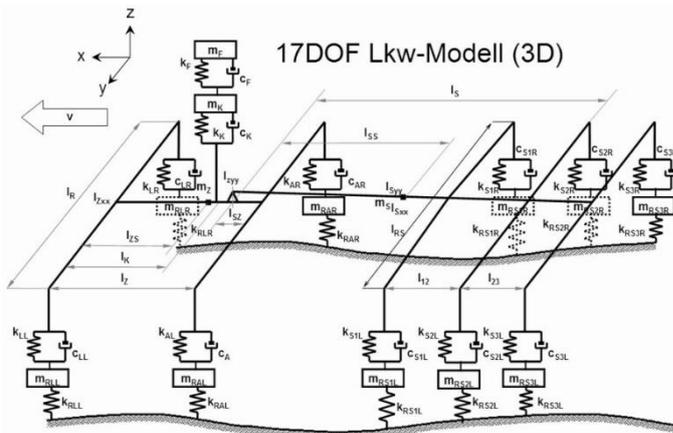


Abbildung 126 LKW Modell ANSYS und Dymola, (aus [14])

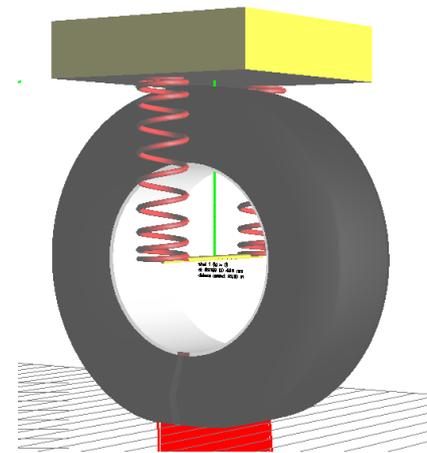


Abbildung 127 LKW-Modell FTire

Die Reifenmodelle unterscheiden sich insofern, dass FTire ein physikalisches Reifenmodell (siehe Abbildung 128) beinhaltet, welches auch den Abrolleffekt simuliert, und bei ANSYS und Dymola, vereinfacht ausgedrückt, das Reifenmodell aus einer Kontaktfläche und einer Feder besteht, wobei es Differenzen in der Bildung des Kontaktpunktes und der Steigung am Kontaktpunkt gibt. Das ANSYS Reifenmodell verwendet als Kontaktpunkt den vordersten Berührungspunkt der Kontaktfläche mit der Fahrbahn und auch die Steigung in diesem Punkt (siehe Abbildung 129). Im Gegensatz dazu bildet das in Dymola verwendete Reifenmodell die Steigung und den Kontaktpunkt aus zwei Straßenpunkten und glättet somit die Straßenoberfläche (siehe Abbildung 129).

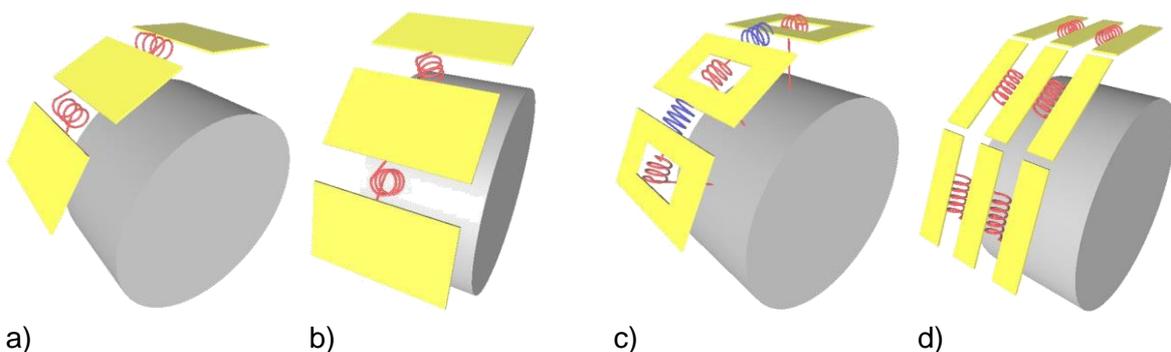


Abbildung 128 FTire Reifenmodell: a) Steifigkeit in Ebene des Gurtes; b) Steifigkeit normal zu Gurt; c) Torsions-steifigkeit (rot) und Verdrehsteifigkeit (blau); d) Querbiegesteifigkeit; alle Abbildungen übernommen aus Präsentation FTire [10]

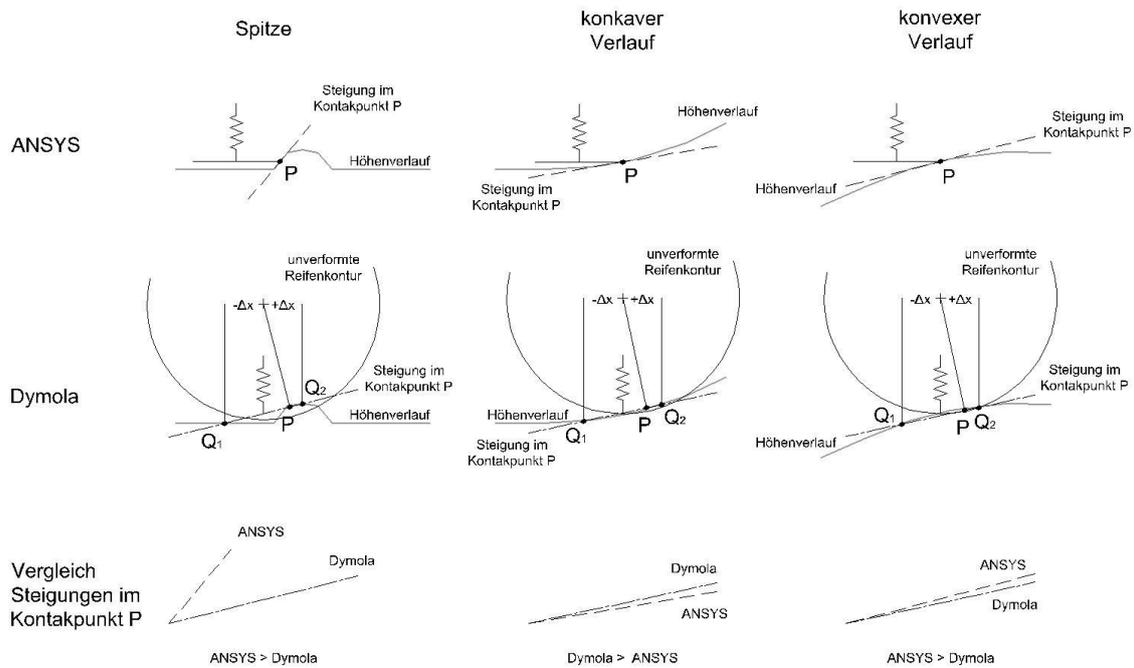


Abbildung 129 Vergleich Bildung Kontaktpunkte und der dazugehörigen Steigung im Kontaktpunkt der Reifenmodelle ANSYS und Dymola; P Kontaktpunkt, Q₁ und Q₂ Straßenpunkt

10.3 Simulationsergebnisse

Die durchgeführten dynamischen Finite-Elemente-Simulationen zeigen eine große Variation der dynamischen Lasterhöhungen bzw. der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren an den vermessenen Höhenverläufen der Fahrbahnübergangskonstruktionen.

10.3.1 ANSYS

Die dynamische Lasterhöhung des verwendeten LKW – Modelles an den gemessenen Höhenprofilen ist zum Teil größer als in den Normen berücksichtigt und wird in Abbildung 130 dargestellt. Von insgesamt 102 Simulationen mit ANSYS sind 43 Faktoren größer als in ETAG 032 ($\varphi_{fat} * \Delta\varphi_{fat} = 1,2 * 1,3 = 1,56$) berücksichtigt, bzw. 61 Faktoren als in der RVS 15.04.51 ($\varphi_V = 1,4$) angegeben. Da jedoch der Abrolleffekt im ANSYS – Reifenmodell nicht berücksichtigt ist, werden die Lasterhöhungsfaktoren eher überschätzt.

Betrachtet man die in Abbildung 131 dargestellten Absolutwerte der dynamischen Last, bietet sich ein anderes Bild. Die dynamische Last der ETAG 032 von 136,5 kN wird bei keinem Höhenverlauf erreicht, die dynamische Last der RVS 15.04.51 von 91 kN wird zweimal überschritten.

Vergleich dynamischer Lasterhöhungsfaktor ANSYS mit Normung

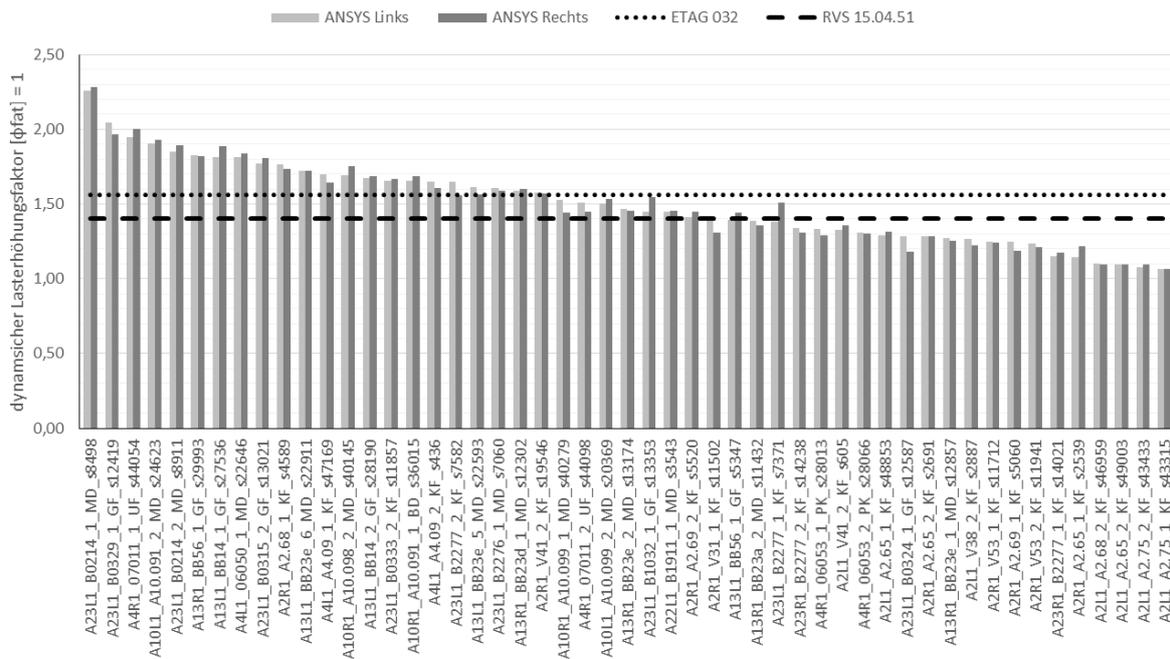


Abbildung 130 Vergleich dyn. Lasterhöhungsfaktor ANSYS mit Normung

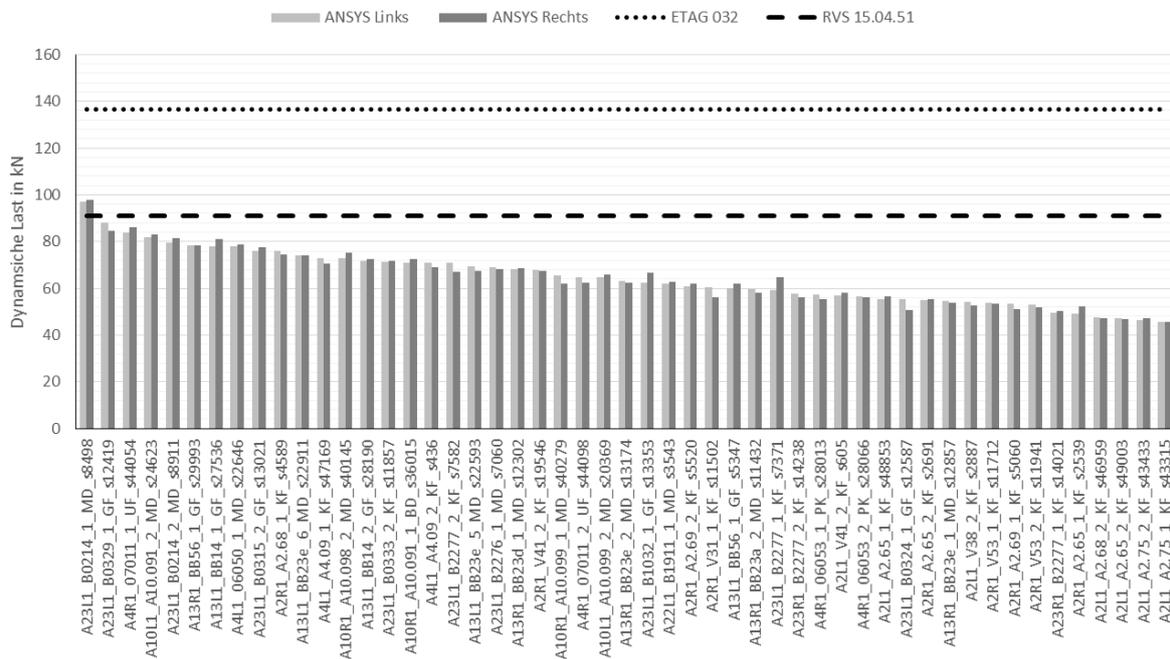


Abbildung 131 Vergleich dyn. Lasterhöhung ANSYS mit Normung

10.3.2 FTire

Die dynamische Lasterhöhung des verwendeten LKW – Modelles an den gemessenen Höhenprofilen ist zum Teil größer als in den Normen berücksichtigt und wird in Abbildung 132 dargestellt. Von insgesamt 102 Simulationen mit FTire sind 9 Faktoren größer als in ETAG 032 ($\varphi_{fat} * \Delta\varphi_{fat} = 1,2 * 1,3 = 1,56$) berücksichtigt, bzw. 28 Faktoren als in der RVS 15.04.51 ($\varphi_V = 1,4$) angegeben.

Betrachtet man die in Abbildung 133 dargestellten Absolutwerte der dynamischen Last, bietet sich wiederum ein anderes Bild. Die dynamische Last der ETAG 032 von 136,5 kN und der RVS 15.04.51 von 91 kN wird kein einziges Mal überschritten.

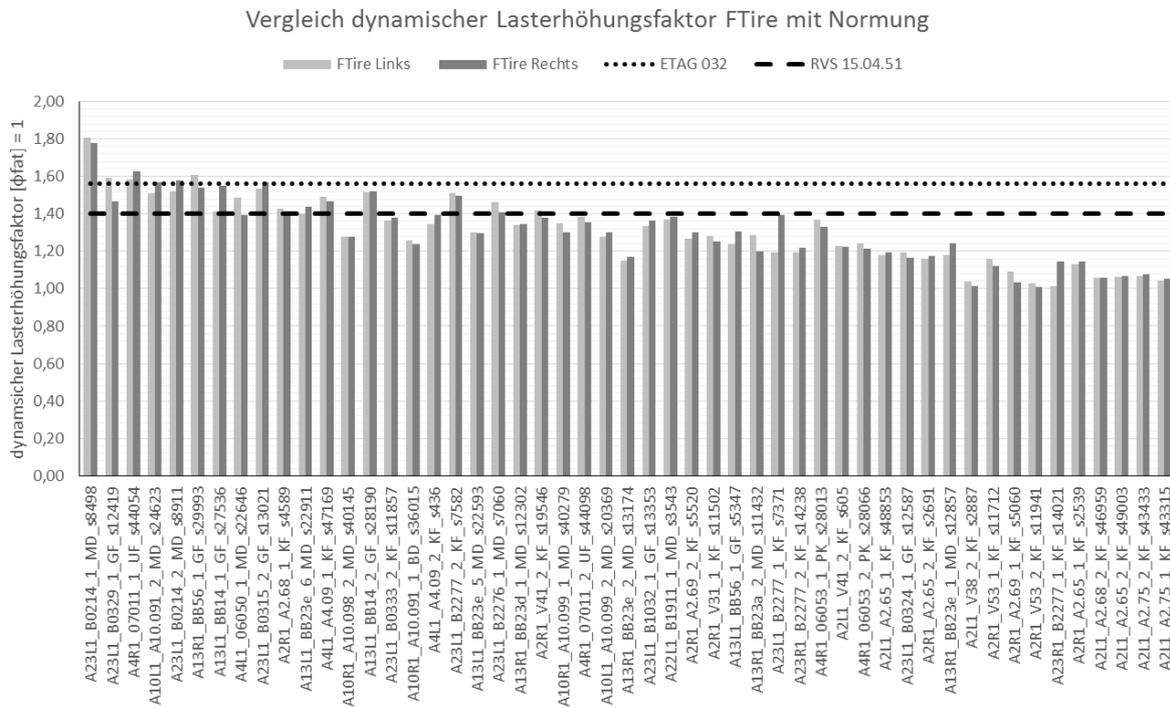


Abbildung 132 Vergleich dyn. Lasterhöhungsfaktor FTire mit Normung

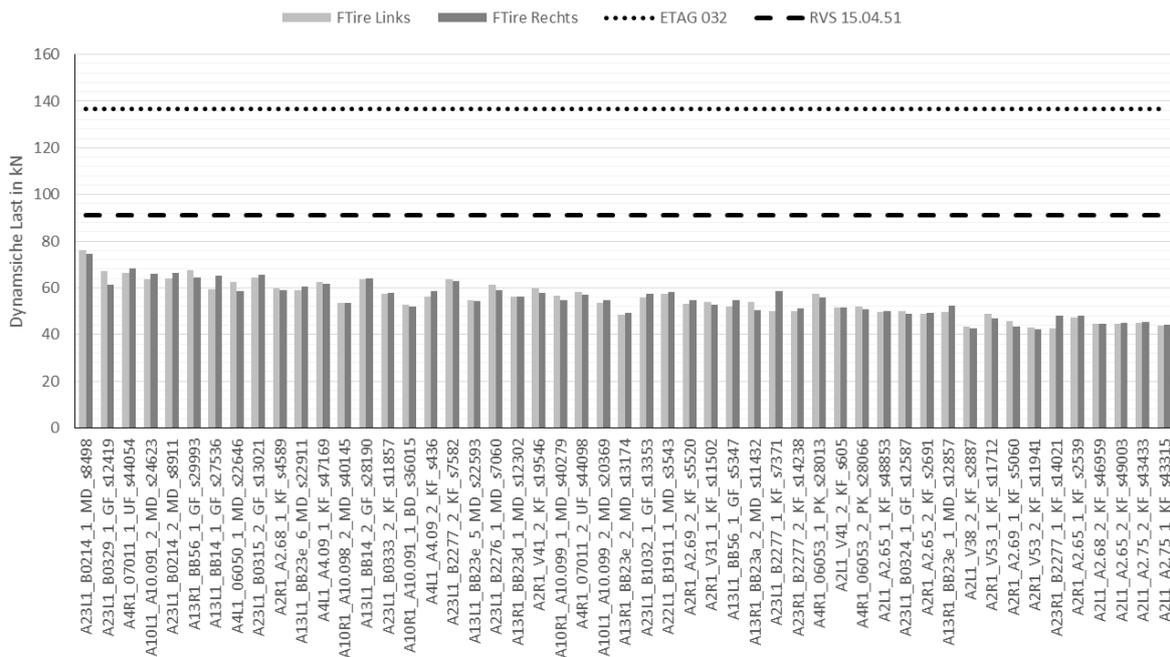


Abbildung 133 Vergleich dyn. Lasterhöhung FTire mit Normung

10.3.3 Dymola

Die dynamische Lasterhöhung des verwendeten LKW – Modelles an den gemessenen Höhenprofilen ist zum Teil größer als in den Normen berücksichtigt und wird in Abbildung 134 dargestellt. Von insgesamt 96 Simulationen mit Dymola sind 42 Faktoren größer als in ETAG

032 ($\varphi_{fat} * \Delta\varphi_{fat} = 1,2 * 1,3 = 1,56$) berücksichtigt, bzw. 64 Faktoren als in der RVS 15.04.51 ($\varphi_V = 1,4$) angegeben.

Betrachtet man die in Abbildung 135 dargestellten Absolutwerte der dynamischen Last, bietet sich wiederum ein anderes Bild. Die dynamische Last der ETAG 032 von 136,5 kN wird bei keinem Höhenverlauf erreicht, die dynamische Last der RVS 15.04.51 von 91 kN wird zweimal überschritten.

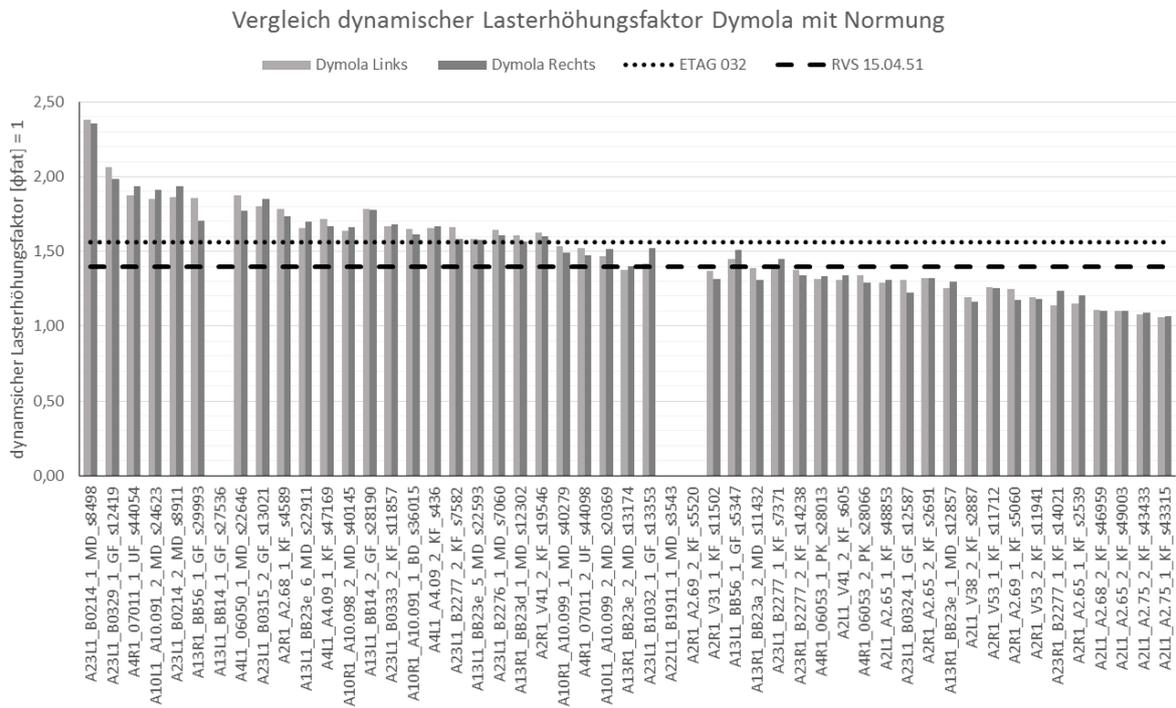


Abbildung 134 Vergleich dyn. Lasterhöhungsfaktor Dymola mit Normung

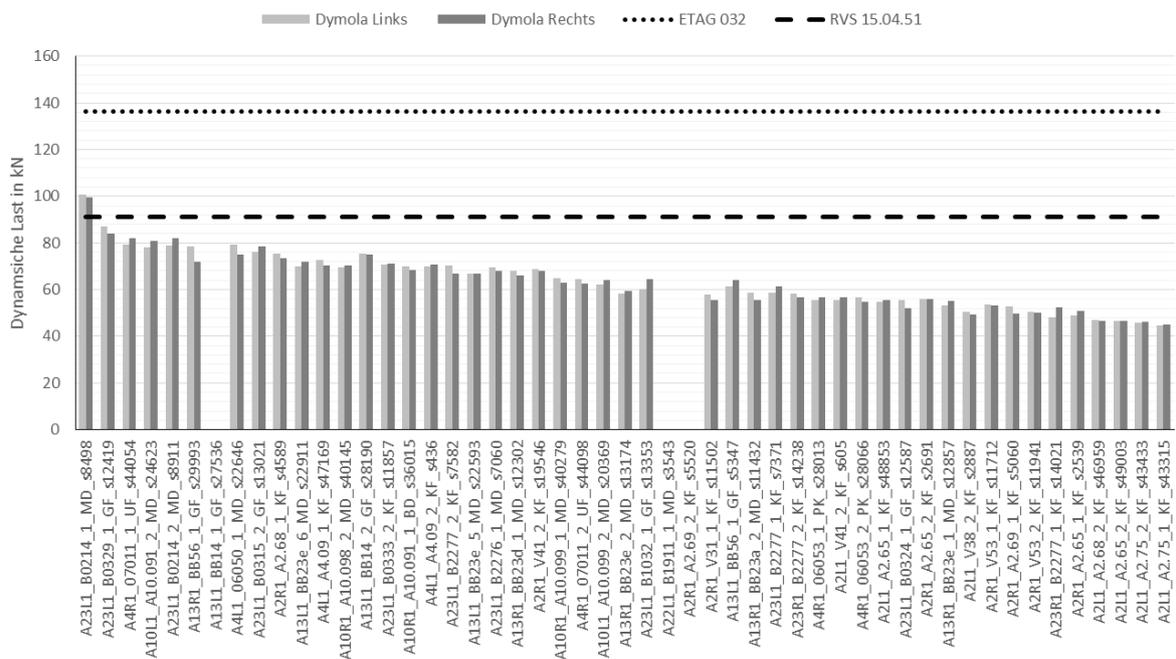


Abbildung 135 Vergleich dyn. Lasterhöhung Dymola mit Normung

10.3.4 Dynamischer Lasterhöhungsfaktor nach Konstruktionstypen

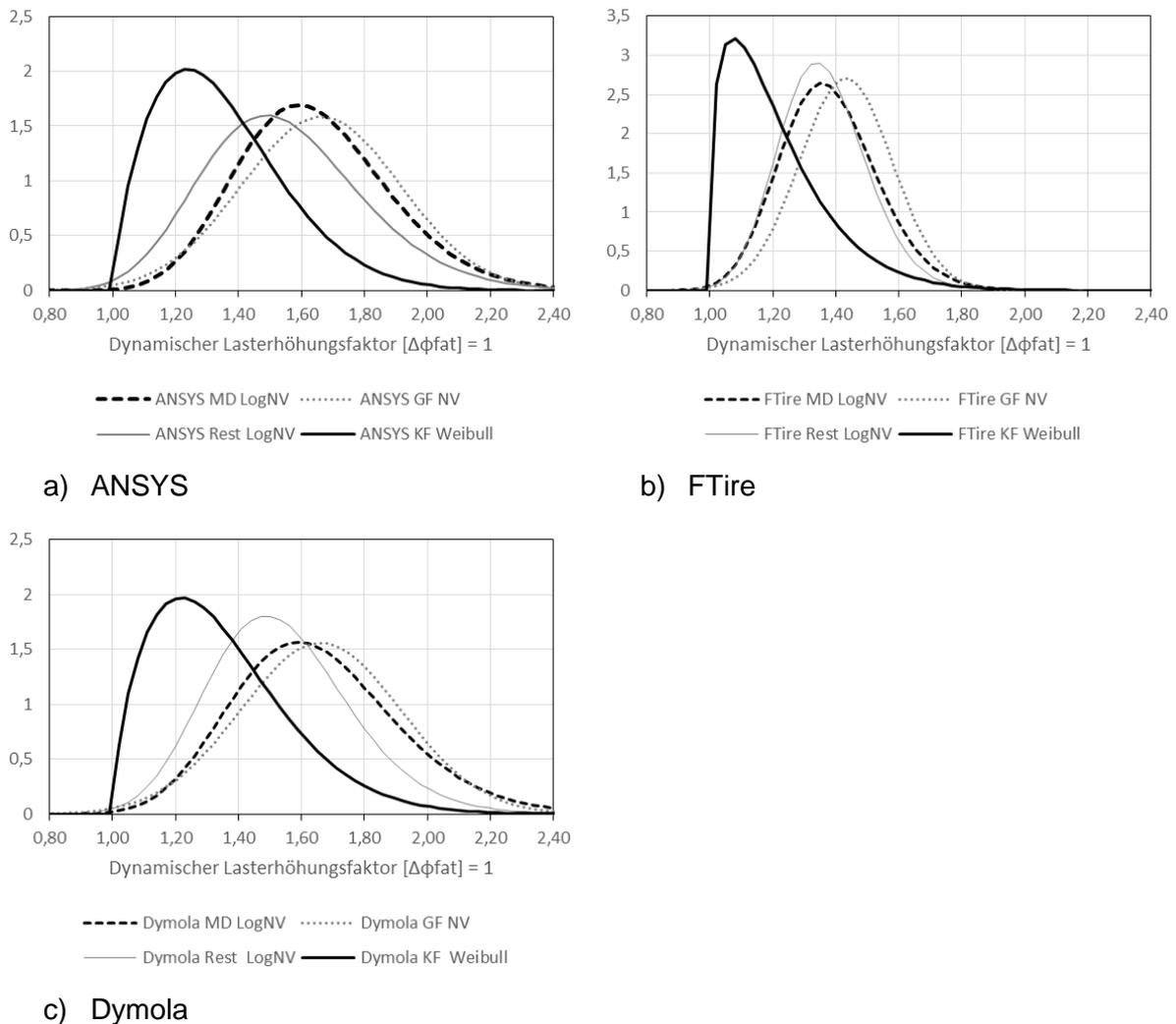


Abbildung 136 Vergleich dynamische Lasterhöhungsfaktoren der Konstruktionstypen; ANSYS: a); FTire: b); Dymola: c); Modulardehnfuge (MD), Gleitfingerkonstruktion (GF), Kragfingerkonstruktion (KF), Sonstige Typen (Rest)

In Abbildung 136 sind die Verteilungen der Simulationsergebnisse (Lagemaße siehe Tabelle 72 bis Tabelle 74), getrennt nach der verwendeten Simulationssoftware, der einzelnen Konstruktionstypen dargestellt. Es zeigt sich, dass Kragfingerübergänge deutlich niedrigere dynamische Lasterhöhungsfaktoren und somit dynamische Lasten aufweisen, als die restlichen Kostruktionstypen, wie Gleitfingerkonstruktionen und Modulardehnfugen. Ein möglicher Grund für das bessere Abschneiden der Kragfingerkonstruktion im Vergleich zur Modulardehnfuge könnte die glattere Oberfläche sein, die bei Überfahrt den nachfolgenden Fahrbahnbelag mit einer geringeren dynamischen Last beansprucht und somit zu geringeren Verformungen der Deckschicht führt. Diese Verformungen des Fahrbahnbelages führen zu höheren dynamischen Lasten. Eine weitere Möglichkeit könnte eine unterschiedliche Altersstruktur der Konstruktionstypen sein. Da die Baujahre der Konstruktionen nicht vollständig vorliegen, ist hier keine Aussage möglich.

Tabelle 72 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ANSYS

	Anzahl	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum	Verteilung
Modular Dehnfuge	30	1,25	1,46	1,60	1,80	2,28	Lognormal
Gleifingerkonstruktion	14	1,18	1,45	1,73	1,82	2,05	Normal
Kragfingerkonstruktion	46	1,06	1,19	1,30	1,54	1,77	Weibull
Restliche Konstruktionsarten	10	1,29	1,32	1,48	1,68	2,00	Lognormal

Tabelle 73 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren FTire

	Anzahl	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum	Verteilung
Modular Dehnfuge	30	1,15	1,28	1,35	1,46	1,81	Lognormal
Gleifingerkonstruktion	14	1,16	1,33	1,49	1,54	1,61	Normal
Kragfingerkonstruktion	46	1,01	1,07	1,19	1,36	1,51	Weibull
Restliche Konstruktionsarten	10	1,21	1,24	1,34	1,38	1,63	Lognormal

Tabelle 74 Lagemaße der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren Dymola

	Anzahl	Minimum	unteres Quartil	Median	oberes Quartil	Maximum	Verteilung
Modular Dehnfuge	28	1,25	1,48	1,61	1,79	2,38	Lognormal
Gleifingerkonstruktion	14	1,23	1,46	1,74	1,84	2,06	Normal
Kragfingerkonstruktion	44	1,06	1,17	1,31	1,59	1,78	Weibull
Restliche Konstruktionsarten	10	1,29	1,34	1,50	1,64	1,94	Lognormal

10.4 Vergleich der Ergebnisse mit der aktuellen Normung

10.4.1 Dynamische Lasterhöhungsfaktoren

Es werden die vorgegebenen dynamischen Lasterhöhungsfaktoren der Normen mit den an die Simulationsergebnisse angepassten (siehe Kapitel 8.1.1) Lognormalverteilungen verglichen. In Abbildung 101 sind die Verteilungsfunktionen der an die empirischen Lasterhöhungsfaktoren angepassten Lognormalverteilung und die Vorgaben der Normung dargestellt. Die Vorgabe der ETAG 032 [7] für den Faktor ($\varphi_{fat} * \Delta\varphi_{fat} = 1,2 * 1,3 = 1,56$) wird von 39% (ANSYS), 9% (FTire) und 38% (Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten. Auch die Vorgabe der RVS 15.04.51 [17] von 1,4 für den Faktor wird von 62% (ANSYS), 29% (FTire) und 61% (Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten. Legt man zur Bestimmung des Design – Wertes der dynamischen Last zur Auslegung einer Fahrbahnübergangskonstruktion einen dynamischen Lasterhöhungsfaktor zugrunde, der von 95% der Fahrbahnübergangskonstruktionen unterschritten wird, so muss ein Wert des Lasterhöhungsfaktors von 2,00 (ANSYS und Dymola) bzw. 1,62 (FTire) herangezogen werden. Der Vergleich der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren ist jedoch problematisch, da eine starke Abhängigkeit des Betrages der Faktoren von der Höhe der statischen Last besteht. Bei steigender statischer Last sinkt der dynamische Lasterhöhungsfaktor (siehe Kapitel 8.8, [1], [16], [3]). Da die statischen Lasten der Ermüdungslastmodelle der Normen mit +22 kN (RVS 15.04.51) und +62 kN (ETAG 032) wesentlich über jenen der simulierten LKW-Modelle liegen, ist rein der Vergleich der Lasterhöhungsfaktoren wenig aussagekräftig.

Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren

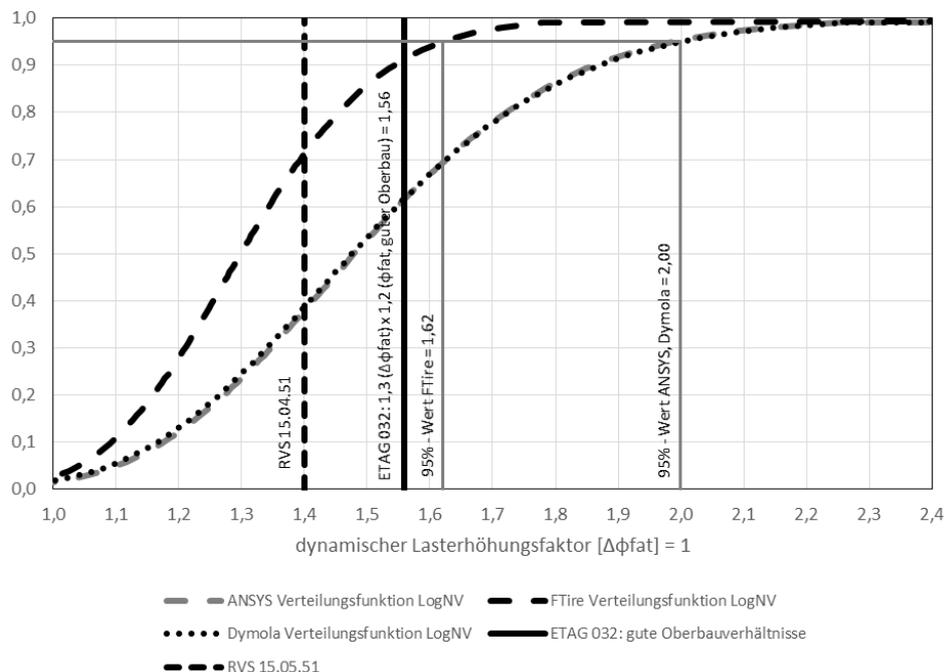


Abbildung 137 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren im Vergleich zur Normung

10.4.2 Dynamische Lasterhöhung

In Abbildung 102 sind die Verteilungsfunktionen der an die empirischen Lasterhöhungsfaktoren angepassten Lognormalverteilung (siehe Kapitel 8.1.1), multipliziert mit den statischen Lasten und die Vorgaben der Normung dargestellt. Die Vorgabe der ETAG 032 von 136,5 kN (siehe ETAG 032 5.1.2) für die dynamische Last wird von weniger als 0,1% (ANSYS, FTire und Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten. Auch die Vorgabe der RVS 15.04.51 (siehe 5.1.1) von 91 kN für die dynamische Last wird nur von 2% (ANSYS), weniger als 0,1% (FTire) und 2% (Dymola) der Fahrbahnübergangskonstruktionen überschritten.

Die dynamischen Lasten der Simulationen ergeben sich rein aus dem Verlauf des Höhenprofils, welches als starr angenommen wurde. Etwaige Dämpfungen aufgrund von Verformungen der Fahrbahnübergangskonstruktionen oder zusätzliche dynamische Lasten aufgrund von Resonanzen (siehe Kapitel 9; [19], [16], [20]) konnten nicht simuliert werden.

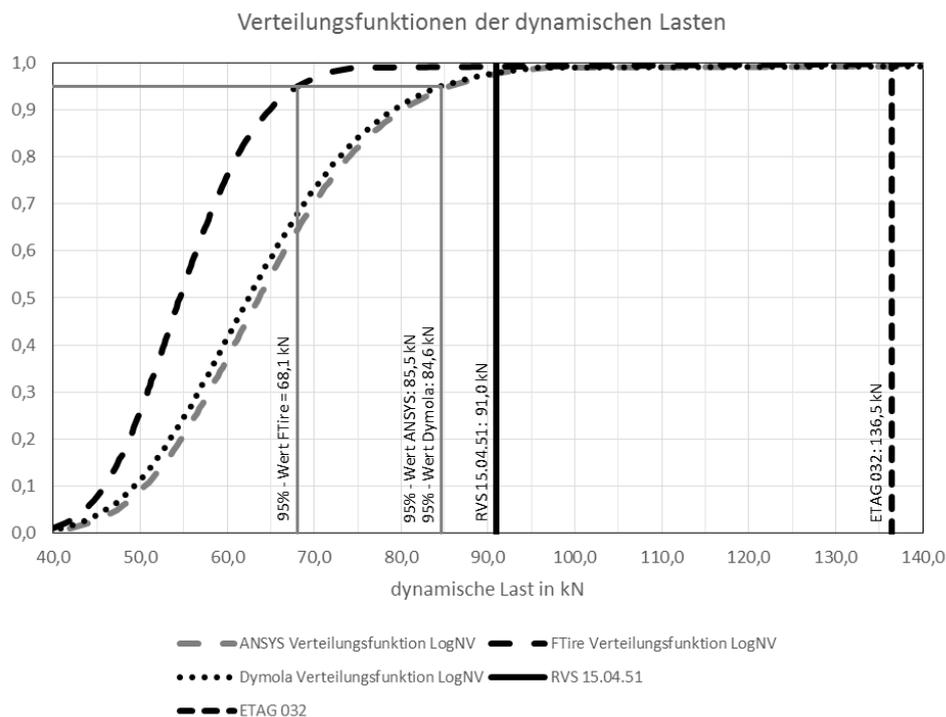


Abbildung 138 Verteilungsfunktionen der dynamischen Lasten im Vergleich zur Normung

10.5 Einfluss der Längsneigung der Fahrbahn auf die dynamische Lasterhöhung

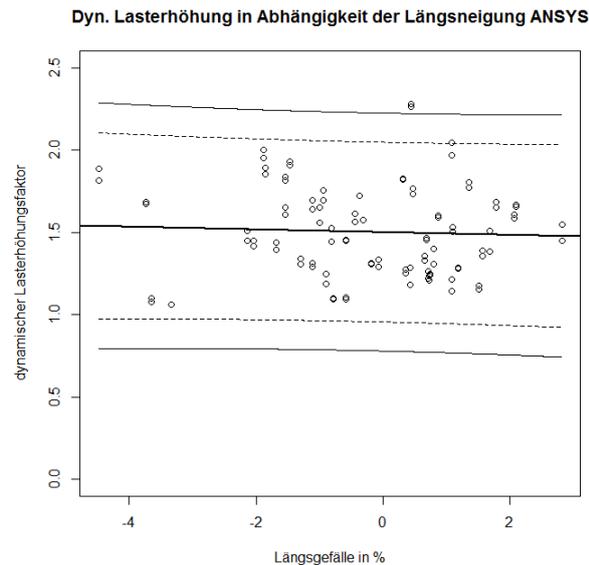


Abbildung 139 QQ-Plot dynamischer Lasterhöhungsfaktor gegenüber Längsgefälle; Regressionsgeraden (dick), 95% Konfidenzintervallen (strichliert) und den 99% Konfidenzintervallen (dünn)

Abbildung 139 zeigt beispielhaft den QQ Plot der dynamischen Lasterhöhungsfaktoren und dem Längsgefälle und ebenso die Regressionsgerade (dicke Linie) mit den Grenzen des 95% Konfidenzintervalls (strichlierte Linie) der ANSYS-Simulationen. Folgende Regressionsmodelle wurden angenommen:

$$\varphi_{ANSYS} = \alpha + \beta * I + \epsilon$$

$$\varphi_{FTire} = \alpha + \beta * I + \epsilon$$

$$\varphi_{Dymola} = \alpha + \beta * I + \epsilon$$

Wobei α und β die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 65), ϵ den Fehler, φ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor und I das Längsgefälle in Prozent darstellen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,3% (ANSYS), 1% (FTire) und 0,02% (Dymola) (siehe Tabelle 75), man kann also nur einen sehr kleinen Teil der Varianz des dynamischen Lasterhöhungsfaktors φ durch die verwendeten Regressionsmodelle erklären. Es kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Längsneigung und dem dynamischen Lasterhöhungsfaktors festgestellt werden.

Tabelle 75 Koeffizienten der linearen Regression Gefälle - Lasterhöhungsfaktor

	α	β	R^2
ANSYS	1,5014	-0,0086	0,0025
FTire	1,3074	-0,0111	0,0099
Dymola	1,5012	-0,0028	0,0002

10.6 Vergleich der einzelnen Simulationsergebnisse

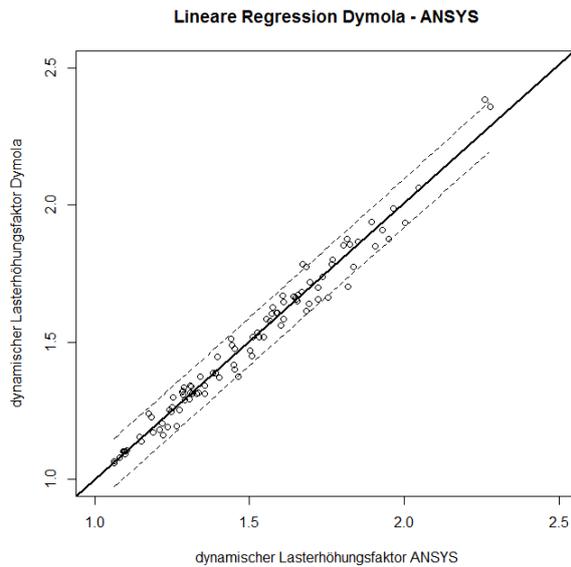


Abbildung 140 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS - Dymola mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)

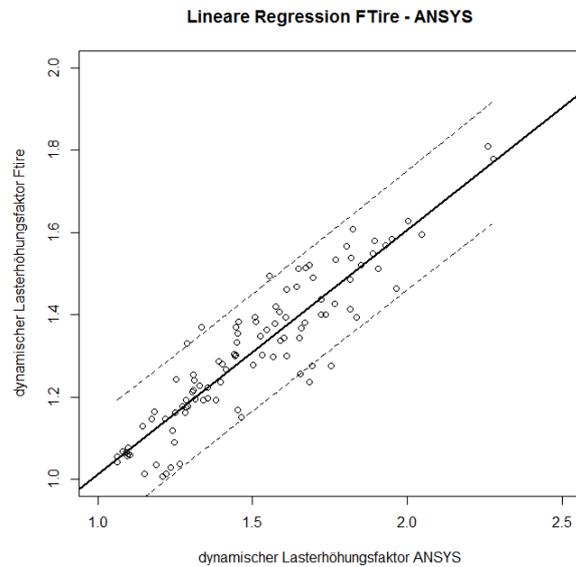


Abbildung 141 QQ Plot dynamische Lasterhöhungsfaktoren ANSYS – FTire mit Regressionsgerade (dick) und 95% Konfidenzintervall (strichliert)

In Abbildung 140 und Abbildung 141 sind die Ergebnisse der Simulationen in einem QQ Plot samt Regressionsgerade und 95% Konfidenzintervall gegenübergestellt. Folgende Regressionsmodelle wurden angenommen:

$$\Delta\varphi_{Dymola} = \alpha + \beta * \Delta\varphi_{ANSYS} + \epsilon$$

$$\Delta\varphi_{FTire} = \alpha + \beta * \Delta\varphi_{ANSYS} + \epsilon$$

$$\Delta\varphi_{FTire} = \alpha + \beta * \Delta\varphi_{Dymola} + \epsilon$$

Wobei α und β die Regressionskoeffizienten (siehe Tabelle 76), ϵ den Fehler, $\Delta\varphi$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor und $\Delta\varphi$ den dynamischen Lasterhöhungsfaktor darstellen. Es zeigt sich, dass ANSYS und Dymola aufgrund der Ähnlichkeit der LKW – und Reifenmodelle sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt hier 97,6%. Im Gegensatz dazu sind die FTire Ergebnisse aufgrund des grundverschiedenen Reifenmodells deutlich niedriger; die Bestimmtheitsmaße R^2 betragen 83,4% (FTire-ANSYS) bzw. 88,2% (FTire – Dymola).

Tabelle 76 Koeffizienten der linearen Regression

	α	β	R^2
ANSYS – Dymola	-0,01075	1,00889	0,9763
FTire – ANSYS	0,4172	0,5940	0,8385
FTire – Dymola	0,4054	0,5997	0,8823

10.7 Einfluss der Geschwindigkeit auf die dynamische Lasterhöhung

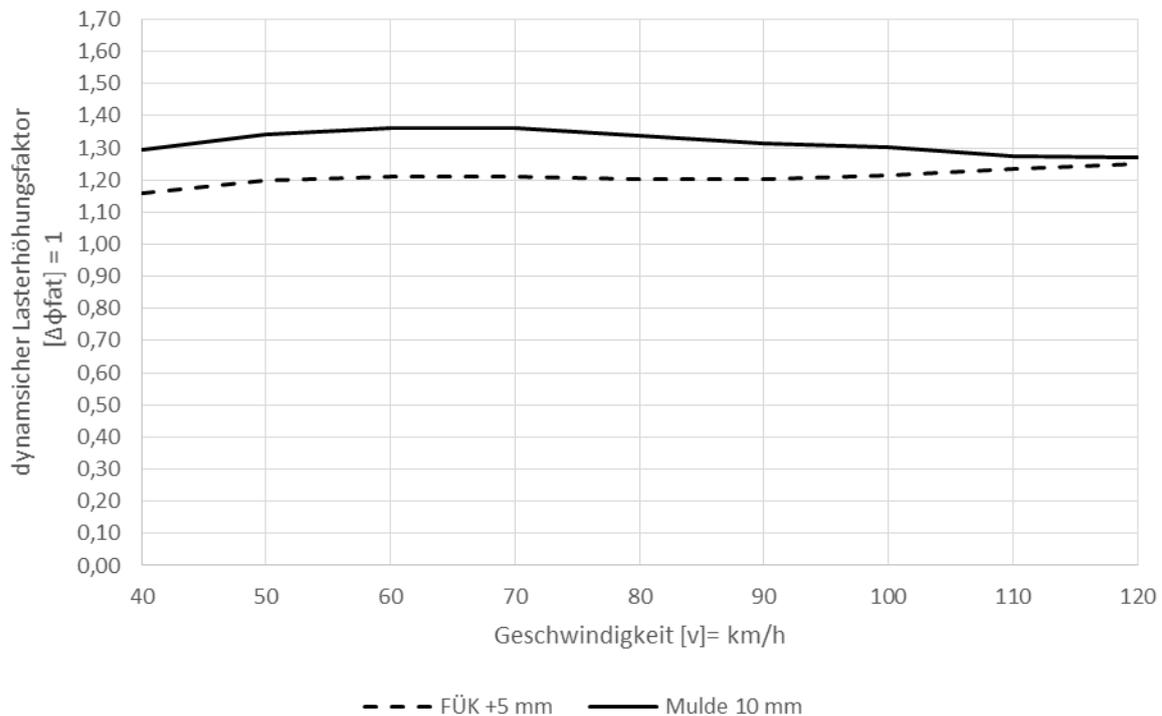


Abbildung 142 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Abbildung 142 zeigt die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren in Abhängigkeit der Geschwindigkeit an den idealisierten Höhenverläufen „Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut“ und „Mulde 10 mm tief“, wobei die Simulation mittels FTire erfolgte.

Der Lasterhöhungsfaktor am Höhenverlauf „FÜK +5 mm“ ist über einen weiten Geschwindigkeitsbereich stabil, so beträgt der Faktor von 50 km/h bis 100 km/h 1,20 bis 1,21. Betrachtet man den gesamten simulierten Geschwindigkeitsbereich von 40 km/h bis 120 km/h, so schwankt der Faktor von 1,16 bis 1,25.

Der Lasterhöhungsfaktor am Höhenverlauf „Mulde 10 mm“ ist ebenso relativ stabil. Über den gesamten Geschwindigkeitsbereich von 40 km/h bis 120 km/h schwankt der Faktor von 1,27 bis 1,36, wobei das Maximum bei einer Geschwindigkeit von 60 bis 70 km/h auftritt. Ashebo et al. [3] stellen in ihrer Studie fest, dass der Zusammenhang des dynamischen Lasterhöhungsfaktor an Brücken mit der Geschwindigkeit ab 55 km/h nicht klar ist, darunter steigt der Faktor mit der Geschwindigkeit.

10.8 Einfluss der statischen Last auf die dynamische Lasterhöhung

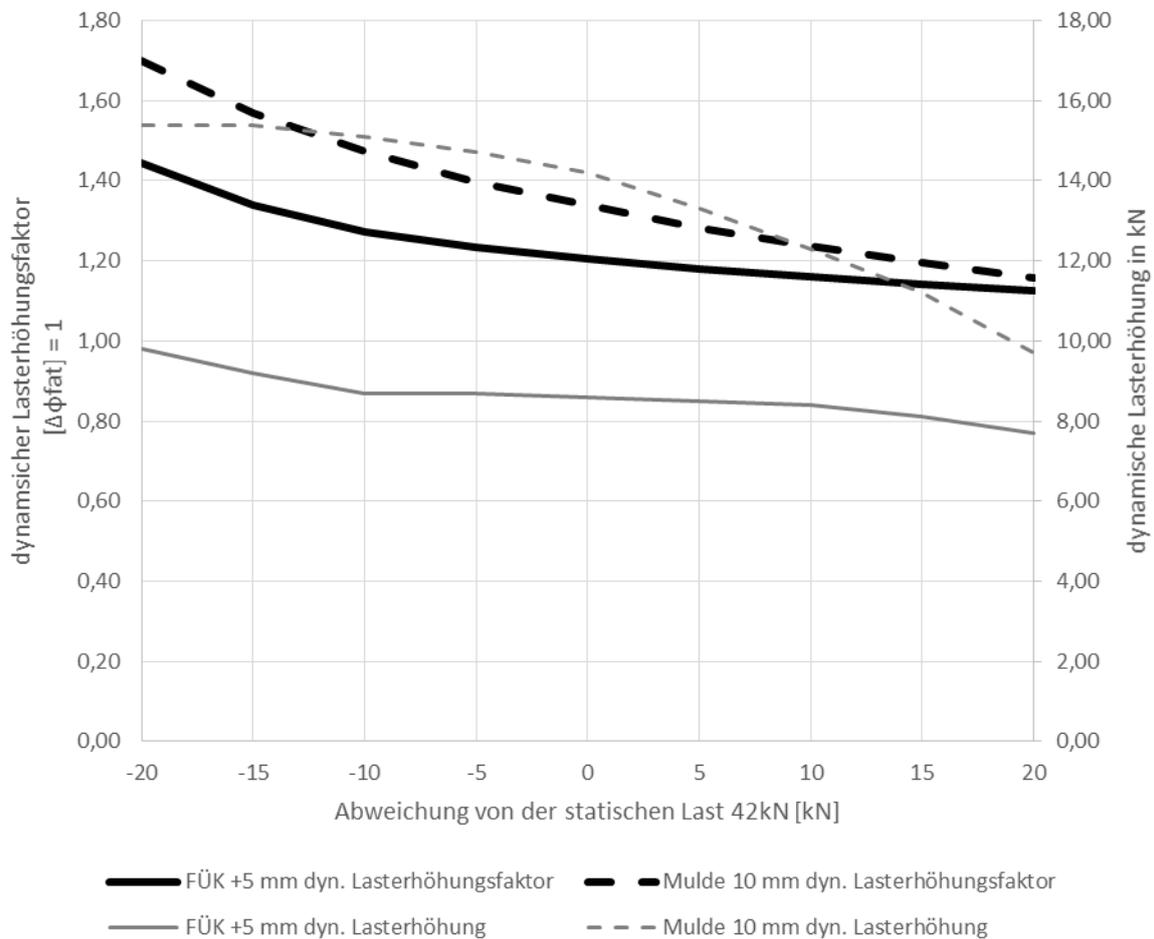


Abbildung 143 Verlauf des dynamischen Lasterhöhungsfaktor und der dynamischen Lasterhöhung in Abhängigkeit der statischen Last; FÜK +5 mm und Mulde 10 mm

Abbildung 143 zeigt die dynamischen Lasterhöhungsfaktoren in Abhängigkeit der gefederten Masse an den idealisierten Höhenverläufen „Fahrbahnübergangskonstruktion 5 mm erhöht eingebaut“ und „Mulde 10 mm tief“, wobei die Simulation mittels FTire erfolgte.

Es besteht eine starke Abhängigkeit des dynamischen Lasterhöhungsfaktors und auch der dynamischen Lasterhöhung von der statischen Last. Mit zunehmender statischen Last sinkt bei gleichbleibenden Feder – Dämpfer – System sowohl der Lasterhöhungsfaktor als auch die dynamische Lasterhöhung. So nimmt der Lasterhöhungsfaktor von 1,45 (FÜK +5 mm) bzw. 1,70 (Mulde 10 mm) auf 1,12 (FÜK +5 mm) bzw. 1,16 (Mulde 10 mm) ab. Die dynamische Lasterhöhung nimmt von 9,8 kN (FÜK +5 mm) bzw. 15,4 kN (Mulde 10 mm) auf 7,7 kN (FÜK +5 mm) bzw. 9,7 kN (Mulde 10 mm) ab. Dies deckt sich auch mit der US-amerikanischen Norm „AASHTO LRFD Bridge Design Specifications“ [1], wo ebendies angemerkt wird. Ashebo et al. [3] stellen in ihrer Studie fest, dass der dynamische Lasterhöhungsfaktor an Brücken mit der Last des Fahrzeuges sinkt.

11 Schlussfolgerungen

- Die Ergebnisse der ANSYS – und Dymola – Simulationen sind unter den verwendeten Modellen nahezu ident. FTire liefert mit seinem physikalischen Reifenmodell deutlich niedrigere Werte.
- Ein erhöhter Einbau der Fahrbahnübergangskonstruktion ist zu vermeiden, da hier das Maximum der dynamischen Last jedenfalls auf dem Übergang auftritt. Ein vertiefter Einbau kann bei Konstruktionen kürzer als 1,5m den Fahrbahnübergang schützen, da hier das Maximum der dynamischen Last auf der Fahrbahn hinter der Konstruktion auftritt. Um jedoch die dynamischen Lasten generell zu minimieren, ist ein möglichst ebener Einbau anzustreben.
- Der dynamische Lasterhöhungsfaktor und auch die dynamische Lasterhöhung zeigen eine starke Abhängigkeit von der Höhe der statischen Last. Sie sinken mit steigender statischer Last.
- Die Geschwindigkeit spielt in einem Bereich von 40 – 120 km/h eine untergeordnete Rolle bezüglich der dynamischen Lasterhöhung, sie liegt immer in derselben Größenordnung.
- Die Ebenheit der Fahrbahn im Bereich der Fahrbahnübergangskonstruktionen ist nach Jahren in Betrieb oft sehr schlecht, dadurch treten unnötigerweise hohe dynamische Lasten nahe oder auf den Konstruktionen auf. Dies kann durch Stützrippen verbessert oder vermieden werden.
- Die dynamischen Lasten steigen mit dem Alter der Konstruktionen aufgrund von Beschädigung und Verschleiß der Fahrbahn, bzw. unsachgemäße Herstellung des Anschlusses an die Fahrbahn bei Erneuerung des Fahrbahnbelages.
- Bei Wartung eines Bereichs von 4m vor der Fahrbahnübergangskonstruktion kann die dynamische Lasterhöhung an der Konstruktion, zumindest auf der Einwirkungsseite, fast zur Gänze vermieden werden. Zu einer deutlichen Reduzierung der dynamischen Lasten an den Übergängen reichen jedoch schon Stützrippen.
- Stützrippen sollten ausgeführt werden, um die dynamischen Lasten über einen längeren so gering als möglich zu halten.
- Die Annahme der ETAG 032 [7], dass der zusätzliche dynamische Faktor ab einer Entfernung von 6 m zur Konstruktion auf $\Delta\varphi_{fat} = 1,0$ sinkt, kann bestätigt werden, da ab dieser Entfernung die dynamischen Lasten nicht mehr dem Fahrbahnübergang zuzuordnen sind. Wie bei den Simulationen an idealisierten Höhenverläufen gezeigt, wirken heftige Diskontinuitäten im Profil maximal ca. 4,0 m nach, der Großteil der dynamischen Lasterhöhung ist bereits nach 1,5 m hinter einer Anregung abgeklungen.

- Der Großteil der Maximalwerte der dynamischen Lasten tritt bei den Simulationen unmittelbar nach der Fahrbahnübergangskonstruktion auf, und nicht direkt an der Konstruktion.
- Die Vertikallast des Lastmodell FLM1_{EJ} der ETAG 032 [7] für unbegrenzte Lebensdauer liegt deutlich über den simulierten dynamischen Lasten. Bei der Bemessung mit diesem Lastmodell sollte sich zumindest eine Verbesserung im Vergleich zu der Verwendung des Lastmodell der RVS 15.04.51 [17] hinsichtlich der Lebensdauer ergeben. Ob die Annahme einer unbegrenzten Lebensdauer gegeben ist, muss in Zukunft festgestellt werden.
- Die Vertikallast des Lastmodells der RVS 15.04.51 [17] liegt im Bereich der Maximalwerte der Simulationen und kann auch übertroffen werden.
- Kragfingerübergänge weisen eine deutlich niedrigere dynamische Lasterhöhung auf als andere Konstruktionstypen der untersuchten Fahrbahnübergänge. Die Ursache hierfür muss erst festgestellt werden.
- Bei der Lebensdauerabschätzung von bestehenden Brücken auf Basis des aufgezeichneten Verkehrs nach Eurocode 1, Teil 2 [8], Annex B ist die Wahl des dynamischen Lasterhöhungsfaktors im Bereich der Fahrbahnübergänge kritisch zu hinterfragen und jedenfalls anzupassen, da die Vorgaben der Normen bezüglich des Faktors in der Realität mit Leichtigkeit überschritten werden können.
- Die aufgrund des Höhenverlaufs auftretenden Horizontalkräfte sind im Vergleich zu den Bremskräften zu vernachlässigen.
- Durch Schäden an den Auflagern können bei Modulardehnfugen die auftretenden Lasterhöhungen um ein vielfaches ansteigen.

12 Ausblick

Bei weiteren Simulationen muss der Einfluss der Federkonstante und der Dämpfung des Lastwagenmodells auf die Ergebnisse der dynamischen Lasten betrachtet werden und neue idealisierte Profile erstellt werden, die einen konvexen oder konkaven Verlauf beinhalten, um die Annahmen in dieser Arbeit über das Verhalten der Reifenmodelle zu überprüfen.

Es ist erforderlich, Überfahrversuche, auch an idealisierten Profilen, durchzuführen, um die Ergebnisse der Simulationen hinsichtlich der Höhe der dynamischen Last überprüfen zu können.

Die Ursachen für die deutlich niedrigeren dynamischen Lasterhöhungsfaktoren an Kragfingerübergängen sind festzustellen.

Bei der Auslegung von Fahrbahnübergangskonstruktionen unter Verwendung des Lastmodells FLM1_{EJ} nach ETAG 032 muss nach dem Einbau beobachtet werden, ob sich die höheren Kräfte dieses Lastmodells, im Vergleich zu jener der RVS 15.04.51, in einer höheren Lebensdauer bzw. einer unbegrenzten Lebensdauer widerspiegeln. Dies kann nur über einen längeren Zeitraum erfolgen.

13 Literaturverzeichnis

- [1] American Association of state highway and transportation officials (AASHTO) Standard specifications for highway bridges. Washington (DC); 2012.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Organization: <http://www.transportation.org/Pages/Organization.aspx>. Accessed: 2015-02-24.
- [3] Ashebo, D.B., Chan, T.H.T. and Yu, L. 2007. Evaluation of dynamic loads on a skew box girder continuous bridge Part II: Parametric study and dynamic load factor. *Engineering Structures*. 29, 6 (2007), 1064 – 1073.
- [4] Austrian Standards ÖNORM B 4031, Brückenausrüstung -
Fahrbahnübergangskonstruktionen.
- [5] Coelho, B.Z., Vervuurt, A.H.J.M., Peelen, W.H.A. and Leendertz, J.S. 2013. Dynamics of modular expansion joints: The Martinus Nijhoff Bridge. *Engineering Structures*. 48, 0 (2013), 144 – 154.
- [6] Cramer, E. and Kamps, U. 2014. Wahrscheinlichkeitsrechnung. *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik*. Springer Berlin Heidelberg.
- [7] ETAG 32 Expansion Joints for Road Bridges. Brussels : 2013.
- [8] Eurocode 1 Actions on structures—Part 2: Traffic loads on bridges. The European Standard EN 1991-2:2003.
- [9] FTire Product Brief: http://www.cosin.eu/prod_FTire. Accessed: 2015-10-23.
- [10] Gipser, Michael. Präsentation FTire:
http://www.cosin.eu/res/FTire_2013_no_movies.zip. Accessed: 2014-03-14.
- [11] Gunacker, D. 2014. *Innovative Fahrbahnübergangskonstruktionen: Bemessungskonzepte numerische Verifikation, Masterarbeit*. Universität für Bodenkultur.
- [12] Hirschberg, W., Palcak, F., Rill, G., Sotnik, J. and Kintler, P. TMEASY FOR RELIABLE VEHICLE DYNAMICS SIMULATION. *SCIENTIFIC PROCEEDINGS 2009, Faculty of Mechanical Engineering, STU in Bratislava*.
- [13] Kurzfassung Projekt EVAF: http://evaf.boku.ac.at/New_EVAF.php?num=1. Accessed: 2015-03-20.
- [14] Lachinger, S., Spielhofer, R., Strauss, A., Zimmermann, T. and Kleiser, M. Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergänge; Forschungsprojekt EVAF - Mobile Datenerfassung - Analyse der dynamischen Belastung.
- [15] Maurer, Peter. RoadSTAR, Erfassung von Straßenzustand, Straßenumfeld und Trassierungsparameter, Folder AIT Austrian Institute of Technology.:
http://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/mobility/downloads/RoadSTAR_Folder_klein_de_Jan11_lowres.pdf. Accessed: 2014-12-13.
- [16] Roeder, C.W. 1998. Fatigue and dynamic load measurements on modular expansion joints. *Construction and Building Materials*. 12, 2–3 (1998), 143 – 150.
- [17] RVS 15.04.51 Brücken, Brückenausrüstung, Übergangskonstruktionen: Ausführungsbestimmungen. 22. März 2011. GZ BMVIT-300.041/0059-II/ST-ALG/2010. BMVIT und FSV.
- [18] Skript Fahrzeugdynamik FH Regensburg: http://www.autogumi.com/FDV_Skript.pdf. Accessed: 2015-01-13.
- [19] Steenbergen, M.J.M.M. 2004. Dynamic response of expansion joints to traffic loading. *Engineering Structures*. 26, 12 (2004), 1677 – 1690.
- [20] Zi, G. and Zhu, X. 2014. Asymmetric vibration of finger-type bridge expansion joint for design consideration. *Engineering Structures*. 70, 0 (2014), 53 – 62.

13.1 Verzeichnis Anhang

- 1) Anhang Ergebnisse gemessene Höhenverläufe
- 2) Lebenslauf

13.2 Verzeichnis CD

Projekt EVAF (Entwicklung verschleißarmer Fahrbahnübergangskonstruktionen)

- 1) Zielsetzung
- 2) RoadStar
- 3) Ergebnisse Arbeitspaket 1 und Arbeitspaket 2
- 4) Präsentation Arbeitspaket 3
- 5) Präsentation Arbeitspaket 4
- 6) Bericht Arbeitspaket 1 und Arbeitspaket 2
- 7) Schadenskatalog EVAF
- 8) Stand EVAF April 2014
- 9) Präsentation Projektstand AIT
- 10) Präsentation Projektstand BOKU
- 11) Bewertungsbogen A2
- 12) Datenblätter A4
- 13) Datenblätter A10
- 14) Datenblätter A13
- 15) Datenblätter A22
- 16) Datenblätter A23

Anhang 1

Ergebnisse gemessene Höhenverläufe

Inhaltsverzeichnis Anhang

1	A4L1_A4.09_2_KF_s436	7
2	A2L1_V41_2_KF_s605	8
3	A2R1_A2.65_1_KF_s2539	9
4	A2R1_A2.65_2_KF_s2691	10
5	A2L1_V38_2_KF_s2887	11
6	A22L1_B1911_1_MD_s3543	12
7	A2R1_A2.68_1_KF_s4589	13
8	A2R1_A2.69_1_KF_s5060	14
9	A13L1_BB56_1_GF_s5347	15
10	A2R1_A2.69_2_KF_s5520	16
11	A23L1_B2276_1_MD_s7060	17
12	A23L1_B2277_1_KF_s7371	18
13	A23L1_B2277_2_KF_s7582	19
14	A23L1_B0214_1_MD_s8498	20
15	A23L1_B0214_2_MD_s8911	21
16	A13R1_BB23a_2_MD_s11432	22
17	A2R1_V31_1_KF_s11502	23
18	A2R1_V53_1_KF_s11712	24
19	A23L1_B0333_2_KF_s11857	25
20	A2R1_V53_2_KF_s11941	26
21	A13R1_BB23d_1_MD_s12302	27
22	A23L1_B0329_1_GF_s12419	28
23	A23L1_B0324_1_GF_s12587	29
24	A13R1_BB23e_1_MD_s12857	30
25	A23L1_B0315_2_GF_s13021	31
26	A13R1_BB23e_2_MD_s13174	32
27	A23L1_B1032_1_GF_s13353	33
28	A23R1_B2277_1_KF_s14021	34
29	A23R1_B2277_2_KF_s14238	35
30	A2R1_V41_2_KF_s19546	36
31	A10L1_A10.099_2_MD_s20369	37
32	A13L1_BB23e_5_MD_s22593	38
33	A4L1_06050_1_MD_s22646	39
34	A13L1_BB23e_6_MD_s22911	40
35	A10L1_A10.091_2_MD_s24623	41
36	A13L1_BB14_1_GF_s27536	42
37	A4R1_06053_1_PK_s28013	43
38	A4R1_06053_2_PK_s28066	44
39	A13L1_BB14_2_GF_s28190	45
40	A13R1_BB56_1_GF_s29993	46
41	A10R1_A10.091_1_BD_s36015	47
42	A10R1_A10.098_2_MD_s40145	48
43	A10R1_A10.099_1_MD_s40279	49

44	A2L1_A2.75_1_KF_s43315	50
45	A2L1_A2.75_2_KF_s43433	51
46	A4R1_07011_1_UF_s44054	52
47	A4R1_07011_2_UF_s44098	53
48	A2L1_A2.68_2_KF_s46959	54
49	A4L1_A4.09_1_KF_s47169	55
50	A2L1_A2.65_1_KF_s48853	56
51	A2L1_A2.65_2_KF_s49003	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ergebnisse A4L1_A4.09_2_KF_s436	7
Tabelle 2 Ergebnisse A2L1_V41_2_KF_s605	8
Tabelle 3 Ergebnisse A2R1_A2.65_1_KF_s2539.....	9
Tabelle 4 Ergebnisse A2R1_A2.65_2_KF_s2691	10
Tabelle 5 Ergebnisse A2L1_V38_2_KF_s2887	11
Tabelle 6 Ergebnisse A22L1_B1911_1_MD_s3543	12
Tabelle 7 Ergebnisse A2R1_A2.68_1_KF_s4589.....	13
Tabelle 8 Ergebnisse A2R1_A2.69_1_KF_s5060.....	14
Tabelle 9 Ergebnisse A13L1_BB56_1_GF_s5347.....	15
Tabelle 10 Ergebnisse A2R1_A2.69_2_KF_s5520.....	16
Tabelle 11 Ergebnisse A23L1_B2276_1_MD_s7060	17
Tabelle 12 Ergebnisse A23L1_B2277_1_KF_s7371	18
Tabelle 13 Ergebnisse A23L1_B2277_2_KF_s7582	19
Tabelle 14 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498	20
Tabelle 15 Ergebnisse A23L1_B0214_2_MD_s8911	21
Tabelle 16 Ergebnisse A13R1_BB23a_2_MD_s11432	22
Tabelle 17 Ergebnisse A2R1_V31_1_KF_s11502.....	23
Tabelle 18 Ergebnisse A2R1_V53_1_KF_s11712.....	24
Tabelle 19 Ergebnisse A23L1_B0333_2_KF_s11857	25
Tabelle 20 Ergebnisse A2R1_V53_2_KF_s11941.....	26
Tabelle 21 Ergebnisse A13R1_BB23d_1_MD_s12302	27
Tabelle 22 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419.....	28
Tabelle 23 Ergebnisse A23L1_B0324_1_GF_s12587	29
Tabelle 24 Ergebnisse A13R1_BB23e_1_MD_s12857	30
Tabelle 25 Ergebnisse A23L1_B0315_2_GF_s13021	31
Tabelle 26 Ergebnisse A13R1_BB23e_2_MD_s13174	32
Tabelle 27 Ergebnisse A23L1_B1032_1_GF_s13353.....	33
Tabelle 28 Ergebnisse A23R1_B2277_1_KF_s14021	34
Tabelle 29 Ergebnisse A23R1_B2277_2_KF_s14238.....	35
Tabelle 30 Ergebnisse A2R1_V41_2_KF_s19546.....	36
Tabelle 31 Ergebnisse A10L1_A10.099_2_MD_s20369.....	37
Tabelle 32 Ergebnisse A13L1_BB23e_5_MD_s22593	38
Tabelle 33 Ergebnisse A4L1_06050_1_MD_s22646.....	39
Tabelle 34 Ergebnisse A13L1_BB23e_6_MD_s22911	40
Tabelle 35 Ergebnisse A10L1_A10.091_2_MD_s24623.....	41
Tabelle 36 Ergebnisse A13L1_BB14_1_GF_s27536.....	42
Tabelle 37 Ergebnisse A4R1_06053_1_PK_s28013.....	43
Tabelle 38 Ergebnisse A4R1_06053_2_PK_s28066.....	44
Tabelle 39 Ergebnisse A13L1_BB14_2_GF_s28190.....	45
Tabelle 40 Ergebnisse A13R1_BB56_1_GF_s29993.....	46
Tabelle 41 Ergebnisse A10R1_A10.091_1_BD_s36015.....	47
Tabelle 42 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145.....	48
Tabelle 43 Ergebnisse A10R1_A10.099_1_MD_s40279.....	49

Tabelle 44 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315	50
Tabelle 45 Ergebnisse A2L1_A2.75_2_KF_s43433	51
Tabelle 46 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054	52
Tabelle 47 Ergebnisse A4R1_07011_2_UF_s44098	53
Tabelle 48 Ergebnisse A2L1_A2.68_2_KF_s46959	54
Tabelle 49 Ergebnisse A4L1_A4.09_1_KF_s47169	55
Tabelle 50 Ergebnisse A2L1_A2.65_1_KF_s48853	56
Tabelle 51 Ergebnisse A2L1_A2.65_2_KF_s49003	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Ergebnisse A4L1_A4.09_2_KF_s436	7
Abbildung 2 Ergebnisse A2L1_V41_2_KF_s605	8
Abbildung 3 Ergebnisse A2R1_A2.65_1_KF_s2539.....	9
Abbildung 4 Ergebnisse A2R1_A2.65_2_KF_s2691.....	10
Abbildung 5 Ergebnisse A2L1_V38_2_KF_s2887	11
Abbildung 6 Ergebnisse A22L1_B1911_1_MD_s3543	12
Abbildung 7 Ergebnisse A2R1_A2.68_1_KF_s4589.....	13
Abbildung 8 Ergebnisse A2R1_A2.69_1_KF_s5060.....	14
Abbildung 9 Ergebnisse A13L1_BB56_1_GF_s5347	15
Abbildung 10 Ergebnisse A2R1_A2.69_2_KF_s5520.....	16
Abbildung 11 Ergebnisse A23L1_B2276_1_MD_s7060	17
Abbildung 12 Ergebnisse A23L1_B2277_1_KF_s7371	18
Abbildung 13 Ergebnisse A23L1_B2277_2_KF_s7582	19
Abbildung 14 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498	20
Abbildung 15 Ergebnisse A23L1_B0214_2_MD_s8911	21
Abbildung 16 Ergebnisse A13R1_BB23a_2_MD_s11432	22
Abbildung 17 Ergebnisse A2R1_V31_1_KF_s11502.....	23
Abbildung 18 Ergebnisse A2R1_V53_1_KF_s11712.....	24
Abbildung 19 Ergebnisse A23L1_B0333_2_KF_s11857	25
Abbildung 20 Ergebnisse A2R1_V53_2_KF_s11941.....	26
Abbildung 21 Ergebnisse A13R1_BB23d_1_MD_s12302	27
Abbildung 22 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419	28
Abbildung 23 Ergebnisse A23L1_B0324_1_GF_s12587	29
Abbildung 24 Ergebnisse A13R1_BB23e_1_MD_s12857	30
Abbildung 25 Ergebnisse A23L1_B0315_2_GF_s13021	31
Abbildung 26 Ergebnisse A13R1_BB23e_2_MD_s13174	32
Abbildung 27 Ergebnisse A23L1_B1032_1_GF_s13353.....	33
Abbildung 28 Ergebnisse A23R1_B2277_1_KF_s14021.....	34
Abbildung 29 Ergebnisse A23R1_B2277_2_KF_s14238.....	35
Abbildung 30 Ergebnisse A2R1_V41_2_KF_s19546.....	36
Abbildung 31 Ergebnisse A10L1_A10.099_2_MD_s20369	37
Abbildung 32 Ergebnisse A13L1_BB23e_5_MD_s22593	38
Abbildung 33 Ergebnisse A4L1_06050_1_MD_s22646.....	39
Abbildung 34 Ergebnisse A13L1_BB23e_6_MD_s22911	40
Abbildung 35 Ergebnisse A10L1_A10.091_2_MD_s24623	41
Abbildung 36 Ergebnisse A13L1_BB14_1_GF_s27536.....	42
Abbildung 37 Ergebnisse A4R1_06053_1_PK_s28013.....	43
Abbildung 38 Ergebnisse A4R1_06053_2_PK_s28066.....	44
Abbildung 39 Ergebnisse A13L1_BB14_2_GF_s28190.....	45
Abbildung 40 Ergebnisse A13R1_BB56_1_GF_s29993.....	46
Abbildung 41 Ergebnisse A10R1_A10.091_1_BD_s36015	47
Abbildung 42 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145.....	48
Abbildung 43 Ergebnisse A10R1_A10.099_1_MD_s40279.....	49

Abbildung 44 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315	50
Abbildung 45 Ergebnisse A2L1_A2.75_2_KF_s43433	51
Abbildung 46 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054.....	52
Abbildung 47 Ergebnisse A4R1_07011_2_UF_s44098.....	53
Abbildung 48 Ergebnisse A2L1_A2.68_2_KF_s46959	54
Abbildung 49 Ergebnisse A4L1_A4.09_1_KF_s47169	55
Abbildung 50 Ergebnisse A2L1_A2.65_1_KF_s48853	56
Abbildung 51 Ergebnisse A2L1_A2.65_2_KF_s49003	57

1 A4L1_A4.09_2_KF_s436

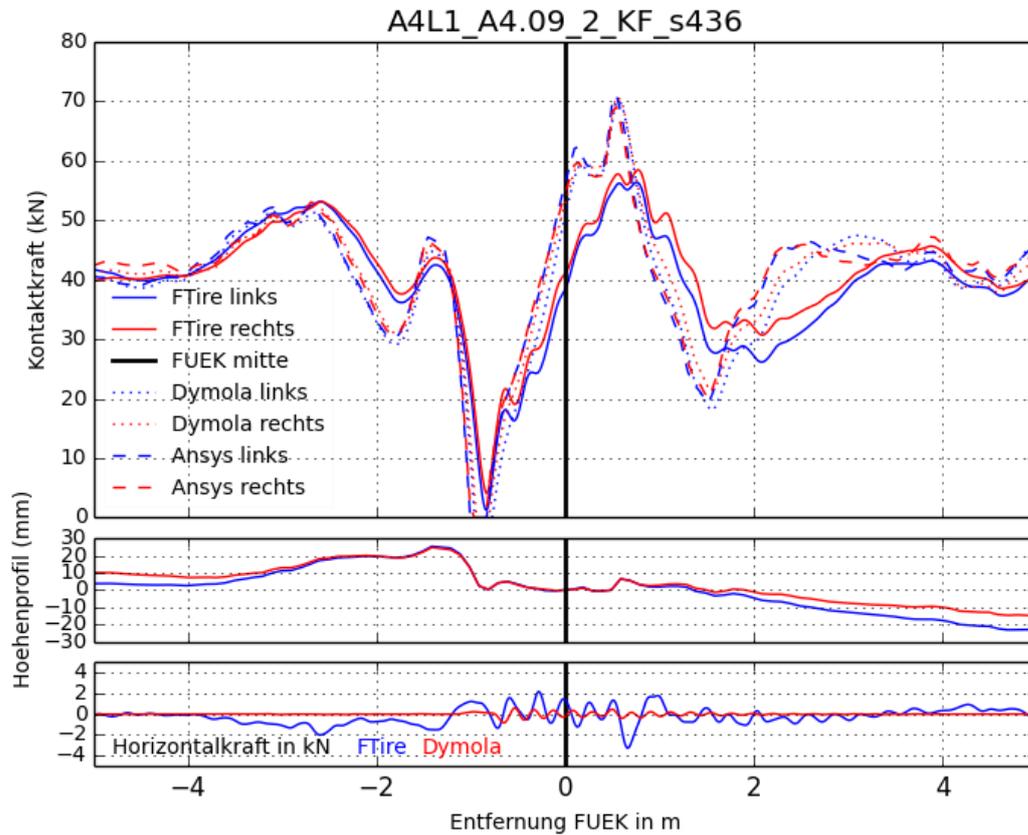


Abbildung 1 Ergebnisse A4L1_A4.09_2_KF_s436

Anmerkungen:

keine

Tabelle 1 Ergebnisse A4L1_A4.09_2_KF_s436

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	71,0 kN	69,1 kN	56,4 kN	58,5 kN	70,0 kN	70,6 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,65	1,61	1,34	1,39	1,65	1,67
Position max. dynamische Last	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,8 m	0,8 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	1,3 kN	4,1 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		3,3 kN		0,8 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

2 A2L1_V41_2_KF_s605

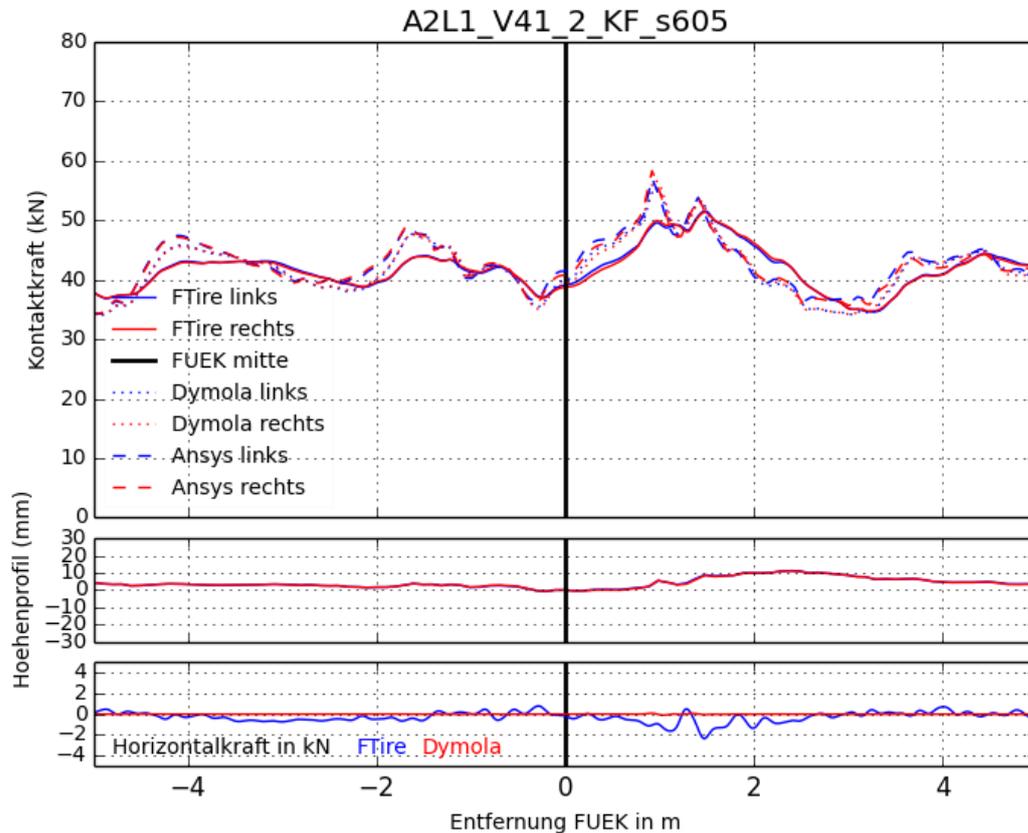


Abbildung 2 Ergebnisse A2L1_V41_2_KF_s605

Anmerkungen:

keine

Tabelle 2 Ergebnisse A2L1_V41_2_KF_s605

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	57,1 kN	58,3 kN	51,6 kN	51,4 kN	55,5 kN	56,8 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,33	1,36	1,23	1,22	1,31	1,34
Position max. dynamische Last	0,9 m	0,9 m	1,5 m	1,5 m	0,9 m	1,0 m
Minimale dynamische Last	36,6 kN	36,2 kN	37,0 kN	36,9 kN	35,4 kN	35,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,4 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

3 A2R1_A2.65_1_KF_s2539

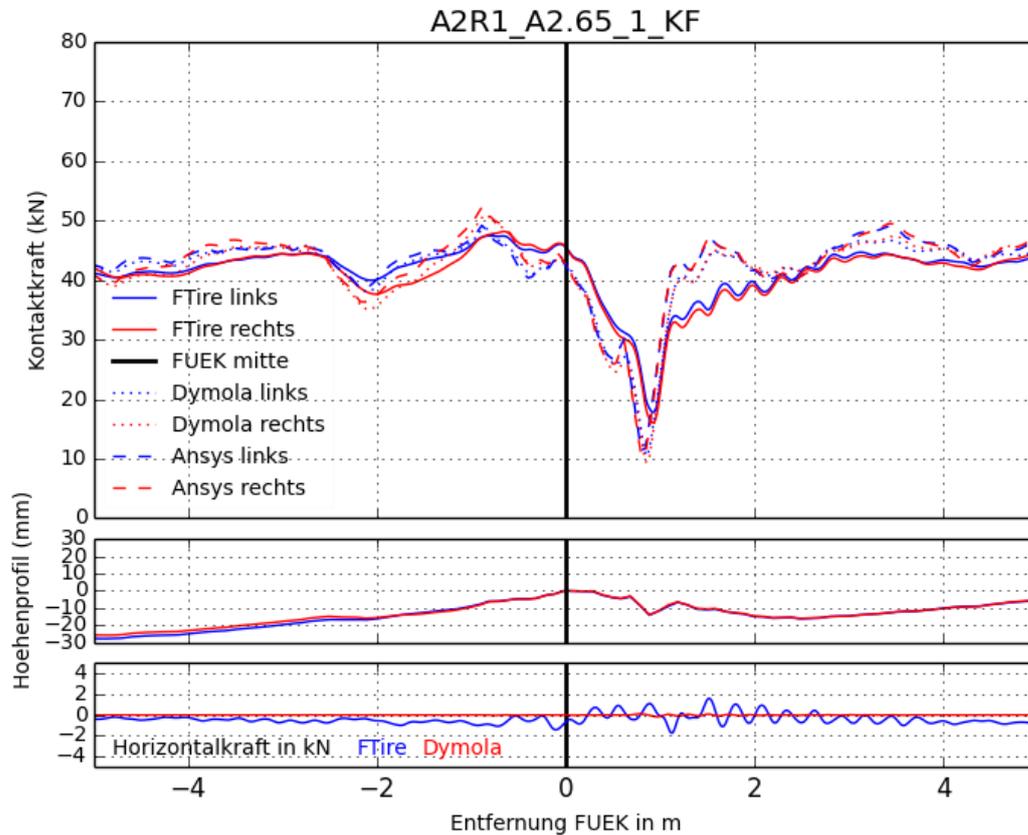


Abbildung 3 Ergebnisse A2R1_A2.65_1_KF_s2539

Anmerkungen:

keine

Tabelle 3 Ergebnisse A2R1_A2.65_1_KF_s2539

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	49,2 kN	52,3 kN	47,4 kN	48,2 kN	48,8 kN	51,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,14	1,22	1,13	1,15	1,15	1,21
Position max. dynamische Last	-0,9 m	-0,9 m	-0,7 m	-0,7 m	-0,9 m	-0,9 m
Minimale dynamische Last	11,3 kN	10,4 kN	10,5 kN	9,4 kN	17,8 kN	16,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,7 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

4 A2R1_A2.65_2_KF_s2691

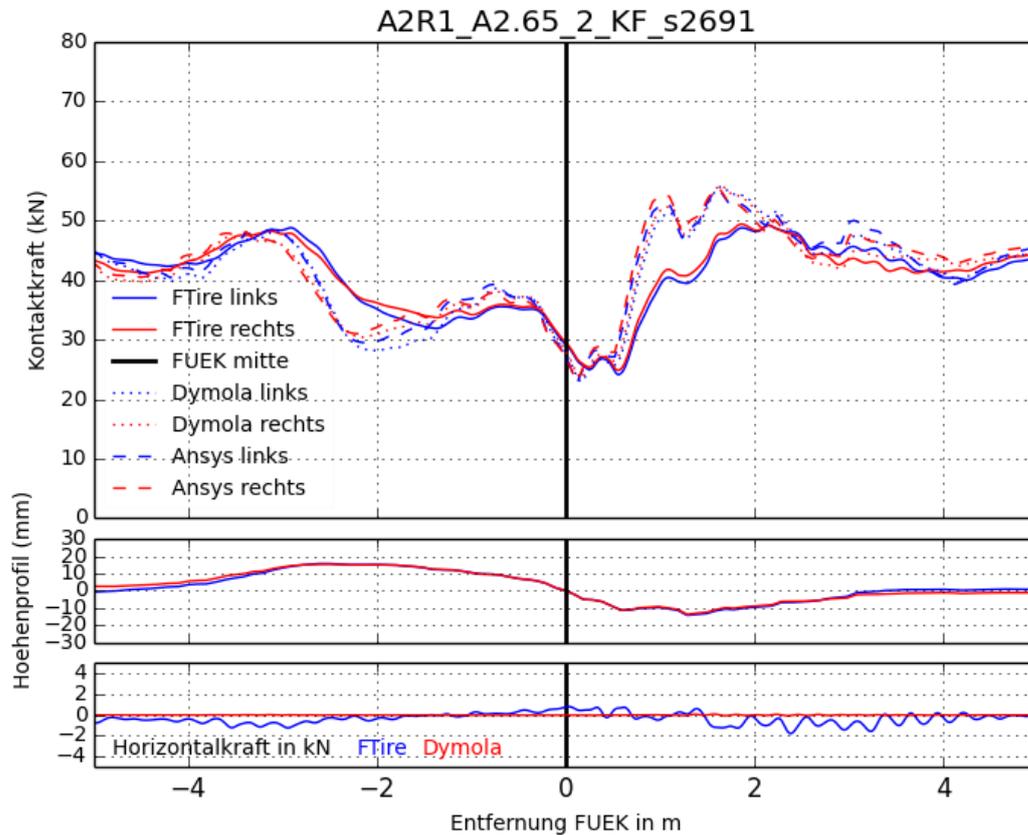


Abbildung 4 Ergebnisse A2R1_A2.65_2_KF_s2691

Anmerkungen:

keine

Tabelle 4 Ergebnisse A2R1_A2.65_2_KF_s2691

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	55,1 kN	55,3 kN	48,8 kN	49,4 kN	55,8 kN	55,9 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,28	1,29	1,16	1,18	1,32	1,32
Position max. dynamische Last	1,6 m	1,6 m	1,9 m	1,9 m	1,6 m	1,7 m
Minimale dynamische Last	22,8 kN	23,0 kN	24,1 kN	24,9 kN	23,0 kN	23,5 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,2 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

5 A2L1_V38_2_KF_s2887

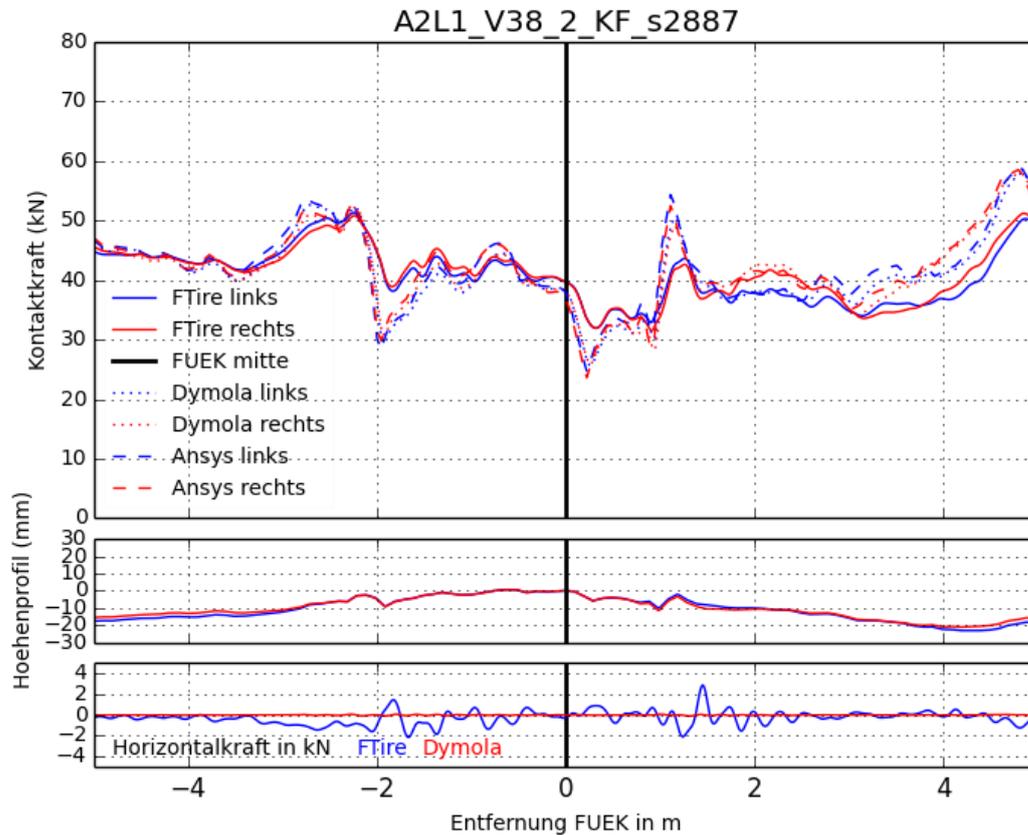


Abbildung 5 Ergebnisse A2L1_V38_2_KF_s2887

Anmerkungen:

Maximalwerte FTire nicht an derselben Stelle wie Maximalwerte ANSYS und Dymola. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die FTire Werte an dieser Stelle verwendet.

Tabelle 5 Ergebnisse A2L1_V38_2_KF_s2887

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	54,4 kN	52,5 kN	43,6 kN	42,6 kN	50,5 kN	49,1 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,27	1,22	1,04	1,01	1,19	1,16
Position max. dynamische Last	1,1 m	1,1 m	-2,2 m	-2,2 m	1,1 m	1,1 m
Minimale dynamische Last	24,7 kN	23,6 kN	32,0 kN	31,9 kN	25,7 kN	25,9 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,9 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

6 A22L1_B1911_1_MD_s3543

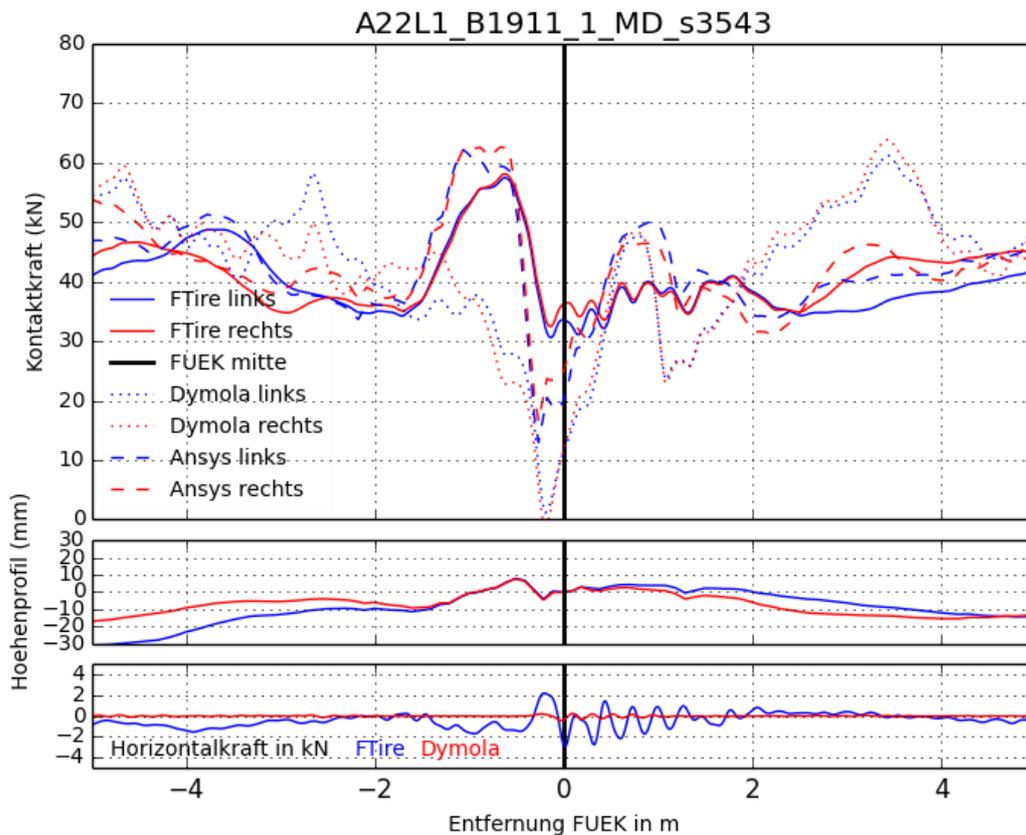


Abbildung 6 Ergebnisse A22L1_B1911_1_MD_s3543

Anmerkungen:

Der Dymola-Ergebnisverlauf ist nicht plausibel (falsches Straßenprofil) und wird in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 6 Ergebnisse A22L1_B1911_1_MD_s3543

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	62,2 kN	62,6 kN	57,5 kN	58,1 kN	-	-
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,45	1,46	1,37	1,36	-	-
Position max. dynamische Last	-1,1 m	-0,7 m	-0,6 m	-0,6 m	-	-
Minimale dynamische Last	13,0 kN	16,5 kN	30,6 kN	32,5 kN	-	-
Maximale Horizontalkraft	-		3,0 kN		-	
Geschwindigkeit	80 km/h					

7 A2R1_A2.68_1_KF_s4589

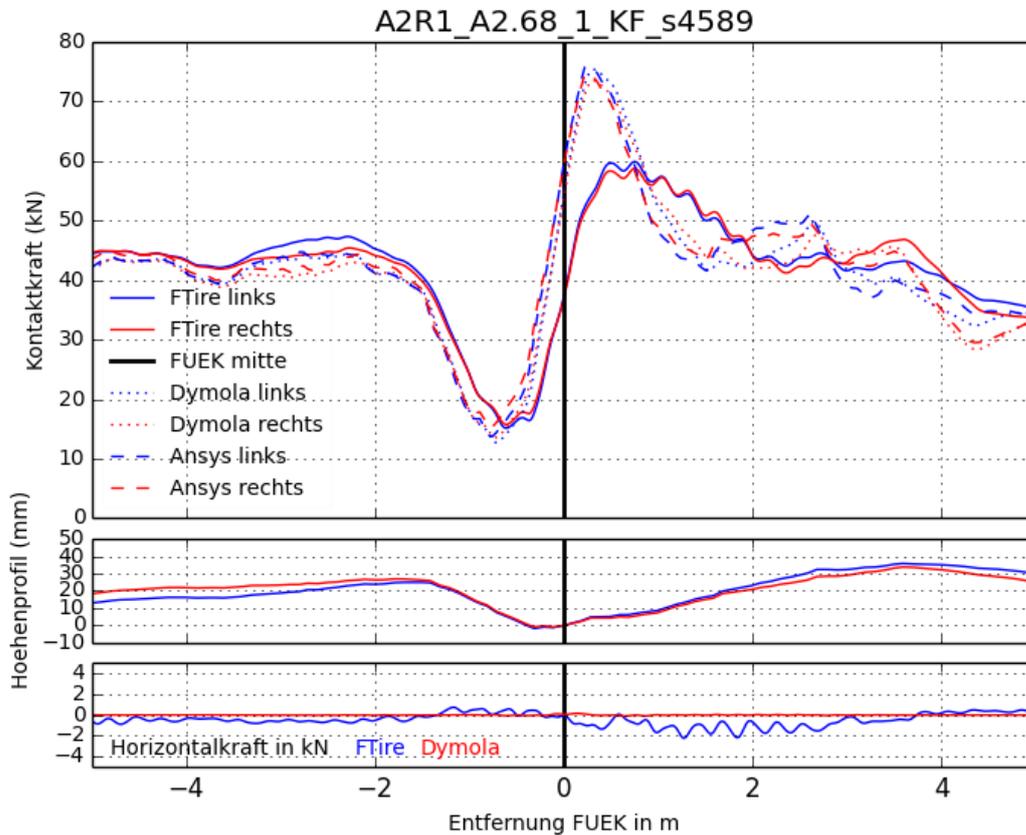


Abbildung 7 Ergebnisse A2R1_A2.68_1_KF_s4589

Anmerkungen:

keine

Tabelle 7 Ergebnisse A2R1_A2.68_1_KF_s4589

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	75,9 kN	74,6 kN	59,9 kN	58,8 kN	75,4 kN	73,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,77	1,73	1,43	1,40	1,78	1,74
Position max. dynamische Last	0,2 m	0,2 m	0,8 m	0,8 m	0,3 m	0,3 m
Minimale dynamische Last	13,7 kN	15,3 kN	15,2 kN	15,8 kN	12,7 kN	13,5 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,2 kN		0,2 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

8 A2R1_A2.69_1_KF_s5060

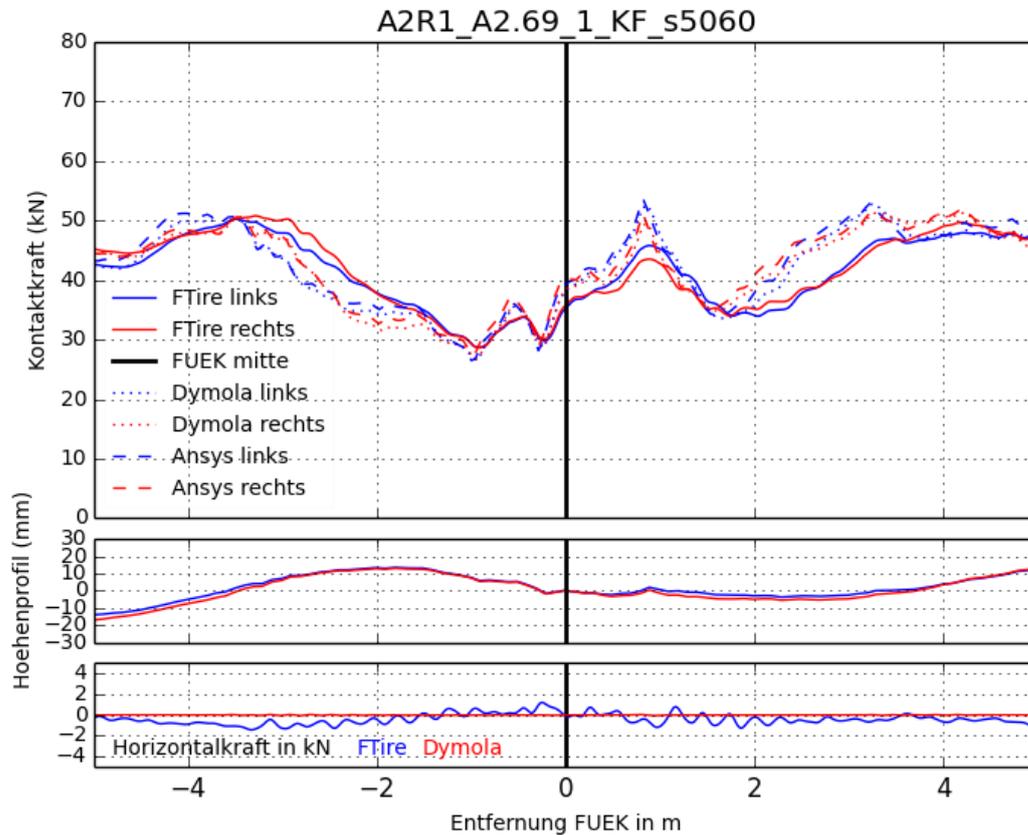


Abbildung 8 Ergebnisse A2R1_A2.69_1_KF_s5060

Anmerkungen:

keine

Tabelle 8 Ergebnisse A2R1_A2.69_1_KF_s5060

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	53,6 kN	51,1 kN	45,8 kN	43,5 kN	52,7 kN	49,6 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,25	1,19	1,09	1,04	1,25	1,17
Position max. dynamische Last	0,8 m	0,8 m	0,9 m	0,9 m	0,8 m	0,8 m
Minimale dynamische Last	26,5 kN	27,5 kN	28,7 kN	28,6 kN	26,6 kN	26,7 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,2 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

9 A13L1_BB56_1_GF_s5347

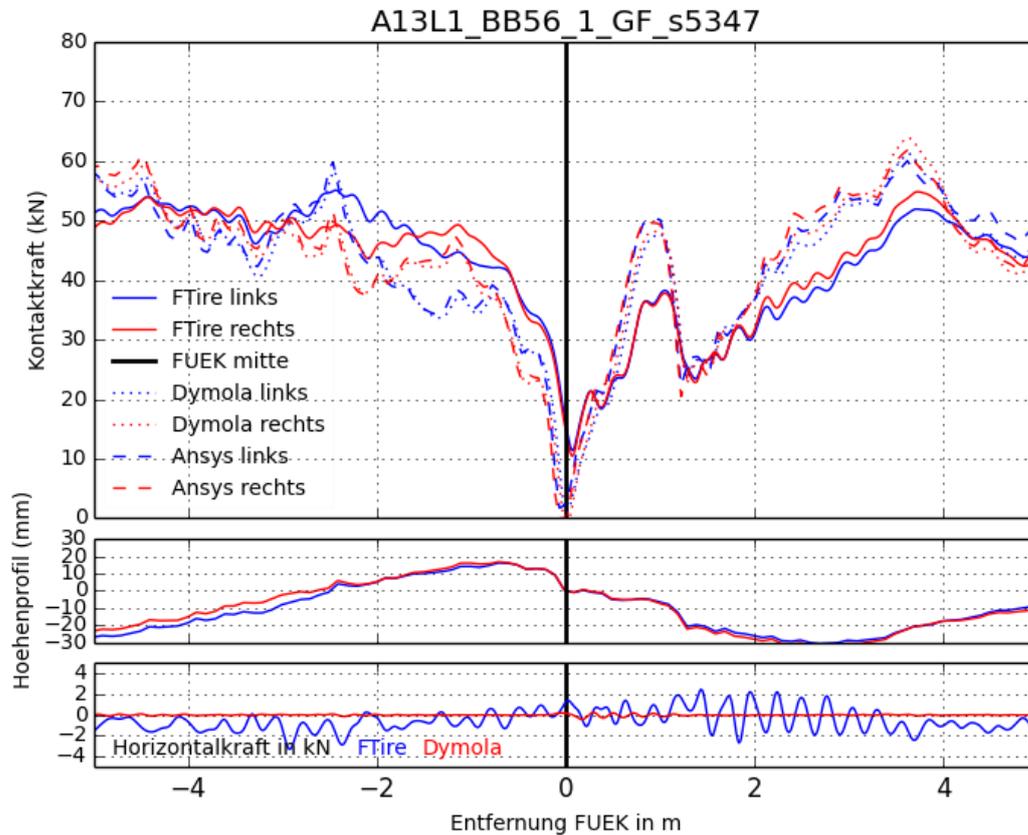


Abbildung 9 Ergebnisse A13L1_BB56_1_GF_s5347

Anmerkungen:

keine

Tabelle 9 Ergebnisse A13L1_BB56_1_GF_s5347

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	60,0 kN	61,9 kN	51,9 kN	54,8 kN	61,2 kN	64,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,40	1,44	1,24	1,30	1,45	1,51
Position max. dynamische Last	3,6 m	3,6 m	3,7 m	3,7 m	3,6 m	3,6 m
Minimale dynamische Last	1,7 kN	0,0 kN	11,4 kN	10,4 kN	1,1 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,7 kN		0,4 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

10 A2R1_A2.69_2_KF_s5520

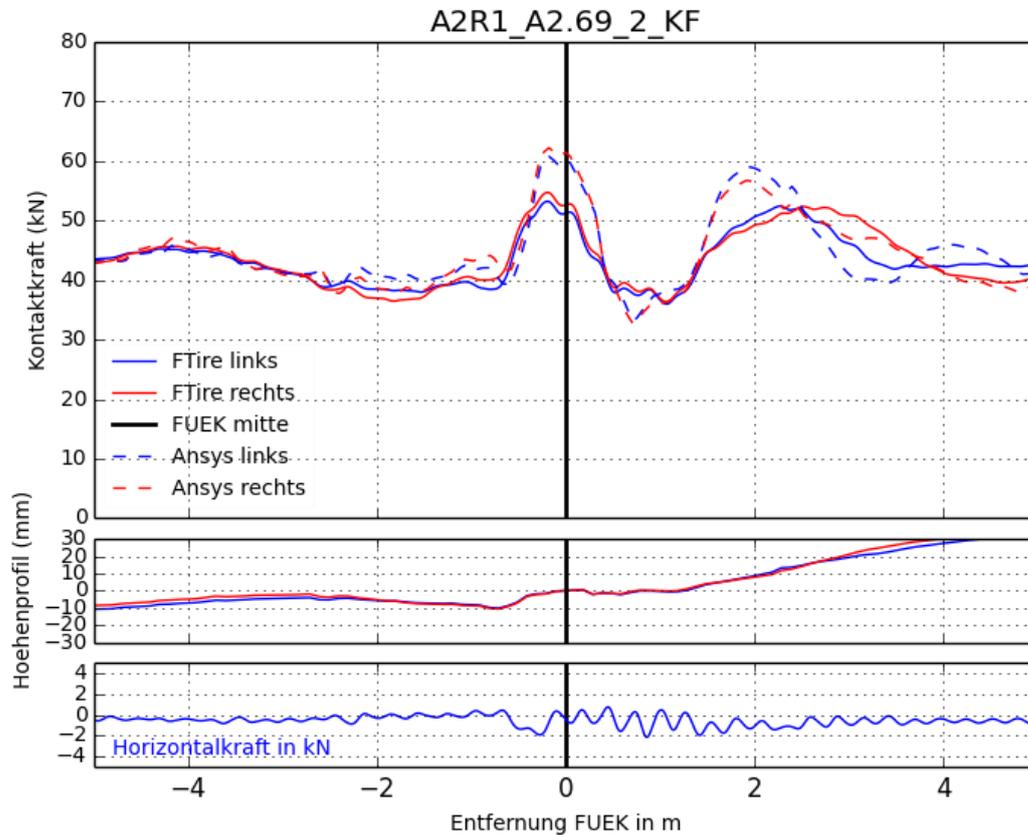


Abbildung 10 Ergebnisse A2R1_A2.69_2_KF_s5520

Anmerkungen:

Keine Simulation mit Dymola durchgeführt.

Tabelle 10 Ergebnisse A2R1_A2.69_2_KF_s5520

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	60,8 kN	62,2 kN	53,2 kN	54,7 kN	-	-
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,41	1,45	1,27	1,30	-	-
Position max. dynamische Last	-0,2 m	-0,2 m	-0,2 m	-0,2 m	-	-
Minimale dynamische Last	33,2 kN	32,7 kN	36,0 kN	36,3 kN	-	-
Maximale Horizontalkraft	-		1,9 kN		-	
Geschwindigkeit	80 km/h					

11 A23L1_B2276_1_MD_s7060

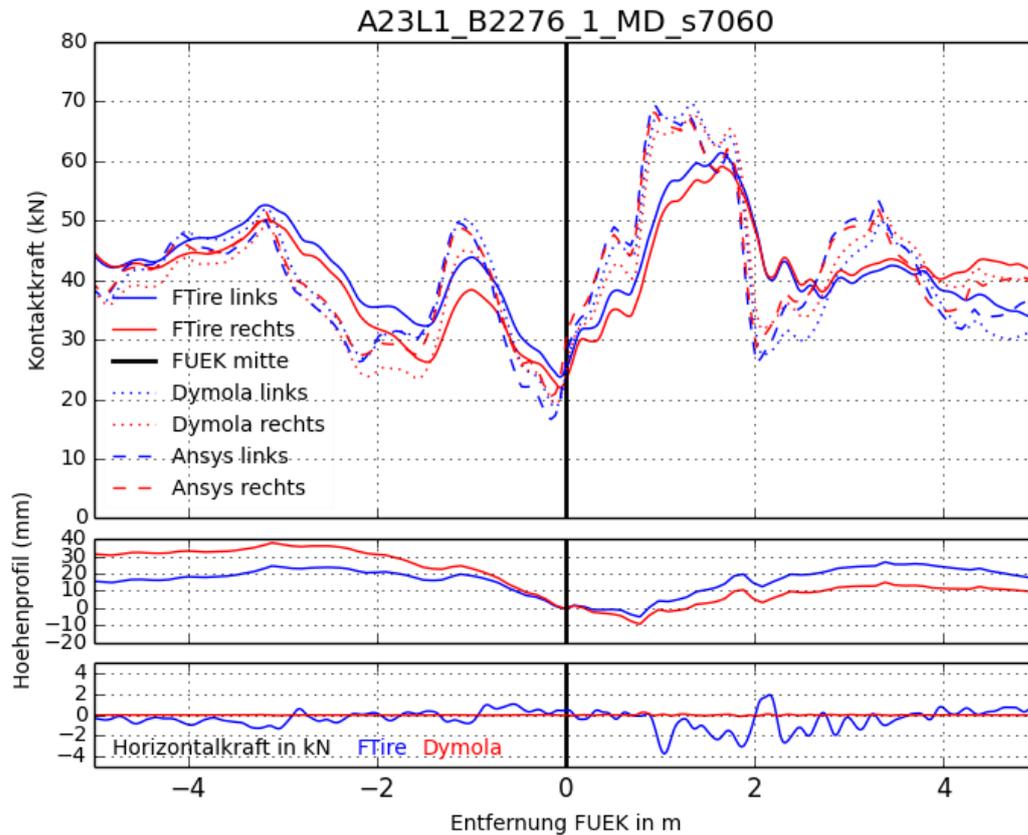


Abbildung 11 Ergebnisse A23L1_B2276_1_MD_s7060

Anmerkungen:

keine

Tabelle 11 Ergebnisse A23L1_B2276_1_MD_s7060

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	69,2 kN	68,2 kN	61,4 kN	59,1 kN	69,6 kN	68,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,61	1,59	1,46	1,41	1,65	1,61
Position max. dynamische Last	0,9 m	0,9 m	1,6 m	1,6 m	1,3 m	1,3 m
Minimale dynamische Last	16,6 kN	20,5 kN	23,7 kN	22,0 kN	18,7 kN	19,2 kN
Maximale Horizontalkraft	-		3,7 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

12 A23L1_B2277_1_KF_s7371

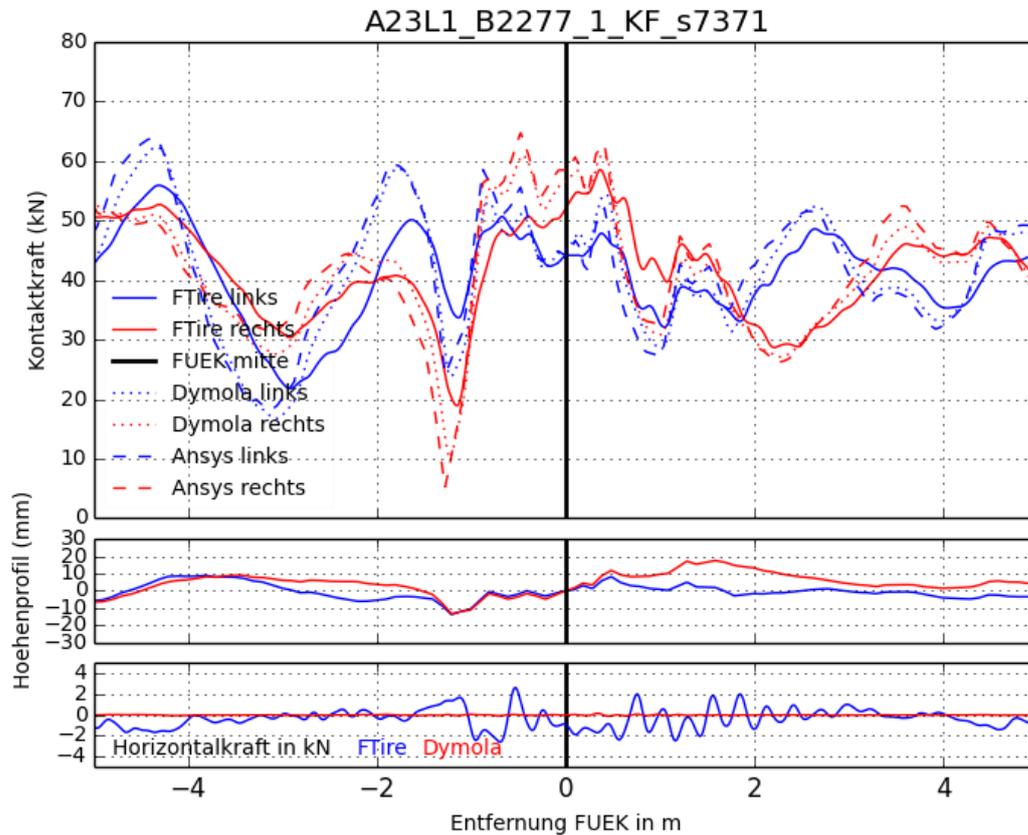


Abbildung 12 Ergebnisse A23L1_B2277_1_KF_s7371

Anmerkungen:

keine

Tabelle 12 Ergebnisse A23L1_B2277_1_KF_s7371

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	59,4 kN	64,8 kN	50,1 kN	58,5 kN	58,7 kN	61,3 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,38	1,51	1,19	1,39	1,39	1,45
Position max. dynamische Last	-0,5 m	-0,5 m	-0,7 m	0,4 m	0,4 m	0,4 m
Minimale dynamische Last	24,2 kN	5,3 kN	33,7 kN	19,0 kN	23,8 kN	10,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,7 kN		0,2 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

13 A23L1_B2277_2_KF_s7582

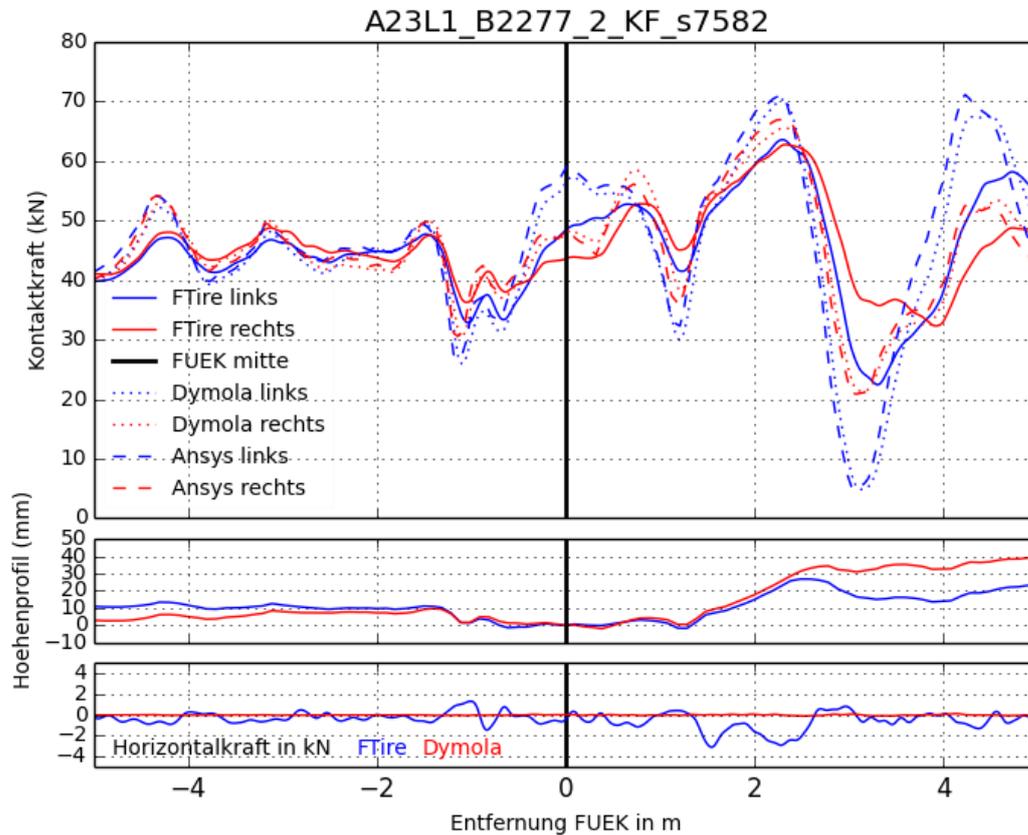


Abbildung 13 Ergebnisse A23L1_B2277_2_KF_s7582

Anmerkungen:

keine

Tabelle 13 Ergebnisse A23L1_B2277_2_KF_s7582

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	70,9 kN	66,9 kN	63,5 kN	62,8 kN	70,3 kN	67,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,65	1,56	1,51	1,50	1,66	1,58
Position max. dynamische Last	2,3 m					
Minimale dynamische Last	5,0 kN	20,9 kN	22,4 kN	32,3 kN	4,9 kN	21,4 kN
Maximale Horizontalkraft	-		3,1 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

14 A23L1_B0214_1_MD_s8498

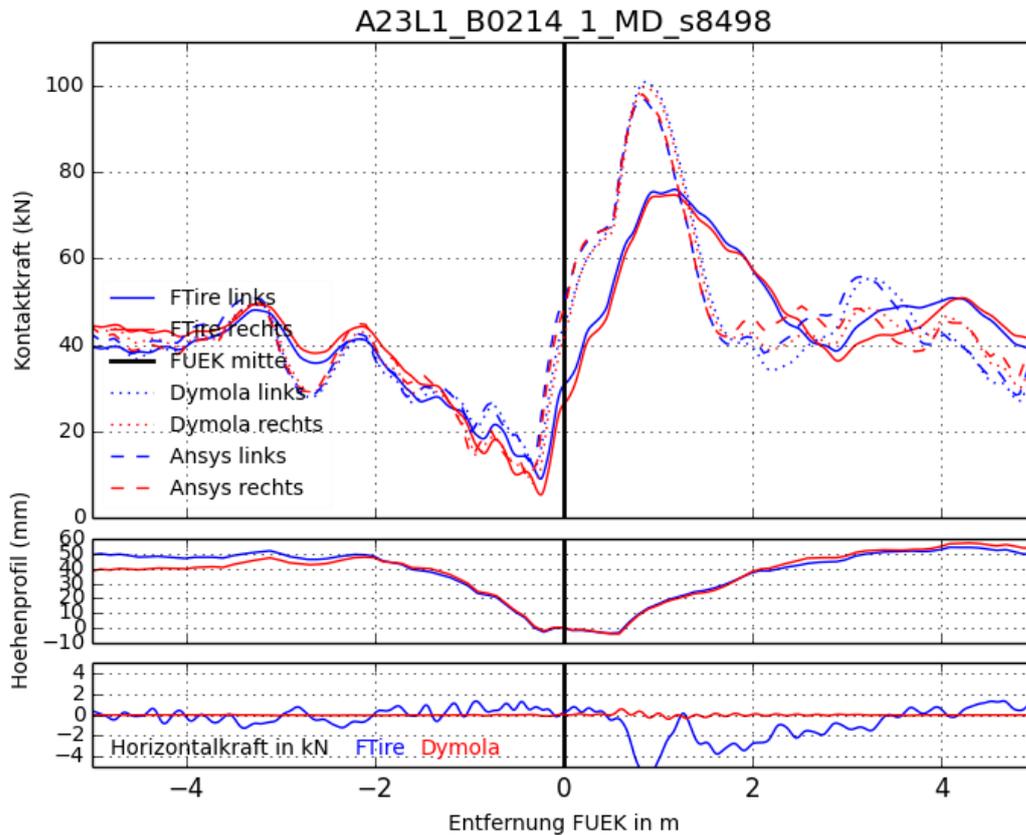


Abbildung 14 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498

Anmerkungen:

keine

Tabelle 14 Ergebnisse A23L1_B0214_1_MD_s8498

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	97,2 kN	98,0 kN	76,0 kN	74,7 kN	100,8kN	99,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	2,26	2,28	1,81	1,78	2,38	2,36
Position max. dynamische Last	0,8 m	0,8 m	1,2 m	1,2 m	0,9 m	0,9 m
Minimale dynamische Last	13,1 kN	9,4 kN	9,1 kN	5,4 kN	12,1 kN	8,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		6,6 kN		0,6 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

15 A23L1_B0214_2_MD_s8911

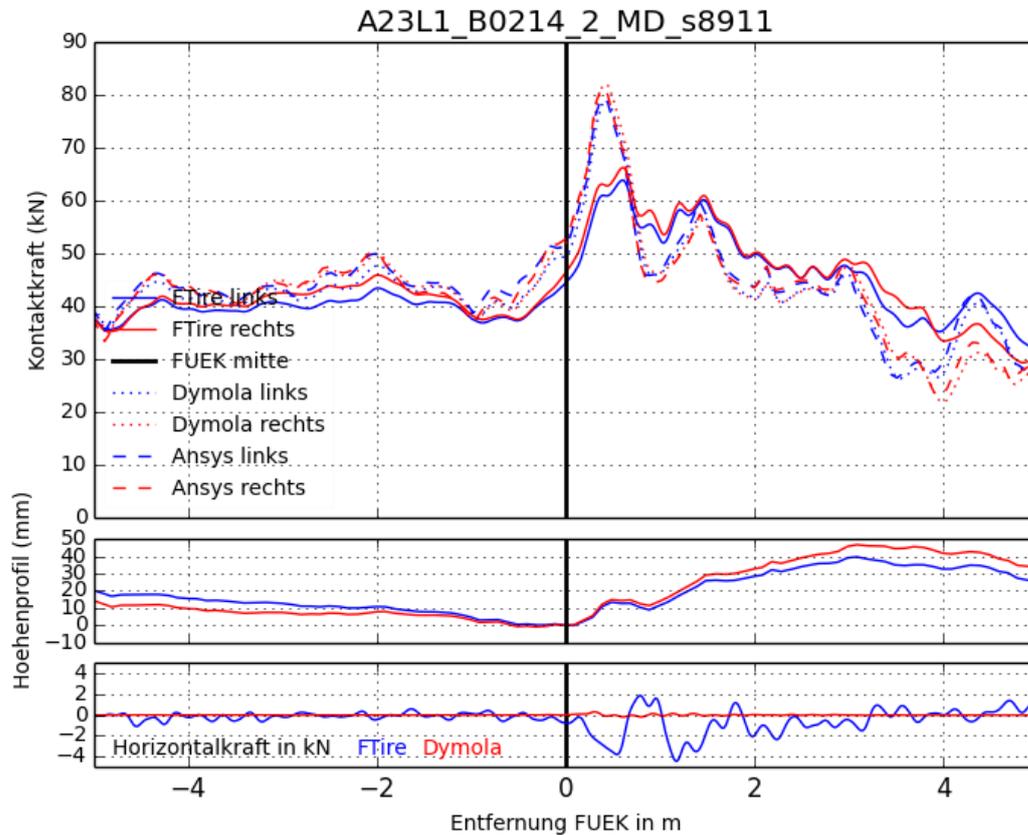


Abbildung 15 Ergebnisse A23L1_B0214_2_MD_s8911

Anmerkungen:

keine

Tabelle 15 Ergebnisse A23L1_B0214_2_MD_s8911

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	79,6 kN	81,4 kN	63,9 kN	66,3 kN	78,9 kN	82,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,85	1,89	1,52	1,58	1,87	1,94
Position max. dynamische Last	0,4 m	0,4 m	0,6 m	0,6 m	0,4 m	0,4 m
Minimale dynamische Last	26,7 kN	23,3 kN	35,3 kN	33,5 kN	26,4 kN	22,0 kN
Maximale Horizontalkraft			4,5 kN		0,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

16 A13R1_BB23a_2_MD_s11432

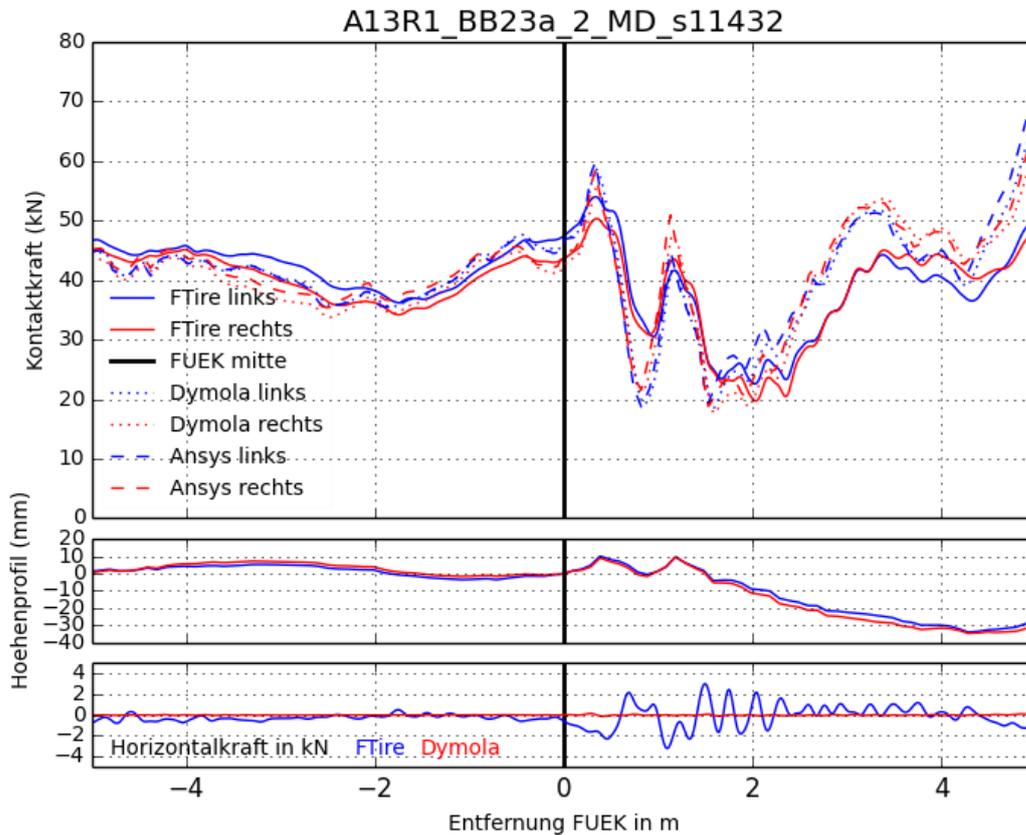


Abbildung 16 Ergebnisse A13R1_BB23a_2_MD_s11432

Anmerkungen:

keine

Tabelle 16 Ergebnisse A13R1_BB23a_2_MD_s11432

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	59,8 kN	58,3 kN	54,0 kN	50,3 kN	58,7 kN	55,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,39	1,36	1,29	1,20	1,39	1,31
Position max. dynamische Last	0,3 m					
Minimale dynamische Last	19,3 kN	18,8 kN	23,4 kN	22,8 kN	18,6 kN	17,7 kN
Maximale Horizontalkraft	-		3,2 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

17 A2R1_V31_1_KF_s11502

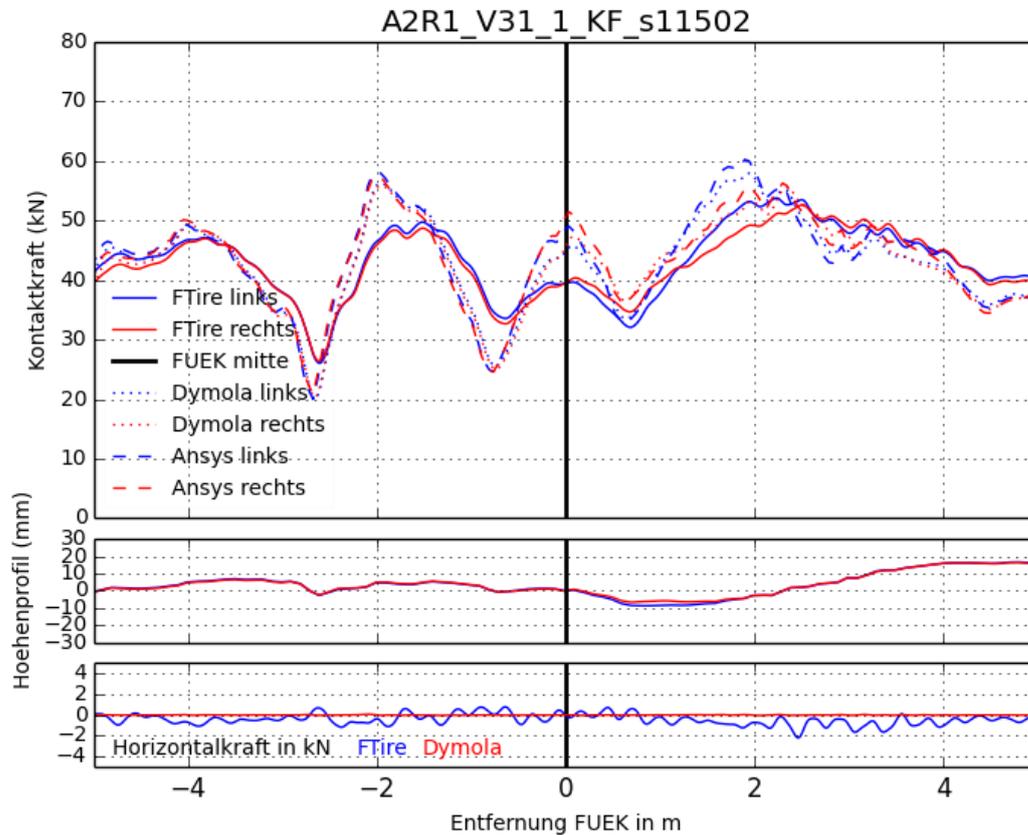


Abbildung 17 Ergebnisse A2R1_V31_1_KF_s11502

Anmerkungen:

keine

Tabelle 17 Ergebnisse A2R1_V31_1_KF_s11502

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	60,3 kN	56,3 kN	53,8 kN	52,7 kN	58,0 kN	55,6 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,40	1,31	1,28	1,25	1,37	1,31
Position max. dynamische Last	1,9 m	2,3 m	2,2 m	2,5 m	1,9 m	2,3 m
Minimale dynamische Last	20,0 kN	20,8 kN	26,1 kN	26,4 kN	20,0 kN	20,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,2 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

18 A2R1_V53_1_KF_s11712

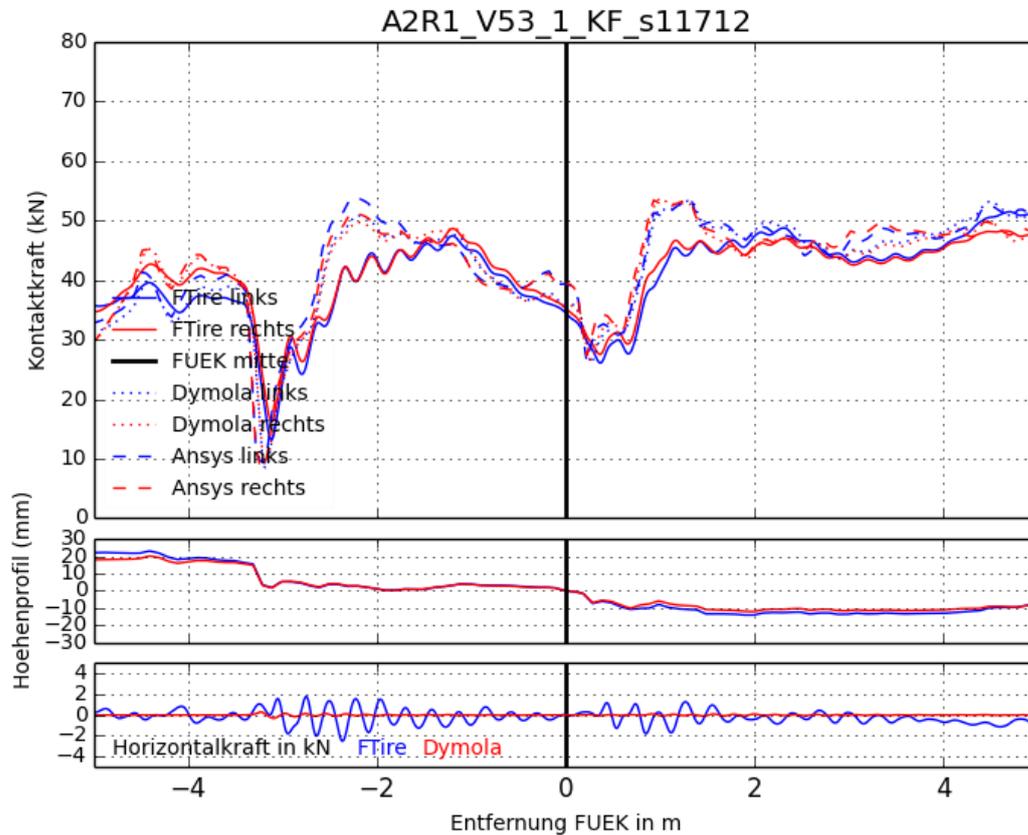


Abbildung 18 Ergebnisse A2R1_V53_1_KF_s11712

Anmerkungen:

keine

Tabelle 18 Ergebnisse A2R1_V53_1_KF_s11712

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	53,7 kN	53,4 kN	48,8 kN	47,0 kN	53,4 kN	53,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,25	1,24	1,16	1,12	1,26	1,25
Position max. dynamische Last	1,3 m	0,9	1,8 m	1,2 m	1,3 m	1,0 m
Minimale dynamische Last	9,3 kN	8,5 kN	13,2 kN	16,3 kN	8,5 kN	9,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,5 kN		0,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

19 A23L1_B0333_2_KF_s11857

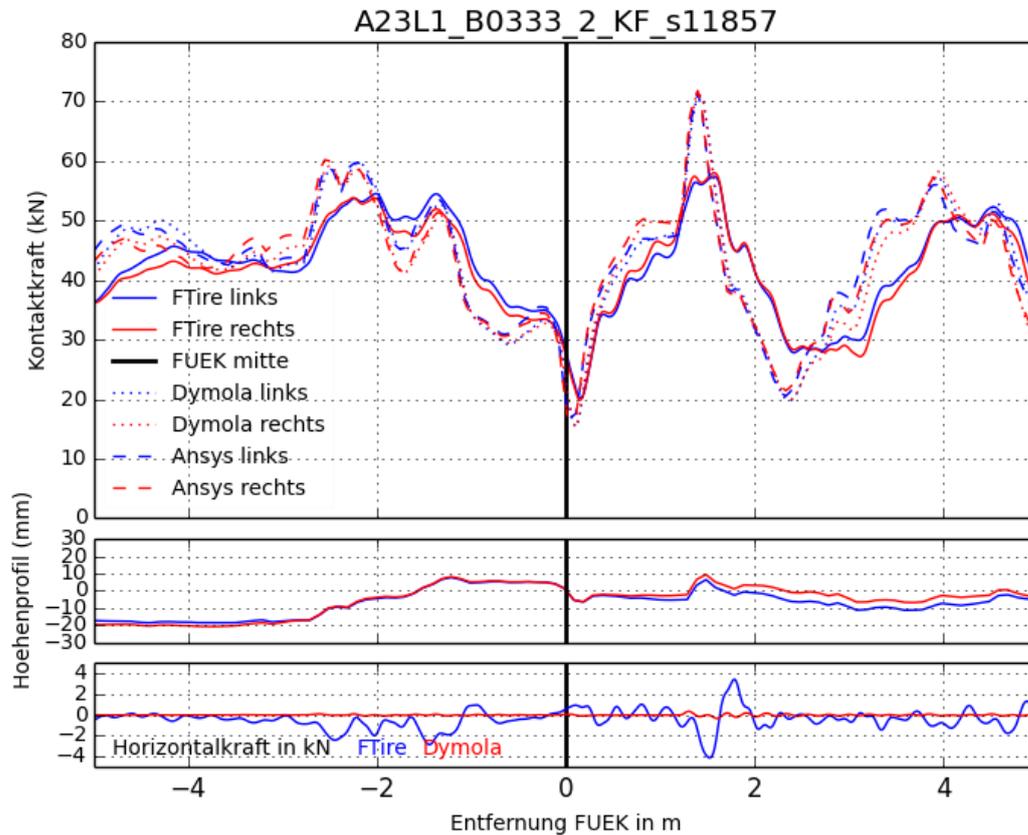


Abbildung 19 Ergebnisse A23L1_B0333_2_KF_s11857

Anmerkungen:

keine

Tabelle 19 Ergebnisse A23L1_B0333_2_KF_s11857

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	71,3 kN	71,8 kN	57,4 kN	58,0 kN	70,7 kN	71,2 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,66	1,67	1,37	1,38	1,67	1,68
Position max. dynamische Last	1,4 m	1,4 m	1,6 m	1,6 m	1,4 m	1,4 m
Minimale dynamische Last	16,8 kN	16,5 kN	20,2 kN	19,8 kN	15,3 kN	15,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		4,1 kN		0,4 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

20 A2R1_V53_2_KF_s11941

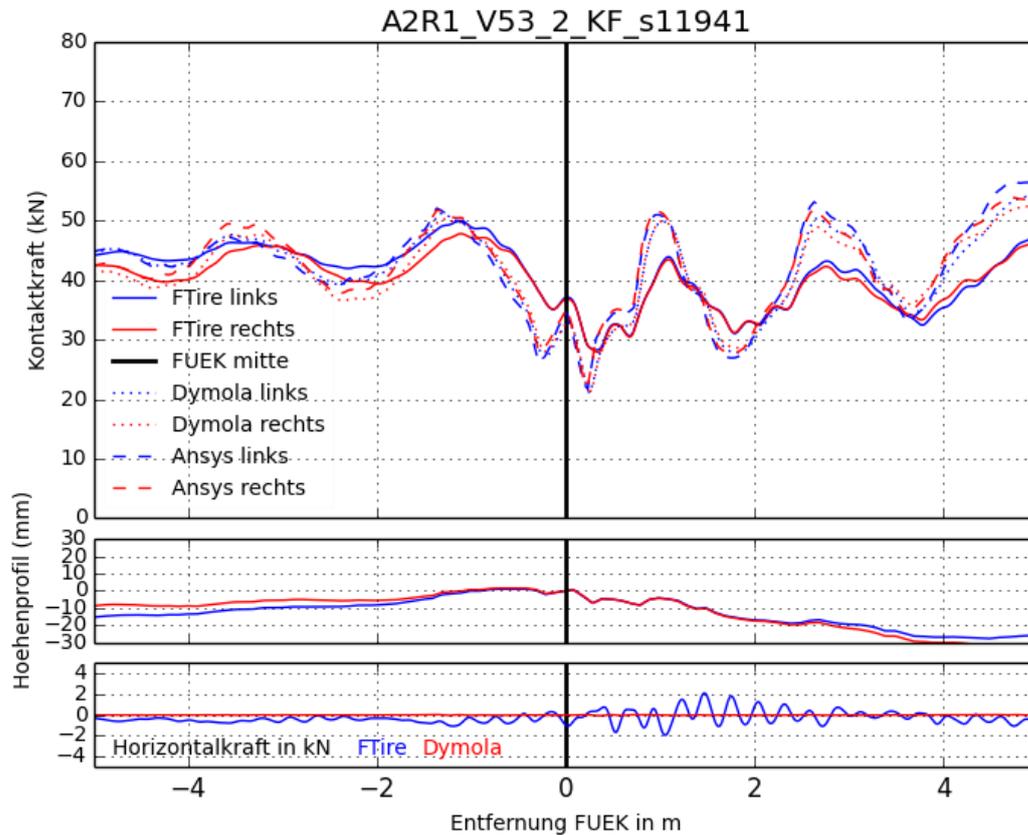


Abbildung 20 Ergebnisse A2R1_V53_2_KF_s11941

Anmerkungen:

keine

Tabelle 20 Ergebnisse A2R1_V53_2_KF_s11941

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	53,1 kN	52,0 kN	43,2 kN	42,3 kN	50,4 kN	50,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,23	1,21	1,03	1,01	1,19	1,18
Position max. dynamische Last	2,7 m	2,7 m	2,8 m	2,8 m	2,7 m	2,7 m
Minimale dynamische Last	21,7 kN	22,1 kN	28,2 kN	28,3 kN	21,0 kN	20,8 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,1 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

21 A13R1_BB23d_1_MD_s12302

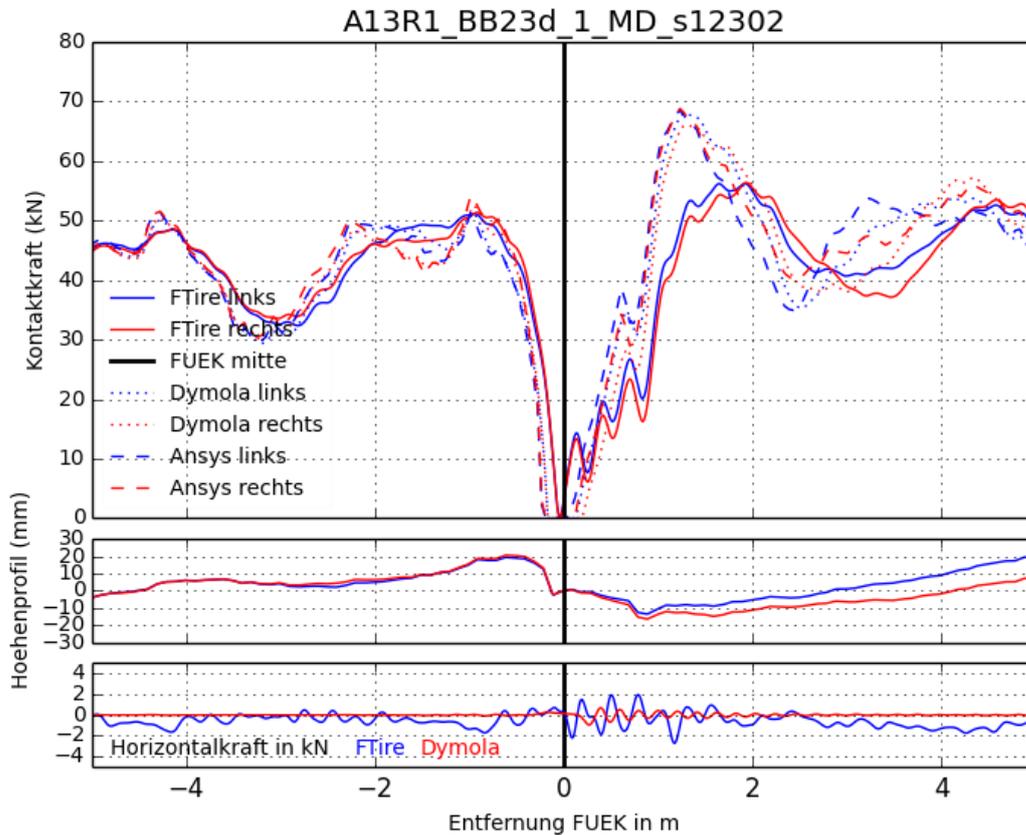


Abbildung 21 Ergebnisse A13R1_BB23d_1_MD_s12302

Anmerkungen:

keine

Tabelle 21 Ergebnisse A13R1_BB23d_1_MD_s12302

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	68,4 kN	68,8 kN	56,2 kN	56,4 kN	68,0 kN	66,1 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,59	1,60	1,34	1,34	1,61	1,56
Position max. dynamische Last	1,2 m	1,2 m	1,9 m	1,9 m	1,3 m	1,3 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	0,2 kN	0,0 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,7 kN		1,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

22 A23L1_B0329_1_GF_s12419

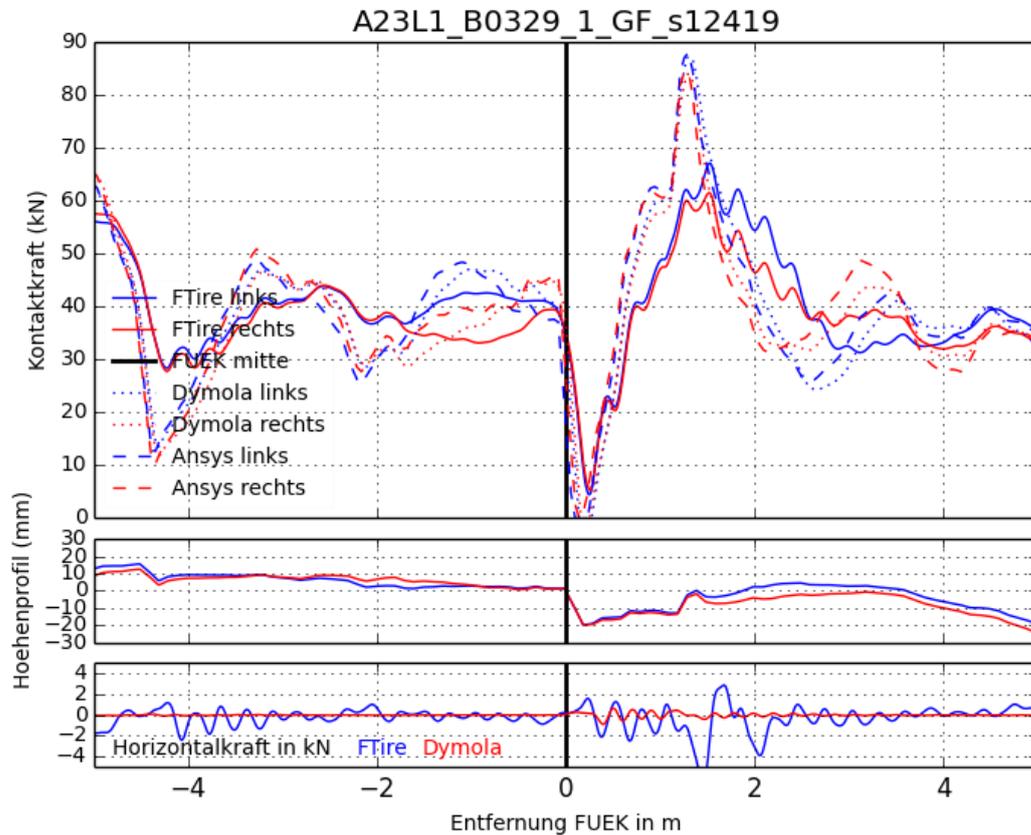


Abbildung 22 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419

Anmerkungen:

keine

Tabelle 22 Ergebnisse A23L1_B0329_1_GF_s12419

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	88,0 kN	84,5 kN	67,0 kN	61,5 kN	87,2 kN	84,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	2,05	1,97	1,60	1,46	2,06	1,99
Position max. dynamische Last	1,3 m	1,3 m	1,5 m	1,5 m	1,3 m	1,3 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	4,4 kN	5,3 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		6,5 kN		0,9 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

23 A23L1_B0324_1_GF_s12587

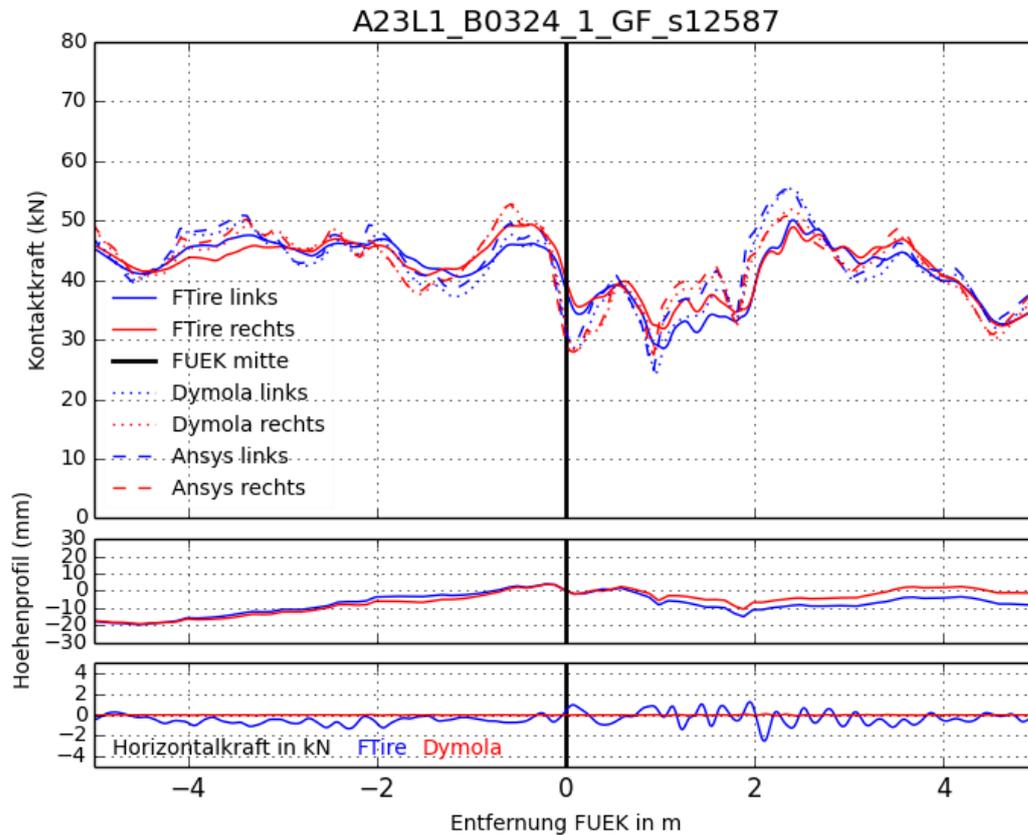


Abbildung 23 Ergebnisse A23L1_B0324_1_GF_s12587

Anmerkungen:

keine

Tabelle 23 Ergebnisse A23L1_B0324_1_GF_s12587

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	55,2 kN	50,8 kN	50,1 kN	48,9 kN	55,4 kN	51,9 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,28	1,18	1,19	1,16	1,31	1,23
Position max. dynamische Last	2,3 m	2,3 m	2,4 m	2,4 m	2,4 m	2,4 m
Minimale dynamische Last	25,0 kN	27,5 kN	31,9 kN	28,6 kN	24,0 kN	28,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,5 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

24 A13R1_BB23e_1_MD_s12857

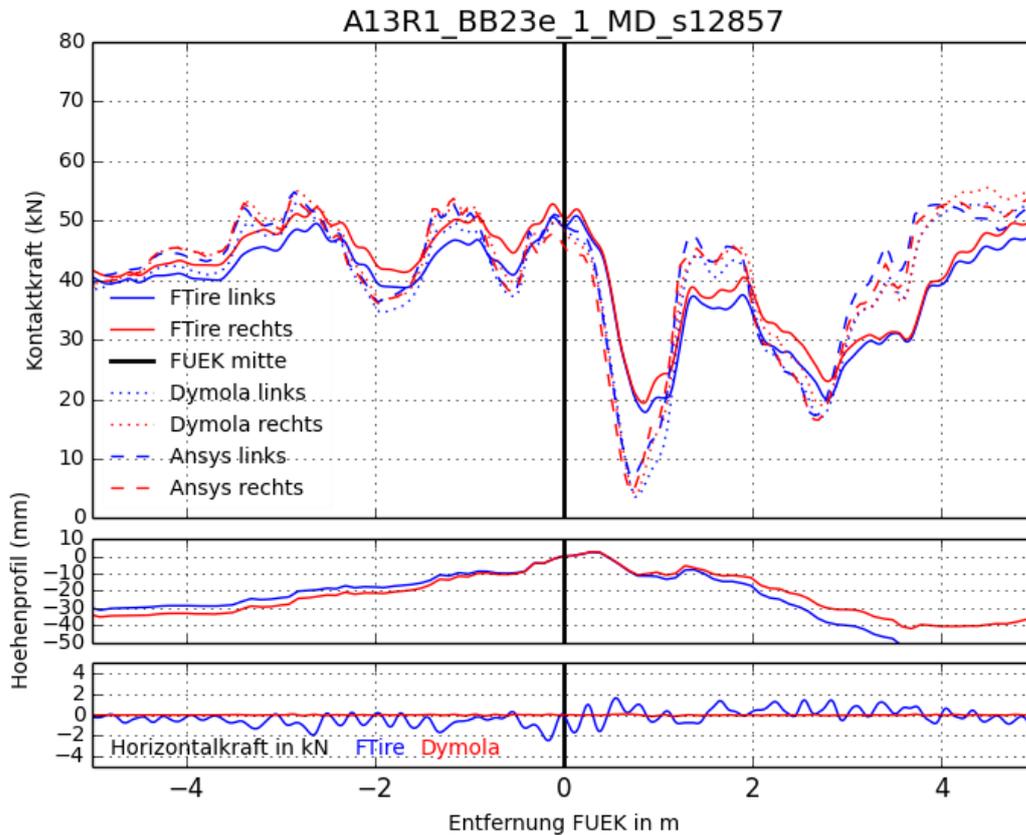


Abbildung 24 Ergebnisse A13R1_BB23e_1_MD_s12857

Anmerkungen:

keine

Tabelle 24 Ergebnisse A13R1_BB23e_1_MD_s12857

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	54,8 kN	53,9 kN	49,5 kN	52,2 kN	53,0 kN	55,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,27	1,25	1,18	1,24	1,25	1,30
Position max. dynamische Last	-2,9 m	-2,9 m	-2,8 m	-2,8 m	-2,8 m	-2,8 m
Minimale dynamische Last	6,9 kN	4,6 kN	17,8 kN	19,4 kN	3,6 kN	4,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,5 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

25 A23L1_B0315_2_GF_s13021

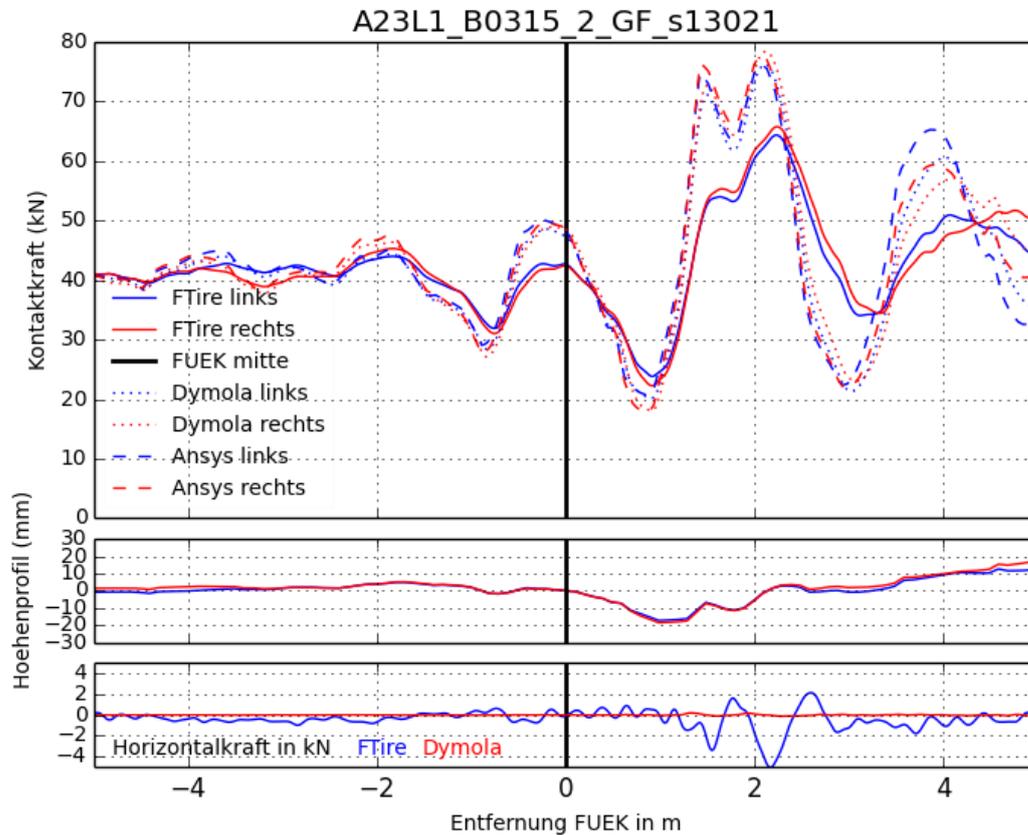


Abbildung 25 Ergebnisse A23L1_B0315_2_GF_s13021

Anmerkungen:

keine

Tabelle 25 Ergebnisse A23L1_B0315_2_GF_s13021

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	76,1 kN	77,6 kN	64,4 kN	65,8 kN	76,2 kN	78,4 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,77	1,80	1,53	1,57	1,80	1,85
Position max. dynamische Last	2,1 m	2,1 m	2,2 m	2,2 m	2,1 m	2,1 m
Minimale dynamische Last	20,7 kN	18,0 kN	23,8 kN	22,3 kN	20,1 kN	18,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-		5,1 kN		0,2 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

26 A13R1_BB23e_2_MD_s13174

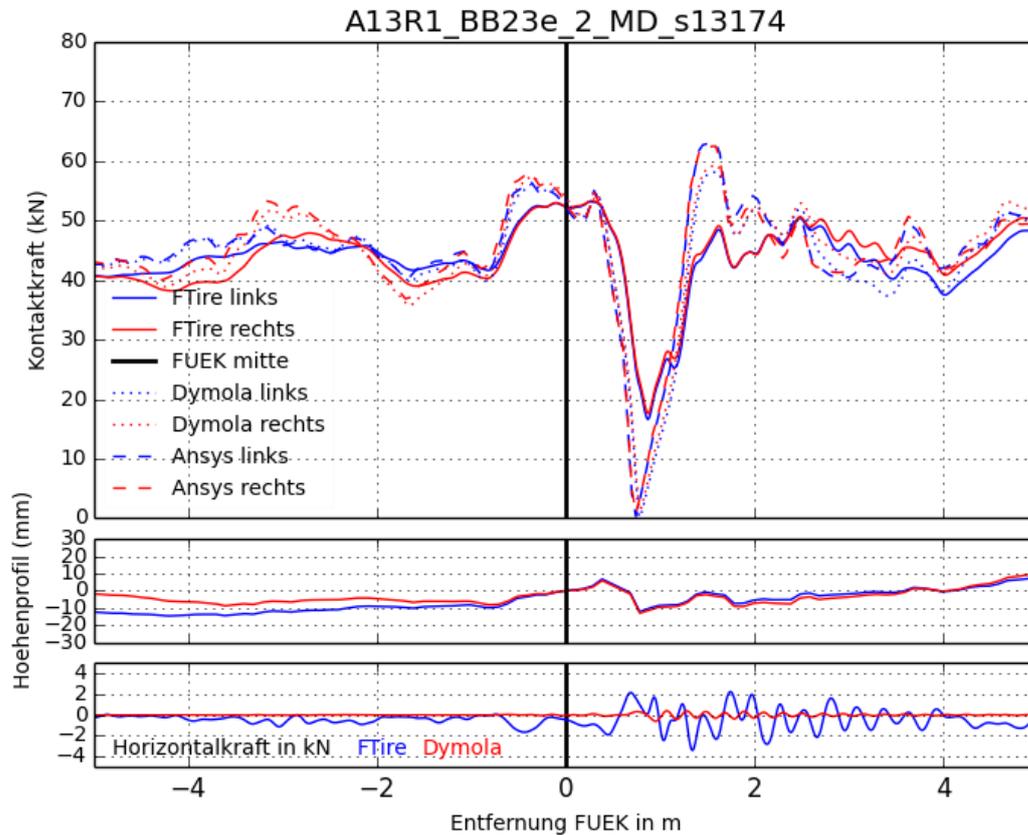


Abbildung 26 Ergebnisse A13R1_BB23e_2_MD_s13174

Anmerkungen:

keine

Tabelle 26 Ergebnisse A13R1_BB23e_2_MD_s13174

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	63,0 kN	62,5 kN	48,4 kN	49,1 kN	58,2 kN	59,3 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,47	1,45	1,15	1,17	1,38	1,40
Position max. dynamische Last	1,6 m					
Minimale dynamische Last	0,3 kN	0,9 kN	16,6 kN	17,6 kN	0,4 kN	1,5 kN
Maximale Horizontalkraft	-		3,4 kN		0,6 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

27 A23L1_B1032_1_GF_s13353

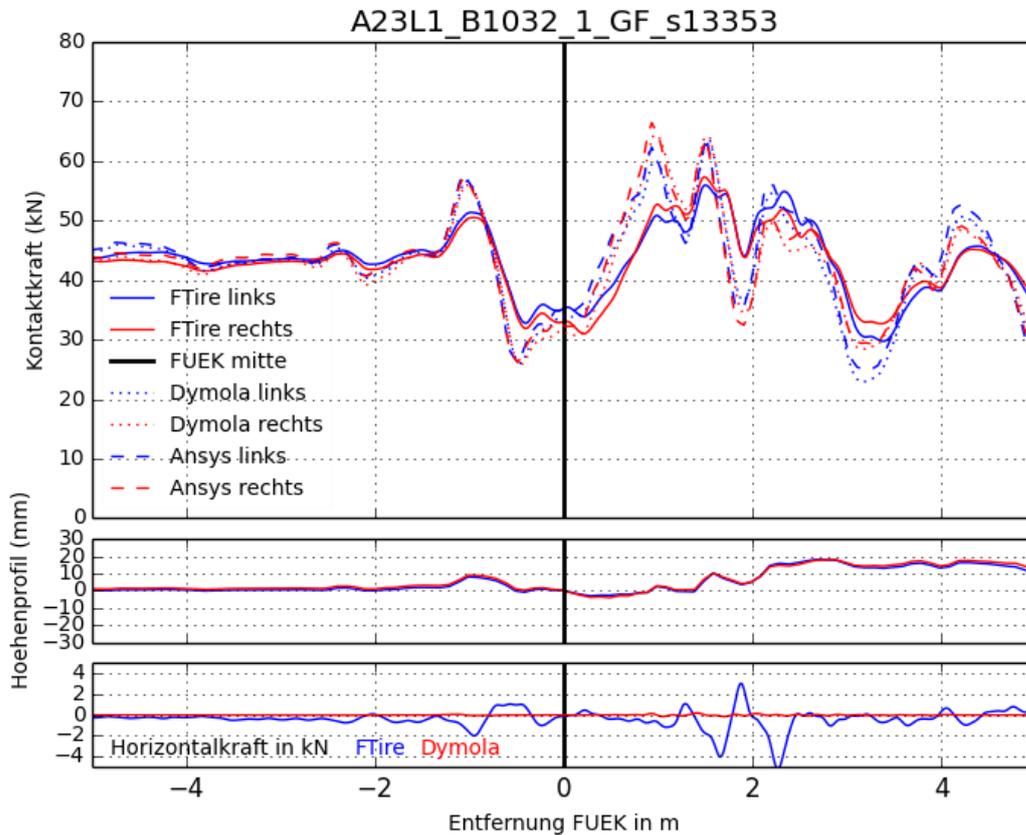


Abbildung 27 Ergebnisse A23L1_B1032_1_GF_s13353

Anmerkungen:

keine

Tabelle 27 Ergebnisse A23L1_B1032_1_GF_s13353

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	62,3 kN	66,5 kN	56,0 kN	57,3 kN	60,0 kN	64,3 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,45	1,55	1,33	1,36	1,42	1,52
Position max. dynamische Last	0,9 m	0,9 m	1,5 m	1,5 m	1,0 m	1,0 m
Minimale dynamische Last	25,2 kN	29,3 kN	29,7 kN	32,7 kN	22,9 kN	28,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		5,2 kN		0,2 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

28 A23R1_B2277_1_KF_s14021

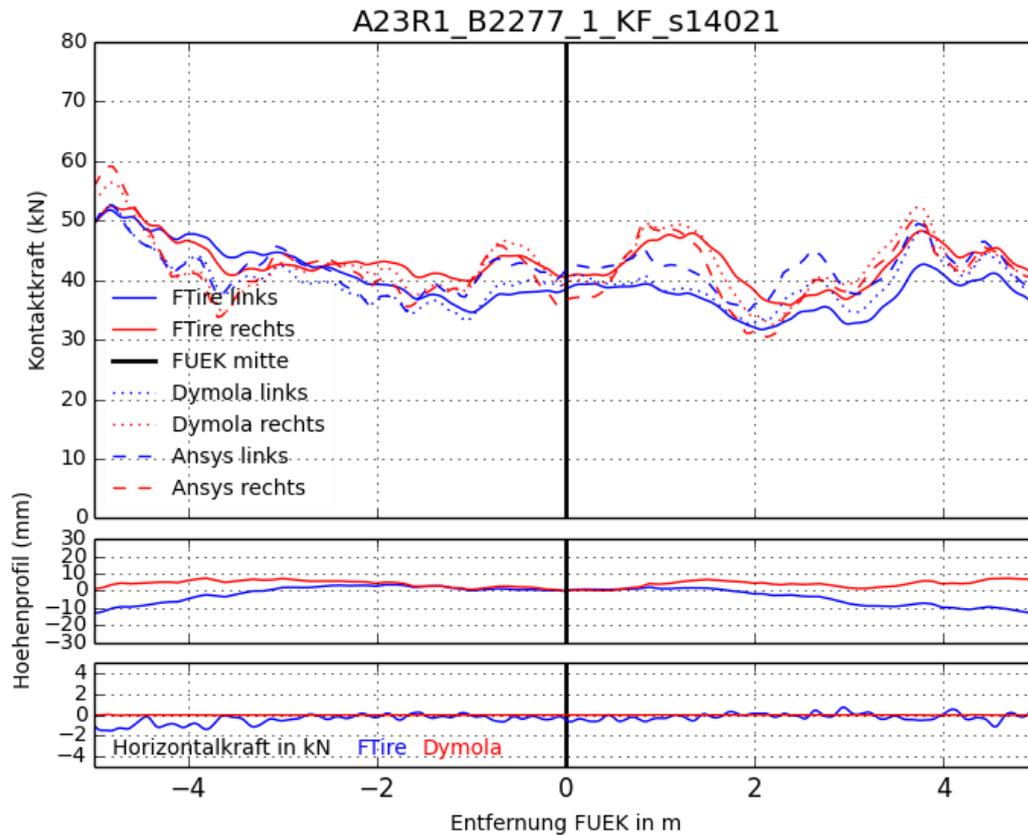


Abbildung 28 Ergebnisse A23R1_B2277_1_KF_s14021

Anmerkungen:

keine

Tabelle 28 Ergebnisse A23R1_B2277_1_KF_s14021

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	49,5 kN	50,5 kN	42,6 kN	48,2 kN	48,2 kN	52,4 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,15	1,17	1,01	1,15	1,14	1,24
Position max. dynamische Last	3,7 m					
Minimale dynamische Last	34,3 kN	30,4 kN	31,7 kN	35,8 kN	32,7 kN	32,5 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,1 kN		0,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

29 A23R1_B2277_2_KF_s14238

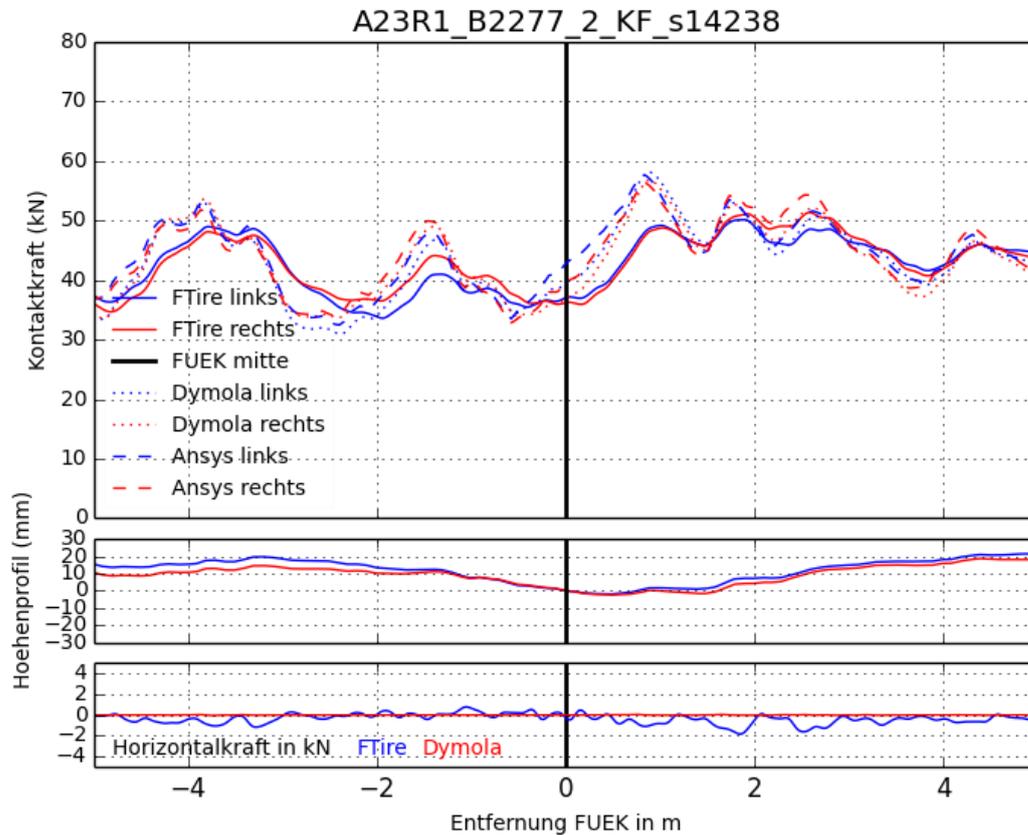


Abbildung 29 Ergebnisse A23R1_B2277_2_KF_s14238

Anmerkungen:

keine

Tabelle 29 Ergebnisse A23R1_B2277_2_KF_s14238

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	57,6 kN	56,3 kN	50,1 kN	51,1 kN	58,1 kN	56,8 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,34	1,31	1,19	1,22	1,37	1,34
Position max. dynamische Last	0,8 m	0,8 m	1,9 m	2,6 m	0,9 m	0,9 m
Minimale dynamische Last	32,5 kN	34,1 kN	33,6 kN	36,5 kN	31,0 kN	33,7 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,8 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

30 A2R1_V41_2_KF_s19546

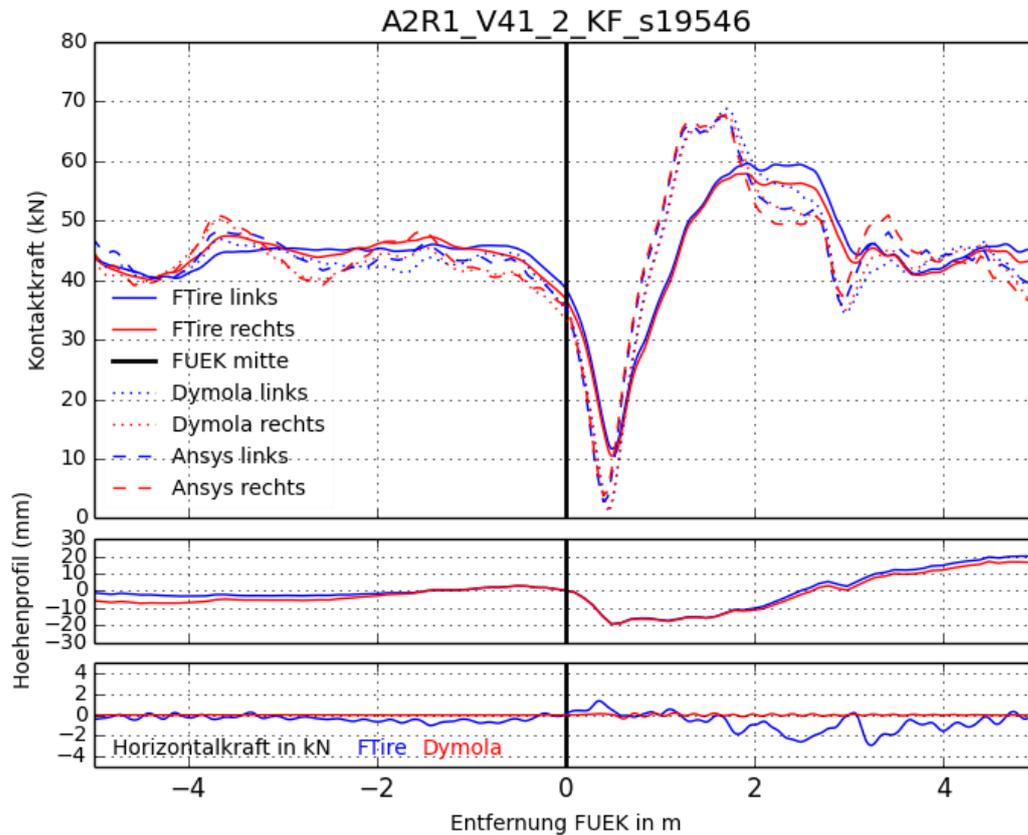


Abbildung 30 Ergebnisse A2R1_V41_2_KF_s19546

Anmerkungen:

keine

Tabelle 30 Ergebnisse A2R1_V41_2_KF_s19546

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	67,7 kN	67,6 kN	59,6 kN	57,9 kN	68,8 kN	67,8 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,57	1,57	1,42	1,38	1,63	1,60
Position max. dynamische Last	1,7 m	1,7 m	1,9 m	1,9 m	1,7 m	1,7 m
Minimale dynamische Last	2,8 kN	3,8 kN	11,7 kN	11,5 kN	1,7 kN	1,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		3,1 kN		0,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

31 A10L1_A10.099_2_MD_s20369

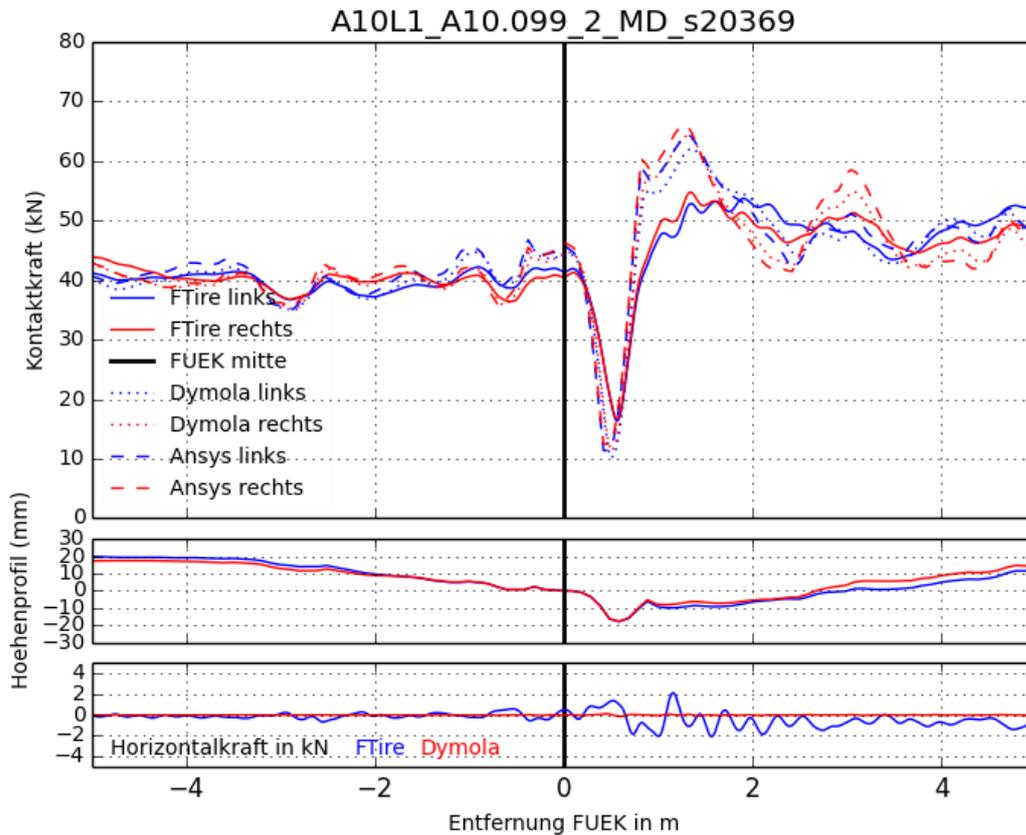


Abbildung 31 Ergebnisse A10L1_A10.099_2_MD_s20369

Anmerkungen:

keine

Tabelle 31 Ergebnisse A10L1_A10.099_2_MD_s20369

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	64,6 kN	65,9 kN	53,7 kN	54,7 kN	62,1 kN	64,2 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,50	1,53	1,28	1,30	1,47	1,52
Position max. dynamische Last	1,3 m	1,3 m	1,9 m	1,3 m	1,3 m	1,3 m
Minimale dynamische Last	11,4 kN	12,4 kN	16,4 kN	16,7 kN	10,2 kN	11,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,1 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

32 A13L1_BB23e_5_MD_s22593

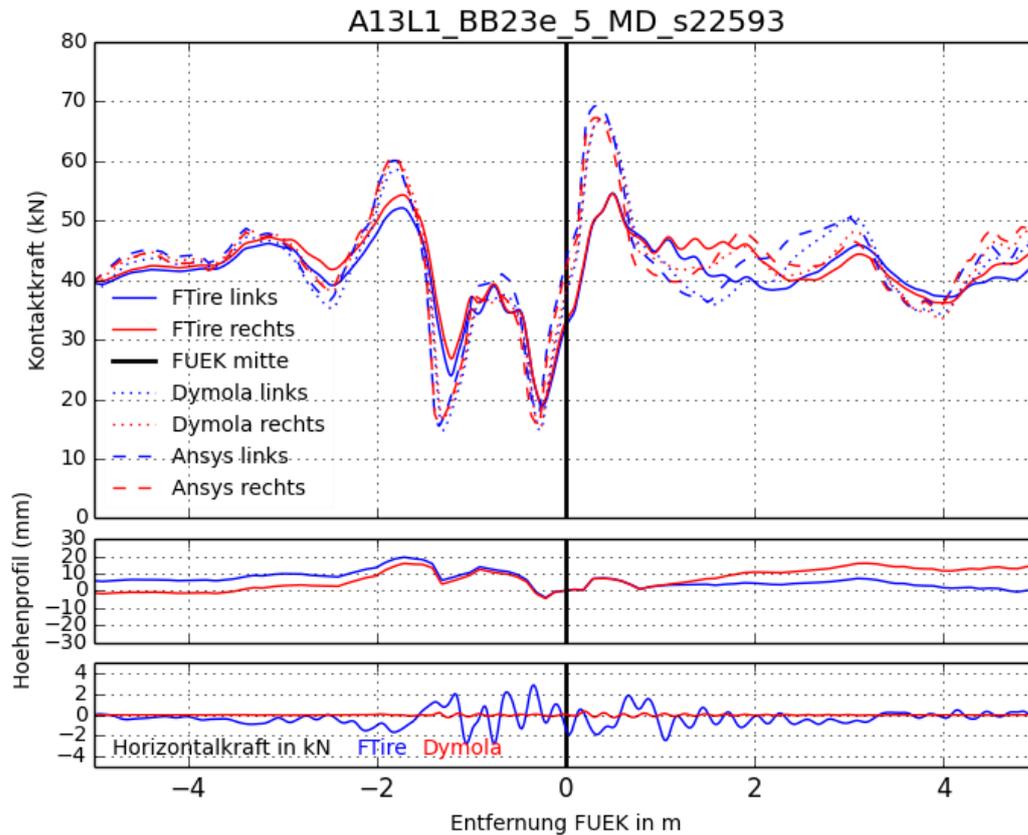


Abbildung 32 Ergebnisse A13L1_BB23e_5_MD_s22593

Anmerkungen:

keine

Tabelle 32 Ergebnisse A13L1_BB23e_5_MD_s22593

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	69,3 kN	67,3 kN	54,6 kN	54,5 kN	67,0 kN	66,8 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,61	1,57	1,30	1,30	1,58	1,58
Position max. dynamische Last	0,3 m	0,3 m	0,5 m	0,5 m	0,4 m	0,4m
Minimale dynamische Last	17,7 kN	15,5 kN	18,8 kN	19,1 kN	14,9 kN	15,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,9 kN		0,4 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

33 A4L1_06050_1_MD_s22646

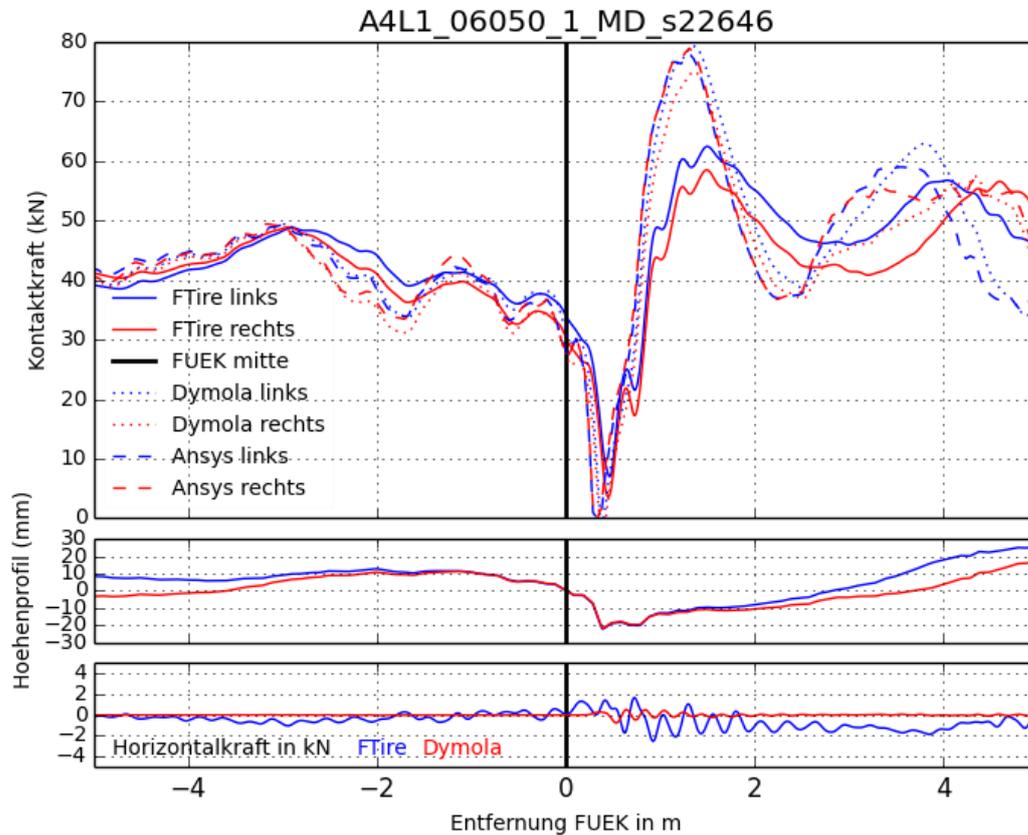


Abbildung 33 Ergebnisse A4L1_06050_1_MD_s22646

Anmerkungen:

keine

Tabelle 33 Ergebnisse A4L1_06050_1_MD_s22646

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	78,0 kN	78,9 kN	62,4 kN	58,5 kN	79,3 kN	75,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,81	1,83	1,49	1,39	1,87	1,77
Position max. dynamische Last	1,3 m	1,3 m	1,5 m	1,5 m	1,3 m	1,3 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	7,0 kN	3,6 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,5 kN		0,8 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

34 A13L1_BB23e_6_MD_s22911

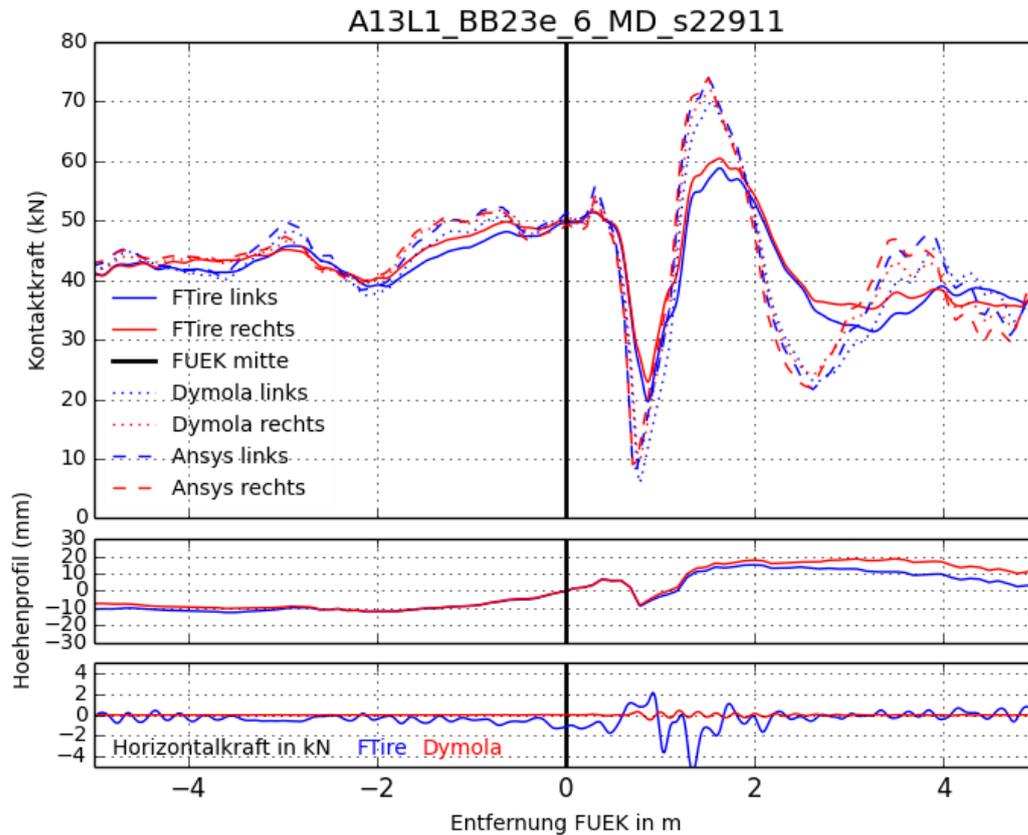


Abbildung 34 Ergebnisse A13L1_BB23e_6_MD_s22911

Anmerkungen:

keine

Tabelle 34 Ergebnisse A13L1_BB23e_6_MD_s22911

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	74,0 kN	74,0 kN	58,8 kN	60,4 kN	70,0 kN	71,8 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,72	1,72	1,40	1,44	1,65	1,70
Position max. dynamische Last	1,5 m	1,5 m	1,6 m	1,6 m	1,5 m	1,5 m
Minimale dynamische Last	8,3 kN	9,0 kN	19,6 kN	22,9 kN	6,0 kN	9,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		5,5 kN		0,5 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

35 A10L1_A10.091_2_MD_s24623

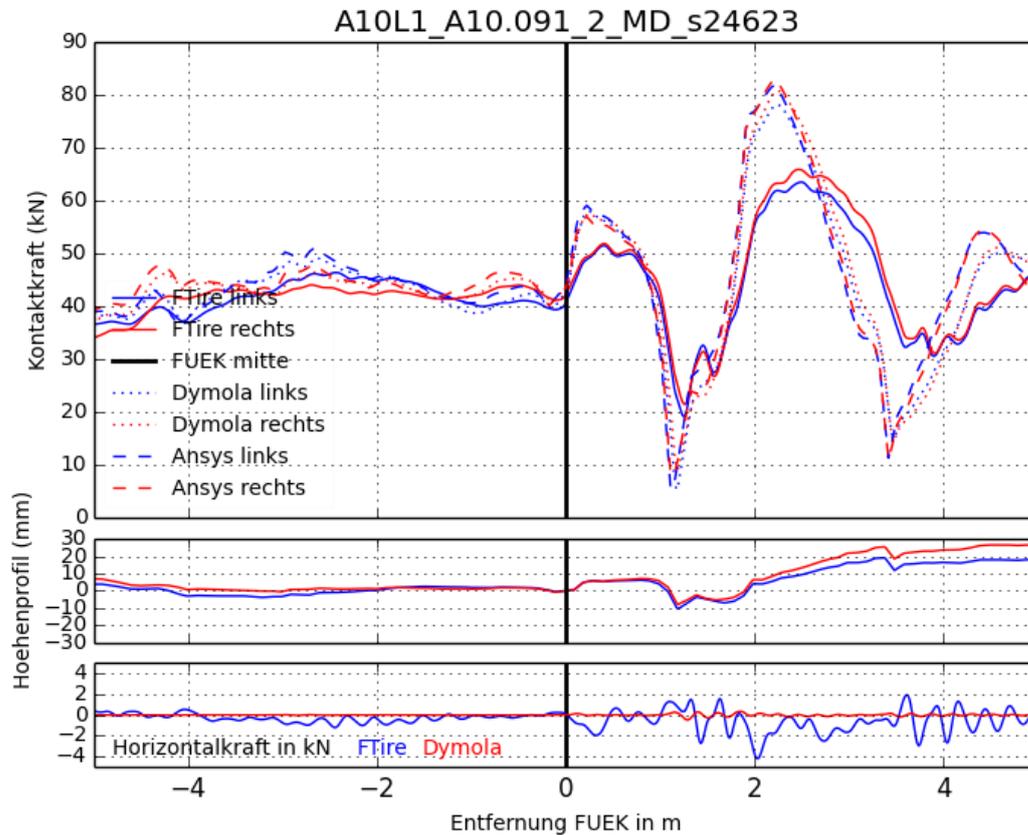


Abbildung 35 Ergebnisse A10L1_A10.091_2_MD_s24623

Anmerkungen:

keine

Tabelle 35 Ergebnisse A10L1_A10.091_2_MD_s24623

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	82,0 kN	83,0 kN	63,5 kN	65,9 kN	78,2 kN	80,8 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,91	1,93	1,51	1,57	1,85	1,91
Position max. dynamische Last	2,2 m	2,2 m	2,5 m	2,5 m	2,2 m	2,2 m
Minimale dynamische Last	5,7 kN	8,2 kN	19,3 kN	21,5 kN	5,5 kN	9,2 kN
Maximale Horizontalkraft	-		4,2 kN		0,5 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

36 A13L1_BB14_1_GF_s27536

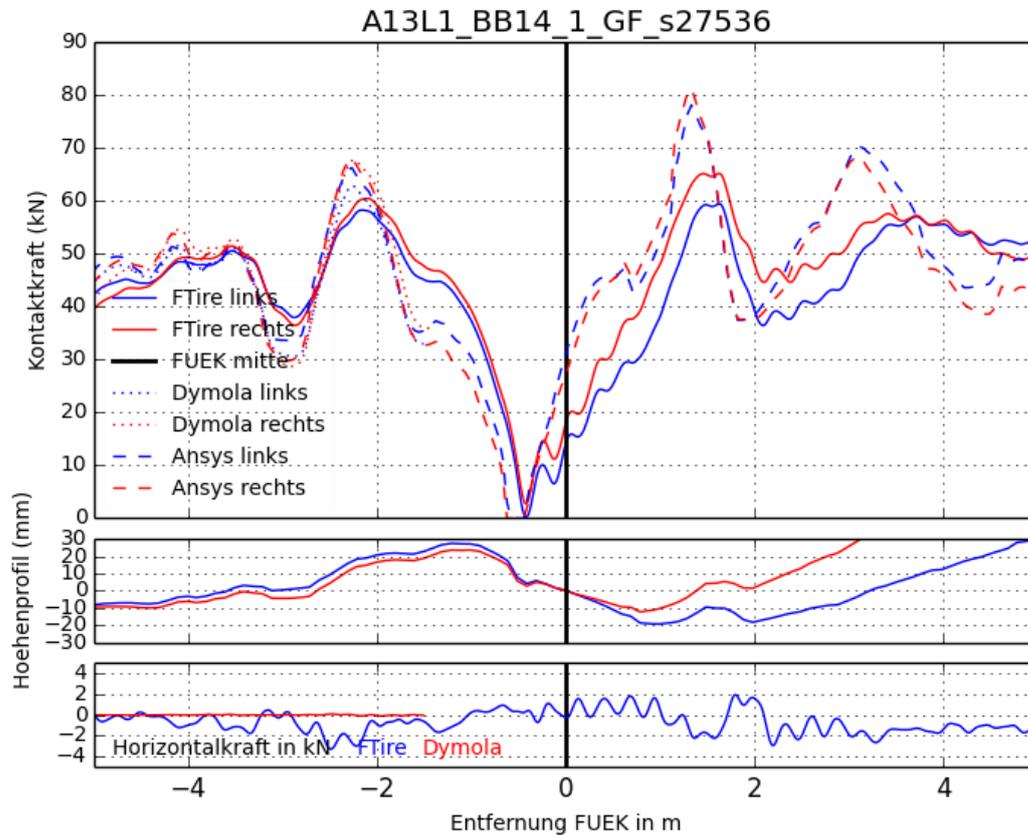


Abbildung 36 Ergebnisse A13L1_BB14_1_GF_s27536

Anmerkungen:

Dymola-Datenreihe nicht vollständig.

Tabelle 36 Ergebnisse A13L1_BB14_1_GF_s27536

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	78,1 kN	81,2 kN	59,4 kN	65,1 kN	-	-
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,82	1,89	1,41	1,55	-	-
Position max. dynamische Last	1,3 m	1,3 m	1,6 m	1,6 m		
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	0,3 kN	2,7 kN	-	-
Maximale Horizontalkraft	-		2,9 kN		-	
Geschwindigkeit	80 km/h					

37 A4R1_06053_1_PK_s28013

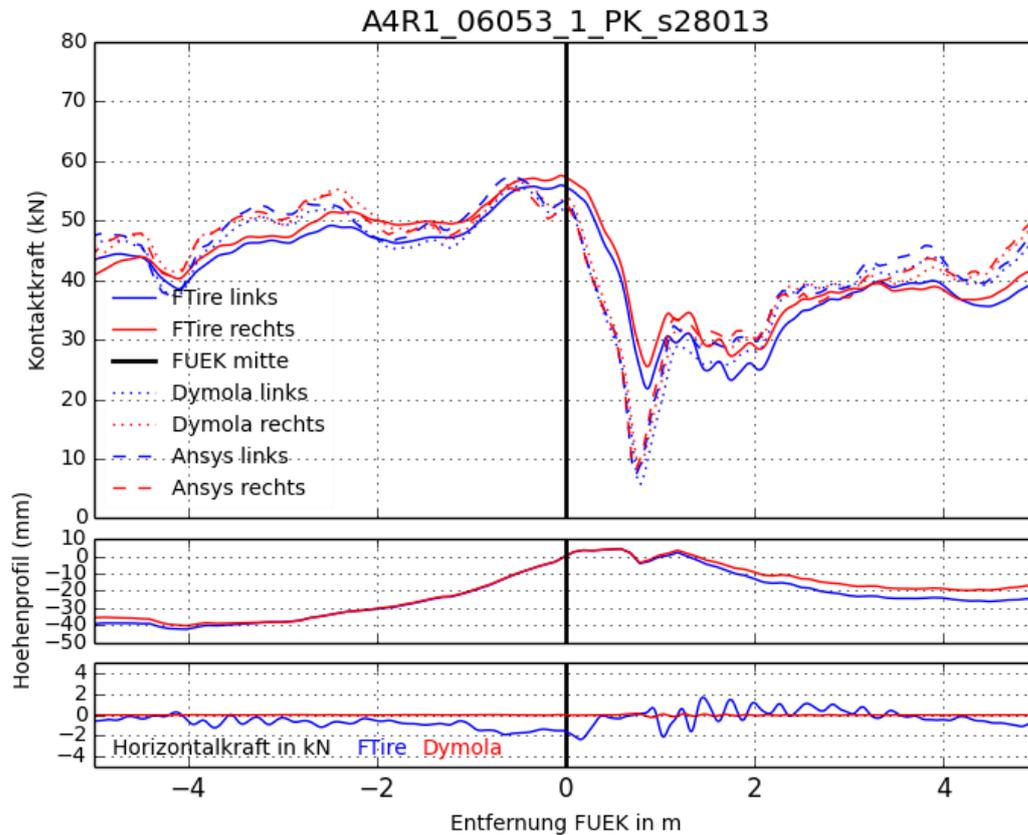


Abbildung 37 Ergebnisse A4R1_06053_1_PK_s28013

Anmerkungen:

keine

Tabelle 37 Ergebnisse A4R1_06053_1_PK_s28013

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	57,4 kN	55,4 kN	57,5 kN	55,9 kN	55,7 kN	56,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,33	1,29	1,37	1,33	1,32	1,34
Position max. dynamische Last	-0,6 m	-0,6 m	0,0 m	0,0 m	-0,5 m	-0,5 m
Minimale dynamische Last	7,3 kN	8,1 kN	21,7 kN	25,5 kN	5,7 kN	8,5 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,1 kN		0,2 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

38 A4R1_06053_2_PK_s28066

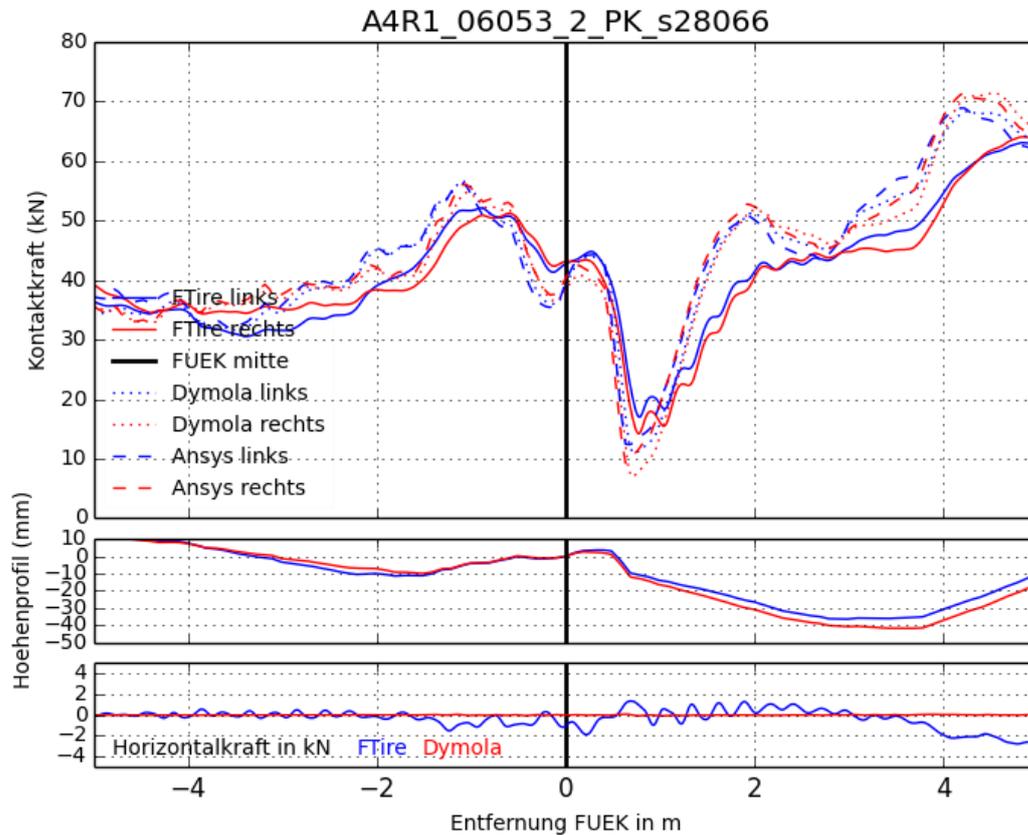


Abbildung 38 Ergebnisse A4R1_06053_2_PK_s28066

Anmerkungen:

keine

Tabelle 38 Ergebnisse A4R1_06053_2_PK_s28066

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	56,4 kN	56,1 kN	52,1 kN	50,9 kN	56,6 kN	54,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,31	1,30	1,24	1,21	1,34	1,29
Position max. dynamische Last	-1,1 m	-1,1 m	-0,9 m	-0,6	-1,1 m	-1,1 m
Minimale dynamische Last	12,4 kN	9,3 kN	17,0 kN	14,2 kN	11,0 kN	7,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,9 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

39 A13L1_BB14_2_GF_s28190

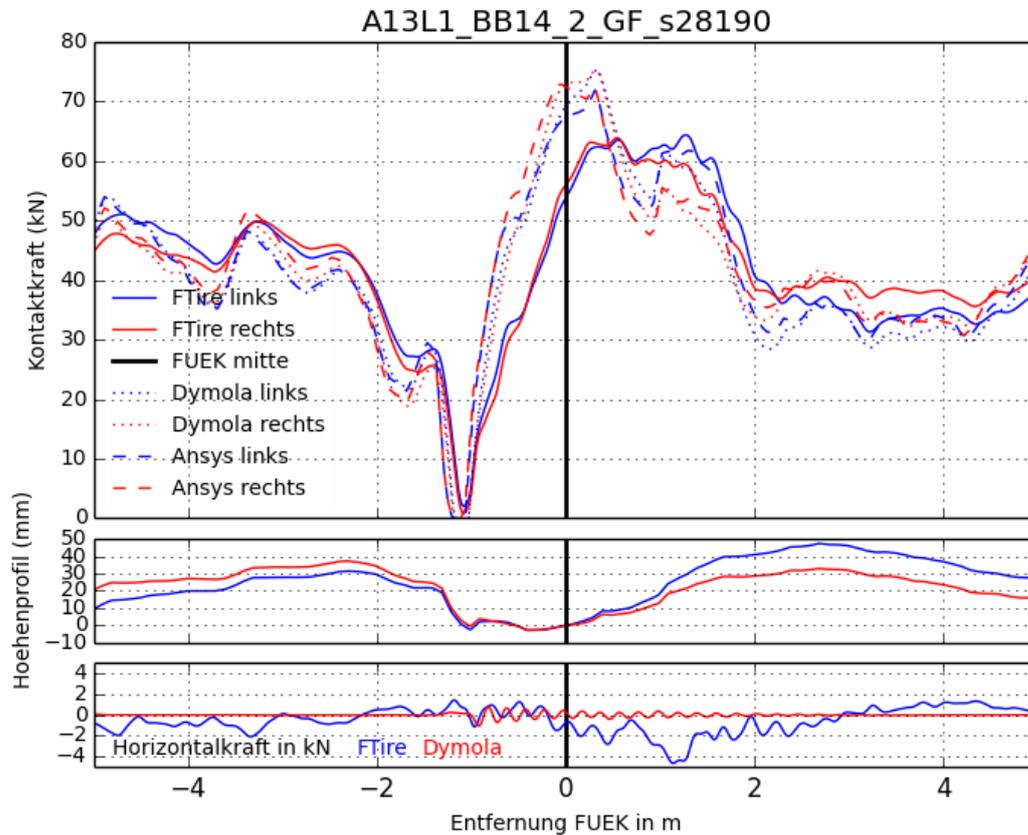


Abbildung 39 Ergebnisse A13L1_BB14_2_GF_s28190

Anmerkungen:

keine

Tabelle 39 Ergebnisse A13L1_BB14_2_GF_s28190

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	71,9 kN	72,4 kN	63,6 kN	63,9 kN	75,4 kN	75,1 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,67	1,68	1,51	1,52	1,78	1,78
Position max. dynamische Last	0,3 m	0,3 m	0,6 m	0,6 m	0,3 m	0,3 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	2,0 kN	0,8 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		4,7 kN		1,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

40 A13R1_BB56_1_GF_s29993

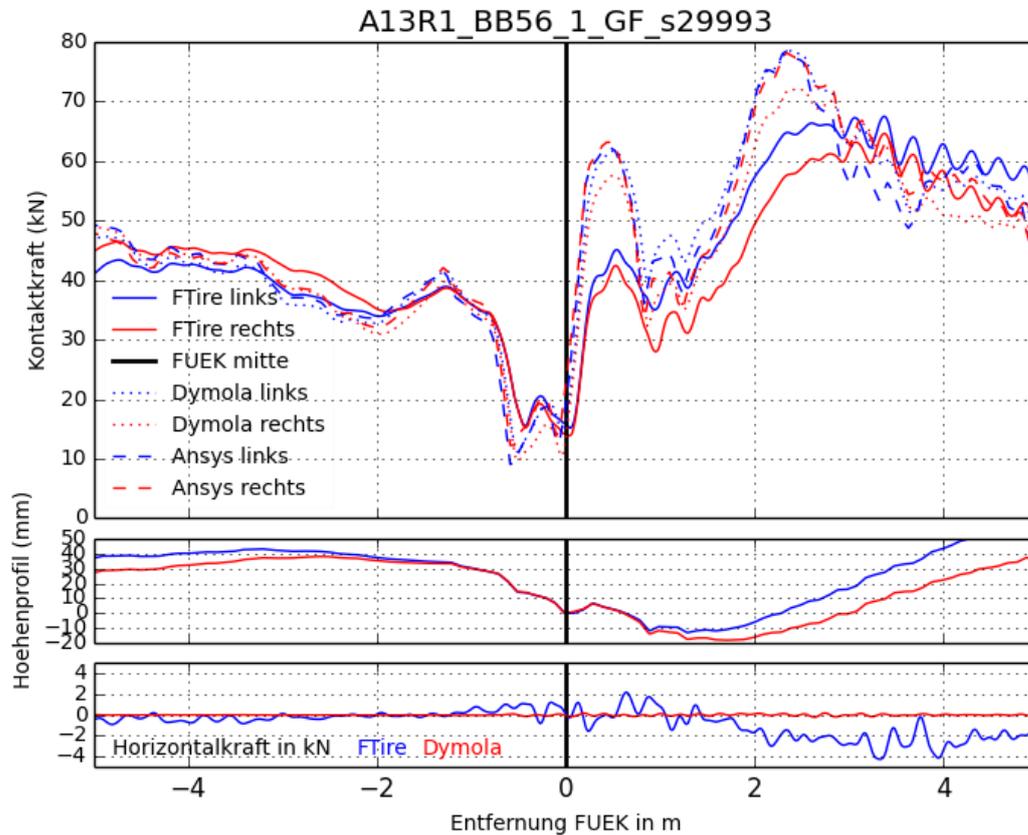


Abbildung 40 Ergebnisse A13R1_BB56_1_GF_s29993

Anmerkungen:

keine

Tabelle 40 Ergebnisse A13R1_BB56_1_GF_s29993

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	78,5 kN	78,2 kN	67,5 kN	64,6 kN	78,5 kN	72,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,83	1,82	1,61	1,54	1,86	1,70
Position max. dynamische Last	2,3 m	2,3 m	3,4 m	3,4 m	2,4 m	2,4 m
Minimale dynamische Last	9,1 kN	12,3 kN	15,2 kN	13,9 kN	11,0 kN	9,7 kN
Maximale Horizontalkraft	-		4,2 kN		0,2 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

41 A10R1_A10.091_1_BD_s36015

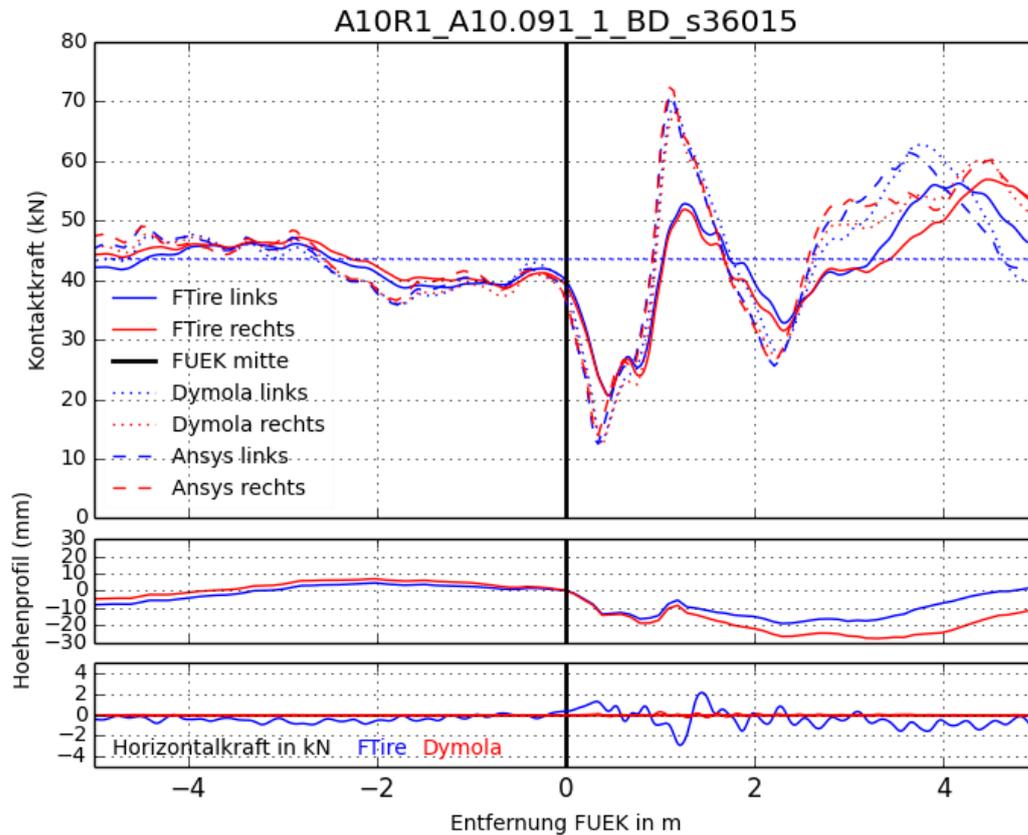


Abbildung 41 Ergebnisse A10R1_A10.091_1_BD_s36015

Anmerkungen:

keine

Tabelle 41 Ergebnisse A10R1_A10.091_1_BD_s36015

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	71,1 kN	72,4 kN	52,8 kN	51,9 kN	69,8 kN	68,2 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,65	1,68	1,26	1,24	1,65	1,61
Position max. dynamische Last	1,1 m	1,1 m	1,3 m	1,3 m	1,2 m	1,2 m
Minimale dynamische Last	12,5 kN	13,9 kN	20,7 kN	20,6 kN	12,8 kN	12,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,9 kN		0,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

42 A10R1_A10.098_2_MD_s40145

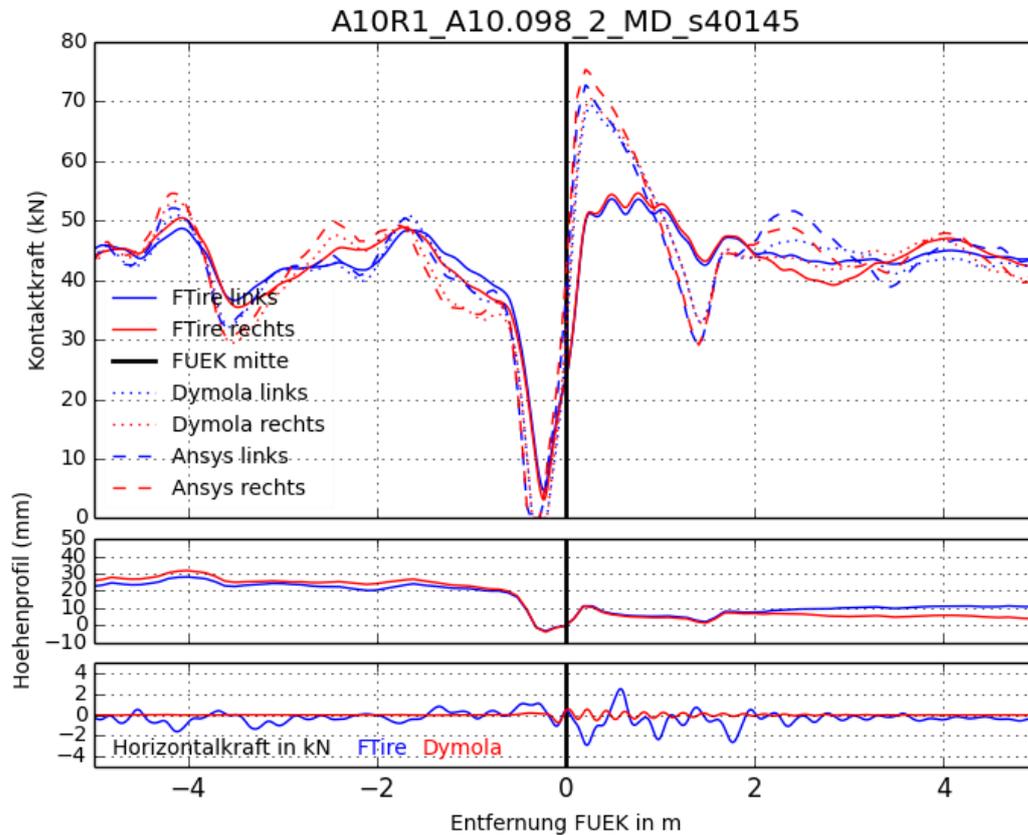


Abbildung 42 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145

Anmerkungen:

FTire kappt durch das Reifenmodell die ausgeprägte Spitze der beiden anderen Simulationsprogramme.

Tabelle 42 Ergebnisse A10R1_A10.098_2_MD_s40145

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	72,8 kN	75,4 kN	53,6 kN	53,6 kN	69,4 kN	70,4 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,69	1,75	1,28	1,28	1,64	1,66
Position max. dynamische Last	0,2 m	0,2 m	0,8 m	0,8 m	0,3 m	0,3 m
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	4,7 kN	3,1 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		2,9 kN		0,7 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

43 A10R1_A10.099_1_MD_s40279

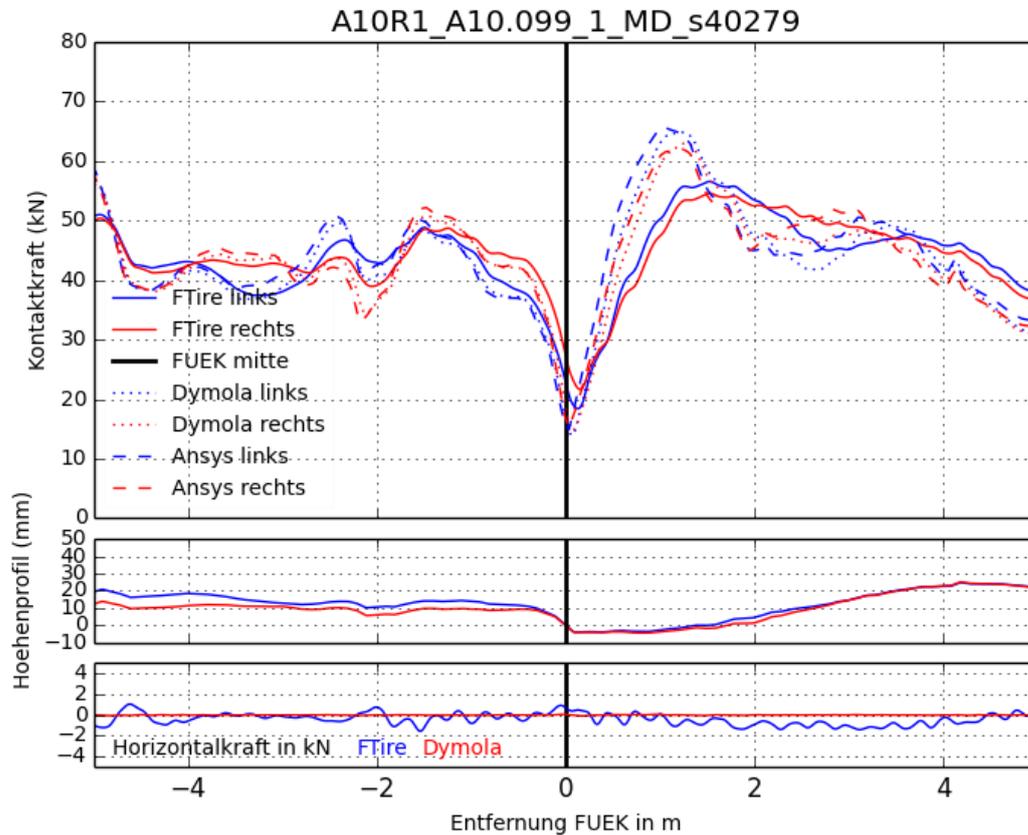


Abbildung 43 Ergebnisse A10R1_A10.099_1_MD_s40279

Anmerkungen:

keine

Tabelle 43 Ergebnisse A10R1_A10.099_1_MD_s40279

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	65,6 kN	62,1 kN	56,6 kN	54,6 kN	64,9 kN	63,0 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,53	1,44	1,35	1,30	1,53	1,49
Position max. dynamische Last	1,0 m	1,2 m	1,5 m	1,5 m	1,2 m	1,3 m
Minimale dynamische Last	14,9 kN	15,3 kN	18,4 kN	21,6 kN	13,9 kN	14,8 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,6 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

44 A2L1_A2.75_1_KF_s43315

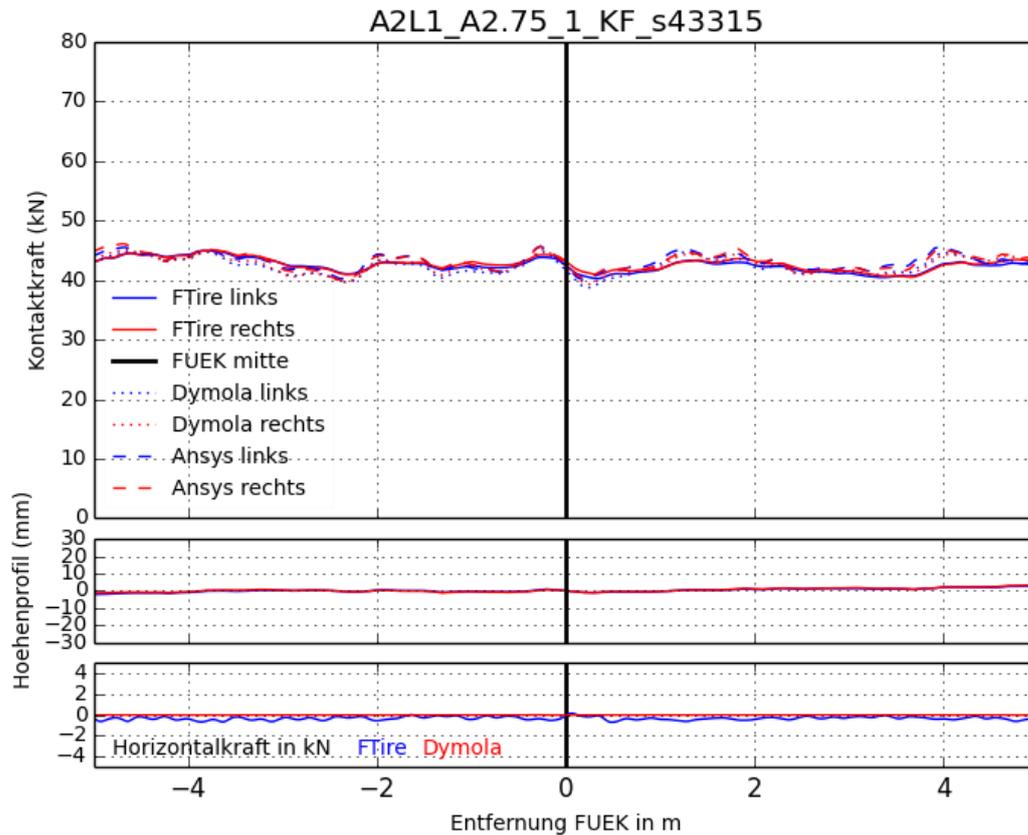


Abbildung 44 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315

Anmerkungen:

keine

Tabelle 44 Ergebnisse A2L1_A2.75_1_KF_s43315

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	45,7 kN	45,7 kN	43,8 kN	44,3 kN	44,8 kN	45,1 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,06	1,06	1,04	1,05	1,06	1,07
Position max. dynamische Last	-0,3 m	-0,3 m	-0,2 m	-0,2 m	-0,2 m	-0,2 m
Minimale dynamische Last	39,9 kN	40,1 kN	40,3 kN	40,9 kN	38,7 kN	39,3 kN
Maximale Horizontalkraft	-		0,7 kN		0,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

45 A2L1_A2.75_2_KF_s43433

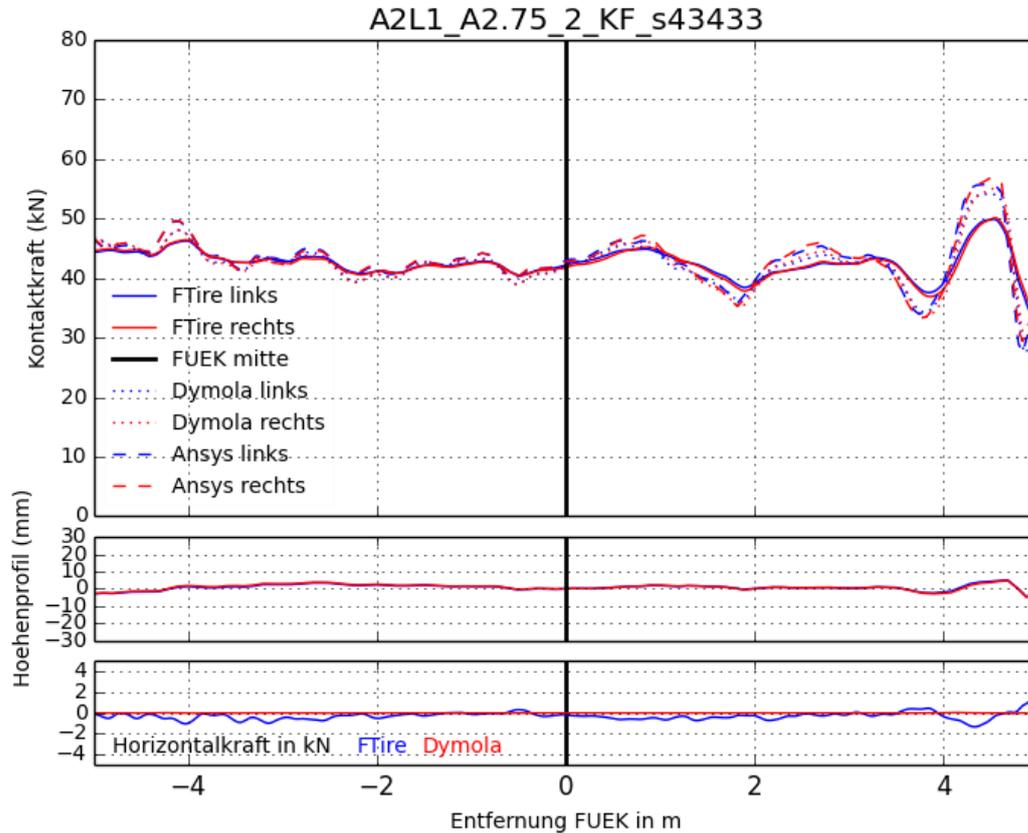


Abbildung 45 Ergebnisse A2L1_A2.75_2_KF_s43433

Anmerkungen:

keine

Tabelle 45 Ergebnisse A2L1_A2.75_2_KF_s43433

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	46,4 kN	47,2 kN	44,9 kN	45,2 kN	45,7 kN	46,2 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,08	1,10	1,07	1,08	1,08	1,09
Position max. dynamische Last	0,8 m	0,8 m	0,9 m	0,9 m	0,6 m	0,8 m
Minimale dynamische Last	35,8 kN	35,2 kN	38,4 kN	37,1 kN	36,0 kN	35,2 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,0 kN		0,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

46 A4R1_07011_1_UF_s44054

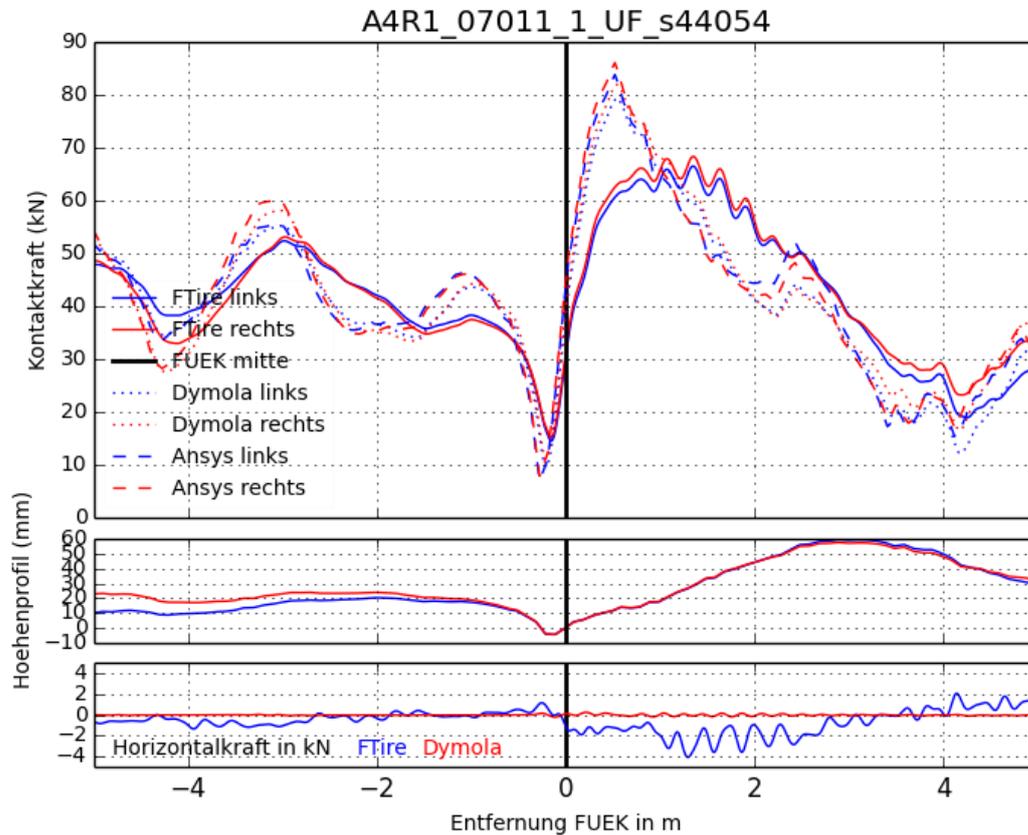


Abbildung 46 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054

Anmerkungen:

Nicht nur an ausgeprägten Spitzen im Höhenverlauf können hohe dynamische Lasten auftreten, auch eine Kombination aus einem Höhengsprung und einer relativ starken Steigung erzeugt hohe Werte.

Tabelle 46 Ergebnisse A4R1_07011_1_UF_s44054

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	83,8 kN	86,1 kN	66,5 kN	68,4 kN	79,4 kN	81,9 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,95	2,00	1,58	1,63	1,88	1,94
Position max. dynamische Last	0,5 m	0,5 m	1,4 m	1,4 m	0,5 m	0,5 m
Minimale dynamische Last	7,2 kN	8,0 kN	14,6 kN	15,4 kN	9,6 kN	11,1 kN
Maximale Horizontalkraft	-		4,2 kN		0,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

47 A4R1_07011_2_UF_s44098

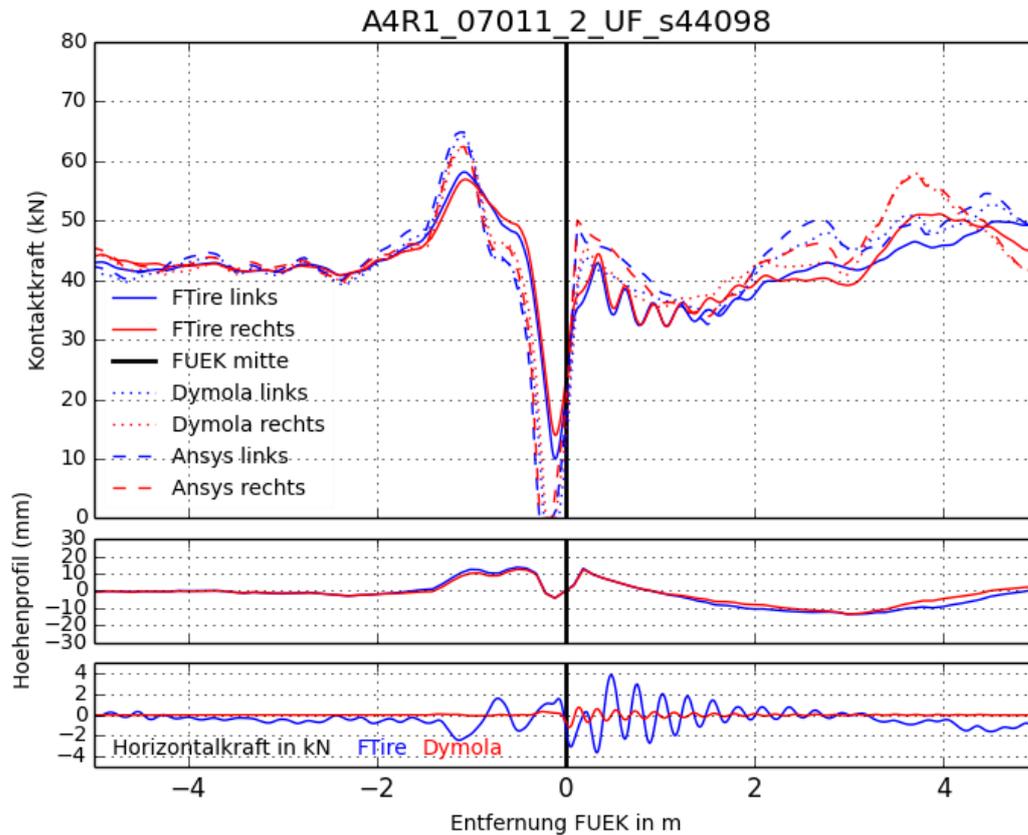


Abbildung 47 Ergebnisse A4R1_07011_2_UF_s44098

Anmerkungen:

keine

Tabelle 47 Ergebnisse A4R1_07011_2_UF_s44098

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	64,9 kN	62,4 kN	58,1 kN	56,9 kN	64,3 kN	62,4 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,51	1,45	1,38	1,35	1,52	1,48
Position max. dynamische Last	-1,1 m					
Minimale dynamische Last	0,0 kN	0,0 kN	10,0 kN	14,0 kN	0,0 kN	0,0 kN
Maximale Horizontalkraft	-		4,0 kN		1,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

48 A2L1_A2.68_2_KF_s46959

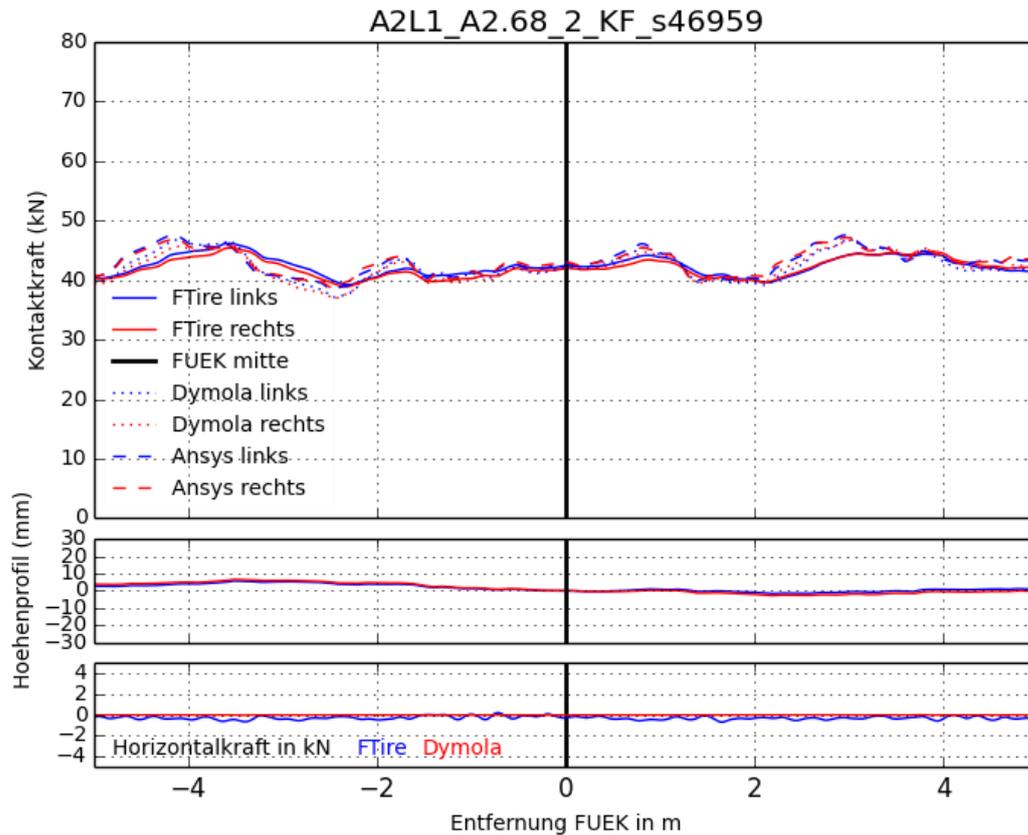


Abbildung 48 Ergebnisse A2L1_A2.68_2_KF_s46959

Anmerkungen:

keine

Tabelle 48 Ergebnisse A2L1_A2.68_2_KF_s46959

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	47,5 kN	47,1 kN	44,5 kN	44,4 kN	46,8 kN	46,7 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,10	1,10	1,06	1,06	1,11	1,10
Position max. dynamische Last	3,0 m	3,0 m	3,4 m	3,4 m	3,0 m	3,0 m
Minimale dynamische Last	40,0 kN	40,4 kN	39,6 kN	39,6 kN	39,2 kN	39,8 kN
Maximale Horizontalkraft	-		0,1 kN		0,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

49 A4L1_A4.09_1_KF_s47169

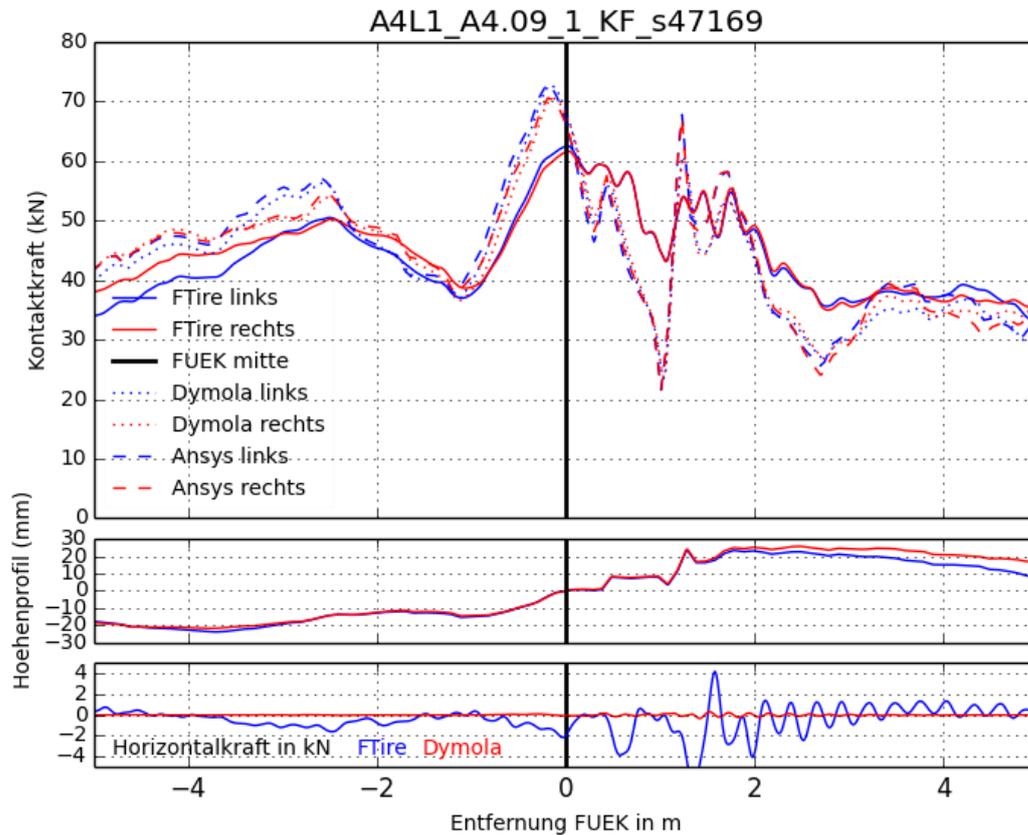


Abbildung 49 Ergebnisse A4L1_A4.09_1_KF_s47169

Anmerkungen:

keine

Tabelle 49 Ergebnisse A4L1_A4.09_1_KF_s47169

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	72,9 kN	70,6 kN	62,6 kN	61,7 kN	72,7 kN	70,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,70	1,64	1,49	1,47	1,72	1,67
Position max. dynamische Last	-0,2 m	-0,2 m	0,0 m	0,0 m	-0,1 m	-0,1 m
Minimale dynamische Last	21,6 kN	21,7 kN	43,2 kN	43,1 kN	23,5 kN	23,6 kN
Maximale Horizontalkraft	-		7,0 kN		0,3 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

50 A2L1_A2.65_1_KF_s48853

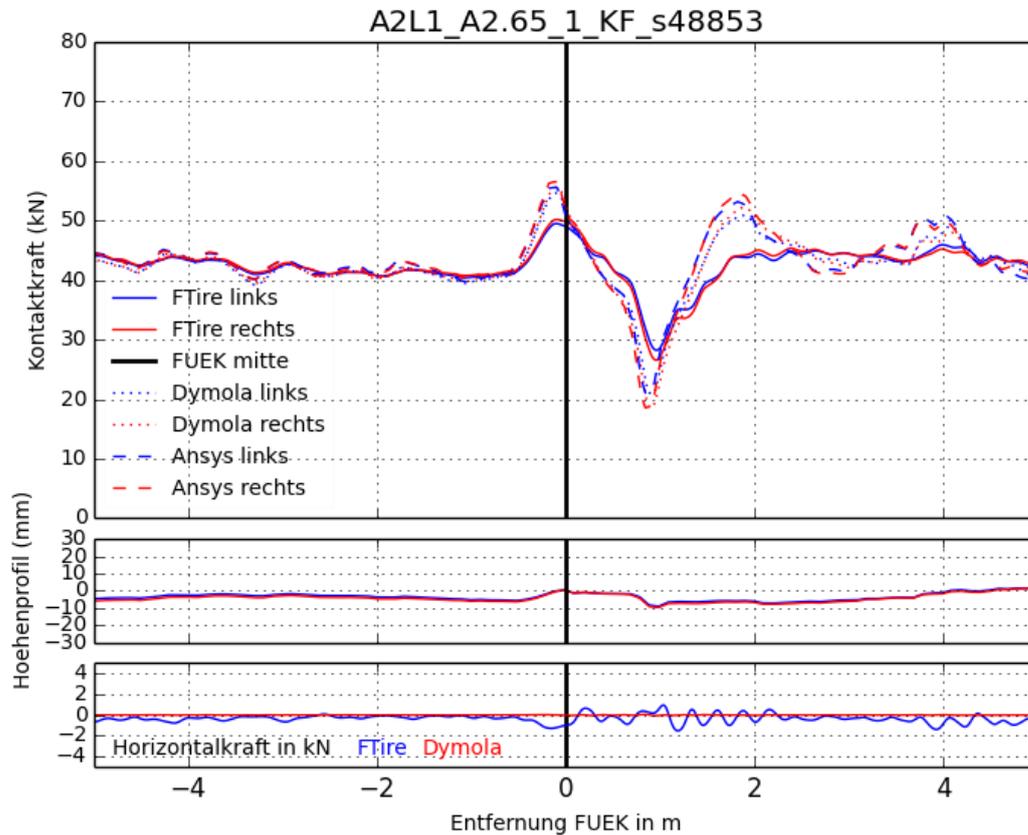


Abbildung 50 Ergebnisse A2L1_A2.65_1_KF_s48853

Anmerkungen:

keine

Tabelle 50 Ergebnisse A2L1_A2.65_1_KF_s48853

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	55,5 kN	56,5 kN	49,5 kN	50,2 kN	54,6 kN	55,5 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,29	1,31	1,18	1,20	1,29	1,31
Position max. dynamische Last	-0,1 m					
Minimale dynamische Last	21,0 kN	18,5 kN	28,2 kN	26,6 kN	20,7 kN	18,5 kN
Maximale Horizontalkraft	-		1,5 kN		0,1 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

51 A2L1_A2.65_2_KF_s49003

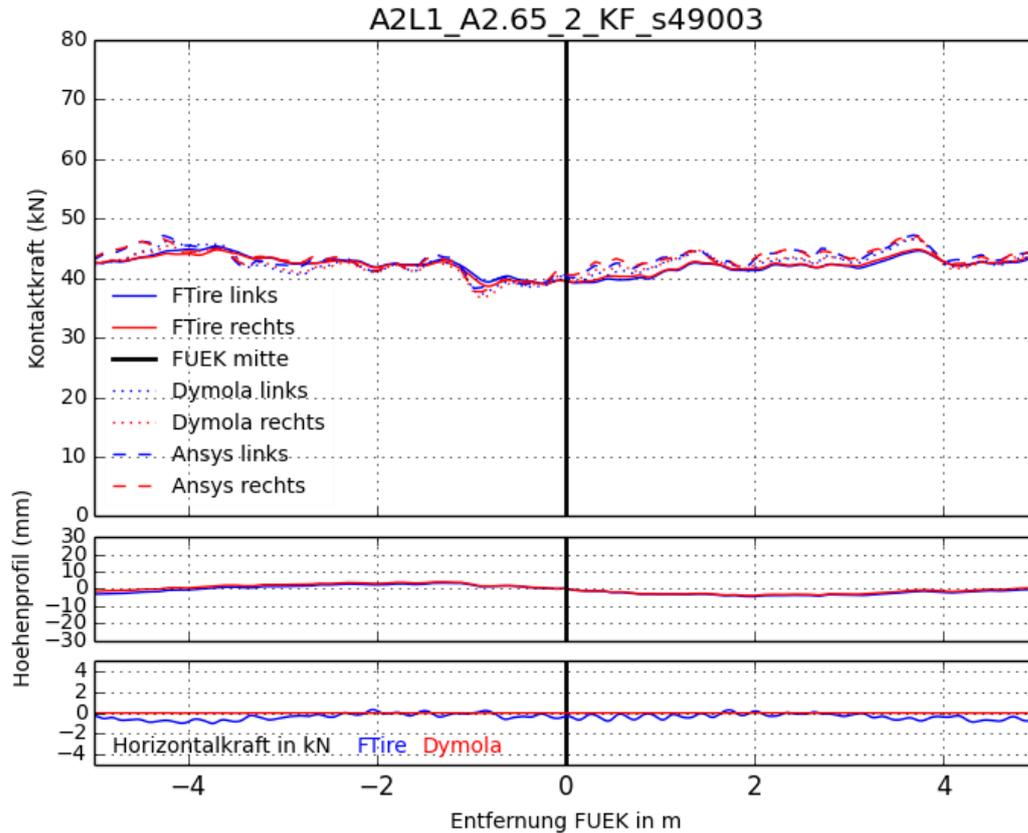


Abbildung 51 Ergebnisse A2L1_A2.65_2_KF_s49003

Anmerkungen:

keine

Tabelle 51 Ergebnisse A2L1_A2.65_2_KF_s49003

	ANSYS		FTire		Dymola	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Statische Last	43,0 kN		42,0 kN		42,3 kN	
Maximale dynamische Last	47,2 kN	47,0 kN	44,6 kN	44,8 kN	46,6 kN	46,6 kN
Dynamischer Lasterhöhungsfaktor	1,10	1,09	1,06	1,07	1,10	1,10
Position max. dynamische Last	3,7 m					
Minimale dynamische Last	38,3 kN	37,8 kN	39,3 kN	38,6 kN	37,3 kN	36,7 kN
Maximale Horizontalkraft	-		0,1 kN		0,0 kN	
Geschwindigkeit	80 km/h					

Anhang 2

Lebenslauf

Curriculum Vitae

Name: Michael Berghammer
Geburtstag: 17.02.1986
Geburtsort: Vöcklabruck
Adresse: Otzigen 5
4873 Redleiten
Mail: mi.berghammer@aon.at
Staatsbürgerschaft: Österreich

Ausbildung:

02/2013 – 06/2015 Universität für Bodenkultur Wien
Masterstudium Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Diplomarbeit am Institut für konstruktiven Ingenieurbau
zum Thema:
*Fahrbahnübergangskonstruktionen: Analyse der
dynamischen Beanspruchung*
assoc. Prof. Dipl.Ing. Dr. Alfred Strauss
Dipl.Ing. Dr. Stefan Lachinger

10/2009 – 02/2013 Universität für Bodenkultur Wien
Bachelorstudium Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Bachelorarbeit am Institut für konstruktiven Ingenieurbau
zum Thema:
*Erarbeitung eines Dokuments zur Schadensbewertung an
Fahrbahnübergangskonstruktionen*
assoc. Prof. Dipl.Ing. Dr. Alfred Strauss

09/2000 – 06/2005 Höhere Technische Bundeslehranstalt (HTBLA)
Vöcklabruck
Maschinenbau, Ausbildungsschwerpunkt Umwelttechnik

Berufliche Erfahrung:

Seit 08/2013

Hydro Ingenieure Umwelttechnik GmbH

- Projektierungs- und Bauleitungsarbeiten kleinerer und mittlerer Bauvorhaben auf dem Gebiet der Abwasserbeseitigung und Wasserversorgung
- Konzeptionierung und Umsetzung von maschineller Ausrüstung von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungs- bzw. Abwasserreinigungsanlagen

07/2012 – 09/2012

07/2011 – 08/2011

07/2010 – 08/2010

div. fachspezifische Praktika in den Sommermonaten im Bereich Siedlungswasserbau

11/2008 – 08/2009

Scheuch GmbH

- Konstruktion und Detailkonstruktion bei Einbauten von Multiklonen
- Mitwirkung bei der Produktentwicklung von Verdampfungskühler
- Detailkonstruktion von Schlauchfiltern
- Auftragsbezogene Anpassungen bei Kundenaufträgen von Multiklonen

10/2006 – 10/2008

FACC AG

- Anschaffung und Betreuung von Anlagen und Maschinen
- Analyse und Optimierung von Anlagenparametern und Prozesse
- Erstellung von Anlagenkonzepten und Pflichtenheften
- Mitarbeit bei der Auswahl von Lieferanten
- Erstellung und Pflege von firmeninternen Spezifikationen
- Organisation und Koordination der Wartung und Reparaturen

10/2005 – 10/2006

Zivildienst Lebenshilfe Oberösterreich

Pflege und Betreuung von geistig behinderten Menschen

07/2005 – 09/2005

FACC AG

Details siehe oben

Sprachkenntnisse: Deutsch (Muttersprache)
Englisch (mittlere Kenntnisse)

EDV Kenntnisse: Office (sehr gute Kenntnisse)
ACAD (sehr gute Kenntnisse)
Barthauer (mittlere Kenntnisse)
Python (mittlere Kenntnisse)
R (mittlere Kenntnisse)
Mathcad (gute Kenntnisse)

Grundkenntnisse in RFEM, ArcGis, HecRas, ME10,
ProEngineer, Dymola, FTire und KAREN

Interessen: Bergsteigen, Tischtennis, laufen, Skitouren, Feuerwehr,
Zeitungen