



Julia Reisinger, BSc

Auswirkungen des Temperaturansatzes auf die Zwangbeanspruchungen im Überbau schiefwinkliger Integralbrücken

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue
Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Michael Mayer, BSc

Institut für Betonbau
Lessingstraße 25, 8010 Graz

Zweitbetreuer

Daniel Gheorghiu, BSc MSc

Graz, September 2021

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich ein Dankeschön an all jene Personen richten, welche mich beim Verfassen dieser Masterarbeit und während meines Studiums begleitet haben.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue für die Möglichkeit bedanken, meine Masterarbeit am Institut für Betonbau verfassen zu können. Ein großer und besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing Dipl.-Ing Michael Mayer, für die fachliche und auch menschliche Unterstützung. Danke für dein Engagement und die zahlreichen Besprechungen, ohne dich wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Danke auch an meinen zweiten Betreuer, Daniel Gheorghiu, B.Sc. M.Sc., der mir bei jeglichen Modellierungs- und Modellbildungsprozessen mit Rat und Tat zur Seite stand.

Weiters möchte ich mich bei meinen Eltern Eduard und Ulrike für die immerwährende moralische und vor allem finanzielle Unterstützung bedanken. Danke auch meinen Großeltern und Geschwistern Anna und Lea für die liebevolle und ständige Unterstützung. Danke, für den familiären Rückhalt!

Ein weiteres Dankeschön gilt meinen Freunden abseits des Studiums und meinen StudienkollegInnen Anna Sophie, Carmen, Marilisa und Thomas. Danke für eure Freundschaft, die unzähligen Lerneinheiten und den gegenseitigen Support in guten wie in schlechten Zeiten.

And last but not least, möchte ich mich hier auch bei den aktuellen und ehemaligen Mitgliedern des Stahlbauzeichensaals bedanken. Vielen Dank für diese unglaublichen Erlebnisse, Abende und Feiern, an die ich mich immer gerne zurückerinnern werde und die mein Studium zu einem unvergesslichen Lebensabschnitt gemacht haben.

Ein herzliches Dankeschön euch allen!

Kurzfassung

Die Wahl des Temperaturansatzes hat einen großen Einfluss auf die Bemessung und die anschließende Bewehrungswahl. Während bei geraden Integralbrücken ein konstanter Temperaturansatz nur in Längsrichtung einen zielführenden Ansatz darstellt, führt ein konstanter Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung zu einer Überschätzung der Zwangbeanspruchung in Querrichtung.

Bei zunehmender Schiefstellung einer Integralbrücke wird aber ersichtlich, dass eine sogenannte Entkoppelung des Temperaturansatzes und folglich ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung infolge Verdrehung des Bauwerks zu unrealistischen Bemessungsergebnissen der Zwangskraft führt.

Um also die Zwangkräfte für schiefe Integralbrücken realitätsnah zu berücksichtigen, ist eine Schiefe im Grundriss zu benennen, ab welcher ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung zu keiner Überschätzung der Zwangbeanspruchungen und der anzuordnenden Bewehrung führt. Anhand einer Parameterstudie an repräsentativen Schiefen wird der Einfluss des entkoppelten und gekoppelten Temperaturansatzes durchgeführt. Anschließend folgt eine Analyse der Auswirkungen verschiedener Temperaturansätze auf die Zwangbeanspruchung im Überbau. Primär werden dabei die quantitativen Zwangkraftverläufe bei Temperaturbeanspruchung und der Einfluss der Schiefwinkeligkeit analysiert.

Für die untersuchten Modellvariationen kann interpretiert werden, dass eine genaue Festlegung der Schiefwinkeligkeit, die einen Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung erfordert, immer von Temperaturgröße, Geometrie und Schlankheit der Bauteile abhängt. Ein pauschaler Winkel und Schnittpunkt, ab dem ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung nicht mehr zu einer Überschätzung der Zwangkraft führt, kann nicht ohne Berücksichtigung der vorherigen Faktoren genannt werden. Es ist aber ersichtlich, dass bis 60° eine Entkoppelung des Temperaturansatzes für die untersuchten Modelle und Temperaturen vorgenommen werden kann. Ab Schiefen kleiner als ca. 60° sind Untersuchungen bezüglich eines gekoppelten Ansatzes erforderlich. Für eine geringe Temperaturbeanspruchungen ist ein Temperaturansatz in Längsrichtung auch für die maximal untersuchte Schiefstellung für die Bemessung zielführend und die Zwangkraft wird dadurch nicht überschätzt.

Abstract

The choice of the temperature approach has a great influence on the design and the subsequent reinforcement selection. While for straight integral bridges a constant temperature approach in the longitudinal direction only is a target-oriented approach, a constant temperature approach in the longitudinal and transverse direction leads to an overestimation of the constraint stress in the transverse direction. With increasing skewness of an integral bridge, however, it becomes apparent that a so-called decoupling of the temperature approach and consequently a temperature approach only in the transverse direction leads to unrealistic design results of the restraint force for the transverse direction.

In order to take the restraint force for oblique integral bridges into account realistically, an oblique angle in plan view must be specified above which a temperature approach in the longitudinal and transverse directions does not lead to an overestimation of the restraint stresses and the reinforcement to be applied. A parameter study of representative oblique angles is carried out to determine the influence of the decoupled and coupled temperature approach. This is followed by an analysis of the effects of different temperature approaches on the restraint stress in the superstructure. The quantitative restraint force curves under temperature loading and the influence of the oblique angle are analyzed.

For the investigated model variations, it can be interpreted that an exact determination of the oblique angle, which requires a temperature approach in longitudinal and transverse direction, always depends on temperature size, geometry and slenderness of the bridge components. A general angle and intersection point above which a temperature approach in the longitudinal and transverse directions no longer leads to an overestimation of the restraint force cannot be stated without taking the previous factors into account. However, it is evident that up to 60° a decoupling of the temperature approach for the investigated models and temperatures can be made. For oblique angles less than 60° , investigations concerning a coupled approach are required. For low temperature loads, a temperature approach in longitudinal direction is feasible for the maximum investigated oblique angle and the restraint force is thereby not overestimated and overdesigned.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Kurzfassung	iv
Abstract	v
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Zwang	3
2.2 Bauteilverhalten unter Zwangbeanspruchungen	5
2.2.1 Fundamente und Bodenplatten	6
2.2.2 Wand auf Fundament	7
2.3 Zwangbeanspruchung in Integralbrücken	9
2.3.1 Situation Überbauplatte auf Widerlagerwand	9
2.3.2 Schiefe im Grundriss	10
2.4 Temperatur	12
2.4.1 Auswirkungen der Temperatur auf schiefe Integralbrücken	13
2.5 Bisherige Untersuchungen und normative Grundlagen	16
2.5.1 Bisherige Untersuchungen	16
2.5.2 Normative Regelungen zu schiefen Integralbrücken	19
3 Modellbildung	21
3.1 Modellierung des schiefwinkligen Systems	22
3.2 Einwirkungen	26
3.3 Vergleichsnachrechnung	31
3.3.1 Vergleich Stabmodell	31
3.3.2 Vergleich 'schwimmende Platte'	38
4 Parameterstudie	47
4.1 Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz	49
4.1.1 Grundsystem 1	50
4.1.2 Grundsystem 2	57
4.2 Interpretation der Temperaturansätze	64
4.2.1 Einfluss der Temperatur	64

4.2.2	Einfluss der Schlankheit	64
4.2.3	Einfluss der Geometrie	65
4.2.4	Einfluss der Bettungsmoduln	67
5	Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau	71
5.1	Auswirkungen des Temperaturansatzes auf die Zwangkraftbeanspruchung im Überbau	74
5.1.1	Lastfall 1	74
5.1.2	Lastfall 2	78
5.1.3	Lastfall 3	82
5.1.4	Lastfall 4	86
5.1.5	Lastfall 5	90
5.1.6	Lastfall 6	94
5.2	Vergleich der Temperaturansätze	98
5.2.1	Vergleich LF 1 und LF 4	98
5.2.2	Vergleich LF 2 und LF 5	106
5.2.3	Vergleich LF 3 und LF 6	113
5.3	Interpretation	121
6	Zusammenfassung und Ausblick	127

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zerlegung der jeweiligen Zwangspannungsanteile im Querschnitt aus [1]	5
2.2	Verformungsverlauf 'Wand auf Fundament' - System infolge Temperatureinwirkung nach [5]	7
2.3	Bereichsunterteilung für die Bemessung der 'Wände auf Fundament' nach [5]	8
2.4	Berechnung der Spannungsverteilung Überbau auf Fundament aus [7]	10
2.5	Schiefer Grundriss Überbau	11
2.6	Aufteilung der Temperaturanteile nach Eurocode 1-5 [3]	12
2.7	Resultierendes Kräftepaar eines schiefen Integralbrückengrundriss nach [9] und [10]	13
2.8	Längenänderungen bei geraden und schiefen Grundrissen	14
2.9	Brückendrehpol schiefer Integralbrücken nach [10]	17
3.1	Visualisierung der Modelle	23
3.2	Visualisierung der Modelle	24
3.3	Visualisierung der Modelle	25
3.4	Visualisierung der Temperaturlastfälle	28
3.5	Modellierung der Bettung	29
3.6	Stabmodell	31
3.7	Grundriss Überbau Stabmodell	33
3.8	Visualisierung der Stabmodelle	33
3.9	Temperaturansatz des Stabmodells	34
3.10	Vergleich der Lagerungen	36
3.11	Modell 'schwimmende Platte'	38
3.12	Verschiebungen schwimmende Platte - Modell 1	39
3.13	Verschiebungen schwimmende Platte - Modell 2	40
3.14	Verschiebungen schwimmende Platte - Modell 2	40
3.15	Berechnung der Verschiebelängen der Plattenecken	41
3.16	Abmessungen Überbau Modell 1 und 3	44
3.17	Abmessungen Überbau Modell 2 und 4	45
4.1	SIR-Schnitte	47
4.2	Visualisierung der Modelle - GM1 $\lambda=15$	51
4.3	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 1	52
4.4	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 2	53
4.5	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 3	54

4.6	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 4	55
4.7	Visualisierung der Modelle - GM2 $\lambda=20$	58
4.8	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 1	59
4.9	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 2	60
4.10	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 3	61
4.11	Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 4	62
4.12	Variation der Bettungsmoduln Modell 1	68
4.13	Variation der Bettungsmoduln Modell 2	68
4.14	Variation der Bettungsmoduln Modell 3	69
4.15	Variation der Bettungsmoduln Modell 4	69
5.1	SIR-Schnitt Überbau	72
5.2	Kraftermittlung Zwangbeanspruchungen im Überbau	72
5.3	LF 1 - dTN in x- und y-Richtung	74
5.4	Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 1	74
5.5	Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 1	75
5.6	Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 1	75
5.7	Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 1	76
5.8	Farbskala der Spannungen	77
5.9	Verformungsfiguren LF 1	77
5.10	LF 2 - dTN in x-Richtung	78
5.11	Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 2	78
5.12	Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 2	79
5.13	Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 2	79
5.14	Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 2	80
5.15	Verformungsfiguren LF 2	81
5.16	LF 3 - dTN in y-Richtung	82
5.17	Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 3	82
5.18	Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 3	83
5.19	Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 3	83
5.20	Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 3	84
5.21	Farbskala der Spannungen	85
5.22	Verformungsfiguren LF 3	85
5.23	LF 4 - dTN in x- und y-Richtung	86
5.24	Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 4	86
5.25	Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 4	87
5.26	Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 4	87
5.27	Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 4	88
5.28	Farbskala der Spannungen	89
5.29	Verformungsfiguren LF 4	89
5.30	LF 5 - dTN in x-Richtung	90
5.31	Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 5	90
5.32	Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 5	91

5.33	Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 5	91
5.34	Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 5	92
5.35	Farbskala der Spannungen	93
5.36	Verformungsfiguren LF 5	93
5.37	LF 6 - dTN in y-Richtung	94
5.38	Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 6	94
5.39	Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 6	95
5.40	Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 6	95
5.41	Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 6	96
5.42	Farbskala der Spannungen	97
5.43	Verformungsfiguren LF 6	97
5.44	Vergleich der Temperaturansätze LF 1 und LF 4	98
5.45	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 1 - LF 1 + 4 . .	99
5.46	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 2 - LF 1 + 4 . .	99
5.47	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 3 - LF 1 + 4 . .	100
5.48	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 4 - LF 1 + 4 . .	100
5.49	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 1 - LF 1 + 4	101
5.50	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 2 - LF 1 + 4	101
5.51	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 3 - LF 1 + 4	102
5.52	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF 1 + 4	102
5.53	Farbskala der Spannungen	104
5.54	Verformungen LF 1 und LF4 - Modell 1	104
5.55	Farbskala der Spannungen	105
5.56	Verformungen LF 1 und LF4 - Modell 2	105
5.57	Vergleich der Temperaturansätze LF 2 und LF 5	106
5.58	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 1 - LF 2 + 5 . .	106
5.59	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 2 - LF 2 + 5 . .	107
5.60	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 3 - LF 2 + 5 . .	107
5.61	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 4 - LF 2 + 5 . .	108
5.62	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 1 - LF 2 + 5	108
5.63	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 2 - LF 2 + 5	109
5.64	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 3 - LF 2 + 5	109
5.65	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF 2 + 5	110
5.66	Farbskala der Spannungen	111
5.67	Verformungen LF 2 und LF 5 - Modell 1	111
5.68	Farbskala der Spannungen	112
5.69	Verformungen LF 2 und LF5 - Modell 2	112
5.70	Vergleich der Temperaturansätze LF 3 und LF 6	113
5.71	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 1 - LF 3 + 6 . .	113
5.72	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 2 - LF 3 + 6 . .	114
5.73	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 3 - LF 3 + 6 . .	114
5.74	Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 4 - LF 3 + 6 . .	115
5.75	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 1 - LF 3 + 6	115

5.76	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 2 - LF 3 + 6	116
5.77	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 3 - LF 3 + 6	116
5.78	Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF 3 + 6	117
5.79	Farbskala der Spannungen	119
5.80	Verformungen LF 3 und LF6 - Modell 1	119
5.81	Farbskala der Spannungen	120
5.82	Verformungen LF 3 und LF 6 - Modell 2	120
5.83	Resultierende Kräfte Modell 3 -T3	123
5.84	Resultierende Kräfte Modell 4 -T3	124
5.85	Resultierende Kräfte Modell 4 -T3	125

Tabellenverzeichnis

3.1	Bauteilabmessungen der Modelle	23
3.2	Variable Modellparameter	24
3.3	Materialparameter	26
3.4	Temperaturen	27
3.5	Temperaturlastfälle	27
3.6	Variation der Federsteifigkeiten	30
3.7	Ermittlung der Federsteifigkeiten des Stabmodells	32
3.8	Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 1 und 2 - GM1	34
3.9	Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 1 und 2 - GM2	35
3.10	Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 3 und 4 - GM1	35
3.11	Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 3 und 4 - GM2	36
3.12	Vergleich der Verschiebungen feste Lagerung und Lagerung mit Federn	37
3.13	Zwangsschnittgrößen Stabmodell 1+2	37
3.14	Zwangsschnittgrößen Stabmodell 3+4	37
3.15	Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Temperatur	42
3.16	Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Schlankheit	43
3.17	Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Geometrie - Modell 1 und 3	44
3.18	Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Geometrie - Modell 2 und 4	45
4.1	Übersicht Varianten Grundsystem 1	48
4.2	Übersicht Varianten Grundsystem 2	48
4.3	Übersicht Varianten Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz-Grundsystem 1	50
4.4	Schnittpunkte für den Ansatz der Temperatureinwirkung Grundsystem 1	56
4.5	Übersicht Varianten Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz-Grundsystem 2	57
4.6	Schnittpunkte für den Ansatz der Temperatureinwirkung Grundsystem 2	63
4.7	Vergleich Schnittpunkte für die Entscheidungshilfe zum Ansatz der Temperatureinwirkung	64
4.8	Variation der Bettungsmoduln	67
5.1	Variable Bauteilabmessungen	73
5.2	Übersicht Varianten Grundsystem 1	73
5.3	Darstellung der Risskraft	122

1 Einleitung

Integrale Bauwerke haben in den letzten Jahren sowohl in der Forschung als auch in der Praxis an Bedeutung gewonnen. Vor allem bei Brückenbauwerken überzeugt die monolithische Bauweise durch die Wartungs- und Instandhaltungsvorteile. Dem statisch unbestimmten Rahmensystem liegt aber eine komplexere Bemessung zugrunde. In der Planung ist neben den konventionellen Einflussfaktoren auf Brücken besonders auf die Boden-Bauwerk-Interaktion und die Temperatureinwirkungen zu achten.

Ebenfalls wesentlich bei der Planung von Integralbrücken sind etwaige Schiefen im Grundriss. Die Schiefe im Grundriss zeigt sich vorteilhaft in Bezug auf die Trassierung und stellt somit eine vereinfachende Maßnahme für die Verkehrsführung dar. Bei Integralbrücken führt die Schiefwinkeligkeit aber im eingespannten monolithischen System zu zusätzlichen Zwangspannungen. Deshalb muss bei der Modellbildung und in weiterer Folge der wirklichkeitsgetreuen Abbildung der Zwangkräfte speziell auf die Rahmenecken geachtet werden. Es bedarf somit einer Ermittlung der Auswirkungen des Temperaturansatzes auf das schiefe Tragwerk und einer realitätsnahen Abbildung der Zwangkräfte, um vor allem die Zwangskraft in Querrichtung realitätsnah abzubilden und nicht zu überschätzen.

1.1 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit soll die Auswirkungen des Temperaturansatzes auf die Zwangkraftentwicklung im Überbau bei schiefen Integralbrücken untersuchen. Dabei ist das Ziel der Untersuchung, einen Temperaturansatz für repräsentative Schiefen zu finden, welcher zu keiner wesentlichen Überschätzung der Zwangkraft in Querrichtung und somit zu einer Überbemessung führt. Auf dieser Grundlage erfolgt die Modellierung eines Integralbrückenmodells mit einer anschließenden Parameterstudie. Die Auswirkungen der Temperaturansätze auf die Zwangkraft werden mittels verschiedener Temperaturlastfälle untersucht. Mit Hilfe dieser Studie wird die Größe der Zwangkraft bei verschiedenen Modellsystemen mit den jeweiligen Schiefstellungen ermittelt und anschließend abgebildet. Außerdem folgen eine Analyse, eine Interpretation und ein Vergleich der resultierenden Zwangkräfte, um auf einen Temperaturansatz schließen zu können.

1.2 Aufbau der Arbeit

Zuerst werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Zwangskraft erläutert. Primär wird auf das Bauteilverhalten unter Zwangbeanspruchung, die Einflüsse von Zwangbeanspruchungen auf Integralbrücken und die Schiefwinkeligkeit eingegangen. Weiters werden der derzeitige Stand der Technik und die einschlägigen Normen und Richtlinien zu Zwang und Temperatureinwirkungen erörtert. Weiters wird auf Untersuchungen und Forschungen zum Thema Temperaturansatz auf schiefwinkelige Integralbrücken verwiesen.

Danach wird in Kapitel 3 die Systemmodellierung der variablen, einfeldrigen Integralbrücke erläutert. Im Zuge der Untersuchungen werden vier verschiedene Modellvarianten ausgewertet und analysiert. Für die Darstellung der Temperatureinflüsse auf die Entwicklung und Größe der Zwangkräfte werden unterschiedliche Temperaturlastfälle untersucht. Im Rahmen ergänzender Vergleichsnachrechnungen werden weiters die Diskretisierungsmöglichkeiten der FE-Modellierung und der Stabmodellierung behandelt und mithilfe einer "schimmwenden Platte" folgt eine Analyse die Systemverschiebungen infolge von Temperatureinwirkungen.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Parameterstudie dargestellt. Es erfolgt eine Analyse der resultierenden Zwangskraft infolge Temperatur sowie die Verifizierung der eruierten Temperaturansätze.

Kapitel 5 behandelt die Auswirkungen des Temperaturansatzes auf die Zwangbeanspruchungen im Überbau, deren Analyse und Interpretation.

Abschließend gibt das Kapitel 6 die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit wieder. Zusätzlich wird noch ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel geht auf die theoretischen Grundlagen von Zwangbeanspruchungen und Temperatur ein. Allgemein wird dabei der Zwang infolge von Temperaturbeanspruchungen und das Bauteilverhalten unter Zwangbeanspruchungen behandelt. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Auswirkung von Zwang und Temperaturlastfällen auf Integralbrücken und die Zwangkraftsituation bei einer schiefwinkligen Ausbildung gelegt.

2.1 Zwang

Unter Zwang sind Schnittgrößen und Spannungen zu verstehen, welche durch behinderte Verformung resultieren. Das zu Zwangbeanspruchungen führende Verformungsbestreben (Längenänderungen und Dehnungen) wird durch folgenden Faktoren hervorgerufen:

- klimatische Temperatureinwirkungen und -änderungen
- exotherme Betonerhärtung
- Auflagerverschiebungen, -verformungen bzw. -verkrümmungen
- Setzungen von Bauwerken
- Kriechen und Schwinden

Prinzipiell entstehen Zwangkräfte also nur, wenn sich Verformungen nicht ungehindert einstellen können. Im Betonbau gibt es grundsätzlich zwei maßgebende Situationen, nämlich den frühen und den späten Zwang, welche in der Bemessung berücksichtigt werden sollten. [1]

Früher und später Zwang

Der frühe Zwang ist auf den Erhärungszeitraum begrenzt. Hauptsächlich entstehen die frühen Zwangbeanspruchungen durch die Hydratation und die damit im Zusammenhang stehende Wärmeentwicklung. Die dadurch verursachte Wärmereaktion löst innere und äußere Temperaturdifferenzen im Bauteilkern und Bauteilrand aus. Die Größe der frühen Zwangskraft ist deshalb abhängig von der Bauteilmasse und -steifigkeit. Je größer die Bauteilabmessungen, desto größer die Behinderung des Wärmetausches und desto größer die Temperaturgradienten und die Reaktion des Temperaturfeldes. Bei zunehmender Bauteildicke werden deshalb im Querschnitt eine zusätzliche Temperaturgradienten und folglich Eigenspannungen erzeugt. Weitere Einflussgrößen sind die Frischbetontemperatur, die Materialeigenschaften des Betons, die klimatischen Randbedingungen bei der Betonage, anfällige Nachbehandlungsmaßnahmen und Schwinden. [2]

Frühe Zwangspannungen werden also von den bereits erwähnten und großteils zeitabhängigen Eingangsgrößen geprägt. Die Ermittlung der Größe des frühen Zwanges erfolgt deshalb zeitdiskret und unter Berücksichtigung der Verformung infolge einer Dehnung ε_0 , des Elastizitätsmoduls E_c und des vorliegenden Behinderungsgrades a .

$$\sigma_{beh}(t) = - \int_0^t \varepsilon_0(t) * a(t) * E_c(t) dt \quad (2.1)$$

mit:

σ_{beh}	...	Zwangspannungen
ε_0	...	Verformungseinwirkung
a	...	Behinderungsgrad
E_c	...	Elastizitätsmodul des Betons

Unter spätem Zwang versteht man Zwang, welcher im Nutzungszeitraum auftritt. Dabei handelt es sich um den Einfluss von zyklischen Veränderungen, wie klimatischen Verhältnissen (Temperatur und Temperaturänderungen). Die Temperatureinwirkungen verursachen Volumenänderungen des Bauteils, wobei eine Temperaturabkühlung eine Reduktion und eine Erwärmung eine Ausdehnung des Bauteils verursacht. Die Größe der Temperatureinwirkung ist von den lokalen und klimatischen Bedingungen, der Ausrichtung des Tragwerks, den täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen, der Außenlufttemperatur und der Sonneneinstrahlung auf das Bauteil abhängig. Die Auswirkung der Temperaturbeanspruchung ist weiters auch vom Material des Tragwerks und dessen Wärmeleiteigenschaften, der Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit abhängig.[3] [4] Genauere Erläuterungen zur Temperatur sind in Abschnitt 2.4 zu finden.

2.2 Bauteilverhalten unter Zwangbeanspruchungen

Insbesondere bei dicken Bauteilen, wie Bodenplatten, Fundamenten und Wänden, wird die Zwangskraft bei einer linear-elastischen Berechnung häufig überschätzt. In weiterer Folge führt die Überschätzung der Zwangskraft zu der Anordnung einer vollflächigen Mindestbewehrung. Um diese konservative Maßnahme zu vermeiden, ist eine genaue Analyse der Zwangbeanspruchung im Tragwerk und in den einzelnen Bauteilen empfehlenswert.[5]

Grundsätzlich resultieren folgende Zwänge, welche im Tragwerk und den jeweiligen Bauteilen auftreten können: [1]

- Zentrischer Zwang
Zentrischer Zwang resultiert aus einer Verformungsbehinderung und einer konstant im Querschnitt verteilten Temperaturänderung (Behinderung einer konstanten Dehnung).
- Biegezwang
Reiner Biegezwang wird von einem linearen Temperaturanteil mit gleichzeitiger Verkrümmungsbehinderung hervorgerufen.
- Kombination aus Biege- und zentrischem Zwang
- Eigenspannungen
Eigenspannungen werden von nichtlinearen Temperaturanteilen verursacht und unterliegen der Verformungskompatibilität (Ebenbleibens des Querschnittes).

Die Zwänge mit den zugehörigen resultierenden Spannungsanteilen sind nachfolgend ersichtlich:

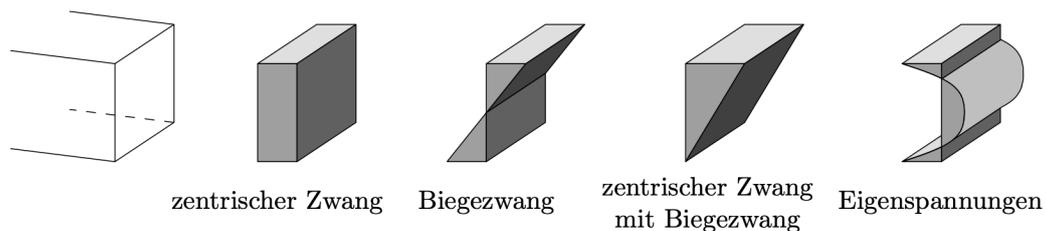


Abbildung 2.1: Zerlegung der jeweiligen Zwangspannungsanteile im Querschnitt aus [1]

Die Kombination der Spannungsanteile des jeweiligen Bauteils resultiert aus der Temperatureinwirkung und der jeweiligen Verformungsbehinderung. Weiters hängt die Zwangbeanspruchung vom Material, der Bauteilgeometrie und der Bauteilart ab. Für eine

zutreffende Beurteilung der Spannungsverteilungen im Querschnitt ist somit eine ganzheitliche und bauteilspezifische Betrachtung des Tragwerkes erforderlich. [1] [6] [5] [7]

Es werden deshalb Untersuchungen bezüglich Zwangkraftentwicklung, Spannungsverteilung und Auswirkung auf die Bauteilinteraktion für das Gesamttragwerk und bauteilspezifische Einzelsituationen benötigt. Es sind vor allem die nachfolgenden Situationen genauer zu betrachten, um eine Überschätzung der Zwangkraft und der dadurch anzuordnenden Mindestbewehrung zu vermeiden:

- Fundament bzw. Bodenplatte
- Wand auf Fundament

2.2.1 Fundamente und Bodenplatten

Das Bauteilverhalten von Fundamenten bzw. Bodenplatten ist durch die Wechselwirkung der Bauteile mit dem Baugrund geprägt. Einerseits sind die thermischen Temperaturunterschiede zwischen der Ober- und Unterseite der Platte zu berücksichtigen (Wärmespeicherung des Baugrundes), andererseits die Nachgiebigkeit des Baugrundes. Fundamente und Bodenplatten unterliegen grundsätzlich einem zentrischen Zwang aus Verformungsbehinderung und einem Biegezwang resultierend aus Temperaturunterschieden im Erhärtungszeitraum. Dabei wird der zentrische Zwang primär durch aufgezwungene Verformungen verursacht. Die Biegespannungen entstehen wiederum durch Abkühlung der Oberseite des Bauteils und Erwärmung der Bauteilunterseite. Durch die wärmespeichernde Wirkung des Bodenkörpers und der anschließender Auskühlung an der Oberseite des Bauteils, werden folglich Biegespannungen umgekehrt und zu Biegezugspannungen umgewandelt. Dadurch entsteht eine über die Querschnittshöhe veränderliche Verkrümmung und Verwölbung der Bodenplatte, welche auch "Aufschüsseln" genannt wird. Die Biegezwangspannungen resultieren also kurzgefasst aus der Behinderungssituation von konstanten und linearen Spannungen über die Bauteilhöhe. [1] [6]

Vereinfachte Methode zur Ermittlung der Zwangkraft der Bodenplatte/Fundament

Für die Bewertung der zentrischen Zwangkraft in Bodenplatten kann eine vereinfachte Berechnungsmethode nach [5] herangezogen werden. Dabei wird zwischen zwei Lösungsmodellen unterschieden. Die zentrische Zwangkraft der Bodenplatte kann mittels Reibungs- oder Kompatibilitätsmodell berechnet werden. Das Reibungsmodell ist heranzuziehen, wenn die Verformungskompatibilität nicht erreicht wird. Das Kompatibilitätsmodell ist maßgebend, wenn das Steifigkeitsverhältnis die Behinderungssituation bestimmt.

2.2.2 Wand auf Fundament

Wird das Fundament nun durch Wände belastet, spricht man von der klassischen Zwangssituation "Wand auf Fundament". Die Situation "Wand auf Fundament" unterliegt der Wechselwirkung und dem Zusammenspiel der Einflüsse beider Bauteile und folglich der Verformungskompatibilität. Die Zwangssituation der Bodenplatte wurde in Abschnitt 2.2.1 erläutert.

Wände unterliegen grundsätzlich einer zentrischen Verformungseinwirkung. Hervorgehoben werden die verursachten Zwangsspannungen durch klimatische Bedingungen und Einflüsse des frühen Zwanges, wie Frischbetontemperatur, Bauteilmassigkeit und erhärterungsbedingte Hydratationwärme etc.. Die Einspannung der Wand am Fundament verursacht, je nach Lage der Wand, eine zentrische oder exzentrische Verformungsbehinderung am Wandfuß. Die Größe der zentrischen Zwangskraft ist vor allem von den Bauteilabmessungen und dem l/h_w -Verhältnis (Wandlänge zu Wandhöhe) der Wand abhängig. Bei zunehmender Wandhöhe nehmen die Spannungen in Richtung des Wandkopfes ab. Bei kleinen Bauteilabmessungen und l/h_w -Verhältnissen ist deshalb eine volle Entwicklung der Zwangskraft bis zum Wandkopf unwahrscheinlich. [5] [4]

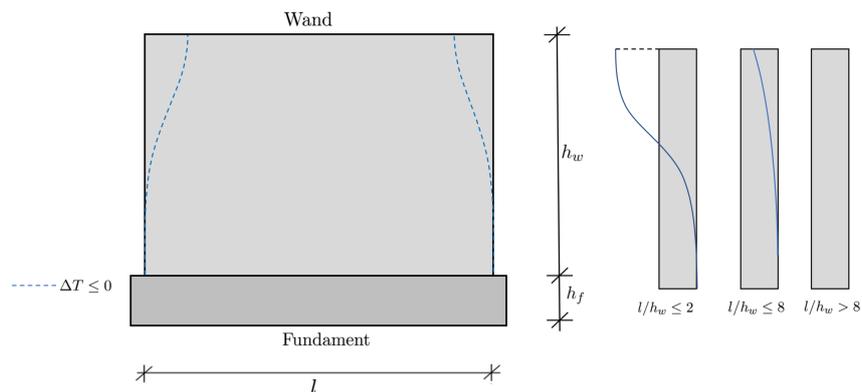


Abbildung 2.2: Verformungsverlauf 'Wand auf Fundament' - System infolge Temperatureinwirkung nach [5]

Die obige Abbildung zeigt die Auswirkungen des frühen Zwanges auf "Wand auf Fundament"- System und deren zentrische Zwangsspannungs- und Verformungsverläufe. Weiters ist die Auswirkung der Bauteilabmessungen auf die Zwangsspannungen abgebildet.

Vereinfachte Methode zur Ermittlung der Zwangskraft - Wand auf Fundament

Im Hinblick auf die genannten Zwangssituationen wird in [5] ein vereinfachten Lösungsansatz zur Ermittlung der Zwangsspannungen für die Situation "Wand auf Fundament" dargestellt. Es wird hierbei die Änderung der Zwangskraft über die Wandhöhe bestimmt. Durch die Berechnungen können drei Bereiche ermittelt werden. Ein biege- und dehnstarrer Anschluss zwischen Wandfuß und Fundament wird für den ganzen Lösungsansatz vorausgesetzt.

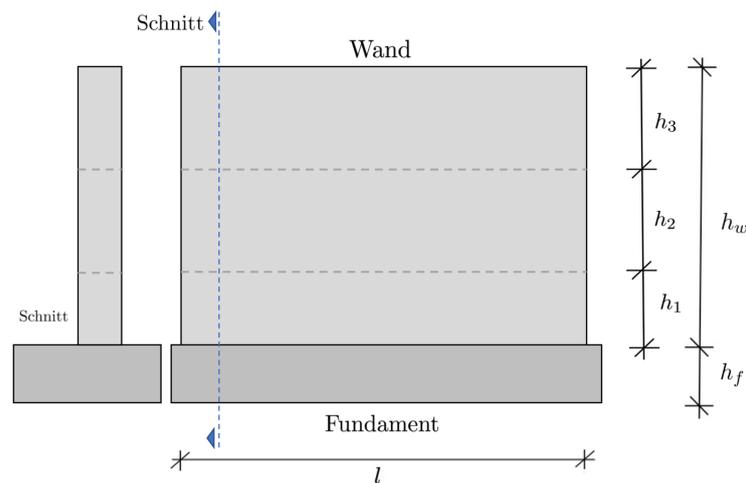


Abbildung 2.3: Bereichsunterteilung für die Bemessung der 'Wände auf Fundament' nach [5]

Der Bereich h_1 beginnt am Wandfuß. Der kontinuierlicher Anstieg der Zwangskraft ist auf die Einspannung zwischen Wand und Fundament zurückzuführen. Eine abgeminderte Mindestbewehrung darf in diesem Bereich vorgesehen werden. Die Länge des Bereichs kann nach nachfolgender Gleichung ermittelt werden:

$$h_1 = \frac{\tan 30 * w_k}{a_t * \theta_{konst}} \quad (2.2)$$

Eine abgeminderte Mindestbewehrung kann in Bereich h_3 ebenfalls vorgesehen werden. Die Ausbildung der Risskraft im Wandkopf-Bereich h_3 ist von den Geometrieverhältnissen abhängig, kann aber üblicherweise geometriebedingt nicht vollständig aufgebaut werden. Im Bereich h_2 ist die zentrische Zwangskraft voll entwickelt und erfordert die Anordnung der vollständigen Mindestbewehrung. Die Grenze zwischen Bereich h_2 und

h_3 kann nach Gleichung 2.3 festgelegt werden. [5] [4]

$$\epsilon_{beh} * E_{c(t)} \leq f_{ct,eff} \quad (2.3)$$

An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Anschluss des Überbaus an die Widerlagerwand einer integralen Brücke in etwa dem Fall "Wand auf Fundament" entspricht. Genauere Erläuterungen folgen im nachfolgenden Abschnitt 2.3.1.

2.3 Zwangbeanspruchung in Integralbrücken

Integrale Brücken weisen einen monolithischen Verbund zwischen Unter- und Überbau auf. Das Rahmensystem ist dabei ein statisch unbestimmtes System und es bedarf einer, im Vergleich zu konventionellen Brücken, komplexeren Berechnung. In der Bauwerksplanung ist neben den konventionellen Einflussfaktoren auf Brücken besonders auf die Zwangskraft resultierend aus der Boden-Bauwerk-Interaktion und den Temperatureinwirkungen zu achten. Durch die Einwirkungen entstehen dabei in Längs- und Querrichtung des Brückentragwerkes Zwangbeanspruchungen. Aufgrunddessen ist es erforderlich, eine Analyse der Zwangskraft in beiden Brückenrichtungen vorzunehmen.

2.3.1 Situation Überbauplatte auf Widerlagerwand

Eine linear-elastische Berechnung stellt für Integralbrücken eine konservative Bemessungsgannahme dar. Die anhand einer linear-elastischen Berechnung ermittelten Zwangsspannungen überschätzen die anzuordnende Mindestbewehrung vor allem in Querrichtung. Um eine realistische Zwangkraftsituation abzubilden und eine Überschätzung der anzuordnenden Bewehrung zu vermeiden, kann somit die Bemessungsaufgabe der Situation "Wand auf Fundament", siehe Abschnitt 2.2.2, auch für die Situation "Überbauplatte auf Widerlagerwand" einer Integralbrücke angewendet werden. Diesbezüglich wurde ein Lösungsvorschlag für "Wand auf Fundament"-Systeme nach [1] für die Situation "Überbauplatte auf Widerlagerwand" von [7] abgewandelt.

Dieser Ansatz erlaubt es, eine Bereichsunterteilung, wie in Abbildung 2.4 über die Überbaulänge vorzunehmen. Das Verhältnis von Überbaulänge zur Widerlagerbreite $\frac{L/2}{B}$ ist hier gleichbedeutend wie l/h_w - Verhältnis beim "Wand auf Fundament"-System in Abschnitt 2.2.2.

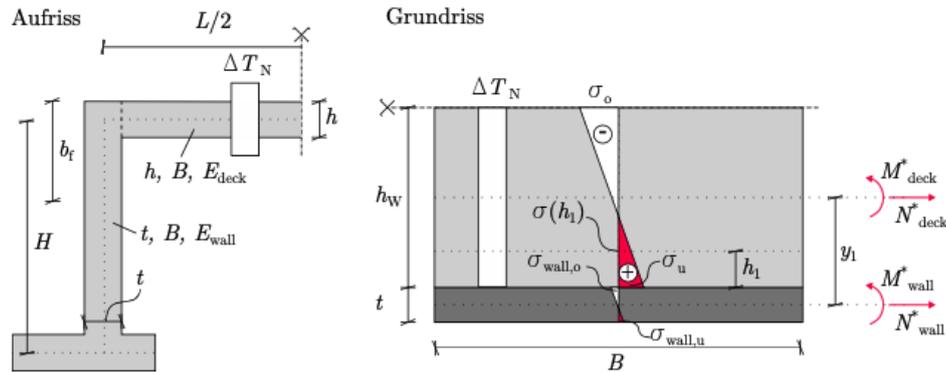


Abbildung 2.4: Berechnung der Spannungsverteilung Überbau auf Fundament aus [7]

Untersuchungen in [7] zeigen, dass für die maßgebende Zwangskraft in Querrichtung der konstante Temperaturunterschied ΔT_N zwischen Über- und Unterbau ausschlaggebend ist. Der Temperatursprung zwischen Über- und Unterbau führt zu einer linearen Spannungsverteilung im Querschnitt. Die Bauteilgeometrie und das Verhältnis $\frac{L/2}{B}$ der Überbauplatte beeinflussen ebenfalls die Spannungsverteilung. Eine Unterteilung in die drei bemessungsrelevanten Bereiche h_1 , h_2 , und h_3 kann analog zu Abschnitt 2.2.2 erfolgen.

2.3.2 Schiefe im Grundriss

Die Schiefe im Grundriss stellt eine beliebige Ausbildungsform ohne Adaptierung der Trassierung an das Gelände dar. Durch die schiefe Ausbildung des Brückengrundrisses und durch den monolithischen Verbund zwischen Über- und Unterbau entstehen zusätzliche Zwangkräfte. Explizit handelt es sich bei den zusätzlichen Zwangbeanspruchungen vor allem um Beanspruchungen in Querrichtung. Zusätzlich entstehen durch die schiefwinkelige Lagerung Einspannmomente und folglich Spannungsspitzen im Bereich der Ecken. [8] [9]

Die Schiefe im Grundriss erhöht die effektive Steifigkeit des Integralbrückensystems und führt deshalb zu einer Erhöhung der Zwangbeanspruchungen in der Rahmenecke. Eine zunehmende Schiefstellung der Widerlagerwand verursacht weitere und somit in Summe immer größer werdende Zwangbeanspruchungen in Querrichtung. [10] [11]

Einfluss auf die Größe der Zwangbeanspruchungen bei schiefen Integralbrücken haben die Temperatur, die generelle Steifigkeit der Überbauplatte und das Steifigkeitsverhältnis zwischen Überbauplatte und Widerlagerwand in Querrichtung. [12]

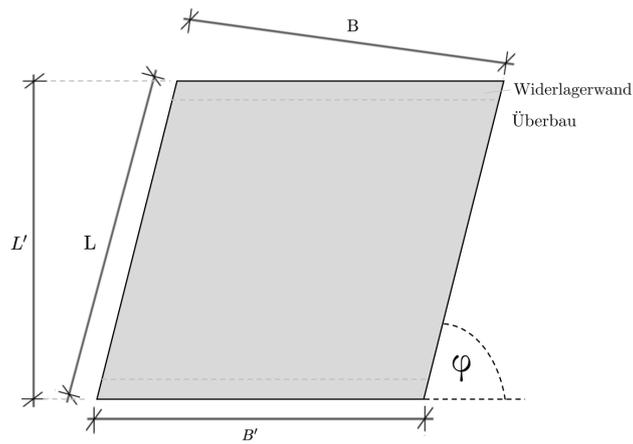


Abbildung 2.5: Schiefer Grundriss Überbau

Zusätzlich sind die Schiefe an sich, ausgedrückt durch den Kreuzungswinkel φ (Verhältnis zwischen der orthogonalen Brückenbreite B' und der effektiven Stützweite der Brücke L'), und die Steifigkeit der Pfeiler bei mehrfeldrigen Integralbrücken entscheidende Einflussgrößen. [13]

2.4 Temperatur

Die Temperatur ist eine maßgebende Einflussgröße für die Zwangskraft. Temperatureinwirkungen verursachen Volumenänderungen im Bauteil und beeinflussen das Bauteil in allen Richtungen. Die Größe der Temperatureinwirkung und die dadurch resultierende Beanspruchung ist von den lokalen und klimatischen Bedingungen, der Ausrichtung des Tragwerks, den täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen, der Außenlufttemperatur und der Sonneneinstrahlung auf das Bauteil abhängig. Temperaturen stellen somit indirekte und veränderliche Einwirkungen dar. [3] [14]

Das sogenannte Temperaturprofil $\Delta T_{(x)}$ kann sich aus den nachfolgenden Temperaturanteilen laut [3] zusammensetzen.

- konstanter Temperaturanteil - ΔT_N bzw. ΔT_u
- linearer Temperaturanteil - ΔT_{M_y}
- linearer Temperaturanteil - ΔT_{M_z}
- nicht-linearer Temperaturanteil - ΔT_E

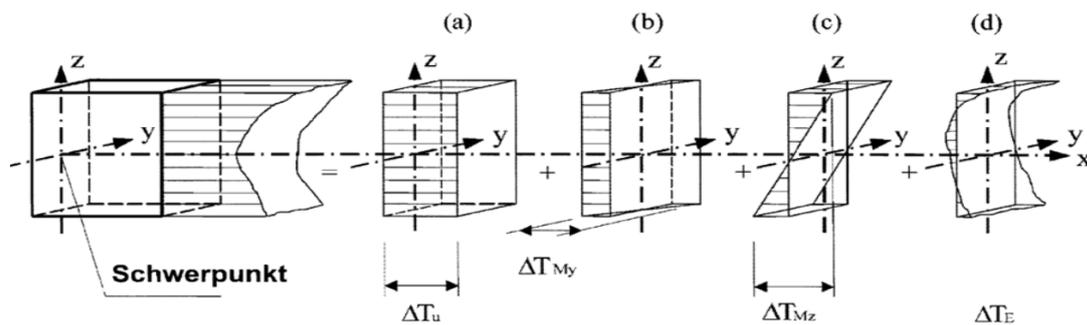


Abbildung 2.6: Aufteilung der Temperaturanteile nach Eurocode 1-5 [3]

Weitere Einflüsse stellen die Oberflächenbeschaffenheit, -farbe, Bauteilabmessungen und das Material dar. Um die Temperatureinwirkungen generell zu ermitteln, sind die linearen Temperaturkoeffizienten des jeweiligen Materials laut Anhang C [3] und das nationalen Anhangsdokument [15] zu verwenden.

Für Beton beträgt der Temperaturkoeffizient $\alpha_T = 1.0 \times 10^{-5} [K^{-1}]$. Dies ergibt eine Dehnung von 0.8 ‰ und eine Temperaturbeanspruchung von 80°C. [4]

2.4.1 Auswirkungen der Temperatur auf schiefe Integralbrücken

Im Unterschied zu konventionellen Brücken können auftretende Verformungen von Integralbrücken nicht zwangungsfrei aufgenommen werden. Bei Brücken, welche einem statisch unbestimmten System unterliegen, entstehen Zwangsschnittgrößen durch Temperaturbeanspruchungen. Grundsätzlich werden Längenänderungen des Integralbrückensystems durch Temperaturbeanspruchungen hervorgerufen. Eine konstante Temperaturänderung ΔT_N führt zu Bauteilverlängerung bzw. -verkürzung. Eine lineare Temperaturänderung ΔT_M führt zu Verkrümmungen des Bauteils und ist abhängig von der Bauteildicke und -massigkeit.

Durch die Auswirkungen der saisonalen Temperaturänderungen (Sommer/Winter) stellen sich also bei der monolithischen Bauweise Tragwerksverkürzungen und -ausdehnungen ein. Diese Temperaturschwankungen rufen folglich Bodenwiderstände hervor. Die sogenannte Boden-Bauwerk-Interaktion ist bei Integralbrücken und rahmenartigen Systemen deshalb nicht vernachlässigbar. Einflussgrößen für die Interaktion stellen die Gründungsart, die Steifigkeit des Baugrundes, die Abmessung des Unterbaus und die Geometrie der gesamten Integralbrücke dar. [11] [12]

Die durch Erddruck und Temperatur entstehenden Kräfte verursachen bei schiefwinkligen Integralbrücken eine zusätzliche Torsionsbeanspruchung durch Verdrehung in der vertikalen Brückenachse. Die durch den Widerstand $E_{ph,mob}$ hervorgerufene Resultierende kann dabei in eine horizontale und vertikale Komponente aufgeteilt werden. Weiters verursachen die resultierenden Kräfte horizontalen Verschiebungen in Längs- und Querichtung, vergrößern die Biegebeanspruchungen in stumpfen Ecken des Rahmens und erzeugen ein Zwangsmoment M_y . [10]

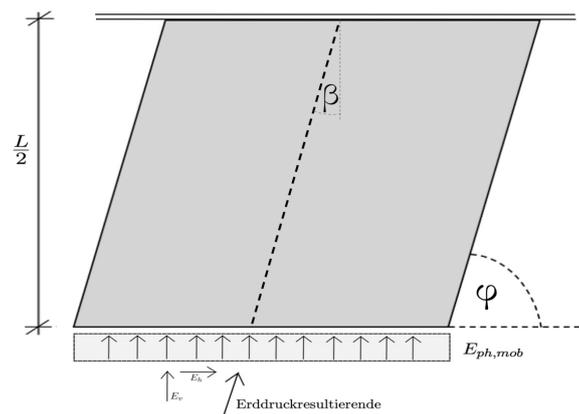


Abbildung 2.7: Resultierendes Kräftepaar eines schiefen Integralbrückenquerschnitts nach [9] und [10]

Außerdem wurde in [9] die maximal zulässige Schiefwinkeligkeit β in Zusammenhang mit den resultierenden Verschiebungen hervorgerufen durch Temperatur und der dadurch mobilisierte Erddruck behandelt.

Verformungen

Bei konventionell gelagerten Brücken führt eine Verformungseinwirkung (Temperaturwechsel, Kriechen, Schwinden) nur zu Lagerverschiebungen und hat keine zwangrelevante Auswirkung auf die Unterbaukonstruktion. Eine freie Verformung der Überbauplatte kann aber bei Integralbrücken aufgrund der monolithischen Verbindung zwischen der Überbauplatte und der Widerlagerwand nicht erfolgen. Es kann aber trotzdem laut [7] von einer freien Widerlagerkopfverformung aufgrund einer konstanten Längenänderung lt. Gleichung 2.4 ausgegangen werden.

$$\Delta L = \pm \alpha_T * \Delta T_N * L/2 \tag{2.4}$$

mit:

ΔL	...	Längenänderung
α_T	...	Temperaturausdehnungskoeffizient des Betons
ΔT_N	...	konstante Temperaturänderung
L	...	Brückenlänge in m

Die nachfolgende Abbildung 2.8 stellt die Längenänderungen infolge Temperatureinwirkungen bei geraden und schiefen Integralbrücken in der Überbauplatte dar.

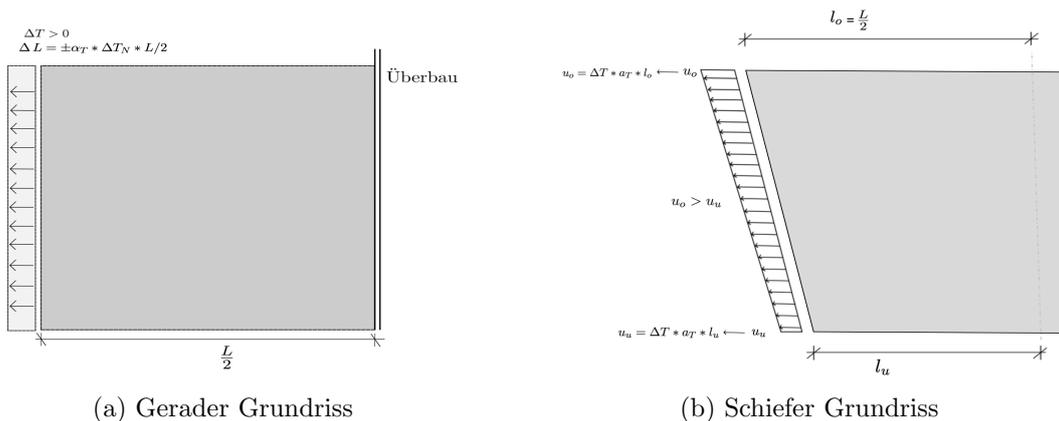


Abbildung 2.8: Längenänderungen bei geraden und schiefen Grundrissen

Der sogenannte Bewegungsruhepunkt stellt weiters die Stelle in der Überbauplatte dar, an welchem keine Verformung mehr aus einer Temperaturbelastung eintritt. [11]

Die Verformungen entstehen daher nur in dem Bereich der Bewegungslänge. Die Bewegungslänge ist der Abstand zwischen Überbauenende und Bewegungsruhepunkt siehe Gleichung 2.5. In der Regel liegt der Verformungsruhepunkt bei einfeldrigen Integralbrücken in der Mitte. Dies ist aber nur der Fall, wenn die Beanspruchung der Widerlager durch die Boden-Bauwerk-Interaktion ident sind.

$$L_{NP} = 0,5 * L \tag{2.5}$$

mit:

L	...	Brückenlänge in m
L_{NP}	...	Verformungsruhepunkt

Bei zunehmender Länge einer integralen Brücke sind die vom Bewegungsruhepunkt am weitesten entfernten Rahmenecken die am höchsten beanspruchten Bauteile. [16]

Wird der Erddruck mobilisiert, können unterschiedliche Bodeneigenschaften an den Widerlagern, über kurz oder lang, bei gleichbleibender Lagerung eintreten. Der Verformungsruhepunkt wird folglich zum steiferen Brückende hin verschoben. Die konstruktive Ausbildung bezüglich der Brückenbewegungen hat bei längeren Bauwerken eine größere Bedeutung als bei kurzen Bauwerken, da die Bauwerksbewegung ungefähr linear mit der Länge des Bauwerks ansteigt. [12]

In weiterer Folge hat die Bewegungslänge einen Einfluss auf die Anordnung der Stahlbetonschleppplatte. Näher wird dies in [7], [16] und [17] behandelt.

2.5 Bisherige Untersuchungen und normative Grundlagen

2.5.1 Bisherige Untersuchungen

Der folgende Abschnitt erläutert die Erkenntnisse bisheriger Untersuchungen zum Thema "Auswirkungen der Temperatur auf schiefe Integralbrücken" und "Temperaturansatz bei schiefwinkligen Integralbrücken".

Untersuchungen zu Integralbrücken DafStb -Heft 496 [10]

Die Auswirkungen der Temperatur auf schiefwinklige Integralbrücken werden in den Untersuchungen des Heft 496 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton behandelt.

Durch saisonale Temperaturänderungen (Sommer/Winter) stellen sich bei der monolithischen Bauweise Tragwerksverkürzungen und -ausdehnungen ein. Diese Temperaturschwankungen rufen folglich Bodenwiderstände hervor. Die sogenannte Boden-Bauwerk-Interaktion ist bei Integralbrücken und rahmenartigen Systemen deshalb nicht vernachlässigbar. Einflussgrößen für die Interaktion stellen die Gründungsart, die Steifigkeit des Baugrundes, die Abmessung des Unterbaus und die Geometrie der gesamten Integralbrücke dar. Die durch Temperatureinwirkung hervorgerufenen zusätzlichen Kräfte verursachen bei schiefwinkligen Integralbrücken eine zusätzliche Torsionsbeanspruchung durch Verdrehung in der vertikalen Brückenachse und resultiert weiters in horizontalen Verschiebungen in Längs- und Querrichtung. Dadurch vergrößern sich die Biegebeanspruchungen in stumpfen Ecken des Rahmens und erzeugen ein Zwangmoment M_y .

Um das Ablösen der Widerlagerwand von der Hinterfüllung zu vermeiden, soll die nachfolgende Gleichung und somit das L'/B' - Verhältnis der Überbauplatte eingehalten werden. In der nachfolgenden Abbildung ist der Brückendrehpol schiefwinkliger Integralbrücken abgebildet.

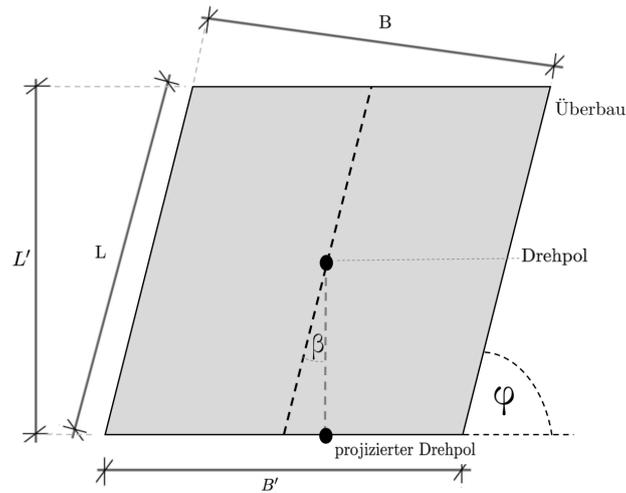


Abbildung 2.9: Brückendrehpol schiefer Integralbrücken nach [10]

$$\frac{L'}{B'} \leq \frac{1}{\tan(\beta)} \quad (2.6)$$

Wird die Gleichung 2.6 nicht erfüllt, führt die Rotation zu einer theoretischen Abhebung der Hinterfüllung vom Widerlager. In Wirklichkeit überlagern sich die Rotationsbewegungen stets mit den Überbauausdehnungen, die einem Ablösen entgegenwirken. Der sogenannte projizierte Brückendrehpol soll sich deshalb immer innerhalb des Widerlagerbereiches befinden, um ein Ablösen des Brückenbauwerks von der Hinterfüllung und dem Erdreich zu verhindern.

Der projizierte Drehpol liegt bei Brücken mit großer Stützweite, großer Schiefe und geringerer Breite außerhalb der Ebene des Widerlagers. Durch eine realitätsgetreue Überlagerung der Überbauausdehnung in Längsrichtung und bei Tiefgründungen, ist die Rotationsbewegung aber laut [10] zu vernachlässigen. Bei Flachgründungen hingegen ist ein womögliches "Wandern" der Brücke in Querrichtung problematischer und sollte unbedingt vermieden werden.

Untersuchungen zu Integralbrücken von Tue et al. - Betonkalender 2021 [12]

Im Rahmen der jährlichen Publikation wurde ein Beitrag zum Thema "Integralbrücken - Tragverhalten und Anregungen zur Bemessung einschließlich Integralisierung von Be-

standsbrücken" [12] durch das Betonbauinstitut der TU-Graz veröffentlicht. Hierbei wurde mitunter auf die schiefe Ausbildung von Integralbrücken und die Auswirkung des Temperaturansatzes auf die Zwangskraft jener Brücken eingegangen. Die Modellierung erfolgte anhand eines Faltwerkmodells in Sofistik. Die Temperaturen wurden hierbei immer auf Widerlager und Überbau appliziert.

Die Wahl des Temperaturansatzes hat einen großen Einfluss auf die Bemessung und die anschließende Bewehrungswahl. Schon bei geradlinige integralen Bauwerken liefert ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung eine unrealistische Abbildung der zentrischen Zwangskraft in Querrichtung. Bei zunehmender Schiefstellung einer Integralbrücke wird aber ersichtlich, dass eine sogenannte Entkoppelung des Temperaturansatzes zu unrealistischen Bemessungsergebnissen der Zwangskraft führt. Dies ist auf eine resultierende Tangentialkraft am Widerlagerwandkopf und die Lage der Ruhelinie in der Überbauplatte zurückzuführen.

Durch die Untersuchungen laut [12] können folgende Ergebnisse gezeigt werden:

- Temperaturansatz in x- Richtung
Eine Temperaturansatz in x-Richtung führt nur bei geringen Schiefstellungen und geraden Integralbrücken zu einer rechnerisch realistischen Einschätzung der Zwangkraftbeanspruchung. Es genügt die Temperatur am Widerlager nur in z-Richtung und Überbau in x-Richtung anzusetzen. Der Temperaturunterschied zwischen Überbauplatte und Widerlagerwand ist ebenfalls zu berücksichtigen.
- Temperaturansatz in y-Richtung
Eine zusätzliche Temperatur in y-Richtung führt zu einer Verkrümmung der Überbauplatte in Querrichtung und einer starken Verformung der Widerlagerwand und der Fundamentplatte. Bei zunehmender Schiefe im Grundriss verstärken sich die Verkrümmung und die Verformungen weiter.
- Temperaturansatz in x- und y-Richtung
Eine Entkoppelung des Temperaturansatzes in x + y-Richtung ist bei zunehmender Schiefstellung nicht mehr durchführbar. Ein Temperaturansatz auf Widerlager und Überbauplatte führt zu einer im Vergleich mit einem alleinigen Temperaturansatz in x-Richtung unterschiedlichen Verformungsfigur. Der Temperaturunterschied zwischen Bauteilen ist für die Behinderung in Querrichtung zwischen den Bauteilen weiters maßgebend. Die Untersuchungen ergeben, wenn die zentrische Zwangspannung als Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz dienen soll, dass eine Entkoppelung der Temperatureinwirkung, für das untersuchte Modell, ab einer Schiefe von $< 50^\circ$ nicht mehr vorgenommen werden soll.

Die Untersuchungen des Betonkalenders schließen ebenfalls die Erkenntnisse von [7] ein.

2.5.2 Normative Regelungen zu schiefen Integralbrücken

Schiefe Integralbrücken sind im deutschsprachigen Raum noch nicht explizit normativ geregelt. Es sind deshalb die Regelungen für konventionelle Integralbrücken nach [11] heranzuziehen. Lediglich in [11] (Abschnitt 3.3.3) wird die Schiefe im Grundriss und die Auswirkung auf das Tragwerk normativ behandelt. Weiter Regelungen für Betonbrücken sind in [18] und dem nationalen Anhangsdokument [19] geregelt.

Normativer Temperaturansatz

Der vorgesehene Temperaturansatz für Integralbrücken wird in der RVS [11] geregelt. Bei der Ermittlung der Temperaturen an sich wird weiters auf den Eurocode 1-5 [3] und das nationale Anhangsdokument [15] verwiesen. Für die Berechnung der Temperatureinwirkungen sind laut [11] (Abschnitt 4.1.2) die Lastansätze für die Temperaturlastfälle geregelt. Abweichend sieht das nationale Anhangsdokument [15] eine Berechnung der Temperaturbeanspruchung in Bezug auf die Seehöhe vor.

Gemäß [11] sollen Temperatureinwirkungen auf Brückenbauwerken in Form eines konstanten ΔT_N und veränderlichen Temperaturanteils ΔT_M berücksichtigt werden. Der konstante Temperaturunterschied zwischen den Bauteilen $\Delta T_{N,wall}$ ist ebenfalls anzusetzen.

- Konstanter Temperaturanteil - ΔT_N bzw. ΔT_u
Der konstante Temperaturanteil gibt eine Änderung der Bauteiltemperatur bezogen auf die Anfangs- und Durchschnittstemperatur an. Dafür sind die Aufstelltemperatur der Brücke, der minimale und maximale Wert der konstanten Temperaturanteile und minimale und maximale Außenlufttemperaturanteile T_{max} und T_{min} wichtige Parameter für die Berechnung. Die geographische Lage, welche auch für die charakteristischen Werte der Außenlufttemperatur bedeutend ist, ist aus nationalen Isothermen-Karten herauszulesen. Die genaue Ermittlung des konstanten Temperaturanteils ist in [3] (Abschnitt 6.1.3.1((3)+(4))) ersichtlich.
- Linear veränderlicher Temperaturanteil ΔT_M
Der linear veränderliche Temperaturanteil hängt von der Deckschichtdicke und der Querschnittsform des Bauteils ab und verursacht eine ungleichmäßige Erwärmung der beanspruchten Teile. Der horizontale Anteil der linear veränderlichen Temperatur darf laut [11] und laut [3] (Abschnitt 6.1.4.3) für Schnittgrößen ermittelt auf ULS-Niveau vernachlässigt werden. Weiters ist eine veränderliche Temperatur zu kombinieren und bei direkter Erdberührung am Widerlager mit $\Delta T_M = 10^\circ/-15^\circ$ anzusetzen.

- Konstanter Temperaturunterschied zwischen den Bauteilen $\Delta T_{N,wall}$
Der konstante Temperaturunterschied zwischen Über- und Unterbau (Widerlager und Überbau) wird laut [11] und [3] (Abschnitt 6.1.6) mit $\Delta T_N = \pm 10^\circ\text{C}$ angenommen. [3] sieht weiters eine Berücksichtigung der verschiedenen Bauteiltemperaturen zusätzlich zu den konventionellen konstanten Temperaturen nur vor, wenn dadurch ungünstige Beanspruchungen ausgelöst werden.

3 Modellbildung

Im Zuge dieser Arbeit wird zur Erfassung der aus verschiedenen Temperaturansätzen resultierenden Zwangbeanspruchungen von schiefen Integralbrücken eine Parameterstudie durchgeführt. Durch eine schiefe Ausbildung des Brückenquerschnitts ergeben sich bei den integralen Brückentragwerken im Vergleich zu konventionellen Integralbrücken zusätzliche Zwangbeanspruchungen. Die Auswirkung des Temperaturansatzes auf die Zwangkraftausbildung schiefwinkliger Integralbrücken erfordert deshalb genaue Untersuchungen, um eine Überschätzung der resultierenden Zwangsschnittgrößen aus Temperaturbelastungen speziell in Querrichtung zu vermeiden. Die Wahl des Temperaturansatzes hat einen großen Einfluss auf die Bemessung und die anschließende Bewehrungswahl. Schon bei geradlinigen integralen Bauwerken liefert ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung (x- und y-Richtung) eine unrealistische Abbildung der zentrischen Zwangskraft in Querrichtung. Bei zunehmender Schiefstellung einer Integralbrücke wird aber laut Literatur [12] ersichtlich, dass eine sogenannte Entkoppelung des Temperaturansatzes und folglich ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung zu unrealistischen Bemessungsergebnissen der Zwangskraft führt. Eine schiefwinkliger Ausbildung erfordert für eine realistischere Einschätzung der resultierenden Zwangskraft eine Berücksichtigung der Temperatur in y-Richtung durch einen kombinierten Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung.

Um die Auswirkungen der Temperaturbeanspruchung auf die Zwangbeanspruchungen bei schiefwinkliger Integralbrücken und den geeigneten Temperaturansatz für repräsentative Schiefen zu untersuchen, werden in den nachfolgenden Kapiteln eine Parameterstudie und weitere Untersuchungen mittels FE-Modell durchgeführt. Die Modellierung von Brückenbauwerken erfolgt computergestützt mittels FE-Modellen. Bei allgemeinen Brückenbauwerken und Integralbrücken stehen folgende Modelle zur Diskretisierung zur Verfügung [12]:

- Stabmodell
- Faltwerk
- Kombination Stab-/Faltwerkmodell

Das Ziel des Modells ist es, das Verhalten einer schiefwinkligen Integralbrücke unter einer Temperaturbeanspruchung möglichst korrekt wiederzugeben. Es werden Vereinfachungen in der Modellierung bezüglich der Baugrundsteifigkeiten angenommen. Die Berechnungen erfolgen weiters auf sicherer Seite und somit linear-elastisch. Die Auswirkung von Kriechen und Schwinden und die Steifigkeitsverminderung infolge Rissbildung werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt. In dem nachfolgenden Kapitel folgt die Erläuterung der Modellierung des einfeldrigen und variablen Faltwerkmodells einer Integralbrücke.

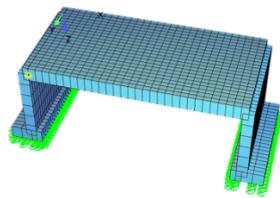
3.1 Modellierung des schiefwinkligen Systems

Die Modellgenerierung erfolgt in Anlehnung an [11] und [12] mit der Software SOFISTIK-Version 2020. Die Software wird vor allem im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus eingesetzt und ermöglicht eine gewünschte Flexibilität bezüglich einer parametrischen und variablen Modellierung mit dem textbasierten Editor Teddy. Für das Berechnungsmodell wird aus Quad-Elementen (die Fundamentplatten, die Widerlagerwände und die Überbauplatte) erzeugt. Eine kraftschlüssige Verbindung und ein biegesteifer Anschluss zwischen Überbauplatte, Widerlagerwand und Fundament werden angenommen.

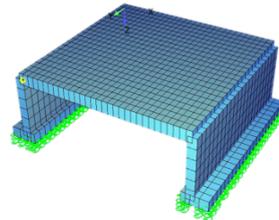
Im Zuge der Modellierung werden vier verschiedene Modelle ausgewertet und analysiert. Für die Darstellung der Temperatureinflüsse auf die Entwicklung und Größe der Zwangkräfte werden die in der Tabelle 3.4 ausgewiesenen Temperaturen untersucht. In der nachfolgenden Tabelle 3.1 sind die Geometrieparameter der vier Modelle ersichtlich. Fortan werden diese Modelle nur noch mit Modell 1 (M1), Modell 2 (M2), Modell 3 (M3) und Modell 4 (M4) bezeichnet.

Tabelle 3.1: Bauteilabmessungen der Modelle

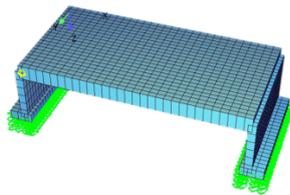
Bauteil		Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Überbau [m]					
Überbaulänge	l	20.0	20.0	30.0	30.0
Widerlager [m]					
Widerlagerhöhe	h_w	7.5	7.5	7.5	7.5
Widerlagerbreite orthogonal	b_w	10.0	20.0	15.0	30.0
Widerlagerstärke	d_w	1.0	1.0	1.0	1.0
l/b_w -Verhältnis	2	1	2	1	
Fundament [m]					
Fundamentplattenstärke	d_f	1.25	1.25	1.25	1.25
Länge innen	l_{f1}	1.0	1.0	1.0	1.0
Länge außen	l_{f2}	2.0	2.0	2.0	2.0



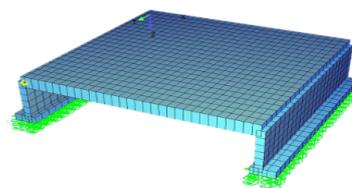
(a) Modell1



(b) Modell 2



(c) Modell3



(d) Modell4

Abbildung 3.1: Visualisierung der Modelle

Die angegebenen Widerlagerbreiten b_w werden orthogonal zur Brückenquerrichtung eingehalten. Die schiefen Widerlagerbreiten B' werden durch die Schiefstellung winkelbezogen verändert und sind in den nachfolgenden Tabellen nicht ersichtlich. Im Zuge der Untersuchungen werden die vier Modelle gemäß Tabelle 3.1 mit unterschiedlichen Überbauschlankheiten λ und Schiefen φ realisiert. Ein Winkel von 90° beschreibt eine gerade und somit konventionelle Brückenstellung.

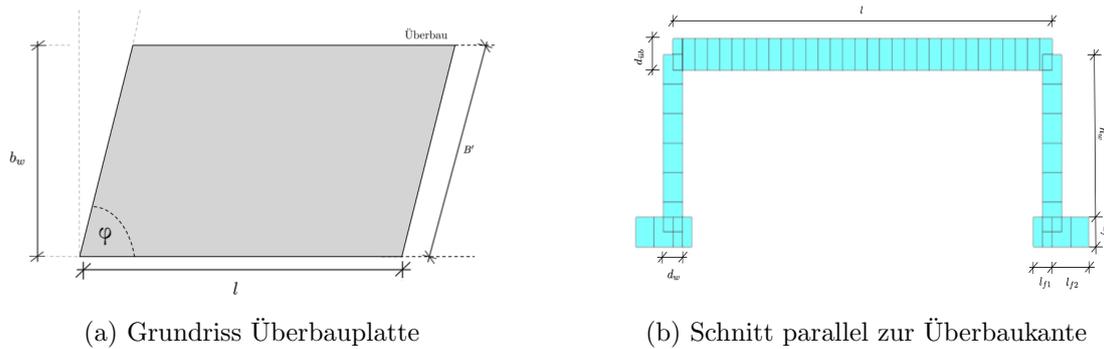


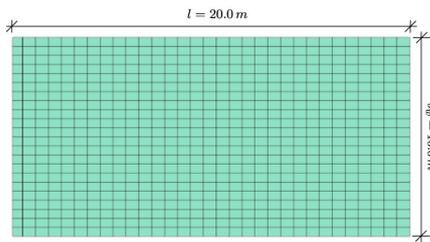
Abbildung 3.2: Visualisierung der Modelle

Zur Vereinfachung werden die Modelle in Bezug auf die Schlankheit in Systeme untergliedert und als Grundsystem 1 ($\lambda = l/h = 15$) und Grundsystem 2 ($\lambda = l/h = 20$) bezeichnet. In diesem Grundsystem werden jeweils die Schiefe der Grundrisse, die Temperaturen und die Temperaturlastfälle variiert. Durch die Variation der Überbauschlankheit λ , der Modellgeometrien und der Temperaturbelastung soll die Auswirkung der Variationen auf die Zwangskraft untersucht werden. Die variablen Parameter sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

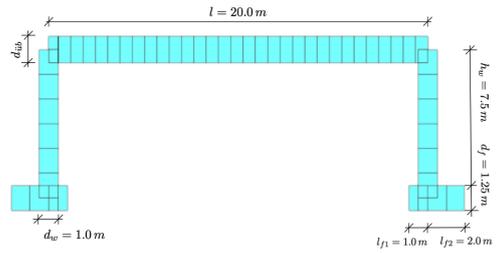
Tabelle 3.2: Variable Modellparameter

Bauteil	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Überbaustärke d_{ub} in [m]				
$\lambda_{15} = l/h = 15$	1.33	1.33	2.0	2.0
$\lambda_{20} = l/h = 20$	1.0	1.0	1.5	1.5
Schiefstellungen in $^\circ$				
ϕ	90	75	60	45

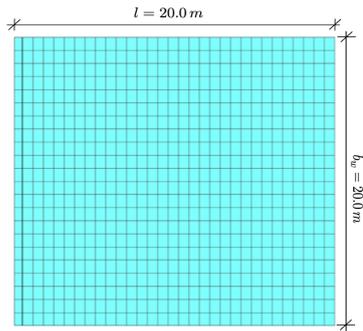
Die zu untersuchenden Modelle sind in Kapitel 4 in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 ersichtlich und vollständig kombiniert aufgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 3.3 sind die Modellparameter der Modelle abgebildet.



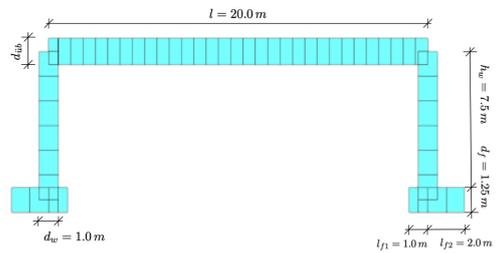
(a) Überbaugrundriss Modell 1



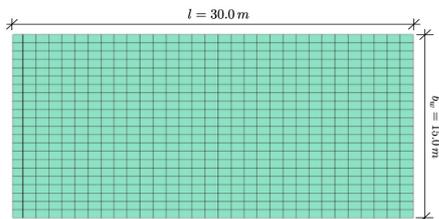
(b) Schnitt Modell 1



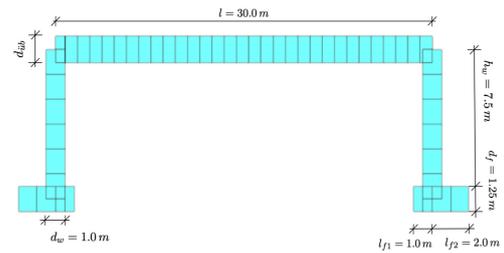
(c) Überbaugrundriss Modell 2



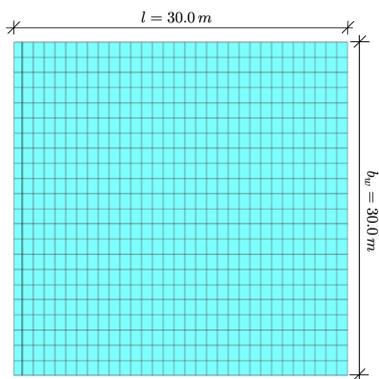
(d) Schnitt Modell 2



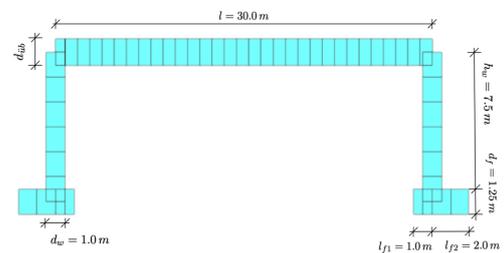
(e) Überbaugrundriss Modell 3



(f) Schnitt Modell 3



(g) Überbaugrundriss Modell 4



(h) Schnitt Modell 4

Abbildung 3.3: Visualisierung der Modelle

3.2 Einwirkungen

Eigengewicht

Das Eigengewicht der einzelnen Bauteile wird mit einer Wichte des Betons von $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt. Für die Ermittlung der Zwangsschnittgrößen wird das Eigengewicht aber vernachlässigt.

Betongüte

Die verwendeten Querschnitte sowie Materialgüten werden analog zu in der Praxis vorkommenden Brückentragwerken gewählt. Die Betongüte wird mit C 30/37 für Unter- und Überbau angenommen. Die für die Parameterstudie relevanten Material- und Festigkeitskennwerte werden angenommen und sind nachfolgend angeführt:

Tabelle 3.3: Materialparameter

$E_c = 30\,000$	MN/m^2	...	Elastizitätsmodul
$f_{ctm} = 2.9$	MPa	...	mittlere Zugfestigkeit

Die effektiv wirksame Zugfestigkeit wird mit $f_{ctm} = f_{ct,eff}$ angenommen.

Temperatur

Wie schon in Abschnitt 2.4 behandelt, verursacht eine Temperatureinwirkung ein Verformungsbestreben des Bauteils und resultiert in Volumenänderungen. Dieses Verformungsbestreben führt im monolithischen System zu Zwangbeanspruchungen. Um die Auswirkung des Temperaturansatzes auf die Zwangsschnittgrößen zu quantifizieren, wird lediglich eine konstante Temperatur ΔT_N auf die Überbauplatte, die Widerlagerwand und die Fundamente der Rahmenbrücke aufgetragen.

Es werden nur positive Temperaturen mittels positiver konstanter Dehnungen ε_N auf das Bauteil aufgebracht. Die negativen Temperaturen verursachen eine Umkehrung des Schnittgrößenvorzeichens der resultierenden Beanspruchungen. Der Temperaturendeckungskoeffizient des Stahlbetons wird laut [3] mit α_T siehe Tabelle 3.4 angenommen. Ein Temperaturunterschied von $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ wird zwischen dem Überbau und dem Widerlager gemäß [3] und [11] berücksichtigt. Die Auswirkungen einer linearen Temperatur ΔT_M werden in dieser Untersuchung vernachlässigt.

Grundsätzlich erfolgen die Untersuchungen auf Basis einer rein linear-elastisch Berechnung. Die Temperatur wird deshalb linear erhöht. Die berücksichtigten Temperaturen sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

Tabelle 3.4: Temperaturen

Nr.	Bauteil	Temperatur [$^{\circ}C$]	$\alpha_T [K^{-1}]$
T 1	Überbau	20	$1,0 \times 10^{-5}$
	Widerlager	10	$1,0 \times 10^{-5}$
T 2	Überbau	30	$1,0 \times 10^{-5}$
	Widerlager	20	$1,0 \times 10^{-5}$
T 3	Überbau	40	$1,0 \times 10^{-5}$
	Widerlager	30	$1,0 \times 10^{-5}$

Es werden weiters verschiedene Temperaturlastfälle gewählt, um die Auswirkungen auf die Zwangbeanspruchungen im Überbau zu untersuchen. Dafür werden die Temperaturen in den nachfolgenden Kombinationen wie folgt auf das Widerlager und den Überbau aufgebracht:

Tabelle 3.5: Temperaturlastfälle

LF Nr.	Temperatureinwirkung	Bauteil
1	dtN in x+y	Überbau + Widerlager
2	dtN in x	Überbau + Widerlager
3	dtN in y	Überbau + Widerlager
4	dtN in x+y	Überbau
5	dtN in x	Überbau
6	dtN in y	Überbau

mit

dtN in x+y	...	Temperatur in Längs- und Querrichtung
dtN in x	...	Temperatur in Längsrichtung
dtN in y	...	Temperatur in Querrichtung

Die in Tabelle 3.5 aufgelisteten Lastfallnummern gelten wieder für die gesamten restlichen Kapitel und werden deshalb nur noch mit LF 1 bis LF 6 angegeben.

In der nachfolgenden Abbildung 3.4 sind die Temperaturlastfälle nochmal übersichtlich abgebildet.

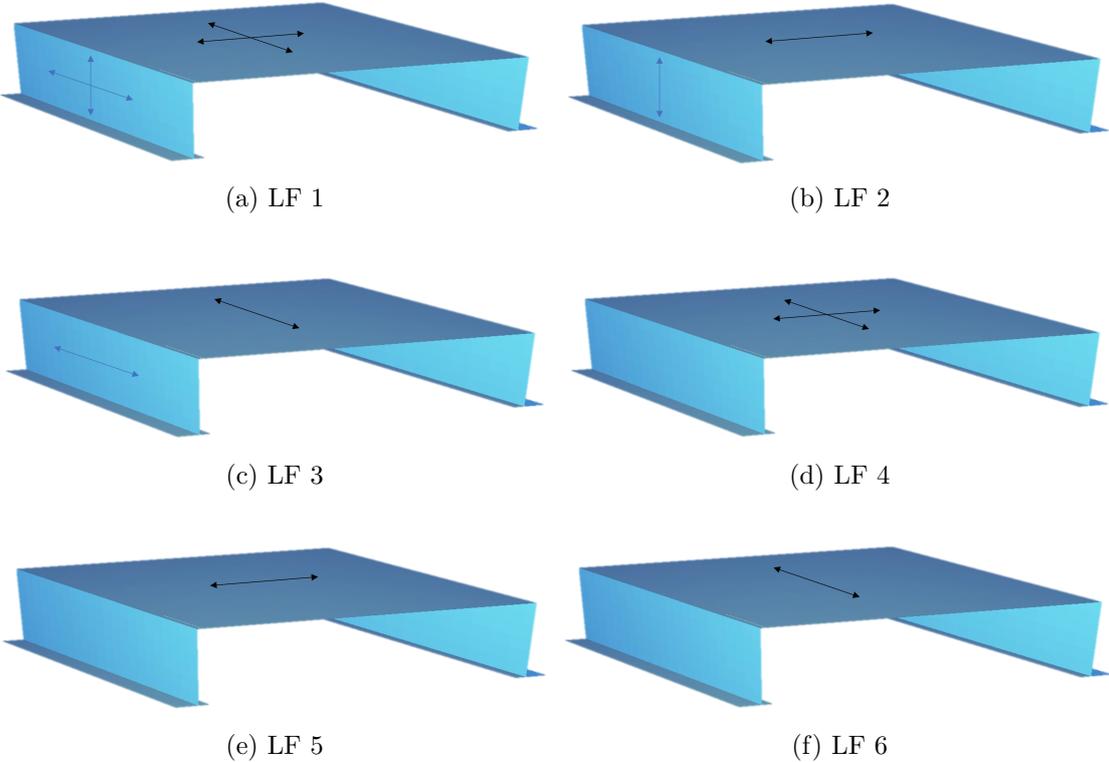


Abbildung 3.4: Visualisierung der Temperaturlastfälle

Baugrund

Die Berücksichtigung der Baugrundsteifigkeiten wird mit einer Flachgründung umgesetzt. Die Federsteifigkeiten werden mit dem Bettungsmodulverfahren, wie in den nachfolgenden Gleichungen ersichtlich, ermittelt. Die spannungsbhängigen Baugrundsteifigkeiten werden bei der Ermittlung mit dem Bettungsmodulverfahren aber vernachlässigt.

$$k_v = \frac{\sigma_{s,zul} * a * b}{s} \quad (3.1)$$

$$k_h = \frac{k_v}{2} \quad (3.2)$$

$$k_\phi = \frac{\sigma_{s,zul} * a * b^3}{s * 12} \quad (3.3)$$

mit

k_v	...	vertikale Bettungssteifigkeit $[\frac{kN}{m^3}]$
k_h	...	horizontale Bettungssteifigkeit in Brückenlängsrichtung $[\frac{kN}{m^3}]$
k_ϕ	...	Drehfedersteifigkeit in Brückenlängsrichtung $[\frac{kNm}{rad}]$
$\sigma_{s,zul}$...	zulässige Sohlpressung gemäß geotechnischem Gutachten $[\frac{kN}{m^2}]$
b	...	Breite des Fundaments $[m]$
a	...	Länge der Fundamentplatte (Brückenquerrichtung) $[m]$
s	...	zugehörige Setzung $[m]$

Da das Modell mittels Schalenelementen realisiert wird, ist eine flächige Bettung mit Federn anzusetzen. In der folgenden Abbildung 3.5 ist die modellierte Bettung illustriert.

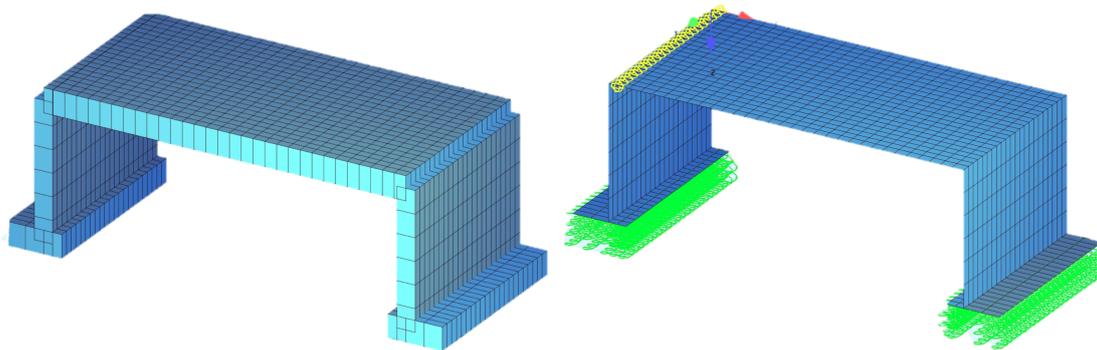


Abbildung 3.5: Modellierung der Bettung

Die Bettung wird mit vertikalen k_v und horizontalen k_h konstanten Federsteifigkeiten be-

rücksichtigt. Die horizontale Federsteifigkeit wird mit 50 % der vertikalen Federsteifigkeit angesetzt. Für die Untersuchung wird die Bodenpressung mit $\sigma_{s,zul} = 300kN/m^2$ und eine Setzung von $s = 0,01 m$ für das Basismodell angenommen und als Baugrundsteifigkeit *B 1* bezeichnet. Für die Baugrundsteifigkeiten *B 2* und *B 3* werden die Setzungen entsprechend 'weicher' und 'steifer' realisiert. In der folgenden Tabelle sind die Variationen der Bettungsmoduln dargestellt.

Tabelle 3.6: Variation der Federsteifigkeiten

Bettungsmodul	Federsteifigkeit	Federsteifigkeit
Nr.	$k_v \left[\frac{kN}{m^3} \right]$	$k_h \left[\frac{kN}{m^3} \right]$
B 1	30000	15000
B 2	14000	7000
B 3	46000	23000

Gemäß [11] sind die Gründungssteifigkeiten durch ein geotechnisches Gutachten zu bestätigen. Bei geringen Tragwerklängen ($l < 30 m$) kann auf eine Sensitivitätsanalyse verzichtet werden und der Mittelwert der Bodenparameter als Referenzwert herangezogen werden. Weitere Erkenntnisse für die Berücksichtigungen der Gründungssteifigkeit und der Boden-Bauwerks-Interaktion sind aus der folgenden Literatur [7], [9], [11], [12], [17] und [20] heranzuziehen.

3.3 Vergleichsnachrechnung

Im Rahmen zusätzlicher Vergleichsnachrechnungen werden weiters die Diskretisierungsmöglichkeiten der FE-Modellierung und der Stabmodellierung behandelt. Bei gerader Grundrissstellung kann das vorliegende Faltwerkmodell auf ein Stabwerksystem zurückgeführt werden. Um das räumliche Faltwerkssystem auf Plausibilität und Übereinstimmung zu überprüfen, folgt eine Gegenüberstellung und ein Vergleich der resultierenden Verschiebungen infolge Temperatur.

Wie in der Einleitung zu Abschnitt 3 erläutert, gibt es mehrere Möglichkeiten zur Diskretisierung von FE-Brückenmodellen. Gemäß [11] und [12] ist aber eine Modellierung als Faltwerk oder eine Kombination zwischen Stab- und Faltwerkmodell für Integralbrücken zu präferieren. Durch ein Faltwerk kann eine realitätsnahe Modellierung von Integralbrücken umgesetzt werden.

Für die Untersuchungen der in Kapitel 4 dargestellten Parameterstudie wurde das Modell deshalb als räumliches Faltwerk diskretisiert. Um weiteren Aufschluss über die Auswirkungen des Temperaturansatzes für ein Integralbrückenmodell geben zu können, erfolgt in diesem Abschnitt eine Analyse der Auswirkungen der Temperaturansätze und Gegenüberstellung der resultierenden Verschiebungen infolge Temperatur anhand eines Stabmodells und einer 'schwimmenden Platte'.

3.3.1 Vergleich Stabmodell

Für den Vergleich wird ein Rahmensystem mit der Software 'Ruck-Zuck' modelliert. Dem Stabmodell wird ein 1 m breiter Querschnittstreifen mit der je nach Modell zugehörigen Bauteildicke zugewiesen. Die jeweiligen Bauteilabmessungen für den Überbau $d_{üb}$ und für die Widerlager d_w sind aus den Tabellen 3.1 und 3.2 zu entnehmen.

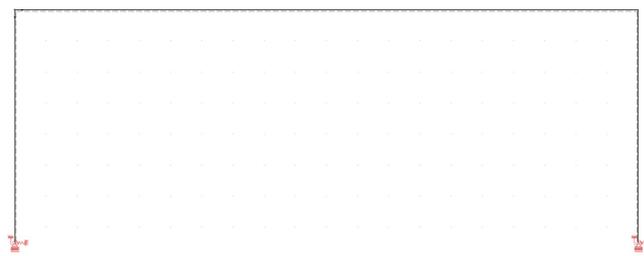


Abbildung 3.6: Stabmodell

Vor allem der für schiefe Integralbrücken wichtige Kraftfluss in Querrichtung ist bei der Modellierung mit dem Stabsystem kaum und nur mit erhöhtem Modellierungsaufwand

darstellbar. Um aber trotzdem zu vergleichen und Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten unter Temperatur und die Auswirkung der Bettung ziehen zu können, werden die aus Temperatur resultierenden Verschiebungen nur in der geraden Grundrissstellung ($\phi = 90^\circ$) am Widerlagerkopf und Widerlagerfuß verglichen.

Berücksichtigung der Gründung

Die Berücksichtigung der Gründungssteifigkeit erfolgt im Faltwerkmodell als Flachgründung mit Federelementen. Für die Untersuchungen wird analog zu Abschnitt 3.2 die Bodenpressung mit $\sigma_{s,zul} = 300 \text{ kN/m}^2$ und eine Setzung von $s = 0,01 \text{ m}$ für das Basismodell mit der Baugrundsteifigkeit $B 1$ angenommen. Für die Baugrundsteifigkeiten $B 2$ und $B 3$ werden die Setzungen entsprechend 'weicher' und 'steifer' realisiert.

Um eine vergleichbare Gründung im Stabmodell erzielen zu können, werden die zuvor ermittelten Federsteifigkeiten, durch Berücksichtigung der Breite des Fundaments in Längsrichtung ($l_{f1} + l_{f2} = 3 \text{ m}$), umgerechnet. Für die Federelemente ist der bereits abgebildete Ansatz von [12] aus Abschnitt 3.2 heranzuziehen. Die Ermittlung der Federsteifigkeit erfolgt wieder unter Berücksichtigung der Formel 3.2 und 3.3. Durch den exzentrischen Anschluss der Widerlagerwand an der Fundamentplatte ist eine Berücksichtigung und Ermittlung der Drehfedersteifigkeit nach [12] nicht erforderlich. Die Lagerung des Rahmens wird vertikal (in z-Richtung) unverschieblich und horizontale (in Brückenlängsrichtung) mit einer horizontalen Wegfeder umgesetzt. Um die Exzentrizität des Widerlageranschlusses an das Fundament zu berücksichtigen, wird weiters eine Drehfeder angeordnet. Dadurch ergeben sich folgende Federsteifigkeiten:

Tabelle 3.7: Ermittlung der Federsteifigkeiten des Stabmodells

Federsteifigkeiten	B1	B2	B3
k_h in $[\frac{kN}{m}]$	45000	21000	69000
k_ϕ in $[\frac{kNm}{rad}]$	67500	31500	103500

Geometrie

Die Querschnittsbreite des Stabmodells beträgt immer $b_w=1$ m siehe Abbildung 3.7. Die restlichen Geometrien der Stabmodelle werden analog zu Tabelle 3.1 und der nachfolgenden Abbildung 3.8 umgesetzt.

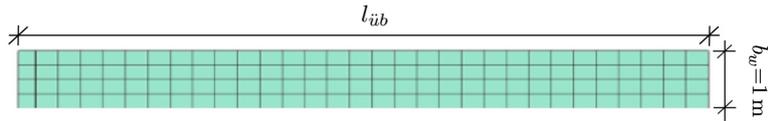


Abbildung 3.7: Grundriss Überbau Stabmodell

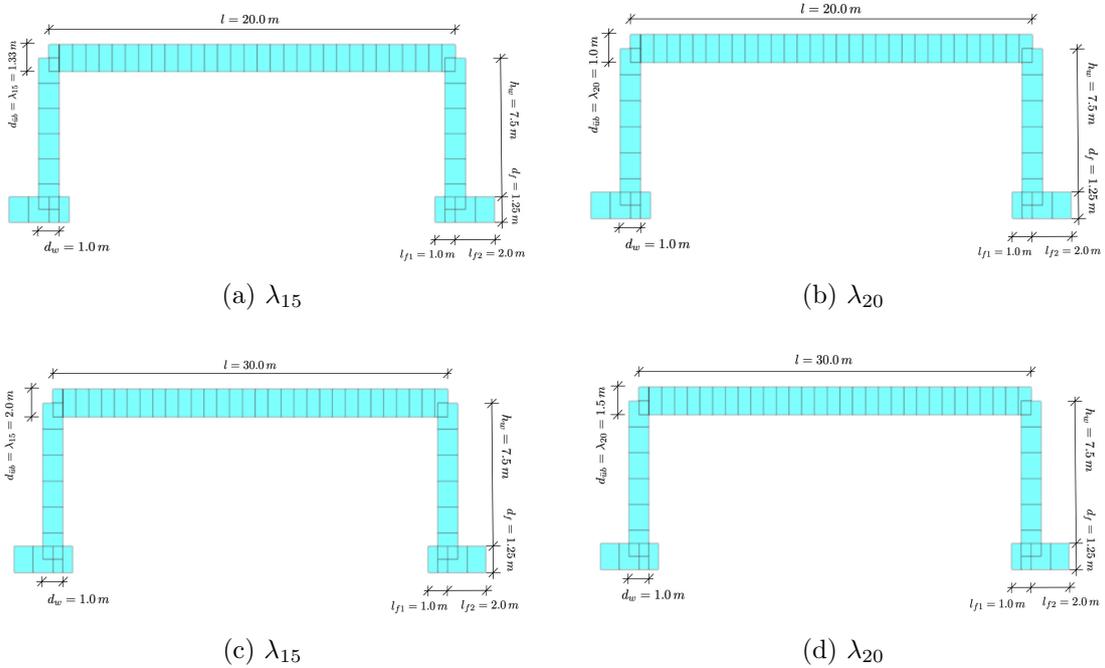


Abbildung 3.8: Visualisierung der Stabmodelle

Temperatur

Die Temperatureinwirkungen werden analog zu Tabelle 3.4 auf das Modell aufgebracht. Die Verschiebungen werden sinngemäß nur für den LF 2 (dtN in x-Richtung auf Überbauplatte und Widerlagerwand) ermittelt.

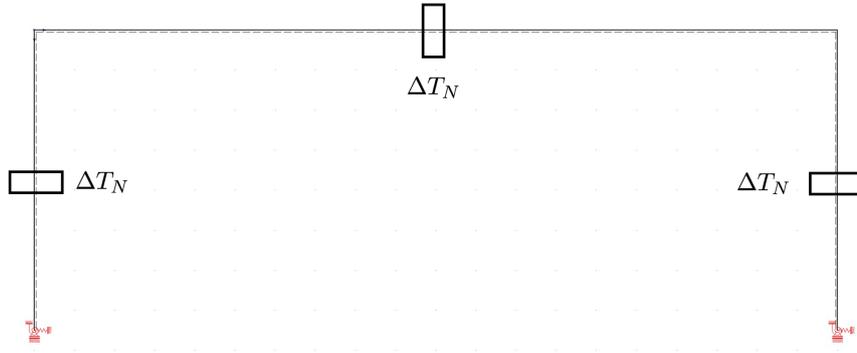


Abbildung 3.9: Temperaturansatz des Stabmodells

Nachfolgend werden die Verschiebungen am Kopf der Widerlagerwand respektive Überbauplatte und am Fuß der Widerlagerwand zufolge Temperatur abgebildet. Modell 1 und 2 und Modell 3 und 4 haben aufgrund der gleichen Brückenlängen in Längsrichtung dieselben Ergebnisse. Die nachfolgenden Tabellen 3.8 - 3.11 enthalten die Ergebnisse der resultierenden horizontalen Verschiebungen.

Tabelle 3.8: Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 1 und 2 - GM1

Modell 1 und 2 Grundmodell 1		λ_{15}					
Modellierung Verschiebung in [mm]	Stabmodell Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Scheibenmodell Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Δ der Modelle Δw_{Kopf}	$\Delta w_{Fuß}$	
B 1							
T 1	1.997	0.325	1.95	0.306	0.047	0.019	
T 2	2.995	0.488	2.92	0.459	0.075	0.029	
T 3	3.993	0.651	3.90	0.612	0.093	0.039	
B 2							
T 1	1.997	0.551	1.92	0.504	0.077	0.047	
T 2	2.996	0.827	2.88	0.756	0.116	0.071	
T 3	3.995	1.103	3.84	1.01	0.155	0.093	
B 3							
T 1	1.996	0.244	1.96	0.231	0.036	0.013	
T 2	2.994	0.366	2.94	0.346	0.054	0.020	
T 3	3.992	0.489	3.91	0.461	0.082	0.028	

Tabelle 3.9: Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 1 und 2 - GM2

Modell 1 und 2 Grundmodell 2		λ_{20}				
Modellierung Verschiebung in [mm]	Stabmodell		Scheibenmodell		Δ der Modelle	
	Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Δw_{Kopf}	$\Delta w_{Fu\ss}$
B 1						
T 1	1.997	0.210	1.96	0.200	0.037	0.010
T 2	2.996	0.315	2.94	0.299	0.056	0.016
T 3	3.994	0.420	3.93	0.399	0.0064	0.021
B 2						
T 1	1.998	0.357	1.95	0.332	0.048	0.025
T 2	2.997	0.536	2.92	0.498	0.077	0.038
T 3	3.995	0.714	3.90	0.664	0.095	0.05
B 3						
T 1	1.997	0.159	1.97	0.153	0.027	0.006
T 2	2.995	0.238	2.95	0.229	0.045	0.009
T 3	3.993	0.317	3.93	0.306	0.063	0.011

Tabelle 3.10: Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 3 und 4 - GM1

Modell 3 und 4 Grundmodell 2		λ_{15}				
Modellierung Verschiebung in [mm]	Stabmodell		Scheibenmodell		Δ der Modelle	
	Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Δw_{Kopf}	$\Delta w_{Fu\ss}$
B 1						
T 1	2.993	0.673	2.89	0.625	0.103	0.048
T 2	4.490	1.010	4.34	0.938	0.15	0.072
T 3	5.986	1.346	5.70	1.25	2.86	0.090
B 2						
T 1	2.995	1.094	2.84	0.993	0.155	0.101
T 2	4.492	1.640	4.26	1.49	0.232	0.15
T 3	5.990	2.187	5.68	1.99	0.310	0.197
B 3						
T 1	2.992	0.504	2.91	0.474	0.082	0.03
T 2	4.488	0.757	4.37	0.711	0.118	0.046
T 3	5.984	1.009	5.82	0.951	0.164	0.058

Tabelle 3.11: Vergleich der horizontalen Verschiebungen Modell 3 und 4 - GM2

Modell 3 und 4 Grundmodell 2		λ_{20}				
Modellierung	Stabmodell		Scheibenmodell		Δ der Modelle	
Verschiebung in [mm]	Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Widerlagerkopf	Widerlagerfuß	Δw_{Kopf}	$\Delta w_{Fu\beta}$
B 1						
T 1	2.993	0.481	2.92	0.451	0.001	0.03
T 2	4.490	0.772	4.38	0.677	0.110	0.045
T 3	5.987	0.963	5.84	0.903	0.147	0.06
B 2						
T 1	2.995	0.811	2.88	0.744	0.115	0.067
T 2	4.492	1.217	4.32	1.12	0.172	0.097
T 3	5.990	1.622	5.76	1.49	0.232	0.132
B 3						
T 1	2.992	0.359	2.93	0.340	0.062	0.019
T 2	4.489	0.538	4.39	0.510	0.099	0.028
T 3	5.985	0.718	5.86	0.688	0.125	0.030

Fazit

Die Änderung der Baugrundsteifigkeit hat nur einen geringfügigen Einfluss auf die temperaturinduzierten Kopfverschiebung der konventionellen Integralbrücke. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass die Baugrundsteifigkeiten üblicherweise geringer als die Bauteilsteifigkeiten der Integralbrücke sind.

Die Untersuchungen zeigen, dass ein steifer Baugrund die horizontalen Fußbewegungen vermindern. Laut [12] vergrößern sich aber dadurch die Biegebeanspruchungen in der Rahmenecke. Dieser Umstand kann vor allem bei kurzen Widerlagern gezeigt werden. Die Ergebnisse aus Ruckzuck und Sofistik weichen nur geringfügig ab. Um die Auswirkung einer festen Lagerung des Rahmensystems zu überprüfen, erfolgen Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Aufgrund der festen Lagerung können deshalb nur die Verschiebungen des Widerlagerkopfs verglichen und untersucht werden.

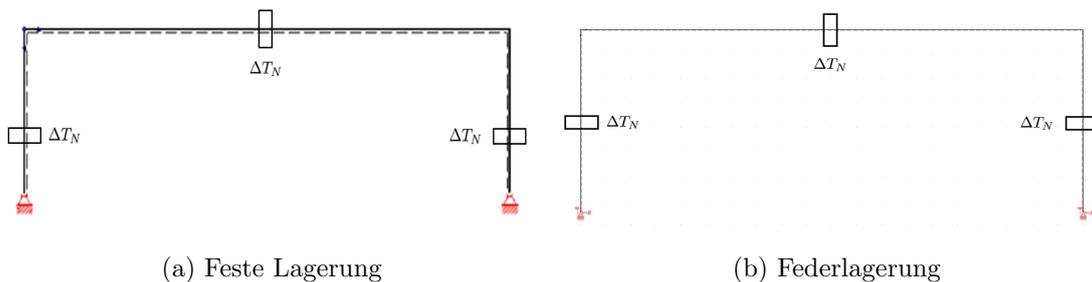


Abbildung 3.10: Vergleich der Lagerungen

Da der Einfluss der Bettungssteifigkeiten auf die resultierenden Widerlagerkopfverschiebungen nur geringfügig ist, wird repräsentativ die Bettungssteifigkeit der Bettung $B1$ ausgewählt und in der nachfolgenden Tabelle zum Vergleich abgebildet.

Tabelle 3.12: Vergleich der Verschiebungen feste Lagerung und Lagerung mit Federn

Verschiebung in [mm]	feste Lagerung		Federlagerung		Δ der Lagerungen			
Überbauschlankheit	λ_{15}	λ_{20}	λ_{15}	λ_{20}	Δw_{Kopf}	λ_{15}	Δw_{Kopf}	λ_{20}
Modell 1+2								
T1	1.997	1.998	1.997	1.997	-		0.001	
T2	2.995	2.996	2.995	2.996	-		-	
T3	3.993	3.995	3.993	3.994	-		0.001	
Modell 3+4								
T1	2.992	2.994	2.993	2.993	0.001		0.001	
T2	4.489	4.492	4.490	4.490	0.001		0.001	
T3	5.985	5.989	5.986	5.987	0.001		0.002	

Weiters werden die resultierenden Zwangkräfte infolge einer Temperaturbelastung LF 2 nachfolgend in den Tabellen 3.13 und 3.14 dargestellt.

Tabelle 3.13: Zwangsschnittgrößen Stabmodell 1+2

Lagerung	B1		B2		B3		feste Lager	
Zwangskraft	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
λ_{15}								
T1	-14.645	-92.928	-11.580	-79.837	-16.859	-100.042	-14.295	-107.215
T2	-21.968	-139.393	-17.370	-119.755	-25.288	-150.062	-21.443	-160.823
T3	-29.291	-185.857	-23.160	-159.673	-33.717	-200.083	-28.591	-214.431
λ_{20}								
T1	-9.443	-54.100	-7.499	-48.863	-10.945	-56.478	-7.813	-58.597
T2	-14.164	-81.149	-11.248	-73.295	-16.418	-84.716	-11.719	-87.896
T3	-18.885	-108.199	-14.998	-97.726	-21.891	-112.955	-15.626	-117.194

Tabelle 3.14: Zwangsschnittgrößen Stabmodell 3+4

Lagerung	B1		B2		B3		feste Lager	
Zwangskraft	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
λ_{15}								
T1	-30.296	-201.714	-22.964	-162.207	-34.801	-220.165	-32.426	-243.192
T2	-45.443	-302.572	-34.446	-243.311	-52.202	-330.247	-48.638	-364.788
T3	-60.591	-403.429	-45.928	-324.415	-69.603	-440.330	-64.851	-486.384
λ_{20}								
T1	-21.661	-137.187	-17.033	-117.200	-24.757	-146.170	-21.075	-158.063
T2	-32.491	-205.780	-25.550	-175.800	-37.135	-219.256	-31.613	-237.094
T3	-43.321	-274.373	-34.066	-234.400	-49.513	-292.341	-42.150	-316.126

Es kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse des Faltwerk-Berechnungsmodell und des vereinfachten Stabmodell übereinstimmen. Es ist weiters ersichtlich, dass die Zwangkräfte durch die Erhöhung der Temperatur, wie zu erwarten, linear ansteigen.

3.3.2 Vergleich 'schwimmende Platte'

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen einer Temperaturbeanspruchung auf eine zwangungsfrei gelagerte Platte behandelt. Dafür wird ebenfalls ein Modell in SOFiSTiK erstellt und die Ergebnisse mittels Wingraf ausgelesen.

Das Modell soll sinngemäß eine Überbauplatte darstellen. Die Platte wird von Feder-elementen anstelle eines Widerlagers gehalten. Die untersuchten Platten liegen in der Ausgangsform eine Überbaugeometrie des Modells 1 und eine quadratische Geometrie des Modells 2 in Abschnitt 3.1, Tabelle 3.1 zugrunde.

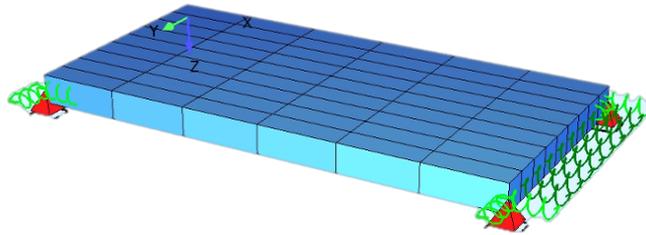
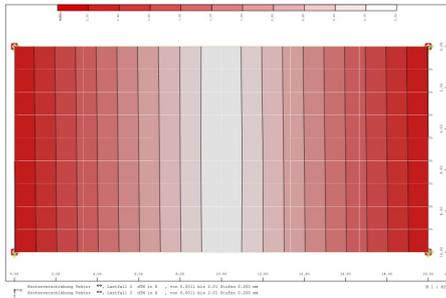


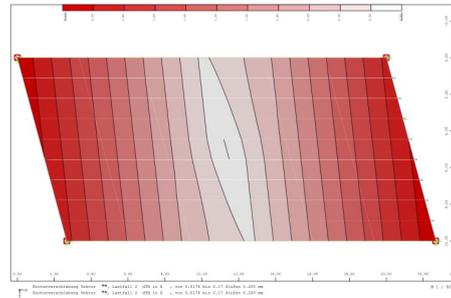
Abbildung 3.11: Modell 'schwimmende Platte'

Die Federsteifigkeiten werden vertikal und horizontal jeweils mit 1.0 kN/m angenommen. Eine Modellierung der Behinderung des Verformungsbestrebens durch die Widerlagerwände ist in diesem Fall durch die weiche Federsteifigkeit nicht realisiert. Die Temperatur ΔT_N wird auch wie im Integralbrückenmodell mit einer konstanten Dehnung $\epsilon_T = \Delta T_N * a_T$ auf das Modell aufgebracht. Die in Tabelle 3.4 abgebildeten Temperaturkombinationen werden auch hier angewendet und mit T1, T2 und T3 abgekürzt.

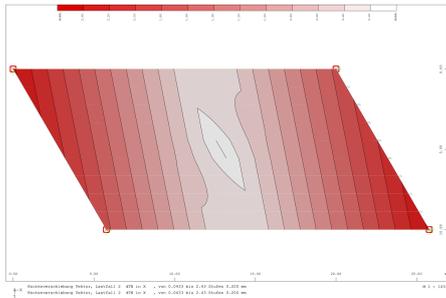
Abbildungen 3.12 und 3.14 zeigen anschließend die Verschiebungen einer durch nur in Längsrichtung mit Temperatur belasteten zwängungsfrei gelagerten Platte ('schwimmende Platte'). Zur Vergleichbarkeit sind die Verschiebungen für die Schiefen ϕ mit 90° , 75° , 60° und 45° abgebildet.



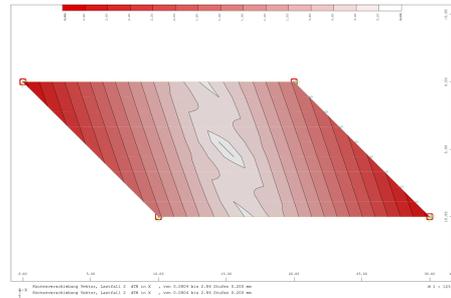
(a) $\phi = 90^\circ$



(b) $\phi = 75^\circ$



(c) $\phi = 60^\circ$



(d) $\phi = 45^\circ$

Abbildung 3.12: Verschiebungen schwimmende Platte - Modell 1

Abbildung 3.13: Verschiebungen schwimmende Platte - Modell 2

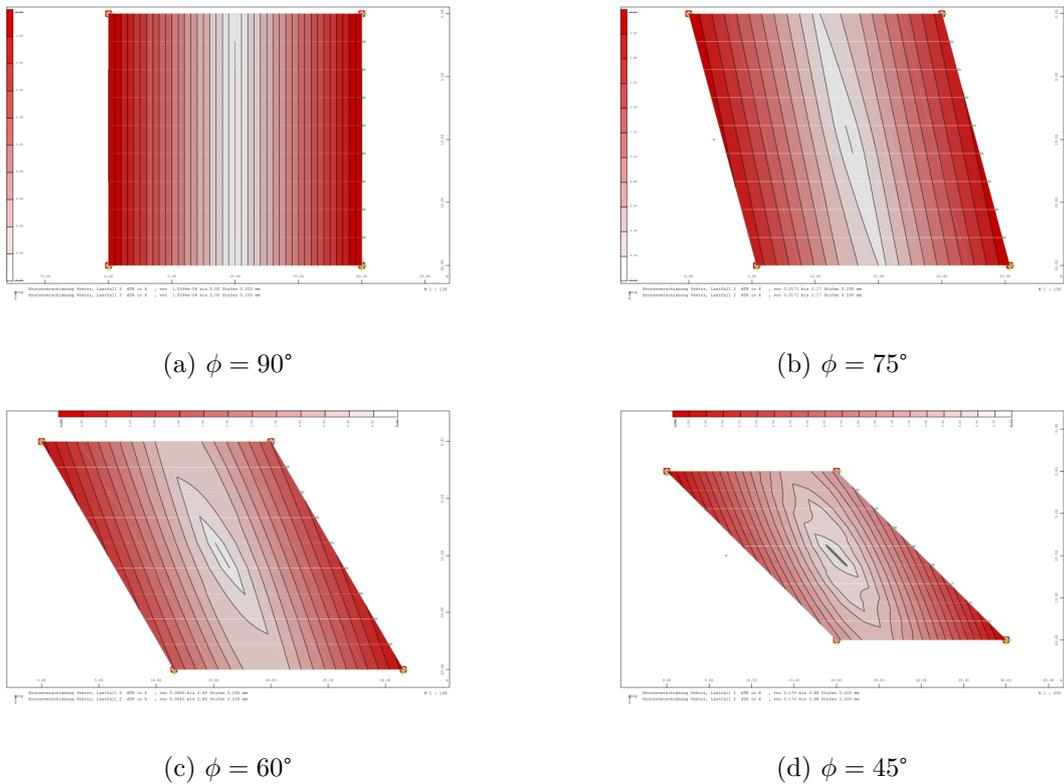


Abbildung 3.14: Verschiebungen schwimmende Platte - Modell 2

Die vorher abgebildeten Verschiebungen in Abbildung 3.12 und 3.14 der Überbauplatte sind nur repräsentativ und für eine Temperatur T_1 und Federsteifigkeit 1 kN/m abgebildet, da sich die qualitativen Verschiebungsfiguren nicht unterscheiden.

Die entstehenden Verformungen können sich durch die zwängungsfreie Lagerung frei einstellen. Die Abbildungen 3.12 - 3.14 zeigen einen sogenannten Bewegungsruehpunkt oder in diesem Fall eine Ruhelinie in der Mitte der Platte (weißer Bereich). Die Ruhelinie stellt dabei jenen Bereich dar, welcher zufolge der Temperatureinwirkung keine Verschiebung in horizontaler Richtung erfährt.

Weiters ist zu beobachten, dass trotz gleichbleibender Temperatureinwirkung eine Veränderung der entstehenden Verschiebungen beobachtet werden kann. Je größer die Schiefe, desto größer sind die Knotenverschiebungen der Platte. Hierbei ist die Distanz zwischen Überbauende und der Ruhelinie als Bewegungslinie bezeichnet. Die Längen werden in diesem Fall als l_u und l_o genannt und stellen die Abstände zwischen dem Mittelpunkt und der jeweiligen Rahmenecke der Lagerpunkte oben und unten respektive in der rechten und linken Überbauplattenecke dar. Die Bewegungslinien der Knotenverschiebungen werden rechnerisch wie folgt ermittelt:

$$u_o = \Delta T * a_T * l_o \quad (3.4)$$

$$u_u = \Delta T * a_T * l_u \quad (3.5)$$

$$u_o > u_u \quad (3.6)$$

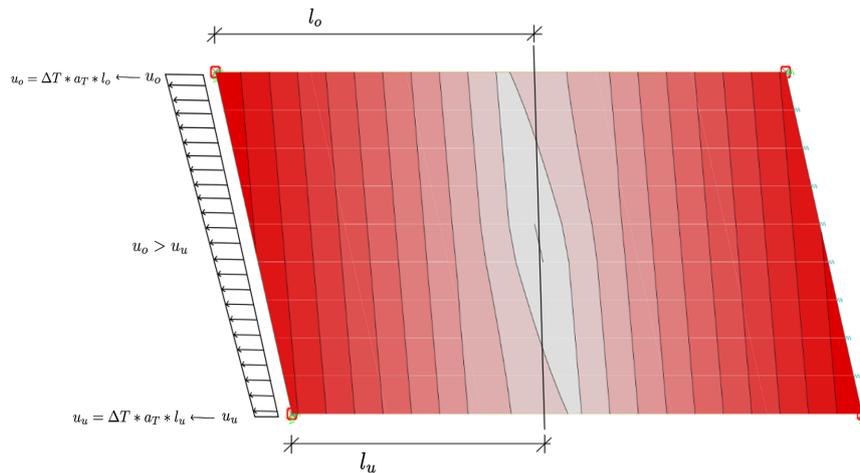


Abbildung 3.15: Berechnung der Verschiebelängen der Plattenecken

Es ist ersichtlich, dass auch bei zunehmender Schiefwinkeligkeit die Neigung der sogenannten Ruhelinie annähernd gerade bleibt und nicht parallel zum Plattenende verläuft. Die Verdrehungen der Platte sind aber nicht proportional zur Schiefwinkeligkeit. Zurückzuführen ist dieses Ergebnis auf die zusätzlichen Beanspruchungen durch die Schiefstellung. Durch die Schiefe im Grundriss resultiert eine Zusatzbeanspruchung in Querrichtung und folglich ein Eigenspannungszustand der Platte. Die Summe der Momente $\sum M_t = 0$ um den Mittelpunkt der Platte ergeben somit Null.

Die nachfolgenden Untersuchungen sollen die Auswirkungen einzelner Faktoren auf die Verschiebungen untersuchen. Die Werte werden aufgrund der Schiefstellungen auf Basis des Verschiebungsvektors untersucht.

Einfluss der Federsteifigkeit

Um die Ergebnisse einer 'schwimmenden Platte' zu erhalten, werden sehr 'weiche' Federlagerungen realisiert, damit sich die Platte frei und ohne Zwängungen verformen kann. Die folgende Tabelle stellt einen Vergleich zwischen einer Federlagerung und den Einfluss auf die Verschiebungswerte dar. Die Federsteifigkeiten werden vertikal und horizontal jeweils mit 1.0 kN/m respektive bei der Gegenüberstellung eines 'weicheren' Vergleichsmodell mit 0.1 kN/m angenommen.

Tabelle 3.15: Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Temperatur

Systemverschiebungen in [mm]					
Federsteifigkeit 0.1kN	ϕ	90°	75°	60°	45°
T1		2.11	2.14	2.61	2.85
T2		3.09	3.19	3.72	4.27
T3		4.22	4.29	5.22	5.69
Federsteifigkeit 1.0kN	ϕ	90°	75°	60°	45°
T 1		2.01	2.17	2.43	2.86
T 2		3.01	3.25	3.62	4.29
T 3		4.01	4.43	4.86	5.72

Durch die größeren Federsteifigkeiten resultieren kleinere Verschiebungen und geringere Verformungen.

Einfluss der Schlankheit

Die nachfolgenden Tabellen sollen den Einfluss der Schlankheit auf die 'schwimmende Platte' verdeutlichen. Repräsentativ wird dabei das Modell 1 dargestellt.

Tabelle 3.16: Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Schlankheit

Systemverschiebungen in [mm] Federsteifigkeit 1.0kN					
λ_{15}	ϕ	90°	75°	60°	45°
T 1		2.01	2.17	2.43	2.86
T 2		3.01	3.25	3.62	4.29
T 3		4.01	4.43	4.86	5.72
λ_{20}	ϕ	90°	75°	60°	45°
T 1		2.00	2.18	2.43	2.87
T 2		3.01	3.30	3.65	4.29
T 3		4.00	4.43	4.86	5.74

Es ist ersichtlich, dass die Schlankheit λ keinen Einfluss auf die Verschiebungen bei 'schwimmenden Platten' hat.

Einfluss der Geometrie

In Rahmen der Untersuchung wird noch der Einfluss der Geometrie auf die resultieren Verschiebungen erörtert. Dabei werden die rechteckigen Platten und die quadratischen Platten verglichen. Anschließend folgt ein repräsentativer Vergleich des Modells 1 und des Modells 2, um den Einfluss der Plattenbreite bei zunehmender Schiefwinkeligkeit und bei gleichbleibender Plattenlänge zu untersuchen.

Modell 1 und 3

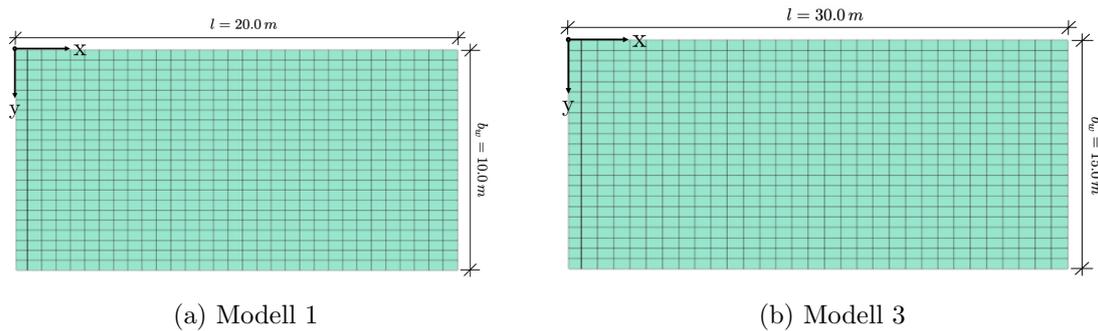


Abbildung 3.16: Abmessungen Überbau Modell 1 und 3

Tabelle 3.17: Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Geometrie - Modell 1 und 3

Systemverschiebungen in [mm]		λ_{20}			
Federsteifigkeit 1.0kN					
Modell 1		ϕ			
Temperatur		90°	75°	60°	45°
T 1		2.00	2.18	2.43	2.87
T 2		3.01	3.30	4.85	4.29
T 3		4.00	4.43	4.86	5.74
Modell 3		ϕ			
Temperatur		90°	75°	60°	45°
T 1		3.01	3.26	3.61	4.37
T 2		4.52	4.87	5.42	6.53
T 3		6.01	6.52	7.21	8.74

Modell 2 und 4

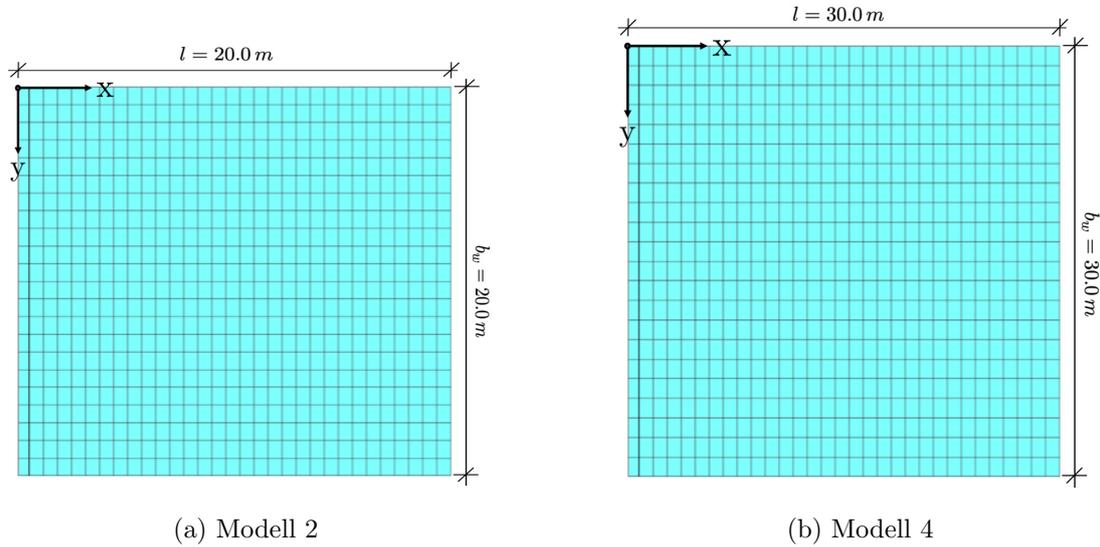


Abbildung 3.17: Abmessungen Überbau Modell 2 und 4

Tabelle 3.18: Vergleich Verschiebvektor - Einfluss der Geometrie - Modell 2 und 4

Systemverschiebungen in [mm]				
λ_{20}				
Federsteifigkeit 1.0kN				
Temperatur	90°	75°	60°	45°
Modell 2		ϕ		
T 1	2.00	2.17	2.66	3.88
T 2	3.02	3.35	4.00	5.83
T 3	4.00	4.43	5.33	7.77
Modell 4		ϕ		
T 1	3.01	3.25	4.00	6.01
T 2	4.51	4.88	6.00	9.00
T 3	6.03	6.50	8.00	12.00

Fazit

Durch eine 'schwimmenden Platte' erfolgt eine Untersuchung der freien, ungehinderten Verformung und die Darstellung des linearen Zusammenhanges zwischen resultierender Verformung und aufgebrachtener Temperatur. Im Allgemeinen kann aber nicht immer von einem linearen Zusammenhang ausgegangen werden.

Anhand der in der Tabelle 3.15 dargestellten Verformungen lässt sich ableiten, dass bei einer steigenden Temperatur auch die Verformungen gemäß $u = \Delta T * a_T * l$ ansteigen. Eine doppelte Temperaturbelastung verursacht laut den Untersuchungen eine doppelte betragsmäßige Verschiebung. Es kann dadurch ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und Verschiebung unter Voraussetzung der freien und zwängungsfreien Lagerung nachgesagt und bestätigt werden.

Der Einfluss der Federsteifigkeit ist, wie zu erwarten, dass eine größer Federsteifigkeit in kleinere Verschiebungen und geringeren Verformungen resultiert. Auch die Variation der Schlankheit zeigt, dass die Schlankheit keinen Einfluss auf die Verschiebungen der 'schwimmenden Platte' haben. Weiters zeigen die Untersuchungen bezüglich des Einflusses der Geometrie, dass bei größeren Geometrien und zunehmender Schiefstellung die Auswirkungen der Temperatur und die dadurch resultierenden Verschiebungen an Bedeutung gewinnen. Vor allem durch die Tabellen 3.17 und 3.18 wird ersichtlich, dass der Einfluss der Überbaubreite auf die Verschiebungswerte bei schiefwinkligen Platten in größeren Verformungen resultieren.

Weiters kann auch gezeigt werden, dass die Ruhelinie bei dem in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Vergleich, wie erwartet, bei $x = L/2$ liegt und somit auch mit den Ergebnissen der 'schwimmenden Platte' übereinstimmen. Die Erkenntnisse aus [12] können weiters mit der durchgeführten Versuchsnachrechnung bezüglich der Steifigkeitsänderungen und dadurch verändernden Verschiebungen bestätigt werden.

4 Parameterstudie

In diesem Kapitel erfolgt die Durchführung der Parameterstudie mit den in Kapitel 3 dargestellten Modellen und Einwirkungen. Durch Variation der Modellparameter und Temperaturlastfälle soll der Einfluss der Temperatur auf die Zwangskraftbeanspruchung quantifiziert werden.

Die Auswertung der Modellergebnisse erfolgt automatisiert. Für die Ergebnisdarstellung werden die benötigten Zwangsschnittgrößen aus SOFiSTiK mittels '.dat'-Dateien herausgelesen. Für eine gezielte Auswertung werden die Schnittkräfte mit sogenannten "SIR-Schnitten" implementiert. Die Schnitte verlaufen über die gesamte Widerlagerbreite. Die Schnittpositionen sind in Abbildung 4.1 ersichtlich und werden jeweils vor dem Rahmen-eck gewählt. Im Rahmen der Untersuchungen in Abschnitt 4.1 werden die Schnittgrößen mit SIR 1 ermittelt. Der zweite Schnitt SIR 2 wird in Kapitel 5 benötigt und wurde nur für Kontrollzwecke gesetzt.

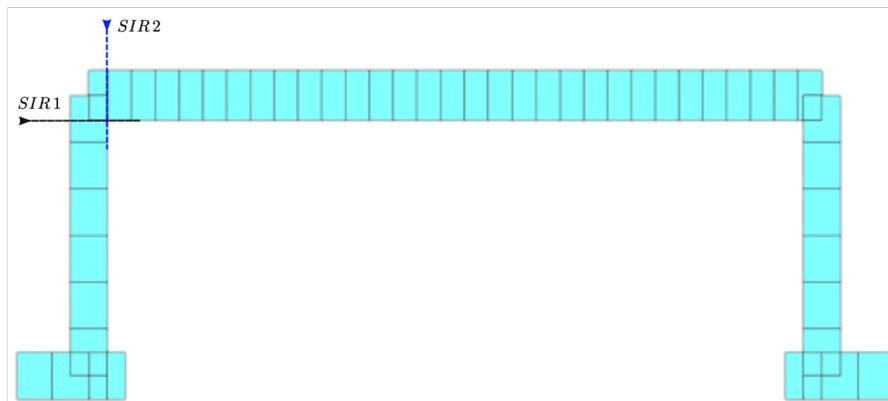


Abbildung 4.1: SIR-Schnitte

4.1 Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz

In diesem Abschnitt erfolgen die Untersuchungen bezüglich der Auswirkung von Temperaturansätzen in Längsrichtung (x-Richtung) sowie in Längs- und Querrichtung (x+y-Richtung). Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, einen Temperaturansatz für repräsentative Schiefen zu finden, welcher zu keiner wesentlichen Überschätzung der Zwangskraft in Querrichtung und somit zu einer Überbemessung führt. Dafür werden die durch die Temperaturlastfälle resultierenden Zwangkraftverläufe über die gesamte Widerlagerwand, siehe Abbildung 4.1 SIR-Schnitt 1, ermittelt. Anschließend werden die Zwangkräfte für eine Vergleichbarkeit aufsummiert und betragsmäßig gemittelt. Es soll der Schnittpunkt der beiden Lastfälle ersichtlich gemacht werden, welcher illustriert, ab welcher Schiefstellung ein Lastansatz in beiden Richtungen günstiger ist als ein Temperaturansatz ausschließlich in Längsrichtung. Durch diesen Schnittpunkt kann weiters auf die zugehörige Schiefstellung geschlossen werden.

Im Zuge der Untersuchungen werden die vier Modelle gemäß Tabelle 3.1 mit unterschiedlichen Überbauschlankheiten λ realisiert. Zur Vereinfachung werden die Modelle in Bezug auf die Schlankheit in Systeme untergliedert und als Grundsystem 1 ($\lambda = l/h = 15$) und Grundsystem 2 ($\lambda = l/h = 20$) bezeichnet. Die nachfolgenden Untersuchungen werden vorerst mit den Federsteifigkeiten von Bettungsmodul B 1 durchgeführt.

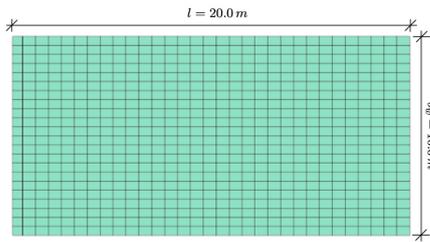
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Schnittpunkte für die Entscheidungshilfe zum Ansatz der Temperatureinwirkung in Längs- (LF 2) oder in Längs- und Querrichtung (LF 1) auf Überbau und Widerlager. Die durchgezogenen Linien stellen die verursachten Zwangkräfte infolge LF 1 dar, die strichlierten Linien bilden die Zwangkräfte gemäß LF 2 ab.

4.1.1 Grundsystem 1

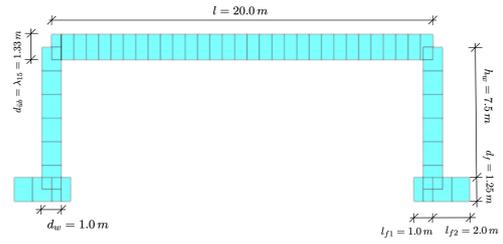
Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der Modellvarianten mit einer resultierenden Überbaustärke von $\lambda = l/h = 15$ dar. Die nachfolgende Tabelle 4.3 zeigt die in diesem Abschnitt untersuchten Lastfallvarianten.

Tabelle 4.3: Übersicht Varianten Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz-Grundsystem 1

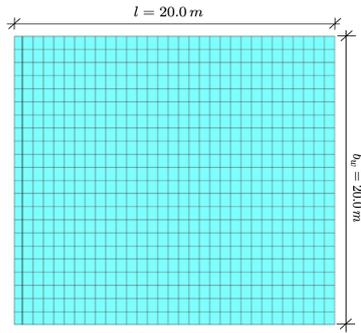
Grundsystem 1	$\lambda = 15$	
Temperatur T1	LF 1	LF 2
	ϕ	ϕ
Modell 1	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 2	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 3	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 4	90,75,60,45	90,75,60,45
Temperatur T2	LF 1	LF 2
Modell 1	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 2	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 3	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 4	90,75,60,45	90,75,60,45
Temperatur T3	LF 1	LF 2
Modell 1	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 2	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 3	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 4	90,75,60,45	90,75,60,45



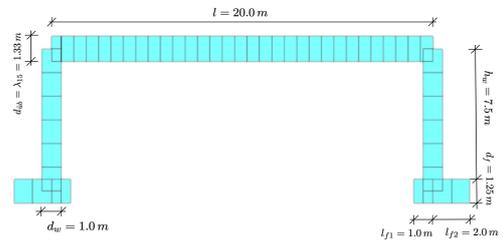
(a) Überbauabmessungen Modell 1



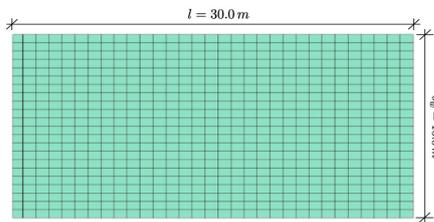
(b) Schnitt Modell 1



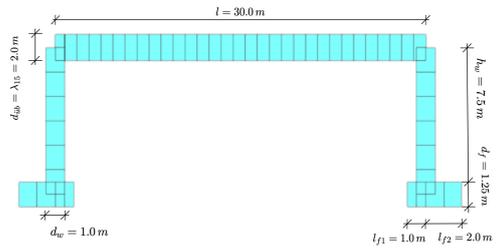
(c) Überbauabmessungen Modell 2



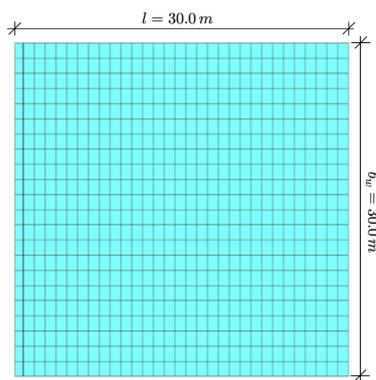
(d) Schnitt Modell 2



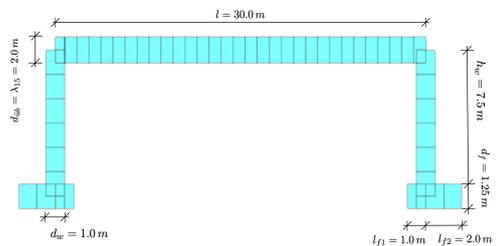
(e) Überbauabmessungen Modell 3



(f) Schnitt Modell 3



(g) Überbauabmessungen Modell 4



(h) Schnitt Modell 4

Abbildung 4.2: Visualisierung der Modelle - GM1 $\lambda=15$

Modell 1

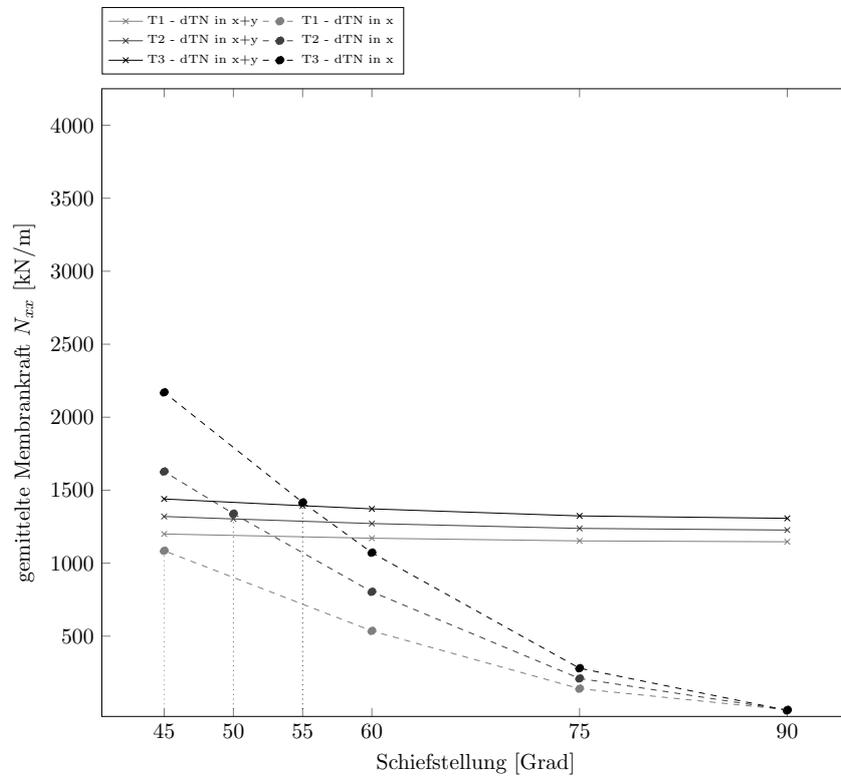


Abbildung 4.3: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 1

Abbildung 4.3 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 1. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 50° und T3 ab 55° notwendig ist.

Bei einer geringen Temperatureinwirkung T1 ist ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung für die Bemessung zielführender.

Modell 2

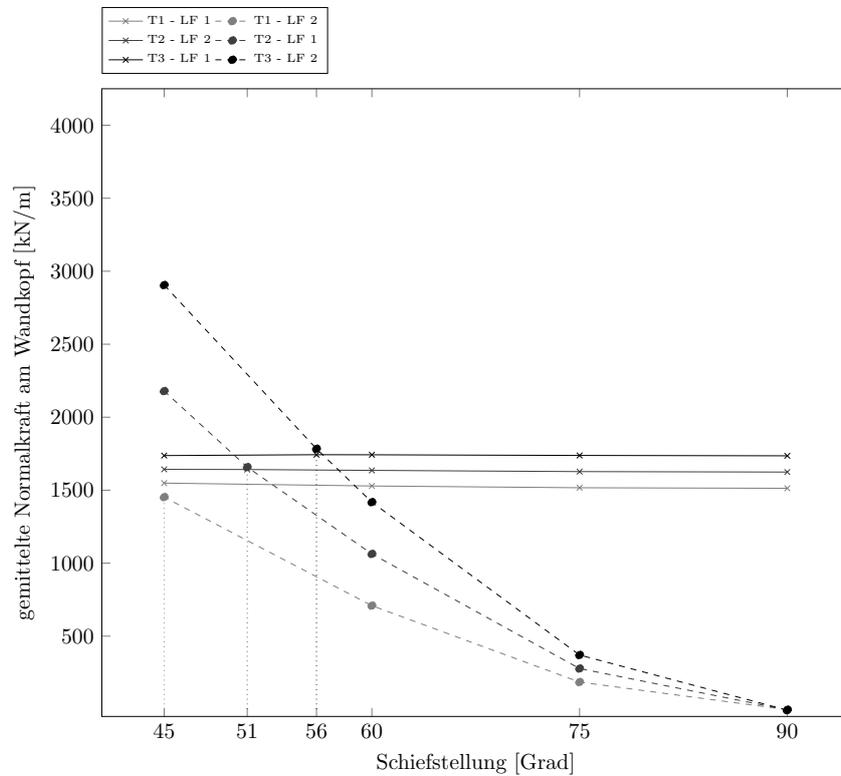


Abbildung 4.4: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 2

Abbildung 4.4 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 2. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 51° und T3 ab 56° notwendig ist.

Bei einer geringen Temperatureinwirkung T1 ist ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung für die Bemessung zielführender.

Modell 3

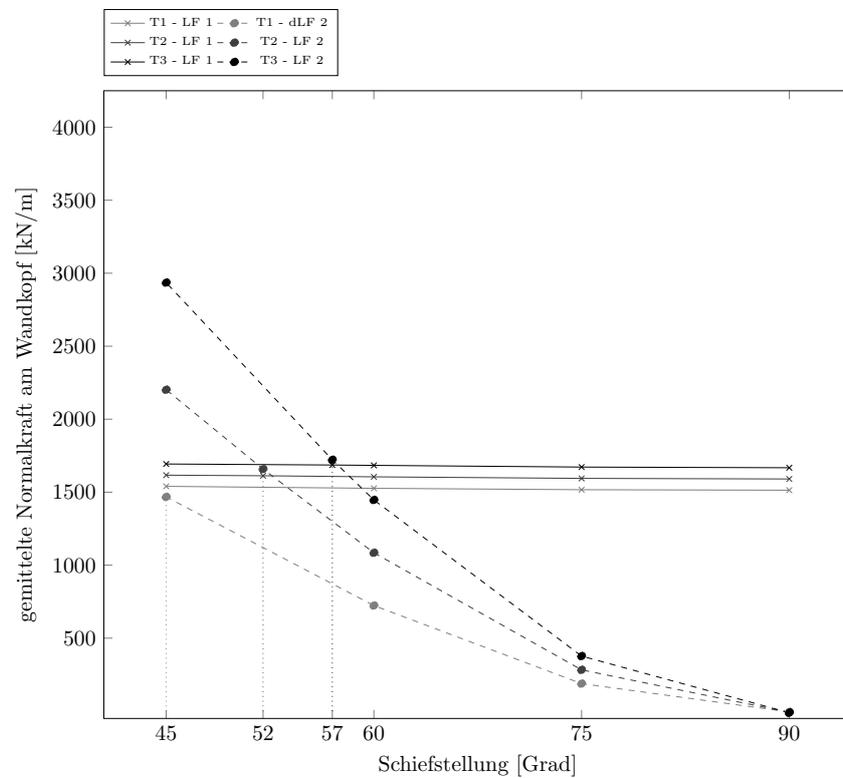


Abbildung 4.5: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 3

Abbildung 4.5 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 3. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 52° und T3 ab 57° notwendig ist.

Bei einer geringen Temperatureinwirkung T1 ist ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung für die Bemessung zielführender.

Modell 4

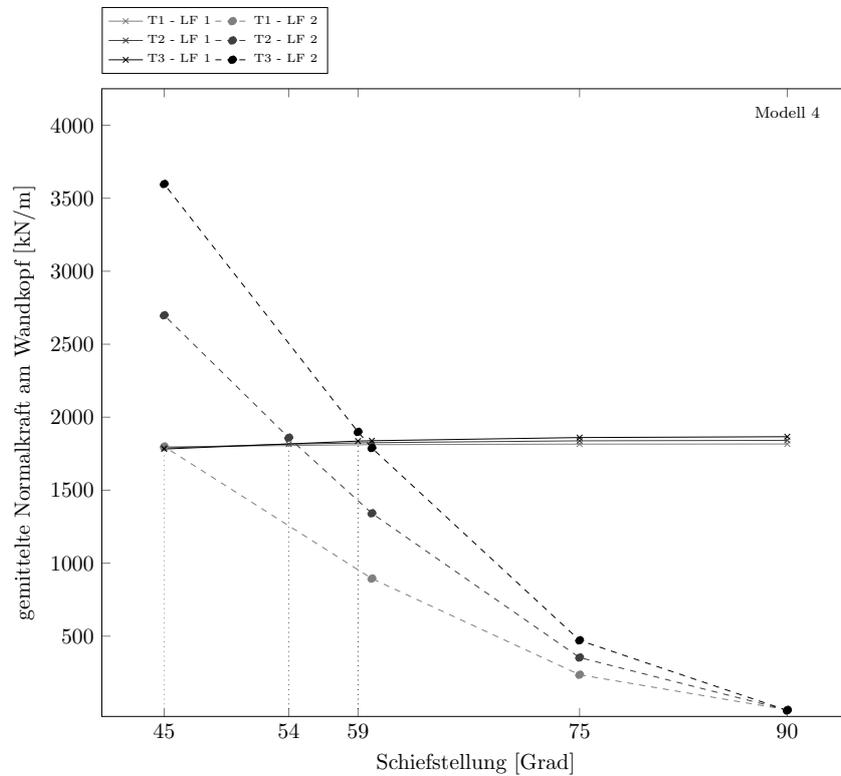


Abbildung 4.6: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 1 - Modell 4

Abbildung 4.6 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 4. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 54° und T3 ab 59° notwendig ist.

Für Temperatur T1 ist der Schnittpunkt bei einer Schiefe im Grundriss von 45° ersichtlich. Die gemittelten Zwangkräfte sind für LF 1 und LF 2 nahezu ident. Es können also beide Temperaturansätze verwendet werden.

Unabhängig von den Temperaturgrößen ist weiters zu erkennen, dass sich die resultierenden Zwangkräfte infolge des Temperaturansatzes in Längs- und Querrichtung (LF1) kaum unterscheiden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse aus den obigen Diagrammen 4.3 - 4.6 tabellarisch dargestellt.

	Winkelschnittpunkt	LF 1	LF 2
Modell	[°]	[kN/m]	[kN/m]
Temperatur T1			
M1	-	1199.9066	1085.1062
M2	45	1548.5228	1452.5438
M3	-	1540.0656	1467.8560
M4	45	1796.8104	1798.6817
Temperatur T2			
M1	50	1303.022	1338.9299
M2	51	1641.2599	1707.6294
M3	52	1612.5650	1658.0464
M4	54	1815.4334	1859.4983
Temperatur T3			
M1	55	1393.6502	1415.9760
M2	56	1743.0466	1783.5812
M3	57	1686.1980	1721.8066
M4	59	1836.4966	1899.0467

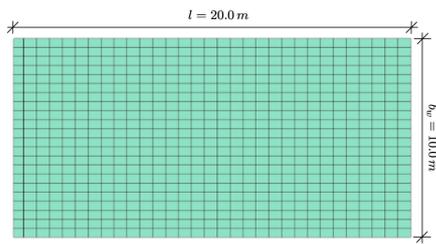
Tabelle 4.4: Schnittpunkte für den Ansatz der Temperatureinwirkung Grundsystem 1

4.1.2 Grundsystem 2

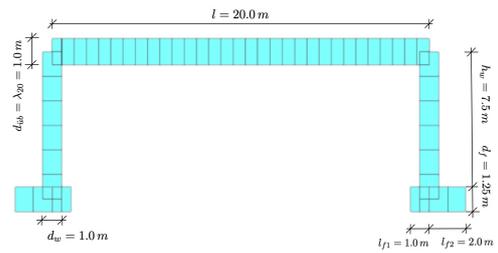
Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der Modellvarianten mit einer resultierenden Überbaustärke von $\lambda = l/h = 20$ dar. Die nachfolgende Tabelle 4.5 zeigt die in diesem Abschnitt untersuchten Lastfallvarianten.

Tabelle 4.5: Übersicht Varianten Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz-Grundsystem 2

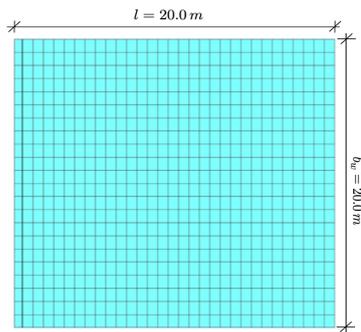
Grundsystem 2	$\lambda = 20$	
	ϕ	ϕ
Temperatur T1	LF 1	LF 2
Modell 1	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 2	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 3	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 4	90,75,60,45	90,75,60,45
Temperatur T2	LF 1	LF 2
Modell 1	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 2	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 3	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 4	90,75,60,45	90,75,60,45
Temperatur T3	LF 1	LF 2
Modell 1	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 2	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 3	90,75,60,45	90,75,60,45
Modell 4	90,75,60,45	90,75,60,45



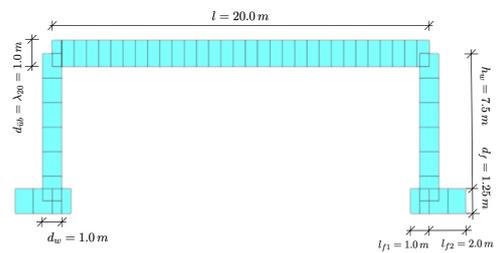
(a) Überbauabmessungen Modell 1



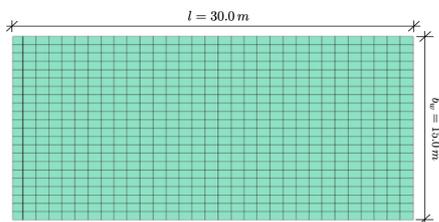
(b) Schnitt Modell 1



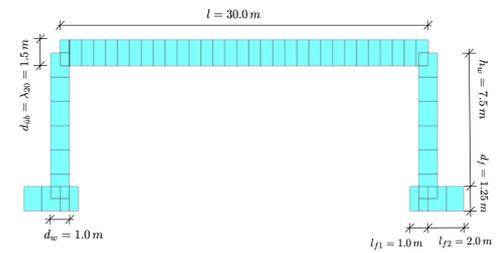
(c) Überbauabmessungen Modell 2



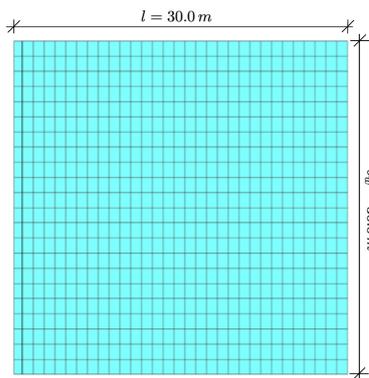
(d) Schnitt Modell 2



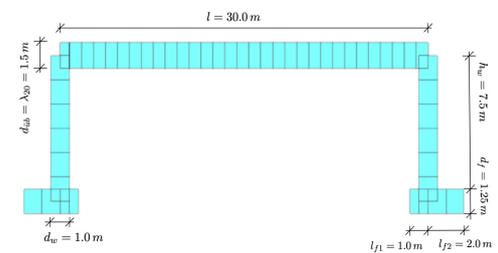
(e) Überbauabmessungen Modell 3



(f) Schnitt Modell 3



(g) Überbauabmessungen Modell 4



(h) Schnitt Modell 4

Modell 1

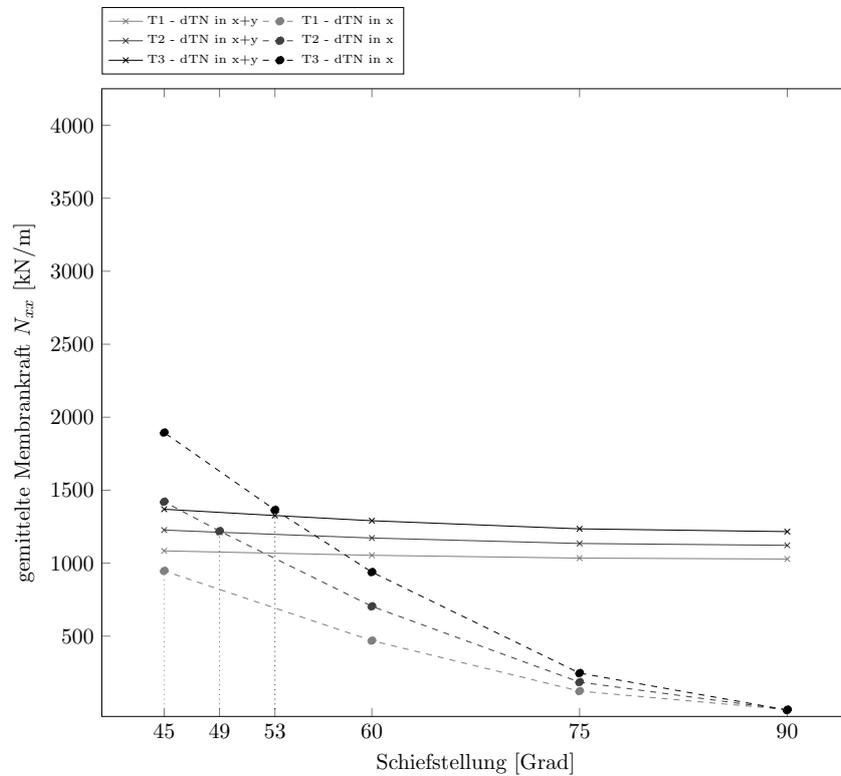


Abbildung 4.8: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 1

Abbildung 4.8 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 1. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 49° und T3 ab 53° notwendig ist.

Bei einer geringen Temperatureinwirkung T1 ist ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung für die Bemessung zielführend.

Modell 2

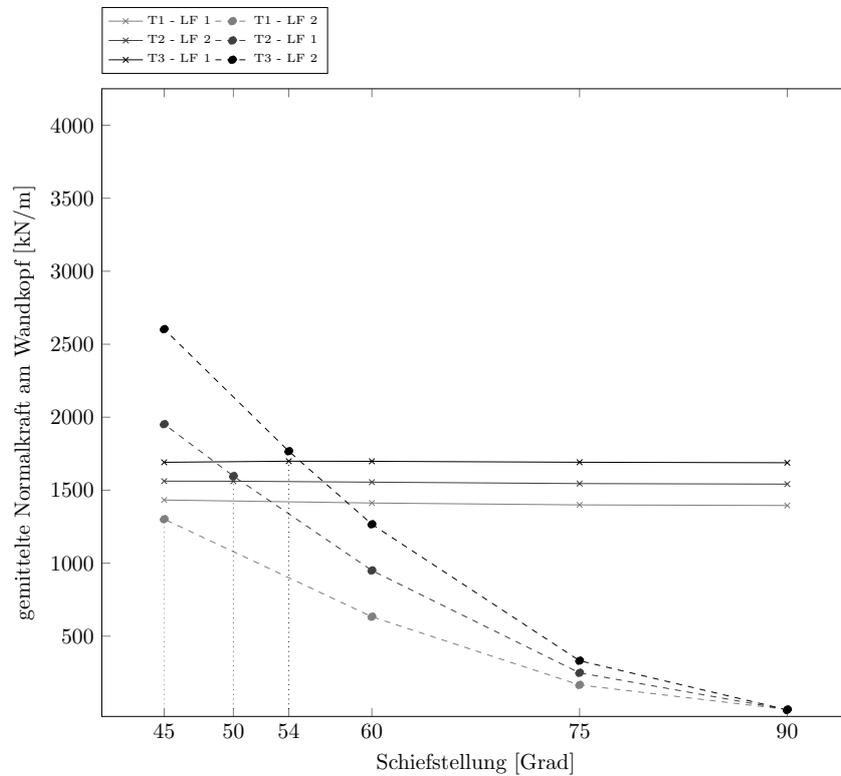


Abbildung 4.9: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 2

Abbildung 4.9 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 2. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 49° und T3 ab 54° notwendig ist.

Bei einer Temperatureinwirkung T1 ist ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung für die Bemessung zielführender. Die Zwangskraft wird dadurch nicht überschätzt.

Modell 3

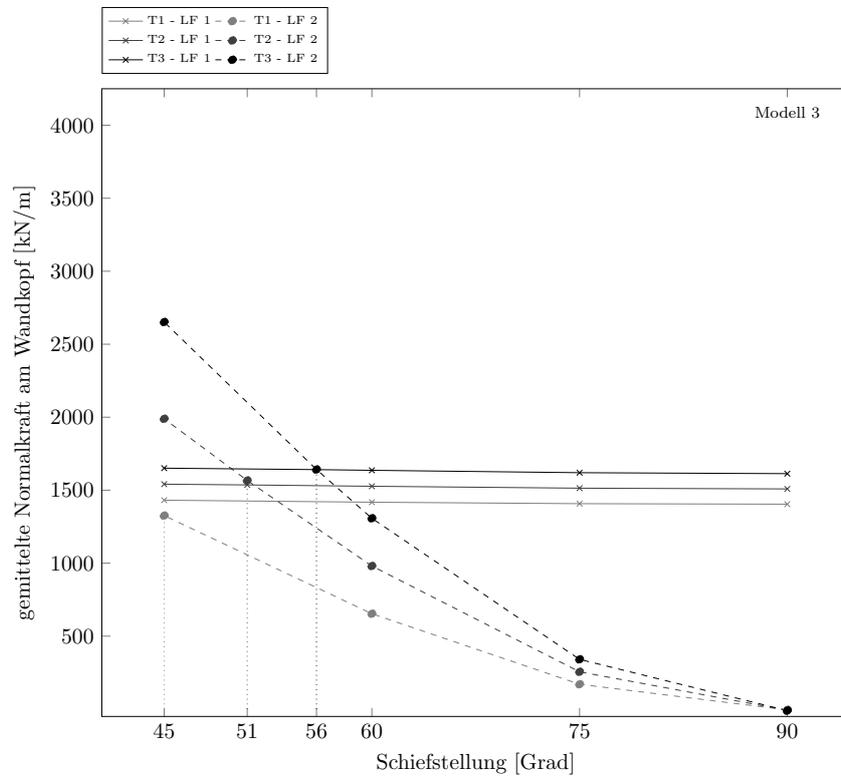


Abbildung 4.10: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 3

Abbildung 4.10 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 3. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 51° und T3 ab 56° notwendig ist.

Eine Betrachtung des Temperaturansatzes nur in Längsrichtung ist bei einer geringer Temperatureinwirkung T1 ausreichend.

Modell 4

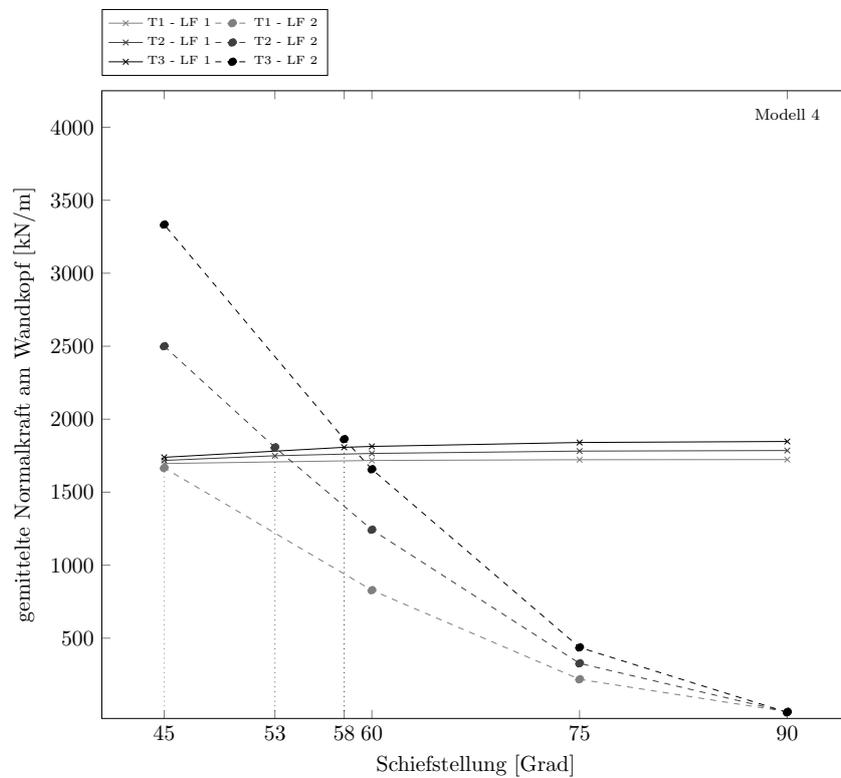


Abbildung 4.11: Temperaturschnittpunkte Grundsystem 2 - Modell 4

Abbildung 4.11 zeigt die Entscheidungshilfe für den Temperaturansatz für das Modell 4. Es wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz der Temperatur in Längs- und Querrichtung nur bei zunehmender Temperatureinwirkung T2 ab 53° und T3 ab 58° notwendig ist.

Für die Temperatur T1 ist der Schnittpunkt bei einer Schiefe im Grundriss von 45° ersichtlich. Die gemittelten Zwangkräfte sind für LF 1 und LF 2 nahezu ident. Es können also beide Temperaturansätze angesetzt werden, siehe Tabelle 4.3.

Unabhängig von den Temperaturgrößen ist weiters zu erkennen, dass sich die resultierenden Zwangkräfte infolge des Temperaturansatzes in Längs- und Querrichtung (LF1) kaum unterscheiden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse aus den obigen Diagrammen 4.8 - 4.11 tabellarisch dargestellt.

	Winkelschnittpunkt	LF 1	LF 2
Modell	[°]	[kN/m]	[kN/m]
Temperatur T1			
M1	-	1084.3324	947.3678
M2	-	1432.8270	1301.4997
M3	-	1325.9569	1325.9569
M4	-	1696.2277	1666.5460
Temperatur T2			
M1	49	1211.7523	1219.6965
M2	50	1561.4552	1596.6918
M3	51	1536.0755	1566.5750
M4	53	1749.5138	1806.8285
Temperatur T3			
M1	53	1326.4394	1365.2111
M2	54	1698.5216	1767.0005
M3	56	1640.9142	1641.6050
M4	58	1807.3782	1863.2781

Tabelle 4.6: Schnittpunkte für den Ansatz der Temperatureinwirkung Grundsystem 2

4.2 Interpretation der Temperaturansätze

In diesem Abschnitt erfolgt die Analyse der Auswirkungen der variablen Parameter auf die Zwangskraft und den darauf basierenden Temperaturansatz.

4.2.1 Einfluss der Temperatur

Je größer die angesetzte Bauteiltemperatur gewählt wird, desto früher ist ein kombinierter Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung erforderlich. Eine Betrachtung des Temperaturansatzes nur in Längsrichtung ist bei einer geringer Temperatureinwirkung T1 ausreichend.

4.2.2 Einfluss der Schlankheit

Es zeigt sich, dass durch die höhere Schlankheit der Überbauplatte, wie erwartet, geringere Zwangskräfte auftreten. Wie ein Vergleich zwischen Grundsystem 1 und 2 dargelegt, können weiters geringfügige Abweichungen bezüglich des Winkelschnittpunktes und der Erfordernis eines Temperaturansatzes in Längs- und Querrichtung aufgezeigt werden (-1° bis 2°). Für das Grundsystem 1 konnten höhere Zwangkräfte und Zwangkraftverläufe ermittelt werden. Zurückzuführen ist die höhere Zwangskraft auf die höhere Steifigkeit des Systems durch die massigere Überbauplatte.

Ein tabellarischer Vergleich der Winkelschnittpunkte aus den Tabellen 4.4 und 4.6 ist nachfolgend dargestellt.

Tabelle 4.7: Vergleich Schnittpunkte für die Entscheidungshilfe zum Ansatz der Temperatureinwirkung

Winkelschnittpunkt [°]		
Modell	ϕ $\lambda = 20$	ϕ $\lambda = 15$
Temperatur T1		
M1	-	-
M2	-	45
M3	-	-
M4	-	45
Temperatur T2		
M1	49	50
M2	50	51
M3	51	52
M4	53	54
Temperatur T3		
M1	53	55
M2	54	56
M3	56	57
M4	58	59

4.2.3 Einfluss der Geometrie

Weiters stellen die Geometrieverhältnisse eine entscheidende Rolle bei der Wahl des Temperaturansatzes dar. Bei zunehmender Brückenbreite ist ersichtlich, dass die Zwangskraft bei gleichbleibender Länge bedeutend ansteigt. Das Verhältnis der Bauwerkklänge zur orthogonalen Bauwerksbreite l/b_w ist folglich ein zusätzlicher Einflussfaktor für die resultierende Zwangskraft. Ebenfalls ein Vergleich zwischen Modell 1 und 2 und zwischen Modell 3 und 4 verdeutlicht, dass die Überbaulänge bei schiefen Grundrissen einen geringeren Einfluss auf die Auswirkung der Zwangskraft als die Überbaubreite hat. Vor allem ein Vergleich zwischen Modell 2 und 3 lässt schließen, dass ein l/b_w Verhältnis von 1 (Abmessungen von 20/20m) und l/b_w von 2 (30/15m) beinahe identische Zwangspannungen resultieren (siehe Tabelle 4.4 und 4.6).

Weiters ist ersichtlich, dass die Zwangkraftentwicklung bei schiefen Grundrissen mit großen Geometrien (M4-Überbaulänge und -breiten von 30m) nicht mehr ausschließlich von der Temperaturgröße abhängt. Die resultierende Zwangskraft und die Zwangkraftverläufe zufolge LF1 weichen bei einem Vergleich der Temperaturbeanspruchung T1, T2, T3 nur geringfügig ab. Vor allem bei einer Schiefe von 45 ° sind die Zwangkräfte fast ident. Dieser Umstand lässt darauf schließen, dass bei großen Geometrien der maßgebende Einfluss die Geometrie und nicht die Temperatureinwirkung an sich darstellt.

Unabhängig des Modells können folgende Temperaturansätze für die jeweiligen Temperaturen genannt werden:

- Eine Betrachtung des Temperaturansatzes nur in Längsrichtung ist bei einer geringer Temperatureinwirkung T1 zielführend.
- Die Temperatur T2 erfordert einen Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung ab einer Schiefstellung von < 55 . Abhängig ist der genaue Schnittpunkt von der Geometrie.
- Die Temperatur T2 erfordert einen Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung ab einer Schiefstellung von < 59 . Abhängig ist der genaue Schnittpunkt auch von der Geometrie.

Zusammenfassend kann für die bisher untersuchten Modellvariationen interpretiert werden, dass der Schnittpunkt für den Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung immer von Temperaturgröße, Geometrie und Schlankheit der Bauteile abhängt. Ein pauschaler Winkel und Schnittpunkt, ab dem ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung nicht mehr zu einer Überschätzung der Zwangskraft führt, kann nicht genannt werden. Die bestimmenden Einflussgrößen stellen die Geometrie, Schlankheit des Überbaus und Temperatur dar. Bei zunehmender Überbauplattenbreite und Schiefstellung im Grundriss erhöht sich folglich auch die Beanspruchung der Querrichtung. Bei einer geringen

Temperatureinwirkung T1 und kleinen Geometrien ist ein Temperaturansatz in Längsrichtung für die Bemessung zielführend und die Zwangskraft wird dadurch nicht überschätzt. Nur bei Geometrien über 30 m Bauwerkslänge und 30 m Widerlagerbreite sollte die Temperatur gekoppelt werden. Die Temperatur T2 ermöglicht eine Entkoppelung der Temperatur und somit einen Temperaturansatz nur in Längsrichtung bis $\phi < 54^\circ$. Bei kleinen Modellen (M1) ist spätestens ab $\phi < 49^\circ$ ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung (x- und y-Richtung) anzusetzen. Bei einer Temperatur T3 ist eine Entkoppelung der Temperatur bis $\phi = 60^\circ$ möglich. Unter Berücksichtigung der Geometrie ist spätestens für kleine Modellgeometrien ein gekoppelter Ansatz ab $\phi < 53^\circ$ erforderlich.

Infolge einer genauen Betrachtung der aufgetragenen Temperatureinwirkung und die Auswirkungen auf die Zwangskraft lassen sich nun folgende Erkenntnisse ableiten: Der Zusammenhang zwischen Zwangkraftentwicklung und Temperaturgröße kann durch einen linearen Zusammenhang beschrieben werden. Für die Verständlichkeit werden die nachfolgenden Temperaturwerte neben den Temperaturen hinzugefügt (Überbau/Widerlager). Für die Lastfälle dTN in x-Richtung auf den Überbau und die Widerlager (LF 2) und dTN in x- und y-Richtung auf den Überbau (LF 4) gilt, dass eine Erhöhung der Temperatur von T1 ($20^\circ/10^\circ$) auf T2 ($30^\circ/20^\circ$) eine Erhöhung der Zwangskraft um 50% und eine weitere Steigung auf die Temperatur T3 ($40^\circ/30^\circ$) eine Vergrößerung um das Doppelte, also 100% bezogen auf Temperatur T1, verursacht. Bei einem gekoppelten Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung (LF 1) ist zwar ein linearer Anstieg der resultierenden Temperatur und Zwangskraft zu erkennen, die Zwangskraft vergrößert sich bei der Temperatur T2 ($30^\circ/20^\circ$) um 7-10% und bei der Temperatur T3 ($40^\circ/30^\circ$) 14-20%. Eine pauschale Erhöhung der Zwangskraft kann hier für die Modelle nicht mehr genannt werden. Weiters ist ersichtlich, dass obwohl die Differenz der Temperatur zwischen Widerlager und Überbau gleich bleibt, der absolute Wert der Temperatur einen Einfluss auf die Zwangskraft hat. Die Schiefwinkeligkeit beeinflusst außerdem die Zwangbeanspruchung und es kann deshalb ein nichtlinearer Einfluss durch die Schiefe im Grundriss nachgesagt werden.

4.2.4 Einfluss der Bettungsmoduln

Dieses Unterkapitel behandelt die Auswirkung des Bettungsmoduls auf die Zwangskraft zufolge Temperatur. Nach Überlegungen bezüglich der Interpretation der in Abschnitt 4.1 gefunden Ergebnisse bezüglich des Temperaturansatzes, wurde weiters entschieden, zusätzlich die Auswirkung der Bodensteifigkeit auf den Temperaturansatz zu untersuchen. Durch die Annahme unterschiedlicher Gründungssteifigkeiten wird versucht, die Auswirkung der Bettung auf die Zwangskraft und auf den Temperaturansatz einer Flachgründung abzuklären.

Für diese Variantenstudie werden die Vertikalfedersteifigkeit c_h und die Horizontalfedersteifigkeit $c_h = \frac{c_v}{2}$ wie folgt laut der nachfolgenden Tabelle angenommen:

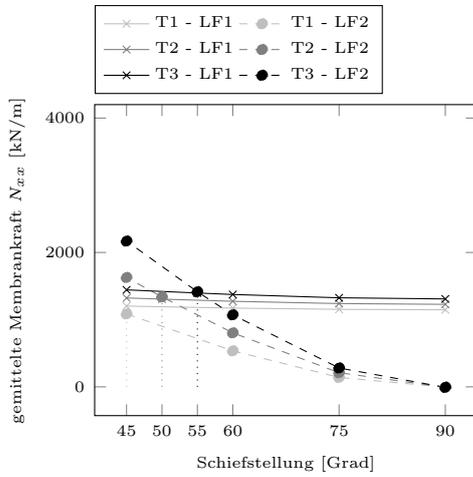
Tabelle 4.8: Variation der Bettungsmoduln

Bettungsmodul	Federsteifigkeit	Federsteifigkeit
Nr.	vertikal $[\frac{kN}{m^3}]$	horizontal $[\frac{kN}{m^3}]$
B1	30000	15000
B2	14000	7000
B3	46000	23000

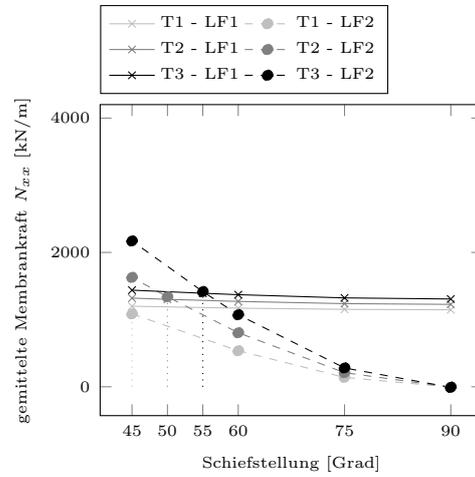
Die in Tabelle 4.8 ersichtlichen Bettungssteifigkeiten werden ab diesem Zeitpunkt nur mehr mit B1, B2 und B3 referenziert. Die drei Varianten unterscheiden sich im Betrag jeweils um $\Delta_c = 16000 [\frac{kN}{m^3}]$. Die Bettungssteifigkeit B1 stellt hierbei das Grundmodell dar, auf das sich die in Abschnitt 4.1 abgebildeten Ergebnisse dieser Arbeit beziehen. Die beiden anderen Bettungssteifigkeiten werden nur in diesem Unterkapitel verwendet, alle anderen Ergebnisse unterliegen der Bettungssteifigkeit B1.

B2 ist an die bisherigen Untersuchungen von [12] angelehnt und wurde für die Vergleichbarkeit mit den selben Federsteifigkeiten übernommen. Um auch die Auswirkung einer höherer Bettungssteifigkeit zu untersuchen, wird Variante B3 untersucht.

Modell 1



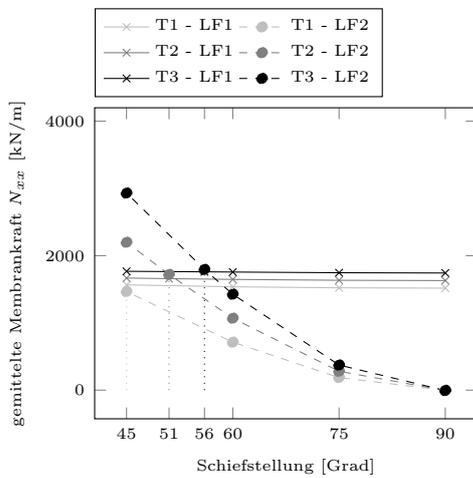
(a) Temperaturansatz zufolge B2



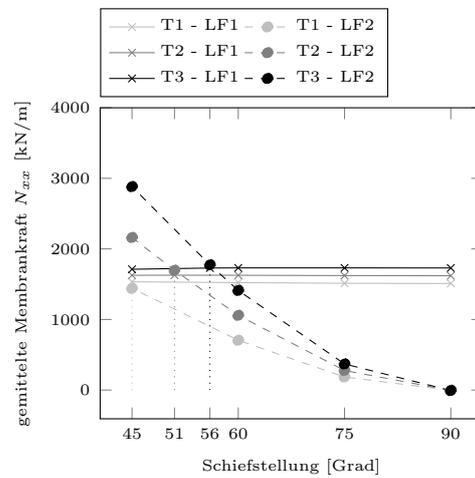
(b) Temperaturansatz zufolge B3

Abbildung 4.12: Variation der Bettungsmoduln Modell 1

Modell 2



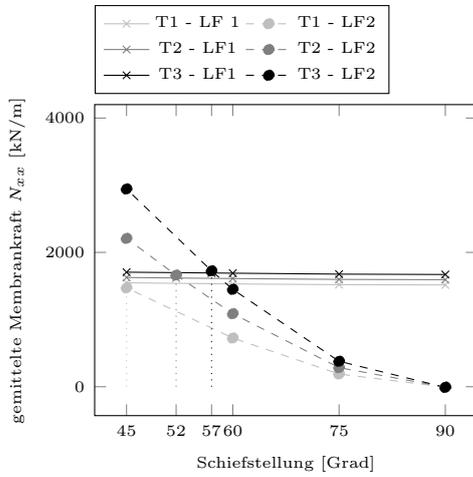
(a) Temperaturansatz zufolge B2



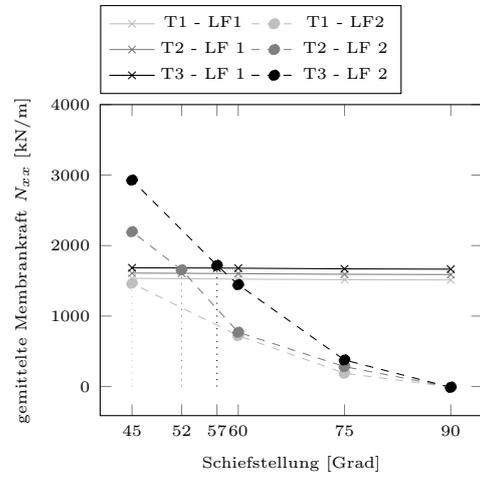
(b) Temperaturansatz zufolge B3

Abbildung 4.13: Variation der Bettungsmoduln Modell 2

Modell 3



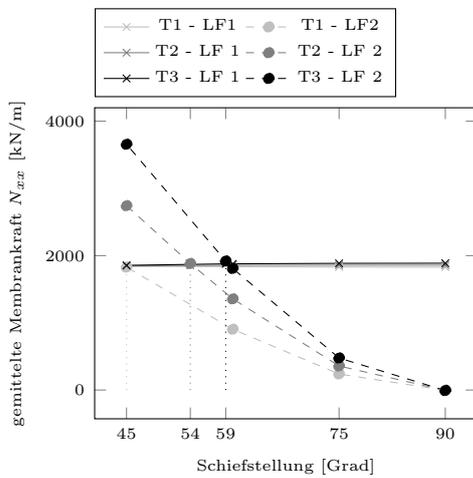
(a) Bettungsmodulvariante - B2



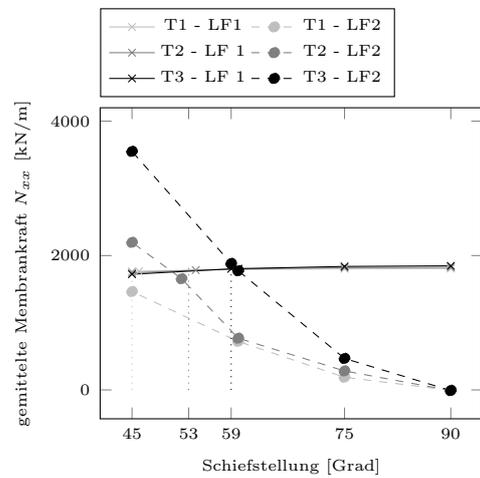
(b) Temperaturansatz zufolge B3

Abbildung 4.14: Variation der Bettungsmoduln Modell 3

Modell 4



(a) Bettungsmodulvariante - B2



(b) Bettungsmodulvariante - B3

Abbildung 4.15: Variation der Bettungsmoduln Modell 4

Interpretation

Abbildungen 4.12 bis 4.15 zeigen, dass die Auswirkung der Bettungsteifigkeit praktisch keinen Einfluss auf den Schnittpunkt respektive den dadurch resultierenden Winkel ergibt. Es ist zu erkennen, dass eine Erhöhung oder Verringerung der Bettungsteifigkeit quasi keinen Einfluss auf die gemittelten Zwangnormalkraft in der Rahmenecke der Widerlagerwand ergibt. Die Schnittpunkte aus Tabelle 4.7 im vorherigen Abschnitt können daher übernommen werden.

Außerdem ist festzustellen, dass die Zwangkraftentwicklung und die Steigerung der Bettungsteifigkeit nicht linear anzunehmen ist. Die Entwicklung der Zwangkraft ist trotz gleichmäßiger Steigerung der Steifigkeit von $\Delta_c = 16000 \left[\frac{kN}{m^3} \right]$ nicht proportional anzunehmen. Es zeigen sich bei geringeren Bettungsmoduln vernachlässigbar größere Zwangbeanspruchungen, welche praktisch nicht möglich sind. Diese geringen Abweichungen sind modellbedingt zurückzuführen und zu vernachlässigen.

5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau

Das folgende Kapitel stellt Auswirkungen des Temperaturansatzes auf die Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau dar, um den Einfluss der einzelnen Temperaturlastfälle zu verdeutlichen. In Abschnitt 5.2 folgt ein Vergleich der Temperaturlastfälle und der Auswirkung der Lastfälle auf das Gesamtsystem durch die Verformungsfiguren. Die normativen Regelungen [3], [11] und [18] sehen dabei einen kombinierten Temperaturansatz auf den Rahmen (Überbau und Widerlagern) vor. Der Temperaturunterschied zwischen Überbauplatte und Widerlagerwand ΔT von 10° ist ebenfalls zu berücksichtigen. Um jedoch die Auswirkungen auf die Zwangkraft und auf die Verformungsfigur des Gesamtsystems zu untersuchen, werden die Lastfälle 1, 2 und 3 mit lediglich einer konstanten Temperatur auf Überbau und Widerlager mit den Lastfälle 4, 5 und 6 mit einer Temperatureinwirkung nur auf den Überbau verglichen und interpretiert. Im Zuge der Untersuchung werden nur qualitative Vergleiche getätigt. Die resultierenden Zwangsschnittgrößen durch die Temperatur T_1 werden über die normierte Widerlagerbreite dargestellt. Um Aufschluss über das Verhalten der Zwangbeanspruchungen unter Berücksichtigung verschiedener Temperaturlastfälle auf verschiedenen Bauteilen zu geben, wird eine Analyse der Zwangkraft bei zunehmender Schiefstellung durchgeführt. Durch die Variation der Parameter können die Auswirkung der Geometrie quantitativ interpretiert werden.

Für die Abbildung der Zwangkräfte gelten wiederum die Temperaturen und Temperaturlastfälle, welche in Kapitel 3 in den Tabellen 3.4 und 3.5 dargestellt sind. Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, werden wieder die in der nachfolgenden Tabelle 5.2 abgebildeten Lastfälle auf die vier Modelle aufgebracht und analysiert. Hierfür werden die resultierenden Membrankräfte aus Sofistik herausgelesen und in den nachfolgenden Diagrammen in Abschnitt 5.1 dargestellt. Der Bezugspunkt der Schnittgrößen wird direkt vor dem Rahmeneck entlang der SIR 2-Schnittlinie, sprich dem Übergang von der Überbauplatte zur Widerlagerwand, gewählt. Der SIR 2-Schnitt wurde nur zu Kontrollzwecken gesetzt und für die Auswertung nicht herangezogen.

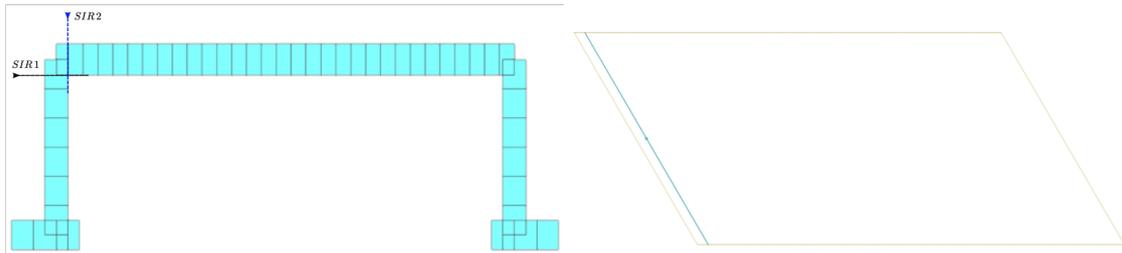


Abbildung 5.1: SIR-Schnitt Überbau

Die Ergebnisse werden durch die Diskretisierung als Faltwerkmodell als Membranschnittgrößen ausgegeben. Die Zwangkräfte werden aus den jeweiligen Elementmittenwerten gebildet. Im Zuge dieser Zwangkraftuntersuchung werden die nachfolgenden Kräfte ausgewertet und in Diagrammen abgebildet:

- Membrankraft parallel zum Schnitt F_{\parallel}
- Membrankraft normal zur Schnittrichtung F_{\perp}

Für die Ermittlung der Zwangkräfte wurde der Schnittpunkt der Kraftermittlung dementsprechend implementiert, sodass die Kräfte immer orthogonal und parallel zur Widerlagerwand abgebildet werden. Da die vorgegebenen Geometrieparameter der Widerlagerwand b_w orthogonal modelliert werden, ergeben sich größere Widerlagerbreiten in den schiefen Grundrissen. Deshalb wurden die Ergebnisse auf normierten Widerlagerbreiten dargestellt, um eine Vergleichbarkeit zu erhalten.

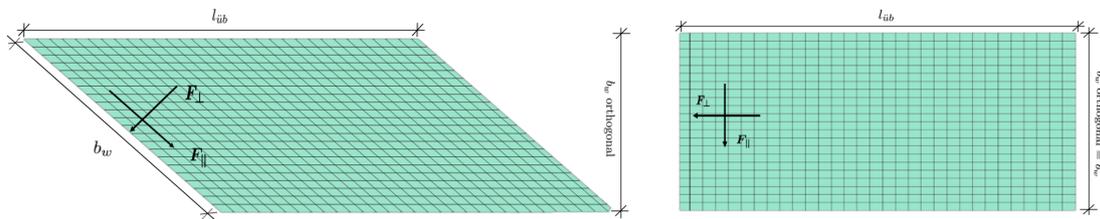


Abbildung 5.2: Kraftermittlung Zwangbeanspruchungen im Überbau

In der nachfolgenden Tabelle sind die variablen Modellparameter nochmal ersichtlich. Zusätzlich wird das Verhältnis Überbauplattenlänge und Widerlagerwandbreite respektive Überbauplattenbreite und Überbaulänge dargestellt. Die Widerlagerwandbreite b_w wird orthogonal auf die Überbaulänge l bezogen abgebildet. Die reale Länge der Widerlagerwandbreite ist eine von der Schiefwinkeligkeit und dessen Winkel abhängigen Größe. Das Verhältnis der Überbaulänge l zur Überbaudicke $d_{üb}$ beträgt $\lambda_{15} = l/h = 15$ und ist

somit abhängig von der Überbaulänge. In der folgenden Tabelle 5.1 sind die variablen Parameter nochmal aufgliedert.

Tabelle 5.1: Variable Bauteilabmessungen

Abmessungen in [m]				
Modell	Überbaulänge l	Widerlagerbreite b_w	Überbaudicke $d_{üb}$	l/b_w -Verhältnis
Modell 1	20.0	10.0	1.33	2
Modell 2	20.0	20.0	1.33	1
Modell 3	30.0	15.0	2	2
Modell 4	30.0	30.0	2	1

Es werden nachfolgende Lastfälle untersucht.

Tabelle 5.2: Übersicht Varianten Grundsystem 1

Grundsystem 1 $\lambda = 15$							
T1	Modell 1		Modell 2		Modell 3		Modell 4
LF	Schiefstellung	LF	Schiefstellung	LF	Schiefstellung	LF	Schiefstellung
LF 1	90,75,60,45	LF 1	90,75,60,45	LF 1	90,75,60,45	LF 1	90,75,60,45
LF 2	90,75,60,45	LF 2	90,75,60,45	LF 2	90,75,60,45	LF 2	90,75,60,45
LF 3	90,75,60,45	LF 3	90,75,60,45	LF 3	90,75,60,45	LF 3	90,75,60,45
LF 4	90,75,60,45	LF 4	90,75,60,45	LF 4	90,75,60,45	LF 4	90,75,60,45
LF 5	90,75,60,45	LF 5	90,75,60,45	LF 5	90,75,60,45	LF 5	90,75,60,45
LF 6	90,75,60,45	LF 6	90,75,60,45	LF 6	90,75,60,45	LF 6	90,75,60,45

Die nachfolgenden Analysen und Interpretation basieren auf den Modellergebnissen des Grundsystems 1 $\lambda = 15$.

Wie schon aus den Untersuchungen in Kapitel 4 ersichtlich, resultieren geringere Zwangkraftbeanspruchungen durch eine Schlankheit $\lambda = 20$ im Grundsystem 2 als im Grundsystem 1 $\lambda = 15$. Da die Schlankheit und die Temperaturgröße (T1, T2, T3) nur eine quantitative Auswirkung auf die Zwangsschnittgrößenverlauf zugrunde liegen, können die nachfolgenden Interpretationen für größere Temperaturen gleichwertig getroffen werden.

Weiters wird nur eine positive Dehnung durch eine positive Temperatureinwirkung (Erwärmung) in den nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt. Durch die Temperatur entsteht in der Widerlagerwand eine Zug- und in der Überbauplatte ein Druck-Zwangspannungen. Eine negative Temperatur (Abkühlung) würde eine Umkehrung der Schnittgrößenvorzeichen verursachen und im Überbau Zugspannungen und im Widerlager Druckspannungen ergeben. Zusätzlich werden die zugehörigen Verformungsfiguren der Modelle 1 und 2 abgebildet, um die Auswirkungen der Zwangbeanspruchung auf das Modell aufzuzeigen.

5.1 Auswirkungen des Temperaturansatzes auf die Zwangkraftbeanspruchung im Überbau

5.1.1 Lastfall 1

Die folgenden Abbildungen 5.4 - 5.7 zeigen die Auswirkung einer konstanten Temperatureinwirkung dTN in x- und y-Richtung des Überbaus und Widerlagers auf die Zwangkraft. Die Abbildungen 5.4a - 5.7a stellen die Zwangkraft normal auf die Widerlagerwand F_{\perp} dar, die Abbildungen 5.4b - 5.7b bilden die Zwangkraft parallel zur Widerlagerwand F_{\parallel} ab.

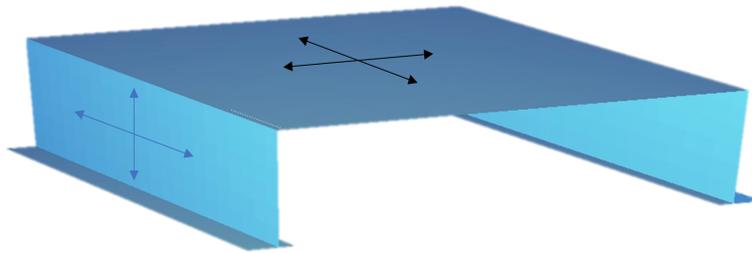


Abbildung 5.3: LF 1 - dTN in x- und y-Richtung

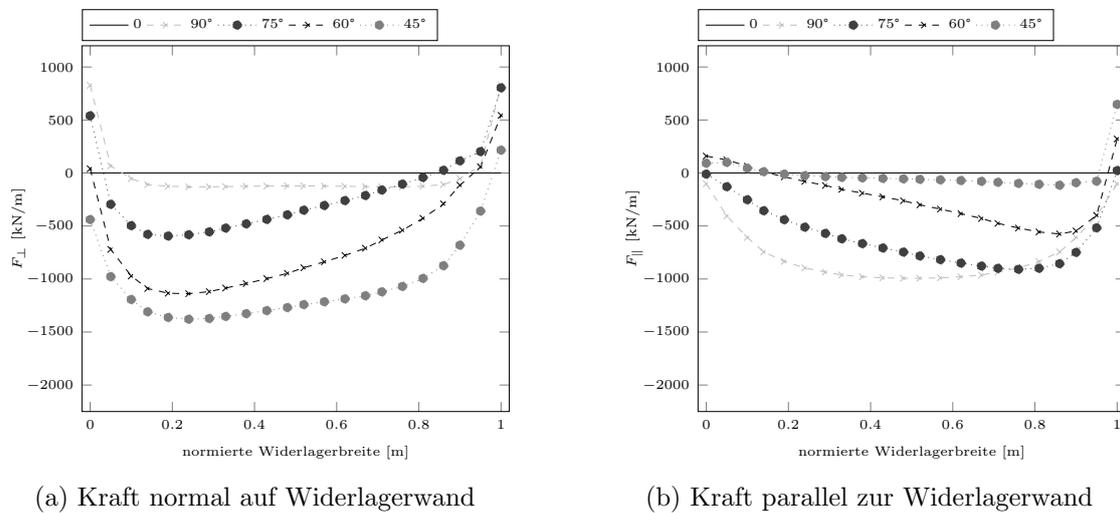
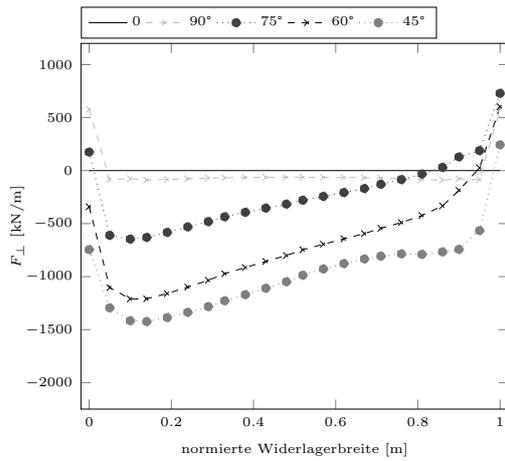
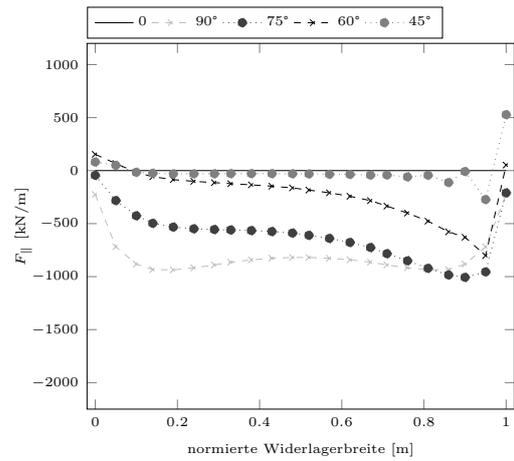


Abbildung 5.4: Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 1

5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau

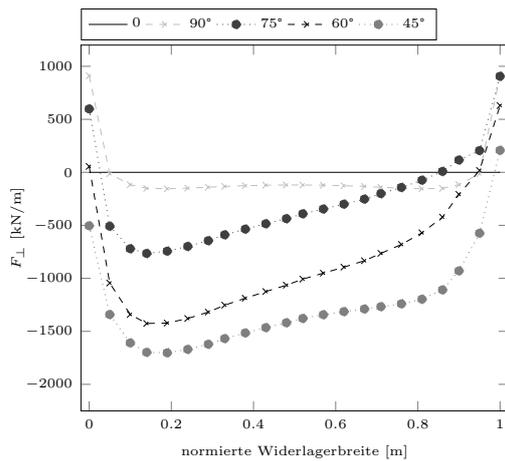


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

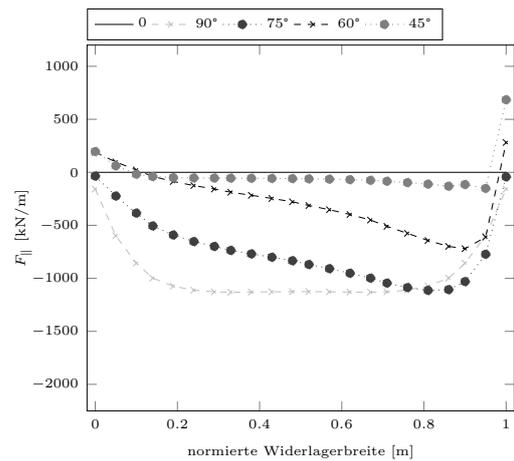


(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.5: Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 1



(a) Kraft normal auf Widerlagerwand



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.6: Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 1

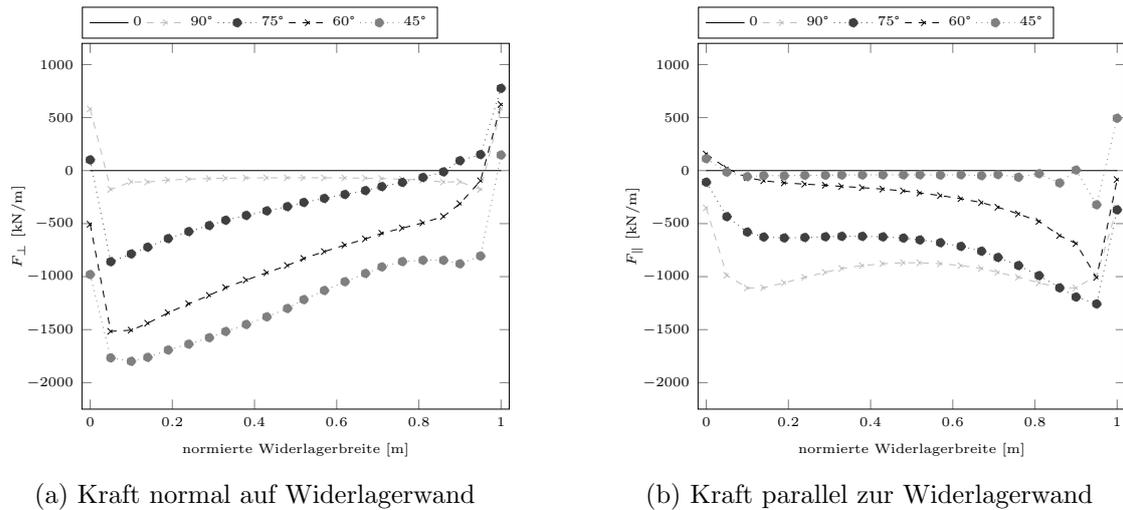


Abbildung 5.7: Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 1

Interpretation Lastfall 1

Anhand der vorherigen Abbildungen können folgende Ergebnisse für die Zwangbeanspruchung durch eine konstante Temperatur in x- und y-Richtung in Überbauplatte und Widerlagerwand dargestellt werden. Es ist ersichtlich, dass die Zwangskraft F_{\perp} mit der Schiefe zunimmt. Eine Verlagerung der maximalen Druckzwangskraft F_{\perp} ist in Richtung des spitzen Winkels in der Überbauplatte zu erkennen. Die maximale Zugzwangskraft des F_{\perp} -Verlaufs ist in der stumpfen Ecke zu erwarten. In Querrichtung wiederum verringert sich die Zwangskraft F_{\parallel} bei zunehmender Schiefstellung. Während bei einer konventionellen Brückengrundriss von 90° noch die größten Druckspannungen zu erwarten sind, vermindern sich diese bis zu einer Schiefe von 45° wieder. In beiden Verläufen sind sich parallel zur zunehmenden Schiefstellung entwickelnde Spannungsspitzen an den Ecken der Überbauplatte im schiefen Grundriss zu erkennen. Während für die Zwangskraft in Längsrichtung zunehmend eine Spannungskonzentration im Bereich der spitzen Ecke (Druck) und an der stumpfen Ecke (Zug) illustriert wird, wird in Querrichtung eine Spannungskonzentration im Bereich der stumpfen Ecke (Zug) wiedergespiegelt.

Verformungsfiguren infolge LF 1

Die folgenden Abbildungen (a)-(h) in Abbildung 5.9 stellen die Verformungsfiguren für den rechteckigen Grundriss (Modell 1 und Modell 3) und den quadratischen Grundriss (Modell 2 und 4) infolge LF 1 dar.

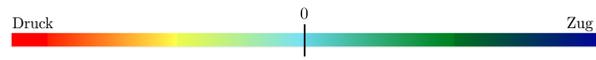
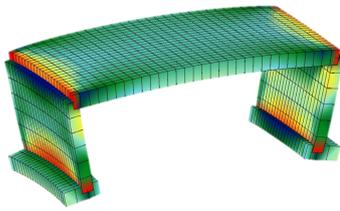
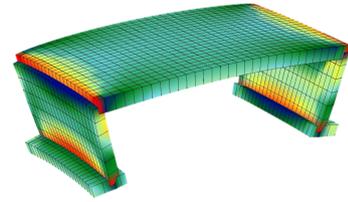


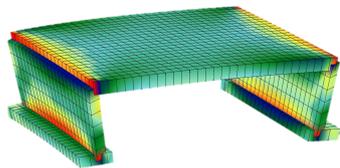
Abbildung 5.8: Farbskala der Spannungen



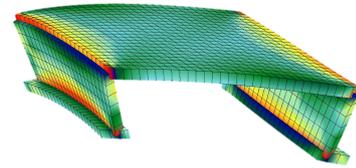
(a) Modell 1 - 90°



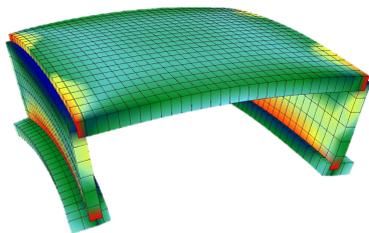
(b) Modell 1 - 75°



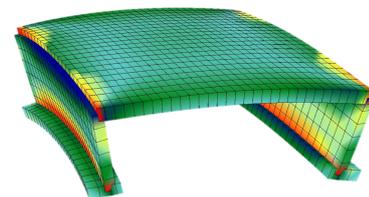
(c) Modell 1 - 60°



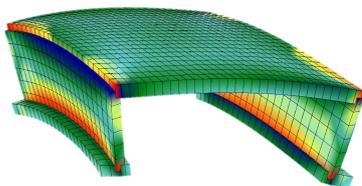
(d) Modell 1 - 45°



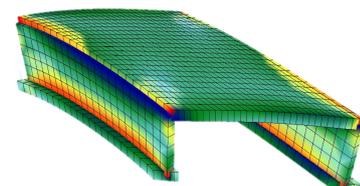
(e) Modell 2 - 90°



(f) Modell 2 - 75°



(g) Modell 2 - 60°



(h) Modell 2 - 45°

Abbildung 5.9: Verformungsfiguren LF 1

5.1.2 Lastfall 2

Die folgenden Abbildungen 5.11 - 5.14 zeigen die Auswirkungen einer konstanten Temperatureinwirkung dTN in x - Richtung des Überbaus und Widerlagers auf die Zwangkraft.

Die Abbildungen 5.11a - 5.14a stellen die Zwangkraft normal auf die Widerlagerwand F_{\perp} dar, Abbildungen 5.11b - 5.14b bilden die Zwangkraft parallel zur Widerlagerwand F_{\parallel} ab.

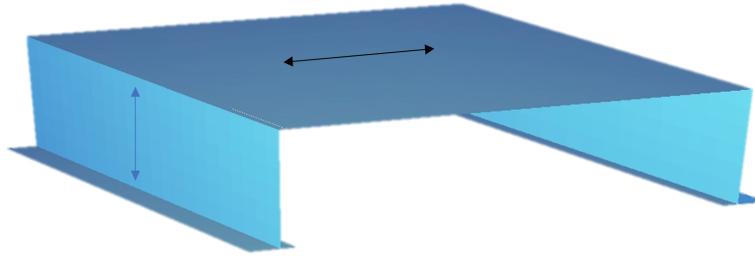
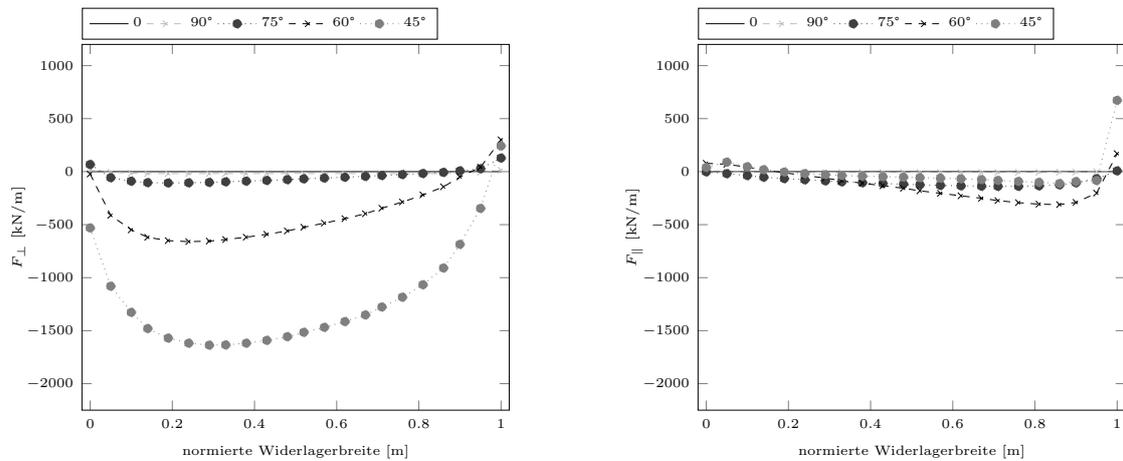


Abbildung 5.10: LF 2 - dTN in x-Richtung

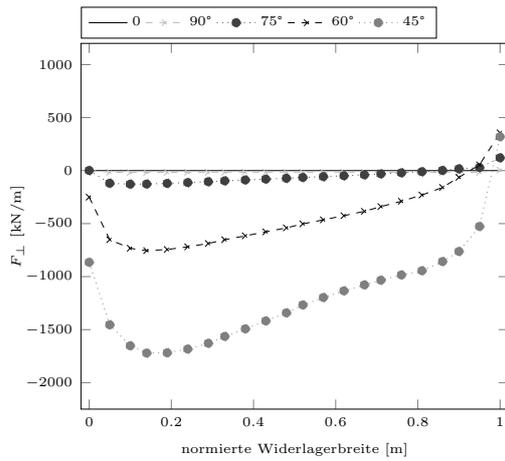


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

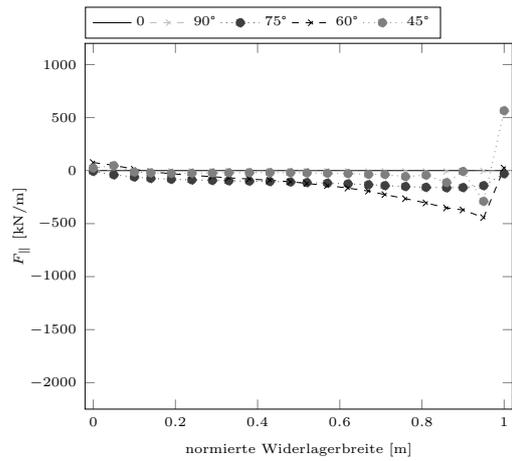
(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.11: Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 2

5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau

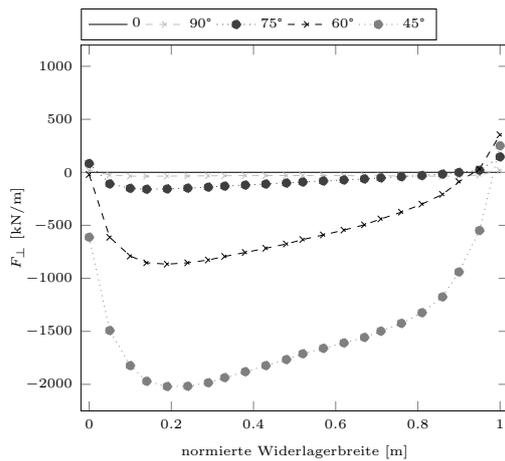


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

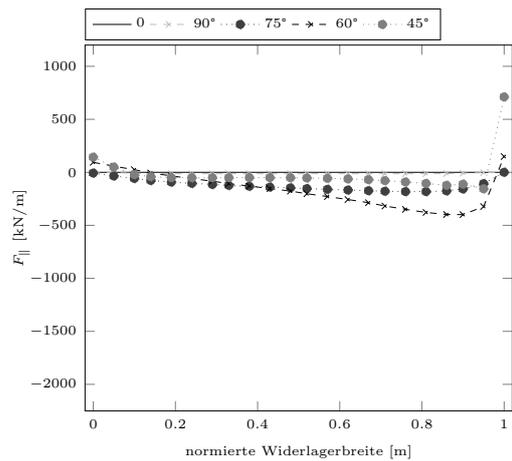


(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.12: Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 2



(a) Kraft normal auf Widerlagerwand



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.13: Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 2

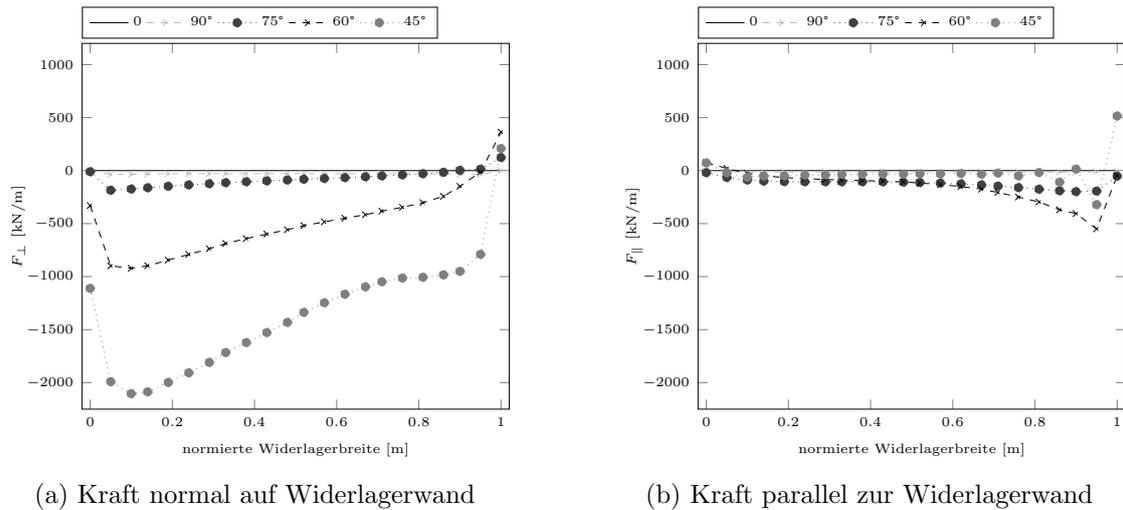


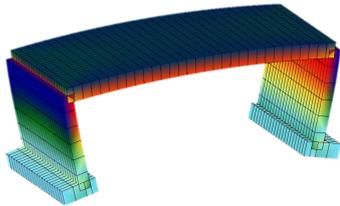
Abbildung 5.14: Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 2

Interpretation Lastfall 2

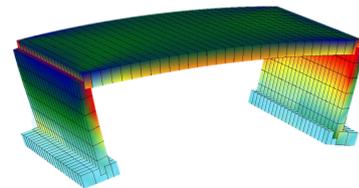
Anhand der vorherigen Abbildungen können folgende Ergebnisse für die Zwangbeanspruchung durch eine konstante Temperatur in x-Richtung auf Überbauplatte und Widerlagerwand dargestellt werden. Es ist ersichtlich, dass die Zwangbeanspruchungen F_{\perp} in der Schiefe zunehmen. Eine Verlagerung der maximalen Druckzwangkraft F_{\perp} ist bei zunehmender Schiefwinkeligkeit in Richtung des spitzen Winkels in der Überbauplatte zu erkennen. Die maximale Zugzwangkraft des F_{\perp} -Verlaufs ist in der stumpfen Ecke zu erwarten. Während bei einem Brückengrundriss ohne Schiefe geringe F_{\parallel} -Zwangspannungen zu erwarten sind, vergrößern sich die Druckspannungen bis zu einer Schiefe von 60° . Anschließend vermindern sich die Druckspannungen bei zunehmender Schiefstellung wieder und resultieren in Spannungskonzentrationen in der stumpfen Ecke der Überbauplatte (Zug). In beiden Fällen sind Spannungsspitzen (Zug) an den Ecken der Überbauplatte im schiefen Grundriss zu erkennen. Während für die Zwangkraft in Längsrichtung eine Spannungskonzentration im Bereich der spitzen Ecke illustriert wird, wird in Querrichtung generell eine Spannungskonzentration im Bereich der Ecken mit Tendenz zur maximalen Spannungskonzentration in Querrichtung in der stumpfen Ecke (Zug) wiedergespiegelt. Vor allem für den F_{\perp} -Verlauf sind sich parallel zur zunehmenden Schiefstellung entwickelnde Spannungsspitzen an den Ecken der Überbauplatte im schiefen Grundriss zu erkennen. Während für die Zwangkraft in Längsrichtung zunehmend eine Spannungskonzentration im Bereich der spitzen Ecke (Druck) und an der stumpfen Ecke (Zug) illustriert wird, ist in Querrichtung F_{\parallel} eine erhöhte Zugspannung im Bereich der stumpfen Ecke (Zug) dargestellt.

Verformungsfiguren infolge LF 2

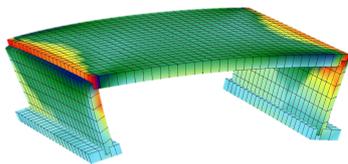
Die folgenden Abbildungen (a)-(h) in Abbildung 5.15 stellen die Verformungsfiguren für den rechteckigen Grundriss (Modell 1 und Modell 3) und den quadratischen Grundriss (Modell 2 und 4) infolge LF 2 dar.



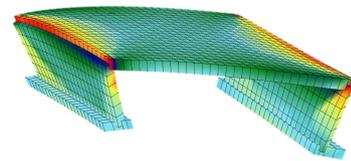
(a) Modell 1 - 90°



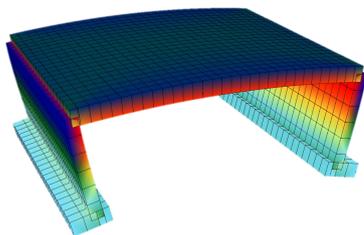
(b) Modell 1 - 75°



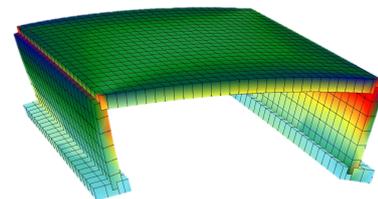
(c) Modell 1 - 60°



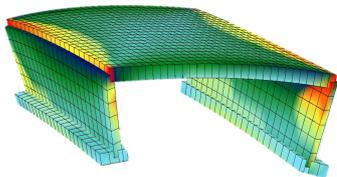
(d) Modell 1 - 45°



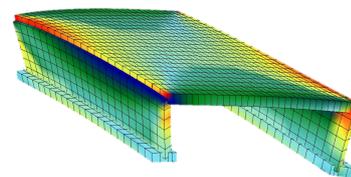
(e) Modell 2 - 90°



(f) Modell 2 - 75°



(g) Modell 2 - 60°



(h) Modell 2 - 45°

Abbildung 5.15: Verformungsfiguren LF 2

5.1.3 Lastfall 3

Die folgenden Abbildungen 5.17 - 5.20 zeigen die Auswirkungen einer konstanter Temperatur dTN in y -Richtung des Überbaus und Widerlagers auf die Zwangkraftentwicklung. Abbildungen 5.17a - 5.17a stellen die Zwangkraft F_{\perp} normal auf die Widerlagerwand dar. Abbildungen 5.17b - 5.20b bilden die Zwangkraft F_{\parallel} parallel zur Widerlagerwand ab.

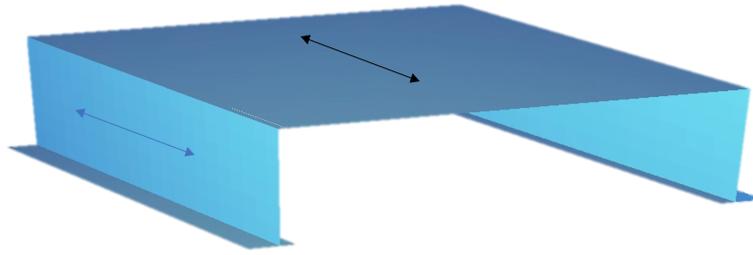


Abbildung 5.16: LF 3 - dTN in y -Richtung

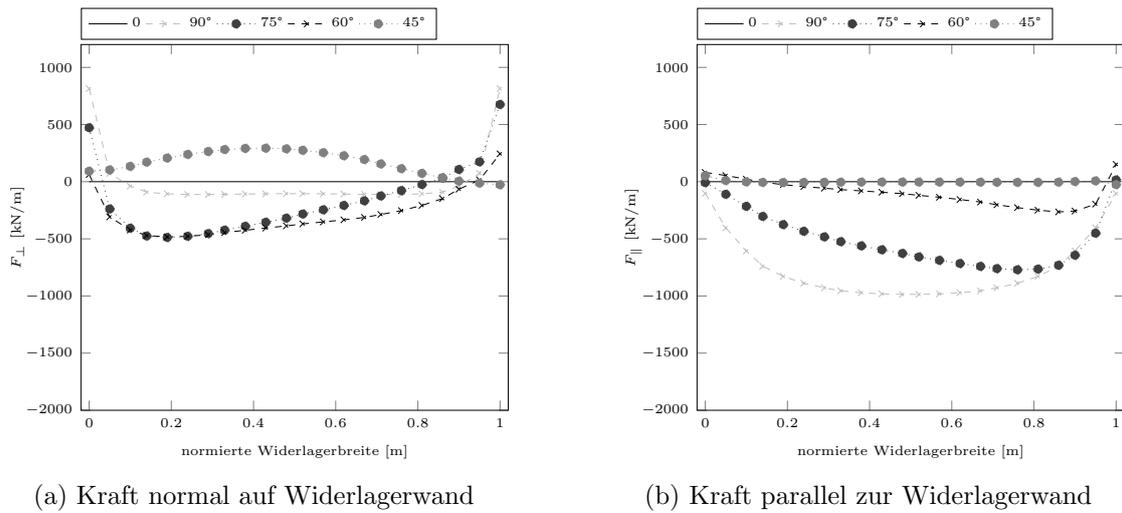
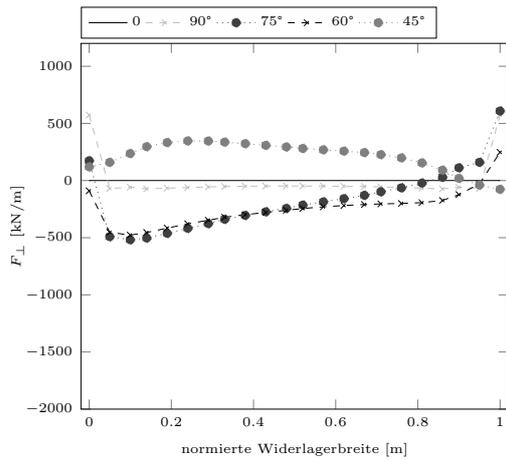
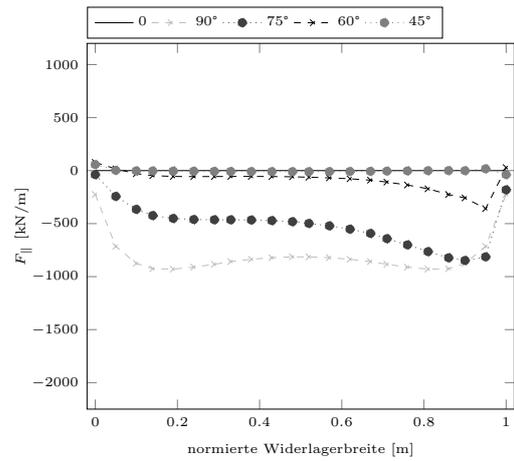


Abbildung 5.17: Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 3

5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau

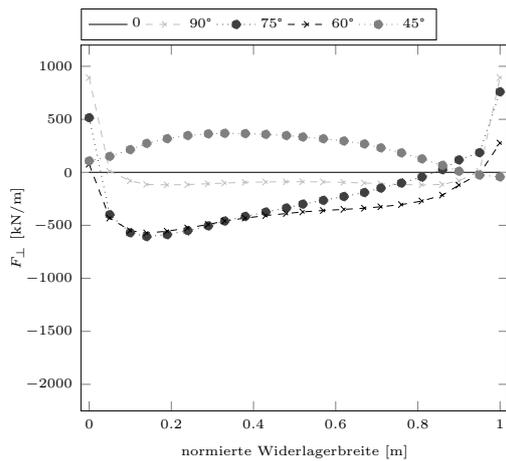


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

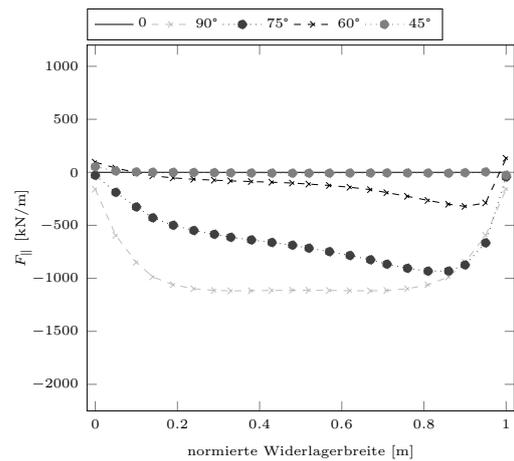


(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.18: Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 3



(a) Kraft normal auf Widerlagerwand



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.19: Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 3

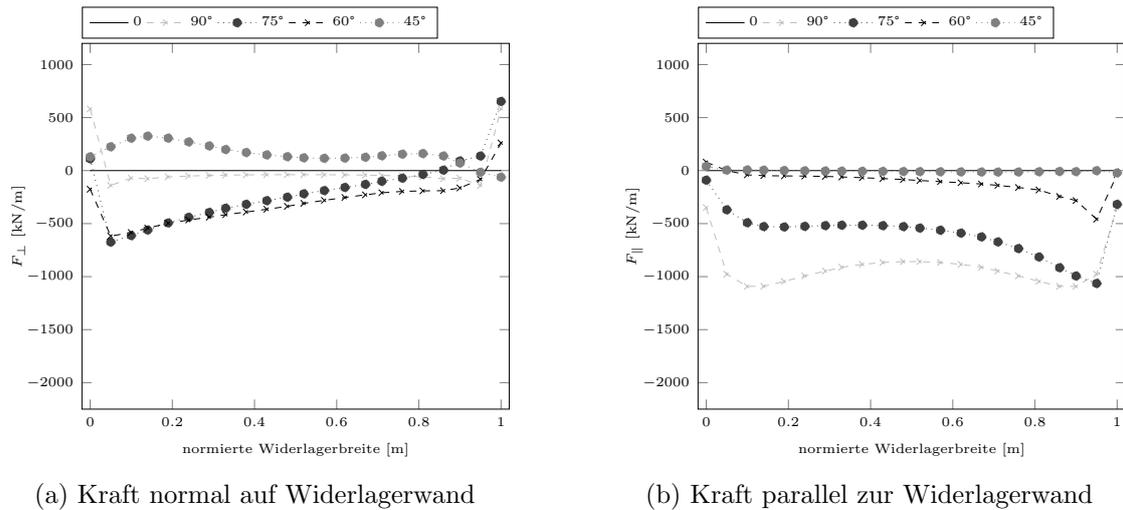


Abbildung 5.20: Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 3

Interpretation Lastfall 3

Anhand der vorherigen Abbildungen können folgende Ergebnisse für die Zwangbeanspruchung durch eine konstante Temperatur in y-Richtung auf der Überbauplatte und den Widerlagern dargestellt werden.

Allgemein ist anzumerken, dass durch die erhöhte Steifigkeit der Widerlagerwand in Querrichtung Zwangbeanspruchungen entstehen. Bestätigt wird dies durch die F_{\parallel} in der gerader Grundrissstellung. Es zeigt sich aber weiters, dass die Zwangkraft mit zunehmender Schiefstellung F_{\parallel} abnimmt. Eine Verringerung der Zwangkraft ist somit bei zunehmender Schiefstellung gegen 0 zu erkennen.

Hingegen erhöht sich die Zwangkraft und die Zwangkraftverläufe der Kraft F_{\perp} . Bei zunehmender Schiefstellung der Brücke bis 60° erhöht sich die Druckspannung. Anschließend vermindern sich die Druckspannungen und resultieren je nach Modellgeometrie ab einer Schiefstellung von 50° in Zugspannungen über die Widerlagerbreite.

Verformungsfiguren infolge LF 3

Die folgenden Abbildungen (a)-(h) in Abbildung 5.22 stellen die Verformungsfiguren für den rechteckigen Grundriss (Modell 1 und Modell 3) und den quadratischen Grundriss (Modell 2 und 4) infolge LF 3 dar.

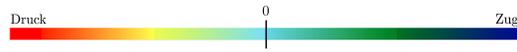


Abbildung 5.21: Farbskala der Spannungen

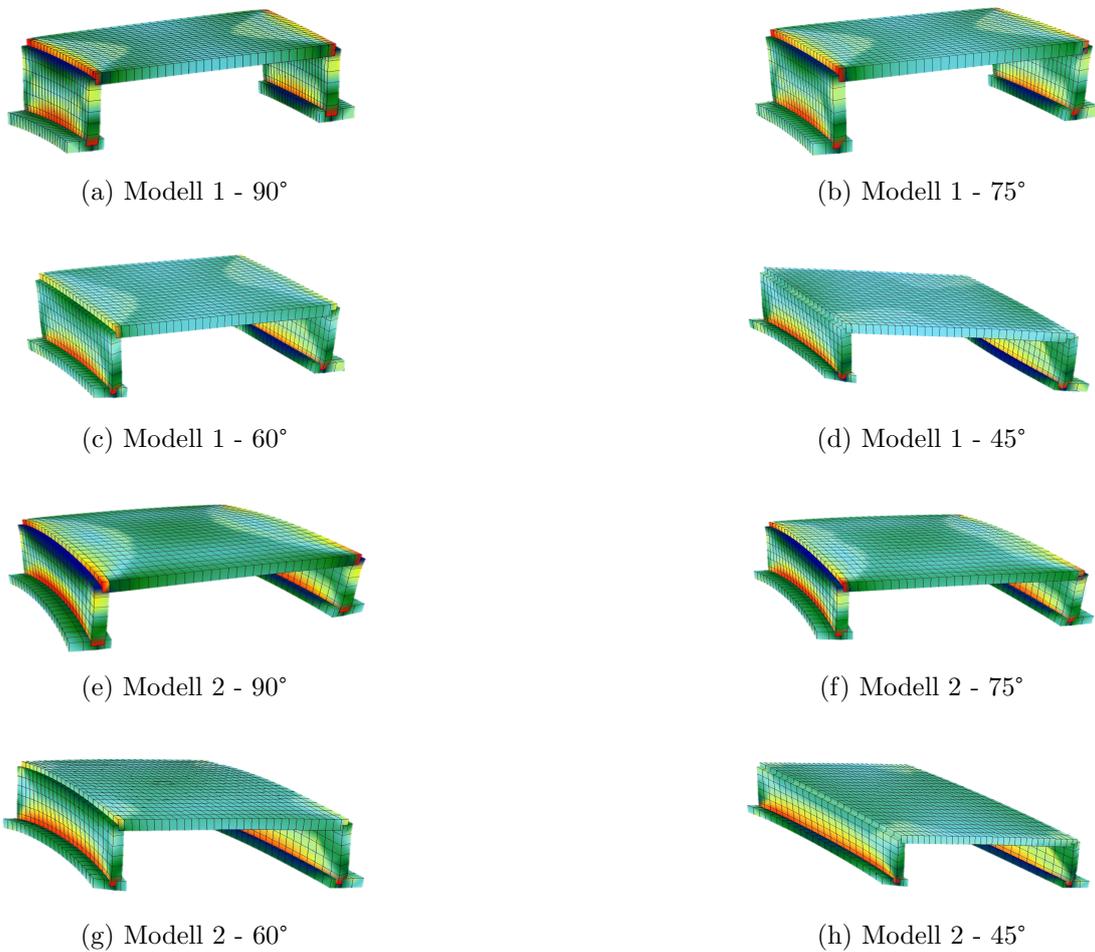


Abbildung 5.22: Verformungsfiguren LF 3

5.1.4 Lastfall 4

Die folgenden Abbildungen 5.24 - 5.27 zeigen die Auswirkung einer alleinigen konstanten Temperaturbelastung dTN in x- und y-Richtung des Überbaus auf die resultierende Zwangkraft.

Abbildungen 5.24a - 5.27a stellen die Zwangkraft normal auf die Widerlagerwand F_{\perp} dar. Abbildungen 5.24b - 5.27b bilden die Zwangkraft parallel zur Widerlagerwand F_{\parallel} ab. Eine generelle Verlagerung des Zwangkraftverlaufes in Richtung der spitzen Ecke der Überbauplatte ist bei zunehmender Schiefwinkeligkeit zu erkennen.

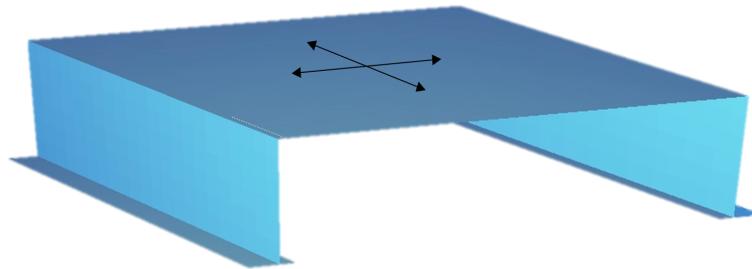


Abbildung 5.23: LF 4 - dTN in x- und y-Richtung

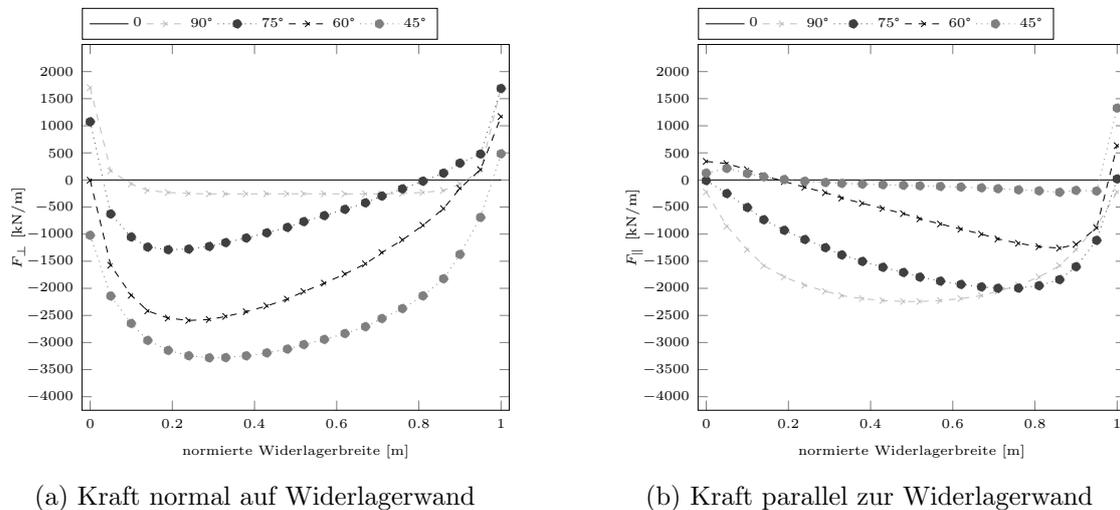
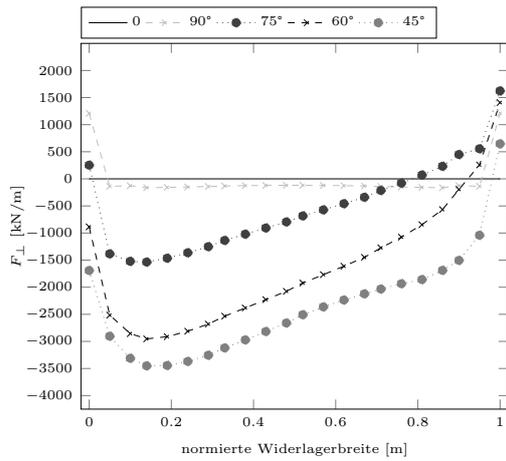
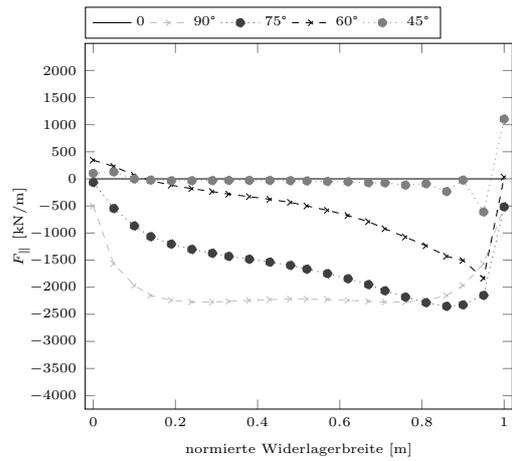


Abbildung 5.24: Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 4

5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau

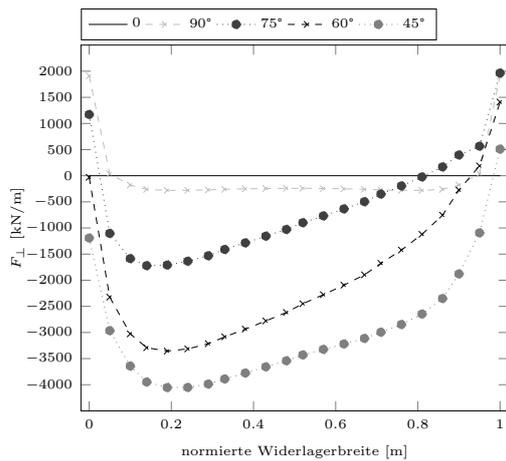


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

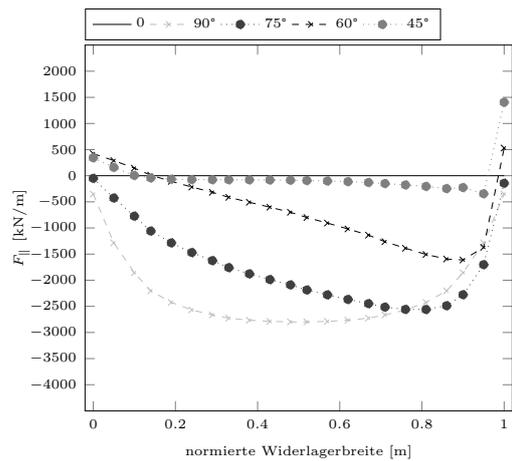


(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.25: Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 4



(a) Kraft normal auf Widerlagerwand



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.26: Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 4

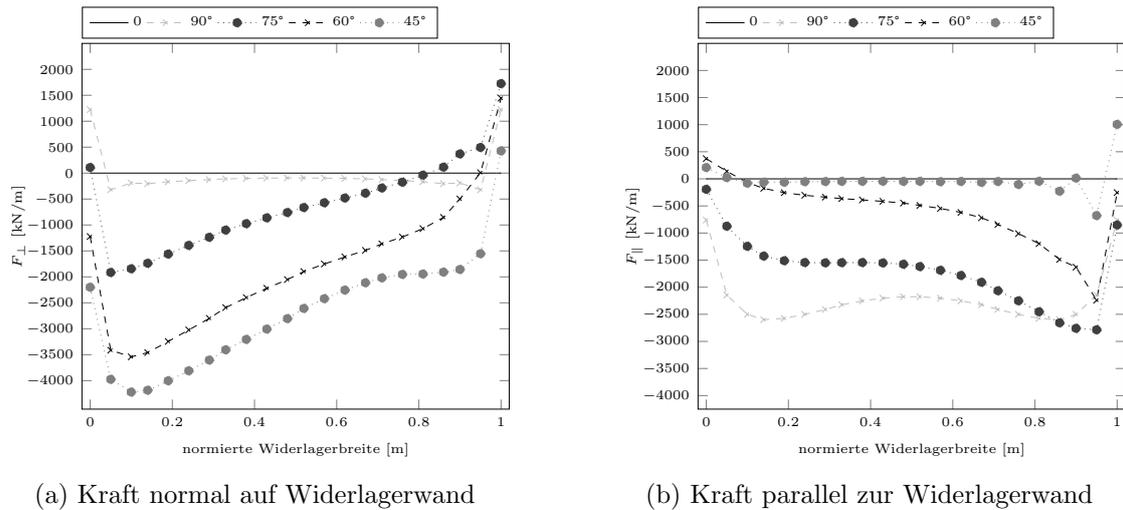


Abbildung 5.27: Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 4

Interpretation Lastfall 4

Anhand der vorherigen Abbildungen können folgende Ergebnisse für die Zwangbeanspruchung durch eine konstante Temperatur in x- und y-Richtung auf der Überbauplatte dargestellt werden.

Bei zunehmender Schiefstellung ist ersichtlich, dass sich die Zwangskraft F_{\perp} erhöht. Eine Verlagerung der maximalen Druckzwangkraft in Längsrichtung F_{\perp} ist in Richtung in des spitzen Winkels der Überbauplatte zu erkennen. Die Zugkräfte in den Ecken der Überbauplatte verringern sich bei erweiterter Schiefstellung. In Querrichtung wiederum verringert sich die Zwangkraft F_{\parallel} bei zunehmender Schiefstellung.

Allgemein ist festzustellen, dass sich parallel zur zunehmenden Schiefstellung Spannungsspitzen an den Ecken der Überbauplatte entwickeln. Während für die Zwangkraft in Längsrichtung zunehmend eine Spannungskonzentration im Bereich der spitzen Ecke (Druck) und an der stumpfen Ecke (Zug) illustriert wird, wird in Querrichtung eine Spannungskonzentration im Bereich der stumpfen Ecke (Zug) wiedergespiegelt.

Verformungsfiguren infolge LF 4

Die folgenden Abbildungen (a)-(h) in Abbildung 5.29 stellen die Verformungsfiguren für den rechteckigen Grundriss (Modell 1 und Modell 3) und den quadratischen Grundriss (Modell 2 und 4) infolge LF 4 dar.

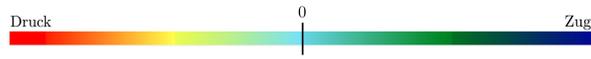


Abbildung 5.28: Farbskala der Spannungen

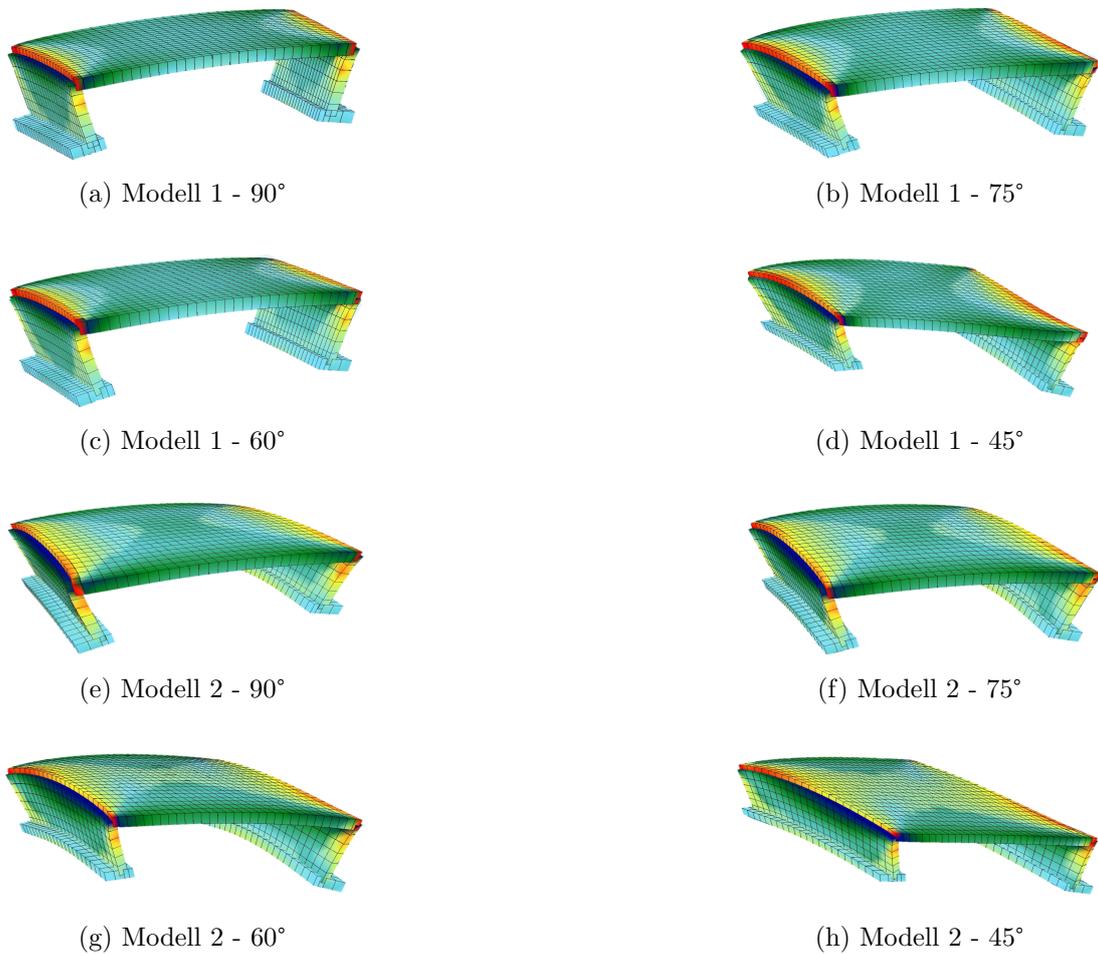


Abbildung 5.29: Verformungsfiguren LF 4

5.1.5 Lastfall 5

Abbildungen 5.31 - 5.34 zeigen die Auswirkung der konstanter Temperatur dTN in x-Richtung des Überbaus.

Die Abbildungen 5.31b - 5.34b bilden die Zwangkraft parallel zur Widerlagerwand ab. Abbildungen 5.31a - 5.34a stellen die Zwangkraft normal auf die Widerlagerwand dar.

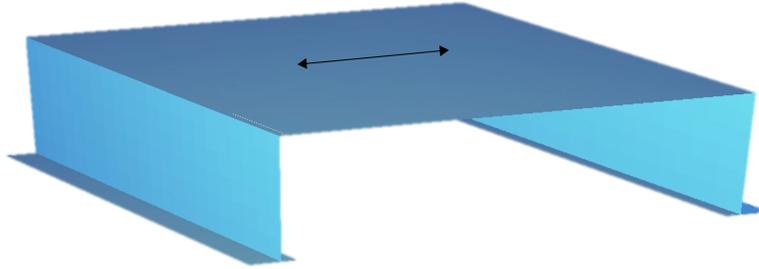


Abbildung 5.30: LF 5 - dTN in x-Richtung

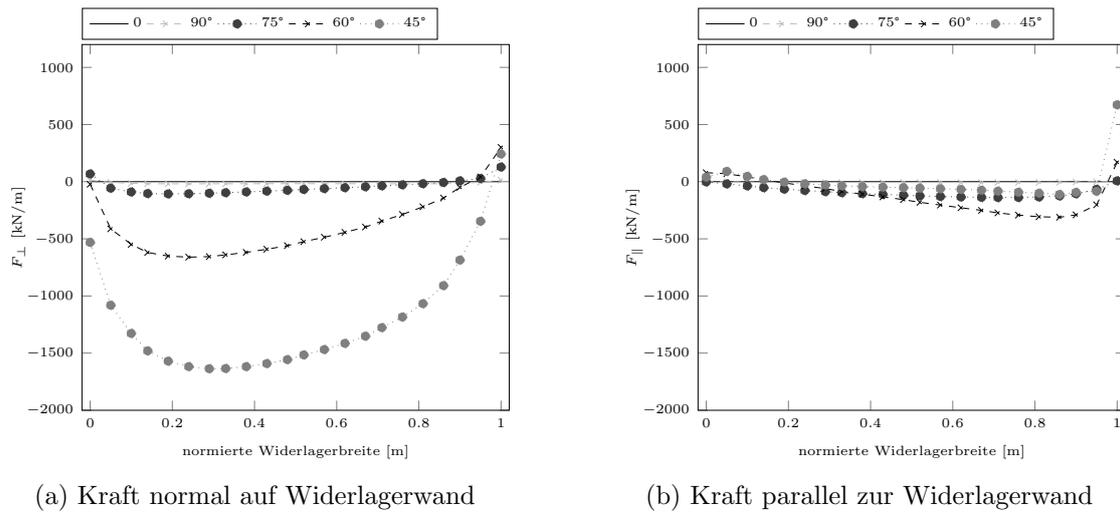
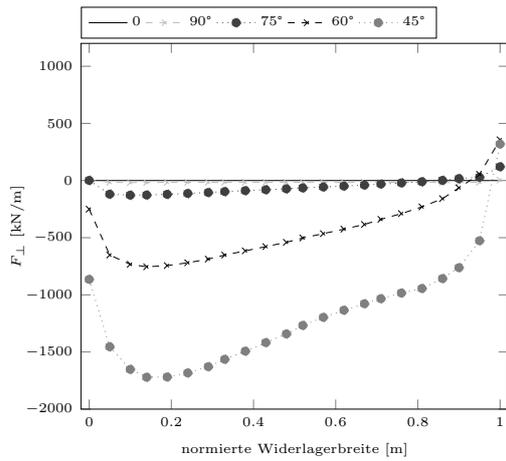
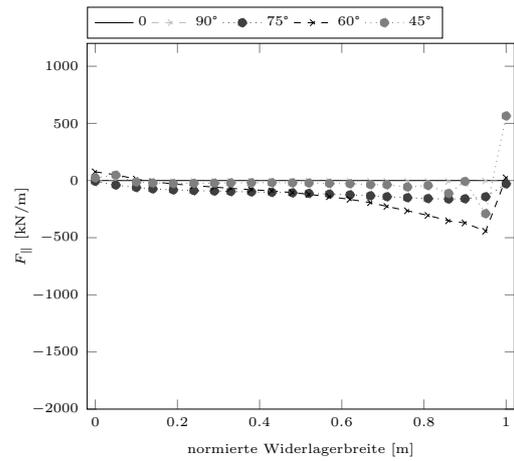


Abbildung 5.31: Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 5

5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau

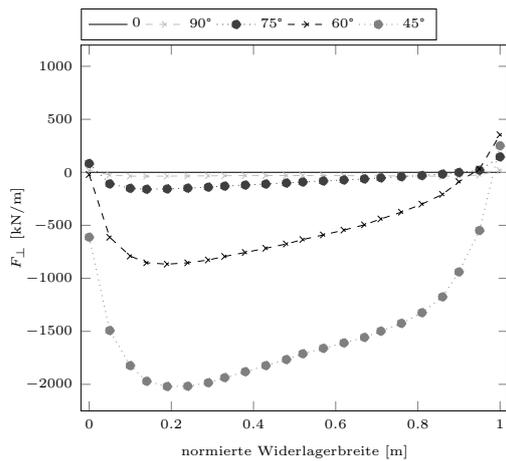


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

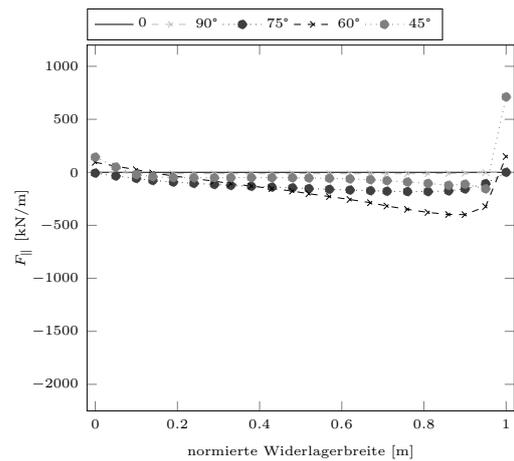


(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.32: Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 5



(a) Kraft normal auf Widerlagerwand



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.33: Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 5

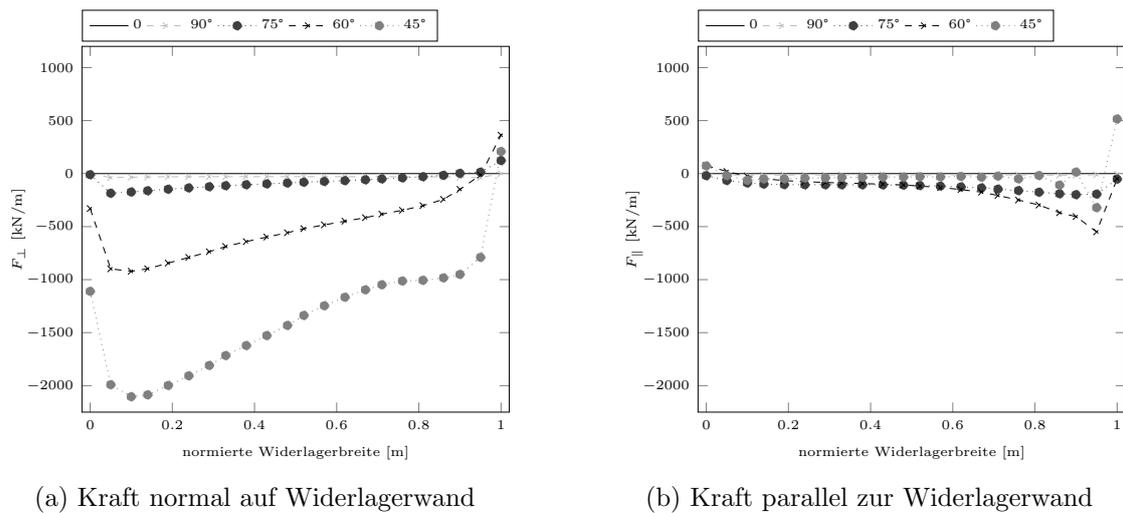


Abbildung 5.34: Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 5

Interpretation Lastfall 5

Anhand der vorherigen Abbildungen können folgende Ergebnisse für die Zwangbeanspruchung durch eine konstante Temperatur in x-Richtung auf Überbauplatte dargestellt werden. Es ist ersichtlich, dass die Zwangskraft F_{\perp} in der Schiefe zunimmt. Eine Verlagerung der maximalen Druckzwangkraft in Längsrichtung F_{\perp} ist in Richtung in der Schiefe in Richtung des spitzen Winkels der Überbauplatte zu erkennen. Die maximale Zugzwangkraft ist in der stumpfen Ecke zu erwarten. In Querrichtung wiederum ergeben sich auch bei zunehmender Schiefstellung geringe Zwangkräfte F_{\parallel} in Querrichtung. Während bei einer konventionellen Brückengrundriss von 90° kaum Zwangspannungen zu erwarten sind, vergrößern sich die Druckspannungen bis sich diese bei einer Schiefe von 60° . vermindern sicher aber bei zunehmender Schiefstellung wieder und resultieren in Spannungskonzentrationen in der stumpfen Ecke der Überbauplatte (Zug) Im Allgemeinen sind aber in beiden Fällen Spannungsspitzen an den Ecken der Überbauplatte im schiefen Grundriss zu erkennen. Während für die Zwangkraft in Längsrichtung eine Spannungskonzentration im Bereich der spitzen Ecke (Druck) illustriert wird, wird in Querrichtung generell eine Spannungskonzentration im Bereich der Ecken mit Tendenz zur maximalen Spannungskonzentration in Querrichtung in der stumpfen Ecke (Zug) wiedergespiegelt.

Verformungsfiguren infolge LF 5

Die folgenden Abbildungen (a)-(h) in Abbildung 5.36 stellen die Verformungsfiguren für den rechteckigen Grundriss (Modell 1 und Modell 3) und den quadratischen Grundriss (Modell 2 und 4) infolge LF 5 dar.

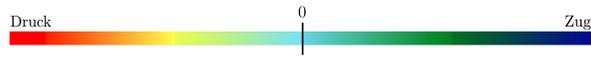


Abbildung 5.35: Farbskala der Spannungen

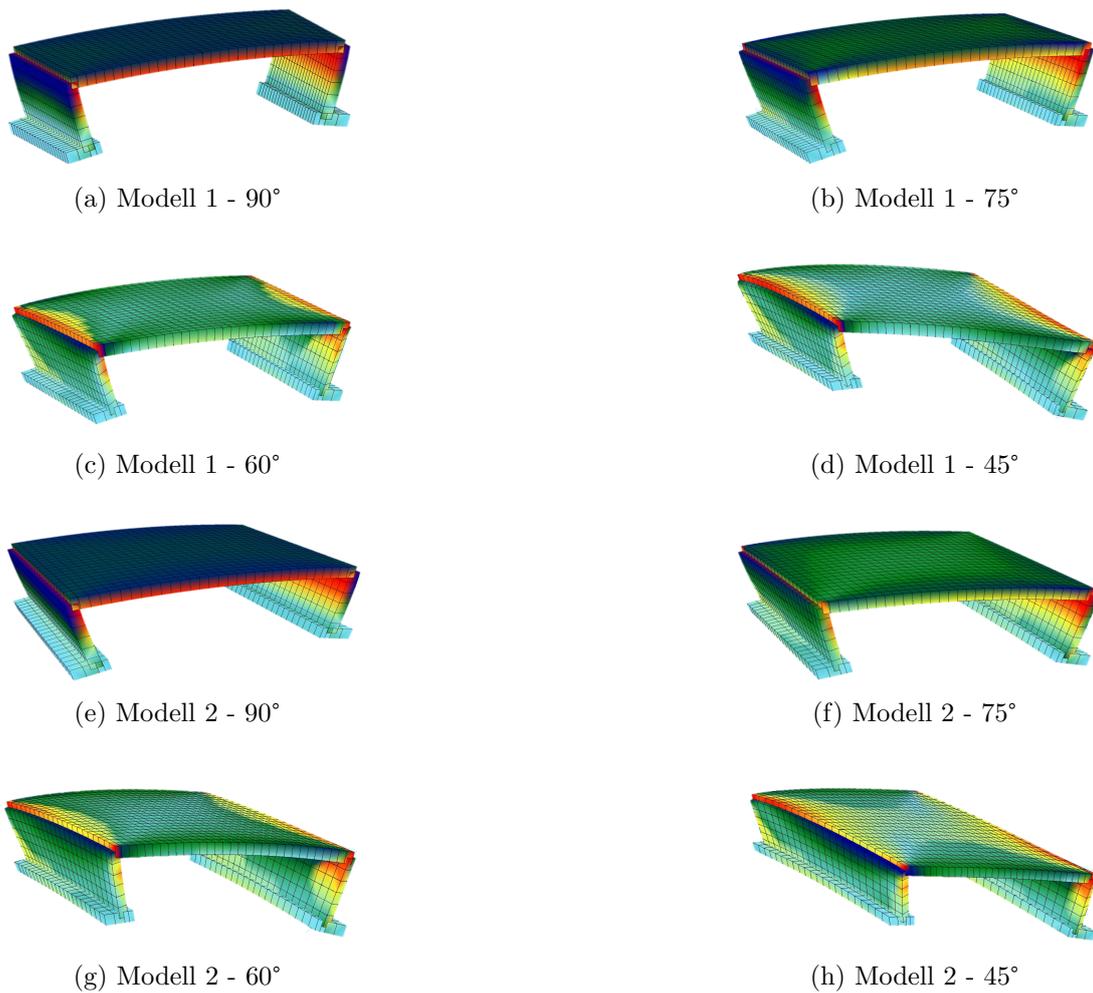


Abbildung 5.36: Verformungsfiguren LF 5

5.1.6 Lastfall 6

Die folgenden Abbildungen 5.38 - 5.41 zeigen die Auswirkung einer konstanter Temperatur in dTN in y-Richtung des Überbaus auf die Zwangkraft.

Abbildungen 5.38a - 5.41a stellen die Zwangkraft normal auf die Widerlagerwand dar. Abbildungen 5.38b - 5.41b bilden die Zwangkraft parallel zur Widerlagerwand ab.

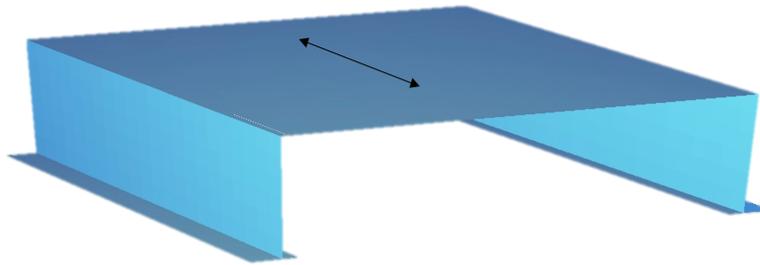
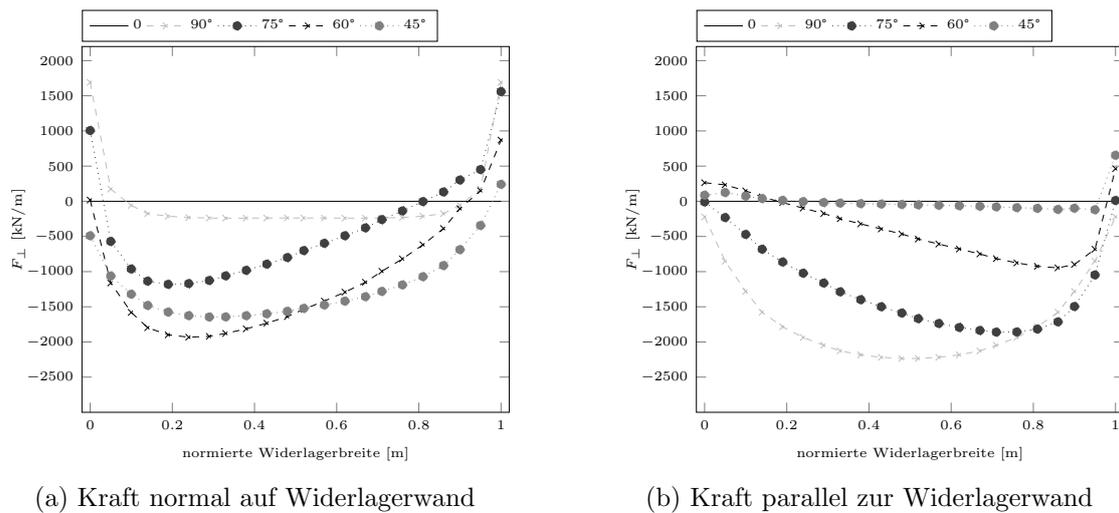


Abbildung 5.37: LF 6 - dTN in y-Richtung

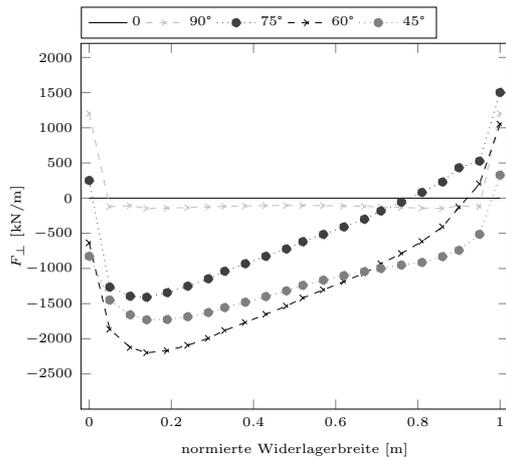


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

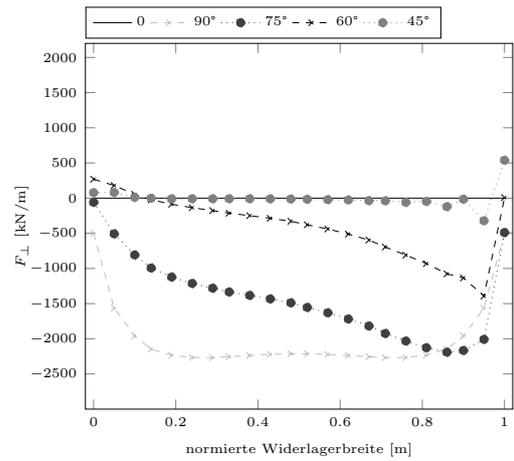
(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.38: Resultierende Kräfte Modell 1 - LF 6

5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau

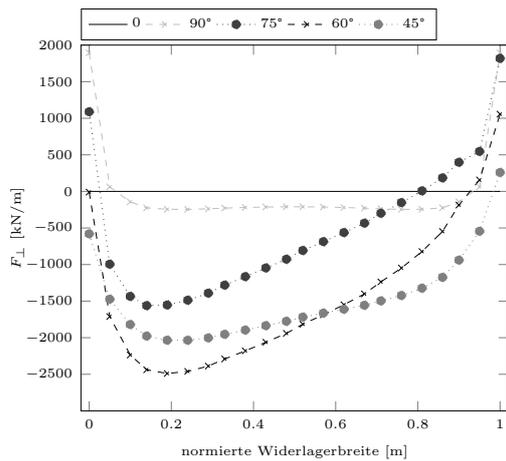


(a) Kraft normal auf Widerlagerwand

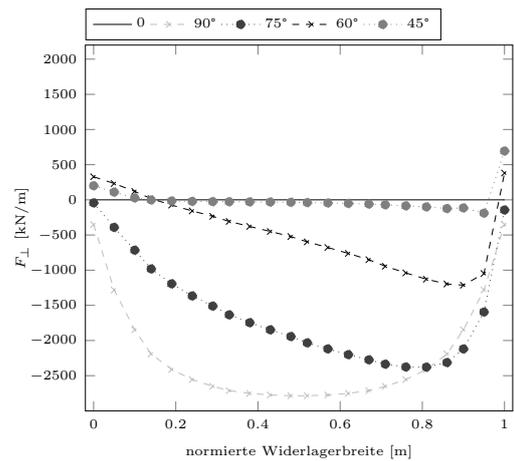


(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.39: Resultierende Kräfte Modell 2 - LF 6



(a) Kraft normal auf Widerlagerwand



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand

Abbildung 5.40: Resultierende Kräfte Modell 3 - LF 6

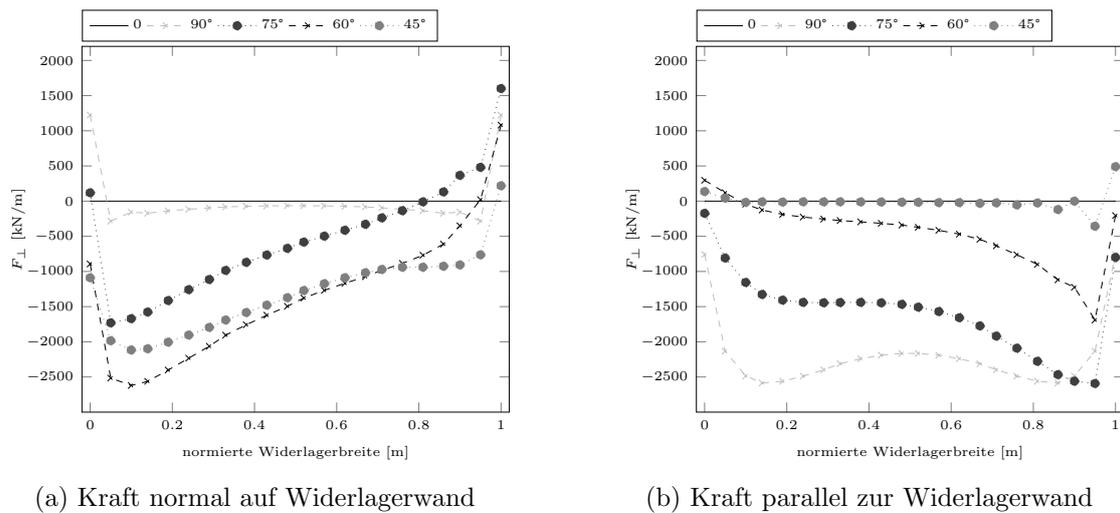


Abbildung 5.41: Resultierende Kräfte Modell 4 - LF 6

Interpretation Lastfall 6

Anhand der vorherigen Abbildungen können folgende Ergebnisse für die Zwangbeanspruchung durch eine konstante Temperatur in y-Richtung in der Überbauplatte und den Widerlagern dargestellt werden.

Allgemein ist anzumerken, dass durch die erhöhte Steifigkeit der Widerlagerwand in Querrichtung schon bei geradem Grundriss eine Temperaturbeanspruchung in y-Richtung zu höheren Zwangbeanspruchungen in Querrichtung führen. Bestätigt wird dies durch den Verlauf der Kraft F_{\parallel} in der konventionellen Grundrissstellung. Es zeigt sich weiters, dass die Zwangkraft mit zunehmender Schiefstellung F_{\parallel} aber wieder abnimmt. Hingegen erhöht sich die Zwangkraft und die Zwangkraftverläufe der Kraft F_{\perp} bei zunehmender Schiefstellung.

Verformungsfiguren infolge LF 6

Die folgenden Abbildungen (a)-(h) in Abbildung 5.43 stellen die Verformungsfiguren für den rechteckigen Grundriss (Modell 1 und Modell 3) und den quadratischen Grundriss (Modell 2 und 4) infolge LF 6 dar.

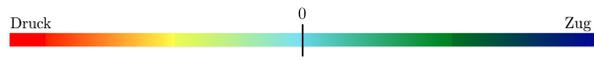


Abbildung 5.42: Farbskala der Spannungen

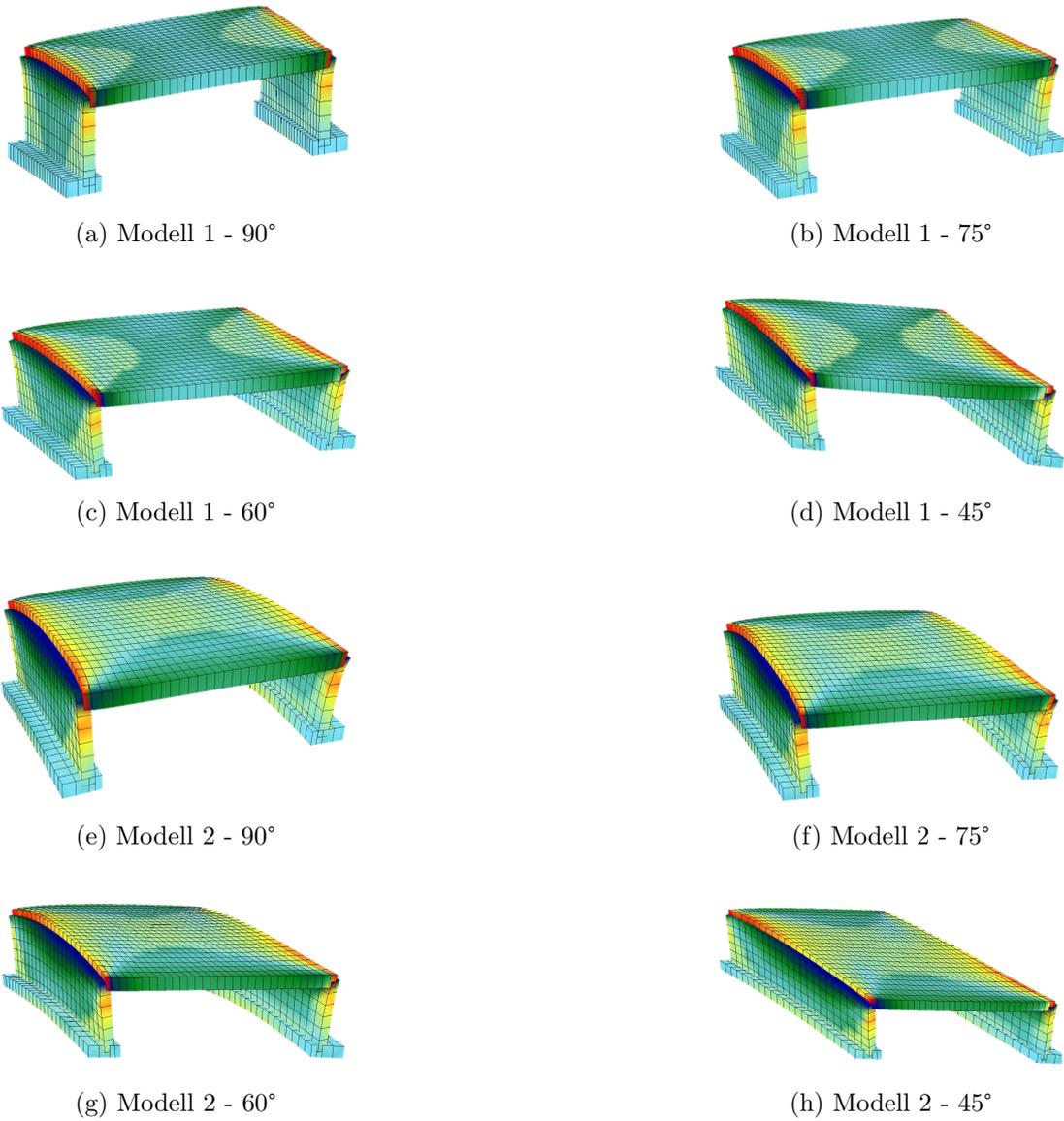


Abbildung 5.43: Verformungsfiguren LF 6

5.2 Vergleich der Temperaturansätze

Generell ist im vorherigen Abschnitt 5.1 ein Unterschied ersichtlich, ob die Temperatur auf die einzelnen Bauteile getrennt oder gemeinsam angesetzt wird. Die Untersuchungen erfolgen wieder mit den gleichen Bauteilabmessungen und Lastfällen, der Schlankheit $GM1$ $\lambda = 15$ und der Temperatur $T1$. Um die Auswirkungen besser vergleichen zu können, folgt ein Vergleich der Temperaturansätze auf die Bauteile Überbau und Überbau und Widerlager. Dabei werden die Lastfälle 1, 2 und 3 wieder lediglich mit einer Temperatur dTN auf Überbau und Widerlager aufgebracht. Die Lastfälle 4, 5 und 6 berücksichtigen die Temperatureinwirkung dTN nur auf den Überbau. Im Zuge der Analyse werden nur qualitative Vergleiche getätigt.

5.2.1 Vergleich LF 1 und LF 4

Der nachfolgende Abschnitt beinhaltet den Vergleich des Temperaturansatzes in Längs- und Querrichtung auf den Überbau und den Überbau und den Widerlagern. Die Abbildungen 5.49 bis 5.52 illustrieren dabei die Zwangkraftverläufe der Lastfälle 1 und 4. Beide Lastfälle beschreiben die Zwangkraft zufolge konstanter Temperatur dTN in x- und y-Richtung. Der Lastfall 1 bildet die Auswirkung der Temperatureinwirkung auf den Überbau und das Widerlager ab. Die Temperaturbeanspruchung von Lastfall 4 begrenzt sich auf den Überbau.

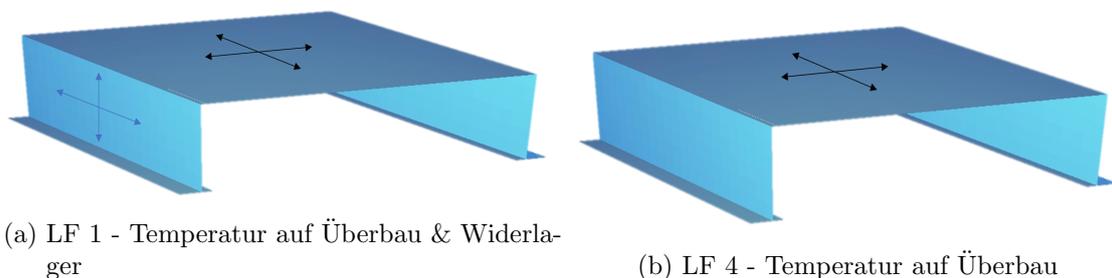


Abbildung 5.44: Vergleich der Temperaturansätze LF 1 und LF 4

Vergleich Modell1 F_{\perp}

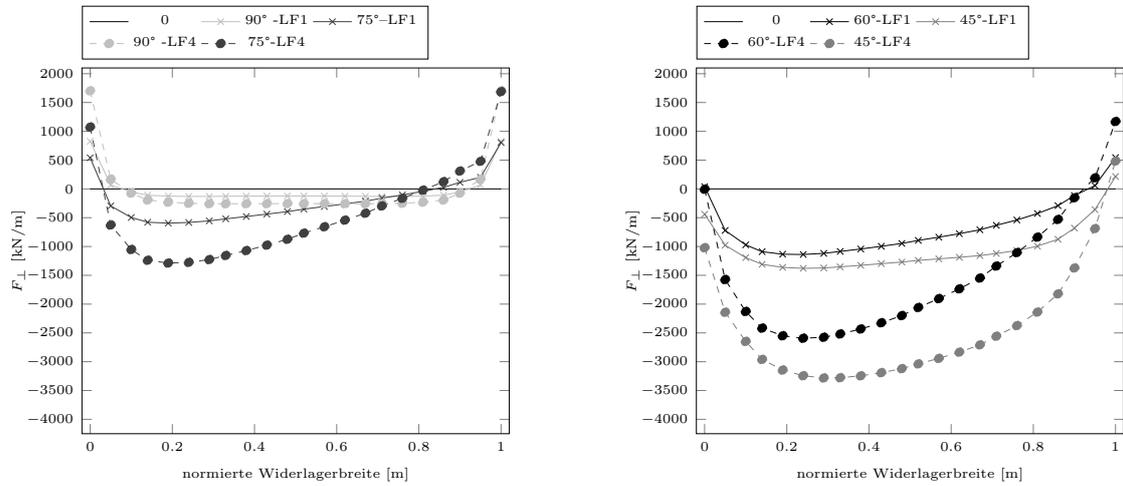


Abbildung 5.45: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 1 - LF 1 + 4

Vergleich Modell 2 - F_{\perp}

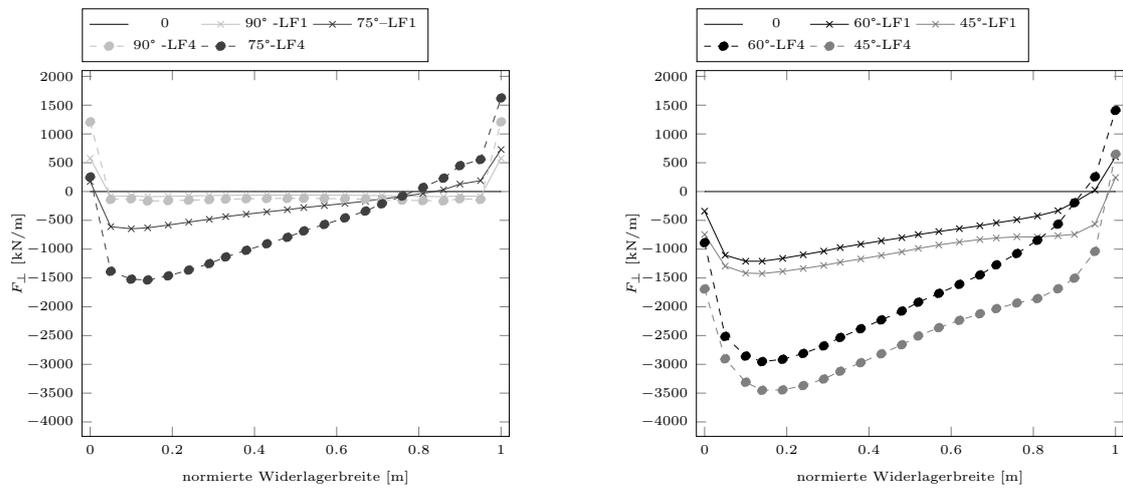


Abbildung 5.46: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 2 - LF 1 + 4

Vergleich Modell 3 - F_{\perp}

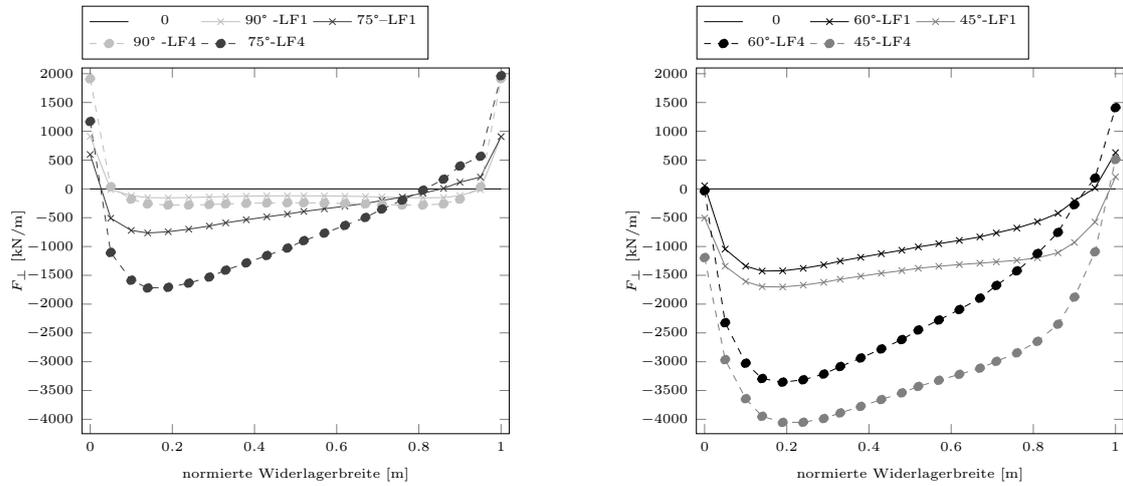


Abbildung 5.47: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 3 - LF 1 + 4

Vergleich Modell 4 - F_{\perp}

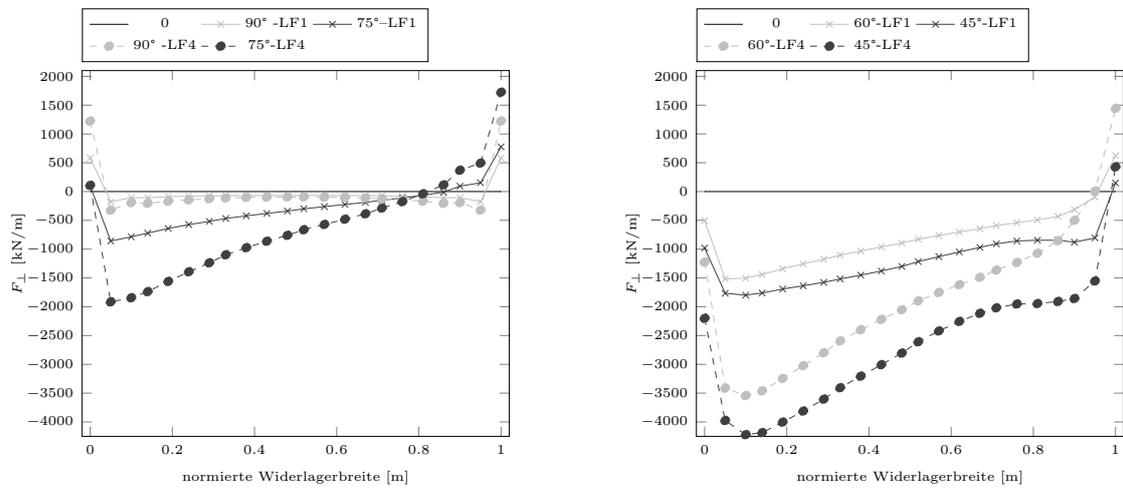


Abbildung 5.48: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 4 - LF 1 + 4

Vergleich Modell 1- $F_{||}$

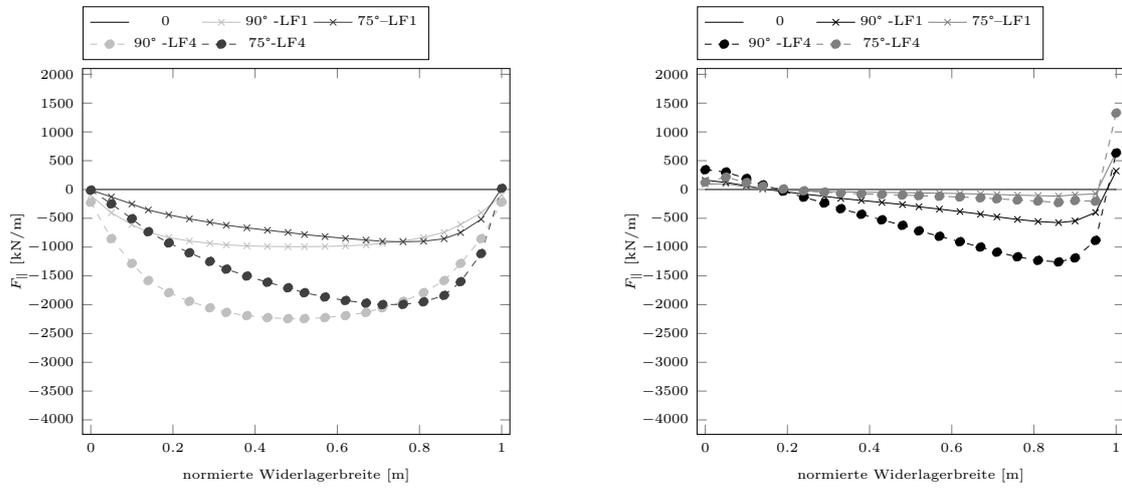


Abbildung 5.49: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 1 - LF 1 + 4

Modell 2 - $F_{||}$

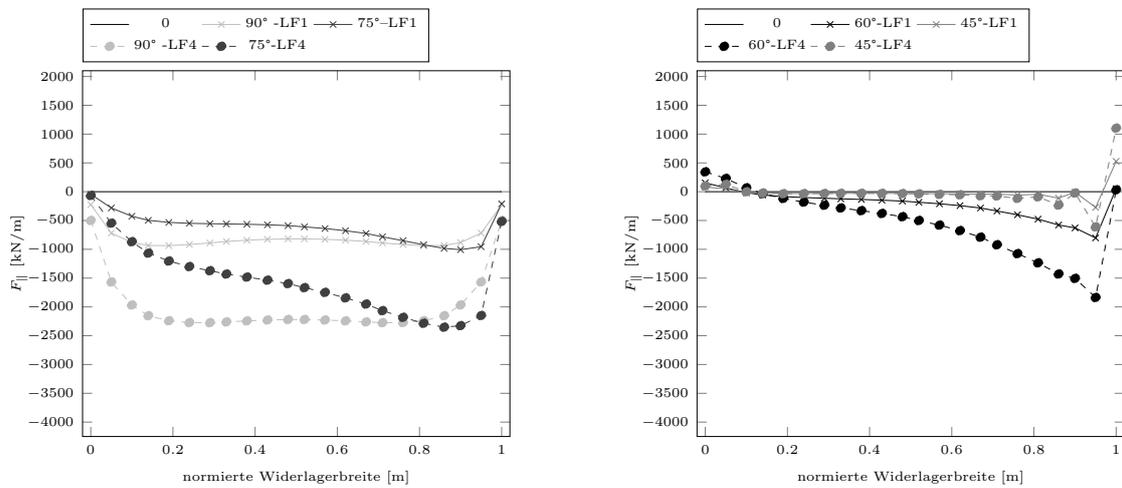


Abbildung 5.50: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 2 - LF 1 + 4

Modell 3 - $F_{||}$

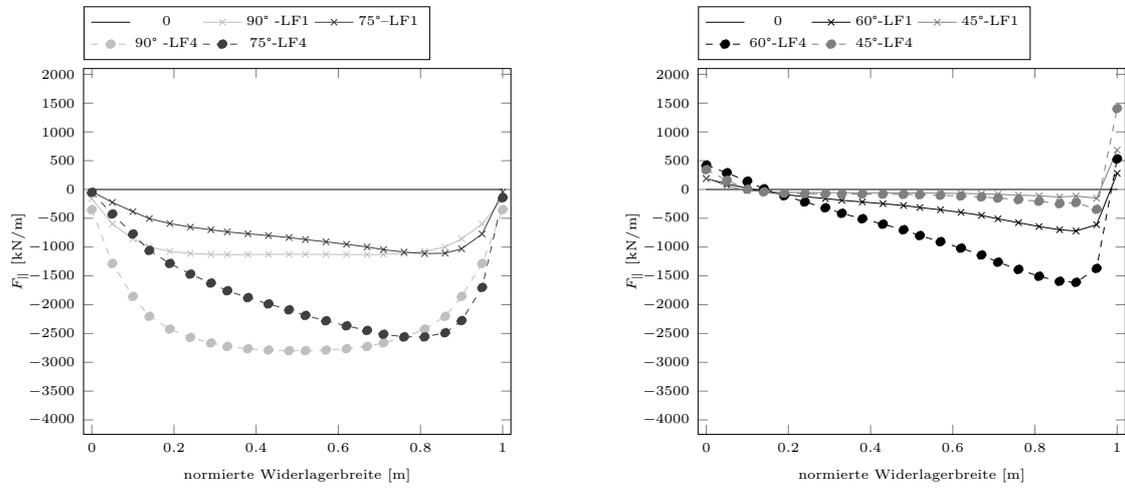


Abbildung 5.51: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 3 - LF 1 + 4

Modell 4 - $F_{||}$

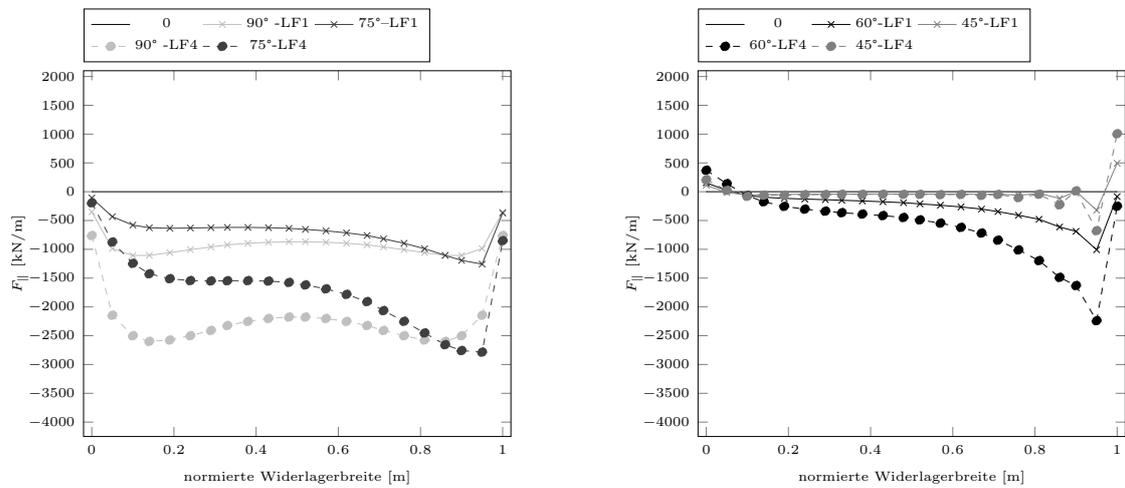


Abbildung 5.52: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF 1 + 4

Interpretation Vergleich LF 1 und LF 4

Durch einen Temperaturansatz lediglich auf die Überbauplatte vergrößert sich die resultierende Zwangskraft in der Überbauplatte. Qualitativ sind die Zwangkraftverläufe über die normierte Widerlagerbreite aber quasi ident. Durch den Verzicht eines Temperaturansatzes auf das Widerlager, erfährt das Widerlager keine Temperaturdehnung. Die Widerlagerwand stellt dadurch eine zusätzliche Behinderung des Verformungsbestrebens dar und verursacht dabei zusätzliche Zwangkräfte. Weiters ist durch Temperaturansatz auf beide Bauteile eine Veränderung der Verformungsfigur zu erkennen. Es ist ersichtlich, dass ein zusätzlicher Temperaturansatz am Widerlager eine zusätzliche Verformungsbehinderung und somit zusätzliche Zwangspannungen am Widerlagerfuß verursachen. Nachfolgend werden die Verformungsfiguren und resultierenden Zwangspannungen LF 1 und LF 4 am gesamten Integralbrückenmodell abgebildet.

Verformungen LF 1 und LF 4

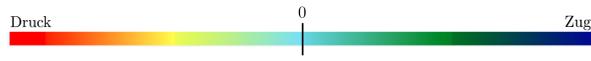


Abbildung 5.53: Farbskala der Spannungen

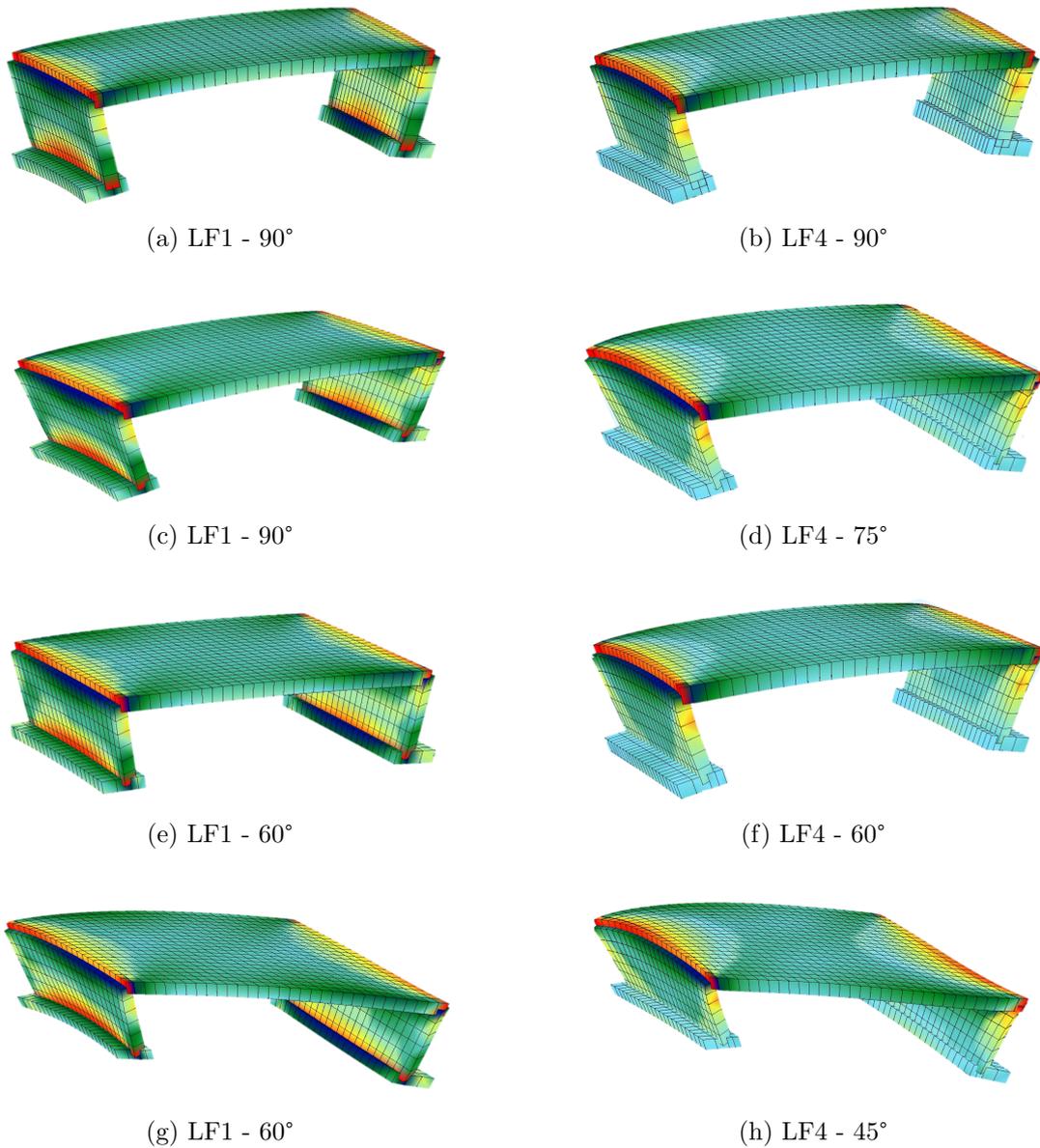


Abbildung 5.54: Verformungen LF 1 und LF4 - Modell 1

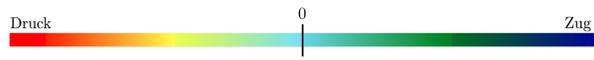


Abbildung 5.55: Farbskala der Spannungen

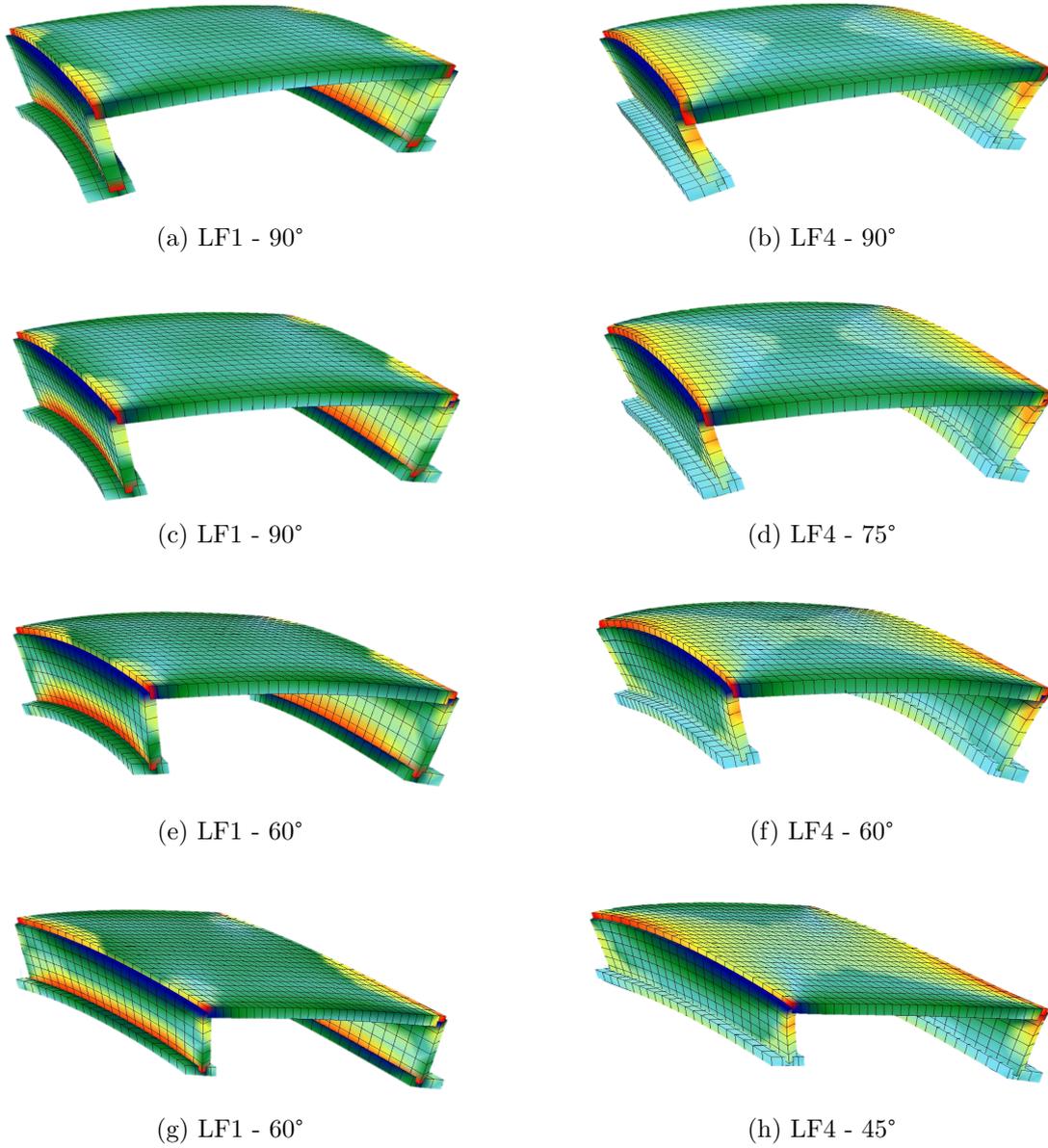
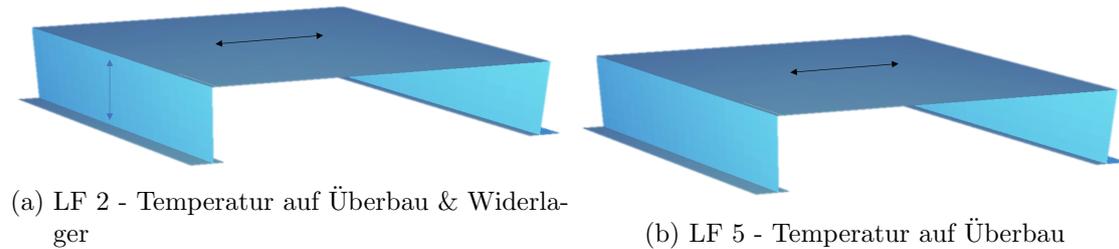


Abbildung 5.56: Verformungen LF 1 und LF4 - Modell 2

5.2.2 Vergleich LF 2 und LF 5

Die nachfolgenden Abbildungen beinhaltet den Vergleich des Temperaturansatzes dTN nur in Längsrichtung (x-Richtung). Die Abbildungen 5.58 bis 5.65 illustrieren dabei die Zwangkraftverläufe der Lastfälle 2 und 5. Der Lastfall 2 bildet die Auswirkung der Temperatureinwirkung auf den Überbau und das Widerlager ab. Der Lastfall 5 stellt die Temperaturbeanspruchung nur auf den Überbau dar.



(a) LF 2 - Temperatur auf Überbau & Widerlager

(b) LF 5 - Temperatur auf Überbau

Abbildung 5.57: Vergleich der Temperaturansätze LF 2 und LF 5

Vergleich Modell1 F_{\perp}

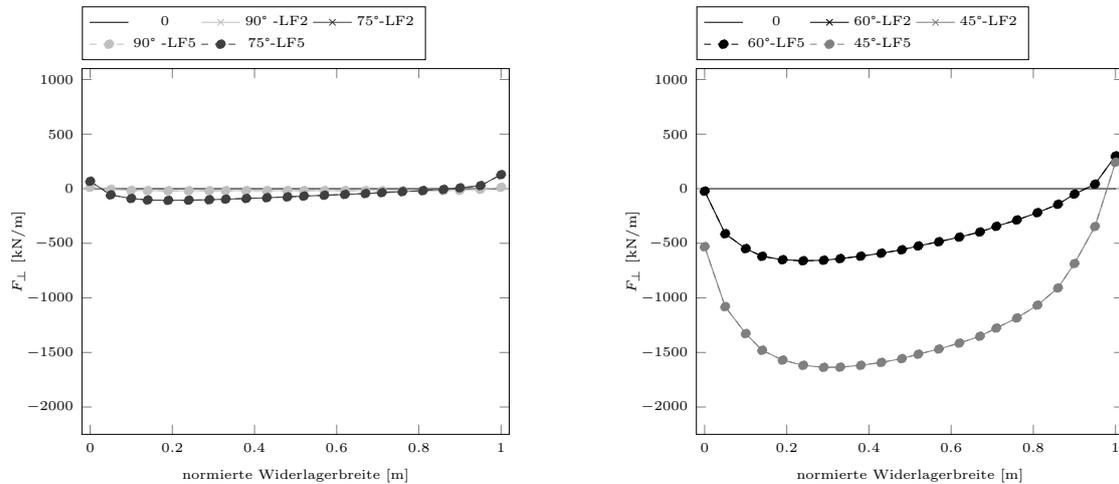


Abbildung 5.58: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 1 - LF 2 + 5

Vergleich Modell 2 - F_{\perp}

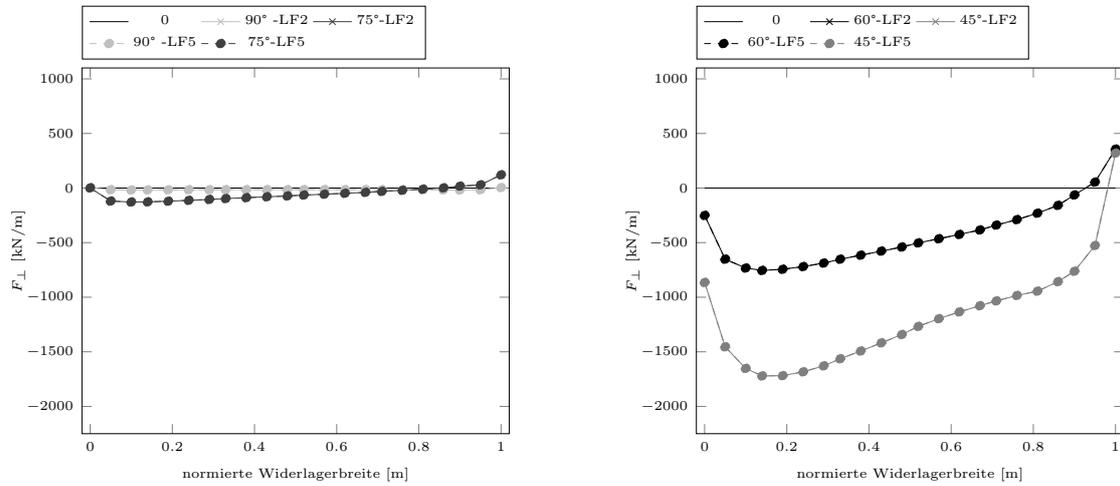


Abbildung 5.59: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 2 - LF 2 + 5

Vergleich Modell 3 - F_{\perp}

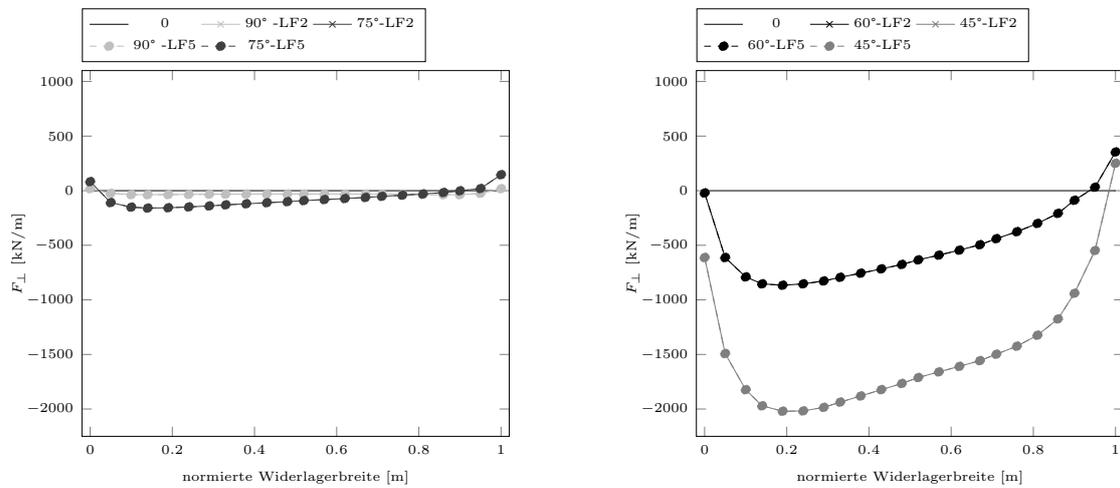


Abbildung 5.60: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 3 - LF 2 + 5

Vergleich Modell 4 - F_{\perp}

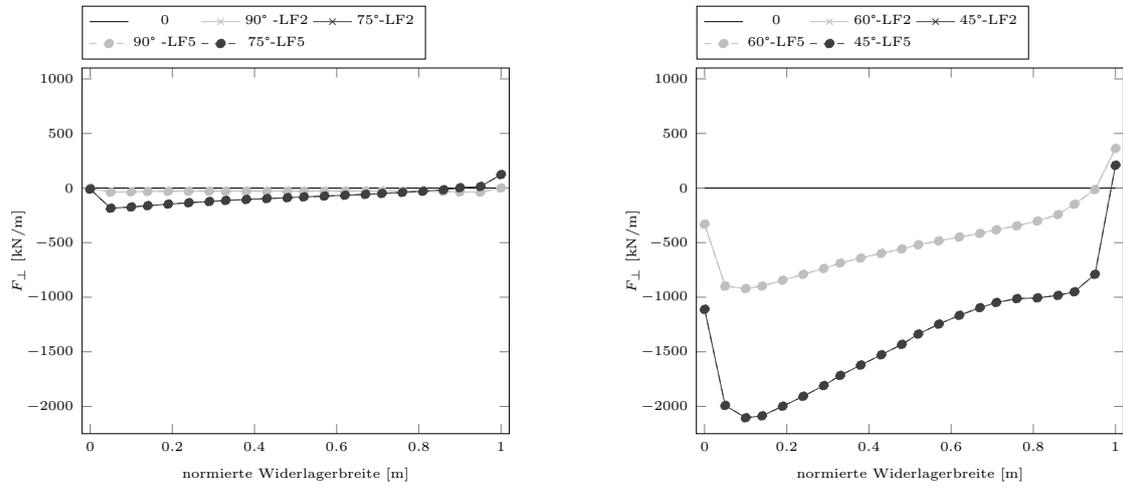


Abbildung 5.61: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 4 - LF 2 + 5

Vergleich Modell 1- F_{\parallel}

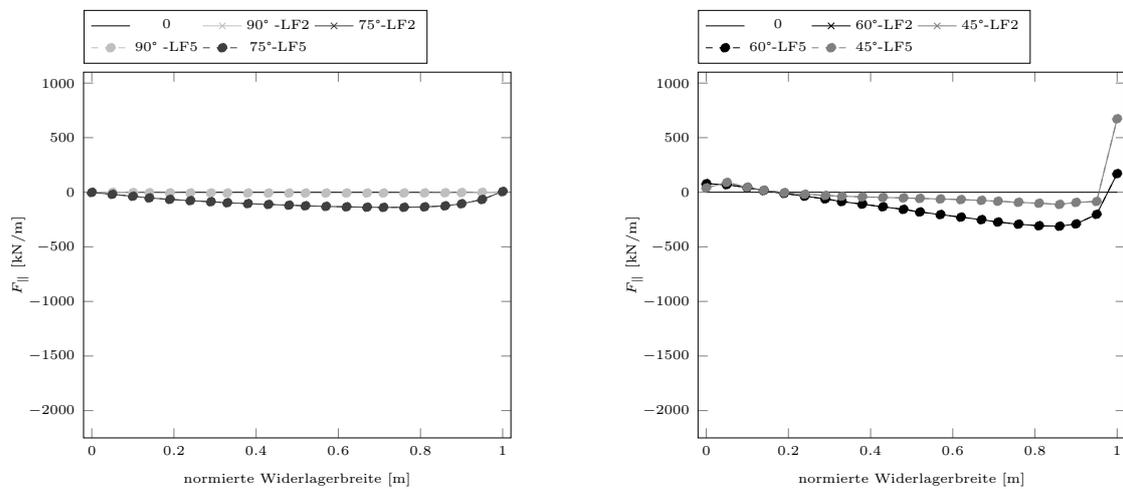


Abbildung 5.62: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 1 - LF 2 + 5

Modell 2 - $F_{||}$

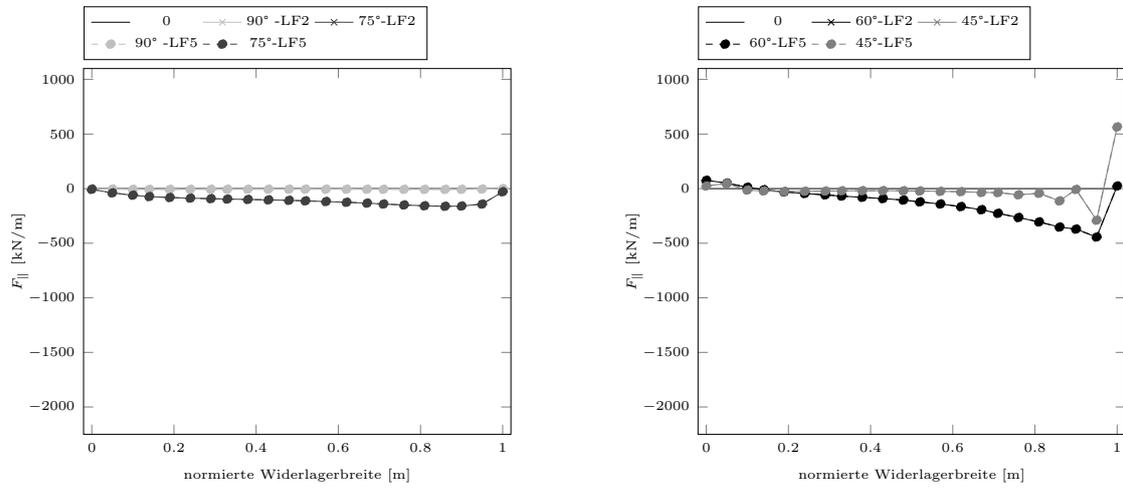


Abbildung 5.63: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 2 - LF 2 + 5

Modell 3 - $F_{||}$

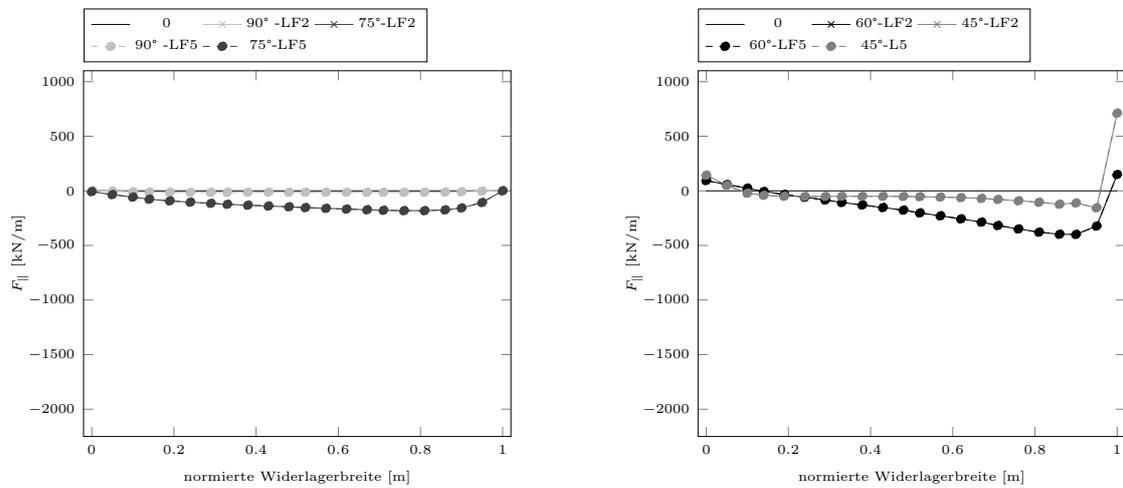


Abbildung 5.64: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 3 - LF 2 + 5

Modell 4 - F_{\parallel}

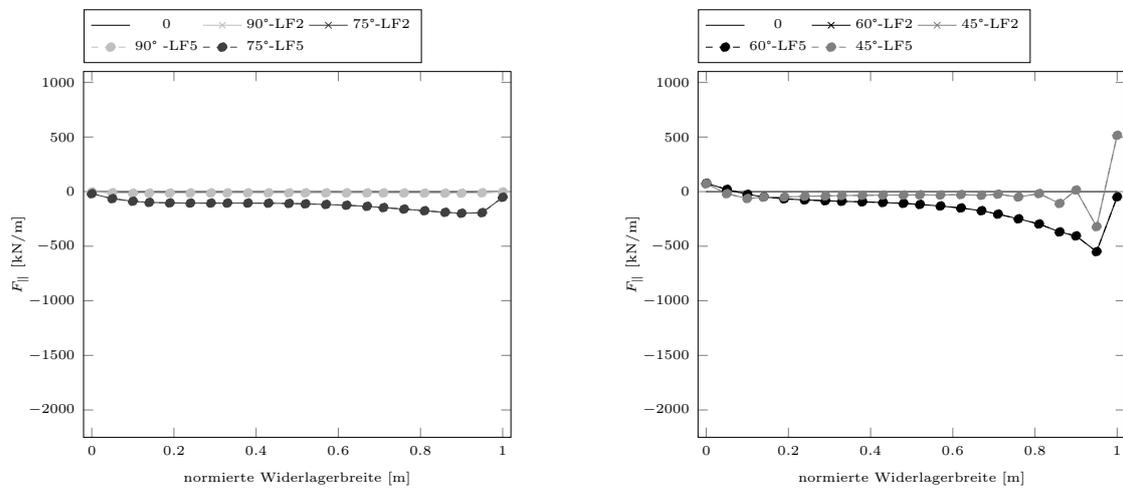


Abbildung 5.65: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF 2 + 5

Interpretation Vergleich LF 2 und LF 5

Die vorhin abgebildeten Zwangkraftverläufe des Lastfalles 2 und 5 verdeutlichen, dass die Verläufe qualitativ und quantitativ bis auf geringfügige Abweichungen im Dezimalstellenbereich, ident sind. Eine zusätzliche Temperaturdehnung des Widerlagers in der lokalen Längsrichtung des Widerlagers hat keinen Einfluss auf die resultierende Zwangkraft in der Überbauplatte.

Die nachfolgend abgebildeten Verformungsfiguren 5.67 und 5.69 illustrieren, dass qualitativ nur Abweichungen der resultierenden Spannungen bei zunehmender Schiefwinke-
 ligkeit zu erkennen sind.

Verformungen LF 2 und LF 5

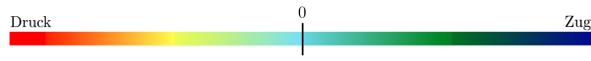


Abbildung 5.66: Farbskala der Spannungen

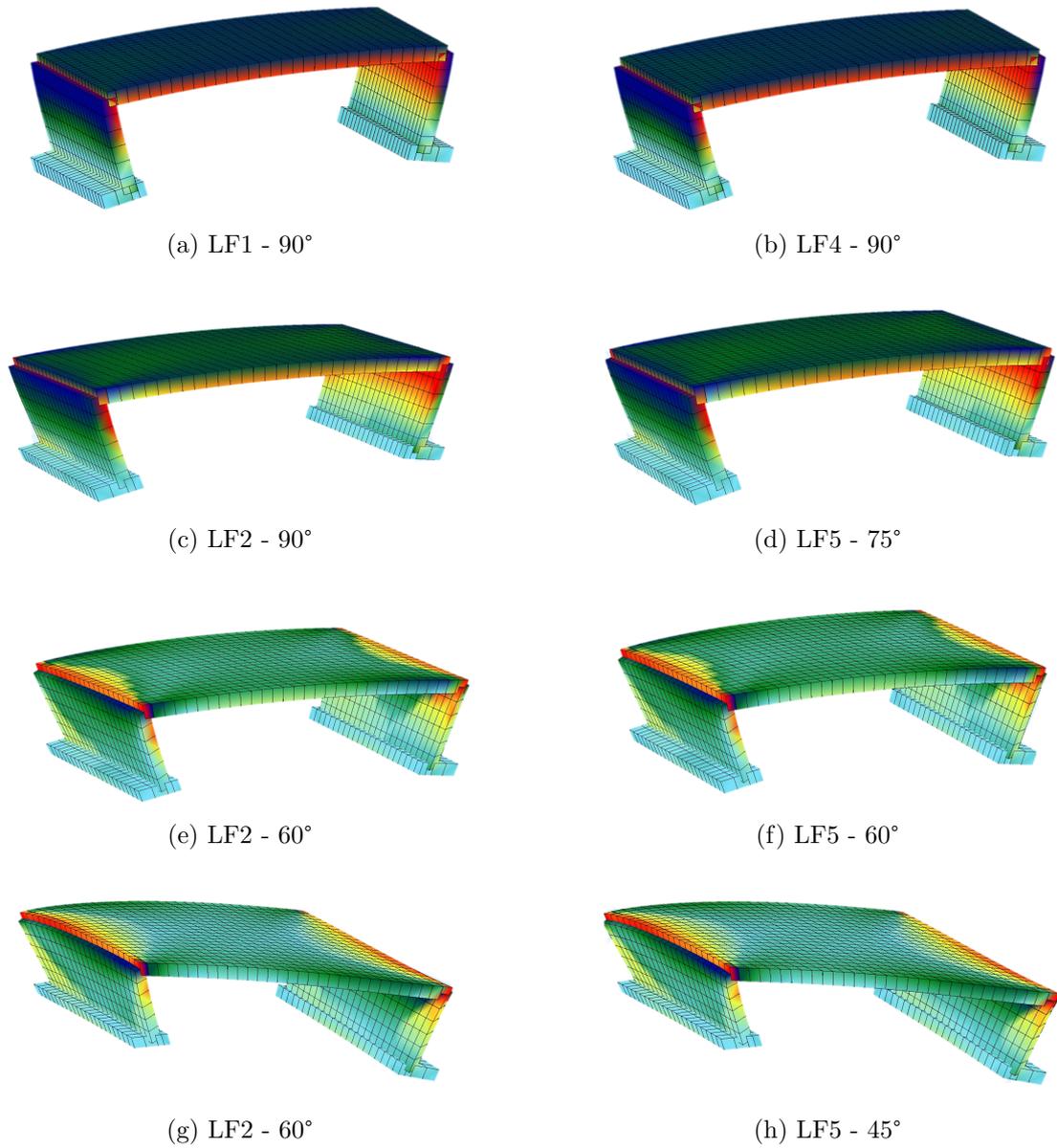


Abbildung 5.67: Verformungen LF 2 und LF 5 - Modell 1

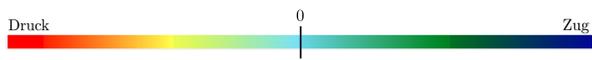


Abbildung 5.68: Farbskala der Spannungen

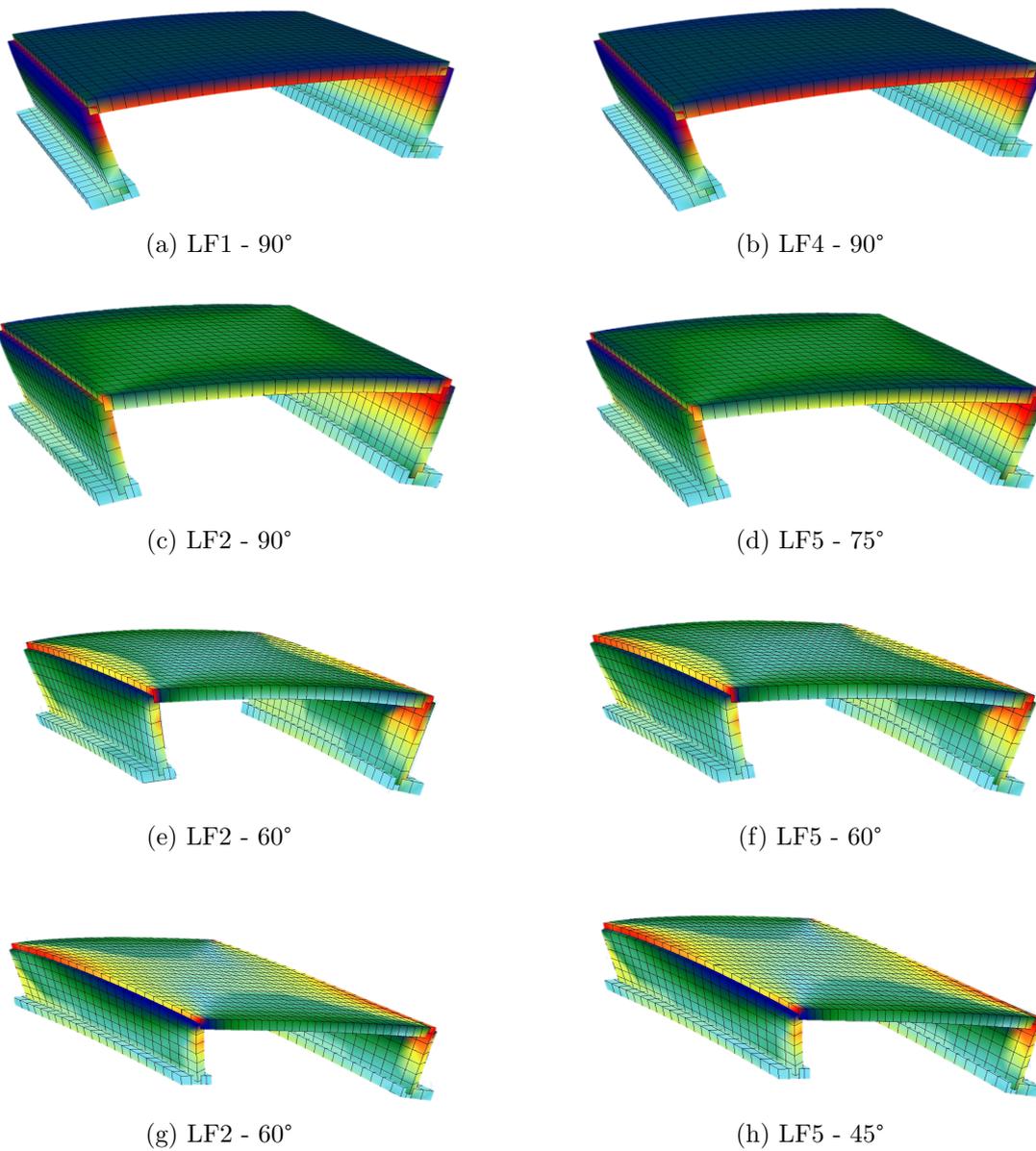
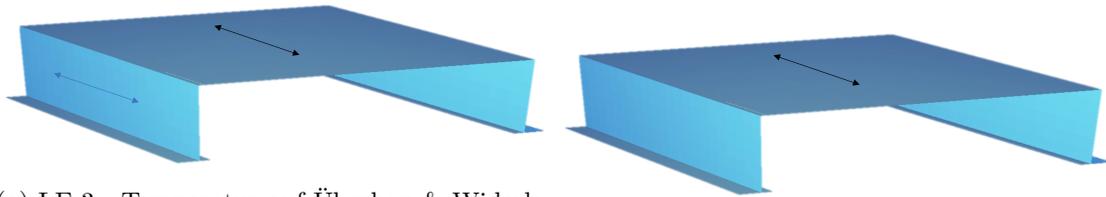


Abbildung 5.69: Verformungen LF 2 und LF5 - Modell 2

5.2.3 Vergleich LF 3 und LF 6

Die nachfolgenden Abbildungen beinhaltet den Vergleich des Temperaturansatzes für die Lastfälle Temperatur nur in Querrichtung. Die Abbildungen 5.71 bis 5.78 illustrieren dabei die Zwangkraftverläufe der Lastfälle 3 und 6. Beide Lastfälle beschreiben die Zwangkraft zufolge konstanter Temperatur dTN nur in y-Richtung. Der Lastfall 3 bildet die Auswirkung der Temperatureinwirkung auf den Überbau und das Widerlager ab. Der Lastfall 6 berücksichtigt ausschließlich eine Temperatureinwirkung auf die Überbauplatte.



(a) LF 3 - Temperatur auf Überbau & Widerlager

(b) LF 6 - Temperatur auf Überbau

Abbildung 5.70: Vergleich der Temperaturansätze LF 3 und LF 6

Vergleich Modell1 F_{\perp}

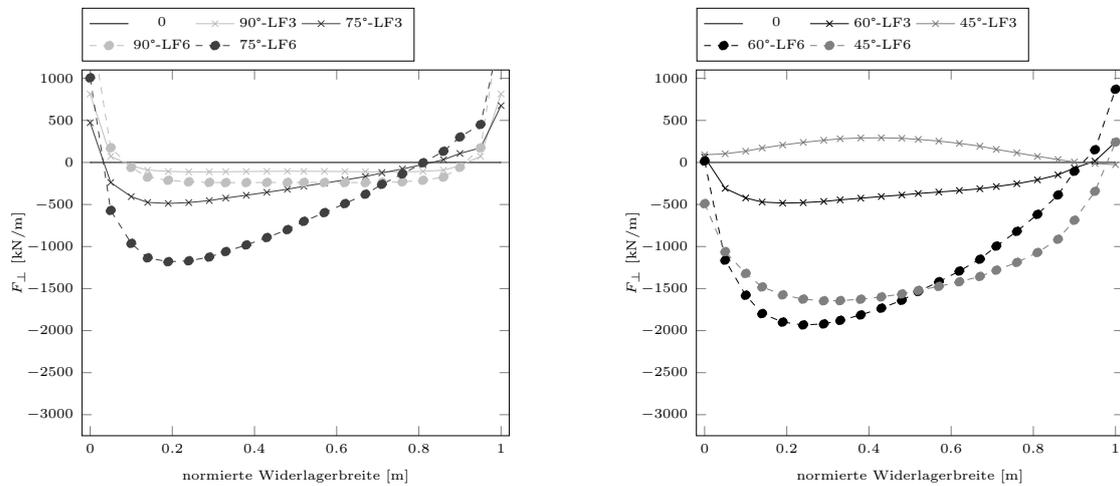


Abbildung 5.71: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 1 - LF 3 + 6

Vergleich Modell 2 - F_{\perp}

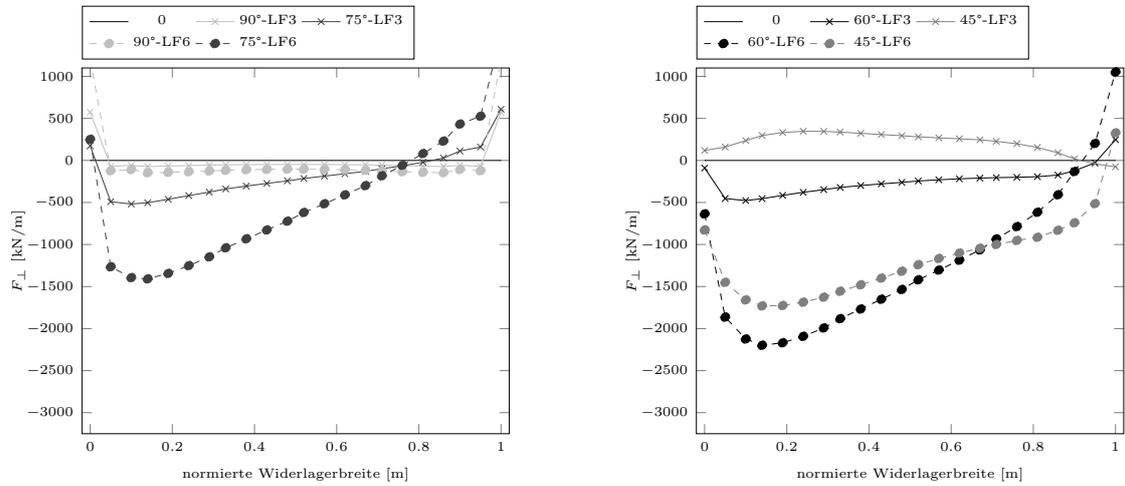


Abbildung 5.72: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 2 - LF 3 + 6

Vergleich Modell 3 - F_{\perp}

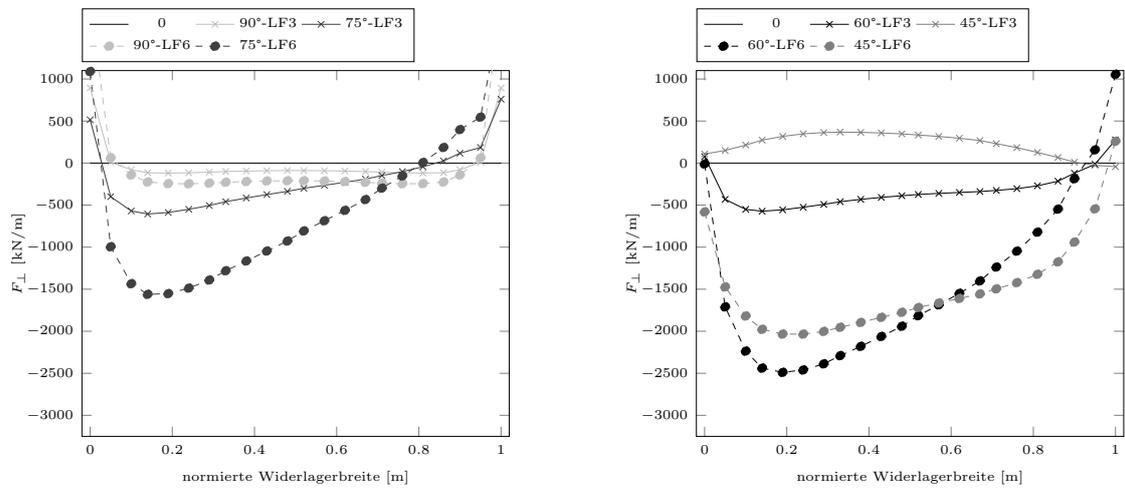


Abbildung 5.73: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 3 - LF 3 + 6

Vergleich Modell 4 - F_{\perp}

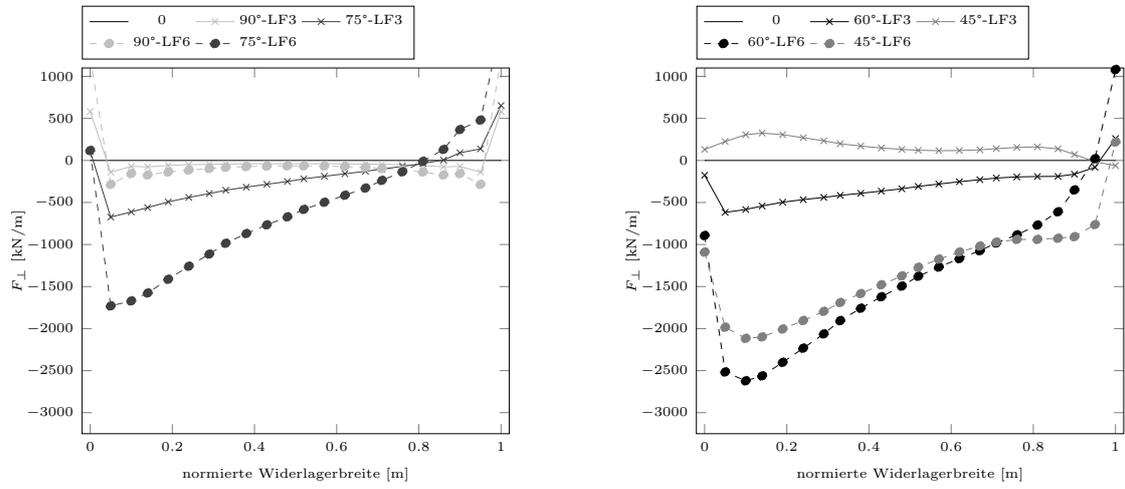


Abbildung 5.74: Vergleich Kräfte normal auf die Widerlagerwand Modell 4 - LF 3 + 6

Vergleich Modell 1- F_{\parallel}

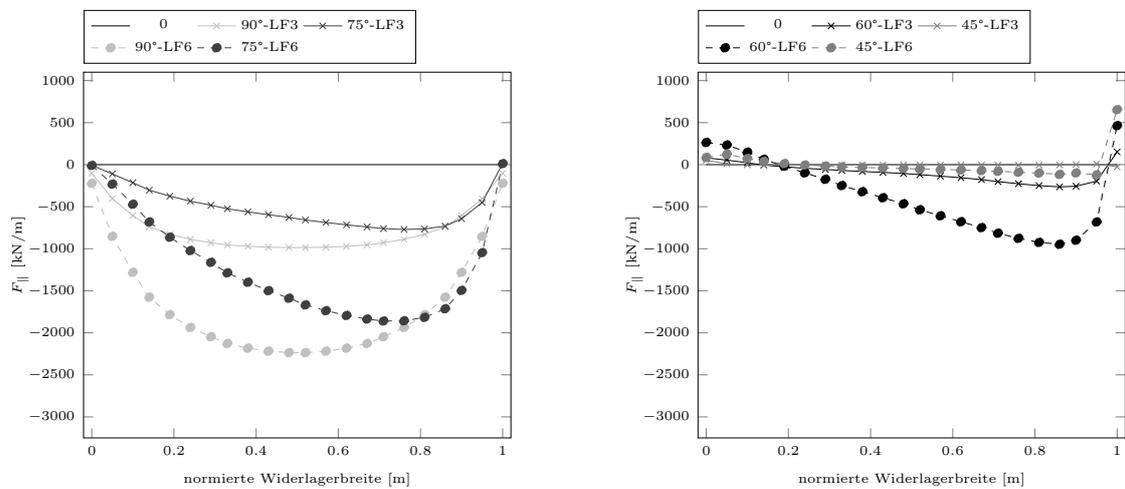


Abbildung 5.75: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 1 - LF 3 + 6

Modell 2 - $F_{||}$

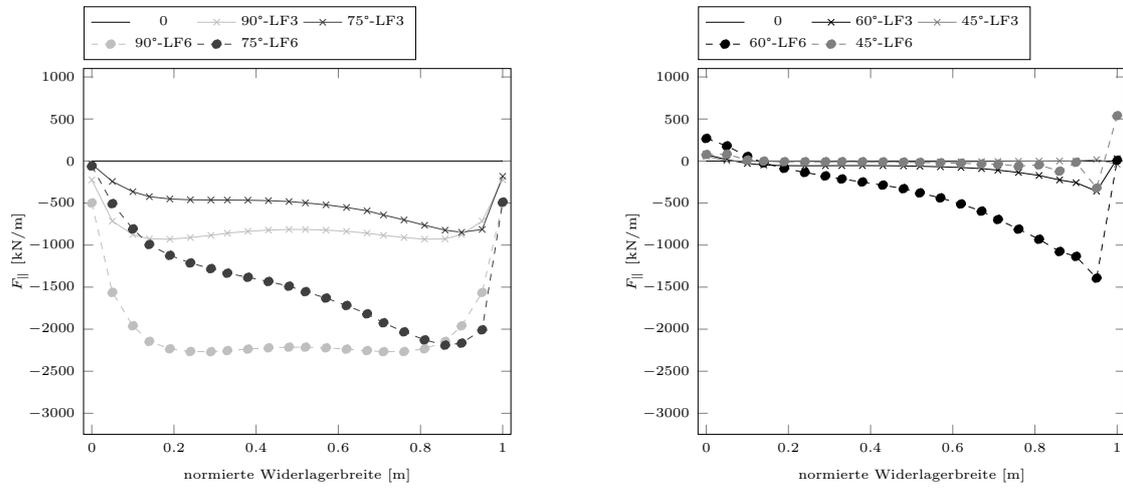


Abbildung 5.76: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 2 - LF 3 + 6

Modell 3 - $F_{||}$

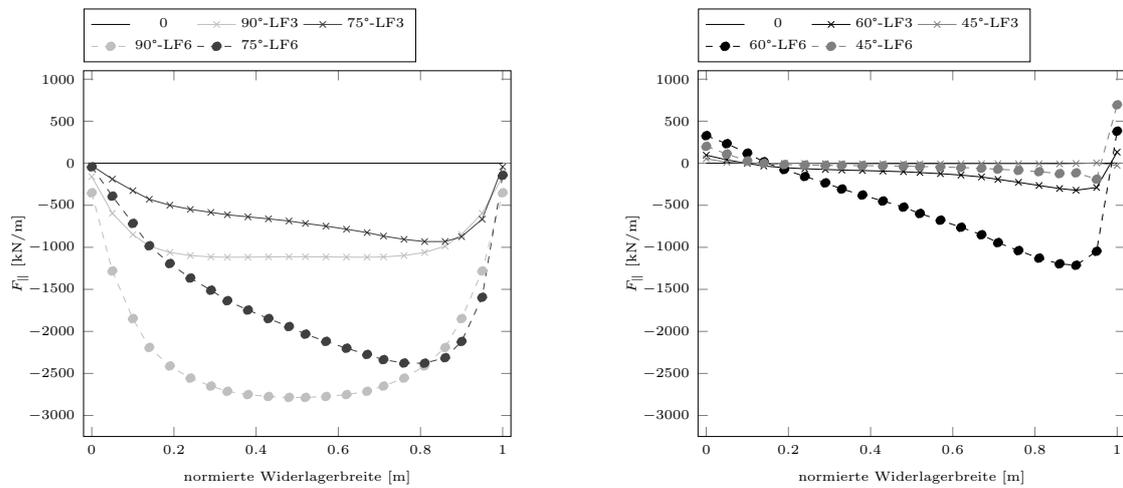


Abbildung 5.77: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 3 - LF 3 + 6

Modell 4 - $F_{||}$

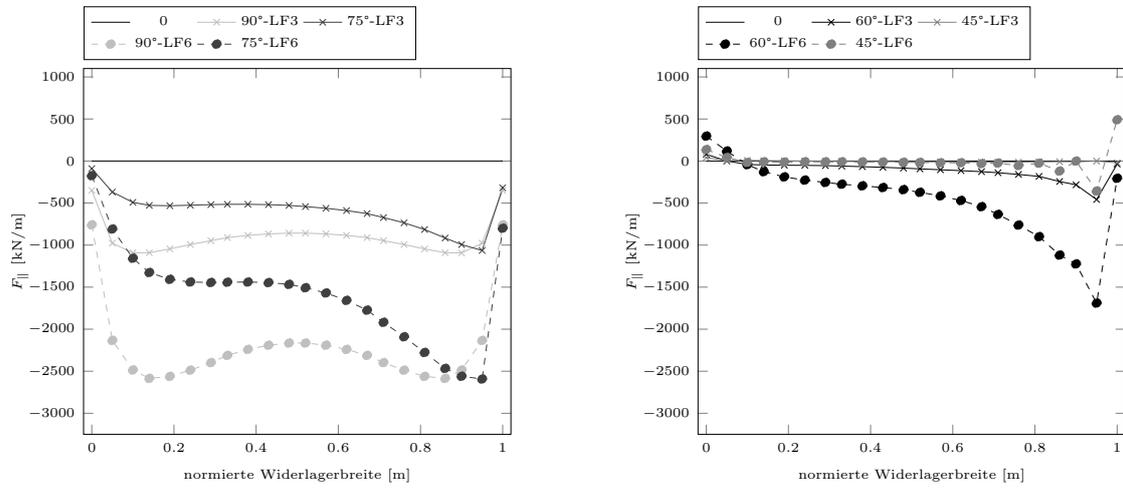


Abbildung 5.78: Vergleich Kräfte parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF 3 + 6

Interpretation Vergleich LF 3 und LF 6

Bei zunehmender Schiefstellung wird ersichtlich, dass der kombinierte Temperaturansatz auf die Widerlagerwand und die Überbauplatte geringere Auswirkungen auf die Zwangkräfte haben. Durch den Verzicht der Temperatur auf die Widerlagerwand entsteht eine zusätzliche Verformungsbehinderung durch die Widerlagerwand und dadurch höhere Zwangkräfte in Querrichtung bei einer konventionellen Brückenstellung. Dies ist zurückzuführen auf die erhöhte Steifigkeit der Widerlagerwand in Querrichtung. Bei zunehmender Schiefe der Überbauplatte können diese Annahmen aber nicht mehr bestätigt werden und es können folgende Aussagen getroffen werden. Es ist zu erkennen, dass ein Temperaturansatz am Widerlager bei zunehmender Schiefstellung für die Zwangkraft F_{\parallel} an Bedeutung verliert. Hingegen erhöhen sich die Zwangkräfte und die Zwangkraftverläufe der Kraft F_{\perp} . Die Lastfälle unterscheiden sich quantitativ und qualitativ. Für die Zwangkraft F_{\perp} gelten die zuvor diskutierten Ergebnisse für LF 3 und LF 6.

Die Auswirkungen der Schiefwinkeligkeit sind aber nicht nur bei den Zwangkraftverläufen, sondern auch bei den Verformungsfiguren, zu erkennen. Wohingegen bei LF 6 eine erhöhte Zwängung in der Rahmenecke durch die Behinderung der Ausdehnung der Widerlagerwand zu erkennen ist, ist bei LF 3 vor allem eine erhöhte Zwängung am Fuß der Widerlagerwand ersichtlich. Eine zusätzliche Temperatur auf das Widerlager verursacht zusätzliche Zwangspannungen am Widerlagerfuß und am Übergang zum Fundament. Da eine volle Einspannung der Widerlagerwand am Fundament bei den Untersuchungen angenommen wird, ergibt dies folglich eine Behinderung der temperaturinduzierten Ausdehnung der Widerlagerwand und resultiert in zusätzlichen Zwangspannungen.

Nachfolgend werden die Verformungsfiguren und resultierenden Zwangspannungen LF 3 und LF 6 am Integralbrückenmodell abgebildet.

Verformungen LF 3 und LF 6

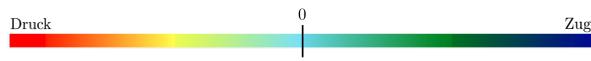


Abbildung 5.79: Farbskala der Spannungen

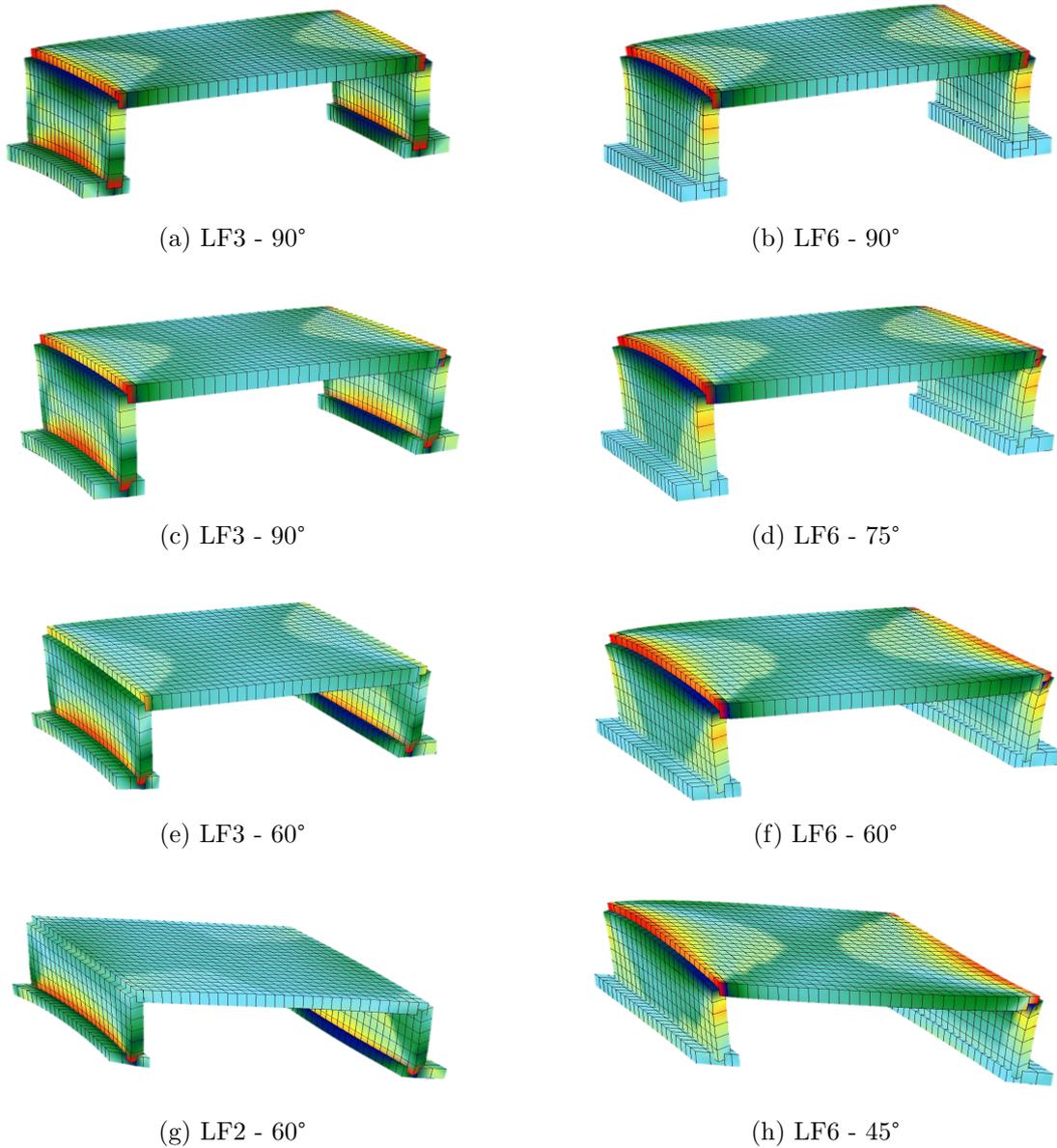


Abbildung 5.80: Verformungen LF 3 und LF6 - Modell 1

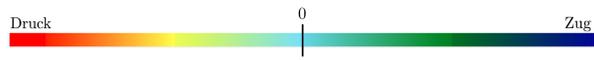


Abbildung 5.81: Farbskala der Spannungen

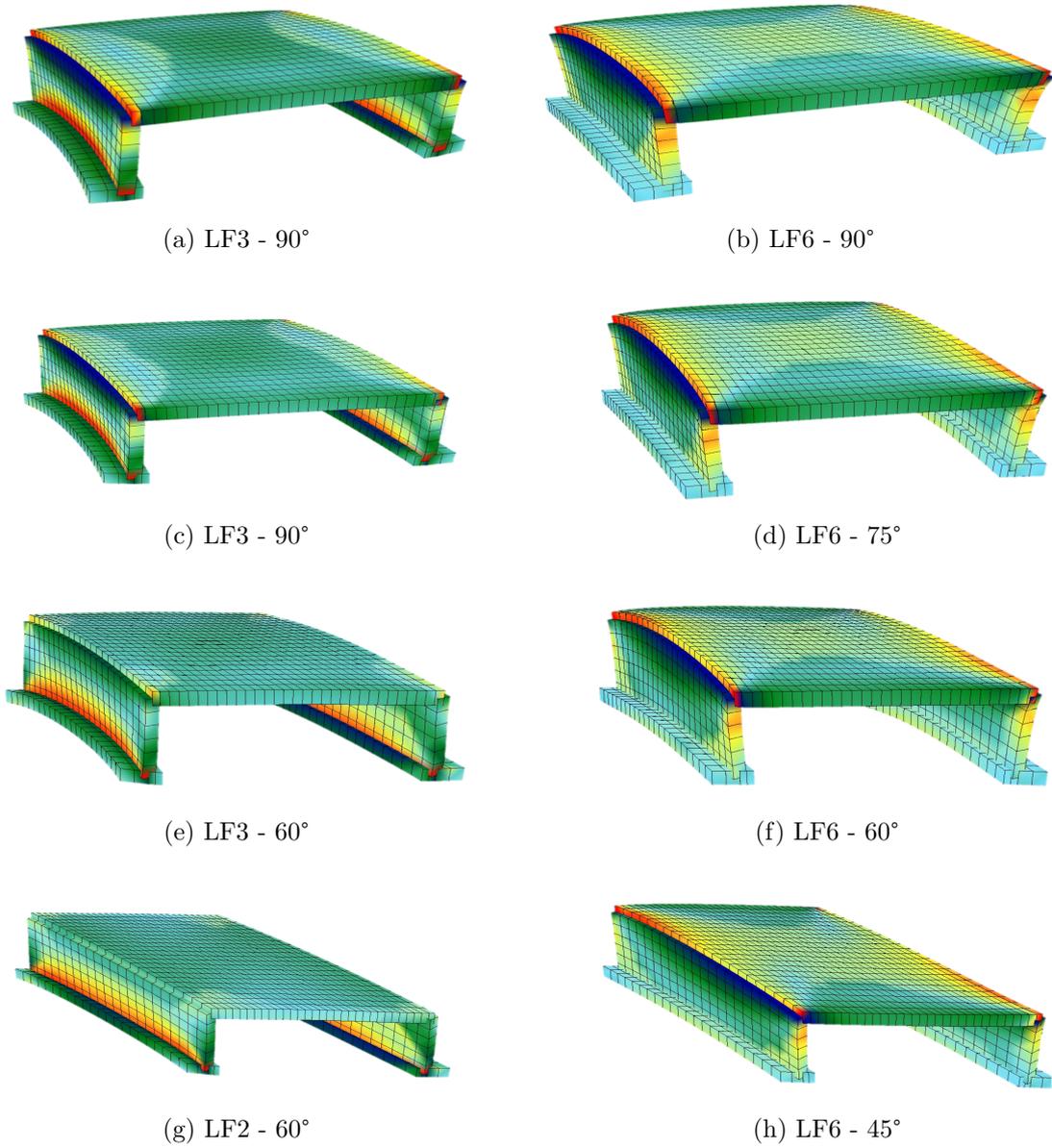


Abbildung 5.82: Verformungen LF 3 und LF 6 - Modell 2

5.3 Interpretation

In diesem Abschnitt erfolgt die Interpretation der zuvor abgebildeten Ergebnisse der aufgetragenen Lastfälle. Um die zuvor erwähnten Ergebnisse zu interpretieren, folgte eine Analyse der Auswirkung des Temperaturansatzes auf die Zwangkraft im Überbau. Primär wird auf das Bauteilverhalten unter Zwangbeanspruchung, Zwangauswirkung auf Integralbrücken und Schiefwinkligkeit eingegangen.

Die Auswirkungen der Schiefstellung auf die Zwangkräfte zeigen, dass vor allem die Ecken der Überbauplatte und das Rahmeneck durch die Schiefe im Grundriss zusätzlich beansprucht werden. Eine zusätzliche Temperatur in y-Richtung führt zu einer Verkrümmung der Überbauplatte in Querrichtung und einer starken Verformung der Widerlagerwand und der Fundamentplatte. Bei zunehmender Schiefe im Grundriss verstärken sich die Verkrümmung und die Verformungen weiter. Ein Temperaturansatz auf Widerlager und Überbauplatte führt zu einer im Vergleich mit einem alleinigen Temperaturansatz in x-Richtung unterschiedlichen Verformungsfigur. Der Temperaturunterschied zwischen Bauteilen ist für die Behinderung in Querrichtung zwischen den Bauteilen weiters maßgebend. Der Temperaturunterschied zwischen Bauteilen ist für die Behinderung in Querrichtung zwischen den Bauteilen weiters ein maßgebender Einflussfaktor für die Zwangbeanspruchung. Ein Temperaturansatz auf Widerlager und Überbauplatte führt zu einer im Vergleich mit einem alleinigen Temperaturansatz in x-Richtung unterschiedlichen Verformungsfigur. Der Temperaturunterschied zwischen Bauteilen ist für die Behinderung in Querrichtung zwischen den Bauteilen weiters maßgebend.

Einfluss der Temperatur und der Risskraft N_{cr}

Wie schon erwähnt, wird nur eine positive Dehnung durch eine positive Temperatureinwirkung (Erwärmung) in den nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt. Durch die Temperatur entsteht in der Widerlagerwand eine Zug- und in der Überbauplatte ein Druck-Zwangspannungen. Eine negative Temperatur oder Temperaturabkühlung würde eine Umkehrung der Schnittgrößenvorzeichen verursachen und im Überbau Zugspannungen und im Widerlager Druckspannungen ergeben. Um die Auswirkungen des Temperaturansatzes im Überbau noch genauer zu analysieren, wurde die Risskraft N_{cr} im Überbau mit den jeweiligen Zwangkraftverläufen verglichen. Um zu untersuchen, ob die resultierenden Zwangbeanspruchungen die Risskraft N_{cr} überschreiten, werden mit der nachfolgend ersichtlichen Formel 5.1 die zugehörigen Risskräfte der Modelle ermittelt.

$$N_{cr} = f_{ctm} * t_{üb} \quad (5.1)$$

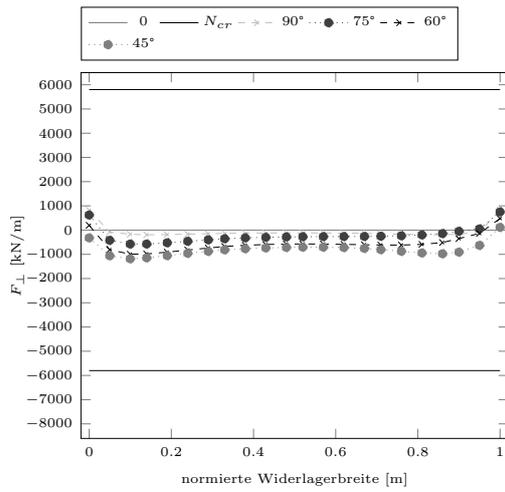
Durch die unterschiedlichen Überbaudicken und Schlankheiten λ ergeben sich die folgenden N_{cr} .

Tabelle 5.3: Darstellung der Risskraft

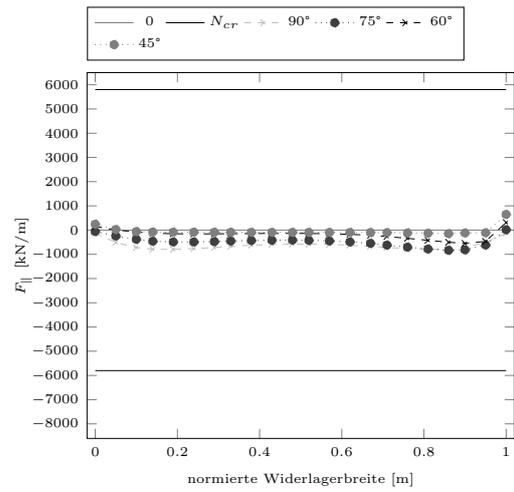
N_{cr} in MN/m		
Modell	Grundsystem 1	Grundsystem 2
	$\lambda = 15$	$\lambda = 20$
M1	3.87	2.90
M2	3.87	2.90
M3	5.80	4.35
M4	5.80	4.35

Aufgrund der positiven Dehnungen infolge der Temperatur entstehen Druckzwangkräfte im Überbau. Bei einer Abkühlung (negative Temperatur) würde eine Umkehrung der Schnittgrößenvorzeichen verursachen und im Überbau Zugspannungen und im Widerlager Druckspannungen ergeben. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass nur bei hohen Temperatureinwirkungen (T2, T3) in Verbindung mit großen Abmessungen (M3, M4) und dem alleinigen Ansatz der Temperatur auf die Überbauplatte (LF4) die jeweilige Risskraft N_{cr} erreicht wird. In den nachfolgenden, repräsentativen Abbildungen werden die Zwangverläufe der Modelle M3 und M4 mit der Temperatur T3 durch die zugehörige N_{cr} - Linie gemäß Tabelle 5.3 abgebildet.

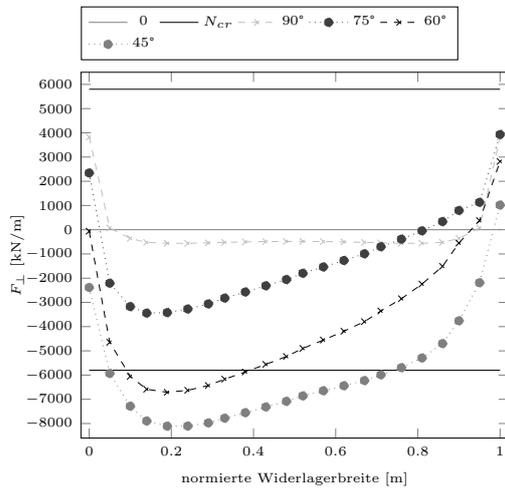
5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau



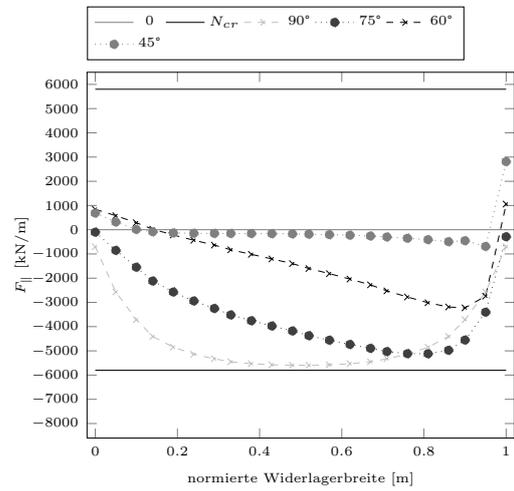
(a) Kraft normal auf Widerlagerwand - LF1 T3



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand - LF1 T3



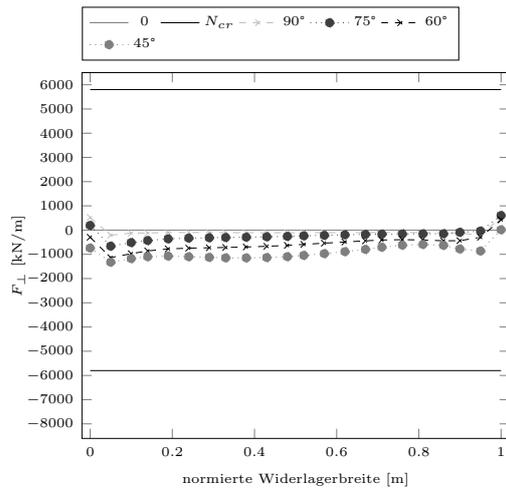
(c) Kraft normal auf Widerlagerwand - LF4 T3



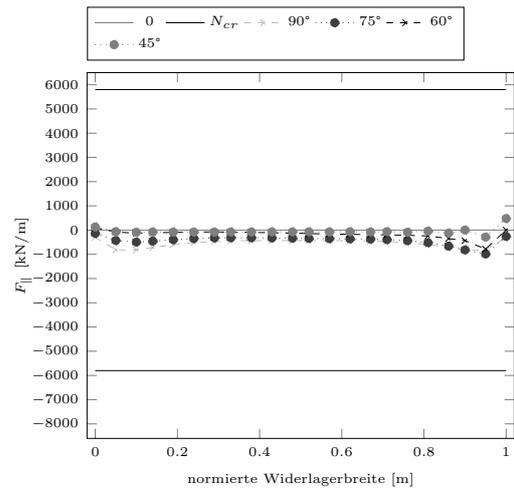
(d) Kraft parallel zur Widerlagerwand - LF4 T3

Abbildung 5.83: Resultierende Kräfte Modell 3 -T3

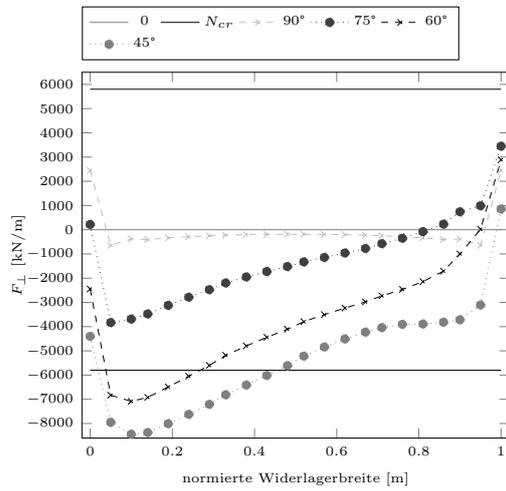
5 Abbildung der Zwangkraftbeanspruchungen im Überbau



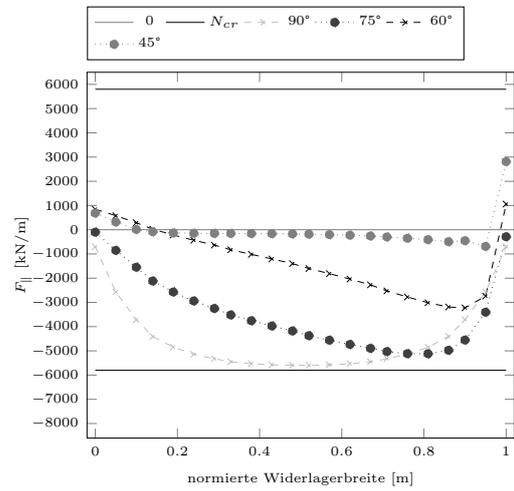
(a) Kraft normal auf Widerlagerwand - LF1 T3



(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF1 T3



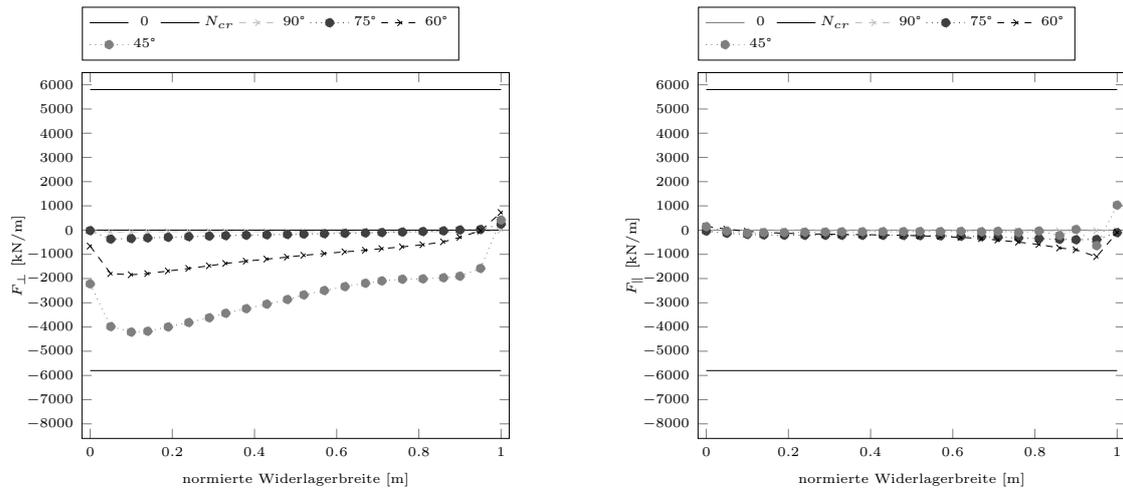
(c) Kraft normal auf Widerlagerwand - LF4 T3



(d) Kraft parallel zur Widerlagerwand - LF4 T3

Abbildung 5.84: Resultierende Kräfte Modell 4 -T3

Zusätzlich wird noch der LF 2 (dTN in x-Richtung auf Überbau und Widerlager) dargestellt, um zu zeigen, dass LF 4 (dTN in x-Richtung auf Überbau) zu einer deutlichen Überschätzung Zwangkraft führt.



(a) Kraft normal auf Widerlagerwand - LF2 T3

(b) Kraft parallel zur Widerlagerwand Modell 4 - LF2 T3

Abbildung 5.85: Resultierende Kräfte Modell 4 -T3

Wie im Vergleich in Abschnitt 5.2.1 ersichtlich, entsteht durch den LF 4 die größte Zwangkraft zufolge Temperatureinwirkung. Da aber eine alleinige Berücksichtigung der Temperatur am Überbau und eine Vernachlässigung der Temperatur auf den Widerlagerwänden in beiden Richtungen zu einer deutlichen Überschätzung der realen Zwangkraftentwicklung und einer Überbemessung führt, kann dieses Ergebnis vernachlässigt werden. Deshalb wurde auch die Risskraft N_{cr} nicht in den Diagrammen der Abschnitte 5.1 und 5.2 berücksichtigt, da dadurch die Skalierung der Verläufe vor allem in den kleinen Modellen und bei niedriger Temperatur (T1) nicht richtig ersichtlich gemacht werden konnte.

Einfluss der Geometrie

Es ist erkennbar, dass die resultierenden Zwangkräfte unabhängig von der Schiefstellung bei größeren Geometrieverhältnissen zunehmen. Zusätzlich können Auswirkungen des l/b_w -Verhältnis respektive der quadratischen ($l/b_w=1$) und rechteckigen Grundrissen ($l/b_w=2$) in den Verformungsfiguren erkannt werden. Vor allem aus den Vergleichen von Modell 1 mit Modell 2 und Modell 3 mit Modell 4 lässt sich schließen, dass mit einer zunehmenden Widerlagerbreite auch die Zwangkraft und die Spannungsspitzen am Anfang und Ende der Widerlagerbreite zunehmen.

Einfluss der Schlankheit und Temperatur

Die Auswirkungen der Schlankheit $\lambda = 20$ werden hier nicht explizit untersucht, da die qualitativen Verläufe grundsätzlich ident sein sollten. Wie schon in Kapitel 4 ersichtlich, resultieren geringere Zwangkraftbeanspruchung durch eine Schlankheit $\lambda = 20$ als $\lambda = 15$.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch eine schiefe Ausbildung des Brückengrundrisses ergeben sich bei integralen Brückentragwerken im Vergleich zu geraden Integralbrücken zusätzliche Zwangbeanspruchungen. Die Auswirkung des Temperaturansatzes auf die Zwangkraftausbildung schiefwinkliger Integralbrücken erfordert deshalb genaue Untersuchungen, um eine Überschätzung der resultierenden Zwangsschnittgrößen aus Temperaturbelastungen speziell in Querrichtung und höhere Bewehrungsmengen zu vermeiden.

Anhand einer Parameterstudie werden Untersuchungen für verschiedene Temperaturansätze für repräsentative Schiefen durchgeführt. Anschließend werden die Auswirkungen des Temperaturansatzes auf den Zwangkraftverlauf im Überbau analysiert. Dafür werden die resultierenden Zwangkräfte für verschiedene Modellsysteme und Schiefstellungen über die normierte Widerlagerbreite abgebildet. Zusätzlich werden verschiedene Temperaturgrößen gewählt, um die Auswirkungen der Zwangkraft bei unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen auf die Brückenbauteile zu verdeutlichen.

Die Wahl des Temperaturansatzes hat einen großen Einfluss auf die Bemessung und die anschließende Bewehrungswahl. Schon bei geradlinigen integralen Bauwerken liefert ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung (x- und y-Richtung) eine unrealistische Abbildung der zentrischen Zwangskraft in Querrichtung. Bei zunehmender Schiefstellung einer Integralbrücke wird aber ersichtlich, dass eine sogenannte Entkoppelung des Temperaturansatzes und folglich ein Temperaturansatz nur in Längsrichtung zu unrealistischen Bemessungsergebnissen der Zwangskraft führt. Eine schiefwinkelige Ausbildung erfordert für eine realistischere Einschätzung der resultierenden Zwangskraft eine Berücksichtigung der Temperatur durch einen kombinierten Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung. Eine Entkoppelung der Temperatur und folglich ein Temperaturansatz in x-Richtung führt also nur bei geringen Schiefstellungen und geraden beziehungsweise konventionellen Integralbrücken zu einer realitätsnahen Einschätzung der Zwangkraftbeanspruchungen.

Die Untersuchungen haben ergeben, wenn die zentrische Zwangsspannung als entscheidender Faktor für den Temperaturansatz gelten soll, dass kein pauschaler Winkel, ab welchem ein Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung (x- und y-Richtung) legitimiert wird, genannt werden kann. Die Schiefstellung kann nur unter Berücksichti-

gung der Brückengeometrie, der Schlankheit der Überbauplatte und der Temperaturgröße an sich ermittelt werden. Es ist aber ersichtlich, dass für die untersuchten Modelle (Überbaulänge und Widerlagerbreite bis 30m) ein entkoppelter Temperaturansatz bis zu 60° Schiefstellung ausreicht, um die Zwangskraft nicht zu überschätzen. Ab Schiefen kleiner als ca. 60° sind genauere Untersuchungen bezüglich eines gekoppelten Ansatzes erforderlich.

Infolge einer genauen Betrachtung der aufgebrachten Temperatureinwirkung lassen sich weiters folgende Erkenntnisse ableiten: Der Zusammenhang zwischen Zwangkraftentwicklung und Temperaturgröße kann durch einen linearen Zusammenhang beschrieben werden. Für die Verständlichkeit werden die nachfolgenden Temperaturwerte neben den Temperaturen hinzugefügt (Überbau/Widerlager). Für die Lastfälle dTN in x-Richtung auf den Überbau und die Widerlager (LF 2) und dtN in x- und y-Richtung auf den Überbau (LF 4) gilt, dass eine Erhöhung der Temperatur von T 1 (20°/10°) auf T 2 (30°/20°) eine Erhöhung der Zwangskraft um 50% und eine weitere Steigung auf die Temperatur T 3 (40°/30°) eine Vergrößerung um das Doppelte, also 100% bezogen auf Temperatur T 1, verursacht. Bei einem gekoppelten Temperaturansatz in Längs- und Querrichtung (LF 1) ist zwar ein linearer Anstieg der resultierenden Temperatur und Zwangskraft zu erkennen, die Zwangskraft vergrößert sich bei der Temperatur T 2 (30°/20°) um 7-10% und bei der Temperatur T 3 (40°/30°) 14-20%. Eine pauschale Erhöhung der Zwangskraft kann hier für die Modelle nicht mehr genannt werden. Weiters ist ersichtlich, dass obwohl die Differenz der Temperatur zwischen Widerlager und Überbau gleich bleibt, der absolute Wert der Temperatur einen Einfluss auf die Zwangskraft hat. Die Schiefwinkeligkeit beeinflusst außerdem die Zwangbeanspruchung und es kann deshalb ein nichtlinearer Einfluss durch die Schiefe im Grundriss nachgesagt werden. Zurückzuführen ist dies auf den Einfluss der Temperatur in Querrichtung, die höhere Steifigkeit des Widerlagers in Querrichtung und die dadurch resultierende Behinderung in jener Richtung.

Um die zuvor erwähnten Ergebnisse zu bestätigen, folgte eine Betrachtung der Auswirkung des Temperaturansatzes auf die Zwangskraft im Überbau. Primär werden dabei die quantitativen Zwangkraftverläufe, das Bauteilverhalten unter Temperaturbeanspruchung und der Einfluss der Schiefwinkeligkeit untersucht. Die Betrachtungen der Auswirkung der Schiefstellung auf den Zwangkraftverlauf zeigen, dass vor allem die Ecken der Überbauplatte und das Rahmeneck durch die Schiefe im Grundriss zusätzlich beansprucht werden. Außerdem wird durch die Untersuchungen ersichtlich, dass die Risskraft N_{cr} nur bei hohen Temperatureinwirkungen und großen Abmessungen (Überbaubreiten von 15-30 m, Überbaulängen von 30 m) und bei alleinigem Ansatz der Temperatur auf die Überbauplatte durch die resultierenden Zwangkräfte erreicht wird. Da aber eine alleinige Berücksichtigung der Temperatur am Überbau und eine Vernachlässigung der Temperatur auf den Widerlagerwänden in beiden Richtungen zu einer deutlichen Überschätzung

der realen Zwangskraftentwicklung und einer unwirtschaftlichen Bemessung führt, kann dieses Ergebnis vernachlässigt werden.

Ausblick

Die ermittelten Zwangsschnittgrößen dieser Arbeit wurden mit einer linear-elastischen Berechnung ermittelt. Eine linear-elastische Berechnung überschätzt aber generell die realen, auftretenden Zwangsspannungen und stellt eine konservative Bemessungsannahme dar. Es wäre deshalb von Vorteil das nichtlineare Materialverhalten bei weiteren Untersuchungen zu berücksichtigen.

Darüber hinaus bedarf es noch einer detaillierten, numerischen Berechnung der erforderlichen Bewehrungsmenge und folglich eines Bemessungsvorschlags für schiefwinkelige Integralbrücken. Ein Vergleich der Temperaturansätze und der folglich erforderlichen Bewehrungsmengen, ermittelt mit einem praxistauglichen Verfahren, wäre deshalb weiters noch erforderlich. Vertiefende Untersuchungen bezüglich des Einflusses von Rissbildung, Vorspannung, Kriechen und Schwinden, Boden-Bauwerk-Interaktion, Zwangskraftabbau auf schiefe Grundrisse sind ebenfalls empfehlenswert, um noch eine genauere Abschätzung des realen Zwangkraftverhaltens von schiefwinkligen, integralen Bauwerken infolge Temperatur zu gewinnen. Detaillierte Untersuchungen wurden weiters in den jeweiligen Teilgebieten am Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz im übergeordneten Forschungsprojekt in [7] und [20] numerisch und mittels Großversuchen durchgeführt. Diese Ergebnisse sollten zukünftig zu einer wirtschaftlicheren Berücksichtigung von Zwangsschnittgrößen in den Normenwerken und Richtlinien führen.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Schlicke. *Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton*. ISBN: 978-3- 85125-363-4. Verlag der Technischen Universität Graz, 2014.
- [2] A. Weisner und T. Richter. “Massige Bauteile aus Beton”. In: *Zement-Merkblatt Betontechnik*. Vol. B 11. Informationszentrum Beton GmbH, 2019.
- [3] Austrian Standards Institute. *Eurocode 1: Allgemeine Einwirkungen — Temperatureinwirkungen (ÖNORM EN 1991-1-5)*. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut, Wien. Ausgabe: 2012-01-01. 2012.
- [4] Technische Universität Graz - Institut für Betonbau. “Skriptum Stahlbetonbau”. Vorlesungs- und Übungsunterlagen. 2019.
- [5] G. König und N. V. Tue. *Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton*. Vol. Heft 466. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1996.
- [6] D. Schlicke und L. Matiaskova. “Advanced Computational Methods versus Analytical and Empirical Solutions for Determining Restraint Stresses in Bottom-Restrained Walls”. In: vol. Vol. 17. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2019.
- [7] R. Della Pietra. “Integralisierung von Bestandsbrücken”. PhD thesis. Technische Universität Graz, 2017.
- [8] M. Rudolf. *Einfluss des Kreuzungswinkels auf Kraftfluss und Bewehrung bei zweifedrigen, integralen Straßenbrücken*. Masterarbeit, Technische Universität Graz. 2017.
- [9] G. Mahlo und S. Martin. “Funktionale Anforderungen und strukturbedingtes Verhalten von Schleppplatten bei integralen Straßenbrücken - Teil 1: Entwurfsmerkmale und Einflüsse des Brückentragwerks auf das Gebrauchsverhalten von Schleppplatten”. In: *Bauingenieur*. Band 90. VDI Fachmedien, 2015, pp. 427–435.
- [10] S. Engelsmann und J. Schlaich und K. Schäfer. *Entwerfen und Bemessen von Betonbrücken ohne Fugen und Lager*. Vol. Heft 496. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1999.

-
- [11] Österreichische Forschungsgesellschaft Straßen - Schiene - Verkehr. *RVS 15.02.12 - Bemessung und Ausführung von Integralen Brücken*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straßen - Schiene - Verkehr. 2018.
- [12] N.V. Tue und R. Della Pietra und M. Mayer. "Integralbrücken - Tragverhalten und Anregungen zur Bemessung einschließlich Integralisierung von Bestandbrücken". In: *Beton Kalender 2021*. Ernst und Sohn, 2021. Chap. 6, pp. 607–672. ISBN: 9783433610206.
- [13] M. Pötzl und J. Schlaich und K. Schäfer. *Grundlagen für den Entwurf, die Berechnung und konstruktive Durchbildung lager- und fugenloser Brücken*. Vol. Heft 461. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1996.
- [14] Austrian Standards Institute. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (ÖNORM EN 1992-1-1)*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien. Ausgabe: 2018-01-01. 2018.
- [15] Austrian Standards Institute. *Eurocode 1: Allgemeine Einwirkungen — Temperaturwirkungen, Nationale Festlegungen (ÖNORM B 1991-1-5)*. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut, Wien. Ausgabe: 2012-01-01. 2012.
- [16] R. Geier und V. Angelmaier et.al. *Integrale Brücken - Entwurf, Berechnung, Ausführung, Monitoring*. Ernst & Sohn, 2017.
- [17] N. V. Tue und R. Della Pietra und S. Oberwalder. "Wesentliche Aspekte bei der Planung integraler Brücken". In: *Beton- und Stahlbetonbau*. Vol. 114. 9. 2019, pp. 683–691.
- [18] Austrian Standards Institute. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessung und Konstruktionsregeln (ÖNORM EN 1992-2)*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien. Ausgabe: 2012-03-01. 2012.
- [19] Austrian Standards Institute. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton - und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessung und Konstruktionsregeln - Nationale Festlegungen (ÖNORM B 1992-2)*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien. Ausgabe: 2019-05-01. 2019.
- [20] M. Mayer. "Arbeitstitel: Temperaturzwang und Umlagerungen bei Integralbauwerken". Dissertation in Vorbereitung. 2022.