



Theoretische und numerische Analysen des Durchschub- und Längsverschiebewiderstandsverhaltens von Eisenbahnbrücken

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur

Im Rahmen des Studiums Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

An der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von
Bakk.techn. **Christine Walchshofer**

Eingereicht bei
Assoc. Prof. Dr. **Alfred Strauss**
Institut für konstruktiven Ingenieurbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren

Wien, im Juni 2015
Walchshofer Christine



Danksagung

Besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer Herrn Alfred Strauss aussprechen, der mir das Thema der Gleis Tragwerk Interaktion näher gebracht und Arbeitsmaterial zur Verfügung gestellt hat. Auch die wertvolle Zeit die er mir für Ratschläge und Denkanstöße gegeben hat, war sehr hilfreich. Weiters danken möchte ich Benjamin Täubling, einem studentischen Mitarbeiter des Instituts, der mir bei der Modellbildung Hilfestellung leistete und immer ein offenes Ohr hatte.

Ganz besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich auf meinem Weg stets unterstützt und motiviert hat. Dies gilt auch für meinen Lebensgefährten Christian, der immer für mich da war und mich ermutigte.

Weiters danken möchte ich meinem Studienkollegen David, mit dem ich durch zahlreich absolvierte Projekte und Prüfungen zu einem guten Team zusammenwuchs. Ebenfalls dankbar bin ich meiner Freundin Corinna, die mir die Arbeit gewissenhaft Korrektur las.

Auch den vielen Freunden, die ich während der Studienzeit kennen lernen durfte, möchte ich hier danken. Auch abseits des Studienalltags haben sie mir eine sehr schöne Zeit und viele Erlebnisse in Wien geschenkt. Gute Freunde im Umfeld sind eine wichtige Basis für den Studienerfolg.

Erklärung

Ich erkläre,

dass ich diese Arbeit eigenständig verfasst habe und mich keiner Quellen als den angegebenen bedient habe,

dass ich diese Arbeit weder im In- noch im Ausland einem Beurteiler/ einer Beurteilerin als Prüfungsarbeit vorgelegt habe,

dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit setzt sich mit dem Durchschub- und Längsverschiebewiderstandsverhalten von Eisenbahnbrücken auseinander. Für das Verhalten dieser Widerstände ist zunächst die gemeinsame Antwort von Gleis und Tragwerk auf eine Belastung zu betrachten. Die durchgehend geschweißte Schiene über einem Tragwerk behindert bei einer Belastung, zum Beispiel durch Temperaturänderungen, den Überbau in seiner Bewegung, wodurch Längskräfte entstehen. Gleis und Tragwerk treten in Interaktion und leisten gemeinsam Widerstand gegen die Längskräfte. Das in Längsrichtung vorhandene Last - Verformungsverhalten des Gleises oder der Schienenbefestigung wird durch den Verschiebewiderstand und den Durchschubwiderstand angegeben.

In der ÖNORM 1991-2 sind die 3 Lastfälle Bremsen und Anfahren, Temperaturänderung und Brückendurchbiegung als Einwirkung auf die Brückenstruktur verankert. In dieser Arbeit wird ein weiterer Lastfall, der "Ruck" genannt wird, theoretisch aufgearbeitet. Dieser handelt vom Steifigkeitswechsel der Schienenbefestigung bei der Überfahrt eines Zuges.

Im Fokus dieser Arbeit lag die Erstellung eines Finite - Elemente Modells für die Eisenbahnbrücke über die L110 auf der Strecke St.Pölten - Wien im Netz der ÖBB. Die Brücke wurde durch die Firma Fritsch, Chiari und Partner ZT GmbH mit einem Monitoringprogramm ausgestattet, welches als Datenbasis diente. Die gemessenen Bauwerkstemperaturen und die daraus resultierenden Verschiebungen fungierten zur Modellkalibrierung.

Am Ende sollten die Ergebnisse durch die definierten Randbedingungen der erarbeiteten Struktur mit den Verschiebungen aus dem Monitoringprogramm vergleichbar sein. Damit wurde geprüft, ob sich die Programme ATENA und GiD für die Untersuchung der Gleis Tragwerk Interaktion eignen. Der Vergleich des theoretischen Durchschub- und Längsverschiebewiderstandsverhaltens mit dem realen Verhalten gibt Aufschluss über mögliche Anpassungen und Verbesserungen der Nachweise.

Abstract

This master thesis deals with the behavior of creep resistance and the resistance to longitudinal displacement on railway bridges. In order to get the behavior of the resistance, the collective answer of the rail bridge interaction after load has to be considered.

The continuous welded rail on a support structure on a load, due to for example temperature changes, constricts the superstructure in its movement. Therefore, longitudinal forces are produced. The rail and the support structure interact and in combination offer resistance against longitudinal forces. Creep resistance and resistance to longitudinal displacement specify the present longitudinal load - deformation behavior of the rail or the fastening for rail.

The three loading cases of braking/ accelerating due to passing trains, seasonal temperature changes and bending of supporting structure, are regulated in ÖNORM 1991-2. Another loading case treated theoretical in this thesis is the load due to a change of the coupling stiffness in longitudinal direction between the track and bridge due to a passing train.

The creation of a finite element model was focused for the bridge over the L110 between the direction of St. Pölten to Vienna, in the railway network of the ÖBB. A monitoring program over the whole bridge, which was made by the company Fritsch, Chiari und Partner ZT GmbH, is used as data base. The measured temperatures of the support structure and the consequential results serve as model calibration.

In the end, the results of the prepared structure, by means of the defined boundary conditions, should be comparable to the displacement in the monitoring program. For this reason the qualification of the used programs ATENA and GiD was verified for the study of the track bridge interaction. The comparison of the theoretical behavior of creep resistance and the resistance to longitudinal displacement with the actual behavior gives information about possible adjustments and improvements in the verification.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Erklärung	3
Kurzfassung	4
Abstract	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	12
Diagrammverzeichnis	13
1 Einleitung	14
Aufgabenstellung.....	15
2 Einführende Begriffsbestimmungen	17
2.1 Erläuterungen zum Thema Eisenbahnbau.....	17
2.2 Erklärung des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes laut [6] und [7].	20
2.3 Finite Elemente Methoden nach [13]	22
2.3.1 Grundlagen	22
2.3.2 Lösung für nichtlineare Gleichungen.....	23
2.3.3 Newton - Raphson - Verfahren	24
3 Gemeinsame Antwort von Tragwerk und Gleis	26
3.1 Das durchgehend geschweißte Gleis.....	26
3.2 Einflussparameter der Gleis Tragwerk Interaktion	27
3.3 Wesentliche Lastfälle	30
3.3.1 Temperaturänderung	31
3.3.2 Brems- und Anfahrkräfte	31
3.3.3 Vertikalkräfte - Tragwerksbiegung	31
3.4 Folgen für die Brücke und das Gleis.....	32
3.4.1 Kombination der Lastfälle.....	32
3.4.2 Zulässige zusätzliche Spannungen bei einer Brücke mit durchgehend geschweißtem Gleis.....	33
3.4.3 Relative und absolute Verschiebung	33

3.4.4	Endverdrehung des Tragwerks.....	34
3.4.5	Veränderliche Einwirkungen.....	34
3.5	Modellierung und Berechnung des gemeinsamen Gleis-Tragwerkssystem	34
4	Bestimmung der Interaktion von Gleis und Tragwerk	36
4.1	Gleis Tragwerk Interaktion	36
4.1.1	Überblick über die nichtlinearen Lastkombinationen	36
4.1.2	Verfügbare Spannungskapazität.....	37
4.1.3	Grundannahmen zur Gleis-Tragwerks-Interaktion	40
4.1.4	Elastische Belastbarkeit.....	43
4.2	Genauere Formulierung.....	46
4.2.1	Stab auf elastischem Unterbau	46
4.2.2	Temperaturänderung des Tragwerks.....	50
4.2.3	Änderung der Koppelungsstelle durch den vorbeifahrenden Zug	57
4.3	Beispiel.....	61
4.3.1	Einfeld - Brücke	61
5	Fallstudie	66
5.1	Ausgangssituation - Brücke über die L110	66
5.2	Monitoringprogramm	69
6	Anpassung anhand des 1 Höcker - Modells mit ATENA	71
6.1	Modellbildung	71
6.1.1	Geometriekennwerte	71
6.1.2	Lastfälle.....	73
6.1.3	Materialkennwerte.....	74
6.1.4	Einwirkungen	79
6.1.5	Strukturantwort.....	79
6.1.6	Analysemethoden	80
6.2	Variation der Randbedingungen in ATENA.....	81
6.3	Durch Schubwiderstand – Rekonstruktion Normmodell.....	85
6.3.1	Modell A	85
6.3.2	Modell B mit dem endgültigen Material	88
7	Modellierung über die gesamte Struktur mit GiD.....	91
7.1	Modellbildung	91
7.1.1	Systemidealisation	91
7.1.2	Geometrie- und Materialkennwerte	91
7.1.3	Einwirkungen	92
7.1.4	Strukturantwort.....	93

7.1.5	Variation der Randbedingungen.....	93
7.2	Basismodell C - Temperatur im Frühling	95
7.2.1	Ergebnisse der Jahreszeitenmodelle mit monituierter Temperatur	97
7.3	Modell D - Temperatur und reduzierte Steifigkeit am Übergang	100
7.4	Modell E - Temperatur und Bremsen.....	104
7.5	Modell F - Temperatur und Biegung.....	105
7.6	Vergleich mit dem Beispiel der Einfeldbrücke aus 4.3.1.....	107
8	Zusammenfassung und Ausblick	110
9	Anhang	112
9.1.1	Durchschubwiderstand - Rekonstruktion Normmodell A.....	113
9.1.2	Modell C: Temperatur - Lastfall Frühling - Erwärmung	115
9.1.3	Modell C: Temperatur - Lastfall Frühling - Abkühlung	118
9.1.4	Modell D: Reduzierte Steifigkeit - Lastfall Frühling - Abkühlung.....	121
9.1.5	Modell D: Reduzierte Steifigkeit - Lastfall Frühling - Erwärmung.....	130
9.1.6	Modell E - Temperatur und Bremsen.....	139
9.1.7	Modell F: Temperatur und Durchbiegung	140
10	Anhang II - Lebenslauf.....	141
	Literaturverzeichnis	144
	Eidesstattliche Versicherung	146
	Auszug aus dem Strafgesetzbuch (StGB).....	146

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: System ÖBB-PORR [14]	18
Abbildung 2: Grundriss und Schnitt des ÖBB-PORR System [14]	18
Abbildung 3: Skizze einer Schienenbefestigung [15]	19
Abbildung 4: Schienenbefestigung L110 [9]	19
Abbildung 5: Schienenauszug [18]	20
Abbildung 6: Modell der Längswiderstände [8].....	21
Abbildung 7: Gleichungssystem in Matrixschreibweise [13].....	22
Abbildung 8: Vergleich der Lösungsverfahren [13].....	23
Abbildung 9: Vergleich der Steifigkeitsmatrizen [eigene Darstellung]	24
Abbildung 10: Newton Raphson Verfahren [13]	25
Abbildung 11: Schienenspannung durch Temperaturänderung [7].....	27
Abbildung 12: Auszugslängen für unterschiedlich gelagerte Brücken [3].....	28
Abbildung 13: Längsverschiebe-Widerstandsgesetz [3]	30
Abbildung 14: Lastmodell 71 [3]	32
Abbildung 15: Lastmodell SW/0 und SW/2 [3]	32
Abbildung 16: Gleis Tragwerkssystem als Modell [3].....	35
Abbildung 17: Charakteristische Werte [5].....	40
Abbildung 18: Theoretisches Model einer einfachen Brücke mit CWR [5]	40
Abbildung 19: Gleis Tragwerk Interaktion der Länge nach [5]	42
Abbildung 20: Situation der Deformation nach einem vergangenen Lastfall nach Ruge et.al. [79] (a) Verschiebungsdifferenz ($u_R - u_B$); (b) Deformation u_D der Koppelungsstelle; (c) entsprechende, verfügbare Kapazität für eine nachfolgende elastische Verformung [5]	45
Abbildung 21: Stabelement mit infinitesimaler Länge dx und elastischer Steifigkeit [5].....	47
Abbildung 22: Auf das Gleis wirkende Kräfte: Koppelungsstelle im elastischen Zustand [5]	49
Abbildung 23: Längskräfte-Gleichgewicht an einem Gleis-Tragwerks-Element [5]	49
Abbildung 24: System aus einem Einzelement [5]	50
Abbildung 25: Gleichgewicht des Gesamtsystems [5].....	52
Abbildung 26: Eingebettetes Gleiselement der Länge l_j , mit der lokalen Achse $0 \leq x_j \leq l_j$ [5]	55
Abbildung 27: Gleichgewicht des Gesamtsystems [5].....	56
Abbildung 28: Längsschnitt über eine einfach gelagerte Brücke [5]	62
Abbildung 29: Querschnitt einer RHEDA 2000® Konstruktion [5]	62
Abbildung 30: Geometrie-, Material- und Belastungskennwerte der Einfeld - Brücke [5].....	63

Abbildung 31: Analyse der Schienenlängsspannung [5].....	64
Abbildung 32: Verteilung der elastischen und plastischen Koppelungsstellen [5].....	64
Abbildung 33: Variation der Lagersteifigkeit mit linearer Lastkombination der Temperaturänderung und Biegung [5].....	65
Abbildung 34: Lagerschema der Brücke über die L110 [16].....	66
Abbildung 35: Längsschnitt und Grundriss der Brücke über die L110 [16].....	67
Abbildung 36: Regelquerschnitt der Brücke über die L110 [16].....	68
Abbildung 37: Brückenübersicht mit den Monitoringpunkten [9].....	70
Abbildung 38: Macro-Elemente anlegen in ATENA und GiD, [eigene Darstellung]	72
Abbildung 39: Schienenprofil [19].....	73
Abbildung 40: Modell 1 Höcker, [eigene Darstellung].....	73
Abbildung 41: Annahmen der Bauteilbreiten im Modell, verändert [14].....	73
Abbildung 42: Auswahl an Lastfällen, [eigene Darstellung]	74
Abbildung 43: Materialauswahl in ATENA, [eigene Darstellung].....	74
Abbildung 44: Materialgesetz für SBeta Material (Beton), [eigene Darstellung].....	75
Abbildung 45: Materialgesetz für Plane Stress Elastic Isotropic Material (Stahl), [eigene Darstellung].....	76
Abbildung 46: Materialgesetz für 3D BiLinear Steel Von Mises (Elastomer), [eigene Darstellung]	77
Abbildung 47: Materialgesetz smeared reinforcement (Bügelbewehrung), [eigene Darstellung]	78
Abbildung 48: Monitoringpunkt setzen in ATENA, [eigene Darstellung]	80
Abbildung 49: Anlegen von Berechnungsschritten, [eigene Darstellung]	80
Abbildung 50: Variation der Lagerung mit Deformationsbilder, [eigene Darstellung] ..	82
Abbildung 51: Kraft-Verschiebungs-Diagramme, [eigene Darstellung]	83
Abbildung 52: Vergleich der Horizontalkräfte an Modell 3, [eigene Darstellung].....	84
Abbildung 53: Modellansicht der Materialien und Monitoringpunkte, [eigene Darstellung]	85
Abbildung 54: Durchschubwiderstand - Verschiebungs - Diagramm, [eigene Darstellung]	86
Abbildung 55: Variantenstudie zur Änderung der Parameter [eigene Darstellung]	86
Abbildung 56: 8 Höcker - Modell, [eigene Darstellung].....	87
Abbildung 57: 32 Höcker - Modell, [eigene Darstellung].....	87
Abbildung 58: 64 Höcker - Modell, [eigene Darstellung].....	88
Abbildung 59: Materialmodell, [eigene Darstellung].....	88
Abbildung 60: Vergleich Modell A und B am 1 Höcker - Modell, [eigene Darstellung]	89
Abbildung 61: Widerstandskraft - Verschiebungs - Diagramm am Modell B mit GiD, [eigene Darstellung].....	90
Abbildung 62: Lagersituation, [eigene Darstellung]	91
Abbildung 63: Lagersituation in GiD, [eigene Darstellung]	92
Abbildung 64: Materialgesetz der Endfedern, [eigene Darstellung].....	92

Abbildung 65: Übersicht der Monitoringpunkte in GiD, [eigene Darstellung]	93
Abbildung 66: Variation der Schienenlagerung, [eigene Darstellung]	94
Abbildung 67: Beispiel der Erwärmung am Brückenende, [eigene Darstellung]	95
Abbildung 68: Verschiebung Tragwerk, [eigene Darstellung]	96
Abbildung 69: Dehnung Schiene, [eigene Darstellung]	96
Abbildung 70: Verschiebung bei Erwärmung, [eigene Darstellung]	96
Abbildung 71: Verschiebung bei Abkühlung, [eigene Darstellung]	97
Abbildung 72: Vergleich der Berechnung mit den Monitoringdaten [8]	97
Abbildung 73: Ergebnisse der Modelle [8]	98
Abbildung 74: Temperaturkombinationen [8]	99
Abbildung 75: Ergebnisse der unterschiedlichen Temperaturkombinationen [8]	99
Abbildung 76: Materialübersicht, [eigene Darstellung]	100
Abbildung 77: Vergleich der Materialkennwerte der Puffer und der reduzierten Puffer, [eigene Darstellung]	100
Abbildung 78: Spannung bei Erwärmung Tragwerk 8°, Schiene 28°, [eigene Darstellung]	101
Abbildung 79: Spannung bei Abkühlung Tragwerk -14°, Schiene -28°, [eigene Darstellung]	102
Abbildung 80: Verschiebung bei Erwärmung, [eigene Darstellung]	102
Abbildung 81: Verschiebung bei Abkühlung, [eigene Darstellung]	103
Abbildung 82: Modell mit Lager am linken Widerlager und der Verschiebung in Feld 1, [eigene Darstellung]	105
Abbildung 83: Modellansicht mit Material, [eigene Darstellung]	105
Abbildung 84: Modell-Detail zu Stütze 2, [eigene Darstellung]	106
Abbildung 85: Verteilung der Schienenlängsdehnungen vergleich Schienentemperatur, verändert [8]	107
Abbildung 86: Erwärmung Schiene 28°C Tragwerk 14°C [eigene Darstellung]	108
Abbildung 87: Modellvergleich unterschiedlicher Schienentemperatur [8]	108
Abbildung 88: Variation der Lagersteifigkeit mit linearer Lastkombination der Temperaturänderung und Biegung; verändert [8]	109
Abbildung 89: Durch Schubkraft - Verschiebungs - Diagramme [eigenen Darstellung]	113
Abbildung 90: Durch Schubkraft - Verschiebungs - Diagramm 64 Höcker [eigene Darstellung]	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Monitoringdaten [17].....	69
Tabelle 2: Materialkennwerte für Modell A und B, [eigene Darstellung]	76
Tabelle 3: Materialkennwerte für Modell A und B, [eigene Darstellung]	77
Tabelle 4: Materialkennwerte für 3D BiLinear Steel Von Mises (Elastomer), [eigene Darstellung]	78
Tabelle 5: Materialkennwerte für SBeta Material, [eigene Darstellung]	78
Tabelle 6: Materialkennwerte für smeared reinforcement, [eigene Darstellung].....	79
Tabelle 7: Materialkennwerte für 3D BiLinear Steel Von Mises (Elastomer), [eigene Darstellung]	89
Tabelle 8: Materialkennwerte für SBeta Material, [eigene Darstellung]	89
Tabelle 9: Vergleich der zusätzlichen Spannung	103

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1a-d: Erwärmung: Tragwerk 2°C - Schiene 28°C.....	115
Diagramm 2a-d: Erwärmung: Tragwerk 8°C - Schiene 28°C.....	116
Diagramm 3a-d: Erwärmung: Tragwerk 14°C - Schiene 28°C.....	117
Diagramm 4a-d: Erwärmung: Tragwerk -2°C - Schiene -28°C	118
Diagramm 5a-d: Erwärmung: Tragwerk -8°C - Schiene -28°C	119
Diagramm 6a-d: Erwärmung: Tragwerk -14°C - Schiene -28°C	120
Diagramm 7a-d: 2 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C	121
Diagramm 8a-d: 2 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -8°C Schiene -28°C	122
Diagramm 9a-d: 2 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -14°C Schiene -28°C	123
Diagramm 10a-d: 4 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C	124
Diagramm 11a-d: 4 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -8°C Schiene -28°C	125
Diagramm 12a-d: 4 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -14°C Schiene -28°C ..	126
Diagramm 13a-d: 8 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C	127
Diagramm 14a-d: 8 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -8°C Schiene -28°C	128
Diagramm 15a-d: 8 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -14°C Schiene -28°C ..	129
Diagramm 16a-d: 2 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 2°C Schiene 28°C.....	130
Diagramm 17a-d: 2 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 8°C Schiene 28°C.....	131
Diagramm 18a-d: 2 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 14°C Schiene 28°C....	132
Diagramm 19a-d: 4 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 2°C Schiene 28°C.....	133
Diagramm 20a-d: 4 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 8°C Schiene 28°C.....	134
Diagramm 21a-d: 4 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 14°C Schiene 28°C....	135
Diagramm 22a-d: 8 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 2°C Schiene 28°C.....	136
Diagramm 23a-d: 8 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 8°C Schiene 28°C.....	137
Diagramm 24a-d: 8 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 14°C Schiene 28°C....	138
Diagramm 25a-d: Temperatur und Bremsen: Tragwerk -2°C Schiene -28°C	139
Diagramm 26a-d: Temperatur und Durchbiegung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C.....	140

1 Einleitung

Brücken verbinden. [12]

Sie überwinden Hindernisse und verbinden zwei Seiten. Darum gebrauchten Menschen schon sehr früh Brücken in Form von umgestürzten Bäumen und bewusst platzierten Stämmen. Archäologische Funde belegen, dass bereits in der Jungsteinzeit Holzbrücken gebaut wurden und diese lange Zeit genutzt werden konnten. Über die Jahrhunderte wurde diese Kunst beispielweise durch den Aquäduktbau der Römer und den Hängebrückenbau aus Pflanzenfasern in Asien und Südamerika immer weiter entwickelt. Mit den Baustoffen Eisen und Beton wurde der Brückenbau in der Zeit der Industrialisierung perfektioniert.

Die Geschichte der österreichischen Eisenbahn beginnt im 19. Jahrhundert mit der ersten Pferdeeisenbahn von Linz nach Budweis. Kurz darauf wurde die erste Dampfeisenbahn, die Kaiser-Ferdinand-Nordbahn, und somit auch die dazu benötigten Eisenbahnbrücken aus Holz und Stein errichtet.

Die Anforderungen an eine Eisenbahnbrücke sind im Vergleich zu Straßenbrücken komplexer, die Beanspruchungen sind größer und konzentrierter und zudem werden deutlich höhere Längskräfte übertragen. Bei den Belastungen auf das Gleis wird zwischen äußerer und innerer Belastung unterschieden. Bei der äußeren Belastung wird die Radkraft über den Kontakt von Rad und Schiene in das Gleis eingeleitet. Dies ruft in den einzelnen Konstruktionselementen (Schiene, Schwelle, Schienenbefestigung, Schotter) innere Belastungen hervor. Hierzu gehören innere seitliche Belastung, Vertikal- und Längskräfte. Letztere beziehen sich auf das lückenlos verschweißte Gleis.

Die für diese Arbeit entscheidende Komponente ist die Längskraft, die aus

- Anfahr- und Bremskräften,
- Temperaturbeanspruchung,
- Durchbiegung infolge von Vertikalbelastung und
- anderen Einwirkungen wie Kriechen und Schwinden, resultiert.

Die genannten Einwirkungen rufen einen ungleichmäßigen Verlauf in der Schiene hervor und dadurch entstehen Längsverschiebungen zwischen Schiene und Schwelle bzw. zwischen Schwelle und Schotter.

Aufgabenstellung

Diese Arbeit ist Teil des Projektes MAGIT - Monitoringbasierte Analyse der Gleis Tragwerk Interaktion. [2]

Das Streckennetz der ÖBB wird hauptsächlich mit durchgehend verschweißten Schienen ausgeführt. Durch Tragwerksverformungen, resultierend aus Temperatur, Anfahr-, Brems- und Vertikalbelastung, entstehen zusätzliche Schienenspannungen, denen nur mit Schienenauszügen entgegnet werden kann.

Zur Vermeidung von Schienenbruch bei Zugspannung und Gleisverwerfung bei Druckspannung, werden Schienennormalspannungen beschränkt. Dadurch wird auch die Wahl des statischen Systems, sowie die Querschnittsgestaltung beeinflusst. Wenn es erforderlich ist, muss zu speziellen Schienenbefestigungsmitteln oder nötigenfalls zu Schienenauszugsvorrichtungen gegriffen werden. Letztere stellen eine Unstetigkeit im Gleis dar und infolgedessen wird zum Beispiel der Fahrkomfort negativ beeinträchtigt und die Lärmemissionen, Entgleisungsgefahr, sowie auch der Erhaltungsaufwand erhöht.

Bei Belastung wird die Schiene in der Dehnung behindert, was wiederum Spannungen verursacht, die in Größe und Verteilung vom Durchschubwiderstand der Schiene in der Schienenbefestigung und vom Längsverschiebewiderstand des Gleisrostes im Schotter abhängen.

Das Projekt MAGIT nimmt sich die Lösung folgender vier Arbeitspakete zum Ziel:

- Aufbereitung der Monitoringdaten
- Trendaufbereitung des Strukturverhaltens aus den Monitoringdaten
- Theoretische und numerische Analysen des Durchschub- und Längsverschiebewiderstandsverhaltens von Eisenbahnbrücken
- Entwicklung eines universellen Durchschub- und Längsverschiebewiderstandsmodells

Ziel dieser Arbeit ist es nun die Entwicklung eines Modells zur Analyse des Durchschub- und Längsverschiebewiderstandes von Eisenbahnbrücken. Als Grundlage dient die Eisenbahnbrücke über die L110, von der in den Programmen ATENA und GiD der Firma Cervenka Consulting ein computerbasiertes Modell erstellt wird. Die nötigen Unterlagen zur Ausführung liegen von den ÖBB vor. Dabei wird die passende Steifigkeit der Pufferelemente zwischen Tragwerk und Schiene erst im Laufe der Modellanpassung ermittelt.

Von der Brücke über die L110 liegen Daten aus einem zweijährigen Monitoring vor. Die Temperaturen und Bewegungen im Bauwerk wurden aufgezeichnet und nun verwendet um das Modell anzupassen.

In den vorangehenden Kapiteln werden die theoretischen Grundlagen behandelt. Kapitel 2 dient als einleitende Erklärung für eisenbahnspezifische Begriffe und Grundlagen der Programmberechnung.

Kapitel 3 und 4 befassen sich mit der Gleis Tragwerk Interaktion basierend auf der ÖNORM 1991-2, dem UIC-Kodex 774-3 und der Dissertation von Dina Ruviana Widarda. Es wird ein Beispiel einer Einfeldbrücke gezeigt, dass abschließend in Kapitel 7 als Vergleich dient.

Kapitel 5 gibt einen kurzen Überblick zur Fallstudie, der Brücke über die L110. Das Monitoringprogramm der Firma Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH und die daraus zur Verfügung gestellten Daten werden vorgestellt.

Beginnend mit dem Programm ATENA werden in Kapitel 6 die Materialparameter hinsichtlich des Durchschubwiderstandes angepasst. Dies erfolgt am "1 Höcker - Modell", welches aus einem einzigen Schienenbefestigungs-Paar besteht.

Anschließend wird in Kapitel 7 die gesamte Struktur der Brücke inklusive Dammbereich auf beiden Seiten mit verschiedenen Lastfällen im Programm GiD berechnet und letztendlich mit den theoretischen Grundlagen verglichen.

2 Einführende Begriffsbestimmungen

2.1 Erläuterungen zum Thema Eisenbahnbau

Dieser erste Abschnitt dient zu Beginn als Einführung für den Leser. Grundsätzliche Begriffe des Eisenbahnbaus werden laut [11] erklärt. Anschließend sollen die Zusammenhänge von Gleis und Tragwerk anhand des Durchschub- und Längsverschiebewiderstandes dargelegt werden. Im Zuge der Masterarbeit wurde ein Computermodell der Brücke über die L110 mit den Programmen ATENA und GiD erstellt. Der letzte Abschnitt dieses Kapitel widmet sich den Lösungswegen die ein solches Programm für die Berechnung anwendet. Diese Lösungswege beruhen auf der nichtlinearen Methode der finite Elemente.

Oberbau

Der Oberbau gliedert sich in Schiene, Schwelle und Bettung. Schiene und Schwelle werden kraftschlüssig mittels Schienenbefestigung zu einem Gleisrost verbunden und im Schotterbett verlegt. Bei der festen Fahrbahn wird die Schwelle durch ein Betonteil ersetzt, das zur Verankerung der Schienenbefestigung dient. Zwischen Oberbau und Untergrund befindet sich der Unterbau, bestehend aus einem Erd- oder Kunstbauwerk.

Feste Fahrbahn

Durch hohe Spannungen im Korngefüge des Schotterbettes ist die Instandhaltung sehr aufwendig und die Verwendung einer festen Fahrbahn wartungsärmer. Bei der festen Fahrbahn wird das Schotterbett durch eine lastverteilende Tragplatte aus Beton oder Asphalt ersetzt, auf der die Schiene elastisch gelagert ist. Wichtig dabei ist eine zum Schotteroberbau vergleichbare Elastizität, damit die im Schienenstützpunkt durch Belastung auftretenden Kräfte vermindert werden.

Als Beispiel dient das in Abbildung 1 und Abbildung 2 gezeigte System ÖBB-PORR einer festen Fahrbahn, laut [14], welches seit 1995 in Österreich verwendet wird. Die feste Fahrbahn besteht aus einer elastisch gelagerten Gleistragplatte mit integrierten

Schienenstützpunkten. Durch die Vergussöffnungen, die nach dem Verfüllen als Dübel wirken, bleibt die Gleistragplatte horizontal und vertikal in ihrer Lage.

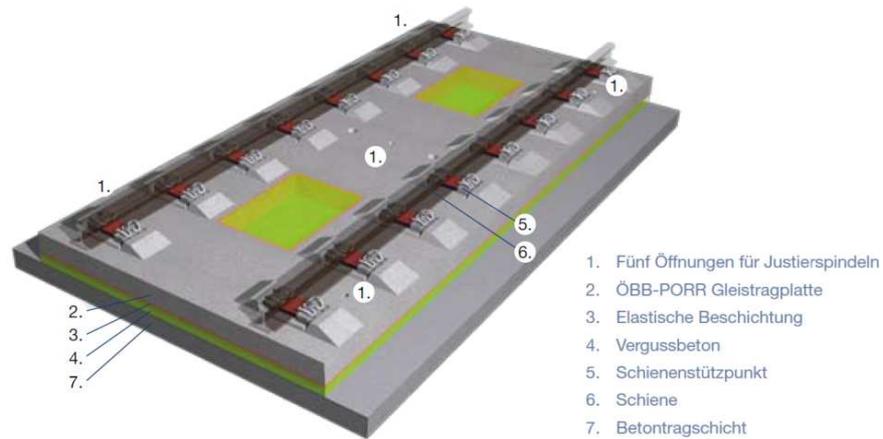


Abbildung 1: System ÖBB-PORR [14]

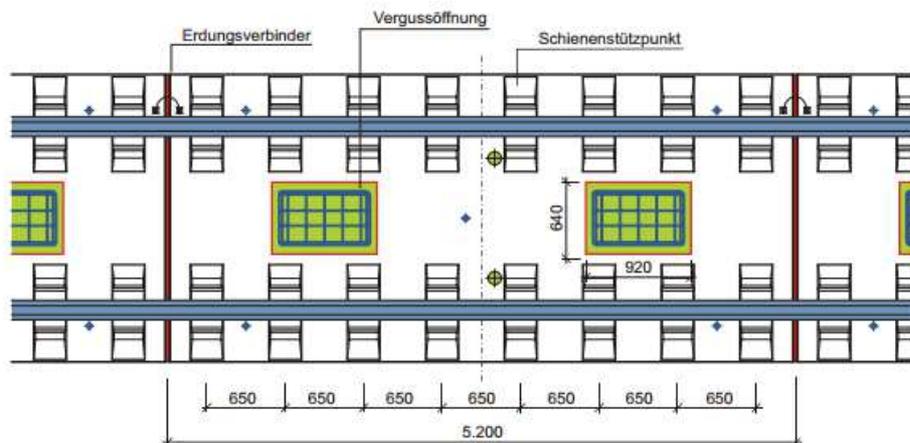
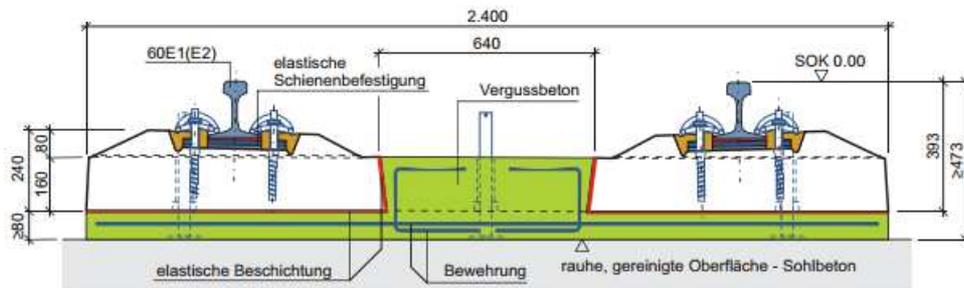


Abbildung 2: Grundriss und Schnitt des ÖBB-PORR System [14]

Schienenbefestigung

Die Schienenbefestigung ist verdreh- und durchschubsicher auszubilden, die Schiene darf sich am Befestigungspunkt gegenüber der Schwelle nicht verdrehen und in Längsrichtung verschieben lassen. Somit wird die Rahmensteifigkeit des Gleisrostes erreicht und die Lage des Gleises gesichert. Der Schienenfuß wird im Befestigungspunkt mit einem Anpressdruck von mindestens 210kN gegen die Schwelle gedrückt.

An beiden Seiten der Schiene ist eine Winkelführungsplatte angeordnet und sichert die Schiene gegen seitliches Verschieben. Die Schiene selbst liegt auf einer Zwischenlage auf der Betonschwelle auf. Der Anpressdruck für eine kraftschlüssige Verspannung wird über "Epsilon"-Spannklemmen auf den Schienenfuß aufgebracht. Dadurch wird der Widerstand gegen Durchschub erreicht. Laut [6] hat auch die Zwischenschicht einen Einfluss auf die Größe des Durchschubwiderstandes: Durch die Verwendung von hartem Kunststoff oder Elastomeren kann dieser erhöht werden.

In Abbildung 3 ist eine Schienenbefestigung an einer Betonschwelle skizziert und als Vergleich zum tatsächlichen Bestand dient Abbildung 4 der Brücke über die L110.

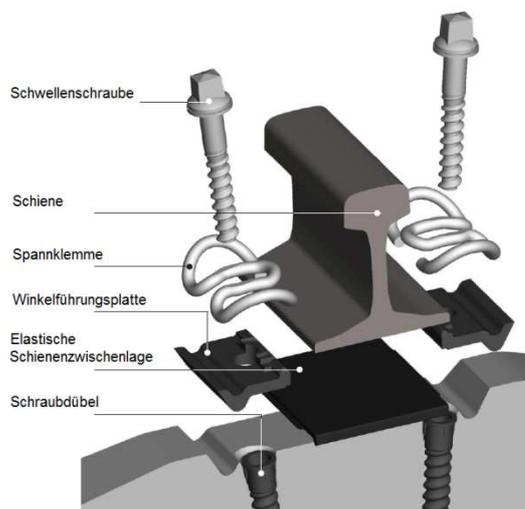


Abbildung 3: Skizze einer Schienenbefestigung [15]



Abbildung 4: Schienenbefestigung L110 [9]

Durchgehend geschweißtes Gleis nach [12]

Ein durchgehend geschweißtes Gleis ist lückenlos, es ist nicht durch Laschen verbunden und wird ab einer Länge von 60m als solches bezeichnet. Durch Temperatureinflüsse entstehen Längsverschiebungen, die im durchgehend geschweißten Gleis in

Längsspannungen umgesetzt werden. Sie werden zu den aus dem Schienenverkehr entstehenden Längskräften addiert. Aufgenommen werden diese durch die Rahmensteifigkeit sowie den Quer- und Längsverschiebewiderstand. Beim Verschweißen ist darauf zu achten, die Schientemperatur spannungsneutral zu halten. Anschließend wird die Schiene durch Anziehen der Befestigungsmittel verspannt. Die Verspanntemperatur bei den ÖBB liegt zwischen +20 und +25°C.

Schienenauszug

Anfahren und Bremsen, Temperaturänderungen, Biegung sowie Schwinden und Kriechen der Brücke erzeugen Bewegungen in der Schiene, die durch Schienenauszüge ausgeglichen werden können. Die, sich gegeneinander in Längsrichtung bewegliche, Backenschiene und Zunge, bewerkstelligen dies.

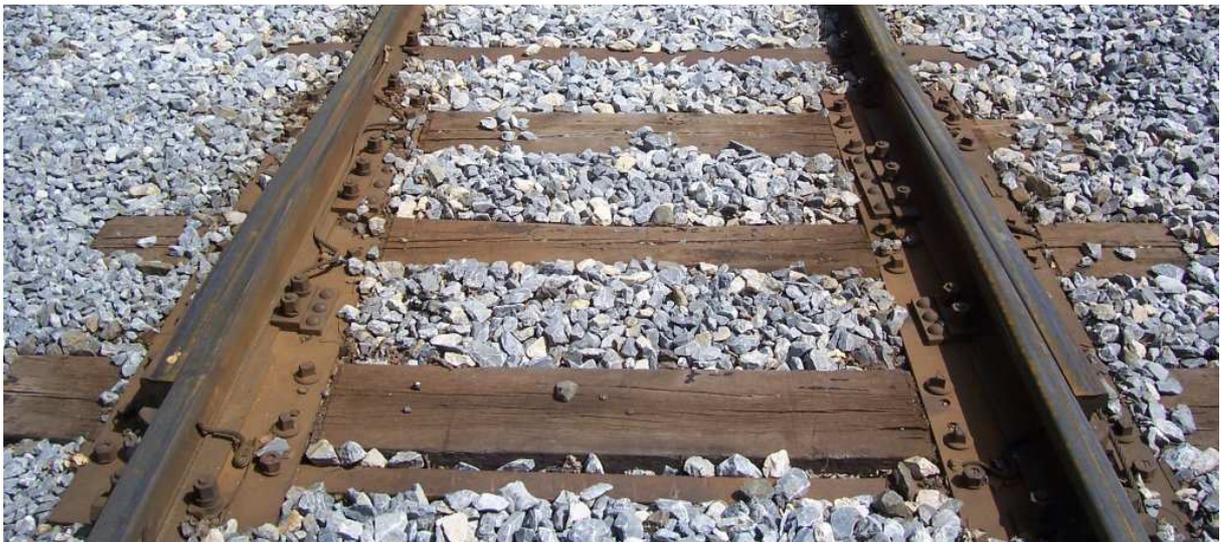


Abbildung 5: Schienenauszug [18]

2.2 Erklärung des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes laut [6] und [7]

Der Längsverschiebewiderstand ist die Kraft, die der Bewegung des gesamten Gleisrostes im Schotterbett entgegen wirkt. Der Durchschubwiderstand definiert die Behinderung der Bewegung der Schiene im Befestigungselement und tritt auf bei gefrorenem Schotter oder fester Fahrbahn. Er ist stets größer als der Längsverschiebewiderstand. Das bedeutet, der Längsverschiebung wirkt der Längsverschiebewiderstand der Schwelle im Schotter entgegen und der Durchschubwiderstand der Schiene in der Schienenbefestigung.

Der Durchschubwiderstand hat seinen Wirkungsbereich zwischen Schiene und Schwelle wogegen der Längswiderstand im Bereich Schwelle-Schotter wirkt, wie in Abbildung 6, im linken Modell ersichtlich. Die Größe des Durchschubwiderstandes hängt von der Art der Schienenbefestigung, der Zwischenschicht, der Anpresskraft, der Reibung sowie auch der Achslast und der Geschwindigkeit vorbeifahrender Züge ab.

Im Modell rechts der Abbildung 6 ist das Verschiebewiderstandsgesetz für eine Schiene in Längsrichtung gezeigt. Die Ergänzungen zu den Widerständen des Gleises wurden dem UIC 774-3 [4] entnommen. Die Widerstände des belasteten Gleises sind stets größer als die des unbelasteten Gleises. Die violetten Kurven, die für den Durchschubwiderstand stehen, sind steiler und leisten somit einen höheren Widerstand als die Kurven des Längswiderstands. Die Verschiebungen von 0,5mm und 2,0mm sind die maßgeblichen Grenzwerte und dürfen nicht vor Erreichen der maximalen Widerstandskraft überschritten werden. Unmittelbar beim Grenzwert tritt auch der plastifizierende Bereich ein, davor verhält sich das Material elastisch.

Bei gefrorenem Schotterbett oder fester Fahrbahn liegt der Durchschubwiderstand für das unbelastete Gleis bei 40kN/m und das belasteten Gleis bei 60kN/m. Der Wert der Verschiebung verbleibt dabei auf 0,5mm.

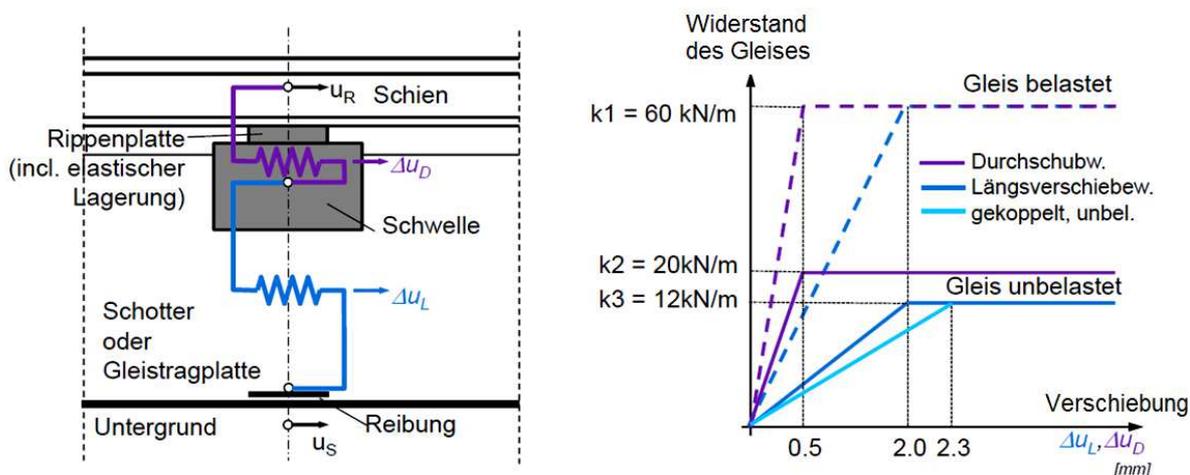


Abbildung 6: Modell der Längswiderstände [8]

2.3 Finite Elemente Methoden nach [13]

Im Zuge von MAGIT wurde ein Modell der Brücke über die L110 in den Programmen ATENA und GiD gefertigt. Da diese auf der nichtlinearen Methode der finite Elemente basieren, soll dieser Abschnitt für ein grundlegendes Verständnis sorgen. Für eine umfassende Erklärung wird der Leser auf [13] verwiesen.

2.3.1 Grundlagen

Anhand des Beispiels in Abbildung 7 wird der Gebrauch von Matrizen verdeutlicht.

lineares Gleichungssystem	Matrizen-Schreibweise
$5x_1 - 3x_2 - 6x_3 = 0$	$\begin{bmatrix} 5 & -3 & -6 & 0 \\ -3 & 8 & 2 & 1 \\ 4 & -9 & 5 & 7 \\ 0 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix}$
$-3x_1 + 8x_2 + 2x_3 + x_4 = 2$	
$4x_1 - 9x_2 + 5x_3 + 7x_4 = 1$	
$3x_2 + 4x_3 + 5x_4 = -2$	

Abbildung 7: Gleichungssystem in Matrizenschreibweise [13]

Somit definiert man eine Matrix als ein System von $m \cdot n$ Elementen, angeordnet in einem rechteckigen Schema von m Zeilen und n Spalten.

Unter zusammenfassen der Felder aus den Gleichungen oben, erhält man folgende Gleichung:

$$K \cdot x = F \tag{2.1}$$

wobei K die Steifigkeitsmatrix,
 x die Verschiebung und
 F die Last darstellen.

Eine mechanische Konstruktion verhält sich unter statischer Belastung linear, wenn eine Veränderung der Belastung um den Faktor a eine entsprechende Veränderung der Verschiebungen um denselben Faktor a bewirkt. Andernfalls verhält sich die Konstruktion nichtlinear.

2.3.2 Lösung für nichtlineare Gleichungen

Für die Lösung nichtlinearer Gleichungen gibt es 3 Lösungsverfahren: das inkrementelle und das iterative Verfahren, sowie eine Verknüpfung aus beidem. Inkrementelle Methoden belasten schrittweise und nehmen in jedem Lastschritt ein lineares Verhalten des Systems an. Durch diese "Linearisierung" entsteht ein Fehler, der sich mit der Anzahl an Schritten summiert. Beim iterativen Verfahren wird die Last in einem einzigen Schritt aufgebracht und die Verschiebung durch Iteration bestimmt. Die inkrementell-iterative Methode geht grundsätzlich inkrementell vor, wobei in jedem Lastschritt eine Iteration durchgeführt wird. Dadurch treten die inkrementellen Näherungsfehler nicht auf. Es gibt einige dieser Verfahren, darunter das Newton - Raphson - Verfahren, welches für diese Arbeit von Bedeutung ist. In den Programmen ATENA und GiD steht dieses Lösungsverfahren zur Wahl.

In Abbildung 8 ist ein graphischer Vergleich dieser drei Verfahren.

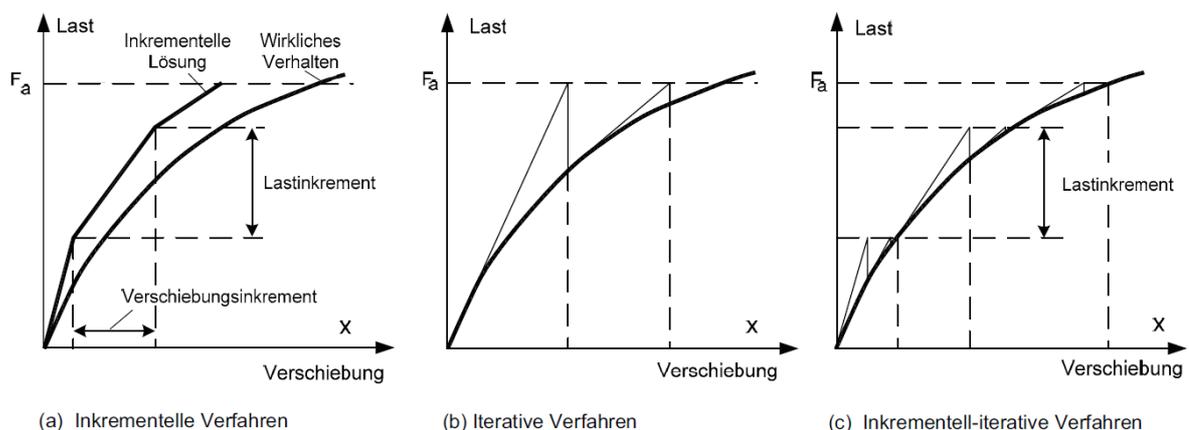


Abbildung 8: Vergleich der Lösungsverfahren [13]

2.3.3 Newton - Raphson - Verfahren

Dieses Verfahren entspringt dem inkrementellen Lösungsverfahren und geht von einer Tangentenmatrix aus.

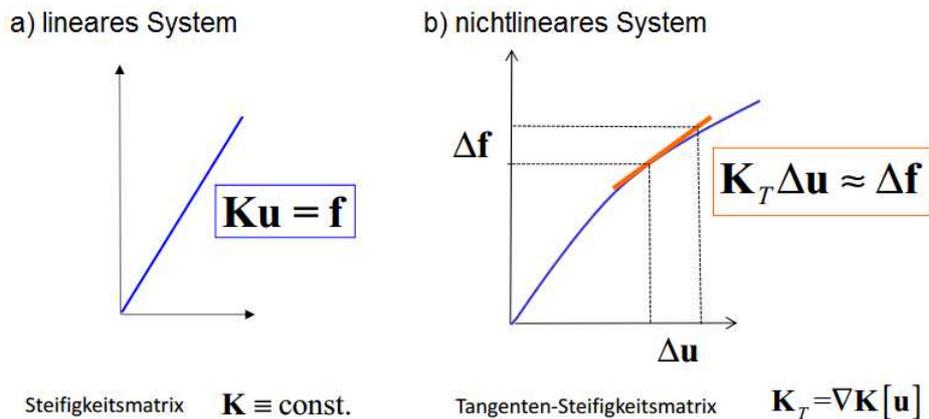


Abbildung 9: Vergleich der Steifigkeitsmatrizen [eigene Darstellung]

Die Nichtlinearität besteht zwischen der Kraft und der Verschiebung.

Das unbelastete, unverformte Tragwerk stellt den Ausgangszustand dar, worauf eine Reihe bekannter Grundzustände folgt. Von diesen gelangt man zum Nachbarzustand. Ein Lastschritt besteht aus einer Reihe von Iterationen, in denen das Gleichgewicht zwischen äußeren Einwirkungen und inneren Kräften gesucht wird. Die inneren Kräfte werden durch Verformung des Tragwerks im Grundzustand hervorgerufen.

Die Funktion wird im Ausgangspunkt linearisiert, das heißt es wird die Tangente bestimmt. Dies ist die erste Iteration, die mit den gegebenen äußeren Lasten und der Anfangssteifigkeit durchgeführt wird. Hierbei weisen die inneren und äußeren Kräfte aber noch eine zu große Differenz auf. Darum wird für die darauffolgende Iteration die Steifigkeitsmatrix korrigiert. Diese Korrektur entspricht der Geraden mit geringerer Steigung in Abbildung 10. Die zweite Iteration baut auf dem Ergebnis der ersten Iteration, für die Kraft und die Verschiebung, auf. Es wird solange iteriert, bis eine bestimmte Genauigkeit erreicht ist. Das Verfahren hat eine quadratische Konvergenz, die Differenz zwischen äußeren und inneren Kräften nimmt von Iteration zu Iteration quadratisch ab.

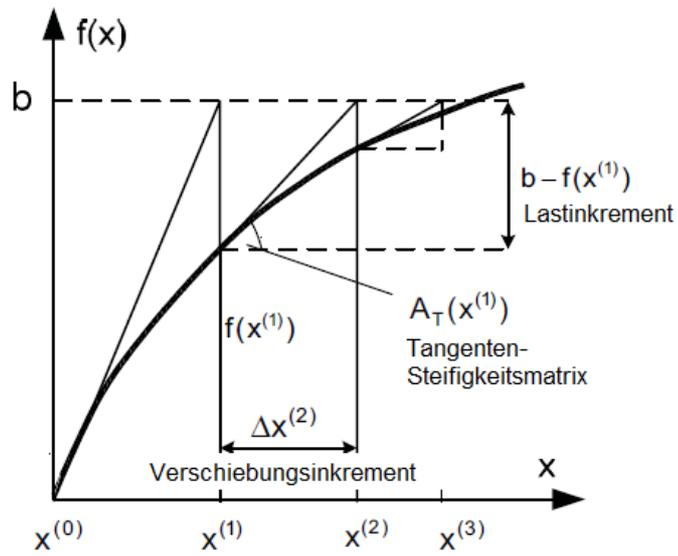


Abbildung 10: Newton Raphson Verfahren [13]

3 Gemeinsame Antwort von Tragwerk und Gleis

Als Grundlage dieses Kapitels dient die ÖNORM EN 1991-2 [3] und der UIC-Kodex 774-3 [4]. Beide Quellen wurden verglichen und das Wesentliche daraus zusammengefasst.

Die Europäische Norm liefert Regelungen für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Tragwerken, die sich für die tägliche Anwendung eignen. Sie geht auf traditionelle Bauweisen ein, liefert aber keine vollständige Regelung für ungewöhnliche Entwurfsbedingungen, weshalb Spezialistenbeiträge erforderlich sein können.

In Kapitel 3 werden die Einflussparameter, Grenzwerte und Berechnungsmethoden mittels Computerprogramm angeführt, wodurch ein Einblick in die Interaktionsvorgänge zwischen Gleis und Tragwerk geschaffen werden soll. Ein Überblick zur Bestimmung der gemeinsamen Antwort von Gleis und Tragwerk auf die verschiedenen Lastfälle wird gegeben.

Anschließend folgt Kapitel 4 mit einem Auszug aus der Dissertation von D. R. Widarda. Sie handelt von, den in der Norm genannten Lastfällen und nennt theoretische Beispiele zu verschiedenen Brückenkonstruktionen. Eines davon wird in Kapitel 4 als Lösungsansatz aufgegriffen und dient als Vergleich für die Berechnungen in Kapitel 7 zur Fallstudie der Brücke über die L110.

3.1 Das durchgehend geschweißte Gleis

Die Schiene ist mittels elastischen Schienenbefestigungen an der Schwelle fixiert. Somit werden die Längsbewegungen auf die Schwelle geleitet, wodurch der Durch Schubwiderstand der Schiene in der Schienenbefestigung stets größer ist als der Längsverschiebewiderstand des Gleises im Schotter. Bei thermischem Einfluss hindert der Längsverschiebewiderstand die Schiene in seiner Bewegung, die folglich die Längskräfte aufnehmen muss.

Abbildung 11 zeigt den Spannungsverlauf einer durchgehend geschweißten Schiene auf einer Brücke bei einer Temperaturänderung. Eine Brücke lässt sich verformen und führt daher, infolge der Wechselwirkung zwischen Gleis und Tragwerk, zu Bewegungen im Gleis.

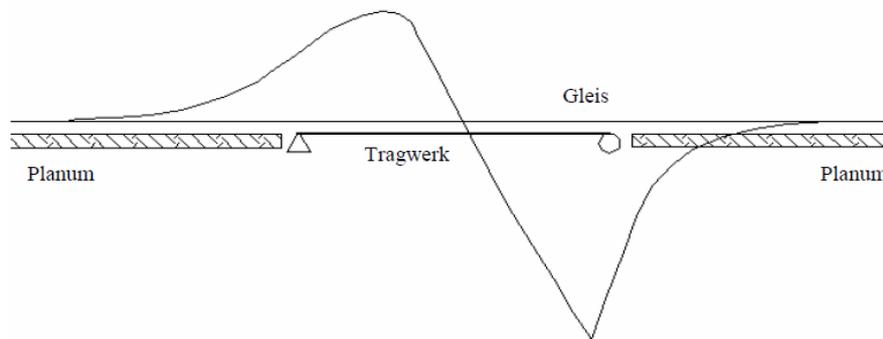


Abbildung 11: Schienenspannung durch Temperaturänderung [7]

Für den konventionellen Schotterbau werden die folgenden Grundsätze für die gemeinsame Antwort von Gleis und Tragwerk festgelegt. Die Anforderungen für eine feste Fahrbahn sollten gesondert festgelegt werden.

- Tragwerk und Gleis treten in Interaktion und leisten gemeinsam Widerstand gegen Längskräfte aus Bremsen und Anfahren in folgendem Fall: die durchgehende Schiene liegt auf Schienenstützpunkten über unterschiedlichem Untergrund (z.B.: zwischen Tragwerk und dem Dammbereich).
- Behindert die Endlosschiene die freie Bewegung des Brückenüberbaus, resultieren aus dessen Verformungen (z.B.: durch Temperaturänderung, vertikale Belastung, Kriechen und Schwinden), Längskräfte in der Schiene und an den festen Brückenlagern.
- Die Wirkungen, resultierend aus der Gleis Tragwerk Interaktion, sind bei der Bemessung des Brückenüberbaus, der Festlager und der Gründungen, sowie beim Nachweis der Lastauswirkung in der Schiene zu berücksichtigen.

3.2 Einflussparameter der Gleis Tragwerk Interaktion

Die Gleis Tragwerk Interaktion wird durch die beiden namensgebenden Teile, das Tragwerk und das Gleis, beeinflusst und sind in der Berechnung zu berücksichtigen.

a) Einflussgrößen des Tragwerks

- Einfeldträger, Durchlaufträger oder Einfeldträgerkette
- Anzahl der einzelnen Überbauten und deren Länge
- Anzahl der Felder und deren Länge
- Steifigkeit der Auflagerung
- Höhe des Tragwerks
- Position der Festlager
- Position des thermischen Festpunktes (das ist jener Punkt, der bei einer gleichmäßigen Temperaturänderung keine Verschiebung erfährt)
- Auszugslänge L_T zwischen dem thermischen Festpunkt und dem Überbauende

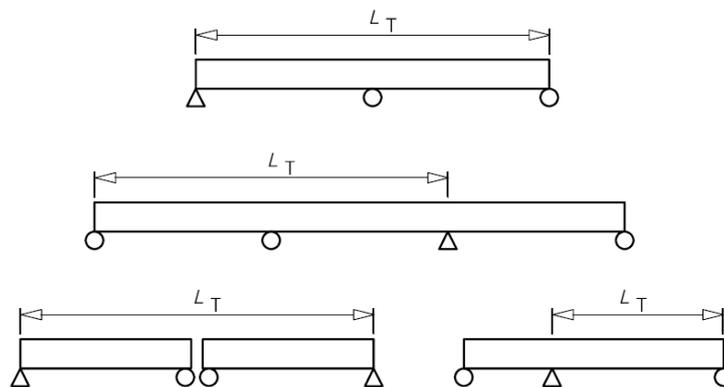


Abbildung 12: Auszugslängen für unterschiedlich gelagerte Brücken [3]

b) Einflussgrößen des Gleises

- Schotteroberbau oder feste Fahrbahn
- vertikaler Abstand zwischen Überbauoberfläche und Schienenschwerachse
- Lage des Schienenauszugs
- Querschnitt der Schiene
- Längsverschiebewiderstand des Gleises

c) Eigenschaften und Verhalten des Bauwerks

- Steifigkeit des Überbaues in vertikaler Richtung (Biegeverhalten)
- vertikaler Abstand zwischen der Schwerachse des Überbaues und der oberen Seite des Überbaues

- vertikaler Abstand zwischen der Schwereachse des Überbaues und der Drehachse des Lagers
- Durch eine Überbauverdrehung erzeugt das Bauwerkssystem an den Lagern eine Längsverschiebung des Überbauendes.
- Durch die Unterbauten wird eine Längssteifigkeit hervorgerufen, die aus den Steifigkeiten der Lager, Unterbauten und Gründungen zur Gesamtsteifigkeit summiert wird.
- Es muss ein Funktionsschema der Brücke bekannt sein, aus dem sich die Zahl der Tragwerke und Auflager, die Lage der Fest- und Loslager, die Feldlänge, die Dehnlänge und die Lage eventueller Schienenauszüge ablesen lässt.
- Verhalten der Unterbauten
- Verhalten der Lager

d) Eigenschaften und Verhalten des Gleises

- Steifigkeit in Längsrichtung
- Widerstand des Gleises gegen Längsverschiebung im Schotter
- Widerstand des Gleises gegen eine Verschiebung in den Schienenbefestigungen z.B. in gefrorenem Schotter oder bei direkt befestigten Schienen
Der Widerstand gegen Verschiebung ist eine Kraft pro Längeneinheit des Gleises und wirkt gegen die Verschiebung zwischen Tragwerk und Schiene.

Das Verhalten von Last und Verformung des Gleises oder der Schienenbefestigung in Längsrichtung kann mit den beiden folgenden Widerständen beschrieben werden:

- Längsverschiebewiderstand k in kN/ mm Verschiebung je m Gleis
- Durch Schubwiderstand k in kN/ m Gleis

In Abbildung 13 wird diese Beziehung dargestellt.

Eine detaillierte Erklärung zu dieser Beziehung, sowie die Grenzwerte für u_0 wurden bereits als Einleitung in Kapitel 2.2 aus der UIC [4] entnommen.

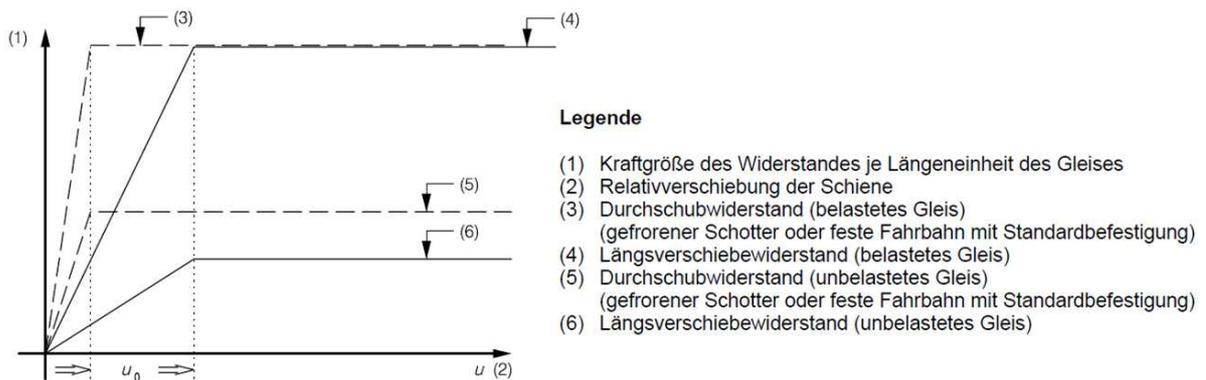


Abbildung 13: Längsverschiebe-Widerstandsgesetz [3]

Der theoretisch vereinfachte Verlauf des Verschiebungswiderstandes in Abhängigkeit der Verschiebung wird mit einer bilinearen Linie dargestellt. Diese Linien sind in Wirklichkeit Kurven mit einem Streubereich.

3.3 Wesentliche Lastfälle

Folgende Einwirkungen sollten berücksichtigt werden:

- Anfahr- und Bremskräfte
- Temperatur - Einwirkungen
- Vertikale Verkehrslasten (dynamische Auswirkungen können vernachlässigt werden)
- Sonstige Einwirkungen wie Kriechen und Schwinden sollten erforderlichenfalls bei der Bestimmung der Rotation des Überbaues berücksichtigt werden.

Um bei der Berechnung der gemeinsamen Antwort von Gleis und Tragwerk den ungünstigsten Fall zu ermitteln, sollten Anfahr- und Bremskräfte nicht auf das anschließende Erdbauwerk angesetzt werden. Es sei denn, es soll eine Gesamtberechnung aus Anfahrt, Überquerung und Abfahrt von der Brücke erstellt werden.

3.3.1 Temperaturänderung

Die Beanspruchung tritt ein bei einer einheitlichen Änderung der Temperatur, woraus eine Längenänderung des Tragwerks resultiert. Bei Vorhandensein eines Schienenausuges hat auch der Temperaturunterschied von Schiene und Tragwerk eine Beanspruchung zur Folge.

Bei einer durchgehend geschweißten Schiene ergibt sich aus der Temperaturänderung in der Schiene keine Gleisverschiebung.

Die Einwirkungen aus Temperaturänderungen werden wie folgt begrenzt:

$$\text{Temperaturänderung } \Delta T_D \text{ des Überbaues: } \Delta T_D \leq 35 \text{ K}$$

$$\text{Temperaturänderung } \Delta T_R \text{ der Schiene: } \Delta T_R \leq 50 \text{ K}$$

maximale Temperaturdifferenz zwischen Schiene und Überbau:

$$\Delta T_D - \Delta T_R \leq 20 \text{ K}$$

3.3.2 Brems- und Anfahrkräfte

Die Brems- und Anfahrkräfte sind in Höhe der Schienenoberkante anzusetzen und mit den entsprechenden Vertikallasten aus 3.3.3 zu kombinieren. Es werden folgende Werte vorgegeben:

für Anfahren: 33kN/m je Gleis nach Lastbild 71 und SW/0

für Bremsen: 20kN/m je Gleis nach Lastbild 71 und SW/0

35kN/m je Gleis bei Brücken für Lastbild SW/2

3.3.3 Vertikalkräfte - Tragwerksbiegung

Die Vertikallasten sind durch die beiden folgenden Lastbilder beschrieben.

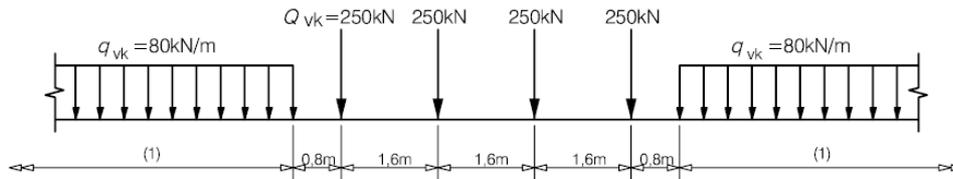
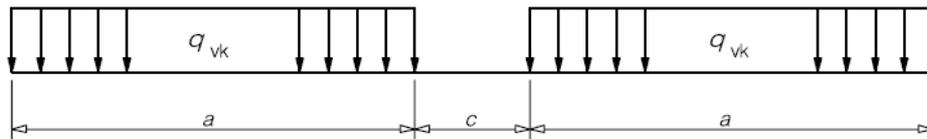


Abbildung 14: Lastmodell 71 [3]



Charakteristische Werte der Vertikallasten der Lastmodelle SW/0 und SW/2

Lastmodell	q_{vk} in kN/m	a in m	c in m
SW/0	133	15,0	5,3
SW/2	150	25,0	7,0

Abbildung 15: Lastmodell SW/0 und SW/2 [3]

3.4 Folgen für die Brücke und das Gleis

3.4.1 Kombination der Lastfälle

Die Gesamtauswirkung ΣR ergibt sich aus den einzelnen Einwirkungen wie folgt:

$$\Sigma R = \alpha R (\text{Temperaturänderung}) + \beta R (\text{Bremsen}) + \gamma R (\text{Biegung}) \quad (3.1)$$

wobei α , β und γ Kombinationsfaktoren sind und für Schienenspannung und Verschiebung bei einfach und durchgehend gelagerten Überbauten den Wert 1 annehmen.

3.4.2 Zulässige zusätzliche Spannungen bei einer Brücke mit durchgehend geschweißtem Gleis

Für die zulässige zusätzliche Schienenspannung, als gemeinsame Antwort der Gleis Tragwerk Interaktion auf veränderliche Einwirkungen, gibt es Grenzwerte. Diese gelten für Schiene, Brücke und Widerlager.

Druckspannung: 72 N/mm²

Zugspannung: 92 N/mm²

Die beiden Grenzwerte gelten unter folgenden Voraussetzungen für das Gleis:

- Schiene UIC 60 mit einer Mindestzugfestigkeit von 900 N/mm²
- gerades Gleis oder Gleisbogenradius von $r \geq 1500\text{m}$
- für Schotteroberbau mit schweren Betonschwellen mit einem maximalen Schwellenabstand von 65cm oder gleichartiger Gleiskonstruktionen
- für Schotteroberbau mit mindestens 30cm verdichtetem Schotter unter der Schwelle

3.4.3 Relative und absolute Verschiebung

δ_B in mm definiert die relative Längsverschiebung zwischen entweder dem Überbauende und dem angrenzenden Widerlager oder zwei aufeinanderfolgenden Überbauten. Aufgrund Anfahren und Bremsen dürfen folgende Werte nicht überschritten werden:

5mm für durchgehend geschweißte Schienen ohne Schienenauszug
oder mit Schienenauszug an einem Überbauende

30mm für Schienenauszüge an beiden Überbauenden bei durchgehendem Schotterbett

> 30mm nur erlaubt, bei Schienenauszug und zusätzlichen Bewegungsfugen im Schotter

3.4.4 Endverdrehung des Tragwerks

δ_H in mm beschreibt die Längsverschiebung der Überbauoberkante am Überbauende aufgrund der Überbauverformung. Wird die erlaubte Zugspannung in der Schiene oder die Längsverschiebung überschritten, ist entweder das Bauwerk zu ändern oder ein Schienenauszug vorzusehen. Für Verkehrseinwirkungen gelten folgende Grenzwerte für δ_H :

8mm wenn das Kombinationsverhalten von Bauwerk und Gleis berücksichtigt wird

10 mm wenn das Kombinationsverhalten von Bauwerk und Gleis vernachlässigt wird

3.4.5 Veränderliche Einwirkungen

δ_V in mm ist die Vertikalverschiebung der oberen Überbaukante relativ zur Konstruktion aufgrund der veränderlichen Einwirkungen. Folgende Werte dürfen für δ_V nicht überschritten werden:

3mm bei örtlich zulässiger Geschwindigkeit bis 160 km/h

2 mm bei örtlich zulässiger Geschwindigkeit über 160 km/h

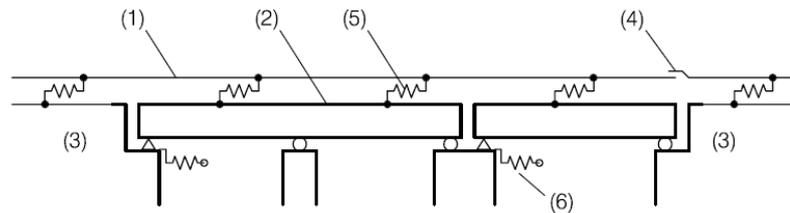
3.5 Modellierung und Berechnung des gemeinsamen Gleis-Tragwerkssystem

Die programmgestützte Berechnung kann mittels einer einfachen Analyse der einzelnen Lastfälle Temperatur, Anfahren/ Bremsen und Durchbiegung geschehen oder durch eine Gesamtanalyse unter Kombination aller genannten Lastfälle.

Bei der Einwirkung dieser Lastfälle ergeben sich Längskräfte, zusätzliche Spannungen und Verschiebungen, die es durch nichtlineare Simulationsanalysen zu bewerten und mit den Grenzwerten zu vergleichen gilt.

Für die Bestimmung der Lastauswirkung im gemeinsamen Gleis-Tragwerkssystem kann das vereinfacht idealisierte Modell aus Abbildung 16 verwendet werden.

Dabei sollten die in 3.2 genannten Brücken- und Gleisparameter, sowie die Lasten aus 3.3 berücksichtigt werden.



Legende

- (1) Gleis
- (2) Überbau (das Bild zeigt einen einzelnen Überbau mit zwei Feldern und einen Einfeldträger)
- (3) Erdbauwerk
- (4) Schienenauszug (wenn vorhanden)
- (5) nicht lineare Längsfedern stellen die Längsbelastung/das Verschiebeverhalten des Gleises dar
- (6) Längsfedern stellen die Steifigkeit K in Längsrichtung eines Festlagers dar, unter Berücksichtigung der Steifigkeit von Gründung, Stützen und Lagern usw.

Abbildung 16: Gleis Tragwerkssystem als Modell [3]

4 Bestimmung der Interaktion von Gleis und Tragwerk

Es haben sich bereits einige Autoren mit dem Thema der Gleis Tragwerk Interaktion beschäftigt. Besonderes Augenmerk dieser Arbeit gilt D. R. Widarda.

Als Grundlage von Kapitel 4 dient die Dissertation von D. R. Widarda mit dem Titel "Längskraftbeanspruchung von durchgehend geschweißten Schienen bei nichtlinearer Gleis-Tragwerk Interaktion für Lastkombinationen" [5]. Die genannte Arbeit geht auf die in der Europäischen Norm fundierten Lastfälle Temperaturänderung, Durchbiegung, sowie Anfahren und Bremsen ein. Darüber hinaus wird ein weiterer unbekannter Lastfall identifiziert, der durch den Wechsel der Koppelungs-Steifigkeit zwischen Gleis und Tragwerk während der Zugüberfahrt begründet wird. Weiters werden Beispiele mit verschiedenen Brückensystemen angeführt.

Die relevanten Teile der Dissertation wurden aus dem Englischen übersetzt.

Deckungsgleiche Abschnitte zu Kapitel 3 werden kursiv dargestellt.

4.1 Gleis Tragwerk Interaktion

4.1.1 Überblick über die nichtlinearen Lastkombinationen

Dieser Abschnitt ist nichtlinearen Lastkombinationen in nichtlinearen Systemen gewidmet.

Es wird ein nichtlinear strukturiertes System betrachtet, welches in Lastfall f_1 mit dem Ergebnis u_1 und Lastfall f_2 mit dem Ergebnis u_2 , geteilt ist. Durch die lineare Summierung beider Lösungen kann die Lösung des gesamten Systems (u_t) der beiden Lastfälle ($f_1 + f_2$) nicht berechnet werden.

$$u_t = u(f_1 + f_2) \neq u_1 + u_2 . \quad (4.1)$$

Um die Lösung einer nicht-linearen Kombination zu erhalten, kann die Gesamtverschiebung als Summe der Teillösungen dargestellt werden. In diesem Fall beschreibt die Deformation Δu die inkrementelle Deformation aufgrund des 2.

Lastfalls f_2 , der dem Lastfall f_1 folgt. Die Deformation u_1 , aufgrund des Lastfall f_1 , ist relativ zur Deformation Δu .

$$u = u_1 + \Delta u . \quad (4.2)$$

Diese Erklärung wird angewendet für ein skalares nichtlineares Problem, mit f_1 als ersten Lastfall mit der entsprechenden Lösung der Deformation u_1 :

$$\begin{aligned} NL[u] &= K_1 u + K_2 u^2 + K_3 u^3 = f , \\ NL[u_1] &= f_1 . \end{aligned} \quad (4.3)$$

Für das oben beschriebene System gibt es eine inkrementelle Deformation Δu , verursacht von Lastfall f_2 , dargestellt in der Taylor-Reihe.

$$\frac{d}{du} \{NL[u]\}_{u_1} \Delta u + \frac{d^2}{du^2} \{NL[u]\}_{u_1} \frac{\Delta u^2}{2} + \frac{d^3}{du^3} \{NL[u]\}_{u_1} \frac{\Delta u^3}{3} = f_2 . \quad (4.4)$$

Durch die Substitution der Funktion $NL[u]$ in Gleichung (4.3) in die Taylor Reihe, ergibt sich eine Gleichung f_2 , die eine andere Form im Vergleich zum Original f_1 in Gleichung (4.3) hat.

$$(K_1 + 2K_2 u_1 + 3K_3 u_1^2) \Delta u + (K_2 + 3K_3 u_1) \Delta u^2 + (K_3 u_1) \Delta u^3 = f_2 ; \quad (4.5)$$

$$u_t = u_1 + \Delta u; f = f_1 + f_2 .$$

f_1 : erster Lastfall,

f_2 : zweiter Lastfall.

4.1.2 Verfügbare Spannungskapazität

Zusätzliche Belastungen im durchgehend geschweißten Gleis auf einer Brücke sollten die folgende zulässige Belastbarkeit nicht überschreiten:

$\sigma_{Zug} = 112 \text{ N/mm}^2$, wenn die Durchbiegung als Lastfall angenommen wird

$\sigma_{Zug} = 92 \text{ N/mm}^2$, wenn die Durchbiegung vernachlässigt wird

$\sigma_{Druck} = 72/92 \text{ N/mm}^2$, Knick belastete Schiene/ unbelastete Schiene

Die oben genannte zulässige Spannung basiert auf der gesamt verfügbaren Spannung im Gleis

$$\sigma_{safe} = 470 \text{ N/mm}^2,$$

reduziert durch die Restspannung

$$\sigma_E = 80 \text{ N/mm}^2,$$

Biegezugspannung aufgrund Radlast Q

$$\sigma_Q = 158 \text{ N/mm}^2,$$

und die Spannung aufgrund von Temperaturänderungen am Gleis unter Berücksichtigung des Elastizitätsmodul $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$, der Temperaturdifferenz $\Delta T = 50\text{K}$ und dem Wärmeoeffizient $\alpha = 1.15 \cdot 10^{-5}$

$$\sigma_T = E\alpha\Delta T = 120 \text{ N/mm}^2.$$

Gemäß ÖNORM 1991-2 [3] sollte bei zusätzlichen Spannungen, die aus der Gleis Tragwerk Interaktion resultieren und größer als die zulässigen Werte sind, die Benutzung von Schienenausügen in Betracht gezogen werden.

Aufgrund der hochdynamische Belastungen, die bei einem passierenden Zug auftreten, würden Schienenausüge wartungsintensiv sein.

Gleichung (4.6) zeigt das klassische Sicherheitskonzept, wo die Sicherheit von einem globalen Sicherheitsfaktor v bestimmt wird:

$$S_{safe} = \frac{R}{v}, \quad (4.6)$$

Festigkeit (S_{safe}) und Widerstand (R) sind beide deterministisch. Dieses klassische deterministische Sicherheitskonzept wird heute immer noch verwendet.

Von diesem Konzept abgeleitet, ergibt jede Kraft F , durch Multiplikation der charakteristischen Kraft F_c mit dem Sicherheitsfaktor γ_F , den Bemessungswert (Designwert) F_d :

$$F_d = F_c \cdot \gamma_F \quad (4.7)$$

Wenn mehrere Kräfte F_1, F_2, \dots, F_N behandelt werden müssen, werden diese mit individuellen Kombinationskoeffizienten $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N$ kombiniert. Somit wird Gleichung (4.7) zu

$$F_d = F_{c1} \cdot \gamma_{F1} \cdot \psi_1 + F_{c2} \cdot \gamma_{F2} \cdot \psi_2 + \dots + F_{cN} \cdot \gamma_{FN} \cdot \psi_N. \quad (4.8)$$

Von Seiten des Materials, wird der Bemessungswert des Widerstands M_d durch Division des charakteristischen Werts M_c durch einen Teilsicherheitsbeiwert γ_M erreicht:

$$M_d = \frac{M_c}{\gamma_M}. \quad (4.9)$$

Für die praktische technische Anwendung sind die charakteristischen 5% -Quantil Werte in der Norm gegeben. Zum Beispiel erhält man die charakteristische Festigkeit S_c durch die Streckgrenze, wie in Abbildung 17 gezeigt:

$$S_c = S_m - 1,645 \cdot \sigma_s; \quad (4.10)$$

S_m : mean value,

σ_s^2 : variance.

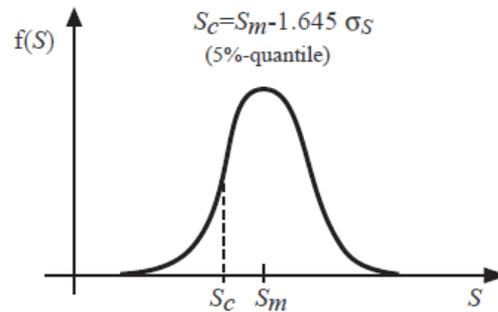


Abbildung 17: Charakteristische Werte [5]

4.1.3 Grundannahmen zur Gleis-Tragwerks-Interaktion

Die theoretische Lösung des Problems zur Interaktion von durchgehend geschweißtem Gleis und Brücke basiert auf folgenden Annahmen:

1. Die Schiene wird betrachtet als eine regelmäßig durchlaufende Längsstange. Diese ist wenn vorhanden, mittels Kiesschotter oder einem Befestigungssystem im Falle einer kieslosen, festen Fahrbahn an die Brücke gekoppelt.

Diese Koppelung wird durch eine kontinuierlich verteilte Steifigkeit c [N/mm²] gekennzeichnet, wie in Abbildung 18 beschrieben. Dieser Wert c ist davon abhängig, ob das Gleis belastet ist, oder nicht:

c_u [N/m²] für die unbelastete Schiene,

c_l [N/m²] für die belastete Schiene.

(4.11)

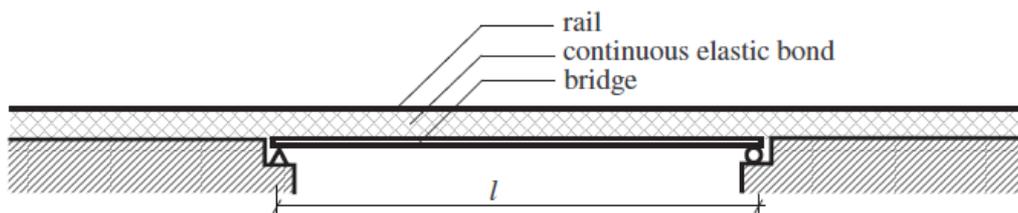


Abbildung 18: Theoretisches Model einer einfachen Brücke mit CWR [5]

2. *Das Verhalten der Koppelungs-Schnittstelle wird durch zwei besondere Situationen charakterisiert: elastisch, wo die Koppelung eine Interaktion zwischen Schiene und Brücke ermöglicht, oder plastisch, wo der Schienenteil gleitet, wodurch die Gleis-Tragwerk Interaktion inaktiv wird.*

Eine elastische Koppelung zwischen Brückentragwerk und Schiene kann veranschaulicht werden durch ein Koppelungs-Scher-Element, welches einer Relativverschiebung u_D unterliegt, wie in Abbildung 19b gezeigt wird.

$$\begin{aligned} u_D &= u_R - u_B && \text{für } |u_R - u_B| < \tilde{u} , \\ u_D &= \tilde{u} \operatorname{sign}(u_R - u_B) && \text{für } |u_R - u_B| \geq \tilde{u} , \end{aligned} \quad (4.12)$$

wobei u_R die Längsverschiebung der Schiene bezeichnet und sich u_B auf die Längsverschiebung der Brücken-Oberfläche bezieht (Abbildung 19a).

Ein wichtiges Merkmal des Gleis-Brücken Systems ist, dass die Verformung u_D der Koppelungsschnittstelle durch den kritischen Wert \tilde{u} beschränkt ist. Unterhalb dieser Grenze gilt eine linear elastische Beziehung zwischen der Verschiebungsdifferenz u_D und der Längsreaktionskraft q wie in Abbildung 19 gezeigt wird.

$$\begin{aligned} \text{unbelastete Schiene:} & \quad q_u = -c_u u_D , \\ \text{belastete Schiene:} & \quad q_l = -c_l u_D; \quad |u_D| \leq \tilde{u} . \end{aligned} \quad (4.13)$$

Dabei wird eine positive Kraft $+q$ angenommen um auf die Schiene einzuwirken, wenn die Verschiebung des ersteren kleiner als die von der Brücke ist; damit wirkt $-q$ auf die Brücke ein.

Über $\pm \tilde{u}$ gleitet die Schiene gegenüber dem Schotterbett oder Betonstreifen. Das entsprechende Steifigkeits-Gesetz für das Schotterbett und die feste Fahrbahn wird bereits in Abbildung 13 gezeigt.

Folgende Werte werden für das Diagramm aus Abbildung 13 angegeben:

$$\text{feste Fahrbahn} \quad c_u = 6 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \quad (5)$$

$$c_l = 12 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \quad (3)$$

$$\tilde{u} = 0,5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Schotter} \quad c_u &= 1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 & (6) \\ c_l &= 3 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 & (4) \\ \tilde{u} &= 2,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

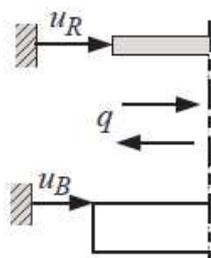
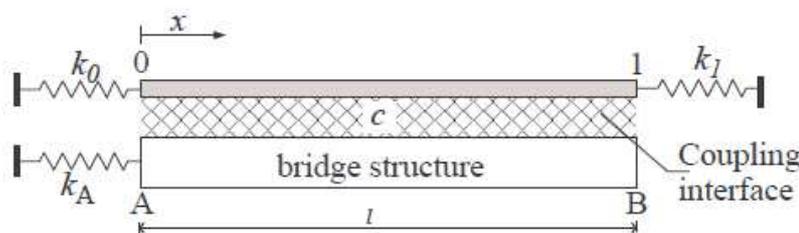
Letztere Darstellung zeigt, dass eine Situation, bei der die Schiene gegenüber dem Koppelungselement gleitet, einer konstanten Längsreaktionskraft \tilde{q} entspricht

$$q = \tilde{q} = -c \cdot \text{sign}(u_R - u_B) \tilde{u} \quad \text{für } |u_R - u_B| \geq \tilde{u} \quad (4.14)$$

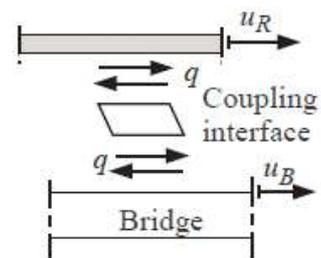
Jedoch gilt die Gleichung 4.14 nur für unbenutzte Gleis-Tragwerks-Systeme, die noch keiner Verformung unterzogen wurden.

3. In Wirklichkeit hat ein durchgehend geschweißtes Gleis eine unendliche Länge, kann aber durch eine elastische Feder dargestellt werden, wie bei typischen Schienen-Brücken Systemen, veranschaulicht in Abbildung 19. Eine Schiene mit Längssteifigkeit EA ruht auf einer Brückenstruktur mit der Länge l . Am linken Widerlager (Punkt A) ist die horizontale Brückenbewegung durch ein elastisches Lager gehalten, welches als Feder mit der Steifigkeit k_A [N/m] modelliert wird. Am rechten Widerlager (Punkt B) wird die horizontale Verschiebung der Struktur durch ein frei bewegliches Auflager aktiviert.

Zwei elastische Federn $k_0 = k_1 = \sqrt{EA c_u}$ [N/m] repräsentieren die ruhende Schiene auf dem anstehenden Damm. Solche Federn der Steifigkeit k_0, k_1 können nur in Bereichen verwendet werden, wo die Schienen-Untergrund Interaktion bei vergangenen Belastungen elastisch war.



(a) System model.



(b) Coupling interface $u_B > u_R$.

Abbildung 19: Gleis Tragwerk Interaktion der Länge nach [5]

4. Der Brückenträger besteht aus einem festen und einem oder mehreren beweglichen Lagern, in welchen die Reibung vernachlässigt wird. Die bewegliche Lagerung ermöglicht eine Ausdehnung oder freie Bewegung der Brücke unter Temperaturänderung.
5. *Die Brücke wird durch die Temperaturänderungen nicht von der Schiene beeinflusst, sondern im Gegenteil, induziert die Verformung der Brücke eine Schienenspannung.*
6. *Wenn die Brückenoberfläche durch fahrende Züge Biegung erfährt, wirkt sich die gekrümmte Neigung der tragenden Struktur auf die Schiene in Längsrichtung aus.*

4.1.4 Elastische Belastbarkeit

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die elastische Kapazität, die nach einer Belastung aus einer vorangegangenen Teilfolge, im System bleibt. Der Begriff des elastischen Reservoir wurde erstmals eingeführt von P. Ruge in [20]. Die kontinuierliche Arbeit an nicht-linearen Gleis-Tragwerksinteraktionen verstärkte die Verwendung der verfügbaren Kapazität des Systems.

Die elastische Kapazität wird charakterisiert durch:

Die Kapazität ist vom System vorgesehen, um bei tatsächlicher Belastung im elastischen Zustand zu verbleiben.

Abbildung 20(a) definiert die relative Verschiebung von Gleis und Tragwerk $u_R - u_B$. Wenn die relative Verschiebung den kritischen Wert \tilde{u} nicht überschreitet, wird die Koppelungsstelle als elastisch charakterisiert. Wenn die relative Verschiebung den kritischen Wert \tilde{u} überschreitet, gleitet die Schiene und die Koppelungsstelle ist nicht weiter aktiv. Die Situation wird dann als plastisch oder rutschend bezeichnet. Im plastischen Zustand behält die Koppelungsstelle die Verformung von $|\tilde{u}|$.

Die relative Verschiebung u_D der Koppelungsstelle ist begrenzt durch \tilde{u} :

$$\begin{aligned}
 u_D &= u_R - u_B, & \text{wenn } |u_R - u_B| < \tilde{u} ; \\
 u_D &= \tilde{u}, & \text{wenn } |u_R - u_B| \geq \tilde{u} ,
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

wie in Abbildung 20(b) veranschaulicht wird.

Abbildung 20(c) erklärt die elastische Kapazität k_l und k_r für die zusätzliche Verformung auf der jeweils linken und rechten Seite. Die elastische Kapazität ist eng mit der Koppelungsstellen-Verformung in Abbildung 20(b) verwandt. Beginnend beim linken plastischen Bereich in Abbildung 20(b), erreicht die Koppelungsstelle die maximale Verformung im negativen Bereich. Das System kann sich nicht mehr weiter in dieselbe Richtung verformen. Im Gegensatz dazu, erreicht die Verformung bis zu $2\tilde{u}$ auf der gegenüberliegenden Seite, bis sie das positive Maximum erreicht. Der elastische Zustand bietet dem Element die Möglichkeit sich zu verformen, entweder in die gleiche oder die andere Richtung. Die Summe der vorausgehenden und der zusätzlichen Verformung in beide Richtungen ist begrenzt durch \tilde{u} wie folgt:

$$\begin{aligned}
 u_D + \kappa &\leq |\tilde{u}|; \\
 -u_D - \tilde{u} &\leq \kappa \leq -u_D + \tilde{u} .
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

Abgeleitet von (4.16) kann die Kapazität als positive Kapazität

$$\kappa_r = -u_D + \tilde{u} ,
 \tag{4.17}$$

oder als negative Kapazität definiert werden:

$$\kappa_l = -u_D - \tilde{u} .
 \tag{4.18}$$

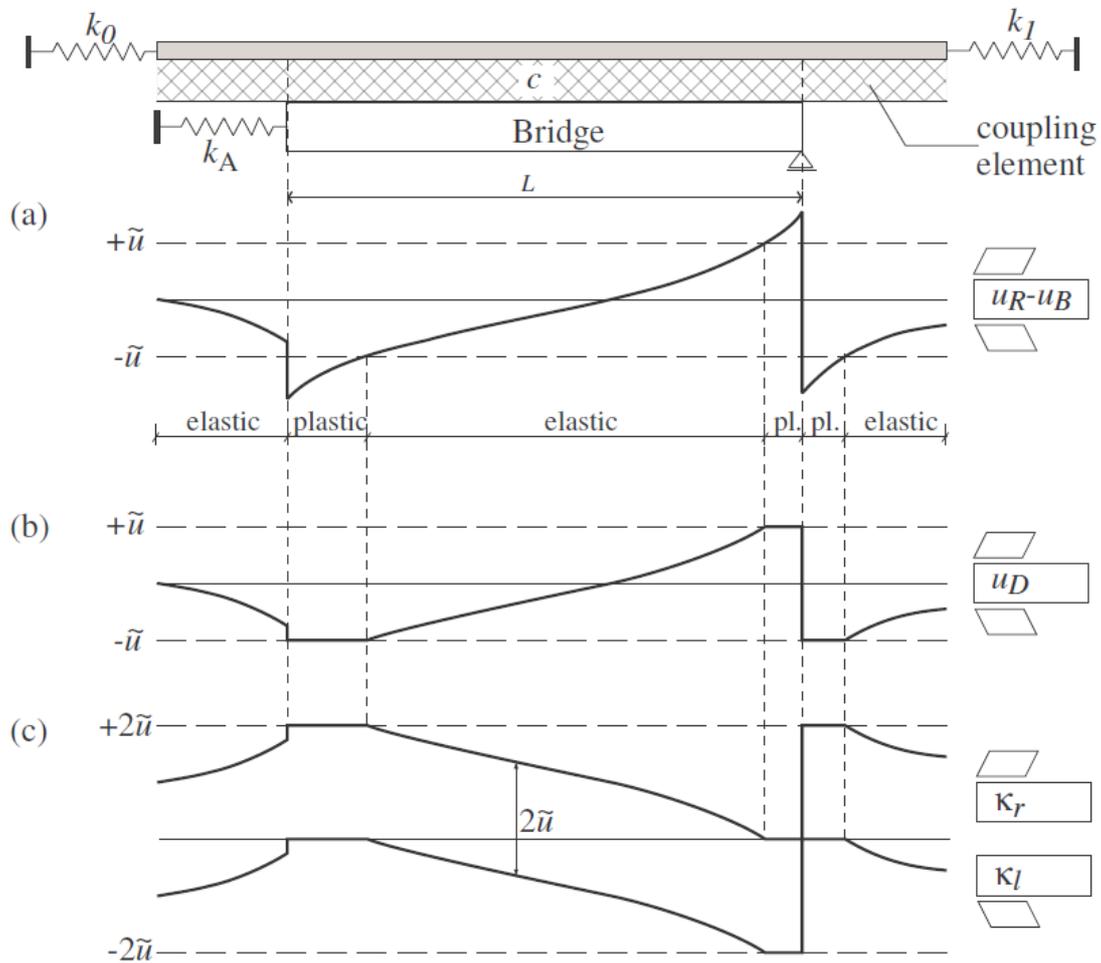


Abbildung 20: Situation der Deformation nach einem vergangenen Lastfall nach Ruge et.al. [79] (a) Verschiebungsdifferenz ($u_R - u_B$); (b) Deformation u_D der Koppelungsstelle; (c) entsprechende, verfügbare Kapazität für eine nachfolgende elastische Verformung [5]

Die Auswertung der elastischen Kapazität k ergibt eine Bandbreite von $2\tilde{u}$. Infolgedessen ist die zusätzliche Verformung elastisch, wenn sie innerhalb dieser Bandbreite der elastischen Kapazität k liegt.

4.2 Genaue Formulierung

Dieser Abschnitt widmet sich der Formulierung für die Gleis-Tragwerks-Interaktionen, wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben.

Die Diskussion beginnt mit dem Niederschreiben der Basis-Gleichung des Stabelementes, welches Längskräften unterliegt. Dann wird die Basis-Formulierung angewendet um einen realistischen Zustand zu simulieren; in diesem Fall wird eine jahreszeitliche Temperaturänderung hergeleitet. Unter Miteinbeziehung der exakten Ergebnisse der vorhergehenden Lastfälle, wird die Lösung aufgrund der tatsächlichen Beanspruchung formuliert. In diesem Fall wird die Veränderung der Koppelungs-Festigkeit benutzt um den Einfluss der früheren Beanspruchung zu beschreiben. Die Herleitung wurde bereits in [20] gezeigt und wird aus Gründen der Vollständigkeit miteinbezogen.

Die genannte Belastungsreihenfolge kann wie folgt zusammengefasst werden:

- 1) saisonale Temperaturänderung
- 2) Änderung der Koppelungs-Festigkeit

In Wirklichkeit ändert der vorbeifahrende Zug den Zustand der Koppelungsstelle von einem unbelasteten zu einem belasteten Zustand und zur selben Zeit bewirkt er ein Biegen der Stützstruktur. Hier wird die Last aufgrund der Biegung in der Trägerstruktur nicht in die genaue Formulierung miteinbezogen.

4.2.1 Stab auf elastischem Unterbau

Betrachten wir einen Teil der Schiene mit einer infinitesimalen Länge Δx in Abbildung 21. Die auf das Element wirkenden Kräfte sind eine verteilte Last p_x und eine gleichmäßig verteilte Last durch die elastische Steifigkeit p_u , die direkt proportional zur Längsverformung $u(x)$ des Stabes ist

$$p_u = c \cdot u(x) . \tag{4.19}$$

Bei Annahme eines Gleichgewichts aller Kräfte

$$-L + p_x - p_u + (L + dL) = 0 \quad (4.20)$$

ergibt sich

$$-dL + p_u = p_x \cdot \quad (4.21)$$

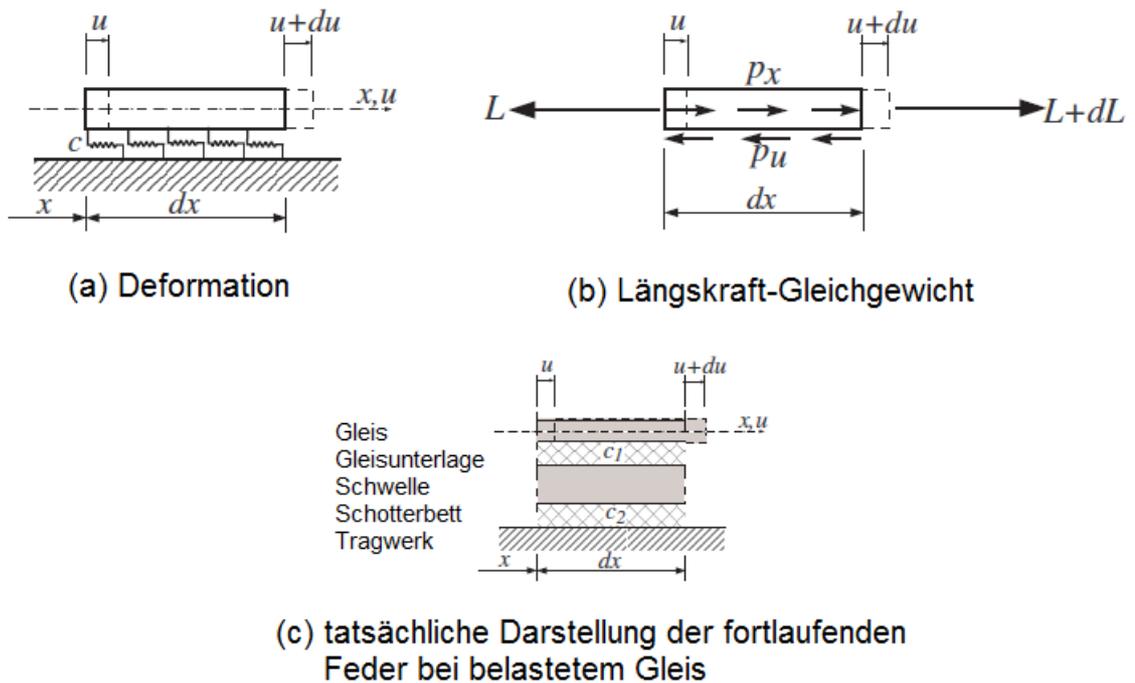


Abbildung 21: Stabelement mit infinitesimaler Länge dx und elastischer Steifigkeit [5]

Von kinematischen Beziehungen und dem Elastizitätsgesetz für Stabelemente, welches wie folgt formuliert wird

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = u'(x) \quad \text{und} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (4.22)$$

kann das Längskraft-Gleichgewicht durch die Spannung $\sigma = L/A$ erhalten werden:

$$L = EAu'_R(x), \quad (4.23)$$

wobei EA die Längsfestigkeit und u_R die Verformung des Schienenelements ist. Setzt man die Längskraft L von Gleichung (4.24) in Gleichung (4.21) ergibt sich

$$-EAu_R''(x) + p_u = p_x . \quad (4.24)$$

Aufgrund der Umsetzung als Schotterbett-Fahrbahn, wird die Koppelungssteifigkeits-Schicht c in Abbildung 21(a) durch die Kombination von zwei fortlaufenden Federn charakterisiert, wie in Abbildung 21(c) gezeigt wird. Diese sind:

7. Koppelung zwischen Schiene und Schwelle (c_1),
8. Koppelung zwischen Schwelle und Unterbau oder Tragwerk (c_2).

Unter Berücksichtigung, dass die Schiene auf einer flexiblen Brücke ruht, werden die auf die Brücke wirkenden Koppelungskräfte auf die Brücke, durch die relative Verformung u_D an der Tragwerksstruktur definiert, wie in Gleichung (4.12) beschrieben. Die elastische Situation ist in Abbildung 22 gezeigt, in welcher $u_D = u_R - u_B$ die Verschiebung von Schiene und Tragwerk enthält.

Letztendlich erhält man durch Einsetzen von $p_u = c_u \cdot u_D$ in die Gleichung (4.24) die differenzierte Gleichung für den Stab in Abhängigkeit der Längskräfte p_x

$$-EAu_R'' + cu_D = p_x . \quad (4.25)$$

Die Differenzialgleichung (4.25) beschreibt jede Situation, entweder elastische Koppelung

$$-EAu_R'' + c(u_R - u_B) = p_x \quad (4.26)$$

oder plastische Koppelung

$$-EAu_R'' = c \tilde{u} \text{sign}(u_R - u_B) + p_x . \quad (4.27)$$

Der Vermerk "sign" bezieht sich auf die Richtung der Rückstellkraft.

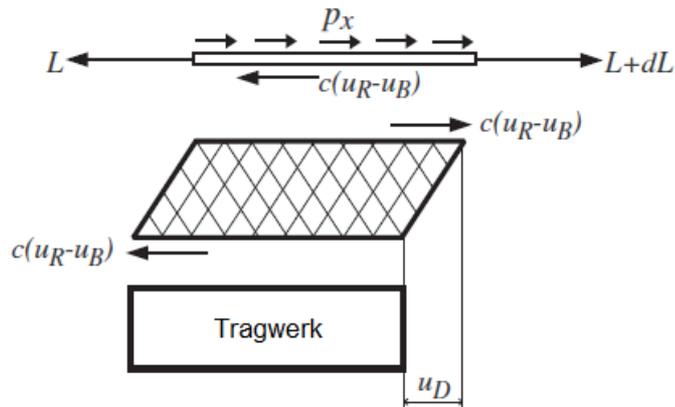


Abbildung 22: Auf das Gleis wirkende Kräfte: Koppelungsstelle im elastischen Zustand [5]

Das Gleichgewicht der Längskräfte des Gleisbrückenelementes ist in Abbildung 23 beschrieben.

Hier verhält sich die feste Koppelungsstelle elastisch und ermöglicht die Interaktion von Gleis und Tragwerk, wie in Abbildung 23(a) gezeigt wird. Die Koppelungsstelle verhält sich plastisch, wenn sie rutscht. In diesem Fall ist die Wechselwirkung zwischen Schiene und Tragwerk inaktiv, wie in Abbildung 23(b) gezeigt.

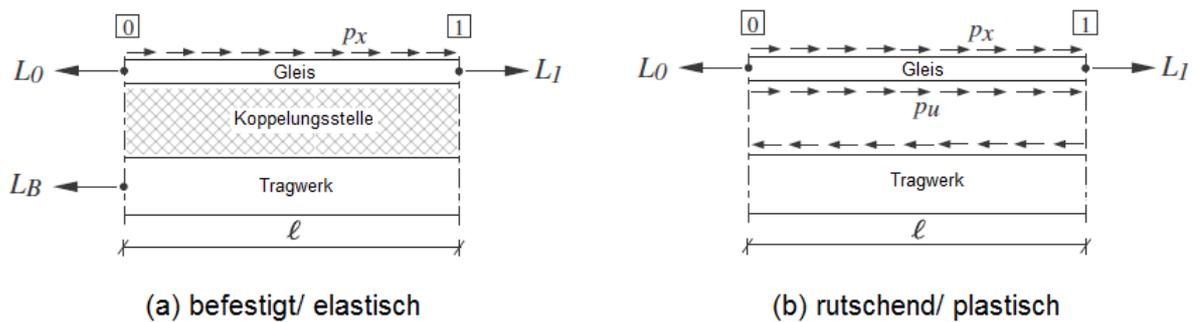


Abbildung 23: Längskräfte-Gleichgewicht an einem Gleis-Tragwerks-Element [5]

4.2.2 Temperaturänderung des Tragwerks

Dieser Belastungsfall wird durch eine auferlegte Verformung der Brückenstruktur gekennzeichnet:

$$u_B = u_A + \alpha \Delta T x, \quad (4.28)$$

wie in Abbildung 24 beschrieben. u_A beschreibt eine Verschiebung am Punkt A, wo sich die elastische Feder befindet. Der thermische Koeffizient wird als α bezeichnet, die Temperaturdifferenz als ΔT und x ist die Koordinate des Elements.

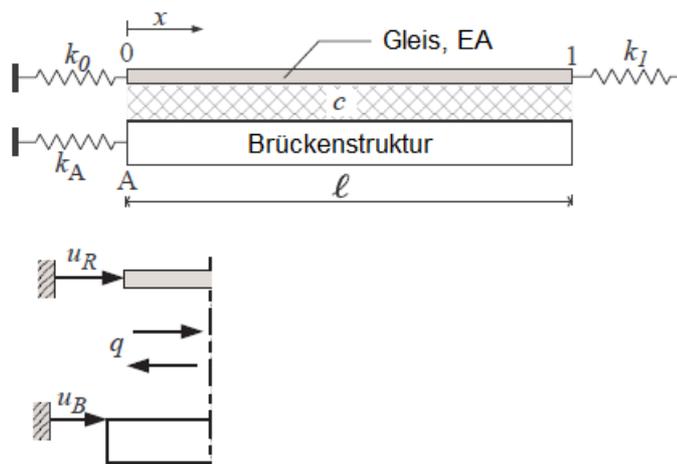


Abbildung 24: System aus einem Einzelement [5]

Setzt man die Temperaturbelastung von Gleichung (3.28) in die Differentialgleichung (4.26), wobei sich die Koppelung elastisch verhält

$$-EAu_R'' - c(u_B - u_R) = 0, \quad (4.29)$$

ergibt sich die Lösung mit zwei Integrations-Konstanten A und B:

$$u_R(x) = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} + u_A + \alpha \Delta T x, \quad \gamma^2 = \frac{c}{EA}. \quad (4.30)$$

Die Lösung von A und B mit der Verschiebung $u(x = 0) = u_0$ und $u(x = l) = u_1$ ergibt:

$$u_0 = u_S(x = 0) = A + B + u_A ,$$

$$u_1 = u_S(x = l) = Ae^{\gamma l} + Be^{-\gamma l} + u_A + \alpha \Delta T l .$$

Danach können die Konstanten A und B als Bedingungen von u_0 und u_1 dargestellt werden:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}} \begin{bmatrix} u_0 e^{-\gamma l} - u_1 + u_A(1 - e^{-\gamma l}) + \alpha \Delta T l \\ -u_0 e^{-\gamma l} + u_1 + u_A(-1 + e^{-\gamma l}) - \alpha \Delta T l \end{bmatrix} . \quad (4.31)$$

Setzt man die zwei Konstanten in die Lösung (4.30) ein und führt eine hyperbolische Funktion ein

$$\sinh \gamma l = \frac{1}{2}(e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}) \quad (4.32)$$

ergibt sich folgende Lösung:

$$u = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_A \end{bmatrix}, h(x) = \frac{1}{\sinh \gamma l} \begin{bmatrix} \sinh \gamma(l - x) \\ \sinh \gamma l \\ -\sinh \gamma(l - x) - \sinh \gamma x + \sinh \gamma l \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

$$u_R(x) = h^T(x)u + \alpha \Delta T \left(x - \frac{l \sinh \gamma x}{\sinh \gamma l} \right) \quad (4.34)$$

$$= \frac{1}{\sinh \gamma l} [\sinh \gamma(l - x) \quad \sinh \gamma x] \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -\alpha \Delta T l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_A \\ 1 \end{bmatrix} + u_A + \alpha \Delta T x . \quad (4.35)$$

Die Steifigkeitsformulierung $K_u = r$ erhält man durch die Auswertung der Längskräfte eines eingebetteten Elements

$$L = EAu'_R, \quad (4.36)$$

an der Grenze: $L(x = 0) = L_0$ und $L(x = l) = L_1$

$$L = EAu'_R(x = 0) = \frac{EA\gamma}{\sinh \gamma l} \begin{bmatrix} -\cosh \gamma l \\ 1 \\ \cosh \gamma l - 1 \end{bmatrix}^T u + EA\alpha\Delta T \left(1 - \frac{\gamma l}{\sinh \gamma l}\right) \quad (4.37)$$

$$L_1 = EAu'_R(x = l) = \frac{EA\gamma}{\sinh \gamma l} \begin{bmatrix} -1 \\ \cosh \gamma l \\ 1 - \cosh \gamma l \end{bmatrix}^T u + EA\alpha\Delta T \left(1 - \frac{\gamma l \cosh \gamma l}{\sinh \gamma l}\right) \quad (4.38)$$

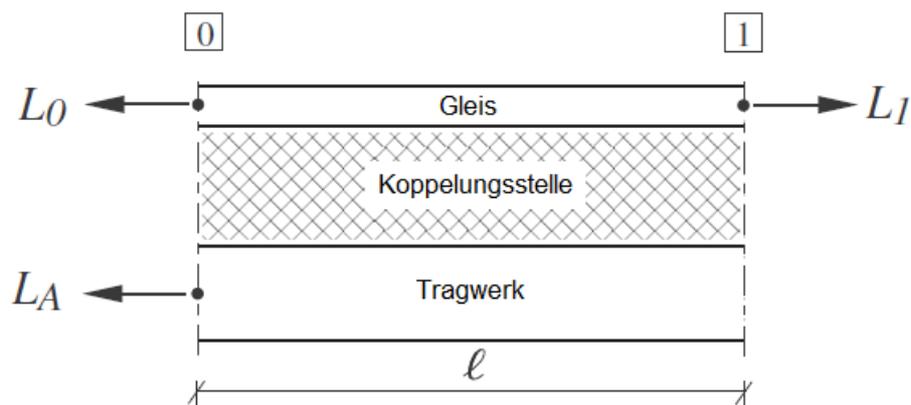


Abbildung 25: Gleichgewicht des Gesamtsystems [5]

Durch Einfügen des Gleichgewichts in das gesamte System in Abbildung 25,

$$L_A = L_1 - L_0 \quad (4.39)$$

und unter Nutzung der Trigonometrie

$$\coth \gamma l - \frac{1}{\sinh \gamma l} = \tanh \frac{\gamma l}{2} \quad (4.40)$$

in Gleichungen (4.37) - (4.39) ergibt das folgende Längskräfte-System:

$$L = -K_e u + r, \quad (4.41)$$

$$\begin{bmatrix} L_0 \\ -L_1 \\ L_A \end{bmatrix} = EA\gamma \begin{bmatrix} -\coth \gamma l & \frac{1}{\sinh \gamma l} & \tanh \frac{\gamma l}{2} \\ \frac{1}{\sinh \gamma l} & -\coth \gamma l & \tanh \frac{\gamma l}{2} \\ \tanh \frac{\gamma l}{2} & \tanh \frac{\gamma l}{2} & -2 \tanh \frac{\gamma l}{2} \end{bmatrix} u + EA\alpha\Delta T \begin{bmatrix} 1 - \frac{\gamma l}{\sinh \gamma l} \\ -1 + \frac{\gamma l \cosh \gamma l}{\sinh \gamma l} \\ \frac{\gamma l}{\sinh \gamma l} - \gamma l \coth \gamma l \end{bmatrix}. \quad (4.42)$$

Abgeleitet von Gleichung (4.41), ist die Steifigkeitsmatrix für ein Element wie folgt:

$$K_e u = r_1 - r_2. \quad (4.43)$$

$$K_e = k \begin{bmatrix} \coth \gamma l & \frac{-1}{\sinh \gamma l} & -\tanh \frac{\gamma l}{2} \\ \text{sym} & \coth \gamma l & -\tanh \frac{\gamma l}{2} \\ & & 2 \tanh \frac{\gamma l}{2} \end{bmatrix}, \quad \text{mit } k = \sqrt{EAc}, \quad \gamma^2 = \frac{c}{EA}, \quad (4.44)$$

$$r_1 = EA\alpha\Delta T \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad r_2 = k\alpha\Delta T l \begin{bmatrix} \frac{1}{\sinh \gamma l} \\ -\frac{\cosh \gamma l}{\sinh \gamma l} \\ \tanh \frac{\gamma l}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.45)$$

Die oben genannten Formulierungen ist gültig für ein Element, dass den elastischen Zustand erfährt und für ein einzelnes Element. Für den Fall eines Systems aus mehreren Elementen, gilt die Formulierung nur für das erste Element in der Reihe.

Wird das System als eine Ansammlung von Elementen modelliert, ist es realistisch mit abwechselnd plastischen und elastischen Bereichen über das gesamte System. Ein eingebettetes Element wird mittels eines zusätzlichen Terms $\alpha\Delta T a_j$ definiert:

$$u_B = (u_A + \alpha\Delta T a_j) + \alpha\Delta T x_j, \quad (4.46)$$

in welchem x_j eine lokale Koordinate des Elementes mit der Länge L_j ist, wie in Abbildung 26 dargestellt.

Infolgedessen erfolgt die analoge Lösung mit Gleichung (4.43) durch Multiplikation von $\alpha\Delta T a_j$ mit der dritten Spalte der Matrix K_e und anschließender Bewegung der Lösung zur rechten Seite:

$$K_e u = r_1 - r_2 + r_3. \quad (4.47)$$

Aus Matrix K_e und den Vektoren u_1 , r_1 , r_2 , wie in Gleichung (4.44) - (4.45) bestimmt, folgt ein zusätzlicher Belastungs-Vektor

$$r_3 = E\gamma\alpha\Delta T a_j \begin{bmatrix} -\tanh \frac{\gamma l}{2} \\ -\tanh \frac{\gamma l}{2} \\ 2 \tanh \frac{\gamma l}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.48)$$

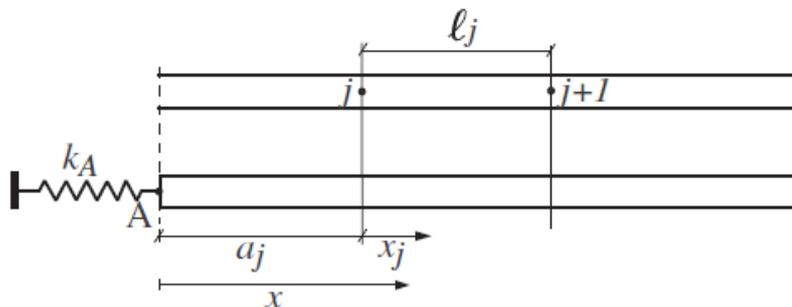


Abbildung 26: Eingebettetes Gleiselement der Länge l_j , mit der lokalen Achse $0 \leq x_j \leq l_j$ [5]

Im Falle, dass das Schienenelement relativ zur Bettung oder zum Betonstreifen abrutscht, ist die Koppelungsstelle inaktiv und daher wird dann eine konstante Längsreaktionskraft (4.14) angewandt.

$$-EAu_R'' = -c\tilde{u} \cdot \text{sign}(u_R - u_B) . \quad (4.49)$$

Beim Lösen der Differenzialgleichung oben mittels Verschiebung $u(x = 0) = u_0$ und $u(x = l) = u_1$ an den Grenzen ergibt sich ein normalisiertes Ergebnis:

$$u_R = \frac{1}{-l} [x \quad 1] \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -l & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} + \frac{c\tilde{u} \cdot \text{sign}(u_R - u_B)}{2EA} (x^2 - lx) \quad (4.50)$$

Bei der Anwendung eines ähnlichen Verfahrens wie es für ein elastisches Element beschrieben ist, ergibt sich eine Formulierung für eine plastische Koppelungsstelle:

$$K_p \cdot u = r_p , \quad (4.51)$$

wobei die dritte Spalte und die Zeile keine Koppelung zur Brücken-Verschiebung zeigt:

$$K_p = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad r_p = -\frac{1}{2} c \tilde{u} l \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \text{sign}(u_R - u_B). \quad (4.52)$$

Die Bewertung des Gesamtsystems soll die Längskräfte L_0 , L_1 in der Schiene am Ende der Brücke und die Längskraft L_A im elastischen Lager am Punkt A beinhalten.

$$\begin{aligned} x = 0: \quad L_0 &= k_0 u_0, \\ x = l: \quad -L_1 &= k_1 u_1, \\ A: \quad L_A &= k_A u_A. \end{aligned} \quad (4.53)$$

Die in dieser Arbeit analysierte Temperaturänderung wird begründet durch saisonale Änderung von Winter über Sommer ohne jeglichen Zusammenhang zum vorbeifahrenden Zug, darum wird die oben genannte Formulierung als unbelasteter Zustand abgeleitet.

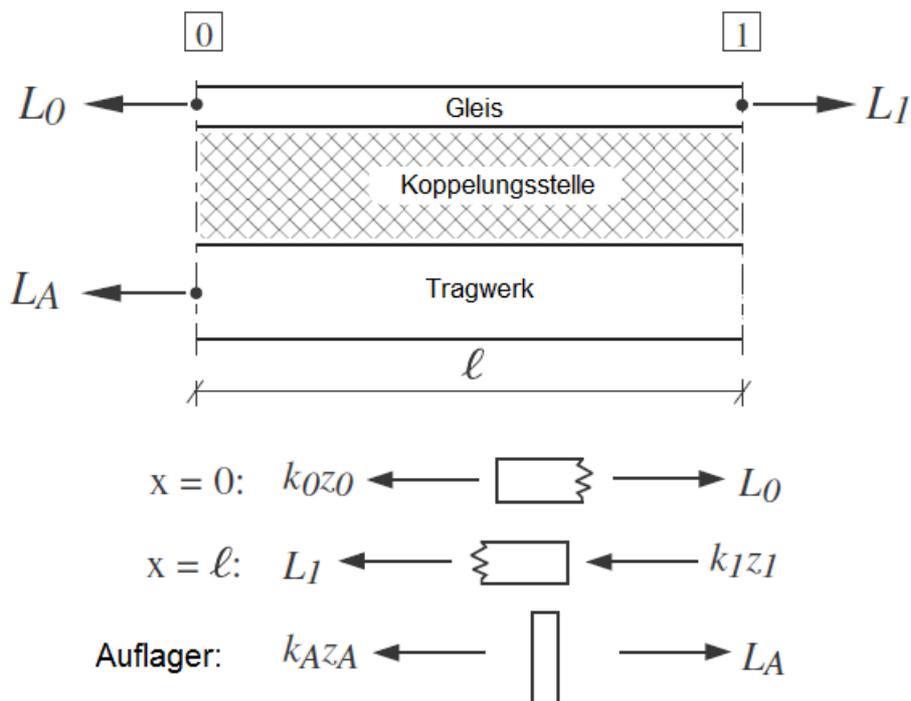


Abbildung 27: Gleichgewicht des Gesamtsystems [5]

4.2.3 Änderung der Koppelungsstelle durch den vorbeifahrenden Zug

Wenn ein Zug vorbeifährt ändern sich die mechanischen Eigenschaften der Koppelungsstellen zwischen Schiene und Tragwerk vom unbelasteten zum belasteten und wieder zurück zum unbelasteten Zustand. Somit bewegt sich das System in eine neue entsprechende Gleichgewichtslage.

Die Änderung der Koppelungs-Steifigkeit erzeugt eine zusätzliche verteilte Koppelungskraft

$$q = -\Delta c \cdot u_D, \quad (4.54)$$

wobei Δc die Änderung der Koppelungs-Steifigkeit ist:

$$\Delta c = c_l - c_u, \quad \text{für die Veränderung durch die unbelastete Schiene,}$$

$$\Delta c = c_u - c_l, \quad \text{für die Veränderung durch die belastete Schiene.} \quad (4.55)$$

Die Verformung u_D der vergangenen Verformung wie in Abschnitt 4.1.3 vorgestellt, zeigt deutlich die Ausgangssituation für die folgende auf das System wirkende Kraft; für $|u_D| \leq \tilde{u}$ erscheint die elastische Koppelung; andererseits rutscht sie. Somit kann die folgende tatsächliche Belastung die Koppelungs-Steifigkeit folgendermaßen ändern:

Von vergangener zu aktueller Elastizität durch die aktuelle Belastung

Von vergangener Elastizität zu aktueller Plastizität durch die aktuelle Belastung

Von vergangener Plastizität zu aktueller Elastizität durch die aktuelle Belastung

Von vergangener Plastizität zu aktueller Plastizität durch die aktuelle Belastung

Die analytische Lösung für alle vier Zustände, in einer statischen Weise behandelt, sind möglich. Hier werden diese Lösungen von einer vergangenen Verformung abgeleitet, die aufgrund saisonaler Temperaturänderung in der Brücke entsteht und in Längsrichtung wirkt.

Für detailliertere mathematische Erklärungen der statischen Lösung wird der Leser auf [20] hingewiesen.

4.2.3.1 Elastische Koppelung während einer tatsächlichen Belastung

Wenn sich ein Gleis-Tragwerks-Teil mit der Steifigkeit c_l während der aktuellen Belastung elastisch verhält, dann wird die linke Seite der entsprechenden Differenzialgleichung durch die elastische Reaktion in der Koppelungsstelle bestimmt, bedingt durch die Schnittgrößen z_B der Brücke und z_R der Schiene. Die rechte Seite zeigt die Differenz $u_D \cdot \Delta c$, aufgrund der Änderung der mechanischen Eigenschaften der Koppelungsstelle:

$$-EAz_R'' + c_l(z_R - z_B) = -\Delta c \cdot u_D \quad (4.56)$$

mit zunehmenden Längskräften

$$L = EAz_R' . \quad (4.57)$$

Die Steifigkeitsformulierung $K_z = r$ ergibt sich durch Lösen der Differenzialgleichung, durch die Beziehung der Längskräfte der Bettungselemente an den Grenzflächen zu den zugehörigen zunehmenden Verschiebungen $z_R(x = 0) = z_0$, $z_R(x = l) = z_1$.

Wenn die Differenz $u_R - u_B$ von der vorhergehenden Belastung im elastischen Bereich ist, ergibt sich die als elastisch angenommene Lösung der folgenden Belastung, durch eine lineare Gleichung mit typischen Abweichungen zwischen c_u und c_l auf der rechten Seite. Dennoch ist diese Lösung durch Hyperbelfunktionen geregelt.

$$K_e^l \cdot z = -(K_e^l - K_e^u) \cdot u + (r_1^l - r_1^u) - (r_2^l - r_2^u) .$$

$$K_e^l = k_l \begin{bmatrix} \coth \gamma_l l & \frac{-1}{\sinh \gamma_l l} & -\tanh \frac{\gamma_l l}{2} \\ & \coth \gamma_l l & -\tanh \frac{\gamma_l l}{2} \\ sym & & 2 \tanh \frac{\gamma_l l}{2} \end{bmatrix}, \quad \text{mit } k_l = \sqrt{EAc_l}, \quad \gamma_l^2 = \frac{c_l}{EA} .$$

$$z^T = [z_0 \quad z_1 \quad z_A], \quad u^T = [u_0 \quad u_1 \quad u_A].$$

$$K_e^u \text{ entspricht } K_e^l \text{ mit } k_u = \sqrt{EA c_u}, \quad \gamma_u^2 = \frac{c_u}{EA};$$

$$r_1^l = k_l \alpha \Delta T a_j \begin{bmatrix} \tanh \frac{\gamma_l l}{2} \\ \tanh \frac{\gamma_l l}{2} \\ -2 \tanh \frac{\gamma_l l}{2} \end{bmatrix}, \quad r_1^u \text{ wie mit } k_u, \gamma_u;$$

$$r_2^l = k_l \alpha \Delta T l \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\sinh \gamma_l l}{\cosh \gamma_l l} \\ \frac{\cosh \gamma_l l}{\sinh \gamma_l l} \\ \tanh \frac{\gamma_l l}{2} \end{bmatrix}, \quad r_2^u \text{ wie mit } k_u, \gamma_u; \quad (4.58)$$

Eine vergangene Plastizität mit $|u_R - u_B| > \tilde{u}$ folgt aus dem elastischen Zustand während der aktuellen Belastung und wird definiert durch das typische Produkt $\tilde{u} \Delta c$ auf der rechten Seite:

$$K_e^l \cdot z = r_c.$$

$$r_c = \frac{1}{\gamma_l} \cdot \Delta c \cdot \tilde{u} \operatorname{sign}(u_R - u_B) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix} \tanh \frac{\gamma_l l}{2}. \quad (4.59)$$

Ein elastisches Verhalten des Systems nach einer vergangenen Plastizität ist sicherlich von einer Reduktion der Verformung der Kopplungsstelle begleitet.

4.2.3.2 Plastische Koppelung während einer tatsächlichen Belastung

Verhält sich ein Gleis-Tragwerks-Teil während einer tatsächlichen Belastung mit einer konstant verteilten Kraft $\tilde{q} = c_l \cdot \tilde{u}$ innerhalb der Koppelungsstelle plastisch, beinhaltet die entsprechende Differenzialgleichung keinen elastischen Teil auf der linken Seite:

$$-EAz_R'' = c_u u_D - c_l \tilde{u} \operatorname{sign}(z_R - z_B). \quad (4.60)$$

Wenn die Verformung $u_R - u_B$ von der vorherigen Belastung im elastischen Bereich ist, ergibt sich die als plastisch angenommene Lösung der folgenden Belastung, durch eine lineare Gleichung mit der, von der vorherigen Verformung u abhängigen, rechten Seite:

$$K_p \cdot z = (K_e^u - K_p) \cdot u - r_p^l \operatorname{sign}(z_R - z_B) - r_3 + r_2^u - r_1^u.$$

$$K_p = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad r_3 = EA\alpha\Delta T \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad r_p^l = \frac{c_l \tilde{u} l}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix}, \quad r_p^u \text{ gleich wie } c_u, \quad (4.61)$$

r_2^u und r_1^u wurden in Gl. (4.58) bestimmt.

Eine vergangene Plastizität mit $|u_R - u_B| > \tilde{u}$ folgt durch eine plastische Situation und wird somit durch eine konstante rechte Seite während der aktuellen Belastung charakterisiert:

$$K_p \cdot z = -r_p^l \operatorname{sign}(z_R - z_B) + r_p^u \operatorname{sign}(u_R - u_B). \quad (4.62)$$

Die bisher vorgestellte Steifigkeits-Formulierung ermöglicht eine exakte Lösung. Dennoch muss die letztendliche Situation durch einen iterativen Prozess, begleitet von einer kontinuierlichen Veränderung der Bereiche mit und ohne Rutschen, gefunden werden.

Nachfolgende Lastfälle erhöhen diese Änderungen und damit wird die Kette der beteiligten analytischen Lösungen schwierig zu handhaben mit einem gut organisierten Computercode.

Und zusätzlich werden die vergangenen Verformungen durch eine quadratische Interpolation repräsentiert anstelle der Verwendung von hyperbolischen Funktionen.

Die bisher vorgestellten Analysen widmen sich der statischen Situation. Dennoch passiert die Änderung der Koppelungs-Steifigkeit in einer eher kurzen Zeitperiode bestimmt durch einen vorbeifahrenden Zug.

Um jegliche Wirkungen aufgrund von Massenbeschleunigungen zu untersuchen, werden diese Kräfte zur Bewegungsgleichung mit der Dichte ρ [kg/m] der Schiene hinzugefügt.

$$-EAz_R'' + c(z_R - z_B) + \rho\ddot{z}_R = q(x, t) . \quad (4.63)$$

Hier kann die exakte Lösung $z_R(x, t)$, $z_B(t)$ formuliert werden, aber im Frequenzbereich

$z_R(x, t) = \hat{z}_R(x)e^{i\omega t}$, $z_B(t) = \hat{z}_B e^{i\omega t}$; jedoch ist die Anregung der Koppelungs-Änderung sehr vergänglich.

Darum wird in dieser Arbeit eine komplett diskretisierte Formulierung hergestellt: Eine quadratische Formulierung im Raum-Bereich und eine lineare Interpolation (Newmark) im Zeit-Bereich.

4.3 Beispiel

In der Literatur werden einige Beispiele angeführt, von denen eines herausgenommen wird. Das Beispiel der Einfeld - Brücke gibt eine simple Darstellung der Einwirkungen und den damit verbundenen Spannungen wieder und dient als Vergleich zur Studien der Brücke über die L110.

4.3.1 Einfeld - Brücke

Die als Beispiel angegebene Brücke hat eine Länge von 60m. Am linken Widerlager ist sie elastisch und an der rechten Seite frei gelagert. Die Schiene ist an beiden Enden elastisch gelagert um die Fortsetzung der Schiene wiederzugeben. Abbildung 28 zeigt eine Skizze dieser Brücke.

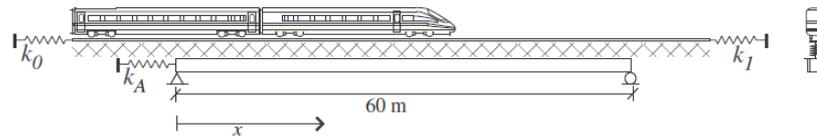


Abbildung 28: Längsschnitt über eine einfach gelagerte Brücke [5]

Als schotterlose Fahrbahn dient in diesem Beispiel das System nach RHEDA, wie in Abbildung 29 gezeigt. Es werden speziell eingebundene Gitterträger-Schwellen in Kombination mit Ortbeton und einer Bewehrung durch die Platte verwendet.

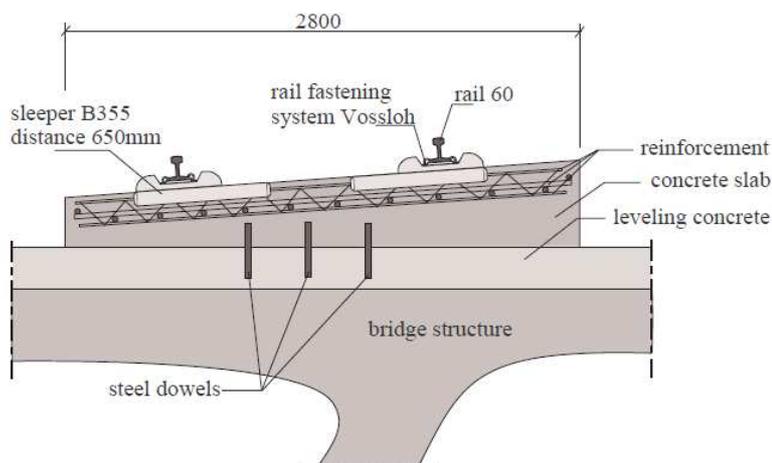


Abbildung 29: Querschnitt einer RHEDA 2000® Konstruktion [5]

Für einen Vergleich werden zuerst drei verschiedene Situationen behandelt:

- $\Delta T_u + Be$: jahreszeitliche Temperaturschwankungen und Durchbiegung werden getrennt behandelt und dann linear hinzugefügt
- $\Delta T_u \rightarrow Be$: sequentielle Auswertung der jahreszeitlichen Temperaturschwankung gefolgt von Durchbiegung

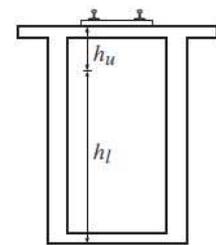
- $\Delta T_u \rightarrow (\Delta C + Be)$: sequentielle Auswertung der jahreszeitlichen Temperaturschwankung gefolgt von Durchbiegung zusammen mit der Änderung der Koppelsteifigkeit vom unbelasteten zum belasteten Zustand

ΔT_u ist die Temperaturänderung der Brücke im unbelasteten Zustand,

Be die Durchbiegung und

ΔC die Änderung der Koppelsteifigkeit.

Bridge		
Length of the bridge	L	= 60 m
Stiffness of the elastic support	k_A	= $6 \cdot 10^8$ N/m
Cross-sectional area of the bridge	A_B	= 3.5070 m ²
Distance from neutral axis to the upper surface	h_u	= 1.21 m
Distance from neutral axis to the lower surface	h_l	= 4.79 m
Rail		
Longitudinal rail stiffness	EA_R	= 3.23×10^9 N
Cross-sectional area of the rail	A_R	= 15372 mm ²
Mass density of the rail	ρ_R	= 7850 kg/m ³
Stiffness of the unloaded track	c_u	= $6.0 \cdot 10^7$ N/m ²
Stiffness of the loaded track	c_l	= $12.0 \cdot 10^7$ N/m ²
Critical elastic relative deformation $\Delta u = u_r - u_b$	\tilde{u}	= 0.0005 m
Mass of bi-block sleeper + concrete slab	μ_{bl}	= 2400 kg/m
Loads		
Temperature change	Δt	= 30K
Thermal expansion coefficient of a concrete bridge	α	= $1.0 \cdot 10^{-5}$
Maximum relative deflection of the bridge	δ	= $\frac{1}{2500}$
Velocity of the train	v_{train}	= 60 m/sec



Bridge cross-section

Abbildung 30: Geometrie-, Material- und Belastungskennwerte der Einfeld - Brücke [5]

Abbildung 31 zeigt die Längsspannungen für die oben genannten drei Lastfälle. Die Ergebnisse der sequentiellen Analyse von $\Delta T_u \rightarrow (\Delta C + Be)$ sind niedriger als die der linearen Kombination von $\Delta T_u + Be$. Die maximalen Differenzen sind im Druckbereich.

Unter Miteinbeziehung der Änderung der Koppelsteifigkeit ($\Delta T_u \rightarrow \Delta C + Be$), steigt die maximale Spannung im Vergleich zum Lastfall nur mit Biegung ($\Delta T_u \rightarrow Be$) um 7,68% an.

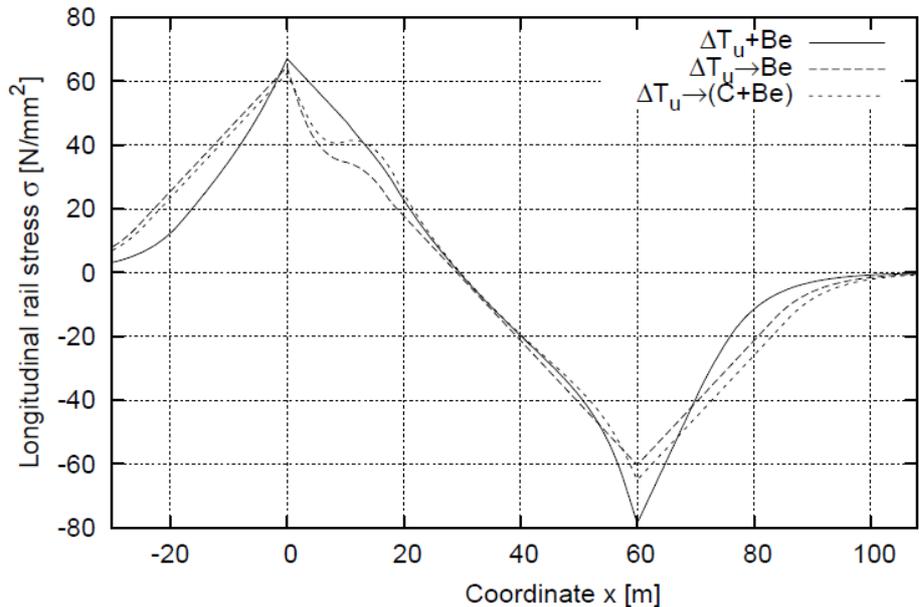


Abbildung 31: Analyse der Schienenlängsspannung [5]

Die Verteilung von elastischen und plastischen Bereichen entlang der Struktur und für die unterschiedlichen Lastfälle wird in Abbildung 32 gezeigt. Der Lastfall, nur mit Temperaturschwankung, erzeugt eine Verteilung, die vom nächsten Lastfall verändert wird. Zum Beispiel erhöht der Lastfall der Biegung $\Delta T_u \rightarrow Be$ die plastischen Bereiche. Der Lastfall der Biegung zusammen mit der Änderung der Koppelungssteigigkeit $\Delta T_u \rightarrow (\Delta C + Be)$ verringert die plastischen Bereiche wieder.

Den Endzustand der Verteilung der plastischen und elastischen Koppelungsstellen erhält man durch die wirkliche lineare Kombination. Ohne die vorherige Belastungsgeschichte, also mit getrennter Betrachtung der Lastfälle kann dieses Ergebnis nicht erreicht werden.

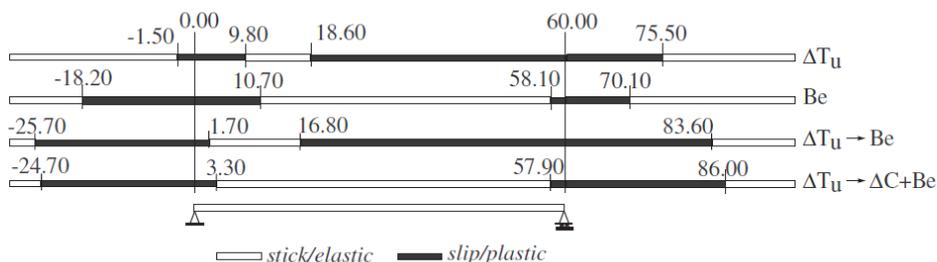


Abbildung 32: Verteilung der elastischen und plastischen Koppelungsstellen [5]

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der maximalen Spannung bei Variation der Steifigkeit der elastischen Lagerung k_A der Brücke an der linken Seite. k_A ergibt sich durch Multiplikation der Brückenlänge mit $10^6 N/m$ und dem Faktor K.

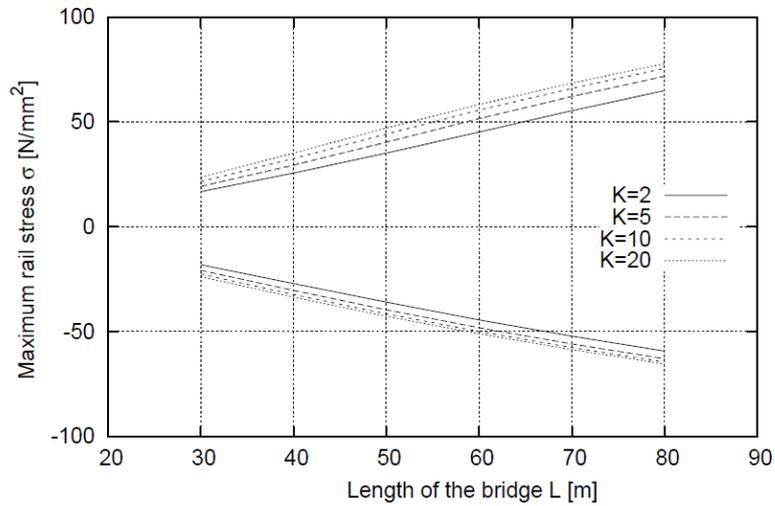


Abbildung 33: Variation der Lagersteifigkeit mit linearer Lastkombination der Temperaturänderung und Biegung [5]

5 Fallstudie

Die Eisenbahnbrücke über die L110 zwischen St.Pölten und Wien wird als Basis für das Computermodell verwendet. Dieses wird mit den nichtlinearen Finite-Elemente-Programmen ATENA und GiD der Firma Cervenka Consulting erstellt.

Diese Brücke wurde im Zeitraum von 2010-2012 mit verschiedenen Dauermessanlagen ausgestattet. Die ausgewerteten Daten dienen zum Vergleich der Brücke mit den Ergebnissen des Modells.

5.1 Ausgangssituation - Brücke über die L110

Die Brücke ist als Plattenbrücke mit drei Feldern mit einer Spannweite von 22 Metern im Mittelfeld und 19 Metern der beiden Randfelder ausgeführt. Die Brücke ist etwa 60 Meter lang und in der Regel etwa 9 Meter breit, wobei sich an beiden Seiten Kragarme von jeweils 2 Meter Länge befinden. Das Tragwerk ist eine vorgespannte Stahlbetonkonstruktion.

Genauer ist aus den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich.

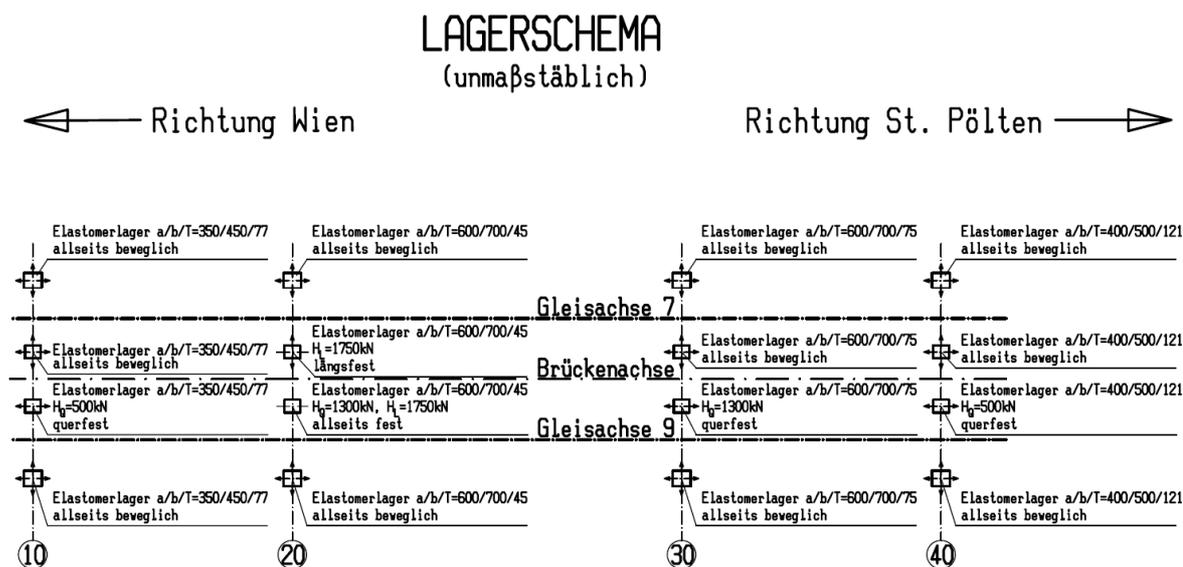


Abbildung 34: Lagerschema der Brücke über die L110 [16]

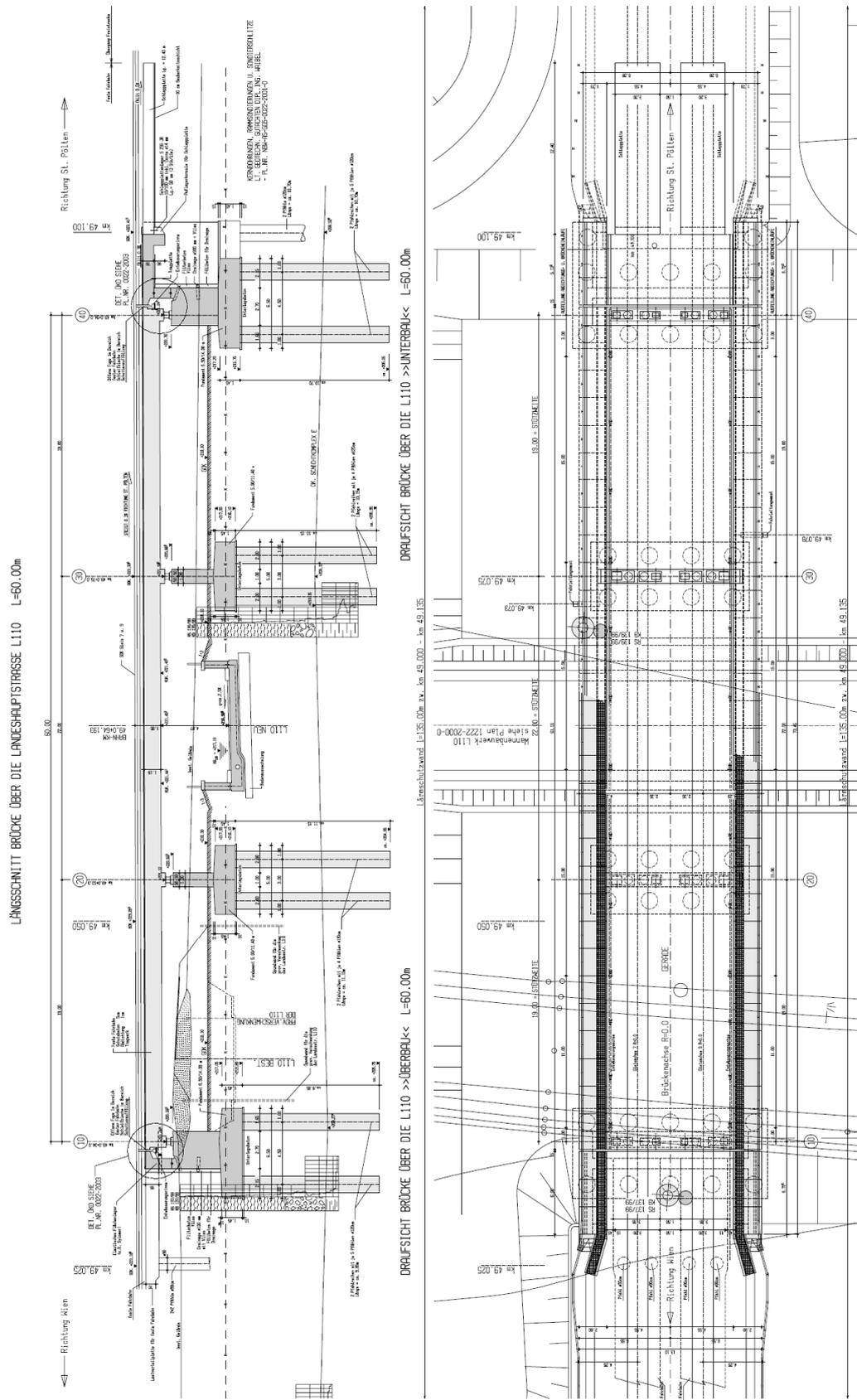


Abbildung 35: Längsschnitt und Grundriss der Brücke über die L110 [16]

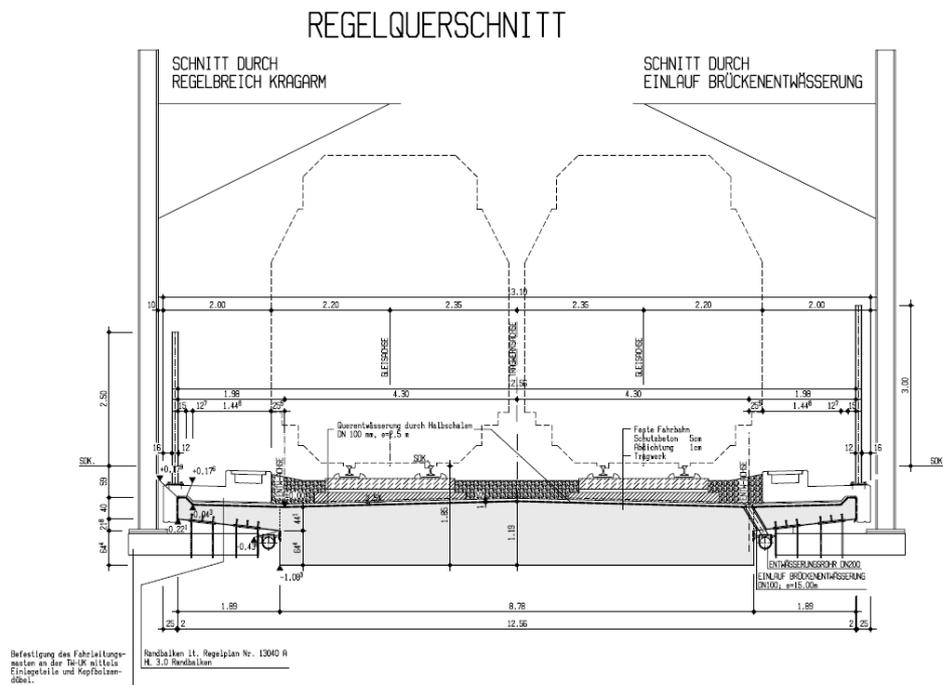


Abbildung 36: Regelquerschnitt der Brücke über die L110 [16]

Im Tragwerksbereich wird das Gleis über eine feste Fahrbahn geführt. Diese ist als elastisch gelagerte Gleistragplatte ausgeführt und besteht aus Fertigteil-Betonelementen mit einer Länge von 5,16m und einer Breite von 2,4m. Details sind Abbildung 1 und Abbildung 2 zu entnehmen.

5.2 Monitoringprogramm

Aus den Monitoringdaten der ÖBB stehen Messdaten über Temperatur und Dehnung zur Verfügung. Diese wurden im Jahr 2012, jeweils an einem Tag in jeder Jahreszeit, in einem Intervall von 1:50min gemessen. Für Winter wurde im Februar gemessen, für Frühling im Mai, für Sommer im Juli und für Herbst im November. Die gemittelten Werte sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Das Monitoring wurde von FCP, der Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, über 2 Jahre ausgeführt.

Tabelle 1: Monitoringdaten [17]

	T_Schiene °C	T_Tragwerk °C	δ _Tragwerk mm	ϵ _Schiene $\mu\text{m}/\text{m}$
Frühling				
MAX	35,56	17,97	61,07	670,92
MIN	7,53	15,12	60,66	350,46
Mittel	15,70	16,15	60,86	574,35
Sommer				
MAX	51,80	27,28	57,92	508,18
MIN	20,24	23,87	57,46	141,66
Mittel	33,18	25,63	57,66	351,94
Herbst				
MAX	13,73	10,86	65,21	738,01
MIN	3,02	8,51	65,00	604,59
Mittel	7,82	9,46	65,11	680,64
Winter				
MAX	-6,21	-8,04	72,59	1011,71
MIN	-17,01	-10,12	72,29	869,60
Mittel	-12,45	-9,17	72,44	954,60

Die Daten dienen als Grundlage für die Temperaturlastfälle in GiD. Es werden die gemittelten Temperaturen der Bauteile ausgewählt und auf die im Programm eingegebene Struktur aufgebracht. Die aus den jeweiligen Temperaturen resultierenden Verschiebungen aus dem Programm, werden mit jenen aus dem Monitoringprogramm verglichen. Sind diese Werte möglichst nah an den realen Bauwerksbewegungen, dann ist das Modell richtig konstruiert.

In Abbildung 37 sind die zahlreichen Sensoren über die gesamte Brücke verteilt, zu sehen.

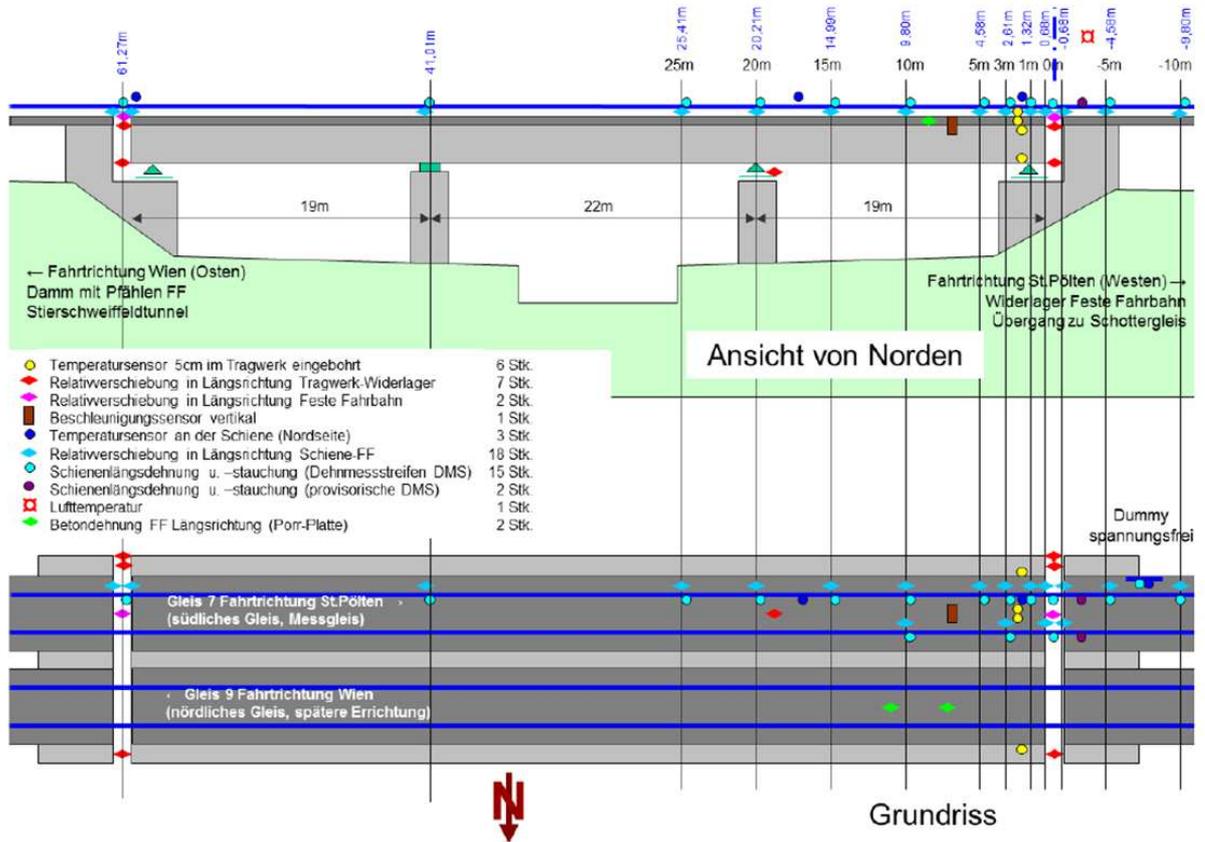


Abbildung 37: Brückenübersicht mit den Monitoringpunkten [9]

6 Anpassung anhand des 1 Höcker - Modells mit ATENA

6.1 Modellbildung

Folgender Abschnitt soll dem Leser das Programm ATENA näher bringen und ihm die einzelnen Schritte beginnend bei der Festlegung der Geometrie, über die Materialien bis hin zur Berechnung zeigen.

Die Bauteile sollen so einfach als möglich dargestellt werden, um die Eingabe und die Berechnung zu erleichtern bzw. effizient zu halten.

Um das Modell anzupassen, und somit die Randbedingungen und die geeigneten Materialien herauszufinden, wird zunächst mit einem "1 Höcker - Modell" gearbeitet. Dies findet mit dem Programm ATENA statt. Im Laufe der Modellbildung mit immer mehr Höckern, werden die Grenzen des Programms erreicht und es wird zum Programm GiD gewechselt. In GiD wird anschließend die gesamte Brücke modelliert. In folgendem Abschnitt wird daher neben den Erklärungen zu ATENA, auch die Vorgehensweise in GiD genannt.

6.1.1 Geometriekennwerte

Die Eingabe in beiden Programmen erfolgt durch koordinativ zu bestimmende Punkte. Diese werden dann zu Linien verbunden und mit Flächen, den sogenannten Macro-Elementen gefüllt. Diesen Macro-Elementen werden Materialeigenschaften, Bauteilbreiten, sowie Größe und Form des Netzes zugewiesen.

Im Vergleich zu ATENA bietet GiD die Möglichkeit Elemente zu kopieren und eine Vereinfachte Eingabe der Macroelemente.

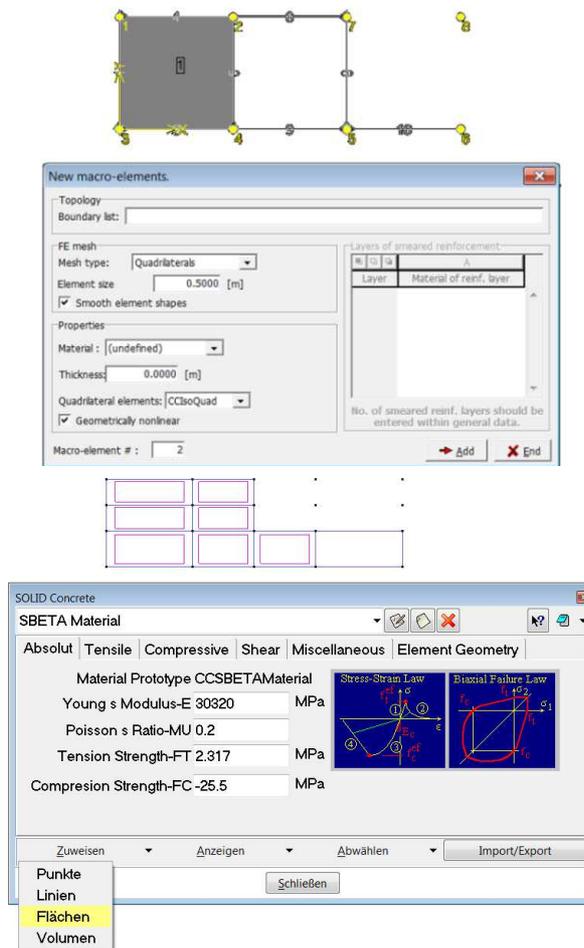


Abbildung 38: Macro-Elemente anlegen in ATENA und GiD, [eigene Darstellung]

Das 1 Höcker Modell hat eine Länge von 0,65m und beinhaltet ein Paar an Schienenbefestigungen, wie in Abbildung 40 gezeigt. Die Schiene hat die Abmessungen eines UIC 60 Profils. Die Abmessungen der Schwelle und des Tragwerks können den Plänen aus Abbildung 1 und Abbildung 2 entnommen werden.

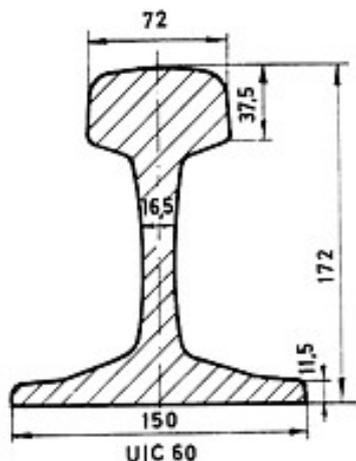


Abbildung 39: Schienenprofil [19]

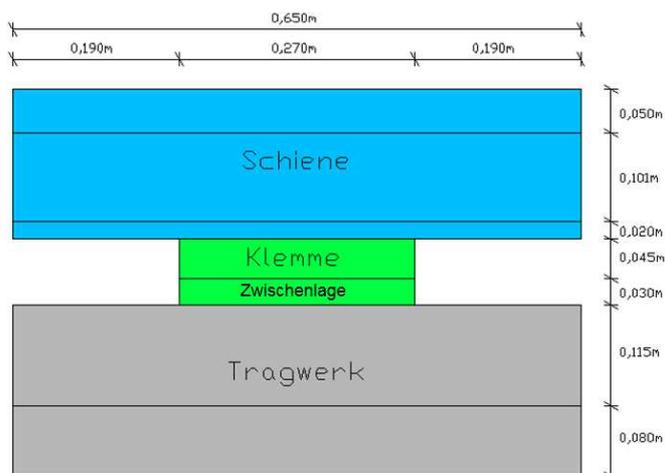


Abbildung 40: Modell 1 Höcker, [eigene Darstellung]

Die Brücke wird der Länge nach zweigleisig modelliert. Somit werden die doppelten Breiten in das Programm eingegeben, wie in Abbildung 41 dargestellt.

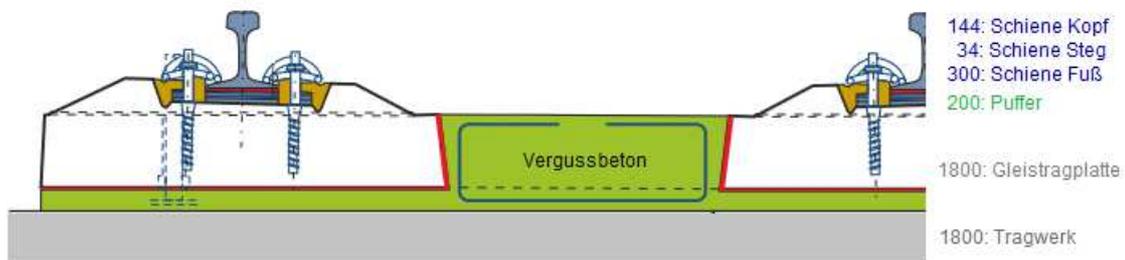


Abbildung 41: Annahmen der Bauteilbreiten im Modell, verändert [14]

6.1.2 Lastfälle

Im Programm ATENA stehen verschiedene Lastfälle zur Verfügung, wie in Abbildung 42 ersichtlich ist. Unabhängig voneinander werden zum Beispiel Auflager, einwirkende Kräfte oder Temperatur in eigene Lastfälle eingeteilt. Diese sind als Voraussetzung zu erstellen, um dann anschließend die genannten Einwirkungen auf das System auftragen zu können.

Die einzelnen Lastfälle können bei der Berechnung wahlweise mit oder nicht miteinbezogen werden.

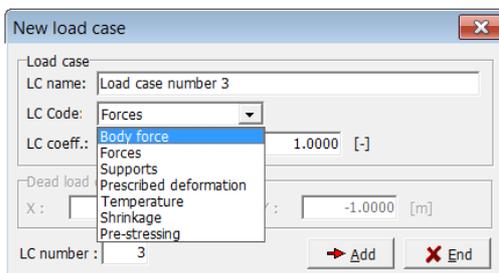


Abbildung 42: Auswahl an Lastfällen, [eigene Darstellung]

In GiD werden die Einwirkungen miteinander, ohne Lastfälle aufgetragen. Es gibt aber sogenannte Intervalle, mithilfe deren man nacheinander auf das gleiche System unterschiedliche Einwirkungen aufbringen kann.

6.1.3 Materialkennwerte

ATENA und GiD bieten beide vordefinierte Materialien, die entweder gleich angewendet oder noch angepasst werden können.

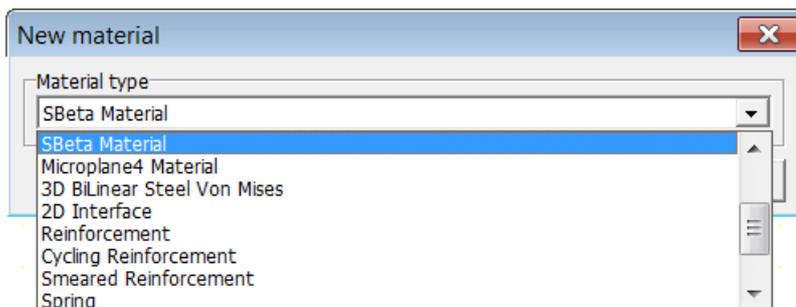


Abbildung 43: Materialauswahl in ATENA, [eigene Darstellung]

Für die einzelnen Bauteile der Brücke werden folgende Materialien gewählt:

- Tragwerk inklusive Zwischenschicht: SBeta Material
Plane Stress Elastic Isotropic Material
- Schienen: Plane Stress Elastic Isotropic Material
- Puffer: 3D BiLinear Steel Von Mises
SBeta Material und smeared reinforcement

6.1.3.1 Tragwerk inklusive Auflager für die Puffer

Für das Tragwerk und die Zwischenschicht in Modell A wird SBeta Material verwendet. SBeta Material entspricht Beton mit den in Tabelle 2 beschriebenen Eigenschaften.

In Modell B wird ein elastisches Material gewählt, mit dem Materialgesetz aus Abbildung 45.

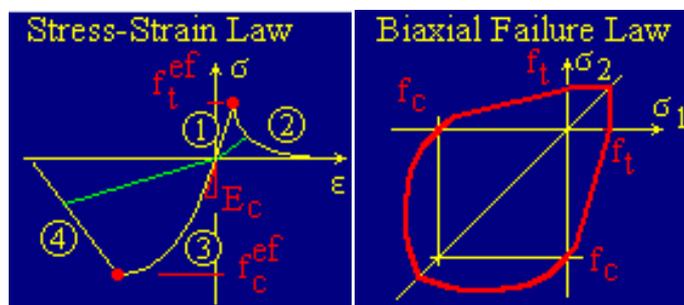


Abbildung 44: Materialgesetz für SBeta Material (Beton), [eigene Darstellung]

Tabelle 2: Materialkennwerte für Modell A und B, [eigene Darstellung]

	Einheit	ATENA (Model A und B)	GiD (Model B)
E - Modul	MPa	3,695E+04	3,695E+04
Poissonzahl	-	0,200E+00	0,200E+00
Zugfestigkeit f_t	Mpa	3,257E+00	
Druckfestigkeit f_c	MPa	-4,250E+01	
Spezifische Bruckenergie G_f	MN/m	8,143E-05	
Stauchung ϵ_c	-	-2,301E-03	
Spezifische Wichte ρ	MN/m ³	2,300E-02	2,300E-02
Temperaturkoeffizient α	1/K	1,200E-05	1,200E-05

6.1.3.2 Schiene

Die Schiene wurde in ATENA sowie in GiD mit dem Plane Stress Elastic Isotropic Material modelliert. Dies entspricht Stahl mit den in Tabelle 3 beschriebenen Eigenschaften. Die

Abbildung 45 zeigt das Materialgesetz des Stahls.

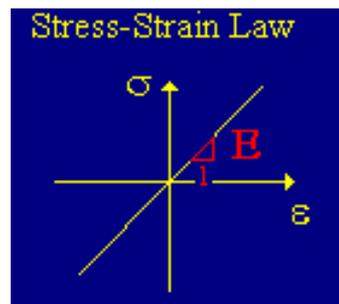


Abbildung 45: Materialgesetz für Plane Stress Elastic Isotropic Material (Stahl), [eigene Darstellung]

Tabelle 3: Materialkennwerte für Modell A und B, [eigene Darstellung]

	Einheit	ATENA (Model A und B)	Solid Elastic (Model B)
E - Modul	MPa	2,100E+06	2,000E+05
Poissonzahl	-	0,300E+00	0,300E+00
Spezifische Wichte ρ	MN/m ³	2,300E-02	2,450E-02
Temperaturkoeffizient α	1/K	1,200E-05	1,200E-05

6.1.3.3 Puffer (elastische Zwischenschicht und Klammer)

Als Material für die Puffer wurde zu Beginn 3D BiLinear Steel Von Mises verwendet. Der Hardening-Modul H des Elastomers in Abbildung 46 wurde für die Eingabe nicht berücksichtigt und erhält den Wert 0. Dieses Elastomer hat sich als unzureichend herausgestellt und dadurch wurde ein neues Modell mit SBeta Material als Beton und smeared reinforcement für Bügelbewehrung erstellt.

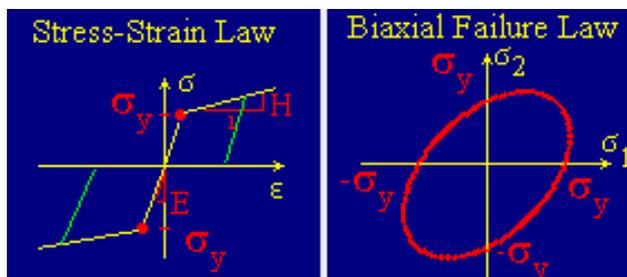


Abbildung 46: Materialgesetz für 3D BiLinear Steel Von Mises (Elastomer), [eigene Darstellung]

Das Materialgesetz für Beton ist in Abbildung 44 ersichtlich. Die Bewehrung hat ein multilineares Materialgesetz und wurde wie in Abbildung 47 mittels Koordinaten selbst eingestellt. Die Werte der spezifischen Wichte und des Temperaturkoeffizienten entsprechen denen des Material Beton wie sie in Tabelle 2 angeführt sind.

Der besonders weiche Beton ist stellvertretend für die elastische Zwischenschicht und die sogenannte Bügelbewehrung - smeared reinforcement stellt die Klammer dar.

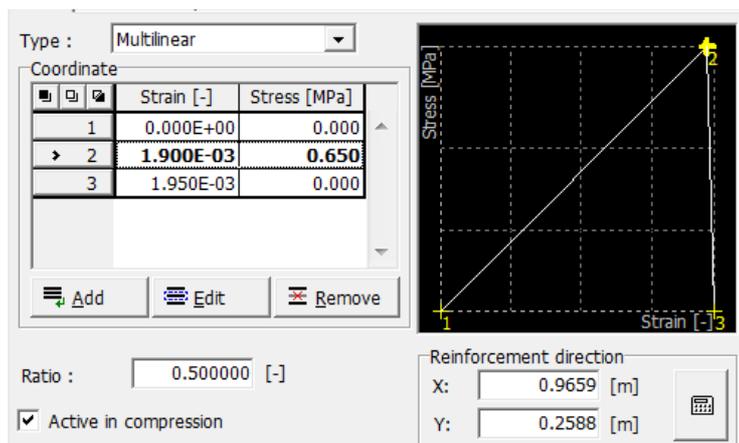


Abbildung 47: Materialgesetz smeared reinforcement (Bügelbewehrung), [eigene Darstellung]

Tabelle 4: Materialkennwerte für 3D BiLinear Steel Von Mises (Elastomer), [eigene Darstellung]

	Einheit	ATENA (Model A)
E - Modul	MPa	2,250E+01
Poissonzahl	-	0,300E+00
Streckgrenze	MPa	1,000E-01
Spezifische Wichte ρ	MN/m ³	7,850E-02
Temperaturkoeffizient α	1/K	1,200E-05

Tabelle 5: Materialkennwerte für SBeta Material, [eigene Darstellung]

	Einheit	ATENA (Model B)	GiD (Model B)
E - Modul	MPa	2,400E+02	3,650E+01
Poissonzahl	-	0,300E+00	0,300E+00
Zugfestigkeit f_t	Mpa	6,500E-01	6,500E-01
Druckfestigkeit f_c	MPa	-3,500E+00	-3,500E+00
Spezifische Bruckenergie G_f	MN/m	6,000E-06	6,000E-06
Stauchung ϵ_c	-	-2,841E-04	-2,841E-04
Spezifische Wichte ρ	MN/m ³	7,850E-02	7,850E-02
Temperaturkoeffizient α	1/K	1,200E-05	1,200E-05

Tabelle 6: Materialkennwerte für smeared reinforcement, [eigene Darstellung]

	Einheit	ATENA (Model B)	GiD (Model B)
E - Modul	MPa	-	33,333E+01
Bewehrungsverhältnis	-	0,500E+00	0,500E+00
Zugfestigkeit f_t	Mpa	6,500E-01	6,500E-01
Spezifische Wichte ρ	MN/m ³	7,850E-02	7,850E-02
Temperaturkoeffizient α	1/K	1,200E-05	1,200E-05

6.1.4 Einwirkungen

Beide Programme bieten auch hier vordefinierte Lastfälle wie in Abbildung 42 gezeigt wird. Diese Lastfälle können bei der Berechnung beliebig miteinbezogen werden.

Ist ein Lastfall gewählt, können auf Punkte, Linien oder Flächen verschiedene Einwirkungen aufgebracht werden. Für das Modell benötigte Einwirkungen sind Kraft, Temperatur und Auflagerreaktion.

6.1.4.1 Auflager

In Abschnitt 6.2 werden verschiedene Auflagersituationen für das 1 Höcker - Modell verglichen.

6.1.4.2 Eigengewicht

Die Programme ATENA und GiD berechnen, mittels vorher eingegebenen Materialkennwerten und der Geometrie, die Gewichte der einzelnen Bauteile selbstständig.

6.1.5 Strukturantwort

Sowohl in ATENA als auch in GiD können Monitoringpunkte gezielt in die Struktur gesetzt werden, um sich bestimmte Werte anzeigen zu lassen. Die Programme bieten zum Beispiel Verschiebung, Spannung, Dehnung oder Temperatur als Werte, wie in Abbildung 48 gezeigt. Das Ergebnis der Monitoringpunkte kann nach der Berechnung im Text-Printout ausgelesen werden.

Für das 1 Höcker - Modell wird lediglich ein Monitoringpunkt zur Messung der Dehnung im Puffer und ein weiterer zur Messung der einwirkenden Kräfte benötigt. Dies ist unter anderem auch in Abbildung 53 ersichtlich.

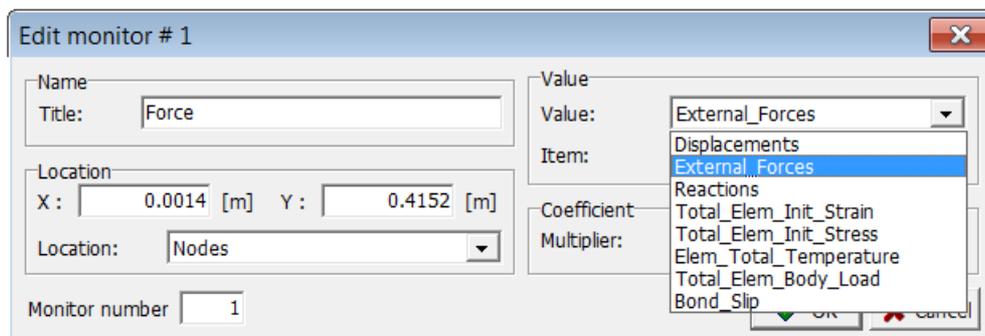


Abbildung 48: Monitoringpunkt setzen in ATENA, [eigene Darstellung]

6.1.6 Analysemethoden

Vor der Berechnung in ATENA müssen die sogenannten "analysis steps" festgelegt werden. Für diese Analyseschritte werden die einzelnen Lastfälle kombiniert und die Anzahl an "load steps" inklusive einem Multiplikationsfaktor für jeden Schritt. Die Berechnung erfolgt mit dem Standard Newton-Raphson-Verfahren.

In Abbildung 49 wird die Belastung in 10 aufeinander folgenden Schritten berechnet. Mit dem Multiplikationsfaktor von 0,1 werden bei jedem dieser Schritte 10% der Gesamtbelastung hinzugefügt.

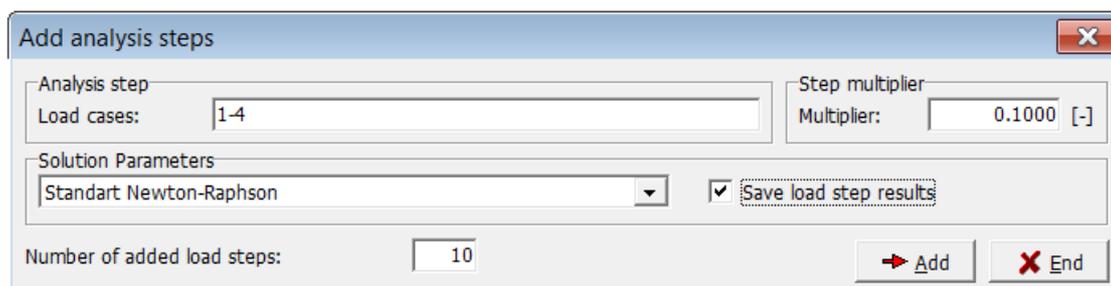


Abbildung 49: Anlegen von Berechnungsschritten, [eigene Darstellung]

Auch in GiD können die einzelnen Intervalle in den "load steps" mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren versehen werden.

6.2 Variation der Randbedingungen in ATENA

Es werden Modelle mit einer Unterstützung mit unterschiedlicher Lagerung im Bereich der Schiene verglichen. Vorausgesetzt ist eine unverschiebliche Lagerung des Tragwerks.

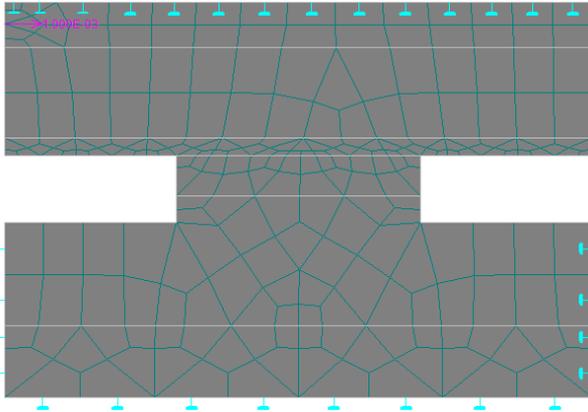
Im Modell 1 wird die Schiene oben horizontal verschieblich gelagert, im Modell 2 ist die Schiene frei beweglich und im Modell 3 ist die Schiene im rechten Randbereich horizontal verschieblich gelagert.

Auf die Modelle wirkt eine horizontale Einzellast von 1kN seitlich auf die Schiene und wird bis zum Bruch summiert.

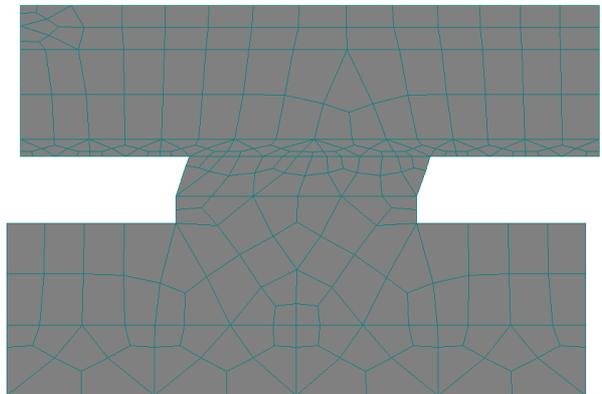
Daraus ergeben sich drei unterschiedliche Deformations-Bilder.

Modell 1

Randbedingungen:

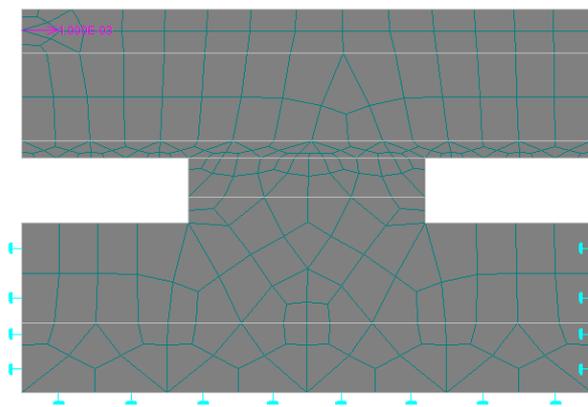


Deformation bei Spitzenbelastung:

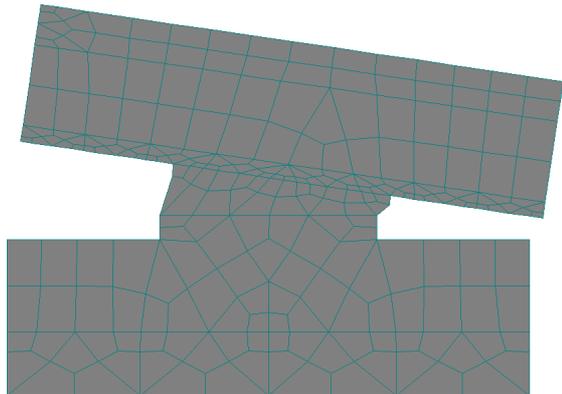


Modell 2

Randbedingungen:

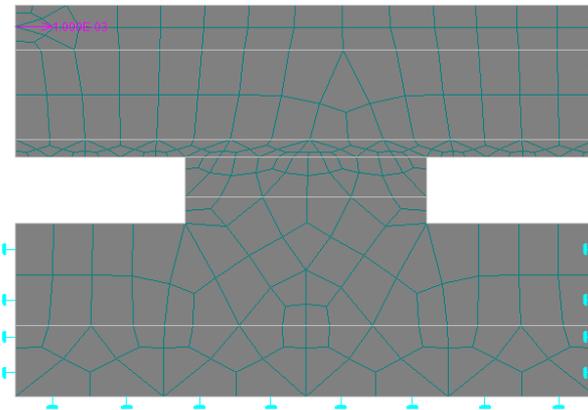


Deformation bei Spitzenbelastung:



Modell 3

Randbedingungen:



Deformation bei Spitzenbelastung:

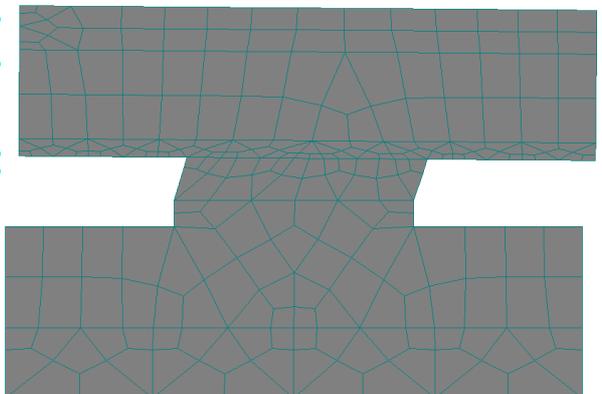


Abbildung 50: Variation der Lagerung mit Deformationsbilder, [eigene Darstellung]

Widerstand des Gleises

Es wird nun das Kraft-Verschiebungs-Diagramm infolge der horizontalen Einzellast betrachtet. Dabei befindet sich der Monitoringpunkt in der rechten oberen Ecke des Pufferelements zwischen Tragwerk und Schiene. E-Modul und Streckgrenze f_y werden so angepasst, dass sich bei einer Belastung von 12kN/m eine Dehnung von 0,3mm einstellt.

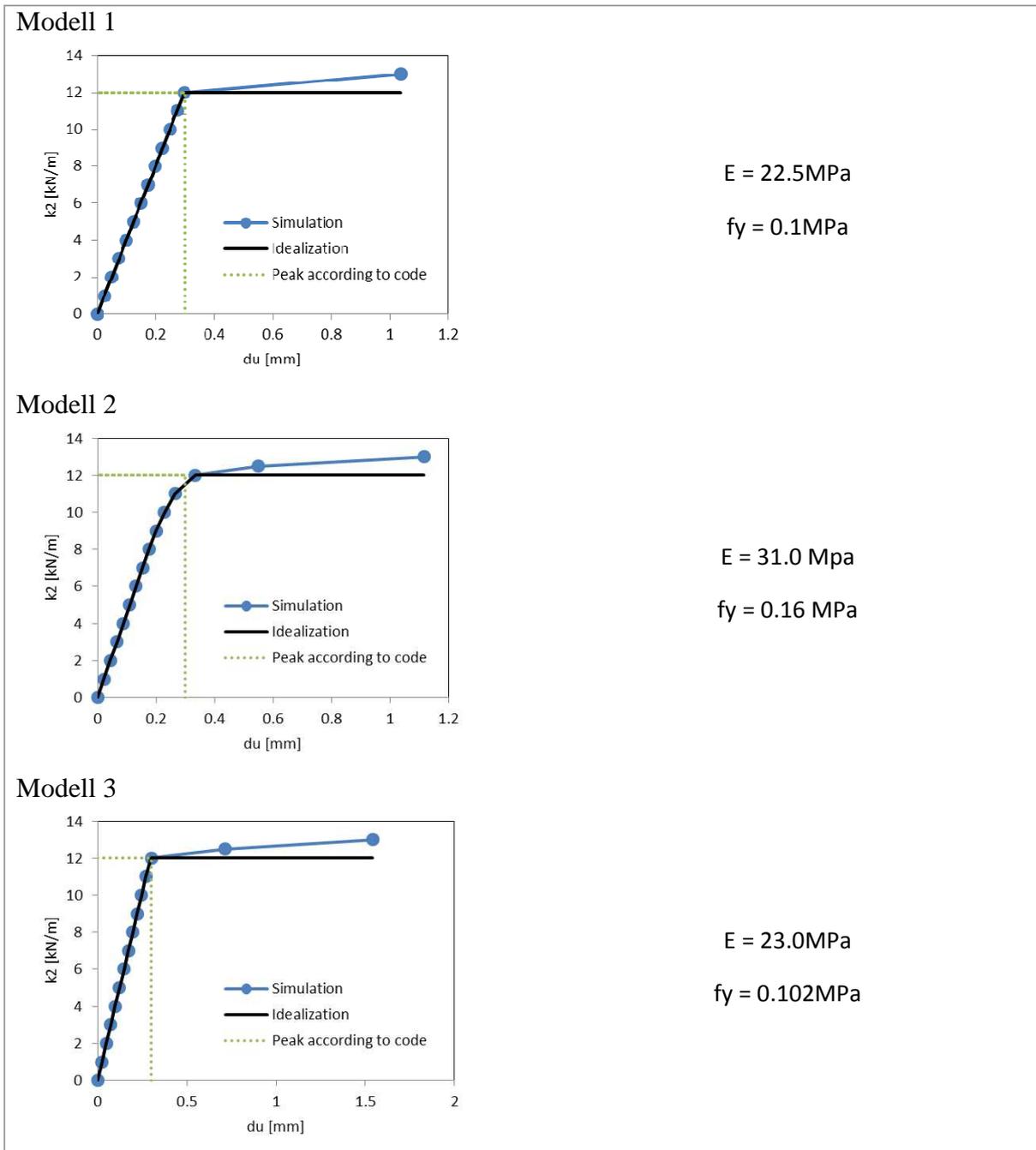


Abbildung 51: Kraft-Verschiebungs-Diagramme, [eigene Darstellung]

Vergleich der Belastung - Einzelkraft und verteilte Kräfte

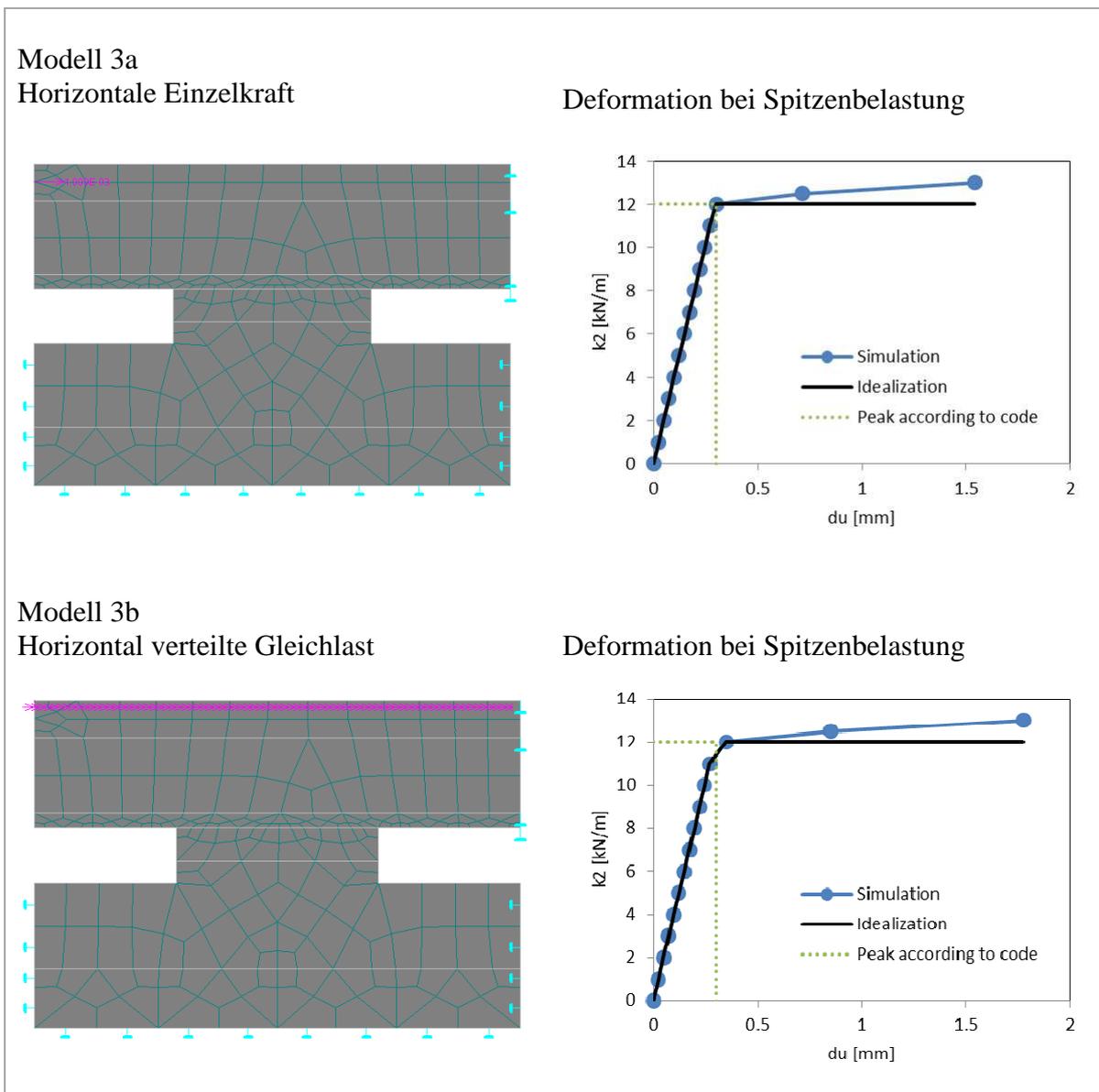


Abbildung 52: Vergleich der Horizontalkräfte an Modell 3, [eigene Darstellung]

Für das 1 Höcker - Modell hat sich die lagerlose Halterung der Schiene in Modell 2 als unzureichend herausgestellt, da der Höcker sofort knickt. Die horizontale oder vertikale Lagerung in den Modellen 1 und 3 erweist sich als passend, da der Höcker durch die Belastung eine gleichmäßige Verschiebung erfährt. Die Variation des Elastizitätsmoduls und der Streckgrenze zeigt unterschiedliche Widerstand - Verschiebungs Diagramme. Im Gegensatz zu Modell 2, ergeben die Modelle 1 und 3 einen passenden Vergleich zum Normmodell.

6.3 Durchschubwiderstand – Rekonstruktion Normmodell

6.3.1 Modell A

In diesem Abschnitt wird das Verhalten der Modelle in Bezug auf das Widerstand - Verschiebungsdiagramm aus Abbildung 6 untersucht. Im Programm ATENA wurden nacheinander die Modelle mit steigender Anzahl an Höckern erstellt. Die Abbildung 53 zeigt als Beispiel das 2 Höcker - Modell mit den verwendeten Materialien, den drei Monitoringpunkten und der horizontalen Einzellast. Die Materialien sind in Abschnitt 6.1.3 angeführt. Am linken Schienenende wird eine horizontale Kraft von 10kN aufgebracht. Genau an dieser Stelle befindet sich auch der Monitoringpunkt zur Messung der aufgebrachten Kraft. An der elastischen Zwischenschicht der Höcker wird auch je ein Monitoringpunkt zur Messung der Verschiebung angebracht.

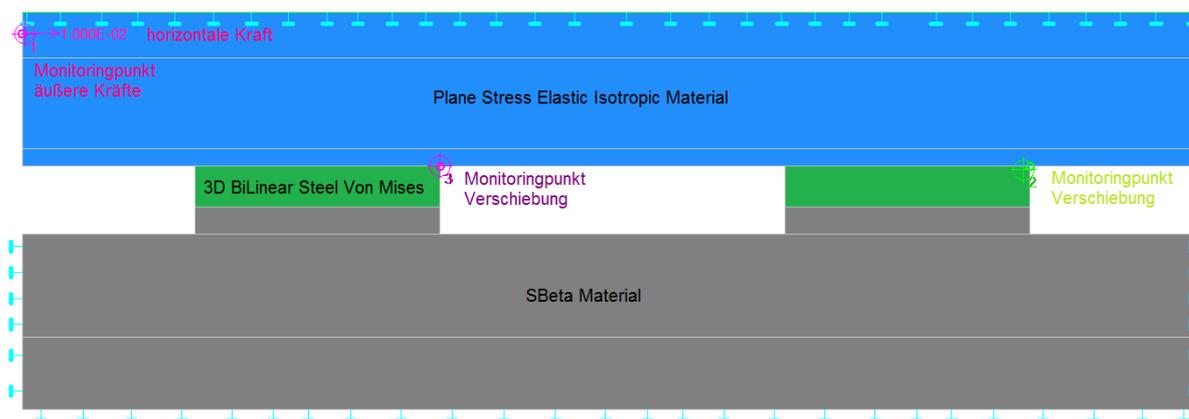


Abbildung 53: Modellansicht der Materialien und Monitoringpunkte, [eigene Darstellung]

Es ergeben sich Kraft-Verschiebungs-Diagramme, die für die Höckeranzahl von 2 - 64 im Anhang unter 9.1.1 zu finden sind.

Für den Durchschubwiderstand wird die Durchschubkraft durch den Abstand der einzelnen Höcker der Länge nach dividiert. Dieser Abstand beträgt 0,65m.

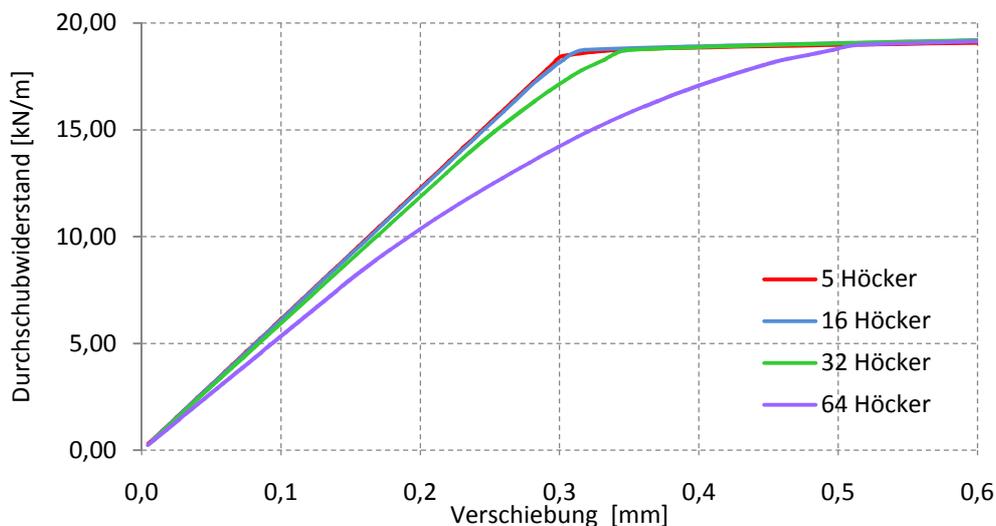


Abbildung 54: Durch Schubwiderstand - Verschiebungs - Diagramm, [eigene Darstellung]

Abbildung 55 zeigt eine einfache Variantenstudie mit dem 1 Höcker - Modell. Es soll zeigen wie sich die Kraft-Verschiebungsbeziehung mit einer Änderung des E - Moduls und der Streckgrenze f_y verhält.

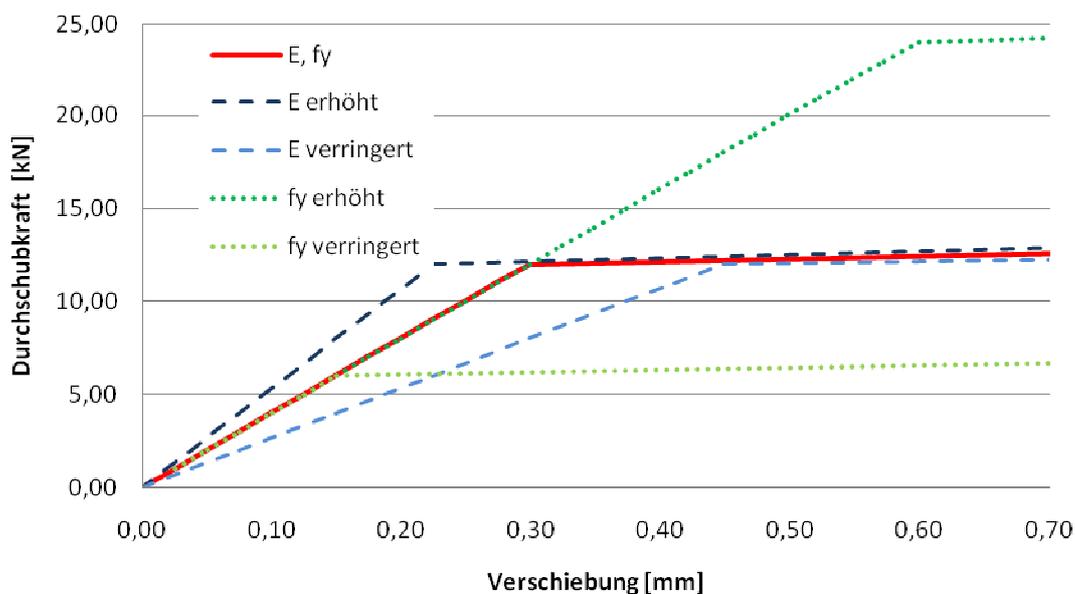


Abbildung 55: Variantenstudie zur Änderung der Parameter [eigene Darstellung]

Die folgenden Abbildungen zeigen wie sich das Verhältnis von Durch Schubkraft und Verschiebung mit der Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung ändert. Die grüne Linie zeigt die Durch Schubkraft des Höckers an erster Stelle und die blaue Linie am letzten Höcker. Die horizontale Belastung trifft am linken Ende auf die Struktur und wirkt daher stärker auf die ersten Höcker als auf die letzten.

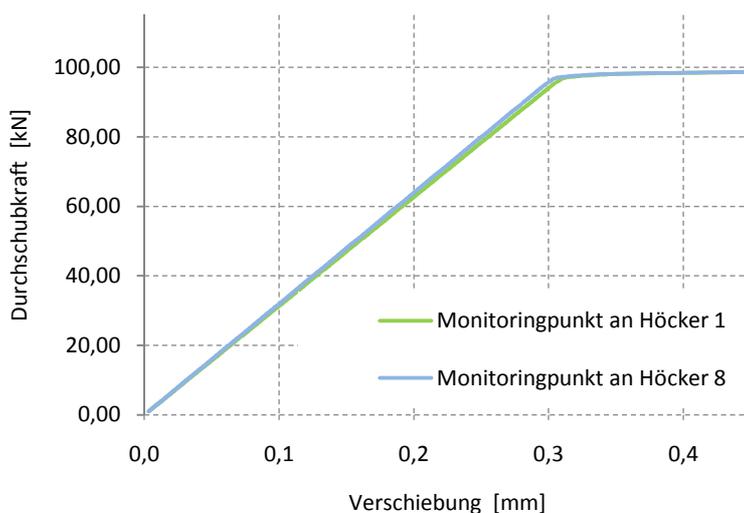


Abbildung 56: 8 Höcker - Modell, [eigene Darstellung]

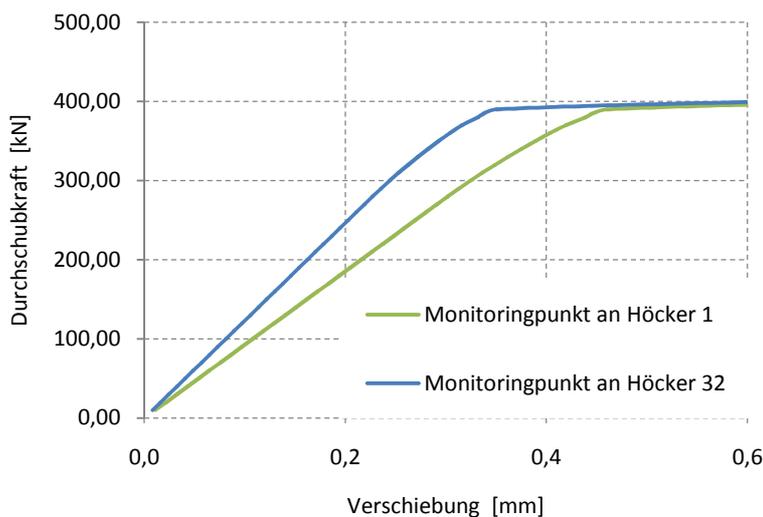


Abbildung 57: 32 Höcker - Modell, [eigene Darstellung]

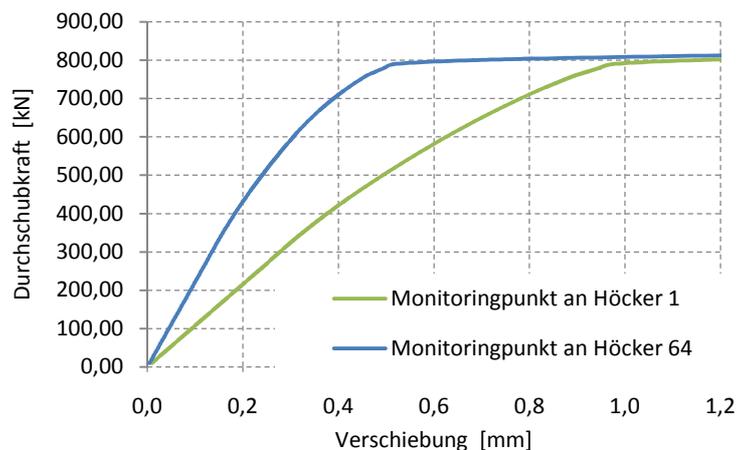


Abbildung 58: 64 Höcker - Modell, [eigene Darstellung]

6.3.2 Modell B mit dem endgültigen Material

Das Material für die Schiene und das Tragwerk inklusive Auflager für den Puffer bleibt gleich. Für den Puffer selbst wird anstatt des 3D BiLinear Steel Von Mises Material, nun Beton - SBeta Material, wie in Tabelle 5 angeführt, verwendet. Zum besseren Vergleich der beiden Materialien werden in

Tabelle 7 nochmals die Kennwerte für 3D BiLinear Steel Von Mises Material beschrieben. Die Einwirkungen werden ident zu Modell A aufgebracht.

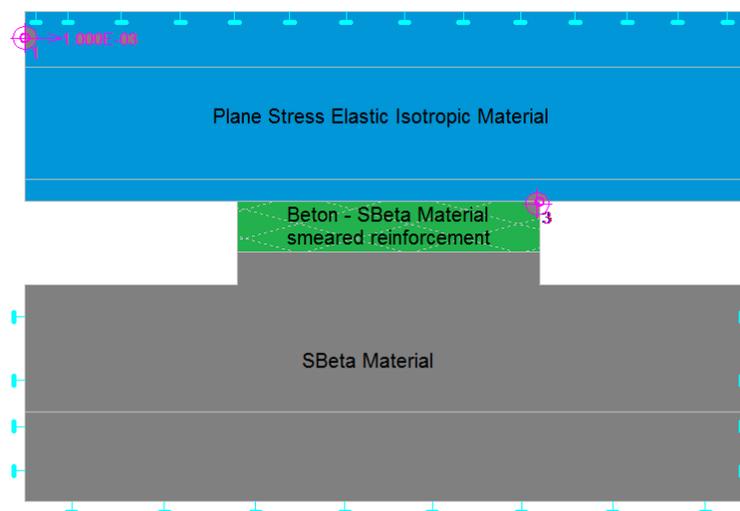


Abbildung 59: Materialmodell, [eigene Darstellung]

Tabelle 7: Materialkennwerte für 3D BiLinear Steel Von Mises (Elastomer), [eigene Darstellung]

	Einheit	ATENA
E - Modul	MPa	2,250E+01
Poissonzahl	-	0,300
Streckgrenze	MPa	1,000E-01
Spezifische Wichte ρ	MN/m ³	7,850E-02
Temperaturkoeffizient α	1/K	1,200E-05

Tabelle 8: Materialkennwerte für SBeta Material, [eigene Darstellung]

	Einheit	ATENA	GiD
E - Modul	MPa	2,400E+02	3,650E+01
Poissonzahl	-	0,300	0,300
Zugfestigkeit f_t	Mpa	6,500E-01	6,500E-01
Druckfestigkeit f_c	MPa	-3,500E+00	-3,500E+00
Spezifische Bruckenergie G_f	MN/m	6,000E-06	6,000E-06
Stauchung ϵ_c	-	-2,841E-04	-2,841E-04
Spezifische Wichte ρ	MN/m ³	7,850E-02	7,850E-02
Temperaturkoeffizient α	1/K	1,200E-05	1,200E-05

Abbildung 60 zeigt einen Vergleich der Widerstandskraft von Modell A und Modell B mit den angepassten Materialkennwerten.

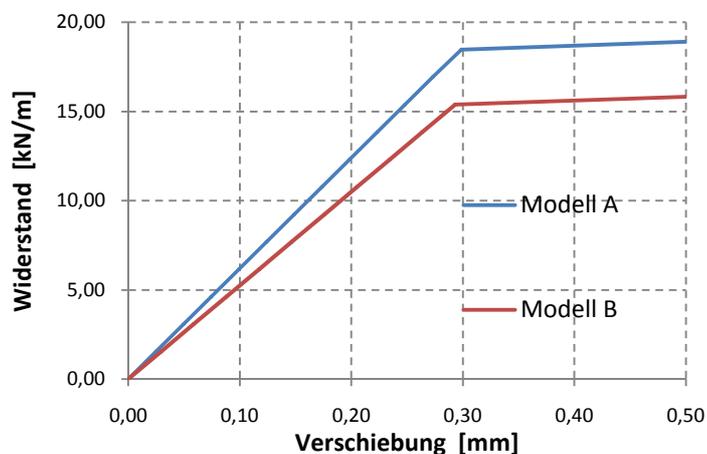


Abbildung 60: Vergleich Modell A und B am 1 Höcker - Modell, [eigene Darstellung]

Abbildung 61 zeigt das Widerstandsverhalten an unterschiedlich vielen Höckern, berechnet mit GiD am Modell B. Wie auch in der Abbildung 54 zu Modell A, befindet sich der Monitoringpunkt für die Verschiebung am jeweils letzten Höcker. Es zeigt sich, dass mit steigender Anzahl der Höcker eine Verfestigung eintritt. Je mehr Höcker hintereinander sind, desto steifer reagieren diese. Im Gegensatz zu Modell B reagierten die Höcker in Modell A mit steigender Anzahl weicher.

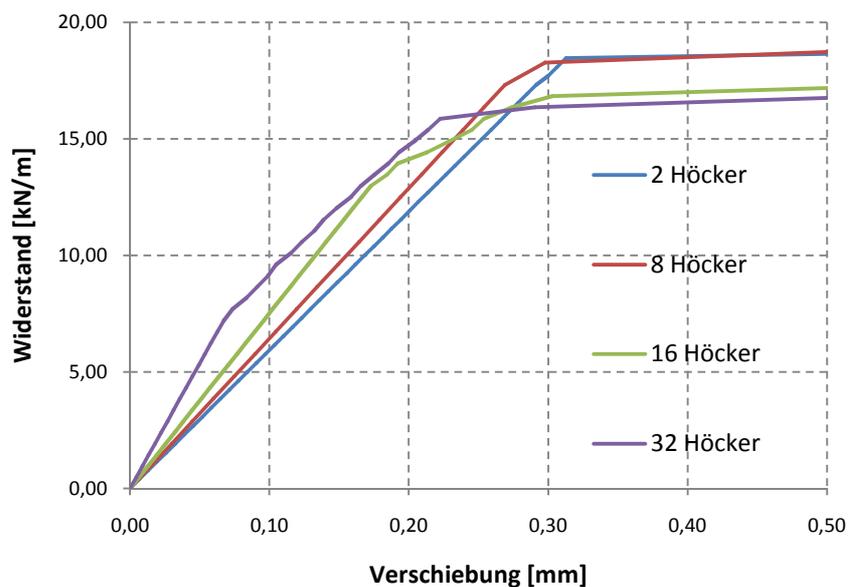


Abbildung 61: Widerstandskraft - Verschiebungs - Diagramm am Modell B mit GiD, [eigene Darstellung]

7 Modellierung über die gesamte Struktur mit GiD

In Kapitel 6.1 wurde bereits die Vorgehensweise zur Erstellung eines Computermodells mit dem Programmen ATENA und GiD vorgestellt. Daher wird im folgenden Kapitel auf diese Erklärungen verzichtet.

7.1 Modellbildung

7.1.1 Systemidealisierung

Die Brücke als gesamtes wird wie in Abbildung 62 idealisiert.

Sie besteht aus drei Feldern, mit den Spannweiten 19, 22 und 19 Metern. Die Brücke ist an beiden Widerlagern und an der ersten Stütze horizontal beweglich gelagert. Die zweite Stütze ist fest gelagert. Als Anschluss an die Brücke werden an beiden Enden 48 Meter Gleis auf Schwellen angefügt und mit zwei Endfedern gelagert.

Die vorhandene Längsneigung von 0,3% wird vernachlässigt und die Brücke wird waagrecht ausgeführt.



Abbildung 62: Lagersituation, [eigene Darstellung]

7.1.2 Geometrie- und Materialkennwerte

Das Material sowie die Bauteilabmessungen bleiben gleich.

Das 1 Höcker - Modell wird auf eine Länge von 60m vervielfältigt. Dies ergibt 93 einzelne Höcker. An beiden Brückenden wird das Gleis mit 75 Höckern auf einer Länge von 49m weitergeführt.

7.1.3 Einwirkungen

7.1.3.1 Auflager

Die Brücke, wie in Abbildung 63 skizziert wird in GiD eingegeben. Die beiden Abbildungen zeigen zum einen die Lager-Bedingungen am Ende der modellierten Gleisstrecke und zum anderen am Übergang zum Tragwerk.

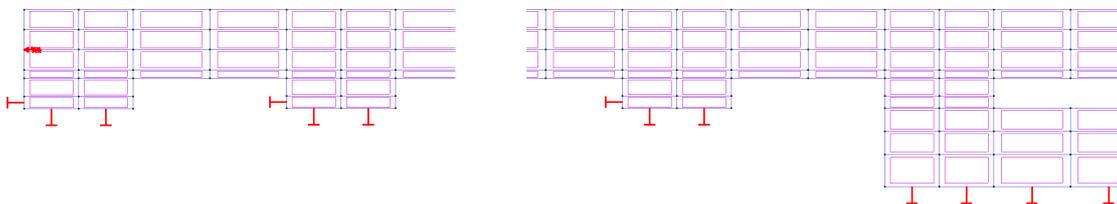


Abbildung 63: Lagersituation in GiD, [eigene Darstellung]

Die beiden Endfedern haben eine Steifigkeit von 500MPa und wirken jeweils auf einer Fläche von 1m².

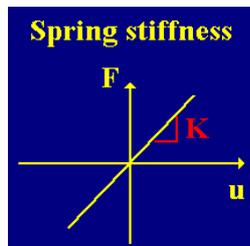


Abbildung 64: Materialgesetz der Endfedern, [eigene Darstellung]

Zum Vergleich der Lagersituation der beiden Gleisenden wird in 7.1.5 eine Variantenstudie mit einer Einspannung, einer Feder und einem Loslager durchgeführt.

7.1.3.2 Temperatur

Im Zuge von MAGIT wurden für jede der 4 Jahreszeiten Modelle erstellt. Diese Arbeit bezieht sich auf das Frühlings-Modell. Die Werte sind Tabelle 1 zu entnehmen. Die Temperaturdifferenz der Schiene beträgt im Frühling 28,0°C, wogegen die Differenz beim Tragwerk lediglich 2,9°C beträgt. Im Modell wird auf die Schiene eine Temperatur von 28°C aufgebracht, während die Temperatur im Tragwerk von 2, 8 und 14°C in den einzelnen Modellen variiert. Es wurden Lastfälle mit positiver und negativer Temperatur erstellt, woraus Erwärmung und Abkühlung resultieren.

7.1.4 Strukturantwort

Abbildung 62 zeigt die über die gesamte Brückenlänge angelegten Monitoringpunkte.

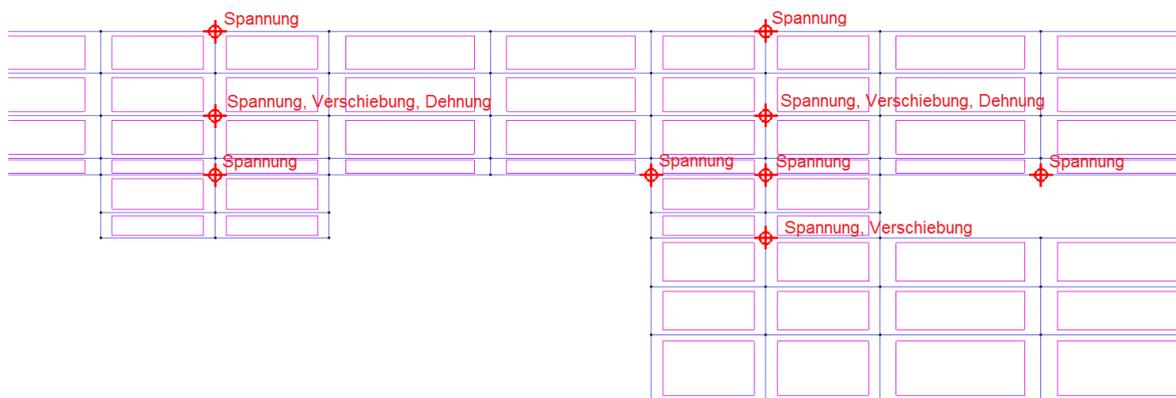


Abbildung 65: Übersicht der Monitoringpunkte in GiD, [eigene Darstellung]

7.1.5 Variation der Randbedingungen

Abbildung 66 zeigt den Spannungsverlauf in der Schiene bei unterschiedlicher Lagerung der Schiene. Auf die Schiene wirkt eine Temperaturänderung von 28°C und auf das Tragwerk 14°C.

Die drei achsennahen Linien stellen die Spannung bei der halben Belastung, die beiden anderen die volle Belastung dar. Die blaue Linie zeigt die freie Lagerung bei halber

Belastung. Weitere Belastungsschritte sind bei dieser Lagerung nicht möglich, da es im Randbereich zu starken Spannungsschwankungen kommt und das Programm als Folge die Berechnung von selbst stoppt. Die beiden roten Linien zeigen die Lagerung durch Einspannung, bei der die Spannung bis in den Randbereich konstant bleibt. Die beiden grünen Linien veranschaulichen die Lagerung mittels Feder. Diese hat eine Steifigkeit von 500MPa, somit reduziert sich die Spannung gegen den Rand. Bei einer geringeren Steifigkeit flacht der Spannungsverlauf vom Brückenwiderlager zum Rand immer stärker ab. Im Gegenteil dazu wird bei einer höheren Steifigkeit der Übergangsbereich steiler und kürzer in der Längenausdehnung.

Beim Vergleich der Einspannung und der Feder zeigt sich, dass der Spannungsverlauf im Brückenbereich nur geringe Unterschiede aufweist. Der Dammbereich von beidseitig 50m schafft einen Bereich in der sich die Schienenspannung einpendeln kann und somit der Zustand einer Endlosschiene erreicht wird. Ohne diesen Bereich würde der Spannungsverlauf nicht der Realität entsprechen.

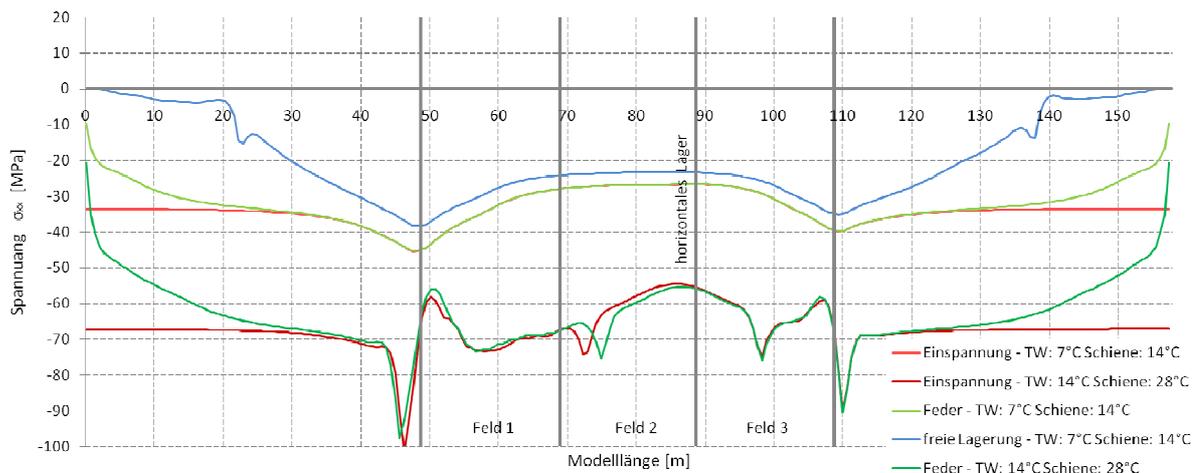


Abbildung 66: Variation der Schienenlagerung, [eigene Darstellung]

7.2 Basismodell C - Temperatur im Frühling

Dieses Modell ist die Basis für die weiterführenden Ermittlungen.

Auf die Schiene wird über die gesamte Länge, im Falle der Erwärmung eine Temperaturdifferenz dT von +28 und -28 bei der Abkühlung aufgebracht. Das Tragwerk erhält in den einzelnen Modellen Temperaturdifferenzen von +2, +8, +14, -2, -8, und -14.

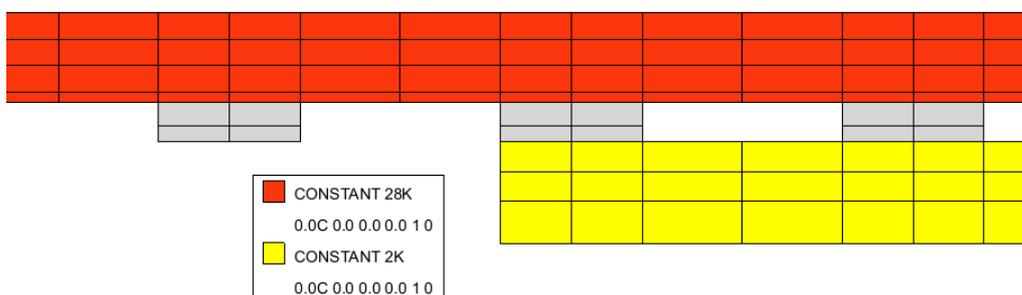


Abbildung 67: Beispiel der Erwärmung am Brückenende, [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse des Modells sind im Anhang unter 9.1.2 und 9.1.3 in Diagrammen abgebildet. Es handelt sich um die Spannung in der Schiene oben und unten, der Verschiebung in der Schiene und der Verschiebung im Tragwerk. Diese 4 Diagramme stellen die Ergebnisse klar dar, und werden daher für alle folgenden Modelle gleich angewandt und im Anhang angeschlossen.

Abbildung 68 zeigt die Analyse des Modells bezüglich der Verschiebung des Tragwerks am Erwärmungs - Modell. Es werden die Werte aus dem Monitoring mit denen aus dem Modell verglichen. Das Minimum und Maximum der gemessenen Werte ist rot strichliert dargestellt. Die Punktgruppen sind für die jeweilige Temperaturänderung im Tragwerk, die Schiene wird bei allen Modellen immer auf 28K erwärmt. Die einzelnen Punkte stellen jeweils ein Drittel von der gesamten Temperaturbelastung dar. Die Abstufung der Helligkeit gibt den Belastungsschritt an, der dunkelste ist somit die Gesamtbelastung.

Aus den Verschiebungs - Diagrammen im Anhang unter **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist zu sehen, dass die maximale Verschiebung vom linken Widerlager bis zum festen Auflager, auf einer Länge von 41m stattfindet. Diese Werte sind ausschlaggebend für den Vergleich.

Abbildung 69 zeigt die Analyse der Schienen - Dehnung auf die gleiche Weise.

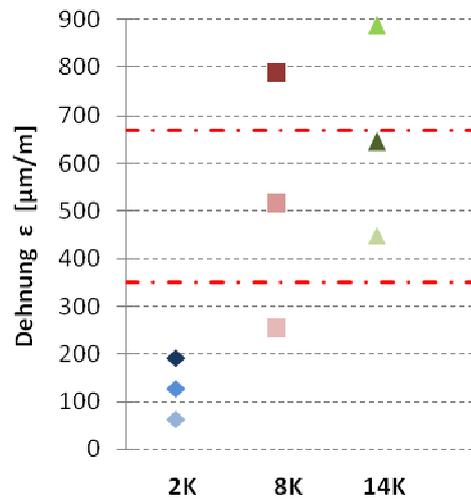
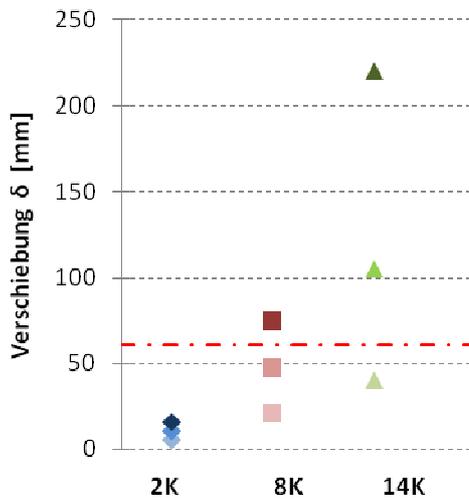


Abbildung 68: Verschiebung Tragwerk, [eigene Darstellung] Abbildung 69: Dehnung Schiene, [eigene Darstellung]

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die relative Verschiebung zwischen dem Tragwerk und der Schiene. Die 3 Linien, beginnend bei der inneren stellen die verwendeten Temperaturdifferenzen von 2K, 8K und 14K dar. Die rot strichlierten Linien kennzeichnen die kritische Verschiebung, an die der plastische Bereich schließt. Laut Kapitel 4.1.3 beträgt der kritische Wert \tilde{u} 0,5mm. Innerhalb des roten Bereiches ist die Interaktion zwischen Gleis und Tragwerk aktiv, die Koppelung verhält sich elastisch. Ab der roten Linie beginnt der plastische Bereich, die Koppelung fängt an zu rutschen.

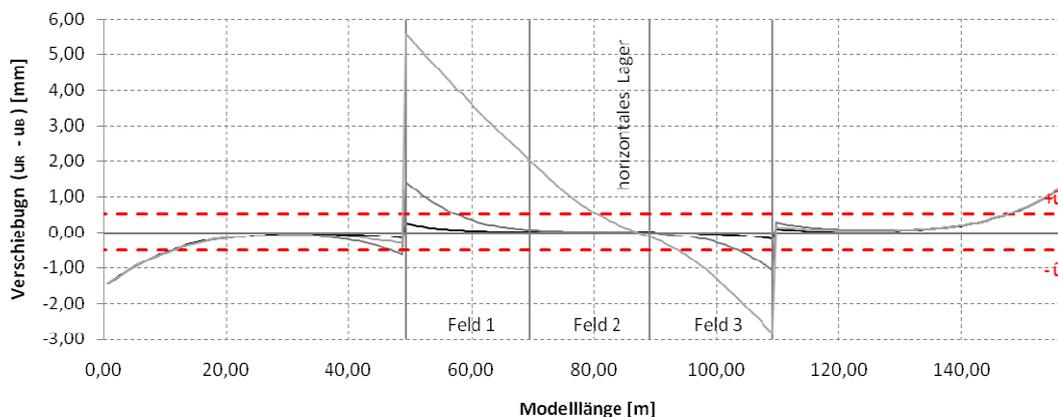


Abbildung 70: Verschiebung bei Erwärmung, [eigene Darstellung]

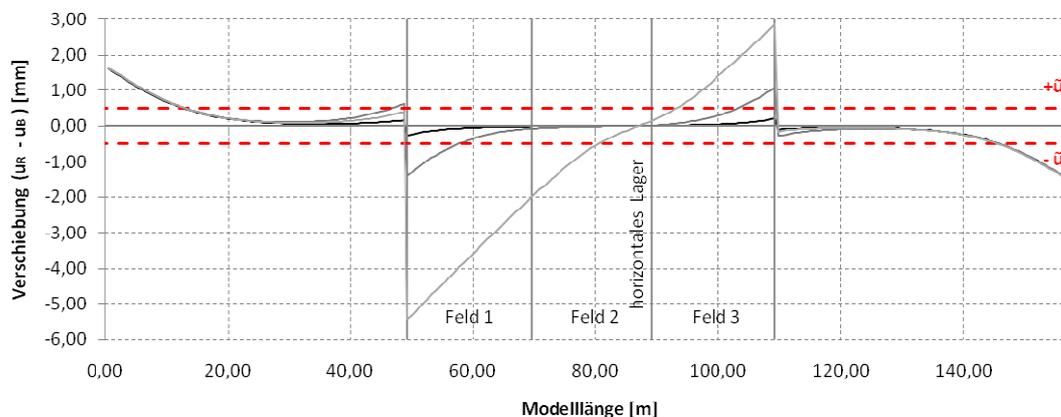
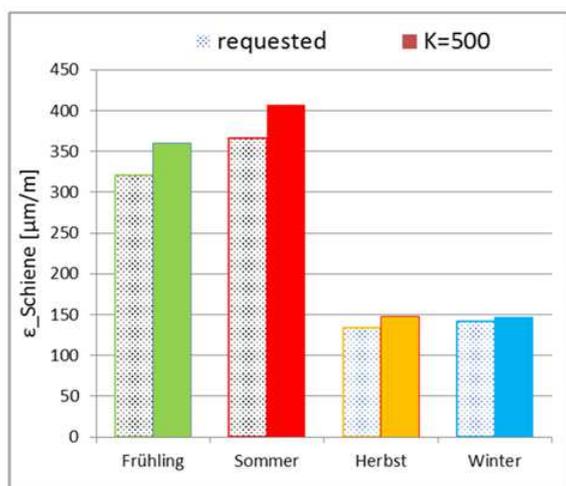


Abbildung 71: Verschiebung bei Abkühlung, [eigene Darstellung]

7.2.1 Ergebnisse der Jahreszeitenmodelle mit monituierter Temperatur

Bei diesen Modellen wurden die genauen Temperaturen aus dem Monitoring auf das System aufgebracht.

Abbildung 72 zeigt in der Tabelle rechts die Ergebnisse der ausgearbeiteten Modelle für Frühling, Sommer, Herbst und Winter und im Diagramm links einen Vergleich mit den Monitoringdaten. Die im Vordergrund stehenden Balken aus dem Diagramm stellen die mit dem Programm berechneten Ergebnisse dar. Die grauen Balken sind die Monitoringdaten für die jeweilige Jahreszeit.



	ε_Schiene			
	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
requested	320.46	366.51	133.42	142.11
K=500	360.15	406.65	148.14	146.97

Abbildung 72: Vergleich der Berechnung mit den Monitoringdaten [8]

Genauere Ergebnisse sind

Abbildung 73 zu entnehmen. Es wird die auf das System aufgebrachte Temperaturänderung angegeben, sowie die Federsteifigkeit der beiden Randfedern an der Schiene. Die daraus resultierende Verschiebung im Tragwerk, sowie die Relativverschiebung in der Schiene werden für beide Bereiche, links und rechts vom festen Auflager, angegeben.

Frühling							
$\delta=0.41$	$\epsilon=320.46$		left		right		
-28.03	-2.85		mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	
T_{Schiene}	T_{Tragwerk}	K	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	
	k		k		k		
-28.03	-2.85	500	0.489583	360.150802	-0.351453	350.125215	

Sommer							
$\delta=0.46$	$\epsilon=366.51$		left		right		
-31.57	-3.41		mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	
T_{Schiene}	T_{Tragwerk}	K	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	
	k		k		k		
-31.57	-3.41	500	0.203503	406.649507	-0.420277	395.291131	

Herbst							
$\delta=0.20$	$\epsilon=133.42$		left		right		
-10.71	-2.35		mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	
T_{Schiene}	T_{Tragwerk}	K	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	
	k		k		k		
-10.71	-2.35	500	0.403538	148.144187	-0.289709	139.883000	

Winter							
$\delta=0.31$	$\epsilon=142.11$		left		right		
-10.80	-2.08		mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	
T_{Schiene}	T_{Tragwerk}	K	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	
	k		k		k		
-10.80	-2.08	500	0.357189	146.968354	-0.256432	139.655909	

Abbildung 73: Ergebnisse der Modelle [8]

In weiterer Folge wurden für das Frühlingsmodell neue Lastfälle erstellt, die nach dem Schema in Abbildung 74 ausgeführt wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 75 ersichtlich.

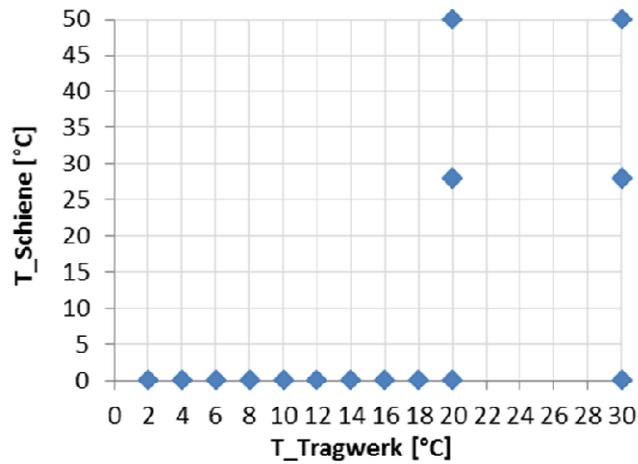


Abbildung 74: Temperaturkombinationen [8]

Frühling						
$\delta=0.41$	$\epsilon=320.46$	left		right		
K=500		mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	mm	$\mu\text{m}/\text{m}$	MPa
T_Schiene	T_Tragwerk	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	δ_{Tragwerk}	$\epsilon_{\text{Schiene}}$	$\Delta\sigma_{\text{rail_up}}$
0.00	0.00	-	-	-	-	-
0.00	2.00	-0.3433444	-16.707237	0.246508	-9.680115	0.000000
0.00	4.00	0.727713	31.902451	0.492534	19.310537	0.000000
0.00	6.00	-1.167359	-44.902184	0.795415	-25.161289	0.000000
0.00	8.00	-1.629106	-55.702280	1.102848	-30.319089	0.000000
0.00	10.00	-2.087886	-56.995920	1.402223	-36.009940	0.000000
0.00	12.00	-3.290710	-51.722090	1.692937	-40.972803	17.000000
0.00	14.00	-4.329093	-43.922976	2.252403	-24.644362	21.000000
0.00	16.00	-5.245087	-38.572196	2.712246	-16.581998	26.000000
0.00	18.00	-6.136417	-35.145995	3.172373	-14.502240	26.000000
0.00	20.00	-6.950025	-34.245082	3.602475	-13.993047	30.000000
0.00	30.00	-10.918923	-128.962474	5.592192	-13.237853	32.000000
28.00	20.00	-7.021868	-357.866602	3.629105	-347.474170	30.000000
28.00	30.00	-11.015488	-351.156567	5.615833	-347.386093	35.000000
50.00	20.00	-7.123637	-626.879340	3.629427	-612.608787	30.000000
50.00	30.00	-11.012678	-625.522939	5.618053	-610.990055	40.000000

Abbildung 75: Ergebnisse der unterschiedlichen Temperaturkombinationen [8]

7.3 Modell D - Temperatur und reduzierte Steifigkeit am Übergang

In Modell C ergeben sich die Spannungsspitzen an den Widerlagern. Um diese Spitzen bzw. Sprünge zu verringern wird die Steifigkeit der Puffer im Modell D teilweise reduziert.

Es werden an jeweils beiden Seiten des Widerlagers, somit am Brückeneende, eine Anzahl an Puffer reduziert. Es werden Modelle mit 2,6 und 8 reduzierten Puffern erstellt und in weiterer Folge daraus wiederum Modelle mit einer Temperatur von +2, +8, +14 und -2, -8, -14 erstellt.

In Abbildung 76 ist die Vorgehensweise dieser Reduktion abgebildet.

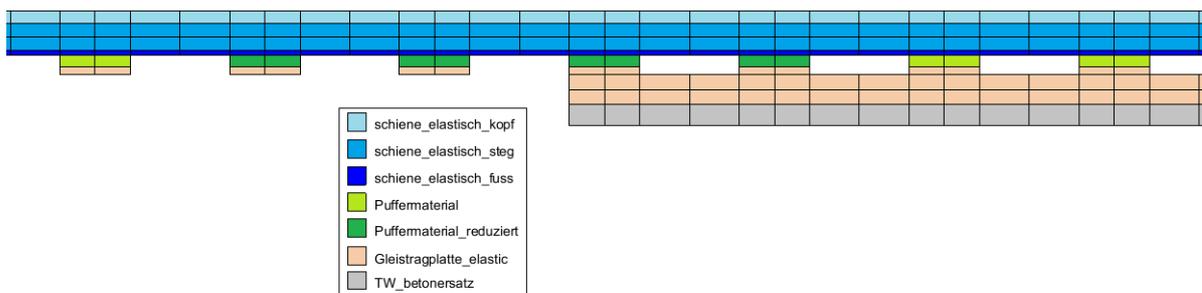


Abbildung 76: Materialübersicht, [eigene Darstellung]

Der Wert der Zuffestigkeit f_t des Puffermaterials wird bei Beton auf 0,22 MPa reduziert.

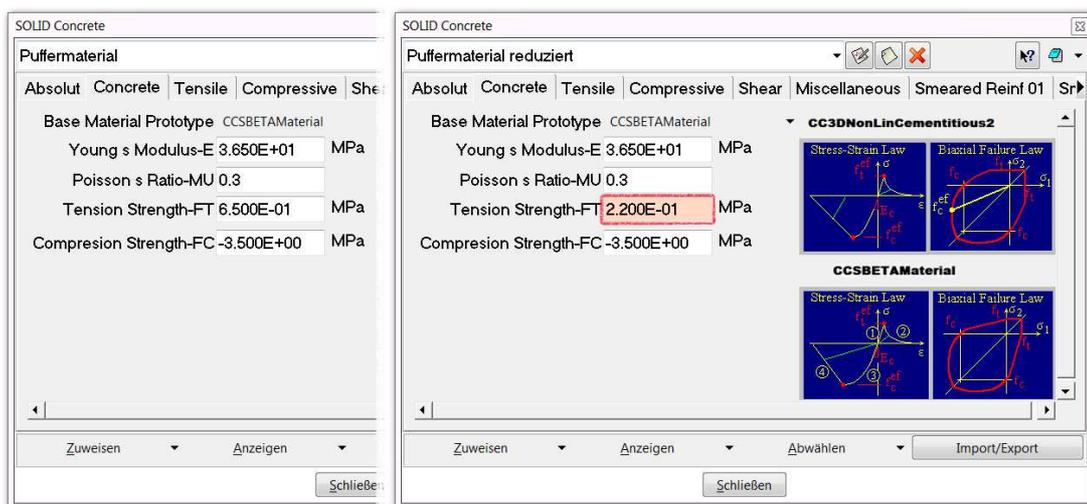


Abbildung 77: Vergleich der Materialkennwerte der Puffer und der reduzierten Puffer, [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse sind im Anhang unter 9.1.4 und 9.1.5.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen einen Vergleich der Spannungen des Basismodells Frühling mit dem Fall einer reduzierten Steifigkeit. Hier wird in beiden Abbildungen die Reduktion von je 16 Höckern an beiden Brückenenden gezeigt, mit der rot strichlierten Kennzeichnung "reduzierter Bereich". Die achsennahe Linie gibt die Spannung bei halber Temperaturbelastung wieder und die andere schließlich die gesamte Belastung.

Aufgrund der Steifigkeitsreduktion wird der Bereich, in der die Interaktion zwischen Tragwerk und Gleis inaktiv ist, vergrößert. Die Spannungsspitzen werden verteilt und somit im Widerlagerbereich niedriger. Dies ist gut erkenntlich bei einer Temperaturdifferenz von -14K im Tragwerk in Abbildung 79.

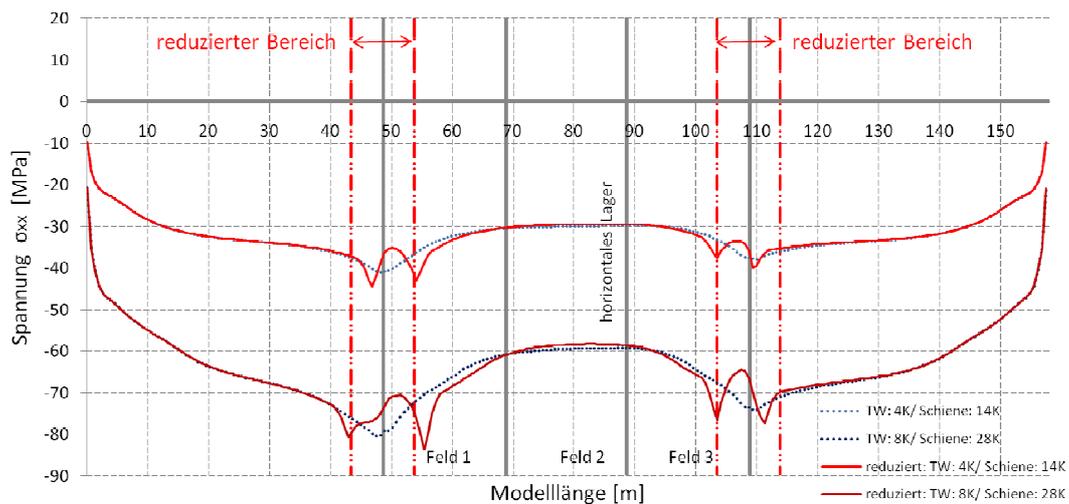


Abbildung 78: Spannung bei Erwärmung Tragwerk 8° , Schiene 28° , [eigene Darstellung]

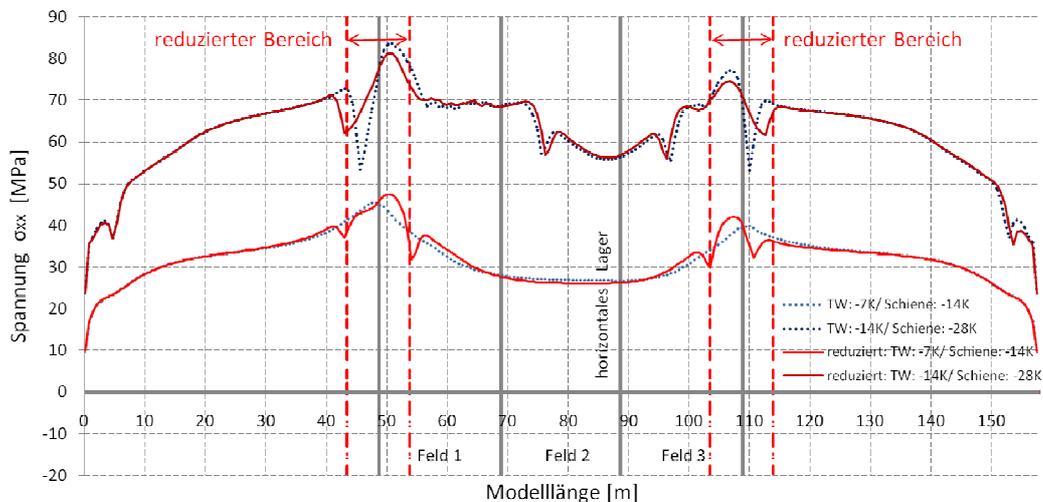


Abbildung 79: Spannung bei Abkühlung Tragwerk -14° , Schiene -28° , [eigene Darstellung]

Die beiden Abbildungen unten zeigen wieder die relative Verschiebung zwischen Tragwerk und Schiene, in der gleichen Darstellungsweise wie Abbildung 70 und Abbildung 71. Der Unterschied zu den vorhin genannten Abbildungen liegt in der Steifigkeitsreduktion an je 16 Höckern an beiden Wiederlagern.

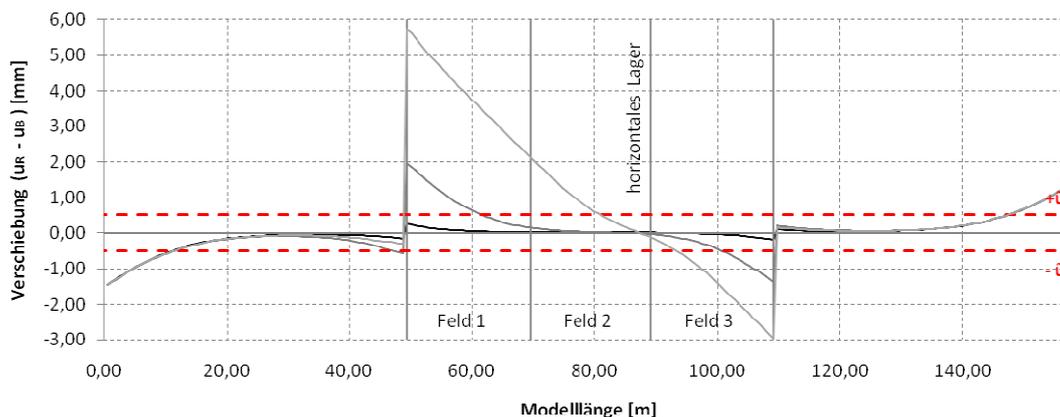


Abbildung 80: Verschiebung bei Erwärmung, [eigene Darstellung]

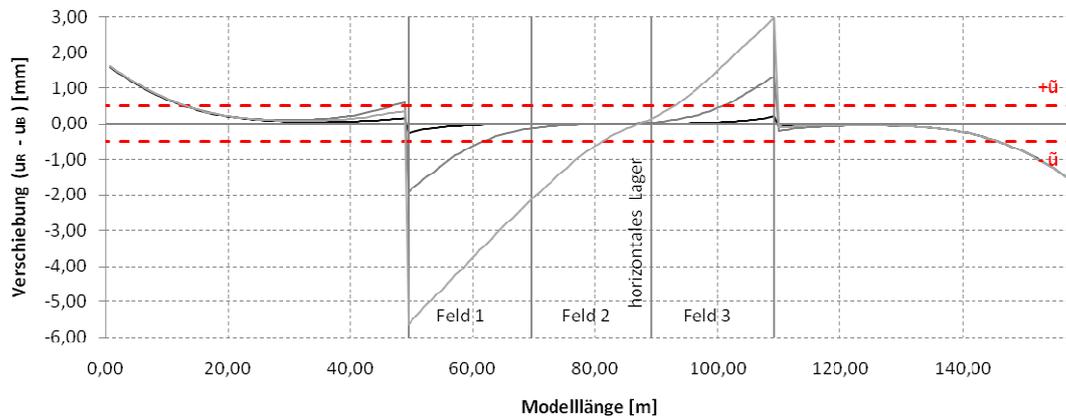


Abbildung 81: Verschiebung bei Abkühlung, [eigene Darstellung]

Aufgrund der Steifigkeitsreduktion wird der Spannungssprung verringert und verteilt, wodurch sich der plastische Bereich verlängert und die relative Verschiebung erhöht. Tabelle 9 zeigt den Vergleich der zusätzlichen Spannungen mit zunehmender Höckeranzahl der Reduzierung. Je mehr Höcker in ihrer Zugfestigkeit reduziert werden, desto geringer wird die zusätzliche Spannung in diesem Bereich. Das Vergleichsmodell wird mit einer Temperaturänderung im Tragwerk von 14°C und in der Schiene von 28°C

Tabelle 9: Vergleich der zusätzlichen Spannung

Reduzierte Höcker	0	2	4	8
Erwärmung	24,6 MPa	24,6 MPa	22,0 MPa	10,7 MPa
Abkühlung	15,5 MPa	14,3 MPa	14,0 MPa	10,7 MPa

7.4 Modell E - Temperatur und Bremsen

Der Lastfall Temperatur wird mit dem Lastfall Bremsen in zwei separaten Intervallen betrachtet. Zu Beginn wird das Basismodell Frühling mit einer Temperaturdifferenz der Schiene von 28K und 2K im Tragwerk berechnet. Im darauffolgenden Intervall wird das System von der Temperatur befreit und durch Bremsen belastet.

Als Lastfall Bremsen wird das Schwerlastmodell SW/2 aus Abbildung 15 gewählt. Auf einer Länge von zwei mal 25m mit einem Abstand zwischen beiden Feldern von 7m werden 150kN/m als Vertikallast aufgetragen. Zusätzlich wirkt auf diese Länge eine horizontale Gleichlast von 35kN/m als Bremslast.

Die ausgewerteten Diagramme sind im Anhang unter 9.1.6 zu finden.

Das Ergebnis des Lastfalles Bremsen unterscheidet sich vom Basismodell Frühling nur minimal. "Die Brücke zeigt sich relativ unbeeindruckt gegenüber einem Bremsvorgang", wird auch von Dr. Fritz Kopf von FCP bestätigt. Es wurde eine Längsverschiebung von 0,2mm am östlichen Widerlager gemessen. [9]

7.5 Modell F - Temperatur und Biegung

Im Modell D wird mithilfe einer auf das Tragwerk aufgetragenen Verschiebung eine Biegung bezweckt. Die Verschiebung beträgt 4cm in vertikale Richtung zum Tragwerk. Die Verschiebung ist im Tragwerk nach einem Abstand von 11,5cm aufgebracht. Der Punkt auf dem sie wirkt befindet sich in der Mitte des ersten Feldes.

Da das Tragwerk in den vorhergehenden Modellen nur aus einer 8cm dicken Betonschicht bestand, wird es nun durch 20cm große Elemente ergänzt, wie in Abbildung 83 veranschaulicht.

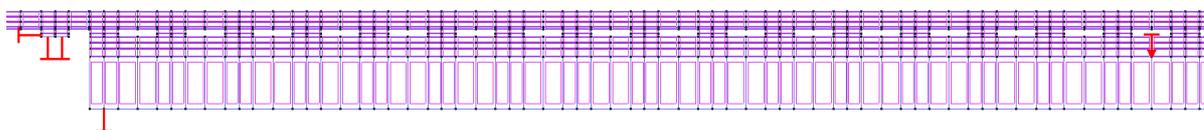


Abbildung 82: Modell mit Lager am linken Widerlager und der Verschiebung in Feld 1, [eigene Darstellung]

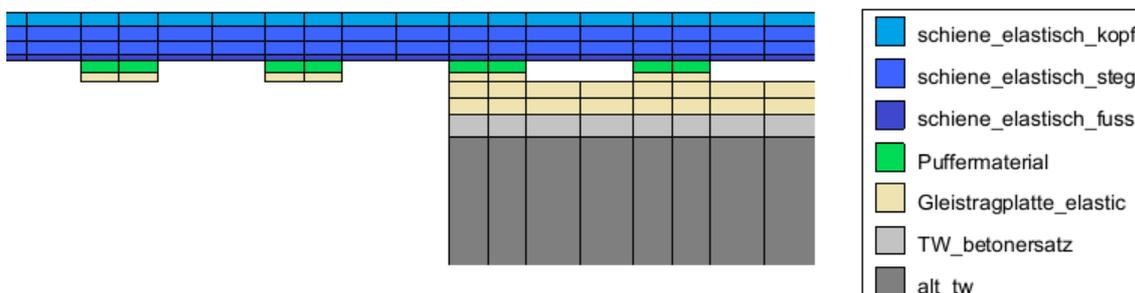


Abbildung 83: Modellansicht mit Material, [eigene Darstellung]

Des weiteren waren die vorherigen Modelle an der Tragwerksunterseite linear über die gesamte Länge gelagert. Um eine Biegung zu ermöglichen wird nun die Lagerung punktuell auf die Widerlager und die Stützen verlagert. Somit entstehen an den Widerlagern und der ersten Stütze drei in horizontale Richtung verschiebliche Lager und an der zweiten Stütze ein unverschiebliches Lager. Letzteres wird in GiD laut Abbildung 84 gelöst.

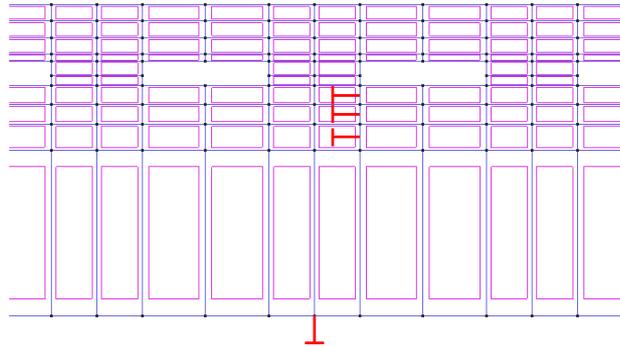


Abbildung 84: Modell-Detail zu Stütze 2, [eigene Darstellung]

7.6 Vergleich mit dem Beispiel der Einfeldbrücke aus 4.3.1

Die Abbildung unten stammt aus dem Monitoring-Daten der Firma FCP. Es zeigt die Längskräfte in der Schiene an verschiedenen Monitoringpunkten in Abhängigkeit von der Temperatur der Schiene. Der magenta-farbene Punkt ist in einer Entfernung von 5m vom rechten Brückenwiderlager stationiert. Bei einer Temperaturdifferenz von 28°C in der Schiene ergibt sich laut diesem Diagramm eine Differenz der Schienenspannung von 26MPa.

Im Erwärmungsmodell aus Abbildung 86 werden diese 26MPa mittels Computerberechnung erreicht.

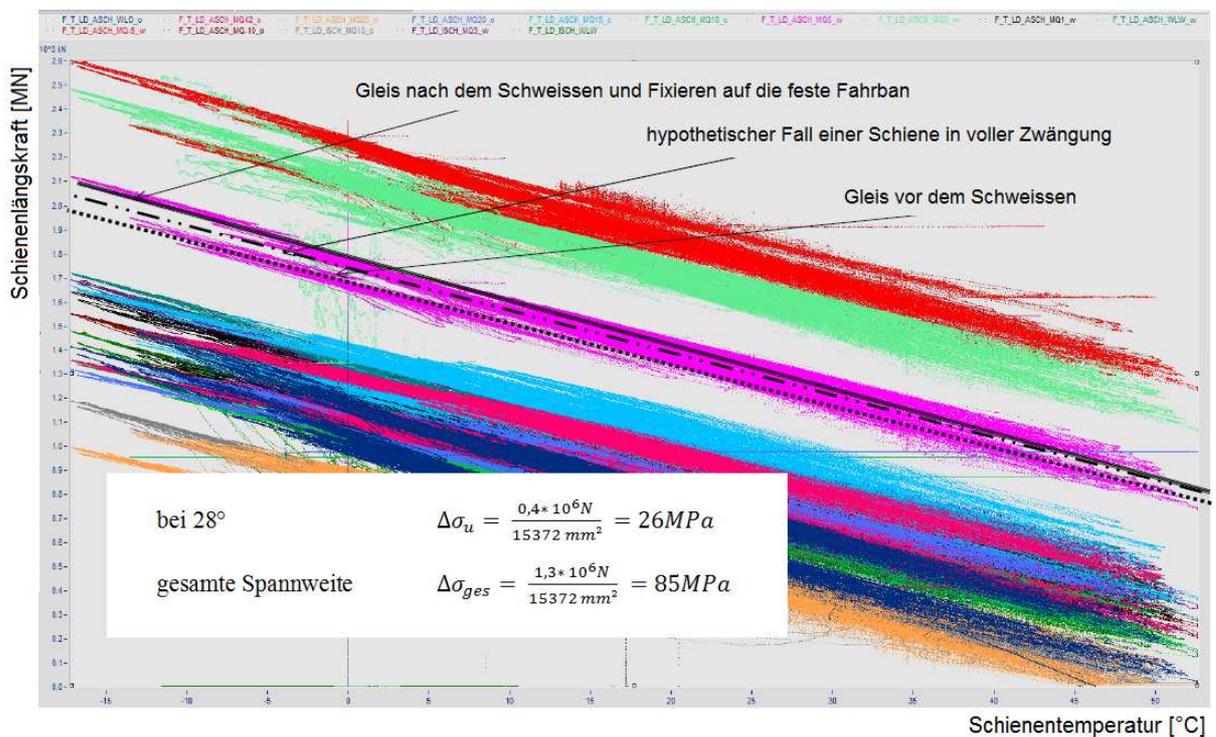


Abbildung 85: Verteilung der Schienenlängsdehnungen vergleich Schienentemperatur, verändert [8]

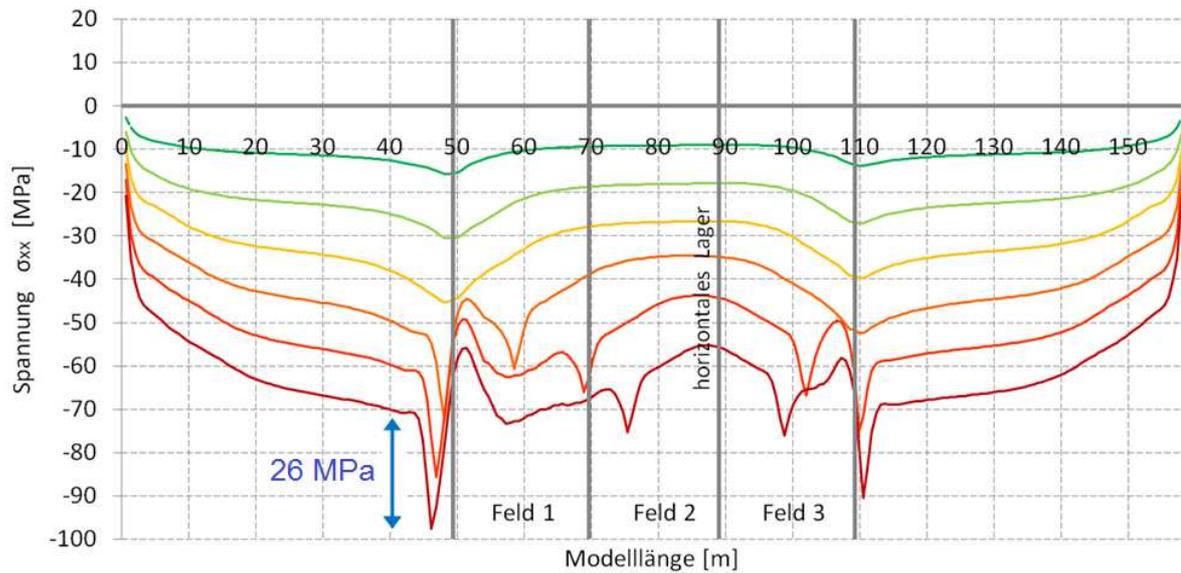


Abbildung 86: Erwärmung Schiene 28°C Tragwerk 14°C [eigene Darstellung]

Basierend auf dem Frühlingsmodell wurden von B. Täubling weitere Modelle mit höheren Temperaturdifferenzen berechnet, wie in Abbildung 87 zu sehen ist. Es wird die Abhängigkeit der Schienentemperatur von der Schienenspannung untersucht.

Die Spannungsdifferenz bei einer Erwärmung des Tragwerks auf 20°C beträgt 28MPa, bei einer zusätzlichen Erwärmung der Schiene auf 28°C bleibt dieser Wert gleich. Bei einer Erwärmung auf 50°C erreicht die Differenz nur 29MPa. Somit hängen die Spannungssprünge in der Schiene nicht von der Änderung der Schienentemperatur sonder lediglich der Tragwerkstemperatur ab.

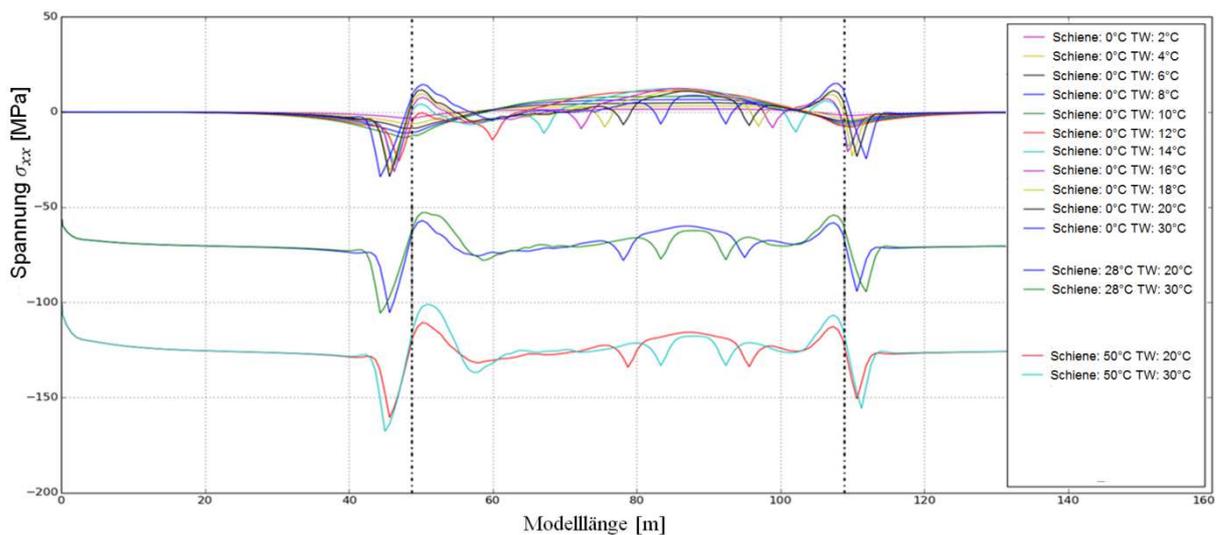


Abbildung 87: Modellvergleich unterschiedlicher Schienentemperatur [8]

Aus dieser Modellanalyse kann man des weiteren die maximale Spannungsdifferenz von 30MPa, bei einer Erwärmung der Schiene auf 50°C und des Tragwerks auf 30°C, entnehmen.

Abbildung 88 zeigt nun die Studie der maximalen Spannung in Abhängigkeit der Brückenlänge und der Steifigkeit k_A des Lagers am linken Brückende. Eine genauere Erklärung ist 4.3.1 zu entnehmen.

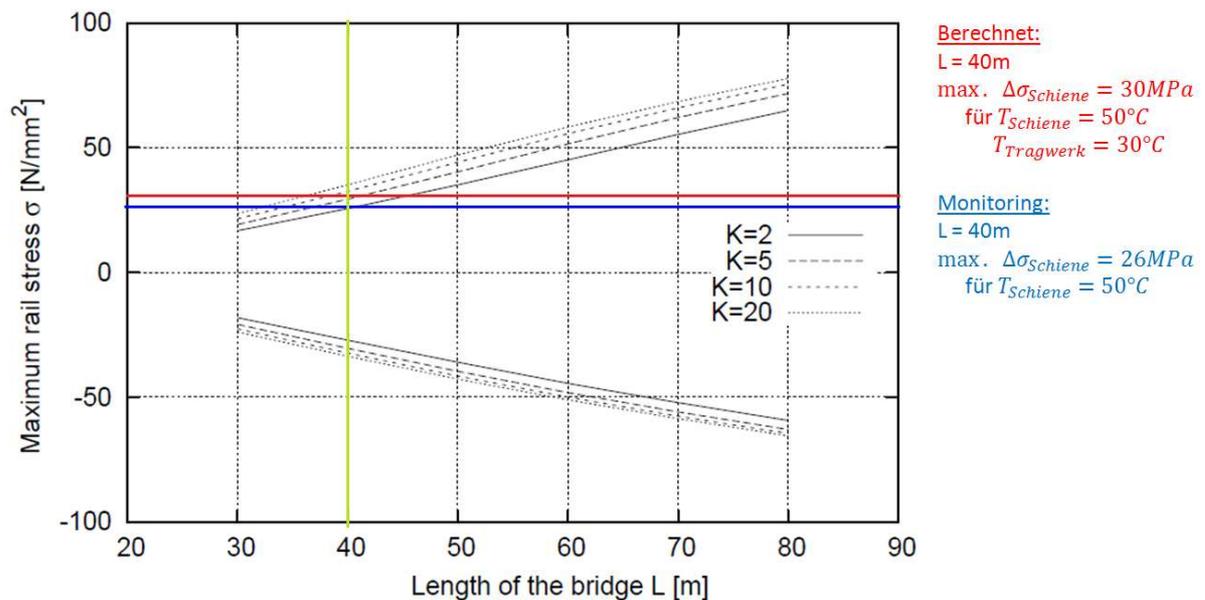


Abbildung 88: Variation der Lagersteifigkeit mit linearer Lastkombination der Temperaturänderung und Biegung; verändert [8]

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verschiebewiderstandsverhalten ist ein komplexes Thema und geht Hand in Hand mit der Interaktion zwischen Gleis und Tragwerk. Diese Wechselbeziehung ergibt sich aus der Verbindung zwischen den beiden. Das Verhalten des Gleises bei einer Belastung hat Auswirkungen auf das Tragwerk und umgekehrt, demgemäß treten Kräfte im Gleis und im Tragwerk sowie Verschiebungen auf. In diesem Zusammenhang leisten Gleis und Tragwerk gemeinsam Widerstand gegen Einwirkungen. Diese Widerstände sind der Durchschub- und der Längsverschiebewiderstand, die einerseits gegen eine Verschiebung der einzelnen Schwelle und andererseits gegen eine Verschiebung des gesamten Gleisrostes wirken.

Die ÖNORM 1991-2 sowie der UIC-Kodex 774-3 bieten eine übersichtliche rechnerische Empfehlung bezüglich der entstehenden Schienenspannung und der Auflagerkräfte. Um die auftretenden Kräfte und Verschiebungen besser abschätzen zu können, geben Computermodelle allerdings eine genauere Antwort.

Durch die Studie der Brücke über die L110 hat sich ATENA Engineering als unzureichend herausgestellt, da die Struktur zu detailliert war und die Kapazität des Programms überschritt. Das Programm ATENA Science mit GiD als Eingabeoberfläche war dieser Situation mächtig und hat mit sehr kurzen Rechenzeiten brilliert. Es ist in beiden Programmen möglich, eine möglichst genaue Struktur mit realitätsnahen Materialien und Randbedingungen zu erzeugen. Wichtig dabei ist, den idealisierten Zustand im Auge zu behalten und das Modell nicht zu komplex aufzubauen. Andernfalls erhöhen sich die Rechenzeiten und man läuft Gefahr sich in der komplexen Struktur zu verlaufen.

Die anfängliche Studie mit dem 1 Höcker Modell hat Aufschluss über die Wirkungsweise im Fall einer Belastung der Struktur gegeben. Das Durchschubwiderstand-Modell wird mittels einzelner Parameter, hauptsächlich des Elastizitätsmodul und der Streckgrenze, gesteuert, bis das passende Verhalten entsprechend der Norm erreicht wird. Dabei wurde das Material durch die Verwendung von Beton und Bewehrung für den Puffer neu definiert.

Aufbauend auf das Ergebnis dieser Studie folgten weitere längere Modelle, bis hin zur gesamten Brückenlänge von 60m inklusive einem beidseitigen Dammbereich von jeweils 50m. Die Modelle wurden für alle 4 Jahreszeiten erstellt und erzielten gute Ergebnisse der Spannung und Verschiebung im Vergleich mit dem Monitoring. Für die beiden Lastfälle

Bremsen und Durchbiegung wurde jeweils ein Modell erstellt und mit den Grenzwerten aus der ÖNORM 1991-2 bzw. dem UIC-Kodex 774-3 geprüft, mit dem Ergebnis geringerer Werte der Programmberechnung als der Grenzwerte.

Weiters wurde das Verhalten der Verläufe mit unterschiedlicher Steifigkeit einzelner Pufferelemente im Widerlagerbereich untersucht. Das Elastizitätsmodul des Betons wurde beidseitig bei 4, 12 und 16 Elementen reduziert. Hierbei haben sich, wie erwartet, die Spannungsspitzen im Widerlagerbereich reduziert und verteilt, und die plastischen Bereiche haben sich daher erhöht.

Basierend auf dem Modell für die Jahreszeit Frühling wurden Modelle mit einer höheren Temperaturdifferenz erstellt. Daraus ergab sich, dass die Schiene auf das Tragwerk einen sehr geringen Einfluss aufweist und nur das Tragwerk Einfluss auf die Spannungsspitzen hat.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Nicht Linearen Finite Elemente Methode können nun drei Nachweisverfahren als zielführend angesehen werden. Beim ersten Verfahren werden die Verschiebungen von Tragwerk und Schiene monitort und die Spannungssprünge im Widerlagerbereich im Detail betrachtet. Das zweite Verfahren ist eine Transferfunktion, von der man ausgehend von einer Verschiebung über einen vereinfachten Faktor zu den Dehnungen gelangt und schließlich zu den Spannungsspitzen. Das dritte Verfahren ist ein Temperaturprozess, bei dem auf das untere Tragwerk eine Temperatur aufgebracht wird. Hierbei wird über die reale Tragwerksverschiebung die Verschiebung im Modell berechnet.

Der Vergleich mit dem Einfeld-Modell aus der Dissertation von Dina Rubiana Widarda ergab einerseits übereinstimmende maximale Spannungen, andererseits aber unterschiedliche Spannungsverläufe. Diesem Unterschied gilt es hiernach im Zuge des Projektes MAGIT auf den Grund zu gehen. Als letzten Arbeitsteil von MAGIT soll ein universelles Durchschub- und Längsverschiebewiderstandsmodell erarbeitet werden. Um eine allgemeingültige Aussage über das Widerstandsverhältnis zu erhalten, werden in Zukunft noch weitere, längere Brücken studiert.

9 Anhang

9.1.1 Durchschubwiderstand - Rekonstruktion Normmodell A

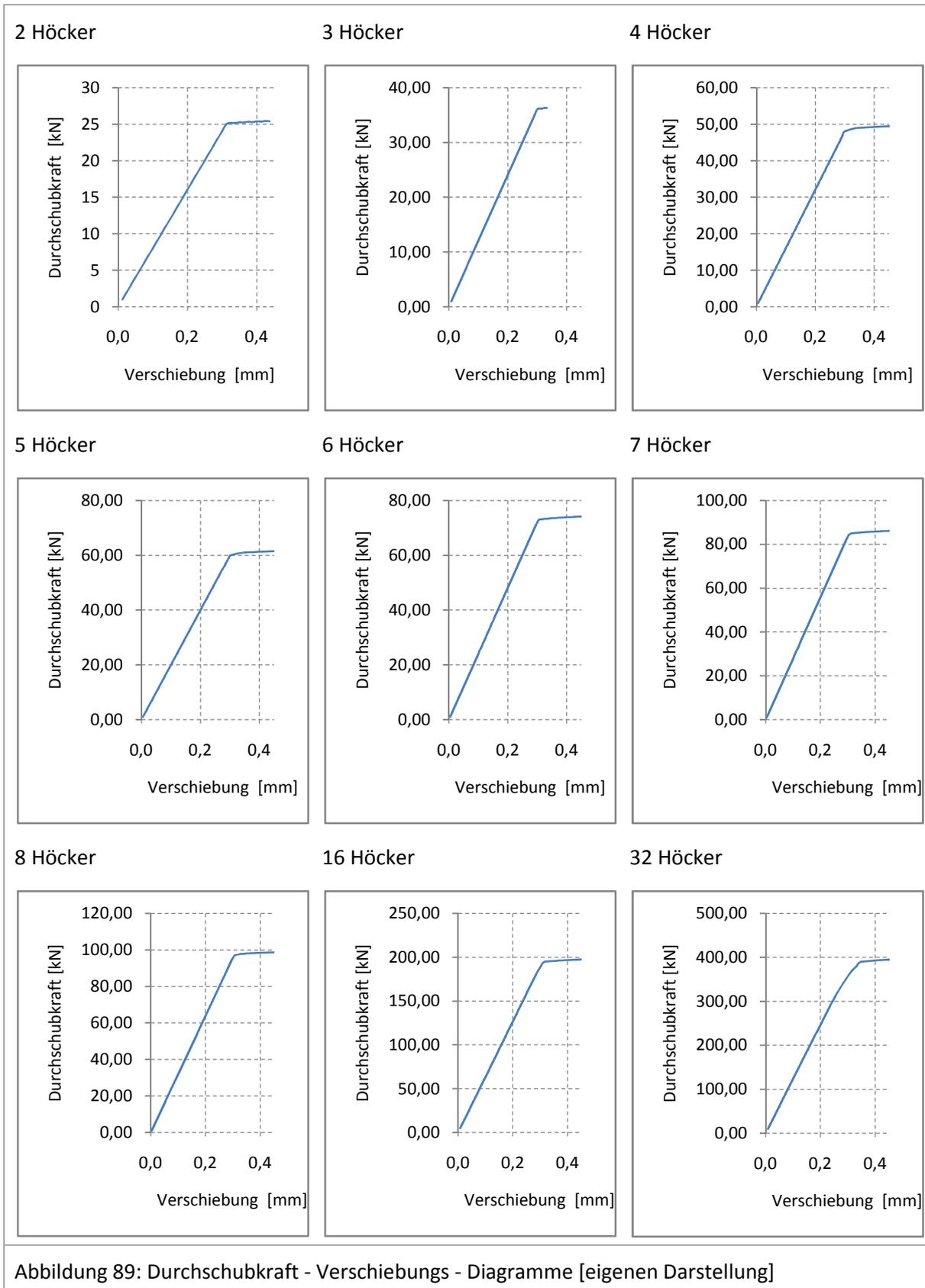


Abbildung 89: Durchschubkraft - Verschiebungs - Diagramme [eigenen Darstellung]

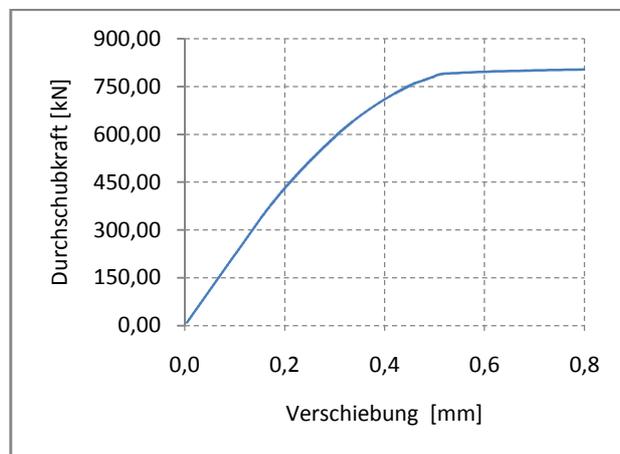


Abbildung 90: Durchschubkraft - Verschiebungs - Diagramm 64 Höcker [eigene Darstellung]

9.1.2 Modell C: Temperatur - Lastfall Frühling - Erwärmung

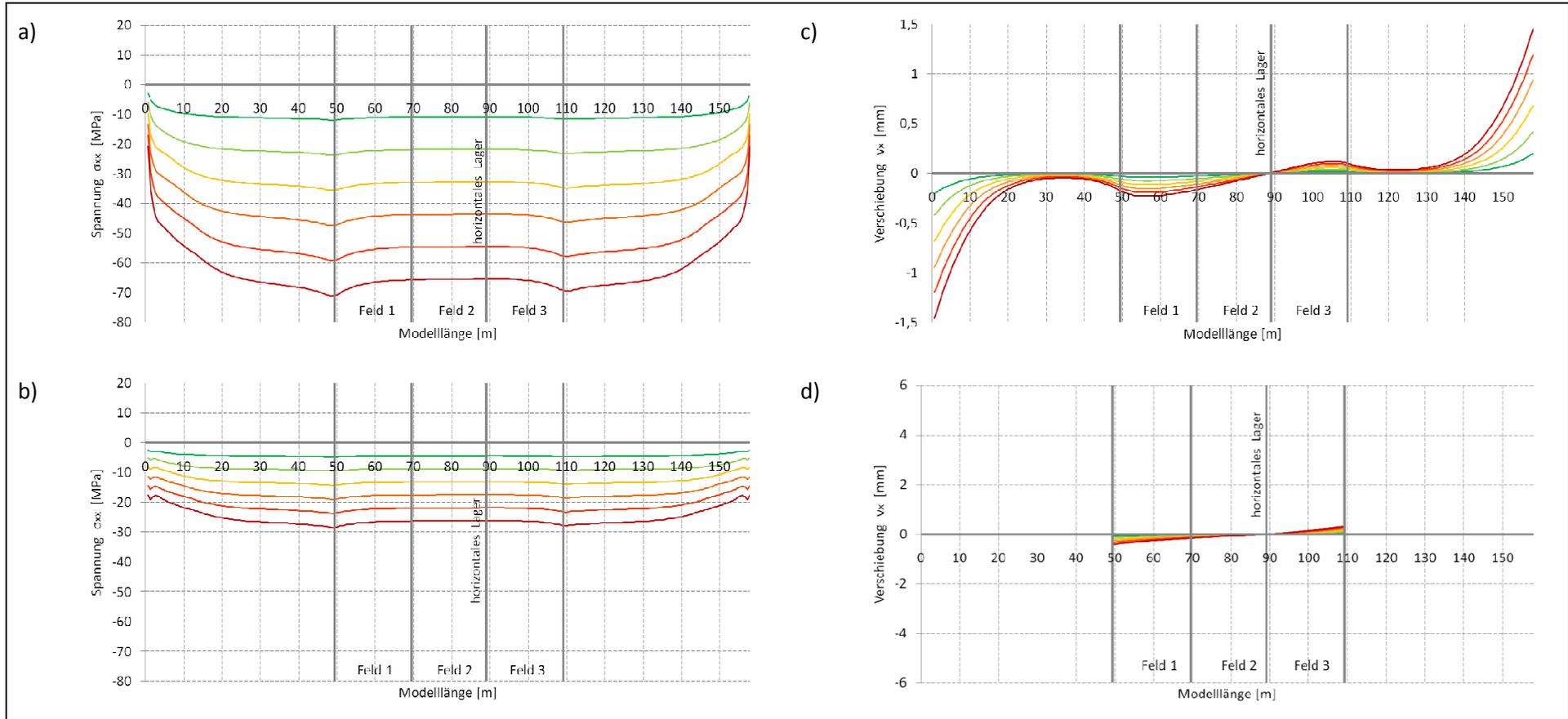


Diagramm 1a-d: Erwärmung: Tragwerk 2°C - Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/	ΔT Tragwerk 0,3K	9,3°K/0,7K	14,0K/1,0K	18,7K/1,3K	23,3K/1,7K	28,0K/2,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

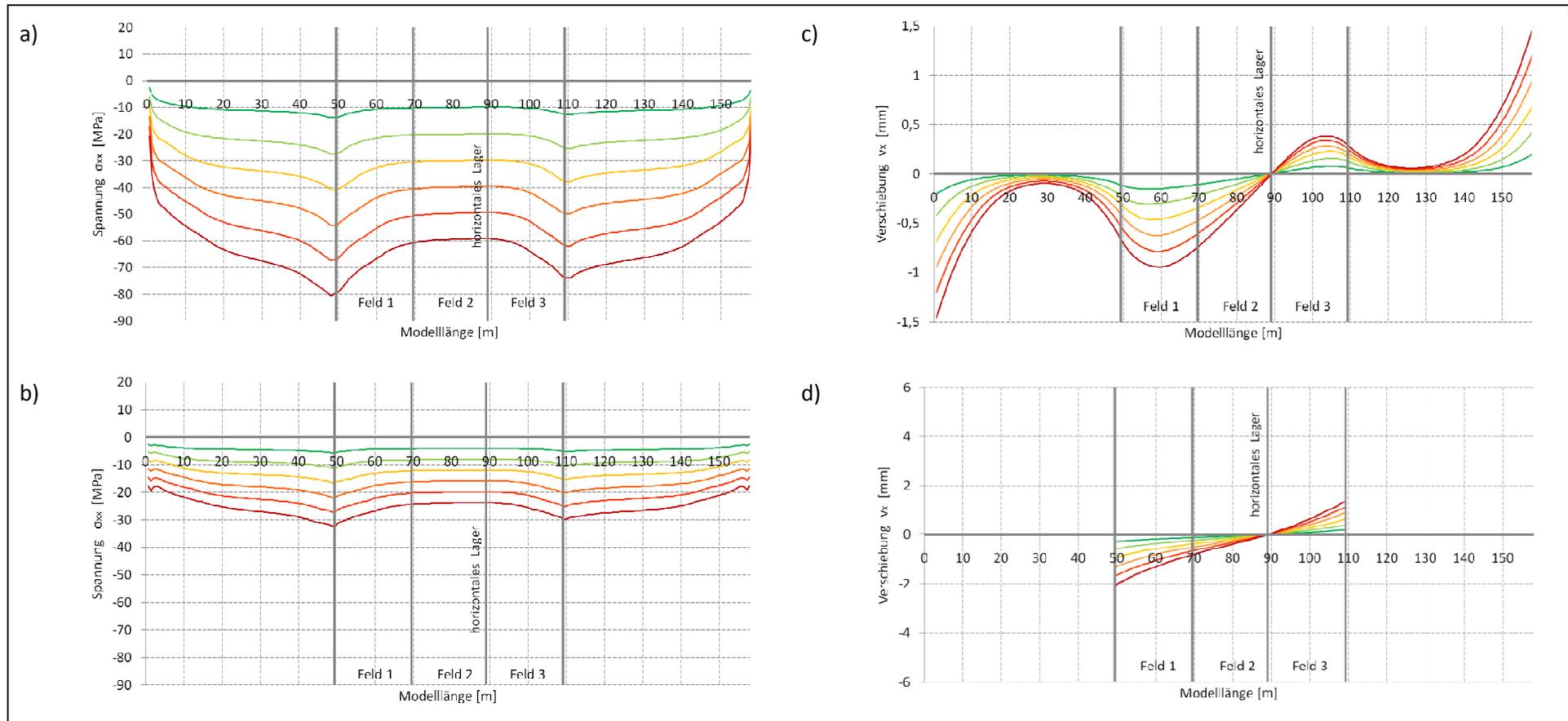


Diagramm 2a-d: Erwärmung: Tragwerk 8°C - Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/ ΔT Tragwerk 1,3K 9,3°K/2,6K 14,0K/4,0K 18,7K/5,3K 23,3K/6,7K 28,0K/8,0K

a) Spannung [MPa] in der Schiene oben
 b) Spannung [MPa] in der Schiene unten

c) Verschiebung [mm] Schiene
 d) Verschiebung [mm] Tragwerk

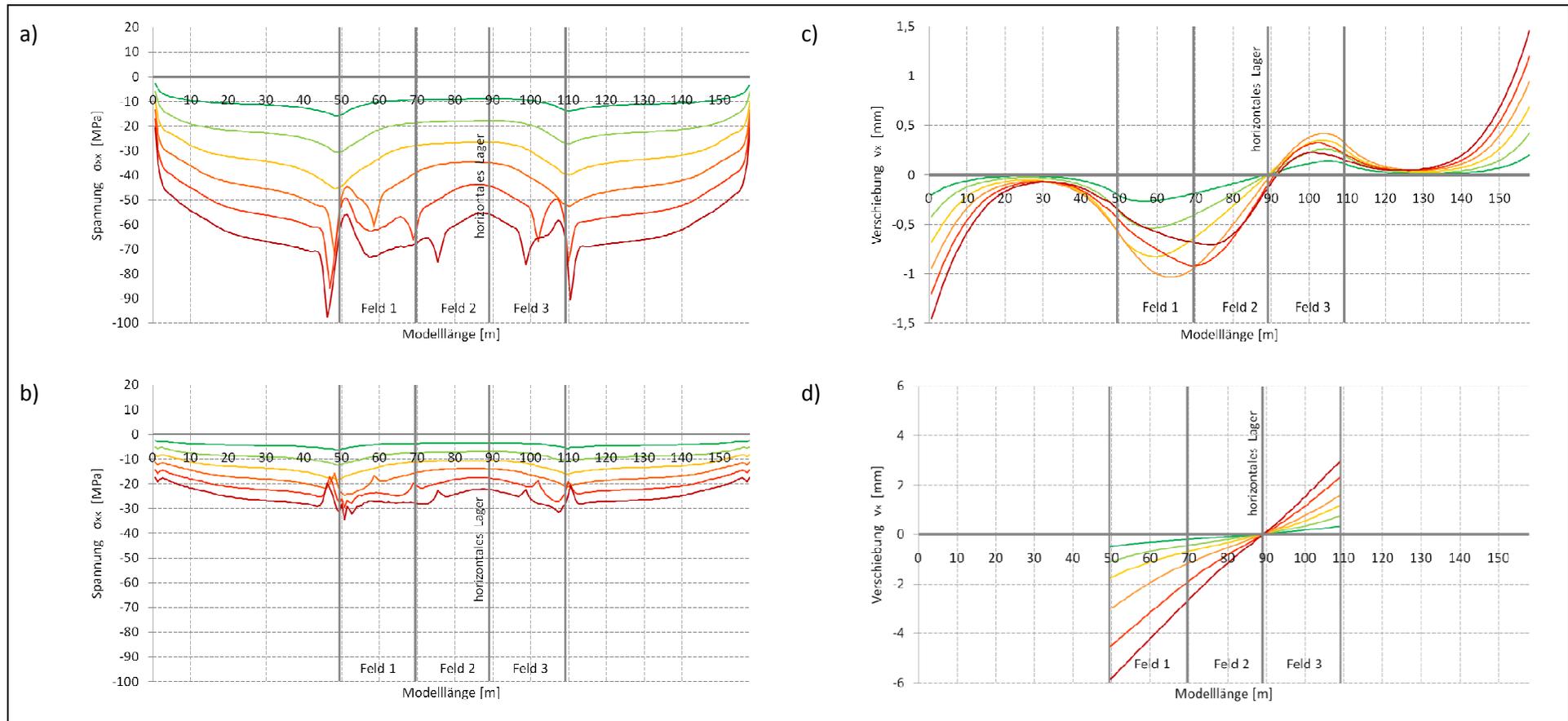


Diagramm 3a-d: Erwärmung: Tragwerk 14°C - Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/ ΔT Tragwerk 2,3K 9,3°K/4,7K 14,0K/7,0K 18,7K/9,3K 23,3K/11,7K 28,0K/14,0K

a) Spannung [MPa] in der Schiene oben
 b) Spannung [MPa] in der Schiene unten

c) Verschiebung [mm] Schiene
 d) Verschiebung [mm] Tragwerk

9.1.3 Modell C: Temperatur - Lastfall Frühling - Abkühlung

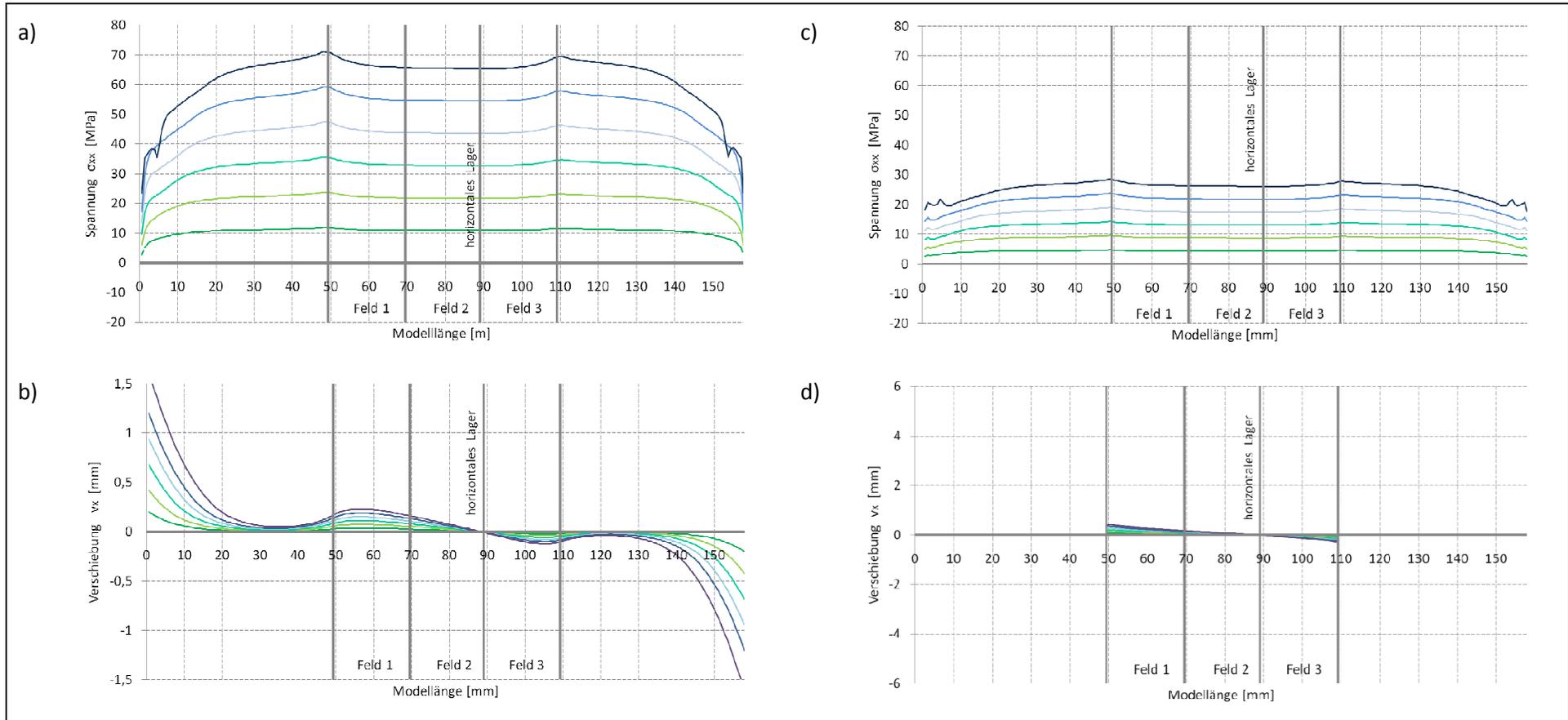


Diagramm 4a-d: Erwärmung: Tragwerk -2°C - Schiene -28°C

ΔT Schiene $-4,6\text{K}$	ΔT Tragwerk $-0,3\text{K}$	$-9,3^{\circ}\text{K}/-0,7\text{K}$	$-14,0\text{K}/-1,0\text{K}$	$-18,7\text{K}/-1,3\text{K}$	$-23,3\text{K}/-1,7\text{K}$	$-28,0\text{K}/-2,0\text{K}$
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

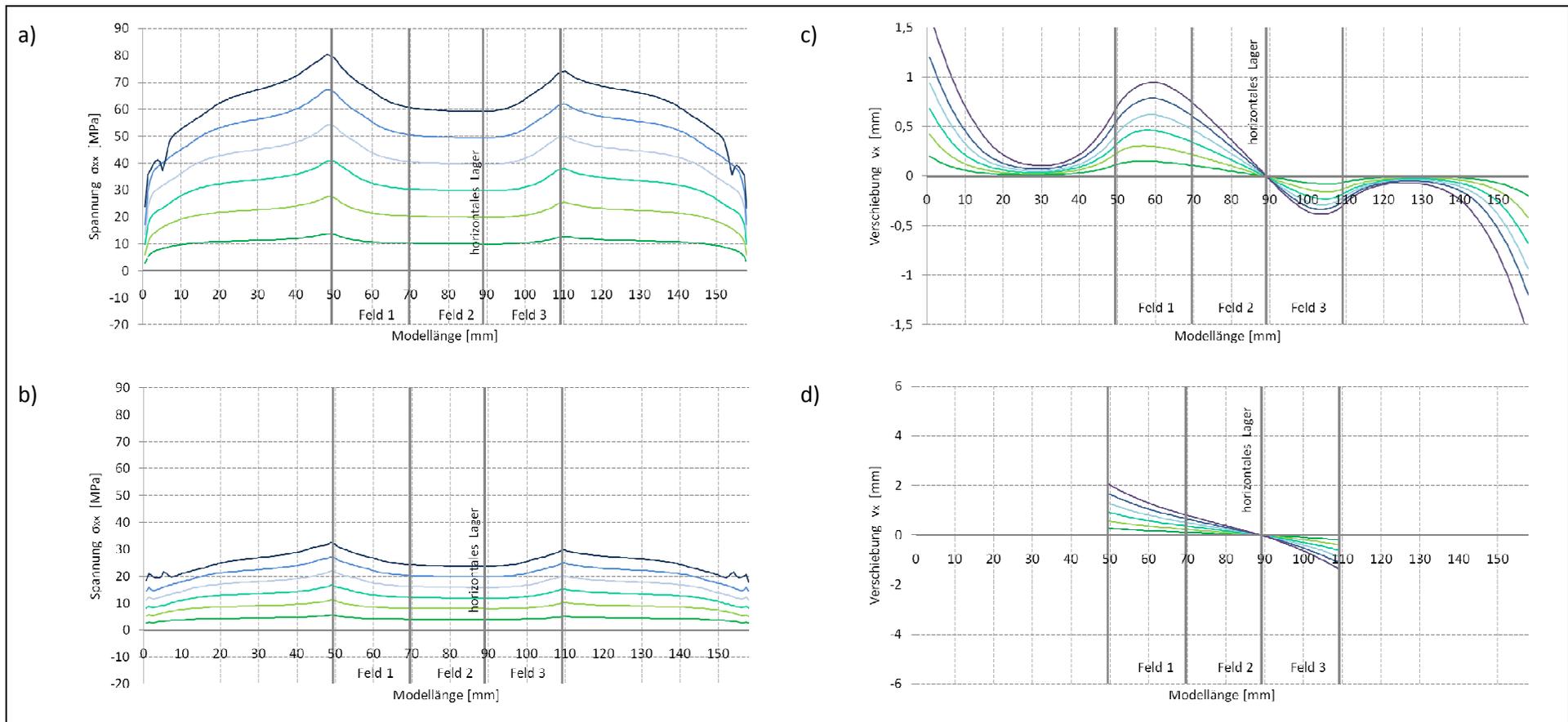


Diagramm 5a-d: Erwärmung: Tragwerk -8°C - Schiene -28°C

—	—	—	—	—	—	
ΔT Schiene $-4,6\text{K}$	ΔT Tragwerk $-1,3\text{K}$	$-9,3^{\circ}\text{K}/-2,7\text{K}$	$-14,0\text{K}/-4,0\text{K}$	$-18,7\text{K}/-5,3\text{K}$	$-23,3\text{K}/-6,7\text{K}$	$-28,0\text{K}/-8,0\text{K}$
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben			c) Verschiebung [mm] Schiene			
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten			d) Verschiebung [mm] Tragwerk			

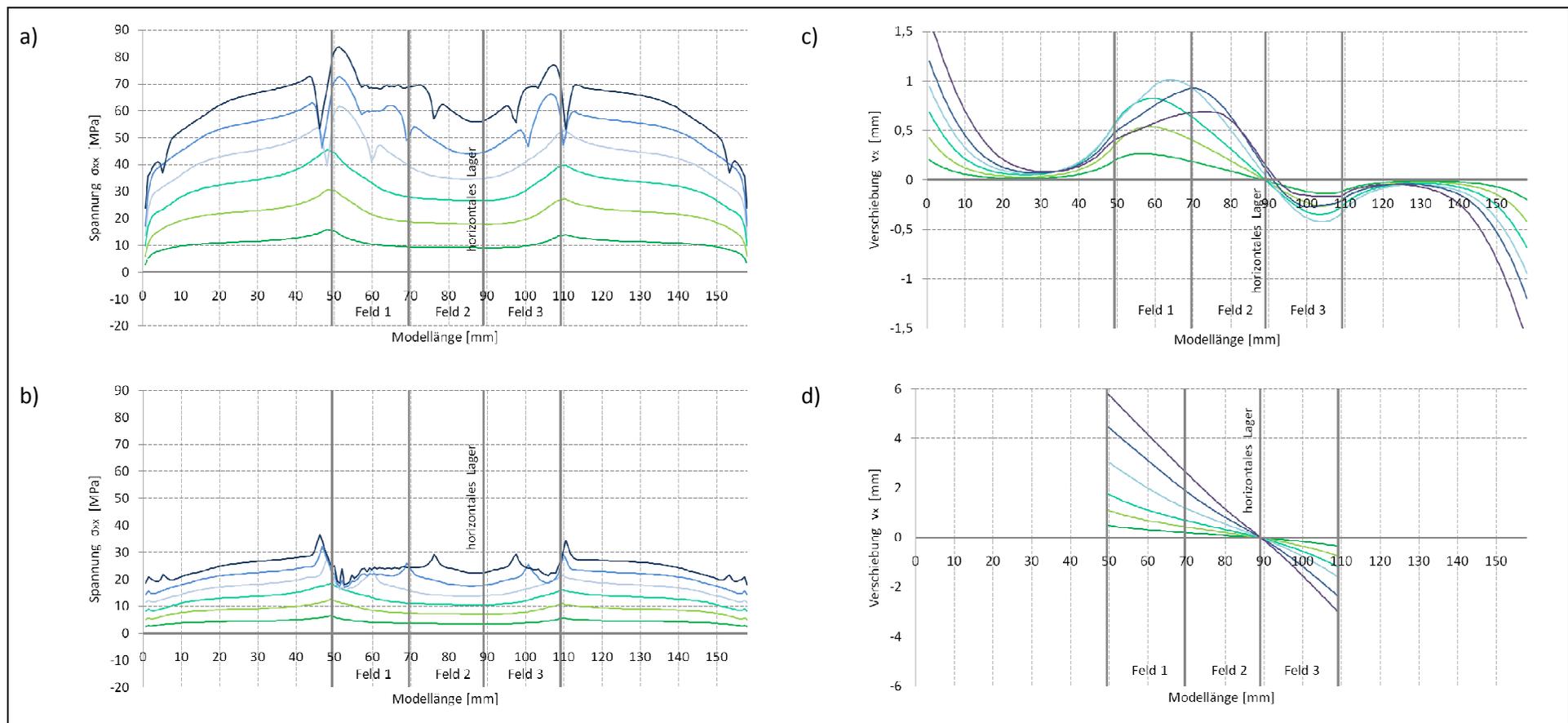


Diagramm 6a-d: Erwärmung: Tragwerk -14°C - Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -2,3K	-9,3K/-4,7K	-14,0K/-7,0K	-18,7K/-9,3K	-23,3K/-11,7K	-28,0K/-14,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

9.1.4 Modell D: Reduzierte Steifigkeit - Lastfall Frühling - Abkühlung

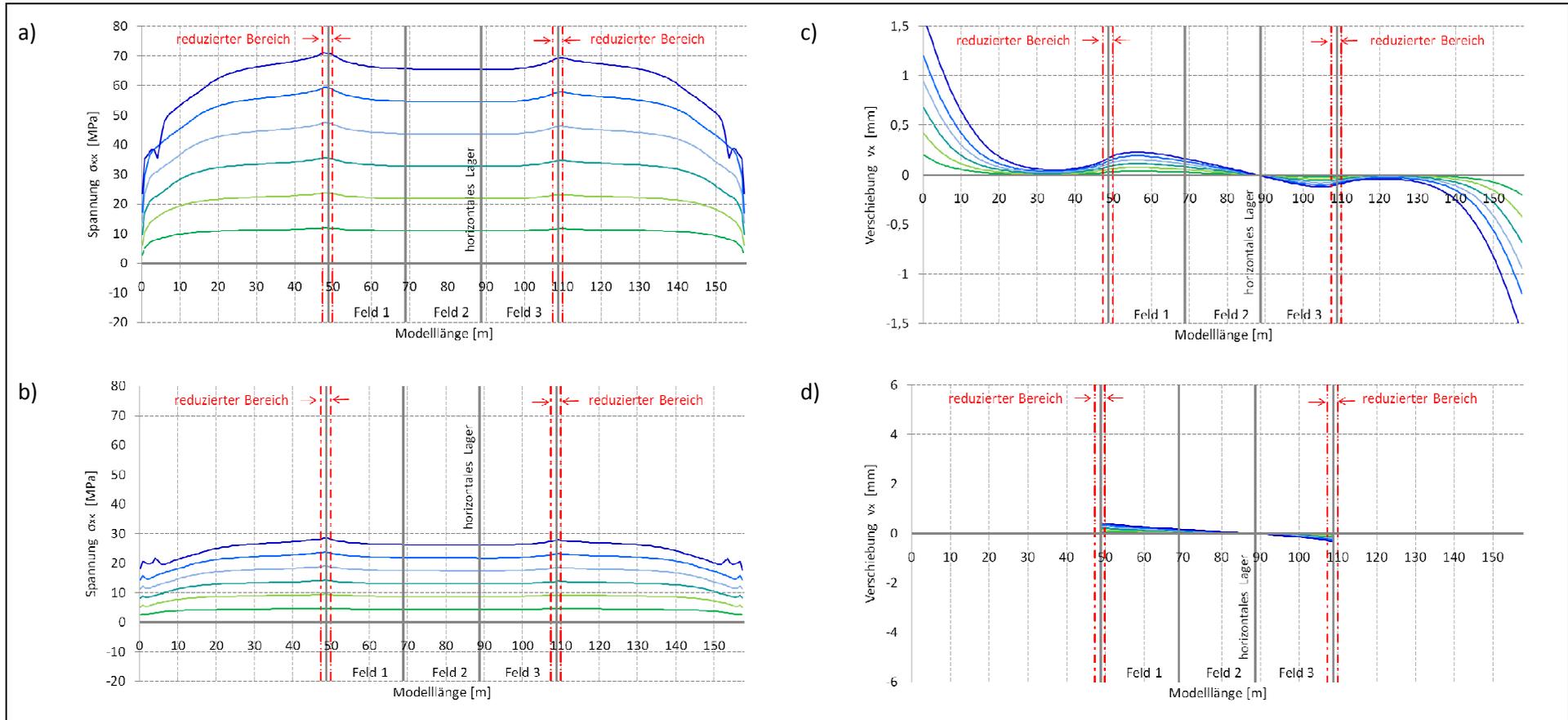


Diagramm 7a-d: 2 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -0,3K	-9,3°K/-0,7K	-14,0K/-1,0K	-18,7K/-1,3K	-23,3K/-1,7K	-28,0K/-2,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

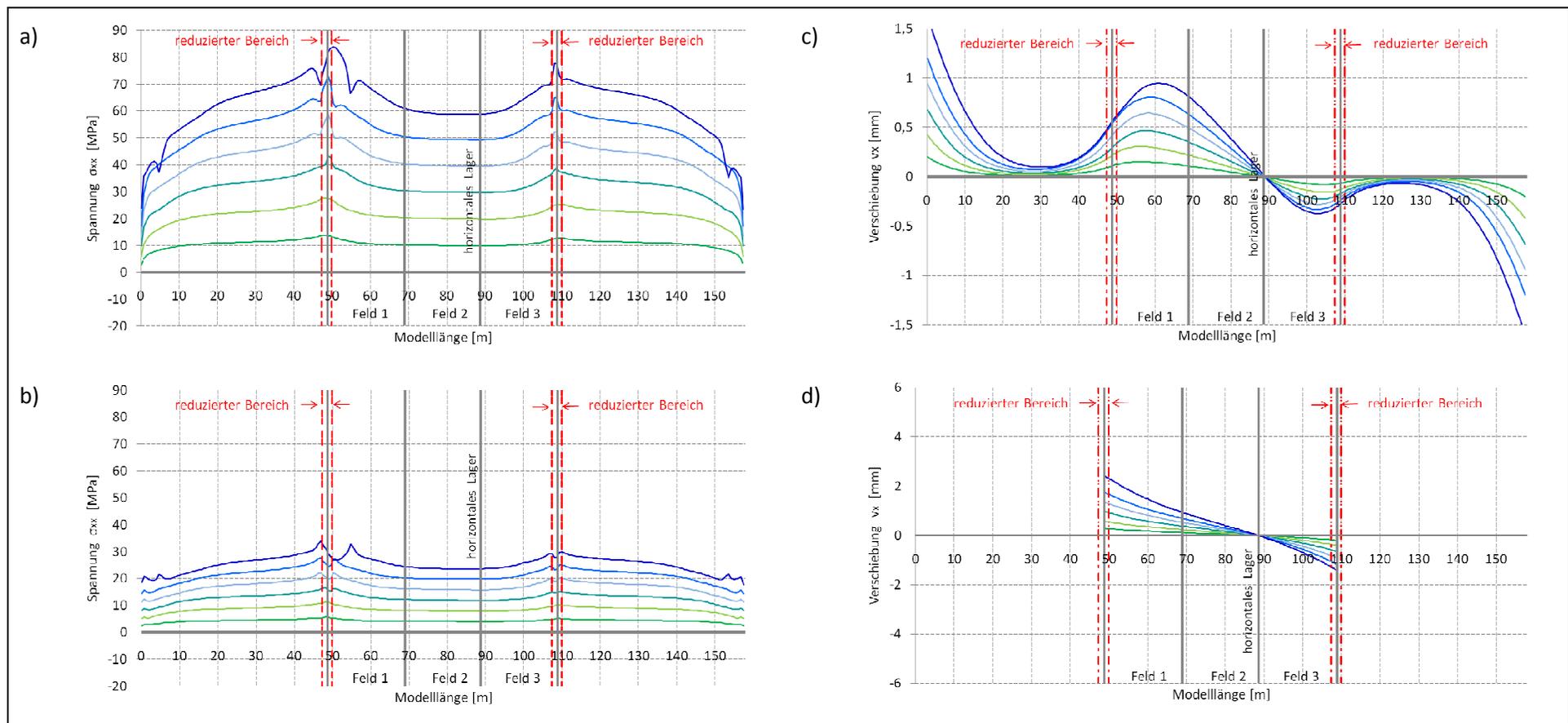


Diagramm 8a-d: 2 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -8°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -1,3K	-9,3°K/-2,7K	-14,0K/-4,0K	-18,7K/-5,3K	-23,3K/-6,7K	-28,0K/-8,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

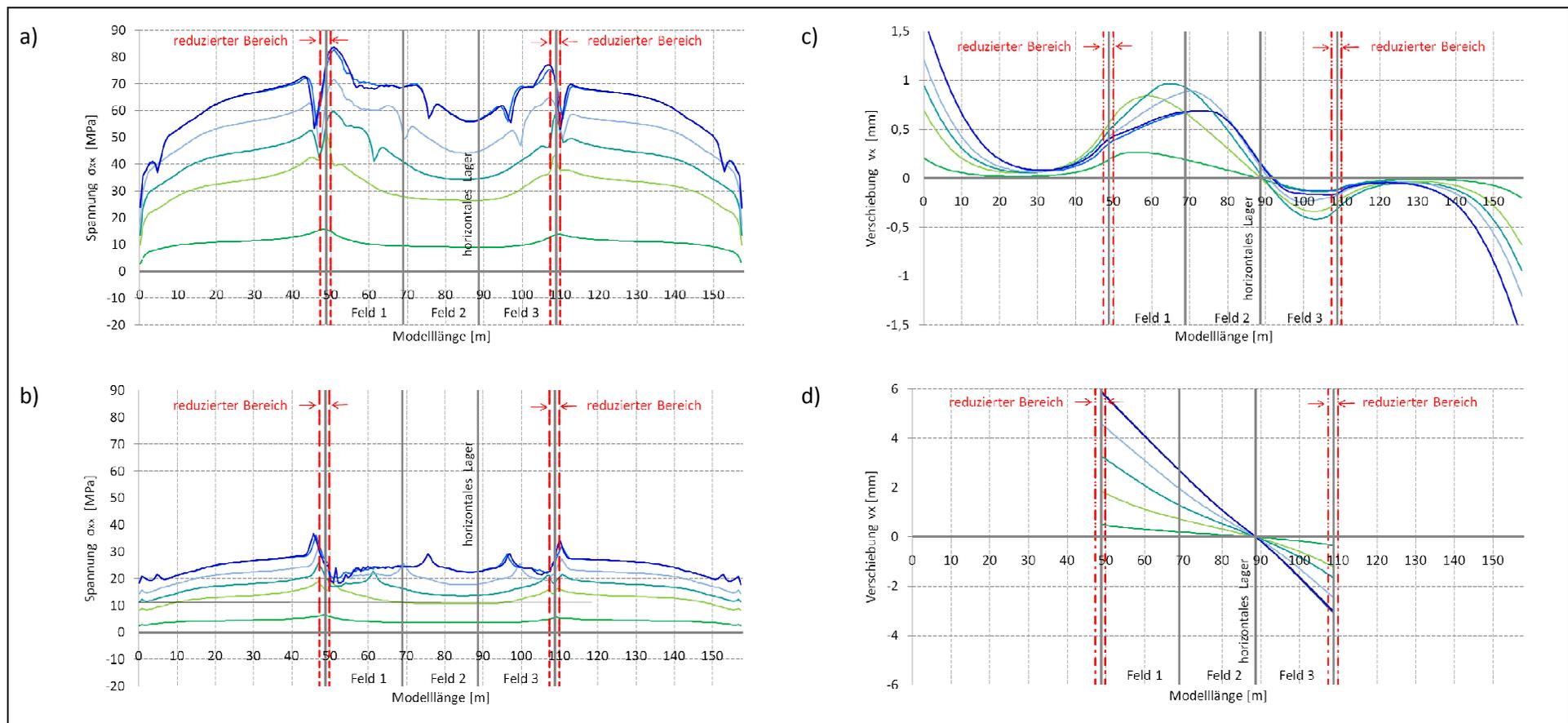


Diagramm 9a-d: 2 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -14°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -2,3K	-9,3K/-4,7K	-14,0K/-7,0K	-18,7K/-9,3K	-23,3K/-11,7K	-28,0K/-14,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

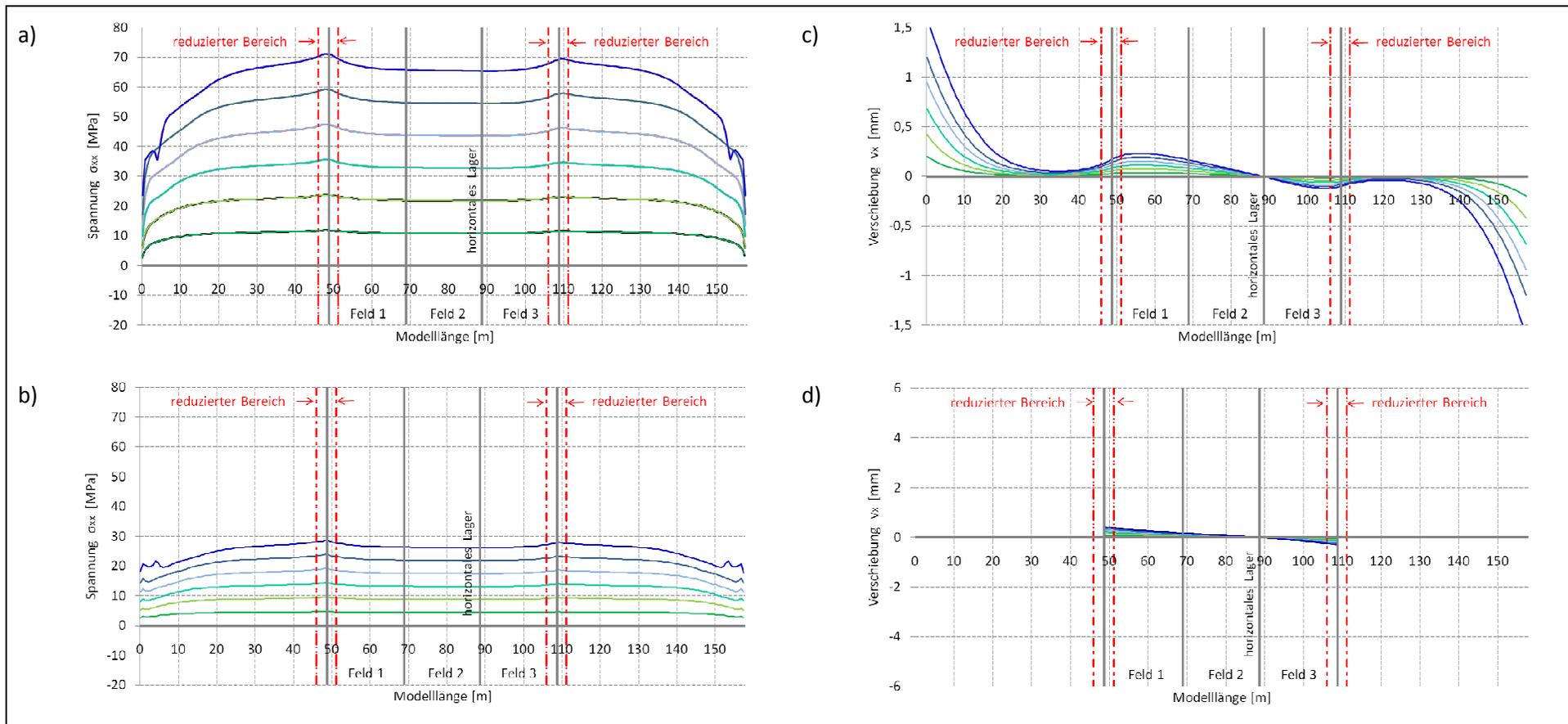


Diagramm 10a-d: 4 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C

ΔT Schiene $-4,6\text{K}$	ΔT Tragwerk $-0,3\text{K}$	$-9,3^{\circ}\text{K}/-0,7\text{K}$	$-14,0\text{K}/-1,0\text{K}$	$-18,7\text{K}/-1,3\text{K}$	$-23,3\text{K}/-1,7\text{K}$	$-28,0\text{K}/-2,0\text{K}$
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben			c) Verschiebung [mm] Schiene			
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten			d) Verschiebung [mm] Tragwerk			

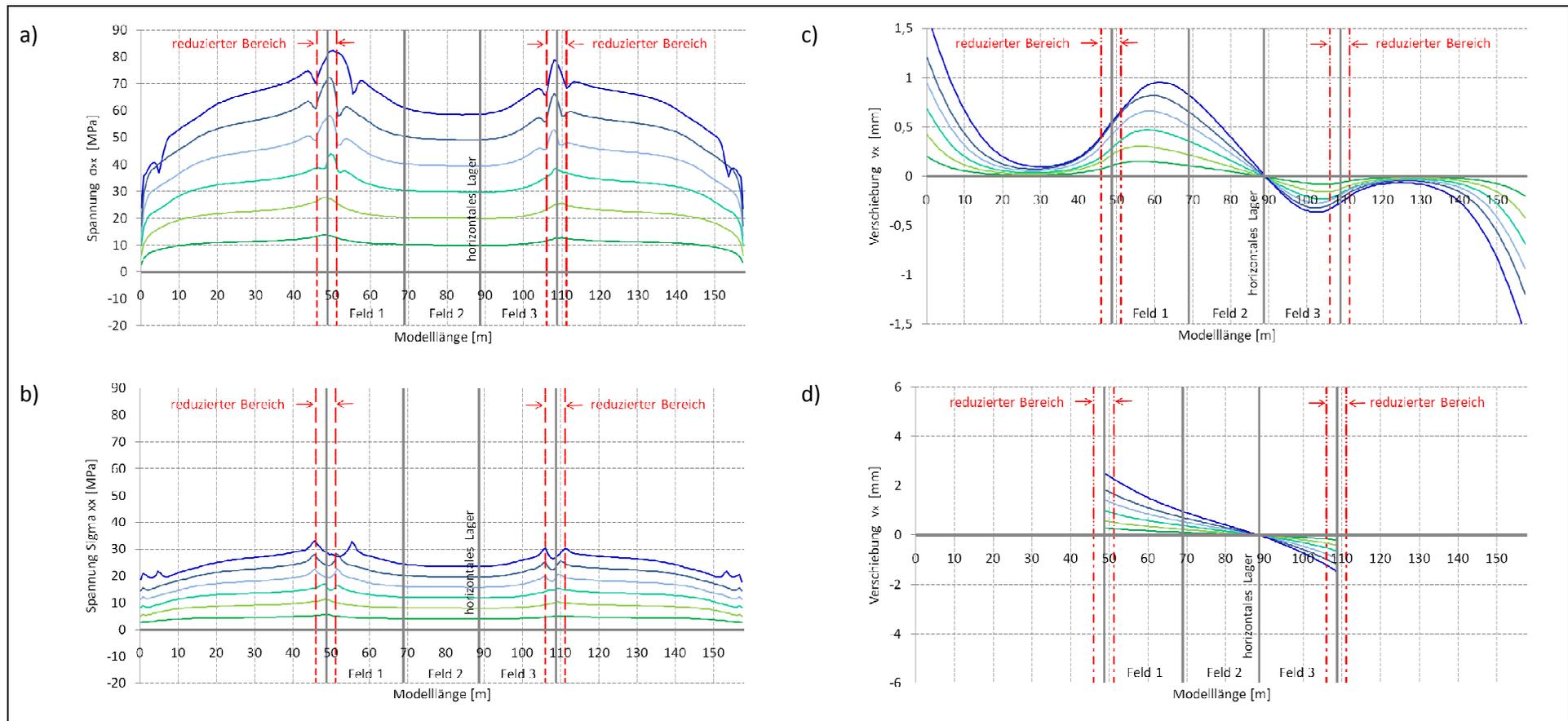


Diagramm 11a-d: 4 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -8°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -1,3K	-9,3°K/-2,7K	-14,0K/-4,0K	-18,7K/-5,3K	-23,3K/-6,7K	-28,0K/-8,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

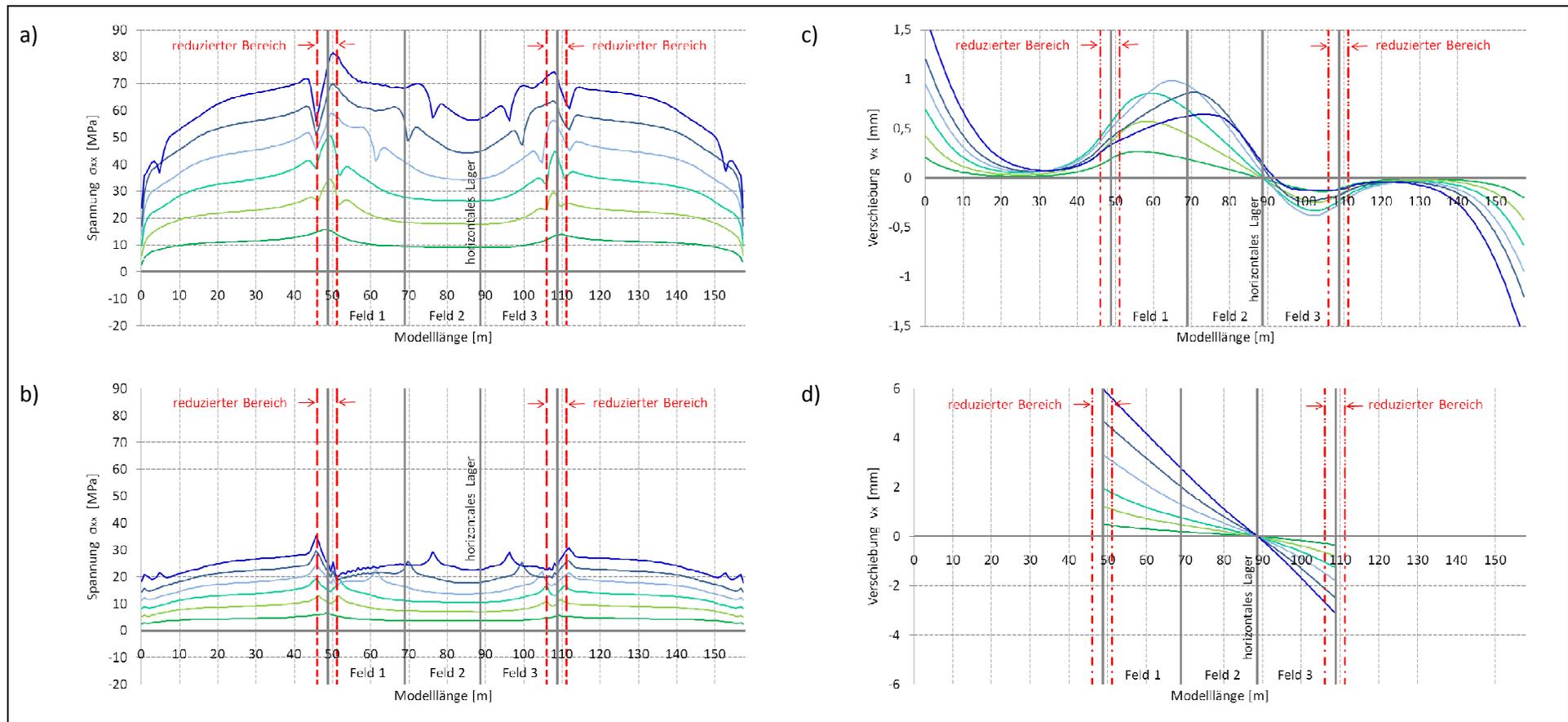


Diagramm 12a-d: 4 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -14°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -2,3K	-9,3°K/-4,7K	-14,0K/-7,0K	-18,7K/-9,3K	-23,3K/-11,7K	-28,0K/-14,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben	c) Verschiebung [mm] Schiene					
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten	d) Verschiebung [mm] Tragwerk					

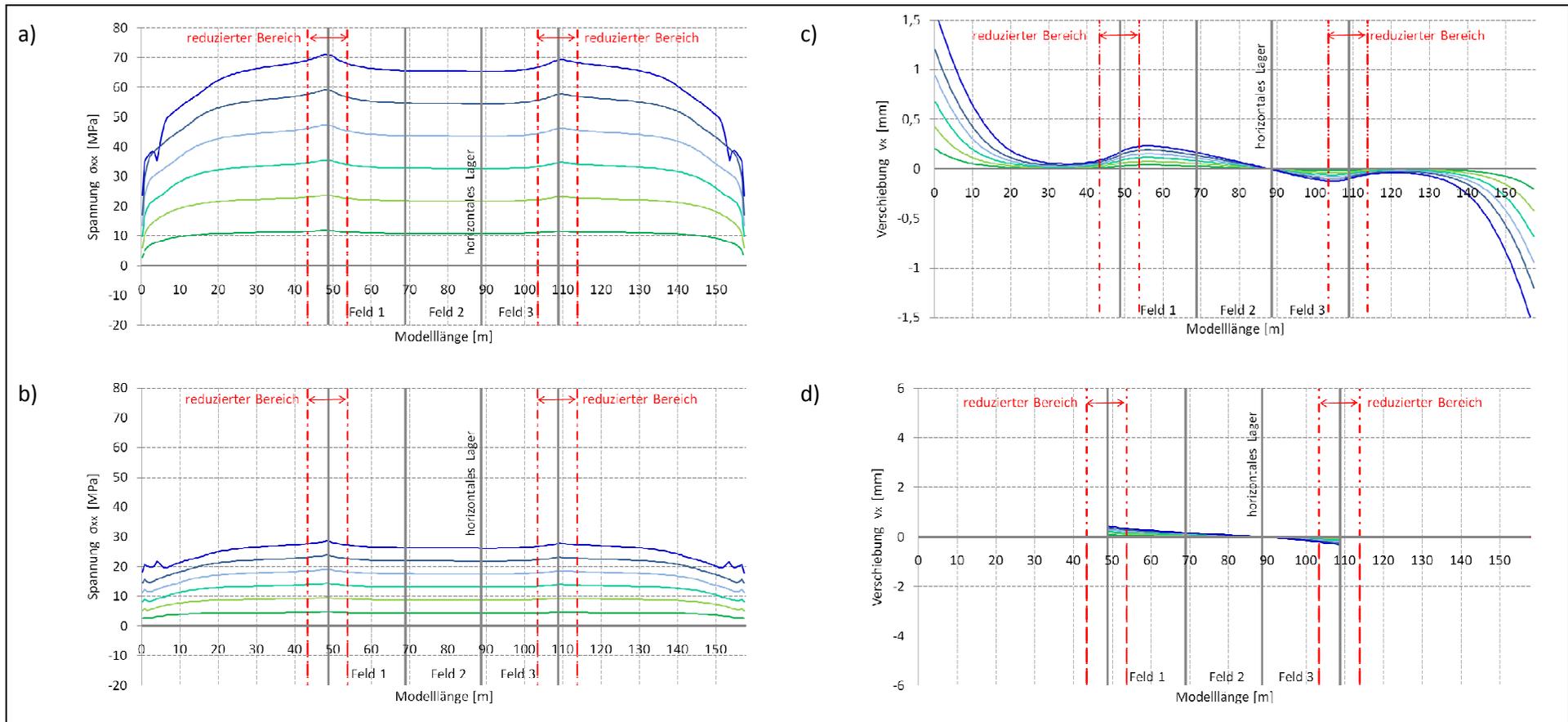


Diagramm 13a-d: 8 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C

ΔT Schiene $-4,6\text{K}$	ΔT Tragwerk $-0,3\text{K}$	$-9,3^{\circ}\text{K}/-0,7\text{K}$	$-14,0\text{K}/-1,0\text{K}$	$-18,7\text{K}/-1,3\text{K}$	$-23,3\text{K}/-1,7\text{K}$
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben			c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten			d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

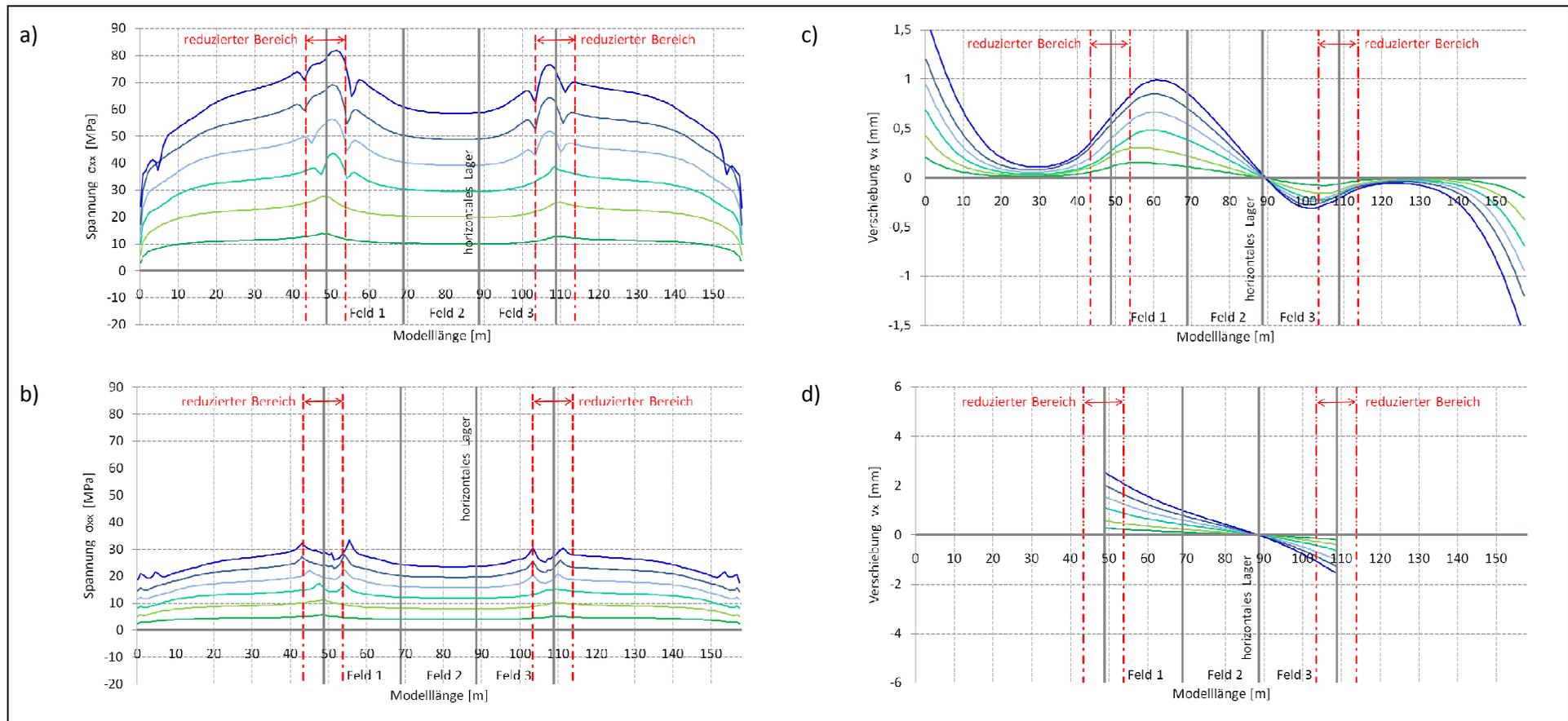


Diagramm 14a-d: 8 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -8°C Schiene -28°C

ΔT Schiene $-4,6\text{K}$	ΔT Tragwerk $-1,3\text{K}$	$-9,3^{\circ}\text{K}/-2,7\text{K}$	$-14,0\text{K}/-4,0\text{K}$	$-18,7\text{K}/-5,3\text{K}$	$-23,3\text{K}/-6,7\text{K}$
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene	
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk	

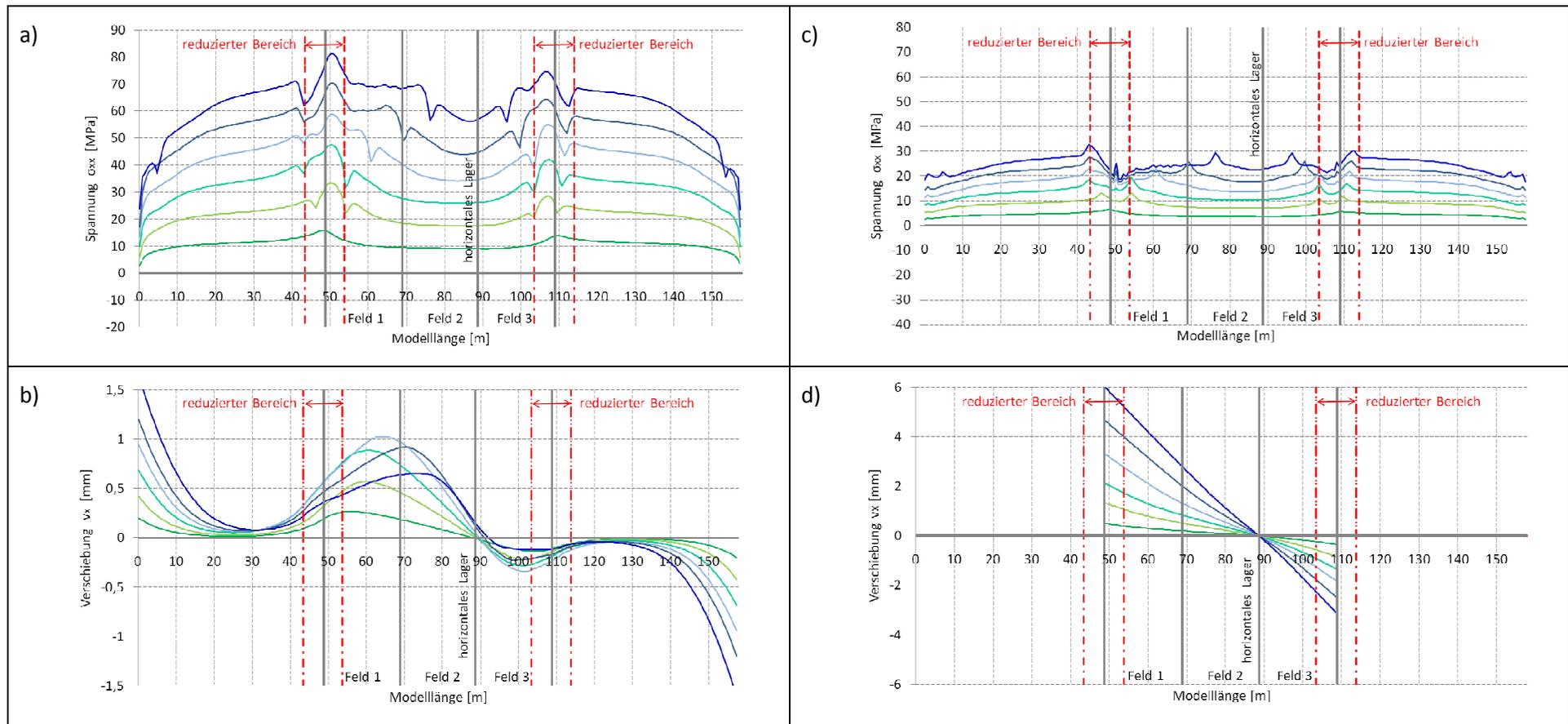


Diagramm 15a-d: 8 Höcker reduziert - Abkühlung: Tragwerk -14°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -2,3K	-9,3°K/-4,7K	-14,0K/-7,0K	-18,7K/-9,3K	-23,3K/-11,7K
-28,0K/-14,0K	a) Spannung [MPa] in der Schiene oben			c) Verschiebung [mm] Schiene	
	b) Spannung [MPa] in der Schiene unten			d) Verschiebung [mm] Tragwerk	

9.1.5 Modell D: Reduzierte Steifigkeit - Lastfall Frühling - Erwärmung

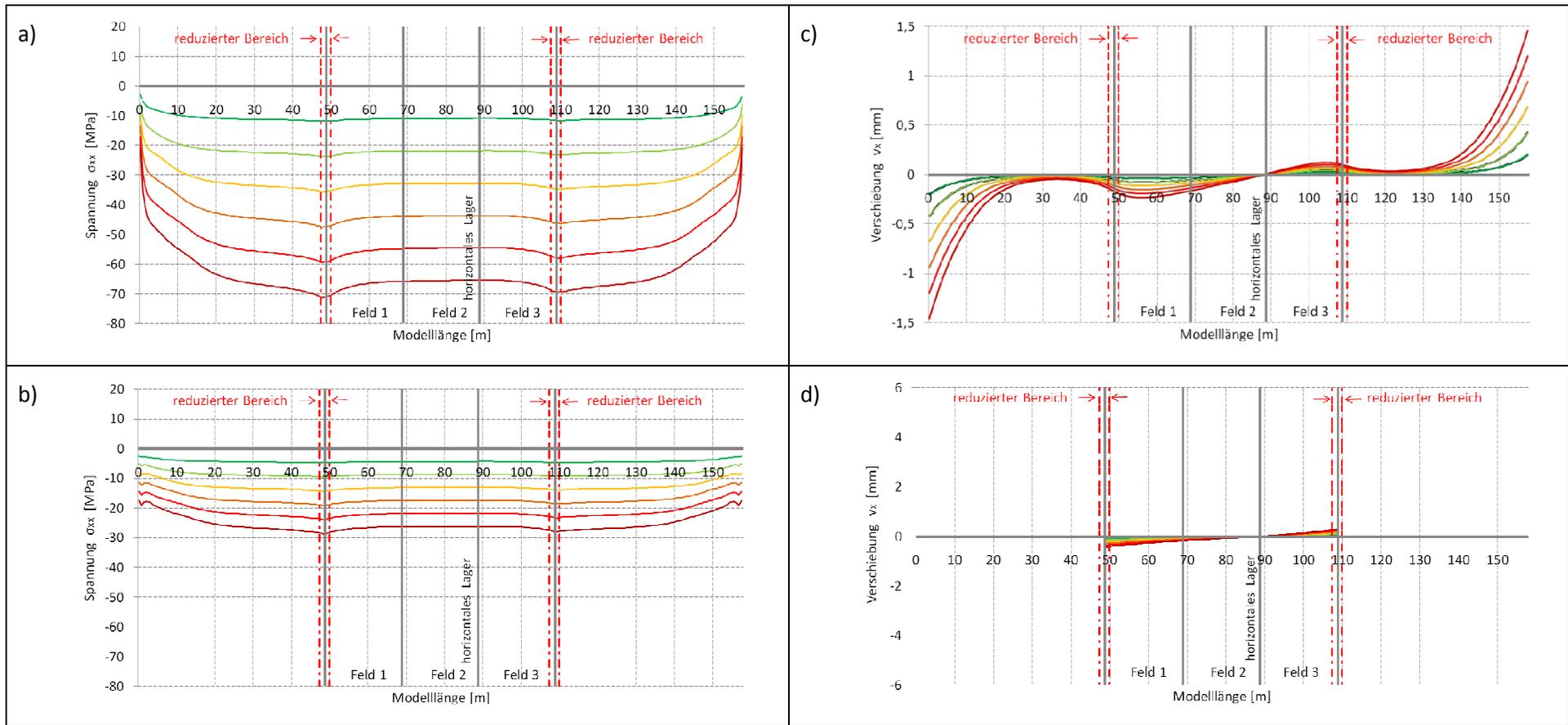


Diagramm 16a-d: 2 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 2°C Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/	ΔT Tragwerk 0,3K	9,3°K/0,7K	14,0K/1,0K	18,7K/1,3K	23,3K/1,7K 28,0K/2,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene	
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk	

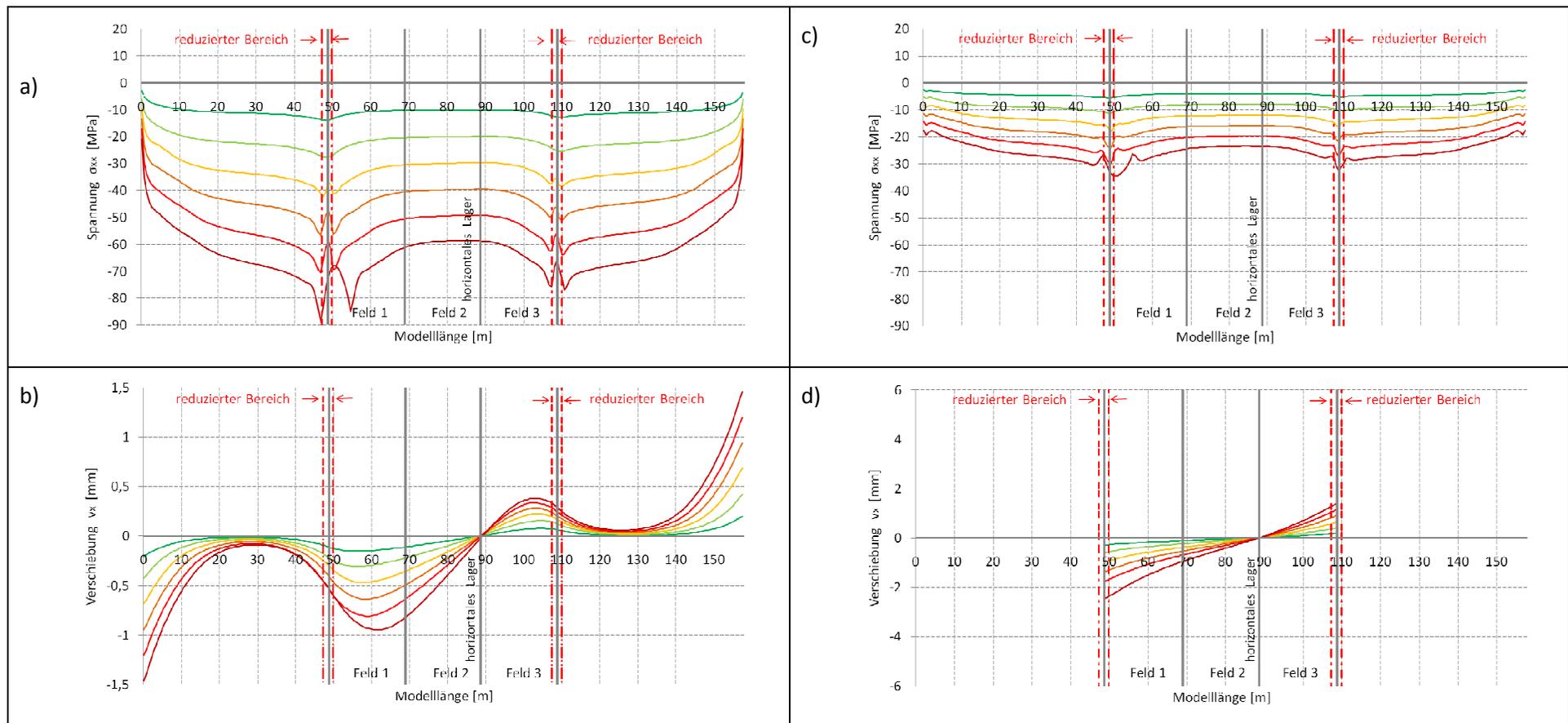


Diagramm 17a-d: 2 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 8°C Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/ ΔT Tragwerk 1,3K 9,3°K/2,7K 14,0K/4,0K 18,7K/5,3K 23,3K/6,7K 28,0K/8,0K

a) Spannung [MPa] in der Schiene oben

c) Verschiebung [mm] Schiene

b) Spannung [MPa] in der Schiene unten

d) Verschiebung [mm] Tragwerk

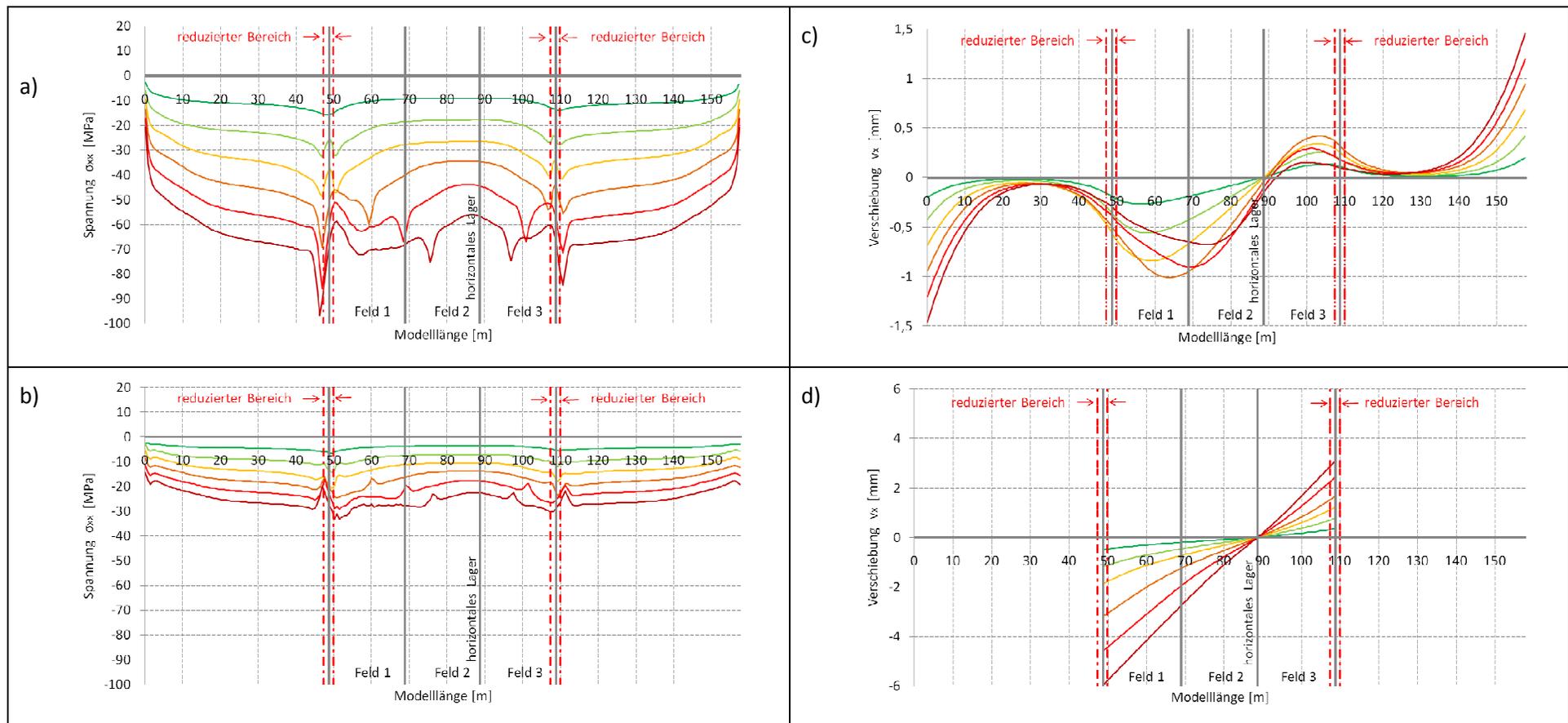


Diagramm 18a-d: 2 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 14°C Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/	ΔT Tragwerk 2,3K	9,3°K/4,7K	14,0K/7,0K	18,7K/9,3K	23,3K/11,7K	28,0K/14,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

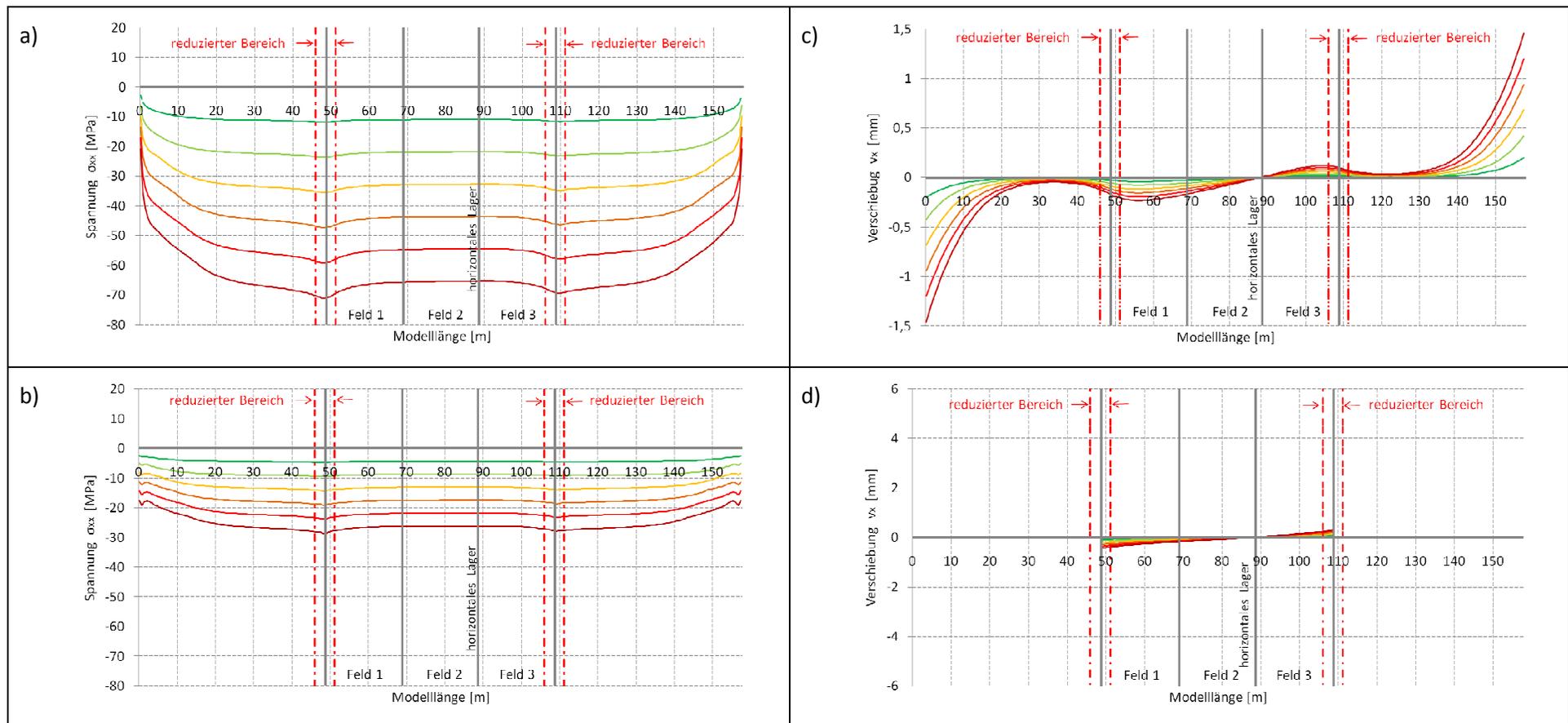


Diagramm 19a-d: 4 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 2°C Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/	ΔT Tragwerk 0,3K	9,3°K/0,7K	14,0K/1,0K	18,7K/1,3K	23,3K/1,7K	28,0K/2,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

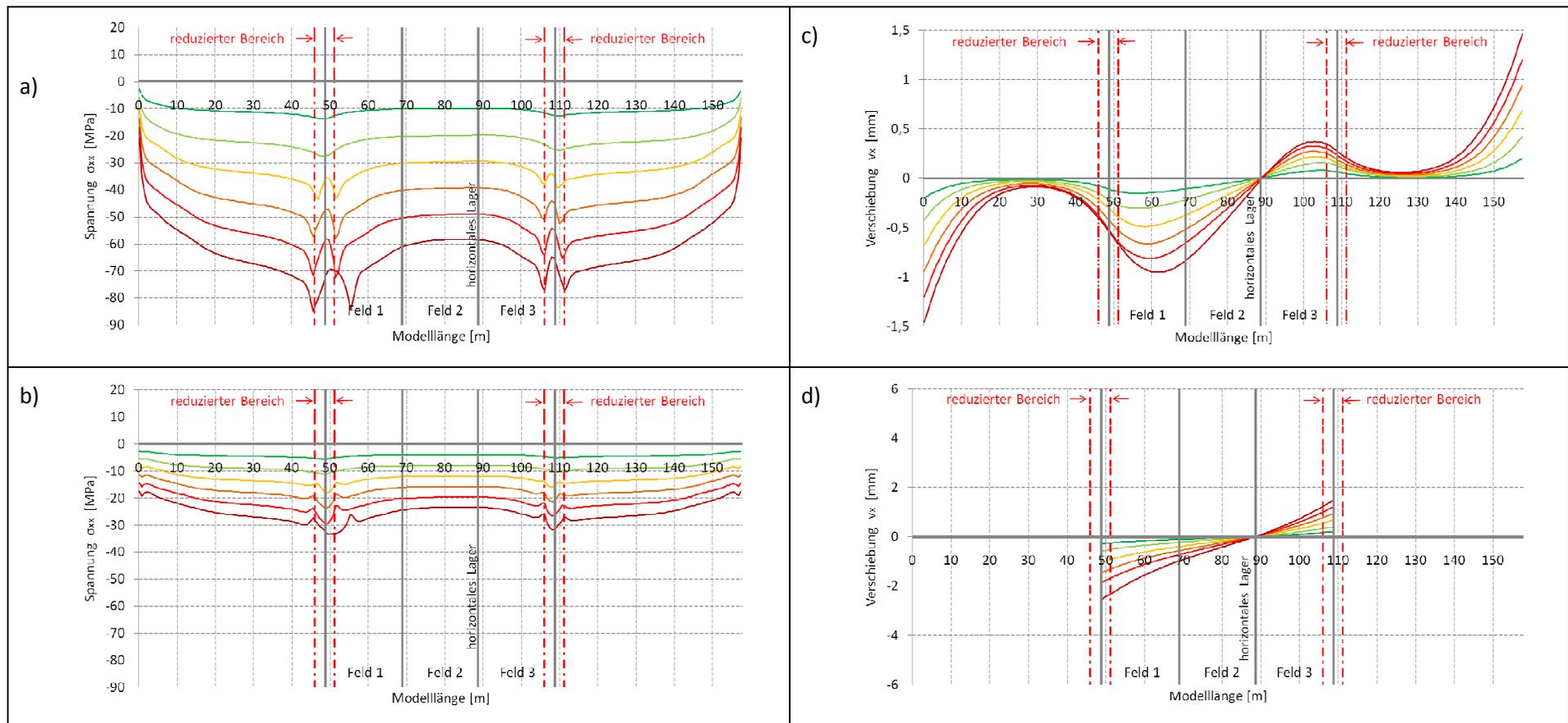


Diagramm 20a-d: 4 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 8°C Schiene 28°C

ΔT Schiene 4,6K/	ΔT Tragwerk 1,3K	9,3°K/2,7K	14,0K/4,0K	18,7K/5,3K	23,3K/6,7K	28,0K/8,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene		
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk		

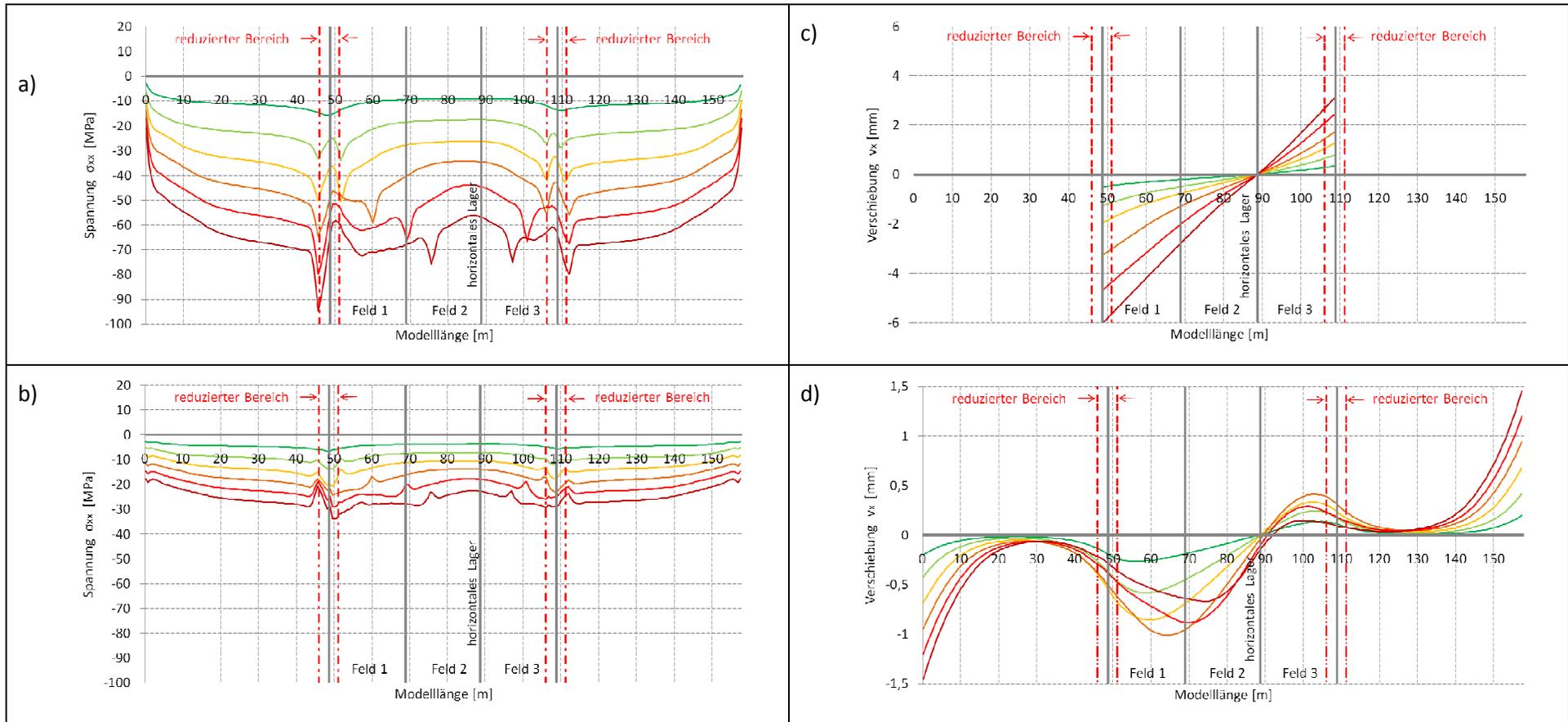


Diagramm 21a-d: 4 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 14°C Schiene 28°C

<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> </div>	ΔT Schiene 4,6K/	ΔT Tragwerk 2,3K	9,3°K/4,7K	14,0K/7,0K	18,7K/9,3K	23,3K/11,7K	28,0K/14,0K
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben		c) Verschiebung [mm] Schiene					
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk			

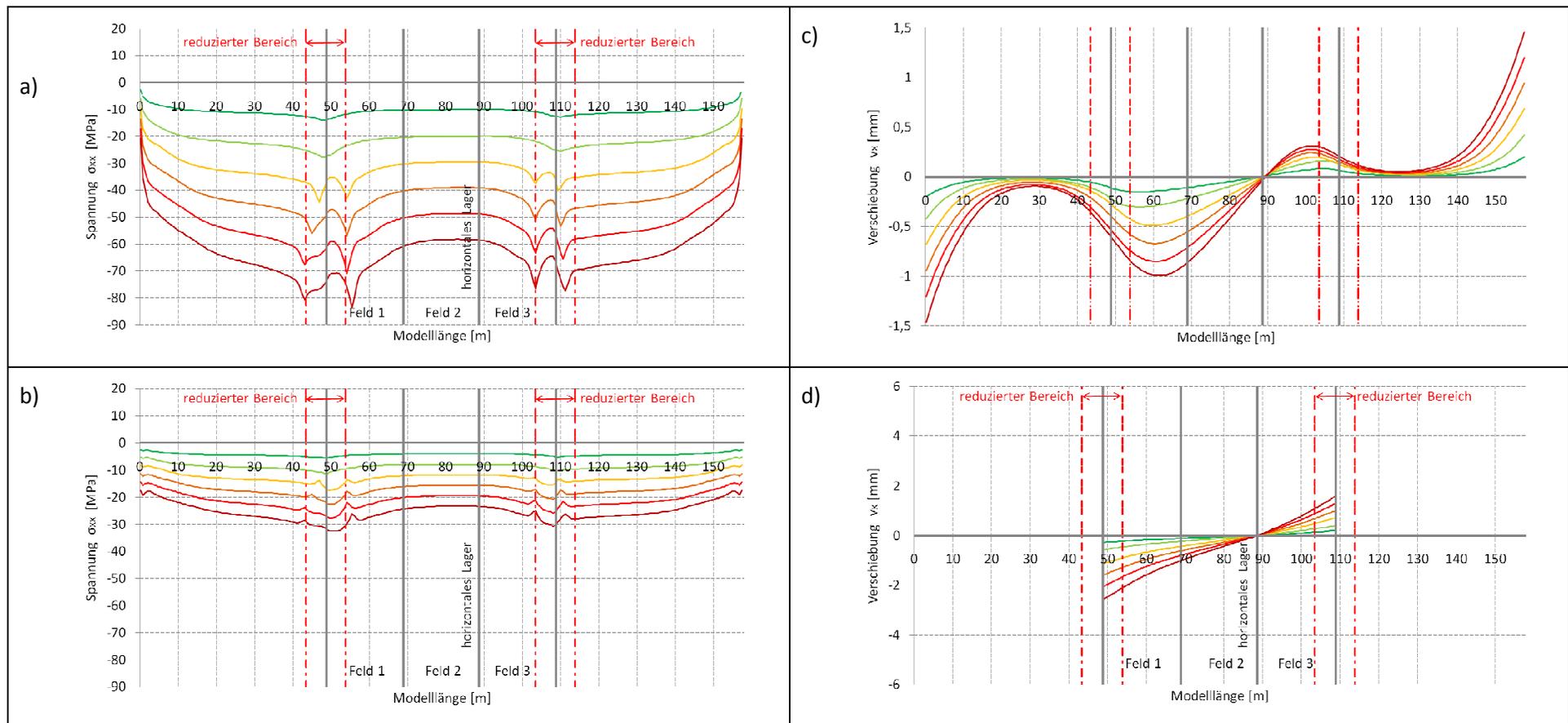


Diagramm 23a-d: 8 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 8°C Schiene 28°C

—————		—————		—————		—————		—————		—————	
ΔT Schiene	4,6K/	ΔT Tragwerk	1,3K	9,3°K/2,7K	14,0K/4,0K	18,7K/5,3K	23,3K/6,7K	28,0K/8,0K			
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben					c) Verschiebung [mm] Schiene						
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten					d) Verschiebung [mm] Tragwerk						

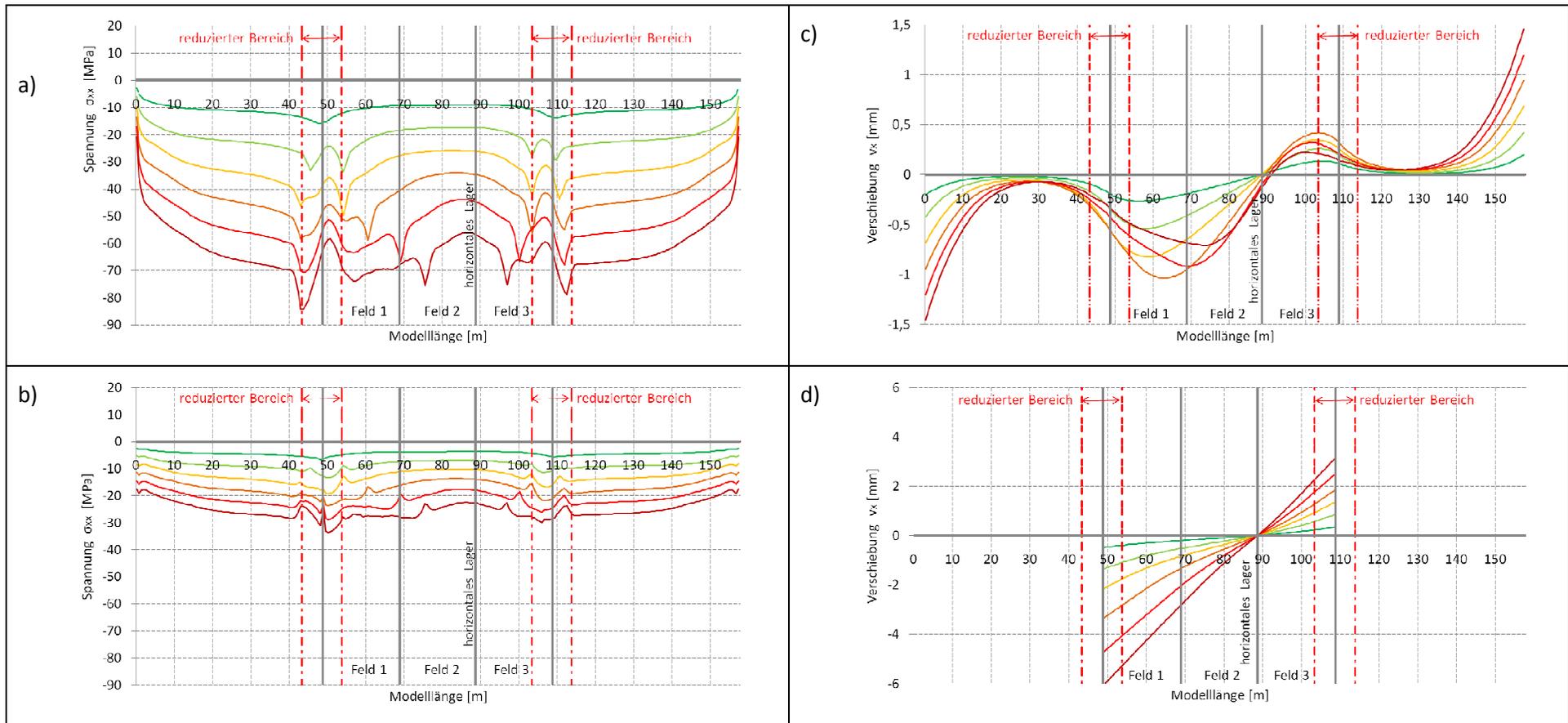


Diagramm 24a-d: 8 Höcker reduziert - Erwärmung: Tragwerk 14°C Schiene 28°C

<p>— — — — —</p> <p>ΔT Schiene 4,6K/ ΔT Tragwerk 2,3K 9,3°K/4,7K 14,0K/7,0K 18,7K/9,3K 23,3K/11,7K 28,0K/14,0K</p>	<p>a) Spannung [MPa] in der Schiene oben</p>	<p>c) Verschiebung [mm] Schiene</p>
<p>b) Spannung [MPa] in der Schiene unten</p>	<p>d) Verschiebung [mm] Tragwerk</p>	

9.1.6 Modell E - Temperatur und Bremsen

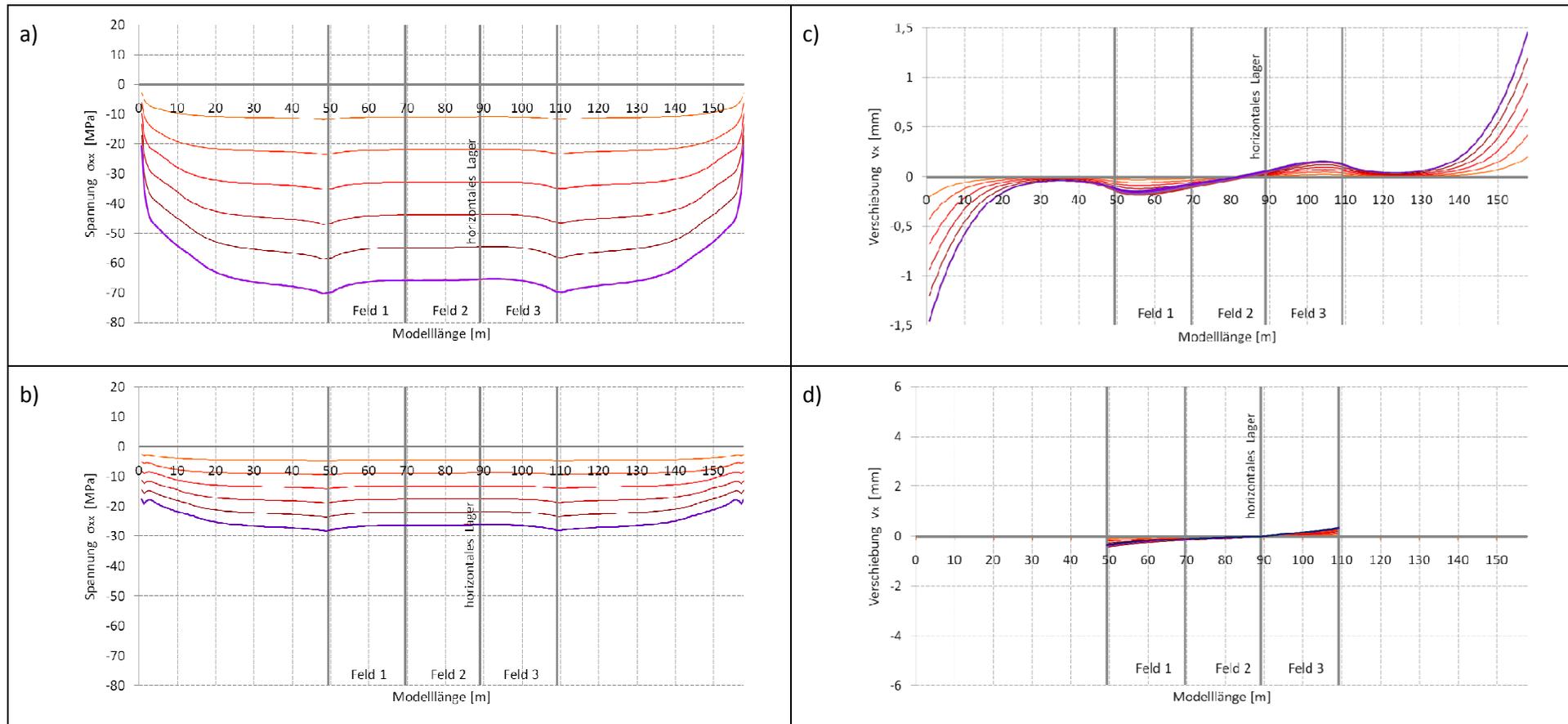


Diagramm 25a-d: Temperatur und Bremsen: Tragwerk -2°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K/	ΔT Tragwerk -0,3K	-9,3°K/-0,7K	-14,0K/-1,0K	-18,7K/-1,3K	-23,3K/-1,7K	-28,0K/-2,0K	Bremslast
a) Spannung [MPa] in der Schiene oben				c) Verschiebung [mm] Schiene			
b) Spannung [MPa] in der Schiene unten				d) Verschiebung [mm] Tragwerk			

9.1.7 Modell F: Temperatur und Durchbiegung

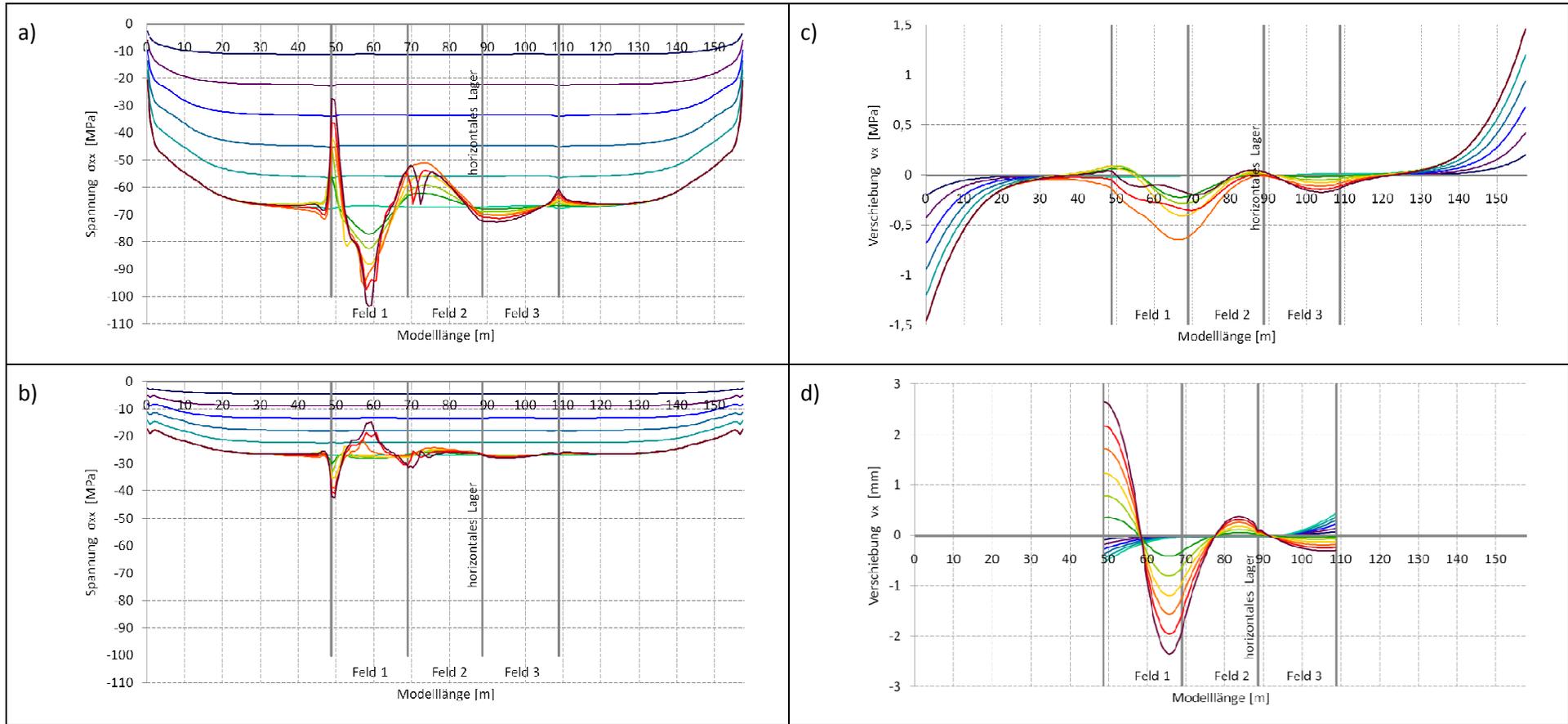


Diagramm 26a-d: Temperatur und Durchbiegung: Tragwerk -2°C Schiene -28°C

ΔT Schiene -4,6K	ΔT Tragwerk -0,3K	-9,3K/-0,7K	-14,0K/-1,0K	-18,7K/-1,3K	-23,3K/-1,7K	-28,0K/-2,0K	Biegung 0,7cm	1,3cm	2,0cm	2,7cm	3,3cm	4cm
--------------------------	---------------------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	-------	-------	-------	-------	-----

a) Spannung [MPa] in der Schiene oben
 b) Spannung [MPa] in der Schiene unten

c) Verschiebung [mm] Schiene
 d) Verschiebung [mm] Tragwerk

10 Anhang II - Lebenslauf

Lebenslauf



Persönliche Daten

Name	Walchshofer Christine
Wohnsitz	Fahnsdorf 11 3644 Emmersdorf
geboren am	23.03.1990
in	Melk

Schulbildung

2012 - 2015

Studium an der Universität für Bodenkultur Wien
Masterstudium - Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Spezialisierung: Geotechnik, Verkehrswegeplanung,
Tragwerksplanung, konstruktiver Wasserbau

Masterarbeit am Institut für konstruktiven Ingenieurbau zum Thema
"Theoretische und numerische Analysen des Durchschub- und
Längsverschiebewiderstandsverhaltens von Eisenbahnbrücken"
Betreuer: Dipl. Ing. Dr. habil Alfred Strauss

2008 - 2012

Studium an der Universität für Bodenkultur Wien
Bachelorstudium - Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Bachelorarbeit am Institut für konstruktiven Ingenieurbau zum Thema
"Holzverbindungen und ihre statische Bemessung"
Betreuer: Dipl. Ing Raimund Hilber; Dipl. Ing. Dr. habil Alfred Strauss

2004 – 2008

Stiftsgymnasium, Melk
Matura, bildnerischer Zweig

Studienbegleitende Tätigkeiten

2014 9 Wochen	Schuster ZT GmbH Ingenieurkonsulent für KTW, Wieselburg <u>Tätigkeit:</u> Planung von Retentionsbecken, Kanal- und Wasserversorgungsleitungen, Detailplanung Wasserversorgung
2010 – 2014	Institut für Mathematik , Universität für Bodenkultur Wien <u>Tätigkeit:</u> CAD Tutor und Trainer; wöchentlich Übungsvorlesungen halten zum Thema technische Geometrie und AutoCAD
2013 7 Wochen	Schimetta Ziviltechnik , Zentrale Wien Tragwerksplanung <u>Tätigkeit:</u> Bewehrungs- und Schalungspläne zeichnen
2012 6 Wochen	Schimetta Ziviltechnik , vor Ort auf der Baustelle, Örtliche Bauaufsicht Generalsanierung A2 – Steinberg <u>Tätigkeit:</u> Unterstützung der ÖBA, Prüfungsabnahme (Auszugversuch, dyn. Plattendruckversuch), Aufmessen, Baustellendokumentation
2011 2 Wochen	Hochtief constructions austria , vor Ort auf der Baustelle Hauptbahnhof Salzburg <u>Tätigkeit:</u> Baustellendokumentation
2008 - 2011 jedes Jahr 4 Wochen	Hochtief constructions austria , Zentrale Wien, je 1 Monat Unterstützung der Kalkulation <u>Tätigkeit:</u> Unterstützung der Kalkulanten, Massenermittlung, Recherchen
2008	NÖ Landwirtschaftskammer , St.Pölten, 4 Wochen Abteilung Betriebswirtschaft

Zusätzliche Qualifikationen

2012	Ausbildung zur Sprengbefugten MS – Office, AutoCAD (sehr gute Kenntnisse) RFEM, ATENA, GiD, Ruck Zuck, ArcGIS (gute Kenntnisse) Englisch (gute Kenntnisse in Wort und Schrift)
------	---

Hobbies

Kunst (Ich male und verkaufe Acryl- Aquarell und Ölbilder)
Landwirtschaft der Eltern (guter Ausgleich für Zeit in der Natur)
Sport (Radfahren, Laufen, Wandern)

Literaturverzeichnis

- [1] ÖBB Infrarstruktur, "B45 Technische Richtlinie für Eisenbahnbrücken und sonstige Konstruktive Ingenieurbauwerke", 2011
- [2] iV2plus Vernetzungsplattform der FFG (www.ffg.at/verkehr) und des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien (Abt. III/I4), "MAGIT - Monitoring basierte Analyse der Gleis Tragwerk Interaktion", 2012
- [3] ÖNORM EN 1991-2, "Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke" Österreichisches Normungsinstitut, 2012
- [4] UIC 773-4, "Interaktion Gleis/ Brücke - Empfehlungen für die Berechnung", Internationaler Eisenbahnverband, 2001
- [5] DINA RUVIANA WIDARDA, S.T., Dissertation "Longitudinal forces in continuously welded rails due to nonlinear track-bridge interaction for loading sequences" (Arbeitstitel), 2009
- [6] KUPFER, R., Dissertation "Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften auf die Längsbewegung des Gleisrostes" (Arbeitstitel), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, 2004
- [7] MORITZ, R., Masterarbeit "Untersuchung der Gleis- Tragwerksinteraktion von Eisenbahn-Spannbetontragwerken auf Basis nichtlinearer Finite-Elemente-Analysen" (Arbeitstitel), 2012
- [8] STRAUSS, A., Präsentation im Rahmen der Arbeitsgruppe MAGIT "Monitoring basierte Analyse der Gleis Tragwerk Interaktion", 23.02.2015
- [9] Arbeitsgruppe MAGIT Präsentation "MQ40 Brücke über die L110 Ergebnispräsentation 27.03.2014", FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 2014
- [10] MEHLHORN, F., "Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [11] Matthews, V., "Bahnbau", "Vieweg+Teubner Verlag |Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011", 2011

- [12] FENDRICH, L.; FENGLER, W., "Handbuch Eisenbahninfrarstruktur - 2. Auflage", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [13] WERKLE, H., "Finite Elemente in der Baustatik", Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008
- [14] Prospekt "Slap Track Austria - System ÖBB-PORR elastisch gelagerte Gleisragplatte", Allgemeine Baugesellschaft – A. Porr Aktiengesellschaft, 2012
- [15] Prospekt "Schienenbefestigungssysteme für Betonschwellen - System W14", Vossloh Fastening Systems GmbH
- [16] L110, Ausführungspläne, ZT Büro DI WESTHAUSSER, W., 2005
- [17] L110, Monitoringdaten, Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH
- [18] VOS, J., "Schienenauszug an einem Werksgleisanschluss bei Steg im Wallis", <http://www.bahnbilder.de/bild/Schweiz~Bahntechnische+Einrichtungen+und+Kunstbauten~Gleise/359324/schienenauszug-an-einem-werksgleisanschluss-bei-steg.html>, BAHNBILDER.de, 2009
- [19] FEISS, M., "Schienenprofil nach UIC 60", http://www.9archiv.bplaced.net/9mm_lexikon_019.htm, 9mm.ch, 2015
- [20] Ruge, P; Trinks, C.; Muncke, M.; "Längskraftbeanspruchung von durchgehend geschweißten Schienen auf Brücken für Lastkombinationen", Bautechnik 81, 2004

Eidesstattliche Versicherung

Name: Walchshofer Vorname: Christine
Matrikel-Nr.: 0840739 Studiengang: 431

Hiermit versichere ich, Christine Walchshofer, an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel "Theoretische und numerische Analysen des Durchschub- und Längsverschiebewiderstandsverhaltens von Eisenbahnbrücken" selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der Hochschule der Medien Stuttgart) sowie die strafrechtlichen Folgen (siehe unten) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Auszug aus dem Strafgesetzbuch (StGB)

§ 156 StGB Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer von einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Ort, Datum

Unterschrift