

Christoph Oberlerchner, BSc

**Einfluss der Bettungssteifigkeiten auf die
Spannungsverteilung bei einfeldrigen,
tiefgegründeten Integralbrücken**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Michael Mayer, BSc

Institut für Betonbau

Lessingstraße 25, 8010 Graz

Graz, März 2021

Eidesstattliche Erklärung

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich über kurz oder lang während meines Studiums an der TU Graz begleitet haben.

Mein Dank gilt den Mitarbeitern des Instituts für Betonbau, insbesondere Herrn Univ. Prof. Dr. Ing. habil Nguyen Viet Tue. Danke für die Möglichkeit diese Arbeit in einem Bereich besonderen persönlichen Interesses zu verfassen.

Ein großes Dankeschön gilt meinem Betreuer, Herrn DI DI Michael Mayer. Danke für die tolle Betreuung und Unterstützung, die Du über die Monate hinweg geleistet hast und das große Engagement, das Du auch im besonderen Jahr 2020 an den Tag gelegt hast.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Karin und Walter und meinen Großeltern Helma und Kurt sowie Antonia, die mir diese langwierige Ausbildung ermöglicht haben. Danke für die große finanzielle und moralische Unterstützung zu jeder Zeit. Ebenso möchte ich mich bei meiner Schwester Kristin bedanken, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Danke euch allen für diesen außergewöhnlichen familiären Rückhalt und Zusammenhalt, der mir erlaubt hat, eine unbeschwerte und sorgenfreie Studienzeit zu genießen.

Danke an meine Studienkollegen Michael und Markus, die mir, einem Gymnasiasten ohne große technische Vorkenntnisse, beim Einstieg in dieses Studium und dem gemeinsamen Lernen eine sehr große Unterstützung waren. Auch den übrigen Kollegen meines Jahrgangs, Daniel, Daniel, Johann, Johannes und Martin, möchte ich mich für die gemeinsame Zeit und die miteinander erlebten Höhen und Tiefen der Studienzeit bedanken.

Zu guter Letzt gilt mein Dank den Mitgliedern des Stahlbauzeichensaals, die mit der Zeit zu Wegbegleitern und Freunden geworden sind. Danke euch allen für die unzähligen Erlebnisse und lustigen Abende, die meine Studienzeit zu einer unvergesslichen Zeit gemacht haben.

Euch allen ein herzliches Dankeschön!

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Parameterstudie an einfeldrigen, tiefgegründeten Integralbrücken unterschiedlicher Geometrien in unterschiedlich steifem Baugrund durchgeführt. Grundsätzlich werden dabei zwei unterschiedliche statische Systeme untersucht. Diese sind zum einen Systeme mit einreihiger Pfahlgründung und zum anderen Systeme mit zweireihiger Pfahlgründung je Widerlagerachse. Diese, als Grundsysteme bezeichneten, Systeme sind mit variablen Spannweiten, Widerlagerhöhen und Steifigkeiten des Baugrunds modelliert, ansonsten weisen sie die exakt gleichen Eingangsparameter auf.

Anhand der gewonnenen Schnittkräfte aus der FE-Berechnung an den wesentlichen Punkten der Brücke wird der Einfluss verschiedener Einzellastfälle ermittelt und analysiert. Die Punkte besonderen Interesses sind der Pfahlkopf, der Widerlagerfuß, das Rahmeneck und die Feldmitte des Überbaus.

Damit der Einfluss der Spannweite, der Widerlagerhöhe und des Steifemoduls auf die Spannungen besser veranschaulicht werden kann, werden die Anteile von Eigengewicht, Temperaturbeanspruchung, ständigem Erddruck und Verkehrsbelastung an der Gesamtspannung zufolge charakteristischer (seltener) Lastkombination im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt und grafisch dargestellt.

Die gewonnenen Ergebnisse identifizieren den Pfahlkopf als sensibelsten Punkt des Systems mit einreihiger Pfahlgründung und den Widerlagerfuß als jenen des Systems mit zweireihiger Pfahlgründung. Eine Änderung des Steifemoduls beeinflusst die Spannungsanteile der Einzellastfälle an diesen Punkten deutlich.

Abstract

Within the scope of this thesis a parametric study is conducted among rigid-frame bridges of numerous widths and heights, aiming to investigate the influence of various Young's moduli of the surrounding subsoil. Therefore two different static systems are defined. On the one hand a system with a deep foundation consisting of a single row of piles and on the other hand a double-row pile deep foundation beneath each abutment. These two categories of static systems, furtherly adressed as main systems, are given the exact same geometric features and basic parameters but have different widths, heights and Young's moduli.

Using the internal forces provided by the FE-calculation, stresses in the critical sections of the bridge are obtained and the influence of various single loading cases is analysed. These critical sections are the transitions between piles and foundation, foundation and abutment, abutment and superstructure, as well as the centre of the superstructure.

In order to analyse the influence of the bridge's width, height and different Young's moduli the shares of self-weight, temperature load, resting earth pressure and traffic in the total stress due to the rare load combination in serviceability limit state are detected and visualised.

Looking at the results of this thesis the transition between pile and foundation can be adressed as the most critical and sensitive section of a rigid-frame bridge with a single row of piles in its deep foundation. When it comes to a system with a double-row pile deep foundation, the transition between foundation and abutment is the most sensitive section. A change of the Young's modulus has a massive impact on the results of local stresses in these sections.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage und Motivation	1
1.2. Zielsetzung	1
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1. Boden-Bauwerk-Interaktion	2
2.1.1. Bettungsmodulverfahren	4
2.1.2. Steifemodulverfahren	5
2.2. Stoffgesetze	5
2.2.1. Linear-elastisches Materialverhalten	6
2.2.2. Modell nach Mohr-Coulomb	6
2.2.3. HSS-Modell	7
3. Stand der Technik zu Pfahlgründungen	9
3.1. Allgemeines	9
3.2. Quer zur Pfahlachse beanspruchte Einzelpfähle	10
3.3. Quer zur Pfahlachse beanspruchte Pfahlgruppen	11
3.4. Modellierung mittels Finite Elemente Software	12
4. Durchführung der Parameterstudie	13
4.1. Festlegung der Eingangsparameter	13
4.2. Modellbildung	17
4.2.1. Brückenbauwerk	17
4.2.2. Baugrund	18
4.2.3. Einwirkungen	20
4.3. Ermittlung der Steifemoduln	29
4.4. Auswertung der Ergebnisse	31
5. Ergebnisse der Einzellastfälle	33
5.1. Grundsystem 1	34
5.1.1. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 5,0$ m	34
5.1.2. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 7,5$ m	41
5.1.3. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 10,0$ m	48
5.1.4. Interpretation	55

5.2. Grundsysteem 2	58
5.2.1. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 5,0$ m	58
5.2.2. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 7,5$ m	65
5.2.3. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 10,0$ m	72
5.2.4. Interpretation	79
6. Auswertung der Spannungsanteile	82
6.1. Grundsysteem 1	84
6.2. Grundsysteem 2	103
7. Zusammenfassung und Ausblick	128
7.1. System mit einreihiger Pfahlreihe	128
7.2. System mit zweireihiger Pfahlreihe	130
7.3. Ausblick	132
Literaturverzeichnis	133
Abbildungsverzeichnis	135
Tabellenverzeichnis	140
A. Anhang - Auswertung der Spannungsanteile für Grundsysteem 1	141
B. Anhang - Auswertung der Spannungsanteile für Grundsysteem 2	147
C. Anhang - Ergebnisse der Einzellastfälle für Grundsysteem 1	153
D. Anhang - Ergebnisse der Einzellastfälle für Grundsysteem 2	177

Formelzeichen und Abkürzungen

Große Buchstaben

D_p	[m]	Bohrpfahldurchmesser
E	[kN/m ²]	Elastizitätsmodul
E_0	[kN]	Resultierende des Erdruhedrucks
E_a	[kN]	Resultierende des aktiven Erddrucks
E_{cm}	[kN/m ²]	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons als Sekante
E_{mob}	[kN]	Resultierende des mobilisierten Erddrucks
E_p	[kN]	Resultierende des passiven Erddrucks
E_s	[kN/m ²]	Steifemodul des Bodens
$E_{s,k}$	[kN/m ²]	charakt. Steifemodul in Richtung der Pfahlverschiebung
H_{wl}	[m]	Widerlagerhöhe
$H_{üb}$	[m]	Höhe des Überbaus
K_i	[-]	Erddruckbeiwert
L_{sp}	[m]	Brückenspannweite
T_0	[°C]	Einbautemperatur
T_M	[°C]	lineare Temperatureinwirkung
T_{max}	[°C]	jahreszeitliches Außenlufttemperaturmaximum
T_{min}	[°C]	jahreszeitliches Außenlufttemperaturminimum
T_N	[°C]	gleichmäßige Temperatureinwirkung

Kleine Buchstaben

a	[m]	Pfahlachsabstand
b_k	[m]	maßgebender charakt. Wert der Einflussbreite
b_{FS}	[m]	Fahrstreifenbreite
c	[kN/m ²]	Kohäsion
f_{ctm}	[MPa]	mittlere zentrische Zugfestigkeit
k_i	[kN/m ³]	Bettungssteifigkeit am Punkt i
$k_{s,k}$	[kN/m ³]	charakt. Wert des horizontalen Bettungsmoduls
$k_{tr,k}$	[kN/m ³]	horizontaler Bettungsmodul
u_i	[mm]	Verformung am Punkt i
$u_{hor,max}$	[mm]	maximale horizontale Pfahlkopfverschiebung
z	[m]	Bodentiefe unter der Geländeoberkante

Griechische Buchstaben

$\Delta T_{n,con}$	[°C]	konstanter Temperaturanteil bei Tragwerksverkürzung
$\Delta T_{n,S}$	[°C]	Unterschied der konst. Anteile zw. ÜB und WL (Sommer)
$\Delta T_{n,W}$	[°C]	Unterschied der konst. Anteile zw. ÜB und WL (Winter)
$\Delta T_{n,exp}$	[°C]	konstanter Temperaturanteil bei Tragwerksausdehnung
$\Delta T_{m,cool}$	[°C]	linear-veränderlicher Temperaturanteil
$\Delta T_{m,heat}$	[°C]	linear-veränderlicher Temperaturanteil
$\Delta T_{m,S}$	[°C]	veränderl. Anteil durch Erdberührung des WL (Sommer)
$\Delta T_{m,W}$	[°C]	veränderl. Anteil durch Erdberührung des WL (Winter)
α_i	[-]	Abminderungsfaktor für den jeweiligen Einzelpfahl
α_L	[-]	Faktor zufolge Pfahlachsabstand in Krafrichtung
α_Q	[-]	Faktor zufolge Pfahlachsabstand normal zur Krafrichtung
γ	[kN/m ³]	Wichte
ϵ	[-]	Dehnung
ν	[-]	Querkontraktionszahl (Poisson'sche Zahl)
σ	[kN/m ²]	Biegenormalspannung
$\sigma_{außen}$	[kN/m ²]	Biegenormalspannung an der Außenseite des Bauwerks
σ_{char}	[kN/m ²]	Biegenormalspannung zufolge charakt. Lastkombination
σ_i	[kN/m ²]	Biegenormalspannung an einem Punkt i
σ_{innen}	[kN/m ²]	Biegenormalspannung an der Innenseite des Bauwerks
τ	[kN/m ²]	Schubspannung
φ	[-]	Kriechzahl
φ'	[°]	innerer Reibungswinkel des Baugrunds
ψ_0	[-]	Komb.beiwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
ψ	[°]	Dilatanzwinkel

Abkürzungen

BBI	Boden-Bauwerk-Interaktion
BP	Bohrprofil
HS	Hauptsystem
OK	Oberkante (Gelände, Halbraum)
SLS	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
TS	Doppelachs-Tandemlast zufolge Verkehr
UDL	Flächenlast zufolge Verkehr
US	Untersystem
ÜB	Überbau
WL	Widerlager

1. Einleitung

Die Entwicklung und Anwendung der Finite Elemente Methode eröffnete in den letzten Jahrzehnten neue Möglichkeiten im Ingenieurbau. Dadurch wurden integrale Brücken sowohl in der Planung als auch in der Ausführung wirtschaftlich. Während konventionelle Brücken im Bereich der Widerlager und Stützen verschiebbliche Auflager besitzen, sind bei einer Integralbrücke Widerlager und Stützen monolithisch (biegesteif) mit dem Überbau verbunden. Auftretende Dehnungen, zum Beispiel durch Temperaturänderungen, bewirken somit Zwangbeanspruchungen im Tragwerk. Daher ist es von besonderer Wichtigkeit, dass die Interaktion zwischen Boden und Bauwerk möglichst realitätsnah abgebildet wird.

Eine überschätzte Steifigkeit des Baugrundes führt dazu, dass im Rechenmodell deutlich höhere Zwangkräfte auftreten als in Wirklichkeit vorhanden sind, was eine höhere Bewehrungsmenge zur Folge hat. Somit ist eine realistische Berücksichtigung des Baugrundes die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Bemessung von integralen Brückenbauwerken.

1.1. Ausgangslage und Motivation

Bei tiefgegründeten, integralen Brücken muss, bedingt durch die Bewehrungsführung, drei geometrischen Bereichen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Diese sind die Übergänge von der Tiefgründung zur Fundamentplatte, die von der Fundamentplatte zur Widerlagerwand sowie die von der Widerlagerwand zum Überbau. Die vorliegende Arbeit dient dazu, den Kraftfluss in den oben genannten Bereichen besser nachvollziehen zu können. Weiters sollen die Spannungen, die von einzelnen Lastfällen hervorgerufen werden, veranschaulicht werden.

1.2. Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mittels einer Parameterstudie den individuellen Einfluss der einzelnen Lastfälle auf die Spannungen in den kritischen Übergangsbereichen des Bauwerks auszuwerten und grafisch darzustellen. Dabei wird besonderer Wert darauf gelegt, realistische Annahmen für die Steifigkeiten des Baugrundes und für die Geometrie des Brückenbauwerks zu treffen.

2. Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden allgemeine, theoretische Grundlagen der Boden-Bauwerk-Interaktion beschrieben. Außerdem werden der Vollständigkeit halber einige der gängigen Stoffgesetze erläutert, die in der Geotechnik zur Anwendung kommen, und bei der numerischen Berechnung verwendet werden.

2.1. Boden-Bauwerk-Interaktion

Bei der Interaktion zwischen dem Baugrund (Boden) und dem Bauwerk, künftig mit BBI abgekürzt, kommt es insbesondere auf das Steifigkeitsverhältnis zwischen diesen beiden an. Wie bereits in Kapitel 1 kurz angeführt, ist es im Ingenieurbau unumgänglich, die Modellierung so realitätsnah wie möglich zu gestalten. In diesem Kapitel werden die gängigen Verfahren zur Beschreibung der BBI erläutert.

Im Zuge der Lastabtragung werden die wirkenden Beanspruchungen vom Bauwerk in den angrenzenden Baugrund abgeleitet. Dadurch entstehen Verformungen im Baugrund, welche wiederum die Lastabtragung verändern und zu Umlagerungen führen können [Universität Siegen, 2018].

In dieser Arbeit werden ausschließlich integrale Brückenbauwerke betrachtet, wodurch der BBI besonders große Bedeutung zukommt. Bei integralen Brücken handelt es sich um statisch unbestimmte Systeme. Das bedeutet, dass bei der Lastabtragung jene Bereiche mit großer Steifigkeit größere Beanspruchung erfahren als Bereiche mit vergleichsweise geringerer Steifigkeit. Insofern ist es notwendig, die Steifigkeit der an das Bauwerk angrenzenden Bodenschichten realistisch zu modellieren, um die Lastabtragung auch realitätsnah abzubilden. Bei unzureichender Erfassung der Bodensteifigkeit wird dem Baugrund zu viel und gleichzeitig dem Bauwerk zu wenig Steifigkeit zugeordnet oder umgekehrt. Dadurch fallen die rechnerisch ermittelten Verformungen und Spannungen geringer oder höher aus als jene, die in der Realität auftreten.

Integralbrücken werden im Übergangsbereich zwischen Straße und Brücke monolithisch ausgeführt. Die Übergangskonstruktion und die verschieblichen Auflager im Bereich von Widerlagern und Stützen oder Pfeilern zum Ausgleich von natürlich auftretenden Dehnungen entfallen, was deutlich weniger Wartungsaufwand bedeutet. Auf das Thema der Fahrbahnübergänge bei Integralbrücken wird im Weiteren allerdings nicht eingegangen. Diese Dehnungen können sich bei integralen Brücken nicht frei einstellen, es kommt zu

Zwangspannungen. Diese müssen vom Bauwerk in den Baugrund abgeleitet werden, wodurch wiederum die BBI an Bedeutung gewinnt.

Wenngleich Flachgründungen in dieser Arbeit nicht untersucht werden, dienen die folgenden Abbildungen und Beschreibungen des Einflusses der Biegesteifigkeit sowie der Berechnungsverfahren anhand von Flachgründungen dem besseren Verständnis der BBI. Wie Abbildung 2.1 verdeutlicht, stellen sich bei biegesteifer Gründung (links) und biegeweicher Gründung (rechts) unterschiedliche Setzungsmulden ein. Dabei passt sich die weiche Gründung ohne auftretende Spannungsumlagerungen der Setzungslinie an. Der ebene Setzungsverlauf zufolge steifer Gründung führt zu Spannungsumlagerungen und erkennbaren Spannungsspitzen in den Randbereichen. Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, wird eine glatte Unterseite der Gründungen angenommen, wodurch es zu keinen Schubspannungen in der Fuge zwischen Baugrund und Bauwerk kommt [Mayer, 2015].

Eine weitere bedeutende Annahme ist, dass Zugspannungen zwischen Baugrund und Bauwerk nicht zulässig sind, da der Boden diese nicht aufnehmen kann [Universität Siegen, 2018].

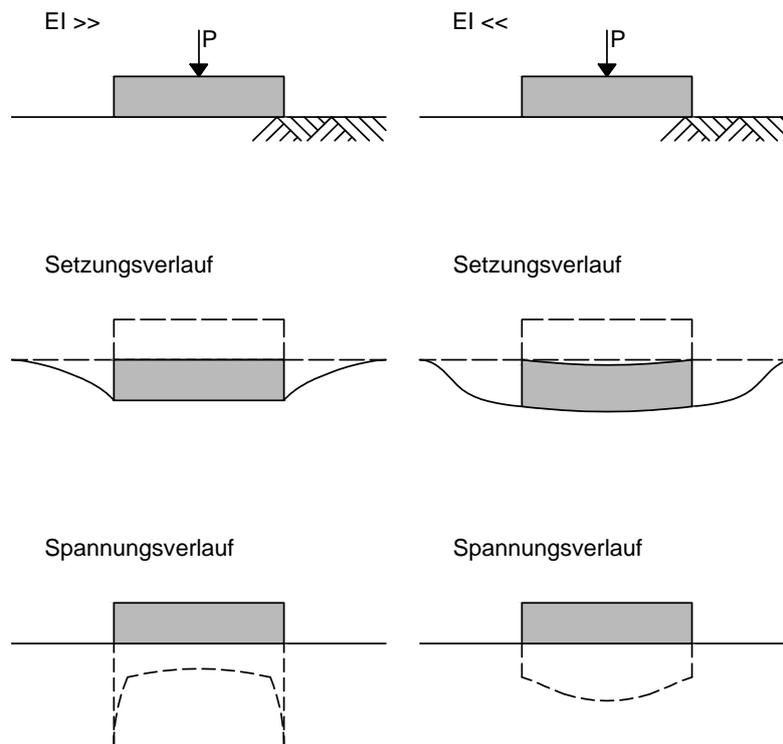
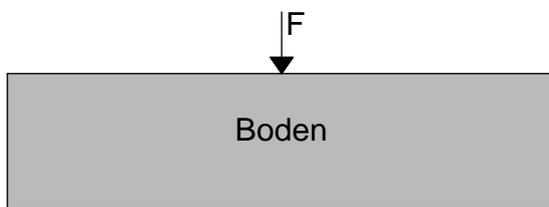


Abbildung 2.1.: Setzungs- und Spannungsverläufe für biegesteife (l) bzw. biegeweiche (r) Gründung nach [Mayer, 2015]

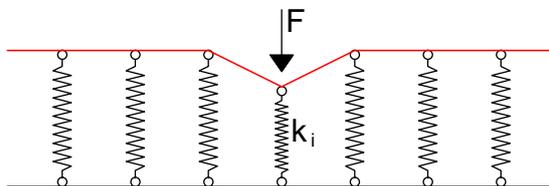
2.1.1. Bettungsmodulverfahren

Beim Bettungsmodulverfahren wird die Steifigkeit des Baugrundes in die statische Berechnung einbezogen, indem in regelmäßigen Abständen Federn modelliert werden. Jede Feder besitzt eine individuelle Federsteifigkeit, die sich berechnen lässt, indem die vorhandene Spannung und die auftretende Verformung in eben jenem Punkt ins Verhältnis gesetzt werden, wie Gleichung 2.1 zeigt. Diese Federsteifigkeit ist allerdings kein Bodenparameter und wird im Bodengutachten nicht angegeben, sondern muss für jeden Lastfall eigens ermittelt werden [Mayer, 2015].

Die Federn, die die Nachgiebigkeit des Baugrunds darstellen sollen, wirken jedoch unabhängig voneinander, wie Abbildung 2.2 zeigt. Die Setzungsmulde kann somit nicht richtig beschrieben werden [Universität Siegen, 2018].



$$k_i = \frac{\sigma_i}{u_i} \quad (2.1)$$



- k_i Bettungssteifigkeit am Punkt i
- σ_i Spannung am Punkt i
- u_i Verformung am Punkt i

Abbildung 2.2.: Bettungsmodulverfahren
nach [Universität Siegen,
2018]

Dieses Verfahren eignet sich also nur bedingt für umfangreiche Berechnungen, da man einen sehr langwierigen, iterativen Prozess durchlaufen muss, um brauchbare Ergebnisse zu bekommen.

Für diese Arbeit ist das Bettungsmodulverfahren jedenfalls ungeeignet, da das Ziel, mit einem möglichst allgemeinen und automatisierten FE-Modell zu arbeiten, so nicht realisierbar ist. Daher wird auf das nachfolgend beschriebene Steifemodulverfahren zurückgegriffen.

2.1.2. Steifemodulverfahren

Das Steifemodulverfahren setzt voraus, dass die Verformung der Fundamentplatte jener der Setzungsmulde entspricht [Mayer, 2015]. Im Unterschied zum Bettungsmodulverfahren wird der Boden hier durch regelmäßig verteilte, miteinander gekoppelte Federn modelliert. Wie in Abbildung 2.3 ersichtlich, verformt sich nicht nur jene Feder, die der Last am nächsten ist, sondern die Federn verformen sich abhängig voneinander, wodurch die Setzungsmulde näherungsweise beschreiben werden kann [Universität Siegen, 2018].

Die Modellierung des Baugrunds entspricht der eines linear-elastischen, isotropen Halbraums. Hierbei wird der Baugrund als unendlich ausgedehnte Schicht mit vordefiniertem Steifigkeitsverlauf abgebildet.

Aufgrund des großen Rechenaufwands, den das Steifemodulverfahren mit sich bringt, ist der Einsatz von geeigneten FE-Programmen notwendig.

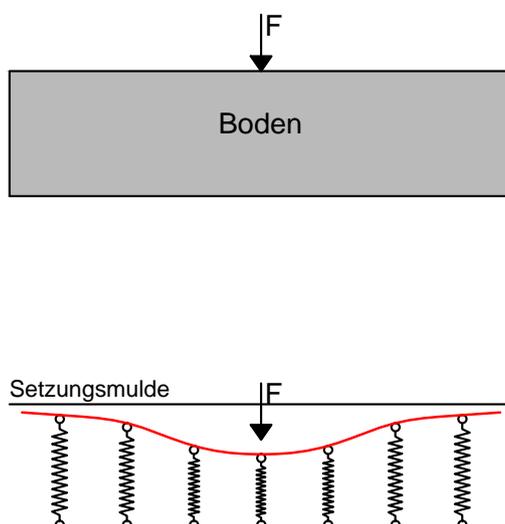


Abbildung 2.3.: Steifemodulverfahren nach [Universität Siegen, 2018]

2.2. Stoffgesetze

In weiterer Folge werden der Vollständigkeit halber einige grundlegende Materialgesetze des Ingenieurbaus bzw. der Geotechnik beschrieben. Dabei sollen die Unterschiede aber nur oberflächlich erläutert werden. Eine umfassendere Beschreibung bietet unter anderem Kempfert (2009).

2.2.1. Linear-elastisches Materialverhalten

Das linear-elastische Materialverhalten basiert auf dem, in Gleichung 2.2 dargestellten, Hook'schen Gesetz.

$$\sigma = E * \epsilon \quad (2.2)$$

mit

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

- σ Biegenormalspannung
- E Elastizitätsmodul
- ϵ Dehnung

Hierbei werden der Elastizitätsmodul E und die Querkontraktionszahl (Poisson'sche Zahl) ν benötigt. Weiters gilt, dass Verformungen reversibel sind und nicht zwischen Erstbelastungsast und Wiederbelastungsast unterschieden wird. In der Regel eignet sich dieses Modell jedoch nicht, um den Baustoff Boden zu beschreiben [Mayer, 2015].

2.2.2. Modell nach Mohr-Coulomb

Beim Mohr-Coulomb Modell handelt es sich um ein linear-elastisches, ideal-plastisches Materialgesetz [Mayer, 2015]. Dieses eignet sich nur dazu, das Versagen des Baugrunds zu beschreiben. Es wird häufig verwendet, um das Bodenverhalten näherungsweise zu beschreiben, jedoch liefert es keine Ergebnisse zum Verhalten des Baugrundes, bevor das Materialversagen eintritt. Die auftretende Gesamtverformung setzt sich dabei aus zwei Anteilen zusammen. Diese sind zum einen ein elastischer, reversibler Anteil und zum anderen ein plastischer, irreversibler Anteil [Mayer, 2015].

$$\epsilon = \epsilon^{el} + \epsilon^{pl}$$

Die Steifigkeit einer Bodenschicht wird entweder als konstant mit der Tiefe zunehmend oder als Durchschnittswert konstant angenommen. Es gilt das Mohr-Coulomb Bruchkriterium nach Gleichung 2.3, welches besagt, dass ein Versagen des Bodenkörpers dann eintritt, wenn die Schubspannungen aus einer äußeren Belastung die Festigkeitsgrenze des inneren Scherwiderstands übersteigen. In Abbildung 2.4 wird das Mohr-Coulomb Bruchkriterium als σ - τ Diagramm in 2-D dargestellt.

$$\tau = c + \sigma * \tan(\varphi') \quad (2.3)$$

- τ Schubspannung
- c Kohäsion
- σ Biegenormalspannung
- φ' Reibungswinkel

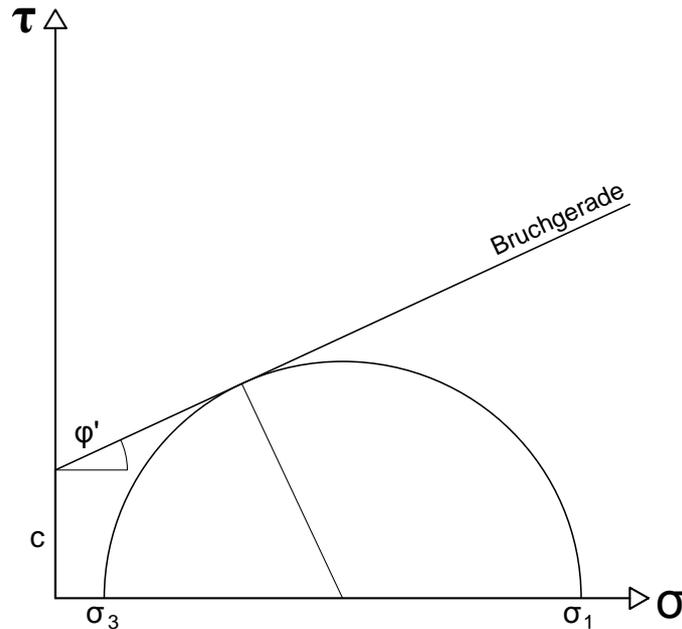


Abbildung 2.4.: Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb in 2-D

Das Mohr-Coulomb Modell basiert auf fünf Parametern, die mittels Versuchen ermittelt werden können. Diese sind der Elastizitätsmodul \mathbf{E} , die Querkontraktionszahl ν , die Kohäsion c , der innere Reibungswinkel des Bodens φ' sowie der Dilatanzwinkel ψ .

Für die vorliegende Arbeit lässt sich dieses Modell jedoch nicht verwenden, da es nicht brauchbar ist, um (kleine) Verformungen des Baugrundes im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) zu untersuchen.

2.2.3. HSS-Modell

Das „Hardening Soil model with Small-strain stiffness“ ist die Weiterentwicklung des ursprünglichen „Hardening Soil model“ (HS-Modell). Das HS-Modell berücksichtigt die spannungsabhängige Verformung des Bodens.

Im Vergleich zum HS-Modell ermöglicht die Anwendung des HSS-Modells eine realistische Abbildung von sehr kleinen Verformungen (small strain). Es handelt sich dabei um ein elasto-plastisches Materialverhalten mit Verfestigungsansatz und erlaubt, unterschiedliche Steifigkeiten bei Erst- und Wiederbelastung zu berücksichtigen [Mayer, 2015]. Das Materi-

alverhalten nach dem HSS-Modell beruht auf einer hyperbolischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung und wird mittels drainiertem Triaxialtests ermittelt. Auch hier gilt das M-C Bruchkriterium, allerdings lassen sich die Bodensteifigkeiten, im Unterschied zum Modell nach Mohr-Coulomb, in Abhängigkeit der Spannungen beschreiben [Mayer, 2015]. Die nötigen Parameter, um den Boden mittels HSS-Modell beschreiben zu können, sind nachfolgend in Tabelle 2.1 angeführt.

Tabelle 2.1.: Eingangparameter für das HSS-Modell

c	Kohäsion	[kPa]
φ'	Reibungswinkel	[°]
ψ	Dilatanzwinkel	[°]
E_{50}^{ref}	Sekantenmodul bei 50% der max. Deviatorspannung aus Triaxialtest	[kPa]
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	Tangentenmodul aus Ödometerversuch	[kPa]
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	Ent- bzw. Wiederbelastungsmodul	[kPa]
m	Potenzzahl zur Beschreibung der spannungsabhängigen Steifigkeit	[-]
ν_{ur}	Poisson'sche Zahl für Ent- bzw. Wiederbelastung	[-]
p^{ref}	Referenzspannung	[kPa]
K_0	K_0 -Wert für entlasteten Zustand	[-]
G_0	Schubmodul bei sehr kleinen Dehnungen	[kPa]
$\gamma_{0,7}$	Scherdehnung bei $G = 0,7 \cdot G_0$	[-]

Dieses Modell eignet sich aufgrund der Vielzahl an Eingangswerten grundsätzlich nicht für die Anwendung in der Tragwerksplanung und wird auch in dieser Arbeit nicht angewendet. Die meisten der in Tabelle 2.1 genannten Größen werden auch nicht in Bodengutachten angegeben. Die notwendigen Versuche zu deren Ermittlung sind sowohl kostspielig als auch langwierig, verglichen mit herkömmlichen Bodengutachten.

3. Stand der Technik zu Pfahlgründungen

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie Pfahlgründungen nach derzeitigem Stand der Technik im Rahmen der Tragwerksplanung modelliert werden können.

In der Regel wird der Baugrund vereinfacht durch Federn beschrieben, um die Boden Bauwerk- Interaktion berücksichtigen zu können. Pfahlgründungen werden dabei vereinfacht durch vertikale und horizontale Bettungsmoduln modelliert. Durch Ansetzen unterschiedlicher horizontaler Moduln können mehrere Schichten unterschiedlicher Bodensteifigkeit berücksichtigt werden. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass Flachgründungen durch eine horizontale und eine vertikale Feder sowie eine zusätzlich angebrachte Drehfeder modelliert werden können.

3.1. Allgemeines

Vertikale Bettungsmoduln von Tiefgründungen können mithilfe von Pfahl-Setzungslinien bestimmt werden. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, beinhalten diese Linien Kraft-Setzung-Beziehungen für den Spitzenwiderstand, den Mantelwiderstand sowie für den kombinierten Gesamtwiderstand. Der Steifemodul lässt sich für einen beliebigen Punkt auf einer der Linien durch deren Steigung, also das Verhältnis von Kraft zu Setzung, bestimmen. Dabei wird der flachere Ast für Untersuchungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit herangezogen, der steiler abfallende Ast für Untersuchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

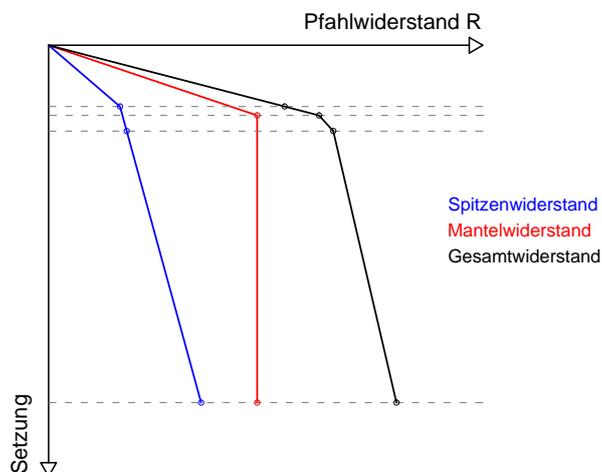


Abbildung 3.1.: Pfahl-Setzungslinie

Pfahl-Setzungslinien sind in der Regel in geotechnischen Gutachten enthalten oder werden im Zuge von Bodenerkundungen für Bauvorhaben eigens erstellt.

Anders als der Steifemodul E_s stellt der Bettungsmodul keine Bodenkenngröße dar. Er ist nur von den äußeren Einwirkungen abhängig und ist folglich nicht für allgemeine Bodenklassen gültig [Kempfert, 2009]. Die Ermittlung des exakten vertikalen Bettungsmoduls ist ein iterativer Prozess, da dieser für jede Einwirkung eigens bestimmt werden muss. In der Tragwerksplanung können gemäß RE-ING (2020) Ober- und Untergrenzen angesetzt werden.

Die Ermittlung des Widerstands quer zur Pfahlachse wird in den folgenden Kapiteln 3.2 und 3.3 erläutert. Dabei muss zwischen einem quer zur Pfahlachse belasteten Einzelpfahl und einer quer zur Pfahlachse belasteten Pfahlgruppe unterschieden werden.

3.2. Quer zur Pfahlachse beanspruchte Einzelpfähle

Bei Anwendung des Bettungsmodulverfahrens erlaubt ÖNORM B 1997-1-3 (2015), dass der horizontale Bettungsmodul $k_{tr,k}$ direkt mit Ergebnissen aus statistischen Baugrunduntersuchungen festgelegt wird, sofern vergleichbare Erfahrungen gegeben sind. Andernfalls erlaubt sie, dass der Bettungsmodul durch Laborversuche gemäß Gleichung 3.1 berechnet wird.

$$k_{tr,k} = \frac{E_{s,k}}{b_k} \tag{3.1}$$

- $k_{tr,k}$ horizontaler Bettungsmodul
- $E_{s,k}$ charakt. Wert des Steifemoduls in Richtung der Pfahlverschiebung
- b_k maßgebender charakt. Wert der Einflussbreite

In der Regel entspricht b_k dem Pfahldurchmesser, bei Pfählen mit einem Durchmesser von $D_p \geq 1,0$ m wird eine Einflussbreite von 1,0 m angenommen.

Gleichung 3.1 findet sich in etwas abgeänderter Form als unten angeführte Gleichung 3.2 auch in DIN 1054 (2010) wieder, allerdings wird deren Anwendung eingeschränkt. Gemäß dem deutschen Anwendungsdokument des EC 7 dürfen Querwiderstände nur für Pfähle mit einem Durchmesser $D_p \geq 0,30$ m angesetzt werden. Zusätzlich ist bei charakteristischer (seltener) Lastkombination im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eine maximale horizontale Verschiebung am Pfahlkopf von 2 cm bzw. $0,03 \cdot D_p$ einzuhalten.

$$k_{s,k} = \frac{E_{s,k}}{D_p} \quad (3.2)$$

- $k_{s,k}$ charakteristischer Wert des horizontalen Bettungsmoduls
- $E_{s,k}$ charakteristischer Wert des Steifemoduls
- D_p Pfahldurchmesser

Auch hier wird für Pfähle mit einem Durchmesser von $D_p \geq 1,0$ m nur 1,0 m in Rechnung gestellt.

Aufgrund der zusätzlichen Anforderung einer begrenzten Pfahlkopfverschiebung wird der horizontale Bettungsmodul in weiterer Folge gemäß DIN 1054 (2010) berechnet.

3.3. Quer zur Pfahlachse beanspruchte Pfahlgruppen

Die Wirkungsweise einer mehrreihigen Pfahlgruppe wird in der EA Pfähle (2012) geregelt. Voraussetzung für eine vorhandene Gruppenwirkung ist, dass die einzelnen Pfähle eine annähernd gleiche horizontale Verschiebung am Pfahlkopf aufweisen. Gemäß der EA Pfähle (2012) beteiligen sich die einzelnen Pfähle einer Pfahlgruppe in unterschiedlichem Maße an der horizontalen Lastabtragung. Damit das auch im Berechnungsmodell abgebildet werden kann, müssen verschiedene horizontale Federsteifigkeiten bzw. Bettungsmoduln berücksichtigt werden. Jedem einzelnen Pfahl innerhalb der Gruppe wird demnach ein gewichteter Widerstand nach Gleichung 3.3 zugeordnet.

$$\alpha_i = \alpha_L * \alpha_Q \quad (3.3)$$

- α_i Abminderungsfaktor für den einzelnen Pfahl
- α_L Abminderungsfaktor zufolge Pfahlachsabstand in Krafrichtung
- α_Q Abminderungsfaktor zufolge Pfahlachsabstand normal zur Krafrichtung

Die Diagramme zur Berechnung von α_L und α_Q sind der EA Pfähle (2012) zu entnehmen. Abbildung 3.2 zeigt die Zuordnung der unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Pfähle.

Im nationalen Anwendungsdokument des EC 7, ÖNORM B 1997-1-3 (2015), werden lediglich konstruktive Kriterien für den Pfahlachsabstand a angeführt, damit eine Gruppenwirkung berücksichtigt werden muss. Darüber hinaus wird auf DIN 1054 (2010) und EA Pfähle (2012) verwiesen. Auch das deutsche Anwendungsdokument verweist bei der Berücksichtigung der Gruppenwirkung lediglich auf die EA Pfähle (2012).

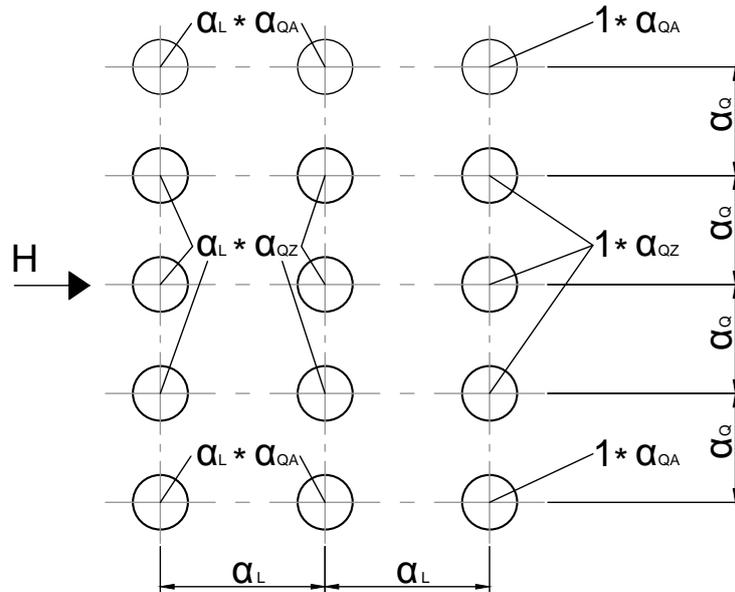


Abbildung 3.2.: Abminderungsfaktoren α_i für die einzelnen Pfähle einer Pfahlgruppe nach [EA Pfähle, 2012]

3.4. Modellierung mittels Finite Elemente Software

Die Verwendung von geeigneter FE-Software bietet mehrere Möglichkeiten, die Boden-Bauwerk-Interaktion zu modellieren. Einerseits lässt sich der Boden mittels einer Vielzahl von einzelnen Federn gemäß Bettungsmodulverfahren beschreiben. Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, handelt es sich dabei aber nur um eine näherungsweise Beschreibung des Bodens.

Das FE-Programm *SOFISTIK* bietet die Möglichkeit, einen linear-elastischen, isotropen Halbraum zu erzeugen. Dazu kann für jeden Pfahl ein eigenes Bohrprofil angelegt werden, um diesem einen individuellen Steifemodul zuzuordnen. Mehrere Bodenschichten unterschiedlicher Steifigkeit lassen sich somit recht einfach berücksichtigen. Die Boden-Bauwerk-Interaktion wird mit dieser Art der Implementierung gemäß Steifemodulverfahren, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, modelliert.

Im Zuge dieser Arbeit wird der Baugrund als linear-elastischer, isotroper Halbraum abgebildet, da sich die Steifigkeit des Bodens damit sehr einfach adaptieren lässt, ohne einer großen Anzahl von Federn unterschiedliche Bettungsmoduln zuweisen zu müssen. Damit ist eine möglichst einfache und automatisierte Art der Modellierung und Adaption der Eingangsparameter möglich. Eine genauere Beschreibung der Modellierung des Baugrundes findet sich in Kapitel 4.2.2.

4. Durchführung der Parameterstudie

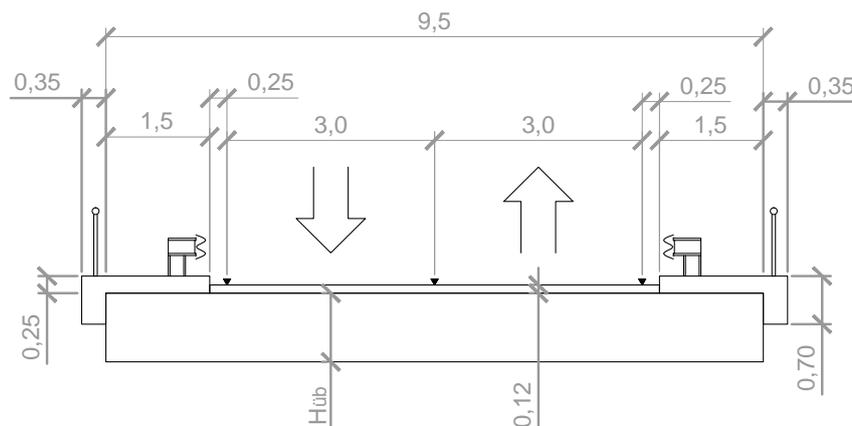
Im folgenden Kapitel werden die Festlegung der Eingangsparameter, die Modellierung der statischen Systeme sowie die Auswertung der Ergebnisse beschrieben.

Zu Beginn der Arbeit wird bestimmt, dass der Einfluss der Bettungssteifigkeiten auf einfeldrige, tiefgegründete Integralbrücken untersucht werden soll. Dabei sollen zwei statische Modelle implementiert werden. Einerseits ein statisches System mit einer Pfahlreihe je Widerlagerachse und andererseits ein System mit zweireihiger Pfahlgründung je Widerlagerachse. Diese beiden statischen Grundsysteme werden für variable Spannweiten und Widerlagerhöhen modelliert und werden in weiterer Folge als Grundsystem 1 (eine Pfahlreihe) und Grundsystem 2 (zwei Pfahlreihen) bezeichnet.

Es folgt die Festlegung und Beschreibung der allgemeinen Eingangsparameter. Diese werden realitätsnah gewählt, um in weiterer Folge realistische Ergebnisse zu erhalten.

4.1. Festlegung der Eingangsparameter

Die Brücke wird als allgemeine Straßenbrücke mit zwei Fahrstreifen angenommen. Dazu wird der Regelquerschnitt RQ 9.5 gewählt, welcher einer Breite von 9,5 m entspricht. Dieser wird in Abbildung 4.1 dargestellt. Vereinfachend werden Vouten an den Querschnittsrändern vernachlässigt.



(Maße in Meter)

Abbildung 4.1.: Brückenquerschnitt RQ 9.5

Die Höhe des Überbaus $H_{\text{üb}}$ wird in Abhängigkeit der Spannweite auf $\frac{L_{sp}}{20}$ festgelegt. Ausgehend von einer Gesamtbreite der Brücke von 9,5 m werden die geometrischen Parameter des Unterbaus wie folgt gewählt. Die Dicke der Widerlagerwände soll unabhängig von ihrer Höhe 1,0 m betragen. Die Höhe der Pfahlkopfplatte wird ebenfalls auf 1,0 m festgelegt, ihre Länge beträgt je nach Grundsystem $L_{\text{platte}} = 2,0$ m bzw. $L_{\text{platte}} = 5,6$ m. Für die Bohrpfähle wird eine Länge von $L_p = 12,0$ m angesetzt sowie ein Durchmesser von $D_p = 0,9$ m gewählt.

Für Grundsystem 2 wird eine exzentrische Anordnung der Widerlagerwand, bezogen auf die Positionierung der Bohrpfähle, gewählt. Der Abstand der beiden Pfahlreihen in Brückenlängsrichtung wird auf $4 \cdot D_p = 3,6$ m festgesetzt. In Querrichtung werden für beide Grundsysteme vier Bohrpfähle je Reihe angeordnet. In Abbildung 4.2 sind die gewählten Geometrien für die beiden Grundsysteme dargestellt.

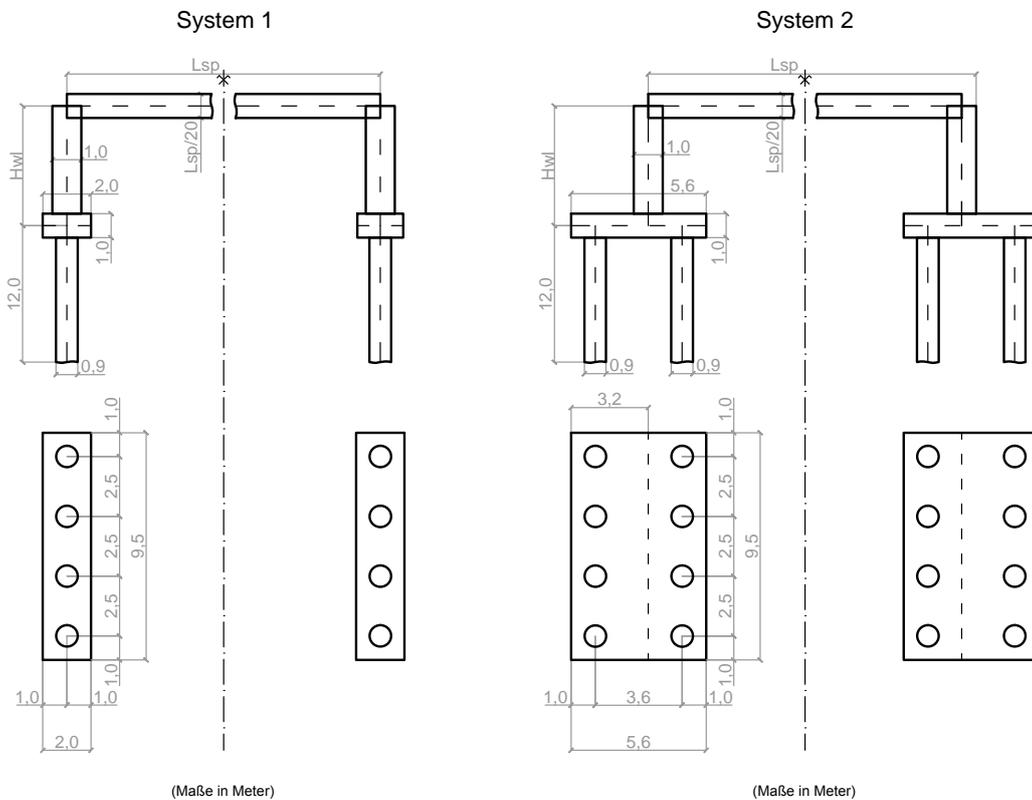


Abbildung 4.2.: Eingangsparemeter für Grundsystem 1 (l) und Grundsystem 2 (r)

Für jedes Grundsystem sollen Spannweiten von 15 m, 20 m und 30 m mit jeweils variablen Widerlagerhöhen von 5,0 m, 7,5 m und 10,0 m modelliert werden. Dadurch ergeben sich für jedes Grundsystem neun unterschiedliche Geometrien, die der Einfachheit halber als Hauptssysteme bezeichnet werden. Die Hauptssysteme für die einreihige Pfahlgründung werden als Hauptssysteme 1.1 bis 1.9 geführt, jene für die zweireihige Pfahlgründung als Hauptssysteme 2.1 bis 2.9. Tabelle 4.1 stellt die zu untersuchenden Hauptssysteme mit ihren unterschiedlichen Parametern übersichtlich dar.

Tabelle 4.1.: Spannweite und zugehörige Widerlagerhöhe der Hauptssysteme

Grundsystem	Nr. Untersystem	L_{sp} [m]	$H_{üb}$ [m]	H_{wl} [m]
1	1.1	15	0,75	5,0
	1.2			7,5
	1.3			10,0
	1.4	20	1,00	5,0
	1.5			7,5
	1.6			10,0
	1.7	30	1,50	5,0
	1.8			7,5
	1.9			10,0
2	2.1	15	0,75	5,0
	2.2			7,5
	2.3			10,0
	2.4	20	1,00	5,0
	2.5			7,5
	2.6			10,0
	2.7	30	1,50	5,0
	2.8			7,5
	2.9			10,0

Für alle Bauteile wird standardmäßig Beton mit einer Güte von C 30/37 verwendet, der einen Elastizitätsmodul von $E_{cm} = 33000$ MPa und eine mittlere zentrische Zugfestigkeit von $f_{ctm} = 2,9$ MPa aufweist. Für das Hinterfüllmaterial wird eine Wichte von $\gamma = 20$ kN/m³ und ein Reibungswinkel von $\varphi' = 30^\circ$ gewählt.

Der Abminderungsfaktor α_i wird, wie in Kapitel 3.3 erläutert, ermittelt, um die Gruppenwirkung der Pfahlgründung für Grundsystem 2 zu berücksichtigen. Außerdem wird für den Baugrund vereinfachend nur eine einzige Bodenschicht angenommen. Darauf wird im folgenden Kapitel 4.2 näher eingegangen.

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, begrenzt DIN 1054 (2010) die maximal zulässige Horizontalverschiebung am Pfahlkopf zufolge charakteristischer (seltener) Lastkombination auf 20 mm. Dementsprechend wird jener Steifemodul E_s , welcher eine Pfahlkopfverschiebung von 20 mm zur Folge hat, als unterer Grenzwert festgelegt. Zusätzlich werden jene Steifemoduln angesetzt, die eine Pfahlkopfverschiebung von 10 mm und 5 mm zulassen, um den Einfluss von unterschiedlichen E_s auf die Spannungen untersuchen zu können.

Somit muss jedes Hauptssystem eigens für eine zulässige Pfahlkopfverschiebung von 20 mm, 10 mm und 5 mm untersucht werden. Es ergeben sich also für jedes der 18 Hauptssysteme jeweils drei Untersysteme mit unterschiedlichen Steifemoduln. Abbildung 4.3 liefert eine detaillierte Übersicht über die Untersysteme der beiden Grundsysteme.

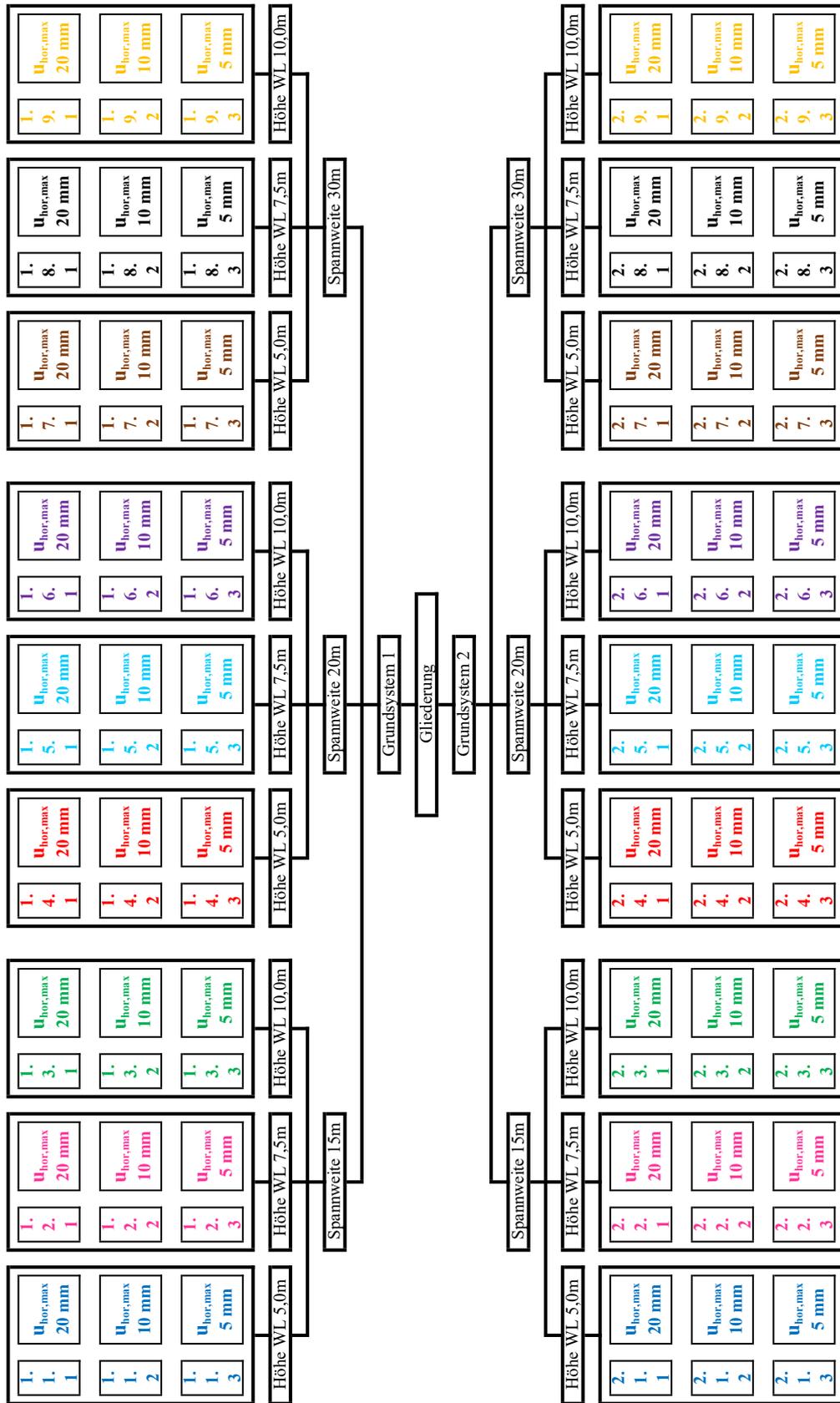


Abbildung 4.3.: Übersicht über die Haupt- und Untersysteme

4.2. Modellbildung

In diesem Kapitel wird die Modellbildung für das Brückenbauwerk und den Baugrund erläutert. Dazu wird das Finite Elemente Programm *SOFISTIK* verwendet.

4.2.1. Brückenbauwerk

Im Zuge dieser Arbeit wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Systemen modelliert, ausgewertet und untersucht. Diese ähneln sich aber größtenteils und besitzen lediglich unterschiedliche Spannweiten, Überbauhöhen, Widerlagerhöhen und Steifemoduln. Daher erfolgt die Modellbildung textbasiert mittels Quellcode im *TEDDY Text Maker*. Diese Art der Implementierung bringt den Vorteil, dass die in Kapitel 4.1 beschriebenen Eingangsparameter als Variablen definiert werden, und sich diese sehr einfach und zeitsparend ändern und beliebig anpassen lassen.

Zur Modellierung der Pfahlkopfplatten, Widerlagerwände und des Überbaus werden Schalenelemente verwendet. Diese sind dazu geeignet, Platten und Scheiben zu modellieren. Schalenelemente liefern allerdings Platten- bzw. Scheibenschnittgrößen. Daher werden die Schnittkräfte mittels *SIR-Schnitten* errechnet, die die Schnittkräfte unter Berücksichtigung der Gesamtbreite der Bauteile ermitteln. Die Pfähle der Tiefgründung werden als Stabelemente definiert und biegesteif an die Pfahlkopfplatte angeschlossen. Somit ist der monolithische Rahmen der Integralbrücke sehr einfach implementiert. In Abbildung 4.4 sind die statischen Modelle für Grundsystem 1 und Grundsystem 2 dargestellt.

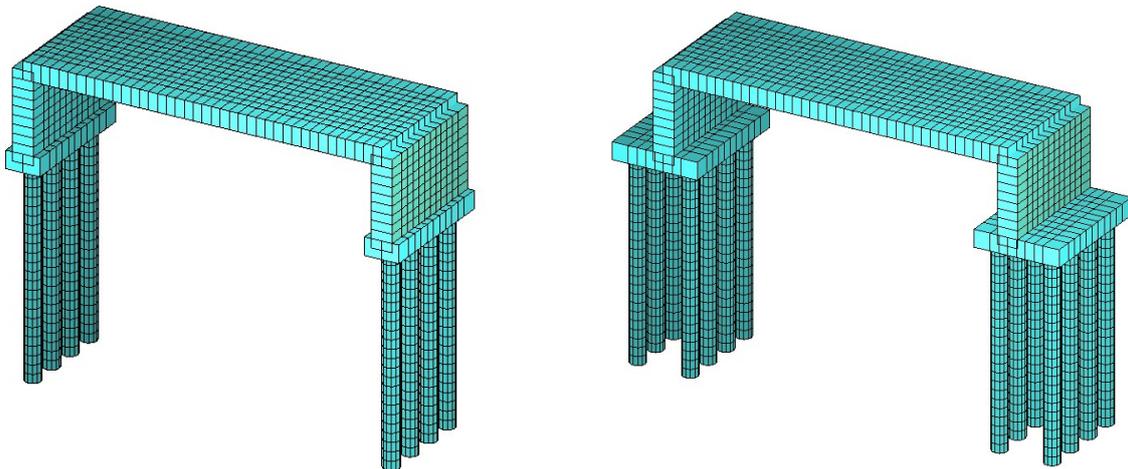


Abbildung 4.4.: Visualisierung der FE-Modelle für Grundsystem 1 (l) und 2 (r)

Im nachfolgenden Kapitel werden die getroffenen Annahmen für den Baugrund beschrieben und es wird erläutert, wie dieser in *SOFISTIK* modelliert wird.

4.2.2. Baugrund

Der Baugrund wird so modelliert, dass er einem linear-elastischen, isotropen Halbraum entspricht. Der Boden wird also mit dem, in Kapitel 2.1.2 erläuterten, Steifemodulverfahren beschrieben. Durch diese Art der Modellierung entfällt das Erstellen von vertikalen und horizontalen Federn an den Pfählen sowie die aufwendige Zuweisung von Federsteifigkeiten in Abhängigkeit der Lage des jeweiligen Pfahls.

Dazu wird in jenen Punkten, wo sich Pfähle befinden, ein Bohrprofil erzeugt, womit jedem Pfahl individuelle Eigenschaften, wie zum Beispiel der Steifemodul, zugewiesen werden können. Schichten unterschiedlicher Steifigkeit würden sich somit ebenfalls in die Modellierung integrieren lassen. Es wird jedoch vereinfachend nur eine einzelne Bodenschicht angesetzt.

In Abbildung 4.5 werden die Anordnung des Halbraumes und die Lage der Bohrprofile für Grundsystem 2 im Aufriss dargestellt.

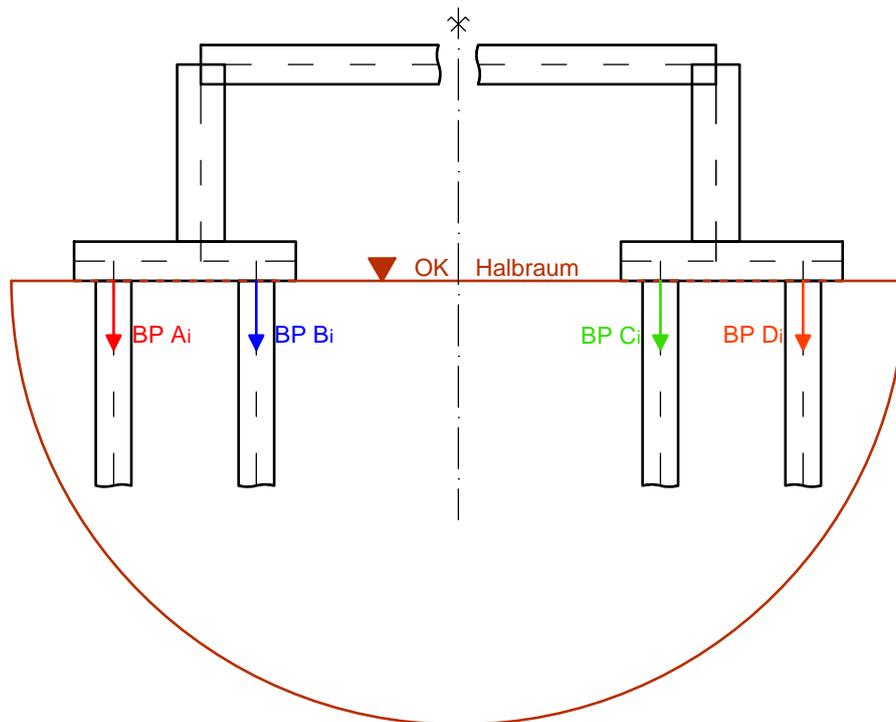


Abbildung 4.5.: Lage des Halbraumes und der Bohrprofile für Grundsystem 2

Wie in Abbildung 4.5 ersichtlich, wird die Oberkante des Halbraumes nicht in die Schwerachse der Pfahlkopfplatte gelegt, sondern an die Unterkante der Platte. Somit ist gewährleistet, dass eine reine Pfahlgründung in Rechnung gestellt wird und keine kombinierte Pfahl-Plattengründung. Das gilt natürlich auch für Grundsystem 1. Der in Abbildung 4.5 als Halbkreis angedeutete Halbraum wird von *SOFISTIK* als unendlicher Raum unterhalb seiner Oberkante erzeugt.

Der dem Pfahl mittels Bohrprofil zugewiesene Steifemodul wird vereinfachend mit einem über die Tiefe konstanten Verlauf angesetzt, wie in Abbildung 4.6 ersichtlich wird.

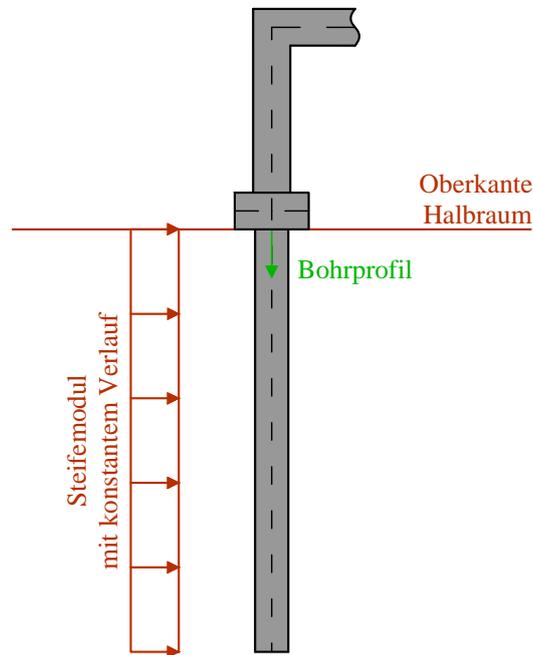


Abbildung 4.6.: Verlauf des Steifemoduls E_s über die Tiefe

Die Gruppenwirkung zufolge der zweireihigen Pfahlgründung wird in Grundsystem 2 durch den Abminderungsfaktor α_i berücksichtigt. Dieser errechnet sich anhand der geometrischen Eingangparameter gemäß EA Pfähle (2012) zu $\alpha_i = \alpha_L = 0,75$. Eine Abminderung in Querrichtung mittels α_Q wird nicht berücksichtigt, da keine Einwirkungen in diese Richtung aufgebracht werden.

Die Steifemoduln für Grundsystem 2 müssen lediglich mit α_L multipliziert werden und wiederum über die Bohrprofile den einzelnen Pfählen zugewiesen werden.

4.2.3. Einwirkungen

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Einwirkungen, welche auf das FE-Modell wirken, angeführt und beschrieben. Dabei werden die getroffenen Annahmen dargestellt und die Vorgaben gemäß Eurocode oberflächlich erläutert. Detaillierte Ausführungen zu den einzelnen Einwirkungen sind den angeführten Normen und Richtlinien zu entnehmen.

Eigengewicht und Ausbaulasten

Das Eigengewicht der Betonquerschnitte wird automatisch durch das FE-Programm angesetzt. Dazu wird eine Wichte von $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ (Normalbeton) herangezogen. In der nachfolgenden Abbildung 4.7 wird ersichtlich, wie die Ausbaulasten auf das statische Modell einwirken.

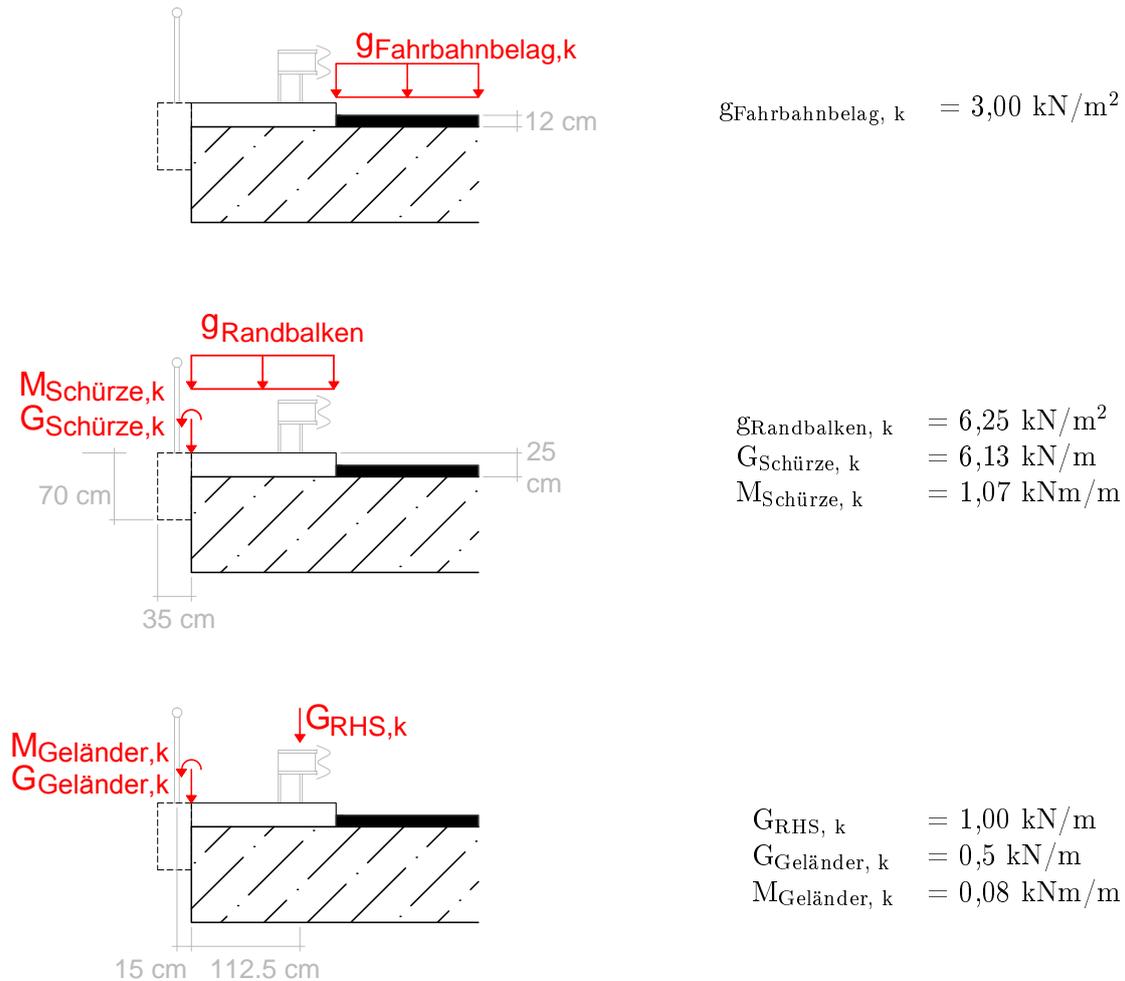


Abbildung 4.7.: Ausbaulasten

Für den Fahrbahnbelag wird eine übliche Dicke von 12 cm gewählt. Gemäß einer Wichte von $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ für Asphaltbeton ergibt sich eine Flächenlast $g_{\text{Fahrbahnbelag, k}}$.

Das Gewicht des Randbalkens wird auf mehrere Einwirkungen aufgeteilt. Dafür wird wiederum von Normalbeton ausgegangen. Jener Teil, der auf der Betonplatte aufliegt, wird mittels Flächenlast $g_{\text{Randbalken, k}}$ berücksichtigt. Das Gewicht der Schürze wird als vertikale Linienlast $G_{\text{Schürze, k}}$ am Plattenrand aufgebracht. Das dadurch resultierende Versatzmoment $M_{\text{Schürze, k}}$ wird als Linienmoment modelliert.

Für das Rückhaltesystem wird eine Linienlast $G_{\text{RHS, k}}$ angesetzt. Die Absturzsicherung am Randbalken wird, ähnlich wie die Schürze, durch eine Linienlast $G_{\text{Geländer, k}}$ und ein durch die Verschiebung ebenjener entstehendes Versatzmoment $M_{\text{Geländer, k}}$ berücksichtigt.

Temperatureinwirkung

Gemäß RVS (2012) werden vier unterschiedliche Lastfälle für die Temperatureinwirkung im Sommer sowie ein Lastfall für die Temperatureinwirkung im Winter angesetzt. Dabei wird stets zwischen konstanten Temperaturbeanspruchungen T_n und linearen Temperaturbeanspruchungen T_m unterschieden. In unterschiedlichen Kombinationen ergeben sie jene fünf Temperaturlastfälle, die gemäß RVS (2012) untersucht werden müssen. Diese sind für ein allgemeines statisches System in der RVS (2012) zu finden und werden in den folgenden Abbildungen 4.8 bis 4.12 für eine einfeldrige Integralbrücke dargestellt. Erwärmungen werden durch rote Einwirkungen gekennzeichnet, Abkühlungen durch blaue Einwirkungen.

Die Regeltemperatur (Einbautemperatur) wird auf $T_0 = 10 \text{ °C}$ festgelegt. Der Standort der Brücke wird im Wald- und Mühlviertel auf einer Seehöhe von 200 Meter über der Adria gewählt. Dadurch ergeben sich für die minimale Außenlufttemperatur $T_{\min} = -32 \text{ °C}$ und für die maximale Außenlufttemperatur $T_{\max} = 37,8 \text{ °C}$. Diese beiden Werte werden gemäß ÖNORM B 1991-1-5 (2012) ermittelt. Da die tatsächlichen Werte für $\Delta T_{n,\text{con}}$ und $\Delta T_{n,\text{exp}}$ von der Höhe des Überbaus $H_{\text{üb}}$ [cm] abhängig sind, werden hier nur die allgemeinen Formeln zu ihrer Berechnung als Gleichung 4.1 und 4.2 angeführt.

$$\Delta T_{n,\text{con}} = T_0 - T_{\min} - 2,5 - 0,05 * H_{\text{üb}} \quad (4.1)$$

$$\Delta T_{n,\text{exp}} = T_{\max} - T_0 - 3,7 - 0,025 * H_{\text{üb}} \quad (4.2)$$

Jener Wert, der sich für $\Delta T_{n,\text{con}}$ nach Gleichung 4.1 ergibt, ist als Temperaturverringerng und dementsprechend als negativer Zahlenwert zu verstehen.

Die Werte für die linear-veränderlichen Temperaturanteile am Überbau werden für eine Stahlbetonplatte angesetzt und ergeben sich folglich zu $\Delta T_{m,\text{heat}} = 15 \text{ °C}$ und $\Delta T_{m,\text{cool}} = 8 \text{ °C}$. Die Werte für den Unterschied für die konstanten Temperaturanteile zwischen

Überbau und Widerlager werden gemäß ÖNORM B 1991-1-5 (2012) angesetzt. Diese sind $\Delta T_{n,W} = -10 \text{ °C}$ im Winter und $\Delta T_{n,S} = 10 \text{ °C}$ im Sommer. Durch den einseitigen Kontakt des Widerlagers mit dem Erdreich entsteht zusätzlich ein veränderlicher Anteil $\Delta T_{m,W} = -15 \text{ °C}$ im Winter und $\Delta T_{m,S} = 10 \text{ °C}$ im Sommer. Die hier angeführten Bezeichnungen weichen von jenen in der Norm ab, um das Verständnis zu erleichtern.

Abbildung 4.8 zeigt die gleichmäßigen und linear-veränderlichen Temperatureinwirkungen im Winter. Um die gleichmäßige Temperaturänderung am Widerlager zu ermitteln, wird $\Delta T_{n,con}$ zunächst betragsmäßig eingesetzt. Erst der endgültige Wert muss entsprechend einer Temperaturverringering negativ angesetzt werden.

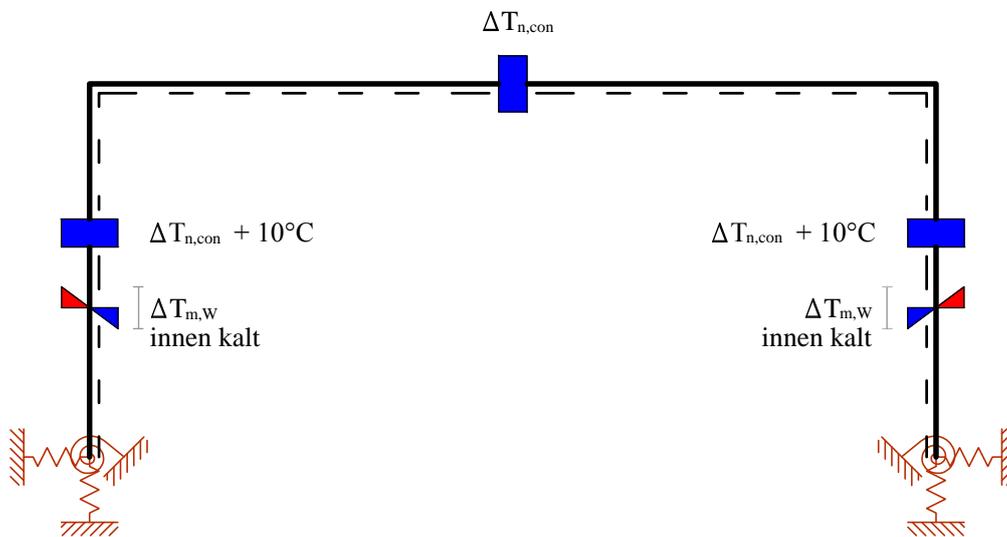


Abbildung 4.8.: Temperatureinwirkung im Winter nach [RVS, 2012]

$$\begin{aligned} \Delta T_{n,con} &= - (39,5 - 0,05 \cdot H_{\text{üb}}) \text{ °C} \\ \Delta T_{n,con} + 10 \text{ °C} &= - (|\Delta T_{n,con}| + 10) \text{ °C} \\ \Delta T_{m,W} &= - 15 \text{ °C} \end{aligned}$$

Abbildung 4.9 veranschaulicht die Kombination aus gleichmäßiger und linearer Temperatureinwirkung für Fall 1 der Sommerlastfälle.

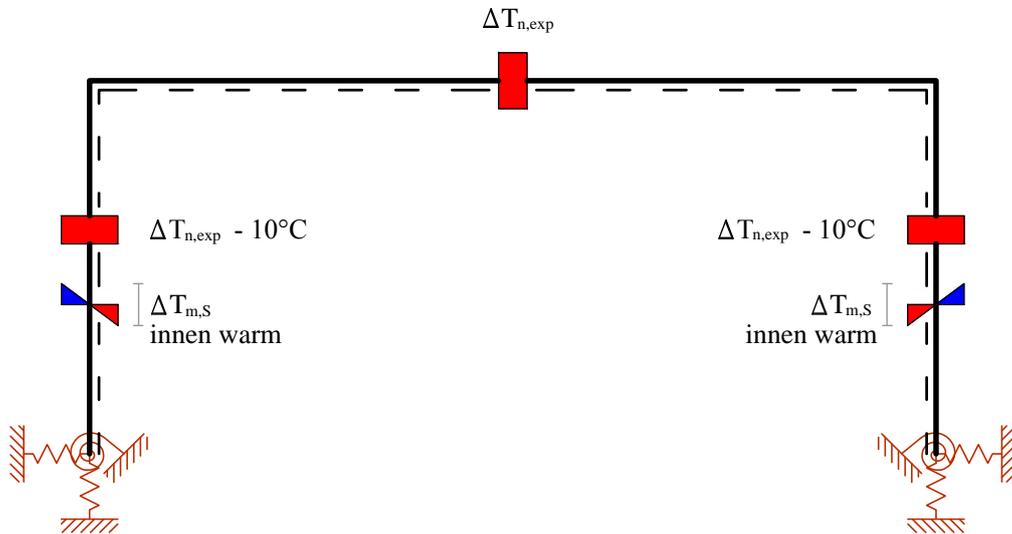


Abbildung 4.9.: Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 1 nach [RVS, 2012]

$$\begin{aligned}\Delta T_{n,exp} &= (24,1 - 0,025 * H_{\text{üb}}) \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Delta T_{n,exp} - 10 \text{ } ^\circ\text{C} &= (\Delta T_{n,exp} - 10) \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Delta T_{m,S} &= 10 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

In Abbildung 4.10 wird ersichtlich, wie die Temperaturanteile angesetzt werden, um Fall 2 für den Sommer abzubilden.

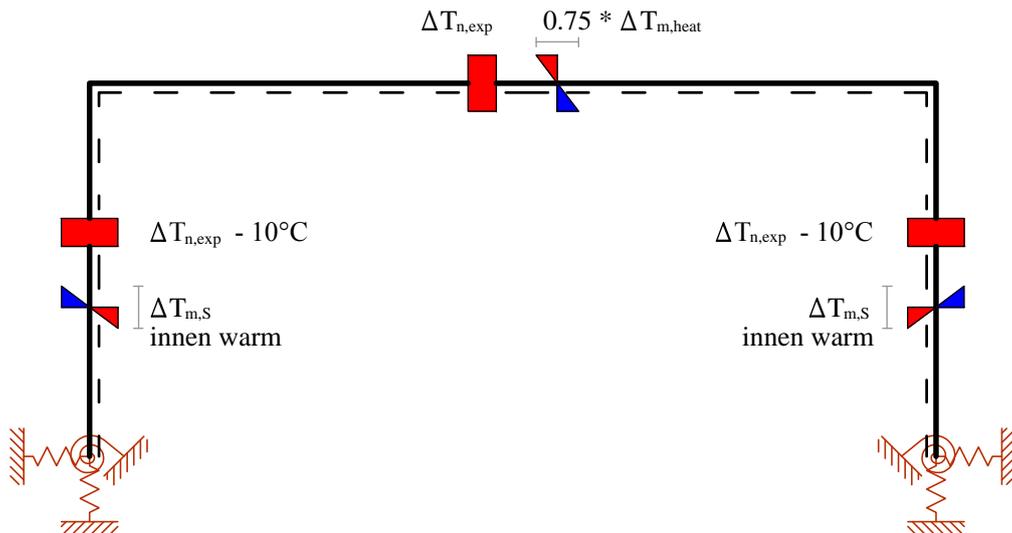


Abbildung 4.10.: Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 2 nach [RVS, 2012]

$$\begin{aligned}\Delta T_{n,exp} &= (24,1 - 0,025 * H_{\text{üb}}) \text{ } ^\circ\text{C} & 0,75 * \Delta T_{m,heat} &= 11,25 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Delta T_{n,exp} - 10 \text{ } ^\circ\text{C} &= (\Delta T_{n,exp} - 10) \text{ } ^\circ\text{C} & \Delta T_{m,S} &= 10 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Die gleichmäßigen und linearen Temperatureinwirkungen für Fall 3 im Sommer können Abbildung 4.11 entnommen werden.

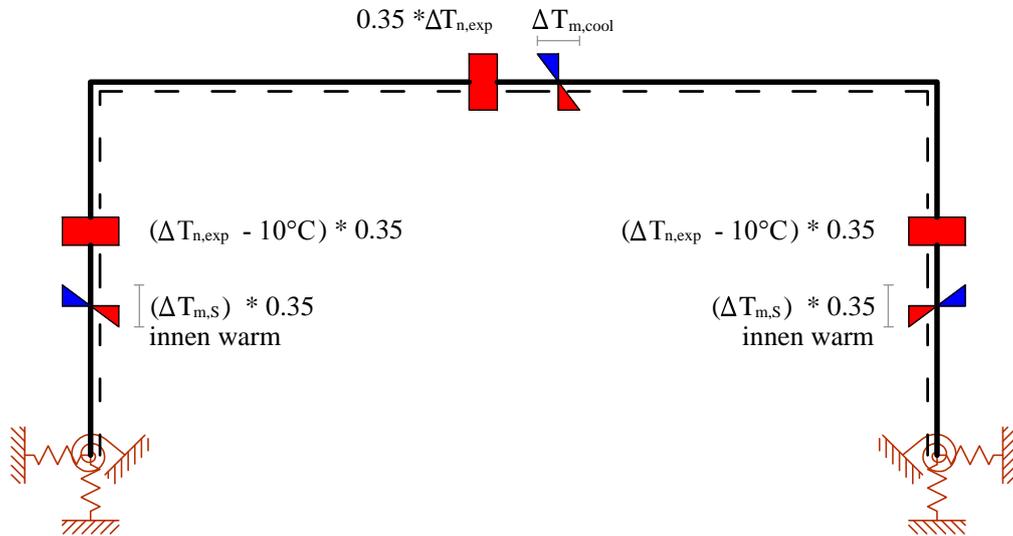


Abbildung 4.11.: Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 3 nach [RVS, 2012]

$$\begin{aligned}
 0,35 * \Delta T_{n,exp} &= 0,35 * (24,1 - 0,025 * H_{üb}) \text{ °C} & \Delta T_{m,cool} &= 8 \text{ °C} \\
 (\Delta T_{n,exp} - 10\text{°C}) * 0,35 &= 0,35 * (\Delta T_{n,exp} - 10) \text{ °C} & \Delta T_{m,s} * 0,35 &= 3,5 \text{ °C}
 \end{aligned}$$

Abbildung 4.12 beschreibt die Kombination der Temperatureinwirkungen für Fall 4 im Sommer.

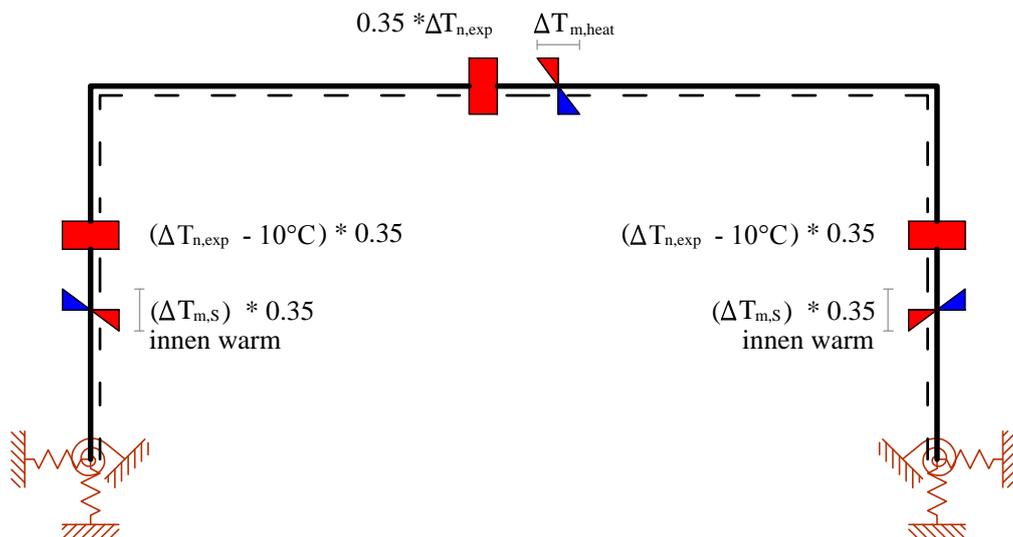


Abbildung 4.12.: Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 4 nach [RVS, 2012]

$$\begin{aligned}
 0,35 * \Delta T_{n,exp} &= 0,35 * (24,1 - 0,025 * H_{üb}) \text{ °C} & \Delta T_{m,heat} &= 15 \text{ °C} \\
 (\Delta T_{n,exp} - 10\text{°C}) * 0,35 &= 0,35 * (\Delta T_{n,exp} - 10) \text{ °C} & \Delta T_{m,s} * 0,35 &= 3,5 \text{ °C}
 \end{aligned}$$

Erddruck

Zur Berechnung des Erddrucks wird eine Wichte von $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ und ein Reibungswinkel von $\varphi' = 30^\circ$ angenommen. Es werden der Erdruhedruck E_0 , der aktive Erddruck E_a und der passive Erddruck E_p modelliert. Dabei gilt die bekannte Beziehung $E_a < E_0 < E_p$. Diese Erddruckverläufe sind in Abbildung 4.13 dargestellt, die Formeln zu ihrer jeweiligen Berechnung rechterhand angeführt. Die Formeln für den aktiven und den passiven Erddruckbeiwert K entsprechen der vereinfachten Annahme, dass der Neigungswinkel der Wand α , der Neigungswinkel der Geländeoberfläche β und der Neigungswinkel des Erddruckes δ gleich null sind.

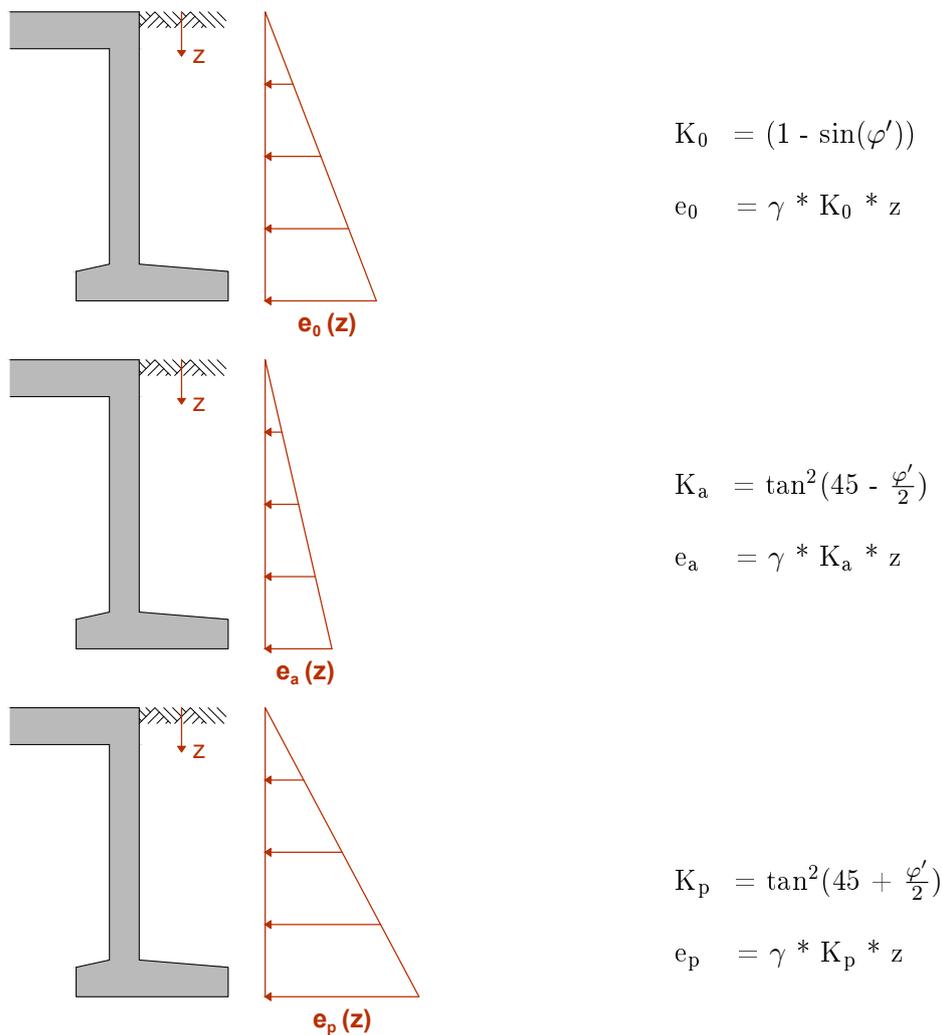


Abbildung 4.13.: Erddrucke

Als ständig auf das Brückenbauwerk wirkender Erddruck wird der Erdruhedruck E_0 angesetzt. Zusätzlich zu den oben angeführten muss der mobilisierte Erddruck berechnet werden. Dieser wird benötigt, um den Erddruck zufolge einer Tragwerksausdehnung im

Sommer und einer Differenzverschiebung laut RVS (2012) im Winter berücksichtigen zu können. Abbildung 4.14 zeigt den mobilisierten Erddruck gemäß RVS (2012), die zur Berechnung benötigten Werte sind rechterhand angeführt. Der mobilisierte Erddruck wird nach Gleichung 4.3 berechnet.

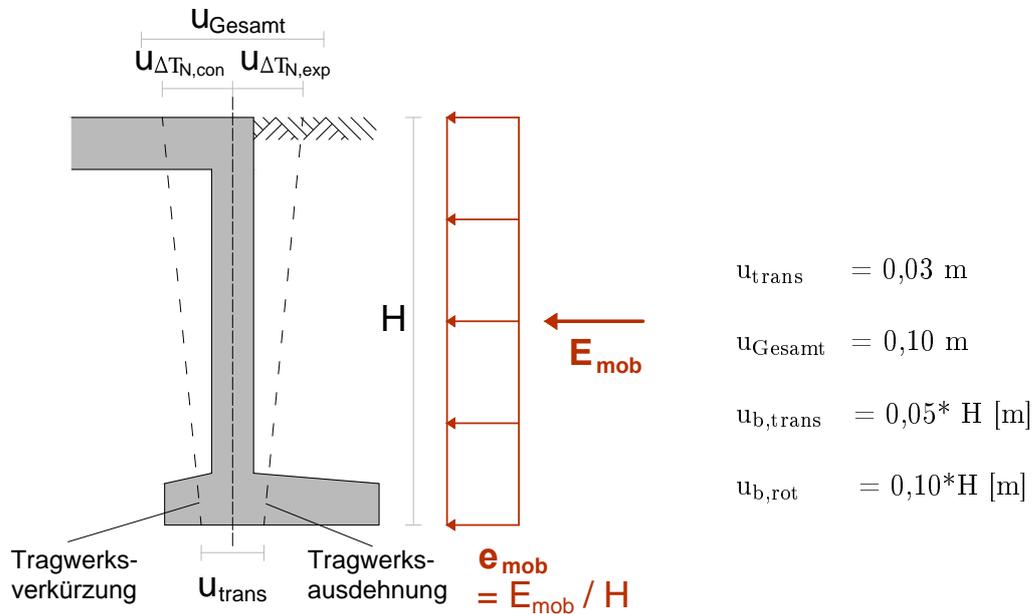


Abbildung 4.14.: Mobilisierter Erddruck nach [RVS, 2012]

$$E_{mob} = E_0 + (E_p - E_0) * \left[1 - \left(1 - \frac{u_{Gesamt}}{\frac{u_{trans}}{u_{Gesamt}} * u_{b,trans} + \left(1 - \frac{u_{trans}}{u_{Gesamt}} \right) * u_{b,rot}} \right)^2 \right]^{0,7} \quad (4.3)$$

Bei der Berechnung der mobilisierten passiven Erddruckresultierenden nach der RVS (2012) wird die Erddruckfigur als Rechteck angenommen, obwohl bei einer Brückenlänge von $L \leq 30 \text{ m}$ eine Vereinfachung als Dreieck zulässig wäre.

Zur Bestimmung von u_{trans} und u_{Gesamt} wird vereinfacht jenes System mit einer Spannweite von 30 m, einer Widerlagerhöhe von 10 m und einer zulässigen Pfahlkopfverschiebung von 20 mm herangezogen. Anschließend werden die Verschiebungen an den beiden relevanten Punkten zufolge charakteristischer Lasteinwirkung für Sommer und Winter addiert. Normalerweise ist die Bestimmung dieser beiden Werte für jedes System iterativ durchzuführen. Hier geschieht es vereinfachend einmalig für den ungünstigsten Fall.

Für die Modellierung der Lastfälle Erddruck zufolge Temperatur empfiehlt die RVS (2012) folgende Ansätze. Bei einer Tragwerksverkürzung soll der Ansatz $e_a - e_0$ in Kombination mit dem Lastfall für Winter und bei einer Tragwerksausdehnung der Ansatz $e_{mob} - e_0$ in Kombination mit den Lastfällen für Sommer verwendet werden. Eine grafische Darstellung

der dadurch resultierenden Erddruckverläufe liefert Abbildung 4.15.

Der Lastfall $e_a - e_0$ wird in weiterer Folge als *Erddruck zufolge Temperatureinwirkung im Winter* und der Lastfall $e_{mob} - e_0$ als *Erddruck zufolge Temperatureinwirkung im Sommer* bezeichnet.

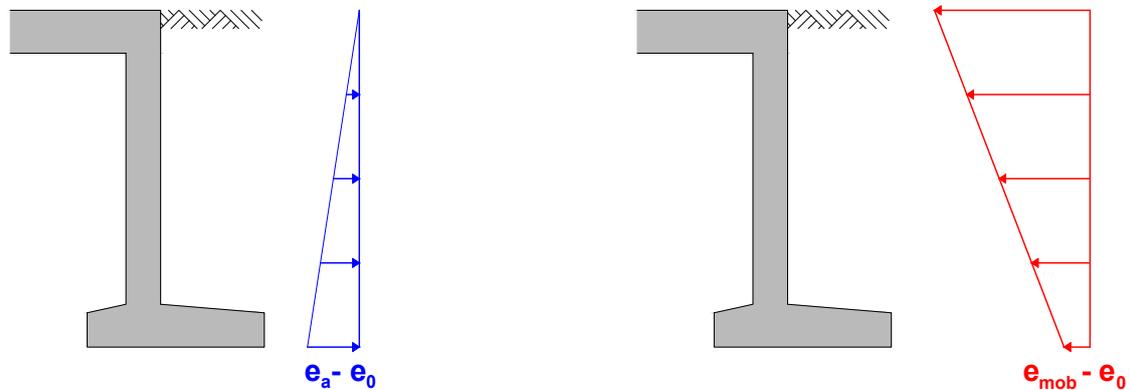


Abbildung 4.15.: Erddruck zufolge Temperatureinwirkung im Winter (l) und zufolge Temperatureinwirkung im Sommer (r)

Es ist zu beachten, dass es sich bei den in Abbildung 4.15 dargestellten Erddruckverläufen lediglich um jene Erddrucke handelt, die durch eine Temperatureinwirkung verursacht werden. Zusätzlich ist immer der ständig wirkende Erddruck anzusetzen.

Kriechen und Schwinden

Die entstehenden Zwangkräfte zufolge Kriechen und Schwinden im Überbau, den Pfahlkopfplatten und Widerlagerwänden werden in der Bemessung berücksichtigt. Dabei wird eine Kriechzahl $\varphi = 1,7$ angesetzt, was für Beton der Güte C 30/37 sicherstellt, dass eine Erstbelastung nach 10 Tagen erfolgt. Das Schwindmaß wird mit 0,23 ‰ festgelegt. Dabei wird von einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 - 85 % ausgegangen, wie es im Brückenbau üblich ist.

Verkehrslast

Die Verkehrslasten werden als gleichmäßig verteilte Flächenlasten für Fahrzeuge auf den beiden Fahrstreifen und für Fußgänger auf den Randbalken (UDL), sowie als Einzellasten (TS) für die Doppelachslasten nach Lastmodell 1 gemäß ÖNORM EN 1991-2 (2012) modelliert. Die einwirkenden Lasten werden in Tabelle 4.2 angeführt. Abbildung 4.16 liefert eine Darstellung, wie die Lasten auf den Brückenquerschnitt verteilt angesetzt werden.

Tabelle 4.2.: Einwirkungen zufolge Verkehr

	UDL Flächenlast [kN/m ²]	TS-Doppelachslast [kN]
Fahrstreifen 1	9,0	300
Fahrstreifen 2	2,5	200
Restfahrstreifen	2,5	-
Fußgänger	2,5	-

Der Wert für die Belastung zufolge Fußgänger ist der untere Grenzwert und wird angesetzt, weil keine Menschenansammlungen berücksichtigt werden. Die Doppelachslasten werden anhand der Radaufstandsflächen von 0,4 * 0,4 m in Flächenlasten umgerechnet und modelliert. Der Abstand zwischen Vorder- und Hinterachse wird gemäß Norm mit 1,20 m angesetzt. Um eine möglichst ungünstige Positionierung der Doppelachslasten zu erreichen, werden diese als Wanderlast angebracht und ausgehend vom Brückenanfang in Schritten von 0,5 m in Brückenlängsrichtung verschoben.

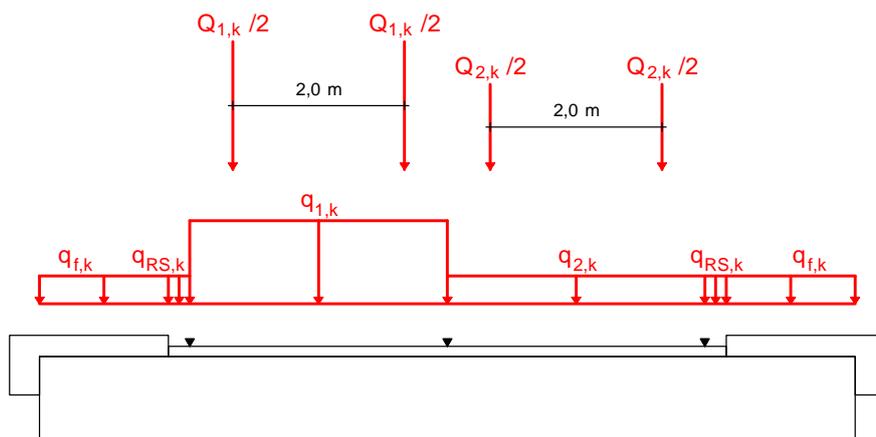


Abbildung 4.16.: Belastung zufolge Verkehr (Lastmodell 1)

Die Einwirkung zufolge Bremsen und Anfahren errechnet sich anhand Gleichung 4.4. Dabei ist eine Fahrstreifenbreite von $b_{FS} = 3,00$ m anzusetzen, der Wert für L_{sp} ist je nach Hauptsysteme variabel.

$$Q_{lk} = 360 + 0,9 * b_{FS} * L_{sp} \quad (4.4)$$

Stützensenkung

Hierbei wird das Absetzen eines Bohrpfahls um 1,0 cm in die Bemessung eingebunden.

4.3. Ermittlung der Steifemoduln

Nachfolgend wird erläutert, wie die Steifemoduln für die Untersysteme von Grundsystem 1 und Grundsystem 2 ermittelt werden. Es werden die berechneten Werte aufgelistet und ihre Plausibilität diskutiert.

Die Ermittlung des Steifemoduls E_s stellt für jedes Untersystem einen eigenen iterativen Prozess dar. Anhand der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Einwirkungen wird die charakteristische Lastkombination gebildet und die daraus resultierende horizontale Verschiebung in Brückenlängsrichtung betrachtet. Die maßgebenden Punkte sind dabei die Pfahlköpfe. Der Steifemodul wird so lange angepasst, bis sich maximale Pfahlkopfverschiebungen von 20 mm, 10 mm und 5 mm für ein Hauptssystem ergeben.

In Tabelle 4.3 werden die berechneten Steifemoduln anschaulich dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass jene für Grundsystem 2 bereits mit $\alpha_L = 0,75$ abgemindert sind.

Tabelle 4.3.: Steifemoduln E_s [MPa] für Grundsystem 1 und 2

L_{sp} [m]	H_{wl} [m]	$u_{hor,max}$ [mm]	Grundsystem 1		Grundsystem 2	
			Nr. US	E_s [MPa]	Nr. US	$E_s * \alpha_L$ [MPa]
15	5,0	20	1.1.1	49	2.1.1	32
		10	1.1.2	127	2.1.2	74
		5	1.1.3	335	2.1.3	174
	7,5	20	1.2.1	174	2.2.1	94
		10	1.2.2	468	2.2.2	223
		5	1.2.3	1250	2.2.3	525
	10,0	20	1.3.1	430	2.3.1	191
		10	1.3.2	1160	2.3.2	437
		5	1.3.3	3100	2.3.3	1005
20	5,0	20	1.4.1	56	2.4.1	36
		10	1.4.2	159	2.4.2	95
		5	1.4.3	450	2.4.3	255
	7,5	20	1.5.1	131	2.5.1	75
		10	1.5.2	350	2.5.2	179
		5	1.5.3	925	2.5.3	420
	10,0	20	1.6.1	361	2.6.1	171
		10	1.6.2	975	2.6.2	398
		5	1.6.3	2625	2.6.3	915
30	5,0	20	1.7.1	131	2.7.1	86
		10	1.7.2	448	2.7.2	284
		5	1.7.3	1450	2.7.3	788
	7,5	20	1.8.1	110	2.8.1	66
		10	1.8.2	310	2.8.2	164
		5	1.8.3	875	2.8.3	406
	10,0	20	1.9.1	240	2.9.1	124
		10	1.9.2	640	2.9.2	289
		5	1.9.3	1690	2.9.3	671

Wie im Vorfeld erwartet, lassen sich die Grenzwerte der horizontalen Pfahlkopfverschiebung bei Grundsystem 2 mit einem geringeren Steifemodul erreichen als bei Grundsystem 1. Es fällt außerdem auf, dass der Unterschied zwischen den Werten der beiden Grundsysteme in weicherem Baugrund wesentlich geringer ausfällt als in steiferem Baugrund.

Die Größenordnungen der Steifemoduln, um die Pfahlkopfverschiebung auf 10 mm oder auf 5 mm zu begrenzen, entsprechen bei großer Spannweite oder großer Widerlagerhöhe kaum mehr realistischen Annahmen. Eine derartige Steifigkeit der Pfahlgründung ließe sich nur in äußerst bindigem Boden in Kombination mit einer großen Anzahl an Bohrpfählen und dementsprechend hohem finanziellen Aufwand erreichen. Für die Annahme einer bzw. zwei Pfahlreihen mit vier Pfählen je Widerlagerachse sind die errechneten Steifemoduln jedoch nicht realistisch. Die Werte der Steifemoduln für eine maximale Pfahlkopfverschiebung von 20 mm sind hingegen durchaus plausibel und entsprechen wirtschaftlichen Annahmen.

In Abbildung 4.17 wird die Steifigkeitsentwicklung für die Hauptssysteme der beiden Grundsysteme dargestellt. Hier ist zu beachten, dass für Grundsystem 2 die „globalen“ Steifemoduln, also ohne Abminderung mittels $\alpha_L = 0,75$, herangezogen werden. Andernfalls lassen sich die Ergebnisse nicht mehr anschaulich darstellen.

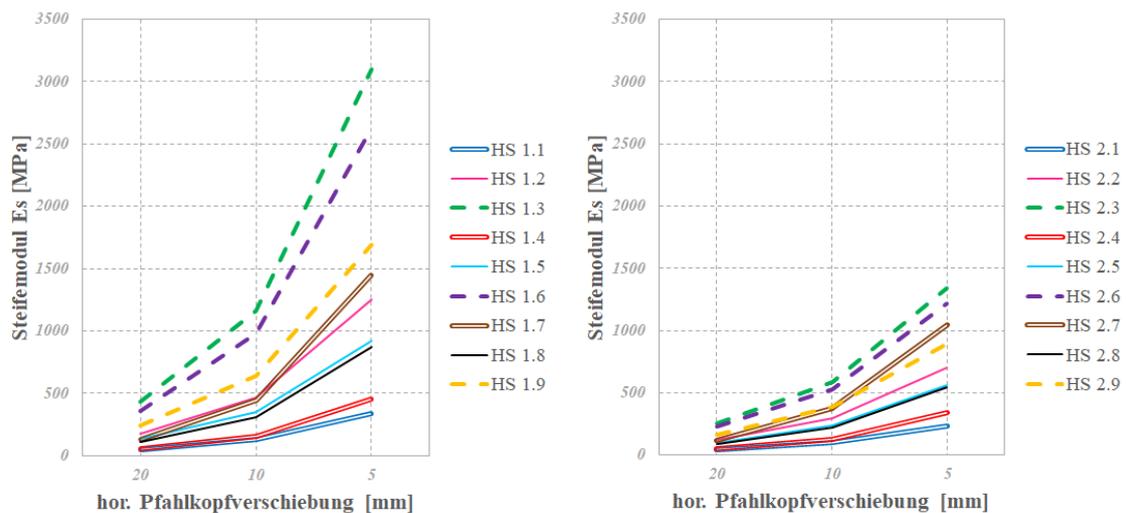


Abbildung 4.17.: Entwicklung der Steifemoduln für Grundsystem 1 (l) und 2 (r)

Mit den zuvor berechneten Steifemoduln als Grundlage werden in weiterer Folge einzelne Lastfälle an den aussagekräftigen Punkten des statischen Modells ausgewertet. Die Vorgehensweise dazu wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

4.4. Auswertung der Ergebnisse

Zunächst werden die einzelnen Lastfälle bestimmt, die für jedes Untersystem untersucht werden sollen. Da in dieser Arbeit der individuelle Einfluss der unterschiedlichen Einwirkungen untersucht wird, werden die einzelnen Lastfälle auf charakteristischem Niveau (ohne Sicherheitsbeiwerte) angesetzt und auch nicht miteinander kombiniert. Da die Berechnung linear-elastisch erfolgt, lässt sich eine Kombination mittels Superposition nachträglich problemlos durchführen. Die zu untersuchenden Einzellastfälle sind in Tabelle 4.4 angeführt.

Tabelle 4.4.: Untersuchte Einzellastfälle

Nr. Lastfall	Lastfall	Bezeichnung
1	Gewicht	Eigengewicht
2	T_n W	Gleichmäßige Temperatureinwirkung Winter
3	T_m W	Lineare Temperatureinwirkung Winter
4	T_n S 1	Gleichmäßige Temperatureinwirkung Sommer Fall 1
5	T_m S 1	Lineare Temperatureinwirkung Sommer Fall 1
6	T_n S 2	Gleichmäßige Temperatureinwirkung Sommer Fall 2
7	T_m S 2	Lineare Temperatureinwirkung Sommer Fall 2
8	T_n S 3	Gleichmäßige Temperatureinwirkung Sommer Fall 3
9	T_m S 3	Lineare Temperatureinwirkung Sommer Fall 3
10	T_n S 4	Gleichmäßige Temperatureinwirkung Sommer Fall 4
11	T_m S 4	Lineare Temperatureinwirkung Sommer Fall 4
12	E zuf W	Erddruck zufolge Temperatureinwirkung im Winter
13	E zuf S	Erddruck zufolge Temperatureinwirkung im Sommer
14	UDL	UDL-Flächenlast für Verkehr zufolge LM 1
15	TS	TS-Doppelachslast für Verkehr zufolge LM 1

Dabei ist zu beachten, dass die Lastfälle 4 und 6 sowie 8 und 10 identisch sind. Die vier Lastfälle für eine Temperatureinwirkung im Sommer ergeben sich nur, wenn gleichmäßige und lineare Einwirkungen entsprechend kombiniert angesetzt werden, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben. Hier werden aber die beiden Komponenten getrennt voneinander betrachtet. Daher werden die Lastfälle T_n S 1 (Nr. 4) und T_n S 2 (Nr. 6) zum Lastfall T_n S 1,2 zusammengeführt. Ebenso werden die Lastfälle T_n S 3 (Nr. 8) und T_n S 4 (Nr. 10) zum Lastfall T_n S 3,4 zusammengeführt.

Bei den Lastfällen 12 und 13 handelt es sich nur um die Erddrucke zufolge Temperatureinwirkung (vgl. Abbildung 4.15). Der ständig wirkende Erddruck E_0 wird hier nicht untersucht.

Bei Lastfall 15 handelt es sich grundsätzlich um eine Wanderlast, bei der die modellierten Doppelachsen als Flächenlasten alle 0,5 m in Brückenlängsrichtung verschoben werden müssen, wie in Kapitel 4.2.3 erläutert. Hier soll jedoch nur eine Position der Doppelachsen untersucht werden. Dazu wird Lastfall 15 in Feldmitte positioniert und ausgewertet.

Bei den aussagekräftigen Punkten der statischen Modelle handelt es sich um den Pfahlkopf, den Widerlagerfuß, das Rahmeneck und die Feldmitte des Überbaus. Bei der Untersuchung von Grundsystem 2 muss zusätzlich noch zwischen äußerem und innerem Pfahlkopf unterschieden werden.

Für jeden dieser Punkte wird im Zuge der Auswertung die Normalkraft N_x und das Biegemoment M_y zufolge der einzelnen Lastfälle berechnet. Mit den gewonnenen Schnittkräften werden die Spannungen in den zu untersuchenden Punkten ermittelt. Dazu werden die Spannungen für das jeweilige Bauteil an der Außen- und an der Innenseite berechnet. Damit die Ergebnisse allgemein vergleichbar sind, werden die Spannungen auf $f_{ct,m}$ normiert. Zum besseren Verständnis der Auswertung zeigt Abbildung 4.18 die zu untersuchenden Punkte für die beiden Grundsysteme.

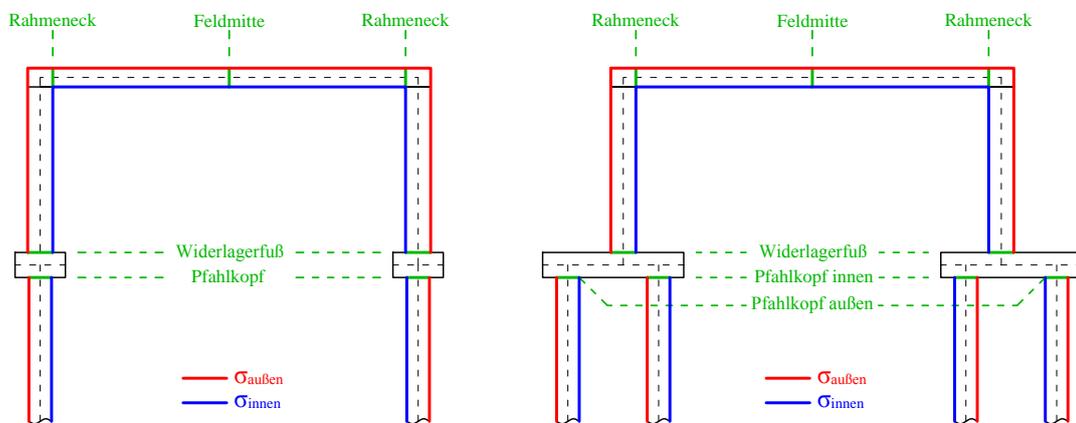


Abbildung 4.18.: Benennung der Schnitte und Spannungen für Grundsystem 1 (l) und 2 (r)

Von den vier Bohrpfählen einer Pfahlreihe wird lediglich einer untersucht. Es handelt sich um jenen Innenpfahl, der auf der Seite des durch die UDL-Verkehrslast stärker belasteten Fahrstreifens liegt. Dieser ist in Abbildung 4.19 blau markiert dargestellt.

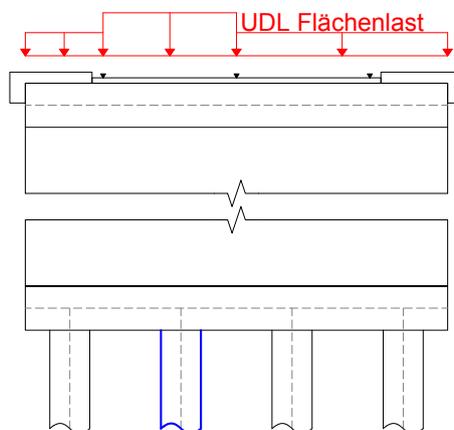


Abbildung 4.19.: Untersuchter Innenpfahl

5. Ergebnisse der Einzellastfälle

In diesem Kapitel werden die ausgewerteten Daten der Untersysteme von Grundsystem 1 und 2 dargestellt. Die Ergebnisse werden grafisch aufbereitet und es folgt eine erste Interpretation der Spannungen hinsichtlich der Zunahme des Steifemoduls bei unterschiedlichen Spannweiten und Widerlagerhöhen.

Zunächst werden die Ergebnisse der einreihigen Pfahlgründung dargestellt, im Anschluss daran die der zweireihigen. Innerhalb eines Diagrammes befinden sich die Spannungen für jeweils jene drei Hauptssysteme mit gleicher Widerlagerhöhe, aber unterschiedlicher Spannweite. Dabei werden zuerst die Spannungen an der Außenseite und danach die Spannungen an der Innenseite des Bauteils erläutert.

Im Zuge der Auswertung der Daten der beiden Grundsysteme zeigt sich, dass nicht alle untersuchten Einzellastfälle maßgebende Spannungen liefern. Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht über jene Einzellastfälle, die am Pfahlkopf, am Widerlagerfuß, im Rahmeneck oder in Feldmitte zu maximalen Spannungen an einzelnen Untersystemen führen und somit auch näher untersucht werden. Die übrigen Lastfälle werden in diesem Kapitel nicht angeführt und interpretiert, die Ergebnisse sind jedoch im Anhang enthalten.

Tabelle 5.1.: Maßgebende Einzellastfälle

Nr. Lastfall	Lastfall	Bezeichnung
1	Gewicht	Eigengewicht
2	T_n W	Gleichmäßige Temperatureinwirkung Winter
3	T_m W	Lineare Temperatureinwirkung Winter
4 bzw. 6	T_n S 1,2	Gleichmäßige Temperatureinwirkung Sommer Fall 1 und 2
7	T_m S 2	Lineare Temperatureinwirkung Sommer Fall 2
11	T_m S 4	Lineare Temperatureinwirkung Sommer Fall 4
13	E zuf S	Erddruck zufolge Temperatureinwirkung im Sommer

Auffallend ist, dass der Verkehr keine maximalen Spannungen in den untersuchten Punkten liefert. Diese unerwartete Tatsache wird in den Kapiteln 5.1.4 und 5.2.4 näher untersucht und erklärt.

Die Unterkapitel zu Grundsystem 1 und 2 gliedern sich nach der Widerlagerhöhe. Die Spannungen aus dem Eigengewicht bzw. aus dem Erddruck zufolge der Temperaturein-

wirkung im Sommer werden in einem Diagramm dargestellt. In einem weiteren Diagramm werden die Spannungen zufolge der gleichmäßigen Temperatureinwirkungen für Winter und Sommer abgebildet. Im dritten Diagramm werden die Spannungen zufolge der linearen Temperatureinwirkungen für Winter und Sommer zusammengefasst. Dabei werden alle maßgebenden Punkte in einem Diagramm dargestellt, um den Einfluss eines Lastfalles am Gesamtsystem zu zeigen.

5.1. Grundsystem 1

Nachfolgend wird grafisch dargestellt, wie die Spannungen an der Außenseite und an der Innenseite von Grundsystem 1 mit sich änderndem Steifemodul E_s zu- bzw. abnehmen.

5.1.1. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 5,0$ m

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Hauptsysteme 1.1, 1.4 und 1.7 angeführt. Es handelt sich dabei um jene Hauptsysteme, die eine Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m, aber unterschiedliche Spannweiten aufweisen. Die folgenden Abbildungen 5.1 bis 5.3 zeigen die Spannungen an der Außenseite, während jene an der Innenseite in den Abbildungen 5.4 bis 5.6 dargestellt werden.

Abbildung 5.1 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Außenseite. Am Pfahlkopf lässt sich bei einer Zunahme von E_s die Abnahme der Spannungen bzw. bereits ein Spannungswechsel erkennen. Auch am Widerlagerfuß nehmen die Spannungen ab. Im Rahmeneck nehmen die Zugspannungen zufolge *Eigengewicht* zu, jene zufolge *Erddruck zufolge Sommer* jedoch ab. In Feldmitte nehmen die Spannungen zufolge beider Lastfälle mit steigendem E_s ab.

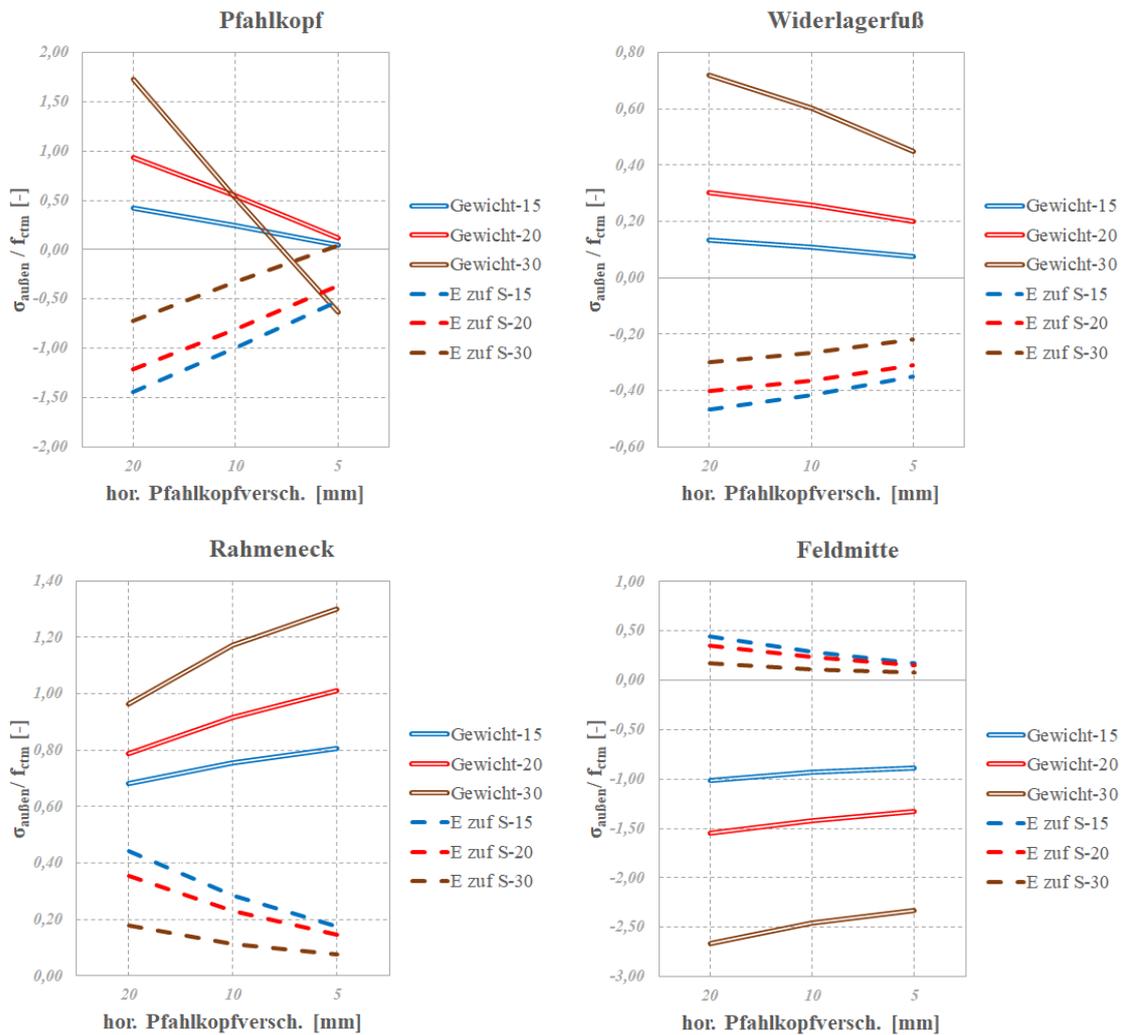
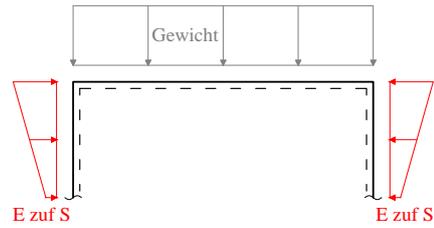


Abbildung 5.1.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.2 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Außenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Zugspannungen zufolge T_n *Winter* sowie die Druckspannungen zufolge T_n *Sommer 1 und 2* mit steigendem E_s zu. Am Widerlagerfuß lässt sich für beide Lastfälle ein Vorzeichenwechsel und somit mit zunehmendem E_s ein Spannungswechsel erkennen. Im Rahmeneck und in Feldmitte liefern T_n *Winter* mit steigendem E_s zunehmende Druckspannungen und T_n *Sommer 1 und 2* zunehmende Zugspannungen.

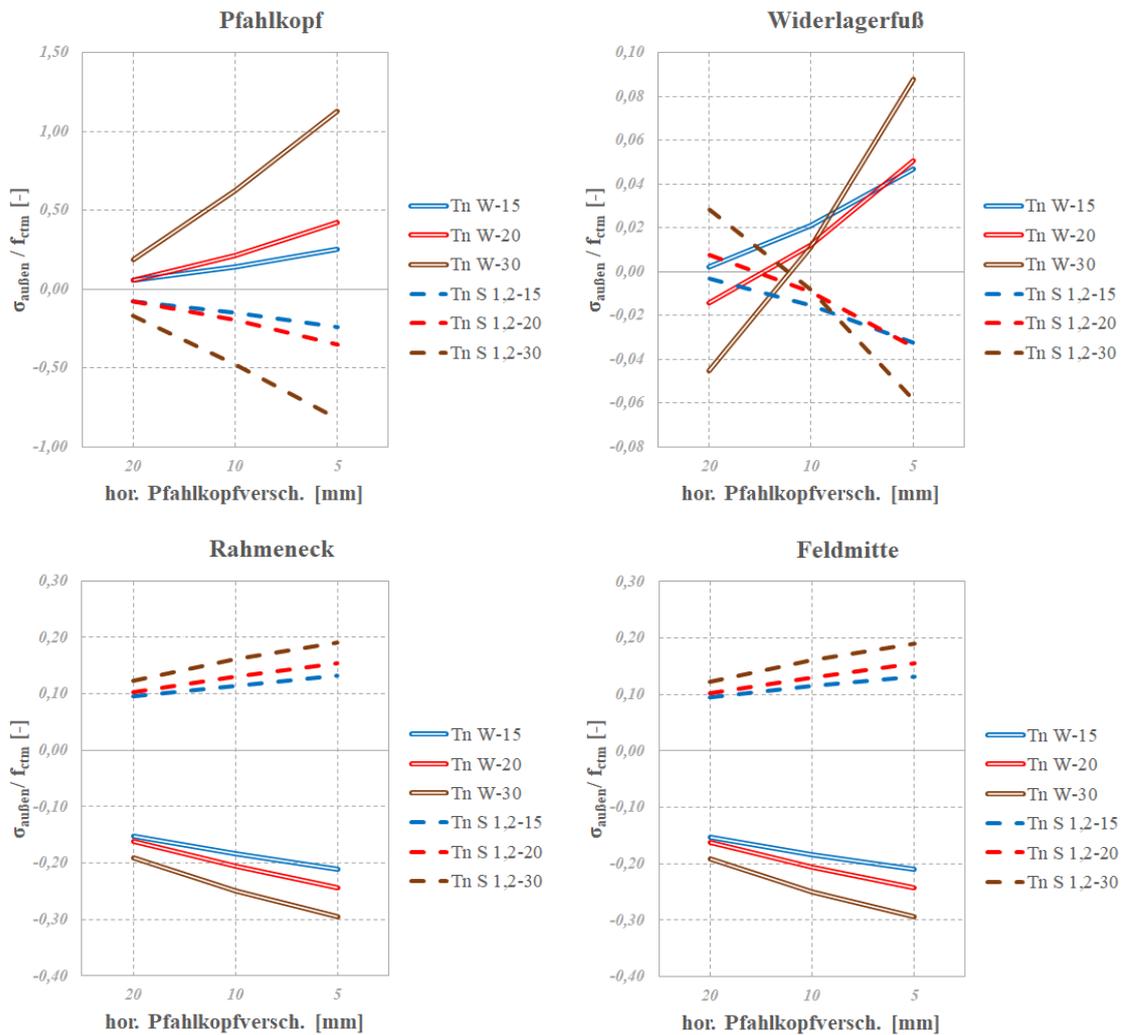
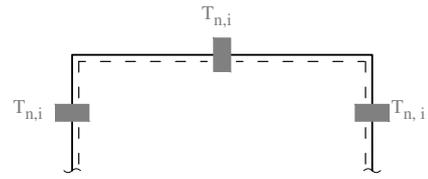


Abbildung 5.2.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.3 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Außenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Druckspannungen, die jedoch bei steigendem E_s nur minimale bis geringe Zu- oder Abnahmen zeigen. Am Pfahlkopf führen die Sommerlastfälle zu Zugspannungen, die mit zunehmendem E_s abnehmen. Auch am Widerlagerfuß liefern die Sommerlastfälle Zugspannungen, die mit steigendem E_s abnehmen. Im Rahmeneck und in Feldmitte steigen die Zugspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s an.

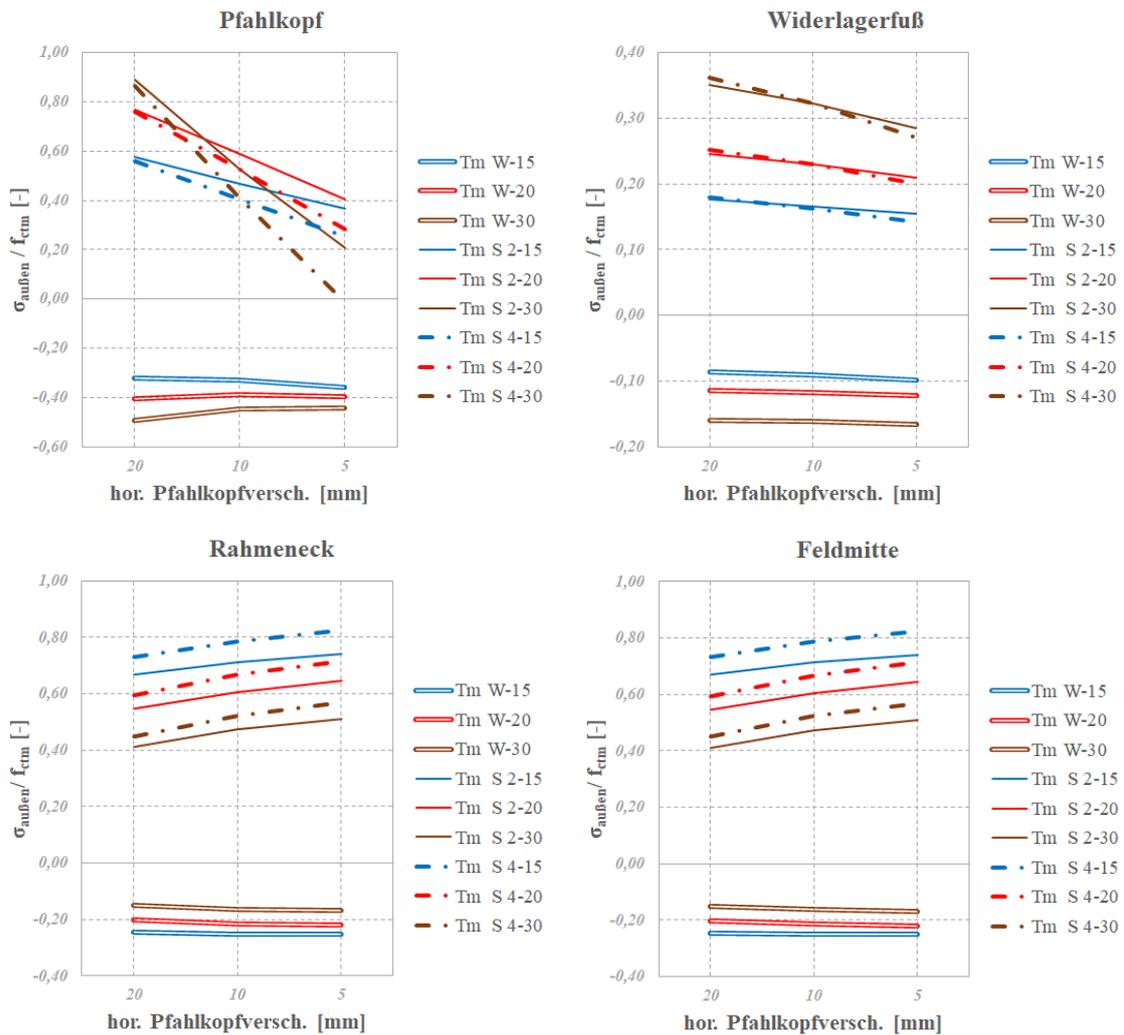
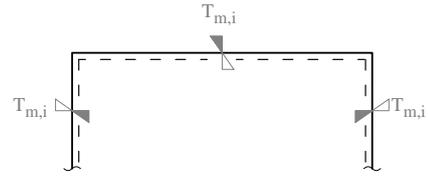


Abbildung 5.3.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.4 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Innenseite. Am Pfahlkopf lässt sich bei einer Zunahme von E_s die Abnahme der Spannungen bzw. ein Spannungswechsel erkennen. Auch am Widerlagerfuß nehmen die Spannungen ab. Im Rahmeneck nehmen die Druckspannungen zufolge *Eigengewicht* zu, jene zufolge *Erddruck zufolge Sommer* jedoch ab. In Feldmitte nehmen die Spannungen zufolge beider Lastfälle mit steigendem E_s ab.

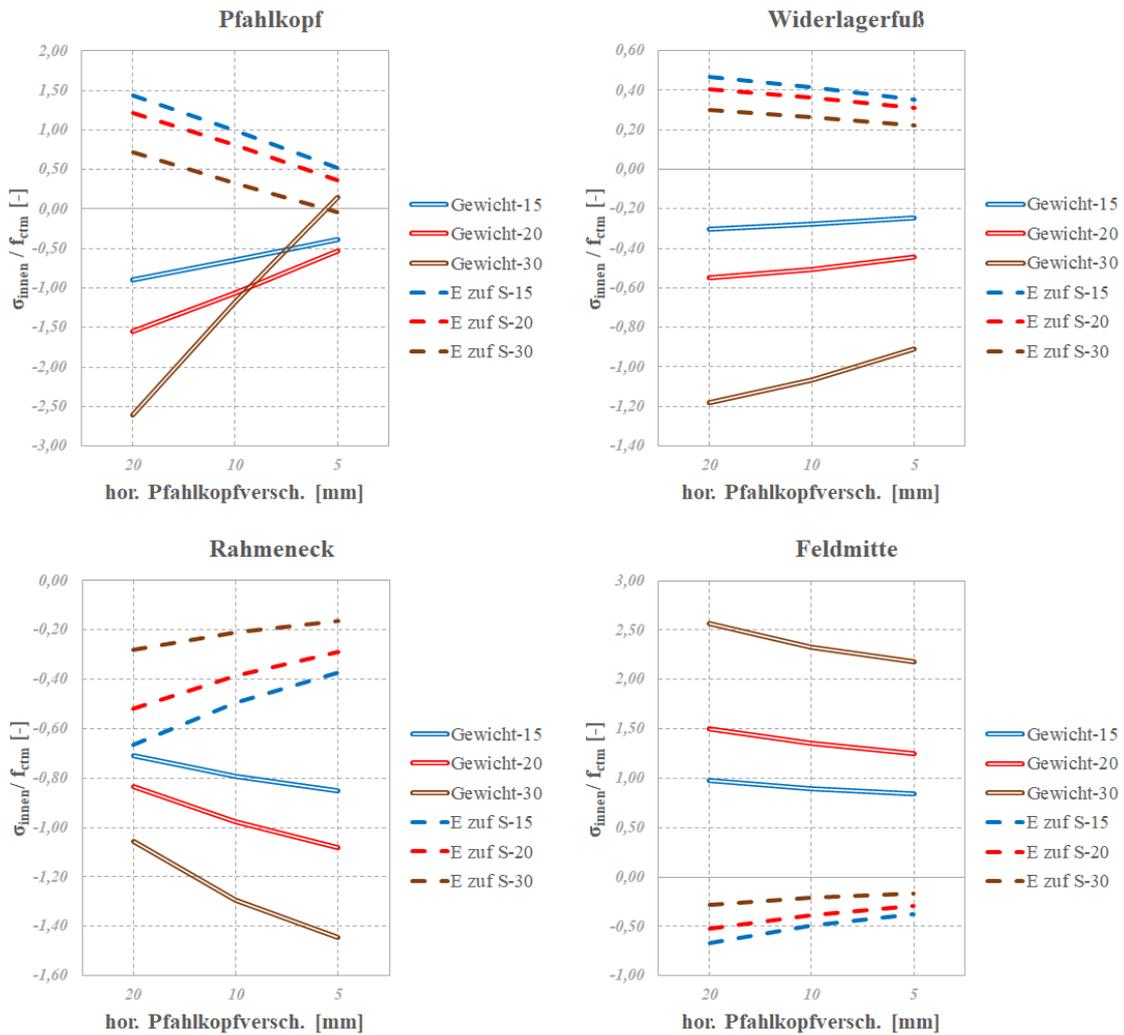
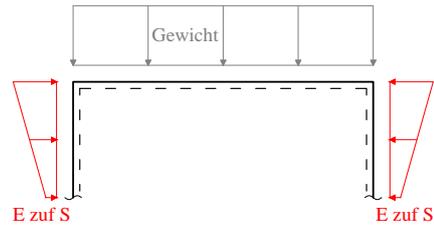


Abbildung 5.4.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.5 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Innenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Druckspannungen zufolge T_n Winter sowie die Zugspannungen zufolge T_n Sommer 1 und 2 mit steigendem E_s zu. Am Widerlagerfuß lässt sich für beide Lastfälle ein Vorzeichenwechsel und somit mit zunehmendem E_s ein Spannungswechsel erkennen. Im Rahmeneck und in Feldmitte liefern T_n Winter mit steigendem E_s zunehmende Zugspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Druckspannungen.

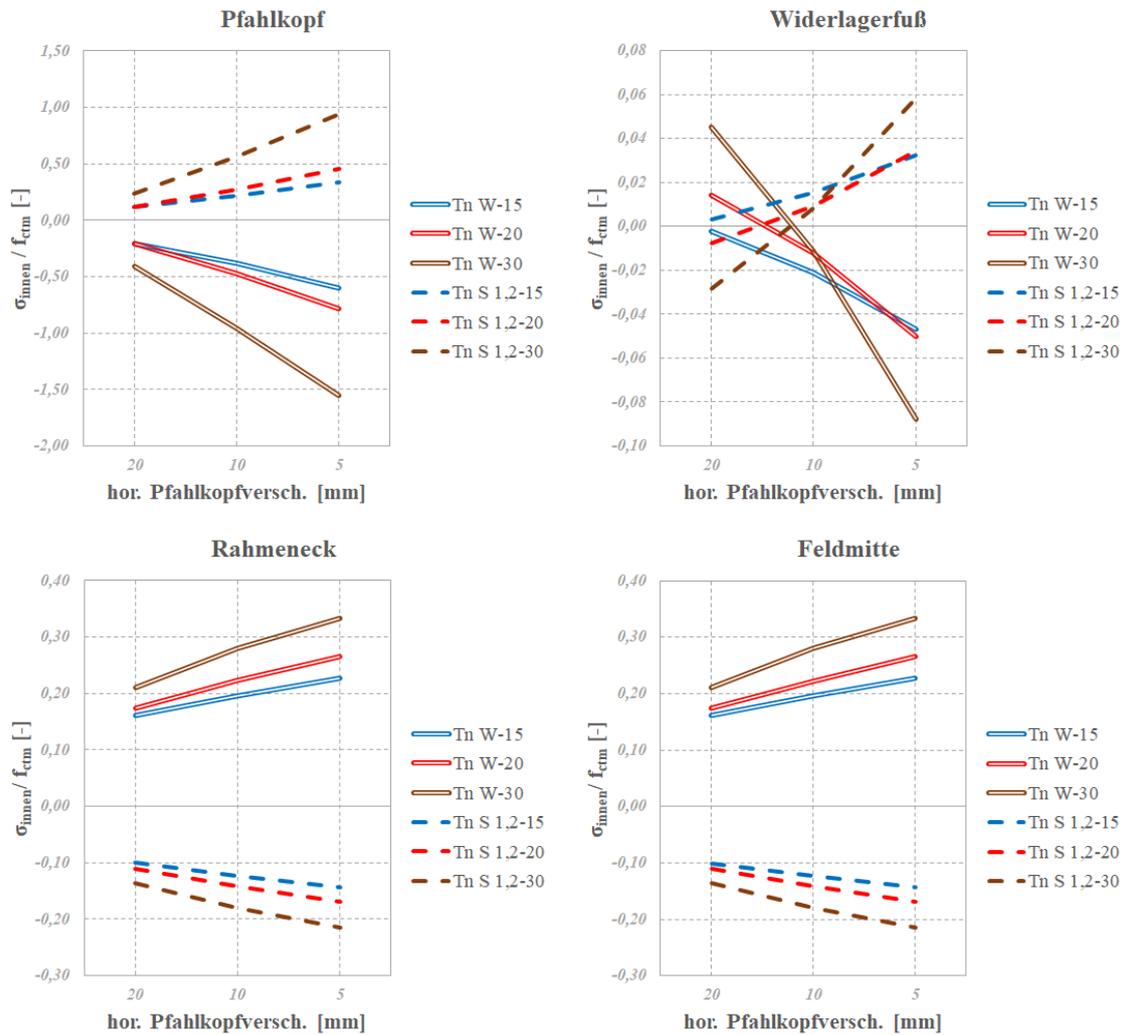
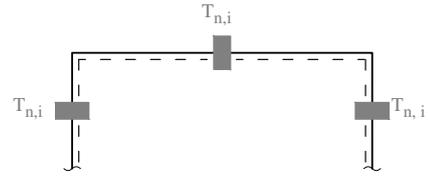


Abbildung 5.5.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.6 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Innenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Zugspannungen, die jedoch bei steigendem E_s nur minimale bis geringe Zu- oder Abnahmen zeigen. Am Pfahlkopf führen die Sommerlastfälle zu Druckspannungen, die mit zunehmendem E_s abnehmen. Auch am Widerlagerfuß liefern die Sommerlastfälle Druckspannungen, die mit steigendem E_s abnehmen. Im Rahmeneck und in Feldmitte nehmen die Druckspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s zu.

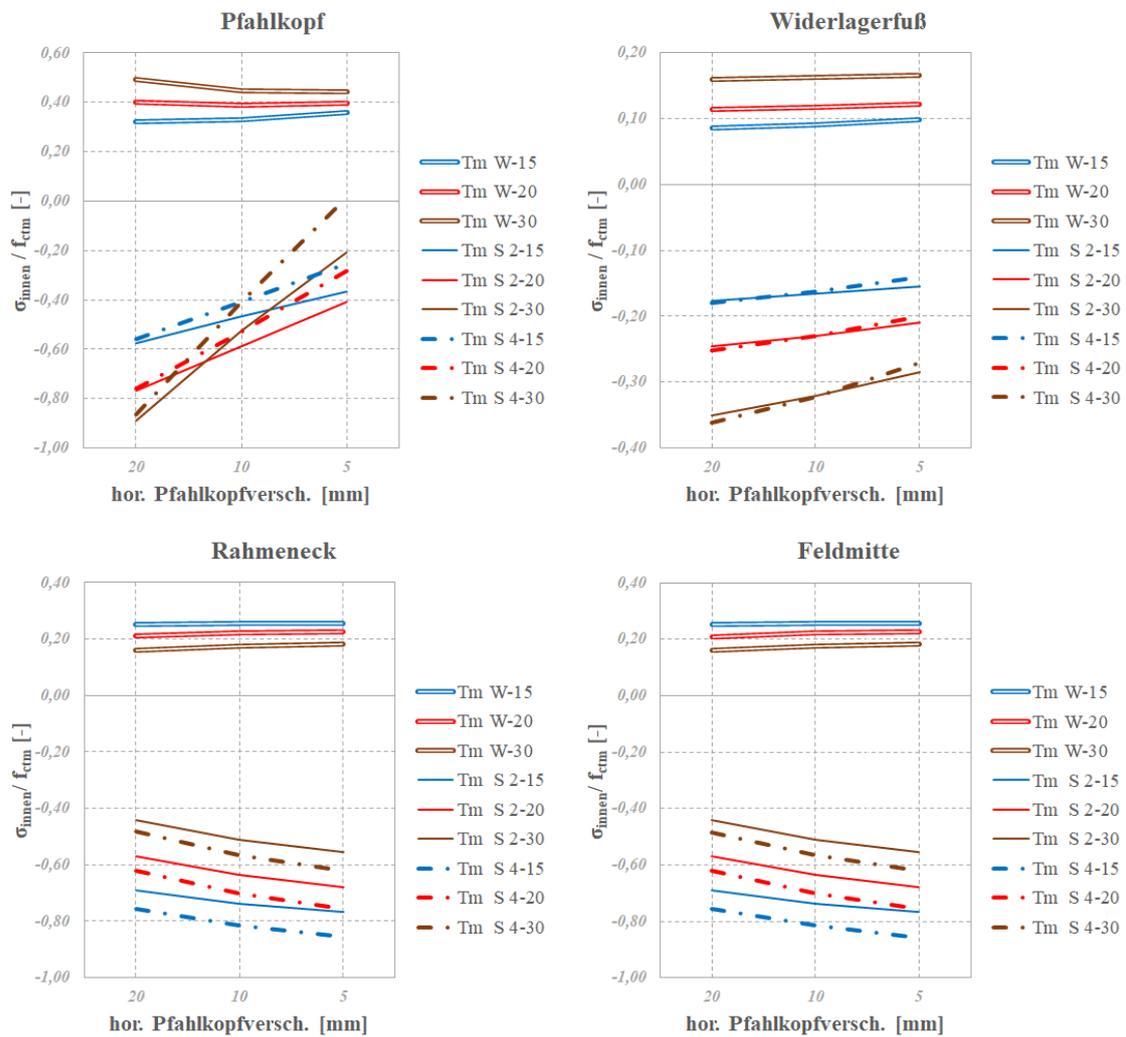
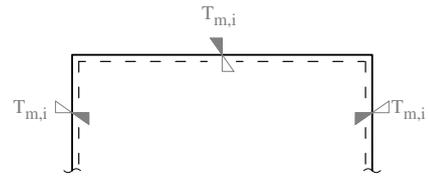


Abbildung 5.6.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 1

5.1.2. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 7,5$ m

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Hauptsysteme 1.2, 1.5 und 1.8 angeführt. Es handelt sich dabei um jene Hauptsysteme, die eine Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 7,5$ m, aber unterschiedliche Spannweiten aufweisen. Die folgenden Abbildungen 5.7 bis 5.9 zeigen die Spannungen an der Außenseite, während jene an der Innenseite in den Abbildungen 5.10 bis 5.12 dargestellt werden.

Abbildung 5.7 zeigt die Spannung zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Außenseite. Am Pfahlkopf lässt sich mit zunehmendem E_s ein Spannungswechsel erkennen. Am Widerlagerfuß nehmen die Spannungen ab und es lässt sich die Tendenz zum Spannungswechsel ausmachen. Im Rahmeneck treten mit steigendem E_s zunehmende Zugspannungen zufolge *Eigengewicht* und abnehmende Zugspannungen zufolge *Erddruck zufolge Sommer* auf. In Feldmitte liefern beide Lastfälle leicht abnehmende Spannungen.

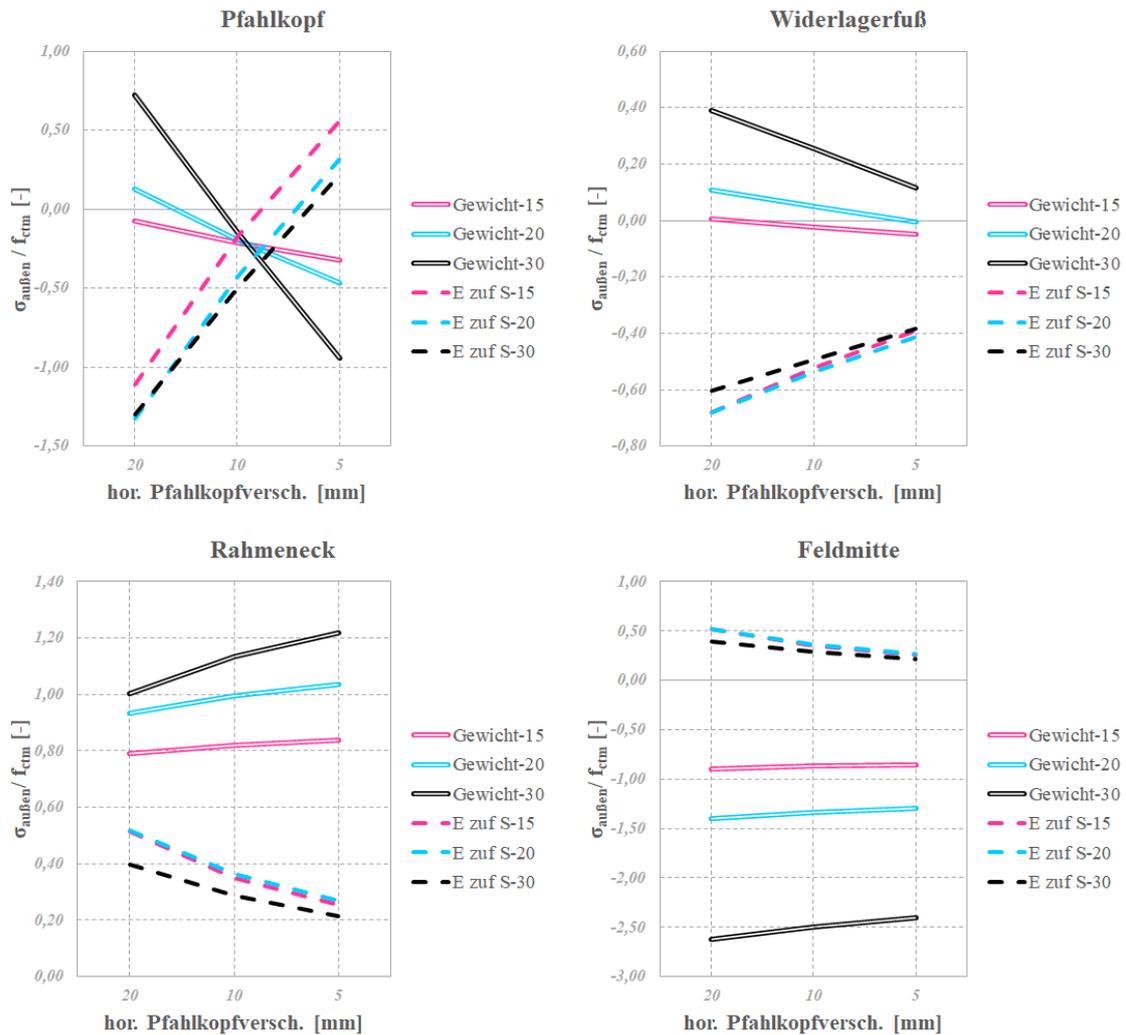
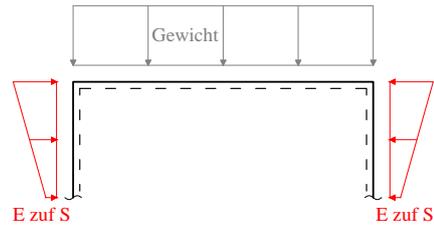


Abbildung 5.7.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.8 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Außenseite. Am Pfahlkopf und auch am Widerlagerfuß treten mit steigendem E_s zunehmende Zugspannungen zufolge T_n *Winter* und zunehmende Druckspannungen zufolge T_n *Sommer 1 und 2* auf. Im Rahmeneck und in Feldmitte kommt es bei steigendem E_s zu zunehmenden Druckspannungen zufolge T_n *Winter* und zu zunehmenden Zugspannungen zufolge T_n *Sommer 1 und 2*.

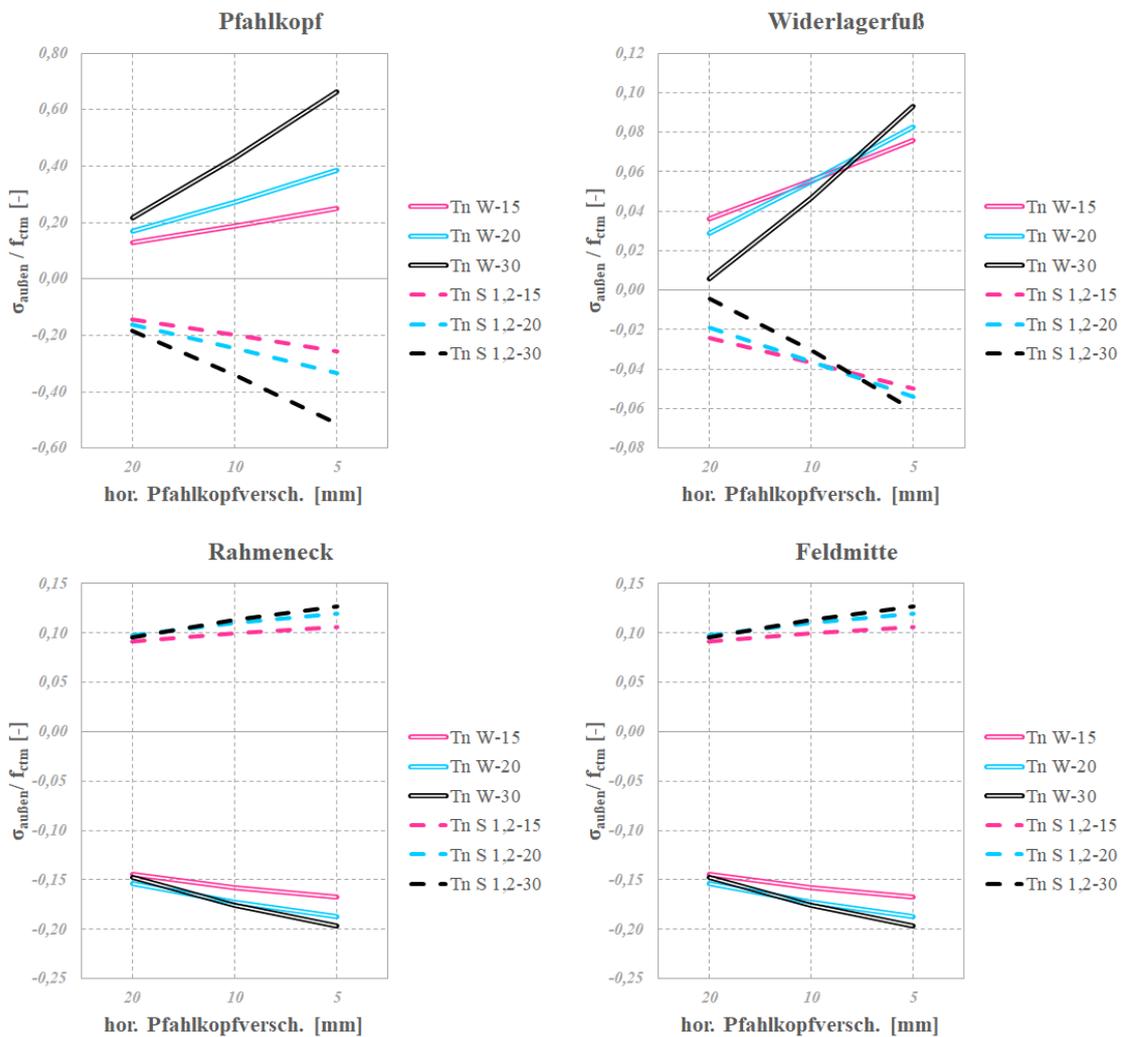
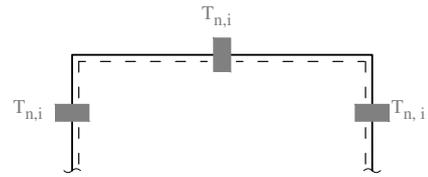


Abbildung 5.8.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.9 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Außenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Druckspannungen. Am Pfahlkopf und Widerlagerfuß kommt es mit zunehmendem E_s zu tendenziell leichten Spannungszunahmen, während die Spannungen im Rahmeneck und in Feldmitte nur minimal zunehmen bzw. stagnieren. Zuzufolge der Sommerlastfälle treten am Pfahlkopf Zugspannungen auf, wobei diese mit steigendem E_s abnehmen und sich die Tendenz eines Vorzeichenwechsels bemerkbar macht. Auch am Widerlagerfuß nehmen die Zugspannungen zufolge Sommer ab. Im Rahmeneck und in Feldmitte liefern die Sommerlastfälle Zugspannungen, die mit steigendem E_s leicht zunehmen.

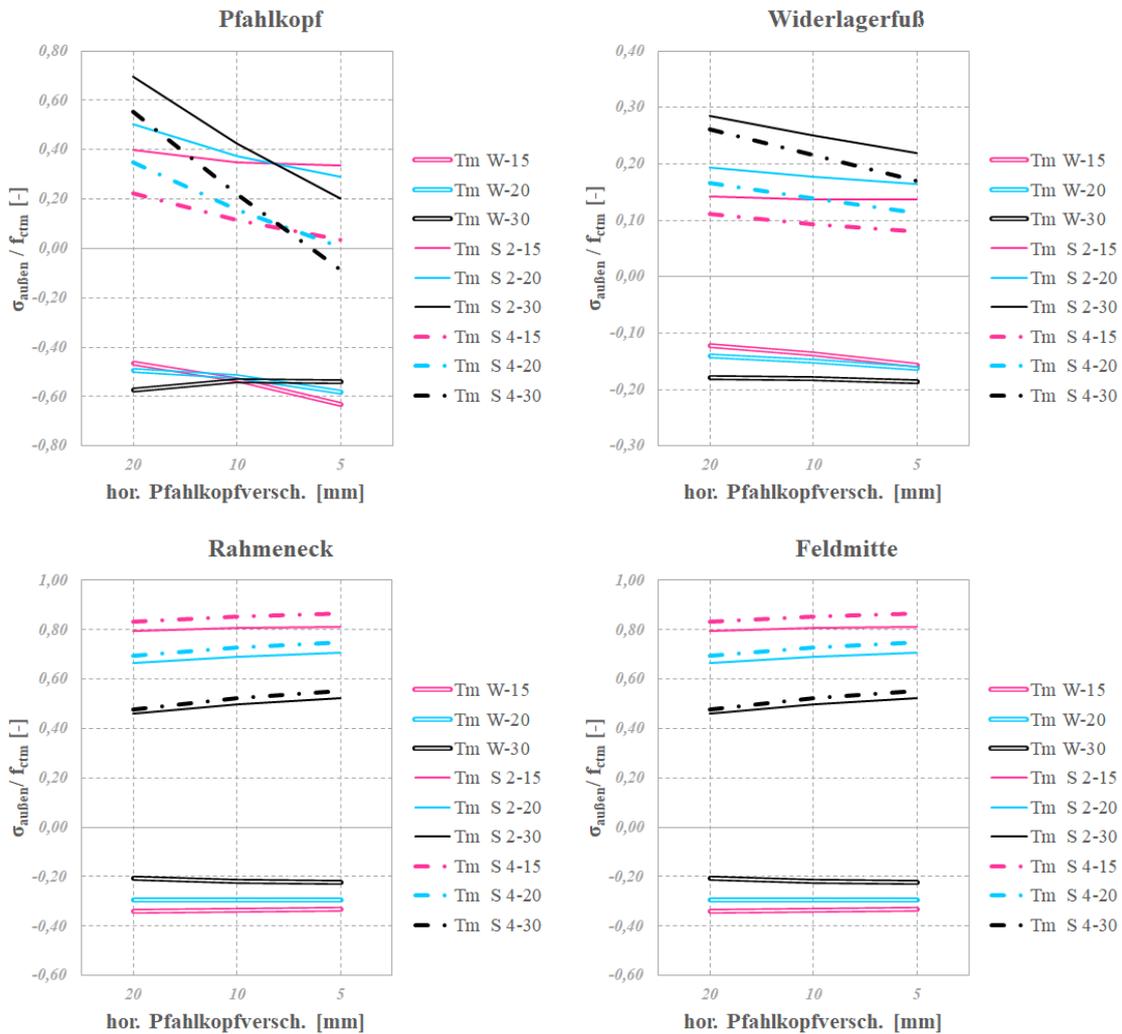
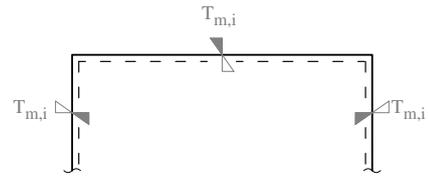


Abbildung 5.9.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.10 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Innenseite. Am Pfahlkopf lässt sich mit zunehmendem E_s ein Spannungswechsel erkennen. Am Widerlagerfuß nehmen die Spannungen ab. Im Rahmeneck treten mit steigendem E_s zunehmende Druckspannungen zufolge *Eigengewicht* und abnehmende Druckspannungen zufolge *Erddruck zufolge Sommer* auf. In Feldmitte liefern beide Lastfälle abnehmende Spannungen.

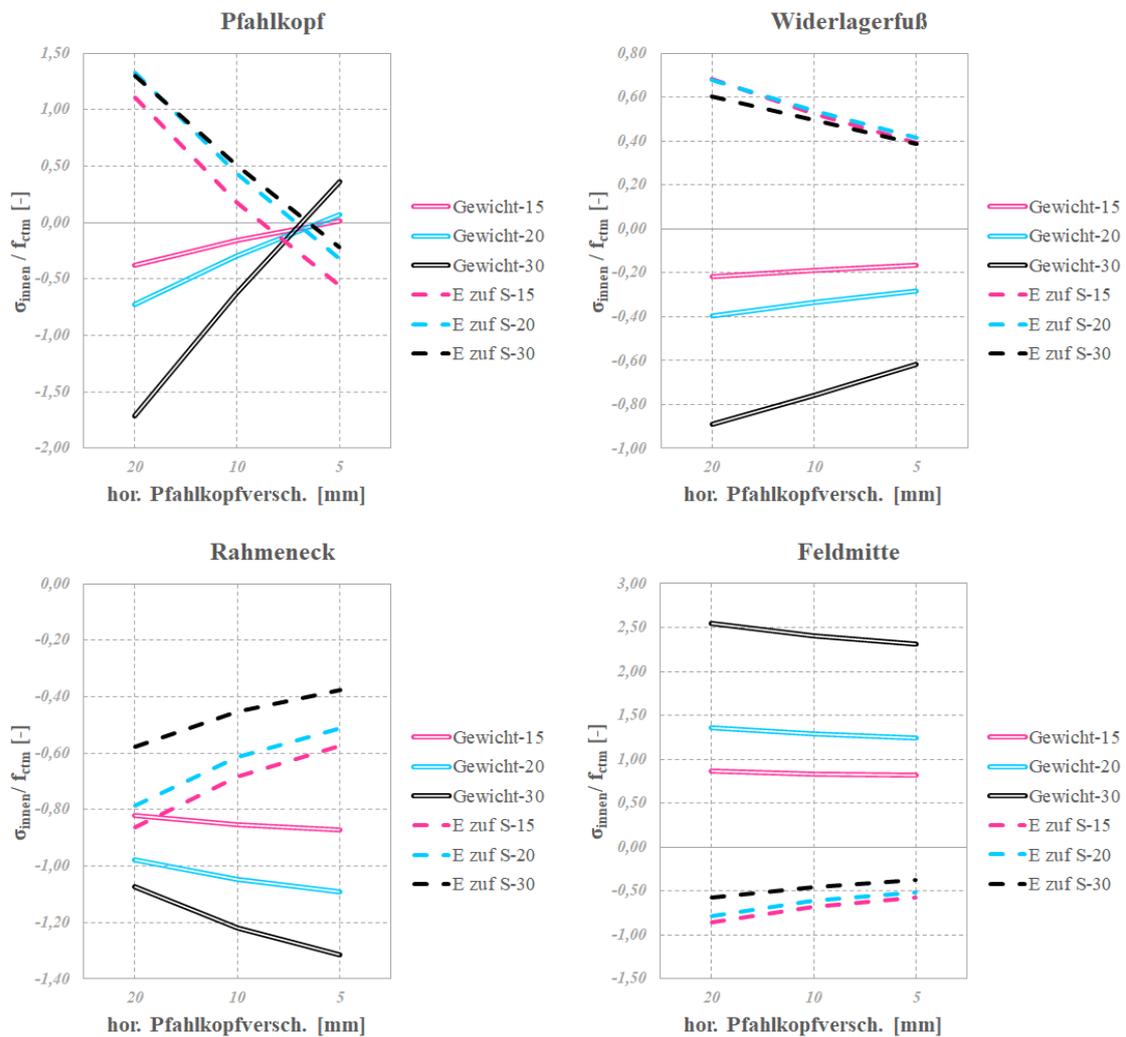
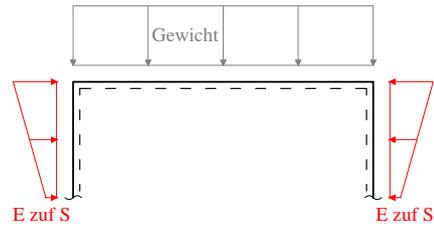


Abbildung 5.10.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.11 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Innenseite. Am Pfahlkopf und auch am Widerlagerfuß treten mit steigendem E_s zunehmende Druckspannungen zufolge T_n *Winter* und zunehmende Zugspannungen zufolge T_n *Sommer 1 und 2* auf. Im Rahmeneck und in Feldmitte kommt es bei steigendem E_s zu zunehmenden Zugspannungen zufolge T_n *Winter* und zu zunehmenden Druckspannungen zufolge T_n *Sommer 1 und 2*.

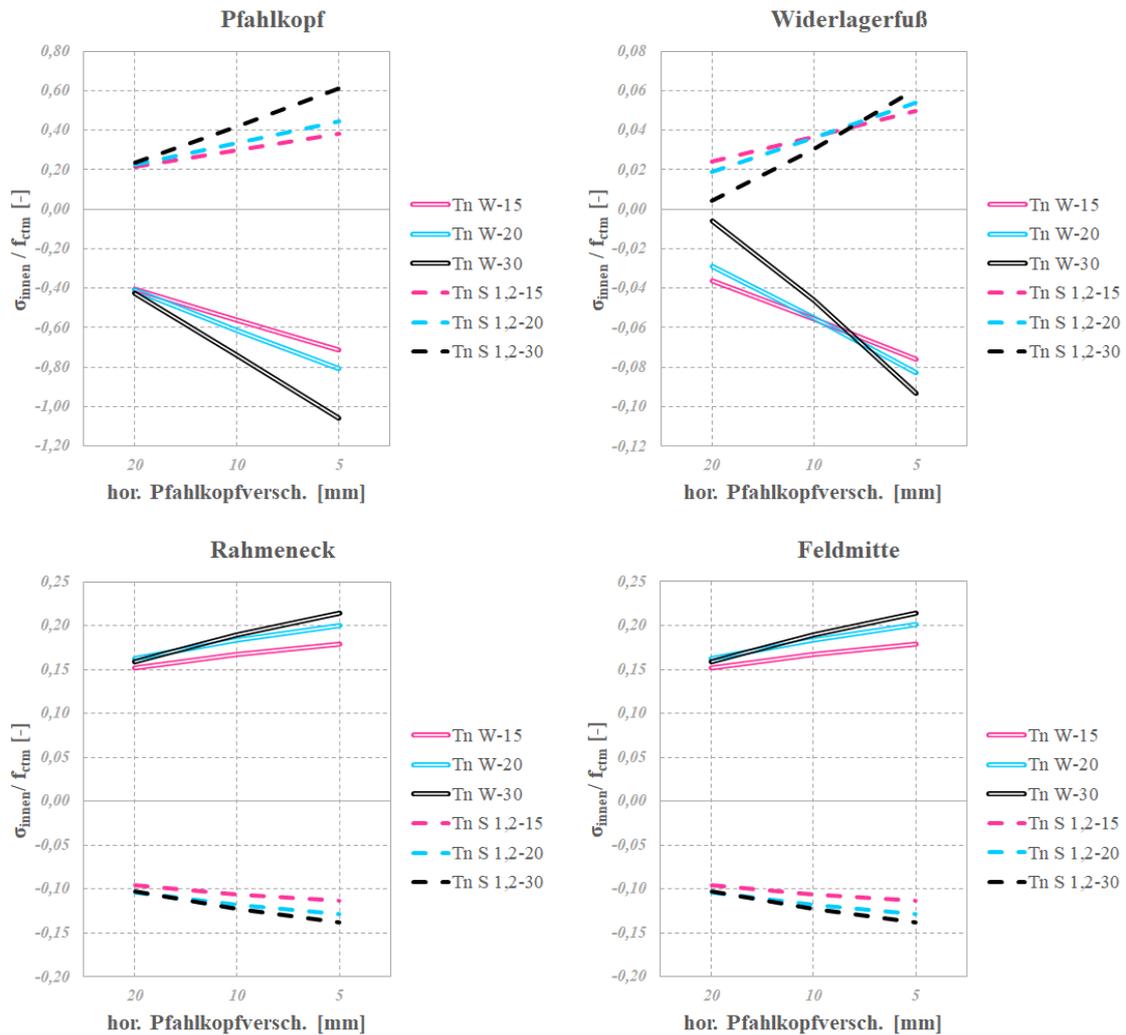
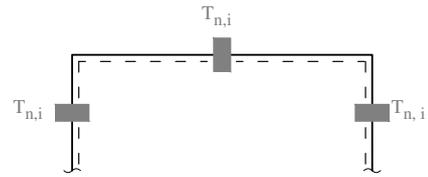


Abbildung 5.11.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.12 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Innenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Zugspannungen. Am Pfahlkopf und Widerlagerfuß kommt es mit zunehmendem E_s zu tendenziell leichten Spannungszunahmen, während die Spannungen im Rahmeneck und in Feldmitte nur minimal zunehmen bzw. stagnieren. Zufolge der Sommerlastfälle treten am Pfahlkopf Druckspannungen auf, wobei diese mit steigendem E_s abnehmen und sich für T_m Sommer 4 die Tendenz eines Vorzeichenwechsels bemerkbar macht. Auch am Widerlagerfuß nehmen die Druckspannungen zufolge Sommer ab. Im Rahmeneck und in Feldmitte liefern die Sommerlastfälle Druckspannungen, die mit steigendem E_s leicht zunehmen.

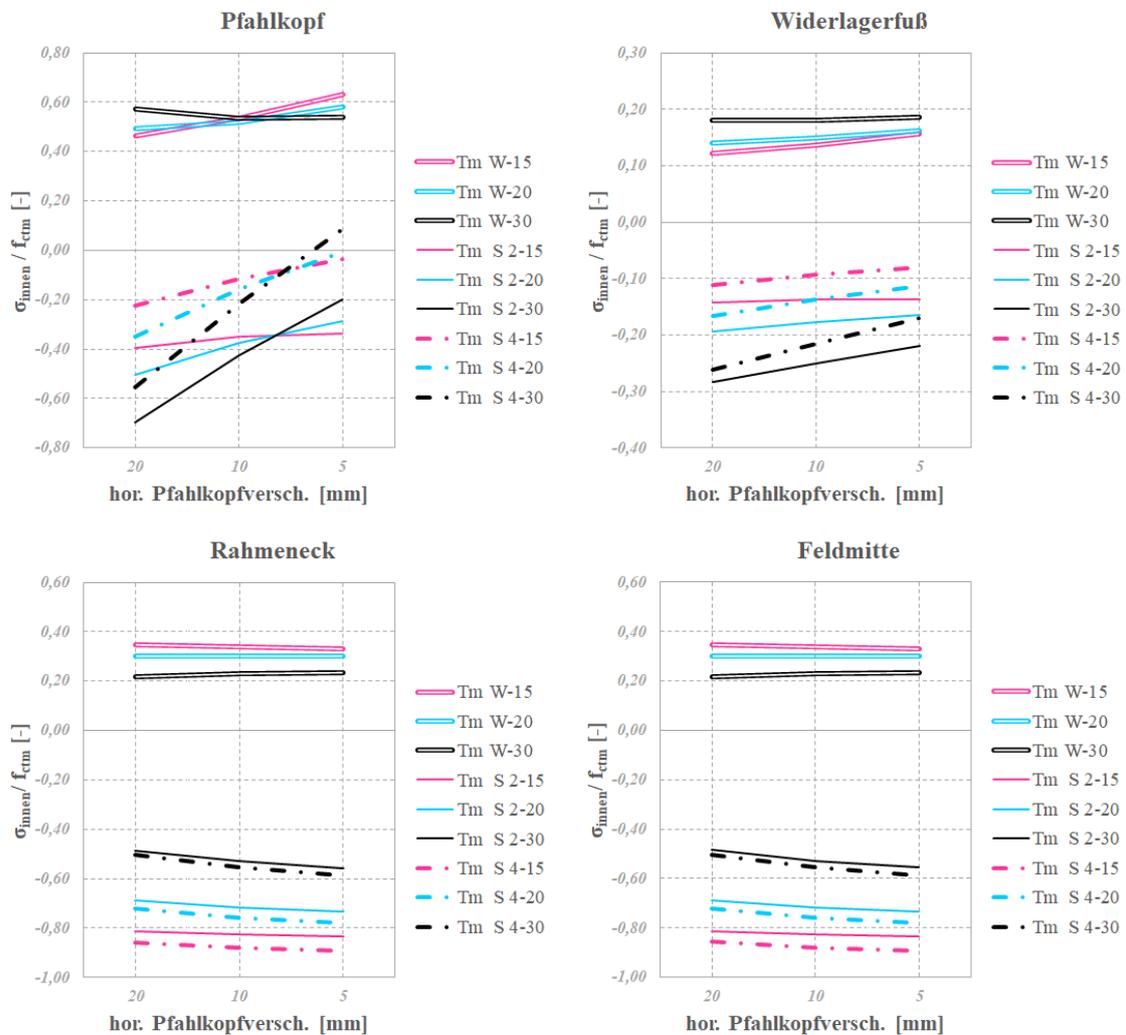
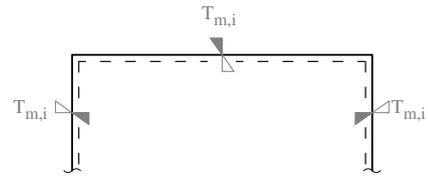


Abbildung 5.12.: $\sigma_{\text{innen}}/f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=7,5$ m für Grundsystem 1

5.1.3. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 10,0$ m

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Hauptssysteme 1.3, 1.6 und 1.9 angeführt. Es handelt sich dabei um jene Hauptssysteme, die eine Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 10,0$ m, aber unterschiedliche Spannweiten aufweisen. Die folgenden Abbildungen 5.13 bis 5.15 zeigen die Spannungen an der Außenseite, während jene an der Innenseite in den Abbildungen 5.16 bis 5.18 dargestellt werden.

Abbildung 5.13 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Außenseite. Am Pfahlkopf treten zufolge *Eigengewicht* mit steigendem E_s zunehmende Druckspannungen auf, während zufolge *Erddruck zufolge Sommer* ein Spannungswechsel und zunehmende Zugspannungen zu beobachten sind. Am Widerlagerfuß liefert *Erddruck zufolge Sommer* abnehmende Druckspannungen, zufolge *Eigengewicht* kommt es zu zunehmenden Druckspannungen. Im Rahmeneck führt steigendes E_s unter *Eigengewicht* zu leicht zunehmenden und unter *Erddruck zufolge Sommer* zu abnehmenden Zugspannungen. In Feldmitte kommt es in beiden Fällen zu leicht abnehmenden bzw. stagnierenden Spannungen.

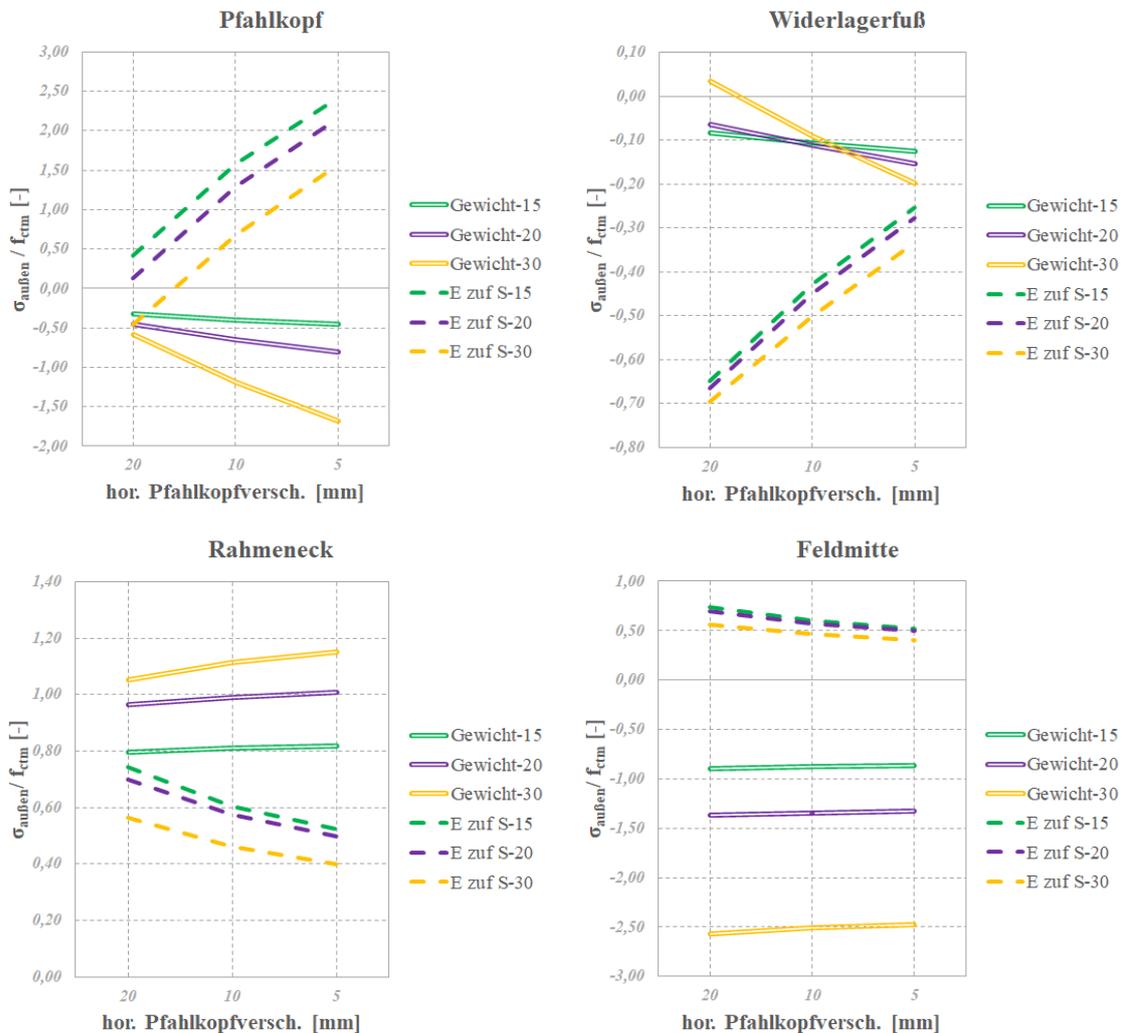
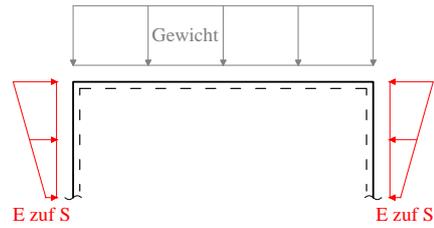


Abbildung 5.13.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.14 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Außenseite. Am Pfahlkopf und auch am Widerlagerfuß kommt es mit steigendem E_s zufolge T_n *Winter* zu zunehmenden Zugspannungen und zufolge T_n *Sommer 1 und 2* zu zunehmenden Druckspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte liefert zunehmendes E_s im Winter zunehmende Druckspannungen und im Sommer zunehmende Zugspannungen.

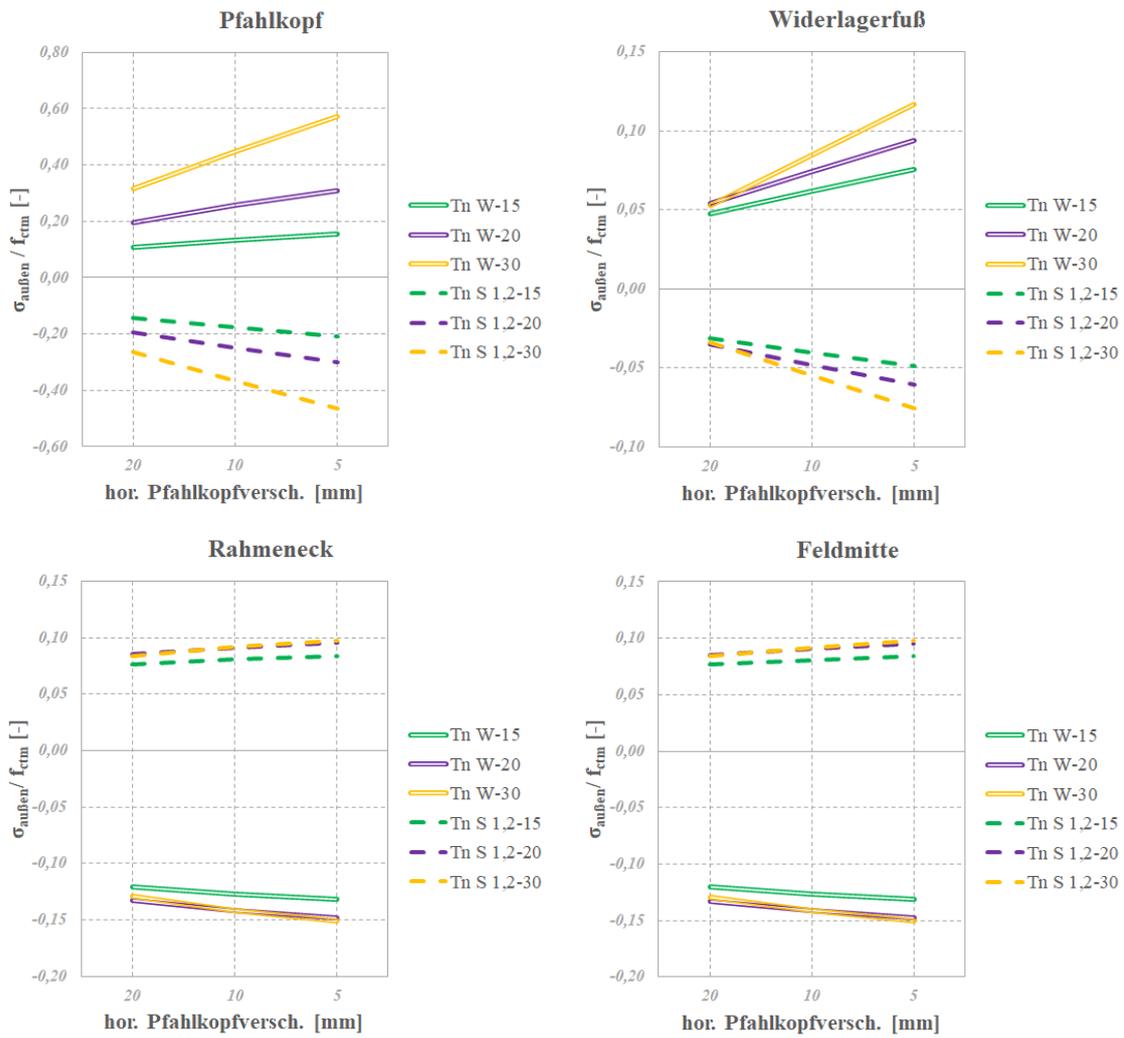
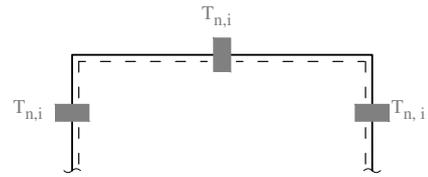


Abbildung 5.14.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{ctm}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.15 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Außenseite. T_m Winter führt in allen Punkten zu Druckspannungen. Am Pfahlkopf und Widerlagerfuß nehmen diese mit steigendem E_s zu, im Rahmeneck und in Feldmitte stagnieren die Spannungen jedoch. Am Pfahlkopf liefert T_m Sommer 2 Zugspannungen, zufolge T_m Sommer 4 kommt es aber zu einem Spannungswechsel. Am Widerlagerfuß liefern beide Sommerlastfälle Zugspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte treten ebenfalls Zugspannungen auf, zunehmendes E_s bewirkt nur minimale Zunahme ebensener.

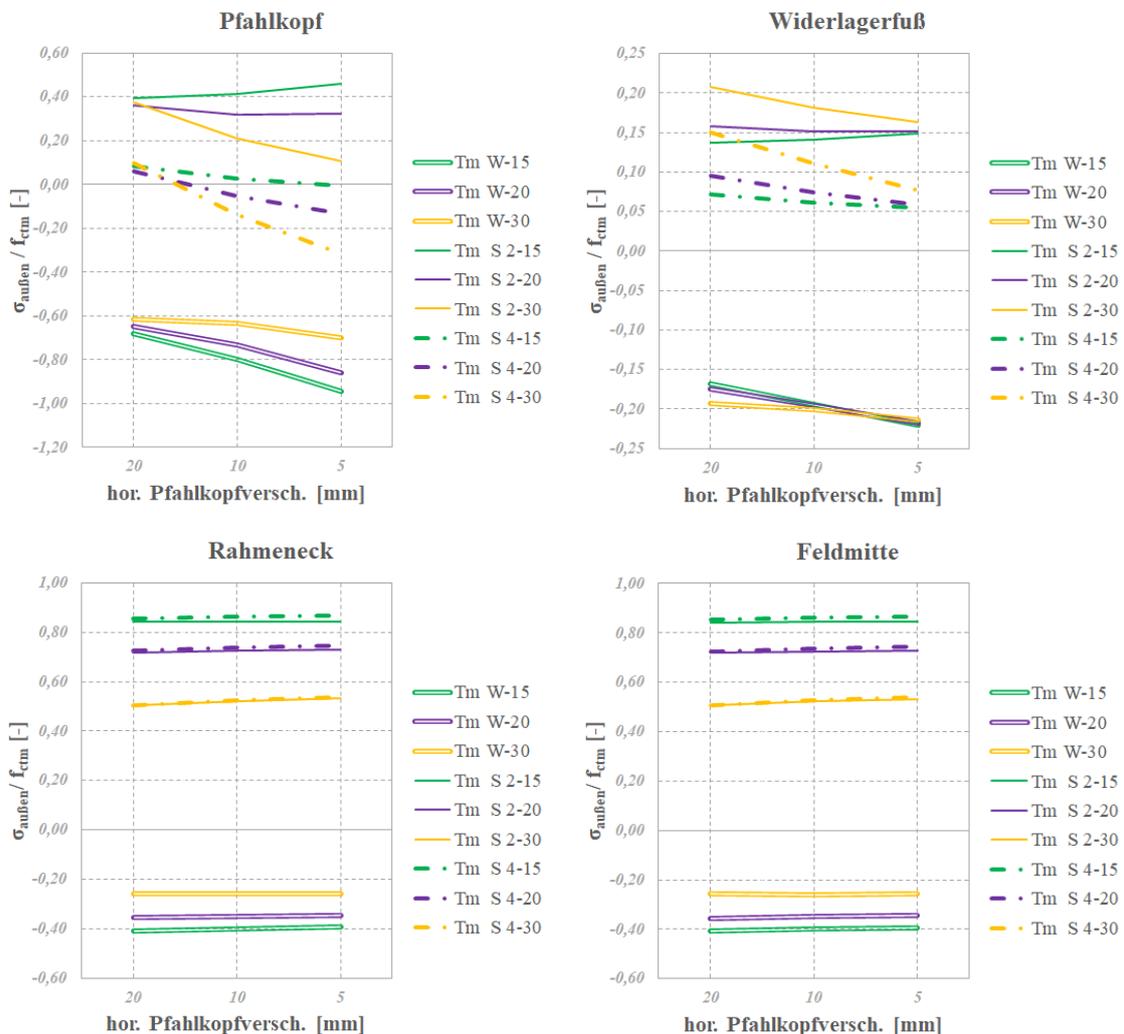
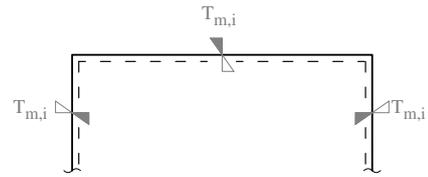


Abbildung 5.15.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *ungleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.16 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Innenseite. Am Pfahlkopf ist für beide Lastfälle ein Spannungswechsel zu beobachten. Am Widerlagerfuß liefern beide Lastfälle abnehmende Spannungen. Im Rahmeneck führt steigendes E_s unter *Eigengewicht* zu leicht zunehmenden und unter *Erddruck zufolge Sommer* zu abnehmenden Druckspannungen. In Feldmitte kommt es in beiden Fällen zu leicht abnehmenden bzw. stagnierenden Spannungen.

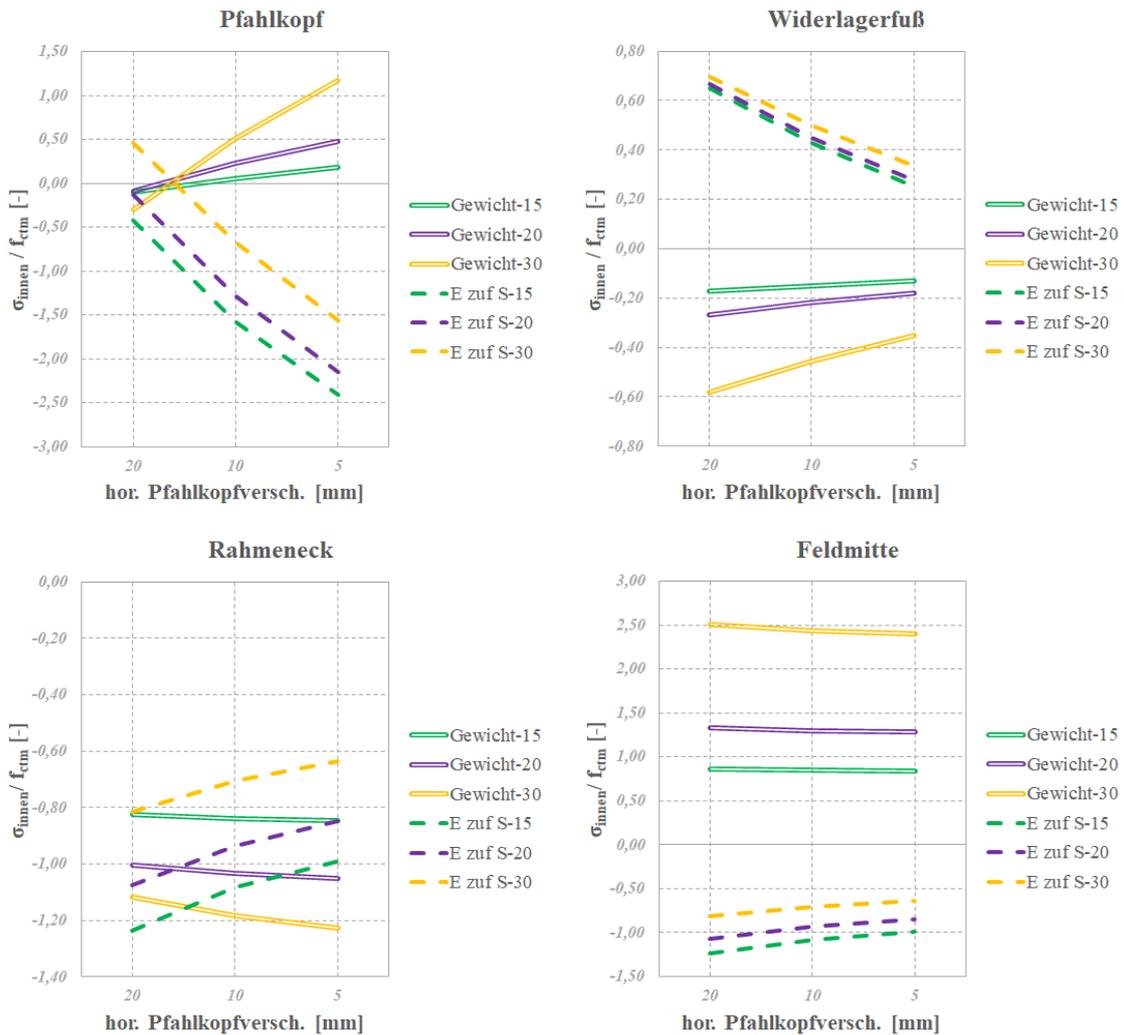
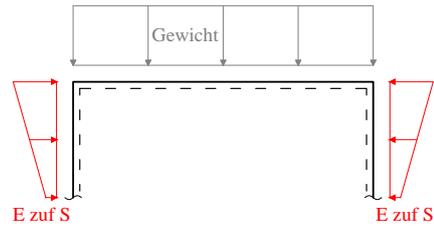


Abbildung 5.16.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.17 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Innenseite. Am Pfahlkopf und auch am Widerlagerfuß kommt es mit steigendem E_s zufolge T_n Winter zu zunehmenden Druckspannungen und zufolge T_n Sommer 1 und 2 zu zunehmenden Zugspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte liefert zunehmendes E_s im Winter zunehmende Zugspannungen und im Sommer zunehmende Druckspannungen.

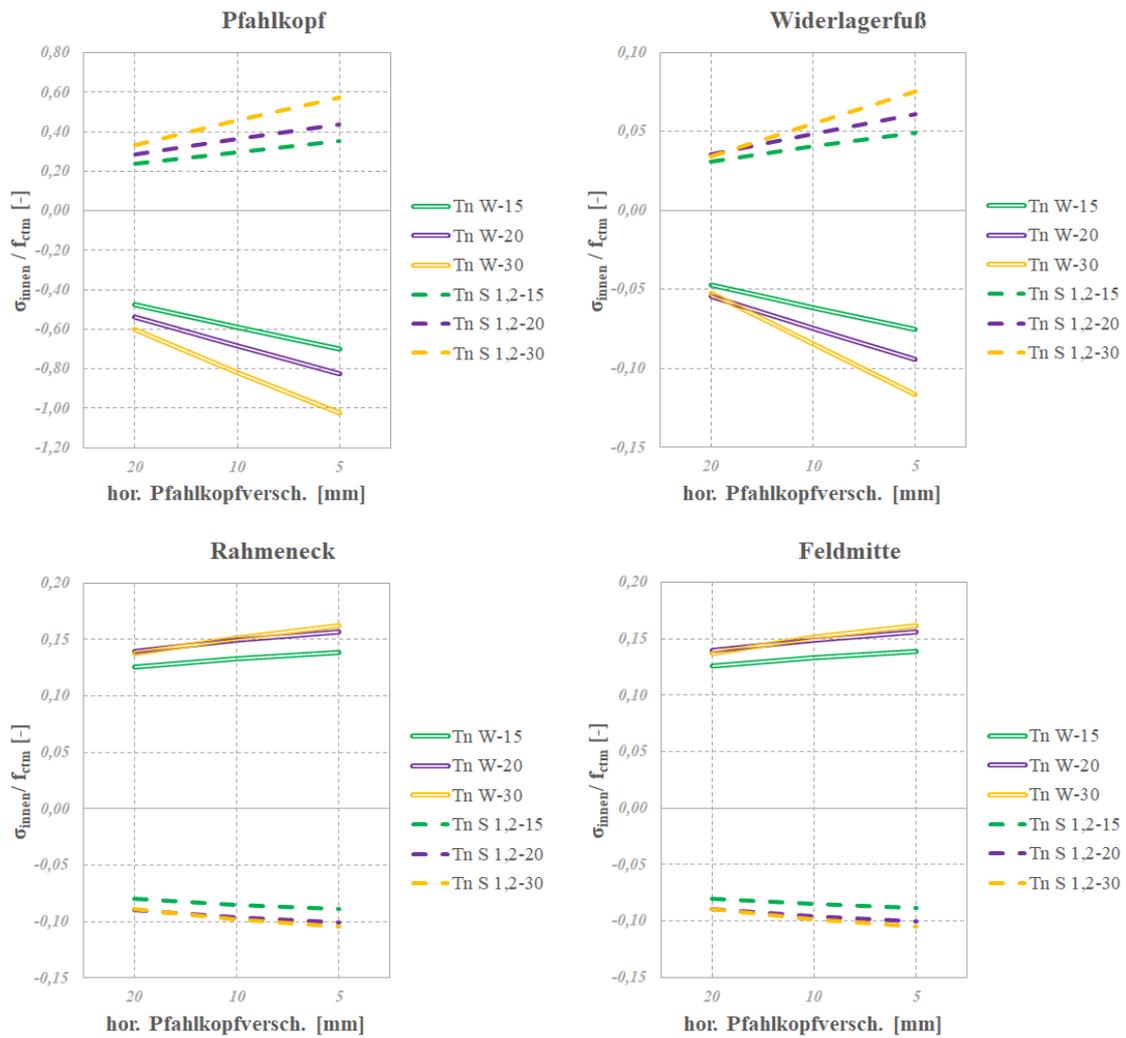
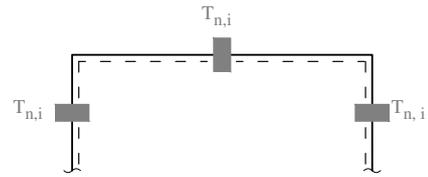


Abbildung 5.17.: $\sigma_{\text{innen}}/f_{ctm}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 5.18 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Innenseite. T_m Winter führt an allen Punkten zu Zugspannungen. Am Pfahlkopf und Widerlagerfuß nehmen diese mit steigendem E_s zu, im Rahmeneck und in Feldmitte stagnieren die Spannungen jedoch oder nehmen minimal ab. Am Pfahlkopf liefert T_m Sommer 2 Druckspannungen, zufolge T_m Sommer 4 kommt es aber zu einem Spannungswechsel. Am Widerlagerfuß liefern beide Sommerlastfälle Druckspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte treten ebenfalls Druckspannungen auf, zunehmendes E_s bewirkt nur minimale Zunahme ebener.

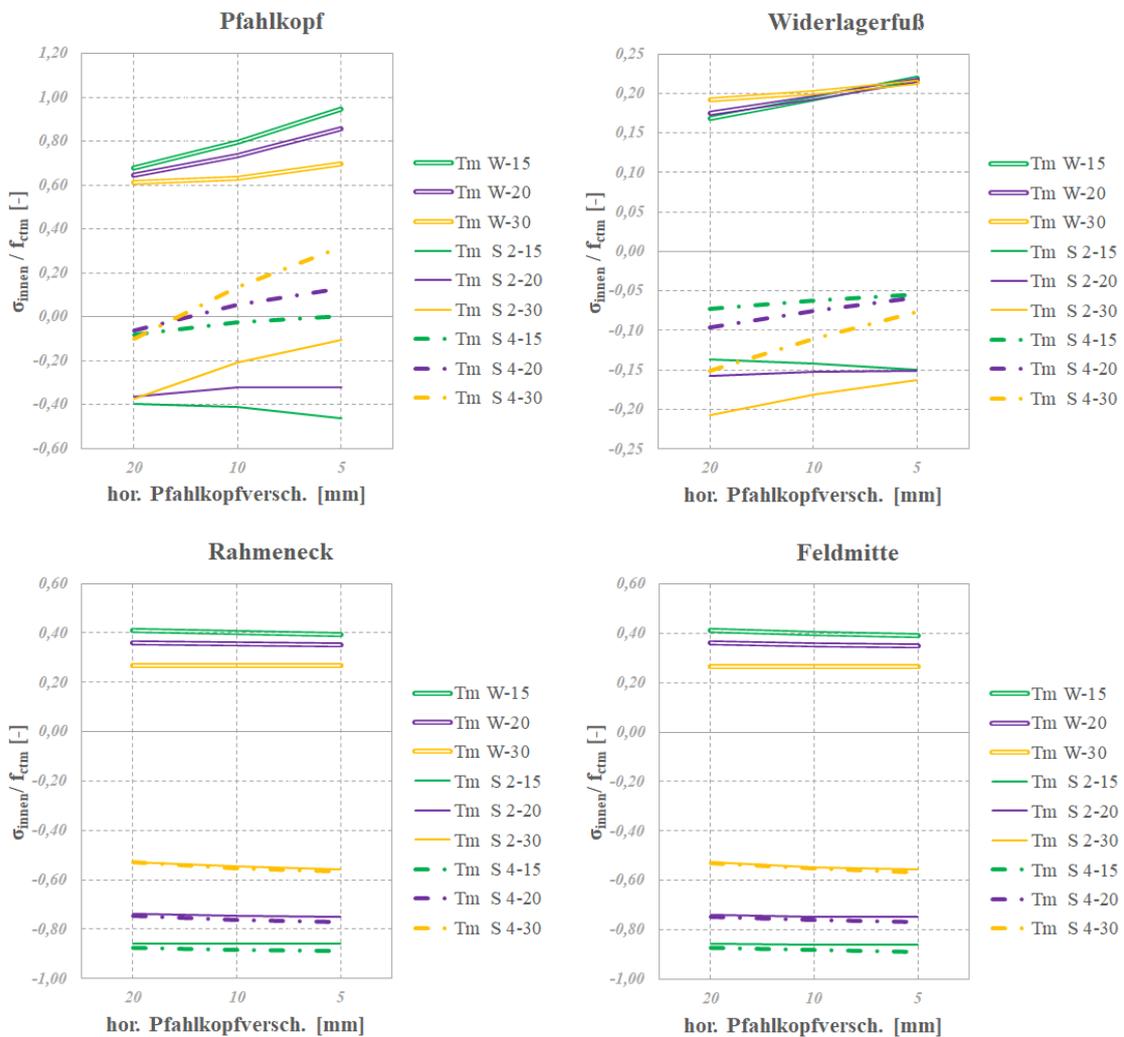
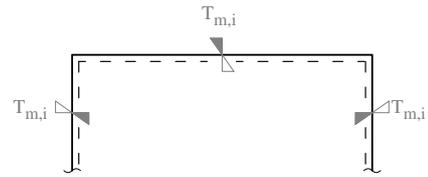


Abbildung 5.18.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1

5.1.4. Interpretation

In diesem Abschnitt folgt eine Interpretation der eben dargestellten Ergebnisse der Einzelastfälle an Grundsystem 1.

Anhand der, in den Abbildungen 5.1 bis 5.18, dargestellten Spannungen zufolge der einzelnen Lastfälle in den maßgebenden Punkten, lässt sich der Einfluss des Steifemoduls für unterschiedliche Spannweiten und Widerlagerhöhen erkennen. Dabei fällt auf, dass es sich beim Pfahlkopf und dem Widerlagerfuß um äußerst sensible Bereiche handelt. Eine Zunahme des Steifemoduls bewirkt deutliches Zu- oder Abnehmen der Spannung und führt häufig zu einem Vorzeichenwechsel der Spannung bzw. des Biegemomentes.

Die Verformungsfigur von Grundsystem 1 ändert sich mit zunehmendem Steifemodul E_s deutlich. In weichem Baugrund kommt es zu gleichzeitiger Translation und Rotation der Pfahlkopfplatte. Steiferer Baugrund hindert die Pfahlkopfplatte zunehmend an der Rotation und lässt zudem deutlich weniger Translation zu. Diese Änderung der Verformung wird mit 500-facher Überhöhung in Abbildung 5.19 für Hauptsystem 1.1 ($L_{sp} = 15$ m, $H_{wl} = 5,0$ m) zufolge des ständigen Erddrucks E_0 dargestellt.

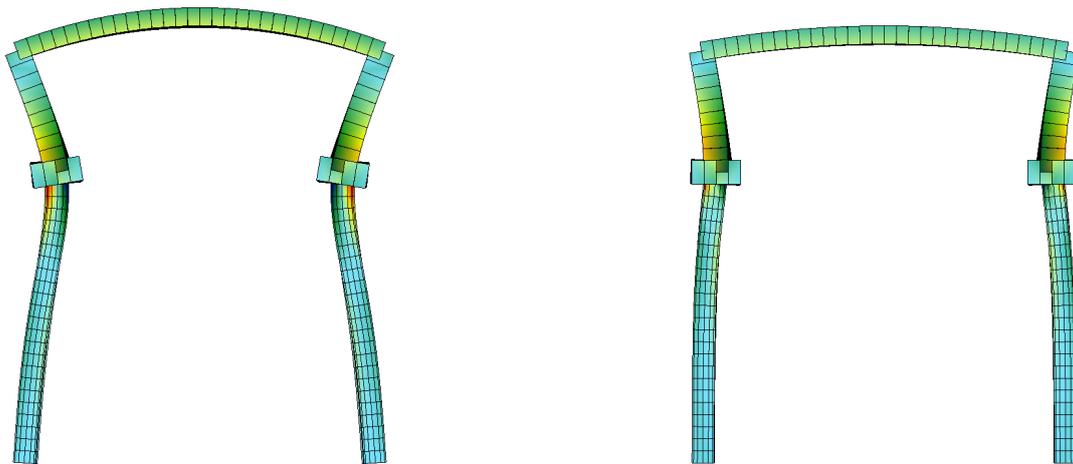


Abbildung 5.19.: Verformung zufolge E_0 für HS 1.1 für $u_{hor,max} = 20$ mm (l) und 5 mm (r)

Ähnlich wie die Verformungsfigur ändert sich auch der Momentenverlauf des Bohrpfahles mit zunehmendem Steifemodul. Um diesen Vorgang zu veranschaulichen, werden die Momentenverläufe zufolge Eigengewicht am Bohrpfahl für Hauptsystem 5.1 ($L_{sp} = 20$ m, $H_{wl} = 7,5$ m) in Abbildung 5.20 dargestellt.

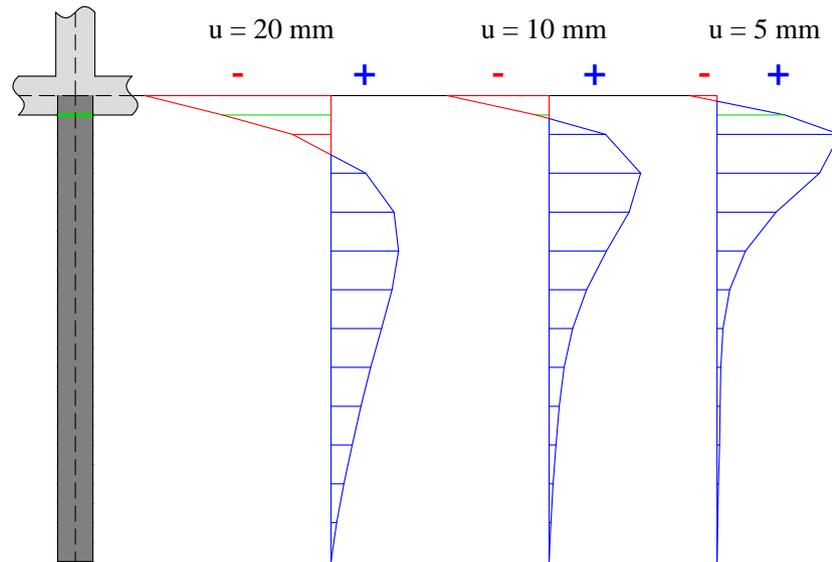


Abbildung 5.20.: Momentenverläufe zufolge Eigengewicht am Bohrpfahl für HS 5.1

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass eine Zunahme des Steifemoduls am Widerlagerfuß große Änderungen des Momentenverlaufs zufolge einer gleichmäßigen Temperatureinwirkung T_n bewirkt und zu Spannungswechsel bzw. zu Vorzeichenwechsel bei den Biegemomenten führt. Durch eine Änderung des Momentenverlaufs verschiebt sich der Momentennullpunkt in der Widerlagerwand.

Dies macht sich besonders bei einer geringen Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m bemerkbar, wie aus den Abbildungen 5.2 und 5.5 hervorgeht. Wie die Abbildungen 5.8 und 5.11 sowie 5.14 und 5.17 zeigen, treten bei größeren Widerlagerhöhen von $H_{wl} = 7,5$ m oder $H_{wl} = 10,0$ m keine Spannungswechsel auf. Das liegt daran, dass sich der Momentennullpunkt in der Widerlagerwand mit zunehmender Höhe nach oben verschiebt. Dadurch kommt es auch bei einer Änderung des Momentenverlaufs zufolge steigenden Steifemoduls zu keinem Vorzeichenwechsel des Biegemomentes am Widerlagerfuß.

Tabelle 5.2 zeigt die ermittelten Werte des Biegemoments M_y zufolge einer gleichmäßigen Temperatureinwirkung im Winter am Widerlagerfuß für die Hauptsysteme 1.7, 1.8 und 1.9 ($L_{sp} = 30$ m, $H_{wl} = 5,0$ m, $7,5$ m und $10,0$ m). Der auftretende Effekt ist zwar tendenziell unabhängig von der Spannweite, aber die Differenz der Biegemomente zufolge des sich ändernden Steifemoduls ist hier besonders deutlich.

Tabelle 5.2.: Biegemoment M_y zufolge T_n am Widerlagerfuß bei $L_{sp} = 30$ m und variablem H_{wl}

	M_y		
	$u_{hor,max} = 20$ mm	$u_{hor,max} = 10$ mm	$u_{hor,max} = 5$ mm
$H_{wl} = 5,0$ m	208,73 kNm	-51,31 kNm	-402,66 kNm
$H_{wl} = 7,5$ m	-28,78 kNm	-212,79 kNm	-428,63 kNm
$H_{wl} = 10,0$ m	-241,05 kNm	-388,61 kNm	-534,56 kNm

Es fällt auf, dass die Spannungen zufolge Verkehr im Rahmeneck und in Feldmitte sehr gering sind und nicht den Erwartungen entsprechen. Daher werden die Spannungen zufolge Eigengewicht, UDL-Verkehr und TS-Verkehr näher untersucht. Es werden die Spannungen für Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m und variablen Spannweiten bei einer Pfahlkopfverschiebung von $u_{hor,max} = 10$ mm herangezogen (US 1.2.2, 1.5.2 und 1.8.2). Die Ergebnisse der Einzellastfälle für $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}/f_{ctm}$ sind in Tabelle 5.3 angeführt.

Tabelle 5.3.: Analyse von $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}/f_{ctm}$ im Rahmeneck und in Feldmitte am Grundsystem 1

L_{sp}	$\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}/f_{ctm}$ Rahmeneck			$\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}/f_{ctm}$ Feldmitte		
	15 m	20 m	30 m	15 m	20 m	30 m
Eigengewicht	0,82	1,00	1,13	-0,87	-1,34	-2,49
UDL	0,20	0,18	0,14	-0,21	-0,24	-0,30
TS	0,49	0,34	0,17	-0,74	-0,63	-0,50

Betrachtet man die Spannungen zufolge der Doppelachslasten (TS) im Rahmeneck bei einer Spannweite von $L_{sp} = 15$ m, so entspricht die Größenordnung der Spannung im Vergleich zu jener zufolge des Eigengewichts mit 60 % durchaus den Erwartungen. Mit zunehmender Spannweite nimmt die Spannung zufolge TS jedoch ab, während jene zufolge des Eigengewichts zunimmt. Das liegt daran, dass einerseits das Eigengewicht mit L_{sp} und $H_{\ddot{u}b}$ betragsmäßig zunimmt während TS konstant bleibt. Andererseits fließt L_{sp} bei einer Flächenlast (Eigengewicht) mit einer Potenz von 2 in das Biegemoment M_y ein, bei einer Einzellast (TS) nur mit einer Potenz von 1. Gleichzeitig fließt $H_{\ddot{u}b}$ mit einer Potenz von 2 in das Widerstandsmoment $W_{\ddot{u}b}$ und somit in die Spannung ein, wie die Gleichungen 5.1 und 5.2 veranschaulichen.

$$\sigma = \pm \frac{N_x}{A_{\ddot{u}b}} + \frac{M_y}{W_{\ddot{u}b}} \quad (5.1)$$

$$W_{\ddot{u}b} = \frac{b_{\ddot{u}b} * H_{\ddot{u}b}^2}{6} \quad (5.2)$$

- $A_{\ddot{u}b}$ Fläche des Überbaus
- $W_{\ddot{u}b}$ Widerstandsmoment des Überbaus
- $b_{\ddot{u}b}$ Breite des Überbaus

Die Verhältnisse der Spannungen zufolge TS und Eigengewicht sind in Feldmitte zwar etwas höher als im Rahmeneck, nehmen aber ebenso aus den eben erläuterten Gründen mit zunehmender Spannweite ab.

Die Spannungen zufolge UDL entsprechen den Erwartungen, da die gemittelte Einwirkung über die Überbaubreite gering ausfällt, was sich auch bei den Spannungen erkennen lässt.

5.2. Grundsystem 2

Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie sich die Spannungen am Grundsystem 2 mit zunehmendem Steifemodul E_s verhalten. Dazu werden diese in den maßgebenden Punkten zuerst an der Außen-, und anschließend an der Innenseite dargestellt.

5.2.1. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 5,0$ m

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Hauptsysteme 2.1, 2.4 und 2.7 angeführt. Es handelt sich dabei um jene Hauptsysteme, die eine Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m, aber unterschiedliche Spannweiten aufweisen. Die folgenden Abbildungen 5.21 bis 5.23 zeigen die Spannungen an der Außenseite, während jene an der Innenseite in den Abbildungen 5.24 bis 5.26 dargestellt werden.

Abbildung 5.21 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Außenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Spannungen zufolge beider Lastfälle mit zunehmendem E_s ab. Unter *Eigengewicht* treten am äußeren Pfahlkopf jedoch höhere Zugspannungen auf als am inneren. Auch am Widerlagerfuß nehmen die Spannungen mit steigendem E_s ab und es lässt sich die Tendenz eines Vorzeichenwechsels erkennen. Im Rahmeneck liefern *Eigengewicht* zunehmende, *Erddruck zufolge Sommer* abnehmende Zugspannungen. In Feldmitte kommt es unter *Eigengewicht* zu abnehmenden Druckspannungen, unter *Erddruck zufolge Sommer* zu abnehmenden Zugspannungen.

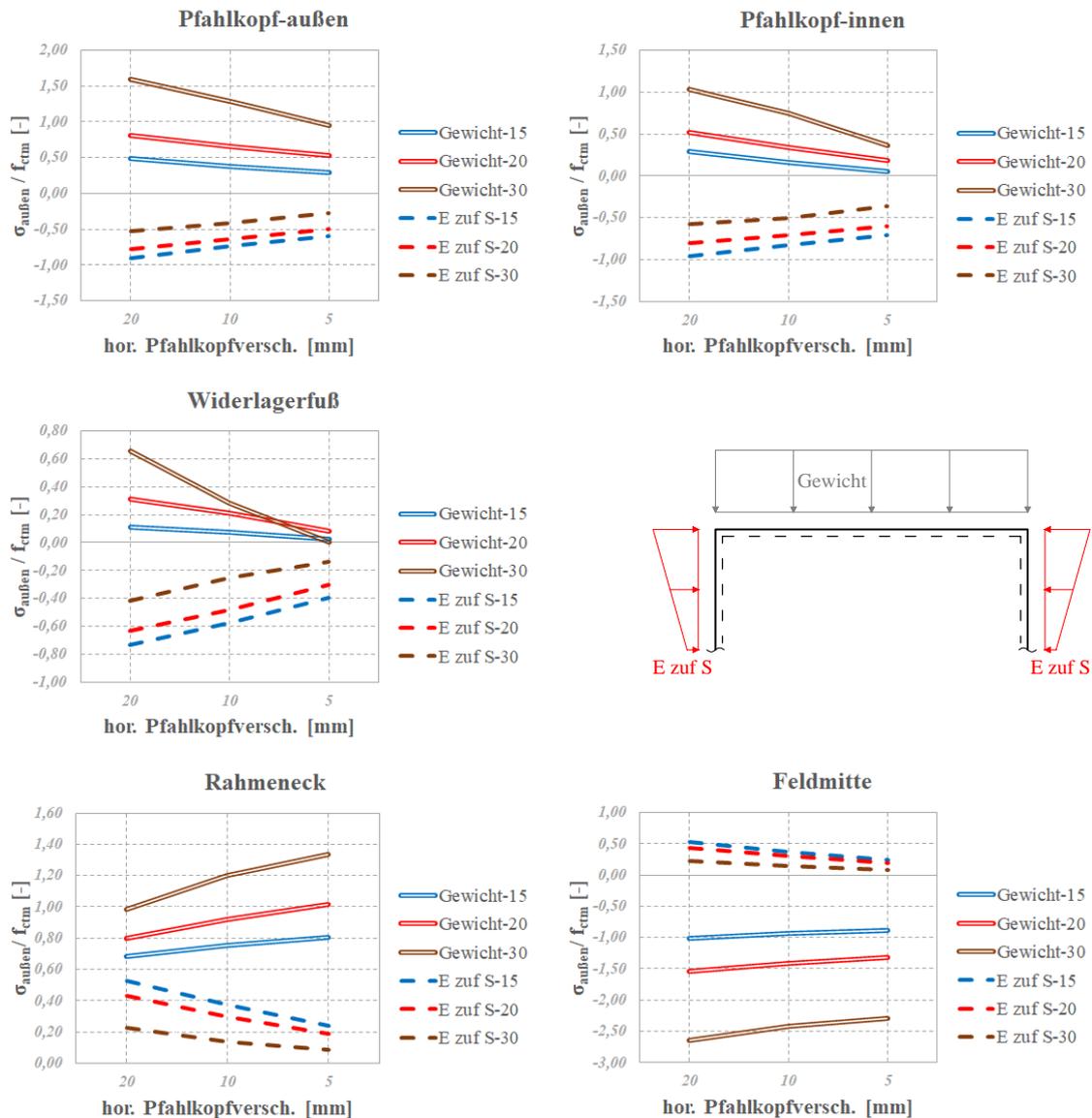


Abbildung 5.21.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.22 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Außenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Druckspannungen zufolge T_n Winter sowie die Zugspannungen zufolge T_n Sommer 1 und 2 mit steigendem E_s tendenziell zu, wobei bei $L_{Sp} = 30$ m ein Knick auftritt. Dieser wird in Kapitel 5.2.4 näher erläutert. Am äußeren Pfahlkopf treten geringere Spannungen auf als am inneren. Am Widerlagerfuß liefern T_n Winter zunehmende Zugspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Druckspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte ist es umgekehrt; T_n Winter liefert mit steigendem E_s zunehmende Druckspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Zugspannungen.

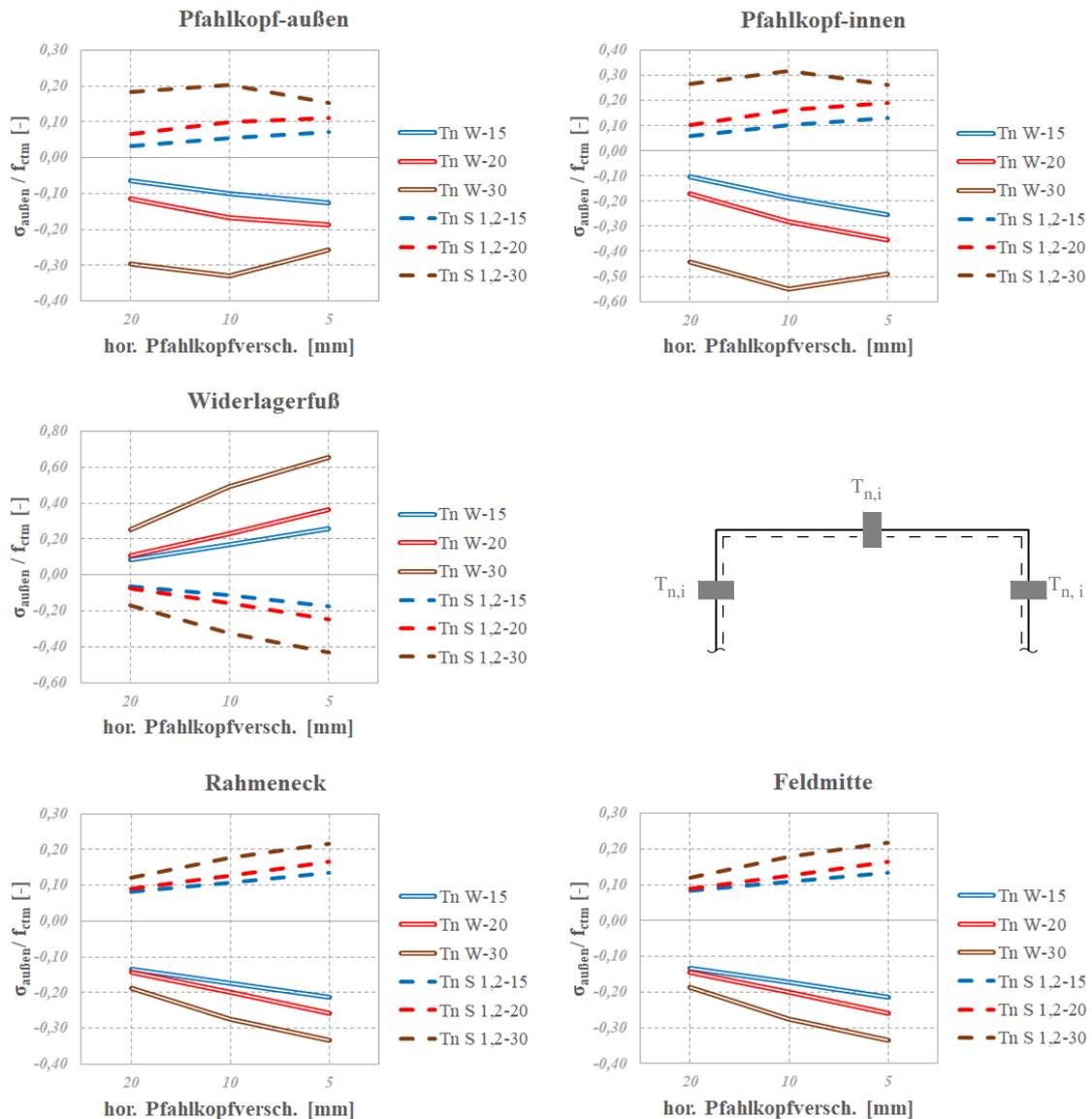


Abbildung 5.22.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.23 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Außenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Druckspannungen, die beiden Sommerlastfälle Zugspannungen. Am inneren Pfahlkopf lässt sich die Tendenz eines Vorzeichenwechsels zufolge T_m Winter erkennen, die auftretenden Spannungen sind an äußeren und inneren annähernd gleich. Am Widerlagerfuß wirkt sich L_{sp} unterschiedlich aus. Zuzufolge T_m Winter nimmt die Druckspannung bei großem L_{sp} nur minimal zu, bei kleinem L_{sp} deutlicher. Bei der Zugspannung im Sommer verhält es sich mit den L_{sp} umgekehrt. Im Rahmeneck und in Feldmitte steigen die Zugspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s leicht an, die Druckspannungen im Winter stagnieren.

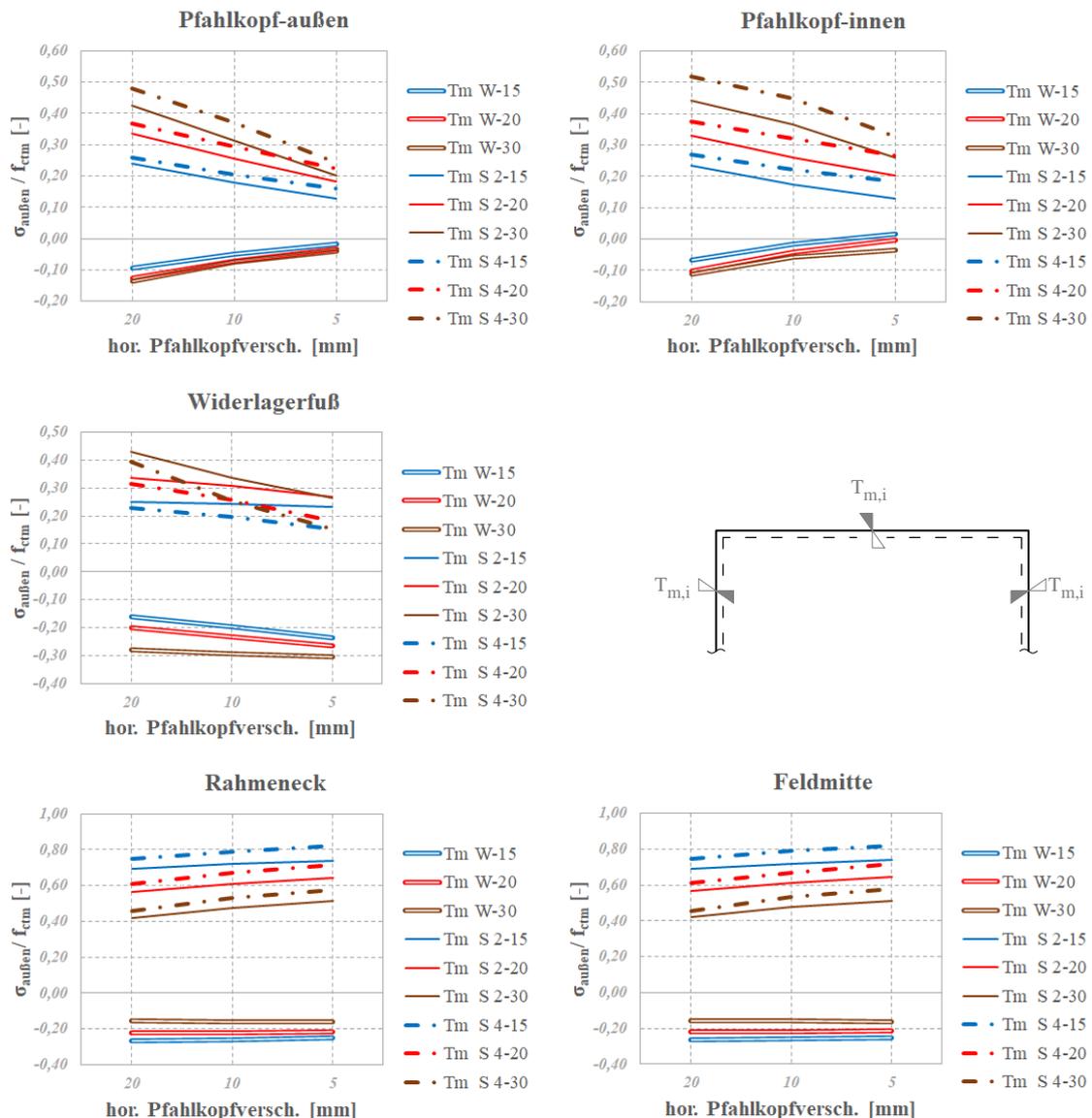


Abbildung 5.23.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.24 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zufolge *Sommer* an der Innenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Spannungen zufolge beider Lastfälle mit zunehmendem E_s ab. Unter *Eigengewicht* treten am äußeren Pfahlkopf jedoch höhere Druckspannungen auf als am inneren. Auch am Widerlagerfuß nehmen die Spannungen mit steigendem E_s ab. Im Rahmeneck liefern *Eigengewicht* zunehmende, *Erddruck* zufolge *Sommer* abnehmende Druckspannungen. In Feldmitte kommt es unter *Eigengewicht* zu abnehmenden Zugspannungen, unter *Erddruck* zufolge *Sommer* zu abnehmenden Druckspannungen.

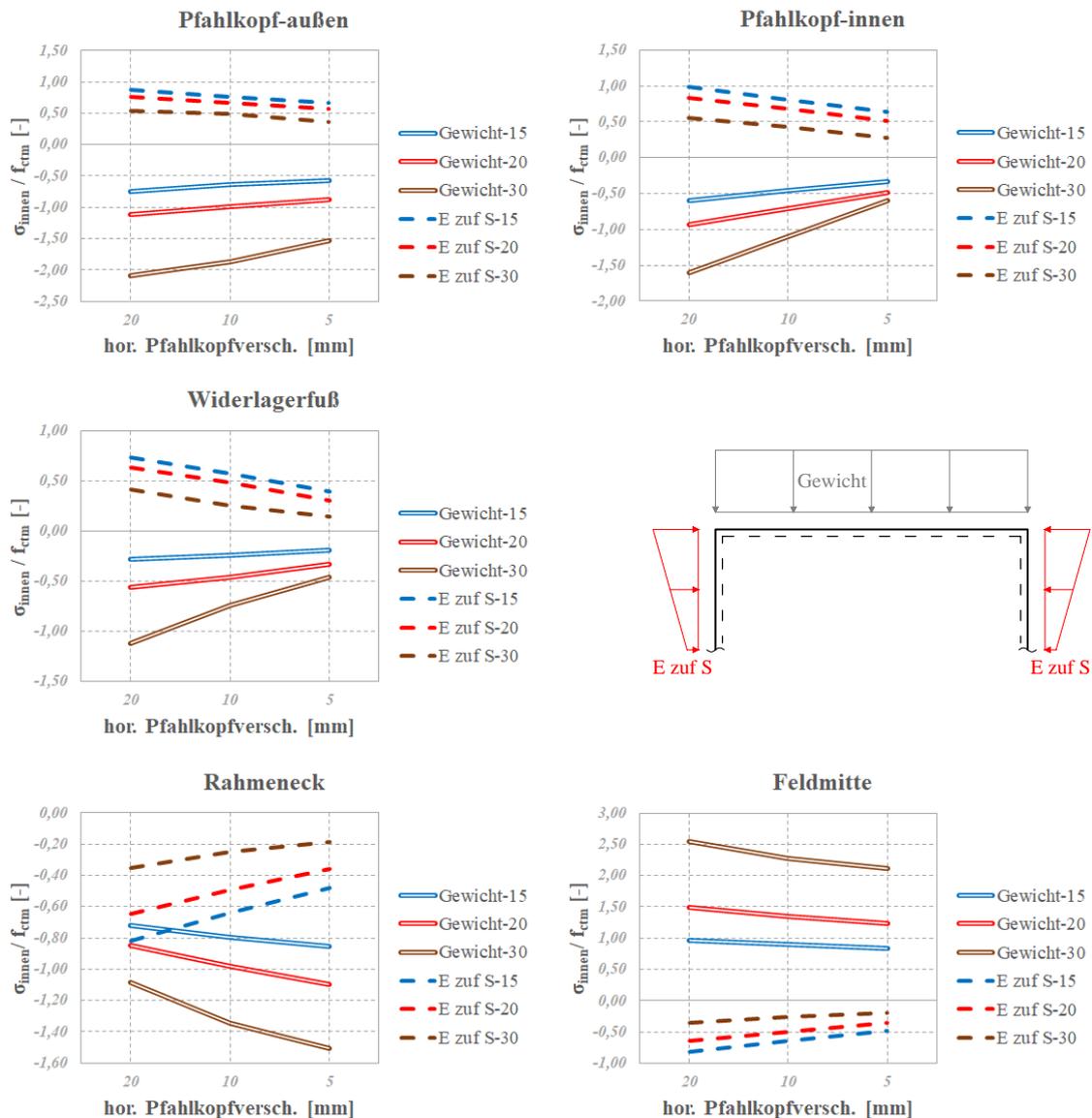


Abbildung 5.24.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zuf. *Sommer* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.25 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Innenseite. Am äußeren Pfahlkopf treten zufolge T_n Winter Zugspannungen auf, die mit steigendem E_s tendenziell zunehmen, für $L_{sp} = 30$ m jedoch erst zunehmen und dann wieder abfallen. Dieser Knick wird in Kapitel 5.2.4 näher erläutert. Ähnliches gilt für T_n Sommer 1 und 2, das Druckspannungen liefert. Am inneren Pfahlkopf kommt es zu abnehmenden Spannungen und Vorzeichenwechsel. Am Widerlagerfuß liefern T_n Winter zunehmende Druckspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Zugspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte ist es umgekehrt; T_n Winter liefert mit steigendem E_s zunehmende Zugspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Druckspannungen.

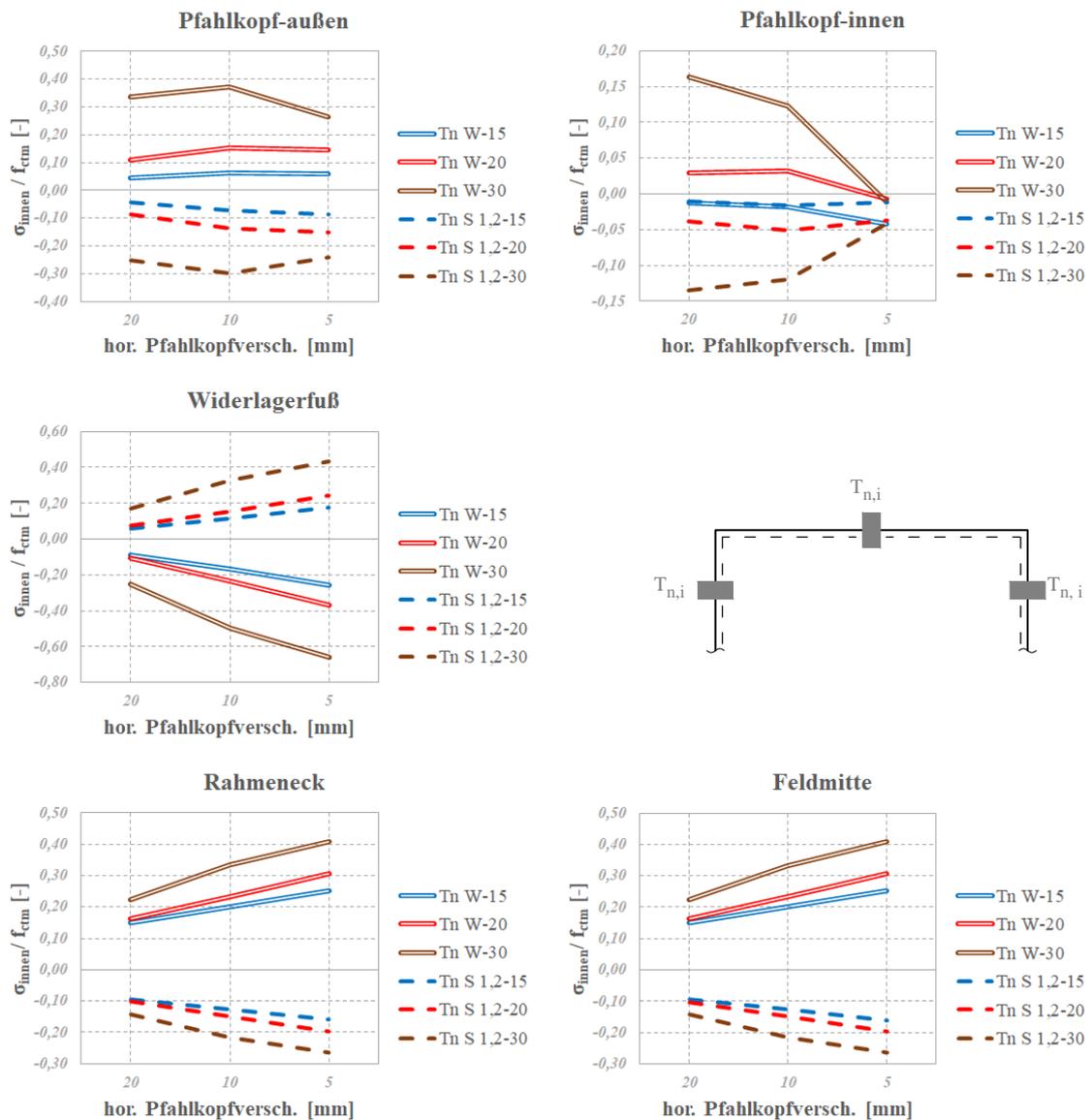


Abbildung 5.25.: $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.26 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Innenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Zugspannungen, am äußeren Pfahlkopf kommt es aber zu einem Vorzeichenwechsel. Die beiden Sommerlastfälle liefern in allen Punkten Druckspannungen. Die Spannungen sind am inneren Pfahlkopf tendenziell etwas höher als am äußeren. Am Widerlagerfuß wirkt sich L_{sp} unterschiedlich aus. Zuzufolge T_m Winter nimmt die Zugspannung bei großem L_{sp} nur minimal zu, bei kleinem L_{sp} deutlicher. Bei der Druckspannung im Sommer verhält es sich mit den L_{sp} umgekehrt. Im Rahmeneck und in Feldmitte steigen die Druckspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s leicht an, die Zugspannungen im Winter stagnieren.

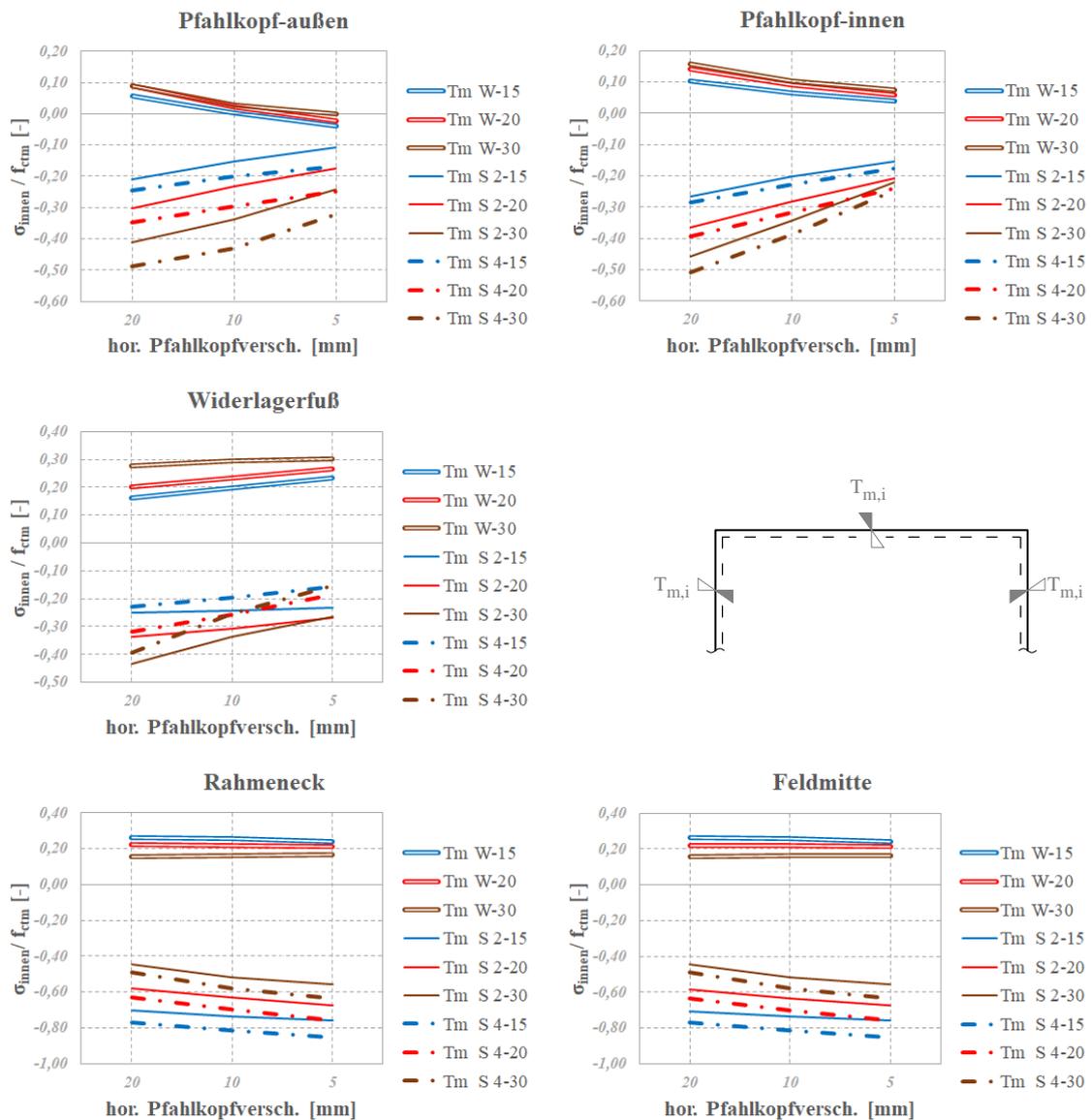


Abbildung 5.26.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

5.2.2. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 7,5$ m

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Hauptsysteme 2.2, 2.5 und 2.8 angeführt. Es handelt sich dabei um jene Hauptsysteme, die eine Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 7,5$ m, aber unterschiedliche Spannweiten aufweisen. Die folgenden Abbildungen 5.27 bis 5.29 zeigen die Spannungen an der Außenseite, während jene an der Innenseite in den Abbildungen 5.30 bis 5.32 dargestellt werden.

Abbildung 5.27 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zufolge Sommer* an der Außenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Spannungen mit zunehmendem E_s ab, am Inneren lässt sich ein Spannungswechsel zufolge *Eigengewicht* erkennen. Unter *Eigengewicht* treten am äußeren Pfahlkopf höhere Zugspannungen auf als am inneren. Unter *Erddruck zufolge Sommer* ist es umgekehrt. Am Widerlagerfuß sind für *Eigengewicht* zunehmende und für *Erddruck zufolge Sommer* abnehmende Druckspannungen zu erkennen. Im Rahmeneck liefert *Eigengewicht* zunehmende, *Erddruck zufolge Sommer* abnehmende Zugspannungen. In Feldmitte liefern beide Lastfälle abnehmende Spannungen.

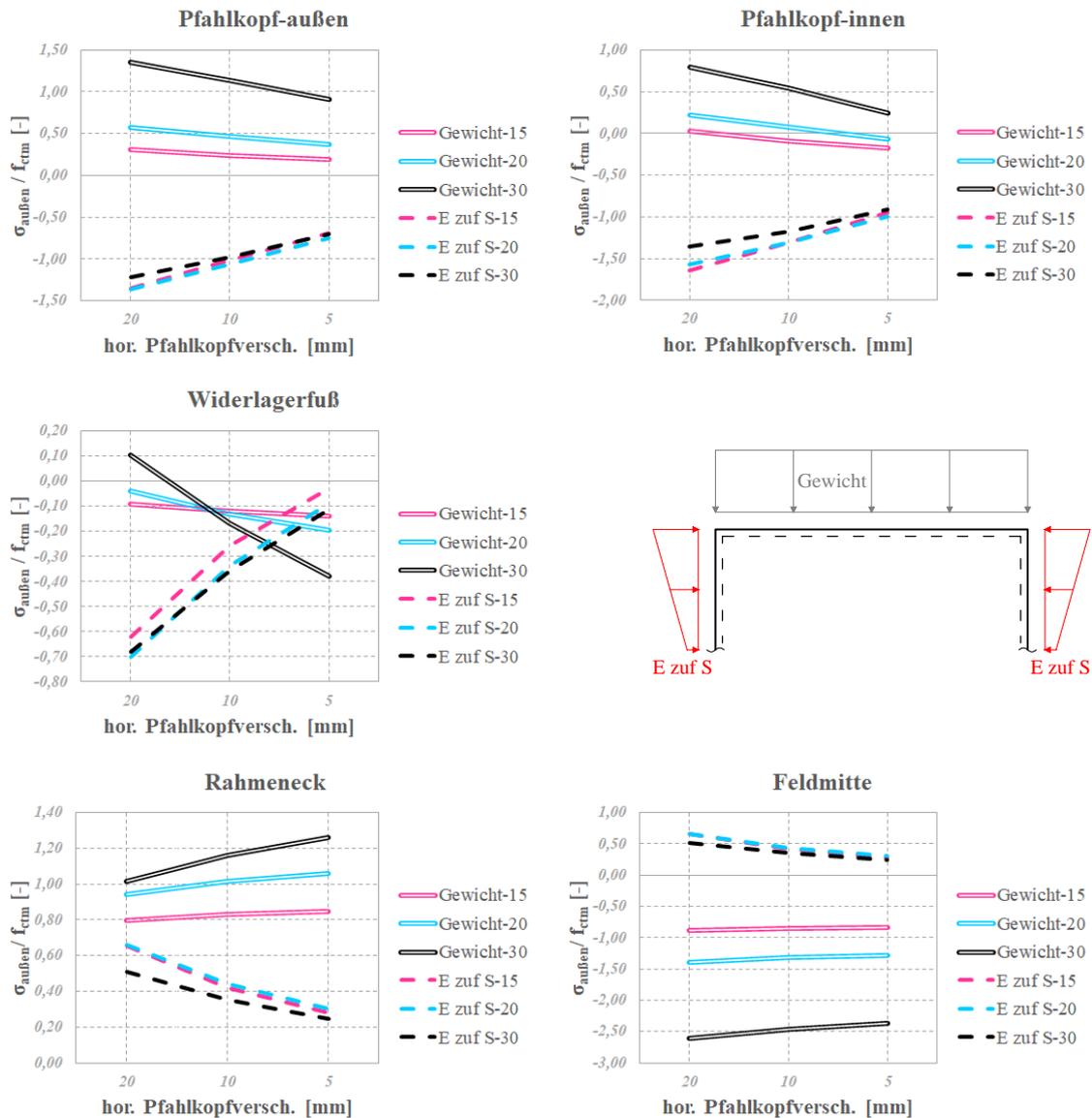


Abbildung 5.27.: $\sigma_{\text{außen}}/f_{ctm}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck zuf. Sommer* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.28 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Außenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Druckspannungen zufolge T_n Winter sowie die Zugspannungen zufolge T_n Sommer 1 und 2 mit steigendem E_s tendenziell zu, wobei bei $L_{Sp} = 30$ m ein Knick auftritt. Dieser wird in Kapitel 5.2.4 näher erläutert. Am äußeren Pfahlkopf treten geringere Spannungen auf als am inneren. Am Widerlagerfuß liefern T_n Winter zunehmende Zugspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Druckspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte ist es umgekehrt. T_n Winter liefert mit steigendem E_s zunehmende Druckspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Zugspannungen.

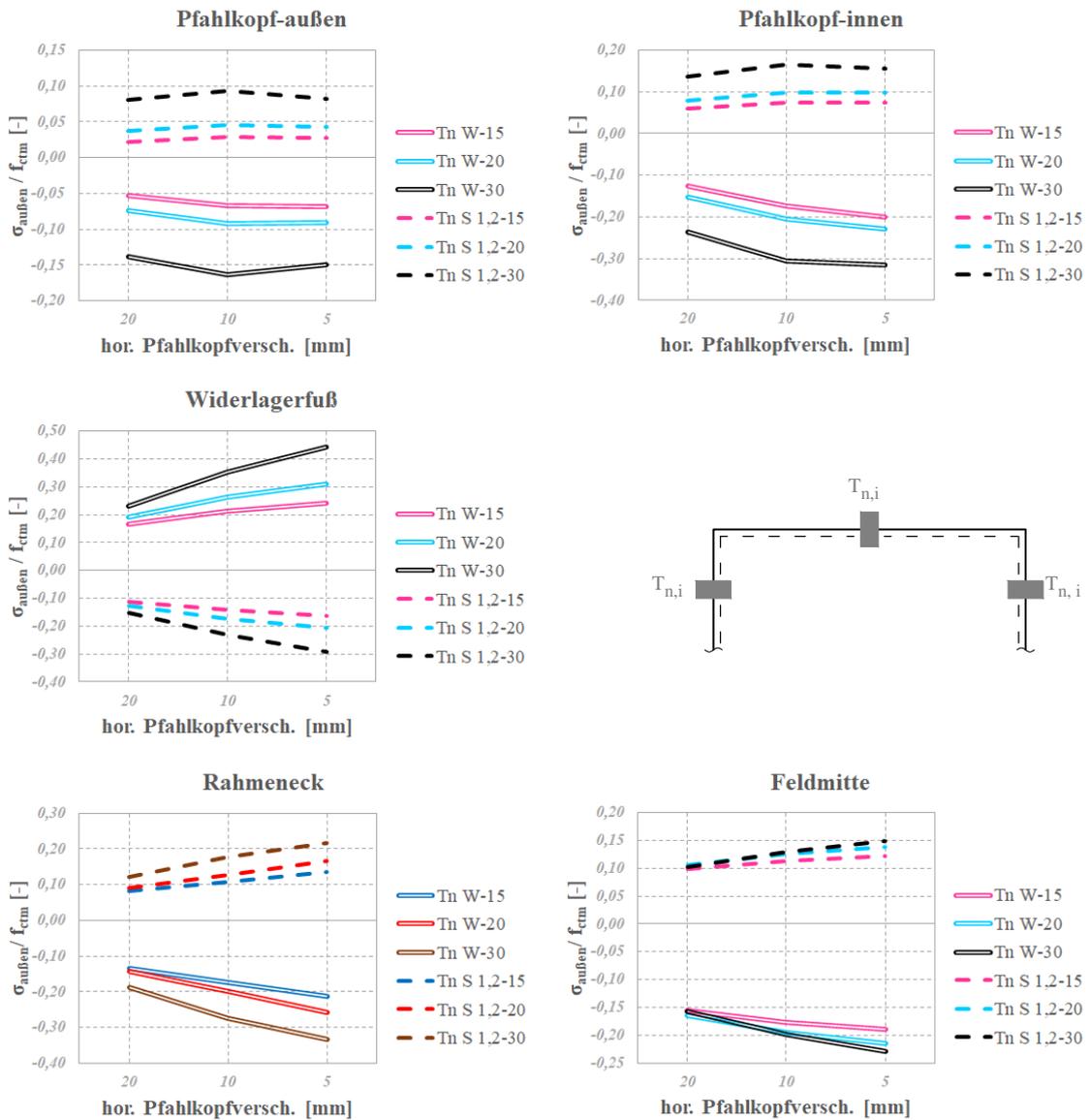


Abbildung 5.28.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.29 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Außenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Druckspannungen, die beiden Sommerlastfälle Zugspannungen. Am inneren Pfahlkopf lässt sich jedoch die Tendenz eines Vorzeichenwechsels zufolge T_m Winter erkennen. Tendenziell sind die Spannungen im Winter am äußeren Pfahlkopf etwas höher, im Sommer am inneren. Mit zunehmendem E_s kommt es zu deutlichen Zu- und Abnahmen der Spannungen. Am Widerlagerfuß wirkt sich L_{sp} unterschiedlich aus. Zuzufolge T_m Winter sind die Druckspannung bei allen L_{sp} fast ident und nehmen nur geringfügig zu. Im Sommer nehmen die Zugspannung bei kleinem L_{sp} nur minimal ab, bei großem L_{sp} aber deutlicher. Im Rahmeneck und in Feldmitte steigen die Zugspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s leicht an, die Druckspannungen im Winter stagnieren.

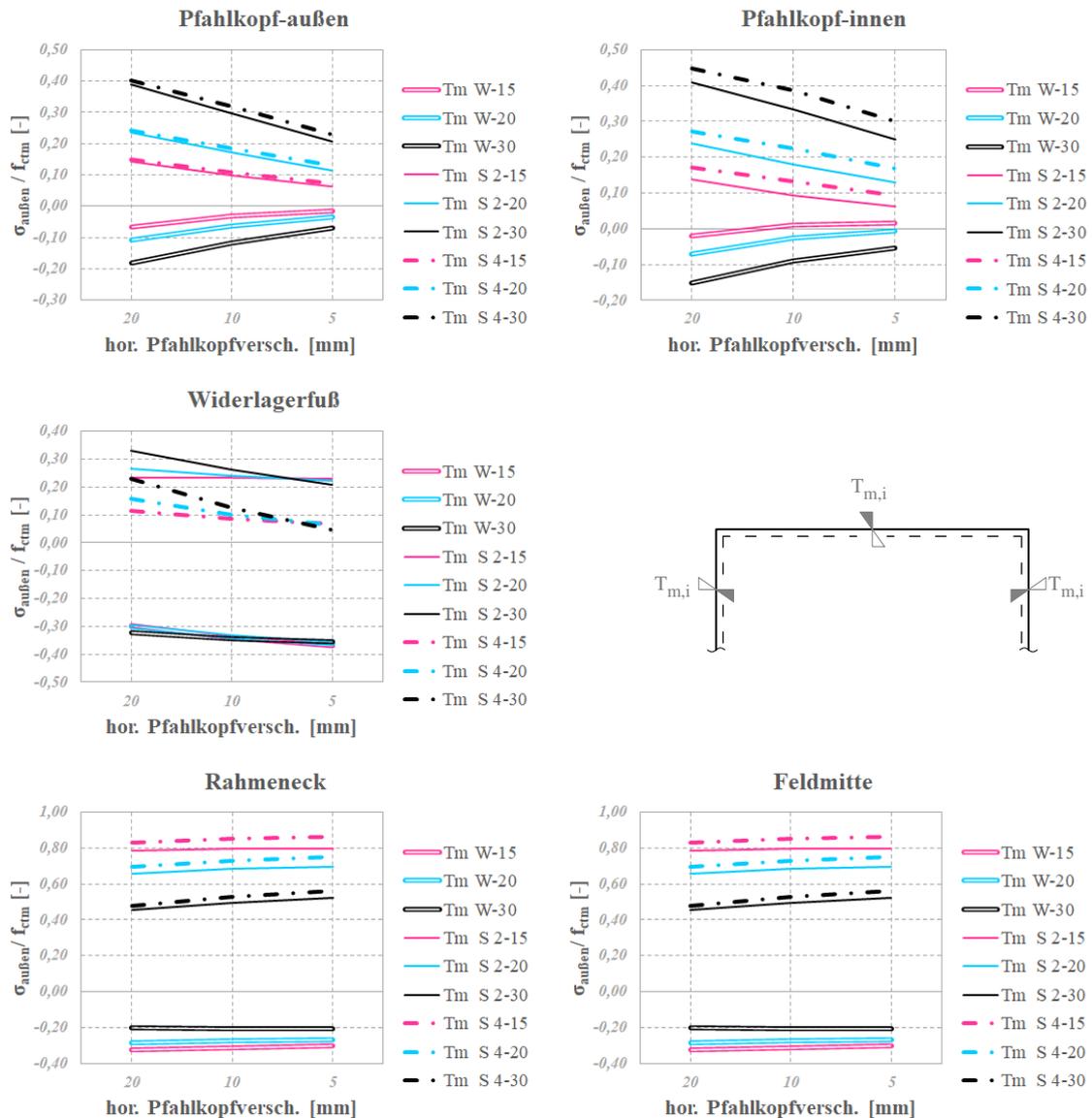


Abbildung 5.29.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.30 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zufolge *Sommer* an der Innenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Spannungen mit zunehmendem E_s ab. Unter *Eigengewicht* treten am äußeren Pfahlkopf höhere Druckspannungen auf als am inneren, unter *Erddruck* zufolge *Sommer* ist es umgekehrt. Am Widerlagerfuß lassen sich abnehmende Spannungen beobachten. Im Rahmeneck liefert *Eigengewicht* zunehmende, *Erddruck* zufolge *Sommer* hingegen abnehmende Druckspannungen. In Feldmitte liefern beide Lastfälle abnehmende Spannungen.

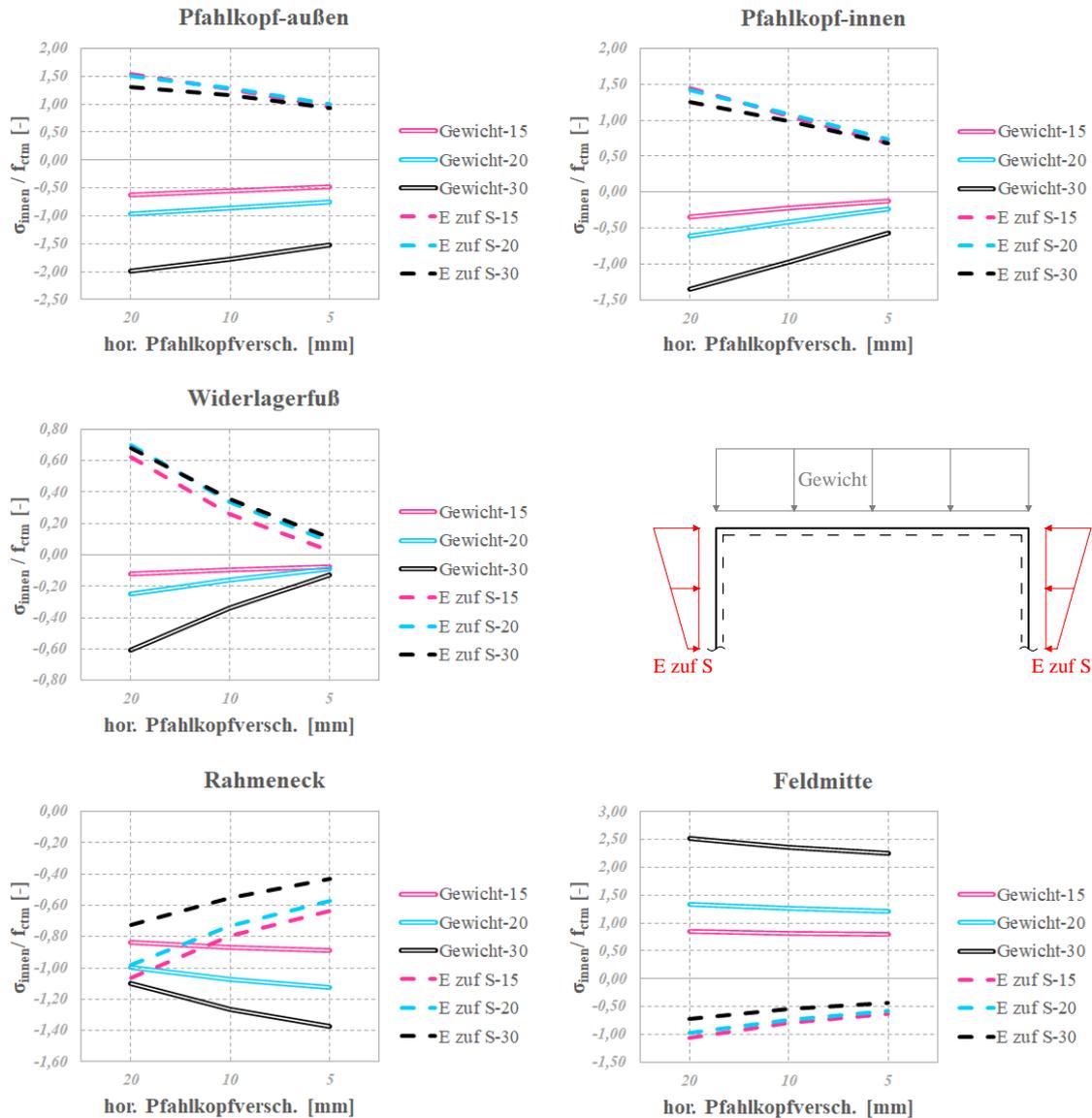


Abbildung 5.30.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zuf. *Sommer* bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.31 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Innenseite. An den Pfahlköpfen treten je nach Jahreszeit tendenziell unterschiedliche Spannungen auf, außerdem sind Vorzeichenwechsel zu beobachten. Der Knick am äußeren Pfahlkopf zufolge T_n bei $L_{sp} = 30$ m wird in Kapitel 5.2.4 näher erläutert. Am Widerlagerfuß liefern T_n Winter zunehmende Druckspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Zugspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte ist es umgekehrt. T_n Winter liefert mit steigendem E_s zunehmende Zugspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Druckspannungen.

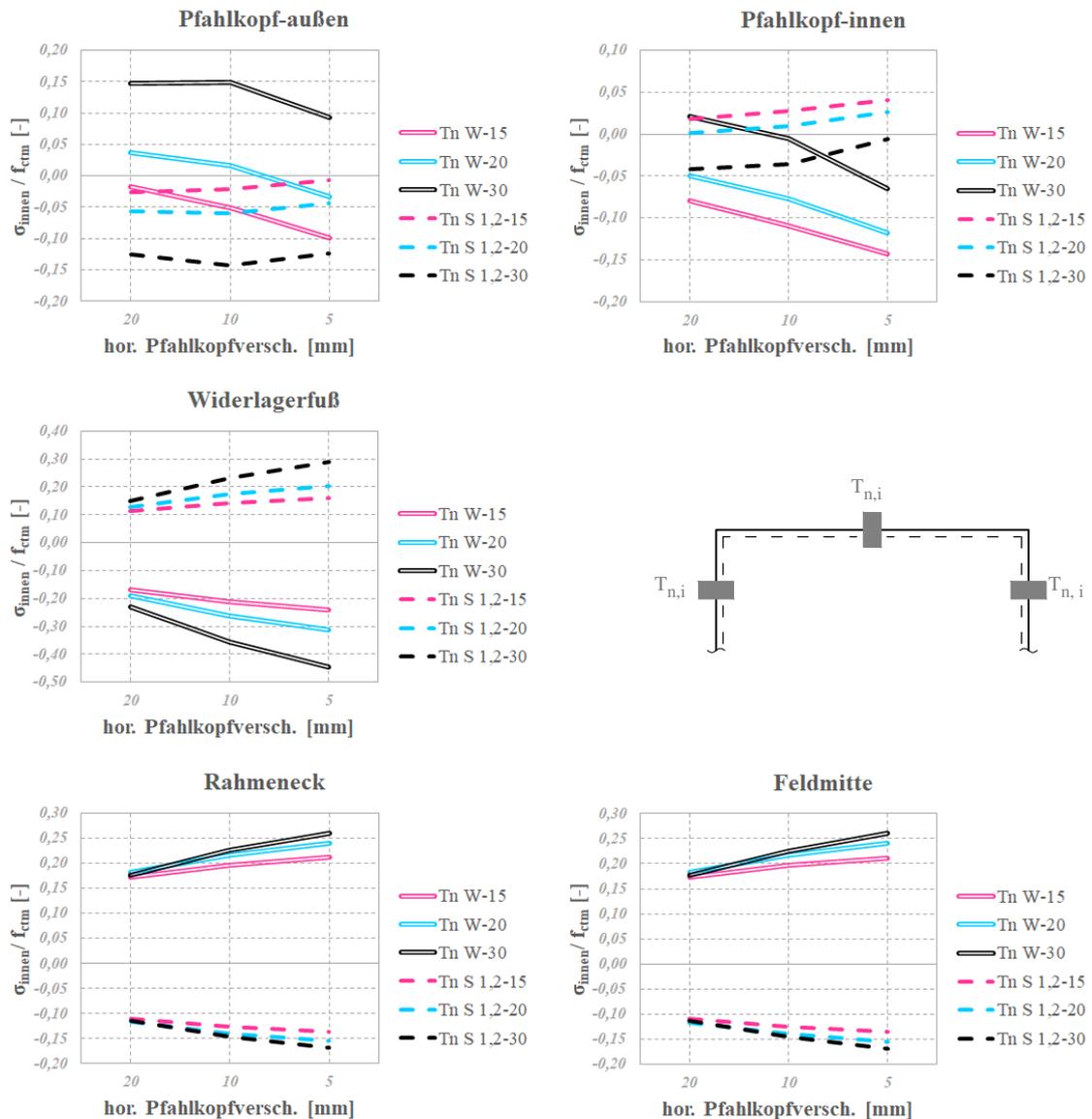


Abbildung 5.31.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.32 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Innenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Zugspannungen, am äußeren Pfahlkopf tritt allerdings ein Spannungswechsel auf. Die beiden Sommerlastfälle liefern in allen Punkten Druckspannungen. Die Spannungen nehmen an den Pfahlköpfen mit zunehmendem E_s ab und sie sind am inneren Pfahlkopf tendenziell etwas höher als am äußeren. Am Widerlagerfuß wirkt sich L_{sp} unterschiedlich aus. Zufolge T_m Winter sind die Zugspannung bei allen L_{sp} fast ident und nehmen nur geringfügig zu. Im Sommer nehmen die Druckspannungen bei kleinem L_{sp} nur minimal ab, bei großem L_{sp} aber deutlicher. Im Rahmeneck und in Feldmitte steigen die Druckspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s leicht an, die Zugspannungen im Winter stagnieren bzw. nehmen leicht ab.

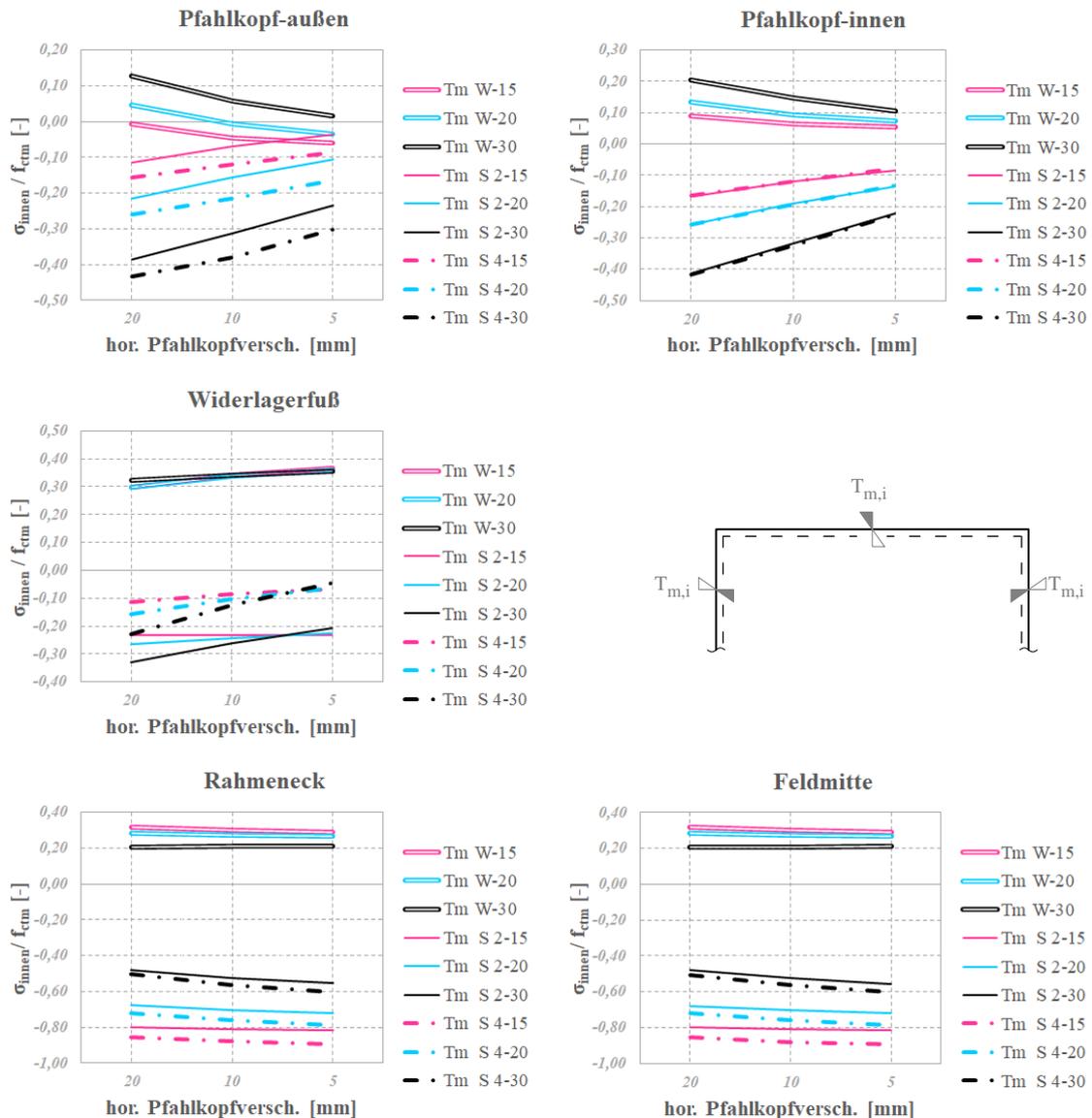


Abbildung 5.32.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=7,5$ m für Grundsystem 2

5.2.3. Höhe der Widerlager $H_{wl} = 10,0$ m

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Hauptssysteme 2.3, 2.6 und 2.9 angeführt. Es handelt sich dabei um jene Hauptssysteme, die eine Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 10,0$ m, aber unterschiedliche Spannweiten aufweisen. Die folgenden Abbildungen 5.33 bis 5.35 zeigen die Spannungen an der Außenseite, während jene an der Innenseite in den Abbildungen 5.36 bis 5.38 dargestellt werden.

Abbildung 5.33 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zufolge *Sommer* an der Außenseite. Am Pfahlkopf nehmen die auftretenden Spannungen mit zunehmendem E_s ab; am inneren lässt sich ein Spannungswechsel zufolge *Eigengewicht* erkennen. Unter *Eigengewicht* treten am äußeren Pfahlkopf höhere Spannungen auf als am inneren, unter *Erddruck* zufolge *Sommer* ist es umgekehrt. Am Widerlagerfuß ist ein Spannungswechsel zufolge *Erddruck* zufolge *Sommer* zu erkennen. Im Rahmeneck liefert *Eigengewicht* leicht zunehmende, *Erddruck* zufolge *Sommer* abnehmende Zugspannungen. In Feldmitte liefern beide Lastfälle abnehmende bzw. stagnierende Spannungen.

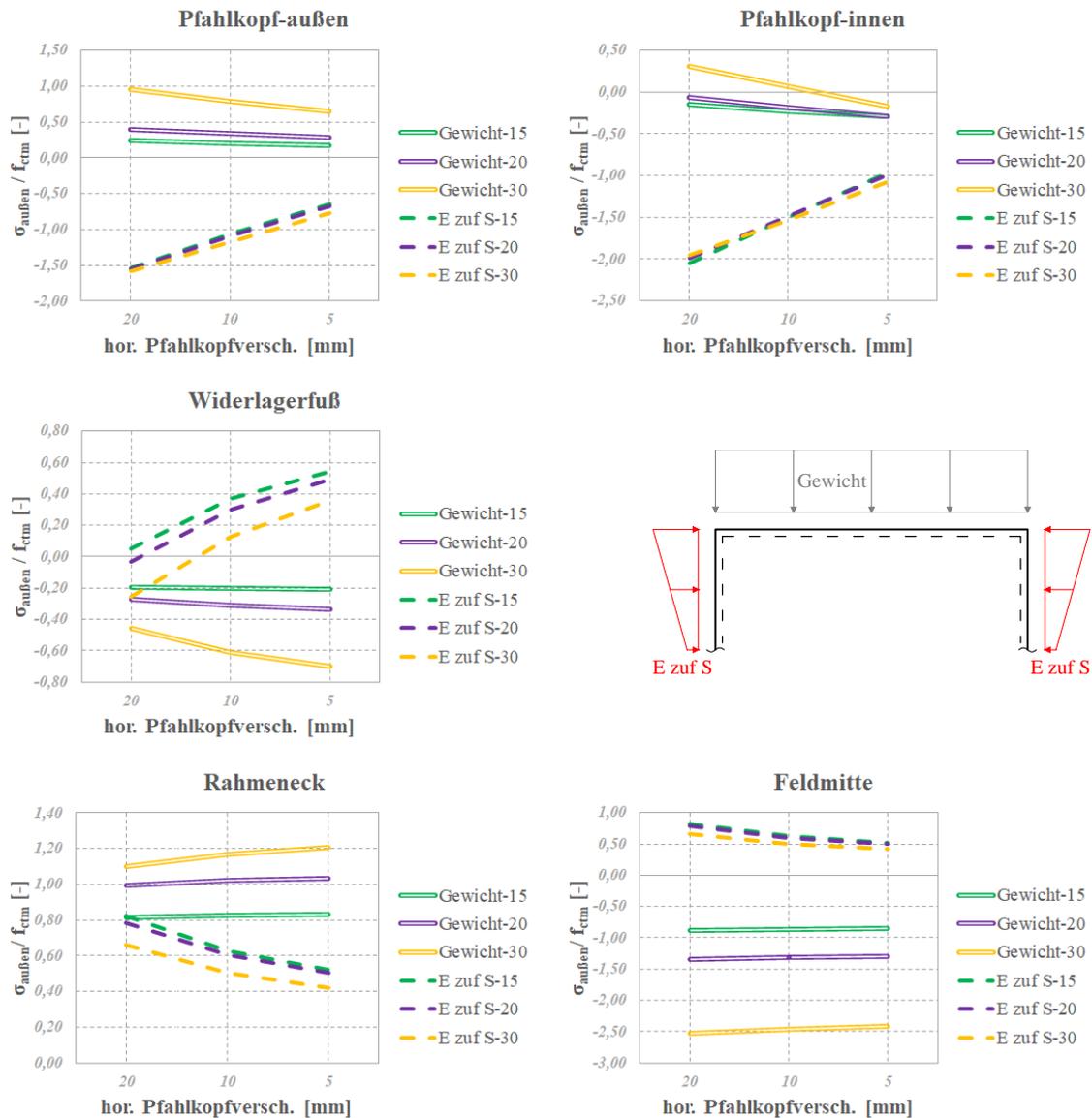


Abbildung 5.33.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zuf. *Sommer* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.34 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Außenseite. Am Pfahlkopf nehmen die Druckspannungen zufolge T_n Winter sowie die Zugspannungen zufolge T_n Sommer 1 und 2 mit steigendem E_s zu, bei $L_{sp} = 30$ m kommt es jedoch zu einem Knick im Verlauf. Dieser wird in Kapitel 5.2.4 näher erläutert. Am äußeren Pfahlkopf treten geringere Spannungen auf als am inneren. Am Widerlagerfuß liefern T_n Winter zunehmende Zugspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Druckspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte ist es umgekehrt. T_n Winter liefert mit steigendem E_s zunehmende Druckspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Zugspannungen.

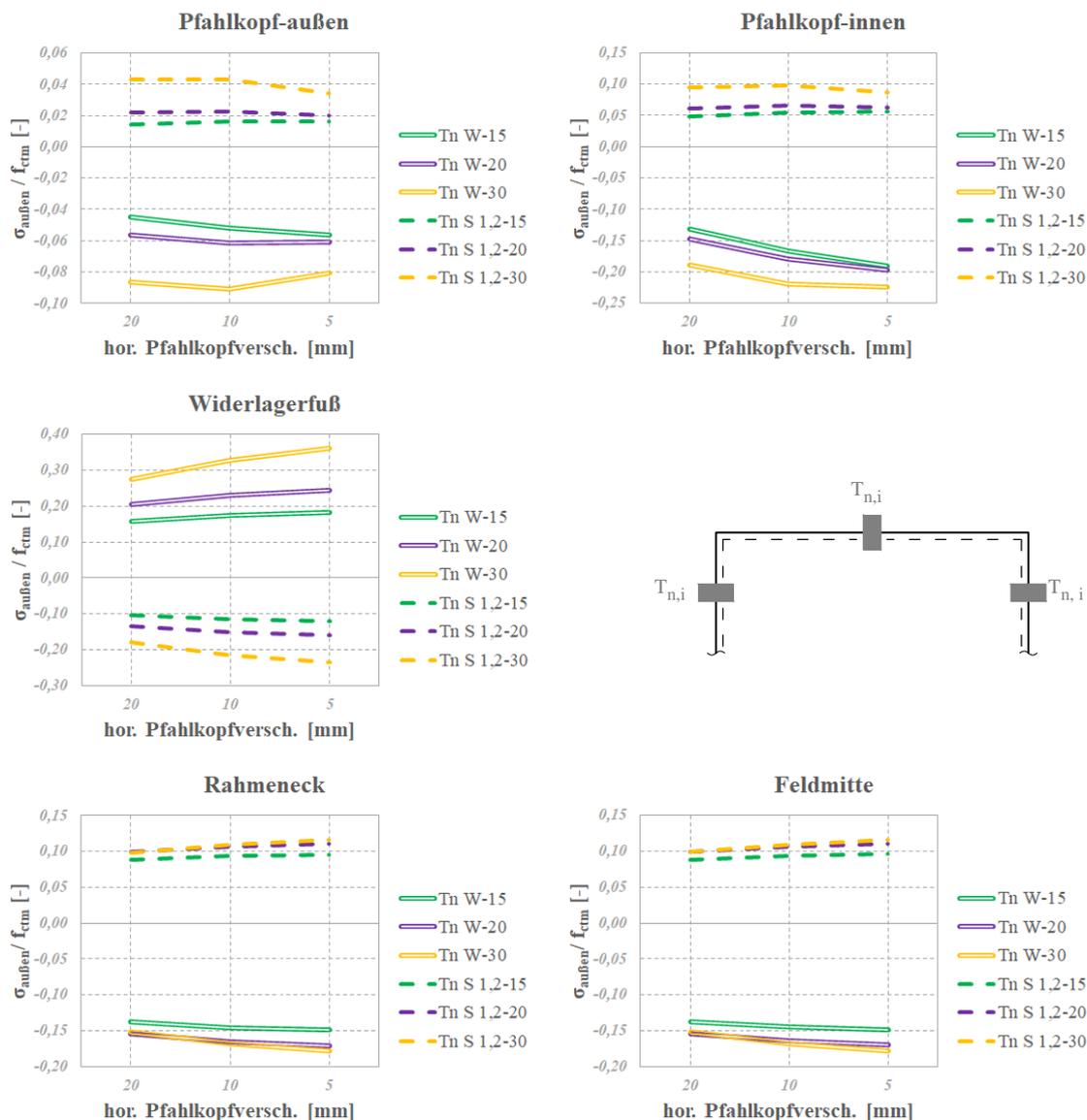


Abbildung 5.34.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{ctm}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.35 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Außenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Druckspannungen, am inneren Pfahlkopf lässt sich aber die Tendenz eines Vorzeichenwechsels erkennen. Die beiden Sommerlastfälle liefern in allen Punkten Zugspannungen. Tendenziell sind die Spannungen im Winter am äußeren Pfahlkopf etwas höher, im Sommer am inneren. Mit zunehmendem E_s kommt es zu deutlichen Zu- bzw. Abnahmen der Spannungen am Pfahlkopf. Am Widerlagerfuß kommt es im Winter zu einer Zunahme der Druckspannungen, im Sommer je nach L_{sp} zu stärker oder schwächer abnehmenden Zugspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte steigen die Zugspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s leicht an, die Druckspannungen im Winter stagnieren.

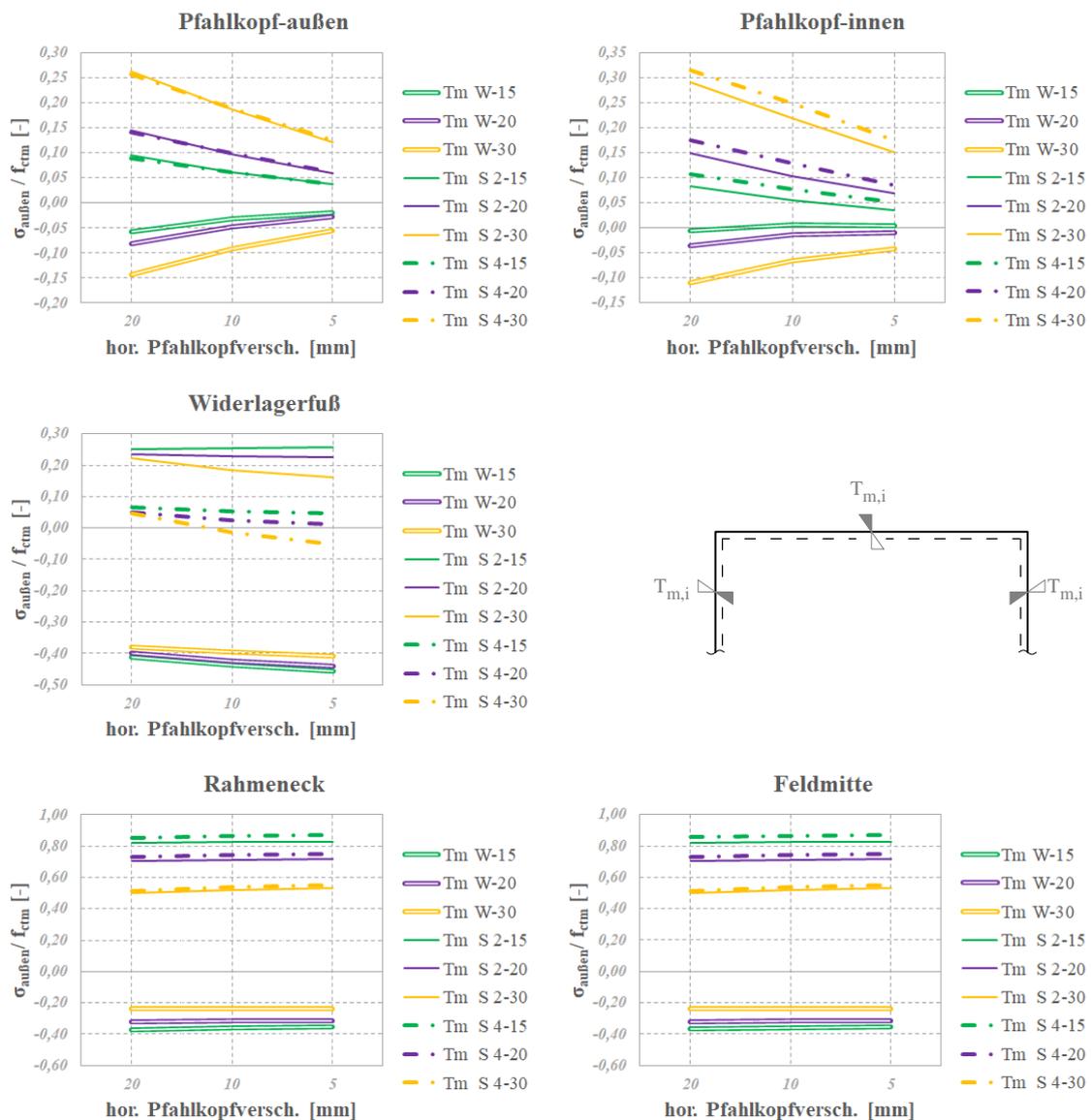


Abbildung 5.35.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.36 zeigt die Spannungen zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zufolge *Sommer* an der Innenseite. Am Pfahlkopf nehmen die auftretenden Spannungen mit zunehmendem E_s ab, dabei sind die Spannungen zufolge *Erddruck* zufolge *Sommer* für alle L_{sp} fast ident. Am äußeren Pfahlkopf treten höhere Spannungen auf als am inneren. Am Widerlagerfuß ist ein Spannungswechsel für beide Lastfälle zu erkennen. Im Rahmeneck liefert *Eigengewicht* leicht zunehmende, *Erddruck* zufolge *Sommer* abnehmende Druckspannungen. In Feldmitte liefern beide Lastfälle abnehmende bzw. stagnierende Spannungen.

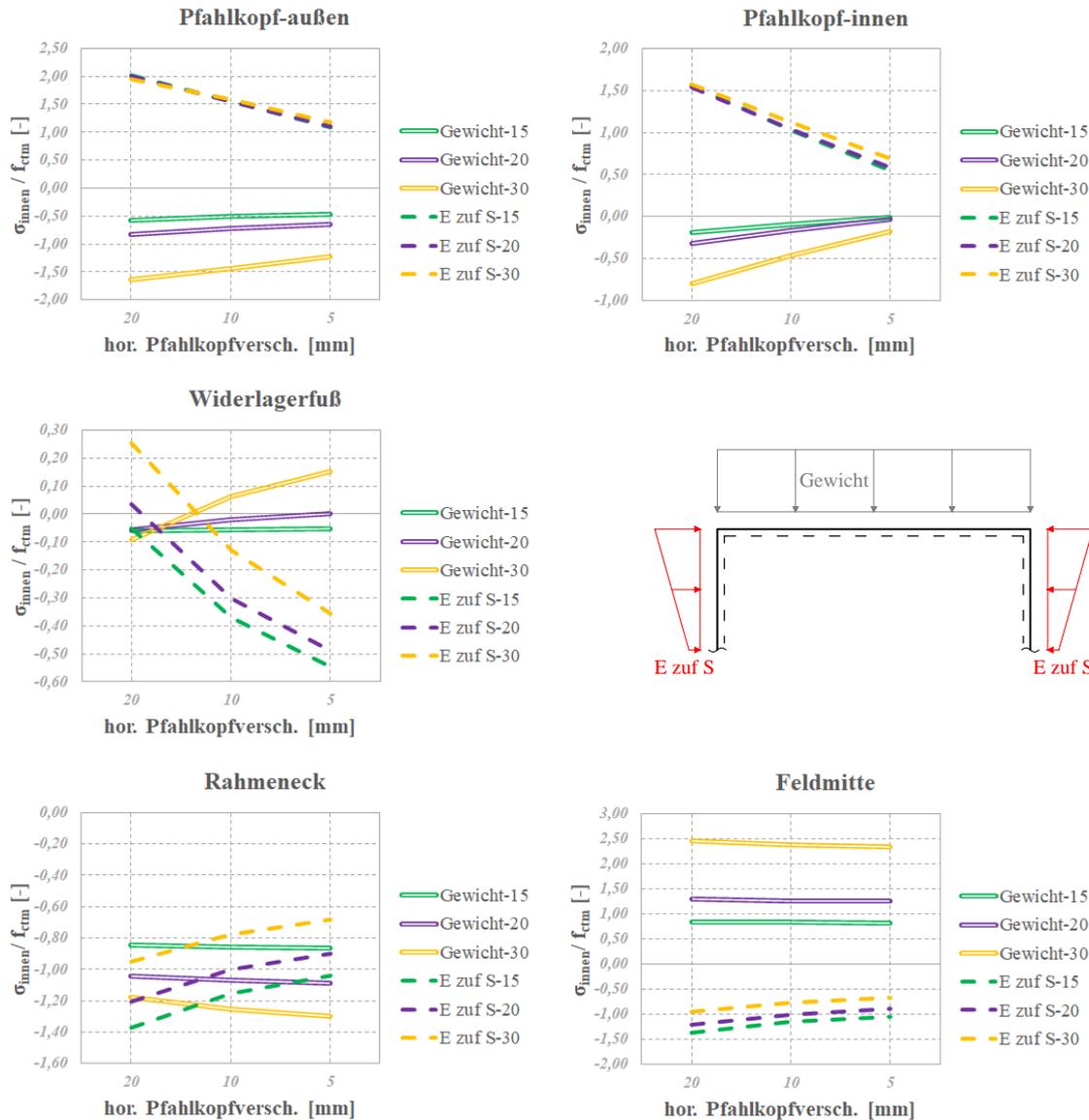


Abbildung 5.36.: σ_{innen} / f_{ctm} zufolge *Eigengewicht* und *Erddruck* zuf. *Sommer* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.37 zeigt die Spannungen zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* an der Innenseite. Am äußeren Pfahlkopf sind Vorzeichenwechsel zu beobachten, am inneren treten unterschiedliche Spannungen auf, die mit steigendem E_s zunehmen. Am Widerlagerfuß liefern T_n Winter zunehmende Druckspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Zugspannungen. Im Rahmeneck und in Feldmitte ist es umgekehrt. T_n Winter liefert mit steigendem E_s zunehmende Zugspannungen und T_n Sommer 1 und 2 zunehmende Druckspannungen.

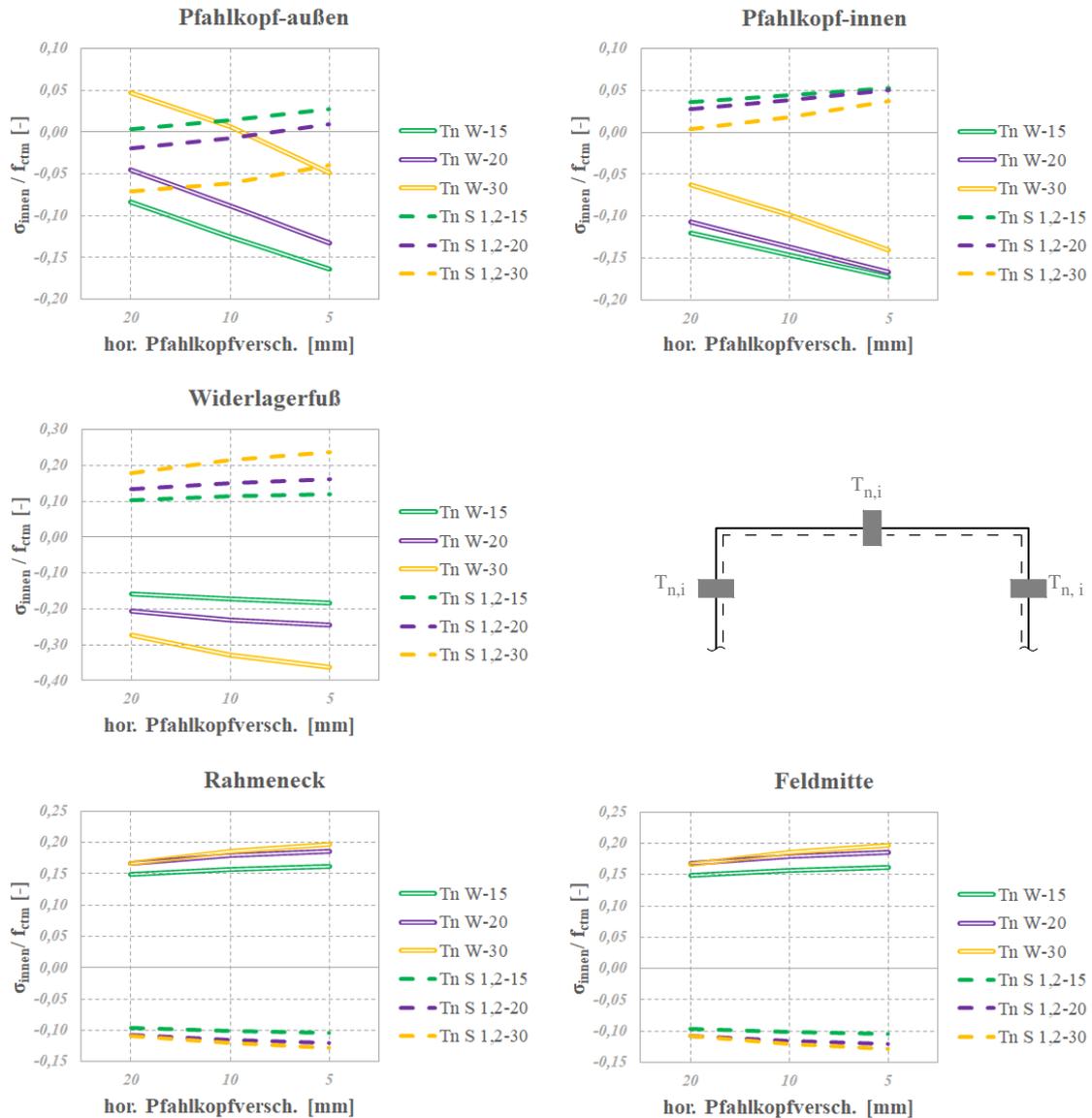


Abbildung 5.37.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1} = 10,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 5.38 zeigt die Spannungen zufolge *linearer Temperatureinwirkung* an der Innenseite. T_m Winter liefert in allen Punkten Zugspannungen, am äußeren Pfahlkopf treten allerdings Spannungswechsel und Druckspannungen auf. Die beiden Sommerlastfälle liefern in allen Punkten Druckspannungen. Die Spannungen nehmen an den Pfahlköpfen mit zunehmendem E_s ab, bzw. nach erfolgtem Spannungswechsel zu. Sie sind am inneren Pfahlkopf tendenziell etwas höher als am äußeren. Am Widerlagerfuß kommt es im Winter zu einer Zunahme der Zugspannungen, im Sommer je nach L_{sp} zu stärker oder schwächer abnehmenden Druckspannungen. Zuzufolge T_m Sommer 4 ist bei $L_{sp} = 30$ m ein Spannungswechsel zu erkennen. Im Rahmeneck und in Feldmitte steigen die Druckspannungen im Sommer mit zunehmendem E_s minimal bis leicht an, die Zugspannungen im Winter stagnieren bzw. nehmen leicht ab.

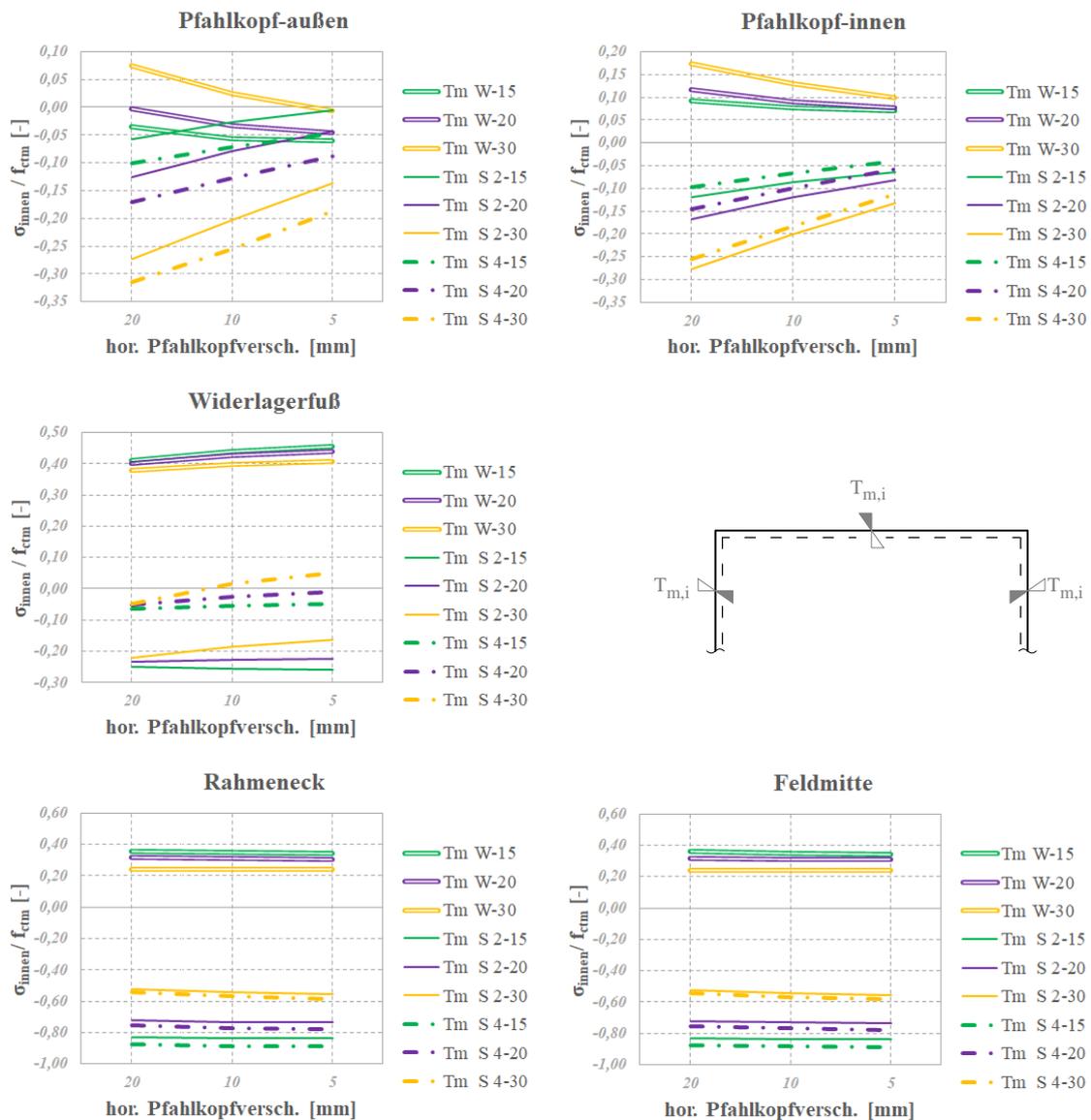


Abbildung 5.38.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 2

5.2.4. Interpretation

In diesem Abschnitt folgt eine Interpretation der zuvor dargestellten Ergebnisse der Einzellastfälle an Grundsystem 2.

Anhand der in den Abbildungen 5.21 bis 5.38 dargestellten Spannungen zufolge der einzelnen Lastfälle in den maßgebenden Punkten lässt sich der Einfluss des Steifemoduls für unterschiedliche Spannweiten und Widerlagerhöhen erkennen. Wie schon bei Grundsystem 1 lassen sich auch bei Grundsystem 2 die Pfahlköpfe und der Widerlagerfuß als jene Bereiche identifizieren, die sehr sensibel auf eine Änderung des Steifemoduls reagieren. Eine Zunahme von E_s bewirkt deutliches Zu- oder Abnehmen der Spannungen und führt häufig zu einem Vorzeichenwechsel der Spannung bzw. des Biegemoments.

Im Vergleich mit Grundsystem 1 kommt es bei Grundsystem 2 in weichem Baugrund zu einer viel geringeren Rotation der Pfahlkopfplatte. Das liegt an der deutlich höheren Steifigkeit, welche eine zweireihige Pfahlgründung mit sich bringt. In weichem Baugrund kommt es allerdings auch hier zu deutlich mehr Translation als in steifem Baugrund. Die unterschiedlichen Verformungen werden mit 500-facher Überhöhung in Abbildung 5.39 für Hauptsystem 2.1 ($L_{sp} = 15$ m, $H_{wl} = 5,0$ m) zufolge des ständigen Erddrucks E_0 dargestellt.

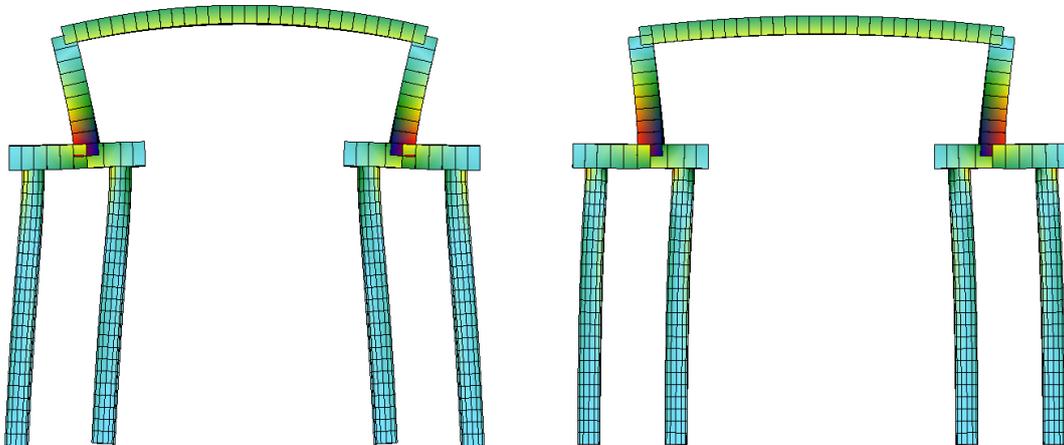


Abbildung 5.39.: Verformung zufolge E_0 für HS 2.1 für 20 mm (l) und 5 mm (r)

Bei der Darstellung der Spannungen am Pfahlkopf zufolge T_n in Kapitel 5.2.1 (siehe Abbildungen 5.22 und 5.25), Kapitel 5.2.2 (siehe Abbildungen 5.28 und 5.31) und Kapitel 5.2.3 (siehe Abbildung 5.34), lässt sich ein markanter Knick im Verlauf der Spannung zufolge T_n *Winter* und T_n *Sommer 1 und 2* erkennen. Dieser Knick ist auf den sich ändernden Momentenverlauf, bzw. auf die Verschiebung des Momentennullpunkts zurückzuführen. Abbildung 5.40 zeigt die Momentenverläufe zufolge T_n *Winter* am äußeren Bohrpfahl für Hauptssystem 2.7 ($L_{sp} = 30$ m, $H_{wl} = 5,0$ m).

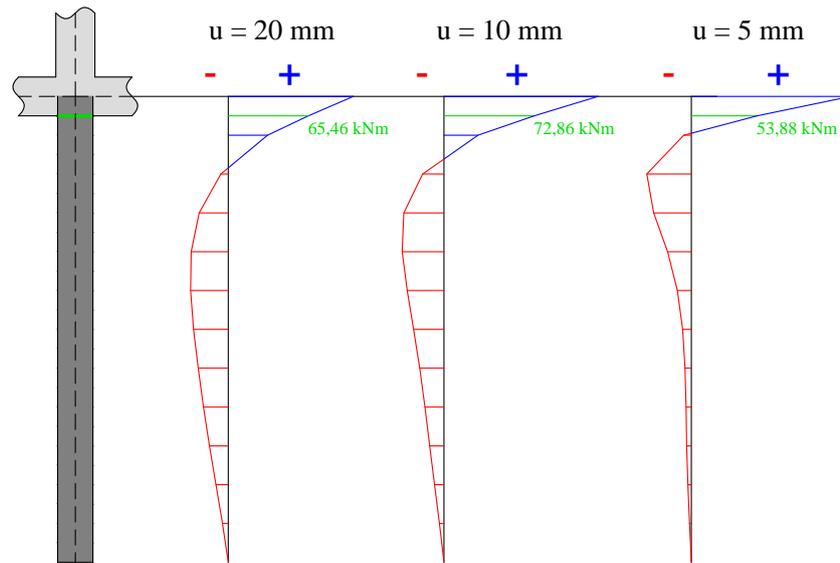


Abbildung 5.40.: Momentenverläufe zufolge T_n *Winter* am äußeren Bohrpfahl für HS 5.7

Der resultierende Knick im Verlauf der Spannung an der Außenseite des äußeren und inneren Pfahlkopfs lässt sich bei allen Widerlagerhöhen, aber nur bei einer Spannweite von $L_{sp} = 30$ m beobachten.

Generell fällt auf, dass die Biegemomente mit zunehmender Widerlagerhöhe stark abnehmen, während die Zugnormalkraft ab- bzw. die Drucknormalkraft zunimmt. Dadurch tritt der beschriebene Effekt in den Verläufen der Spannung an der Innenseite nur am äußeren Pfahlkopf bei Widerlagerhöhen von $H_{wl} = 5,0$ m und 7,5 m auf.

Wie schon zuvor bei Grundsystem 1 fällt auch hier auf, dass die Größenordnung der Spannungen zufolge der Verkehrseinwirkung im Rahmeneck und in Feldmitte unter den Erwartungen bleiben. Daher werden die Spannungen zufolge Eigengewicht, UDL-Verkehr und TS-Verkehr in diesen beiden Punkten näher untersucht. Es werden die Spannungen für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 7,5$ m und variablen Spannweiten bei einer Pfahlkopfverschiebung von $u_{hor,max} = 10$ mm herangezogen (US 2.2.2, 2.5.2 und 2.8.2). Die Ergebnisse der Einzellastfälle für $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}/f_{ctm}$ werden in Tabelle 5.4 angeführt.

Tabelle 5.4.: Vergleich von $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}/f_{ctm}$ im Rahmeneck und in Feldmitte am Grundsystem 2

L_{sp}	Rahmeneck			Feldmitte		
	15 m	20 m	30 m	15 m	20 m	30 m
Eigengewicht	0,83	1,01	1,16	-0,86	-1,32	-2,46
UDL	0,20	0,18	0,14	-0,21	-0,24	-0,30
TS	0,50	0,34	0,17	-0,74	-0,63	-0,50

Im Rahmeneck macht die Spannung zufolge TS bei einer Spannweite von $L_{sp} = 15$ m 60 % der Spannung zufolge Eigengewicht aus, in Feldmitte sind es 86 %. Bei größerer Spannweite nehmen die Prozentsätze ab bzw. treten deutlich größere Differenzen zwischen den Spannungen der beiden Lastfälle auf. Wie schon in Kapitel 5.1.4 für Grundsystem 1 erläutert, ist die Zunahme der Überbauhöhe $H_{üb}$ mit der Spannweite der Grund für die vergleichsweise niedrigen Spannungen zufolge TS.

Die Spannungen zufolge UDL fallen wie erwartet sehr gering aus. Das liegt an der über die Breite der Brücke gemittelten Einwirkung.

6. Auswertung der Spannungsanteile

In diesem Kapitel werden die Anteile der einzelnen Lastfälle an der Gesamtspannung abgebildet und interpretiert, um den Einfluss der Einzellastfälle besser zu verdeutlichen.

Da bereits zur Ermittlung der Steifemoduln die charakteristische Lastkombination erforderlich ist, wird diese auch zur Ermittlung der Gesamtspannungen σ_{char} an der Außen- und Innenseite herangezogen. Dazu werden vier Einwirkungskategorien festgelegt, deren Spannungsanteile untersucht werden sollen. Dabei handelt es sich um das Eigengewicht, den ständigen Erddruck, die Temperatureinwirkung im Winter bzw. Sommer sowie den Verkehr. In Tabelle 6.1 werden die Einwirkungskategorien und ihre zugehörigen Lastfälle und Kombinationsbeiwerte ψ_0 dargestellt.

Tabelle 6.1.: Einwirkungen für σ_{char}

Kategorie	Art	Lastfall	ψ_0
Eigengewicht	ständig	Eigengewicht	1,00
ständiger Erddruck	ständig	E_0	1,00
Temperatur	veränderlich	$T_{n,i}$	0,60
		$T_{m,i}$	0,60
		E zuf T_i	0,60
Verkehr	veränderlich	UDL	0,40
		TS	0,75

Die Temperatureinwirkung setzt sich aus der gleichmäßigen Temperaturänderung, der linearen Temperaturänderung und dem Erddruck zufolge Temperaturänderung zusammen. Somit ergeben sich die bekannten Lastfälle für Winter und Sommer, die in Kapitel 4.2.3 erläutert werden. Die Einwirkung zufolge Verkehr setzt sich aus der UDL-Flächenlast und den TS-Doppelachslasten zusammen. Diese beiden Lastfälle haben aber unterschiedliche Kombinationsbeiwerte ψ_0 . Die TS-Doppelachslast wird, wie schon bei der Ermittlung der Spannungen der Einzellastfälle in Kapitel 5, in der Feldmitte des Überbaus angesetzt. Die charakteristische Lastkombination errechnet sich nach bekannter Gleichung 6.1. $Q_{k,1}$ steht dabei für die führende veränderliche Einwirkung.

$$E_{char} = \sum G_{k,i} + Q_{k,1} + \sum (Q_{k,j} * \psi_{0,j}) \quad (6.1)$$

Für jedes Untersystem wird die maximale Spannung zufolge charakteristischer Lastkombination an der Außen- und an der Innenseite ermittelt. Die einzelnen Lastfall-Komponenten dieser maßgebenden Lastkombination werden anschließend betragsmäßig aufsummiert und grafisch dargestellt. Damit soll veranschaulicht werden, wie die Anteile der einzelnen Lastfälle bei sich ändernden Spannweiten, Widerlagerhöhen und Steifemoduln zu- und abnehmen.

Auch hier werden die Spannungen in den bereits bekannten Punkten untersucht. Jede Abbildung zeigt die Spannungsanteile für jene drei Hauptssysteme gleicher Widerlagerhöhe, aber variabler Spannweite. Die beigegefügte Tabelle gibt an, welche führende Einwirkung in welchem Temperaturlastfall (Winter bzw. Sommer Fall 1 bis 4) die maßgebende Lastkombination liefert. Beispielsweise bedeutet *T-S3*, dass die Temperatureinwirkung als Führende wirkt und der Temperaturlastfall *Sommer 3* maßgebend wird.

Zunächst werden die Spannungsanteile für Grundsystem 1 in Kapitel 6.1 dargestellt, im Anschluss daran die für Grundsystem 2 in Kapitel 7.2.

Für Rahmeneck und Feldmitte ergeben sich an der Innenseite und Außenseite optisch sehr ähnliche Diagramme. Sie unterscheiden sich nur durch sehr geringe Unterschiede der einzelnen Anteile der Lastfälle. Das lässt sich auf den geringen Normalkraftanteil der Spannung zurückführen. Aus diesem Grund werden hier für das Rahmeneck und die Feldmitte nur die Spannungsanteile an der Außenseite abgebildet und interpretiert, jene für die Innenseite sind im Anhang dargestellt.

6.1. Grundsystem 1

Nachfolgend wird dargestellt, wie sich die Spannungsanteile zufolge der einzelnen Einwirkungen bei zunehmendem Steifemodul am Grundsystem 1 verhalten. Die Abbildungen 6.1 bis 6.6 zeigen die Spannungsanteile am Pfahlkopf, die Abbildungen 6.7 bis 6.12 jene am Widerlagerfuß. Die Ergebnisse für das Rahmeneck werden in den Abbildungen 6.13 bis 6.15 beschrieben, jene für die Feldmitte in den Abbildungen 6.16 bis 6.18.

Im ersten Abschnitt werden die Ergebnisse für den Pfahlkopf dargestellt. Die Abbildungen 6.1 bis 6.3 zeigen die Spannungsanteile an dessen Außenseite.

Abbildung 6.1 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Der Anteil zufolge *Eigengewicht* nimmt mit L_{sp} zu. Der Knick im Verlauf von $L_{sp} = 30$ m ist auf einen Vorzeichenwechsel der Spannung zurückzuführen (vgl. Abbildung 5.1). Gleichzeitig nimmt der Anteil zufolge *ständigen Erddrucks* mit L_{sp} ab. Bei $L_{sp} = 30$ m und steifem Baugrund steht ein Vorzeichenwechsel der Spannung kurz bevor, was den praktisch nicht vorhandenen Anteil bei $u_{hor,max} = 5$ mm erklärt. Tendenziell liefert die *Temperatur* den größten Spannungsanteil, der mit zunehmendem E_s noch zunimmt. Bei $L_{sp} = 30$ m und weichem Baugrund kommt die *Temperatur* jedoch nicht so deutlich zur Geltung, da sich die maximale Spannung mit *UDL* als führender Einwirkung errechnet.

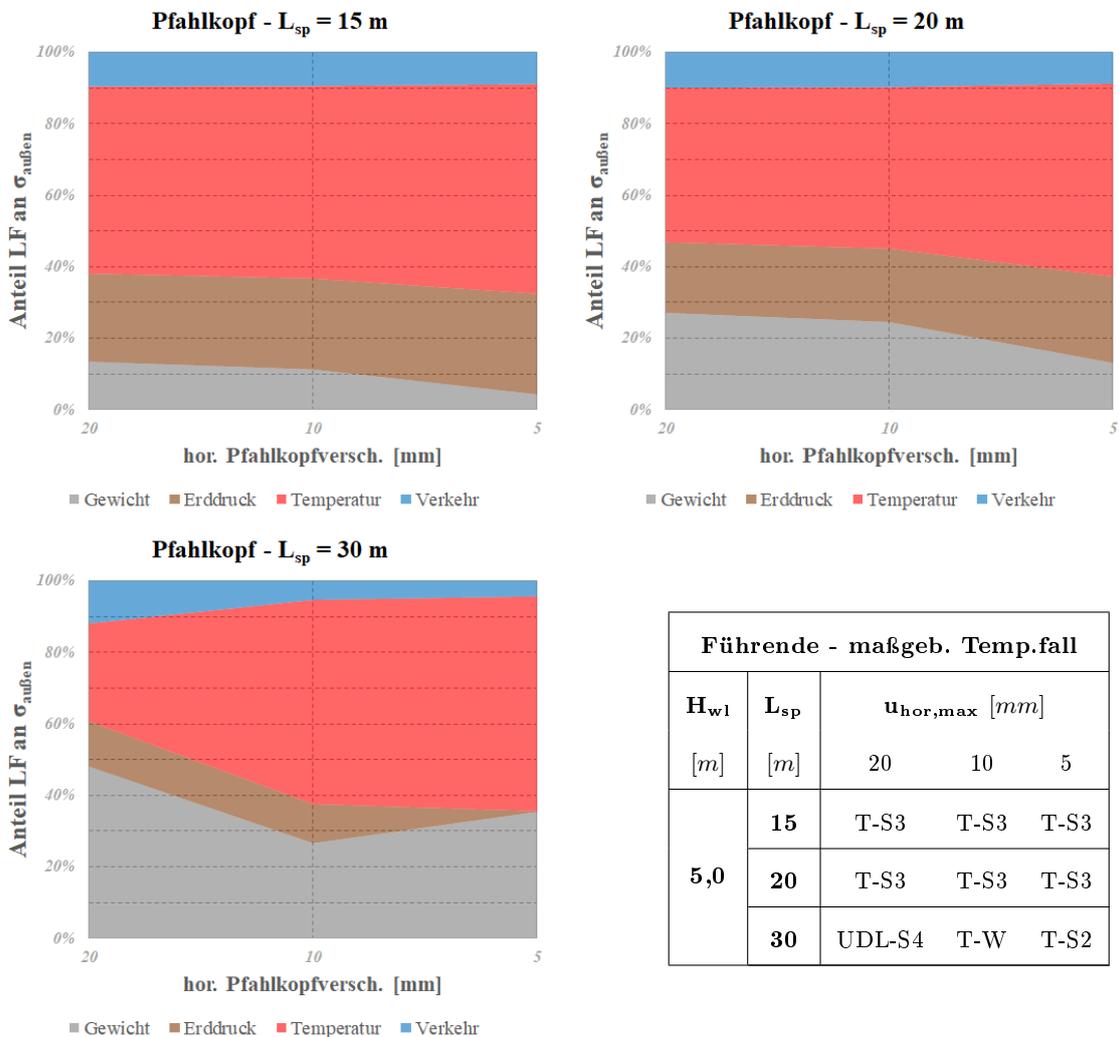


Abbildung 6.1.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}$ am Pfahlkopf bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.2 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 7,5$ m. Der Anteil zufolge *Eigengewicht* nimmt tendenziell sowohl mit L_{sp} als auch mit zunehmendem E_s zu. Der Knick im Verlauf bei $L_{sp} = 30$ m ist auf einen Vorzeichenwechsel der Spannung zurückzuführen (vgl. Abbildung 5.7). Das selbe gilt für die Verläufe zufolge *Verkehr*. Für den Anteil des *ständigen Erddrucks* lässt sich erkennen, dass dieser mit größer werdendem E_s abnimmt. Für den Anteil der *Temperatur* gilt tendenziell das Gegenteil. Bei $L_{sp} = 30$ m und $u_{hor,max} = 5$ mm kommt das jedoch nicht zur Geltung, da *UDL* als Führende wirkt.

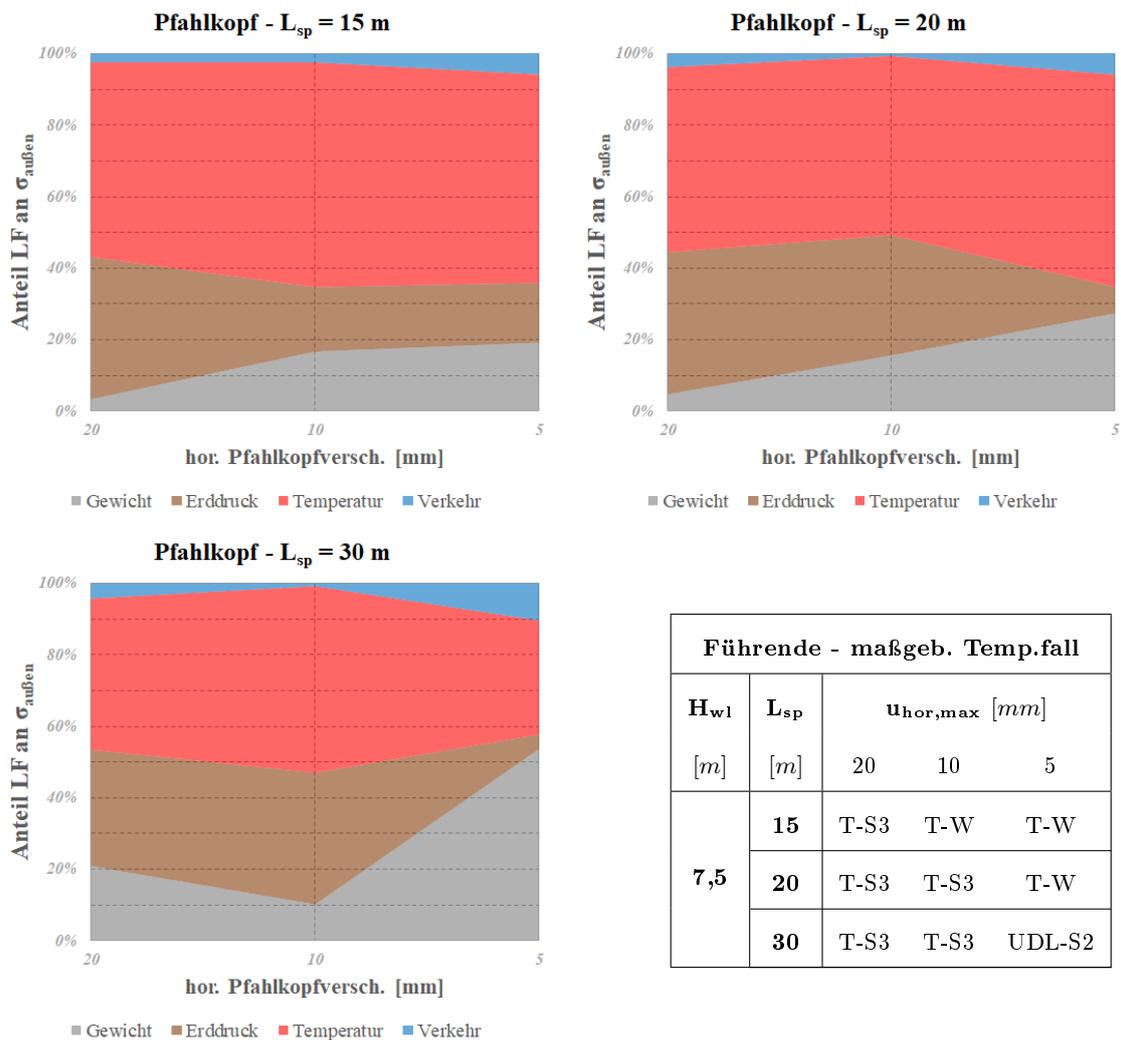


Abbildung 6.2.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}$ am Pfahlkopf bei $H_{wl}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.3 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 10,0$ m. Der Spannungsanteil des *Eigengewichts* nimmt mit zunehmendem L_{sp} zu. Bei geringerem L_{sp} nimmt er mit steigendem E_s ab, bei $L_{sp} = 30$ m jedoch leicht zu. Der dort auftretende Knick ist auf einen Spannungswechsel zufolge des *ständigen Erddrucks* zurückzuführen. Auch sein Anteil verhält sich je nach L_{sp} unterschiedlich. Bei kleinem L_{sp} nimmt er mit zunehmendem E_s zu, bei großem L_{sp} hingegen ab. Ebenso verhält sich der Anteil der *Temperatur*, der generell mit steigendem L_{sp} abnimmt.

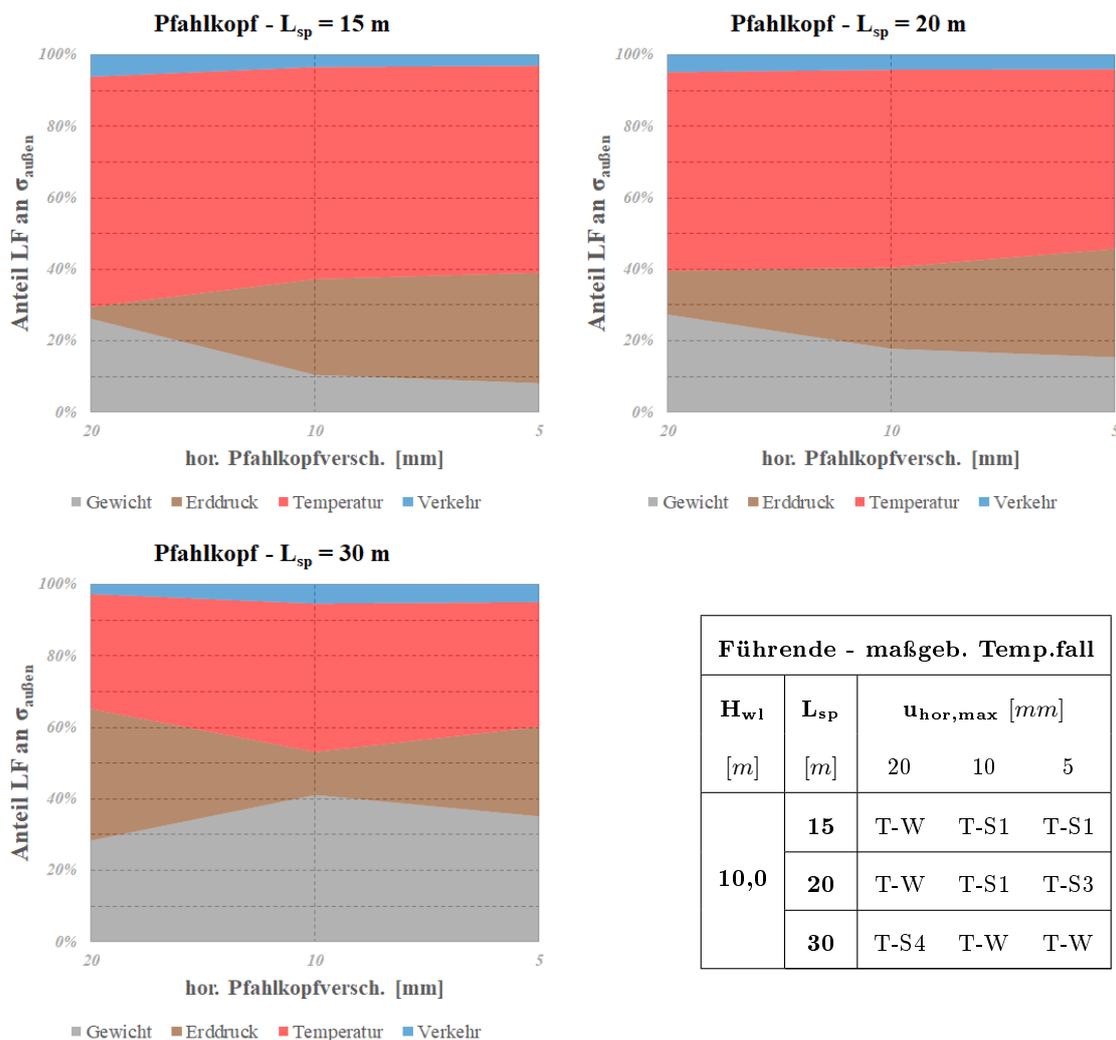


Abbildung 6.3.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{au\ddot{a}}en$ am Pfahlkopf bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 1

Die folgenden Abbildungen 6.4 bis 6.6 zeigen die Anteile der einzelnen Lastfälle an der Gesamtspannung an der Innenseite des Pfahlkopfs.

Abbildung 6.4 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Es lässt sich beobachten, dass der Anteil zufolge *Eigengewicht* mit zunehmendem E_s abnimmt, bei großem L_{sp} macht es sich jedoch viel deutlicher bemerkbar. Tendenziell nimmt sein Anteil mit steigendem L_{sp} zu. Der Anteil des *ständigen Erddrucks* nimmt mit steigendem L_{sp} ab, der geringe Anteil bei $L_{sp} = 30$ m und $u_{hor,max} = 5$ mm ist durch einen Vorzeichenwechsel zu erklären. Zunehmen von E_s bewirkt, dass der Anteil der *Temperatur* zunimmt. Aufgrund unterschiedlicher maßgebender Lastkombinationen ergeben sich je nach L_{sp} recht konträre Bilder. Der Anteil zufolge *Verkehr* nimmt bei zunehmendem E_s ab.

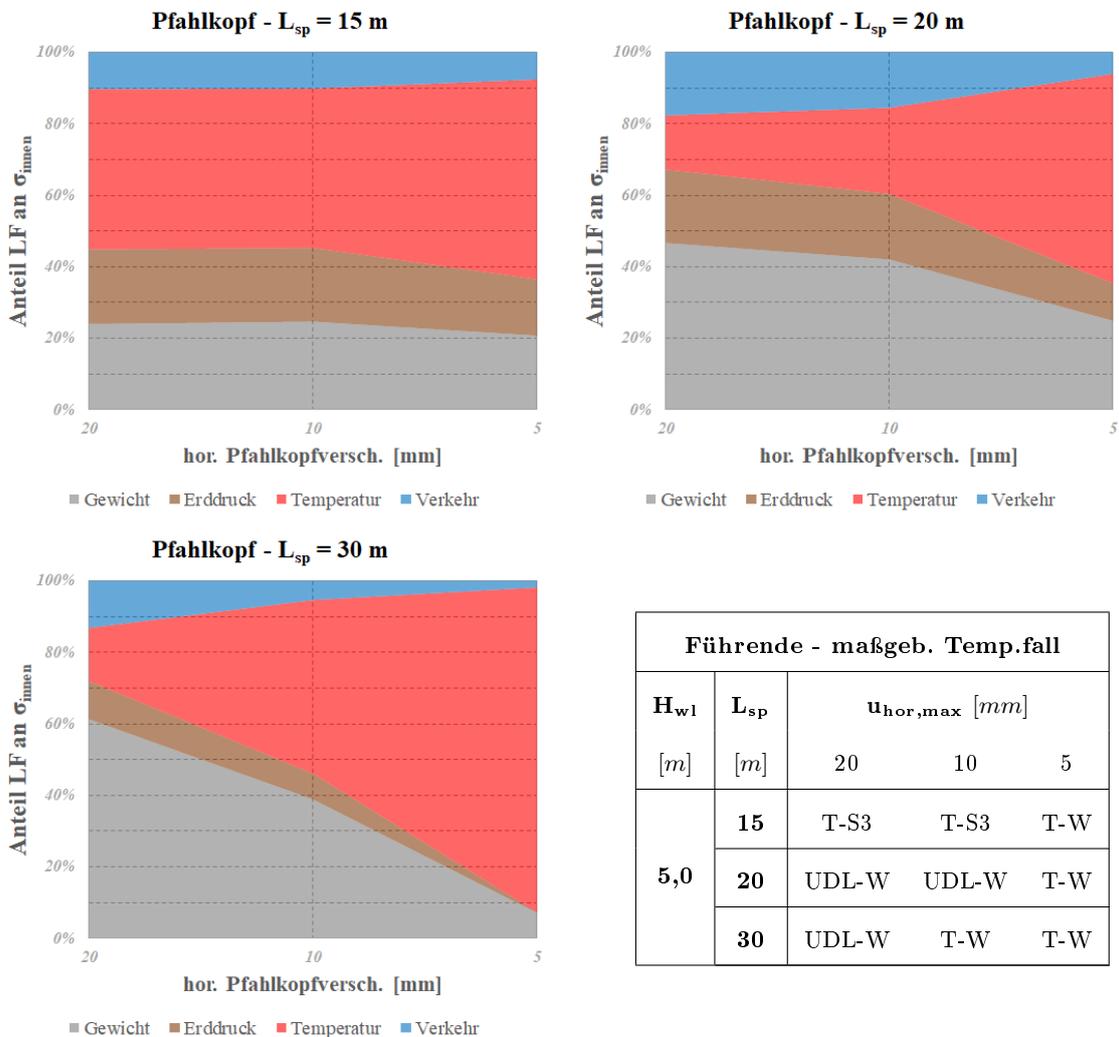


Abbildung 6.4.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Pfahlkopf bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.5 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 7,5$ m. Hier werden die Verläufe, unabhängig von L_{sp} , von Vorzeichenwechsel der Gesamtspannung zufolge charakteristischer Lastkombination durch eine Zunahme von E_s beeinflusst. Dadurch entstehen Knicke, wie bei $L_{sp} = 15$ m zufolge *Eigengewicht*. Tendenziell nimmt der Anteil des *Eigengewichts* mit steifer werdendem Baugrund ab und ist bei großem L_{sp} größer als bei kleinem L_{sp} . Der Anteil des *ständigen Erddrucks* nimmt mit steigendem E_s ab, während jener der *Temperatur* zunimmt.

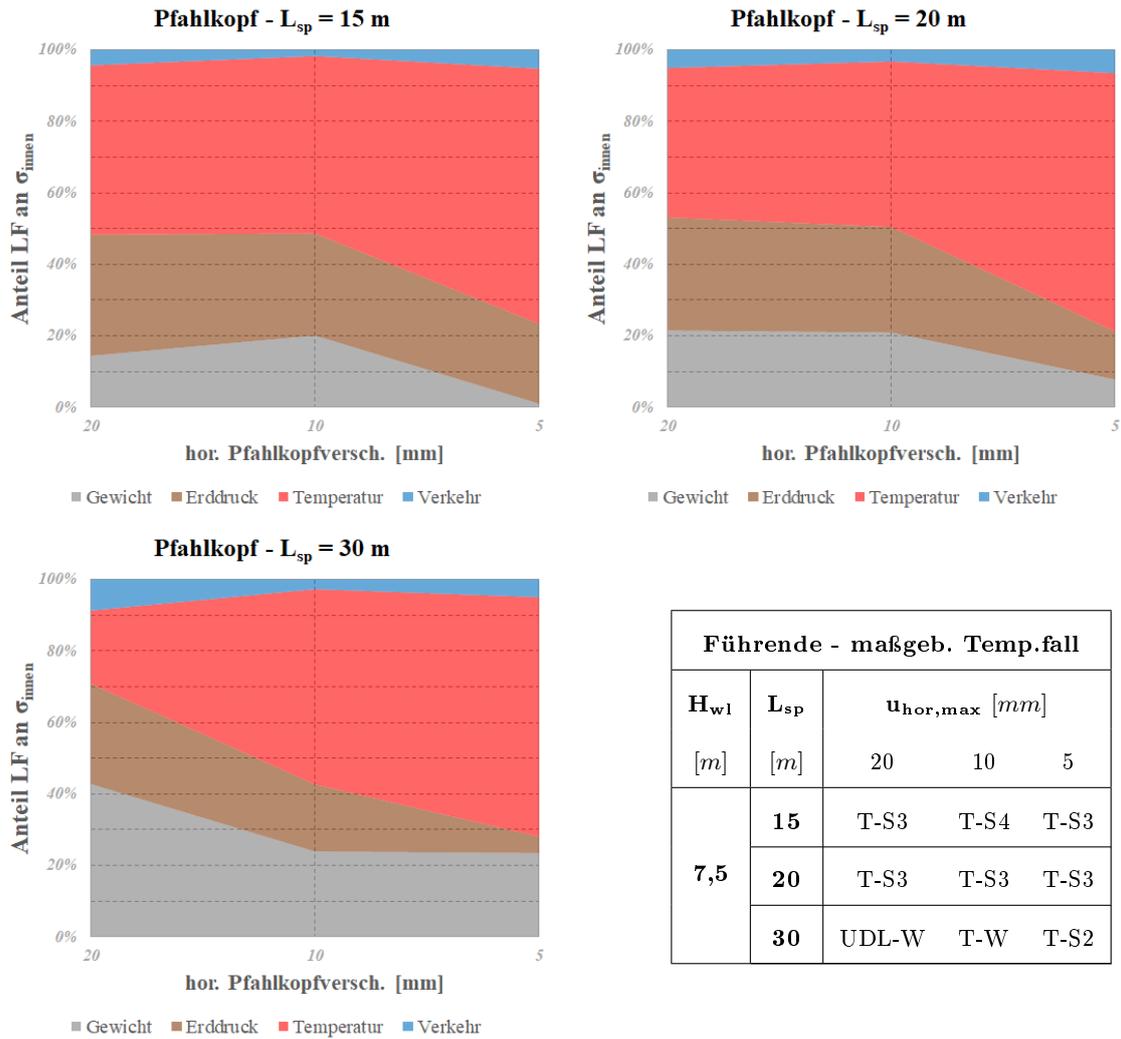


Abbildung 6.5.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Pfahlkopf bei $H_{wl}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.6 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 10,0$ m. Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt mit L_{sp} zu, während er tendenziell mit steigendem E_s ebenso zunimmt. Bei $L_{sp} = 15$ m bildet sich das jedoch nicht ab, da es zu einem Vorzeichenwechsel der Spannung kommt (vgl. Abbildung 5.16). Tendenziell nehmen auch die Anteile des *ständiges Erddrucks* und der *Temperatur* mit steifer werdendem Baugrund zu. Das kommt bei $L_{sp} = 30$ m jedoch nicht zur Geltung, da für $u_{hor,max} = 20$ mm die Lastkombination *T-S4* maßgebend wird.

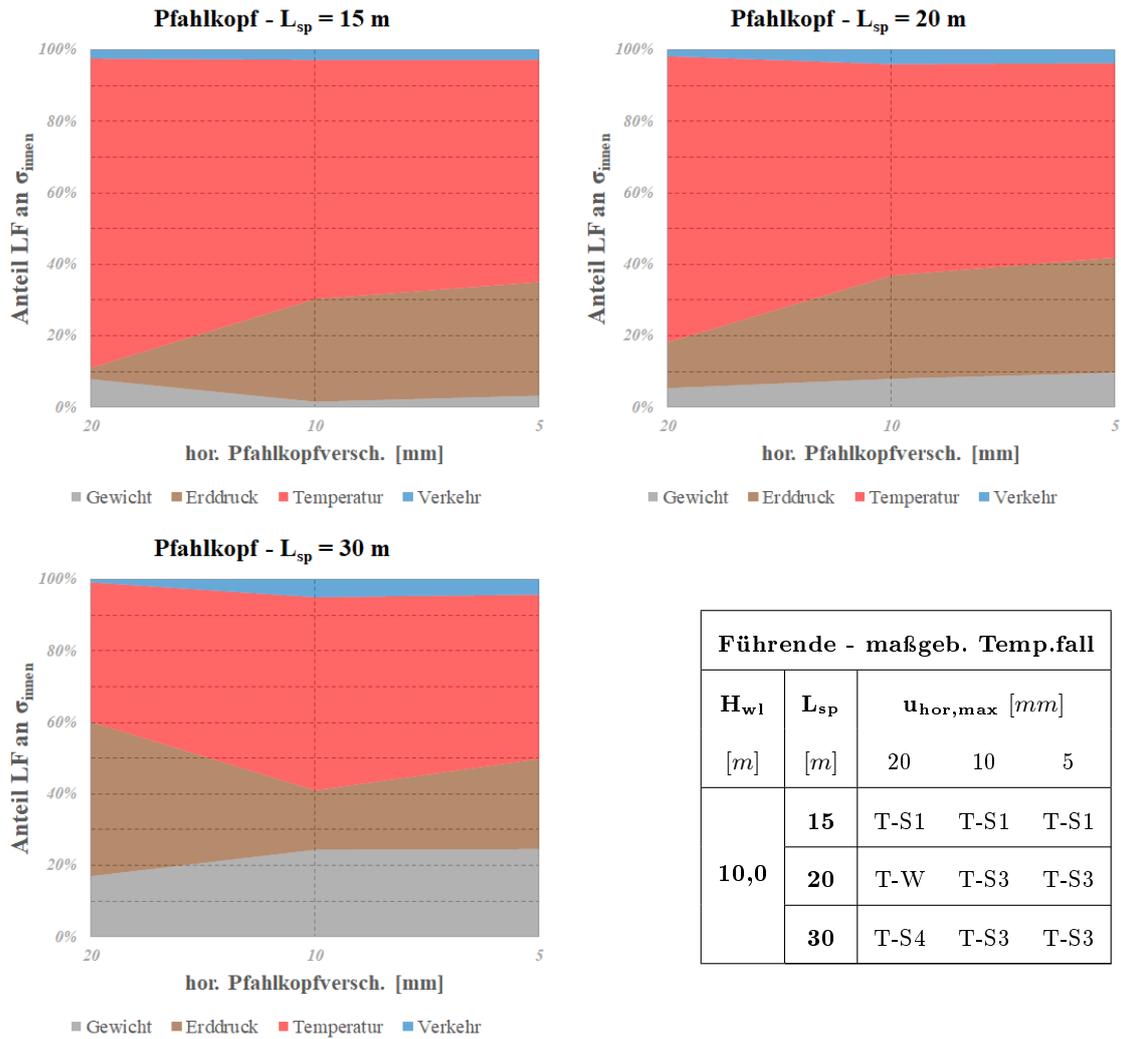


Abbildung 6.6.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Pfahlkopf bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 1

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für den Widerlagerfuß dargestellt. Die Abbildungen 6.7 bis 6.9 zeigen die Spannungsanteile an dessen Außenseite.

Abbildung 6.7 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m. Die Anteile aller verschiedenen Einwirkungen ändern sich zufolge zunehmendem E_s nur geringfügig. Mit steigendem L_{sp} nimmt der Anteil des *Eigengewichts* merklich zu, während die Anteile zufolge des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* abnehmen. Der Anteil des *Verkehrs* bleibt nahezu unverändert, auch bei $L_{sp} = 30$ m, wo *UDL* als führende Einwirkung wirkt.

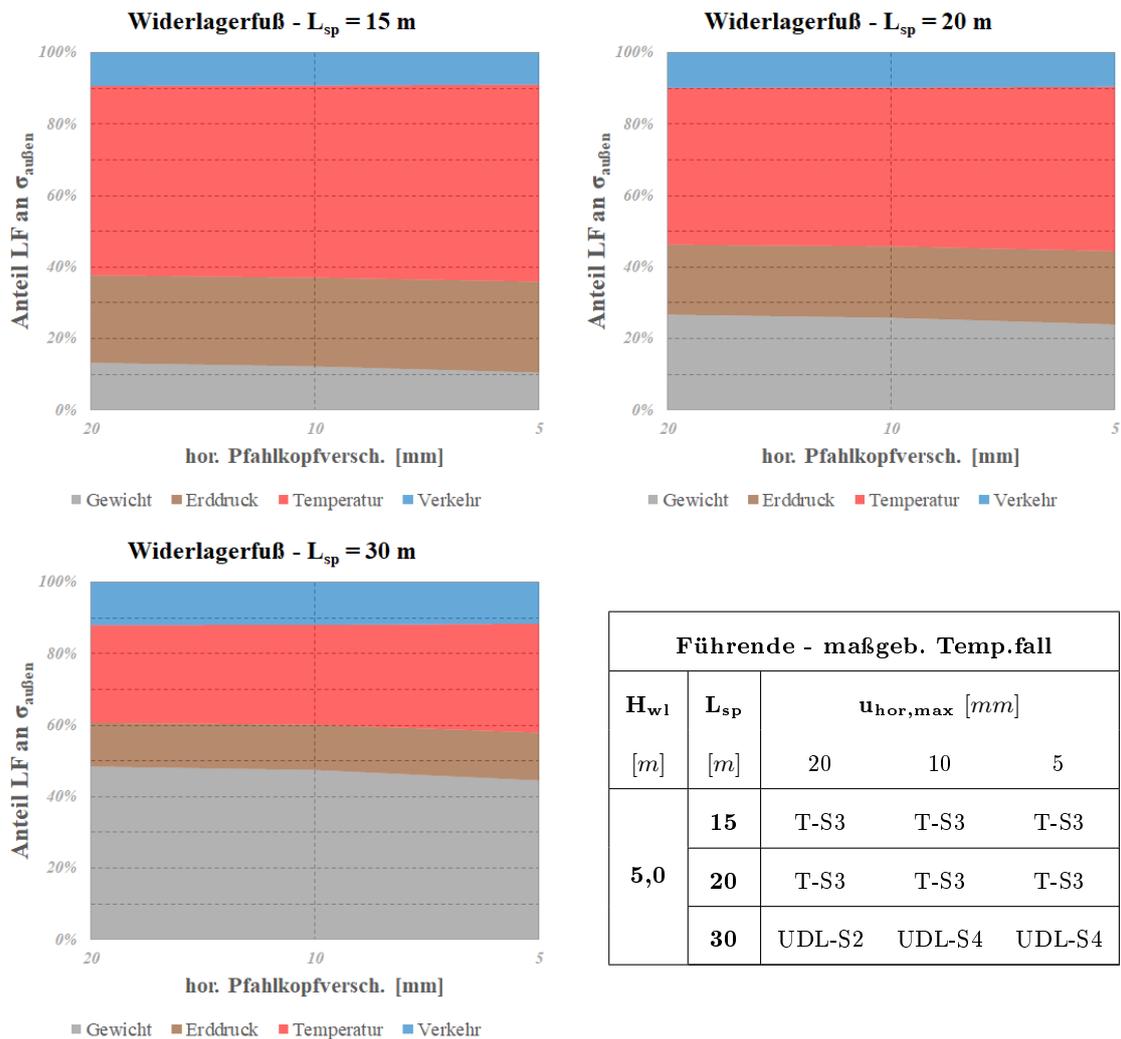


Abbildung 6.7.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.8 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt bei $L_{sp} = 15$ m zufolge zunehmendem E_s zu, während er für größere L_{sp} abnimmt. Das ist auf einen Vorzeichenwechsel der Spannung zufolge *Eigengewicht* zurückzuführen (vgl. Abbildung 5.7). Im Allgemeinen nimmt der Anteil des *Eigengewichts* aber mit steigendem L_{sp} zu. Gleichzeitig nehmen die Anteile des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* mit zunehmendem L_{sp} ab. Der Anteil zufolge *Verkehr* nimmt nur minimal zu.

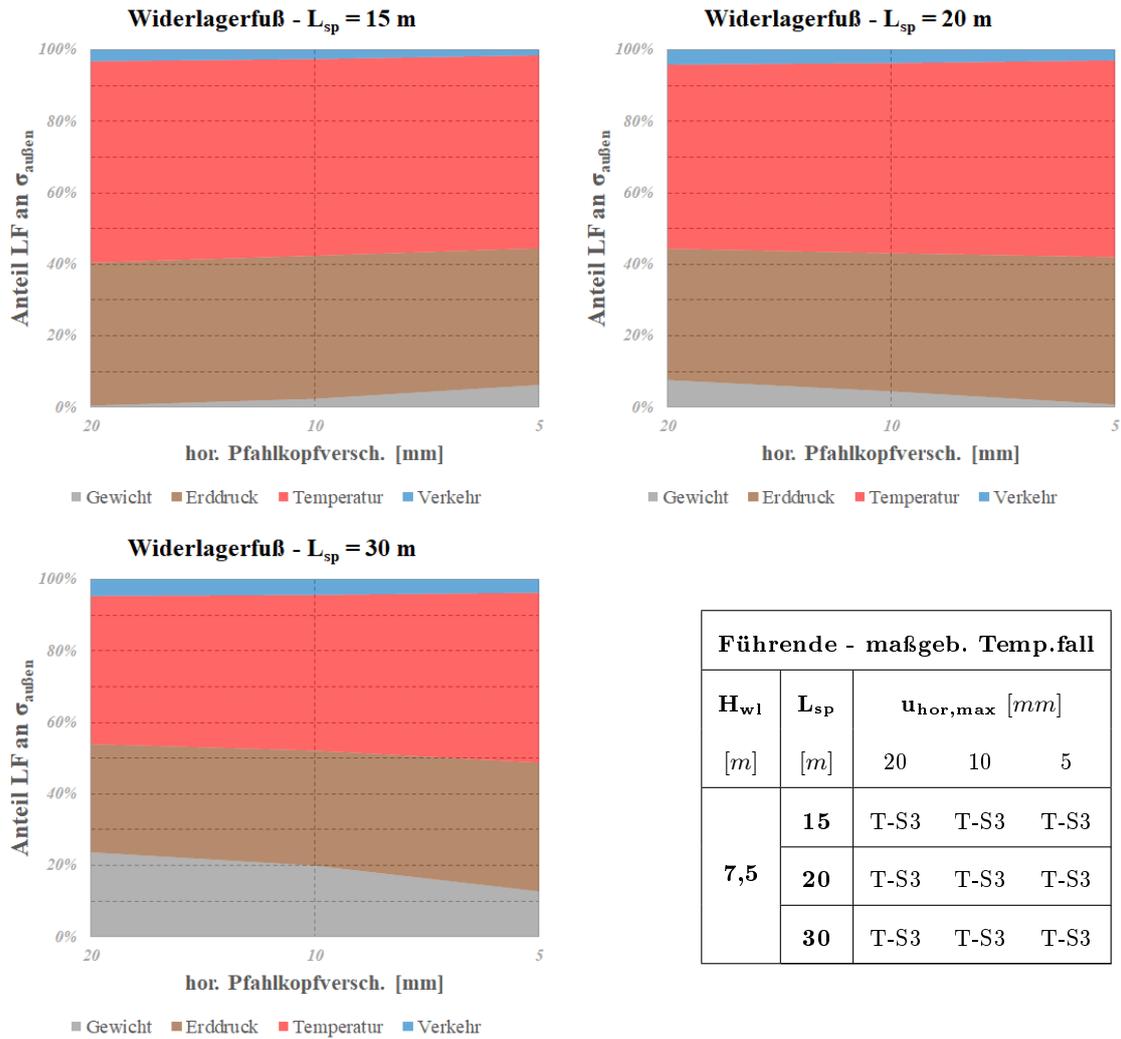


Abbildung 6.8.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.9 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Hierbei ist der Anteil zufolge *Verkehr* kaum vorhanden. Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt zufolge steigendem E_s zu, jedoch ist der Einfluss von L_{sp} sehr gering. Mit zunehmendem E_s nimmt der Anteil der *Temperatur* geringfügig ab, der des *ständigen Erddrucks* ändert sich minimal bis gar nicht. Generell ähneln sich die Spannungsanteile für alle L_{sp} sehr.

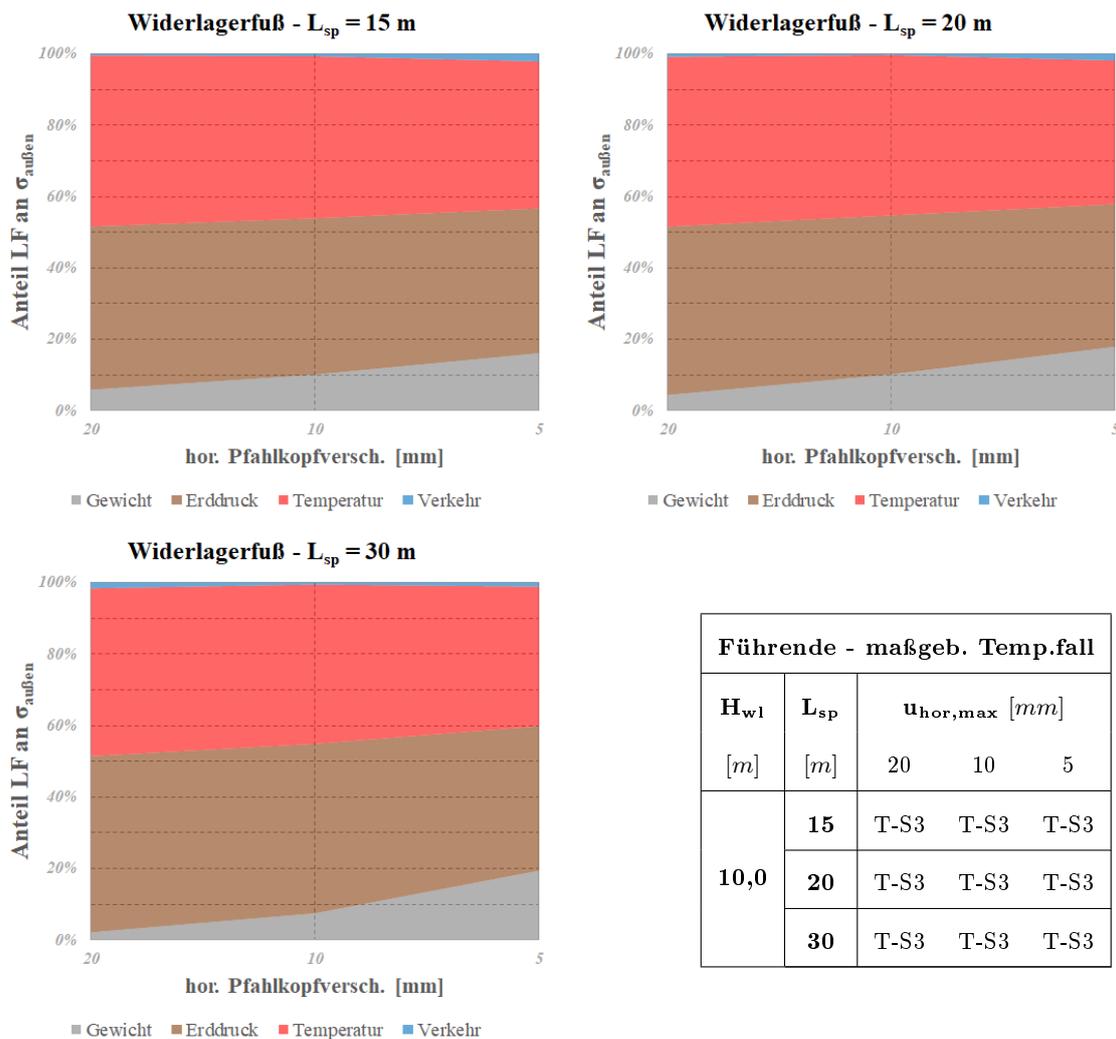


Abbildung 6.9.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

Die folgenden Abbildungen 6.10 bis 6.12 zeigen die Anteile der einzelnen Lastfälle an der Gesamtspannung an der Innenseite des Widerlagerfußes.

Abbildung 6.10 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m. Hier zeigt sich für die einzelnen Anteile kaum eine Änderung zufolge steigendem E_s . Mit zunehmendem L_{sp} steigt der Anteil des *Eigengewichts* deutlich an. Gleichzeitig nehmen die Anteile zufolge des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* ab. Der Anteil des *Verkehrs* ändert sich je nach L_{sp} , was aber auf unterschiedliche maßgebende Lastkombinationen und führende Einwirkungen zurückzuführen ist.

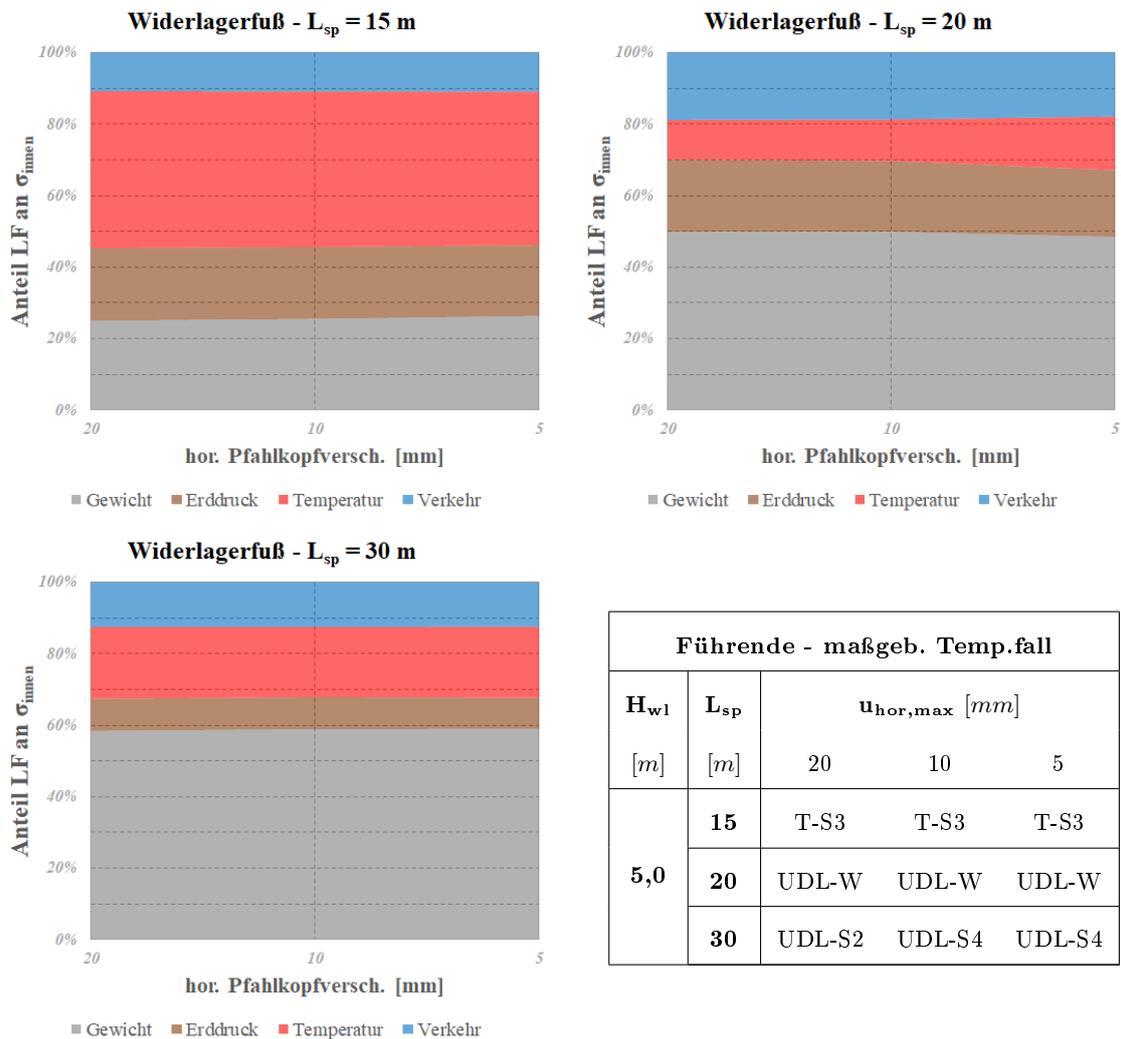


Abbildung 6.10.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.11 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptsysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Die Zu- bzw. Abnahmen zufolge steigendem E_s fallen nur gering aus. Die unterschiedliche Steigung der Verläufe zufolge E_s (fallend bzw. zunehmend) hängt mit den unterschiedlichen Vorzeichen der Spannungen zufolge den maßgebenden Lastkombinationen im Winter bzw. Sommer zusammen. Allgemein lässt sich feststellen, dass der Anteil des *Eigengewichts* mit zunehmendem L_{sp} zunimmt, während die Anteile des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* abnehmen. Der Anteil des *Verkehrs* fällt bei $L_{sp} = 30$ m größer aus als bei $L_{sp} = 15$ m und 20 m, da dort *UDL* als Führende angesetzt wird.

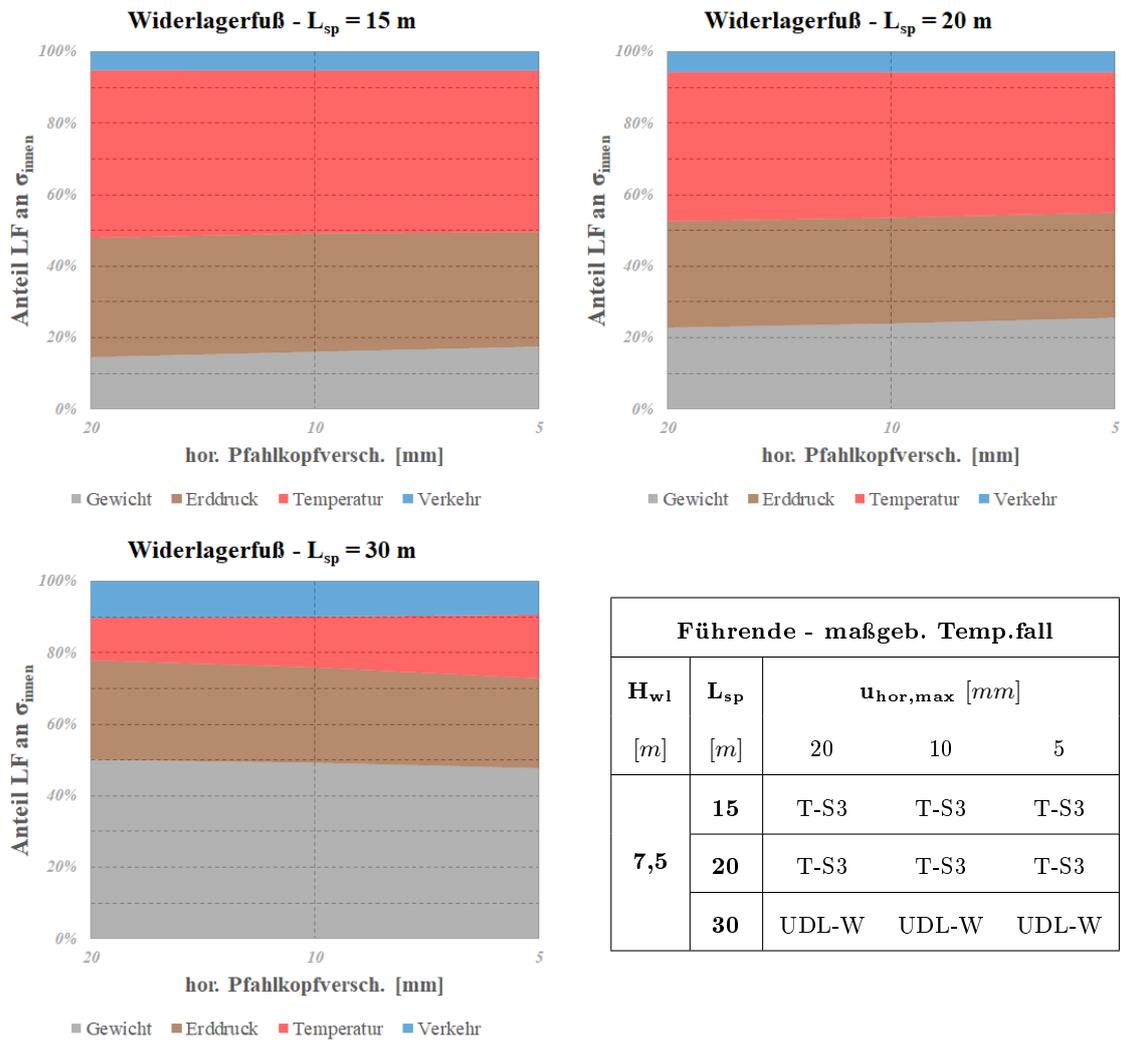


Abbildung 6.11.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.12 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Eine Änderung der Spannungsanteile zufolge zunehmenden E_s erfolgt nur sehr gering, wobei diese bei kleinem L_{sp} größer ist als bei großem L_{sp} . Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt mit zunehmendem L_{sp} zu, während die Anteile zufolge des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* abnehmen. Der Spannungsanteil des *Verkehrs* bleibt unverändert.

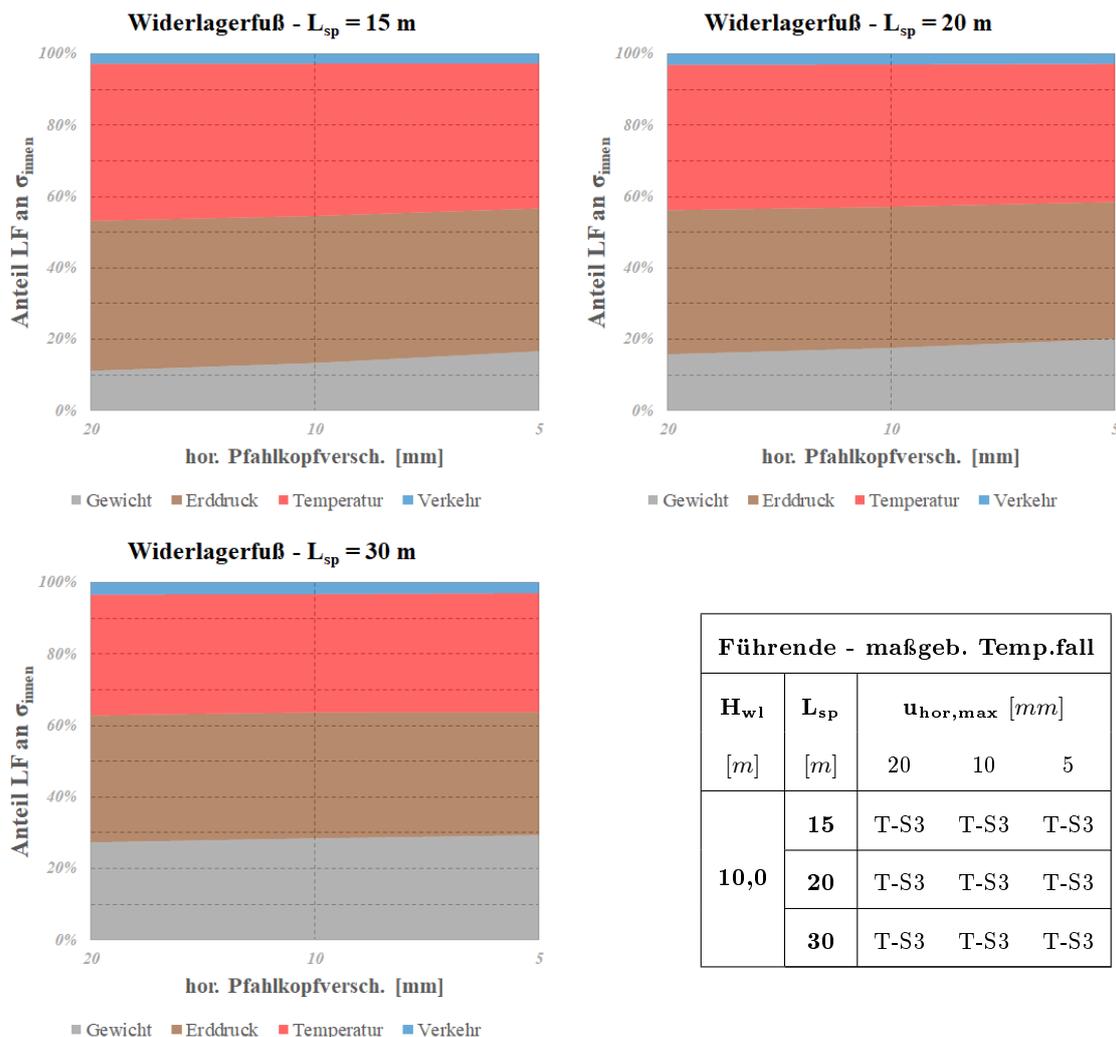


Abbildung 6.12.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für das Rahmeneck dargestellt. Die Abbildungen 6.13 bis 6.15 zeigen die Spannungsanteile an dessen Außenseite.

Abbildung 6.13 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m. Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt mit L_{sp} deutlich zu. Gleichzeitig nehmen die drei anderen Spannungsanteile leicht ab. Ein Zunehmen von E_s bedeutet für den *Verkehr* eine Zunahme seines Anteils an der Gesamtspannung, während es bei den übrigen Einwirkungen eine Abnahme des Spannungsanteils bewirkt.

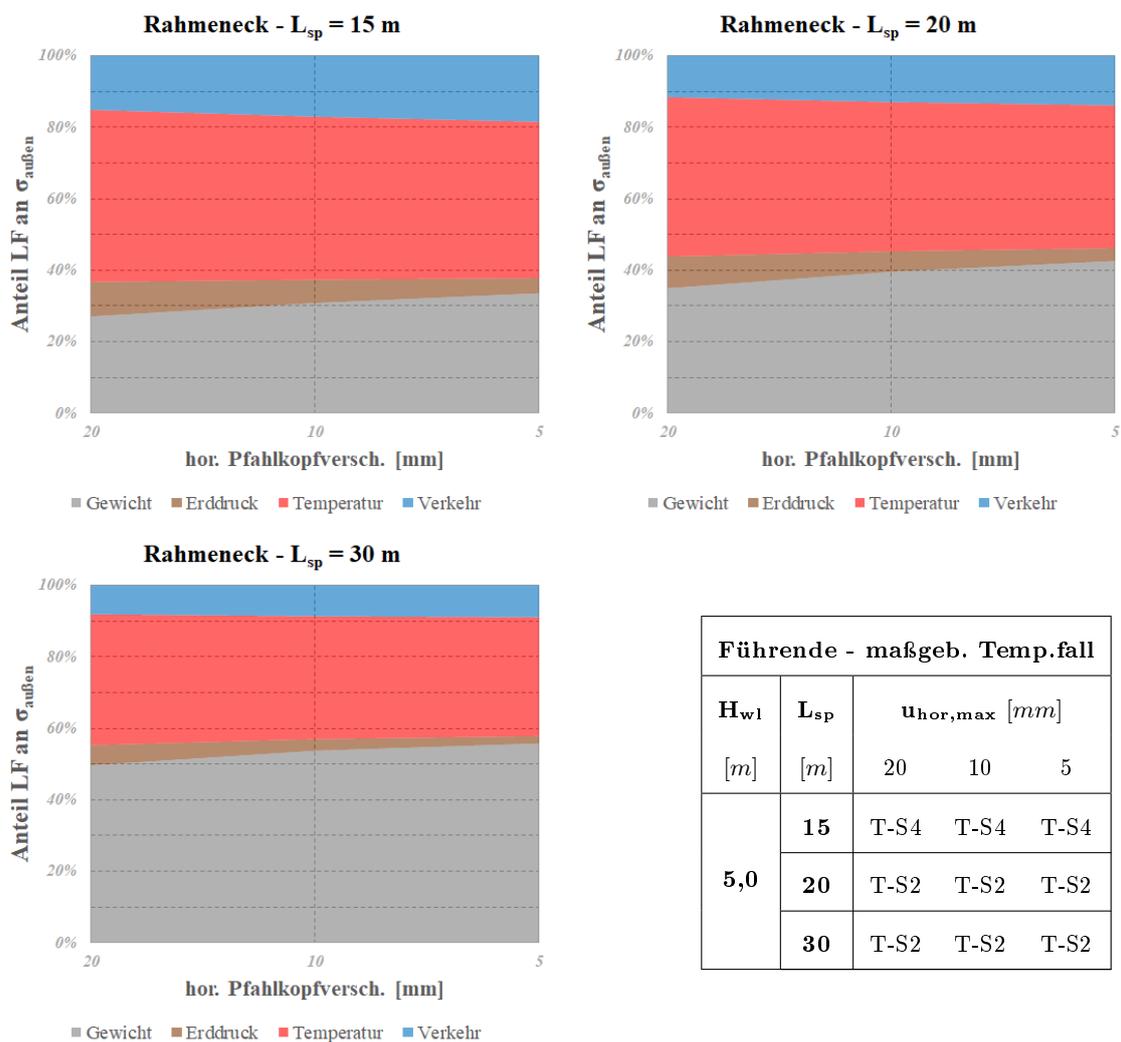


Abbildung 6.13.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{au\ddot{a}u\text{en}}$ im Rahmeneck bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.14 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptsysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Ein Zunehmen von E_s bedeutet für den *Verkehr* eine Zunahme seines Anteils an der Gesamtspannung, während es bei den übrigen Einwirkungen eine Abnahme des Spannungsanteils bewirkt. Der Spannungsanteil zufolge des *Eigengewichts* nimmt mit L_{sp} deutlich zu. Gleichzeitig nehmen die drei anderen Anteile leicht ab.

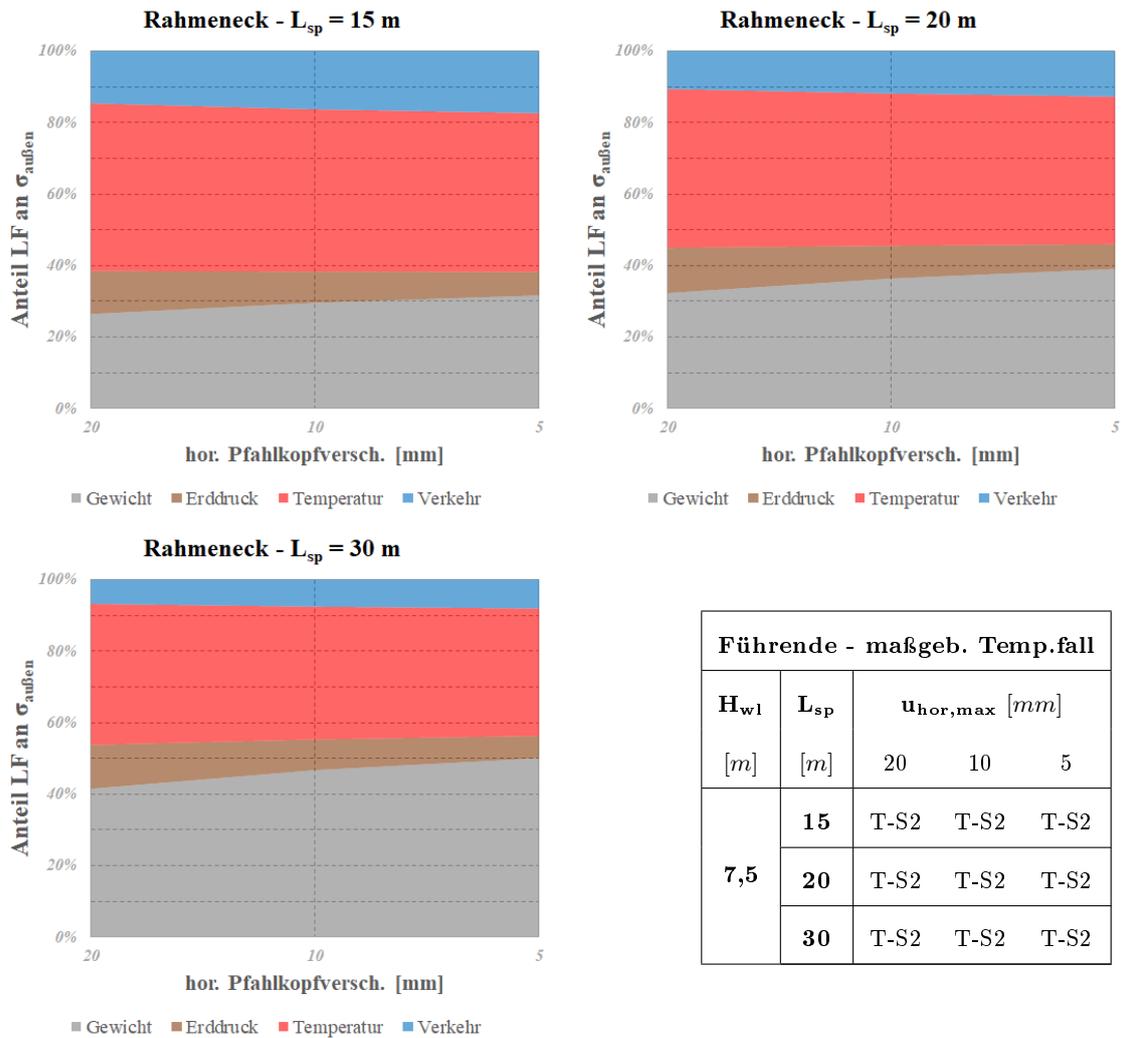


Abbildung 6.14.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.15 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Der Spannungsanteil des *Eigengewichts* nimmt mit L_{sp} zu, während die Anteile des *Verkehrs* und der *Temperatur* abnehmen. Der Anteil des *ständigen Erddrucks* bleibt bei zunehmendem L_{sp} konstant. Ein Zunehmen von E_s bedeutet für den *Verkehr* eine Zunahme seines Anteils an der Gesamtspannung, während es bei den übrigen Einwirkungen eine Abnahme des Spannungsanteils bewirkt.

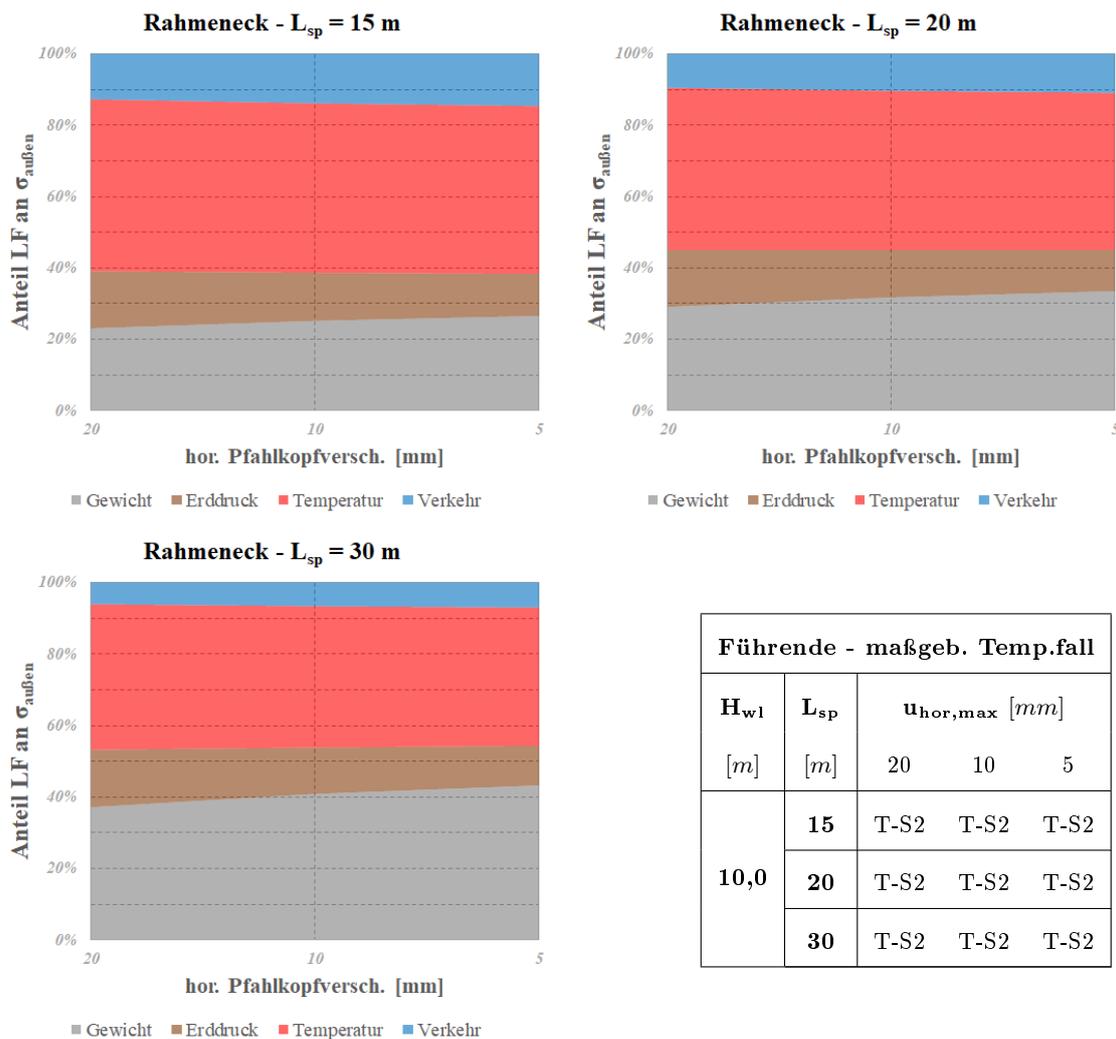


Abbildung 6.15.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Feldmitte dargestellt. Die Abbildungen 6.16 bis 6.18 zeigen die Spannungsanteile an deren Außenseite.

Abbildung 6.16 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m. Generell lässt sich feststellen, dass eine Zunahme von E_s keine Auswirkung auf die Anteile des *Eigengewichts* oder des *Verkehrs* hat. Der Anteil der *Temperatur* nimmt jedoch leicht zu, während der des *ständigen Erddrucks* abnimmt. Mit zunehmendem L_{sp} nimmt der Spannungsanteil des *Eigengewichts* deutlich zu, während alle übrigen Anteile abnehmen. Der *ständige Erddruck* trägt bei L_{sp} kaum etwas zur Gesamtspannung bei.

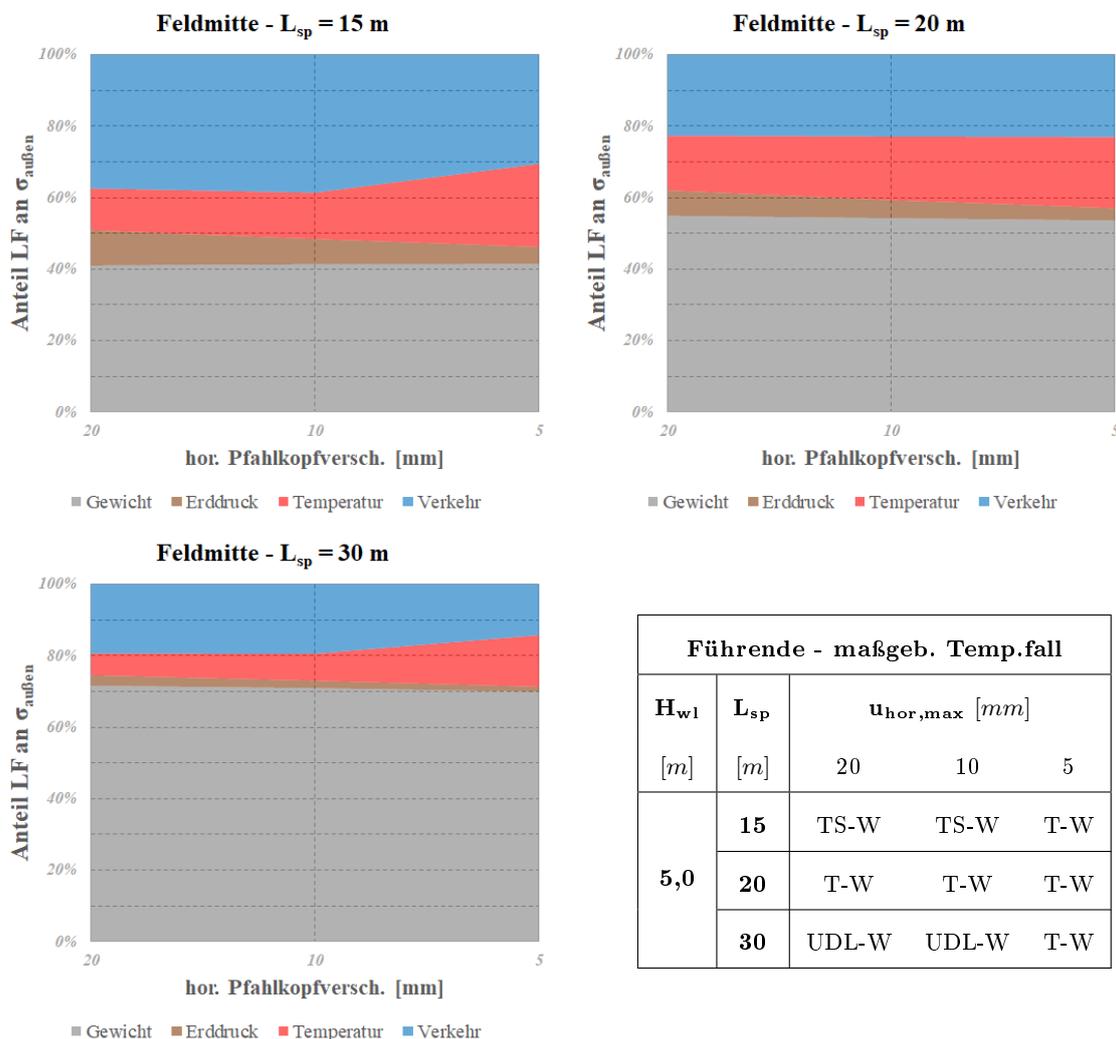


Abbildung 6.16.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{außen}$ in Feldmitte bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.17 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Generell lässt sich feststellen, dass eine Zunahme von E_s nur geringe Auswirkungen auf die Anteile des *Eigengewichts* oder des *Verkehrs* hat. Der Anteil der *Temperatur* nimmt jedoch leicht zu, während der des *ständigen Erddrucks* abnimmt. Mit zunehmendem L_{sp} nimmt der Spannungsanteil des *Eigengewichts* deutlich zu, während alle übrigen Anteile abnehmen.

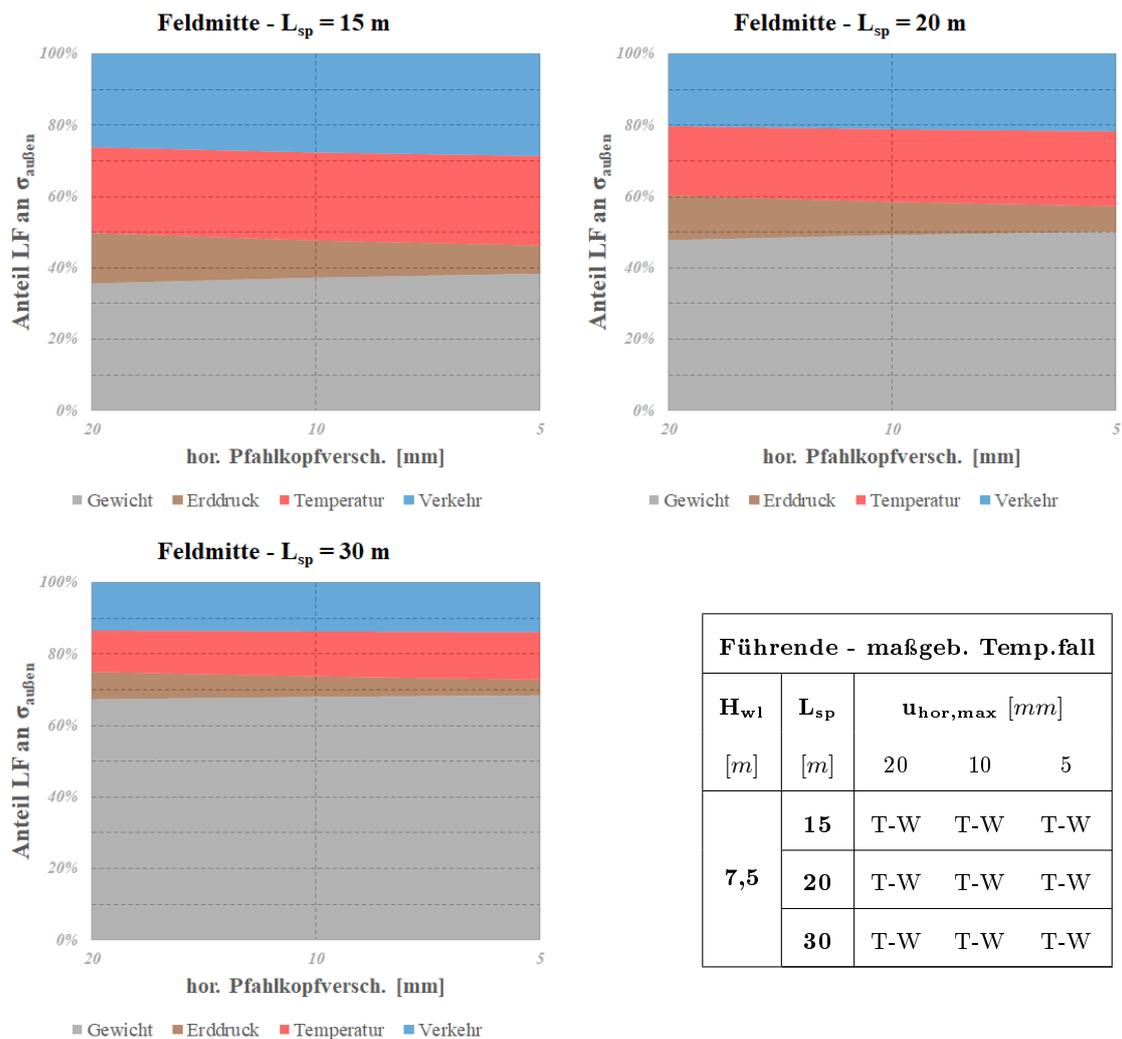


Abbildung 6.17.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

Abbildung 6.18 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptsysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 10,0$ m. Eine Zunahme von E_s hat nur geringe Auswirkungen auf den Anteil der *Temperatur*. Der Anteil des *ständigen Erddrucks* nimmt jedoch leicht ab, während die Anteile des *Eigengewichts* und des *Verkehrs* zunehmen. Mit steigendem L_{sp} nimmt der Spannungsanteil des *Eigengewichts* deutlich zu, während alle übrigen Anteile abnehmen.

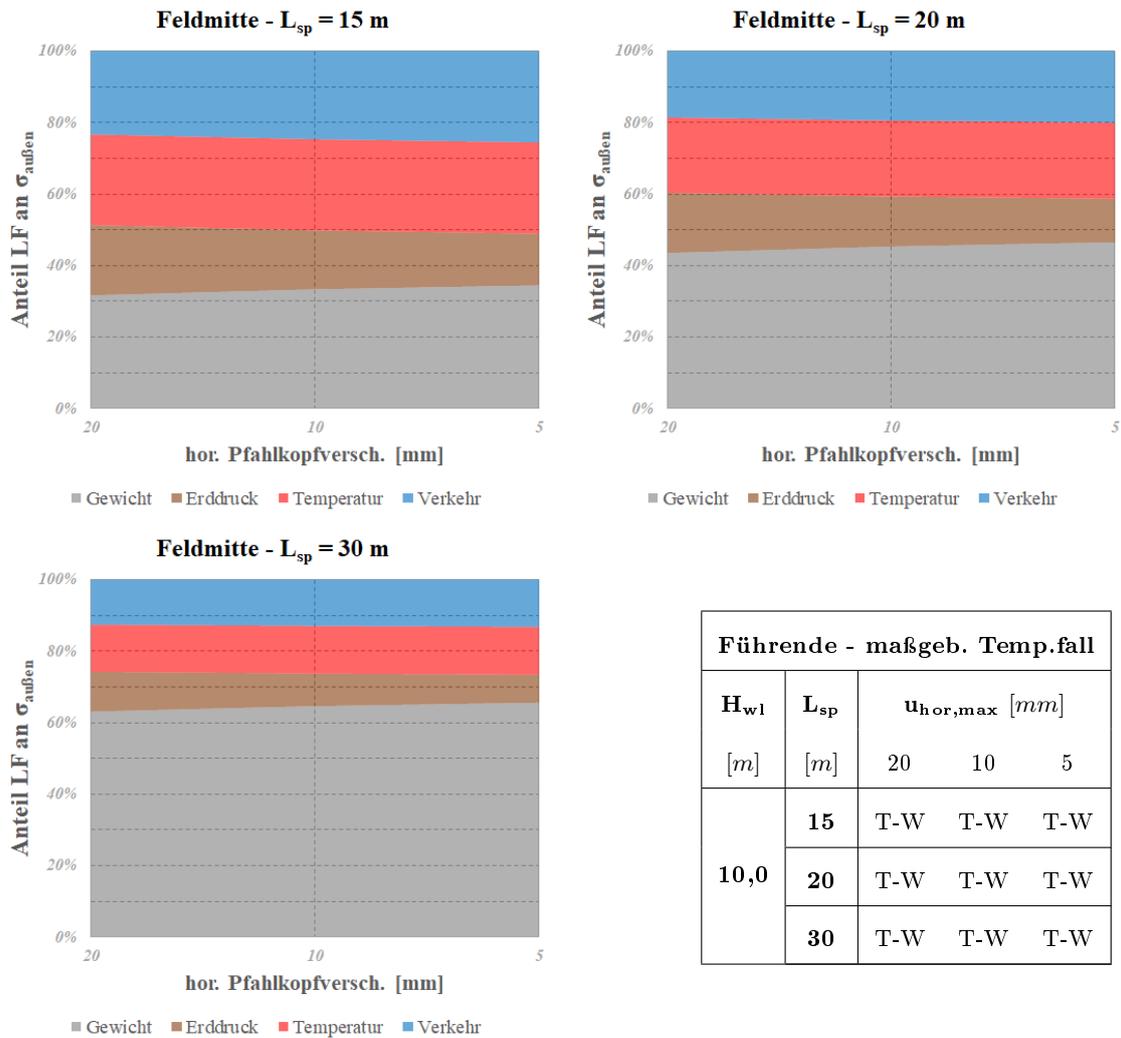


Abbildung 6.18.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 1

6.2. Grundsystem 2

In diesem Unterkapitel wird die Änderung der Spannungsanteile zufolge der einzelnen Einwirkungen durch zunehmenden Steifemodul am Grundsystem 2 dargestellt. Die Abbildungen 6.19 bis 6.24 zeigen die Spannungsanteile am äußeren Pfahlkopf, die Abbildungen 6.25 bis 6.30 jene am inneren Pfahlkopf. Die Ergebnisse für den Widerlagerfuß finden sich in den Abbildungen 6.31 bis 6.36. Für das Rahmeneck und die Feldmitte werden wiederum nur die Spannungsanteile an der Außenseite näher beschrieben. Diese werden in den Abbildungen 6.37 bis 6.39 sowie in den Abbildungen 6.40 bis 6.42 dargestellt.

Im ersten Abschnitt werden die Ergebnisse für den äußeren Pfahlkopf dargestellt. Die Abbildungen 6.19 bis 6.21 zeigen die Spannungsanteile an dessen Außenseite.

Abbildung 6.19 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Generell hat eine Zunahme von E_s nur minimale Auswirkungen auf die Spannungsanteile der verschiedenen Einwirkungen. Steigendes L_{sp} bewirkt, dass der Spannungsanteil des *Eigengewichts* deutlich zunimmt, während die Anteile zufolge der *Temperatur* und des *ständigen Erddrucks* abnehmen. Bei $L_{sp} = 15$ m und $L_{sp} = 30$ m werden die maximalen Spannungen zufolge charakteristischer Lastkombination im Sommer erreicht, bei $L_{sp} = 20$ m hingegen im Winter. Daher kommt es dort auch zu höheren Anteilen des *Verkehrs* und des *ständigen Erddrucks*, verglichen mit den anderen Spannweiten.

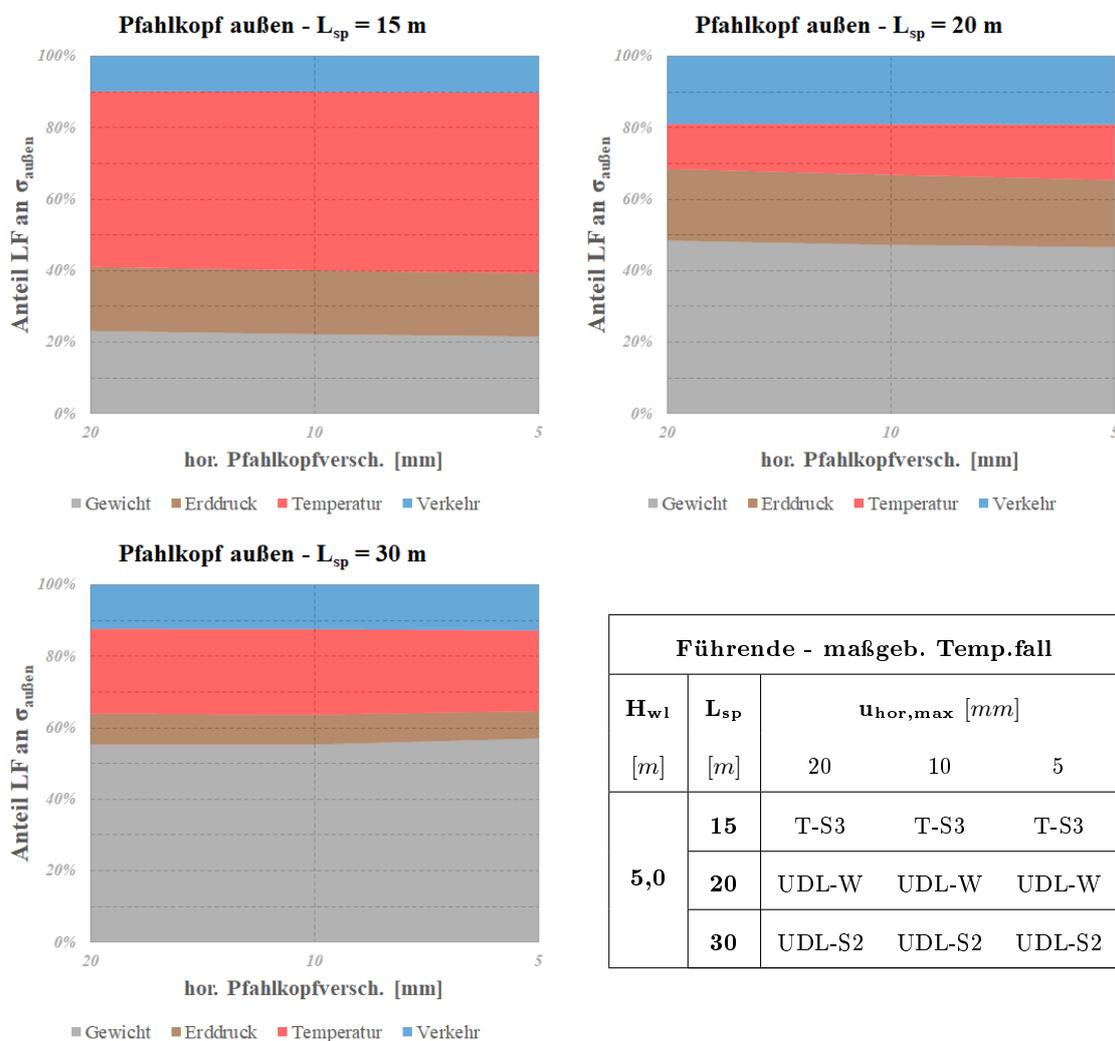


Abbildung 6.19.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am äußeren Pfahlkopf bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.20 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Der Einfluss des zunehmenden E_s auf die Spannungsanteile ist nur minimal. Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt mit steigendem L_{sp} deutlich zu, während jener der *Temperatur* abnimmt. Der Anteil des *ständigen Erddrucks* bleibt hingegen relativ konstant. Der *Verkehr* liefert bei $L_{sp} = 30$ m einen doppelt so hohen Anteil wie bei geringeren Spannweiten, was aber auf die führende *UDL*-Einwirkung zurückzuführen ist.

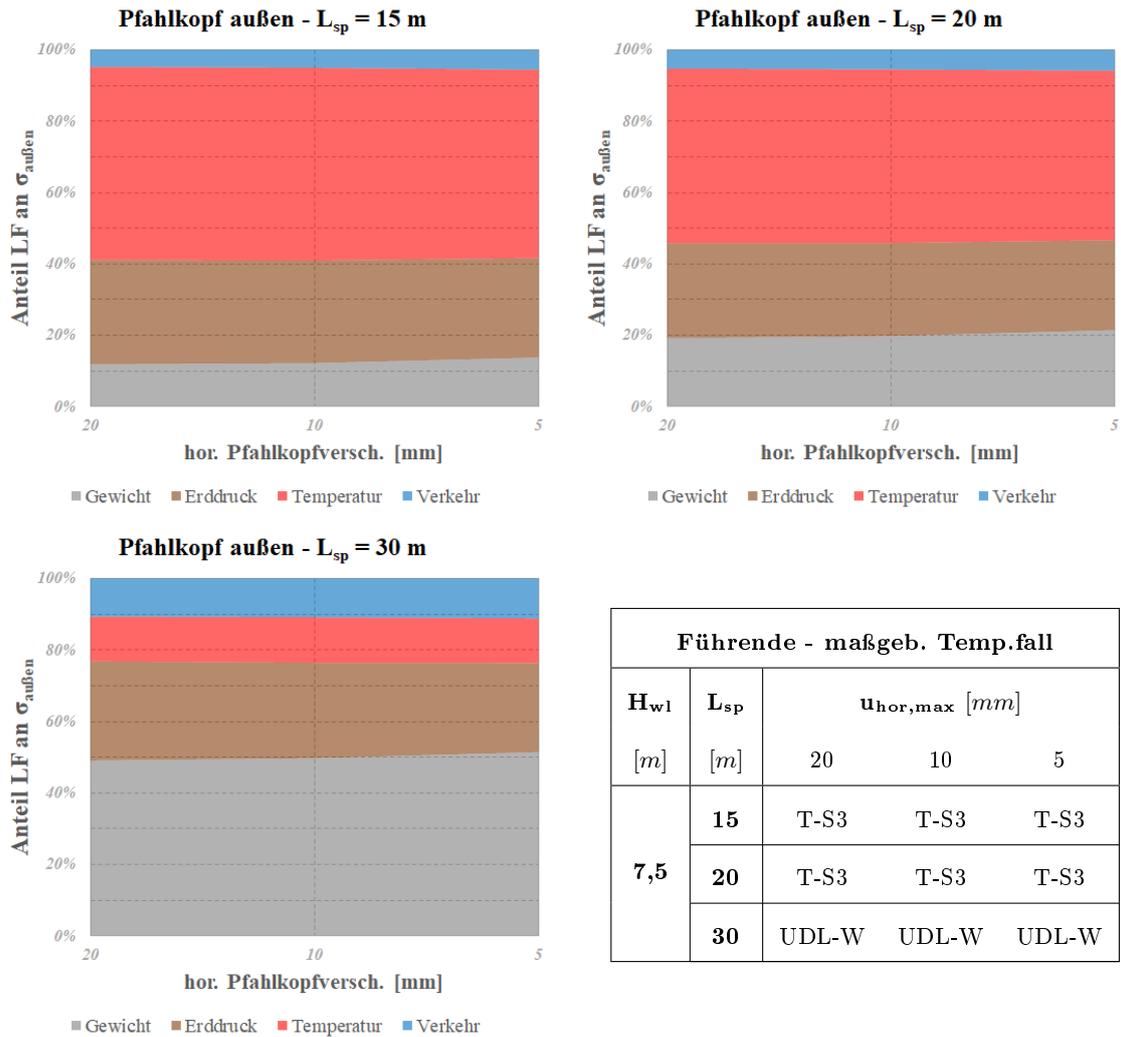


Abbildung 6.20.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am äußeren Pfahlkopf bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.21 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Mit zunehmendem E_s nehmen die Spannungsanteile des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* leicht ab, während der Anteil des *Eigengewichts* leicht zunimmt. Allgemein ist mit steigendem L_{sp} eine Zunahme des Anteils des *Eigengewichts* festzustellen, während jener der *Temperatur* abnimmt. Der Spannungsanteil des *ständigen Erddrucks* nimmt dabei nur minimal ab, der Anteil zufolge *Verkehr* bleibt unverändert.

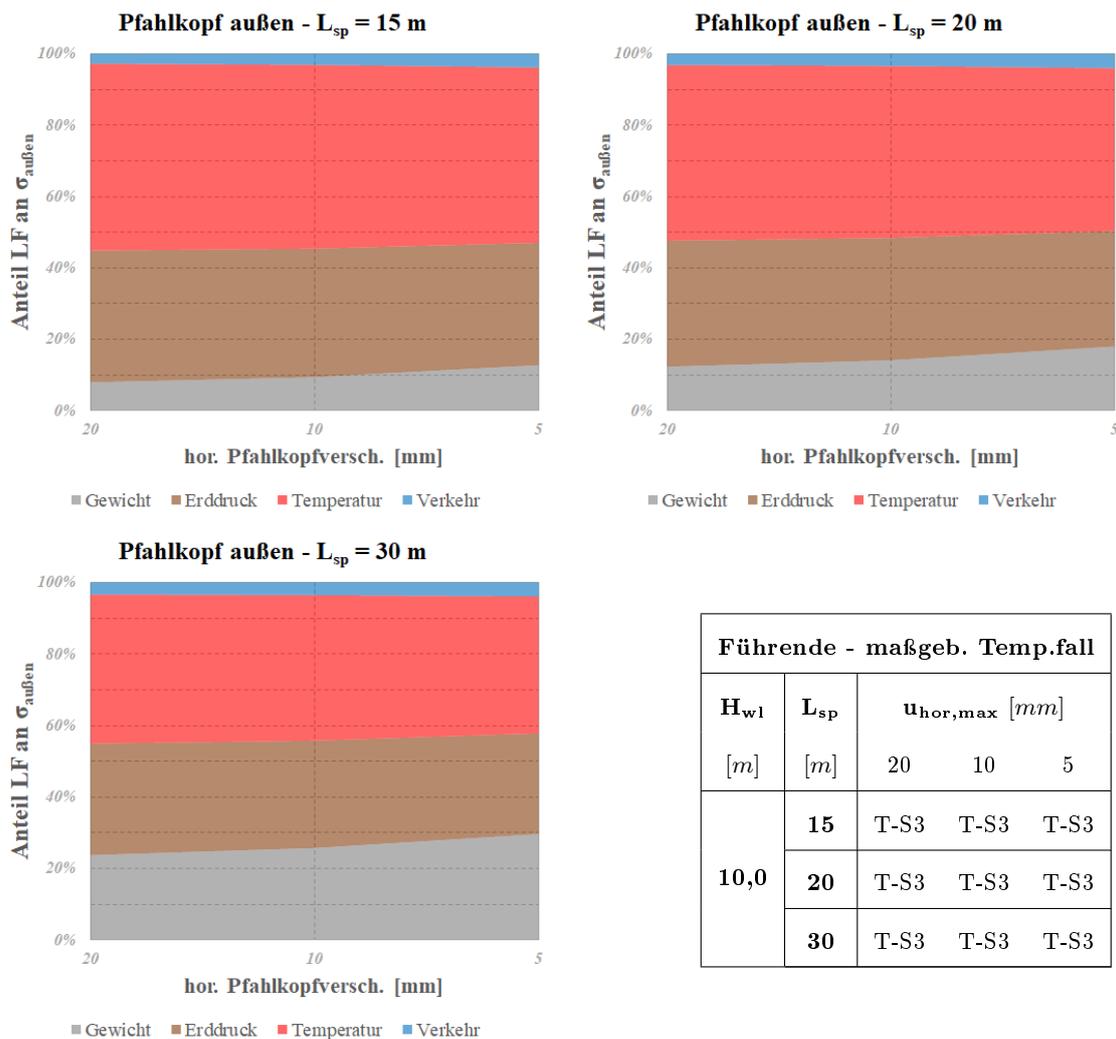


Abbildung 6.21.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am äußeren Pfahlkopf bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

Die folgenden Abbildungen 6.22 bis 6.24 zeigen die Anteile der einzelnen Lastfälle an der Gesamtspannung an der Innenseite des äußeren Pfahlkopfs.

Abbildung 6.22 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Mit zunehmendem E_s zeigt sich keine nennenswerte Zu- oder Abnahme der Spannungsanteile. Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt bei steigendem L_{sp} zu, während die Anteile zufolge des *ständigen Erddrucks* und des *Verkehrs* abnehmen. Bei $L_{sp} = 30$ m tritt ein deutlich höherer Anteil zufolge *Temperatur* auf, als bei geringeren L_{sp} . Das ist aber nur der Fall, weil die maßgebende Lastkombination für $L_{sp} = 30$ m im Sommer auftritt und nicht im Winter, wie bei den anderen L_{sp} .

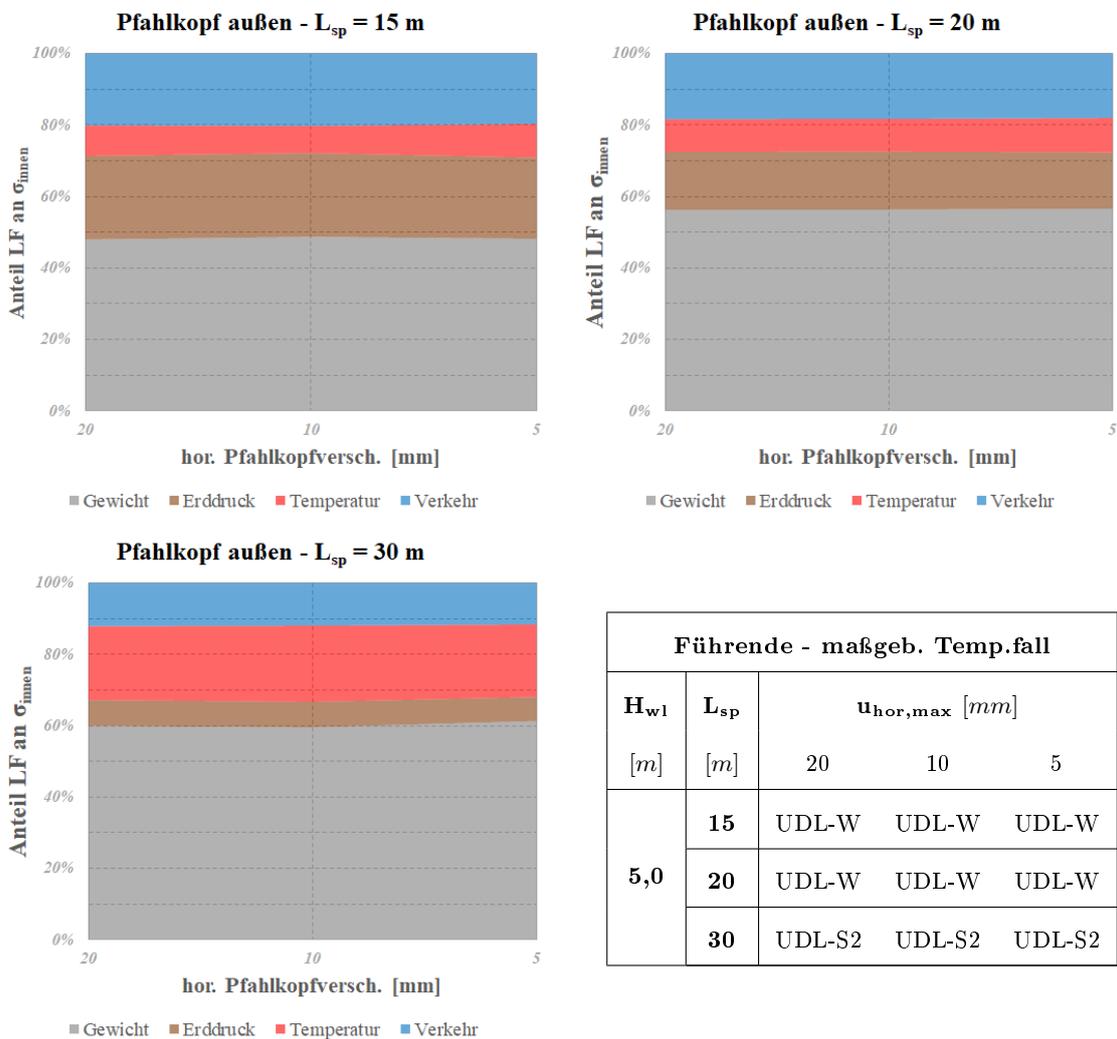


Abbildung 6.22.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am äußeren Pfahlkopf bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.23 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Hier zeigen sich bei den Spannungsanteilen große Unterschiede zwischen $L_{sp} = 15$ m und 20 m sowie $L_{sp} = 30$ m. Diese sind aber durch die unterschiedlichen führenden Einwirkungen zu erklären. Allgemein lässt sich feststellen, dass der Anteil des *Eigengewichts* mit zunehmendem L_{sp} zunimmt, während jener des *ständigen Erddrucks* leicht abnimmt. Aufgrund der führenden *UDL*-Einwirkung bei $L_{sp} = 30$ m ist der Anteil der *Temperatur* sehr gering, während der des *Verkehrs* größer ist.

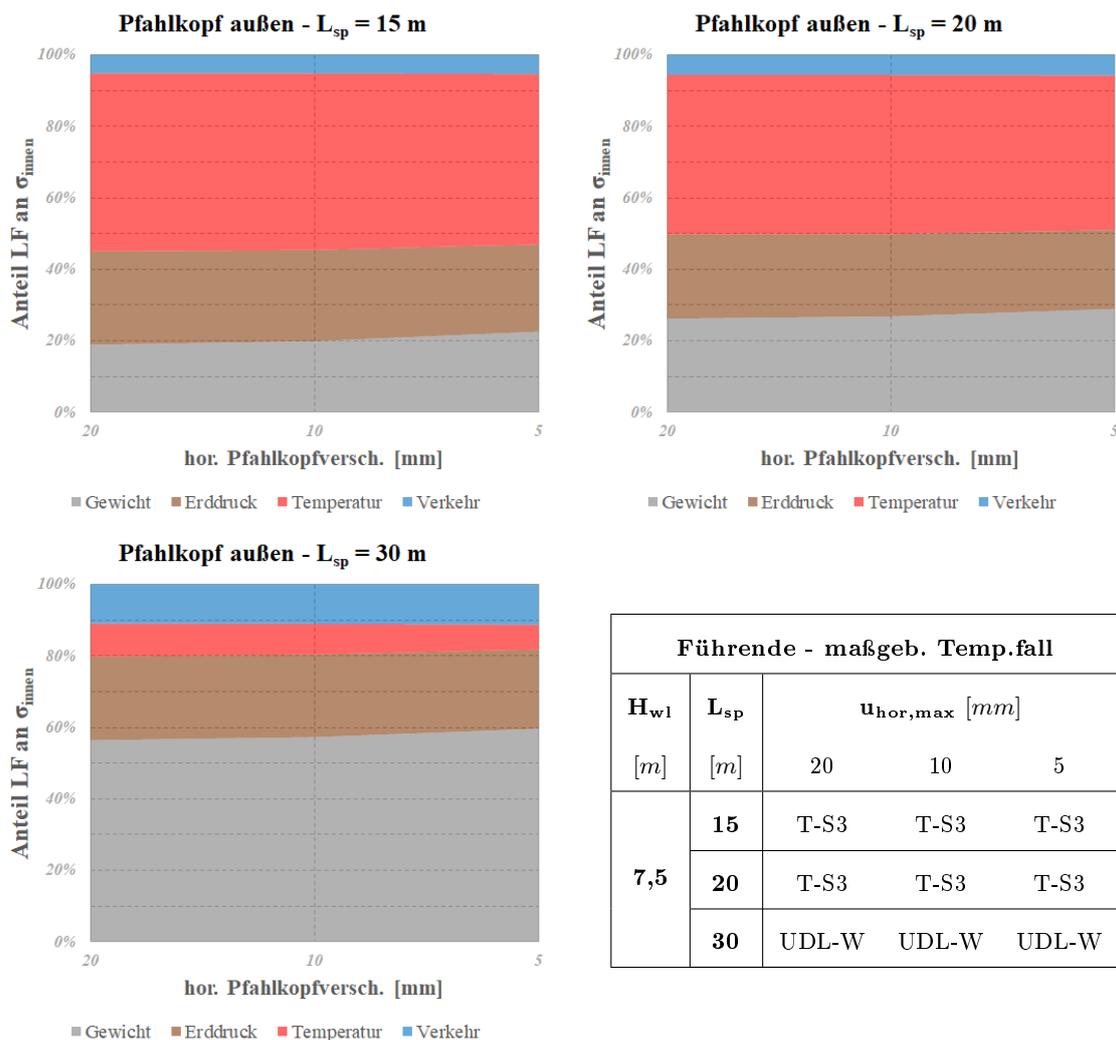


Abbildung 6.23.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am äußeren Pfahlkopf bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.24 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Bei $L_{sp} = 15$ m und $L_{sp} = 20$ m zeigen sich bei steigendem E_s nur leichte Zunahmen des Anteils des *Eigengewichts* und gleichzeitig Abnahmen bei den Anteilen des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur*. Bei $L_{sp} = 30$ m zeigt sich ein deutlich größerer Einfluss von E_s , was aber durch eine unterschiedliche maßgebende Lastkombination zu erklären ist. Generell kommt es mit zunehmendem L_{sp} zu einer Zunahme des Spannungsanteils zufolge *Eigengewicht* und zu Abnahmen der Anteile des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur*.

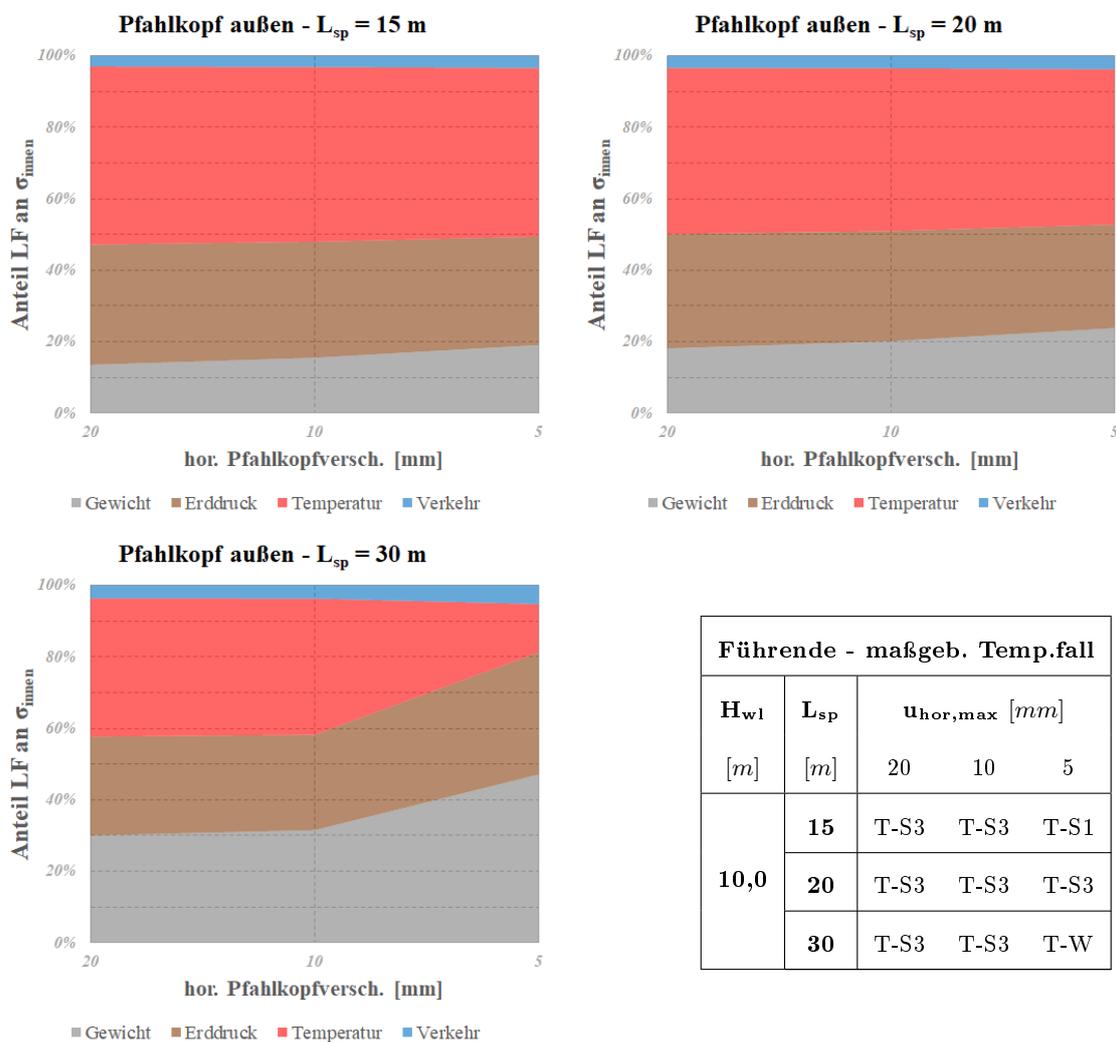


Abbildung 6.24.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am äußeren Pfahlkopf bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

Die Abbildungen 6.25 bis 6.27 zeigen die Entwicklung der Spannungsanteile an der Außenseite des inneren Pfahlkopfs.

Abbildung 6.25 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Mit zunehmendem E_s nimmt der Spannungsanteil des *Eigengewichts* ab, während der Anteil zufolge *Temperatur* zunimmt. Generell nimmt der Anteil des *Eigengewichts* mit steigendem L_{sp} zu, die Anteile der *Temperatur* und des *ständigen Erddrucks* hingegen ab.

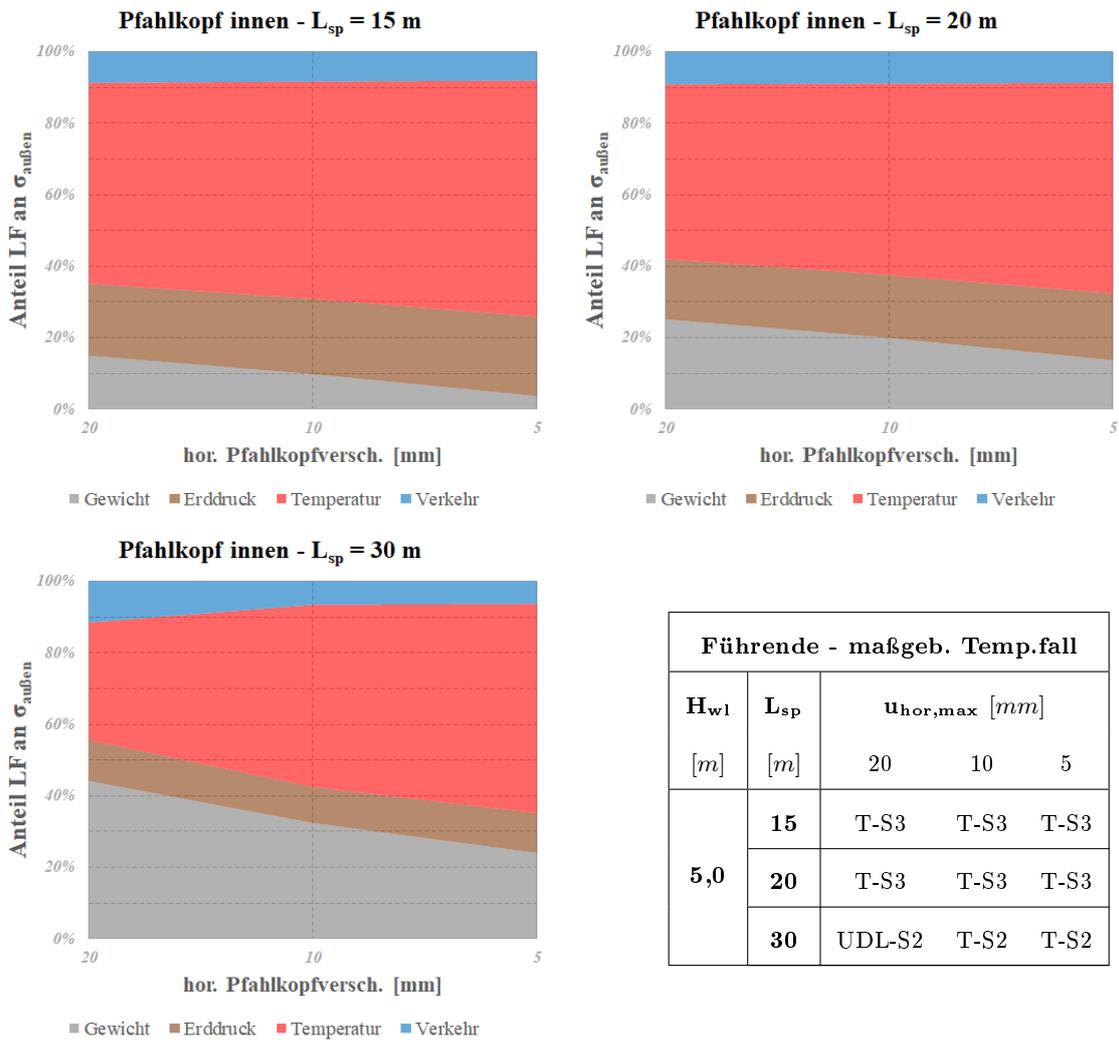


Abbildung 6.25.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am inneren Pfahlkopf bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.26 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Je nach L_{sp} nehmen die Anteile des *Eigengewichts* bei steigendem E_s zu oder ab. Das hängt mit einem Spannungswechsel zufolge *Eigengewicht* zusammen (vgl. Abbildung 5.27). Durch diesen nehmen die Anteile zufolge *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* ebenso zu oder ab. Tendenziell nimmt mit zunehmendem L_{sp} der Anteil des *Eigengewichts* zu und die Anteile des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur* ab.

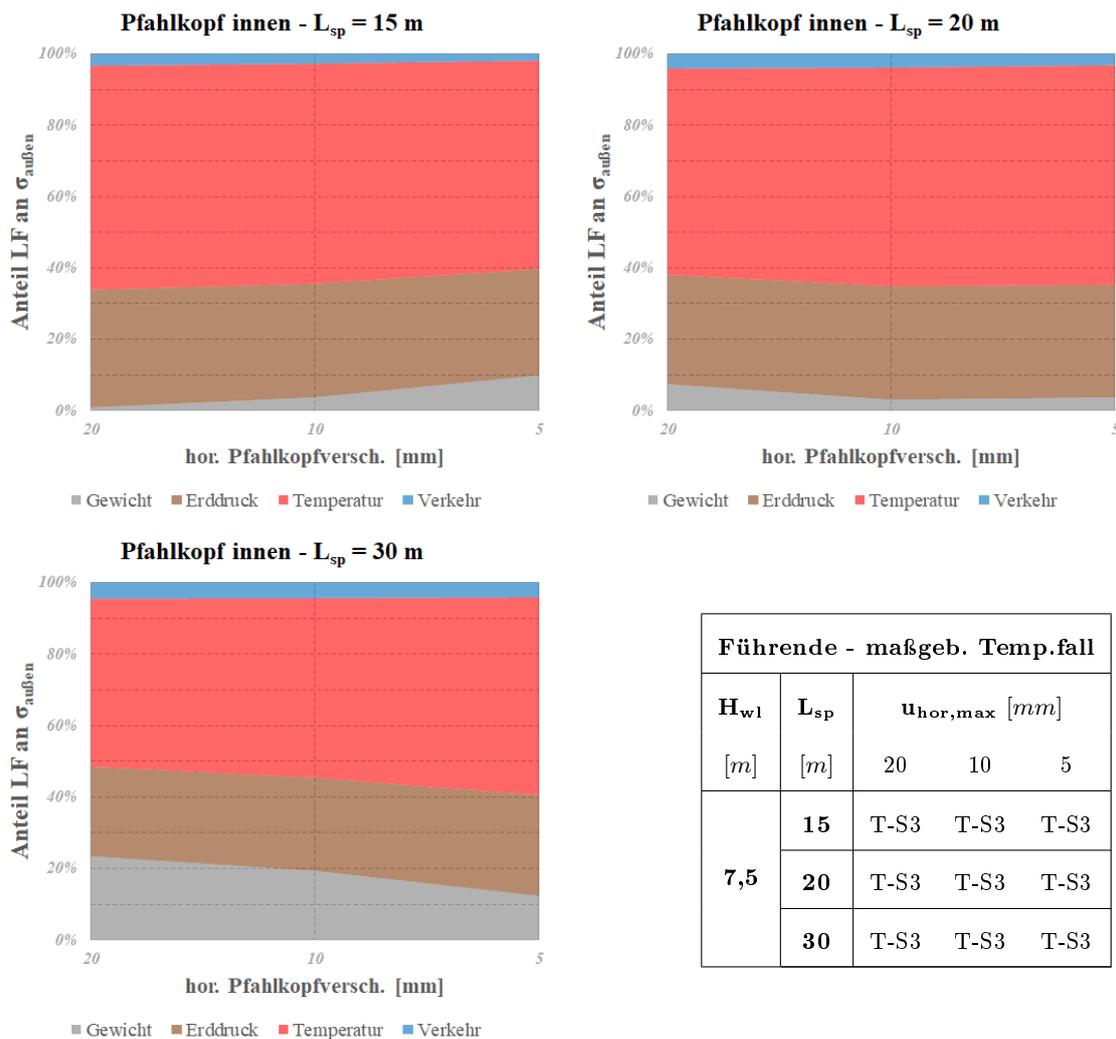


Abbildung 6.26.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am inneren Pfahlkopf bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.27 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Bei $L_{sp} = 15$ m und $L_{sp} = 20$ m bewirkt zunehmendes E_s eine Zunahme des *Eigengewichts* und gleichzeitig eine Abnahme des Anteils der *Temperatur*, während die Anteile des *ständigen Erddrucks* und des *Verkehrs* konstant bleiben. Das Zunehmen von L_{sp} zeigt dabei keine Auswirkungen. Bei $L_{sp} = 30$ m, weist der Anteil des *Eigengewichts* einen Knick auf, der auf einen Spannungswechsel zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 5.33). Dadurch nimmt der Spannungsanteil der *Temperatur* mit zunehmendem E_s zuerst leicht zu und dann wieder ab.

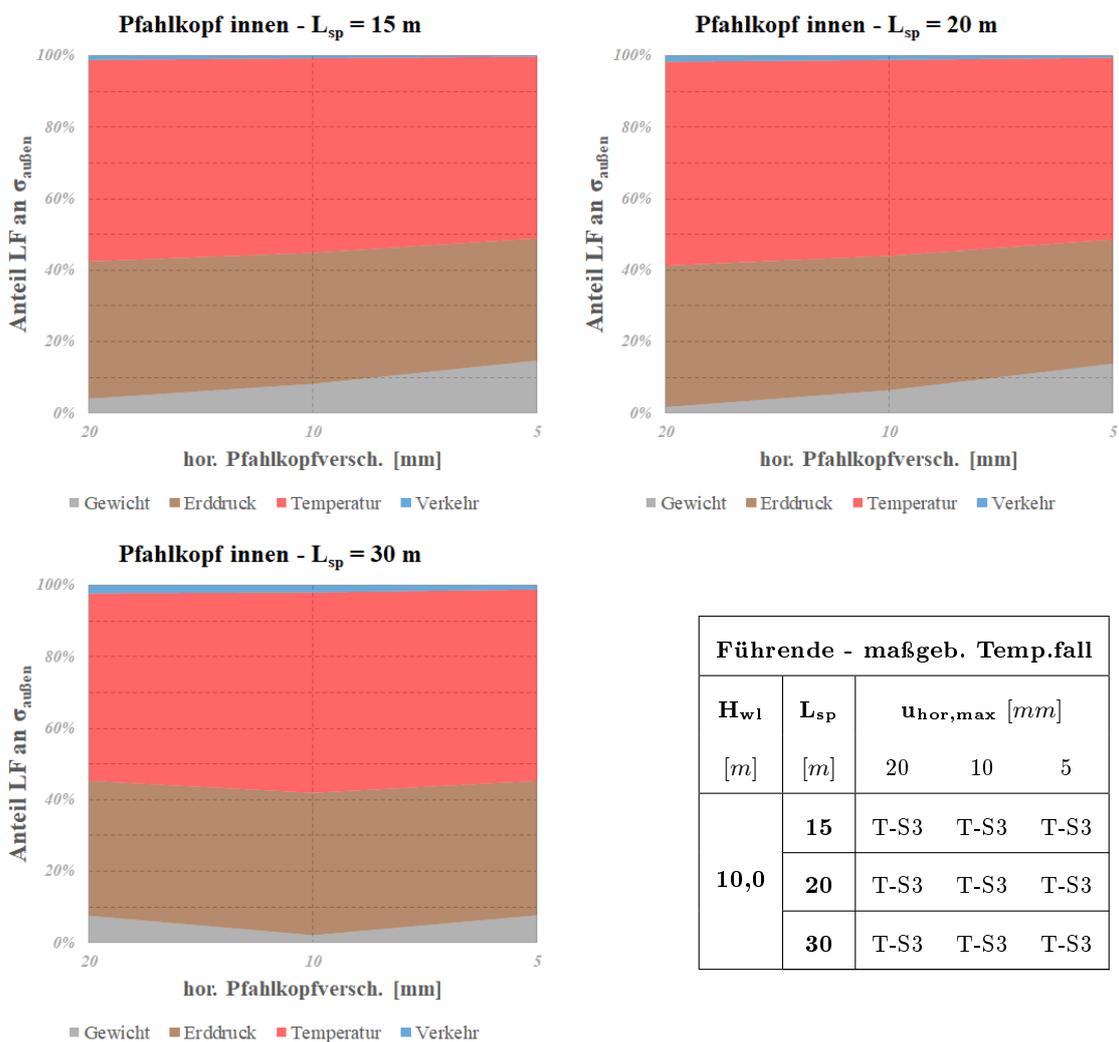


Abbildung 6.27.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am inneren Pfahlkopf bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

Die nachfolgenden Abbildungen 6.28 bis 6.30 zeigen die Anteile der einzelnen Lastfälle an der Gesamtspannung an der Innenseite des inneren Pfahlkopfs.

Abbildung 6.28 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 5,0$ m. Generell zeigen sich zufolge des zunehmenden E_s nur geringe Änderungen der Spannungsanteile. Der Anteil des *Eigengewichts* nimmt mit steigendem L_{sp} zu. Für Anteile der übrigen Lastfälle zeigen sich, je nach L_{sp} und zugehöriger maßgebender Lastkombination, unterschiedliche Bilder. Bei $L_{sp} = 15$ m und $L_{sp} = 30$ m werden die maximalen Spannungen zufolge charakteristischer Lastkombination im Sommer erreicht, bei $L_{sp} = 20$ m hingegen im Winter. Daher kommt es dort auch zu höheren Anteilen des *Verkehrs* und des *ständigen Erddrucks* sowie zu einem sehr geringen Anteil zufolge *Temperatur*, verglichen mit den anderen Spannweiten.

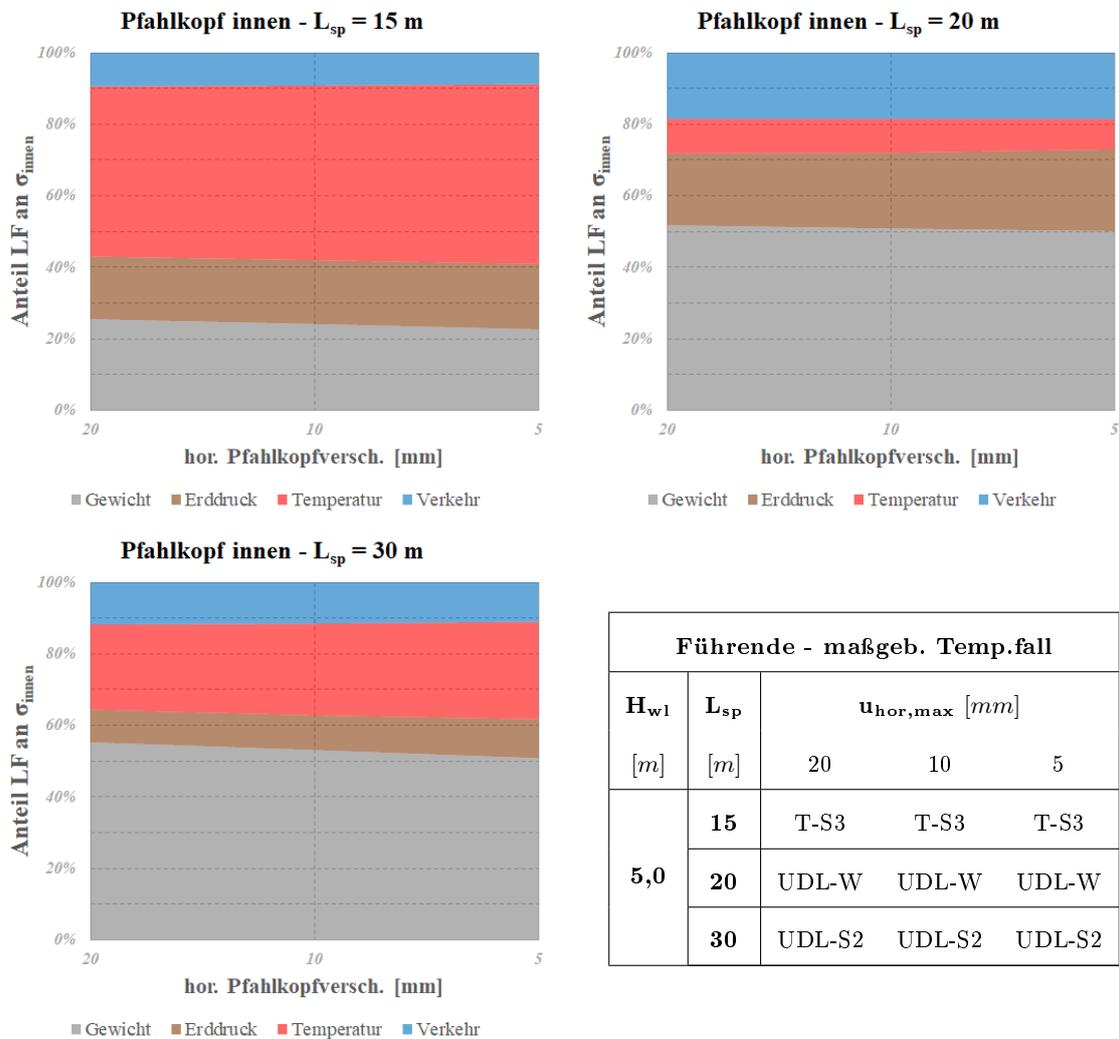


Abbildung 6.28.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am inneren Pfahlkopf bei $H_{wl}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.29 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Für $L_{sp} = 15$ m und $L_{sp} = 20$ m nimmt der Anteil des *Eigengewichts* bei steigendem E_s leicht ab, während die Anteile der *Temperatur* und des *ständigen Erddrucks* zunehmen. Der Anteil des *Eigengewichts* ist bei $L_{sp} = 15$ m höher und jener zufolge *Temperatur* geringer, als bei $L_{sp} = 20$ m. Für $L_{sp} = 30$ m zeigt sich aufgrund einer wechselnden maßgebenden Lastkombination ein etwas verzerrtes Bild. Dort nimmt der Anteil des *Eigengewichts* stärker ab, während jener zufolge *Temperatur* zunimmt.

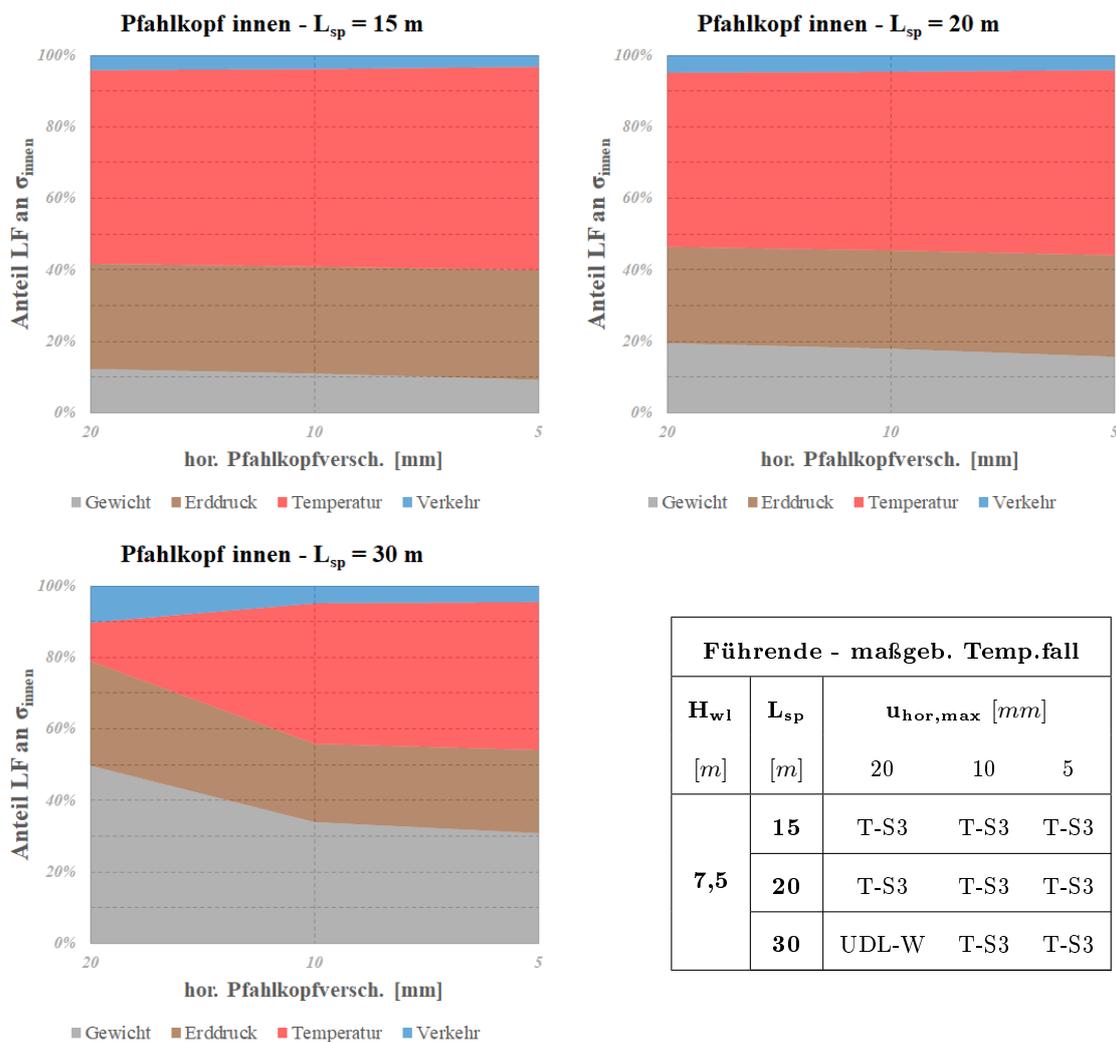


Abbildung 6.29.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am inneren Pfahlkopf bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.30 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Das Zunehmen von E_s führt zu leichten Abnahmen beim Anteil des *Eigengewichts* und leichten Zunahmen bei den Anteilen der *Temperatur* und des *ständigen Erddrucks*. Allgemein nimmt der Anteil des *Eigengewichts* mit zunehmendem L_{sp} zu, während die Anteile der *Temperatur* und des *ständigen Erddrucks* leicht abnehmen. Der Anteil zufolge *Verkehr* bleibt unverändert gering.

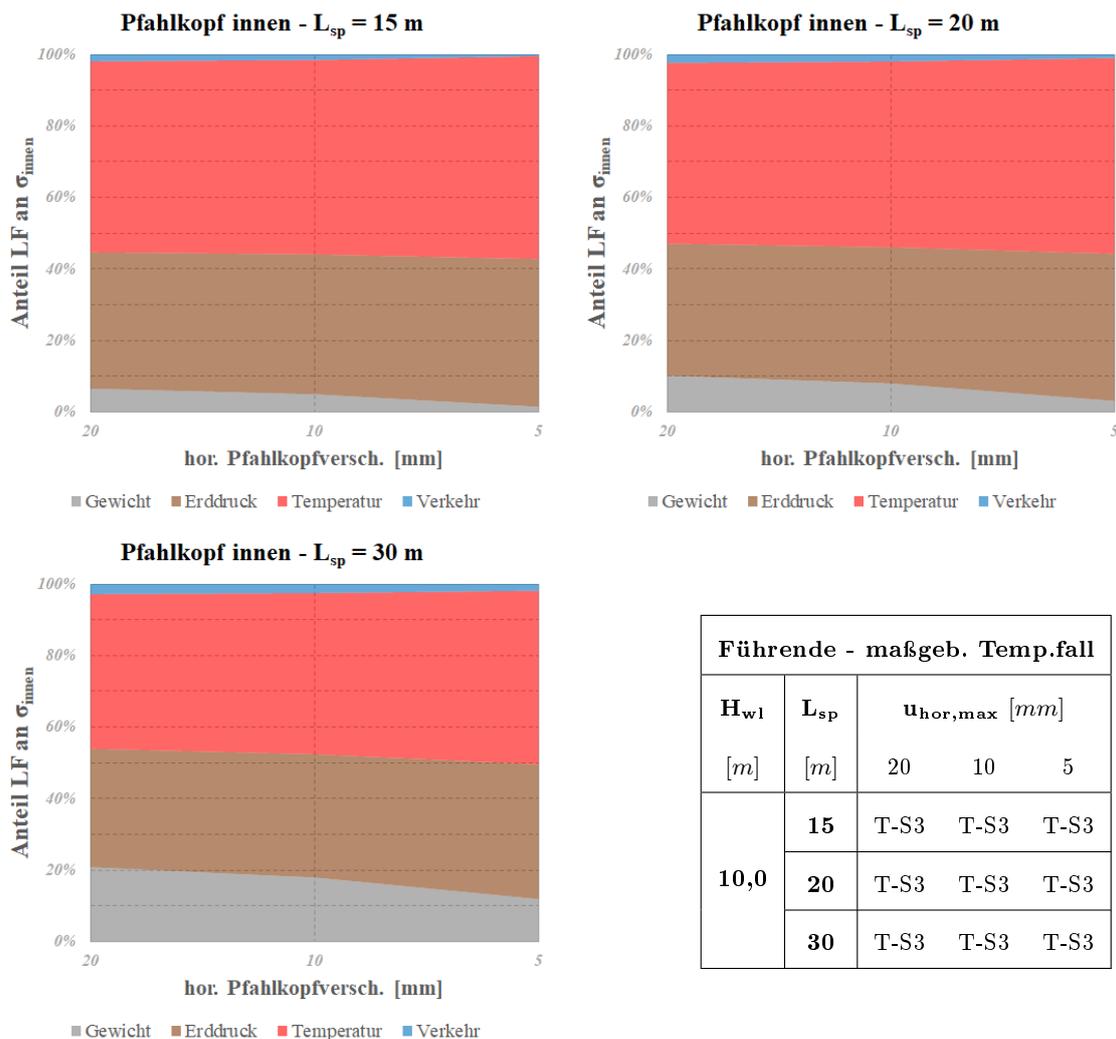


Abbildung 6.30.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am inneren Pfahlkopf bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für den Widerlagerfuß dargestellt. Die Abbildungen 6.31 bis 6.33 zeigen die Spannungsanteile an dessen Außenseite.

Abbildung 6.31 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Bei $L_{sp} = 15$ m und 20 m kommt es bei zunehmendem E_s zu abnehmenden Spannungsanteilen zufolge des *Eigengewichts* und des *Verkehrs*, gleichzeitig aber zu Zunahmen bei den Anteilen des *ständigen Erddrucks* und der *Temperatur*. Beim Vergleich dieser beiden Spannweiten liefert $L_{sp} = 20$ m höhere Anteile zufolge *Eigengewicht* und *Verkehr* sowie geringere Anteile bei *Temperatur* und *ständigem Erddruck*. Bei $L_{sp} = 30$ m kommt es bei zunehmendem E_s zu einer deutlich stärkeren Änderung der Anteile, was sich durch die unterschiedlichen maßgebenden Lastkombinationen erklären lässt. Der kaum vorhandene Anteil des *Eigengewichts* bei $u_{hor,max} = 5$ mm ist auf einen Vorzeichenwechsel der Spannung zurückzuführen (vgl. Abbildung 5.21).

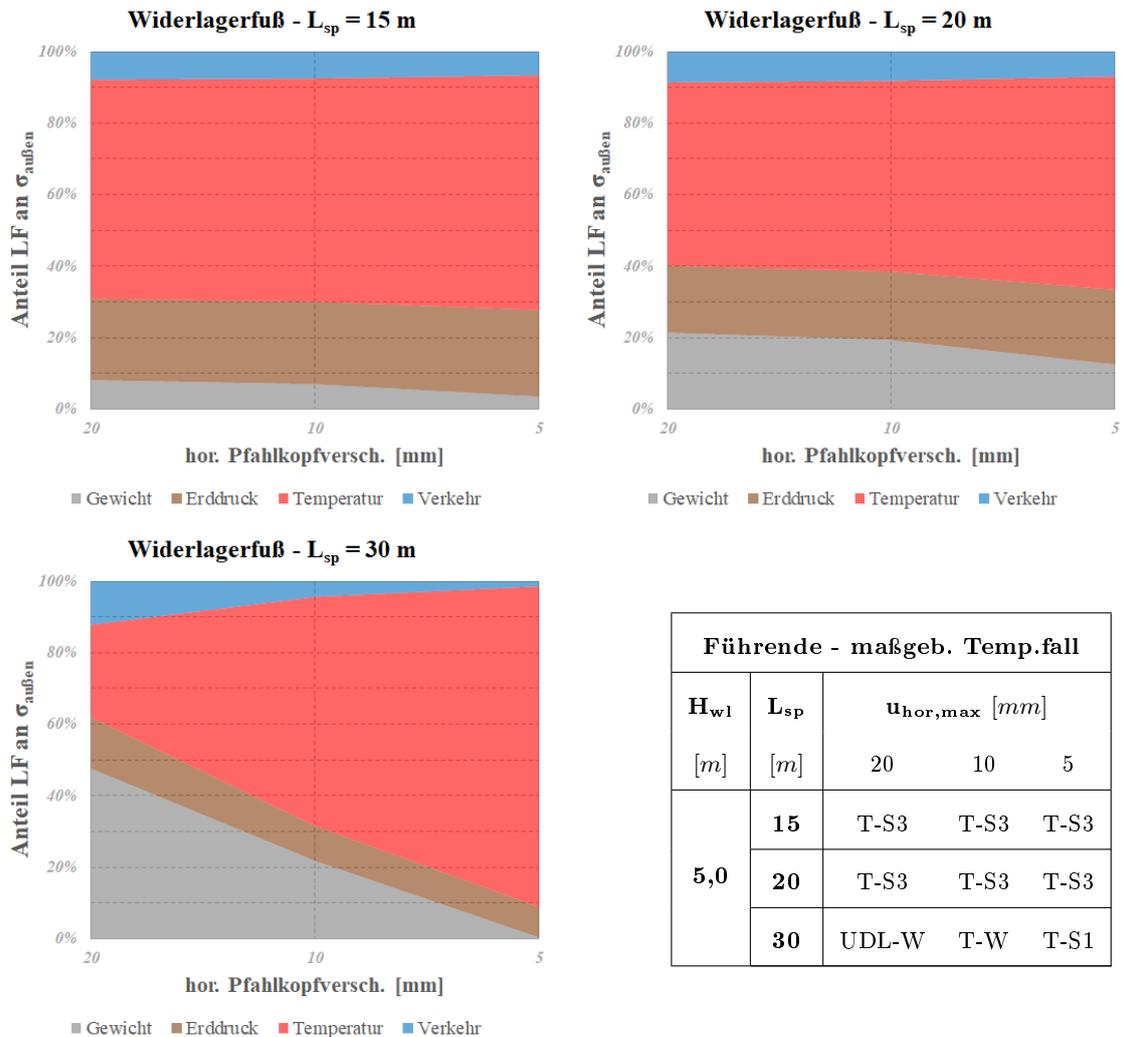


Abbildung 6.31.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{außen}$ am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.32 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptsysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Für $u_{hor,max} = 20$ mm und 10 mm gelten die selben Lastkombinationen, für $u_{hor,max} = 5$ mm wird eine unterschiedliche Lastkombination maßgebend. Das gilt für alle L_{sp} und bewirkt Knicke in den Verläufen der Spannungsanteile. Bei $L_{sp} = 15$ m kommt es zu einem besonders deutlichen Knick, da dort der maßgebende Temperaturfall von Sommer auf Winter wechselt. Dort stellt die *Temperatur* den größten Spannungsanteil, unabhängig von E_s . Für $L_{sp} = 20$ m nehmen die Anteile der *Temperatur* und des *ständigen Erddrucks* mit zunehmendem E_s ab, jener des *Eigengewichts* jedoch zu. Für $L_{sp} = 30$ m nimmt der Anteil des *Eigengewichts* ebenfalls mit steigendem E_s zu, der Anteil des *ständigen Erddrucks* ab. Der Anteil der *Temperatur* nimmt zuerst ab, dann aber wieder zu, bedingt durch die unterschiedlichen Lastkombinationen.

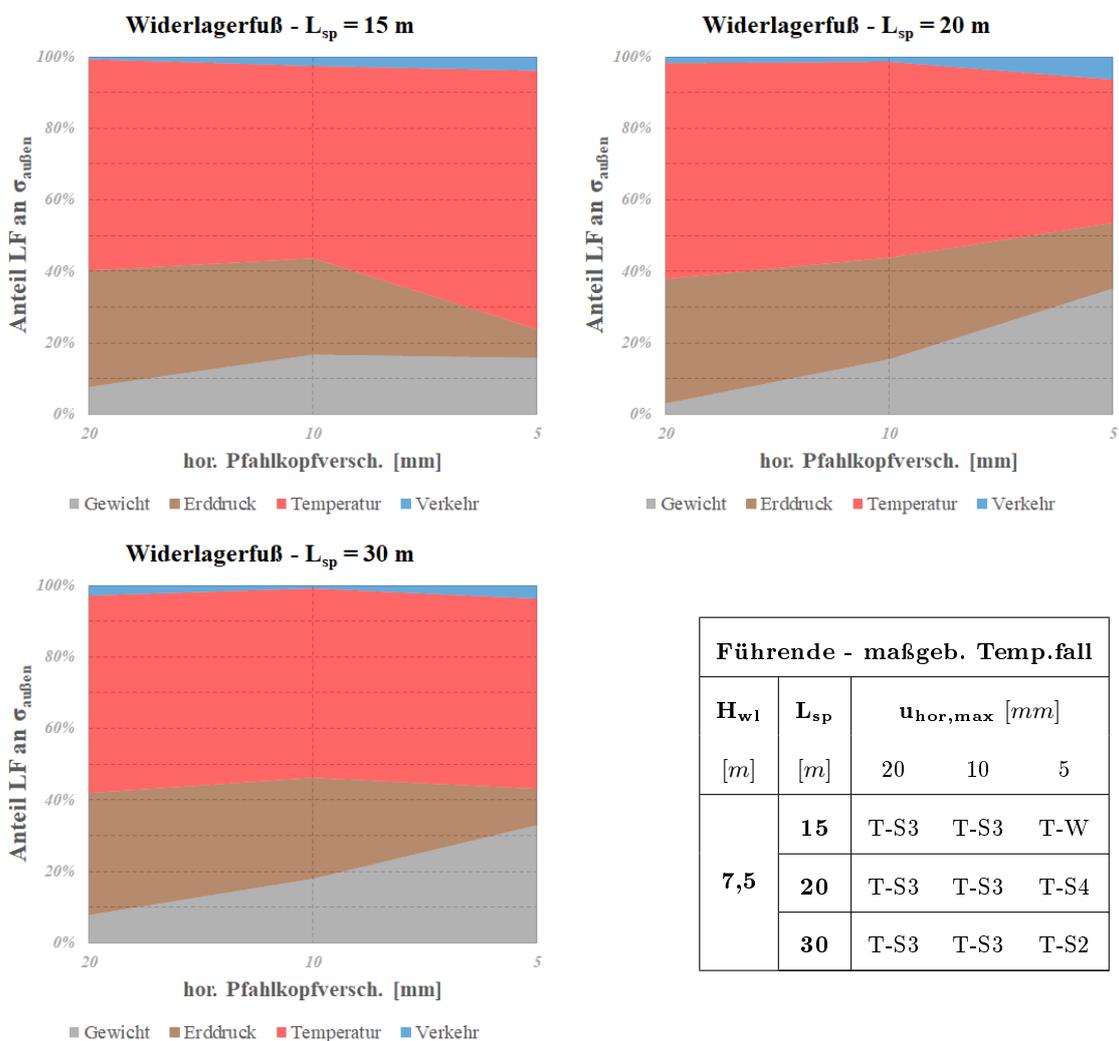


Abbildung 6.32.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{au\ddot{a}u\ddot{e}n}$ am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.33 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Unabhängig von L_{sp} kommt es mit zunehmendem E_s zu Knicken in den Verläufen der Spannungsanteile. Diese sind in erster Linie auf einen Vorzeichenwechsel der Spannung zufolge des *ständigen Erddrucks* zurückzuführen. Generell lässt sich feststellen, dass mit zunehmendem L_{sp} der Anteil des *Eigengewichts* zunimmt, während jener zufolge *Temperatur* abnimmt. Bei $L_{sp} = 30$ m nimmt außerdem der Anteil des *Verkehrs* mit steigendem E_s zu, was sich durch die unterschiedlichen maßgebenden Lastkombinationen erklären lässt.

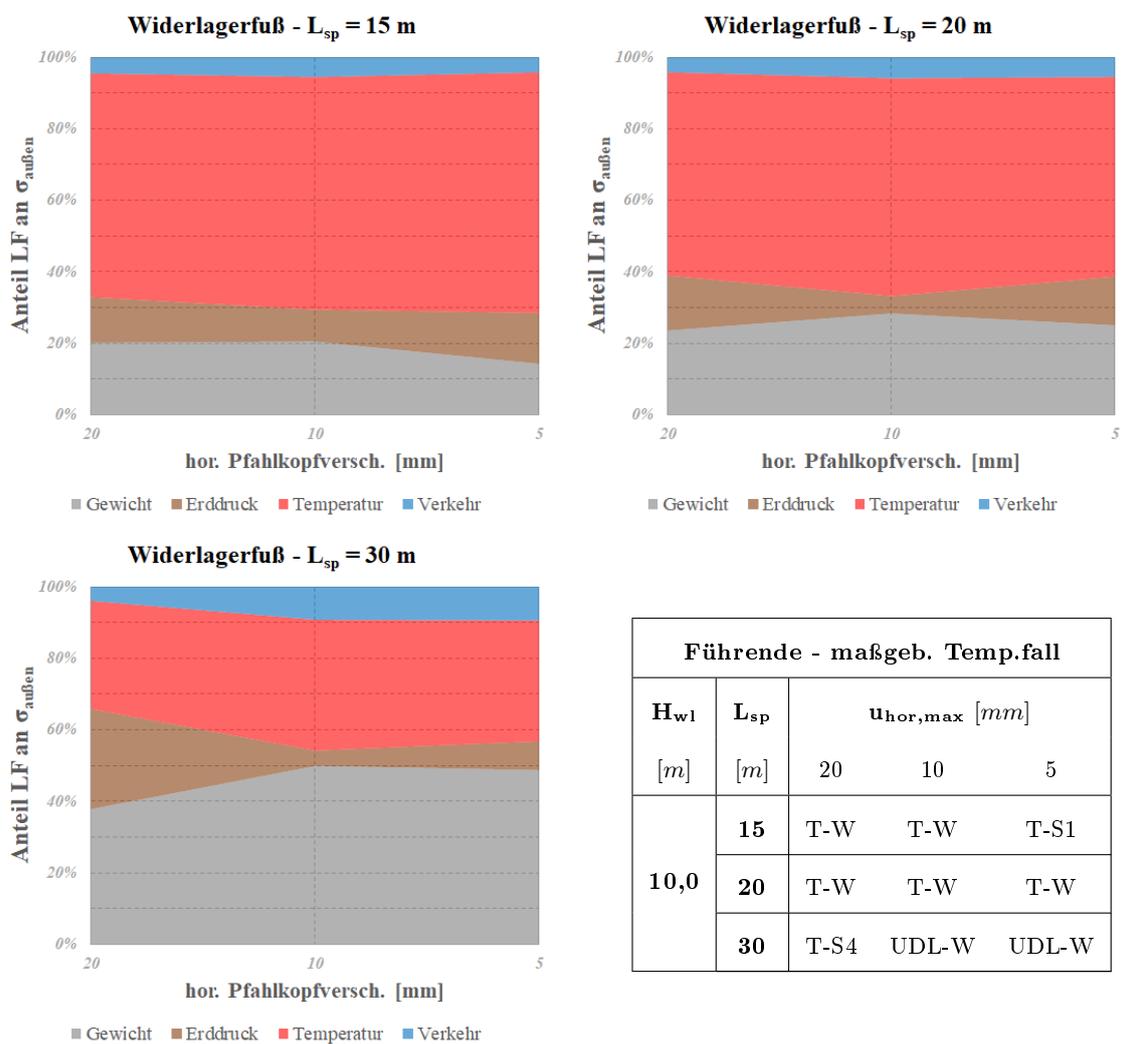


Abbildung 6.33.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{au\ddot{a}u\ddot{e}n}$ am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

Die Abbildungen 6.34 bis 6.36 zeigen die Spannungsanteile der Einzellastfälle an der Gesamtspannung an der Innenseite des Widerlagerfußes.

Abbildung 6.34 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Mit zunehmendem L_{sp} werden die Änderungen der Spannungsanteile zufolge zunehmenden E_s größer. Bei $L_{sp} = 15$ m nimmt der Anteil des *Eigengewichts* mit steigendem E_s zu, jener zufolge *Temperatur* ab. Umgekehrt ist es bei den anderen Spannweiten, was durch die unterschiedlichen maßgebenden Temperaturlastfälle zu erklären ist. Allgemein lässt sich feststellen, dass der Anteil des *Eigengewichts* mit L_{sp} zunimmt, jener des *ständigen Erddrucks* hingegen leicht abnimmt.

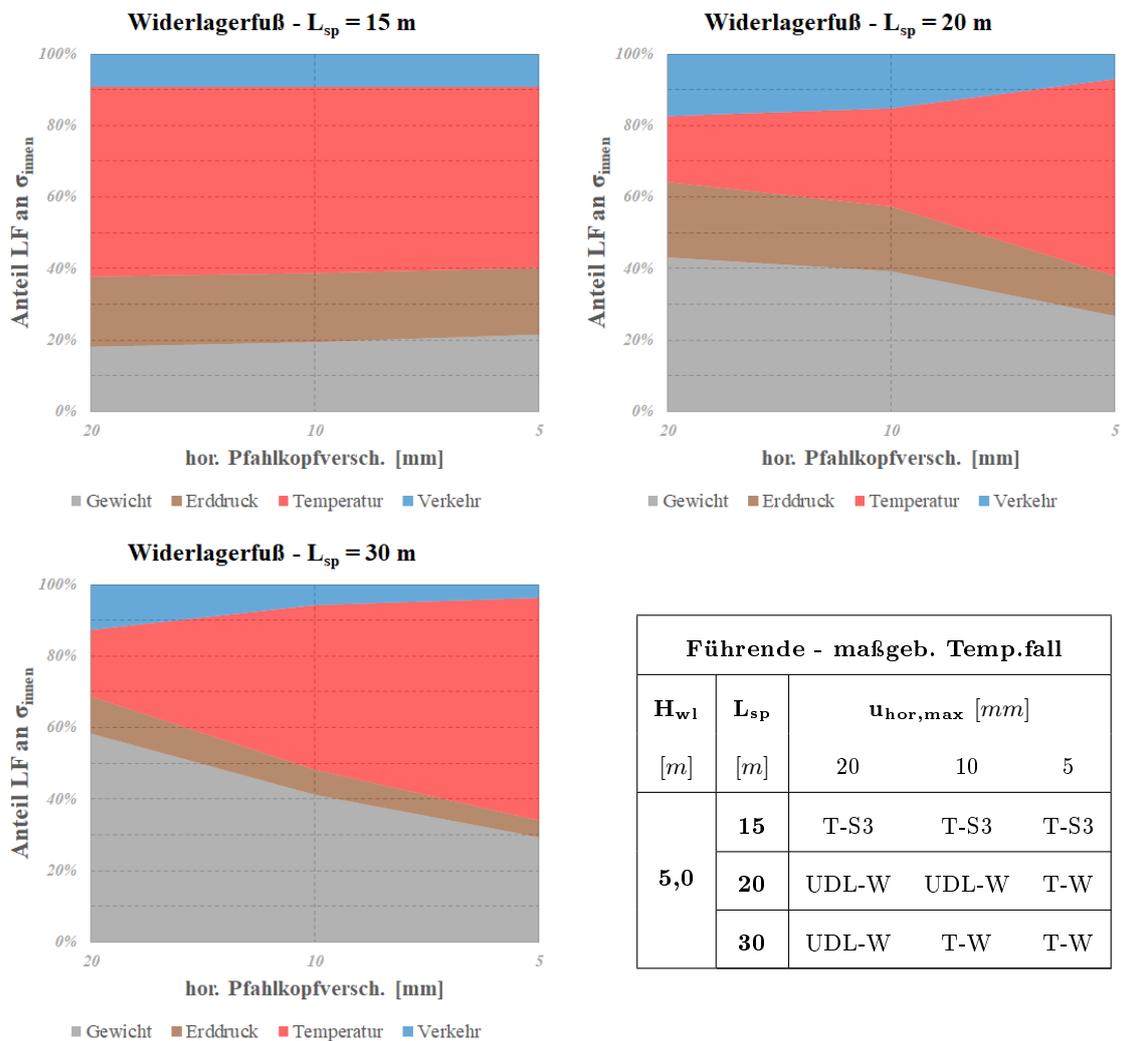


Abbildung 6.34.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.35 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Für $u_{hor,max} = 20$ mm und 10 mm gelten die selben Lastkombinationen, für $u_{hor,max} = 5$ mm wird eine unterschiedliche Lastkombination maßgebend. Das gilt für alle L_{sp} und bewirkt Knicke in den Verläufen der Spannungsanteile. Die Temperatur liefert für alle L_{sp} große Anteile an der Gesamtspannung, für $L_{sp} = 15$ m und 30 m nimmt ihr Anteil auch mit zunehmendem E_s deutlich zu.

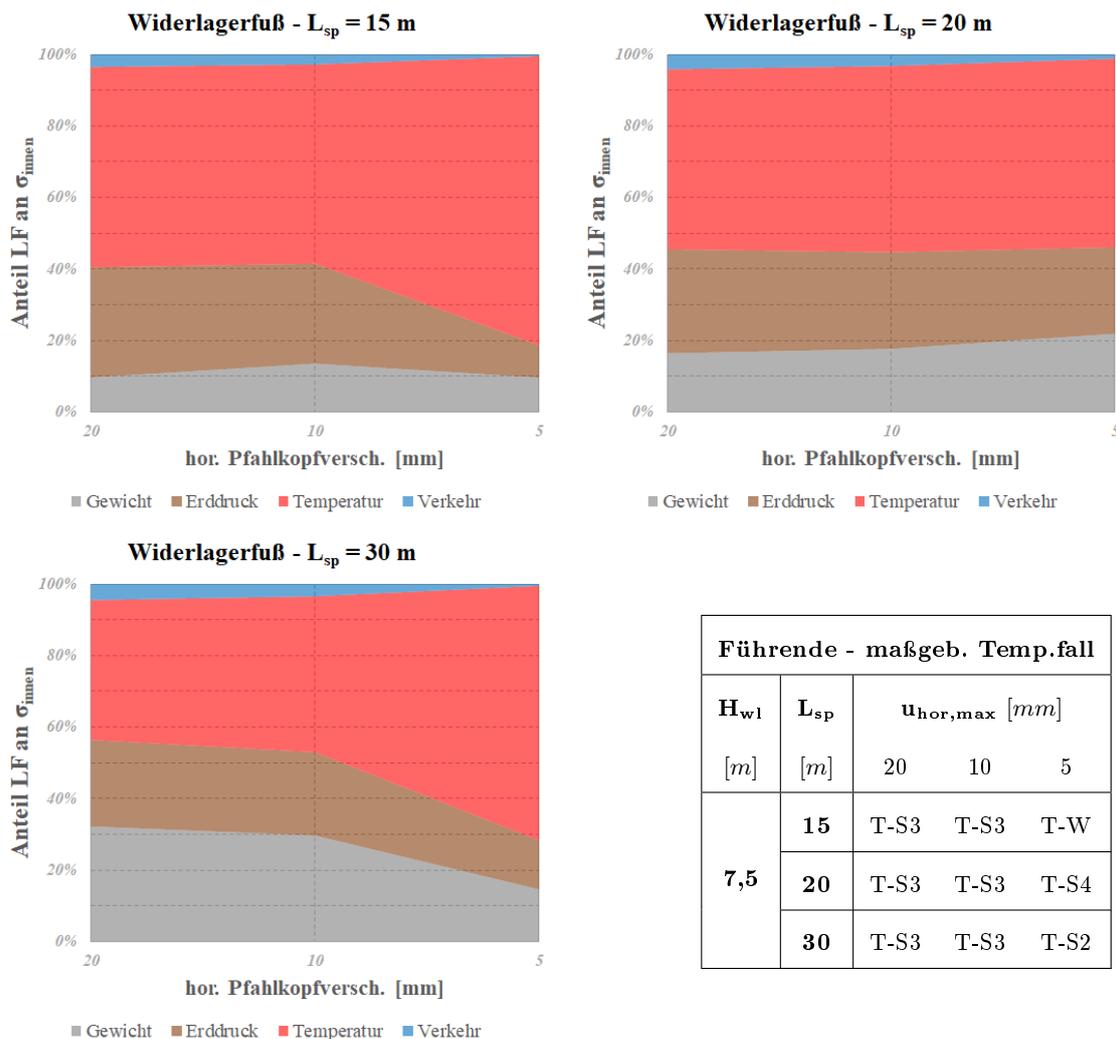


Abbildung 6.35.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.36 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 10,0$ m. Unabhängig von L_{sp} kommt es mit zunehmendem E_s zu Knicken in den Verläufen der Spannungsanteile. Diese sind in erster Linie auf einen Vorzeichenwechsel der Spannung zufolge des *ständigen Erddrucks* zurückzuführen. Auch bei der Spannung des *Eigengewichts* kommt es für $L_{sp} = 20$ m und 30 m zu einem Vorzeichenwechsel (vgl. Abbildung 5.36), der jedoch besonders bei $L_{sp} = 20$ m zur Geltung kommt. Allgemein überwiegt der Anteil der *Temperatur* bei allen L_{sp} deutlich.

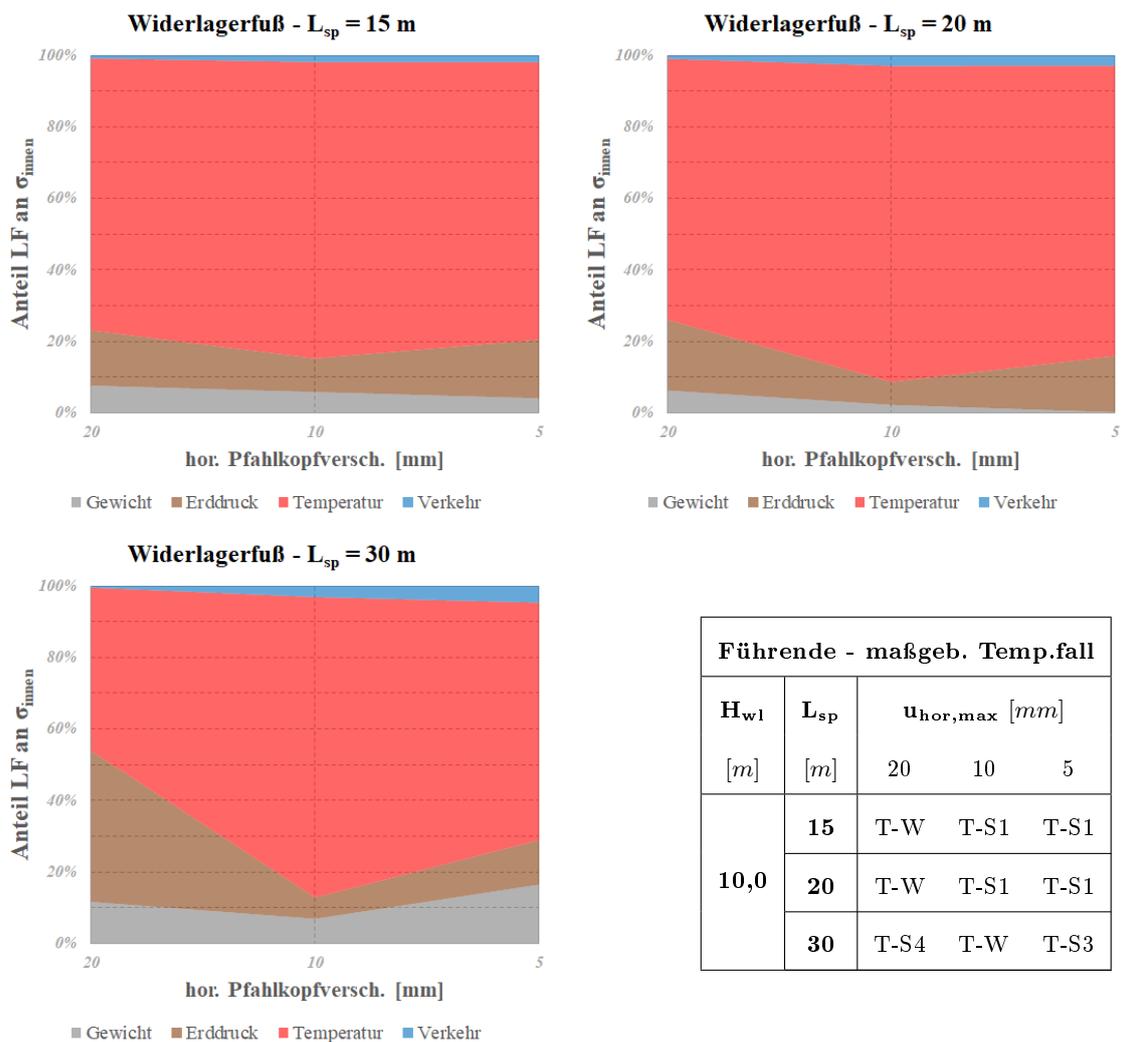


Abbildung 6.36.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 2

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für das Rahmeneck dargestellt. Die Abbildungen 6.37 bis 6.39 zeigen die Entwicklung der Spannungsanteile an dessen Außenseite.

Abbildung 6.37 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Mit steigendem E_s zeigen sich leichte Zu- bzw. Abnahmen der einzelnen Spannungsanteile. Mit zunehmendem E_s steigen die Anteile des *Eigengewichts* und des *Verkehrs*, während die übrigen Anteile leicht abnehmen. Generell lässt sich feststellen, dass mit zunehmendem L_{sp} der Anteil zufolge *Eigengewicht* zunimmt und die restlichen Anteile abnehmen. Jener des *ständigen Erddrucks* ist für alle L_{sp} sehr gering.

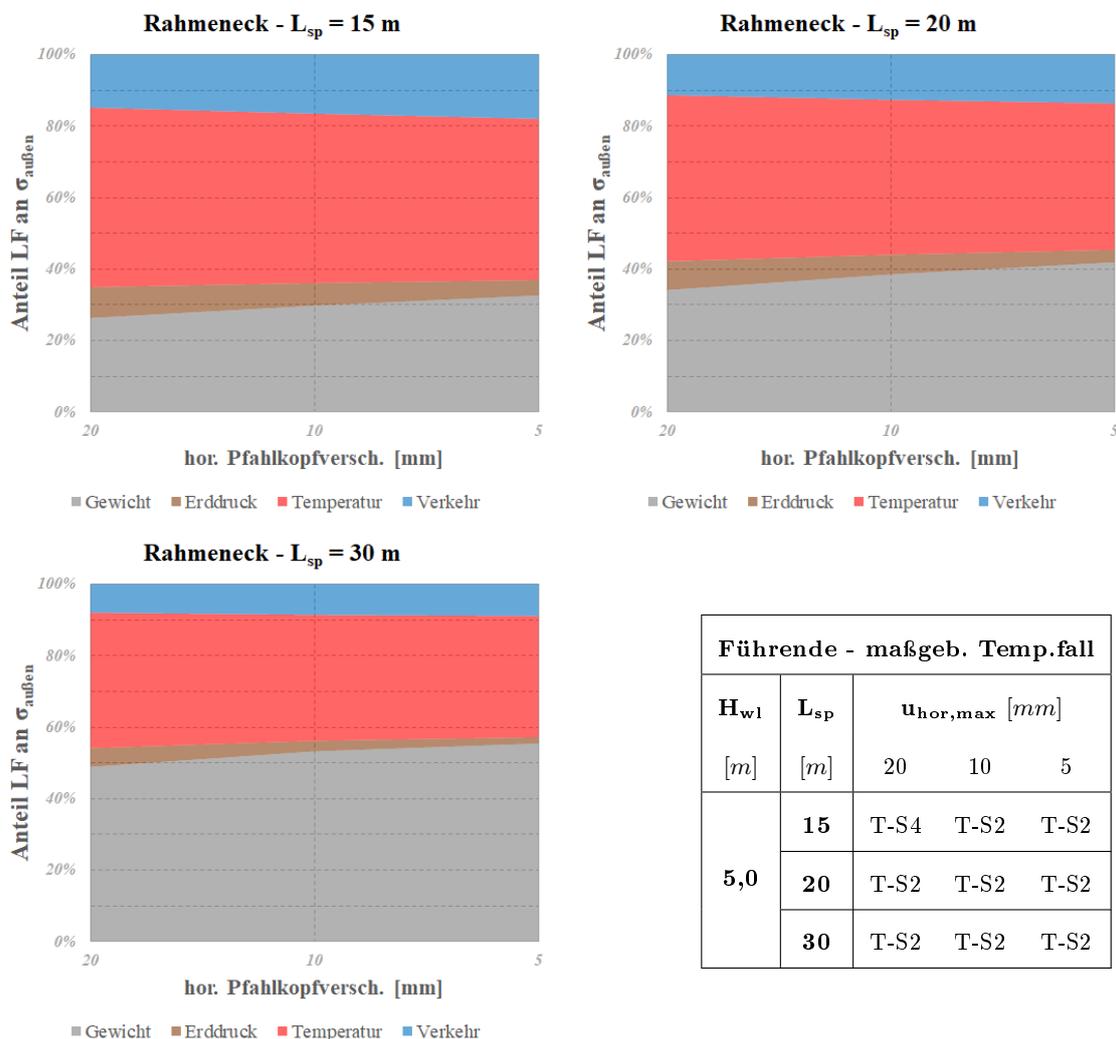


Abbildung 6.37.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{außen}$ im Rahmeneck bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.38 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Generell lässt sich feststellen, dass mit zunehmendem L_{sp} der Anteil zufolge *Eigengewicht* zunimmt und die restlichen Anteile abnehmen. Jener des *ständigen Erddrucks* ist für alle L_{sp} konstant gering. Mit steigendem E_s zeigen sich leichte Zu- bzw. Abnahmen der einzelnen Spannungsanteile. Dabei steigen die Anteile des *Eigengewichts* und des *Verkehrs* an, während die übrigen Anteile leicht abnehmen.

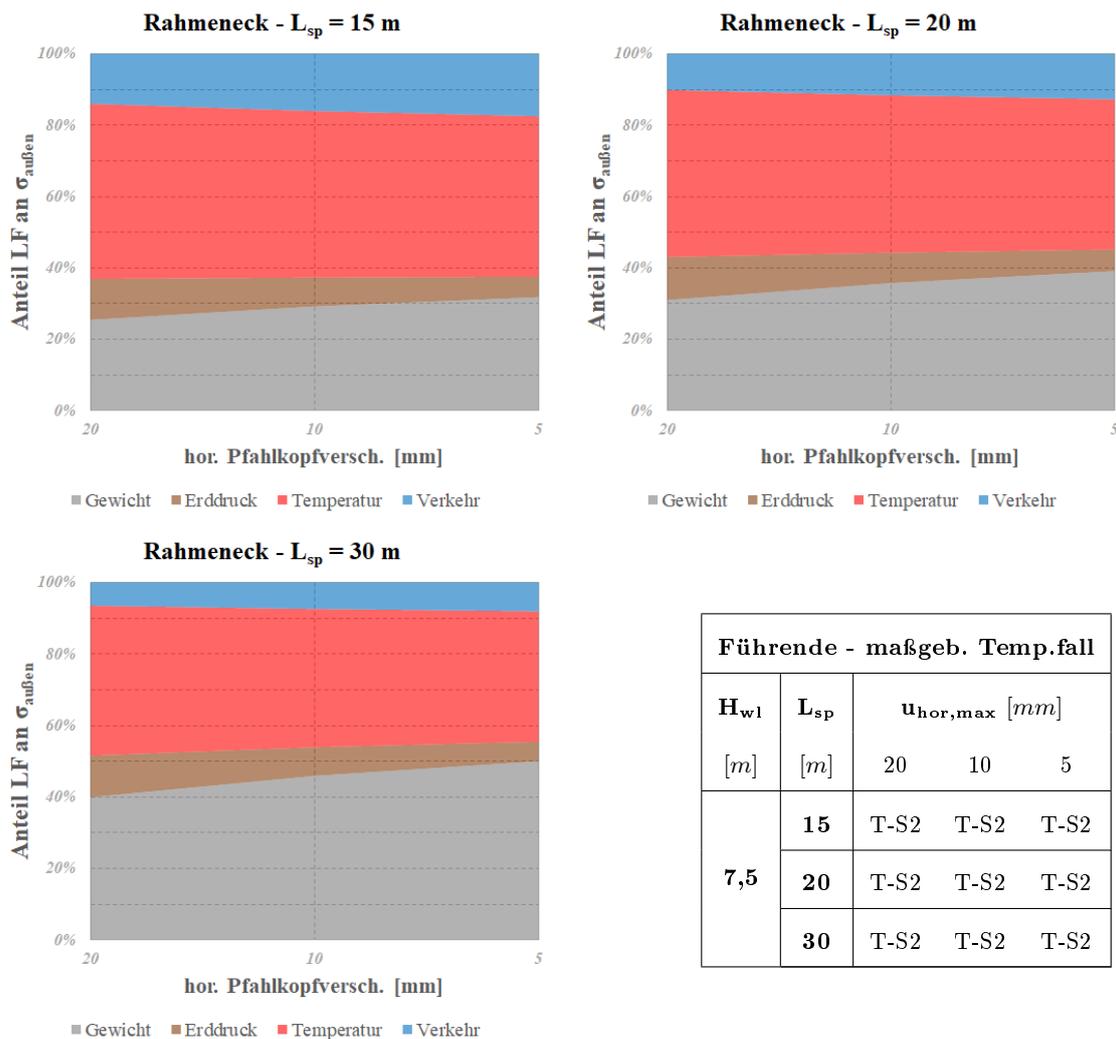


Abbildung 6.38.: Beträgmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.39 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptsysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{wl} = 10,0$ m. Mit steigendem E_s zeigen sich leichte Zu- bzw. Abnahmen der einzelnen Spannungsanteile. Mit zunehmendem E_s steigen die Anteile des *Eigengewichts* und des *Verkehrs*, während die übrigen Anteile leicht abnehmen. Generell lässt sich feststellen, dass mit zunehmendem L_{sp} der Anteil zufolge *Eigengewicht* steigt und die restlichen Anteile abnehmen. Jener des *ständigen Erddrucks* ist für alle L_{sp} relativ konstant.

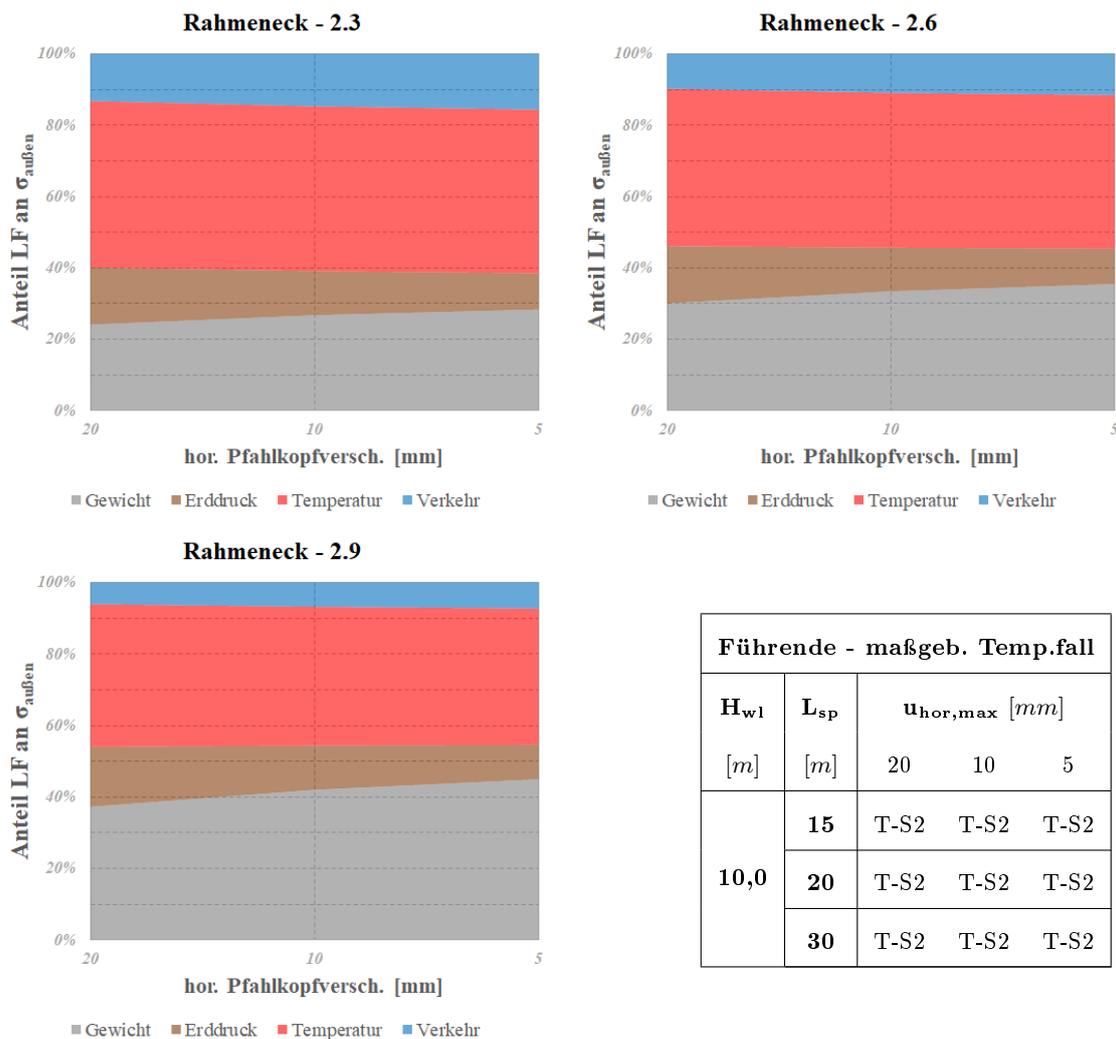


Abbildung 6.39.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 2

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für die Feldmitte des Überbaus dargestellt. Die Abbildungen 6.40 bis 6.42 zeigen die Spannungsanteile an deren Außenseite.

Abbildung 6.40 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 5,0$ m. Mit steigendem E_s nehmen die Anteile des *Eigengewichts* und des *ständigen Erddrucks* bei allen L_{sp} leicht ab, der Anteil zufolge *Temperatur* hingegen zu. Mit zunehmendem L_{sp} steigt der Anteil des *Eigengewichts* deutlich an, alle übrigen Anteile nehmen ab. Jener zufolge des *ständigen Erddrucks* ist für $L_{sp} = 30$ m verschwindend gering.

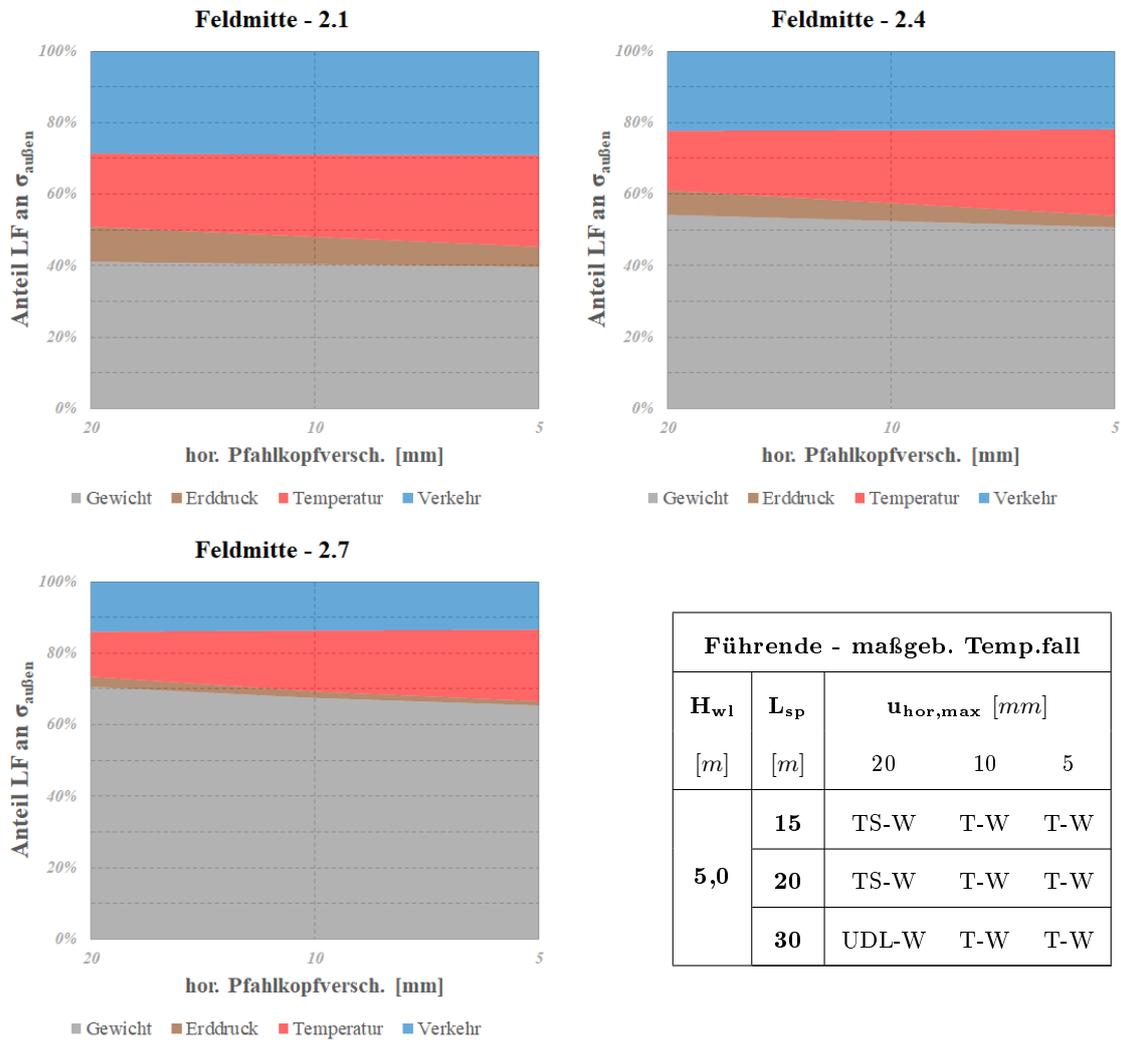


Abbildung 6.40.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.41 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 7,5$ m. Mit steigendem E_s nehmen die Anteile des *Eigengewichts* und der *Temperatur* bei allen L_{sp} leicht zu, der Anteil des *ständigen Erddrucks* hingegen ab. Jener zufolge *Verkehr* nimmt nur für $L_{sp} = 15$ m leicht zu. Mit zunehmendem L_{sp} steigt der Anteil des *Eigengewichts* an, alle übrigen Anteile nehmen ab.

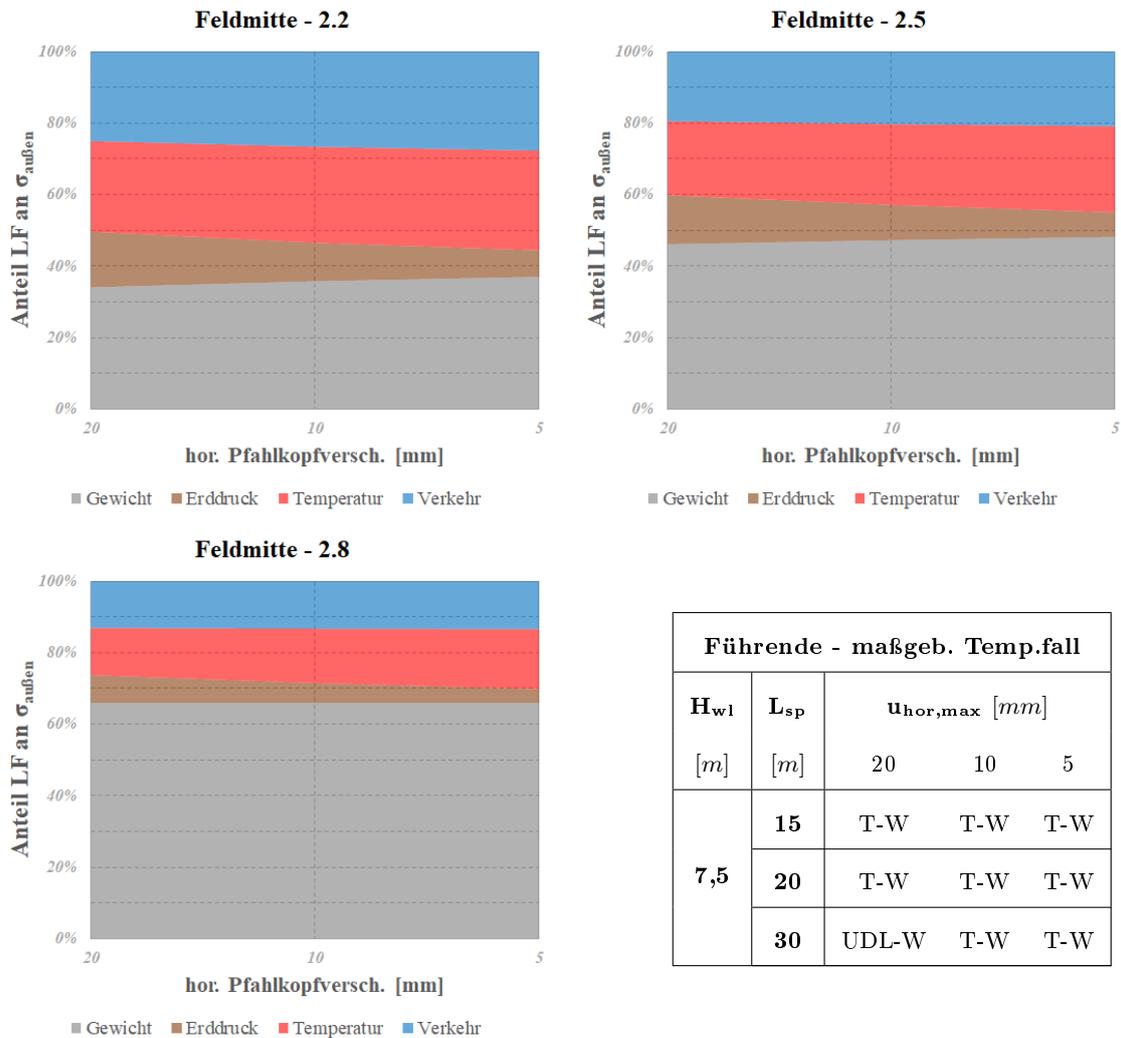


Abbildung 6.41.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{außen}$ in Feldmitte bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

Abbildung 6.42 zeigt die Spannungsanteile für jene Hauptssysteme mit einer Widerlagerhöhe von $H_{w1} = 10,0$ m. Mit steigendem E_s nehmen die Anteile des *Eigengewichts* und des *Verkehrs* bei allen L_{sp} leicht zu, der Anteil zufolge *ständigen Erddrucks* hingegen ab und jener der *Temperatur* bleibt konstant. Mit zunehmendem L_{sp} steigt der Anteil des *Eigengewichts* an, alle übrigen Anteile nehmen ab.

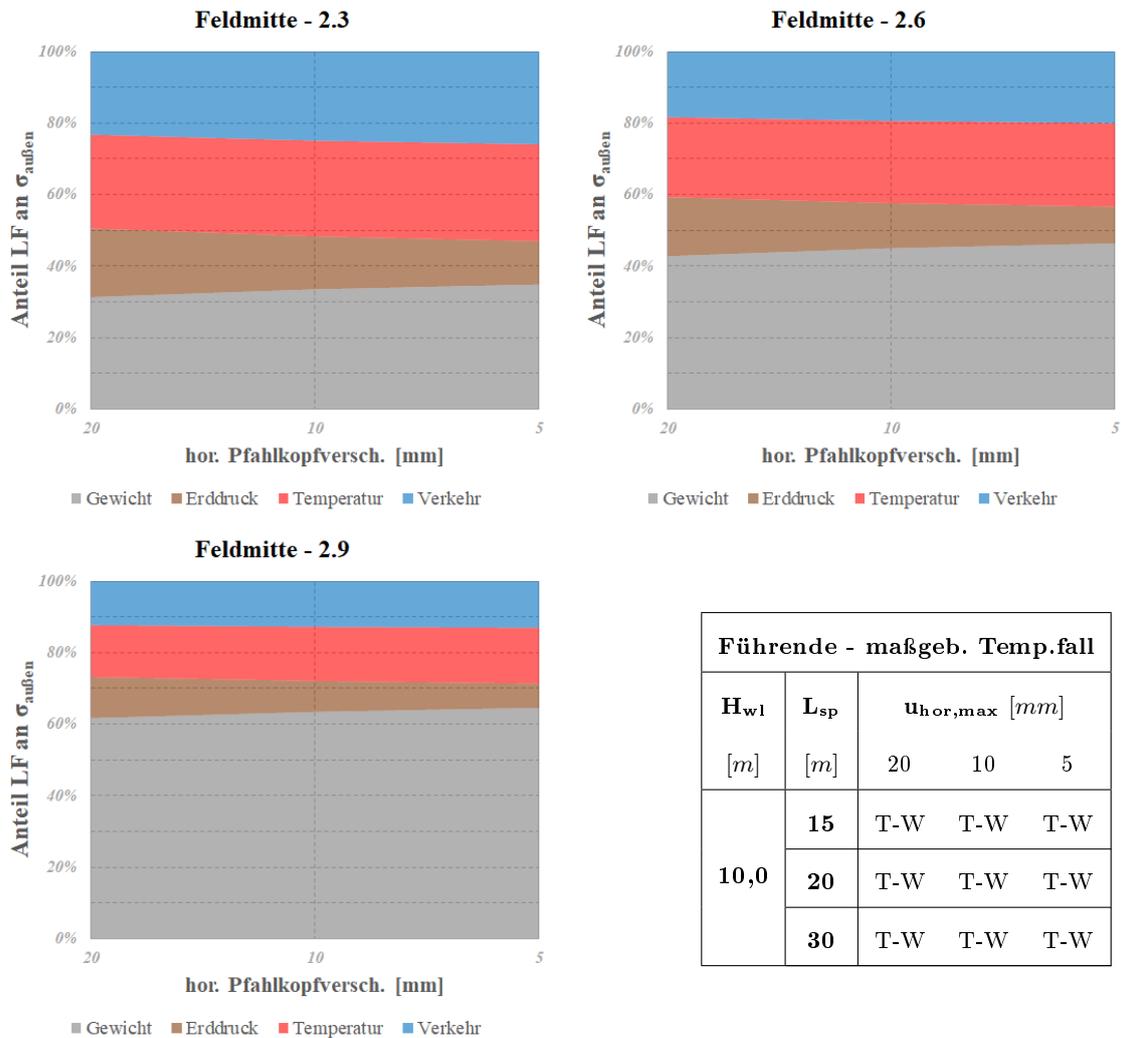


Abbildung 6.42.: Beträgsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

7. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie sowie eine Beschreibung der gewonnenen Erkenntnisse. Zum Abschluss folgt ein Ausblick.

Wie schon in den Kapiteln 5.1.4 und 5.2.4 erläutert, verhalten sich der Pfahlkopf und der Widerlagerfuß bei Änderungen der Widerlagerhöhe und des Steifemoduls sehr sensibel. Die Untersuchung der Spannungsanteile der einzelnen Einwirkungen an der jeweiligen Gesamtspannung zufolge charakteristischer Lastkombination bestätigt diesen Sachverhalt für beide Grundsysteme.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden zuerst die Ergebnisse der relevanten Punkte an Grundsystem 1 und anschließend an Grundsystem 2 zusammengefasst.

7.1. System mit einreihiger Pfahlreihe

Im folgenden Abschnitt werden die gewonnenen Erkenntnisse für die vier untersuchten Punkte am Grundsystem 1 beschrieben.

Pfahlkopf

Bei einer einfeldrigen Integralbrücke mit einer Bohrpfahlreihe je Widerlagerachse erweist sich der Pfahlkopf als jener Punkt des statischen Systems, der am sensibelsten auf eine Änderung des Steifemoduls reagiert. Wie bereits in Kapitel 5.1.4 veranschaulicht, kommt es durch zunehmende Gründungssteifigkeiten zu veränderten Verläufen der Verformung und des Biegemomentes. Die Spannungsanteile der einzelnen Einwirkungen weisen bei einer Zunahme des Steifemoduls sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite deutliche Änderungen und häufig Knicke auf. Zusätzlich werden bei einer Änderung des Steifemoduls auch häufig Lastkombinationen mit unterschiedlichen Führenden bzw. unterschiedlichen Temperaturlastfällen maßgebend.

Allgemein lässt sich erkennen, dass die Temperatur einen sehr großen und häufig den maßgebenden Anteil an der Gesamtspannung am Pfahlkopf ausmacht.

Widerlagerfuß

An der Außenseite des Widerlagers lässt sich ein großer Einfluss des zunehmenden Steifemoduls in Kombination mit zunehmender Widerlagerhöhe feststellen. Dadurch treten Vorzeichenwechsel der Spannungen zufolge Eigengewicht, ständigen Erddrucks sowie Temperatur auf. Betrachtet man die Spannungsanteile der einzelnen Lastfälle bei einer Widerlagerhöhe von 5,0 m und variablen Spannungen, lassen sich zufolge steigenden Steifemoduls ein Abnehmen des Eigengewichtsanteils und gleichzeitig Zunahmen beim Anteil der Temperatur und des ständigen Erddrucks feststellen. Bei einer Widerlagerhöhe von 10,0 m hingegen verhält es sich genau umgekehrt. Eine Widerlagerhöhe von 7,5 m stellt für den Widerlagerfuß jenen Grenzfall dar, an dem die Zu- bzw. Abnahmen je nach Spannweite unterschiedlich erfolgen. Allgemein lässt sich jedoch erkennen, dass der Spannungsanteil des Verkehrs mit zunehmender Widerlagerhöhe deutlich abnimmt, während jener zufolge ständigen Erddrucks zunimmt. Für Widerlagerhöhen von 5,0 sowie 7,5 m bedeutet das Zunehmen der Spannweite zunehmende Anteile des Eigengewichts und des Verkehrs und gleichzeitige Abnahmen bei den Anteilen der Temperatur und des ständigen Erddrucks. Bei einer Widerlagerhöhe von 10,0 m jedoch bleiben die Anteile mit zunehmender Spannweite relativ konstant.

An der Innenseite des Widerlagerfußes zeigen sich bei geringer Widerlagerhöhe nur minimale Zu- bzw. Abnahmen der Spannungsanteile zufolge des zunehmenden Steifemoduls. Bei größerer Widerlagerhöhe hingegen zeigen sich die Zu- und Abnahmen etwas deutlicher. Generell lässt sich feststellen, dass eine Zunahme der Widerlagerhöhe zu einer Verringerung der Anteile zufolge Eigengewicht und Verkehr führt, gleichzeitig aber zu einer Zunahme des Anteils des ständigen Verkehrs. Der Anteil der Temperatur verhält sich dabei je nach Spannweite unterschiedlich. Eine Zunahme der Spannweite bedeutet, dass der Anteil des Eigengewichts deutlich ansteigt, die übrigen Anteile nehmen hingegen ab.

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Spannungen zufolge Eigengewicht an der Innenseite höher sind als an der Außenseite. Gleichzeitig sind die Spannungsanteile zufolge Temperatur und Erddruck an der Außenseite größer als innen.

Rahmeneck

Im Rahmeneck sind die Anteile der einzelnen Lastfälle an der Gesamtspannung an der Außen- und Innenseite nahezu ident, was an der geringen Normalkraft liegt, die im Überbau vorhanden ist. Hier werden die maßgebende Lastkombinationen ausschließlich im Sommer erreicht. Die resultierenden Drucknormalkräfte führen dazu, dass der Spannungsanteil der Temperatur an der Innenseite geringfügig höher ist als an der Außenseite. Für den Anteil des Eigengewichts ist genau das Gegenteil der Fall.

Es lassen sich unabhängig von Spannweite und Widerlagerhöhe leichte Änderungen der

Spannungsanteile zufolge zunehmendem Steifemodul erkennen. Davon betroffen sind aber hauptsächlich die Anteile des Eigengewichts und des ständigen Erddrucks. Der Anteil der Temperatur bleibt mit zunehmenden Steifemodul relativ konstant. Bei zunehmender Widerlagerhöhe verringern sich die Spannungsanteile des Eigengewichts und des Verkehrs leicht, während die Anteile von Temperatur und ständigem Erddruck leicht zunehmen. Eine Zunahme der Spannweite bedeutet hingegen eine Zunahme des Anteils des Eigengewichts und eine leichte Abnahme der Anteile zufolge Temperatur und Verkehr sowie eine minimale Abnahme des Anteils des ständigen Erddrucks.

Feldmitte

In Feldmitte zeigt sich, dass die Spannungsanteile an der Außen- bzw. Innenseite nahezu gleich groß sind. Auch hier ist der Anteil des Eigengewichts an der Außenseite geringfügig größer als an der Innenseite. Die Anteile der Temperatur und des ständigen Erddrucks sind hingegen an der Innenseite minimal größer als an der Außenseite.

Die Zunahme des Steifemoduls hat vereinzelt sehr geringe Auswirkungen auf die Spannungen. Das ist aber eher die Ausnahme und auf unterschiedliche maßgebende Lastkombinationen zurückzuführen. Eine Zunahme der Widerlagerhöhe führt zu leicht steigenden Spannungsanteilen der Temperatur und des ständigen Erddrucks, während für Eigengewicht und Verkehr das Gegenteil der Fall ist. Das Zunehmen der Spannweite lässt den Anteil des Eigengewichts deutlich ansteigen und alle anderen Anteile abnehmen.

7.2. System mit zweireihiger Pfahlreihe

In diesem Abschnitt werden die gewonnenen Erkenntnisse für die fünf untersuchten Punkte am Grundsystem 2 beschrieben.

Äußerer Pfahlkopf

Am äußeren Pfahlkopf ändern sich die Spannungsanteile mit zunehmendem Steifemodul nur geringfügig. Das gilt jedoch nur für eine große Widerlagerhöhe, bei kleiner Höhe, gibt es keine Änderungen. Für die Außenseite des äußeren Pfahlkopfs lässt sich feststellen, dass eine Zunahme der Widerlagerhöhe eine Abnahme der Anteile zufolge Eigengewicht und Verkehr, aber gleichzeitig eine Zunahme der Anteile zufolge Temperatur und ständigem Erddrucks bedeutet. Bei steigender Spannweite kommt es generell zu einer Zunahme des Eigengewichtsanteils. Grundsätzlich wirkt die Temperatur in der charakteristischen Lastkombination als Führende. Bei geringer Widerlagerhöhe und großer Spannweite wird aber der Verkehr als führende Einwirkung maßgebend.

Betrachtet man die Spannungen an der Innenseite, so fällt auf, dass bei geringer Widerlagerhöhe der Verkehr als führende Einwirkung maßgebend wird, bei großer Widerlagerhöhe hingegen die Temperatur. Bei mittlerer Höhe wird nur bei großer Spannweite der Verkehr

zur führenden Einwirkung.

Allgemein lässt sich festhalten, dass der Spannungsanteil des Eigengewichts an der Innenseite größer ist als an der Außenseite. Für den Anteil der Temperatur verhält es sich umgekehrt.

Innerer Pfahlkopf

Am Innenpfahl kommt es zufolge zunehmenden Steifemoduls zu deutlich größeren Änderungen der Spannungsanteile als am Außenpfahl. Der Innenpfahl weist einen höheren Spannungsanteil zufolge Temperatureinwirkung auf als der äußere Bohrpfahl, gleichzeitig aber auch einen geringeren Anteil zufolge Eigengewicht. An der Außenseite des inneren Bohrpfahls tritt ein größerer Anteil zufolge Temperatur auf als an der Innenseite. Für das Eigengewicht ist es umgekehrt.

Widerlagerfuß

Der Widerlagerfuß erweist sich bei einer einfeldrigen Integralbrücke mit zwei Bohrpfahlreihen je Widerlagerachse als jener Punkt des statischen Systems, der am sensibelsten auf eine Änderung des Steifemoduls reagiert. Aufgrund der Verschiebung des Momentennulldurchgangs in der Widerlagerwand kommt es häufig zu Spannungswechsel und unterschiedlichen maßgebenden Lastkombinationen. Bei geringer Widerlagerhöhe lässt sich erkennen, dass der Temperaturanteil an der Außenseite größer ist als an der Innenseite, während der Anteil des Eigengewichts an der Innenseite größer ist als außen. Bei einer großen Widerlagerhöhe verhält es sich genau umgekehrt.

Rahmeneck und Feldmitte

Für das Rahmeneck und die Feldmitte am Grundsystem 2 lassen sich die selben Schlüsse ziehen wie schon für Grundsystem 1 im vorangegangenen Kapitel 7.1.

7.3. Ausblick

Die Untersuchung des Pfahlkopfs und des Widerlagerfußes zeigt, dass diese beiden Punkte besonders stark auf geringe Änderungen der Gründungssteifigkeiten und der Widerlagerhöhe reagieren. Anhand der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse lassen sich die Entwicklungen der Spannungsverteilungen am Pfahlkopf und am Widerlagerfuß sehr gut nachvollziehen. Allerdings reichen sie nicht aus, um das Verhalten dieser wichtigen Punkte exakt beschreiben zu können, sondern sind als Grundlage für die weitere Forschung zu verstehen.

Zukünftige Studien zum Einfluss der Spannweite, der Widerlagerhöhe und des Steifemoduls bei mehrfeldrigen Integralbrücken sind ebenso erforderlich wie die nähere Untersuchung von schiefwinkligen integralen Brückenbauwerken. Auch der Einfluss von mehreren Bodenschichten unterschiedlicher Steifigkeit auf die globalen Spannungen wird näher untersucht werden müssen, um aussagekräftige Ergebnisse zu Baugründen zu erhalten, die auch der Realität entsprechen.

Eine genaue Untersuchung der genannten Parameter ist dringend notwendig, da es sich beim Pfahlkopf und dem Widerlagerfuß auch hinsichtlich der Bewehrungsführung um äußerst wichtige und kritische Punkte handelt. Ein möglichst genaues Verständnis der Spannungsentwicklung ist Voraussetzung für eine wirtschaftlichere und einfachere Bewehrungsführung in der Pfahlkopfplatte, als derzeit üblich.

Literaturverzeichnis

Arnold, A. (2011)

Tragverhalten von nicht starren Flachfundationen unter Berücksichtigung der lokalen Steifigkeitsverhältnisse. Dissertation, ETH Zürich.

DIN 1054 (2010)

Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2010-12, Berlin.

EA Pfähle (2012)

Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ - EA-Pfähle. 2. Auflage. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Ernst & Sohn, Berlin.

Geier, R.; Angelmaier, V.; Graubner, C.-A.; Kohoutek, J. (2017)

Integrale Brücken. Entwurf, Berechnung, Ausführung, Monitoring. Ernst & Sohn, Berlin.

Kempfert, H.-G. (Hrsg.) (2009)

Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk. Zulässige Setzungsdifferenzen sowie Beanspruchung von Bauwerk und Gründung. Heft 21. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel.

Mayer, M. (2015)

Numerische Untersuchung der Bettungssteifigkeiten von flach- und pfahlgegründeten Brückenpfeilern. Masterarbeit, TU Graz.

ÖNORM B 1991-1-5 (2012)

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM B 1997-1-3 (2015)

Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. Teil 1-3: Pfahlgründungen. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM EN 1991-2 (2012)

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

RE-ING (2020)

Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten (RE-ING). Anlage 1 zum ARS 10/2020 vom 06.04.2020. Stand 2019/12. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

RVS (2012)

Bemessung und Ausführung von integralen Brücken. RVS 15.02.12. Bearbeitungsstand 21.08.2017. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien.

Schwarz, G. (2010)

Technisch und wirtschaftlicher Vergleich von Bodenplatten mit unterschiedlichen Gründungssystemen. Masterarbeit, TU Graz.

TU Graz – Institut für Bodenmechanik und Grundbau (2016)

Unterlagen zu Erddruck, zuletzt geprüft am 16.12.2020.

Universität Siegen – Lehrstuhl für Baustatik (2018)

Unterlagen zur Bauwerk-Baugrund-Interaktion, zuletzt geprüft am 16.12.2020.

Witt, K. J. (Hrsg.) (2018)

Grundbau-Taschenbuch. Teile 1 bis 3. 8. Auflage. Ernst & Sohn, Berlin.

Zehentner, F. (2010)

Numerische Untersuchungen zur Einflusstiefe von Gründungen. Masterarbeit, TU Graz.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Setzungs- und Spannungsverläufe für biegesteife (l) bzw. biegeweiche (r) Gründung nach [Mayer, 2015]	3
2.2. Bettungsmodulverfahren nach [Universität Siegen, 2018]	4
2.3. Steifemodulverfahren nach [Universität Siegen, 2018]	5
2.4. Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb in 2-D	7
3.1. Pfahl-Setzungslinie	9
3.2. Abminderungsfaktoren α_i für die einzelnen Pfähle einer Pfahlgruppe nach [EA Pfähle, 2012]	12
4.1. Brückenquerschnitt RQ 9.5	13
4.2. Eingangsparameter für Grundsystem 1 (l) und Grundsystem 2 (r)	14
4.3. Übersicht über die Haupt- und Untersysteme	16
4.4. Visualisierung der FE-Modelle für Grundsystem 1 (l) und 2 (r)	17
4.5. Lage des Halbraumes und der Bohrprofile für Grundsystem 2	18
4.6. Verlauf des Steifemoduls E_s über die Tiefe	19
4.7. Ausbaulasten	20
4.8. Temperatureinwirkung im Winter nach [RVS, 2012]	22
4.9. Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 1 nach [RVS, 2012]	23
4.10. Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 2 nach [RVS, 2012]	23
4.11. Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 3 nach [RVS, 2012]	24
4.12. Temperatureinwirkung im Sommer - Fall 4 nach [RVS, 2012]	24
4.13. Erddrucke	25
4.14. Mobilisierter Erddruck nach [RVS, 2012]	26
4.15. Erddruck zufolge Temperatureinwirkung im Winter (l) und zufolge Tempe- ratureinwirkung im Sommer (r)	27
4.16. Belastung zufolge Verkehr (Lastmodell 1)	28
4.17. Entwicklung der Steifemoduln für Grundsystem 1 (l) und 2 (r)	30
4.18. Benennung der Schnitte und Spannungen für Grundsystem 1 (l) und 2 (r) .	32
4.19. Untersuchter Innenpfahl	32
5.1. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> <i>zuf. Sommer</i> bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	35
5.2. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichmäßiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	36

5.3.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	37
5.4.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	38
5.5.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichm\u00e4\u00dfiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	39
5.6.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	40
5.7.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m f\u00fcr Grundsystem 1	42
5.8.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichm\u00e4\u00dfiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m f\u00fcr Grundsystem 1	43
5.9.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m f\u00fcr Grundsystem 1	44
5.10.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m f\u00fcr Grundsystem 1	45
5.11.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichm\u00e4\u00dfiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m f\u00fcr Grundsystem 1	46
5.12.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m f\u00fcr Grundsystem 1	47
5.13.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{w1}}=10,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	49
5.14.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichm\u00e4\u00dfiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=10,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	50
5.15.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>ungleichm\u00e4\u00dfiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=10,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	51
5.16.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{w1}}=10,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	52
5.17.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichm\u00e4\u00dfiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=10,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	53
5.18.	$\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=10,0$ m f\u00fcr Grundsystem 1	54
5.19.	Verformung zufolge E_0 f\u00fcr HS 1.1 f\u00fcr $u_{\text{hor,max}} = 20$ mm (l) und 5 mm (r)	55
5.20.	Momentenverl\u00e4ufe zufolge Eigengewicht am Bohrpfahl f\u00fcr HS 5.1	56
5.21.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m f\u00fcr Grundsystem 2	59
5.22.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichm\u00e4\u00dfiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m f\u00fcr Grundsystem 2	60
5.23.	$\sigma_{\text{au\ss en}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m f\u00fcr Grundsystem 2	61

5.24. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	62
5.25. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichmäßiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	63
5.26. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	64
5.27. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	66
5.28. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichmäßiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	67
5.29. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	68
5.30. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	69
5.31. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichmäßiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	70
5.32. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	71
5.33. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	73
5.34. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichmäßiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	74
5.35. $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	75
5.36. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>Eigengewicht</i> und <i>Erddruck</i> zuf. <i>Sommer</i> bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	76
5.37. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>gleichmäßiger Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	77
5.38. $\sigma_{\text{innen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge <i>linearer Temperatureinwirkung</i> bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	78
5.39. Verformung zufolge E_0 für HS 2.1 für 20 mm (l) und 5 mm (r)	79
5.40. Momentenverläufe zufolge T_n <i>Winter</i> am äußeren Bohrpfahl für HS 5.7	80
6.1. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	85
6.2. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1	86
6.3. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1	87
6.4. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	88

6.5. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1	89
6.6. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1	90
6.7. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	91
6.8. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1	92
6.9. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1	93
6.10. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	94
6.11. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1	95
6.12. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1	96
6.13. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	97
6.14. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1	98
6.15. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1	99
6.16. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1	100
6.17. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1	101
6.18. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1	102
6.19. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am äußeren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	104
6.20. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am äußeren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	105
6.21. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am äußeren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	106
6.22. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am äußeren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	107
6.23. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am äußeren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	108
6.24. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am äußeren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	109

6.25. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am inneren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	110
6.26. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am inneren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	111
6.27. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am inneren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	112
6.28. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am inneren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	113
6.29. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am inneren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	114
6.30. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am inneren Pfahlkopf bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	115
6.31. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	116
6.32. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	117
6.33. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	118
6.34. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	119
6.35. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	120
6.36. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} am Widerlagerfuß bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	121
6.37. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	122
6.38. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	123
6.39. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ im Rahmeneck bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	124
6.40. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2	125
6.41. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2	126
6.42. Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an $\sigma_{\text{außen}}$ in Feldmitte bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2	127

Tabellenverzeichnis

2.1. Eingangparameter für das HSS-Modell	8
4.1. Spannweite und zugehörige Widerlagerhöhe der Hauptsysteme	15
4.2. Einwirkungen zufolge Verkehr	28
4.3. Steifemoduln E_s [MPa] für Grundsystem 1 und 2	29
4.4. Untersuchte Einzellastfälle	31
5.1. Maßgebende Einzellastfälle	33
5.2. Biegemoment M_y zufolge T_n am Widerlagerfuß bei $L_{sp} = 30$ m und variablem H_{wl}	56
5.3. Analyse von $\sigma_{\text{außen}}/f_{ctm}$ im Rahmeneck und in Feldmitte am Grundsystem 1	57
5.4. Vergleich von $\sigma_{\text{außen}}/f_{ctm}$ im Rahmeneck und in Feldmitte am Grundsystem 2	81
6.1. Einwirkungen für σ_{char}	82

A. Anhang - Auswertung der Spannungsanteile für Grundsystem 1

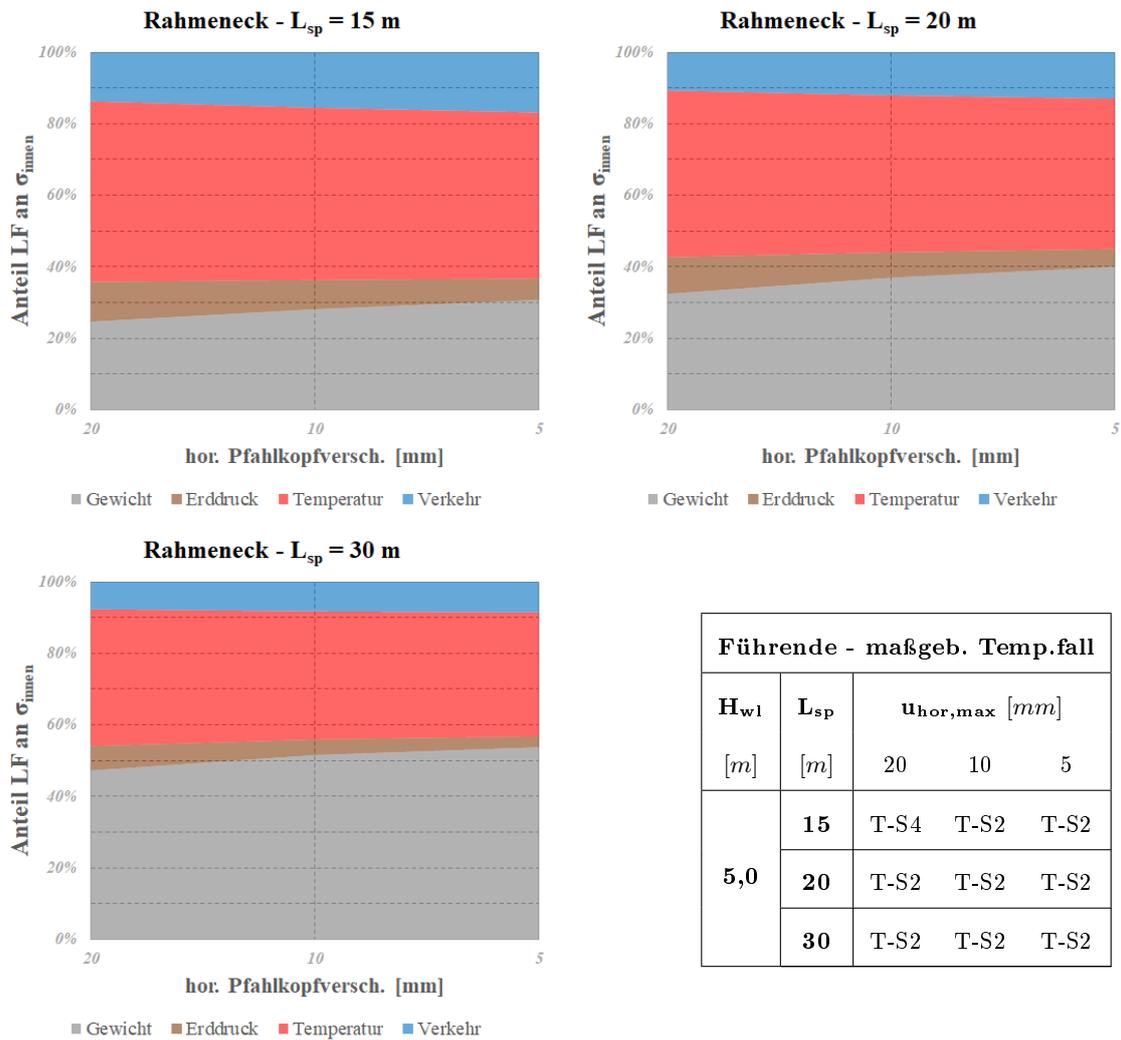


Abbildung A.1.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} im Rahmeneck bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

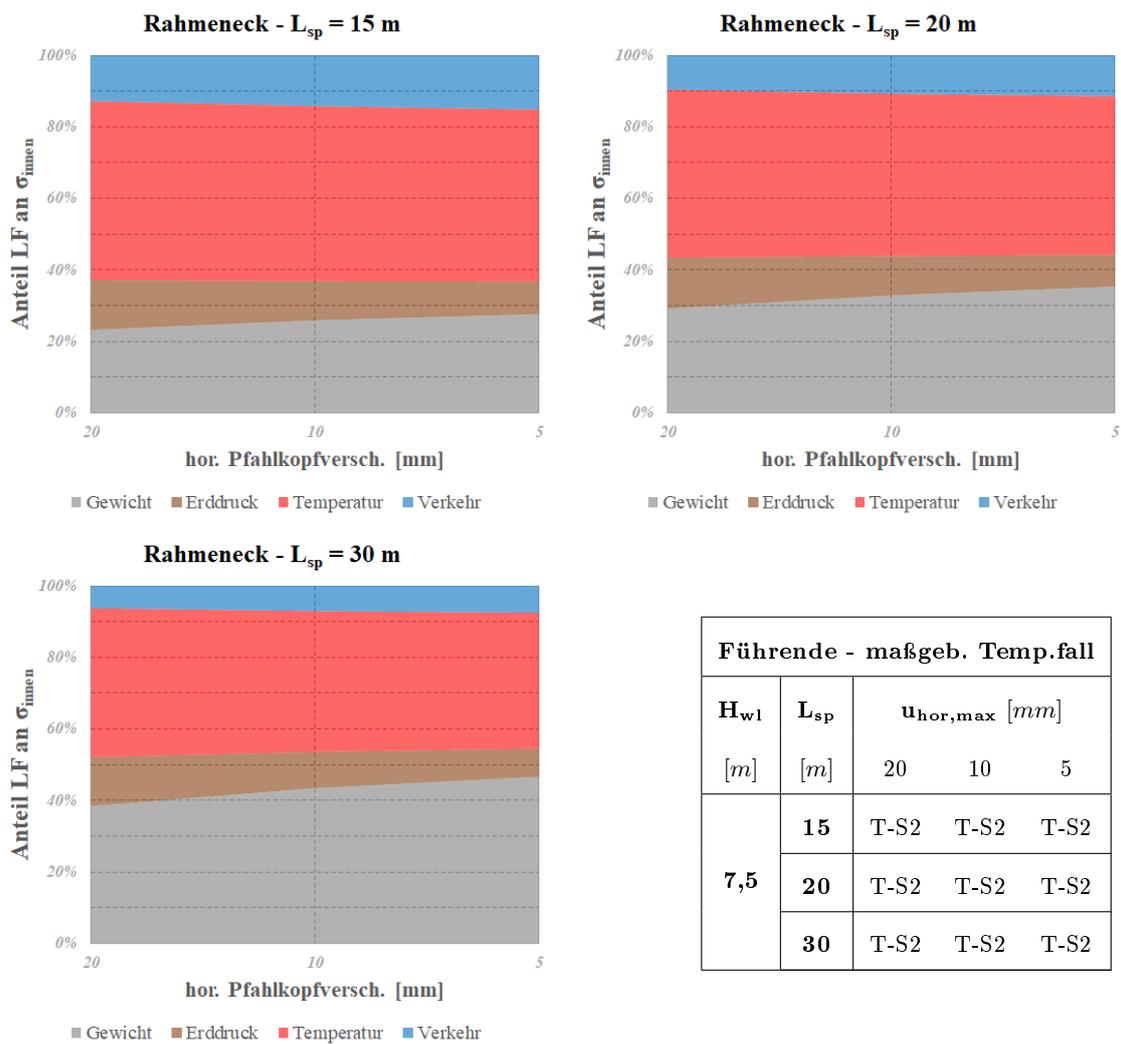


Abbildung A.2.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} im Rahmeneck bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

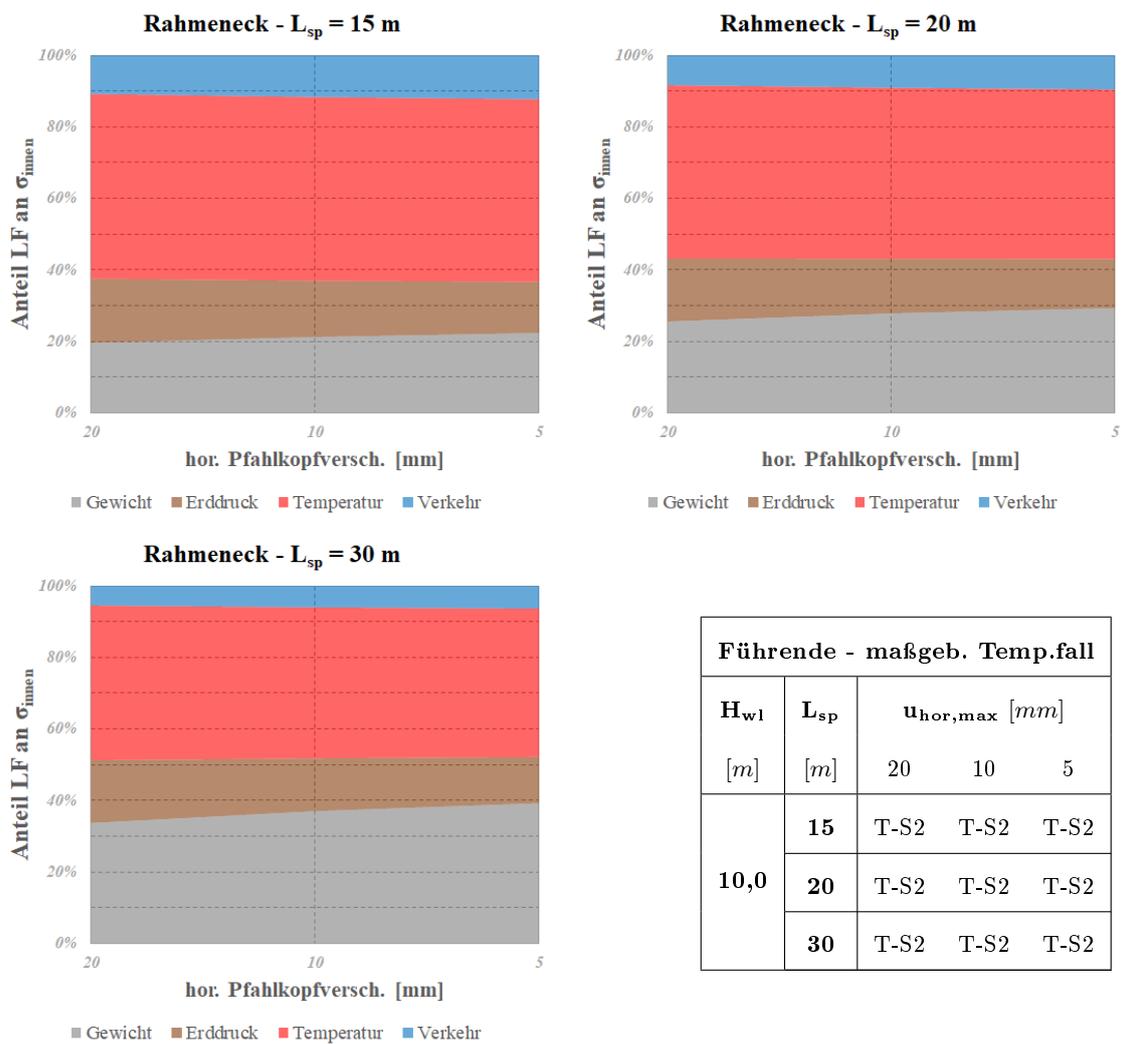


Abbildung A.3.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} im Rahmeneck bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

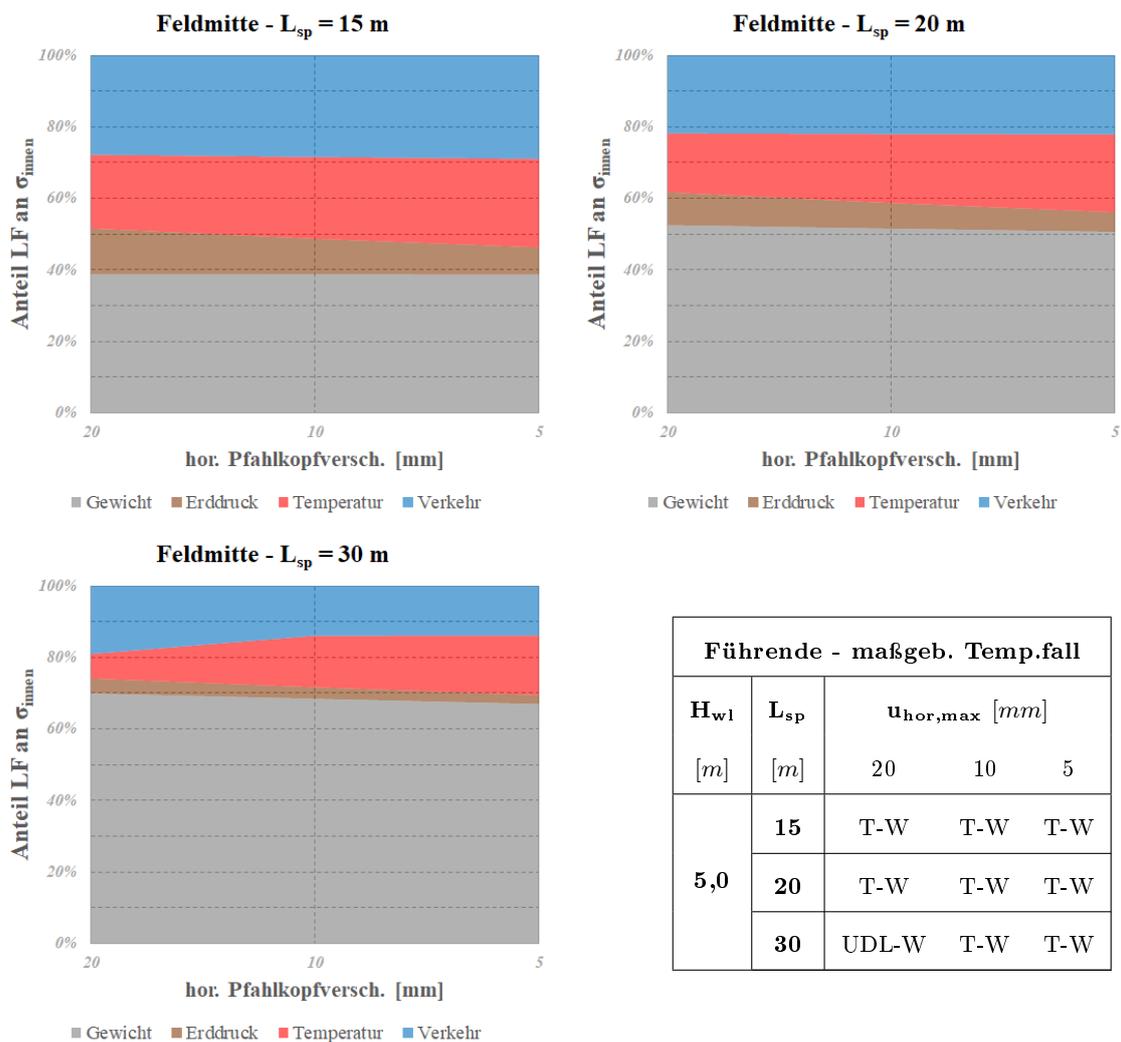


Abbildung A.4.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} in Feldmitte bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

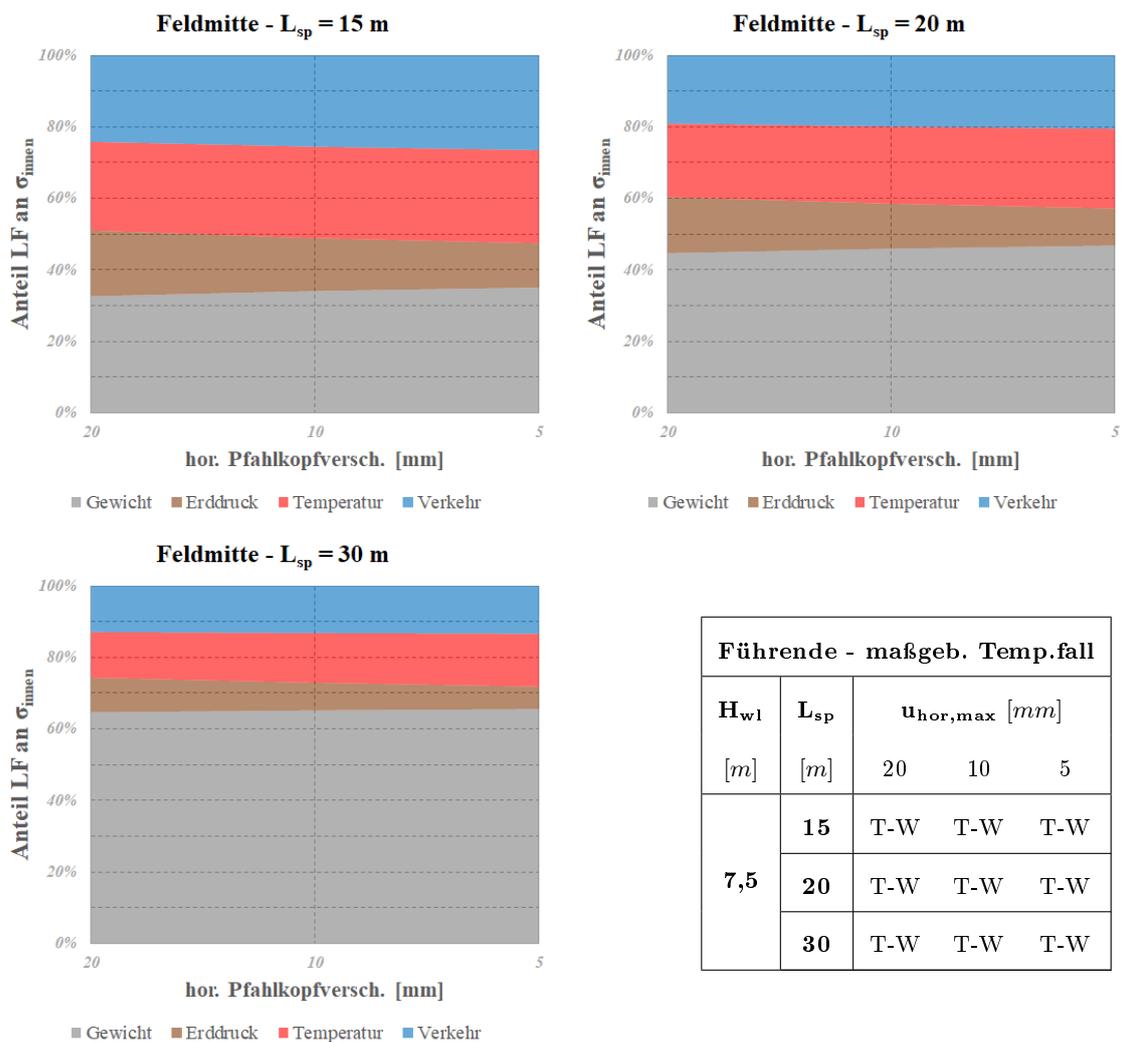
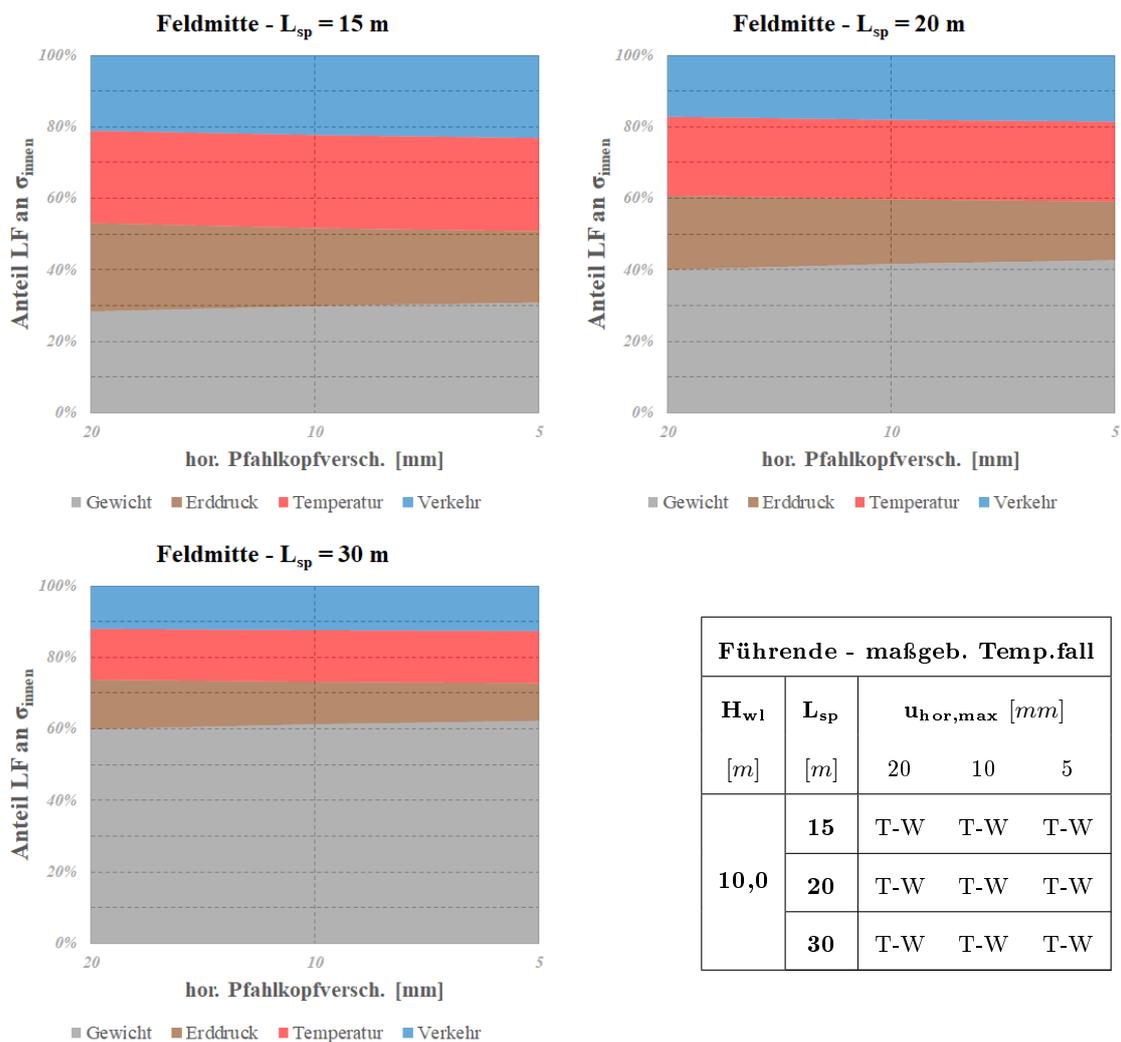


Abbildung A.5.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} in Feldmitte bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1



Führende - maßgeb. Temp.fall				
H_{w1}	L_{sp}	$u_{hor,max}$ [mm]		
[m]	[m]	20	10	5
10,0	15	T-W	T-W	T-W
	20	T-W	T-W	T-W
	30	T-W	T-W	T-W

Abbildung A.6.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} in Feldmitte bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

B. Anhang - Auswertung der Spannungsanteile für Grundsystem 2

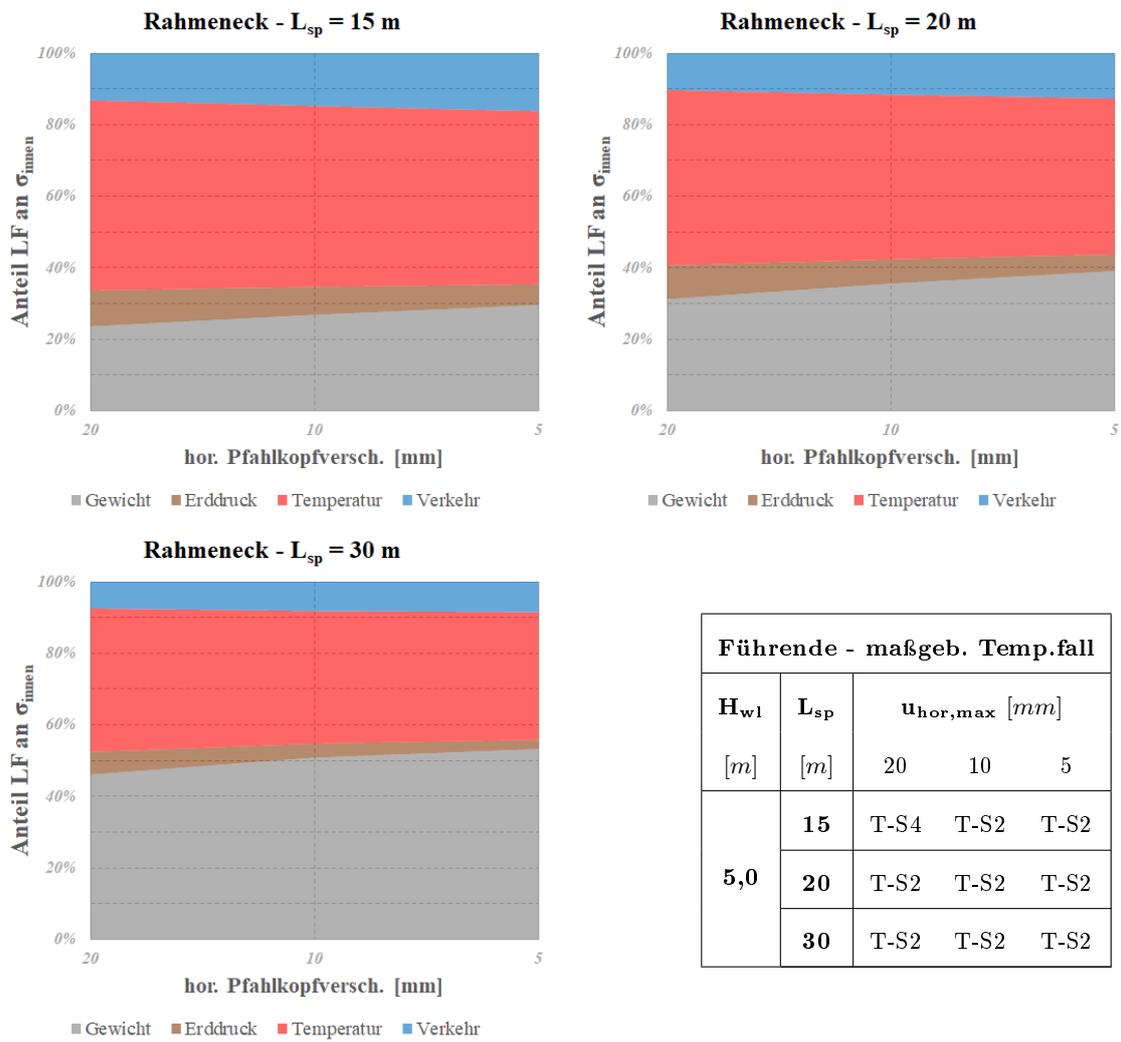


Abbildung B.1.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} im Rahmeneck bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

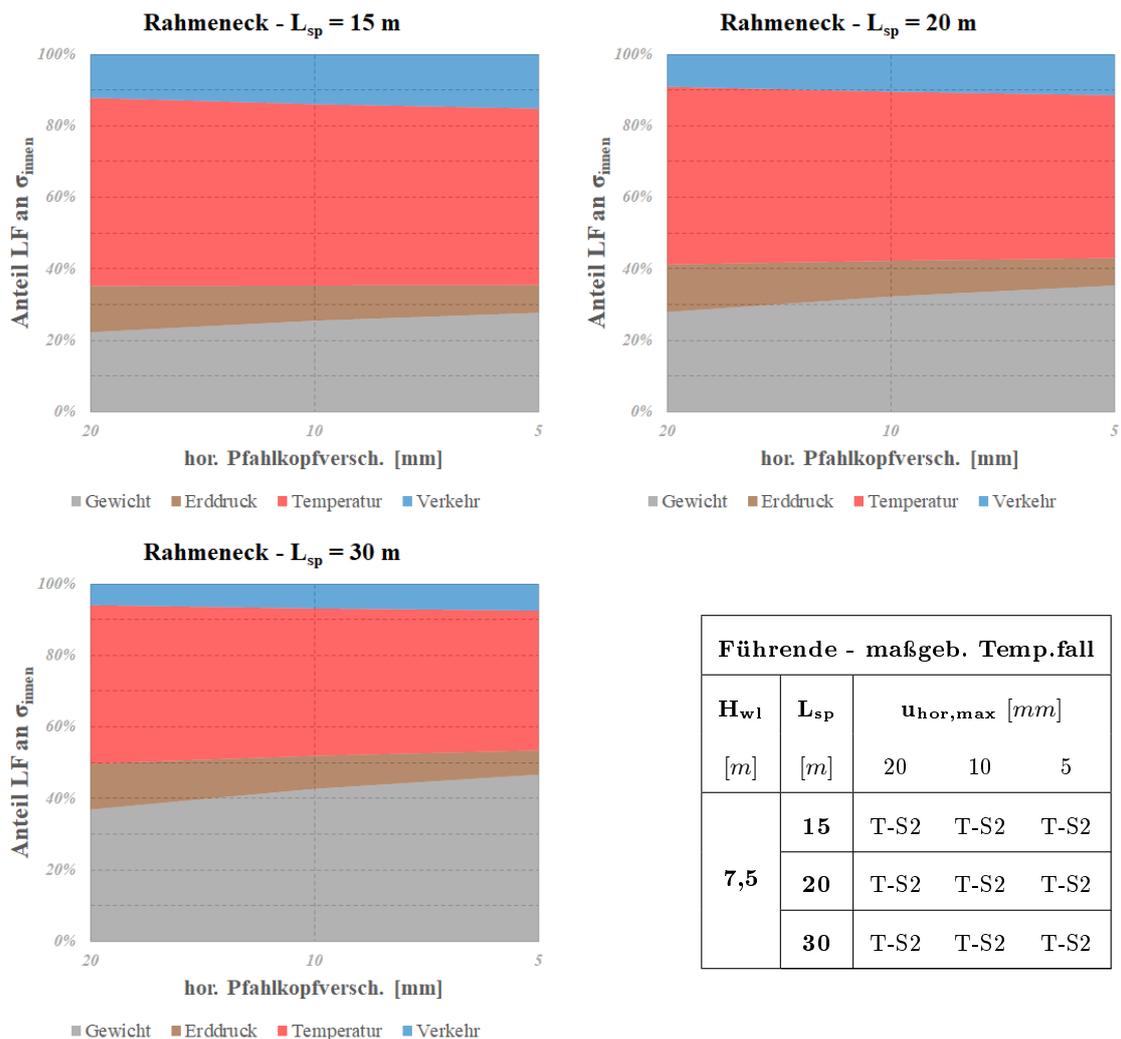


Abbildung B.2.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} im Rahmeneck bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

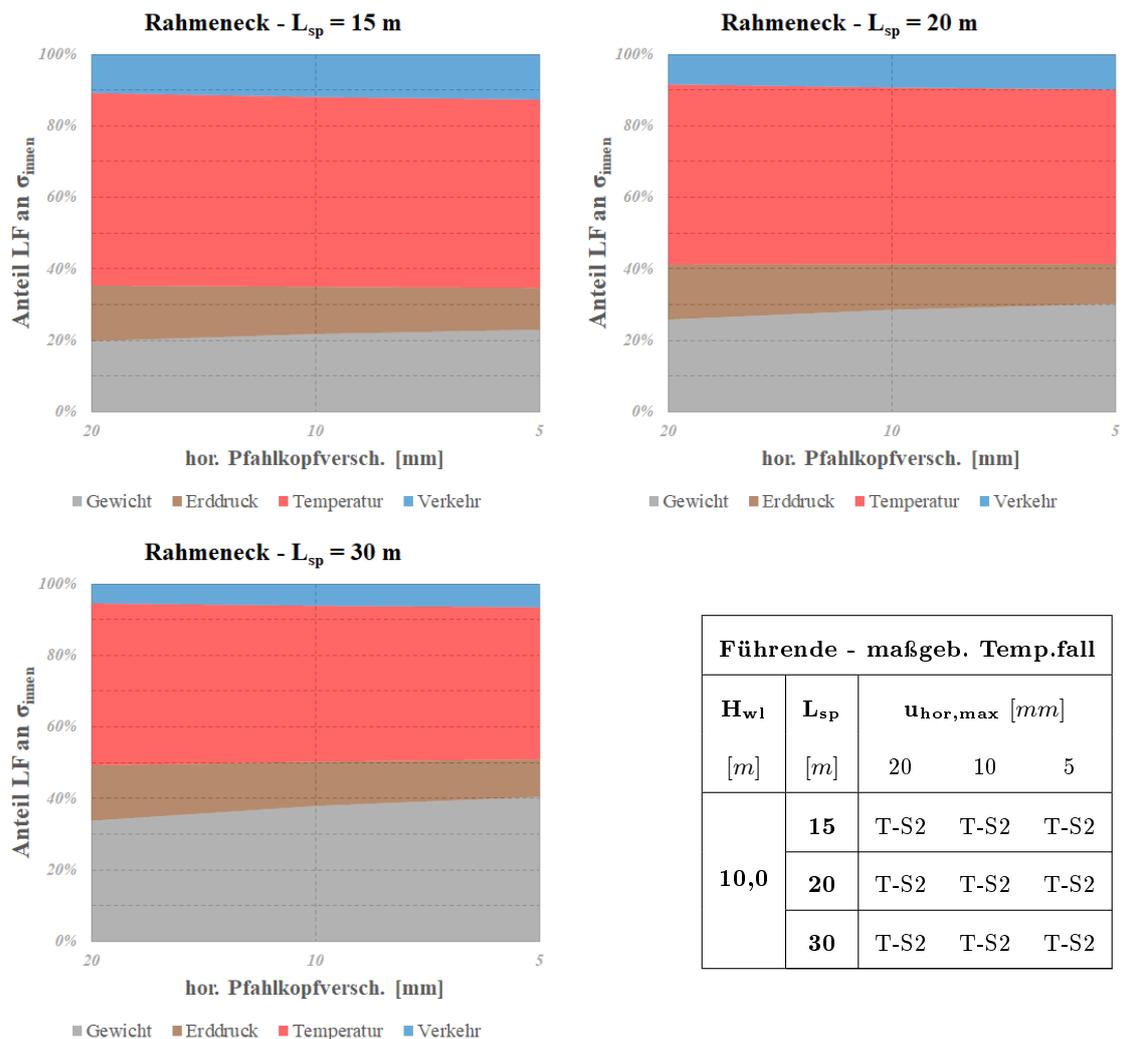


Abbildung B.3.: Betragsmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} im Rahmeneck bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

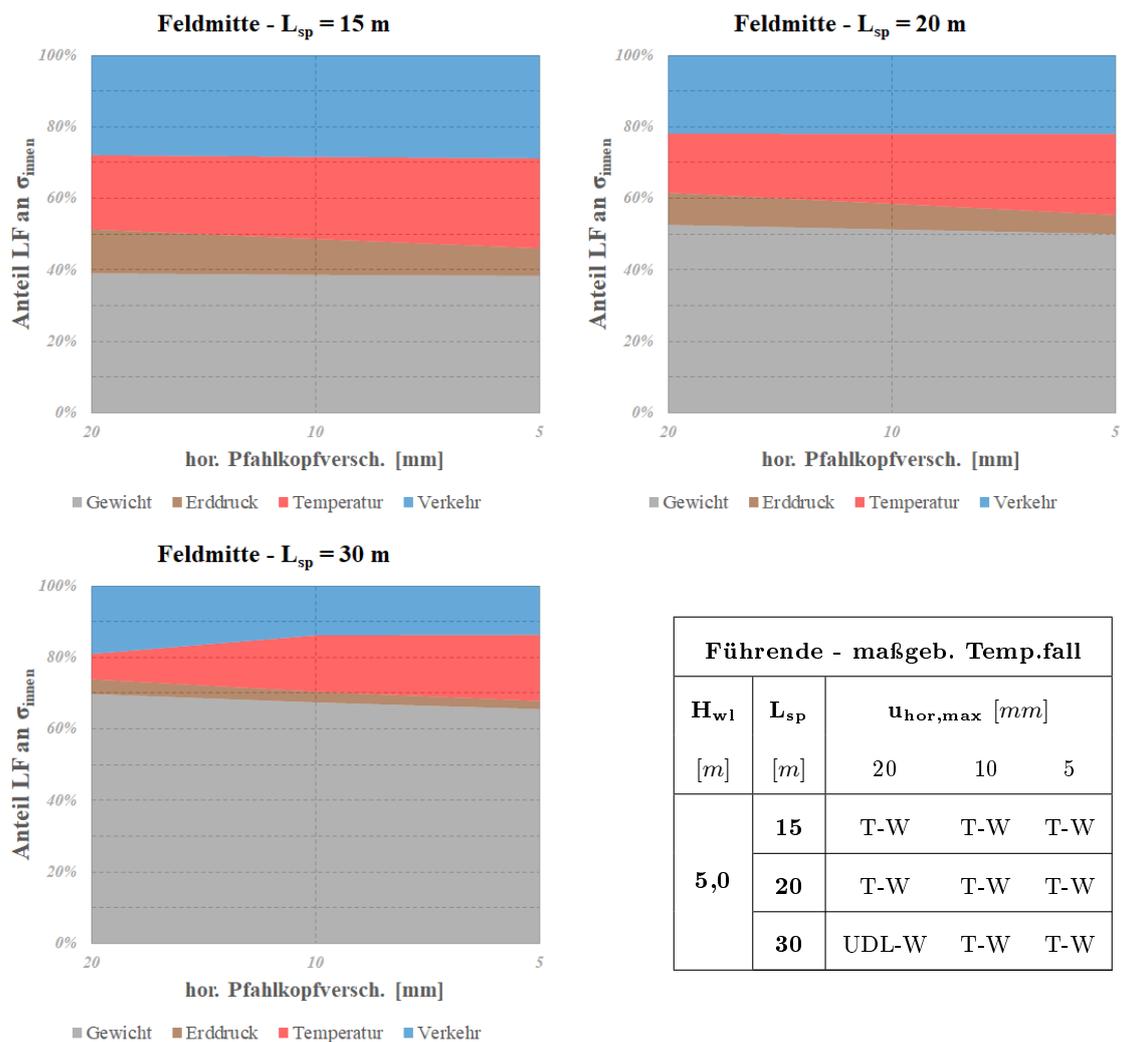


Abbildung B.4.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} in Feldmitte bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

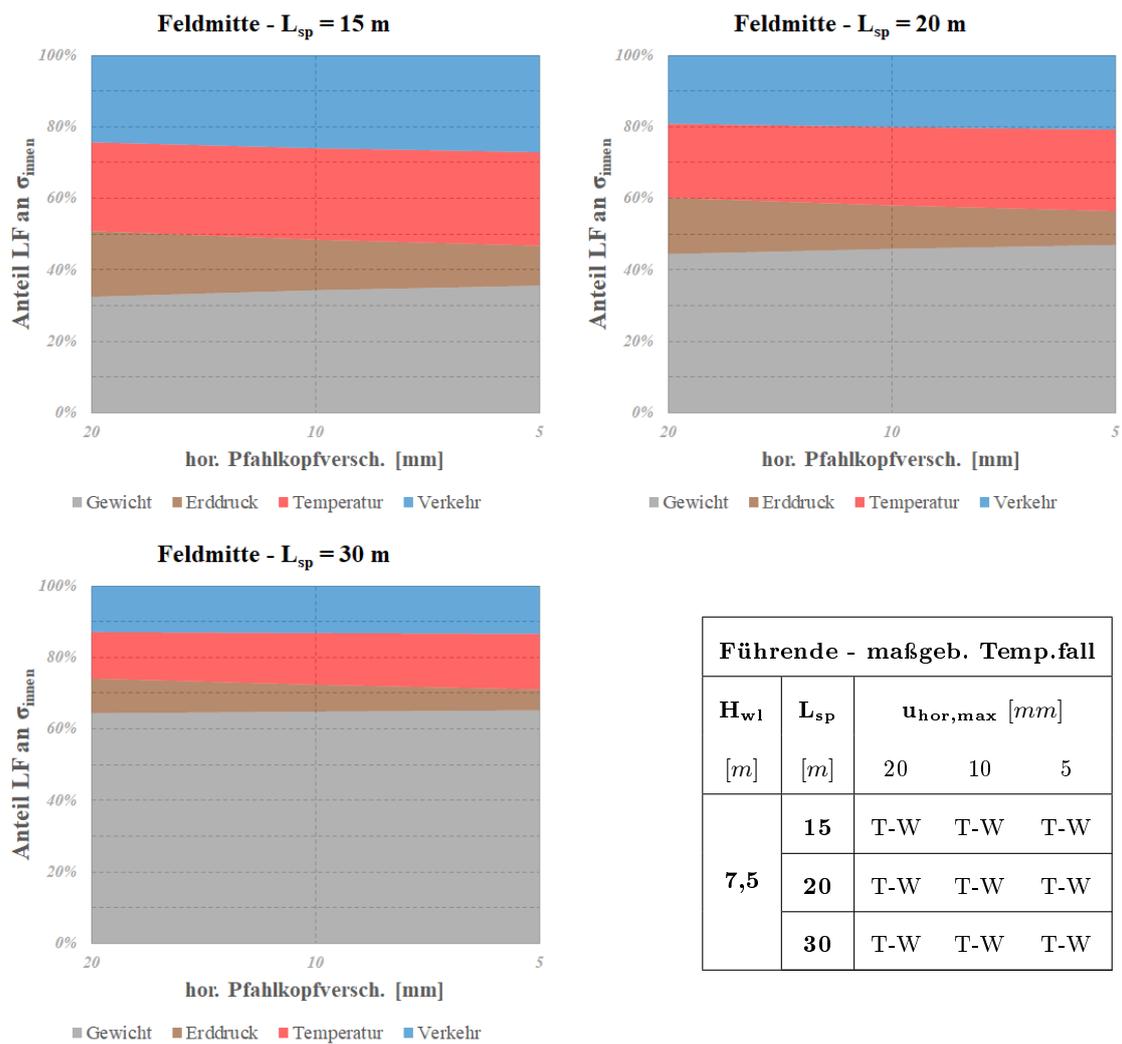


Abbildung B.5.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} in Feldmitte bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

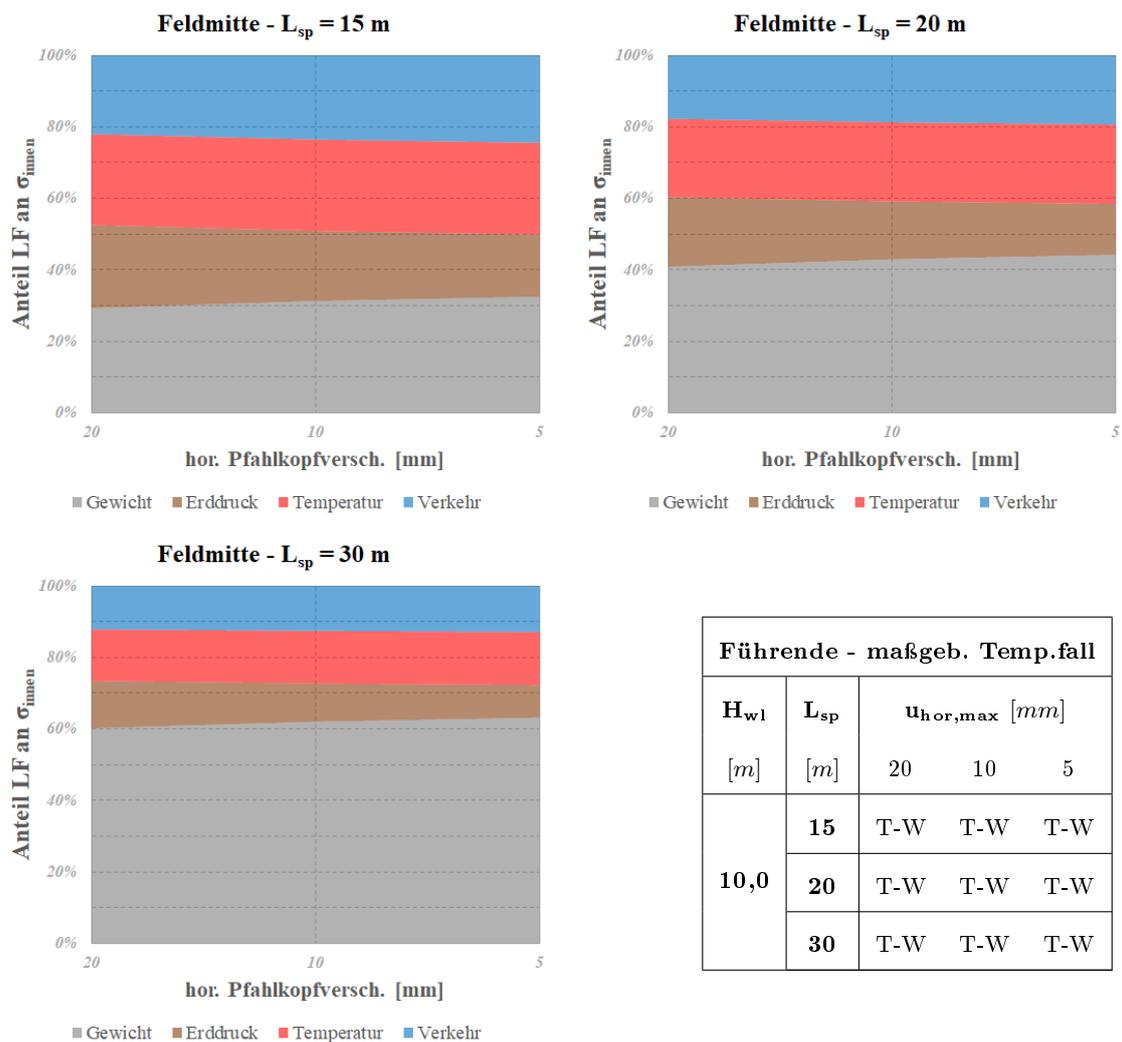


Abbildung B.6.: Betragmäßiger Anteil der Einzellastfälle an σ_{innen} in Feldmitte bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

C. Anhang - Ergebnisse der Einzellastfälle für Grundsystem 1

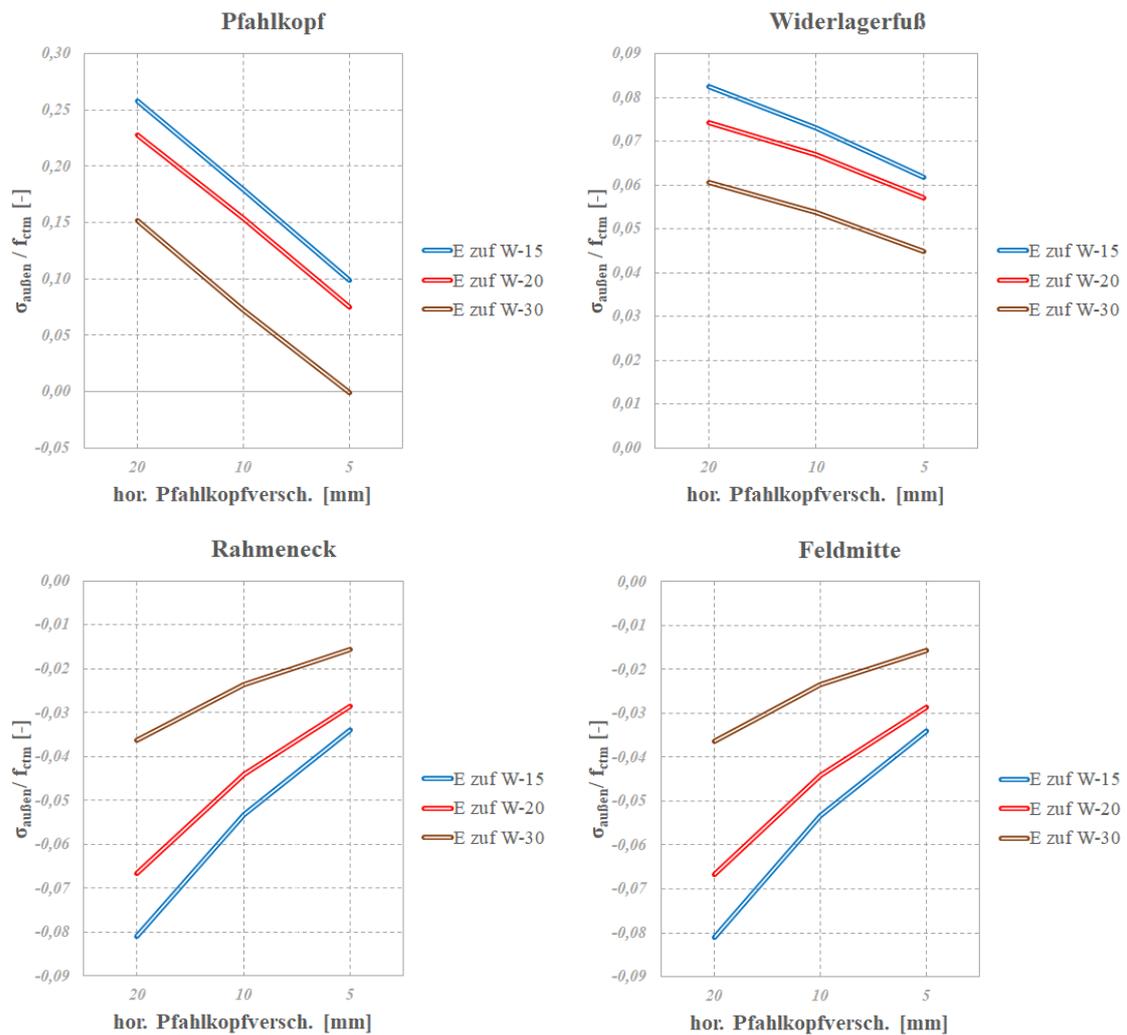


Abbildung C.1.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m für Grundsystem 1

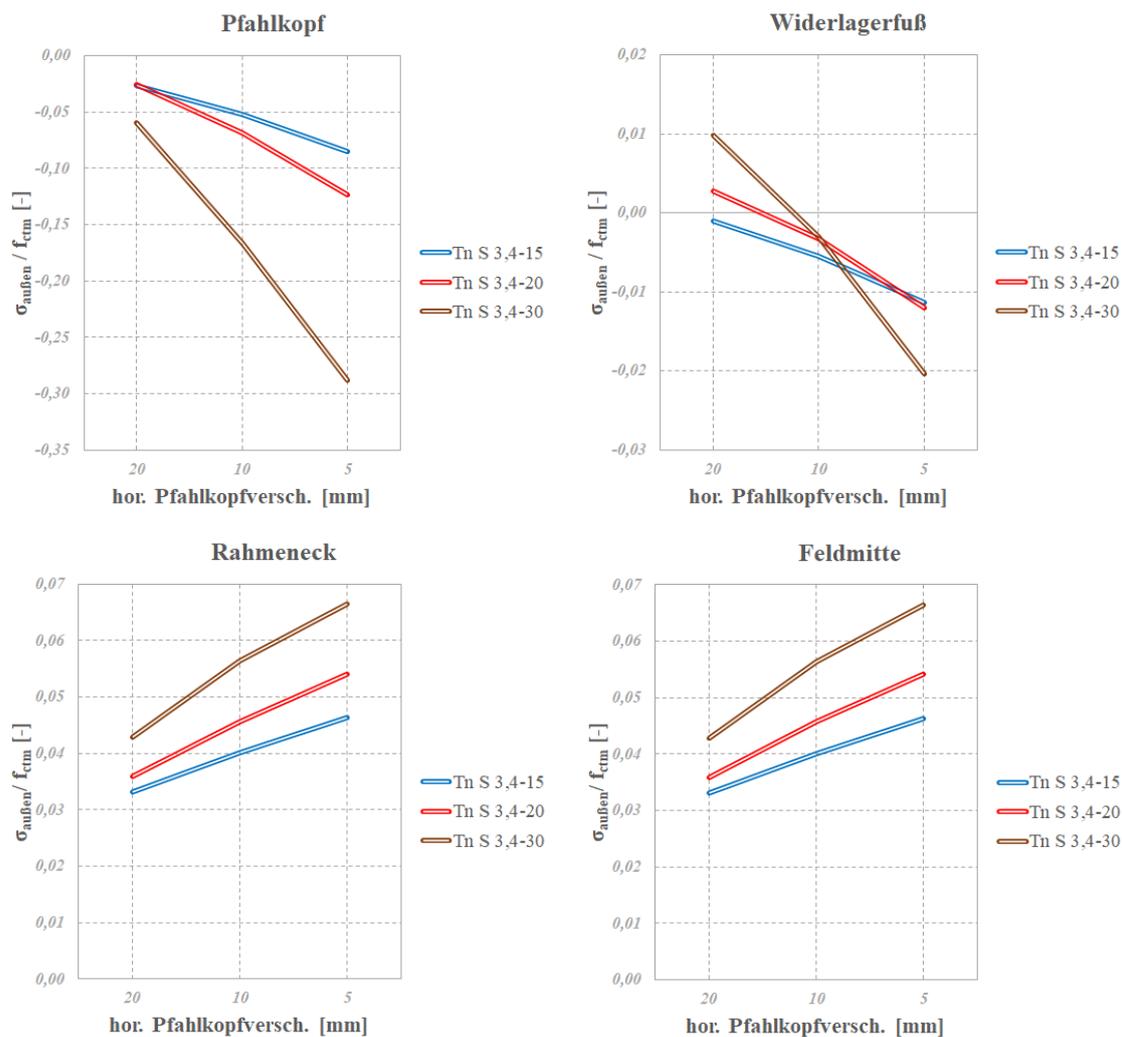


Abbildung C.2.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{ctm}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

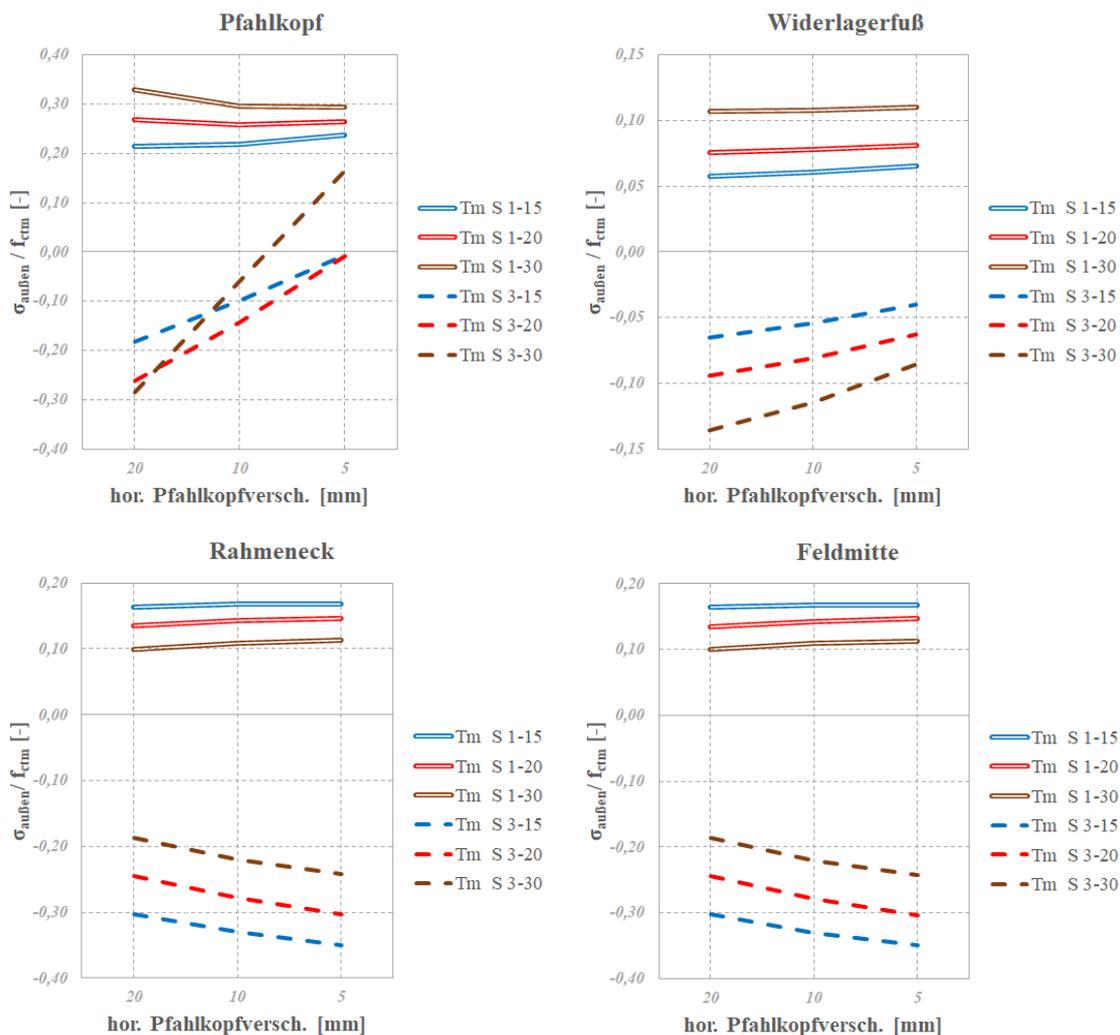


Abbildung C.3.: $\sigma_{\text{außen}}/f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

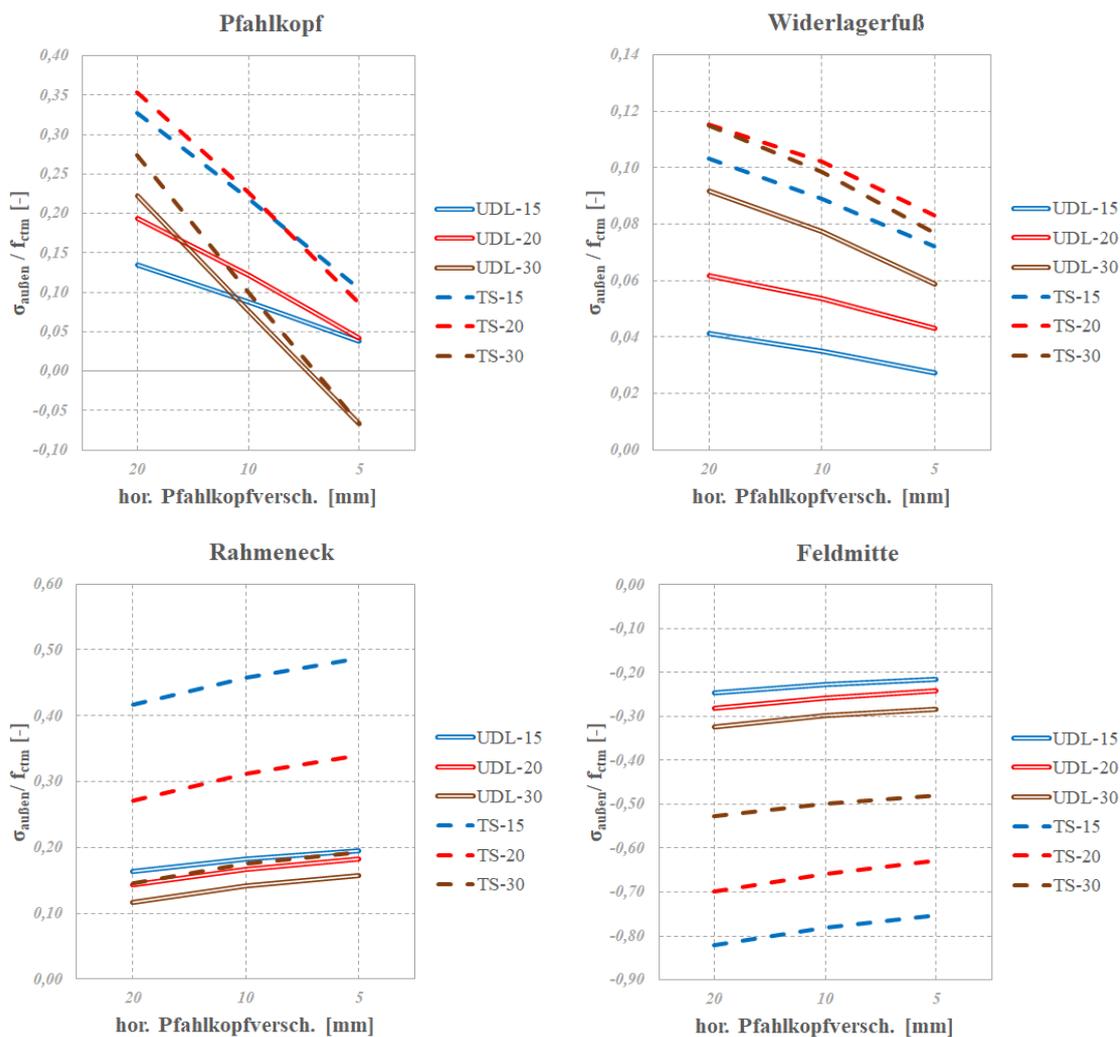


Abbildung C.4.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

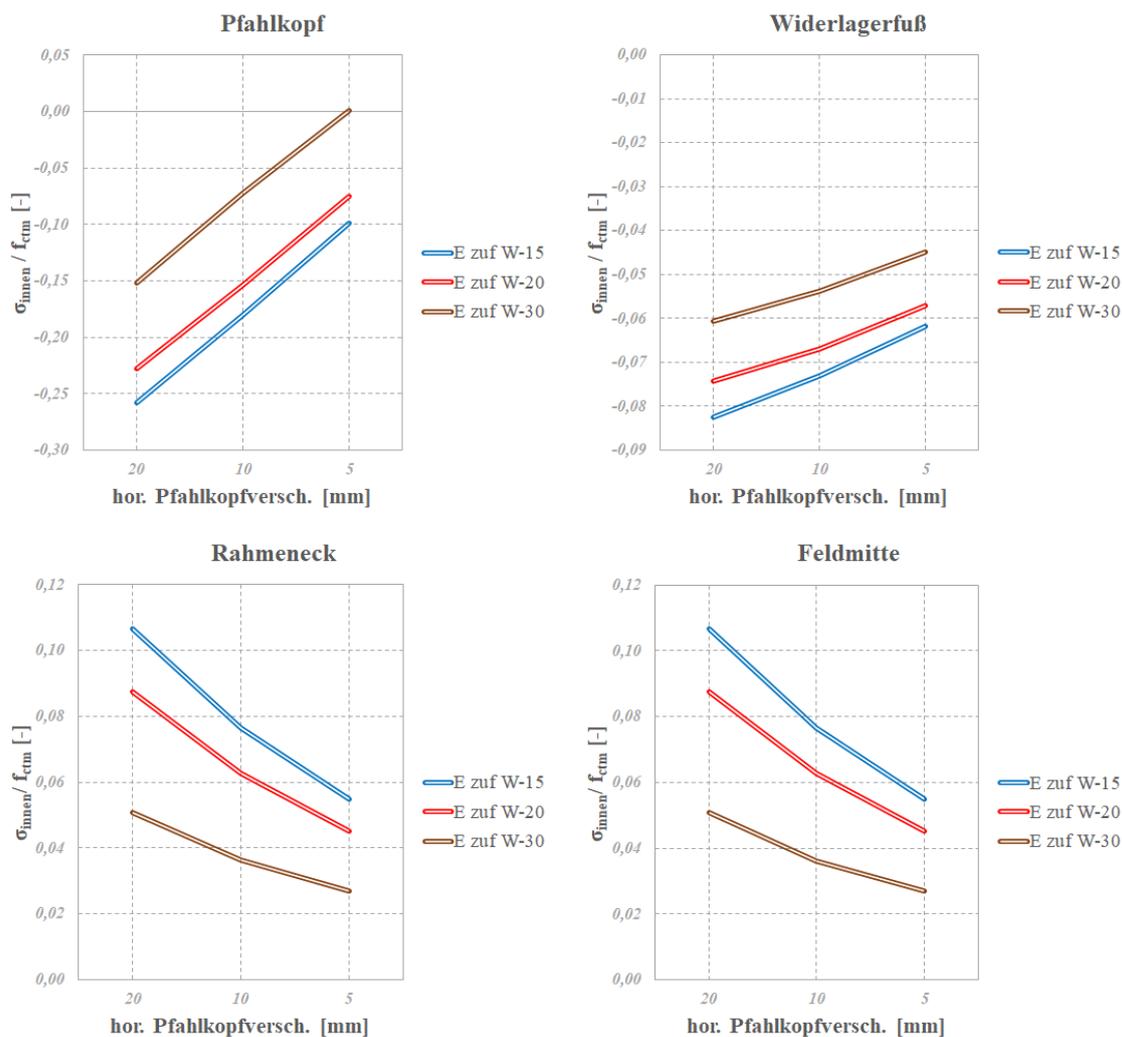


Abbildung C.5.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{\text{wI}}=5,0$ m für Grundsystem 1

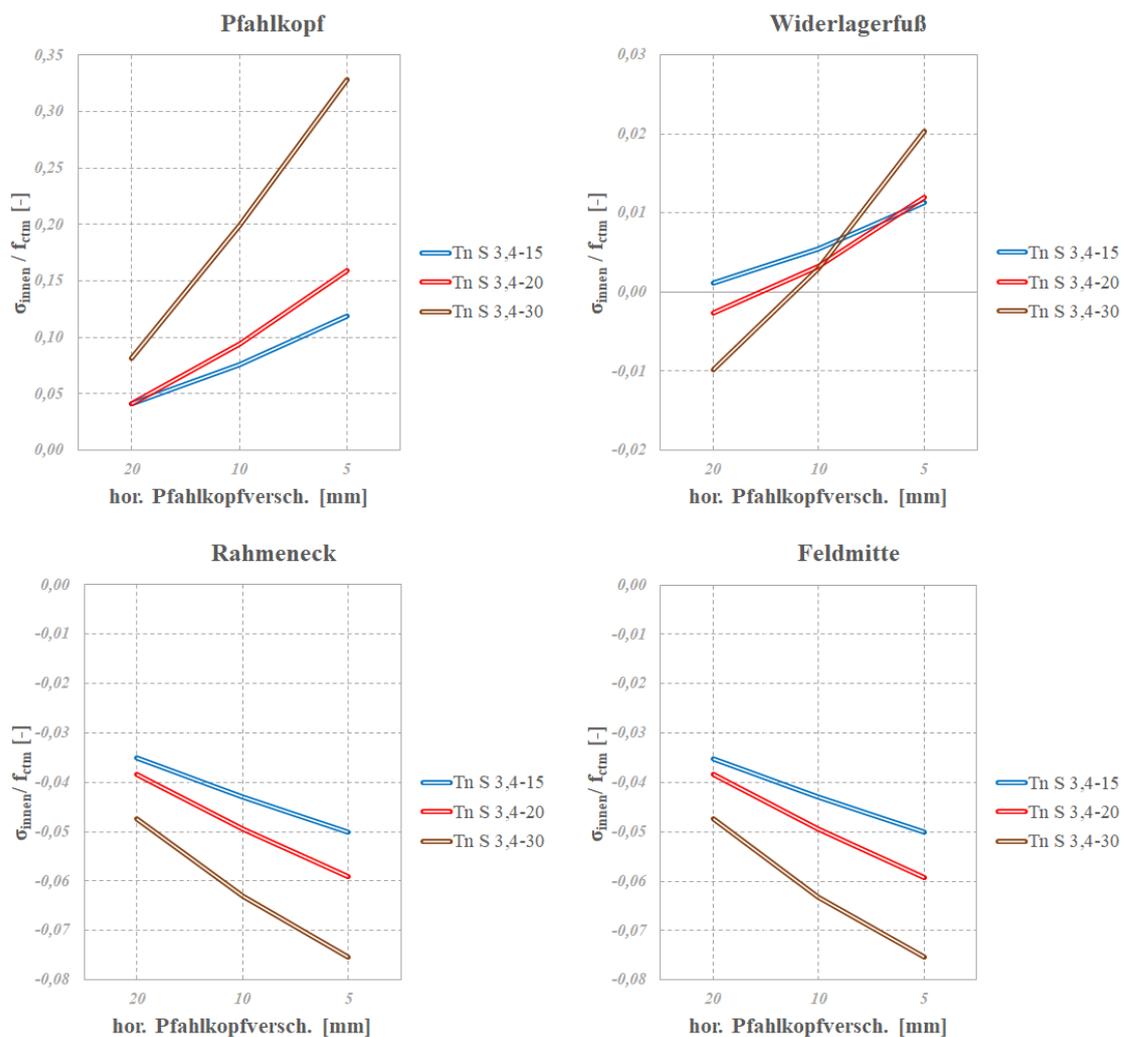


Abbildung C.6.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{w1}}=5,0$ m für Grundsystem 1

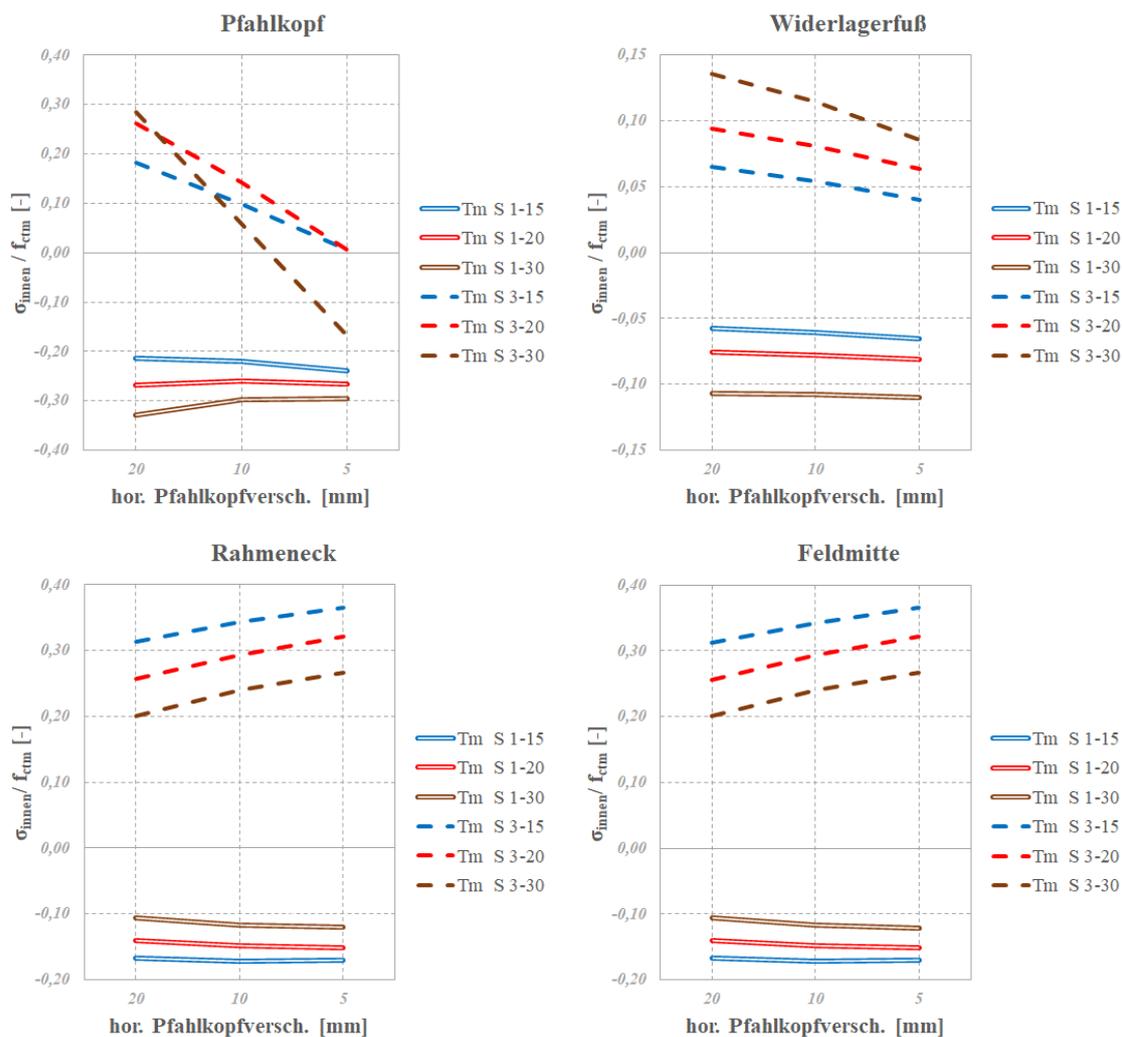


Abbildung C.7.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 1

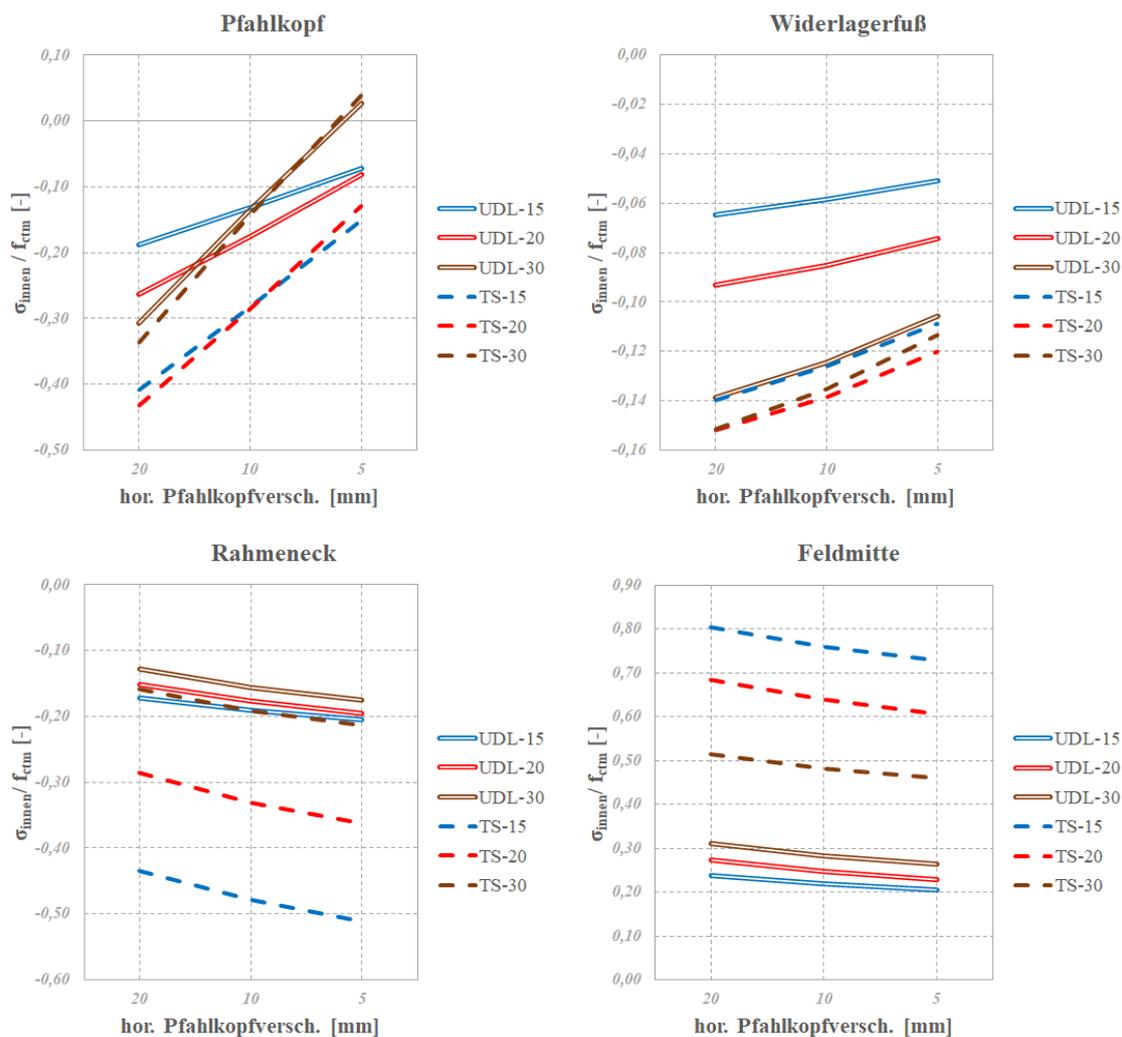


Abbildung C.8.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 1

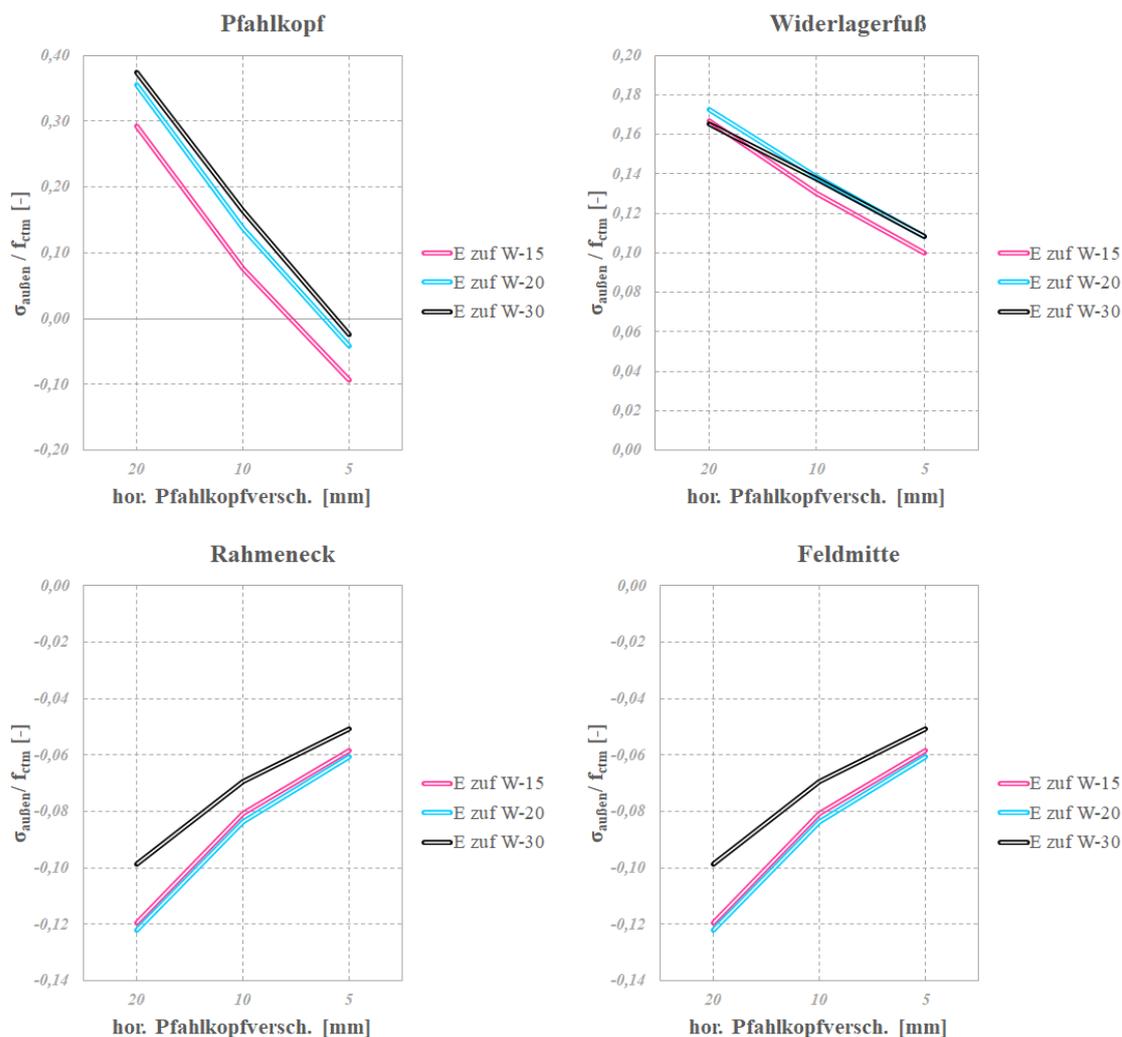


Abbildung C.9.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

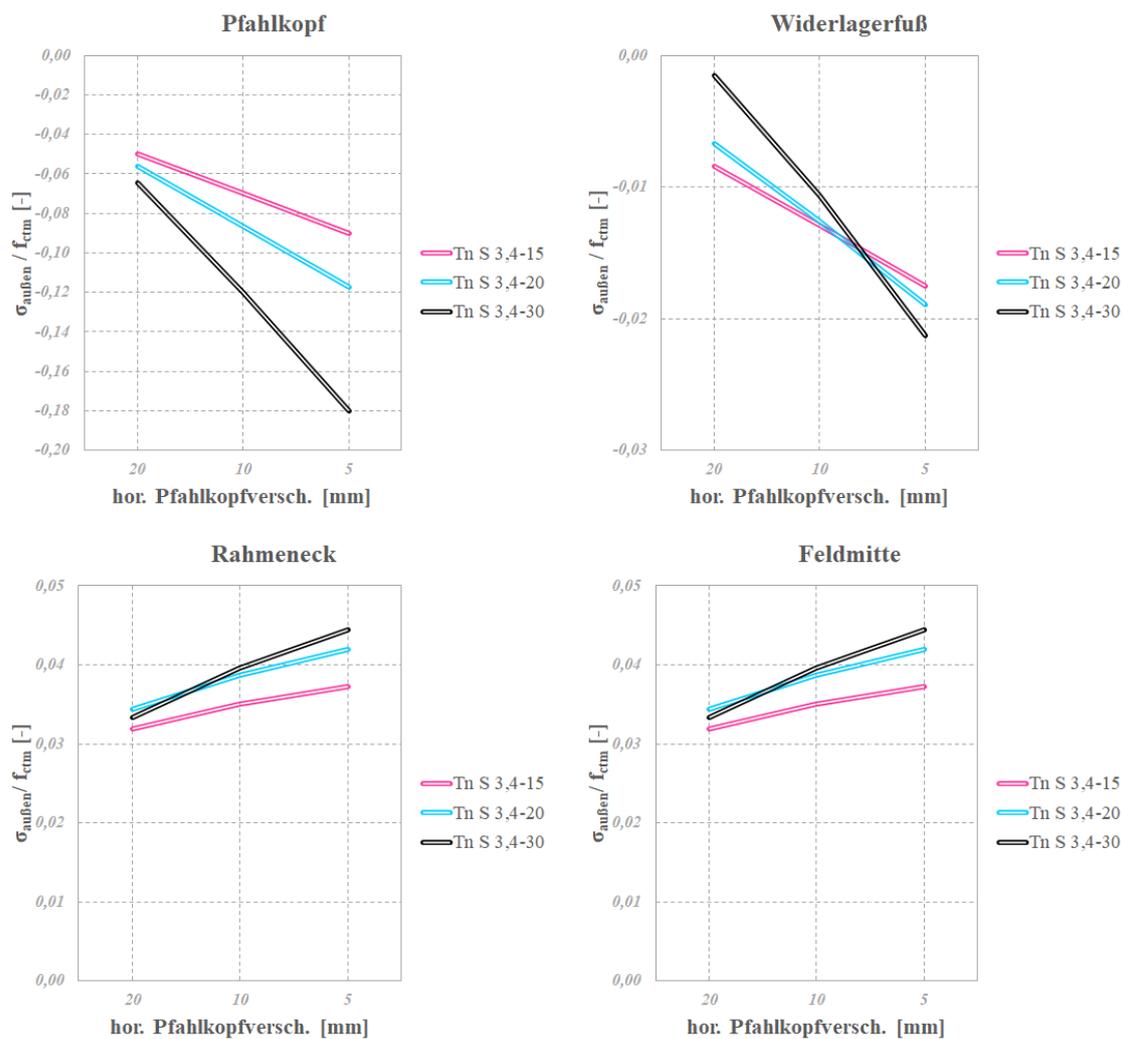


Abbildung C.10.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsistem 1

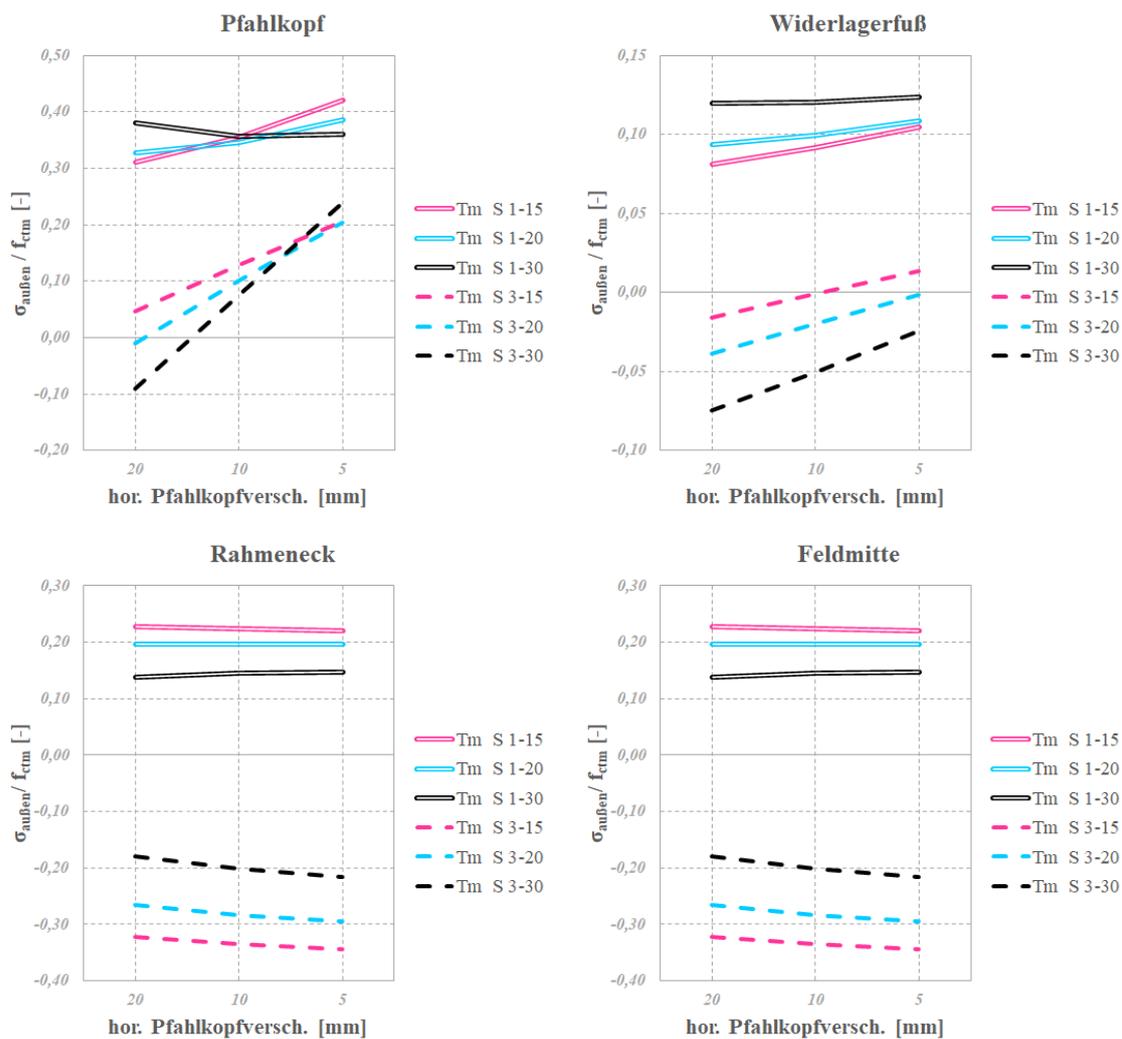


Abbildung C.11.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

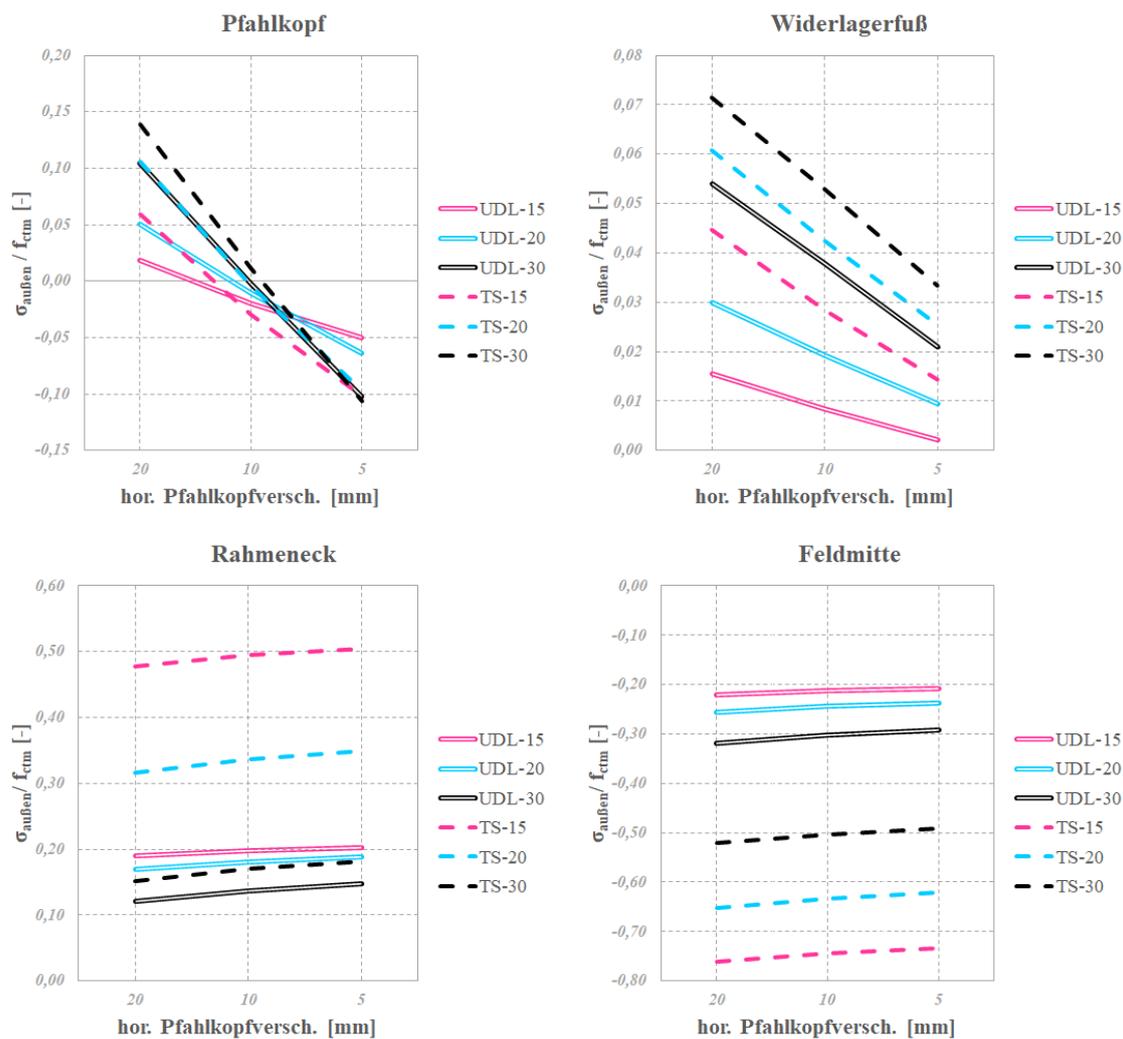


Abbildung C.12.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

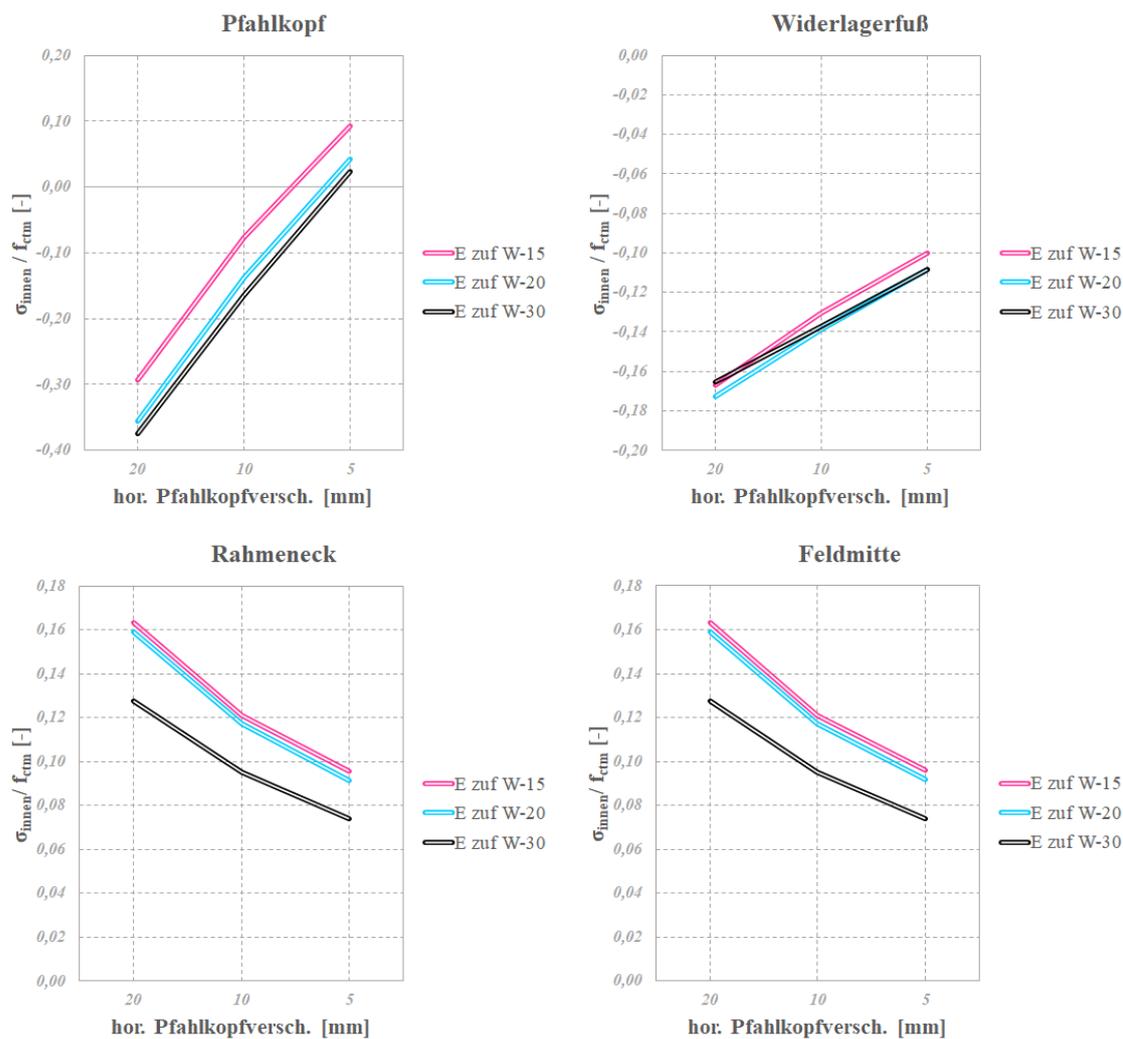


Abbildung C.13.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 1

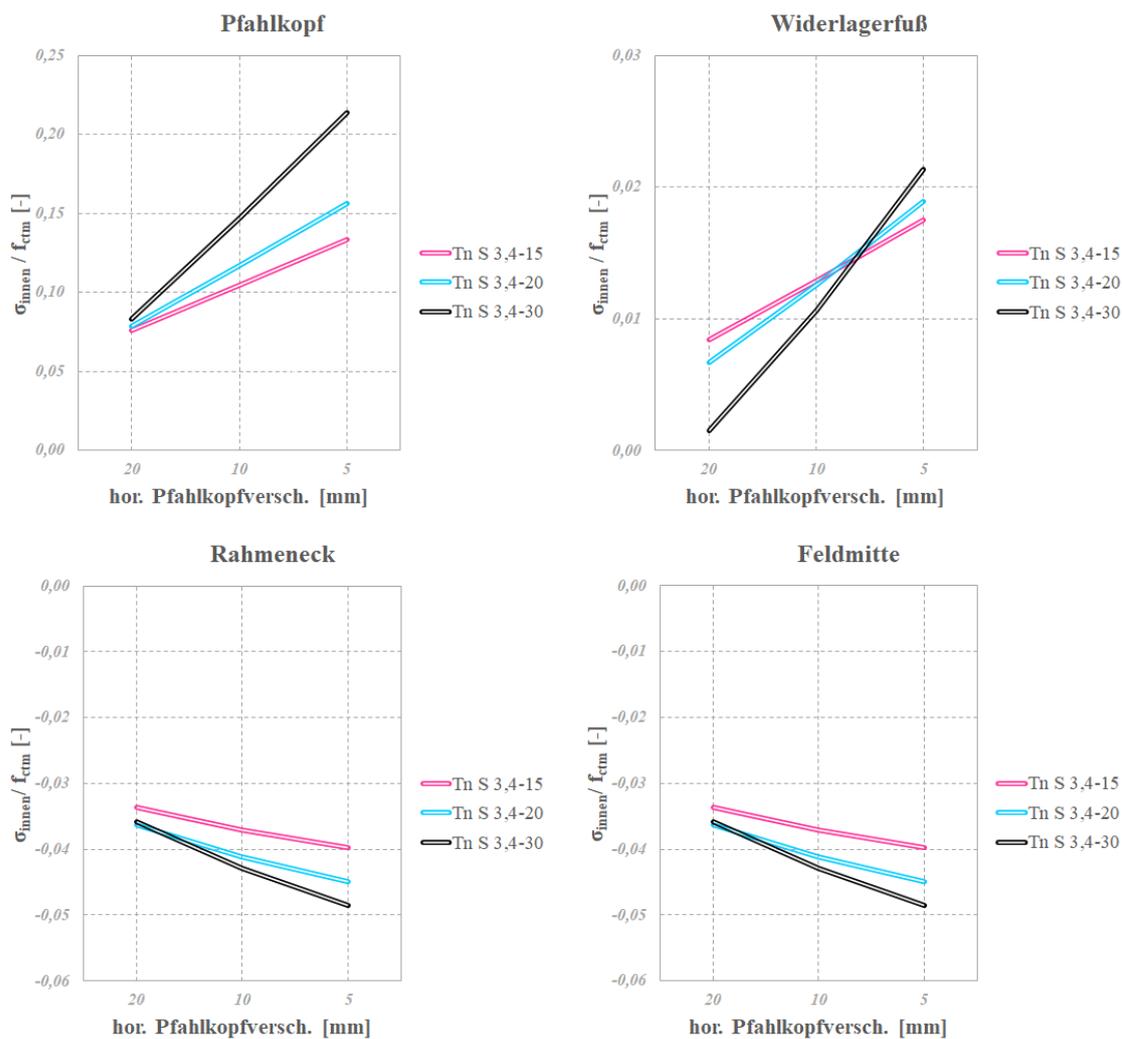


Abbildung C.14.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

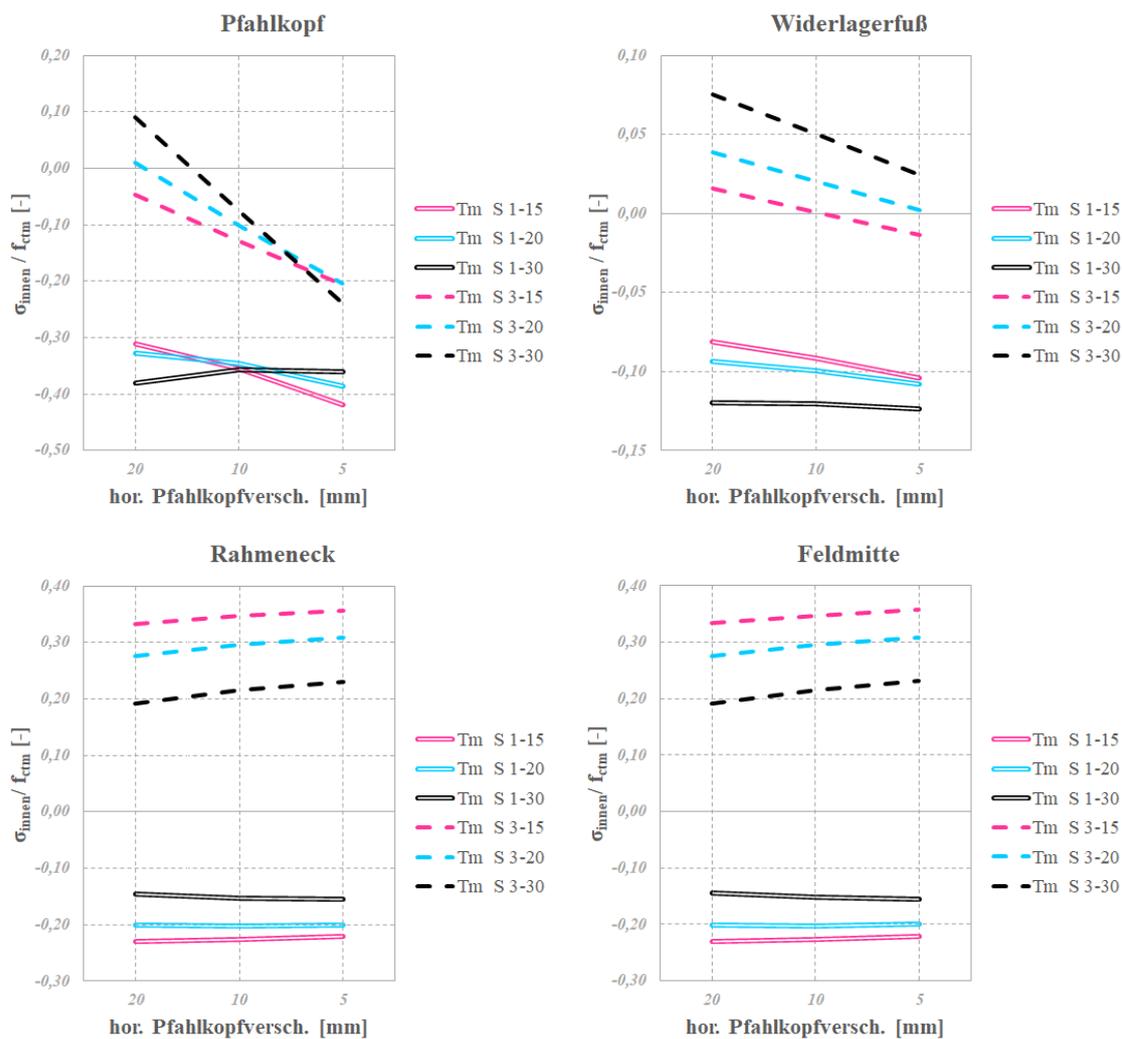


Abbildung C.15.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

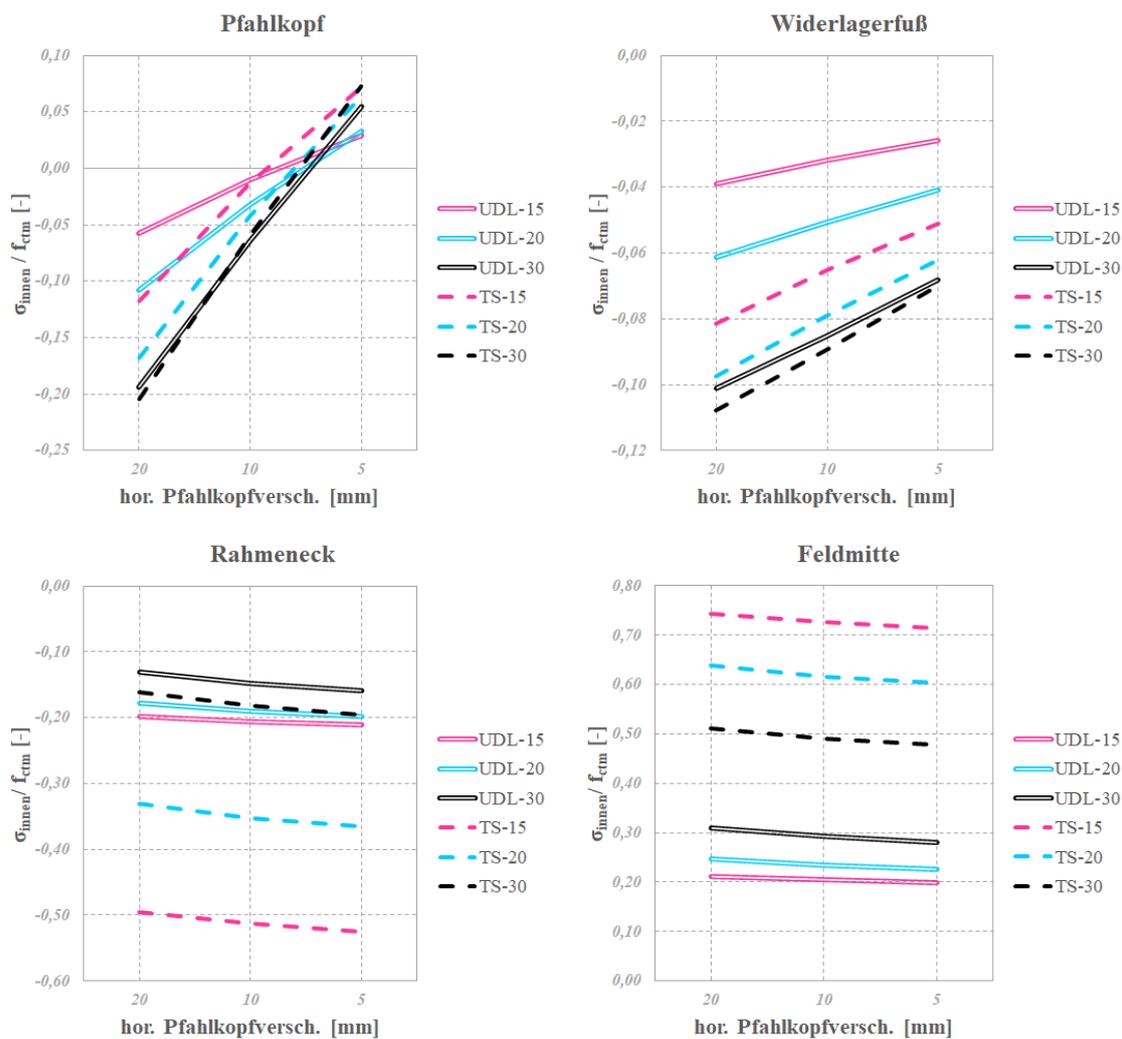


Abbildung C.16.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 1

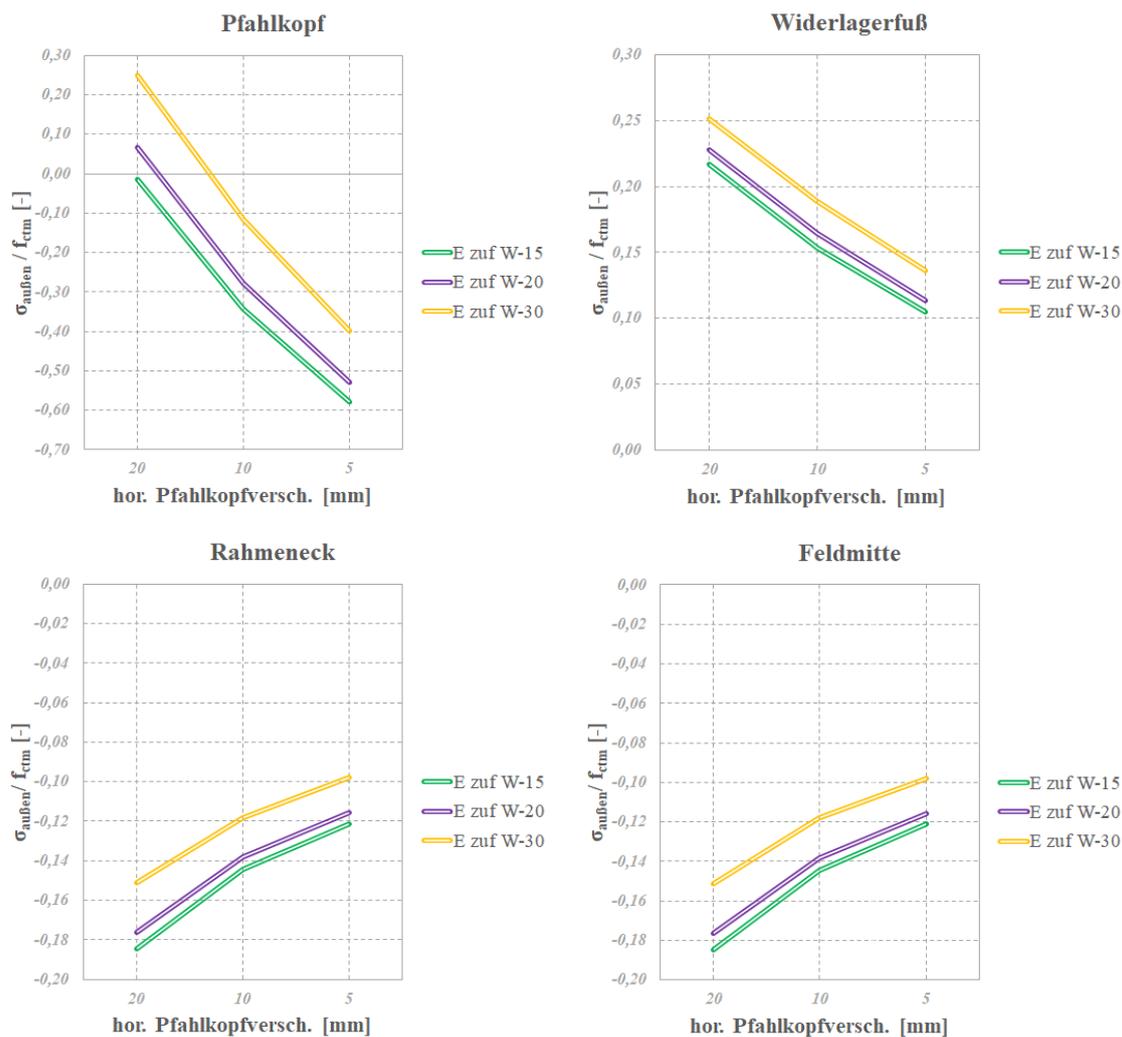


Abbildung C.17.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck* zuf. *Winter* bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1

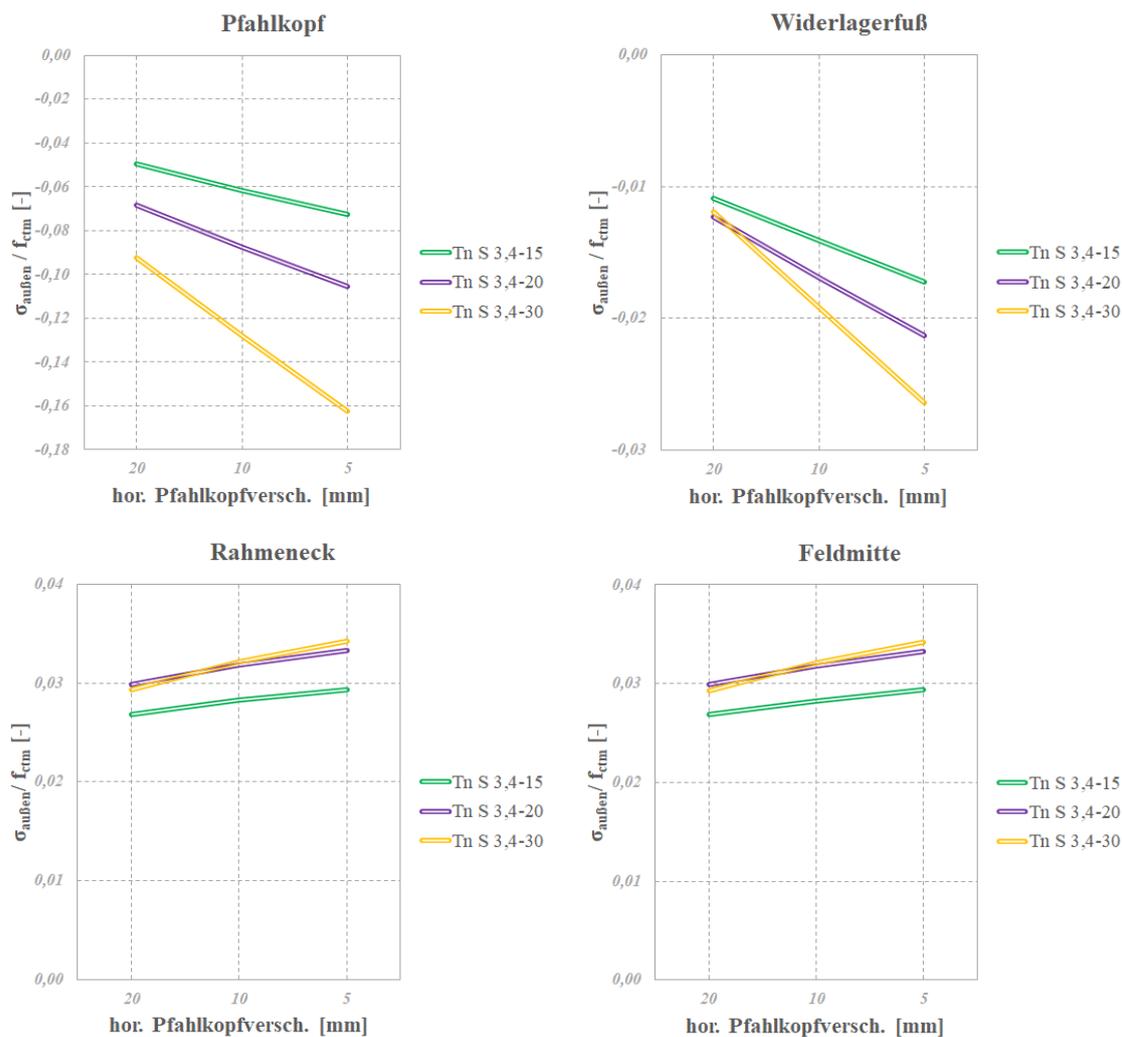


Abbildung C.18.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

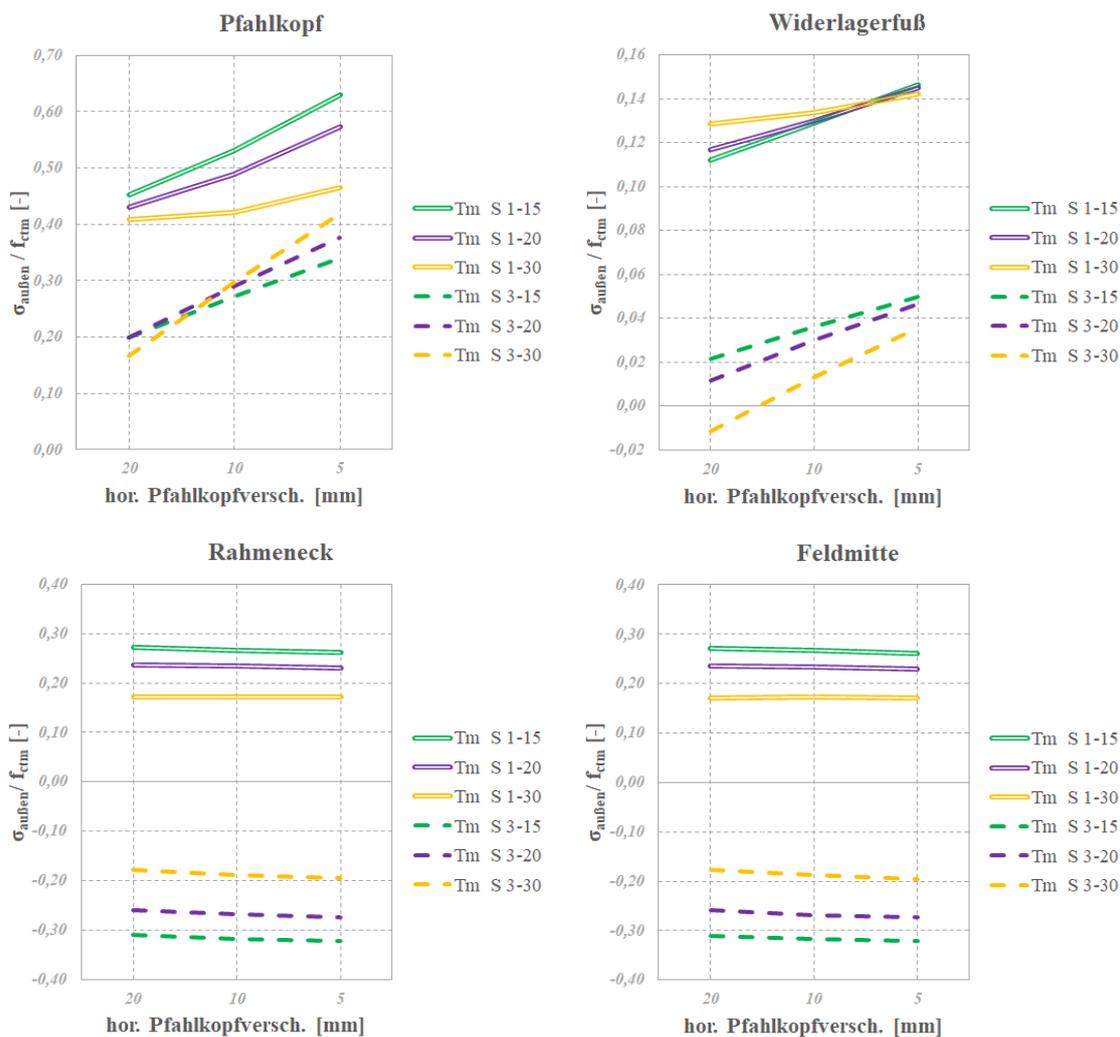


Abbildung C.19.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

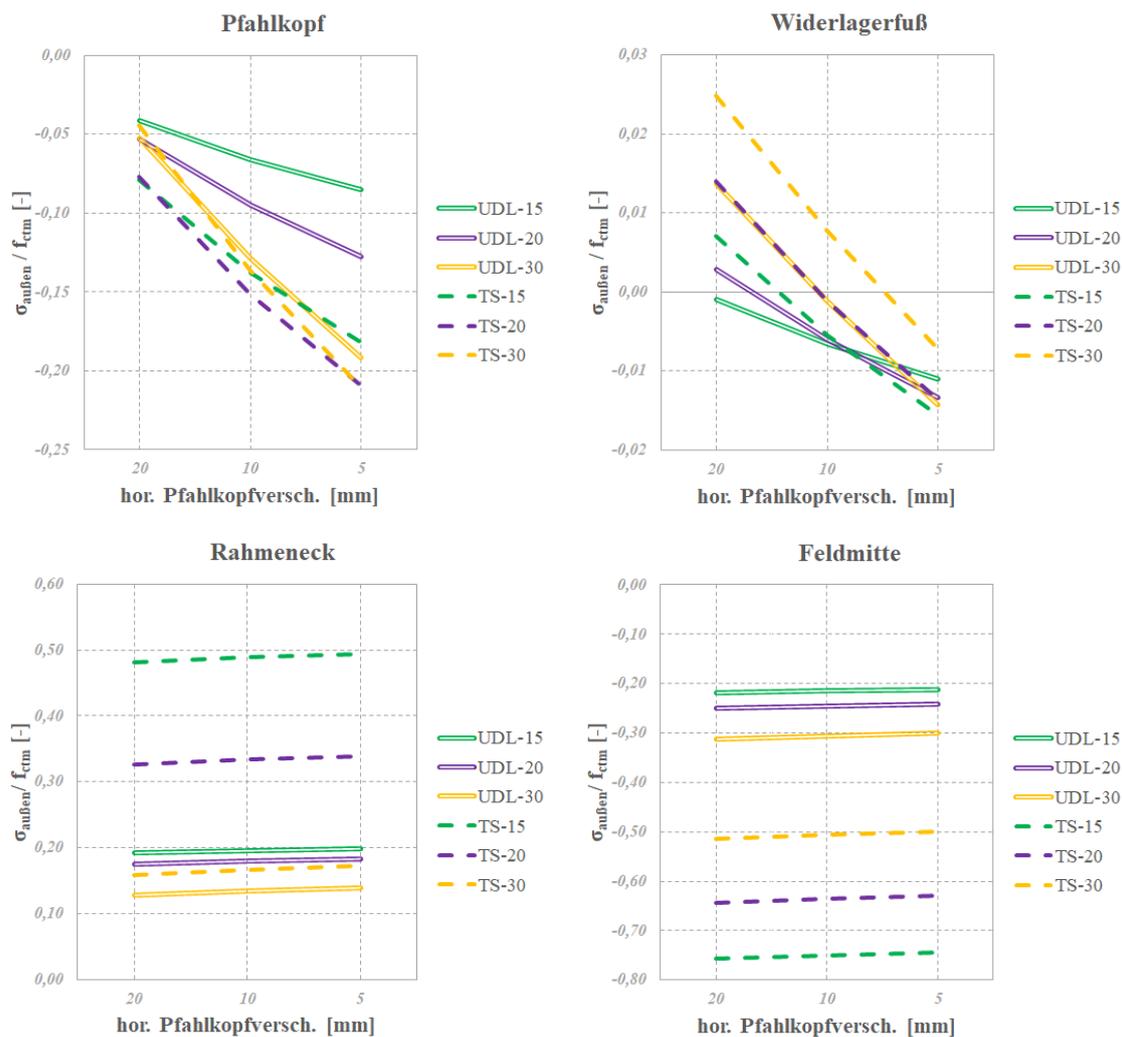


Abbildung C.20.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 1

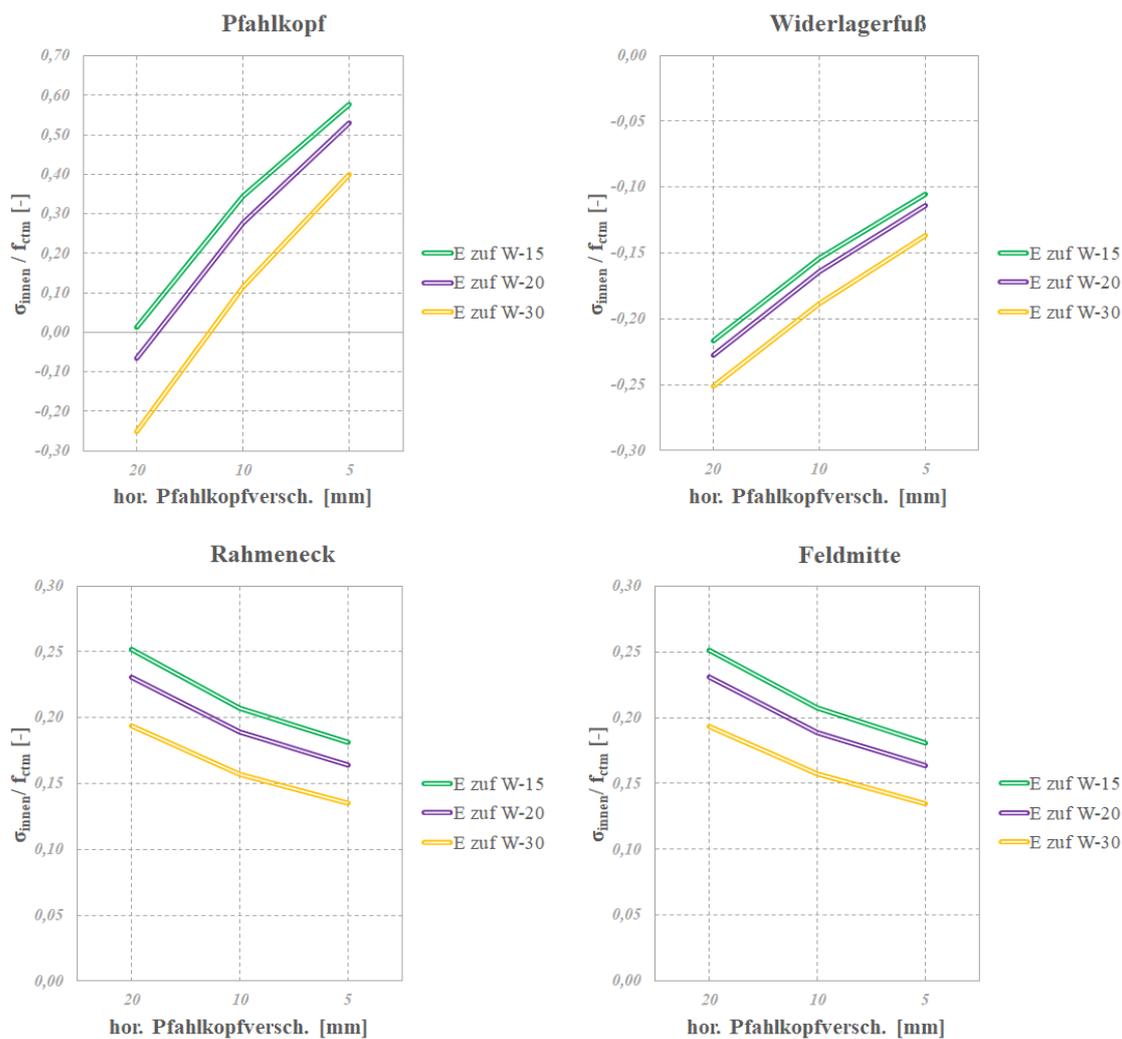


Abbildung C.21.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

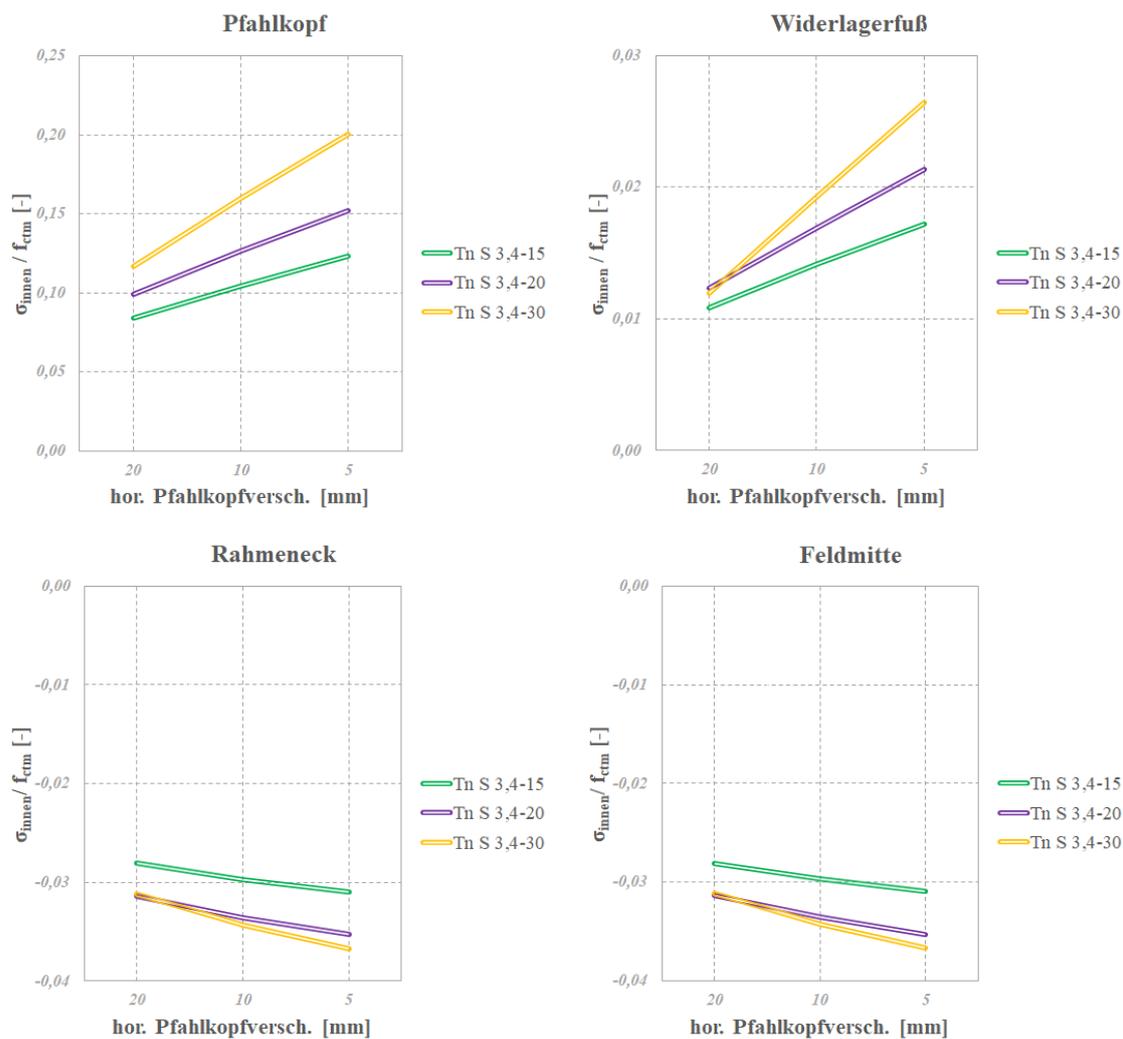


Abbildung C.22.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

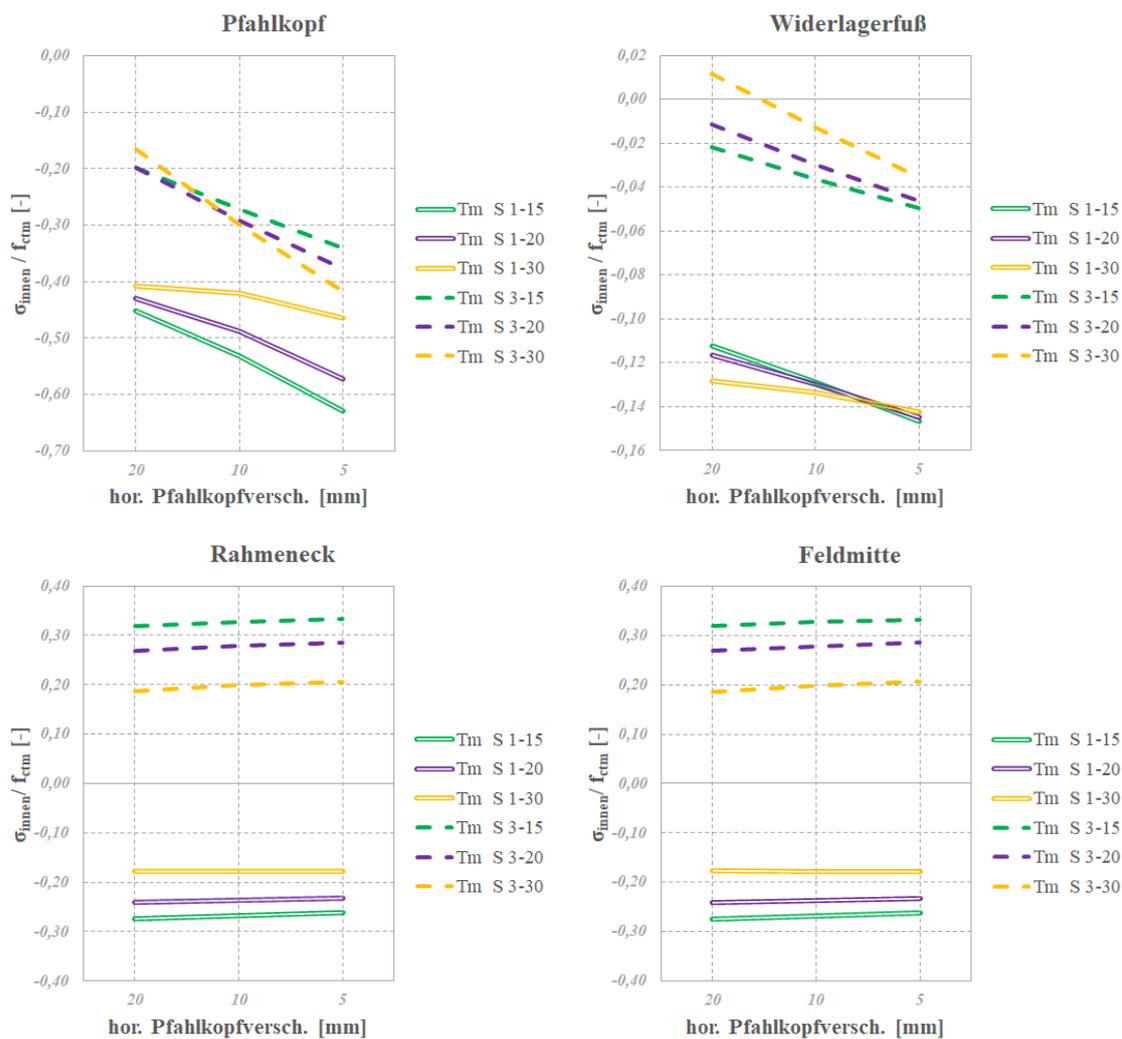


Abbildung C.23.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

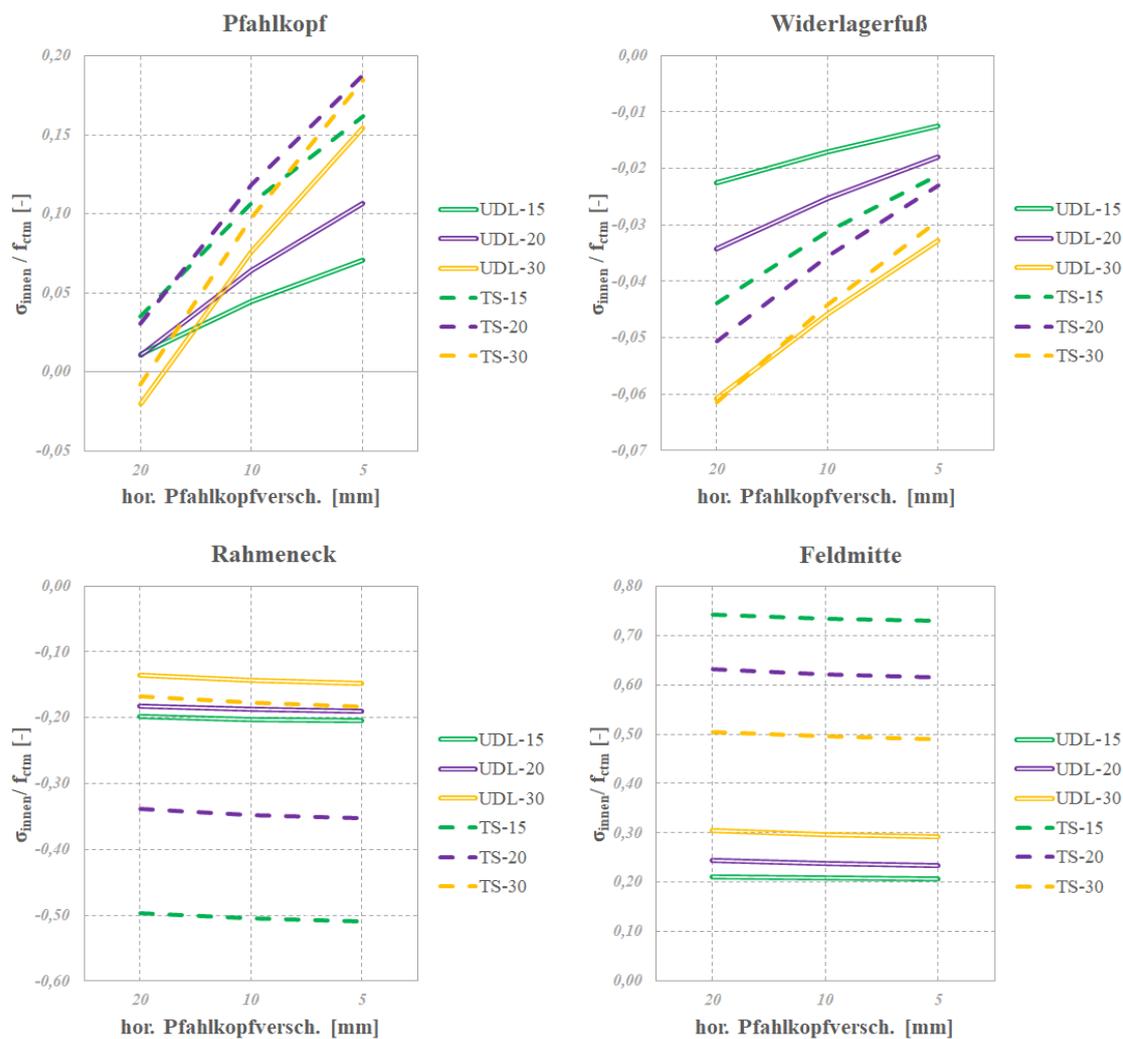


Abbildung C.24.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 1

D. Anhang - Ergebnisse der Einzellastfälle für Grundsystem 2

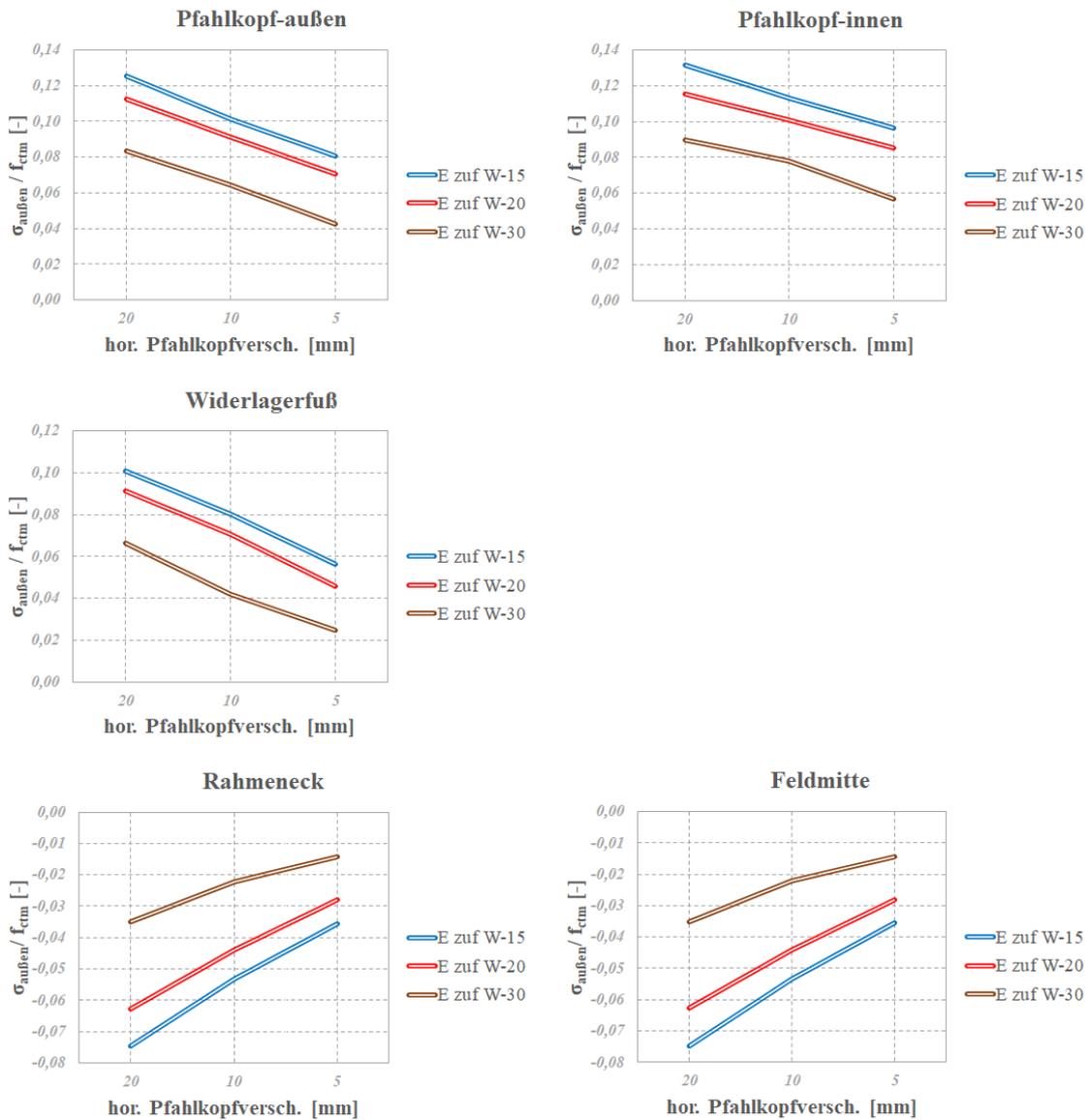


Abbildung D.1.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2

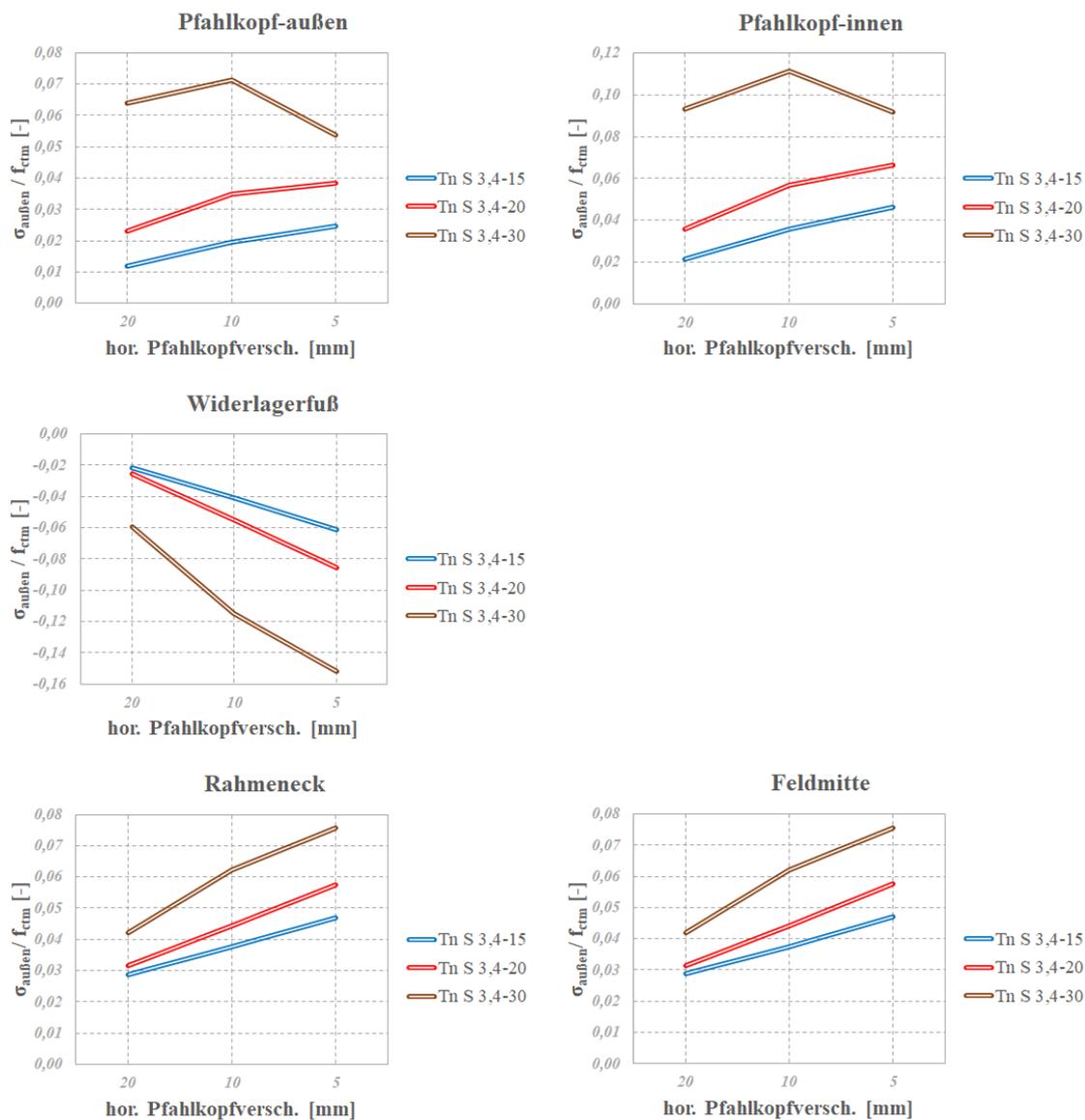


Abbildung D.2.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

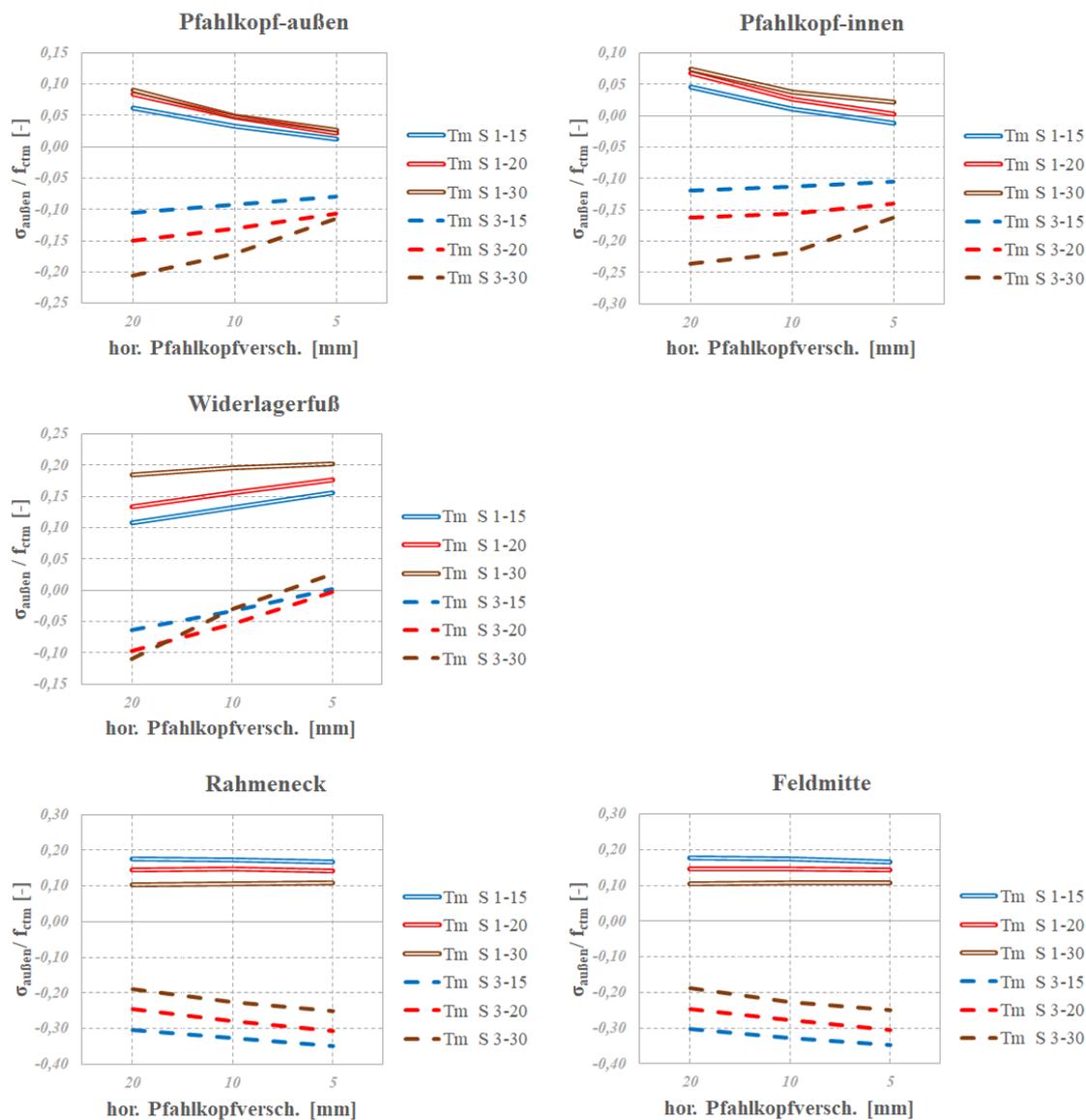


Abbildung D.3.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

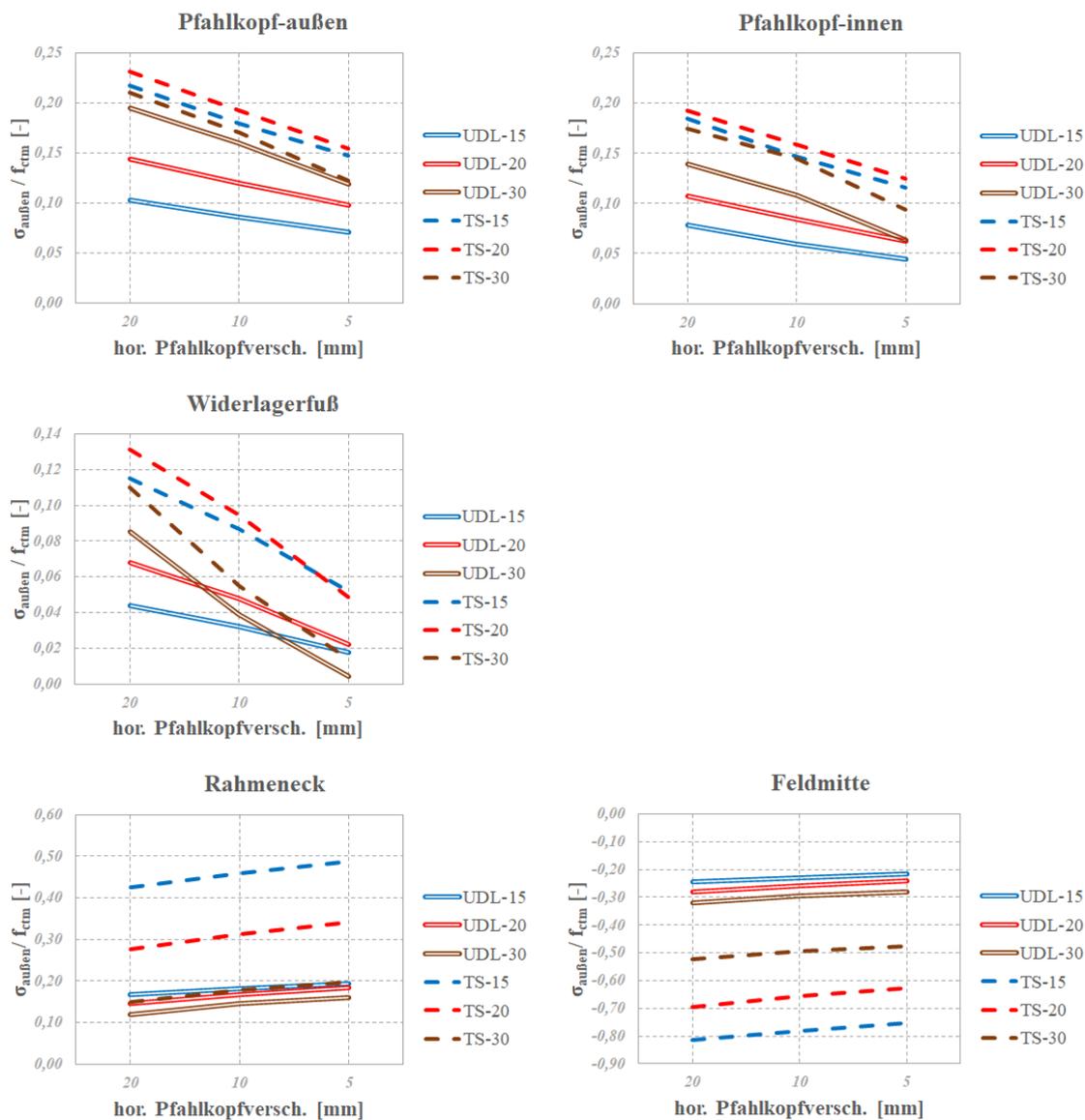


Abbildung D.4.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

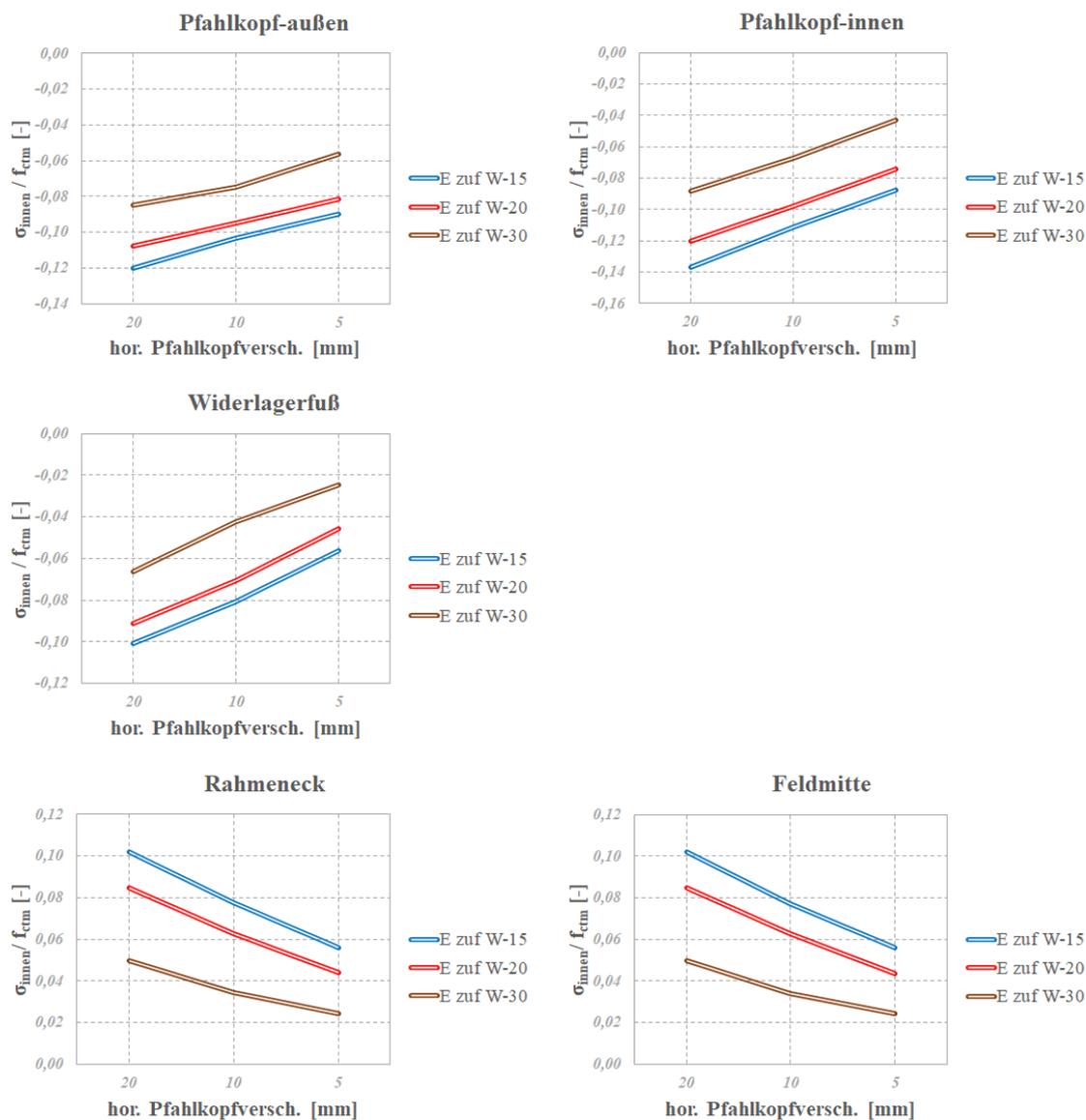


Abbildung D.5.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2

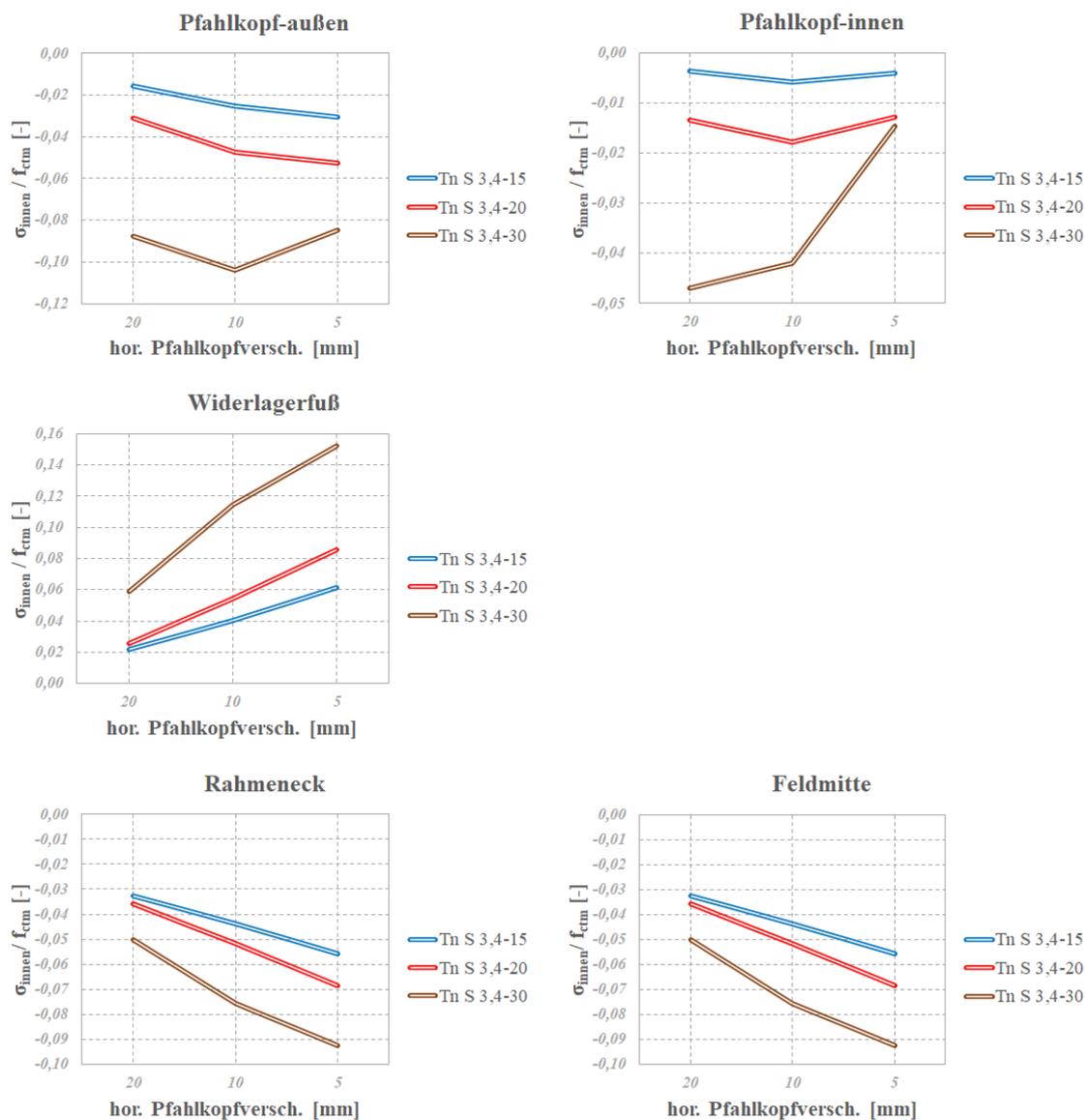


Abbildung D.6.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2

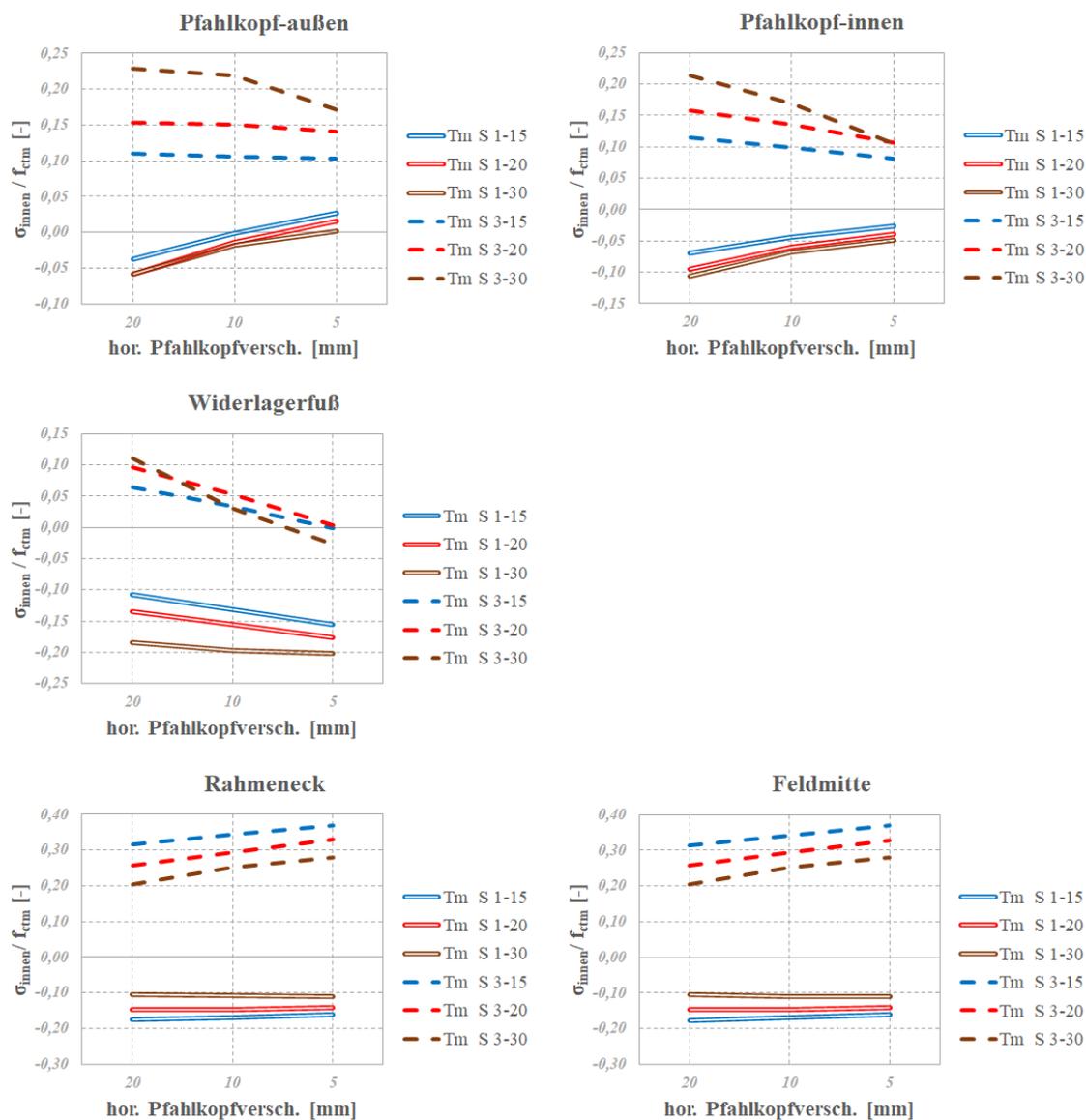


Abbildung D.7.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=5,0$ m für Grundsystem 2

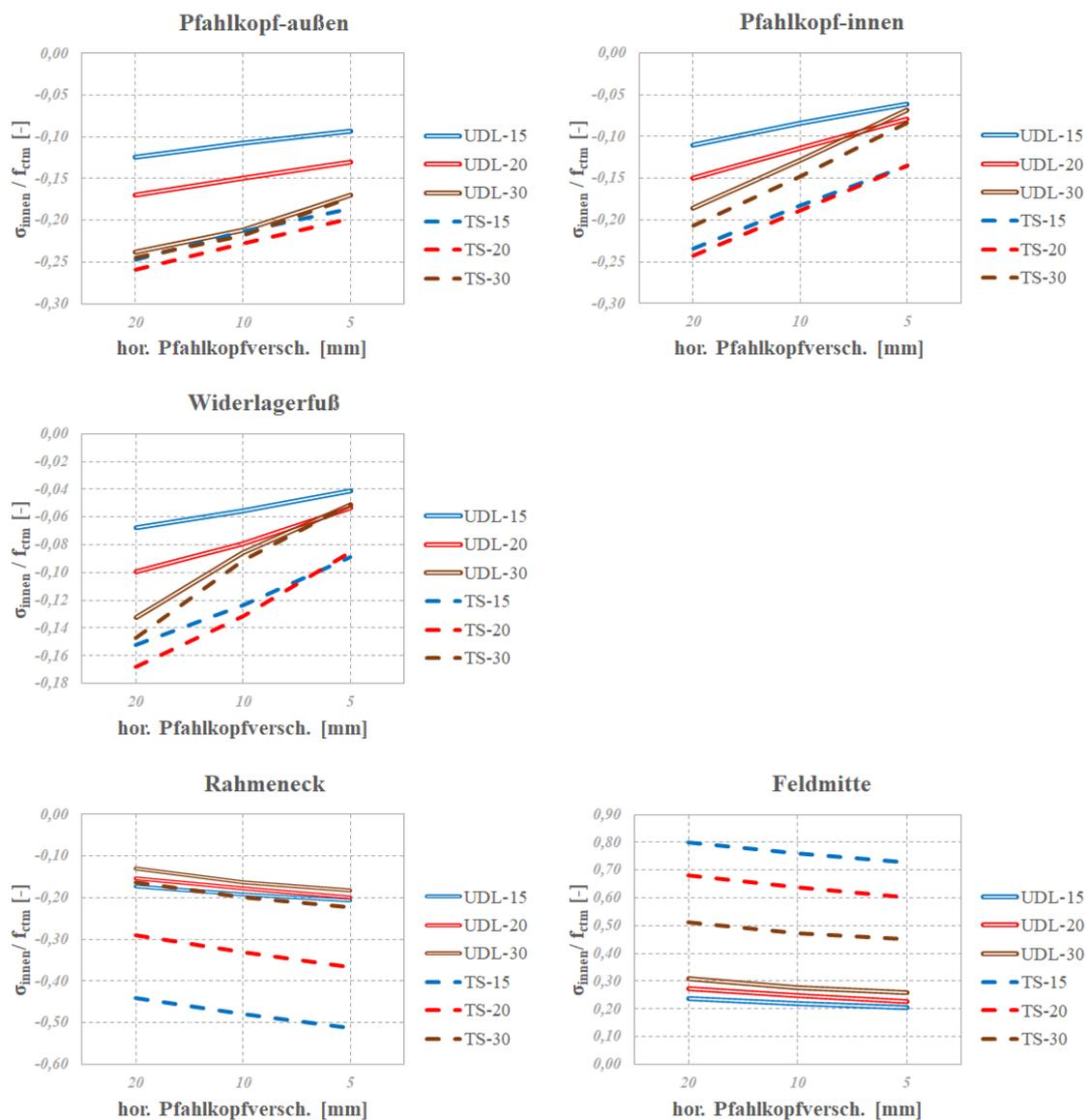


Abbildung D.8.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=5,0$ m für Grundsystem 2

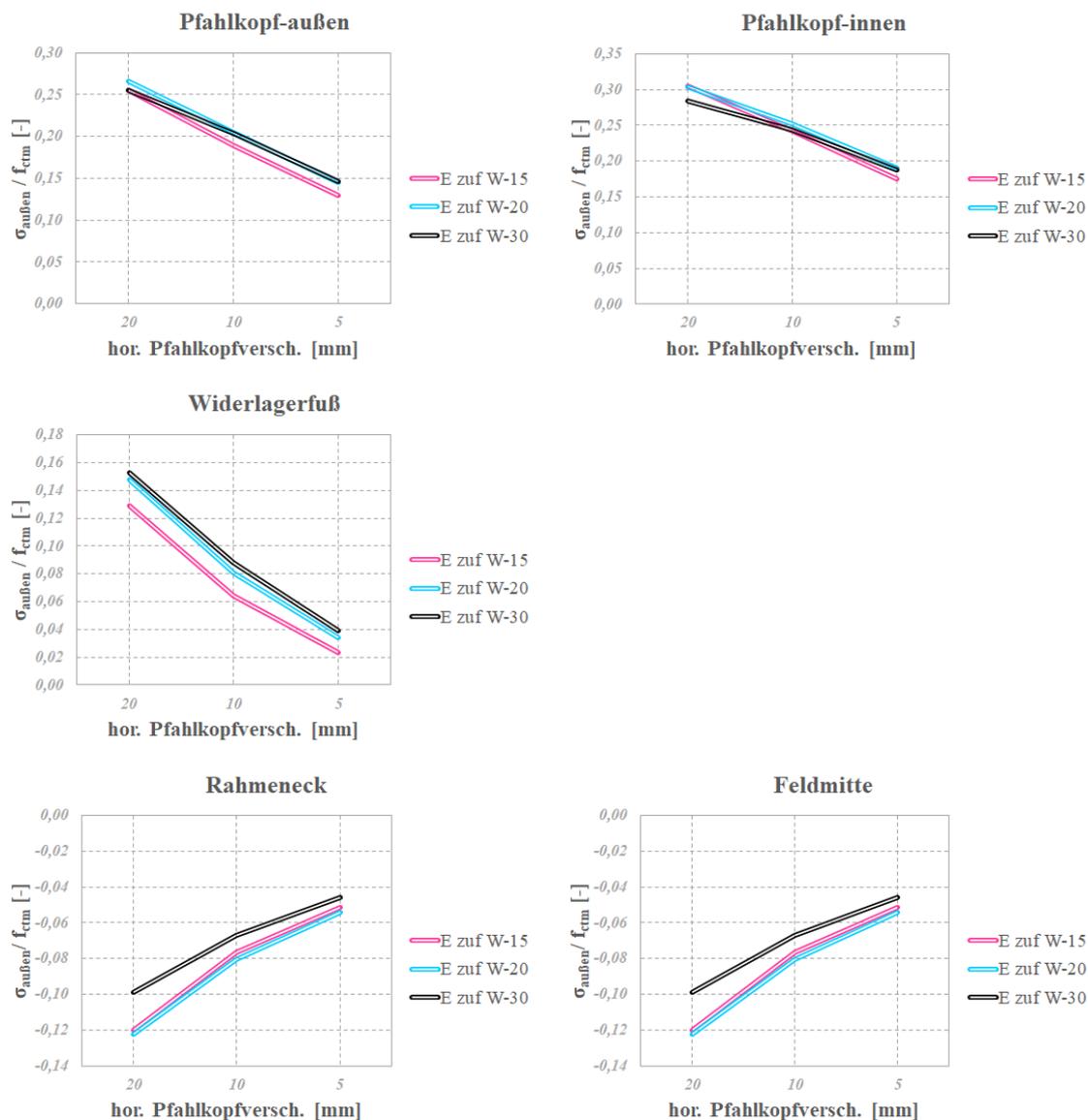


Abbildung D.9.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck* zuf. *Winter* bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2

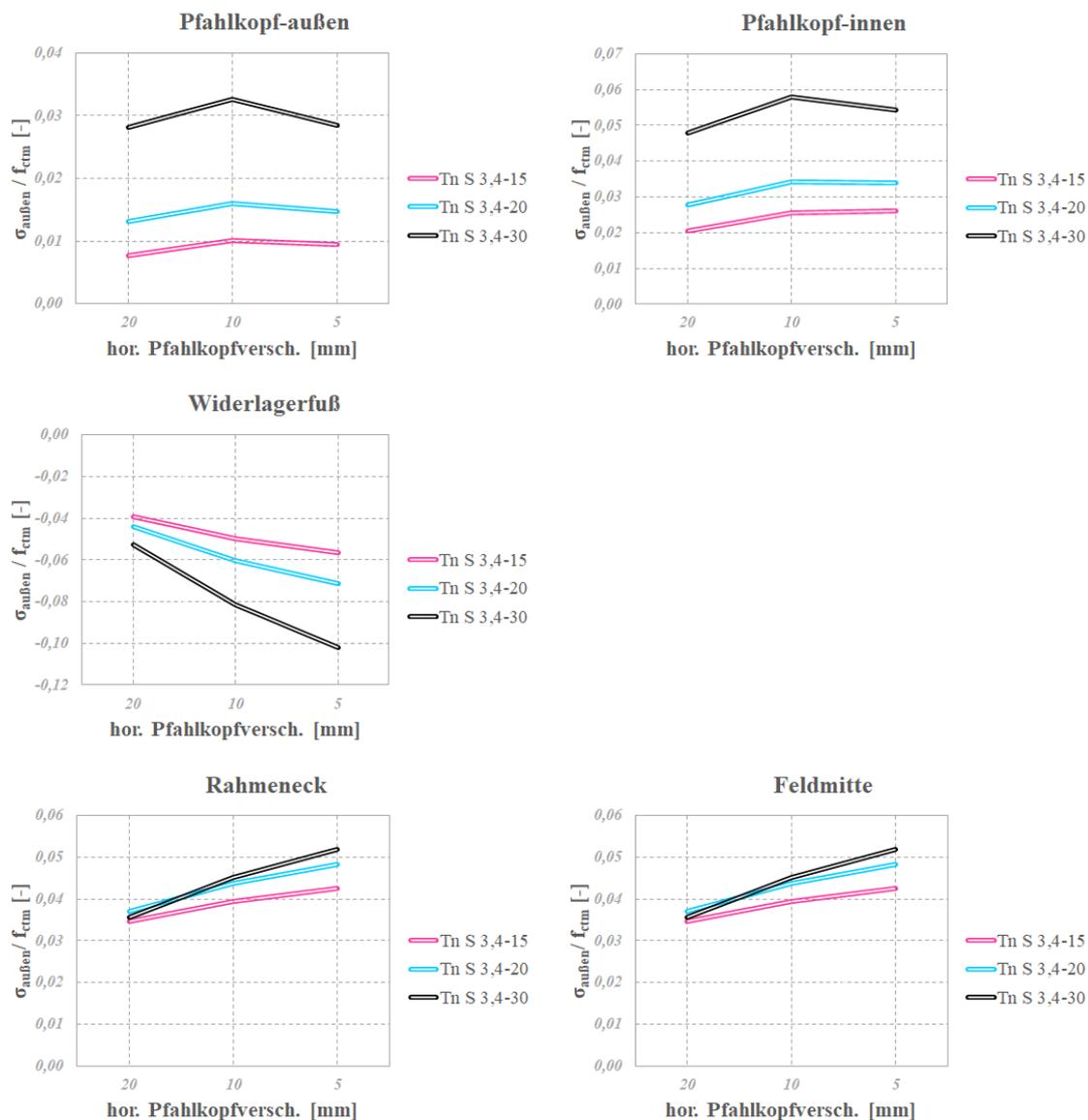


Abbildung D.10.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{ctm}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

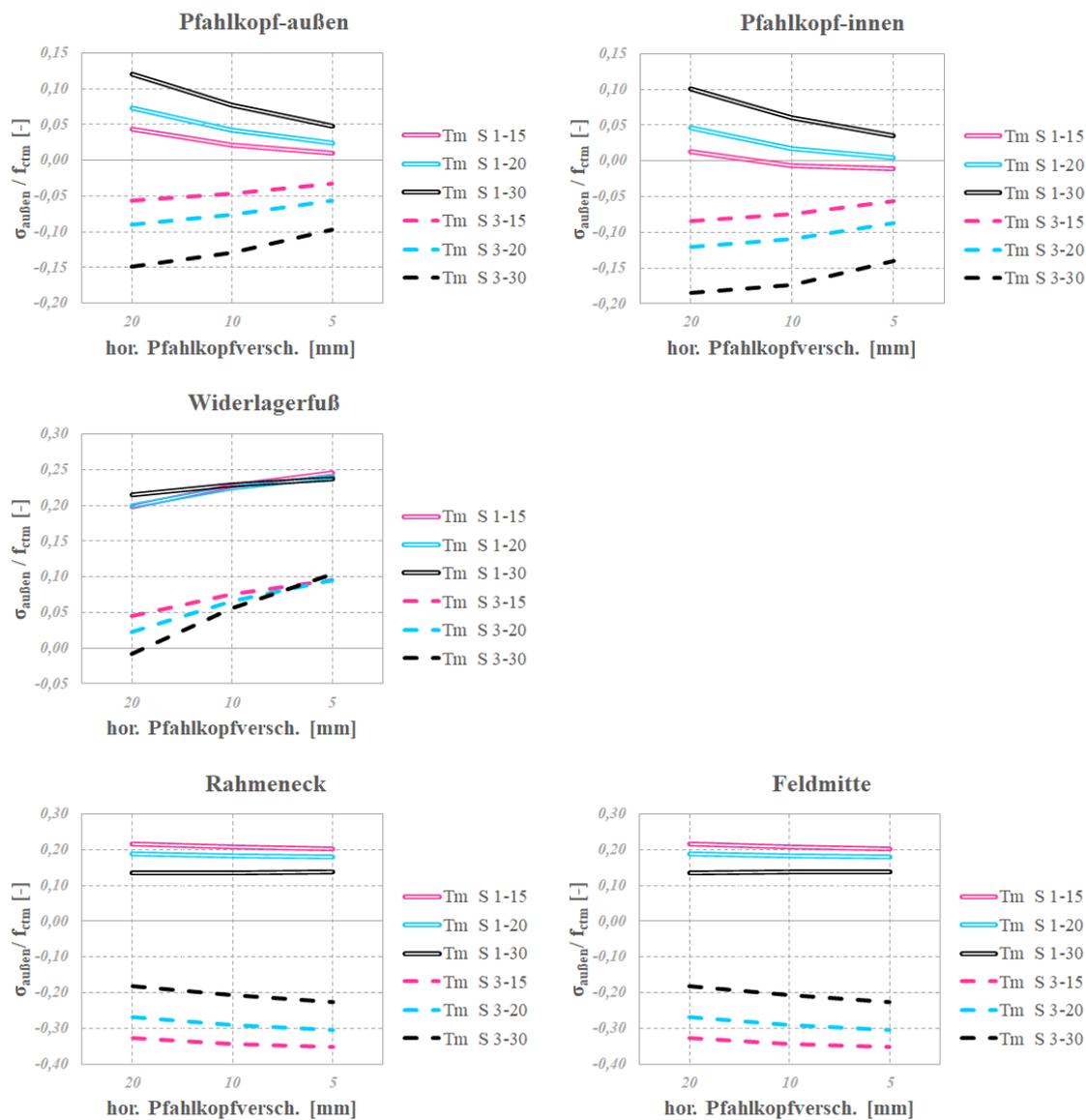


Abbildung D.11.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2

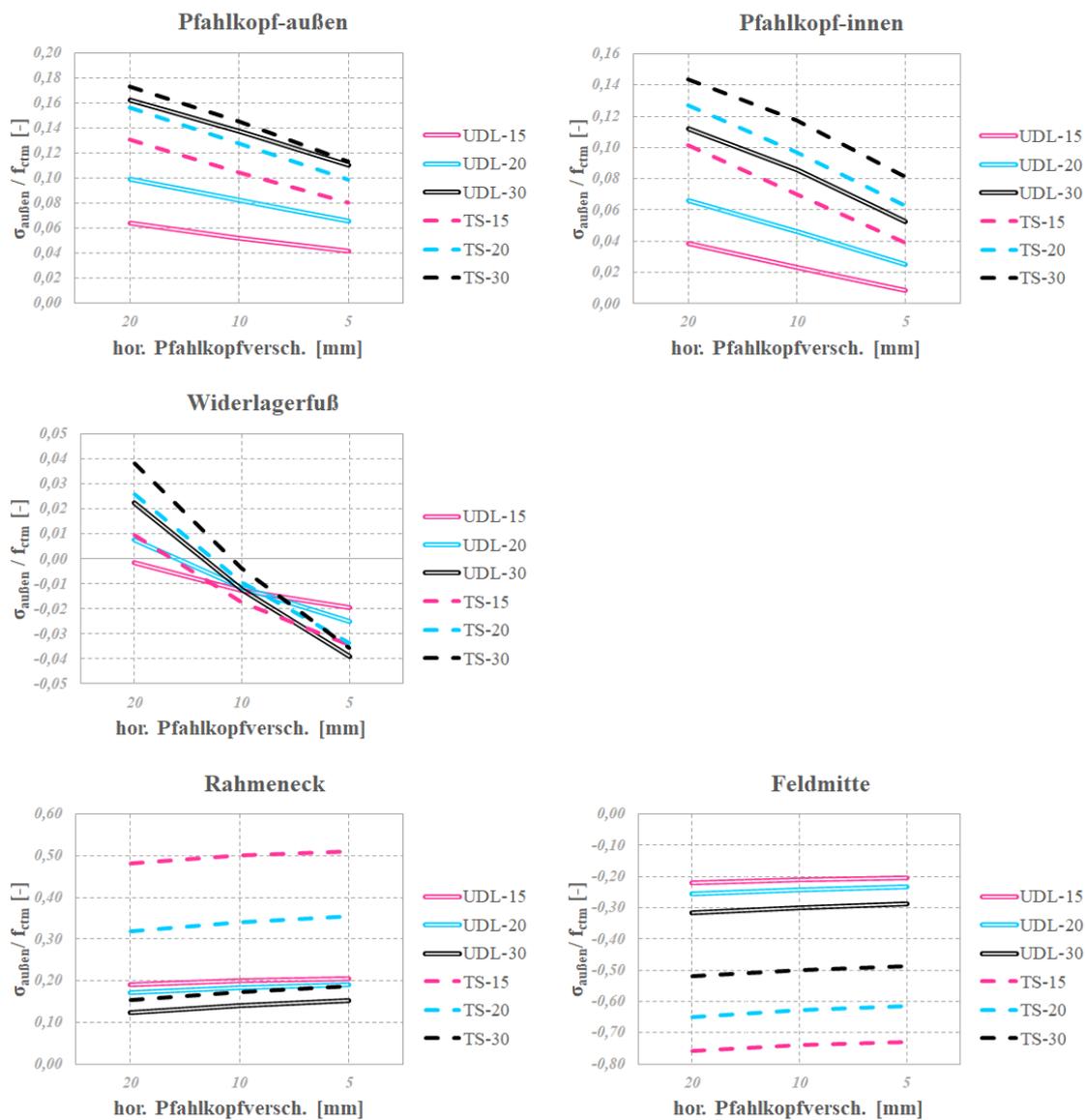


Abbildung D.12.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

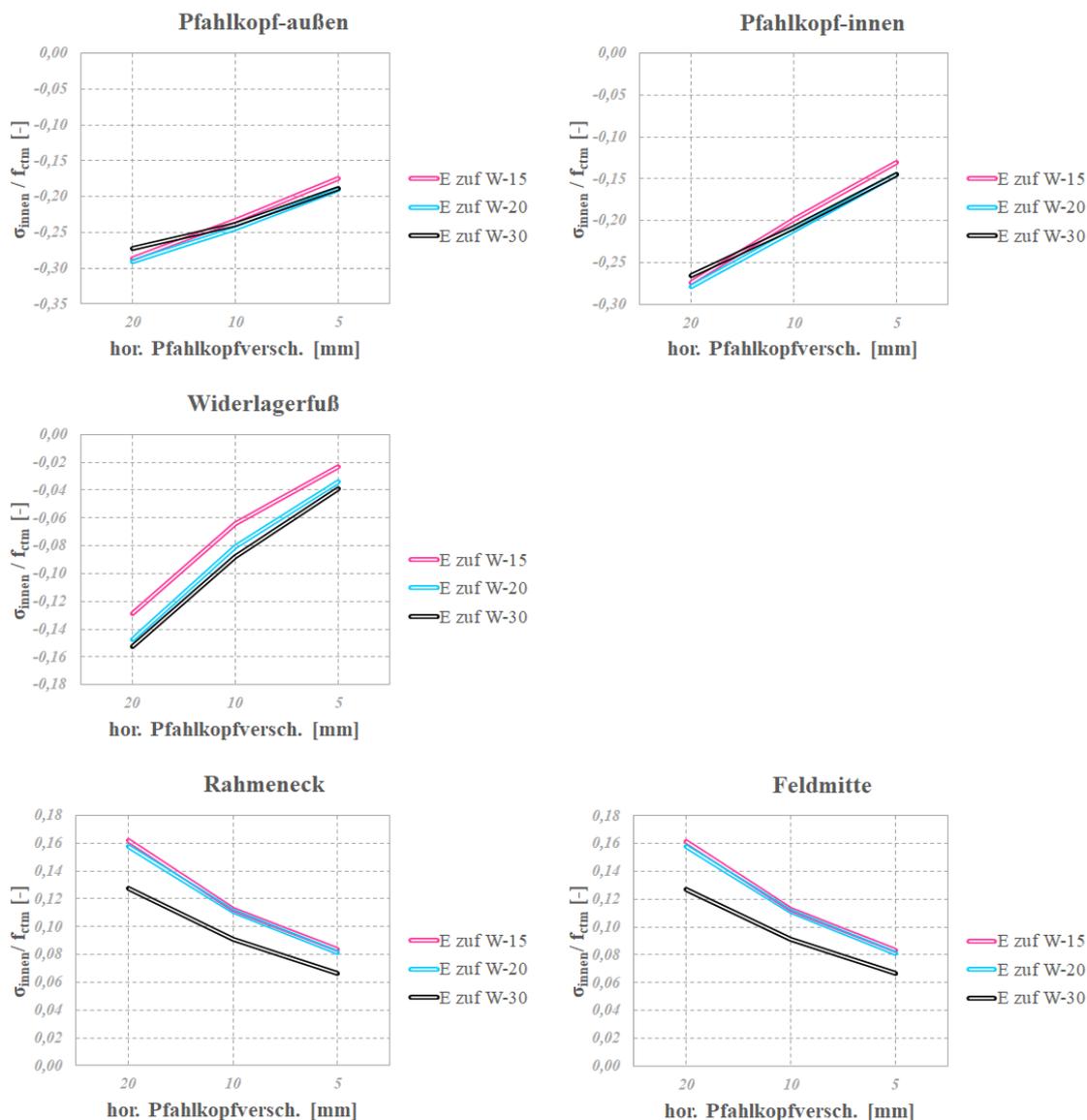


Abbildung D.13.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

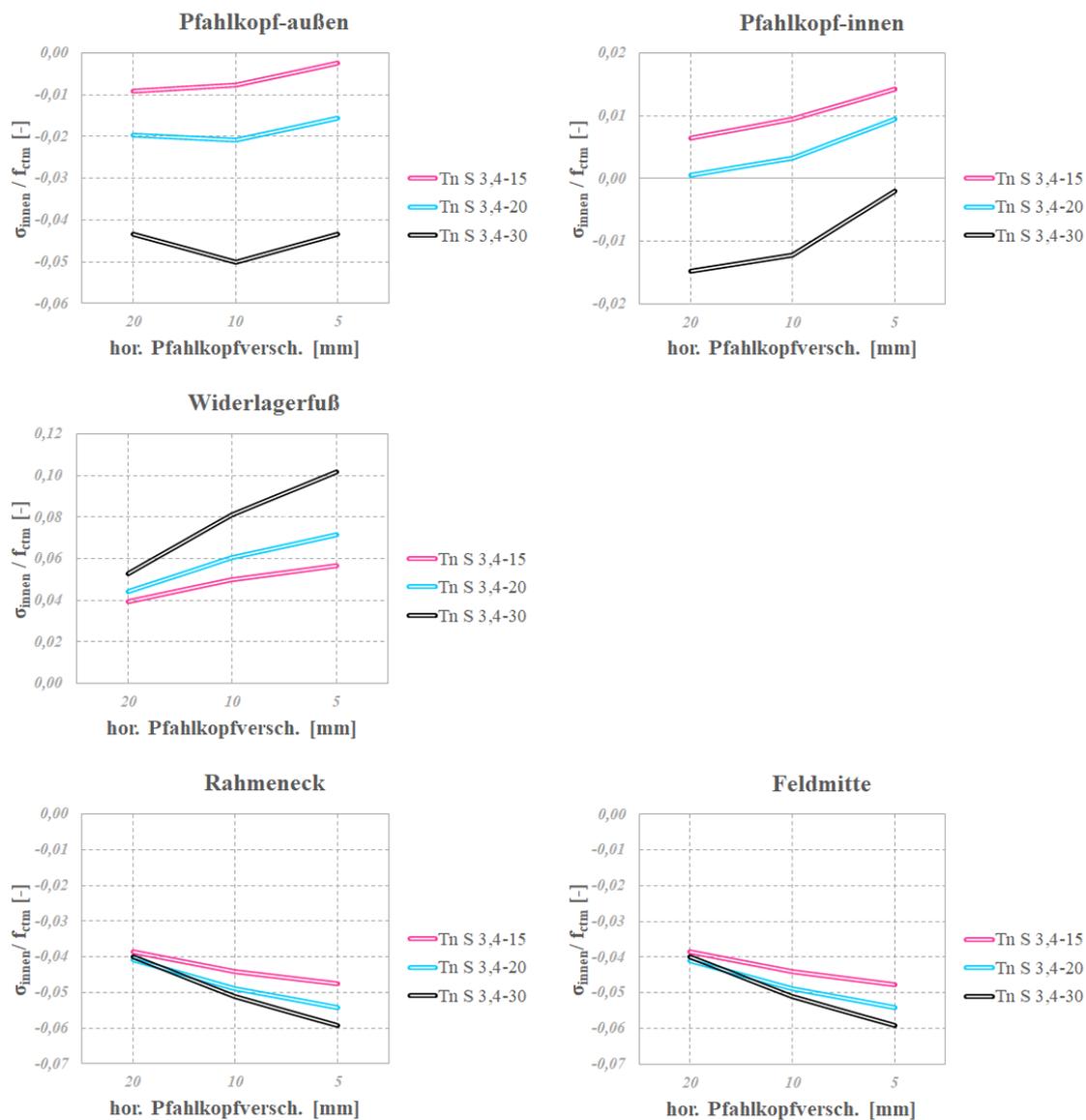


Abbildung D.14.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{w1}}=7,5$ m für Grundsystem 2

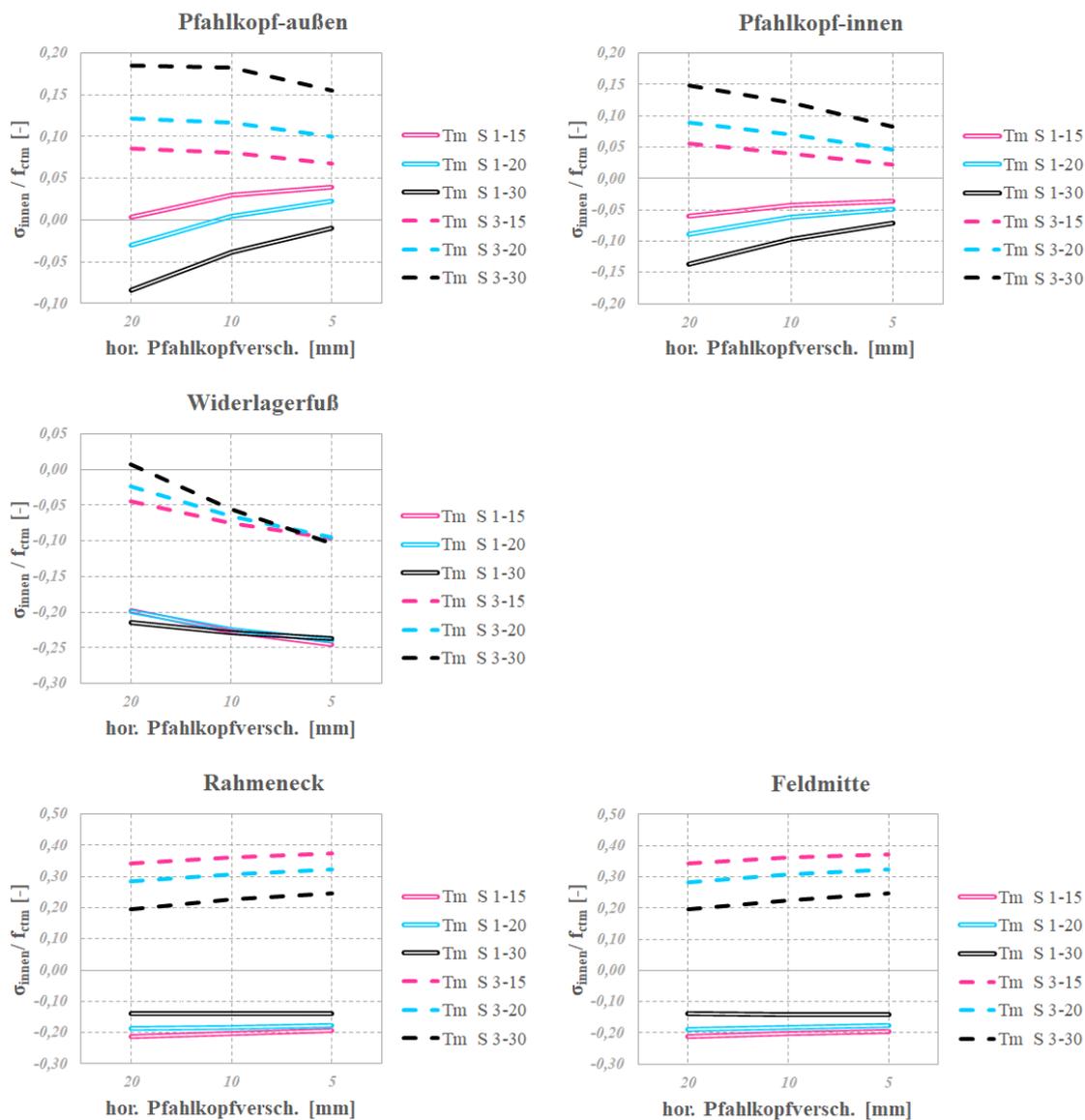


Abbildung D.15.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=7,5$ m für Grundsystem 2

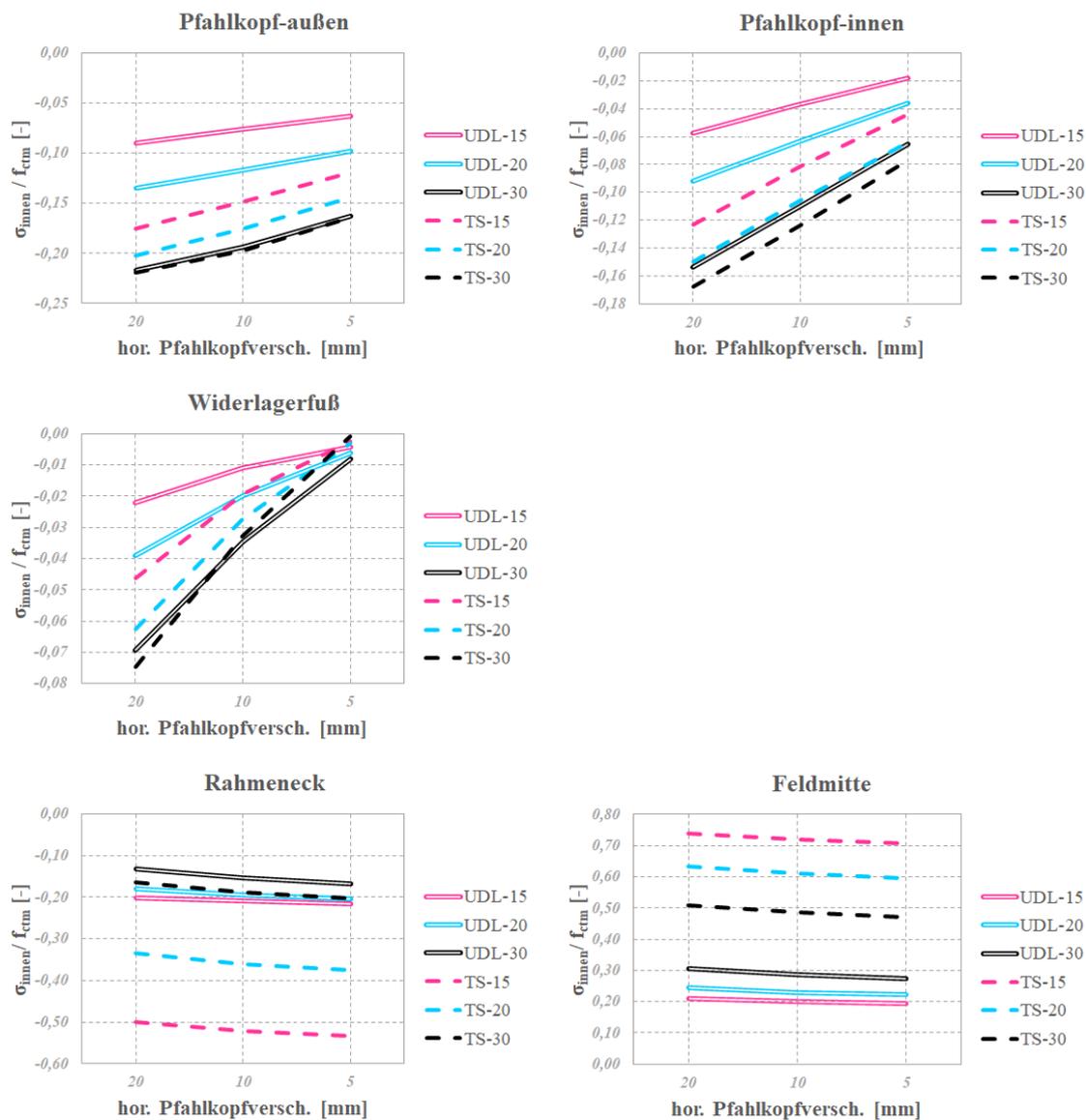


Abbildung D.16.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{\text{wl}}=7,5$ m für Grundsystem 2

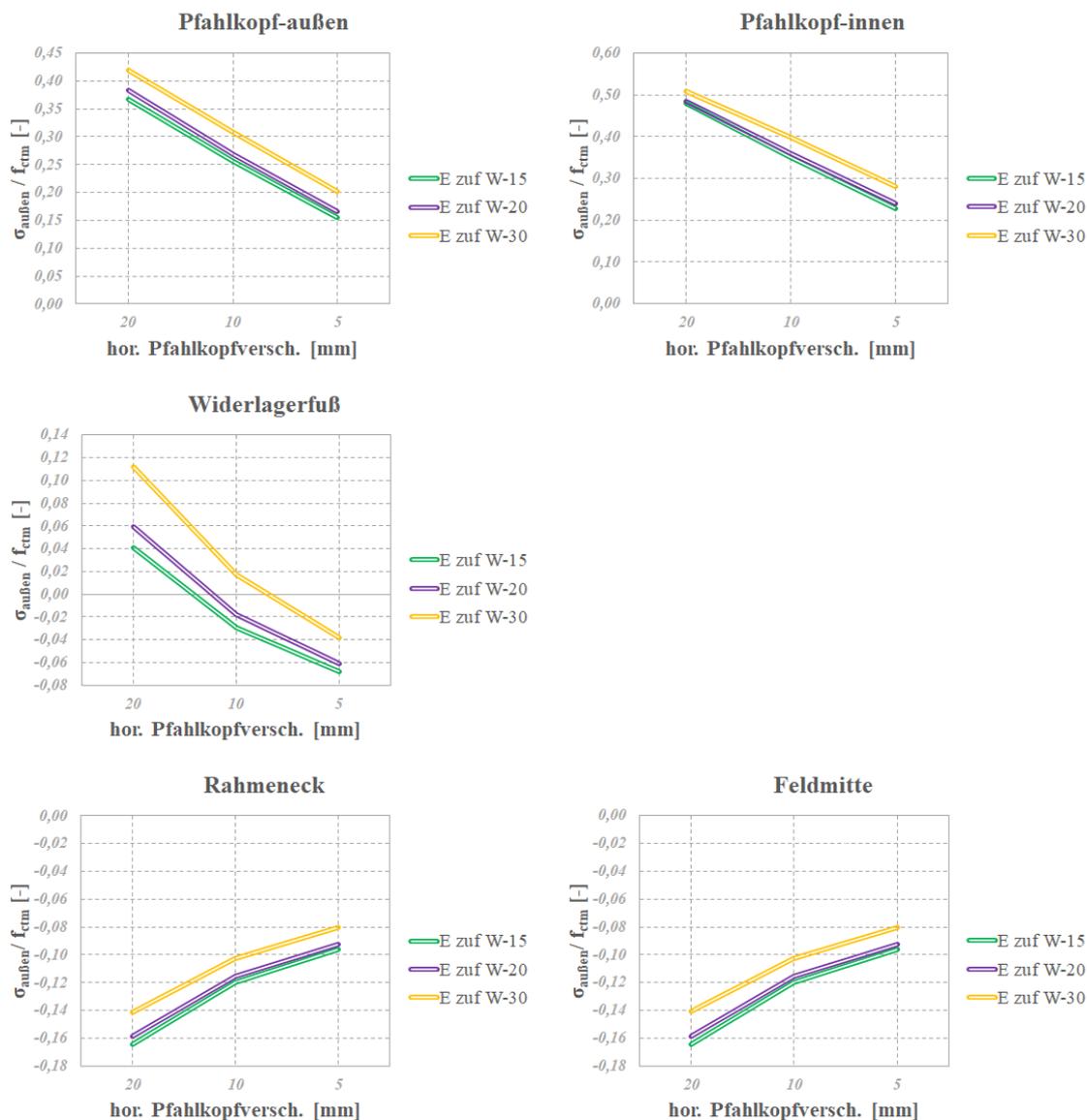


Abbildung D.17.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{\text{w1}}=10,0$ m für Grundsystem 2

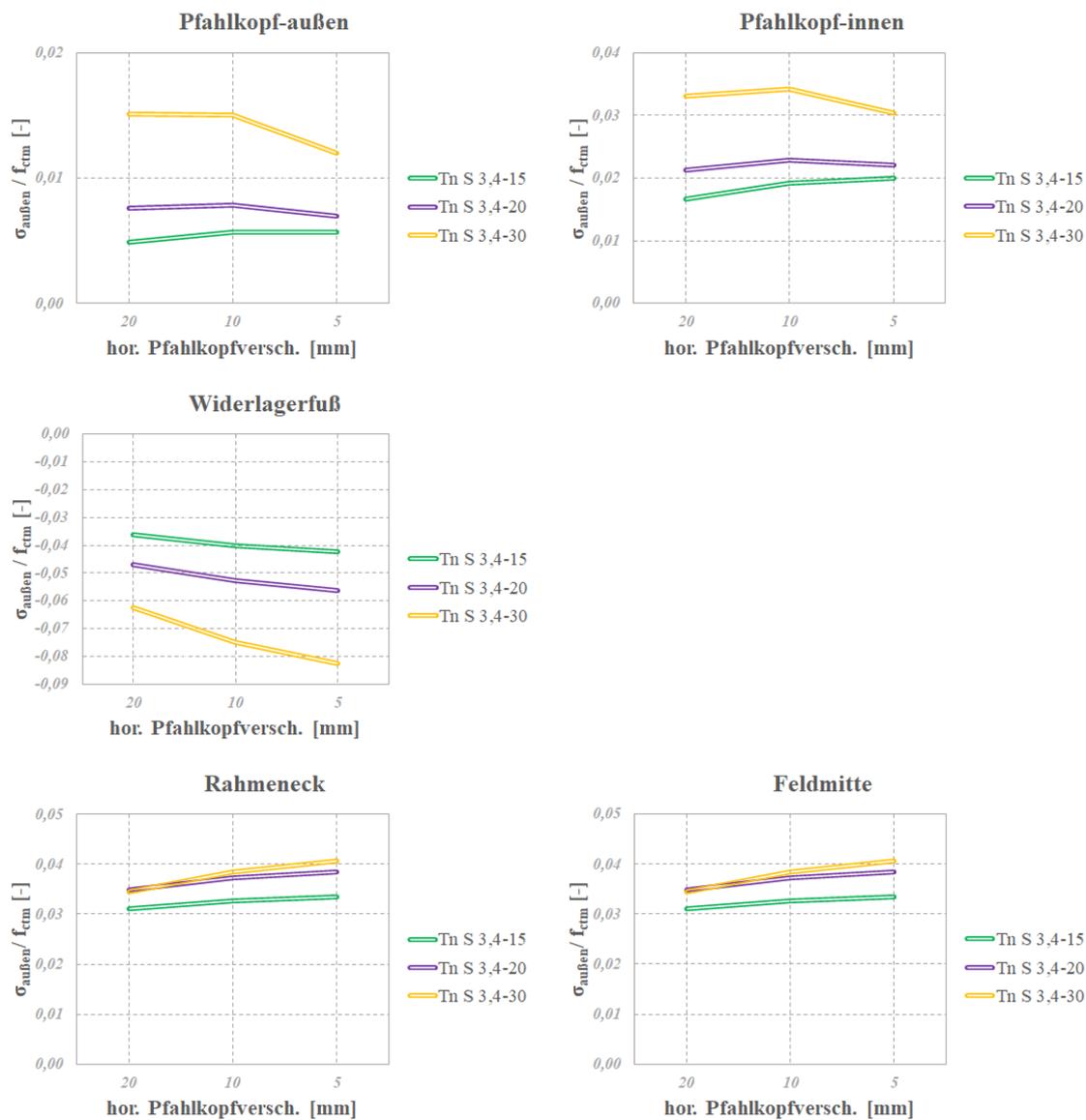


Abbildung D.18.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

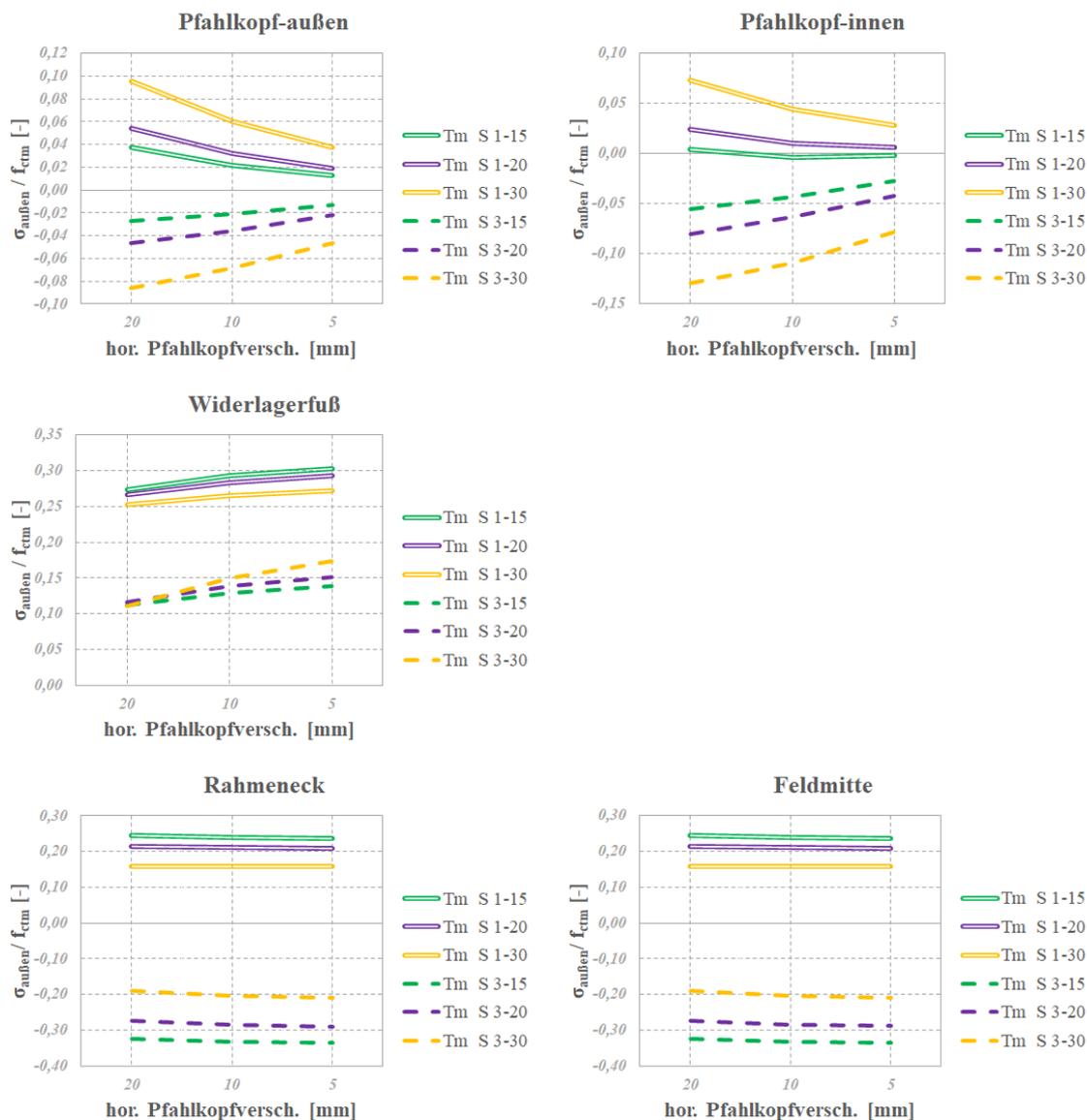


Abbildung D.19.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2

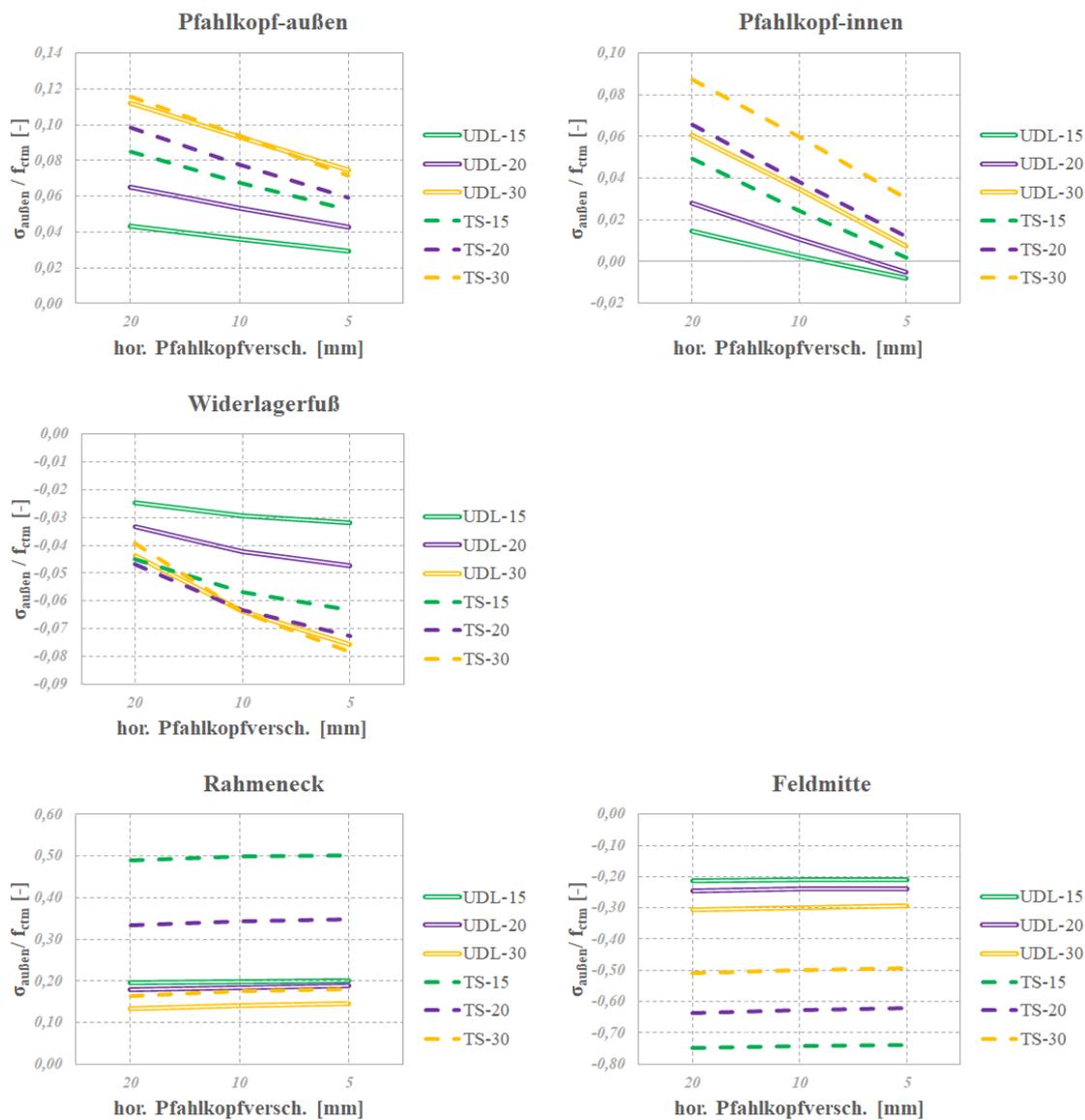


Abbildung D.20.: $\sigma_{\text{außen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2

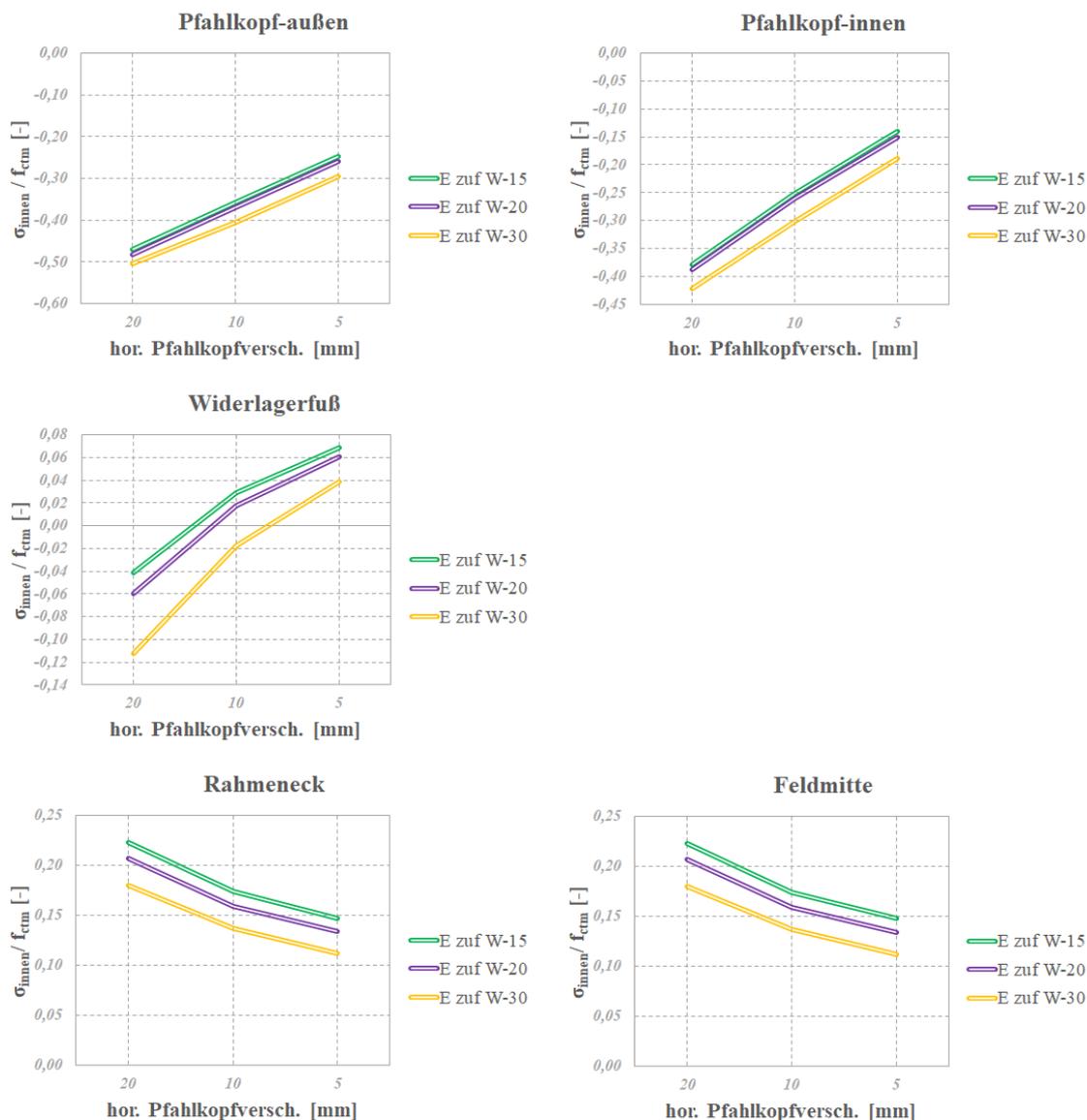


Abbildung D.21.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Erddruck zuf. Winter* bei $H_{\text{wl}}=10,0$ m für Grundsystem 2

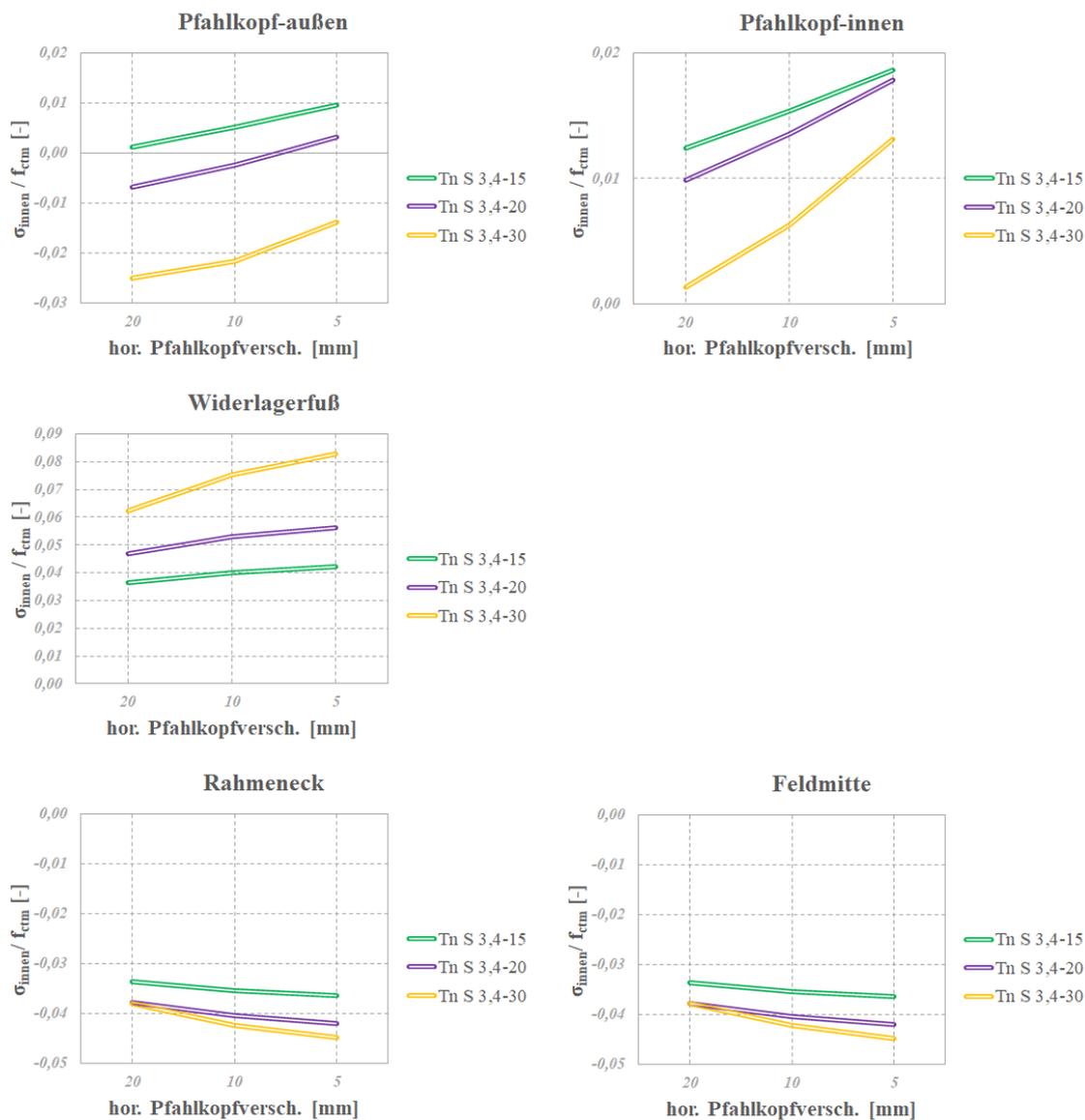


Abbildung D.22.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{ctm}$ zufolge *gleichmäßiger Temperatureinwirkung* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2

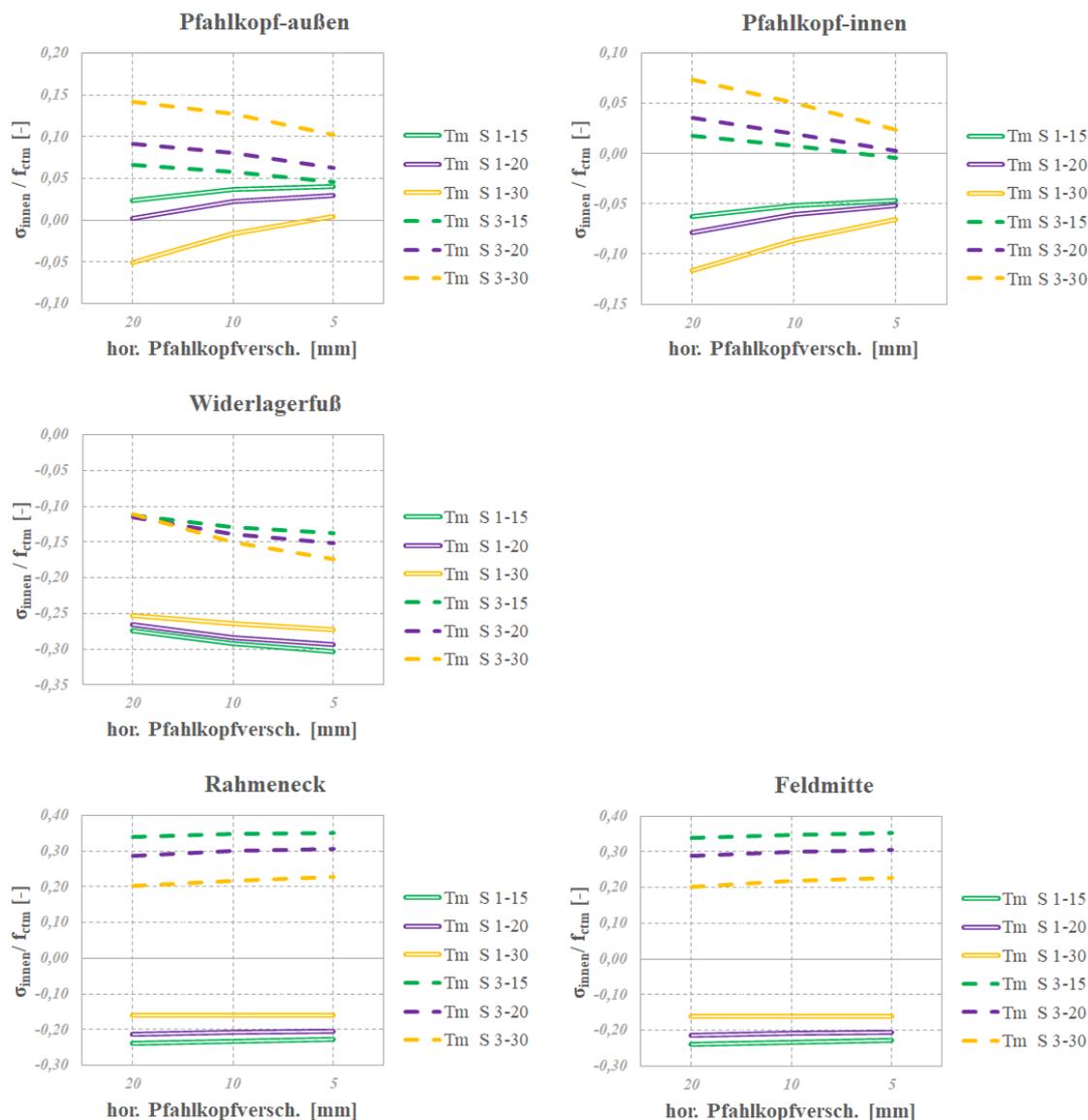


Abbildung D.23.: $\sigma_{\text{innen}}/f_{ctm}$ zufolge *linearer Temperatureinwirkung* bei $H_{wl}=10,0$ m für Grundsystem 2

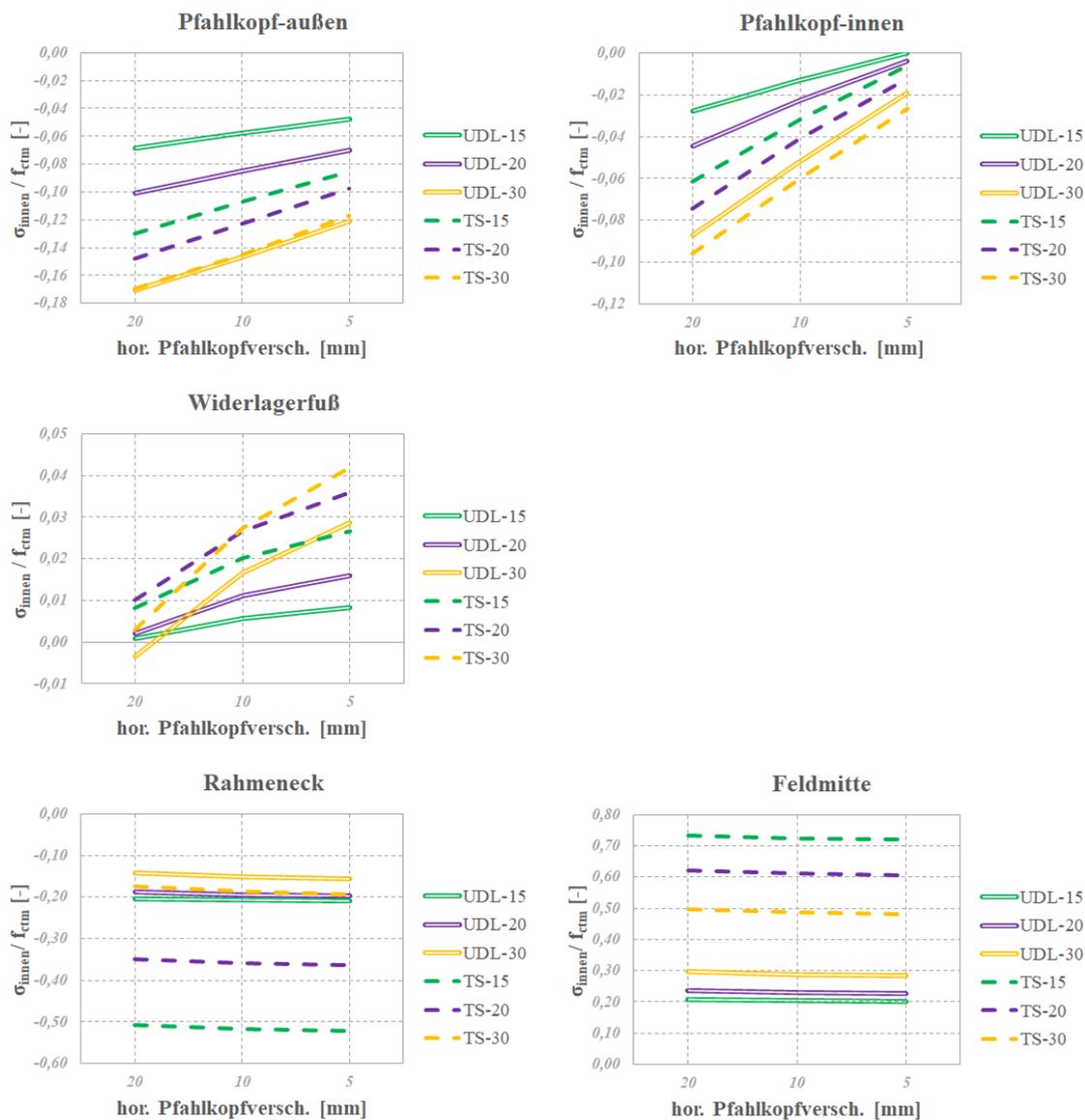


Abbildung D.24.: $\sigma_{\text{innen}} / f_{\text{ctm}}$ zufolge *Verkehr* bei $H_{w1}=10,0$ m für Grundsystem 2