
Masterarbeit

**Untersuchung zur Durchstanzgefahr bei punktförmig
gelagerten Plattenbrücken**

Verfasser:

Maximilian Rieger, BSc

Betreuer:

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

Ass.Prof. Dr. Dirk Schlicke

Dipl.-Ing. Christoph Betschoga

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

Graz, Jänner 2017

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.

.....
(Ort, Datum)

.....
(Unterschrift)

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Betonbau der Technischen Universität Graz, insbesondere bei meinen Betreuern Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue, Herrn Ass.Prof. Dr. Dirk Schlicke und Herrn Dipl.-Ing. Christoph Betschoga für die nette und ausgezeichnete Betreuung.

„*Ohne Geld ka Musi*“, daher möchte ich mich herzlichst bei meinen Eltern unter anderem für die finanzielle Unterstützung während der letzten 25 Jahre bedanken.

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob bei punktförmig gelagerten Plattenbrücken die Gefahr des Durchstanzens besteht. Die Spannweite in Längsrichtung beträgt bei solchen Brücken ein Vielfaches der Spannweite in Querrichtung, wie man bspw. bei der Autobahnauffahrt Bad St. Leonhard - Südautobahn A2 erkennen kann.

Bei solchen Verhältnissen liegt die Vermutung nahe, dass sich im Bereich der Stützen kein Durchstanzversagen einstellen kann. Viel wahrscheinlicher ist die Ausbildung eines deckengleichen Unterzugs in der Stützenachse und damit einhergehend ein reines Querkraftversagen. Diese Überlegungen werden mit Hilfe einer Parameterstudie unter Verwendung des Finite Elemente Programms SOFiSTiK untersucht. Im ersten Schritt werden hierzu der Einfluss der Brückengeometrie auf die Verteilung der Schnittkräfte, Spannungen und Verformungen im Stützbereich ausgearbeitet. Im zweiten Schritt wird auf Grundlage der Ingenieurvorstellungen zum Lastfluss bei reinem Querkraftversagen bzw. Durchstanzversagen ein praktikables Kriterium entwickelt, um die beiden Versagensformen voneinander abgrenzen zu können. Um die Eingangsfrage zu beantworten, werden abschließend die Erkenntnisse aus der Parameterstudie mit diesem Kriterium hinterfragt.



Praxisbeispiel Autobahnauffahrt Bad St. Leonhard - Südautobahn A2

Abstract

The present master thesis deals with the risk of punching in case of point-supported plate bridges. In such bridges, the span in the longitudinal direction is a multiple of the span in the transverse direction, as can be seen, for example, in case of the aforementioned motorway access road Bad St. Leonhard - Südautobahn A2.

In such circumstances, punching failure becomes increasingly unrealistic. In reality the load transfer of such structures can be described with the assumption of a transverse beam over the supports thus a pure shear failure is to be expected. These considerations are investigated by means of a parametric study using the finite element program SOFiSTiK. In the first step, the influence of the bridge geometry on the distribution of the cutting forces, stresses and deformations in the supporting area is worked out. In the second step, a practicable criterion is developed to allow a reasonable distinction between the failure modes of shear and punching. Finally, the insights from the parametric study are connected with this criterion in order to answer the input question.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines Tragverhalten punktförmig gelagerter Plattenbrücken	1
1.1.1	Lastfluss	1
1.1.2	Querkraftversagen	2
1.1.3	Versagen infolge Durchstanzens	3
1.2	Ziel der Arbeit	4
2	Ausgewählte Bemessungsverfahren für schubbeanspruchte Bauteile	5
2.1	EUROCODE 2 (ÖNORM B 1992-1-1)	5
2.2	Besonderheiten in anderen Richtlinien	6
2.3	Schlussfolgerung für die betrachteten Tragwerke	7
3	Modellbildung	8
3.1	FE-Idealisierung	8
3.2	Materialmodell	9
3.2.1	Linear-elastisches Werkstoffverhalten	10
3.2.2	Nichtlineares Werkstoffverhalten	10
4	Detaillierte Betrachtung des Tragverhaltens punktförmig gestützter Plattenbrücken / Referenzfall	11
4.1	Allgemeines Tragverhalten am Beispiel des Referenzfalls	11
4.1.1	Schnittkräfte	12
4.1.2	Verformung	14
4.2	Grenzfälle	18
5	Parameterstudie	21
5.1	Einfluss des Stützenabstands	21
5.1.1	Schnittkräfte	21
5.1.2	Verformung	23
5.2	Einfluss des Stützendurchmessers	24
5.2.1	Schnittkräfte	25
5.2.2	Verformung	27
5.3	Einfluss der Feldlänge und der Schlankheit Feldlänge zu Plattendicke	28
5.3.1	Schnittkräfte	28
5.3.2	Verformung	30
5.4	Einfluss des Werkstoffgesetzes	33
5.4.1	Schnittkräfte	33

5.4.2	Verformung	36
5.5	Spannungen	38
5.6	Schlussfolgerung	42
6	Kriterium zur Abgrenzung zwischen Querkraft- und Durchstanzproblematik	43
6.1	Hypothese	43
6.2	Auswertung	44
6.2.1	Einfluss der Betonfestigkeitsklasse	45
6.2.2	Einfluss des Druckstrebenwinkels	46
6.2.3	Einfluss der Schlankheit	47
6.2.4	Zusammenspiel von Schlankheit und Druckstrebenwinkel	47
6.3	Schlussfolgerung	48
7	Zusammenfassung und Ausblick	51
7.1	Zusammenfassung	51
7.2	Ausblick	52

1 Einleitung

Zunächst wird das Tragverhalten und der Lastfluss punktförmig gelagerter Plattenbrücken allgemein erklärt. Ausgehend davon wird auf den grundlegenden Unterschied zwischen Querkraftversagen und Versagen infolge Durchstanzens eingegangen. Im Detail werden hierbei die Tragmechanismen und die wesentliche Versagensart erläutert. Zum Abschluss des Abschnitts wird die Zielsetzung dieser Arbeit definiert.

1.1 Allgemeines Tragverhalten punktförmig gelagerter Plattenbrücken

1.1.1 Lastfluss

Grundsätzlich muss zwischen zwei Arten des Lastflusses unterschieden werden. Bei Systemen mit geringem Stützenabstand in Querrichtung kann davon ausgegangen werden, dass sich über den Stützen in Querrichtung ein deckengleicher Unterzug bildet. Eine gedachte Last im Feldbereich zwischen den Stützen würde von dem deckengleichen Unterzug angezogen werden und somit zunächst in Längsrichtung zum Unterzug gelenkt und von dort in die Stützen abgeleitet werden. Der Schnittkraft- und Verformungsverlauf in Längsrichtung ist bei solchen Brücken nahezu konstant über die Brückenbreite. Durch diese klare Lastabtragung kann davon ausgegangen werden, dass der Schubfluss annähernd gleich über die Plattenbreite verläuft. Bezüglich der Schubbeanspruchung muss das Bauteil nur auf Querkraftversagen in Längs- und Querrichtung bemessen werden (Abb. 1.1).

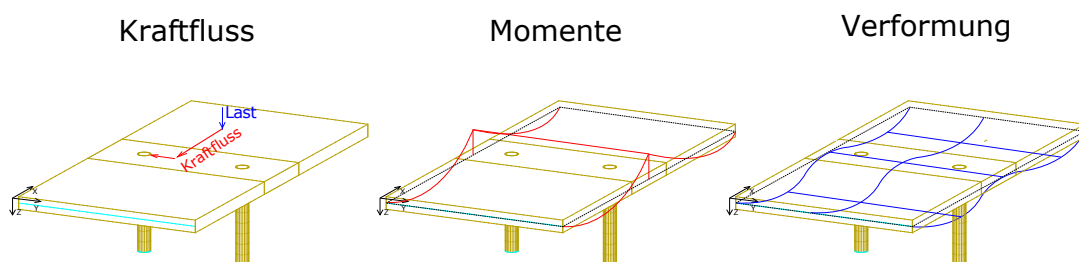


Abb. 1.1: System mit deckengleichem Unterzug

Bei Systemen mit zunehmendem Stützenabstand in Querrichtung (Abb. 1.2) nimmt die Durchbiegung zwischen den Stützen derart zu, dass die Last nicht mehr über den gedachten Unterzug geleitet werden kann, sondern direkt in die Stütze wandert. Weder der Schnittkraft- noch der Verformungsverlauf in Längsrichtung ist über die Brückenbreite konstant. Außerdem kommt es zur Konzentration des Schnittkraftverlaufs in unmittelbarer Nähe der Stützen und im Stützbereich liegt ein pilzförmiges Verformungsbild vor, das in weiterer Folge die Ausbildung eines Durchstanzkegels nach sich ziehen kann.

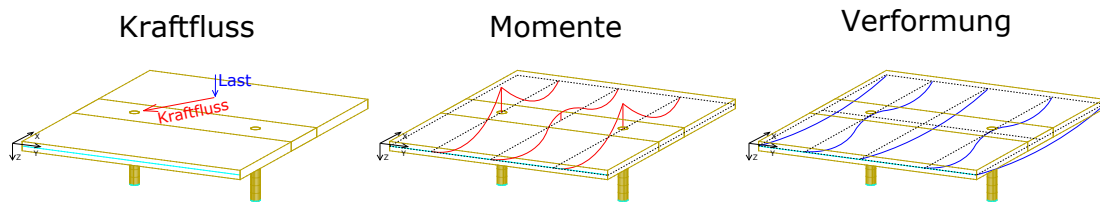


Abb. 1.2: System ohne deckengleichen Unterzug

1.1.2 Querkraftversagen

Generell beschreibt das Querkraftversagen einen ebenen Versagensmechanismus eines Bauteils, bei dem Zugzone und Druckzone durch schräge Schubrisse voneinander separiert werden. Bei Platten tritt diese Versagensform auf, wenn eine nahezu konstante Momentenbeanspruchung über die Breite herrscht (System mit deckengleichem Unterzug). Wird die Platte im Bereich des Auflagers (Unterzug) durch ein negatives Moment beansprucht, bildet sich infolge des Moments eine horizontale Druckstrebe an der Unterseite sowie eine horizontale Zugstrebe an der Oberseite. Aufgrund der Querkraft bilden sich zudem schräge Druckstreben und vertikale Zugstreben.

Kommt es an der Oberseite zur Rissbildung, entstehen zunächst vertikal verlaufende Risse infolge des Moments. Neben dem Auflager werden diese Biegerisse von der Druckstrebe infolge Querkraft abgelenkt und gehen in schräge, zum Auflager hin gerichtete, Risse über. Diese Risse können das Bauteil jedoch nicht vollständig durchdringen, da sie an der Unterseite aufgrund der Druckstrebe infolge des Moments überdrückt werden (Druckzone). Das Versagen tritt letztendlich ein, wenn sich ein kritischer Schubriss bildet, der Druck- und Zugzone vollständig separiert.

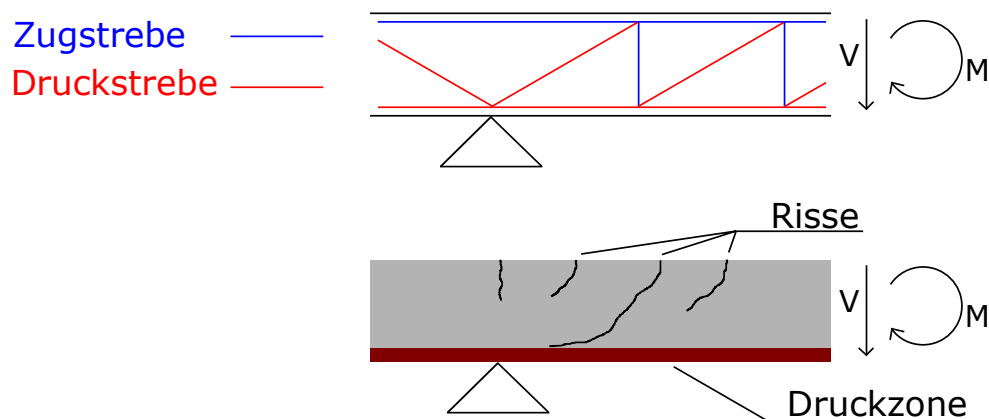


Abb. 1.3: Tragverhalten und Versagensart der Querkraftproblematik

1.1.3 Versagen infolge Durchstanzens

Im Gegensatz zum Querkraftversagen handelt es sich beim Durchstanzens um einen räumlichen Versagensmechanismus. Über der punktförmigen Stützung bilden sich tangentielle Biegemomente, die radiale und tangentielle Biegerisse erzeugen, wie in Abb. 1.4 gezeigt. Sowohl tangentielle als auch radiale Biegerisse werden durch die schräge Druckstrebe zum Auflager hin abgelenkt.

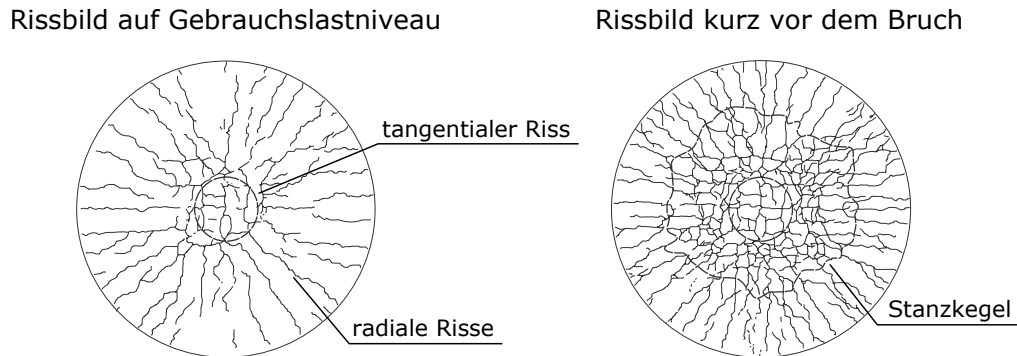


Abb. 1.4: Rissbild an der Plattenoberseite infolge Durchstanzens (aus: [5], Seite 321)

Die punktuelle Lagerung führt außerdem dazu, dass eine im Vergleich zur reinen Querkraftproblematik verhältnismäßig große Schubbeanspruchung in unmittelbarer Nähe der Stütze auftritt. Das Fachwerkmodell zum Abtrag dieser Schubbeanspruchung verläuft so wie beim Querkraftabtrag, allerdings ist dieses Fachwerk radial zur Stütze ausgerichtet. Durch diese radiale Ausrichtung und der deutlich größeren Querkraftdruckstrebe im Vergleich zur Momentendruckstrebe wird das Gleichgewicht über einen tangential um die Stütze verlaufenden Druckring gebildet (Abb. 1.5).

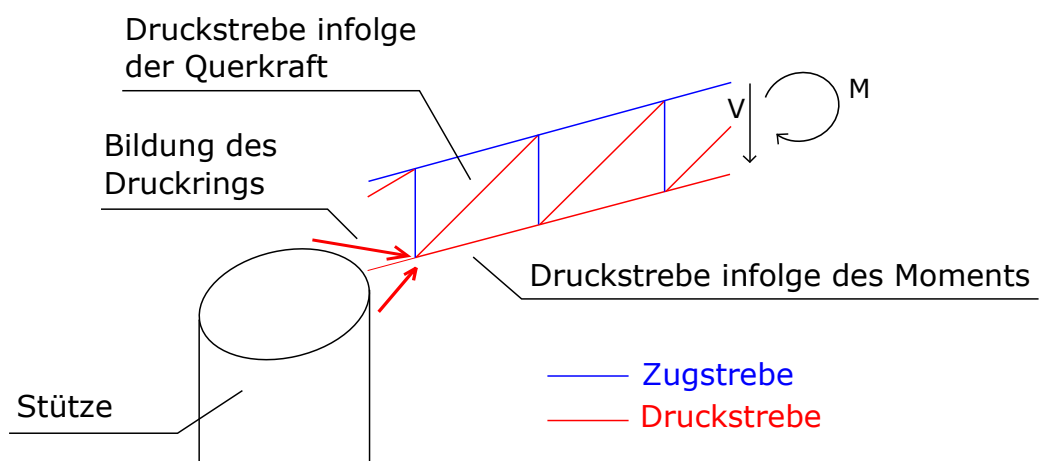


Abb. 1.5: Tragverhalten der Durchstanzproblematik

In diesem Gleichgewicht werden die radialen Schubrisse durch den Druckring überdrückt. Die tangentialen Schubrisse können das Bauteil allerdings durchdringen und ein Durch-

stanzversagen herbeiführen, da die horizontale Druckstrebe nicht ausreicht diese Risse zu überdrücken (Abb. 1.6).

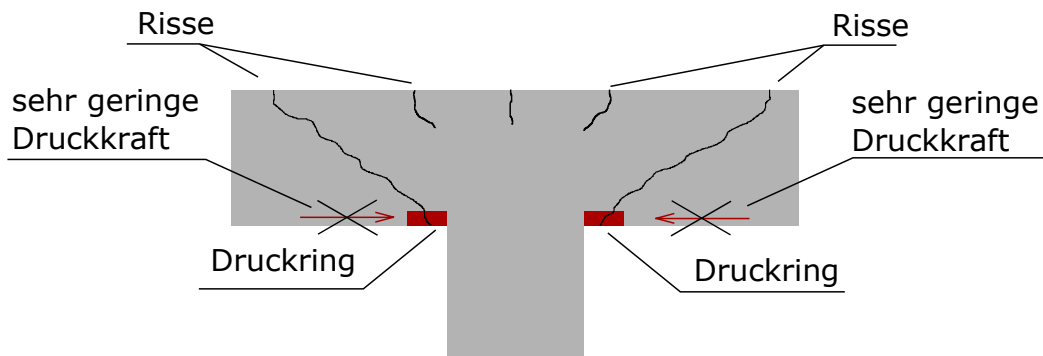


Abb. 1.6: Versagensart der Durchstanzproblematik

1.2 Ziel der Arbeit

Mit der vorliegenden Arbeit soll die Durchstanzgefahr von punktförmig gelagerten Plattenbrücken untersucht werden. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf den zuvor erläuterten Zusammenhang zwischen Lastfluss und Schubversagen (Querkraftversagen oder Versagen infolge Durchstanzens) gelegt. Dafür ist es notwendig die Schnittkräfte, die Verformungen und die Spannungen im Stützbereich detailliert zu bestimmen. Weiters werden die Auswirkungen verschiedener geometrischer Parameter wie Feldlänge in Längsrichtung, Stützenabstand in Querrichtung, Stützendurchmesser und Plattendicke sowie der Einfluss der Rissbildung dieser Brücken quantifiziert.

Eine Literaturstudie hat außerdem ergeben, dass es sehr wenige Unterlagen zur Abgrenzung zwischen Querkraftversagen und Versagen infolge Durchstanzens gibt. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Definition eines Kriteriums zur Abgrenzung von Querkraftversagen und Versagen infolge Durchstanzens.

2 Ausgewählte Bemessungsverfahren für schubbeanspruchte Bauteile

In dem vorliegenden Kapitel werden ausgewählte Bemessungsverfahren für schubbeanspruchte Bauteile mit Fokus auf den punktförmigen Stützbereich von Plattenbrücken betrachtet. Mit dieser Erhebung soll ermittelt werden, inwieweit der tatsächliche Lastfluss im Stützbereich von punktförmig gelagerten Plattenbrücken in den verfügbaren Nachweisen berücksichtigt werden kann.

2.1 EUROCODE 2 (ÖNORM B 1992-1-1)

Die ÖNORM B 1992-1-1 beinhaltet getrennte Nachweisverfahren für Querkraft und Durchstanzen, wobei der Nachweis gegen Durchstanzen als ergänzendes Verfahren zum Querkraftnachweis zu betrachten ist.

Der Nachweis gegen Querkraftversagen muss somit immer geführt werden, zusätzlich ist laut Norm bei Vollplatten, Rippendecken und Fundamenten infolge konzentrierter Lasten oder Auflagerreaktionen der Nachweis gegen Durchstanzen zu erbringen. I.d.R. kann davon ausgegangen werden, dass nach Erbringen des Nachweises gegen Durchstanzen im Einzugsbereich der punktförmigen Lagerung auch die Querkrafttragfähigkeit erfüllt ist.

Gemäß ÖNORM B 1992-1-1 handelt es sich bei den hier betrachteten Brückenplatten immer um Vollplatten, da der Abstand der Auflager größer als $5h$ ist.

Grundsätzlich ist der Aufbau der beiden Nachweise sehr ähnlich. Zunächst wird überprüft, ob aufgrund der gegebenen Belastung Schubrisse auftreten.

Können Schubrisse ausgeschlossen werden, darf auf Querkraft- bzw. Durchstanzbewehrung verzichtet werden. Einzige Ausnahme bilden hier Bauteile ohne Umlagerungspotential, wie bspw. Balken. Hier ist eine Mindestquerkraftbewehrung anzuordnen.

Können Schubrisse nicht ausgeschlossen werden, muss eine entsprechende Querkraft- bzw. Durchstanzbewehrung angeordnet und die maximale Druckstrebe auf ihre Tragfähigkeit nachgewiesen werden.

Für die Belastung wird beim Querkraftnachweis die Querkraft im Abstand der statischen Nutzhöhe d zum Auflager herangezogen. Beim Nachweis gegen Durchstanzen wird die punktuelle Auflagerkraft in eine konstante Schubspannung entlang des kritischen Rundschnitts umgerechnet. Dieser kritische Rundschnitt verläuft im Abstand von $2d$ zum Stützenrand, wie in Abb. 2.1 dargestellt. Die Umrechnung der Auflagerkraft in eine Schubspannung erfolgt letztendlich über den Umfang des kritischen Rundschnitts u_1 , der statischen Nutzhöhe der Platte d und eines Beiwerts β zur Berücksichtigung der Lasteinzugsfläche und der Interaktion von Querkraft und Moment.

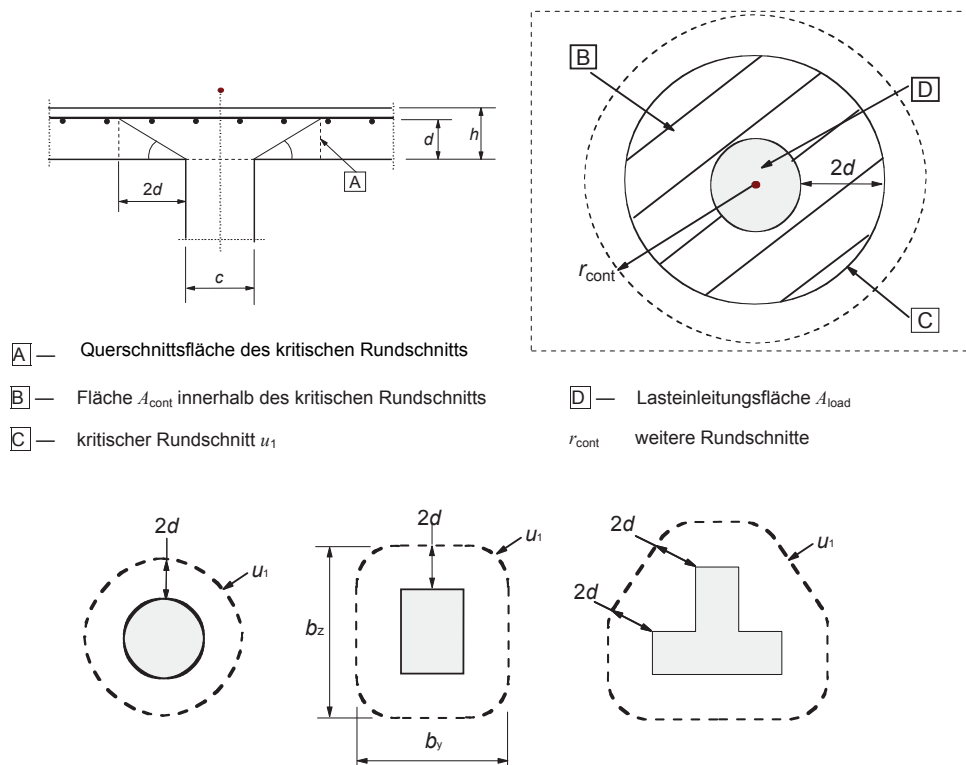


Abb. 2.1: Definition des kritischen Rundschnitts (aus: [1], Seite 26)

Für die nachfolgenden Betrachtungen sei vor allem auf die Definition des kritischen Rundschnitts hingewiesen. In der Auswertung der Parameterstudie sowie in der weiterführenden Abgrenzung zwischen Querkraft- und Durchstanzproblematik wird auf diesen Rundschnitt zurückgegriffen.

2.2 Besonderheiten in anderen Richtlinien

In diesem Abschnitt werden gesonderte Regelungen zum Querkraft- und Durchstanznachweis in SIA 262, DIN-Fachbericht 102 und Model Code 2010 gegenüber der Regelungen in ÖNORM B 1992-1-1 aufgezeigt.

Bezüglich der Parameter zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit können keine grundlegenden Unterschiede in den anderen Richtlinien gefunden werden. Auffällig ist nur, dass die empirisch ermittelten Beiwerte zum Teil voneinander abweichen und SIA 262 sowie Model Code 2010 zusätzlich die Größe des Größtkorns des Betons berücksichtigen. Darüber hinaus beträgt der Abstand zur Berechnung der Belastung in SIA 262 $d/2$ anstatt d .

Bei der Berechnung der Durchstanztragfähigkeit gibt es mehrere Unterschiede, welche die nachfolgende Auswertung beeinflussen würden. Generell wird der kritische Rundschnitt in den betrachteten Regelwerken mit einem kleineren Abstand zum Stützenrand definiert (DIN-Fachbericht 102: $1,5d$, SIA 262 und Model Code 2010: $d/2$). Zudem ist in SIA 262 angemerkt, dass der Radius des kritischen Rundschnitts reduziert werden muss, wenn keine konstante Querkraftbeanspruchung entlang des kritischen Rundschnitts vorausgesetzt werden kann.

Ferner kann angemerkt werden, dass die Berechnung einer etwaigen Durchstanzbewehrung in DIN-Fachbericht 102 für vordefinierte Sektoren erfolgen würde und die Durchstanztragfähigkeit in SIA 262 und Model Code 2010 unter Berücksichtigung der Größe des Größtkorns und der Plattenrotation erfolgt. Außerdem kann nach SIA 262 auf den Nachweis gegen Durchstanzen verzichtet werden, wenn das Bauteil gegen Totaleinsturz gesichert und der Querkraftabtrag gewährleistet ist.

2.3 Schlussfolgerung für die betrachteten Tragwerke

Generell muss festgestellt werden, dass keine explizite Abgrenzung zwischen Querkraftversagen und Durchstanzversagen angegeben wird. Bezüglich Durchstanzen wird nur auf punktuelle Lagerung und Lasteinleitung bei Vollplatten, Rippendecken mit Vollquerschnitten und Fundamenten verwiesen. Eventuelle stark voneinander abweichende Feldlängen in Längs- und Querrichtung und die damit verbundene Spannungsverteilung im Bereich der Stütze werden hinsichtlich einer reduzierten Durchstanzgefahr nicht berücksichtigt. Eine Unterscheidung nach unsymmetrischen Beanspruchungen wird lediglich in SIA 262 getroffen, wobei hier nicht der Übergang von Durchstanzen zu Querkraft im Vordergrund steht, sondern die Widerstandsseite ohne Angabe von Hintergründen zusätzlich reduziert wird.

Auch die Regelungen zur Bestimmung des kritischen Rundschnitts beim Durchstanzversagen unterscheiden sich innerhalb der einzelnen Regelwerke zum Teil deutlich. Für die nachfolgenden Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit wird die Regelung nach EUROCODE 2 in Einklang mit ÖNORM B 1992-1-1 zugrunde gelegt.

3 Modellbildung

3.1 FE-Idealisierung

Die Untersuchungen werden mit parametrisierten Berechnungsmodellen auf Grundlage der Finiten Elemente Methode durchgeführt. Diese Modelle wurden mit der Software SOFiSTiK erstellt und berechnet. Generell bilden diese Modelle eine zweifeldrige Brückenplatte mit linienförmiger Lagerung am Bauteilrand und mit punktförmiger Mittelstützung in Längsrichtung ab, wie in Abb. 3.1 gezeigt. Aufgrund der geometrischen Symmetrie werden immer nur zwei Stützen in Querrichtung abgebildet. Es werden stets monolithisch angeschlossene Stützen betrachtet. In Längs- und Querrichtung ist die Brücke zwängungsfrei gelagert.

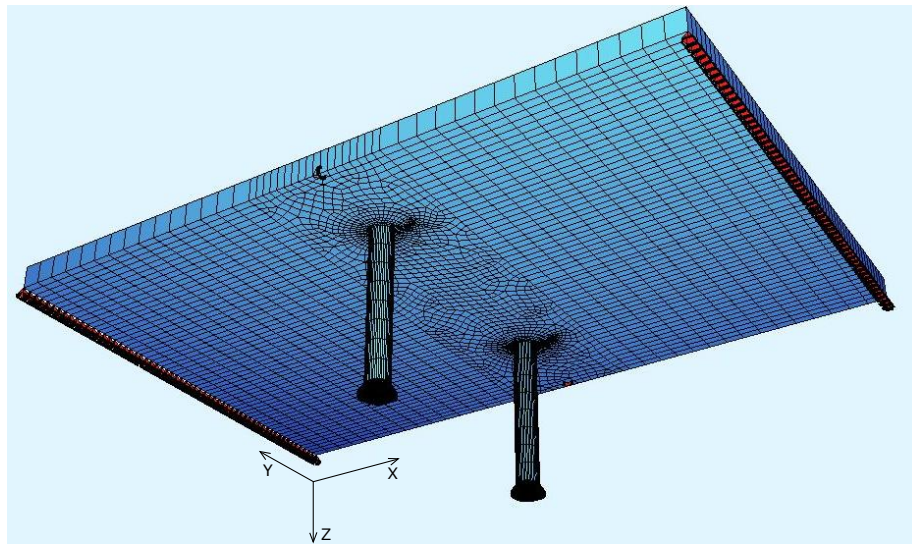


Abb. 3.1: Modell (Untersicht)

Für eine gezielte Auswertung der Schnittkräfte sowie der Verschiebungen wird die Platte mit Hilfe von Schalenelementen idealisiert. Für genauere Untersuchungen der Spannungen im Bereich der Stützen wird die Platte in einem weiteren Modell mit Volumenelementen abgebildet. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen beiden Modellen wurde durch eine Überprüfung der Übereinstimmung von Spannungen und Verschiebungen in beiden Modellen gewährleistet.

In beiden Fällen werden die Stützen mit Volumenelementen modelliert. Vergleichsrechnungen mit Idealisierung der Stützen durch feste Auflager bzw. mit Federn in Eigengewichtsrichtung zeigen, dass es durch diese Modellierungen im Bereich der Stützen zu Abweichungen in den Spannungs- und Verschiebungsverläufen kommt.

Die monolithisch angeschlossenen Stützen führen zu einer lokalen Querschnittsänderung des Bauteils. Wie in Abb. 3.2 mit einem vertikalen Schnitt direkt über dem Auflager bzw. der Stütze für den Lastfall Eigengewicht gezeigt werden kann, entstehen dadurch im

Stützbereich zusätzliche Membrankräfte in der Platte. Dieser Effekt wird bei einem Modell mit Federn oder festen Auflagern nicht berücksichtigt und in der gesamten Brückenplatte würden ausschließlich Biegespannungen über die Plattenhöhe herrschen.

System mit Federn



System mit Stützen

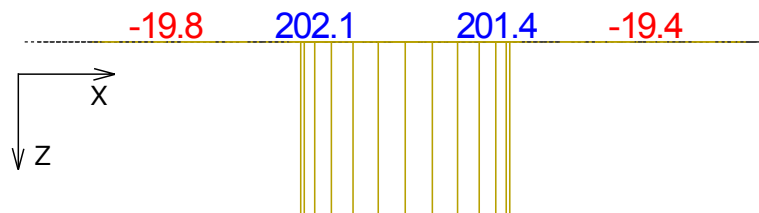


Abb. 3.2: Membrankräfte in Längsrichtung in kN/m ohne und mit Modellierung der Stützen

In der vorliegenden Untersuchung werden nur symmetrische Lastfälle mit dem 1,0-fachen Eigengewicht abgebildet, da der Schwerpunkt auf einer Bestimmung der grundlegenden Lastabtragsmechanismen liegt. Erfolgt die Berechnung mittels linear-elastischem Werkstoffverhalten, können Aussagen zu höheren Ausnutzungsgraden des Bauteils durch Skalierung der Ergebnisse gemäß der Erhöhung des Eigengewichtsfaktors erzielt werden. Der qualitative Kraftfluss bleibt hiervon unberührt. Gezielte Untersuchungen auf die Auswirkungen verschiedener Lastmodelle und unsymmetrischer Laststellungen auf den hier betrachteten Zusammenhang gemäß [3] bleiben zukünftigen Arbeiten vorbehalten.

3.2 Materialmodell

Generell erfolgt die Berechnung mittels linear-elastischem Werkstoffverhalten. In ausgewählten Fällen wird außerdem auf die Auswirkung der Rissbildung eingegangen. Dafür ist eine Definition der Parameter des nichtlinearen Werkstoffverhaltens notwendig.

3.2.1 Linear-elastisches Werkstoffverhalten

Der Elastizitätsmodul des Betons wird mit 35000 N/mm^2 angenommen. Das entspricht einer charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} von 40 N/mm^2 . Da es im gerissenen Zustand zu keiner Behinderung der Querdehnung kommt, wird die Querdehnzahl des Betons mit 0,00 festgelegt. Das Eigengewicht beträgt $25,00 \text{ kN/m}^3$.

3.2.2 Nichtlineares Werkstoffverhalten

Für die nichtlinearen Berechnungen wird im Werkstoffgesetz eine Zugfestigkeit des Betons von $3,5 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Außerdem wird das gesamte Bauteil mit Hilfe von SOFiSTiK nach ÖNORM B 1992-1-1 für eine maximale Rissbreite von 0,3 mm bewehrt. Als Bewehrungsstahl wird ein BSt 550 gewählt und die Betondeckung beträgt 5 cm. Um in der Berechnung ein realitätsnahes Rissbild zu erzielen, wird die Brücke in den nichtlinearen Berechnungen zunächst mit dem 1,5-Fachen ihres Eigengewichts vorbelastet. Die Auswertung der Schnittkräfte und des Verformungsverlaufs erfolgt anschließend am gerissenen System mit dem 1,0-Fachen des Eigengewichts.

4 Detaillierte Betrachtung des Tragverhaltens punktförmig gestützter Plattenbrücken / Referenzfall

Aufbauend auf die allgemeinen Betrachtungen zum Tragverhalten punktförmig gestützter Platten im Abschnitt 1.1 wird in diesem Kapitel das Tragverhalten detailliert mit Hilfe eines Referenzbeispiels veranschaulicht und diskutiert. Dazu wird insbesondere auf den Schnittkraftverlauf und den Verformungsverlauf eingegangen.

Zum besseren Verständnis der Abgrenzung zu den im Abschnitt 1.1 angeführten Versagensmechanismen infolge Querkraft und Durchstanzens werden außerdem noch zwei Grenzfälle dargestellt.

Die Begriffsbestimmung für die nachfolgenden Ausführungen zeigt Abb. 4.1.

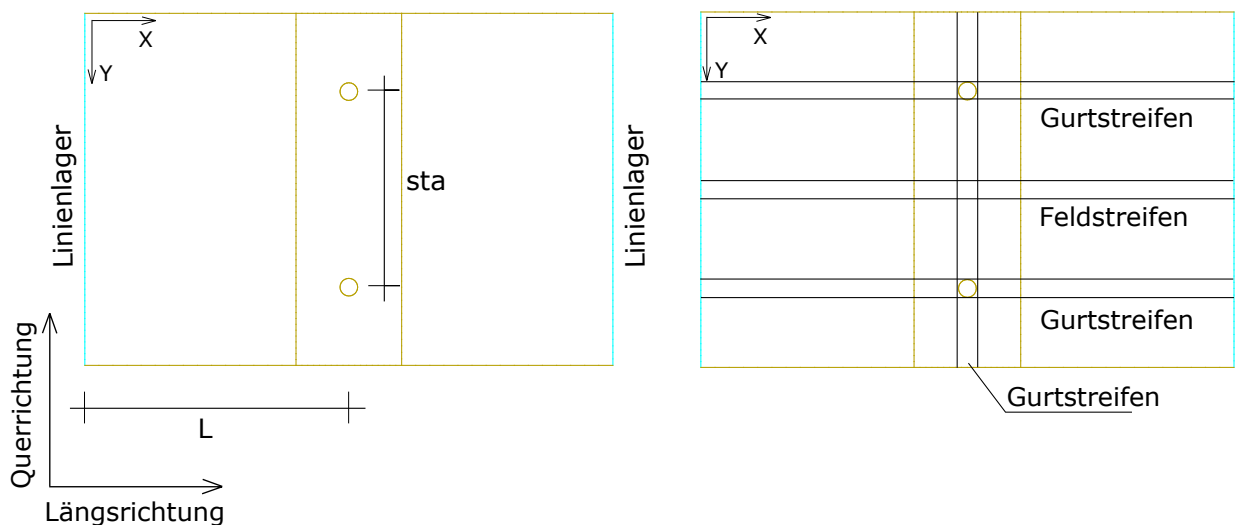


Abb. 4.1: Begriffsbestimmung für die nachfolgenden Betrachtungen

Die Biegemomente und die Querkräfte werden immer nach der Richtung benannt, in der sie Spannungen erzeugen (l für Längsrichtung und q für Querrichtung). Die Wirkungsrichtung der Querkraft ist immer die Eigengewichtsrichtung.

4.1 Allgemeines Tragverhalten am Beispiel des Referenzfalls

Als Referenzfall wird eine zweifeldrige Brücke mit einer Feldlänge l von 9,0 m, einer Breite von 6,0 m, einem Stützenabstand sta von 3,33 m sowie einer Plattendicke h von 0,6 m

gewählt. Das ergibt eine Schlankheit von $l/h = 15$ sowie ein Verhältnis sta/l von 0,37. Die Rundstützen werden mit einem Durchmesser d von 0,6 m ausgeführt.

Für ein besseres Verständnis zum Einfluss des Stützenabstands in Querrichtung wird dem Referenzfall bereits an dieser Stelle ein Vergleichsfall mit erhöhtem Stützenabstand gegenübergestellt. In diesem Vergleichsfall wird sta mit 6,66 m eingestellt ($sta/l = 0,74$), gleichzeitig erhöht sich dadurch die Brückenbreite auf 12 m. Alle anderen Parameter bleiben unverändert.

4.1.1 Schnittkräfte

Abb. 4.2 zeigt die Schnittkräfte des Referenzbeispiels. Dabei sind die Momente in Querrichtung über den Stützen (Gurtstreifen; Schnitt 1-1) und die Momente in Längsrichtung über und zwischen den Stützen (Gurtstreifen; Schnitt A-A und Feldstreifen; Schnitt B-B) abgebildet. Die Schnitte für die Querkraftverläufe befinden sich in Längs- und Querrichtung jeweils im Gurtstreifen direkt über den Stützen (Schnitt A-A bzw. Schnitt 1-1).

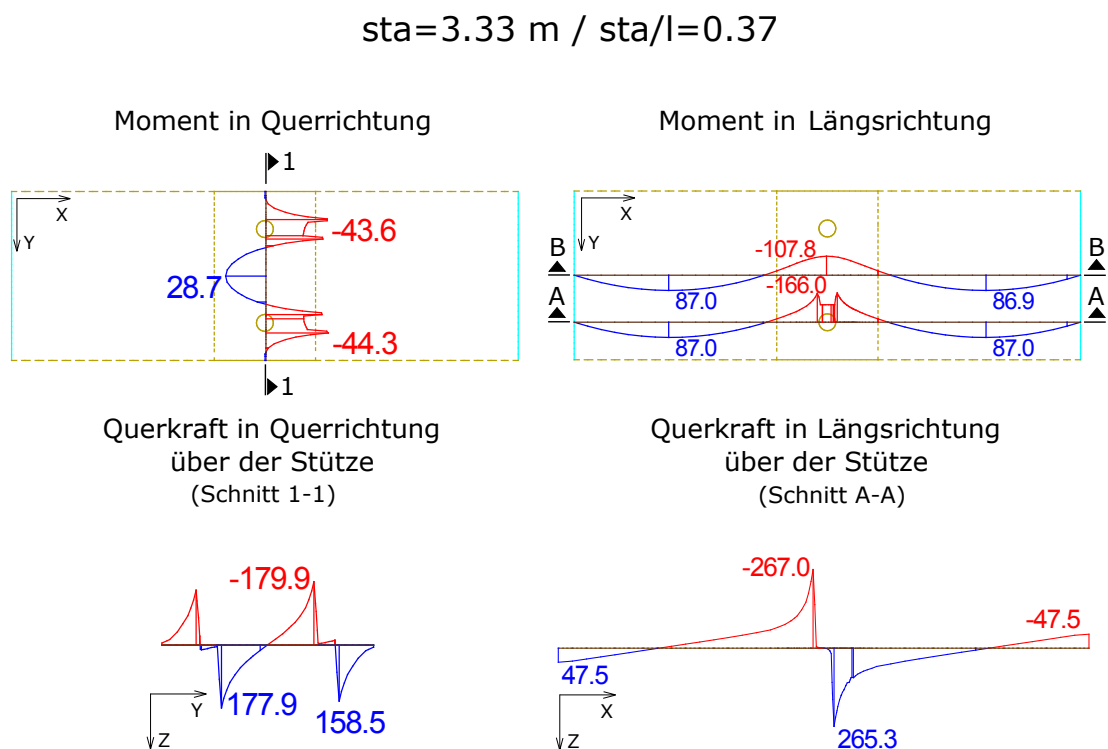


Abb. 4.2: Schnittkräfte in kNm/m bzw. kN/m bei sta/l von 0,37

Betrachtet man die Schnitte direkt über den Stützen, handelt es sich in Längsrichtung um einen Zweifeldträger und in Querrichtung um einen Einfeldträger mit zwei Kragarmen. Der Längsschnitt zwischen den Stützen entspricht einem Zweifeldträger mit einer Feder als Mittelaufleger.

Die resultierenden Verläufe der Längs- und Quermomente werden durch die Stützen signifikant beeinflusst. Dies betrifft insbesondere die Längs- und Quermomente im Stützbereich. Im Feldbereich bleiben die Längsmomente in Querrichtung allerdings nahezu konstant. Weiters kann festgestellt werden, dass am freien Rand des Kragarms geringe positive Quermomente auftreten können. Diese entstehen, wenn sich die Durchbiegung des Kragarms durch die Plattenwirkung in Längsrichtung nicht frei einstellen kann. Die punktförmige Lagerung ruft außerdem eine ausgeprägte Schubbeanspruchung im Stützbereich hervor. Geringfügige Abweichungen hinsichtlich der symmetrisch zu erwartenden Querkraftverläufe sind durch ein unregelmäßiges FE-Netz im Stützbereich zu erklären.

Die Auswirkung der Vergrößerung des Stützenabstands ist in Abb. 4.3 dargestellt. Die Zunahme von sta verursacht im querverlaufenden Gurtstreifen einen Steifigkeitsverlust und dadurch nimmt der Effekt des deckengleichen Unterzugs ab. Dies äußert sich vor allem in einer Zunahme des Unterschieds zwischen den Stützmomenten in Längsrichtung (Gurt- versus Feldstreifen). Durch die Vergrößerung von sta/l wird die Brücke außerdem breiter und somit muss bei gleichbleibender Stützenanzahl auch mehr Last über die Stützen abgetragen werden. Dadurch nimmt die Schubbeanspruchung im Stützbereich deutlich zu und die Schnittkräfte vergrößern sich im Vergleich auch absolut. Im Detail nehmen das Längsmoment über der Stütze und auch die Quermomente entlang des querlaufenden Gurtstreifens zu. Die Längsmomente im Feldstreifen nehmen im Stützenbereich hingegen ab.

$$sta=6.66 \text{ m} / sta/l=0.74$$

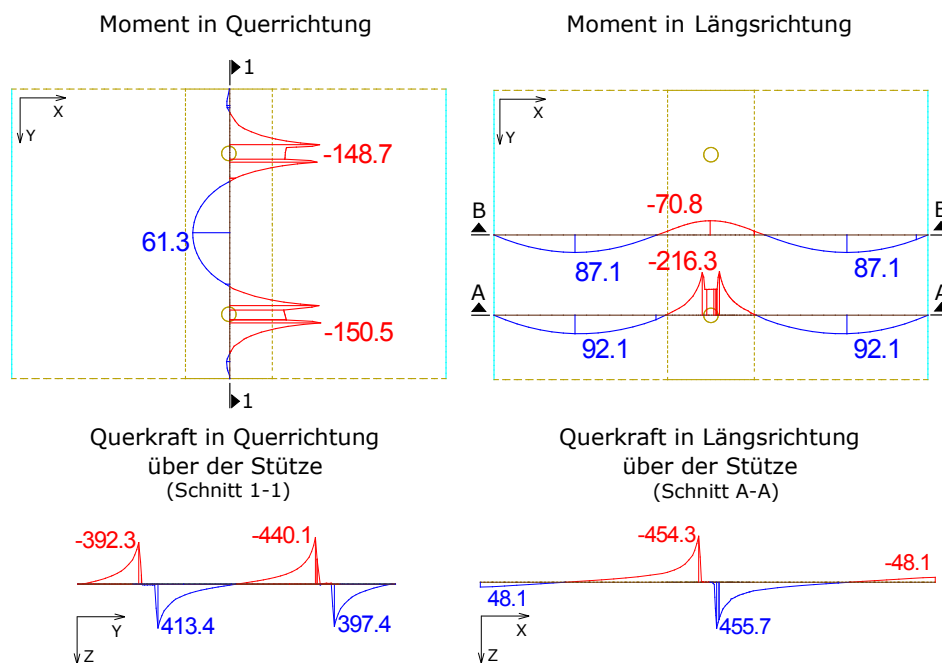


Abb. 4.3: Schnittkräfte in kNm/m bzw. kN/m bei sta/l von 0,74

Für einen besseren Vergleich des Einflusses einer geänderten Geometrie werden nachfolgend Schnittkraftverhältnisse betrachtet, siehe auch Abb. 4.4:

- maximales Stützmoment in Längsrichtung im Gurtstreifen zu Stützmoment in Längsrichtung im Feldstreifen: $M_{s,l}/M_{f,l}$
- maximales Stützmoment in Längsrichtung zu maximalem Stützmoment in Querrichtung: $M_{s,l}/M_{s,q}$
- maximale Querkraft in Längsrichtung bei der Stütze zu maximaler Querkraft in Querrichtung bei der Stütze: $V_{s,l}/V_{s,q}$

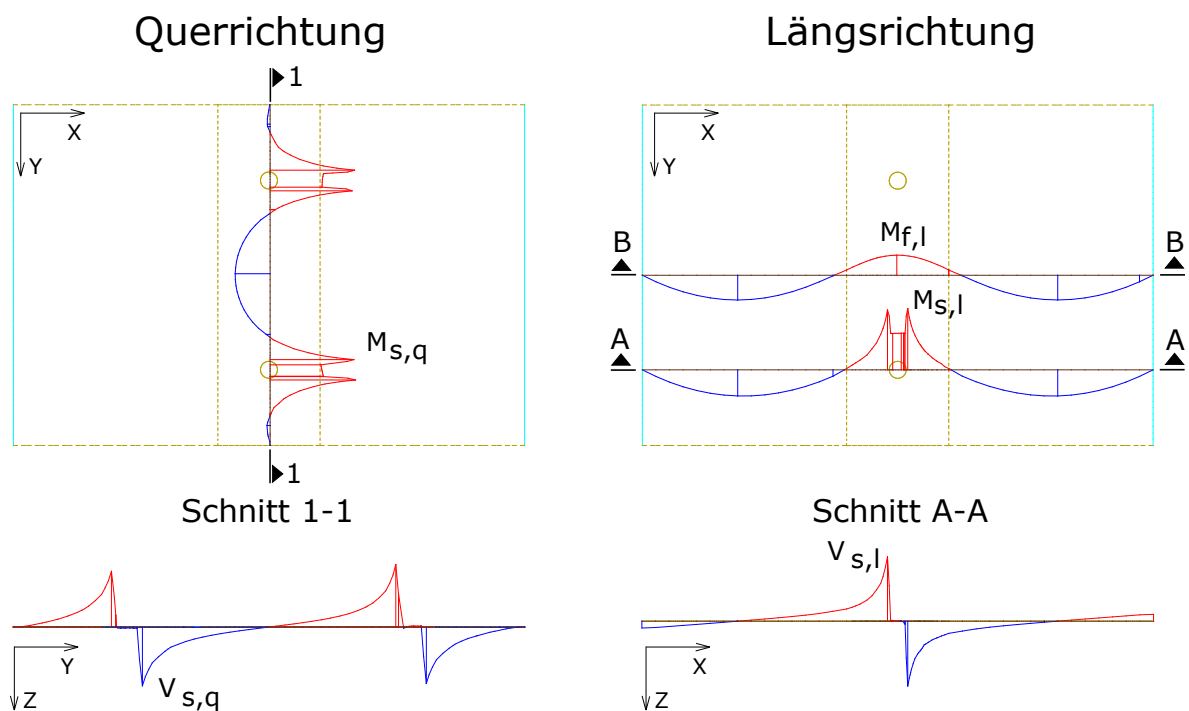


Abb. 4.4: Definition der Schnittkräfte

In den vorliegenden Beispielen ergeben sich die Schnittkraftverhältnisse gemäß Tabelle 4.1.

	$sta/l = 0,37$	$sta/l = 0,74$
$M_{s,l}/M_{f,l}$	1,54	3,06
$M_{s,l}/M_{s,q}$	3,75	1,45
$V_{s,l}/V_{s,q}$	1,49	1,07

Tab. 4.1: Schnittkraftverhältnisse des Referenz- und des Vergleichsfalls

4.1.2 Verformung

Der Verlauf der Verformung in Eigengewichtsrichtung des Referenzfalls ist mit Hilfe von Höhenlinien in Abb. 4.5 dargestellt. Diese Höhenlinien verlaufen hauptsächlich parallel zu den Linienauflagern am Rand. Demzufolge ist die Verformung über die Querrichtung

konstant. In unmittelbarer Nähe der Stützen entstehen zwar kreisförmige Höhenlinien, allerdings unterscheiden sich die Durchbiegungen in Querrichtung in dieser Achse nur gering. Die Zunahme der Verformung erfolgt hauptsächlich in Längsrichtung. Insgesamt kann dieses Verhalten mit dem Konzept des deckengleichen Unterzugs beschrieben werden.

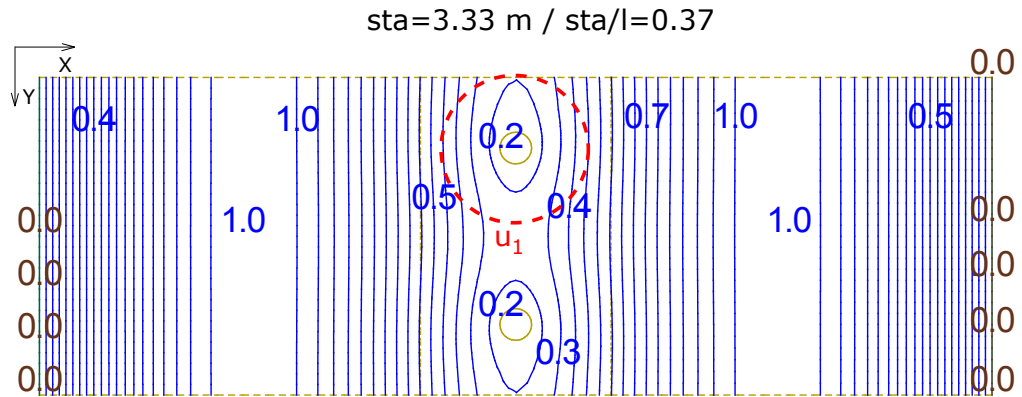


Abb. 4.5: Verformung in Eigengewichtsrichtung in mm: Referenzfall mit sta/l von 0,37

In Abb. 4.6 ist der Einfluss von sta auf die Verformung dargestellt. Durch die Vergrößerung des Stützenabstands ist die Platte in der Lage sich in Querrichtung zwischen den Stützen viel stärker zu verformen. Im vorliegenden Fall ist die Zunahme der Verformung um die Stütze in alle Richtungen ungefähr gleich (kreisförmige Höhenlinien um die Stützen). Dieser Zustand wird auch als pilzförmiges Verformungsbild beschrieben. Der Effekt eines deckengleichen Unterzugs ist deutlich geringer ausgeprägt.

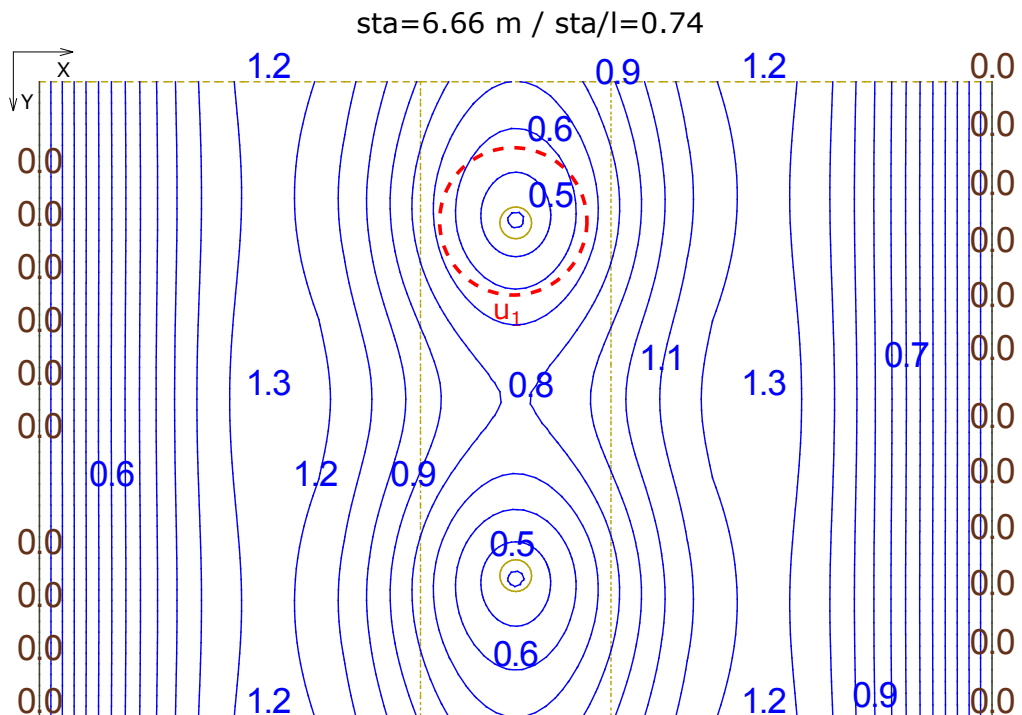


Abb. 4.6: Verformung in Eigengewichtsrichtung in mm: Vergleichsfall mit sta/l von 0,74

Für einen besseren Vergleich wird das Verhältnis q_δ/l_δ gegenübergestellt, siehe Abb. 4.7. Dieses Verhältnis kann als Faktor zur Beschreibung der Verformungsfigur im relevanten Bereich um die Stütze verstanden werden. Hierzu wird zunächst die absolute Durchbiegung im kritischen Rundschnitt in Längsrichtung ausgelesen ($\delta(P_1)$). Dann wird in Querrichtung der Punkt mit exakt derselben Durchbiegung gesucht ($P_q(\delta(P_1))$). Letztendlich wird das Verhältnis aus dem Abstand beider Punkte zur Stütze gebildet (q_δ bzw. l_δ).

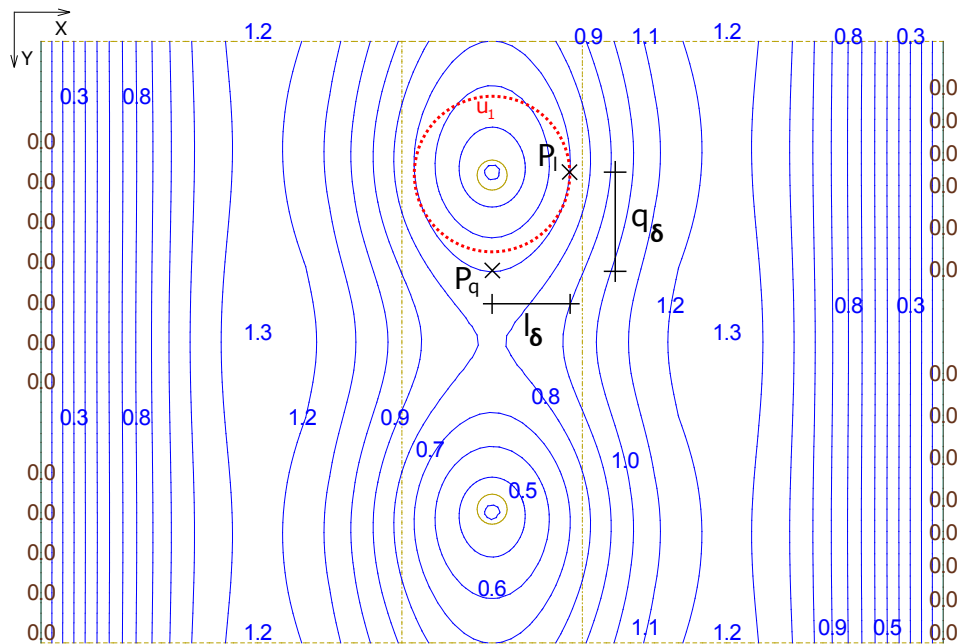


Abb. 4.7: Definition der Verformungspunkte

Ist das Verhältnis q_δ/l_δ gleich 1,0, bilden die Höhenlinien im Bereich des kritischen Rundschnitts u_1 einen Kreis.

Da sich der Verlauf der Verformung auf den Verlauf der Momente zurückführen lässt, werden die Positionen der Momentennullpunkte der Gurtstreifen in Längs- und Querrichtung zur Stütze verglichen ($X_{0,l}/X_{0,q}$, gezeigt in Abb. 4.8).

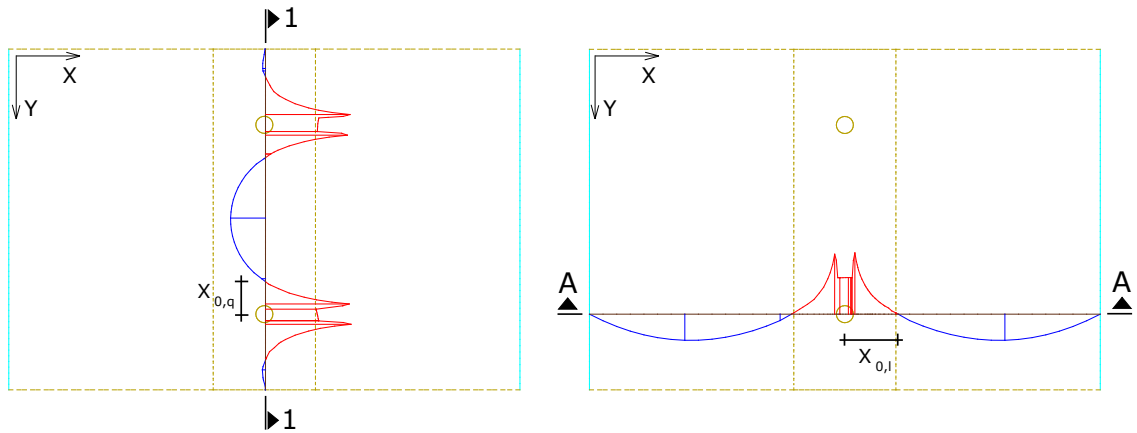


Abb. 4.8: Momentennullpunkte in Längs- und Querrichtung

Das Verhältnis der Momentennullpunkte lässt sich nach Abb. 4.9 auch analytisch herleiten. Unter der Annahme eines Durchlaufträgers in Querrichtung und der Berücksichtigung des monolithischen Anschlusses der Stützen kann das vereinfachte statische System als beidseitig eingespannter Träger dargestellt werden. Beim System in Längsrichtung handelt es sich um einen Durchlaufträger und dieser wird als Einfeldträger mit einem gelenkigen und einem eingespannten Auflager dargestellt.

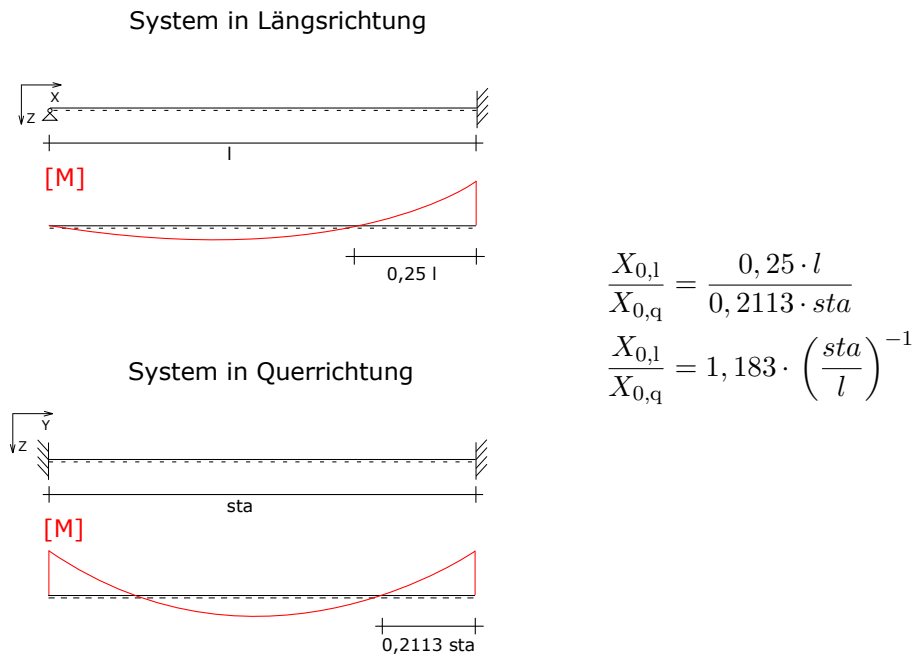


Abb. 4.9: analytische Lösung

Im Fall des Referenzbeispiels ist das Verhältnis q_δ/l_δ nicht definiert (n.d.), da in Querrichtung kein Punkt mit derselben Verschiebung in Eigengewichtsrichtung wie der Punkt des kritischen Rundschnitts in Längsrichtung existiert. Am Beispiel des Vergleichsfalls beträgt das Verhältnis $q_\delta/l_\delta = 1,23$.

Betrachtet man die vorliegenden Beispiele ergeben bezüglich der Momentennullpunkte folgende Verhältnisse (Tabelle 4.2):

	$sta/l = 0,37$	$sta/l = 0,74$
$X_{0,l}/X_{0,q}$	3,31	1,62
$X_{0,l}/X_{0,q}$ analytisch	3,20	1,60
Abweichung in %	3,44	1,25

Tab. 4.2: Momentennullpunkte des Referenz- und des Vergleichsfalls

4.2 Grenzfälle

Als Grenzfälle des zuvor beschriebenen Verhaltens können einerseits das tatsächliche Vorhandensein eines Unterzugs bzw. eine Brücke mit einem sta/l Verhältnis von 1,0 betrachtet werden. In Abb. 4.10 und 4.11 sind die Schnittkraftverläufe der beiden Grenzfälle dargestellt. Der Grenzfall mit $sta/l = 1,0$ wird nachfolgend als Durchstanzsystem bezeichnet.

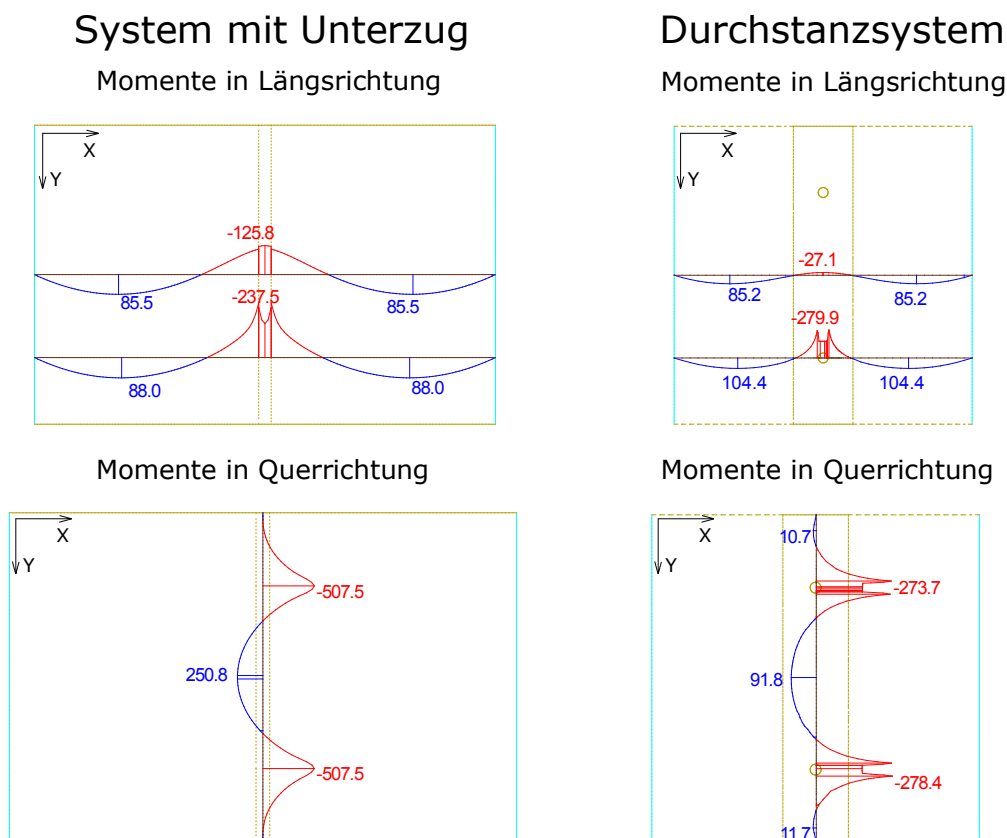
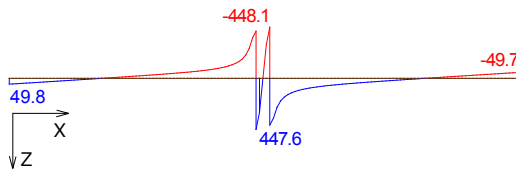


Abb. 4.10: Unterscheidung von Querkraft und Durchstanzsystemen mittels Schnittkräften (in kNm/m)

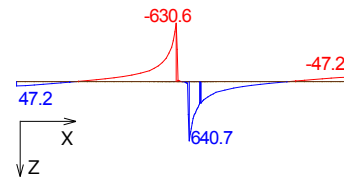
System mit Unterzug

Querkräfte in Längsrichtung

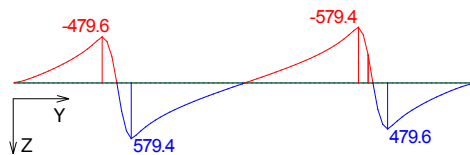


Durchstanzsystem

Querkräfte in Längsrichtung



Querkräfte in Querrichtung



Querkräfte in Querrichtung

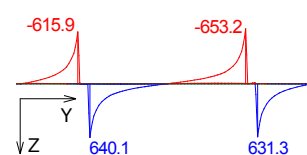


Abb. 4.11: Unterscheidung von Querkraft und Durchstanzen mittels Schnittkräften (in kN/m)

Tabelle 4.3 stellt die Schnittkraftverhältnisse der beiden Grenzfälle gegenüber.

	System mit Unterzug	Durchstanzsystem
$M_{s,l}/M_{f,l}$	1,89	10,33
$M_{s,l}/M_{s,q}$	0,47	1,03
$V_{s,l}/V_{s,q}$	0,77	0,98

Tab. 4.3: Schnittkraftverhältnisse der Grenzfälle

Aufgrund der Spannweite des Unterzugs sind die Verhältnisse $M_{s,l}/M_{s,q}$ und $V_{s,l}/V_{s,q}$ kleiner als 1,0. Besonders auffallend ist der Unterschied von $M_{s,l}/M_{f,l}$. Die Konzentration der Schubspannung im Stützbereich ist im System mit Unterzug erheblich geringer als beim Durchstanzsystem.

Abb. 4.12 zeigt den Durchbiegungsverlauf der beiden Grenzfälle. Für die Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich des zu erwartenden Schubversagens ist vor allem der Verlauf der Durchbiegung in Längs- und Querrichtung wichtig, der absolute Betrag der Durchbiegungen ist hingegen von untergeordneter Bedeutung.

Handelt es sich um eine Brücke mit Unterzug in Querrichtung, verlaufen die Höhenlinien der Verschiebung parallel zum Unterzug. Erst in unmittelbarer Nähe der Stützen gehen die Höhenlinien in Ellipsen bzw. Kreise über. Betrachtet man den Stützbereich, zeigt die Verformung in Längsrichtung eine sehr starke Zunahme mit zunehmendem Abstand zur Stützlinie. In Querrichtung ist eine solch ausgeprägte Zunahme der Durchbiegung nicht zu beobachten. Es lässt sich folgender Kraftfluss erkennen: die Last wandert zuerst in den Unterzug und anschließend vom Unterzug in die Stützen.

Hingegen entstehen im Durchstanzsystem kreisförmige Höhenlinien rund um die Stützen. Erst in unmittelbarer Nähe zum Linienlager am freien Rand gehen diese kreisförmigen Höhenlinien in parallel zum Randaufleger verlaufende Linien über. Es lässt sich wiederum der Kraftfluss erkennen: die Last wird direkt von der Stütze angezogen.

Die Verhältnisse zur Beschreibung der Verformungsfigur q_δ/l_δ betragen für die beiden Grenzfälle "n.d." im Unterzugsystem bzw. "1,0" im Durchstanzsystem.

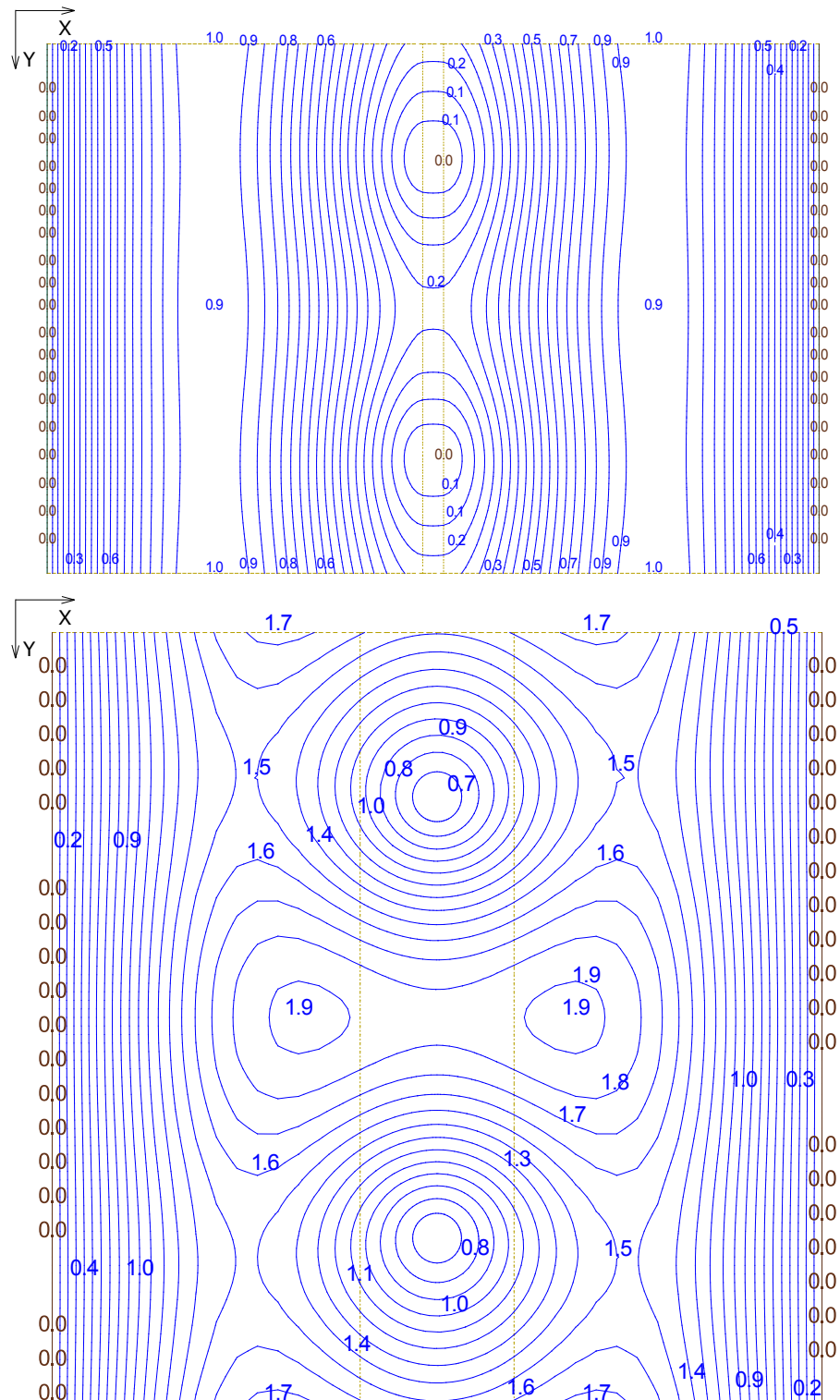


Abb. 4.12: Durchbiegung der Grenzfälle in mm; **oben:** Systems mit Unterzug; **unten:** Durchbiegung des Durchstanzsystems

5 Parameterstudie

Mit der nachfolgenden Parameterstudie wird einerseits der Einfluss relevanter Geometrie- parameter der Brücke auf die Schnittkräfte und deren Verteilung sowie der Einfluss auf die Verformungsfigur der Brückenplatte untersucht. Andererseits wird mit nichtlinearen Berechnungen der Einfluss der Rissbildung ermittelt.

Darüber hinaus wird das lokale Verhalten im durchstanzgefährdeten Bereich mit einer detaillierten Auswertung von Spannungen im kritischen Rundschnitt analysiert.

5.1 Einfluss des Stützenabstands

Der Einfluss des Stützenabstands wird im Bereich sta/l von 0,37 bis 1,3 untersucht. Hierbei werden Feldlänge l , Höhe der Platte h und Stützendurchmesser d gemäß dem Referenzfall konstant gehalten ($l = 9,0$ m / $h = 0,6$ m / $d = 0,6$ m). Die untersuchten Fälle weisen somit alle eine Schlankheit von $l/h = 15$ auf. Zur Veranschaulichung des Einflusses einer realistischen Idealisierung der monolithisch angeschlossenen Stütze werden die Ergebnisse außerdem mit dem Fall einer Modellierung der Stützen mittels einer einzigen Knotenfesthaltung pro Stütze verglichen.

5.1.1 Schnittkräfte

Hinsichtlich der Schnittkräfte wirkt sich der Stützenabstand sowohl in Längs- als auch in Querrichtung aus. In Längsrichtung wird vor allem eine Abnahme von $M_{f,1}$ bei zunehmendem Stützenabstand hervorgerufen. Dies resultiert aus der Abnahme der Quersteifigkeit zwischen den Stützen. Gleichzeitig steigt hierdurch $M_{s,1}$.

Überlagert wird dieser Trend außerdem von einer absoluten Zunahme der Belastung infolge der größeren Brückenbreite bei zunehmendem Stützenabstand aber gleichbleibender Stützenanzahl. Insgesamt muss aber festgestellt werden, dass der Einfluss aus der Abnahme der Quersteifigkeit überwiegt. Wie in Abb. 5.1 ersichtlich, steigt letztendlich das Verhältnis $M_{s,1}/M_{f,1}$ bei Zunahme von sta/l überproportional an.

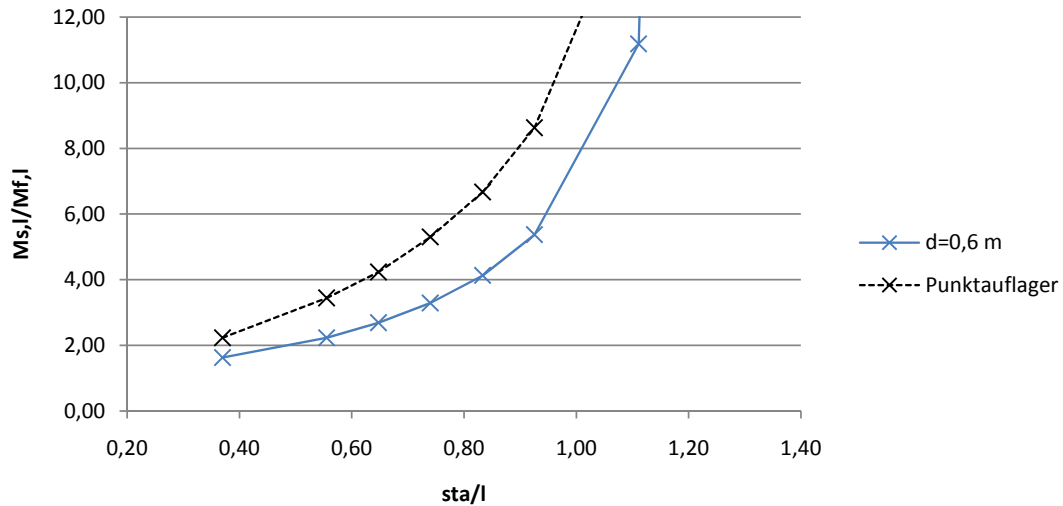


Abb. 5.1: Schnittkraftverhältnisse abhängig von sta/l

Abb. 5.2 zeigt, dass sich das Verhältnis $M_{s,l}/M_{s,q}$ bei zunehmendem sta/l dem Wert 1,0 annähert. $M_{s,q}$ ist primär von der Spannweite in Querrichtung (sta) abhängig. Je größer sta , desto größer $M_{s,q}$ und desto kleiner $M_{s,l}/M_{s,q}$. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Verhältnisse $sta/l > 1,0$ bereits Fälle mit größer Spannweite in Quer- als in Längsrichtung darstellen und somit Verhältnisse $M_{s,l}/M_{s,q} < 1,0$ auftreten.

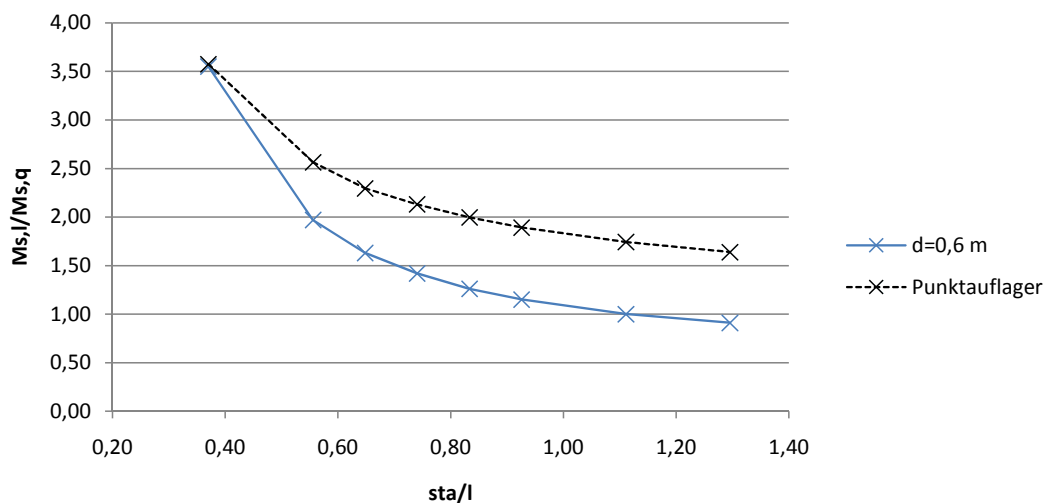


Abb. 5.2: Schnittkraftverhältnisse abhängig von sta/l

Vergleicht man die Momentenverhältnisse der Berechnungen mit idealisierten Stützen mit den Momentenverhältnissen der Berechnungen mit Punktlagern, kann festgestellt, dass:

- generell größere Verhältnisse $M_{s,l}/M_{f,l}$ und $M_{s,l}/M_{s,q}$ auftreten, wobei
 - die Abweichung von $M_{s,l}/M_{f,l}$ mit steigendem sta/l zunimmt, während
 - die Abweichung von $M_{s,l}/M_{s,q}$ ab $sta/l \geq 0,85$ annähernd gleich bleibt.

Hintergrund dieses Verhaltens ist die Unterschätzung der Steifigkeit in Querrichtung zwischen den Stützen, wenn nur Punktlager anstelle von idealisierten Stützen berücksichtigt werden.

Hinsichtlich des Schubflusses in Längs- und Querrichtung wirkt sich der Stützenabstand hauptsächlich im Bereich $sta/l \leq 0,6$ aus, wobei das Verhältnis $V_{s,l}/V_{s,q}$ für kleine Stützenabstände bis zu 1,5 ansteigt, siehe Abb. 5.3.

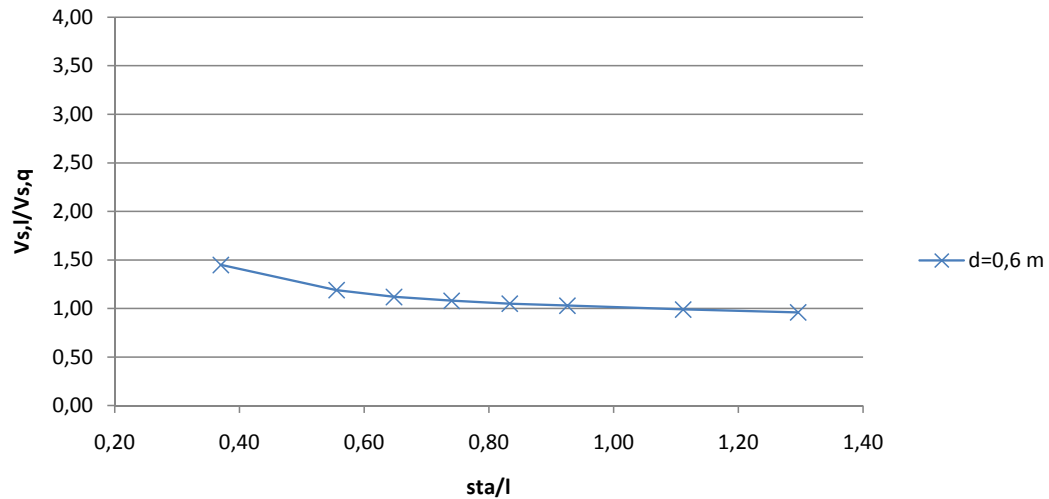


Abb. 5.3: Schnittkraftverhältnisse abhängig von sta/l

Auf den Vergleich mit den Querkraftverhältnissen aus Berechnungen mit Punktlagern wird verzichtet, da diese konsistenterweise direkt über dem Auflager ausgewertet werden müssten, dort aber durch Auflagersingularitäten stark verzerrt sind.

5.1.2 Verformung

Die Verformungsfigur wird ebenfalls sehr stark vom Verhältnis sta/l geprägt. Abb. 5.4 zeigt, dass es ab $sta/l \geq 0,6$ zum pilzförmigen Verformungsbild kommt. Bei $sta/l = 0,85$ bilden die Höhenlinien im Bereich des kritischen Rundschnitts einen Kreis.

Außerdem kann festgestellt werden, dass die Form der Verformungsfigur kaum von der Art der Stützenmodellierung beeinflusst wird.

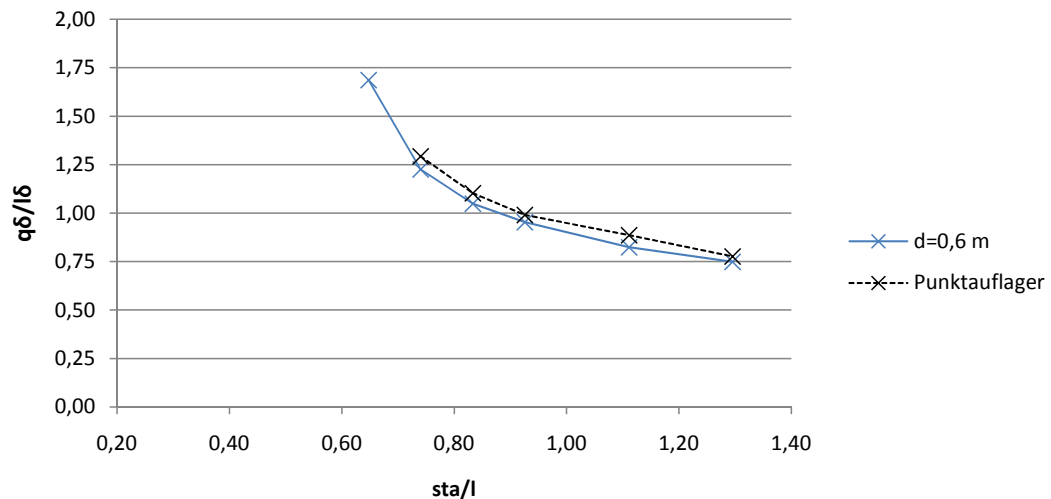


Abb. 5.4: Verhältnis q_{δ}/l_{δ} abhängig von sta/l

Die Lage der Momentennullpunkte und deren Verhältnis $X_{0,l}/X_{0,q}$ zeigt Abb. 5.5. Aufgrund unterschiedlicher statischer Systeme in Längs- und Querrichtung sind die Abstände zu den Momentennullpunkten in Längs- und Querrichtung bei $sta/l \approx 1,15$ gleich. Die gute Übereinstimmung dieser Ergebnisse mit der analytischen Lösung bestätigt die Überlegungen zum Tragverhalten.

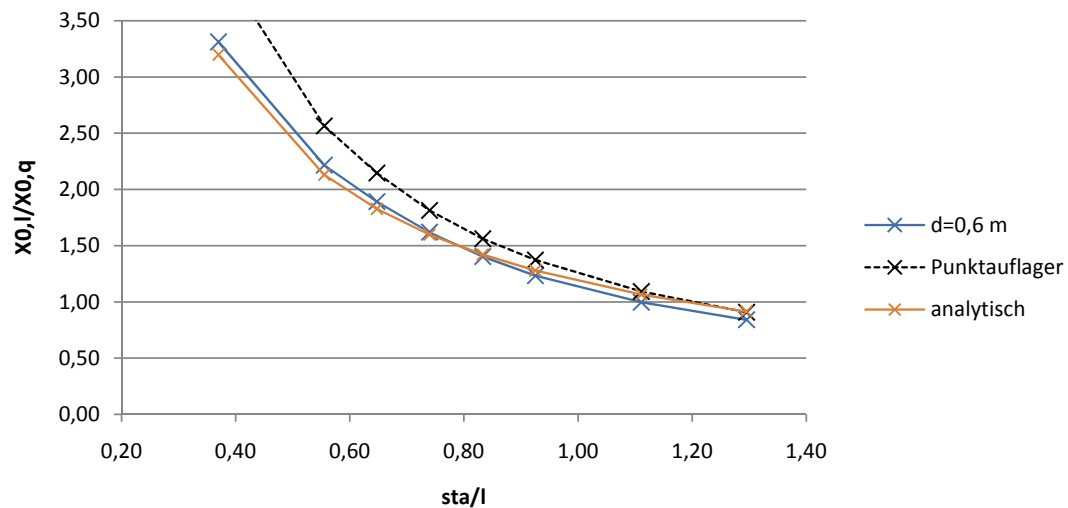


Abb. 5.5: Momentennullpunkte abhängig von sta/l

5.2 Einfluss des Stützendurchmessers

In diesem Abschnitt werden die Schnittkräfte und der Verlauf der Verformung im Stützbereich abhängig vom Stützendurchmesser d beschrieben. Für eine Vergleichbarkeit mit den vorherigen Ergebnissen wird dieser Einfluss wieder in Abhängigkeit vom Verhältnis

Stützenabstand zu Feldlänge sta/l dargestellt.

Die Feldlänge l und die Höhe der Platte h entsprechen auch hier dem Referenzfall ($l = 9,0 \text{ m}$ / $h = 0,6 \text{ m}$) mit einer Schlankheit von $l/h = 15$. Der Durchmesser d variiert von $0,6 \text{ m}$ bis $1,2 \text{ m}$, der untersuchte Bereich von sta/l erstreckt sich wieder von $0,37$ bis $1,3$.

5.2.1 Schnittkräfte

Eine Vergrößerung des Stützendurchmessers d wirkt sich auf die Schnittkraftverhältnisse aus. Vergrößert man d , wird das System im Bereich der Stützen steifer und dadurch erhöht sich der Effekt des deckengleichen Unterzugs. Es wird mehr Last von dem in Querrichtung verlaufenden Gurtstreifen angezogen, dadurch vergrößert sich $M_{f,l}$ und das Verhältnis $M_{s,l}/M_{f,l}$ sinkt (Abb. 5.6).

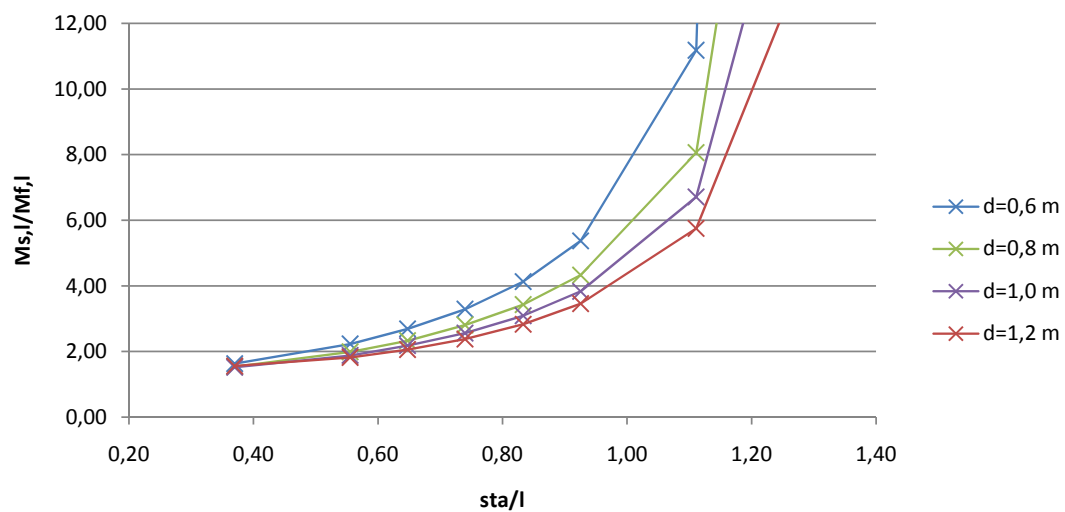


Abb. 5.6: Schnittkraftverhältnisse unter Variation von d

Zusätzlich zu der Erhöhung der Steifigkeit bewirkt ein größerer Stützendurchmesser außerdem eine Senkung der tatsächlichen Spannweite in Querrichtung. Wie Abb. 5.7 veranschaulicht, steigt hierdurch das Verhältnis von $M_{s,l}/M_{s,q}$, vor allem für kleine sta/l . Je größer sta/l wird, desto kleiner ist der Unterschied von $M_{s,l}/M_{s,q}$ abhängig vom Stützendurchmesser.

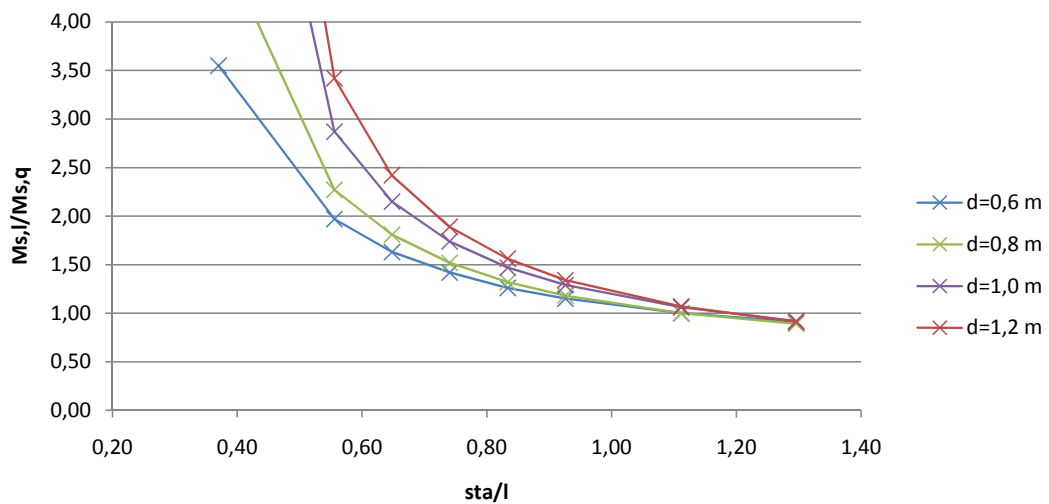


Abb. 5.7: Schnittkraftverhältnisse unter Variation von d

Der Schubfluss hängt ebenfalls deutlich vom Stützendurchmesser ab. Je größer d desto kleiner $V_{s,q}$ und desto größer $V_{s,l}$. Infolgedessen vergrößert sich das Verhältnis $V_{s,l}/V_{s,q}$ bei größeren Stützendurchmessern signifikant (Abb. 5.8). Der Einfluss eines sinkenden Abstands zwischen den Stützen infolge eines zunehmenden Stützendurchmessers spiegelt sich auch hier wieder.

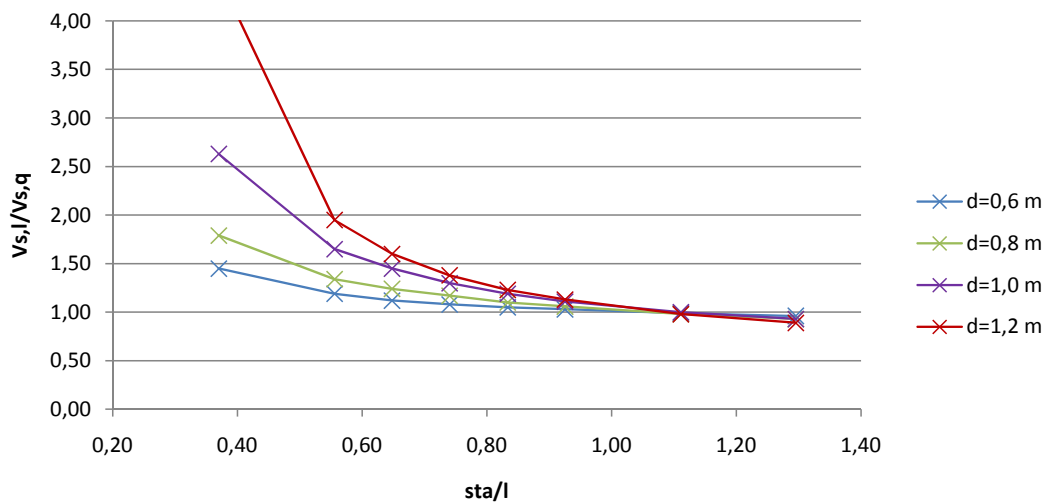


Abb. 5.8: Schnittkraftverhältnisse unter Variation von d

Zusätzlich zu diesen Effekten kommt es durch die Erhöhung des Stützendurchmessers zu einer Ausrundung der Stützmomente in Längs- und Querrichtung. Dadurch verringern sich die Stützenmomente auch absolut (Abb. 5.9).

Durchmesser 60 cm

Durchmesser 120 cm

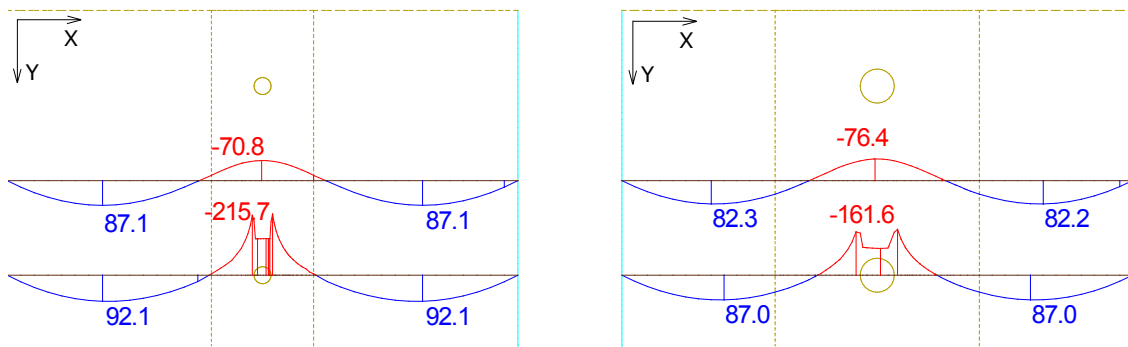


Abb. 5.9: Momentenverläufe in Längsrichtung abhängig vom Stützendurchmesser in kNm/m

5.2.2 Verformung

Abb. 5.10 zeigt, dass der Verlauf der Durchbiegung im Bereich der Stütze erst bei einem sta/l Verhältnis unter 0,8 vom Stützendurchmesser beeinflusst wird.

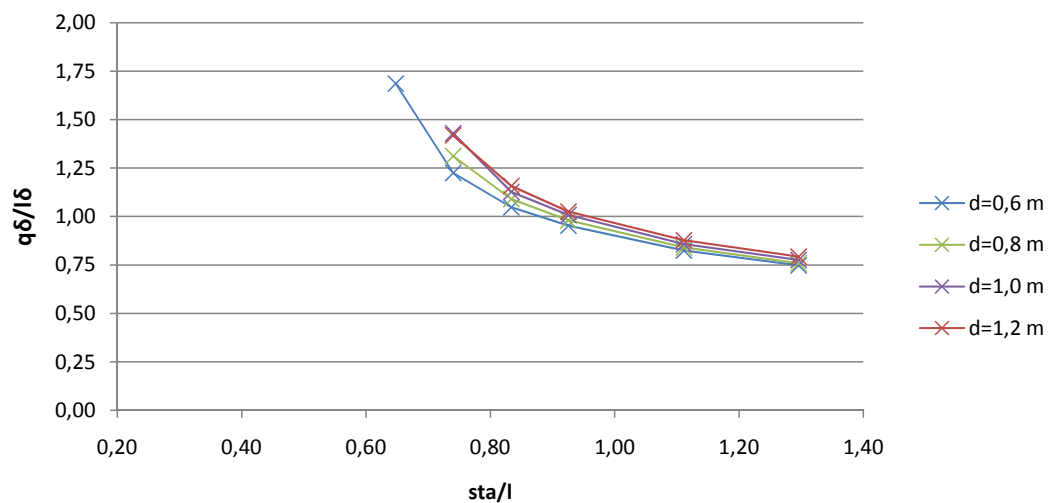


Abb. 5.10: Verhältnis $q\delta/l\delta$ unter Variation von d

Die Lage der Momentennullpunkte und deren Verhältnis wird nur sehr gering vom Durchmesser beeinflusst (Abb. 5.11).

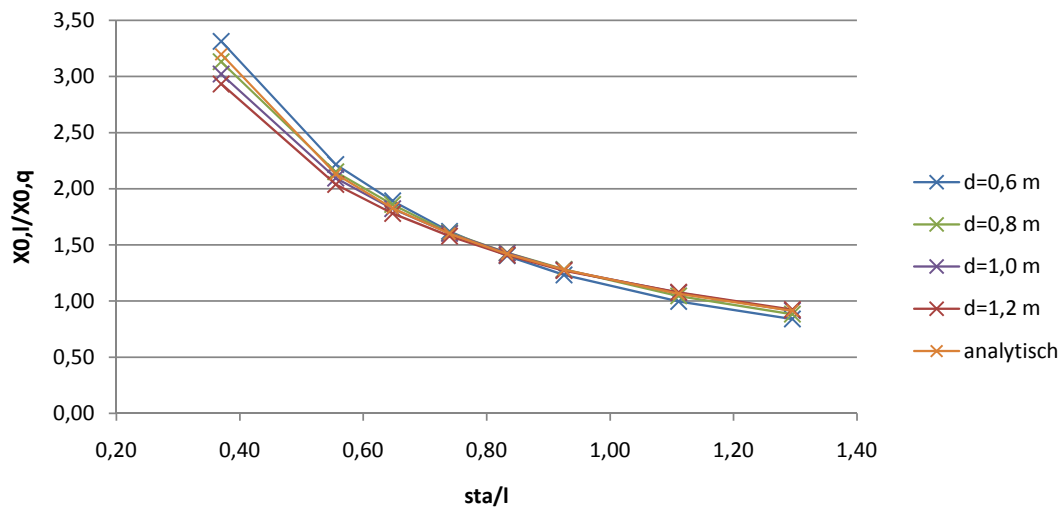


Abb. 5.11: Momentennullpunkte unter Variation von d

5.3 Einfluss der Feldlänge und der Schlankheit Feldlänge zu Plattendicke

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung der Feldlänge l und der Schlankheit l/h (Feldlänge zu Plattendicke) auf die Entwicklung der Schnittkräfte, deren Verhältnisse und das Verformungsbild untersucht. Dazu variiert l/h von 15 über 20 bis 25 und die Feldlänge von 9,0 m bis 24,0 m. Der Stützendurchmesser stimmt mit der Dicke der Platte überein. Alle Verhältnisse sind wieder von sta/l abhängig.

Vergrößert sich die Feldlänge l bzw. die Schlankheit l/h so wächst der Stützenabstand sta und somit auch die Brückenbreite bei gleichbleibendem sta/l und gleichbleibender Stützenanzahl. Dadurch muss die Stütze mehr Last abtragen. Die erhöhte Beanspruchung der Stütze kann dazu führen, dass der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit „Begrenzung der Spannungen“ ($\sigma_c \leq 0,6 \cdot f_{ck}$) nicht eingehalten wird. In solchen Fällen wird die Parameterstudie abgebrochen.

Es bestünde zwar die Möglichkeit, die Betonfestigkeitsklasse der Stütze zu erhöhen, oder den Stützendurchmesser zu vergrößern, jedoch würden diese Maßnahmen im Einzelfall die Vergleichbarkeit in der Parametristudie verfälschen.

5.3.1 Schnittkräfte

Man stellt fest, dass die Verhältnisse von $M_{s,l}/M_{f,l}$, $M_{s,l}/M_{s,q}$ und $V_{s,l}/V_{s,q}$ (Abb. 5.12 bis 5.14) weder von der Feldlänge l noch von der Schlankheit l/h abhängig sind.

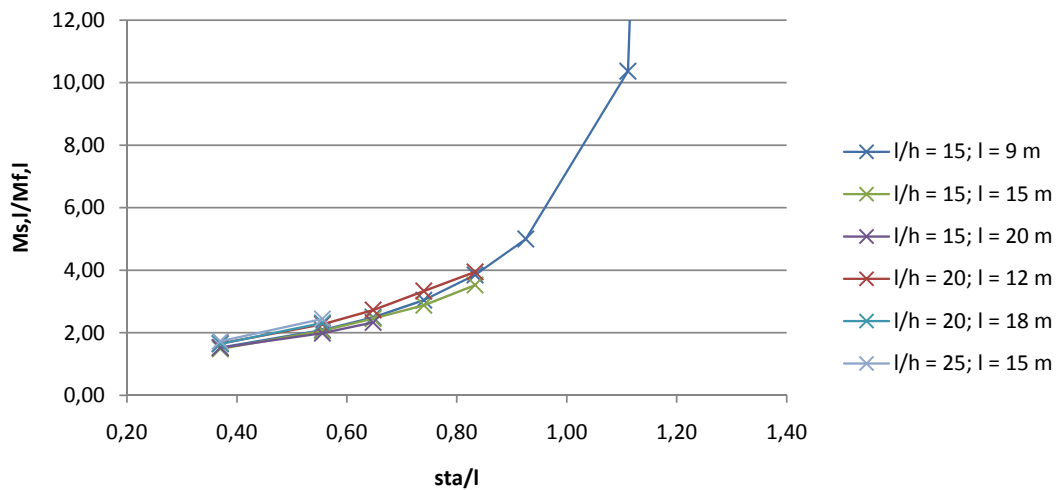


Abb. 5.12: Schnittkraftverhältnisse unter Variation von l und l/h

Nur bei sehr geringem sta/l haben die Werte bezüglich $M_{s,l}/M_{s,q}$ eine gewisse Abweichung zueinander. Im Vergleich zu den Schnittkraftverhältnissen abhängig vom Durchmesser (Abschnitt 5.2) ist diese Abweichung allerdings gering.

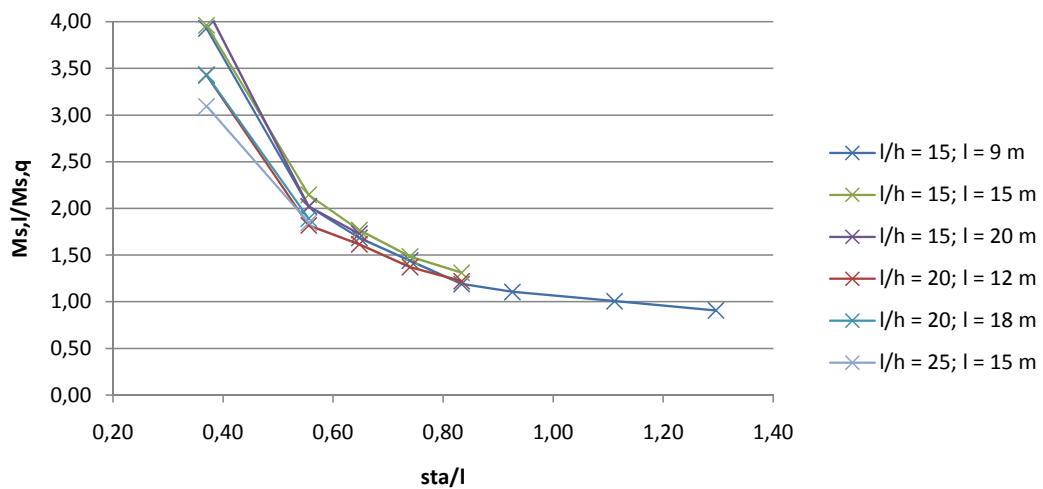


Abb. 5.13: Schnittkraftverhältnisse unter Variation von l und l/h

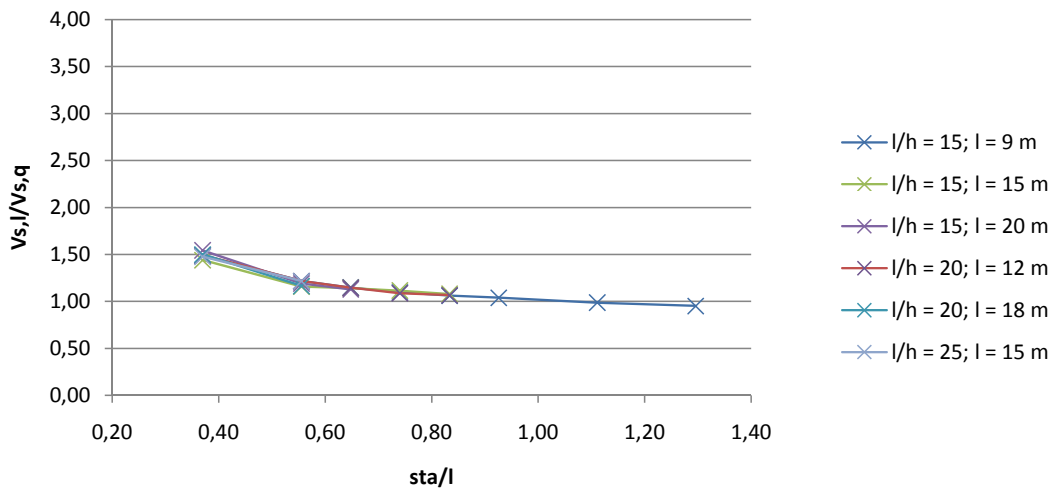


Abb. 5.14: Schnittkraftverhältnisse unter Variation von l und l/h

5.3.2 Verformung

Bleiben die Schlankheit l/h und das Verhältnis von Plattendicke zu Stützenradius gleich, ist das Verhältnis q_δ/l_δ nicht von der absoluten Feldlänge l abhängig (Abb. 5.15 und 5.16).

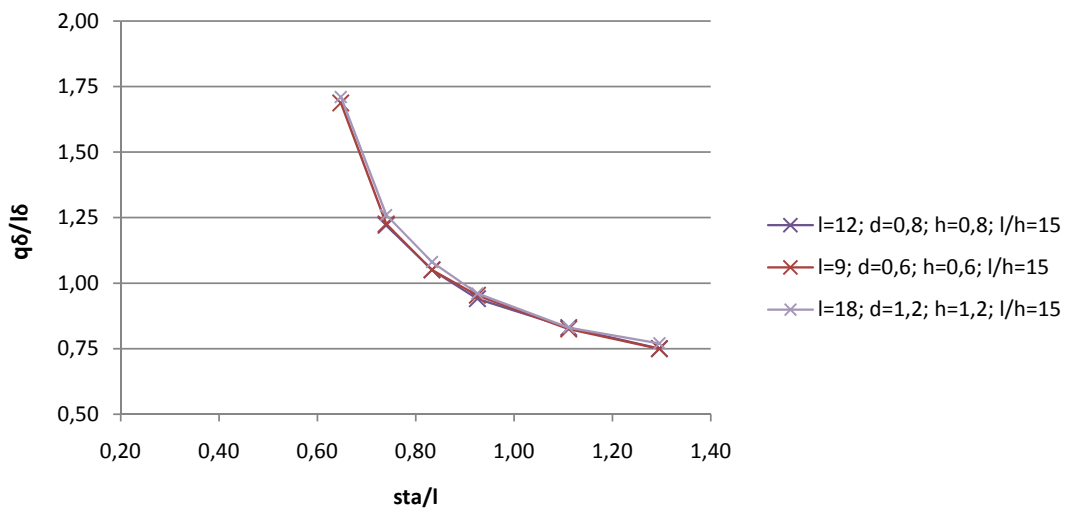


Abb. 5.15: Verhältnis q_δ/l_δ unter Variation von l

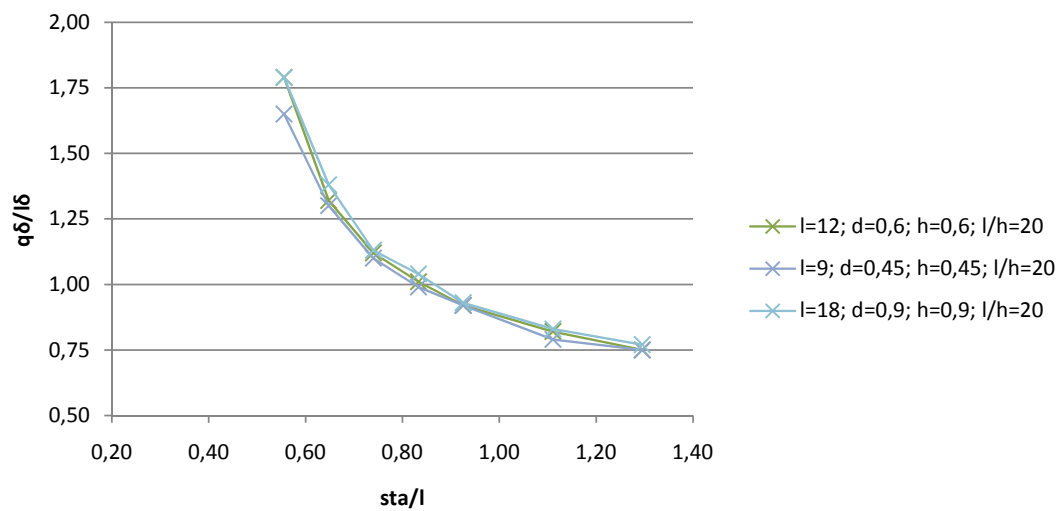


Abb. 5.16: Verhältnis q_δ/l_δ unter Variation von l

Abb. 5.17 und 5.18 zeigen aber, dass das Verhältnis q_δ/l_δ von der Schlankheit l/h abhängt. Durch eine Variation von l/h verändert sich die Lage des kritischen Rundschnitts u_1 und diese beeinflusst q_δ/l_δ . Weiters erkennt man, dass das Verhältnis q_δ/l_δ nur von sta/l und der Lage des kritischen Rundschnitts abhängig ist.

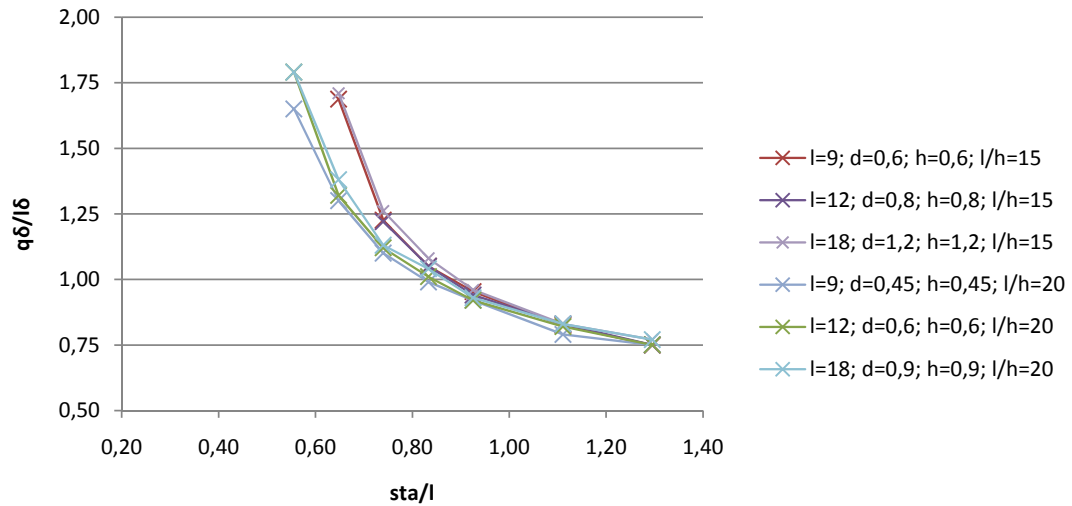


Abb. 5.17: Verhältnis q_δ/l_δ unter Variation von l/h

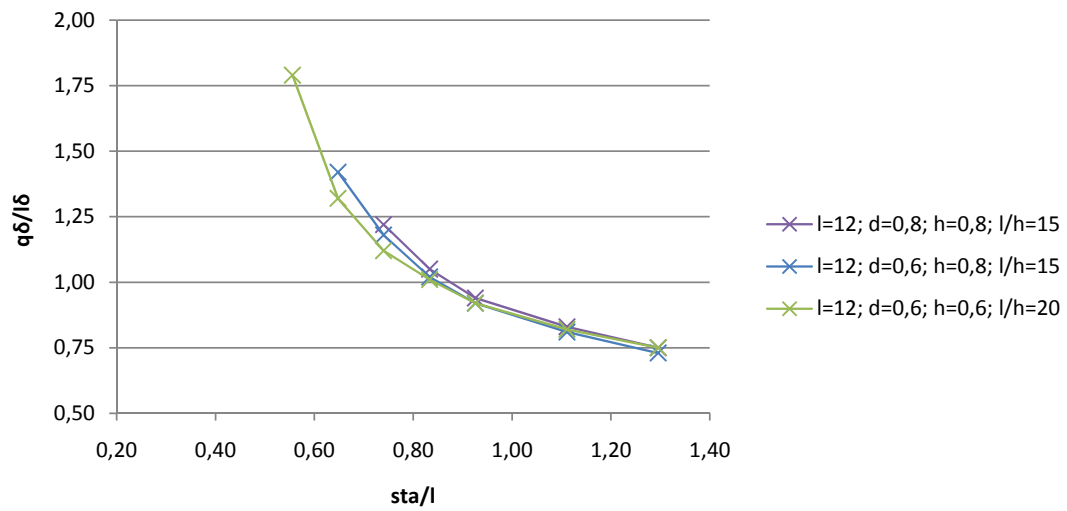


Abb. 5.18: Verhältnis q_δ/l_δ unter Variation von d und l/h

Im Gegensatz zum Verhältnis der Durchbiegung im Bereich des kritischen Rundschnitts q_δ/l_δ (Abb. 5.19) wird die Lage der Momentennullpunkte nur vom Verhältnis Stützenabstand zu Feldlänge sta/l beeinflusst. Das Verhältnis $X_{0,1}/X_{0,q}$ aus der Parameterstudie stimmt mit der analytischen Lösung überein (Abb. 5.20).

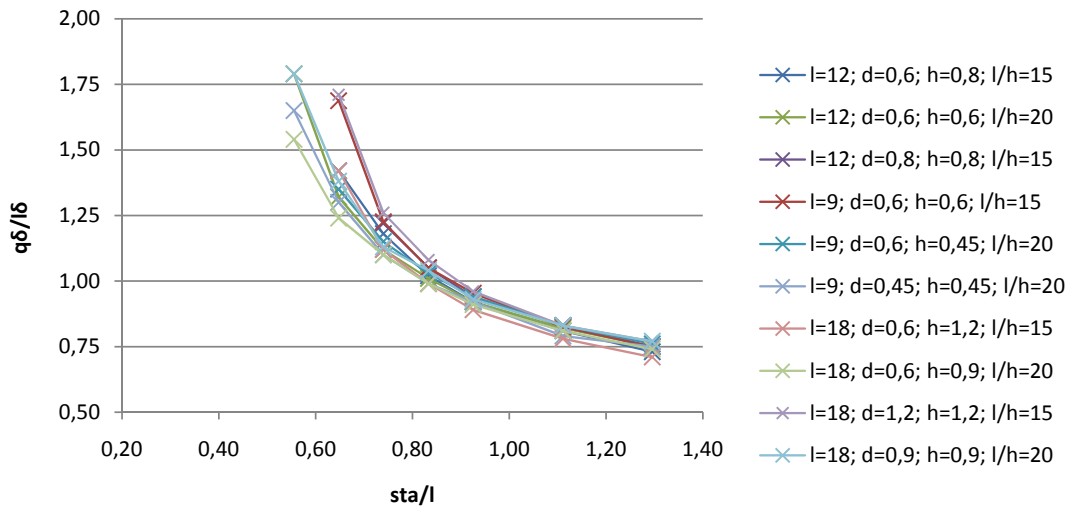


Abb. 5.19: Verhältnis q_δ/l_δ unter Variation von l und l/h

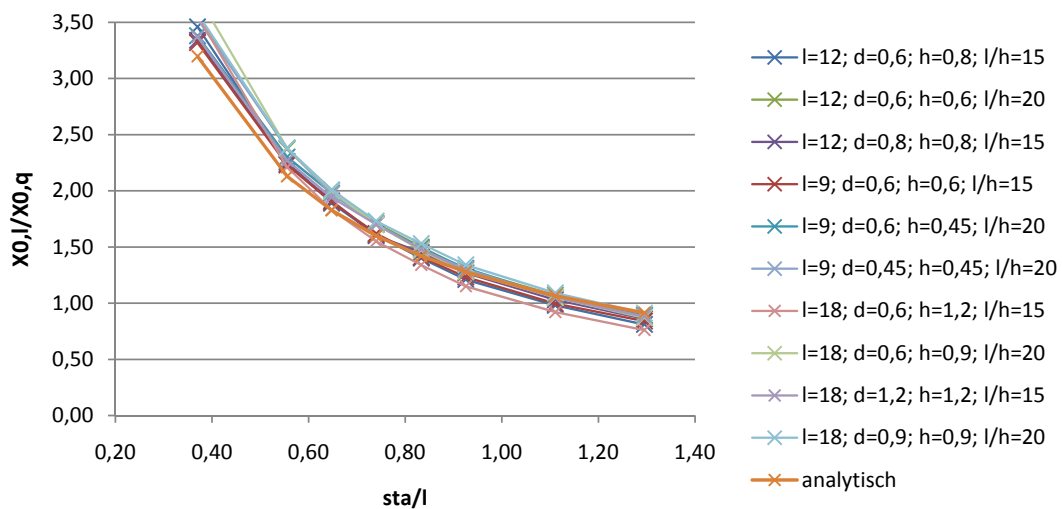


Abb. 5.20: Momentennullpunkte unter Variation von l und l/h

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Schnittkraftverteilungen nicht signifikant von der absoluten Feldlänge und der Schlankheit l/h beeinflusst werden. Allerdings ändert sich die Verformungsfigur im kritischen Bereich in Abhängigkeit von der Schlankheit l/h . Hintergrund ist, dass der kritische Rundschnitt von der statischen Nutzhöhe und somit direkt von h abhängt.

Vergrößert sich der Radius des Rundschnitts bei zunehmender Plattendicke, verringert sich der Einfluss der Stütze auf die Durchbiegung im Bereich des Rundschnitts. Bei einem sta/l Verhältnis kleiner als 0,55 entsteht ein pilzförmiges Verformungsbild um die Stütze sogar erst in unmittelbarer Nähe zu dieser und kann daher durch das Verhältnis q_δ/l_δ gar nicht mehr erfasst werden.

5.4 Einfluss des Werkstoffgesetzes

Die Auswirkung der Rissbildung auf die Schnittkräfte und den Verlauf der Durchbiegung wird in diesem Abschnitt diskutiert. Mit Blick auf eine Beurteilung von Versagensformen im Grenzzustand der Tragfähigkeit liefert eine solche Betrachtung wertvolle Informationen, da sich die Brücke dann im gerissenen Zustand befindet.

In dieser Detailuntersuchung werden die Parameter Feldlänge l , Höhe der Platte h und Stützendurchmesser d gemäß des Referenzfalls angenommen ($l = 9,0 \text{ m} / h = 0,6 \text{ m} / d = 0,6 \text{ m}$). Das ergibt wiederum ein Schlankheit von $l/h = 15$.

5.4.1 Schnittkräfte

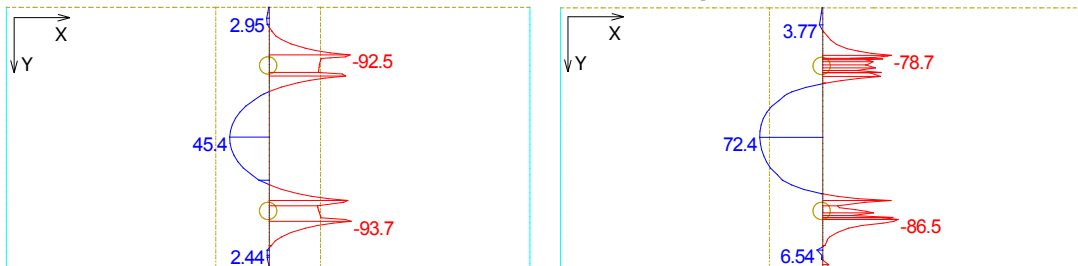
Kommt es zur Rissbildung lagern, sich die Schnittkräfte um. Wie beispielhaft in Abb. 5.21 ersichtlich, reduzieren sich die Stützmomente in Längsrichtung im Feldstreifen ($M_{f,l}$) und die Längsmomente im Gurtstreifen ($M_{s,l}$) wachsen an. Durch die Rissbildung sind die Quermomente im Feldbereich des querverlaufenden Gurtstreifens größer als im ungerissenen Zustand, im Stützbereich ($M_{s,q}$) werden sie hingegen kleiner. Die Umlagerung der

Querkkräfte in den Gurtstreifen verläuft gleich. Treten Risse auf, so wächst $V_{s,l}$ und $V_{s,q}$ sinkt.

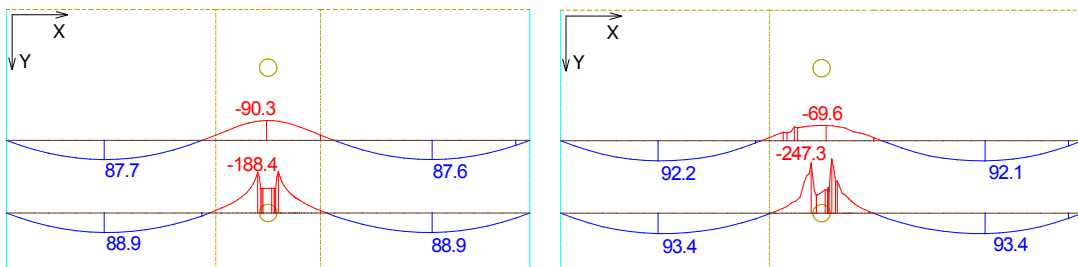
lineares Materialgesetz

nichtlineares Materialgesetz

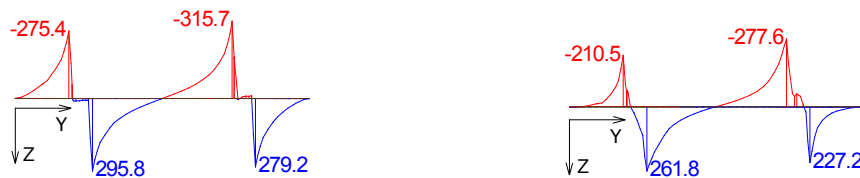
Momente in Querrichtung



Momente in Längsrichtung



Querkraft in Querrichtung über der Stütze



Querkraft in Längsrichtung über der Stütze

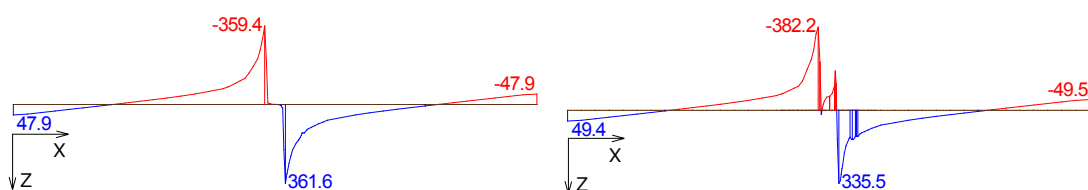


Abb. 5.21: Schnittkräfte in kNm/m bzw. kN/m abhängig vom Materialgesetz

Führt man eine Variation des Verhältnisses sta/l durch, wie in den Abb. 5.22 bis 5.24 gezeigt, stellen sich deutliche Abweichungen des Verhältnisses $M_{s,l}/M_{f,l}$ zwischen den Berechnungen mit linear-elastischem und nichtlinearem Materialgesetz heraus.

Durch die Schnittkraftumlagerung ist das Verhältnis $M_{s,l}/M_{f,l}$ der nichtlinearen Berechnung größer als der linear-elastischen Berechnung. Erst ab einem sta/l Verhältnis $\geq 0,9$ ist der Unterschied zwischen den Berechnungen mit linear-elastischem und nichtlinearem Werkstoffgesetz gering.

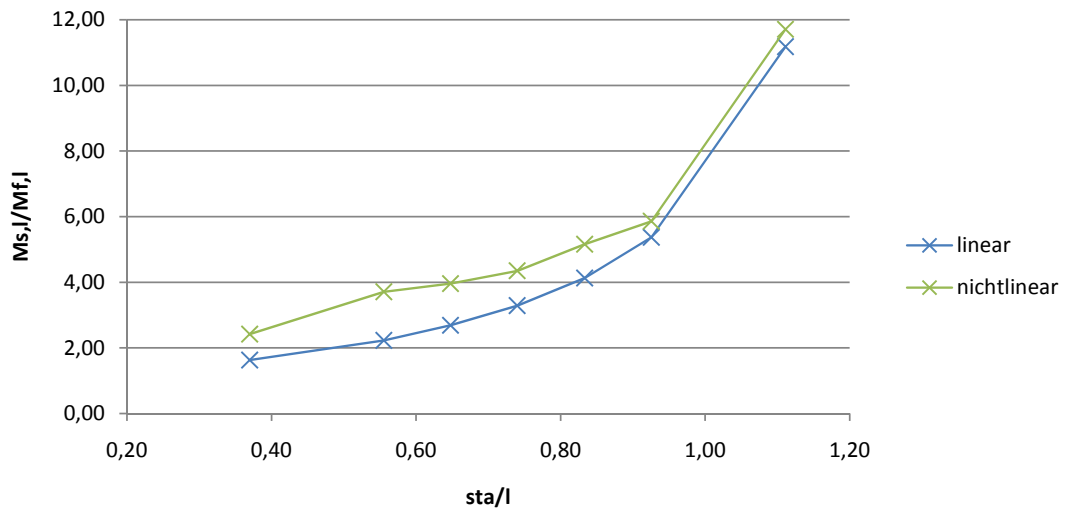


Abb. 5.22: Schnittkraftverhältnisse unter Variation des Werkstoffgesetzes

$M_{s,l}/M_{s,q}$ nimmt durch die Rissbildung und die damit verbundene Umlagerung der Schnittkräfte zu. Je größer sta/l desto geringer die Abweichung.

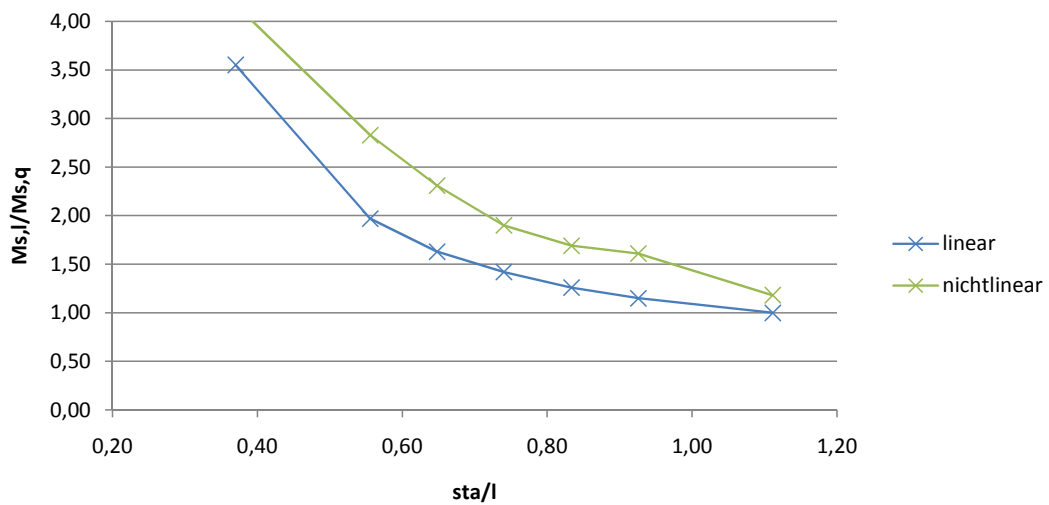


Abb. 5.23: Schnittkraftverhältnisse unter Variation des Werkstoffgesetzes

Das Verhältnis der Querkräfte $V_{s,l}/V_{s,q}$ vor und nach der Rissbildung weicht bei einem geringen sta/l Verhältnis voneinander ab und ist nach der Rissbildung wiederum größer als davor. Ab einem sta/l Verhältnis größer als 0,65 gibt es keinen signifikanten Unterschied von $V_{s,l}/V_{s,q}$ zwischen der linear-elastischen und der durchgeführten nichtlinearen Betrachtung.

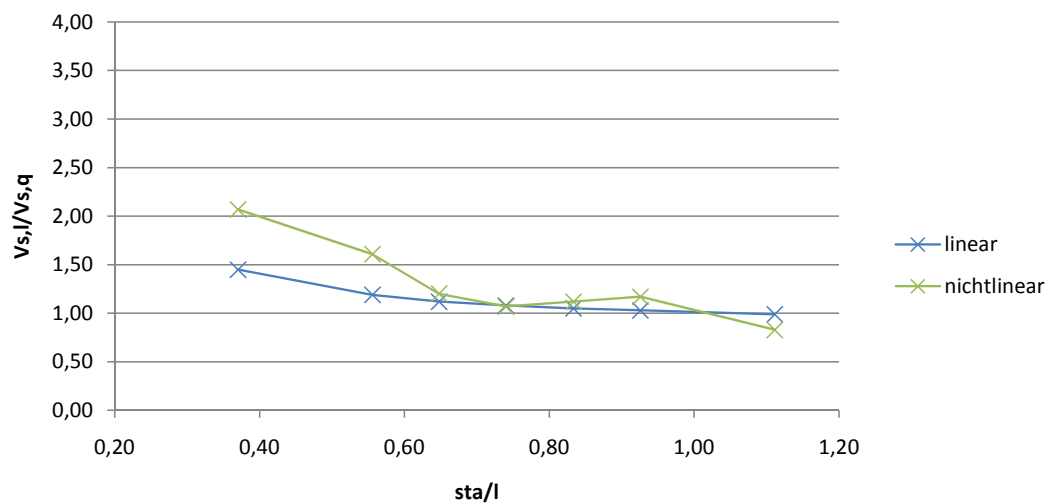


Abb. 5.24: Schnittkraftverhältnisse unter Variation des Werkstoffgesetzes

5.4.2 Verformung

Durch die Rissbildung werden die Verformungen der Brücke in Querrichtung vergleichmäßigt.

Wie in Abb. 5.25 eindrucksvoll gezeigt wird, gehen die mit einer linear-elastischen Berechnung ermittelten kreisförmigen Höhenlinien im Bereich des kritischen Rundschnitts in nahezu konstante Verformungen in Querrichtung über. Zusätzlich wird das System weicher und dadurch erfährt die Brücke eine größere Verschiebung in Eigengewichtsrichtung.

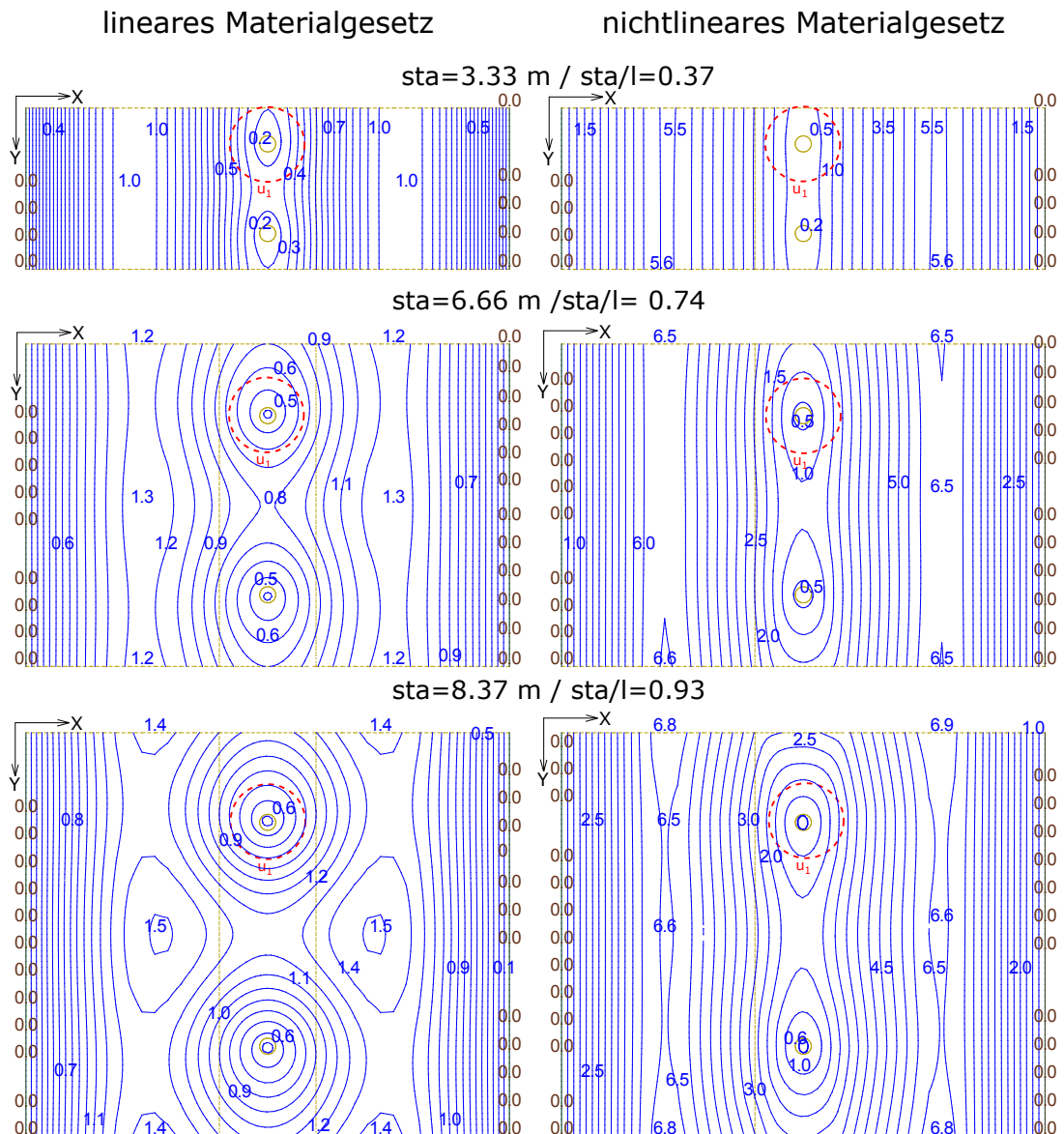


Abb. 5.25: Verformung in Eigengewichtsrichtung abhängig vom Materialgesetz in mm

Durch die Rissbildung kommt es auch zur Abweichung bezüglich des Verhältnisses der Momentennullpunkte $X_{0,1}/X_{0,q}$ (Abb. 5.26). $X_{0,1}$ wird durch die Rissbildung größer, $X_{0,q}$ wird hingegen kleiner. Insgesamt kann ein großer Unterschied von $X_{0,1}/X_{0,q}$ in Abhängigkeit von der Rissbildung festgestellt werden.

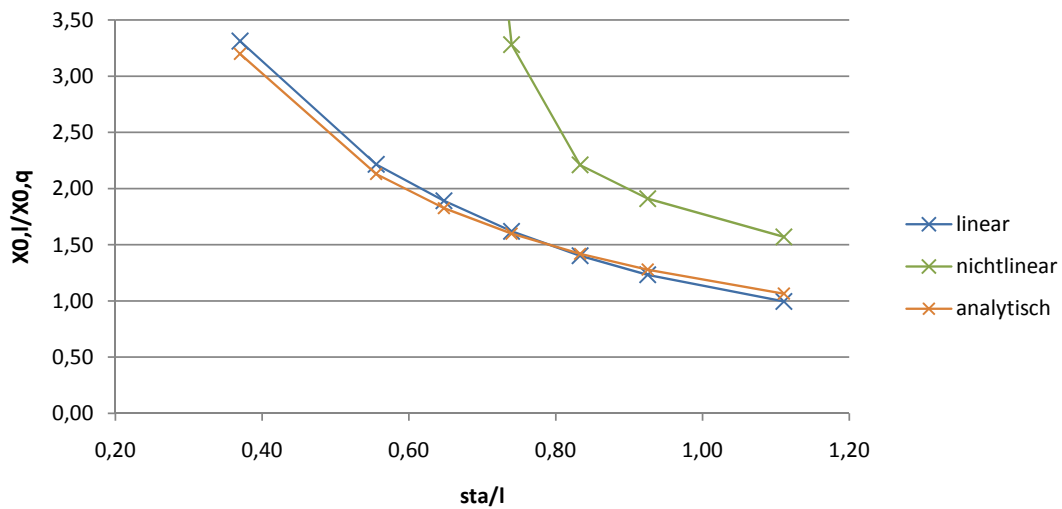


Abb. 5.26: Momentennullpunkte unter Variation des Werkstoffgesetzes

5.5 Spannungen

Zum Abschluss der Parameterstudie werden die Normal- und Schubspannungen in radialer Richtung im kritischen Rundschnitt u_1 untersucht. Dazu wird wieder das Verhältnis sta/l variiert. Die Feldlänge (9,0 m), die Plattendicke (0,6 m) und der Stützendurchmesser (0,6 m) werden im ersten Schritt nicht verändert.

Diese Untersuchung (Abb. 5.27 bis 5.29) zeigt, dass die Normalspannungen in Längs- und Querrichtung bei geringem sta/l ein gegensätzliches Vorzeichen über die Höhe aufweisen können. In Längsrichtung kommt es aufgrund des negativen Moments in der unteren Hälfte der Brückenplatte zu Druckspannungen und in der oberen Hälfte zu Zugspannungen. In Querrichtung kommt es bei kleinem sta/l zu einer positiven Momentenbeanspruchung im Bereich des kritischen Rundschnitts, dadurch herrscht in der unteren Hälfte Zug und in der oberen Druck.

Hinsichtlich der Schubspannungen in radialer Richtung entstehen bei einem kleinen Verhältnis sta/l Spannungskonzentrationen in Längsrichtung. Vergrößert sich sta/l breiten sich diese Konzentrationen in Querrichtung aus.

Die asymmetrische Spannungsverteilung in Querrichtung erklärt sich durch die Betrachtung einer Randstütze.

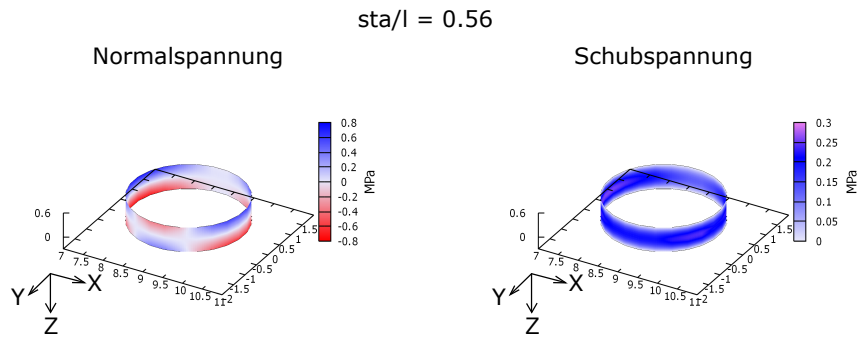


Abb. 5.27: Spannungen in radialer Richtung beim kritischen Rundschnitt

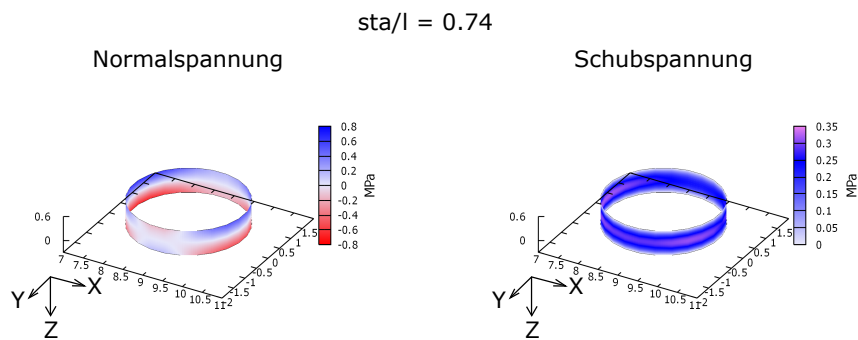


Abb. 5.28: Spannungen in radialer Richtung beim kritischen Rundschnitt

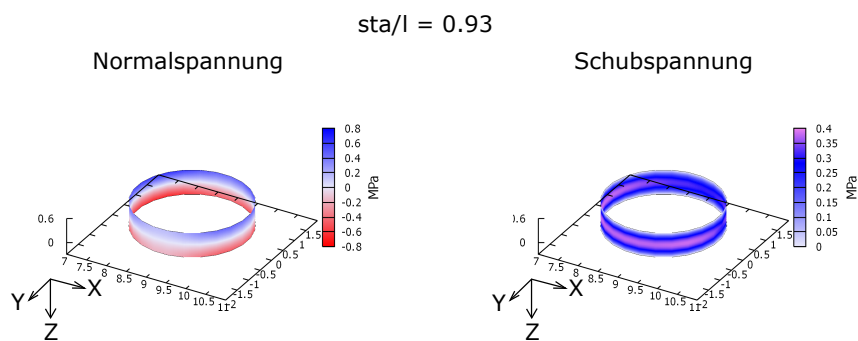


Abb. 5.29: Spannungen in radialer Richtung beim kritischen Rundschnitt

Die Änderung der Normalspannung in Längs- und Querrichtung hängt von der Lage der Momentennullpunkte zum kritischen Rundschnitt ab. Ist der Momentennullpunkt innerhalb des kritischen Rundschnitts, kommt es beim kritischen Rundschnitt zu einer positiven Momentenbelastung und dadurch herrscht in der oberen Hälfte der Platte Druck bzw. in der unteren Hälfte Zug. Befindet sich der Momentennullpunkt außerhalb des kritischen Rundschnitts entsteht hingegen ein negatives Moment beim kritischen Rundschnitt und

es kommt in der oberen Hälfte der Platte zu Zugspannungen bzw. in der unteren zu Druckspannungen. Ist das Verhältnis sta/l klein, befindet sich der Momentennullpunkt in Längsrichtung außerhalb des kritischen Rundschnitts und der Momentennullpunkt in Querrichtung liegt innerhalb des kritischen Rundschnitts. In solchen Fällen weisen die Normalspannungen über die Höhe in Längs- und Querrichtung ein gegesätzliches Vorzeichen auf (Abb. 5.30).

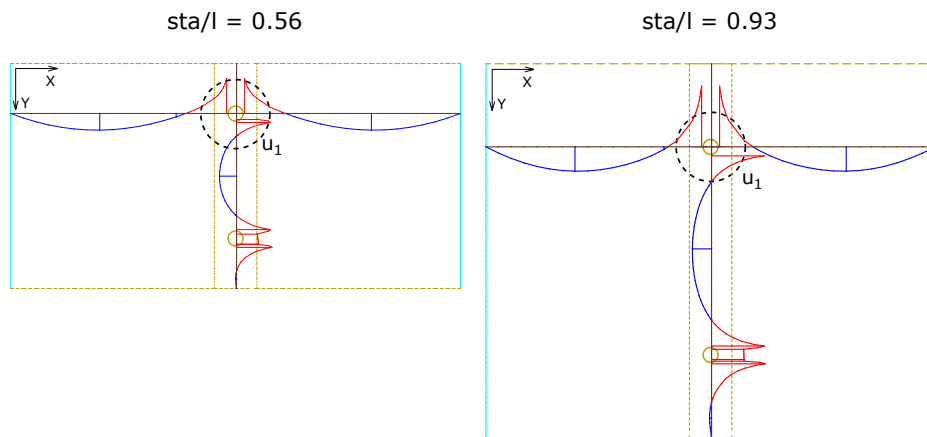


Abb. 5.30: Lage der Momentennullpunkte und des kritischen Rundschnitts

Der Radius des kritischen Rundschnitts hängt vom Stützendurchmesser und der statischen Nutzhöhe d ab. Die statische Nutzhöhe wird von der Dicke der Platte h und daher von der Schlankheit l/h beeinflusst. Die Lage des Momentennullpunkts hängt nur vom statischen System und der Spannweite des Systems ab. D.h. in Querrichtung ist diese abhängig von sta und in Längsrichtung von l .

Die Auswertung der Spannungen (beispielhaft in Abb. 5.31 und 5.32 gezeigt) bestätigt die Vermutung, dass der Wechsel der Spannung in Längs- und Querrichtung nicht nur von sta/l abhängt sondern auch von der Schlankheit l/h .

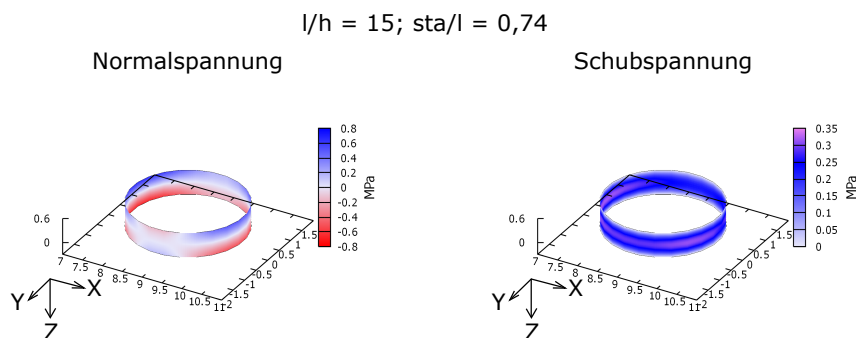


Abb. 5.31: Spannung in radialer Richtung beim kritischen Rundschnitt abhängig von l/h

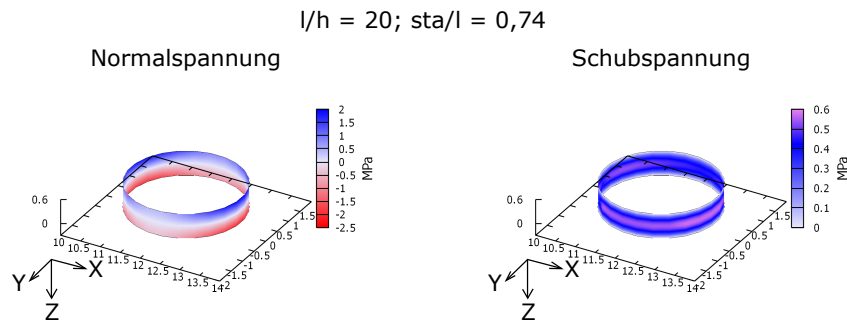


Abb. 5.32: Spannung in radialer Richtung beim kritischen Rundschnitt abhängig von l/h

Eine Abschätzung, bei welchem sta/l Verhältnis abhängig von der Schlankheit l/h , der Wechsel der Spannungen in Längs- und Querrichtung auftritt, zeigt Abb. 5.33. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Stützendurchmesser d mit der Plattendicke h übereinstimmt und die Schlankheit l/h größer als 10 ist.

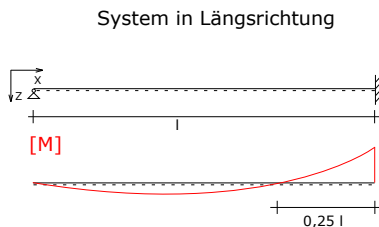
Abschätzung des Spannungswechsels in Längs- und Querrichtung

Annahme:

$$\frac{l}{h} = x; \frac{sta}{l} = y; r_1 \approx 2,5 \cdot h = 2,5 \cdot \frac{l}{x}$$

Längsrichtung:

wenn $r_1 \leq 0,25 \cdot l \Rightarrow$ negatives Moment bei u_1



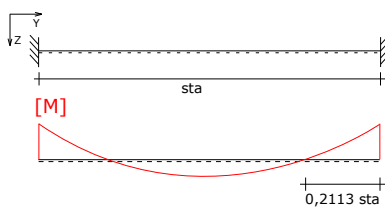
$$r_1 \leq 0,25 \cdot l$$

$$2,5 \cdot \frac{l}{x} \leq 0,25 \cdot l$$

$$x \geq 10$$

$$\frac{l}{h} \geq 10$$

System in Querrichtung



Querrichtung:

wenn $r_1 \leq 0,2113 \cdot sta \Rightarrow$ negatives Moment bei u_1

$$r_1 \leq 0,2113 \cdot sta$$

$$2,5 \cdot \frac{l}{x} \leq 0,2113 \cdot y \cdot l$$

$$y \geq \frac{2,5}{0,2113} \cdot x^{-1}$$

$$\frac{sta}{l} \geq \frac{2,5}{0,2113} \cdot \left(\frac{l}{h}\right)^{-1}$$

Abb. 5.33: Abschätzung des Spannungswechsels in Längs- und Querrichtung

Somit tritt der Spannungswechsel bei einer Schlankheit von $l/h = 15$ bei einem Verhältnis $sta/l \leq 0,79$ auf. Ist $l/h = 20$ tritt der Wechsel bei $sta/l \leq 0,59$ auf. Die Abschätzung wird durch die Parameterstudie bestätigt.

Wie im Abschnitt 5.4 gezeigt, kommt es durch die Rissbildung zu einer Abnahme von $M_{s,q}$ und zu einer Zunahme des Feldmoments im querverlaufenden Gurtstreifen über den Stützen. D.h der Abstand des Momentennullpunkts in Querrichtung sinkt. Obwohl $M_{s,l}$ zunimmt bleibt der Abstand des Momentennullpunkts in Längsrichtung annähernd gleich. Insgesamt ist davon auszugehen, dass der Wechsel der Normalspannung in Längs- und Querrichtung durch die Rissbildung ab einem größeren sta/l Verhältnis auftritt.

Nach ÖNORM B 1992-1-1 wird bezüglich des Durchstanzens nur der Maximalwert der Schubspannung nachgewiesen. Die Normalspannung und die damit verbundene Auswirkung bezüglich Durchstanztragfähigkeit wird nicht berücksichtigt. Daher wird auf eine weitere bzw. detailliertere Untersuchung der Spannungen an dieser Stelle verzichtet.

5.6 Schlussfolgerung

Wie in diesem Kapitel gezeigt wurde, ist der maßgebende Parameter zur Beeinflussung der Schnittkraftverhältnisse ($M_{s,l}/M_{f,l}$, $M_{s,l}/M_{s,q}$ und $V_{s,l}/V_{s,q}$) und des damit verbundenen Kraftflusses das Verhältnis Stützenabstand zu Feldlänge (sta/l). Die Schnittkraftverhältnisse werden außerdem durch die Dimension des Stützendurchmessers beeinflusst. Die Veränderung der Feldlänge l oder der Schlankheit l/h hat demgegenüber keinen relevanten Einfluss auf die Schnittkraftverteilungen.

Der Verlauf der Verschiebung in Eigengewichtsrichtung in unmittelbarer Nähe der Stütze ist hauptsächlich von sta/l und nur bedingt von l/h abhängig.

Insgesamt wird das im Abschnitt 1.1 erklärte Tragverhalten durch die Ergebnisse der Parameterstudie bestätigt.

6 Kriterium zur Abgrenzung zwischen Querkraft- und Durchstanzproblematik

Nach Interpretation der Parameterstudie (Abschnitt 5) stellt man fest, dass der maßgebende Wert zur Abgrenzung bezüglich Querkraft- und Durchstanzproblematik das Verhältnis Stützenabstand zu Feldlänge sta/l ist. In den betrachteten Verhältnisse kann man bereits ablesen, ab welchem sta/l Verhältnis das Bauteil auf Durchstanzen bemessen werden muss bzw. ab wann sich ein deckengleicher Unterzug ausbildet und es daher ausreicht, die Brücke auf ihre Querkrafttragfähigkeit zu bemessen. Für eine gezielte Auswertung soll in weiterer Folge ein Kriterium definiert werden, welches die beiden Versagensarten klar voneinander abgrenzt. Dieses Kriterium wird auf Grundlage der Ingenieurvorstellung zum Lastabtrag über Druck- und Zugstreben in einem Fachwerkmodell abgeleitet.

6.1 Hypothese

Wie im Abschnitt 1.1.3 erklärt, kommt es zum Durchstanzen, wenn der horizontale Anteil der Druckstrebe infolge der Querkraft größer wird, als die Druckstrebe infolge des Moments. Dadurch kann die Querkraftdruckstrebe nicht mehr aufgenommen werden und es bildet sich ein tangential verlaufender Druckring um die Stütze. Dieser ist mitverantwortlich für das Durchstanzversagen. Aufgrund dieser Überlegung werden die horizontalen Anteile der Druckstreben in Längsrichtung infolge Querkraft und Moment im Abstand der statischen Nutzhöhe d zur Stütze verglichen (Abb. 6.1).

Die Schnittkräfte werden unter Annahme der definierten linear-elastischen Werkstoffparameter berechnet. Auf eine Untersuchung der Druckstreben infolge Rissbildung wird an dieser Stelle auf der sicheren Seite liegend verzichtet, da es durch die Schnittkraftumlagerung zu einer vergleichsweise größeren Zunahme des betrachteten Moments als der betrachteten Querkraft kommt. Mit anderen Worten könnte gesagt werden, dass sich die Rissbildung günstig auf die Ausbildung eines deckengleichen Unterzugs auswirkt.

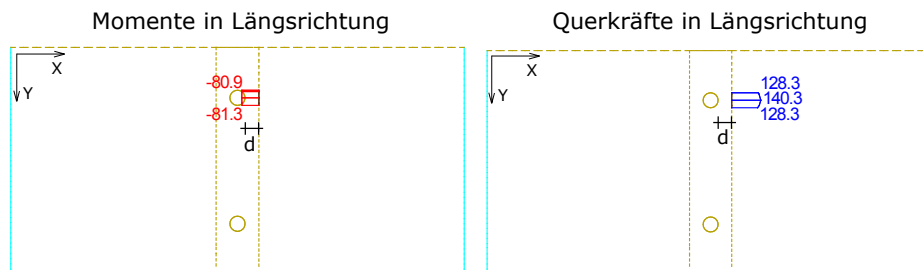


Abb. 6.1: Auswertungsposition der Momente und Querkräfte

Abb. 6.2 zeigt die Berechnung der horizontalen Anteile der Druckstreben aus dem Moment $F_{h,m}$ und der Querkraft $F_{h,q}$. Ist das Kräfteverhältnis $F_{h,q}/F_{h,m} > 1,0$, kann die Druckstrebe resultierend aus der Querkraft nicht mehr durch die Momentendruckstrebe aufgenommen werden und es bildet sich der Druckring.

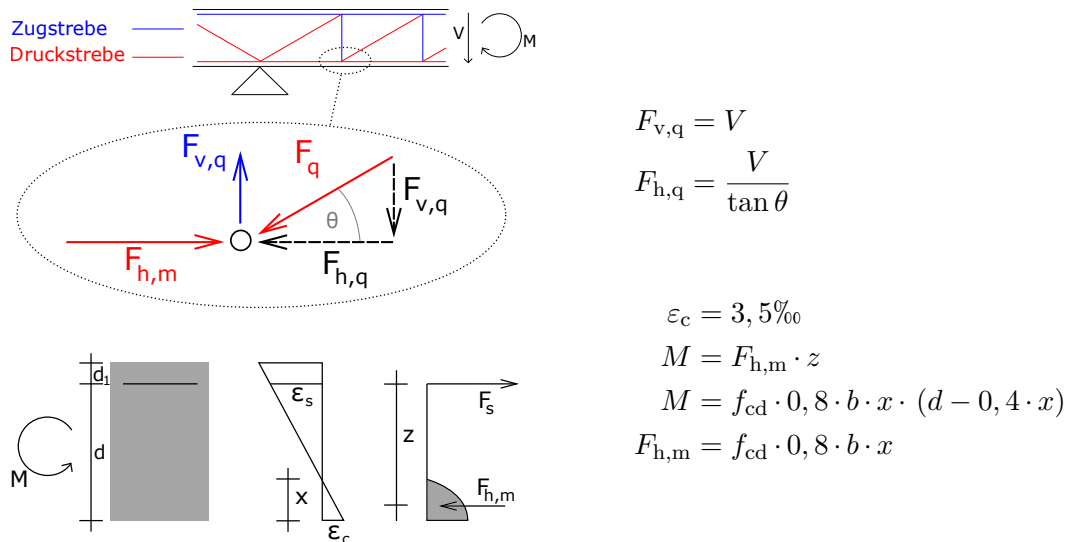


Abb. 6.2: Berechnung der horizontalen Druckstreben

6.2 Auswertung

Betrachtet wird eine Plattenbrücke mit einer Feldlänge l von 9,0 m, einer Plattendicke h von 0,6 m und einem Stützendurchmesser d von 0,6 m. Das ergibt eine Schlankheit l/h von 15.

Der horizontale Anteil der Querkraftdruckstrebe $F_{h,q}$ ist vom Winkel der Betondruckstrebe θ abhängig. Nach ÖNROM B 1992-1-1 kann der Winkel der Druckstrebe zwischen 30° und 45° frei gewählt werden. Aufgrund dessen wird θ in den folgenden Betrachtungen in diesen Grenzen variiert. Die Ergebnisse werden analog der Aufbereitung in der Parameterstudie wieder über Verhältnis Stützenabstand zu Feldlänge sta/l aufgetragen.

Abb. 6.3 zeigt das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$ für eine Brücke mit der Schlankheit von $l/h = 15$ für verschiedene sta/l . Bei der gegebenen Schlankheit l/h ist die statische Nutzhöhe relativ groß, dadurch entsteht durch das Moment eine kleine Druckstrebenkraft und das Bauteil würde eher gering bewehrt sein. Mit Blick auf den geringen Bewehrungsgrad wird deshalb an dieser Stelle ein Druckstrebenwinkel von $\theta = 45^\circ$ unterstellt.

Die rote Linie bei $F_{h,q}/F_{h,m} = 1,0$ markiert die Grenze, oberhalb derer mit der Bildung des Druckrings zu rechnen ist. Im vorliegenden Fall liegt diese bei einem $sta/l > 0,6$.

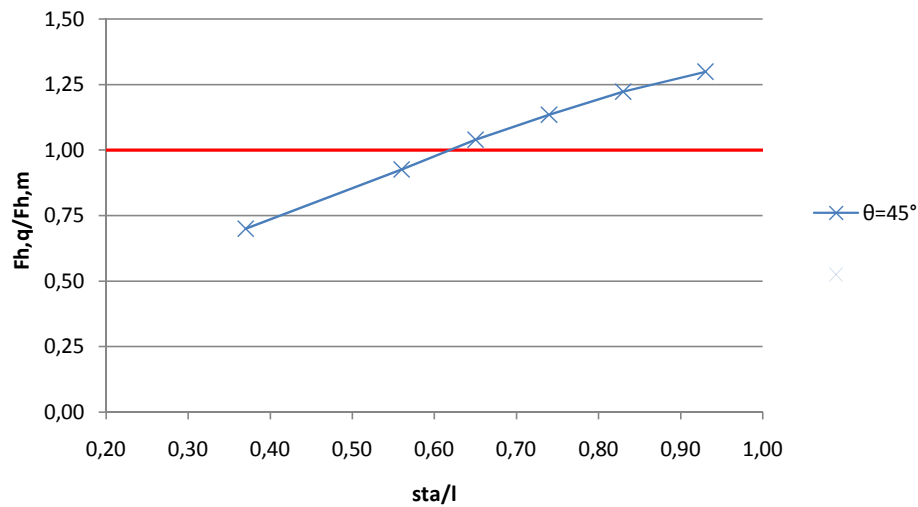


Abb. 6.3: $F_{h,q}/F_{h,m}$ für $l/h=15$ und $\theta = 45^\circ$

6.2.1 Einfluss der Betonfestigkeitsklasse

Die absolute Größe der Druckstrebe infolge des Moments ist unabhängig von der Festigkeitsklasse des Betons (f_{cd}). Der Einfluss der Festigkeitsklasse im Gleichgewicht des Querschnitts wird über eine zunehmende Druckzonenhöhe bei kleiner werdender Festigkeitsklasse kompensiert, vgl. Abb. 6.2. Dieser Zusammenhang wird durch die Auswertung des Verhältnisses $F_{h,q}/F_{h,m}$ für zwei Festigkeitsklassen bestätigt. Wie Abb. 6.4 entnommen werden kann, hat die Veränderung der Festigkeitsklasse keinen Einfluss auf das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$ (die beiden Linien überdecken sich).

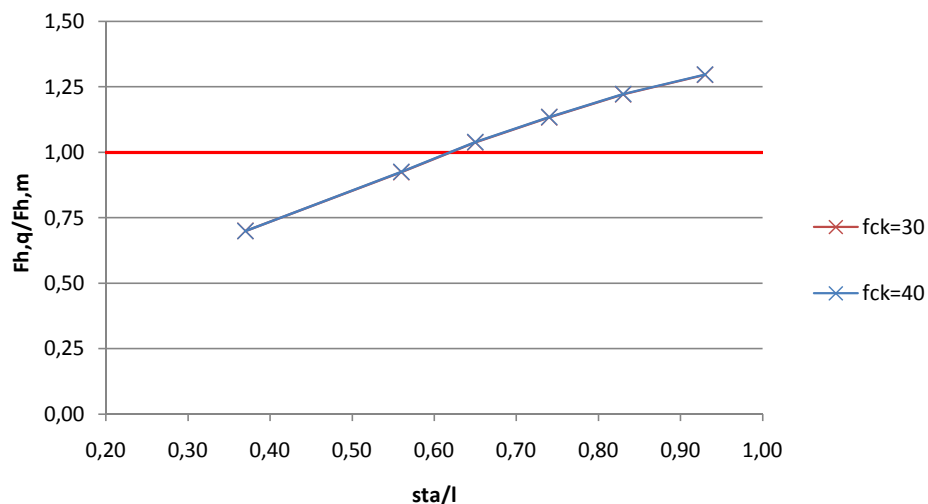


Abb. 6.4: Einfluss der Betondruckfestigkeitsklasse f_{ck} auf das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$

6.2.2 Einfluss des Druckstrebenwinkels

Die Annahme des Druckstrebenwinkels sollte unter Berücksichtigung der Bauteilsteifigkeit erfolgen. Je mehr Bewehrung, desto steifer das Bauteil und desto kleiner der Winkel der Druckstrebe. Der Einfluss des Druckstrebenwinkels soll mit Abb. 6.5 und Abb. 6.6 für verschiedene l/h veranschaulicht werden.

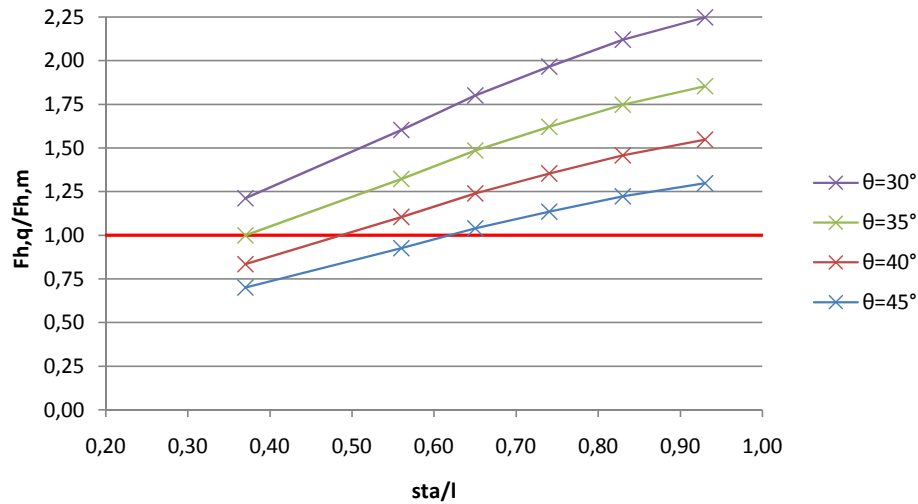


Abb. 6.5: Einfluss des Druckstrebenwinkels auf das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$ (dargestellt für $l/h=15$)

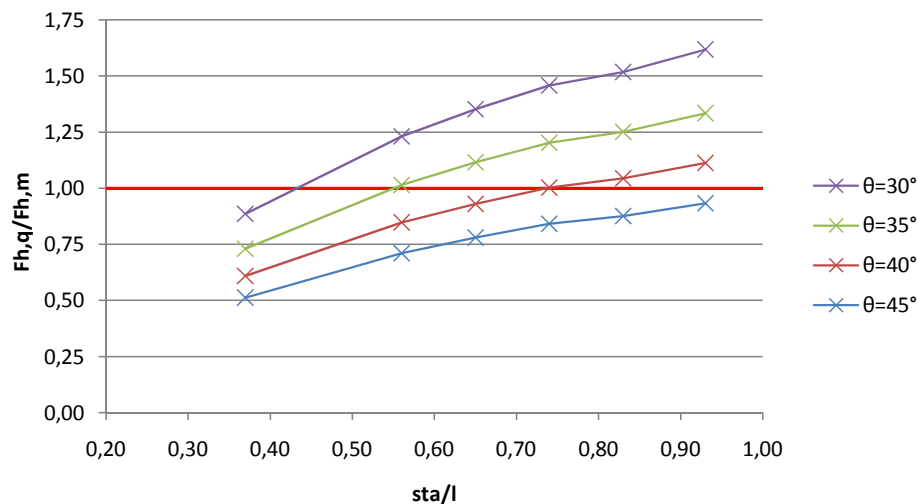


Abb. 6.6: Einfluss des Druckstrebenwinkels auf das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$ (dargestellt für $l/h=20$)

Man kann erkennen, dass sich bei Abnahme des Druckstrebenwinkels θ die Druckstrebe aus der Querkraft $F_{h,q}$ vergrößert und dadurch das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$ zunimmt. Mit der Abnahme des Druckstrebenwinkels muss deshalb schon für kleinere Verhältnisse sta/l von der Bildung des Druckrings ausgegangen werden.

Wie aus dem Vergleich von Abb. 6.5 und Abb. 6.6 entnommen werden kann, wirkt sich die Schlankheit l/h zwar absolut aus, allerdings kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Druckstrebenwinkels unabhängig von l/h ist.

6.2.3 Einfluss der Schlankheit

Abb. 6.7 zeigt die Entwicklung von $F_{h,q}/F_{h,m}$ abhängig von l und l/h für verschiedene sta/l . Die absolute Feldlänge hat einen sehr geringen Einfluss auf $F_{h,q}/F_{h,m}$, während der Einfluss aus l/h für unterschiedliche sta/l deutlich wird. Steigt die Schlankheit l/h , verringert sich die statische Nutzhöhe und die horizontale Druckstrebenkraft infolge des Moments vergrößert sich. Insgesamt nimmt das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$ bei steigendem l/h nahezu unabhängig von sta/l ab.

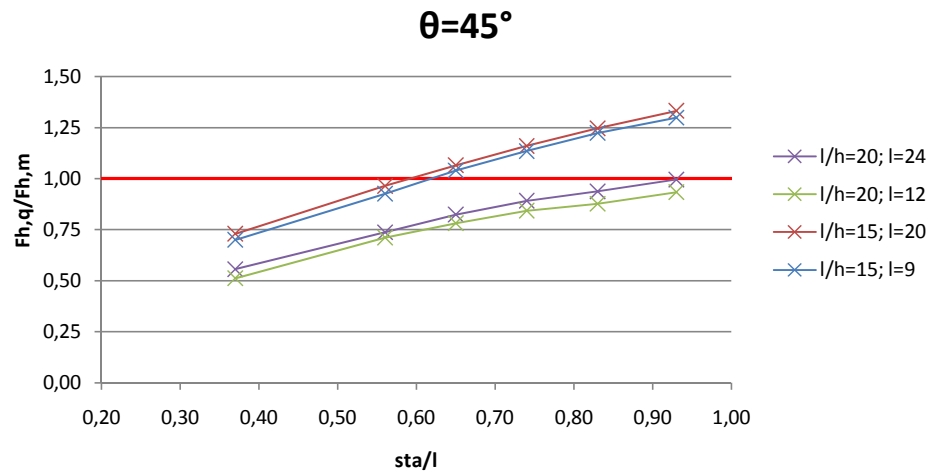


Abb. 6.7: Einfluss von l und l/h auf das Verhältnis $F_{h,q}/F_{h,m}$

6.2.4 Zusammenspiel von Schlankheit und Druckstrebenwinkel

Vergrößert sich die Schlankheit l/h bildet sich der Druckring für gleiche θ erst bei einem größeren Verhältnis sta/l . Ein größeres Verhältnis l/h vergrößert aber auch die Druckstrebenkraft aus dem Moment, sodass mehr Bewehrung eingelegt werden muss. Dadurch erhöht sich die Steifigkeit und der Winkel der Druckstrebe θ sinkt. Berücksichtigt man diesen Zusammenhang bspw. durch einen Vergleich der beiden Systeme mit einer Schlankheit l/h von 15 und 20 und einer Abnahme von θ um 8° für das System mit größerem l/h , so stimmen $F_{h,q}/F_{h,m}$ annähernd überein (Abb. 6.8).

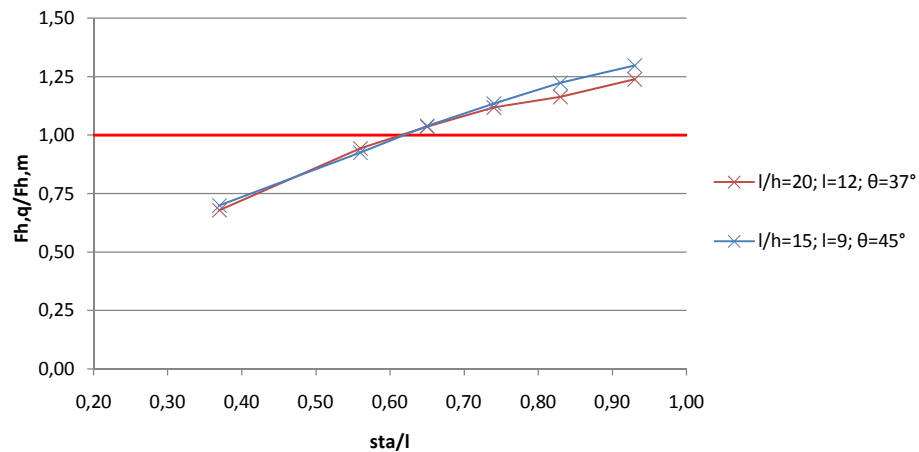


Abb. 6.8: Vergleich von $F_{h,q}/F_{h,m}$ für $l/h=15$ und 20 unter realistischer Berücksichtigung des Druckstrebenwinkels

6.3 Schlussfolgerung

Insgesamt kann mit den Untersuchungsergebnissen der vorherigen Abschnitte davon ausgegangen werden, dass sich der Druckring bei einem sta/l Verhältnis zwischen $0,5$ und $0,6$ bildet (Abb. 6.9). Ab einem Verhältnis sta/l kleiner als $0,5$ muss das Bauteil nur auf Querkraftversagen bemessen werden. Ist sta/l größer als $0,6$ kann es zum Durchstanzen im Stützbereich kommen.

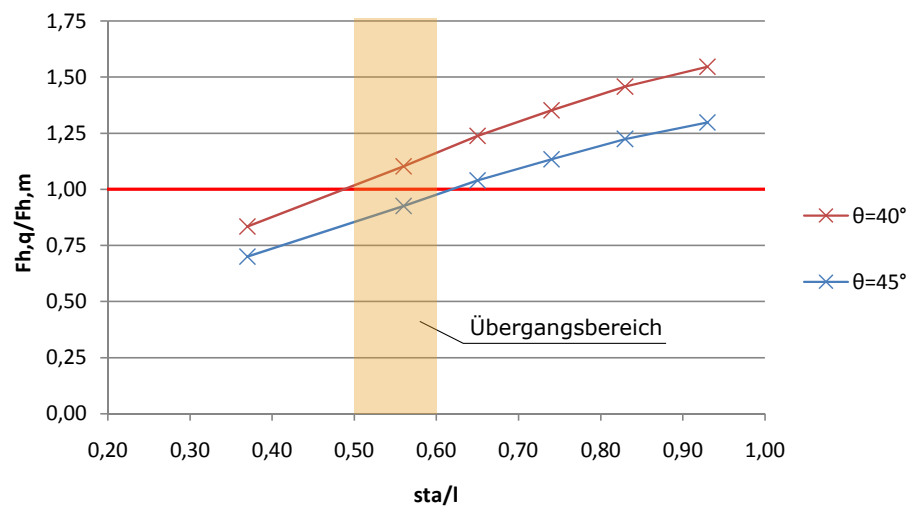


Abb. 6.9: Übergangsbereich bei $F_{h,q}/F_{h,m}$

Betrachtet man die Schnittkraftverhältnisse (Abb. 6.10 bis 6.12) in diesem Bereich, versagt das Bauteil aufgrund Durchstanzens wenn $M_{s,l}/M_{f,l}$ größer als 2,0 ist. Im Übergangsbereich zwischen Versagen aufgrund Querkraft und Versagen aufgrund Durchstanzens beträgt das Verhältnis $M_{s,l}/M_{s,q}$ 1,75 bis 2,5 und $V_{s,l}/V_{s,q}$ 1,10 bis 1,25.

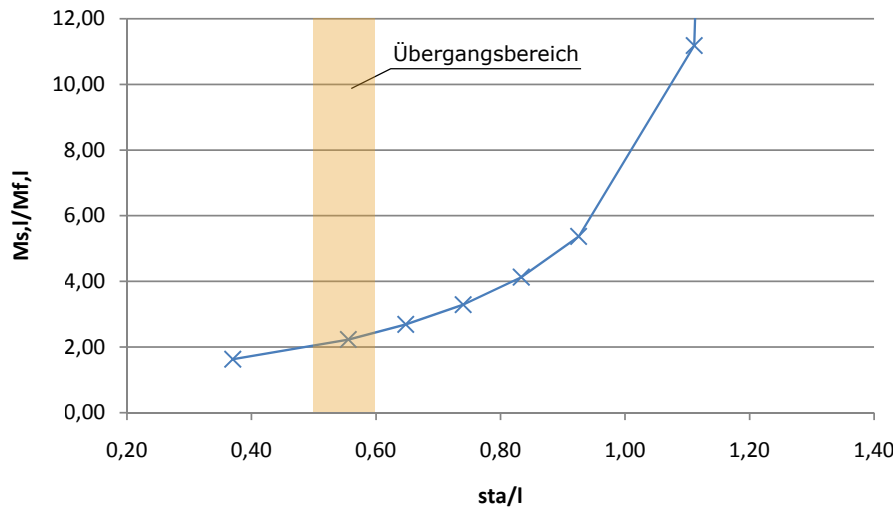


Abb. 6.10: Übergangsbereich bei $M_{s,l}/M_{f,l}$

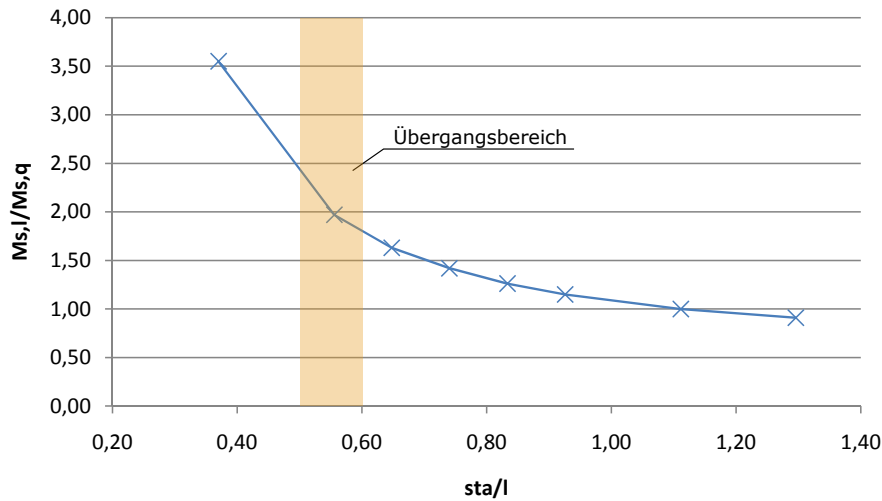


Abb. 6.11: Übergangsbereich bei $M_{s,l}/M_{s,q}$

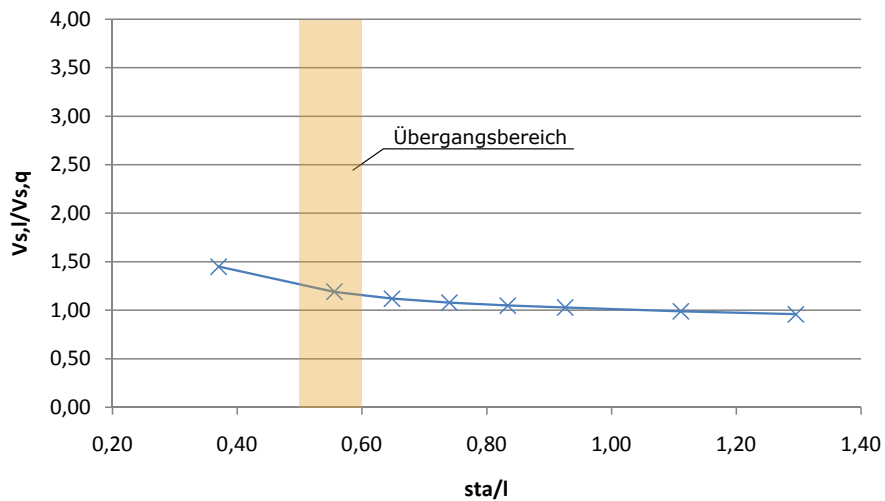


Abb. 6.12: Übergangsbereich bei $V_{s,1}/V_{s,q}$

Betrachtet man die Verformungsfigur, so ist von kreisförmigen Höhenlinien im Bereich des kritischen Rundschnitts ab einem Verhältnis sta/l größer als 0,6 auszugehen (Abb. 6.13). Dies kann letztendlich als eine unabhängige Bestätigung des festgelegten Übergangsbereichs gesehen werden.

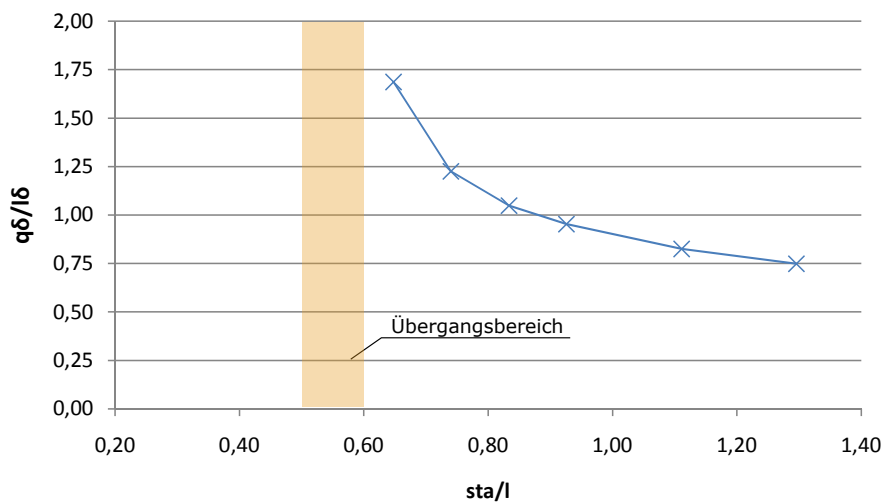


Abb. 6.13: Übergangsbereich bei q_{δ}/l_{δ}

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Eine gezielte Betrachtung der normativen Regelungen ergab, dass es keine Abgrenzung zwischen Querkraftversagen oder Durchstanzversagen unter Berücksichtigung der tatsächlichen geometrischen Randbedingungen gibt. ÖNORM B1992-1-1 geht davon aus, dass es bei einer Punktlagerung infolge der Bildung von Schubrisen immer zu einem Durchstanzversagen kommt. Etwaige Effekte aufgrund stark voneinander abweichender Spannweiten in Längs- und Querrichtung werden nicht berücksichtigt.

Daher wurde mit der vorliegenden Arbeit der Einfluss der Feldlänge, des Stützenabstands, der Plattendicke und des Stützendurchmessers von punktförmig gelagerten Plattenbrücken auf den Kraftfluss, die Schnittkräfte, den Verformungsverlauf und den Spannungsverlauf untersucht.

Diese Untersuchung hat ergeben, dass der maßgebende Faktor zur Beeinflussung der zuvor erwähnten Größen das Verhältnis Stützenabstand in Querrichtung zu Feldlänge in Längsrichtung ist. Ist dieses Verhältnis eher gering, bildet sich im Bereich der Stützen ein deckengleicher Unterzug und die Lastabtragung erfolgt wie bei einem System mit Unterzug in Querrichtung. Vergrößert sich der Stützenabstand bei gleichbleibender Feldlänge, verringert sich die Steifigkeit in Querrichtung und damit der Effekt des deckengleichen Unterzugs. In solchen Fällen muss der Stützbereich auf Durchstanzen bemessen werden.

Um ein aussagekräftiges Kriterium bezüglich der Unterscheidung zwischen Querkraftversagen und Versagen des Bauteils aufgrund Durchstanzens zu bekommen, wurden in der vorliegenden Arbeit die Druckstreben des Fachwerkmodells verglichen. Auf Basis dieses Kriteriums kann man davon ausgehen, dass die Brücke auf Durchstanzen bemessen werden muss, wenn das Verhältnis von Stützenabstand zu Feldlänge größer als 0,5 bis 0,6 ist. Ist das Verhältnis kleiner, bildet sich ein deckengleicher Unterzug und es genügt die Brücke auf Querkraftversagen zu bemessen. Die Abgrenzung wird durch die Untersuchung der Schnittkräfte und des Verformungsverlaufs bestätigt.

Erste Auswertungen von Bestandsbrücken haben ergeben, dass das Verhältnis Stützenabstand zu Feldlänge bei punktförmig gelagerten Plattenbrücken meist sehr gering ist. In diesen Fällen ist von der Bildung des deckengleichen Unterzugs auszugehen bzw. der Querkraftnachweis zutreffend. Weitere Schlussfolgerungen zum Brückenbestand würden allerdings deutlich umfangreichere Auswertungen bezüglich des Verhältnisses Stützenabstand zu Feldlänge erfordern.

Ich hoffe die Arbeit regt zur Diskussion dieser sehr komplexen Thematik an und fördert das Verständnis des Lesers bezüglich Querkraftversagen und Versagen infolge Durchstanzens.

7.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden nur rechtwinklige Brücken (Kreuzungswinkel = 90°) unter Eigengewicht behandelt. In weiterer Folge wäre es interessant, die Auswirkungen unsymmetrischer Laststellungen und des Kreuzungswinkels auf die Bildung des deckengleichen Unterzugs zu untersuchen.

Durch die Schiefwinkligkeit und die unsymmetrischen Lastfälle kommt es zur Veränderung des Verformungsverlaufs, wie beispielhaft durch die Variation des Kreuzungswinkels in Abb. 7.1 gezeigt. Dadurch stellt sich die Frage, ob das gefundene Kriterium auch auf schiefwinklige punktförmig gestützte Plattenbrücken und punktförmig gestützte Plattenbrücken mit unsymmetrischen Laststellungen zutrifft.

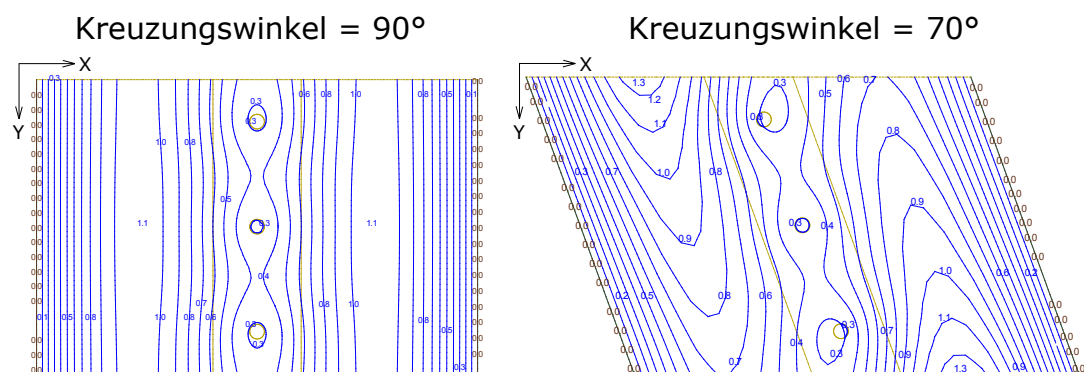


Abb. 7.1: Verschiebung in Eigengewichtsrichtung in mm abhängig vom Kreuzungswinkel

Darüber hinaus kann vermutet werden, dass gezielte experimentelle Untersuchungen und Monitorings von Bestandsbrücken bezüglich des Verformungsverhaltens bei üblichen Verhältnissen von Stützenabstand in Querrichtung zu Feldlänge in Längsrichtung einen wesentlichen Beitrag zu einer verbesserten Abgrenzung zwischen Querkraftversagen und Versagen aufgrund Durchstanzens bei punktförmig gelagerten Plattenbrücken liefert.

Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM B 1992-1-1 (2011) *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau Ausgabe: 2011-12-01
- [2] ÖNORM B 1992-2 (2014) *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*
Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln Ausgabe: 2014-09-01
- [3] ÖNORM B 1991-2 (2011) *Einwirkungen auf Tragwerke*
Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken Ausgabe: 2011-04-15
- [4] König, G., Tue, N. V., Schenck, G. (2007) *Grundlagen des Stahlbetonbaus*
3. Auflage
- [5] Zilch, K. und Zehetmaier, G. (2009) *Bemessung im konstruktiven Betonbau*
2. Auflage
- [6] SIA 262 (2013) *Betonbau* Ausgabe: 2013-01-01
- [7] DIN-Fachbericht 102 (2009) *Betonbrücken* Ausgabe: 2009-03
- [8] Model Code (2010) **fib** *Model Code for Concrete Structures 2010* Ausgabe: 2013-10