

Rechnerische Überprüfung von mehrzelligen Hohlkastenbrücken

Gregor Borkowski

Technische Universität Hamburg-Harburg
g.borkowski@tu-hamburg.de

Zusammenfassung

Eine aktuelle Herausforderung für Bauingenieure ergibt sich aus den Fragen nach dem Umgang mit der bestehenden Bausubstanz. Immer häufiger sind Tragwerke hinsichtlich ihres Zustands und ihrer Tragfähigkeit zu überprüfen und bezüglich der zu erwartenden Restnutzungsdauer zu beurteilen. Zudem sind geeignete Strategien für die Erhaltung und gegebenenfalls Maßnahmen für die Ertüchtigung oder die Verstärkung zu entwickeln.

Für die rechnerische Überprüfung ist einerseits die Kenntnis des Verhaltens der Baustoffe erforderlich, andererseits ist ein Tragwerksmodell zu verwenden, mit dem sich die Beanspruchungen zuverlässig erfassen lassen. An diesem Punkt setzt das hier vorgestellte Forschungsprojekt an. Es werden Brückensysteme mit (ein- und mehrzelligen) Hohlkastenquerschnitten betrachtet, und für die Ermittlung der Schnittgrößen wird zunächst ein linear elastisches Materialverhalten vorausgesetzt. Es wird gezeigt, wie bei unsymmetrischer Belastung die Kräfte in das System eingetragen werden und in welchen Fällen Zusatzbeanspruchungen durch profilverformende Kräfte entstehen, die z.B. Schädigungen an Spanngliedkoppelstellen zur Folge haben können.

Grundlage für die Analyse ist die Finite Elemente Methode, deren Ergebnisse denjenigen der klassischen Stabstatik gegenübergestellt werden. Anhand einer Fallstudie werden Unterschiede und Besonderheiten dieser beiden Vorgehensweisen aufgezeigt. Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen werden Empfehlungen für das Ansetzen der Normlasten abgeleitet, um die jeweils maßgebenden Beanspruchungen zu erfassen.

1 Einleitung

Der Spannbeton kam im Brückenbau erst in den 1940er und im größeren Umfang ab den 1960er Jahren zum Einsatz. Der Bedarf nach neuen Brücken war zu der Zeit sehr groß, und man erkannte schnell den großen Vorteil der neuen Bauweise. Die heute deutlich höheren Verkehrslasten sowie ausgeprägte Umwelteinflüsse erfordern regelmäßige Überprüfungen dieser Bauwerke. Da die vorgesehene Nutzungsdauer der Brücken noch nicht erreicht ist, ist es oft wirtschaftlicher diese zu erhalten und ggf. zu verstärken, anstatt sie zu ersetzen. Die ersten Probleme mit der neuen Bauweise traten in den 1970er Jahren auf. Die Brücken wurden meist abschnittsweise hergestellt, und folglich wurde an bereits erhärteten Beton ein neuer Abschnitt angeschlossen. Da an diesen Stellen die Betonzugfestigkeit geringer als in den übrigen Bereichen ist, wurden die Arbeitsfugen in Bereichen angeordnet, die planmäßig aus ständigen Lasten keine oder nur geringe Zugbeanspruchungen erfahren. Diese Bereiche liegen in einem Abstand von ca. $0,2l$ vom Auflagerrand, wobei l die Spannweite des betrachteten Feldes bezeichnet. Da an diesen Stellen auch die Spannglieder gekoppelt

werden, ist der Betonquerschnitt zusätzlich geschwächt. Der wohl bekannteste und größte Schadensfall im Bereich der Koppelstellen ist an der erst gut 20 Jahre im Betrieb stehenden „Hochstraße Prinzenallee“ (Fertigstellung: 1959/60) entstanden [2]. Bei einer Brückenprüfung wurde festgestellt, dass pro Koppelstelle fünf Spannglieder infolge Ermüdung gerissen waren. Insgesamt waren vier Koppelstellen betroffen. Auch die Betonstahlbewehrung war in diesen Bereichen gerissen [2]. Nach bekannt werden des Schadensfalls wurden die Koppelstellen weiterer Brücken untersucht, und es zeigte sich, dass sehr viele Brücken Risse an Koppelstellen aufwiesen.

In Folge dessen kam es im Februar 1977 zu einem Soforterrlass [6], der eine besondere Bemessung von Koppelfugen regelte. Auch alle sich im Bau befindenden Brücken sollten auf die Koppelstellenproblematik hin untersucht und ggf. die Regelungen des Soforterrlasses auf diese angewendet werden. Als Hauptursachen für die Schäden an den Koppelstellen wurden zu stark vereinfachte statische Systeme, zu gering angesetzte Temperatureinwirkungen sowie die Vernachlässigung von Zusatzbeanspruchungen durch profilverformende Kräfte angegeben. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird auf die Zusatzbeanspruchung durch die Profilverformung eingegangen. Es wird abgeschätzt, ob dieser Teil der Beanspruchung tatsächlich eine bemessungsrelevante Größe darstellt. Hierfür wird zunächst an einem allgemeinen Modell untersucht, wie sich Querkräfte infolge Einzellasten in Hohlkastenquerschnitten verteilen.

Mithilfe räumlicher Finite Elemente Programme ist es heute möglich, komplexe Strukturen detailliert zu analysieren. Da es dabei oft schwierig ist, den räumlichen Lastabtrag zu verstehen, werden im vorliegenden Beitrag die Querkräfte nach der Finite Elemente Methode (FEM) und nach klassischer Stabstatik miteinander verglichen und diskutiert. Es wird beschrieben, wie sich Brückentragwerke unter Normlasten nach DIN-Fachbericht 101 [3] verhalten und welche Querschnittsbereiche sich am Lastabtrag beteiligen. Dabei werden beispielhaft drei Querschnitte betrachtet. Für die FE-Modelle werden Schalenelemente verwendet und es wird von linear elastischem Materialverhalten ausgegangen. Anhand der gewonnen Erkenntnisse werden Empfehlungen zur Lastanordnung bei der Anwendung räumlicher Finite Elemente Berechnung gemacht, und es wird aufgezeigt, wie Querkräfte ermittelt werden können, falls der klassische Weg der Schnittgrößenermittlung mithilfe der Stabstatik eingeschlagen wird.

2 Untersuchungen am idealisierten System

Zusatzbeanspruchungen von Hohlkastenquerschnitten durch profilverformende Kräfte infolge exzentrisch angreifender Lasten beschäftigten Forscher größtenteils in den 1970er und 80er Jahren. Es wurden Beziehungen vorgestellt, bei denen das statische System des Tragwerks auf einen elastisch gebetteten Balken reduziert wird, und mithilfe dessen die Zusatzbeanspruchungen ermittelt werden können ([12], [8], [9], [13], [4], [11]). Die Ansätze eignen sich jedoch nur für spezielle Belastungskonfigurationen sowie bestimmte Querschnittsformen. Ebenso werden die Einflüsse der Lagerung vernachlässigt. Im Folgenden werden die Auswirkungen der Profilverformung für ein idealisiertes System dargestellt und diskutiert.

Trotz der steigenden Leistungsfähigkeit von Computern und Computerprogrammen werden Schnittgrößen von Brückensystemen größtenteils mithilfe der Stabstatik ermittelt. Im Folgenden wird ein idealisiertes, einzelliges Brückenmodell betrachtet, das wahlweise mit einer Einzellast in Feldmitte und einer in Lagernähe jeweils direkt über dem Steg oder am Rand der Kragplatte belastet ist (Abbildung 1). Die Querkraft im Steg wird zum Einen nach der Stabstatik und zum Anderen mithilfe eines räumlichen Finite Elemente Modells

bestimmt. Beim Vergleich der ermittelten Querkräfte wird deutlich, dass im Bereich der Lasteinleitung sowie bei einer direkten Belastung des Stegs die Querkraft nach der FEM (V_{FEM}) um rund 30% größer ist als nach der Stabstatik (V_{St}). In Richtung der Lagerung nimmt der Unterschied allerdings ab (Abbildung 2a)).

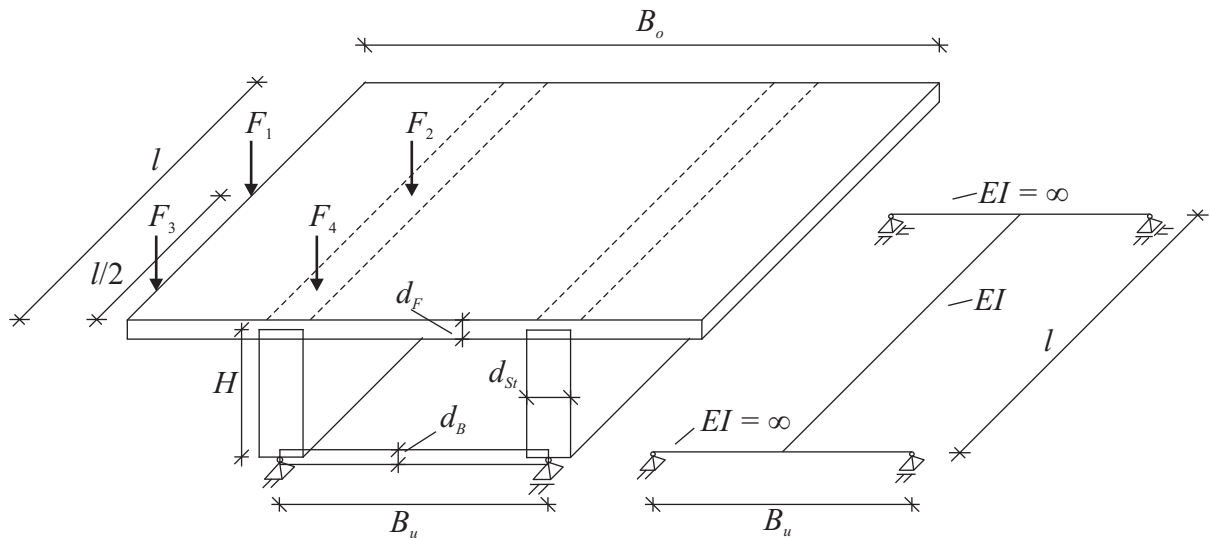


Abbildung 1. Idealisiertes System: links: FEM, rechts: Stabstatik

Während die Größe der Querkraft im Bereich der Lasteinleitung nahezu vom Querschnitt unabhängig ist, beeinflussen die Querschnittsabmessungen die Art des Abklingens der Kraft in Richtung der Lager. Die wichtigsten Parameter sind die Steifigkeit der Stege, der Fahrbahnplatte sowie der Abstand der Stege. Mit steigender Steifigkeit der Platte in Querrichtung wird mehr Kraft in die benachbarten Stege übertragen. Mit steigender Steifigkeit der Stege verbleibt mehr Kraft im belasteten Steg [1]. Diese Zusammenhänge treffen für die durch die Lagerung unbeeinflussten Bereiche uneingeschränkt zu, jedoch nicht für die Bereiche der Lager, wo Querschotte den Querschnitt aussteifen. Deutlich wird dies bei einer Belastung des Steges im Abstand $1,0H$ vom Auflagerrand. In diesem Fall wird die Last nicht verteilt und die Querkraft bleibt nahezu konstant (Abbildung 2b)). Eine geringe Abminderung der Querkraft in Richtung des Lagers wird durch das Querschott verursacht, indem Querkräfte aus dem Steg in die angrenzenden Plattenbereichen eingeleitet werden. Dieser Effekt ist jedoch gering, so dass er für die Querkraftermittlung nahezu keine Rolle spielt.

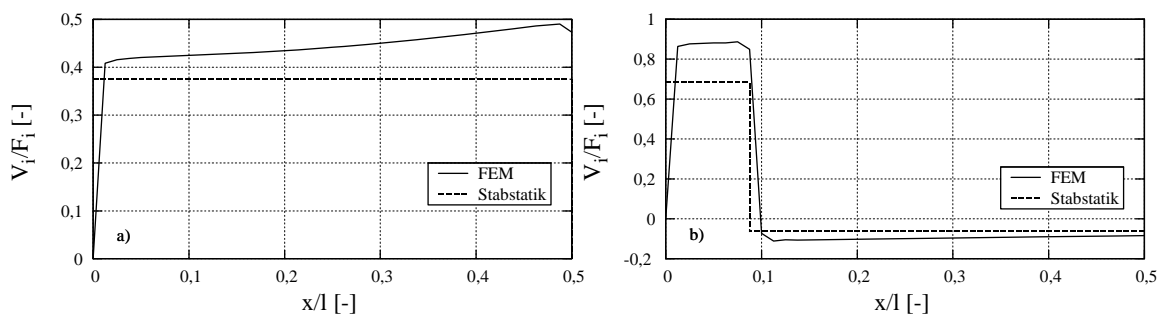


Abbildung 2. Bezogene Querkraft nach der FEM und Stabstatik, Last direkt über dem Steg: a) Last in Feldmitte (F_2), b) Last bei $1,0H$ vom Lagerrand (F_4)

Mit der FEM werden für direkt über dem Steg angreifende Einzellasten generell größere Querkräfte ermittelt als mit der Stabstatik. Mithilfe des Modells des elastisch gebetteten Balkens kann diese Differenz erfasst werden, wenn der Abstand zum Lager groß genug ist. Solche Laststellungen spielen in der Regel jedoch keine Rolle. In der Bemessung oder Nachrechnung sind meist die maximalen Beanspruchungen in der Nähe der Lager zu ermitteln, die durch Lastgruppen (wie z. B. Achslasten) hervorgerufen werden. Abbildung 2b) zeigt, dass die Lagernähe einen entscheidenden Einfluss auf die Querkraft hat. Mit der Theorie des elastisch gebetteten Balkens kann dieser Einfluss nicht erfasst werden. Darüber hinaus greifen die Achslasten nicht konzentriert an, was zur Folge hat, dass die Kräfte zunächst in die einzelnen Stege eingeleitet werden müssen bevor eine Zusatzbeanspruchung durch profilverformende Kräfte ermittelt werden kann. Hierbei entstehen weitere Schwierigkeiten, denn die Größe der eingetragenen Kraft sowie ihre Einleitungslänge sind nicht ohne weiteres bestimmbar und hängen von den Steifigkeiten der einzelnen Querschnittskomponenten ab. Abbildung 3 zeigt den Querkraftverlauf im Steg infolge am Rand der Kragplatten angreifender Lasten. Es wird deutlich, dass sobald die Einzellast nicht mehr direkt über dem Steg angreift die Zusatzbeanspruchung infolge der Profilverformung im Vergleich zu einer direkten Belastung nahezu verschwindet und die Lasteinleitungsproblematik an Bedeutung gewinnt. Bei einer Belastung am Rand der Kragplatte in der Nähe des Lagers (Abbildung 3b)) entspricht der Querkraftverlauf und somit auch die Beanspruchung des Stegs im Abstand $1,0H$ vom Lager nicht mehr dem Modell des elastisch gelagerten Balkens.

Für linienartige Belastungen der Stege wurden im Laufe der Zeit ebenfalls analytische Lösungen entwickelt. Ihre Anwendung führt jedoch zu ähnlichen Problemen wie die Umsetzung der analytischen Lösungen für Einzellasten. Diese Schwierigkeiten sind durchaus bekannt, so dass bei der Berechnung komplexer Strukturen oft auf Trägerrostmodelle zurückgegriffen wird [7]. Die Modellierung mittels Trägerrosten hilft einige Probleme zu erfassen, jedoch sind dabei ebenfalls Vereinfachungen zu treffen (z. B. Lastanordnung oder Systemsteifigkeit), die erneut Ungenauigkeiten mit sich bringen.

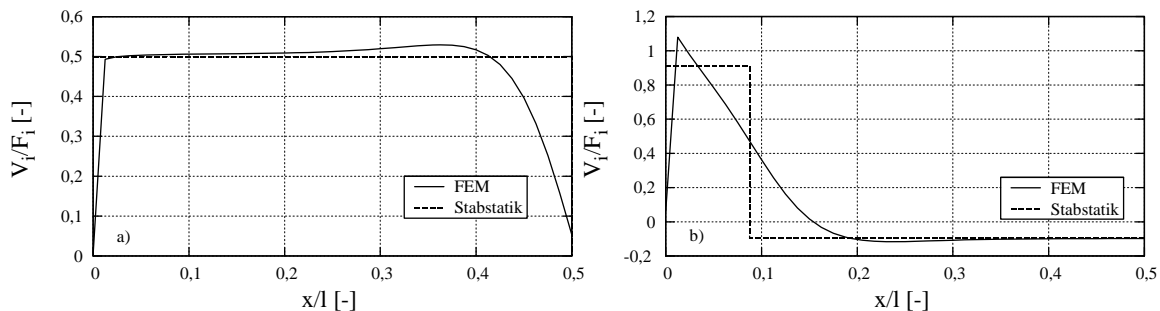


Abbildung 3. Bezogene Querkraft nach der FEM und Stabstatik, Last am Rand der Kragplatte: a) Last in Feldmitte (F_1), b) Last bei $1,0H$ vom Lagerrand (F_3)

Die größte Genauigkeit bei der Ermittlung der Schnittgrößen erreicht man mit räumlichen FE-Modellen. Diese Verfahren werden in Ingenieurbüros jedoch aufgrund des hohen Modellierungsaufwandes selten angewendet. Die folgende Untersuchung soll deshalb eine Hilfestellung zum besseren Verständnis des Lastabtrags in ein- und mehrzelligen Hohlkastensystemen sein.

3 Untersuchungen an ein- und mehrzelligen Hohlkastenquerschnitten

3.1 Einleitung

Die ersten Studien zu veränderlichen Lasten und Querschnittswerten wurden in [5] und [10] durchgeführt. In [5] wurde die Tragwirkung eines zweizelligen Hohlkastens untersucht, wobei die damaligen Normlasten konzentriert über einem Steg angesetzt wurden. In [10] wurde untersucht wie sich die Veränderung einzelner Querschnittsteile, z. B. Stegneigung oder Voutung der Kragplatten, auf die Profilverformung auswirkt. Die folgenden Untersuchungen zeigen auf, ob und wie sich eine in Querrichtung verschiebliche Last auf die Stegbeanspruchung auswirkt. Hierbei werden die Normlasten nach [3] angesetzt, jedoch nur die exzentrisch liegenden Lastanteile (Achslasten sowie der torsionswirksame Anteil der Hauptspurlasten). Gleichmäßig verteilte Flächenlasten (Nebenspurlasten und Eigengewicht) werden hier nicht betrachtet, da sie das Tragwerk gleichmäßig belasten. Es wird ein Vergleich der FE-Ergebnisse mit den Schnittgrößen vorgenommen, die auf Grundlage der Stabstatik ermittelt werden. Die Untersuchungen umfassen nicht nur einzellige sondern auch mehrzellige Systeme. Die angenommenen Querschnitte sowie Lasten können der Abbildung 4 entnommen werden. In Längsrichtung wird ein Einfeldsystem mit einer Spannweite von 40 m untersucht. Die Abmessungen des einzelligen Querschnittes sind in Tabelle 1 aufgeführt, das Verhältnis H/B_u ist bei allen Querschnitten gleich.

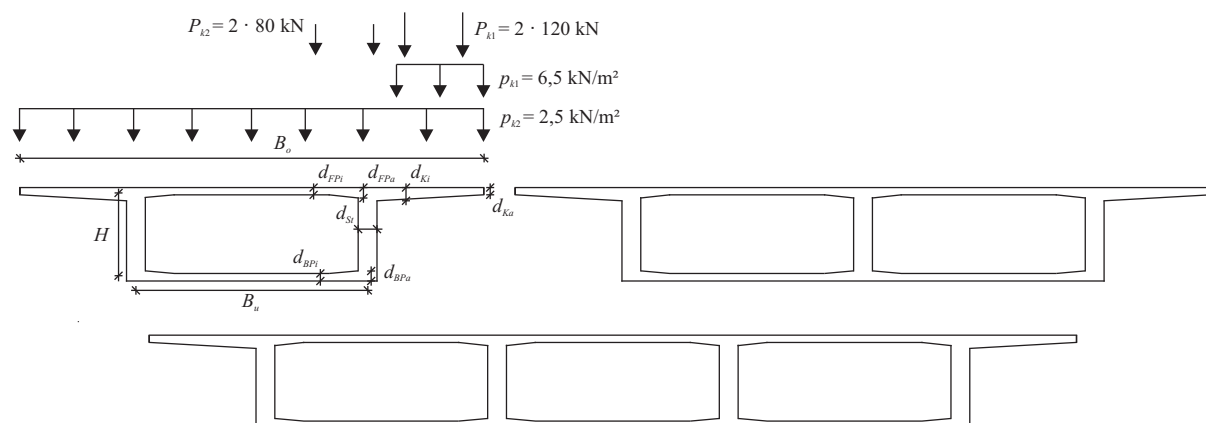


Abbildung 4. Untersuchte Querschnitte sowie Lasten

Tabelle 1. Abmessungen der Untersuchten Querschnitte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	B_o	B_u	H	d_{FPi}	d_{FPa}	d_{Ki}	d_{Ka}	d_{St}	d_{Bpi}	d_{BPa}
2	16 m	8 m	3 m	0,25 m	0,35 m	0,45 m	0,25 m	0,65 m	0,25 m	0,35 m

Gemäß der Stabstatik ergibt sich die Querkraft im am stärksten beanspruchten Steg nach Gleichung (1). Dabei beteiligt sich jeder Steg eines Querschnitts bezüglich der Biegung gleichwertig am Lastabtrag (Gl. (2)). Die Torsionsbelastung wird hingegen durch die äußeren Stege abgetragen (Gl. (3)). Die so ermittelten Ergebnisse werden mit den FE-Ergebnissen verglichen. Dabei werden die Querkräfte betrachtet, die sich aus der Integration der Spannungen über die Stegflächen ergeben. Querkraftanteile in den übrigen Querschnittsbereichen werden vernachlässigt.

$$V_{Ges,Steg} = V_{Q,Steg} + V_{T,Steg} \quad (1)$$

$$V_{Q,Steg} = \frac{V_{Ges}}{n_{St}} \quad (2)$$

$$V_{T,Steg} = \frac{T_{Ges} \cdot H}{2A_K} \quad (3)$$

Mit:

- $V_{Ges,Steg}$ – gesamte Querkraft im Steg
- $V_{Q,Steg}$ – Querkraft im Steg infolge Biegung
- $V_{T,Steg}$ – Querkraft im Steg infolge Torsion
- V_{Ges} – gesamte Querkraft im betrachteten Schnitt
- n_{St} – Anzahl der Stege
- T_{Ges} – Torsionsmoment im betrachteten Schnitt
- A_K – die durch die Mittellinien der Wände eingeschlossene Fläche

Im Folgenden wird die Entwicklung der Querkräfte im angenommenen Bemessungsschnitt im Abstand $1,0H$ vom Lager betrachtet. Zur Verdeutlichung der Lastausbreitung und Darstellung der Querkräfte wird die Notation nach Abbildung 5 eingeführt. Der Wert a bezeichnet den Abstand der Lasten von der Mittelachse des gesamten Querschnittes und b die halbe Breite des Hohlkastens; b ist hierbei von der Zellenanzahl unabhängig. Bei einer Flächenbelastung ist a der Abstand zur Resultierenden und bei der Einzellastgruppe ist es die Entfernung zur geometrischen Mitte aller Punktlasten des Achslastmodells.

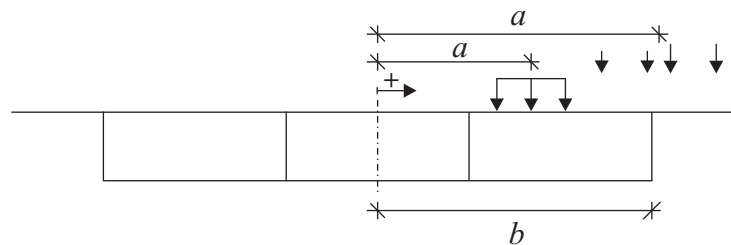


Abbildung 5. Notation für Laststellungen

3.2 Querkräfte infolge der Hauptspurlasten

Abbildung 6a) zeigt den Vergleich zwischen den ermittelten Querkäften für einen einzelligen Querschnitt und einen der Stege. Bei den Werten der Querkraft, die mithilfe der FEM ermittelt wurden, handelt es sich nur um die Anteile, die im Steg vorliegen. Die Querkraftanteile aus den Platten sind hier nicht dargestellt. Gezeigt ist die Größe in Abhängigkeit vom a/b -Verhältnis, das ein Maß für die Exzentrizität der Laststellung ist. Aus der Abbildung geht hervor, dass die tatsächlich vorhandene Querkraft in dem betrachteten Steg nicht mit der nach der Stabstatik übereinstimmt. Die Verteilung der Querkräfte auf die einzelnen Stege sowie die Ausbildung eines Schubflusses infolge der Torsion ist abhängig von der Quersteifigkeit des Querschnittes. Damit Gl. (3) ihre Gültigkeit behält, müsste der Querschnitt eine unendlich große Quersteifigkeit aufweisen. Dies liegt bei Hohlkästen nicht

vor, und es gilt, dass je mehr sich die Belastung einem Steg nähert, umso mehr Kraft in diesem verbleibt.

Betrachtet man die Entwicklung der Querkraft innerhalb eines zwei- oder dreizelligen Hohlkastens in Abhängigkeit vom a/b -Verhältnis, fällt auf, dass der Unterschied zur Stabstatik noch größer wird als bei einem einzelligen Querschnitt (Abbildung 6b) und c)). Der Unterschied zwischen den Ergebnissen nach der FEM und der Stabstatik wird umso größer, je mehr Zellen der Hohlkasten aufweist. Aus den Abbildungen geht ebenfalls hervor, dass die maximale Stegbeanspruchung nahezu unabhängig von der Anzahl der Zellen ist. Zudem werden die inneren Stege bei einer direkten Belastung weniger beansprucht als die äußeren, da sich die Flächenlast bei dieser Laststellung teilweise zu den benachbarten Stegen hin ausbreiten kann. Befindet sich die Last jedoch auf den Kragplatten, steht nur der äußere Steg zum Lastabtrag zur Verfügung.

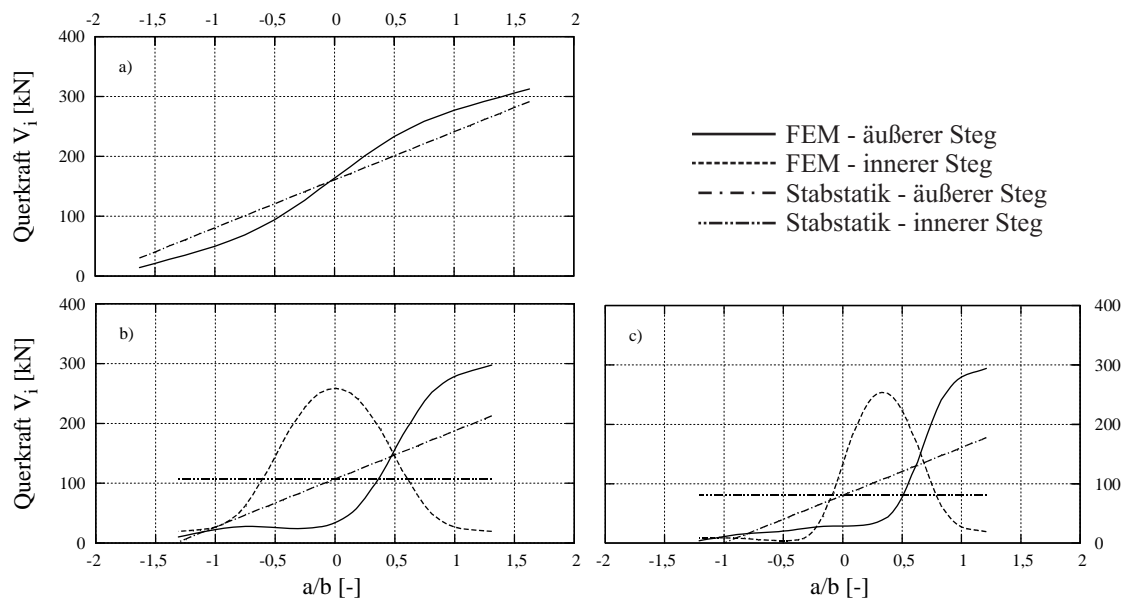


Abbildung 6. Querkraft bei $1,0H$ in einem Steg infolge horizontal verschieblicher Hauptspurlasten; Vergleich zwischen Stabstatik und FEM: a) einzellig, b) zweizellig, c) dreizellig

3.3 Querkräfte infolge der Achslasten

Bei der Ermittlung der Querkräfte infolge der Achslasten nach [3] gilt es zunächst zu klären, wo das Lastmodell in Längsrichtung anzuordnen ist, so dass an einer betrachteten Stelle die maximale Beanspruchung entsteht, wenn die Querkräfte mithilfe eines räumlichen FE-Modells ermittelt werden. Abbildung 7 zeigt die Entwicklung der Querkraft im äußeren Steg infolge der Achslasten. Betrachtet wird der angenommene Bemessungsschnitt in einem Abstand $1,0H$ vom Auflagerrand, wobei die Entfernung des Lastmodells variiert wird (siehe Abbildung 8). Hierfür werden die Achslasten zunächst mit der größtmöglichen Exzentrizität aufgebracht. Dargestellt ist die ermittelte Querkraft im äußeren Steg von ein- bis dreizelligen Querschnitten (Abbildung 4). Es ergibt sich, dass erst ab einem Abstand der Last von ca. $1,0H$ in Längsrichtung zur betrachteten Stelle die maximale Beanspruchung erreicht wird. Für weitere Untersuchungen werden die Achslasten deshalb in einer Entfernung $x = 2,0H$ vom Lager aufgebracht.

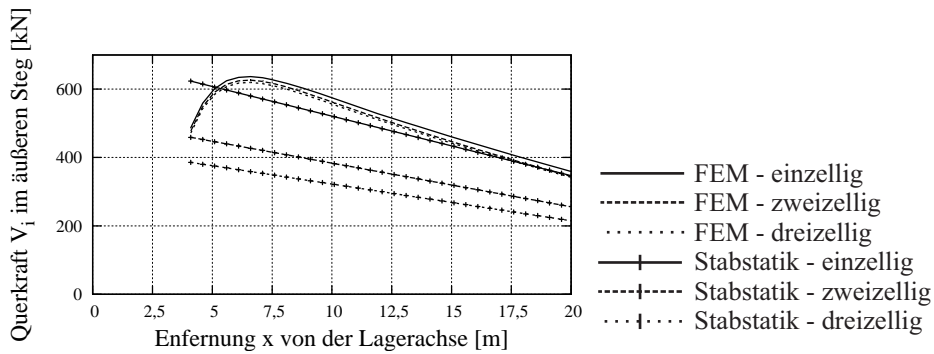


Abbildung 7. Querkraft bei $1,0H$ im äußeren Steg aus in Längsrichtung verschieblichen Achslasten, Vergleich zwischen Stabstatik und FEM

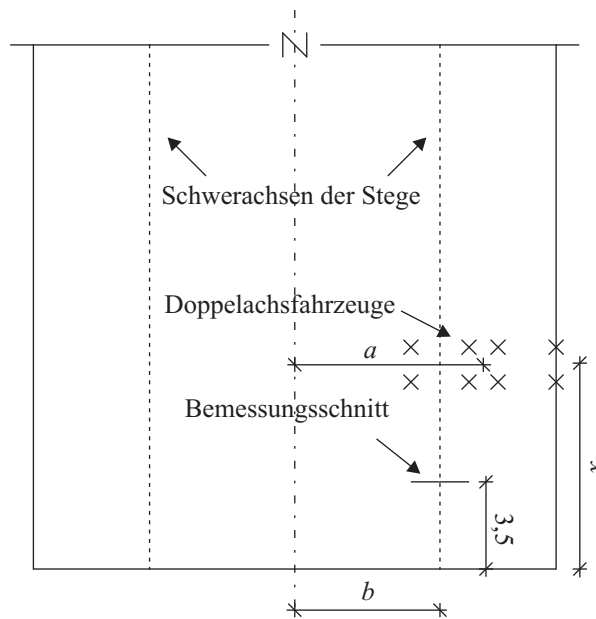


Abbildung 8. Draufsicht auf ein Einzelliges System

Für die Achslasten werden nur positive a/b -Verhältnisse betrachtet, denn bei negativen Verhältnissen müssten die Achslasten anders aufgebracht werden, um eine größere Torsionsbeanspruchung zu erzielen. Bei der Betrachtung der Querkräfte im Bemessungsschnitt ergeben sich vergleichbare Resultate wie infolge der Hauptspurlasten. Abbildung 9 zeigt die Querkräfte in den einzelnen Stegen in Abhängigkeit vom a/b -Verhältnis. Aus der Belastung des Systems durch die Achslasten lässt sich auch keine bedeutende Zusatzbelastung infolge der Profilverformung herauslesen. Vielmehr ist ein mehrdimensionaler Lastabtrag, der größtenteils von der Steifigkeit des Systems abhängig ist, als Ursache für die Unterschiede zwischen FE-Ergebnissen und Stabstatik festzustellen.

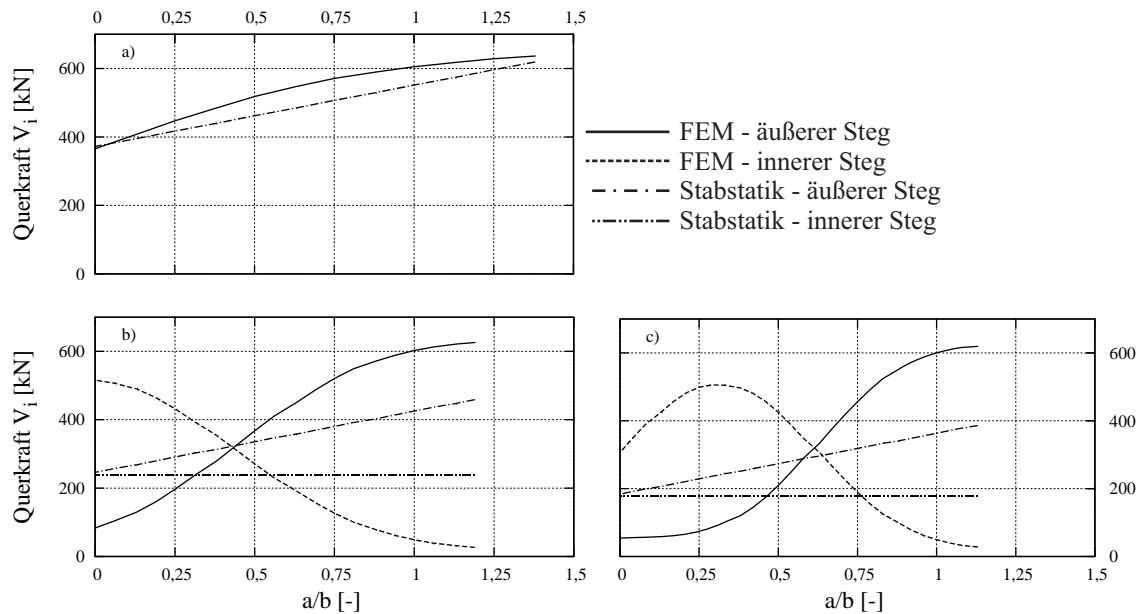


Abbildung 9. Querkraft bei $1,0H$ in einem der Stege infolge horizontal verschieblicher Achslasten; Vergleich zwischen Stabstatik und FEM: a) einzellig, b) zweizellig, c) dreizellig

3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die bisherigen Ausführungen machen deutlich, dass die Querkräfte infolge des Lastmodells, die mithilfe der FEM ermittelt werden, von der Zellenanzahl nahezu unabhängig sind. Die Differenz zwischen FEM und Stabstatik wird bei steigender Zellenzahl größer, weil die Stabstatik für Torsion nur die äußeren Stege und für Biegung alle Stege gleichberechtigt berücksichtigt. Diese Annahmen führen bei Hohlkastenquerschnitten zu auf der unsicheren Seite liegenden Ergebnissen. Lediglich für den einzelligen Querschnitt ergeben sich nach der Stabstatik und der FEM nahezu gleiche Ergebnisse (Abbildung 10a) und c)). Bei einer entsprechenden Vorbemessung kann somit von dem in Abbildung 11 gezeigten einfachen Balkenmodell ausgegangen werden. Für die hier verwendeten Lastgrößen ergäbe sich somit eine Querkraftbeanspruchung eines Stegs infolge der torsionswirksamen Lastanteile der Hauptspurlasten ($6,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 3 \text{ m}$) im Bemessungsschnitt bei $3,5 \text{ m}$ von der Lagerachse zu $V=p_{k,l}(l/2-3,5)=321,75 \text{ kN}$ (Abbildung 10c)). Werden die jeweils in Querrichtung nebeneinander stehenden Radlasten zusammengefasst und in Längsrichtung mit einem Abstand von $1,2 \text{ m}$ aufgebracht (Abbildung 11) ergibt sich die Querkraft im Bemessungsschnitt zu $V=-400/l(3,5+4,7)+800=718 \text{ kN}$, was annähernd den Werten nach der FEM entspricht (Abbildung 10 a)). Für die äußeren Stege ist dies eine gute Näherung, jedoch werden die inneren Stege mit dieser Vereinfachung etwas überschätzt (Abbildung 10b) und d)).

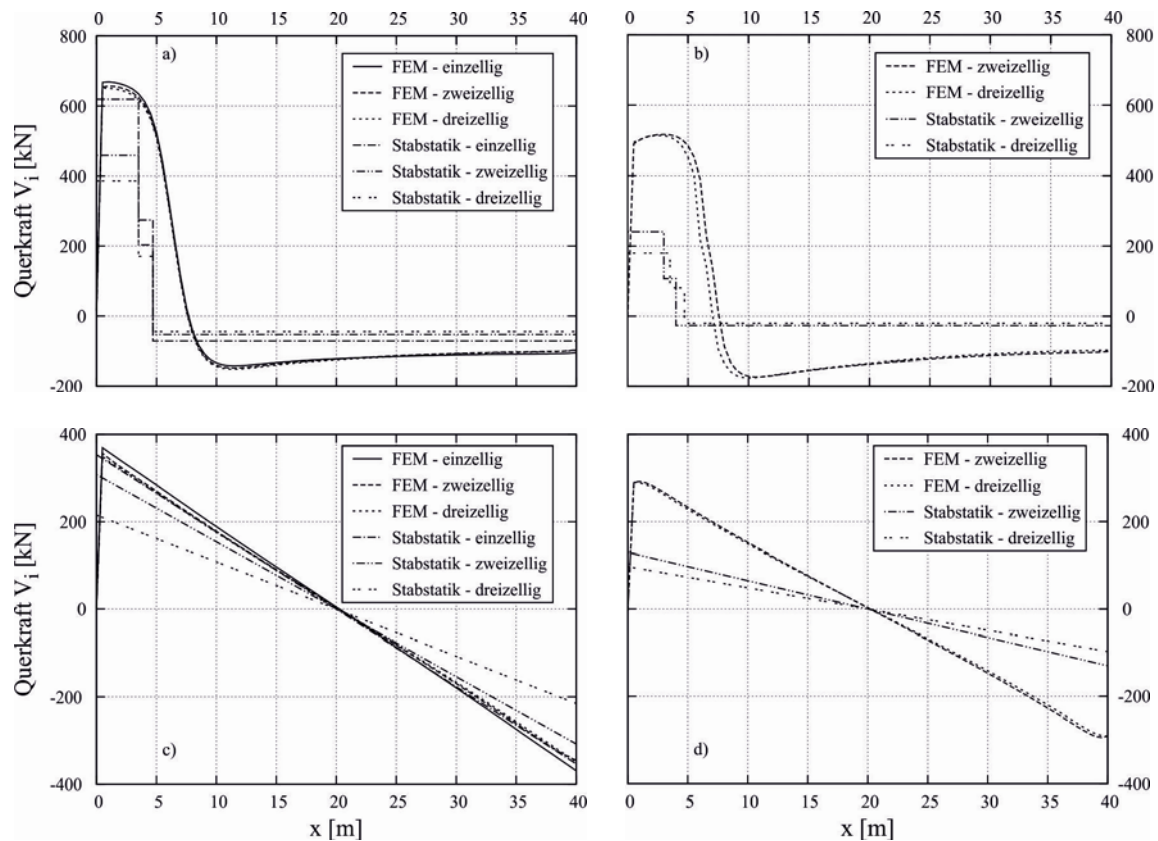


Abbildung 10. Querkraftverläufe in einzelnen Stegen aus der FEM und Stabstatik, infolge der Achslasten: a) äußerer Steg, b) innerer Steg; infolge der Hauptspurlasten: c) äußerer Steg d) innerer Steg

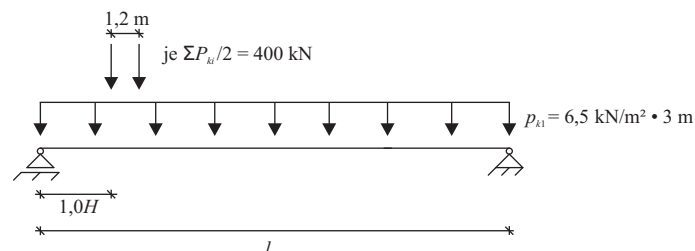


Abbildung 11. Ersatzsystem für exzentrische Lastanteile des Lastmodells

Werden die im Sinne einer Nachrechnung oder Bemessung einer Brücke ermittelten maßgebenden Querkräfte in den Stegen betrachtet (Tabelle 2), fällt auf, dass die Anteile aus den Hauptspur- und Achslasten ca. 8% bzw. 16% der Summe der Querkräfte ausmachen. Die Berücksichtigung der entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte hat nur geringe Auswirkungen auf die prozentuale Aufteilung dieser Größen. Der Vergleich wird anhand der Querkräfte zweier Laststellungen durchgeführt. Für eine maximale Beanspruchung des äußeren Stegs werden die Achs- sowie Hauptspurlasten mit $a/b \rightarrow \max.$ angesetzt und für die inneren Stege des zwei- und dreizelligen Querschnitts mit $a/b=0$ bzw. $a/b=1/3$. Erwartungsgemäß ergeben sich aus den FE-Berechnungen infolge der torsionswirksamen Lastanteile erheblich größere Beanspruchungen als nach der Stabstatik. Betrachtet man jedoch die Summen aller Werte ist der Unterschied zwischen Stabstatik und FEM gering. Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen die Werte für die einzelnen Berechnungsarten. Aufgeführt sind nur die wichtigsten

Einwirkungen. Beachtet man weitere Einflüsse wie Temperatur- oder Windlasten sowie Lasten aus Stützensenkungen, verlieren die Werte infolge der Hauptspur- und Achslasten noch mehr an Bedeutung. Anhand der hier betrachteten Querschnitte und Lastfälle betragen die Unterschiede zwischen FEM und Stabstatik in der Summe rund 10%. Dies liegt zum Teil an der gewählten Spannweite von 40 m, bei der das Eigengewicht dominiert. Bei geringeren Spannweiten nimmt z. B. der Anteil der Achslasten zu, da diese nicht von den Spannweiten abhängig sind. Bei großen Spannweiten kann der Einfluss der vergrößerten Beanspruchung somit vernachlässigt werden; bei geringen Spannweiten sowie bei lokalen Betrachtungen, ist die Vergrößerung bedeutender.

Tabelle 2. Lastanteile in einzelnen Stegen bei 1,0H vom Auflagerrand aus der FEM

	1	2	3	4	5	6	7	8
1			Einzellig		Zweizellig		Dreizellig	
2			[kN]	%	[kN]	%	[kN]	%
3	Äußerer Steg	Eigengewicht	2326,38	64,4	2463,41	66	2615,79	67,5
4		2,5 kN/m ²	335,3	9,3	344,52	9,2	346,59	8,9
5		6,5 kN/m ²	312,62	8,7	297,73	8	294,17	7,6
6		Achslasten	636,65	17,6	626,22	16,8	619,54	16
7		Summe	3610,95	100	3731,88	100	3876,09	100
8	Innerer Steg	Eigengewicht			2431,28	69	2240,28	68,2
9		2,5 kN/m ²			317,69	9	285,54	8,7
10		6,5 kN/m ²			258,78	7,3	253,81	7,7
11		Achslasten			516,11	14,6	505,65	15,4
12		Summe			3523,86	99,9	3258,28	100

Tabelle 3. Lastanteile in einzelnen Stegen bei 1,0H vom Auflagerrand aus der Stabstatik

	1	2	3	4	5	6	7	8
1			Einzellig		Zweizellig		Dreizellig	
2			[kN]	%	[kN]	%	[kN]	%
3	Äußerer Steg	Eigengewicht	2360,78	65,5	2472,69	71,2	2461,84	73,4
4		2,5 kN/m ²	330	9,2	330	9,5	330	9,8
5		6,5 kN/m ²	291,59	8,1	212,82	6,1	177,63	5,3
6		Achslasten	619,13	17,2	459,02	13,2	385,77	11,5
7		Summe	3601,5	100	3474,53	100	3355,24	100
8	Innerer Steg	Eigengewicht			2472,69	78,5	2461,84	80,7
9		2,5 kN/m ²			330	10,5	330	10,8
10		6,5 kN/m ²			107,25	3,4	80,44	2,6
11		Achslasten			239,33	7,6	179,5	5,9
12		Summe			3149,27	100	3051,78	100

4 Variationen der Querschnittsabmessungen

Die Querkräfte eines räumlichen Systems verteilen sich immer entsprechend der Steifigkeiten der einzelnen Bauteile. Die obige Untersuchung wurde anhand eines konkreten Beispiels durchgeführt. Abbildung 12 zeigt, wie sich die Querkraft im Schnitt bei 1,0H ändert, wenn

die Querschnittsdicke, und damit die Steifigkeit, einzelner Bauteile zu- oder abnimmt. Es werden die Querkräfte im äußeren und im inneren Steg sowie zwei Laststellungen betrachtet. Für den äußeren Steg werden die Hauptspurlasten mit der größtmöglichen Exzentrizität auf der Kragplatte aufgebracht, für den inneren Steg stehen die Lasten genau mittig über den Stegen (siehe Abschnitt 3.4). Die in Tabelle 1 aufgeführten Abmessungen werden einzeln mit dem Faktor f_i multipliziert, alle übrigen bleiben jeweils unverändert. Es stellt sich heraus, dass sich die Änderung der Steifigkeiten ähnlich auf die Querkräfte in den Stegen auswirkt: Eine größer werdende Steg- oder Fahrbahnstärke verringert die Querkraft, da die Rahmensteifigkeit des Hohlkastens vergrößert wird und somit die Fähigkeit zunimmt, Lasten aus einem Steg in den benachbarten weiterzuleiten. Eine größer werdende Steghöhe hat eine Vergrößerung der Querkraft zur Folge, da die Steifigkeit des Stegs in Längsrichtung steigt und somit mehr Kraft im Steg verbleibt. Bei einer Veränderung des Stegabstandes zeigt sich ebenfalls diese Tendenz. Der Grund hierfür ist, dass nahe liegende Stege von der Hauptspur gleichmäßig belastet werden und die steifigkeitsabhängige Lastaufteilung eine untergeordnete Rolle spielt. Bei großen Stegabständen verteilt sich die Last nur geringfügig und verbleibt im belastet Steg. Eine Besonderheit ergibt sich jedoch für den äußeren Steg bei geringen Stegabständen. Bei sehr eng stehenden Stegen steigt die Querkraft, da der Querschnitt in Querrichtung immer steifer wird; es kann sich ein Schubfluss nach Gl. (3) ausbilden, der die Beanspruchung vergrößert und die Querkraft wieder ansteigen lässt.

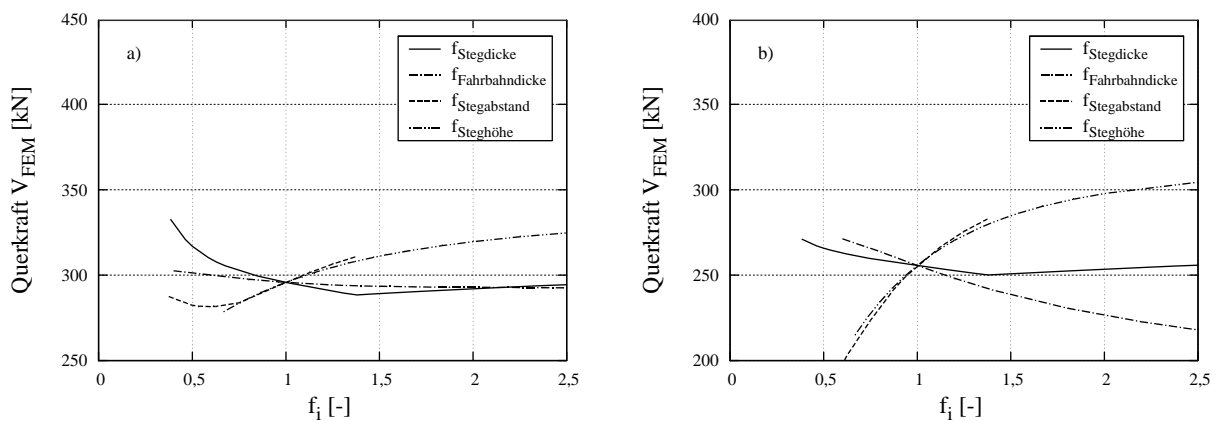


Abbildung 12. Querkraft infolge Hauptspurlasten im zweizelligen Querschnitt bei $1,0H$ bei einzeln veränderlichen Bauteilabmessungen um den Faktor f_i : a) äußerer Steg, b) innerer Steg

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, wie sich Querkräfte in ein- und mehrzelligen Hohlkastenbrücken verteilen. Bei der Ermittlung der Querkräfte wird ein linear elastisches Materialverhalten angesetzt, und es werden Unterschiede zwischen der Stabstatik und der FEM dargestellt. In einer Voruntersuchung wird gezeigt, dass, falls Einzellasten nicht direkt über den Stegen aufgebracht werden, sich keine nennenswerten Zusatzbeanspruchungen aus der Profilverformung ergeben. Aufgrund der Lastaufteilung und Lasteinleitung entstehen jedoch andere Querkräfte als nach der Stabstatik. In einer Parameterstudie an ein-, zwei- und dreizelligen Hohlkastenquerschnitten wird sodann dargestellt, wie sich die Querkräfte auf die einzelnen Stege aufteilen, wenn die Fahrbahnen mit Achslasten und Hauptspurlasten belastet werden. Es zeigt sich, dass bei Verwendung räumlicher FE-Modelle Einzellasten in einem Abstand von ca. $1,0H$ zur betrachteten Stelle aufgebracht werden müssen, um eine maximale

Querkraftbeanspruchung zu erzielen. Weiter ergibt sich, dass bei steigender Zellenanzahl die Unterschiede zwischen FEM und Stabstatik größer werden, da sich die Querkräfte entsprechend der Steifigkeiten der einzelnen Bauteile auf die Stege verteilen. Da reale Belastungen nicht direkt über den Stegen angreifen, entstehen keine nennenswerten Zusatzbeanspruchungen infolge der Profilverformung. Im Vergleich mit den Gesamtquerkräften infolge des Eigengewichts und den Verkehrslasten fallen die Beanspruchungsunterschiede zwischen FEM und Stabstatik nicht sonderlich ins Gewicht. Weiter wird gezeigt, dass für Vorbemessungen Querkräfte infolge Achslasten und Hauptspurlasten an einem einfachen Balkenmodell bestimmt werden können. In weiteren Untersuchungen zur Lastaufteilung in Hohlkastenquerschnitten sollen materielle Nichtlinearitäten berücksichtigt werden, so dass insbesondere auch die Möglichkeit der Umlagerungen von Beanspruchungen abgeschätzt werden kann.

Literatur

- [1] Borkowski, G., FE-Modellierung von Hohlkastenbrücken unter Berücksichtigung nichtlinearen Werkstoffverhaltens, TU-Hamburg Harburg, Diplomarbeit, 2006
- [2] Buschmayer, W., Roder, C., Gusia, „Erfahrungen bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonbrücken“, Bautechnik 86 (2009), S. 133-141
- [3] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN Fachbericht 101, „Einwirkungen auf Brücken“, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003
- [4] Glahn, H., „Die Berechnung der Profilverformung symmetrischer, einzelliger Kastenträger mit in Längs- und Querrichtung veränderlichen Querschnittsverhältnissen“, Beton- und Stahlbetonbau 1 (1980), S. 5-9
- [5] Grossert, E., „Untersuchungen zum Tragverhalten von Massivbrücken mit zweizelligem Kastenquerschnitt“, TU-Braunschweig, 1989
- [6] Institut für Bautechnik: „Geänderte Fassung der Zulassungsbescheide vom 08.02.1977 für Spannverfahren“, Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 2/1977, S. 37-38
- [7] Just, M., „Structural Assessment of Multi-Cell Box Girder Bridges“, 6th International PhD Symposium in Civil Engineering, Zürich, 2006
- [8] Knittel, G., „Zur Berechnung des dünnwandigen Kastenträgers mit gleich bleibendem symmetrischen Querschnitt“, Beton- und Stahlbetonbau 9 (1965), S. 205-211
- [9] Kupfer, H., „Kastenträger mit elastisch ausgesteiftem Querschnitt unter Linien- und Einzellasten“, Stahlbetonbau – Berichte aus Forschung und Praxis, Wilhelm Ernst & Sohn, 1969
- [10] Rao, D. S. P., „Einfluß der Querschnittsabmessungen auf die Profilverformung von massiven Hohlkastenträgern“, Beton- und Stahlbetonbau 1 (1981), S. 6-9
- [11] Schlaich, J., Scheef, H., „Betonhohlkastenbrücken“, IVBH, Zürich, 1982
- [12] Steinle, A., „Torsion und Profilverformung – Berechnung eines in Feldmitte durch eine Torsionsmoment belasteten Trägers mit einem verformbaren biegesteifen Rechteckkastenprofil mit auskragenden Gurten“, TH-Stuttgart, 1967
- [13] Usuki, T., Torsion und Profilverformung des einzelligen Kastenträgers mit vier Wänden unter Berücksichtigung der Schubverformungen und der Drillsteifigkeit der Wände“, TH-Darmstadt, 1976