

# 1 Arbeits- und Ergebnisbericht

## 1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das Tragverhalten von gedrungenen, punktgestützten Platten am Beispiel von Fundamentplatten anhand von Bauteilversuchen und numerischen Simulationen zu beschreiben. Im Vordergrund stehen die Einflüsse aus der Schubschlankheit und der Boden-Bauwerk-Interaktion. Im Vergleich zu Flachdecken sind in den letzten Jahren nur wenige Versuche zum Durchstanzen von Fundamenten in der Literatur veröffentlicht worden. Obwohl die Versuche gezeigt haben, dass sich das Tragverhalten von Flachdecken und Fundamenten unterscheidet, ist den normativen Bemessungskonzepten mit Ausnahme des neuen Eurocode 2 gemeinsam, dass sie bei der Ermittlung des Durchstanzwiderstands nicht zwischen Flachdecken und Fundamenten unterscheiden.

## 1.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

### 1.2.1 Allgemeines

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von gedrungenen Fundamenten wurden sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen wurden zur systematischen Ermittlung verschiedener Einflussfaktoren auf den Durchstanzwiderstand verwendet. Zusätzlich konnten die Versuchsergebnisse zur Kalibrierung der numerischen Modelle genutzt werden. Die Ergebnisse sind ausführlich in zwei Versuchsberichten [6],[8], in einem Bericht zu den numerischen Simulationen [9] und in der Arbeit von RICKER [15] dargestellt.

### 1.2.2 Versuche

Insgesamt wurden 17 Durchstanzversuche an quadratischen Fundamenten durchgeführt, die mit DF6 bis DF22 bezeichnet wurden. Eine detaillierte Beschreibung der Versuche kann [6] und [8] entnommen werden. Die durchgeführten Versuche lassen sich in zwei Versuchsserien aufteilen und wurden als Ergänzung zu einer ersten Versuchsserie (Serie I) durchgeführt, die fünf Versuche (DF1 bis DF5) umfasste [5],[7],[17]. Die fünf Versuche der Serie II (DF6 bis DF10) waren realitätsnah in einer Versuchsgrube des GiB auf Sand gebettet. Bei den restlichen Fundamenten (DF11 bis DF22) wurde eine gleichmäßige Bodenpressung durch hydraulische Pressen simuliert (Serie III).

Die Versuchskörper wurden im Maßstab 1:2 bis 1:3 verkleinert. Durch die begrenzte Größe der Versuchsgrube war dieses Vorgehen bei den auf Sand gebetteten Fundamenten der Serie II notwendig, da sich bei größeren Abmessungen die Spannungen im Boden nicht mehr unabhängig von Wand- und Bodeneinflüssen hätten einstellen können. Bei der Serie III begrenzte der verwendete Versuchsrahmen die maximale Größe der Fundamentplatten auf 180 cm. Die Aufstandsfläche der Versuchskörper variierte somit zwischen 90 cm × 90 cm und 180 cm × 180 cm. Die Kantenlänge der quadratischen Stützen betrug 20 cm und die untersuchten statischen Nutzhöhen deckten den Bereich zwischen 25 cm und 48 cm ab. Die Betone für die Versuchskörper der Serie II wurden in der Versuchshalle des IMB mit einem Zwangsmischer hergestellt. Die Zylinderdruckfestigkeit variierte zwischen  $f_{c,cyl} = 19,0$  MPa und 38,1 MPa. Für die Fundamente der Serie III wurde Transportbeton mit einer Festigkeit zwischen  $f_{c,cyl} = 20,0$  MPa und 36,4 MPa verwendet. Als Bewehrung kam üblicher Betonstahl BSt 500 S zur Anwendung. Die Biegezugbewehrung war orthogonal angeordnet und die Bewehrungsgrade variierten zwischen 0,85 % und 0,91 %. Insgesamt vier Versuchskörper waren mit vertikalen Bügeln als Durchstanzbewehrung versehen und sollten zur Untersuchung der maximalen Durchstanztragfähigkeit verwendet werden. Bei den auf Sand gebetteten Fundamenten der Serie II wurde ein enggestufter Sand verwendet. Der Einbau des

Sandes erfolgte durch eine lagenweise Verdichtung. Resultierend aus der in den Versuchen annähernd gleichen Lagerungsdichte (mit Ausnahme vom DF9) wurde der Reibungswinkel des Bodens zu  $\varphi = 40^\circ$  ( $\varphi = 42^\circ$  bei DF9) bestimmt. Eine Kohäsion des Bodens wurde planmäßig nicht angesetzt. Auf Grund der Steifigkeitsunterschiede zwischen dem verwendeten Boden und dem verwendeten Beton können alle Fundamente als starr angesehen werden.

Die verwendeten Versuchsaufbauten sind in Bild 1 dargestellt. Die Belastung erfolgte bei den auf Sand gebetteten Versuchen der Serie II über sechs hydraulische Pressen, die in einem Pressenpaket gebündelt waren. Da alle Pressen an einem gemeinsamen Ölkreislauf angeschlossen waren, konnte eine gleichmäßige Belastung sichergestellt werden. Um größere Fundamentabmessungen prüfen zu können, waren die 12 Fundamente der Serie III nicht auf Sand gebettet, sondern wurden auf dem Kopf stehend durch hydraulische Pressen belastet. Die Lasten wurden durch acht Pressen aufgebracht, die ihre Lasten über einen Lastverteilungsträger an jeweils zwei kombinierte Gleit- und Verformungslager abgaben. Da die Pressen an einem gemeinsamen Ölkreislauf angeschlossen waren, wurden die Versuchskörper somit durch insgesamt 16 gleiche Einzellasten beansprucht.

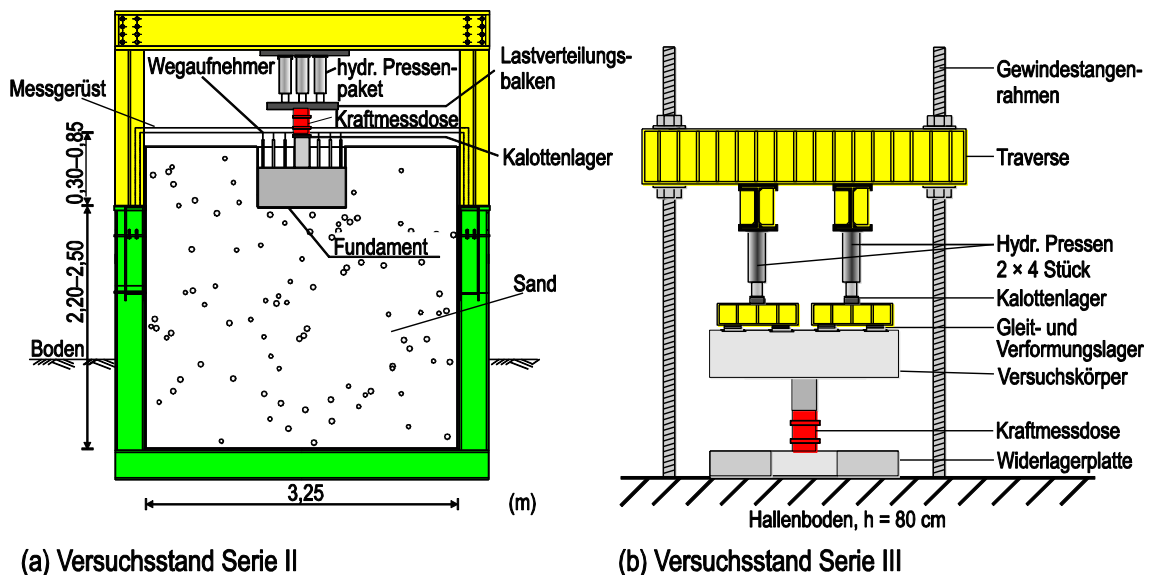


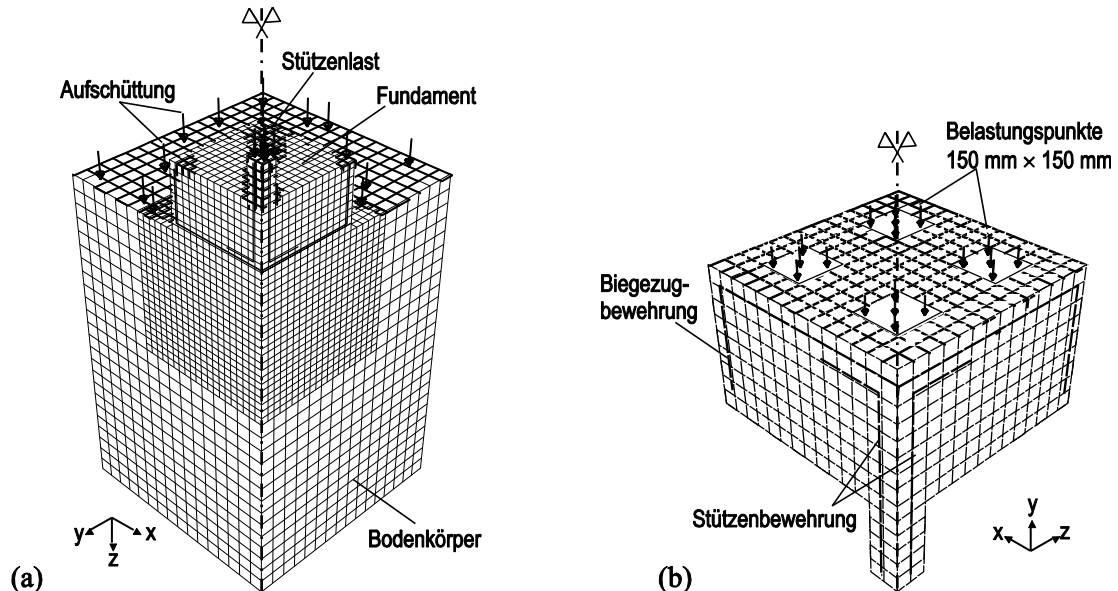
Bild 1: Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten

In beiden Versuchsserien wurden die Plattendurchbiegungen jeweils an den Ecken der Fundamente und an den Ecken der Stützen mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Die Betonestauchungen auf der Biegedruckseite der Platte sowie die Dehnungen der Biegezugbewehrung und der Bügel wurden mit Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen. Die Messung der Sohlspannungsverteilung unterhalb des Fundaments erfolgte durch zwei verschiedene Messsysteme. Die Verteilung konnte durch 21 hydraulischen Druckmesskissen unter dem gesamten Fundament durch punktuelle Messungen bestimmt werden. Unter Ausnutzung der Symmetrie konnten somit unplanmäßige Schiefstellungen des Fundaments eliminiert werden. Zusätzlich wurde die Sohlspannungsverteilung für ein Fundamentviertel flächig mit Sensorfolien gemessen. Diese Messwerte liefern eine flächige Verteilung der Sohlspannungsverteilung bis zum Bruch.

### 1.2.3 Numerische Untersuchungen

Die numerischen Berechnungen wurden mit dem Finite-Elemente-Programm Abaqus [4] durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der numerischen Untersuchungen kann [9],[15] entnommen werden.

Die Versuchskörper wurden dreidimensional mit Volumenelementen modelliert. Aus Symmetriegründen war die Simulation eines Viertels der Versuchskörper ausreichend (Bild 2). Für den Beton wurde ein plastisches Schädigungsmodell, das auf Veröffentlichungen von LUBLINER ET AL. [12] sowie von LEE und FENVES [11] basiert, verwendet. Für die Modellierung des Bodens wurde ein linear-elastisches, ideal plastisches Stoffgesetz mit der Bruchbedingung nach MOHR-COLOUMB verwendet. Die verwendeten Materialparameter wurden in Laborversuchen bestimmt (vgl. [9]).



**Bild 2: Diskretisierung der Versuchskörper: auf Sand gebettete Fundamente (a) und gleichförmig belastete Fundamente (b)**

Zunächst wurden die durchgeführten Versuche nachgerechnet, um die verwendeten FE-Modelle zu überprüfen. Die Nachrechnungen ergaben, dass die Traglasten relativ genau bestimmt werden konnten. Für das Verhältnis aus experimenteller und rechnerischer Bruchlast  $V_{test}/V_{FE}$  ergab sich ein Mittelwert von  $x_m = 0,98$  bei einem relativ geringen Variationskoeffizienten von  $V = 0,096$ . Die gemessenen und berechneten Verformungen sowie die Dehnungen der Biegezugbewehrung stimmten gut überein. Die Bügeldehnungen und vor allem die Betondehnungen wurden dagegen nur eingeschränkt abgebildet, wohingegen die Sohlnormalspannungen eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen den gemessenen und rechnerischen Werten aufwiesen. Da sowohl die Bruchlast als auch das Verformungsverhalten gut erfasst wurden, konnte davon ausgegangen werden, dass das Programm das Tragverhalten und den Lastabtrag ebenfalls zutreffend abbildet. Das verwendete Programmsystem sowie die Bestimmung der Materialparameter und die Modellierung erschienen somit für die Durchführung von Parameterstudien zur weiteren Untersuchung des Durchstanztragverhaltens von Fundamenten geeignet.

In einer ersten Parameterstudie wurden verschiedene Einflussfaktoren auf den Durchstanzwiderstand von Fundamenten ohne Durchstanzbewehrung systematisch untersucht. Ausgangspunkt der Rechnungen war die Versuchsreihe DF11 bis DF13, bei der die Schubslankheit  $a/d$  bei konstanter Plattendicke durch eine Änderung der Plattenbreite zwischen 1,25 und 2,0 variiert wurde. Auf die Abbildung eines Bodenkörpers wurde bei diesen Rechnungen wegen des hohen numerischen Aufwands verzichtet. Untersucht wurden der Einfluss der Schubslankheit, der Betonfestigkeit, des Biegebewehrungsgrades, des Maßstabsfaktors der statischen Nutzhöhe und des Verhältnisses zwischen Stützenumfang und statischer Nutzhöhe.

In einer zweiten Parameterstudie wurden die konstruktiven Abstandsregelungen für eine Durchstanzbewehrung überprüft. Variiert wurden der Abstand der ersten Durchstanz-

bewehrungsreihe vom Stützenanschnitt und der Abstand zwischen der ersten und zweiten Durchstanzbewehrungsreihe.

Die Versuchskörper DF6 und DF8 wurden als Ausgangsmodelle für eine Parameterstudie an den auf Sand gebetteten Fundamenten herangezogen. Variiert wurden der Reibungswinkel, die Kohäsion sowie der Elastizitätsmodul des Bodens. Der Einfluss der Bauteilverformung konnte durch den Vergleich der Versuchskörper DF6 und DF8 erfolgen.

### 1.2.4 Ingenieurmodelle

Die für Fundamente ohne Durchstanzbewehrung erstellte Datenbank [7],[15] wurde zunächst überprüft und um Fundamente mit Durchstanzbewehrung erweitert. Anschließend wurden die Datensätze verwendet, um die Güte ausgewählter mechanischer Modelle und normativer Regelungen durch Versuchsnachrechnungen zu überprüfen. Zusätzlich wurden für Fundamente ohne Durchstanzbewehrung die Sicherheitsniveaus von DIN 1045-1 und Eurocode 2 mit Verfahren der Zuverlässigkeitstheorie genauer beurteilt [15]. Bei einer Bemessung nach DIN 1045-1 ergeben sich für schlanke Fundamente ( $a/d \geq 2,0$ ) Sicherheitsindices  $\beta$  oberhalb des nach Eurocode erforderlichen Mindestwertes von 3,8. Für gedrungene Fundamente ( $a/d < 2,0$ ) ergeben sich jedoch zu kleine Werte für  $\beta$ .

Basierend auf den experimentellen und theoretischen Untersuchungen wurden bestehende Modelle für Fundamente mit und ohne Durchstanzbewehrung erweitert und wenn möglich semiprobabilistisch bewertet.

### 1.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen zum Durchstanzen von auf Sand gebetteten und gleichförmig belasteten Fundamenten können folgende Schlussfolgerungen aus den 17 Versuchen abgeleitet werden:

- Die Neigung des Versagensrisses wird hauptsächlich von der Schubschlankheit  $a/d$  und nicht von der Betonfestigkeit beeinflusst. Die Neigung des Versagensrisses betrug bei den gedrungenen Fundamenten ( $a/d = 1,25$ ) etwa  $45^\circ$  und weniger als  $35^\circ$  bei den schlankeren Fundamenten ( $a/d = 2,0$ ).
- Der Durchstanzwiderstand wird signifikant von der Schubschlankheit  $a/d$  beeinflusst. Die aufnehmbare Querkraft nimmt mit zunehmendem  $a/d$ -Verhältnis ab.
- Anhand der Versuchsergebnisse kann vermutet werden, dass der Durchstanzwiderstand der schlankeren Fundamente ( $a/d = 1,5$  und  $2,0$ ) signifikant von der Betonfestigkeit beeinflusst ist. Bei den gedrungenen Fundamenten mit einem  $a/d$ -Verhältnis von  $1,25$  war dieser Effekt jedoch nicht eindeutig.
- Durch die Anordnung einer Durchstanzbewehrung lässt sich die aufnehmbare Querkraft erheblich steigern. Die Effektivität der Durchstanzbewehrung wird jedoch von der Schubschlankheit  $a/d$  beeinflusst. Die Wirksamkeit der Durchstanzbewehrung wird mit abnehmendem  $a/d$ -Verhältnis reduziert.
- Auf sandgebettete Fundamente erzielen höhere Traglasten als gleichmäßig belastete Fundamente. Dieser Effekt resultiert aus einer mit steigendem Verhältnis von Bruchlast zu Grundbruchlast fortschreitenden Spannungskonzentration unterhalb der Stütze.
- Die vorhandene Spannungsverteilung im Boden ist abhängig vom Verhältnis Belastung zu Grundbruchlast  $V_{test}/R_{n,k}$ . Bei den 5 durchgeführten Versuchen war auf Grund der abweichenden  $V_{test}/R_{n,k}$ -Verhältnisse die Spannungsumlagerung zur Fundamentmitte hin unterschiedlich weit fortgeschritten. Der nach DIN 4017 [14] ermittelte Grundbruchwert kann dabei als konservativ angesehen werden.

- Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Spannungsverteilung im Boden neben dem Belastungsniveau auch von der Schubschlankheit  $a/d$  sowie der Systemsteifigkeit abhängt. Es zeigt sich die Tendenz, dass die Spannungsumlagerung bei gedrunenen, starren Fundamenten erst später einsetzt als der theoretische Verlauf für ideal starre Fundamente vermuten lässt.

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter auf die Tragfähigkeit von Fundamenten ohne Durchstanzbewehrung wurden mehrere FE-Parameterstudien durchgeführt. Es wurde dabei analog zum Versuchsstand der Serie III eine gleichförmige Belastung simuliert. Aus den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen lassen sich für Fundamente ohne Durchstanzbewehrung folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Der Durchstanzwiderstand von Fundamenten ohne Durchstanzbewehrung ist signifikant von der Schubschlankheit  $a/d$  beeinflusst. Die aufnehmbare Querkraft steigt mit abnehmender Schubschlankheit  $a/d$  an. Für  $a/d$ -Verhältnisse kleiner als 1,5 ist der Anstieg deutlich überproportional.
- Die Tragfähigkeit wird mit zunehmender Betondruckfestigkeit größer. Die Zunahme ist bei gedrunenen Fundamenten ( $a/d \leq 1,25$ ) ausgeprägter als bei schlanken Fundamenten.
- Der Durchstanzwiderstand nimmt bei schlanken Fundamenten mit zunehmendem Biegebewehrungsgrad zu. Bei gedrunenen Fundamenten ( $a/d \leq 1,25$ ) kann dagegen keine signifikante Zunahme der Tragfähigkeit bei einer Erhöhung des Bewehrungsgrades beobachtet werden.
- Für schlanke Fundamente wird der Maßstabeffekt mit dem Ansatz in Model Code 90 hinreichend genau erfasst. Fundamente mit einer Schubschlankheit  $a/d \leq 1,5$  zeigen dagegen einen etwas ausgeprägteren Maßstabeffekt.
- Der bezogene Stützenumfang  $u_0/d$  beeinflusst den Durchstanzwiderstand signifikant. Mit abnehmendem  $u_0/d$ -Verhältnis steigt die Tragfähigkeit an.
- Diese Effekte können möglicherweise auf einen Wechsel des Versagensmechanismus zurückgeführt werden. Das Tragverhalten von gedrunenen Fundamenten ( $a/d < 1,5$ ) kann mit einem Druckkegelschalenmodell („Direktabstützung“) beschrieben werden. Bei schlanken Fundamenten ( $a/d \geq 1,5$ ) tritt dagegen das Versagen ein, wenn die Tragfähigkeit der Betondruckzone erschöpft ist.

Für Fundamente mit Durchstanzbewehrung aus geschlossenen Bügeln wurden zwei numerische Parameterstudie zum Einfluss der Abstände zwischen den einzelnen Bewehrungsreihen durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In den FE-Berechnungen konnte die Traglast durch eine Reduktion des Abstands der ersten Bügelreihe vom Stützenanschnitt auf  $s_0 = 0,2d$  um 10 % bis 14 % gesteigert werden. Eine Vergrößerung des Abstands  $s_0$  auf  $0,5d$  führte dagegen nur zu einer Abnahme der Traglast um etwa 5 %.
- Der Abstand zwischen der ersten und zweiten Bügelbewehrungsreihe  $s$  wurde zwischen  $0,3d$  und  $0,7d$  variiert. Die in den numerischen Simulationen ermittelten Traglasten waren für alle untersuchten radialen Abstände nahezu gleich groß.

Um den Effekt der Boden-Bauwerk-Interaktion näher zu untersuchen, wurden FE-Parameterstudien an auf Sand gebetteten Fundamenten durchgeführt. Als Ausgangspunkt wurde dabei das für die Nachrechnung der Versuche der Serie II entwickelte FE-Modell verwendet. Aus den Rechnungen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die Schubslankheit sowie die Systemsteifigkeit beeinflussen maßgeblich die sich einstellende Sohlnormalspannungsverteilung. Die Spannungsumlagerung von einer konkaven in eine konvexe Verteilung findet bei gedrunenen und starren Fundamenten erst bei höheren Lastniveaus statt. Auf das Verformungsverhalten des Bodens konnte kein nennenswerter Einfluss festgestellt werden.
- Die sich einstellende Sohlnormalspannung hängt maßgeblichen von den Scherparametern des Bodens ab. Der Elastizitätsmodul beeinflusst dagegen das Verformungsverhalten des Bodens und nicht die sich einstellende Spannungsverteilung.
- Der Ansatz einer gleichmäßigen Sohlspannungsverteilung im Durchstanznachweis liegt auf der sicheren Seite. Vor allem bei schlanken Fundamenten sind jedoch deutliche Tragreserven vorhanden, sodass der Ansatz einer realitätsnahen Spannungsverteilung wirtschaftliche Vorteile bringen kann

Basierend auf den experimentellen und numerischen Ergebnissen sowie den Nachrechnungen der Versuche der Datenbank mit ausgewählten mechanischen Modellen und normativen Regelungen wurden verschiedene Ingenieurmodelle abgeleitet. Das mechanische Modell von ANDRÄ [1] wurde durch die Einführung eines neuen Grenzwertes für die Betonstauchungen in tangentialer Richtung, der ursprünglich für das Durchstanzmodell von BROMS [3] hergeleitet wurde, modifiziert. Zusammen mit weiteren Anpassungen kann das Durchstanzmodell beim Vergleich mit den Versuchen der Datenbank die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Durchstanzwiderstand bei geringer Streuung nahezu trendfrei erfassen [15].

Als Vorschlag für den Nationalen Anhang zu Eurocode 2 (NAD) wurde der empirische Vorfaktor der Durchstanzgleichung für Fundamente in Abhängigkeit der Schubslankheit  $a/d$  neu definiert. Eurocode 2 verwendet einen kritischen Rundschnitt, dessen Abstand von der Lasteinleitungsfläche iterativ zu ermitteln ist. Die Iteration ermittelt in Übereinstimmung mit den Versuchsbeobachtungen für gedrungene Fundamente steiler und für schlankere Fundamente flacher geneigte Versagensrisse. Aus diesem Grund wurde der kritische Rundschnitt in Eurocode 2 für den NAD-Vorschlag beibehalten. Die Versuchsnachrechnung weist für den neuen Ansatz eine deutlich reduzierte Streuung auf. Das erforderliche Sicherheitsniveau wurde durch eine semiprobabilistische Berechnung nachgewiesen [15].

Die Bemessungsansätze nach DIN 1045-1 und Eurocode 2 für exzentrisch belastete Fundamente ergaben im Vergleich mit Versuchsergebnissen aus der Literatur keine befriedigende Übereinstimmung [15]. Daher wurden zwei Bemessungsvorschläge für Fundamente mit und ohne klaffende Fuge auf Basis des Sektormodells von BEUTEL [2] hergeleitet [15].

Die Bemessungsregeln für Fundamente mit Durchstanzbewehrung konnten anhand von 18 Versuchen bewertet werden. Da der Ansatz in Eurocode 2 für Fundamente weder die Maximaltragfähigkeit noch die Tragfähigkeit innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs richtig ermittelt, wurde ein Neuvorschlag erarbeitet [15]. Die Maximaltragfähigkeit wurde analog zu DIN 1045-1 als Vielfaches der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung definiert. DIN 1045-1 weist sehr große erforderliche Stahlquerschnitte für die erste Durchstanzbewehrungsreihe aus, die nach den durchgeführten Versuchen überbemessen ist. Es wurde deshalb eine neue Bemessungsgleichung für die Tragfähigkeit innerhalb der durchstanzbewehrten Zone abgeleitet, die sich an die Zulassungen für Doppelkopfkanker anlehnt. Der abschließende Vergleich mit den verfügbaren Versuchen belegt, dass der neue Ansatz bei geringer Streuung der Ergebnisse zu einer sicheren und wirtschaftlicheren Bemessung führt [15]. Eine weitergehende probabilistische Überprüfung des Ansatzes war nicht möglich, da die Modellunsicherheit aufgrund der unzureichenden Versuchszahl nicht ausreichend genau ermittelt werden konnte.

## 1.4 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Mit den neu entwickelten bzw. angepassten Bemessungsregeln zur Ermittlung des Durchstanzwiderstands von Fundamenten mit und ohne Durchstanzbewehrung können im Gegensatz zu den vorhandenen Bemessungsansätzen die Traglasten ausreichend genau bestimmen werden. Die neuen Modelle sind durch weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen abzusichern und gegebenenfalls anzupassen. Es erscheint vor allem notwendig, den Maßstabseffekt der statischen Nutzhöhe und den Einfluss der Betonfestigkeit durch systematische Versuche genauer zu quantifizieren. Es ist geplant hierzu einen Fortsetzungsantrag bei der DFG zu stellen. Nach den numerischen Simulationen führt bei gedrungenen Fundamenten die Erhöhung des Biegebewehrungsgrades über einen bestimmten Mindestwert hinaus (der deutlich geringer ist als die nach Norm maximal zulässigen 2%) zu keiner weiteren Steigerung des Durchstanzwiderstands. Diese Aussage sollte ebenfalls durch experimentelle Untersuchungen abgesichert werden. Die hierzu notwendigen Versuche mit systematisch variiertem Bewehrungsgrad könnten ebenfalls dazu verwendet werden, nachzuweisen, ob die Durchstanztragfähigkeit bei gedrungenen Platten analog zu schlanken Platten (vgl. [13]) eine Rotationsabhängigkeit aufweist.

## Zusammenfassung

Infolge der konzentrierten Lasteinleitung entstehen im Bereich des Anschlusses zwischen Fundament und Stütze hohe Momenten- und Querkraftbeanspruchungen. Diese können sowohl ein Biege- als auch ein lokales Querkraftversagen verursachen, das als Durchstanzen bezeichnet wird. Hinsichtlich des Durchstanzenverhaltens werden Fundamente wie punktgestützte Platten behandelt. Versuche zeigen jedoch, dass die Schubschlankheit einen großen Einfluss auf die Durchstanzenfähigkeit von Fundamenten hat, die allerdings in den vorhandenen Modellen zum Durchstanzen nicht konsistent erfasst wird. Eine Versuchsdatenbank wurde verwendet, um ausgewählte normative Regelungen und mechanische Modelle zu analysieren und mit probabilistischen Methoden zu bewerten [15].

Zur experimentellen Überprüfung des Tragverhaltens wurden 17 Durchstanzenversuche an Fundamenten durchgeführt. Fünf Fundamente wurden unter wirklichkeitsnahen Randbedingungen auf Sand gebettet. Bei zwölf Versuchskörpern wurde eine gleichmäßige Bodenpressung durch hydraulische Pressen simuliert. Die Ergebnisse waren eindeutig durch die Schubschlankheit beeinflusst: Die Neigung des Versagensrisses variierte zwischen  $45^\circ$  bei gedrungenen und  $35^\circ$  bei schlanken Fundamenten und die aufnehmbare Querkraft nahm mit zunehmender Schubschlankheit ab. Bei den gedrungenen Fundamenten traten Umlagerungen der Sohlnormalspannungen erst bei höheren Lasten als bei den schlankeren Fundamenten auf. Die Wirksamkeit einer Durchstanzenbewehrung war bei gedrungenen Fundamenten zudem deutlich geringer als bei schlanken. Die auf Sand gebetteten Fundamente erreichten geringfügig höhere Bruchlasten im Vergleich zu den gleichförmig belasteten Versuchskörpern. Dies kann auf eine Konzentration der Sohlnormalspannungen im Bereich der Stütze zurückgeführt werden. Die Konzentration ist umso ausgeprägter je näher die Bruchlast an der Grundbruchlast liegt.

In nichtlinearen numerischen Simulationen wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf den Durchstanzenwiderstand von Fundamenten ohne Durchstanzenbewehrung systematisch untersucht. Dabei konnten zwei Versagensmechanismen beobachtet werden. Bei gedrungenen Fundamenten kann das Tragverhalten durch eine Schar von Druckkegelschalen beschrieben werden. Der Durchstanzenkegel im Versagenszustand entsteht dann in erster Linie durch ein Spalten der Druckkegelschalen. Schlankere Fundamente versagen dagegen, wenn die Druckzone am Stützenanschnitt ihre Tragfähigkeit infolge der Beanspruchung durch den tangentialen Biegedruck und die vertikale Querkraft erreicht. Der Ansatz einer realitätsnahen Verteilung der Bodenpressungen kann vor allem bei schlanken, weniger starren Fundamenten zu wirtschaftlichen Vorteilen führen.

Basierend auf den experimentellen und theoretischen Untersuchungen wurde ein bestehendes mechanisches Modell so erweitert, dass es für die Berechnung von Fundamenten ohne Durchstanzenbewehrung verwendbar ist. Für den Nationalen Anhang Deutschland wurde eine an Eurocode 2 angepasste, empirische Gleichung für Fundamente ohne Durchstanzenbewehrung erarbeitet und semiprobabilistisch bewertet. Zudem wurde für Fundamente mit Durchstanzenbewehrung ein halbempirischer Bemessungsansatz abgeleitet. Für exzentrisch belastete Fundamente mit und ohne Durchstanzenbewehrung wurden die Bemessungsansätze mit einem Sektormodell kombiniert.



## 2 Literatur

- [1] ANDRÄ, H.-P.: *Zum Tragverhalten des Auflagerbereichs von Flachdecken*. Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Diss., 1982
- [2] BEUTEL, R.: *Durchstanzen schubbewehrter Flachdecken im Bereich von Innenstützen*. Aachen: Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2003 (Schriftenreihe des Lehrstuhls und Instituts für Massivbau (IMB) Heft 16). – Diss.
- [3] BROMS, C. E.: *Concrete flat slabs and footings – design methods for punching and detailing for ductility*. Stockholm : Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Design and Bridges, Royal Institute of Technology, 2005 (TRITA-BKN Bulletin 80). – Diss.
- [4] DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA CORP.: *Abaqus Version 6.7-EF Documentation*. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes, 2007
- [5] HEGGER, J., RICKER, M.; ULKE, B.; ZIEGLER, M.: Untersuchungen zum Durchstanzenverhalten von Stahlbetonfundamenten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101(2006), H. 4, S. 233-243
- [6] HEGGER, J.; RICKER, M.; NEITZKE, B.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten von gedrunenen, punktgstützten Platten am Beispiel von Fundamenten – Versuchsbericht gleichförmig belastete Fundamente DF11 bis DF22*. IMB-Bericht 240/2009, Institut für Massivbau, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, 2009.
- [7] HEGGER, J.; SHERIF, A. G.; RICKER, M.: Experimental Investigations on Punching Behavior of Reinforced Concrete Footings. In: *ACI Structural Journal* 103 (2006), S. 604-613
- [8] HEGGER, J.; ZIEGLER, M.; RICKER, M.; KÜRTEEN, S.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten von gedrunenen, punktgstützten Platten am Beispiel von Fundamenten – Versuchsbericht Fundamente auf Sand DF6 bis DF10*. IMB-Bericht 212/2008, Institut für Massivbau, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, 2008.
- [9] HEGGER, J.; ZIEGLER, M.; RICKER, M.; KÜRTEEN, S.; NEITZKE, B.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten von gedrunenen, punktgstützten Platten am Beispiel von Fundamenten – Numerische Untersuchungen*. IMB-Bericht 243/2009, Institut für Massivbau, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, 2009.
- [10] HEGGER, J.; ZIEGLER, M.; RICKER, M.; ULKE, B.: *Entwicklung eines Bemessungskonzeptes zum Durchstanzen von Fundamentplatten unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion*. IMB-Bericht 136/2005, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2005.
- [11] LEE, J. ; FENVES, G. L.: Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. In: *Journal of Engineering Mechanics* 124 (1998), S. 892-900
- [12] LUBLINER, J.; OLIVER, J.; OLLER, S; OÑATE, E.: A Plastic-Damage Model for Concrete. In: *International Journal of Solids and Structures* 25 (1989), S. 299-326
- [13] MUTTONI, A.: Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. In: *ACI Structural Journal* 105 (2008), S. 440-450
- [14] Norm DIN 4017 März 2006. *Baugrund – Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen*
- [15] RICKER, M.: *Zur Zuverlässigkeit der Bemessung gegen Durchstanzen bei Einzelfundamenten*. Aachen: Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2009 (Schriftenreihe des Lehrstuhls und Instituts für Massivbau (IMB) Heft 28). – Diss.
- [16] SMOLTZYK, U.; NETZEL, D.; KANY, M.: Flachgründungen. In: U. Smolczyk (Hrsg.), *Grundbau-Taschenbuch. Teil 3: Gründungen*. 6. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2001
- [17] ULKE, B.: *Einfluss der Bodenreaktionskraft beim Durchstanzen von Einzelfundamenten*. Aachen: Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen und Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, 2008. - Diss.