# Verwendung von selbstverdichtendem Beton für Flachdecken

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Institut d'Ingénierie Civile
Laboratoire de Construction en Béton

Dr. Olivier Burdet
Roberto Guidotti
Prof. Dr Aurelio Muttoni

cemsuisse-Projekt 200703 – Juli 2010
Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband der Schweizerischen Cementindustrie finanziert.

Bezeichnungen ..... 3
1. Einführung ..... 5
1.1 Grundlagen ..... 5
1.2 Forschungsziele ..... 5
1.3 Ziele des Berichts ..... 5
2. Kenntnisstand ..... 6
2.1 Norm SIA 262/2003 ..... 6
2.2 Theorie des kritischen Schubrisses ..... 6
2.3 Versuche von Regan, Moe, Hognestad, Tolf ..... 7
3. Laborversuche ..... 9
3.1 Probekörper ..... 9
3.2 Beton ..... 9
3.3 Bewehrung ..... 10
3.4 Hauptergebnisse ..... 10
3.5 Platten aus Vibrierbeton ..... 11
3.6 Platten aus selbstverdichtendem Beton ..... 12
4. Auswertung der Versuchsergebnisse ..... 13
4.1 Vergleich von Vibrierbeton mit selbstverdichtendem Beton ..... 13
4.2 Gültigkeit der Norm SIA 262 für selbstverdichtenden Beton ..... 13
5. Ersetzen eines VB 0-32 durch einen SCC 0-16 ..... 13
5.1 Berechnungsgrundlagen ..... 13
5.2 Anwendung der Berechnungsergebnisse für Platten ohne Durchstanzbewehrung ..... 14
6. Schlussfolgerungen ..... 14
Bibliographie ..... 15
Anhang ..... 17

---

**Versuchsbericht**

Durchstanzversuche an Deckenplatten aus Vibrierbeton und selbstverdichtendem Beton mit unterschiedlichem Grösstkorn der Gesteinskörnung, Versuchsbericht, Lausanne, 2009.

## Vorwort der Begleitgruppe

Obwohl man heute selbstverdichtende Betone (SVB) mit einem Grösstkorn der Gesteinskörnung Dmax = 32 mm herstellen kann, wird die Körnung häufig auf 16 mm beschränkt, um die Neigung zum Sedimentieren einzuschränken und eine perfekte Fliessfähigkeit auch bei eng liegender Bewehrung zu gewährleisten. Gemäss Norm SIA 262 ergibt sich aus einer Reduktion der Gesteinskörnung ein geringer Durchstanzwiderstand als bei einem Rüttelbeton der gleichen Festigkeitsklasse mit einem Grösstkorn von 32 mm. Doch ist ebenfalls anerkannt, dass selbstverdichtender Beton aufgrund seines tieferen w/z-Werts von 0.40 bis 0.45 generell eine höhere Druckfestigkeit besitzt als herkömmliche Rüttelbetone, was zumindest teilweise die kleinere Körnung ausgleicht.

Die vom Laboratoire de Construction en Béton der ETH Lausanne im Rahmen dieses von cemsuisse finanzierten Projekts durchgeführten Versuche prüften die Auswirkungen des Grösstkorns der Gesteinskörnung Dmax auf den Durchstanzwiderstand von SVB-Betonen und erbrachten den Nachweis, dass das Widerstandsmodell der Norm SIA 262 (2003) auch für selbstverdichtende Betone Gültigkeit hat. Angesichts der Komplexität des Modells und seiner zahlreichen Parameter (Durchmesser der Pfeiler, Vorhandensein einer Durchstanzbewehrung, Druckfestigkeit des Betons, Spannweite, statische Höhe und Bewehrung der Platten) wurden für die Dimensionierung Nomogramme entwickelt, die schnell aufzeigen, welche Erhöhung der Druckfestigkeitsklasse erforderlich ist, um die Reduktion der Gesteinskörnung von 32 auf 16 mm zu kompensieren. Wir hoffen, mit diesem Instrument, das eine Garantie für die Sicherheit derartiger Tragwerke darstellt, den Einsatz von SVB für Deckenplatten zu erleichtern.

Blaise Fleury, Holcim (Schweiz) AG
Dr. Claude Pilloud, Juracime SA

## cemsuisse Forschungsförderung

Die cemsuisse Forschungsförderung unterstützt Forschungsprojekte im Bereich der Betonanwendung, welche von kompetenten Forschergruppen an cemsuisse herangetragen werden. Mit der proaktiven Forschungsförderung definiert cemsuisse zudem Forschungsprojekte von Interesse und trägt diese an kompetente Forschergruppen heran oder schreibt sie öffentlich aus. Die Projektnehmer werden jeweils von einer Begleitgruppe aus cemsuisse – Vertretern fachlich unterstützt.

Dr. Heiner Widmer, Leiter Umwelt, Technik, Wissenschaft, cemsuisse

## Bezeichnungen

### Lateinische Grossbuchstaben

| | |
|---|---|
| $D_{max}$ | Grösstkorn der Gesteinskörnung |
| $E_{cm,28}$ | Mittelwert des Elastizitätsmoduls von Beton nach 28 Tagen |
| $V$ | von der Platte auf die Stütze übertragene vertikale Kraft |
| $V_R$ | von der Platte auf die Stütze übertragene vertikale Kraft beim Bruch |

### Lateinische Kleinbuchstaben

| | |
|---|---|
| $d_m$ | mittlere statische Höhe |
| $f_c$ | Zylinderdruckfestigkeit |
| $f_{c,essai}$ | Zylinderdruckfestigkeit am Tag des Versuchs |
| $f_{ck}$ | charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit (5% Fraktilwert) |
| $f_{ck,32}$ | charakteristische Zylinderdruckfestigkeit eines Betons mit $D_{max}$ = 32 mm Grösstkorn der Gesteinskörnung |
| $f_{cm,28}$ | Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen |
| $f_{ctm,28}$ | Mittelwert der Zylinderzugfestigkeit nach 28 Tagen |
| $f_s$ | Fliessgrenze von Betonstahl |
| $f_t$ | Zugfestigkeit von Betonstahl |
| $\ell$ | Spannweite |
| $r_{col}$ | Radius der Stütze |
| $u$ | Umfang des Nachweisschnitts |

### Griechische Kleinbuchstaben

| | |
|---|---|
| $\varepsilon_{su}$ | Bruchdehnung von Betonstahl |
| $\rho$ | geometrischer Bewehrungsgehalt der Zugzone bezüglich der mitwirkenden Plattenbreite |
| $\psi$ | Plattenrotation |
| $\psi_R$ | Plattenrotation beim Bruch |

# 1. Einführung

## 1.1 Grundlagen

Selbstverdichtender Beton (englisch: Self-Compacting Concrete, SCC) bietet zahlreiche Vorteile im Hinblick auf Einbau, Formgebung, Qualität des Endproduktes, Aussehen und Tragfähigkeit. Sein Einsatz für Flachdecken, die einen bedeutenden Anteil der in der Schweiz jährlich hergestellten Deckenplatten ausmachen, wird allerdings dadurch eingeschränkt, dass es nicht möglich ist, einen Vibrierbeton (VB) bei der Ausführung direkt durch einen selbstverdichtenden Beton zu ersetzen. Diese Einschränkung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Tragwerksnorm SIA 262 den Durchstanzwiderstand von Beton nicht nur in Abhängigkeit von der Festigkeit, sondern auch vom Grösstkorn der Gesteinskörnung definiert. Um den Einbau zu erleichtern, ist das Grösstkorn der Gesteinskörnung in einem SCC im Allgemeinen auf 16 mm begrenzt. Daraus ergibt sich ein geringerer Durchstanzwiderstand als bei Vibrierbeton der gleichen Festigkeitsklasse mit einem Grösstkorn von 32 mm.

Es ist allerdings bekannt, dass die Druckfestigkeit eines selbstverdichtenden Betons aufgrund seines höheren Zementanteils und seines geringeren Wasser/Zement-Wertes häufig höher ist als für seine Klasse verlangt. Dadurch kann - zumindest teilweise - die ungünstige Wirkung des kleineren Grösstkorns ausgeglichen werden.

## 1.2 Forschungsziele

Die heute verfügbaren Versuche zeigen sehr gut den Einfluss der Betondruckfestigkeit auf den Durchstanzwiderstand. Im Gegensatz dazu wird der Einfluss des Grösstkorns auf den Durchstanzwiderstand, obwohl klar erkennbar, weniger deutlich dargestellt. Die vorgestellte Forschungsarbeit hat zum Ziel, den Einfluss des Grösstkorns auf den Durchstanzwiderstand zu untersuchen. Der experimentelle Teil des Projekts erlaubt diesen besser einzuschätzen und stützt sich dabei auf in einem vorherigen Cemsuisse Forschungsprojekt von Guandalini und Muttoni durchgeführte Versuche [6]. Der theoretische Teil der Forschungsarbeit stellt einen direkt anwendbaren Ansatz zur Ermittlung des Durchstanzwiderstands von Deckenplatten aus SCC vor. Dieser ermöglicht, den Ersatz einer Deckenplatte aus Normalbeton durch eine aus SCC zu überprüfen.

## 1.3 Ziele des Berichts

Im vorliegenden Bericht werden das Umfeld der Forschungsarbeit und die wichtigsten Parameter der durchgeführten Versuche vorgestellt. Die Versuchsergebnisse werden in konzentrierter Form dargestellt Empfehlungen zum Ersatz von Vibrierbeton durch selbstverdichtenden Beton gegeben. Eine ausführliche Darstellung der Versuchsergebnisse ist im Bericht „Durchstanzversuche an Platten aus Vibrier- bzw. selbstverdichtendem Beton mit unterschiedlichem Grösstkorn“ von R. Guidotti, M. Fernández Ruiz und A. Muttoni [8] (auf französisch) enthalten, der dem vorliegenden Bericht als Anlage beiliegt.

## 2. Kenntnisstand

Flachdecken, die nicht auf Pilzkopfstützen aufgelagert sind, stellen die heute in der Schweiz am häufigsten gewählte Lösung für Geschossdecken in Verwaltungs-, gewerblich genutzten oder Industriegebäuden mit mässiger Belastung und in Lagerhallen, Parkhäusern und weiteren ähnlichen Gebäuden dar. Die Wahl der Deckenstärke und die Bemessung ergeben sich häufig aus den Anforderungen bezüglich Durchstanzen und Gebrauchstauglichkeit.

Immer häufiger wird in der Schweiz für den Bau von Gebäuden selbstverdichtender Beton (SCC) eingesetzt. Folglich stellen die von den Ingenieuren formulierten Anforderungen an den Durchmesser des Grösstkorns eine wesentliche Beschränkung für den Einsatz in hoch belasteten Flachdecken dar. Um das Risiko des Blockierens des SCC durch Bewehrungsstäbe während des Betonierens zu reduzieren, wird der Durchmesser des Grösstkorns im Allgemeinen auf 16 mm begrenzt [11].

### 2.1 Norm SIA 262/2003 [20]

Gemäss der Norm SIA 262 [20] hängt der Durchstanzwiderstand von der Plattenstärke (statische Höhe), dem Stützenquerschnitt, dem Bewehrungsgehalt, der Betondruckfestigkeit, dem Durchmesser des Grösstkorns, der Spannweite der Platte und dem eventuellen Vorhandensein einer Durchstanzbewehrung ab.

Da Flachdecken im Allgemeinen mit der Annahme eines Grösstkorndurchmessers von $D_{max}$ = 32 mm bemessen werden, werden Unternehmervorschläge selbstverdichtenden Beton einzusetzen, häufig vom Bauingenieur abgelehnt, da der Wechsel zu einem Beton mit $D_{max}$ = 16 mm eine deutliche Verringerung des Durchstanzwiderstands von 7 bis 10% oder mehr (siehe Abbildung 1) mit sich bringt.

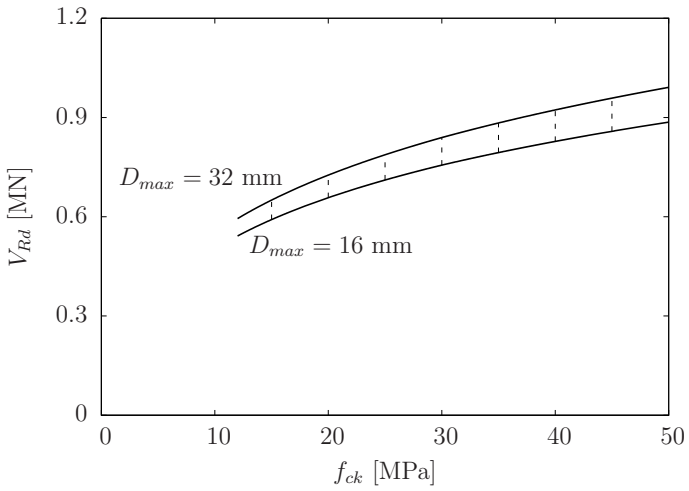



Abbildung 1: Durchstanzwiderstand einer Deckenplatten in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit und des Grösstkorndurchmessers $D_{max}$ (Berechnung gemäss SIA 262 für $\ell$ = 8 m, $d_m$ = 0.30 m, $r_{col}$ = 0.15 m, $\rho$ = 0.7 %)

### 2.2 Theorie des kritischen Schubrisses

Die Norm SIA 262 basiert auf der von Prof. Muttoni entwickelten Theorie des kritischen Schubrisses [14]. Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse direkt mit den theoretischen Berechnungen verglichen. Es ist nicht möglich, diese direkt mit den Bestimmungen der SIA-Norm 262 zu vergleichen, da diese Modellierungs- und Sicherheitsfaktoren mit einschliessen,

die sich nicht auf die Versuchsergebnisse anwenden lassen. Umgekehrt ist es nicht möglich, die aus den Versuchen abgeleiteten Ergebnisse direkt für die Bemessung zu nutzen.

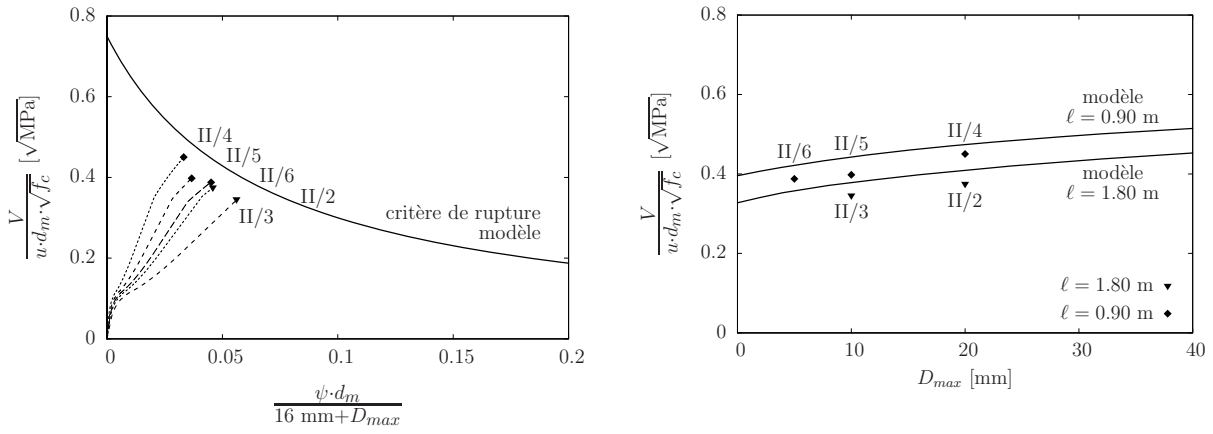
## 2.3 Versuche von Regan, Moe, Hognestad, Tolf

Versuchsdaten, die den Einfluss des Grösstkorndurchmessers auf den Durchstanzwiderstand beschreiben, sind nicht sehr zahlreich und wenig zufriedenstellend. Besagter Einfluss wird in Analogie aus Arbeiten zur Querkraft abgeleitet, unter der Annahme, dass die Korngrösse (positive Wirkung) die negative Wirkung der Grösse der Platte teilweise ausgleicht (dickere Platten haben einen niedrigeren Durchstanzwiderstand) [14, 22, 13]. Auf der Grundlage dieser Arbeiten wurde der Parameter

$$\frac{48}{D_{\max} + 16mm}$$

in das Kapitel Durchstanzen der SIA-Norm 262 eingeführt [14].

Eine von Regan [19] mit einer Reihe von Platten der Grösse 1.8 x 1.8 x 0.16 m und 0.9 x 0.9 x 0.08 m durchgeführte Versuchsserie mit jeweils einem zwischen 5 und 20 mm veränderten Grösstkorn hat interessante Ergebnisse gebracht (Abbildung 2). Abbildung 2(a) zeigt die normalisierten Ergebnisse im Vergleich zum Bruchkriterium der Theorie des kritischen Schubrisses. Die Belastungskurven wurden von den Autoren dieses Berichts auf der Grundlage der verfügbaren Daten berechnet. Abbildung 2(b) zeigt die gleichen normalisierten Ergebnisse bezogen auf den Durchmesser des Grösstkorns. Die Kurven stellen den Einfluss des Grösstkorndurchmessers nach dem Modell der Theorie des kritischen Schubrisses dar. Diese Versuche bestätigen die Tendenz, dass sich mit steigendem Grösstkorndurchmesser der Durchstanzwiderstand erhöht.



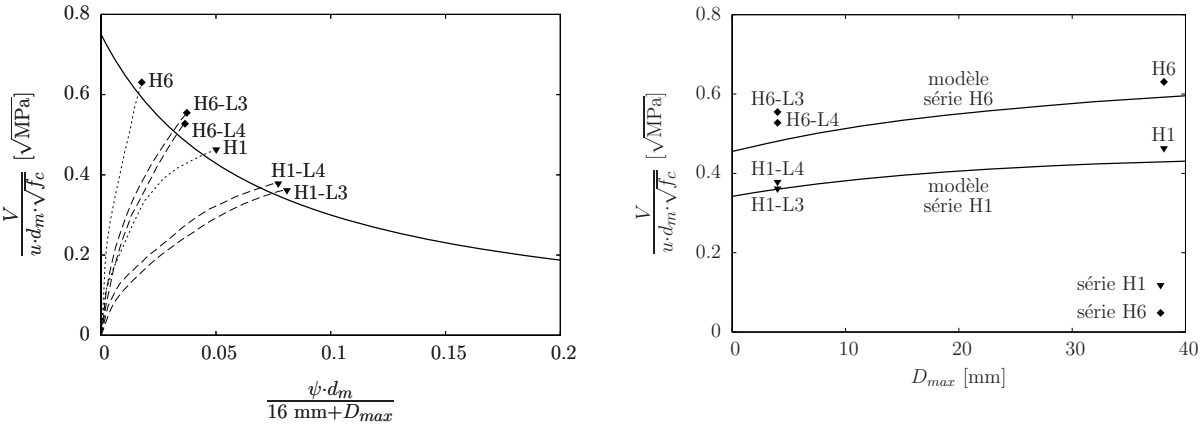

(a) Vergleich der Versuchsergebnisse (gestrichelte Linien) mit dem Bruchkriterium (durchgezogene Linie)

(b) Einfluss des Grösstkorndurchmessers, Vergleich der Versuche (Punkte) mit der Theorie des kritischen Schubrisses (Kurven)

Abbildung 2: Ergebnisse der Versuche von Regan [19] und Vorhersagen nach dem Modell der Norm SIA 262

Hognestad et al. [10] haben eine Reihe weiterer Versuche mit Platten der Grösse 1.829 x 1.829 x 0.152 m durchgeführt, wobei die Kornart im Vergleich zur ursprünglichen Versuchsreihe von Moe [12] verändert wurde. Bei dem von Moe verwendeten Zuschlag

handelte es sich um eine Standardkörnung mit einem maximalen Durchmesser von 38.1 mm. Hognestad et al. setzten einen Leichtzuschlag ein, der beim Durchstanzen bricht und für den ein äquivalenter Durchmesser von 4 mm angenommen wurde, welcher dem des verwendeten Sandes entspricht. Die Leichtzuschläge mit grösserem Durchmesser wurden nicht berücksichtigt. Die Reihe H6 entspricht massiven Platten, die Reihe H1 Platten mit Aussparungen in Stützennähe.

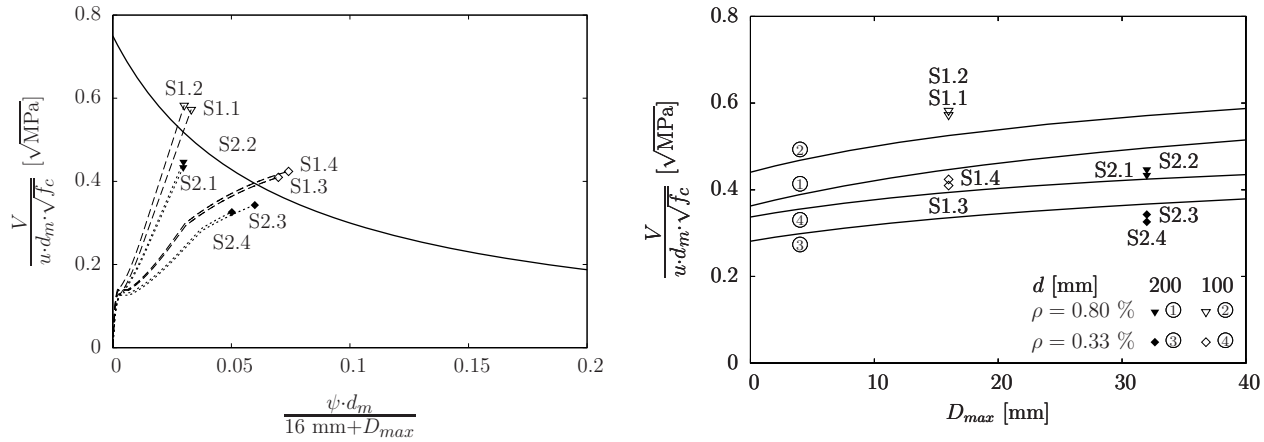



(a) Vergleich der Versuchsergebnisse (gestrichelte Linien) mit dem Bruchkriterium (durchgezogene Linie)

(b) Einfluss des Grösstkorns, Vergleich der Versuche (Punkte) mit der Theorie des kritischen Schubrisses (Kurven)

Abbildung 3: Versuchsergebnisse von Moe und Hognestad et al. [12,10]

Eine weitere Studie wurde von Tolf [21] durchgeführt. Die Auswertung dieser Versuche gestaltet sich schwieriger (denn es wurden nicht nur der Grösstkorndurchmesser $D_{max}$ sondern auch die Plattenstärke und der Bewehrungsgehalt verändert) und die Übereinstimmung mit der Theorie des kritischen Schubrisses ist weniger eindeutig (Abbildung 4). Die Versuche ergeben, dass die Plattenstärke grossen, im Gegensatz dazu aber der Grösstkorndurchmesser weit weniger Einfluss hat (die Versuche mit $D_{max} = 32$ mm ergaben geringere Widerstände als erwartet).




(a) Vergleich der Versuchsergebnisse (gestrichelte Kurven) mit dem Bruchkriterium (durchgezogene Linie)

(b) Einfluss des Grösstkorndurchmessers, Vergleich der Versuche (Punkte) mit der Theorie des kritischen Schubrisses (Kurven)

Abbildung 4: Versuchsergebnisse von Tolf [21]

## 3. Laborversuche

Es wurden insgesamt zehn Durchstanzversuche an Platten mit für die Praxis repräsentativen Abmessungen von 3.0 x 3.0 x 0.25 m durchgeführt. Die wichtigsten Parameter waren der Längsbiegebewehrungsgehalt der oberen Bewehrungslage (0.75 % und 1.5 %) sowie die Betonsorte und die Gesteinskörnung: Vibrierbeton mit einem Grösstkorn von 16 und 32 mm (VB16 und VB32) und selbstverdichtender Beton mit einem Grösstkorn von 8, 16 oder 32 mm (SCC8, SCC16 und SCC32). Alle Betonsorten wurden von Holcim (Schweiz) AG, Betonwerk Aigle hergestellt und mit einem Fahrmischer zum Ort des Einbaus in ein Fertigteilwerk in Riddes (VS) transportiert (Abb. 5(a)). Das Mix Design der Betonarten erfolgte durch Holcim (Schweiz) AG. Die Frischbetonversuche während des Einbaus wurden durch das mobile Labor der Holcim (Schweiz) AG durchgeführt (Abb. 5(b)).

(a) Einbau des selbstverdichtenden Betons (SCC)

(b) Setzfliessmass des Frischbetons (SCC 8)

Abbildung 5: Betonierung der Probekörper aus selbstverdichtendem Beton

### 3.1 Probekörper

Bei den Probekörpern handelte es sich um Platten der Grösse 3.0 x 3.0 x 0.25 m. Abbildung 6 zeigt die wichtigsten Abmessungen der zehn untersuchten Platten.

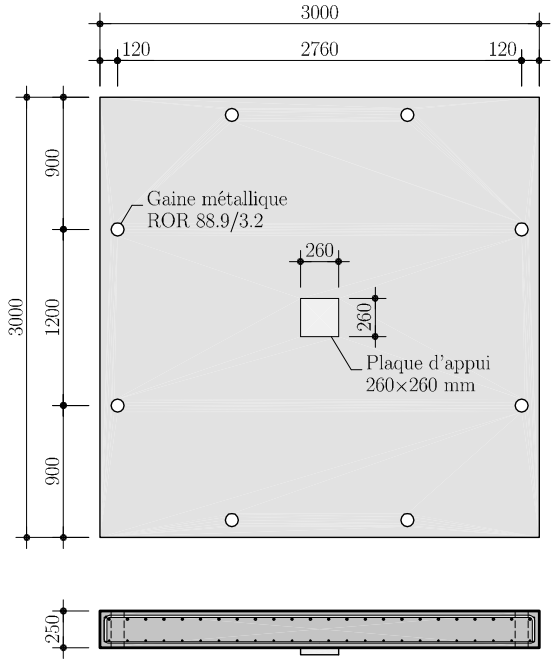
### 3.2 Beton

Wichtigster Parameter war die Betonsorte (Vibrierbeton unter Verwendung eines Zements CEM II /A-LL 42,5 N (Fluvio 4), bzw. selbstverdichtender Beton (SCC) unter Verwendung eines Zements CEM II /B-M(V-LL) 32,5 R (Holcim 219, heute Bisolvo 3R) sowie die Sieblinie der Gesteinskörnung ($D_{max}$ = 8, 16 und 32 mm). Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften der für die Versuche verwendeten Betonsorten.

Mit Blick auf das Versuchsziel, das Durchstanzverhalten der Platten aus Vibrierbeton mit dem der Platten aus selbstverdichtendem Beton zu vergleichen, wurde die Rezeptur des letzteren angepasst, um ähnliche Festigkeiten wie die des Vibrierbetons zu erzielen. In der Praxis ist die Festigkeit von selbstverdichtenden Betonen üblicherweise höher als die von Vibrierbeton.

Tabelle 1: Haupteigenschaften der untersuchten Betonsorten

| Beton | $D_{max}$ [mm] | $f_{cm,28}$ [MPa] | $f_{ctm,28}$ [MPa] | $E_{cm,28}$ [GPa] |
|---|---|---|---|---|
| VB | 16 | 51.7 | 3.4 | 33.8 |
| VB | 32 | 46.4 | 3.2 | 33.6 |
| SCC | 8 | 45.4 | 3.8 | 29.8 |
| SCC | 16 | 42.4 | 3.6 | 30.6 |
| SCC | 32 | 41.6 | 3.3 | 32.9 |



(a) Geometrie und Hauptabmessungen der Platten (b) Platte im Versuchsaufbau

Abbildung 6: Probekörper

## 3.3 Bewehrung

Die untersuchten Platten hatten nominale Bewehrungsgehalte, die für praktische Anwendungen repräsentativ sind: für jede Betonsorte eine Platte mit einem Bewehrungsgehalt von 1.5% bestehend aus Stäben mit einem Durchmesser von 20 mm @ 100 mm bzw. einem Bewehrungsgehalt von 0.75% bestehend aus Stäben mit einem Durchmesser von 16 mm @ 125 mm. Auf der Unterseite der Platte wurde Bewehrung mit einem Durchmesser von 10 mm im gleichen Abstand wie in der oberen Bewehrungslage eingelegt. Tabelle 2 zeigt die Eigenschaften des in den Versuchen verwendeten Betonstahls.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften des Betonstahls

| Ø [mm] | $f_s$ [MPa] | $f_t$ [MPa] | $\varepsilon_{su}$ [%] |
|---|---|---|---|
| 10 | 500 | 553 | 4.5 |
| 16 | 510 | 607 | 12.9 |
| 20 | 551 | 659 | 9.4 |

## 3.4 Hauptergebnisse

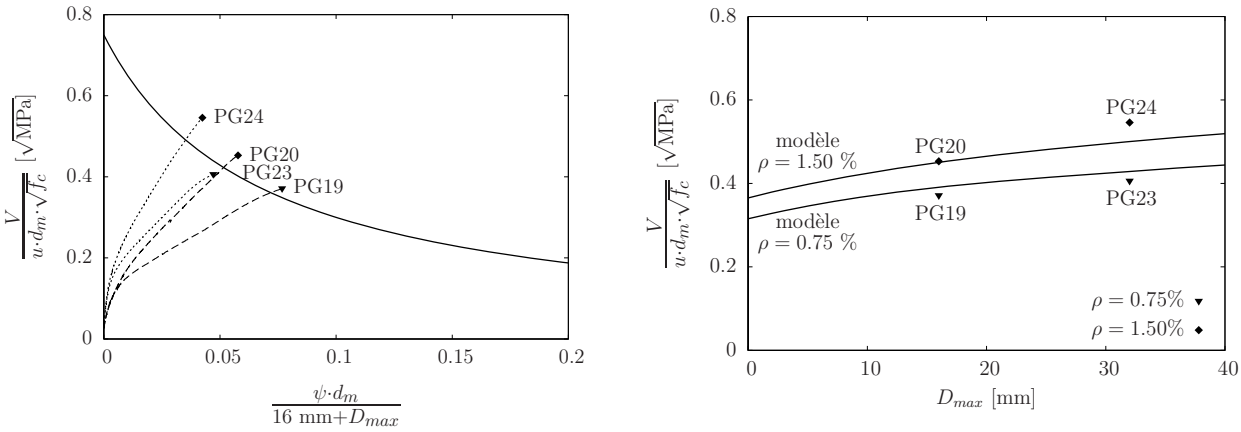
In Tabelle 3 sind die wichtigsten Parameter sowie die jeweils erreichte Bruchlast $V_R$ und die Rotation beim Bruch $\psi_R$ der zehn Versuche zusammengefasst.

Tabelle 3: Versuchsparameter und -ergebnisse

| Platte | Beton | $D_{max}$ [mm] | $f_{c,\text{essai}}$ [MPa] | ρ [%] | $V_R$ [kN] | $\psi_R$ [‰] | $d_m$ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PG19 | VB | 16 | 46.2 | 0.75 | 860 | 12.1 | 206 |
| PG20 | VB | 16 | 51.7 | 1.5 | 1094 | 9.2 | 201 |
| PG23 | VB | 32 | 41.0 | 0.75 | 839 | 11.6 | 199 |
| PG24 | VB | 32 | 39.8 | 1.5 | 1102 | 10.5 | 194 |
| PG25 | SCC | 8 | 45.0 | 0.75 | 935 | 14.3 | 203 |
| PG26 | SCC | 8 | 41.0 | 1.5 | 1175 | 10.3 | 204 |
| PG27 | SCC | 16 | 44.9 | 0.75 | 900 | 14.4 | 200 |
| PG28 | SCC | 16 | 43.3 | 1.5 | 1098 | 9.5 | 202 |
| PG29 | SCC | 32 | 39.7 | 0.75 | 854 | 12.1 | 203 |
| PG30 | SCC | 32 | 36.6 | 1.5 | 1049 | 9.0 | 201 |

## 3.5 Platten aus Vibrierbeton

Die normalisierten Ergebnisse der 4 Plattenversuche aus Vibrierbeton sind in Abbildung 7 dargestellt. Abbildung 7(a) zeigt die gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem Modell der Theorie des kritischen Schubrisses, die als Grundlage für die Norm SIA 262 dient. In Abbildung 7(b) sind die gleichen normalisierten Ergebnisse als Funktion des Grösstkorndurchmessers dargestellt. Die Versuche bestätigen die Tendenz einer Steigerung des Durchstanzwiderstands mit grösserem Grösstkorn.



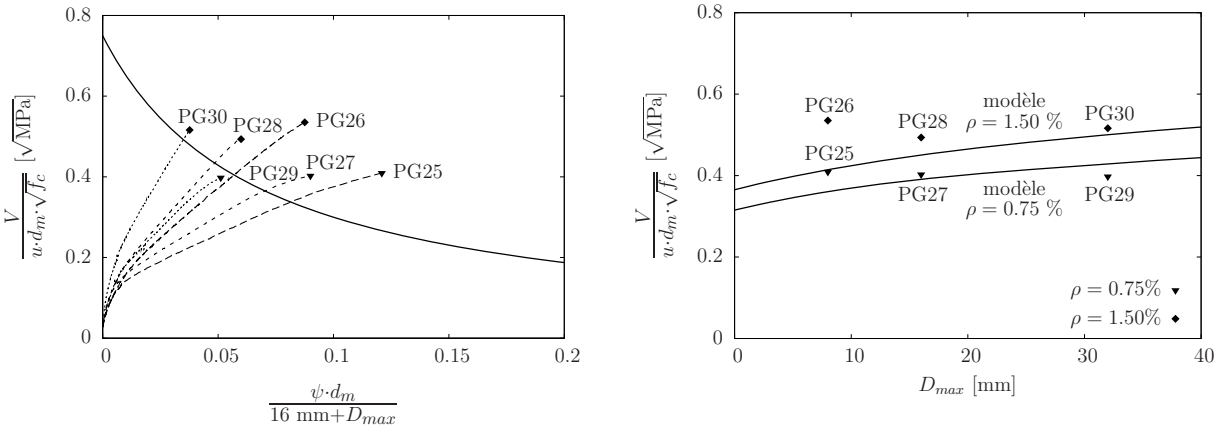

(a) Vergleich der Versuchsergebnisse (gestrichelte Kurven) mit dem Bruchkriterium (durchgezogene Linie)

(b) Einfluss des Grösstkorndurchmessers, Vergleich der Versuche (Punkte) mit der Theorie des kritischen Schubrisses (Kurven)

Abbildung 7: Versuchsergebnisse der Platten aus Vibrierbeton

## 3.6 Platten aus selbstverdichtendem Beton

In Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Plattenversuche aus selbstverdichtendem Beton zusammengefasst. Abbildung 8(a) zeigt den Vergleich der normalisierten Ergebnisse mit dem Bruchkriterium der Theorie des kritischen Schubrisses. Mit Ausnahme des Versuchs PG29, dessen Ergebnis leicht unter dem erwarteten liegt, übertreffen die anderen, zum Teil deutlich, die erwarteten Werte für die Bruchlast und das Verformungsvermögen. Abbildung 8(b) zeigt die gleichen Ergebnisse als Funktion des Grösstkorns. Die Ergebnisse der Platten mit einem Grösstkorn von 16 und 32 mm folgen in guter Übereinstimmung der erwarteten Tendenz gemäss der mit grösserem Grösstkorn ein erhöhter Durchstanzwiderstand erreicht wird. Im Gegensatz dazu folgen die Versuchsergebnisse mit einem Grösstkorn von 8 mm dieser Tendenz überhaupt nicht. In den beiden Versuchen wurden Bruchlasten erreicht, die weit über den erwarteten Werten lagen (Abb. 8(a)). Dies scheint darauf hinzuweisen, dass das Verhalten von Betonsorten mit einer sehr feinen Gesteinskörnung nicht direkt mit dem von gewöhnlichen Betonsorten vergleichbar ist.




(a) Vergleich der Versuchsergebnisse (gestrichelte Kurven) mit dem Bruchkriterium (durchgezogene Linie)

(b) Einfluss des Grösstkorns, Vergleich der Versuche (Punkte) mit der Theorie des kritischen Schubrisses (Kurven)

Abbildung 8: Versuchsergebnisse der Platten aus selbstverdichtendem Beton

# 4. Auswertung der Versuchsergebnisse

## 4.1 Vergleich von Vibrierbeton mit selbstverdichtendem Beton

Die Versuchsergebnisse zwischen Vibrier- und selbstverdichtendem Beton mit einem Grösstkorn gleich oder grösser 16 mm zeigen, dass die beide Betonsorten miteinander vergleichbar sind. Die Tendenz der Zunahme des Durchstanzwiderstands mit grösserem Grösstkorndurchmesser wird durch die durchgeführte Versuchsreihe bestätigt, ohne dass sie weiter präzisiert werden kann.

Die Versuchsergebnisse mit selbstverdichtendem Beton mit einem Grösstkorndurchmesser von 8 mm haben deutlich höhere Bruchlasten als erwartet ergeben, besonders für Platte G 26. Allerdings kann die Abweichung nicht erklärt werden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die geringe Anzahl von Versuchen (zwei Versuche mit $D_{max}$ = 8 mm) und die Streuung der Versuchsergebnisse im Allgemeinen nicht gestatten, definitive Schlussfolgerungen zu ziehen.

## 4.2 Gültigkeit der Norm SIA 262 für selbstverdichtenden Beton

Aus den obigen Beobachtungen kann gefolgert werden, dass die in der Norm SIA 262 verwendete Berechnungsformel zur Berücksichtigung des Grösstkorns auch für selbstverdichtenden Beton angewendet werden kann. Dies gilt auch für den Fall eines Grösstkorns von 8 mm wofür der Normansatz jedoch zu konservativ erscheint. Zusätzliche Prüfungen wären notwendig, um das charakteristische Verhalten von Beton mit geringer Korngrösse zu bestätigen und gegebenfalls daraus Nutzen zu ziehen.

# 5. Ersatz eines VB 0-32 durch einen SCC 0-16

## 5.1 Berechnungsgrundlagen

In den obigen Kapiteln wurde gezeigt, dass die Eigenschaften eines selbstverdichtenden Betons im Hinblick auf den Einfluss des Grösstkorns mit denen eines Normalbetons vergleichbar sind. Jedoch erreichen selbstverdichtende Betone (SCC), die einen grösseren Zementgehalt als herkömmliche Betonsorten haben, um ihre selbstverdichtenden Eigenschaften zu erhalten, typischerweise eine höhere Druckfestigkeit als die aus statischen Gründen erforderliche. Es ist durchaus normal, dass charakteristische Zylinderdruckfestigkeiten über 35 N/mm$^2$ erreicht werden, auch wenn dies nicht gefordert wurde. Der Ersatz eines Vibrierbetons mit einem Grösstkorn von 32 mm (VB 0-32) durch einen selbstverdichtenden Beton mit einem Grösstkorn von 16 mm (SCC 0-16) und der gleichen Druckfestigkeit hat eine signifikante Verringerung des Durchstanzwiderstands zur Folge (Abb. 1). Diese Verringerung kann jedoch ausgeglichen werden, wenn die Druckfestigkeit des selbstverdichtenden Betons (SCC) höher als die des ursprünglich vom Bauingenieur vorgeschriebenen Vibrierbetons ist.

Die für den Ausgleich der Verringerung des Durchstanzwiderstands aufgrund des geringeren Grösstkorns erforderliche Erhöhung der Druckfestigkeit hängt von zahlreichen Parametern ab, wie den Abmessungen der Platte und der Stütze sowie dem Bewehrungsgehalt der Platte in einem Streifen der Breite $0.3 \cdot \ell$ über der Stütze. Dieser Aspekt ist im Anhang dargestellt. Die Ergebnisse dort wurden erhalten, indem der Durchstanzwiderstand für eine bestimmte Konfiguration (Deckenplatte mit rechteckigen Feldern konstanter Dicke, runde Stütze)

berechnet und anschliessend die erforderliche Festigkeit des Betons für ein von 32 auf 16 mm verringertes Grösstkorn ermittelt wurde, um einen identischen Durchstanzwiderstand zu erreichen. Diese Berechnungen wurden auf Grundlage der Formeln der Norm SIA 262 [20], Kapitel 4.3.6 durchgeführt. Sie sind so dargestellt, dass sie vom Bauingenieur direkt verwendet werden können, indem die zusätzlichen Festigkeitsklassen, die notwendig sind, um einen Beton der Sorte VB 0-32 durch eine Sorte SCC 0-16 ersetzen zu können, gezeigt werden. Dabei entspricht jede Festigkeitsklasse einer Erhöhung des charakteristischen Werts der Zylinderdruckfestigkeit $f_{ck}$ um 5 N/mm$^2$. Gewisse Parametersätze führen dabei zu Ergebnissen ohne praktische Bedeutung. Die Fälle, in denen der Durchstanzwiderstand nicht den Bemessungswert erreicht, der dem Eigengewicht der Platte und einer Nutzlast von 1.3 kN/m$^2$ entspricht, wurden ausgelassen und mit weissen Kästchen dargestellt. Umgekehrt entsprechen bestimmte Fälle dem Bemessungswert einer sehr stark belasteten Decke. Um möglichst praxisnah in Bezug auf Hochbauanwendungen vorzugehen, wurde der Bemessungswert für eine Platte aus SCC auf $1.35 \cdot (g + 2.5\ [\text{kN/m}^2]) + 1.5 \cdot 5\ [\text{kN/m}^2]$ begrenzt, was einer recht stark belasteten Decke entspricht. Diese Fälle sind durch Kästchen mit einem Schrägstrich gekennzeichnet. Wenn das geplante Bauwerk Belastungen über diesem Wert aufnehmen können muss (z.B. Decken von Werkshallen oder erdebedeckte Decken, Flachgründungen), besitzen die Kästchen mit Querbalken dieser Tabelle keine Gültigkeit.

Ziel dieser Berechnung ist es den Projektverantwortlichen ein Hilfsmittel anzubieten zur Abschätzung der Möglichkeit, eine Betonsorte des Typs VB 0-32 durch eine des Typs SCC 0-16 zu ersetzen. Im Allgemeinen kann angenommen werden, dass ein SCC-16 eine charakteristische Zylinderdruckfestigkeit erreicht, die im Vergleich zu Normalbeton zwei Klassen höher liegt. In besonderen oder in Grenzfällen, die nicht den Berechnungshypothesen entsprechen, ist eine vollständige Berechnung durch den Ingenieur durchzuführen.

### 5.2 Anwendung der Berechnungsergebnisse für Platten ohne Durchstanzbewehrung

Für praktische Anwendungen kann es nützlich sein, sich auf die Ergebnisse in Funktion des Stützenradius $r_{col}$ , der maximalen Spannweite der Platte $\ell$ , ihrer statischen Höhe $d_m$ und des Biegebewehrungsgehalts $\rho$ im Anhang zu beziehen.

## 6. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Forschungsarbeit untersucht das Durchstanzverhalten von Platten aus selbstverdichtendem Beton. Tatsächlich ist das Verhalten sehr ähnlich wie das von Vibrierbeton, bei dem eine Erhöhung des Durchstanzwiderstands infolge der Erhöhung des Grösstkorndurchmessers beobachtet werden kann. Eine Ausnahme bildet selbstverdichtender Beton mit einer feinen Körnung ($D_{max}$ = 8 mm), dessen Durchstanzwiderstand deutlich höher als erwartet war. Allerdings erlaubt die geringe Probenanzahl (zwei Platten) keine zuverlässigen Schlussfolgerungen.

Die Vorgaben der Norm SIA 262 bezüglich des Einflusses des Grösstkorns werden bestätigt und lassen sich auch auf selbstverdichtenden Beton anwenden.

Wird ein Vibrierbeton mit einem Grösstkorn von 32 mm durch einen selbstverdichtenden Beton mit einem Grösstkorn von 16 mm ersetzt, so gleicht die grössere Druckfestigkeit des selbstverdichtenden Betons im Vergleich zum Vibrierbeton den geringeren Durchstanzwiderstand zu mindestens teilweise aus. Dies gilt um so mehr, wenn die vom Bauingenieur gewählte Betonfestigkeitsklasse niedrig ist (C20/25 oder C25/30). Dies ist nicht möglich für höhere Klassen.

## Bibliographie


[ 1] **ELSTNER R. C. und HOGNESTAD E.**, *Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs*, ACI Materials Journal, Ausg. 53-2, S. 29-58, Detroit, USA, englisch, **1956**.

[ 2] **FERNÁNDEZ RUIZ M. und MUTTONI A.**, *Applications of the critical shear crack theory to punching of R/C slabs with transverse reinforcement*, ACI Structural Journal, Ausg. 106 N° 4, S. 485-494, USA, englisch, **2009**.

[ 3] **FIB**, *Punching of structural concrete slabs*, fib bulletin 12, 307 S., Lausanne, englisch, **2001**.

[ 4] **GUANDALINI S.**, *Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé*, Diplomarbeit, N. 3380 (2005), 289 S., Lausanne, französisch, **2005**.

[ 5] **GUANDALINI S., BURDET O. et MUTTONI A.**, *Punching tests of slabs with low reinforcement ratios*, ACI Structural Journal, V. 106, N°1, S. 87-95, USA, englisch, **2009**.

[ 6] **GUANDALINI S. und MUTTONI A.**, *Essais de poinçonnement symétrique des dalles en béton armé sans armature à l'effort tranchant*, Versuchsbericht, 85 S., Lausanne, französisch, **2004**.

[ 7] **GUIDOTTI R.**, *Étude du comportement structural des joints colonnes - dalle dans les planchers dalles en béton armé*, Diplomarbeit - IS-BETON, 64 S., Lausanne, französisch, **2007**.

[ 8] **GUIDOTTI R., FERNÁNDEZ RUIZ M. et MUTTONI A.**, *Essais de poinçonnement de dalles en béton vibré et béton autocompactant avec différentes tailles maximales du granulat*, Versuchsbericht, Lausanne, französisch, **2009**.

[ 9] **HALLGREN M.**, *Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs*, Doktorarbeit, KTH Stockholm, Stockholm, Schweden, englisch, **1996**.

[ 10] **HOGNESTAD E., ELSTNER R. C. und HANSON J. A.**, *Shear Strength of Reinforced Structural Lightweight Aggregate Concrete Slabs*, ACI Journal, Ausg. 61, S. 643-655, USA, englisch, **1964**.

[ 11] **HOLCIM** , *Selbstverdichtender Beton*, ein Publikation der Holcim (Schweiz) AG, 2. Ausgabe, 32 S., **2007**.

[ 12] **MOE J.**, *Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads*, PCA, Ausg. D47, Illinois, USA, englisch, **1961**.

[ 13] **MUTTONI A.**, *Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement*, ACI Structural Journal, V. 105, N° 4, S. 440-450, USA, englisch, **2008**.

[ 14] **MUTTONI A.**, *Schubfestigkeit und Durchstanzen von Platten ohne Querkraftbewehrung*, Beton- und Stahlbetonbau, Ausg. 98, No 2, S. 74-84, Berlin, Deutschland, deutsch, **2003**.

[ 15] **MUTTONI A.**, *Durchstanzen*, SIA Dokumentation SIA, D 0182 Einführung zur Norm SIA 262, S. 57-66, Zürich, **2003**.

[ 16] **MUTTONI A. und FERNÁNDEZ RUIZ M.**, *Shear strength in one- and two-way slabs according to the critical shear crack theory*, fib Symposium, Amsterdam 2008, Amsterdam, Niederlande, englisch, **2008**.

[ 17] **MUTTONI A. und FERNÁNDEZ RUIZ M.**, *Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width*, ACI Structural Journal, V. 105, No 2, S. 163-172, Farmington Hills, USA, englisch, **2008**.

[ 18] **RAMDANE K.-E.**, *Punching Shear of High Performance Concrete Slabs*, Proceedings of the Fourth International Symposium on Utilization of High-Strength / High Performance Concrete, Ausg. 3, S. 1015-1026, Paris, Frankreich, englisch, **1996**.

[ 19] **REGAN P. E.**, *Symmetric Punching of Reinforced Concrete Slabs*, Magazine of Concrete Research, Ausg. 38, S. 115-128, Grossbritannien, englisch, **1986**.

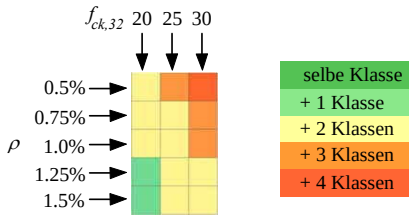
[ 20] **SIA**, *SIA 262:2003, Betonbau*, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Schweizer Norm SN 505 262, **2003**.

[ 21] **TOLF P.**, *Influence of the slab thickness on the strength of concrete slabs at punching. Tests with circular slabs. (Auf schwedisch: Plattjocklekens inverkan pa betongplattors hallfasthet vid genomstansning. Försök med cikulära plattor.)*, Royal Institute of Technology, Dep. of Structural Mechanics and Engineering, Bulletin 146, 64 S., Stockholm, Schweden, schwedisch, **1988**.

[ 22] **VECCHIO F. J. und COLLINS M. P.**, *The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear*, ACI Journal, Ausg. 83, S. 219-231, USA, englisch, **1986**.

## Anhang : Erforderliche Steigerung der Betondruckfestigkeit zur Kompensation der Reduktion von $D_{max}$ = 32 mm auf $D_{max}$ = 16 mm bei Platten mit und ohne Durchstanzbewehrung

Nebenstehende Abbildung: Erläuterung der Bedeutung der im Folgenden gezeigten verschiedenen Fälle




$d_m$ : mittlere statische Höhe

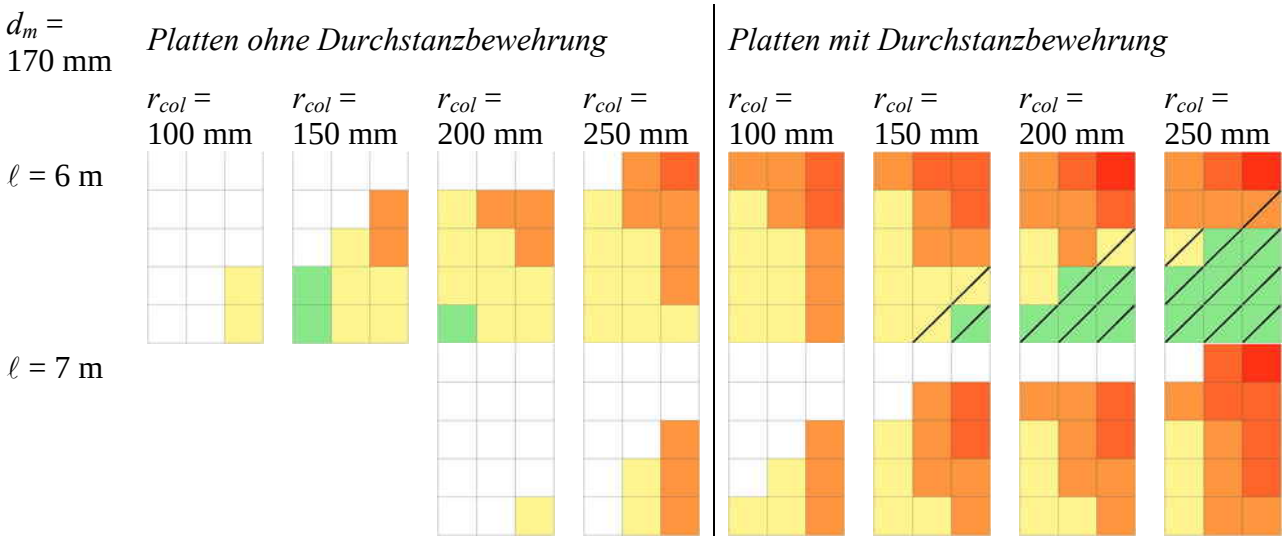
$\ell$ : max. Spannweite der Platte

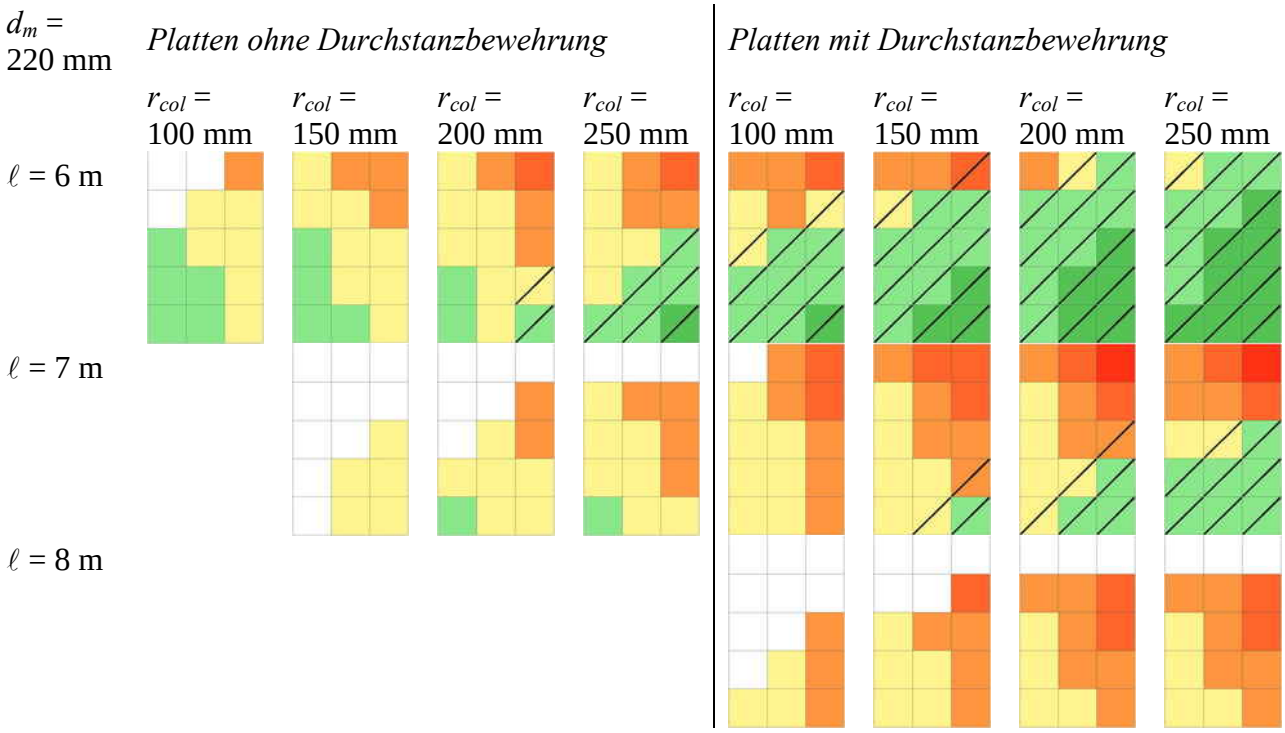
$r_{col}$ : Stützenradius (für nicht runde Stützen der Radius eines Kreises mit der gleichen Fläche wie der Stützenquerschnitt)

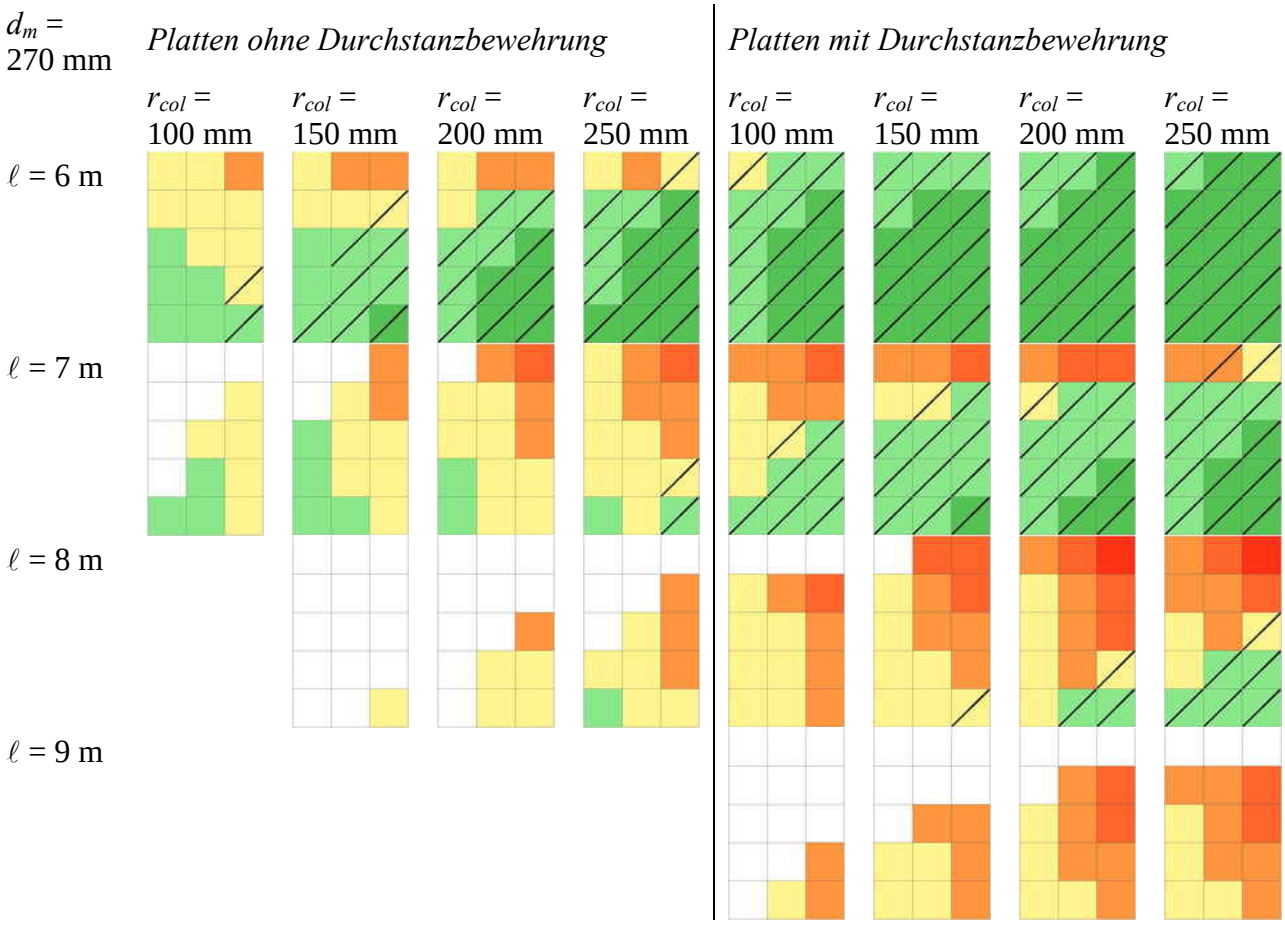
$\rho$ : geometrischer Bewehrungsgehalt der Zugzone bezüglich der mitwirkenden Plattenbreite

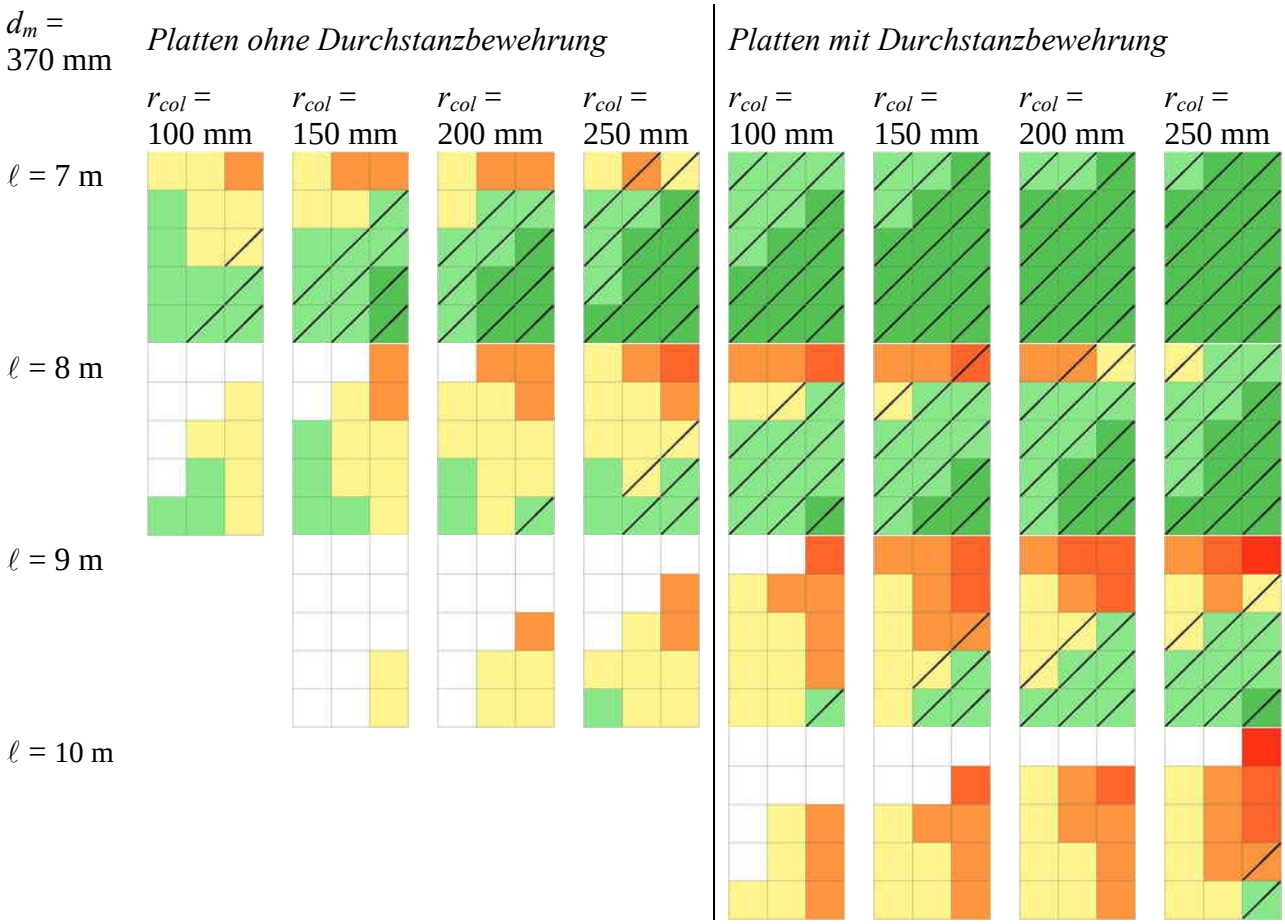
$f_{ck,32}$ : charakteristische Zylinderdruckfestigkeit für einen Beton mit $D_{max}$ = 32 mm

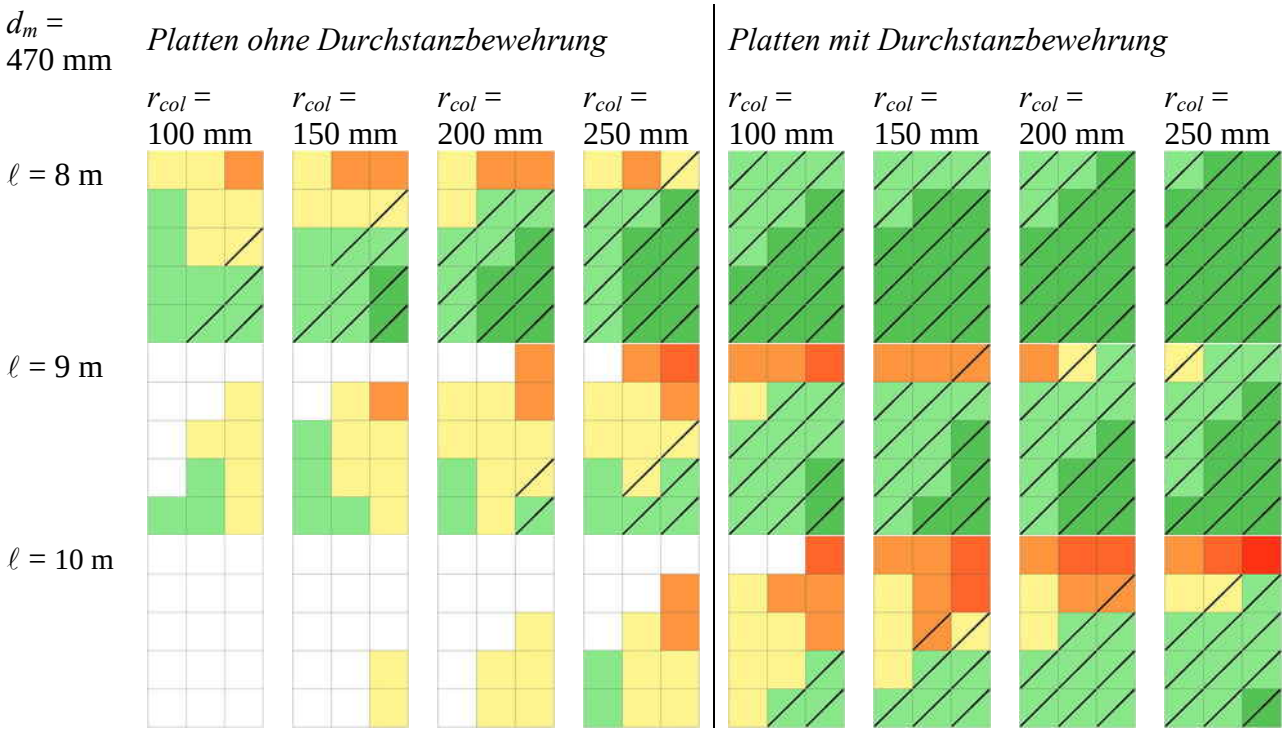
Die weissen Kästchen entsprechen nicht anwendbaren Lösungen, bei denen eine Platte mit den Abmessungen $\ell$ x $\ell$ ihr Eigengewicht und eine Nutzlast von 1.3 kN/m$^2$ nicht trägt. Der erforderliche Klassenwechsel für die Kästchen mit Schrägstrich wurde für eine Bemessungslast berechnet, die zusätzlich zum Eigengewicht eine ständige Belastung von 2.5 kN/m$^2$ und eine Verkehrslast von 5 kN/m$^2$ einschliesst.




$d_m$ = 220 mm
Platten ohne Durchstanzbewehrung
Platten mit Durchstanzbewehrung
$r_{col}$ = 100 mm
$r_{col}$ = 150 mm
$r_{col}$ = 200 mm
$r_{col}$ = 250 mm
$\ell$ = 6 m
$\ell$ = 7 m
$\ell$ = 8 m


$d_m$ = 270 mm
Platten ohne Durchstanzbewehrung
Platten mit Durchstanzbewehrung
$r_{col}$ = 100 mm
$r_{col}$ = 150 mm
$r_{col}$ = 200 mm
$r_{col}$ = 250 mm
$\ell$ = 6 m
$\ell$ = 7 m
$\ell$ = 8 m
$\ell$ = 9 m


$d_m$ = 370 mm
Platten ohne Durchstanzbewehrung
Platten mit Durchstanzbewehrung
$r_{col}$ = 100 mm
$r_{col}$ = 150 mm
$r_{col}$ = 200 mm
$r_{col}$ = 250 mm
$\ell$ = 7 m
$\ell$ = 8 m
$\ell$ = 9 m
$\ell$ = 10 m


$d_m$ = 470 mm
Platten ohne Durchstanzbewehrung
Platten mit Durchstanzbewehrung
$r_{col}$ = 100 mm
$r_{col}$ = 150 mm
$r_{col}$ = 200 mm
$r_{col}$ = 250 mm
$\ell$ = 8 m
$\ell$ = 9 m
$\ell$ = 10 m