Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE
LUZERN

Technik & Architektur

YES2018 – Seminar
Durchstanzen von Recyclingbetonplatten

Institut für Bauingenieurwesen IBI
Prof. Dr. Albin Kenel
Leiter Institut für Bauingenieurwesen

T direkt +41 41 349 34 00
E-Mail albin.kenel@hslu.ch

Luzern 04. Oktober 2018

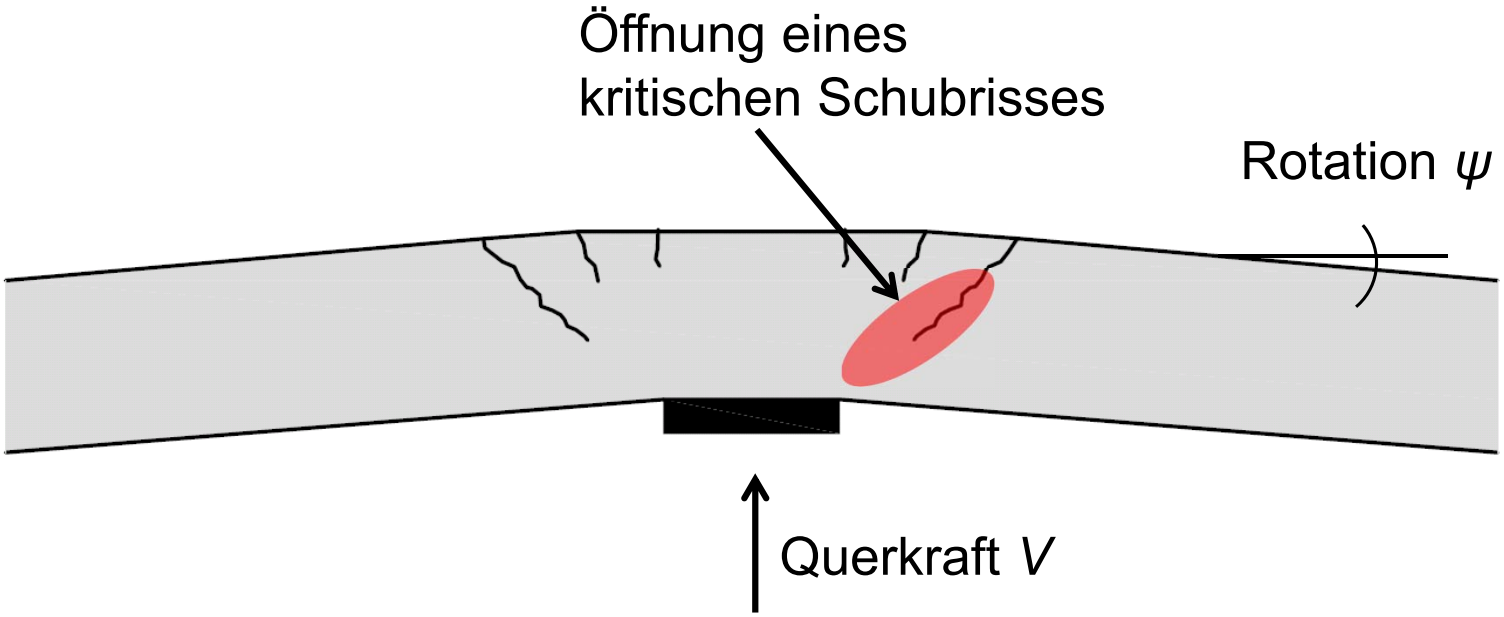
FH Zentralschweiz

EFQM
Recognised for excellence
5 star - 2015

Inhalt

- **Ausgangslage: Theoretische Grundlagen und Merkblatt 2030:2010**
- **Durchstanzversuche an Platten aus RC-M**
- **Bewertung der Versuchsergebnisse**
- **Empfehlung zur Aktualisierung des Merkblatt 2030:2019**
- **Zusammenfassung**
- **Verdankungen**

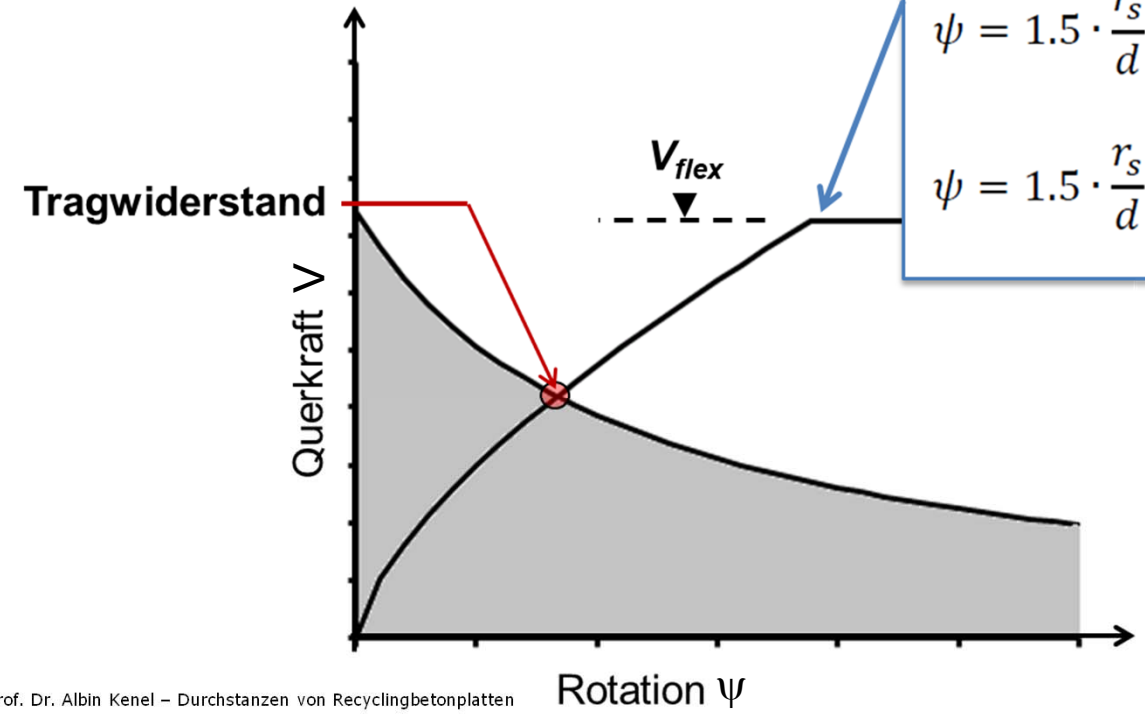
Ausgangslage: Theorie des kritischen Schubrisses (CSCT)[1)]



[1)] Die Theorie des kritischen Schubrisses wurde an der EPFL unter der Leitung von Prof. Dr. A. Muttoni entwickelt

Ausgangslage: Theorie des kritischen Schubrisses[1)]

Platten ohne Durchstanzbewehrung



Last-Verformungskurve

→ Öffnung des Schubrisses in Abhängigkeit der aufgebrachten Last

$$\psi = 1.5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \left(\frac{V_d}{V_{flex}}\right)^{3/2}$$

$$\psi = 1.5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{sd}}{Es} \cdot \left(\frac{m_{sd}}{m_{Rd}}\right)^{3/2}$$

Kenel, A., Lips, S., «Durchstanzbewehrung und die revidierte SIA Norm 262», Fachreferat F.J. Aschwanden AG, April 2013

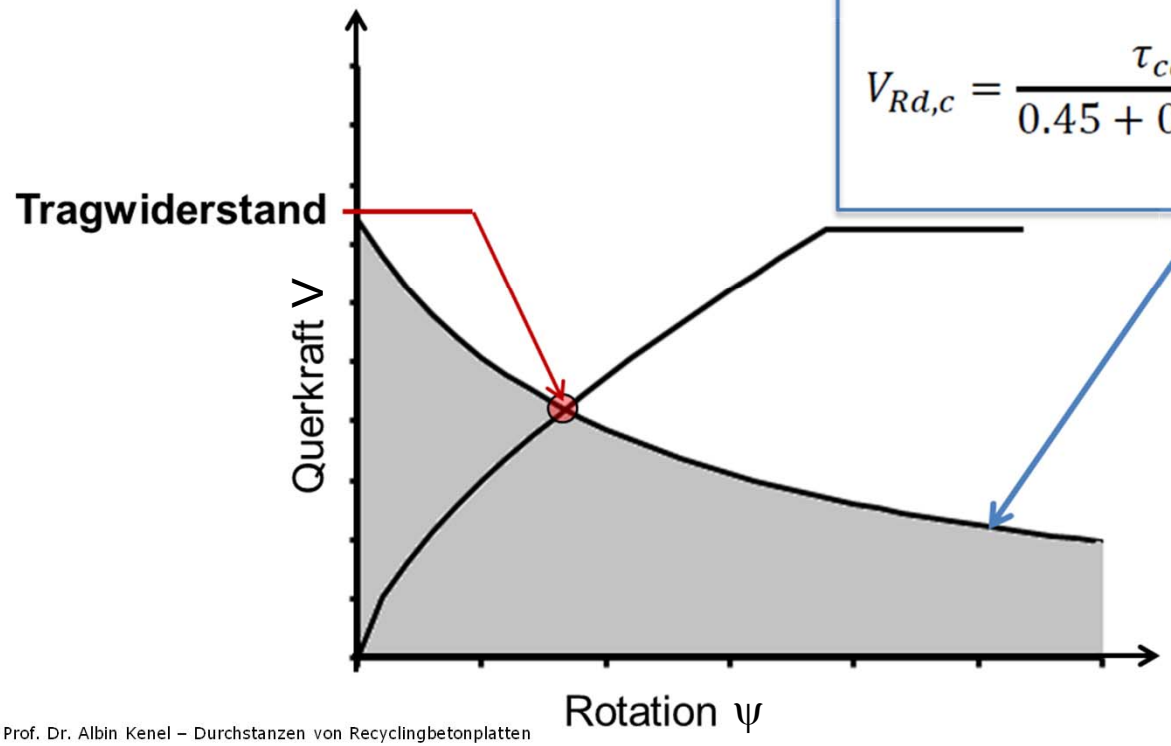
Ausgangslage: Theorie des kritischen Schubrisses[1)]

Platten ohne Durchstanzbewehrung

Bruchkriterium

→ Widerstand in Abhängigkeit der Öffnung des Schubrisses

$$V_{Rd,c} = \frac{\tau_{cd} \cdot d_v \cdot u}{0.45 + 0.18 \cdot \psi \cdot d \cdot k_g}$$

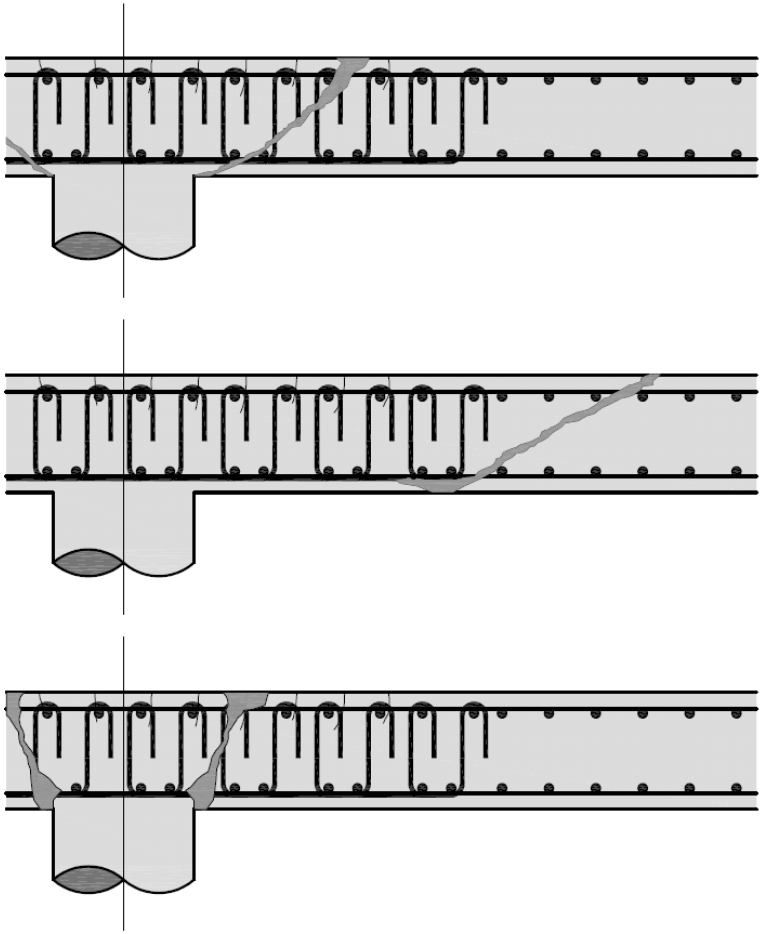


Kenel, A., Lips, S., «Durchstanzbewehrung und die revidierte SIA Norm 262», Fachreferat F.J. Aschwanden AG, April 2013

Ausgangslage: Theorie des kritischen Schubrisses[1)]

Platten mit Durchstanzbewehrung; 3 Nachweise:

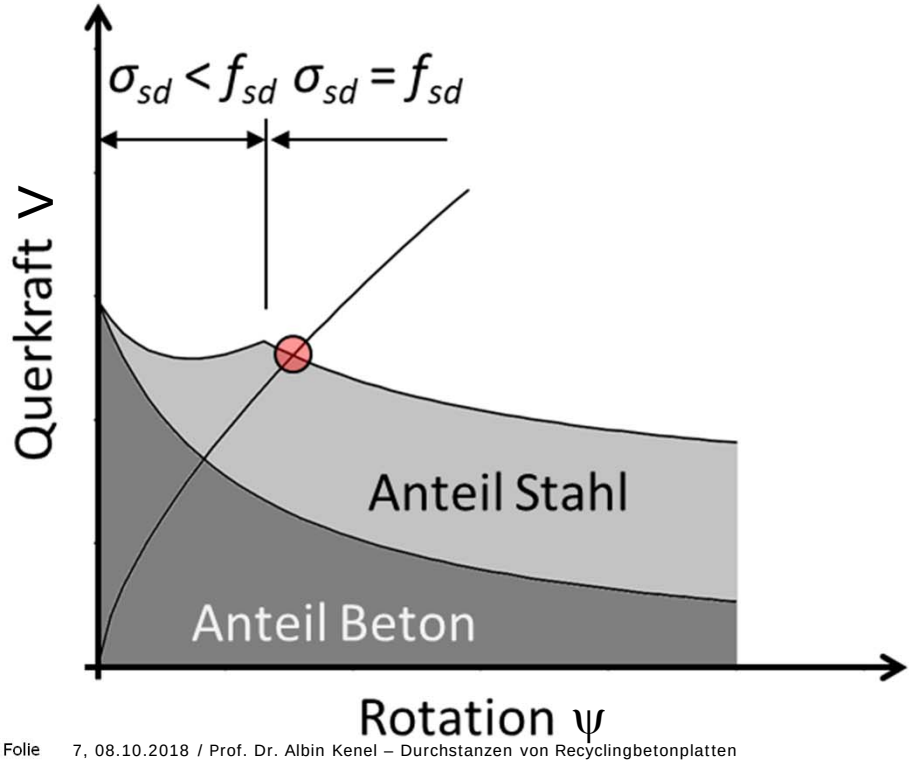
- **Bruch im Bereich der Durchstanzbewehrung**
- **Bruch ausserhalb der Durchstanzbewehrung**
- **Bruch der Betondruckdiagonale**

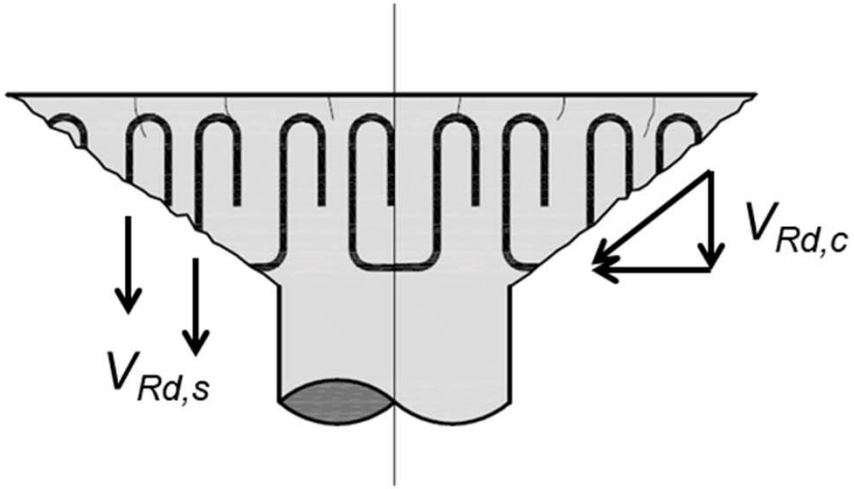


Kenel, A., Lips, S., «Durchstanzbewehrung und die revidierte SIA Norm 262», Fachreferat F.J. Aschwanden AG, April 2013

Ausgangslage: Theorie des kritischen Schubrisses[1)]

Platten mit Durchstanzbewehrung





$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$$

Kenel, A., Lips, S., «Durchstanzbewehrung und die revidierte SIA Norm 262», Fachreferat F.J. Aschwanden AG, April 2013

Ausgangslage: Merkblatt 2030:2010

Merkblatt
2030

sia

Recyclingbeton 4.2.2

Für Recyclingbeton RC-M sind zusätzlich folgende Regeln zu beachten:

- Norm SIA 262, Ziffer 4.2.1 Beton:
  Für die maximalen Stauchungen sind bei RC-M die folgenden Werte anzusetzen:
  - $\varepsilon_{c2d} = 0{,}003\ \eta_r \quad \geq 0{,}002$
  - $\varepsilon_{c1d} = 0{,}67\ \varepsilon_{c2d}$
- Norm SIA 262, Ziffer 4.3.3 Querkraft:
  Die Querkraftbemessung erfolgt für RC-M mit dem Ansatz $D_{max} = 0$ wie für Leichtbeton.
- Norm SIA 262, Ziffer 4.3.6 Durchstanzen:
  Der Durchstanznachweis erfolgt für RC-M mit dem Ansatz $D_{max} = 0$ wie für Leichtbeton.

schweizerischer ingenieur- und architektenverein
société suisse des ingénieurs et des architectes
società svizzera degli ingegneri e degli architetti
swiss society of engineers and architects
selnaustrasse 16
postfach
ch-8027 zürich
www.sia.ch

Preisgruppe: 16

Ausgabe 2010

Ausgangslage: Merkblatt 2030:2010

2.1.1 Recyclingbeton wird als Beton nach den Normen SN EN 206-1 und SIA 262 behandelt, sofern dieses Merkblatt keine anders lautenden Angaben enthält.

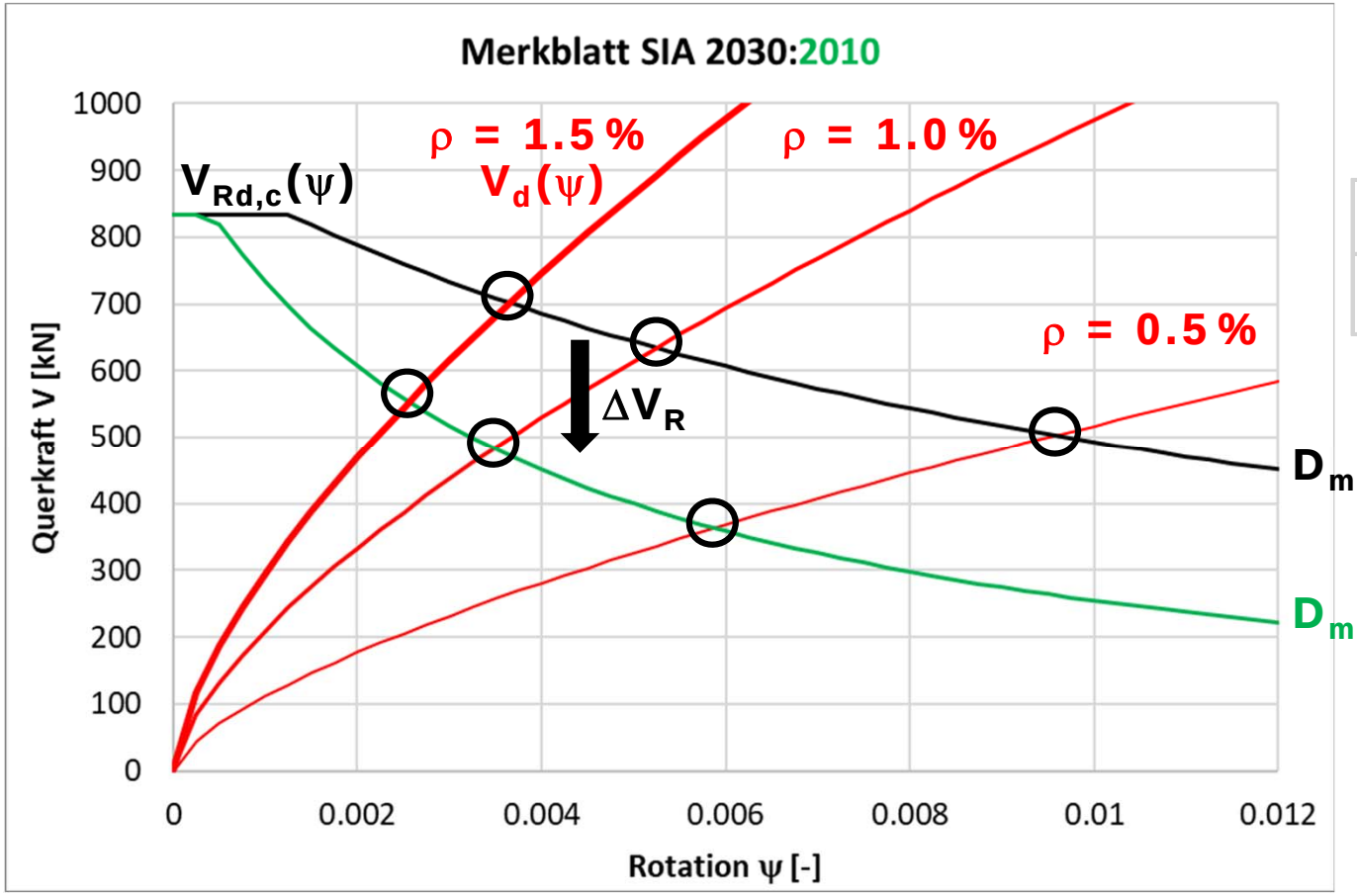
2.1.2 Recyclingbeton RC-M mit einem Gehalt von mehr als 25 Massenprozenten R_b ist ohne entsprechende Voruntersuchungen nur für die Expositionsklasse XC1(CH, trocken) zu verwenden (vgl. Tabelle 1).

2.1.3 Recyclingbeton RC-M mit einem Gehalt von 5 bis 25 Massenprozenten R_b kann für die Expositionsklassen XC1(CH), XC2(CH) und XC3(CH) verwendet werden (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1 Einsatzgebiete von Recyclingbeton

Recyclingbeton		Expositionsklasse				
	Anteile	X0(CH)	XC1(CH) trocken	XC1(CH) nass, XC2(CH), XC3(CH)	XC4(CH)	XD(CH), XF(CH), XA1-3(CH)
RC-C	$R_c \geq 25$ M.-% $R_b < 5$ M.-%	zulässig				①
RC-M	5 M.-% ≤ R_b ≤ 25 M.-% und $R_c + R_b \geq 25$ M.-%	zulässig			①	nicht zulässig
	$R_b > 25$ M.-%	zulässig		①	①	

Ausgangslage: Merkblatt 2030:2010 / ohne Durchstanzbewehrung



Einfluss der Reduktion von D_{max} an einem Beispiel mit RC-M:

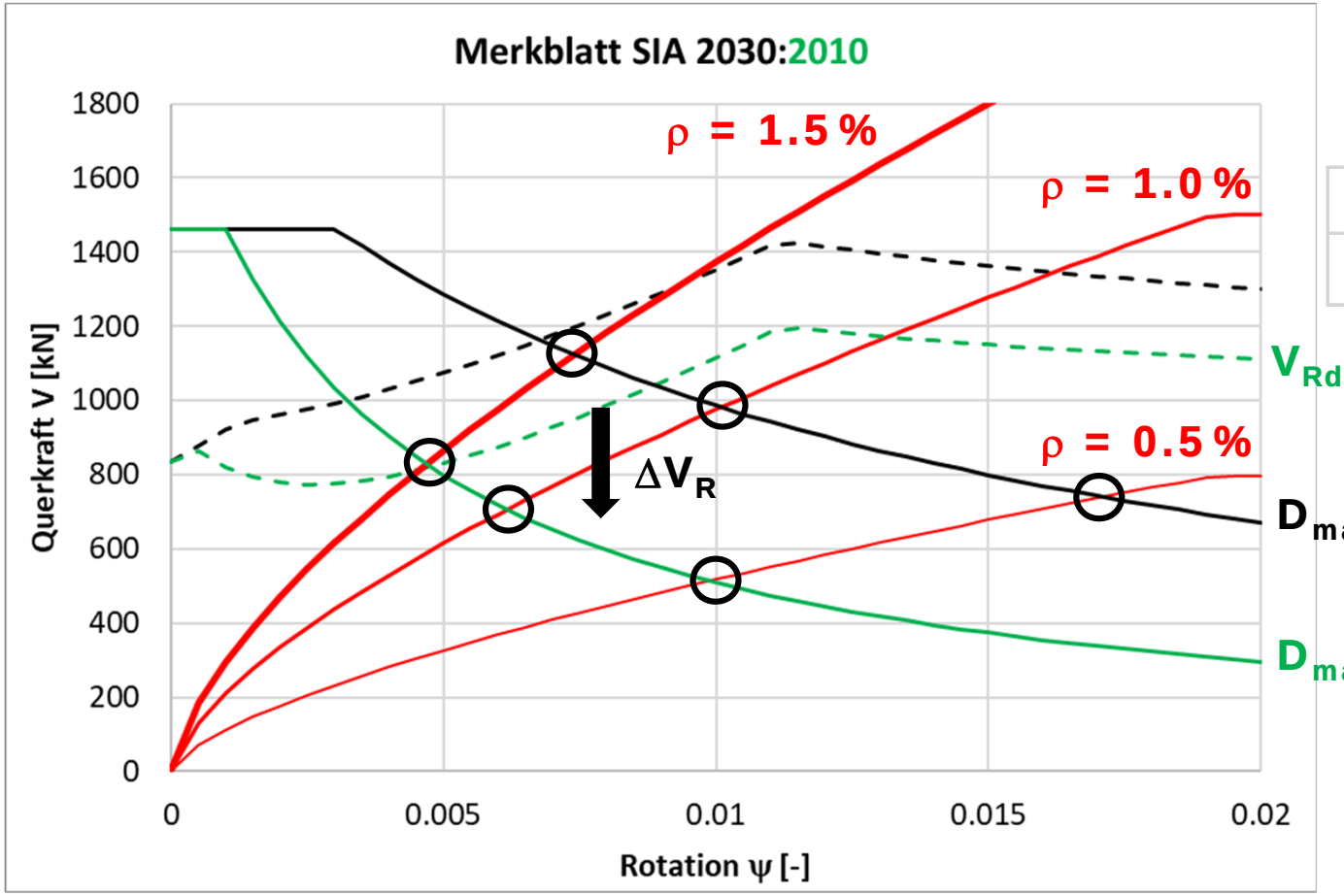
ρ	1.5%	1.0%	0.5%
ΔV_R	-21%	-24%	-28%

D_{max} = 32mm RC-C

D_{max} = 0mm RC-M

L=6.0m; $d=d_v$=0.22m
Quadratstütze mit a=0.26m
RC30/37; B500B

Ausgangslage: Merkblatt 2030:2010 / mit Durchstanzbewehrung



Einfluss der Reduktion von D_{max} an einem Beispiel mit RC-M:

ρ	1.5%	1.0%	0.5%
ΔV_R	-28%	-28%	-31%

$V_{Rd,c}(\psi) + V_{Rd,s}(\psi)$

D_{max} = 32mm RC-C

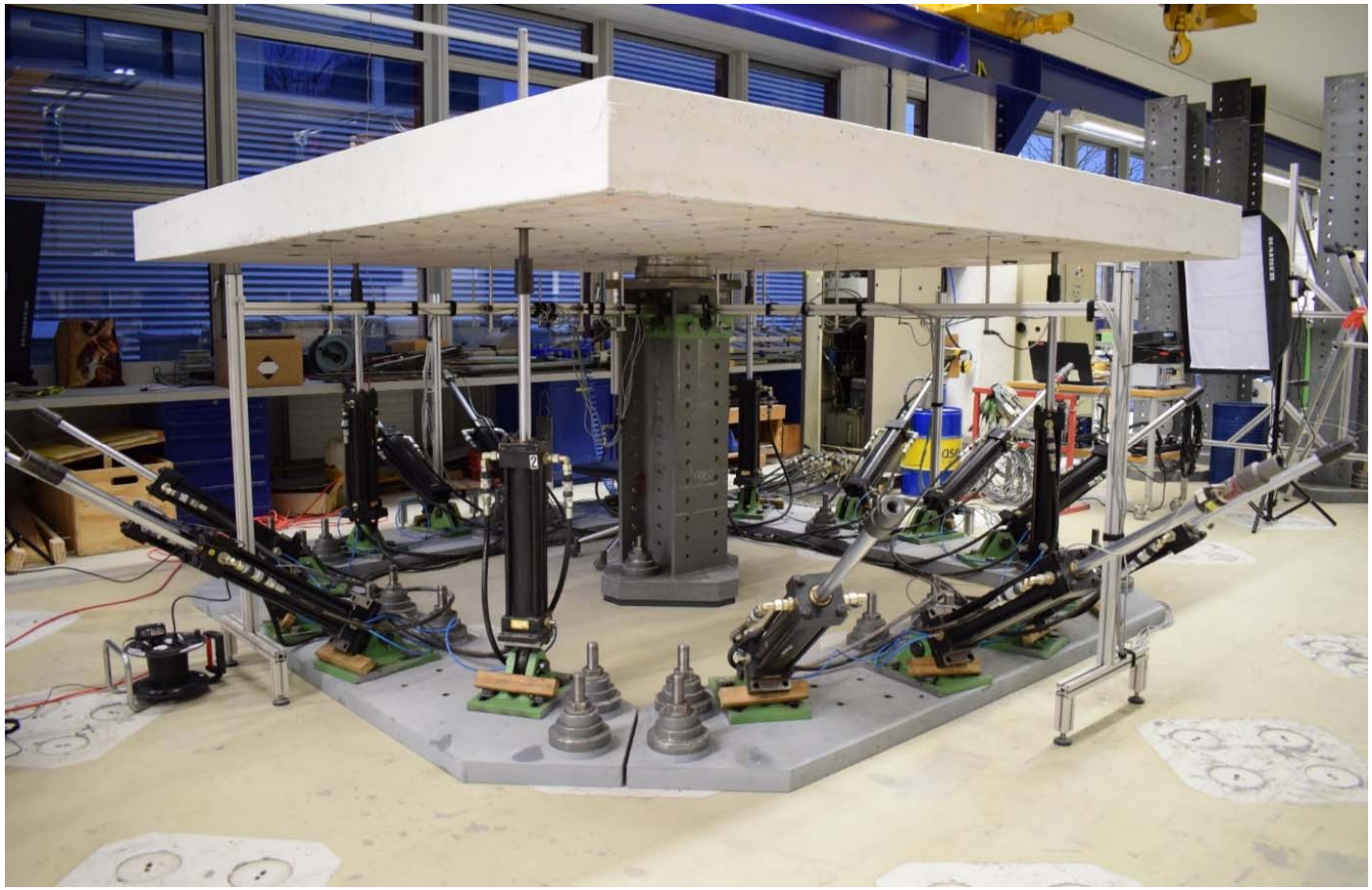
D_{max} = 0mm RC-M

L=6.0m; $d=d_v=0.22$m
Quadratstütze mit a=0.26m
RC30/37; B500B; $\rho_{sw}=0.785\%$

Ausgangslage: Merkblatt 2030:2010

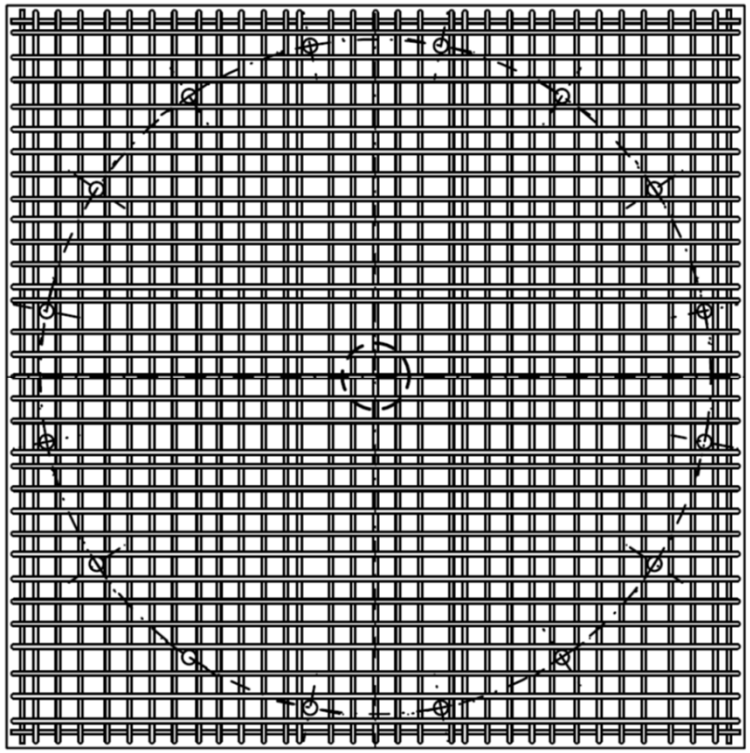
- **Deutliche Reduktion des Durchstanzwiderstandes** für RC-M infolge $D_{max}=0$ statt 32mm
- **Keine Angaben zur Begrenzung der maximalen Beanspruchung der Betondruckdiagonale**
- **Keine Durchstanzversuche an Platten aus RC-M**
- **Der Formelapparat**, der den aktuellen Bemessungsregeln zu Grunde liegt, wurde **an 87 Versuchen ohne Durchstanzbewehrung** und **an 45 Versuchen mit Durchstanzbewehrung validiert** und ist damit wissenschaftlich **ausreichend abgestützt**
- Zur Berücksichtigung des Einfluss des Grösstkorndurchmessers von Betonplatten aus Recyclingbeton RC-M müssen **'nur' die spezifischen Faktoren des grundlegenden Formelapparates** angepasst werden
- Die dokumentierten und bewerteten Durchstanzversuche an Platten aus RC-M dienen der **Anpassung der spezifischen Faktoren**

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU



- Mit 16 hydraulischen Pressen rotations-symmetrisch belastet
- Verschiedene Durchbiegungen sowie Verzerrungen oben/unten gemessen
- Umfangreiche Materialversuche an Betonstahl und RC-M
- Nach dem Versuch: Platten geschnitten (Bruchkegel)

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2013



6 Platten ohne Durchstanzbewehrung:

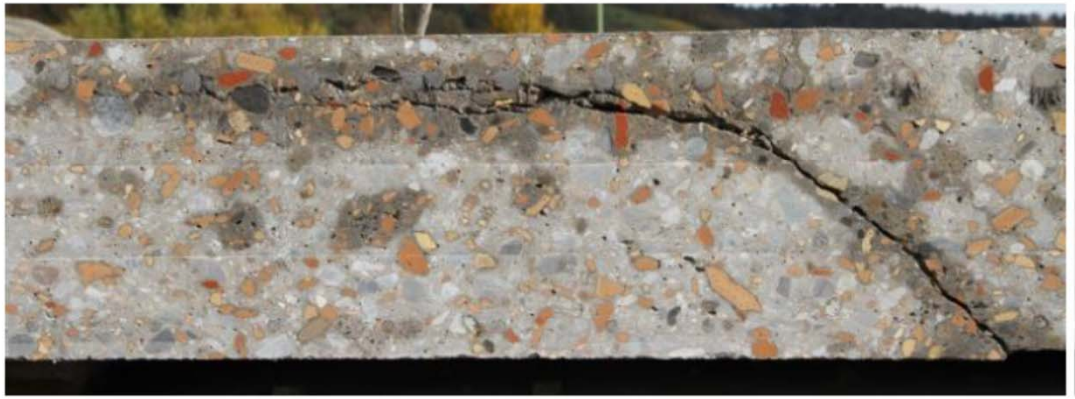
- P1.1, P1.2: h=280mm, $ø_A$=300mm, ø20, s=100mm
- P2.1, P2.2: h=220mm, $ø_A$=300mm, ø18, s=100mm
- P3.1, P3.2: h=220mm, $ø_A$=300mm, ø14, s=100mm
- Beton: RC-M mit 25% Mischabbruchgranulat

Thoma, K., Seelhofer, B., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch», Versuchsbericht, Dez. 2013, 57 pp.

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2013

$P_{1.1}$

$P_{1.2}$

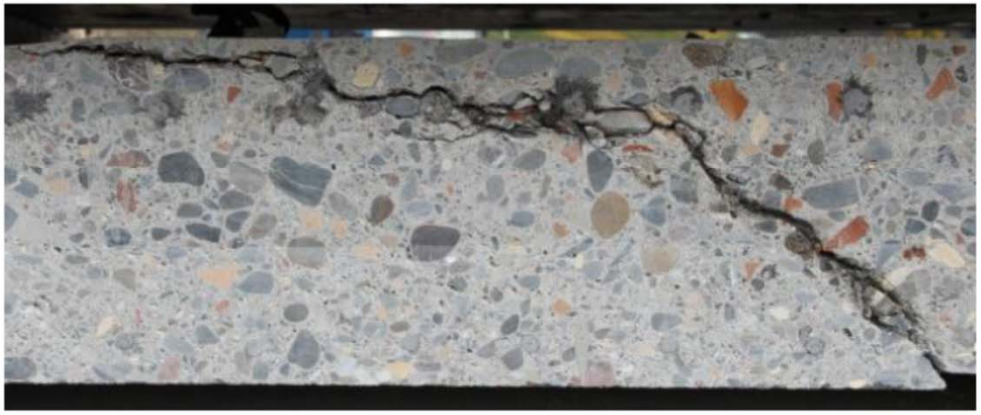


Platte 1.1 bzw. 1.2: Schnittbilder im Bereich des Durchstanzkegels
Der Riss verläuft teilweise durch die Gesteinskörnung

Thoma, K., Seelhofer, B., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch», Versuchsbericht, Dez. 2013, 57 pp.

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2013

$P_{2.1}$



$P_{2.2}$

Thoma, K., Seelhofer, B., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch», Versuchsbericht, Dez. 2013, 57 pp.

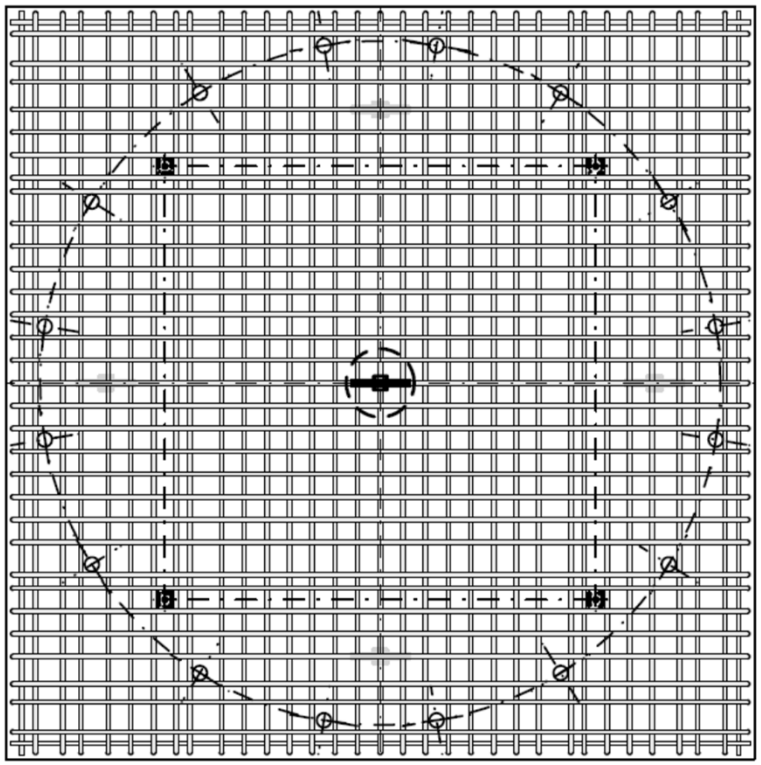
Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2013

$P_{3.1}$

$P_{3.2}$

Thoma, K., Seelhofer, B., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch», Versuchsbericht, Dez. 2013, 57 pp.

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2018



3 Platten ohne Durchstanzbewehrung:

- Platte I: h=280mm, $ø_A$=300mm, ø20, s=100mm
- Platte II: h=220mm, $ø_A$=300mm, ø18, s=100mm
- Platte III: h=220mm, $ø_A$=300mm, ø14, s=100mm
- Beton: RC-M mit 40% Mischabbruchgranulat

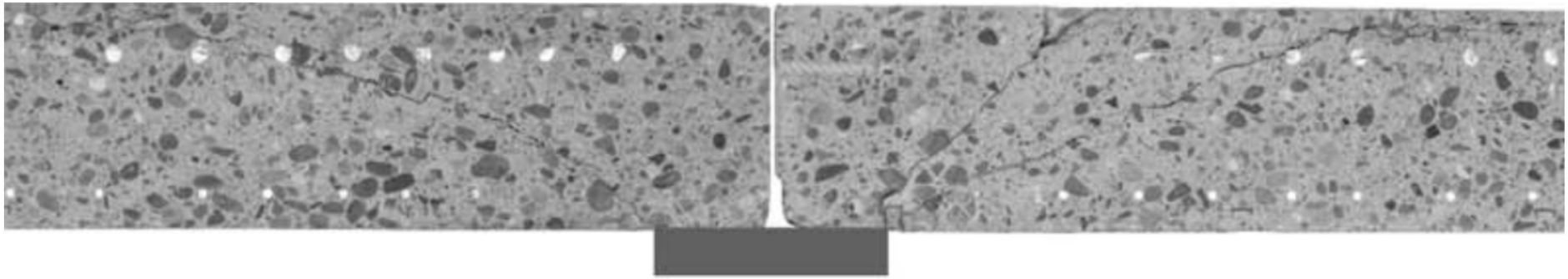
Kenel, A., Laurent, M., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch mit und ohne Durchstanzbewehrung», Versuchsbericht, Juli 2018, 86 pp.

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2018

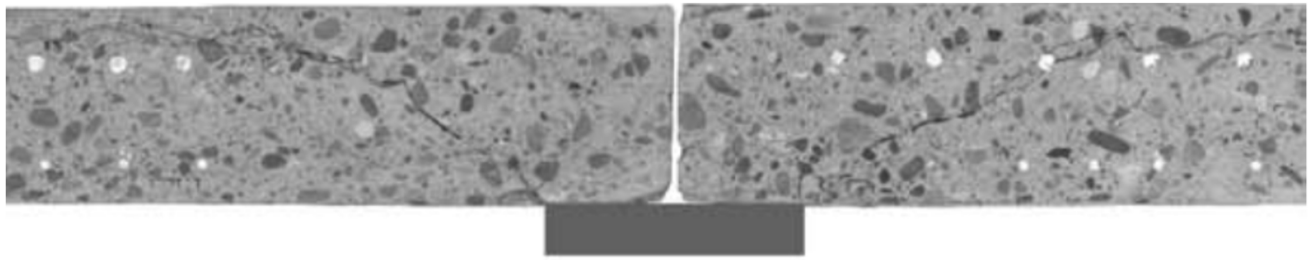
Herstellung der Platten:
KIBAG AG

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2018

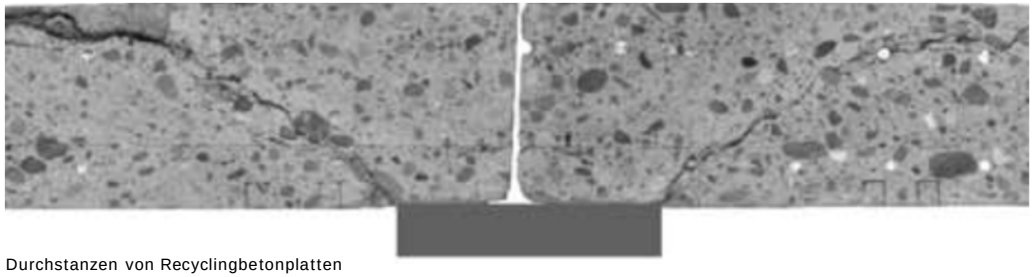
I



II

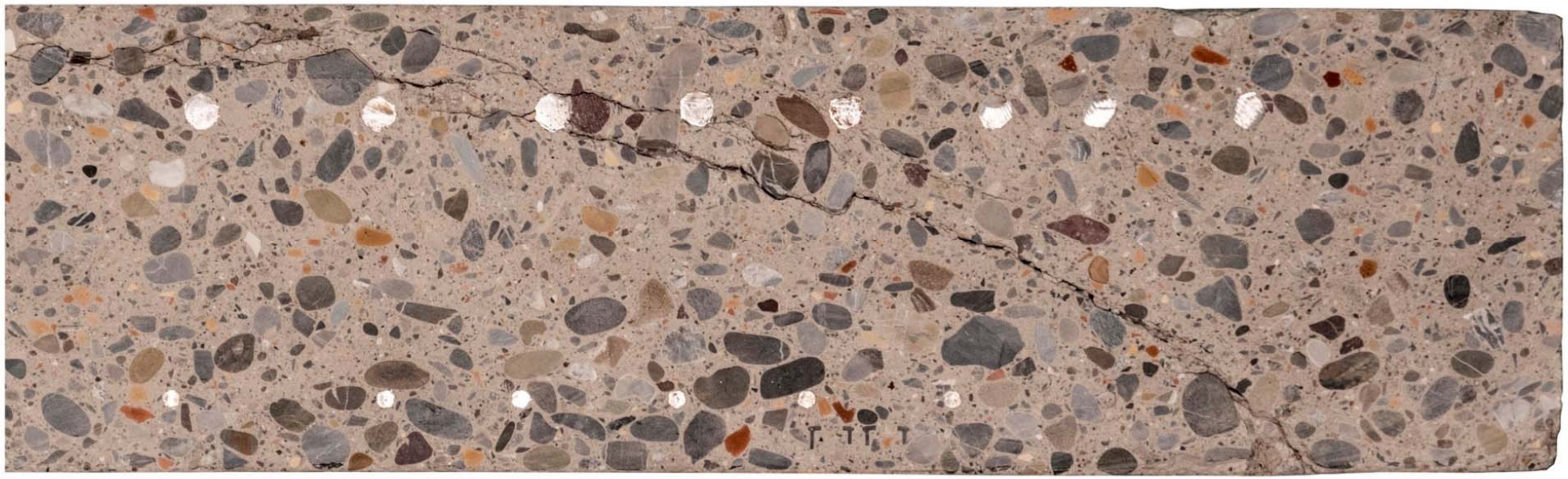


III



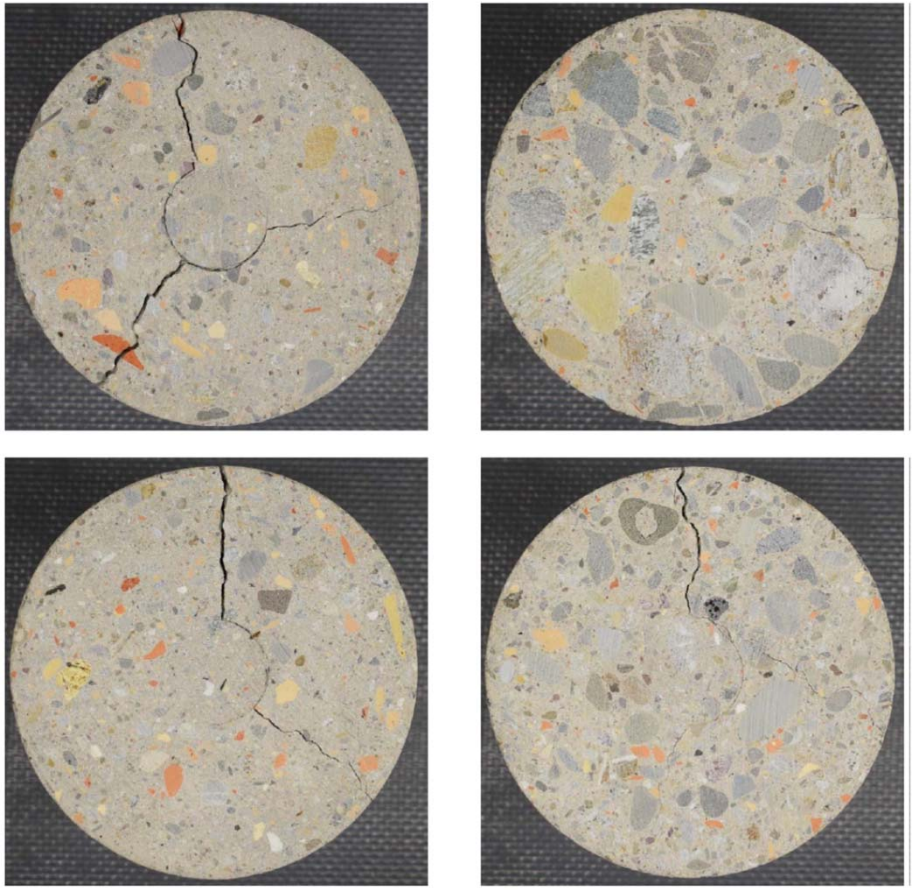
Kenel, A., Laurent, M., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch mit und ohne Durchstanzbewehrung», Versuchsbericht, Juli 2018, 86 pp.

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2018



Platte I: Schnittbild im Bereich des Durchstanzkegels
Der Riss verläuft um die Gesteinskörnung herum und nicht durch die Gesteinskörnung

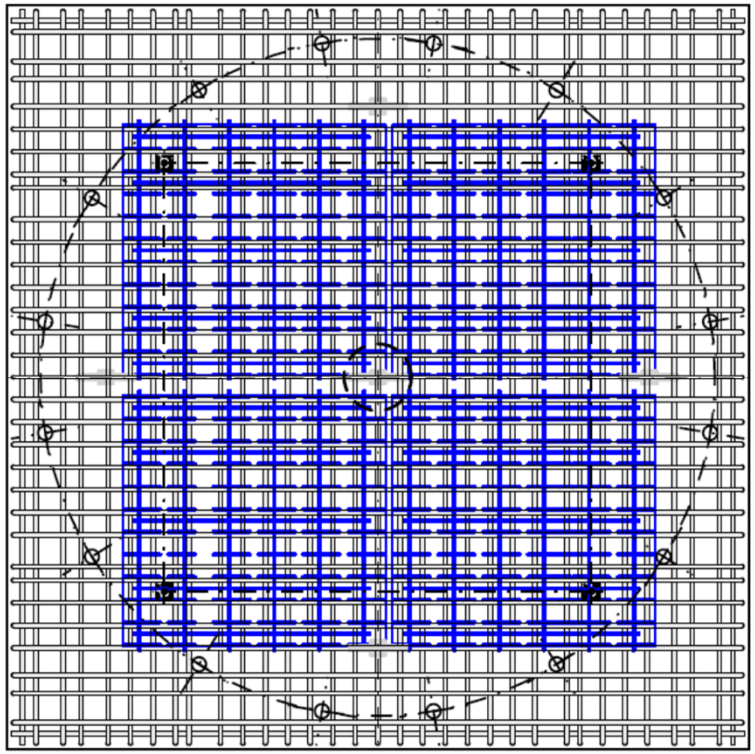
Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2018



Zylinderschnittflächen der Betonprüfkörper: Double Punch Versuche zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit

Kenel, A., Laurent, M., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch mit und ohne Durchstanzbewehrung», Versuchsbericht, Juli 2018, 86 pp.

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2018



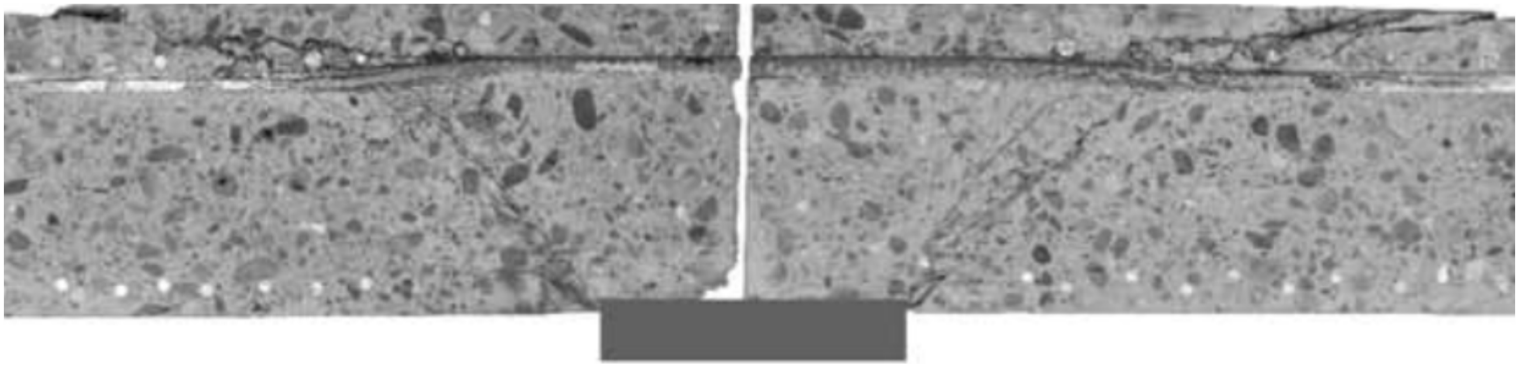
3 Platten mit Durchstanzbewehrung:

- Platte IV: h=280mm, $ø_A$=300mm, ø20, s=100mm
- Platte V: h=220mm, $ø_A$=300mm, ø18, s=100mm
- Platte VI: h=220mm, $ø_A$=200mm, ø18, s=100mm
- Beton: RC-M mit 30% Mischabbruchgranulat
- Durchstanzbewehrung: 4x DURA 110, ρ_s=0.785%

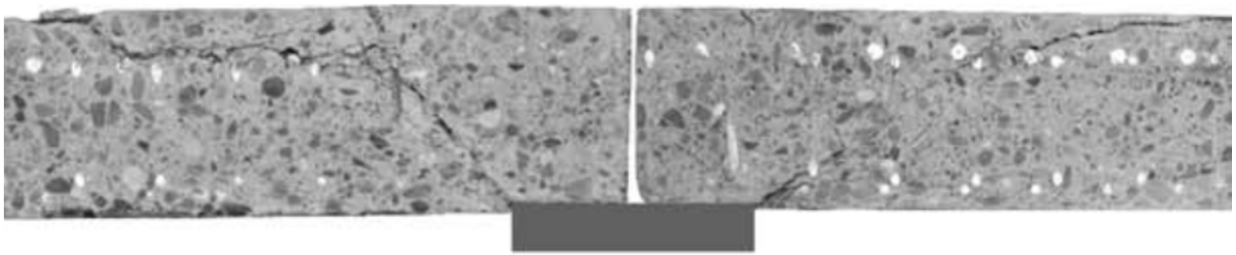
Kenel, A., Laurent, M., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch mit und ohne Durchstanzbewehrung», Versuchsbericht, Juli 2018, 86 pp.

Durchstanzversuche an Platten aus RC-M an der HSLU: Kampagne 2018

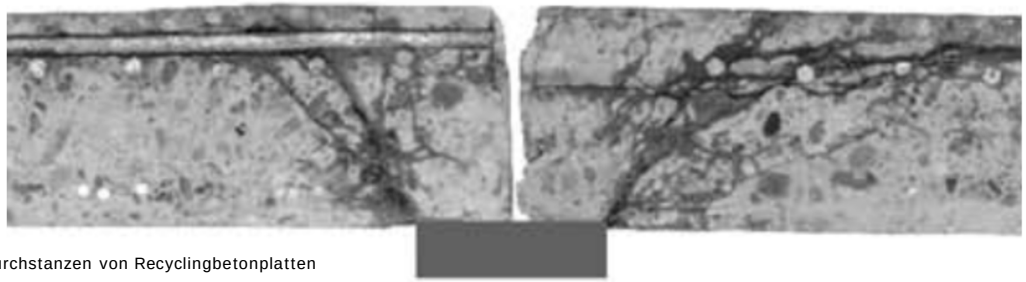
IV



V

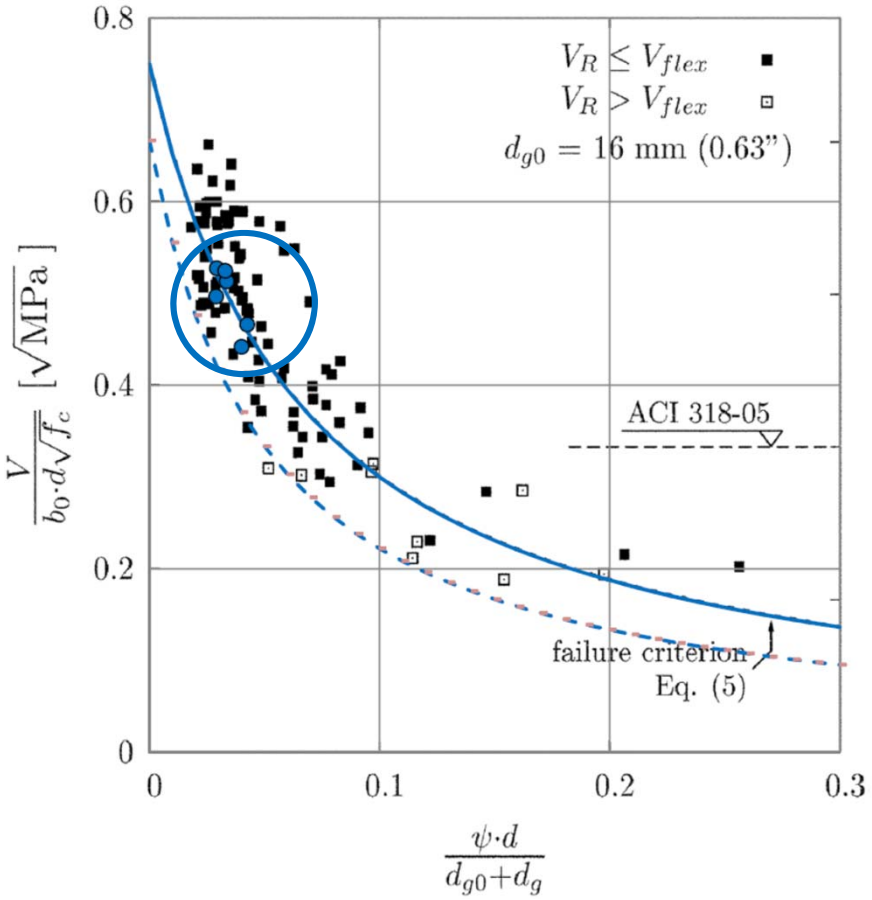


VI



Kenel, A., Laurent, M., «Durchstanzversuche mit Recyclingbeton aus Mischabbruch mit und ohne Durchstanzbewehrung», Versuchsbericht, Juli 2018, 86 pp.

Versuchsergebnisse der Versuchskampagne 2013 – Vergleich mit CSCT



- Die blauen Kreise liegen auf dem Mittelwert-Bruchkriterium und die Streuung (COV) ist sehr gering

- Eine Reduktion des anrechenbaren Grösstkorn-Durchmessers der Gesteinskörnung aus dem Vergleich mit dem Bruchkriterium scheint nicht erforderlich

Diagramm aus: Muttoni, A. (2008). Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. ACI Structural Journal, 105(4):440–450.

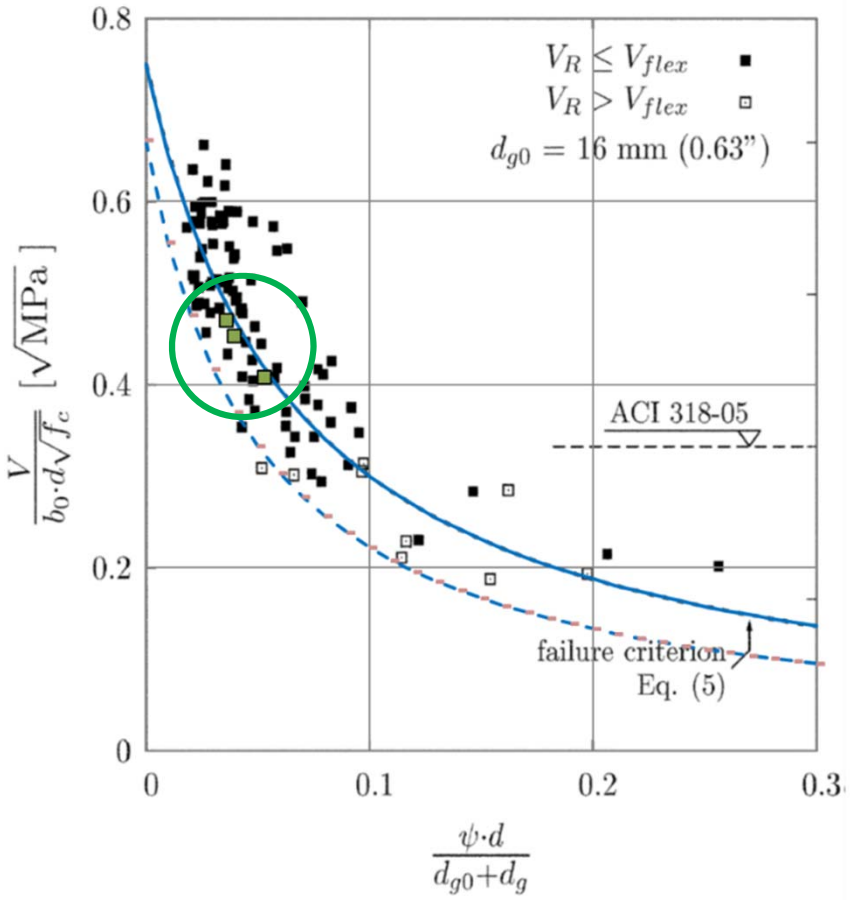
Versuchsergebnisse der Versuchskampagne 2013

Platte / Kennwerte	$V_{R,\exp}/V_{R,cal}$	$\psi_{\exp}\left(V_{R,\exp}\right)/\psi_{cal}\left(V_{R,cal}\right)$
Platte 1.1	0.979	0.912
Platte 1.2	1.043	0.909
Platte 2.1	1.062	0.914
Platte 2.2	1.079	0.914
Platte 3.1	1.058	0.756
Platte 3.2	1.127	0.785
Mittel	**1.058**	**0.865**
COV	4.6%	8.5%

- Die experimentellen Bruchlasten (Maximallast) liegen im Mittel 5.8% über den theoretischen Durchstanzlasten (mit k_g=1.0)
- Streuung (COV) ist sehr gering

Kenel, A., «Durchstanzversuche an Platten mit Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat - Bewertung der Versuche und Folgerungen», Sept. 2018, 12 pp.

Versuchsergebnisse der Versuchskampagne 2018 – Vergleich mit CSCT



- Die grünen Quadrate liegen 3.3% unterhalb des Mittelwert-Bruchkriteriums; aber immer noch deutlich über dem charakteristischen Bruchkriterium (strichlierte Linie)

- Die Streuung (COV) ist sehr gering

- grössere Rotationen weil
  a) das E-Modul des RC-M mit einem höheren Mischabbruch-Anteil deutlich kleiner ist
  b) das Verbundverhalten zwischen Bewehrung und RC-M weicher ist als bei «Normal-Beton»

→ Beiwert k_g zur Berücksichtigung des Grösstkorns der Gesteinskörnung in Gleichung (37) der SIA 262 mit dem Faktor 1.2 vergrössern

Diagramm aus: Muttoni, A. (2008). Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. ACI Structural Journal, 105(4):440–450.

Versuchsergebnisse der Versuchskampagne 2018

Platte / Kennwerte	$V_{R,\exp}/V_{R,cal}$	$\psi_{\exp}(V_{R,\exp})/\psi_{cal}(V_{R,cal})$
Platte I	0.989	1.123
Platte II	0.974	1.157
Platte III	1.063	0.994
Mittel	**1.009**	**1.091**
COV	4.7%	7.9%

Gleichung (37) der SIA 262 wird zu:

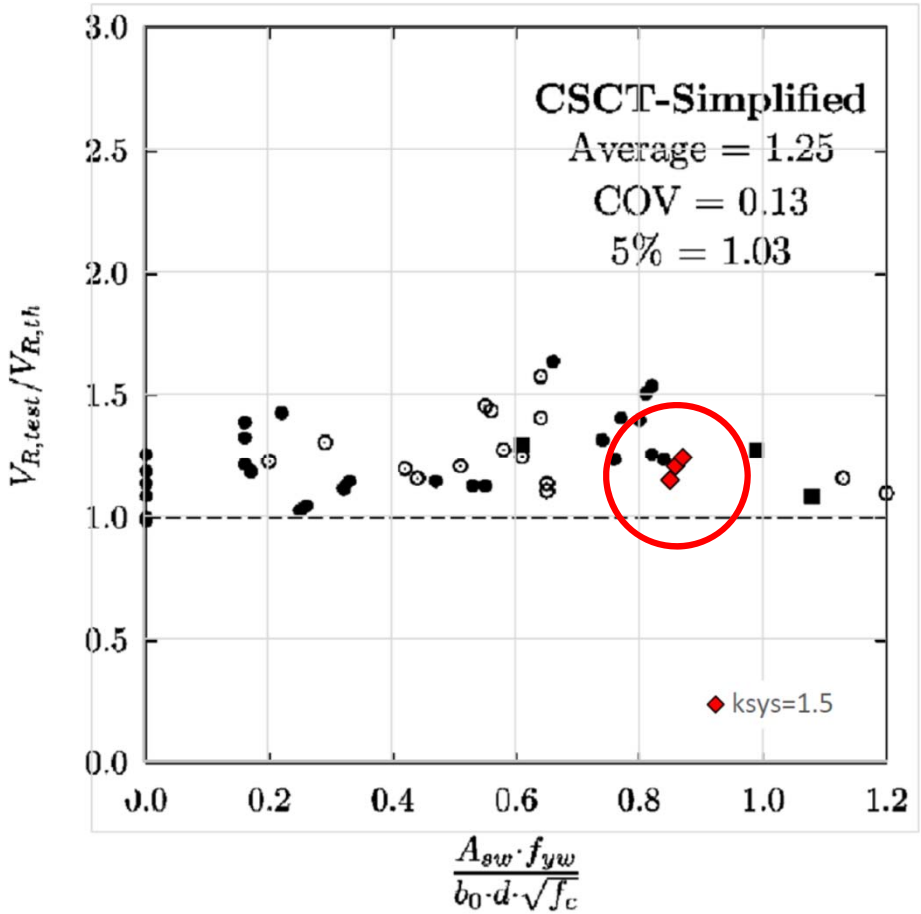
$$k_g = \boxed{1.2}\frac{48}{16 + D_{\max}}$$

- Die experimentellen Bruchlasten (Maximallast) liegen im Mittel 0.9% über den theoretischen Durchstanzlasten (mit k_g=1.2)

- **Beiwert zur Berücksichtigung des Grösstkorns der Gesteinskörnung k_g in Gleichung (37) der SIA 262 mit dem Faktor 1.2 vergrössern**

Kenel, A., «Durchstanzversuche an Platten mit Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat - Bewertung der Versuche und Folgerungen», Sept. 2018, 12 pp.

Versuchsergebnisse der Versuchskampagne 2018 – Vergleich mit CSCT



- Die roten Rauten (Maximallast) liegen mit einem Systembeiwert k_{sys}=1.5 im Mittel 20% über den theoretischen Durchstanzlasten (mit k_g=1.2 und k_{sys}=1.5)

- Streuung (COV) ist sehr gering

- **Zur Sicherstellung eines mit der SIA 262:2013 vergleichbaren Sicherheitsniveaus und unter Berücksichtigung von Verlegetoleranzen und Anforderungen an die konstruktive Durchbildung sollte der Faktor der ersten Betondruckdiagonale ohne weitere Untersuchungen zu höchstens 1.5 angenommen werden**

Diagramm aus:Fernández Ruiz, M., Muttoni, A. (2009). Applications of Critical Shear Crack Theory to Punching of Reinforced Concrete Slabs with Transverse Reinforcement. ACI Structural Journal, 106(4):485–494.

Versuchsergebnisse der Versuchskampagne 2018

Platte / Kennwerte	$V_{R,\exp}/V_{R,cal}$	$\psi_{\exp}(V_{R,\exp})/\psi_{cal}(V_{R,cal})$
Platte IV	1.205	1.368
Platte V	1.240	1.521
Platte VI	1.147	1.173
Mittel	**1.197**	**1.354**
COV	4.0%	13%

Gleichung (69) der SIA 262 wird zu:

$$V_{Rd,c} = \boxed{1.5}\, k_r \tau_{cd} d_v u \leq \boxed{2.5}\, \tau_{cd} d_v u$$

- Die experimentellen Bruchlasten (Maximallast) liegen im Mittel 20% über den theoretischen Durchstanzlasten (mit k_g=1.2 und k_{sys}=1.5)

- **Die Betondruckdiagonale hat bei allen drei Versuchen versagt → Der Faktor der ersten Betondruckdiagonale darf ohne weitere Untersuchungen zu höchstens 1.5 angenommen werden**

Kenel, A., «Durchstanzversuche an Platten mit Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat - Bewertung der Versuche und Folgerungen», Sept. 2018, 12 pp.

Empfehlung zur Aktualisierung des Merkblatt 2030:2019

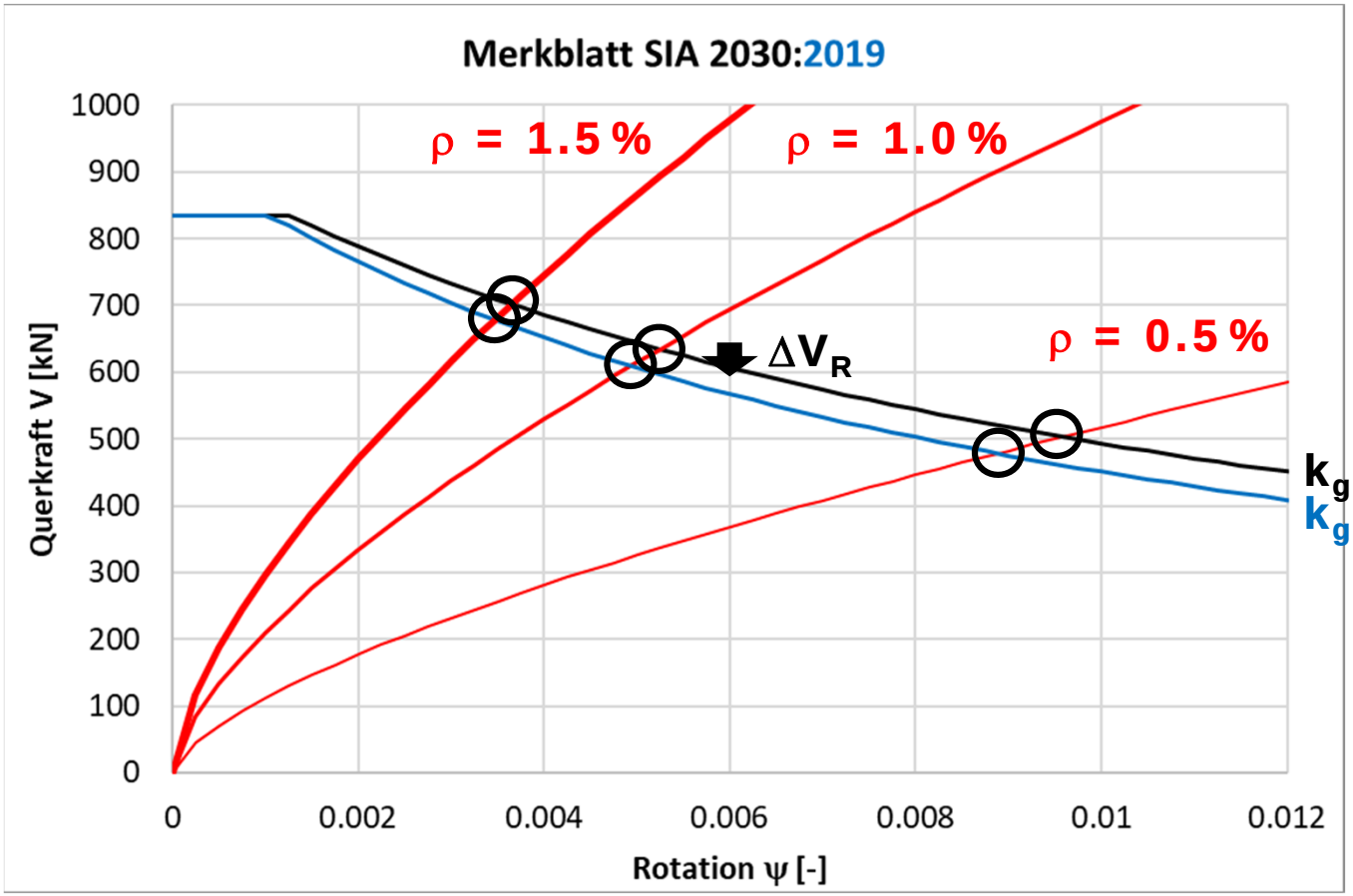
Empfehlung zur Anpassung Ziffer 4.2.2 des Merkblatt SIA 2030:2010 – Recyclingbeton:

Für Recyclingbeton RC-M sind zusätzlich folgende Regeln zu beachten:

- Norm SIA 262, Ziffer 4.2.1 Beton:
  Für die maximalen Stauchungen sind bei RC-M die folgenden Werte anzusetzen:
  - $\varepsilon_{c2d} = 0,003\,\eta_r \quad \geq 0,002$
  - $\varepsilon_{c1d} = 0,67\,\varepsilon_{c2d}$
- Norm SIA 262, Ziffer 4.3.3 Querkraft:
  Der Wert k_g aus der Gleichung (37) ist mit dem Faktor 1,2 zu vergrössern.
- Norm SIA 262, Ziffer 4.3.6 Durchstanzen:
  Die Faktoren 2 und 3,5 in Gleichung (69) sind auf 1,5 und 2,5 zu verkleinern.

Kenel, A., «Recyclingbeton Empfehlung zur Anpassung des SIA MB 2030», März 2018, 11 pp.

Konsequenzen: Merkblatt 2030:2019 / ohne Durchstanzbewehrung



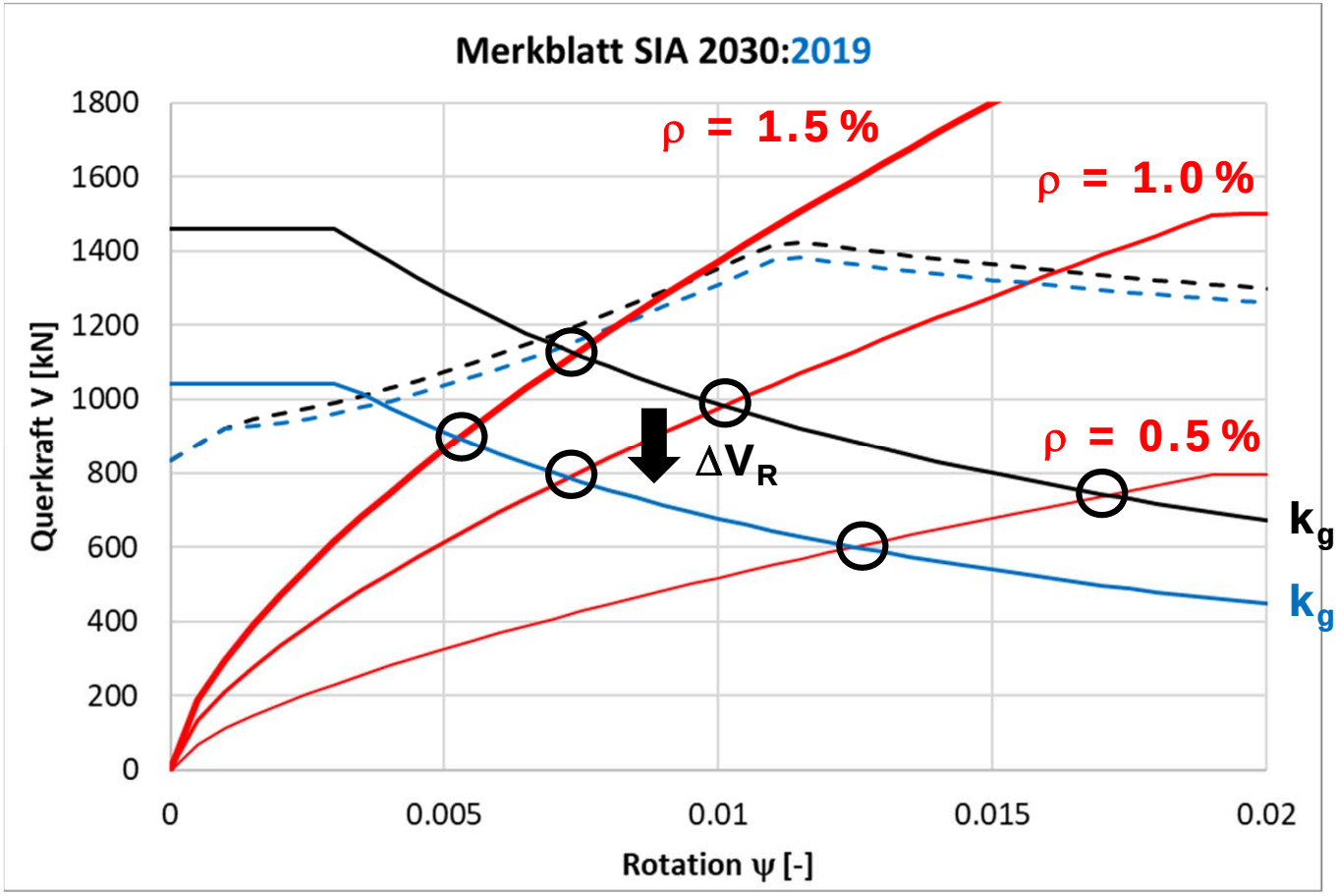
Einfluss der Reduktion von D_{max} an einem Beispiel mit RC-M:

ρ	1.5%	1.0%	0.5%
ΔV_R	-3.3%	-3.9%	-4.9%

k_g = 1.0 RC-C
k_g = 1.2 RC-M

L=6.0m; d=d_v=0.22m
Quadratstütze mit a=0.26m
RC30/37; B500B

Konsequenzen: Merkblatt 2030:2019 / mit Durchstanzbewehrung



Einfluss der Reduktion von D_{max} an einem Beispiel mit RC-M:

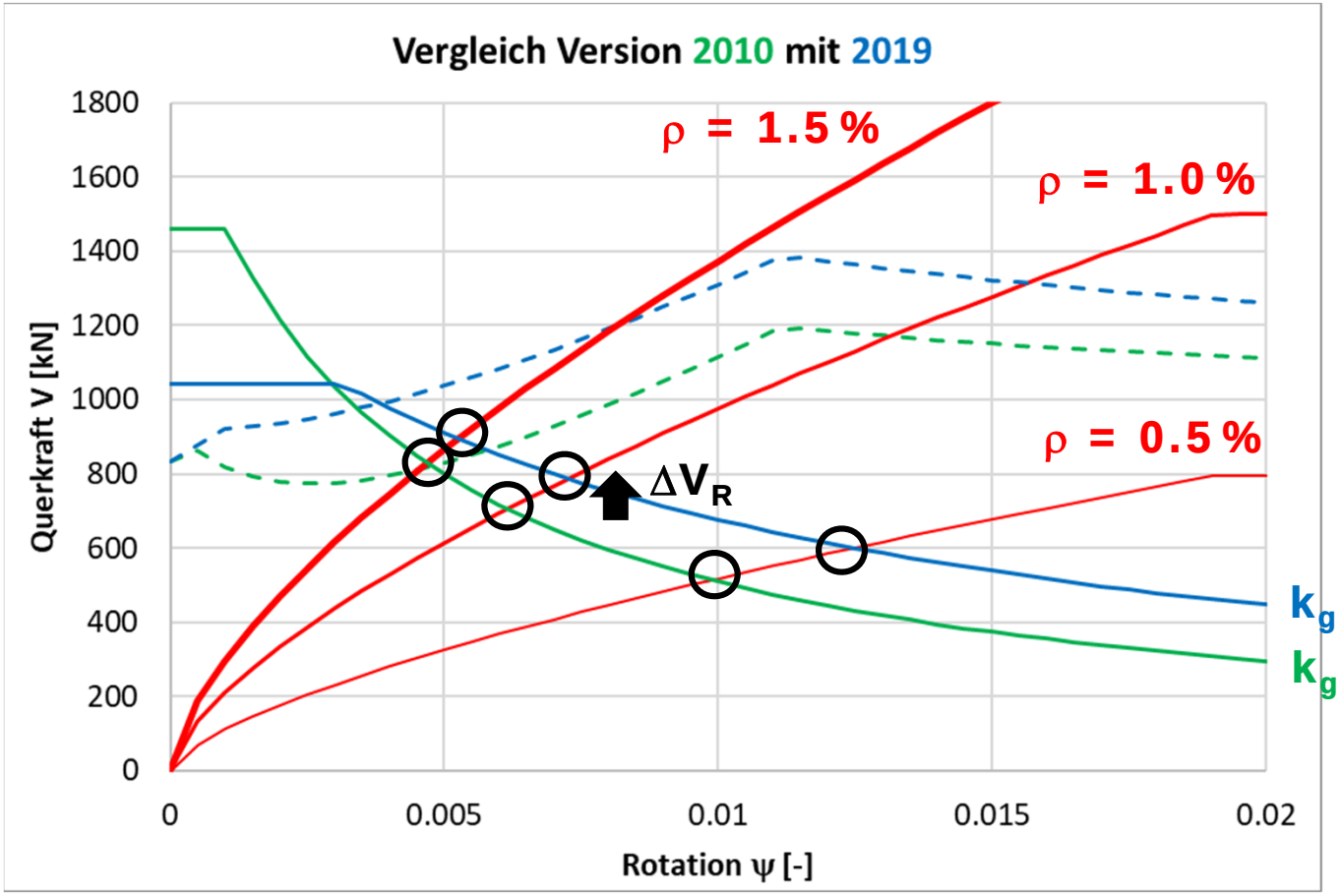
ρ	1.5%	1.0%	0.5%
ΔV_R	-20%	-20%	-19%

k_g = 1.0 / 2.0k_r RC-C

k_g = 1.2 / 1.5k_r RC-M

L=6.0m; d=d_v=0.22m
Quadratstütze mit a=0.26m
RC30/37; B500B; ρ_{sw}=0.785%

Vergleich: Merkblatt 2030:2019 mit Merkblatt 2030:2010



Vergleich von V_{Rd} der MB-Versionen 2019 zu 2010:

ρ	1.5%	1.0%	0.5%
ΔV_R	+10%	+12%	+17%

k_g = 1.2 / 1.5k_r RC-M

k_g = 3.0 / 2.0k_r RC-M

L=6.0m; d=d_v=0.22m
Quadratstütze mit a=0.26m
RC30/37; B500B; ρ_{sw}=0.785%

Zusammenfassung

- Die insgesamt **zwölf Durchstanzversuche** dienten der Ermittlung der adäquaten Berücksichtigung des **Grösstkorndurchmesser-Einflusses** und der Ermittlung der **bemessungsrelevanten Systembeiwerte** für Bügelbewehrungen

- Es konnten **Empfehlungen zur Anpassung des MB SIA 2030:2010** abgeleitet werden

- **Gleichung (37) der SIA 262 wird zu**: $k_g = 1.2 \frac{48}{16 + D_{max}}$

- **Gleichung (69) der SIA 262 wird zu**: $V_{Rd,c} = 1.5\, k_r \tau_{cd} d_v u \leq 2.5\, \tau_{cd} d_v u$

- Mit den Empfehlungen können die in der Norm SIA 262:2013 angegebenen Gleichungen **mit geringen Korrekturen angewendet** werden

- Es wird **mit dem aktualisierten Merkblatt 2030 ein höherer Durchstanzwiderstand** resultieren als mit der bisherigen Betrachtung als 'Leichtbeton':

  ohne Durchstanzbewehrung **ca. +20-30%** (bezogen auf das MB SIA 2030:2010)
  mit Durchstanzbewehrung **ca. +10-20%** (bezogen auf das MB SIA 2030:2010)

Verdankungen

Versuchskampagne 2013:

Initiator und finanzieller Hauptpartner:	**Stadt Zürich – Amt für Hochbauten**
Herstellung und Transport von drei Durchstanzplatten:	**Eberhard Bau AG, Kloten**
Herstellung und Transport von drei Durchstanzplatten:	**Richi AG, Weiningen**

Versuchskampagne 2018:

Initiator und finanzieller Hauptpartner:	**Stadt Zürich – Amt für Hochbauten**
Herstellung von sechs Durchstanzplatten:	**KIBAG AG**
Transporte an die HSLU:	**Toggenburger AG**
Durchstanzbewehrung und finanzieller Partner:	**F.J. Aschwanden AG, Lyss**