

# Das neue Merkblatt Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Prof. Dr. Albin Kenel  
Institut für Bauingenieurwesen, Hochschule Luzern

**Technik & Architektur**  
1. September 2022

FH Zentralschweiz

## Inhalt

- Definitionen und Materialeigenschaften
- Neues SIA Merkblatt 2030:2021 Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen
- Durchstanzversuche, Konsequenzen für die Bemessung
- Querkraftversuche, Konsequenzen für die Bemessung
- Verformungen

## Definitionen und Begriffe – 1/3



### Betonabbruch

Rückgebaute bewehrte/unbewehrte  
Betonkonstruktionen und -beläge

HSLU



### Mischabbruch

Gemisch aus rückgebauten Massivbauteilen  
wie Beton, Backstein-, Kalkstein- und  
Natursteinmauerwerk

Bilder und Definitionen aus: Hoffmann, C., Stand von Forschung und  
Entwicklung in der Schweiz, 9., Schweizer Betonforum

## Definitionen und Begriffe – 2/3



### Betongranulat (C)

Gemisch aus aufbereitetem Betonabbruch  
(rezyklierte Körner aus Beton, -produkten,  
Mörtel, Mauersteinen aus Beton,  
natürlichem Gestein)

HSLU



### Mischgranulat (M)

Gemisch aus aufbereitetem Mischabbruch  
(rezyklierte Körner aus Beton, -produkten,  
Mörtel, Mauersteinen aus Beton, Mauer-  
und Dachziegeln aus gebranntem Ton,  
Kalksandsteinen, natürlichem Gestein)

Bilder und Definitionen aus: Hoffmann, C., Stand von Forschung und  
Entwicklung in der Schweiz, 9., Schweizer Betonforum

## Definitionen und Begriffe – 3/3



Beton aus natürlicher Gesteinskörnung



Recyclingbeton aus Betongranulat (RC-C)

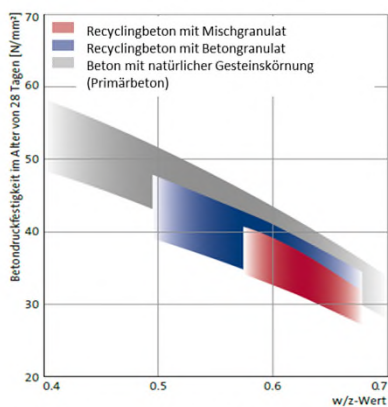


Recyclingbeton aus Mischgranulat (RC-M)

HSLU

Bilder und Definitionen aus: Hoffmann, C., Stand von Forschung und Entwicklung in der Schweiz, 9, Schweizer Betonforum

## Materialeigenschaften – 1/3



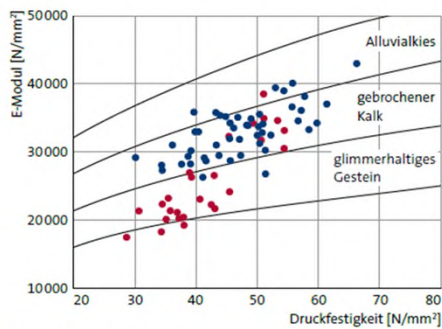
Druckfestigkeit (28 Tage) in Abhängigkeit vom w/z-Wert für Recyclingbetone und Primärbeton

HSLU

- Im Vergleich zu Beton aus natürlicher Gesteinskörnung weist Recyclingbeton bei vergleichbarem w/z-Wert eine tiefere Druckfestigkeit auf infolge
  - geringerer Kornfestigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung
  - grösseren Zementsteinvolumens.

Bilder und Definitionen aus: Hoffmann, C., Stand von Forschung und Entwicklung in der Schweiz, 9, Schweizer Betonforum

## Materialeigenschaften – 2/3



• RC-C mit C > 50%  
 • RC-M mit M > 50%  
 — Bereiche zwischen den Kurven: Normalbeton aus natürlicher Gesteinskörnung gemäss SIA 262

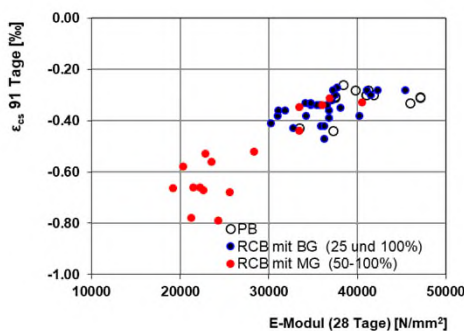
E-Modul in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit (28 Tage) für Recyclingbetone im Vergleich zu Primärbeton

HSLU

- Der E-Modul  $E_{rcm}$  von Recyclingbeton ist geringer als derjenige von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung aufgrund
  - geringerer Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung
  - höheren Zementsteinvolumens.

Bilder und Definitionen aus: Hoffmann, C., Stand von Forschung und Entwicklung in der Schweiz, 9. Schweizer Betonforum

## Materialeigenschaften – 3/3



Schwindmass (91 Tage) in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul für Recyclingbetone im Vergleich zu Primärbeton

HSLU

- Das Schwindmass von Recyclingbeton ist grösser als das von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung aufgrund des
  - geringeren E-Moduls der rezyklierten Gesteinskörnung
  - höheren Zementsteinvolumens.
- Das Schwindmass kann für den Recyclingbeton zuverlässig über die Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul beschrieben werden.

Bilder und Definitionen aus: Hoffmann, C., Stand von Forschung und Entwicklung in der Schweiz, 9. Schweizer Betonforum

## Neues Merkblatt 2030:2021

### Motivation

- Neuere Forschungsergebnisse und Umsetzungserfahrung seit 2010
- Aktualisierte Tragwerksnorm SIA 262 Betonbau
- Notwendigkeit zur sprachlichen und technischen Präzisierung

### Inhaltliche Anpassungen

- Einführung von zwei Recyclingbetonklassen mit Betongranulat (C) bzw. Mischgranulat (M)
- Einführung von E-Modulklassen
- Bemessungsgrundlagen für Querkraft und Durchstanzen

HSLU

## Ausgangslage Merkblatt 2030:2010 – 1/3

Merkblatt  
2030

sia

### Recyclingbeton

Reinigungsstufe  
festlegen und  
anfordern  
sollte sich  
an den  
anforderungen  
anpassen  
sollte sich  
an den  
anforderungen  
anpassen

Prüfung 10

Ausgabe 2010

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:
  - $\epsilon_{c2d} = 0,003 \cdot \eta_c \geq 0,002$
  - $\epsilon_{c1d} = 0,67 \cdot \epsilon_{c2d}$
- 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.

HSLU

### **Ausgangslage Merkblatt 2030:2010 – 2/3**

- Deutliche Reduktion des Durchstanzwiderstandes für RC-M infolge  $D_{\max}=0$  statt 32mm
- Keine Angaben zur Begrenzung der maximalen Beanspruchung der Betondruckdiagonale
- Bisher 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

HSLU

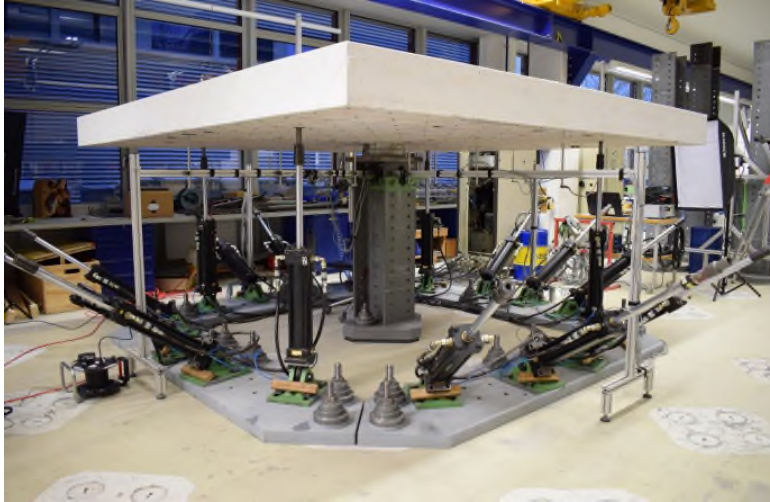
### **Ausgangslage Merkblatt 2030:2010 – 3/3**

- Zur Berücksichtigung des Einflusses des Grösstkorndurchmessers von Betonplatten aus Recyclingbeton RC-M müssen „nur“ die spezifischen Faktoren des (der SIA 262 zu Grunde liegenden) Formelapparates angepasst werden
- Es waren einige Durchstanzversuche aus RC-M notwendig
- Die dokumentierten und bewerteten Durchstanzversuche an Platten aus RC-M dienen der Anpassung der spezifischen Faktoren

HSLU



## Durchstanzversuche 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)

HSLU

## Durchstanzversuche aus RC-M an der HSLU – 2013: 6 Durchstanzversuche (ohne Durchstanzbewehrung)

$P_{1.1}$



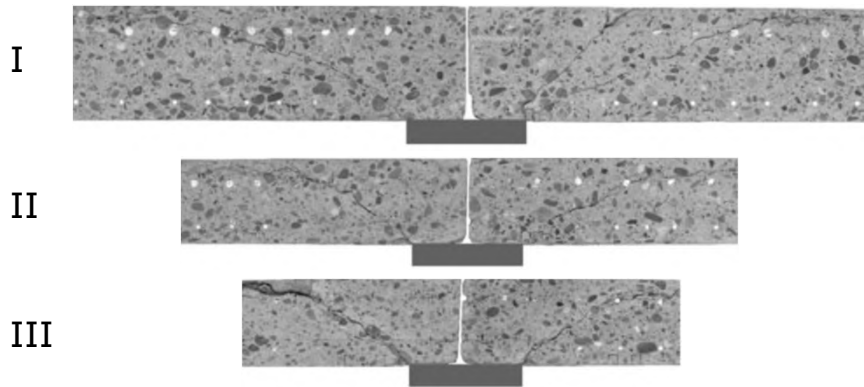
$P_{1.2}$



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

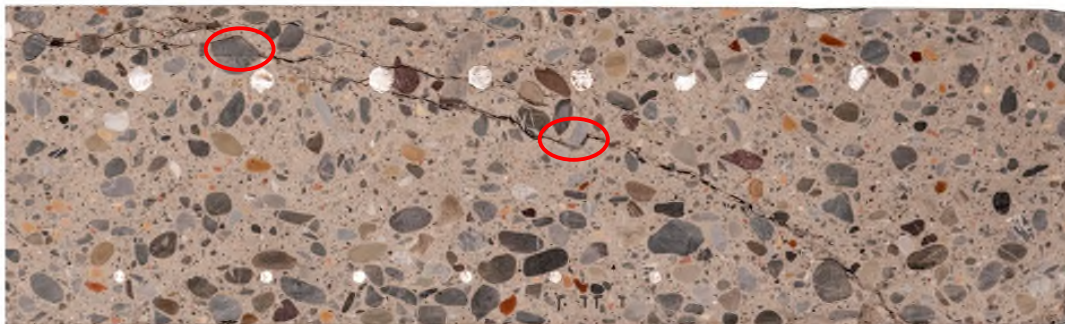
HSLU

**Durchstanzversuche aus RC-M an der HSLU –  
2018: 3 Durchstanzversuche (ohne Durchstanzbewehrung)**



HSLU

**Durchstanzversuche aus RC-M an der HSLU –  
2018: 3 Durchstanzversuche (ohne Durchstanzbewehrung)**

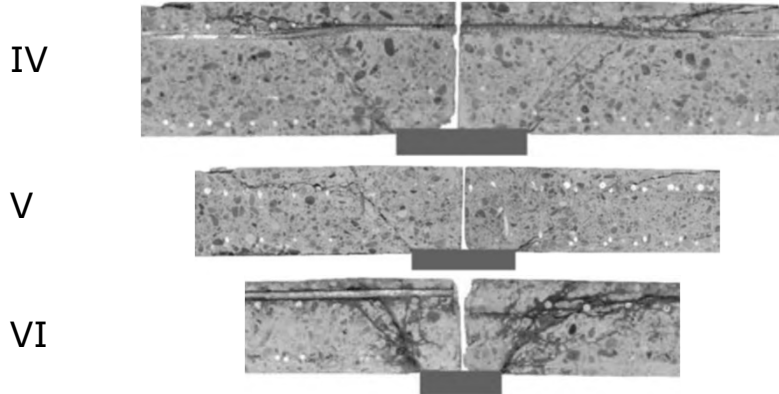


Platte I: Schnittbild im Bereich des Durchstanzkegels  
Der Riss verläuft um die Gesteinskörnung herum und nicht durch die  
Gesteinskörnung hindurch

HSLU

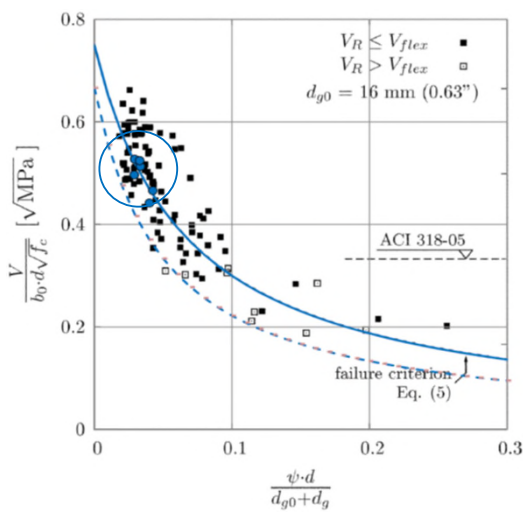


**Durchstanzversuche aus RC-M an der HSLU –  
2018: 3 Durchstanzversuche (mit Durchstanzbewehrung)**



HSLU

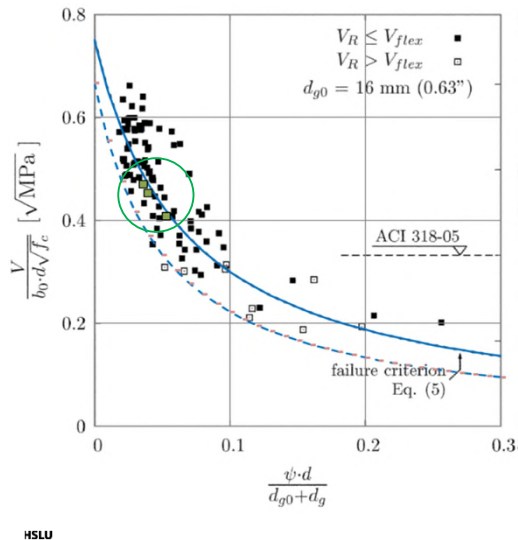
**Versuchskampagne 2013 – Vergleich mit CSCT ( $A_{sw}=0$ )**



- Die blauen Kreise liegen auf dem Mittelwert-Bruchkriterium und die Streuung (COV) ist sehr gering
- Eine Reduktion des anrechenbaren Grösstkorndurchmessers der Gesteinskörnung aus dem Vergleich mit dem Bruchkriterium scheint nicht erforderlich

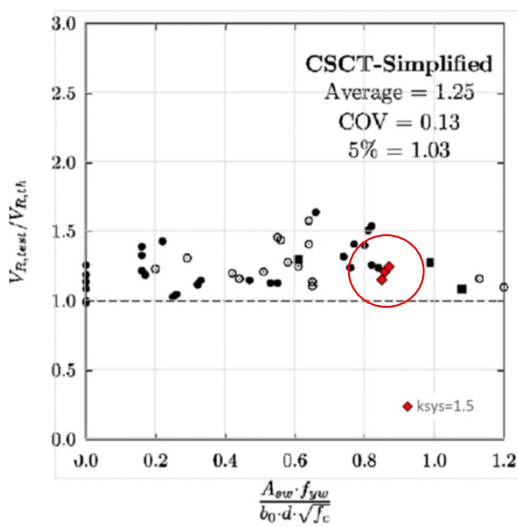
HSLU

### Versuchskampagne 2018 – Vergleich mit CSCT ( $A_{sw}=0$ )



- 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

### Versuchskampagne 2018 – Vergleich mit CSCT ( $A_{sw}>0$ )



- 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

## Konsequenzen für die Durchstanzbemessung – 1/2

- Die insgesamt **zwölf Durchstanzversuche** dienen 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:** 
$$V_{Rd,c} = 1.5 k_r \tau_{cd} d_v u \leq 2.5 \tau_{cd} d_v u$$

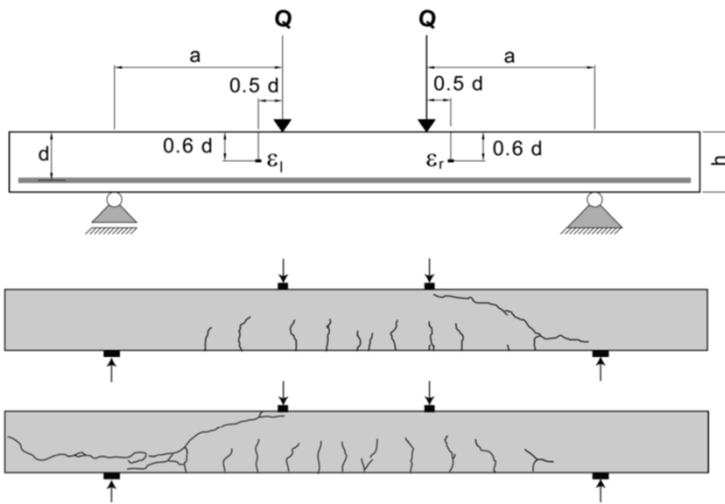
HSLU

## Konsequenzen für die Durchstanzbemessung – 2/2

- Mit den Empfehlungen können die in der Norm SIA 262:2013 angegebenen Gleichungen **mit geringen Korrekturen angewendet** werden
- Es resultiert **mit dem aktualisierten Merkblatt 2030 ein höherer Durchstanzwiderstand** als mit der bisherigen Betrachtung als „Leichtbeton“:
  - ohne Durchstanzbewehrung ca. +20-30% (bez. auf MB SIA 2030:2010)
  - mit Durchstanzbewehrung ca. +10-20% (bez. auf MB SIA 2030:2010)

HSLU

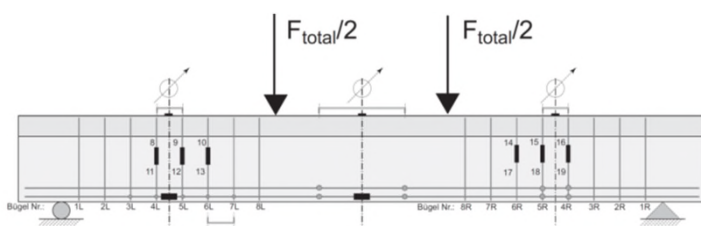
## Empa-Querkraftversuche an Plattenstreifen



HSLU

- 3\*2 Plattenstreifen von 0.2m Höhe und 0.5m Breite mit Spannweite 1.5m aus RC-C
- Die Querkrafttragfähigkeit der drei untersuchten Recyclingbetone lag im Mittel 6 % unterhalb der nach SIA berechneten Querkrafttragfähigkeit

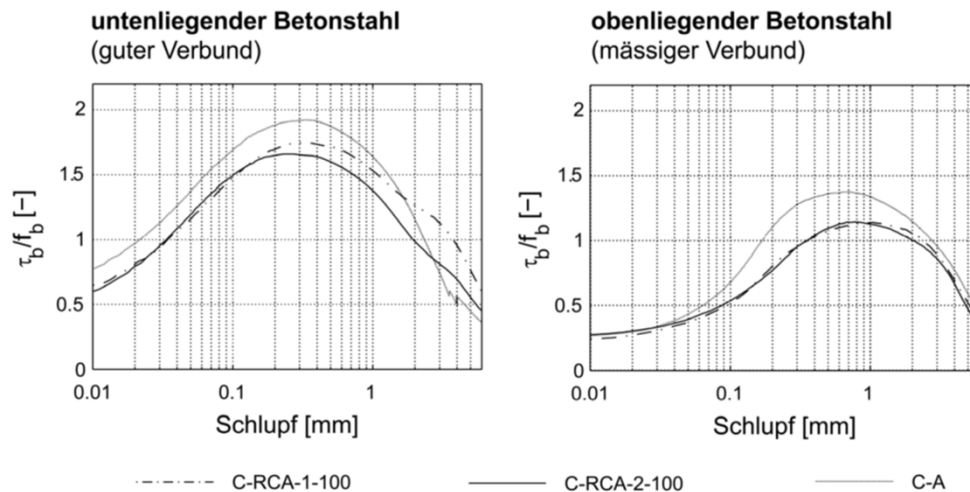
## Empa-Querkraftversuche an Balken



HSLU

- 3 Plattenbalken von 0.5m Höhe und 0.15m Stegbreite mit Spannweite 1.5m je aus RC-M, RC-C und Normalbeton
- Das Schubtragverhalten der bewehrten Träger aus Recyclingbeton unterschied sich nicht signifikant vom Träger aus Normalbeton

## Empa-Verbundversuche



HSLU

## Konsequenzen für die Querkraftbemessung

- Die Steifigkeit des RC-C bzw. insbesondere des RC-M ist kleiner als von Normalbeton
  - geringerer E-Modul (weichere Gesteinskörnung, mehr Zementstein)
  - Geringere Schubfestigkeiten bzw. grössere Schlupfverformung
    - geringere Zugversteifung des Betons zwischen den Rissen

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

- **Einfluss auf Gleichung (36):**  $k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_v \cdot d \cdot k_g}$

HSLU



## Verformungen – Übersicht

- Grössere Verformungen als bei Normalbeton
  - Tieferer E-Modul
  - Grössere Kriechverformungen
  - Grössere Schwindverformungen
  - Aber bei RC-M kleinere Verformungen infolge Temperatur
- Elastische Verformungen über E-Modulklassen bzw.  $E_{rcm}$
- Kriechen mit «pauschalem» Vergrößerungsfaktor
- Schwinden mit relativem Vergleich der E-Moduli

HSLU

## Verformungen – Elastische Verformungen

E-Modulklasse	$E_{rcm}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{rc,i,min}$ N/mm <sup>2</sup>
EX	Keine Anforderung	Keine Anforderung
E15	≥ 15'000	≥ 12'000
E20	≥ 20'000	≥ 17'000
E25	≥ 25'000	≥ 22'000
E30 <sup>1)</sup>	≥ 30'000	≥ 27'000

Elastische Verformungen (z.B. mit FEM, linear-elastisch ungerissen) unter Verwendung von  $E_{rcm}$  gemäss Tabelle 2 des MB2030:2021 berechnen:

$$\Rightarrow w_c$$

Ungerissener Zustand → Gleichung (101) der SIA 262:  $\Rightarrow w_{c\varphi} = w_c (1 + \varphi_r(t, t_0))$

Gerissener Zustand → Gleichung (102) der SIA 262:  $\Rightarrow w = w_c \frac{1 - 20\rho'}{10\rho'^{0.7}} (0.75 + 0.1 \varphi_r(t, t_0)) \left(\frac{h}{d}\right)^3$

HSLU

## Verformungen – Kriechen und Schwinden

- Kriechen mit «pauschalem» Vergrößerungsfaktor

$$\varphi_r(t, t_0) = 1.25 \cdot \varphi(t, t_0)$$

- Schwinden mit relativem Vergleich der E-Moduli

$$\varepsilon_{rcs,\infty} = \frac{\varepsilon_{cs,\infty}}{\eta_r}; \eta_r = \frac{E_{rcm}}{E_{cm}} \leq 1 \Rightarrow \varepsilon_{rcs,\infty} = \varepsilon_{cs,\infty} \frac{E_{cm}}{E_{rcm}} \geq \varepsilon_{cs,\infty}$$

HSLU

**HSLU** Hochschule  
Luzern

**Hochschule Luzern**  
**Technik & Architektur**  
Institut für Bauingenieurwesen IBI  
**Prof. Dr. Albin Kenel**  
Leiter Institut für Bauingenieurwesen

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

FH Zentralschweiz