Duurzaamheid versus Technische levensduur van beton

Stubeco – Stufib - Stutech 27-10-2026

Edwin Vermeulen

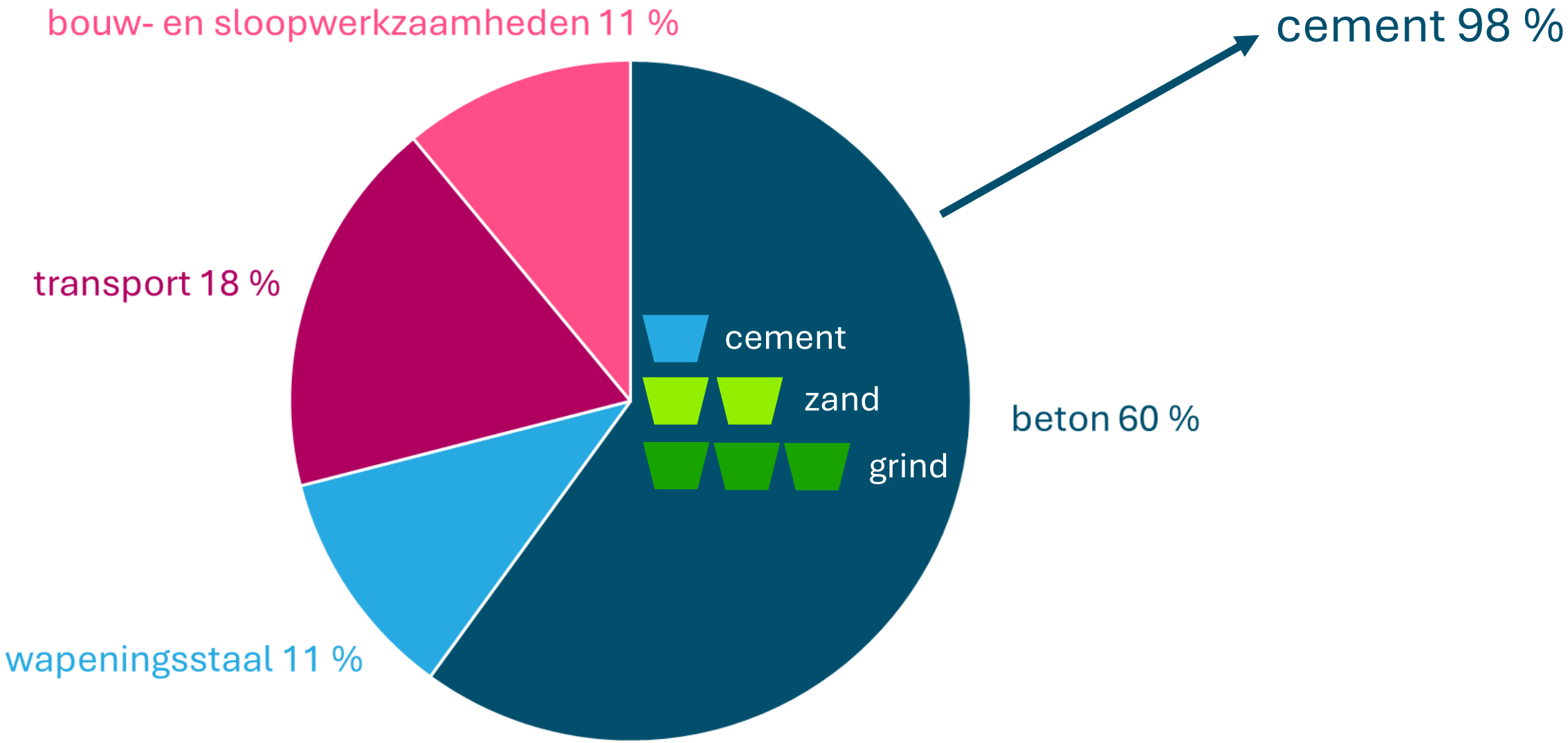
STUTECH

Cement&Beton Centrum

Inhoud

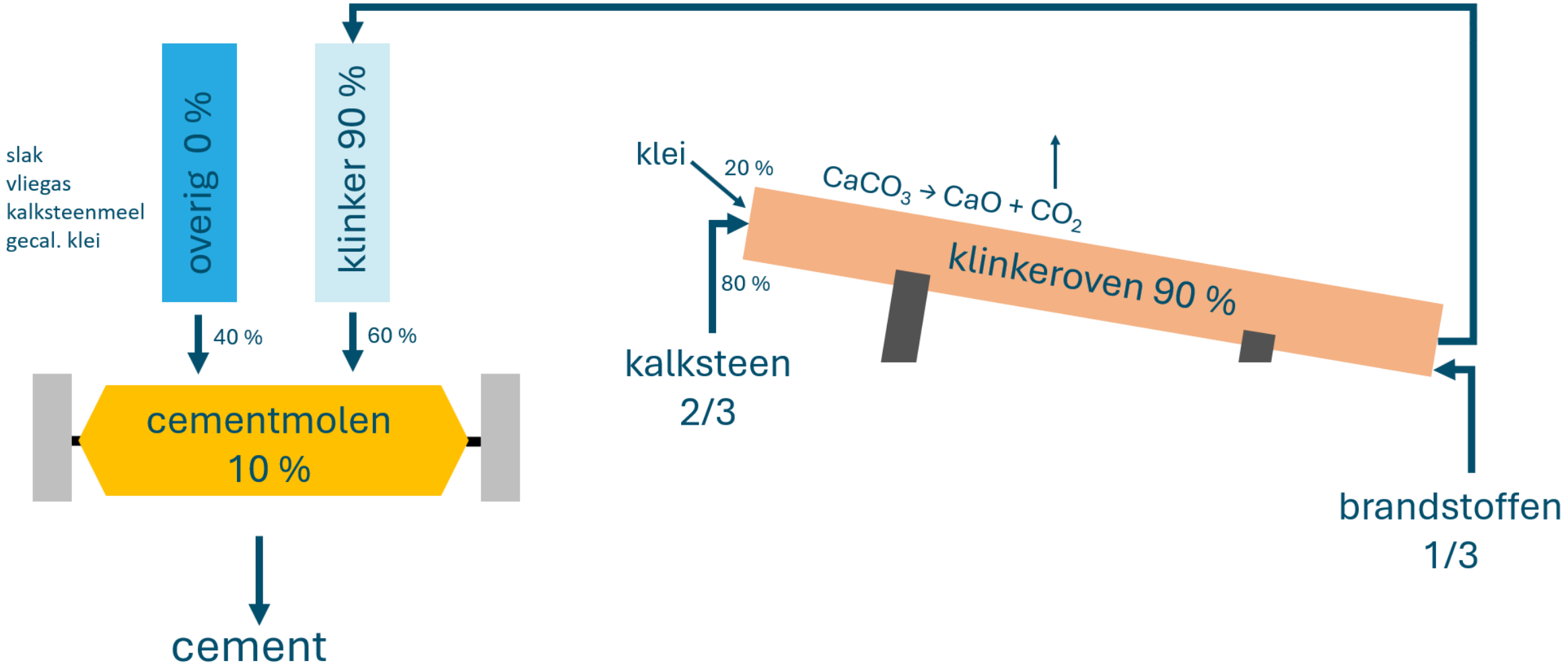
- Achtergrond verlaging klinkergehalte in cement en beton
- Consequenties voor nabehandeling en biologische aangroei
- Literatuur: toename porositeit bij lage klinkergehaltes
- Resultaten onderzoek Stutech studiegroep 72
- Conclusies en aanbevelingen

Betonketen – bijdragen CO_2-emissies

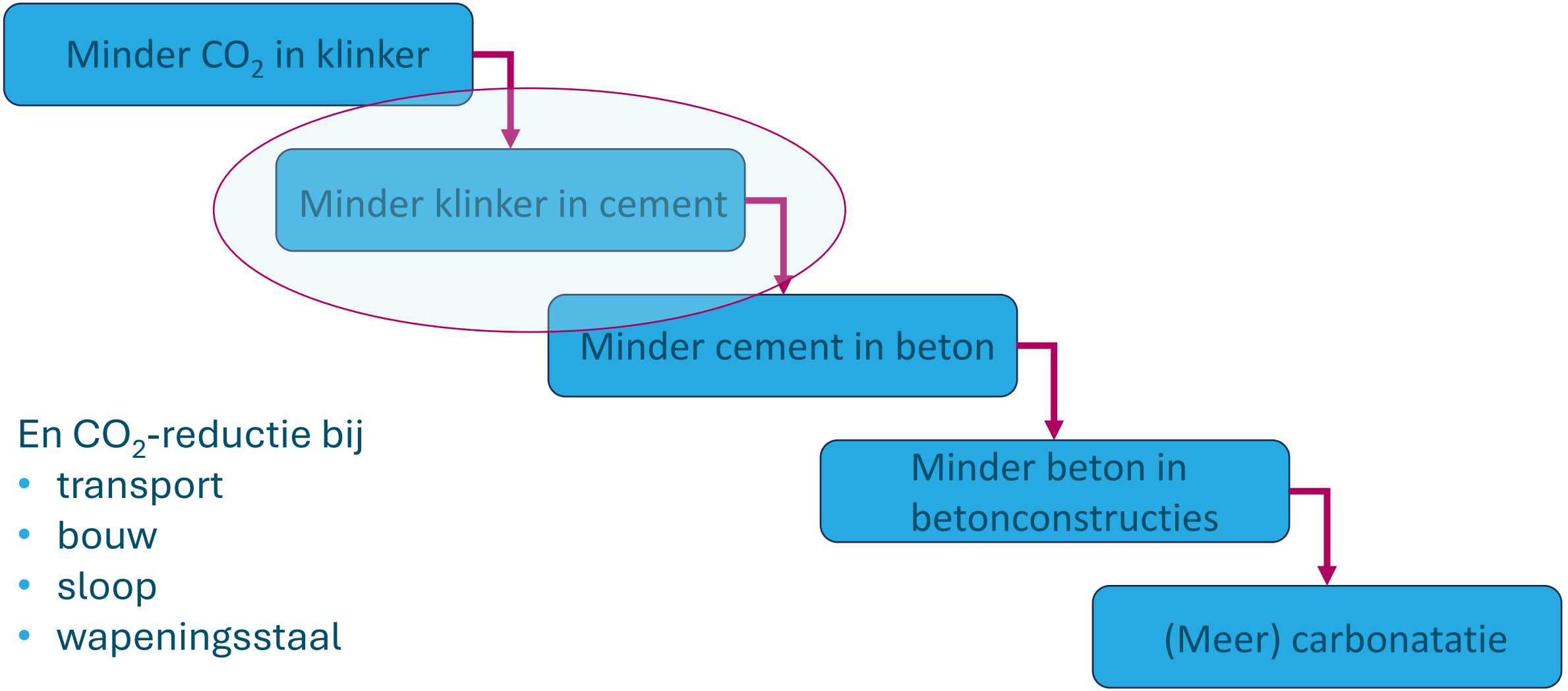


Figuur gebaseerd op data uit Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, CE Delft, 2013

Betonketen – bijdragen CO_2-emissies



Breed pakket aan maatregelen nodig voor klimaatneutraal beton



En CO_2-reductie bij

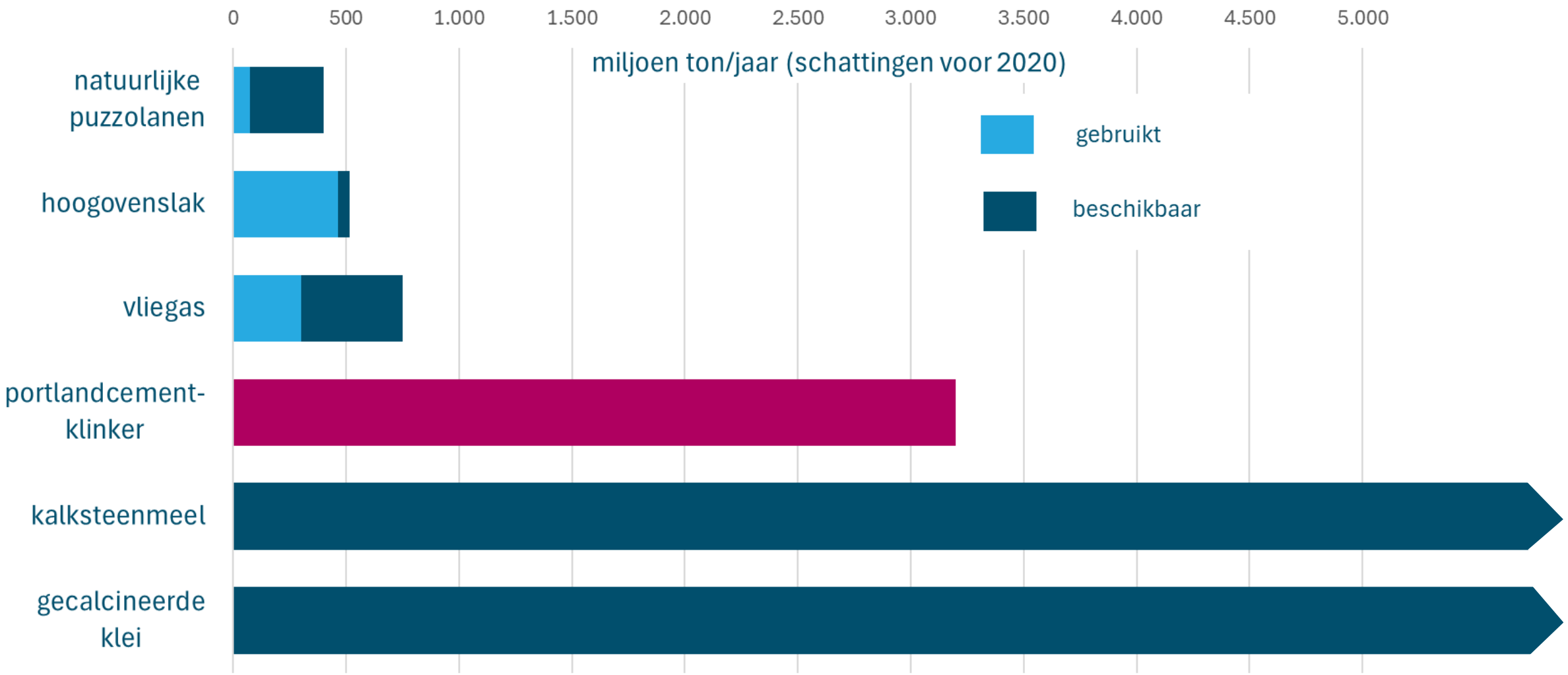
- transport
- bouw
- sloop
- wapeningsstaal

Portlandcement CEM I versus hoogovencement CEM III/B

- MKI oud (A1) en nieuw (A2) en CO_2 voor 1 m^3 beton in sterkteklasse C30/37:

Cementsoort	MKI A1	MKI A2	CO_2 (GPW totaal A2)
CEM I	€ 19,63	€ 37,32	275 kg
CEM III/B	€ 12,00	€ 20,93	135 kg

Minder klinker in cement



Figuur samengesteld door C&BC op basis van diverse bronnen.

Minder klinker in cement wenselijk, maar:

- Langere nabehandeling nodig.
- Mogelijk meer biologische aangroei.
- Bij schaarse grondstoffen die *al volledig worden toegepast* in cement en beton: eigenlijk geen milieuwinst (alleen op projectniveau) maar verplaatsing.
- Bij zeer lage klinkergehaltes: sterke toename porositeit.

Langere nabehandeling

- NEN 8670: Nabehandelingsklassen 3 en 4 uit EN 13670 zijn van toepassing.
  - Nabehandelingsklasse 3: nabehandelen totdat minimaal 50 % van de *werkelijke* 28-daagse karakteristieke druksterkte is bereikt (in de oppervlaktezone).
  - Nabehandelingsklasse 4: nabehandelen totdat minimaal 70 % van de *werkelijke* 28-daagse karakteristieke druksterkte is bereikt (in de oppervlaktezone).
- NEN 8005: opmerking bij milieuklassen XF3 en XF4: voor vloeren en wegen wordt een minimum klinkergehalte aanbevolen van 50 %, in combinatie met nabehandelingsklasse 4.
  (Die 50 % is gebaseerd op hoogovenslak, niet op puzzolanen!)

Langere nabehandeling

- De benodigde nabehandelingsduur per nabehandelingsklasse kan worden ingeschat op basis van de sterkteontwikkeling van beton bij 20 °C:

	Sterkteontwikkeling	Sterkteverhouding $r = f_{cm,2} / f_{cm,28}$
CEM I 52,5 R	Snel	≥ 0,5
CEM I 42,5 R	Gemiddeld	≥ 0,3 en < 0,5
CEM III/B 42,5 N	Traag	≥ 0,15 en < 0,3
	Zeer traag	< 0,15



Meer klinker
Hogere sterkteklasse cement
Lagere wcf

Langere nabehandeling

3

Oppervlaktetemperatuur van het beton (°C)	Minimale nabehandelingsperiode (dagen)		
	Ontwikkeling van de betonsterkte r		
	Snel	Gemiddeld	Traag
t ≥ 25	1,5	2,5	3,5
15 ≤ t < 25	2,0	4	7
10 ≤ t < 15	2,5	7	12
5 ≤ t < 10	3,5	9	18

4

Oppervlaktetemperatuur van het beton (°C)	Minimale nabehandelingsperiode (dagen)		
	Ontwikkeling van de betonsterkte r		
	Snel	Gemiddeld	Traag
t ≥ 25	3	5	6
15 ≤ t < 25	5	9	12
10 ≤ t < 15	7	13	21
5 ≤ t < 10	9	18	30

Lager klinkergehalte = meer biologische aangroei

- Meer klinker = initieel hogere pH aan het oppervlak = minder aangroei.
- Meer klinker = dichtere microstructuur na carbonatatie = minder vocht = minder aangroei.



Lager klinkergehalte = meer biologische aangroei

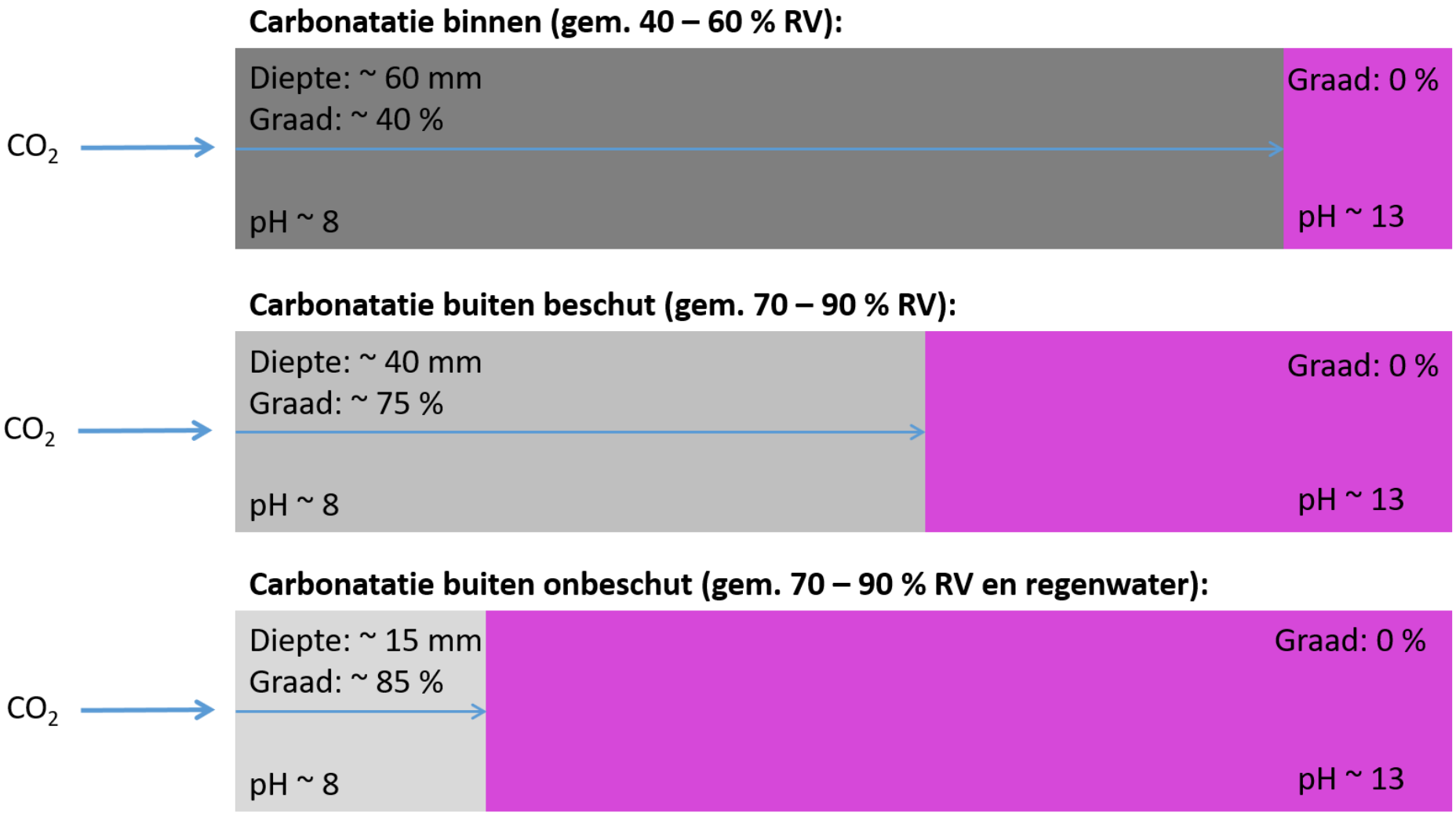


Voorkomen biologische aangroei – CROW-CUR Aanbeveling 125

Aangroeiklasse A	Aangroeiklasse B
Pas een cement toe met een klinkergehalte van ten minste 65 %.	Pas een cement toe met klinkergehalte van ten minste 25 %.
Pas mengsels toe met een water-bindmiddelfactor 0,45 of lager.	Pas mengsels toe met een water-bindmiddelfactor 0,50 of lager.
Pas nabehandelingsklasse 4 toe volgens NEN-EN 13670, houdt bij voorkeur een nog langere tijd aan, ten minste 3 dagen langer.	Pas nabehandelingsklasse 4 toe volgens NEN-EN 13670.

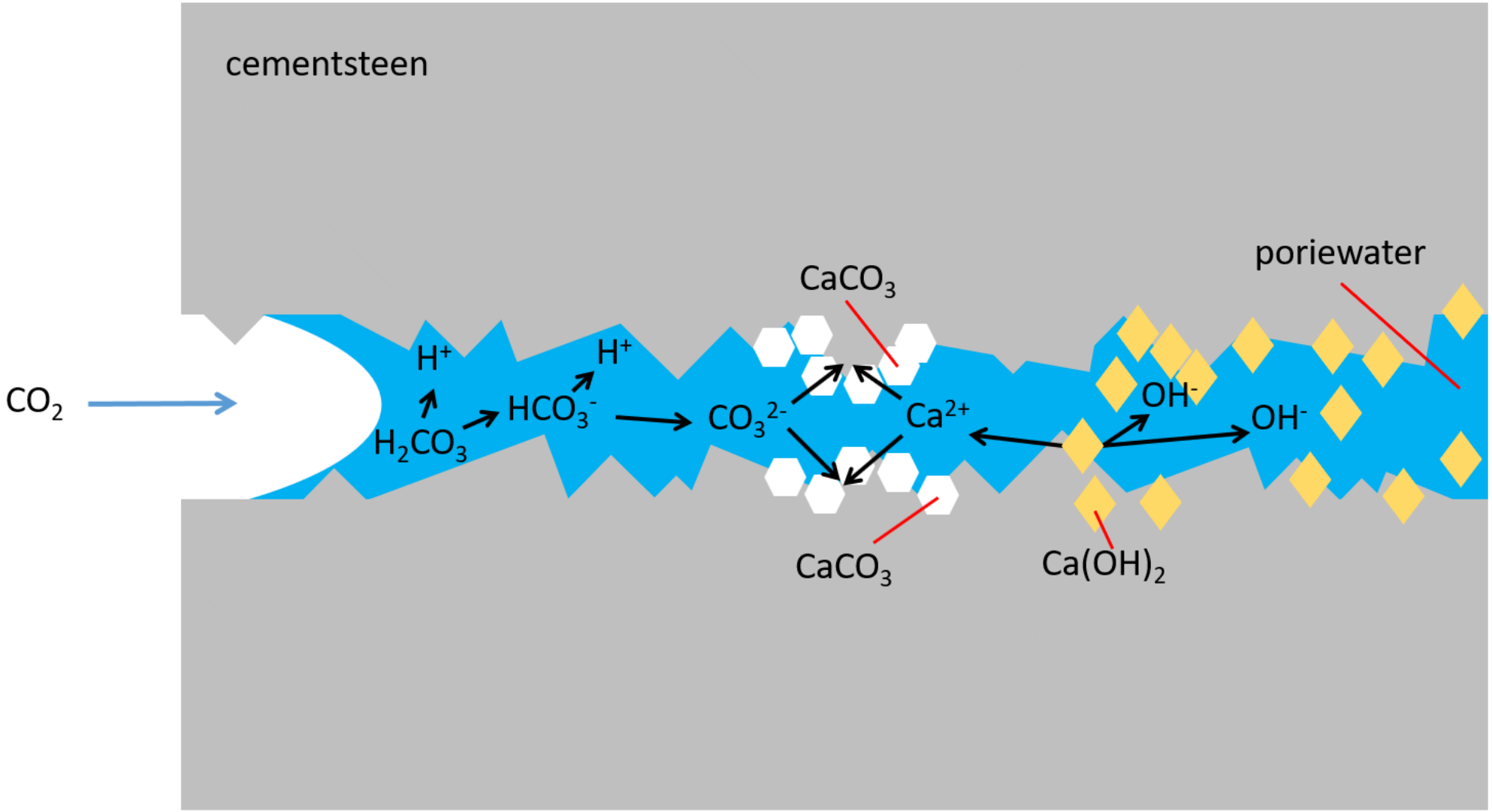
De CROW-CUR Aanbeveling geeft ook richtlijnen voor het ontwerp en de oppervlaktestructuur (glad oppervlak). Gebruik geen (A) of zo min mogelijk (B) curing compound.

Carbonatatiediepte versus carbonatatiegraad

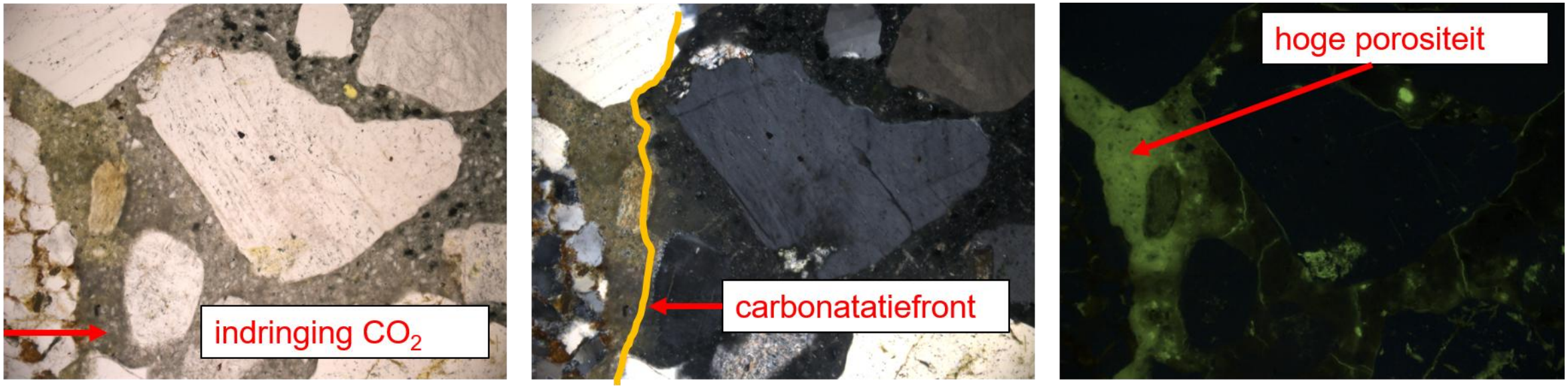


Getallen voor een C30/37 op basis van CEM III/B en na 50 jaar

Carbonatatie: hoge pH en Ca^{2+} ionen houden CSH-gel stabiel



Toename porositeit door carbonatatie onder microscoop

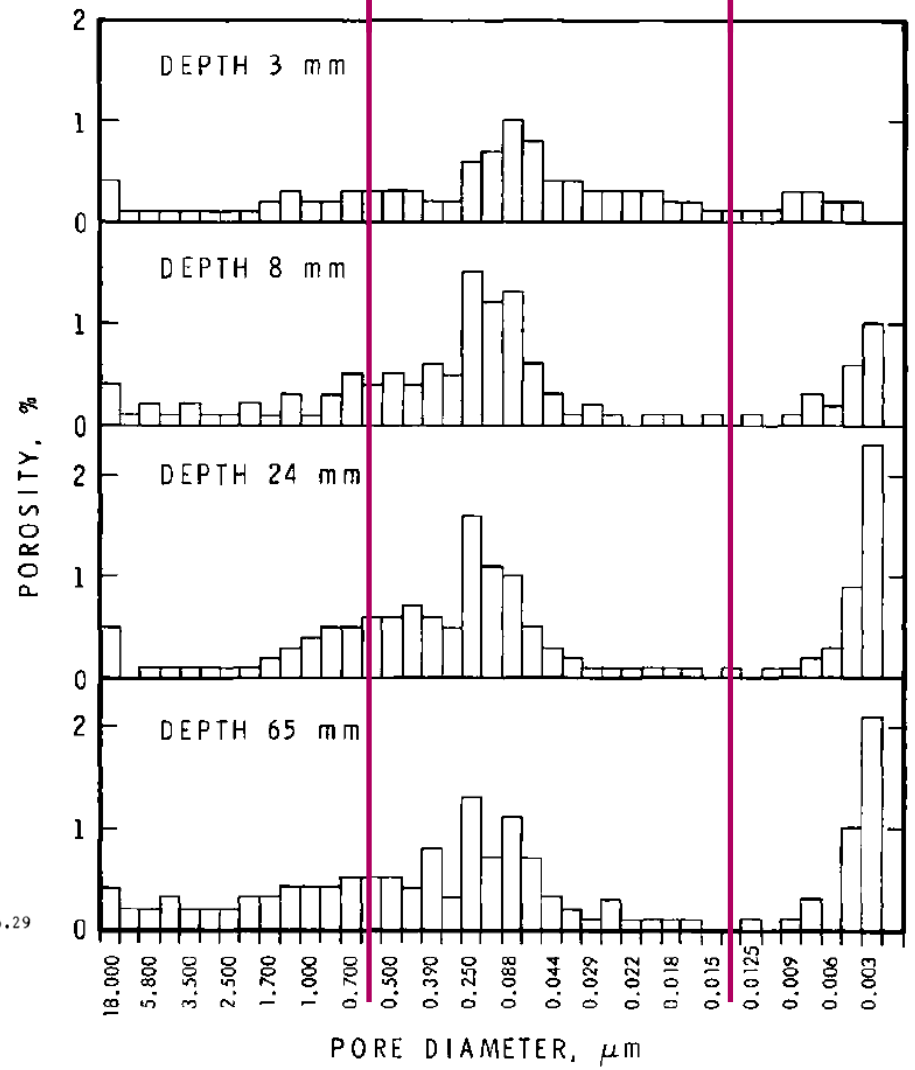


Beton op basis van CEM III/B). Van links naar rechts: onder parallel gepolariseerd licht, kruislings gepolariseerd licht en UV-licht.

Foto's: Dr. Oguzhan Copuroglu, TU Delft
Bron: Betoniek 16/24

Effect carbonatatie op porositeit

Poriën die makkelijk kunnen bevriezen

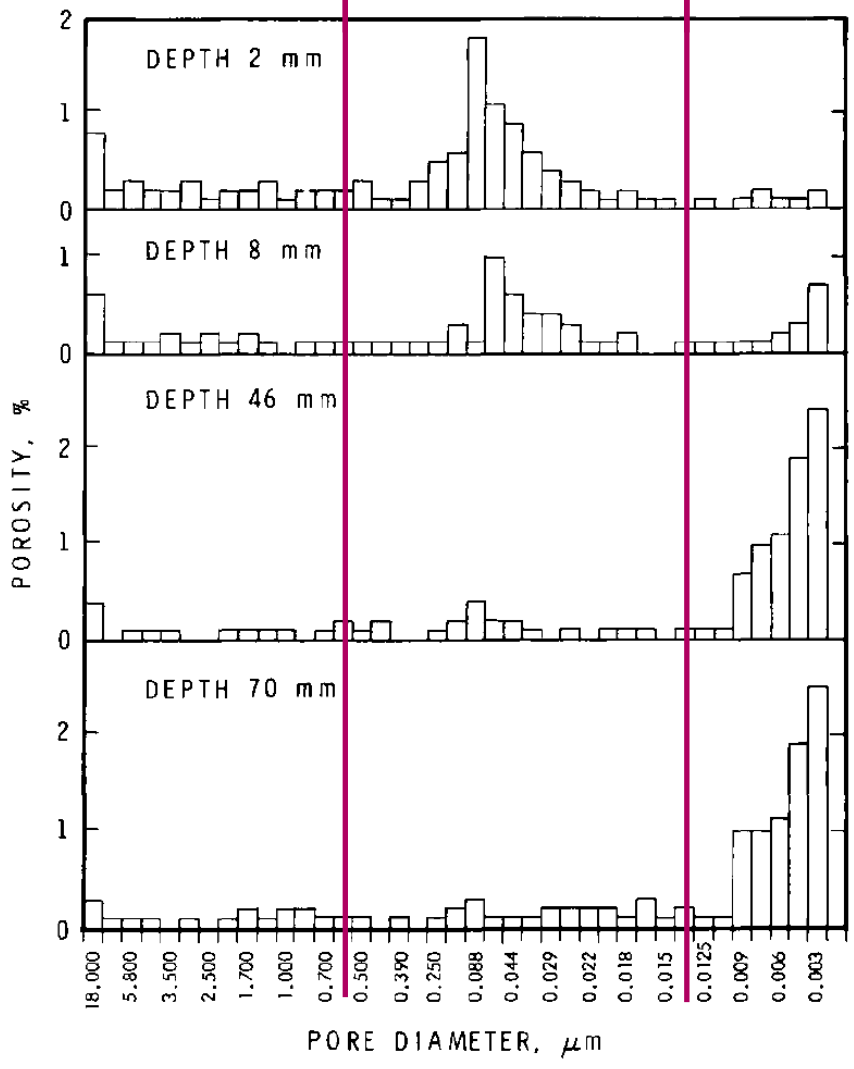


(d) OPC concrete exterior exposure

Cement:water:sand Weight proportion	1:0.61:6.3	1:0.58:6.29
Compressive strength at 28 days 20 × 20 × 20-m cubes		
MPa	35.8	32.8
(psi)	(5190)	(4760)
Compressive strength in Sept. 1975 (at 12 and 11 yr, respectively)		
MPa	40.4	52.8

(portlandcement)

Poriën die makkelijk kunnen bevriezen



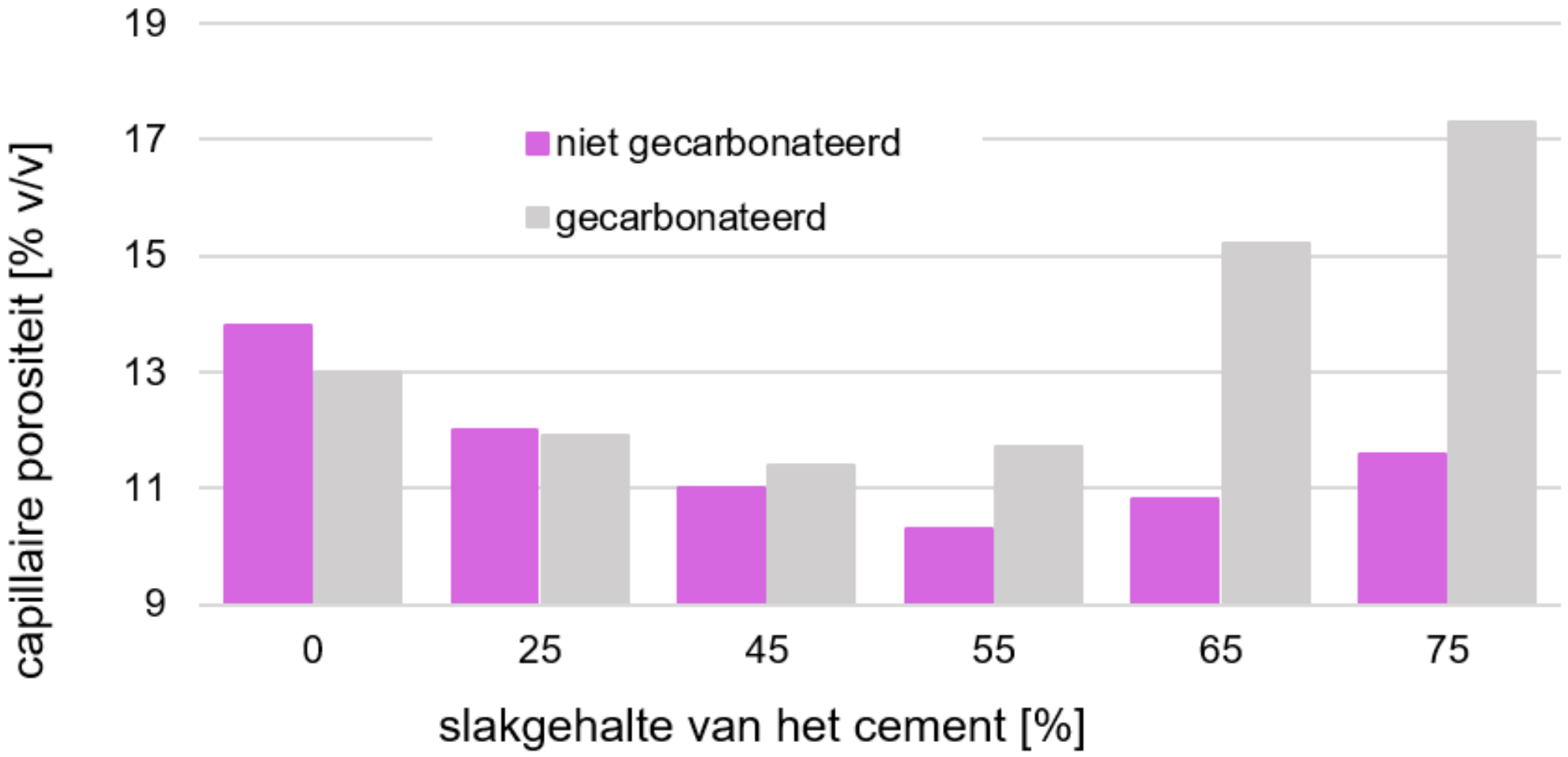
(b) GBFSC concrete exterior exposure

(cement met 65 % hoogovenslak)

Bron: Carbonation of Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete During Twenty Years of Field Exposure, Litvan and Meyer, 1986

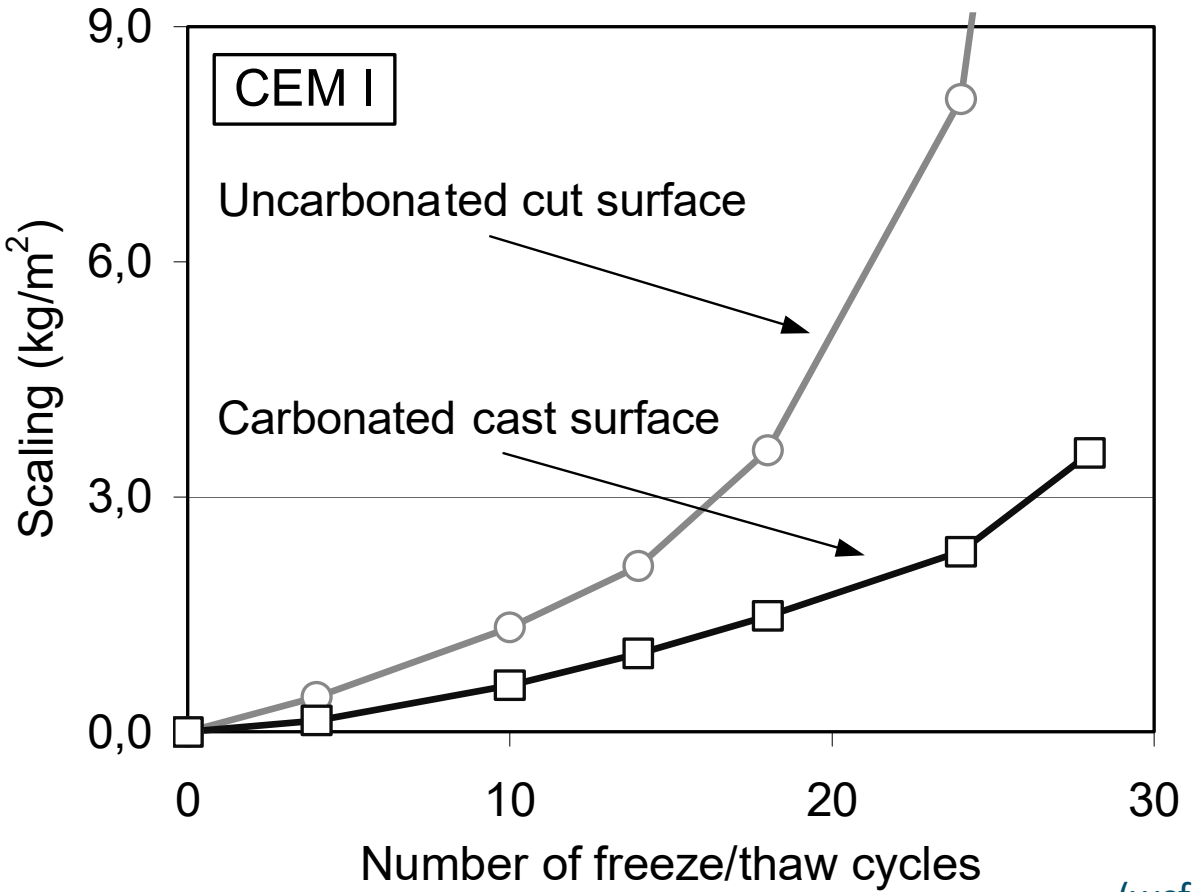
Toename porositeit door carbonatatie

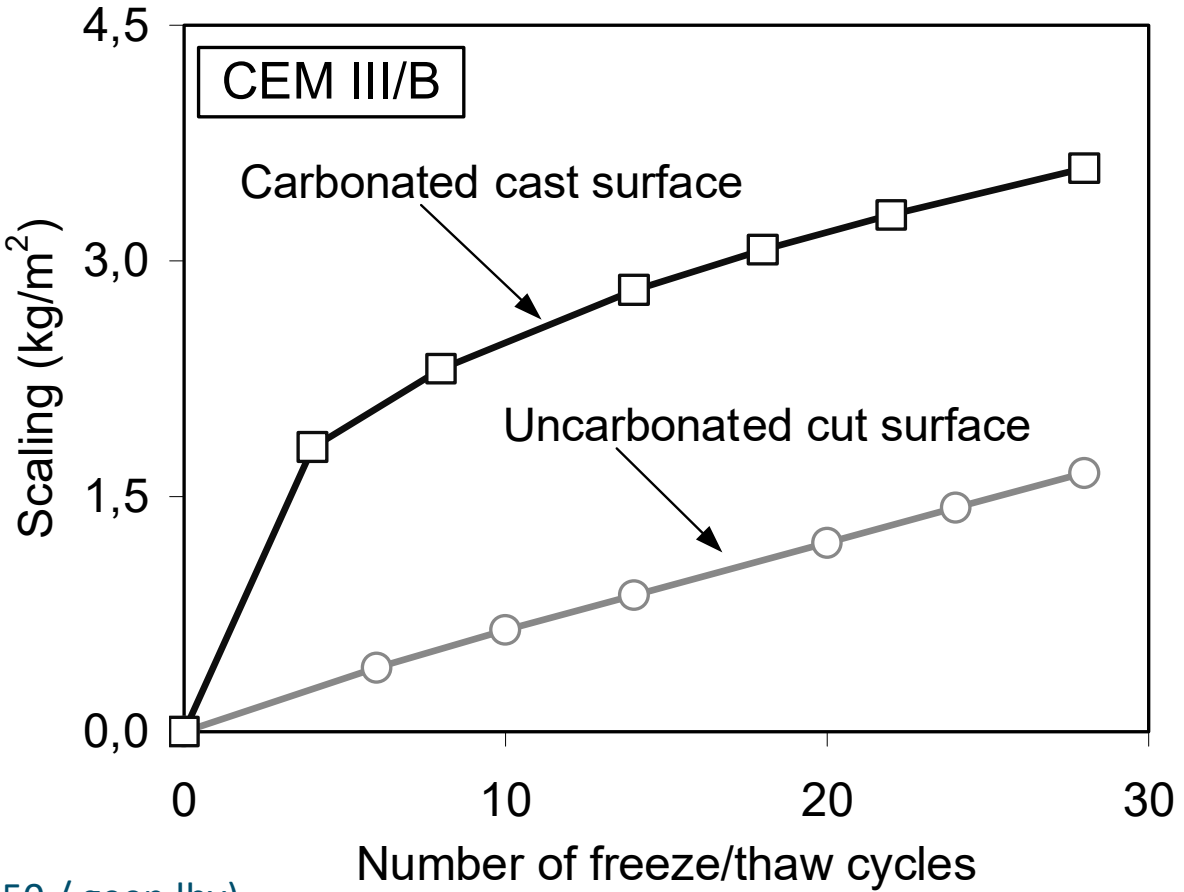
80 % slak ~ 40 % puzzolaan



Bron: Stark & Ludwig (1997)

Effect carbonatatie op vorstbestandheid





(wcf 0,50 / geen lbv)

Bron: Thesis Peter Utgenannt: the influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete (2004) (Auberg 1998)

Stutech studiegroep 72 - Aanleiding

Klinkergehalte (MKI): duurzaamheid versus technische levensduur van beton

- Aanleiding: eisen aan de MKI voor betonverhardingen en –wegen die alleen haalbaar zijn met CEM III/B, terwijl NEN 8005 hiervoor minimaal 50 % klinker adviseert. Spanningsveld tussen technische levensduur en verlaging van de MKI/CO_2-profiel van beton.
- Eerste vergadering: 26 oktober 2023.

Stichting | SKKB

STUTECH

Stutech studiegroep 72 - Veroudering

- Simulatie 50 jaar veroudering GWW: gedurende 6 maanden laten carbonateren bij 3,0 % CO_2 én regelmatig onder water plaatsen (demiwater ter simulatie van regenwater):
  1. Proefstukken na 3 dagen ontkisten en tot 7 dagen in verzadigd kalkwater van 20 °C
  2. Na 7 dagen de proefstukken tot 28 dagen bewaren bij 65 % RV/20 °C.
  3. Na 28 dagen de proefstukken gedurende een week in demiwater plaatsen.
  4. Vervolgens de proefstukken 24 uur bij 65 % RV/20 °C bewaren.
  5. Daarna proefstukken 21 dagen bewaren bij 45 % RV/20 °C en 3,0 % CO_2.
  6. Herhalen van de stappen 3 t/m 5 tot een ouderdom van zes maanden.

- Simulatie 50 jaar veroudering woningbouw: gedurende 6 maanden laten carbonateren bij 3,0 % CO_2 en 50 % RV. (helaas als GWW uitgevoerd.)

- Druksterkte: kubussen van 10 i.p.v. 15 cm om effect veroudering te versterken.

Stutech studiegroep 72 – Samenstellingen/druksterkte

- Drie bindmiddelen: CEM II/A-LL 52,5 N, CEM III/B 42,5 N en innovatief bindmiddel bestaande uit 25 % portlandcementklinker (CEM I 52,5 R), 31 % gemalen gegranuleerde hoogovenslak en 44 % gecalcineerde klei.
- Twee sterkteklassen: C20/25 (woningbouw) en C35/45 (GWW).

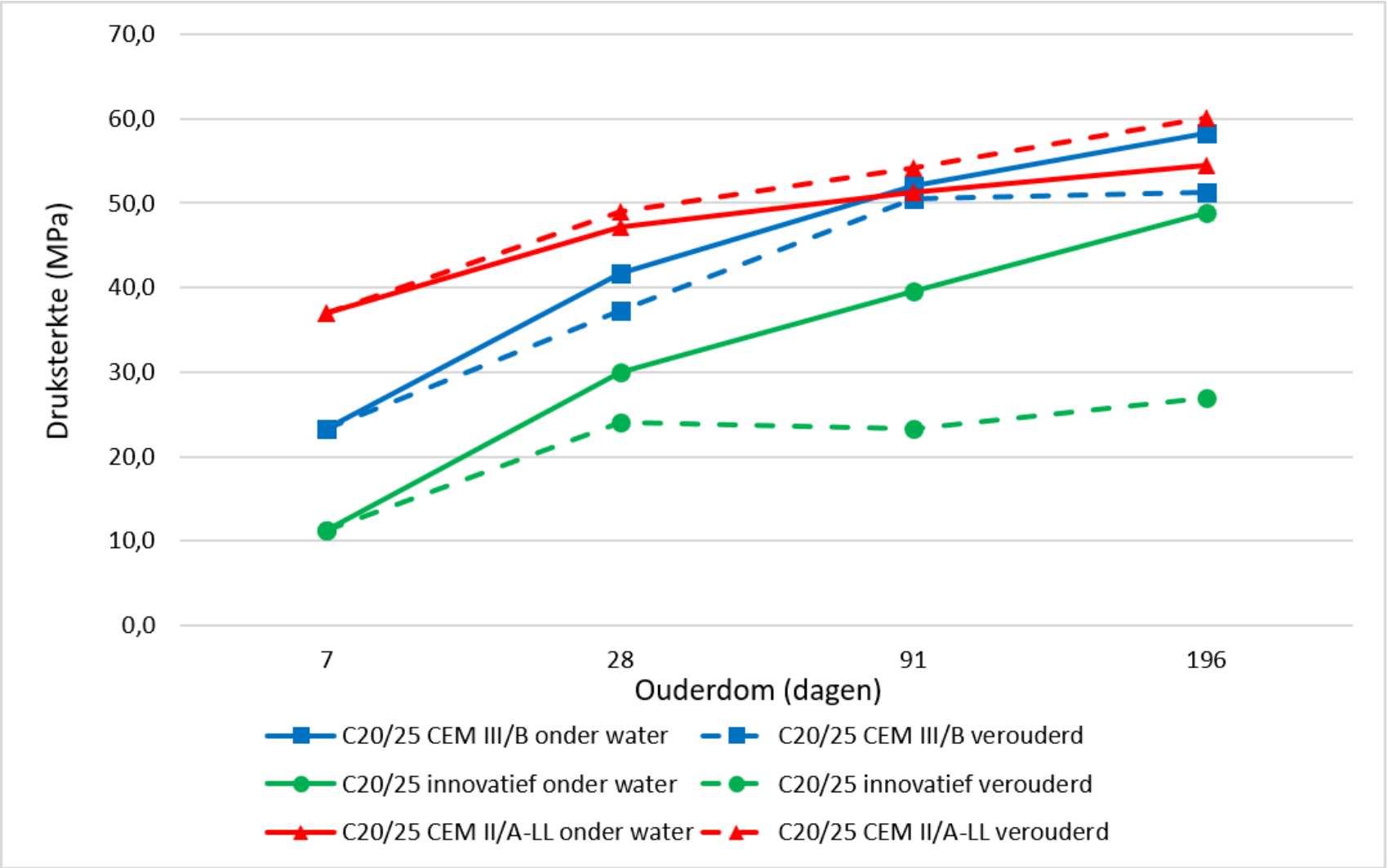
	C20/25			C35/45		
Bindmiddel	CEM II/A-LL	CEM III/B	Innovatief	CEM II/A-LL	CEM III/B	Innovatief
Water-bindmiddelfactor	0,58	0,58	0,54	0,45	0,45	0,40
Bindmiddel (kg/m^3)	310	310	310	350	350	395
Druksterkte 3d (MPa)	28,7	9,5	5,3	42,9	18,6	13,3
Druksterkte 7d (MPa)	37,0	23,2	11,2	52,5	38,1	26,8
Druksterkte 28d (MPa)	47,1	41,7	29,9	66,9	58,8	49,6
Druksterkte 91d (MPa)	51,3	52,0	39,5	72,5	62,9	66,9
Druksterkte 196d (MPa)	54,5	58,3	48,9	74,5	66,0	71,4
Doorgroei 28d- 196d (%)	15,7	39,8	63,5	11,4	12,2	44,0
MKI (€)	25,20	13,30	13,50	28,40	15,00	17,20

Stutech studiegroep 72 – Sterkte-ontwikkeling met veroudering

	C20/25			C35/45		
Bindmiddel	CEM II/A-LL	CEM III/B	Innovatief	CEM II/A-LL	CEM III/B	Innovatief
	Normale verharding onder water					
Druksterkte 7d (MPa)	37,0	23,2	11,2	52,5	38,1	26,8
Druksterkte 28d (MPa)	47,1	41,7	29,9	66,9	58,8	49,6
Druksterkte 196d (MPa)	54,5	58,3	48,9	74,5	66,0	71,4
	Verouderd					
Druksterkte 28d (MPa)	49,0	37,3	24,1	69,9	57,1	51,6
Druksterkte 91d (MPa)	54,1	50,5	23,3	73,2	63,4	50,7
Druksterkte 196d (MPa)	60,1	51,2	27,0	85,8	74,7	61,0
Doorgroei 28d- 196d (%)	22,7	37,3	12,0	22,7	30,8	18,2
Sterkte 196d verouderd tov 196d ow (%)	10,3	-12,2	-44,8	15,2	13,2	-14,6
	Carbonatatie na veroudering					
Carbonatatiediepte na 238d (mm)	9,8	20,7	37,1	4,8	12,2	23,2

- C20/25 niet verouderd in droog milieu!
- C20/25 innovatief nabehandeld tot 37 %! (C35/45 tot 54 %)

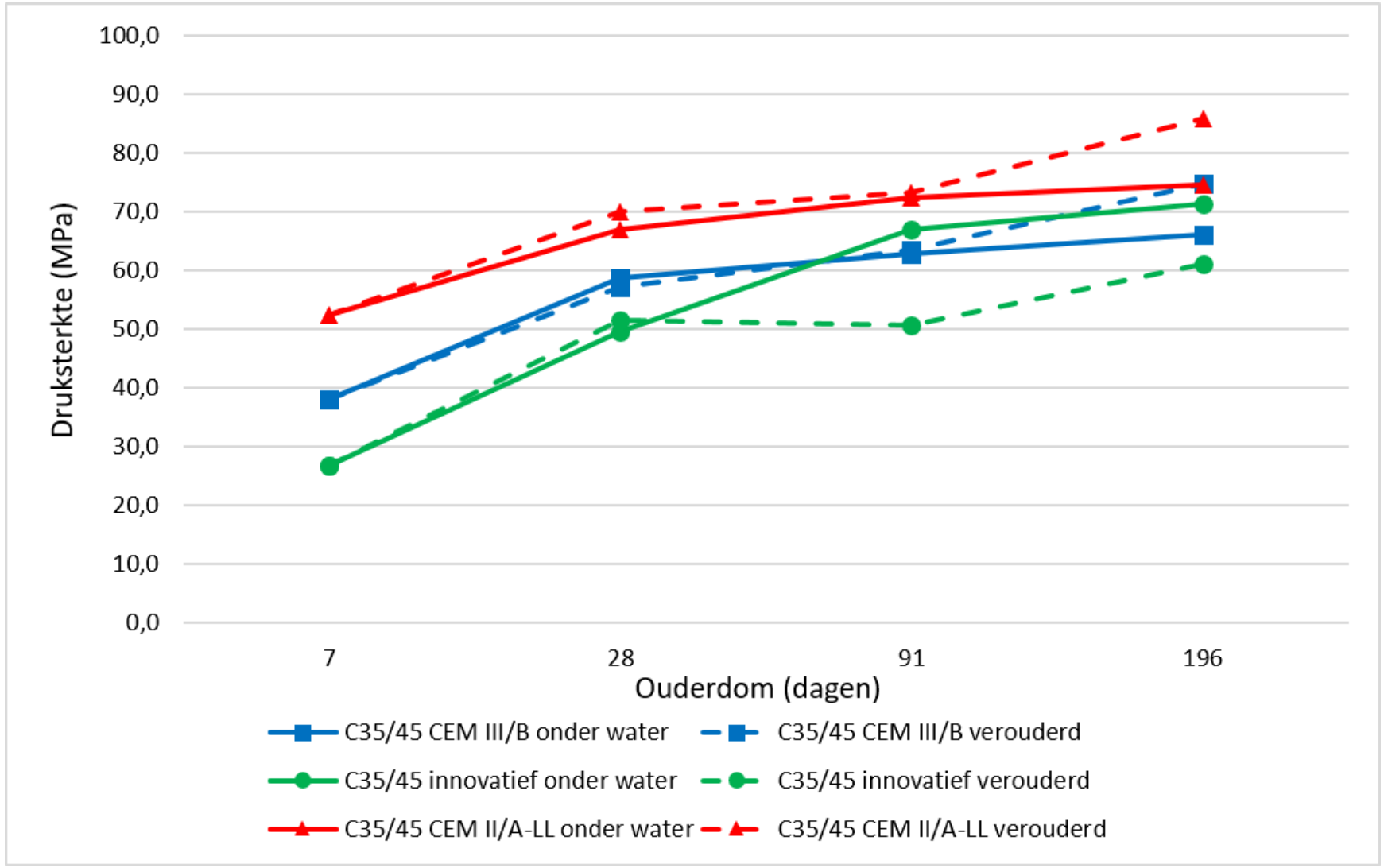
Stutech studiegroep 72 – Sterkte-ontwikkeling met veroudering



Bij innovatief mengsel effect van veroudering én onvoldoende nabehandeling!

Veroudering had in droog milieu moeten plaatsvinden.

Stutech studiegroep 72 – Sterkte-ontwikkeling met veroudering



Stutech studiegroep 72 – Chloride-indringing

	C35/45		
Bindmiddel	CEM II/A-LL	CEM III/B	Innovatief
RCM 28d (10^{-12} m^2/s)		3,1	
RCM na veroudering - 204d (10^{-12} m^2/s)	9,3	0,8	> 17,3

Stutech studiegroep 72 – Vorstdooizoutbestandheid

	C35/45		
Bindmiddel	CEM II/A-LL	CEM III/B	Innovatief
Wateropname 7d - normale verharding (% m/m)		0,61	
Wateropname 7d na veroudering (% m/m)	0,62	1,55	2,53
Afschilfering 14 cycli - normale verharding (kg/m^2)		2,5	
Afschilfering 14 cycli na veroudering (kg/m^2)	6,9	26,4	55,3
Afschilfering 28 cycli - normale verharding (kg/m^2)		3,5	
Afschilfering 28 cycli na veroudering (kg/m^2)	13,7	63,0	> 151

- De proefstukken met het innovatieve bindmiddel waren na 28 cycli volledig gedesintegreerd.

Stutech studiegroep 72 – Conclusies

- Toegepaste verouderingsmethode laat grote verschillen zien tussen verschillende bindmiddelen.
- Noodzakelijk om beton met cementen met laag klinkergehalte en innovatieve bindmiddelen te onderzoeken na veroudering.
- Vanaf een bepaald punt leidt verdere verlaging van het klinkergehalte tot verlaging van weerstand tegen diverse aantastingsmechanismen. Dit punt wordt bij puzzolanen (door hogere consumptie van $Ca(OH)_2$) eerder bereikt dan bij hoogovenslak.
- Belang van voldoende lange nabehandeling en lage water-bindmiddelfactor voor technische levensduur opnieuw bevestigd.
- Verlaging van de MKI kan leiden tot kortere technische levensduur.

Stutech studiegroep 72 – Aanbevelingen

- C20/25 niet verouderd in droog milieu. Dit onderzoek zal alsnog worden uitgevoerd.
- De normen sluiten cementen met zeer lage klinkergehaltes niet uit en CROW-CUR Aanbeveling 48 voorziet niet in veroudering. Nader onderzoek en aanpassing van regelgeving is wenselijk.
- Voor buitentoepassingen terughoudend zijn met toepassing van cementen en bindmiddelen met zeer lage klinkergehaltes. Vuistregel voor buitentoepassingen:
  - Minimaal 1 deel portlandcementklinker op 3 delen hoogovenslak (CEM III/B).
  - Minimaal 2 delen portlandcementklinker op 1 deel puzzolane vulstof.

