



Delft University of Technology

Verduurzaming tunnelgietsbouw

Beperkte aanpassing, grote impact

Schuurman, Marco; Robbemont, Arnold

Publication date

2023

Document Version

Final published version

Published in

Cement: vakblad voor de betonwereld

Citation (APA)

Schuurman, M., & Robbemont, A. (2023). Verduurzaming tunnelgietsbouw: Beperkte aanpassing, grote impact. *Cement: vakblad voor de betonwereld*, 2023(8), 44-53. <https://www.cementonline.nl/verduurzaming-tunnelgietsbouw>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Verduurzaming tunnelgietsouw

Beperkte aanpassing, grote impact



Met tunnelgietbouw kunnen snel en tegen lage kosten woningen worden gerealiseerd. Het is dan ook een veel toegepaste bouwmethodiek. Er valt potentieel veel terrein te winnen ten aanzien van milieu-impact door de betonsector.

In de tweede helft van de vorige eeuw ontstond een enorme vraag naar woningen in Nederland, als gevolg van de wederopbouw na de Tweede Wereldoorlog.

Deze vraag diende richting de jaren 70 als aanjager voor de ontwikkeling van bouwmethodieken waarmee snel en goedkoop woningen konden worden gerealiseerd: de prefab casco-bouw en de tunnelgietbouw [1]. Het is nog steeds een veel toegepaste bouwmethode om snel en tegen lage kosten een hoge productie van woningen en woongebouwen te realiseren (foto 1).

Warme en koude gietbouw

Om de kosten laag te houden wordt bij tunnelgietbouw gestreefd naar een hoge mate van repetitie en een korte uitvoeringscyclus: in 8 uur tunnelkist opbouwen en beton storten, vervolgens 16 uur uitharden. Deze korte uitvoeringscyclus werd in eerste instantie gerealiseerd met warme gietbouw, een methode waarbij de tunnel gedurende de uithardingsfase wordt verwarmd met gasbranders, en de tunnel en constructie worden geïsoleerd (foto 2). Bij dit extern verwarmen kan bijvoorbeeld een betonmengsel met hoogoven-cement worden toegepast (CEM III), wat de milieu-impact van het mengsel aanzienlijk beperkt ten opzichte van mengsels met portlandcement [2].

Warme gietbouw wordt tegenwoordig niet veel meer toegepast, omdat opslag van gastanks in verband met de (bouwplaats) veiligheid vaak wordt beperkt of zelfs helemaal verboden [2]. Als gevolg hiervan is

auteurs



**IR. MARCO
SCHUURMAN RC**

Constructeur /
Projectleider
Zonneveld ingenieurs
Docent Civiele Techniek
TU Delft



**IR. ARNOLD
ROBBEMONT RO**

Raadgevend Ingenieur /
Directeur
Zonneveld ingenieurs

tegenwoordig koude tunnelgietbouw de meest gangbare methode. Hierbij wordt een betonmengsel toegepast met een hoge initiële uithardingssnelheid, waarvoor vaak een aanzienlijk aandeel portlandcement (CEM I) benodigd is.

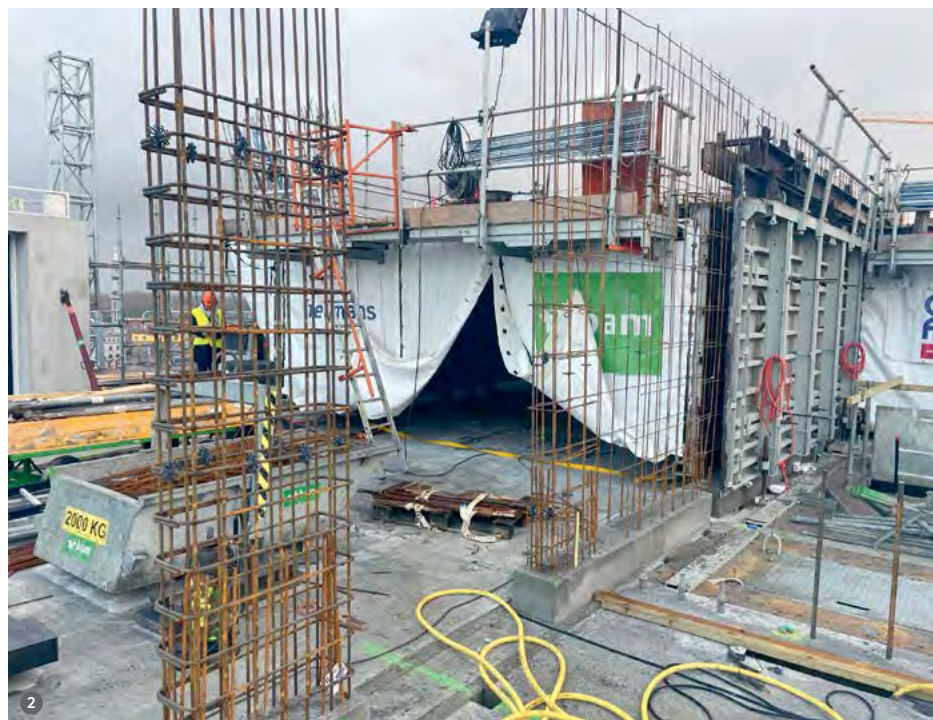
Door het slechtere milieuprofiel van CEM I ten opzichte van CEM III, staat de toepassing van koude gietbouw haaks op de duurzaamheidsambities waaraan de bouwsector zich heeft gecommitteerd.

Betonakkoord en roadmap CO₂

Klimaat en duurzaamheid zijn de afgelopen jaren belangrijke thema's geworden, maatschappijbreed en daarmee ook voor de bouwsector. Eind 2015 werd de Conference of Parties (CoP) van Parijs gehouden, waaruit het Klimaatakkoord van Parijs voortkwam. Dit klimaatakkoord is in 2020 in werking getreden. Belangrijkste uitkomst van het akkoord is het beperken van de mondiale temperatuurstijging met 1,5 °C (ambitieniveau) tot 2 °C (maximaal). Om dit te bereiken, heeft de Nederlandse politiek zich tot doel gesteld in 2030 de uitstoot van broeikasgassen met bijna de helft (49%) te reduceren ten opzichte van 1990, en een uiteindelijke reductie van 90% of meer te realiseren in 2050.

Vanwege het aanzienlijke aandeel in die uitstoot van de bouwsector in het algemeen en specifiek van de betonsector, is in 2016 het initiatief voor het Betonakkoord opgestart door het toenmalige ministerie van Infrastructuur & Milieu en MVO Nederland. Dit akkoord is in 2018 door een brede →

De invloed van ontkistingssterkte en uithardingsduur is significant



vertegenwoordiging van private en publieke partijen in de sector ondertekend. De doelstellingen ten aanzien van CO₂-reductie: minimaal 30% reductie in 2030 (ambitie 49%), 100% reductie in 2050.

Daarnaast is er ook wetgeving waar de bouwsector rekening mee moet houden. Voor woningbouw geldt sinds 2021 dat de MilieuPrestatie Gebouwen (MPG) maximaal 0,8 (€/m²/jaar) mag bedragen, een eis die in 2030 verder zal worden aangescherpt naar 0,5. Bij een aandeel van de hoofddraagcon-

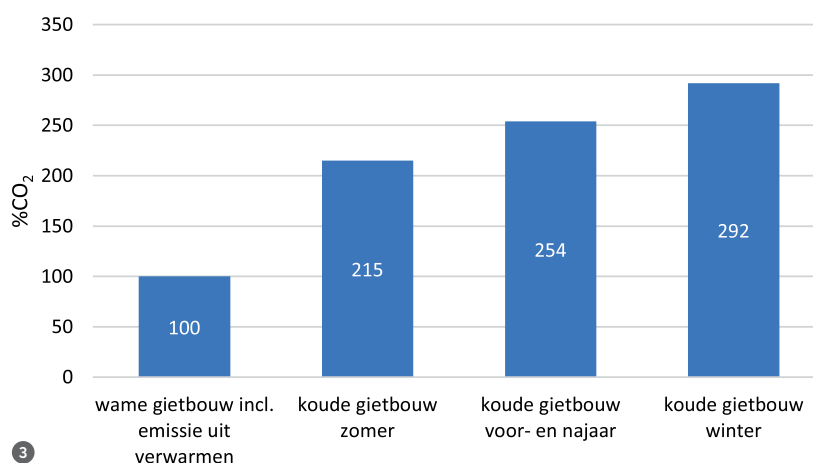
structie van 25-60% [3] op de totale MPG, wordt het belang van verduurzaming voor de betonsector de komende jaren daardoor alleen maar groter.

Milieu-impact

Onderzoeken of en hoe tunnelgietbouw kan worden verduurzaamd, is niet helemaal nieuw. In 2012 en aansluitend in 2015 zijn diverse Stufib- en Stutech-studiecellen met verduurzaming van (onder andere) tunnelgietbouw bezig geweest [4, 5]. In dit onder-

MILIEU-IMPACT WARME VERSUS KOUDE GIETBOUW

In Stufib-rapport 21/Stutech-rapport 29 [4] uit 2012 is uitgezocht wat de verschillen zijn van warme versus koude tunnelgietbouw ten aanzien van de carbon footprint, één van de leidende parameters in een MPG-berekening voor betonconstructies. Daarbij is geconcludeerd dat koude gietbouw een factor 2,15 tot bijna 3 keer meer uitstoot van CO₂ veroorzaakt dan warme gietbouw (fig. 3).



zoek is onder andere gekeken naar de invloed van de volgende parameters:

- warme versus koude gietbouw;
- ontkisten bij 10 MPa versus 14 MPa (minimale eis volgens de norm);
- ontkisten na 16 uur versus na 40 uur verharden (cyclus van één dag versus cyclus van twee dagen).

Hieruit blijkt dat koude gietbouw een hogere CO₂-uitstoot heeft dan warme gietbouw (zie kader 'Milieu-impact warme versus koude gietbouw'). Ook de invloed van ontkistingssterkte en uithardingsduur bleek significant: tot 50% minder CO₂ uitstoot en tot 40% verlaging van de MKI (MilieuKosten Indicator, in €/m³).

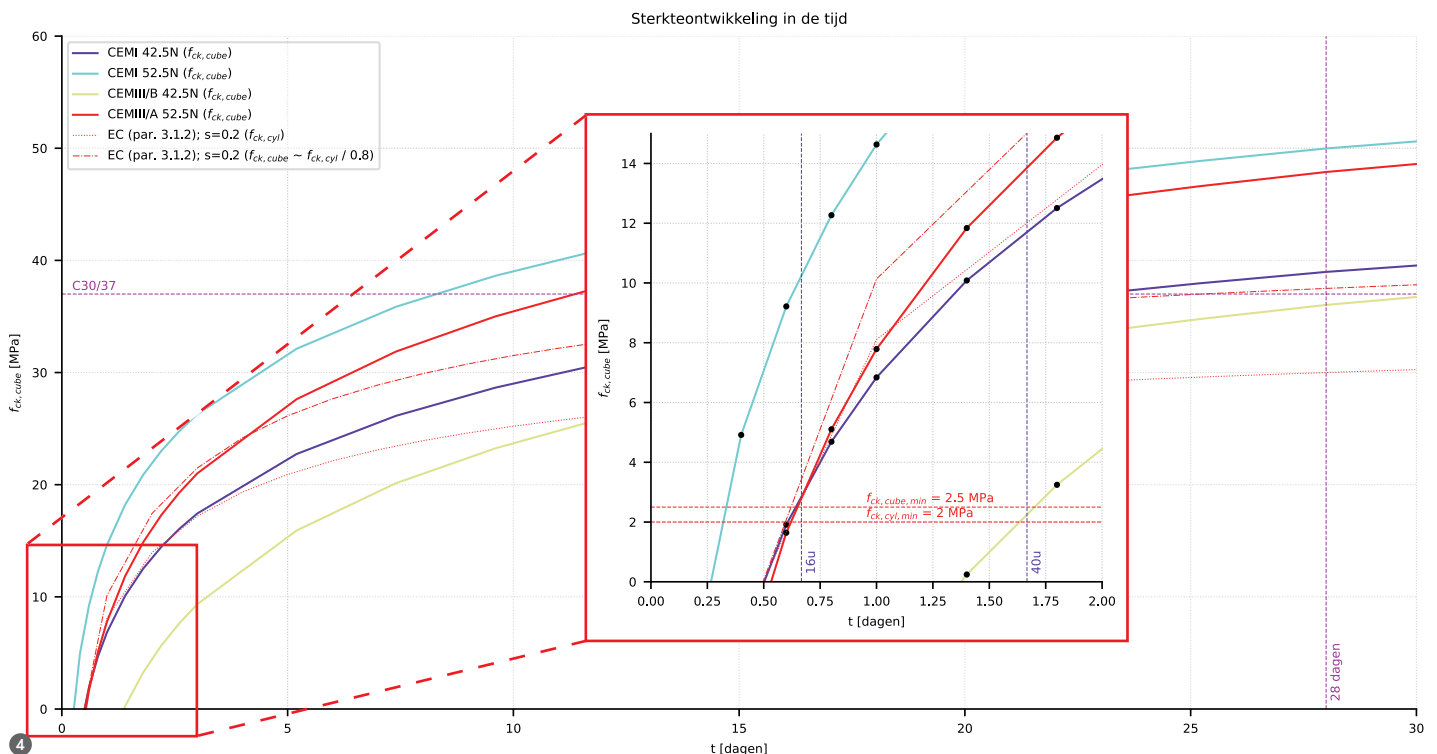
Het bleef hierbij echter beperkt tot een theoretische exercitie; praktisch werden in genoemde rapporten nog geen handvatten gegeven hoe met name de lagere ontkistingssterkte kan worden gerealiseerd. Dit is waar Zonneveld ingenieurs het afgelopen jaar mee aan de slag is gegaan. In dit artikel worden verschillende mogelijkheden aan de hand van deelonderzoeken en een casestudie behandeld.

Ontwikkeling betonsterkte

Om de mogelijkheden van verschillende betonmengsels bij koude gietbouw en de invloed daarvan op het milieuprofiel beter inzichtelijk te krijgen, is eerst de uithardingstijd van verschillende betonmengsels vlak na storten met elkaar vergeleken. Hier toe is gebruikgemaakt van de rekenregels van de Betonhuis Betonpocket (2016/2020) [6, 7] (zie kader 'Berekening kubusdruksterkte'). De verharding van de volgende mengsels is met elkaar vergeleken: CEM I 42,5 N en CEM I 52,5 N (portlandcement) versus CEM III/A 52,5 N en CEM III/B 42,5 N (hoogovencement met een aanzienlijk lagere milieu-impact) (fig. 4).

Op basis van deze grafieken kan worden geconcludeerd dat CEM III/B-mengsels – zonder verwarmen – niet zullen resulteren in een uitvoeringscyclus van een dag, aangezien het doorgaans te lang duurt voordat dergelijke mengsels beginnen te verharderen. De sterkte begint zich immers na meer dan een dag te ontwikkelen.

Een betonmengsel gebaseerd op CEM III/A daarentegen lijkt wel tot de mogelijkheden te behoren. Door het



**BEREKENING
KUBUSDRIKSTERKTE**

$f_{cm,cube(n)} = a \cdot N_n + b/wcf - c$
volgens Betonpocket 4.8.2

met:

$f_{cm,cube(n)}$ = gemiddelde kubusdruksterkte na n dagen verharding;
 N_n = normsterkte van het gebruikte cement na n dagen
 wcf = water-cementfactor = 0,5 (aanname, aandachtspunt is de verwerkbaarheid)
 $a/b/c$
volgens tabel Betonpocket:

cement	a	b	c
CEM I en CEM II/B-V	0,85	33	62
CEM III/A	0,8	25	45
CEM III/B	0,75	18	30

$f_{ck,cube} = f_{cm,cube} - 8 \text{ MPa}$
(aanname, gebaseerd op NEN-EN 1992-1-1)
 $f_{ck} = f_{ck,cube} \cdot 0,8 \text{ à } 0,85$ (afhankelijk van de betonsterkteklasse)

grotere aandeel portlandcement zal de verharding eerder starten en wordt na circa 16 uur al een kubusdruksterkte van circa 2,5 MPa gerealiseerd.

Deze sterkte is nog altijd een stuk lager dan die van CEM I 52,5N, die na 16 uur al voor een druksterkte van 10 MPa of meer zorgt. Er moeten dus aanvullende maatregelen worden getroffen om sterkte en optredende spanningen op elkaar uit te lijnen. Aan de hand van een casestudie is gekeken of en hoe de spanningen in de constructie voldoende laag gehouden kunnen worden (daarover verderop meer).

In tabel 1 en 2 is een globale vergelijking gemaakt tussen de MKI's van betonmengsels op basis van CEM I 52,5 N en CEM III/A 52,5 N.

Aan de hand hiervan kan worden geconcludeerd dat het toepassen van CEM III/A 52,5 N in plaats van CEM I 52,5 N kan resulteren in een reductie van bijna 50% op de uitstoot van broeikasgassen (GWP) en 25% op de milieukostenindicator (MKI). Het loont daarom om te zoeken naar opties in het tunnelproces om deze keuze in het betonmengsel mogelijk te maken.

Tunnelkist

Om optredende spanningen en ontwikkelde druksterkte van het beton met elkaar in overeenstemming te brengen, is gekeken hoe de inzet van tunnelkisten kan worden aangepast, zodat bij een lagere sterkte kan worden ontkist.

Bij tunnelgietsbouw worden gestandaardiseerde systemen toegepast voor de bekisting. Meest gebruikt zijn de hele tunnels, waarmee een hele beuk in één keer kan worden gestort (foto 5). Naast deze hele tunelelementen zijn er ook halve tunelelementen beschikbaar. Deze elementen kunnen worden gecombineerd met een stempelrij in het midden van de beuk (fig. 6). Het gebruik van deze stempelrij in het midden kan worden ingezet om de spanningen in met name de jonge betonvloer te beperken tot onder een acceptabel niveau.

Om de mogelijkheden van een milieuvriendelijker betonmengsel bij gebruik van een tussensteunpunt te onderzoeken, is een analyse uitgevoerd van de invloed van een tussenstempel op de optredende spanningen in het beton.

Hiertoe is bij twee verschillende beukmaten (5,4 m en 7,2 m) gekeken naar de spanningen in het beton tijdens de bouwphase, zowel zonder als met tussensteunpunt. Hierbij zijn de volgende (gelijke) randvoorwaarden aangenomen voor de verschillende varianten:

- vloerdikte $d = 280 \text{ mm}$ (een veel toegepaste dikte, ook vanwege isolatie van geluid/trillingen);
- een veranderlijke belasting van $1,0 \text{ kN/m}^2$ in de uitvoeringsfase;
- buigend moment bepaald bij een enkele, scharnierend opgelegde veldoverspanning (om de steunpuntscapaciteit in de vroege fase niet te overschatten);

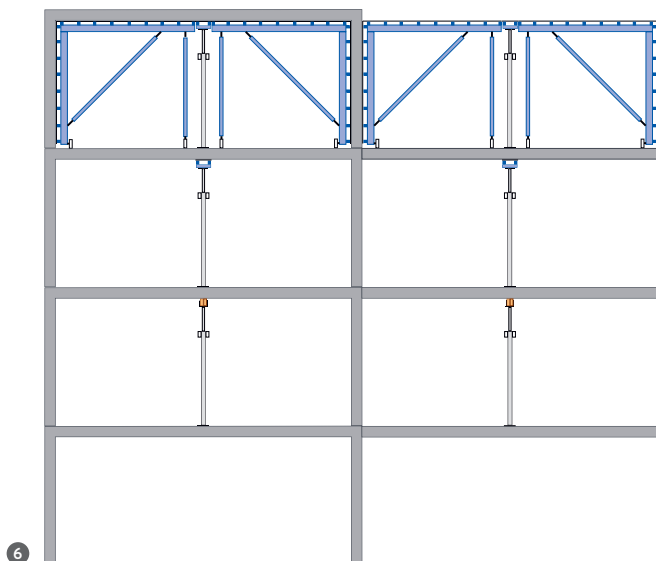
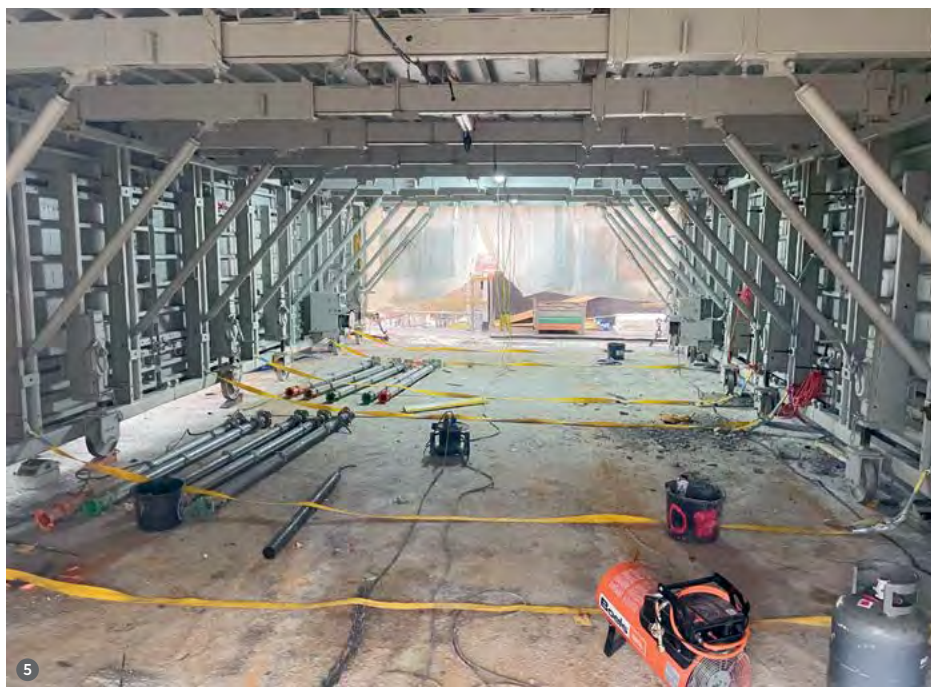
Tabel 1 Onderzochte mengselssamenstellingen

[kg/m³]	CEMI [kgCO₂/kg]		CEMIII/A [kgCO₂/kg]		CEMIII/B [kgCO₂/kg]	
cement	300	0,86	258	0,47	141	0,272
zand	780	0,004	3,12	0,004	3,12	0,004
grind	1170	0,004	4,68	0,004	4,68	0,004
water	150	0	0	0	0	0
						0 +
2400		266	149		89	kgCO₂e/m³
		0,111	0,062		0,037	kgCO₂e/kg

Tabel 2 MKI van mengels tabel 1

[kg/m³]	CEMI [€/kg]		CEMIII/A [€/kg]		CEMIII/B [€/kg]	
cement	300	€ 0,060	€ 18,12	€ 0,044	€ 13,08	€ 0,026
zand	780	€ 0,001	€ 0,55	€ 0,001	€ 0,55	€ 0,001
grind	1170	€ 0,001	€ 0,59	€ 0,001	€ 0,59	€ 0,001
water	150	0	0	0	0	0
						0 +
2400		€ 19,25	€ 14,21		€ 8,90	/m³
		€ 0,0080	€ 0,0059		€ 0,0037	/kg

Bij toepassing van een tussensteunpunt is de benodigde karakteristieke cilinderdruksterkte circa 0,7 a 1,2 MPa



→ uitgaand van een elastische verdeling van de spanningen in de betondoorsnede (geen kruip of scheurvorming);
→ invloed van de wapening op de spanningen in de doorsnede wordt verwaarloosd.

Dit resulteert in de spanningen in de doorsnede zoals weergegeven in tabel 3, ofwel een minimaal benodigde karakteristieke cilinderdruksterkte van 0,7 en 1,2 MPa, voor respectievelijk een beukmaat van 5,4 m en

7,2 m. Dit betekent dat een gemiddelde kubusdruksterkte bij ontkisten nodig is van circa 11 à 12 MPa. (van karakteristiek naar gemiddeld = +8 MPa; van cilinder naar kubus = delen door 0,80 à 0,85) Dit is aanzienlijk minder dan de minimale gemiddelde kubusdruksterkte van 14 MPa zoals voorgeschreven in NEN 8670:2021, en kan binnen 16 uur worden bereikt zoals te zien in figuur 4, óók met bijvoorbeeld een mengsel op basis van CEM III/A in plaats van CEM I. →

Al met al biedt tunnelgietbouw grote kansen voor verduurzaming van de Nederlandse betonbouw

MATEN VOOR DUURZAAMHEID

MKI - Milieukostenindicator: waarde waarmee alle milieueffecten van een materiaal worden uitgedrukt in één getal, in euro's. Deze milieueffecten worden bepaald met een LCA. GWP - Global Warming Potential: een aanduiding voor de mogelijke klimaatimpact van een broeikasgas. Klimaatimpact is een van de milieueffecten in de MKI/LCA. MPG - Milieuprestatie Gebouw: het totaal van de milieueffecten van alle materialen in een gebouw (MKI's) per m² bruto vloeroppervlakte, per jaar beoogde levensduur.

Tabel 3 Spanningen in de doorsnede bij verschillende varianten

variant	L _{beuk}	tussenstempels bouwphase	optredend moment ⁽¹⁾ (M _{Ed})	optredende spanning (σ _{el,d})	optredende spanning ⁽²⁾ (σ _{el,k})	benodigde betonsterkte (f _{ck,min})
	[m]	[-]	[kNm/m²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1A	5,4	nee	26,4	2,0	1,8	2,7
1B	5,4	ja	6,6	0,5	0,4	0,7
2A	7,2	nee	46,9	3,6	3,2	4,8
2B	7,2	ja	11,7	0,9	0,8	1,2

⁽¹⁾ moment bepaald op basis van $M = 1/10 \cdot q \cdot l^2$
⁽²⁾ ten behoeve van beoordeling risico op scheurvorming in de bouwphase

Hiermee behoort toepassing van een betonmengsel met hoogovencement en daarmee een lagere milieu-impact tot de realistische verduurzamingsopties van koude tunnelgietbouw.

Overigens is de stap van karakteristiek naar gemiddeld gebaseerd op de relatie in de Eurocode voor deze parameters. Of deze stap ook opgaat voor jong beton is de vraag [7]. Deze methodiek dient daarom bij uitvoering gevalideerd te worden, bijvoorbeeld met rijpheidsmetingen.

Aanvullende opties milieuwinst

Uiteraard speelt niet alleen het tunnelsysteem (al dan niet met tussensteun) een rol bij de krachtswerking in de jonge betonvloer, ook de breedte van de standaard beuk speelt een rol. Door bijvoorbeeld overspanningen te verkleinen, wordt de milieu-impact van de constructie verkleind. De (constructief benodigde) dikte van de vloer kan worden gereduceerd en er is minder wapening nodig. Daarentegen zijn – bij eenzelfde totale breedte van het gebouw – meer wanden nodig, wat weer een negatieve impact heeft op de milieuprestatie van de draagconstructie.

Verder speelt de hoeveelheid wapening in de wanden uiteraard een rol. Het is vrij gebruikelijk om wanden praktisch te wapenen met dubbele wapeningsnetten. Maar wat nu als hier niet meer wapening in de wanden wordt gestopt dan strikt noodzakelijk (tweede draagweg / robuustheid), en ze dus verder als praktisch ongewapend worden uitgevoerd?

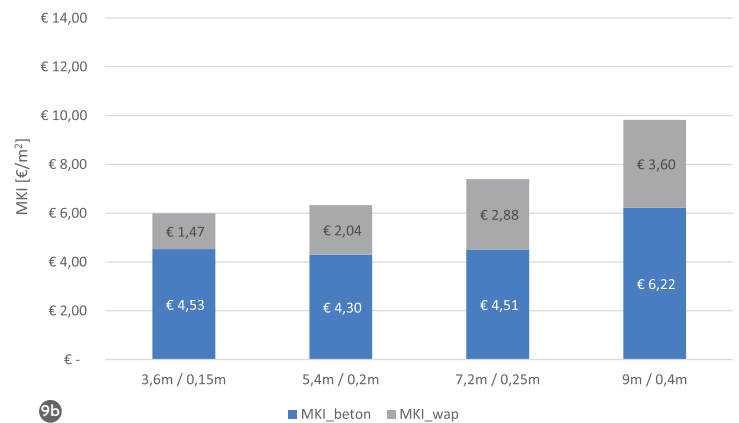
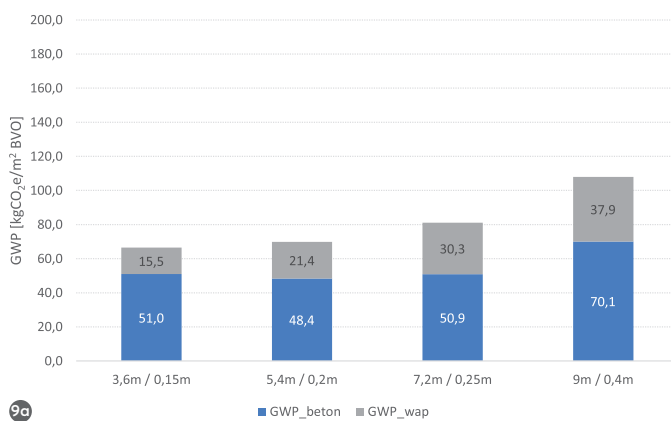
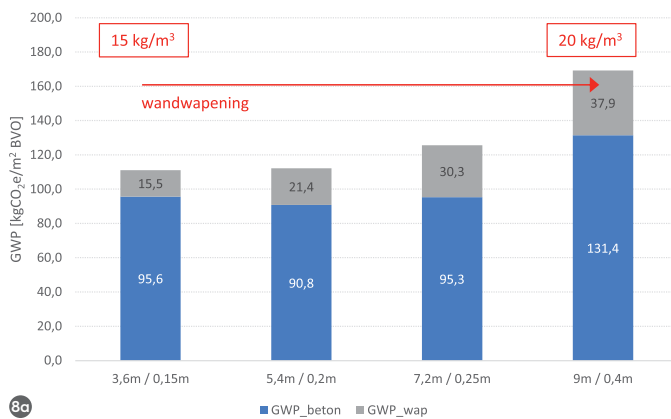
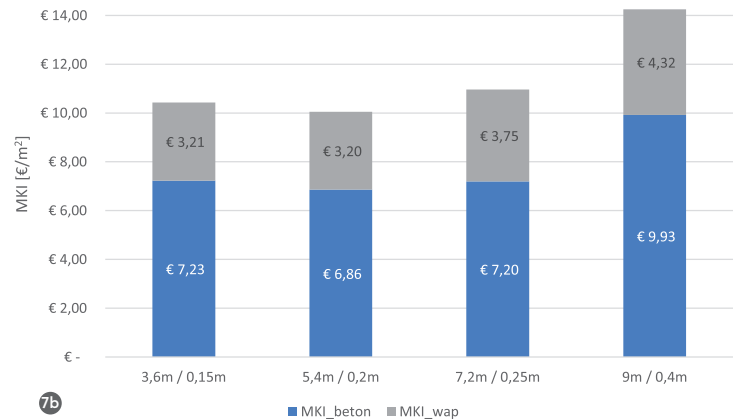
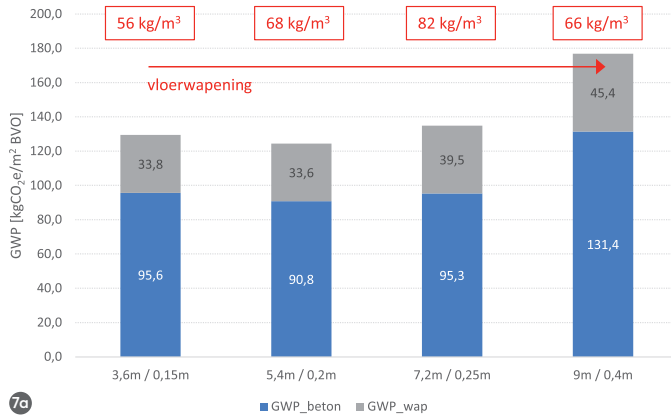
Om gevoel te krijgen bij voorgenoemde parameters op de totale milieu-impact van een tunnelcasco, zijn een aantal varianten beschouwd. Hierbij is uitgegaan van vier

verschillende beukmaten, oplopend van 3,6 m tot 9,0 m, bij een vaste totale breedte van het gebouw (dit betekent minder wanden bij een grotere beukmaat). Voor de benodigde vloerdikte en wapening is uitgegaan van wat bij deze beukmaat constructief nodig is (bouw fysische eisen buiten beschouwing gelaten). De wanddikte bedraagt in alle gevallen 250 mm.

Van de verschillende varianten is de GWP (Global Warming Potential, zie kader ‘Maten voor duurzaamheid’) en de MKI bepaald. Als eerste is hierbij uitgegaan van de minimaal benodigde wapening voor de vloeren, bij wanden met 80 kg/m³ wapening. In de tweede stap is de wapening in de wanden beperkt tot wat er minimaal nodig is. Tot slot is voor het betonmengsel CEM III/A toegepast in plaats van CEM I. De uitkomsten staan in de grafieken in figuur 7, 8 en 9.

In deze grafieken is te zien dat het beton een grotere bijdrage aan de milieu-impact van de draagconstructie heeft dan de wapening. De optimale beukmaat – vanuit het perspectief van de milieubelasting – lijkt zich tussen de 5,4 m en 7,2 m te bevinden, een mogelijke relatie met het omslagpunt waarbij stijfheid maatgevend wordt ten opzichte van de sterkte. Desalniettemin resulteert de optimalisatie van de wandwapening nog steeds in een significante verbetering van de milieuprestatie. Om dit te duiden, zijn de gecombineerde milieuprestaties van de optimalisaties naast elkaar gezet in figuur 10 (zonder onderscheid naar beton- of staal-aandeel). Geconcludeerd kan worden dat:

- een optimalisatie van het betonmengsel kan resulteren in:
- 35-40% reductie van de GWP;
- 25-30% reductie van de MKI/MPG;



→ een optimalisatie van de wandwapening kan resulteren in:

- 5-15% reductie van de GWP;
- idem voor de MKI/MPG.

Een en ander is afhankelijk van de beukmaat van de tunnel.

Bovenstaande bevindingen worden in de volgende paragraaf verwerkt in een casestudie.

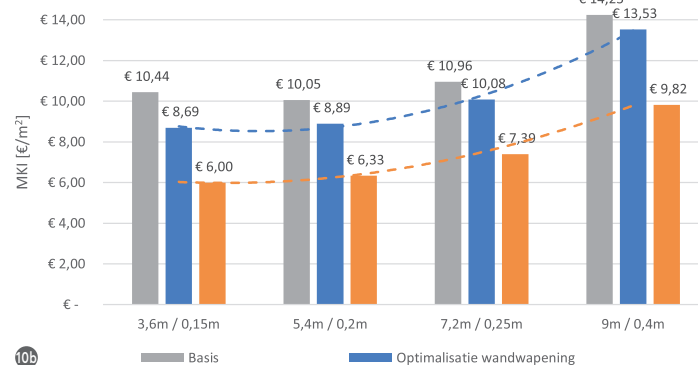
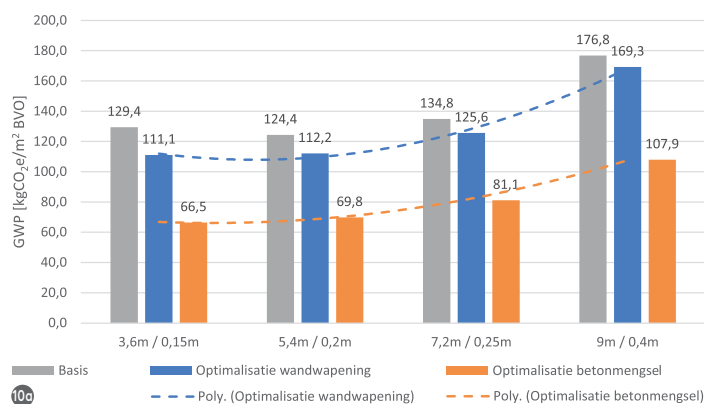
Uiteraard zijn er nog andere (betontechnologische) aspecten die invloed hebben op de uithardingsnelheid van beton. Denk bijvoorbeeld aan de water-cementfactor (wcf) en de omgevingstemperatuur. Ook hiermee kan dus de samenstelling van het betonmengsel worden geoptimaliseerd. In deze studie zijn deze parameters echter niet meegenomen.

→

7 GWP (a) en MKI (b) bij verschillende vloeroverspanningen en vloerdikten (wanden $d = 250$ mm, $A_s = 80$ kg/m³)

8 GWP (a) en MKI (b) bij ongewapende wanden (wanden $d = 250$, alleen verticale trekbandwapening)

9 GWP (a) en MKI (b) bij betonmengsel met CEM III i.p.v. CEM I



Casestudie

Om de invloed van de voorgaande factoren binnen een complete draagconstructie inclusief bijvoorbeeld de fundering te onderzoeken, is een casestudie opgezet aan de hand van een project van Zonneveld ingenieurs dat zich nog in de ontwerpfase bevindt (fig. 11).

Bij Zonneveld is een tool ontwikkeld voor het berekenen van de milieu-impact van een draagstructuur (fig. 12). Deze rekent enerzijds de uitstoot van broeikasgassen uit (GWP, Global Warming Potential) en toetst deze met behulp van de zogeheten SCO₂RS-methodiek (Structural Carbon Rating Scheme, met label A++ t/m G) van het Institute for Structural Engineers [6]. Dit is een goede maatstaf voor de milieu-impact van de draagconstructie op de korte termijn (constructiefase).

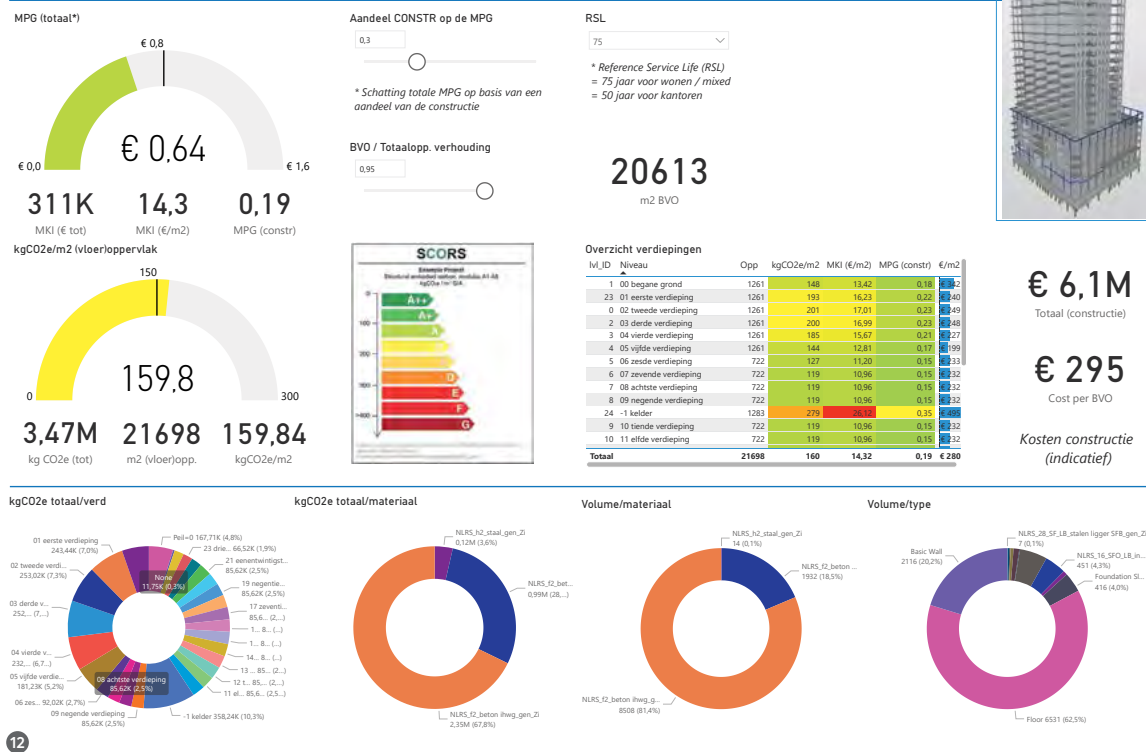
Anderzijds worden de MKI en het MPG (MilieuPrestatie Gebouwen) aandeel van de constructie door de tool berekend, waarmee de milieu-impact over meerdere impactcategorieën (denk naast broeikasgas bijvoorbeeld aan verzuring, vermist, toxiciteit, aantasting van de ozonlaag en uitputting van grondstoffen) en gedurende de hele levenscyclus kan worden beoordeeld.

Bij gebruikelijke kengetallen voor koude tunnelgietbouw resulteert dit in de volgende (indicatieve) milieu-impact voor de draagconstructie van dit gebouw:

→ GWP = 213 kg CO₂e/m² (label C - SCO₂RS methodiek) en

→ MPG = 0,23 (constructie) / 0,77 (totaal, geëxtrapoleerd).





Deze optimalisatie van het tunnelcasco in het voorbeeldproject, van een mengsel met CEM III/A 52,5 N in plaats van CEM I / 52,5 N, resulteert in de volgende milieu-impact:

- GWP = 166 kgCO₂e/m² (label B - SCO₂RS methodiek) en
- MPG = 0,20 (constructie) / 0,66 (totaal, geëxtrapoleerd), oftewel een reductie van:
- 28% op de uitstoot van broeikasgassen (GWP) en
- 15% op de MPG van de draagconstructie.

Tot slot is – naast de optimalisatie van het betonmengsel – het optimaliseren (minimaliseren) van de wandwapening nog verwerkt in de casestudie. In deze variant is ook de wandwapening geoptimaliseerd (reductie van ca. 40% wandwapening). Dit resulteert in de volgende kengetallen:

- GWP = 160 kgCO₂e/m² (label B - SCO₂RS methodiek) en
 - MPG = 0,19 (constructie) / 0,64 (totaal, geëxtrapoleerd).
- Dit komt neer op een totale reductie van:

- 33% op de uitstoot van broeikasgassen (GWP) en
- 20% op de MPG van de draagconstructie.

Conclusie

Al met al biedt tunnelgietsbouw grote kansen voor verduurzaming van de Nederlandse betonbouw. Door optimalisatie van het tunnelcasco is al een realisatie van label C (200-250 kgCO₂e/m²) naar bijna label A (< 150 kgCO₂e/m²) volgens de SCO₂RS methodiek gerealiseerd. De laatste stappen voor label A kunnen zeker gevonden worden in de verduurzaming van de funderingsconstructie.

Wel is het zaak om integraal met aannemer en betontechnoloog kritisch naar uitvoeringsproces en toegepaste betonmengsels te kijken. Dit onderzoek betreft vooral een onderzoeksrichting, in de praktijk zal moeten blijken dat dit ook echt kan worden gerealiseerd. De verwachting is dat op zeer korte termijn de eerste projecten volgens deze methodiek in uitvoering gaan. ●

LITERATUUR

- 1 Linssen, J., Differentiatie woningbouw essentieel, *Cement* 2017/1.
- 2 Warme en koude gietbouw, Betonhuis (website: <https://betonhuis.nl/betonmortel/warme-en-koude-gietbouw>).
- 3 Dutch Green Building Council, Koplopers in de utiliteitsbouw, april 2022.
- 4 Stufib rapport 21 / Stutech rapport 29, Duurzaamheid als ontwerpcriterium voor beton – toegespitst op CO₂ – Fase A: state-of-the-art, 2012.
- 5 Stufib rapport 24 / Stutech rapport 30, Duurzaamheid als ontwerpcriterium voor beton – toegespitst op CO₂ – Fase B: uitwerking basisopties, 2015.
- 6 Gibbons, O., Orr, J.J., How to calculate embodied carbon (Second edition), maart 2022.
- 7 Ruijs, M., Sterken, R., Linssen, J., Gewogen rijpheid op de bouwplaats, *Cement* 2020/2.