

RAPPORT

Keteninitiatief Computational Design

Versie: 1.0

Status: Vrijgegeven

Datum: 17-02-2023

Kenmerk: X28-R.A.-HS-RAP-
23001503

Autorisatieblad

Keteninitiatief Computational Design

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	Mieke van Eerten - Jansen	V	21-2-2023
Gecontroleerd door	Ruben van der Ende	V	22-2-2023
Vrijgegeven door	Rinske Schukken	V	24-2-2023

Versiehistorie

Versie	Naam	Datum	Korte toelichting

Samenvatting

Per 1 december 2009 is door ProRail de CO₂-prestatieladder ingevoerd, een instrument om de CO₂-uitstoot van opdrachtnemers terug te dringen en de uitstoot van de sector te verminderen. Deze ladder kenmerkt zich door treden, waarbij een hogere trede een hogere fictieve korting op de aanbestedingsprijs met zich mee brengt. Voor het behouden van trede 5 – de hoogste trede – dient Movares twee lopende keteninitiatieven te hebben op zijn belangrijkste Product-Markt-Combinaties. Dit rapport beschrijft het keteninitiatief Beton, gekoppeld aan de meest impactvolle Product-Markt-Combinatie van Movares.

Het keteninitiatief gestart door Movares – en in samenwerking met Bruil en K. Dekker – gaat over Computational Design. Allereerst leidt Computational Design tot een efficiënter ontwerpproces. Daarnaast wordt het productieproces uitgevoerd door 3D-printers en robots, waardoor bijvoorbeeld bekisting overbodig wordt en leidingenzones geïntegreerd worden. Dit maakt het productieproces duurzamer en leidt tot CO₂-reductie.

In 2021 werkte Movares aan een Computational Design ontworpen circulair viaduct voor Rijkswaterstaat, waarvan de CO₂-reductie is berekend. Tot slot is de CO₂-reductie van Computational Design ontworpen Wintrack funderingen berekend. Wel moet worden opgemerkt dat Computational Design nog in de kinderschoenen staat en alle berekeningen rusten op een aantal aannames. In 2022 werkte Movares aan Computational Design ontworpen perronkeerwanden voor ProRail en kademuuren voor Provincie Zuid-Holland, waarvan de CO₂-reductie is berekend.

Ook beschrijft het keteninitiatief het resultaat van het duurzaam adviseren van onze klanten omtrent betonnen kunstwerken.

Jaar	2021	2022	2023	2024	2025
Computational Design					
Besparing [kton CO ₂]	0,6	1,1	2,3	3,4	5,6
Besparing [%]*	0,75	1,5	3	4,5	7,5
Computational Design met 3D-betonprinten					
Besparing [kton CO ₂]	0,9	1,3	1,7	2,3	2,8
Besparing [%]**	1,25	1,75	2,25	3	3,75
Computational Design (met 3D-betonprinten)					
Besparing – totaal [kton CO ₂]	1,5	2,4	4,0	5,7	8,4
Realisatie [kton CO ₂]	3,17-3,18	7,0-26,3			
Realisatie [%]*	4,2	9,3-35,1			
Advies verduurzamen beton opdrachtgevers					
Besparing [kton CO ₂]	11	13	15	19	22,5
Besparing [%]	15	17,5	20	25	30
Realisatie [kton CO ₂]	10,7	23,4			
Realisatie [%]*	14,3	31,2			
Totaal – besparing [kton CO₂]	1,6	2,4	3,9	5,6	8,4
Totaal – realisatie [kton CO₂]	13,8	30,4-49,7			

* In de periode 2020-2025 is het marktaandeel van Movares in Kunstwerken gekoppeld aan 75 kton CO₂-emissies.

Concreet leverde het keteninitiatief Beton een 26,5% reductie op van onze totale Kunstwerken emissies (75 kton CO₂). De komende jaren wil Movares meer inzetten op Computational Design en de samenwerking met Bruil versterken omtrent Computational Design om deze innovatie verder uit te bouwen en toe te passen.

Inhoudsopgave

Samenvatting

1	Inleiding	1
1.1	Inleiding	1
1.2	Scope 3-emissies	1
1.3	Leeswijzer	1
2	Ketenanalyse Beton in de GWW-sector	2
2.1	Systeemanalyse	2
2.2	Ketenpartners	3
2.3	Scope 3-emissies	3
2.4	Lopende initiatieven	3
2.5	Invloed Movares	3
3	Keteninitiatief	4
3.1	Betonakkoord	4
3.2	Computational Design ontwerpen & 3D-printen	4
3.3	Gerealiseerde CO ₂ -reductie 2017-2021	4
3.4	Nieuwe CO ₂ -reductiedoelen 2020-2025	5
	3.4.1 Computational Design ontwerpen & 3D-printen	5
	3.4.2 Advies verduurzamen beton opdrachtgevers	6
3.5	Nieuwe initiatieven	6
	3.5.1 Proeftuin duurzame keerwanden	7
	3.5.2 Computational Design kademuren	8
	3.5.3 3D-printen van rioolwaterzuiverings-afval voor ventilatiekolommen	10
	3.5.4 Advies verduurzamen beton opdrachtgevers	11
3.6	Resultaten CO ₂ -reductie	11
4	Gebruikte bronnen	13
	Colofon	14

1 Inleiding

1.1 Inleiding

Per 1 december 2009 is door ProRail de CO₂-prestatieladder ingevoerd, een instrument om de CO₂-uitstoot van opdrachtnemers terug te dringen en de uitstoot van de sector te verminderen. Deze ladder kenmerkt zich door treden, waarbij een hogere trede een hogere fictieve korting op de aanbestedingsprijs met zich mee brengt.

Voor opdrachtnemers is de prestatieladder een extra impuls om duurzaam te ondernemen. Daarnaast biedt de ladder kansen om zich niet alleen kwalitatief te onderscheiden van concurrenten, maar ook op duurzaamheid.

De prestatieladder heeft Movares in de achterliggende jaren gestimuleerd tot het versneld doorvoeren van maatregelen om CO₂-emissies en reductieopties in kaart te brengen en om haar directe en indirecte emissies te verminderen. Een onderdeel van de eisen voor het behouden van niveau 5 is het opstellen van twee ketenanalyses van sectoren waarop Movares initiatieven en maatregelen kan nemen voor CO₂-reductie.

1.2 Scope 3-emissies

In 2020 is een analyse uitgevoerd in welke Product-Markt-Combinaties (PMC's) Movares de grootste bijdrage heeft aan de scope 3-emissies (Tabel 1).¹ Movares kiest ervoor om voor de PMC's, waarin wij de grootste bijdrage aan de scope 3-emissies hebben, een ketenanalyse uit te voeren. Dit is conform de CO₂-prestatieladder, waarin wordt aangegeven dat 1 ketenanalyse uit de bovenste 2 en 1 ketenanalyse uit de eerste 6 PMC's moet komen.

Tabel 1. Meest materiële scope 3-emissies Movares Nederland

PMC's Movares	Relatief belang van CO ₂ -belasting van de sector	Invloed van onze activiteiten op deze CO ₂ -emissies	Potentiële invloed Movares op CO ₂ -uitstoot	Rang orde	Indicatie uitstoot (kton CO ₂)
Rail, wegen en water – kunstwerken	middelgroot/groot	groot	middelgroot/groot	1	75
Rail, wegen en water – infrastructuur	middelgroot/groot	groot	klein/middelgroot	2	158
Gebouwen en energie - gebouwen	groot	groot	klein	3	7
Gebouwen en energie – installaties	groot	groot	klein	4	5
Rail – tractievoeding	klein	middelgroot	groot	5	0,5

In de GWW-sector heeft Movares – naast “Rail, wegen en water – infrastructuur” – de meeste invloed op de emissies van kunstwerken (zie tabel 1), met een geschatte emissie van 75 kton CO₂.² Uit een nadere analyse blijkt dat beton in kunstwerken een van de grootste emissies veroorzaakt. Deze ketenanalyse en de bijbehorende reductiedoelstellingen richten zich dan ook op de reductie van emissies van beton in de GWW-sector. Hierbij wordt voortgebouwd op eerdere ketenanalyses en reductiedoelstellingen omtrent de reductie van emissies van beton in de GWW-sector.

1.3 Leeswijzer

In dit document worden de ketenanalyse en de reductiedoelstellingen voor beton in kunstwerken in de GWW-sector beschreven. Dit document is een actualisatie van de ketenanalyse, zoals beschreven in Keteninitiatief Beton 2019 [Van Eerten-Jansen – 2019]. Om herhaling te voorkomen is de ketenanalyse beknopt beschreven in hoofdstuk 2. Onze reductiedoelstellingen, maatregelen en resultaten staan beschreven in hoofdstuk 3.

¹ Movares Nederland B.V. (2020), Energiemanagement actieplan 2020-2025 Movares Nederland [2020-2025]

² Movares Nederland B.V. (2017), Energiemanagement actieplan 2020-2025 Movares Nederland [2020-2025]

2 Ketenganalyse Beton in de GWW-sector

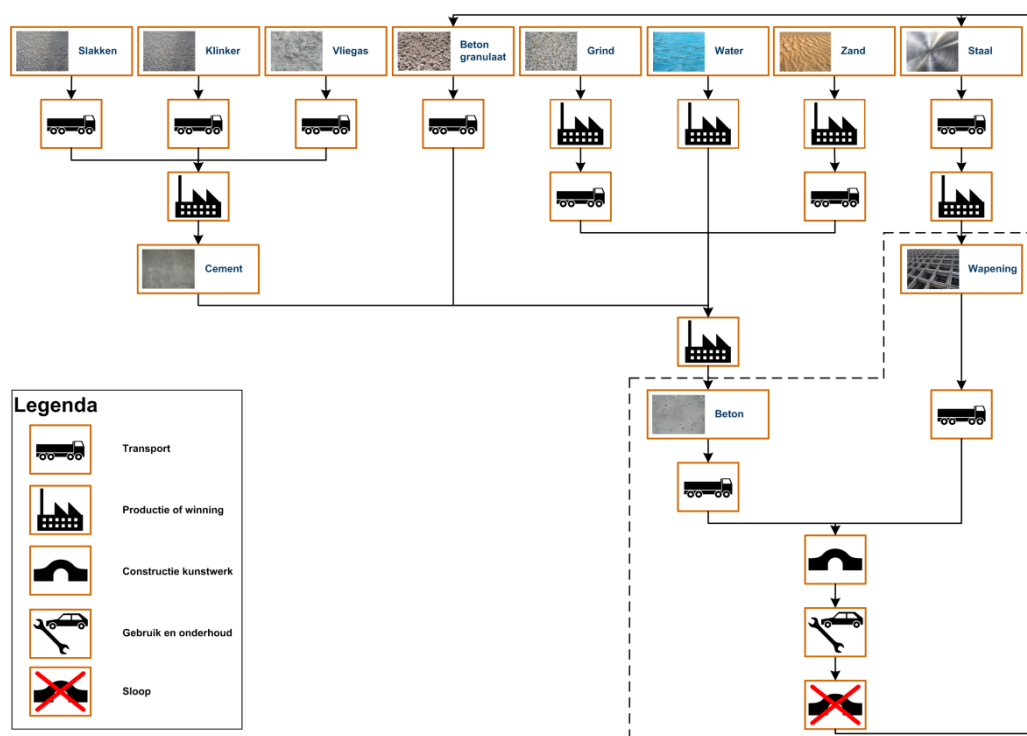
In 2017 is de keten van beton in de GWW-sector geanalyseerd, alsmede lopende initiatieven van duurzaam beton in de sector. Op basis van de analyse is toentertijd een reductiedoelstelling bepaald.³ Dit hoofdstuk bouwt voort op de eerdere ketenganalyse en bevat een analyse van de ontwikkelingen en lopende initiatieven in duurzaam beton in de GWW-sector. De analyse diende als basis voor de reductiedoelstellingen en maatregelen die Movares in 2017 heeft bepaald, zoals beschreven in hoofdstuk 3.

Dit document is een actualisatie van de ketenganalyse, zoals beschreven in Keteninitiatief Beton 2019 [Van Eerten-Jansen – 2019]. Om herhaling te voorkomen is de ketenganalyse beknopt beschreven in hoofdstuk 2. Voor de volledige ketenganalyse wordt verwezen naar voorgaand document.

2.1 Systeemanalyse

In Figuur 1 is de systeemanalyse van beton bij kunstwerken getoond. CO₂-emissies treden op bij de winning, het transport en de productie van grondstoffen en halffabricaten, en daarnaast bij de constructie van kunstwerken, het gebruik en onderhoud en bij de sloopfase. Het beton wordt vermalen en hergebruikt als betongranulaat voor de productie van beton.

Materialen als staal, gips, vliegas en hoogovenslakken kennen allemaal daarnaast nog een eigen CO₂-emissie tijdens de productie.



Figuur 1. Systeemanalyse beton bij kunstwerken

³ Movares Nederland B.V. (2017), Energiemanagement en CO₂-reductieplan Movares Nederland - Doelstellingen en maatregelen scope 1, 2 en 3 [2017-2021]

2.2 Ketenpartners

De winning van grondstoffen, het produceren van halffabricaten en de productie van beton zijn processen waarop Movares geen invloed heeft. Deze processen worden beheerst door betonproducenten en grondstoffenleveranciers.

Movares heeft vooral een rol in het ontwerp van het kunstwerk (en daarbij in bijvoorbeeld materiaalhoeveelheden en materiaalkeuze), en adviseert daarnaast over de keuze van het type beton, de onderhouds- en gebruiksfase en de sloopfase. Adviezen worden zowel aan aannemers als aan provincies, gemeenten, Rijkswaterstaat en ProRail verstrekt.

Samengevat is de rol van Movares op het verduurzamen van beton als product beperkt. De invloed van Movares zit veel meer in een optimalisatie van het ontwerp (optimalisatie op materiaalkeuze en zo min mogelijk beton) en adviezen rond hergebruik en toepassing van duurzamere betonsoorten.

2.3 Scope 3-emissies

CO₂-emissies gekoppeld aan beton staan uitgebreid beschreven in Keteninitiatief Beton 2019 [Van Eerten-Jansen – 2019]. Voor het keteninitiatief wordt gefocust op de bijdrage van beton aan het betonnen kunstwerk. Beton levert namelijk de grootste bijdrage aan de emissies, waarbij geldt dat 85 tot 95 procent van de emissies van het betonmengsel op het conto van cement zijn te schrijven [Bijleveld – 2013; Knipscheer].

2.4 Lopende initiatieven

Er loopt een groot aantal initiatieven om de CO₂-emissies van beton te reduceren. Een (niet-uitputtende) opsomming over verduurzaming van beton is opgenomen in Keteninitiatief Beton 2019 [Van Eerten-Jansen – 2019].

Naast verduurzaming van beton, is het mogelijk om de CO₂-uitstoot door de betonindustrie te verlagen door 'Carbon Capture and Storage'-technieken: het afvangen en opslaan van CO₂ die tijdens de productie van cement vrij komt. Hiermee kan tot wel 100% CO₂-uitstoot worden afgevangen en opgeslagen [Favier – 2018, paragraaf 5.2], echter, de investeringen zijn nog groot en de processen kosten nog veel extra energie – wat de kostprijs van cement opdrijft en implementatie vertraagt.

2.5 Invloed Movares

De invloed van Movares op het reduceren van de CO₂-uitstoot door betongebruik staat uitgebreid beschreven in Keteninitiatief Beton 2019 [Van Eerten-Jansen – 2019] en Energiemanagement Actieplan 2020-2025 [Van Eerten-Jansen – 2020]. Hier zijn in het afgelopen jaar geen wijzigingen opgetreden.

3 Keteninitiatief

3.1 Betonakkoord

Het Betonakkoord is een samenwerkingsverband van publieke en private partijen van overheid tot betonleverancier. Het Betonakkoord heeft als doel de betonketen verder te verduurzamen en er als keten sterker uit te komen: een transitie naar een betonsector met gezonde, toekomstbestendige verdienmodellen met een positieve maatschappelijke impact. Speerpunten zijn: CO₂-reductie, circulariteit, natuurlijk kapitaal en sociaal kapitaal.

De doelstelling van het Betonakkoord op CO₂-reductie is als volgt verwoord: een vermindering van de CO₂-uitstoot in de betonketen met 30% in 2030 t.o.v. 1990 als ondergrens, te behalen in de keten, met daarbij een inspanning gericht op de nationale CO₂-reductie ambitie van 49% uit het regeerakkoord Rutte III (2017).

Movares heeft in 2018, als enige ingenieurbureau, het Betonakkoord ondertekend om initiatieven te ontplooiën om voor het betongebruik in Nederland verdere CO₂-reductie te bereiken.

3.2 Computational Design ontwerpen & 3D-printen

Movares is koploper op het gebied van 'Computational Design' ontwerpen. Dit houdt in dat ontwerpprocessen niet meer plaatsvinden op de schetsrol, maar worden geprogrammeerd én uitgevoerd door de computer. Dat leidt tot efficiënter materiaalgebruik. Immers, de computer berekent exact waar materiaal wel en niet nodig is. Beton is een uitermate geschikt product als uitgangspunt in Computational Design ontwerpen. De techniek van 3D-printen maakt het mogelijk om de ontworpen vormen ook daadwerkelijk te realiseren.

Allereerst leidt Computational Design ontwerpen tot een efficiënter ontwerpproces. Daarnaast wordt het productieproces uitgevoerd door 3D-printers en robots, waardoor bijvoorbeeld bekisting en wapening overbodig wordt en leidingenzones geïntegreerd worden. Dit maakt het productieproces duurzamer en leidt tot CO₂-reductie. De grootste duurzaamheidswinst zit in het besparen op de hoeveelheid materiaal die benodigd is.

Movares werkt sinds 2017 aan dit keteninitiatief. Oorspronkelijk startte de samenwerking met Bruil. Bruil heeft een 3D-betonprint fabriek en innoveert met duurzame betonprintmengsels. Movares ontwerpt en berekent de constructieve kwaliteit. Momenteel is het keteninitiatief uitgebreid met ketenpartners StudioRAP (digitaal ontwerpen voor robotische productie), Dywidag (expert in wapening van betonconstructies) en K. Dekker Bouw & Infra (aannemer). Het keteninitiatief omvat nu dus ketenpartners van tekentafel tot realisatie.

3.3 Gerealiseerde CO₂-reductie 2017-2021

Movares heeft al verschillende Computational Design-projecten uitgevoerd en daarmee de nodige CO₂-reductie bereikt. We focusten in onze aanpak op het toepassen van Computational Design in onze beton-ontwerpen, maar ook over het toepassen van Computational Design met 3D-betonprinten. Tabel 2 en Tabel 3 tonen de gerealiseerde CO₂-reductie in de voorgaande periode 2017-2021.

Concreet leverden de keteninitiatieven een 18,5% reductie op van onze totale Kunstwerken emissies (75 kton CO₂, Tabel 2).

Tabel 2. Totale CO₂-reductie van alle keteninitiatieven Beton.

Jaar	2017	2018	2019	2020	2021
Besparing – Computational Design [kton CO ₂]	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0
Realisatie – Computational Design [kton CO ₂]	0	0	0,21	0,21-0,22*	3,17-3,18*
Besparing – Beton-projecten [kton CO ₂]	0,2	0,5	0,8	1,0	11**
Realisatie – Beton-projecten [kton CO ₂]	2,2	1,0	1,3	2,4	10,7
Realisatie – Totaal [kton CO₂]	2,2	1,0	1,5	2,6	13,9
Realisatie t.o.v. totale Kunstwerken emissies (%)*	2,8%	1,3%	1,9%	3,5%	18,5%

* In de periode 2017-2020 was het marktaandeel van Movares in Kunstwerken gekoppeld aan 80 kton CO₂-emissies. In de periode 2020-2025 is het marktaandeel van Movares in Kunstwerken gekoppeld aan 75 kton CO₂-emissies.

** Zie paragraaf 3.4 voor de nieuwe reductiedoelstellingen 2020-2025. Deze reductiedoelen zijn nu in lijn met het Klimaatakkoord: 49% CO₂-reductie t.o.v. 1990 in 2030

Tabel 3. Initiatieven waarin Computational Design gekoppeld is aan 3D-printen en de hoeveelheid CO₂-reductie die daarmee is gemoeid.

Initiatief	Jaar	CO ₂ -reductie (ton CO ₂ -eq)	Reductie t.o.v. referentie (%)
3D-geprinte gevelpanelen flat Baskeweg te Den Helder	2019-2020	207	76%
3D-geprinte woning	2020	-1,5* tot 15,1	-3% tot 31%
SBIR-uitvraag Rijkswaterstaat Computational Design ontworpen Circulair Viaduct	2021	57 (in toekomst 93 ton mogelijk)	24% (in toekomst mogelijk 42%)
Computational Design geoptimaliseerde wapening voor funderingen Wintrack-masten TenneT	2021	2900	18,2%

* Afhankelijk van het printbeton mengsel dat wordt gekozen bij de Computational Design woningen wordt er netto CO₂ uitgestoten of CO₂ gereduceerd.

3.4 Nieuwe CO₂-reductiedoelen 2020-2025

De CO₂-reductiedoelstellingen van dit keteninitiatief Beton liepen in 2020 af. Voor de periode 2020-2025 zijn daarom nieuwe CO₂-reductiedoelstellingen geformuleerd.

3.4.1 Computational Design ontwerpen & 3D-printen

Digitale Transformatie en IT – en daarmee gekoppeld Computational Design – is één van zes strategische thema's waar Movares komende jaren extra op inzet. Voor Computational Design betekent het dat in 2025 50% van onze betonprojecten middels Computational Design zijn ontworpen en dat dit resulteert in gemiddeld 15% CO₂-besparing. In 2025 verwachten we zo 5,6 kton CO₂ te besparen (Tabel 4).

Computational Design – in combinatie met 3D-printen van beton – zit nog steeds in een ontwikkelstadium en wordt nog niet grootschalig toegepast. Op basis van Computational Design projecten in het verleden weten we dat:

- Computational Design projecten ong. 10% bijdragen aan onze CO₂-reductie van beton-projecten (Tabel 2)
- Computational Design kan resulteren in een netto CO₂-uitstoot (project 'Circulair Viaduct Rijkswaterstaat')⁴ tot wel 76% reductie in CO₂-uitstoot (project '3D-geprinte gevelpanelen flat Den Helder')⁵, maar zit gemiddeld rond 25% reductie in CO₂-uitstoot

⁴ Zoals beschreven in paragraaf 3.2.2 in dit Keteninitiatief Beton 2021

⁵ Beschreven in "Keteninitiatief Beton 2020", [Certificaten en rapportages - Ingenieursbureau Movares - adviseurs en ingenieurs](#)

Omdat Computational Design (nog) niet in constructieve objecten wordt toegepast, is de verwachting dat het in ong. 15% van onze projecten kan worden toegepast. Daarom is onze doelstelling ten aanzien van Computational Design:

- In 2025 Computational Design ontwerpen toepassen in 15% van onze projecten met beton.
- In deze projecten een besparing van minimaal 25% CO₂ realiseren door het verminderen van het gebruik van beton.

Dit komt naar verwachting neer op een besparing van 2,8 kiloton CO₂.

De komende jaren wordt er naar bovenstaande doelstelling toegewerkt, met de volgende CO₂-reductie per jaar, zie Tabel 4.

Tabel 4. Reductiedoelstelling Computational Design.

Jaar	2021	2022	2023	2024	2025
Computational Design					
Besparing [kton CO ₂]	0,6	1,1	2,3	3,4	5,6
Besparing [%]*	0,75	1,5	3	4,5	7,5
Computational Design met 3D-betonprinten					
Besparing [kton CO ₂]	0,9	1,3	1,7	2,3	2,8
Besparing [%]**	1,25	1,75	2,25	3	3,75
Totaal	1,6	2,4	3,9	5,6	8,4

* In 2021 wordt Computational Design in 5% van de projecten met beton toegepast (oplopend naar 10-20-30-50% van de projecten in de jaren erna) – Movares heeft invloed op 75 kton CO₂-uitstoot van Product-Markt-Combinatie “Kunstwerken”, waarbij in elk project 15% CO₂-reductie wordt nagestreefd.

** In 2021 wordt Computational Design in combinatie met 3D-betonprinten in 5% van de projecten met beton toegepast (oplopend naar 7-9-12-15% van de projecten in de jaren erna) – Movares heeft invloed op 75 kton CO₂-uitstoot van Product-Markt-Combinatie “Kunstwerken”, waarbij in elk project 25% CO₂-reductie wordt nagestreefd.

3.4.2 Advies verduurzamen beton opdrachtgevers

Movares heeft als adviseur en constructeur invloed op het ontwerp van betonnen kunstwerken (zie ook paragraaf 2.5), waarbij Movares invloed heeft op ongeveer 75 kton CO₂ in de Product-Markt-Combinatie “Kunstwerken” [Van Eerten-Jansen – 2020]. Vanuit de overheidsdoelen die een CO₂-reductie van 50% in 2030 stelt en 95% in 2050 (t.o.v. 1990), dient Movares in 2025 een minimaal reductiedoel van 30% te bereiken om de nationale doelstellingen van 2030 te kunnen bereiken. Dit betekent voor de jaren 2021-2025 een potentiële CO₂-reductie zoals geformuleerd in Tabel 5.

Tabel 5. CO₂-reductiedoelstelling adviezen betonnen kunstwerken.

Jaar	2021	2022	2023	2024	2025
Besparing [kton CO ₂]	11	13	15	19	22,5
Besparing [%]	15	17,5	20	25	30

Een groot deel van onze projecten zijn integrale projecten, waarbij betonnen kunstwerken onderdeel zijn van een groter geheel (ook andere niet-beton objecten). Tot 2020 rekenden we voor deze integrale projecten dat beton verantwoordelijk was voor 15% van de CO₂-reductie. Echter, op basis van CO₂-reductie-berekeningen van projecten uit het verleden, blijkt dat betonnen kunstwerken eerder voor 1/3^e van de behaalde CO₂-reductie verantwoordelijk zijn⁶. Daarom rekenen we vanaf 2021 dat van de CO₂-reductie van integrale projecten 30% CO₂-reductie toegeschreven kan worden aan betonnen kunstwerken.

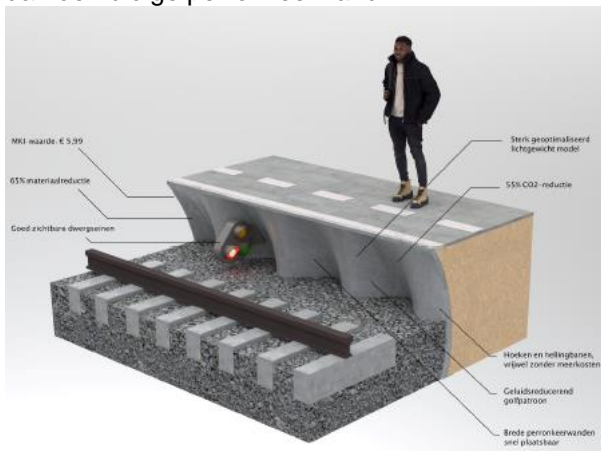
3.5 Nieuwe initiatieven

In 2022 zijn nieuwe initiatieven met Computational Design ontwerpen in combinatie met 3D-betonprinten gestart. We lichten ze hieronder toe, inclusief potentiële CO₂-reductie.

⁶ PHS Amsterdam, MKI-berekening 2020, waarbij Kunstwerken verantwoordelijk waren voor 34,8% van de CO₂-uitstoot

3.5.1 Proeftuin duurzame keerwanden

ProRail heeft in 2022 een Proeftuin Duurzame Keerwanden aanbesteed, waarin marktpartijen werden uitgedaagd om met een innovatieve keerwand te komen met veel lagere CO₂-uitstoot en MKI-waarde dan de huidige perronkeerwand.



Figuur 2. Computational Design 3D-geprinte perronkeerwand (concept-ontwerp).

Onze Computational Design ontworpen 3D-geprinte perronkeerwand zorgt ten opzichte van een traditionele perronkeerwand voor 55% CO₂-reductie (van 139 kg naar 62,2 kg CO₂/m¹; Figuur 3). Een perron van ProRail heeft ten minste een lengte van 90 meter tot maximaal 340 meter en een overzicht van de perronlengtes in het ProRail-areaal staat weergegeven in [Netverklaring 2022 Definitief \(prorail.nl\)](#) – bijlage 19. De CO₂-reductie van deze innovatie voor één perron is minimaal 6,9 ton CO₂-reductie en maximaal 26,1 ton CO₂-reductie.⁷ Voor het gehele ProRail-areaal zou de CO₂-reductie vele malen groter zijn.

De belangrijkste besparingen op een rij:

			Milieuwinst in percentages
	Traditionele keerwand model 1980	Geprinte keerwand, model 130	
Gewicht per m1	870 kg	299 kg	65%
MKI per m1	€ 14,95	€ 5,99	60%
CO ₂ -reductie per m1	139 kg CO₂	62,2 kg CO₂	55%

Figuur 3. Milieuwinst van een Computational Design ontworpen 3D-geprinte perronkeerwand ten opzichte van een traditionele perronkeerwand.⁸

We zijn als inzending geselecteerd voor de testfase. De testfase houdt in dat er eerst bezwijktesten worden uitgevoerd. Wanneer deze succesvol worden doorlopen, wacht een 2-jarige pilot waarbij een

⁷ De CO₂-reductie van deze innovatie voor één perron is minimaal 90 x (139 – 62,2) = 6.912 kg CO₂-reductie en maximaal 340 x (139 – 62,2) = 26.112 kg CO₂-reductie.

⁸ [Onderzoeksfase Proeftuin duurzame keerwanden met bijlagen 180222 def..pdf](#)

proefstuk van 5 meter in een perron in station Amersfoort wordt geplaatst. Daarna volgt bij succes de commerciële fase.

Helaas bleek tijdens de testfase dat we als consortium niet op tijd voldoende proefstukken konden produceren voor de pilot in Amersfoort, dus de ontwikkeling is voor ons gestopt bij de bezwijktesten. De opgedane lessen nemen we mee in de doorontwikkeling van Computational Design ontworpen producten.

3.5.2 Computational Design kademuren

Movares en K. Dekker passen het ontwerpprincipe van Computational Design toe op kademuren voor Provincie Zuid-Holland. Provincie Zuid-Holland staat namelijk open voor een pilot met 3D-geprinte kademuren in delen van hun areaal.

Movares heeft meerdere kademuur-ontwerpen gemaakt die (deels via) Computational Design zijn ontworpen.⁹ Figuur 4 toont de ontwerpvarianten: de bovenste tekening toont de huidige kademuur en zijn specificaties (referentieontwerp); middenlinks is ontwerpvariant 1a welke dezelfde vorm heeft als het referentie-ontwerp en deels via Computational Design is ontworpen; middenrechts is ontwerpvariant 1b waarbij het onderste deel van de kademuur al in materiaal is gereduceerd en deels via Computational Design is ontworpen; tenslotte, onderlinks is ontwerpvariant 2 welke volledig via Computational Design is ontworpen en met 3D-printen kan worden gereduceerd. Daarnaast is er een variant ontwikkeld waarin het referentieontwerp gemaakt is met 3D-printen (3D-massief).

De ontwerpen verschillen met name in de gebruikte hoeveelheden beton (Tabel 6) en daarmee hun gewicht per strekkende meter. Dat laatste zorgt weer voor een lager brandstofverbruik in transport (fase A4 en C2) en uitvoering (fase A5 en C1), maar omdat dat moeilijk te kwantificeren is, is dat buiten beschouwing gelaten. Daarnaast verschilt het referentie-ontwerp van de 3D-geprinte elementen (opties 1a, 1b en 2) in het gebruikte betonmortel/betonprintmengsel. Alle uitgangspunten staan beschreven in

Tabel 7.

Tabel 6. Hoeveelheden beton gebruikt in de kademuur-ontwerpen.

Optie	Volume [m ³ /m]
Referentie-element (en 3D-massief)	0,31
Optie 1a	0,243
Optie 1b	0,227
Optie 2	0,152

Figuur 4. Ontwerpvarianten waarin kademuren (deels via) Computational Design zijn ontworpen.

⁹ <https://movares.sharepoint.com/:w:/r/teams/Kademuurgeprintebetonelementen/Gedeelde%20documenten/General/B95-MS-HS-ADV-22000852.docx?d=w726e56affb9b4e259c7e29646d92a000&csf=1&web=1&e=ZFzWf6>, 12 september 2022

Tabel 7. Gehanteerde uitgangspunten in de MKI/CO₂-reductieberekening (bronnen staan onderaan de tabel).

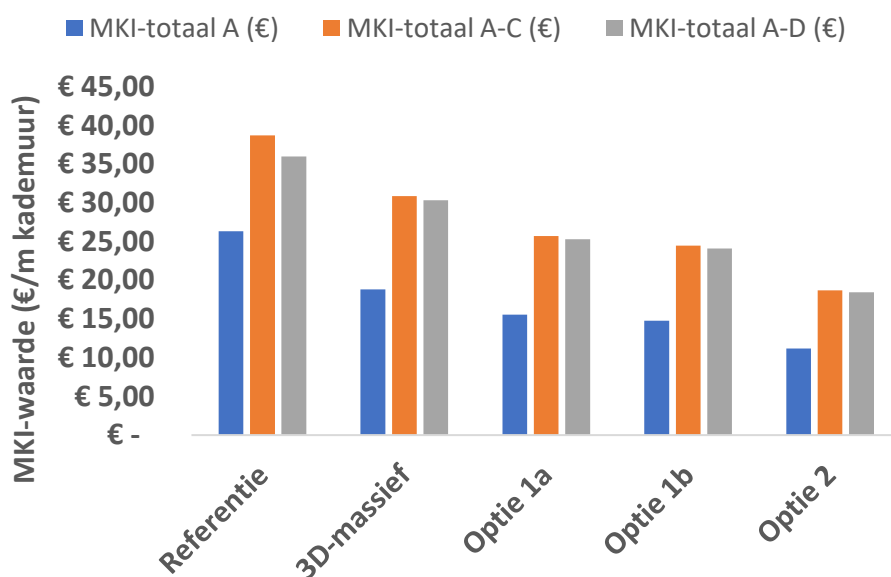
MKI-fase	Uitgangspunt	Referentie-ontwerp	Computational Design ontwerp
A1-A3	MKI-waarde beton(print)mengsel (€/m ³)	18,15 ^a	20,30 ^b
A1-A3	Wapeningsstaal	45,5 kg/m ³ ^c	n.v.t. ^c
A1-A3	Houten systeembekisting	2,8 m ² /m ^c	n.v.t. ^c
A1-A3	Trilnaad	0,477 kWh/m ^d	n.v.t. ^c
A4/C2	Transport	EURO6 32t vrachtauto diesel; 10 elementen per rit; element is 2,4 m lang; aanname transportafstand: 50 km ^c	
A5/C1	Hijskraan	6 elementen per dag (elementen van 2,4m); 50% van de tijd (8u) aan het draaien ^c	
B	Beheer & Onderhoud	n.v.t. ^c	
C2 (aanvullend)		o.b.v. 99% recycling en 1% stort, waarbij afstand sorteerlocatie = 50km en afstand stort nog aanvullende 50km (dus 100km totaal) ^d	
C3	Afvalverwerking	o.b.v. breken van beton (proces in NMD) ^d	
		Dichtheid 2387 kg/m ³ (conform betonmortel A1-A3) ^a	Dichtheid 2300 kg/m ³ (conform betonmortel A1-A3) ^b
C4	Finale afvalverwerking	o.b.v. 1% stort ^d	

^a DuboCalc v6.0 "Betonmortel voor GWW C4555 CEM III 2387 kgm3 compleet"

^b Bruil

^c Expert judgement: Gerard Krooshoop

^d NMD: Ongetoetst LCA rapport voor betonmortel (2019; SGS in opdracht van RWS)



Figuur 5. MKI-reductie van (deels) Computational Design ontworpen kademuur-elementen.

Tabel 8. Reductie MKI-waarde (%) van (deels) Computational Design ontworpen kademuur-elementen.

Reductie MKI-waarde t.o.v. referentie-ontwerp (%)				
	3D-massief	Optie 1a	Optie 1b	Optie 2
MKI-totaal A (€)	29%	41%	44%	58%
MKI-totaal A-C (€)	20%	34%	37%	52%
MKI-totaal A-D (€)	16%	30%	33%	49%

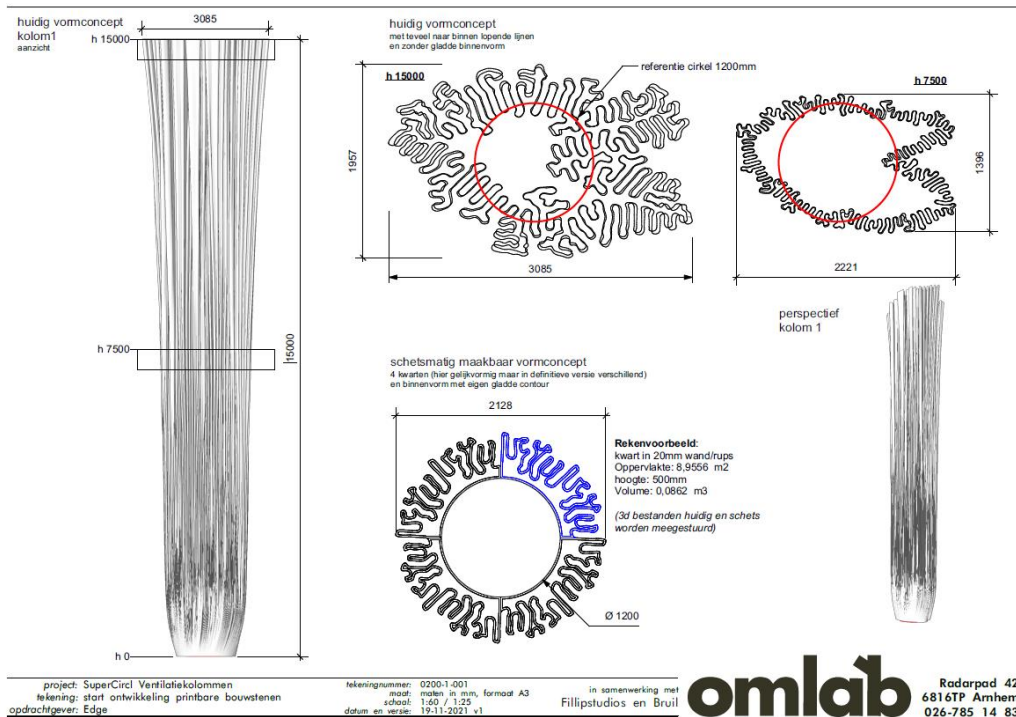
Per strekkende meter kademuur kan met ontwerpvariant 2 zo'n €15-20 MKI-reductie worden bereikt per strekkende meter kademuur-element, wat neerkomt op zo'n 50% MKI-reductie (

Tabel 8 en Figuur 5).

Voor de vertaling van MKI-waarde naar CO₂-reductie wordt ervan uitgegaan dat 50% van de MKI-waarde wordt bepaald door het milieu-effect klimaatverandering (wat het geval is voor betonmortel en aangezien betonmortel als grondstof > 60% van de MKI-waarde bepaald) met een schaduwprijs van €0,05/kg CO₂. Dit resulteert in een CO₂-reductie van 152 (fase A), 200 (fase A-C) en 176 (fase A-D) kg CO₂-reductie.

3.5.3 3D-printen van rioolwaterzuiverings-afval voor ventilatiekolommen

Movares en Bruil werkten samen met Omlab en Philips Studio aan het ontwerp voor het 3D-printen van ventilatiekolommen voor de renovatie van het hoofdkantoor van ABN AMRO (Figuur 6). De ventilatiekolommen zouden in het ontwerp geprint worden van cellulose, restproduct van rioolwaterzuiveringsinstallaties. Het product is 100% circulair en 100% biobased.



Figuur 6. Impressie van Computational Design ontworpen ventilatiekolommen.

Uiteindelijk bleek het product te duur om te produceren en wordt niet toegepast in de renovatie van het hoofdkantoor. Het consortium is nu op zoek naar andere toepassingen voor Computational Design ontwerp en 3D-printen met cellulose uit rioolwaterzuiveringsinstallaties.

3.5.4 Advies verduurzamen beton opdrachtgevers

Movares heeft als adviseur en constructeur invloed op het ontwerp van betonnen kunstwerken (zie ook paragraaf 2.5).

In 2022 hebben projecten – waar betonnen kunstwerken één van de ontwerpelementen waren – een potentiële CO₂-reductie gerealiseerd van 78,0 kton CO₂. Echter, de genoemde CO₂-reducties gelden voor alle ontwerpcomponenten in het project, waar betonnen kunstwerken slechts één van de ontwerpcomponenten zijn. Met een aanname dat CO₂-reductie adviezen omtrent betonnen kunstwerken 30% van de CO₂-reductie voor hun rekening nemen, komt dit neer op een potentiële CO₂-reductie van 23,4 kton CO₂ op het conto van duurzaam beton (Tabel 9).

Als men kijkt naar de gemiddelde CO₂-reductie die bereikt wordt door een referentie-ontwerp te vergelijken met een geoptimaliseerd ontwerp, komt men uit op 43% potentiële CO₂-reductie in 2022.

Ondanks de mooie resultaten die bereikt zijn in 2022, wordt nog niet bij alle betonnen kunstwerken-projecten een *kwantitatief* advies voor CO₂-besparing bespreekbaar gemaakt bij de Opdrachtgever. Om dit doel beter te borgen in de organisatie – ook in lijn met het Betonakkoord – gaan we in gesprek met de groepsmanager van de Afdeling Kunstwerken Beton voor het aanwijzen van een duurzaamheidsverantwoordelijke die als doel heeft de adviseurs in deze afdeling aan te sporen om bij de klant duurzaamheid bespreekbaar te maken.

3.6 Resultaten CO₂-reductie

Concreet leverden de keteninitiatieven een 35% reductie op van onze totale Kunstwerken emissies (75 kton CO₂, Tabel 9).

Tabel 9. Reductiedoelstelling én resultaat Computational Design.

Jaar	2021	2022	2023	2024	2025
Computational Design					
Besparing [kton CO ₂]	0,6	1,1	2,3	3,4	5,6
Besparing [%]*	0,75	1,5	3	4,5	7,5
Computational Design met 3D-betonprinten					
Besparing [kton CO ₂]	0,9	1,3	1,7	2,3	2,8
Besparing [%]**	1,25	1,75	2,25	3	3,75
Computational Design (met 3D-betonprinten)					
Besparing – totaal [kton CO ₂]	1,5	2,4	4,0	5,7	8,4
Realisatie [kton CO ₂]	3,17-3,18	7,0-26,3			
Realisatie [%]*	4,2	9,3-35,1			
Advies verduurzamen beton opdrachtgevers					
Besparing [kton CO ₂]	11	13	15	19	22,5
Besparing [%]	15	17,5	20	25	30
Realisatie [kton CO ₂]	10,7	23,4			
Realisatie [%]*	14,3	31,2			
Totaal – besparing [kton CO₂]	1,6	2,4	3,9	5,6	8,4
Totaal – realisatie [kton CO₂]	13,8	30,4-49,7			

* In 2021 wordt Computational Design in 5% van de projecten met beton toegepast (oplopend naar 10-20-30-50% van de projecten in de jaren erna) – Movares heeft invloed op 75 kton CO₂-uitstoot van Product-Markt-Combinatie “Kunstwerken”, waarbij in elk project 15% CO₂-reductie wordt nagestreefd.

** In 2021 wordt Computational Design in combinatie met 3D-betonprinten in 5% van de projecten met beton toegepast (oplopend naar 7-9-12-15% van de projecten in de jaren erna) – Movares heeft invloed op 75 kton

CO₂-uitstoot van Product-Markt-Combinatie “Kunstwerken”, waarbij in elk project 25% CO₂-reductie wordt nagestreefd.

Voor zowel het keteninitiatief Computational Design ontwerpen als op het gebied van duurzaam adviseren lopen we voor op onze eigen doelstellingen (Tabel 9).

4 Gebruikte bronnen

Bijleveld, M. et al (2013), *Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw, Status quo en toetsing van verbeteropties*, Delft, CE Delft

Boon (2017), *Reductie van scope 3 CO₂-emissies - Ketenanalyse Beton in de GWW-sector v1.0*

Brochure "Cement, beton en CO₂ – Feiten en trends", <http://www.cementenbeton.nl/publicaties> (25 november 2019)

Favier, A. et al. (2018), *A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry - Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*, ETH Zürich, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000301843> (7 december 2020)

Greeve, J.J. en M.J. Seventer, *CO₂-footprint Xirion*, Leeuwarden, E kwadraat advies BV, 2008. https://www.acroniq.nl/co2_pdf.html (25 november 2019)

Knipscheer, *CO₂-emissie scope 3, Ketenanalyse Beton en prefab betonelementen*, Knipscheer

Movares Nederland B.V. (2017), *Energiemanagement en CO₂-reductieplan Movares Nederland - Doelstellingen en maatregelen scope 1, 2 en 3 [2017-2021]*

Ramsey et al. (2014), *Life Cycle Assessment of pre-cast concrete vs. cast-in-place concrete*, Arizona State University. <https://repository.asu.edu/attachments/135303/content/ASU-SSEBE-CESEM-2014-CPR-002.pdf> (9 december 2019)

Roemaat, J. en H. Severins (2013), *Recycling staalvezelbeton – Eindrapport afstudeeronderzoek*. Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Van Eerten-Jansen, M. (2020), *Energiemanagement Actieplan 2020-2025 v1.0*, Movares Nederland B.V.

Van Eerten-Jansen, M. (2019), *Keteninitiatief Beton 2019 v1.0*, Movares Nederland B.V.

Van Herwijnen, F., *Duurzaam construeren met milieuvriendelijke cementen*, VN constructeurs, 15 mei 2013

Van Kuik, C. (2019), *Afstudeerrapport: CO₂-reductie in de bouwsector*, Hogeschool van Amsterdam

Van Lieshout, M. en S. Nusselder (2016), *Update prioritering handelings-perspectieven verduurzaming betonketen 2016 - CO₂-reductiepotentieel en CO₂-reductiekosten van 17 verduurzamingsopties van beton*. CE Delft, publicatienummer 16.2G75.110.

Colofon

OPDRACHTGEVER	Directie Movares
UITGAVE	Movares Europe B.V. Daalseplein 100 Postbus 2855 3500 GW Utrecht
TELEFOON	+31 6 53 43 48 69
ONDERTEKENAAR	Ende RA van der (Ruben) ruben.vd.ende@movares.nl
PROJECTNUMMER	
KENMERK	X28-R.A.-HS-RAP-23001503

© 2023, Movares Nederland B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Movares Nederland B.V.

 **Movares** samen werkt het