

PILOTPROJECT KADEMUUR 2^e PETROLEUMHAVEN ROTTERDAM

Geopolymeerbeton

in een maritieme omgeving



1 Afhangen prefab geopolymeerbeton-elementen
(foto: Martens Multimedia)



Havenbedrijf Rotterdam heeft een aantal jaren geleden zijn duurzaamheidsambities verwerkt in specifieke CO₂-reductie-doelstellingen en deze vertaald naar concrete doelen. Op het gebied van materiaalinnovatie bood beton de grootste kansen voor CO₂-reductie. Drie jaar geleden werd daarom de vraag gesteld of het mogelijk zou zijn beton met een 50% lagere CO₂-footprint toe te passen in een maritieme omgeving, mét behoud van prestaties in de hoogste milieuklassen. Een pilotproject moest daar antwoord op geven. Het resultaat biedt perspectief voor de toekomst.

Het Havenbedrijf Rotterdam heeft de ambitie de meest duurzame haven ter wereld te zijn, waar klanten succesvol kunnen ondernemen. Die ambitie is vertaald in concrete doelen. Op het vlak van materiaalgebruik is de doelstelling een CO₂-reductie van 25% te realiseren in 2030 en in 2050 klimaat-neutraal te zijn.

Met name het cement in het beton van kademuuren en aanlegsteigers zorgt voor een forse CO₂-uitstoot. Geopolymeerbeton is beton zónder cement, waardoor die uitstoot tot circa 50% kan worden verlaagd. Daarmee kan het een aanzienlijke bijdrage leveren aan de duurzaamheidsdoelstellingen van het havenbedrijf. Ook is de techniek en de beschikbaarheid van het materiaal inmiddels zo ver ontwikkeld dat het in de praktijk kan worden toegepast.

Daarom is het bedrijf drie jaar geleden een pilotproject gestart, met als doel een kademuur in dit materiaal te realiseren.

De aanpak van het pilotproject werd verdeeld in drie fases die opeenvolgend zijn uitgevoerd. Een nieuwe fase kon pas worden gestart na succesvolle afronding van de vorige.

FASE 1 : LABORATORIUMTESTEN

In de eerste fase is uitgebreid betontechnologisch onderzoek uitgevoerd op laboratoriumschaal, waarbij 28 verschillende parameters zijn getest door SGS-INTRON van mengsels met en zonder staalvezels. Die resultaten werden vergeleken met de prestaties van regulier CEM III/B-beton, dat gangbaar is in betonconstructies in de haven. Hieruit bleek dat geopolymeerbeton op basis van hoogovenslak en vliegas in veel aspecten gelijkwaardig of zelfs beter presteerde dan het reguliere beton. Op

de afwijkende aspecten waren er qua ontwerp en uitvoeringswijze mogelijkheden om die te beheersen.

De volgende laboratoriumtesten zijn uitgevoerd:

Plastische fase

In de plastische fase zijn de volgende parameters getest: schudmaat, zetmaat, volumieke massa, retentietijd en bindtijd. Het meest opvallende uit deze testen was dat het geopolymeerbeton iets sneller leek te verharden. Dit is tijdens de proefstort nogmaals getest en blijkt goed beheersbaar te zijn door het materiaal in beweging te houden in de mixer en daarna met een trilnaald te verdichten in de bekisting.

Mechanische eigenschappen

Bij de mechanische eigenschappen zijn de volgende parameters getest: kubusdruksterkte, kubussplijtsterkte, treksterkte, E-modulus, autogene krimp, uitdrogingskrimp, totale krimp, pull-out test, driepunts-buigtreksterkte (mengsel met staalvezels), vervormingsgestuurde buigtreksterkte (mengsel zonder staalvezel) en dwarskrachtcapaciteit. Het meest opvallende aan deze testen was de hogere autogene krimp, de lagere uitdrogingskrimp en daaruit volgend de 10-20% hogere totale krimp. Verder onderzoek naar dit fenomeen leert dat deze hogere krimp, die op laboratoriumschaal zichtbaar is, in de praktijk niet, of veel minder optreedt, zo blijkt uit metingen na realisatie en periodieke monitoring. Gepubliceerd onderzoek laat zien dat dit komt door onder andere kruip en relaxatie. Daardoor resulteert de hogere autogene krimp niet auto-

PROJECTGEGEVENS

Project: Realisatie kademuur 2^e Petroleumhaven Rotterdam

Opdrachtgever: Havenbedrijf Rotterdam

Constructeur: Witteveen+Bos

Materiaalkundig onderzoek en

inspectie: SGS-Intron

Aannemer: De Klerk Werkendam

Leveranciers: Jansen Beton en BMN de Klerk

Oplevering: mei 2024



matisch in hogere spanningen in het beton. Nader onderzoek op dit punt loopt nog. Bij de overige parameters hebben we vergelijkbare of betere waarden gevonden ten opzichte van regulier beton.

Fysieke eigenschappen

Bij de fysieke eigenschappen zijn de volgende parameters getest: Thermische uitzetting, carbonatatie, chloride-indringingsweerstand, alkali-silicareactie (ASR), sulfaat- en zeewaterbestendigheid, twee elektroden-meting (TEM), bestandheid tegen vorst-dooizout en vloeistofdichtheid.

Wat hier opviel was de hogere thermische uitzettingscoëfficiënt, een diepere carbonatatie en een lage chloridediffusiecoëfficiënt. In het monitoringsprogramma wordt het verloop van de natuurlijke carbonatatie van het materiaal gevolgd, maar doordat de pH van het poriewater op een niveau van pH 10-11 blijft, corrodeert het wapeningsstaal niet (de passiveringslaag blijft intact).

Nader onderzoek en monitoring van de chloride-indringing leert dat deze dermate laag is en dat de kans op wapeningscorrosie gedu-

rende de ontwerplevensduur van honderd jaar substantieel lager is dan bij regulier CEM III/B beton.

Uitlooggedrag

Bij het uitlooggedrag zijn er kolom- en uitspoelproeven gedaan om de mate van recyclebaarheid te toetsen, voor het moment waarop de constructie ooit zou worden gesloopt. Uiteindelijk vallen de resultaten van alle testen binnen het kader van het Besluit Bodemkwaliteit. Voor colloïdale toepassingen is geopolymeerbeton nog niet geschikt, omdat er nog geen hulpstof voor beschikbaar is.

In tabel 1 zijn de resultaten van de laboratoriumtesten, de vergelijking met de waarden van regulier beton en de verwachte waarden uit de Eurocode 2 samengevat. De resultaten zijn gedeeld met de CUR-commissie Geopolymeerbeton en de Proeftuin constructief Geopolymeerbeton van Rijkswaterstaat.

FASE 2: PROEFSTORT

In de volgende fase is een proefstort uitgevoerd, waarbij het materiaal in grotere volumes is gestort (circa 10 m³). Bij deze proefstort

zijn er een aantal praktische aspecten onderzocht, zoals consistentie en verpompbaarheid na ruim een uur transport, handeling met de toevoeging van staalvezels én werden verschillende manieren van nabehandeling getest.

Leerpunten vanuit het proefstorten zijn het feit dat het geopolymeerbeton goed te verpompen is, zowel mét staalvezelbijmenging als zonder. Na een uur transporttijd en handeling op locatie is de consistentieklasse van het beton nog steeds gelijk aan de klasse die het had bij het verlaten van de betoncentrale.

Qua nabehandeling gaf de toepassing van een *curing compound*, in combinatie met het afdekken met een folie het beste resultaat. Het beton vertoonde een lage warmteontwikkeling met een kerntemperatuur van maximaal 40 °C.

De techniek en beschikbaarheid van het materiaal zijn inmiddels zo ver ontwikkeld dat het in de praktijk kan worden toegepast

Tabel 1: Beoordelingsaspecten onderzoek Havenbedrijf Rotterdam [1,2,3]

KLEUR	BEOORDELING
	resultaat is beter i.v.m. traditioneel beton (TB)
	resultaat is afwijkend i.v.m. traditioneel beton (TB)
	resultaat wijkt duidelijk af i.v.m. traditioneel beton (TB)
	geen eis gesteld

NR.	ASPECT	ZV*	MV**		TOETSCRITERIUM	RESULTAAT
0 ANDERE ASPECTEN (ZV)						
1	milieu-impact		X		GWP en MKI lager dan C35/45 TB	GWP (54%) en MKI (72%) t.o.v. TB C35/45
A PLASTISCHE FASE (MV/ZV)						
2	schudmaat	X	X		F4 (490-550 mm)	schudmaat ZV 470 mm; MV 500 mm
3	zetmaat	X	X		geen	zetmaat ZV 200 mm; MV 200 mm
4	volumieke massa	X	X		geen	volumieke massa ZV 2363 kg/m ³ ; MV 2397 kg/m ³
5	retentietijd na 0,15,30,45,60,90 min	X	X		terugloop zetmaat of schudmaat? (na 90 min): <100-150 mm	terugloop schudmaat: 12,5 cm, mengsel C en 9,5 cm, mengsel D
6	bindtijd (HUMM sonde)	X	X		> 225 minuten	indringdiepte bereikt na ongeveer 135 min (ZV) en na ongeveer 165 min (MV)
B MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN (MV/ZV)						
7	kubus druksterkte	X	X		$f_{ck} > 45 \text{ N/mm}^2$	gemiddeld 28 dagen ZV: 57,4 N/mm ² , MV: 50,9 N/mm ²
8	kubus splijttreksterkte	X	X		4,0-4,5 N/mm ²	ZV: 28 dagen 4,3 N/mm ² ; MV: 28 dagen 5,9 N/mm ²
9	berekenen directe treksterkte	X			$f_{ctm} = 3,2 \text{ N/mm}^2$ (C35/45)	ZV 3,9 N/mm ² (splijtproef) en 4,8 N/mm ² (buigproef)
10	E-modulus	X	X		30000-35000 N/mm ² (afhankelijk toetslag)	28 dagen MV: 32100 N/mm ² , ZV: 30833 N/mm ²
11	autogene krimp	X	X		EC2 vergelijking	91 dagen: autogene krimp -0,44mm/m (ZV) en -0,52 mm/m (MV) totale krimp
12	uitdrogingskrimp	X	X		EC2 vergelijking	91 dagen: uitdrogingskrimp -0,14 mm/m (ZV) en -0,03 mm/m (MV)
13	totale krimp	X	X		totale krimp: 0,5 mm/m	91 dagen ZV -0,58 mm/m; MV -0,55 mm/m
14	pull-out test	X	X		C30/37 beton/geribde staven/ d = 12 mm: 8-11 N/mm ²	ZV 27,7 N/mm ² ; MV 27,6 N/mm ²
15	driepuntsbuigtreksterkte (alleen ZV)	X			7-12 N/mm ²	7,4 N/mm ²
16	vervormingsgestuurde 3-puntsbuigtrek (alleen MV)		X		$f_{R1} = 5,8 \text{ N/mm}^2 / f_{R3} = 6,3 \text{ N/mm}^2$	$f_{R1} = 6,9 \text{ N/mm}^2 / f_{R3} = 6,6 \text{ N/mm}^2$
17	dwarskrachtcapaciteit	X			vergelijkbaar met TB	gemeten dwarskrachtcapaciteit vergelijkbaar of beter.
C FYSIEKE EIGENSCHAPPEN (ZV)						
18	thermische uitzettingscoëfficiënt	X			$12 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	thermische uitzetting is gemiddeld 25% hoger dan criterium
19	carbonatatieweerstand	X			natuurlijke carbonatatie na 1 jaar = 4-6 mm	na 70 dagen bij 1,0% CO ₂ -gehalte is diepte carbonatatiefront 11 mm
20	chlorideindringingsweerstand	X			$\leq 5,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
21	ASR-aantasting	X			expansie < 0,1%	expansie < 0,1%
22	sulfaat- en zeewaterbestandheid	X			expansie < 0,4 mm/m (182 dagen)	sulfaat (186 dagen): expansie 0% zeewater (186 dagen) expansie 66 % van de grenswaarde
23	TEM (op kubussen druksterkte)	X			> 200 W × m	201 W × m
24	vorstdooizoutbestandheid,	X			14 cycli: 1,5 kg/m ² verlies (CDF test)	28 cycli: 0,75 kg/m ² verlies (slab-test)
25	vloeistofdichtheid	X			waterindringing < 30 mm	waterindringing: 22 mm
D UITLOOGGEDRAG (ZV)						
26	kolomproef	X			voldoen aan besluit bodemkwaliteit	geen waarde overschreden
27	diffusieproef	X			voldoen aan besluit bodemkwaliteit	geen waarde overschreden, geen grenswaarde voor Na en K in Besluit Bodemkwaliteit
28	uitspoelproef	X			5% uitwassing	32,7%

* ZV is mengsel zonder toevoeging van staalvezels

** MV is mengsel moet toevoeging van staalvezels (dosering 50 kg/m³)



3 Prefab geopolymeerbeton hoekelement gereed voor plaatsing

500 m³ geopolymeerbeton toegepast.

Elke moot bestond uit zeven á acht L-vormige prefab-elementen die aan een basisconstructie, een combiwand, zijn afgehangen. Deze prefab-elementen hadden een globale afmeting van 6 × 5 m². Na het afhangen van deze elementen is de ruimte tussen de combiwand en het prefab-element gevuld met staalvezel-versterkt geopolymeerbeton. Deze stort is gedeeltelijk waterverdringend uitgevoerd. De laatste stap was de realisatie van een in situ gestorte deksloof die alle eerdergenoemde elementen met elkaar verbindt.

NABEHANDELING

Nabehandeling van beton is essentieel voor de kwaliteit van het eindresultaat. Dit is ook bij geopolymeerbeton het geval. Hierbij hebben we gezien dat de invloed van het weer bepalend is voor de start daarvan. Geopolymeerbeton heeft de neiging om wat sneller te verharden en de buitentemperatuur en de wind spelen daarin een rol.

Afhankelijk van de omstandigheden moest soms direct na de laatste stort al worden gestart met het schuren en vlinderen van het oppervlak, gevolgd door het aanbrengen van een curing compound. Uiteindelijk leverde het meerdaags afdekken van het beton na het aanbrengen van de curing compound het beste eindresultaat. Ook is ondervonden dat, als je de uithardende toplaag voor het schuren en vlinderen licht vernevelt met water, de nabehandeling makkelijker uit te voeren is.

MONITORING EN CHLORIDE-INDRINGING

Het beton van de kadeconstructies in het Rotterdamse havengebied moet bestand zijn tegen veeleisende en ongunstige omstandigheden. Dit onder andere door golfslag, getijdenwerking en contact met zeewater. Die aantasting van wapening in het beton door chloride-geïnduceerde corrosies is de grootste bedreiging voor de levensduur van deze constructies.

Om het risico te kwantificeren, worden de betonconstructies periodiek gemonitord door het boren en analyseren van kernen uit de constructies. De resultaten van al deze analyses worden verzameld in een KMS (Kademuur Modeling Systeem) die de restlevensduur van de betonconstructies voorspelt en hier een onderhoudsprogramma aan koppelt. Ook zijn uit de gerealiseerde kademuur diverse



4 Vlechtwerk deksloof geopolymeerbeton

FASE 3: REALISATIE EN MONITORING

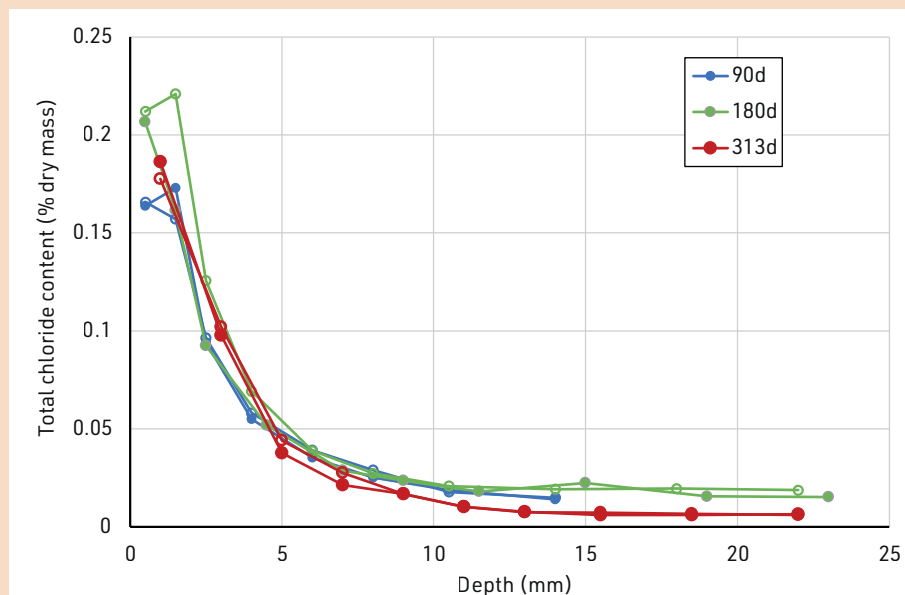
Na evaluatie van de proefstort is de laatste fase ingegaan, waarbij het project na een ontwerpfase werd aanbesteed. Twee van de vijf betonmoten, van de in totaal 100 m lange kademuur, zijn in geopolymeerbeton uitge-

voerd. Tijdens de realisatiefase is het geopolymeerbeton op drie verschillende manieren toegepast. Het is toegepast in het prefab-element en is in situ gestort met en zonder toevoeging van staalvezels. In totaal is er circa



kernen geboord in zowel de atmosferische zone, de splash zone (de zone van het beton boven de getijdenzone die door o.a. golfslag en opspattend water afwisselend nat en droog kan zijn) en het getijdengebied. Uit de onderzoeken naar lange duur chloride-indringing blijkt dat de chloride-indringing in het beton zeer laag is en niet toeneemt ten opzichte van de indringing na 90 dagen. In de grafiek in figuur 6 staat een visualisatie daarvan. Deze testen lopen op het moment van schrijven van dit artikel nog door, waarbij er minimaal tot een periode van twee jaar wordt doorgetest.

Uit laboratoriumonderzoek bleek dat geopolymeerbeton in veel aspecten gelijkwaardig of zelfs beter presteerde dan regulier beton



6 Resultaten lange duur chloride-indringingsprofielen

Naast deze langeduurtesten is ook gekeken naar de daadwerkelijke chloride-indringing, nu de kademuur een langere periode in de verschillende zones is blootgesteld aan de natuurlijke omstandigheden. Dit is gedaan voor zowel het reguliere CEM III/B beton als het geopolymeerbeton.

Ook uit die analyses blijkt dat de kans op aantasting van wapening door chloride-geïnduceerde corrosie zeer klein is bij een ontwerp-levensduur van honderd jaar. Op dit punt presteert geopolymeerbeton beter dan regulier beton. Zie tabel 2 en 3 voor de kans op wapeningscorrosie zowel op basis van een totaal chloridegehalte als op basis van een Cl^-/OH^- verhouding.

ROADMAP GEOPOLYMEERBETON

Gezien de positieve resultaten uit het pilotproject lijkt de toepassing van geopolymeerbeton op basis van hoogovenslak en vliegas in constructies die in contact komen met zeewater een verstandige keuze. Daarom heeft het Havenbedrijf Rotterdam de Roadmap Geopolymer beton opgesteld. Die roadmap geeft aan

hoe wij de toepassing in verschillende projecten willen opschalen naar volledig constructieve toepassingen op industriële schaal, door opeenvolgende projecten van steeds grotere omvang uit te voeren.

Parallel aan dit traject zullen full scale veldtesten de prestaties vanuit de labtesten verifiëren, waarna de kennis wordt gedeeld met regelgevende instanties op dit gebied. Het eerstvolgende project is een kademuur op de 2^e Maasvlakte waar ruim 10.000 m³ geopolymeerbeton zal worden toegepast. In deze constructie worden ook bolders en haalkommen uitgevoerd.

TOT SLOT

Na het doorlopen van de verschillende fases, het afronden van het pilotproject en het monitoren van de prestaties in de gebruiksfase, zijn de ervaringen met geopolymeerbeton overwegend positief.

Naast de lage CO₂-footprint, die volgt uit geverifieerde berekeningen, heeft het materiaal een hoge weerstand tegen indringing van chlorides. Dit maakt de toepassing in con-

structies die in contact staan met zeewater een goed alternatief voor regulier beton. De komende jaren is de ambitie van het Havenbedrijf Rotterdam om geopolymeerbeton in meer kademuren en steigers te gaan toepassen. Daarnaast zal er ruimte zijn om ook beton met andere bindmiddelsystemen toe te passen. Ook zal de eventuele toepassing van alternatieve wapeningssoorten en voorgespannen ontlastvloeren worden onderzocht.

Literatuur

- 1. Onderzoek geopolymeerbeton Havenbedrijf Rotterdam, SGS-Intron, 15 november 2023.
- 2. Mock-up geopolymeerbeton Havenbedrijf Rotterdam. SGS-Intron, 15 november 2023.
- 3. Uitvoeringsfase geopolymeerbeton in maritieme omstandigheden, SGS-Intron, 19 december 2024.
- 4. Characterization of Geopolymer concrete mixture, SIMCO Technologies, 2 april 2024.
- 5. Service Life Evaluation of 2e Petroleumhaven east, SIMCO Technologies, 15 april 2025.

Naast de lage CO₂-footprint heeft geopolymeerbeton een hoge weerstand tegen indringing van chlorides

Tabel 2. Kans op wapeningscorrosie op basis van de Cl^-/OH^- verhouding [4,5]

CONCRETE MIXTURE	ZONE	PROBABILITY OF CORROSION INITIATION IN 100 YEARS	YEARS TO REACH 5% PROBABILITY OF CORROSION INITIATION	YEARS TO REACH 10% PROBABILITY OF CORROSION INITIATION
regular mix - precast	intertidal	14.6 %	63.9	81
	splash	3.9 %	>100	>100
regular mix - cast in place	splash	2.7 %	>100	>100
	atmospheric	0.0 %	>100	>100
geopolymer mix - precast	intertidal	0.0 %	>100	>100
	splash	0.5 %	>100	>100
geopolymer mix - cast in place	splash	0.0 %	>100	>100
	atmospheric	0.0 %	>100	>100

Tabel 3. Kans op wapeningscorrosie op basis van totaal gehalte chloride [4,5]

CONCRETE MIXTURE	ZONE	PROBABILITY OF CORROSION INITIATION IN 100 YEARS	YEARS TO REACH 5% PROBABILITY OF CORROSION INITIATION	YEARS TO REACH 10% PROBABILITY OF CORROSION INITIATION
regular mix - precast	intertidal	17.8 %	42	66
	splash	8.6 %	69	>100
regular mix - cast in place	splash	10.7 %	65	96
	atmospheric	0.2 %	>100	>100
geopolymer mix - precast	intertidal	0.3 %	>100	>100
	splash	0.1 %	>100	>100
geopolymer mix - cast in place	splash	0.1 %	>100	>100
	atmospheric	0.0 %	>100	>100