

TNO PUBLIEK

Stieltjesweg 1
2628 CK Delft
Postbus 155
2600 AD Delftwww.tno.nl

T +31 88 866 20 00

TNO-rapport**TNO 2021 R12402****Proeftuin Geopolymeren: Monitoring van tien
pilots met geopolymeer beton gedurende het
eerste gebruiksjaar en duurzaamheids-
kenmerken**

Datum	6 december 2021
Auteur(s)	Dr. T.G. Nijland T.J.A. Dijkmans, MSc
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	41 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Provincie Gelderland met financiering van Rijkswaterstaat vanuit programma Klimaatvelop Beton
Projectnaam	Monitoringsprogramma geopolymeerbeton
Projectnummer	060.34687

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	De pilots in de proeftuin	5
2.1	Gemeente Alphen aan den Rijn	5
2.2	Provincie Gelderland	7
2.3	Gemeente Rotterdam	9
2.4	Gemeente Amersfoort	11
2.5	Gemeente Amsterdam.....	12
2.6	Gemeente Leeuwarden	13
2.7	Gemeente Nijmegen.....	18
2.8	Gemeente Dordrecht	19
2.9	Provincie Groningen	22
2.10	Provincie Overijssel	23
3	Monitoring	25
3.1	Opzet van het monitoringsprogramma	25
3.2	Korte toelichting op de beproevingsmethoden	26
3.3	Resultaten.....	26
4	Duurzaamheidskenmerken	33
4.1	Werkwijze LCA en CI.....	33
4.2	Werkwijze LCC	34
4.3	Resultaten per pilot geclusterd naar product.....	35
4.4	Discussie	36
5	Afsluitende beschouwing	38
6	Literatuur	39
6.1	Rapportages individuele pilots.....	39
6.2	Referenties	39
7	Ondertekening	41

1 Inleiding

Geopolymeer beton heeft de potentie om de milieu-impact te reduceren ten opzichte van cement gebaseerde betonproducten. Er zijn verschillende geopolymeer beton-producten op de markt verkrijgbaar, maar deze worden nog op beperkte schaal toegepast. Objectieve informatie over de duurzaamheid en de relatie tot technische prestaties en eigenschappen ontbreekt. Dit remt een grootschalige toepassing.

Vanuit het netwerk BouwCirculair is het initiatief genomen om een proeftuin in te richten om zo meer ervaring op te doen¹. Deze Proeftuin Geopolymereen omvat tien pilots van gemeenten en provincies. TNO is gevraagd een integraal monitoringsprogramma op te stellen om een tiental geopolymeer beton projecten tenminste een jaar te kunnen monitoren en relevante duurzaamheidskenmerken per pilot vast te stellen. Dit programma wordt mogelijk gemaakt door financiering uit de Klimaatenvelop van de Rijksoverheid met als doel dat de overheid inzage krijgt in de prestatiekenmerken gerelateerd aan duurzaamheid zijnde LCA (levenscyclusanalyse), LCC (levensduurkosten) en CI (circulariteitsindex). Voor deze prestatiekenmerken is het ook van belang om inzicht te krijgen in de technische prestaties en eigenschappen, omdat deze bepalend zijn voor de levensduur. Het monitoringsprogramma omvatte al deze aspecten. De visuele monitoring van de pilots is verzorgd door de piloteigenaren zelf, die in samenspraak met de leveranciers van de achterliggende geopolymeertechnologie ook de relevante basisinformatie verzameld hebben. De piloteigenaren hebben ook zorggedragen voor bemonstering (in de vorm van betonwaren of boorkernen) na oplevering van de pilot en na één jaar. Het laboratoriumonderzoek aan deze monsters is uitgevoerd door TNO. De uitvoering van de levenscyclusanalyse (LCA) en bepaling van de circulariteitsindex (CI) is door TNO uitbesteed aan SGS Intron. De bepaling van de levensduurkosten (LCC) is uitgevoerd door TNO. Bij alle drie indicatoren zijn de geopolymeer producten vergeleken met een gangbaar cement gebonden referentieproduct.

De Proeftuin Geopolymereen omvat tien pilotprojecten. In alle gevallen betreft het verhardingen zoals betonstraatstenen of -tegels, grastegels, of in het werk gestort beton zoals een fietspad en bermbeton. Het gaat om de volgende pilots (Fig. 1.1):

1. Gemeente Alphen aan den Rijn: bestrating
2. Provincie Gelderland: in het werk gestort bermbeton
3. Gemeente Rotterdam: bestrating
4. Gemeente Amersfoort: bestrating
5. Gemeente Amsterdam: bestrating
6. Gemeente Leeuwarden: in het werk gestort fietspad
7. Gemeente Nijmegen: bestrating
8. Gemeente Dordrecht: bestrating
9. Provincie Groningen: grastegels
10. Provincie Overijssel: in het werk gestort fietspad

¹ <https://bouwcirculair.nl/proeftuin/proeftuin-geopolymereen/>

De betonwaren c.q. betonmortel zijn geleverd door verschillende producenten:

1. Van den Bosch Beton, Reduton® straatstenen (pilot 1, 3)
2. Rouwmaat, product RaMaC mortel (pilot 2, 10)
3. Struyk Verwo Infra, CERO tegels (pilot 4, 5, 8)
4. Kijlstra Betonmortel (pilot 6)
5. De Hamer (pilot 7)
6. Van den Bosch Beton, Reduton® grasbetontegels (pilot 9)



Figuur 1. Locatie van de verschillende pilots in de Proeftuin Geopolymere.

De achterliggende geopolymeertechnologie waarmee de betonwaren en in het werk gestort beton gemaakt zijn, is afkomstig van de volgende producenten:

1. SQAPE (pilots 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10)
2. ASCEM / BTE (pilot 7)
3. Kijlstra Betonmortel (pilot 6)

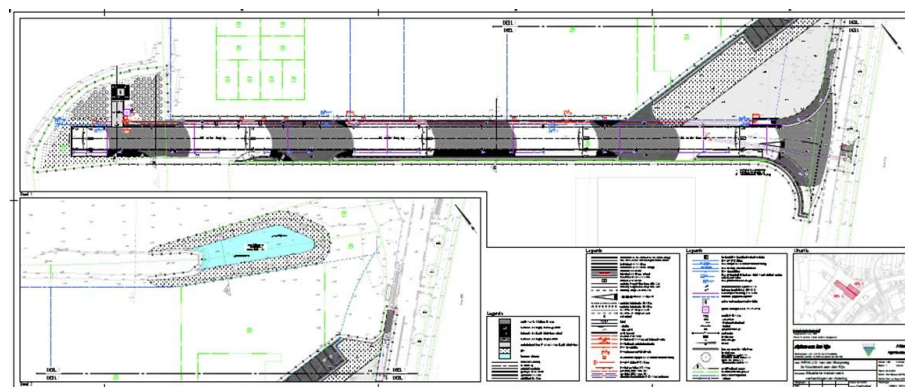
De resultaten per individuele pilot zijn apart gerapporteerd aan de eigenaren van de pilots; een overzicht wordt gegeven in § 6.1. Alle pilot gerelateerde informatie is uit deze rapporten afkomstig. In dit rapport wordt een algemeen beeld geschetst dat uit de gezamenlijke proeftuin naar voren komt om zo inzicht te geven in de stand der techniek van geopolymeer beton in zijn toepassing. Hierbij is het nadrukkelijk niet de bedoeling geweest om individuele producten met elkaar te vergelijken. De meetresultaten worden daarom niet hier, maar in de individuele rapportages per pilot gegeven.

In hoofdstuk 2 worden eerst de tien pilots in de Proeftuin Geopolymere gepresenteerd. Daarna worden in hoofdstuk 3 de resultaten van de visuele monitoring en het materiaalonderzoek besproken vanuit een gezamenlijk perspectief. Datzelfde gebeurt met de resultaten voor LCA, CI en LCC in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt een afsluitende beschouwing over de Proeftuin Geopolymere gegeven.

2 De pilots in de proeftuin

2.1 Gemeente Alphen aan den Rijn

De pilot in de Gemeente Alphen aan den Rijn betreft de inrichting van de J.G. van der Stoopweg in Koudekerk aan den Rijn (Fig. 2, 3). Het project betreft het aanbrengen van riolering, inritten naar percelen en aanbrengen uitvullingen en deklaag asfalt en is uitgevoerd tussen 14 november 2018 en 21 juni 2019. De totale aanneemsom bedroeg € 394.797,30, opdrachtnemer was J. Bijleveld b.v. In totaal is sprake van 1800 m² asfalt en 1700 m² straatwerk, waarvan 1100 m² geopolymer betonstraatstenen. In de pilot zijn betonstraatstenen in Reduton® cementloos beton toegepast van fabrikant Van den Bosch beton b.v., geproduceerd op basis van technologie van SQAPE. Figuur 4 en 5 geven een beeld van de monsternamen na een jaar en de betonstraatstenen in het werk na anderhalf jaar; Figuur 6 laat een gespleten straatsteen zien, waar de opbouw zichtbaar is. De steen heeft een cementgebonden toplaag en een massa van geopolymer beton.



Figuur 2. Pilot Gemeente Alphen aan den Rijn: overzichtstekening van het werk J.B. van der Stoopweg, Koudekerk aan den Rijn.



Figuur 3. Pilot Gemeente Alphen aan den Rijn: beeld van het werk met geopolymer beton straatstenen met een cement gebonden toplaag na anderhalf jaar.



Figuur 4. Pilot Gemeente Alphen aan den Rijn: monsternamen na één jaar.



Figuur 5. Pilot Gemeente Alphen aan den Rijn: geopolymeer betonstraatstenen met cement gebonden toplaag na anderhalf jaar.



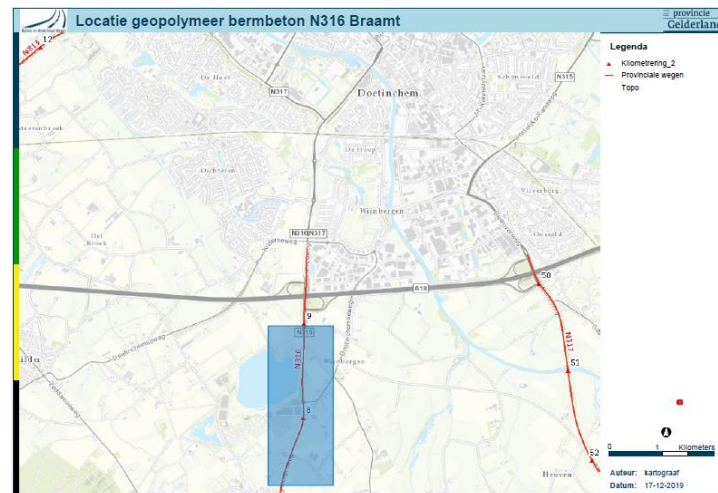
Figuur 6. Pilot Gemeente Alphen aan den Rijn: gespleten geopolymeer betonstraatsteen; de onderste helft laat de reguliere buitenkant van de steen zien, de bovenste helft het splijtvlak met daarop zichtbaar het geopolymeer onderbeton en de cement gebonden toplaag.

2.2 Provincie Gelderland

De pilot van de Provincie Gelderland betreft geopolymeer bermbeton langs asfalt in een traject (117) van de provinciale weg 316 (Fig. 7). De totale omvang van het werk uitgevoerd tussen 3 en 14 juni 2019, omvat 338 m³ geopolymeer beton. Het werk is uitgevoerd door Aannemingsmaatschappij Van Gelder. De totale aanneemsom is onbekend.

Het geopolymeer bermbeton is gestort met RaMaC betonmortel geleverd door Rouwmaat, geproduceerd op basis van SQAPE technologie. Het werk is uitgevoerd met een paver. Er is niet nabehandeld en er zijn geen dilatatievoegen aangebracht.

De fundering onder het in het werk gestort beton bestaat uit asfalt, ongebonden asfaltresten of zand. Figuur 8 geeft een beeld van het bermbeton bij oplevering, figuur 9 toont een boorkern uit het beton.



Figuur 7. Pilot Provincie Gelderland: overzicht van de locatie.



Figuur 8. Pilot Provincie Gelderland: geopolymeer bermbeton bij oplevering.



Figuur 9. Pilot Provincie Gelderland: boorkern uit het geopolymeer beton.

2.3 Gemeente Rotterdam

De Gemeente Rotterdam heeft reeds eerder geopolymeer betonstenen toegepast. De huidige pilot is deel van een project in Prins Alexander in Rotterdam (Fig. 10). Het project betreft de herinrichting van een aantal straten: Verwijderen van de oude verharding, kleine wijzigingen in de inrichting en het aanbrengen nieuwe materialen, in totaal circa 12.000 m². Het aandeel geopolymeerwaren in de pilot betreft ca. 1.500 m² betonstraatstenen en 450 m¹ trottoirbanden. De geopolymeer betonstraatstenen liggen in de straten Goud-, Geel- en Cymbelkruid (Fig. 11). Het werk is uitgevoerd door de Gebr. Kloens tussen oktober 2018 en juni 2019. De totale aanneemsom bedroeg € 1.100.000,-.

Toegepast zijn geopolymeer betonstraatstenen en trottoirbanden van Reduton® van fabrikant Van den Bosch beton b.v. op basis van technologie van SQAPE. In beide is (deels) betongranulaat toegepast. De betonstraatstenen bestaan uit een cement gebonden toplaag en massa van geopolymeer beton (Fig. 12).



Figuur 10. Pilot Gemeente Rotterdam: overzicht pilotlocatie.



Figuur 11. Pilot Gemeente Rotterdam: geopolymer betonstraatstenen met cement gebonden toplaag in Goudkruid na 6 maanden.



Figuur 12. Pilot Gemeente Rotterdam: voorbeeld toegepaste geopolymer betonstraatstenen met cement gebonden toplaag.

2.4 Gemeente Amersfoort

De pilot van de Gemeente Amersfoort betreft de reconstructie van de Columbusweg en omgeving (Fig. 13), met vervanging van riolering, bestrating en groen. Het werk is uitgevoerd door Timmer Weg- en Waterbouw tussen 10 juni 2019 en 11 december 2020. De totale omvang van de nieuwe geopolymer beton bestrating is 8000 m² (Fig. 14). Informatie over de aanneemsom is TNO niet bekend.

Toegepast zijn CERO betonstraatstenen en -tegels van Struyk Verwo Infra op basis van geopolymeretechnologie van SQAPE. De straatstenen en tegels hebben een cement gebonden toplaag en een massa van geopolymer beton. (Fig. 15).



Figuur 13: Pilot Gemeente Amersfoort: overzicht pilotlocatie.



Figuur 14. Pilot Gemeente Amersfoort: trottoir in de Cabralstraat.



Figuur 15. Pilot Gemeente Amersfoort: geopolymeer betonstraatsteen en tegel met cement gebonden toplaag.

2.5 Gemeente Amsterdam

De pilot van de Gemeente Amsterdam betreft de herbestrating van de Rode Kruisstraat. Het werk is uitgevoerd door de Gebr. Beentjes GWW b.v. in de periode september-november 2019. Het totale werk omvatte 540 m² geopolymeer betontegels, waarvan 170 m² halve tegels 8 cm dik op in-/uitritten en 370 m² hele tegels 6,2 cm dik op het voetpad (ook in relatie tot de aanwezigheid van bomen). De totale aanneemsom was circa 1.150.000 Euro waarvan ongeveer 17.500 Euro voor de geopolymeer betontegels. De geopolymeer betontegels zijn op bepaalde locaties in het werk geclusterd gelegd op plekken die representatief zijn voor het gebruik en de belasting (Fig. 16). In de pilot zijn CERO cementvrije betontegels gebruikt geproduceerd door Struyk Verwo Infra b.v. op basis van geopolymeertechnologie van SQAPE. Het betreft tegels met een cement gebonden toplaag en een massa van geopolymeer beton. (Fig. 17). De tegels zijn 6,2 respectievelijk 8 cm dik. De keuze van de 6,2 cm dikke tegels voor het halfsteensverband in plaats van de in Amsterdam gebruikelijk dikte van 4,5 cm komt voort uit het feit dat het produceren van tegels met deze dikte voor Struyk Verwo Infra b.v. te veel aanpassingen in het productieproces zou vergen.



Figuur 16. Pilot Gemeente Amsterdam: bestrating van geopolymer betontegels met cement gebonden toplaag.



Figuur 17. Pilot Gemeente Amsterdam: geopolymer betontegels met cement gebonden toplaag in tas.

2.6 Gemeente Leeuwarden

De pilot betreft een beton fietspad langs een woonwijkenkantsluitingsweg in de wijk Cammingaburen in Leeuwarden. Het werk is uitgevoerd door Jansma Drachten en omvatte tussen 500 en 800 m² in het werk gestort geopolymer beton, uit te voeren in de periode oktober-november 2019. De aanneemsom was gemaximeerd op 100.000 Euro, waarvan de kostprijs voor levering van 30 m³ geopolymer beton 3.600 Euro bedroeg.

Oorspronkelijk was beoogd het werk geheel in geopolymer beton uit te voeren.

Omdat de weersomstandigheden tijdens het storten op 20 november 2019 anders waren dan tijdens de proeven op de centrale is voor een 'veilig' mengsel gekozen, d.w.z. een mengsel dat niet te snel zou gaan binden. Tijdens de productie werd duidelijk dat de grondstoffen, welke handmatig werden gedoseerd, beter en automatisch via een gesloten systeem onderdeel zouden moeten worden van de doseerinstallatie. Vanwege corona kon door Kijlstra niet worden overgegaan tot een dergelijke installatie, ondanks de goede resultaten met het mengsel. Het fietspad is vervolgens afgemaakt met een mengsel op basis van > 50% gegranuleerde hoogovenslak en betongranulaat, XF4. Uiteindelijk is 80 m² in het werk gestort geopolymer beton gerealiseerd. Figuur 18 t/m 22 geven een beeld van de uitvoering. Tijdens de uitvoering was de minimum temperatuur -0,5 °C, de maximum temperatuur 5,9 °C, overwegend mistig en bewolkt, met in totaal 4 uur zon. Er was sprake van langzame uitharding. Op 's ochtends vroeg gestort beton kon pas rond 17 uur een bezemstreek worden gezet. Het verse beton moest regelmatig bijgewerkt worden (glad trekken) tussen de bekisting. Vanwege de vloeibaarheid van het mengsel is geen afdekfolie gebruikt.

In het werk gestort geopolymer beton geproduceerd door Kijlstra Betonmortel te Drachten (Fig. 23) en verwerkt door Jansma Drachten. Als referentie dient in dit geval regulier in het werk gestort C30/37 beton van de milieuklasse XD3/XF4 met een combinatie van Portland (CEM I) en hoogovencement (CEM III/B) dat gebruikelijk is voor fietspaden.



Figuur 18. Pilot Gemeente Leeuwarden: overzicht werk. Het te storten fietspad bevindt zich achter het rood-witte lint.



Figuur 19. Pilot Gemeente Leeuwarden: storten geopolymeer beton.



Figuur 20. Pilot Gemeente Leeuwarden: geopolymeer beton kort na storten.



Figuur 21. Pilot Gemeente Leeuwarden: geopolymeer beton circa halve dag na het storten.



Figuur 22. Pilot Gemeente Leeuwarden: afwerken betonoppervlak circa een halve dag na het storten.



Figuur 23. Pilot Gemeente Leeuwarden: boorkern uit in het werk gestort geopolymeer beton.

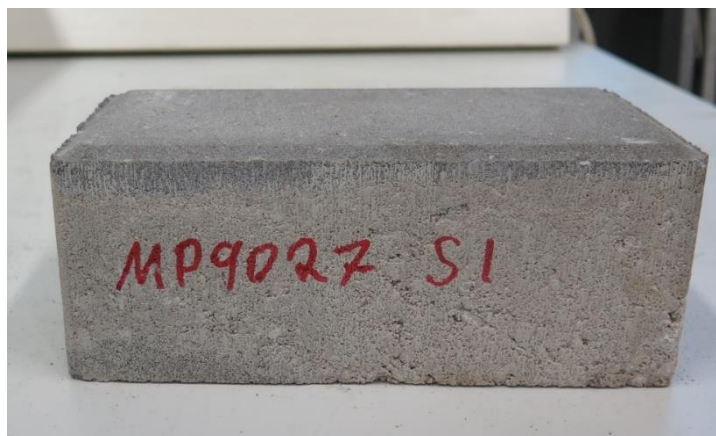
2.7 Gemeente Nijmegen

De pilot betreft de herinrichting Malder-Burchtstraat te Nijmegen. Er is een 30 km zone van de straat gemaakt om de verkeersveiligheid te vergroten. Dit is gebeurd door drempels aan te brengen, andere materialen toe te passen en de rijbaan te versmallen (Fig. 24). Daarnaast was de wens er een duurzame straat van maken. Het werk heeft een omvang van circa 9000 m². Een deel hiervan is bestraat met circa 10000 geopolymer betonstraatstenen. Het is uitgevoerd door Aannemingsmaatschappij Van Gelder in de periode 30 september 2019 – 20 december 2019. De totale aanneemsom was 1,3 miljoen Euro; het aandeel geopolymer beton hiervan is niet bekend.

Er is gebruik gemaakt van geopolymer betonstraatstenen geleverd door De Hamer / ASCEM-BTE. Het betreft stenen met afmetingen 210 x 105 x 80 mm met geopolymer onderbeton en een cement gebonden deklaag (Fig. 25) zwart/antraciet 03.



Figuur 24. Pilot Gemeente Nijmegen: overzicht van het werk.



Figuur 25. Pilot Gemeente Nijmegen: voorbeeld geopolymeer beton straatsteen met cement gebonden toplaag.

2.8 Gemeente Dordrecht

De pilot betreft de herinrichting van de Hugo de Grootlaan in Dordrecht (Fig. 26, 27). Vanwege spoorvorming in de rijbaan en grote voegen tussen tegels van het fietspad, moesten de rijbaan en het fietspad opnieuw worden bestraat. Dit is aanleiding geweest om ook de trottoirs en parkeerstroken te vernieuwen en om de wegindeling nader te beschouwen. Hieruit is een nieuw ontwerp ontstaan voor de inrichting van de Hugo de Grootlaan. Het werk is uitgevoerd door de Gebr. Kloens te Dordrecht en omvatte in totaal circa 5600 m² herbestrating met zowel geopolymeer als cement betonstraatstenen en tegels. Oorspronkelijk was beoogd circa 2200 m² hiervan uit te voeren in geopolymeer betonwaren. De totale aanneemsom was circa 700.000 Euro, waarvan 500.000 Euro straatwerk; het oorspronkelijke aandeel geopolymeer beton bedroeg 40.000 Euro. Het werk is uitgevoerd in de periode oktober 2019 – juli 2020. Het oorspronkelijk plan van 2200 m² geopolymeer betonwaren omvatte:

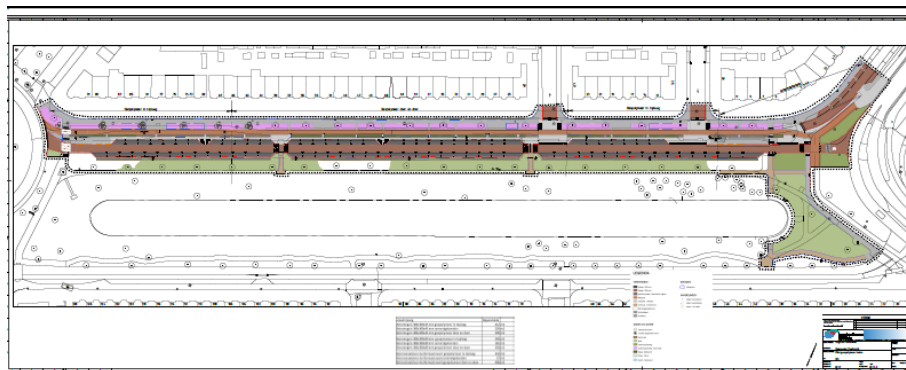
- 412 m² betontegels 300 x 300 x 62 mm met geopolymeer onderbeton en cement gebonden toplaag
- 299 m² betontegels 300 x 300 x 62 mm met geopolymeer door-en-door geopolymeer beton
- 240 m² betontegels 300 x 300 x 80 mm met geopolymeer onderbeton en cement gebonden toplaag
- 303 m² betontegels 300 x 300 x 80 mm door-en-door geopolymeer beton
- 433 m² betonstraatsteen keiformaat zwart met geopolymeer onderbeton met cement gebonden toplaag
- 496 m² betonstraatsteen keiformaat zwart door-en-door geopolymeer beton

De rijbaan is uitgevoerd in rode gebakken klinkers, de parkeerplaatsen in betonstraatstenen, de trottoirs en uitstapstroken in betontegels van 300 x 300 mm.

Bij de tweede dag van de uitvoering in oktober 2019 was sprake van een ARBO-incident bij het leggen van de geopolymeer betonstraatstenen. De 22 september 2019 geproduceerde betonstraatstenen hadden nog een hoge alkaliniteit (pH) aan het betonoppervlak. Hierdoor ontstonden brandwonden bij één van de stratenmakers. Het werk is gelijk stilgelegd door de opdrachtgever. Vanwege de strakke planning van het werk is besloten verder te gaan met traditionele cement gebonden materialen. Na diverse onderzoeken, gesprekken en contacten was pas eind maart

duidelijk dat de aannemer voor het toen nog resterende deel van het werk weer verder kon gaan met het gebruik van de geopolymeer stenen. Om deze reden zijn aan het eind van de laatste fase van het werk beperkte hoeveelheden van de geopolymeer stenen toegepast, circa 60 m² per soort (Fig. 28). Daarbij is vastgelegd dat geopolymeer betonstraatstenen pas 35 dagen na productie in de fabriek mogen worden gebruikt.

Toegepast zijn geopolymeer betontegels en -straatstenen geleverd door Struyk Verwo Infra b.v. op basis van geopolymeertechnologie van SQAPE. Het betreft producten met een cement gebonden toplaag (Fig. 29, 30).



Figuur 26. Pilot Gemeente Dordrecht: overzichtstekening werk.



Figuur 27. Pilot Gemeente Dordrecht: overzicht van het werk; de parkeervakken en trottoirs zijn uitgevoerd in betonwaren, de rijbaan in gebakken klinkers.



Figuur 28. Pilot Gemeente Dordrecht: geopolymer betontegels.



Figuur 29. Pilot Gemeente Dordrecht: overzicht verschillende toegepaste geopolymer betonwaren (al dan niet met toplaag).



Figuur 30. Pilot Gemeente Dordrecht: geopolymer betontegel met cementgebonden toplaag.

2.9 Provincie Groningen

De pilot in de Provincie Groningen betreft de toepassing van grasbetontegels langs de provinciale weg N982 (hectometerpaal 0,6) / Boventilsterweg in Oldehove (Fig. 31). Het werk is uitgevoerd in juni-juli 2020. In het totaal gaat het om circa 28 m² geopolymer grasbetontegels. De tegels zijn gelegd in blokverband op een straatlaag en ingetrild. Het werk is uitgevoerd door Bam Infra Regionaal Drachten bv. Het aandeel van de geopolymer grasbeton tegels in het werk bedroeg circa 679 Euro.

In het werk zijn geopolymer grasbetontegels van 600 x 400 x 120 mm voorzien van ronde gaten van grijze kleur zonder deklaag (Fig. 32). De tegels zijn geproduceerd door Van den Bosch Beton te Almelo onder de aanduiding Grasbeton type D Reduton®.



Figuur 31. Pilot Provincie Groningen: overzicht van het werk.



Figuur 32. Pilot Provincie Groningen: toegepaste geopolymer grasbetontegel.

2.10 Provincie Overijssel

Het project² betreft de vervanging van 11 km fietspaden langs de provinciale weg N344 tussen Oude Molen en Deventer in geopolymer beton. Het werk is uitgevoerd door Twentse Weg- en Waterbouw (TWW) tussen 23 september en 13 december 2019. De totale aanneemsom bedroeg 5,5 miljoen Euro; het aandeel geopolymer beton daarin is niet gespecificeerd. In totaal gaat het om 3450 m³ geopolymer beton, in het werk gestort (Fig. 33). Het werk is uitgevoerd met een paver. Het gaat om RaMaC betonmortel geleverd door Rouwmaat op basis van geopolymer technologie van SQAPE (Fig. 34). Het beton is gedurende de stortperiode nabehandeld met een curing compound.

² Provincie Overijssel heeft aangegeven dat het beschouwde project voor hen geen pilot/innovatie is, maar dat het aanbrengen van het cementloze betonnen fietspad in het RAW bestek is voorgeschreven. Binnen de Proeftuin geopolymeren noemt TNO alle beschouwde projecten "pilots, pilotprojecten etc." met daarin "innovaties" toegepast. Voor de consistentie worden deze aanduidingen gehandhaafd. Alleen wanneer specifiek over het fietspad in Overijssel wordt gesproken wordt dit niet aangeduid als "pilot".



Figuur 33. Project Provincie Overijssel: in het werk gestort geopolymer beton.



Figuur 34. Project Provincie Overijssel: boorkern uit in het werk gestort geopolymer beton.

3 Monitoring

3.1 Opzet van het monitoringsprogramma

Het monitoringsprogramma van de proeftuin is pragmatisch opgezet. Het kon slechts één jaar duren, de omvang van de proeftuin in het aantal pilots (10) is groot, maar de middelen per individuele pilot is daardoor beperkt. Dit heeft vanzelfsprekend een aantal implicaties. De duur van de monitoring is te kort om trage, op lange termijn spelende degradatiemechanismen in beeld te brengen. In retrospectief geldt dit des te meer omdat een groot deel van de monsters niet genomen is direct na oplevering van de pilots, maar vier á vijf maanden later. De effectieve monitoringsperiode is wat dat betreft dus nog aanzienlijk korter dan één jaar; dit geldt niet voor de visuele monitoring. Zelfs een mechanisme dat al snel tot aantasting leidt als vorst is beperkt in beeld gekomen omdat er in de monitoringsperiode amper vorst geweest is. Daarnaast is geopolymeer beton een nieuw materiaal. Daardoor kan niet a priori worden uitgesloten dat er aantastingsmechanismen optreden die nog niet in beeld zijn. Bepaling van materiaaleigenschappen in het laboratorium kan daar dus ook niet op afgestemd worden.

De visuele inspecties van de pilots zijn een belangrijke bron van informatie. Inspecties zijn uitgevoerd bij oplevering, na een half jaar en na een jaar. De inspecties zijn uitgevoerd door de individuele piloteigenaren. Om zoveel mogelijk uniformiteit in de waarnemingen te bewerkstelligen is een inspectieprotocol opgesteld. Gelet bovenstaand is er wat betreft het volgen van het materiaal zelf voor gekozen om niet te kijken naar specifieke degradatiemechanismen, maar naar algemene aanwijzingen die er op duiden dat een materiaal (in negatieve zin) verandert.

Afname van de dichtheid van een materiaal met de tijd is een aanwijzing voor het verlies van samenhang of toename van porositeit. Aangezien de meeste vormen van aantasting gedreven worden door de toetreding van vocht betekent toename van de wateropname van een materiaal dat dit vatbaarder wordt voor toekomstige aantasting. Daarom zijn de *volumieke massa* en *vrijwillige wateropname* bepaald.

Voor steenachtige materialen geldt dat zij een aanvangsterkte hebben die zich daarna nog doorontwikkelt (zoals cementgebonden producten) of constant blijft (zoals keramische straatklinkers). Een afname van de sterkte hoeft niet per sé negatief te zijn en kan ingecalculeerd zijn (zoals bij beton op basis van aluminaatcement), maar zal in veel gevallen wijzen op aantasting van een materiaal. Daarom zijn de *druksterkte* en de *ultrasone geluidssnelheid* (UPV) bepaald. Deze laatste is indicatief voor de stijfheid (dynamische elasticiteitsmodulus) van een materiaal. Vergelijkbaar is de bepaling van de *elektrische weerstand* (TEM). Deze is een maat voor de ontwikkeling (dichtheid) van de microstructuur. Bij cement gebonden materialen wordt deze met de tijd dichter. Bij geopolymeer gebonden materialen is dit tot dusver minder onderzocht, maar mag verwacht worden dat deze in ieder geval gelijk blijft. Een afname van de elektrische weerstand zou dan kunnen duiden op achteruitgang van het materiaal, al speelt bij geopolymeer beton de afname van het gehalte aan oplosbare zouten ook een rol.

Geopolymeren worden gemaakt op basis van (een mengsel van) uitgangsmaterialen die voor een belangrijk deel bestaan uit (alumino)silicaten die oplosbaar zijn bij hoge pH, zoals hoogovenslak, poederkoolvliegasslag, metakaolien, etc., en een alkalische activator die voor de hoge pH zorgt. Deze kan bijvoorbeeld natrium- of kaliumloog of -waterglas bevatten. Een deel van deze alkaliën (Na, K) wordt niet gebonden en zal met de tijd uitlogen. Redelijkerwijs neemt het gehalte aan oplosbare bestanddelen met de tijd af. Een toename zou kunnen duiden op het mogelijk uiteenvallen van verbindingen dan wel vorming van (mogelijk ongewenste) oplosbare verbindingen. Daarom is het gehalte aan *wateroplosbare bestanddelen* bepaald.

Aanvullend is bij die projecten met betonstraatstenen of -tegels respectievelijk de splijttreksterkte of buigtreksterkte bepaald. Deze eigenschap is lopende het project aan de beproevingen toegevoegd. De bepaling is daarom alleen uitgevoerd na één jaar.

3.2 Korte toelichting op de beproevingsmethoden

De beproevingen zijn beschreven in de achterliggende individuele rapportages per pilot. Voor zover beschikbaar zijn ze uitgevoerd conform de geldende standaard. Volumieke massa en open porositeit zijn bepaald conform NEN-EN 12390-7:2019, de vrijwillige water opname is bepaald volgens bijlage E van NEN-EN 1338:2003 of vergelijkbaar waar relevant. De ultrasone geluidssnelheid is uitgevoerd volgens NEN-EN 12504-4:2010 op ongeconditioneerde proefstukken bewaard onder laboratoriumcondities. De druksterkte is bepaald conform NEN-EN 12390-3:2019. Splijt- en buigtreksterkte zijn bepaald volgens NEN-EN 1338:2003 respectievelijk NEN-EN 1339:2003. Voor de elektrische weerstand bestaat geen standaard. Deze is uitgevoerd volgens interne TNO-procedure met de twee elektroden methode (TEM). De TEM waarde is de gemeten weerstand vermenigvuldigd met het oppervlak waarover deze gemeten is gedeeld door de lengte waarover de weerstand is gemeten. De bepaling is uitgevoerd op met water verzadigde proefstukken en bij tegels en straatstenen over de hoogte bepaald. Het gehalte aan wateroplosbare bestanddelen is bepaald door ontsluiting analoog aan de schudproef voor wateroplosbare bestanddelen in metselwerk volgens NEN-EN 772-5:2002 met een vaste stof : demiwater verhouding van 1:10, waarna deze zijn bepaald door middel van inductief gekoppeld plasma - optische emissiespectrometrie (ICP-OES).

Een belangrijke kanttekening is, dat gedurende het monitoringsprogramma gebleken is dat een deel van de betonstraatstenen en -tegels voorzien is van een toplaag, die niet uit geopolymer maar uit cement gebonden beton bestaat.

3.3 Resultaten

3.3.1 Geopolymeer betonwaren

In alle zes van de zeven pilots met betonwaren zien de geopolymeer betonstraatstenen of -tegels er na een jaar nog steeds prima uit. In één pilot is de bindmiddel-huid op de grove toeslag nabij het oppervlak verdwenen. Figuur 35 geeft een impressie van de pilots op verschillende leeftijden. Ze vertonen geen gebreken die te wijten zijn aan het materiaal zelf. Figuur 36 laat voorbeelden zien van betonwaren die uit het werk genomen zijn na een jaar. Ook de materiaaleigenschappen

duiden niet op significante achteruitgang van het geopolymeer beton. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de trends in de zeven pilots met betonwaren. In een deel van de pilots is dat beton nog dichter of (iets) sterker geworden met de tijd. Het gehalte nog vrij in het materiaal aanwezige water-oplosbare componenten uit de activator (natrium, kalium) neemt af met de tijd.

Tabel 3.1. Globale ontwikkeling materiaaleigenschappen na een jaar ten opzichte van de uitgangssituatie in de 7 pilots met geopolymeer betonwaren. Aangegeven is het aantal pilots waar sprake is van een duidelijke afname, gelijk blijven of toename van de relevante eigenschap (het totaal is dus steeds 7).

Eigenschap	Afname	Gelijk	Toename
Volumieke massa		7	
Porositeit	1	6	
Wateropname		7	
Elektr. Weerstand	1	1	5
UPV	1	6	
Druksterkte		5	2
Wateroplosbaar Ca	2	3	2
Wateroplosbaar Na	5	2	
Wateroplosbaar K	3	4	



Figuur 35. Proeftuin Geopolymeren: impressie van de pilots met geopolymeer betonwaren. De nummers corresponderen met het pilotnummer. 1 – Gemeente Alphen aan den Rijn, na 1,5 jaar. 3 – Gemeente Rotterdam, na 1 jaar, 4 – Gemeente Amersfoort, na een half jaar, 5 – Gemeente Amsterdam, na oplevering, 7 – Gemeente Nijmegen, na een half jaar, 8 – Gemeente Dordrecht, na 1 jaar, 9 – Provincie Groningen, na 1 jaar.



Figuur 36. Proeftuin Geopolymeren: uit het werk genomen geopolymeer beton-waren na een jaar. De nummers corresponderen met het pilotonummer. 1 – Gemeente Alphen aan den Rijn. 3 – Gemeente Rotterdam. 4 – Gemeente Amersfoort. 7 – Gemeente Nijmegen. 8 – Gemeente Dordrecht. 9 – Provincie Groningen. Van pilot 5 – Gemeente Amsterdam is geen foto beschikbaar.

3.3.2 In het werk gestort geopolymeer beton

De proeftuin kent drie pilots met in het werk gestort geopolymeer beton. Deze geven een wisselend beeld. Figuur 37 laat dit zien. Figuur 38 geeft een beeld van het beton in de vorm van kernen geboord na een jaar. De pilot in Leeuwarden is uitgevoerd bij koude omstandigheden eind 2019. Er zijn drie vakken gestort, waarbij telkens de samenstelling van de mortel is aangepast. Het beton in deze drie vakken presteert verschillend: waar na een jaar bij het eerste vak het oppervlak al voor de vorstinvall niet alleen uitgewassen oogt en de toeslag makkelijk met de schoen los te wrijven is, is dat laatste bij het eveneens uitgewassen tweede vak niet zo, terwijl het derde vak niet eens een uitgewassen structuur heeft (Fig. 38). Terwijl de elektrische weerstand van het beton als maat voor de microstructuur erg laag is en de ultrasone geluidssnelheid is afgenomen na een jaar, is er sprake van een duidelijke toename van de druksterkte in deze pilot. Bij het project in Overijssel met in het werk gestort geopolymeer beton zijn na de vorstperiode in februari 2021 problemen met het oppervlak (Fig. 38). Ook dit werk is uitgevoerd bij een koude periode met soms veel wind. Er waren door omstandigheden tijdens het aanbrengen al voor de vorst problemen met de toplaag. Dit oppervlak vertoont na de vorst uitgebreide schilfering, loskomen van de toeslag en poederen, leidend tot stofwolken. Ook zijn er in deze pilot talrijke dwarsscheuren, ondanks dat er zaagsneden zijn gemaakt. Er is sprake van een afname van zowel de elektrische weerstand als de ultrasone geluidssnelheid, wat vragen oproept over het materiaal op termijn. Het beton in de derde in het werk gestorte pilot Gelderland vertoonde ook na de vorstperiode in februari 2021 geen zichtbare achteruitgang (Fig. 38). Dit werk is uitgevoerd in juni. Wel zijn er dwarsscheuren, maar niet meer dan in conventioneel ongedilateerd beton. Dit beton laat ook geen duidelijk verschil in de meeste materiaaleigenschappen met de tijd zien, behoudens een geringe toename in de druksterkte en te verwachten veranderingen in de hoeveelheid wateroplosbare componenten (Ca, Na, K).

Tabel 3.2. Globale ontwikkeling materiaaleigenschappen na een jaar ten opzichte van de uitgangssituatie in de 3 pilots met in het werk gestort geopolymeer beton. Aangegeven is het aantal pilots waar sprake is van een duidelijke afname, gelijk blijven of toename van de relevante eigenschap (het totaal is dus steeds 3).

Eigenschap	Afname	Gelijk	Toename
Volumieke massa		3	
Porositeit		3	
Wateropname		3	
Elektr. Weerstand	1	2	
UPV	2		1
Druksterkte		1	2
Wateroplosbaar Ca	2		1
Wateroplosbaar Na	2		1
Wateroplosbaar K	1	1	1



Figuur 37. Proeftuin Geopolymeren: impressie van de pilots met in het werk gestort geopolymer beton. De nummers corresponderen met het pilotnummer, 2 – Provincie Gelderland, na 22 maanden (na de vorst van februari 2021). 6 – Gemeente Leeuwarden, na 13 maanden (voor de genoemde vorstperiode); links de eerst gestorte moot, rechts de laatst gestorte. 10 – Provincie Overijssel, na 14 maanden (na de vorstperiode).



Figuur 38. Proeftuin Geopolymeren: kernen van in het werk gestort geopolymeer beton, geboord na een jaar. De nummers corresponderen met het pilotnummer, 2 – Provincie Gelderland. 6 – Gemeente Leeuwarden. 10 – Provincie Overijssel.

4 Duurzaamheidskenmerken

De bepaling van de prestatiekenmerken voor de duurzaamheid beperkt zich tot de verschillen tussen de geopolymeer betonproducten en conventioneel cement-gebaseerde referentieproducten. Het onderzoek gaat niet in op de verschillen tussen de individuele geopolymeer producten. Een dergelijke vergelijking tussen de individuele geopolymeer betonproducten is op basis van dit onderzoek om de volgende redenen ook niet mogelijk:

- De toepassingen van de geopolymeer betonproducten zijn verschillend, waardoor ook de prestatie-eisen verschillend zijn.
- Door de verschillende toepassingen zijn ook de referentieproducten verschillend.
- De duurzaamheidskenmerken hebben uitsluitend betrekking op de productiefasen van het geopolymeer beton, omdat dit de enige fasen zijn waarin dit verschilt van cement gebaseerd beton.
- In een aantal gevallen bestaat een steen of tegel uit een combinatie van een geopolymeer onderbeton met een cement gebonden toplaag. De LCA en CI zijn in dat geval berekend voor het onderbeton (dat is immers waarin de producten van elkaar verschillen).

Meer grootschalige effecten van de vervanging van conventioneel cementgebonden beton door geopolymeer beton, voortkomend uit de concurrentie om grondstoffen als slak en poederkoolvliegias³, zijn eveneens buiten beschouwing gelaten.

Om oneigenlijke vergelijking tussen producten te voorkomen worden in dit hoofdstuk de resultaten per product als percentage weergegeven ten opzichte van het gekozen referentieproduct en niet de absolute getallen. De resultaten geven een goede indicatie van de duurzaamheidskenmerken van de geopolymeer betonproducten. Vanwege de ongelijksoortigheid van de producten, hun toepassing en de gekozen referentieproducten kan niet genoeg benadrukt worden dat er geen conclusies kunnen worden getrokken over welk product het meest duurzaam is.

4.1 Werkwijze LCA en CI

In opdracht van TNO heeft SGS Intron voor een zestal producten een vergelijkende levenscyclusanalyse uitgevoerd. Deze is gebaseerd op de Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken van SBK (2019), waarbij conform de Uitvraag van de Klimaatvelop beton van Rijkswaterstaat (2019) uitsluitend de milieu-impacts in de berekening meegenomen die verschillen tussen het geopolymeer betonproduct en een referentieproduct. Voor geopolymeer beton heeft SGS Intron beargumenteerd dat dit de productiefasen (A1-A3) betreft. De uitkomst van de LCA is de milieukostenindicator (MKI) met eenheid Euro. De MKI wordt bepaald uit 11 effectcategorieën, waarbij in dit onderzoek de klimaatverandering (*Global Warming Potential*) met als eenheid kg CO₂ eq ook apart wordt gerapporteerd omdat

³ Zie m.b.t. deze problematiek SGS Intron rapport A117240/R20201150a (Muehleisen 2021) opgesteld in opdracht van Rijkswaterstaat.

‘CO₂-reductie’ expliciet als ‘*key performance indicator*’ (KPI) is benoemd in de Klimaatenvelop beton.

Daarnaast heeft SGS Intron de zogenaamde circulariteitsindex bepaald met een relatieve berekening. Dit is een methode – opgesteld binnen de Klimaatenvelop beton - om de circulariteit van innovatief beton te bepalen in vergelijking met referentiebeton⁴. De circulariteitsindex wordt bepaald met de formule:

$$\frac{\left(Sx + \frac{QrI}{QrR}Rg + \frac{QhI}{QhR}Hg\right)I}{(Sx + Rg + Hg)R} \times \frac{LI}{LR}$$

waarin:

<i>Sx</i>	<i>aandeel secundaire grondstoffen (% m/m)</i>
<i>Rg</i>	<i>aandeel realistische recycling (% m/m)</i>
<i>Hg</i>	<i>aandeel hergebruik (% m/m)</i>
<i>QrI/QrR</i>	<i>kwaliteitsfactor recycling product</i>
<i>QhI/QhR</i>	<i>kwaliteitsfactor hergebruiksproduct</i>
<i>LI/LR</i>	<i>levensduurfactor</i>
<i>I</i>	<i>innovatief product</i>
<i>R</i>	<i>referentieproduct</i>

Bij een CI lager dan 1 wordt het geopolymeer beton product als ‘minder circulair’ beschouwd dan het referentieproduct, bij een CI hoger dan 1 als ‘meer circulair’.

Voor het verkrijgen van de data voor de berekeningen heeft SGS Intron direct en onder vertrouwelijkheid informatie ontvangen van de producenten en deze beoordeeld. Deze informatie is niet gedeeld met TNO. De producenten hebben zelf het referentieproduct gekozen. Omdat het een relatieve berekening betreft die niet de gehele levenscyclus beslaat, heeft geen externe review plaatsgevonden. Het is immers geen volledige LCA conform de SBK bepalingmethode.

4.2 Werkwijze LCC

De beschouwing van de levensduurkosten (LCC) is in dit onderzoek eveneens beperkt tot de fasen waarin de innovatie verschilt van het referentieproduct, van winning van de grondstoffen tot en met productie van de betonmortel in de fabriek (fasen A1-A3). TNO heeft aan de producenten gevraagd om informatie te leveren over de kostprijs(opbouw) van drie producten:

1. Het referentieproduct.
2. Het toegepaste geopolymeer betonproduct.
3. Het toegepaste geopolymeer betonproduct bij productie op grote schaal.

In een aantal gevallen is er geen informatie geleverd door de producent. Voor wat betreft punt 3 is de producent gevraagd om een inschatting te geven van verwachte prijsontwikkeling.

⁴ SGS Intron rapport A110030-R20190323a (Hofstra 2019).

4.3 Resultaten per pilot geclusterd naar product

4.3.1 *Gemeente Alphen aan den Rijn en Gemeente Rotterdam*

De productie van geopolymeer beton in een Reduton® straatsteen zoals toegepast in de pilotprojecten in Koudekerk aan den Rijn en Rotterdam leidt tot een reductie van 33% op de MKI en 55% op het CO₂-effect per m³ onderbeton in vergelijking met traditioneel beton met CEM II/B-M 42,5 R cement.

De circulariteitsindex CI voor de innovatie is bepaald op 0,67 ten opzichte van 1 voor de referentie.

Informatie over de productiekosten en de verwachte ontwikkeling daarin bij opschaling is door TNO uitgevraagd maar niet beschikbaar gekomen.

4.3.2 *Provincie Gelderland en Provincie Overijssel*

De productie van RaMaC 400 zoals toegepast in de projecten in Gelderland en Overijssel in plaats van traditioneel beton met Portland cement (CEM I), Ecocem en kalksteenmeel leidt tot een reductie van 42% op de MKI en 58% op het CO₂-effect per m³ betonmortel.

De circulariteitsindex CI voor de innovatie is bepaald op 0,57 ten opzichte van 1 voor de referentie.

De productiekosten van het toegepaste product zijn 20-25% hoger dan de referentie. De verwachting van de producent is dat na opschaling van de productie de kosten van het geopolymeer beton en het referentieproduct nog slechts ca. 12% hoger zullen zijn.

4.3.3 *Gemeente Amersfoort, Gemeente Amsterdam en Gemeente Dordrecht*

De productie van geopolymeer beton in een CERO betontegel zoals toegepast in de pilotprojecten in Amersfoort, Amsterdam en Dordrecht leidt tot een reductie van 52% op de MKI en 69% op het CO₂-effect per m³ onderbeton in vergelijking met traditioneel cementbeton met een mengsel van CEM I 52,5 N en CEM III/A 42,5 N cement.

De circulariteitsindex CI voor de innovatie is bepaald op 0,63 ten opzichte van 1 voor de referentie.

Informatie over de productiekosten en de verwachte ontwikkeling daarin bij opschaling is door TNO uitgevraagd maar niet beschikbaar gekomen.

4.3.4 *Gemeente Leeuwarden*

De productie van geopolymeer betonmortel zoals toegepast in het pilotproject in Leeuwarden leidt tot een reductie van 30% op de MKI en 60% op het CO₂-effect per m³ betonmortel in vergelijking met gangbaar beton voor fietspaden op basis van een mengsel van CEM I en CEM III/B cement.

De circulariteitsindex CI voor de innovatie is bepaald op 0,62 ten opzichte van 1 voor de referentie.

De productiekosten van het toegepaste geopolymeer beton zijn 70% hoger dan de referentie. De verwachting van de producent is dat deze na opschaling van de productie ca. 60% hoger zullen zijn.

4.3.5 *Gemeente Nijmegen*

De productie van geopolymeer beton in een straatsteen zoals toegepast in het pilotproject in Nijmegen leidt tot een reductie van 46% op de MKI en 67% op het CO₂-effect per m³ onderbeton in vergelijking met regulier beton op basis van CEM III/A 42,5 N cement.

De circulariteitsindex CI voor de innovatie is bepaald op 0,56 ten opzichte van 1 voor de referentie.

De productiekosten van het toegepaste product zijn 25% hoger dan de referentie. De verwachting van de producent is dat dit ook na opschaling van de productie zo zal zijn omdat winst in productoptimalisatie teniet zal worden gedaan door stijgende grondstofprijzen.

4.3.6 *Provincie Groningen*

De productie van geopolymeer beton in een grasbetontegel zoals toegepast in het pilotproject in de provincie Groningen leidt tot een reductie van 59% op de MKI en 73% op het CO₂-effect per m³ onderbeton in vergelijking met regulier beton op basis van CEM II/B-M 42,5 R cement.

De circulariteitsindex CI voor de innovatie is bepaald op 0,67 ten opzichte van 1 voor de referentie.

Informatie over de productiekosten en de verwachte ontwikkeling daarin bij opschaling is door TNO uitgevraagd maar niet beschikbaar gekomen.

4.4 **Discussie**

De resultaten van de vergelijkende LCA's voor de productiefase laten zien dat de toegepaste geopolymeer betonproducten een aanmerkelijk lagere milieubelasting hebben dan de tot nu toe gangbare cementgebonden referentieproducten. Voor de betonwaren met geopolymeer onderbeton moet hierbij wel de kanttekening worden geplaatst dat deze producten zijn voorzien van een cementgebonden toplaag die in de berekening buiten beschouwing is gelaten. Bij een vergelijking op productniveau zal het verschil dus iets kleiner zijn.

In de uitgevoerde LCA gericht op de productiefase is gekozen om te vergelijken per m³ onderbeton of betonmortel.

Voor een volledige en toetsbare LCA over de complete levenscyclus met als resultaat absolute waarden voor de MKI van de producten die kunnen worden opgenomen in de Nationale Milieudatabase zou de functionele eenheid zodanig gekozen moeten worden dat de functionele prestatie van de producten leidend wordt. Daarmee loont minder materiaalgebruik immers. Een dergelijke functionele eenheid is bijvoorbeeld "1 m² voetpadverharding conform eisen zoals gesteld in ...".

Wat de circulariteitsindex betreft is in de berekening uitgegaan van een situatie waarbij bij einde levensduur het granulaat van geopolymeer beton wordt

gelijkgesteld aan menggranulaat voor wegfunderingen. Daardoor steekt de circulariteitsindex negatief af bij die van de referentieproducten. Voor deze wordt uitgegaan van hergebruik als betongranulaat met een hogere functioneel-technische kwaliteit. SGS Intron onderzoek laat zien dat dit in de toekomst ook voor geopolymeer beton kan⁵. Dit zal leiden tot een hogere circulariteitsindex voor geopolymeer beton.

Er zijn grote verschillen tussen producenten in de bereidheid om kostprijsinformatie te delen ten behoeve van de LCC. Er is begrip voor producenten die daar terughoudend in zijn. Met de ontwikkeling van geopolymeer beton en zeker met de opschaling van productie zijn grote investeringen gemoeid die zich op termijn moeten terugverdienen. Anderzijds is het voor de opdracht gevende partijen van belang om tenminste enig zicht te hebben op de kosten van innovaties opdat zij een passende uitvraag kunnen formuleren waarin meer duurzame producten worden beloond. Binnen de scope van dit project is slechts gekeken naar de kostprijs van het product, maar de kosten voor producten of materialen zijn slechts een beperkt deel van de opdrachtsom. Daar staat tegenover dat het materiaal mogelijk juist wel het deel van een werk is waar een relatief grote milieuwinst te realiseren is.

⁵ Zie bijvoorbeeld SGS-Intron rapport A896780/R20180056a (Van der Wegen 2018) en recent onderzoek in Mesgari et al. (2020).

5 Afsluitende beschouwing

De Proeftuin Geopolymeren omvat zeven pilots met betonwaren en drie met in het werk gestort beton. De pilots zijn gedurende hun eerste levensjaar visueel en qua ontwikkeling van de materiaaleigenschappen gevolgd (zie § 3). In de pilots is ervaring op gedaan met de uitvoering (inclusief Arbo-aspecten, zie § 2.6 en 2.8) en uitvoeringscondities (met name bij in het werk gestort geopolymeer beton).

Bij drie pilots met in het werk gestort geopolymeer beton is het beeld wisselend. Het beton in twee pilots laat schade aan het oppervlak zien en een aantal materiaal-eigenschappen lopen terug. In de derde pilot is dit niet zo. Of de schade en het teruglopen van de eigenschappen gerelateerd zijn aan het beton zelf en betekenen dat de stabiliteit van dit beton in het geding is en, zou nader onderzoek moeten uitwijzen. Uitvoeringscondities en al dan niet nabehandelingen verdienen nadrukkelijk aandacht. De lage temperatuur (en wind) bij twee van de drie pilots met in het werk gestort geopolymeer beton heeft waarschijnlijk een rol gespeeld; terwijl de projecten in Overijssel en Gelderland met een zelfde mengsel en beiden met een paver zijn uitgevoerd⁶, zijn de verschillen in kwaliteit van de toplaag groot. Het is wenselijk om te komen tot een richtlijn voor de uitvoering van in het werk gestort geopolymeer beton. Dit geldt niet alleen de weersomstandigheden, maar bijvoorbeeld ook de wijze van uitvoering⁷.

In de zeven pilots met geopolymeer betonwaren is gedurende een jaar geen enkele achteruitgang opgetreden. Ze presteren als beoogd, zonder gebreken.

De milieuwinst van geopolymeer betonproducten in termen van MKI en met name CO₂-effect ten opzichte van tot nu toe gangbare cement gebonden referentieproducten is substantieel en over de hele linie zichtbaar. De kostprijs van deze producten ligt nog wel hoger (minimaal 20-25 % tot 70 %). Het is niet de verwachting dat deze in de nabije toekomst zal zakken tot onder de prijs van traditionele cement gebonden producten. Deze meerkosten zullen moeten worden afgewogen tegen de te behalen milieuwinst.

Voor uitontwikkelde producten zou een volgende stap het opstellen van een complete (dus alle levensfasen en niet alleen de productiefasen A1-A3 waarin het geopolymeer beton afwijkt van cement gebonden beton) en getoetste LCA kunnen zijn, zodat deze producten kunnen worden opgenomen in de Nationale Milieudatabase. Daarbij is het aan te bevelen om recente onderzoeken over het tweede en derde leven van geopolymeerbeton mee te nemen. Dat zou het ook gemakkelijker maken om de toepassing van deze producten met een aantoonbaar lagere milieubelasting te waarderen in een aanbestedingstraject.

⁶ Mededeling R. Bleijerveld (SQAPE) d.d. 24 juni 2021.

⁷ Bijvoorbeeld de consistentie van het geopolymeer beton in relatie tot een te gebruiken paver.

6 Literatuur

6.1 Rapportages individuele pilots

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Gemeente Alphen aan den Rijn. TNO-rapport 2021-R-11366.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Provincie Gelderland. TNO-rapport 2021-R-11379.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Gemeente Rotterdam. TNO-rapport 2021-R-11383.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Gemeente Amersfoort. TNO-rapport 2021-R-11384.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Gemeente Amsterdam. TNO-rapport 2021-R-11387.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Provincie Leeuwarden. TNO-rapport 2021-R-11388.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Gemeente Nijmegen. TNO-rapport 2021-R-11389.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Gemeente Dordrecht. TNO-rapport 2021-R-11391.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Provincie Groningen. TNO-rapport 2021-R-12393.

Dijkmans, T. & Nijland, T.G., 2021. Proeftuin geopolymeren: projectrapportage pilot Provincie Overijssel. TNO-rapport 2021-R-11393.

6.2 Referenties

Hofstra, U., 2019. Meetmethode circulariteit in klimaatenvolop beton. SGS Intron rapport A110030-R20190323a.

Mesgari, S., Akbarnezhad, A. & Xiao, J.Z., 2020. Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties. Construction & Building Materials 236:117571.

Muehleisen, N., 2021. Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaseerde cementen en geopolymeren. SGS Intron rapport A117240/R20201150a.

NEN-EN 772-5:2002. Beproevingmethoden voor metselstenen - Deel 5: Bepaling van het gehalte aan oplosbare zouten in metselbakstenen.

NEN-EN 1338:2003. Betonstraatstenen - Eisen en beproevingsmethoden.

NEN-EN 1339:2003. Betontegels – Eisen en beproevingsmethoden.

NEN-EN 12390-3:2019. Beproeving van verhard beton - Deel 3: Druksterkte van proefstukken.

NEN-EN 12390-7:2019. Beproeving van verhard beton - Deel 7: Volumieke massa van verhard beton.

NEN-EN 12504-4:2005. Beproeving van beton - Deel 4: Bepaling van de ultrasone-pulssnelheid.

Nijland, T.G., 2019. Inspectieprotocol Monitoring Geopolymeren. TNO-memo M-100321189

Rijkswaterstaat 2019. Uitvraag duurzaamheidsmonitoring (LCA/LCC) pilots Klimaatvelop beton, concept 25 juni 2019.

Stichting Bouwkwiteit (SBK), 2019. Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken, versie 3.0,

Wegen, G. J.L. van der, 2018. Milieuhygiënische en materiaaltechnische kwaliteit bij meervoudig hergebruik van geopolymeerbeton vervaardigd met SQAPE alkalisch geactiveerd bindmiddel in vergelijking met Portlandcementbeton. SGS Intron rapport A896780/R20180056a.

7 Ondertekening

Delft, december 2021

TNO

Dr.T.G. Nijland
Auteur

Dr. P.C. Rasker
Research manager
Structural Reliability