



WHITE PAPER

Geopolymeerbeton

Duurzaamheid en eigenschappen
- een kritische beoordeling -

Duurzaamheid en eigenschappen van geopolymeerbeton

- een kritische beoordeling -

Geopolymeerbeton wordt steeds vaker gezien als dé oplossing om het CO₂-profiel van beton fors te verlagen. Naast een veel gunstiger milieuprofiel zou het technisch gelijk of beter presteren dan regulier beton. Veruit de meeste artikelen over geopolymeerbeton, meestal afkomstig van universiteiten en onderzoeksinstituten, zijn positief over dit materiaal. Toch blijft de toepassing nog zeer beperkt en dat zou vooral komen door het ontbreken van regelgeving. Er zijn echter meer redenen waarom geopolymeerbeton niet grootschalig wordt toegepast. In deze white paper worden de feiten rondom de milieuaspecten en eigenschappen van geopolymeerbeton besproken en de hindernissen voor opschaling.



In het kort:

- ♦ Bij gebruik van gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias in geopolymeerbeton is er geen sprake van milieuwinst maar van milieuverlies.
- ♦ De meeste eigenschappen van geopolymeerbeton zijn inferieur ten opzichte van regulier beton.
- ♦ Het wezenlijk opschalen van geopolymeerbeton is niet mogelijk door de beperkte en niet-opschaalbare beschikbaarheid van activators.
- ♦ Geopolymeerbeton kan niet als circulair worden beschouwd.

Wat is geopolymeerbeton?

Geopolymeren is een gangbare aanduiding voor alkalisch geactiveerde bindmiddelen. Materialen zoals poederkoolvliegask en hoogovenslak worden hierbij niet geactiveerd met portlandcementklinker, zoals in regulier beton, maar met een sterke base (alkali).

Bij grondstoffen die hoofdzakelijk silicium bevatten, zoals poederkoolvliegask, kan er hierbij een min of meer polymeerachtige structuur ontstaan. Bij materialen die ook veel calcium bevatten, zoals hoogovenslak, ontstaat er net als bij regulier cement hoofdzakelijk een zogeheten CSH-gel (calciumsilicaathydraat), de basis van cementsteen. De verhouding calcium/silicium in de CSH-gel van geo-'polymeer'-beton wijkt wel sterk af van die in regulier beton, waardoor de eigenschappen toch verschillen. In alkalisch geactiveerde slak is deze verhouding circa 1 terwijl de verhouding bij reguliere cementsteen circa 1,5 tot 1,8 bedraagt.

Het bindmiddel bestaat bij geopolymeerbeton meestal uit grondstoffen die ook voor regulier cement geschikt zijn, zoals hoogovenslak en poederkoolvliegask, en daarnaast is een alkalische activator nodig. De activator zorgt voor een hoge pH, waardoor de slak en vliegask oplossen en kunnen gaan reageren.

Activators

De meest gangbare activators zijn natriumhydroxide (NaOH, als waterige oplossing aangeduid als natronloog) en natriumsilicaat (Na_2SiO_3 , waterglas). Ook natriumcarbonaat (Na_2CO_3 , soda) wordt als activator gebruikt. Deze zwakke base is in vergelijking met waterglas en natriumhydroxide veel minder agressief (lagere pH) en milieuvriendelijker, maar ook veel minder effectief. In combinatie met verwarmen kan hoogovenslak er echter goed mee worden geactiveerd.

Een nog zwakkere activator dan natriumcarbonaat is natriumsulfaat. In combinatie met hoogovenslak én een klein aandeel portlandcement (5%) is de sterkteontwikkeling echter voldoende, al is het daarmee geen volledig alkalisch geactiveerd bindmiddel. Bij deze combinatie ontstaat er natriumhydroxide door de vorming van calciumhydroxide bij de hydratatie van de portlandcementklinker: $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2 \text{NaOH} + \text{CaSO}_4$. De sulfaat helpt ook bij de sterkteontwikkeling door de vorming van ettringiet. Dit type bindmiddel is in de jaren 50 in België op de markt gebracht als Purdocement en beperkt toegepast. Onderzoek aan enkele teruggevonden bouwwerken laten overigens op een ouderdom van circa 55 jaar forse carbonatisatie en als gevolg daarvan corrosie zien [1].



Het eerste patent voor een geopolymeerbindmiddel (alkalisch geactiveerde slak) werd al in 1908 afgegeven in de VS [2]. Van groot-schalige toepassing kwam het echter pas in de jaren 60 in met name Rusland en Oekraïne, gedreven door een tekort aan portlandcement in de voormalige Sovjet-Unie (fig. 1). De

afgelopen decennia is er wereldwijd zeer veel onderzoek gedaan naar geopolymeerbeton, vanwege de theoretische potentie om het CO₂-profiel van beton fors te verlagen. De toepassing van geopolymeerbeton blijft echter wereldwijd zeer marginaal.



Figuur 1. Appartementencomplex uit 1994 van 24 verdiepingen gebouwd met alkalisch geactiveerde slak in Lipetsk, Rusland [8] (foto: Google Street View – juli 2015)

Theoretische winst op projectniveau

Op projectniveau kan geopolymeerbeton op basis van hoogovenslak en poederkoolvliegias een lage MKI (milieukosten indicator) opleveren, maar gemiddeld zal de MKI op landelijke schaal niet dalen en daarmee ook niet de CO₂-emissie. Dit komt omdat er gebruik wordt gemaakt van grondstoffen die nu al volledig worden toegepast in de cement- en betonindustrie.

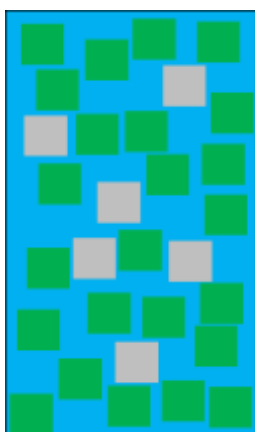
Hoogovenslak en poederkoolvliegias zijn schaarse grondstoffen die in Europa (en hoogovenslak ook wereldwijd) nu al vrijwel volledig worden toegepast in cement en beton, die daarmee portlandcementklinker (zeker in Nederland) al sinds vele decennia gedeeltelijk vervangen. Het toepassen van extra hoge gehalten aan slak of vliegias in geopolymeerbeton maar ook bijvoorbeeld in de vorm van een hoogovencement CEM III/C, levert dus geen milieuwinst op omdat er alleen sprake is van een verschuiving van grondstoffen (fig. 2).

Natuurlijk kunnen we door een toenemende vraag meer slak en vliegias importeren uit de omliggende landen dan nu al het geval is. In

Nederland kan de gemiddelde MKI dan dalen, maar uiteraard zal de gemiddelde MKI van beton in de omliggende landen dan stijgen, want ook daar worden slak en vliegias al nagenoeg volledig toegepast in beton. Door het toegenomen transport neemt de totale CO₂-emissie dan zelfs toe.

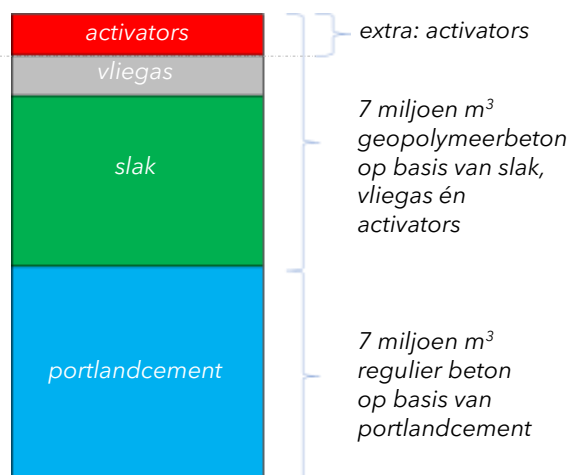
Ook de activators resulteren in extra CO₂-emissie. Daar komt nog bij dat portlandcementklinker effectiever slak en puzzolanen zoals vliegias activeert dan sterke basen: om dezelfde sterkte te bereiken is in de regel meer slak nodig in geopolymeerbeton dan hoogovencement in regulier beton.

Nederlands beton zonder geopolymeren:



14 miljoen m³ regulier beton op basis van een mix van verschillende cementsoorten en vulstoffen (gemiddeld 50 % klinker, 40 % slak en 10 % vliegias)

Nederlands beton met volledige toepassing van slak en vliegias in geopolymeerbeton:



Figuur 2. Geopolymeerbeton op basis van grondstoffen die al volledig worden toegepast in de cement- en betonindustrie leveren geen milieuwinst op. De milieukosten nemen zelfs toe door de toevoeging van activators aan de betonketen.

Beschikbaarheid grondstoffen

Geopolymeren kunnen alleen een bijdrage leveren aan het beperken van de CO₂-emissie als er gebruik wordt gemaakt van materialen die we nu nog niet toepassen in beton. Met het toepassen van geopolymeerbeton op basis van hoogovenslak of poederkoolvliegias wordt tenslotte alleen op het project (schijnbare) milieuwinst behaald, maar stijgt de totale CO₂-footprint van de bouw in Nederland. Alternatieve materialen zijn bijvoorbeeld een kunstmatig vervaardigde slak, lavameel of gecalcineerde klei, maar ook andere secundaire materiaalstromen dan poederkoolvliegias en hoogovenslak.

In het geval van geschikte alternatieve secundaire materiaalstromen zijn de beschikbare volumes helaas meestal beperkt. Gecalcineerde klei kan wél onbeperkt worden geproduceerd en als grondstof voor geopolymeerbeton worden gebruikt. Het is alleen zeer de vraag of er dan nog milieuwinst wordt bereikt ten opzichte van een regulier cement met een laag CO₂-profiel.

Er kan grofweg worden gesteld dat de effectiviteit van een grondstof in geopolymeerbeton vergelijkbaar is met de effectiviteit in combinatie met portlandcementklinker. In cement kan met gegraneerde hoogovenslak het grootste aandeel portlandcementklinker worden vervangen en ook voor geopolymeerbeton is hoogovenslak het meest geschikt. Met een hoog aandeel hoogovenslak kan geopolymeerbeton worden gemaakt dat ook zonder verwarmen een goede sterkteontwikkeling heeft. Met minder reactieve materialen, zoals poederkoolvliegias, gemalen baksteen, tras of gecalcineerde klei, zijn in geopolymeerbeton zeer hoge doseringen sterke activator en/of verwarmen noodzakelijk. De productie van de benodigde sterke activator, NaOH, kan echter, zoals we verderop beschrijven, niet worden opgeschaald.

Hoogovenslak

Zoals eerder aangegeven levert het gebruik van gegraneerde hoogovenslak en poederkoolvliegias in geopolymeerbeton geen milieuwinst maar milieuverlies op, maar het volume van deze bijproducten is ook relatief beperkt. Bij elkaar vormen ze circa 13% van de wereldwijde cementproductie [3]. Er zijn andere rest- en afvalstromen die geschikt zijn voor het maken van geopolymeerbeton en die nog niet worden toegepast in cement en beton, maar de volumes hiervan zijn beperkt en aanzienlijk minder dan de hoeveelheid hoogovenslak en vliegias. Zo komt er in België een relatief grote hoeveelheid koperslak vrij die geschikt lijkt voor



de productie van geopolymeerbeton. Het gaat echter om minder dan 200.000 ton per jaar, terwijl er in België circa 6 miljoen ton cement per jaar wordt gebruikt.

Klei en tras

Klei is wel ruim beschikbaar en kan door calcineren (verhitten tussen circa 700 en 800 °C) geschikt worden gemaakt voor toepassing in zowel cement als in geopolymeerbeton. Het gaat vooral om de kleisoort kaolien (Chinese klei) die rijk is aan het mineraal kaolinit. Door verhitten ontstaat er een complexe min of meer amorse structuur, waarmee het puzzolane eigenschappen krijgt. Vooral door de energie die nodig is voor het verhitten, heeft gecalcineerde klei in vergelijking met hoogovenslak en poederkoolvliegask wel een hoog CO₂-profiel (270 - 423 kg CO₂ per ton [3][4]), waardoor er in combinatie met activators weinig of geen milieuwinst wordt bereikt in vergelijking met regulier beton op basis van cement met een laag



Figuur 3. Het mineraal kaolinit. De chemische formule van kaolinit is $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Door verhitten wordt de aluminiumsilicaat omgezet in meta-kaolien: het kristalwater wordt eruit gestookt (foto: Wikimedia Commons)

CO₂-profiel. Ook tras is ruim beschikbaar en hoeft niet te worden verhit, maar net als bij gecalcineerde klei is er een zeer hoge dosering sterke activator nodig om een acceptabele sterkte-ontwikkeling in geopolymeerbeton te bereiken.

Activators

Nog problematischer voor het opschalen van geopolymeerbeton is de beperkte beschikbaarheid van activators. De productie van natriumhydroxide (NaOH, in water opgelost natronloog genoemd), de belangrijkste en meest effectieve activator, bedraagt circa 60 miljoen ton per jaar via elektrolyse van een natriumchlorideoplossing, waarbij chloorgas vrijkomt. De markt voor chloor (Cl_2) is beperkt, waardoor opschaling van de productie van NaOH niet eenvoudig is [5]. Bovendien is nu al de vraag naar NaOH vanuit andere toepassingen groter dan de productie. Natronloog wordt onder andere gebruikt voor de productie van papier en voor tal van chemische processen. De beperkte beschikbaarheid belemmert dan ook de opschaling van geopolymeerbeton [3].

De wereldwijde productie van natriumsilicaat (waterglas), een activator die vaak in combinatie met natronloog wordt gebruikt, bedraagt minder dan 10 miljoen ton per jaar, waarmee hooguit 50 miljoen ton bindmiddel kan worden gemaakt [6]. Dat komt grofweg overeen met 1% van het totale wereldwijde cementvolume. Maar ook waterglas kent tal



Figuur 4. Natriumhydroxide pellets
(foto: Wikimedia Commons)

van andere toepassingen, waardoor de huidige productie maar beperkt voor geopolymeerbeton kan worden aangewend.

De productie van de zwakke base natriumcarbonaat bedraagt circa 50 miljoen ton, door delving en vooral door een chemische reactie tussen kalksteen en natriumchloride [7]. Grofweg de helft hiervan wordt gebruikt voor de productie van glas. De productie van natriumcarbonaat zou wel opgevoerd kunnen worden (en in de VS zijn grote voorraden), maar deze activator is niet erg geschikt voor activatie van ruim beschikbare grondstoffen zoals (gecalcineerde) klei en tras.

Vergelijking eigenschappen

De eigenschappen van geopolymeerbeton zijn sterk afhankelijk van de gekozen combinatie van vulstof(fen) met bindmiddelfunctie (poeders) en activator(s), terwijl ook geringe variaties in de samenstelling van de poeder(s) meer invloed hebben op de eigenschappen dan bij toepassing in regulier cement en beton. Er zijn echter wel enkele algemene uitspraken te doen die voor de meeste varianten van geopolymeerbeton gelden.

Constructieve eigenschappen

Geopolymeerbeton heeft in vergelijking met regulier beton (althans, zolang het nog niet gecarbonateerd is) een hogere treksterkte bij gelijke druksterkte. Dat is gunstig voor ongewapend beton. Bij gewapend beton is de hogere treksterkte in de regel ongunstig: om de scheurwijdte beperkt te houden en het risico op brosse breuk te voorkomen is er dan vaak meer wapening nodig dan bij regulier beton.

Geopolymeerbeton vertoont meestal fors meer krimp dan regulier beton. Tweemaal zoveel krimp is gebruikelijk, al zijn er ook onderzoeken en geopolymeer-varianten die weinig verschil laten zien. Geopolymeerbeton vertoont ook aanzienlijk meer kruip dan regulier beton [8][11]. Dat geopolymeerbeton in de regel, in vergelijking met regulier beton, meer krimpt en meer kruipt is uit constructief oogpunt meestal ongunstig.

Figuur 5. Veel fietspaden van geopolymeerbeton vertonen al binnen enkele jaren zeer forse scaling – hierbij wordt door vorst-dooiwisselingen de cementshuid verwijderd en komen de grindkorrels aan het oppervlak te liggen. Foto: Fietspad Ede bij parkeerplaats sportpark De Peppel, aangelegd in 2017, foto gemaakt in 2023.



Aantastingsmechanismen

Ten aanzien van diverse aantastingsmechanismen, zoals vorst-dooiwisselingen en indringing van chloriden, lijkt geopolymeerbeton goed te presteren. De onderzoeken zijn echter vrijwel zonder uitzondering verricht aan jong geopolymeerbeton. De weerstand tegen deze aantastingsmechanismen gaat echter sterk achteruit door carbonatatie, terwijl de weerstand tegen carbonatatie juist niet een sterk aspect is van geopolymeerbeton.

Bij carbonatatie van geopolymeerbeton, in ieder geval bij alkalisch geactiveerde slak, wordt direct de CSH-gel aangetast [9]. Hierbij ontstaat naast calciumcarbonaat een soort silicagel die poreuzer en zwakker is dan de oorspronkelijke CSH-gel. Hierdoor wordt bij geopolymeerbeton de cementsteen niet zoals bij portlandcement harder en dichter door carbonatatie, maar juist zachter en poreuzer. Dat heeft een negatief effect op de dichtheid en daarmee de

Carbonatatie

Het fenomeen carbonatatie is de reactie tussen CO_2 uit de lucht en bepaalde bestanddelen in het beton. Bij deze reactie daalt de pH en neemt dus de kans toe dat de wapening gaat roesten.

Bij de chemische reactie van carbonatatie is calcium betrokken. Dit calcium wordt onttrokken uit twee belangrijke producten in de cementsteen, namelijk calciumhydroxide portlandiet, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en CSH-gel (de belangrijkste component van de cementsteen).

De belangrijkste vorm van carbonatatie is de reactie van CO_2 uit de lucht met in het poriewater opgeloste calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tot calciumcarbonaat ofwel kalk (CaCO_3). Carbonatatie begint aan het betonoppervlak en dringt langzaam het beton in. Naast calciumhydroxide bevat cementsteen vooral

calciumsilicaat-hydraatverbindingen (CSH-gel) en daarnaast andere verbindingen zoals ettringiet. In niet-gecarbonateerd beton zijn deze componenten stabiel door onder andere de hoge pH. Door carbonatatie daalt echter de pH van het poriewater van ruim 13 tot minder dan 8. Zodra de pH voldoende is gedaald, zal op termijn ook een groot deel van de calcium in de CSH-gel langzaam worden omgezet in calciumcarbonaat. Er ontstaat dan een soort silicagel die poreuzer en zwakker is dan de oorspronkelijke CSH-gel. Door de lagere kalkbuffer (afwezigheid van veel $\text{Ca}(\text{OH})_2$ die bij hydratatie van portlandcementklinker ontstaat) treedt dit effect eerder en sterker op bij geopolymeerbeton dan bij regulier beton.

weerstand tegen onder andere indringing van chloriden en het verlaagt ook sterk de weerstand tegen vorst-dooiwisselingen (fig. 5 en 6). Ook de druksterkte neemt hierdoor af.

Ook neemt bij geopolymeerbeton op basis van vliegas (en daarmee vermoedelijk ook andere puzzolanen zoals gecalcineerde klei en tras) vanwege het lage gehalte aan calciumoxide (CaO) door carbonatie de porositeit toe en de weerstand tegen diverse aantastingsmechanismen af [10].

Geopolymeerbeton presteert hierdoor in de praktijk veel slechter dan op basis van laboratoriumonder-

zoek aan jong (niet gecarbonateerd) beton mag worden verwacht.

Overigens blijkt ook laboratoriumonderzoek aan in het laboratorium gecarbonateerd beton niet representatief voor de praktijk, doordat de praktijkomstandigheden (wisselend nat/droog) niet in het laboratorium worden gesimuleerd [10].

Er is geen twijfel dat met geopolymeerbeton kan worden gebouwd. Maar de veel gehoorde stelling dat de eigenschappen van geopolymeerbeton in algemene zin gelijk of beter zijn dan die van regulier beton is onjuist.

Figuur 6. De toplaag van het geopolymeerbeton-fietspad Deventer-Holten, provincie Overijssel moest na 4 jaar vanwege forse scaling worden gefreesd.



Geopolymeerbeton is niet circulair

In de CROW-CUR richtlijn 2 'Beoordelingssystematiek grondstoffen op geschiktheid voor circulair beton' is een criterium voor het alkaligehalte van betongranulaat opgenomen van maximaal 0,4% m/m. Dit criterium is opgenomen om te voorkomen dat er ASR ontstaat in nieuw beton met betongranulaat. Betongranulaat van geopolymeerbeton zal in de regel niet aan dit criterium voldoen. ASR is de afkorting van alkali-silicareactie, een reactie van alkaliën en water met reactief silica. Reactief silica is vaak een bestanddeel van toeslagmaterialen. De reactieproducten van ASR kunnen veel water binden en daardoor gaan zwellen, waarbij er forse scheurvorming kan ontstaan.

ASR kan tot forse schade van beton leiden. Geopolymeerbeton moet dus bij recycling opnieuw worden toegepast in geopolymeerbeton of er zal moeten worden aangetoond dat er bij toepassing in regulier beton geen verhoogd risico is op ASR. Dat is echter niet eenvoudig. Het gehalte aan alkaliën is in geopolymeerbeton dermate hoog dat bij hergebruik in de vorm van traditioneel betongranulaat de zogeheten cementparagraaf van CROW-CUR Aanbeveling 89 niet kan worden gebruikt omdat de 'alkalibijdrage overige bestanddelen' al bij toepassing van 30% betongranulaat te hoog zal zijn. Zelfs bij toepassing van een hoogovencement CEM III/B is ASR dan dus niet uit te sluiten. En dat ondanks het feit dat CUR-Aanbeveling 89 rekening houdt met de binding van alkaliën in een slak- en/of vliegaskrijke matrix en bij hoge slakgehalten dus hogere alkaligehalten toestaat.

De kruip van geopolymeerbeton kan een factor vier of meer hoger zijn dan de kruip van regulier beton bij vergelijkbare sterkte. Het is onduidelijk wat de effecten op de kruip van nieuw regulier beton zijn wanneer het toeslagmateriaal gedeeltelijk wordt vervangen door betongranulaat van geopolymeerbeton.

Bij slim breken zullen de alkaliën vooral in de cementsteenfractie terecht komen. Het slim gebroken grind is dan wél te hergebruiken, maar hergebruik van de cementsteenfractie in regulier beton wordt dan problematisch.

Geopolymeerbeton apart recyclen en hergebruiken in nieuw geopolymeerbeton is in de praktijk niet eenvoudig te organiseren en er is niet aangetoond dat er geen verhoogd risico is op ASR of andere negatieve effecten bij dit hergebruik. Geopolymeerbeton kan daarom vooralsnog niet als circulair worden beschouwd.

Bijdrage aan verduurzaming beperkt

Duidelijk is dat, door de beperkte beschikbaarheid van grondstoffen en activators, de productie van geopolymeerbeton niet zodanig kan worden opgeschaald, dat het een belangrijk deel van op regulier cement gebaseerd beton kan vervangen. Daarnaast zijn voor de meeste toepassingen ook de eigenschappen van geopolymeerbeton inferieur aan die van regulier beton. Verder kan geopolymeerbeton vooralsnog niet als circulair worden beschouwd.

Het is natuurlijk goed om reststromen die niet al in cement en beton worden toegepast, zoals koperslak, te gebruiken voor geopolymeerbeton, wanneer deze toepassing de meeste milieuwinst oplevert. Daarnaast kan geopolymeerbeton worden gebruikt vanwege specifieke eigenschappen zoals zuurbestendigheid. Maar de potentiële bijdrage van geopolymeren aan de verdere verduurzaming van beton is zeer beperkt.

Cement&BetonCentrum

Het Cement&BetonCentrum is de branchevereniging voor de cementindustrie in Nederland. Onze leden zijn CCB, Dyckerhoff, Heidelberg Materials en Holcim. Het Cement&BetonCentrum houdt zich bezig met markt-onderzoek, kennisoverdracht, technisch onderzoek, belangenbehartiging en regelgeving.

www.cementenbeton.nl

Literatuur

- [1] Duurzaamheid van beton met alkali-geactiveerde slak uit de jaren 50 – Het Purdocement, Maarten Vanooteghem, Master thesis Universiteit Gent, 2011
- [2] US Patent 900,939, Slag cement and process of making the same, 1908
- [3] Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinker-gebaseerde cementen en geopolymeren, SGS INTRON B.V., mei 2021
- [4] Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL, Materials and Structures (2022) 55:3
- [5] One-part alkali-activated materials: A review, Tero Luukkonena, Zahra Abdollahne-jan-da, Juho Yliniemi, Paivo Kinnunen, Mirja Illikainen, Cement and Concrete Research 103 (2018) 21-34
- [6] Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry, Karen L. Scrivener, Vanderley M. John, Ellis M. Gartner, United Nations Environment Programme, Paris 2016.
- [7] The Essential Chemical Industry - online
<https://www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/sodium-carbonate.html>
- [8] Alkali-Activated Cements and Concretes, Caijun Shi, Pavel V. Krivenko, Della Roy, Taylor & Francis, USA, 2006
- [9] Carbonation process of alkali-activated slag mortars, F. Puertas, M. Palacios, T. Vazquez, Eduardo Torroja Institute (C.S.I.C), Madrid, 2005
- [10] Field and Laboratory Investigation of the Durability Performance of Geopolymer Concrete, Kirubajiny Pasupathy, thesis, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2018
- [11] Kostiuchenko, A. (2024). Creep of alkali-activated fly ash and slag concrete: Unveiling multiscale dynamics. [Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology].