

BETONNIEK

STANDAARD voor technologie en uitvoering van beton

Band

16

Uitgave

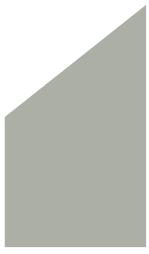
30



Brand meester

Over de effecten van
brand op beton

Oktober
2019



Brand meester

Beton is onbrandbaar, veroorzaakt geen rookontwikkeling en er komen geen giftige gassen vrij bij hoge temperaturen. Omdat beton ook in zekere mate hitte-isolerend is en bij brand lang z'n draagvermogen behoudt, zijn betonconstructies van zichzelf in hoge mate bestand tegen een forse brand. Toch worden in situaties waarbij een extreme vuurbelasting kan optreden vaak extra voorzieningen getroffen. De sterkte en stijfheid van beton en wapening nemen namelijk wel af bij hoge temperaturen. Ook kan spatten van het beton optreden. In deze *Betoniek* leggen we uit wat er bij brand met beton gebeurt en wanneer aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn.



◀
Een brand woedt in een gebouw in Kiev, foto: Shutterstock.

Als brand uitbreekt in de buurt van een betonconstructie zal deze constructie vanaf het betonoppervlak opwarmen. De mechanische eigenschappen, en daarmee het dragend vermogen van zowel het beton zelf als van de wapening veranderen bij oplopende temperaturen. Het risico bestaat dat de betonconstructie bezwijkt als deze te lang aan hoge temperaturen wordt blootgesteld. Het is belangrijk dat er voldoende tijd is om te kunnen vluchten, de constructie te kunnen doorzoeken en de brand te bestrijden. Rekening houdend met allerlei invloedsfactoren kan een constructie daarop worden ontworpen, bijvoorbeeld door de dikte van de betondekking aan te passen.

In deze *Betoniek* gaan we eerst in op de verschillende soorten branden die kunnen optreden. Vervolgens staan we stil bij de opwarming van de betonconstructie vanaf

het betonoppervlak. Daarna kijken we wat er gebeurt in het beton bij opwarming en wat het effect van deze opwarming is op de mechanische eigenschappen van het beton en de wapening.

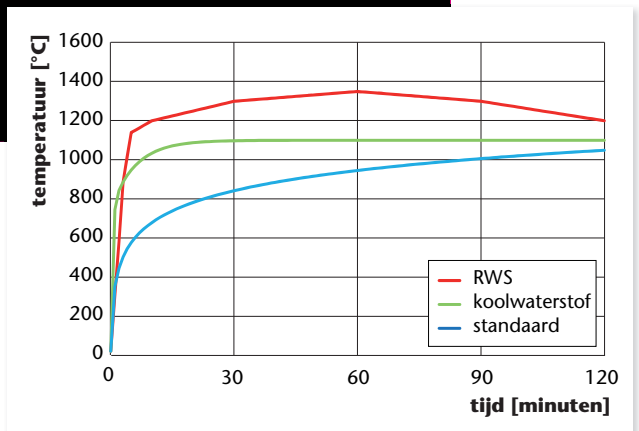
Daarnaast is er nog een ander belangrijk fenomeen dat bij brand kan optreden: spatten. Door het opwarmen van het beton is het mogelijk dat stukken beton uit het betonoppervlak springen. Hierdoor vermindert of verdwijnt de betondekking op de wapening, waardoor de wapening rechtstreeks wordt blootgesteld aan de brand met alle gevolgen van dien. Na de beschouwing van brand en het effect op de eigenschappen van beton en wapening, gaan we uitgebreid in op het fenomeen spatten en op de mogelijkheden dit te voorkomen.



1
Brandweer blust een brand, foto: Pxhere

Soorten brand

De ene soort brand is de andere niet. In deze Betoniek maken we daarom een tweedeling wat betreft de intensiteit van de brand. We onderscheiden twee soorten: een 'standaard'-brand in een betonconstructie als een appartementencomplex of kantoor, en een felle brand in een tunnel. Bij een standaardbrand wordt uitgegaan van het brandbare materiaal dat normaal aanwezig is, zoals meubels en papier. Bij een tunnelbrand kan er sprake zijn van een concentratie van zeer veel brandbaar materiaal, in de vorm van een volgeladen vrachtauto met brandbaar materiaal of een tankwagen met brandstof. Omdat in een tunnel daarnaast de warmte niet gemakkelijk weg kan, kunnen veel hogere temperaturen ontstaan dan bij een 'standaard'brand. De temperatuur van het betonoppervlak loopt bij een tunnelbrand hierdoor veel sneller op.



Om inzicht te krijgen in het verloop van de temperatuur bij een brand zijn er zogenoemde brandkrommen opgesteld. In figuur 1 worden voor de twee soorten brand de genormeerde brandkrommen weergegeven: voor tunnels de RWS-brandkromme uit de nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-2 en de koolwaterstofbrandkromme uit Eurocode 1, en voor de woning- en utiliteitsbouw de standaard brandkromme volgens ISO 834. De brandkrommen zijn bepaald op basis van het gemeten temperatuurverloop in de tijd tijdens een gecontroleerde brand. Het gaat

2
Brandkrommen. Weergegeven worden de RWS-brandkromme (Rijkswaterstaat) ofwel de tunnelbrandkromme, de koolwaterstofkromme (Eurocode) en de standaard brandkromme (ISO 834 / Eurocode). Weergegeven wordt de luchttemperatuur in de brandoven versus de tijd

hierbij om de luchttemperatuur. De luchttemperatuur is bij de RSW-brandkromme voor tunnels al na 5 min tweemaal zo hoog als de luchttemperatuur volgens de ISO 834-kromme die voor woningen wordt gebruikt. Deze veel hogere luchttemperatuur resulteert in een fors snellere opwarming van de randzone van het beton bij een tunnelbrand.

Door de 'Regeling aanvullende regels veiligheid wegtunnels' wordt voor het gesloten deel van de tunnels langer dan 250 m de RWS-brandkromme voorgeschreven. Deze door Rijkswaterstaat ontwikkelde brandkromme is gebaseerd op door TNO in 1979 uitgevoerd onderzoek naar een worstcasescenario, waarbij een grote tankwagen met 45 m³ brandstof in brand vliegt en gedurende twee uur brand, resulterend in een maximaal vermogen van ruim 200 MW. Ter vergelijking: een autobrand heeft een (relatief kortstondig) maximaal vermogen van circa 6 tot 8 MW en een totale brandduur van circa een halfuur. De RWS-brandkromme geeft een realistisch

temperatuurverloop weer, al is het werkelijke temperatuurverloop in de praktijk uiteraard ook afhankelijk van de dimensies van de tunnel. Voor de open toeritten wordt de koolwaterstofkromme voorgeschreven omdat de warmte hier beter weg kan.

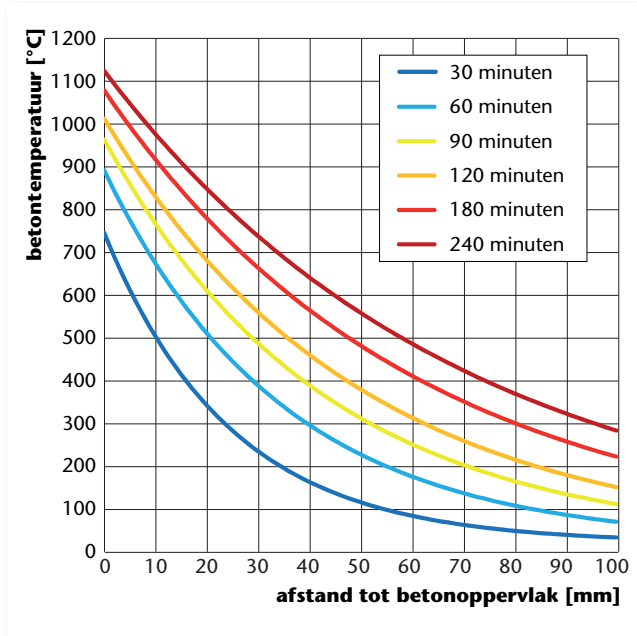
Opwarming

Beton en staal verliezen beide bij hoge temperaturen hun sterkte. Gelukkig is beton een tamelijk slechte warmtegeleider, waardoor het lang duurt voordat het draagvermogen van de constructie wezenlijk afneemt. Hoe snel de warmte in het beton dringt, kan worden berekend op basis van de materiaaleigenschappen van beton, met name de thermische geleidbaarheid, de soortelijke warmte en de dichtheid (zie gelijknamige kader). Een complicerende factor bij het berekenen van de opwarmingssnelheid bij brand is dat de materiaaleigenschappen van beton veranderen bij oplopende temperatuur. Ook het verdampen en de migratie van het in het beton aanwezige vocht beïnvloedt de temperatuurindringing.

Berekenen

Op basis van de (temperatuurafhankelijke) eigenschappen van beton en een gekozen brandkromme (luchttemperatuur) kan een temperatuurprofiel van een betonconstructie als functie van de tijd worden berekend. Op basis hiervan – de dekking op de wapening en de afname van de sterkte en stijfheid van het beton en het wapeningsstaal (waarop we in het navolgende ingaan) – kan worden bepaald hoelang een constructie haar draagvermogen behoudt. Hieraan worden in het Bouwbesluit eisen gesteld om voldoende tijd te hebben om te kunnen vluchten, een constructie te kunnen doorzoeken en de brand te kunnen bestrijden. Daarnaast kunnen de eisen ten aanzien van de brandwerendheid een economische achtergrond hebben: een

3
Temperatuurprofielen voor een vloer of wand van 200 mm dik die eenzijdig wordt blootgesteld aan een standaardbrand (ISO 834-brandkromme)



Soortelijke warmte, thermische geleidbaarheid en dichtheid

Soortelijke warmte

De soortelijke warmte (symbool c ; ook wel warmtecapaciteit genoemd) geeft het vermogen weer van een materiaal om warmte op te slaan. De soortelijke warmte wordt uitgedrukt in J/kg·K en geeft dus weer hoeveel energie nodig is om 1 kg materiaal 1 °C in temperatuur te laten stijgen. De soortelijke warmte van beton wordt vooral bepaald door het vochtgehalte; het soort toeslagmateriaal heeft een beperkte invloed.

De invloed van de temperatuur op de soortelijke warmte is beperkt. De soortelijke warmte van beton loopt op van circa 0,9 kJ/kg·K bij 20 °C naar circa 1,1 kJ/kg·K bij 400 °C en blijft daarna op dat niveau tot 1200 °C. Tussen 100 en 200 °C is er wel sprake van een piek in de soortelijke warmte als gevolg van het verdampen van het in het beton aanwezige vrije water. Deze piek is afhankelijk van het vochtgehalte van het beton. Bij een vochtgehalte van 3% loopt de soortelijke warmte op tot circa 2,0 kJ/kg·K.

Thermische geleidbaarheid

De thermische geleidbaarheid of warmtegeleidingscoëfficiënt (symbool λ) geeft weer hoe goed materialen warmte kunnen geleiden. De warmtegeleidingscoëfficiënt wordt uitgedrukt in W/m·K en geeft weer hoeveel warmte bij een temperatuurverschil van 1 °C over een

afstand van 1 m op een oppervlakte van 1 m² in 1 s in een materiaal kan worden verplaatst. De thermische geleidbaarheid van beton wordt vooral beïnvloed door het soort toeslagmateriaal en door het vochtgehalte.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van beton is sterk afhankelijk van de temperatuur. De warmtegeleidingscoëfficiënt daalt van circa 2,0 W/m·K bij 20 °C (voor grindbeton) naar 1,3 W/m·K bij 400 °C en 0,7 W/m·K bij 800 °C. Deze daling is uiteraard gunstig: naarmate het beton warmer wordt, gaat het steeds slechter warmte geleiden waardoor de opwarming van het diepergelegen beton wordt vertraagd.

Dichtheid

De dichtheid van beton (symbool ρ) neemt eveneens af bij stijgende temperatuur. Dit is het gevolg van het verdampen van het in het beton aanwezige water. Eerst verdamppt het in de poriën aanwezige water en daarna achtereenvolgens het fysisch gebonden water en het chemisch gebonden water. De dichtheid daalt hierdoor vanaf 100 tot 1200 °C geleidelijk tot circa 90% van de oorspronkelijke dichtheid.

In tabel 1 worden ter vergelijking van een aantal bouwmaterialen de thermische geleidbaarheid, de soortelijke warmte en de dichtheid gegeven bij 20°C.

Tabel 1 **Thermische geleidbaarheid (λ), soortelijke warmte (c) en dichtheid (ρ) van een aantal bouwmaterialen (bij 20 °C)**

| materiaal | ρ [kg/m ³] | λ [W/m·K] | c [J/kg·K] |
|------------|-----------------------------|-------------------|--------------|
| staal | 7850 | 52,000 | 630 |
| beton | 2400 | 2,000 | 840 |
| lichtbeton | 1600 | 0,700 | 840 |
| glas | 2500 | 0,800 | 840 |
| glaswol | 150 | 0,045 | 840 |
| EPS | 50 | 0,035 | 1470 |
| vurenhout | 550 | 0,140 | 1800 |
| hardhout | 800 | 0,170 | 1880 |

betonconstructie moet na een brand nog repareerbaar zijn.

Voor de berekeningen is software beschikbaar. Als alternatief kan voor eenvoudige situaties in de woning- en utiliteitsbouw ook gebruik worden gemaakt van de in bijlage A van EN 1992-1-2 weergegeven temperatuurprofielen

voor vloeren, balken en kolommen. Deze profielen zijn berekend op basis van de ISO 834-brandkromme en conservatieve uitgangspunten ten aanzien van de betoneigenschappen. De uit deze bijlage afkomstige figuur 3 is van toepassing op vloeren en wanden van 200 mm dik die aan één zijde met brand worden belast. Uit de figuur kan

Beton bij brand: fysische en chemische processen

In grote lijnen treden bij het verhitten van normaal beton de volgende fysische en chemische processen op:

- Tot 100 °C treedt een lichte uitzetting van de cementsteen op en verliest het beton een deel van het water dat aanwezig is in de capillaire poriën.
- Vanaf 100 °C krimpt de cementpasta merkbaar, doordat zowel het vrije als het fysisch en chemisch gebonden water uit het beton verdwijnt.
- Vanaf 300 °C begint de ontbinding van de CSH-gel wezenlijke vormen aan te nemen, waarbij ook de porositeit van de cementsteen sterk toeneemt. De kleur verandert bij kwartshoudend toeslagmateriaal van grijs naar rozerood door oxidatie van ijzerhoudende verbindingen. De cementsteen trekt samen terwijl de korrels toeslagmateriaal verder uitzetten. Hierdoor ontstaan scheurtjes in de cementsteen.

Bij de ontbinding van de CSH-gel vindt er bij 'lage' temperaturen (100 – 600 °C) mogelijk (ook) de vorming van sterke siloxaanverbindingen plaats (Si-O-Si), hetgeen het sterkteverlies zou beperken.

- Vanaf 400 °C begint de calciumhydroxide Ca(OH)_2 te ontbinden in CaO (ongeblyste kalk) en H_2O . De ontbindingssnelheid is nul bij 400 °C, bereikt een piek bij circa 500 °C en stopt weer bij 600 °C.
- Bij 573 °C vindt er bij kwarts (zand en grind bestaan voor het grootste gedeelte uit

kwarts) een plotselinge endotherme omzetting van de kristalstructuur plaats (van α -kwarts naar β -kwarts), waarbij het volume van het zand en grind circa 5% toeneemt (de dichtheid neemt af van circa 2650 naar 2530 kg/m^3). Deze forse en plotselinge toename van het volume kan schade aan het beton veroorzaken. Kalksteen blijft stabiel tot 700 °C.

- Vanaf 600 °C valt de CSH-gel verder uit elkaar, met een sterk (en blijvend) verlies in sterkte tot gevolg.
- Boven 700°C begint de decarbonatie van kalksteen (CaCO_3) in calciumoxide (CaO) en koolstofdioxide (CO_2). De ongebluste kalk die gevormd wordt door de dehydratie van Ca(OH)_2 (boven 400 °C) en de decarbonatie van CaCO_3 (boven 700 °C), reageren bij afkoeling met omgevingsvocht (of bluswater) tot Ca(OH)_2 . Hierbij neemt het volume van de kalk toe met 44%, waardoor het beton uiteenvalt.
- Vanaf 1100°C begint het beton te smelten.

Voorgaande effecten treden normaliter alleen op in de buitenste centimeters van het beton. Ook na de eerder beschreven veranderingen (tot het smelten, wat in de praktijk niet voorkomt) blijft deze buitenste laag werken als isolatielaag voor het diepergelegen beton. Overigens: wanneer na een brand een constructie wordt gerepareerd, wordt het beton vervangen dat heter is geweest dan circa 300 °C.

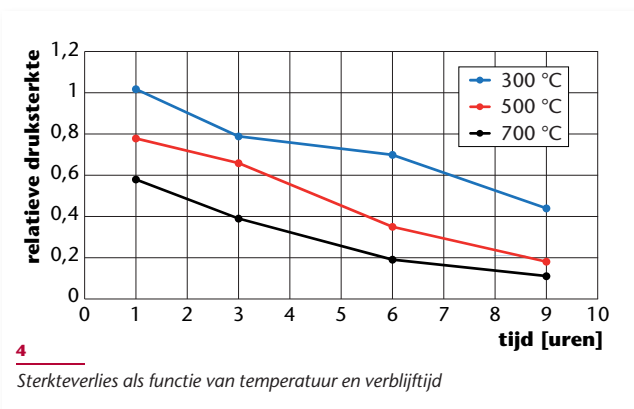
worden afgelezen dat al na 30 min het beton op 5 mm onder het oppervlak een temperatuur heeft bereikt van 600 °C. De temperatuur op 15 mm diepte is op dat moment 400 °C en op 25 mm diepte slechts circa 270 °C. Wat deze temperaturen met het beton en staal doen, beschrijven we in het navolgende.

Materiaaleigenschappen beton bij brand

Door interne scheurvorming en degradatie van de cementsteen (zie kader 'Beton bij brand: fysische en chemische processen') neemt bij oplopende temperatuur de sterkte en stijfheid van het beton af. Het sterkteverlies van het beton is afhankelijk van het type bindmiddel en uiteraard de hoogte van de temperatuur, maar ook van de duur van de hoge temperatuur. Het type toeslagmateriaal heeft ook invloed, vooral bij hogere temperaturen. Bij opwarming expandeert het toeslagmateriaal, terwijl de cementsteen juist krimpt door het verdwijnen van water, met inwendige spanningen, scheurvorming en sterkteverlies tot gevolg. Kalksteen heeft een lagere thermische uitzettingscoëfficiënt dan grind (kiezelhoudend toeslagmateriaal), hetgeen zou kunnen verklaren waarom beton met kalksteen als toeslagmateriaal in het algemeen minder snel sterkte verliest dan beton met grind (fig. 5).

In figuur 4 wordt het relatieve sterkteverlies weergegeven voor bij verschillende temperaturen gedurende 1, 3, 6 en 9 uur verhit beton. Het betreft hier beton op basis van portlandcement CEM I 42,5 N en kalksteen als (fijn en grof) toeslagmateriaal en onderzoek aan kubussen met een ribbe van 100 mm. De oven werd opgewarmd met 10 °C per minuut tot de gewenste temperatuur was bereikt. De sterkte werd na afkoeling na 24 uur bepaald aan drie kubussen.

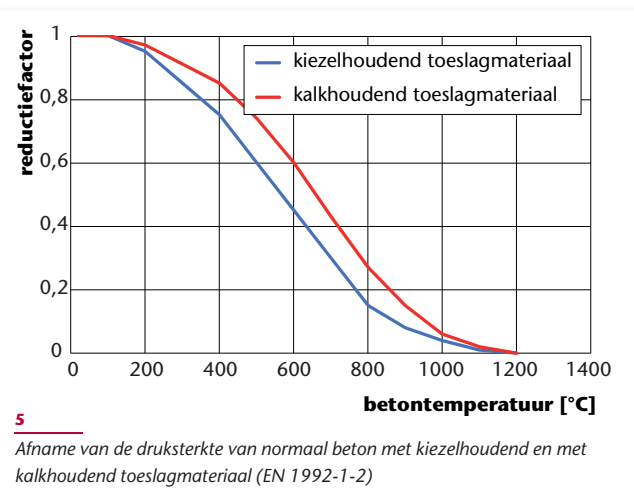
Uit de figuur volgt dat tot 500 °C en tot een



duur van 3 uur het sterkteverlies circa 35% bedraagt. Bij hogere temperaturen en/of een langere brandduur is er sprake van nog meer sterkteverlies.

Het sterkteverlies bij hogere temperaturen verloopt bij beton op basis van hoogovencement en portlandvliegascement minder snel dan bij beton op basis van portlandcement. Bij hoogovencementbeton kan er tot zo'n 400 °C in eerste instantie zelfs sprake zijn van een toename in sterkte.

In de Eurocode zijn factoren opgenomen voor de reductie in druksterkte van het beton (fig. 5). Deze factoren zijn alleen geldig voor een standaardbrand en tot een brandduur van twee uur.



Materiaaleigenschappen wapeningsstaal bij brand

Ook het wapeningsstaal verliest sterkte bij oplopende temperatuur, waarvoor in de Eurocode reductiefactoren zijn opgenomen (fig. 6 en 7). Wapeningsstaal behoudt z'n treksterkte tot circa 350 °C; daarna treedt sterkteverlies op. Bij circa 550 °C is de sterkte gehalveerd. Bij voorspanstaal begint het sterkteverlies al bij circa 100 °C (fig. 6) en de vloeigrens van voorspanstrengen is al bij 200 °C gehalveerd.

Bij vloeren en balken die voornamelijk op buiging worden belast, is de temperatuur van de wapening maatgevend. Bij kolommen en dragende wanden die hoofdzakelijk op druk

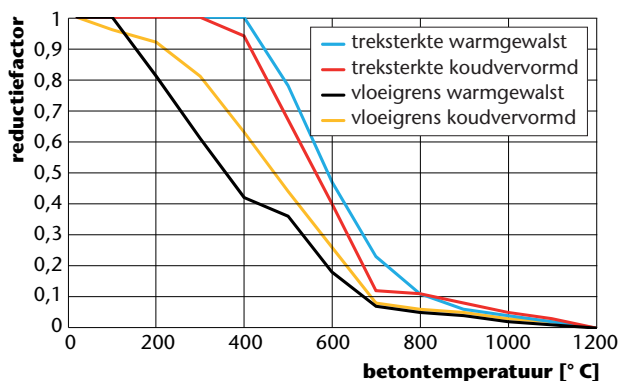
worden belast, is ook de diepte van de warmte-indringing in het beton van belang.

De opwarming van beton en wapeningsstaal, de afname van sterkte en stijfheid en de te verwachten vervormingen zijn redelijk te voorspellen. Hierdoor kan een constructie, uitgaande van een bepaalde brandkromme, ontworpen worden op een bepaalde duur van brandwerendheid. Als spatten in wezenlijke mate optreedt, hebben de uitgevoerde berekeningen echter geen relevantie meer. In het navolgende gaan we uitgebreid in op dit fenomeen.

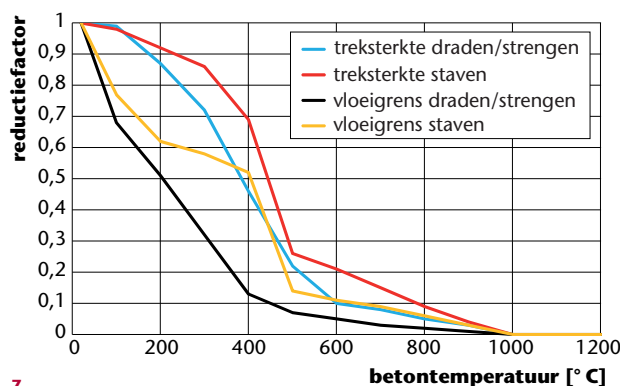
Spatten van beton

In het voorgaande zijn we voor de beschouwing van de brandwerendheid van betonconstructies ervan uitgegaan dat het beton tijdens de brand intact blijft. Wanneer het zogenoemde spatten optreedt, is dat echter niet het geval. Onder spatten van beton verstaan we het al dan niet explosief afspringen van grote of kleine stukken beton uit het betonoppervlak door blootstelling aan hoge en snel oplopende temperaturen. Dit spatten is een grillig fenomeen, dat zowel plaatselijk als over het gehele verhitte oppervlak kan optreden. Door het spatten neemt de betondekking snel af en kan de wapening bloot komen te liggen, waardoor deze direct opwarmt (foto 9). Terwijl zonder spatten het gedrag van de constructie bij brand redelijk voorspelbaar is, zijn er voor het optreden van spatten en de mate waarin het optreedt helaas geen goede, algemeen toepasbare modellen beschikbaar. Het spatten van beton is een complex fenomeen dat nog niet volledig wordt begrepen.

We kunnen meerdere vormen van spatten onderscheiden, waarvan de belangrijkste en meest ernstige vorm het explosief afspringen van stukken beton uit het oppervlak is. Dit



6
Afname van de treksterkte van wapeningsstaal (EN 1992-1-2)



7
Afname van de treksterkte van voorspanstaal (EN 1992-1-2)

treedt gebruikelijk na zo'n 7 tot 30 min na aanvang van de brand op en leidt snel tot ernstige beschadiging van het beton.

Als verklaring voor het optreden van explosief spatten, worden er in de literatuur hoofdzakelijk twee mechanismen beschreven: spatten als gevolg van hoge poriedrukken door het verdampen van water en spatten als gevolg van het optreden van thermische spanningen. Vaak wordt een van deze twee mechanismen als enige of hoofdoorzaak genoemd, maar er zijn ook bronnen die aan beide mechanismen evenveel belang toekennen.

Onderzoek naar het fenomeen spatten begon al meer dan 100 jaar geleden en in een proefschrift uit 1935 wordt al gesteld dat spatten niet alleen wordt veroorzaakt door hoge poriedrukken, maar ook door thermische spanningen als gevolg van het snelle opwarmen. Beton is echter een fysisch en chemisch zeer complex materiaal, waarvan de eigenschappen tijdens de brand ook nog eens veranderen. Naast de eigenschappen van het beton zijn er nog zeer veel andere factoren van invloed op het spatgedrag van beton. Te denken valt aan:

- snelheid van opwarmen;
- thermische expansie(coëfficiënt) toeslagmateriaal;
- maximumkorrelgrootte toeslagmateriaal;
- treksterkte beton;
- ouderdom beton;
- drukbelasting betreffende constructiedeel;
- temperatuurprofiel en dus (onder andere) warmtegeleiding beton;
- permeabiliteit;
- vorm en afmetingen betonelement;
- wapening;
- vochtgehalte.

Hoewel er al zolang onderzoek naar wordt gedaan, is er dan ook nog steeds geen theoretisch model dat generiek en betrouwbaar



8
De Torre Windsor in Madrid na de brand in 2005. De brand begon op de 21e verdieping; na een uur stonden alle bovengelegen verdiepingen in brand, waarna de brand zich naar beneden uitbreidde. In totaal duurde de brand circa 20 uur. Vijf uur na de start van de brand stortte een groot deel van de buitenste vloeren boven de 17e verdieping in, waarschijnlijk als gevolg van het doorbuigen van de onbeschermde stalen kolommen bij de gevels. De betonnen kern, kolommen en tussenliggende vloeren presteerden zeer goed gezien de omvang en duur van de brand (foto: Wikimedia Commons)

het optreden van spatten kan voorspellen.

De twee belangrijkste theorieën over explosief spatten, poriedruk en thermische spanningen, worden nu beschreven.

Poriedruk

Bij een snelle verhitting van beton wordt het aanwezige vocht in korte tijd omgezet in stoom, waardoor het volume snel en sterk toeneemt. Afhankelijk van de permeabiliteit van het beton kan de waterdamp niet snel naar buiten. Hierdoor neemt de druk toe. Als deze druk plaatselijk de treksterkte van het beton overstijgt, kan de buitenlaag worden afgedrukt. De belangrijkste factoren voor het wel of niet optreden van spatten als gevolg van hoge poriedrukken, zijn het initiële vochtgehalte, de permeabiliteit van het beton, de aanwezigheid van drukspanningen en de opwarmsnelheid. De poriedruk neemt toe bij toenemende opwarmsnelheid, hogere vochtgehalten en lagere permeabiliteit. Bij een zeer hoge opwarmsnelheid kan de maximale poriedruk weer lager uitvallen, omdat hierbij door thermische spanningen meer scheurtjes ontstaan waardoor waterdamp kan ontsnappen. Ten aanzien van de opwarmsnelheid is er wat betreft de poriedruk dus mogelijk een 'optimum'.



De kans op het optreden van spatten is bij regulier beton laag bij een vochtgehalte van circa 3 à 4% m/m of lager. Bij beton in een droog binnenmilieu ligt na verloop van tijd het vochtgehalte in de randzone rond deze waarde. Bij beton in tunnels zal het evenwichtsvochtgehalte echter door de hogere luchtvochtigheid met circa 5 tot 7% m/m een stuk hoger liggen.

9 Als het spatten eenmaal begint, kan de wapening snel zichtbaar worden. Het betreft hier een brandproef die zoals gebruikelijk (ter bescherming van de oven) kort na het begin van het spatten is gestopt (foto: Rijkswaterstaat)

Thermische spanningen

Bij het opwarmen van beton ontstaan er drukspanningen aan de buitenzijde omdat de thermische uitzetting wordt verhinderd. Doordat de buitenschil wil uitzetten, ontstaan er trekspanningen in het diepergelegen koelere beton. Het samendrukken aan de buitenzijde en de trekspanningen in het diepergelegen beton resulteren in het ontstaan van scheurtjes. Vervolgens kunnen stukjes beton naar buiten knikken, doordat de buitenschil meer uitzet dan het diepergelegen beton en daarna zal losscheuren en wegspringen.

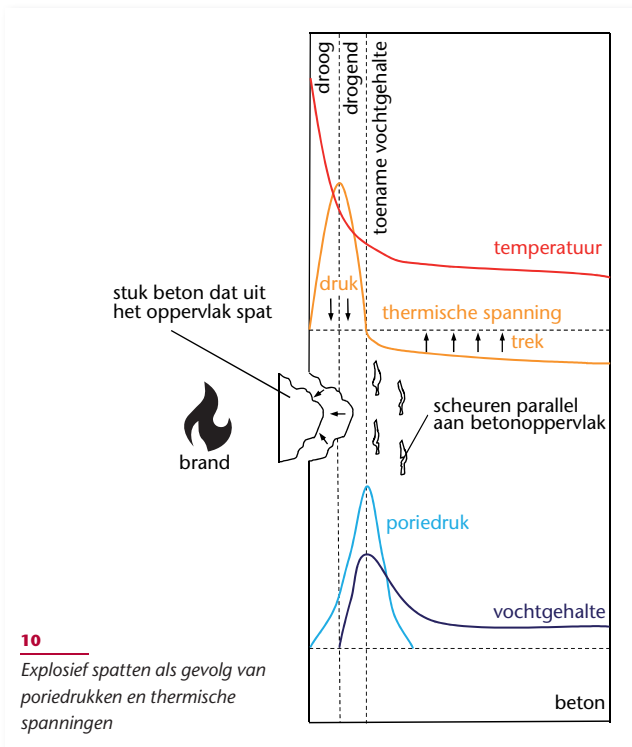
Het spatten als gevolg van thermische spanningen wordt ook wel verklaard vanuit het bezwijken onder druk in de buitenschil. De drukspanningen aan de buitenzijde komen bovenop de al aanwezige uitwendige belasting van het constructiedeel, terwijl juist aan de buitenzijde de druksterkte van het beton door de hoge temperatuur snel afneemt. De

totale spanning kan de afgenomen druksterkte van het beton overstijgen.

Poriedruk en thermische spanningen gecombineerd

De twee mechanismen poriedruk en thermische spanningen kunnen afzonderlijk en gezamenlijk tot spatten leiden. Welk mechanisme onder welke omstandigheden dominant is, hangt vooral af van het vochtgehalte en de permeabiliteit (poriedruk) en de thermische expansie van de toeslagmaterialen (thermische spanningen) in samenhang met de snelheid van opwarmen en de dimensies en belasting van het betonelement. De twee mechanismen poriedruk en thermische spanningen zijn schematisch weergegeven in figuur 10.

Bij beton in tunnels zal het evenwichtsvochtgehalte door de hoge luchtvochtigheid rond



circa 5 tot 7% m/m liggen. De kans op spat-ten is zonder aanvullende maatregelen daarom bij een grote tunnelbrand hoog (fig. 11). Deze figuur is slechts indicatief; het gebied waar spatten optreedt is in werkelijkheid niet zo nauwkeurig aan te geven en zoals eerder beschreven afhankelijk van zeer veel factoren.

Voorkomen van spatten

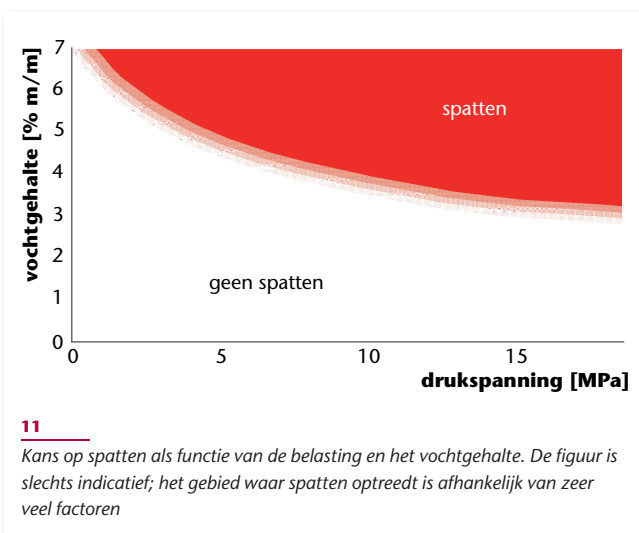
De kans op het optreden van spatten kan worden verlaagd door gebruik van hittewerende bekleding en gebruik van polypropyleenvezels. Verder is de kans op spatten lager bij lage vochtgehalten en een hoge permeabiliteit van het beton. De kans op spatten neemt toe met toenemende drukbelasting van een element en met toenemende verhin-dering van de vervorming.

Hittewerende bekleding

Hittewerende bekleding vertraagt de opwar-ming van het beton en wapeningsstaal en verlengt daarmee de weerstand van een constructie tegen brand. Door de vertraging van de opwarming wordt ook de kans op het optreden van spatten verlaagd. Hittewerende bekleding kan in de vorm van platen worden aangebracht of door middel van spuiten. In dat laatste geval gaat het meestal om een mortel op basis van het mineraal vermiculiet en portlandcement. Deze mortels hebben een zeer lage volumieke massa (afhankelijk van de toepassing en vereiste robuustheid ongeveer 1000 kg/m³ of lager) en een zeer lage warm-tegeleidingscoëfficiënt (0,2 W/m·K of lager).

Vezels

Vezels kunnen de indringing van warmte in het beton uiteraard niet vertragen, maar monofilament polypropyleenvezels kunnen wel de kans op het optreden van spatten fors verlagen. Monofilament vezels zijn enkelvou-dige vezels die worden geproduceerd door



het spinnen van gesmolten polypropyleen. Bij het opwarmen van beton verhogen deze vezels de permeabiliteit, waardoor de porie-druk en daarmee de kans op spatten wordt verlaagd. De vezels die dicht onder het oppervlak zitten, zullen bij een brand snel verbranden. Hierdoor ontstaan kanaaltjes waarlangs vocht naar buiten kan. Maar ook bij lagere temperaturen dieper in het beton kunnen de vezels al bijdragen aan het verla-gen van de poriedruk. Waarschijnlijk is er, door slechte hechting tussen de vezels en de cementsteen, ruimte rondom de vezels waarlangs onder druk vochttransport moge-lijk is. Daarnaast zullen de vezels als ze opwarmen samentrekken en dus korter in lengte en dikker worden. Hierbij ontstaat ruimte in het beton, wat kan bijdragen aan vochttransport en het verlagen van de porie-druk. Bij circa 160 °C beginnen de vezels te smelten en vanaf circa 350 °C te verbranden, waarbij er een holle ruimte achterblijft voor expansie en transport van waterdamp.

Uit diverse onderzoeken weten we dat al vanaf 1 kg vezels per m³ beton de mate van afspatten fors kan verminderen. Over het algemeen wordt aanbevolen 2 kg/m³ aan te houden.

Betoniek = Standaard + Vakblad

Onderdeel van het *Betoniek*-abonnement is naast *Betoniek Standaard* ook **Betoniek Vakblad**. Dit is een magazine op groot formaat met artikelen over onder meer projecten, ontwikkelingen, onderzoek, regelgeving en onderwijs. Deze artikelen worden geschreven door de lezers van *Betoniek* zelf. Daarin wijkt *Betoniek Vakblad* dus af van *Betoniek Standaard*, dat volledig door een deskundige redactie wordt geschreven. *Betoniek Vakblad* verschijnt vier keer per jaar. Alle artikelen zijn te raadplegen op www.betoniek.nl. Voor leden van *Betoniek* is dat gratis!



Tot slot

In deze *Betoniek* zijn we uitgebreid ingegaan op de effecten van brand op beton. Betonconstructies zijn in de regel zeer goed bestand tegen brand, maar er zijn situaties die aanvullende maatregelen vereisen. Met name het spatten van beton is een fenomeen dat we nog niet volledig begrijpen. Gelukkig hebben we voldoende kennis van zaken om onherstelbare schade aan betonconstructies door brand te voorkomen.

Geraadpleegde bronnen

- Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken ROK 1.4, Rijkswaterstaat, april 2017.
- fib bulletin 38, Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling, april 2007.
- Coupled Effect of High Temperature and Heating Time on the Residual Strength of Normal and High-Strength Concretes, B. Toumi, M. Resheidat, Z. Guemmadi and H. Chabil, Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 3, No. 4, 2009.
- Explosive spalling of concrete in fire, thesis, E. Klingsch, ETH Zurich, 2014.

Kennisdeling via *Betoniek*, dankzij onze partners



Betoniek Standaard is onderdeel van *Betoniek Platform*, hét kennisplatform over technologie en uitvoering van beton. *Betoniek Standaard* verschijnt 4x per jaar en is een uitgave van Aeneas Media bv, in opdracht van het Cement&BetonCentrum. In de redactie zijn vertegenwoordigd: BAM Infraconsult, ENCI, Mebin, SKG-IKOB, Spanbeton en TNO.

Uitgave
Aeneas Media bv
Ruimte 4121
Veemarktkade 8
5222 AE 's-Hertogenbosch

Website
www.betoniek.nl

Lezersservice
T: 073 205 10 10
E: lezersservice@aeneas.nl

Vormgeving
Inpladi bv, Cuijk

Redactie
T: 073 205 10 27
E: betoniek@aeneas.nl

Aeneas
MEDIA

mvw
media voor vak
& wetenschap

Lidmaatschap 2019
Kijk voor meer informatie over onze lidmaatschappen op www.betoniek.nl/lidwoorden of neem contact op via lezersservice@aeneas.nl of 073 205 10 10.

Voorwaarden
Je vindt onze algemene voorwaarden op www.betoniek.nl/algemene-publicatievoorwaarden-betoniek.

Hoewel de grootst mogelijke zorg wordt besteed aan de inhoud van het blad, zijn redactie en uitgever van Cement niet aansprakelijk voor de gevolgen, van welke aard ook, van handelingen en/of beslissingen gebaseerd op de informatie in deze uitgave.

Niet altijd kunnen rechthebbenden van gebruik beeldmateriaal worden achterhaald. Belanghebbenden kunnen contact opnemen met de uitgever.

© Aeneas Media bv 2019
ISSN: 2352-1090