

NIEUWE INZICHTEN IN DE RISICO'S OP SPATTEN VAN ONBESCHERMD BETON IN TUNNELS

Brandwerendheid TUNNELS

In 2017 zijn naar aanleiding van brandproeven twijfels ontstaan over de brandwerendheid van onbeschermde beton (het zogeheten ROK-beton) in tunnels. Het ROK-beton zou ongevoelig zijn voor spatten, maar dat bleek niet uit de recente brandproeven. Naar aanleiding hiervan zijn door het Kennisplatform Tunnelveiligheid (KPT) vier gesprekstafels geformeerd om de problematiek nader te beschouwen: Bestaande tunnels, Nieuwe tunnels, Onderzoek en Hulpverlening. De gesprekstafels hebben na zo'n drie jaar werk hun conclusies in 2021 gerapporteerd. In dit artikel wordt de achtergrond van het 'ROK-beton' beschreven, wordt het fenomeen spatten van beton toegelicht en worden de conclusies van de gesprekstafel Onderzoek weergegeven.

ROK-BETON

Tot medio jaren negentig was spatten van beton geen belangrijk aandachtspunt bij nieuwbouw van tunnels. Dat veranderde met de bouw van de geboorde Westerscheldetunnel (1997-2002). Vooral omdat daarin prefab beton met een relatief hoge sterkte (en daarmee minder en kleinere poriën) zou worden toegepast, waardoor er een risico op spatten zou kunnen bestaan.

Met onderzoek TNO naar ROK-beton

In opdracht van Rijkswaterstaat werd door TNO eerst literatuuronderzoek uitgevoerd (BRAWAT-literatuurstudie spatten beton; 1996) [7]. Vervolgens werden er door TNO brandproeven uitgevoerd met beton met hitte-kerende bekleding en met onbeschermde

beton met polypropyleenvezels (BRAWAT II; 1997-1999).

Tot slot werd gekeken naar afgezonken tunnels. Het plafond van afgezonken tunnels werd doorgaans voorzien van isolerende bekleding om te voorkomen dat de wapening bij een felle brand te heet zou kunnen worden, maar de wanden (met uitzondering van de bovenkant) in de regel niet. Er werd een proef uitgevoerd om het spatgedrag te beoordelen van deels onbeschermde beton, waarbij een wand van een afgezonken tunnel werd gesimuleerd (BRAWAT 3; 2001) [8].

De proef bevestigde wat werd verwacht van beton met een normale sterkte: ook het onbeschermde beton vertoonde nauwelijks schade. Men concludeerde op basis van deze proef dat onder gelijke omstandigheden (inclusief het



PERSOONLIJKE TITEL

Dit artikel is op persoonlijke titel geschreven en is geen weergave of samenvatting van de toelichting op de conclusies die door de gesprekstafel Onderzoek is opgesteld.

betonmengsel; 340 kg/m³ cement CEM III/B; druksterkte na 28 dagen circa 45 MPa) een vergelijkbaar resultaat mag worden verwacht en het afspatcriterium niet maatgevend is.

Het resultaat van het BRAWAT 3-onderzoek werd verwerkt in de richtlijn van Rijkswaterstaat. In de ROK (en daarvoor in de ROBK) stond dat afspatten van beton niet mag optreden; te realiseren door beton te beschermen of door het toepassen van een betonmengsel dat ongevoelig is voor spatten (eventueel met polypropyleenvezels). Dit kon worden aangetoond door het uitvoeren van brandproeven. In de toelichting bij de eis stond echter dat voor grindbeton met een sterkteklasse C28/35 met maximaal 340 kg/m³ hoogovencement is aangetoond dat het voldoet (mits de hoofddruk-



1 Zeeburgertunnel. Aanbrengen brandwerende platen tegen de binnenwanden van de tunnel (1988), foto: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat

spanning aan het oppervlak niet hoger is dan 10 MPa). Indien het betreffende onderzoek (TNO-rapport BRAWAT 3) [8] werd gebruikt om aan te tonen dat een mengsel voldeed, mocht de maximale waarde voor de 28-daagse kubusdruksterkte maximaal 45 MPa zijn. Vervolgens werd jarenlang in tunnels het zogeheten ROK-beton toegepast, waarbij er ook tunnels werden gebouwd zonder hittewerende bekleding. Door voldoende dekking op de wapening werd voorkomen dat de wapening te heet zou worden bij een brand volgens de RWS-curve.

Onderzoek Efectis – samenstelling veranderd?

In 2015 bleek uit onderzoek bij Efectis dat bij de in de ROK beschreven betonsamenstelling toch spatten kan optreden. Naar aanleiding

AANLEIDING

Toen in 2015 het vermoeden ontstond dat er mogelijk iets aan de hand was met de brandwerendheid van het beton in tunnels, heeft Rijkswaterstaat in eerste instantie zelf onderzoek gedaan naar dit onderwerp. Maar aangezien de brandwerendheid van beton in wegtunnels de belangen raakt van vele partijen betrokken bij de veiligheid van tunnels (tunnelbeheerders, openbare hulpdiensten en de bevoegde gezagen), heeft het KPT een themadag over de brandwerendheid van betonnen tunnels georganiseerd. Na deze themadag zijn vier gesprekstafels ingericht die vanuit verschillende invalshoeken de problematiek rondom de brandwerendheid van beton in wegtunnels konden uitdiepen:

Gesprekstafel 1 – Bestaande tunnels

Gesprekstafel 2 – Nieuwe tunnels

Gesprekstafel 3 – Onderzoek

Gesprekstafel 4 – Brandbestrijding en hulpverlening

Het verslag van het werk van het KPT en alle producten die door de verschillende gesprekstafels zijn opgeleverd, zijn verzameld in het document 'Brandwerendheid beton in wegtunnels – Resultaten en verslag van het samenwerkingsproces', beschikbaar op de website van het KPT [6].

hiervan zijn in 2017 diverse brandproeven uitgevoerd op ROK-beton, waaruit het beeld naar voren kwam dat ROK-beton meestal gaat spatten bij beproeving volgens de RWS-brand-curve.

Al snel werd gesteld dat de samenstelling van het beton veranderd zou zijn en dat daarom het spatgedrag zou zijn veranderd. In onder meer het *Algemeen Dagblad* werd aandacht besteed aan de recente onderzoeken naar de brandweerstand van onbeschermd beton in tunnels. Op 18 augustus 2020 stond in deze krant: "Er loopt een onderzoek naar vier tunnels die na 2008 zijn opgeleverd, omdat ze niet aan alle brandwerende normen voldoen. Oorzaak is dat bij extreme brand beton van de tunnel af kan spatten. Het beton houdt daardoor minder lang stand. Dat komt omdat in de loop der jaren de samenstelling van het beton is veranderd."

Oorzaak in proeven

Voor de betonindustrie en voor de leveranciers van grondstoffen voor beton was echter duidelijk dat er geen bijzondere wijzigingen zijn geweest rond 2008 maar ook niet rond en na 2001, het jaar waarin het BRAWAT 3-onderzoek plaatsvond. Zowel wat betreft de regelgeving als de productiemethoden van beton en grondstoffen voor beton zijn er geen bijzondere wijzigingen geweest. Bedenk ook dat installaties zoals klinkerovens en hoogovens al snel meer dan 50 jaar meegaan. De oorzaak van het verschil moet dan ook worden gezocht in de proef in 2001 en de proeven vanaf 2017. Achteraf kunnen we concluderen dat het uitvoeren van één proef aan onbeschermd beton in 2001 onvoldoende was om het ROK-beton als afspatongevelig te karakteriseren. Bovendien week de proefopzet af van de vanaf 2017 uitgevoerde proeven en zeer waarschijnlijk was ook het vochtgehalte in het proefstuk laag (4,1% m/m) en daarmee niet representatief voor beton in tunnels. Rond 2000 werd echter algemeen verondersteld dat spatten van beton vooral een aandachtspunt was voor hogesterktebeton en zeker niet voor beton tot sterkteklasse C28/35. De eenmalige proef bevestigde dat beeld, waardoor er geen aanleiding was voor aanvullend onderzoek.

Aanpassing ROK

De ROK is inmiddels aangepast. Nog steeds kan in plaats van hittewerende bekleding een betonmengsel worden toegepast dat ongevoe-

lig is voor spatten, maar dat moet op basis van brandproeven worden aangetoond. De brandproeven mogen maximaal drie jaar geleden zijn uitgevoerd en moeten uiteraard representatief zijn voor het betonmengsel en de omstandigheden in de tunnel (ROK 1.4, april 2017) [1].

THEORIE SPATTEN VAN BETON

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

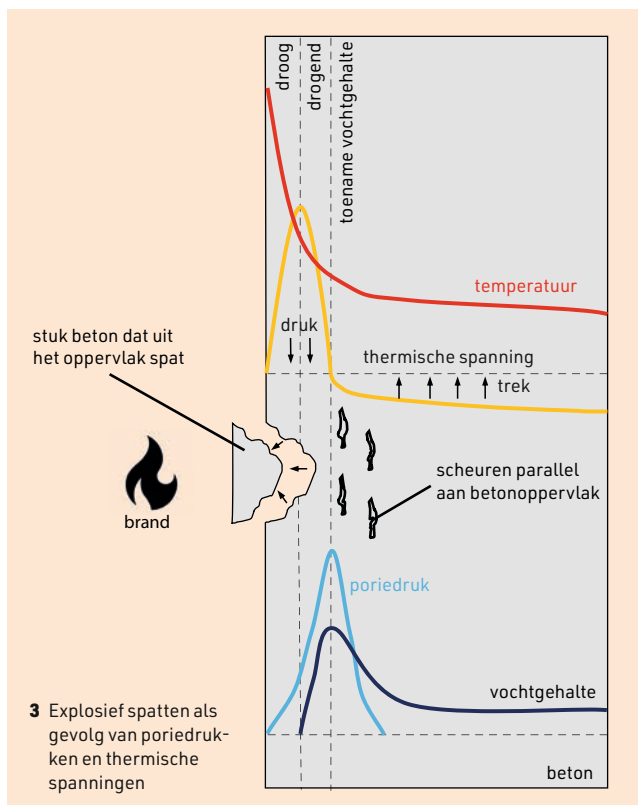
Als verklaring voor het optreden van explosief spatten worden in de literatuur hoofdzakelijk twee mechanismen beschreven: spatten als gevolg van hoge poriedrukken door het verdampen van water en spatten als gevolg van het optreden van thermische spanningen. Vaak wordt één van deze twee mechanismen als 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. 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 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 veel andere factoren van invloed op het spatgedrag van beton. Te denken valt aan de snelheid van opwarmen, de thermische expansie (coëfficiënt) van het toeslagmateriaal, de maximumkorrelgrootte van het toeslagmateriaal, de treksterkte van het beton, de ouderdom van het beton, de drukbelasting van het betreffende constructiedeel, het temperatuurprofiel en dus onder andere de warmtegeleiding van het beton, de permeabiliteit, de vorm en afmetingen van het betonelement, de

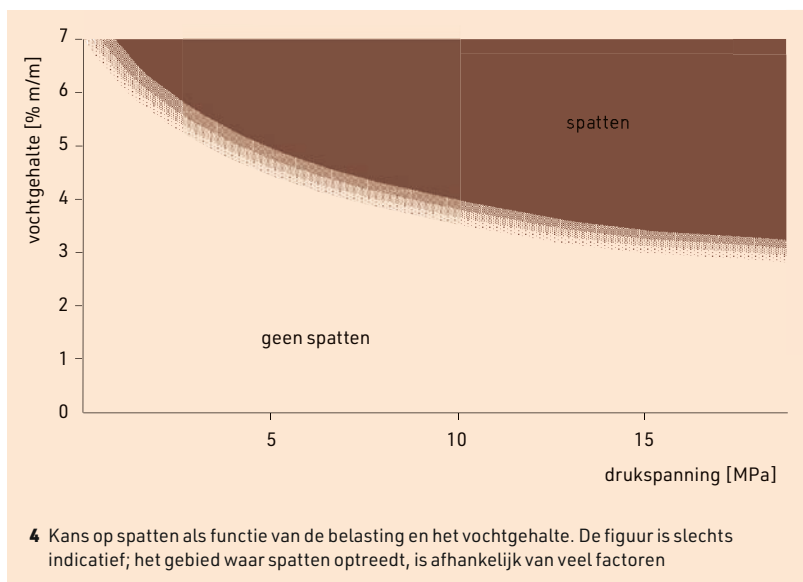
In 2015 bleek uit onderzoek bij Efectis dat bij de in de ROK beschreven betonsamenstelling toch spatten kan optreden



2 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



Achteraf kunnen we concluderen dat het uitvoeren van één proef aan onbeschermd beton in 2001 onvoldoende was om het ROK-beton als afspatongevoelig te karakteriseren



wapening en het vochtgehalte. Hoewel er al zo lang onderzoek naar wordt gedaan, is er dan ook nog steeds geen theoretisch model dat generiek en betrouwbaar het optreden van spatten kan voorspellen.

De twee belangrijkste theorieën over explosief spatten, poriedruk en thermische spanningen, worden in het navolgende beschreven.

Poriedruk

Bij een snelle verhitting van beton wordt het aanwezige vocht in korte tijd omgezet in stoom. Hierdoor neemt het volume snel en sterk toe. Afhankelijk van de permeabiliteit van het beton kan de waterdamp niet snel naar buiten, waardoor de druk toeneemt. 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 poriedruk zijn het initiële vochtgehalte, de permeabiliteit van het beton, de aanwezigheid van drukspanningen en de opwarmingssnelheid. De poriedruk neemt toe bij toenemende opwarmingssnelheid, hoger vochtgehalte en lagere permeabiliteit. Bij een zeer hoge opwarmingssnelheid kan de maximale poriedruk weer lager uitvallen, doordat hierbij door thermische spanningen

meer scheurtjes ontstaan en waterdamp kan ontsnappen. Ten aanzien van de opwarmingssnelheid is er wat betreft de poriedruk dus mogelijk een 'optimum'.

De kans op het optreden van spatten is bij regulier beton klein 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 echter door de hogere luchtvochtigheid het evenwichtsvochtgehalte met circa 5 tot 7% m/m een stuk hoger liggen.

Thermische spanningen

Bij het opwarmen van beton ontstaan drukspanningen aan de buitenzijde doordat 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 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, 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 3.

KANS OP SPATTEN

Bij beton in tunnels zal het evenwichtsvochtgehalte door de hoge luchtvochtigheid rond circa 5 tot 7% m/m liggen. De kans op spatten is zonder

CONCLUSIES GESPREKSTAFEL ONDERZOEK

De gesprekstafel Onderzoek heeft in de periode 2018-2020 onderzoeksresultaten en literatuur bestudeerd. De conclusies van de gesprekstafel Onderzoek zijn hieronder integraal overgenomen.

De KPT gesprekstafel Onderzoek is op basis van de huidige stand van de kennis alsmede de nu bekend zijnde testresultaten van de hitte- en brandproeven uitgevoerd in/voor wegtunnels tot de volgende conclusies gekomen:

1. Ten tijde van de BRAWAT-onderzoeken (1996-2001) waren er geen significante signalen dat bij een forse brand in niet-geboorde tunnels beton ernstig zou kunnen gaan afspringen. De uitgevoerde onderzoeken waren daarom beperkt van omvang.
2. Tussen 2001-2015 zijn geen verdere brandproeven uitgevoerd voor niet-geboorde tunnels gericht op het afspringen van beton. De opzet en omvang van de vanaf 2015 uitgevoerde brandproeven wijken af van de uitgevoerde BRAWAT-proeven, waardoor de resultaten lastig onderling te vergelijken zijn.
3. Met de kennis van nu kan worden geconcludeerd dat er in het verleden te weinig representatieve proeven zijn gedaan om te kunnen stellen dat regulier (onbeschermd) beton ('ROK-mengsel') afspatongevoelig zou zijn. Er kan dan ook niet worden geconcludeerd dat de afspatgevoeligheid van beton tegenwoordig anders is dan ten tijde van de BRAWAT-onderzoeken.
4. Uit literatuur volgt dat de afspatgevoeligheid afhangt van het toegepaste beton, de brand en de constructie (o.a. de afmetingen, de wapening, de thermische en mechanische belastingen, vocht en verandering van thermische vervormingen).
5. Het optreden van afspringen is niet goed te voorspellen. Er is wel een grove relatie met het vochtgehalte van het beton in samenhang met de permeabiliteit en de aanwezigheid van drukspanningen. Thermische spanningen, drukspanningen en verhinderde thermische vervormingen vergroten de kans op afspringen. De relatie met de druksterkte is minder eenduidig.
6. Met de huidige kennis kan worden geconcludeerd dat er bij een forse brand in een onbeschermd betonnen tunnel een grote kans is op het optreden van afspringen.

Een toelichting en onderbouwing op deze conclusies staat in het document 'Toelichting conclusies na analyse brandproeven wegtunnels' [5], beschikbaar op de website van het KPT

aanvullende maatregelen daarom bij een grote tunnelbrand groot. Zie hiertoe ook figuur 4. 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 veel factoren. Monofilament (enkelvoudige) polypropyleenvezels kunnen de kans op het optreden van spatten fors verkleinen. Deze vezels, geproduceerd door het spinnen van gesmolten polypropyleen, verhogen bij het opwarmen van beton de permeabiliteit. Hierdoor wordt de poriedruk en daarmee de kans op spatten verkleind. 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 verlagen van de poriedruk. Waarschijnlijk is er, door slechte hechting tussen de vezels en de cementsteen, ruimte rondom de vezels waarlangs onder druk vocht-

transport mogelijk is. Daarnaast zullen de vezels als ze opwarmen samentrekken en dus korter in lengte en dikker worden, waarbij ruimte in het beton ontstaat die kan bijdragen aan vochttransport en het verlagen van de poriedruk.

BUITENLANDSE REGELGEVING

In Duitsland wordt de toepassing van 2,0 kg/m³ monofilament polypropyleenvezels voorgeschreven, waarbij de werkzaamheid van de toe te passen vezels moet kunnen worden aangetoond ('allgemeine bauaufsichtliche Zulassung'). De werkzaamheid van de vezels mag ook middels brandproeven aan twee proefstukken worden aangetoond. Wanneer hiervan wordt afgeweken of niet aan de randvoorwaarden voor de dimensies (overspanning en dikte van het beton) wordt voldaan, is aanvullend bewijs nodig. Door voldoende dekking op de wapening wordt ervoor gezorgd dat het wapeningsstaal niet te heet kan worden.

In België is het gebruikelijk tunnels van brandwerende bekleding te voorzien, zowel om de temperatuur in het wapeningsstaal beperkt te houden als het spatten van beton te voorkomen.

TOT SLOT

Door de hoge luchtvochtigheid buiten en daarmee ook in tunnels en als gevolg daarvan het hoge evenwichtsvochtgehalte in beton, is er bij een forse brand in een tunnel altijd sprake van een grote kans op het optreden van spatten van onbeschermd beton. Dat was in het verleden zo en dat is nog steeds zo. Hoewel de kans op zo'n forse brand extreem klein is, kunnen de consequenties voor de constructie zeer groot zijn. Het risico op het optreden van spatten kan sterk worden verlaagd door hittewerende bekleding toe te passen of door polypropyleenvezels aan het beton toe te voegen. ■

Literatuur

1. Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken ROK 1.4, Rijkswaterstaat, april 2017.
2. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Oktober 2021.
3. fib bulletin 38, Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling, April 2007.
4. Explosive spalling of concrete in fire, thesis, E. Klingsch, ETH Zurich, 2014.
5. Kennisplatform Tunnelveiligheid (KPT), Toelichting conclusies na analyse brandproeven wegtunnels, 16 april 2021.
6. Kennisplatform Tunnelveiligheid (KPT), Brandwerendheid beton in wegtunnels, Resultaten en verslag van het samenwerkingsproces, 7 oktober 2021.
7. BRAWAT-literatuurstudie spatten beton, TNO-rapport 96-CVB-R0399, C. Both, P.W. van de Haar, TNO, 1996.
8. BRAWAT 3: Onderzoek naar het afspatgedrag van een op druk belaste wand in afgezonken tunnels, TNO-rapport 2001-CVB-R03264, C. Both, TNO, 2001.
9. fib bulletin 38, Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling, April 2007.

MEER LEZEN IN BETONIEK STANDAARD

Meer over brandveiligheid en de mogelijke gevolgen van brand op een betonconstructie staat in *Betoniek* Standaard 14/16 – Brand! en *Betoniek* Standaard 16/30 – Brand Meester.