

Alkali-silicareactie, ASR

De alkali-silicareactie (ASR) is een chemische reactie tussen alkaliën in het beton, water en reactief silica uit het toeslagmateriaal als grondstof voor beton. Bij de reactie wordt een expansief gel gevormd, die het beton van binnenuit kapot drukt. ASR-schadegevallen kwamen in de jaren 1990-2000 in Nederland aan het licht; in vrijwel alle gevallen ging het om betonconstructies voor viaducten.

Onder welke omstandigheden is er kans op ASR? Hoe kan ASR-schade worden voorkomen?

ASR is een chemische reactie tussen alkaliën in het beton, water en reactief silica uit het toeslagmateriaal (zie kader).

In 'wetenschappelijke' zin zal ASR vrijwel in alle beton optreden. Immers in bijna alle betonsamenstellingen kan wel in enige mate een reactie van alkaliën en silica plaatshebben. Een belangrijke randvoorwaarde voor deze reactie is de mobiliteit van ionen.

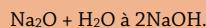
Schadelijke ASR kan alléén optreden als ten minste aan de volgende drie voorwaarden gelijktijdig wordt voldaan:

- er moet blijvend of periodiek voldoende vocht in het beton aanwezig zijn;
- er moeten voldoende alkaliën in het beton beschikbaar zijn;
- het toeslagmateriaal moet ASR-gevoelig zijn.

Alkali-silicareactie

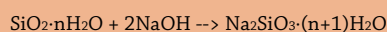
De alkali-silicareactie is een reactie van alkaliën en water met reactief silica. Reactief silica is een bestanddeel van sommige toeslagmaterialen. Alkaliën (natrium- en kaliumhydroxiden) zijn aanwezig in het poriewater van beton. Bij de reactie ontstaan gelvormige reactieproducten die (porie-)water kunnen absorberen en daardoor zwellen. Als gevolg hiervan worden drukspanningen in het beton opgebouwd. Bij te hoge spanningen zal het beton gaan scheuren. In dat geval is sprake van schadelijke ASR.

De alkali-silicareactie verloopt als volgt: eerst reageren alkaliën met water tot alkalihydroxide:



Daarna reageert het reactief silica met deze alkalihydroxide tot alkali-silicaathydraat, dat zeer veel water aan zich kan binden.

In formulevorm:



De reactie verloopt uiterst langzaam en de eerste schade wordt pas na jaren zichtbaar. Uiterlijk kenmerkt de schade zich door een scheurpatroon dat het meest lijkt op grootschalige craquelé.

Nieuwe regelgeving

Na de eerste diagnose van betonschade door ASR in Nederland (1992) is dergelijke schade geconstateerd in 40 à 50 bouwwerken in het land. Hiervan heeft met name een reeks aangetaste viaducten over rijksweg 59 in de jaren negentig van de vorige eeuw de meeste aandacht getrokken.

Gebouw Cementrum
Sint Teunislaan 1
5231 BS 's-Hertogenbosch
Postbus 3532
5203 DM 's-Hertogenbosch

t. 073 640 12 31
f. 073 640 12 84

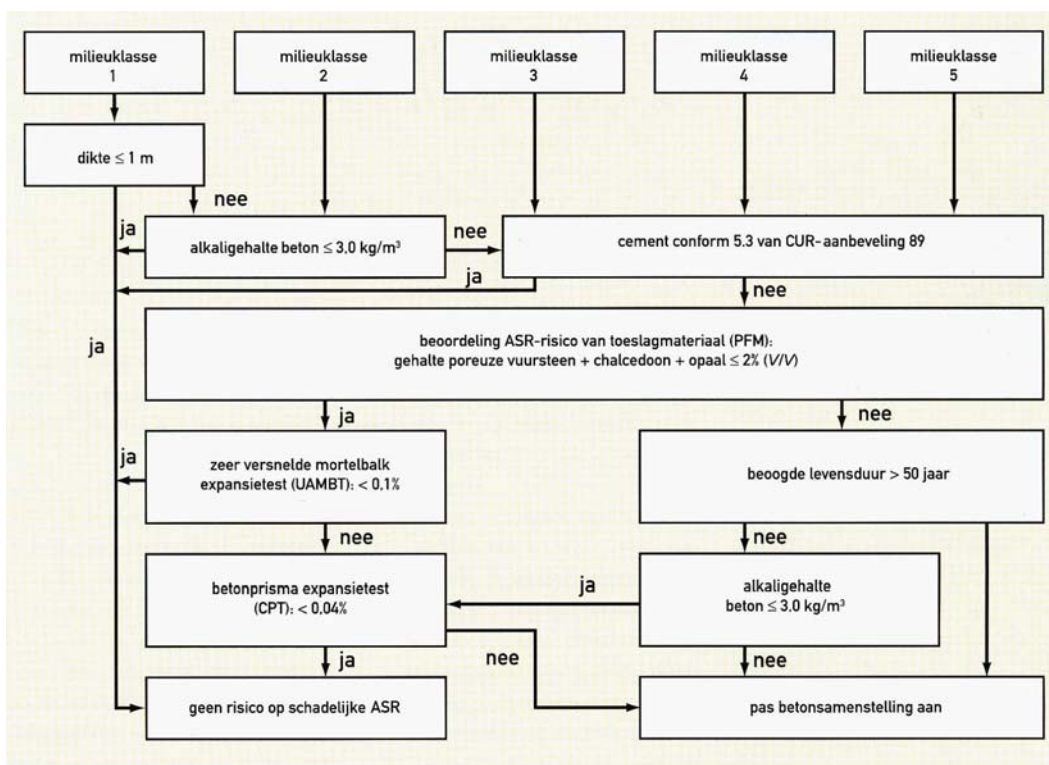
info@cementenbeton.nl
www.cementenbeton.nl

Deze schadegevallen én nieuwe inzichten betreffende schadelijke ASR hebben geleid tot het opstellen van CUR-Aanbeveling 89 'Maatregelen ter voorkoming van betonschade door alkali-silicareactie (ASR)'. Het uitgangspunt van CUR-Aanbeveling 89 is als volgt (zie ook stroomschema, figuur 1):

- 1. Het risico op ASR is primair afhankelijk gesteld van de milieuklasse.
- 2. Afhankelijk van de betreffende milieuklasse moet de hoeveelheid alkaliën worden beperkt:
 - door alkaligehalte beton $\leq 3,0 \text{ kg/m}^3$ (milieuklasse 2);
 - door cementkeuze volgens tabel 1 of een cement-vulstofcombinatie volgens 5.3 van CUR-Aanbeveling 89 (milieuklasse 3 tot en met 5).
- 3. Als niet aan de onder punt 2 genoemde voorwaarden kan worden voldaan, moet de hoeveelheid reactief silica in het toeslagmateriaal worden beperkt:
 - gehalte poreuze vuursteen + chalcedoon + opaal $\leq 2\%$ (V/V);
 - toetsing door middel van een expansietest of aan bovengenoemde voorwaarde kan worden voldaan.

Zoals blijkt uit het stroomschema is de kans op schadelijke ASR bij beton in milieuklasse 1 verwaarloosbaar klein omdat water (vocht) ontbreekt. Omdat in dikke betonconstructies het vochtgehalte gedurende lange tijd nog heel hoog kan zijn, is er een beperking gesteld aan de dikte van het bouwdeel (maximaal 1 m dik) in milieuklasse 1.

Figuur 1 Stroomschema beoordeling van het risico op schadelijk ASR volgens CUR-Aanbeveling 89 Schade als gevolg van de alkali-silicareactie



Risico van ASR-schade bij expositie in diverse milieuklassen

CUR-Aanbeveling 89 is (nog) gebaseerd op de milieuklassen volgens de NEN 5950 (VBT 1995). Om hierbij het gebruik van NEN-EN 206-1 mogelijk te maken, is in tabel 1 de relatie tussen de milieuklassen volgens beide normen aangegeven.

Tabel 1 Relatie tussen de milieuklassen volgens NEN 5950 en NEN-EN 206-1

Milieu	Milieuklassen volgens NEN 5950	Milieuklassen volgens NEN-EN 206-1
droog	1	XC
vochtig	2	XC, XD, XS en XF
vochtig in combinatie met dooizouten	3	XD en XF
zeewater	4	XS
agressief chemisch milieu	5	XA

Beton in milieuklasse 1

In milieuklasse 1 is géén vocht beschikbaar. In deze milieuklasse is dus ongeacht de betonsamenstelling en de keuze van de verschillende grondstoffen, géén risico voor schadelijke ASR. We zagen al eerder dat in veel beton alkaliën in enige maten reageren met silica in toeslagmateriaal, waardoor in 'wetenschappelijke' zin sprake is van een alkali-silicareactie. Dit kan ook in droog milieu. Echter, de schade die door ASR wordt veroorzaakt treedt op doordat reactieproducten water opnemen, waarbij hun volume sterk toeneemt. Door deze zwelling treedt spanningsopbouw in het beton en uiteindelijk schade op.

Indien er geen of onvoldoende vocht beschikbaar is, zullen de reactieproducten niet zwellen en zal geen schade optreden. In een droge omgeving, te weten beton in milieuklasse 1, is derhalve geen extra preventieve maatregel vereist. Hierbij valt wel één kanttekening te maken. Onduidelijk is in hoeverre in het hart van zeer grote, dikke betonconstructies voldoende 'eigen vocht' kan worden aangetrokken om toch zwelling mogelijk te maken. Daarom is een beperking gesteld aan de dikte van betonelementen waarbij de afwezigheid van vocht van buiten als preventieve maatregel geldt. Deze dikte is vastgesteld op 1 m. Bij grotere doorsneden moet het risico op schadelijke ASR worden beoordeeld zoals in milieuklasse 2 (figuur 1).

Beton in milieuklasse 2

In milieuklasse 2 is van buitenaf wél vocht beschikbaar. Dit betekent dat in deze milieuklasse één van de 'andere' voorwaarden voor het mogelijk optreden van schadelijke ASR moet worden uitgeschakeld.

Nu de zwelling niet kan worden beperkt door de beschikbaarheid van het vocht uit te sluiten, moet ervoor worden gezorgd dat vanuit de samenstelling onvoldoende alkaliën beschikbaar zijn. Uit ervaring en onderzoek is gebleken dat de limiet voor het alkaligehalte van 3,0 kg/m³, uitgedrukt in natriumequivalent Na₂O_e (= Na₂O + 0,658 K₂O) van het beton, een veilige grenswaarde vormt.

Met de meeste betonsamenstellingen kan eenvoudig aan deze eis worden voldaan. Om het alkaligehalte te kunnen berekenen, moeten uiteraard wél het alkaligehalte van de gebruikte grondstoffen bekend zijn (zie kader).

Indien niet aan de limiet voor het alkaligehalte kan worden voldaan, gelden dezelfde eisen als voor milieuklasse 3 tot en met 5.

Typisch voorbeeld van ASR-schade



Beton in milieuklasse 3 tot en met 5

Ten aanzien van het alkaligehalte is de situatie in milieuklasse 3 tot en met 5 enigszins anders dan in milieuklasse 2. Hier bestaat, in principe, de mogelijkheid dat van buitenaf alkaliën in het beton dringen, bijvoorbeeld door dooizouten of zeewater. Hoewel onderzoek heeft aangetoond dat de indringing van alkaliën van buitenaf in het algemeen minimaal is, is deze in milieuklasse 3 tot en met 5 niet geheel uit te sluiten. Hierdoor zou het alkaligehalte van het beton boven de kritische grens van $3,0 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{Oe}$ kunnen oplopen. In deze milieuklassen is dus sprake van én vocht én het risico van buitenaf indringen van alkaliën. Voor deze milieuklassen geldt dat het risico voor ASR moet worden beperkt door de juiste cement- of bindmiddelkeuze.

Cementkeuze

Bij de juiste cement- of bindmiddelkeuze is er geen risico voor schadelijke ASR, omdat daarbij de hoeveelheid voor ASR beschikbare alkaliën wordt beperkt.

In veel gevallen zal dit in Nederland de eenvoudigste preventieve maatregel zijn om ASR te voorkomen.

Op basis van ervaring en uitgebreid onderzoek in binnen- en buitenland is vastgesteld dat als het cement een bepaald minimumgehalte aan slak, dan wel poederkoolvliegias bevat, het risico op ASR tot een minimum wordt beperkt (zie kader).

Er zijn geen verdere preventieve maatregelen nodig als gewerkt wordt met hoogovencement (CEM III/B) of een cementmengsel met minimaal 50% hoogovenslak óf met een portlandvliegascement (of portlandcement in combinatie met een voldoende hoog vliegasaandeel) die voldoen aan tabel 2. Met deze cementen wordt een beton met een zodanig dichte structuur verkregen, dat alkaliën van buitenaf nauwelijks kunnen binnendringen. Indien een cement of bindmiddel wordt toegepast dat niet voldoet aan 5.3 van CUR-Aanbeveling 89, moet het toeslagmateriaal voldoen aan de eisen van de CUR-Aanbeveling (figuur 1).

Tabel 2 Eisen aan cementen met preventieve werking ten aanzien van ASR volgens CUR-Aanbeveling 89

Cement	CEMII/B-V			CEM III/A	CEM III/B
gehalte aan vliegias c.q. slag % (m/m)	≥ 25	≥ 25	≥ 30	≥ 50	≥ 66
Na₂Oe vliegias % (m/m)	1 ≤ x ≤ 2	2 ≤ x ≤ 3	3 ≤ x ≤ 4,5	-	-
max. alkaligehalte cement % (m/m)					
- indien de alkalibijdrage van de overige bestanddelen ≤ 0,6 kg/m ³	1,1	1,3	1,6	1,1	1,5
- indien de alkalibijdrage van de overige bestanddelen ≤ 1,2 kg/m ³ ¹	0,9	1,1	1,5	0,9	1,3
- indien (rekenvoorbeeld) de alkalibijdrage van de overige bestanddelen > 1,2 kg/m ³ ²	(0,8) ²	(1,0) ²	(1,4) ²	(0,8) ²	(1,2) ²

¹⁾ Indien wordt aangetoond dat de alkalibijdrage van de hulp- en vulstoffen, anders dan vliegias, < 0,1 kg/m³ is, mag voor de alkalibijdrage van de overige bestanddelen worden uitgegaan van maximaal 1,2 kg/m³. Wordt niet aan deze eis voldaan, dan moet het alkaligehalte worden berekend volgens de procedure die is vastgelegd in het achtergrondrapport bij CUR-Aanbeveling 89.

²⁾ Indien bijvoorbeeld de alkalibijdrage van de overige bestanddelen ≤ 1,6 kg/m³ is, mag het maximale alkaligehalte van het cement de tussen haakjes vermelde waarde niet overschrijden.

Voorbeeldberekening van het alkaligehalte

320 kg/m ³ portlandcement met 0,7 % (m/m) Na ₂ Oe	2,240 kg/m ³
1100 kg/m ³ grind met 0,010 % (m/m) Na ₂ Oe	0,110 kg/m ³
800 kg/m ³ zand met 0,012 % (m/m) Na ₂ Oe	0,096 kg/m ³
120 kg/m ³ water met 0,01 % (m/m) Na ₂ Oe	0,001 kg/m ³
3,0 kg/m ³ hulpstof met 2,0 % (m/m) Na ₂ Oe	0,060 kg/m ³
het totale alkaligehalte van het beton, in Na ₂ Oe, is	2,507 kg/m ³

Cementkeuze en beschikbare alkaliën

Uit zowel de praktijk als uit divers wereldwijd onderzoek is bekend dat zowel hoogovenslak als poederkoolvliegias de hoeveelheid alkaliën die beschikbaar zijn voor de alkali-silicareactie, sterk verminderen. De slak- en vliegiasdeeltjes houden als het ware de alkaliën vast. Dit betekent ten minste dat de bijdrage van alkaliën aan de ASR-reactie uit slak en vliegias veel lager is dan uit portlandcement.

Om praktische redenen is ervoor gekozen de eisen aan effectieve alkaligehaltes van beton met portlandcement, hoogovenslak en/of vliegias te vertalen naar grenswaarden voor het totale alkaligehalte van de cementen. Hierbij wordt uitgegaan van een bepaalde bijdrage vanuit de 'overige bestanddelen', een (voor Nederland) realistische waarde voor het alkaligehalte van de vliegias en een bepaalde binding van alkaliën door hoogovenslak en vliegias. De verschillende grenswaarden zijn gegeven in tabel 2.

In Nederland liggen de gebruikelijke waarden voor cement normaliter v^{er} onder deze grenswaarden.

ASR-gevoelig toeslagmateriaal

Als de toegepaste cement of cementvulstofcombinatie voldoet aan de criteria zoals omschreven in CUR-Aanbeveling 89, behoeven géén aanvullende eisen te worden gesteld aan het te gebruiken toeslagmateriaal. Dat betekent dat alle toeslagmaterialen die voldoen aan de norm voor toeslagmaterialen NEN-EN 12620, altijd mogen worden gebruikt. Er moet wel aan de overige eisen in de vigerende betonvoorschriften (normen en CUR-Aanbevelingen) worden voldaan!

Als het niet mogelijk is één van de hiervoor beschreven maatregelen uit te voeren, moet toeslagmateriaal worden toegepast waarvan door middel van één of meer expansieproeven is aangetoond dat het niet gevoelig is voor ASR. De procedure om die gevoeligheid te bepalen is beschreven in CUR-Aanbeveling 89.

Als eerste stap wordt het gehalte aan potentieel reactieve materialen in het toeslagmateriaal bepaald met PFM microscopie (polarisatie- en fluorescentiemicroscopie). De mate van reactiviteit hangt af van de kristalstructuur van de vrije silica, SiO₂, die in het toeslagmateriaal aanwezig is. Hoe beter de kristalstructuur geordend is, des te lager is de oplosbaarheid van silica en des te geringer is de reactiviteit van de silica.

Kwarts is bijvoorbeeld SiO₂ met een goed geordende (volledig kristallijne) kristalstructuur. Voorbeelden van silica met een slecht geordende (men spreekt ook wel van amorfe of glasachtige) structuur zijn poreuze vuursteen, chalcedoon en opaal (figuur 2). Deze materialen worden beschouwd als reactief. Indien het gehalte aan deze materialen groter is dan 2% (V/V) wordt het toeslagmateriaal beschouwd als potentieel ASR-gevoelig. Het blijkt vaak moeilijk om op grond van een oordeel over individuele korrels te komen tot een oordeel over de ASR-gevoeligheid van samengestelde materialen zoals rivierzand en -grind en zeezand en -grind. De mineralogische samenstelling van deze toeslagmaterialen bevat vaak een variëteit aan mineralen en de kristalstructuur bevat vele (overgangs)vormen.

Materiaal dat 2% (V/V) of minder poreuze vuursteen + chalcedoon + opaal bevat, kan veelal als ongevoelig voor de alkali-silicareactie worden beschouwd. Er kunnen echter nog wel geringe hoeveelheden ander reactief silica aanwezig zijn. Om dit risico te ondervangen moet het materiaal, na beoordeling op grond van de PFMresultaten, ook worden onderworpen aan een expansietest. Hierbij bestaat de keuze uit de 'zeer versnelde mortelbalkexpansietest', die veertien dagen duurt, of de 'betonprisma-expansietest', die één jaar duurt. Beide beproevingsmethoden zijn beschreven in CUR Aanbeveling 89. De maximaal toelaatbare expansie volgens beide beproevingen is 0,1%, respectievelijk 0,04%.

Voor materiaal dat meer dan 2% (V/V) poreuze vuursteen + chalcedoon + opaal bevat, is de situatie ingewikkelder. De zeer versnelde mortelbalkexpansietest is niet geschikt voor materialen met een hoog gehalte aan poreuze vuursteen. Als beproevingsmethode voor deze materialen resteert derhalve in principe alleen de betonprisma-expansietest. Dit lijkt de meest betrouwbare beproevingsmethode.

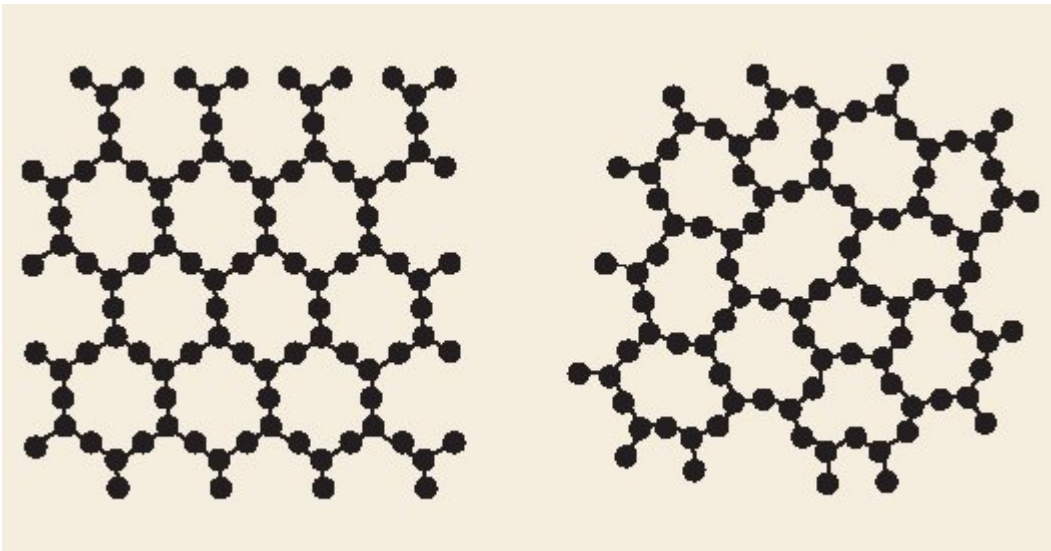
Het blijft echter moeilijk om bij het ontwerpen van constructies voor een zeer lange levensduur elk risico op het optreden van ASR uit te sluiten. Daarom is in CUR-Aanbeveling 89 gekozen voor de volgende tweedeling:

- voor constructies met een beoogde levensduur van 50 jaar of minder en een alkaligehalte van het beton $\leq 3,0 \text{ kg/m}^3$, moet de ASR-gevoeligheid van het toeslagmateriaal worden bepaald door middel van de betonprisma-expansietest;
- voor constructies met een beoogde levensduur van 50 jaar of minder en een alkaligehalte van het beton dat hoger is dan $3,0 \text{ kg/m}^3$ moet, om het risico van schadelijke ASR te minimaliseren, de betonsamenstelling worden aangepast;
- voor constructies met een beoogde levensduur van meer dan 50 jaar moet, om het risico van schadelijke ASR te minimaliseren, de betonsamenstelling altijd worden aangepast.

Bij aanpassing van de betonsamenstelling zal het cement of het bindmiddel moeten voldoen aan de eisen van CUR-Aanbeveling 89 of moet toeslagmateriaal worden gekozen dat wel voldoet aan de 2% (V/V) eis.

Voor alle duidelijkheid nog maar eens: bovenstaande maatregelen gelden alleen als niet door middel van de cementkeuze (tabel 2) of cementvulstofcombinatie (zie 5.3 van CURAanbeveling 89) dan wel door beperking van de alkaliën in het beton (milieuklasse 2), het risico op schadelijke ASR kan worden voorkomen (zie kader en figuur 1).

Figuur 2 Voorbeeld van een geordende (volledig kristallijn) en ongeordende (volledig amorf ofwel glasachtig) kristalstructuur



Reactiviteit van het toeslagmateriaal

De ASR-gevoeligheid van toeslagmateriaal hangt fundamenteel af van de kristalstructuur van de vrije silica, SiO_2 , die in het toeslagmateriaal aanwezig is. Hoe beter de kristalstructuur geordend is, des te lager is de oplosbaarheid van silica en des te geringer is de hoeveelheid silica beschikbaar voor ASR. Een maat voor deze ordening is de kristalliniteit. De kristalliniteit wordt bepaald door middel van Röntgen-diffractieanalyse. De kristalliniteit wordt uitgedrukt op een schaal van 1 tot 10. De hoogste waarde (10) staat voor volledig kristallijn, de laagste waarde voor 'totaal ongeordend'.

Voor gewone kwartskorrels (kiezels) is de kristalliniteit 9 à 10, maar bij verschillende soorten vuursteen kan dit teruglopen tot minder dan 1. De ASR-gevoeligheid van toeslagmateriaal is echter niet alleen afhankelijk van de kristalliniteit. De korrels moeten ook toegankelijk zijn voor vloeistoffen om op te lossen: poreuze vuursteen en zeer fijnkorrelige zandstenen zijn in de regel reactiever dan dichte vuursteen en meer grofkorrelige zandstenen.

Conclusie

Voor beton in alle milieuklassen is het mogelijk maatregelen te nemen om schade door ASR te voorkomen. Schadelijk ASR treedt alléén op als aan alle drie genoemde essentiële voorwaarden (aanwezigheid van vocht, alkaliën en ASR gevoelig toetsmateriaal) gelijktijdig wordt voldaan.

Literatuur

1. Betoniek 9/25, Alkali-silicareactie, mei 1994.
2. Betoniek 11/13, Petrografie, maart 1998.
3. CUR-Aanbeveling 89, Maatregelen ter voorkoming van betonschade door alkalischsilicareactie (ASR). CUR, Gouda, 2002.
4. CUR-rapport 2003-1, Alkali-silicareactie in beton - Achtergrondrapport bij CURAanbeveling 89. CUR, Gouda, 2003.
5. NEN 5950, Voorschriften beton - Technologie (VBT 1995). Eisen, vervaardiging en keuring. NNI, Delft, 1995, met wijzigingsblad A3:2001.
6. NEN-EN 206-1, Beton - Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. NEN, Delft, 2001.
7. NEN-EN 12620, Toetsmateriaal voor beton. NEN, Delft, 2002.