

STUVO-rapport 103

**Duurzaamheid van betonnen
bruggen, voorgespannen met
nagerekt voorspanstaal**

Eindrapport van STUVO-studiecommissie 146

Prof. dr. ir. J.C. Walraven (Mentor)
Ir. J.C. Kuiper (voorzitter)
Ir. J. Groenveld (secretaris)
Ir. G.Chr. Bouquet
Prof. dr. ir. A.S.G. Bruggeling
ir. R. Dayala (tot augustus 1995)
Ir. Th.A. Feijen
Dr. R.B. Polder
Ing. J. de Vries
Ir. D.H. Weertman

januari 1997

Een STUVO-rapport is compleet wanneer daaraan het verslag van de discussie hierover in de STUVO-ledenvergadering is toegevoegd.

Copyright STUVO, 's-Hertogenbosch, Nederland 1997.

De STUVO heeft deze publicatie met een zo groot mogelijke zorgvuldigheid samengesteld. Mede ten behoeve van allen, die hieraan hebben meegewerkt, sluit de STUVO elke aansprakelijkheid uit die mocht voortvloeien uit het gebruik en de toepassing van gegevens uit deze publikatie. Gehele of gedeeltelijke overname van de inhoud van dit rapport is alleen toegestaan met voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteurs.

STUVO-rapport 103

BIBLIOTHEEK
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Postbus 20.000
3502 LA Utrecht

**Duurzaamheid van betonnen
bruggen, voorgespannen met
nagerekt voorspanstaal**

Eindrapport van STUVO-studiecommissie 146

Prof. dr. ir. J.C. Walraven (Mentor)
Ir. J.C. Kuiper (voorzitter)
Ir. J. Groenveld (secretaris)
Ir. G.Chr. Bouquet
Prof. dr. ir. A.S.G. Bruggeling
ir. R. Dayala (tot augustus 1995)
Ir. Th.A. Feijen
Dr. R.B. Polder
Ing. J. de Vries
Ir. D.H. Weertman

januari 1997

Een STUVO-rapport is compleet wanneer daaraan het verslag van de discussie hierover in de STUVO-ledenvergadering is toegevoegd.

Copyright STUVO, 's-Hertogenbosch, Nederland 1997.

De STUVO heeft deze publicatie met een zo groot mogelijke zorgvuldigheid samengesteld. Mede ten behoeve van allen, die hieraan hebben meegewerkt, sluit de STUVO elke aansprakelijkheid uit die mocht voortvloeien uit het gebruik en de toepassing van gegevens uit deze publikatie. Gehele of gedeeltelijke overname van de inhoud van dit rapport is alleen toegestaan met voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteurs.

Voorwoord

Internationaal is er een discussie gaande m.b.t. de duurzaamheid van voorgespannen betonnen brugconstructies. Het betreft vooral constructies met nagerekt voorspanstaal. Deze problemen spelen met name in Engeland en Duitsland. Maar ook in Nederland doen zich incidenteel problemen voor. In Engeland heeft het "Department of Transport" sinds september 1992 een verbod 'Ban' ingesteld op het toepassen van voorspanning met nagerekt staal [DoT 1992] (zie bijlage I).

Het STUVO-bestuur besloot naar aanleiding hiervan een studietoelating in te stellen die de volgende taakstelling mee kreeg:

- Het verrichten van een oriënterende studie naar de problemen die zich hebben voorgedaan in Engeland en Duitsland op het gebied van de duurzaamheid van voorgespannen betonconstructies, met name kunstwerken.
- Het uitbrengen van een advies om het optreden van dergelijke schade in Nederland tegen te gaan.

In de eerste commissievergadering stelde de commissie zelf de taak wat ruimer, door ook Nederland hierin te betrekken. Het aanvankelijke idee om ook het aandrazen van curatieve oplossingen tot taak te rekenen, heeft de commissie bij nader inzien laten varen, omdat dit alleen goed kan aan de hand van een concreet project.

Voor u ligt een rapport dat door de commissieleden met veel inspanning tot stand is gebracht. Een speciaal woord van dank geldt Saskia de Bruijn van Holland Railconsult, die de verschillende tekstbijdragen voor dit rapport bijeenbracht.

Samenvatting

De studiegcommissie verzamelde n.a.v. het instellen van de tijdelijke "Ban" in Engeland een groot aantal gegevens. Het betreft reacties op de "Ban" en gegevens over de schadegevallen die ertoe leidden. Daarnaast werden gegevens van andere schadegevallen en inspecties in binnen- en buitenland bijeengebracht. De commissie doet in dit rapport aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering van duurzame voorspanning en de daarbij toe te passen materialen.

De commissie deed ook onderzoek naar de resterende draagkracht van constructies met beschadigde voorspanning.

De commissie analyseerde de verzamelde gegevens.

Wat opvalt is dat er heel wat mis kan gaan zonder dat dit tot problemen leidt. Waar het misgaat is er veelal sprake van fouten uit de beginperiode van het voorspannen (1950-1960) en dan vaak nog door een combinatie van verschillende factoren.

Zo leidt het onvolledig injecteren van voorspankanalen sec nauwelijks tot draagkrachtverlies of vermindering van de duurzaamheid. Is echter bovendien het beton niet goed verdicht, en is er onvoldoende afdichting van de bovenzijde van de constructie of ter plaatse van de verankeringen, dan is er bij een zoutbelasting kans op schade.

Het merendeel van de aanbevelingen van de STUVO-commissie liggen op het gebied van ontwerp en uitvoering en materiaalkeuze. De aanbevelingen gaan verder dan het strikt toepassen van de voorschriften. Het toepassen van het principe:

"Keep it simple"

is misschien wel de belangrijkste aanbeveling van dit rapport. Houd het eenvoudig. Beperk daardoor de kans op fouten, ook al laten de voorschriften complexe oplossingen toe.

Er is geen enkele reden om voor Nederland beperkende maatregelen voor te stellen zoals in Engeland is gebeurd. De bestaande Nederlandse bruggen, voorgespannen met nagerekt voorspanstaal, zijn in het algemeen met voldoende zorg ontworpen en uitgevoerd. De huidige know-how is (mede dankzij de rol van de STUVO, die o.a. waarschuwde tegen het gebruik van Rheinhausenstaal) zodanig ontwikkeld dat mits zorgvuldig ontworpen, gedetailleerd en uitgevoerd, en met de juiste materiaalkeuze, constructies van grote duurzaamheid kunnen worden verkregen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	II
Samenvatting	III
Inleiding	1
1. Internationale reacties op de "Ban"	2
1.1. Reacties uit de FIP	2
1.2. Ontwikkelingen in het Verenigd Koninkrijk	3
2. Bestaande kunstwerken van voorgespannen beton	6
2.1. Schadegevallen bij kunstwerken in het buitenland	6
2.1.1. Engeland	6
2.1.2. Duitsland	6
2.2. Onderzoek en inspectie aan voorgespannen kunstwerken in Nederland	7
2.2.1. Brug over de IJssel bij Zwolle in de A28 (Katerveer II)	7
2.2.2. Viaduct in de A28 in knooppunt Hoevelaken	8
2.2.3. Brug over de IJssel bij Deventer	8
2.2.4. Brug over de Maas bij Grubbenvorst	8
2.2.5. Viaduct over A28 bij Nijkerk	8
2.2.6. Tafelbrug in A4 nabij Ypenburg	9
3. Materialen	10
3.1. Beton	10
3.1.1. Duurzaamheid	10
3.1.2. Verwerkbaarheid	10
3.1.3. Verdichten	11
3.1.4. Afwerking	11
3.1.5. Nabehandeling	11
3.2. Omhullingsbuizen	11
3.2.1. Belang van omhullingsbuizen	11
3.2.2. Stalen omhullingsbuis	12
3.2.3. Kunststof omhullingsbuis	12
3.2.4. Benodigde diameter	13
3.2.5. Ontluchting van omhullingsbuizen, verankeringen en tussenkoppelingen	13
3.2.6. Eisen omhullingsbuis	13
3.3. Voorspanstaal	14
3.3.1. Eigenschappen	14
3.3.2. Corrosie van voorspanstaal	15
3.4. Injectiespecie	18
3.4.1. Algemeen	18
3.4.2. Algemene eigenschappen	18
3.4.3. Samenstelling injectiespecie	19
3.4.4. Technologische- en rheologische eigenschappen	19
3.4.5. Resumé voorkomen van lucht- en waterinsluitingen	22
4. Aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering van duurzame voorspanning	23
4.1. Hoofdoorzaken falen betonconstructies.	23
4.2. Constructieve vormgeving in het ontwerp-stadium.	23
4.2.1. Kwaliteit van de betondekking	23
4.2.2. Het beloop van de kabels over de liggerlengte.	24
4.2.3. De plaats en afwerking van verankeringen en ontluchtingsbuisjes.	26

4.2.4. Scheurverdelende wapening	27
4.3. Constructievormen	28
4.3.1. Plaatvormige brugconstructies over meer steunpunten.	28
4.3.2. Kokervormige brugconstructies over meer steunpunten.	30
4.3.3. T- en TT-vormige liggers in een brugconstructie.	32
4.4. Uitvoeringsaspecten	32
4.4.1. Montage van ankers en buis	32
4.4.2. Invoeren van kabels	32
4.4.3. Spannen van kabels	33
4.4.4. Het injecteren van kabelkanalen	33
4.4.5. Het afwerken van voorspankabels	33
4.5. Bescherming tegen indringing van dooizouten	33
4.5.1. Opbouw slijtlagen	33
4.5.2. Behandeling van stornaden en sparingen	34
5. Draagkracht van constructies met beschadigde voorspanning	35
5.1. Globale vergelijking van de voorschriften.	35
5.2. Afstudeeronderzoek F. Bockhoudt	37
5.3. Forschungsbericht T 2660: Schadensablauf bei Korrosion der Spannbewehrung Deutsches Institut für Bautechnik	38
5.4. Samenvatting	39
6. Conclusies en aanbevelingen	41
6.1. De "Ban" in het Verenigd Koninkrijk	41
6.2. Schade aan Kunstwerken	41
6.3. Materialen	41
6.4. Ontwerp en uitvoering	42
6.5. Draagkracht bij gereduceerde voorspanning	42
6.6. Aanbevelingen	42
6.7. Conclusie	42
7. Literatuur	43
Colofon	1
 Bijlage I	
 Bijlage II	
 Bijlage III	
 Bijlage IV	
 Bijlage V Korrelverdeling van ENCI portlandcement	
 Bijlage VI	
 Bijlage VII	
 Bijlage VIII	
 Bijlage IX	

Inleiding

In Engeland heeft het "Department of Transport" een verbod ingesteld op de toepassing van voorspanning met nagerekt staal. Dit gebeurde na het instorten van een brug in Ynys-y-Gwas. De duurzaamheid van voorgespannen betonconstructies met nagerekt staal stond daardoor ter discussie. Ook in Duitsland zijn er problemen op dit gebied.

In augustus 1995 was er een IABSE-congres in San Francisco. Het congres had als thema de levensduurverlenging van constructies. In een van de sessies over onderhoud van constructies noemde prof. Jungwirth een globale analyse van de oorzaken die reparatie van Duitse constructies nodig maakten: 40% Ontwerpfouten, 40% Uitvoeringsfouten, 20% tijdafhankelijke materiaalfactoren.

Deze analyse geeft te denken: Meer dan tachtig procent van deze reparaties waren vermijdbaar bij een goed ontwerp en een goede uitvoering en een goede materiaalkeuze.

Er zijn in Duitsland relatief meer problemen dan in Nederland. De (nieuwbouw) projecten komen op een andere wijze tot stand dan in Nederland.

In Duitsland wordt per project door meerdere ingenieurbureaus of aannemers een ontwerp gemaakt, dat vaak leidt tot uiterste ontwerpen. De "prüfende" ingenieur toetst het ontwerp sec aan de voorschriften en kan zijn "constructeursgevoel" niet goed inbrengen. In de begintijd van het voorgespannen beton is het corrosiegevoelige zgn. Rheinhausenstaal toegepast. Wel is het zo dat in Duitsland de aanvangsspanning ca. 15% lager is dan wat in Nederland gangbaar is, hetgeen leidt tot een extra incasseringsvermogen.

In Nederland worden de bruggen en tunnels grotendeels ontworpen door aan de opdrachtgevers gelieerde gespecialiseerde ingenieurbureaus. Hierdoor is de ervaring geconcentreerd en is de kans op beginnersfouten gering. Echter, ook in Nederland was het nodig een aantal projecten te herstellen teneinde de levensduur te verlengen.

Met de presentatie, op 25 september 1996 tijdens het FIP-symposium te Londen, van het eindrapport [Concrete Society 1996] is tevens het moratorium op het toepassen van voorspanning met nagerekt staal in monoliete constructies opgeheven. Dit eindrapport bevat zowel ontwerp aanbevelingen als richtlijnen voor omhullingsbuizen en injectiespecie.

De aanbevelingen en richtlijnen zijn gericht op het realiseren van een duurzame meervoudige bescherming van het voorspanstaal tegen corrosie.

1. Internationale reacties op de "Ban"

1.1. Reacties uit de FIP

De publikatie van de "ban" in het Verenigd Koninkrijk op 25 September 1992 op de toepassing, in bruggen en viaducten, van voorgespannen beton met nagerekt staal - met geïnjecteerde voorspankabels - bracht grote beroering teweeg in de gelederen van de FIP. In Londen is immers, sedert haar oprichting, het secretariaat van de FIP gevestigd. Juist in dat land wordt dan de toepassing van een belangrijke methode van voorspannen verboden! De directe oorzaak voor het uitvaardigen van dit verbod was het in 1985 instorten, van een brug in Ynys-y-Gwas (zie 3.1). Eerder (in 1966) stortte in het Verenigd Koninkrijk een brug in Bickton Meadows in.

In beide gevallen was het instorten van de brugconstructie te wijten aan corrosie van het voorspanstaal.

De "officiële reactie" van de FIP werd uitgebracht door de besturen van twee FIP commissies, namelijk commissie 2 "voorspanmaterialen" en commissie 4 "uitvoering" De reactie werd afgedrukt in de FIP notes no. 4 van 1993. Zie bijlage II.

Het initiatief om op het bedoelde verbod te reageren ging vooral uit van de bedrijven die voorspansystemen exploiteerden. Deze werden door dit verbod in hun activiteiten in de Verenigd Koninkrijk belemmerd maar ook werden repercussies daarvan verwacht in andere landen. Ook werden verschillende cementindustrieën actief omdat zij beseften dat het imago van het bouwen in voorgespannen beton was geschaad.

In het kort zal hier op de door de bedoelde FIP-commissies opgestelde stellingname worden ingegaan.

Gesteld wordt dat het uitvaardigen van het verbod berust op problemen, die slechts bij uitzondering voorkomen, in constructies welke niet goed waren gedetailleerd en/of waarin aan de voegen tussen op elkaar aansluitende segmenten niet voldoende aandacht was besteed. Zo waren deze voegen bovendien niet afdoende tegen indringen van agressieve stoffen beschermd.

Als op grond van de beschikbare kennis dit soort betonconstructies waren ontworpen, gedetailleerd en gebouwd zouden ongevallen zich slechts in hoge uitzonderingsgevallen kunnen voordoen.

De eigenlijke problemen ontstaan door onjuist ontwerp en detaillering, uitvoeringsfouten, het gebruik van niet daartoe geschikte materialen en - last but not least - door het ontbreken van een regelmatige controle van de in gebruik zijnde bruggen en viaducten. Vervolgens gaat deze publikatie in op alle beschikbare informatie, gegenereerd door FIP commissies.

Vermeld worden de volgende FIP rapporten.:

- Verzekering van de kwaliteit [FIP 1986a].
- Materialen:
 - Voorspansystemen [FIP 1972/1993].
 - Spanningscorrosie in voorspanstaal [FIP 1988].
 - Dwarsbelasting van strengen.[FIP notes 1987-1]
 - Corrosiebescherming van voorspanning zonder aanhechting.[FIP 1986d].
- Werkzaamheden op de bouwplaats.
 - Het aanspannen van voorspankabels. [FIP 1986b]
 - Het injecteren van voorspankanalen. [FIP 1990]

Bovendien wordt er hier met nadruk op gewezen dat de voorwaarden voor het verkrijgen van een "gezonde" constructie in ieder geval betrekking hebben op de keuze van een deskundige aannemer, een deskundige spanfirma en het functioneren van een goed toezicht op de bouwplaats.

- Inspectie, proces van regelmatig uitvoeren van controlemetingen, onderhoud.
- Voorzieningen met betrekking tot regelmatige inspectie [FIP 1986c].
- Reparatie en versterking [FIP 1991].

Tot slot wordt gesteld, dat het antwoord op de vraag of voorgespannen betonconstructies gevaarlijk zijn, zonder meer NEE is.

In deze reactie van de FIP commissies ontbreekt één element namelijk de vraag of, in het verleden, met voldoende kennis van zaken en zorgvuldigheid voorgespannen betonconstructies zijn gerealiseerd.

Wat Nederland betreft kan worden gesteld dat de STUVO in de beginfase van ontwikkeling een dominante rol heeft gespeeld in het uitwisselen van kennis over, in de praktijk ondervonden, problemen en de oplossing daarvan. Daarin heeft de CUR een belangrijk aandeel gehad omdat deze ook over de financiële middelen beschikte om onderzoek te laten uitvoeren, gericht op een verantwoorde toepassing van de voorspanttechniek.

De eerste CUR commissies zijn veelal ontstaan uit reeds ter zake actieve STUVO commissies. Een blik op de lijst van CUR rapporten uit die begintijd maakt dat snel duidelijk. Ook in de verdere ontwikkeling van de kwaliteit van onze voorgespannen betonconstructies, is de uitwisseling van goede en slechte ervaringen in de STUVO van wezenlijke betekenis geweest. Dat naast het werk van de CUR, voor het verantwoord bouwen in voorgespannen beton.

Zie [CUR 1,2,3,7,11,14,15,27]

1.2. Ontwikkelingen in het Verenigd Koninkrijk

Het instorten in 1985 van de Ynys-y-Gwas brug in Zuid Wales heeft in Engeland een discussie op gang gebracht over de duurzaamheid van bruggen met nagerekt voorspanstaal.

Door de British Cement Association (BCA) is aan prof.L.A. Clark opdracht verstrekt om een rapport op te stellen met alle relevante informatie betreffende de duurzaamheid van voorgespannen bruggen [Clark 1992].

De algemene indruk, op grond van deze studie, is dat er slechts een paar gevallen bekend zijn van bruggen met ernstige corrosie van voorspanstaal en dat de duurzaamheid van voorgespannen bruggen over het algemeen goed is.

Wel wordt er op gewezen dat de niet-destructieve inspectie van voorspankabels moeilijk is en in sommige gevallen zelfs onmogelijk.

Her rapport van Clark kon echter niet verhinderen dat de grootste opdrachtgever/beheerder van o.a. bruggen, het 'Department of Transport'(DoT), in september 1992 een tijdelijk verbod uitvaardigde op het bouwen van voorgespannen bruggen met nagerekt staal [DoT 1992].

De meeste andere opdrachtgevers in deze sector sloten zich spoedig daarna aan bij deze beslissing.

In juni 1992 is door de 'Concrete Society' in samenwerking met de 'Concrete Bridge Development Group' een 'Working Party' ingesteld met als doel om de problemen te bestuderen en aanbevelingen/richtlijnen op te stellen.

Op 4 maart 1993 is het interimrapport van de Working Party aangeboden aan de Concrete Bridge Development Group [Raiss 1993].

De Working Party heeft vervolgens op basis hiervan de 'Grouting Specifications' opgesteld [Gr.Spec. 1993].

Bij het opstellen van deze richtlijn zijn, voor zover het wenselijk leek, de eisen en beproevingsmethoden uit de nieuwe Europese richtlijnen overgenomen [NEN-EN 445, 446 en 447].

Het uitgangspunt bij het opstellen van deze interim aanbeveling/richtlijn was de behoefte om het risico van corrosie van voorspanstaal zo klein mogelijk te maken door middel van het creëren van een meervoudige bescherming. Het risico van corrosie van het voorspanstaal wordt veroorzaakt door het falen van een of meerdere details zoals o.a.: de waterdichte laag op het brugdek, voegovergangs-constructies, waterafvoer of het injecteren van de spankanalen.

Lekkage van water, al dan niet met chloriden of andere schadelijke stoffen, is volgens de Working Party de belangrijkste oorzaak van aantasting. Gebleken is dat voorspanelementen in gedeeltelijk geïnjecteerde voorspankanalen niet corroderen als het voorspanstaal niet bloot staat aan vocht en de toevoer van zuurstof.

De volgende factoren worden aangemerkt als de belangrijkste oorzaken van corrosie van voorspanstaal [Clark 1995]:

- a) verzameling van water in de holle ruimten van gedeeltelijk gevulde voorspankanalen;
- b) indringen van lekwater in de eindverankering van kabels als gevolg van lekkende voegovergangs-constructies;
- c) indringen van lekwater in de omhullingen van kabels als gevolg van lekkage vanaf het brugdek door de slijtlaag;
- d) indringen van speciewater in de omhullingen via de contact- of constructievoegen van prefab elementen.

De aanbevelingen voor verbetering van de duurzaamheid hebben betrekking op de volgende aspecten [Clark 1995]:

- a) Stalen omhullingsbuizen bieden geen afdoende bescherming tegen lekkage van water dat de voorspankabels kan bereiken bij niet volledig geïnjecteerde kanalen. Als de omhullingsbuis volledig is geïnjecteerd én de slijtlaag op het brugdek waterdicht is dan is er geen kans op aantasting. De ervaring is echter dat beide vormen van bescherming mankementen kunnen hebben. Daarom wordt als extra bescherming een omhullingsbuis aanbevolen met (water)dichte verbindingen.
- b) Hoewel in het verleden de eigenschappen van injectiespecie werden getest, zijn er inmiddels meer stringente eisen m.b.t. waterafscheiding en krimp alsmede een nieuwe beproevingsmethode voor het vloeigedrag. De maximale water-cementfactor is beperkt tot een niveau waarbij het gebruik van hulpstoffen noodzakelijk is voor het verkrijgen van de benodigde verwerkbaarheid.
- c) Praktijkproeven worden aanbevolen, niet alleen om aan te tonen dat met de toegepaste injectiemethode een goede vulling van de omhullingsbuizen mogelijk is maar ook om er zeker van te zijn dat de gekozen methode in de praktijk toepasbaar is.
- d) Het uitvoeren van injectiewerkzaamheden moet worden gezien als specialistisch werk. Sommige problemen uit het verleden kunnen mogelijk worden toegeschreven aan onervaren personeel. Met het door de Post-Tensioning Association ontwikkelde certificatiesysteem voor de uitvoering van alle voorspan-werkzaamheden op de bouwplaats, kan dit in de toekomst worden vermeden.

Het lopende onderzoek (1995) met o.a., speciaal injectiecement, is medio 1996 afgesloten met een revisie van de eerder gepubliceerde Grouting Specifications [Concrete Society 1996].

De eisen betreffende de injectiespecie zijn grotendeels gebaseerd op de nieuwe CEN normen [NEN-EN 445, NEN-EN 446, NEN-EN 447]

Als de omhullingsbuis ook dienst doet als middel van bescherming van het voorspanstaal (multy-layer protection) dan wordt kunststof omhullingsbuis HDPE of PP aanbevolen. In de richtlijnen wordt aangegeven hoe de dichtheid van de omhullingsbuis kan worden getest met overdruk.

Aan beton en de betondekking worden geen aanvullende eisen gesteld anders dan in de bestaande Britse voorschriften (BS 5400, deel 4).

Opmerkelijk is dat niet expliciet gesproken wordt over het soort cement terwijl wel o.a. het toevoegen van vliegas of hoogovenslak wordt aanbevolen om de permeabiliteit van het beton te verminderen.

Middels detailtekeningen wordt de mogelijke bescherming van verankeringen ten de indringing van water met eventueel dooizouten aangegeven.

Bij landhoofden wordt aanbevolen om tussen de einddwarsdrager en de grondkerende wand van het landhoofd een inspectieruimte te creëren. Het rapport wordt afgesloten met een beoordelingsrichtlijn voor het aanbrengen, verwerken inclusief afspannen en injecteren van voorspanelementen.

Met de presentatie, op 25 september 1996 tijdens het FIP-symposium te Londen, van het eindrapport [Concrete Society 1996] is tevens het moratorium op het toepassen van voorspanning met nagerekt staal in monoliete constructies opgeheven. Het eindrapport van de Working Party: Technical Report No 47 "Durable Bonded Post-tensioned Concrete Bridges" [Concrete Society 1996] bevat zowel ontwerp aanbevelingen als richtlijnen voor omhullingsbuizen en injectiespecie.

De aanbevelingen en richtlijnen zijn gericht op het realiseren van een duurzame meervoudige bescherming van het voorspanstaal tegen corrosie.

2. Bestaande kunstwerken van voorgespannen beton

2.1. Schadegevallen bij kunstwerken in het buitenland

2.1.1. Engeland

- Ynys-y-Gwas brug

De brug, gebouwd in 1953, over de rivier Afan was gelegen in een lokale binnenweg. De constructie bestond uit prefab kokerliggers met een totale lengte van 19,60 m. en een constructiehoogte van 1,066 m.

Elke ligger was opgebouwd uit 8 segmenten met elk een lengte van ca. 2,44 m. De voorspanning in elke ligger bestond uit 10 kabels 12 Ø 5 mm.

In december 1985 bezweken zonder waarschuwing enkele tussenliggers als gevolg van breuk van de, door corrosie aangetaste, voorspankabels. Door belastingoverdracht via de dwarsbalken bezweken ook de overige tussenliggers. De zwaardere randliggers bleven in tact en zijn vervolgens onderzocht bij het 'Transport and Road Research Laboratory' (TRRL), onderdeel van het DoT [Woodward 1989].

- Besses O'Th' Barn Bridge

De spoorbrug in de buurt van Manchester bestaat uit prefab betonnen segmenten (lengte 1.2 m) die met voorspankabels aan elkaar zijn gespannen. De schade aan de voorspanning (corrosie) werd veroorzaakt door het binnendringen van water ter plaatse van de voegen. Dit water kon gemakkelijk het voorspanstaal bereiken omdat de omhullingsbuizen ter plaatse van de voegen (breedte 102 mm) waren onderbroken [Blackler et.al.1995, Cement 1995/12].

Bruggen met corrosieproblemen:

Brug	Ingestort	Gedemonteerd	Gerepareerd	Gebouwd
Ingoldmells footbridge		1965		1958
Bickton Meadows Bridge	1967			?
Angel Road Bridge			1982	1960
Taf Fawr Bridge		1983		1962
Ynys-y-Gwas Bridge	1985			1953
Went Viaduct			1988	?
Folly New Bridge		1989		1950
Besses O'Th' Barn Bridge			1995	1969

Een mogelijke verklaring van het feit dat in het Verenigde Koninkrijk het aantal schadegevallen hoog uitvalt is wellicht het feit dat een relatief groot aantal (ca. 120) van 600 kunstwerken bestaat uit met segmenten opgebouwde prefab-bruggen. Zonder goede voegafwerking is de kwetsbaarheid van de hooggelegen voorspankabels zeer groot.

2.1.2. Duitsland

Geraadpleegde literatuur:

- Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, Ursachen und Erkenntnisse, Dokumentation 1982. Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau. (zie ook literatuurlijst onder [Ruhrberg et.al.1982])
- idem, Dokumentation 1994, 444 p.

Beide uitvoerige en waardevolle naslagwerken beschrijven tot in detail een groot aantal schadegevallen aan betonnen bruggen. Er wordt een systematische behandeling (algemene gegevens bouwwerk en schadegeval, beschrijving schade, oorzaak en herstelmaatregelen, conclusies) gegeven van ernstige tot zeer ernstige schadegevallen, geconstateerd bij veelal grote constructies. Hierbij is herhaaldelijk sprake van aanzienlijke herstelkosten.

Er wordt een onderverdeling gemaakt naar:

- Schadegevallen aan de bouwwerken zelf (ontwerp-, uitvoerings- en gebruiksfase). Deze schadegevallen zijn veelal geconstateerd bij inspectie en/of onderhoud;
- Ongevallen tijdens de uitvoering;
- Beschadigingen van de bouwwerken t.g.v. externe oorzaken.

Verreweg het grootste aantal schadegevallen valt onder de eerste categorie.

T.a.v. het aspect voorspanning in relatie tot. duurzaamheid worden 14 schadegevallen vermeld.

Optredende schadekenmerken zijn hierbij:

- (buig)scheuren;
- afgesprongen schollen;
- grindnesten;
- onvolledig of in het geheel niet met injectiemortel gevulde panelementen;
- ontbrekende injectiemortel t.p.v. verankeringen;
- het geheel ontbreken van voorspanstaal;
- corroderende voorspanelementen.

Als schade-oorzaken worden genoemd:

- onzorgvuldige uitvoering van, controle op en toezicht bij het aanbrengen van de voorspanning en het injecteren;
- vorstschade veroorzaakt door bevroren water in onvolledig gevulde voorspanelementen;
- beschadigen en verschuiven voorspan-elementen tijdens het betonstorten;
- onjuiste detaillering wapening t.p.v. verankeringen;
- onvoldoende verdichting van de betonspecie;
- luchtinsluitingen door ongunstige combinatie van geometrie constructie, verloop en vormgeving voorspanning en plaats ontluchtingen;
- beschadigingen en scheurvorming in afdichtings- en afwerkingslagen betonoppervlak.

In [Blackler et.al. 1995] wordt de schade aan de Schmargendorf brug in de ringweg bij Berlijn beschreven. Dooizouten hadden het voorspanstaal en de onbeschermd eindverankeringen zo ernstig aangetast dat besloten werd om het kunstwerk (ca. 20 jaar oud!) te slopen.

2.2. Onderzoek en inspectie aan voorgespannen kunstwerken in Nederland

2.2.1. Brug over de IJssel bij Zwolle in de A28 (Katerveer II)

In het brugdek van de kokerligger zijn Dywidagstaven toegepast (met koppelmoffen). Bij inspecties in 1988 werd zodanige schade aan de constructie geconstateerd dat herstel nodig was. Uit aanvullende onderzoeken bleek dat 30 tot 40% van de voorspankanalen niet goed was geïnjecteerd. Een onvolkomenheid van verontrustende omvang! Tijdens een omvangrijke renovatie werden de voorspankanalen m.b.v. een zogenaamde endoscoop nader geïnspecteerd.

De conditie van de voorspanwapening was over het algemeen goed. Herstel heeft plaatsgevonden door de niet of onvolledig geïnjecteerde kanalen alsnog te injecteren met een epoxymortel.

2.2.2. Viaduct in de A28 in knooppunt Hoevelaken

Bij een inspectie in september 1993 zijn op het meest oostelijke viaduct een 8-tal gaten gehakt ter plaatse van de voorspanwapening boven de steunpunten.

De omhullingsbuis heeft een betondekking van 70 à 80 mm. Het omringende beton bevat geen of weinig chloriden. Slechts op 1 punt werd in de buitenste 20 mm een vrij hoog chloridegehalte aangetroffen.

Bij het openmaken van de omhullingsbuizen is gelet op de vullingsgraad en eventuele roestvorming op de voorspanstrengen. Slechts oppervlakkige roestvorming werd geconstateerd, geen putcorrosie, met name in de bovenste streng. Bij enkele kanalen bleek boven de verharde injectiespecie holle ruimte aanwezig in het voorspankanaal, de minimale vullingsgraad was op dit hoogste punt ca. 70%, waardoor alle voorspanstrengen in de verharde grout lagen. Algemeen werd geconcludeerd dat de voorspanning zich in goede conditie bevond.

2.2.3. Brug over de IJssel bij Deventer

Bij deze brug is onderzoek uitgevoerd naar corrosie van voorspanstaven en strengen. Op een aantal plaatsen zijn eenvoudig bereikbare voorspankanalen vrijgehakt en opengemaakt, waarna visuele inspectie van de voorspanwapening kon plaatsvinden. Bij het gehele onderzoek zijn geen grote carbonatatiediepten, onvoldoende dekking of verhoogde chloride-gehalten gemeten.

Op de onderzochte Dywidagstaven (met koppelmoffen) is in alle gevallen enige oppervlakkige roestvorming aangetroffen. Daarbij was de kwaliteit van de groutvulling en het omringende beton goed. De waargenomen corrosie op de Freyssinetkabels is in het algemeen zeer gering. De weinige corrosie concentreert zich tussen de draden van de afzonderlijke strengen.

2.2.4. Brug over de Maas bij Grubbenvorst

Bij inspectie van voorspankanalen met Dywidagstaven (met koppelmoffen) zijn deze bloot gehakt en geopend om ze visueel te kunnen inspecteren.

Aangetroffen werd over het algemeen slechts "vliegroe" op de staven en soms een lichte vorm van putcorrosie. Over het algemeen was de vulling van de voorspankanalen goed, maar van matig tot slechte kwaliteit (met name bovenin het kanaal verbrokkelde injectiespecie). Ernstige roestvorming of verdere onvolkomenheden in de vulling van de voorspankanalen zijn niet vastgesteld.

2.2.5. Viaduct over A28 bij Nijkerk

Van een te slopen viaduct zijn voor de sloop zeven voorspankanalen boven het middensteunpunt vrijgehakt, opengemaakt en visueel geïnspecteerd. Twee van deze voorspankanalen zijn vervolgens doorgeslepen en een deel ervan voor nader onderzoek meegenomen. Na het "springen" van het viaduct zijn aanvullende delen van voorspankanalen met inhoud voor onderzoek meegenomen.

De onderzochte voorspankanalen bleken alle volledig gevuld met injectiespecie van goede kwaliteit. De dekking van de kanalen was ca. 100 mm. Slechts op plaatsen waar de voorspanstrengen contact maakten met de omhullingsbuis kon enige oppervlakkige roestvorming worden vastgesteld. Het chloridegehalte van het beton bleek laag, met uitzondering van de randen langs de schampkant. In het grout werd geen chloride aangetroffen. Uit aanvullende onderzoek aan het voorspanstaal bleek geen achteruitgang in kwaliteit.

Geconcludeerd werd dat de voorspanwapening in het rijdek in een goede conditie verkeerde en dat de voorspankanalen goed waren geïnjecteerd.

2.2.6. *Tafelbrug in A4 nabij Ypenburg*

Ten behoeve van de in 1996 uitgevoerde reconstructie van het verkeersplein Ypenburg zijn in 1994 o.a. een aantal randdelen van de vaste bovenbouw van deze brugconstructie gesloopt. Dit gedeelte van de bovenbouw betreft een holle plaat van voorgespannen beton, ter plaatse gestort en voorgespannen. Na het slopen is het vermoeden gerezen dat mogelijk de injectie van de in het sloopwerk aanwezige spanelementen onvolkomenheden vertoonde. Nader onderzoek heeft uitgewezen dat hier geen nadere uitspraak over gedaan kon worden. Wel is vastgesteld dat bij ten minste één spanverankering over de laatste ca. 0,5 m. naar de verankering toe, de kabelomhulling vrijwel leeg was. Op deze kabel, omhullingsbuis, alsmede verankering is geen roestvorming geconstateerd.

3. Materialen

3.1. Beton

3.1.1. Duurzaamheid

Voor de ter plaatse gestorte voorgespannen bovenbouw van kunstwerken dient men beton toe te passen met een sterkteklasse van tenminste B 35 met millieklasse 3 (vochtig in combinatie met dooizouten). Voor het realiseren van een grote dichtheid van het beton wordt voor brugdekken, met uitzondering van opstortingen zoals schampranden e.d., het gebruik van hoogovencement (CEM III/B 42,5 LH HS) sterk aanbevolen. In de aanduiding van het cementtype staat de letter B voor een slakgehalte tussen 66%-80%. Ook wordt hierdoor de alkali-toeslag-reactie (ASR) voorkomen.

Bij penetratie van chloriden is een cement met een hoog gehalte hoogovenslak ($> 50\%$ m/m) de meest belangrijke parameter omdat hierdoor de diffusiecoëfficiënt vrijwel nul wordt [Bijen 1996]. Onder winterse omstandigheden de vereiste sterkte-ontwikkeling te bereiken, kan een deel van het hoogovencement (max. 50%) worden vervangen door portlandcement (CEM I 42,5 R of CEM I 52,5 R). De letter R is de aanduiding van snelle sterkteontwikkeling (rapid).

Ook zijn de eisen aan het beton met betrekking tot "corrosiefactoren" in de voorschriften strenger (VBT 1995) Het maximale gehalte aan chloriden in voorgespannen beton met voorgerekt voorspanstaal is 0,2% (m/m) (VBT 1995). Met de toepassing van nagerekt voorspanstaal is impliciet rekening gehouden met de extra bescherming door de omhullingsbuis en is aan chloriden 0,4% (m/m) in het beton toegestaan. Dit komt overeen met de situatie in gewapend beton. De Europese regels in ED206 schrijven overigens nog algemeen 0,2% (m/m) voor bij toepassing in voorgespannen beton.

Zonder het argument omtrent de beschermende omhullingsbuis te kort te doen, wordt in de Europese norm de zorg voor beton met voorspanning beter gediend.

3.1.2. Verwerkbaarheid

De bovengenoemde betoneigenschappen komen pas tot hun recht als de betonspecie onder de gegeven omstandigheden goed verwerkbaar is. Onder verwerkbaarheid van een betonspecie wordt verstaan:

- het vermogen om tijdens transport, storten en verdichten niet te ont mengen (stabiel mengsel);
- het vermogen om te kunnen worden verpompt;
- het vermogen om de bekisting tot in alle hoeken te vullen (ook wanneer er veel wapening, omhullingsbuizen of sparingkokers aanwezig zijn);
- het vermogen om te kunnen worden verdicht, dat wil zeggen door trillen of anderszins voldoende ingesloten lucht kwijt te raken;
- het vermogen om te kunnen worden afgewerkt.

Bij al deze bewerkingen is beton in beweging. De eisen die aan het gedrag worden gesteld, zijn echter verschillend, en soms zelfs in strijd met elkaar. Verwerkbaarheid is dus een kwalitatieve term die een zeer complex geheel van eigenschappen aanduidt. Als ontwerpers zich dit niet of in onvoldoende mate realiseren dan kunnen er specificaties in bestekken terechtkomen die onder de gegeven omstandigheden op gespannen voet staan met de beoogde kwaliteit.

3.1.3. Verdichten

Doel van het verdichten is het uitdrijven van de overmaat aan ingemengde lucht en het volledig vullen van de bekisting. Een volledig verdichte betonspecie bevat een luchtgehalte van 1 à 2% waarmee bij het mengselontwerp rekening is gehouden. Een juiste verdichting van de betonspecie is voor de sterkte en dichtheid erg belangrijk. Het verdichten kan bij brugdekken gebeuren met behulp van een trilbalk. Deze dient voldoende zwaar te zijn en bij het verdichten en afreien moet ervoor worden gezorgd dat er vóór de balk voldoende betonspecie aanwezig is. Alleen dan is te voorkomen dat er door gebrek aan betonspecie plaatselijk aan het oppervlak holten ontstaan die vollopen met cementwater in plaats van betonspecie. Niet alleen voldoende betondekking ($c \geq 30$ mm) maar ook de kwaliteit van de betondekking is van belang als bescherming tegen indringing van water en dooizouten.

3.1.4. Afwerking

Nadat de betonspecie met behulp van trilapparatuur is verdicht, zal het betonoppervlak nog wat oneffenheden vertonen. Om een brugdek met een dichte en dus sterke toplaag (dekking) te verkrijgen, is het gewenst om het oppervlak af te werken en bijv. met schuurappartuur dicht te schuren.

3.1.5. Nabehandeling

Nadat de betonspecie is gestort, verdicht en afgewerkt begint de periode van nabehandeling. Deze nabehandeling bepaalt of alle genomen moeite zal resulteren in het uiteindelijk gewenste eindresultaat.

Essentieel is dat de reactie tussen cement en water ongestoord kan plaatsvinden. Zodra water uit nog maar pas gestort beton verdampt, wordt de hydratatie-reactie verstoord en vindt er onvoldoende sterkteontwikkeling plaats en zal ook zeker de dichtheid lang niet zo worden als was verwacht en vereist. Bovendien veroorzaakt verdampend water uitdrogingskrimp waardoor scheurvorming kan ontstaan.

Aanbevolen wordt om horizontale vlakken zoals brugdekken af te dekken met doorzichtig kunststoffolie (geen zwarte folie toepassen i.v.m. warmte-accumulatie!).

De nabehandeling moet minstens vijf dagen duren. Bij lagere temperaturen moet dit zeker nog langer worden volgehouden, omdat de hydratatie-reactie onder deze omstandigheden minder snel verloopt.

Als tijdens de verharding de luchttemperaturen onder het vriespunt kunnen dalen, bijv. 's nachts bij helder hemel, moet pas gestort beton tegen bevriezen worden beschermd met bijvoorbeeld isolatiedekens. Behalve onder winterse omstandigheden (weerfase 4 of 5 [NEN 6722]) moet isoleren van het betonoppervlak gedurende de eerste drie tot vijf dagen ook gebeuren als het verschil tussen de gemiddelde dag- en nachttemperatuur groter is dan $10^{\circ}\text{--}12^{\circ}\text{C}$.

3.2. Omhullingsbuizen

3.2.1. Belang van omhullingsbuizen

Bij toepassing van voorspanning met nagerekt staal worden de kabelkanalen gevormd door stalen of kunststof omhullingsbuizen. Het plaatselijk toepassen van sparringen zonder omhullingsbuis waarbij er rechtstreeks contact is tussen beton en voorspanstaal, moet worden ontraden omdat:

- hierbij de injectiespecie rechtstreeks in contact komt met het beton dat op een ongecontroleerde wijze water aan de injectiespecie kan onttrekken;
- water (met dooizouten) het voorspanstaal gemakkelijk kan bereiken [Blackler et.al. 1995];

De omhullingbuis is uit het oogpunt van duurzaamheid een belangrijk onderdeel van het voorspanstelsel.

3.2.2. Stalen omhullingsbuis

Bij de stalen omhullingsbuis kunnen twee typen worden onderscheiden:

- a) de langsegefelste (LF) buis met wanddikte van 0,25 tot 0,30 mm;
- b) de spiraalsegefelste (SF) buis met wanddikten van 0,3 tot 0,4 mm.

Bij omhullingsbuizen met een zeer sterke kromming wordt soms naadloze stalen omhullingsbuis (dikte min. 2 mm) toegepast om doorslijten tijdens het invoeren van een bundel en het spannen te voorkomen.

In gevallen waarin de omhullingsbuis leeg wordt ingestort, moeten buizen worden toegepast met een wanddikte van minimaal 0,4 mm. Een andere mogelijkheid is het toepassen van een kunststof steunbuis of van een dummy in de omhullingsbuis.

Als extra bescherming tegen corrosieve aantasting van het voorspanstaal, bijv. in de spatzone bij maritieme constructies, worden soms naadloze buizen toegepast met een grote wanddikte [CUR/IRO-MaTS rapport 84-4].

Een bijkomend voordeel van dit type buis is dat beschadiging tijdens het monteren en het gevaar van een verbinding tussen elkaar rakende en loodrecht kruisende kanalen tijdens het injecteren van deze buizen voorkomen wordt.

De STUVO commissie is van mening dat er met stalen omhullingsbuizen van goede kwaliteit en bij zorgvuldige uitvoering constructies kunnen worden gemaakt die zowel tijdens de bouw als in de gebruiksfase aan de eisen ten aanzien van duurzaamheid voldoen.

3.2.3. Kunststof omhullingsbuis

Kunststof omhullingsbuis wordt gemaakt van 'hoge-dichtheid-polyethyleen' (HDPE) en polypropyleen (PP).

Volgens Schupack [Schupack 1982] is door proeven aangetoond, dat met geribde kunststof omhullingsbuizen een aanhechting aan het beton kan worden bereikt, die niet onderdoet voor de aanhechting tussen beton en geribde stalen omhullingsbuizen. Dit is bevestigd door onderzoek bij IBBC-TNO [Amerongen 1982]. Dit bleek ook uit de aan de ETH te Zürich uitgevoerde uittrekproeven met kunststof- en stalen omhullingsbuis [Kollegger 1994].

Een voordeel van kunststof omhullingsbuis is dat de gemiddelde wrijvingscoëfficiënt slechts 0,14 is wat ca. 30% lager is dan die van stalen omhullingsbuis met een gemiddelde waarde van 0,20.

Tijdens de verwerking van kunststof omhullingsbuis blijkt dat speciaal aandacht moet worden besteed aan de volgende punten [Kollegger 1994] [FIP 1996]:

- a) Bij directe zonsbestraling kan de op de omhullingsbuis steunende wapening de buis plaatselijk indeuken;
- b) Als de voorspanelementen na het betonneren in de omhullingsbuizen worden aangebracht, moeten de lichte omhullingsbuizen op korte onderlinge afstanden stevig aan de wapening of supporten worden vastgemaakt om vervorming of opdrijven te voorkomen;
- c) Bij het in de constructie aanbrengen van lange aan elkaar gekoppelde omhullingsbuis kunnen bij het doortrekken de profielribbels door de supporten worden beschadigd;
- d) Door de hoge uitzettingscoëfficiënt (12 à 15 maal zoveel als staal) willen de kunststofbuizen vervormen over de supporten. Bij nachtelijke afkoeling kunnen de onderlinge verbindingen verbroken worden.
- e) Ter plaatse van sterke krommingen in de omhullingsbuis, bv. ter plaatse van tussensteunpunten, moet een grotere wanddikte gekozen worden.

Kunststof omhullingsbuizen zijn toe te passen in bijzondere gevallen, zoals bij te verwachten scheuren in het spankanaal, of bij grote wrijving in de vorm van cirkelvormige constructies. Ook in grote off-shore constructies waar anders naadloze stalen pijp gebruikt zou worden, zijn deze buizen effectief toe te passen. In constructies van (gedeeltelijk) voorgespannen beton draagt de kunststofbuis niet extra bij tot de bescherming van de spankabel.

3.2.4. Benodigde diameter

Om een vlotte invoer van de spankabel en doorstroming van de injectiespecie mogelijk te maken, moet er voldoende ruimte overblijven tussen kabel en de omhullingsbuis. In de praktijk wordt voor de eenvoud meestal gewerkt met de verhouding tussen de doorsnede van de omhullingsbuis en de (equivalente) doorsnede van het voorspanstaal:

$$N = D_i^2 / n \cdot d^2 \quad (4.1)$$

waarin:

D_i = inwendige diameter omhullingsbuis

n = aantal strengen / draden

d = nominale diameter streng / draad

Door de FIP wordt aanbevolen om combinaties van omhulling en spankabels toe te passen met als uitgangspunt

$$2 \leq N \leq 2,5 \text{ [FIP 1990].}$$

3.2.5. Ontluchting van omhullingsbuizen, verankeringen en tussenkoppelingen

Een belangrijk aspect bij het voorkomen van luchtinsluitingen is de ontluchting van de omhullingsbuis en trompetten etc. In [Engelke 1986] wordt voor alle mogelijke situaties aangegeven hoe de ontluchttingsbuis moet worden aangebracht. Op basis van deze informatie zijn voor de Nederlandse situatie en systemen praktische aanbevelingen gegeven [STUVO 1986, Nelissen 1986].

3.2.6. Eisen omhullingsbuis

De felsnaden van plaatstalen omhullingsbuizen en de aansluitingen tussen de buizen onderling alsmede die bij trompetten en ontluchttingspijpjes moeten waterdicht zijn. Dit is belangrijk om te voorkomen dat enerzijds cementwater uit de omringende betonspecie in de omhullingsbuis kan lekken en anderzijds dat bij het injecteren water aan de injectiespecie wordt onttrokken. Verder moeten de omhullingsbuizen voldoende sterk zijn om beschadiging (knikken op supporten) door trilnaalden, belopen etc. tijdens het storten en verdichten van de betonspecie te voorkomen. Tijdens het injecteren van de specie moet de omhullingsbuis met een zekere veiligheid de maximaal optredende injectiedruk kunnen opnemen. Dit is met name van belang bij voorspanning in dunne bouw delen zoals de bovenflens van een kokerligger.

Verder is het ook belangrijk dat de omhullingsbuis voldoende buigstijf is om met de benodigde supporten een vloeiend kabelverloop te kunnen realiseren. In par. 11.7.5 van [NEN 6722] is als stijfheidseis gesteld dat de omhullingsbuis met daarin een voorspanelement maximaal 1/200 van de overspanning tussen de supporten mag doorbuigen. Onder normale omstandigheden wordt een supportafstand aanbevolen van 1000 mm en bij sterke kromming maximaal 500 mm. De omhullingsbuis moet stevig op de supporten worden vastgebonden zodat horizontaal verschuiven nooit meer kan zijn dan 10 mm. Dit is met name van belang bij kunststof omhullingsbuis die een thermische uitzettingscoëfficiënt heeft die ca. 15 maal groter is dan die van staal.

Bij het beproeven van de dichtheid van stalen omhullingsbuis volgens de Duitse norm [DIN 18553] mag het waterverlies bij een druk van 0,5 bar gedurende 5 minuten niet meer bedragen dan 1,5% van de inhoud van de buis. Deze beproeving is echter geen garantie dat de koppelingen tussen de buissecties onderling en die met trompetten etc. ook waterdicht zijn.

Als proef om te bepalen of alle in het werk gemonteerde omhullingsbuizen vóór het betonneren waterdicht waren, is bij de bouw van het viaduct in de Butetown Link Road te Cardiff elke omhullingsbuis getest op waterdichtheid. Deze test bestond uit het op een druk van 2,75 bar afpersen van de met water gevulde omhullingsbuizen [Johns et.al.1995].

In de Engelse richtlijnen [Concrete Society 1996] is voorgeschreven dat ter controle van de waterdichtheid het in het werk gemonteerde systeem moet worden afgeperst met een luchtdruk van 1 bar, waarbij het verlies gedurende 5 minuten maximaal 0,5 bar mag zijn.

Aan het Institut für Massivbau te Aken is onderzoek verricht naar de dichtheid van omhullingsbuizen (staal/kunststof) [Cordes et.al 1993].

In CEN-verband wordt momenteel gewerkt aan Europese richtlijn voor stalen omhullingsbuis (pr EN 523, pr EN 524).

De STUVO-commissie is, op grond van de Nederlandse praktijk, van mening dat deze in-situ beproevingen niet praktisch en onnodig duur zijn. Als volgens de momenteel gangbare methode de verbindingen tussen de buissecties worden 'afgetaped' door deskundig personeel van het voorspanbedrijf dan wordt dit voldoende geacht om lekkage te voorkomen.

3.3. Voorspanstaal

3.3.1. Eigenschappen

De duurzaamheid van voorgespannen betonconstructies wordt mede bepaald door de kwaliteit van het voorspanstaal. Daarbij is het van belang te weten hoe het materiaal in de afgelopen jaren technisch ontwikkeld is. In ons land zijn reeds in 1952 de "Keuringsvoorschriften van hoogwaardig staal" opgesteld en in 1956 werd de certificatencommissie geïnstalleerd.

Hiermede werd bereikt dat hoogwaardig staal dat breukgevoelig was niet of nauwelijks in Nederlandse kunstwerken is toegepast. Met name betreft het dan Rheinhausen Sigma Stahl 145/165 Ø 5 mm in 1952 en later Krupp gewalste staven QP135.

Om te weten welk materiaal wanneer is ingebouwd volgt hier de ontwikkeling van sterkte in draden, strengen en staven; uitgedrukt in $QP = \text{kg/mm}^2$.

draden	Ø5 - Ø7mm	QP160	1956
	Ø8mm	QP160	1961
	Ø7mm	QP170	1962
	Ø6mm	QP180	1966
strengen	55 - 100 mm ²	QP190	1963
	150 mm ²	QP180	1966
	150 mm ²	QP190	1985
staven	Krupp	QP105	1956
	Peine	QP125	1974

In het productie-proces van draden en strengen werd de warmtebehandeling d.m.v. patenteren in lood- of zoutbad vervangen door geforceerde luchtkoeling, het zgn. Stelmor-procede, toegepast vanaf 1971. Aanvankelijk werden beperkingen opgelegd aan de op deze wijze geproduceerde draad bij drie-assige belasting. Ook werd de te verwerken draaddiameter beperkt tot \varnothing 6mm. Verbeteringen aan het proces leidden tot een algemene toepassing. Alleen draad met bijzondere eigenschappen, bijv. op het gebied van vermoeiing door dynamische belasting wordt nog in baden geproduceerd.

De relaxatie van het voorspanstaal werd teruggebracht met het invoeren van de methode van thermisch nabehandelen onder trekspanning (het zgn. stabiliseren toegepast vanaf 1970). Het voorspanstaal wordt geleverd met een gegarandeerde treksterkte overeenkomend met de theoretische waarde. Hierbij geldt dat een bepaalde waarde niet overschreden mag worden. En hoewel een kleine afwijking in doorsnede van het staal toelaatbaar is, betekent dit dat altijd meer breukkrachtcapaciteit geleverd is dan in de berekening opgenomen werd. Dit levert nog een extra bijdrage aan de in hfdst. 6 berekende theoretische capaciteit. De huidige eigenschappen van het voorspanstaal zijn opgenomen in de prEN-10138-1 t/m 5 - 1995.

Draden	Staven	Strengen
\varnothing 4 FeP1860	\varnothing 15 FeP1130	\varnothing 7 FeP2060
\varnothing 5/6 FeP1770	\varnothing 20 - \varnothing 50 FeP1030	\varnothing 9 FeP1960
\varnothing 7/8 FeP1670	\varnothing 20 - \varnothing 40 FeP1230	\varnothing 12,5 - \varnothing 13 - \varnothing 15,2 FeP1860

3.3.2. Corrosie van voorspanstaal

Voorspanstaal in beton gedraagt zich vanuit het oogpunt van corrosie in veel opzichten als betonstaal [Polder, Bijen 1995]. Het wordt normaal gesproken door de hoge alkaliteit van het beton gepassiveerd. Ook voorspanstaal kan gaan corrodereren door carbonatatie van het beton of door de aanwezigheid van chloride, net als betonstaal. Er zijn echter bij voorspanstaal verschijnselen die tot veel ernstiger schade kunnen leiden, die samenhangen met de hoge trekspanning; zij worden samengevat onder de naam spanningscorrosie. Er bestaat anodische spanningscorrosie, waarbij door carbonatatie of chloride het staal gaat corrodereren en vervolgens door de hoge trekspanning bij een betrekkelijk geringe mate van (put)corrosie al breuk optreedt. Nog meer bedreigend is echter de zogenaamde kathodische spanningscorrosie van voorspanstaal: hierbij kan zogenaamde waterstofverbrossing plotselinge breuk van het voorspanstaal veroorzaken.

Dit schademechanisme is om twee redenen gevaarlijker dan de gewone corrosie van betonstaal. Ten eerste omdat het beton niet waarschuwt met scheuren in de dekking en roestuitbloei (voordat de draagkracht is aangetast), zoals bij corrosie van betonstaal. Ten tweede omdat bij breuk van het voorspanstaal de voorspanning wegvalt, wat kan betekenen dat relatief hoge trekspanningen in het beton vrijkomen, waardoor de constructie plotseling kan bezwijken. Er zijn enkele gevallen bekend waarin dat is gebeurd, overigens in samenhang met ernstige bouwfouten [Isecke 1983]. Een goed ontwerp en een goede uitvoering kan deze vorm van corrosie in verreweg de meeste gevallen uitsluiten.

Schade door kathodische spanningscorrosie is uiterst zeldzaam omdat brosse breuk van voorspanstaal alleen kan optreden bij een combinatie van:

- staal met een hoge treksterkte;
- een hoge trekspanning in het staal;
- een agressief milieu aan het staaloppervlak.

Overigens kan ook schade (door verbrossing) aan voorspanstaal optreden door galvanische koppeling met aluminium. Opgemerkt wordt dat sommige typen (leveringstoestanden) voorspanstaal véél gevoeliger zijn voor waterstofverbrossing dan andere. In Nederland is overwegend voorspanstaal toegepast dat een geringe gevoeligheid heeft.

Het schademechanisme

Het reactiemechanisme dat leidt tot de brosse breuk van voorspanstaal door kathodische spanningscorrosie (waterstofverbrossing) is ingewikkeld en nog niet geheel opgehelderd. Uit de literatuur is een beeld verkregen waarbij de volgende reacties een rol spelen [Polder 1994]:

anodische reactie:



kathodische reactie bij $\text{pH} > 7$:



of kathodische reactie bij $\text{pH} < 7$:



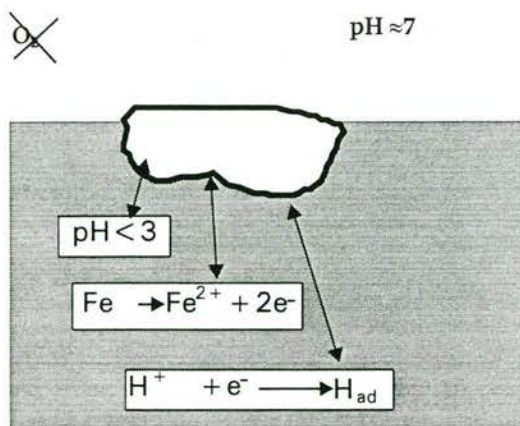
Reacties (2) en (3) zijn 'concurrerende' reacties, waarbij de pH en de beschikbaarheid van zuurstof bepalen welke route wordt gevolgd.

Door de hoge pH is (2) de normale kathodische reactie in beton. Echter, wanneer voldoende sterke putcorrosie optreedt, ontstaat in de putten een lage pH en wel des te sterker naarmate minder zuurstof beschikbaar is. Hierdoor kan de potentieel schadelijke "alternatieve" kathodische reactie (3) op gang komen.

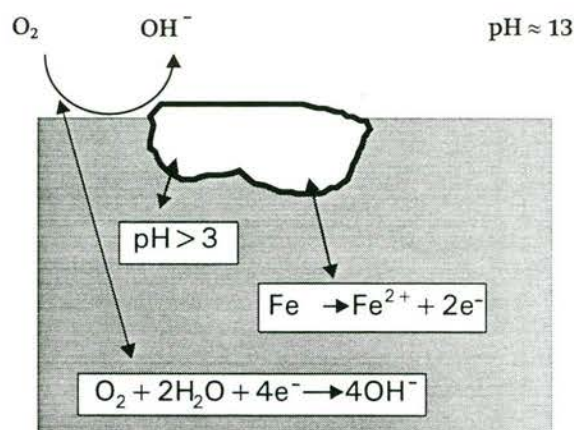
In corrosieputten (of in spleten) kan de pH dalen door reactie van watermoleculen met de gevormde Fe^{2+} - volgens:



De reacties (1) en (3) kunnen ook optreden indien tijdens de bouwphase, voordat de voorspankanalen geïnjecteerd zijn, corrosie ontstaat. Doordat geen alkalische injectiemortel aanwezig is, kan condensatie van water voldoende zijn om corrosie op gang te brengen. Daarbij ontstaan corrosieputjes waarin het milieu niet alkalisch maar neutraal of zelfs zuur is. Doordat corrosieproducten de putjes afschermen voor de alkalische grout, blijft deze zure toestand plaatselijk aanwezig ook na het injecteren. Hierdoor kan ook na lange tijd de "zure" kathodische reactie (3) nog optreden.



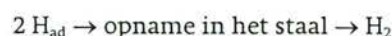
Figuur 1. Kathodische reactie in zuur milieu in een corrosieput.



Figuur 2: Kathodische reactie in basisch milieu en anodische reactie in een corrosieput.

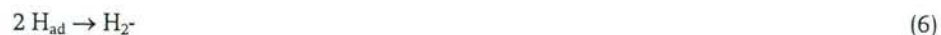
De zure kathodische reactie in de put wordt geschetst in figuur 1; de alkalische reactie aan het passieve staaloppervlak is getoond in figuur 2. Men moet zich hierbij realiseren dat een klein plekje met een lage pH voldoende kan zijn om de schadelijke keten van reacties voort te zetten, ongeacht of de rest van het staal in aanraking is met alkalische vloeistof of mortel.

Anders dan bij corrosie van betonstaal of bij anodische spanningscorrosie, is het niet het oplossen van ijzer dat bij waterstofverbrossing de grootste schade veroorzaakt. Schadelijk is het veranderen van de mechanische eigenschappen door het binnendringen van waterstof. Ook hier zijn verschillende routes mogelijk, met als schade-veroorzakende reactie in het voorspanstaal:



verlies van ductiliteit en eventueel brose breuk (5),

of als onschuldige reacties aan het staaloppervlak:



of



Het voorspanstaal is door zijn speciale microstructuur (die samenhangt met de hoge treksterkte) gevoelig voor penetratie en daaropvolgende recombinatie in het staal van waterstof (5). Hierbij ontstaan waterstofgasbelletjes die de structuur minder taai maken. Mogelijk speelt het immobiliseren van dislocaties in het staal door waterstof een rol. Het staal kan hierdoor verbrossen en plotseling breken bij een spanning die onder de normale breukspanning ligt. De beide andere volgreacties (6) en (7) leiden niet tot schade aan het voorspanstaal.

Het ontstaan van verbrossing door opname van atomaire waterstof in het staal wordt bevorderd door bepaalde chemische stoffen, die promotoren worden genoemd; deze stoffen bevorderen reactie (5) en verhinderen reactie (6).

Voorbeelden van promotoren zijn sulfide, thiocynaat (molecuulformule SCN^- , ook wel rhodanide genoemd), nitraat, fosfaat, cyanide en ammonium.

In de jaren '60 is schade door brosse breuk van voorspanstaal opgetreden bij gebruik van aluminium overgangsbuizen. De oorzaak is de sterke reactie van aluminium met het alkalische porievocht, waarbij waterstof wordt gevormd. Door galvanische koppeling kan ook aan het voorspanstaal waterstof worden gevormd, dat penetreert en volgens (5) verbrossing kan veroorzaken. Sindsdien wordt aluminium niet meer toegepast voor omhullingsbuizen. Bij de moderne verzinkt stalen omhullingsbuizen treedt geen verbrossingsschade op.

3.4. Injectiespecie

3.4.1. Algemeen

Bij voorspanning met aanhechting (VMA) ligt het injecteren van de voorspankanalen op het kritieke pad van de kwaliteitsketen, waarbij de injectiemortel een cruciale rol vervult:

- a) het verkrijgen van volledige samenwerking tussen voorspanelementen en betonconstructie door middel van aanhechting;
- b) het beschermen van het voorspanstaal tegen corrosie

Controle op volledige vulling van de voorspankanalen is nog niet goed mogelijk. Wel worden de cruciale punten in het spanelement gecontroleerd door toepassing van ontluchtingsbuizen die achteraf een inspectie en eventueel bijvullen mogelijk maken. De mogelijkheid van insluiting van luchtbellen en vorming van waterlenzen als gevolg van waterafscheiding blijft aanwezig.

3.4.2. Algemene eigenschappen

De in Nederland toegepaste injectiespecie bestaat meestal uit een mengsel van portlandcement CEM I 32,5R of 42,5R (de voormalige pc-klasse A resp. klasse B), water en een injectiehulpstof.

Deze injectiehulpstof moet ervoor zorgen dat de injectiespecie de volgende eigenschappen krijgt:

- a) waterreductie: vermindering van de water-cementfactor bij een gelijk blijvende viscositeit (consistentie);
- b) verlaging van de (dynamische) viscositeit: verbetering van de verwerkbaarheid bij gelijk blijvende water-cementfactor;
- c) verbetering van de speciestabiliteit onder invloed van (hoge) injectiedrukken: vermindering van de waterafscheiding (bleeding);
- d) verlaging van de oppervlaktetenspanning: door de dispergerende werking ontstaat een optimale vermenging van cement met water;
- e) volumevergroting: zwelling van de specie ter compensatie van de verhardingskrimp;
- f) vertraging van de binding: verlenging van de verwerkingstijd van de specie;
- g) vorming van watervrije microporiën door gasbelvorming: verbetering van de vorstbestendigheid van de specie;
- h) verbeteren van de waterdoorlaatbaarheid van de verharde specie (mortel): vermindering van de kans op corrosie van het voorspanstaal;
- i) verhoging van de druksterkte bij gelijk blijvende consistentie.

Voor een overzicht van de in Nederland, Groot Brittannië, Duitsland en in de nieuwe Europese normen gehanteerde eisen en beproevingsmethoden voor injectiespecie wordt verwezen naar bijlage III

3.4.3. Samenstelling injectiespecie

Cement

Cement voor injectiespecie moet aan de volgende eisen voldoen:

- a) voldoen aan de NEN 3550;
- b) de vereiste druksterkte kunnen ontwikkelen: gemiddeld 20 à 30 N/mm² na 7 dagen bij 20°C en RV ≥ 70%;
- c) de gewenste rheologische eigenschappen bezitten;
- d) de samenstelling moet zeer constant zijn.

In de praktijk wordt in de zomer meestal Portlandcement CEM I 32,5R toegepast terwijl in het koudere jaargetijde, bij temperaturen < 10°C, soms CEM I 42,5R wordt gebruikt.

In de nieuwe richtlijnen [NEN EN 447] en [Concrete Society 1996] is alleen Portlandcement toegestaan. De toepassing van Portland vliegascement dan wel vliegascement in de injectiemortel is niet toegestaan vanwege de mogelijke nadelige invloed van bestanddelen uit de vliegascement op (spannings)corrosie van het voorspanstaal.

Voor de samenstelling van de Nederlandse Portlandcementen wordt verwezen naar tabel 1 in bijlage IV, voor de korrelverdeling naar tabel 2, bijlage V.

Aanmaakwater

Het aanmaakwater moet voldoen aan NEN 5995. Leidingwater bevat gemiddeld 0,25 gr/l chloride dat bij de hydratatie grotendeels chemisch wordt gebonden.

Voor een constante kwaliteit van de specie is een nauwkeurige dosering van het aanmaakwater van groot belang.

Als maximale afwijking van de hoeveelheid water wordt aanbevolen +/- 1%.

3.4.4. Technologische- en rheologische eigenschappen

Aanhechting en sterkte

Door de goede aanhechting tussen beton via de injectiespecie met het voorspanstaal wordt bij overbelasting van de constructie een gunstig scheurpatroon verkregen, terwijl bovendien het breukmoment groot is.

Hoewel goede aanhechting bij VMA-systemen belangrijk is hoeven er aan de sterkte van de injectiemortel geen al te hoge eisen te worden gesteld omdat de grootte van de schuifspanningen betrekkelijk gering is.

De druksterkte van de injectiemortel is afhankelijk van:

- de normsterkte van het cement;
- de water-cementfactor;
- de specietemperatuur;
- de hydratatiegraad;
- de swelling van de injectiespecie.

Vereist wordt een druksterkte van minimaal 27 N/mm² na 7 dagen en minimaal 30 N/mm² na 28 dagen, conform par. 5.5 van Ontwerp NEN-EN 447 [NEN-EN 447]. Bepaling van de druksterkte middels prisma's 40x40x160 cm³, conform par. 3.6 van Ontwerp NEN- [NEN-EN 445].

Waterafscheiding

In de eerste fase van de reactie ontstaat in een blanco specie (zonder injectiehulpstof) sedimentatie (zetting) die gepaard gaat met afscheiding van water.

De belangrijkste factoren bij de waterafscheiding zijn de maalfijnheid van het cement, de water-cementfactor en de specietemperatuur.

Een lage temperatuur vergroot de waterafscheiding omdat de binding wordt vertraagd, waardoor er meer tijd is voor de sedimentatie. Ook grove cementkorrels verhogen de sedimentatie. Uit metingen is gebleken dat de waterafscheiding van (blanco) injectiespecie kan variëren van 1-10% van het oorspronkelijke volume.

De door de inwendige krimp gevormde ruimte in de cementsteen wordt opgevuld door het afgescheiden water.

Het is daarom erg belangrijk de stabiliteit van de specie met behulp van cohesieverbeterende hulpstoffen, cellulose-derivaten e.d. zodanig te verbeteren dat er geen waterafscheiding meer optreedt.

De conclusies uit onderzoek [Grübl 1987] is dat er bij goede injectiespecie na 6 uur geen waterafscheiding meer mag plaatsvinden, uitgaande van de testmethode met de bus (inwendig Ø100 mm), conform par. 3.5.3.1 uit [NEN-EN 445].

Volumeverandering

De inwendige krimp wordt gecompenseerd door een zwelmiddel aan de injectiehulpstof toe te voegen. Het effect hiervan is:

- a) vermindering van waterafscheiding;
- b) betere vulling van het voorspankanaal;
- c) verbetering van de aanhechting;
- d) dispersie en betere bevochtiging cementkorrels
- e) verhoging vorstbestendigheid;
- f) verhoging consistentie en stabiliteit.

In verband met het nadelige effect op de druksterkte van de mortel is het van belang om de maximaal optredende zwelling te limiteren (bv. max. 5%(v/v)). Hierbij moet wel worden opgemerkt dat als gevolg van de reductie van de water-cementfactor door toepassing van een superplastificeerder, de teruggang in sterkte wordt opgeheven. Gebleken is dat menging met een colloïdaalmenger een snellere reactie van de expansiemiddelen tot gevolg heeft dan bij andere type mengers. Door toepassing van een colloïdale hulpstof wordt echter voorkomen dat het ontwikkelde gas vroegtijdig ontsnapt.

Ook de temperatuur van de specie is van invloed op de grootte van de expansie. Eén van de conclusies uit onderzoek [Grübl 1987] is dat na 6 uur in injectiespecie geen volumeverandering meer mag optreden bij meting met de bus conform par. 3.5.3.1 uit [NEN-EN 445].

Consistentie

Een algemeen model om het vloeigedrag van vloeistoffen en suspensies te beschrijven is het model van Hershel-Bulkley [Tattersall et.al. 1983]:

$$\tau = \tau_0 + kD^n \quad (4.3)$$

Waarin:

τ = inwendige schuifspanning in de specie (Pa);

τ_0 = cohesie (Pa);

k = algemene term voor viscositeit (Pa.s);

$D^n = (d\gamma/dt)^n$ waarin $\gamma = \tau/G$ met G = glijdingsmodulus.

Species kunnen worden aangemerkt als zogenaamde Binghamse vloeistoffen. Deze worden gekenmerkt door:

$\tau_0 > 0$, $n = 1$, $k = \eta_p$ (dynamische viscositeit).

De superplastificeerder in de injectiehulpstof zorgt ervoor dat de cohesie τ_0 zo veel mogelijk wordt gereduceerd. Hierdoor is de injectiespecie in staat om diep in nauwe spleten tussen de voorspanelementen door te dringen.

Voor de relatie tussen de penetratiediepte en de cohesie geldt [Jefferis 1994]:

$$L = p.r/2 \tau_0 \quad (4.4)$$

Waarin:

L = penetratiediepte (mm);

p = injectiedruk (Pa), 10^5 Pa = 1 bar;

r = equivalente straal van de ruimte waarin de specie moet indringen (mm).

Uit formule 4.4 blijkt dat er bij een toenemende injectiedruk met een hoogvloeibare injectiespecie een optimale vulling van de nauwe ruimten tussen de voorspanelementen mogelijk is.

Voor de controle van de consistentie op de bouwplaats wordt in Nederland uitsluitend gebruik gemaakt van de ASTM-vloeihtrechter (flow cone). De uitstroomopening heeft een inwendige diameter van \varnothing 12,7 mm (0,5 inch); dan wel \varnothing 15mm voor mengsels met een zeer lage w/c factor. In de nieuwe Europese Ontwerp norm NEN-EN 445 is een vloeihtrechter voorgeschreven met \varnothing = 10 mm, die feitelijk ongeschikt is om de huidige mengsels te meten i.v.m. de te geringe doorstroomopening.

In deze norm is de uitstroomtijd gedefinieerd als de tijd (in sec) die nodig is om 1000 ml specie uit de vloeihtrechter te laten stromen.

Vorstbestendigheid

Als binnen 48 uur na het injecteren vorst wordt verwacht kan, een 'versneller' aan de specie worden toegevoegd. Hierdoor wordt bereikt dat:

- a) snel een relatief hoge hydratatiegraad wordt bereikt waardoor er voldoende open poriën ontstaan die, in geval van bevriezing van het resterende water, voor de nodige ruimte kunnen zorgen;
- b) de mortel bij bevriezing van het water al voldoende sterkte ($> \text{ca. } 5 \text{ N/mm}^2$) heeft ontwikkeld om de expansie op te kunnen nemen.

Ook met luchtbelvormers kan vorstbestendigheid bereikt worden. Met de methode van het verwijderen van het overtollige water uit het mengsel d.m.v. napersen wordt het beste resultaat verkregen.

Permeabiliteit

Duurzaamheid heeft direct te maken met permeabiliteit: hoe dichter het materiaal is, hoe moeilijker schadelijke stoffen zoals chloriden in de injectiemortel kunnen binnendringen. Voor de duurzaamheid spelen de gelporiën daarom geen rol: ze zijn ondoordringbaar. De hoeveelheid en afmetingen van de capillaire poriën zijn bepalend voor de duurzaamheid. Naast invloed van de verhardingstijd, uitgedrukt in de hydratatiegraad, hangt de poriënstructuur ook af van de water-cementfactor.

Voor de capillaire porositeit geldt:

$$p_{\text{cap}} = (w_{\text{cf}} - 0,33 \alpha_h) / (w_{\text{cf}} + (\rho_w / \rho_c)) \quad (4.5)$$

waarin:

α_h = hydratatiegraad, waarbij geldt: $0 \leq \alpha_h \leq [w_{\text{cf}}/0,40]$ en $\alpha_h \leq 1$

Tabel 3.2 Capillaire porositeit injectiespecie in relatie tot de hydratatiegraad en water-cementfactor.

Hydratatiegraad α_h (%)	Capillaire porositeit bij:	
	$w_{cf} = 0,36$ P_{cap}	$w_{cf} = 0,27$ P_{cap}
0	53	46
10	48	40
20	43	35
40	34	23
60	24	12
67,5 ¹⁾	20	8
80	14	–
90 ²⁾	9	–

¹⁾ α_h is max. 67,5% bij $w_{cf} = 0,27$

²⁾ α_h is max. 90% bij $w_{cf} = 0,36$

Uit de tabel blijkt dat al bij een hydratatiegraad van 40 % de capillaire porositeit bij $w_{cf} = 0,27$ ca. 1,5 maal lager is

Uit deze onderzoeken blijkt het belang van een injectiespecie met een lage water-cementfactor (denk aan 0,27), onder de voorwaarde dat het voorspankanaal met deze specie goed gevuld kan worden.

3.4.5. *Resumé voorkomen van lucht- en waterinsluitingen*

Het ontstaan van luchtinsluitingen kan worden vermeden als bij de voorbereiding en uitvoering van de werkzaamheden de volgende punten in acht worden genomen:

- Pas de juiste diameter omhullingsbuis toe;
- Pas bij verankeringen en tussenkoppelingen omhullingen toe met een vloeiende overgang (trompet) naar een grotere diameter zonder dode hoeken;
- Plaats op het hoogste punt in een gebogen omhullingsbuis een ontluichtingsbuis;
- Voorzie de plaatselijke grotere diameter omhullingsbuis bij verankeringen en tussenkoppelingen van één of meerdere ontluichtingsbuizen, e.e.a. afhankelijk van de positie en injectieerrichting [Engelke 1986];
- Pas een injectiespecie toe die hoogvloeibaar is bij een lage water-cementfactor en geen waterafscheiding (bleeding) vertoont;
- Injecteer de voorspankanalen zo veel mogelijk van onder naar boven;
- Injecteer met een stroomsnelheid van de injectiespecie in de omhullingsbuis van 5 - 15 m/min., e.e.a. afhankelijk van de positie van het kanaal (verticaal/horizontaal).
- Pas waar het nodig en mogelijk is napersen toe.
- Inspecteer de ontluichtingsbuizen na het injecteren en vul eventueel een holle ruimte na.

Voor uitvoeringsaspecten die moeten leiden tot goedgevulde spankanalen wordt voorts verwezen naar [Brandt 1987, STUVO 1987, STUVO 1988]

4. Aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering van duurzame voorspanning

4.1. Hoofdoorzaken falen betonconstructies.

Het bezwijken van het voorspanstaal onder trek als gevolg van vermindering van de doorsnede door voortschrijdende corrosie en, in uitzonderingsgevallen, als gevolg van waterstofverbrossing kan als de hoofdoorzaak worden aangemerkt van het bezwijken van voorgespannen betonconstructies.

Corrosie van het voorspanstaal kan o.a. ontstaan door:

- Onvoldoende betondekking op de voorspanelementen.
- Betondekking van onvoldoende kwaliteit, (grote porositeit etc.)
- Niet volledig met (verharde) injectiespecie gevulde voorspankanalen.
- Toegankelijkheid van de voorspankanalen voor vocht, water, van buiten.
- Onvoldoende bescherming van de verankeringen tegen vochttoetreding.
- Wijde scheuren in de betonconstructie, die agressief vocht naar het voorspanstaal transporteren

Via constructieve vormgeving, in het ontwerp-stadium, kunnen een aantal van deze oorzaken worden weggenomen.

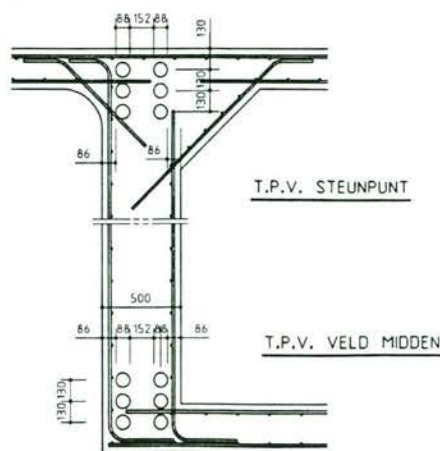
4.2. Constructieve vormgeving in het ontwerp-stadium.

4.2.1. Kwaliteit van de betondekking

Teneinde de kwaliteit van de betondekking te verzekeren is het volgende van belang in het ontwerp-proces:

4.2.1.1 De verdeling van de kabels over de doorsnede. (figuur 3)

In de betonconstructie moeten de kabels zodanig over de doorsnede worden verdeeld, dat de betonspecie over de gehele hoogte goed gestort en verdicht kan worden. Dit geldt met name ter plaatse van de steunpunten waar de kabels hoog liggen. Voor het verdichten met trilnaalden moet in wanden voldoende ruimte worden gespaard, om beschadiging van de omhullingsbuizen te voorkomen. Ook voor stortkokers dient ruimte gereserveerd te worden. De h.o.h. afstanden van de omhullingsbuizen dienen daaraan te worden aangepast [RWS 1995]. (bijlage 8).



Figuur 3

4.2.1.2 De betondekking op de kabels.

Teneinde een goed verdichte beton rondom de kabels te verkrijgen is het van belang om de ruimte tussen de omhullingsbuis en de wand niet te gering te maken. Aanbevolen wordt een betondekking die ongeveer gelijk is aan de diameter van de omhullingsbuis. In deze betondekking altijd een wapeningsnet aanbrengen met maaswijdten niet groter dan 250mm en niet kleiner dan 100mm (bijlage 8)

4.2.1.3 Het aantal voorspaneenheden.

De grootte van voorspaneenheden hangt samen met de afmetingen van de dikte van de lijven van balken en de wanden van kokerliggers. Het aantal kabels in een balk of wand van een kokerligger dient tenminste twee en bij voorkeur meer te zijn. Hiermee worden eventuele risico's over meerdere kabels verdeeld.

4.2.1.4 De kromming van de kabels.

Met het oog op de grote radiaalkrachten, die in sterk gekromde kabels op de omhullingsbuis en via deze op het beton worden uitgeoefend dienen te sterk gekromde kabels zoveel mogelijk te worden vermeden. Soms geven sterke krommingen aanleiding tot het afdrukken van de betondekking of scheurvorming in het zich in de "knieholte van de kabel" bevindende beton. Een optimale wapening is daar nodig.

4.2.1.5 Verticale kabels.

Zoals bekend is het goed injecteren - vullen - van verticale spankanalen moeilijk. Vooral in lange kanalen kunnen water- en luchtinsluitingen ontstaan die niet eenvoudig te voorkomen zijn. Het verdient daarom aanbeveling om deze kanalen gefaseerd te voorzien van tusseninjectie-aansluitingen, zodat de injectiemortel aan de bovenzijde weinig inzakt door waterafscheiding (bleeding). De speciedruk in het kanaal met eventuele doorverbindingen wordt daardoor beperkt. Door op deze manier in fasen te injecteren kan tussentijds de waterscheiding verwijderd worden. In het bovenste deel van het kanaal kan de waterafscheiding door napersen met injectiespecie via de ontluuchtingsopening van het spananker verwijderd worden direct na het injecteren. Of na verhardening van de injectiespecie wordt de holle ruimte via een injectieopening van het spananker met injectiespecie volgeperst. [CUR-rapport 51, STUVO 1987 en STUVO 1988]

4.2.2. Het beloop van de kabels over de liggerlengte.

Algemeen: het beloop van de kabels moet zodanig zijn dat, bij alle door het certificaat van het spansysteem toegestane waarden van wrijvingsfactor en wobble, de voorspanning op een correcte wijze kan worden aangebracht. Minder totaalkromming geeft minder wrijving, te streven is naar een eenvoudig vloeiend verloop, "keep it simple". De kans op defecten bij het injecteren wordt hierdoor verkleind.

4.2.2.1 Plaatvormige constructies.

Voor bij, over meer steunpunten doorlopende, constructies moet naar een vloeiend beloop van de kabels in langsrichting worden gestreefd. Dit betekent o.a.:

- Aandacht voor de wijze waarop de kabels in de lengterichting worden beëindigd.
- Worden daartoe blinde ankers toegepast dan zal men zorgvuldig de plaats van dat blinde anker - onder of meer boven in de plaat - moeten kiezen o.a. in verband met de plaats van de ontluuchtingen aan het eind van het spankanaal naast het blinde anker. De ontluuchtingen van spankanalen die boven de plaat uitkomen, vormen kritieke punten ten aanzien van indringing van agressieve stoffen.

Worden de kabels naar boven in het veld of nabij een steunpunt met spanverankeringen beëindigd dan moet worden bedacht dat de vulling van de uitsparingen boven in een plaat los zal kunnen krimpen van het omringende beton. Dit betekent dat agressieve stoffen (dooizouten) via deze krimpaden de spankanalen kunnen bereiken en

indringen in elke onvolkomenheid van het met verharde injectiespecie gevuld spankanaal.

Het onderbrengen van spanankers in de onderzijde van de plaat is, mede op uitvoeringstechnische gronden, niet aan te bevelen. Ook hier moet met het loskrimpen van de vulling van de uitsparing worden gerekend.

- Bij het in etappes spannen van kabels in de lengterichting van de constructie speelt uiteraard ook de keuze van de injectierichting een rol. Met name wanneer het viaduct een langshelling heeft moet hierop gelet worden.

Er is een trend vast te stellen in de richting van eenvoudiger - lees plaatvormige - constructies, ook bij grotere overspanningen.

Daarbij neemt de kans toe op een groter effect van nazakken van de betonspecie onder de hoger gelegen kabels. Zie ook onder 4.2.2.2.

4.2.2.2 Kokerliggers.

Met het berekenen van de benodigde voorspankracht kan men uitgaan van het in de gebruikstoestand beperken of niet toelaten van trekspanning in beton. Het beloop van de kabels wordt door die voorwaarde volledig bepaald. Het gevolg is vaak een relatief grillig beloop en een geforceerde ligging van deze kabels zowel in de lengte- als dwarsrichting.

De kabels "waaieren uit" zowel in het dek nabij een tussensteunpunt en in de onderflens in het veld.

Het zal duidelijk zijn dat zulk een beloop de kans op beschadigingen van de omhullingsbuizen tijdens het wapenen en betonneren vergroot en ook ongunstig is voor een goede vulling van de spankanalen met injectiespecie. Op veel plaatsen zijn luchtopsluitingen mogelijk, die moeilijk te verhelpen zijn en die later kans op indringen van agressief vocht in deze plaatsen geven met alle consequenties van dien. Bovendien sluit het geforceerde beloop van de kabels niet uit dat plaatselijk injectiespecie overloopt van het ene spankanaal in het andere.

Ook het inbrengen en verdichten van de betonspecie wordt daardoor bemoeilijkt. Zie onder 4.2.1.1. Last but not least zijn de voorspanverliezen door wrijving van de kabels in de grillig verlopende spankanalen ook niet goed te beheersen!

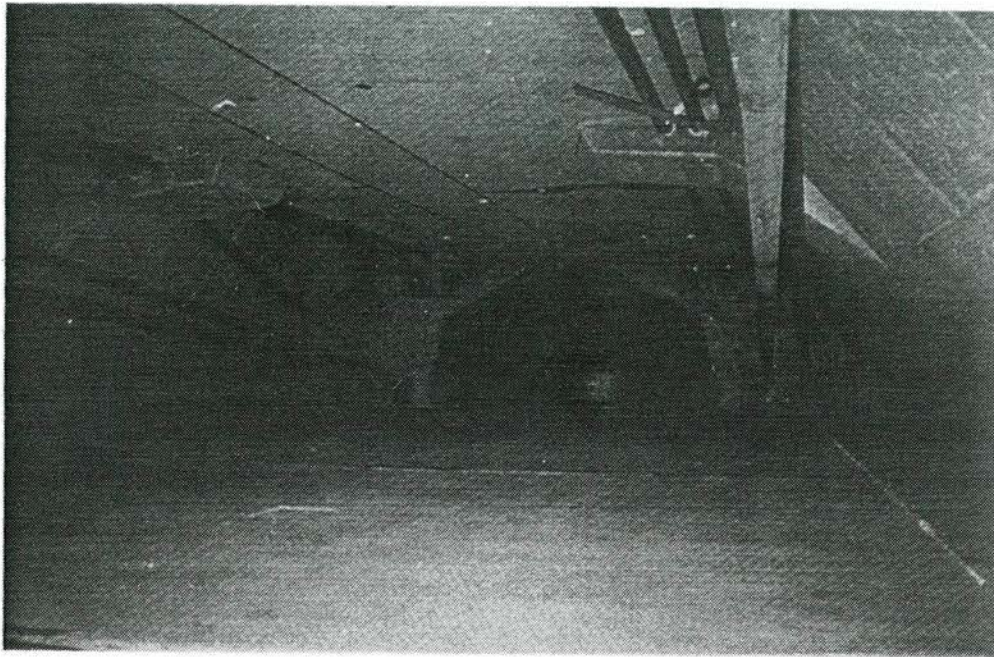
Een goede duurzaamheid van deze betonconstructies moet dus vooral reeds in het ontwerpstadium worden gerealiseerd. Dit wordt vaak over het hoofd gezien. Wanneer in het ontwerp problematische oplossingen worden toegepast, ook al voldoen deze aan alle voorschriften, dan zal de uitvoering daarvan de moeilijkheden ondervinden.

In verband hiermee kan worden gesteld dat het van belang is dat de ontwerper vooraf een eenvoudig beloop van de kabels vastlegt, zodat aan de gestelde voorwaarden van goede injectie, ontluchting en betondekking wordt voldaan. Door een effectieve wapening kunnen dan zones, waar mogelijkerwijs scheurvorming zou kunnen optreden, worden overbrugd. Hier geven de regels omtrent Constructief Beton, vastgelegd in de huidige betonvoorschriften, de mogelijkheid toe. Bij het toestaan van trekspanningen en een beheerste scheurvorming dient wel te worden gecontroleerd of dit qua vermoeiing is toegestaan.

Op verschillende plaatsen zullen de dwarskabels de langskabels kruisen. Vooral in brede platen van kokerliggers zullen in een zone dus veel kruisende kabels kunnen voorkomen. Door zetting van de betonspecie na het betonstorten kunnen onder kabels holten ontstaan die de mogelijkheid op contact met nog niet geïnjecteerde ondergelegen kabels kunnen vergroten. Bij het injecteren loopt men dan de kans dat de injectiespecie in een ander, niet voorzien, spankanaal wordt geperst.

Bij de detaillering van de dwarsvoorspanning moet met dit aspect terdege rekening worden gehouden. Door het toenemen van de hoogte van kokerliggers wordt ook de zetting van de betonspecie groter en dus de kans op holten onder hoger gelegen kabels.

Opmerking: Als men alle uitvoeringstechnische consequenties, in relatie tot de duurzaamheid van doorgaande kokerliggers, beziet, komt de vraag naar voren of het geen aanbeveling verdient veel meer aandacht aan nieuwe mogelijkheden te gaan schenken. Zoals het toepassen van uitwendige voorspanning, waarbij het aanbrengen van de voorspankabels buiten de betondoorsnede deze activiteit scheidt van het proces van stellen en betonneren.

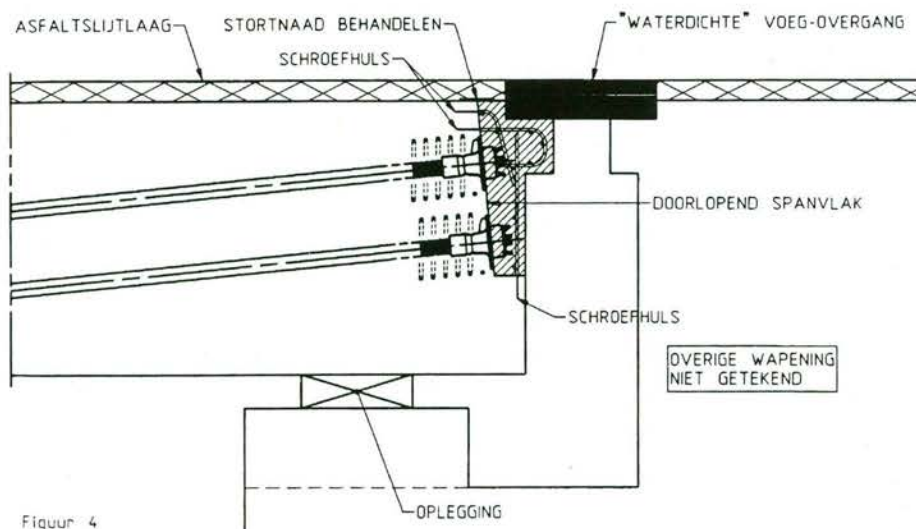


De controleerbaarheid wordt daarbij in alle fasen vergroot. Bij uitbouwbruggen wordt door toepassing van hogesterktebeton een simpel kabelverloop mogelijk. De bijna volledige scheiding tussen de uitvoering van de betonconstructie en die van het aanbrengen van de voorspanning door ter zake deskundige bedrijven biedt de voorwaarde voor het verkrijgen van een grote duurzaamheid van deze kokerliggerbruggen - en viaducten.

4.2.3. De plaats en afwerking van verankeringen en ontluchtingsbuisjes.

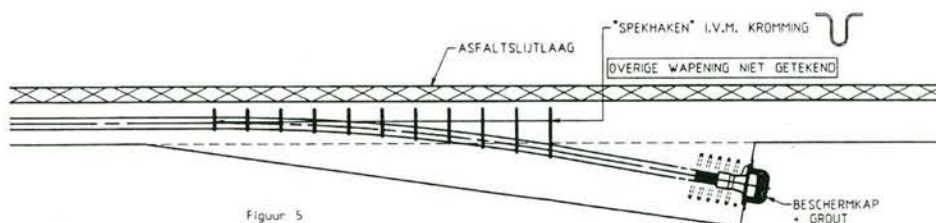
4.2.3.1 Voorzieningen aan eindverankeringen. (figuur 4)

Aan de plaatsing en bescherming van de eindverankeringen moet voldoende zorg worden besteed. Daar waar de verankeringen aan het einde van de plaat ingebetonneerd zijn, kan dat efficiënt gedaan worden. Er dient voldoende ruimte te zijn om het beton aan te storten en de stortnaad moet afgeplakt worden.



Figuur 4

Een beëindiging bovenin de plaat is veel kritischer. Krimpscheuren tussen het vulbeton en het oorspronkelijke beton zijn bijna niet te vermijden. Hierdoor kan agressief lekwater vanaf het brugdek in de einden van de spankanalen dringen en via de "kanaaltjes" het voorspanstaal plaatselijk aantasten. Stortvoegen moeten aan de bovenzijde van een waterdichte coating worden voorzien. Op verankeringen in een boveninkassing zijn beschermkappen aan te bevelen. Ook kunnen bij voldoende ruimte in kokerliggers de voorspankabels aan de onderzijde van het dek worden verankerd (figuur 5).



Figuur 5

4.2.3.2 Bepaling van de plaats van ontluchtingen.

Het is bijzonder belangrijk om in de ontwerp-fase aandacht te besteden aan de plaats van de ontluchtingen van de kabels. In de bovenzijde van de betonconstructie, bijvoorbeeld boven de steunpunten, bevinden de uiteinden van deze ontluchtingen zich vaak in een ongunstige positie, namelijk direct onder het asfaltdek. Het is niet uit te sluiten dat de injectiespecie loskrimpt van het ontluchtingsbuisje of dat er een onvolledige vulling is ontstaan. Dit betekent dat bij het indringen van dooizouten in dit asfaltdek, in de bovenzijde van het spankanaal, water met veel chloorionen zou kunnen binnendringen. Afwerken van de uitmonding van ontluchtingsbuisjes met een daartoe geëigende coating moet de kans op waterpenetratie voorkomen.

4.2.4. Scheurverdelende wapening

Als uitgangspunt, bij het dimensioneren van voorspanning en wapening, moet worden aangenomen dat geïnjecteerde voorspankabels, in gescheurde (buig)trekzones een primitieve wapening vormen.

Dit uitgangspunt is gebaseerd op de volgende overwegingen:

- De overdrachtslengte van extra trekkrachten, fungerend als "wapening" van de kabel in de betonconstructie, is groot, vergeleken met die van betonstaal.

- De verdeling van deze "wapening" over de (buig)trekzone is slecht met betrekking tot beheersing van scheurvorming. Men krijgt enige wijde scheuren op grote onderlinge afstanden.

Wanneer er kans bestaat op scheurvorming in de (buig)trekzone moet deze worden beheerst door voldoende betonstaalwapening. Deze wapening moet dan worden gedetailleerd met het oog op die scheurbeheersing. Tevens wordt dan de scheurdiepte beperkt en wel zodanig dat de scheur niet tot aan het spankanaal doorloopt. Is dit niet gedaan en wordt aangenomen dat er, door overschrijden van de treksterkte van het beton, scheuren ontstaan dan zullen deze wijd zijn en het indringen van (regen)water mogelijk maken.

Zijn deze scheuren diep, dan kan dit water via de ter plaatse van de scheuren eveneens gescheurde omhullingsbuis, het voorspanstaal bereiken.

Kort samengevat: met betrekking tot scheurvorming zijn voorspankabels en wapening elkaar aanvullende componenten.

Door de voorspanning in een constructie te vergroten wordt de scheurvorming beperkt. Door het aanbrengen van voldoende wapening wordt mogelijk optredende scheurvorming beheerst.

4.3. Constructievormen

4.3.1. Plaatvormige brugconstructies over meer steunpunten.

4.3.1.1. Beloop van de kabels.

In het algemeen kan het beloop van de langskabels in een plaat eenvoudig en regelmatig zijn.

4.3.1.2 Verankeringen. Zie 4.2.2.1

De eindverankeringen bevinden zich normaliter in de plaaieinden.

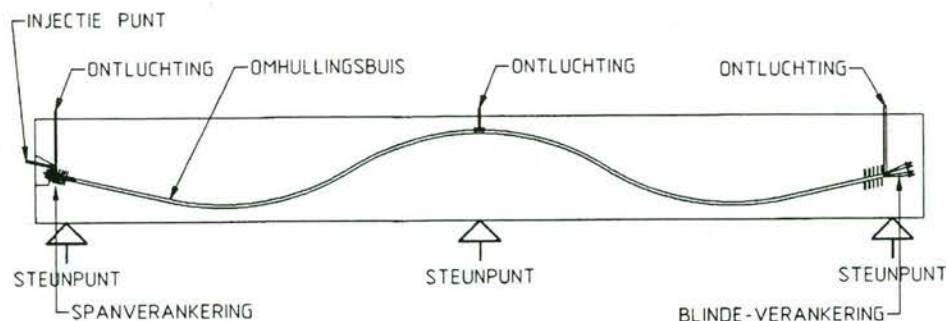
Hier bevinden zich ook de dilatatievoegen, met overgangsconstructies, in het rijdek.

Goede detaillering van de uitsparingen voor het onderbrengen van die verankeringen is dus vereist. Zie 4.2.3.1.

Indien de kabels niet doorlopen naar de eindoplegging en in een blind anker eindigen, dient aandacht besteed te worden aan de wapening ten behoeve van de krachtsinleiding en de plaatsing van de ontluchtingsbuizen.

4.3.1.3 Ontluchtingen. Zie ook 4.2.3.2 (figuur 6)

Men ontkomt er niet aan om in doorgaande kabels ontluchtingen te moeten aanbrengen boven de steunpunten in de bovenzijde van de plaat. Afdoende bescherming van de einden van deze ontluchtingen is noodzakelijk en vraagt veel zorg bij de uitvoering. Dit geldt ook voor de ontluchtingen van de eindverankeringen.



Figuur 6

4.3.1.4. Invloed verhinderde opgelegde vervormingen.

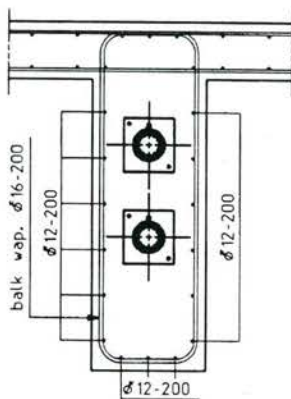
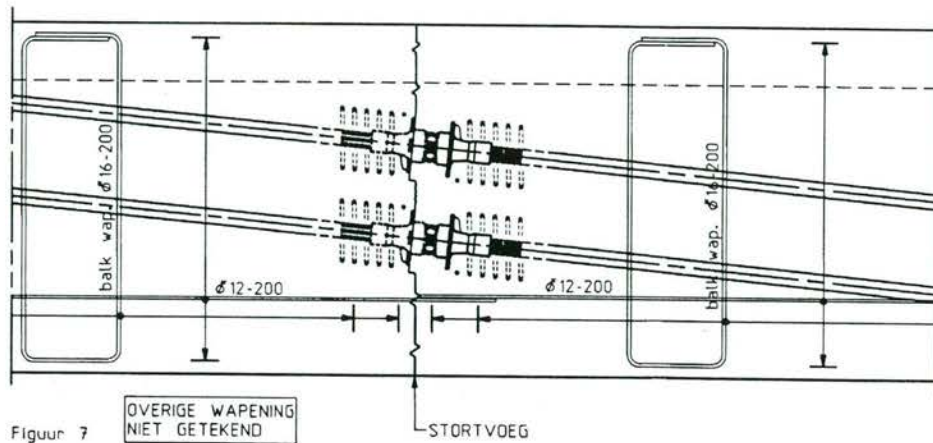
In doorgaande platen worden opgelegde vervormingen verhinderd om op te treden. Het gevolg daarvan is het optreden van "belastingen" anders dan die door het verkeer etc. In de regel zijn platen relatief slap. Dit betekent dat de belastingen die uit dit effect resulteren vaak klein zijn. Stijve platen zijn uiteraard daarvoor veel gevoeliger. Het aanbrengen van normale wapening in die zones waar de invloed van deze effecten groot kan zijn is dan ook noodzakelijk. Men denke hierbij in het bijzonder aan de zones nabij en boven de steunpunten. Scheurwijdten moeten hier klein blijven - niet meer dan gemiddeld 0.1mm. - om indringen van water (met dooizouten) via scheuren naar de kabels te verhinderen. In dit opzicht moet worden bedacht dat de kabels een primitieve steunpuntswapening vormen en reeds daarom voldoende normale wapening noodzakelijk is. Scheve en lijnvormig ondersteunende platen kunnen, ook wanneer deze aan de einden vrij ondersteund zijn, onder invloed van opgelegde vervormingen niet vrij vervormen. Bij de detaillering van de wapening dient daarmee rekening te worden gehouden.

- Stortvoegen (figuur 7)

In de regel komen in stortvoegen spanverankeringen voor als tussen- dan wel tijdelijke verankeringen. In de stortvoeg zijn deze verankeringen vaak zware stijve stalen elementen. Dit betekent dat door krimp en kruip van het beton ter plaatse, maar vaak ook door het daar aangrijpen van geconcentreerde voorspankrachten, deze zich vaak in en om de verankeringen concentreren. Als gevolg daarvan is het beton rondom de stortvoeg minder voorgespannen dan de constructiedelen aan weerszijden daarvan. Waar de treksterkte van het beton in de stortnaad toch reeds geringer is dan die van het omringende beton bestaat er grote kans dat in deze zones bij belastingen, geringer dan verwacht, scheuren worden opgewekt. Het (deels) verhinderen van aan de constructie opgelegde vervormingen kan daarop ook een ongunstig effect hebben.

Deze stortvoegen zijn dus zones waar het voorspanstaal zich vaak in een minder goed beschermd milieu bevindt.

Daarom is het zeer belangrijk om in deze stortvoegen zoveel normale wapening door te voeren dat, in het geval van scheurvorming ter plaatse, de scheurwijdten klein zijn. Zie ook 4.3.1.



4.3.2. Kokervormige brugconstructies over meer steunpunten.

4.3.2.1 Ter plaatse gestorte constructies.

- Beloop van de kabels. Zie onder 4.2.2.2
- Verankeringen. Zie onder 4.2.3.1 en 4.2.3.2
- Ontluchtingen. Zie onder 4.2.3.3
- Bereikbaarheid kabels bij geconstateerde defecten.

Het is zeer belangrijk dat in het geval van het constateren van defecten in kabels, bijvoorbeeld onvolledige vulling met injectiespecie, begin van corrosie van het voorspanstaal etc. deze goed bereikbaar zijn. Vandaar dat wordt voorgesteld de kabels zoveel mogelijk langs de wandvlakken te plaatsen. Deze kabels zijn dan bijna over de gehele lengte in de wanden goed bereikbaar, in het bijzonder voor het uitvoeren van eventuele inspecties (proefgaten boren) en reparaties.

- Invloed verhinderde opgelegde vervormingen. Kokerliggers zijn stijve liggers en daarom zeer gevoelig voor opgelegde vervormingen omdat deze grotendeels worden verhinderd. Als gevolg daarvan kunnen grote "belastingen" worden opgewekt. Teneinde deze te reduceren verdient het aanbeveling om de voorspanning te verminderen en deze aan te vullen met voldoende wapening. Via deze wapening kan de scheurvorming worden beheerst. Bovendien wordt de stijfheid van de ligger door scheurvorming kleiner als gevolg waarvan de "belastingen", voortvloeiend uit verhinderde opgelegde vervormingen ook geringer worden. In dit opzicht wordt aandacht gevraagd voor het dek en de bodemplaat tussen de wanden. In het geval van scheurvorming kunnen de kabels geen functie als wapening vervullen.

- Stortvoegen. Zie ook dit onderwerp onder 3.2.2.

De effecten van stalen verankeringslichamen, normaliter in de wanden van de kokerligger zijn nog ongunstiger dan die in platen. In de regel is het aantal verankerungen daar relatief groot. Het gevolg is dat wijde scheuren kunnen ontstaan, mede als gevolg van extra kruip van het beton in de gereduceerde drukzone boven de plaatselijk gescheurde betontrekzone. Hier is het aanbrengen van voldoende wapening zeer belangrijk.

- Doorkoppelingen in veldgewijze uitbouw. (figuur 7)

In veldgewijze uitbouw zijn de stortvoegen meestal in de buurt van het momentennulpunt, behorend bij gelijkmatig verdeelde belasting, aangebracht. Door het samenspel van de hierboven beschreven effecten en het verhinderen van opgelegde vervormingen kunnen deze stortvoegen later zeer ongunstig worden belast. In de praktijk hebben zich dan ook ernstige schades, met name in Duitsland en Oostenrijk voorgedaan. Verankeringselementen werkten als "scharnieren"!

Voldoende, en goed over de doorsnede verdeelde, wapening kan deze, in de loop van de tijd optredende, schaden voorkomen.

- Via stortvoegen doorgaande kabels.

Wanneer kabels in de stortvoegen worden doorgevoerd moet veel aandacht worden besteed aan de doorkoppeling van de omhullingsbuizen en aan het voorkomen van knikken in deze buizen.

Voor het ontwerp betekent dit dat de kabels daar alleen worden doorgevoerd waar een goede ondersteuning van de aan te koppelen omhullingsbuis mogelijk is. Vooral voor de, in deze gevallen vaak, later in te voeren kabels is een vloeiend verloop van de omhullingsbuis ter plaatse noodzakelijk. Vandaar dat geen kabels moeten worden doorgevoerd die ter plaatse sterk zijn gekromd.

- In stortvoegen doorgekoppelde kabels.

Onder verwijzing naar hetgeen hiervoor reeds is behandeld kan nog het volgende worden opgemerkt. In verband met de afmetingen van de verankeringslichamen moeten de kabels in de wand meer naar binnen worden geplaatst. Dit betekent dat voor het inbrengen van betonmortel minder ruimte overblijft, tenzij men de wanden dikker maakt, wat kostbaar is, of de kabels achter de verankerungen naar buiten gaan lopen, hetgeen ongewenst is. In het ontwerp dient de mogelijke keuze van deze oplossing zorgvuldig te worden afgewogen.

Indien in stortvoegen kabels in inkassingen worden verankerd en eventueel worden doorgekoppeld moet, naast het hiervoor reeds behandelde, in dit geval veel aandacht worden besteed aan maatregelen om de sparing, waarin het anker of de doorkoppeling is aangebracht, afdoende met mortel te kunnen vullen. De ontluchtungs- c.q. injectiebuis moet zodanig worden aangebracht dat aan deze voorwaarde wordt voldaan. In de regel kunnen deze aansluitingen in de wanden van de koker worden opgenomen. In de buitenwand dient dan, in de detaillering van de uitsparing, aandacht te worden besteed aan het voorkomen van indringend vocht via krimpnaad etc.

4.3.2.2 Uit prefab elementen opgebouwde kokerconstructies.

Onder verwijzing naar hetgeen onder 4.3.1 reeds over kokerliggers is vermeld wordt hier alleen nog aandacht gevraagd voor de voegen tussen prefab elementen.

In Nederland zijn in de zeventiger jaren veel bruggen en viaducten gebouwd met behulp van prefab kokerelementen en gelijmde voegen. Door het ontbreken van wapening in de voegen is deze constructievorm zeer gevoelig voor afwijkingen in de ontwerp-berekeningen. Dit kan zijn het praktijkgedrag t.o.v. het toepassen van de noodzakelijke berekeningsprogramma's. Ondanks het ontwerpen op volledige voorspanning resulteren

genoemde effecten in het openstaan en lekken van voegen. Het toepassen van uitwendige voorspanning kan in deze constructiewijze de gevoeligheid voor aantasting van de voorspankabels reduceren.

4.3.3. *T- en TT-vormige liggers in een brugconstructie.*

Veel brug- en viaduct constructies worden ontworpen in de vorm van betonplaten die monolithisch zijn verbonden met langsliggers.

Voor deze constructie gelden veel van de opmerkingen die hiervoor over kokerliggers zijn gemaakt. Zie 4.3.3.1.

Prefab T-liggers.

De hier bedoelde betonconstructies kunnen ook worden gebouwd met behulp van geprefabriceerde T-liggers. In het werk worden dan de langsnaden tussen de bovenflenzen van de liggers volgestort met beton en vervolgens worden deze (dwars) voorgespannen. Vooral in brede brugdekken met dwarsdragers in het veld en boven de steunpunten kunnen de bovenflenzen door mogelijke uitdroging van het beton zoveel verkorten dat in de ongewapende langsnaden scheuren ontstaan. De dwarsvoorspanning concentreert zich dan in de dwarsdragers. In de langsscheuren tussen de hoofdliggers kan agressief water vanuit het asfaltdek in de spankanalen komen. Indien deze niet volledig met verharde injectiemortel zijn gevuld kan aantasting van het voorspanstaal daarvan het gevolg zijn. In het ontwerp dient met name aandacht te worden besteed aan:

- de breedte van de brugvelden;
- het al dan niet noodzakelijk zijn van dwarsdragers;
- mogelijke voorzieningen ter plaatse van de langsnaden, in de vorm van doorkoppelingen van de sparingbuizen in de liggers;
- mogelijk doorgaande, later in te brengen, kunststof omhullingsbuizen rondom de dwarskabels.

Ook zou kunnen worden overwogen om de dwarsdragers eerst voor te spannen en de voorspanning in de bovenplaat achterwege te laten. De brede voeg tussen de bovenplaten kan dan worden doorgekoppeld middels lusverbindingen. De langsvogen kunnen in alle gevallen afgeplakt worden.

4.4. **Uitvoeringsaspecten**

Naast de constructieve vormgeving spelen ook uitvoeringsaspecten een belangrijke rol in het totstandkomen van een duurzame voorgespannen betonconstructie. In alle onderdelen van het bouwproces van bekisten, wapenen, betonstorten, ontkisten en afwerken is wel één van de elementen van de voorspanning aanwezig.

4.4.1. *Montage van ankers en buis*

Het plaatsen van spanankerplaten en omhullingsbuizen in de bekisting vraagt ruimte. In samenhang met de wapening en met behulp van supporten worden omhullingsbuizen geplaatst, maar ook met moffen doorverbonden en afgeplakt. Een goede volgorde in het plaatsen van wapening en omhullingsbuizen is van belang. In dit stadium zijn de omhullingsbuizen kwetsbaar.

4.4.2. *Invoeren van kabels*

Het invoeren van de voorspankabels vraagt in de voorbereiding aanvoer en bescherming van het voorspanstaal. Indien het voorspanstaal lange tijd voor het injecteren in de constructie aanwezig is, kan het staal met een in water oplosbare olie beschermd worden. De uitstekende kabeldelen dienen d.m.v. omhulling beschermd te worden tegen chemische en mechanische beschadigingen. Hoewel de ingevoerde kabels de

omhullingsbuis steun geven, dient tijdens het betonneren met storten en trillen alle aandacht erop gericht te zijn de buizen niet te beschadigen.

4.4.3. *Spannen van kabels*

Het spannen moet worden uitgevoerd volgens een spanprotocol, zie ook artikel 11.2 van de VBU 1988 [NEN 6722]. Het spannen kan in fasen uitgevoerd worden, waarbij voor het uitvoeren van een gedeeltelijke voorspanning de kopkist zo snel mogelijk verwijderd moet kunnen worden. De overige bekisting moet vervorming van de constructie toelaten. De ruimte om te spannen moet zowel de uitvoering als de veiligheid dienen.

4.4.4. *Het injecteren van kabelkanalen*

Het injecteren dient zo spoedig mogelijk na het spannen uitgevoerd te worden. Teneinde de kabelkanalen op vernauwingen te controleren kan met perslucht doorgeblazen worden. Bepalend voor de kwaliteit van de injectiespecie zijn de factoren: cement, hulpstof, watercementfactor, mengers en pomp. In Nederland kan men beschikken over een cement (zonder vliegashoudende) van constante samenstelling en korrelverdeling. Dit in samenhang met moderne hulpstoffen maakt het mogelijk een mengsel met een lage watercementfactor samen te stellen. Door het toepassen van goede mengers is hieruit een mengsel met goede verwerkbaarheid en vrijwel geen waterafscheiding te produceren. Met in druk verstelbare pompen is het mogelijk het injecteren aan te passen aan de weerstand in de buis. In horizontale kabelkanalen zal gestreefd worden een snelheid van 12m/min niet te overschrijden. Bij verticale kanalen blijft dat 6m/min. In het geval er kans op waterinsluiting bestaat of toch waterafscheiding te verwachten is, kan bij toepassing van strengen de methode van napersen toegepast worden. Onder druk wordt injectiespecie toegevoegd, dat het overtollige water verdrijft door drainage van de strengen.

4.4.5. *Het afwerken van voorspankabels*

Het afwerken van voorspankabels bestaat uit het verwijderen van de uitstekende ontluuchtings- en injectiebuizen, alsmede het beschermen van de verankeringen. De verwijdering van de buizen biedt de mogelijkheid op een visuele controle. In het geval van geconstateerde holle ruimte kan dan nog met injectiespecie worden nagevuld. De restanten van de buizen dienen goed afgedicht te worden. De verankeringen worden meestal ingebetonneerd. Mogelijke krimpnaadnaden moeten bij de aansluitingen goed afgeplakt worden. Op plaatsen waar toetreding van water met agressieve stoffen mogelijk is, dienen kappen op de ankers geplaatst te worden. Zo'n situatie kan zich voordoen als de spansparingkassen zich aan de bovenzijde van het dek bevinden.

4.5. **Bescherming tegen indringing van dooizouten**

4.5.1. *Opbouw slijtlagen*

In Nederland worden op betonnen kunstwerken, in tegenstelling tot de in het buitenland (o.a. Duitsland, Engeland) toegepaste dichtingslagen, 'waterdichte' slijtlagen toegepast bestaande uit een laag dicht asfaltbeton met een holle ruimte van maximaal 4%.

De ervaringen met deze constructie zijn gunstig en hebben tot op heden geen schade van grote omvang tot gevolg gehad.

Het vermoeden bestaat dat juist de combinatie van gunstige factoren, te weten:

- kwalitatief goede beton (door zorgvuldige uitvoering en nabehandeling)
- eenvoudige slijtlaag qua opbouw en uitvoering;
- visuele inspectie van de slijtlaag;

- goede inspectie van het beton mogelijk bij volledige vervanging van de slijtlaag na 10 à 15 jaar;
voorkomen dat de brugdekken ernstig worden aangetast.

4.5.1.1. Slijtlaag van dicht asfaltbeton (DAB)

De opbouw van de slijtlaag bestaat, van onder naar boven, bijvoorbeeld uit:

- a) een impregnering van het betonoppervlak met een hydrofobeermiddel. Voor de aan dit hydrofobeermiddel te stellen eisen wordt verwezen naar [BSW 1993].
- b) een kleeflaag van $0,6 \text{ kg/m}^2$ bitumenemulsie, type 0, afgestrooid met droog rivierzand;
- c) een laag dicht asfaltbeton 0/16 met een minimale dikte van 50 mm;

4.5.1.2. Slijtlaag van zeer open asfaltbeton (ZOAB)

de opbouw van de slijtlaag bestaat in dit geval bijvoorbeeld uit:

- a) een impregnering van het betonoppervlak met een hydrofobeermiddel. Voor de aan dit hydrofobeermiddel te stellen eisen wordt verwezen naar [BSW 1993].
- b) een kleeflaag van $0,3 \text{ kg/m}^2$ bitumenemulsie, type 0, afgestrooid met grof droog zand;
- c) een laag dicht asfaltbeton 0/16 met een minimale dikte van 50 mm;
- d) een kleeflaag met $0,3 \text{ kg/m}^2$ bitumenemulsie, type 0, afgestrooid met grof droog zand;
- e) een laag zeer open asfaltbeton 0/16 met een minimale dikte van 40 mm.

4.5.1.3. Aansluiting slijtlaag tegen schampranden

Bij het formeren van een waterdichte 'bak' op het brugdek is gebleken dat de aansluiting met opstortingen zoals schampranden een kritisch detail is. Uit inspecties is gebleken dat, in geval van lekkage, de meeste schade door dooizouten ontstaat in een strook langs de schampranden.

Een goede waterdichte aansluiting kan worden gemaakt door langs de schampranden een 100 mm brede strook gietasfalt aan te brengen. Deze strook gietasfalt aanbrengen nadat het dichte asfaltbeton is ingezaagd en verwijderd.

Voor volledige informatie wordt verwezen naar de handleiding van Rijkswaterstaat voor het aanbrengen van slijtlagen op betonnen kunstwerken [RWS 1996].

4.5.2. Behandeling van stornaden en sparingen

Uitbouwbruggen en veldsgewijs gebouwde bruggen hebben door hun constructiewijze meestal een groot aantal stornaden. Aan de bovenzijde van het dek worden deze afgeplakt met een bitumenstrook of een kunststoffolie. De opbouw is dan bijvoorbeeld als volgt: (Brug Venlo over de A73).

- betonoppervlak licht aanstralen over 300 mm breedte.
- 1 primerlaag + 2 lagen elastofalt EP breed 300 mm.
- afstrooien met 1-2 mm vuurgedroogd brekerzand

Ook alle andere stornaden zoals bij mangaten, sparingkassen voor verankeringen en voegovergangen worden afgeplakt. Als afdek materiaal kan ook kunststof gebruikt worden (Brug Zaltbommel):

Plastikol UDM2S, een 2 componenten materiaal, dat vloeibaar aangebracht wordt. Het betonoppervlak wordt in zijn geheel door hydrofoberen beschermd.

5. Draagkracht van constructies met beschadigde voorspanning

5.1. Globale vergelijking van de voorschriften.

Voor de in Nederland gebouwde constructies in voorgespannen beton zijn in de loop der jaren verscheidene voorschriften gebruikt voor de berekening van de benodigde hoeveelheid voorspanning.

Onderscheid kan worden gemaakt tussen constructies die zijn berekend met de

- Richtlijnen Voorgespannen Beton 1962 (RVB 1962),
- Richtlijnen Voorgespannen Beton 1967 (RVB 1967),
- Voorschriften Beton 1974/1984 deel F (VB 1974/1984),
- Technische grondslagen voor bouwconstructies TGB 1990 - Voorschriften Beton Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1990),
- Voorschriften betonnen Bruggen (VBB 1995)

Hoewel dit slechts een deel vertegenwoordigt van de constructies die zijn uitgevoerd in voorgespannen beton, wordt in dit hoofdstuk alleen een beschouwing gegeven over de draagkracht van bruggen omdat daarnaar een onderzoek heeft plaatsgehad.

Indien het bezwijken van het beton als criterium wordt genomen, kan door een eenvoudige vergelijking van de voorschriften reeds een globaal beeld worden verkregen van de veiligheid van een constructie waarin de voorspanning door onvolledige vulling van de spankanalen of aantasting van het voorspanstaal door corrosie, niet meer volledig aanwezig is.

Aangezien alleen een indicatie wordt nagestreefd, worden als beperkende voorwaarden meegenomen:

- de betonkwaliteit van de constructie is vergelijkbaar met de kwaliteit zoals die tegenwoordig wordt gebruikt,
- de constructie is zodanig uitgevoerd dat juist de volgens het voorschrift vereiste veiligheid wordt bereikt,
- de verkeersbelasting is niet gewijzigd,

Als voorbeeld is een tweetal vergelijkingen gemaakt:

- een berekening volgens de RVB 1967 en een berekening volgens de VBC 1990,
- een berekening volgens de VB 1974/1984 en een berekening volgens de VBC 1990,

Vergelijking van de RVB 1967 en de VBC 1990

De RVB 1967 schrijft voor dat het bezwijkmoment moet worden berekend met de volgende coëfficiënten:

voor de permanente belasting	: $\gamma_g =$	1,75
voor de mobiele belasting	: $\gamma_q =$	2,25

In de VBC 1990 worden deze coëfficiënten:

voor de permanente belasting	: $\gamma_g =$	1,20
voor de variabele belasting	: $\gamma_q =$	1,50

terwijl de karakteristieke waarde van de betonsterkte door een materiaalfactor $\gamma = 1,20$ moet worden gedeeld om de rekenwaarde van de betonsterkte te verkrijgen.

Om een eenvoudige vergelijking te kunnen maken tussen de RVB 1967 en de VBC 1990 zijn in het onderstaande de coëfficiënten volgens de VBC 1990 vermenigvuldigd met de materiaalfactor zodat dan schijnbaar de volgende coëfficiënten in rekening moeten worden gebracht:

voor de permanente belasting	:	$\gamma_g =$	1,45
voor de mobiele belasting	:	$\gamma_q =$	1,80

Indien vervolgens het aandeel van de permanente belasting op α procent wordt gesteld, kan een "overall"- coëfficiënt worden geschreven als:

$$\gamma = \alpha \cdot \gamma_g + (1-\alpha) \cdot \gamma_q$$

en kan de faktor tussen de RVB 1967 en de VBC 1990 op het bezwijkmoment globaal worden berekend als:

$$\frac{1,75 \cdot \alpha + 2,25 \cdot (1-\alpha)}{1,45 \cdot \alpha + 1,80 \cdot (1-\alpha)}$$

Uitgaande van een waarde van α die varieert tussen 0,4 en 0,7 wordt dan een faktor berekend van 1,23 ($\alpha = 0,4$) tot 1,22 ($\alpha = 0,7$).

Eenvoudig gezegd zou er dus een marge van ca 20 % aanwezig zijn op de totale belasting hetgeen betekent dat globaal met ca 20 % minder voorspanning zou kunnen worden volstaan. Deze marge wordt in praktijk in het algemeen nog groter omdat de werkelijk bereikte veiligheidscoëfficiënt meestal (aanzienlijk) groter is dan die welke volgens het voorschrift wordt vereist. Het uitvallen van een deel van de voorspanning (in elk geval tot het aangegeven percentage) zal dus niet direct leiden tot bezwijken van de constructie.

Uiteraard is deze aanpak niet correct omdat behalve naar de grenstoestand met betrekking tot bezwijken ook naar andere grenstoestanden moet worden gekeken. Te denken valt een controle op dwarskracht, een controle op scheurwijdte en doorbuiging maar ook een controle op vermoeiing van beton en voorspanstaal.

Mogelijk dat een van deze controles leidt tot kleinere marges.

Vergelijking van de VB 1974/1984 deel F en de VBC 1990

Op dezelfde wijze als hierboven beschreven kan een vergelijking tussen de VB 1974/1984 en de VBC 1990 worden gemaakt.

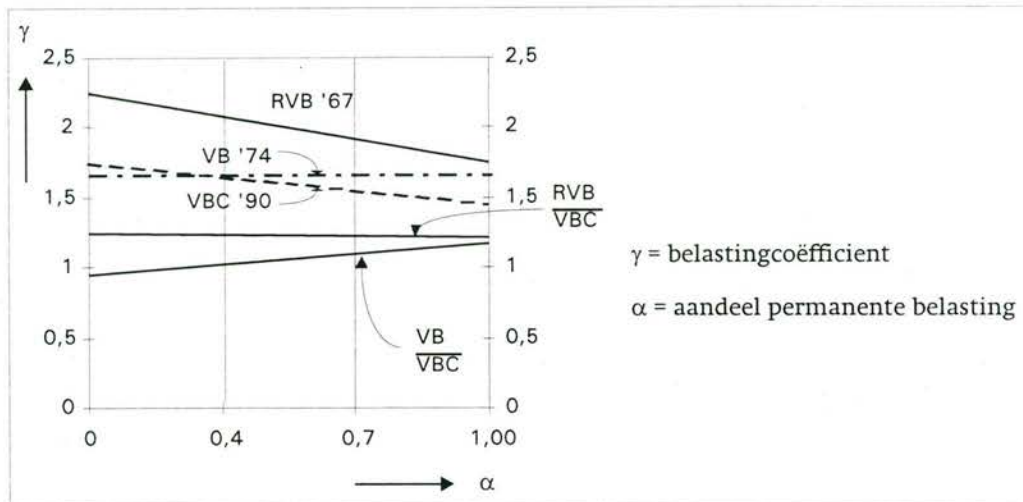
In de VB 1974/1984 wordt in de grenstoestand met betrekking tot bezwijken geen onderscheid gemaakt tussen permanente en variabele belasting. Voor beide wordt een coëfficiënt $\gamma = 1,70$ voorgeschreven.

Dit leidt tot een vergelijking voor de marge tussen beide voorschriften:

$$\frac{1,70 \cdot \alpha + 1,70 \cdot (1-\alpha)}{1,45 \cdot \alpha + 1,80 \cdot (1-\alpha)}$$

waardoor bij een waarde van α die varieert tussen 0,4 en 0,7 een marge wordt berekend van 1,024 ($\alpha = 0,4$) tot 1,093 ($\alpha = 0,7$).

In dit geval blijkt dus slechts een geringe marge aanwezig te zijn, zodat imperfecties in de voorspanning eerder aanleiding zullen geven tot onaanvaardbare situaties. Ook hier geldt dat controles moeten worden uitgevoerd op andere aspecten dan alleen het bezwijken van het beton.



5.2. Afstudeeronderzoek F. Bockhoudt

In het kader van een afstudeerproject op de TU Delft is door de student F. Bockhoudt in samenwerking met de Bouwdienst van Rijkswaterstaat een onderzoek gedaan naar de gevolgen van een onvolledige injectie bij spankanalen.

Zijn afstudeerrapport, dat zeer het lezen waard is, bestaat uit een hoofdrapport en drie deelrapporten. In het hoofdrapport wordt verslag gedaan van de bevindingen van de studie en de resultaten van de deelstudies die zijn beschreven in de deelrapporten. Deze behandelen achtereenvolgens:

- Deelrapport 1: Schademechanismen.
- Deelrapport 2: Handberekening.
- Deelrapport 3: DIANA-berekening.

Aan de hand van een bestaand viaduct is een vergelijking gemaakt tussen de RVB 1967 en de VBC 1990 en is nagegaan wat de invloed kan zijn van onvolledig geïnjecteerde spankanalen en van het wegvallen van een deel van de voorspankracht door corrosie. Hierbij zijn alle aspecten die van belang kunnen zijn in beschouwing genomen. Behalve naar bezwijken is ook een onderzoek gedaan naar de dwarskrachtcapaciteit, de scheurwijdte, de doorbuiging en naar het aspect vermoeiing.

Uit de vergelijking van de voorschriften komt naar voren dat er een redelijke marge bestaat tussen de veiligheid berekend volgens de RVB 1967 en de VBC 1990. Met uitzondering van het aspect vermoeiing blijkt er een behoorlijke reserve te bestaan. Het wegvallen van een deel van de voorspanning zal niet direct tot grote schade behoeven te leiden.

Omdat het vermoeiings-aspect in de RVB 1967 geen criterium was waarop de constructie moet worden beschouwd blijkt daar slechts een geringe marge aanwezig te zijn indien de bepalingen van de VBC 1990 daarop worden toegepast. Hiermee moet dus terdege rekening worden gehouden indien constructies waarin schade aan de voorspanning is geconstateerd worden beoordeeld.

Uit sterkteberekeningen die zijn gemaakt met het eindig elementen pakket DIANA is gebleken dat er in de constructie (berekend volgens de RVB 1967) door herverdeling zelfs meer reserve aanwezig is dan met een handberekening wordt gevonden.

Voor verschillende scenario's is vervolgens nagegaan wat het effect is van onvolledige vulling van spankanalen en van het wegvallen van een deel van de voorspanning door corrosie.

Gebleken is daarbij dat zelfs bij het volledig ongevuuld zijn van de kanalen voldoende veiligheid in de constructie overblijft. Deze gaat zich gedragen als een met VZA elementen voorgespannen constructie, uiteraard met alle daarbij behorende aspecten met betrekking tot geconcentreerde scheurvorming en doorbuiging.

Het wegvallen van een deel van de voorspanning door corrosie leidt tot lagere veiligheidscoëfficiënten maar zelfs bij een terugval van 30 % blijft de veiligheid in het onderzochte geval voldoende groot.

Een combinatie van onvolledige vulling van spankanalen en corrosie leidt wel tot een verder teruggang van de veiligheid zoals ook verwacht kan worden. Gezien de grote marge tussen de voorschriften RVB 1967 en VBC 1990, blijkt dit ook niet per definitie te leiden tot het gevaar van bezwijken.

De letterlijk uit het hoofdrapport van F. Bockhoudt overgenomen conclusie luidt dan ook als volgt:

- Uitkomsten van de handberekening van een plaatviaduct volgens de VBC 1990 laten een stijging in de veiligheid voor het bezwijkstadium zien van $\gamma = 2,3$ naar $\gamma = 3,1$. Een toename van 35 % ten opzichte van het toenmalig ontwerp dat gebaseerd was op de RVB 1967. Modelleren van hetzelfde plaatviaduct in een eindig elementen-model levert voor de onaangetaste constructie een veiligheidsfactor $\gamma = 3,6$; een toename van nog eens 13 % ten opzichte van de handberekening, hetgeen al met al zo'n 75 % aan reserve ten opzichte van de VBC-eis ($\gamma = 1,5$) oplevert. γ berekend met:

$$\gamma = \frac{M_{II} - (\gamma_g \cdot M_g + \gamma_{vsp} \cdot M_{vsp})}{M_{vb}}$$

Het meenemen van onvolledige injectie in de modellering maakt dat de gevonden veiligheidsfactor bij een toenemend NOBOND (percentage van het voorspankanaal dat niet is gevuld) afneemt van $\gamma = 3,6$ tot $\gamma = 2,2$.

Eenzelfde daling wordt, zij het in sterkere mate, ook teruggevonden bij de modellering van corrosie in het eindig elementen-model; de veiligheidsfactor varieert nu tussen $\gamma = 3,6$ en $\gamma = 1,3$. De combinatie van zowel onvolledige injectie met corrosie doet de reikwijdte nog verder vergroten waardoor de veiligheidsfactor varieert tussen $\gamma = 3,6$ en $\gamma = 0,5$.

- Bestudering van deze waarden leert dat over het algemeen de veiligheidsfactor ruim boven het vereiste VBC-bezwijkniveau van $\gamma = 1,5$ blijft en pas bij extreme situaties deze grens overschrijdt. Men mag dan ook concluderen dat voor dit kunstwerk de effecten van corrosie en onvolledige injectie, voor zover deze betrekking hebben op het bezwijkstadium, wel leiden tot een verlaging van de veiligheidsfactor, doch niet de veiligheid van het kunstwerk in gevaar brengen.

5.3. Forschungsbericht T 2660: Schadensablauf bei Korrosion der Spannbewehrung Deutsches Institut für Bautechnik

In dit rapport wordt een verhandeling gegeven over de breukveiligheid van geheel of gedeeltelijk voorgespannen constructies waarin een deel van de voorspanning uitvalt.

Onderscheid wordt gemaakt in het wegvallen van een deel van de kabels en het wegvallen van een deel van de voorspankracht door corrosie.

Geconcludeerd wordt dat het wegvallen van een deel van de kabels een gevaarlijker situatie oplevert dan het wegvallen van een deel van de voorspankracht, zeker als het aantal kabels beperkt is.

Indien voldoende betonstaalwapening aanwezig is zal de constructie niet bezwijken zonder waarschuwing in de vorm van doorbuiging en scheurvorming. Berekening toont aan dat in de meeste gevallen de resterende breukveiligheid op het moment van scheurvorming nog groter is dan 1. Voorzichtigheid is evenwel geboden in de omgeving van eindsteunpunten waar weinig betonstaalwapening aanwezig is. Hier zou brosse breuk kunnen optreden omdat het scheurmoment groter is dan het moment onder volle belasting.

Bij statisch onbepaalde constructies is de situatie nog iets gunstiger door de mogelijkheid van herverdeling van momenten. Uiteraard moet voldoende betonstaalwapening aanwezig zijn om deze herverdeling mogelijk te maken.

In het rapport wordt aanbevolen in nieuw te bouwen, geheel of gedeeltelijk voorgespannen constructies een minimale wapening toe te passen. Deze wapening dient de volgende doelen:

- fijne verdeling van oppervlaktescheurtjes,
- scheurwijdtebeperking bij gedeeltelijke voorspanning,
- verhoging van het incasseringsvermogen van de constructie.

Met het laatste doel wordt bereikt dat bij een voorgespannen constructie het uitvallen van een deel van de voorspanning, onafhankelijk van de oorzaak, altijd kan worden waargenomen door het optreden van scheuren. Aangegeven wordt op welke wijze deze wapening het best kan worden toegepast.

5.4. Samenvatting

Uit de zeer globale vergelijking zoals in 5.1 aan is gegeven en het fundamentele onderzoek van F. Bockhoudt zoals beschreven in 5.2 komt naar voren dat constructies die zijn berekend volgens de RVB 1967 een grote reserve hebben op bezwijken. Onvolledige vulling van de spankanalen en/of corrosie behoeven dus niet te leiden tot een onveilige situatie.

Of deze conclusie ook kan worden getrokken voor constructies die in een latere periode zijn berekend volgens de VB 1974/1984 is niet met zekerheid te zeggen. Uit de globale aanpak volgens 5.1 zijn de marges in de constructie aanzienlijk kleiner. Uiteraard geldt ook daar dat de in praktijk bereikte veiligheidscoëfficiënt waarschijnlijk hoger zal zijn dan die welke volgens het voorschrift moet worden gehaald, toch is voorzichtigheid geboden. Zeker als bedacht wordt dat de bezwijkfase niet altijd het maatgevende criterium zal zijn.

Dit leidt ertoe dat ten aanzien van de draagkracht van constructies met gebreken de volgende conclusies kunnen worden geformuleerd:

- omdat met de huidige voorschriften VBC 1990 en VBB 1995, de materialen in voorgespannen beton beter worden benut dan met de oude voorschriften RVB 1962, RVB 1967 en VB 1974/1984 deel F, is er in constructies berekend volgens die oude voorschriften een behoorlijke reserve ten aanzien van bezwijken aanwezig,
- bij constructies berekend volgens de VB 1974/1984 deel F is de reserve waarschijnlijk aanzienlijk geringer dan bij constructies die berekend zijn met de RVB 1962 of RVB 1967. Ten opzichte van de VB 1990 en VBB 1995 blijft enige reserve aanwezig.

- de in praktijk bereikte veiligheidscoëfficiënt op het bezwijken van de constructie is in het algemeen hoger dan die welke volgens het voorschrift moet worden bereikt, hetgeen leidt tot een reservecapaciteit in de constructie.
- onvolledige vulling van de spankanalen leidt ertoe dat de veiligheidsfactor van de constructie terugloopt, evenwel niet in die mate dat (direct) een onveilige constructie ontstaat. In het geval de volledige aanhechting verloren zou gaan, gedraagt de constructie zich alsof deze is voorgespannen met elementen zonder aanhechting (VZA).
- corrosie van de kabels leidt tot een teruggang in de veiligheid op bezwijken. Indien de graad van corrosie beperkt is zal dit niet (direct) leiden tot een onveilige constructie.
- onvolledige vulling van spankanalen in combinatie met corrosie (mogelijk het gevolg van de onvolledige vulling van de kanalen) kan in een aantal gevallen waar de reserve in de constructie gering is leiden tot een onverantwoord teruglopen van de veiligheidsfactor.
- indien zich een schadegeval aandient is het noodzakelijk door middel van een berekening na te gaan welke reserves aanwezig zijn. Hierbij moet naast het bezwijken van de constructie ook aandacht worden besteed aan de aspecten dwarskrachtcapaciteit, scheurwijdte, doorbuiging en vermoeiing van het voorspanstaal.

6. Conclusies en aanbevelingen

6.1. De "Ban" in het Verenigd Koninkrijk

De kritische beoordeling van betonconstructies voorgespannen met nagerekt voorspanstaal na het instellen van de "Ban", leidde in het Verenigd Koninkrijk tot herziening van voorschriften en uitvoeringswijzen. Vergeleken met de in Nederland geldende regels moet vastgesteld worden, dat men betreffende beproeving en materiaalkeuze op het gebied van injecteren naar het oordeel van de studiegcommissie overdreven eisen is gaan stellen.

6.2. Schade aan Kunstwerken

Vastgesteld moet worden dat ook in Europa schade aan voorgespannen betonnen kunstwerken is opgetreden. Meestal in kunstwerken daterend uit de aanvangsperiode (1950-1960) van het voorspannen, waarbij manco's in ontwerp, uitvoering en materialen een rol speelden.

Ook in Nederland zijn aan kunstwerken gebreken vastgesteld, in de vorm van onvolledig gevulde spankanalen. Door een meestal goede afdichting van de brugdekken konden agressieve stoffen niet tot de spankanalen doordringen, waardoor schade voorkomen is.

6.3. Materialen

Beton is met zijn sterkte en dichtheid medebepalend voor de duurzaamheid van de constructie. De toepassing van Hoogovencement, eventueel samen met Portlandcement, zoals veel in kunstwerken in Nederlands is toegepast, verdient aanbeveling. De eventuele zoutpenetratie wordt hiermee zeer beperkt.

Omhuillingsbuizen van metaalstrip functioneren zeer goed indien de dichtheid en stijfheid, met de daarbij behorende materiaaldikte, gewaarborgd is. De koppelingen en speciaal de doorverbindingen in constructievoegen moeten goed uitgevoerd worden. Kunststof omhuillingsbuizen zijn daar toe te passen waar scheurvorming doorlopend tot over de spankanalen te verwachten is. In (gedeeltelijk) voorgespannen betonconstructies werken metaal- en kunststof buizen even goed. [FIP 1996]

Het voorkomen van corrosie van nagerekt voorspanstaal wordt bereikt door:

- goede vulling van de voorspankanalen met injectiespecie
- goede afdichting van de verankeringen
- goede dichtheid van de omhuillingsbuizen
- goede kwaliteit en dikte van de betondekking op de omhuillingsbuizen.

Maatregelen tegen corrosie voor het injecteren zijn het oliën van het voorspanstaal en het drooghouden van de voorspankanalen.

De injectiespecie dient zo te zijn samengesteld dat bij een goede verwerking, in de vorm van mengen en verpompen, vrijwel geen bleeding optreedt. Wat vroeger niet altijd mogelijk was, kan met de huidige hulpstoffen wel bereikt worden. De juiste plaats van injectiepunten en de positionering van de ontluchtingen moeten bij het ontwerp reeds beoordeeld worden. Indien zich toch water kan verzamelen, dan kan water en lucht door napersen verwijderd worden door de drainerende werking van de strengen.

6.4. Ontwerp en uitvoering

In het ontwerp dient de plaatsing van de spanelement zodanig te zijn, dat voldoende ruimte aanwezig is voor het uitvoeren van de montage en het betonneren. De h.o.h. afstand van de spanelementen is hierbij bepalend. De constructiehoogte en de balkbreedte moeten hierop gedimensioneerd zijn. Beëindiging van spankabels boven in het dek is niet aan te bevelen. Indien dit toch nodig is, dan moet de sparing zeer efficiënt afgedicht worden. Concentraties van spankabels en contactkruisingen dient te worden voorkomen. Bij het ontwerpen moet worden gezorgd voor een zo vloeiend mogelijk kabelverloop (zo mogelijk in één vlak) hetgeen leidt tot minder wrijvingsverlies en minder kans op defecten bij het injecteren.

Een goede afdichting van voorgespannen betonnen kunstwerken is van groot belang. Door hydrofoberen en toepassen van de juiste kleeflagen en dichte asfalt slijtlagen is dit te bereiken [BSW 1993, RWS 1996]. Stort- en constructienaden dienen te worden afgeplakt. Op deze wijze wordt het indringen van zoutoplossingen voorkomen. In Nederland is hier altijd veel aandacht aan besteed [STUVO 1971].

6.5. Draagkracht bij gereduceerde voorspanning

De commissie onderzocht de resterende draagkracht van constructies met gebreken in de voorspanning. Zo leidt het onvolledig injecteren van voorspankanalen sec nauwelijks tot draagkrachtverlies. Ook blijkt dat met het ontwerpen volgens oudere voorschriften meer capaciteit ingebouwd is, t.o.v. de huidige ontwerpnormen.

6.6. Aanbevelingen

Het merendeel van de aanbevelingen van de STUVO-commissie liggen op het gebied van ontwerp en uitvoering en materiaalkeuze. De aanbevelingen gaan verder dan het strikt toepassen van de voorschriften. Het toepassen van het principe

"Keep it simple"

is misschien wel de belangrijkste aanbeveling van dit rapport. Houd het eenvoudig. Beperk daardoor de kans op fouten, ook al laten de voorschriften complexe oplossingen toe.

6.7. Conclusie

Er is geen enkele reden om voor Nederland beperkende maatregelen voor te stellen zoals in Engeland is gebeurd. De bestaande Nederlandse bruggen, voorgespannen met nagerekt voorspanstaal, zijn in het algemeen met voldoende zorg ontworpen en uitgevoerd. De huidige know-how is, mede dankzij de rol van de STUVO, zodanig ontwikkeld dat mits zorgvuldig ontworpen, gedetailleerd en uitgevoerd, en met de juiste materiaalkeuze, constructies van grote duurzaamheid kunnen worden verkregen.

7. Literatuur

- [Amerongen 1982]
Amerongen, H. van, "Trekproeven aan betonstaal met groutmortel in kunststof (PVC) omhullingsbuizen in beton", (Mats-onderzoek 17B), rapport TNO-IBBC nr. BI-82-47.
- [Beks 1993]
Beks, J.H., "Renovatie Nieuwe IJsselbrug Zwolle in de A28 - Katerveer II", Civiele techniek 1993 nr.3, pp.6-10.
- [Benz 1984]
Benz, G./, "Einpreßmörtel" Chemische Fabrik Grünau GmbH., Illertissen, 1984, p. 348
- [Betonstaal 1952, 1954 en 1955]
Keuringsvoorschriften voor hoogwaardig staal voor voorgespannen betonconstructies. Commissie betonstaal.
- [Betonstaal 1958] 0
Voorlopige keuringsvoorschriften voor hoogwaardig staal voor voorgespannen beton.
- [Betonstaal 1962]
Keuringsvoorschriften voorspanstaal 1962.
- [Binnekamp et.al. 1982]
Binnekamp, D.C.;Bruggeling, A.S.G.;Zuithoff, A.J., Voorspanstaal - 25 jaar kwaliteitszorg", Betonvereniging, 41 p.
- [Blackler et.al. 1995]
Blackler, M.J., Cooke, R.C., "Besses O'Th" Barn Bridge: inspection and testing of a segmental post-tensioned concrete bridge", Proc.Instn Civ.Engres. Structures and Buildings, volume 110, 1995 p. 19-27
- [Bockhoudt 1995]
Bockhoudt, F., "Onvolledige injectie bij voorspankanalen", Hoofdrapport 61 p.,deelstudie I schademechanismen 75 p, deelstudie 2 handberekening, deelstudie 3 DIANA-berekening 63 p., Afstudeerstudie Faculteit de Civiele Techniek TU Delft, 1995.
- [Boone 1992]
Boone, P., "Omvangrijke renovatie IJsselbrug bij Zwolle bijna gereed", Cement 1992 nr.9, pp.53-57.
- [Bouquet 1995]
Bouquet, G.Chr., "Grouting of tendons in prestressed concrete - Rheology and flow properties of injection grouts", VNC, 's-Hertogenbosch, 1995, 96 p.
- [Bouquet et.al.1995]
Bouquet, G.Chr.;Hillebrandt, A., "Innovatieve injectiespecie geeft voorspantechiek nieuw elan", Cement nr.11, 1995, pp. 29-35.
- [Bouvy 1955]
Bouvy, J.J.B.J.J., Some problems concerning high-tensile steel for prestressed concrete from the users' point of view", Proceedings I^e FIP congres, Amsterdam 1955, pp. 164-177.
- [Brandt 1987]
Brandt, G.A., "Injecteren van voorspankanalen", Rijkswaterstaat - directie Bruggen, okt. 1987
- [Braun et.al.1987]
Braun, g.; Mallon, Th., "Einpreßhilfen in der Spannbetontechnologie", Bauingenieur 62/1987, pp. 11-14.
- [Bruggeling 1955]
Bruggeling, A.S.G., "Ter inleiding van de 'Voorlopige Keuringsvoorschriften voor hoogwaardig staal voor voorgespannen beton', Cement 1955 nr. 1-2, pp. 1-4

- [Bruggeling 1955a]
Bruggeling, A.S.G., "De Voorlopige Keuringsvoorschriften voor Hoogwaardig Staal van Voorgespannen Beton' herzien", Cement 1955 nr. 7, pp. 966-968.
- [Bruggeling 1955b]
Bruggeling, A.S.G., "Experience and problems concerning the manufacture and the use of steel for prestressing", Proceedings li^e FIP congres, Amsterdam 1955, pp. 212-230.
- [Bruggeling 1963]
Bruggeling, A.S.G., "Theorie en praktijk van het voorgespannen beton", N.V. Drukkerij 'T Koggeschip, Amsterdam 1963, band I, pp. 103-156.
- [BSW 1993]
BSW rapport 93-26, "Aanbeveling voor de keuring van hydrofobeermiddelen voor beton volgens de eisen van Bouwdienst Rijkswaterstaat", Bouwdienst RWS afd.Bouwspeurwerk, Utrecht, 1993, 24 p.
- [BV 1990]
"De geschiedenis van de Betonvereniging", Betonvereniging, Gouda, 1990, ...p
- [BV/KOMO 1982]
Voorspanstaal. 25 jaar kwaliteitszorg.
- [Carino & Sansalone 1992]
Carino, N.J.; Sansalone, M., "Detection of voids in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method", ACI Materials Journal Vol.89. no.3, 1992, pp. 296-303.
- [Cement 1951]
Tanks met voorgespannen wapening voor de rioolwaterzuiveringsinstallatie te Beverwijk.Op ten Noort. 1951 pag 162-164.
- [Cement 1955]
Ter inleiding van de voorlopige keuringsvoorschriften voor hoogwaardig staal voor voorgespannen beton. Bruggeling. Cement 1955 1-4, met losse bijlage 1-2.
- [Cement 1958]
Voorlopige keuringsvoorschriften voor hoogwaardig staal voor voorgespannen beton herzien. Bruggeling. Cement 1958 pag.966-968
- [Clark 1992]
Clark, L.A., "Performance in service of Post-Tensioned Bridges", Report prepared for the British Cement Association, 1992
- [Clark 1994]
Clark, G., "Grouting Specification and Experience", Proceedings seminar 'Durable Post-Tensioned Concrete Bridges', The Concrete Society / Concrete Bridge Development Group, London, 1994, pp.7-32.
- [Clark 1995]
Clark, G., "Post-tensioned prestressing cables in ducts", CONCRETE July/August 1995, pp.27-28.
- [Concrete Society 1996]
Technical report no. 47 "Durable Bonded Post-tensioned Concrete Bridges"
- [Cordes et.al. 1996]
Cordes, H., Abel, M., "Bedeutung der Hüllrohre für die Qualität der Vorspannung mit nachträglichen Verbud", Beton- und Stahlbetonbau 91 (1996), heft 5 pp 110-114.
- [CUR rapport 1],
CUR-rapport 1 Litt. studie over de opbouw van beton.1955
- [CUR rapport 2].
CUR-rapport 2, "De slip bij en de sterkte van eindverankeringen", 1955
- [CUR rapport 3],
CUR-rapport 3 "Onderzoek hoogwaardig staal voor voorgespannen beton" 1955.
- [CUR rapport 7]
CUR-rapport 7, "Versnelde verharding van beton door verwarming "1956

- [CUR rapport 11],
CUR-rapport 11 "Onderzoek van de voorspankracht bij de verankering" 1957
- [CUR rapport 14],
CUR-rapport 14 "Onderzoek van hoogwaardig staal voor voorgespannen beton" 1958
- [CUR rapport 25],
CUR-rapport 25 "Onderzoek betreffende het stomen van beton" 1960
- [CUR-rapport 27]
CUR rapport 27, "Onderzoek over injectieproblemen bij voorgespannen beton",
Gouda, 1963, 139 p.
- [CUR rapport 49]
CUR rapport 49, "Cases of damage due to corrosion of prestressing steel", Gouda,
1971, 96 p.
- [CUR-VB rapport 105]
CUR-VB rapport 105, "Corrosiebescherming bij voorspanning zonder aanhechting",
Betonvereniging, Zoetermeer, 1982, 110 pp.
- [CUR/IRO-MaTS rapport 84-4]
CUR/IRO-MaTS rapport 84-4, "Corrosiebescherming van eindverankering van
voorspanelementen in offshore constructies", Gouda, 1984, 106 p.
- [Darby 1994]
Darby, J., "Testing methods for grouting systems", Proceedings seminar 'Durable
Post-Tensioned Concrete Bridges', The Concrete Society / Concrete Bridge
Development Group, London, 1994, pp. 36-64
- [DAS 19xx]
Rapport onderzoek voorspanning KW Xid: 32B-108/BC01 Hoevelaken, DAS
Gelderland-Noord, 19xx, p.
- [DIN 4227]
DIN 4227, Teil 5 (1979), "Spannbeton; Einpressen von Zement in Spannkäule", DIN-
Taschenbuch 37, 8. Auflage, Beuth/Bauverlag Berlin, 1988, pp. 322-327.
- [DIN 18553]
DIN 18553 (1980), "Hüllrohre aus Stahlband für Spannglieder - Anforderungen,
Prüfungen", DIN-Taschenbuch 37, 8. Auflage, Beuth/Bauverlag Berlin, 1988, pp. 388-
391.
- [Djorai 1992]
Djoray, M.H., "Onderzoekprogramma voor uitbouwbruggen, gespannen met
voorspanstaven, n.a.v. problematiek bij de brug Katerveer II", Rapport PU-R1292-D2,
Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1992, ...p.
- [DoT 1992]
Department of Transport, "Standards for Post-Tensioned prestressed Bridges to be
Reviewed", Press Notice No260, Sept. 1992
- [Eggermont 1993]
Eggermont, P., "Renovatie van de brug over de IJssel nabij Zwolle in de A28",
Bouwdienst Rijkswaterstaat, verslag project, 1993, ...p.
- [Engelke 1986]
Engelke, P., "Zum Stand der Einpreßtechnik im Spannbetonbau", Beton- und
Stahlbetonbau 6/1986, pp. 147-150.
- [pvEN523]
pvEN523, "Steel strip sheaths for prestressing requirements tendons" april 1995
- [pvEN524]
pvEN524, "Steel strip sheaths for prestressing tendons" april 1995
- [FIP 1955-1]
FIP, "Erfahrung und Schwierigkeiten bei der Herstellung und Verwendung von
Spannbetonstählen". Generalbericht tweede FIP congres in Amsterdam 1955.
Bruggeling.

- [FIP 1955-2]
FIP, "Some problems concerning high tensile steel for prestressed concrete from the users' point of view". Paper tweede FIP congres in Amsterdam 1955. Bouvy
- [FIP 1972/1993]
FIP, "Acceptance of post-tensioning systems". 1972, 1974, 1981, 1993.
- [FIP 1978]
FIP, "Grouting of vertical ducts", FIP Guide to good practice, C&CA, Wexham Springs, 1978, 19 p.
- [FIP 1981]
FIP, "Recommendations for acceptance and application of post-tensioning systems", FIP Recommendations, Thomas Telford Ltd., London, 1981, 30 p.
- [FIP 1986a]
FIP, "Quality assurance and quality control for post-tensioned concrete structures", FIP Guide to Good Practice, Thomas Telford Ltd., London, 1986, 8 p.
- [FIP 1986b]
FIP, "Tensioning of tendons: force-elongation relationship", FIP State-of-the-art report, Thomas Telford Ltd., London, 1986, 18 p.
- [FIP 1986c]
FIP, "Inspection and maintenance of reinforced and prestressed concrete structures", FIP Guide to Good Practice, Thomas Telford Ltd., London, 1986, 7 p.
- [FIP 1986d]
FIP, "Corrosion protection of unbonded tendons", FIP Recommendations, Thomas Telford Ltd., London, 1986, 6 p.
- [FIP notes 1987-1]
FIP, "Deflected tensile test". FIP notes 1987 no 1.
- [FIP 1988]
The FIP stress corrosion test with ammonium thiocyanat. 1988.
- [FIP 1990]
FIP, "Grouting of tendons in prestressed concrete", FIP Guide to good practice, Thomas Telford Ltd., London, 1990, 10 p.
- [FIP 1991]
FIP, "Repair and strengthening of concrete structures", FIP Guide to Good practice, Thomas Telford Ltd., London, 1991, 37 p.
- [Ganz et.al.1993]
Ganz, H.R.;Jartoux, M.P.;Koster, J.;Morf, U.;Henriksen, K.R., "Experience with post-tensioned structures: a note from Commissions 2 and 4", FIP notes 1993/4, pp.4-5.
- [Grimme 1983]
Grimme, D., "Spannungsrißkorrosion in Spannbetonbauwerken", Stahl und Eisen, Vol.103 nr.20, 1983, pp.67-70.
- [Grimme et.al.1983]
Grimme, D.; Isecke, B.; Nürnberger, U.; Uhlig, G., "Spannungsrißkorrosion in Spannbetonbauwerken", Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 1983.
- [Gr.Spec 1993]
"Grouting Specifications", Concrete July/August 1993, pp.23-28.
- [Grübl 1987]
Grübl, P., "Rheologische eigenschaften von Einpreßmörtel", Fachkolloquim Zementleim, frischmörtel, Frischbeton', Heft 55, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, 1987, pp. 58-67.
- [Grübl et.al 1993]
Grübl, P.;Hofmann, U.;Hög, R., "Development of a rapid test-method to evaluate the susceptibility of prestressing steels to hydrogen-induced stress corrosion cracking", Darmstadt Concrete, Vol.8/1993, pp. 153-159.

- [Hampejs 1988]
Hampejs, G., "The FIP stress corrosion test with ammonium thiocyanate", FIP Special Report, 1988, ca. 49 p.
- [Hart 1983]
Hart, P.G., "Grouting post-tensioned tendons", Concrete, Nov.1983, pp. 32-34.
- [Hillemeier 1994]
Hillemeier, B., "Das Erkennen von Spanndrahtbrüchen an einbetonierten Spannstählen", Vorträge auf dem Deutschen Betontag 1993, Deutscher Beton-Verein E.V., Wiesbaden, 1994, pp. 251-264
- [Isecke 1983]
Isecke, B., "Failure analysis of the Berlin Congress Hall", Proceedings Corrosion of Reinforcement in Concrete', ed. A.P.Crane, SCI, 1983, ...p.
- [Isecke et.al.1995]
Isecke, B.;Menzel, K.;Mietz, J.; Nürnberger, U., "Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke durch Spannungsrisskorrosion", Beton- und Stahlbetonbau 5/1995, pp. 120-123.
- [Jefferis 1994]
Jefferis, S.A., "The grouting of prestressing ducts", In: P.L.J.Domone and S.A.Jefferis 'Structural grouts', Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1994, pp. 194-216.
- [Johns et.al.1995]
Johns, M.D.; Norman, G.F.; Smith, L.J., "A positive approach to grouting", Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 1995, 110, Nov., pp. 398-409.
- [Kollegger 1994]
Kollegger, J., "Untersuchungen an einem Kunststoffhüllrohr für Spannglieder mit nachträglichem Verbund", Bauingenieur, 1994, pp. 247-255.
- [König 1994]
König, G.;Tue, N.V.;Bauer, T.;Pommerening, D., "Schadenablauf bei Korrosion der Spannbewehrung", Forschungsbericht T 26660, Deutscher Institut für Bautechnik, Darmstadt, 1994, 178 p.
- [Lankard et.al.1993]
Lankard, D.;Thompson, N.;Sprinkel, M.;Virmani, Y., "Grouts for bonded post-tensioned concrete construction: protection prestressing steel from corrosion", ACI Materials Journal, Vol.90 nr.5, 1993, p.406-414.
- [Mallett 1994]
Mallett, G.P., "Repair of concrete bridges", Thomas Telford Services Ltd, London, 1994, 194 p.
- [Nebest 19xx]
Nebest rapport nr. 1051, "Verificatie-onderzoek RITM", Deventer, 19xx, ..p.
- [Nebest 1993]
Nebest rapport nr. b1236, "Inspectie voorspanelementen, Kunstwerk 4 Grubbenvorst", Verificatie Grubbenvorst 93-129, Bouwdienst Rijkswaterstaat regio Zuid, 1993, ...p.
- [Nelissen 1986]
Nelissen, M.G.P., "Herziening op het injecteren van spankanalen", Cement 1986 nr.11, pp. 62-63.
- [NEN 5950]
NEN 5950, Voorschriften Beton Technologie (VBT 1995)", NNI-Delft, 1995, 15 p.
- [NEN 6722]
NEN 6722, "Voorschriften Beton Uitvoering (VBU 1988)", NNI-Delft, 1989, 50 p.
- [NEN]
Voorschriften betonnen bruggen (VBB 1995)

- [NEN-EN 445]
Ontwerp prEN 445, "Grout for prestressing tendons - Test methods", Brussel 1990, 5 p.
- [NEN-EN 446]
Ontwerp prEN 446, "Grout for prestressing tendons - Grouting procedures", Brussel, 1990, 7 p.
- [NEN-EN 447]
Ontwerp prEN 447, "Grout for prestressing tendons - Requirements for common grout", Brussel, 1990, 5 p.
- [Noort 1951]
Noort, L.H. op ten, "Tanks met voorgespannen wapening voor de rioolwaterzuiveringsinrichting", Cement 1951 nr. 9-10, pp. 162-164.
- [Nürnberg 1992]
Nürnberg, U., "Special corrosion problems in post-tensioned structures", Otto Graf Journal, 1992 nr.3, pp.148-163.
- [Nürnberg 1994]
Nürnberg, U., "Stress corrosion behaviour of high strength prestressing steel under practical conditions", Otto Graf Journal, Vol.5, 1994, pp. 150-160.
- [OECD 1989]
OECD report "Durability of concrete road bridges", OECD, Parijs, 1989, 136 p.
- [Polder 1994]
Polder, R.B., "Inspectie voorspanning viaduct Nijkerk", TNO-rapport 94-Bt-R0825-02, TNO Bouw, Rijswijk, 1994, 71 p.
- [Polder 1994a]
Polder, R.B., "Studie naar de mogelijkheid van corrosie van voorspanwapening in onvolledig gevulde voorspankanalen", TNO-rapport 94-BT-R1337-03, TNO Bouw, Rijswijk, 1994, 35 p.
- [Polder et.al.1995]
Polder, R.B.;Beijen, J.M.J.M., "Corrosie van wapening en andere metalen in beton", SMD/ Waltman, 1995, 38 p.
- [Raiss 1993]
Raiss, M.E., "Durable Post-Tensioned Concrete Bridges", Concrete Magazine, May/June 1993, pp. 15-18.
- [Raiss 1994]
Raiss, M.E., "Design Details for durable grouted, bonded, Post-Tensioned concrete bridges", Proceedings seminar e'Durable Post-Tensioned Concrete Bridges', London, 1994, pp.73-106.
- [Rauen 1994]
Rauen, A., "Prüfverfahren zur Wasserstoffverspröding bei Betonzusatzmitteln", Forschungsbbericht T 2625, Nr. 1080, TU München - Lehrstuhl für Massivbau, München, 1994, p. 15
- [Rehm et.al. 1989]
Rehm, G.;Frey, R.;Funk, D., "Auswirkung von fehlstellen im Einpreßmörtel auf die Korrosion des Spannstahls", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAFStb), Volume 353, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1984, pp.57-79.
- [Reinhardt, H.W., 1985,
Beton als constructiemateriaal - eigenschappen en duurzaamheid, Delftse Universitaire Pers
- [Ruhrberg et.al.1982]
Ruhrberg, R.;Schumann, H., "Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken", Verkehrsblatt-Verlag Borgmann GmbH & Co. KG, Dortmund, 1982, 461 p.

- [RWS 1992]
Bouwdienst rapport PU-R1292-D2 (PD-OTO), Onderzoeksprogramma voor
uitbouwbruggen met voorspanstaven.
- [RWS 1996]
RWS handleiding, "Zeer open asfaltbeton op cementbetonnen kunstwerken",
Bouwdienst Rijkswaterstaat, Zoetermeer, 1996, 29 p.
- [Schupack 1982]
Schupack, F., "Protection post-tensioning tendons in concrete structures", Civil
Engineering ASCE, Vol.52 nr.12, 1982, p.43-45.
- [STUVO 1951]
STUVO jaarverslag 1951
- [STUVO 1951a]
Jäniche, "Über die Festigkeitseigenschaften und Beanspruchbarkeiten von
Spannbetonstählen", STUVO-Inleiding nr., 1951. ...p.
- [STUVO 1962]
Richtlijnen voor voorgespannen beton. R.V.B. 1962.
- [STUVO 1976]
Bergsma, F.;Boon, J.W.;Etienne, C.F.;Kreijger, P.C.;Sluijter, W.L., "Spanningscorrosie in
voorspanstaal", STUVO-inleiding, Amsterdam, 1976, 100 p.
- [STUVO 1971]
Broek, H.J.C. van den;Herbschleb, J.F.;Niemeijer, W., "Discussienota
Injectieproblemen", STUVO-rapport 2, 's-Hertogenbosch, 1971, 21 p.
- [STUVO 1985]
Etienne, C.F.;Boon, S.J.P.;Lange, J.I.de;Mendes de Leon, M.F., "De invloed van vlieg-
as op de (spannings)corrosie van voorspanstaal", Rapport van STUVO studiec-
el 107, 's-Hertogenbosch, 1985, 31 p.
- [STUVO 1985]
Brakel, J., Doorn, L. van, Hoos, H., Pol, F.J.M. van de "Schadegevallen aan betonnen
kunstwerken in Nederland", STUVO-rapport 101, p. 194, 1985
- [STUVO 1987]
Groenveld, J.;Brandt, G.A.;Jonker, J.H.;Mans, D.G., "Injecteren van voorspankanalen",
STUVO-rapport 78, 's-Hertogenbosch, 1987, 43 p.
- [STUVO rapport 84]
Boon, P.;Gründlechner, W.B.;Koster, J.P.;Loenen, J.H.van;Zielinski, A.J., "Praktische
richtlijnen voor het injecteren van spankanalen", STUVO rapport 84, 's-
Hertogenbosch, 1988, 42 p.
- [Tattersall et.al. 1983]
Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G., "The Rheology of fresh concrete", Pitman
London/Masachusetts, 1983, 356 p.
- [Warren 1987]
Warren, D., "Hydrogen effects on steel", Material performance, Vol.26 jan.1987,
pp.38-48.
- [Wegen 1994]
Wegen, G. van der, "Onderzoek aan hulpstof Addiment EH-NS voor injectiespecie",
Intron rapport nr. 94211, 1994, 10 p.
- [Woodward 1989]
Woodward, R.J., "Measurements of prestress and load tests to failure on segmental
concrete beams, TRRL Research Report 255, Crowthorne, 1989, 28 p.
- [Woodward & Wilson 1991]
Woodward, R.J.;Wilson, D.L.S., "Deformation of segmental post-tensioned precast
bridges as a result of corrosion of the tendons", Proc.Instn.Civ.Engrs., Part 1, 1991,
pp. 397-419.

Vrijwel alle genoemde literatuur is beschikbaar in het Beton Informatiecentrum van de Vereniging Nederlandse Cementindustrie.
Beto-Info-Fax: 073 - 6401284

Colofon

Opdrachtgever STUVO

Uitgave Holland Railconsult
Vakafdeling Civiele Techniek
Daalseplein 101
Postbus 2855
3500 GW Utrecht
Telefoon 030 - 235 59 15
Telefax 030 - 235 72 29

Auteurs prof.dr.ir.J.C. Walraven (mentor)
ir. J.C. Kuiper (voorzitter)
ir. J. Groenveld (secretaris)
ir. G.Chr. Bouquet
prof. dr. ir. A.S.G. Bruggeling
ir. R. Dayala (tot augustus 1995)
ir. Th. A. Feijen
dr. R.B. Polder
ing. J. de Vries
ir. D. Weertman

Projectnummer Y6

Bijlage I

(Bijlage bij "BAN")

THE DEPARTMENT
OF TRANSPORT

Press notice no: 260

Date: 25 september 1992

STANDARDS FOR POST-TENSIONED PRESTRESSED BRIDGES TO BE REVIEWED

The department of Transport is to review design and construction standards for post-tensioned prestressed concrete bridges. These are bridges where the steel reinforcing is tensioned after the concrete has hardened.

Evidence gathered over recent years has indicated that this type of structure can suffer from corrosion, mainly caused by the chlorides from de-icing salts.

Standards will be raised if necessary, to ensure that the full design life of this type of bridge is achieved.

About 600 of the Department's 9500 bridges have been constructed by this method. They are to be inspected to ensure that they continue to be fit to carry current traffic.

Until new standards are available, the Department will not commission any new bridges of the grout-duct post-tensioned type. Schemes involving bridges currently at an advanced stage of design or under construction will continue, although additional quality control will be adopted during construction.

Other bridge owners are being consulted about the Department's decision.

THE DEPARTMENT OF TRANSPORT
2 MARSHAM STREET LONDON SW1P 3EB
TELEPHONE 071 276 3000

Bijlage II

POST TENSIONED STRUCTURES IN DANGER?

H.R. Ganz

1. INTRODUCTION

With the press release of September 25, 1992, the UK Ministry of Transport has banned commissioning of post-tensioned bridge construction with grouted tendons until it has reviewed design and construction standards. This action was induced by problems found during inspection of prestressed concrete structures in the United Kingdom and their discussion in public. The problems are related to bridges suffering from corrosion, mainly caused by chlorides from de-icing salts.

This ban is severe action and most probably will have effects on other countries and authorities around the world. A first reaction to the ban, was the drafting of a new grouting specification, which has been prepared by the Concrete Bridge Development Group. The specification includes detailed provisions for grouting and will exclude the use of corrugated steel ducts. It is the intention of this article to qualify the UK experience and reaction to some extent, and in particular, to refer to the wide range of experience available today to avoid such problems. Indeed, as far as the authors understand, the problems referred to as a reason for the ban occurred in isolated structures which had used poor details at critical joints of the structures. Due to inadequate protection of these critical joints corrosion had occurred in the tendons and finally caused rupture of the tendons and collapse of these structures. Provided the readily available experience and knowledge are properly applied in the design, detailing, construction and monitoring of structures the problems which led to the UK ban will remain isolated cases.

2 WHAT ARE THE PROBLEMS?

The vast majority of post-tensioned concrete structures have performed extremely well and have proven to be exceptionally durable. However, as mentioned in the introduction, there have been problems with isolated structures due to inadequate corrosion protection of the post-tensioning tendons. These problems and deficiencies in corrosion protection originating from:

- Errors in design and particularly in detailing
- Errors in execution
- Use of unsuitable materials and outdated technologies
- Insufficient monitoring and inspection of structures

The above mentioned deficiencies are known and have been evaluated in detail.

Methods have been developed and experience gained so as to avoid these problems.

3 WHAT DO WE KNOW?

The following summarises the state of the art to avoid the above mentioned construction problems with particular reference to FIP Publications. These publications have been prepared by specialists from all over the world and may serve as a basis for

the preparation of specifications and standards for the design, detailing, execution, monitoring and inspection of post-tensioned structures.

3.1 Quality Assurance

- Qualifications of all parties and individuals involved is a key factor for durable structures. Quality assurance systems, prequalification of tenderers and execution of specialised work by specialist companies contribute significantly towards this goal. It is the owner's obligation to assure the above requirements during tender and execution of projects are met.
- FIP has published a report (2), on this subject. In a more general manner ISO Standard 9000 Series also deal with this.

3.2 Materials

- Use of approved systems and materials is essential for the durability of a structure. Owner and designer have to assure this with tight performance specifications.
- FIP has prepared Recommendations for the "Acceptance of Post-Tensioning Systems" (3), which set minimum requirements for the performance of anchorage systems.
- Report (4) gives details on the requirements for prestressing steels to avoid sensitivity to stress corrosion
- Strand sensitive to transverse pressure can be avoided by proper material selection using the "Deflected Tensile Test" (5).
- The FIP Report on "Corrosion Protection of Unbonded Tendons" (6), provides world-wide experience on successful corrosion protection methods.

3.3 Site works

- Execution of specialised works according to proven methods is a must for any project. Prequalification / Selection of qualified companies and on-site supervision of all relevant work will assure good workmanship.
- The FIP Report "Tensioning of Tendons", (7), provides details to avoid errors during stressing tendons.
- The FIP Report "Grouting of Tendons", (8), provides details for grouting of tendons. Suitable materials and equipment are essential. Proven grouting techniques are presented including post-grouting, pressure grouting, and vacuum grouting. These techniques have proven themselves in the past even under extreme conditions. The report also provides an unbiased view of the use of steel and plastic ducts and would be helpful for the development of any future performance specification.

3.4 Inspection and Monitoring

- Inspection and monitoring of structures will help to detect potential problems at an early stage and hence, to avoid major repair and costs or even collapse.
- Provision for structural inspection of structures are provided in the FIP Report "Inspection and Maintenance" (9)
- The FIP Report "Repair and Strengthening" (10), provides solutions for rehabilitation of structures.

4 POST-TENSIONED STRUCTURES IN DANGER?

The authors answer this question with a very clear: No!

Problems such as the ones referred to in the UK ban will remain isolated cases.

Sufficient experience is available to build durable post-tensioned structures. However, the good experience and the related know-how must be disseminated to the relevant parties involved and must be applied. The documents referred to in this article provide a vast resource of information available to authorities and to the construction industry. The experts of the FIP Commissions would be happy to contribute or assist in resolving any particular question or in the future development of specifications and standards.

REFERENCES

1. FIP Guides to Good Practice, "Practical Construction", 1975
2. "Quality assurance and quality control for post-tensioned concrete structures", FIP Guide to good practice, 1986
3. FIP Recommendations for "Acceptance of Post-Tensioning Systems" 1993, (earlier issues: 1972, 1974 and 1981)
4. Hampejs, G. : The FIP Stress Corrosion Test with ammonium Thiocyanate, 1988
5. "Deflected Tensile Test": Draft Report of FIP Commission 2, Ad hoc committee "Multiaxial behaviour".
6. FIP Recommendations: "Corrosion Protection of Unbonded Tendons" 1986
7. "Tensioning of Tendons: force-elongation relationship", FIP State of the Art Report, 1986
8. "Grouting of Tendons in prestressed concrete". FIP Guide to good practice, 1990
9. "Inspection and Maintenance of reinforced and prestressed concrete structures" FIP Guide to good practice, 1986)
10. "Repair and Strengthening of concrete structures" , FIP Guide to good practice, 1991

Bijlage III

INJECTIESPECIE VOOR VOORSPANKABELS

MATERIAAL	EIGENSCHAP		NORM	EISEN	BEPROEVINGSMETHODE
Cement	n.v.t.	NL D E Eur.	NEN 6722, art.11.10.1a DIN 4227, deel 5 Gr.Spec., par. 2 Ontw.NEN-EN 447, art. 4.2	Portland- en Hoogovencement Portlandcement Z35F, Z45F en Z55F Portlandcement Class 42,5 N Portlandcement CEM I	NEN 3550 DIN 1164, deel 1 BS 12 ENV 197
Water	n.v.t.	NL D E Eur.	NEN 6722, art. 11.10.1b Din 4227, deel 5, art. 3.2 Gr.Spec., par. 2 Ontw.NEN-EN 447, art. 4.3	Gehalte chloriden max. 500 ml/l Cl ⁻ ≤ 600 mg.	NEN 5995, art. 3.1 en 3.4 BS 3148 EN 104.500
Hulpstoffen	n.v.t.	NL D E Eur.	NEN 6722, art. 11.10.1c DIN 4227, deel 5, art. 3.3 Gr. Spec., par.10 Ontw.NEN-EN 447, art. 4.4	Cl ⁻ < 0,1 % (m/m) Verbetering eigenschappen grout Toegelaten hoeveelheid ≤ 5 % (m/m)	BS 5750, deel 1-3 prEN 934-4
Vulstoffen	n.v.t.	NL D E Eur.	NEN 6722 art.11.10.1c(toel.) DIN 4227, deel 5 art. 3.4 en 3.5 — —	Fijn zand of fijngemalen kwarts tot 25 %(m/m) toegestaan geen geen	DIN 4226, deel 1

MATERIAAL	EIGENSCHAP		NORM	EISEN	BEPROEVINGSMETHODE
Injectiespecie	Consistentie	NL	NEN 6722, art. 11.10.2a		Controle consistentie met vloeiconus Ø 12,7 mm
		D	DIN 4227,deel 5, art. 2.2	Direct na mengen ≥ 30 s Na 30 min. ≤ 80 s	Dompelapparaat conform DIN 4227, deel 5, art. 8.1
		E	Gr. Spec., par. 8.1	Direct na mengen ≤ 25 s/50 s *) Na 30 min. of na einde injectiewerk ≤ 25 s/50 s Bij uitloop kanaal ≥ 10 s	Vloeiconus conform Ont.NEN-EN 445 (Gr.Spec.par.9.2))50 s bij colloïdaal menging
		Eur.	Ontw.NEN-EN 447, art. 5.2	Direct na mengen ≥ 30 s ≤ 25 s Na 30 min. of na einde injectiewerk.. ≤ 80 s ≤ 25 s Bij uitloop kanaal. ≥ 30 s ≥ 10 s	Dompelapparaat conform DIN 4227 Vloeiconus conform Ont.NEN-EN 445 Dompelapparaat conform DIN 4227 Vloeiconus.conform Ont.NEN-EN 445 Dompelapparaat conform DIN 4227 Vloeiconus.conform Ont.NEN-EN 445
Injectiespecie	Waterafschei- ding	NL	NEN 6722 art. 11.10.2b	Direct na mengen $\leq 4\%$ (v/v) Na 3 uur $\leq 2\%$ (v/v) Na 24 uur 0 %	Cilinder Ø 100 mm, hoog 100 mm conform NEN 6722, art. 11.10.2b
		D	Din 4227, deel 5, art. 2.3	Na 28 dagen 0%	
		E	Gr. spec. par. 8.2	Na 3 uur $\leq 2\%$ (v/v), gem. van 4 metingen $\leq 1\%$ Na 24 uur 0%	Cilinder Ø50 mm, hoog 200 mm
		Eur.	Ontw.NEN-EN 447, art. 5.3	Na 3 uur $< 2\%$ (v/v)	Cilinder Ø 25 mm, hoog 250 mm of cilinder Ø 50 mm, hoog 200 mm conform prEN 445
Injectiespecie	Volume verandering	NL	NEN 6722 art. 11.10.2d	Geen vol. toename na 36 uur verharding bij 2°C waarna in -20°C tot grout deze temp. heeft bereikt	ASTM C 827-87

MATERIAAL	EIGENSCHAP		NORM	EISEN	BEPROEVINGSMETHODE
		D	DIN 4227, deel 5, art. 2.3	Niet meer dan 2% van de oorspronkelijke hoogte van het grout	Bus Ø 100 mm, hoog 120 mm Hoogtemaat volgens DIN 4227, art. 8.2.2; Dubbelmeetbrug volgens DIN 4227, art. 8.2.3.
		E	Gr. Spec., par. 8.3	Vol.verandering -1% tot + 5% Bij grout met expansieve hulpstof geen vol. vermindering toegestaan	Cilinder Ø50 mm, hoog 200 mm, conform Gr.Spec., par. 9.4
		Eur.	Ontw.NEN-EN 447, art. 5.4	Vol. verandering. -1% tot + 7% Bij grout met expansie hulpstof geen vol. vermindering toegestaan	Cilinder Ø 50 mm. hoog 200 mm Bus Ø 100 mm, hoog 120 mm (DIN 4227, art. 8.2.2)
Injectiespecie	Sterkte	NL	NEN 6722, art. 11.10.2e	Na 7 d.: gem. 6 kubussen $\geq 20 \text{ N/mm}^2$ bij 20°C, 70% RV	Kubussen, riblengte 70 mm, conform NEN 6722, art. 11.10.2e
		D	DIN 4227, deel 5, art. 2.4 en 7.1	Na 28 d.: gem.3 cilinders $\geq 30 \text{ N/mm}^2$, elke proefserie $\geq 27 \text{ N/mm}^2$. Bij besparing na 7d min 90% van 28d sterkte	Cilinder Ø 100 m, hoog 80 mm
		E	Gr. spec. par. 8.4	Na 7 d: $> 27 \text{ N/mm}^2$	Kubussen, riblengte 100 mm, conform BS 1881
		Eur.	Ontw.NEN-EN 447, art. 5.5	Na 7d $\geq 27 \text{ N/mm}^2$ Na 28d $\geq 30 \text{ N/mm}^2$	Prisma 40 x 40 x 160 mm, conform Ontw.NEN-EN 445, art.3.6 Cilinder Ø 100 mm, hoog 80 mm, conform Ontw.NEN-EN 445, art.3.7

[Ontw.NEN-EN 445]

- Ontw.NEN-EN 445, "Injectiemortel voor voorspankabels - Beproevingsmethoden, NNI-Delft, 1991, 11 p.

[Ontw.NEN-EN 446]

- Ontw.NEN-EN 446, "Injectiemortel voor voorspankabels - Werkwijzen voor het injecteren", NNI-Delft, 1991, 7 p.

[Ontw.NEN-EN 447]

- Ontw.NEN-EN 447, "Injectiemortel voor voorspankanalen - Eisen voor standaard injectiemortel", NNI-Delft, 1991, 5 p.

Bijlage IV

Tabel 1 Samenstelling van ENCI Portlandcementen
CEM I 32,5R, 42,5R en 52,5R

Mineralogische samenstelling Portlandcement-klinker:		
tricalciumsilicaat	C ₃ S	63% (m/m)
dicalciumsilicaat	C ₂ S	13% (m/m)
tricalciumaluminaat	C ₃ A	8% (m/m)
tetracalciumaluminaat-ferriet	C ₄ AF	9% (m/m)
Chemische samenstelling cement:	CaO	64% (m/m)
	SiO ₂	21% (m/m)
	Al ₂ O ₃	5% (m/m)
	Fe ₂ O ₃	3% (m/m)
	MgO	2% (m/m)
	SO ₃	3.0% (m/m)
	Cl ⁻	0.02% (m/m)
gloeiverlies		ca. 1-3% (m/m)
onoplosbaar		ca. 1-2% (m/m)
Na ₂ O-equivalent		0,6% (m/m)

Bijlage V Korrelverdeling van ENCI portlandcement

De korrelverdeling van cement is een belangrijke eigenschap voor wat betreft de consistentie van het cement/water mengsel (cementlijm).

Uit onderzoek is gebleken dat de parameters uit de RRSB-analyse - de equivalente korreldiameter d' en de helling van de zeefkromme $n = \tan \alpha$ - in belangrijke mate de consistentie van cementlijm bepalen [Rendchen 1985].

Bij de RRSB-methode is d' de diameter van de cementkorrel waarbij de cumulatieve zeefrest gelijk is aan 36,8% (m/m).

Tabel 2 Korrelverdeling van ENCI portlandcement
CEM I 32,5R, CEM I 42,5R en CEM I 52,5R

	CEM I 32,5	CEM I 42,5	CEM I 52,5
Cumulatieve korrelverdeling			
> fr. 2 μm	89,6%	83,8%	78,6%
> fr. 4 μm	82,5%	73,2%	66,6%
> fr. 8 μm	69,8%	56,6%	47,3%
> fr. 16 μm	54,0%	34,5%	23,9%
> fr. 32 μm	29,5%	8,0%	3,7%
> fr. 64 μm	5,9%	–	–
> fr. 128 μm	–	–	–
Korrelverdeling (RRSB-methode) ¹⁾			
- equivalente korreldiameter d'	23,9 μm	13,5 μm	10,0 μm
- vormfactor zeefkromme $n = \tan \alpha$	0,992	0,945	0,936
Gem. specifiek oppervlak (O_{spec})			
volgens blaine (NEN-EN 196-6)	270 m^2/kg	420 m^2/kg	550 m^2/kg

¹⁾ RRSB: Rosin-Rammler-Sperling-Bennett

De waterbehoefte van cement neemt toe als:

- de equivalente korreldiameter d' kleiner wordt;
- de korrelverdeling steiler wordt (n groter);
- het specifieke oppervlak groter wordt.

De verklaring hiervoor is dat bij een steilere korrelverdeling (toename n) de holle ruimte tussen de cementkorrels toeneemt. Bij het kleiner worden van d' neemt de waterbehoefte toe omdat het oppervlak van de cementkorrels toeneemt.

bewusst ist. Bis zu der Zeit, zu der bekannt wird, dass es gelungen ist, die Spannungskorrosion-Empfindlichkeit verschiedene Sorten vergüteten Drahtes auf normale Werte zurück zu führen, wird man bei der Verwendung solcher Drähte aus diesem Grunde die nötige Vorsicht beobachten müssen und diese Stahlsorten bestimmt nicht unter Umständen anwenden, die einen Spannungskorrosionsangriff in besonderem Masse begünstigen."

2. De beperking van de toepassing van gehard, ontlaten voorspanstaal.

2.1 Algemeen.

De STUVO was aangesloten bij de Betonvereniging, maar uiteraard geen vereniging die de bevoegdheid had om officiële regels te maken voor materialen, zoals voorspanstaal, en constructies in voorgespannen beton. Door de in ontwikkeling zijnde voorgespannen betonconstructies heeft de STUVO, waarvan in feite in die tijd alle Nederlandse deskundigen op het gebied van het voorgespannen beton lid waren, een dominante rol gespeeld in de regelgeving.

Uitgegeven werden - regelmatig herziene- Richtlijnen voor de toelaatbare spanningen en de veiligheidscoëfficiënt bij constructies in voorgespannen beton. (Noot: Toen al "veiligheidscoëfficiënt", toen alleen de N-methode bestond!).

Hoe ging de STUVO om met de problemen van "spanningscorrosie" ?

Uit de, zeer zorgvuldig door Bruggeling opgestelde tekst van het General Report op het FIP Congres van Amsterdam blijkt toch zeer duidelijk dat toepassing van dit voorspanstaal alleen verantwoord werd geacht als geen spanningscorrosie werd gevreesd. Dit stelling nemen vertegenwoordigde de mening van de STUVO, waarvan hij secretaris was.

2.2 De bouwplaats.

Duidelijk zal zijn dat alle ingenieurs in dienst van de overheid na "Rotterdam" de verantwoordelijkheid voor toepassing van Rheinhausen staal niet wilden nemen. Het draad met een ronde doorsnede is dan ook, zover dit is na te gaan, sedert 1951 niet of nauwelijks meer toegepast in voorspankabels. Het is wel toegepast in voorgespannen beton met voorgerekt staal. Zie hierna.

De Keuringsvoorschriften voor voorspanstaal van 1954 [Betonstaal 1954] maken ook wel duidelijk hoe e.e.a. werd aangepakt!

In art. 5.3. De heen- en weer buigproef worden waarden gegeven voor het minimum aantal vereiste heen- en weerbuigingen. Deze bedragen voor:

Getrokken draad	25
Getrokken en thermisch nabehandeld draad	15
Gewalst draad, ev. thermisch nabehandeld	8 !!!!

Ieder verantwoordelijke ingenieur bedenkt zich wel ernstig om zulk een staal te kopen waarvan het te garanderen heen- en weerbuiggetal zo laag is vergeleken met andere produkten!

In de STUVO is reeds in 1952 de mogelijkheid geopperd om het voorspanstaal te certificeren. Het duurde nog bijna vier jaar voordat dit idee werd gerealiseerd. Op 25

April 1956 komt de nieuwe spruit van de Commissie betonstaal voor het eerst bij elkaar. Op 22 juli 1958 wordt het eerste certificaat uitgereikt. Dit was mogelijk na de totstandkoming van een nieuwe versie van de keuringsvoorschriften voorspanstaal vastgesteld op 16 juni 1958 door de Commissie Betonstaal [Betonstaal 1958]. In juni 1959 wordt een certificaat uitgereikt aan Rheinhausen voor OVAAL geribd Sigmastaal. In dat certificaat komt een beperkingsclausule voor met betrekking tot de toepassing ervan. Dat het draad met een ronde doorsnede niet wordt gecertificeerd duidt er ook weer op dat dit staal al lange tijd niet meer in voorgespannen betonconstructies met nagerekt staal werd toegepast. Ook hier weer een duidelijk teken dat de problemen met dit soort voorspanstaal in 1951 sindsdien het niet (meer) toepassen van dit type voorspanstaal op de bouwplaats tot gevolg hebben gehad.

2.3 De prefabindustrie.

De hierboven geschetste gang van zaken gold niet in die mate voor de prefabindustrie. De volgende redenen zijn daarvoor aan te wijzen:

- De goede verankering aan het beton van het ovaal geribd Sigma draad, • De wijze van verwerken ervan in de fabriek met een goede gecontroleerde opslag ervan.
- Het recht door de elementen lopen van de voerspandraden.
- Het ontbreken van mechanische verankeringen in het element zelf.
- De vervangbaarheid van een draad als deze onverhoopt bij het aanspannen zou breken.
- De gunstige prijs van het produkt, vergeleken met de andere produkten.

Zo is het bekend dat met name Schokindustrie in Zwijndrecht nog tot het midden van de zeventiger jaren, als laatste prefabindustrie dit staal in heipalen van voorgespannen beton heeft verwerkt.

3. Latere ontwikkelingen.

Het was duidelijk dat een heen- en weerbuigproef niet direct de aangewezen proef is om de spanningscorrosie gevoeligheid van voorspan staal vast te stellen. daar is naarstig naar gezocht. Ir. Rengers, die nauw betrokken was bij de keuze en de kwaliteitscontrole van voorspanstaal voor waterleiding buizen voor het transport van schoon water naar Den Haag (duinen) en voor Amsterdam ontdekte rond 1956 het bestaan van een proef ontwikkeld door Wyszomirski en Fry. Hierbij wordt een draad voorspanstaal, op buiging belast, geplaatst in een oplossing van calciumnitraat en ammoniumnitraat in gedestilleerd water. Gemeten wordt de tijdsduur tot breuk. de proefbeschrijving werd opgenomen in de KVS 1962 artikel 15.5. [Betonstaal 1962].

In dit voorschrift werden geen eisen aan de minimum tijd tot de breuk gesteld. Het resultaat van deze proef werd opgenomen in het certificaat afgegeven door de, eerder genoemde, Certificaten commissie.

In dit certificaat konden beperkingen worden gesteld aan de toepassing van het produkt. Uit [Bruggeling 1963] pag 148, lid van deze Certificatencommissie kan de volgende interpretatie worden afgeleid.

- Breuk binnen 24 uren.
Toepassing van het staal slechts toegestaan bij de nodige voorzorg op het werk t.a.v. transport, opslag en verwerking.
- Breuk na 24 tot 48 uren.

Toepassing van het staal toegestaan, mits aandacht wordt besteed aan transport, opslag en verwerking.

- Breuk na 48 uren.

Geen beperking aan de toepassing gesteld.

In 1964 ging Rheinhausen over op een staal voor voorspandraden met een andere analyse [BV/KOMO 1982]. Dit staal had langere standtijden in de proef van Wyszomirski en Fry dan het oorspronkelijke Sigma staal.

Tot toepassing in Nederlandse bouwwerken van voorgespannen beton heeft dit niet meer geleid omdat er geen gecertificeerde verankeringen voor bestonden maar vooral omdat de voorspanstrengen aan hun opmars waren begonnen. In de KVS 1962 werden daarvoor reeds de keuringseisen vastgelegd.

Ook aan de proef van Wyszomirski en Fry kleefden bezwaren. Zie [Bruggeling 1963] pag. 149. Door de Fip commissie Voorspanstaal- en systemen is met grote inzet, op internationaal niveau, uiteindelijk een proefmethode omschreven waarmee de gevoeligheid van voorspanstaal voor spanningscorrosie en waterstofbroosheid kan worden bepaald.

Eerst in 1980 werd de proefbeschrijving in een FIP rapport officieel vastgelegd.

In het concept voor de Europese norm voor voorspanstaal, de prEN 10138-1 van juli 1995, is deze in Annex D beschreven.

4. Samenvatting.

Uit het hierboven gegeven historisch overzicht over de problemen rond spanningscorrosie in gehard, ontlaten voorspanstaal mag worden afgeleid dat het desbetreffende staal sedert 1951 nauwelijks meer op bouwwerken in voorspansystemen is toegepast. In het eerste certificaat, uitgereikt voor dit type voorspanstaal met een ovale doorsnede komt een beperkende clausule met betrekking tot de toepassing voor. Dit ovale draad kan echter niet in voorspankabels worden gebruikt o.a. omdat daarvoor geen verankeringen bestonden.

In fabrieksmatig vervaardigd voorgespannen beton - met voorgerekt staal - is het tot ver in de jaren zestig nog toegepast.

Bijlage VI

Volumieke massa

Voor de volumieke massa van de injectiespecie, onder verwaarlozing van de kleine hoeveelheid lucht, geldt:

$$\rho_g = (C + W)/(V_c + V_w) \quad (1)$$

waarin:

C = gewicht cement (kg);

W = gewicht water (kg);

$V_{c,w}$ = volume cement respectievelijk water (m^3)

Als we teller en noemer van formule 1 delen door C en met de water-cementfactor $w_{cf} = W/C$, $\rho_c = C/V_c$ en $\rho_w = W/V_w$ dan kan voor de relatie tussen de soortelijk massa van de injectiespecie en de water-cementfactor w_{cf} worden geschreven:

$$\rho_g = (1 + w_{cf})/(1/\rho_c + w_{cf}/\rho_w) \quad (2)$$

Bepaling benodigde hoeveelheden

Formule 1 kan met $V_g = V_c + V_w$ worden herschreven als:

$$V_g \cdot \rho_g = C + W \quad (3)$$

Delen we deze relatie door C dan kan worden geschreven:

$$C = V_g \cdot \rho_g / (1 + w_{cf}) \quad (4)$$

Als we rekening houden met het verlies van injectiespecie door de ontluhtingsbuisjes dan kan voor de totaal benodigde hoeveelheid cement worden geschreven:

$$C = V_g \cdot k_g \cdot [\rho_g / (1 + w_{cf})] \quad (5)$$

waarin:

k_g = factor ter compensatie van het verlies van injectiespecie uit de ontluhtingsbuisjes;

De door dr. V.H. Dodson (W.R. Grace & Co.) geïntroduceerde 'Omega Index Factor' (O.I.F.) geeft een kwalitatieve indicatie van de sterkte. Onder vergelijkbare omstandigheden is er een lineaire relatie tussen de sterkte en O.I.F.

Uit formule 5 volgt dat met $V_g = 1 m^3$ en $k_g = 1$ de benodigde hoeveelheid cement per m^3 injectiespecie (zie tabel 1).

Bijlage VII

GEHARD ONTLATEN VOORSPANSTAAL IN NEDERLAND.

A.S.G. Bruggeling

1. De confrontatie van de STUVO met het fenomeen spanningscorrosie.

In het voorjaar van 1951 werd de jonge STUVO geconfronteerd met het feit dat op drie bouwwerken het voorspanstaal spontaan brak. In alle gevallen bleek het te gaan om draden f 5, afkomstig van het Hüttewerk Rheinhausen.

Deze drie bouwwerken betroffen [FIP 1955-2]: vraag in bijlage opnemen?

- Beverwijk. Hier werden twee tanks gebouwd voor de zuivering van rioolwater. [Cement 1951].

- Rotterdam. Het viaduct, gebouwd door Gemeentewerken Rotterdam, in de Spaanse Polder nabij Overschie.

- Rotterdam. Kleine brug bij het Groothandelscentrum.

In alle gevallen was het staal reeds op de rollen, met een diameter van 0.9 m. gebroken. De staalspanning in de uiterste vezels werd berekend op ca 1200 N/mm².

Bouvy, de auteur van dit FIP paper, wijst daarin op de agressieve atmosfeer, of in de grond waarop de rollen waren opgeslagen. Spanningscorrosie werd door de STUVO als oorzaak genoemd.

In het STUVO jaarverslag over 1951 kan men hierover het volgende lezen:

"Op de dertiende ledenvergadering van de STUVO werd een zeer belangrijk punt naar voren gebracht nl. de opgetreden moeilijkheden met het Rheinhausen staal. De problemen betreffende het hoogwaardig staal hebben op verschillende vergaderingen een onderwerp van bespreking uitgemaakt. Een nader onderzoek in deze kwestie werd opgedragen aan de "Commissie Betonstaal", welke enige vergaderingen aan dit onderwerp besteedde. De conclusie die door deze commissie in overleg met Dr. Ing. Jäniche werd opgesteld zal nader aan de STUVO-leden bekend worden gemaakt." [STUVO 1951].

Opmerking. De Commissie Betonstaal was op 15 Januari 1951 door de Bond van Materialenkennis en de STUVO geïnstalleerd.

Sedert 3 Juni 1953 was deze commissie opgenomen in het fonds voor experimenteel onderzoek (de huidige CUR) als Onderzoekingscommissie B 4.

Zie ook [BV/KOMO 1982].

De bedoelde Inleiding - niet genummerd - is bij de STUVO inleidingen opgenomen. [STUVO inl.1951]. Hierin is geen woord te vinden over de gerezen problemen! Jäniche beweerde op die STUVO vergadering nog nooit iets over spanningscorrosie met betrekking tot "zijn" staal te hebben gehoord! Later bleek uit documenten die prof. Magnel ons ter hand stelde onjuist te zijn. In Duitsland was men al eerder geconfronteerd met het verschijnsel van spontaan breken van voorspanstaal.

Op het onderwerp "Spanningscorrosie" is door Bruggeling uitvoerig ingegaan in het door hem aan het FIP Congres te Amsterdam aangeboden "General Report" [FIP 1955-1].

Uit dit General Report moge het volgende worden geciteerd:

"Durch die Hersteller vergüteten Drahtes wird gegenwärtig die Schwierigkeit "Spannungskorrosion" eingehend studiert, da man sich in diesen kreisen der dem Hersteller zufallende Mitverantwortung für die Sicherheit der Konstruktionen durchaus

Tabel 1 Benodigde hoeveelheid cement voor 1 m³ injectiemortel
($\rho_c = 3150 \text{ kg/m}^3$)

Water-cementfactor w_{cf}	Vol. massa $\rho_g \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Hoeveelheid cement $C \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Omega Index Factor O.I.F. = C/w_{cf}
0,27	2161,8	1702,2	6304
0,30	2105,4	1619,5	5398
0,33	2054,2	1544,5	4680
0,36	2007,5	1476,1	4100
0,39	1964,8	1413,5	3624

Bijlage VIII

Minimale h.o.h. afstanden van omhullingsbuizen. Maten in mm.

Kabels bestaande uit:	Ø	Ø _k	A	B	C	D	E	E*
strengen 12 * 12.9	75	39	59	120	155	190	120	150
strengen 19 * 12.9	90	49	75	130	170	205	130	180
strengen 19 * 15.2	102	58	87	145	180	220	145	205
strengen 19 * 15.7	102	60	90	145	180	220	145	205
draden 40 Ø 7	75	44	66	120	155	190	120	150
draden 50 Ø 7	90	50	75	130	170	205	130	180

- | | |
|----------------|---|
| Ø | maximale uitwendige omhullingsbuisdiameter |
| Ø _k | equivalente nenmiddellijn voorspanstaal |
| A | dekking op de omhullingsbuis |
| B | h.o.h kabels |
| C | h.o.h kabels benodigd bij trilnaald ≤ Ø 63mm |
| D | h.o.h benodigd bij storkoker ≤ Ø 100mm |
| E, E* | h.o.h kabels in richting kromtedruk afhankelijk van de kromtestraal r en het type voorspanstaal |

- | | | |
|-----------------------|----------------|-------------------------|
| - 12 * 12.9 en 40 Ø 7 | 7 m ≤ r < 10 m | E* - ((r-7) * (E*-E))/3 |
| | r ≥ 10 m | E |

Indien $r < 7.0\text{m}$ moet E^* groter worden genomen en/of berekende pons- en/of splijtwapening worden toegepast.

- 12 * 12.9 en 50 Ø 7 9.5 m ≤ r < 16 m E* - ((r-9.5) * (E*-E))/6.5

Indien $r < 9.5$ m moet E^* groter worden genomen en/of berekende pons- en/of splijtwapening worden toegepast.

- | | | | |
|---|-------------------------|-----------------|---------------------------------|
| - | 19 * 15.29 en 19 * 15.7 | 14 m ≤ r < 24 m | $E^* - ((r-14) * (E^*-E)) / 10$ |
| - | | r ≥ 24 m | E |

Indien $r < 14.0$ m moet E^* groter worden genomen en/of berekende pons- en/of splijtwapening worden toegepast.

T.b.v. het trillen van het beton mogen niet meer dan twee kabels naast elkaar liggen met een h.o.h. afstand B, de volgende h.o.h. afstand moet minimal C of D zijn. Een stortkoker is nodig indien de stortheogte ≥ 1 m.

Bijlage IX

Samenstelling STUVO-commissie 146 'Duurzaamheid van betonnen bruggen, voorgespannen met nagerekt voorspanstaal'

Lid	Adres
Prof. dr. ir. J.C. Walraven (Mentor)	TU - Delft Faculteit der Civiele Techniek Postbus 5048 2600 GA Delft Tel. 015 - 2785452 / 2784578 Fax. 015 - 2787438
Ir. J.C. Kuiper (voorzitter)	Holland Railconsult Postbus 2855 3500 GW Utrecht Tel. 030 - 2355335 Fax. 030 - 2357229
Ir. J. Groenveld (secretaris)	VVN Postbus 320 2740 AH Waddinxveen Tel. 0182 - 392961 Fax. 0182 - 392961
Ir. G.Chr. Bouquet	VNC Postbus 3011 5203 DA 's-Hertogenbosch Tel. 073 - 6401365 fax. 073 - 6401284
Prof. dr. ir. A.S.G. Bruggeling	Molenweg 33 2631 AA Nootdorp Tel./fax. 015 - 3109494
Ir. Th.A. Feijen	Gemeentewerken Rotterdam Postbus 6633 3002 AP Rotterdam Tel. 010 - 4894275 Fax. 010 - 4896200
Dr. R.B. Polder	TNO Bouw Postbus 49 2600 AA Delft Tel. 015 - 2842087 Fax. 015 - 2843981
Ing. J. de Vries	Bouwdienst Rijkswaterstaat Postbus 20000 3502 LA Utrecht Tel. 030 - 2857704 Fax. 030 - 2888419
Ir. D.H. Weertman	Bouwdienst Rijkswaterstaat Postbus 59 2700 AB Zoetermeer Tel. 079 - 3292747 Fax. 079 - 3292301 STUVO-cel 146

