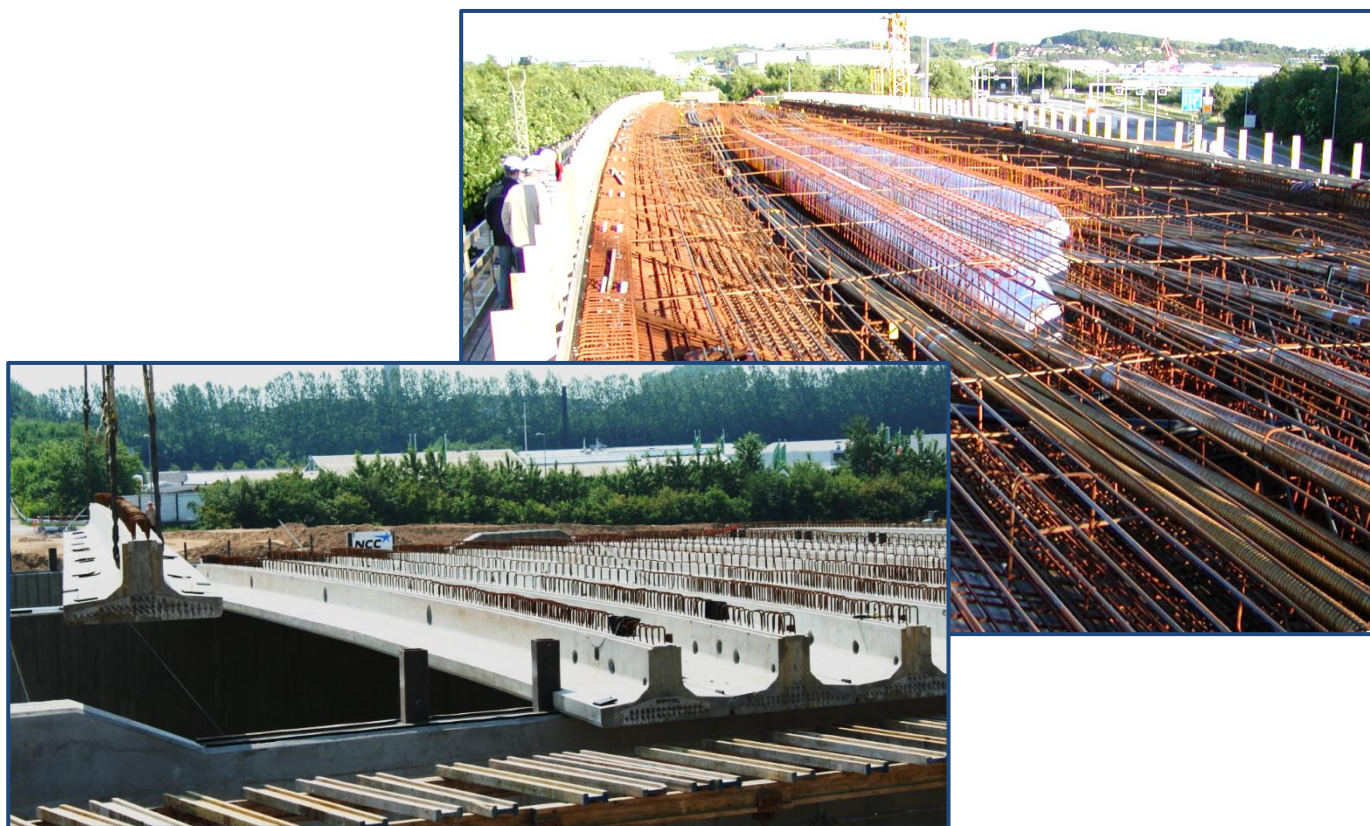


11.2 Spændt armering

Af Bjarne Landgrebe og Christian Munch-Petersen



Figur 1. Forspænding anvendes til broer, hvor forspændingen lægges i kabelrør og opspændes efter støbning (billedet til højre), eller i fx OT-bjælker, hvor opspændt spændarmering omstøbes med beton til bjælker (billedet til venstre). Figurens to billeder viser begge broer, men forspænding anvendes stadig oftere i byggeri til fx bjælker og dæk med lange spænd. Billedet med OT-bjælkerne er fra Spæncom.

Armering kaldes spændt armering, hvis armeringen er påført en træktøjning – og dermed en trækspænding – inden armeringen faststøbes/fastgøres til betonen.

Spændt armering og den teknologi, der knytter sig hertil, kaldes ofte for forspænding.

Forspænding kan etableres på to måder, nemlig med:

- førspændt armering
- efterspændt armering

Førspændt armering anvendes normalt kun på elementfabrikker til fx produktion af forspændte huldæk og forspændte bjælker som OT- og TT-bjælker. Armeringen spændes op før støbningen (heraf navnet førspændt) og betonen støbes uden om den førspændte armering.

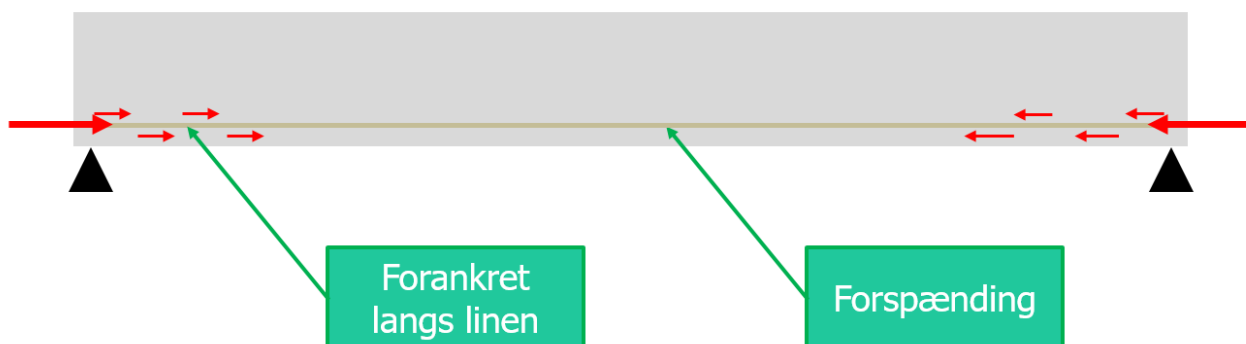
Efterspændt armering anvendes traditionelt på fx motorvejsbroer, men har efter år 2000 også vundet et vist indpas i store og komplicerede byggerier – fx til efterspænd-

te dæk med stor spændvidde. Forspændingen kan også anvendes i bygningskerner og/eller tværvægge og bidrager udover kraftoptagelse også til tværstabilitet og robusthed. Der indstøbes rør i betonen – både i elementer og in-situ beton – hvori forspændingsarmeringen placeres, og efter betonens hærdning (heraf navnet efterspændt) opspændes armeringen og fastgøres til betonen.

11.2.1 Teknologien ved forspænding

Armering skal optage træk i en betonkonstruktion – se også afsnit 11.1.1. Når en slap armeringsstang optager en trækraft, vil stangen få en tøjning, men denne tøjning er større end den omgivende betons brudtræktøjning, og betonen vil derfor revne.

Ved forspænding gives armeringen en træktøjning inden armering fastgøres til betonen, og armeringen vil efter fastgørelsen søge at trække sig sammen, hvilket imidlertid nu er forhindret af betonen. Den opspændte armering vil derfor skabe et tryk og en sammentrykning af betonen.



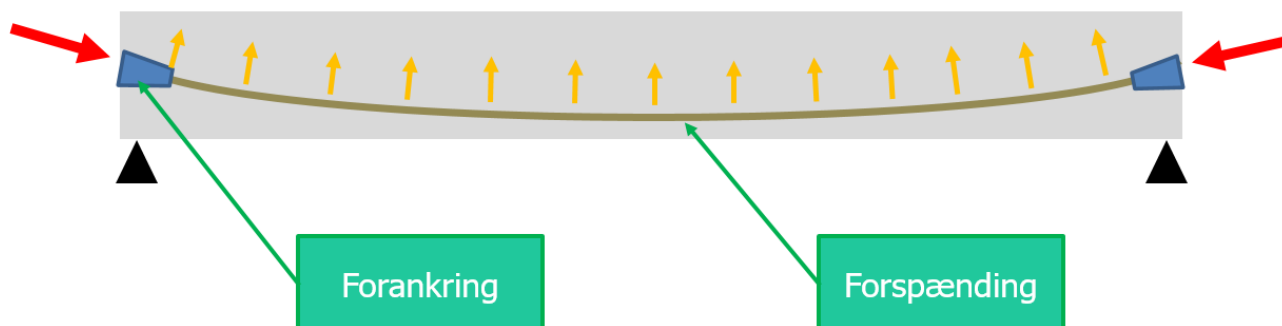
Figur 2. Forspændt armering i en betonbjælke eller et huldæk skaber dels et tryk i betonen, der modvirker revner, dels et negativt moment, der bærer egenvægten og evt. noget af nyttelasten.

Når betonens egenvægt eller en ydre belastning efterfølgende påvirker konstruktionen, vil armeringen (som al armering) optage trækket og forlænge armeringen, men da betonen har en sammentrykning fra forspændingen vil der ikke opstå revner før sammentrykningen i betonen er ophævet og brudtræktøjningen i betonen er overskredet.

I praksis forspænder man normalt i en sådan grad, at konstruktionens egenvægt tillagt en del af den forventede nyttelast ikke giver revner. Hvor fx en simpelt understøttet, almindeligt armeret betonbjælke således må forventes af få revner på undersiden fra egenvægten alene, kan den tilsvarende bjælke med forspænding undgå revner for både egenvægt og i den normale brugssituation, hvilket muliggør større spænd, er en holdbarhedsfordel og er æstetisk tiltalende.

En forspændt betonbjælke er også mere stiv, fordi revnedannelse reducerer stivheden. Samtidig reduceres nedbøjningerne – dels på grund af den øgede stivhed, dels fordi forspændingen normalt er dimensioneret til at give bjælken en mindre opbøjning fra egenvægten alene.

Samlet giver forspænding mulighed for større spændvidder med samme konstruktionshøjde. Huldæk med store spændvidder (over 6 meter) er således altid forspændte (førspændte).



Figur 3. Efterspændt armering påfører konstruktionen et tryk ved forankringerne, der skaber tryk i betonen og modvirker revner. I det viste tilfælde sidder forankringerne i tværsnittets midterlinje og påfører ikke bjælken noget moment (som i figur 2), men forspændingen forløber her krumt og skaber dermed opadrettede kræfter, der bærer egenvægten og evt. noget af nyttelasten.

For at kunne opnå disse fordele med forspænding, kræves et kompetent personale og et kvalificeret produktionsapparat. Omkostningerne ved at anvende forspænding er derfor højere end ved almindelig armering, men man kan med forspænding udføre konstruktioner, der slet ikke kan udføres med traditionel armering. Forspænding kan også give besparelser samlet set på armeringen også i mere almindelige konstruktioner. Dette skyldes, at for nogle konstruktionstyper vil prisen pr. kraftenhed i armeringen være lavere ved spændarmering eller ved slap armering.

Forspænding er derfor ikke en fordyrende teknologi, hvis man besidder kompetence og materiel hertil. Det må forventes, at ønsket om CO₂-reduktion i betonkonstruktioner vil fremme brugen af forspænding, fordi mængden af blød armering i mange konstruktioner kan reduceres betydeligt ved brug af forspænding – og reduktionen i mængden af blød armering er betydelig større end mængden af forspændingsarmering.

Anvendelse af forspænding har i nogle tilfælde givet anledning til store holdbarhedsproblemer – også i Danmark – og også kollaps af fx broer – dog ikke i Danmark. Holdbarhedsproblemerne kan især opstå ved en forkert korrosionsbeskyttelse af forspændingsarmeringen. Da forspændingsarmering er tyndere og stærkere end almindelig armering, vil fejl – fx med grubetæring til følge – i korrosionsbeskyttelsen derfor også kunne have alvorligere konsekvenser. Man bør derfor aldrig anvende forspænding uden at inddrage den nødvendige kompetence.

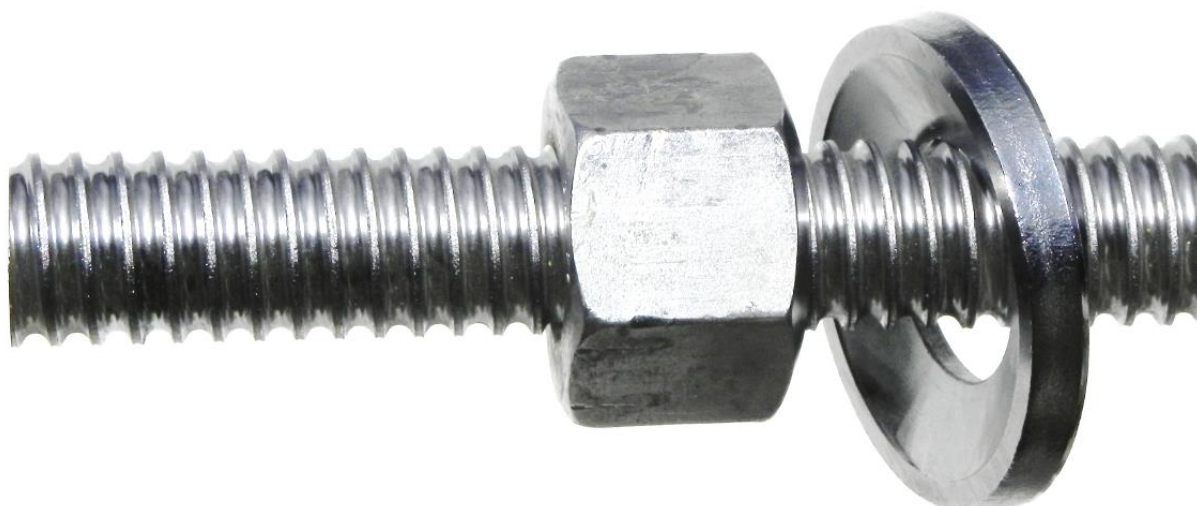
11.2.2 Komponenter til forspænding

Spændarmering er højstyrkestål, hvor den høje brudstyrke er opnået ved koldbearbejdning – se afsnit 11.1.9, punkt B.

Almindelig armering med lavere styrke kan i princippet også anvendes som forspænding, men da ståls E-modul er uafhængigt af styrken, vil der under opspænding kunne opnås størst træktøjninger i højstyrkestål. Disse store træktøjninger (forlængelser) er vigtige, da betonen efter kraftpåførelse fra forspændingen får en tryktøjning (elastisk tøjning plus krybning). Denne tryktøjning af betonen medfører en reduktion af træktøjningen i forspændingen, og dermed en reduktion af kraftpåvirkningen fra forspændingen. Jo større spændarmeringens træktøjning er, jo større del af forspændingskraften vil blive bevaret efter betonens tryktøjning.

Selve armeringsstålet vil også miste lidt af forspændingskraften med tiden - det kaldes relaxation, som defineres som reduktion i spænding ved konstant tøjning. Det er samme mekanisme som krybning, der dog er defineret som øget tøjning ved konstant spænding. Det er en fordel at anvende forspændingsstål med en lav relaxation.

Spændt armering leveres som enkelttråde (UK: wire), som liner (også kaldet kabler eller spundet tråd) (UK: strand) og som kraftige stænger (UK: bar).



Figur 4. 25 mm Macalloy-stang med rullet gevind, møtrik med afrundet flade og skive med tilsvarende afrundet anlægsflade. Hermed får stangen ikke et knæk i anlægget, hvis kabelrøret ikke er eksakt vinkelret på anlægsfladen.

For en oversigt over de forskellige størrelser og deres brudspænding henvises til FprEN 10138-1, Annex A. Forspændingsstål er omhandlet i standarderne FprEN 10138-1 til -4 som omhandler henholdsvis:

- -1 Generelle krav
- -2 Enkeltråd
- -3 Liner
- -4 Stænger

Af de mange typer heri anvendes i Danmark oftest 7-tråds liner med en brudspænding på 1.860 MPa i dimensionerne 9,3 mm, 12,5 mm og 15,7 mm.

Desuden anvendes ofte stænger i fx 25 mm, 32 mm, 40 mm eller 50 mm med en brudspænding på 1.030 eller 1.050 MPa. Disse stænger er glatte med et rullet gevind i enderne eller med rullet gevind over hele længden.

Der findes også stænger, der har et groft gevind over hele stangens længde (ofte kaldet "Dywidag"-stænger), hvor møtrikker og koblinger kan påskrues. Brudspænding er 1.050 MPa og dimensionerne er fx 26,5 mm, 32 mm og 40 mm.



Figur 5. 15 mm forspændings-stang med kæmpegevind. Gevindet er over hele stangens længde, der derfor let kan afskæres i ønsket længde. På grund af den store styrke og det meget grove gevind er møtrikker og koblinger (som på billedet) relativt lange. Sådanne stænger bruges også til sammenspænding af forme som spændestave – ofte kaldet klamsjern – se afsnit 9.2 Form.

11.2.2.1 Førspændt armering

Ved førspændt armering består forspændingssystemet udelukkende af:

- Spændarmering
- Opspændingsudstyr

Førspændt armering anvendes på elementfabrikker, hvor spændarmeringen opspændes mellem kraftige bukke indstøbt i produktionshallens gulv.

Spændarmeringen går på langs igennem formene til elementerne og enten støbes et antal enkeltforme opstillet på række, eller også – ved huldæk – støbes et meget langt element, der efter betonens hærkning opskæres i passende længder.

Spændarmeringen går derfor på langs af elementerne, og går ud igennem elementernes endeflader.

Spændarmeringen fastholdes i betonen alene ved friktion mellem beton og spændarmering, og det er derfor meget vigtigt, at opspændingen bibeholdes og at spændarmeringen ikke afskæres ved elementernes ender – eller at huldæk-elementerne ikke opskæres i længder – før betonens styrke er så stor, at betonen kan holde fast på spændarmeringen. I praksis tillades en vis mindre indtrækning af den afskårne spændarmering i snitfladerne.



Figur 6. På en elementfabrik støbes en række forspændte bjælker, hvor formene er opstillet på række og linerne er opspændt gennem alle bjælkerne. På billedet ses to bjælkeender. Efter betonen har opnået tilstrækkelig styrke afskæres linerne ved bjælkeendernes overflade.

Man kunne tro, at disse blotlagte armeringsender i elementerne ville give både forankringsproblemer og holdbarhedsproblemer (med korrosion), men praksis har vist, at det i hvert fald i normale husbygningsmiljøer går godt.



Figur 7. Huldæk produceres med forspænding i lange baner med en ekstruderingsmaskine, der udstøber betonen. Efter betonen har opnået fornøden styrke, opskæres de lange baner i de ønskede længder. Billedet er fra Spæncom.

Da forspændingsarmeringen er i direkte kontakt med betonen, er det vigtigt, at betonen er af en god kvalitet og særligt at chloridindholdet i betonen er lavt (fx mindre end 0,10 % af cementvægten). Den gode kvalitet sikres også af betonproducentens ønske om en hurtig opskæring, hvilket svarer til en hurtig styrkeudvikling og typisk en høj styrke.

11.2.2.2 Efterspændt armering

Ved efterspændt armering består forspændingssystemet af:

- Spændarmering
- Kabelrør
- Forankringer
- Opspændingsudstyr
- Korrosionsbeskyttelse (injicering eller fedt)

Kabelrørene – det kaldes de, både til tråde, liner og stænger – kan udføres af plast, men oftest kræves stålør fremstillet som korrugerede og ret fleksible rør.



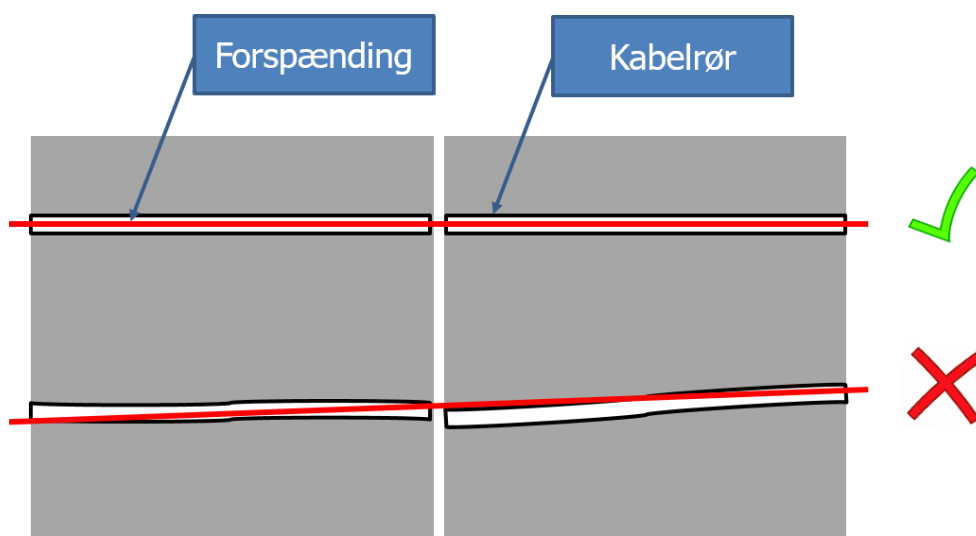
Figur 8. Kabelrørene er ilagt på en bro, der skal efterspændes.

Kabelrørene indstøbes i konstruktionen eller de konstruktionsdele, der skal efterspændes. Det er afgørende for en korrekt kraftpåførsel, at kabelrørene er placeret præcist og med den foreskrevne længdegeometri. Tolerancekrav af størrelsen 10 mm er almindelige, selv i større konstruktioner.



Figur 9. Prinsesse Mary's bro syd fra Frederikssund er bygget med elementer i fuldt brotværnsnit, sammenlimet og sammenspændt med spændarmering. I hvert element er indstøbt kabelrør, som linerne kan placeres i.

Normalt ilægges (indskubbes) forspændingen efter støbningen, hvorfor fejl i rørenes geometri kan være kritisk. Det er fx ikke muligt at indskubbe en stiv 32 mm forspændingsstang i et Ø60 mm kabelrør, der bugter sig for meget. Er kabelrøret under støbningen blevet klemt fladt eller på grund af utætheder fyldt med fx indtrængende mørtel fra betonen, kan det være nødvendigt at omgøre konstruktionsdelen. Der bør derfor benyttes rør med stor stivhed og tæthed – fx blikrør i Klasse 2 efter DS/EN 523.



Figur 10. To elementer (fx som på figur 1) skal sammenspændes med spændarmering indlagt i kabelrør. Det er afgørende at kabelrørene har den foreskrevne geometri, som vist øverst på figuren, og at samlingen mellem rørene er udført korrekt.

Når spændarmeringen er indskubbet/placeret, forsynes enderne af spændarmeringen med forankringer. Herefter monteres donkrafte, der, når betonens styrke er tilstrækkelig, kan opspænde forspændingen. Der skal herunder holdes styr på både spænding (måles ved hjælp af måling af olietrykket i donkraften) og tøjning (måles som forspændingens forlængelse = længde af spændarmering udtrukket af konstruktionen). Da donkraften således også fungerer som måleinstrument (på kraftmåling), skal donkraften været kalibreret.

I nogle tilfælde opspændes en spændarmering kun fra den ene ende – fx hvis forspændingen er stort set retlinet. Er forspændingen fx en line i en flerfagsbro, og forspændingen føres fra bjælkeoversider (ved understøtninger) til bjælkeundersider (i bjælkemidte), er det nødvendigt at spænde fra begge ender, da friktionen langs kablets bugtninger ellers vil reducere kabelkraften for meget.

Hvis der kun spændes fra den ene ende, kan der anvendes en såkaldt passiv forankring i den anden ende af kablet. Det vil sige, at kabelenden faststøbes i betonen.



Figur 11. På Øresundsbroen blev dækket tværforspændt med et system af 4 liner i flade kabelrør. Nederst i billedet ses en passiv forankring, hvor linen splittes op og faststøbes i betonen – der opspændes fra venstre side. Linerne i kabelrøret øverst i billedet spændes fra højre side. Bemærk plastrøret til mørtel-injicering til venstre på det nederste kabelrør.

Efter opspænding forankres spændarmeringen (som regel af den donkraft, der foretager opspændingen). Forankringen sker med kiler ved anvendelse af liner og med møtrikker for forspændingsstænger.

Det er vigtigt at forstå, at en forspændingsstang forsynet med møtrikker i enderne, IKKE opspændes ved at dreje på møtrikkerne. Stangen opspændes med en donkraft, hvorefter møtrikken spændes til – ofte bare med hånden.

Hvor liner kan få et låsetab (en indadgående bevægelse på typisk omkring 6 mm) på grund af glidning i kilerne inden låsning, vil stænger på grund af møtrikkerne stort set ikke have noget låsetab. Stænger er derfor velegnede til meget korte længder af forspænding.

Forspændingen skal herefter korrosionsbeskyttes. Det sker traditionelt ved at injicere kabelrøret med en cementmørtel med lavt v/c-forhold, der ligesom beton beskytter mod korrosion. Mørtlen skal opfylde DS/EN 447.

Det er vigtigt, at kabelrøret fyldes fuldstændigt, og mørtlen gøres derfor ofte ekspanderende, ligesom mørtelen skal pumpes ind i en styret proces, startende i den ene ende af kabelrøret, således at der ikke indkapsles luftlommer i kabelrøret. På ældre broer i Danmark (fx fra 1970'erne) har mangelfuld injektion og efterfølgende lokal korrosion vist sig i flere tilfælde at reducere konstruktionens levetid betydeligt.

Injektionsmørtlen fastgør samtidigt spændarmeringen til konstruktionen, således at forspændingen under belastning ikke kan længdeforskydes i forhold til konstruktionen. Det kan have betydning for forspændingens virkning under revnedannelse og ved optagelse af brudbelastningen.



Figur 12. Liner klar til opspænding med den hydrauliske donkraft. De tredelte låse-kiler i æsken til venstre (op på det indsatte billede nederst til venstre) fastholder den enkelte line. Forankringerne er indstøbt i betonen til højre.

I nogen tilfælde anvendes også oliebaseret konsistensfedt som korrosionsbeskyttelse. Herved opnås ikke en fastgørelse af forspændingen til betonen, men til gengæld kan forspændingen senere genopspændes eller udstrækkes og udskiftes, hvis det måtte ønskes. Mulighed for senere opspænding kræver dog, at de udragende line-ender har tilstrækkelig længde til at donkraften kan gribe fat i dem. Er linerne for korte, kan de kun udskiftes.

Der eksisterer forspændingssystemer, hvor forspændingen leveres liggende i et plastrør fyldt med fedt og ofte også med påmonterede forankringer. Et sådant system kan umiddelbart indstøbes og senere opspændes uden en række af de ovenfor nævnte processer. Denne type forspænding kan også anvendes som ekstern forspænding, hvor forspændingen lægges UDEN på konstruktionen – fx ved forstærkning.

Ekstern forspænding indeholder særlige fordele og vanskeligheder, som det vil være for vidtgående at beskrive her.

11.2.3 Krav til forspænding

Krav til forspænding er typisk projektspecifikke. Der eksisterer dog en Vejregel for broer, der omhandler forspænding (efterspændt).

For førspændte betonelementer står kravene i de harmoniserede produktstandards og i den fælles standard for betonelementer DS/EN 13369 [7].

Et godt udgangspunkt til krav til projektering og udførelse af efterspændt armering er "Almindelig arbejdsbeskrivelse – Betonbro – Spændt armering – AAB" fra Vejdirektoratet. Dokumentet har status som Vejregel, som gælder for stort set alle broer i Danmark.

Der er heri krav til selve spændarmeringsstålet, som skal opfylde krav i henhold til Euronormen FprEN 10138 – der består af 4 dele: generelt, tråd, liner og stænger. Her angives en række tekniske specifikationer, som både skal opfyldes og dokumenteres. Kravene til spændstål gælder både for førspændt og efterspændt armering.

For selve spændsystemet skal der foreligge en ETA – European Technical Assessment. Dette er dokumentation for at systemet opfylder en række krav (tests), som er angivet i ETAG 013. Dokumentet angiver bl.a. krav til: center- og kantafstande for spændankre, ankerarmering, pladsbehov til donkraft samt angiver dimensioner for forskellige dele til spændsystemet. Mange af oplysningerne i ETA'en anvendes ofte af den projekterende ingeniør.

En del af spændsystemet er kabelrør, som der er specifikke krav til. Disse skal opfylde kravene i DS/EN 523, som angiver specifikationer og dokumentation (tests), der skal opfyldes. Vejdirektoratet i Danmark kræver bl.a., at kabelrørene skal være klasse 2, hvilket bl.a. betyder en øget godstykkelse i forhold til den blødere klasse 1. For begge klasser er der endvidere krav om vandtæthed, som skal dokumenteres. Vejreglen

kræver herudover, at kabelrørene ikke må være galvaniserede – af hensyn til risiko for brintskørhed.

Opspænding af linerne skal foretages med udstyr tilpasset det enkelte spændsystem og skal dokumenteres. Udstyret (donkraft, pumpe m.v.) skal være vedligeholdt og dokumenteret ved en kalibreringsattest, som ikke må være ældre end 6 måneder. Opspænding foretages på basis af spændlister, som specificerer opspændingskraft og forlængelse af spændarmeringen. Der er her egentlig tale om dobbelt kontrol – idet der er en defineret sammenhæng mellem de to størrelser, hvis kabelrørenes geometri - og friktionen heri - er som forventet. Derfor er det vigtigt, at der påføres konstruktionen den definerede kraft og samtidig opnås den ønskede forlængelse. Kraften måles med manometer, som kontrolleres før og efter opspændingen og forlængelsen måles med en egnet målestok.

For injicerede (bondede) liner er der endvidere specifikke krav til injektionsmørtlen, som skal opfylde kravene i normsættet DS/EN 445 (prøvningsmetoder), DS/EN 446 (udførelse) og DS/EN 447 (mørtlen). Der er bl.a. dokumentationskrav til egenskaber for mørtlen, forprøvning og styrke.

Vejreglen specificerer, at arbejdet med spændarmering udføres af personer med erfaring med spændarmeringsarbejde, og at dette skal kunne dokumenteres. I Norge arbejdes der efter nationale regler, som kræver dokumentation/bevis (kursus eller lignende) for kompetencer indenfor spændarmering. Eksempelvis anføres, at spændarmeringslederen er en teknisk ekspert fra spændarmeringsleverandøren. De Norske krav til personale refererer til CWA (CEN Workshop Agreement) 14646, der er et kompendium indeholdende anbefalinger/krav til udførelse af spændarmering.

11.2.4 Referencer

- [1] DSF/FprEN 10138-1, -2, -3 og -4, Standarder for forspændingsstål
- [2] DS/EN 523 Tynde blikrør til forspændte kabler
- [3] DS/EN 446 Injektionsmørtel til forspændingskabler
- [4] DS/INF 165 Armeringsstål til betonkonstruktioner (Denne vejledning kan hjælpe til at finde rundt i standarderne for både slap armering og forspænding)
- [5] Betonbro – Spændt armering – AAB, Vejregler.dk
- [6] CWA 14646 Krav til installation af opspændingssystemer til efterspænding af konstruktioner og forudsætninger for specialistvirksomheden og dennes personale
- [7] DS/EN 13369 Almindelige regler for præfabrikerede betonelementer.