

Efterspænding af en forspændt bro



Langelandsbroen

Langelandsbroen forstærkes i en treårig entreprise ved hjælp af et stort antal eksterne spændkabler inden i beton-brokassen. Arbejde, der ikke tidligere er udført i den størrelse og stil i Danmark.



AF IBENA MAAG
Vejdirektoratet
ibma@vd.dk



**AF ULRIK SLOTH
ANDERSEN**
COWI
usa@cowi.com

Øjebliksbillede

Entreprenøren knokler med at bore huller, ruhugge betonen og transportere materialer ind i Langelandsbroen for at etablere det, der er Danmarks første storstilede udgave af eftermonteret ekstern forspænding på en bro.

Forspændingen består i, at der i hver ende af hvert enkelt af de fem parallelle celler i et brofag etableres to forankringsblokke i beton, der via kraftig armering og dorne har rigtig godt fat i broens beton. Når betonen er hærdet, spændes et stålkabel ud mellem hvert sæt af ankerblokke, så kablet svæver langs broens betonavægge, udspændt med stor kraft.

Ekstern forspænding betyder, at der etableres en "elastik" uden for betonens tværsnit, der skal trykke betonen sammen og derved mindske nedbøjning og trækkræfter i broens underside. Det betyder, at betonen herefter kan bære mere end før.

Hvert af de 20 ens brofag består af fem parallelle celler, der hver har et tværsnit på cirka 1,4 meter x 1,4 meter, så man lettest kan færdes inde i broen siddende på en trehjulet elscooter.

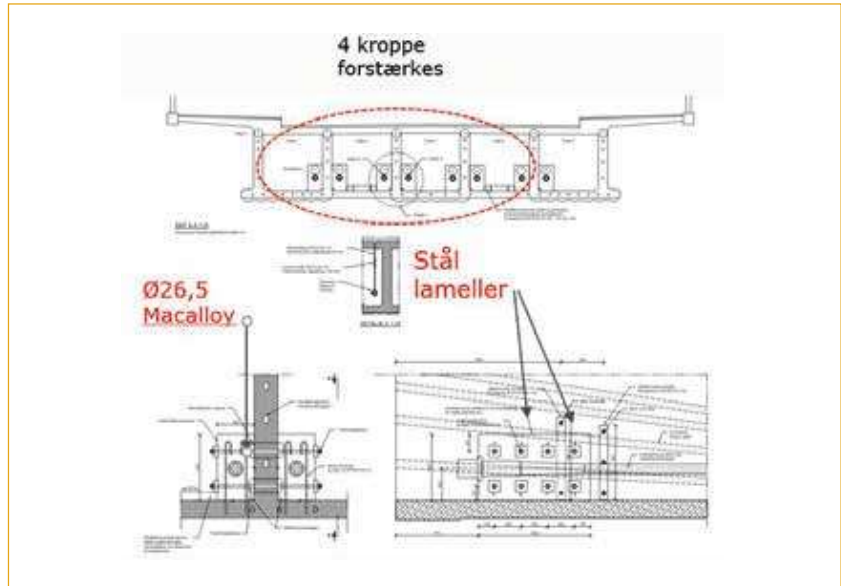
"Efterspænding af en forspændt bro" hentyder til, at betonen i undersiden var forspændt fra opførelsen, men at den nu bliver forspændt på ny med supplerende opspænding.

Forhistorie

Vejdirektoratet med entreprenør og rådgiver var tæt på at være færdig med et flerårigt projekt med betonreparationer og katodisk beskyttelse af store dele af betonen i brofagene. En dag havde entreprenøren hugget dårlig beton væk lokalt, og her viste sig en brudt stålstang (Ø32 mm). Ikke bare almindelig armering, men en af de mange tykke forspændte stænger af højstyrkestål i broens underside. Det gav anledning til stor bekymring, for hvor stor en del af



Stålløsning til venstre og beton til højre



Brottværsnit ved ankre

bæreevnen af det samlede betonfag var derved gået tabt, og kunne der være flere steder med samme skade?

COWI, der var rådgiver på betonarbejdet, gik i gang med nærmere undersøgelser af omfanget. Ved at nærstudere alle fotos af rustskadet armering ved de forgangne ophugninger og ved at screene armeringen i betonen bedst muligt med tilgængeligt udstyr. Der blev desuden la-

vet ophugningsforsøg og materialeforsøg med stålstængerne.

Sideløbende med undersøgelserne blev der lavet diverse beregninger af brofagene. Modelleret uden den fundne brudte stang og uden flere stænger i forskelligt antal for at vide, hvor bekymrede vi skulle være over situationen. Hvor meget og hvad skulle der til, for at man kunne føle sig sikker?

Undersøgelserne og beregningerne mundede efter få uger ud i en vurdering af, at broen har en nedsat, men acceptabel, bæreevne nu (med den midlertidigt indførte vægtbegrænsning for særtransporter), men der skulle gøres noget hurtigst muligt for at opnå den sædvanlige bæreevne på konstruktionerne. Løsningsforslaget fra COWI var at udføre en omfattende ekstern forspænding i alle fag. Denne løsning er ikke så kendt, og ingeniørerne fik travlt med at undersøge mulighederne og kombinere viden fra andre projekter.

Med broens 20 betonbjælkefag - ud over gennemsejlings-buefaget - og med beregningsforudsætningerne om otte nye forspændingssteder for hvert fag, var der meget stor volumen i opgaven og stor gentagelseeffekt, så det var vigtigt at få den rette detaljløsning introduceret fra starten.

Det blev i Vejdirektoratet besluttet hurtigst muligt at lave et pilotprojekt på forspænding af ét af de 20 fag - nemlig der hvor vi havde fundet skaden. Dette blev, fordi det hastede så meget, udført som et ekstraarbejde til betonreprisen, varetaget af Arkil. COWI detailprojekterede sideløbende med, at Arkil allerede gik i gang med forberedelserne. »



Brudt armeringsjern



Armering i anker

For at finde frem til den bedst mulige håndterbare løsning til de snævre forhold inde i broen, blev der arbejdet med forankringsblokke udført både med en beton- og en stålløsning. Der viste sig at være fordele og ulemper ved begge dele, så da pilotprojektet var færdigt i juni 2020, og det fulde arbejde skulle udbydes, gik vi videre med begge løsninger, så entreprenørerne selv kunne vælge. Ved licitationen bød tre ind med betonløsningen og to bød ind med stålløsningen. Det endte med, at betonløsningen var billigst (17 millioner kroner). Licitationen i september 2020 blev vundet af Aarsleff Rail A/S. Arbejdet pågår og forventes færdigt i forsommeren 2022.

Teknik

Forspændingskræfterne fra de langsgående stålkabler skal overføres gennem forankringsblokken til den 220 millimeter tykke cellevæg og også til den cirka 160 millimeter tykke cellebund. Til dette formål er der ved hver forankringsblok udført såkaldt tværforspænding, som etableres ved at bore stænger (otte styk pr. blok) gennem cellevæggene og forspænde disse. Det giver en effektiv overførsel af kræfterne til den eksisterende beton. Forankringsblokkene består af et meget kraftigt armeringsnet, så kraftigt at der knap er plads til betonen.

Selv om betonløsningen er ret massiv, er den fleksibel ved små uregelmæssigheder i broens geometri, og det er nemmere at fremføre materialer til denne løsning end til stålløsningen, hvor den cirka 220 kilo tunge forankringsblok i stål skal transporteres ind i ét stykke.

Før udførelse af forspænding i pilotprojektet var der i et avanceret modelleringsprogram beregnet, hvor meget brofaget ville "skyde ryg" ved forspænding af kablet, der er forankret cirka 450 millimeter over undersiden af broen. Det blev regnet til cirka 7 millimeter. Ved forspænding kunne man måle en forhøjelse på 5,8 millimeter. Det må siges at være en særdeles nøjagtig modellering af geometri og materialeparametre. I hovedprojektet vil der også blive holdt nøje øje med brofagernes "opførsel", når forspænding af de enkelte fag kommer til at skride frem.

Hvorfor - og kan det ske igen?

Den brudte forspændingsstang og de mange fundne grubetærings-skader skyldes kombinationen af flere forhold. De oprindelige forspændingsstænger Ø32 ligger i metalrør med kun lidt større diameter end stængerne. De blev efter opspænding injiceret, men nogle steder mangelfuldt, så der er luftlommer. Teorien er, at den primære årsag til de mange skader er, at både beton og injiceringsmørtel var lavet helt eller delvist ved brug af brakvand (fordi vandværket leverede støbevand fra en "dårlig boring"), hvorved der allerede fra starten er tilført store

mængder af klorider i miljøet omkring stængerne. Dertil kommer, at der i perioder har været utætte dilatationsfuger, afløb med mere, så der er kommet yderligere klorider fra saltning af broen og fra havmiljøet.

Klorider i aerobt (med ilt) og fugtigt miljø forårsager overfladekorrosion. Klo-



Langelandsbroen er den eneste bro i Danmark, hvor vi ved, der har været systematisk brug af brakvand i betonen ...

rider i anaerobt (uden ilt) miljø - i luftlommerne i trækrørene - kan forårsage grubetærning, der ofte giver stor reduktion af tværsnittet og dermed øget risiko for overbelastede forspændingsstænger.

Langelandsbroen er den eneste bro i Danmark, hvor vi ved, der har været systematisk brug af brakvand i betonen, så derfor er vi i Vejdirektoratet ikke umiddelbart bekymret for, om noget lignende skulle ske i den øvrige bromasse. Vi følger løbende op på, om der på andre broer kan være forhold af samme type.

Senest er der i efteråret 2020 lavet sær eftersyn af kabler på den nærliggende bro - Siø sundbroen. Denne bro er opført tre år før Langelandsbroen og efter næsten samme princip og med samme type forspændingskabler i overbygningen. Dette sær eftersyn viste begyndende korrosion på den forspændte armering, men ikke i samme alvorlige grad som på Langelandsbroen. Det forventes derfor, at man på Siø sundbroen kan udføre reparationer på betonen, som beskytter kablerne - og derved undgå en forstærkning af samme type som på Langelandsbroen. Denne proaktive tilgang medfører med stor sandsynlighed, at præventive tiltag og reparationer kan stoppe nedbrydningen, og en langt bekosteligere forstærkning kan undgås. ●

FAKTA

- Samlet antal forspændingskabler: 160 styk. I alt cirka 5.100 meter.
- Gennemsnitlig forspændingskraft i hvert kabel: 1.170kN
- Hver ankerblok består af 60 kilo armering og 530 kilo beton
- Forspænding øges, så der ville kunne undværes cirka halvdelen af nuværende spændte armering