

VERANKERINGSSYSTEMEN BIJ VOORGESPANNEN BETON

In dit artikel wordt eerst een kort overzicht gegeven van de belangrijkste verankeringssystemen. Van de factoren, die de bruikbaarheid van een systeem bepalen, is hier het gedrag van de wiggende constructies tijdens het verankeren en speciaal de slip, die daarbij optreedt, in beschouwing genomen, waarbij een beschrijving wordt gegeven van een door de Werkgroep gebruikte beproevingsinstallatie. Tenslotte wordt de invloed van de slip op de voorspanning in de draden (spanningsverlies) nagegaan.

De grote vlucht, die de toepassing van voorgespannen beton de laatste jaren heeft genomen, heeft ertoe geleid dat het aantal verankeringssystemen, dat gebruikt wordt bij voorgespannen betonconstructies met nagerekt staal, eveneens aanzienlijk uitgebreid is. Met enig voorbehoud kunnen deze systemen verdeeld worden in drie groepen, nl.

1. de systemen, waarbij de verankering plaatsvindt door middel van een wigconstructie;
2. de systemen, waarbij de draad wordt opgesloten door een moerconstructie;
3. de systemen, waarbij de draad verankerd wordt door opstuiking; in feite dus een klinknagelconstructie.

Ten einde de werkwijze bij elk dezer groepen enigszins te verduidelijken, zullen hierna de bekendste systemen van elke groep nader toegelicht worden.

Hier te lande treft men hoofdzakelijk de in de eerste groep genoemde verankeringsconstructies aan, waarvan de systemen Freyssinet en Magnel de meest gangbare zijn.

Bij het systeem Freyssinet geschiedt de verankering door de draden door middel van een kegelvormige betonnen prop vast te wigen in een eveneens betonnen conus, welke zwaar gewapend is en waarin een conisch gat is uitge-

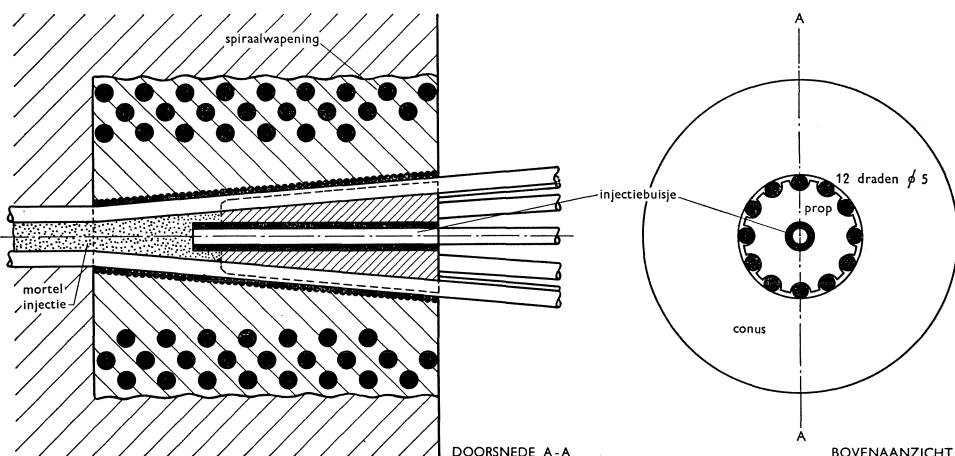


Fig. 1. Verankeringsysteem Freyssinet.

spaard (zie fig. 1). Verschillende uitvoeringen zijn mogelijk; de meest gangbare is echter wel die voor een kabel van 12 draden $\varnothing 5$, hoewel ook het systeem voor een kabel van 12 draden $\varnothing 7$ meer en meer toegepast wordt.

Magnel maakt bij zijn systeem gebruik van een geheel stalen verankerings-systeem (zie fig. 2). De kabel wordt in veelvouden van 8 draden geformeerd. Dit laatste vloeit voort uit de verankeringsconstructie, waarbij gebruik gemaakt wordt van een sandwichplaat met behulp waarvan aan de boven- en onderzijde van deze plaat 4 draden vastgewigd kunnen worden.

Een systeem analoog aan dat van Freyssinet, echter in staal uitgevoerd, wordt toegepast in Joego-Slavië (zie fig. 3). Hierbij worden kabels geformeerd van 2, 4 en 6 draden.

Tenslotte een systeem, ontwikkeld in Italië, waarbij de draden afzonderlijk verankerd worden door middel van een wig, die vervaardigd is, door in een axiaal doorboorde, afgeknotte kegel (zie fig. 4) de zaagsneden PQ en PR aan te brengen. Dit systeem maakt het mogelijk elke willekeurige kabeldoorsnede te verwezenlijken door wijziging van de vorm van de verankeringsplaat, waarin de wiggen zich vastzetten.

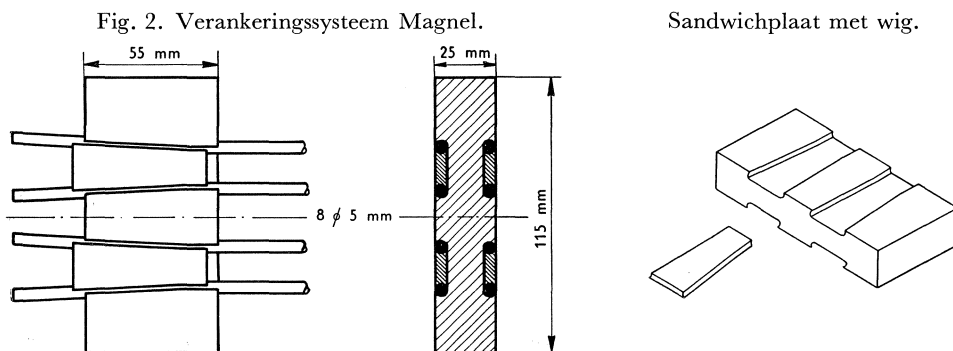


Fig. 2. Verankeringsysteem Magnel.

Sandwichplaat met wig.

De tweede groep, waarbij de draden door een moerconstructie worden opgesloten, vindt vooral in Amerika veel toepassing, hoewel deze systemen ook in Europa wel gangbaar zijn. In België werd een systeem ontwikkeld met staven van grote diameter (systeem Wets). Het aanspannen van deze trekstaven geschiedt met behulp van aparte hulpstukken, die op het uiteinde

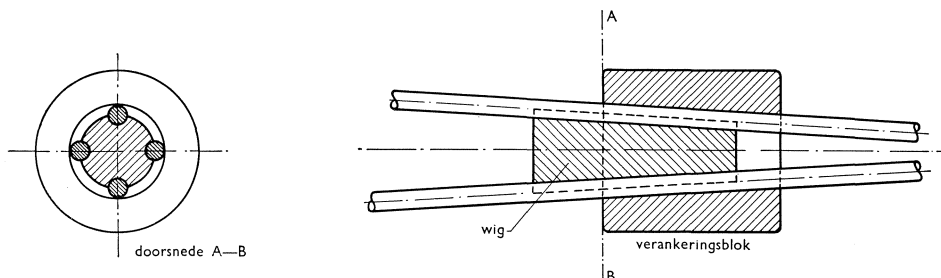


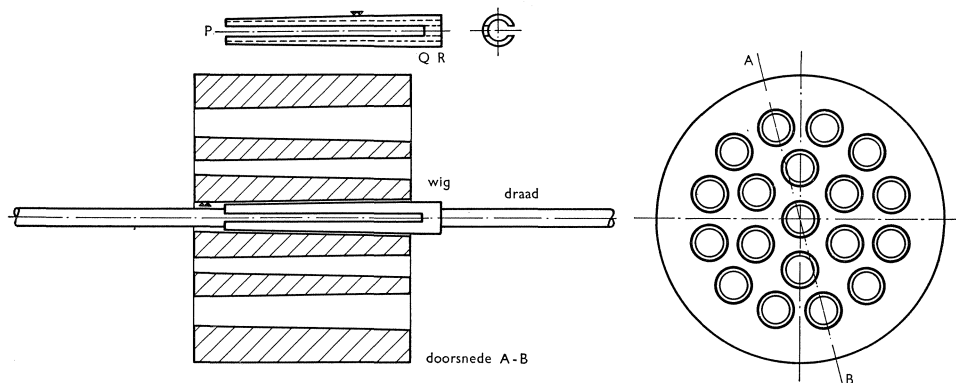
Fig. 3. Joego-Slavisch systeem.

van de staaf geschroefd worden. De verankering geschiedt door middel van een plaat opgesloten door een moer met contra-moer.

De staven liggen aan weerszijden van het lijf van de balk en zijn alleen aan de uiteinden van de balk, waar de doorsnede verzwaard is, omgeven door beton. Dit is enerzijds een voordeel, daar slechts in de eindblokken een gat behoeft te worden uitgespaard, wat het vervaardigen van de balk aanmerkelijk vereenvoudigt, anderzijds echter een nadeel, daar niet de normale bescherming tegen corrosie aanwezig is, zoals bij ingestorte kabels.

Een systeem, dat hieraan verwant is, is het systeem Finsterwalder. De schroefdraad voor de moer en contra-moer, door middel waarvan de verankering van de staven plaatsvindt, wordt op het staal over een lengte van ca. 15 cm koud ingewalst, waardoor de staaf dus niet verzwakt wordt. Tijdens het storten worden de staven door middel van een metalen buisje (dikte 0,2 mm) vrij gehouden van het beton. Na het aanspannen wordt cementwater

Fig. 4. Systeem Rinaldi.



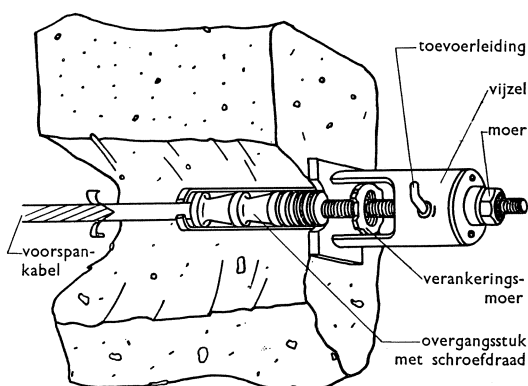


Fig. 5. Een in Amerika toegepast systeem.

in deze omhulling gespoten. Van aanhechting van de staaf aan het omhullende beton zal moeilijk sprake kunnen zijn.

De Amerikaanse systemen gaan veelal uit van een groep draden, die tot een kabel gevlochten is. Deze is bevestigd aan een speciaal eindstuk, dat voorzien is van een schroefdraad, waarmee door middel van een moer de verankering wordt verkregen (zie fig. 5).

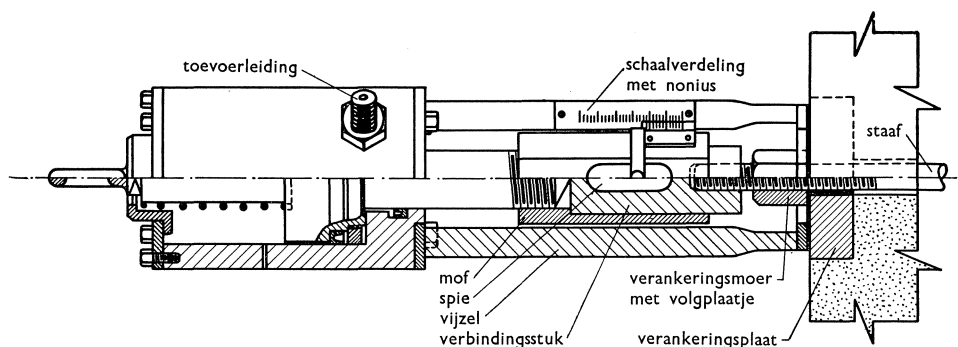
In de aanspanvijzel is een gat

uitgespaard, zodat er voldoende ruimte is om de moer aan te draaien.

Een systeem, dat zich wel weer bedient van staven met een grote diameter, is dat van Billner en Carlson. Het spannen geschiedt als volgt: Door een elektrische stroom door de staaf te voeren, zal warmteontwikkeling plaatsvinden, waardoor de staaf langer wil worden, wat geschiedt als de zwavel, die de staaf omhult, smelt. De moeren worden dan aangedraaid en de zwavel stolt weer. De toepassingsmogelijkheden van dit systeem zijn echter gering, daar de mogelijke voorspanning slechts 20 kg/mm² bedraagt.

De hierboven genoemde systemen, behoudens het systeem Finsterwalder, hebben allen echter het aanzienlijke nadeel, dat de staaf over het grootste gedeelte van zijn lengte niet ten volle benut kan worden ten gevolge van de verzwakking door de schroefdraad aan de uiteinden. Het in Engeland ontworpen Lee-McCall systeem heeft dit bezwaar slechts in zeer geringe mate, (zie fig. 6 en 7). De draad van de moer loopt aan de binnenkant iets trechtervormig uit, terwijl de draad op de staaf zo gemaakt wordt dat een gelijkmatige

Fig. 6. Lee-McCall-systeem met aanspaninrichting (gedeeltelijke doorsnede).



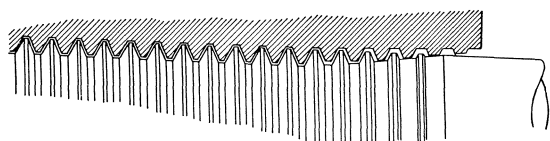


Fig. 7. Lee-McCall-systeem, staaf met moer.

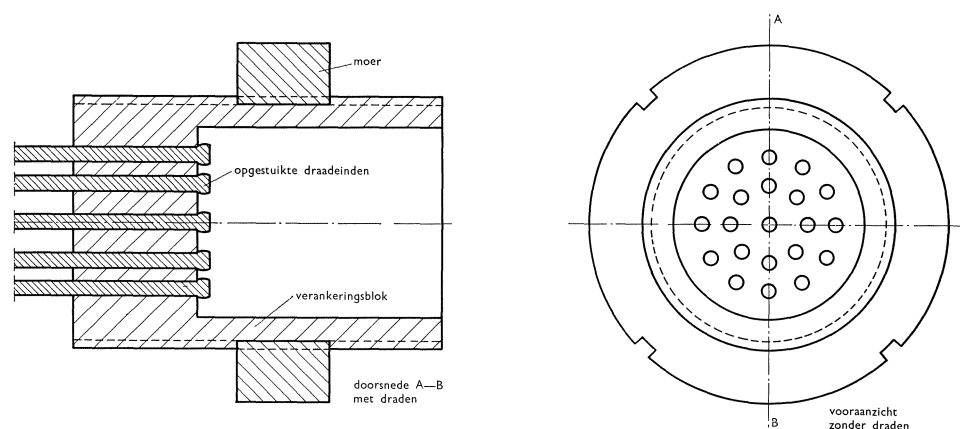
gedraaid. Van de moer, die van enigszins zachter materiaal is dan de staaf, wordt de draad dan over een zekere lengte geplet. Deze constructie eist, aldus toegepast, een nauwkeurigheid, welke onmogelijk te bereiken is. Daarom worden de verankeringsplaten ruw afgesteld en het verschil met behulp van volgplaatjes overbrugd.

Van de derde groep, waarbij de verankering door opstuiking van de draden plaatsvindt, noemen we een systeem, waarbij eerst de draden aan beide uiteinden opgestuikt worden tegen verankeringsplaatjes (op dezelfde wijze als bij klinknagels geschiedt); vervolgens worden de draden paarsgewijze aan één uiteinde aangespannen. Is de benodigde spanning bereikt, dan wordt tussen het verankeringsplaatje en de balk een hulpstuk geplaatst. Nadat alle draden aldus gespannen zijn, wordt het eindstuk van de balk gestort. De toepassingsmogelijkheid van dit systeem hangt af van het feit of het mogelijk is de draden op te stuiken zonder dat kerfvorming optreedt.

Een combinatie van de laatste twee groepen vormt het systeem BBRV (Birkenmaier, Brandestini, Rös, Vogt) (zie fig. 8). De draden worden hierbij door opstuiking vastgezet in een verankeringsblok en aldus tot een kabel verenigd. Het verankeringsblok zelf wordt echter verankerd door middel van een moerconstructie.

De bruikbaarheid van een systeem wordt bepaald door factoren als: het gedrag van de verankering, zowel tijdens als na het voorspannen; de sterkte

Fig. 8. BBRV-systeem.



van de verankering; de wijze waarop wordt voorgespannen; de mogelijkheden van toepassing wat betreft de plaats van de kabels; het maximum (eventueel minimum) aantal draden per kabel; het materiaal van de verankering en de kosten van de samenstellende delen hiervan.

Het gedrag tijdens het verankeren.

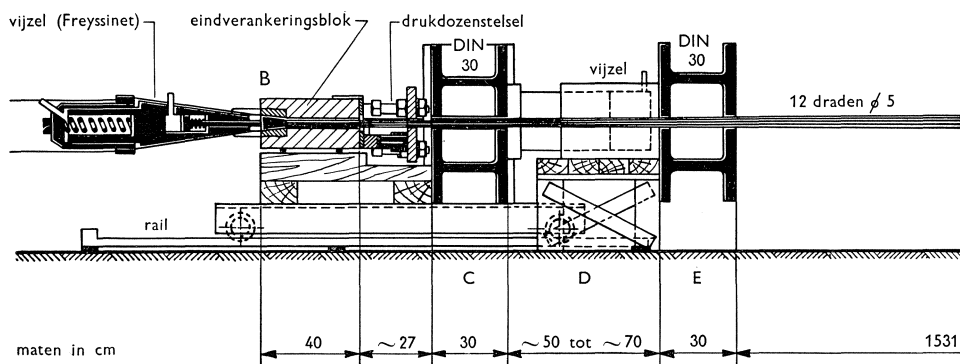
Bij de eerste groep systemen, de zgn. wiggende constructies, is speciaal het gedrag tijdens het verankeren van belang. Er ontstaat dan namelijk spanningsverlies ten gevolge van het feit, dat de verankering „zich zet” op het moment dat de voorspankracht van de vijzel op de verankering wordt overgebracht, welk verschijnsel in het navolgende „slip” genoemd wordt. Daar in Nederland hoofdzakelijk de systemen Magnel en Freyssinet, die tot deze groep behoren, toegepast worden, was een bestudering van dit verschijnsel gewenst.

De sterkte van het geheel stalen verankeringsorgaan van Magnel blijkt in de praktijk voldoende te zijn. Wel treedt na het aanspannen door vloeien een geringe deformatie van de verankeringsconstructie op, die eveneens een spanningsverlies in de draden veroorzaakt en dus bij de reeds genoemde slip gevoegd kan worden. Bij het systeem Freyssinet wordt de sterkte van het verankeringsysteem zowel door de prop als door de conus bepaald. Uit de literatuur (1 t/m 3) is bekend, dat de sterkte van de conus sterk afhankelijk is van het aantal windingen, doch dat deze in de gebruikelijke uitvoering met drie windingen ruim voldoende is. Beproeving van de conus kan b.v. geschieden door deze te belasten met een stalen prop (zie lit. 2, waar een breukbelasting van 74 ton werd gevonden voor een conus voor 12 draden $\varnothing 5$).

De ervaringen met de prop zijn in het algemeen gunstig te noemen, behoudens die met de vroeger toegepaste propfen van aluminiumcement.

Teneinde het gedrag van een verankeringsysteem te bestuderen werd een proefruimte ingericht, welke het mogelijk maakt diverse systemen te beproeven, speciaal wat betreft de sterkte en de deformatie. Er wordt gebruik gemaakt

Fig. 9. Beproevinginstallatie van de werkgroep.



van een gepraefabriceerd eind-verankeringsblok, dat het balkuiteinde vervangt, zodat de proeven zoveel mogelijk aan de praktijk aansluiten. De draden zijn niet in beton ingestort en niet in een kabel verenigd, zodat elke draad afzonderlijk geobserveerd kan worden, b.v. om te zien of verschil in spanning bepaalde verschijnselen, als slip, beïnvloedt. Ook kan nagegaan worden of bij een extra belasting de sterkte nog voldoende is of dat de deformatie ontoelaatbare waarden aanneemt of dat extra slip, de zgn. naslip, optreedt. Een mogelijkheid, welke niet rechtstreeks verband houdt met het verankeringsysteem, is het observeren van de kruip van het staal.

De opstelling is weergegeven in fig. 9. De beproevingsinstallatie werd ingericht in een gewapend betonnen schuilkelder, die door zijn vorm (een stijve koker) en zijn grote lengte uitstekend voor dat doel geschikt was. Bij het uiteinde A bevindt zich een „vaste” verankerings, waar de draden solide verankerd zijn, hetgeen uiteraard een eerste vereiste is voor het bepalen van het gedrag van het te beproeven verankeringsysteem, dat bij B geplaatst is, ten aanzien van een verschijnsel als slip. De draden zijn bij A afzonderlijk verankerd (zie

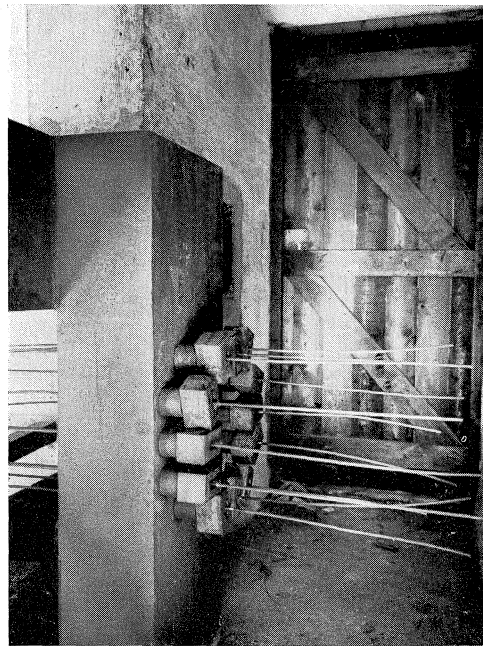


Fig. 10. Vaste verankerings van de draden in de beproevingsinstallatie.

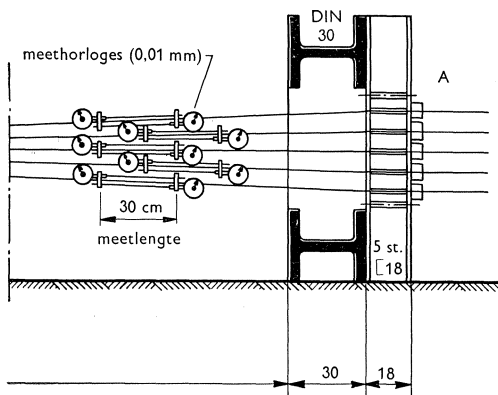


fig. 10), daar voor het observeren van elke draad enige ruimte tussen de draden voor het aanbrengen van meetapparatuur noodzakelijk was.

De totale kracht in alle draden wordt bepaald door een drukdozenstelsel (zie fig. 11), dat bij het uiteinde B is opgesteld tussen het eindverankeringsblok en de beide DIN-balken C, welke de kracht via de vijzels D en de DIN-balken E overbrengen op

de zijwanden van de schuilkelder. Eindverankeringsblok, drukdozenstelsel en DIN-balken C zijn als één geheel gemonteerd op een wagenconstructie (zie ook fig. 12), zodat ook na het verankeren de kracht in de draden, met behulp van de vijzels D verhoogd kan worden, waarmee dus een extra belasting verwezenlijkt kan worden.

Inleidende proeven met de systemen Magnel en Freyssinet, die voornamelijk het meten van de slip tot doel hadden, hebben uitgewezen, dat met een slip van ca. 5 mm rekening dient te worden gehouden, hetgeen aanmerkelijk meer is, dan in de literatuur vermeld wordt. De spreiding in de resultaten was echter aanzienlijk. *Bovendien is gebleken, dat de slip onafhankelijk van de lengte van de kabel is.*

De onderzoeken worden voortgezet in het kader van het Fonds voor Experimenteel Beton Onderzoek (FEBO). De hieronder ressorterende Onderzoekingscommissie A₃ (Commissie „Eindverankerungen”) zal te zijner tijd een advies inzake deze materie uitbrengen.

Het spanningsverlies ten gevolge van slip.

Het in rekening brengen van het spanningsverlies ten gevolge van slip tijdens het verankeren zal leiden tot een betere overeenstemming tussen de gewenste en de werkelijk in de balk optredende voorspankracht. Bij het bepalen van de voorspankracht zal men uiteraard met een bepaalde nauwkeurigheid genoeg dienen te nemen, die behalve door de variatie in de grootte van de slip ook bepaald wordt door de nauwkeurigheid in het aanbrengen van de primaire voorspankracht en de mate, waarin de in rekening gebrachte kruip- en krimpmaat afwijken van de realiteit.

Dat het spanningsverlies ten gevolge van slip aanzienlijk kan zijn, leert het volgende voorbeeld. Bij een balk met een lengte van 36 m, die aan beide uiteinden gespannen wordt, waarbij men rekening houdt met een elasticiteits-

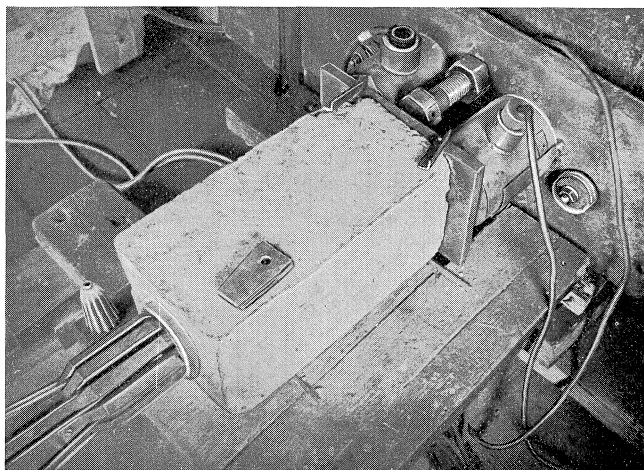


Fig. 11. Vijzelkop, eindverankeringsblok en drukdozenstelsel.

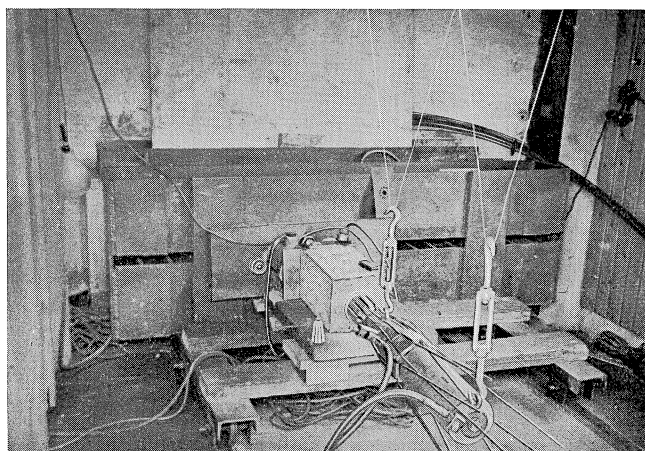


Fig. 12. Aanzicht van het verankeringsysteem.

modulus van het staal: $E = 2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, bedraagt dit spanningsverlies: $\frac{2 \times 5}{36 \times 10^3} \times 2 \cdot 10^4 = 5,5 \text{ kg/mm}^2$. Dit is dus bij een primaire voorspanning van 110 kg/mm^2 een spanningsverlies van 5%.

Het verlies, dat men in het algemeen voor kruip- en krimpinvloeden in rekening brengt, bedraagt 15%. Het totale verlies wordt dus 20%.

Uitgaande van het feit, dat er geen correlatie tussen deze invloeden bestaat, kan dus een benedengrens voor de lengte van een kabel bepaald worden, afhankelijk van de eisen die men stelt. Een hiervolgend voorbeeld moge dit nader toelichten.

Wil men een voorspanning van 85 kg/mm^2 in de kabel introduceren en stelt men de primaire voorspanning, die te verwezenlijken is op 120 kg/mm^2 , dan kan dus een spanningsverlies van 35 kg/mm^2 toegelaten worden. Hier- van komt voor rekening van kruip en krimp ca. 15% van de primaire voor- spanning, dus 18 kg/mm^2 . Rekent men met een slip van 5 mm (optredend aan één uiteinde van de balk!), dan zal deze slip dus mogen corresponderen met $35 - 18 = 17 \text{ kg/mm}^2$ spanningsverlies. Stelt men de elasticiteitsmodulus van het staal: $E = 2 \cdot 10^4 \text{ kg/mm}^2$, dan vindt men dus als minimum balklengte:

$$l = \frac{E \cdot \Delta l}{\sigma} = \frac{2 \cdot 10^4 \times 5}{17} = 5900 \text{ mm} = 5,90 \text{ m.}$$

Men dient er zich hierbij goed rekenschap van te geven, dat de spreiding in de slip vrij groot kan zijn. Bij een spreiding van 3—7 mm houdt dit in, dat bij bovenstaande berekende balklengte de uiteindelijke voorspanning van 85 kg/mm^2 een afwijking kan

vertonen van $\Delta \sigma = \pm \frac{\Delta l}{l} \cdot E = \pm \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^4}{5900} = \pm 7 \text{ kg/mm}^2$. Afgezien van de

andere onnauwkeurigheden is de mogelijke afwijking hierdoor dus al $\pm 8\%$.

Uitgaande van een slip van 5 mm is het spanningsverlies uitgezet als functie van de kabellengte (zie fig. 13). De primaire voorspanning is 120 kg/mm^2

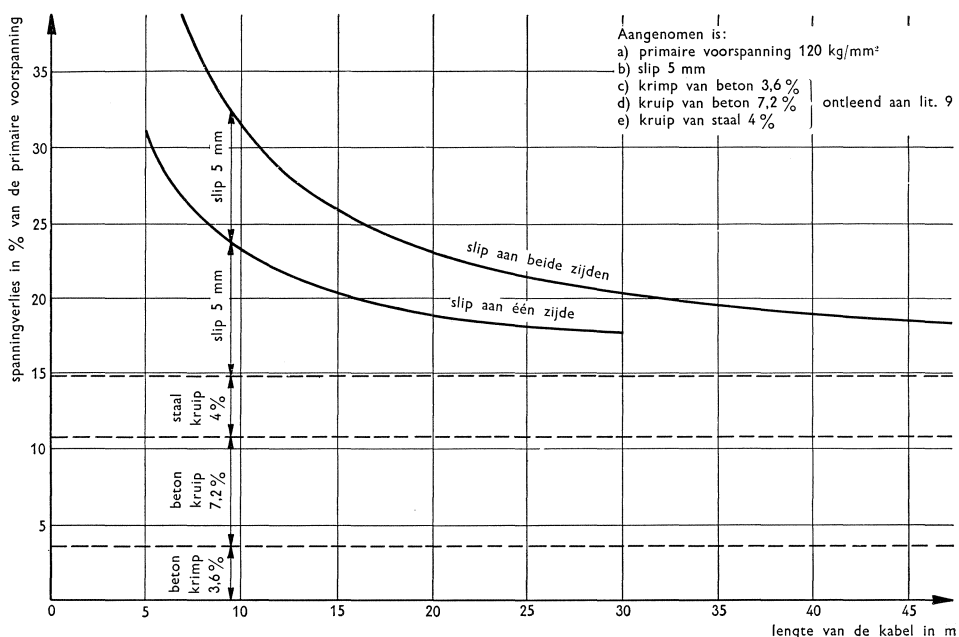


Fig. 13. Spanningsverliezen als functie van de kabellengte.

gesteld. Onderscheid werd gemaakt of er aan één of aan twee uiteinden spanningsverlies optreedt. Deze figuur toont wel zeer duidelijk de grote betekenis, die het spanningsverlies ten gevolge van slip vooral bij korte kabel-lengte heeft.

Uit bovenstaande uiteenzetting blijkt dus wel, dat de zgn. wiggende ver-ankeringsystemen ten opzichte van die, waarbij de verankering geschiedt met behulp van moeren of opstuiking van de draad, vooral bij korte kabel-lengten ongunstig afsteken.

LITERATUUR:

1. Brice: Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Mei 1949.
2. Coepijn: Enige ervaringen bij de toepassing van spanbeton voor het toegangsviaduct naar de Spaanse brug te Rotterdam. De Ingenieur, 11 April 1952 (No. 15).
3. Ostenfeld en Jønson: „Essais de Constructions en Béton Précontraint”, Kopenhagen 1951.
4. Algemene vereniging der Ingenieurs uit de bijzondere scholen te Gent. Internationaal Congres voor spanbeton 1951.
5. G. Magnel: le Béton Précontraint, vol IV, 1948.
6. Y. Guyon: Béton Précontraint, 1951.
7. Précontrainte — Prestressing.
8. Symposium on Prestressed concrete statically indeterminate structures, Londen 1951.
9. A. S. G. Bruggeling: „Voorgespannen Beton”, 1e dr.