

DI: 642446-1

ort

NIJVERHEIDSORGANISATIE T.N.O.

INSTITUUT T.N.O. VOOR BOUWMATERIALEN EN
BOUWCONSTRUCTIES

RAPPORT NO. B-58-661

OPDRACHTNO. 28.283

METINGEN VERRICHT AAN VOORGESPANNEN BETONPLATEN
VAN RIJKSWEG 4 A.

7692
782

1958

RIJKSWEGENBOUWLABORATORIUM
BIBLIOTHEEK



INSTITUUT T.N.O. VOOR BOUWMATERIALEN EN BOUWCONSTRUCTIES
NIJVERHEIDSORGANISATIE VOOR TOEGEPAST NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK

NIJVERHEIDSORGANISATIE T.N.O.
INSTITUUT T.N.O. VOOR BOUWMATERIALEN EN BOUWCONSTRUCTIES

RAPPORT NO.: B-58-661

OPDRACHTNO.: 28.283

JULI 1958

METINGEN VERRICHT AAN VOORGESPANNEN BETONPLATEN
VAN RIJKSWEG 4^A.

Opdrachtgever: Directie Wegen van de Rijkswaterstaat
te 's-Gravenhage.

Dit rapport mag slechts woordelijk en in zijn geheel worden gepubliceerd; voor reclame alleen na schriftelijke toestemming. Aanvragen om advies worden alleen behandeld op voorwaarde, dat de aanvrager afstand doet van ieder recht op aansprakelijkstelling terzake van de inhoud van het te geven of gegeven advies.

Inhoud:

Blz.:

Hoofdstuk I : Opdracht en inleiding	4
Hoofdstuk II : De gevolgde werkwijze	6
Hoofdstuk III: De meetresultaten	16
Hoofdstuk IV : Het bepalen van de optredende betonspanningen in de proefplaten	23
Hoofdstuk V : Bepaling van de beginspanning σ_0 en de wrijvingscoëfficiënt f	29
Hoofdstuk VI : Samenvatting en conclusies	35
Bijlage I : Resultaten van de metingen verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij. aan proefvak I	
Bijlage II : Idem aan proefvak II	
Bijlage III: Idem aan proefvak III	

Lijst van figuren.

- Fig. 1. Schets van de toegepaste kruipprisma's
- " 2. Bepaling beginspanning σ_0
- " 3. Detail plaatbelastingproef
- " 4. Meetschema voor de O-rijstrook van proefvak No. I
- " 5. Meetschema voor de W-rijstrook van proefvak No. I
- " 6 en 7. Resultaten van de metingen verricht aan de O en W-rijstrook van proefvak No. I
- " 8. Overzicht van de gehouden plaatbelastingsproeven
- " 9. $\sigma - \epsilon$ diagrammen van de plaatbelastingsproeven
- " 10. Elasticiteitsmoduli voor de verschillende proefvakken als functie van de ouderdom van het beton
- " 11. Meetschema voor de O-rijstrook van proefvak II
- " 12. Resultaten van de metingen verricht aan de O-rijstrook van proefvak II
- " 13. Meetresultaten krimpplaten proefvak II
- " 14. Meetresultaten kruipprisma's proefvak II
- " 15. De grootheid ($\epsilon - \alpha t$) gemeten aan de plaa-teinden van proefvak II en aan het kleinste kruipprisma
- " 16. Resultaten van het voorspannen in dwarsrichting van het Z-einde van proefvak II
- " 17. Meetschema van de W-rijstrook van proefvak III
- " 18. Resultaten van de metingen verricht aan de W-rijstrook van proefvak III
- " 19. Meetresultaten kruipplaten proefvak III
- " 20. Meetresultaten kruipprisma's proefvak III
- " 21. De grootheid ($\epsilon - \alpha t$) gemeten aan de plaa-teinden van proefvak III en aan het kleinste kruipprisma
- " 22^a en ^b. Resultaten van het voorspannen in dwarsrichting van beide plaa-teinden
- " 23. Luchttemperaturen gemeten op het vliegveld Ypenburg
- " 24. Aangehouden kruip en krimp voor proefvak I
- " 25. Optredende betonspanningen aan de plaa-teinden van proefvak I
- " 26. Optredende betonspanningen aan de plaa-teinden van proefvak II
- " 27. Idem voor proefvak III
- " 28. Optredende betonspanningen in het plaatmidden van proefvak I

Fig. 29. Optredende betonspanningen in het plaatmidden van
proefvak II

" 30. Idem voor proefvak III

" 31^{a,b,c}. Spanningsverschillen tussen de plaa-teinden en het
plaatmidden bepaald uit de metingen en uit de gemiddel-
de wrijvingscoëfficiënt

Hoofdstuk I.

Opdracht en inleiding.

Door de Directie Wegen van de Rijkswaterstaat, Louise de Colignystraat 120 te Den Haag werd aan het Instituut T.N.O. voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies opdracht verstrekt tot het verrichten van metingen aan voorgespannen betonplaten van Rijksweg 4^A.

Deze metingen werden verricht aan drie proefvakken. Het eerste proefvak was gelegen aan de Zuidelijke afrit van Rijksweg 4^A naar de Landscheidingsweg (gemeente Leidschendam).

Het tweede proefvak was gelegen op de Zuidelijke rijbaan van Rijksweg 4^A in de omgeving van de Landscheidingsweg (eveneens in de gemeente Leidschendam).

Het derde proefvak was gelegen in de W-rijbaan van Rijksweg 4^A bij de Ericalaan (gemeente Leiderdorp).

Gemakshalve zullen deze proefvakken in dit rapport achtereenvolgens worden aangeduid met "proefvak I", "proefvak II" en "proefvak III".

De drie proefvakken bestonden ieder uit twee betonplaten (dik 12 cm en breed 3,62⁵ m) met een lengte van ongeveer 100 m. De drie proefvakken werden nagenoeg op dezelfde wijze vervaardigd.

Op een vooraf vervaardigd spanraam werd het voorspanstaal voor één betonplaat (ca 60 draden \emptyset 5) gespannen en verankerd. Vervolgens werd het beton van deze betonplaat gestort en getrild. Daarna werd het voorspanstaal voor de volgende plaat gespannen en verankerd, waarna het beton voor deze plaat werd gestort en getrild. De twee betonplaten van één proefvak werden koud tegen elkaar aangestort.

De platen werden gestort tot op een afstand van 1 à 2 m van de dwarsbalken van het spanraam. Het voorspannen van de betonplaat geschiedde door de draden in deze ruimte door te branden.

Het doel van de metingen was, na te gaan in hoeverre de betonplaten bij deze wijze van werken werden voorgespannen. De mogelijkheid was nl. niet uitgesloten dat de voorspanning in het middelste gedeelte van de betonplaten, t.g.v. de tegenwerkende wrijving van de ondergrond, aanzienlijk minder zou zijn dan aan de uiteinden van de betonplaat.

Onder het middelste gedeelte van de betonplaat wordt in dit verband verstaan, het gedeelte van de plaat dat zich bij het middelste stuk van de lengte-as van de betonplaat bevindt.

Gemakshalve zal in dit rapport dit gedeelte verder worden aangeduid met "het midden" van de plaat.

De metingen verricht aan proefvak No. I zijn uitgevoerd als oriënterende metingen, om een globaal inzicht in het probleem te verkrijgen. Bij deze metingen werden n.l. geen afzonderlijke kruip- en krimpmetingen verricht op aparte proefstukken. De metingen verricht aan de proefvakken II en III zijn over een langere termijn voortgezet. Het doel van deze langdurige observatie was om ook de invloed na te gaan van kruip, krimp en temperatuurvariatie op de spanningsverdeling van de betonplaat.

Daartoe zijn in de onmiddellijke omgeving van de proefvakken no.'s II en III aparte proefstukken gestort. Deze proefstukken zijn onder dezelfde omstandigheden verhard als de betonweg.

Op deze proefstukken zijn krimp- en kruipproeven verricht.

De proefvakken no's I en II zijn aangebracht op een verdicht zandbed.

Proefvak no. III is gestort op een gestabiliseerde ondergrond. De metingen aan proefvak III dienden daarom o.m. ook om eventuele verschillen tussen het gedrag van een voorgespannen betonplaat, gestort op een zandfundering en eenzelfde betonplaat, aangebracht op een gestabiliseerde fundering te kunnen bepalen. Tenslotte zij nog vermeld dat bij proefvak II langs de langsvoeg en langs de buitenkant van de betonplaten 4 extra draden zijn gespannen.

Bij proefvak III is dit alleen langs de buitenkant van de betonplaat gebeurd.

Bovendien zijn bij deze twee proefvakken voorzieningen getroffen om aan beide (proefvak III) of aan één der plaa-teinden (proefvak II) een voorspanning in dwarsrichting te kunnen aanbrengen. Bovengenoemde wijzigingen in de constructie zijn aangebracht om de randen van de betonplaten te versterken.

De lengte-as van de proefvakken I en II was recht, die van proefvak III was flauw gebogen.

Hoofdstuk II.

De gevolgde werkwijze.

In de betonplaten van de proefvakken kunnen spanningen ontstaan t.g.v.:

- het voorspannen
- de wrijving van de ondergrond
- zetting van de ondergrond
- temperatuursveranderingen
- krimp van het beton
- kruip van het beton
- de verkeersbelasting

Wordt in eerste instantie de kruip van het beton buiten beschouwing gelaten, dan geldt het volgende:

De spanning σ in de betonplaat is gelijk aan $\sigma = E (\epsilon - \epsilon_{kr} \pm \alpha t)$.

In deze formule is:

E = elasticiteitsmodulus beton

ϵ = gemeten specifieke lengteverandering in de betonplaat

ϵ_{kr} = krimp van het beton bij onbelemmerde vervorming

α = temperatuursuitzettingscoëfficiënt beton

t = temperatuursverandering

Uit bovenstaande formule blijkt dat, wil men m.b.v. rekmetingen spanningen in het beton bepalen, behalve ϵ ook de E , ϵ_{kr} , α en t bekend moeten zijn.

(De uitzettingscoëfficiënt α van beton kan op $11 \cdot 10^{-5}$ worden gesteld.)

In verband hiermede zijn nu aan de proefvakken de volgende metingen verricht:

- lengte- en krommingsveranderingen op verschillende plaatsen aan de bovenzijde van de betonplaat met behulp van de afneembare rek-krommingsmeter
 - betontemperaturen met behulp van N.T.C.-weerstand. Op iedere betonplaat werden op een viertal plaatsen drie N.T.C.-weerstand ingestort. De afstanden van deze N.T.C.-weerstand tot de bovenkant van de betonplaat bedroegen resp. 1, 6 en 11 cm.
- In het T.N.O.-rapport no. B-58-196 "Metingen aan een betonplaat van R.W. 4^A" werden zowel de afneembare rek-krommingsmeter als de N.T.C.-weerstand beschreven.

Voor de interpretatie zijn voornamelijk van belang de spanningen, ontstaan t.g.v. de normaalkracht in de plaat. Daarvoor is het

Bij onbelemmerde vervorming

$$\epsilon = \epsilon_{kr} + \epsilon_{pl} + \epsilon_v + \alpha t$$

ϵ = gemeten vva

ϵ_{kr} = vva tgv krimp

ϵ_{pl} = " " kruip

αt = " " temp verand

ϵ_v = " " voorsp

$$\text{dus } \epsilon_v = \epsilon - \epsilon_{kr} - \epsilon_{pl} - \alpha t$$

$$\text{en } \sigma_v = E \epsilon_v$$

tgv voorsp bij vrij vervorming

nodig de lengte- en de temperatuursveranderingen in het midden van de plaatdikte te kennen.

Met behulp van de gemeten lengteveranderingen kan de specifieke rek aan de bovenzijde van de betonplaat (ϵ_{boven}) berekend worden. Wordt bovendien een kromming K gemeten, dan geldt voor de rek ϵ in het midden van de dikte van de plaat

$$\epsilon = \epsilon_{\text{boven}} + K \cdot \frac{1}{2} d$$

waarin d = dikte betonplaat.

Opgemerkt zij dat op de waarnemingstijdstippen de temperatuur over de dikte praktisch constant was. De in het volgende gegeven temperaturen zijn de gemiddelde waarden van de 3 boven elkaar geplaatste N.T.C.-weerstanders.

Om ϵ_{kr} te kunnen bepalen zijn bij de proefvakken II en III twee ongewapende betonplaten met afmetingen $200 \times 15 \times 12 \text{ cm}^3$ gelijktijdig en onder dezelfde omstandigheden met het proefvak meegestort.

Van deze krimpplaten zijn op dezelfde wijze als bij de betonplaten van de proefvakken lengte- en krommingsveranderingen en temperaturen gemeten.

Bedraagt de aan de krimpplaten gemeten rek (in het midden van de dikte) ϵ_1 , dan geldt:

$$\epsilon_1 = \epsilon_{\text{kr}} \pm \alpha t$$

of
$$\epsilon_{\text{kr}} = \epsilon_1 \mp \alpha t.$$

Met behulp van deze krimpplaten kan dus op eenvoudige wijze ϵ_{kr} bepaald worden.

De elasticiteitsmodulus E is bepaald aan de hand van twee prisma's $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$, die bij ieder proefvak eveneens gelijktijdig en onder dezelfde omstandigheden werden gestort. Op het laboratorium werd van deze prisma's op verschillende tijdstippen de E bepaald.

Aangezien de elasticiteitsmodulus toeneemt met de tijd, geldt de formule aangevende het verband tussen spanning en vervorming slechts voor een tijdsinterval, waarin E vrijwel constant aangenomen kan worden. Voor elk tijdsinterval is dus de spanningsverandering $\Delta \sigma$ te bepalen m.b.v. de formule

$$\Delta \sigma = E_t (\Delta \epsilon - \Delta \epsilon_{\text{kr}} \pm \alpha \Delta t), \text{ byzondere verandering}$$

waarin Δ = de verandering van de betreffende grootte in ge-

noemd tijdsinterval.

Langs numerieke weg is het dus mogelijk de verandering van de betonspanning vanaf het begin van de meting te bepalen.

Bovenstaande beschouwingen gelden voor het geval dat er geen kruip optreedt. *en vervorming niet belemmerd wordt.*

Staat een prisma onder constante spanning σ_1 , dan zal de elastische verkorting bedragen $\epsilon_{el} = \frac{\sigma}{E}$.

In de loop van de tijd neemt de vervorming echter toe, zodat de totale verkorting ϵ_{tot} bedraagt.

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{el} [1 + \varphi(t)],$$

waarin $\varphi(t)$ = een funktie van de tijd, aangevende de verhouding van de kruip en de elastische vervorming. De plastische vervorming is dus

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{el} \varphi(t) = \frac{\sigma}{E} \cdot \varphi(t)$$

Is de spanning niet constant dan geldt de differentiaalvergelijking

$$d \epsilon_{tot} = \frac{d\sigma}{E_t} + \frac{\sigma}{E_t} d \varphi(t)$$

Is de kruipfunctie $\varphi(t)$ dus bekend, dan is het mogelijk, langs numerieke weg de verandering in spanning σ te bepalen (zie ook I.B.C.-mededelingen, jaargang 3 no. 3), uit de gemeten vervormingen, uiteraard weer gecorrigeerd op temperatuur en krimp. Dit is de rede waarom bij de proefvakken II en III ook enkele kruipprisma's gelijktijdig met de betonplaten zijn meegestort. In deze prisma's bevindt zich een plastic pijp, waarin een staaf $\emptyset 19$ vrij kan bewegen. De einden van deze staaf zijn voorzien van schroefdraad, zodat m.b.v. moeren de prisma's onder spanning gebracht kunnen worden (zie fig. 1). Met behulp van een drukdoos kunnen de aangebrachte krachten gemeten worden. Op deze prisma's werden lengte-, krommings- en temperatuurveranderingen gemeten op dezelfde wijze als bij de proefplaten en de krimpplaten. Bedraagt de aan één der kruipprisma's gemeten rek (in het midden van de dikte) ϵ_2 , dan is de grootte van de zojuist genoemde

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_2 - \epsilon_{kr} \pm \alpha t.$$

Daar bij de kruipprisma's steeds zowel de spanning σ , als de vervorming ϵ_{tot} en de elasticiteitsmodulus E bekend zijn, is het mogelijk een inzicht in de kruipfunctie $\varphi(t)$ te krijgen.

Voor het geval de spanning σ niet constant is tijdens de proef

kan bij de interpretatie gebruik gemaakt worden van het superpositiebeginsel (zie I.B.C.-mededelingen, Jaargang 3 no. 3).

Een moeilijkheid bij de interpretatie van de metingen is nog, dat de spanningen in het plaatmidden sterk afhankelijk zijn van de temperatuurwisselingen. Het is dus waarschijnlijk, dat op het ogenblik, waarop de eerste meting (z.g. "nulstand") werd verricht, reeds betonspanningen aanwezig zijn.

De verrichte metingen geven dus inzicht in het spanningsverschil, echter niet in de werkelijk optredende spanningen. Dit geldt uiteraard slechts voor het plaatmidden; voor de plaa-einden mag redelijkerwijs verondersteld worden, dat bij de "nulmeting" ook de spanningen nul zijn.

Voor de beoordeling in het algemeen is het beter, de werkelijk optredende spanningen te kennen; bovendien geldt, dat een juiste interpretatie naar spanningen door in rekening brengen van de kruip ook slechts mogelijk is, indien de spanning bij het begin van de meting bekend is.

Getracht is daarom, door het doen van enkele aannamen, een schatting te maken van deze beginspanning (σ_0).

Aangenomen wordt, dat de wrijving van de weg op de ondergrond een vervorming in het plaatmidden volledig belemmert, totdat de wrijving wordt overschreden. Deze maximale wrijving wordt over de halve weglengte (50 m) gelijkmatig verdeeld aangenomen. Over de andere 50 m is de wrijving gelijk maar tegengesteld. Door het eigen gewicht van de weg wordt per m' breedte van de weg een kracht op de grond uitgeoefend over een lengte van 50 m van:

Wanneer de wrijving in het midden wordt overwonnen, dan moet men rekening houden met een lengte van 50 m
 $N = 500 \cdot 1,2 \cdot 2,4 \cdot 10 = 14400 \text{ kg.}$

De wrijvingskracht W is dus: $W = f \cdot 14400$, waarin

f = wrijvingscoëfficiënt.

Dit levert dus een betonspanning in het plaatmidden van

$$\sigma = \frac{14400}{12 \cdot 100} f = 12 f.$$

Zolang de weg nog niet is voorgespannen, kan de spanning in het midden door b.v. temperatuur- en krimpinvloeden variëren tussen + en - 12 f.

Is de weg aan de einden voorgespannen met σ_v , dan kan deze spanning in het midden variëren tussen $\sigma_v + 12 f$ en $\sigma_v - 12 f$. Beschouwt men nu de periode vóór de nulmeting, dan is in sommige gevallen wel een tijdstip te vinden, dat de temperatuur

+ spanningen klemmen de kromming bij de midtlijn niet

een zeer extreme waarde heeft gehad. In eerste instantie kan dan aangenomen worden, dat de spanning in het midden op dat ogenblik de waarde $12 f$ heeft bereikt (zie b.v. fig. 2a). In fig. 2a geldt voor tijdstip a b.v., dat hier waarschijnlijk de wrijving volledig ontwikkeld is geweest, zodat

$$\sigma_{ma} = 12 f \text{ (druk).}$$

De nulmeting werd verricht op tijdstip b, waarbij de temperatuur b.v. $t_1^{\circ}\text{C}$ gezakt is t.o.v. a. Is t_1 klein, dan is het aannemelijk, dat de hierbij behorende verkorting volledig belemmerd is, zodat op tijdstip b geldt $\sigma_{mb} = 12 f - E \alpha t_1$ (druk).

De tweede meting werd b.v. verricht op tijdstip d.

Meestal werd deze meting verricht na een belangrijk temperatuurverschil. Het is dus waarschijnlijk, dat de wrijving weer volledig ontwikkeld is geweest. Op tijdstip c is dus de spanning

$$\sigma_m \text{ geweest } \sigma_{mc} = 12 f \text{ (trek).}$$

Is t_2 weer klein, dan geldt

$$\sigma_{md} = 12 f - E \alpha t_2 \text{ (trek)}$$

Het spanningsverschil $\sigma_{md} - \sigma_{mb}$ is gemeten, b.v. $\Delta\sigma$ (krimpen en kruip kunnen in deze korte periode buiten beschouwing blijven).

Voor $\Delta\sigma$ geldt

$$\Delta\sigma = 24 f - E \alpha (t_2 - t_1)$$

Hieruit volgt dus een waarde voor f en hieruit weer de spanning bij de nulmeting $\sigma_0 = \sigma_{mb}$. Is f op deze wijze bepaald, dan kan gecontroleerd worden, of de gestelde aannamen (volledig ontwikkelde wrijving ten tijde a en c) verantwoord zijn.

Het geval kan zich ook voordoen, dat in het begin van de verhardingsperiode (b.v. eerste drie dagen na storten) de temperatuur betrekkelijk weinig varieert tot aan het tijdstip, waarop de nulmeting plaatsvond.

In dit geval kan aangenomen worden, dat de spanningsloze toestand optreedt bij de gemiddelde temperatuur t_{gem} in deze periode. Voor de "nulmeting" geldt dan:

$$\sigma_0 = E \alpha t_1 \quad (\text{zie fig. 2b})$$

In dit laatste geval levert de temperatuurmeting echter geen waarde voor de wrijvingscoëfficiënt f .

Voor de bepaling van f kan in dit laatste geval echter gebruik gemaakt worden van de metingen tijdens het voorspannen. Dit voorspannen treedt n.l. op, vrij kort na het verrichten van de nulmeting. Ook hier kunnen dus kruip en krimpinvloeden verwaar-

loosd worden.

Tijdens dit voorspannen wordt de wrijving volledig ontwikkeld, zodat de werkelijke spanning in het plaatmidden bedraagt $\sigma_v - 12 f$.

Is de initiele spanning σ_0 bekend, of kan deze in f uitgedrukt worden, dan geldt

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{gem}} = \sigma_v - 12 f,$$

waarin σ_{gem} de gemeten spanning in het plaatmidden t.o.v. de nulmeting is.

In deze vergelijking is f de enige onbekende.

Uit het bovenstaande moge blijken, dat het mogelijk is uit de "korte duur" metingen (temperatuurmeting en voorspannen, volgend op nulmeting) een schatting te maken van σ_0 en f .

De betonspanningen in de plaat kunnen ook bepaald worden met behulp van de z.g. experimentele interpretatie. Voor het geval van zuivere druk gaat men bij deze methode als volgt te werk:

Op een prisma, dat zich onder dezelfde omstandigheden bevindt als de proefplaat wordt een zodanige centriscche kracht aangebracht, dat de vervormingen van het prisma gelijk zijn aan de vervormingen gemeten aan het proefvak. Gedurende de beproeving wordt deze kracht bijgeregeld, zodat steeds aan deze voorwaarde wordt voldaan. De aangebrachte kracht wordt gemeten, bijv. met een drukdoos.

De spanningen in het prisma zijn dus steeds bekend, en, omdat het prisma dezelfde temperatuur, krimp- en kruipinvloeden heeft als het proefvak, gelijk aan de spanning in de weg. Wil deze methode slagen, dan moet over het algemeen de kracht op het prisma geregeld bijgesteld worden. Daarom dient in dit geval een meetassistent dag en nacht op het werk aanwezig te zijn, teneinde ook dag- en nachtschommelingen te kunnen blijven volgen. Op verzoek van de opdrachtgever dienden de kosten van het onderzoek beperkt te worden, zodat het systeem van de experimentele interpretatie niet volledig kon worden gevolgd. Deze methode werd daarom slechts toegepast bij de bepaling van de gemiddelde spanningen aan het einde van de plaat. Voor het voorspannen van de plaat zijn deze spanningen nul, na het voorspannen blijft deze spanning gedurende de hele beproeving gelijk aan de betonvoorspanning, indien geen uitwendige krachten

op het plaaiteinde worden uitgeoefend of slip van de draden optreedt. Het genoemde prisma, dienend om langs experimentele weg de gemiddelde betonspanning aan het plaaiteinde te bepalen, heeft dus vrijwel niet te worden bijgeregeld. Voor dit prisma is gebruikt één van de kruipprisma's.

Tenslotte zij nog vermeld dat door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij. op verschillende tijdstippen de spanning in het voorspanstaal tussen de uiteinden van de proefplaten en de dwarsbalken van het spanraam is gemeten met de zgn. "draadspanningsmeter". De resultaten van deze meting zullen eveneens in dit rapport worden verwerkt.

De volgende methoden van interpreteren zijn toegepast:

a) voor de spanningen aan de plaaiteinden

- 1) De voorspanning in de eerst gestorte rijstrook ontstaat in twee etappes.

De eerste etappe treedt op, als door het spannen van de draden voor de tweede rijstrook het spanraam gaat vervormen, de tweede, als de draden worden doorgebrand.

Zijn de lengte- en temperatuurveranderingen, behorend bij de 1^e etappe, resp. ε_1 en t_1 , en bij de 2^e etappe resp. ε_2 en t_2 , dan is de betonvoorspanning σ_e aan het plaaiteinde $\sigma_e = E_1 (\varepsilon_1 \pm \alpha t_1) + E_2 (\varepsilon_2 \pm \alpha t_2)$,

waarin E_1 en E_2 de elasticiteitsmoduli zijn, behorend bij de ouderdom van het beton op het ogenblik van het meten.

Daar deze voorspanning in korte tijd wordt aangebracht, kunnen de invloeden van kruip en krimp verwaarloosd worden. Wordt tijdens het doorbranden van de draden bij de tweede rijstrook een vervorming ε_3 en een temperatuurvariatie t_3 gemeten, dan geldt voor de betonvoorspanning aan het plaaiteinde $\sigma_e = E_3 (\varepsilon_3 \pm \alpha t_3)$.

Deze methode kan toegepast worden voor de drie proefvakken.

- 2) De spanningen aan de plaaiteinden kunnen ook berekend worden uit de staalspanningen, gemeten door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij.

Is de gemiddelde spanning in het voorspanstaal σ_y , dan zal de gemiddelde betonspanning na het doorbranden van het staal bedragen

$$\sigma_e = \frac{\sigma_y \cdot F_y}{F_b}$$

F_y = staaloppervlak

F_b = betonoppervlak

De staalspanning is bij de eerste rijstrook op verschillende tijdstippen gemeten, o.m. ook direct vóór en na het spannen van het staal van de tweede rijstrook. De grootte van de betonvoorspanning kan dus ook tussentijds worden bepaald.

- 3) Bij de proefvakken II en III zijn de kruipprisma's in twee etappes voorgespannen. Direct na het spannen van het voorspanstaal van de tweede rijstrook van het betreffende proefvak is het kruipprisma voorgespannen met een kracht groot 2,88 ton. Deze kracht veroorzaakte in de drie prisma's spanningen groot 20, 15 en 10 kg/cm². Het kleinste kruipprisma doorsnede (12 x 12 cm²) verkreeg daardoor een betonvoorspanning, die ongeveer gelijk was aan de gemiddelde betonspanning aan de uiteinden van de eerste rijstrook. Direct na het doorbranden van de draden van het proefvak werd de kracht in de kruipprisma's verhoogd tot 4,32 ton. Deze kracht werd gedurende de proeftijd constant gehouden. De spanningen werden hierdoor in de prisma's verhoogd tot 30, 22,5 en 15 kg/cm². Het kleinste kruipprisma had dus gedurende de gehele meetperiode ongeveer dezelfde betonspanning als de uiteinden van de eerste rijstrook van het betreffende proefvak. De vervormingen gemeten aan dit kruipprisma moeten dus overeenstemmen met de vervormingen gemeten aan de plaa-teinden. Zou het prisma sterk afwijken van de proefplaat, dan zou dit b.v. kunnen wijzen op slip van de draden.
- 4) Met behulp van de kruipfunctie $\varphi(t)$ bepaald uit de drie prisma's kunnen uit de gemeten vervormingen aan de plaa-teinden de daar optredende betonspanningen worden bepaald, zoals in het begin van dit hoofdstuk werd aangegeven.

b) Voor de spanningen in het plaatmidden

- 1) Wordt een constante elasticiteitsmodulus E aangehouden, dan geldt universeel voor de spanningen in de betonplaat:

$$\sigma = E (\epsilon + \alpha t - \epsilon_{kr} - \epsilon_{pl}) = E (\epsilon - \epsilon_c),$$

waarin ϵ_c een correctieterm is, die van de gemeten vervorming ϵ afgetrokken moet worden, om de optredende spanning te kunnen bepalen.

Aangezien voor de plaaieinden de spanning $\sigma = \sigma_e$ en de gemeten vervorming $\epsilon = \epsilon_e$ bekend zijn, volgt uit deze formule de grootte van de correctieterm ϵ_{ce} voor de einden van de plaat:

$$\epsilon_{ce} = (\alpha t + \epsilon_{kr} + \epsilon_{pl}) = \epsilon_e - \frac{\sigma_e}{E}.$$

In het plaatmidden zal de temperatuur en de kruip gelijk zijn aan die bij het plaaieinde. De factoren αt en ϵ_{kr} zijn dus in beide gevallen gelijk. In het plaatmidden zullen, de eerste dagen na het voorspannen, over het algemeen als gevolg van de wrijving, de betonspanningen lager zijn dan aan het plaaieinde. ϵ_{pl} is dus in deze periode voor het plaatmidden waarschijnlijk kleiner dan voor het plaaieinde.

De correctieterm voor het midden ϵ_{cm} is dus waarschijnlijk kleiner dan voor het plaaieinde, dus $\epsilon_{cm} < \epsilon_{ce}$.

De spanning σ_m in het plaatmidden is gelijk aan

$$\sigma_m = E (\epsilon - \epsilon_{cm})$$

of wel

$$\sigma_m > E (\epsilon - \epsilon_{ce})$$

Is de aflezing aan het plaaieinde ϵ_e en die in het midden ϵ_m , dan is de betonspanning in het midden dus waarschijnlijk groter dan $E (\epsilon_m - \epsilon_e + \frac{\sigma_e}{E})$,

dus

$$\sigma_m > \sigma_e - E (\epsilon_e - \epsilon_m).$$

Door σ_m met de laatste formule te bepalen wordt dus een onderste grens voor de betonspanningen in het midden van de plaat gevonden.

- 2) Voor de spanning in het midden is ook een bovengrens op eenvoudige wijze te geven, indien n.l. verondersteld wordt dat $\epsilon_{pl} = 0$. In dat geval geldt:

$$\sigma_m < E [\epsilon - (\alpha t + \epsilon_{kr})].$$

Deze bovengrens kan echter alleen gegeven worden, als t en ϵ_{kr} bekend zijn.

- 3) De werkelijk optredende betonspanningen in het plaatmidden kunnen bepaald worden met methode a 4, maar nu uitgaande van de gemeten vervormingen in het plaatmidden (ϵ_m). Voor proefvak I is voor de kruip en krimp het gemiddelde aangehouden van de kruip- en krimpwaarden gemeten bij de proefvakken II en III.

De variatie van de elasticiteitsmodulus met de tijd is in rekening gebracht door genoemde formules in differentievorm toe te passen voor een bepaald tijdsinterval, waarin de E als constant aangehouden kon worden. Op deze wijze wordt de toename van de spanning ($\Delta\sigma$) in een tijdsinterval (ΔT) bepaald. Door numerieke integratie is het dan mogelijk de spanning σ te bepalen, uitgaande van de beginspanning σ_0 voor de tijd $T = 0$ (begin meting).

In het begin van dit hoofdstuk werd er reeds op gewezen, dat de spanningen in de betonplaat ontstaan t.g.v. verschillende factoren. Daar het resultaat van de metingen slechts informatie verschaft over de som van deze invloeden, is het theoretisch niet zonder meer mogelijk hieruit de invloeden van de afzonderlijke factoren te bepalen.

Daar echter niet alle factoren gelijktijdig optreden of daar bepaalde invloeden redelijkerwijs te verwaarlozen zijn, is toch getracht de geconstateerde verschijnselen zo goed mogelijk te verklaren.

Plaatbelastingproeven.

Om de deugdelijkheid van de voorgespannen wegconstructie met het oog op de verkeersbelasting te toetsen zijn op verschillende plaatsen op de W-rijstrook van proefvak I plaatbelastingproeven uitgevoerd. Bij deze proeven is telkens de grootte van de belasting bepaald waarbij breuk of een begin van scheurvorming optrad. Hiervoor is gebruik gemaakt van een plaatbelastinginstallatie van het Laboratorium voor Grondmechanica te Delft. Deze beproevingsinstallatie bestond uit een vijzel die afgestempeld kon worden tegen een staalconstructie.

Het contactvlak tussen de vijzel en de betonplaat was cirkelvormig met een diameter van 33 cm. Teneinde onder de vijzel lengteveranderingsmetingen met vaste rekmeters te kunnen verrichten, werden uit de cirkelvormige plaat in 2 onderling loodrechte

richtingen door het middelpunt een strook gezaagd met een breedte van 1,5 cm. Zodoende bestond het contactvlak uit vier delen van de cirkelvormige plaat met tussen die delen gleuven van 1,5 cm (zie fig. 3).

Behalve met vaste rekmeters zijn ook metingen verricht met een afneembare rekmeter. De grootte van de belasting werd bepaald m.b.v. een drukdoos. Zodoende konden dus de lengteveranderingen als functie van de belasting bepaald worden ($P - \epsilon$ diagrammen). Begin van scheurvorming of breuk trad op wanneer de lineariteit tussen de belasting en de gemeten ϵ verbroken werd.

Dwarsvoorspanning.

Tenslotte zijn ook nog metingen uitgevoerd bij het dwarsvoorspannen van de uiteinden van de proefvakken II en III. Met de afneembare rek-krommingsmeter zijn de lengte- en krommingsveranderingen t.g.v. dit voorspannen gemeten, met N.T.C.-weerstandsen werden de temperaturen bepaald. Daar het voorspannen in dwarsrichting in een kort tijdsbestek plaats vond, zijn de optredende betonspanningen t.g.v. dit spannen te berekenen met de formule $\sigma = E (\epsilon \pm \alpha t)$.

Hoofdstuk III.

De meetresultaten.

a) Proefvak I.

In fig. 4 en 5 is aangegeven op welke plaatsen rek-krommings- en temperatuurmetingen zijn verricht. De meetgroepen A t/m P bevonden zich langs de lengte-as van de betonplaten. Bovendien is er in de meetgroepen A, H en P nog gemeten langs de langsvoeg en langs de buitenkant van de betonplaten.

De meetresultaten zijn nu als volgt gegeven:

1^o) Metingen aan de betonplaten.

De uit de metingen bepaalde waarden van ϵ in het midden van de dikte zijn als functie van de plaats op diverse data gegeven.

In dezelfde grafieken is uitgezet de grootte αt , waarin t correspondeert met het verschil in de gemiddelde beton-temperatuur. ??

In de tabellen I en II en de figuren 6 en 7 zijn de resultaten voor de metingen verzameld. (Voor zover de metingen, verricht langs de randen, niet zijn aangegeven, zijn ze

210 pag 7

gelijk aan de overeenkomstige metingen, verricht in de lengte-as.)

Tabel I.

Proefvak I (Oostelijke rijstrook) gestort op 1 augustus 1957			
Metingen verricht op	Grootheden ξ en α t gegeven in fig.	ξ en α t berekend t.o.v. meting verricht op	Bijzonderheden
5-8-'57	-	-	Aangehouden nulstand
6-8-'57	6 ^a	5-8-'57	Meting verricht vóór spannen staal W-rijstrook
6-8-'57	6 ^b	5-8-'57	Meting verricht na spannen staal W-rijstrook
7-8-'57	6 ^c	5-8-'57	
14-8-'57	6 ^d	5-8-'57	Meting verricht direct voor het doorbranden van de draden
14-8-'57	6 ^e	5-8-'57	Meting verricht na het doorbranden van de draden
19-8-'57	6 ^f	5-8-'57	
22-8-'57	6 ^g	5-8-'57	
27-8-'57	6 ^h	5-8-'57	

Tabel II.

Proefvak I (Westelijke rijstrook) gestort op 7 augustus 1957			
13-8-'57	-	-	Begin meting
14-8-'57	7 ^a	13-8-'57	Direct voor het doorbranden van de draden
14-8-'57	7 ^b	14-8-'57	Direct na het doorbranden van de draden
19-8-'57	7 ^c	14-8-'57	
22-8-'57	7 ^d	14-8-'57	
27-8-'57	7 ^e	14-8-'57	

2^o) Proefbelasting op de W-rijstrook.

In fig. 8 zijn aangegeven de plaatsen, waar plaatbelastingsproeven zijn uitgevoerd. Tevens zijn in deze figuur aangegeven de meetplaatsen.

In fig. 9 zijn de gemeten specifieke rekken uitgezet als functie van de belasting. Voor belastingsproef 6 is dit niet

gebeurd, omdat de scheuren in dit geval buiten de meet-instrumenten optraden.

Uit fig. 9 blijkt dat (behalve bij belastingsproef 1) in de P - ϵ diagrammen steeds één of meer lijnen gaan afbuigen, hetgeen wijst op het begin van scheurvorming.

In onderstaande tabel III zijn de resultaten samengevat.

Tabel III.

Overzicht plaatbelastingsproeven			
Belas-tings-proef no.	Plaats v/d proef op de rijstrook (fig. 8)	Grootte der gemeten scheur- of breukbelasting	Bijzonderheden
1	Hoekpunt Z-zijde	tussen 4 en 6 ton	Breuk op \approx 70 cm van hoekpunt
2	Zijkant (6 m van hoekpunt Z-zijde)	4 ton	Begin van scheurvorming
3	Midden v/d lengte-as	8,5 ton	"
4	In lengte-as op 6 m van het N-uiteinde	8,5 ton	"
5	In lengte-as op het N-uiteinde	5 ton	"
6	Hoekpunt (N-zijde)	5,5 ton	Breuk op \approx 70 cm van hoekpunt
7	Zijkant (6 m van N-hoekpunt)	5,5 ton	Begin van scheurvorming

Bij de proefbelastingen 2, 5 en 7 trad de eerste scheur op aan de onderzijde van de plaat loodrecht op de randen van de plaat.

Bij de proefbelastingen 3, 4 en 5 trad begin van scheurvorming op aan de onderzijde van de plaat evenwijdig aan de lengterichting van de weg.

3^o) De gemeten elasticiteitsmoduli.

De in het laboratorium bepaalde elasticiteitsmoduli zijn in fig. 10 als funktie van de ouderdom van het beton voor beide rijstroken gegeven.

4^o) Metingen verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij.

De metingen verricht door de Nederlandse Spanbeton Mij. aan proefvak I zijn als bijlage No. I in dit rapport opgenomen.

b) Proefvak II.

1^o) Metingen aan de O-rijstrook.

In fig. 11 zijn de meetplaatsen van proefvak II aangegeven. De resultaten van deze metingen zijn op dezelfde wijze gegeven als voor proefvak I is beschreven (fig. 12a t/m 12m). In onderstaande tabel IV is een overzicht van deze metingen gegeven.

Tabel IV.

Proefvak II Oostelijke rijstrook (gestort op 13 september 1957)			
Metingen verricht op	Grootheden ϵ en αt gegeven in fig.	ϵ en αt berekend t.o.v. meting verricht op	Bijzonderheden
17- 9-'57	-	-	Aangehouden nulstand
18- 9-'57	12 ^a	17-9-'57	Gemeten direct na spannen staal W-rijstrook
20- 9-'57	12 ^b	17-9-'57	
23- 9-'57	12 ^c	17-9-'57	
26- 9-'57	12 ^d	17-9-'57	Direct vóór het doorbranden van de draden
26- 9-'57	12 ^e	17-9-'57	Direct na het doorbranden van de draden
30- 9-'57	12 ^f	17-9-'57	
8-10-'57	12 ^g	17-9-'57	
18-10-'57	12 ^h	17-9-'57	
30-10-'57	12 ⁱ	17-9-'57	
8-11-'57	12 ^j	17-9-'57	
15-11-'57	12 ^k	17-9-'57	
2-12-'57	12 ^l	17-9-'57	
16-12-'57	12 ^m	17-9-'57	

2^o) De metingen aan de krimpplaten.

In het vorige hoofdstuk werd reeds beschreven hoe uit de gemeten rek ϵ_1 van de krimpplaten de grootte van ϵ_{kr} kan worden bepaald ($\epsilon_{kr} = \epsilon_1 - \alpha t$).

In fig. 13 zijn de grootheden ϵ_1 , αt en ϵ_{kr} als functie van de tijd gegeven.

Het blijkt, dat i.p.v. krimp een zwelling optreedt, waarschijnlijk als gevolg van de hoge vochtigheid.

3^o) De metingen aan de kruipprisma's.

In fig. 14 zijn gegeven de lengteveranderingen ϵ_2 gemeten aan de drie kruipprisma's. Met behulp van de grootheden ϵ_{kr} en αt kan nu ϵ_{tot} ($= \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}$) bepaald worden. Vervolgens kan hieruit de kruipfunctie $\varphi(t)$ berekend worden met de formule

$$\varphi(t) = \frac{\epsilon_{tot} - \epsilon_{el}}{\epsilon_{el}} \quad (\text{zie hoofdstuk II}).$$

Daar de spanning tijdens de proef verhoogd is, is gebruikgemaakt van het superpositie-beginsel voor de bepaling van $\varphi(t)$.

In fig. 14 is deze kruipfunctie gegeven.

De spreiding in de resultaten blijkt aanzienlijk te zijn.

4^o) Vergelijking van de gemeten vervormingen aan de uiteinden van de betonplaat met die van het kleinste kruipprisma.

De grootte van de faktor αt gemeten aan de plaa-teinden is bij de verschillende metingen niet altijd gelijk aan die van het kleinste kruipprisma. Om toch de gemeten vervormingen aan de plaa-teinden te kunnen vergelijken met die van het kleinste kruipprisma is in fig. 15 uitgezet de grootte $\epsilon - \alpha t$.

Voor de plaa-teinden is $\epsilon - \alpha t$ bepaald uit het gemiddelde van de maximale lengteveranderingen gemeten in de meetgroepen A en J.

5^o) De gemeten elasticiteitsmoduli.

In fig. 10 zijn als functie van de ouderdom van het beton uitgezet de in het laboratorium op verschillende tijdstippen bepaalde elasticiteitsmodulus van het voor proefvak II gebruikte beton.

6^o) De metingen verricht tijdens het dwarsvoorspannen van het Z-einde van proefvak II.

In fig. 16 is gegeven de ligging van de voorspandraden.

Tevens is de plaats aangegeven, waarin lengte- en krommingsveranderingen zijn gemeten. (Meetlijnen A_1 , A_2 en A_3).

De metingen zijn verricht op 20 december 1957, direct vóór en na het spannen van de draden, zodat de kruip en krimp te verwaarlozen zijn. Er werd praktisch geen temperatuurverschil in het beton gemeten.

De gemeten lengteveranderingen ϵ zijn met behulp van een elasticiteitsmodulus van 350.000 kg/cm^2 omgerekend naar betonspanningen in het hart van de plaat. Deze betonspanningen zijn voor de verschillende meetlijnen gegeven in fig. 16. In de meetlijnen A_1 en A_2 zijn aan de buitenkant van de beton-

plaat drukspanningen gemeten groot $\approx 16 \text{ kg/cm}^2$ en in de lengte-as van de O-rijstrook van $\approx 7 \text{ kg/cm}^2$.

In de meetlijn A₃ bedraagt de betonspanning $\approx 4 \text{ kg/cm}^2$, hetgeen gezien de ligging van de voorspandraden t.p.v. de meetlijnen zeer plausibel is.

7^o) De metingen verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij. aan proefvak II.

Deze zijn gegeven in bijlage II.

c) Proefvak III.

De meetresultaten van dit proefvak zijn op dezelfde wijze samengevat als hierboven voor proefvak II is beschreven. Het meetschema van de betonplaat is gegeven in fig. 17.

De resultaten van de metingen verricht aan de W-rijstrook zijn op de gebruikelijke wijze verwerkt in de fig. 18a t/m 18i.

In onderstaande tabel V is een overzicht van de verrichte metingen gegeven.

Tabel V.

Proefvak III W-rijstrook (gestort op 15 oktober 1957)			
Metingen verricht op	Grootheden ϵ en α t gegeven in figuur	ϵ en α t berekend t.o.v. meting verricht op	Bijzonderheden
17-10-'57	-	-	Nulstand voor meting op 21-10-'57
21-10-'57	18 ^a	17-10-'57	Gemeten vóór het spannen draden O-rijstrook
22-10-'57	18 ^b	21-10-'57	Gemeten direct na spannen draden O-rijstrook
29-10-'57	18 ^c	21-10-'57	Gemeten direct voor het doorbranden van de draden
29-10-'57	18 ^d	21-10-'57	Gemeten direct na het doorbranden van de draden
1-11-'57	18 ^e	21-10-'57	
8-11-'57	18 ^f	21-10-'57	
15-11-'57	18 ^g	21-10-'57	
23-11-'57	18 ^h	21-10-'57	
2-12-'57	18 ⁱ	21-10-'57	

In fig. 19 zijn vervolgens uitgezet de grootheden ϵ_1 en αt gemeten aan de krimpplaten en de hieruit bepaalde ϵ_{kr} . Het blijkt, dat evenals bij proefstuk II weer zwellen optreedt. In fig. 20 zijn gegeven de grootheden ϵ_2 en αt gemeten aan de kruipprisma's en de hieruit bepaalde kruipfunctie $\varphi(t)$. De grootheid $(\epsilon_2 - \alpha t)$ gemeten aan het kleinste kruipprisma en $(\epsilon - \alpha t)$ gemeten in de meetgroepen A en I zijn gegeven in fig. 21.

In fig. 10 is de elasticiteitsmodulus van het toegepaste beton gegeven. Het dwarsvoorspannen van beide uiteinden van proefvak III heeft plaatsgevonden op 10 januari 1958.

In fig. 22a en b is een overzicht van deze metingen gegeven. De betondrukspanningen, veroorzaakt t.g.v. het voorspannen, zijn bepaald met een E van 350.000 kg/cm^2 .

De gemeten betondrukspanningen aan de Z.W.-zijde blijken aanmerkelijk kleiner te zijn dan aan de N.O.-zijde. Dit is een gevolg van het feit dat aan de Z.W.-zijde slechts 4 draden $\varnothing 5$ zijn gespannen en aan de N.O.-zijde 8 draden $\varnothing 5$.

Aan de Z.W.-zijde is de dwarsvoorspanning ongeveer 5 kg/cm^2 , aan de N.O.-zijde werd langs de buitenrand 12 kg/cm^2 gemeten, in de lengte-as ca 6 kg/cm^2 .

In alle meetlijnen is ook de verandering van de breedte van de langsvoeg gemeten. De voegbreedte bleek 0,1 à 0,2 mm kleiner te zijn geworden.

De metingen, verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij. aan dit proefvak, zijn gegeven in bijlage III.

Bij de proefvakken II en III werd meestal om de 7 à 10 dagen een meting uitgevoerd en dus een betontemperatuur gemeten. Om een indruk te verkrijgen over het verdere verloop van de temperatuur tussen twee metingen zijn in fig. 23 gegeven de luchttemperaturen, gemeten op het vliegveld Ypenburg en verstrekt door het K.N.M.I. in De Bilt. In de figuur zijn tevens uitgezet de gemeten betontemperaturen van de verschillende proefvakken. Het blijkt dat deze betontemperaturen op enkele uitzonderingen na overeenkomen met de gegeven luchttemperaturen. Verwacht mag dus worden dat de gegeven temperatuurlijn het verloop van de betontemperatuur in de meetperiode goed weergeeft.

Om voor proefvak I ook de beschikking te hebben over kruip- en krimp-krommen is een gemiddelde bepaald van de kruip- en krimp-krommen gemeten aan de proefvakken II en III. Het resultaat is gegeven in fig. 24.

Hoofdstuk IV.

Het bepalen van de optredende betonspanningen in de proefplaten.

A. Spanningen in de plaa-teinden.

1) Proefvak I.

In hoofdstuk II werd reeds aangegeven, welke methoden gebruikt zullen worden om de optredende betonspanningen te bepalen.

Volgens methode a 1 kan de betonvoorspanning σ_e voor de O-rijstrook bepaald worden met de formule:

$$\sigma_e = E_1 (\varepsilon_1 - \alpha t_1) + E_2 (\varepsilon_2 - \alpha t_2),$$

en voor de W-rijstrook met de formule:

$$\sigma_e = E_3 (\varepsilon_3 - \alpha t_3).$$

De grootheden E_1 , E_2 en E_3 zijn gegeven in fig. 10. De grootheden $(\varepsilon_1 - \alpha t_1)$, $(\varepsilon_2 - \alpha t_2)$ en $(\varepsilon_3 - \alpha t_3)$ kunnen uit de fig. 6 en 7 bepaald worden.

Daar het voorspanstaal een zekere aanhecht-lengte nodig heeft om de volle voorspanning aan het beton te kunnen overdragen, is voor de grootheid $\varepsilon - \alpha t$ steeds de maximale waarde bepaald in de betreffende meetgroepen. Voor de O-rijstrook zijn de optredende betonspanningen aan de plaa-teinden bepaald t.p.v. de lengte-as van de weg (meetgroepen A en P) en langs de langsvog (meetgroepen A" en P"), voor de W-rijstrook alleen t.p.v. de lengte-as van de weg (meetgroep A en P).

Met methode a 2 zijn de betonspanningen berekend uit de door de Nederlandse Spanbeton Mij. gemeten spanningen in het voorspanstaal. In onderstaande tabel VI zijn de resultaten van deze beide berekeningen samengevat.

Tabel VI.

Gemeten betonspanningen aan de plaaieinden van proefvak I t.g.v. het voorspannen						
	Oostelijke rijstrook				Westelijke rijstrook	
Meetgroep Beton- drukspan- ningen ontstaan	A	A"	P	P"	A	P
tussen storten beton en span- nen draden W-rijstrook	(1,4)	(1,0)*				
t.g.v. spannen draden W-rijstrook	17,0(13,2)	23,0(19,0)	11,0	14,0		
tussen spannen W-rijstrook en doorbranden draden	(1,4)				(1,7)	
t.g.v. door- branden van de draden	5,0(12,9)	1,0	13,0	12,0	28,0(27,6)	28,0
Gemeten beton- spanningen	22,0(28,9)	24,0	24,0	26,0	28,0(29,3)	28,0
* De tussen haakjes gegeven waarden zijn bepaald uit de metingen verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij.						

Het blijkt, dat in de perioden, gelegen tussen storten beton en spannen draden W-rijstrook, en tussen het spannen en het doorbranden van de draden, in de Oostelijke rijstrook als gevolg van temperatuurvariaties nog enige spanningsveranderingen zijn opgetreden. Daar deze spanningen slechts bepaald konden worden met methode a 2, dienen de spanningen, bepaald volgens methode a 1, gecorrigeerd te worden.

De in de tabel gegeven betonspanningen voor meetgroep A van de O-rijstrook ($22,0 \text{ kg/cm}^2$) moet dus worden verhoogd met $2 \times 1,4 \text{ kg/cm}^2$, zodat de totale gemeten optredende betonspanning wordt $22,0 + 2,8 \cong 25 \text{ kg/cm}^2$.

Om dezelfde redenen wordt de totale betonspanning van meetgroep A van de W-rijstrook $28,0 + 1,7 \cong 30 \text{ kg/cm}^2$.

Voor de overige betonspanningen bepaald uit de rekmetingen is de grootte van deze correctie niet bekend, daar de meting verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij. niet volledig is.

Door het spannen van de draden van de W-rijstrook wordt, zoals uit de tabel blijkt, het spanraam zodanig vervormd, dat de O-rijstrook hierdoor al voor een groot deel wordt voorgespannen.

In fig. 25 zijn de gemeten gemiddelde betonspanningen (meetgroepen A en P) voor beide rijstroken als functie van de tijd gegeven. Uitgezet zijn zowel de waarden gemeten met de afneembare rekmeter, als de waarden bepaald uit de meting verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij.

Uit de in fig. 6 gegeven meetresultaten blijkt, dat de in tabel VI gegeven maximale betonspanningen optreden op 2 à 3 m van de plaaiteinden. Op 1 m van het plaaiteinde werd bij de O-rijstrook nog praktisch geen betondrukspanning gemeten. Dit is toe te schrijven aan onvoldoende hechting van de wapening aan het beton door een slechte verdichting van het beton ter plaatse.

Ter controle zijn de betonspanningen aan het plaaiteinde ook bepaald met methode a 4. Voor de benodigde kruip- en krimpgegevens is het gemiddelde van de resultaten, verkregen bij de proefvakken II en III aangehouden (zie fig. 24).

In fig. 25 zijn de op deze wijze bepaalde spanningen ter vergelijking gegeven. Uit de figuur blijkt dat de betonspanningen, bepaald met bovenstaande methode, redelijk overeenstemmen.

2) Proefvak II.

Analoog aan proefvak I zijn uit de rek- en krommingsmetingen en uit de metingen, verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij., de optredende betonspanningen bepaald. Ze zijn samengevat in onderstaande tabel VII.

Tabel VII.

Gemeten betonspanningen aan de plaafeinden van de O-rijstrook van proefvak II							
Beton- drukspan- ningen ontstaan	Meetgroep	A'	A	A''	J'	J	J''
tussen storten beton en span- nen draden W-rijstrook			(3,9)*				
t.g.v. spannen draden W-rijstrook	33	15	(12)	8	28	18	13
tussen spannen en door- branden van de draden			(0,3)				
t.g.v. doorbranden van de draden	14	16	(14)	45	16	18	29
Gemeten betonspanningen	47	31	(30,2)	53	44	36	42
* Bepaald uit metingen N.S.M. (bijlage II).							

Uit de tabel blijkt, dat er in de meetgroepen A en J betonspanningen zijn gemeten van 31 à 36 kg/cm² en in de overige meetgroepen betonspanningen variërend van 42-53 kg/cm². Dit is een gevolg van de extra voorspandraden langs de langsvoeg en de buitenkant van de rijstrook. Deze hoge betonspanningen treden slechts plaatselijk aan de plaafeinden op. In het plaatmidden was deze spanningsverhoging aan de zijanten niet meer aanwezig.

Bij proefvak II is aan de verdichting van het beton aan de plaafeinden meer aandacht besteed dan bij proefvak I. Bij dit proefvak werd van 0 tot 0,50 m uit het plaafeinde reeds een betonspanning gemeten groot 25 à 50% van de maximale betondrukspanning en van 0,50 tot 1,00 m de volle voorspanning. Het gemiddelde van de betonspanningen, bepaald in de meetgroepen A en J zijn als funktie van de tijd uitgezet in fig. 26.

De optredende betonspanningen zijn eveneens bepaald met methode a 4. In fig. 26 is het resultaat hiervan aangegeven. De overeenstemming tussen de methoden a 1, a 2 en a 4 is goed. In fig. 15 is als funktie van de tijd gegeven de grootheid $\varepsilon - \alpha t$ gemeten aan de plaafeinden en aan het kleinste kruipprisma. Het blijkt, dat het slechts ten dele gelukt is, de vervormingen in het kruipprisma gelijk te maken aan die, in

in het plaaiteinde. Toch geeft deze proef (methode a 3) wel informatie over de grootte-orde van de optredende spanningen.

3) Proefvak III.

De betonspanningen ontstaan aan de plaaiteinden, zijn samengevat in onderstaande tabel VIII.

Tabel VIII.

Gemeten betonspanningen aan de plaaiteinden van de W-rijstrook van proefvak III.						
Beton- drukspan- ningen ontstaan	Meetgroep A'	A	A''	I'	I	I''
tussen storten beton en spannen draden W-rijstrook		(1,8)*				
t.g.v. spannen draden W-rijstrook	13	16 (9,2)	21	8	14	19
tussen spannen draden W-rijstrook en doorbranden		(0,2)				
t.g.v. doorbranden draden	37	20 (19,2)	14	34	18	14
Gemeten betonspanningen	50	36 (30,4)	35	42	32	33
* De tussen haakjes gegeven waarden zijn bepaald uit de meting verricht door de N.V. Nederlandse Spanbeton Mij.						

Bij proefvak III werden alleen langs de buitenkant van de rijstrook extra draden gespannen. Deze veroorzaken de gegeven hoge betondrukspanningen in de meetgroepen A' en I'. Deze betonspanning treedt weer plaatselijk op, daar er in de meetgroepen C'', E'' enz. dezelfde lengteveranderingen worden gemeten als in de meetgroepen C en E. In de overige meetgroepen aan de plaaiteinden werden betondrukspanningen gemeten van 32 à 36 kg/cm². In fig. 27 zijn voor de meetgroepen A en I de betonspanningen gegeven als funktie van de tijd.

Uit fig. 21 volgt eveneens dat de betonspanningen aan het plaaiteinde na het volledige voorspannen ongeveer 30 kg/cm² moeten bedragen. Er blijkt n.l. een redelijke overeenstemming te zijn tussen de vervormingen gemeten aan de plaaiteinden van het proefvak en aan het kleinste kruipprisma.

In fig. 27 zijn tenslotte ook nog gegeven de betonspanningen optredend aan de plaaiteinden en bepaald met methode a 4. Er blijkt een goede overeenstemming te bestaan met de spanningen,

bepaald volgens de andere methoden.

B. Spanningen in het plaatmidden.

I) Proefvak I.

In hoofdstuk II werden enkele methoden beschreven waarmee de betonspanningen in het plaatmidden bepaald kunnen worden. Om de werkelijk optredende betonspanningen te kunnen berekenen, moet de spanning σ_0 bij het begin van de meting bekend zijn. In hoofdstuk V zal deze beginspanning σ_0 voor de drie proefvakken berekend worden. Voor de O-rijstrook van proefvak I bedraagt deze beginspanning (op 5-8-'57) 2 kg/cm^2 (druk) en voor de W-rijstrook (op 13-8-'57) 6 kg/cm^2 (druk). De onderste grens voor de optredende betonspanningen in het midden van de betonplaat is nu voor beide rijstroken te berekenen met de formule

$$\sigma_m = \sigma_e + \sigma_0 - E (\epsilon_e - \epsilon_m) \quad (\text{methode b 1 uit hoofdstuk II}).$$

ϵ_e en ϵ_m kunnen uit de fig. 6 en 7 bepaald worden. De in fig. 7b t/m e gegeven lengteveranderingen voor de W-rijstrook zijn bepaald t.o.v. de meting verricht op 14-8-'57. Door superpositie van deze meetresultaten met die uit fig. 7a kunnen ϵ_e en ϵ_m bepaald worden t.o.v. de beginmeting op 13-8-'57.

Voor de bovenste grens van de optredende betonspanningen geldt voor beide rijstroken de formule

$$\sigma_m = \sigma_0 + E \cdot \epsilon_m - (\alpha t + \epsilon_{kr}) \quad (\text{methode b 2 uit hoofdstuk II}).$$

ϵ_{kr} is voor proefvak I gegeven in fig. 24.

De werkelijk optredende betonspanningen zijn te bepalen met de methode b 3. Hierbij zijn de kruip- en krimpkrommen uit fig. 24 gebruikt.

De met deze 3 methoden bepaalde betonspanningen zijn gegeven in fig. 28.

Na het voorspannen blijken in beide rijstroken betondrukspanningen te zijn gemeten van ca 20 kg/cm^2 .

II) Proefvak II.

De optredende betonspanningen zijn op dezelfde wijze bepaald als hierboven voor proefvak I is aangegeven.

De beginspanning σ_0 (bepaald in het volgende hoofdstuk)

bedraagt voor dit proefvak 0 kg/cm^2 .

De resultaten zijn gegeven in fig. 29.

Uit deze figuur blijkt dat na het volledige voorspannen van dit proefvak in het plaatmidden betonspanningen gemeten zijn van ca 30 kg/cm^2 .

III) Proefvak III.

Ook voor dit proefvak zijn de betonspanningen in het plaatmidden bepaald met de drie beschreven methoden.

Als begin van de meting is aangehouden 17-10-'57. Door de lengteveranderingen gegeven in de fig. 18b t/m 18i te superponeren op die, gegeven in fig. 18a, kunnen ξ_e en ξ_m bepaald worden t.o.v. 17-10-'57. De beginspanning σ_0 (op 17-10-'57) bedraagt voor dit proefvak 3 kg/cm^2 (druk). De optredende betonspanningen in het plaatmidden zijn gegeven in fig. 30.

Na het doorbranden van de draden bedraagt de gemeten betonspanning in het plaatmidden ca 25 kg/cm^2 .

Deze betonspanning treedt ook langs de langsvoeg en langs de buitenkant van de betonplaat op.

Uit de metingen langs de buitenkant en langs de langsvoeg is n.l. gebleken, dat dezelfde lengteveranderingen worden gemeten als in de lengte-as van de weg.

De flauwe boog waarin dit proefvak is gelegen beïnvloedt de spanningsverdeling in de betonplaat dus niet.

Hoofdstuk V.

Bepaling van de beginspanningen σ_0 en de wrijvingscoëfficiënt f .

In fig. 23 zijn uitgezet, voor de diverse metingen, verricht aan de drie proefvakken, de gemeten gemiddelde betontemperaturen. In hoofdstuk II werd reeds aangegeven op welke wijze er uit de "korte duur metingen" (temperatuurmeting en metingen vóór en na het voorspannen) een indruk verkregen kan worden van de beginspanning σ_0 en de wrijvingscoëfficiënt f .

Deze berekeningen zijn nu voor de drie proefvakken als volgt uitgevoerd:

A. Proefvak I. Oostelijke rijstrook.

De nulstand werd afgelezen op 5-8-'56 te 20.⁰⁰ uur.

Zoals uit de temperatuurlijn van fig. 23 blijkt ging aan deze meting vooraf een zeer grote temperatuurstijging van 12°C op 5-8-'56.

De hoogste temperatuur was 24°C op 5-8-'56 te 16.⁰⁰ uur. Vanaf dit tijdstip tot aan de "nulmeting" is de temperatuur geleidelijk gedaald tot 21°C.

Aangenomen kan worden dat bij de hoge temp. van 24°C de wrijving volledig ontwikkeld was. De wrijving was gericht naar het plaatmidden.

Bij een wrijvingscoëfficiënt f was op dit ogenblik een drukspanning in het plaatmidden van 12 f aanwezig.

In hoofdstuk II werd voor een 100 m lange proefplaat berekend dat er bij volledige ontwikkeling van de wrijving een spanningsverschil tussen het plaatmidden en de plaa-teinden ontstaat groot 12 f . De lengte van proefvak I is 107 m, zodat op 5-8-'56 te 16.⁰⁰ uur er een betondrukspanning in het plaatmidden aanwezig was groot $\frac{107 \cdot 12}{100} f \approx 13 f$.

Worden de vervormingen t.g.v. de temperatuurdaling van 3°C volledig belemmerd, dan ontstaat er een spanningsverandering in het plaatmidden van 9 kg/cm². Dit zal plaatsvinden wanneer 26 $f > 9$ of $f > 0,3$. In dat geval bedraagt de initiale spanning bij het opnemen van de nulstand in het plaatmidden 13 $f - 3 E \cdot \alpha = 13 f - 9 \text{ kg/cm}^2$ (druk).

Na de nulstandmeting daalde de temperatuur verder tot 16°C (6-8-'56, 1.⁰⁰ uur), d.w.z. een daling van 8°C t.o.v. het punt waar volledige wrijvingsontwikkeling werd aangenomen (24°C).

Bij volledige belemmering veroorzaakt een temperatuurverschil van 8°C een betonspanning van ca 24 kg/cm².

Is $f > 0,9$, dan is bij 16°C de wrijving weer volledig ontwikkeld, alleen tegengesteld aan de wrijving bij 24°C.

De trekspanning in het plaatmidden is dan op dat ogenblik 12 f .

De 2^e meting werd verricht op 6-8-'56, 10.⁰⁰ uur bij een temperatuur van 17°C.

De spanning in het plaatmidden is dan 13 $f - 3 \text{ kg/cm}^2$ (trek). Dit betekent een spanningsverschil t.o.v. de nulstand van

$13 f - 3 + 13 f - 9 = 26 f - 12 \text{ kg/cm}^2$. Gemeten werd een verschil van 10 kg/cm^2 (trek), hetgeen overeenkomt met:

$$26 f - 12 = 10$$

$$26 f = 22$$

$$f = \frac{22}{26} = 0,85$$

De spanning in het plaatmidden bedroeg dus volgens deze globale berekening $\bar{T}_0 = 13 f - 9 = 11 - 9 = 2 \text{ kg/cm}^2$ (druk). Even vóór het voorspannen was de spanning dus $13 f - 3 = 11 - 3 = 8 \text{ kg/cm}^2$ (trek).

Vervolgens werd de plaat gedeeltelijk voorgespannen. Dit geschiedde in de periode van 6-8-'56, 10.⁰⁰ uur (temp. 17°C) tot 6-8-'56, 17.³⁰ uur (temp. 21°C).

In deze periode is in het midden een verkorting gemeten, zodat aangenomen kan worden, dat de wrijving overschreden is.

Het werkelijke spanningsverschil tussen de plaa-teinden en het plaatmidden bedraagt dus na het spannen 13 f. Aan het plaa-teinde werd een spanning van 14 kg/cm^2 (druk) gemeten. In het plaatmidden werd t.o.v. de nulstand 5-8-'56, 20.⁰⁰ uur 3 kg/cm^2 druk gemeten, d.w.z. dat de werkelijke betondrukspanning in het plaatmidden bedroeg $3 + 2 = 5 \text{ kg/cm}^2$ (druk), hetgeen correspondeert met een spanningsverschil van $14 - 5 = 9 \text{ kg/cm}^2$. Hieruit volgt $13 f = 9$ en $f = \frac{9}{13} \approx 0,7$.

Direct ná het doorbranden van de draden, dus na volledig voorspannen van de plaat, bedroegen aan het plaa-teinde en het plaatmidden de spanningen resp. 23 kg/cm^2 en 12 kg/cm^2 . Dit spanningsverschil correspondeert dus met een wrijvingscoëfficiënt $f = \frac{23 - 12}{13} \approx 0,85$.

De drie waarden, gevonden voor de wrijvingscoëfficiënt, blijken dus goed overeen te stemmen.

B. Proefvak I (Westelijke rijstrook).

Bij deze rijstrook werd de nulstand opgenomen op 13-8-'57 om 15.⁰⁰ uur. De gemeten betontemperatuur bedroeg op dat ogenblik ca 20°C. In de periode tot het opnemen van de nulstand was de gemiddelde temperatuur 18°C met schommelingen van ca $\pm 2^\circ\text{C}$.

Aangenomen wordt, dat in deze periode de plaat spanningsloos is bij de gemiddelde temperatuur van 18°C.

Indien $f > 0,5$ zal de wrijving in deze periode nog niet volledig ontwikkeld zijn. D.w.z. dat bij het opmeten van de nulstand

(13-8-'57 om 15.⁰⁰ uur) de spanning in het plaatmidden bedroeg $2 E \alpha = 6 \text{ kg/cm}^2$ (druk). Daarna is de temperatuur gaan dalen tot 13°C (14-8-'57, 4.⁰⁰ uur).

Dus een daling van 5°C t.o.v. de spanningsloze toestand. Is $f < 1,20$, dan wordt de wrijving volledig ontwikkeld. Dus op 14-8-'57, 4.⁰⁰ uur is de spanning in het plaatmidden in dit geval 13 f (trek).

Daarna is de temperatuur gaan stijgen tot 16°C op 14-8-'57, 10.⁰⁰ uur, (2^e meting). Dit wil zeggen, dat de spanning in het plaatmidden door deze stijging van 3°C is veranderd met 9 kg/cm^2 (druk), zodat bij de 2^e meting de spanning bedroeg $13 f - 9 \text{ kg/cm}^2$ (trek).

T.o.v. de nulstand betekent dit een spanningsverandering van $13 f - 3$ (trek). Gemeten werd een spanningsverandering van 10 kg/cm^2 (trek) t.o.v. de nulstand.

Dus $13 f - 3 = 10$ of $f = \frac{13}{13} = 1,0$.

Na het voorspannen is de betonspanning in het plaatmidden toegenomen tot 7 kg/cm^2 , druk, (zie fig. 28).

Aan de plaa-teinden werd een betondrukspanning gemeten van 28 kg/cm^2 . Tijdens het voorspannen werd de wrijving weer volledig ontwikkeld. Het spanningsverschil tussen de plaat-einden en het plaatmidden bedraagt na het voorspannen $28 - 7 = 21 \text{ kg/cm}^2$.

Uit het bovenstaande volgt $13 f = 21$ en $f = \frac{21}{13} = 1,6$.

C. Proefvak II (Oostelijke rijstrook).

De lengte van proefvak II bedraagt $\approx 105 \text{ m}$. Het spanningsverschil tussen plaatmidden en de plaa-teinden bedraagt bij volledige wrijvingsontwikkeling $\frac{12 \cdot 105}{100} f \approx 13 f$.

De "nulstand" werd afgelezen op 17-9-'57.

Uit fig. 23 blijkt dat tussen het storten van de rijstrook en het opnemen van deze nulstand slechts kleine temperatuurwisselingen hebben plaatsgevonden en dat de gemiddelde temperatuur in die periode ca 13°C bedroeg. De nulstand werd bij eenzelfde temperatuur afgelezen, zodat aangenomen kan worden dat $\sigma_0 = 0 \text{ kg/cm}^2$.

In de fig. 26 en 29 zijn de optredende betonspanningen gegeven aan de plaa-teinden en het plaatmidden. Uit de gemeten spanningen blijkt, dat zowel na het spannen van de draden van de aangrenzende rijstrook als na het volledige voorspannen, de

spanning in het plaatmidden is toegenomen. Hieruit volgt dat de plaat bij beide fasen van het voorspannen is gaan glijden over de ondergrond door het bereiken van de maximale wrijving. Na de 1^e fase van het voorspannen werd gemeten:

$$\sigma_e = 17 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

$$\sigma_m = 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

Het spanningsverschil $\sigma_e - \sigma_m$ bedraagt dus $17 - 10 = 7 \text{ kg/cm}^2$.

Hieruit volgt $13 f = 7$ en $f = \frac{7}{13} \approx 0,5$.

Na het volledige voorspannen werd gevonden

$$\sigma_e = 33 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

$$\sigma_m = 24 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

Een spanningsverschil van $33 - 24 = 9 \text{ kg/cm}^2$, dus $f = \frac{9}{13} = 0,7$.

D. Proefvak III (Westelijke rijstrook).

Daar de lengte van proefvak III ca 88 m bedraagt, is de spanning in het plaatmidden t.o.v. het plaa-teinde bij volledige ontwikkeling van de wrijving $\frac{12 \cdot 88}{100} f \approx 11 f$.

De nulstand werd afgelezen op 17-10-'57 om 16.⁰⁰ uur. In het gedeelte van de verhardingsperiode gelegen tussen het storten van het beton en het aflezen van de nulstand was de variatie in de temperatuur gering en bedroeg de gemiddelde temperatuur 12°C. Bij het opnemen van de nulstand bedroeg de betontemperatuur 13°C.

In verband met het bovenstaande kan aangenomen worden dat voor het opnemen van de nulstand alle vervormingen van de betonplaat volledig door de ondergrond werden belemmerd en dat de betonplaat bij een temperatuur van 12°C spanningsloos was. De beginspanning σ_0 wordt dus veroorzaakt door een temperatuurstijging van 1°C en bedraagt dus 3 kg/cm^2 (druk).

De volgende meting werd verricht op 21-10-'57 om 10.⁰⁰ uur. De temperatuur was toen 9°C. De vorige dag 20-10-'57 om 5.⁰⁰ uur was de temperatuur echter, voor het eerst na de nulmeting, laag (n.l. 6°C) t.o.v. de temperatuur, behorend bij de spanningsloze toestand (12°C).

Indien $f < 1,6$, dan zal op dat ogenblik de plaat zijn gaan glijden over de ondergrond. In dat geval is de spanning bij de 2^e meting $11 f - 9 \text{ kg/cm}^2$ (trek). Gemeten werd een spanning van $2,5 \text{ kg/cm}^2$ (trek), waaruit volgt $11 f - 9 = 2,5$ en $f = \frac{11,5}{11} = 1,0$.

Na de 1^e fase van het voorspannen werden de volgende betonspanningen gemeten:

$$\bar{\sigma}_e = 15 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

$$\bar{\sigma}_m = 4,5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

Het spanningsverschil tussen plaaieinden en het plaatmidden bedraagt $15 - 4,5 = 10,5 \text{ kg/cm}^2$, hetgeen correspondeert met $f = \frac{10,5}{11} = 1,0$.

Na de 2^e fase van het voorspannen werden gemeten

$$\bar{\sigma}_e = 34 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

$$\bar{\sigma}_m = 27,5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (druk)}$$

Hieruit volgt $f = \frac{34 - 27,5}{11} = 0,6$.

In onderstaande tabel IX zijn de in het voorgaande gevonden waarden voor $\bar{\sigma}_0$ en f samengevat.

Tabel IX.

Proef- vak No.	Metingen verricht	$\bar{\sigma}_0$ in kg/cm ²	f	f _{gem}
I	<u>Oostelijke rijstrook</u>			
	a) Voor 1 ^e fase voorspannen		0,85	
	b) na 1 ^e fase voorspannen	2 (druk)	0,7	0,8
	c) na 2 ^e fase voorspannen		0,85	
	<u>Westelijke rijstrook</u>			
	a) Voor het voorspannen		1,0	
II	b) na volledig voorspannen	6 (druk)	1,6	1,3
	<u>Oostelijke rijstrook</u>			
	a) Na 1 ^e fase voorspannen		0,5	
III	b) na 2 ^e fase voorspannen	0	0,7	0,6
	<u>Westelijke rijstrook</u>			
III	a) Voor 1 ^e fase voorspannen		1,0	
	b) na 1 ^e fase voorspannen	3 (druk)	1,0	0,9
	c) na 2 ^e fase voorspannen		0,6	

Uiteraard gelden bovenstaande berekeningen als globaal.

Uit de tabel blijkt dat de grootte-orde van de wrijvingscoëfficiënten, bepaald voor de betonplaten gefundeerd op een verdicht zandbed, vrijwel gelijk is aan die, bepaald voor de betonplaat gestort op een gestabiliseerde fundering.

Voor proefvak I (0-rijstrook) is de wrijvingscoëfficiënt 0,8.

Dat wil zeggen, dat de werkelijke spanningen, vóór het voorspannen in het plaatmidden kunnen variëren tussen 10 kg/cm^2 druk en 10 kg/cm^2 trek.

Na het voorspannen van de plaa-teinden met $\bar{\sigma}_v$ zal de spanning in het midden variëren tussen globaal $\bar{\sigma}_v \pm 10 \text{ kg/cm}^2$.

Het maximale spanningsverschil tussen de plaa-teinden en het plaatmidden bedraagt dus zowel vóór als na het spannen 10 kg/cm^2 .

Voor de W-rijstroom van proefvak I is dit spanningsverschil globaal 17 kg/cm^2 , voor proefvak II 8 kg/cm^2 en voor proefvak III 10 kg/cm^2 .

In fig. 31 a, b en c zijn voor de drie proefvakken de, tijdens de beproeving gemeten waarden voor dit spanningsverschil verzameld. Ter vergelijking zijn de, uit de wrijvingscoëfficiënt volgende waarden eveneens aangegeven.

Uit de figuur blijkt dat het gemeten spanningsverschil slechts in enkele gevallen groter is dan het spanningsverschil berekend uit de gevonden wrijvingscoëfficiënt.

Tijdens de metingen was de spanning in het midden van de plaat vrijwel steeds gelijk aan of kleiner dan de spanning aan het einde. Dit komt waarschijnlijk, omdat tijdens de metingen de temperatuur vrijwel steeds relatief laag was. Verwacht kan worden, dat bij hogere temperaturen de spanningen in het midden hoger kunnen worden dan de spanning aan het plaa-teinde.

Hoofdstuk VI.

Samenvatting en conclusies.

A. De materiaaleigenschappen.

Het verloop van de elasticiteitsmodulus als functie van de tijd was voor de drie proefvakken vrijwel gelijk.

Na 7 dagen bedroeg de elasticiteitsmodulus 320.000 kg/cm^2 , na 14 dagen 340.000 kg/cm^2 en na 100 dagen 360.000 kg/cm^2 .

Aan de krimpplaten gestort bij proefvak II werd na 95 dagen een specifieke verlenging (zwellen) gemeten, groot $7 \cdot 10^{-5}$.

Aan de krimpplaten gelijktijdig gestort met proefvak III werd na 48 dagen een specifieke verlenging gemeten van $4 \cdot 10^{-5}$.

De gemiddelde kruipmaat bepaald met behulp van de kruipprisma's van proefvak II bedroeg maximaal $0,65$ en die aan de

kruipprisma's van proefvak III ongeveer 0,70.

Door de grote spreiding in de meetresultaten van de verschillende kruipprisma's kon de kruipfunctie voor de twee genoemde proefvakken niet nauwkeurig bepaald worden.

B. De plaatbelastingsproeven.

Uit de plaatbelastingsproeven, uitgevoerd op de W-rijstrook van proefvak I is gebleken, dat aan de randen van de betonplaat, de belasting, waarbij breuk of begin van scheurvorming optrad, het kleinst was, n.l. 4 tot 6 ton. Deze belasting bedroeg op andere plaatsen van de rijstrook 8,5 ton.

Naar aanleiding hiervan werden bij de proefvakken II en III de plaa-teinden in dwarsrichting voorgespannen, terwijl in lengterichting langs de randen extra voorspandraden werden aangebracht.

C. De gemeten betonspanningen.

Na het volledige voorspannen werden aan de plaa-teinden van de drie proefvakken in de lengte-as betondrukspanningen gemeten van 28 - 34 kg/cm².

In het plaatmidden varieerde deze betondrukspanning na het voorspannen, als gevolg van de temperatuurvariatie, tussen:

Proefvak I	(O-rijstrook)	12 en 24 kg/cm ²
Proefvak I	(W-rijstrook)	7 en 22 kg/cm ²
Proefvak II	(O-rijstrook)	23 en 35 kg/cm ²
Proefvak III	(W-rijstrook)	20 en 29 kg/cm ²

Hierbij zij opgemerkt, dat aan proefvak I na het voorspannen slechts enkele metingen zijn verricht, terwijl bij de andere proefvakken de metingen over een langere periode zijn voortgezet.

Bij de proefvakken II en III liepen de langsspanningen aan de plaa-teinden plaatselijk op tot ca 50 kg/cm², als gevolg van de extra voorspandraden.

Door de dwarsvoorspanning werden betonspanningen van 5 - 15 kg/cm² opgewekt.

D. De grootte van de wrijvingscoëfficiënt.

De grootte van de variatie in de betonspanningen in het plaatmidden worden bepaald door de wrijving. Wordt de wrijving gelijkmatig verdeeld gedacht over de gehele oppervlakte van de

plaat, dan kan de grootte van de maximale wrijving uitgedrukt worden in een wrijvingscoëfficiënt.

Voor proefvak I werden voor de wrijvingscoëfficiënt waarden gevonden van 0,7 - 1,6.

Voor proefvak II van 0,5 - 0,7. Deze beide proefvakken zijn gefundeerd op een zandbed.

Voor proefvak III, gefundeerd op een gestabiliseerd zandbed, varieerde de gevonden wrijvingscoëfficiënt van 0,6 - 1,0.

Bij een plaatlengte van 100 m kan de betonspanning in het plaatmidden ongeveer + of - 6 à 19 kg/cm² t.o.v. de spanning aan het plaaiteinde verschillen.

E. Aanhechtingslengte.

Bij een slechte verdichting van het beton bij de plaaiteinden bleek de aanhechtlengte 2 à 3 m te bedragen.

Bij een goede verdichting bleek een aanhechtlengte van 0,50 m voldoende te zijn om de volle voorspanning op het beton over te dragen.

F. Advies.

Uit het bovenstaande moge blijken, dat de spanningsvariaties in het plaatmidden voor het grootste deel bepaald worden door de grootte van de wrijving. Bovengenoemde resultaten hebben betrekking op een plaatlengte van ca 100 m.

Voor een juiste beoordeling van de invloed van de wrijving bij grotere plaatlengten is een nader onderzoek gewenst.

Rijswijk (Z-H), juli 1958
INSTITUUT T.N.O. VOOR
BOUWMATERIALEN EN BOUWCONSTRUCTIES
De Directeur,



(Ir J.G. Hageman)

De Assistent,


(J. Dekker)

Kolom no.	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11			
<u>Staal- spann. meting N.S.M. Leid- schen- dam</u>	Direct na spannen		Voor het storten		Voor span- nen 2 ^e baan		Na 10 ^e stel draden 2 ^e baan		Na 18 ^e stel draden 2 ^e baan		Na spannen van 2 ^e baan		Voor stor- ten 2 ^e baan		Voor ont- spannen		Direct na spannen		Voor stor- ten 2 ^e baan		Voor ont- spannen			
	1 ^e baan		1 ^e baan		1 ^e baan		1 ^e baan		1 ^e baan		1 ^e baan		1 ^e baan		1 ^e baan		2 ^e baan		2 ^e baan		2 ^e baan			
	1-8-57		2-8-57		6-8-57		6-8-57		6-8-57		6-8-57		7-8-57		14-8-57		6-8-57		7-8-57		14-8-57			
	DSM. ¹⁾	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²
Draad- stel no.																								
1	45	121,0	41,2	109,0	40,5	107,0							16,7	32,5			42,1	112,0	41,3	109,0	39,7	104,5		
2	44,5	120,0	41,7	109,5	40,5	107,0							17,0	35,0			43,2	115,0	42,5	113,0	39,7	104,5		
3	46	124,0	42,5	113,0	40,7	107,5	36,5	95,0					19,0	40,5			44,2	117,5	42,7	114,0	41,0	108,5		
4	44,3	118,0	43	114,5	41,4	110,0			32	80,0			20,0	44,0	19,0	41,0	-		42,0	112,0	40,0	105,0		
5			42,5	113,0	41,0	108,5					23,5	55,0	19,5	42,0	18,0	37,5	-		42,7	114,0	41,2	109,0		
6			40,2	106,0	40,0	105,0							19,0	40,5	14,0	25,0	44,2	117,5	44,0	117,3	40,7	107,5		
7	43,5	115,0	40,5	106,0	38,5	100,5							17,5	36,0	15,0	28,5	-		42,0	112,0	39,2	102,5		
8			40,7	107,5	39,4	103,5							19,2	41,0	17,5	36,0	-		43,0	114,5	40,7	107,5		
9			41,2	109,0	39,1	102,5							19,2	41,0	18,0	37,5	44,2	117,5	43,0	114,5	41,0	108,5		
10			40,7	107,5	38,5	100,5							20,2	44,0	18,5	39,0	43,5	115,0	42,0	112,0	41,0	108,5		
11			39,7	104,5	38,0	99,0							23,5	54,5	16,5	32,5	43,7	116,5	42,7	114,0	41,0	108,5		
12			39,7	104,5	38,8	101,5							20,7	46,0	18,0	37,5	-		42,7	114,0	41,0	108,5		
13	43,7	116,5	40,7	107,5	39,1	102,5							22,5	51,3	21,0	46,5	42,5	113,0	40,7	107,5	38,7	100,5		
14	43,7	116,5	40,0	105,0	39,0	102,5							23,5	54,5	20,5	45,0	41,5	110,0	40,7	107,5	38,2	99,0		
15			40,7	107,5	38,2	99,0							22,7	51,6	21,0	46,5	-		40,7	107,5	39,0	102,5		
16			39,7	104,5	38,2	99,0							22,0	50,0	21,5	48,0	-		40,6	107,0	38,0	99,0		
17			41,0	108,5	39,5	104,0							24,0	56,0	23,0	52,5	-		41,5	110,0	40,7	107,5		
18	43,0	114,5	39,5	104,0	37,8	99,0							23,7	55,0	21,0	46,5	-		40,7	107,5	39,5	104,0		
19			38,0	99,0	36,5	94,5							23,7	55,0	20,2	44,0	43,0	114,0	41,2	109,0	38,0	99,0		
20			39,0	102,5	37,0	96,0							26,0	62,0	23,2	53,0	-		41,0	108,5	38,5	100,5		
21	42	112,0	39,2	103,0	37,2	96,5							26,6	64,0	23,2	53,0	-		40,7	107,5	38,2	99,0		
22			37,7	99,0	36,2	93,5							25,2	59,5	23,5	54,5	-		39,0	102,5	38,0	99,0		
23			37,2	98,0	35,5	92,0							23,2	53,0	22,0	50,0	-		40,0	105,0	38,5	100,5		
24			37,2	98,0	37,2	96,5							27,0	65,5	23,0	52,5	-		40,0	105,0	38,5	100,5		
25	33	83,0	30,0	75,0	28,7	70,5							23,7	55,0	21,2	47,0	-		40,2	106,0	40,0	105,0		
26	42	112,0	39,2	103,0	37,8	99,0							27,7	67,0	25,2	59,5	41,0	108,5	40,0	105,0	38,2	99,0		
27			38,0	99,0	37,0	96,0							29,3	72,5	24,0	56,0	-		40,5	107,0	38,0	99,0		
28	42	112,0	40,0	105,0	39,0	102,5							30,5	76,0	28,5	70,0	-		40,8	108,0	39,0	102,5		
29			40,2	106,0	37,3	97,0							28,0	68,0	29,0	71,5	41,0	110,0	41,0	108,5	39,0	102,5		
30	40,5	107,0	38,7	100,5	36,4	94,0							29,0	71,5	28,0	68,0	-		41,4	110,0	-	-		

¹⁾ D.S.M. = Schaaldelen Draadspanningsmeter.

Kolom no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Staal- spann. meting N.S.M. Leid- schen- dam.	Direct na spannen 3 ^e baan 12-9-57	Voor het storten 3 ^e baan 13-9-57	Voor het spannen 4 ^e baan 3 ^e baan 17-9-57	Na 10 ^e stel draden 4 ^e baan 3 ^e baan 17-9-57	Na spannen 4 ^e baan 3 ^e baan 17-9-57	Voor storten 4 ^e baan 3 ^e baan 18-9-57	Voor ont- spannen 3 ^e baan 26-9-57	Direct na spannen 4 ^e baan 17-9-57	Voor storten 4 ^e baan 4 ^e baan 18-9-57	Voor ont- spannen 4 ^e baan 26-9-57
	D.S.M. ¹⁾ kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²	D.S.M. kg/mm ²
Draad- stel No. 1	38,0	99,0								
2	45,0	121,0	44,0	117,3				43,0	114,5	
3	45,0	121,0						42,7	114,0	41,0 108,5 38,0 99,0
4			43,0	114,0				43,0	114,5	
5			41,0	108,5	37,5	97,5				39,0 102,5 35,0 90,0
6	44,0	117,0	40,7	107,5	36,5	94,5	36,0 92,5 27,5 66,5	15,0		41,0 108,5 39,5 104,0
7			39,0	102,5	37,0	96,0		15,0		41,5 110,0 40,0 105,0
8			38,5	100,5	36,2	93,5	18,0 37,5 16,0	16,0		42,0 112,0 40,0 105,0
9			39,0	102,5	37,0	96,0	16,0 31,5 16,0	45,0 121,0	41,5 110,0	40,1 105,5
10			39,0	102,5	37,0	96,0	16,5 32,5 16,0	44,5 120,0	40,7 107,5	40,0 105,0
11			38,5	100,5	36,5	94,5	16,5 32,5 17,0		40,0 105,0	39,5 104,0
12			39,5	104,0	36,5	94,5	18,5 39,0 18,0		40,5 107,0	38,5 100,5
13			38,5	100,5	36,7	95,0	19,5 42,0 18,0		39,7 104,5	39,0 102,5
14	43,0	114,0	39,0	102,5	37,0	96,0	21,5 48,0 20,0		39,0 102,5	38,0 99,0
15			39,5	104,0	37,0	96,0	21,5 48,0 22,0		39,7 104,5	40,0 105,0
16	42,5	113,0	39,7	104,5	37,5	97,5	21,7 48,5 21,0		39,5 104,0	39,0 102,5
17			40,0	105,0	37,0	96,0	23,5 54,5 22,0	42,0 112,0	40,5 107,0	39,5 104,0
18			38,5	100,5	37,7	99,0	22,7 51,6 22,5		40,5 107,0	39,5 104,0
19	41,5	110,0	40,0	105,0	37,0	96,0	23,0 52,5 23,0		38,5 100,5	38,0 99,0
20	40,5	106,0	40,5	107,0	39,0	102,5	24,0 56,0 25,0		40,5 107,0	39,0 102,5
21			39,5	104,0	37,5	97,5	24,5 57,5 23,0	40,7 107,5	40,5 107,0	40,0 105,0
22			38,0	99,0	36,5	94,5	25,7 61,0 23,5		38,5 100,5	37,0 96,0
23			40,0	105,0	38,5	100,5	26,2 62,5 26,0		40,5 107,0	38,0 99,0
24			39,5	104,0	37,0	96,0	26,7 64,0 26,0		40,0 105,0	39,5 104,0
25			39,0	102,5	36,7	95,0	27,2 65,5 27,0		40,5 107,0	39,0 102,5
26	41,0	108,5	41,0	108,5	38,0	99,0	27,2 65,5 28,0		41,5 110,0	39,0 102,5
27			39,5	104,0	38,2	99,3	28,5 70,0 29,0	41,0 108,5	41,5 110,0	41,0 108,5
28	41,5	110,0	39,5	104,0	37,5	97,5	29,5 73,0 29,0		40,2 106,0	39,0 102,5
29			40,0	105,0	38,7	100,7	28,0 68,0 28,0		40,5 107,0	39,0 102,5
30			37,0	96,0	35,2	90,5	30,5 76,0 28,5	41,5 110,0	39,5 104,0	39,5 104,0
31			40,2	105,5	38,0	99,0			40,5 107,0	39,0 102,5
32									38,0 99,0	39,0 102,5
33										
34									41,0 108,5	39,0

Kolom no.	1		2		3		4		5		6		7		8	
	Direct na spannen 1 ^e baan 14-10-57		Voor storten 1 ^e baan 15-10-57		Voor spannen 2 ^e baan 1 ^e baan 21-10-57		2 dagen na storten 2 ^e baan 1 ^e baan 23-10-57		Ontspannen 1 ^e baan 29-10-57		Direct na spannen van 2 ^e baan 21-10-57		2 dagen na storten 2 ^e baan 23-10-57		Ontspannen 2 ^e baan 29-10-57	
	D.S.M. ¹⁾	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²	D.S.M.	kg/mm ²
Draadstel no. 1	44,0	117,0									44,0	117,0	41,0	108,5	40,0	105,0
2													39,5	104,0	39,0	102,5
3	44,5	120,0									42,0	108,5				
4			43,0	114,0							43,5	116,0	40,5	107,0	39,0	102,5
5			43,0	114,0	40,0	105,0	35,0	90,0	33,0	84,0			39,0	102,5	38,0	99,0
6			41,5	110,0	40,5	106,0	35,0	90,0	33,0	84,0			38,0	99,0	36,0	92,5
7	44,5	120,0	42,5	113,0	40,0	105,0	34,0	87,0	32,5	82,0	41,0	108,5	40,0	105,0	37,0	96,0
8	44,0	117,0	42,0	112,0	40,0	105,0	34,0	87,0	32,0	80,0	42,0	112,0	40,0	105,0	38,0	99,0
9	43,7	116,5	41,2	109,0	39,0	102,5	32,5	82,0	30,5	76,0	40,5	106,0	38,5	100,5	37,0	96,0
10			42,0	112,0	40,0	105,0	31,0	77,5	30,0	75,0			38,0	99,0	38,0	99,0
11			40,0	105,0	39,0	102,5	30,0	75,0	28,5	69,5			40,5	107,0	37,0	96,0
12			43,0	114,0	41,0	108,5	32,0	80,0	31,0	77,5	42,0	112,0	39,5	104,0	36,0	92,5
13			42,0	112,0	41,0	108,5	32,0	80,0	29,0	71,5			39,5	104,0	37,0	96,0
14	45,0	121,0	43,0	114,0	40,5	106,0	31,0	77,5	30,0	75,0			38,5	100,5	38,0	99,0
15	44,2	117,5	42,2	112,0	40,0	105,0	29,0	71,5	28,0	68,0			-		38,0	94,0
16			42,0	112,0	40,0	105,0	29,0	71,5	28,0	68,0	40,5	106,0	-		37,0	96,0
17	44,0	117,0	42,3	112,8	41,0	108,5	29,0	71,5	29,0	71,5			38,0	99,0	38,0	99,0
18			42,0	112,0	39,5	104,0	29,0	71,5	28,0	68,0			39,0	102,5		
19			41,7	109,5	40,0	105,0	27,0	65,0	25,0	59,0			40,0	105,0	37,0	96,0
20			42,2	112,0	40,5	106,0	27,0	65,0	25,5	60,5	40,7	107,5	40,0	105,0	38,0	99,0
21	44,0	117,0	42,0	112,0	39,0	102,5	26,5	64,0	24,0	56,0			38,0	99,0	-	
22			41,7	111,0	39,2	103,0	27,5	66,5	25,0	59,0			-		37,0	96,0
23	42,7	114,0	41,0	108,5	39,0	102,5	24,0	56,0	24,0	56,0			39,0	102,5	38,0	99,0
24			41,0	108,5	39,5	104,0	23,5	54,5	23,0	52,5			38,5	107,0	37,0	96,0
25			40,5	107,0	39,0	102,5	24,0	56,0	22,5	51,0			40,5	106,0	36,5	94,5
26	42,5	113,0	40,6	108,0	40,0	105,0	22,5	51,0	21,0	46,5			40,0	105,0	38,0	99,0
27			40,7	107,5	39,5	104,0	22,5	51,0	21,0	46,5			39,0	102,5	37,5	97,5
28			40,0	105,0	39,0	102,5	21,0	46,5	20,0	43,5			39,0	102,5	35,0	90,0
29			41,5	110,0	39,0	102,5	22,0	50,0	20,0	43,5			38,0	99,0	33,0	84,0
30			42,0	112,0	39,0	102,5	21,0	46,5	20,0	43,5			-			
31			41,5	110,0	39,0	102,5	20,0	43,5					39,0	102,5	36,0	92,5

1) D.S.M. = Schaaldelen draadspanningsmeter.

