

Ir. A. S. G. BRUGGELING

DE SPANNINGSVERDELING IN EEN
PREFLEXCONSTRUCTIE

U.D.C. 624.016: 624.072.2/3

Ten geleide: Naast de voor ons orgaan in beginsel geldende opzet, om als publikatiemedium te dienen van artikelen afkomstig van auteurs in de sfeer van het IBBC-TNO en het STEVIN-laboratorium der T.H., is opengelaten de „mogelijkheid tot het opnemen van artikelen van derden”, zoals op iedere binnenslag van Heron staat vermeld.

Het in dit nummer geplaatste artikel van de hand van ir. A. S. G. Bruggeling over PREFLEX-balken hebben wij gemeend als zodanig in de kolommen van ons tijdschrift af te drukken, ten einde de lezer van meer nabij op de hoogte te brengen van de met deze vinding verkregen toepassing op het gebied van draagliggers, die hun sterkte ontlenen aan het samenwerken van een elastisch sterk voorgebogen stalen balk en hem op doelmatige wijze omhullend (gewapend) beton, in geprefabriceerde uitvoering.

De achtergronden van deze samenwerking, toegelicht door meetresultaten, worden in dit artikel uitvoerig en op rationele wijze beschouwd. Redactie

Korte inhoud: De naam Preflex is afkomstig uit België, en door de uitvinders van deze methode, Prof. L. Baes † en Ir. A. Lipski, daaraan gegeven. In Nederland is het octrooi gedeponeerd onder no. 80197, terwijl het preflexen van binten geschiedt door de N.V. Nederlandse Spanbeton Maatschappij te Alphen a/d Rijn.

Door het voorbelasten van stalen binten van een staalkwaliteit St. 52 en het vervolgens met beton omstorten van de stalen onderflens wordt een samenwerkend geheel verkregen, waarvan de stijfheid zodanig opgevoerd is, dat het ook bij grote overspanningen kan worden toegepast. Dit betekent dat de staalkwaliteit volledig kan worden benut, mede omdat de wisselingen in de staalspanning gering zijn. De brede betononderflens van de preflexligger verzekert bovendien een goede brandwerendheid van de constructie.

Preflexliggers vinden meer en meer toepassing in geprefabriceerde betonconstructies (parkeergarages, magazijngebouwen), waarin zij in samenwerking met prefab-vloerconstructies goed op hun plaats zijn.

Ook in bruggen speelt Preflex een rol in die gevallen, waarin de constructiehoogte van de brug minimaal moet zijn.

Daarnaast vindt Preflex toepassing in bijzondere gevallen, zoals zeer zwaar belaste balken, grote geconcentreerde lasten op korte overspanningen enz.

1 Inleiding

Preflexliggers zijn stalen binten, waarvan de onderflens is opgenomen in een rib van gewapend beton. Deze betonrib wordt om de onderflens gestort wanneer het stalen bint kunstmatig onder volbelasting verkeert. Nadat het beton een hoge druksterkte heeft bereikt wordt de belasting verwijderd. Via de uvels

en de aanhechting tussen staal en beton komt de met het stalen bint verbonden gewapend betonrib daarbij onder een grote drukkracht; deze drukkracht is in evenwicht met de tegelijkertijd in het stalen bint opgewekte trekkracht en het op de constructie werkende buigende moment t.g.v. het eigen gewicht van de ligger en andere belastingen.

In fig. 1 is een doorsnede van zo'n preflexligger, alsmede een krachten- en spanningsverdeling aangegeven.

De aldus verkregen preflexligger wordt meestal na zijn aanbrenging in het bouwwerk van een betondrukflens voorzien. Het preflexen van stalen binten heeft ten doel de stijfheid van een aldus opgebouwde constructie te vergroten,

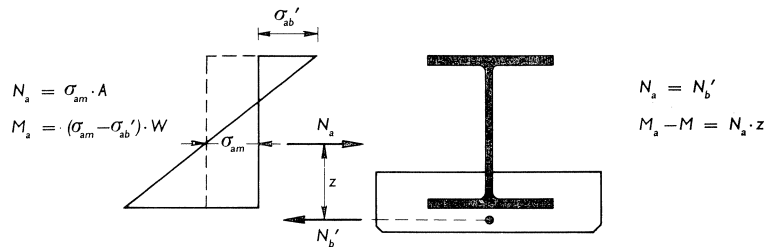


Fig. 1. Spannings- en krachtenverdeling in preflexligger.

waardoor deze zwaarder kan worden belast [1, 2]. Het is duidelijk dat bij het beoordelen van het gedrag van preflexconstructies de samenwerking tussen het staal en het beton van groot belang is.

In het bedrijfslaboratorium van NSM heeft een uitvoerige beproeving van een tweetal preflexliggers plaatsgevonden teneinde het inzicht in dit samenspel te verdiepen. De aldus verkregen ervaring moge hierbij in grotere kring worden bekend gemaakt.

2 Lijst van gebruikte notaties

Krachten

N_a trekkracht evenwijdig langsas in hart stalen bint

N'_b resultante drukkrachten evenwijdig langsas in preflexbetononderflens

Momenten

M uitwendig buigend moment op de constructie werkend

M_a buigend moment in stalen bint

Spanningen

σ_a in staal

σ_b in beton

Vervormingen

ε_a in staal

ε_b in beton

Extra indices i.v.m. plaatsbepaling bij spanningen en vervormingen

- b bovenzijde bint
- nabij bovenzijde preflexbetononderflens
- b_1 bovenzijde preflexbetononderflens
- b_m hart bovenzijde bint
- $\frac{3}{4}$ op driekwart van de hoogte van het bint
- m halverwege de hoogte van het bint (oorspronkelijke neutrale lijn)
- o bovenzijde onderflens bint
- O nabij onderzijde preflexbetononderflens
- o_1 onderzijde preflexbetononderflens
- y richting loodrecht op de langsas
- 1 onderste rij wapeningsstaven in preflexbeton
- 2 bovenste rij wapeningsstaven in preflexbeton
- p bovenzijde betonflens van preflexconstructie

Oppervlak van de doorsnede

- A Stalen bint
- A_1 onderste rij wapeningsstaven
- A_2 bovenste rij wapeningsstaven

Overige notaties

- z inwendige hefboomsarm
- I traagheidsmoment
- v afstand neutrale lijn tot onderzijde bint (ligger)
- E_a elasticiteitsmodulus van het staal
- E_b elasticiteitsmodulus van het beton
- n E_a/E_b

3 Beproeving van de stalen binten alleen

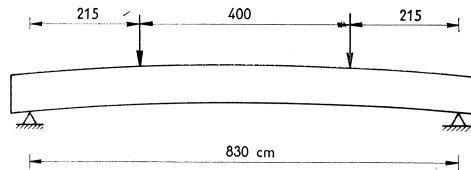


Fig. 2. Belastingsschema stalen binten.

Het onderzoek betrof het gedrag van twee stalen binten DIN 28, lang 8,30 m, kwaliteit St. 52, welke na het walsen van een voorzeeg van 123 mm resp. 125 mm waren voorzien.

Teneinde het gedrag van deze stalen binten bij belasten en ontlasten te kunnen nagaan werden zij onderworpen aan een vierpuntsbuigproef, waarbij de binten zo werden opgelegd, dat de in het walswerk aangebrachte voorzeeg omhoog was gericht (fig. 2).

Gemeten werd de relatie tussen vervorming en spanning onder verschillende belastingen, en de grootte van het „Bauschingereffect”. Deze factoren zijn van invloed op het gedrag van een preflexconstructie.

Het is bekend dat bij het onder belasting plastisch vervormen van staal extra vervormingen optreden. Als belangrijkste oorzaak is te noemen het z.g. „Bauschingereffect”. Daarnaast hebben walsspanningen e.d. ook invloed.

Het bedoelde effect ontleent zijn naam aan J. BAUSCHINGER, die in 1886 voor het eerst erop heeft gewezen, dat bij koud voorgerekte of voorgestuite proefstaven onder belasting in tegengestelde zin een aanmerkelijk verlaagde elasticiteitsgrens valt waar te nemen. Dit verschijnsel beperkt zich niet tot de elasticiteitsgrens, maar strekt zich ook uit over de vloeigrens en andere materiaaleigenschappen.

Als oorzaak van dit verschijnsel geldt de invloed van eigenspanningen die bijvoorbeeld in een uit kristallen opgebouwd materiaal na het koudvervormen

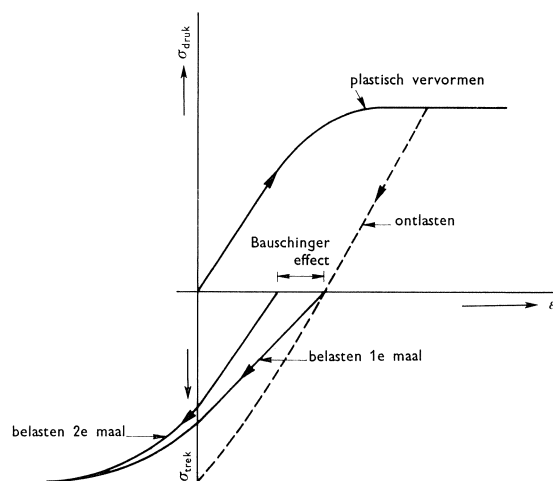


Fig. 3. Invloed Bauschinger-effect op het σ - ϵ -diagram.

aanwezig blijven, doordat de willekeurig gerichte kristallen een onderling verschillend elastisch gedrag vertonen [3, 4].

Wordt bijvoorbeeld een stalen staaf (onder overschrijding van de vloeigrens) gestuikt, dan zal bij een daaropvolgende trekproef – tot spanningen ver beneden de normale vloeigrens – blijken dat dit staal toch een blijvende vervorming vertoont. Na enige malen be- en ontlasten is dit verschijnsel verdwenen en gedraagt de proefstaaf zich verder volledig elastisch (fig. 3).

Waar de voorzeg in de stalen binten eveneens is aangebracht onder plastisch vervormen van het staal, treedt bij de eerste buigbelastingen van aldus behandelde stalen binten reeds een soortgelijk verschijnsel op. Bij rechte stalen binten is het genoemde effect beperkt aanwezig als gevolg van het richten van de binten na het walsen.

Bij bint 1 werden de blijvende vervormingen in de middenzone gemeten na vier achtereenvolgende belastingen tot een buigend moment van 45066 kgfm, overeenkomend met een max. staalspanning van ca. 2800 kgf/cm². De daarbij optredende vervormingen zijn in tabel 1 weergegeven.

Tabel 1. Blijvende vervormingen van bint 1.

belastingtrap	1	2	3	4	totaal
zeegverlies in mm op 123 mm	29	4	0	0	33
verkorting bovenzijde bovenflens in 10 ⁻⁵	-47,4	-12,8	-0,10	+0,30	-60,0
verlenging bovenzijde onderflens in 10 ⁻⁵	+59,9	+ 5,3	+0,8	+0,8	+66,8

Voor bint 2 waren de totalen zoals hierboven bedoeld respectievelijk 30 mm, $-35,7 \times 10^{-5}$ en $+65,45 \times 10^{-5}$. De genoemde waarden wijzen uit dat de vervormingsverliezen ten gevolge van het Bauschingereffect belangrijk zijn en bovendien dat de grootte van deze vervormingen van bint tot bint sterk kan variëren. Bij het bepalen van de juiste voorzeeg van stalen binten, mede in verband met de gewenste zeeg in definitieve toestand, moet dan ook met dit verschijnsel terdege rekening worden gehouden.

Overigens zal, in het algemeen, de nodige voorzichtigheid moeten worden betracht in al die gevallen waarin stalen constructiedelen worden toegepast, die bij de vervaardiging plastisch zijn vervormd. Gedacht wordt aan bepaalde typen hoogwaardig betonstaal verwerkt in kolommen, en aan voorgebogen stalen binten. Bij de eerste maal belasten bezitten deze constructiedelen schijnbaar een belangrijk kleinere elasticiteitsmodulus.

Uit de onderzoeken bleek nog het directe verband tussen het Bauschingereffect en de grootte van de belasting. Wanneer door herhaald belasten tot een zekere waarde het Bauschingereffect is opgeheven, treedt het verschijnsel wederom op wanneer deze belasting in grootte wordt overschreden.

Na het elimineren van het Bauschingereffect werd het elastische gedrag van de stalen binten zo goed mogelijk vastgelegd, teneinde met behulp daarvan later de spanningsverdeling in de preflexligger – c.q. constructie – te kunnen afleiden.

Voor de uitwerking van deze meetresultaten is uitgegaan van een elasticiteitsmodulus van het staal van de binten $= 2,15 \times 10^6$ kgf/cm². Met behulp daarvan is de grootte van het traagheidsmoment voor bint 1 berekend op $I = 22757$ cm⁴.

Teneinde een beter inzicht te krijgen in de verdeling van de vervormingen over de doorsnede van het bint is bij bint 2 niet alleen de vervorming gemeten aan de langszijde van de bovenflens maar ook in het hart hiervan, d.w.z. boven het lijf.

Tevens is daar de grootte van de dwarsvervorming (ϵ_{ay}) bepaald over een meetlengte van 20 cm.

Voor een beeld van de vervormingen over de hoogte van het bint (onder invloed van een buigend moment $M = 34185$ kgfm), wordt verwezen naar fig. 4.

Het traagheidsmoment van bint 2 werd op deze wijze berekend op 22798 cm⁴.

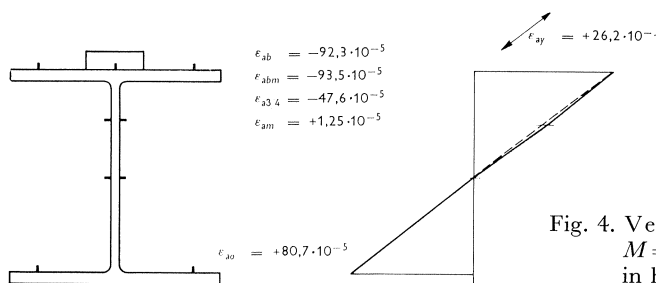


Fig. 4. Vervormingsverdeling bint 2 bij $M = 34185$ kgfm. De doorbuiging in het midden is 56,5 mm.

4 Metingen aan de preflexbalk tijdens en na het deblokken

Na de metingen aan de stalen binten alleen zijn deze in de fabrieksinstallatie „gepreflexed” en vervolgens van een betonflens voorzien. Bint 1 werd in december 1961 in de buitenlucht behandeld, terwijl bint 2 in april 1964 in de inmiddels daarvoor gereed gekomen fabriekshal is klaargemaakt. Niet alleen was wegens het jaargetijde bij bint 1 het elimineren van de temperatuursinvloed uit de meetresultaten tijdens het „preflexen” moeilijker, ook de betonkwaliteit bij het ontspannen bleek lager te liggen dan voor bint 2, zoals uit de hieronder te behandelen meetresultaten blijkt.

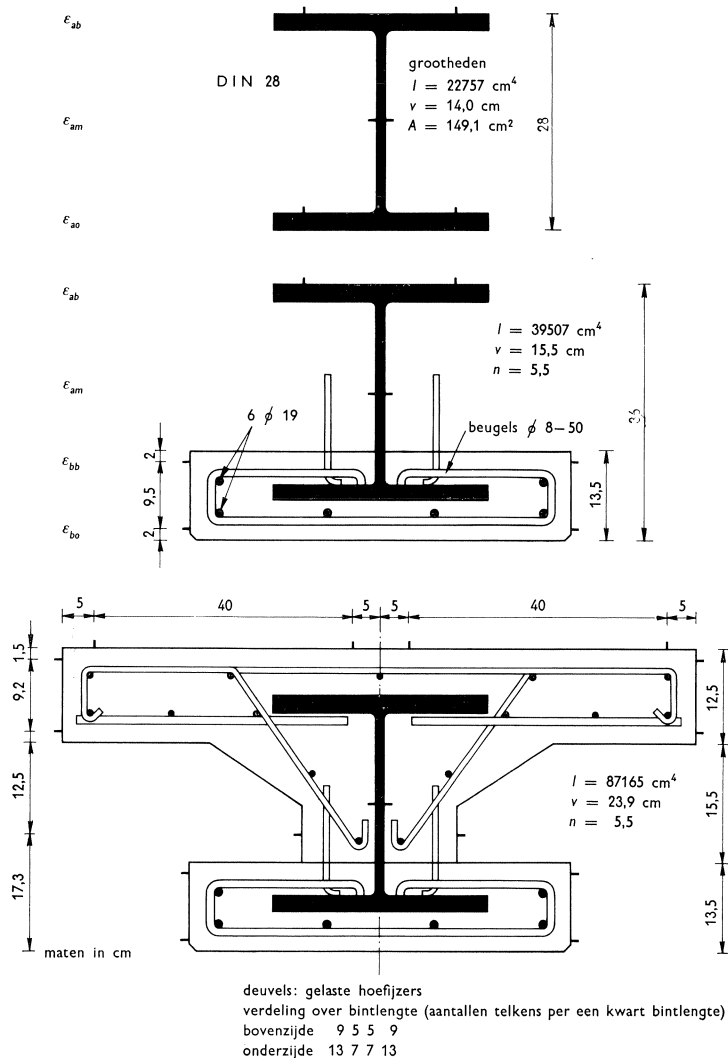


Fig. 5. Doorsneden preflexligger 1.

Bij de beproeving hadden de proefkuben een betonkwaliteit voor bint 1 van 525 kgf/cm² en voor bint 2 van 620 kgf/cm².

Er is een gering verschil tussen de op bint 1 resp. bint 2 aangebrachte deuvels. In het eerste geval waren dit hoefijzervormige gelaste beugels, in het tweede geval hoekstalen vastgezet met voorspanbouten. Voor de verdeling van de deuvels over de bintlengte zie figuren 5 en 6.

De overige metingen geschieden voor beide binten in het bedrijfslaboratorium, onder gebruikmaking van een deel der oude meetpunten voor bint 1, met behulp waarvan de „buitenfase” kon worden gereconstrueerd. Deze reconstructie was voor bint 2 niet noodzakelijk, temeer omdat het „deblokkeren” van de preflexset ook in het laboratorium plaats vond (dit om zoveel mogelijk ongelijke temperatuursverdeling over het bint te vermijden en zo correct mogelijke meetresultaten te verkrijgen).

In de tabellen 2 en 3 zijn de resultaten verwerkt van de metingen aan de preflexbalken tijdens en na het deblokkeren. De vervormingen zijn gemeten in de op tekening aangegeven punten (fig. 5 en 6).

Alle vervormingen zijn bij het uitwerken na temperatuurscorrectie betrokken op de gedaante van het op een kwart van de overspanning ondersteunde stalen bint. In deze uitgangstoestand zijn de spanningen in de middenzone van het bint nul.

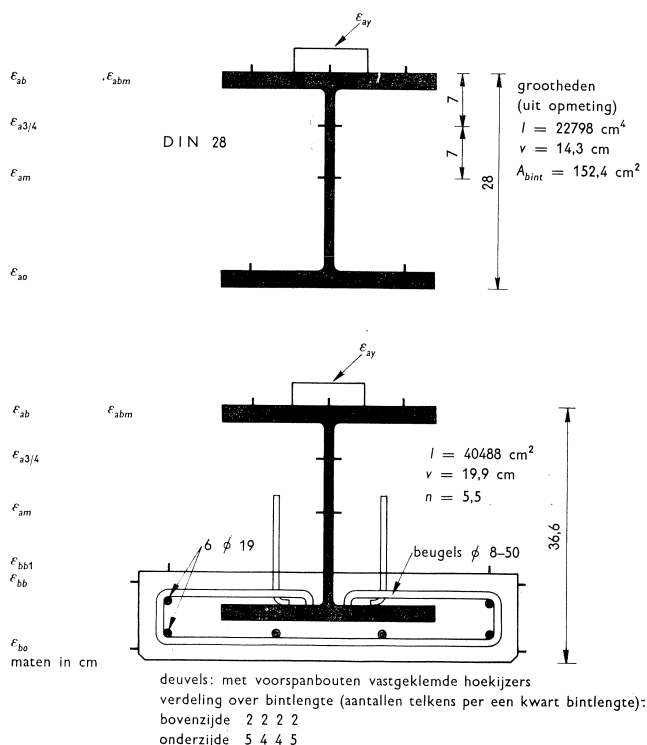


Fig. 6. Doorsneden preflexligger 2.

Tabel 2. Uitgewerkte meetresultaten in de middenzone van ligger 1 (1961/1962).

	aan- duiding	z in cm	op $1/4$ l opge- hangen		op $1/4$ l opge- hangen, m. beton		op $1/4$ l opge- hangen, ont- spannen		prefixbalk in einden ondersteund, kruipmeting						op- merking
			$M_b =$ 0 kgm		43964		niet gemeten		buigend moment t.g.v. eigen gewicht (2422, 5796)						
			13/12/61	20/12	13/12/61	20/12	20/12	21/12	22/12	23/12	3/1/62	5/1	16/1	16/1 *	
staalspanningen in kgf/cm ² onder aanneming prefix: $E_{a_1} = 2,15 \times 10^6$ kgf/cm ² $E_{a_2} = 2,03 \times 10^6$ kgf/cm ²	σ_{ab}	36,0	0	- 2703	- 582	- 522	- 514	- 517	- 493	- 489	- 500	- 663			
	σ_{am}	21,7	0	+ 77	+ 564	+ 567	+ 532	+ 549	+ 481	+ 468	+ 451	+ 420			
	σ_{a_0}	10,1	0	- 2320	+ 1496	+ 1462	+ 1382	+ 1415	+ 1486	+ 1458	+ 1224	+ 1296			
	σ_{a_1}	9,9	0	0	- 719	- 800	- 842	- 918	- 948	- 960	- 1001	- 976	extrap.		
	σ_{a_2}	4,8	0	0	- 1325	- 1427	- 1492	- 1508	- 1618	- 1636	- 1693	- 1618	interp.		
vervormingen in 10 ⁻⁵	ϵ_{bb1} ϵ_{b_01}	13,5 0	0 0	0 0	- 14,2 - 93,5	- 17,5 - 99,4	- 18,8 - 103,6	- 24,7 - 101,6	- 23,4 - 110,8	- 23,9 - 111,8	- 25,1 - 115,6	- 25,7 - 109,8	extrap.		
zeeg in mm			91,5	15,5	60	61	61	61	63	63	65	64,5			
trekkracht in bint in kgf	$\sigma_{am}A$		0		84103	84551	79331	81867	71727	69788	67253	62630			
drukkracht in wapening in kgf	$\sigma_{a_1}A_1 + \sigma_{a_2}A_2$		0	0	18770	20353	21313	21913	23304	23575	24434	23463			
buigend moment bint in kgfm	M_a		0	43952	18233	17326	16642	16960	15496	15226	15130	17232			
hefboomsarm in m	$\frac{M_a - M}{\sigma_{am} \cdot A}$		0		0,188	0,176	0,179	0,178	0,182	0,183	0,189	0,183	0,182 gemidd.		

* belast met gewicht van het te omstorten beton.

Tabel 3. Uitgewerkte meetresultaten in de middenzone van ligger 2 (1964).

	aan- duiding	z in cm	op $\frac{1}{4}l$ opge- hangen	op $\frac{1}{4}l$ gepref. opge- hangen, m. beton	op $\frac{1}{4}l$ opge- hangen, ont- spannen	preflexbalk in einden ondersteund, kruipmeting							op- merking	
						27/3	24/4 11.25 u.	24/4 11.45 u.	24/4 15.30 u.	29/4	1/5	15/5		29/5
staalspanningen in kgf/cm ²	σ_{ab}	36,6	0	- 2649	- 459	- 559	- 534	- 518	- 477	- 481	- 427	- 422	- 429	
onder aanneming	σ_{am}	22,6	0	+ 14	+ 696	+ 631	+ 611	+ 583	+ 551	+ 514	+ 536	+ 519	+ 514	
preflex:	σ_{ao}	10,5	0	+ 2316	+ 1693	+ 1659	+ 1601	+ 1536	+ 1440	+ 1372	+ 1366	+ 1333	+ 1330	extrap.
$E_a = 2,15 \times 10^6$ kgf/cm ²	σ_{a1}	9,96		0	- 587	- 589	- 668	- 713	- 765	- 850	- 834	- 889	- 897	interp.
wapening:	σ_{a2}	4,96		0	- 1102	- 1084	- 1188	- 1234	- 1330	- 1405	- 1401	- 1468	- 1478	interp.
$E_a = 2,03 \times 10^6$ kgf/cm ²														
vervormingen in 10 ⁻⁵	ϵ_{bb1}	13,8		0	- 9,8	- 10,35	- 13,7	- 15,4	- 18,4	- 20,65	- 19,4	- 21,65	- 22,1	
	ϵ_{bo1}	0		0	- 79,3	- 77,7	- 83,7	- 86,3	- 92,6	- 96,3	- 95,6	- 100,1	- 101,2	extrap.
zeeg in mm			76	0	38	36,5	39	40	41	43	43	43,5	43,5	
trekkracht in bint in kgf	$\sigma_{am} \cdot A$		0	105956	96139	93108	88777	84014	78240	81704	79105	78384		
drukkracht in wapening in kgf	$\sigma_{a1} \cdot A_1 + \sigma_{a2} \cdot A_2$		0	15546	15356	16955	17718	19077	20386	20253	21305	21461		
buiwend moment in bint in kgfm	M_a		0	43298	18700	19338	18541	17891	16705	16169	15649	15291	15324	
hefboomsarm in m	$\frac{M_a - M}{\sigma_{am} \cdot A}$		0	0,177	0,176	0,174	0,175	0,171	0,176	0,163	0,163	0,165	0,171	gemidd.

* begin proefbelasting.

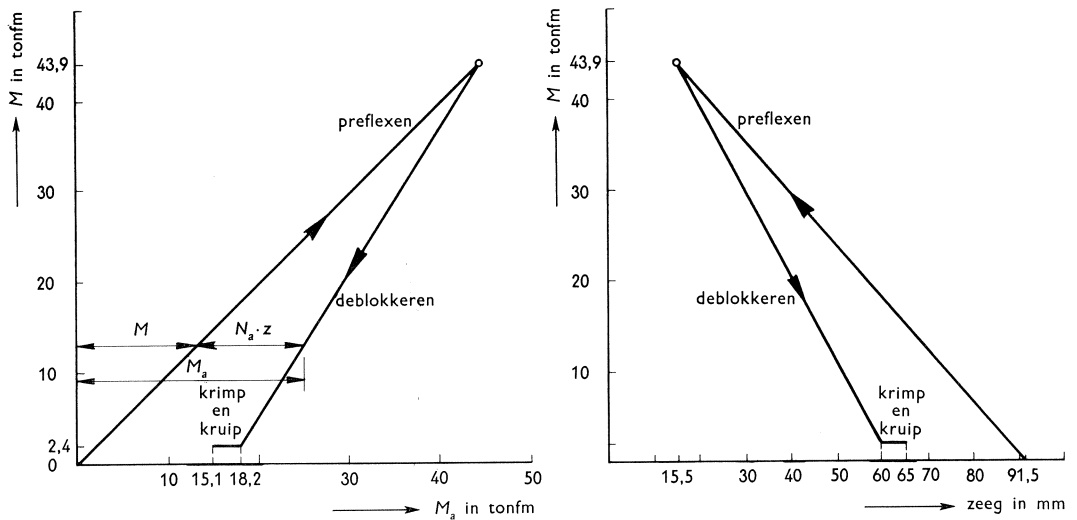
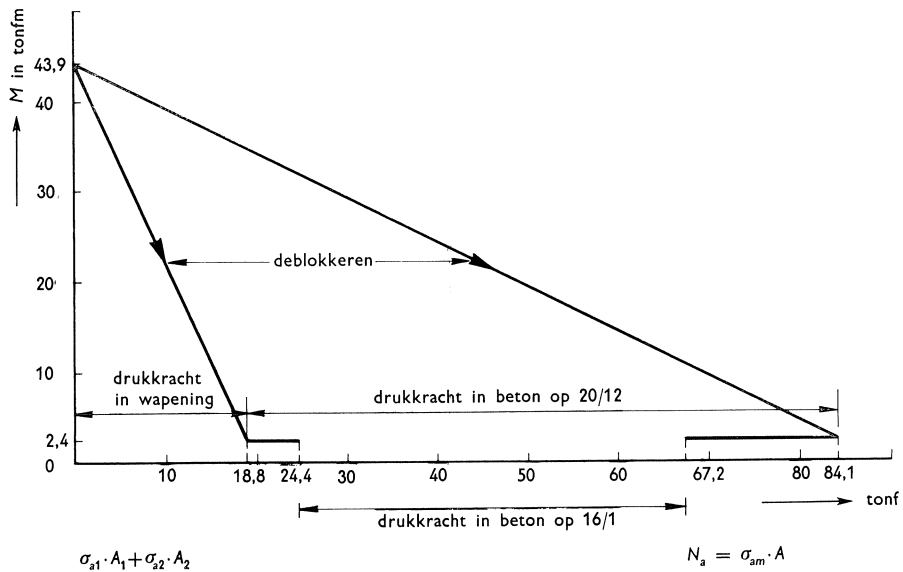


Fig. 7. Invloed kruip van het preflexbeton bij ligger 1.

Doordat de onderste rij meetpunten van de stalen ligger in de beton-omhulling valt zijn de vervormingen (ε_{ao}) aan de bovenzijde van die stalen onderflens door extrapolatie afgeleid uit de gemeten vervormingen in het bovenste nog vrije deel van het stalen bint (ε_{ab} , $\varepsilon_{a^2/4}$, ε_{am}). Alleen bij bint 2 zijn ook rekmetingen uitgevoerd op $3/4$ van de binthoogte.

Bij de eerdere metingen aan de stalen binten alléén is gebleken dat de bepaling van ε_{ao} door extrapolatie uit ε_{ab} en ε_{am} verantwoord is (zie ook de vervormingsverdeling, fig. 4).

Door vermenigvuldiging van de tot de onbelaste toestand herleide vervormingen met de elasticiteitsmodulus $E_a = 2,15 \times 10^6$ kgf/cm² zijn de staalspanningen in de binten in verschillende belastingstoestanden bepaald en in de

tabellen weergegeven. Daarbij is σ_{ao} de staalspanning aan de bovenzijde van de onderflens. De maximum staalspanning aan de onderzijde van deze flens is dus niet vermeld.

Een aantal resultaten van deze metingen is in de figuren 7 en 8 grafisch weergegeven.

Uit de spanningsverdeling over de hoogte van het stalen bint kan aldus worden afgeleid:

1. De op het bint uitgeoefende trekkracht. Deze is het produkt van de staalspanning in de oorspronkelijke neutrale lijn van het stalen bint en het oppervlak van de doorsnede, dus $\sigma_{am} \cdot A$ (fig. 1). Doordat het preflexbeton bij het deblokken de vervorming verhindert komt het zelf immers onder druk te staan; deze drukkracht komt overeen met de trekkracht in het stalen bint.
2. Het buigende moment M_a in het stalen bint.
Dit buigende moment is gelijk aan het weerstandsmoment van de staaldoorsnede maal het verschil der staalspanning aan de bovenzijde bovenflens en in de oorspronkelijke neutrale lijn.
3. Het buigende moment (M) in het stalen bint.
Dit is de som van het op de constructie werkende moment M en het moment van de drukkracht in het preflexbeton t.o.v. de neutrale lijn van het bint. De afstand z van het aangrijpingspunt van deze drukkracht t.o.v. de neutrale lijn van het bint volgt uit de formule:

$$\sigma_{am} \cdot A \cdot z = M_a - M$$

De bovengenoemde gegevens zijn in de tabellen opgenomen. De vervormingen van het preflexbeton zijn herleid t.o.v. de toestand juist vóór het ontspannen. Van deze vervormingen is een deel niet gemeten maar door extrapolatie bepaald. De resultaten zijn in de tabellen 2 en 3 opgenomen en betreffen:

1. De vervormingen aan de onder- en bovenzijde van het preflexbeton.
2. De vervormingen ter hoogte van het in het preflexbeton aanwezige hoogwaardige betonstaal.

Bij trekproeven werd voor dit staal een gemiddelde elasticiteitsmodulus gevonden van $2,03 \times 10^6$ kgf/cm².

De vervormingen van het beton werden met de elasticiteitsmodulus van het betonstaal vermenigvuldigd om de staalspanningen in de wapening vast te stellen, waarna via de bekende doorsnede van de wapening de drukkrachten hierin konden worden berekend.

Uit de tabellen 2 en 3 is onder meer het volgende af te leiden:

1. Bij ligger 1 waren de betonvervormingen door het deblokken en het in de einden opleggen belangrijk groter dan voor ligger 2. De spanningsverdeling was daarom in ligger 2 gunstiger dan in ligger 1, aangezien er meer spanningen in „geconserveerd” waren. Dit blijkt vooral uit de grotere totale drukkracht in het preflexbeton bij ligger 2 (96 tonf t.o.v. 84 tonf in ligger 1) en uit het grote inwendige moment bij ligger 2 (19,3 tonfm t.o.v.

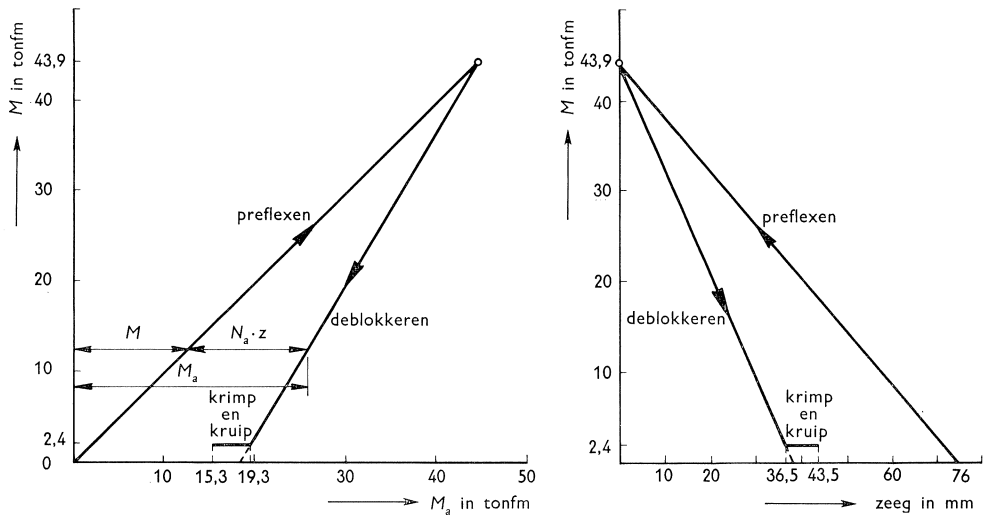
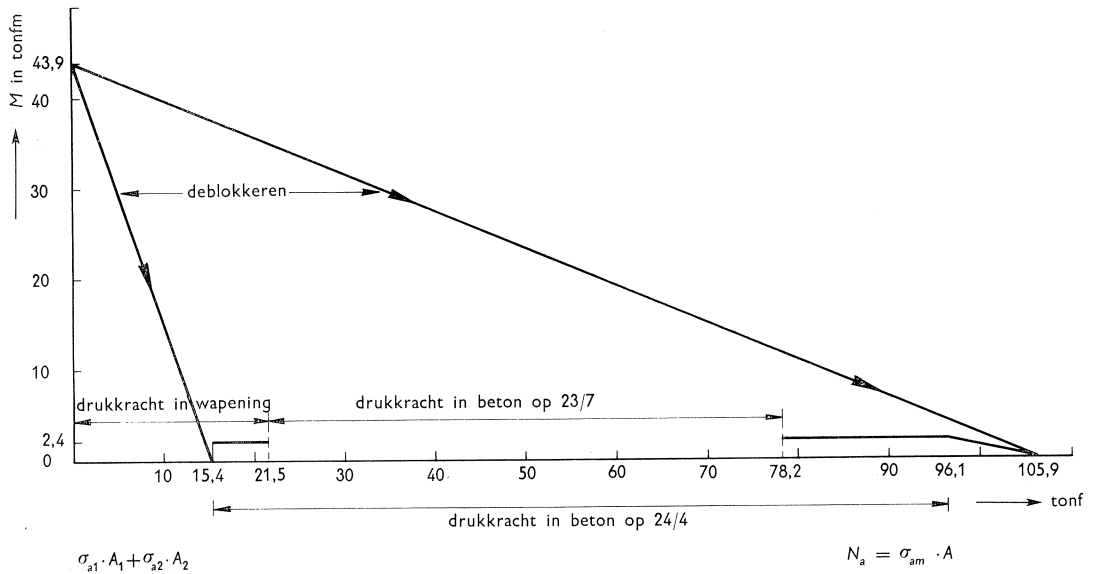


Fig. 8. Invloed kruip van het preflexbeton bij ligger 2.

18,2 tonfm). Door de grotere vervormingen van het beton was de drukkracht in de wapening bij ligger 1 relatief groter dan bij ligger 2 en wel 22% (t.o.v. 16%) van de totale drukkracht.

2. Door de medewerking van het preflexbeton is de stijfheid van de preflexligger belangrijk groter dan van het oorspronkelijke stalen bint. De verhouding van deze stijfheden kan worden berekend uit de vervormingen. Voor ligger 1 is deze verhouding 1,62 en voor ligger 2 is zij 1,74.
3. De krimp- en kruipvervorming van het preflexbeton van ligger 1 in ca. één maand was ongeveer even groot als voor ligger 2 in ca. 3 maanden. Ligger 2 was onbelast in het voorjaar, d.w.z. de tijd die voor kruip van beton

ongunstig is. De krimp- en kruipvervorming in de betononderzijde was voor ligger 1 groot $22,1 \times 10^{-5}$ in 3 maanden.

Opgemerkt wordt dat door de krimp- en kruipverkorting het preflexbeton wordt ontlast, zodat de totale vervorming van het beton is samengesteld uit de genoemde verkorting en de verlenging van het beton t.g.v. het ontlasten.

Waar de kruipvervorming van beton in dit samenspel van krimp en kruip overweegt zal in het vervolg ter vereenvoudiging alleen gesproken worden van *kruip* van het beton; in feite wordt dan echter bedoeld „krimp en kruip” van het beton.

4. Door de kruip van het preflexbeton nam de trekkracht in ligger 1 af met 16,9 tonf, d.i. 20% van de oorspronkelijke trekkracht. Voor ligger 2 is deze waarde 17,9 tonf, of wel 19% van de oorspronkelijke trekkracht.
5. Door de kruip van het preflexbeton nam de drukkracht in het betonstaal van ligger 1 toe van 18,8 tot 24,4 tonf, d.i. 36% van de totale drukkracht. Voor ligger 2 nam deze toe van 15,4 tot 21,5 tonf, d.i. 27% van de totale drukkracht.

De invloed van het betonstaal op de kruipverkorting van het preflexbeton is dus groot, aangezien door het overdragen van drukspanningen naar het staal het beton wordt ontlast en minder kruip zal vertonen.

6. De ligging van het aangrijpingspunt van de drukkracht op het preflexbeton verandert door de kruip van het beton nauwelijks. In beide gevallen was een tendens tot geringe afneming van de hefboomsarm z waarneembaar.

Bij ligger 2 lag het aangrijpingspunt van de drukkracht 2 cm hoger dan bij ligger 1, en wel resp. op 5,5 cm en 3,5 cm boven de betononderzijde.

Ook dit duidt wellicht op een hogere kwaliteit van het beton van ligger 2, aangezien het preflexbeton nu over grotere hoogte onder hoge drukspanningen verkeert.

7. De toeneming van de zeeg door kruip van het preflexbeton was voor ligger 1 kleiner dan voor ligger 2, en wel 5 mm t.o.v. 7 mm. Uit deze toeneming van de zeeg kan ook een indruk worden verkregen omtrent het afnemen van de drukkracht in het preflexbeton t.g.v. de kruip. Voor ligger 1 is op deze wijze berekend een afneming van 15,8 (16,9) tonf en voor ligger 2 van 16,3 (17,7) tonf. De strooiing in deze waarden wordt door onnauwkeurigheid van de zeegmeting veroorzaakt. Tussen haakjes zijn aangegeven de gemeten waarden van het afnemen van de drukkracht. Daaruit blijkt dat uit zeegmeting evenwel een zeer behoorlijke indruk kan worden verkregen omtrent het afnemen van de drukkracht in het preflexbeton. In dit verband kan ook worden gewezen op de publikatie opgenomen in de verhandelingen van het F.I.P.-congres te Rome 1962, waarin gegevens van zeegmetingen aan preflexbalken zijn verwerkt en nader op de theoretische achtergrond wordt ingegaan. [5]

8. De vorm van de op het stalen bint aangebrachte deuvels, dienende voor het overbrengen van de schuifkrachten tussen staal en beton, blijkt weinig invloed te hebben op de spanningsverdeling. Uit het feit dat de drukkracht bij ligger 2 hoger aangrijpt op het preflexbeton dan bij ligger 1 zou men evenwel kunnen concluderen dat de hoekstalen deuvels, welke met voorspanbouten zijn vastgezet, een iets betere overdracht van de krachten geven.

Als gevolgen die de kruip van het preflexbeton op de spanningsverdeling in de preflexligger heeft zijn derhalve samen te vatten:

1. Geringe afneming van de staalspanning in de bovenzijde van het bint.
2. Afneming van de trekkracht in het stalen bint, respectievelijk drukkracht in het preflexbeton.
3. Belangrijke afneming van de staalspanning in de onderzijde van het bint.
4. Toeneming van de zeeg van het bint.
5. Toeneming van de drukspanning in de wapening van het preflexbeton.
6. Afneming van het door het „preflexen” in het stalen bint „geconserveerde” buigende moment.

5 Metingen aan een preflexligger tijdens het belasten

Een vierpuntsbuigproef volgens fig. 2 is ook toegepast op preflexligger 2. Tabel 4 geeft de uitgewerkte meetresultaten. Deze zijn op dezelfde wijze verkregen als die weergegeven in de tabellen 2 en 3.

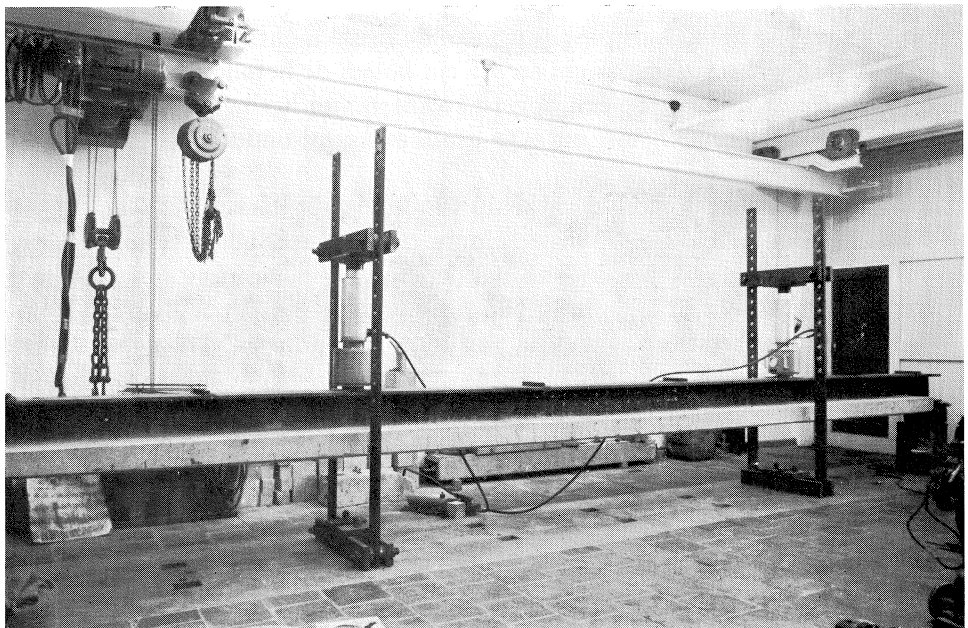


Fig. 9. Preflexligger 2 tijdens vierpuntsbuigproef.

Het optreden van scheuren in het preflexbeton verliep op de volgende wijze:

Bij fase 11 werd een kleine haarscheur ($< 0,05$ mm) zichtbaar over een hoogte van 3,1 cm op 185 cm uit het midden van de overspanning.

Bij fase 12 waren zes haarscheurtjes ($\leq 0,05$ mm) zichtbaar over een hoogte variërend van 2 tot 7 cm.

Bij fase 13 waren negenentwintig scheurtjes (0,05–0,1 mm) zichtbaar over hoogten variërend van 4 tot 9 cm. De gemiddelde scheurafstand was in dit geval 18 cm.

Bij fase 14 liepen de scheurwijdten op tot 0,15 à 0,2 mm, terwijl bij fase 15 de maximum scheurwijdte 0,3 mm was.

De belasting van fase 15 is op de preflexligger gedurende 1 nacht (± 15 uur) gehandhaafd, waarna de ligger werd ontlast. Gedurende die tijd namen de vervormingen van de preflexligger nauwelijks toe.

Uit de in tabel 4 verzamelde gegevens zijn de volgende conclusies te trekken:

1. Bij het belasten van de preflexligger neemt het verschil tussen het in het stalen bint aanwezige moment M_a en het door de belasting uitgeoefende buigende moment M steeds af. Het preflexeffect gaat bij opvoeren van de belasting langzamerhand verloren. Zo ziet men, dat bij het toenemen van het buigende moment M van 2371 kgfm tot 27146 kgfm het buigende moment M_a in het stalen bint toeneemt van 15324 kgfm tot 29002 kgfm.

De verhouding tussen de stijfheid van de preflexligger en die van het eigenlijke stalen bint is op grond hiervan:

$$(27146 - 2371) : (29002 - 15324) = 1,81 : 1.$$

Bij het deblokken was deze stijfheidsverhouding 1,74 : 1. Uit de berekening van de ligger volgde onder aanneming van $n = 5,5$ eveneens een stijfheidsverhouding van 1,74 : 1.

Doordat het beton in de loop van drie maanden een grote sterkte heeft verkregen is de stijfheid van de preflexligger dus ook toegenomen.

Uit de gegeven getallen blijkt dat bij het belasten het stalen bint slechts 55% van het daarbij op de preflexligger uitgeoefende buigende moment opneemt.

Dit wettigt de veronderstelling dat de preflexligger zich gunstiger zal gedragen t.a.v. wisselbelasting dan het stalen bint alleen, wanneer dit aan dezelfde belastingen zou worden onderworpen.

2. Bij het toenemen van de belasting neemt de drukkracht in het preflexbeton en in de aanwezige wapening af.

Tussen de belastingtrappen 10 en 11 is de trekkracht in het bint gelijk aan de drukkracht in de wapening, en wordt het preflexbeton dus spanningsloos.

Bij fase 11 wordt inderdaad het eerste haarscheurtje in het preflexbeton gevonden bij een kracht van (10421–6062) kgf ofwel een gemiddelde trekspanning van ± 7 kgf/cm² in het preflexbeton.

Tabel 4. Uitgewerkte meetresultaten in de middenzone van de belaste preflexligger 2.

	aan- duiding	z in cm	23-7-1964						
			fase 0	1	2	3	4	5	6
			$M=$ 2371 kgfm	7326	12281	17236	19713	22191	24668
staalspanning in kgf/cm ² onder aanneming preflex:	σ_{ab}	36,6	- 429	- 662	- 935	- 1188	- 1297	- 1427	- 155
$E_a=2,15 \times 10^6$ kgf/cm ²	σ_{am}	22,6	+ 514	+ 433	+ 316	+ 264	+ 246	+ 212	+ 16
wapening:	σ_{a0}	10,5	+ 1330	+ 1381	+ 1397	+ 1519	+ 1580	+ 1610	+ 165
$E_a=2,03 \times 10^6$ kgf/cm ²	σ_{a1}	9,96	- 897	- 836	- 784	- 730	- 680	- 654	- 61
	σ_{a2}	4,96	- 1478	- 1376	- 1263	- 1143	- 1086	- 1011	- 96
vervormingen in 10 ⁻⁵	ϵ_{bb1}	13,8	- 22,1	- 21,5	- 20,9	- 20,25	- 19,2	- 18,75	- 18,0
	ϵ_{bb1}	0	- 101,2	- 93,9	- 85,5	- 76,55	- 61,0	- 55,05	- 64,0
zeeg in mm			43,5	39,5	34,4	30,0	27,5	25	22,
trekkracht in bint in kgf	$\sigma_{am}A$		78384	65956	48204	40266	37524	32328	2554
drukkkracht in wapening in kgf	$\sigma_{a1}A_1 + \sigma_{a2}A_2$		- 21461	- 19985	- 18437	- 16799	- 15866	- 14905	- 1416
buigend moment in bint in kgfm	M_a		15324	17831	20372	23645	25127	26690	2810
hefboomsarm in m	$\frac{M - M_a}{\sigma_{am} \cdot A}$		0,165	0,159	0,168	0,159	0,144	0,139	0,13

Bij verder toenemende belasting zijn de trekkrachten in het stalen bint vrijwel gelijk aan die in de wapening. Dit betekent dat het gescheurde preflexbeton nauwelijks meer meespeelt.

De stijfheid van de preflexligger – onder verder toenemende belasting – is bij een buigend moment groter dan ca 35 tonfm nagenoeg gelijk geworden aan die van het stalen bint.

Door de invloed van krimp en kruip van het beton is het preflexeffect voor de preflexligger afgenomen van 43861 tot 32101 kgfm, d.w.z. tot ca 74% van de oorspronkelijke waarde. De invloed van krimp en kruip van beton op de spanningsverdeling in de preflexligger is dus slechts van beperkte betekenis en verstoort het preflexeffect niet.

3. Bij een nog aanwezige vervorming in de onderzijde van het beton van 45×10^{-5} trad scheurvorming op.

Het vervormingsverlies in het beton door krimp en kruip, verminderd met de vervorming van het beton onder trek, heeft dus ongeveer deze grootte.

4. De elasticiteitsmodulus van het preflexbeton kan uit de vervormingen worden berekend. Tussen de belastingsfasen 0 en 7 neemt de drukkkracht in het beton af van 56887 tot 2248 kgf terwijl de gemiddelde vervorming afneemt van

7	24-7-1964								27-7-'64	28-7-'64
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
27146	24068	27146	29623	32101	34578	39533	44488	49443	49443	2371
- 1680	- 1524	- 1691	- 1824	- 1949	- 2083	- 2375	- 2638	- 2941	- 2947	- 444
+ 101	+ 198	+ 162	+ 98	+ 40	+ 35	+ 7	+ 9	- 41	+ 7	+ 547
+ 1643	+ 1686	+ 1763	+ 1760	+ 1758	+ 1866	+ 2064	+ 2392	+ 2465	+ 2559	+ 1403
- 587	- 599	- 564	- 544	- 479	- 392	- 164	+ 59	+ 248	+ 268	- 828
- 891	- 934	- 863	- 818	- 696	- 562	- 231	+ 77	+ 367	+ 398	- 1389
-17,25	-17,65	-16,95	-16,85	- 15,1	- 12,5	- 4,1	+ 2,25	+ 8,35	+ 9,05	- 19,1
-58,75	-62,15	-57,05	-53,65	- 45,0	- 36,1	- 15,0	+ 4,85	+23,85	+25,75	- 94,6
20,3	22,8	20,0	19,5	14,5	11,5	3,0	- 4,5	- 12	- 12,5	43
15443	30164	24679	15010	6062	5340	1010	1443	-6206	1010	83419
-13195	-13741	-12755	-12143	-10421	- 8444	- 3487	+ 1186	+ 5470	+ 5926	-20085
29002	28042	30175	31298	32389	34490	38789	43105	47224	48104	16138
0,120	0,132	0,123	0,112	0,047	- 0,016	- 0,737	- 0,958	+ 0,358	- 1,327	+ 0,166

$61,6 \times 10^{-5}$ tot 38×10^{-5} . Bij een oppervlak van de betondoorsnede van 619 cm^2 volgt hieruit een elasticiteitsmodulus van het preflexbeton van 375.000 kgf/cm^2 .

5. Bij toeneming van de belasting wordt de inwendige hefboomsarm kleiner, totdat deze na fase 12 praktisch tot nul nadert.

Dit betekent derhalve dat het preflexeffect boven deze belasting niet meer aanwezig is.

6. Bij ontlasten van de langdurig overbelaste preflexligger herstelt zich praktisch de toestand van vóór de proefbelasting.

De preflexligger heeft daarbij de oorspronkelijke spanningsverdeling en stijfheid teruggekregen.

In fig. 10 is grafisch het gedrag van de preflexligger tijdens het belasten weergegeven. Fig. 11 geeft een beeld van het scheurenpatroon bij de maximum belasting.

Deze uitkomsten leiden tot de volgende conclusies:

1. De stijfheid van de preflexligger komt goed overeen met de berekende waarde, bij aanneming van een waarde van $n = 5,5$ zodat $E_b = 390.000 \text{ kgf/cm}^2$.

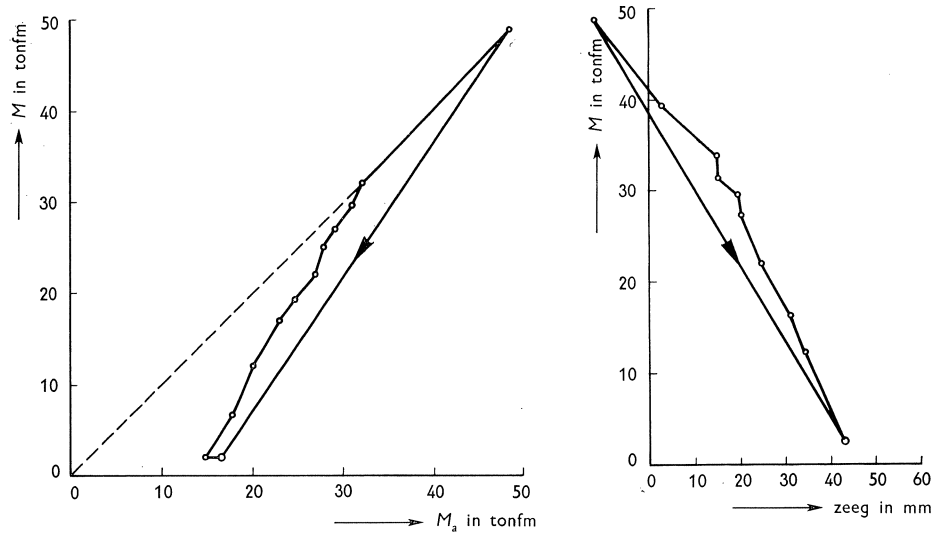
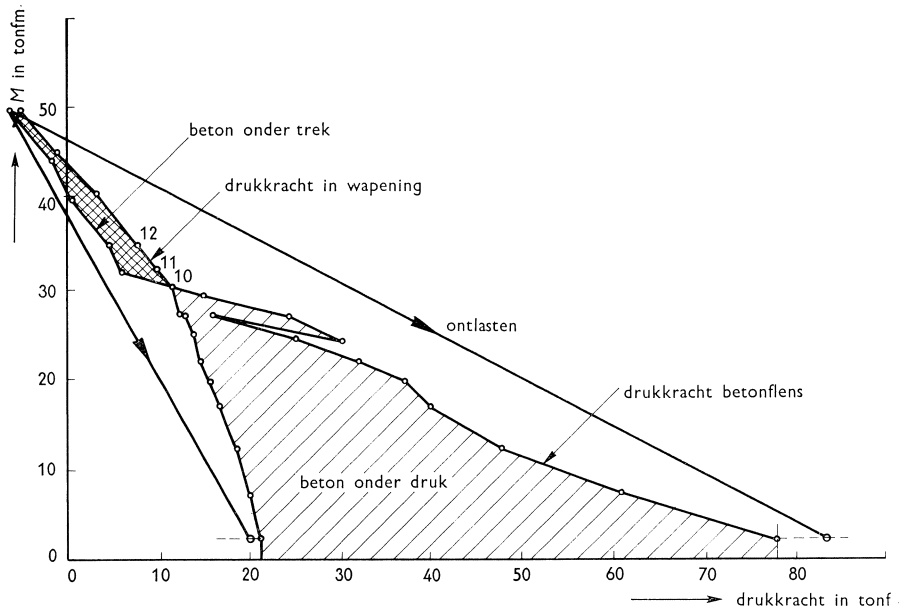


Fig. 10. Wijziging krachtenverdeling prefixligger 2 tijdens het belasten (voortzetting fig. 8).

De grootte van n komt ook goed overeen met de in de proef bepaalde waarde van E_b .

2. Bij het belasten van de prefixligger blijkt de betekenis van de in het prefixbeton opgenomen wapening van hoogwaardig bestonstaal, aangezien in dat stadium een belangrijk deel van de drukkraften op de betononderflens door die wapening wordt gedragen.

3. Wanneer bij overbelasting van de preflexligger scheuren in het preflexbeton zijn opgetreden, is dit voor de stijfheid van de ligger onder gebruiksbelasting nauwelijks van betekenis. De preflexligger toont hierbij dus hetzelfde gedrag als voorgespannen beton.
4. Wanneer men geen scheuren in het preflexbeton onder *vol*belasting wil toestaan zou in de statische berekening een waarde aan vervormings-

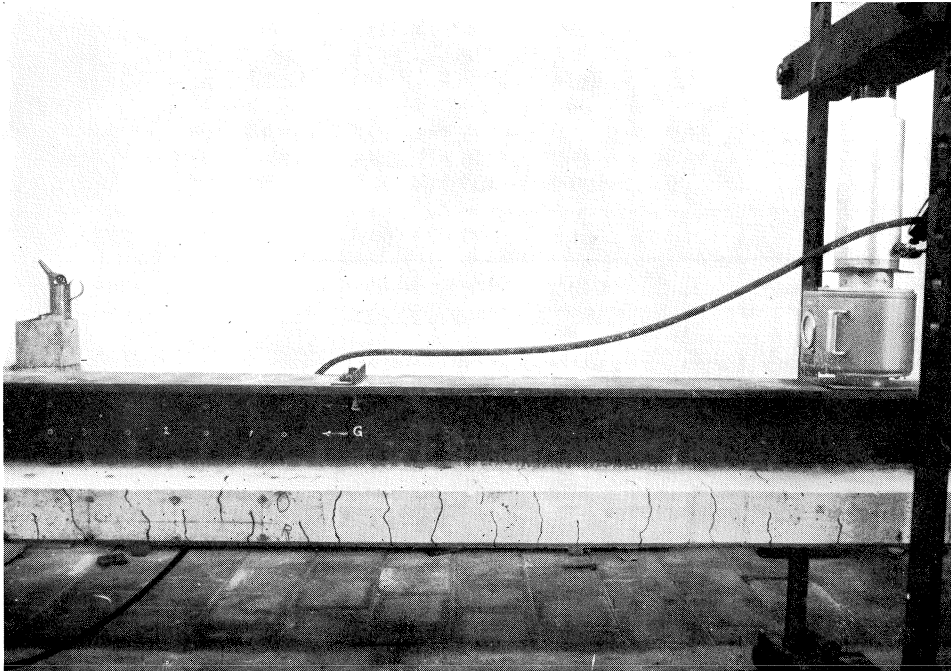


Fig. 11. Scheurenbeeld preflexligger 2 in fase 15.

verlies door krimp en kruip van het beton kunnen worden ingevoerd van 45×10^{-5} . In de berekening mogen dan bij volbelasting geen trekspanningen in het beton worden toegelaten.

5. Wanneer men een scheurwijdte van max. 0,1 mm voor het preflexbeton aanvaardbaar acht, mede in verband met een hoog wapeningspercentage, kan in de berekening bij het invoeren van een vervormingsverlies door krimp en kruip van 45×10^{-5} een trekspanning in het beton (bij volbelasting) worden toegelaten van ten hoogste 60 kgf/cm^2 .
6. Het wapeningspercentage van het preflexbeton dient i.v.m. de hierboven genoemde waarden 2 tot 2,5% van de betondoorsnede te bedragen. Deze wapening moet bij voorkeur bestaan uit geprofileerd betonstaal, dat zo regelmatig mogelijk over de doorsnede is verdeeld.

Tabel 5. Uitgewerkte meetresultaten in de middenzone van de belaste volledige constructie.

	aan- duiding	z in cm	5-2-1962							
			fase 0	1	2	3	4	5	6	7
			$M = 5790$	12090	18350	24650	30950	34100	37250	12050
staalspanning in kgf/cm ² onder aanneming preflex: $E_a = 2,15 \times 10^6$ kgf/cm ² wapening: $E_a = 2,03 \times 10^6$ kgf/cm ²	σ_{ab} σ_{am} σ_{ao} σ_{a1} σ_{a2}	36,0 21,7 10,1 9,9 4,8	- 663 + 420 + 1296 - 964 - 1614	- 731 + 514 + 1342 - 958 - 1563	- 834 + 413 + 1432 - 871 - 1439	- 946 + 436 + 1559 - 769 - 1283	- 950 + 471 + 1711 - 639 - 1094	- 1114 + 495 + 1797 - 544 - 983	- 1161 + 585 + 2002 - 392 - 777	- 755 + 436 + 1400 - 895 - 1448
vervormingen in 10 ⁻⁵	ε_{bdp} ε_{bb1} ε_{bo1}	41,0 13,5 0	0 - 24,9 - 109,7	- 4,2 - 26,2 - 105,0	- 10,8 - 23,1 - 97,3	- 18,1 - 19,8 - 87,0	- 25,7 - 15,6 - 74,8	- 29,5 - 11,7 - 68,4	- 33,7 - 5,8 - 56,2	- 6,1 - 23,5 - 100,6
zeeg in mm			64,5	63	60,5	57,5	55	53,5	51,5	62
trekkracht in bint in kgf	$\sigma_{am}A$		62630	61804	61586	65076	70235	73814	87235	65016
drukkkracht in wapening in kgf	$\sigma_{a1}A_1 + \sigma_{a2}A_2$		23451	22750	20873	18566	15762	13885	10855	21551
buigend moment in bint in kgfm	M_u		17234	18237	19845	21993	22613	24014	27754	18954
	$M - M_u$		- 11444	- 6147	- 1495	+ 2657	8337	10086	9496	6904

6 Metingen aan een preflexconstructie tijdens het belasten

Met behulp van preflexligger 1 is een volledige preflexconstructie vervaardigd met een doorsnede als weergegeven in fig. 5. Deze constructie is aan een vierpuntsbuigproef onderworpen (zie fig. 12); de plaats van de meetpunten volgt eveneens uit fig. 5.

Als vervormingstoestand van het stalen bint bij de aanvang van de proef is aangehouden de bij belasting van de preflexligger tot een moment van 5796 kgfm (tabel 2) waargenomen gedaante. Dit lijkt verantwoord wanneer men de vervormingen van de betononderflens beschouwt bij de eerste proef (tabel 2) en bij de aanvang van de hier beschreven proefbelasting (tabel 5).

Tabel 5 bevat de uitgewerkte meetresultaten. Deze zijn op dezelfde wijze tot stand gekomen als die in de tabellen 2, 3 en 4. Daarbij is ervan uitgegaan dat

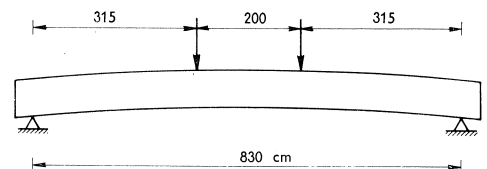


Fig. 12. Belastingschema preflexconstructie.

6-2-1962												
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
12050	18350	24650	27800	30950	37250	43550	53000	62450	71900	81350	5561	
- 740	- 849	- 959	- 1011	- 1071	- 1161	- 1269	- 1434	- 1677	- 1863	- 2098	- 684	afgeleid uit ver- vor- ming beton
+ 447	+ 452	+ 449	+ 499	+ 510	+ 585	+ 667	+ 800	+ 950	+ 1379	+ 1916	+ 1167	
+ 1408	+ 1505	+ 1632	+ 1720	+ 1789	+ 2002	+ 2238	+ 2617	+ 3077	(4007)	(5169)	(2668)	
- 903	- 810	- 692	- 599	- 542	- 345	- 128	+ 213	+ 832	+ 1628	+ 2763	+ 248	
- 1488	- 1358	- 1181	- 1080	- 995	- 737	- 449	+ 6	+ 637	+ 1703	+ 3077	+ 83	
- 5,3	- 12,2	- 19,5	- 23,1	- 27,1	- 34,0	- 43,1	- 54,7	- 72,2	- 90,9	- 114,4	- 13,5	interp. extrap.
- 24,2	- 21,1	- 16,7	- 12,7	- 10,1	- 3,3	- 6,8	+ 17,8	+ 47,9	+ 77,5	+ 125,0	+ 23,6	
- 100,4	- 92,3	- 82,0	- 75,5	- 69,9	- 54,5	- 37,0	- 9,4	+ 22,1	+ 87,4	+ 166,3	- 19,4	
62,5	59,5	57	55	54	50,5	47	40,5	31,5	20,5	7,5	53,5	
66656	67402	66954	74410	76051	87235	99462	119295	141663	(205625)	(285712)	(174022)	
21597	19652	17006	15378	14089	10131	- 5699	+ 1266	+ 11737	+ 28042	+ 49661	+ 2329	
18890	20704	22407	25622	25160	27786	30809	35552	41806	(51593)	(63720)	(29616)	
6840	2354	2243	2178	5790	9464	12741	17448	20644	(20307)	(17630)	(24055)	

de vervormingen zich rechtlijnig over de hoogte van de betonconstructie verdelen, wat door het vervormingsdiagram voor $M = 37250$ kgfm (fig. 13) blijkt te worden bevestigd.

Uit de vervormingen van het beton zijn die van het daarin opgesloten stalen bint afgeleid, en voorts gecombineerd met de vervormingen van het stalen bint, welke waren bepaald juist vóór het omstorten met beton. Op deze wijze is continuïteit in de waarnemingsreeksen verkregen.

T.a.v. de scheurvorming werd het volgende waargenomen: Bij fase 4 werd

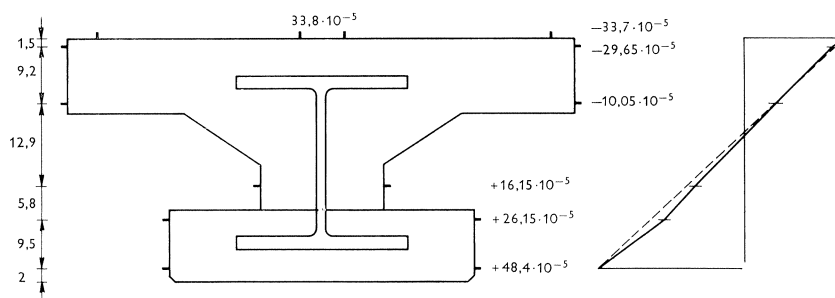


Fig. 13. Vervormingsverdeling preflexconstructie. $M = 37250$ kgfm.

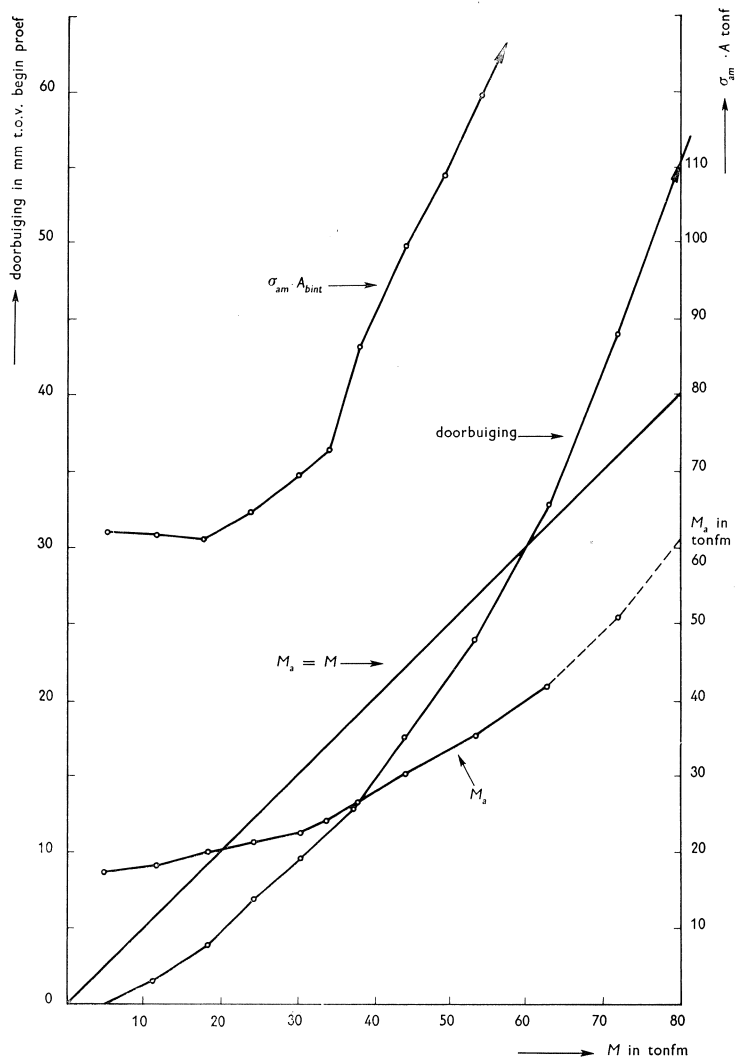


Fig. 14. Wijziging krachtenverdeling in preflexconstructie tijdens het belasten.

in de onderflens een kleine haarsceur ($< 0,05$ mm) zichtbaar. De scheurvorming nam niet waarneembaar toe bij het opvoeren van de belasting tot fase 6.

Nadat de constructie gedeeltelijk was ontlast, waarbij de eerst ontstane scheur zich sloot, werd deze bij het herhaald opvoeren van de belasting in fase 11 wederom zichtbaar. Bij het vergroten van de belasting kwamen er meer scheuren bij. Fase 12 vertoonde 4 scheuren. Bij fase 18, d.i. bij een buigend moment gelijk aan 1,9 maal het preflexmoment, was het aantal scheuren zodanig toegenomen dat de gemiddelde scheurafstand ca. 20 cm bedroeg.

In de betononderflens verliepen de scheuren zowel van beneden naar boven als van boven naar beneden.

De belastingfase 18 is gedurende 14 uur op de constructie gehandhaafd. Bij het ontlasten vertoonden zich in de bovenflens scheuren, waarschijnlijk t.g.v. de kruip van het beton die is opgetreden onder invloed van deze langdurige hoge belasting, en als gevolg van het terugveren van het stalen bint bij ontlasten van de constructie.

Omdat de proefbank in het laboratorium met 81 tonfm maximaal was belast en er geen breuk van de constructie was opgetreden is de proefbelasting tot bezwijken elders voltooid, waarbij echter alleen doorbuigingen werden gemeten. De uitkomsten zijn in de navolgende tabel opgenomen.

buigend moment	zeeg
19,6 tonfm	29 mm
44,8 tonfm	12,8 mm
70,0 tonfm	-3 mm
95,2 tonfm	-21 mm

Bij het verder opvoeren van de belasting nam bij een moment van 104,8 tonfm, d.i. het 2,38-voud van het preflexmoment, de doorbuiging overmatig toe, zonder dat de belasting verhoogd behoefde te worden. Onder de optredende vervormingen bezweek hierbij het beton in de bovenflens.

Er kan nog worden opgemerkt dat de vervormingsmeting uitwees, dat de verdeling van de vervormingen over de betonbovenflens volledig gelijkmatig was.

De totale vervormingen in de bovenflens tussen de fasen 0 en 18 bedroegen voor de meetpunten op 45 cm uit het hart van de plaat $114,5 \times 10^{-5}$ en voor de meetpunten op 5 cm uit het hart van de plaat $114,1 \times 10^{-5}$.

Uit de in tabel 5 verzamelde gegevens is te concluderen:

1. Bij het belasten van de constructie heeft het uitwendige buigende moment tussen fasen 2 en 3 reeds dezelfde grootte als het buigende moment in het stalen bint.

Evenwel wordt in dat stadium extra een grote trekkracht op het stalen bint uitgeoefend, aangezien dit bint nu ook als „wapening” van het beton werkzaam wordt.

2. Uit de beproeving van de preflexligger 2 (tabel 4) blijkt dat tussen de fasen 0 en 2 bij afnemen van de drukkracht in het hoogwaardig betonstaal met 3 tonf de drukkracht in het preflexbeton (incl. wapening) afneemt met ca 30 tonf. Wordt aangenomen dat zulks ongeveer in dezelfde verhouding (1:10) opgaat voor de volledige constructie van ligger 1, dan zou daaruit geconcludeerd kunnen worden dat bij fase 3 de drukkracht in het preflexbeton t.o.v. fase 0 van 62,630 tonf met 10 (23,451-18,566) tonf is afgenomen, dus tot rond 13,8 tonf is gedaald, terwijl de drukkracht in de wapening

18,6 tonf bedraagt. Na fase 3 is derhalve scheurvorming in het preflexbeton te verwachten. Deze veronderstelling wordt bevestigd door de waarnemingen.

3. De scheurvorming in het preflexbeton is in dit geval bij een lagere belasting opgetreden door de invloed van de reeds aangehaalde grotere kruip van het preflexbeton van ligger 1. Zou ligger 2 voor deze proef zijn gebruikt dan had men eerst scheurvorming kunnen verwachten bij een vervorming $\varepsilon_{bol} = 56 \times 10^{-5}$ t.o.v. fase 16/1 (voorlaatste kolom tabel 2), d.w.z. bij een totale vervorming van ca. 60×10^{-5} , hetgeen ligt tussen de fasen 12 en 13.
4. Het scheurenbeeld bij overbelasting is voor de beide proeven nagenoeg gelijk (zie fig. 11 en 15).
5. Bij het toenemen van het uitwendige buigende moment M van 5790 kgfm tot 24650 kgfm neemt het buigende moment in het stalen bint toe van 17234 kgfm tot 21993 kgfm.

Aldus is de constructie in deze toestand 5,1 maal zo stijf te achten als het stalen bint alleen. Voor toeneming van het uitwendige buigende moment van 5790 tot 43550 blijkt deze factor zelfs 5,5 te bedragen. Een zelfde resultaat wordt verkregen bij vergelijking van de doorbuigingen (onder een zelfde buigend moment) van een preflexconstructie met die van het stalen bint alleen.



Fig. 15. Scheurenbeeld preflexconstructie in fase 18.

De stijfheid van de volledige constructie is belangrijk vergroot door preflexen en het met beton omstorten van het stalen bint.

6. Bij fase 17 blijken de vervormingen aan de onderzijde van het stalen bint zo groot te zijn dat de vloeigrens wordt overschreden. (De gegarandeerde vloeigrens van het staal bedraagt 36 kgf/mm^2). De vervormingen nemen dan ook bij hogere belastingen sneller toe, hetgeen blijkt uit de vergrote toeneming van de doorbuiging tussen de fasen 17 en 18. Bovendien wijst het niet volkomen terugveren van de constructie (fase 19) op het optreden van plastische vervormingen in het staal en in het beton.
7. Bij nog grotere overbelasting van de constructie (104 tonfm) blijkt evenwel pas dat het stalen bint als geheel gaat vloeien. Men moet aannemen dat eerst bij deze belasting de vervormingen in de bovenzijde van het bint zodanig zijn geworden dat ook daar vloeien van het staal is opgetreden.
8. In de toestand waarbij het preflexbeton is gescheurd wordt het op de constructie werkende buigende moment opgenomen door:
 - a. Het buigende moment M_a van het stalen bint alleen.
 - b. Een moment t.g.v. de in hart van het stalen bint werkende trekkracht N_a t.o.v. de betonbovenflens.
 - c. Een moment t.g.v. de in de betonstaalwapening in het preflexbeton werkende trekkracht N_b' t.o.v. de betonbovenflens.

In fase 16 is de waarde 62450 derhalve ongeveer gelijk aan:

$41806 + 141663 \times 0,13 + 11737 \times 0,27$, wat betekent dat de uitgewerkte waarneming goed overeenstemt met het werkelijke krachten spel.

9. Het buigende moment, dat de constructie doet bezwijken is eveneens uit de hierboven gegeven factoren opgebouwd. Daarbij kan worden aangenomen dat de staalspanning in de betonstaalwapening de vloeigrens heeft bereikt, terwijl dit tevens reeds het geval is met het staal in de bovenzijde van het stalen bint.

Bij een vloeispanning in het betonstaal van 40 kgf/mm^2 en in het bintstaal van 36 kgf/mm^2 zou men aldus tot de volgende opbouw van het breukmoment in de constructie kunnen komen (fig. 16):

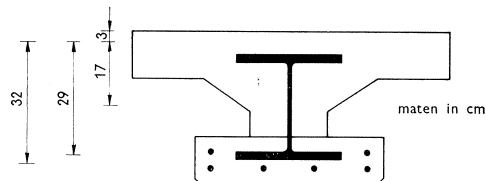


Fig. 16. Inwendige hefboomsarmen bij breuk preflexconstructie.

Moment door

- | | |
|---|--|
| a. Trekkracht in onderflens van het stalen bint | $58 \times 3,6 \times 0,29 = 61 \text{ tonfm}$ |
| b. Trekkracht in het lijf van het stalen bint | $35 \times 3,6 \times 0,17 = 22 \text{ ,,}$ |
| c. Vloeien van betonstaal | $16,8 \times 4 \times 0,32 = 21 \text{ ,,}$ |
| | 104 tonfm |

Op grond van bovenstaande proefresultaten kan worden geconcludeerd dat de stijfheid van de preflexconstructie relatief groot is, en tevens dat deze stijfheid

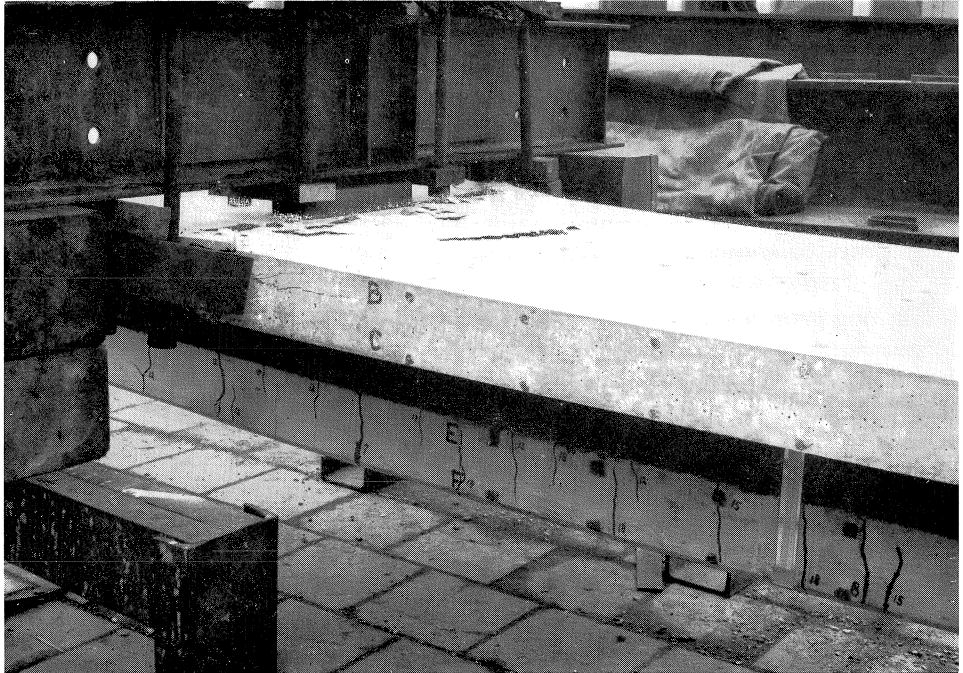


Fig. 17. Bezweken bovenflens preflexconstructie.

door het optreden van enige scheuren in het preflexbeton nauwelijks wordt beïnvloed. Het toelaten van scheurwijdten in het preflexbeton $\geq 0,1$ mm doet aan de stijfheid van de constructie niets tekort.

Bovendien kan worden vastgesteld dat het bezwijkmoment van de preflexconstructie belangrijk hoger is dan het vloeimoment van het daarin opgenomen stalen bint, zulks wegens de groter inwendige hefboomsarm van het staal t.o.v. het beton en mede door de invloed van het hoogwaardige betonstaal in het preflexbeton.

7 Besluit

Uit een beproeving van stalen binten, welke bestemd zijn voor preflexconstructies, alsmede uit onderzoeken op deze stalen binten na het preflexen en opnemen in een volledige betonconstructie volgen de onderstaande conclusies:

1. Bij het bepalen van de uiteindelijke vorm (opbuiging) van de preflexbalk dient rekening te worden gehouden met de invloed van het „Bauschinger-effect” bij voorgebogen stalen binten, en met de kruip van het preflexbeton.
2. Teneinde de krimp en kruip van het preflexbeton te beperken dient een belangrijk percentage hoogwaardig betonstaal in dit beton te zijn opgenomen.

3. Mede door de invloed van het betonstaal in het preflexbeton treedt bij overbelasting een fijn verdeeld scheurenbeeld op.
4. Het optreden van haarscheurtjes $\leq 0,1$ mm in het preflexbeton heeft geen merkbare invloed op de stijfheid van de preflexconstructie. Bovendien draagt de preflexconstructie zich als voorgespannen beton: bij ontlasten sluiten eventuele scheuren zich weer geheel.
5. De stijfheidsvergroting in de preflexbalk kwam goed overeen met een daarvoor berekende waarde, onder aanneming van een waarde voor n groot 5,5 d.w.z. $E_b = 390.000$ kgf/cm².
De spanningsverdeling in de preflexbalk bleek eveneens goed overeen te komen met de berekening.
Wel werd vastgesteld dat aan de kwaliteit van het preflexbeton bij het „deblokkeren” zeer hoge eisen moeten worden gesteld, omdat daardoor de in de preflexligger aanwezige spanningsverdeling sterk wordt beïnvloed en mede daardoor de stijfheid van de constructie en de scheurveiligheid.
6. Metingen van de toeneming van de zeeg in preflexbalken t.g.v. de krimp en kruip van het beton geven een goed inzicht in de invloed daarvan op de spanningsverdeling in de balk.
7. Het bezwijkmoment van de preflexconstructie is belangrijk hoger dan het vloeimoment van het daarin aanwezige stalen bint alleen, wegens de grote inwendige hefboomsarm en door de bijkomende invloed van het hoogwaardig betonstaal in het preflexbeton.

8 Literatuurverwijzing

1. DOBRUSZKES, A., Preflexbalken. Cement 1959 jrg. 11 no. 4 en 5.
2. BRUGGELING, Ir. A. S. G., Ervaringen bij de toepassing van preflex. Cement 1963, jrg. 15 no. 10 en 11.
3. POLAKOWSKI, Dipl. Ing. N. H., Softening of Metals during Cold-working. Journal of the Iron and Steel Institute, december 1951.
4. HOFF, HUBERT und GEORG FISCHER, Beobachtungen über den Bauschinger-Effekt an weichen und mittelhartem Stählen. Stahl u. Eisen 78 (1958) no. 19 september.
5. BRUGGELING, Ir. A. S. G., L'influence du retrait et du fluage du béton précomprimé sur les contraintes dans l'acier des poutres Préflex. Fourth Congress of the F.I.P., Rome-Naples 1962. Volume I – Theme I – paper no. 11.