

De hoofdstukken 1 tot 3 behandelen de functies van de sluisdeuren, hun integratie in de betonnen sluis-
hoofden, alsook de verschillende andere beschou-
wingen die tussenkomen in hun ontwerp (milieu,
uitvoering, transport, uitbating, onderhoud, enz...).

In hoofdstuk 4 wordt een type-sluisdeur beschreven
met inbegrip van haar werking, de bewegingsuit-
rusting en haar onderhoud.

De deuren van de voornaamste Belgische zeesluizen
worden elk afzonderlijk beschreven in hoofdstuk 5.
Hierbij wordt mede de aandacht gevestigd op de evo-
luties die zijn opgetreden in de structuur, in de be-
schermingsmethodes en in bepaalde uitrustingen. Dit
hoofdstuk getuigt ook van een dosis ondervinding op-
gedaan in de uitbating. De sluisdeuren van de Van-
dammesluis te Zeebrugge worden vrij uitgebreid be-
handeld terwille van de niet conventionele uitvoerings-
wijze van de betonwerken die geleid hebben tot het
incorporeren in de deuren van de dispositieven voor

vulling en lediging van de saskolk, en terwille van de
speciale voorzieningen die aangenomen werden omdat
de afwaarste deuren rechtstreeks aan de golfslag van-
uit de zee onderhevig kunnen zijn.

In de slotbeschouwingen wordt de noodzaak onder-
streept om de deuren stabiele en stijve afsteuning te
geven, om de deuren zelf robuust en uiterst betrouw-
baar te ontwerpen, ze ruim te dimensioneren om te
weerstand aan belastingen die soms slecht gekend zijn
of maar occasioneel optreden, alsmede aan zeer stren-
ge exploitatieomstandigheden. Daarenboven moeten
deze sluisdeuren een reeks uitrustingen bevatten met
het oog op snelle en doeltreffende onderhouds- of her-
stellingswerkzaamheden.

Nochtans hebben geëvolueerde inzichten, de tech-
nische vooruitgang en de mogelijkheden van de com-
puterberekeningen toegelaten de constructies te ver-
eenvoudigen en ze lichter uit te voeren, en dit met
behoud van hun stevigheid.

DEEL 2

ANALYSE VAN DE GLOBALE BEREKENING VAN DE BERENDRECHTSLUISDEUREN, EN ALGEMENE BESCHOUWINGEN AANGAANDE DE BEREKENING VAN HET KRACHTENSPEL IN DERGELIJKE SLUISDEUREN

1. INLEIDING

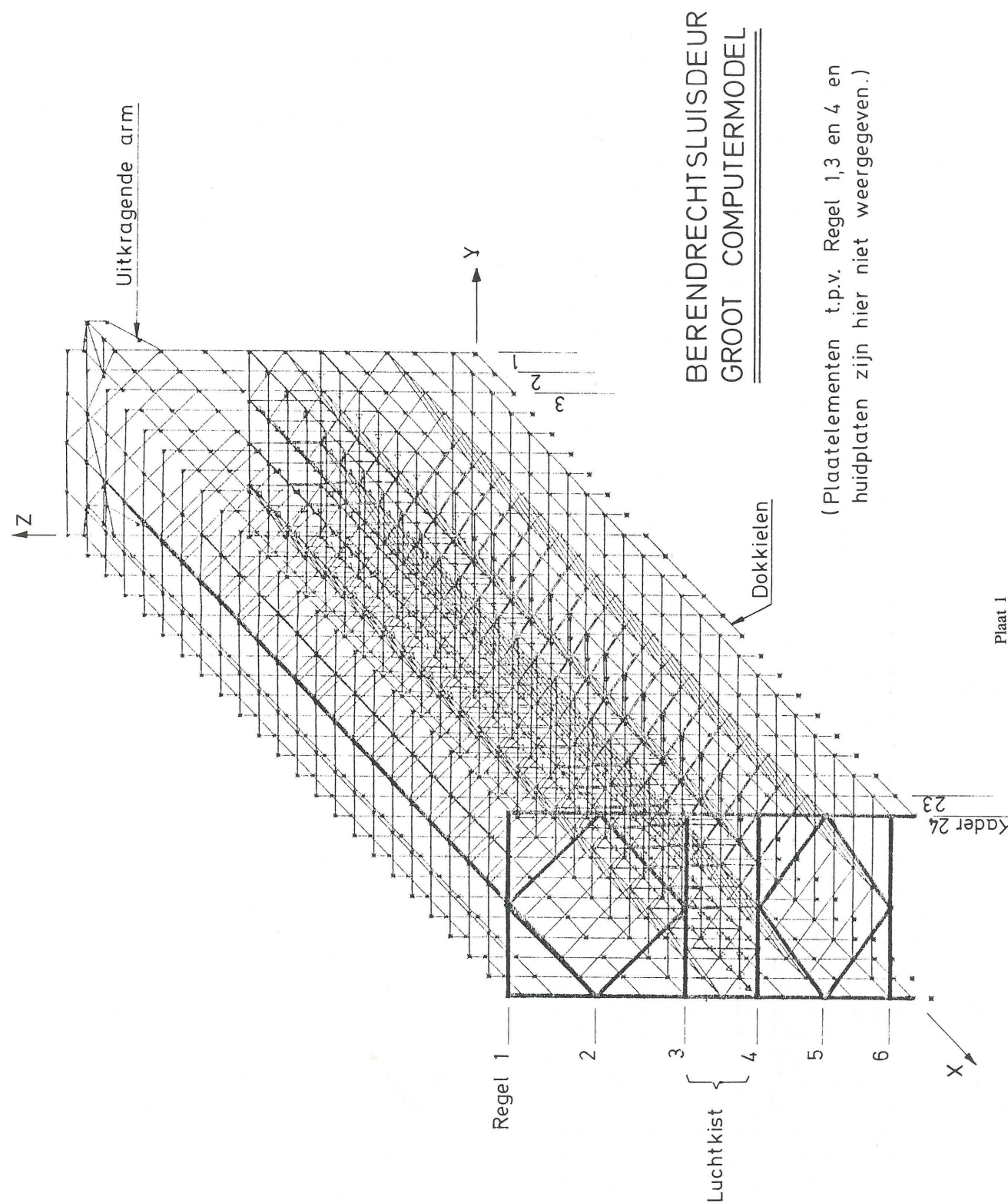
Deze bijdrage heeft niet de bedoeling de hele bere-
kening van een sluisdeur in detail te bespreken. Er
wordt hier dus geen volledigheid nagestreefd. Daar-
voor dient verwezen te worden naar de berekenings-
nota's zelf. Enkel zal getracht worden aan de hand
van de recente studie van de Berendrechtsluisdeuren
enige globale aspecten van de berekeningsresultaten
weer te geven, ten einde het gedrag van de sluisdeur
onder de aangebrachte belasting beter te verstaan.
Daartoe moet eerst aangegeven worden hoe de deur
voor de computerberekening gemodelleerd is, welke
randvoorwaarden er beschouwd zijn en welke belas-
tingen er ingevoerd werden. Vervolgens zal nageke-
ken worden hoe de reactiekrachten zich verdelen
over de aanslagen, zal gepoogd worden na te gaan hoe
de globale krachtsverdeling in de deurconstructie
verloopt, en zullen de globale vervormingen geanaly-
seerd worden. Dit geheel zou een inzicht moeten ver-
schaffen over het gedrag van de sluisdeur en over de
mogelijkheid om dit gedrag b.v. ten behoeve van een

voorontwerpberekening, door middel van een een-
voudig mathematisch model toch vrij natuurgetrouw
weer te geven. Bij deze laatste opgave zullen we ech-
ter op een aantal moeilijkheden stuiten die hieronder
besproken zullen worden. Na onderzoek van enige
varianten en na de mogelijkheid aangegeven te heb-
ben voor optimalisatie van een dergelijke constructie
zal nog een blik geworpen worden op de vroegere
sluisdeuren en zal nog aangegeven worden hoe na de
globale berekening de studie voortgaat.

2. GLOBAAL MODEL EN RANDVOORWAARDEN

2.1. Model van de sluisdeur

De sluisdeur, met inbegrip van de uitkragende arm,
is in zijn geheel zo werkelijkheidsgetrouw mogelijk
gemodelleerd door middel van plaalementen, bal-
kelementen en staafelementen, met elkaar verbonden
in de knopen. Dit geheel is gesitueerd in een drie-
dimensionaal assenstelsel, met de X-as volgens de



deurlengte (vanuit kader 1 naar kader 24), de Y-as dwars op de deur (vanuit de huidplaat rechts naar de huidplaat links), en de Z-as volgens de deurhoogte (vanuit het peil der drempelaanslag $-13,675$ naar boven (plaat 1).

Om redenen van interne modelbouw zijn alle knopen vastgehouden volgens de Y-rotatierichting, en zijn de knopen waar wel plaalementen maar geen balkelementen samenkomen vastgehouden volgens de Z-rotatierichting. Bovendien zijn sommige knopen (in de luchtkist) vastgehouden volgens de X-rotatierichting. Deze vasthoudingen zijn nodig om het gebrek aan buigingsstijfheid van de plaalementen te compenseren, ze verminderen het aantal vrijheidsgraden en komen dus de berekening ten goede, en zij schaden geenszins de natuurgetrouwheid der resultaten.

Elk van de 24 kaders van de deur omvat 36 knopen, dat maakt 864 knopen voor de sluisdeur zelf; de uitkragende arm omvat 13 bijkomende knopen. Zodoende wordt de deur omschreven door 877 knooppunten. Het computermodel voorziet verder nog 83 niet gebruikte „dummy nodes”, en rekent uiteindelijk dus met 960 knopen.

De elementen waarmee de deurstructuur is opgebouwd zijn balkelementen („beam”, met axiaal-, buigings- en torsieweerstand), staafelementen („truss” of „rod”, enkel met axiaalkrachtcapaciteit), en plaalementen („membran”, zonder buigingsstijfheid).

Elk kader van de deur is, in zijn vlak, opgebouwd uit 38 balken, 3 staven en 8 platen (de staven en platen ter weergave van de dwarsschotten in de luchtkist). Zowel de bodem van de luchtkist (regel 4), de top van de luchtkist (regel 3), als het rijdek (regel 1) zijn elk opgebouwd uit 4 naast elkaar gelegen stroken van elk 23 platen, en 3 rijen van elk 23 staven. Elk der beide huidplaten bestaat uit 11 boven elkaar gelegen stroken van elk 23 platen, met daartussen 10 rijen van elk 23 staven (met 2 keer een ontbrekende staafelement aan de hefinrichting), en 1 rij van 23 balken (regel 6). In de as-lijn der deur ter hoogte van regel 6 bevinden zich nog eens 23 balken. De dokkielen bestaan uit 2 maal 9 balken. De uitkragende armen ten slotte zijn gemodelleerd door 8 platen en 24 balken. Daarnaast worden de randvoorwaarden (lineair veerende opleggingen) ingebracht door speciale elementen („bounderies”). Hiervan zijn er 97 gebruikt. Voor hun detaillering zie volgende paragrafen.

In het totale model zijn dus, ingedeeld in 133 groepen, 1023 balkelementen, 731 staafelementen, 982

plaalementen en 97 veerelementen verwerkt, dit is samen 2833 elementen.

2.2. Randvoorwaarden der verticale eindkaders (Y-richting)

In het gebruikte computerprogramma (SAP IV) geven enkel de veerelementen een reactieoutput (starre vasthoudingen geven geen reactieoutput). Omdat men deze output wenste ter plaatse van de eindkaders zijn hier deze elementen gebezigd, daarbij trachtend op redelijke wijze de veerstijfheid van de houten aanslagbalken te benaderen. Per strekkende meter wordt deze veerstijfheid benaderend gegeven door:

$$k' = b \cdot E/h = 8,854 \cdot 10^5 \text{ t/m}^2$$

met b = breedte houten balk = 0,34 m
 h = dikte houten balk = 0,24 m
 E = elasticiteitsmodulus van azobéhout = $6,25 \cdot 10^5 \text{ t/m}^2$.

Omdat de veerelementen in de knooppunten geplaatst worden, wordt aan elke knoop van deze aanslagen een meewerkende houtlengte geassocieerd, gaande van de halve afstand boven tot de halve afstand onder de knoop. Per knoop van de aanslag wordt dus de veerconstante:

$$k = k' \cdot l \quad \text{met } l = \text{geassocieerde houtlengte.}$$

Volgende bemerkingen dienen hierbij gemaakt te worden:

- gezien de houten balk niet volledig doorloopt tot aan het rijdek (regel 1), is in het model ook geen verend element aangebracht in de bovenste knoop;
- gezien in een eerste computerrun de knoop halverwege tussen regel 1 en regel 2 trek gaf, wat fysisch niet mogelijk is, is voor deze knoop de veerconstante zo klein genomen dat hier de reactie nul wordt;
- in het belastingsgeval 1 (zie verder) geeft de knoop ter hoogte van regel 6 een trekkracht, wat fysisch onmogelijk is. Nochtans is deze veer zo behouden omdat de grootte van deze trek-reaktie beperkt is en de fout dus klein is, en omdat zodoende hetzelfde model voor beide belastingsgevallen kan behouden blijven (in geval 2 komt hier geen trek voor).

2.3. Randvoorwaarden der horizontale drempelaanslag (Y-richting)

Van kader 2 tot kader 23, met uitzondering van kader 21 (ter plaatse van de onderrolwagen) rust elk

kader met tussenkomst van een rubberen element tegen de granietaanslag. Deze rubbers zijn voorgesteld door een lineair veerelement in de onderste knoop van elk van deze kaders. De veerconstante is deze welke vereist werd voor de rubbers, namelijk:

$$k = 1000 \text{ kN} / 17,5 \text{ mm} = 101,94 \text{ t} / 17,5 \text{ mm} = 5825 \text{ t/m.}$$

Gezien, zoals gezegd, de rubber op kader 21 ontbreekt, is aan de aangrenzende rubbers (kader 20 en kader 22) een aangepaste stijfheid gegeven, ten einde een betere continuïteit van de doorbuigingslijn te verkrijgen. Op basis van een eerste computerrun is voor deze veerstijfheden een waarde gekozen van:

$$k = 7822 \text{ t/m.}$$

Alhoewel voor de rubbers een lineair verloop van het krachten/indrukkingsdiagram vereist was, bleken de werkelijk geleverde produkten hier niet volledig aan te voldoen. Om de invloed van de niet-lineariteit na te gaan werd achteraf een computerberekening uitgevoerd waaruit bleek dat deze invloed gering was, zodat ook met deze rubbers de berekeningen voldoende betrouwbaar blijven.

2.4. Andere randvoorwaarden

Om diverse redenen werden drie andere groepen veren ingevoerd:

- één oneindig stijve veer (= starre vasthouding) in de X-richting aan één knoop (kader 13), teneinde het model in deze richting ruimtelijk op zijn plaats te houden. Dit heeft geen verdere fysische betekenis;
- elke knoop op de top en op de bodem der luchtkist, gelegen in de aslijn der deur (dus 2 per kader), wordt in de X-rotatierichting voorzien van een veer met berekende veerstijfheid. Immers, de diagonaalbalken komen daar samen en zouden in deze knopen momenten afgeven, maar deze knopen houden enkel plaalementen samen die geen buiging kunnen opnemen. De ingevoerde veerstijfheden zijn deze die overeenkomen met de stijfheid der werkelijke platen tegen verdraaiing, namelijk:

$$k = 0,1129 \cdot 10^8 \text{ tm/rad.}$$
 De in deze veerelementen uitgeoefende reacties zijn klein en beïnvloeden niet de globale berekening;
- twee veren zijn ingevoerd in de verticale Z-richting, ter plaatse van de bevestiging van de pendels aan de uitkragende arm. Hun veerstijfheid komt overeen met wat opgelegd was voor de werkelijke pendels, namelijk:

$$k = 100 \text{ t} / 25 \text{ mm} = 4000 \text{ t/m.}$$

Anderzijds werd aan één deurzijde, de zijde waartegen de waterdruk werkt, de oplegging van de deur op de onderrolwagen (knoop 802 kader 21) gesimuleerd door een veer in de Z-richting, met een oneindig grote veerstijfheid (vaste oplegging). Merk op dat bij de starre oplegging op de onderrolwagen slechts één van beide steunen ingevoerd werd, aangezien door de vervorming van de deur de andere steun kan loskomen, wat, als hier ook een oplegging zou gesimuleerd worden, in een trek-reaktie zou resulteren, wat fysisch niet mogelijk is. Daarentegen zijn voor de ophanging aan de pendels de beide ophangpunten aangebracht, omdat het hier veren betreft, waarvan de invloed moet gekoppeld worden met hun gedrag onder de werkelijke verticale belasting op de deur. Immers, in het computermodel werd geen verticale belasting beschouwd (zie verder). Hoe dan ook zijn deze drie ingevoerde verticale randvoorwaarden zodanig dat de onder de ingevoerde belasting verkregen reacties klein zijn.

3. INGEVOERDE BELASTING OP DE SLUISDEUR

3.1. Belasting in de Y-richting (horizontaal dwars op de deur)

De voornaamste belasting op de sluisdeur is de hydrostatische druk vanwege het verschil in waterstanden aan beide deurzijden. Er worden twee belastingsgevallen beschouwd, overeenkomend met de hoogwaterstand en de laagwaterstand aan de rivierzijde, telkens bij konstant dokpeil. De beschouwde niveau's zijn:

hoogwaterstand:	+ 7,50
laagwaterstand:	- 1,00
dokpeil:	+ 4,25.

In geval 1 (hoogwater) bedraagt de hydrostatische druk dus $3,25 \text{ t/m}^2$, in geval 2 (laagwater) is dit $5,25 \text{ t/m}^2$.

Aangezien de deur aanslaat en afdicht aan de afwaartse zijde doen deze drukken zich voor op de huidplaat aan de afwaartse deurzijde, en zijn gericht van binnen naar buiten (dus naar afwaarts). Op de zijwanden van de luchtkist (tussen regel 3 en regel 4) doet zich een ander schema voor: ervan uitgaande dat de luchtkist leeg is en inwendig onderhevig aan de atmosferische druk, worden de beide zijden der luchtkist rechtstreeks belast door de hydrostatische drukken, telkens gericht naar binnen. Deze schikking is aangenomen over de ganse deurlengte.

Voor meer duidelijkheid zie plaat 2.

BERENDRECHTSLUIS SLUISDEUR COMPUTERBEREKENINGEN INGEVOERDE BELASTINGEN

(momenten en zwaartepunten t. o. v. drempel op -13.675)

BELASTINGSGEVAL 1 :
 PER KADER 2 t/m 23 :

regel	niveau m	plaat hoogte m	druk t/m ²	plaat kracht t	knoop kracht t	moment tm
regel 1	21.810	1.718	0.341	1.777	0.888	19.374
regel 2	20.092	1.718	0.341	1.777	0.888	201.317
regel 3	17.515	2.577	2.339	18.263	21.308	373.207
regel 4	15.042	2.473	3.250	24.353	24.358	366.390
regel 5	12.568	2.474	3.250	24.363	21.994	276.426
regel 6	10.575	1.993	3.250	19.626	19.626	207.546
regel 7	8.582	1.993	3.250	19.626	17.071	146.500
regel 8	7.108	1.474	3.250	14.515	18.129	128.863
regel 9	4.900	2.208	3.250	21.743	18.494	90.619
regel 10	3.352	1.548	3.250	15.244	18.095	60.654
regel 11	1.225	2.127	3.250	20.946	10.473	12.829
ing. kracht						7.243
ing. moment						-1.484
som =						1891.113
zhtpt :						10.075

(momenten en zwaartepunten t. o. v. drempel op -13.675)

BELASTINGSGEVAL 2 :
 PER KADER 2 t/m 23 :

regel	niveau m	plaat hoogte m	druk t/m ²	plaat kracht t	knoop kracht t	moment tm
regel 1	21.810	1.718	0.000	0.000	0.000	0.000
regel 2	17.515	2.577	0.033	0.255	0.127	2.557
regel 3	15.042	2.473	1.647	12.338	21.602	110.275
regel 4	12.568	2.474	4.118	30.867	31.287	324.943
regel 5	10.575	1.993	5.251	31.707	31.705	393.214
regel 6	8.582	1.993	5.250	31.704	27.576	335.282
regel 7	7.108	1.474	5.250	23.448	29.286	236.654
regel 8	4.900	2.208	5.250	35.124	29.874	208.163
regel 9	3.352	1.548	5.250	24.625	29.230	146.384
regel 10	1.225	2.127	5.250	33.835	16.918	97.979
ing. kracht						11.700
ing. moment						-2.397
som =						1888.111
zhtpt :						8.014

Plaat 3

aangeduid op platen 4 en 5. Aangezien echter de veerconstante die het hout voorstelt telkens bepaald is voor een zekere houtlengte (plaat 4), lijkt het realistisch om de reacties om te rekenen tot reacties per strekkende meter aanslagbalk (plaat 5). Maar ook dit komt niet met de werkelijkheid overeen daar dit geen continu verlopende lijn geeft. Men zou zich eerder een vloeiende lijn moeten voorstellen die zo goed mogelijk de histogrammen van plaat 5 volgt.

In ieder geval blijkt uit de resultaten dat de grote

reacties uitgeoefend worden ter hoogte van regel 1, regel 3 en regel 4, dus ter plaatse van de fysieke regels bestaande uit gesloten plaelementen. Deze regels gedragen zich immers, samen met een zeker deel van de verticale huidplaat, als een volle balk over de ganse deurlengte. Door het starre schot tussen regel 3 en 4 (eindschot der luchtkist) ontstaat er ook een grote reactie in de knoop op halve luchtkisthoogte, dus de reacties afkomstig uit de regels 3 en 4 spreiden zich via dit schot over de hoogte der luchtkist.

BERENDRECHTSLUIS				SLUISDEUR				COMPUTERBEREKENINGEN				OUTPUT REAKTIES				GROOT MODEL			

Belastingsgeval 1																			

1. OP EINDKADERS																			

regel	knoop	hoogte	niv.	hout	kracht	mom.	kracht	mom.	kracht	mom.	kracht	mom.	kracht	mom.	kracht	mom.			
	t			lengte	K1	tm	K24	tm	K1	tm	K24	tm	K1	tm	K24	tm			
1	13	22.675	9.000		467.320	10192.249	495.050	10797.041	322.410	7031.762	345.810	7542.116	0.000	0.000	0.000	0.000			
	12	21.810	8.135	1.292	0.000	0.000	0.000	0.000	25.206	441.483	42.760	748.941	36.233	545.017	32.240	484.954			
	11	20.092	6.417	2.148	18.126	317.477	35.428	620.521	409.880	5151.372	411.910	5176.885	12.179	10.997	138.213	103.773			
	9	15.042	1.367	2.474	36.506	549.123	31.712	477.012	10.997	10.997	103.773	103.773	9.813	8.535	73.250	64.431			
	8	12.568	-1.107	2.234	373.920	4699.427	376.440	4731.098	9.813	8.535	73.250	64.431	9.065	9.247	45.309	45.309			
	7	10.575	-3.100	1.993	241.430	2553.122	246.690	2608.747	9.065	9.247	45.309	45.309	9.047	9.047	30.327	30.327			
	6	8.582	-5.093	1.734	235.360	2019.860	242.950	2084.997	9.047	9.047	30.327	30.327	9.047	9.047	30.327	30.327			
	5	7.108	-6.567	1.841	23.542	167.337	24.642	175.155	9.047	9.047	30.327	30.327	9.047	9.047	30.327	30.327			
	4	4.900	-8.775	1.878	45.472	222.813	46.048	225.635	9.047	9.047	30.327	30.327	9.047	9.047	30.327	30.327			
	3	3.352	-10.323	1.838	9.956	33.372	9.942	33.324	9.956	33.372	9.942	33.324	9.956	33.372	9.942	33.324			
	2	1.225	-12.450	1.676	-21.069	-25.810	-20.281	-24.844	2.410	(niv. 0.0)	0.000	0.000	2.410	(niv. 0.0)	0.000	0.000			
	1	0.000	-13.675	0.613	0.097	0.000	0.358	0.000	0.097	0.000	0.358	0.000	0.097	0.000	0.358	0.000			
som =					1430.660	20728.969	1488.979	21728.686	1668.564	20747.683	1733.752	21740.288	1668.564	20747.683	1733.752	21740.288			
zhtpt :					14.489	14.593	12.434	12.539	14.489	14.593	12.434	12.539	14.489	14.593	12.434	12.539			
totaal :					K1 + K24:	2919.639	42457.655	14.542	K1 + K24:	3402.316	42487.970	12.488	K1 + K24:	3402.316	42487.970	12.488			
zhtpt :					14.542	14.542	14.542	14.542	14.542	14.542	14.542	14.542	14.542	14.542	14.542	14.542			

2. OP DREMPEL																			

					0.000	K2	14.735	0.000							28.252	0.000			
					0.000	K3	29.117	0.000							49.170	0.000			
					0.000	K4	41.217	0.000							64.182	0.000			
					0.000	K4	51.973	0.000							77.930	0.000			
					0.000	K6	61.288	0.000							89.820	0.000			
					0.000	K7	69.237	0.000							99.980	0.000			
					0.000	K8	75.787	0.000							108.310	0.000			
					0.000	K9	81.090	0.000							115.080	0.000			
					0.000	K10	85.195	0.000							120.270	0.000			
					0.000	K11	87.887	0.000							123.690	0.000			
					0.000	K12	89.376	0.000							125.580	0.000			
					0.000	K13	89.413	0.000							125.650	0.000			
					0.000	K14	87.997	0.000							123.870	0.000			
					0.000	K15	85.436	0.000							120.690	0.000			
					0.000	K16	81.381	0.000							115.570	0.000			
					0.000	K17	76.224	0.000							109.070	0.000			
					0.000	K18	69.760	0.000							100.850	0.000			
					0.000	K19	61.867	0.000							90.774	0.000			
					0.000	K20	65.127	0.000							97.980	0.000			
					0.000	K21	0.000	0.000							0.000	0.000			
					0.000	K22	37.952	0.000							63.618	0.000			
					0.000	K23	15.171	0.000							28.945	0.000			
totaal :					1357.230	0.000	1979.281	0.000	1357.230	0.000	1979.281	0.000	1357.230	0.000	1979.281	0.000			

3. VANWEGE VERTIKALE REAKTIES																			

F = 7.633																			
75.460																			

F = 2.859																			
28.266																			

4. VANWEGE VASTHOUDINGEN IN LUCHTKIST																			

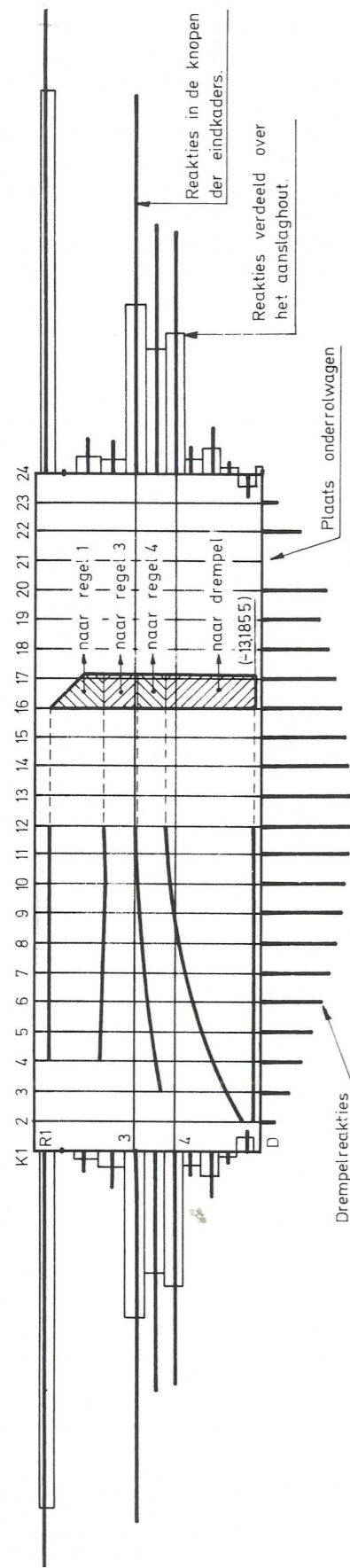
59.840																			

5. TOTAAL (1+2+3+4)																			

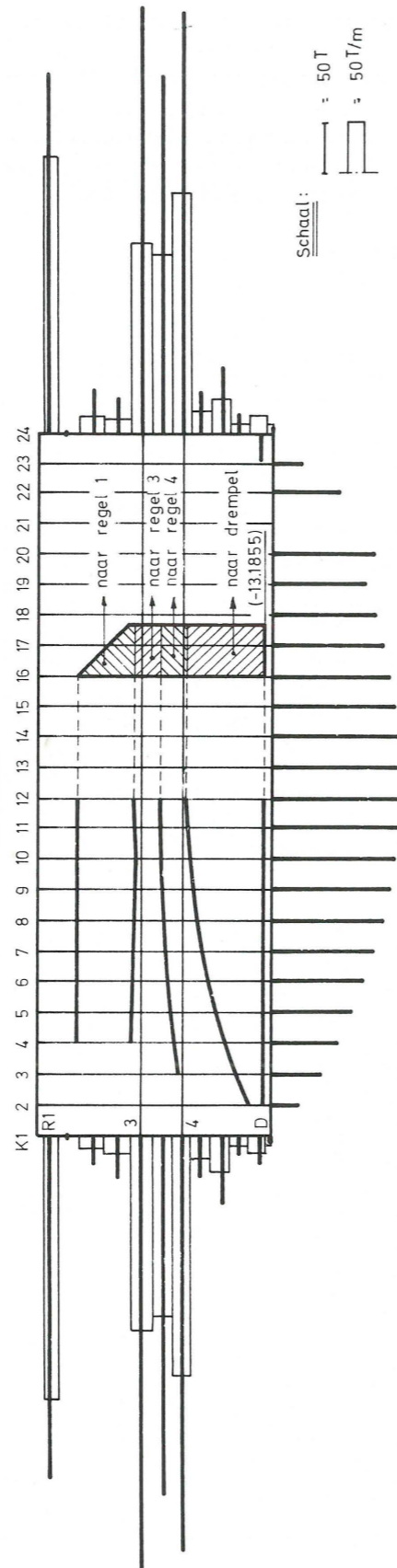
zhtpt :					4276.869	42592.955	5381.597	42524.999	4276.869	42592.955	5381.597	42524.999	4276.869	42592.955	5381.597	42524.999			
zhtpt :					9.959	9.959	7.902	7.902	9.959	9.959	7.902	7.902	9.959	9.959	7.902	7.902			

Plaat 4

GEVAL 1



GEVAL 2



Plaat 5. — Sluisdeur Berendrecht. Belastingsverdeling en reakties.

In de knopen tussen de andere regels zijn de reakties eerder klein.

In het belastingsgeval 1 doen zich ter hoogte van regel 6 negatieve reakties voor. Dit kan fysisch niet en is te wijten aan de modelopbouw (zie § 2.2.), maar het betekent dat de deur daar iets zou kunnen loskomen van de aanslag. De invloed hiervan is echter klein, zodat het globale gedrag der deur niet verstoord wordt.

Beide eindkaders, die onderling weinig verschillen, geven samen een reactie van:

- in geval 1: 2919,639 ton, dit is 68,27% van de totale deurreactie,
- in geval 2: 3402,316 ton, dit is 63,22% van de totale deurreactie.

Benaderd kan men dus stellen dat in de beide gevallen de eindkaders samen ongeveer twee derde van de totale reaktiekracht uitoefenen.

4.2. Reakties der drempelaanslagen

De reakties die ter plaatse van elk kader (van kader 2 tot kader 23) via de rubberen elementen op de drempel worden overgebracht zijn weergegeven in platen 4 en 5. Hun verloop volgens de deurlengte is ongeveer parabolisch, met de maximale reactie in het midden der deur (kader 13); deze maximale reactie bedraagt:

- in geval 1: 89,41 ton,
- in geval 2: 125,65 ton.

Zoals reeds gemeld is er geen drempelsteun ter plaatse van de onderrolwagen (kader 21). De daarnaastliggende reakties vertonen een zekere diskontinuiteit in het verloop, aangezien voor deze steunen de veereigenschappen zodanig gekozen zijn dat wel een continu verloop verkregen wordt voor de indrukkingen en dus niet noodzakelijkerwijze voor de krachten. Daarbij moet opgemerkt worden dat ter plaatse van de kaders 20 en 22 de reakties merklijk lager blijven dan in het midden van de deur.

De totale reactie op de drempel (som van alle kaderreakties) bedraagt:

- in geval 1: 1357,230 ton, dit is 31,73% van de totale deurreactie,
- in geval 2: 1979,281 ton, dit is 36,78% van de totale deurreactie.

Men kan dus stellen dat gemiddeld over beide belastingsgevallen, de drempel ongeveer één derde van de totale reactie opneemt.

4.3. Vertikale reakties

Vertikale reakties komen voor in de knopen 118 en 120, dit is aan beide deurzijden in de uitkragende arm, en knoop 802, dit is aan de oplegging op de onderrolwagen (kader 21) aan één deurzijde. Deze reakties bedragen:

	geval 1 (in ton)	geval 2
knoop 118:	-7,4114	-2,9883
knoop 120:	+7,6330	+2,8592
knoop 802:	-0,2217	+0,1290
som:	0	0

Hieruit blijkt dat deze reakties weinig te betekenen hebben en niet van invloed zullen zijn op het globale gedrag van de sluisdeur.

4.4. Andere reakties

Zoals gezegd zijn om redenen van interne modelbouw vasthoudingen voorzien ter plaatse van elk kader, in de aslijn der deur ter hoogte van regel 3 en regel 4. Deze vasthoudingen geven reakties in vorm van momenten. In geval 1 liggen deze momenten ongeveer tussen de 0,8 tm en 1,5 tm (met op de eindkaders een uitschieter van 3,3 tm); in geval 2 tussen de 0 tm en 0,4 tm (met op de eindkaders een uitschieter van 0,8 tm). Deze reakties zijn dus niet van aard om er verder aandacht aan te besteden.

4.5. Bespreking bij deze reakties

Vergelijking tussen de platen 2, 3 en 4 toont aan dat de totale som der beschouwde drukken, de totale som der ingevoerde belastingen en de totale som der reakties op enkele zeer kleine afrondingen na identiek zijn (let er op dat bij de reakties de invloed van de kracht op het geleidingswiel ingecalculeerd is).

Hetzelfde kan gezegd worden over de ligging van het zwaartepunt (boven het niveau -13,675) van de beschouwde drukken, van de ingevoerde belasting en van het totaal der reakties.

Gezien ongeveer één derde van de totale belasting op de drempel onderaan wordt afgegeven, zal het zwaartepunt van de reakties op de eindkaders merklijk hoger liggen dan dat der totale belasting. Immers, hoe groter het deel van de belasting dat naar onderaan geleid wordt, hoe hoger het zwaartepunt van de reakties op de eindkaders zal liggen. Dit verschijnsel kan tot gevolg hebben (en de resultaten in het geval 1 wijzen er enigzins op) dat aan de onderzijden van de eindkaders negatieve reakties gaan optreden, of fy-

sisch juist gezegd dat de deur zal loskomen van de aanslagen (tegen de waterdruk in). Dit zou het geval kunnen zijn bij een volledig starre onderaanslag van de deur tegen de drempel. Anderzijds is het wenselijk een zo groot mogelijk deel der belasting naar de drempel af te voeren omdat dit de meest direkte weg is die de deur globaal gesproken het minst belast. Om tussen beide zienswijzen een compromis te vinden zijn de rubberen drempelsteunen ingevoerd, die een verende oplegging verzekeren, met het resultaat zoals hierboven en in de tabellen uiteengezet.

5. GLOBALE VERVORMINGEN

Plaat 6 geeft de vervormingen, in mm, in de richting der waterdrukken, en genomen in de knopen gelegen in het vlak der huidplaat ($Y = 0$) waarop de waterdrukken werken.

Men zal opmerken dat met uitzondering van de lokale waarden in de omgeving van de onderrolwagen (kader 21 onderaan) de vervormingen symmetrisch verlopen ten opzichte van de aslijn der deur (tussen de kaders 12 en 13), zodat het verder zal volstaan een halve deur te beschouwen.

De vervormingen in planzicht bekeken verlopen zowat parabolisch, en op een factor na hebben deze vervormingen nagenoeg hetzelfde verloop in de beide belastingsgevallen en voor alle niveau's. Als voorbeeld wordt in plaat 7 de vervorming gegeven van regel 3 in geval 1. In plaat 8 wordt dan een schematische vergelijking gemaakt (waarbij alle vervormingen in de X-richting verwaarloosd worden) tussen de vervormingen ter plaatse van regel 1, ter plaatse van de halve hoogte der luchtkist en ter plaatse van de rubberen drempelaanslagen, en dit voor beide belastingsgevallen. Op te merken valt dat de vervorming ter plaatse van regel 1, kader 1 niet verwaarloosbaar is (omdat het hoogste steunpunt niet ter plaatse van maar onder regel 1 genomen werd), wat fysisch niet correct lijkt. Daar het hier gaat over een maximale waarde van 2,6 mm is de invloed hiervan echter niet belangrijk. Uit deze plaat 8 blijkt dat voor beide belastingsgevallen de vervorming van regel 1 in het midden der deur dezelfde is, terwijl de luchtkist en de drempel in geval 2 meer doorbuigen dan in geval 1. Er valt ook op te merken dat in geval 2 de luchtkist iets verder doorbuigt dan regel 1, waar dit in geval 1 duidelijk omgekeerd is.

Om een nog beter inzicht te krijgen in het verloop der vervormingen geeft plaat 9 de vervormingen in de kadervlakken (in de huidplaat $Y = 0$), voor de kaders 3, 6, 9 en 12, en voor beide belastingsgevallen.

De maximale vervormingen doen zich voor in het midden der deur, maar situeren zich voor beide gevallen op verschillende niveau's:

- geval 1: tussen regel 1 en regel 2: 34,9 mm,
- geval 2: tussen regel 5 en regel 6: 39,1 mm.

Voor een totale deurlengte van 69,69 m is dit gemiddeld: 1/1890.

Tussen regel 3 en 4 verloopt de vervorming rechtlijnig gezien de zeer grote stijfheid der schotten in de luchtkist. Ongeveer in het verlengde van deze rechte lijn liggen de vervormingen van regel 1, wat er op wijst dat de rechthoekige koker, gevormd door de beide huidplaten, regel 1, 3 en 4, rechthoekig blijft. Dit is te wijten aan de zeer grote stijfheid die in de kadervlakken verkregen wordt door de diagonaalstructuren. De relatieve vervormingen die zich ten opzichte van de rechte lijn voordoen tussen de volle plaatregels (en vooral tussen regel 2 en 3) zijn te wijten aan de lokale waterdrukken. Eenzelfde redenering kan opgebouwd worden voor het deel onder de luchtkist, met dit verschil dat ter plaatse van regel 6 de relatieve vervormingen groter zijn door de grote reacties op de drempelaanslagen. Ook ten gevolge van deze drempelreacties ondergaat de knoop ter plaatse van regel 6 een rotatie waardoor de vervormingen boven regel 6 nog toenemen. Tussen regel 6 en de drempelaanslag werkt enkel de uitkraging (hier komt dus niet meer de hele deurbreedte tussen), met een veel geringere stijfheid dan de bovenliggende delen; vandaar een vrij grote vervorming. Ter plaatse van de drempel wordt de vervorming alleen veroorzaakt door de samendrukking der rubbers.

Opmerkelijk is ook dat de rechte lijn tussen de punten op de regels 1, 3 en 4 (dus de koker) in geval 1 naar voor helt (dus grote vervormingen op regel 1 dan op de luchtkist), terwijl in geval 2 deze helling naar achter geïntendeerd is en veel kleiner is (de koker blijft eerder vertikaal).

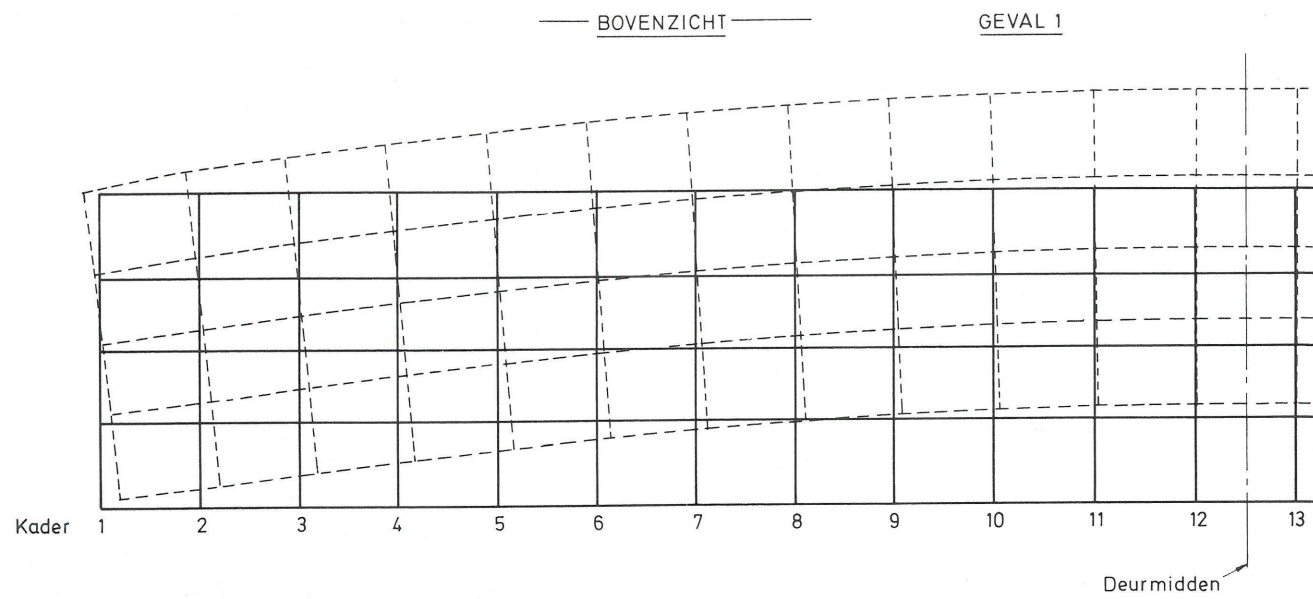
6. GLOBAAL KRACHTENVERLOOP

6.1. Opzet van het onderzoek en type van „klein model”

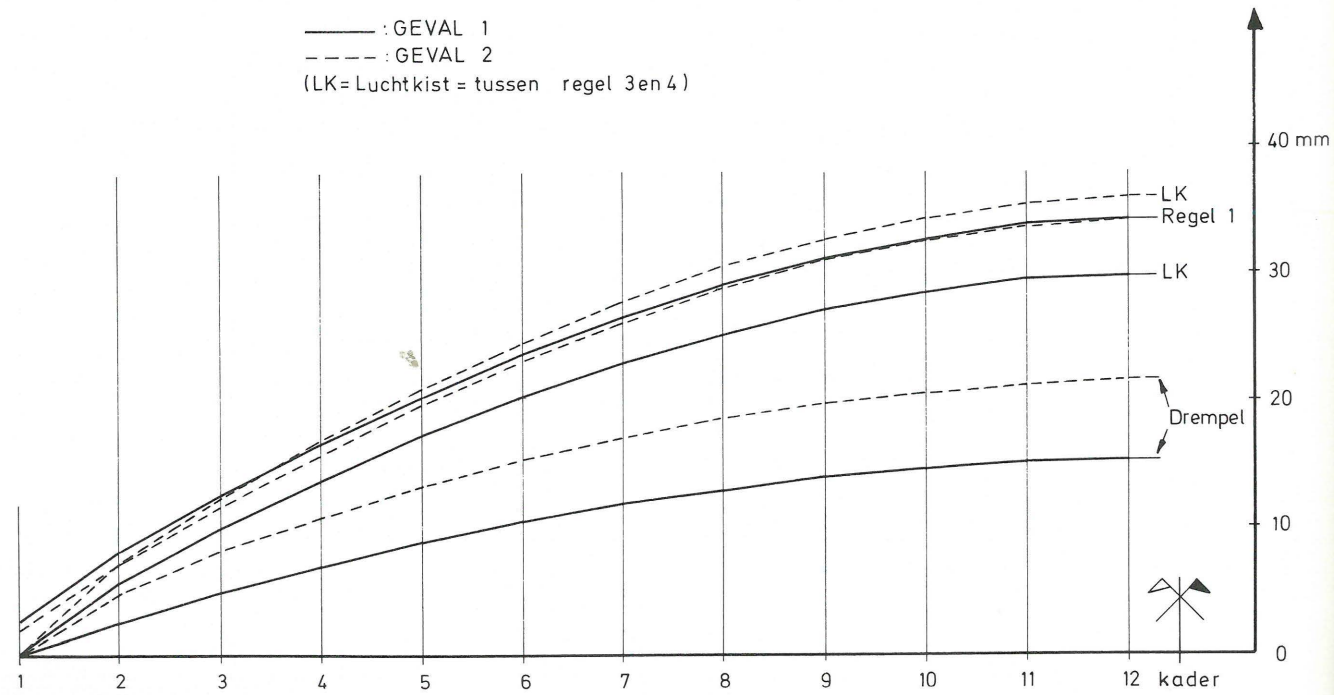
Er dient nu nagegaan te worden in hoeverre het mogelijk is uit bovenstaande resultaten der computerberekening het globaal krachtenverloop in de deur af te leiden. We nemen ons voor een beperkt computermodel op te bouwen, dat voortaan zal genoemd worden „klein model” in tegenstelling tot het hierboven besproken „groot model”. De bedoeling van dit klein model is om daarmee zo getrouw mogelijk een aantal belangrijke gedragingen van het groot model te

BERENDRECHTSLUIS		SLUISDEUR		COMPUTERBEREKENINGEN		OUTPUT VERVORMINGEN IN HET VLAK $Y = 0$ (IN MM)		GROOT MODEL																	
*****		*****		*****		*****		*****																	
GEVAL 1	kader:	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18	K19	K20	K21	K22	K23	K24
+++++	+++++																								
regel	knoop																								
R1	13	2.6	8.3	12.6	16.7	20.4	23.7	26.6	29.1	31.1	32.6	33.7	34.2	34.2	33.7	32.6	31.1	29.1	26.6	23.7	20.4	16.7	12.6	8.3	2.4
	12	0.4	8.7	12.9	16.9	20.7	24.0	26.9	29.4	31.3	32.9	33.9	34.4	34.4	33.9	32.9	31.4	29.4	26.9	24.0	20.7	17.0	12.9	8.6	0.4
	11	-1.0	9.4	13.4	17.4	21.3	24.6	27.5	29.9	31.9	33.3	34.3	34.9	34.9	34.4	33.3	31.9	29.9	27.5	24.6	21.4	17.5	13.4	9.4	-0.6
R2	10	0.0	9.1	13.3	17.3	21.0	24.2	27.0	29.4	31.3	32.8	33.8	34.2	34.2	33.8	32.8	31.4	29.4	27.0	24.2	21.0	17.3	13.3	9.1	0.0
	9	0.0	9.2	12.7	16.6	20.8	24.0	26.8	29.1	31.0	32.4	33.4	33.9	34.2	33.4	32.5	31.0	29.1	26.8	24.0	20.9	16.7	12.7	9.2	0.0
R3	8	0.2	6.5	10.7	14.5	18.0	21.1	23.8	26.1	27.9	29.3	30.2	30.7	30.7	30.3	29.3	27.9	26.1	23.8	21.1	18.0	14.6	10.7	6.5	0.2
	7	0.1	5.8	10.0	13.8	17.3	20.3	23.0	25.2	27.1	28.4	29.4	29.8	29.8	29.3	28.5	27.1	25.3	23.0	20.4	17.3	13.9	10.1	5.9	0.1
R4	6	0.2	5.5	9.5	13.3	16.7	19.8	22.4	24.6	26.4	27.7	28.6	29.1	29.1	28.6	27.8	26.4	24.7	22.5	19.9	16.9	13.4	9.7	5.5	0.2
	5	0.0	5.8	9.8	13.6	17.0	19.9	22.5	24.7	26.4	27.7	28.6	29.0	29.0	28.6	27.8	26.5	24.7	22.6	20.0	17.2	13.7	10.0	5.9	0.0
R5	4	0.0	6.0	10.1	13.8	17.0	19.9	22.4	24.4	26.1	27.4	28.2	28.6	28.6	28.2	27.4	26.2	24.5	22.5	20.0	17.4	13.9	10.4	6.1	0.0
	3	0.0	6.3	10.5	14.2	17.4	20.2	22.6	24.7	26.3	27.5	28.4	28.8	28.8	28.4	27.6	26.4	24.8	22.8	20.4	18.0	13.9	11.0	6.5	0.0
R6	2	0.0	4.4	8.1	11.1	13.9	16.3	18.3	20.0	21.4	22.4	23.1	23.5	23.5	23.2	22.5	21.4	20.1	18.4	16.4	14.2	12.3	8.5	4.6	0.0
	1	0.0	2.5	5.0	7.1	8.9	10.5	11.9	13.0	13.9	14.6	15.1	15.3	15.3	15.1	14.7	14.0	13.1	12.0	10.6	8.3	11.4	4.9	2.6	0.0

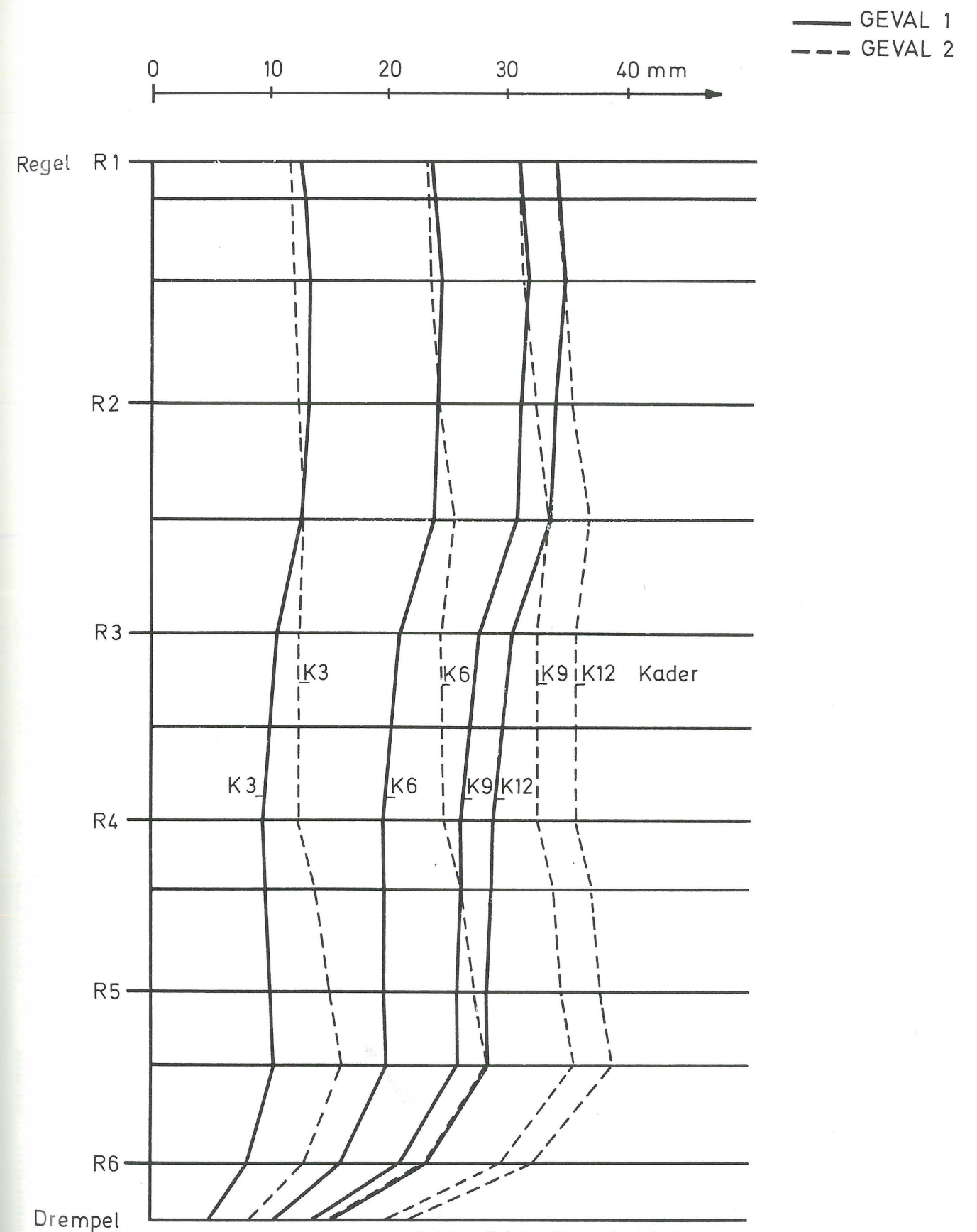
BERENDRECHTSLUIS		SLUISDEUR		COMPUTERBEREKENINGEN		OUTPUT VERVORMINGEN IN HET VLAK $Y = 0$ (IN MM)		GROOT MODEL																	
*****		*****		*****		*****		*****																	
GEVAL 2	kader:	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18	K19	K20	K21	K22	K23	K24
+++++	+++++																								
regel	knoop																								
R1	13	1.9	7.2	11.6	15.8	19.7	23.2	26.3	28.9	31.1	32.7	33.8	34.3	34.3	33.8	32.7	31.1	28.9	26.3	23.1	19.6	15.8	11.6	7.1	1.7
	12	0.3	7.2	11.7	15.9	19.8	23.3	26.4	29.0	31.1	32.8	33.9	34.4	34.4	33.9	32.8	31.1	29.0	26.4	23.2	19.7	15.9	11.7	7.2	-0.3
R2	11	-0.8	7.3	12.0	16.2	20.0	23.6	26.7	29.3	31.4	33.1	34.2	34.7	34.7	34.2	33.1	31.4	29.3	26.7	23.6	20.0	16.3	11.9	7.3	0.5
	10	0.0	7.8	12.4	16.9	20.9	24.4	27.6	30.2	32.4	34.0	35.1	35.6	35.7	35.1	34.0	32.4	30.3	27.6	24.5	20.9	16.9	12.4	7.8	0.0
R3	9	0.0	8.6	12.8	17.3	22.0	25.6	28.8	31.4	33.6	35.2	36.3	36.9	36.9	36.3	35.3	33.6	31.5	28.8	25.6	22.0	17.4	12.8	8.6	0.0
	8	0.2	7.5	12.4	16.9	21.0	24.6	27.8	30.5	32.6	34.3	35.3	35.9	35.9	35.4	34.3	32.7	30.6	27.9	24.8	21.1	17.0	12.5	7.5	0.2
R4	7	0.2	7.3	12.4	17.0	21.1	24.7	27.9	30.6	32.7	34.3	35.4	36.0	36.0	35.4	34.4	32.8	30.7	28.0	24.9	21.2	17.1	12.5	7.4	0.2
	6	0.3	7.4	12.5	17.1	21.2	24.9	28.0	30.7	32.8	34.4	35.5	36.0	36.1	35.5	34.5	32.9	30.8	28.2	25.1	21.4	17.3	12.7	7.6	0.3
R5	5	0.0	8.9	14.0	18.6	22.8	26.4	29.5	32.1	34.2	35.8	36.9	37.4	37.4	36.9	35.9	34.3	32.3	29.7	26.6	23.1	18.9	14.3	9.1	0.0
	4	0.0	9.7	15.2	19.7	23.8	27.3	30.3	32.9	34.9	36.5	37.5	38.0	38.0	37.6	36.5	35.1	33.0	30.6	27.6	24.4	19.9	15.7	9.9	0.0
R6	3	0.0	10.7	16.3	20.9	24.9	28.5	31.5	34.0	36.0	37.6	38.6	39.1	39.1	38.7	37.7	36.2	34.2	31.7	28.7	25.9	20.6	17.2	10.9	0.0
	2	0.0	8.0	13.1	17.0	20.4	23.5	26.0	28.2	29.9	31.2	32.1	32.5	32.5	32.1	31.3	30.0	28.3	26.2	23.7	21.0	18.7	13.7	8.2	0.0
	1	0.0	4.9	8.4	11.0	13.4	15.4	17.2	18.6	19.8	20.6	21.2	21.6	21.6	21.3	20.7	19.8	18.7	17.3	15.6	12.5	11.7	8.1	5.0	0.0



Plaat 7. — Berendrechtsluisdeur. Vervormingen regel 3.



Plaat 8. — Berendrechtsluis — Sluisdeur. Vervormingen in bovenzicht.



Plaat 9. — Berendrechtsluis — Sluisdeur. Vervormingen in dwarsdoorsnede.

benaderen (dan is het klein model valide), en dan op dit klein model na te gaan wat de invloed is van de wijziging van sommige karakteristieken. Dit laatste kan immers bezwaarlijk gebeuren op het groot model omdat de kost hiervan te hoog zou liggen en de tijdsduur ervoor te lang zou zijn. Daarenboven moet opgemerkt worden — en deze bemerking is algemeen — dat het groot model waarschijnlijk wel de werkelijkheid goed benadert, en door zijn omvang een enorme hoeveelheid informatie geeft, maar dat het juist door het hanteren van zoveel eindige elementen slechts weinig inzicht verschaft in het waarom van bepaalde gedragingen. Bijvoorbeeld is uit de resultaten ervan niet zomaar af te leiden of de verplaatsing in het midden der sluisdeur ter hoogte van regel 1 nu voornamelijk veroorzaakt wordt door buiging of door torsie van de hoofdbalk.

We nemen ons dus voor een eenvoudig klein model op te bouwen dat zal bestaan uit een vlak roosterwerk dat de halve sluisdeur weergeeft (abstraktie makend van de uitkragende arm of van de schikkingen rond de onderrolwagen) en dat belast wordt door krachten loodrecht op dit vlak.

Het roosterwerk zelf zal bestaan uit enerzijds één hoofdlijger die een weergave is van de regels 1, 3 en 4 samen met (een deel van) de huidplaat, en anderzijds een reeks oneindig stijve verticale balken die de kaders weergeven. Deze kaderbalken lopen van de drempelsteun tot de hoofdlijger, waarbij sommige kaderbalken (t.pl.v. kaders 1, 3, 6, 9 en 12) naar boven verlengd worden tot het niveau van regel 1 om daar de vervormingen rechtstreeks te kunnen aflezen.

6.2. Verloop van de opbouw van het klein model

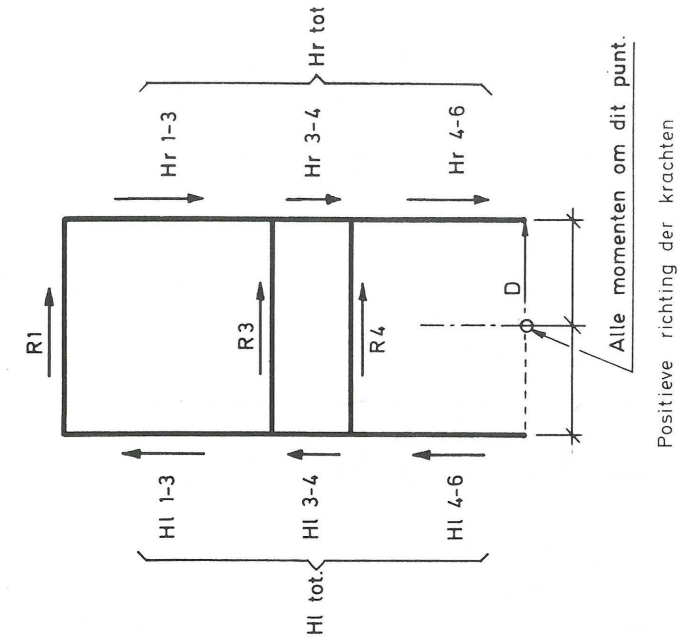
6.2.1. De oorspronkelijke bedoeling was de hoofdlijger in te voeren als een horizontale balk. Maar zelfs daar rees onmiddellijk de vraag op welke hoogte (b.v. onder het niveau van regel 1) dit moet gebeuren, en welk buigingstraagheidsmoment eraan moest toegekend worden. Als men er van uitgaat dat de regels 1, 3 en 4 samen de lijfplaat van deze hoofdlijger vormen, en de huidplaat der deur de flenzen ervan, kan men deze flenzen beschouwen als een soort „meewerkende plaatbreedte”. In analogie met b.v. de Duitse norm DIN 1073, waarin de meewerkende plaatbreedte ook varieert volgens het verloop van de momentenlijn en volgens de plaats op de beschouwde balk, kan men zich hier ook goed indenken dat per kader een variërend deel van de huidplaat zal meewerken.

Verder moet deze hoofdlijger gesitueerd worden ter plaatse van het torsiecentrum van de echte doorsnede ten einde buiging en wringing op de juiste manier weer te geven. De ligging van dit torsiecentrum is echter ook functie van de hierboven genoemde meewerkende plaatbreedte en dus ook niet van tevoren gekend.

Om deze moeilijkheid op te lossen dient dus vooraf per kader een studie gemaakt te worden op basis van de gegevens van het groot model. Deze studie verloopt als volgt. In het groot model wordt voor de eerste halve deurlengte telkens juist voorbij elk kader een doorsnede gedacht. Deze doorsnede bestaat enkel uit plaalementen en staafelementen (op enkele balk-elementen na op en nabij regel 6 die weinig krachten overbrengen en verder verwaarloosd worden). Gezien de staafelementen enkel axiaalkrachten overbrengen komen zij niet rechtstreeks tussen in de krachtwerking in deze doorsneden. Van alle plaalementen worden de schuifspanningen opgetekend; vermenigvuldigd met de sectie van de platen geeft dit schuifkrachten. Gesommeerd over grotere gehelen geeft dit de schuifkrachten (dus de dwarskrachten) in de regels 1, 3 en 4 en in de verticale huidplaat. Differentiatie hiervan kader per kader geeft dan de bijdrage van elk kader afzonderlijk (en dit steeds voor beide belastingsgevallen). Het resultaat hiervan wordt weergegeven op plaat 10.

We kunnen hier opmerken dat voor wat betreft de berekening van de schuifkracht in de regels ook kan uitgegaan worden van de krachten in de balken der kaders, gekombineerd met de hydrostatische drukken op elk kader. Deze berekening is echter omslachtiger.

Vervolgens dient gezocht te worden welke doorsneden het beste aan deze schema's beantwoorden. In elke beschouwde doorsnede zijn de schuifkrachten het resultaat van een totale dwarskracht aangrijpend in het torsiecentrum van de doorsnede, en van een wringmoment rond dat torsiecentrum. Dit wringmoment wordt gegeven door de totale dwarskracht te vermenigvuldigen met de afstand van het aangrijpingspunt van deze totale dwarskracht tot het torsiecentrum. De totale dwarskracht en zijn aangrijpingspunt zijn per kader gekend; ze vloeien voort uit de totale hydrostatische druk per kader (in grootte en ligging konstant voor elk belastingsgeval) en de drempelreactie (vaste ligging en variërend in grootte per kader). Plaat 11 geeft aldus per kader en per geval de resulterende dwarskracht en zijn ligging. Vergelijking tussen platen 10 en 11 toont aan dat een grote mate van overeenstemming bereikt wordt in het verloop van de som der regeldwarskrachten en de daarmee overeenstemmende resultante tussen de hydrostati-



BERENDRECHTSLUIS		SCHUIFKRACHTEN PER KADER												VANUIT GROOT MODEL											
*****		*****												*****											
* GEVAL 1 *		*****												*****											
*****		*****												*****											
kader :	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12														
regel 1 :	40.79	38.55	37.13	36.24	36.33	36.57	36.96	37.23	37.41	37.38	37.35														
regel 3 :	77.10	64.84	52.18	46.23	43.42	39.24	38.59	34.79	34.90	31.30	30.71														
regel 4 :	39.19	62.00	59.52	54.33	47.74	43.25	37.30	35.14	31.30	31.37	30.86														
totaal r :	157.08	165.39	148.83	136.80	127.49	119.06	112.85	107.16	103.61	100.05	98.92														
drempel d :	14.74	29.12	41.22	51.97	61.29	69.24	75.79	81.09	85.20	87.89	89.38														
som r+d :	171.82	194.51	190.05	188.77	188.78	188.30	188.64	188.25	188.81	187.94	188.30														
som theorie :	187.69	187.69	187.69	187.69	187.69	187.69	187.69	187.69	187.69	187.69	187.69														
huid r. tsn																									
r1 en 3 :	-2.78	-12.20	-8.80	0.40	4.39	7.72	11.56	13.62	15.11	14.90	14.88														
r3 en 4 :	-8.98	-3.58	-2.72	-3.27	-0.49	2.36	4.36	6.44	6.32	6.10	5.75														
r4 en 6 :	-35.53	-10.55	2.17	6.15	8.43	10.23	9.87	11.14	13.07	17.61	19.48														
totaal h :	-47.30	-26.33	-9.35	3.27	12.32	20.31	25.78	31.20	34.50	38.62	40.11														
huid l. tsn																									
r1 en 3 :	-27.44	-18.98	-11.74	-5.16	1.15	6.05	9.94	12.70	13.58	13.56	13.33														
r3 en 4 :	-4.18	-8.80	-4.72	-1.87	-0.06	2.62	4.70	6.77	6.51	5.97	5.50														
r4 en 6 :	-16.97	-0.79	6.76	10.13	11.00	10.94	11.71	14.23	19.05	21.19	21.19														
totaal h :	-48.58	-26.99	-9.70	3.09	12.09	20.26	25.57	31.18	34.31	38.57	40.02														
Mom van r :	2230.23	2221.11	2008.52	1869.02	1779.19	1693.56	1643.18	1583.00	1555.51	1510.19	1497.72														
Mom van h :	-473.93	-263.53	-94.11	31.46	120.66	200.54	253.86	308.32	340.14	381.55	396.11														
Mom tot :	1756.30	1957.58	1914.41	1900.48	1899.85	1894.11	1897.03	1891.32	1895.65	1891.73	1893.82														
Mom theorie :	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02	1885.02														
*****		*****												*****											
* GEVAL 2 *		*****												*****											
*****		*****												*****											
regel 1 :	18.13	22.93	26.07	28.10	30.14	31.68	32.87	33.69	34.16	34.33	34.33														
regel 3 :	79.55	80.78	66.07	59.91	53.20	49.30	45.52	42.60	40.12	37.46	36.36														
regel 4 :	79.34	94.22	82.62	71.05	63.65	55.32	49.82	44.83	42.18	40.31	39.84														
totaal r :	177.02	197.93	174.76	159.06	146.99	136.30	128.21	121.12	116.46	112.10	110.53														
drempel d :	28.25	49.17	64.18	77.93	89.82	99.98	108.31	115.08	120.27	123.69	125.58														
som r+d :	205.27	247.10	238.94	236.99	236.81	236.28	236.52	236.20	236.73	235.79	236.11														
som theorie :	235.60	235.60	235.60	235.60	235.60	235.60	235.60	235.60	235.60	235.60	235.60														
huid r. tsn																									
r1 en 3 :	12.51	-16.97	-21.36	-13.65	-8.67	-4.28	1.13	4.07	6.39	6.28	6.36														
r3 en 4 :	-7.22	-9.43	-6.50	-6.27	-2.92	-0.09	2.45	4.40	4.50	3.90	3.55														
r4 en 6 :	-42.57	-9.12	7.12	10.34	12.12	12.67	11.97	12.49	15.06	19.85	22.05														
totaal h :	-37.29	-35.51	-20.73	-9.58	0.53	8.30	15.55	20.96	25.95	30.03	31.96														
huid l. tsn																									
r1 en 3 :	-14.31	-21.17	-19.72	-13.56	-8.00	-3.30	1.39	4.47	6.16	6.30	6.27														
r3 en 4 :	-2.89	-10.46	-7.33	-6.28	-3.29	-0.77	2.05	3.90	4.27	3.53	3.25														
r4 en 6 :	-25.32	-5.29	5.79	10.13	11.44	12.43	11.78	12.69	15.14	20.21	22.35														
totaal h :	-42.52	-36.91	-21.26	-9.71	0.16	8.37	15.22	21.06	25.56	30.03	31.88														
Mom van r :	2091.78	2343.78	2130.55	1999.87	1898.29	1812.70	1744.98	1684.05	1640.79	1595.17	1577.31														
Mom van h :	-394.49	-358.00	-207.57	-95.32	3.41	82.39	152.08	207.72	254.60	296.90	315.51														
Mom tot :	1697.29	1985.78	1922.98	1904.55	1901.70	1895.10	1897.05	1891.77	1895.39	1892.07	1892.82														
Mom theorie :	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25	1878.25														
*****		*****												*****											

GEVAL 1 halve deur

 tot. hydrostatische druk per kader: T = 187.698 t.
 angrijpend op 10.075 m boven drempel.

kader	drempel D t	K=T-D t	k m	= ligging K onder regel 1.
K2	14.735	172.963	11.7414	
K3	29.117	158.581	10.7498	
K4	41.217	146.481	9.7647	
K5	51.973	135.725	8.7416	
K6	61.288	126.410	7.7148	
K7	69.237	118.461	6.7110	
K8	75.787	111.911	5.7766	
K9	81.090	106.608	4.9361	
K10	85.195	102.503	4.2257	
K11	87.887	99.811	3.7281	
K12	89.376	98.322	3.4411	

som = 686.902 1377.776
 totaal = 2064.678

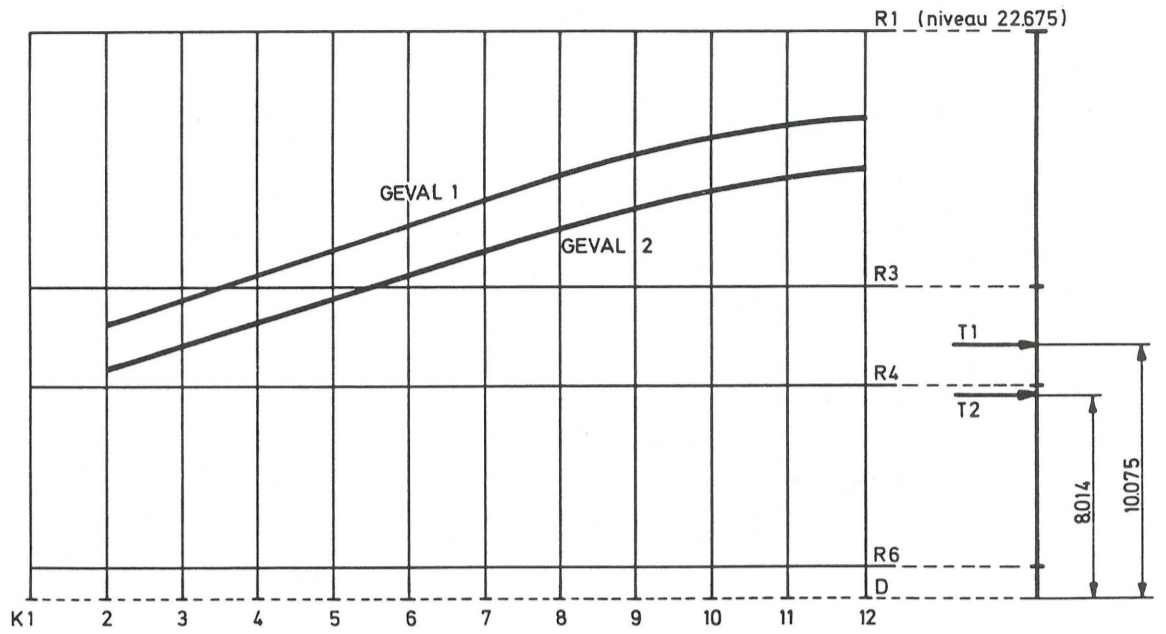
 GEVAL 2 halve deur

 tot. hydrostatische druk per kader: T = 235.601 t.
 angrijpend op 8.014 m boven drempel.

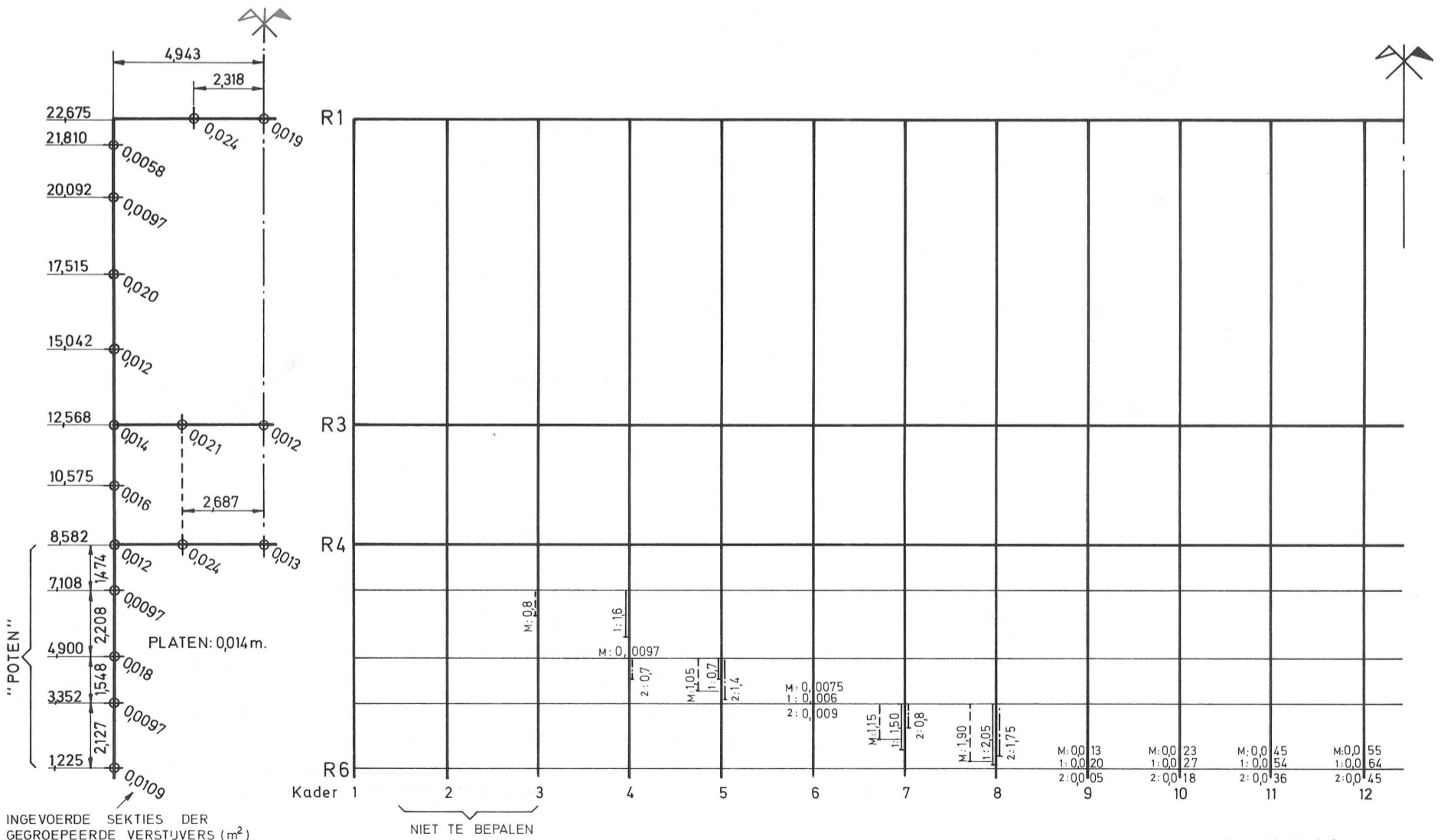
kader	drempel D t	K=T-D t	k m	= ligging K onder regel 1.
K2	28.252	207.349	13.5690	
K3	49.170	186.431	12.5473	
K4	64.182	171.419	11.6604	
K5	77.930	157.671	10.7000	
K6	89.820	145.781	9.7233	
K7	99.980	135.621	8.7530	
K8	108.310	127.291	7.8420	
K9	115.080	120.521	7.0088	
K10	120.270	115.331	6.3038	
K11	123.690	111.911	5.8035	
K12	125.580	110.021	5.5136	

som = 1002.264 1589.347
 totaal = 2591.611

Aangrijpingspunt van resultante K



Plaat 11. — Berendrechtsluisdeur. Belasting op hoofdlijger.



SCHIKKING
 — "GROOT MODEL"

" MEEWERKENDE PLAATBREEDTE "

- Boven de aangegeven waarden: de oorspronkelijke schikking.
 - Onder " " " : geen materiaal.

Plaat 12. — Berendrechtsluisdeur.

sche druk en de drempelreactie, maar geeft ook naar kader 1 toe een zekere afwijking.

Voor de berekening wordt nu een doorsnede beschouwd die volledig overeenstemt met deze van het groot model, t.t.z. platen van 0,014 m dikte en de verstijvers voorgesteld door in de knopen van het groot model geconcentreerde oppervlakten (plaat 12). Zo een doorsnede vormt een twee-cellig profiel (regel 1, 3 en 4 en de huidplaat tussen regel 1 en 4), met onder regel 4 uitstekende „poten”. Deze „poten” spelen niet mee in de deelberekening torsie zelf, maar wel in de deelberekening dwarskracht waaruit de ligging van het torsiecentrum bepaald moet worden. Het zal zijn door deze „poten” te laten variëren (als meewerkende plaatbreedte) dat we elke doorsnede zullen aanpassen om de resultaten in overeenstemming te brengen met deze van het groot model. Daartoe kan ofwel de oppervlakte van de onderste staaf variëren, ofwel de hoogte van het onderste plaalement als daaronder geen staaf komt. In andere woorden kan men de meewerkende plaatbreedte vergroten door de onderste staaf (ter hoogte van regel 6) in oppervlakte te vergroten, ofwel deze plaatbreedte verminderen door de „poten” te verkorten naar boven toe.

Deze berekening verloopt zoals gezegd in twee stappen. In een eerste stap wordt de invloed van dwarskracht onderzocht, en dit op de klassieke manier. In elke cel van de doorsnede wordt een doorsnijing aangebracht waardoor een samenhangend open profiel ontstaat. In dit profiel wordt het verloop der schuifkrachten berekend. In elk van beide doorsnijdingen wordt dan een onbekende schuifkracht ingevoerd en er wordt uitgedrukt dat deze doorsnijdingen in werkelijkheid niet bestaan; zo bepaalt men de ingevoerde schuifkrachten. Combinatie van de oorspronkelijke en de ingevoerde schuifkrachten geeft het resultaat. Het punt waarrond al deze schuifkrachten (in regels 1, 3 en 4 en in de huidplaten) een moment gelijk aan nul geeft is per definitie het torsiecentrum. Ook geeft deze berekening het buigings-traagheidsmoment van het beschouwde profiel. We merken op dat dit traagheidsmoment mede bepaald wordt door de verstijvers en door de „poten”.

In een tweede stap van de berekening wordt dan eveneens op de klassieke manier de invloed van de torsie onderzocht. Door tweemaal toepassen van de stelling van Prandtl lossen we ook dit probleem op. Hierbij wordt ook het torsietraagheidsmoment berekend, dat in tegenstelling tot het buigings-traagheidsmoment niet beïnvloed wordt door de verstijvers of door de „poten” (de uitsteeksels aan het profiel spelen in deze stap der berekening immers niet mee); dit

torsietraagheidsmoment zal dus hetzelfde zijn voor alle kaders.

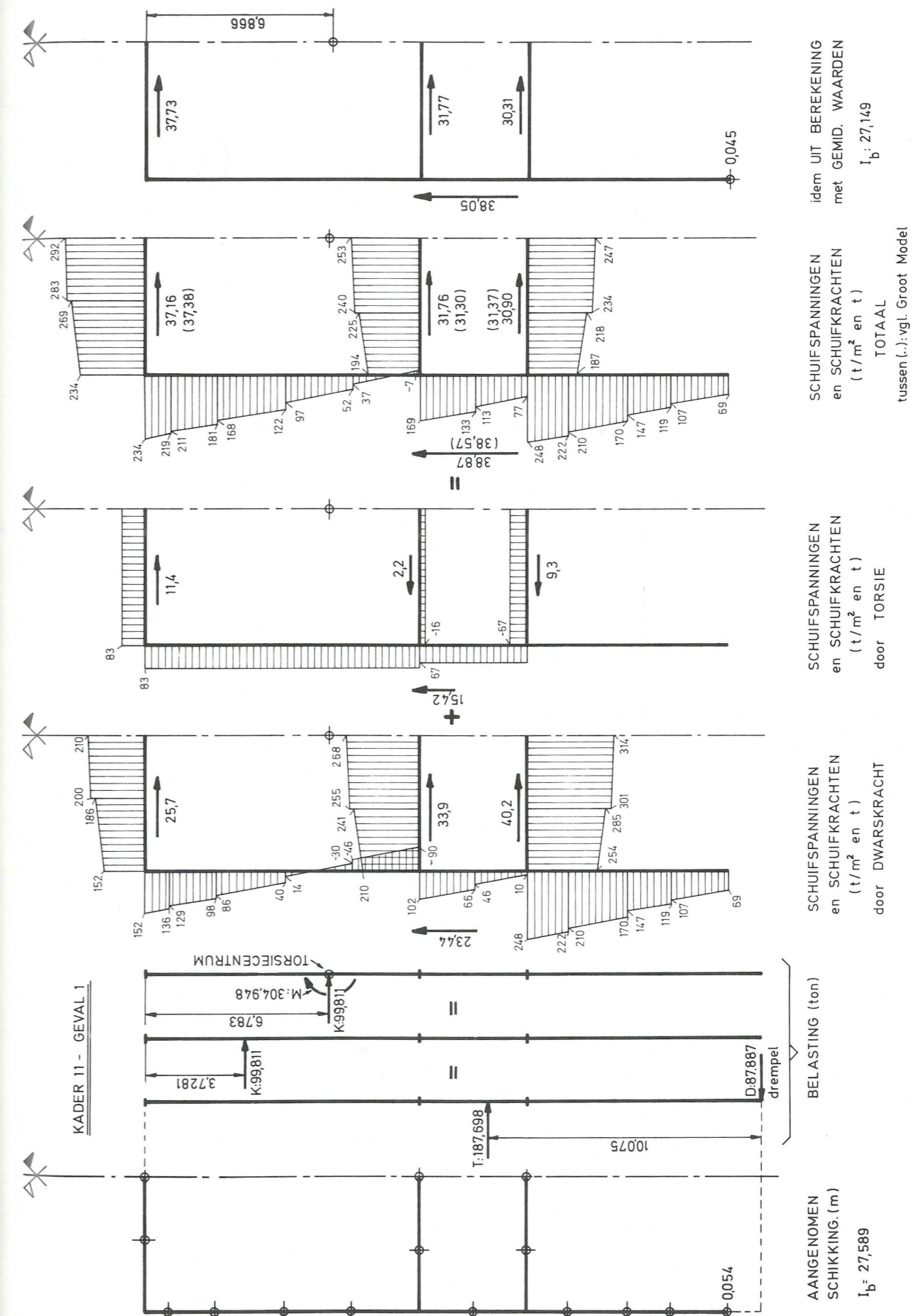
Tenslotte dienen beide stappen van de berekening gekombineerd te worden, wat per kader en per belastingsgeval onder invloed van de gegeven kracht (in grootte en ligging) en in functie van de voor dat geval gekozen configuratie der „poten” de schuifkrachten geeft in heel deze doorsnede. Gebruik makend van een computerprogramma kan men gemakkelijk de „poten” laten variëren om zo per geval de beste overeenstemming met het groot model te verwezenlijken.

Ter illustratie hiervan wordt in plaat 13 kader 11/geval 1 uitgewerkt, waar afzonderlijk de invloed van de dwarskrachtberekening en van de torsieberekening wordt getoond en dan de combinatie van beide.

De resultaten van heel deze berekening worden gegeven in plaat 14.

Enige commentaar bij deze resultaten is onontbeerlijk.

- Zoals gezegd wordt per geval overeenstemming nagestreefd met de schuifspanningen vanuit het groot model, en dit door de „poten” te laten variëren. Nu blijkt het niet steeds mogelijk te zijn om deze overeenstemming te bereiken in al de plaalementen van een doorsnede. Voor de meeste doorsneden is wel een bevredigende overeenstemming te bereiken voor wat betreft de regels 1, 3 en 4, en ook voor de totale schuifkracht over de huidplaat, maar in veel mindere mate voor verdeling van deze laatste schuifkracht over de verschillende delen der huidplaat. De uiteindelijk als oplossing gekozen schikkingen zijn dan ook in de meeste gevallen een soort compromisoplossing. Ook wordt de overeenstemming veel moeilijker naar het einde van de deur toe (nabij kader 2) daar hier verstoringseffekten optreden. Zie b.v. plaat 10: de schuifkrachtenverdeling over de hoogte der beide huidplaten.
- De schikking der „poten” variëert vrij sterk over de verschillende kaders. In het midden der deur (rond kader 12) dient aan de „poten” een groter gewicht toegekend te worden, aan het einde der deur (nabij kader 2) een veel kleiner gewicht. Grofweg kan gezegd worden dat de meewerkende plaatbreedte van het midden naar de opleggingen afneemt. Dit verloop komt overeen met de verwachtingen en is logisch. Wat minder met de verwachtingen overeenkomt is dat in de middenzone der deur de „poten” groter uitvallen dan ze in



GEVAL 1	TORSIECENTUM (TC), TRAAAGHEIDSMOMENT (Ib) EN SCHUIFKRACHTEN											per kader	(t en m)
KADER :	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12		

VANUIT GROOT MODEL (= referentie)													
regel 1 =	38.55	37.13	36.24	36.33	36.57	36.96	37.23	37.41	37.38	37.35			
regel 3 =	64.84	52.18	46.23	43.42	39.24	38.59	34.79	34.90	31.30	30.71			
regel 4 =	62.00	59.52	54.33	47.74	43.25	37.30	35.14	31.30	31.37	30.86			
huidpl. =	-26.66	-9.52	3.18	12.21	20.29	25.68	31.19	34.41	38.59	40.07			

VANUIT POTEN VOOR DIT GEVAL													
TC =	8.07	7.99	7.78	7.64	7.42	7.34	7.11	7.04	6.78	6.69			
Ib =	18.26	20.67	22.44	23.31	24.52	24.90	25.93	26.27	27.59	28.08			
torsiemom. =	-425.69	-260.25	-130.92	-9.66	83.73	174.54	231.88	288.50	304.95	319.86			
regel 1 =	37.98	35.91	35.10	35.96	36.06	37.34	37.28	38.07	37.16	37.06			
regel 3 =	60.61	53.86	48.47	44.08	40.34	37.34	34.90	33.02	31.76	31.07			
regel 4 =	59.99	56.70	52.15	46.37	42.06	37.22	34.44	31.41	30.90	30.20			
huidpl. =	-24.95	-8.78	3.89	12.52	20.78	25.85	31.54	34.73	38.87	40.58			

VANUIT POTEN VOOR GEMIDDELDE VAN BEIDE GEVALLEN													
TC =	8.03	7.89	7.74	7.63	7.47	7.36	7.18	7.08	6.87	6.77			
Ib =	20.12	21.56	22.68	23.39	24.28	24.79	25.59	26.07	27.15	27.64			
torsiemom. =	-430.91	-275.39	-135.66	-11.18	89.51	177.10	239.64	292.63	313.22	327.73			
regel 1 =	34.22	34.05	34.64	35.83	36.49	37.52	37.81	38.35	37.73	37.60			
regel 3 =	59.63	53.60	48.43	44.07	40.36	37.35	34.91	33.03	31.77	31.08			
regel 4 =	64.73	58.83	52.66	46.51	41.61	37.04	33.89	31.12	30.31	29.64			
huidpl. =	-19.20	-6.01	4.57	12.71	20.16	25.60	30.77	34.32	38.05	39.80			

VOOR KLEIN MODEL GENOMEN WAARDEN :													
TC =	8.17	8.03	7.89	7.75	7.61	7.47	7.33	7.19	7.05	6.91	6.77		
Ib =	18.87	20.12	21.28	22.36	23.36	24.28	25.12	25.87	26.54	27.13	27.64		

GEVAL 2	TORSIECENTUM (TC), TRAAAGHEIDSMOMENT (Ib) EN SCHUIFKRACHTEN											per kader	(t en m)
KADER :	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12		

VANUIT GROOT MODEL (= referentie)													
regel 1 =	22.93	26.07	28.10	30.14	31.68	32.87	33.69	34.16	34.33	34.33			
regel 3 =	80.78	66.07	59.91	53.20	49.30	45.52	42.60	40.12	37.46	36.36			
regel 4 =	94.22	82.62	71.05	63.65	55.32	49.82	44.83	42.18	40.31	39.84			
huidpl. =	-36.21	-21.30	-9.64	0.34	8.33	15.38	21.01	25.75	30.03	31.91			

VANUIT POTEN VOOR DIT GEVAL													
TC =	7.84	7.78	7.70	7.61	7.51	7.38	7.27	7.13	6.95	6.87			
Ib =	21.96	22.44	22.92	23.46	24.04	24.69	25.19	25.83	26.71	27.15			
torsiemom. =	-878.01	-665.69	-472.35	-307.44	-168.18	-58.62	31.42	95.49	128.51	148.82			
regel 1 =	22.85	25.57	28.12	30.19	31.88	33.02	34.09	34.58	34.26	34.23			
regel 3 =	71.76	64.77	58.40	52.89	48.19	44.35	41.26	38.87	37.29	36.41			
regel 4 =	91.82	81.07	71.16	62.70	55.55	49.91	45.17	41.88	40.36	39.38			
huidpl. =	-32.35	-20.39	-9.51	0.07	8.38	15.53	21.13	25.91	29.96	32.01			

VANUIT POTEN VOOR GEMIDDELDE VAN BEIDE GEVALLEN													
TC =	8.03	7.89	7.74	7.63	7.47	7.36	7.18	7.08	6.87	6.77			
Ib =	20.12	21.56	22.68	23.39	24.28	24.79	25.59	26.07	27.15	27.64			
torsiemom. =	-841.70	-647.23	-466.38	-305.70	-174.46	-61.47	21.11	89.58	118.93	138.71			
regel 1 =	27.67	27.66	28.66	30.34	31.40	32.82	33.38	34.17	33.60	33.53			
regel 3 =	72.48	65.03	58.45	52.90	48.17	44.35	41.24	38.86	37.27	36.39			
regel 4 =	86.28	78.73	70.56	62.53	56.05	50.12	45.90	42.30	41.04	40.10			
huidpl. =	-39.52	-23.47	-10.31	-0.15	9.07	15.82	22.15	26.49	30.91	33.01			

VOOR KLEIN MODEL GENOMEN WAARDEN :													
TC =	8.17	8.03	7.89	7.75	7.61	7.47	7.33	7.19	7.05	6.91	6.77		
Ib =	18.87	20.12	21.28	22.36	23.36	24.28	25.12	25.87	26.54	27.13	27.64		

werkelijkheid zijn. Immers om de nagestreefde overeenstemming te bereiken moeten in de middelste kaders de aangerekende oppervlakten voor de onderste verstijver merkelijk groter genomen worden dan in werkelijkheid. Dit wordt getoond in plaat 12. Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat in dit deel van de deur een zekere participatie plaatsgrijpt van regel 6 zelf. Onderzoek of deze regel 6 zelf misschien ook als een dunne plaat zou meewerken in de torsieberekening (waardoor een gesloten drie-cellig profiel zou ontstaan) leverde echter geen positieve resultaten op. Anderzijds blijkt dat nabij kader 1 het onderste deel van de huidplaat niet meegerekend mag worden in deze berekeningen.

- c. Ook blijkt uit de oplossing dat per kader de aangenomen schikking der „poten” verschilt per belastingsgeval. In het geval 1 is de variatie duidelijk meer uitgesproken dan in het geval 2. Dit fenomeen is verstaanbaar als men bedenkt dat inderdaad de meewerkende plaatbreedte kan beïnvloed worden door de aard en het verloop der belasting.

Deze laatste vaststelling levert wel een moeilijkheid op. Aangezien we ons voorgenomen hebben een klein model te construeren dat geldig is voor beide belastingsgevallen, en in principe dus ook voor alle andere belastingen, zijn we verplicht een soort gemiddelde schikking voor de „poten” aan te nemen, wel wetende dat dit de nauwkeurigheid niet ten goede zal komen. Er is dus als volgt gewerkt: per kader werd het gemiddelde der „poten” berekend tussen beide belastingsgevallen; met dit gemiddelde werd opnieuw de doorsnede berekend, waaruit de ligging van het torsiecentrum en de grootte van het buigingstraagheidsmoment bepaald werden. Om de oneffenheden in het verloop van deze beide grootheden weg te werken werd dan voor het torsiecentrum een lineair verloop aangenomen tussen kader 3 en kader 12; voor het traagheidsmoment werd een 2e graadsparabolisch verloop aangenomen gaande door de waarden van de kaders 3, 7 en 12. De resultaten worden gegeven in plaat 14.

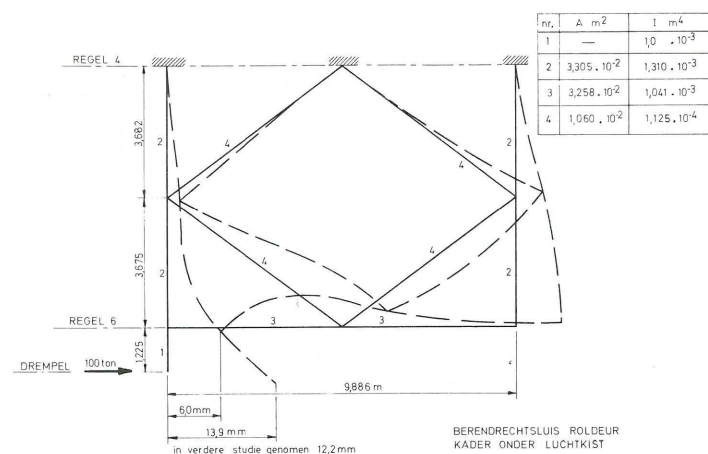
Op deze manier liggen nu per kader het torsiecentrum en het buigingstraagheidsmoment vast.

- 6.2.2. In het klein model dient rekening gehouden te worden met de rubbers ter plaatse van de drempelsteunen, en met de vervormbaarheid der kaders tussen de hoofdlijger en de drempelsteunen. We zullen dit doen als volgt: we beschouwen de stijlen (kaders) van het klein model als oneindig stijve balken die onderaan ter plaatse van de drempel opgelegd zijn via een veer. Deze veer geeft dan zowel de invloed van

de rubbers weer als de invloed van de vervormbaarheid der kaders zelf. Om deze laatste te bepalen wordt in een eenvoudige vlakke computerberekening een kader weergegeven van onder de luchtkist (regel 4) tot aan de drempelsteun, waarbij voor alle balken dezelfde eigenschappen worden ingevoerd als in het groot model, tenzij voor de eigenlijke drempeloverkraging (onder regel 6) omdat het groot model hier een te grote buigingsstijfheid hanteert maar tegelijk ook rekening houdt met de dwarskrachtvervorming wat wij hier niet doen. Wanneer op dit model een kracht gezet wordt van 100 ton ter plaatse van de drempelsteun geeft dit in het aangrijpingspunt van deze kracht een verplaatsing van 13,9 mm (merk op dat nog niet de helft hiervan gegeven wordt door heel het kader tussen regel 4 en regel 6 — plaat 15). Zoals gezegd in § 2.3. geven de rubbers zelf nog eens een indruk van 17,17 mm onder 100 ton. Dit geeft voor 100 ton een totale veerstijfheid van $13,9 + 17,17 = 31,07$ mm, ofwel 3220 t/m. In onze verdere studie is echter licht foutief gerekend met een elastische vervorming ter grootte van 12,2 mm van het kader, dus met een iets te stijve veerconstante van 3405 t/m; dit geeft slechts een gering verschil.

Gezien de grote kaderstijfheid wordt de elastische vervorming van het kader onder invloed van de lokale hydrostatische druk verwaarloosd. Ter plaatse van de drempel bedraagt deze vervorming $\pm 2,3$ à 3,7 mm volgens het belastingsgeval. Daar waar dit verwaarlozen hier al niet volstrekt korrekt is, mag dit niet zomaar gebeuren als de kaders minder stijf zijn uitgevoerd.

Moeilijker is het om de randvoorwaarden van de hoofdlijger juist weer te geven, t.t.z. de oplegging van de hoofdlijger ter plaatse van kader 1. Zoals gezegd in § 2.2. is in het groot model kader 1 ondersteund door een reeks veren die de houten balk weergeven, maar de veerstijfheden hiervan zijn zo groot dat ze vergelijkbaar worden moet de elastische stijfheden van dit kader 1 zelf. Daarenboven zorgt heel deze configuratie van het eindkader ervoor dat er niet alleen een zekere translatievervorming optreedt maar ook een rotatievervorming (vanwege torsie). Deze invloeden juist trachten weer te geven in het klein model zou dit model te ingewikkeld maken. Derhalve werd volstaan met in het klein model aan het einde van de hoofdlijger een translatieveer en een rotatieveer in te voeren met zeer grote stijfheden, respectievelijk $8,7 * 10^5$ t/m en $1,4 * 10^7$ tm/rad. Deze waarden komen in grootte orde overeen met de schikkingen van het groot model en geven uiteindelijk redelijke resultaten zoals verder zal blijken.



Plaat 15

Tenslotte worden de nodige randvoorwaarden ingevoerd die uitdrukken dat het in het klein model om een halve deur gaat en die dus aan het andere uiteinde der hoofdligger de symmetrie-as weergeven.

6.2.3. In het groot model zijn de regels 1, 3 en 4 opgebouwd uit plaalementen. Naast hun vervorming door de globale doorbuiging vertonen deze ook vervormingen onder invloed van de dwarskracht. Dit te meer daar het hier in feite gaat over balken met grote lijfhoogte (de deurbreedte dus 9,886 m) en korte lengte (kaderafstanden 3,03 m). Wil men het klein model, waar de hoofdligger ingevoerd wordt als een lijn, hiermee in overeenstemming brengen dan dient deze dwarskrachtvervorming supplementair te worden ingevoerd. Dit gebeurt via een korrektiefactor die voornamelijk inwerkt op het buigingstraagheidsmoment van de hoofdbalk.

6.2.4. De andere staafkarakteristieken die nodig zijn voor het klein model zijn van geen belang omdat ze overeenkomen met onbestaande krachtwerkingen; zo kunnen de buigingsstijfheden in het andere vlak, de staafsecties, de torsiestijfheid der stijlen, enz. in principe willekeurig gekozen worden. We herinneren eraan dat de stijlen als oneindig stijve balken beschouwd worden in de richting van de krachtwerking.

6.2.5. Tenslotte moeten de belastingen ingevoerd worden. Gezien de stijlen in het klein model als oneindig stijf beschouwd worden kunnen de belastingen zonder bezwaar ingevoerd worden als een puntlast per stijl. Deze lasten zijn dezelfde voor alle stijlen en komen in grootte en aangrijpingspunt overeen met wat werkelijk in het groot model werd ingevoerd.

Dit geeft het volgende schema:

Belastingsgeval 1:
kracht per kader = 187,70 ton,
aangrijpend op 10,075 m boven de drempel.

Belastingsgeval 2:
kracht per kader = 235,60 ton,
aangrijpend op 8,014 m boven de drempel.

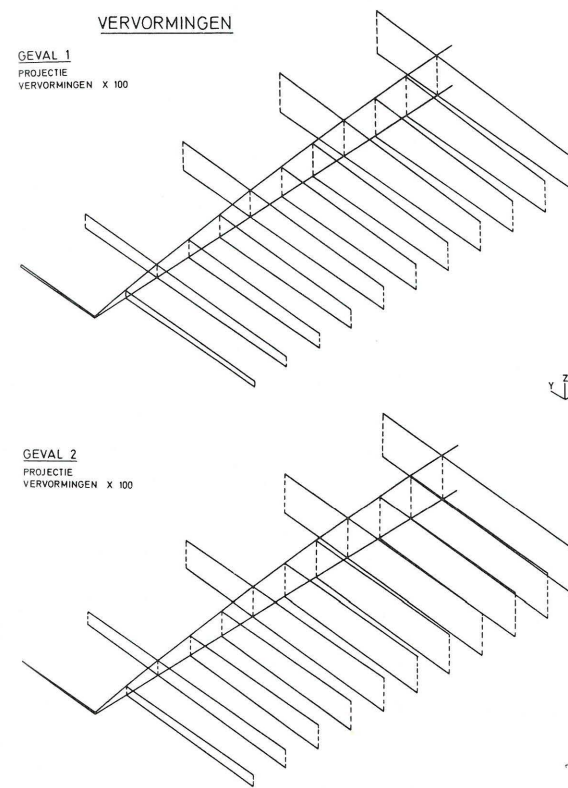
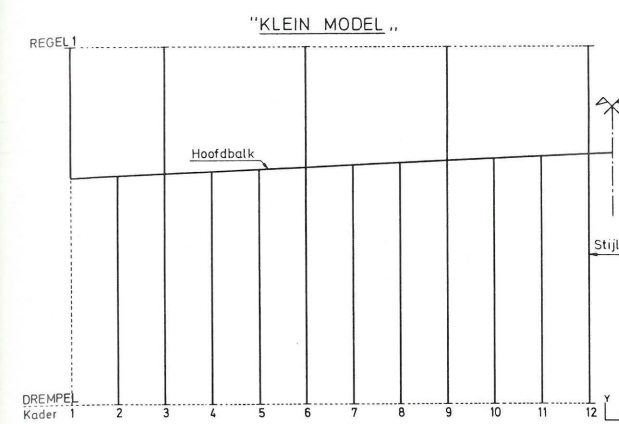
Merk op dat op kader 1 geen belasting wordt ingevoerd.

6.3. Resultaten klein model en algemeen krachtenverloop

6.3.1. Samengevat bestaat het klein model dus uit een licht schuin geplaatste hoofdligger met een per stuk variërend buigingstraagheidsmoment en konstante torsiestijfheid, met daaraan verbonden verticale oneindig stijve stijlen als kaderelementen die elk dezelfde hydrostatische druk als puntlast dragen en die onderaan ter hoogte van de drempelsteunen verend afgesteund zijn. Deze veren (dezelfde voor alle stijlen) houden rekening met de rubberen elementen en met de elastische vervorming der kaders zelf. De hoofdligger is naar translatie en rotatie verend afgesteund ter plaatse van kader 1, en houdt rekening met de dwarskrachtvervorming. Tenslotte zijn de meest significante kaders naar boven verlengd door oneindig stijve balken, maar dit is enkel gedaan terwille van een vlugge aflezing van de vervormingen ter plaatse van regel 1 (plaat 16).

De resultaten van de berekening van het klein model worden weergegeven in de platen 16 tot 19.

6.3.2. De drempelreacties (krachten D) zijn opgetekend in plaat 17. Ze nemen toe naar het midden der



Plaat 16. — Berendrechtsluisdeur.

deur en ze benaderen goed de resultaten van het groot model, maar ze zijn in vergelijking daarmee iets te klein (3 à 10%) (plaat 17).

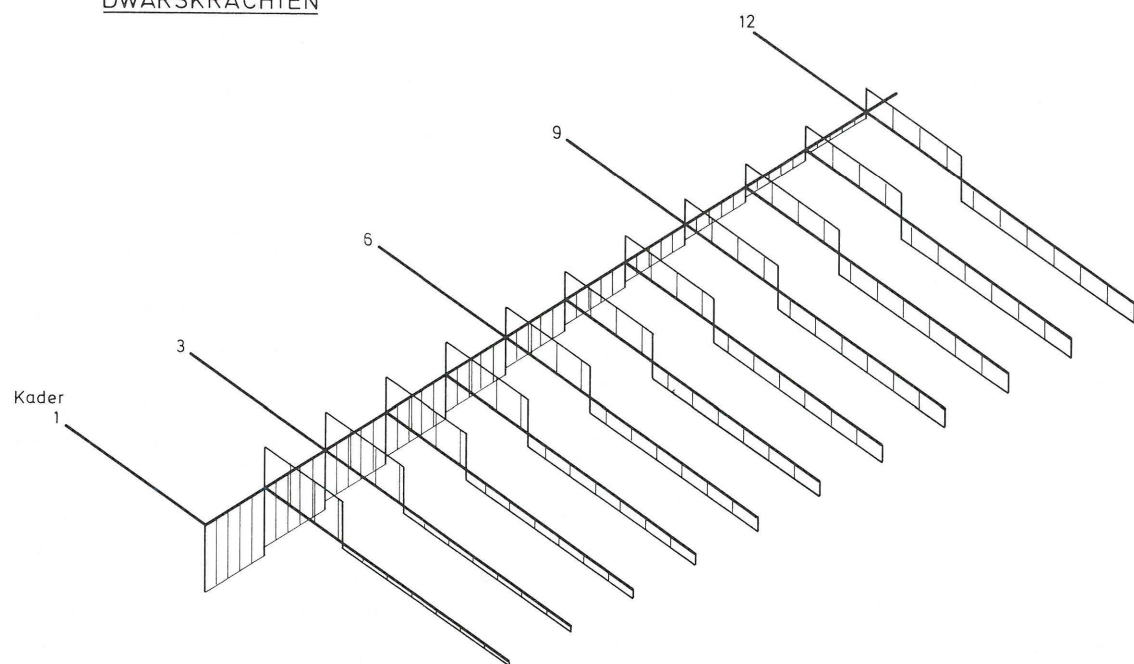
6.3.3. De vervormingen van het klein model zijn slechts relevant ter plaatse van regel 1, aangezien alle stijlen als oneindig stijf zijn opgevat. Een algemeen beeld van de vervormingen wordt gegeven in plaat 16, en de waarden van de vervorming ter plaatse van regel 1 (f) zijn voor sommige kaders gegeven in plaat 17. Uit het algemeen beeld blijkt duidelijk dat de stijlen nagenoeg vertikaal blijven, in andere woorden dat de veren ter plaatse van de drempel

(rubbers én elastische vervorming der kaders) ongeveer evenveel vervormen als de hoofdligger, wat betekent dat ook de hoekverdraaiing der hoofdligger door torsie zeer klein zal zijn. Deze hoekverdraaiingen der hoofdligger zijn eveneens gegeven in plaat 17 (hoek balk). Wenst men de doorbuiging en de hoekverdraaiing te vergelijken met deze van het groot model, dan stuit men op de moeilijkheid een geschikte referentie te vinden bij het groot model. Bij dit groot model kan men immers voor de doorbuiging ter plaatse van regel 1 het knooppunt beschouwen op de rechter huidplaat, op de aslijn of op de linker huidplaat, en voor de hoekverdraaiing is het daarenboven nog uiterst onzeker op welke hoogte men de referentie moet kiezen. Om toch een idee te geven is in plaat 17 de vergelijking gemaakt met de doorbuiging ter plaatse van de aslijn, en met de hoekverdraaiing berekend als het verschil in doorbuiging (op de aslijn) van de regels 3 en 4 gedeeld door de afstand tussen die regels.

Omdat al deze vervormingen zeer klein zijn en in grootte orde vergelijkbaar zijn met de elastische vervormingen in het vlak van de kaders (zeker nabij kader 1) is deze werkwijze onnauwkeurig; toch geeft vergelijking tussen de overeenkomstige waarden van het klein en het groot model een heel aanvaardbaar resultaat. Om redenen die hierboven aangehaald zijn is het resultaat beter naar het midden der deur toe.

6.3.4. Het verloop van de buigende momenten en de dwarskrachten is voor het klein model en voor belastingsgeval 1 weergegeven in plaat 19. Men ziet duidelijk hoe deze diagrammen voor de stijlen evolueren van kader 2 naar het midden der deur toe. Het buigend moment dat elke stijl afgeeft op de hoofdligger, vormt daar de bijdrage van dat kader tot het torsiemoment in de hoofdligger. Deze buigende momenten, samen met de dwarskrachten aldaar, zullen als basis dienen om via de volgende stap in de berekening terug de verdeling van de schuifkrachten in de verschillende regels en in de huidplaten te bepalen. Ze zijn aangegeven in plaat 18 (dwarskracht K en moment M). Wat opvalt in het verloop van deze momenten is dat ze over de lengte van de halve deur van teken veranderen, met een nulpunt nabij kader 7. Op deze plaats ligt de resultante van de hydrostatische druk en de drempelreactie in het torsiecentrum; meer naar kader 12 toe ligt deze resultante boven het torsiecentrum (en dus boven de hoofdbalk), en andersom naar kader 1 toe. Dit fenomeen dat typerend is voor het gedrag van de deur, brengt mee dat het gecumuleerd torsiemoment in de hoofdbalk vanaf het midden der deur, waar het omwille van de symmetrie nul is, naar kader 7 toe eerst toeneemt, en dan van kader 7 naar kader 1 terug afneemt, waarbij het

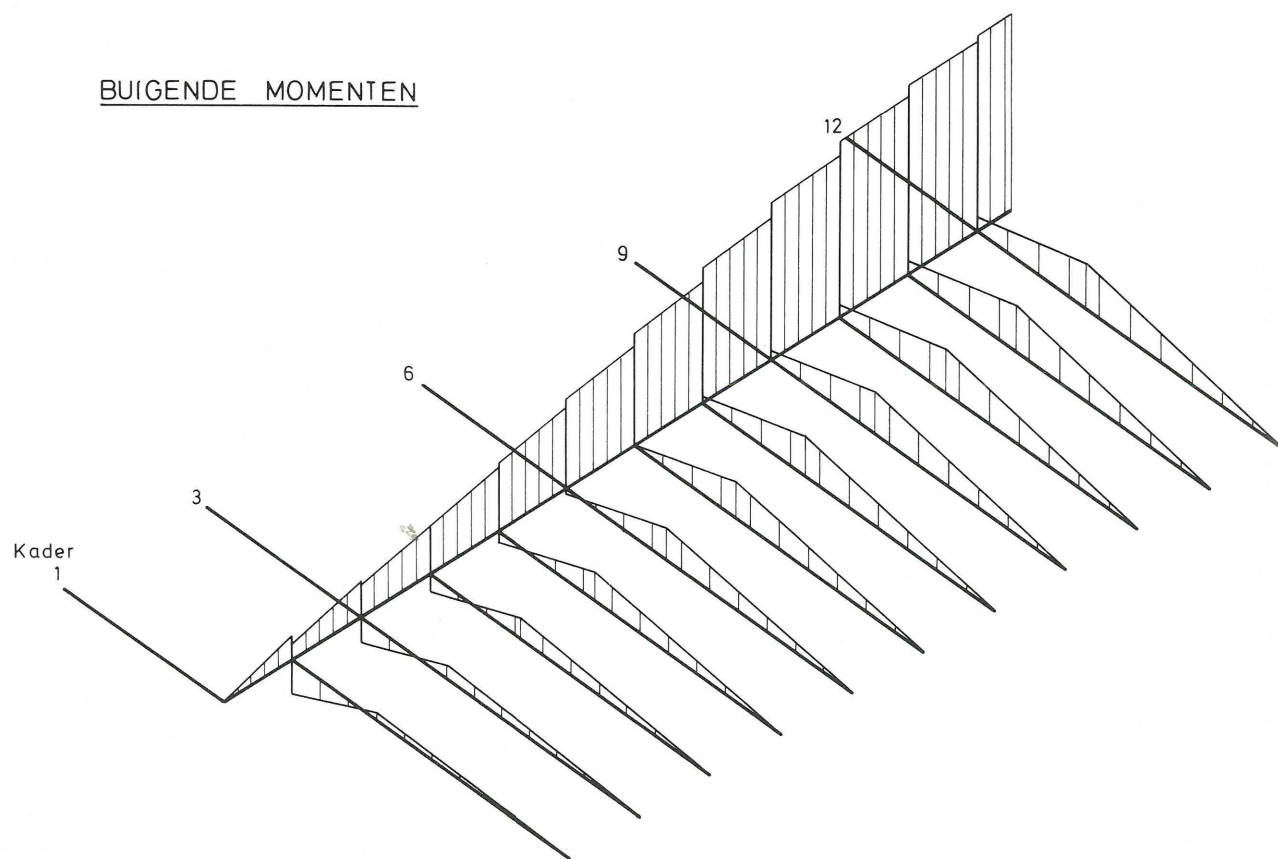
DWARSKRACHTEN



NOTA: dwarskrachten in hoofdligger zijn 5x kleiner getekend dan in stijlen.

Plaat 19a. — Berendrechtsluisdeur. Geval 1 „klein model”.

BUIGENDE MOMENTEN



NOTA: buigende momenten in hoofdligger zijn 10x kleiner getekend dan in stijlen.

Plaat 19b

nabij het deureinde snel daalt en van teken verandert. Voor belastingsgeval 2 is dit verschijnsel nog veel meer uitgesproken; het nulpunt in de gecumuleerde torsiementenlijn ligt dicht bij het midden der deur en de afname naar kader 1 toe is zeer aanzienlijk. Het resulteert op kader 1 in een vrij grote negatieve waarde (zie ook § 7). Dit alles heeft tot gevolg dat het gecumuleerd torsiement in de hoofdbalk eerder klein is in de middenzone van de deur. Nabij kader 1 kan dit torsiement nog afnemen of, met een negatief teken dan, juist aanzienlijk toenemen, maar in die zone is de invloed ervan op de hoekverdraaiing echter gering (dicht bij het steunpunt met kwasi-inklemming). Hierdoor is het ook niet zo erg dat de momenten die elke stijl overbrengt op de hoofdbalk in het klein model, niet zo goed overeenstemmen met de per kader berekende torsiementen in het groot model (vergelijk plaat 18 met 14), alhoewel de grootte orde wel overeenstemt.

Naar buigende momenten en dwarskrachten gedraagt de hoofdligger zich ongeveer als een eenvoudig opgelegde balk op twee steunpunten. Het maximaal buigend moment in het midden der deur bedraagt zowat 40 000 tm (iets minder in geval 1 en iets meer in geval 2), wat bij een deurbreedte van ± 10 m en een buigingstraagheidsmoment aldaar van $\pm 27,6$ m⁴ een buigspanning geeft van zowat 725 kg/cm². Dit is op zich weinig maar moet later nog gekombineerd worden met de lokale plaatsspanningen.

Tenslotte moeten we opmerken dat in het klein model een verstoringseffekt optreedt in het hierboven beschreven verloop van het gecumuleerd torsiement in de hoofdbalk, omdat door het licht schuin plaatsen van de hoofdbalk, de in principe verticale buigmomentvektor genomen wordt als een loodrechte op de hoofdbalk en dus een component heeft volgens de lijnrichting der hoofdbalk. Om deze reden wordt voor de grafische weergave van deze torsiementen ook verwezen naar § 7.

6.3.5. Over de reacties op het eindkader valt weinig te zeggen gezien de modellering hier hoegenaamd niet overeenstemt met de werkelijkheid.

6.3.6. Vanuit de resultaten van het klein model (dwarskrachten en momenten door elke stijl overgebracht op de hoofdligger) kan men dan via de in § 6.2.1. beschreven methode de schuifkrachten berekenen die optreden in de regels 1, 3 en 4 en in de huidplaten, in andere woorden terugkeren van de hoofdligger als eenvoudige staaf naar de werkelijke structuur. De resultaten van deze berekening zijn opgetekend in plaat 18, die voor de overeenstemmende waarden van het groot model moet vergeleken wor-

den met plaat 14. De overeenkomst is niet overal perfect, maar toch wel bevredigend. Tenslotte valt op dat de aldus berekende schuifspanningen overal klein zijn, maar vergeten we niet dat de werkelijke spanningen in een kader de gesommeerde spanningen van alle kaders tussen dit kader en het deurmidden zijn; in geval 2 wordt bij kader 1 op regel 4 de dwarskracht ± 666 ton, wat bij uniforme verdeling een schuifspanning betekent van ± 475 kg/cm². Hoe per kader de hydrostatische druk zich uiteindelijk verdeelt over de drie regels en de drempelsteunen wordt geïllustreerd in plaat 5.

6.4. Beoordeling en besluit over het klein model

6.4.1. Bij de opmaak van het klein model werden ook enkele varianten onderzocht. Aangezien de inbreng in het klein model van translatie- en rotatievervormingen in de oplegging van de hoofdbalk op het eindkader en van een korrektiefactor voor dwarskrachtvervorming der hoofdligger nogal onzeker zijn, werden drie varianten onderzocht waarbij telkens een van deze of beide schikkingen achterwege gelaten werden.

De resultaten hiervan lagen slechter wat betreft overeenstemming met het groot model. Ter illustratie hiervan wordt enkel het verloop van de drempelreacties gegeven in plaat 17 voor een klein model zonder veren ter plaatse van kader 1, zonder correctie voor dwarskrachtvervorming en zonder beide schikkingen. Vergelijking van de vervormingen toont eveneens aan dat deze varianten niet weerhouden moeten worden.

6.4.2. Het blijkt niet mogelijk te zijn een klein model te konstrueren dat in alle aspecten gelijke resultaten geeft als het groot model. Daarvoor is het groot model te complex. Vooreerst kent het groot model wel een uitwendige belasting op kader 1, en is dit kader afgesteund op een wijze die niet eenvoudig is weer te geven in een klein model (wat wel een relatief belangrijke invloed schijnt te hebben). Verder blijft het feit dat er verstoringseffekten optreden als men een zo grote koker (deurbreedte ± 10 m, afstand regel 1 tot regel 4 ± 14 m) wil reduceren tot een serie lijnbalken met als lengte telkens een kaderafstand van ± 3 m. Zo bestaat in het groot model ter plaatse van elk kader een soort „diafragma”, gevormd door een vast schot tussen regel 3 en 4 en door een diagonaalverband tussen regel 1 en 3. Alhoewel dit diagonaalverband een grote stijfheid vertoont is het toch minder stijf dan het schot daaronder.

Deze schikking wordt niet weergegeven door een klein model.

Anderzijds is het groot model ook niet perfect gezien er telkens tussen de kaders per strook slechts één plaalement is ingevoerd, wat voldoende is voor het beoogde resultaat maar wat misschien het verloop der schuifkrachten niet precies weergeeft.

6.4.3. Ondanks bovenstaande beperkingen kunnen we de resultaten van het klein model als behoorlijk beoordelen. We zijn er echter van overtuigd dat nauwkeuriger onderzoek tot een beter klein model zou kunnen leiden, maar vanwege tijds- en personeelsgebrek in de Studiedienst moesten we vrede nemen met de hierboven beschreven resultaten, die voor het hier beoogde doel, namelijk het verklaren van het algemeen krachtenspel in de sluisdeur, als voldoende kunnen beschouwd worden.

7. VOORONTWERPBEREKENINGEN

Bij de voorontwerpberekeningen van een dergelijke sluisdeur kan men natuurlijk geen beroep doen op het hierboven ontwikkeld klein model. Dit is immers tot stand gekomen op basis van de resultaten van de definitieve berekening in het groot model. Hoe gaat men dan te werk?

Wanneer men zoals gewoonlijk eerst de structuur van de sluisdeur bepaalt en voor deze structuur ruwweg een idee van het krachtenspel wil krijgen, kan men een nog beperkter model opstellen dat verder zal aangeduid worden als „gereduceerd model”. Gezien we in dit stadium niet beschikken over het verloop der schuifkrachten per kader kan ook moeilijk een oordeel geveld worden over het bij de hoofdligger te beschouwen deel der meewerkende plaatbreedte, waardoor ook de ligging (per kader) van het torsiecentrum onbekend is. Derhalve zullen we voor het gereduceerd model voldoening nemen met volgende schikkingen: voor de hoofdbalk wordt een horizontale ligger beschouwd met konstant buigings- en torsie-traagheidsmoment, berekend op basis van een volledige doorsnede van de deur (dus regels 1, 3 en 4, en de huidplaten van regel 1 tot regel 6 met inbegrip van al de verstijvers). In vergelijking met het klein model (zie § 6) geeft dit:

	gereduceerd model	klein model
I-buiging:	25,482 m ⁴	van 18,87 (kader 2) tot 27,64 (kader 12)
I-torsie:	23,079 m ⁴	23,079 (over hele lengte)
torsiecentrum:	7,206 m (onder regel 1)	van 8,17 (kader 2) tot 6,77 (kader 12)

Deze voor het gereduceerd model genomen karakteristieken komen dus ongeveer overeen met deze die in het klein model nabij kader 9 genomen zijn.

Verder kunnen we in het voorontwerp stadium moeilijk begroten welke waarden van stijfheden we zouden moeten invoeren voor eventuele translatie- en rotatieveren bij de afsteuning van de hoofdbalk ter plaatse van kader 1. We nemen hier dus een eenvoudige starre oplegging met volledige torsieinklemming. Er wordt voorlopig ook geen correctie voor dwarskrachtvervorming toegepast. Zodoende is in het gereduceerd model de hoofdligger volledig bepaald.

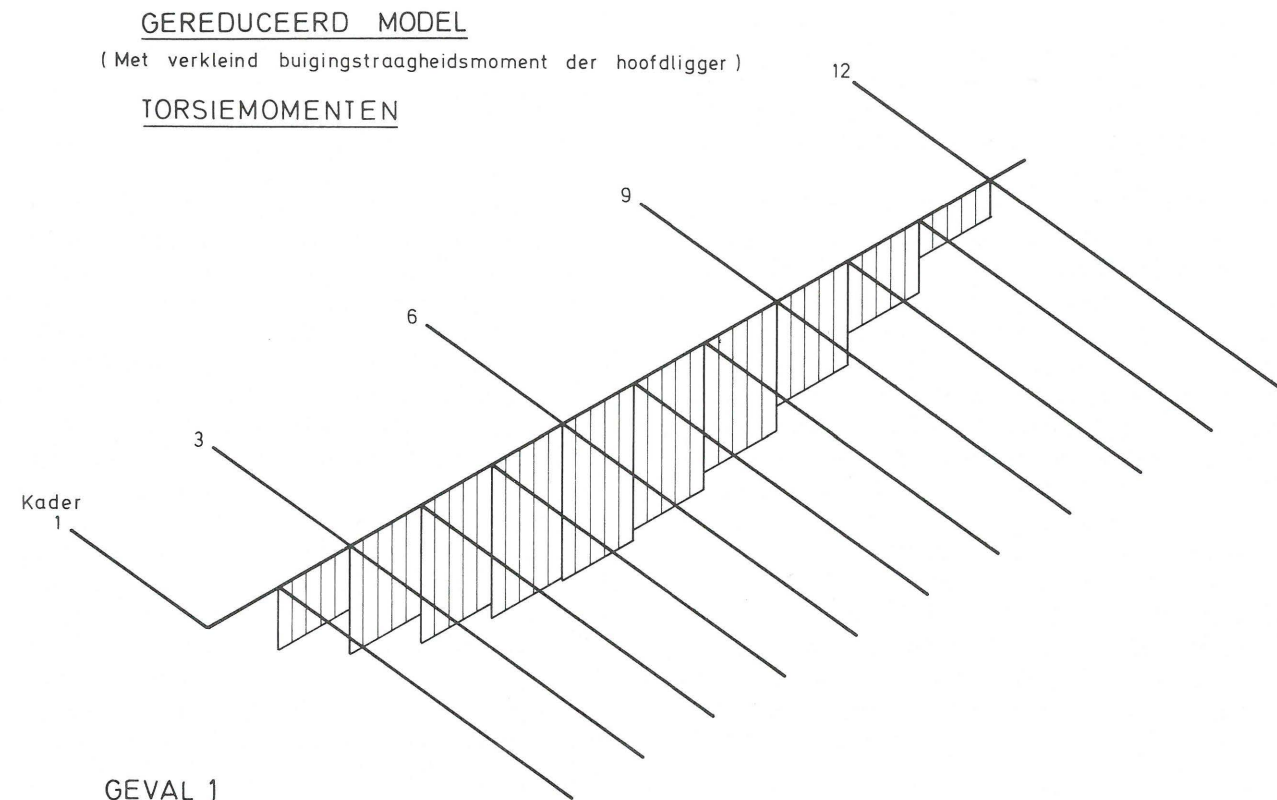
Voor wat betreft de stijlen (kaders) volgen we dezelfde redenering als voor het klein model, dit wil zeggen dat ze worden beschouwd als oneindig stijve verticale balken, waarbij ter hoogte van de afsteuning tegen de drempel een translatie- en rotatieveren zowel de rubbers aldaar als de elastische vervorming der eigenlijke kaderstructuur weergeeft. Dit laatste veronderstelt dus ook in dit stadium de voorafgaande berekening van het gedrag van één kader tussen regel 4 en de drempel onder invloed van een puntlast ter plaatse van de drempelreactie (plaat 15).

De hydrostatische drukken worden op identieke wijze ingevoerd als bij het klein model, dus als puntlasten op elke stijl.

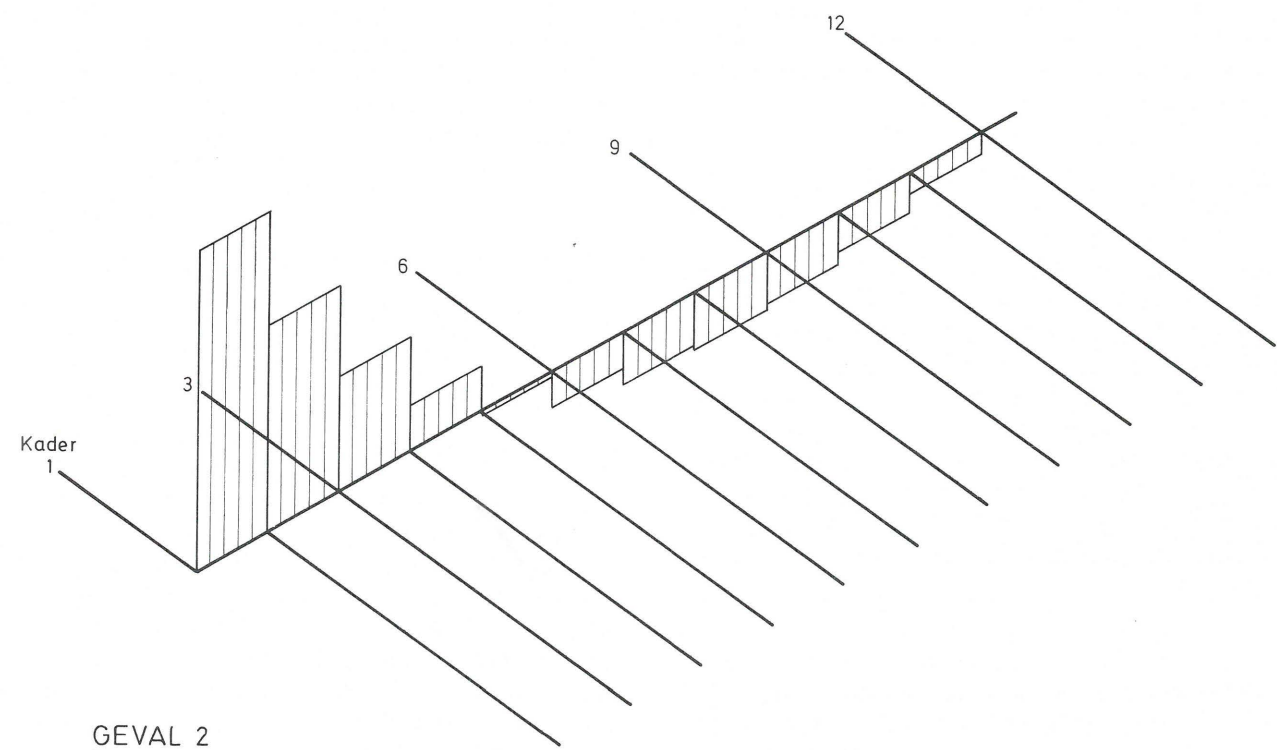
Het resultaat van dit gereduceerd model is alhoewel niet onbevredigend toch iets minder goed dan bij het klein model. De drempelreacties zijn kleiner (zie plaat 17: „gereduceerd model, I origineel”), de vervorming van kader 12/regel 1 bedraagt ongeveer 24 mm in plaats van 35 mm. Toch kan voor een voorontwerpberekening dit gereduceerd model dienst doen.

Maar verbetering is mogelijk. Indien we in dit gereduceerd model toch een correctie voor dwarskrachtvervorming toepassen, of indien we deze correctie onrechtstreeks toepassen door het buigingsstraagheidsmoment van de hoofdligger te reduceren tot 2/3e van de oorspronkelijke waarde (dus ± 17 i.pl.v. 25,482 m⁴) — beide werkwijzen geven nagenoeg dezelfde resultaten — dan worden de uiteindelijke resultaten beter vergelijkbaar met deze van het klein model en dus ook met deze van het groot model. In plaat 17 („gereduceerd model, I verkleind”) worden ook voor dit geval de drempelreacties weergegeven die nu iets te hoog uitvallen (max 6% in geval 1 en max 3% in geval 2). De vervorming van kader 12/regel 1 is nu toegenomen tot 33 mm (geval 1) en 36 mm (geval 2) wat een voldoende nauwkeurige benadering lijkt te zijn.

Door in dit gereduceerd model de hoofdligger horizontaal te nemen, is het verloop van het torsie-



Plaat 20a. — Berendrechtsluisdeur.



Plaat 20b. — Berendrechtsluisdeur.

ment dat elk kader overbrengt op de hoofdlijger groter dan in het klein model. Immers, het aangrijpingspunt van de uit de hydrostatische druk en de drempelreactie resulterende kracht blijft nagenoeg dezelfde als in het klein model (gezien de drempelreacties goed overeenstemmen; zie ook plaat 11), terwijl de hefboomsarm tussen dit aangrijpingspunt en het torsiecentrum (ligging hoofdbalk) nu verschilt door de horizontale positionering van de hoofdbalk. Het in de hoofdbalk gecumuleerde torsiemoment wordt weergegeven op plaat 20; het vertoont een gelijkaardig verloop als beschreven voor het klein model in § 6.3.4. Merkwaardig is wel dat nu in geval 1 het gecumuleerde torsiemoment bij kader 1 nagenoeg nul wordt. Door deze toch iets andere torsiemomentverdeling en door bij elk kader de volledige deurdoorsnede te beschouwen, wordt de volgende stap in de berekening, namelijk de verdeling van de dwarskracht in de hoofdlijger over de regels 1, 3 en 4 en de huidplaat, ook minder nauwkeurig. Deze resultaten zijn opgetekend in plaat 18 en dienen te worden vergeleken met deze van het klein model (ook plaat 18) en uiteindelijk met deze van het groot model (platen 10 en 14).

Al bij al mag men besluiten dat dit gereduceerd model over de hele lijn voldoende betrouwbare resultaten geeft voor een voorontwerpberekening. Het algemeen krachtenverloop wordt er op kwalitatief juiste manier door weergegeven en al de rekenresultaten zijn kwantitatief bruikbaar voor het hier beoogde doel. Zeker mits toepassing van een reductie op het buigingstraagheidsmoment van de hoofdlijger zijn de resultaten goed.

Bij het uitvoeren van de werkelijke voorontwerpberekeningen voor de sluisdeuren van de Berendrechtsluis is zelfs een model gehanteerd dat nog meer vereenvoudigd was: daar werden telkens drie kaders gegroepeerd tot één stijl om zodoende het aantal balken in het model sterk te kunnen beperken. Heel deze voorontwerpberekening hier beschrijven zou ons te ver leiden; het kan volstaan er op te wijzen dat het op basis van deze voorontwerpberekening tot stand gekomen projekt door de definitieve berekening (groot model) niet noemenswaardig en zeker niet in essentiële onderdelen moest aangepast worden. Dit toont aan dat een dergelijke werkwijze voor een voorstudie volstaat.

Het grote voordeel van een dergelijk model ligt er in dat hierop kan geëxperimenteerd worden. Het laat toe op vlugge manier een oordeel te vellen over de invloed van de wijziging van diverse karakteristieken.

8. VARIANTEN

8.1. Inleiding

Nu zullen we trachten na te gaan hoe het gedrag van de konstruktie zal veranderen als er variaties aan de basisgegevens worden aangebracht. Alhoewel het klein model dicht bij de werkelijkheid (groot model) benadert dan het gereduceerd model zullen we toch uitgaan van dit gereduceerd model (met verminderd buigingstraagheidsmoment), omdat hierbij de invloed van de variaties duidelijker naar voren komt en omdat zodoende de eventuele problemen met de correctie voor dwarskrachtvervorming vermeden worden. Eerst zullen we in het klein model de invloed onderzoeken van de variatie van telkens één karakteristiek, zonder hieraan direkt een fysische betekenis te geven. Het is immers in werkelijkheid niet goed in te beelden dat bijvoorbeeld het buigingstraagheidsmoment zou veranderen, terwijl het torsietraagheidsmoment en de ligging van het torsiecentrum onveranderd behouden blijven, en omgekeerd. Dit is dus voornamelijk op te vatten als een oefening om de afzonderlijke invloeden van verschillende karakteristieken te bepalen. Daarna zullen meer aan de werkelijkheid beantwoordende variaties onderzocht worden.

Plaat 21 geeft de resultaten van deze berekeningen. We gaan er van uit dat het volstaat telkens de drempelreacties te bepalen; dan is de sollicitatie van de hoofdbalk volledig gekend. Ter indicatie wordt ook de som der drempelreacties gegeven en het percentage van de totale hydrostatische kracht dat deze som betekent. Volledigheidshalve wordt dan ook de vervorming van kader 12/regel 1 gegeven.

8.2. Variatie van het torsietraagheidsmoment van de hoofdbalk

Vanaf de initiële waarde van 23,079 laten we dit torsietraagheidsmoment variëren naar de waarden 50, 10 en 5 m⁴. Hoe groter de torsiestijfheid, hoe minder afgevlakt de drempelreacties verlopen, dus kleiner nabij het eindkader en groter nabij het deurmidden. Deze toename nabij het deurmidden is echter nagenoeg niet aanwezig in het geval 2. Het deel van de totale druk dat naar de drempel gaat neemt toe in geval 1, maar neemt af in geval 2. De vervorming ter plaatse van kader 12/regel 1 daarentegen neemt af in geval 1 en neemt toe in geval 2. Een en ander volgt uit de overweging dat hoe torsiestijver de hoofdlijger, hoe meer de stijlen vertikaal blijven.

VERGELIJKING VARIANTEN gereduceerd model met Ib verkleind. (krachten in ton)

Drempelreakties:	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	som D	% D/tot dr	f k12/r1 (cm)

GEVAL 1														
REFERENTIE:														
gr.model:	14.74	29.12	41.22	51.97	61.29	69.24	75.79	81.09	85.20	87.89	89.38	686.90	31.73	3.430
kl.model:	14.01	26.14	37.47	47.89	57.28	65.53	72.51	78.09	82.14	84.56	85.26	650.88	31.52	3.560
gered.model:	14.99	28.96	41.78	53.36	63.62	72.50	79.96	85.95	90.47	93.49	95.00	720.08	34.88	3.295

It = 50:	14.62	28.59	41.68	53.70	64.51	73.98	82.01	88.52	93.46	96.77	98.43	736.27	35.66	3.162
It = 10:	16.06	30.26	42.70	53.50	62.75	70.53	76.91	81.94	85.68	88.15	89.38	697.86	33.80	3.501
It = 5:	18.03	32.80	44.89	54.76	62.77	69.20	74.27	78.15	80.95	82.78	83.68	682.28	35.05	3.690
TC 3m hoger:	17.17	32.71	46.63	58.94	69.65	78.77	86.34	92.36	96.86	99.86	101.35	780.64	37.81	2.961
TC 3m lager:	13.27	25.98	37.91	48.90	58.79	67.46	74.81	80.78	85.30	88.34	89.87	671.41	32.52	3.790
k = 2150 :	11.85	23.00	33.34	42.75	51.15	58.47	64.65	69.64	73.42	75.94	77.21	581.42	28.16	3.531
k = 8200 :	21.20	40.29	57.27	72.16	85.05	95.94	104.91	112.01	117.29	120.79	122.53	949.44	45.99	2.911
k = 12500 :	24.27	45.55	64.03	79.91	93.35	104.54	113.62	120.72	125.96	129.40	131.10	1032.45	50.01	2.777
Ib=I/2 :	19.83	38.48	55.70	71.32	85.18	97.19	107.27	115.38	121.49	125.57	127.61	965.02	46.74	5.267
Ib=I*2 :	11.33	21.74	31.20	39.66	47.11	53.52	58.87	63.17	66.40	68.55	69.63	531.18	25.73	1.766

GEVAL 2														
REFERENTIE:														
gr.model:	28.25	49.17	64.18	77.93	89.82	99.98	108.31	115.08	120.27	123.69	125.58	1002.26	36.78	3.450
kl.model:	29.63	45.51	60.22	73.63	85.65	96.15	104.99	112.04	117.19	120.30	121.30	966.61	37.30	3.576
gered.model:	21.04	40.45	58.10	73.91	87.83	99.81	109.82	117.84	123.87	127.89	129.90	990.46	38.22	3.615

It = 50:	19.53	38.05	55.33	71.13	85.28	97.64	108.10	116.57	122.97	127.26	129.42	971.28	37.48	3.684
It = 10:	24.23	45.32	63.56	79.19	92.43	103.46	112.42	119.44	124.63	128.05	129.74	1022.47	39.45	3.524
It = 5:	28.80	52.01	70.72	85.74	97.75	107.26	114.66	120.26	124.27	126.88	128.14	1056.49	40.77	3.467
TC 3m hoger:	23.99	45.52	64.65	81.45	95.97	108.28	118.44	126.50	132.51	136.49	138.48	1072.28	41.38	3.307
TC 3m lager:	18.60	36.21	52.58	67.52	80.88	92.54	102.38	110.34	116.35	120.38	122.41	920.19	35.51	4.109
k = 2150 :	16.57	32.02	46.24	59.11	70.54	80.45	88.79	95.51	100.57	103.96	105.66	799.42	30.85	3.939
k = 8200 :	30.15	56.84	80.24	100.50	117.79	132.28	144.12	153.43	160.31	164.86	167.11	1307.63	50.46	3.087
k = 12500 :	34.82	64.71	90.17	111.65	129.58	144.29	156.09	165.23	171.92	176.30	178.46	1425.22	54.92	2.903
Ib=I/2 :	26.74	51.66	74.49	95.04	113.18	128.82	141.90	152.39	160.26	165.51	168.14	1278.13	49.32	5.929
Ib=I*2 :	16.74	31.96	45.65	57.80	68.42	77.51	85.06	91.10	95.62	98.63	100.14	768.63	29.66	1.820

Plaat 21. — Berendrechtsluisdeur.

8.3. Variatie van de ligging van het torsiecentrum (dus van de hoofdbalk)

We leggen achtereenvolgens de hoofdbalk 3 meter hoger en 3 meter lager. Hoe hoger het torsiecentrum (dit betekent hoe dicht bij de hoofdbalk bij regel 1), hoe groter al de drempelreacties; en deze toename is des te meer uitgesproken nabij het eindkader. De som der drempelreacties neemt natuurlijk ook toe, maar de doorbuiging van kader 12/regel 1 vermindert.

8.4. Variatie van de veerstijfheden der drempelaanslagen

Deze veerstijfheden geven zowel de elastische vervorming der kaders weer als de rubbers die daar geplaatst zijn. Zoals uiteengezet in § 6.2.2. is de initiële waarde (3405 t/m) verkregen als de som van een rubbersamendrukking van 1,717 cm en een kaderver-

vorming van 1,22 cm onder een drempelreactie van 100 ton. We onderzoeken nu eerst een rubber die twee keer zo slap is als de initiële

dit geeft $k = 100 \text{ ton} / (1,22 + 1,717 * 2) \text{ cm} = 2150 \text{ t/m}$.

Vervolgens bekijken we het geval dat de rubbers volledig weggelaten worden of vervangen worden door een star stuk

dus $k = 100 \text{ ton} / 1,22 \text{ cm} = 8200 \text{ t/m}$.

Tenslotte onderzoeken we wat er gebeurt als in dit vorige geval de kaders verstijfd worden (plaat 15) zodat de elastische vervorming gereduceerd wordt tot 8 mm

dan wordt $k = 100 \text{ ton} / 0,8 \text{ cm} = 12500 \text{ t/m}$.

Als besluit geldt: hoe stijver de veerconstante k hoe groter de som der drempelreacties en hoe kleiner de doorbuiging ter plaatse van kader 12/regel 1. De individuele drempelreacties stijgen sterk.

8.5. Variatie van het buigingstraagheidsmoment van de hoofdbalk

We zullen achtereenvolgens dit traagheidsmoment halveren en verdubbelen. Bij toenemende stijfheid der hoofdligger dalen de drempelreacties allemaal en dus ook hun som. En alhoewel er dus meer krachten op de hoofdligger komen vermindert de vervorming ter plaatse van kader 12/regel 1 omdat de toename van de stijfheid der hoofdligger doorweegt.

8.6. Commentaar

Bovenstaande oefeningen zijn slechts ter illustratie. De aangehaalde verschijnselen zijn meestal logisch en volgens de verwachtingen. De berekeningen (plaat 21) dienen dan enkel om een kwantitatief beeld te krijgen van wat men kwalitatief al wist. Zo is ook de onderlinge samenhang van verschillende invloeden rechtstreeks kwalitatief te deduceren. Nemen we bijvoorbeeld het geval waarin de geometrie (ligging hoofdbalk), het buigingstraagheidsmoment der hoofdbalk en de drempelveren zodanig gekozen zijn dat op elk kader de doorbuiging van de hoofdligger en de indrukking der drempelveer gelijk zijn. Elke stijl blijft dan vertikaal (ondergaat enkel een translatie) en er is geen torsieverdraaiing in de hoofdbalk, wat ook de torsiestijfheid der hoofdbalk moge zijn. Als integendeel de hoofdbalk zeer buigingslap is en dus veel zal vervormen, dan zorgt een grote torsiestijfheid, die tracht de stijlen vertikaal te houden, voor een zwaar aanleunen van de stijlen tegen de drempel. Wanneer anderzijds de hoofdbalk erg stijf is en dus nagenoeg niet vervormt dan leidt een grote torsiestijfheid ertoe dat de stijlen ook ongeveer vertikaal in het vlak blijven en dus nauwelijks de drempelveren indrukken. Dit geeft dus een beeld van de onderlinge samenhang der karakteristieken ter illustratie van het gezegde dat men soms moeilijk een uitspraak kan doen over de invloed van de variatie van één ervan. Ook moet men opletten om de resultaten van bovenstaande oefeningen zomaar over te dragen van het gehanteerde gereduceerd model naar het klein model.

8.7. Invloed van een vreemd voorwerp tussen de drempelaanslag

Bij de ontwerpers van sluisdeuren bestaat steeds een zekere angst dat een vreemd voorwerp zich ergens tussen de deuraanslag en het graniet of beton zou klemmen en zodoende het voorziene continue gedrag der aanslagen grondig zou verstoren. Zo'n vreemd voorwerp kan een stuk autowrak zijn of een stuk scheepsketting of om het even wat dat op de sluisbodembodem tussen de deur en de harde aanslag kan geraken. We zullen dit fenomeen hier onderzoeken

voor het geval dat één kader door een dergelijk voorwerp geteisterd wordt. We kunnen hiervoor werken op het klein model, met dien verstande dat we dan in feite telkens twee dergelijke kaders beschouwen gezien het model steeds symmetrisch is ten opzichte van het deurmidden. Omdat reeds in het normale geval het belastingsgeval 2 de grootste reacties op de drempel oplevert zullen we ons hier beperken tot dit geval. Wanneer we één drempelveer oneindig stijf maken en de andere ongewijzigd laten, dan trekt dit kader natuurlijk een zeer grote reactiekracht aan. Berekeningen voor een nagenoeg oneindig stijve veer, achtereenvolgens uitgeprobeerd op kaders 3, 6, 9 en 12, leveren telkens in deze kaders reacties op ter grootte van zowat 930 à 1300 ton. Moest dit mogelijk zijn dan zou dit betekenen dat aldaar een vervorming (rubber plus kader) van zowat 27 à 38 cm zou optreden (dikte vreemd voorwerp), maar deze redenering houdt geen steek aangezien onder zulke krachten het kader bezwijkt en dus de steun aldaar verloren gaat. Als we aannemen dat de kaders berekend zijn voor de grootste normale belasting (kader 12, geval 2: $D = 125$ ton) en dat dan gewerkt wordt aan $2/3e$ van de vloiegrens, zal een kader beginnen vloeien aan zowat 187 ton. Als we veiligheidshalve aannemen dat een drempelreactie zonder schade te veroorzaken mag oplopen tot 175 ton, kunnen we de veerconstante zoeken die deze reactie oplevert. Door de reactie van 175 ton te delen door de zo gevonden veerconstante, bepalen we de vervorming aan deze drempel; door daar de rubber- en kadervorming (2,94 cm voor 100 ton, dus 5,15 cm voor 175 ton) van af te trekken vinden we de „toelaatbare” dikte van een vreemd voorwerp. Dit geeft (steeds in belastingsgeval 2) volgende resultaten:

kader 3: veerconstante: 15 300 t/m, dikte voorwerp: 4,0 cm
6: veerconstante: 7 500 t/m, dikte voorwerp: 2,8 cm
9: veerconstante: 5 650 t/m, dikte voorwerp: 2,0 cm
12: veerconstante: 5 250 t/m, dikte voorwerp: 1,8 cm.

We merken ook op dat de andere kaders door dit fenomeen slechts zeer weinig beïnvloed worden; hun reacties dalen zeer lichtjes.

Deze redenering gaat echter niet volledig op aangezien in werkelijkheid en ook in het groot model de kaders ter hoogte van regel 6 met elkaar verbonden zijn door regel 6, zodat de interactie tussen naast elkaar gelegen kaders veel groter zal zijn. Derhalve zouden we heel dit verschijnsel slechts kunnen onderzoeken door in het model deze regel 6 weer te geven, wat we hier niet verder zullen uitwerken. We willen er enkel nog op wijzen dat in het gehanteerde klein model, bij het weglaten van één drempelsteun (na bezwijken van dit kader), al de andere drempelreacties lichtjes toenemen en niet enkel de meest nabijge

drempelreacties. Dit wijst op hetzelfde gebrek van het klein model (geen regel 6) als hierboven aangehaald.

Deze redenering geeft dus slechts aan hoe men zou kunnen te werk gaan om de problematiek van een vreemd voorwerp tussen de drempel grondig te onderzoeken. Dezelfde redenering kan ook gebruikt worden om na te gaan hoe de reacties zich op de drempel verdelen als deze laatste niet recht is uitgevoerd.

8.8. Open regel 1

We onderzoeken nu een geheel andere problematiek. In tegenstelling tot de deuren van de Berendrechtsluis waar regel 1 uit een volledig gesloten plaatligger bestaat (zoals ook bij de zeeaarste deuren te Zeebrugge), is bij vroegere sluisdeuren de regel 1 open. In het vlak der kaders is daar wel een diagonaalverband tussen de huidplaat ter hoogte van regel 1 en het deurmidden van regel 2, maar dit neemt in vergelijking met de gesloten regel 1 slechts zeer weinig krachten op.

Om na te gaan wat het effect is van deze wijziging zullen we trachten de „open regel” toe te passen op de deur van Berendrecht, en we zullen dit doen met behulp van het gereduceerd model. In een eerste stap zullen terug de ligging van het torsiecentrum en het torsietraagheidsmoment moeten bepaald worden. Dit doen we op dezelfde manier als beschreven in § 6.2.1. waarbij we vertrekken van identiek dezelfde volledige doorsnede (platen én alle verstijvers) maar met volledig weglaten van de regel 1. Deze doorsnede bestaat dus uit een ééncellig gesloten profiel met uitsteeksels naar onder (tussen regel 4 en de onderkant) en naar boven (tussen regel 3 en de bovenkant). De berekening geeft een buigingstraagheidsmoment ter grootte van $24,169 \text{ m}^4$ (vergelijk met $25,482 \text{ m}^4$ in het gereduceerd model; nu enkel regel 1 weggelaten), een torsietraagheidsmoment van $3,134 \text{ m}^4$ (vergelijk met $23,079 \text{ m}^4$, nu enkel een koker ter hoogte van 3,986 m in plaats van 14,093 m), en een ligging van het torsiecentrum op 12,935 m onder regel 1 (vergelijk met 7,206 m, nu enkel de koker tussen de regels 3 en 4, met uitkragingen). In woorden uitgedrukt betekent dit dat de hoofdbalk nagenoeg dezelfde buigstijfheid behoudt, maar veel lager komt te liggen, en dat de torsiestijfheid aanzienlijk afneemt.

Gaan we nu over naar de berekening van dit gereduceerd model dan moeten we op dezelfde manier als uiteengezet in § 7 de buigingsstijfheid reduceren om rekening te houden met de vervorming door dwars-

kracht. We zullen deze reductie echter kleiner nemen daar er nog maar twee regels zijn in plaats van drie die de dwarskracht opnemen. We verkleinen aldus het buigingstraagheidsmoment van de hoofdligger van $24,168$ tot $18,82 \text{ m}^4$. Anderzijds vervalsen we gemakshalve het model enigzins door het torsiecentrum iets hoger te nemen dan het zou moeten (op 12,58 m onder regel 1 in plaats van op 12,935 m) aangezien anders de belasting in geval 1 boven het staafeinde van de stijl valt en we dus het model naar boven toe zouden moeten uitbreiden.

De belangrijkste resultaten van deze berekening en van de volgende stap, de berekening der schuifkrachten in de regels 3 en 4 (voor de twee meest uiterste kaders) zijn gegeven in plaat 18, waar ze direkt vergeleken kunnen worden met de waarden voor de gesloten regel 1. We kunnen de volgende besluiten trekken. De reacties op de drempel zijn fel verminderd; in geval 1 met meer dan de helft, in geval 2 met zowat $1/3e$. De belasting op de hoofdligger is dus toegenomen, en dit vooral nabij het midden van de deur. Het buigmoment dat elk kader overbrengt op de hoofdbalk en dat daar het torsiemoment vormt ligt in dezelfde orde grootte als bij gesloten regel 1, maar het verloop ervan is in geval 2 merklijk vlakker. De enig overblijvende regels 3 en 4 worden totaal anders belast. Grofweg gezegd krijgt vooral regel 3 een veel groter deel van de belasting te dragen, en dit opnieuw vooral nabij het deurmidden (zowat 4 keer groter). Regel 4 krijgt daarentegen nabij het deurmidden een kleinere belasting (ten nadele dus van regel 3). De doorbuiging van kader 12/regel 1 is nu in geval 1: 7,338 cm, dit is 2,23 keer zo groot, en in geval 2: 6,483 cm, dit is 1,79 keer zo groot als bij gesloten regel 1. De torsiehoek (dus de helling van de stijl) op kader 12 is zowat 10 keer groter geworden.

We kunnen besluiten dat deze oplossing met open regel 1 ook een aanvaardbare schikking is. De grotere vervorming is op zichzelf immers geen bezwaar en de grotere sollicitatie van regel 3 blijkt uiteindelijk vrij beperkte schuifspanningen te geven. Het materiaal van de regels wordt wel iets minder goed benut gezien de ongelijke verdeling over regel 3 en 4, en de hoofdbalk op zich dient wel een grotere belasting over te dragen naar de eindkaders. Men kan proberen de drempelreacties op te drijven door de veerstijfheid van de drempelveren te verhogen, maar zelfs met oneindig stijve veren aldaar blijven de reacties kleiner dan bij volle bovenregel.

De reden om de regel 1 als volle plaat uit te voeren is dan ook niet uitsluitend te zoeken in deze overwegingen, maar ook in de wens om de torsiestijfheid te verhogen wanneer de deur in beweging en onder

dwarse sollicitatie door een niveauverschil of door golfslag, enkel geleid wordt nabij de deurkameringang en ter plaatse van de onderregel, waardoor de hoek aan kader 24/regel 1 volledig vrij is en dus bij grote vervorming tijdens het invaren in de nis de randen hiervan kan raken. Deze situatie is berekend voor de ook met gesloten regel 1 uitgevoerde zeewaartse deur van Zeebrugge, waar als de deur in de aslijn geleid wordt de elastische vervorming van de vrije bovenhoek van het eindkader kleiner blijft dan de speling aldaar tussen de deur en de nis.

8.9. Andere varianten

Op dezelfde manier als hierboven beschreven zouden andere varianten kunnen onderzocht worden. Zo kunnen we nagaan hoe de karakteristieken veranderen als de deurplaten overal slechts een dikte hebben van 10 mm in plaats van 14 mm. Met gesloten regel 1, met behoud van alle verstijvers en gerekend voor een volledige deurdoorsnede wordt het buigingsstraagheidsmoment dan $20,385 \text{ m}^4$, het torsietraagheidsmoment wordt $16,485 \text{ m}^4$ en het torsiecentrum ligt op 7,195 m onder regel 1. Met deze gegevens kan dan terug de krachtenverdeling worden nagegaan, als eerst de elasticiteit van een kader onder regel 4 wordt berekend om de drempelveerconstante te kunnen invoeren. Vanuit dit gereduceerd model kunnen de schuifkrachten in de regels berekend worden.

Zo ook zou de invloed kunnen nagegaan worden van een dunnere plaat op sommige plaatsen of ook nog van een iets smallere deur.

Ook kunnen verschillende van bovenstaande veranderingen gekombineerd worden. Dit opent de mogelijkheid om te streven naar een optimalisatie van de constructie, maar laat ons niet vergeten dat heel deze berekening slechts een eerste stap is die gevolgd moet worden door allerlei lokale en detailberekeningen. De spanningen die uit deze berekeningen voortvloeien moeten in veel gevallen gekombineerd worden met deze uit de globale berekening, zodat men niet enkel uit de globale berekening besluiten mag trekken aangaande de beste schikking.

Tenslotte ontbrak ons de tijd om verder te zoeken naar een mogelijke optimalisering die ten andere zeer complexe vormen zou kunnen aannemen als men per kader of per groep van kaders andere schikkingen zou kiezen (b.v. de huidplaatdikte en de drempelveer karakteristieken laten variëren over de deurlengte). We hebben hier enkel willen aantonen dat de mogelijkheid bestaat en hoe de methode verloopt.

9. GLOBALE BEREKENINGEN VAN DE VROEGERE SLUISDEUREN

9.1. Sluisdeuren van Zandvliet

Deze deuren bestaan uit 21 kaders (kader 11 valt in de aslijn) op een onderlinge afstand van 2,93 m, dus de totale deurlengte bedraagt 58,6 m. De bovenregel is open, zodat de torsiestijfheid enkel gegeven wordt door de luchtkist en de huidplaten.

Van deze deuren beschikken wij enkel over een handberekening. Hierin wordt uitgegaan van een buigingstraagheidsmoment ter grootte van zowat $17,65 \text{ m}^4$, gegeven door de platen met verstijvers vanaf $\pm 5,67 \text{ m}$ boven tot $\pm 5,67 \text{ m}$ onder de 3,84 m hoge luchtkist, dus over een hoogte van 15,2 m en niet over de volledige deurhoogte. Als torsiestijf element wordt enkel de luchtkist beschouwd, met torsiecentrum op de halve hoogte ervan en torsiestijfheid ($3,84 \text{ m} * 9,886 \text{ m}$)

$$I_t = 4 * (\text{oppervlakte})^2 * \text{plaatdikte} / \text{omtrek} = 2,94 \text{ m}^4.$$

De hydrostatische druk in het zwaarste belastingsgeval is 230,39 ton per kader.

In een eerste stap der berekening wordt de drempel weggelaten en de hele belasting op de caisson aangebracht, die als tweezijdig op de eindkaders opgelegde ligger beschouwd wordt en aldaar naar de torsie ingeklemd wordt. De buigende momenten, dwarskrachten en torsiemomenten van de hoofdligger worden berekend alsook de vervormingen ter plaatse van de drempel aan de kaders 9, 11 en 13. In een tweede stap worden enkel drempelkrachten als onbekenden ingevoerd ter plaatse van deze kaders 9, 11 en 13, en deze worden zodanig bepaald dat de vervormingen gelijk en tegengesteld zijn aan deze uit de eerste stap. Combinatie van de buig-, torsiemomenten en dwarskrachten uit beide stappen geeft het totale krachten spel en laat toe al de vervormingen te bepalen.

Omdat deze benadering geen voldoende nauwkeurigheid geeft — slechts drie drempelsteunen over de hele deurlengte — wordt vervolgens gepoogd een meer verfijnd model te berekenen, waarin onbekenden als drempelreacties worden beschouwd ter plaatse van de kaders 2, 3, 5, 7, 9, 11 enz. Deze onbekenden worden bepaald door de vereiste dat de gekombineerde vervorming ter plaatse van de drempel in deze kaders gelijk aan nul zou zijn. In deze berekening wordt rekening gehouden met de doorbuiging en de torsie der hoofdbalk en met de elastische vervorming der kaders onder de luchtkist.

Heel deze met de hand uitgevoerde berekening is vrij lang en omslachtig. Ook kunnen er twijfels bestaan over de juistheid van sommige opvattingen (b.v. de globale torsiemomentenvergelijking houdt geen rekening met het torsie-inklemmingsmoment op de eindkaders). Maar vooral komt de dubbele handicap van een handberekening naar voor die erin bestaat dat enerzijds het model vereenvoudigd wordt (zowat één drempelsteun om de twee kaders) waardoor terugrekenen naar de werkelijkheid bemoeilijkt wordt, en vooral dat anderzijds op deze manier het snel uittesten van variaties niet mogelijk is.

9.2. Sluisdeuren van Kallo

Deze deuren bestaan uit 19 kaders (kader 10 valt in de aslijn) met een onderlinge afstand die niet overal gelijk is maar meestal 2,86 m bedraagt. De totale deurlengte is 51,6 m. Ook hier is de bovenregel open. Dit is de eerste van de grote zeesluisdeuren waarbij het globale krachtenverloop volledig met een computer werd uitgerekend. Het daarbij gebruikte model is echter nog vrij eenvoudig. Er wordt wel uitgegaan van een ruimtelijke structuur (STRUDL programma), maar in het model worden enkel balken gehanteerd, dus geen plaelementen. Verder wordt slechts de halve deur gemodelleerd. Het model bestaat zodoende uit 213 knooppunten en 343 staven (kader 1 = 37 staven, elk gewoon kader = 28 staven, en langsstaven ter plaatse van de regels 1, 2, 5, 6 en de luchtkist). Bij één deurzijde worden al de knopen van het eindkader en al de drempelsteunen in de dwarse richting eenvoudig star opgelegd genomen (dus zonder veren), met uitzondering van de onderste hoekknoop van kader 1 (omdat die kan loskomen). Al de balken worden ingebracht met hun eigen karakteristieken, maar hierbij ontstaat natuurlijk de moeilijkheid dat men zich vooraf een idee moet vormen van de eigenschappen van de hoofdbalk (luchtkist) aangezien het model dit niet zelf kan doen omdat de platen niet zijn ingegeven. Deze hoofdbalk is ingevoerd als één lijnbalk, op het hart der werkelijke luchtkist (dus torsiecentrum op halve hoogte der luchtkist). Het buigingstraagheidsmoment wordt berekend op een doorsnede (met verstijvers) gaande van 2,25 m boven tot evenveel onder de luchtkist, dus over een deurhoogte van slechts 2 keer de luchtkisthoogte (dus 9 m), en wordt $I_b = 9,55 \text{ m}^4$ (er is ingevoerd $8,94 \text{ m}^4$). Het torsietraagheidsmoment, berekend zoals voor Zandvliet voor een eenvoudige koker van 8,4 m breed en 4,5 m hoog geeft bij een plaatdikte van 0,014 m: $I_t = 3,1 \text{ m}^4$, maar in de computerberekening is hier (zoals ook voor al de andere balken) een polair traagheidsmoment ingevoerd. Hiervoor wordt een waarde van $11,43 \text{ m}^4$ gehanteerd. Het is dus niet zomaar duidelijk hoe de torsiestijfheid is in rekening gebracht.

Dit computermodel heeft dus zijn beperkingen. De hydrostatische druk tenslotte (geval A: 5 t/m^2 , totaal 3657 ton; geval B: $4,5 \text{ t/m}^2$, totaal 4278 ton) wordt aangebracht op de verticale balken van elk kader.

De computer berekent alle verplaatsingen der knooppunten, alle staafkrachten en alle oplegreakties. Als resultaat vermelden we dat de drempel in totaal 18,83% opneemt van de gehele belasting in geval A, en 31,45% in geval B. Verder vallen vooral de grote vervormingen op: in geval B is de doorbuiging van kader 10/regel 1: 7,58 cm (dit is 1/681), wat én een grote vervorming van de hoofdbalk veronderstelt én een grote vervormbaarheid van de kaders zelf, gezien de drempelsteun star is opgelegd (doorbuiging van kader 10 is op halve luchtkisthoogte nog 4,14 cm).

Omdat het hier gaat over de eerste uitgebreide computerberekening van een sluisdeur willen we een verduidelijkende tekst van de berekenaars citeren, die bovenstaande moeilijkheden behandelt en tevens aantoonst dat de opbouw van zo'n computermodel niet altijd zomaar voor de hand ligt.

„De werkelijke deurstructuur moet voor het computermodel geïdealiseerd worden. Dit houdt het vertalen in van de werkelijkheid naar een model dat voor de computer handelbaar is (dit doen we ook bij handberekeningen), en dat toch de wezenlijke eigenschappen van de werkelijke structuur oordeelkundig behoudt.

Aangezien de deur behandeld werd als een ruimtevakwerk, betekende dit het reduceren van de structuur tot een netwerk van staven, en alhoewel de huidbeplating en langshuidverstijvingen niet in het model bijgenomen werden, werd hun invloed toch mede ingerekend via het bepalen van de karakteristieken van de opgebouwde liggers met dewelke ze verbonden zijn.

De effectief geassocieerde plaat is in het algemeen bepaald aan de hand van de Lloyd's Register of Shipping Rules. Deze effectief geassocieerde plaat, verbonden aan de verticale stijlen werd initieel konstant genomen over de hele deurhoogte en was gebaseerd op de waarde van het element met de grootste overspanning. Dit geschiedde omdat het als onredelijk werd geoordeeld, abrupte variaties in de effectief geassocieerde plaatbreedte te hebben ter plaatse van de knopen in een vrijwel continu element. Nochtans werd in een later stadium deze procedure gewijzigd toen met de bouwers discussies plaatsvonden met betrekking tot de spanningsniveau's in de plaat ter plaatse van korte elementen.

De karakteristieken voor buiging rond de as loodrecht op de huidbeplating werden artificieel hoog genomen om rekening te houden met de 'afschuivingsverbinding' die aanwezig is in de beplating en die de doorbuiging in deze richting beperkt. Dit was gerechtvaardigd aangezien zich geen last in dit vlak bevond.

Om de symmetrie te vrijwaren na het snijden ter plaatse van kader 10 werden de elementen van dit kader gehalveerd in hun karakteristieken.

De polaire inertiemomenten van de stijlen werden initieel berekend door sommatie van de momenten rond de overige hoofdasen, maar omwille van de hoge stijfheid van de huidbeplating werd een te hoge waarde bekomen. Dit resulteerde in een te groot torsiemoment geabsorbeerd door de stijlen ten koste van de horizontale regels van het kader. Grafieken van de momentendistributie in deze regels toonden een zaagpatroon met grote sprongen ter plaatse van de knopen. Lagere, meer realistische waarden, werden dan berekend, enkel rekening houdend met de torsieweerstand van de binnenflenzen van de stijlen rond de neutrale vezel en wanneer deze gesubstitueerd werden, verbeterde de momentendistributie.

De geïdealiseerde stijlen werden geplaatst in lijn met de huidbeplating. Dit was een compromis tussen de neutrale vezelpositie van de langsverstijvers enerzijds en van de kaderspanten anderzijds, aangezien sommige langsverstijvers ter plaatse van de langsliggers ingecalculceerd moesten worden.

De luchtkist vormt een stijve dooslijger en wordt genomen als hoofdlangsterkte element van de deur. De voorstelling van deze luchtkist in het model vereiste speciale aandacht. Het hoofdprobleem bestond in de verbinding van de dwarsraamspanten met de staven die de luchtkist voorstellen zodanig dat de relatieve positionering korrekt uitkwam. Aangezien de luchtkist in het model noch breedte noch hoogte bezit was het nodig diverse staven met zeer grote stijfheid te introduceren om de stijve schotten op ieder dwarsraam te simuleren voor verbinding van de dwarsramen met de luchtkiststaaf. Voor deze fiktieve staven werd geen spanningsoutput gevraagd. De geometrische eigenschappen van de luchtkist ten opzichte van buiging in het horizontaal vlak bevatten een zekere hoeveelheid geassocieerd huidplaatmateriaal. Rekening houdend met de luchtkist als hoofdlangdrager enerzijds en als ondersteunend element voor de totale hoogte van de deur anderzijds werd krachtens de Lloyd's Rules een geassocieerde plaatbreedte bekomen van 11,6 m. Bij het afzonderlijk beschouwen van regel 3 en regel 4 werd respectieve-

lijk 4,9 m en 3,6 m bekomen, gevende een totaal van 8,5 m. Daarom werd als compromis 9,0 m gekozen of 2 maal de hoogte van de luchtkist. Deze subjectief gekozen waarde is aan de veilige kant. Voor de afschuiving in het horizontaal vlak werd de totale sectie van top- en bodemvlakken plus de effectieve afschuifsectie van de toegangstunnel voldoende geacht. Voor buiging en afschuiving in het vertikaal vlak werden de invloed van de huidbeplating en verstijvers in rekening genomen. Aangezien de deur grotendeels een open doos is was het enigszins moeilijk de torsiekarakteristieken nauwkeurig in STRUDL in te voeren. Approximatieve methoden werden gebruikt die wederom aan de veilige kant werden genomen. De torsie-energie van de luchtkist (en deur) werd berekend door sommeren van de buigingstraagheidsmomenten van de kist (rond de verticale as) en de horizontale inertie van de luchtkist alleen (dit wil zeggen tussen de regels 3 en 4 alleen). Alhoewel deze methode normaal op gesloten dooskonstrukties van toepassing is, werd aldus door een bewust onderschatten van de torsiestijfheid van de deur via de lage inertiewaarde waarmee werd gerekend (? , PD), belasting overgebracht op de dwarsramen en eveneens de drempelreacties verhoogd. Aangezien de dwarsramen hierdoor slechts weinig meer belast werden blijkt dat wanneer de deur torsioneel stijver is dan werd aangenomen, de belastingen op de kaders minder worden. Dit betekent uiteraard dat het torsiemoment in de deur zal stijgen maar de waarden tot dusver bekomen zijn zo laag dat het duidelijk blijkt dat hiermee geen moeilijkheden te verwachten zijn. De variabele secties van de luchtkist naar de einden toe werden vastgesteld met behulp van variabele staven uit drie segmenten elk.

Algemeen, doorheen de ganse structuur, werd geen rekening gehouden met knieën. Bij interpretatie van de resultaten moet vanzelfsprekend daarmee wel rekening gehouden worden."

Nog twee korte citaten uit deze tekst zijn belangrijk, de eerste met het oog op de volgende modellen, het tweede ter onderlijning van de voordelen van een computerberekening, ondanks de moeilijkheden daaraan verbonden.

„Tentatief is het nut onderzocht geworden om plaalementen in de geïdealiseerde structuur op te nemen, maar er werd gevonden dat de vergrootte precisie verwaarloosbaar klein was ten opzichte van de bijkomende ingewikkeldheid van de analyse."

„De computeroutput is flexibel en laat bijvoorbeeld toe tussentijds informatie te verkrijgen omtrent de status van de diverse fasen van de analyse ge-

urende uitvoering. Dit laat een geschikte controle toe zodanig dat wijzigingen kunnen ingevoerd worden zonder daarom het ganse probleem volledig opnieuw te moeten behandelen."

9.3. Zeebrugge — landwaartse deuren

Deze deuren die gelijkaardig zijn aan die van Zandvliet (21 kaders op afstanden van 2,93 m, dus totale lengte 58,6 m), zijn berekend met behulp van een computermodel dat grotendeels gelijkaardig is als voor de deuren van Kallo. Er werd wel een moderner NASTRAN programma aangewend. Ook hier zijn enkel balkelementen ingevoerd, voor een halve deurlengte, met starre drempelsteunen per kader. Elk gewoon kader omvat 38 balkelementen; het hele model bestaat uit ongeveer 370 knopen en 580 balken. In tegenstelling tot Kallo is hier de luchtkist gemodelleerd door middel van 3 balken, één in de middellijn en één op elke huidplaat. De horizontale buigingsstijfheid wordt derhalve weergegeven door de balk op de middellijn de stijfheid te geven van luchtkisttop en -bodem ($4,02 \text{ m}^4$), en elke balk op de huidplaat een sectie te geven van de huidplaat (met verstijvers) van een hoogte van 2,2 m boven tot evenveel onder de luchtkist. Dit komt er dus op neer als buigingsstijfheid van de luchtkist een meewerkende plaat te kiezen van 8,4 m hoog, dus zoals bij Kallo de dubbele luchtkisthoogte. Dit geeft $I_b = 13,82 \text{ m}^4$. Als torsiestijfheid is aan de centrale luchtkistbalk een waarde toegekend berekend volgens de klassieke formule op basis van een rechthoekig kokerprofiel (luchtkist) van 4,2 m hoog en 9,9 m breed, waaruit $I_t = 3,25 \text{ m}^4$.

Er zijn twee belastingsgevallen beschouwd:

- A1 hoogwater, met drukken van $3,59 \text{ t/m}^2$, en met golfslag tegen de deur; dit geeft een totale kracht van 5320 ton (waarvan 1017 t vanwege de golfslag);
- A3 laagwater, met drukken van $4,61 \text{ t/m}^2$, zonder golfslag; dit geeft een totale kracht van 4450 ton.

In geval A1 gaat 1330 ton naar de drempel, dit is 25%; met een maximale drempelreactie in het deurmidden van 90 ton. In geval A3 gaat 1520 ton naar de drempel, dit is 34%; met een maximale drempelreactie in het deurmidden van 96 ton. Ook hier kunnen de benedenhoeken der eindkaders loskomen.

De grootste vervormingen doen zich voor op het middenkader maar op verschillende hoogte naargelang het belastingsgeval (plaat 22):

- geval A1: 7,34 cm ter hoogte van regel 1;
- geval A3: 3,18 cm ter hoogte van regel 5.

Merken we tenslotte op dat op basis van de resultaten van de eerste computerberekening de vervolgberekeningen aantoonde dat een aantal wijzigingen noodzakelijk waren. Tengevolge hiervan werd de computerberekening hernomen en dus ook de vervolgberekening terug aangepast.

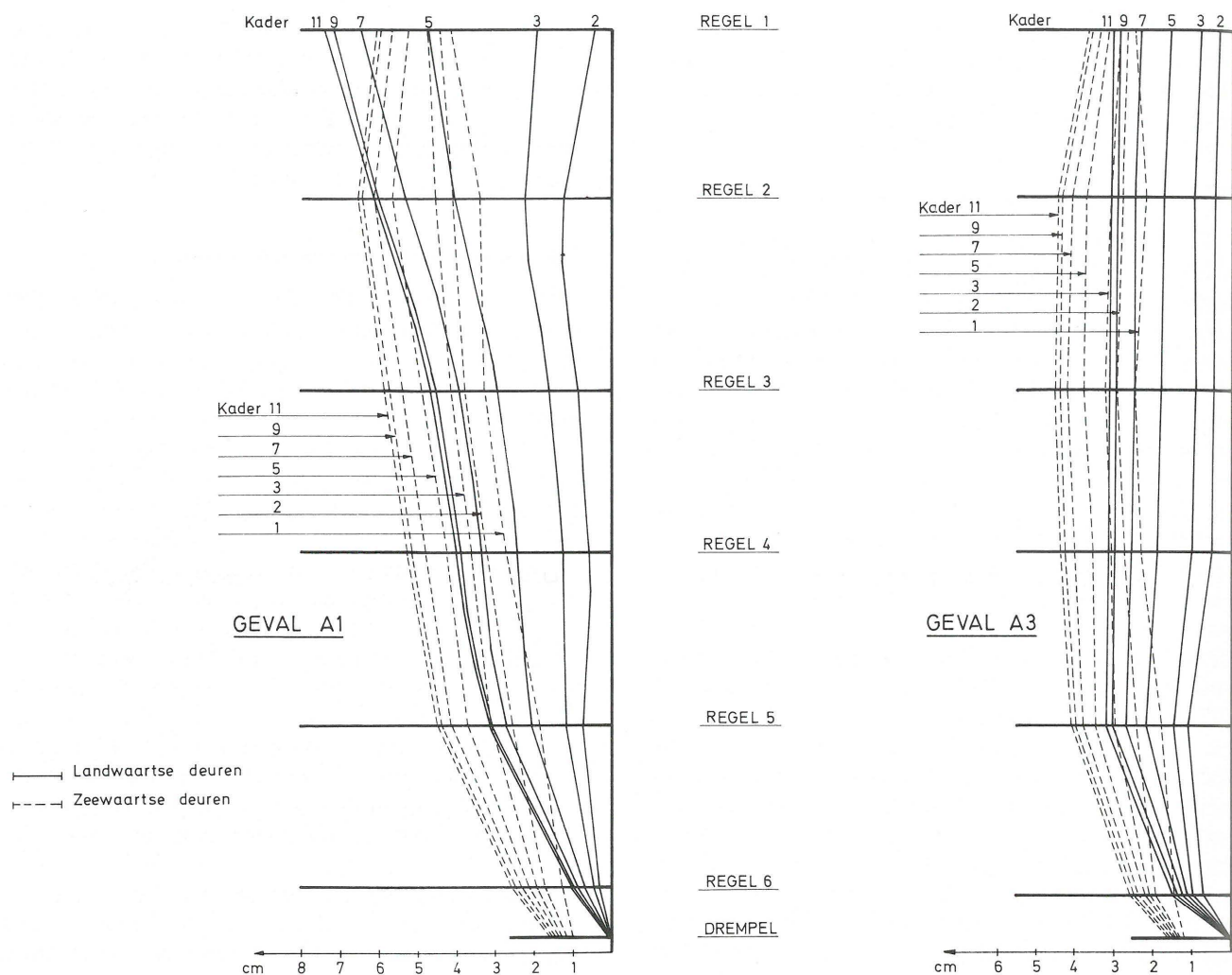
9.4. Zeebrugge — zeewaartse deuren

Daar waar oorspronkelijk voor de sluis van Zeebrugge vier identieke deuren voorzien waren, moest men daarvan terugkomen omdat de zeewaartse deuren ook tijdens hun beweging een vrij grote golfslag moeten trotseren.

Om hieraan te weerstaan werd aan de deur een geleidingssysteem toegevoegd dat tijdens het bewegen de deur in axiale positie geleidt in de boven- en onderhoek van kader 1 en in de onderhoek van kader 21. Om de enige dan nog vrije hoek (kader 21, boven) in zijn beweging te beperken diende de torsiestijfheid van de deur opgevoerd te worden. Dit werd bereikt door regel 1 over de ganse deurlengte dicht te maken. Daarenboven werden al de deuraanslagen (eindkaders en drempel) voorzien van een continu rubberen profiel om de dynamische golfsollicitaties bij gesloten deur op te vangen. Tevens werden enkele andere aanpassingen aangebracht.

Omdat men hier expliciet de bewegende deur onder golfslag wilde bestuderen was een computermodel van de hele deurlengte vereist; immers in dit geval vertonen de randvoorwaarden geen symmetrie meer. We zullen hier echter deze belastingsgevallen niet bespreken. Door heel de deur te modelleren en door hierbij ook de platen als dusdanig in het model op te nemen, wat aangewezen leek om niet vooraf de buigings- en torsiekarakteristieken der hoofdlijger te moeten inschatten, wordt het model uiteraard veel complexer. Het NASTRAN programma behandelt alzo 1680 knooppunten (met elk 6 vrijheidsgraden, dus in totaal zowat 10 000 vrijheidsgraden), 1946 plaalementen, 1594 balkelementen en 763 staaelementen. Ervan uitgaande dat de deureinden en de middenzone de meest kritische delen zijn, werden daar de kaderbalken ook ingevoerd als platen voor het lijf en balken voor de flenzen. De plaalementen omvatten dus niet alleen de huid, de volle regels 1, 3 en 4, maar ook een aantal lijfplaten van balken, ook de dwarsschotten in de luchtkist, de luchtkisttunnel en toegangsschachten, en de uitkragende arm. Zo omvat kader 1 als meest complexe kader zowat 106 balken, 44 platen en 20 staaelementen.

De rubberprofielen der aanslagen zijn 11 cm dik en geven een indrukkskurve die zowat exponentieel



Plaat 22. — Zeesluis Zeebrugge. Vervormingen kaders sluisdeuren.

verloopt met als referentiepunt een indrukking van 32,5 mm onder een last van 100 ton per strekkende meter. Voor de drempelsteunen, dus voor een kaderafstand van 2,93 m geeft dit voor 100 ton 11,1 mm, dit is zwaar 1,5 keer zo stijf als de rubberelementen van de Berendrechtssluis, met dit grote verschil dat het hier te Zeebrugge gaat over een continu aanslag die zelf over heel de deurlengte gesteund wordt door een vrij zwaar horizontaal stalen profiel. In het model zijn deze veren beschouwd met een lineair verloop. Over heel de drempelaanslag en over heel de hoogte der eindkaders is het model dus verend afgesteund. De belastingsgevallen voor een gesloten deur zijn dezelfde als voor de landwaartse deuren.

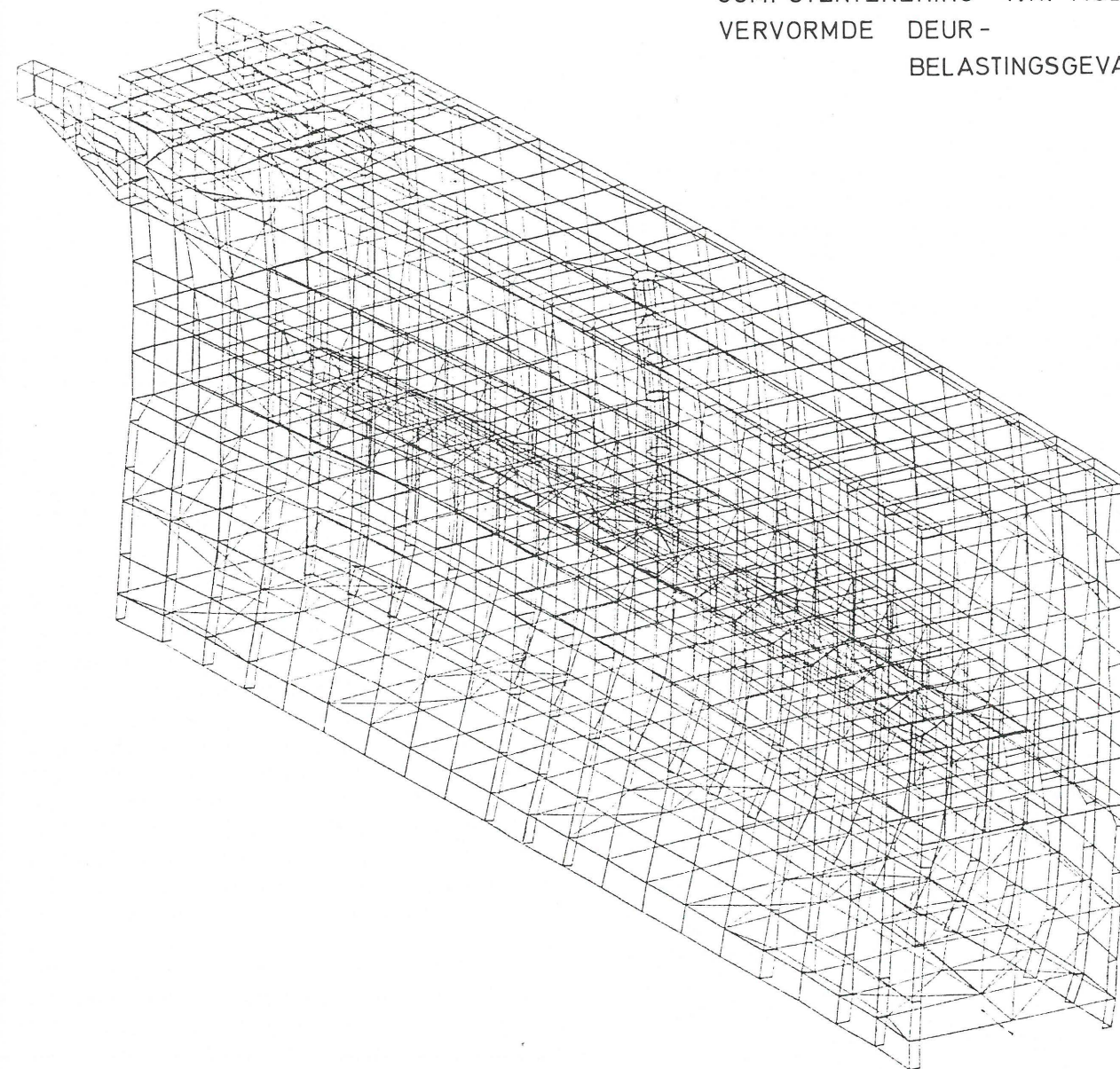
Als resultaten van de computerberekening vermelden we:

— geval A1: totale drempelreactie = 1440 ton, dit is 27%, de maximale reactie daarbij in het deur-

midden is 97,6 ton wat gezien de rubberen aanslag neerkomt op $\pm 33,3$ ton per strekkende meter. De grootste vervorming bedraagt 6,5 cm (middenkader, regel 2), maar hier is inbegrepen $\pm 2,3$ cm indrukking van de rubberen profielen op de eindkaders, zodat de deurvervorming zelf dus $\pm 4,2$ cm bedraagt;

— geval A3: totale drempelreactie = 1632 ton, dit is 37%, de maximale reactie daarbij in het deurmidden is 101,7 ton wat gezien de rubberen aanslag neerkomt op $\pm 34,7$ ton per strekkende meter. De grootste vervorming bedraagt 4,6 cm (middenkader, tussen regel 2 en 3), maar hier is inbegrepen $\pm 1,7$ cm indrukking van de rubberen profielen op de eindkaders, zodat de deurvervorming zelf $\pm 2,9$ cm bedraagt.

Plaat 22 vergelijkt deze vervormingen met die van de landwaartse deuren. Ondanks het feit dat tussen



Plaat 23. — Zeesluis Zeebrugge. Zeewaartse sluisdeur.

beide oplossingen in de drempelreacties geen groot verschil is, wijst de vervorming der kaders toch wel op verschillen.

We kunnen ons niet van de indruk ontdoen dat de merklijke vermindering van de vervormingen van de stalen structuur zelf niet enkel te wijten is aan het veel groter torsietraagheidsmoment, maar vooral aan het groter buigingstraagheidsmoment, dat nu verkregen wordt door de plaalementen in het computermodel in te voeren. Dit zou er op kunnen wijzen dat de buigingsstijfheid die bij de vorige sluisdeuren werd ingegeven op basis van bepaalde rekenregels (Lloyd's

Register Rules of DIN norm), in deze gevallen onderschat werd, of anders gezegd dat in deze gevallen de meewerkende plaatbreedte te klein genomen werd.

Anderzijds kan de invloed van de grotere torsiestijfheid ook afnemen door kader 1 over de hele hoogte op elastische rubbers op te leggen, wat dus al aan dit kader een zekere hoekverdraaiing toelaat.

Tenslotte geeft plaat 23 een idee van hoe de computer de vervormde deur ziet (bij belastingsgeval A3).

10. BEREKENINGEN VOLGEND OP DE COMPUTERANALYSE

Er is hier al herhaaldelijk op gewezen dat heel de computerberekening, zoals die in bovenstaande paragrafen besproken werd, slechts een eerste stap is in de gehele berekening van een dergelijke sluisdeur. Volledigheidshalve zullen we nu de vervolgberekeningen, zoals die voor de Berendrechtssluisdeuren zijn opgevat, in volgelvlucht doornemen met als enig oogmerk een idee te geven van wat deze omvatten.

Na de hoofdstukken die de idealisering tot het computermodel omvatten, volgen drie omvangrijke delen die achtereenvolgend de plaatberekeningen, de balkberekeningen en de knooppuntenberekeningen behandelen.

In het deel „plaatberekeningen” worden vooreerst de spanningen berekend die in de plaatvelden en in de verstijvers optreden onder invloed van de lokale hydrostatische drukken. Dit omvat dus bijvoorbeeld zowel de verticale en de horizontale spanningen in de plaalementen als de horizontale spanningen in de verstijvers. Deze moeten dan gekombineerd worden met de verticale en horizontale plaatspanningen van uit het computermodel tot resulterende spanningen. Deze berekening moet gebeuren voor alle significante plaat- en verstijverelementen van de beide huidplaten, van de regels 1, 3 en 4, van de dwarsschotten (en eindschotten) in de luchtkist, van de langschotten in de luchtkist, van de luchtkisttunnel en de toegangschachten, en van de veerplaat onder regel 6 (de laatste is niet in het computermodel opgenomen). Bij de luchtkistberekening dient anderzijds ook rekening gehouden te worden met het geval dat door middel van perslucht een ballastkompartment wordt leeggeblazen. Vervolgens dient het uitbuilen der plaalementen gecontroleerd te worden. Verder worden in dit deel een aantal structuren afzonderlijk berekend, zoals het rijdek (regel 1) onder invloed van een belasting door de wielen van een kraanwagen, de uitkragende arm, de hefconsoles met omliggende structuur waaraan de deur in het droge kan opgehangen worden, en de bovenkant van kader 24 bij botsen van de deur tegen de deurnis. Tenslotte wordt uitgebreid aandacht besteed aan de berekening van de lussen van al deze plaalementen en verstijvers, en aan de dimensionering en lasberekening van alle knieplaten.

In het deel „balkberekeningen” wordt vooreerst voor die gevallen die door de computer als mogelijk problematisch gesignaleerd werden de gekombineerde spanning (vanwege de verschillende krachtwerkingen) berekend. Anderzijds wordt voor alle drukstaven de

knikberekening uitgevoerd. Als afzonderlijke detailberekeningen volgen dan de drempeluitkragingen (kaders onder regel 6), de dokkielen waarop de deur in het droge kan geplaatst worden, en de deurstructuur rond de onderrolwagens.

In het deel „knooppuntenberekeningen” worden in detail alle knooppunten (dit is samenlopen van balken onderling of van balken met schotten) berekend, met inbegrip van alle knieplaten en van alle lasverbindingen.

De mechanische onderdelen van de horizontale geleidingswielen van de uitkragende arm (assen, bussen, veren, enz.) worden in een afzonderlijk deel behandeld.

Vervolgens wordt in het deel „stabiliteit” heel de berekening gemaakt van de afgewerkte deur als schip, dit wil zeggen het drijven van de deur, de operaties van afzinken van de deur op de onderrolwagen en omgekeerd het opvloten van de deur naar de steunwagentjes, enz. Dit houdt in de berekening van de ballastverdeling en de ballastmanipulatie in de verschillende gevallen, met inbegrip van een aantal lekberekeningen met ballast herverdeling.

Niet tot de eigenlijke deur behoren dan nog de berekeningen van de structuur der onder- en bovenrolwagens en der steunwagentjes, met inbegrip van al hun mechanische onderdelen. Ook de pendels en trekkers (verbindingsstaven tussen de deur en de bovenrolwagens), die typisch mechanische constructies zijn, worden in detail bestudeerd.

Tenslotte is er nog de afsluitcaisson waarmee een deurkamer kan afgesloten worden van de sluis, die een heel eigen berekening vergt met opnieuw een rekenen naar de globale spanningen, de lokale spanningen in platen en verstijvers, combinatie van beide, alle detailberekeningen en lasberekeningen, en stabiliteitsberekening voor drijven en kantelen.

Meerdere van al deze berekeningen werden uitgevoerd met ondersteuning door een lokale computerberekening. Het geheel van deze vervolgberekeningen omvat meerdere honderden bladzijden.

Los van en voorafgaandelijk aan heel deze berekening werd ook een studie uitgevoerd om te weten of een dergelijke sluisdeur moet berekend worden op vermoeiing. De deur is immers steeds onderhevig aan de getijdewerking, die afwisselend in de ene en in de andere richting optreedt. Anderzijds liggen de aangenomen waarden voor de beide beschouwde belastinggevallen zeer extreem. Rekening houdend met

deze en andere beschouwingen werd berekend dat men moest uitgaan van zowat 50 000 belastingscycli over de hele levensduur van de sluisdeur, zodat er nog niet echt sprake kan zijn van een verplichte vermoeiingsberekening. Toch werden met het oog op deze problematiek de hoge kerfslaggroepen vermeden (bij het staal AE 355), en werd speciale aandacht besteed aan de opvatting, berekening, uitvoering en controle van de lussen, vooral onder regel 5. Ook werden de toegelaten spanningen in enkele lussen licht gereduceerd.

11. METINGEN OP DE SLUISDEUR VAN BERENDRECHT

11.1. Doel, opzet en moeilijkheden

Zoals hierboven aangetoond werden voor al de recente zeesluisdeuren uitgebreide berekeningen gemaakt. Nochtans werd nooit in situ nagegaan in hoeverre deze berekeningen met de werkelijkheid overeenstemmen. Metingen bij proefbelasting zoals dat gewoonlijk voor bruggen gebeurt, worden op de sluisdeuren niet toegepast. Voor de Berendrechtssluisdeuren bestaat nu echter voor het eerst die mogelijkheid wel. Derhalve werd hier onderzocht in welke mate het mogelijk zou zijn de resultaten der berekening te toetsen aan metingen in situ.

Een eerste daarbij opduikende moeilijkheid is dat de in de berekening beschouwde getijdeniveau's in de praktijk slechts uiterst zelden voorkomen, en dat zoals we gezien hebben, door het gedrag der deuren en door de noodzakelijke combinatie van allerlei globale en lokale fenomenen de uiteindelijke resultaten niet zomaar lineair interpoleerbaar zijn naar tussenliggende belastinggevallen. Daarom zou ofwel de deurberekening tenminste grofweg moeten hermaakt worden voor meer reële getijdegevallen, ofwel moet de belasting kunstmatig hoger opgevoerd worden. Er zal onderzocht moeten worden of deze laatste optie mogelijk is door in een sluisdeur de beide deuren te sluiten en dan de kleine ruimte tussen beide deuren meer te vullen of meer leeg te maken om alzo de typebelastinggevallen te veroorzaken.

Een tweede moeilijkheid ligt in wat en vooral hoe er moet gemeten worden om resultaten te bekomen die betrouwbaar zijn en die rechtstreeks vergelijkbaar zijn met de berekende waarden. Het enige meetstelsel dat voorheen reeds voorzien was is een drukdoos die de mogelijkheid geeft om in de pendels de verticale ophangkrachten van de deur aan de bovenrolwagens te meten. Een hele reeks andere meetstelsels moet dus uitgedacht worden.

11.2. Meetpunten en meetstelsels

Vooreerst dienen bij elk meetgeval vanzelfsprekend de waterniveaus aan beide zijden van de deur opgetekend te worden. Dit levert geen moeilijkheden op.

Het meten van de vervormingen in een gesloten waterkerende deur is al heel wat moeilijker. Toch lijkt dit noodzakelijk in een meetcampagne. Op enkele kaders en ter plaatse van al de regels moeten de vervormingen opgetekend worden, dus ook onder water. Daartoe zou men als de deur in het sas staat op de kaders een afgesloten verticale buis aanbrengen van waarin men na het definiëren van een loodlijn de afstanden tot de vervormde deur kan meten.

Vervolgens wenst men bij een gesloten waterkerende deur al de oplegreacties te kennen, dus zowel het verloop der reacties op de verticale aanslagen der eindkaders als de drempelreacties. Daartoe werden de houten aanslagbalken van het eindkader doorboord om er cilindrische sensoren uitgerust met rekstrookjes in aan te brengen. Na ijking van een dergelijke houten balk met aangebrachte sensoren, hoopt men een voldoende reële waarde te krijgen van deze verticale drukverdeling. Voor de drempelreacties kent men van elk rubberelement de krachten-indrukingskurve vanuit laboratoriumtesten op deze rubbers. Hieruit kan de reactiekracht afgeleid worden als men de indrukking meet en deze kan geregistreerd worden door middel van LVDT vervormingsmeters.

Om een beter inzicht te krijgen in het volledig gedrag van de deur is het verder aangewezen op een beperkt aantal oordeelkundig gekozen plaatsen de spanningen te meten door middel van rekstrookjes. Om zo weinig mogelijk last te hebben van de combinatie van allerlei spanningen is het best deze metingen te doen op de vrije balken, en als men specifiek de verdeling van de kracht van de hoofdbalk over de verschillende regels wilt kennen lijken de diagonaalbalken daarvoor het meest aangewezen.

Tegelijkertijd met al deze metingen, die het werkelijk gedrag der deur moeten vergelijken met het berekende gedrag, wenst men de krachten in de verticale pendels te registreren, wat geen moeilijkheden oplevert omdat daar zoals gezegd een meetstelsel met drukdozen voor voorzien was. Wil men echter alle verticale krachten kennen dan moeten dus ook de reacties op de onderrolwagens gemeten worden. Dit kan gebeuren door de hoofdbalken van de onderrolwagens te voorzien van rekstrookjes en heel deze aldus uitgeruste wagen te ijken in het laboratorium. Als deze metingen goed verlopen kan dit bijdragen tot een beter inzicht in de moeilijke vraagstukken hoe bij een bewegende deur die toch gesolliciteerd zou worden door een dwarse kracht (wind, golfslag, klein

niveaueverschil, dichtheidsstromen, enz.), de verticale reacties zich verdelen, en hoe bij een gesloten waterkerende deur de reacties worden opgenomen. In dit laatste geval toont de globale berekening immers een kleine verticale vervorming tussen de beide starre opleggingspunten op de onderrolwagen. In werkelijkheid zou dit betekenen dat de ene steun loskomt, waarbij alle daar afgegeven reacties op de andere steun terecht komen, tenzij dat door wrijving een deel van het dienstgewicht op de aanslaghouten der verticale eindkaders wordt overgedragen.

Tenslotte zullen rechtstreeks de krachten gemeten worden in de horizontale trekkers en in de horizontale buffers, respectievelijk door rekstrookjes en vervormingsmetingen, teneinde de krachten te kennen in beide horizontale verbindingselementen tussen de deur en de bovenrolwagen. Dit leert ons met welke reële krachten de deur bewogen wordt.

11.3. Stand van zaken en verwachtingen

Al deze metingen zijn bestudeerd en gepland, maar op het ogenblik dat deze regels geschreven worden zijn ze nog niet begonnen. Over het verloop en over de resultaten kan heden dus nog niets gezegd worden. Er kan enkel op gewezen worden dat dit meetprogramma voortbouwt op een reeks metingen die gedaan werden op de sluisdeuren van de Zandvlietsluis met het oog op de controle van deze deuren bij het met explosieven vernietigen van de toegangskaaimeer voor deze sluis voor de bouw van de Berendrechtsluis. Daar werd bijvoorbeeld de duurzaamheid onder water van rekstrookjes en hun bekabeling uitgetest met goed resultaat. Het meetprogramma op de Berendrechtdeur is echter veel omvangrijker. De ijking van de verschillende metingen, de bekabeling, en vooral misschien de interpretatie van de geregistreerde waarden kan nog voor heel wat moeilijkheden zorgen.

Het zal ook duidelijk zijn dat zo'n meetprogramma enkel kan bij een sluis in aanbouw waar men om andere redenen toch nog de deur moet droogzetten en waar nog geen scheepvaartverkeer aanwezig is. Anderzijds blijft dit meetprogramma een vrij dure aangelegenheid, die echter moet leiden tot besluiten die voor alle verdere gelijkaardige waterbouwkundige constructies van belang kunnen zijn.

12. BESLUITEN

Zonder op de details in te gaan waarvan de meeste besluiten al in vorige paragrafen geformuleerd werden, zullen we hier slechts enkele grote lijnen aanhalen.

Een groot drie-dimensionaal computermodel op basis van oordeelkundig gekozen eindige elementen (balken en platen) dat de sluisdeur goed weergeeft is een handig instrument om het globale gedrag van de deur te bepalen. Het gebruik van plaalementen voorkomt het zelf voorafgaandelijk inschatten van de karakteristieken van de hoofdbalk en lijkt derhalve meer aangewezen te zijn dan een louter uit balken opgebouwd model. Maar dit doet tevens de complexiteit van het model toenemen en dus ook de moeilijkheden die bij elke idealisatie optreden. De computerinput wordt vrij omvangrijk en veronderstelt zelf een hele reeks voorberekeningen (zoals de karakteristieken van alle kaderbalken, waar het probleem blijft bestaan van de geassocieerde plaatbreedte voor de aan de huidplaat bevestigde kaderbalken). Ook de idealisatie zelf is niet steeds voor de hand liggend; het vergt heel wat ervaring zowel in dit soort computerberekeningen als in het gedrag van dergelijke sluisdeuren, om een model op te bouwen dat voldoende de werkelijkheid weergeeft en dat toch nog hanteerbaar is. De keuze van het type eindige elementen, de fijnheid van het mazennet, de mogelijke invloed van allerlei deelconstructies (uitkragende arm, schikkingen rond de onderrolwagen, enz.) die kunnen bepalend zijn of een hele dan wel een halve deur moet beschouwd worden, de invloed van de dwarschotten in de luchtkist, enz. zijn allemaal vragen die bij de idealisatie de kop opsteken. Ieder model is aldus een compromis tussen de betrachting de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen en het streven naar een zo eenvoudig mogelijk model.

Ook de computeroutput levert moeilijkheden op in die zin dat niet enkel door de enorme hoeveelheid geleverde resultaten de mogelijkheid tot vergissingen toeneemt, maar mogelijkerwijze ook door de interpretatie van sommige resultaten.

Om een goed groot model op te bouwen en te hanteren moet men dus vertrouwd zijn met dit soort computerberekeningen, moet men vertrouwd zijn met dit type sluisdeuren, en moet men zeer secuur tewerk gaan.

Een klein computermodel als vlak balkenroosterwerk is veel hanteerbaarder, maar bevat zoals uitvoerig aangetoond werd heel wat onzekerheden. De mogelijkheid bestaat om dit klein model voldoende betrouwbaar te maken, maar dan wel als model achteraf, dit wil zeggen op basis van de resultaten van een groot model, waardoor het heel wat van zijn waarde verliest. Wil men bij het voorontwerp werken op basis van een dergelijk klein model, wat zeker aangewezen is, dan weet men dat in het beste geval de resultaten slechts geïnterpreteerd mogen worden als

ordegroottes, die dan nog zeer voorzichtig moeten beoordeeld worden.

In principe is er geen verschil tussen een klein model en een handberekening. Het onmiskenbare voordeel van een klein computermodel ligt in de uitnodigende mogelijkheid om varianten te gaan bestuderen.

De gevolgde procedure bij het tot stand komen van de Belgische zeesluisdeuren is meestal als volgt: de Administratie maakt een voorontwerp dat op basis van een soort klein model en soms (Berendrechtsluisdeuren) zelfs een semi-groot model voorzien wordt van nagenoeg alle maten, afmetingen, plaatdiktes en profielkeuzen (maar b.v. geen lasberekeningen) en ook een aantal details; de opdracht van de aanneming omvat een volledige berekening met inbegrip van een groot model, alle volgende berekeningen en alle details, op basis van het ontwerp van de Administratie. Deze werkwijze brengt mee dat de definitieve berekening (op basis van het groot model) enkel een controleberekening is die niet streeft naar het zoeken van betere oplossingen en zeker niet naar optimalisatie. Deze betrachtingen zijn wel aanwezig in het ontwerp stadium door de Administratie maar daar zijn helaas gewoonlijk de mogelijkheden tot uitgebreide studies eerder beperkt.

Men moet zich trouwens afvragen in hoeverre het streven naar optimalisatie zin heeft voor dergelijke sluisdeuren. Optimalisatie betekent dan het zoeken naar de beste oplossing voor de geringste kost. Nu zijn om te beginnen de kosten niet eenvoudig afhankelijk van het gewicht maar speelt de ingewikkeldheid van de constructie ook een rol. Daarnaast moeten de kosten globaal bekeken worden en dienen dus alle elementen te omvatten zoals het gemak van schilderen, de latere herstellingen, enz. Juist met het oog op deze beschouwingen is er een evolutie vast te stellen die over heel de sluisdeurlengte alle plaatdikten en alle kaders gelijk maakt, waar dit volgens de berekening niet zou moeten. Verder is een sluisdeur voor een grote zeesluis geen serieprodukt. Alhoewel België het land is dat ter wereld over het meeste grote zeesluizen beschikt, met vijf zeesluizen van na de tweede oorlog, vergt ieder geval een nieuwe studie. Hierbij kan men wel kwalitatief voortbouwen op de opgedane ervaringen, maar één grote optimalisatiestudie is hier ook niet mogelijk. Tenslotte wordt ook op het theoretische vlak een optimalisatie bemoeilijkt door het feit dat zoals gezegd de uiteindelijke resultaten van de berekening, de combinaties omvatten van allerlei fenomenen (groot model en vervolgberekeningen), waarbij een wijziging van het ene onmiddellijk invloed kan hebben op het andere, en door het feit dat het aantal variabelen in de constructie zeer groot

is, zodat een optimalisatiestudie enorme vormen zou aannemen. Als men bedenkt dat bijvoorbeeld voor de Berendrechtdeuren de voorstudie al meer dan een jaar in beslag genomen heeft en de definitieve berekening ook zoiets, kan men zich een beeld vormen van wat een werkelijke optimalisatie zou omvatten.

Daar waar een optimalisatie dus niet kan en ook niet moet, is een grondige studie van elk geval afzonderlijk zeker wel verantwoord. Maar een dergelijke berekening is tijdrovend en kostelijk, en daartegenover moet dus iets staan. In het stadium van het ontwerpen is dat een gewichtsvermindering (zelfs zonder echte optimalisatie) door een betere en meer eenvoudige conceptie van de structuur. Het voorbeeld hiervan zijn de Berendrechtdeuren waar een vrij grondige voorstudie mogelijk was met als resultaat dat deze deuren voor grotere afmetingen relatief heel wat lichter zijn dan deze van de Zandvlietsluis en dat de constructie op meerdere punten vereenvoudigd is. Ook in het stadium van de definitieve berekening is een grondige studie gewettigd, omdat dit de enige manier is om met vrij grote nauwkeurigheid de gekozen schikkingen te verantwoorden en alles in detail te kunnen bestuderen met inbegrip van de instabiliteitscontroles, de knieën, de lassen, enz., wat ook leidt tot gewichtsvermindering en tot een beter inschatten van de veiligheids.

Tenslotte moet gewezen worden op het belang van de metingen die in situ op de Berendrechtdeuren gepland zijn. Tot op heden ontbrak inderdaad elke toetsing van welke berekeningsmethode dan ook aan de werkelijkheid. Als de resultaten van deze metingen bevredigend zijn, kunnen hieruit waarschijnlijk belangrijke conclusies getrokken worden aangaande de validiteit der berekeningen. Het zou ten dele een oplossing kunnen betekenen voor de problemen die nu steeds bestaan in de idealisatie tot computermodel van deze sluisdeuren, waaruit besluiten kunnen getrokken worden die ook op andere structuren (kleinere sluisdeuren, stuwten, enz.) kunnen van toepassing zijn. Deze meetresultaten zouden dus als referentiepunt kunnen dienen voor de hele studie zoals die hierboven beschreven is, maar in afwachting van deze resultaten blijft dit toekomstmuziek.

INHOUD (deel 2)

1. INLEIDING	52
2. GLOBAAL MODEL EN RANDVOORWAARDEN	52
2.1. Model van de sluisdeur	52
2.2. Randvoorwaarden der verticale eindkaders (Y-richting)	54
2.3. Randvoorwaarden der horizontale drempelaanslag (Y-richting)	54
2.4. Andere randvoorwaarden	55

3. INGEVOERDE BELASTING OP DE SLUISDEUR . . .	55	6.4.2. Vergelijking klein en groot model	79
3.1. Belasting in de Y-richting (horizontaal dwars op de deur)	55	6.4.3. Besluit klein model	80
3.2. Belasting in de X-richting (horizontaal langs op de deur)	57	7. VOORONTWERPBEREKENINGEN	80
3.3. Belasting in de Z-richting (vertikaal op de deur)	57	8. VARIANTEN	82
4. OPLEGREAKTIES	57	8.1. Inleiding	82
4.1. Reacties der verticale eindkaders	57	8.2. Variatie van het torsietraagheidsmoment van de hoofdbalk	82
4.2. Reacties der drempelaanslagen	61	8.3. Variatie van de ligging van het torsiecentrum van de hoofdbalk	83
4.3. Vertikale reacties	61	8.4. Variatie van de veerstijfheden der drempelaanslagen	83
4.4. Andere reacties	61	8.5. Variatie van het buigingstraagheidsmoment van de hoofdbalk	84
4.5. Bespreking bij deze reacties	61	8.6. Commentaar	84
5. GLOBALE VERVORMINGEN	62	8.7. Invloed van een vreemd voorwerp tussen de drempelaanslag	84
6. GLOBAAL KRACHTENVERLOOP	62	8.8. Open regel 1	85
6.1. Opzet van het onderzoek en type van „klein model”	62	8.9. Andere varianten	86
6.2. Verloop van de opbouw van het klein model	66	9. GLOBALE BEREKENINGEN VAN DE VROEGERE SLUISDEUREN	86
6.2.1. Bepalen hoofdbalk	66	9.1. Sluisdeuren van Zandvliet	86
6.2.2. Randvoorwaarden	73	9.2. Sluisdeuren van Kallo	87
6.2.3. Correctie voor dwarskrachtvervorming	74	9.3. Zeebrugge — landwaartse sluisdeuren	89
6.2.4. Andere karakteristieken	74	9.4. Zeebrugge — zeewaartse sluisdeuren	89
6.2.5. Belastingen	74	10. BEREKENINGEN VOLGEND OP DE COMPUTER-ANALYSE	92
6.3. Resultaten klein model en algemeen krachtenverloop	74	11. METINGEN OP DE SLUISDEUR VAN BERENDRECHT	93
6.3.1. Overzicht klein model	74	11.1. Doel, opzet en moeilijkheden	93
6.3.2. Drempelreacties	74	11.2. Meetpunten en meetsystemen	93
6.3.3. Vervormingen	75	11.3. Stand van zaken en verwachtingen	93
6.3.4. Krachtenverloop	75	12. BESLUITEN	93
6.3.5. Reacties op eindkader	79		
6.3.6. Schuifkrachten	79		
6.4. Beoordeling en besluit over het klein model	79		
6.4.1. Wijzigingen aan klein model	79		

RÉSUMÉ :

LES PORTES D'ECLUSES MARITIMES BELGES

Dans la deuxième partie de cet article, il est question des méthodes de calcul des grandes portes d'écluses maritimes et principalement du calcul à l'ordinateur de l'ensemble de leur structure.

Le cas des portes de l'écluse de Berendrecht a servi pour illustrer les possibilités et difficultés de modélisation des charges, des conditions aux limites ainsi que l'interprétation des résultats (réactions, déformations).

Ensuite, on présente une méthode approchée pour comprendre le cheminement approximatif des efforts dans une telle porte. Dans ce but, il a été conçu un petit modèle mathématique dont le comportement est analogue à celui du grand modèle.

La mise au point de ce petit modèle ne s'effectue pas sans difficulté, mais il permet de voir plus clair dans les interactions de torsion, de flexion et de l'effet de ressort des éléments de la construction qui transmettent les réactions aux appuis ainsi que dans l'influence relative de la poutre horizontale principale et des cadres verticaux. La compréhension de ces interactions

et de cette influence est exclue avec un grand modèle pour des raisons de temps, de complexité et de coût.

Enfin, il permet d'apprécier dans certaines limites, l'influence des modifications de la structure sur le comportement de celle-ci.

En outre, cette deuxième partie de l'article montre l'évolution des méthodes de calcul utilisées pour l'étude de portes depuis l'écluse de Zandvliet jusqu'à celle de Berendrecht.

En même temps, l'attention est attirée sur le fait que le calcul d'une porte dans son ensemble n'est qu'une première étape qui précède toute une série de calculs complémentaires.

Les portes de l'écluse de Berendrecht sont les premières sur lesquelles des mesures sont prévues et il sera intéressant de confronter les résultats des observations à ceux des calculs. Dans la conclusion, il est question des grandes possibilités des calculs à l'ordinateur mais aussi de leurs limites.

Il y est également discuté de la possibilité d'utiliser le petit modèle comme moyen d'optimiser éventuellement les portes des écluses maritimes.

COMMUNICATIONS - MEDEDELINGEN

Association Internationale des Ponts et Charpentes

Symposium sur

« DURABILITÉ DES CONSTRUCTIONS »

Laboratoire National du Génie Civil (LNEC)

Lisbonne, Portugal

6-8 septembre 1989

— Invitation préliminaire et Appel de communications —

Préliminaire

La durabilité des constructions est un sujet qui prend toujours plus d'importance. Au cours des cinquante dernières années, un nombre incroyablement élevé de constructions a été réalisé afin de répondre aux besoins de l'homme: vivre confortablement, travailler et produire, se déplacer et avoir des loisirs.

Le nombre et le genre des constructions augmentent quotidiennement, tandis que le remplacement des constructions existantes rencontre un nombre croissant de restrictions. La fonction d'une construction peut être si importante qu'un arrêt, même temporaire, de son exploitation peut être inacceptable. Des restrictions dues à l'environnement peuvent avoir un effet similaire.

En dépit de ces faits, la durabilité est souvent négligée lors de la conception et de l'exécution des ouvrages. On croit souvent, à tort ou à raison, que les conséquences économiques d'une telle attitude apparaîtront dans un futur très lointain, mais l'ingénieur consciencieux doit faire preuve d'intégrité et de conscience professionnelle et s'assurer que la construction qu'il crée, pourra remplir sa fonction sans détérioration exagérée.

La durabilité est la capacité d'une construction à maintenir son niveau de fiabilité et d'aptitude au service pendant toute sa durée de vie. Etant donné que de nombreuses constructions peuvent remplir d'autres fonctions ou supporter des charges plus élevées que celles prévues à l'origine, il est important d'envisager lors du projet, les possibilités d'adaptation de la construction.

Le Symposium portera sur le rôle de la conception, des études et de l'exécution dans la durabilité des constructions ainsi que sur la maintenance, la répara-

tion, la restauration et la transformation des ouvrages existants. Ces problèmes seront examinés pour tous les matériaux et tous les types de structures.

Objectifs du Symposium

Les objectifs du Symposium sont les suivants:

- mieux connaître les phénomènes physico-chimiques provoquant la détérioration de la construction, l'influence de l'environnement sur de tels phénomènes et les conséquences de ces processus sur la durabilité générale de la construction;
- mieux appréhender les aspects de la durabilité lors du projet et lors de l'exécution des travaux;
- mieux apprécier les aspects de la durabilité lors de la maintenance, réparation, restauration et transformation;
- préciser les domaines de recherches futures.

Déroulement du Symposium

Le Symposium se déroulera en quatre séances similaires:

- introduction de chaque thème par des conférenciers invités, au cours de séances plénières;
- suite en deux sessions parallèles avec
 - présentation de contributions résultant de l'appel de communications, discussion
 - table ronde.

Des séances de posters seront présentées sur tous les thèmes du Symposium, montrant en particulier des cas concrets relatifs à la durabilité des constructions.