

BEVEILIGINGSCONSTRUCTIES OP KUNSTWERKEN

Verslag en resultaten van de botsproeven ten behoeve van het onderzoek naar beveiligingsconstructies op kunstwerken die in opdracht van de Rijkswaterstaatswerkgroep "Bermbeveiligingen" in 1969 t/m 1971 gehouden zijn op De Vlasakkers te Amersfoort

Deel I. Algemeen gedeelte

R-75-8 I

Voorburg, 1975

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

1. Inleiding
2. Probleemstelling en analyse
3. Mogelijkheden voor beveiligingsconstructies op kunstwerken
 - 3.1. Ruimte
 - 3.2. Bevestiging van de beveiligingsconstructie op het brugdek
 - 3.3. Verschillende mogelijkheden van constructie-uitvoering
 - 3.3.1. De ligger
 - 3.3.2. De paal
 - 3.3.3. Onderlinge samenhang
 - 3.4. Bijzondere constructies
4. Opzet onderzoek
 - 4.1. Experimenteel proevenprogramma
 - 4.1.1. Beschikbare kennis
 - 4.1.2. De proevenserie
 - 4.1.3. Proevenserie bijzondere constructies
 - 4.2. Mathematisch model
 - 4.2.1. Inleiding
 - 4.2.2. Het digitale simulatiesysteem
 - 4.2.2.1. Het voertuig
 - 4.2.2.2. De geleiderailconstructie
 - 4.2.2.3. Invoergegevens
 - 4.2.2.4. Uitvoergegevens
 - 4.2.2.5. Slotopmerkingen
 - 4.2.3. Deelonderzoeken ten behoeve van het mathematisch model
 - 4.2.3.1. Zwaartepuntmetingen
 - 4.2.3.2. Palenproeven

- 5. Resultaten onderzoek
- 5.1. Experimenteel gedeelte
- 5.2. Mathematisch gedeelte

- 6. Discussie

- 7. Conclusies

Literatuur

Tabellen 1 t/m 4

Afbeeldingen 1 t/m 17

Constructietekeningen 1 t/m 23

1. INLEIDING

Bij het afsluiten van het SWOV-onderzoek "Bermbeveiliging" kon worden gesteld dat er een scala van beveiligingsconstructies was ontwikkeld die goed voldeden (SWOV, 1970). Tijdens dit onderzoek werden ook enkele proeven gehouden op beveiligingsconstructies op kunstwerken. Aan deze proeven kon niet het predikaat van systematisch onderzoek worden gegeven, maar hadden meer de indicatie van proeven voor ad-hoc oplossingen. De uitkomsten van deze proeven waren dan ook zeker niet bevredigend te noemen.

Afgezien van een niet altijd juiste werking van deze constructies waren er, als gevolg van de resultaten van het onderzoek "Bermbeveiliging" nog andere bezwaren, zoals aansluitproblemen en standaardisatie in de onderdelen van de constructies, die aan de beproefde constructies kleefden. In hoofdstuk 2 zal hierop uitvoeriger worden ingegaan, alsmede op de te stellen eisen waaraan beveiligingsconstructies op kunstwerken moeten voldoen. Het bleek dat de in Duitsland ontwikkelde beveiligingsconstructie voor kunstwerken (Böhringer et al., 1970) de meest geschikte constructie was om als basis te dienen voor het ontwikkelen van een goed werkende beveiligingsconstructie. Deze Duitse constructie werd niet zonder meer overgenomen, daar er op diverse punten wantrouwen bestond betreffende de juiste werking van deze constructie.

Dit alles leidde er toe om toch over te gaan tot een systematisch onderzoek. Het onderzoek werd gesplitst in twee delen, nl. een experimenteel gedeelte en een mathematisch gedeelte.

Het experimentele gedeelte van het onderzoek werd zo beperkt mogelijk opgezet, zodat alleen het minimaal noodzakelijke aantal proeven werd uitgevoerd. Eventuele aanvullende gegevens zullen door het mathematische gedeelte van het onderzoek moeten worden geleverd.

Het mathematische model voor het simuleren van botsingen op beveiligingsconstructies op kunstwerken werd door prof.dr.ir. V.

Giavotto te Milaan uit het reeds bestaande model voor beveiligingsconstructies in aardebanen ontwikkeld (Giavotto, 1973).

De Rijkswaterstaatswerkgroep "Bermbeveiligingen" werd gedurende het onderzoek steeds van de resultaten op de hoogte gehouden, waardoor reeds in een vroeg stadium van het onderzoek enkele belangrijke veranderingen konden worden doorgevoerd. De Werkgroep groeide zodoende uit tot een begeleidend lichaam van het onderzoek met als tweeledige taak: het formuleren van de wensen ten aanzien van de kunstwerken en de beveiligingsconstructies en het creëren van de mogelijkheden om aan de wensen te kunnen voldoen. Door deze handelwijze heeft de Werkgroep dan ook een belangrijk aandeel gehad in de uiteindelijke resultaten van het onderzoek.

2. PROBLEEMSTELLING EN ANALYSE

Beveiligingsconstructies worden toegepast omdat zij door hun werking een veel lager gevarenniveau hebben dan de gevarenezones die door de constructies worden afgeschermd. Deze gevarenezones kunnen voor midden- of tussenbermen bestaan uit een rijbaan met tegemoetkomend verkeer of ander (druk) lokaal verkeer zoals fiets- en voetpaden. Voor de zijberm bestaan de gevarenezones voornamelijk uit veelal veel lager gelegen kruisende (of parallel lopende) verkeersaders, zoals spoorbanen, waterwegen of stedelijk verkeer, alsmede fiets- en voetpaden. Ten opzichte van de beveiligingsconstructies in aardebanen verkeren de constructies op kunstwerken in een specifieke situatie.

Op de eerste plaats schermen deze constructies zones af die veelal een veel hoger gevarenniveau hebben dan de constructies in aardebanen. Op de tweede plaats is voor de goede werking van de constructie een zekere uitbuigingsruimte noodzakelijk. Veelal is deze ruimte nauwelijks, maar zeker in onvoldoende mate aanwezig. Op de derde plaats verkeert de paal met zijn bevestiging en zijn bewegingsmogelijkheden in een nadelige positie ten opzichte van de paal in aardebanen.

De eisen die voor beveiligingsconstructies in aardebanen zijn opgesteld (SWOV, 1970), gelden in principe ook voor de beveiligingsconstructies op kunstwerken. In het kort komen deze eisen hierop neer.

1. Voertuigen mogen niet door de constructie heenbreken, er overheen klimmen of kantelen, dan wel er onderdoor schieten.
2. Letsel aan inzittenden en schade aan voertuigen en de constructie moeten zoveel mogelijk worden beperkt.
3. Voertuigen mogen niet door de constructie in de eigen verkeersstroom worden teruggekaatst.
4. De constructie moet na een aanrijding zoveel mogelijk haar werking behouden en snel te repareren zijn.

Bovendien zullen de beveiligingsconstructies moeten voldoen aan de eisen die gesteld zijn in het rapport "Discontinuïteiten" (SWOV, 1967).

Gezien de specifieke situatie waarin constructies op kunstwerken zich bevinden, is het niet verantwoord bovenstaande eisen zondermeer op de constructies op kunstwerken toe te passen. Tevens krijgen de eisen andere accentueringen bij het beoordelen van de beveiligingsconstructies. Dit heeft geleid tot het omwerken van bovenstaande eisen waardoor de eisen meer specifiek zijn gericht op beveiligingsconstructies op kunstwerken. Het een en ander heeft geleid tot de volgende vijf eisen.

De eerste eis is dat het voertuig de met de beveiligingsconstructie afgeschermd gevarenzone niet mag binnentreden. Hiervoor is het nodig dat het voertuig niet door de constructie kan heen breken, er onder door schieten, of erover heen rijden of kantelen. Deze eis is uiteraard zeer belangrijk, want daar is de beveiligingsconstructie in eerste instantie voor geplaatst. Toch kan hierin nog nuanceering worden aangebracht, vooral wanneer deze eis in conflict komt met nog andere te stellen eisen. In dit geval kan het van de aard van de gevarenzone afhangen hoe zwaar deze eis moet wegen. Zo is het duidelijk dat deze eis zeer overwegend is bij de zijkant van kunstwerken, waar het risico van de gevarenzone in het algemeen zeer groot is.

Het voldoen aan deze eerste eis is echter niet genoeg voor een goedwerkende beveiligingsconstructie. Het is niet alleen nodig om de uit de koers geraakte voertuigen tegen te houden, de constructie moet ook werkelijk beveiligen. Hiertoe is de tweede eis noodzakelijk, namelijk dat letsel aan inzittenden van botsende voertuigen moet worden voorkomen en dat de schade aan deze voertuigen zo gering mogelijk moet zijn. Bepalend hiervoor zijn de krachten die door de constructie worden uitgeoefend en de daaruit resulterende vertragingen in langs- en dwarsrichting van het voertuig. Hoe groot de toelaatbare vertragingen mogen zijn is nog een punt

van discussie. Voorlopig worden hiervoor de uit de USA afkomstige normen voor auto's met inzittenden zonder gordels gehanteerd. In het rapport "Obstakels in wegbermen" (SWOV, 1973) wordt op deze normen uitvoeriger ingegaan.

Deze cijfers zijn echter beslist niet het laatste woord; ze zijn afhankelijk van het gebruik van autogordels, de inwendige constructie van het voertuig, e.d. Aangezien op dit gebied in de komende jaren waarschijnlijk nog het een en ander zal veranderen zullen deze normen ook aan verandering onderhevig kunnen zijn.

Naast bescherming van het botsende voertuig zelf moet het overige verkeer ook geen extra gevaar lopen. Een derde eis is dan ook dat het voertuig niet in de verkeersstroom wordt teruggekaatst en als het enigszins kan buiten de rijbaan tot stilstand komt.

Bij grote verkeersintensiteiten is het zeer wel denkbaar dat de constructie na een botsing nog niet hersteld is, wanneer er een volgend maal op ongeveer dezelfde plaats tegenaan gereden wordt. Een vierde eis is dan ook dat de constructie na een aanrijding redelijk ~~zijn~~ werkzaamheid behoudt.

Een vijfde eis tenslotte is dat de constructie na een aanrijding snel gerepareerd kan worden, zonder grote hinder voor het normale verkeer, dit niet alleen om hinder aan dit verkeer zoveel mogelijk te voorkomen, maar ook om het extra gevaar zo klein mogelijk te houden.

Bij het bestuderen van de eisen kwam vast te staan dat de toen bestaande beveiligingsconstructies op kunstwerken niet of nauwelijks aan de eisen voldeden. Ook werd het duidelijk dat het onmogelijk was om op de bestaande kunstwerken beveiligingsconstructies te bouwen die wel aan de eisen zouden voldoen.

Na uitvoerig overleg met de Rijkswaterstaatswerkgroep "Bermbeveiligingen" werd besloten een systematisch onderzoek te starten, specifiek gericht op beveiligingsconstructies op kunstwerken.

De activiteit van de werkgroep heeft geleid tot enkele belangrijke wijzigingen met betrekking tot de kunstwerken.

Op de eerste plaats is de beschikbare ruimte voor de werking van de beveiligingsconstructies aanzienlijk vergroot.

Op de tweede plaats is de stootrand op betonnen kunstwerken ter plaatse van de beveiligingsconstructie verlaagd tot 5 cm. Dit maakte het mogelijk voor de diverse situaties goed werkende beveiligingsconstructies te ontwikkelen.

Als derde punt, waarvoor de werkgroep zijn invloed heeft aangewend, is de normalisatie in de te bouwen kunstwerken en in de daarop te bouwen beveiligingsconstructies. Ook de normalisatie wat betreft de constructie-onderdelen van de beveiligingsconstructies op kunstwerken en in aardebanen is ver doorgevoerd, waardoor eigenlijk alleen de palen verschillend zijn.

Het opgezette proevenprogramma is alleen gericht op beveiligingsconstructies voor nog te bouwen kunstwerken. Voor het ontwerpen van beveiligingsconstructies op reeds bestaande kunstwerken zullen deze situaties van geval tot geval moeten worden bekeken.

De bovenstaande functionele eisen kunnen worden vertaald in constructieve eisen waaraan een beveiligingsconstructie moet voldoen. Hierbij moet in het oog worden gehouden voor welke voertuigen de constructie moet werken. In Nederland bestaat het verkeer voor het overgrote deel uit personenauto's met een gewicht van 500 tot 1500 kgf. Het is duidelijk dat de constructie in ieder geval voor deze categorie goed moet werken. Er is echter ook een behoorlijk aantal bussen en vrachtauto's op de weg tot een gewicht van 56 tf. Vooral in die gevallen waarin de beveiligingsconstructie moet verhinderen dat een uit de koers geraakt voertuig in een andere verkeersstroom terecht komt (bijv. in de middenberm) is het dan ook zeer belangrijk dat ook deze voertuigen behoorlijk worden gekeerd. De eis dat de constructie niet doorbroken mag worden, kan worden vervuld als de constructie in langsrichting voldoende sterk is om de optredende krachten te weerstaan. De eis dat er geen voertuigen onder de constructie mogen schuiven en over de constructie heen mogen kantelen is, gezien de grote

variëteit in het voertuigenpark, moeilijk te vervullen. Om het kantelgevaar geheel te voorkomen is het nodig dat krachten tussen constructie en voertuig aangrijpen boven het zwaartepunt of in ieder geval daar in de buurt.

Dit is echter niet te realiseren voor alle auto's. De constructie zal daarom juist zó hoog moeten zijn dat normale personenauto's er niet onder kunnen schuiven. Er moeten dan andere maatregelen genomen worden om te zorgen dat vrachtauto's niet kantelen. Deze is gevonden in de flexibiliteit van de constructie, ook nodig om de vertragingen van het voertuig te beperken. Deze flexibiliteit beperkt de reactiekrachten van de constructie op het voertuig, waardoor het kantelgevaar klein blijft.

Om te voorkomen dat het aldus omgeleide en het tot stilstand gekomen voertuig een gevaarlijk obstakel voor het overige verkeer vormt, is het wenselijk dat er een voldoende grote bergingszone is tussen de rijbaan en de beveiligingsconstructie. Door deze ruimte zal ook de frequentie van aanrijden geringer zijn dan wanneer de constructie vlak langs de rijbaan zou zijn geplaatst. De bergingszone maakt het tevens mogelijk reparaties aan de constructie uit te voeren met weinig hinder voor het verkeer.

3. MOGELIJKHEDEN VOOR BEVEILIGINGSCONSTRUCTIES OP KUNSTWERKEN

3.1. Ruimte

Voor het goed functioneren van een beveiligingsconstructie is een bepaalde ruimte nodig. Op de bestaande kunstwerken was deze ruimte niet of in onvoldoende mate aanwezig. Het gevolg van deze situatie was dat de beveiligingsconstructies op de rand van het kunstwerk kwamen te staan.

In het begin bestonden de constructies slechts uit een soort handleuning (zie Afbeelding 1a). In de jaren zestig werden de handleuning op een aantal plaatsen vervangen door beveiligingsconstructies met de zgn. Plooyerpaal, maar met slechts één enkele geleiderail en niet of nauwelijks uitgebouwd. De constructies werden op de 20 cm hoge stootrand geplaatst (zie Afbeelding 1b). Deze stootrand stak voor de beveiligingsconstructies uit, waardoor het botsende voertuig in aanraking kwam met de stootrand. Het voertuig werd sterk in zijn beweging belemmerd waardoor - vooral voor voertuigen met een relatief hoog zwaartepunt - kantelgevaar ontstond. Een ander groot gevaar was dat het voorwiel door de botsing met de stootrand een opwaartse beweging kreeg en het voertuig over de constructie "sprong". Een goede verbetering was reeds het uitbouwen van de geleiderail (zie Afbeelding 1c).

De Werkgroep heeft kunnen bereiken dat nieuw te bouwen kunstwerken wat breder zouden worden uitgevoerd. De ruimte die door deze verbreding zou ontstaan, diende volledig ten goede te komen van de werkingsruimte voor de beveiligingsconstructie. De ruimte aan de zijkanen van het kunstwerk zou dan tevens te benutten zijn als inspectiepad. Voorts kon daar waar de beveiligingsconstructie aan het kunstwerk dient te worden bevestigd een rand van slechts 5 cm hoog worden aangebracht die weinig of geen invloed meer heeft op het gedrag van het botsende voertuig. De hoge stootrand bevindt zich 1,01 m achter de voorste geleiderail. In die gevallen waar geen inspectiepad aanwezig is, is deze afstand 0,80 cm (zie Afbeeldingen 2 en 3).

3.2. Bevestiging van de beveiligingsconstructie op het brugdek

In principe zullen beveiligingsconstructies op kunstwerken zich op gelijke wijze moeten gedragen als beveiligingsconstructies in aardebanen; dus met een zo laag mogelijk draaipunt van de paal. Bij gelijke werking ontstaan bij de aansluitingen van aardebanen op kunstwerken en omgekeerd geen discontinuïteiten in de beveiligingsconstructie. De beweging van de paal is voor beide situaties echter niet gelijk. Het laagst mogelijke draaipunt van de paal op het kunstwerk is nl. het brugdek. Bij het bevestigen van de paal aan het brugdek moet rekening worden gehouden met de eis dat tijdens een botsing het dek niet mag worden beschadigd. In deze bevestiging moet dus een breekconstructie worden aangebracht. Hiervoor is de reeds in Duitsland beproefde lasnaad gekozen (Böhringer et al., 1970). Deze lasnaad is de verbinding tussen paal en voetplaat. De voetplaat wordt niet rechtstreeks aan de ankers in het dek bevestigd, maar door middel van een grondplaat. De bouten waarmee de voetplaat op de grondplaat wordt bevestigd, vormen een extra beveiliging ter voorkoming van schade aan het kunstwerk tijdens een botsing. Onder de kop van deze bouten is namelijk een groef ingedraaid.

3.3. Verschillende mogelijkheden van constructie-uitvoering

In de Inleiding is reeds aangehaald dat de flexibele beveiligingsconstructie uit het onderzoek "Bermbeveiliging" zeer geschikt is om als basis te dienen voor beveiligingsconstructies op kunstwerken. De belangrijkste onderdelen van deze constructie zijn de geleiderails, de afstandhouders en de palen. Deze onderdelen spelen alle hun eigen specifieke rol in de werking van de constructie tijdens een botsing. De twee geleiderails met de daar tussenin aangebrachte afstandhouders vormen een horizontale ligger die door de palen op een bepaalde hoogte wordt gehouden. De geleiderail aan de verkeerszijde heeft vooral een geleidende functie, terwijl de andere geleiderail meer een ondersteunende functie heeft. De afstandhouders houden de twee geleiderails, afhankelijk

van hun grootte, op een zekere afstand van elkaar. De flexibele constructie in aardebannen krijgt ten gevolge van een botsing een amplitude/golflengte-verhouding van ongeveer 1 : 40. Er moet naar worden gestreefd dat deze amplitude/golflengte-verhouding ten gevolge van een botsing ook op de kunstwerken wordt verkregen. Zeer belangrijk is ook dat de constructie-onderdelen een goede harmonische, op elkaar afgestemde, samenwerking hebben om de beveiligingsconstructie goed te kunnen laten werken. Door deze goede samenwerking worden namelijk gevaren als zakvorming, aanrijden van de palen, het teruggeven van energie aan het voertuig, breuk in de geleiderail of het omlaag klappen van de geleiderail zo niet voorkomen, dan toch sterk gereduceerd. In het algemeen genomen is de beschikbare ruimte op kunstwerken beperkter dan in aardebannen. De beveiligingsconstructie moet dien ten gevolge dan ook worden verstijfd. Deze verstijving kan op drie manieren worden verkregen, nl. door de ligger te verstijven, door de weerstand in de paal te vergroten of door een combinatie van beide.

3.3.1. De ligger

De ligger van de flexibele beveiligingsconstructie heeft een traagheidsmoment - stijfheid - dat voornamelijk wordt gevormd door de som van de twee traagheidsmomenten van de geleiderails. De onderlinge afstand van de geleiderail heeft weinig of geen invloed op de grootte van het traagheidsmoment, daar de verbinding geleiderail - afstandhouder als een scharnierverbinding kan worden beschouwd. Het traagheidsmoment van de constructie met trekstrip* is echter lager, daar de trekstrip nauwelijks geprofileerd is en is dus maar iets meer dan het traagheidsmoment van één geleiderail. Een groter traagheidsmoment - dus het verstijven van de ligger - kan worden verkregen door het aanbrengen van diagonalen in elk

*Op plaatsen waar maar weinig ruimte beschikbaar is kan de achterste geleiderail worden vervangen door een enigszins geprofileerde band van staal (zie Afbeelding 3).

middenveld van de rail lengtes. Door het aanbrengen van de diagonaal ontstaan daar dan twee "onvervormbare" driehoeken. Tijdens het uittuigen van de ligger blijven deze driehoeken onvervormbaar totdat de krachten in de diagonaal zo groot worden dat deze de bevestigingsbouten door de rail gaan trekken of drukken. De mogelijkheden van het op deze wijze stijver maken van de ligger zijn dus slechts beperkt.

Het verder verstijven van de ligger door in elk veld van de ligger een diagonaal aan te brengen, heeft geen zin omdat in de uiteinden van de standaard geleiderail slobgaten zijn aangebracht.

Bij de beveiligingsconstructie met trekstrip in plaats van een geleiderail is wel in elk veld een diagonaal aan te brengen, daar in de trekstrip geen slobgaten aanwezig zijn. De bevestigingsbouten moeten van hogere kwaliteit zijn dan de rest van de bouten, nl. 8.8. Worden op deze plaatsen bouten van mindere kwaliteit gebruikt, dan worden de bouten afgeschoven en valt de invloed van de diagonaal weg.

Het zou misschien mogelijk zijn om de trek- en drukkrachten in de diagonaal door middel van voorspanbouten door wrijvingskrachten te laten opnemen (Normcommissie 104, 1968). Door gebruik te maken van deze voorspanbouten is het wellicht dan toch mogelijk slobgaten in de rail lengtes toe te laten. Hierdoor wordt dan weer de mogelijkheid geschapen de ligger verder te verstijven door in elk veld een diagonaal aan te brengen.

Een andere mogelijkheid om de ligger stijver te maken is wellicht het aanbrengen van meerdere afstandhouders.

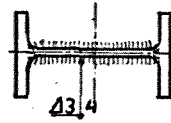
Tegen beide methoden om de ligger stijver te maken, bestaan bedenkingen die vooral zijn gericht tegen de werkzaamheid van de methoden. Als voordeel van deze methoden kan echter wel genoemd worden het gemakkelijker plaatsen van de constructies.

3.3.2. De paal

Als paal is, evenals in Duitsland, het IPE-100 profiel gekozen. Dit IPE-profiel is boven de ronde SWOV-paal gekozen, omdat deze

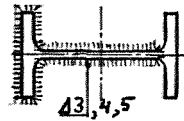
paal - zonder kunstgrepen - rechtstreeks op diverse manieren op de voetplaat te lassen is. Deze manieren zijn:

a. alleen het lijf te lassen



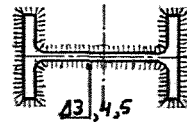
lascode L

b. lijf en voorflens te lassen



lascode LV

c. rondom te lassen



lascode R

Met de lasmethoden L en R kunnen constructies, vanwege de symmetrische lasuitvoering, van beide zijden aangereden worden; met de lasmethode LV van één zijde, nl. aan de kant van de gelaste flens. Wanneer alleen het lijf gelast is, heeft een grotere lasdikte van 3 mm geen zin daar bij een grotere dikte het lijf zelf gaat scheuren. Als de voorflens gelast is, gaat in eerste instantie de voetplaat uitstulpen totdat de speling uit de boutgaten is getrokken. Daarna gaat de las afscheuren. Het draaipunt van de bewegende paal ligt in de buurt van de achterflens en voetplaat. Is de achterflens ook gelast dan ligt het draaipunt van de paal eveneens in de buurt van deze las.

Een groot gevaar bij de rondom gelaste palen is het aanrijden van deze palen door het voertuig. De las van de achterflens scheurt namelijk niet af tijdens de beweging van de paal en vormt dus nog een hechte verbinding met de voetplaat. Worden deze palen aangereiden, dan ontstaat grote schade aan de voorwielophanging van het voertuig. Is de achterflens niet gelast dan kan de paal gemakkelijk worden weggereden en is de schade aan het voertuig ook kleiner.

Het stijver maken van de beveiligingsconstructie kan worden verkregen door de paalweerstand te vergroten.

Daar de paal met de L-las de meest flexibele paal is wordt, bij het stijver maken van de beveiligingsconstructie, van deze paal uitge-

gaan. Het stijver maken van de beveiligingsconstructie kan in eerste instantie worden verkregen door meerdere palen toe te passen, waardoor de paalafstand wordt verkleind en wel van 4 m tot 2,67 m of 1,33 m. Het verder verstijven van de beveiligingsconstructie kan worden bereikt door van lascode L over te gaan op lascode LV of R. Beide lascodes geven ongeveer een gelijke stijfheid van constructie daar de gelaste achterflens nauwelijks weerstand biedt bij het omgaan van de paal. In uiterste noodzaak is het mogelijk de beveiligingsconstructie nog verder te verstijven door de lasdikte van de LV- of R-lassen te vergroten. In de praktijk is gebleken dat de L-lascode problemen geeft.

In het rapport "Paal/voetverbindingen" (SWOV, 1975a) is hierop nader ingegaan.

3.3.3. Onderlinge samenhang

Beide methoden van verstijven, vergroten van het traagheidsmoment van de ligger en vergroten van de weerstand van de palen, mogen niet willekeurig worden toegepast. Wanneer een flexibele beveiligingsconstructie moet worden verstijfd, dan moet in eerste instantie de ligger worden verstijfd. Daarna mag pas de paalafstand worden verkleind. Via deze volgorde wordt beter de amplitude/golflengte-verhouding van 1 : 40 gegarandeerd, evenals de goede harmonische, op elkaar afgestemde, samenwerking van de constructieonderdelen.

Voor de goede werking van de beveiligingsconstructie zijn ook nog enkele andere punten van belang.

De bevestiging van de afstandhouder aan de paal moet goed worden uitgevoerd. Is deze bevestiging te slap, dan kan deze als scharnier gaan werken. De kans dat de geleiderail aan de botskant zich dan naar omlaag beweegt is groot, waardoor het voertuig over de constructie kan kantelen of rijden.

De palen worden, afhankelijk van de grootte van de afstandhouders, in het midden of aan de zijkant van de afstandhouders bevestigd. Hierdoor ontstaan naar één of beide zijden uitgebouwde constructies. De uitbouw van de ligger is erg belangrijk in de werking

van de constructie. Op de eerste plaats voorkomt de uitbouw aan de voorzijde dat bij het uitbuigen van de constructie de palen in het begin van het uitbuigen buiten de voorste geleiderail gaan uitsteken. Het aanrijden van de palen wordt hierdoor bij lichte aanrijdingen voorkomen. Ook in de eerste fase van een zwaardere aanrijding, waarbij de breekklassen nog maar voor een klein deel zijn ingescheurd, kunnen de palen niet worden aangereden. De schade, vooral van de voorwielophanging van het voertuig, zal hierdoor minder groot zijn. Op de tweede plaats veroorzaakt de uitbouw aan de achterzijde een progressieve werking in de beveiligingsconstructie. Na een bepaalde uitbuiging komt deze geleiderail op de grond. Op de ligger vormen zich nu nieuwe reactiekrachten, veroorzaakt door de grond, tegen het uitbuigen van de ligger. Dit verschijnsel wordt het tweetrapseffect genoemd. Op de derde plaats zorgt de uitbouw aan de voorzijde er voor dat in samenwerking met de paal de voorste geleiderail in eerste instantie iets omhoog beweegt. Het kantelgevaar wordt door deze opwaartse beweging tegengegaan. In de verdere beweging gaat de voorste geleiderail weer omlaag totdat de achterste geleiderail de grond raakt. De beide geleiderails zijn niet verticaal aan de afstandhouders gemonteerd maar onder een hoek van 6° . Het gevolg van deze scheefstelling is dat de bovenste golf van de geleiderail het eerst in aanraking komt met het botsende voertuig. Tijdens het uitbuigen van de constructie komt op een gegeven moment ook de onderste golf in aanraking met het voertuig en neemt tenslotte de geleidende functie van de bovenste golf over. Hiermee wordt voorkomen dat de onderste golf van de geleiderail al direct wordt belast en in het verdere verloop van de botsing misschien overbelast. De bovenste golf heeft in dit geval in het geheel geen mechanische belasting ondergaan. De onderste flens van de afstandhouder heeft een verzwakt uiteinde. Dit verzwakte uiteinde buigt weg wanneer de onderste golf (te) zwaar wordt belast, zodat de onderste golf nog iets verder kan uitbuigen. Vooral de funeste invloed van de uitstekende wielbouten en -moeren op de onderste golf wordt door het verzwakte uiteinde sterk beperkt.

3.4. Bijzondere constructies

Om aan temperatuurinvloeden het hoofd te kunnen bieden, moeten in de kunstwerken expansievoegen aanwezig zijn. In de beveiligingsconstructies moeten dus ook voorzieningen worden aangebracht om zich aan de lengteveranderingen te kunnen aanpassen. Een eenvoudige oplossing is gevonden in het aanbrengen van slobgaten in de geleiderail en de verbinding overlappend te maken. De moeren worden hierbij slechts handvast aangedraaid en geborgd met een contraoer. Door deze methode wordt echter wel een discontinuïteit geïntroduceerd. Door deze expansiemogelijkheid is het niet mogelijk om langskrachten die tijdens een botsing ontstaan, van het éne liggerdeel op het andere liggerdeel over te brengen. De aanwezige speling moet eerst uit de expansiemogelijkheid worden getrokken voordat er langskrachten kunnen worden overgebracht. De diepte van de uitbuiging wordt hierdoor tijdens de botsing, afhankelijk van de aanwezige speling, groter dan wanneer er geen expansiemogelijkheid aanwezig is. De invloedssfeer van de expansiemogelijkheid is vrij groot, zodat botsingen in de naaste omgeving ervan ook een diepere uitbuiging tot gevolg zullen hebben. Een en ander is echter wel afhankelijk van welke lasmethode er gekozen is (zie par. 3.3.2.).

Het nadeel van het ontbreken van het langsverband in de ligger kan door het aanbrengen van een hydraulische schokdemper worden opgeheven. De demper laat de langzame bewegingen ten gevolge van temperatuursinvloeden wel toe, maar blokkeert als het ware bij snellere bewegingen. Door de grote krachten die moeten worden overgebracht zijn de afstandhouders, waaraan de demper wordt bevestigd, erg zwaar.

Samen met deze afstandhouders wordt door de demper een gewichtsdiscontinuïteit van ca. 200 kgf geïntroduceerd. Dit gewichtsnadeel kan misschien voor een gedeelte worden ondervangen door toepassing van de zgn. éénpijpsdempers (Stigter, 1971).

Vanwege de lange ontwikkelingstijd kon de éénpijpsdemper niet meer in het proevenprogramma worden opgenomen.

Zie voor een verslag en resultaten het rapport "Hydraulische schokdempers" (SWOV, 1975b).

4. OPZET ONDERZOEK

4.1. Experimenteel proevenprogramma

4.1.1. Beschikbare kennis

Naast de eisen waaraan de beveiligingsconstructies moeten voldoen, zijn er nog een aantal andere punten die bij het ontwikkelen van beveiligingsconstructies van belang zijn.

1. Voor welke situaties moeten er beveiligingsconstructies worden ontworpen?, zie Tabel 1.

2. Hoeveel ruimte is er beschikbaar voor de werking van de beveiligingsconstructies?

Afhankelijk van de situatie waarvoor een constructie moet worden ontworpen kan dan van een bepaalde hoeveelheid ruimte worden uitgegaan. Dit leidt overigens wel tot de behoefte aan een zekere standaardisatie in de te ontwerpen constructies. Deze standaardisatie is bij beveiligingsconstructies op kunstwerken voortgezet door het toepassen van zoveel mogelijk dezelfde constructie-onderdelen als bij constructies in aardebanen.

In nauwe samenwerking met de Werkgroep zijn de bovenstaande punten verder uitgewerkt, waarbij de opgedane kennis tijdens het onderzoek "Bermbeveiliging" een belangrijke leidraad is geweest. Het belangrijkste besluit van de Werkgroep is het verbreden van de kunstwerken geweest. Door deze beslissing is het mogelijk geworden om aan de gestelde eisen te voldoen.

De beschikbare kennis diende te worden getoetst aan de resultaten van onderzoek in binnen- en buitenland. Hierbij is het duidelijk geworden dat alleen de in Duitsland ontwikkelde beveiligingsconstructie (Böhringer et al., 1970) in aanmerking kwam voor verdere analyse. Andere ontwikkelde beveiligingsconstructies vielen af bij toetsing aan de beschikbare kennis en/of aan de eisen.

De Duitse beveiligingsconstructie komt qua uitvoeringen goed overeen met de Nederlandse uitgangspunten, maar de constructie voldoet slechts in beperkte mate aan de gestelde eisen. Vooral de bij deze

uitvoeringsvorm behorende werkingsruimte is veel groter dan in Nederland beschikbaar is. Ook qua doorschrijdingsgevaar bestaan grote bedenkingen tegen de Duitse constructie. Uit het Duitse onderzoek is uiteindelijk dan ook alleen de paal en de afstandhouder overgenomen. De paal is voorzien van een breekconstructie, namelijk door middel van de lasverbinding met de voetplaat (zie ook par. 3.3.2.). Uit eigen onderzoek zijn de liggers van de goedwerkende beveiligingsconstructies voor aardebanen overgenomen. De Duitse paal en deze liggers vormden de basisonderdelen van de te ontwikkelen beveiligingsconstructies voor kunstwerken.

4.1.2. De proevenserie

De in de vorige paragraaf vermelde overwegingen hebben geleid tot het opzetten van een proevenserie. Bij het opzetten van deze proevenserie is mede rekening gehouden met het feit dat parallel aan het experimentele gedeelte van het onderzoek, een mathematisch model zal worden ontwikkeld voor het simuleren van proeven (zie verder par. 4.2.). Het experimentele gedeelte van het onderzoek is daardoor beperkter van opzet geworden. Met behulp van simulaties met het mathematische model zullen de ontbrekende proeven worden aangevuld. Door gebruik te maken van de handleuning van het inspectiepad zou mogelijk een wat minder stijve constructie kunnen worden toegepast. Het voordeel is dan dat voor~~de~~de personenwagens redelijk flexibel werkende constructie kan worden gebruikt. Bij de zware aanrijdingen zorgt de handleuning voor het zo belangrijke twee-trapseffect.

De opgezette proevenserie ziet er als volgt uit:

V _{1p}	2R	267	tekening 1 en 2	proef C1 t/m C3
V _{1p}	2R	133	tekening 1 en 2	proef C4 t/m C6
V _{1p}	2L	267	tekening 1 en 2	proef C16 t/m C18
V _{1p}	1LV	267	tekening 3 en 4	proef C7 t/m C9 en C19
V _{1p}	1LV	133	tekening 3 en 4	proef C10 t/m C12
V _{1p}	1LV	200	tekening 5 en 6	proef C13 t/m C15
V _{1p}	1LV	267*	tekening 7 en 8	proef C20 en C21
V _{1p}	1 _s L	133	tekening 9 en 10	proef C22 t/m C25

*voorspanbouten

Zie Tabel 4 voor de verklaring van de code

4.1.3. Proevenserie bijzondere constructies

Bepaalde situaties vereisen bijzondere maatregelen om tot goed werkende beveiligingsconstructies te komen. Eén van deze situaties is de expansiemogelijkheid in kunstwerken, zie par. 3.4. Om de werking van de daar genoemde demper te kunnen beoordelen zijn zowel proeven gehouden op beveiligingsconstructies met expansiemogelijkheid en demper als op constructies met expansiemogelijkheid zonder demper. Bij de proeven met de expansiemogelijkheid zonder demper was tevens mogelijk na te gaan in hoeverre de gebruikte handleuning in staat is een wezenlijk aandeel in het omleiden van zware proefvoertuigen kan leveren.

De opgezette proevenserie ziet er als volgt uit:

V _{lp} 1 _s L 133	met expansiemogelijkheid
	tekening 11 en 12 proef C26 t/m C28 en C33
V _{lp} 1 _s L 133	met expansiemogelijkheid met demper
	tekening 11 en 12 proef C29 t/m C32
F 2L 400	met expansiemogelijkheid
	tekening 13 en 14 proef C37
F 2L 400	met expansiemogelijkheid met demper
	tekening 13 en 14 proef C34 t/m C36 en C38

Zie Tabel 4 voor de verklaring van de code.

4.2. Mathematisch model

4.2.1. Inleiding

De resultaten met het mathematisch model voor de beveiligingsconstructies in aardebanen waren zo gunstig dat aan prof.ir. V. Giavotto eind 1968 opdracht werd gegeven het model ook geschikt te maken voor beveiligingsconstructies op kunstwerken (Giavotto, 1973).

Tevens is het model uitgebreid om speciale constructies te kunnen simuleren. Hierdoor is het mogelijk geworden simulaties uit te voeren op beveiligingsconstructies met expansiemogelijkheid, op

constructies met plaatselijk zware onderdelen, en op stootranden. Bij de beveiligingsconstructies met expansiemogelijkheid kan ook de invloed van de demper worden nagegaan. Is een stootrand aanwezig dan wordt zowel zijn invloed op de werking van de constructie als zijn rechtstreekse invloed op de baan van het botsende voertuig nagegaan. Ook beveiligingsconstructies met oplopende of aflopende stijfheid, de zogenaamde overgangsconstructies, kunnen door dit model worden gesimuleerd.

4.2.2. Het digitale simulatiesysteem

Het simulatiesysteem is in wezen een programma dat bestaat uit verschillende delen of segmenten. Het programma kiest zelf uit welk deel het moet gebruiken en hoe het de verschillende segmenten bij de simulatie moet combineren. De hoofddelen, het voertuig en de geleiderail, kunnen bijvoorbeeld in de volgende combinaties werken:

- A. Dynamica van het voertuig alleen, vóór de botsing tegen de geleiderail; geleiderail nog niet vervormd.
- B. Dynamica van het voertuig en de geleiderail die na de botsing krachten op elkaar uitoefenen.
- C. Dynamica van het voertuig en de geleiderail die geen krachten op elkaar uitoefenen, als het voertuig niet langer meer in aanraking is met de geleiderail en de geleiderail nog natrilt ten gevolge van zijn trage massa.
- D. Dynamica van het voertuig alleen, als het voertuig niet meer in aanraking is met de geleiderail en de geleiderail niet langer natrilt.

Bij de configuraties A en D worden de posities van het voertuig en de geleiderail vergeleken en wanneer er een interferentie optreedt tussen de zijkant van het voertuig en de zijkant van de geleiderail (voertuig en geleiderail bij A niet vervormd, bij D wel) gaat de berekening over in configuratie B.

Bij configuratie B worden het voertuig en de geleiderail beschouwd in samenhang met elkaar op een bepaald aantal punten waar een bepaald aantal onderlinge krachten worden uitgeoefend. Iedere onder-

linge kracht kan geen trekkracht zijn, dus als een kracht een trekkracht wordt is het overeenkomstige punt niet langer een aanrakingspunt. Als er geen enkel aanrakingspunt meer is, gaat de berekening over in configuratie C.

Afbeelding 4 laat een algemeen stroomdiagram van het simulatiesysteem zien. In configuratie A wordt fase 2 door test 3 overgeslagen. In configuratie B wordt fase 2 uitgevoerd. In configuratie C wordt fase 2 nog steeds uitgevoerd, maar er is geen aanrakingspunt (en kracht) tussen het voertuig en de geleiderail. In configuratie D wordt fase 2 weer door test 3, die een nogal ingewikkelde test is, overgeslagen. Test 4 beslist wanneer de berekening beëindigd moet worden: dat kan gebeuren als de berekening het eindpunt zowel in plaats als in tijd bereikt heeft, wat bij de invoergegevens gespecificeerd moet worden, of als de rolhoek van het voertuig groter dan 1 radiaal wordt. Op dat punt kantelt het voertuig zeker, maar het programma kan de daaruitvolgende beweging niet simuleren.

4.2.2.1. Het voertuig

De voertuigsimulatie bestaat uit drie hoofdsegmenten:

- het voertuig als een star lichaam
- de stuurinrichting
- de vervorming van de carrosserie ten gevolge van de botsing.

Het eerste segment berekent de beweging van het voertuig beschouwd als een star lichaam met zes vrijheidsgraden. De krachten die optreden zijn alleen gravitatiekrachten en grondreacties (voor ieder wiel één). Aerodynamische krachten blijven buiten beschouwing. De verticale component van iedere grondreactie wordt berekend als een functie van de overeenkomstige verticale indrukking van de wielophanging en de band; de horizontale component, of spoorkracht, is gelijk aan de verticale component, vermenigvuldigd met een spoorkrachtcoëfficiënt, die een functie van de drifthoek is. De maximale waarde van de coëfficiënt kan verschillende waarden aannemen, afhankelijk van de aard en de toestand van het wegdek. De

bewegingen van de stuurinrichting kunnen bijvoorbeeld als invoergegevens bekend zijn, als iemand het stuurwiel vasthoudt en het voertuig stuurt, of ze kunnen op gespecificeerde tijdintervallen berekend worden uit de dynamica van het stuurmechanisme. Dat wordt gedaan in een vrij compleet schema, waarbij ook rekening gehouden wordt met de gyroscopische momenten op de wielen, het effect van caster, wielvlucht en pneumatisch spoor (*). Dus de simulatie kan elke beweging van het voertuig, die verkregen wordt door het stuurwiel te bewegen of aan zichzelf over te laten, omvatten.

(*) Pneumatisch spoor is de achterwaartse verplaatsing van de centroïde van het aanrakingsvlak tussen de band en het wegdek, die toeneemt met de verticale reactie en met de drifthoek en die een koppel oplevert dat de neiging heeft de stuurinrichting te bewegen in die zin, dat de drifthoek vermindert.

Het derde segment, dat werkt als het voertuig in aanraking is met de geleiderail, kan de vervorming van de carrosserie simuleren. De aanraking kan plaatsvinden op een bepaald aantal nog aan te geven punten tot een maximum van 8. Het kracht-vervormingsdiagram bestaat op ieder punt uit een zwak hellend deel, gevolgd door een steiler deel, nadat de vervorming een bepaalde waarde bereikt heeft. Bij een afnemende vervorming S neemt de kracht T nog steiler af en nadat de kracht het nulpunt bereikt heeft, blijft een zekere mate van plastische vervorming bestaan, zie Afbeelding 5.

4.2.2.2. De geleiderailconstructie

De geleiderailconstructie is in wezen een doorlopende ligger op vele flexibele palen. De ligger is verdeeld in een bepaald aantal "elementen" die met elkaar verbonden zijn op de "knooppunten". Een element is een deel van de ligger tussen twee afstandhouders en kan een diagonaal hebben. Sommige van de knooppunten zijn verbonden aan de flexibele palen. Als er geen uitwendige kracht wordt uitgeoefend op een element tussen de knooppunten wordt de vervorming van het element volledig weergegeven door de superpositie van de

zes knooppunten. Als er een diagonaal is, oefent deze een kracht T uit die afhankelijk is van de relatieve verplaatsing δ van zijn eindpunten. Het model voor de kracht T is als volgt. Als δ toeneemt, beginnend bij $\delta = 0$, neemt T elastisch toe tot de waarde T_A van de wrijvingskracht, dan is $T = T_A$. T neemt weer elastisch toe nadat δ de waarde bereikt heeft die toegestaan wordt door de speling tussen de bouten en de gaten GPO tot de waarde T_S van de maximale trekkracht. Na dat punt beginnen de bouten de plaat van de rail te scheuren, waardoor de eigenlijke speling toeneemt. Als δ kleiner wordt, neemt T elastisch af. Voor negatieve waarden van T is het model hetzelfde, maar er kan een andere waarde van de speling gespecificeerd worden, zie Afbeelding 6. Het model voor de beweging van de verschillende delen van de ligger wordt getoond in Afbeelding 7: het is een starre rotatie om punt O , hoofdzakelijk ten gevolge van de weerstand van de palen, gevolgd door een starre rotatie om punt O_1 als de achterste rail de grond raakt.

Door de juiste keuze van de waarden van CRO, CRV en CRC kan het model een goede benadering geven van de beweging zoals waargenomen bij proeven op ware schaal. Voor de reacties T van de palen worden uit afzonderlijke palenproeven verkregen waarden gebruikt, en deze worden uitgezet tegen de verplaatsingen S . Bij het kleiner worden van de verplaatsing wordt een lineaire vermindering van de kracht verondersteld met een helling die begint af te nemen na zijn maximale waarde, zie Afbeelding 8. Zo lang de achterste rail in aanraking blijft met de grond, treden er ook contactreacties op, waarvan aangenomen wordt dat ze volkomen ideaal elastisch-plastisch reageren, zie Afbeelding 9.

De belangrijkste effecten van grote verplaatsingen zijn:

- in de ligger wordt een zekere mate van spanning opgebouwd, die een verstijvend effect heeft;
- er vindt een bepaalde mate van secundaire buiging plaats ten gevolge van de weerstand van de palen, die de uitbuiging veroorzaken.

De uitbuiging kan, hoewel zij niet erg groot is, een nogal groot verstijvend effect hebben, daar zij plaats vindt rondom de as van

de maximale buifstijfheid van de rail. Bij het buigen van de ligger zijn ook enkele plastische vervormingen mogelijk, zoals gebeurd wanneer de grensspanningen worden overschreden. Bij iedere stap van de berekening wordt een nieuwe evenwichtsconfiguratie gevonden nadat het voertuig naar de nieuwe positie verplaatst is overeenkomstig een geringe tijdtoename dt . Typerende getallen voor de tijdtoename die veelvuldig gebruikt worden bij berekeningen met praktisch dezelfde resultaten zijn 5 en 2,5 ms.

Bij iedere stap worden alle niet-lineaire krachten (zoals bijvoorbeeld de diagonaal en paalreacties) gelineariseerd in de kleine pauze tussen twee opeenvolgende stappen, zodat de nieuwe evenwichtsconfiguratie de oplossing is van de matrixvergelijking:

$$\{P\} = [K] \times \{v\}$$

waarin $\{v\}$ = de kolommatrix van de onbekenden, die de genormaliseerde verplaatsing op ieder knooppunt (drie per knooppunt), plus de verplaatsing w van de aanrakingspunten tussen voertuig en geleiderail zijn. De stijfheidsmatrices $[K]$ en $\{P\}$ worden bij iedere stap berekend door superpositie van de bijdrage van de elementen, palen, diagonalen, voertuig-aanrakingskrachten en krachten van de trage massa van de geleiderail. Met enkele van de snelheid afhankelijke krachten (damping) kan ook rekening gehouden worden.

4.2.2.3. Invoergegevens

De invoergegevens worden verdeeld in drie hoofdgroepen:

- voertuiggegevens
- geleiderailgegevens
- berekeningsparameters.

In eerste instantie zijn de voertuiggegevens voor vijf voertuigtypen voorbereid; een personenauto, twee bussen, een lichte vrachtauto (3 ton) en een zware vrachtwagen (24 ton bij maximale belasting). Deze voertuigen kunnen gebruikt worden als proefmodellen voor het simuleren van botsingen tegen verschillende soorten geleiderailconstructies.

Berekeningsparameters zijn hoofdzakelijk de positie en de snelheid van het voertuig bij het begin van de berekening en de bewegingen van de stuurinrichting.

4.2.2.4. Uitvoergegevens

Voor iedere tijdtoename is de uitvoer de beweging van het voertuig en de vervorming van de geleiderail. De uitvoergegevens van het voertuig zijn: positie, stand, vervorming van de carrosserie, snelheid, stuurhoek en versnellingen van verschillende punten van het voertuig. De uitvoergegevens van de geleiderailconstructies zijn de uitbuigingen van alle knooppunten. Verschillende berekeningen zijn verricht met invoergegevens afkomstig uit door de SWOV verrichte proeven op ware schaal, waarbij de uitvoer van de simulatie vergeleken is met de proefresultaten.

4.2.2.5. Slotopmerkingen

Het digitale simulatiesysteem dat ontwikkeld is voor botsproeven tegen geleiderailconstructies is een waardevol instrument gebleken; het kan de kosten van een proefprogramma lager maken, of nog beter, de omvang van het programma aanzienlijk doen toenemen zonder de kosten te verhogen. In feite schept het de mogelijkheid het aantal proeven op ware schaal, die een lange tijd van voorbereiding, uitvoering en verwerking vereisen en hoge kosten met zich meebrengen, aanzienlijk te beperken.

4.2.3. Deelonderzoeken ten behoeve van het mathematisch model

Voor de uitvoering van het mathematische model was het noodzakelijk twee deelonderzoeken uit te voeren, nl. zwaartepuntmetingen en palenproeven.

Het eerste deelonderzoek had tot doel de ligging van het zwaartepunt van het botsvoertuig te bepalen. Het tweede deelonderzoek had tot doel na te gaan hoeveel energie door de palen van de geleiderailconstructie tijdens het uitbuigen wordt opgenomen.

4.2.3.1. Zwaartepuntmetingen

De bepaling van de plaats van het zwaartepunt geschiedde door middel van het meten van verticale wielbelastingen, spoorbreedten en wielbasis wanneer het voertuig horizontaal staat. Hieruit volgde de ligging van het zwaartepunt in het horizontale vlak. Daarna werd het voertuig aan de achteras omhoog gebracht tot een hoek werd bereikt van maximaal 30° . Uit de voorasdruk en de hoek volgde (met een aantal correcties) na berekening de hoogte van het zwaartepunt boven het wegoppervlak. Ter controle werd deze procedure ook gevolgd voor de vooras. De wielbelastingmeting werd met behulp van twee zogenaamde load-o-meters (weegschalen) uitgevoerd. Spoorbreedten, wielbasis en de afstand van hart van de wielen tot aan grondniveau werden gemeten. De helling van het voertuig werd door middel van een verstelbare waterpas gemeten en gecontroleerd aan de hand van de hoogteverandering van vier referentiepunten (twee voor en twee achter), waarvan de onderlinge afstanden tevoren bepaald waren. Tevens werd bij het hellen van het voertuig de verplaatsing van de wielen ten opzichte van het chassis bepaald uit de verandering van de afstand tot twee referentiepunten per wiel, één punt in lengterichting en één punt in hoogterichting van het voertuig. Deze laatste metingen dienden ter correctie bij de bepaling van de zwaartepunthoogte.

Tabel 2 geeft gegevens van de voertuigen, terwijl Tabel 3 de ligging van de zwaartepunten weergeeft. Zie voor een uitgebreide rapportage: Edelman, 1970.

4.2.3.2. Palenproeven

Deze proeven zijn door IWECO-TNO uitgevoerd met behulp van een slingerinstallatie. Het slingergewicht van ca. 500 kgf bestond uit een massieve staaf met een diameter van 170 mm en een lengte van 2,45 m. Aan dit gewicht waren twee armen gelast. Met behulp van deze twee armen was het gewicht met acht kabels van ca. 7 m lengte aan twee armen van de bovenbouw opgehangen. Op deze wijze werd een slingerlengte van 6,69 m verkregen. De botskracht van de

slinger op de paal en de verplaatsing van de paal zijn de grootheden die werden gemeten. Deze door de opnemers in een elektrisch signaal omgezette grootheden werden na versterking met behulp van een bandrecorder op een magneetband vastgelegd. De opnamesnelheid van de bandrecorder was 60 inch/s. De signalen werden met behulp van een Ultra-Violet-schrijver zichtbaar gemaakt op licht gevoelig papier. Door de tijd uit deze signalen te elimineren konden de krachtverplaatsingsdiagrammen worden samengesteld. In Afbeelding 10 is een blokschema gegeven van de gebruikte meetinstallatie. Afbeelding 11 laat zien op welke hoogte de botsing plaatsvond en op welke hoogte de verplaatsing werd gemeten. Voor een uitgebreide rapportage wordt verwezen naar het 3-delige rapport van Schulze, 1970.

5. RESULTATEN ONDERZOEK

5.1. Experimenteel gedeelte

De proefresultaten zijn verzameld en weergegeven in de delen II, III en IV van dit rapport. Met deze grote hoeveelheid gegevens is het moeilijk om zonder kennis van zaken bepaalde beveiligingsconstructies bij bepaalde situaties te passen. Getracht is dan ook de voorhande zijnde gegevens in overzichtelijke grafieken te verwerken. Gelet op het grote aantal variabelen die bij de botsingen met beveiligingsconstructies kunnen optreden is het niet mogelijk per constructietype geldende maten voor de uitbuigingen te noemen. Alleen al de grote verscheidenheid in het voertuigenpark maakt dit onmogelijk.

De krommen van de Afbeeldingen 12 t/m 15 moeten dan ook als gemiddelde krommen worden gezien over een groot aantal mogelijke soorten botsingen. De vertoonde krommen zullen dan ook met gepaste voorzichtigheid gehanteerd moeten worden.

De krommen zijn als volgt opgebouwd. Horizontaal is de impuls van het voertuig loodrecht op de constructie - dat is de massa van het voertuig vermenigvuldigt met de snelheid en de sinus van de inrijhoek - uitgezet tegen verticaal de dynamische uitbuiging van de achterste geleiderail.

Bij de proeven zijn geen duidelijke kantelverschijnselen geconstateerd. Een beperking in het onderzoek is het ontbreken van de mogelijkheid zware voertuigen met hogere snelheden te laten botsen. Door de relatief grote stijfheid van de constructies zullen deze voertuigen, daar hun zwaartepunt hoger zal liggen dan bij de gebruikte proefvoertuigen, eerder gaan kantelen dan bij botsingen tegen de flexibele constructies.

Vanwege hun symmetrie van de las zijn L- en R-lascoden toegepast bij constructies die van beide zijden kunnen worden aangerezen. De LV-lascode is daarentegen alleen toegepast bij constructies die maar van één kant kunnen worden aangerezen. De paal is dan zo

geplaatst dat de gelaste flens van de paal aan de botskant zit. Het is nu mogelijk om uit de onderdelen waaruit de constructie moet worden samengesteld een range van beveiligingsconstructies te formeren die elk een werkingsgebied hebben waarin zij op de meest ideale manier het kunstwerk beveiligen.

5.2. Mathematisch gedeelte

De resultaten van het mathematische model komen goed overeen met de resultaten van de proeven op ware schaal. Deze goede overeenkomst slaat zowel op de bewegingen en de baan van het voertuig als op de uitbuigingen van de beveiligingsconstructies. Afbeelding 16 laat de statische uitbuiging van de voorste geleiderail zien van de botsproef en de computersimulatie. Beide andere lijnen geven de dynamische uitbuiging van de voorste geleiderail aan van de eerste botsing en de vergroting van deze uitbuiging als gevolg van het rear-end effect. Ook diverse andere grootheden zoals plaats, lengte en tijdstip van het rear-end effect, uitrijhoek, lengte en duur van het contact met de constructie vertonen grote overeenkomst. De vertragingen die met behulp van het model werden uitgerekend kunnen door deze grote overeenkomst wel als reëel worden beschouwd. Afbeelding 17 geeft een indruk van de optredende langs- en dwarsvertragingen van het zwaartepunt van de Opel, de vrachtwagen en de bus. De botsing is tegen een stijve constructie (V_{lp} 2R 133). Vergelijken we deze vertragingen met de normen die in de USA gelden (zie SWOV, 1973), dan zien wij dat de optredende vertragingen van de Opel aan de hoge kant zijn. Zij zijn eigenlijk niet meer acceptabel te noemen. De meer flexibele beveiligingsconstructies geven vertragingen die wat meer acceptabel zijn. Het al-of-niet acceptabel zijn van de vertragingen in de bus hangt af van de plaats in de bus. De optredende vertragingen rond het zwaartepunt zijn zonder meer acceptabel, maar voor en achter in de bus zijn de vertragingen groter.

6. DISCUSSIE

De resultaten van de proeven geven duidelijk aan dat de goede werking van de constructie in aardebanen ook kan worden verwezenlijkt met de constructie voor kunstwerken. Voor de meest ideaal werkende constructie is echter een vrij brede werkingsruimte nodig. Is deze ruimte niet aanwezig, dan moet de constructie stijver worden gemaakt. In eerste instantie wordt de stijfheid van de beveiligingsconstructie verkregen door het monteren van diagonalen. De diagonalen worden in bepaalde velden, gevormd door geleiderails en afstandhouders, aangebracht. In tweede instantie kan de stijfheid van de constructie worden vergroot door de paalafstand te verkleinen tot 2,67 m of tot 1,33 m. In derde instantie kan de vorm van de las van de paal aan de voetplaat worden veranderd, nl. van lijfgelast naar lijf- en voorflensgelast of rondomgelast. In vierde instantie kan de lasdikte worden vergroot. Het vergroten van de lasdikte bij lijfgelaste palen heeft geen zin daar het lijf zelf gaat scheuren. Het is mogelijk langs deze weg diverse beveiligingsconstructies te creëren die zo goed mogelijk van de beschikbare ruimte gebruik maken. Heeft de beschikbare werkingsruimte aan de buitenzijde van het kunstwerk een bepaalde breedte overschreden, dan kan deze ruimte tevens worden gebruikt als inspectiepad. De buitenzijde van het kunstwerk wordt dan afgeschermd door een handleuning. In de beveiliging van het kunstwerk kan deze handleuning - bij een juiste dimensionering - een belangrijke rol spelen en wel als tweede kering. Tevens kan de handleuning door zijn hoogte het kantelgevaar tegengaan.

De beproefde constructies bestaan uit de volgende hoofdelementen:

1. geleiderail volgens tekening 15
2. afstandhouder volgens tekening 16, 17 en 18
3. paal volgens tekening 19
4. diagonaal volgens tekening 20

De andere tekeningen geven een volledig beeld van de beproefde constructies.

Met betrekking tot het kantelgevaar speelt de schampkant of stootrand een belangrijke rol. Deze schampkant belemmert het botsende

voertuig sterk in zijn bewegingen. De schampkant houdt de wielen tegen waardoor bij zware aanrijdingen, vooral van zware voertuigen met een hoog zwaartepunt, het kantelgevaar sterk wordt vergroot. Het is dan ook noodzakelijk dat de schampkant wordt weggelaten of verder naar de zijkant van het kunstwerk wordt verplaatst; het liefst zo ver mogelijk achter de beveiligingsconstructie. Tijdens de proeven is niet gebleken dat de 5 cm hoge rand - nodig bij het asfalteren - enige invloed heeft gehad op de afloop van de proeven. Vergelijk Afbeelding 1C met Tekening 6 of 10.

Het overbrengen van de diagonaalkrachten door middel van voorspanbouts hebben niet tot de gewenste resultaten geleid. Deze verbinding is veel te zwak, waardoor de verplaatsingen in de slobgaten veel groter zijn dan de verplaatsingen bij de normale verbindingen. De oorzaken van het niet goed functioneren zijn:

- de draagvlakken zijn niet vlak genoeg
- de draagvlakken zijn te klein
- de draagvlakken zijn meestal niet schoon
- de draagvlakken zijn gegalvaniseerd
- te veel draagvlakken op elkaar
- de plaatdikten zijn dunner dan 4 mm.

Bij een grote inrijhoek (78 grad) is van de geleidende werking van de beveiligingsconstructie geen sprake meer. De kinetische energie van het proefvoertuig moet volledig door de constructie worden vernietigd. Hierdoor ontstaan in de ligger grote langskrachten, die door de verankeringen moeten worden opgenomen. Het is dan ook belangrijk dat vooral op die plaatsen waar grote inrijhoeken kunnen ontstaan zeer veel zorg wordt besteed aan de verankeringen. Het is noodzakelijk om de beveiligingsconstructies dezelfde expansiemogelijkheden te geven als de kunstwerken zelf hebben. De benodigde expansiemogelijkheid in de beveiligingsconstructie moet worden afgestemd op de grootte van de voeg in het kunstwerk. Gezien de invloed van de expansiemogelijkheid op de werking van de constructie is het sterk te ontraden de bewegingsvrijheid in de constructie veel groter te maken dan noodzakelijk is.

De expansiemogelijkheid moet gemakkelijk kunnen bewegen om "spat-

ten" van geleiderail en/of strip te voorkomen door het ontstaan van drukkrachten in de ligger. De moeren mogen niet meer dan handvast worden aangedraaid en worden door een contraemoer geborgd. Wanneer de expansiemogelijkheid binnen de invloedssfeer van de botsing valt, wordt tijdens de botsing eerst de speling uit de slobgaten getrokken alvorens het langsverband in de ligger wordt hersteld. Dit houdt in dat - vooral de zware - proefvoertuigen in het eerste gedeelte van de botsing niet worden omgeleid, maar "recht door" rijden. Dit verschijnsel veroorzaakt een diepere uitbuiging van de beveiligingsconstructie dan wanneer er geen expansiemogelijkheid aanwezig zou zijn geweest. Op kunstwerken waarop op de zij-kanten een handleuning aanwezig is, bestaat dan de kans dat, wanneer er bij het begin van deze handleuning een expansiemogelijkheid aanwezig is, het proefvoertuig "frontaal" tegen het begin van de handleuning botst. Bij proeven waarbij in de beveiligingsconstructie geen expansiemogelijkheid aanwezig was, kwam de uitbui-gende constructie reeds in aanraking met de handleuning. Daar de beveiligingsconstructie door de aanwezigheid van de expansiemoge-lijkheid verder kan uitbuigen, moet de handleuning bij deze proeven een wezenlijk aandeel in het omleiden van het proefvoertuig leveren. De constructie van de handleuning is hiervoor sterk genoeg. Het langsverband in de ligger kan worden hersteld door het aanbrengen van een hydraulische schokdemper. De demper is in staat een groot deel van de bovengenoemde bezwaren te ondervangen.

Het inbouwen van één demper in een expansiemogelijkheid heeft een bezwaar. Deze wijze van inbouwen van de demper voldoet niet helemaal aan het doel, namelijk het "blokkeren" van de expansie-mogelijkheid. De mogelijkheid van scharnieren om de demper van het éne liggerdeel ten opzichte van andere liggerdelen wordt niet voorkomen. Door twee éénpijpsdempers in plaats van één tweepijps-demper in te bouwen, kan aan dit nadeel tegemoet worden gekomen. Hierdoor wordt echter de massa vergroot. Dit is alleen mogelijk bij de tweezijdige uitgebouwde beveiligingsconstructies. Het onder elkaar plaatsen van twee dempers heeft, om bovenvermeld bezwaar te voorkomen, geen zin.

Het is niet mogelijk uit de gehouden proeven een volledig overzicht te krijgen over de invloed en werking van de demper op de werking van een beveiligingsconstructie met expansiemogelijkheid tijdens een - vooral zware - botsing. De oorzaak hiervan is tweeledig, namelijk:

1. de invloed van de handleuning op de werking van de beveiligingsconstructies met strip bij zware botsingen
2. te grote uitbuigingen bij de flexibele beveiligingsconstructie, waardoor de tweede constructie en de zandwal - op 2,60 m achter de te beproeven constructie - invloed uitoefenen op het omleiden van de proefvoertuigen.

Uit de proeven is wel te controleren dat de dempers bij relatief lichte aanrijdingen het meeste effect hebben. Dit is ook wel te verklaren, omdat bij deze aanrijdingen de krachten op de demper, en daarmee de verlengingen, beperkt blijven, terwijl bij afwezigheid van de demper alle aanwezige ruimte in de expansiemogelijkheid wel wordt gebruikt. Bij zwaardere aanrijdingen zal de demper verder uitgetrokken worden, maar dit kan door de krachtopbouw in de demper toch wel binnen de perken worden gehouden. Toch heeft dit tot gevolg dat bij kleine expansiemogelijkheden het weinig zinvol is de demper toe te passen. Bij welke grootte van de expansiemogelijkheid het gebruik van dempers lonend begint te worden, is door het geringe aantal proeven en door de beperkingen die daarbij zijn opgetreden, moeilijk te zeggen. Gezien de bij de proeven optredende verlengingen van de demper kan worden aangenomen dat bij expansiemogelijkheden groter dan 8 cm het effect van de demper zeker te merken zal zijn. Deze veronderstelling wordt door de proef tegen het begin van de handleuning onderstreept.

De gekozen manier van verankeren van de beveiligingsconstructies heeft goed voldaan. De langskrachten in de ligger zijn door de verankeringen goed in de grond overgebracht. Hierbij zijn alleen bij de botsingen met de bussen elastische verplaatsingen ontstaan. Bij twee proeven is de zorg besteed aan de verankeringen te klein geweest, met als gevolg dat er verankeringskabels zijn gebroken.

Het gevolg hiervan is geweest dat vooral de dynamische uitbuigingen (veel) groter waren.

De constructie van de botszijde van het proefvoertuig is erg belangrijk in de afloop van de botsing. Stijve botszijden vangen de botsing goed op en beschermen zo de voorwielen van het botsende voertuig.

Is de botszijde slap geconstrueerd - bijvoorbeeld alleen het spatbord - dan komt het voorwiel in aanraking met de beveiligingsconstructie en is de kans groot dat het voorwiel de palen aanrijdt. Hierdoor ontstaat, afhankelijk van de lasvorm, in het algemeen grote schade aan voorwielophanging en stuurinrichting waardoor het botsende voertuig onbestuurbaar wordt.

7. CONCLUSIES

Samenvattend kan worden gesteld dat het goed mogelijk is om met de beschikbare constructie-onderdelen van de beveiligingsconstructie in aardebanen, maar met andere palen een goed werkende beveiligingsconstructie op kunstwerken te bouwen, die aan de gestelde eisen voldoet.

Vanuit deze goedwerkende beveiligingsconstructie is het mogelijk, door deze constructie steeds verder te verstijven, voor diverse breedtes van werkingsruimten op de kunstwerken, constructies te bouwen die een zo optimaal mogelijke beveiliging op deze kunstwerken bieden. Het is erg belangrijk dat de zogenaamde schampkant of stootrand zo ver mogelijk achter de beveiligingsconstructie wordt geplaatst. Hoogteverschillen tot 5 cm bleken tijdens de proeven geen merkbare invloed uit te oefenen op het proefverloop. Uit de proeven is verder gebleken dat de standaard handleuning sterk genoeg is om een wezenlijk aandeel te kunnen leveren in het omleiden van het proefvoertuig. Tevens werkt de handleuning in positieve zin bij het tegengaan van het kantelgevaar bij voertuigen met een hoog zwaartepunt.

De krachten die tijdens een botsing in de diagonalen ontstaan, zijn zo groot dat het noodzakelijk is deze diagonalen met kwaliteitsbouten te bevestigen. Bouten van 8.8 kwaliteit zijn hiervoor zeer geschikt. Om bovenvermelde reden is het ook niet mogelijk ter plaatse van de diagonalen slobgaten in de geleiderails toe te staan, daar anders de werking van de diagonalen te niet wordt gedaan. Het overbrengen van de krachten van de diagonalen op de geleiderails door het toepassen van voorspanbouten levert niet de gewenste resultaten.

Is er in het kunstwerk een dilatatievoeg aanwezig, dan moet op dezelfde plaats in de beveiligingsconstructie een expansiemogelijkheid aanwezig zijn. Deze expansiemogelijkheid moet dan niet veel groter gemaakt worden dan strikt noodzakelijk is. Om de expansiemogelijkheid te laten werken waarvoor zij is ontworpen mogen de moeren niet vaster dan handvast worden aangedraaid, waarna deze moeren met een contra-moer worden geborgd. De invloed van

een expansiemogelijkheid op de werking van een beveiligingsconstructie kan ongeveer evenredig met de grootte van de expansiemogelijkheid worden gesteld. Hoe groter de expansiemogelijkheid is, hoe verder de beveiligingsconstructie bij een botsing zal uitbuigen, daar het langsverband door het aanbrengen van expansiemogelijkheid uit de ligger is gehaald.

Het aanbrengen van een hydraulische schokdemper is een goede methode om het verloren gegane langsverband weer te herstellen. De demper brengt de langskrachten, die tijdens een botsing in de ligger ontstaan, goed van het ene liggerdeel op het andere liggerdeel over. De invloed van de demper op de werking van de beveiligingsconstructie is relatief het grootst bij grote expansiemogelijkheden. Een nadeel is als maar één demper kan worden geplaatst, deze demper als een scharnier gaat werken en deze scharnierwerking een negatieve invloed uitoefent op de werking van de beveiligingsconstructie. Deze negatieve invloed van de scharnierwerking is echter veel kleiner dan de invloed van de expansiemogelijkheid zelf op de werking van de constructie.

Uit de proeven is niet gebleken dat de geïntroduceerde discontinuïteiten (demper en expansiemogelijkheid met demper) een duidelijk nadelige invloed hebben op de werking van de beveiligingsconstructies. Het aantal proeven is te klein geweest om een volledig overzicht te kunnen verkrijgen omtrent de invloed van de expansiemogelijkheid en van de demper. Gesteld kan echter wel worden dat de invloed van de expansiemogelijkheid (erg) negatief is op de goede werking van de beveiligingsconstructie en dat de demper deze negatieve invloed voor een (groot) deel wegneemt.

Uit de vertragingen die met behulp van het mathematisch model zijn berekend kan blijken dat de optredende vertragingen voor de Opel Rekord kritiek zijn. Zowel voor de Bedford als voor de bus leveren de optredende vertragingen (berekend in het zwaartepunt) geen enkel gevaar op.

De vorm en de sterkte van het voertuig en speciaal die delen van het voertuig die met de beveiligingsconstructie in botsing komen, hebben een belangrijke invloed op de afloop van de botsing.

De verankering moet met zorg worden aangebracht, teneinde de optredende langskrachten goed te kunnen opvangen.

LITERATUUR

Böhringer, A., Roschmann, R. & Domhan, M. (1970). Anfahrversuche an Leitplanken. Schriftenreihe Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 98. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1970.

Edelman, ir. A. (1970). Meting van zwaartepuntsligging van vijf voertuigen. Rapport 05-2-10. IW-TNO, Delft, 1970.

Giavotto, V. (1973). A mathematical model for impact tests on crash barriers. In: Traffic safety barriers and lighting supports. H.R. Record No. 460, pp. 49-60. HRB, Washington, D.C., 1973.

Normcommissie 104 (Voorspanbouten) (1968) (Tweede druk). Voorlopige richtlijnen voor het ontwerpen en de uitvoering van verbindingen met voorspanbouten in staalconstructie; Concept, 2de uitgave. Delft, 1968.

Schulze, ir. R.A.P. (1970). Beproeving van middenbermpalen. Deel I, II & III. Rapport 5064. IWECO-TNO, Delft, 1970.

Stigter, B.J. (1971). Metingen aan vangraildemper. KONI N.V., Oud-Beijerland, 1971.

SWOV (1967). Discontinuïteiten in beveiligingsconstructies voor bermen en kunstwerken. SWOV (ir. F.C. Flury). Rapport 67-2. Tweede druk. SWOV, 1967.

SWOV (1970). Bermbeveiliging; Een beschrijving van de ontwikkelde geleiderailconstructies. SWOV (ir. M. Slop). Rapport 1970-1. SWOV, Voorburg, 1970.

SWOV (1973). Obstakels in wegbermen; Een overzicht en beschrijving van in de literatuur beschreven onderzoek omtrent het gedrag bij botsingen met vaste voorwerpen die voorkomen in zones langs de rijbaan. SWOV (C.C. Schoon). R-73-2A + B. SWOV, Voorburg, 1973.

SWOV (1975a). Paal/voetverbindingen volgens nieuwe L-lascodes bij beveiligingsconstructies op kunstwerken. SWOV (ing. W.H.M. van de Pol). R-75-7. SWOV, Voorburg, 1975.

SWOV (1975b). Hydraulische schokdempers; Expansiemogelijkheden in beveiligingsconstructies op kunstwerken. SWOV (ing. W.H.M. van de Pol). R-75-9. SWOV, Voorburg, 1975.

TABELLEN 1 T/M 4

Tabel 1. Situaties waarvoor een beveiligingsconstructie moet worden ontworpen.

Tabel 2. Maten en gewichten van de proefvoertuigen.

Tabel 3. Zwaartepuntsligging van de proefvoertuigen.

Tabel 4. Lijst van gebruikte codes beveiligingsconstructies op kunstwerken.

Situatie	Plaats	Opmerking
1	middenberm tussenberm	zonder obstakels met daarnaast parallelweg voor veel en zwaar verkeer
2	middenberm zijberm	met obstakels met daarnaast parallelweg voor langzaam of weinig verkeer of fietspad
3	zijberm	zijkant kunstwerk al of niet met obstakel
4	zijberm	inspectiepad met handleuning

Tabel 1. Situaties waarvoor een beveiligingsconstructie moet worden ontworpen.

Voertuig		Spoorbreedte		Wiel- basis	Gewicht
		voor	achter		
		mm	mm	mm	kgf
Personenwagen	Opel Rekord	1260	1270	2540	944
	Citroën ID	1500	1300	3100	1265
Vrachtwagen	Bedford	1762	1958	4255	3101
Autobussen	Kromhout/Verheul	2135	2200	5945	9085
	Leyland	2014	2100	5330	8618

Tabel 2. Maten en gewichten van de proefvoertuigen.

Voertuig		Zwaartepunt			Hoogte
		Achter vooras	Lengtehartlijn		
		mm	links	rechts	mm
Personenwagen	Opel Rekord	1074	5		565
	Citroën ID	1095		2	495
Vrachtwagen	Bedford	2224	23		1685
Autobussen	Kromhout/Verheul	3025	46		1340
	Leyland	2932		31	1065

Tabel 3. Zwaartepuntsligging van de proefvoertuigen.

F	flexibel	
V ₁	verstijfd door middel van diagonalen in het middelste veld van elke 4 m geleiderail	
V _p	verstijfd door verkleining van de paalafstand	
V _{1p}	verstijfd door middel van diagonalen in het middelste veld van elke 4 m geleiderail en door verkleining van de paalafstand	
2	tweezijdig uitgebouwd	
1	éénzijdig uitgebouwd	
l _s	éénzijdig uitgebouwd met strip en in elk veld een diagonaal	
L	lijf gelast	} IPE 100 paal
LV	lijf en voorflens gelast	
R	rondom gelast	
133	} paalafstand in cm	
267		
400		

Tabel 4. Lijst van gebruikte codes beveiligingsconstructies op kunstwerken.

AFBEELDINGEN 1 T/M 17

Afbeelding 1. Beveiligingsconstructies voor de zijkant van oudere kunstwerken.

Afbeelding 2. Beveiligingsconstructie voor de zijkant van nieuwe kunstwerken, doch zonder inspectiepad.

Afbeelding 3. Beveiligingsconstructie voor de zijkant van nieuwe kunstwerken met inspectiepad en handleuning.

Afbeelding 4. Stroomdiagram van het programma.

Afbeelding 5. Kracht-vervormingsdiagram carrosserie.

Afbeelding 6. Kracht-verplaatsingsdiagram diagonalen.

Afbeelding 7. Ligger-paalbeweging.

Afbeelding 8. Kracht-verplaatsingsdiagram van de paal.

Afbeelding 9. Kracht-verplaatsingsdiagram tweetrapseffect.

Afbeelding 10. Blokschema meetapparatuur.

Afbeelding 11. Opstelling paal, op proefstrand.

Afbeelding 12. Globaal te verwachten uitbuigingen van de tweezijdig uitgebouwde beveiligingsconstructies.

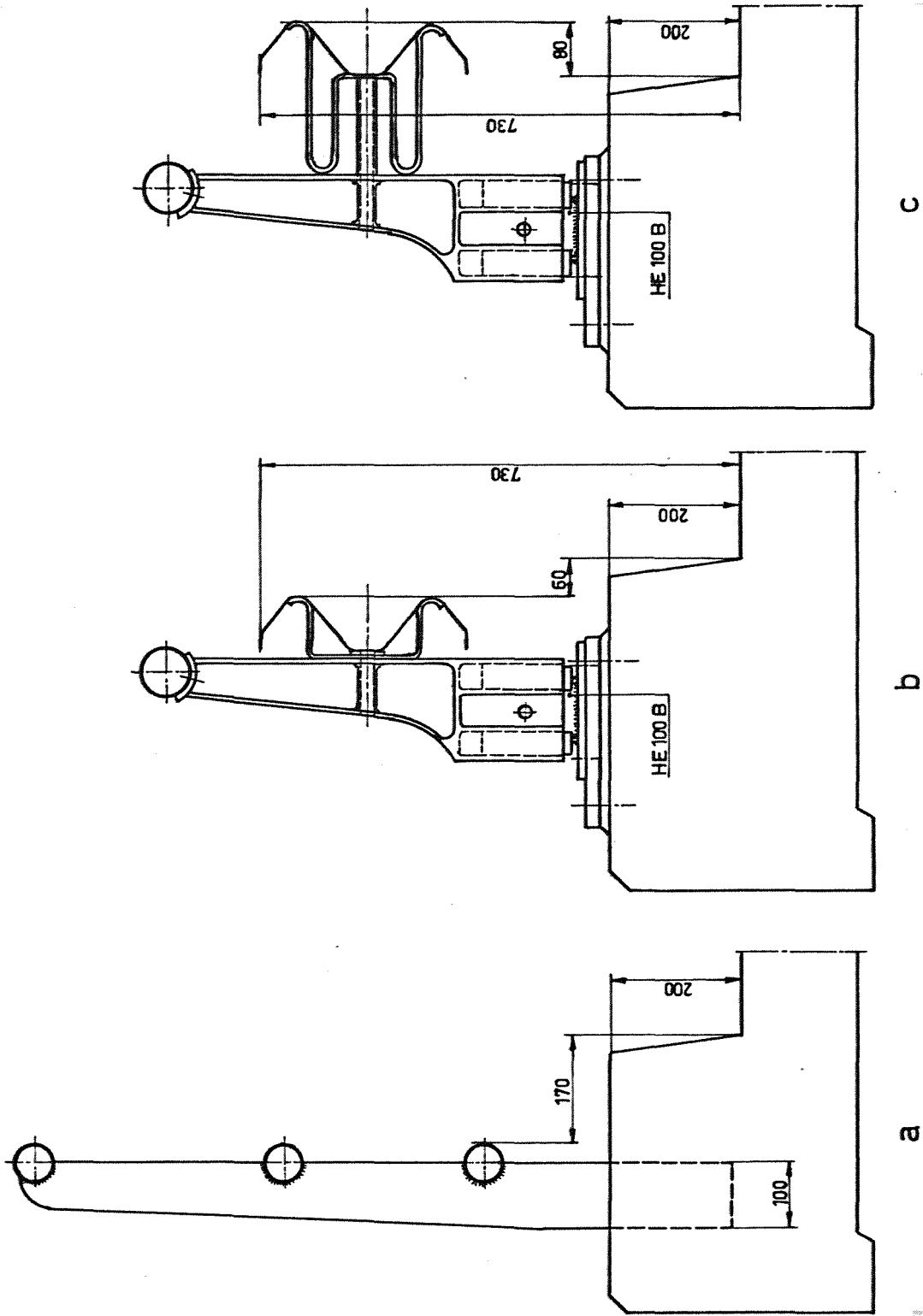
Afbeelding 13. Globaal te verwachten uitbuigingen van de éenzijdig uitgebouwde beveiligingsconstructies.

Afbeelding 14. Globaal te verwachten uitbuiging van de éenzijdig uitgebouwde beveiligingsconstructie met trekstrip.

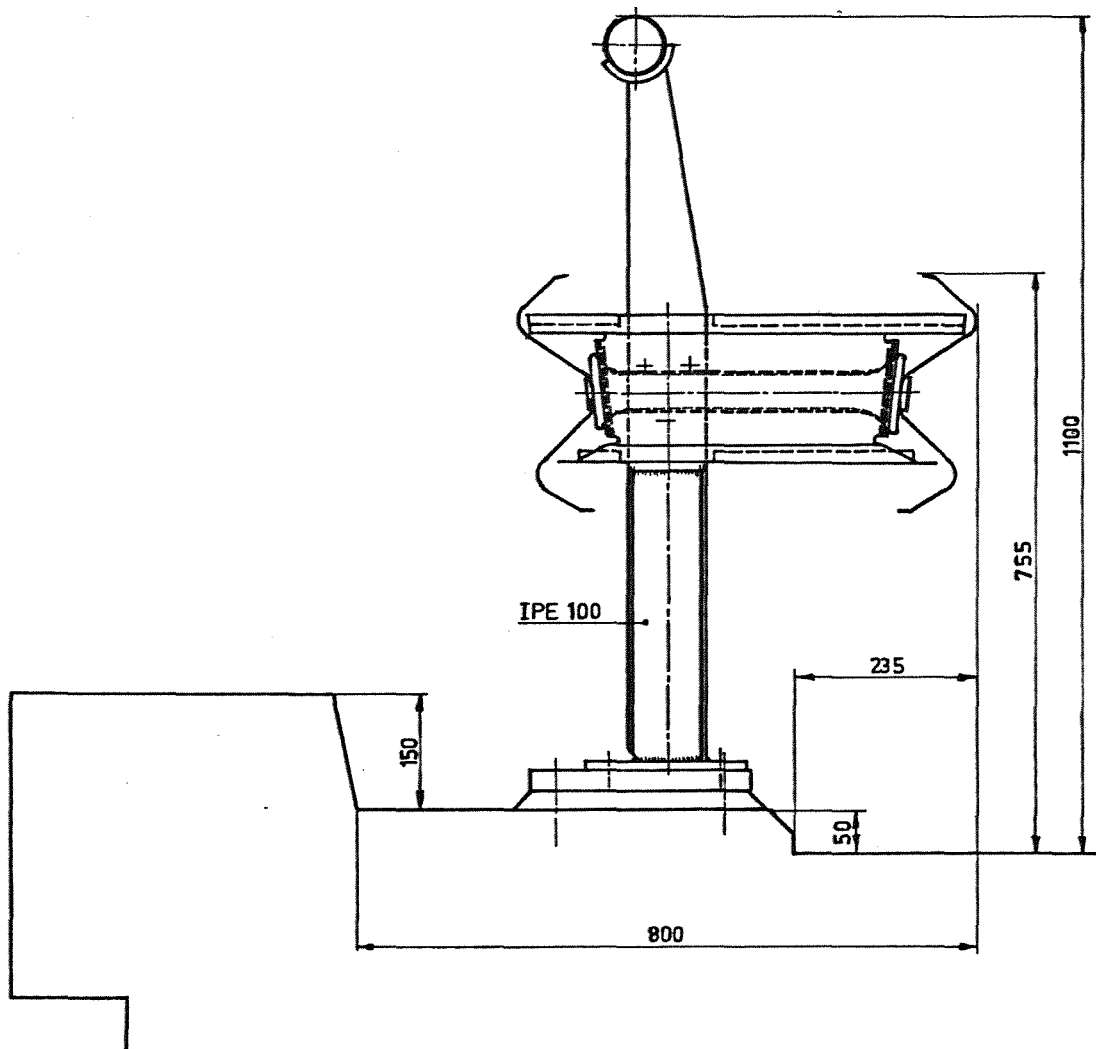
Afbeelding 15. Globaal te verwachten uitbuigingen van de beveiligingsconstructies.

Afbeelding 16. Statische uitbuiging voorste geleiderail van de proef (C3) versus het mathematisch model.

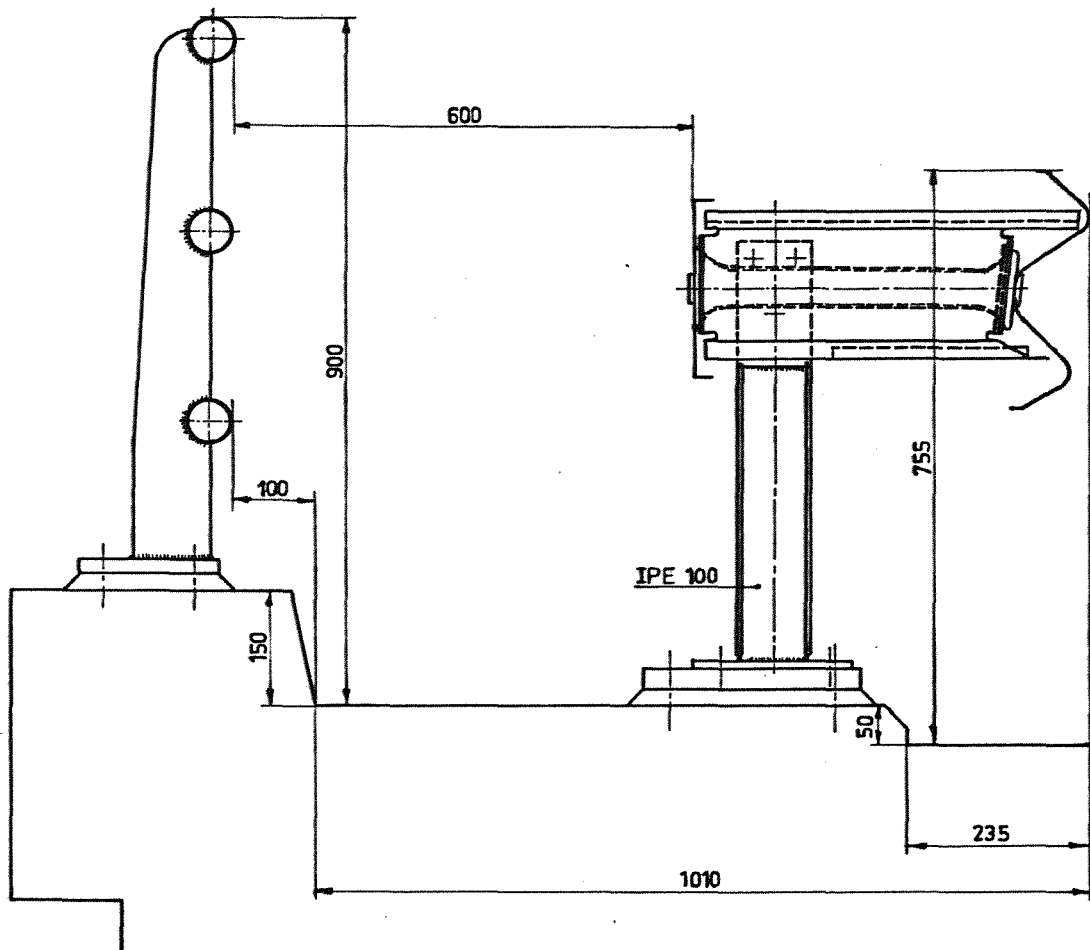
Afbeelding 17. Vertraging tegen de tijd van de proeven C1, C2 en C3 volgens het mathematisch model.



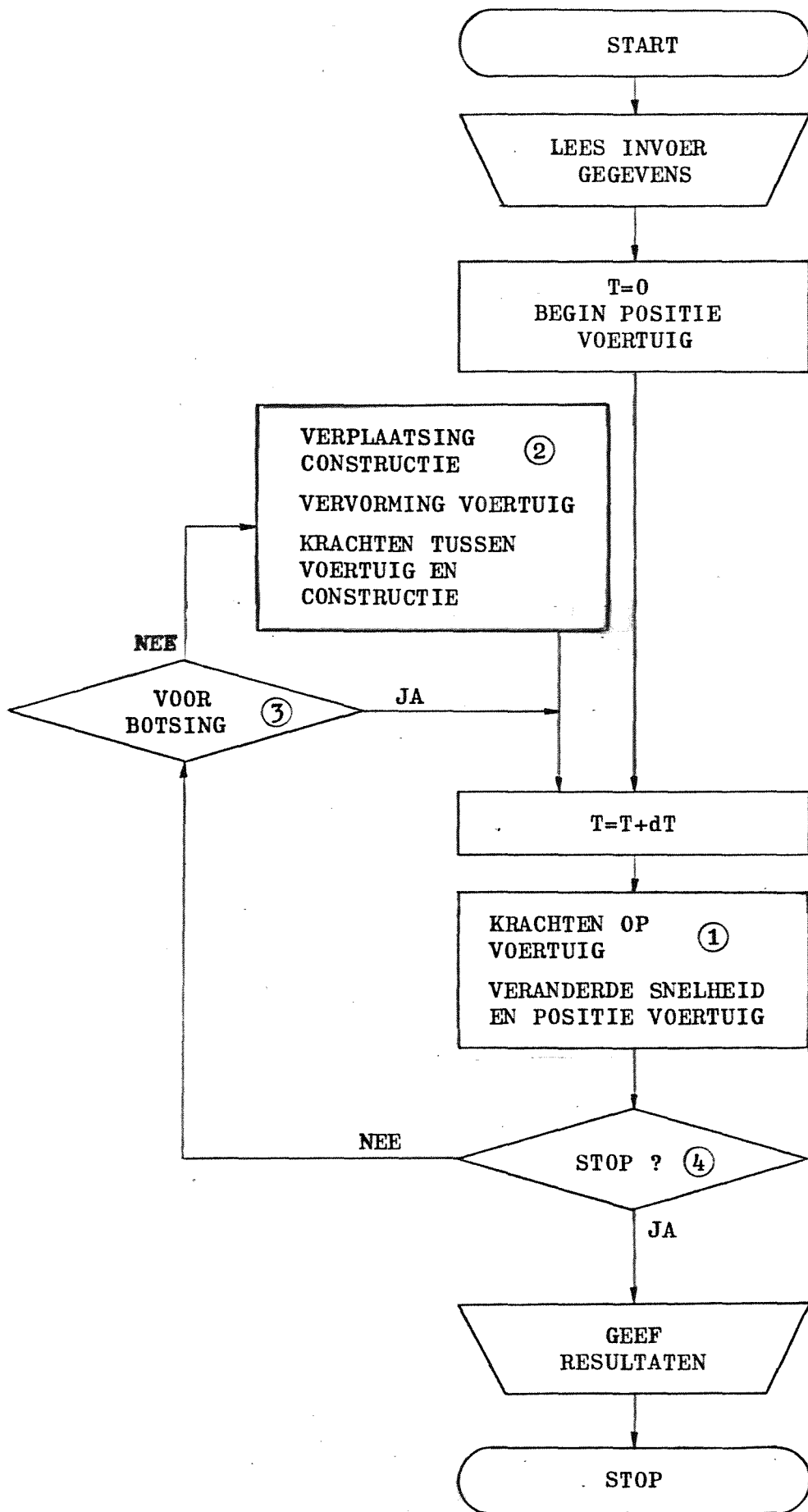
Afbeelding 1. Beveiligingsconstructies voor de zijkant van oudere kunstwerken.



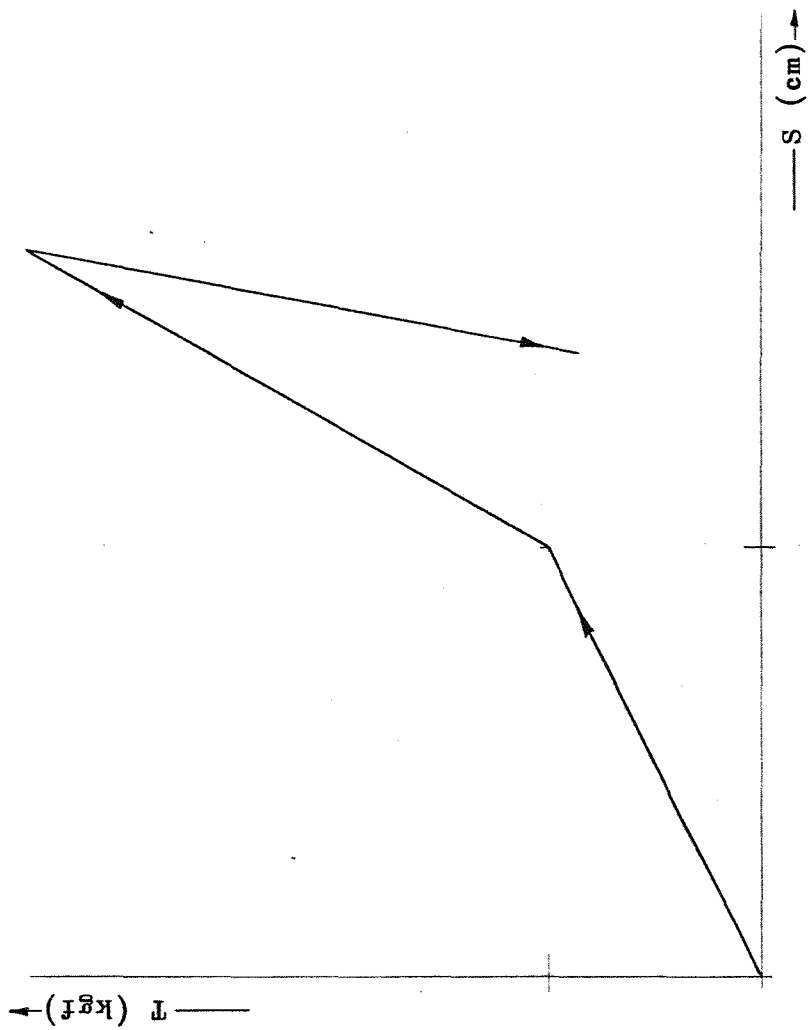
Afbeelding 2. Beveiligingsconstructie voor de zijkant van nieuwe kunstwerken, doch zonder inspectiepad.



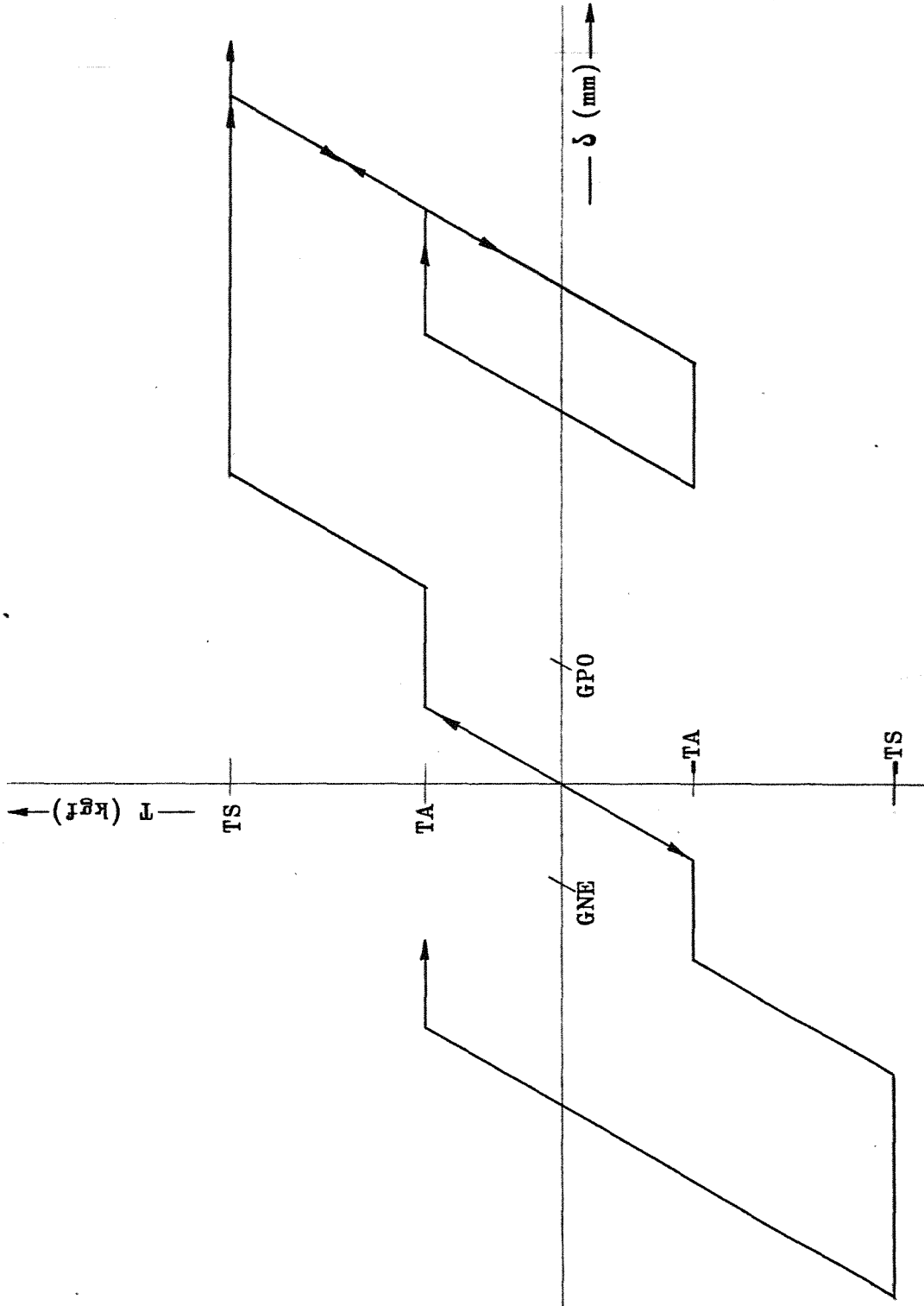
Afbeelding 3. Beveiligingsconstructie voor de zijkant van nieuwe kunstwerken met inspectiepad en handleuning.



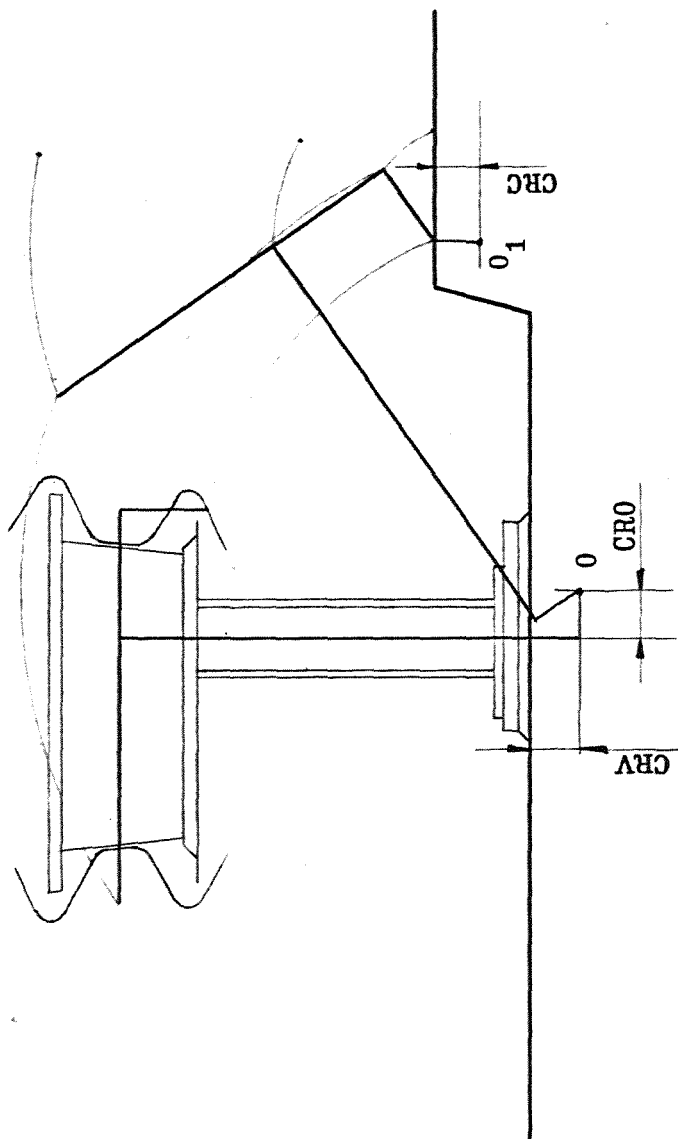
Afbeelding 4. Stroomdiagram van het programma.



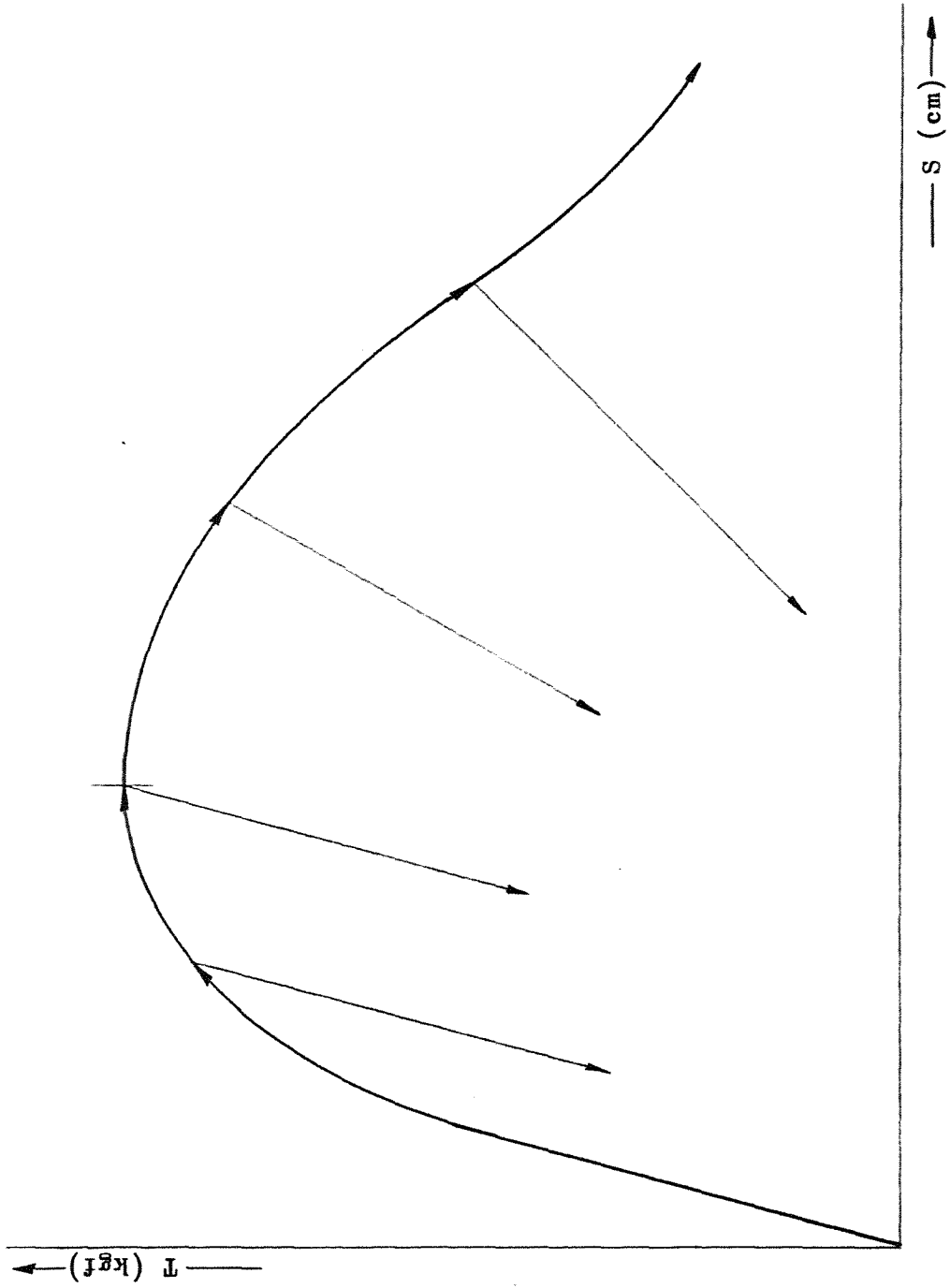
Afbeelding 5. Kracht-vervormingsdiagram carrosserie.



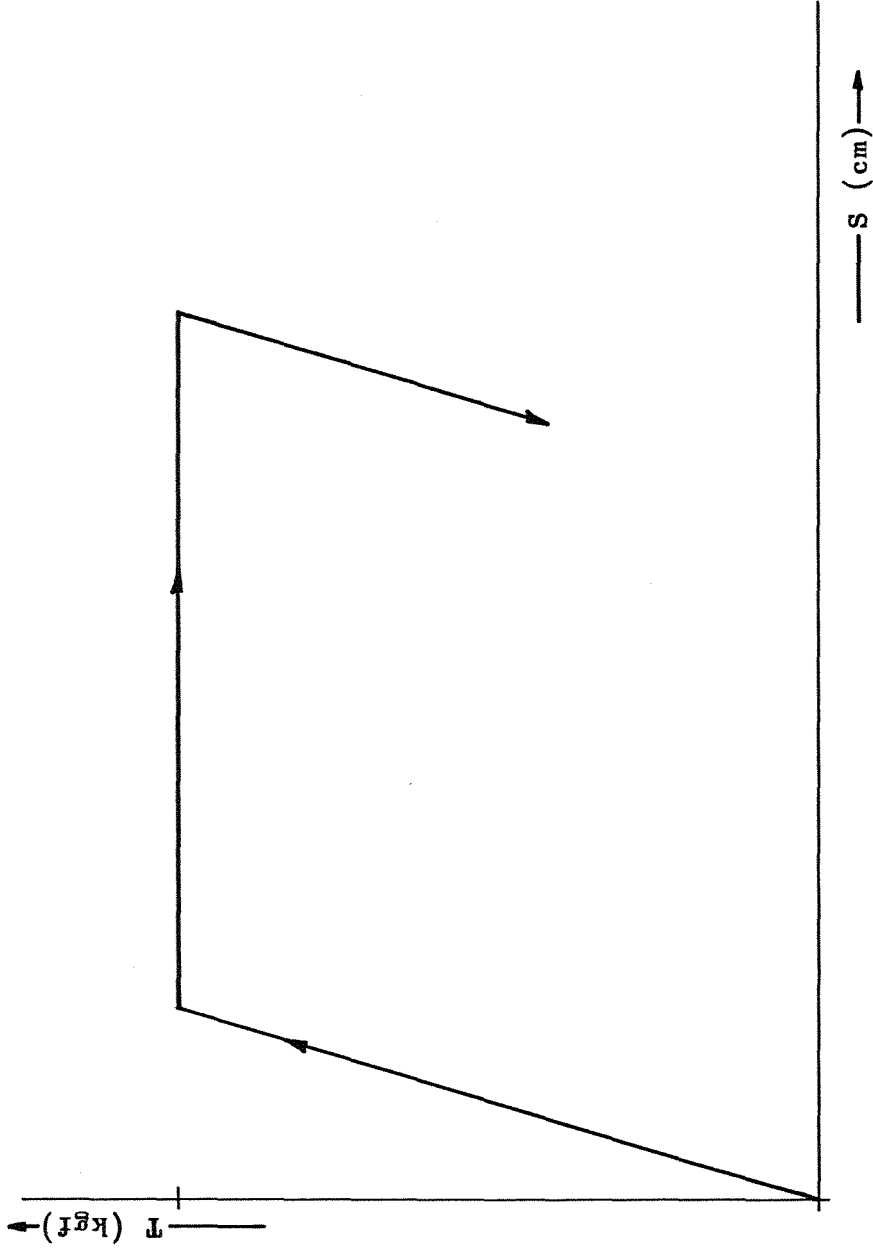
Afbeelding 6. Kracht-verplaatsingsdiagram diagonalen.



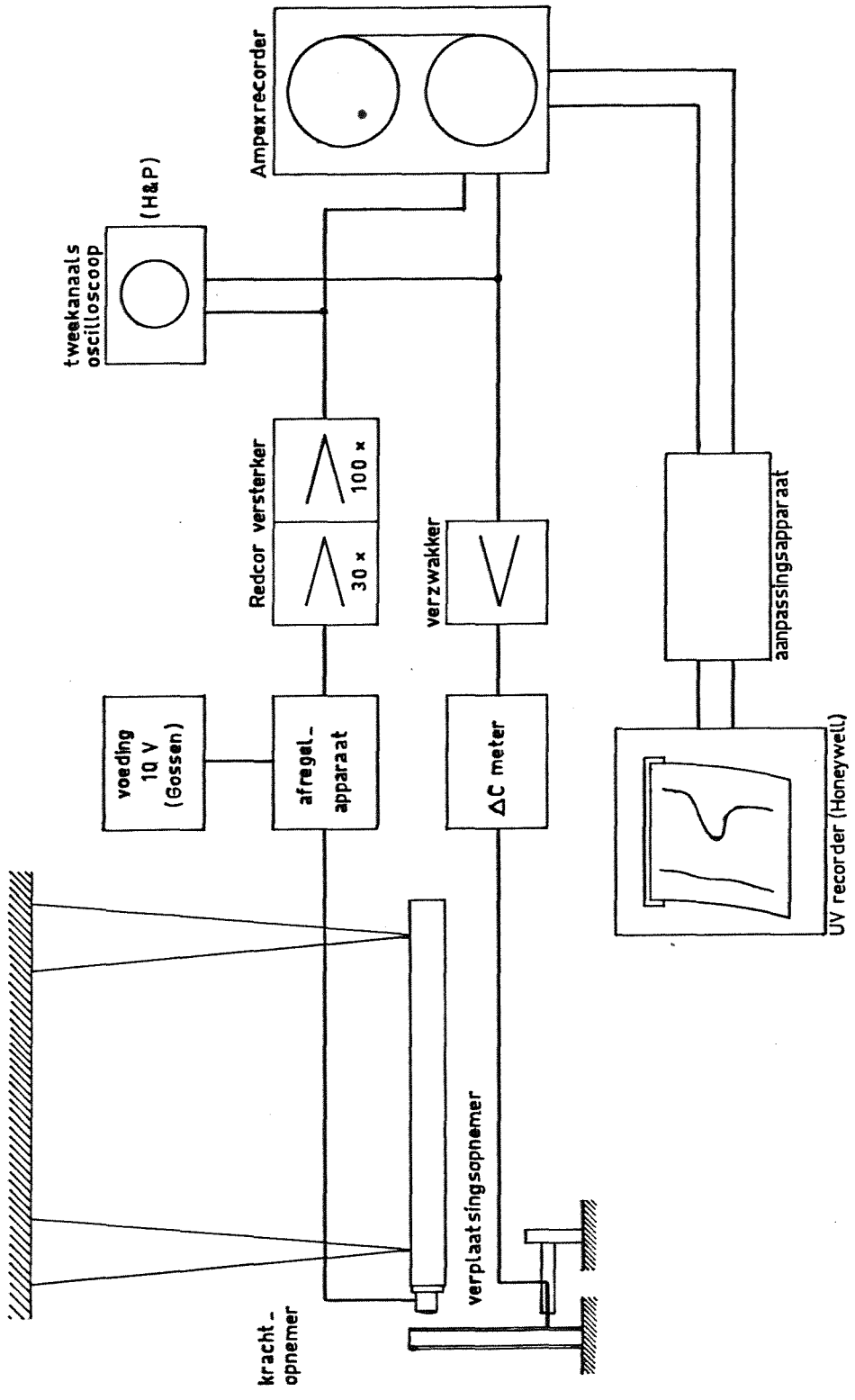
Afbeelding 7. Ligger-paalbeweging.



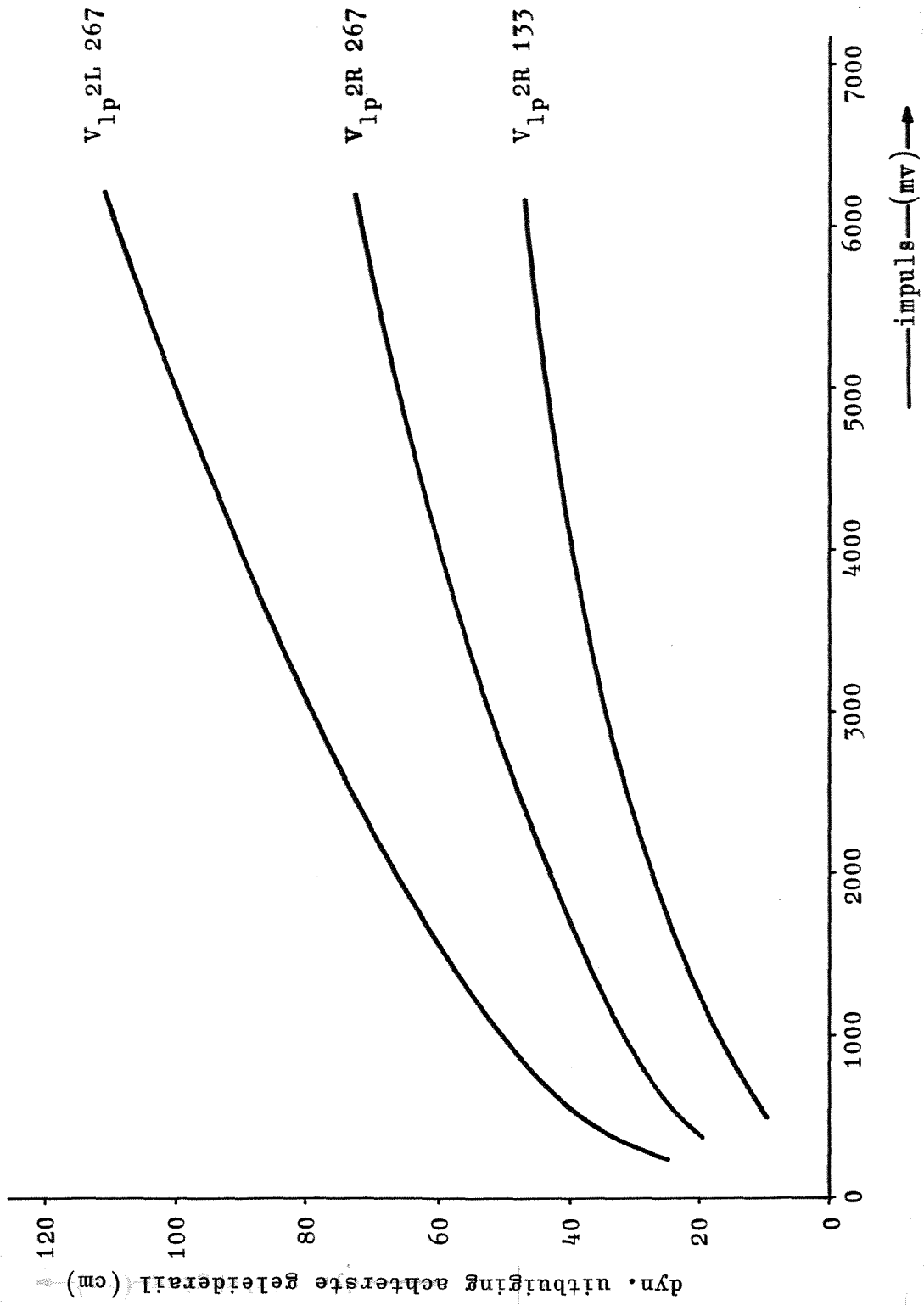
Afbeelding 8. Kracht-verplaatsingsdiagram van de paal.



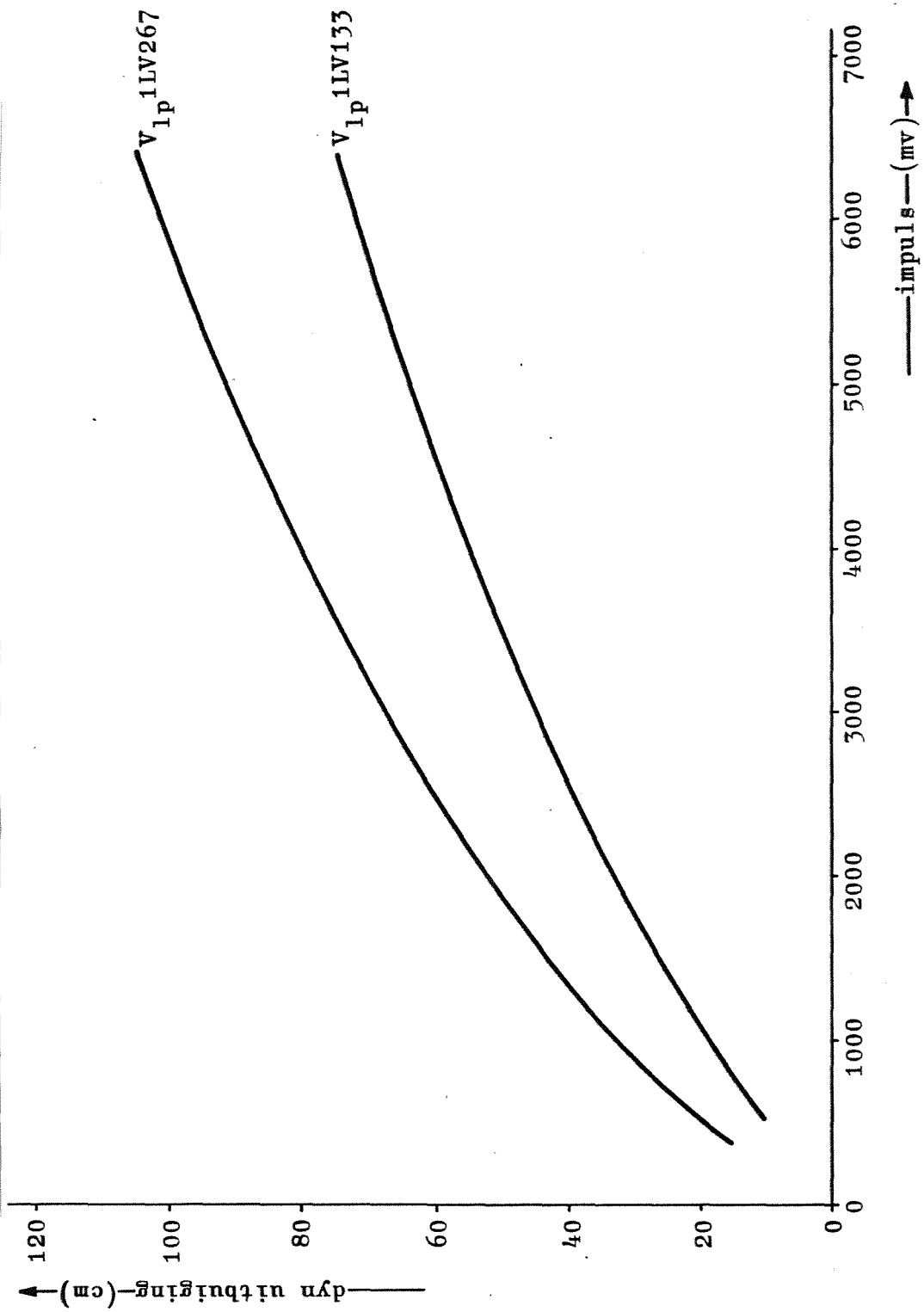
Afbeelding 9. Kracht-verplaatsingsdiagram tweetrapseffect.



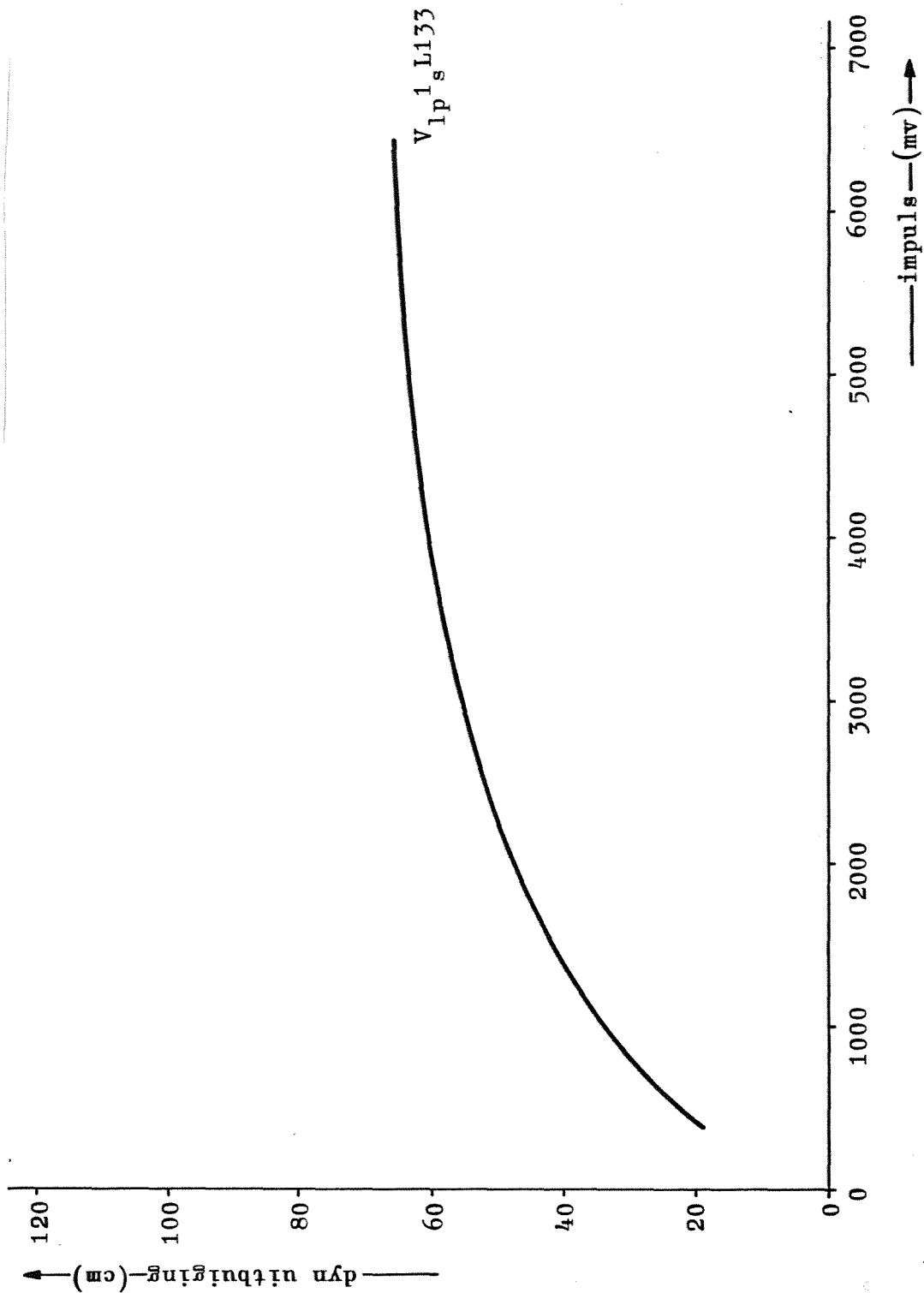
Afbeelding 10. Blokschema meetapparatuur.



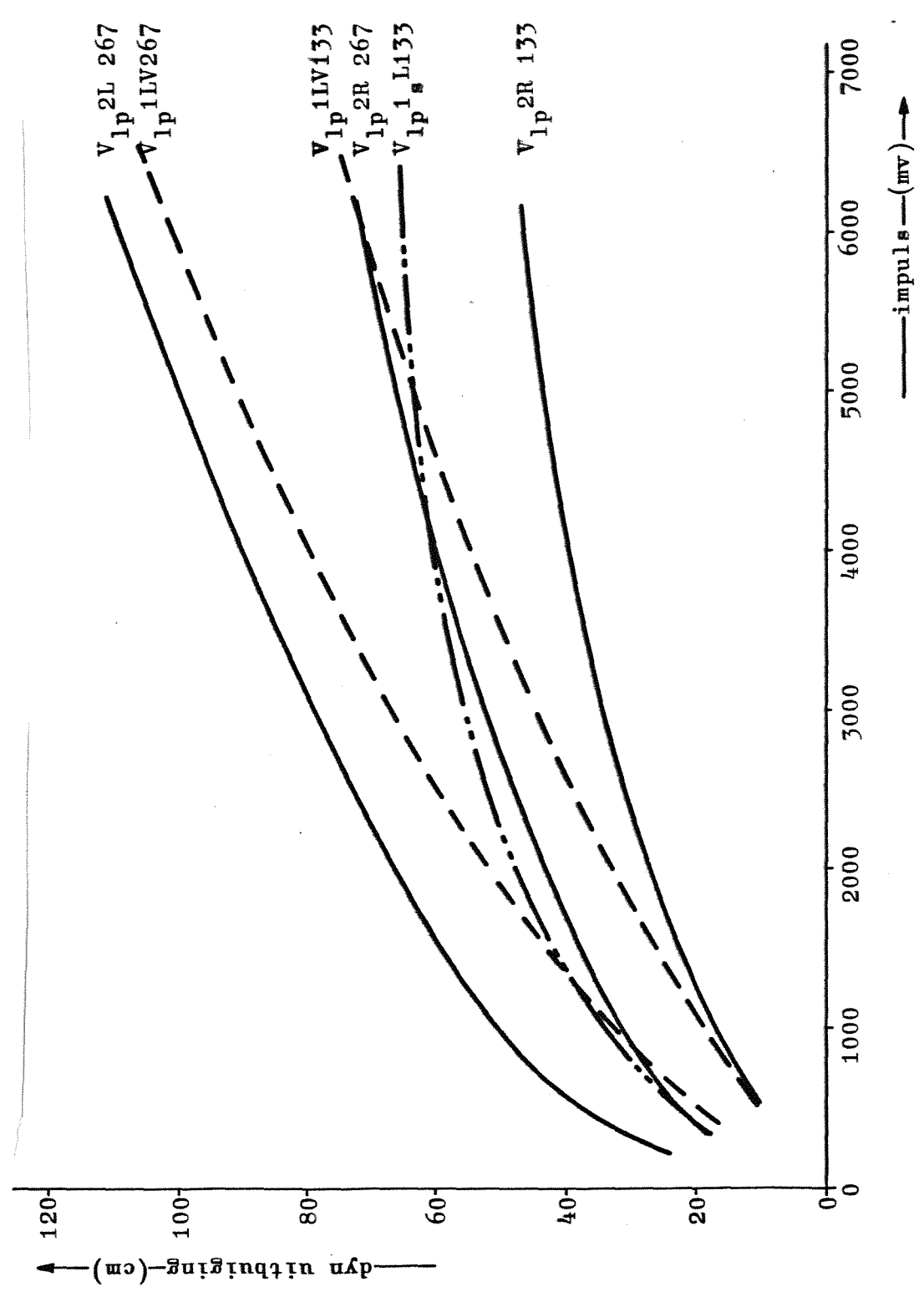
Afbeelding 12. Globaal te verwachten uitbuigingen van de tweezijdig uitgebouwde beveiligingsconstructies.



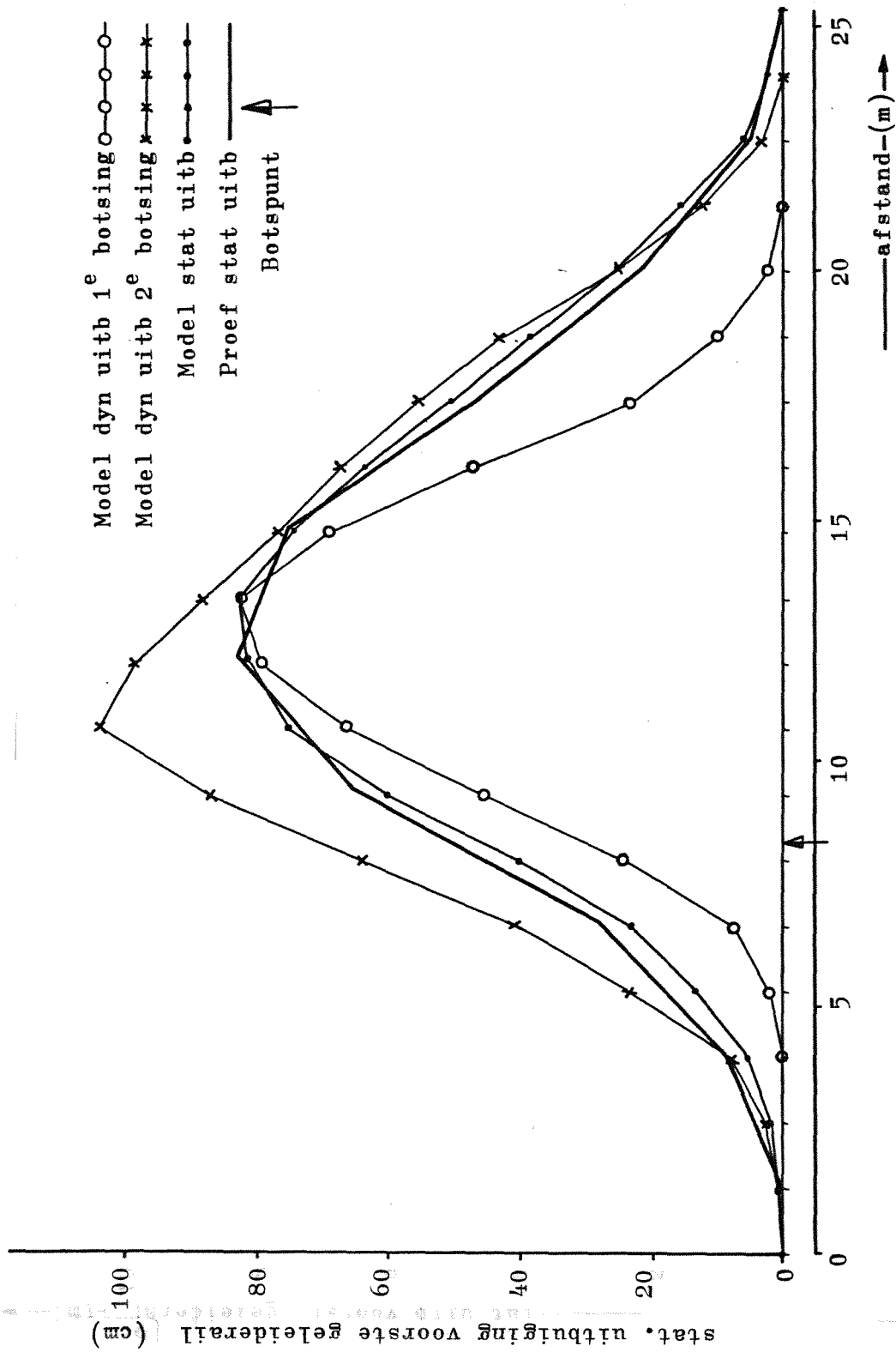
Afbeelding 13. Globaal te verwachten uitbuigingen van de één-
zijdig uitgebouwde beveiligingsconstructies.



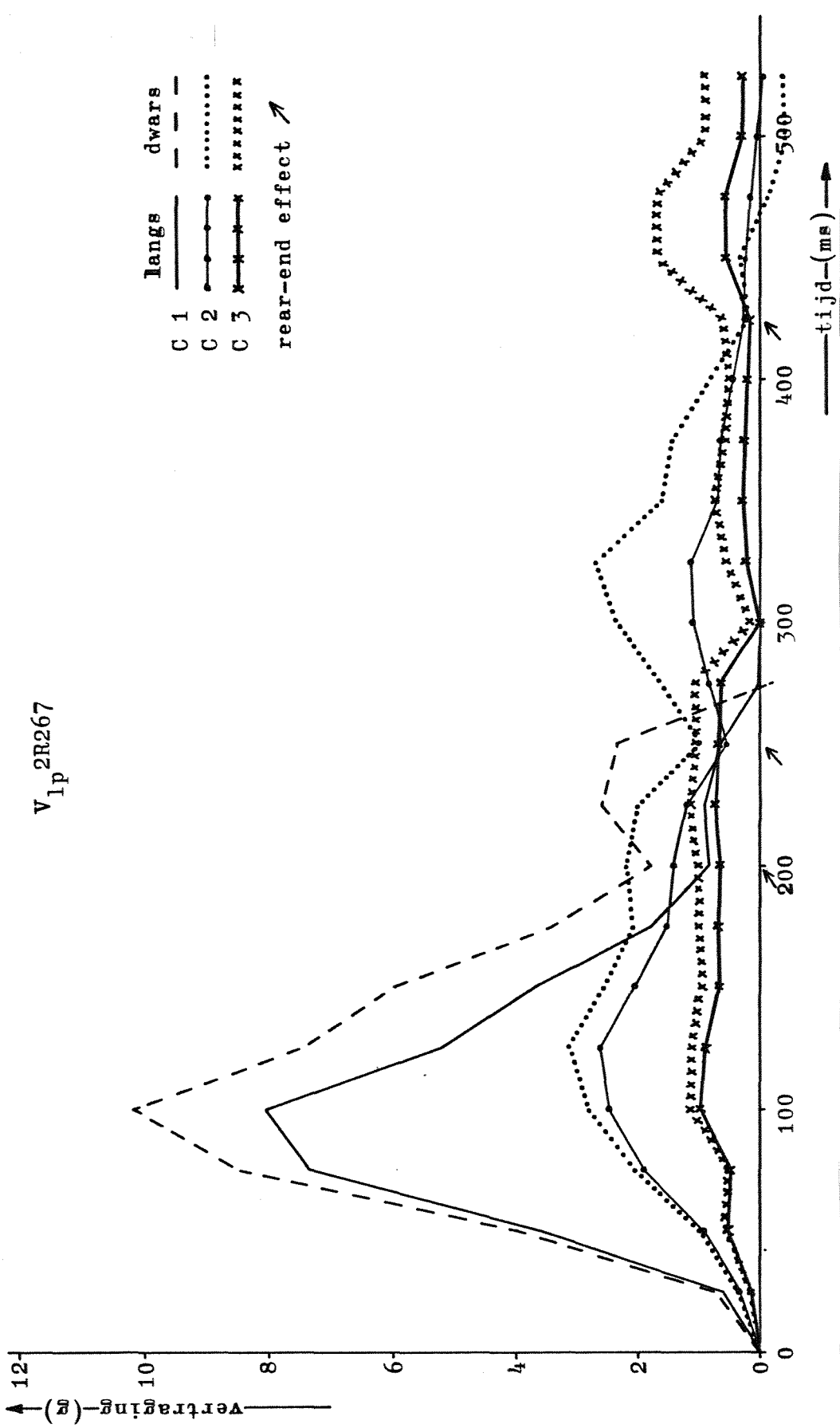
Afbeelding 14. Globaal te verwachten uitbuiging van de één-zijdig uitgebouwde beveiligingsconstructie met trekstrip.



Afbeelding 15. Globaal te verwachten uitbuigen van de beveiligingsconstructies.



Afbeelding 16. Statische uitbuiging voorste geleiderail van proef C3 versus het mathematisch model.



Afbeelding 17. Vertraging tegen de tijd van de proeven C1, C2 en C3 volgens het mathematisch model.

CONSTRUCTIETEKENINGEN 1 T/M 23

Overzicht van de tekeningen van de beproefde beveiligingsconstructies

Tekening 1. Verstijfde tweezijdig uitgebouwde constructie

V_{lp} 2R 267

Tekening 2. Doorsnede A-A van V_{lp} 2R 267

Tekening 3. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie

V_{lp} 1LV 267

Tekening 4. Doorsnede A-A van V_{lp} 1LV 267

Tekening 5. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie met schampkant V_{lp} 1LV 133

Tekening 6. Doorsnede A-A van V_{lp} 1LV 133

Tekening 7. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie

V_p 1LV 200

Tekening 8. Doorsnede A-A van V_p 1LV 200

Tekening 9. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie met

trekstrip V_{lp} 1 L 133

Tekening 10. Doorsnede A-A van V_{lp} 1 L 133

Tekening 11. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie met

trekstrip, expansiemogelijkheid en demper V_{lp} 1 L 133

Tekening 12. Doorsnede A-A van V_{lp} 1 L 133

Tekening 13. Flexibele tweezijdig uitgebouwde constructie met expansiemogelijkheid en demper F2L 400

Tekening 14. Doorsnede A-A van F2L 400

Tekening 15. Geleiderail type A

Tekening 16. Afstandhouder voor de tweezijdig uitgebouwde constructie

Tekening 17. Afstandhouder voor de éénzijdig uitgebouwde constructie

Tekening 18. Afstandhouder voor de éénzijdig uitgebouwde constructie met trekstrip

Tekening 19. Paal met lasdetails

Tekening 20. Diagonalen

Tekening 21. Trekstrip met koppelplaat

Tekening 22. Expansiemogelijkheid in geleiderail

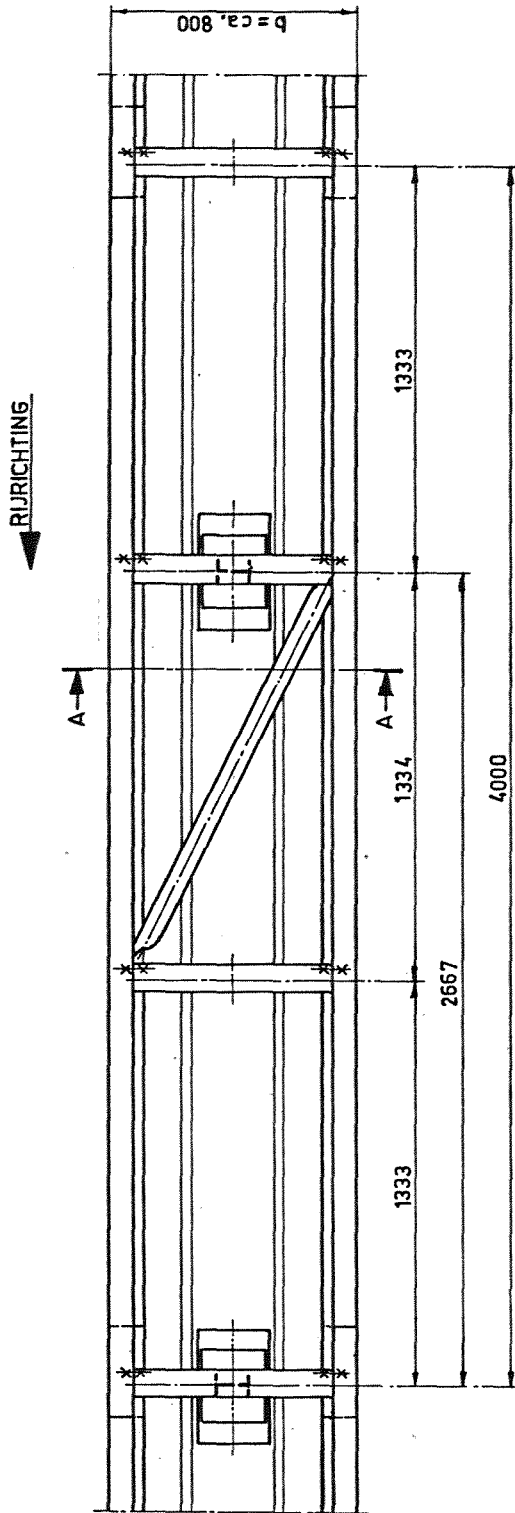
Tekening 23. Expansiemogelijkheid in trekstrip

Tekening nummer	Onderwerp	Type beveiligingsconstructie		Toegepast bij de proeven
1	Overzicht 1:25	Tweezijdig uitgebouwde constructie verstijfd d.m.v. verkleinde paalafstand en diagonalen in elk middenveld.	V _{1p} 2R 267	C 1 t/m C 3
2	Doorsnede A-A 1:10		V _{1p} 2R 133 V _{1p} 2L 267 (b=80 cm)	C 4 t/m C 6 C 16 t/m C18
3	Overzicht 1:25	Eénzijdig uitgebouwde constructie verstijfd d.m.v. verkleinde paalafstand en diagonalen in elk middenveld, met schampkant.	V _{1p} 1LV 267	C 7 t/m C 9
4	Doorsnede A-A 1:10		V _{1p} 1LV 133 (b=60 cm)	C 10 t/m C 12
5	Overzicht 1:25	Eénzijdig uitgebouwde constructie verstijfd d.m.v. verkleinde paalafstand. Als bij tekening 3 en 4 echter zonder een schampkant.	V _p 1LV 200 (b=60 cm)	C 13 t/m C15
6	Doorsnede A-A 1:10		V _{1p} 1LV 267 (b=60 cm)	C 19
7	Overzicht 1:25	Eénzijdig uitgebouwde constructie verstijfd d.m.v. verkleinde paalafstand en diagonalen in elk middenveld.	V _{1p} 1LV 267	C 20 en C 21
8	Doorsnede A-A 1:10		(b=60 cm)	
9	Overzicht 1:25	Eénzijdig uitgebouwde constructie met trekstrip verstijfd d.m.v. verkleinde paalafstand en diagonalen in elk veld.	V _{tp} 1 _s L 133	C 22 t/m C 25
10	Doorsnede A-A 1:10		(b=51 cm)	
11	Overzicht 1:25	Eénzijdig uitgebouwde constructie met trekstrip verstijfd d.m.v. verkleinde paalafstand en diagonalen in elk veld met een expansiemogelijkheid van 40 mm en een Koni hydraulische schokdemper. Als bij tekening 11 en 12 echter zonder een Koni hydraulische schokdemper.	V _{tp} 1 _s L 133	C 29 t/m C 32
12	Doorsnede A-A 1:10		(b=51 cm)	
13	Overzicht 1:25	Tweezijdig uitgebouwde constructie flexibel met een expansiemogelijkheid 80 mm en een Koni hydraulische schokdemper. Als bij tekening 13 en 14 echter zonder een Koni hydraulische schokdemper.	F 2L 400	C 34 t/m C 36
14	Doorsnede A-A 1:10		(b=80 cm)	C 38
15	Geleiderail type A	Alle beveiligingsconstructies.	F 2L 400 (b=80 cm)	C 37 C 1 t/m C 38

Overzicht van de tekeningen van de beproefde beveiligingsconstructies

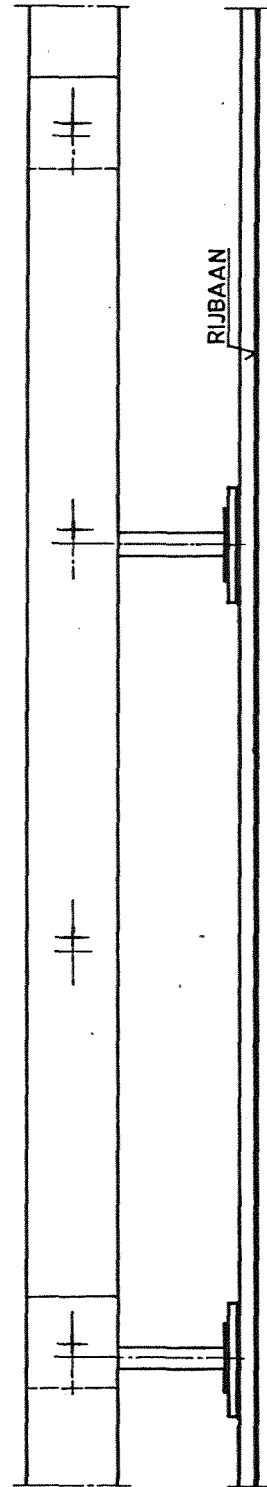
Tekening nummer	Onderwerp	Type beveiligingsconstructie	Code	Toegepast bij de proeven
16	Afstandhouder type NEHER	Tweezijdig uitgebouwde constructies.	(b=80 cm)	C 1 t/m C 6 C 16 t/m C 18 C 34 t/m C 38
17	Afstandhouder type NEHER	Eénzijdig uitgebouwde constructies	(b=60 cm)	C 7 t/m C 15 C 19 t/m C 21
18	Afstandhouder type NEHER	Eénzijdig uitgebouwde constructies met een trekstrip.	(b=51 cm)	C 22 t/m C 33
19	Paal met lasdetails	Twee- en éénzijdig uitgebouwde constructies eventueel met een trekstrip.	R LV L	C 1 t/m C 6 C 7 t/m C 15 C 19 t/m C 21 C 16 t/m C 18 C 22 t/m C 38
20	Diagonalen			C 1 t/m C 33
21	Trekstrip met koppelplaat	Eénzijdig uitgebouwde constructie met een trekstrip.	V _{tp} 1 _s L 133 (b=51 cm)	C 22 t/m C 33
22	Expansiemogelijkheid in geleiderail type A.			C 26 t/m C 38
23	Expansiemogelijkheid in geleiderail type A			C 26 t/m C 33

Overzicht van de tekeningen van de beproefde beveiligingsconstructies



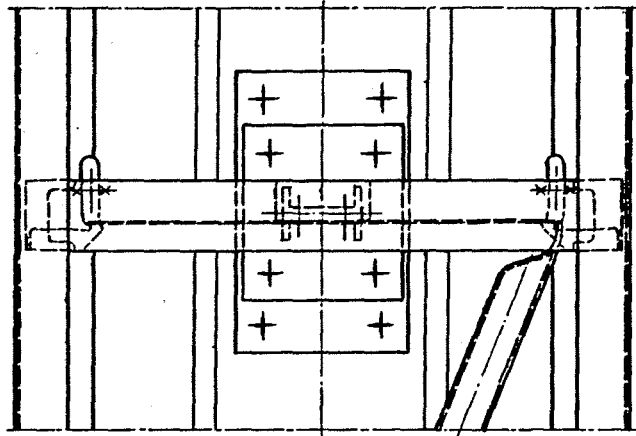
RIJRICHTING

SCHAAL 1:25

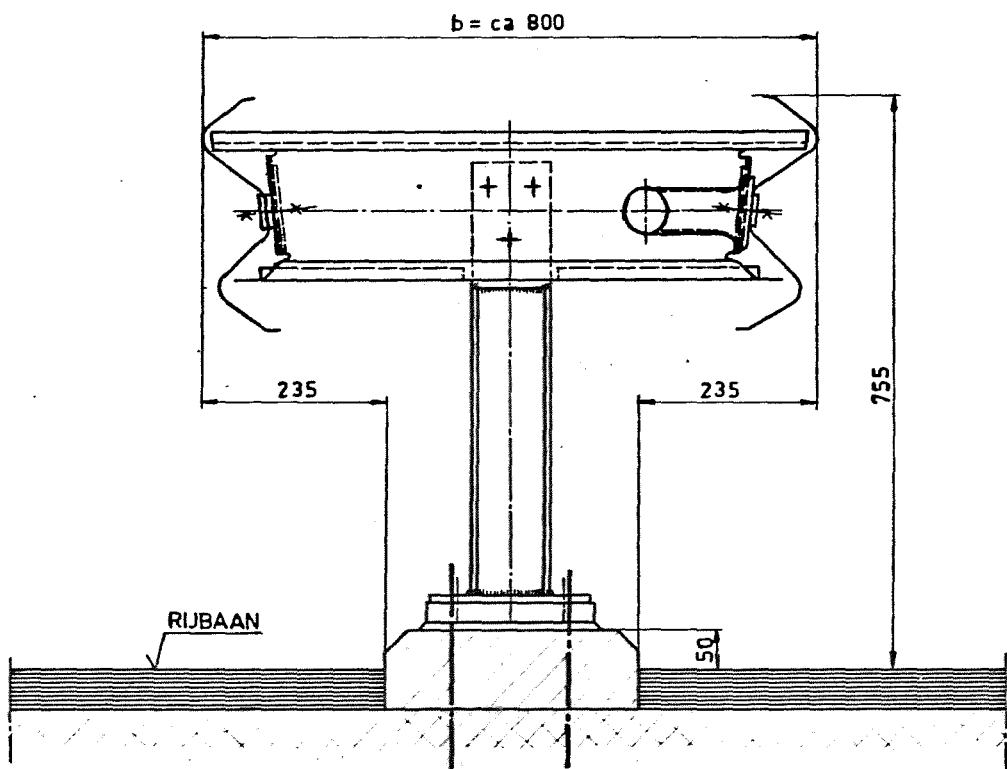


Tekening 1. Verstijfde tweezijdig uitgebouwde constructie

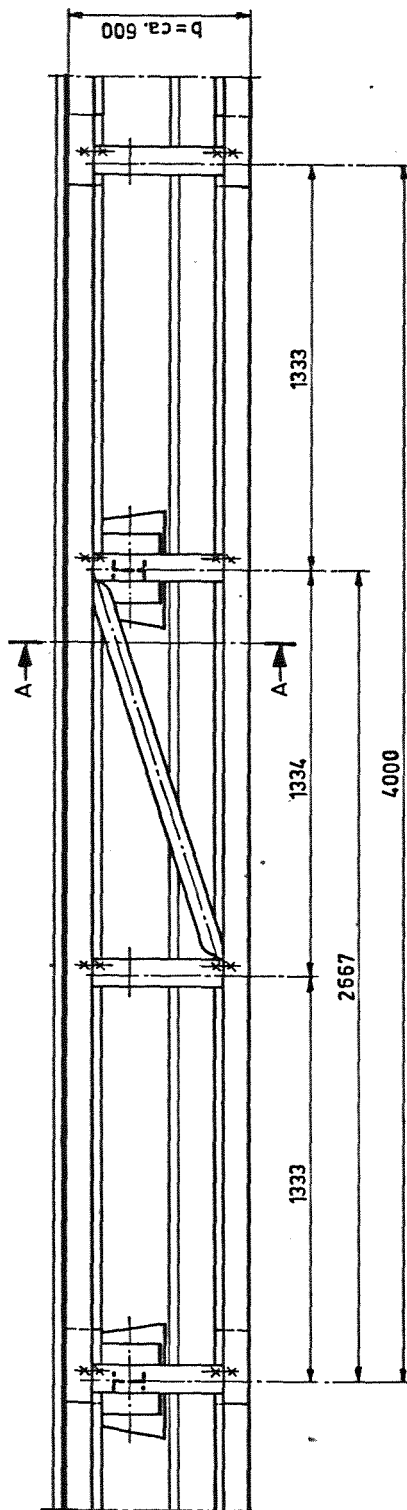
V_{lp} 2R 267



DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1:10

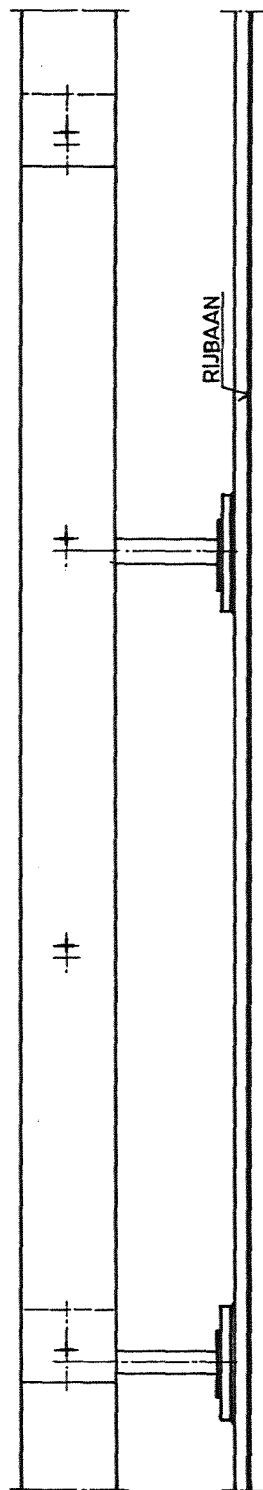


Tekening 2. Doorsnede A-A van V_{1p} 2R 267



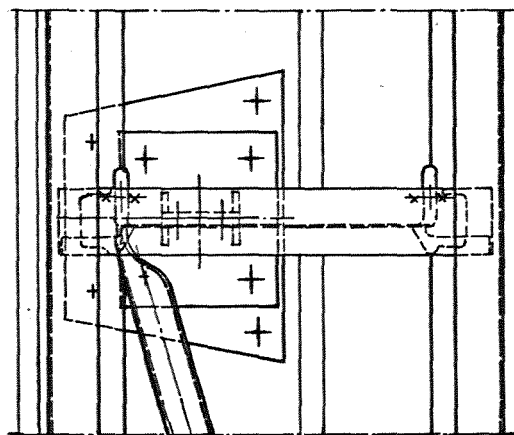
RIJRICHTING

SCHAAL 1 : 25

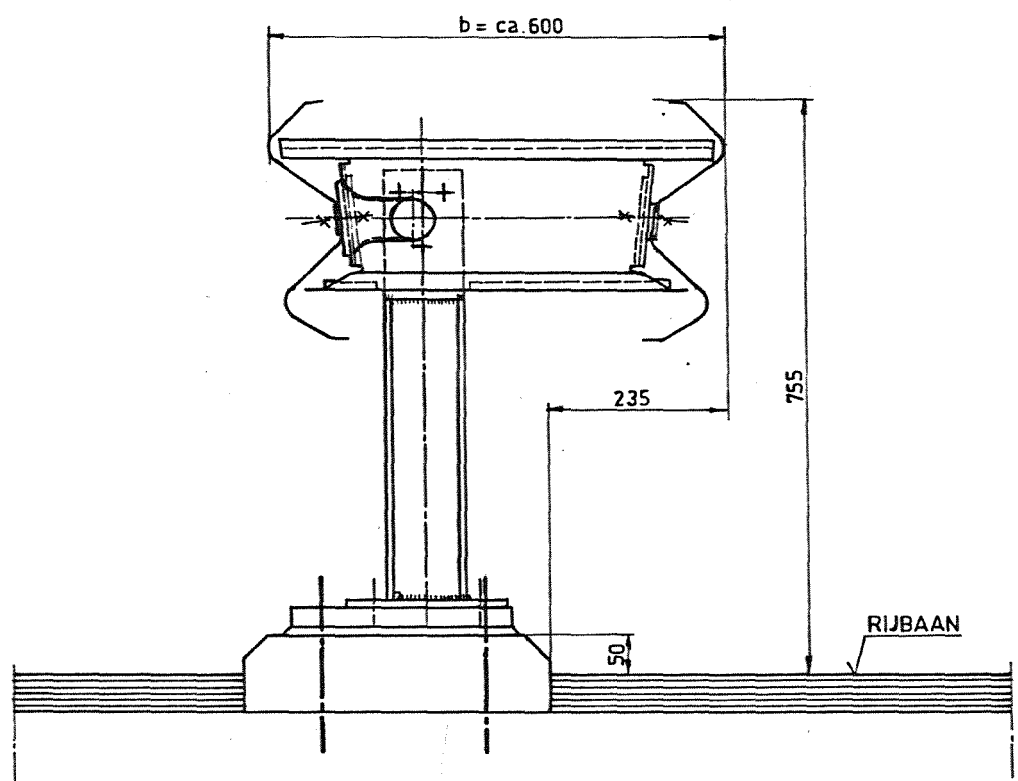


Tekening 3. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie

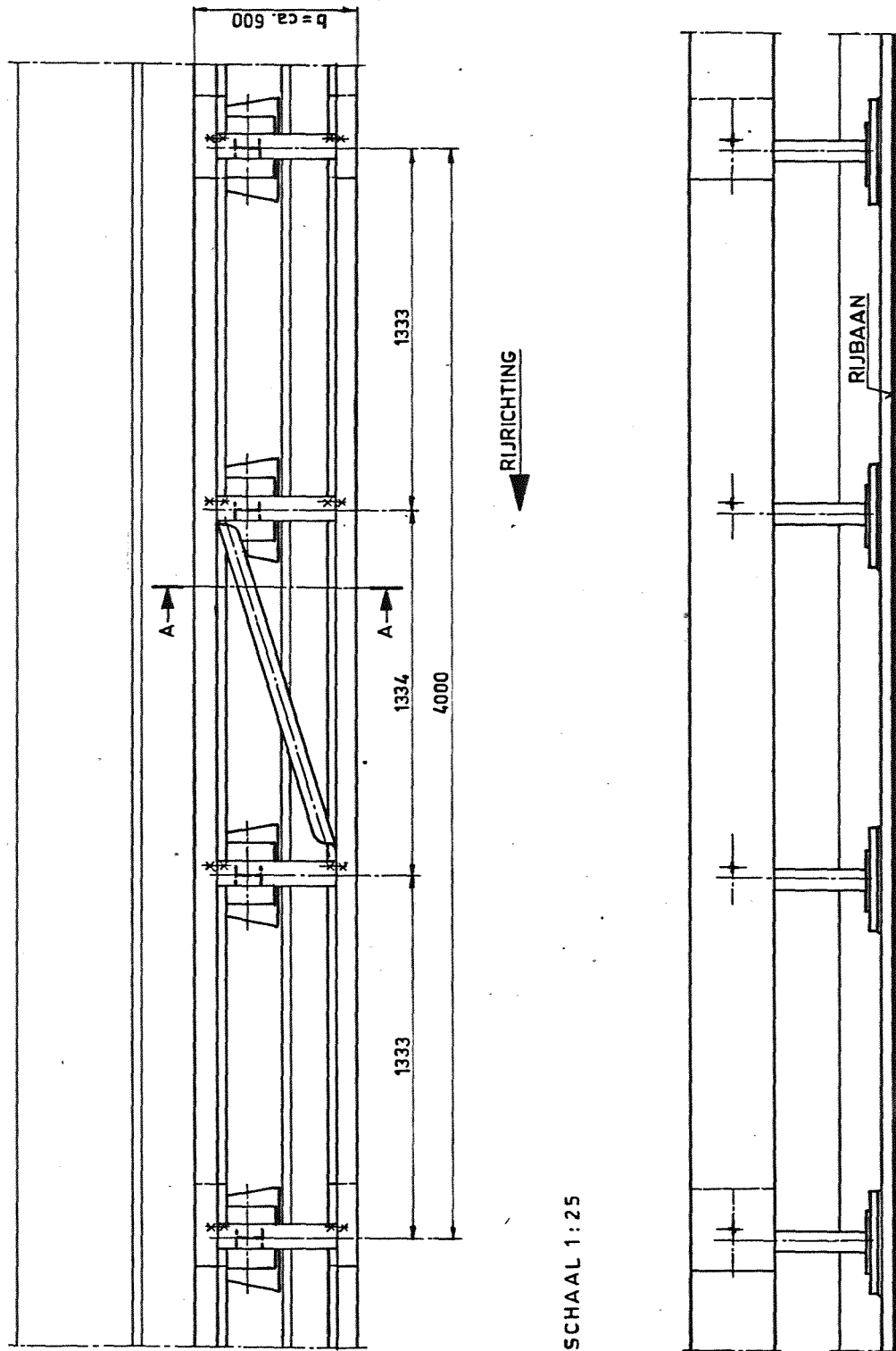
V_{1p} 1LV 267



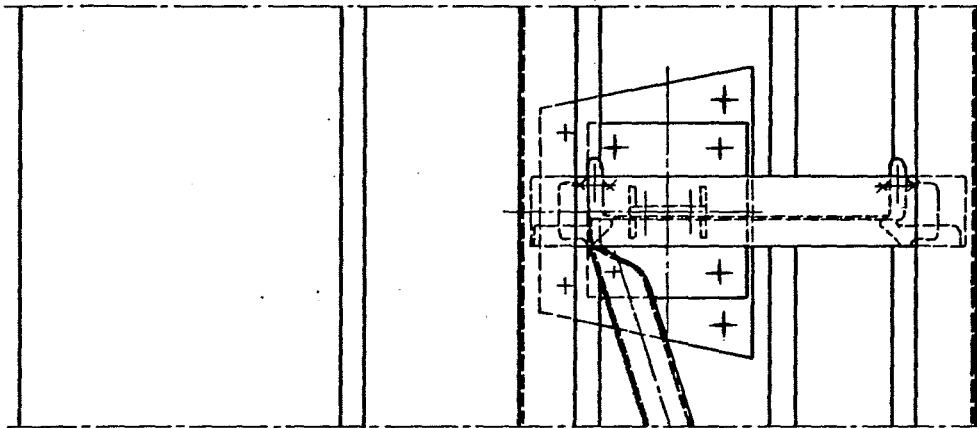
DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1:10



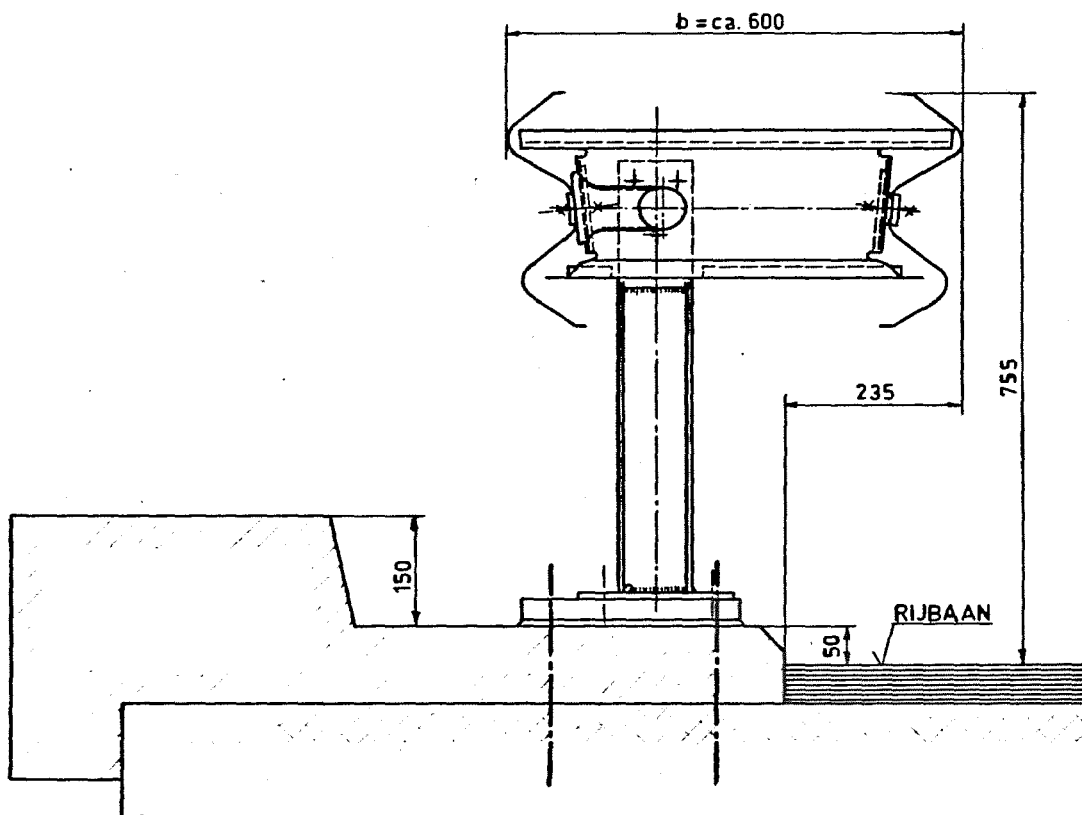
Tekening 4. Doorsnede A-A van V_{lp} 1LV 267



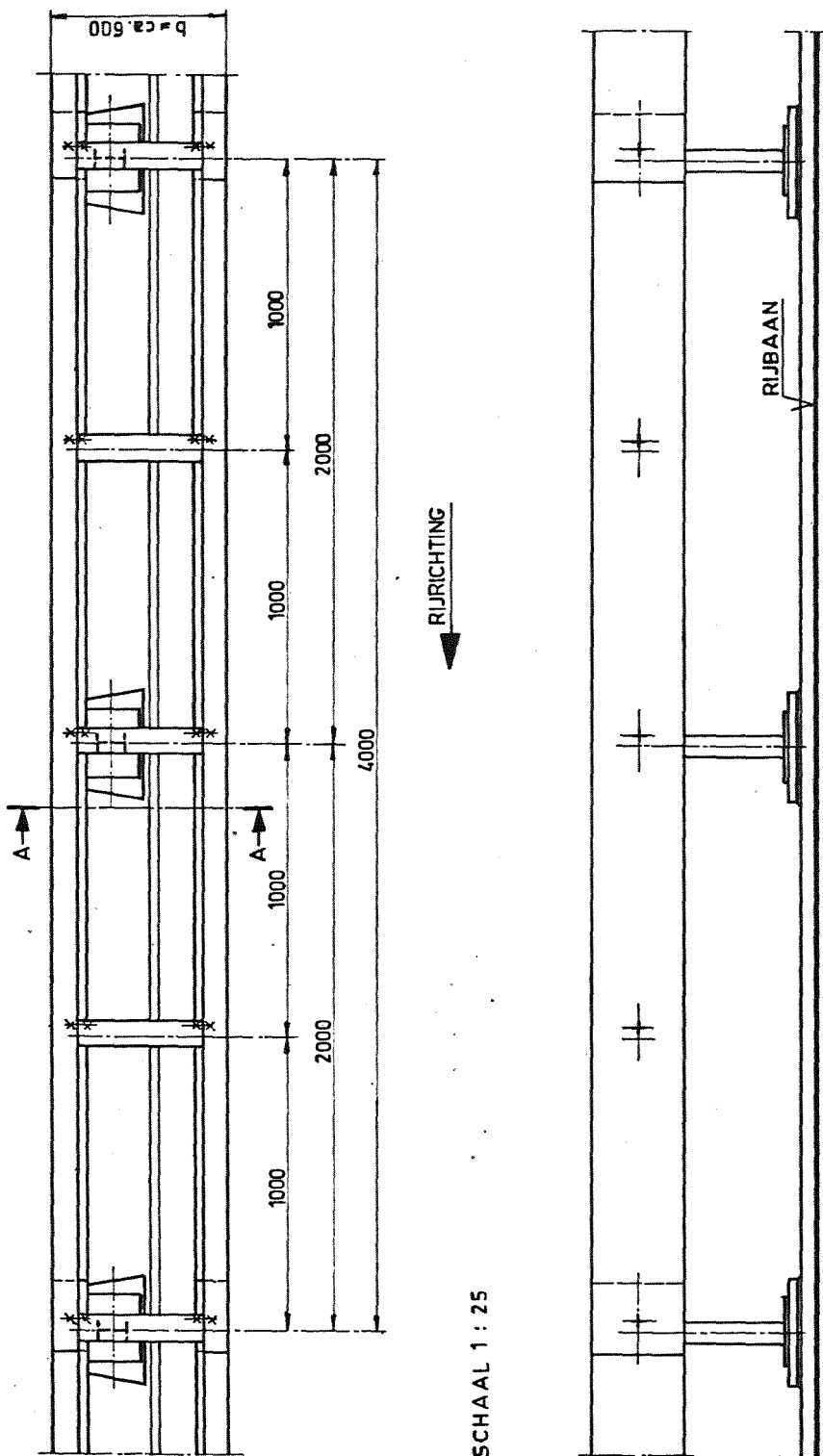
Tekening 5. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie met schampkant V_{1p} LV 133



DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1 : 10

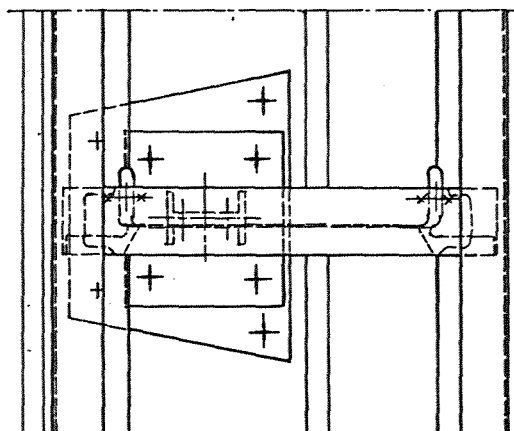


Tekening 6. Doorsnede A-A van V_{lp} 1LV 133

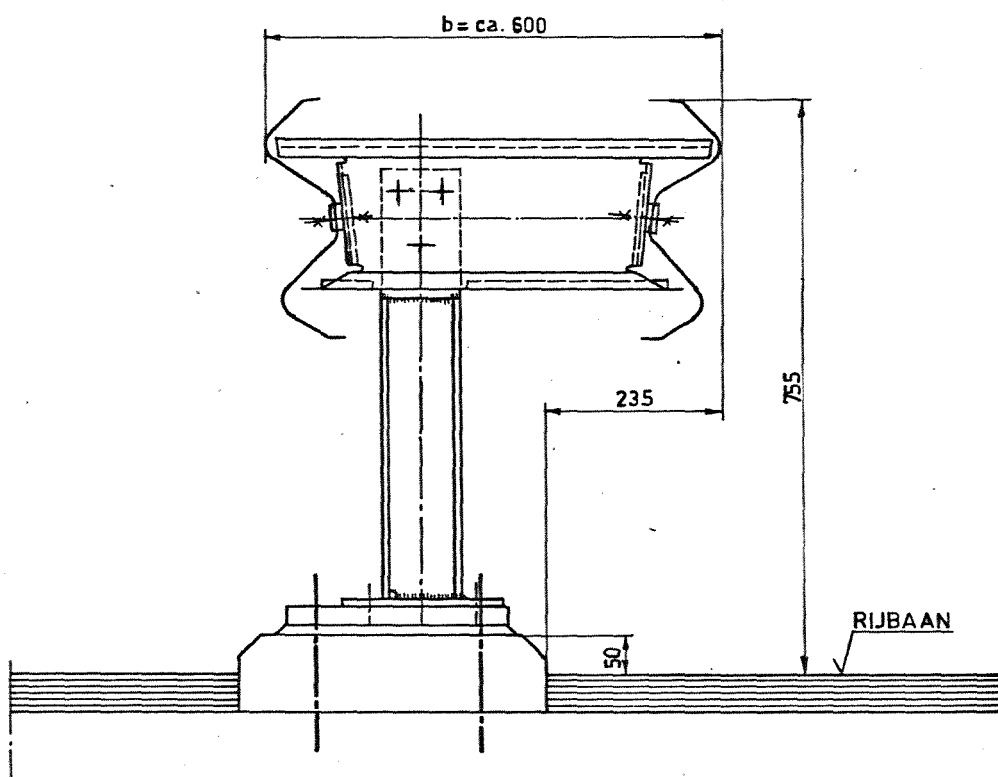


Tekening 7. Verstijfde éénzijdig uitgebouwde constructie

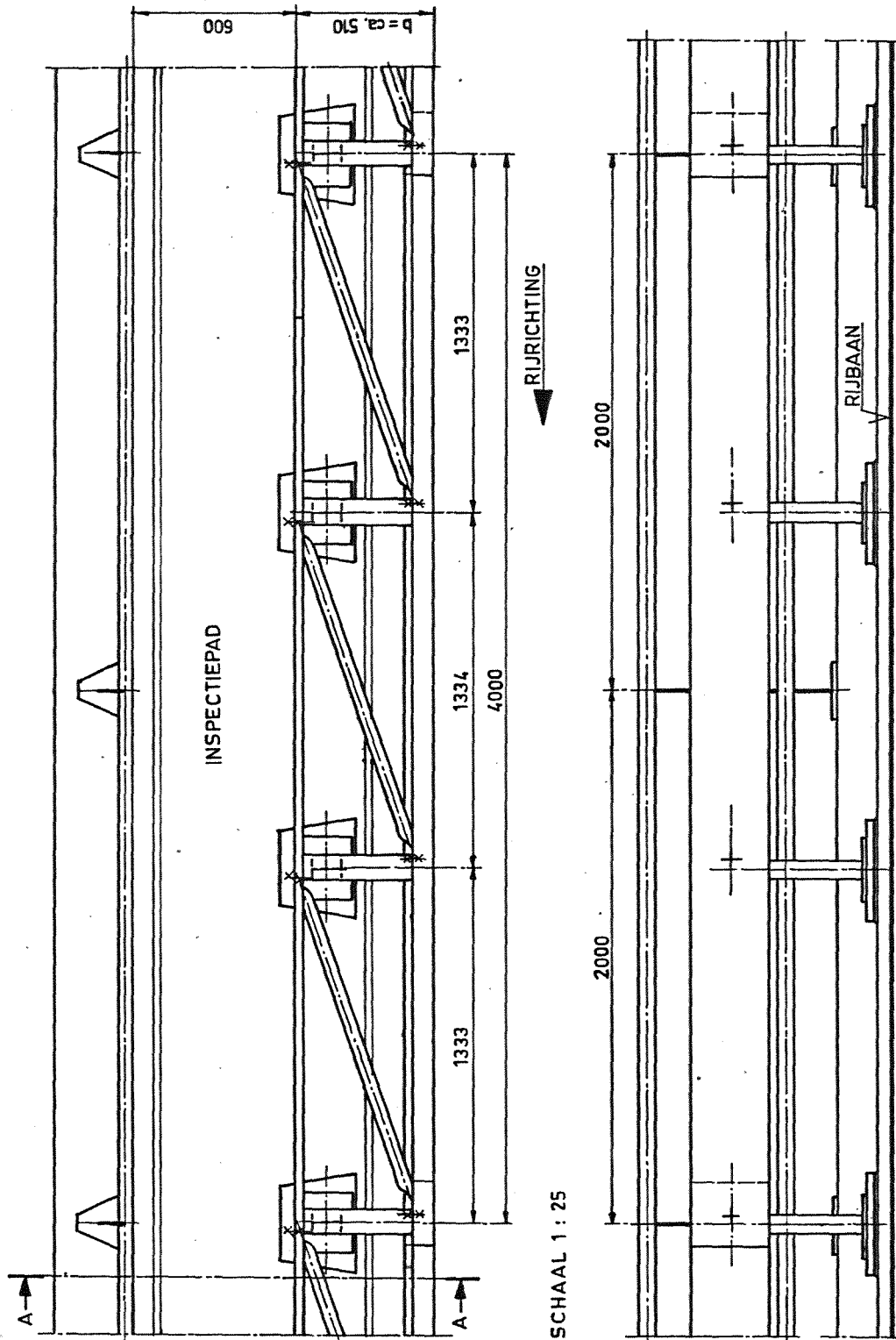
V ILV 200
p



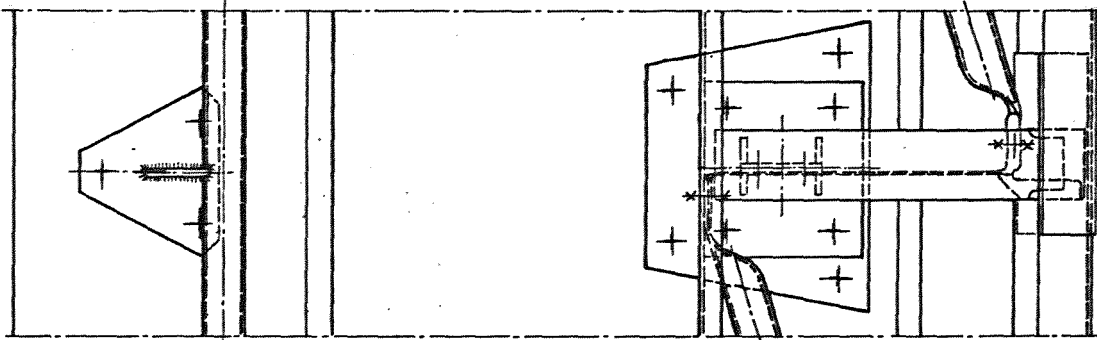
DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1 : 10



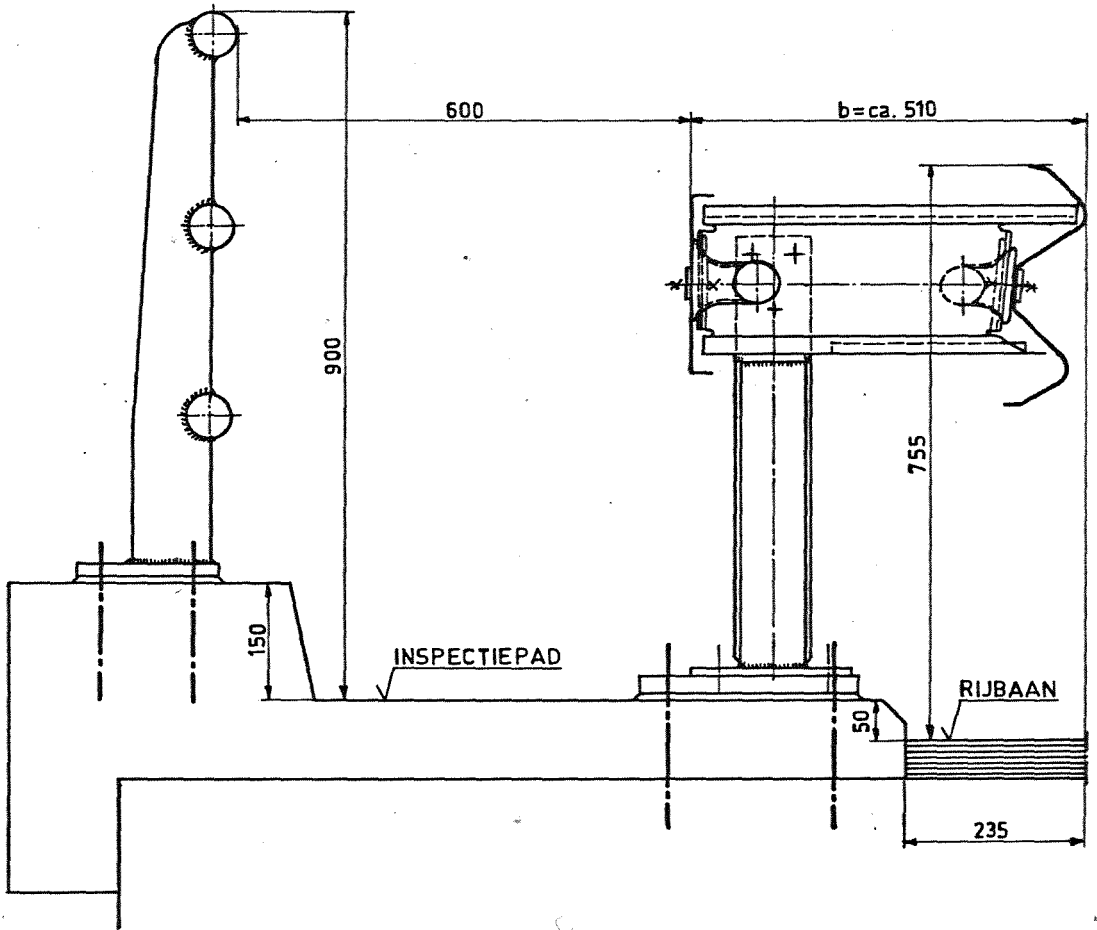
Tekening 8. Doorsnede A-A van V_p 1LV 200



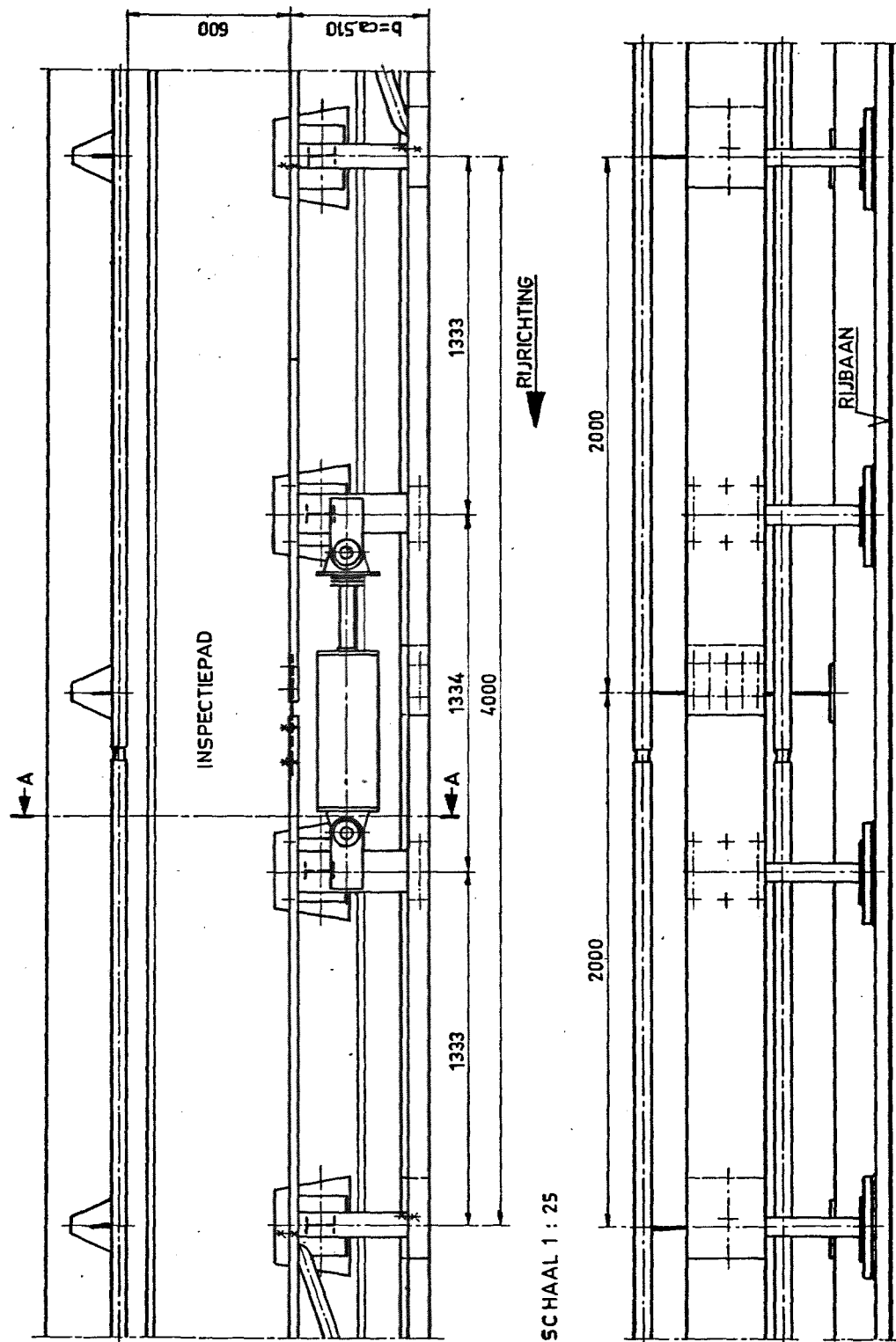
Tekening 9. Verstijfde éézijdig uitgebouwde constructie met trekstrip $V_{lp} 1 L 133$



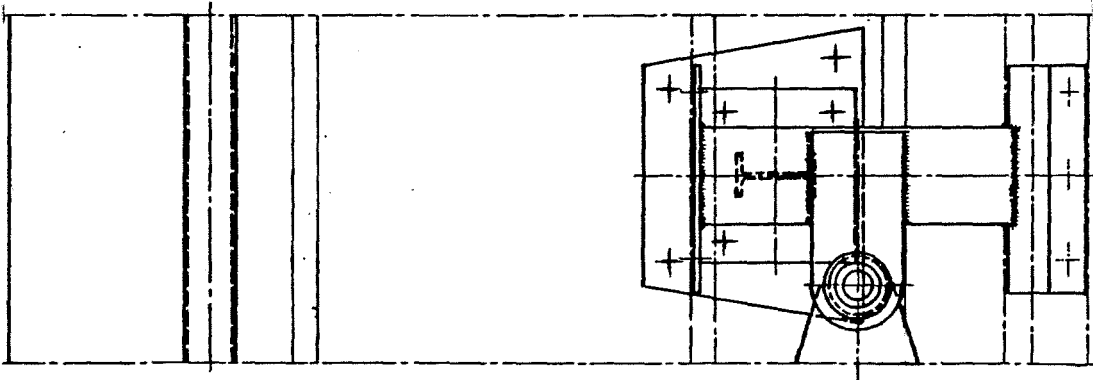
DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1:10



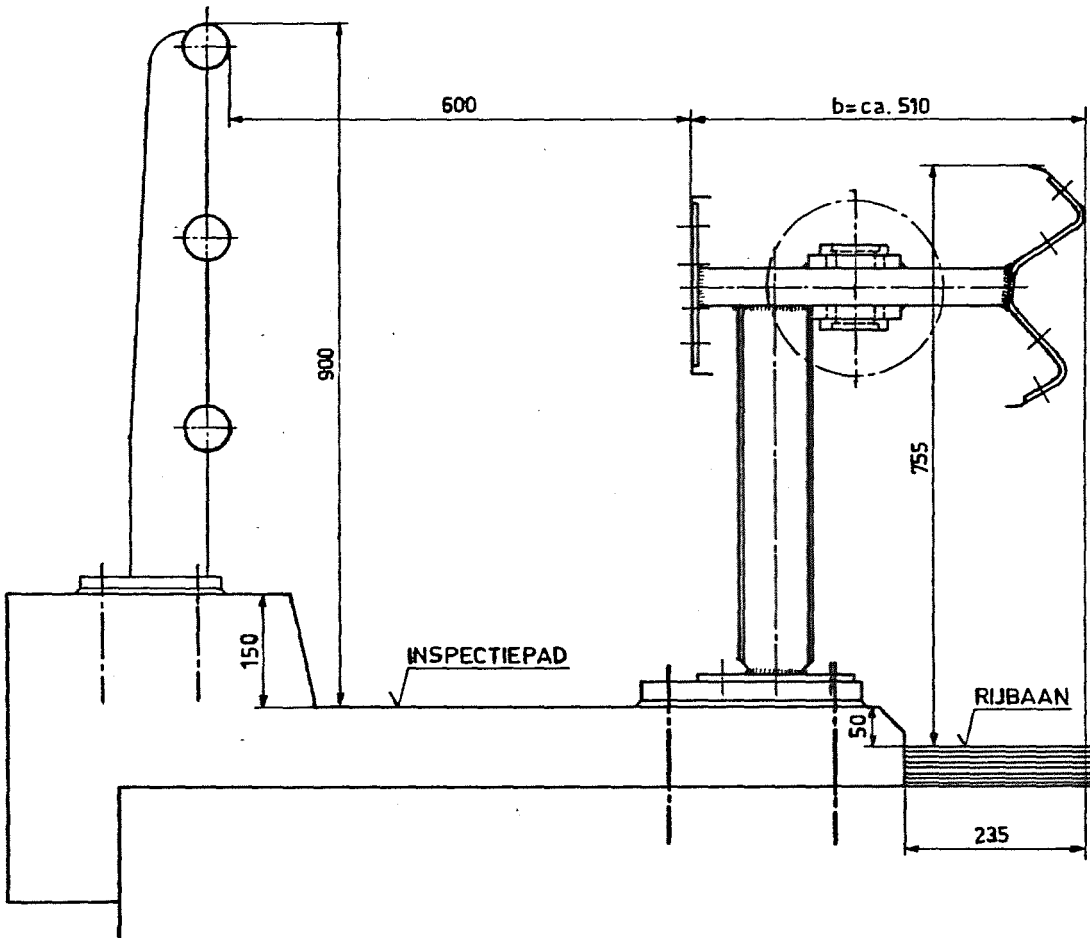
Tekening 10. Doorsnede A-A van $V_{lp s}$ 1 L 133



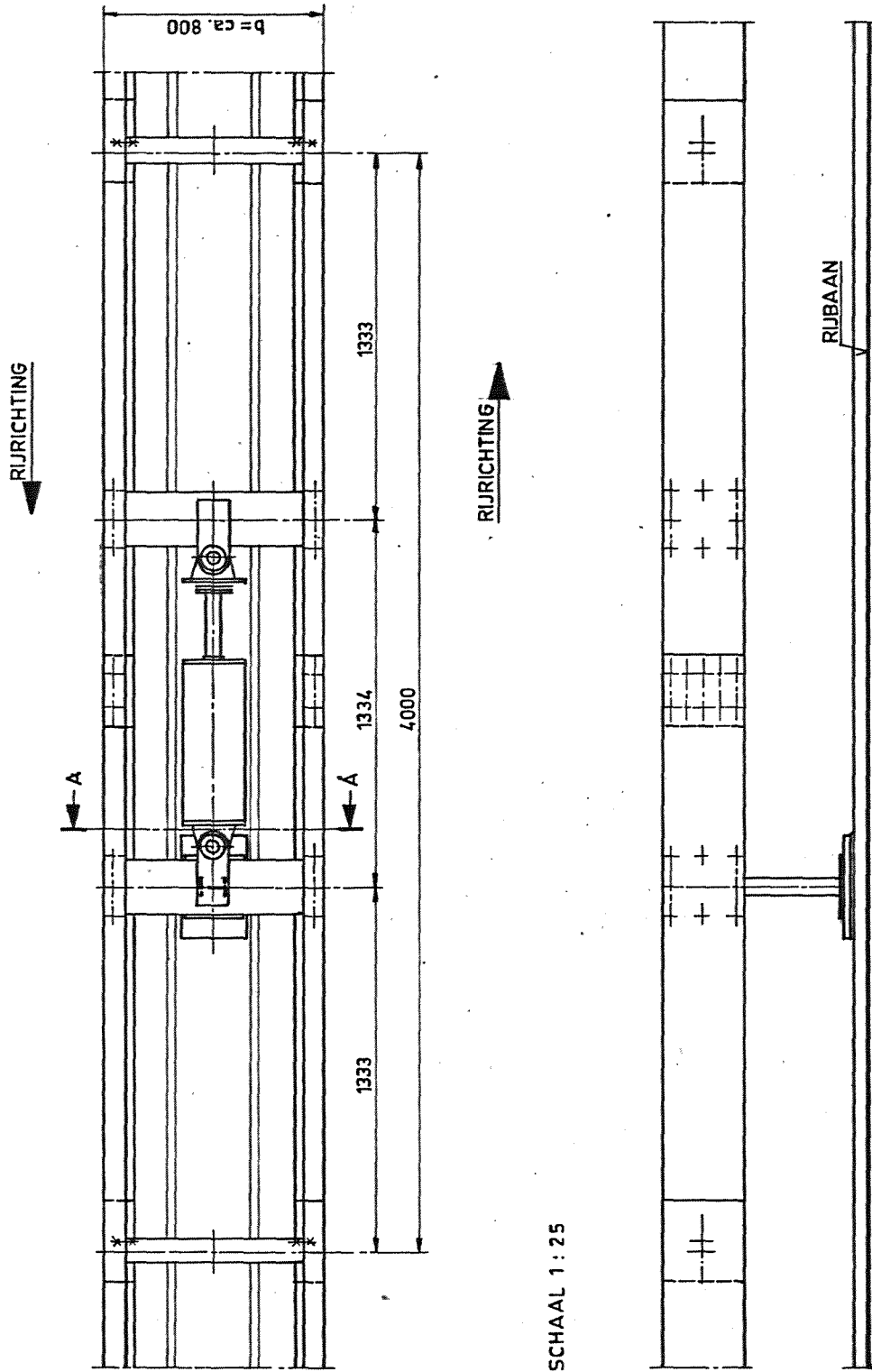
Tekening 11. Verstijfde éézijdig uitgebouwde constructie met trekstrip, expansiemogelijkheid en demper $V_{lp} 1 L 133$



DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1 : 10

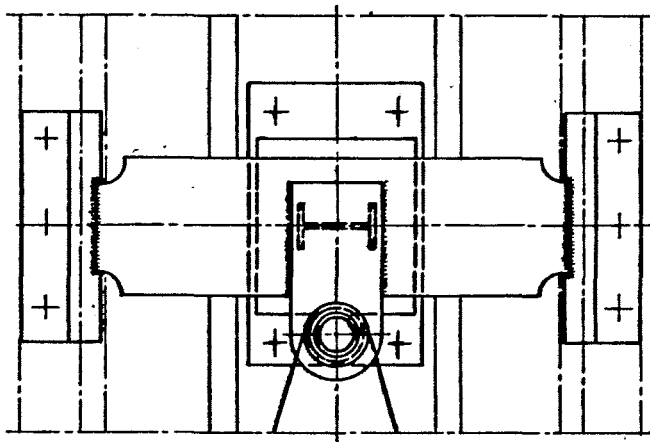


Tekening 12. Doorsnede A-A van $V_{lp s}$ 1 L 133

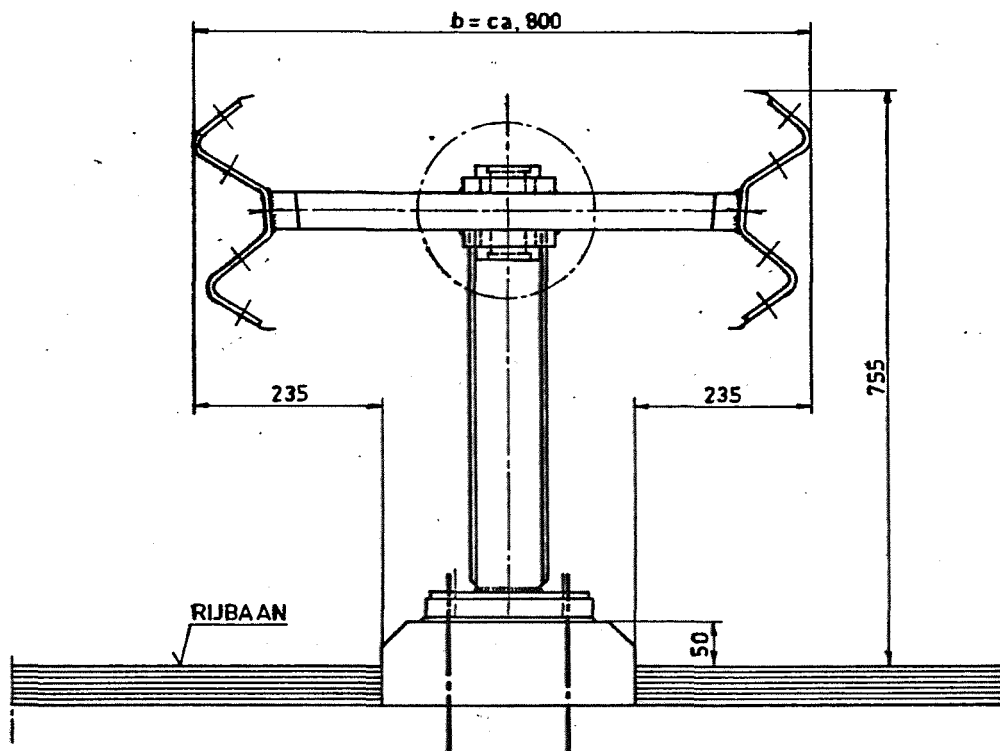


SCHAAL 1 : 25

Tekening 13. Flexibele tweezijdig uitgebouwe constructie met expansiemogelijkheid en demper F2L 400

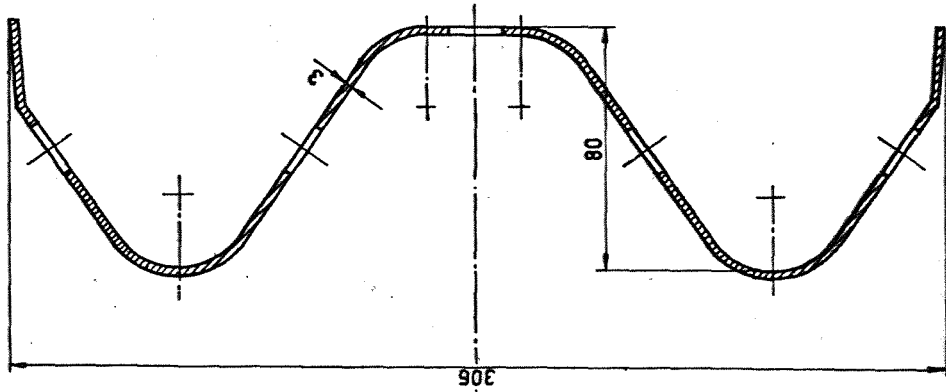


DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1:10

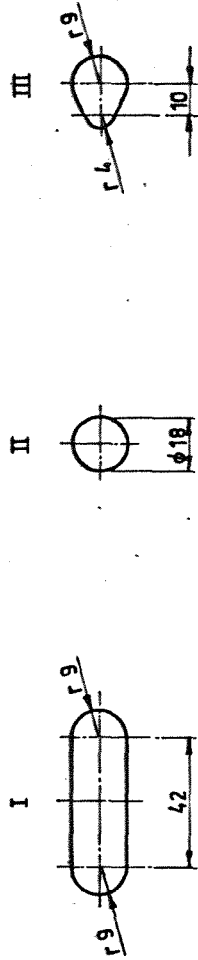


Tekening 14. Doorsnede A-A van F2L 400

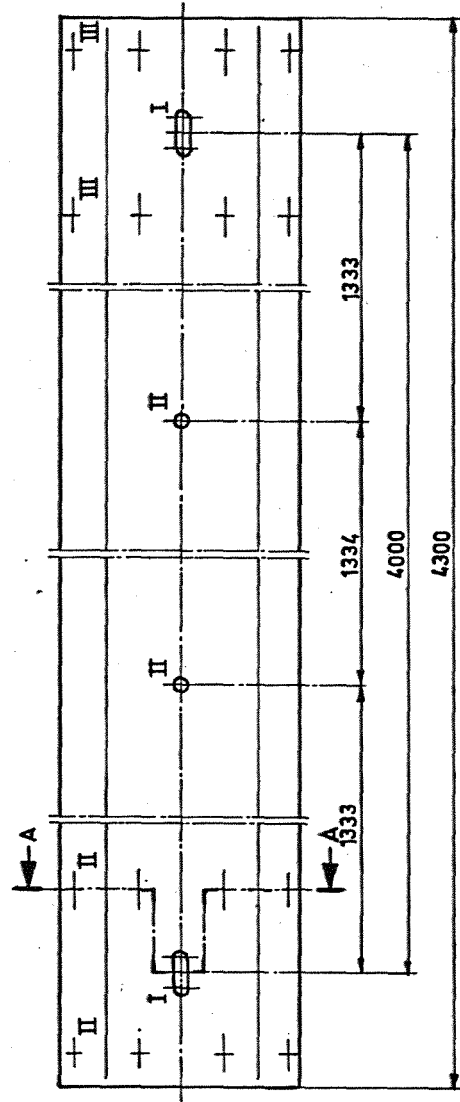
DOORSNEDE A - A
SCHAAL 1:2,5



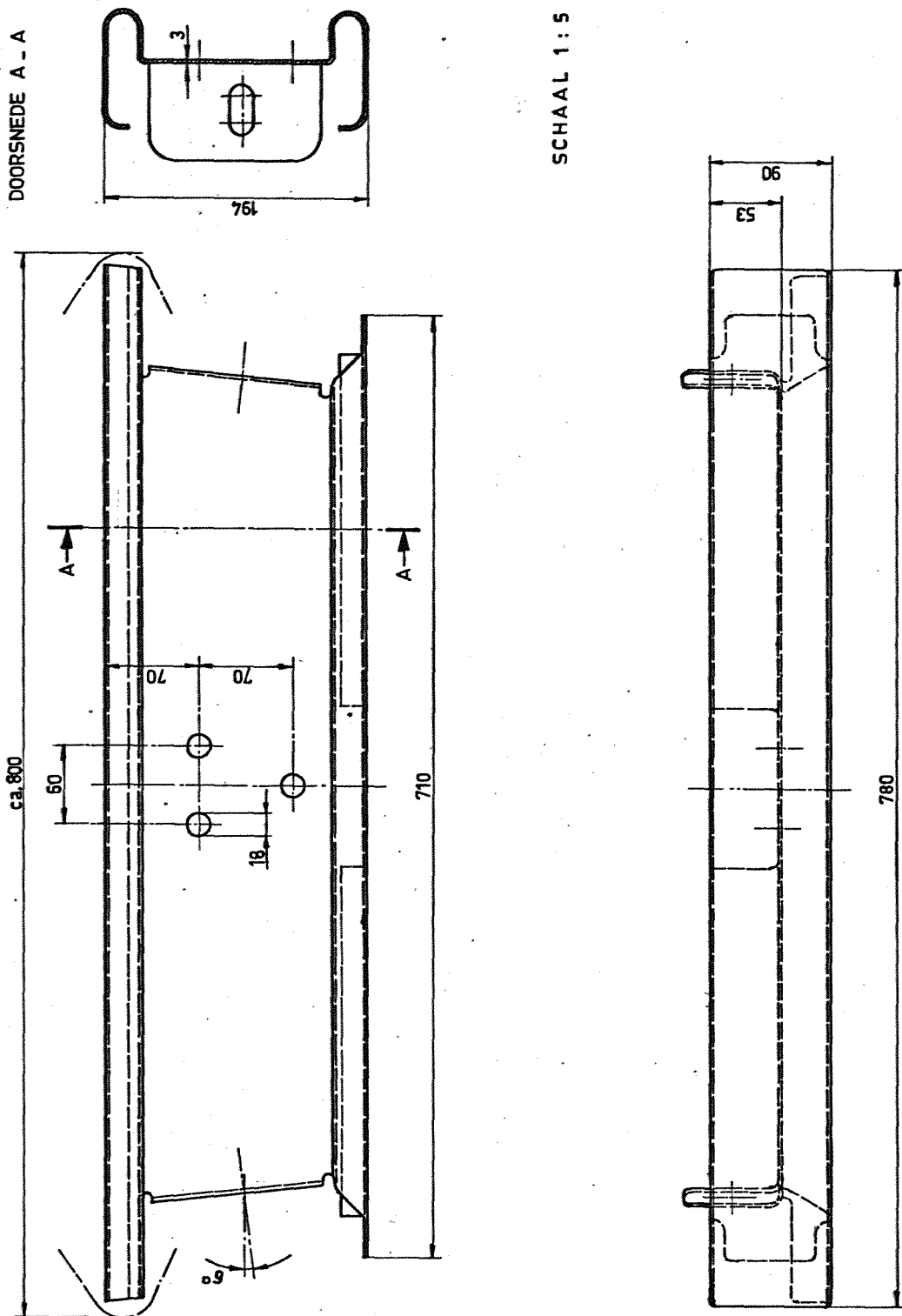
DETAILS, SCHAAL 1:2,5



SCHAAL 1:10

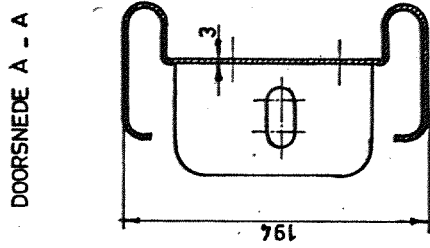


Tekening 15. Geleiderail type A

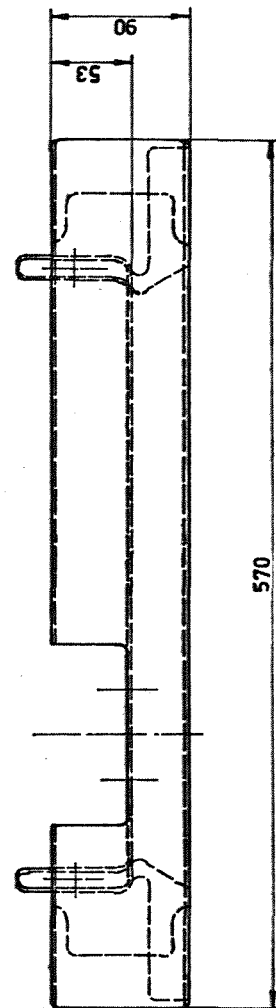
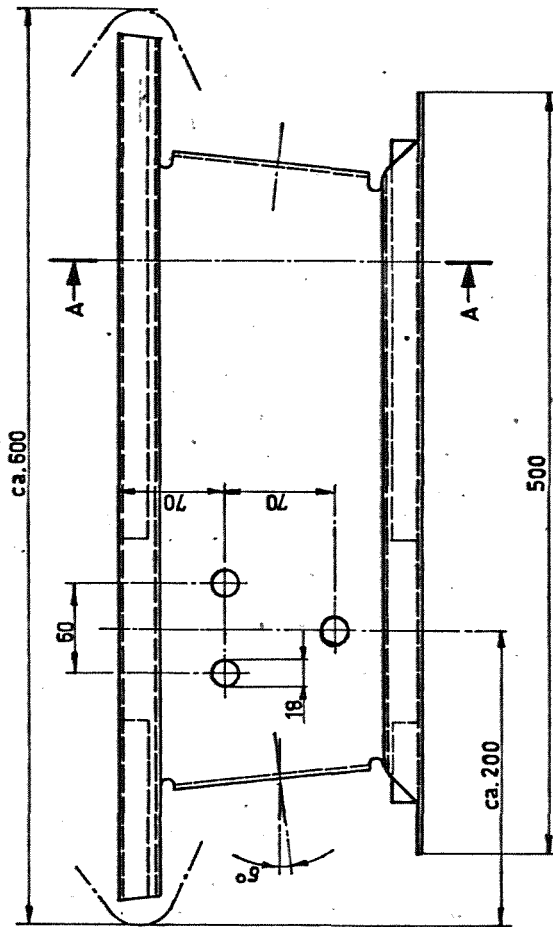


SCHAAL 1:5

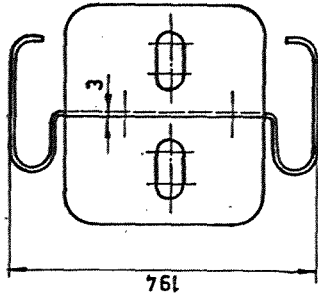
Tekening 16. Afstandhouder voor de tweezijdig uitgebouwde constructie



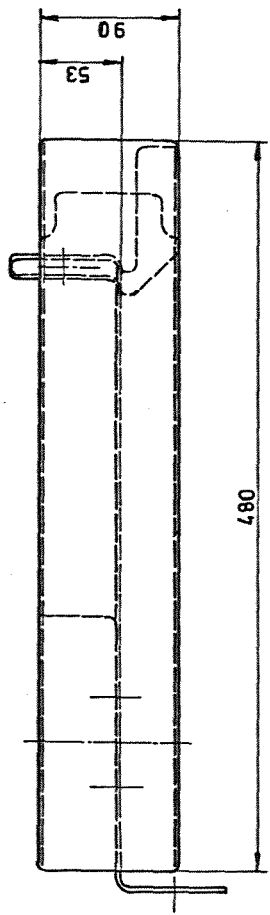
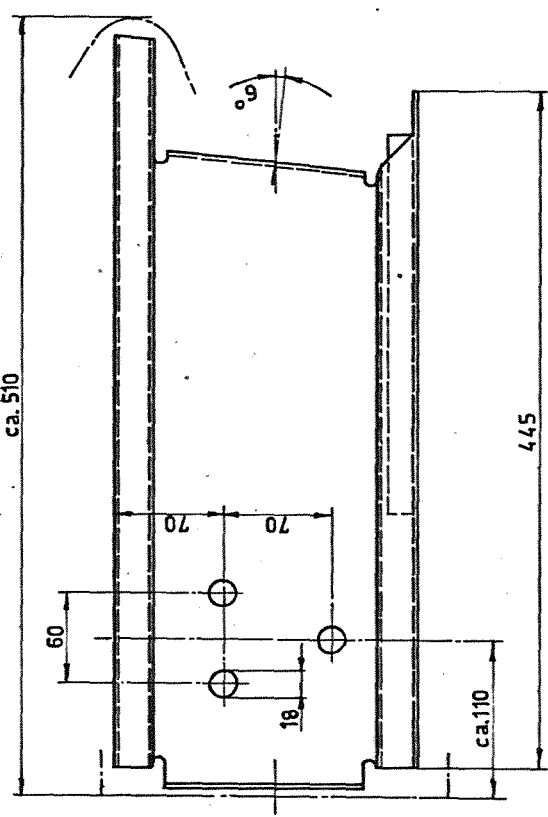
SCHAAL 1:5



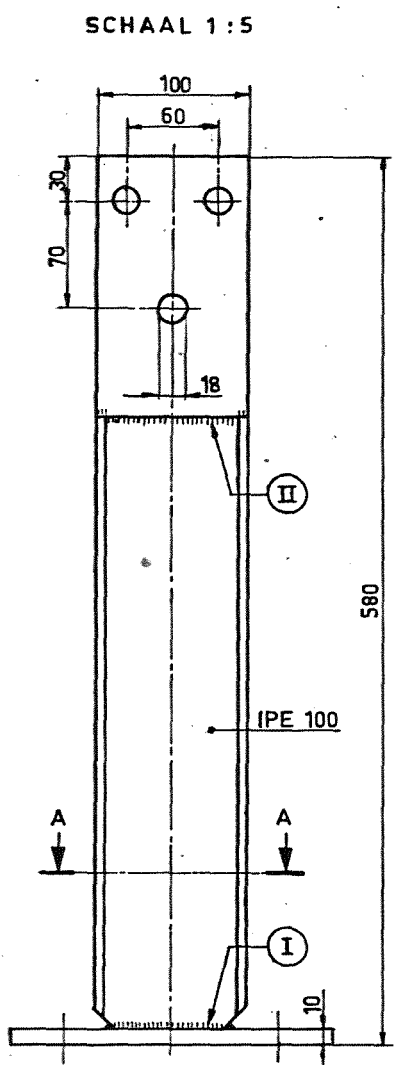
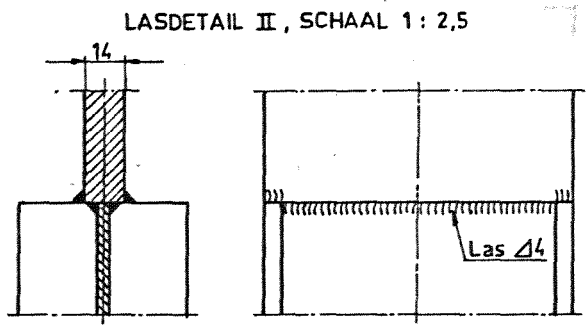
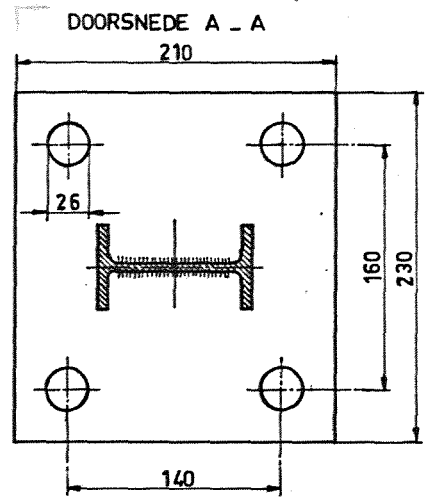
Tekening 17. Afstandhouder voor de éénzijdig uitgebouwde constructie



SCHAAL 1:5

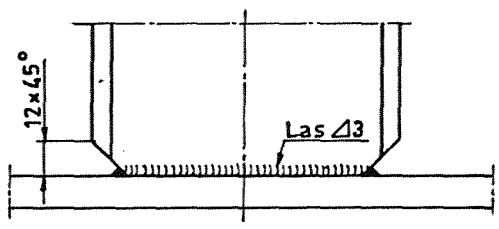


Tekening 18. Afstandhouder voor de éézijdig uitgebouwde constructie met trekstrip

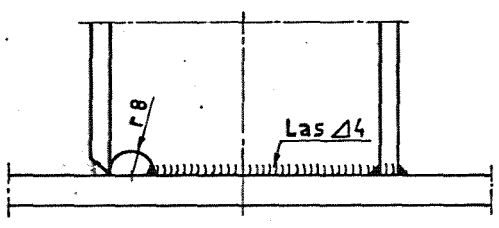


LASDETAILS I
SCHAAL 1 : 2,5

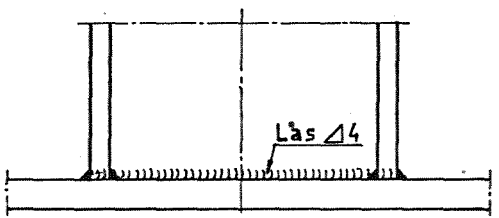
L = LIJFGELAST



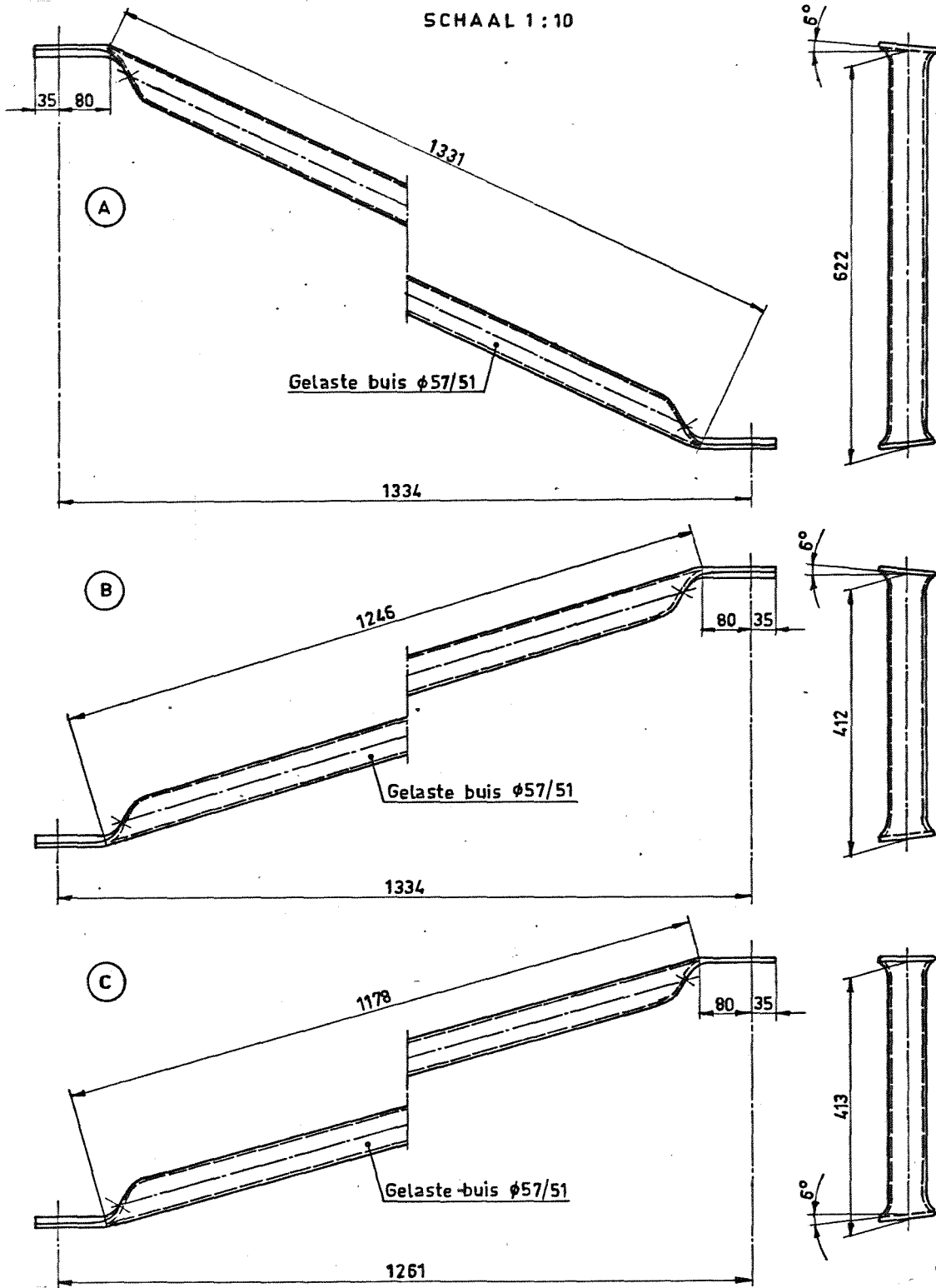
LV = LIJF - VOORFLENS GELAST



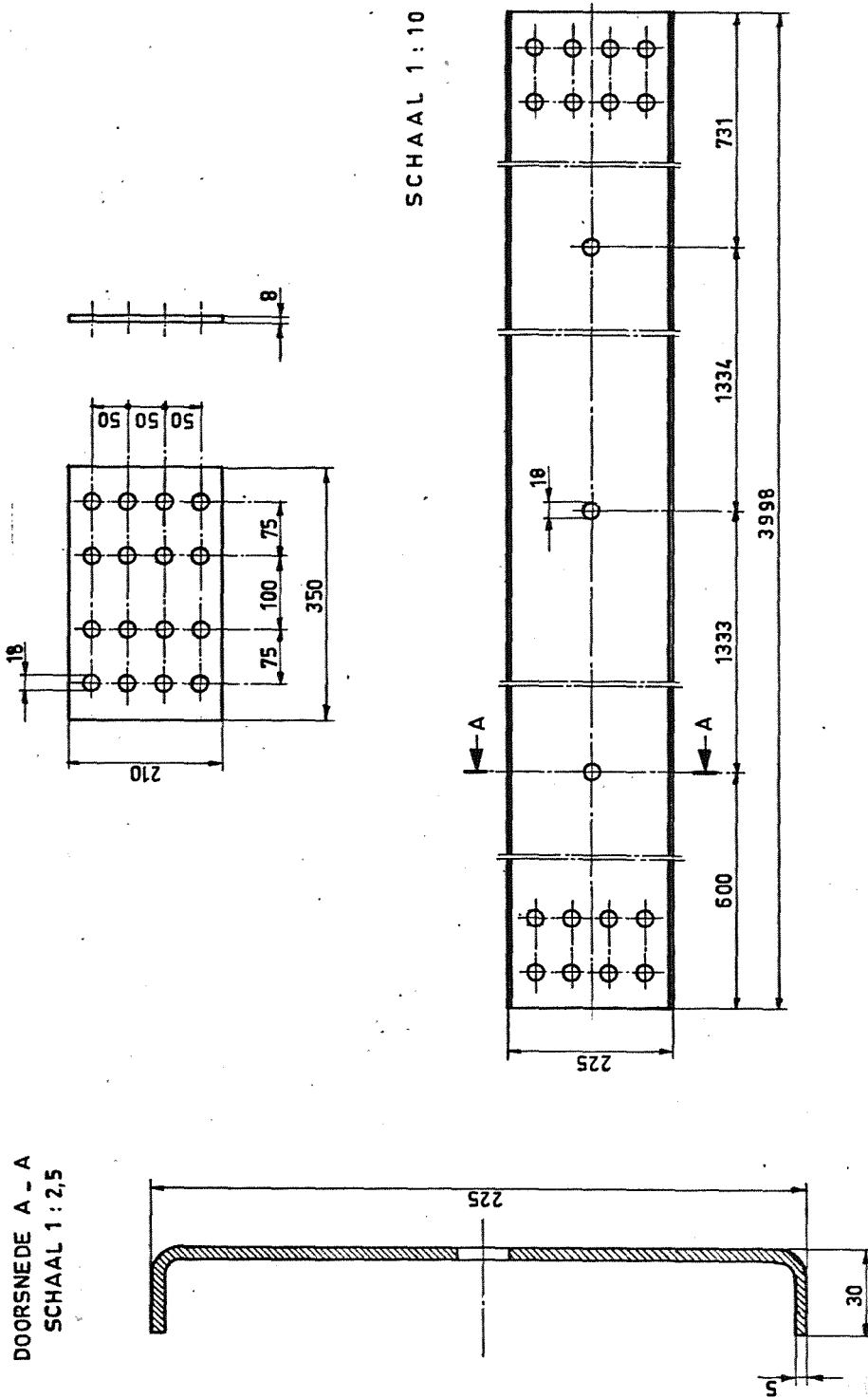
R = RONDOM GELAST



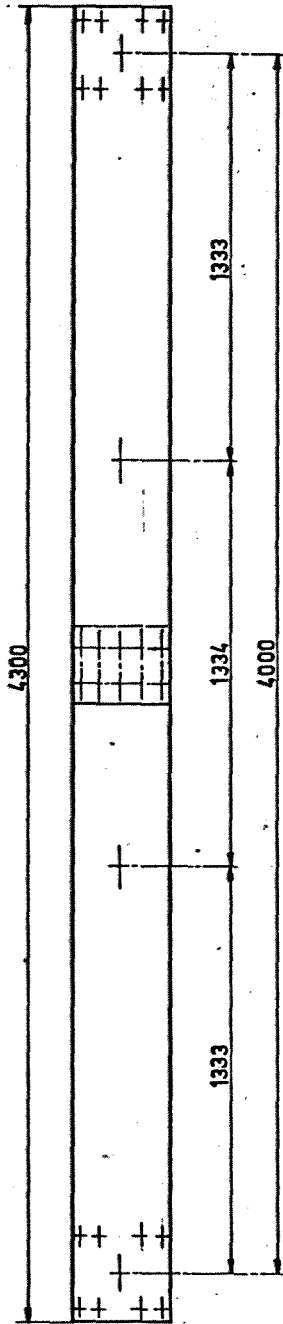
Tekening 19. Paal met lasdetails



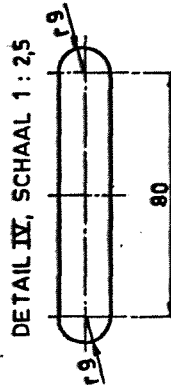
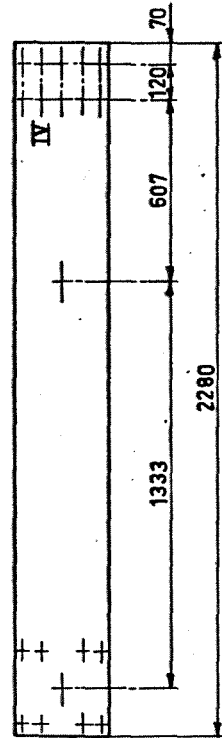
Tekening 20. Diagonalen



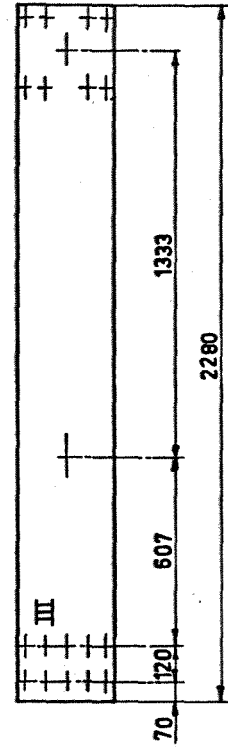
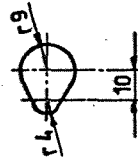
Tekening 21. Trekstrip met koppelplaat



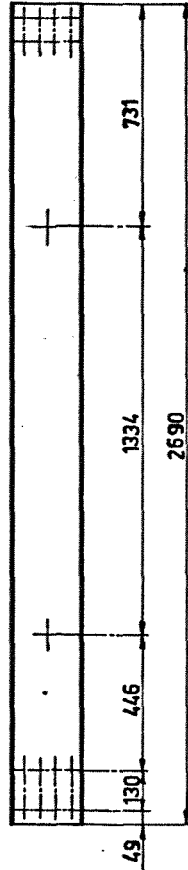
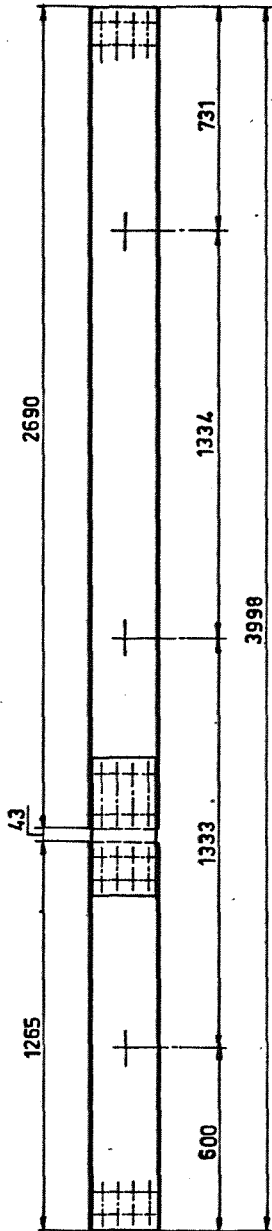
SCHAAL 1 : 25



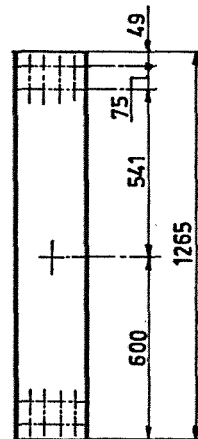
DETAIL III, SCHAAL 1 : 2,5



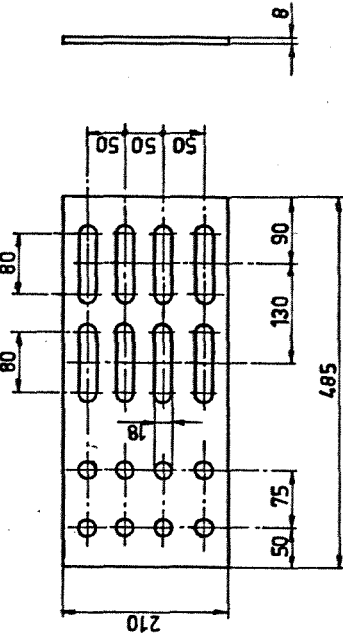
Tekening 22. Expansiemogelijkheid in geleiderail



SCHAAL 1 : 25



KOPPELPLAAT, SCHAAL 1 : 10



Tekening 23. Expansiemogelijkheid in trekstrip