

REKENMODELLEN VAN DE RIMOB

Een beschrijving van rekenmodellen voor de bepaling van de energie-
absorptiecapaciteit en zijdelingse stabiliteit van de rimpelbuis-
obstakelbeveiliger (RIMOB)

R-84-22

Ing. C.C. Schoon

Leidschendam, 1984

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

De SWOV heeft in 1982 het ontwikkelingsonderzoek van de RIMOB, een obstakelbeveiliger met rimpelbuizen ten behoeve van de afscherming van solitaire obstakels in de wegberm, afgesloten.

Is in een eerder SWOV-rapport de ontwikkeling en beproeving van de RIMOB beschreven, nu wordt een beschrijving gegeven van rekenmodellen die tot doel hebben de energie-absorptiecapaciteit en stabiliteit van de RIMOB en varianten hierop te bepalen. Deze modellen hebben alleen betrekking op aanrijdingen op de neus van de RIMOB. Bij aanrijdingen in de flank is de RIMOB voldoende stabiel gebleken.

Er zijn twee rekenmodellen ontwikkeld: één model ter bepaling van de energie-absorptiecapaciteit van de RIMOB, gebaseerd op frontale, centrale aanrijdingen, en één ter bepaling van de stabiliteit in zijdelingse richting, gebaseerd op schuine aanrijdingen op de neus van de RIMOB. De rekenmodellen zijn gebaseerd op de energiebalans: de kinetische energie van het botsende voertuig wordt volledig door de RIMOB geabsorbeerd. De rekenmodellen hebben een sterk pragmatisch karakter. Dit wordt vooral veroorzaakt door de vele dynamische effecten die optreden en die in een kort bestek niet in enige exacte mate zijn te berekenen. Daarom zijn dergelijke effecten schattenderwijs ondergebracht in een aantal termen in de formules, en getoetst aan het ter beschikking staande verificatiemateriaal.

Bij het eerste rekenmodel ter bepaling van de energie-absorptiecapaciteit is door middel van een formule de relatie tussen de kinetische energie van het voertuig en de energie-absorptiecapaciteit van de RIMOB vastgelegd. Teneinde veel rekenwerk te besparen is deze relatie in een nomogram afgebeeld. Hierin wordt het verband tussen de volgende drie grootheden gelegd: de voertuigmassa, de voertuigsnelheid en de afstand waarover de RIMOB wordt ingedrukt (de remweg). Met behulp van het nomogram kan het aantal segmenten en de soort rimpelbuizen worden bepaald op grond van de te verwachten inrijnsnelheden, in combinatie met de voertuigmassa. Ook kan worden uitgegaan van de plaatsingsruimte die voor de RIMOB beschikbaar is: van de RIMOB die op een bepaalde plaats wordt gewenst, kan worden bepaald welke combinaties van voertuigsnelheid en -massa bij een

aanrijding overeenkomen met de energie-absorptiecapaciteit van de RIMOB. De formule (en het nomogram) is getoetst aan de hand van enkele fullscale proeven die tijdens het ontwikkelingsonderzoek zijn uitgevoerd. De geconstateerde verschillen zijn klein gebleken.

Het nomogram is gebaseerd op gegevens van de RIMOB-V270 (de basisbreedte is 2,70 m). Een nomogram voor een parallelvormige RIMOB wijkt niet veel af van die voor een V-vormige.

Met het tweede rekenmodel is de stabiliteit van de RIMOB in zijdelingse richting te bepalen. De stabiliteit is van belang nadat in de beginfase van de aanrijding de neus van de RIMOB uit de grondgeleiding is losgekomen. Er is uitgegaan van het zwaarste type aanrijding, nl. schuin op de neus. De op de RIMOB uitgeoefende dwarskracht doet de neus in zijdelingse richting bewegen. De stabiliteit dient dan voldoende groot te zijn om bezwijken te voorkomen.

Door middel van berekeningen is de grootte van de dwarskracht die de RIMOB in staat is op te nemen bepaald. Vervolgens is de relatie tussen de dwars- en langsverplaatsingen van de RIMOB onder diverse botscondities vastgesteld. Een "begrenzingscurve" waarbij de RIMOB naar alle waarschijnlijkheid niet meer goed zal functioneren wordt aangegeven. In de meeste gevallen zal, als deze grens wordt bereikt, de voertuigsnelheid reeds aanzienlijk zijn gereduceerd.

Van varianten van de RIMOB kan eveneens de stabiliteit worden vastgesteld. De stabiliteit van de RIMOB-V met een basisbreedte van 2,70 m wordt hierbij als referentie gebruikt.

Vanwege het beperkte aantal proeven dat ten tijde van het ontwikkelingsonderzoek is uitgevoerd, is het model met slechts één full-scale proef gevalideerd.

Diverse aannamen, met name betreffende de dynamische processen, zijn nodig geweest en in de rekenmodellen ingevoerd. Deze hebben hierdoor dan ook een pragmatisch karakter, maar geven een zo goed mogelijke benadering van de realiteit.

INHOUD

Voorwoord

1. Inleiding

2. Doel van het onderzoek

3. Opzet van het onderzoek

3.1. Inleiding

3.2. Centrale aanrijdingen

3.3. Niet-centrale aanrijdingen

4. Uitvoering van het onderzoek

4.1. Bepaling energie-absorptiecapaciteit

4.1.1. Inleiding

4.1.2. Ontwikkeling energieformule

4.1.3. Bepaling rimpelkracht van een rimpelbuis

4.1.4. Nomogram van de energieformule

4.1.5. Toetsing nomogram aan resultaten full-scale proeven

4.2. Bepaling stabiliteit

4.2.1. Inleiding

4.2.2. Berekeningswijze (algemeen)

4.2.3. Berekening dwarsverplaatsing

4.2.4. Berekening langsverplaatsing

4.2.5. Grafische uitwerking

4.2.6. Toetsing dwars- en langsverplaatsing

4.2.7. Discussie berekeningswijze

4.2.8. Berekening sterkte in zijdelingse richting van RIMOB-varianten

Afbeeldingen en Tabellen

Bijlage 1: Formule energie-absorptiecapaciteit RIMOB

VOORWOORD

In 1982 heeft de SWOV het ontwikkelingsonderzoek afgesloten naar een nieuw type obstakelbeveiliger die de naam RIMOB kreeg, afgeleid van rimpelbuisobstakelbeveiliger. Het ontwikkelingsonderzoek naar deze voorziening voor de afscherming van solitaire obstakels in wegbermen is beschreven in het SWOV-rapport R-82-38. Dit rapport geeft een overzicht van de functionele eisen te stellen aan obstakelbeveiligers en een beschrijving van de ontwikkeling en beproeving van de RIMOB.

Omdat de dimensies van de RIMOB en varianten hierop afhankelijk zijn van de grootte van de energie-absorptiecapaciteit en de stabiliteit, is in aansluiting op het ontwikkelingsonderzoek onderzoek verricht naar de mogelijkheid van het opstellen van rekenmodellen, waarmee de dimensies kunnen worden vastgesteld op grond van de te verwachten inrijgegevens (snelheid, voertuigmassa, hoek van inrijden).

Ten behoeve van dit onderzoek, dat is verricht in opdracht van de Rijkswaterstaat, zijn belangrijke bijdragen geleverd door het Technisch Bureau "Van Schie" te Strijen.

Het voorliggende rapport is samengesteld door ing. C.C. Schoon (Afdeling Crash- en Postcrash-onderzoek).

Leidschendam, februari 1984

Prof. ir. E. Asmussen, directeur

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

1. INLEIDING

De werking van de RIMOB is afhankelijk van de wijze waarop de aanrijding plaatsvindt. Wordt de RIMOB op de punt aangereden dan zal de constructie in elkaar worden gedrukt, waarbij het voertuig geheel tot stilstand zal worden gebracht. Vindt een aanrijding in de flank plaats, dan wordt het voertuig geleid en functioneert de RIMOB als een geleiderailconstructie.

Het ontwikkelingsonderzoek heeft twee basistypen van de RIMOB opgeleverd: één in een V-vorm, de RIMOB-V (zie Afbeelding 1) en een parallelvormige, de RIMOB-P (zie Afbeelding 2).

Een belangrijk uitgangspunt bij de ontwikkeling was dat het ontwerp de nodige flexibiliteit in vormgeving en mate van energie-absorptie mogelijk moest maken, waardoor varianten zouden kunnen worden samengesteld. Gekozen is voor een opbouw uit segmenten.

De vorm van een segment van de RIMOB-V is een gelijkbenig trapezium (met een vaste hoogte en een variabele breedte) en van de RIMOB-P een rechthoek (met een vaste hoogte en breedte). Verder is er nog een neusegment met vaste afmetingen, dat zowel voor de RIMOB-V als voor de RIMOB-P wordt toegepast.

Op grond van dit ontwerp kan de vormgeving ervan gevarieerd worden door de keuze van:

- het aantal segmenten
- de breedte van de trapeziumvormige segmenten.

N.B. De basisbreedte van het laatste segment van een RIMOB-V is bepalend voor de basisbreedte van de overige segmenten.

De grootte van de gewenste energie-absorptie van de RIMOB, die met behulp van een rekenmodel moet kunnen worden bepaald, kan gevarieerd worden door de keuze van:

- het aantal segmenten
- het aantal rimpelbuizen per segment
- het materiaal van de rimpelbuizen
- de diameter en wanddikte van de rimpelbuizen

De wijze van verankering van de RIMOB is van belang voor de wijze waarop de rekenmodellen moeten worden opgezet. De achterzijde van de RIMOB is

bevestigd aan een fundering. De voorzijde is alleen in dwarsrichting gefixeerd over een afstand van 1 m gezien in langsrichting. Bij de uitoefening van een langskracht beweegt de neus van de RIMOB zich over deze afstand naar achteren. Daarna is de dwarsfixatie beëindigd. Bij een uitgeoefende dwarskracht wordt de RIMOB hierdoor opzij gedrukt. Stabiliteit in dwarsrichting ontleent de constructie aan de flankdelen die als ligger fungeren en aan de specifieke bouw van de segmenten met de rimpelbuizen en boven- en onderplaten. De bepaling van de stabiliteit maakt deel uit van de in dit rapport beschreven rekenmodellen.

Bij aanrijdingen in de flank van de RIMOB zullen de door het voertuig uitgeoefende krachten door de voor- en achterverankering opgenomen dienen te worden. Uit de ten tijde van het ontwikkelingsonderzoek uitgevoerde flankaanrijdingen is gebleken dat de stabiliteit van de RIMOB bij dit type aanrijdingen voldoende groot is. Hiervoor behoeven dan ook geen bijzondere rekenmodellen te worden gemaakt.

2. DOEL VAN HET ONDERZOEK

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van rekenmodellen waarmee de wegbeheerder in staat is de energie-absorptiecapaciteit en de stabiliteit van de RIMOB en varianten hierop te bepalen. De te ontwikkelen rekenmodellen moeten door de wegbeheerder gemakkelijk hanteerbaar zijn. Met de rekenmodellen moeten op grond van de voertuiggegevens (massa, snelheid en inrijhoek) de dimensies van de RIMOB kunnen worden vastgesteld. Andersom moet ook mogelijk zijn: op grond van de gewenste contouren van de RIMOB (afgeleid van de beschikbare plaatsingsruimte) dienen de acceptabele voertuigcondities te kunnen worden bepaald.

De rekenmodellen zullen alleen betrekking hebben op aanrijdingen op de neus van de RIMOB. Voor aanrijdingen in de flank is dit gezien de grote mate van de stabiliteit bij dit type aanrijdingen van de RIMOB, niet noodzakelijk (zie Hoofdstuk 1).

3. OPZET VAN HET ONDERZOEK

3.1. Inleiding

De energie-absorptiecapaciteit van de RIMOB is te berekenen met behulp van de energiebalans: de door de RIMOB te absorberen hoeveelheid energie is ongeveer gelijk aan de kinetische energie van het botsende voertuig. Uit de grootte van de energie kan na berekening van de reactiekrachten van de RIMOB de remweg in zowel de langs- als dwarsrichting worden vastgesteld.

Met de remweg in langsrichting kan de hoeveelheid toe te passen energie-absorberend materiaal in combinatie met de bouwlengte worden bepaald. Met de remweg in dwarsrichting kan de mate van doorbuiging in deze richting worden bepaald.

De grootte van de benodigde energie-absorptiecapaciteit en de stabiliteit van de RIMOB zijn erg afhankelijk van de plaats van de aanrijding tegen de RIMOB en de hoek waaronder de aanrijding plaats vindt. Hiertoe zullen de aanrijdingen in twee hoofdtypen worden onderscheiden, te weten de centrale en de niet-centrale aanrijdingen.

3.2. Centrale aanrijdingen

Onder een centrale aanrijding met een inrijhoek van 0° wordt verstaan dat bij een aanrijding de lengte-as van het voertuig met die van de RIMOB samenvalt. Bij dit type botsingen wordt door het voertuig alleen in langsrichting een kracht op de RIMOB uitgeoefend.

Vanwege het ontbreken van zijdelingse krachten is dit botsingstype qua krachtenberekening relatief eenvoudig te benaderen. Tevens zal het aandeel van energie-absorptie door de rimpelbuizen het grootst zijn vergeleken met de niet-centrale aanrijdingen. Bij de laatst genoemde typen aanrijdingen zullen namelijk meer wrijvings- en wringingskrachten optreden - in het bijzonder in de flankdelen - zodat de rimpelbuizen in verhouding minder zullen worden aangesproken.

Gezien het feit dat bij de centrale aanrijdingen de rimpelbuizen de meeste energie absorberen, zal de energie-absorptiecapaciteit van de

RIMOB uit dit type aanrijding worden afgeleid. De grootte van de voertuigmassa en -snelheid zijn hierbij bepalend voor de hoeveelheid energie die moet worden geabsorbeerd.

3.3. Niet-centrale aanrijdingen

Bij de niet-centrale frontale aanrijdingen kan onderscheid worden gemaakt tussen aanrijdingen onder een hoek en excentrische aanrijdingen. Onder dit laatste type worden die aanrijdingen verstaan waarbij de langsassen van de RIMOB en het botsende voertuig ten opzichte van elkaar zijn verschoven.

Bij beide typen aanrijdingen worden op de RIMOB zowel langs- als dwarskrachten uitgeoefend. Door de langskrachten schuift de constructie in axiale richting in elkaar, waarbij de rimpelbuizen het grootste gedeelte van de energie van het botsende voertuig absorberen. De dwarskrachten zullen de RIMOB in zijdelingse richting doen bewegen. Zolang de neus van de constructie nog geborgd is in de langsgeluiders (over een lengte van ca 1 m) is de beweging in zijdelingse richting gering. Komt de neus door de uitgeoefende langskrachten uit deze geleiders, zal de neus zich in zijdelingse richting gaan bewegen. De stabiliteit van de RIMOB in zijdelingse richting dient dan voldoende groot te zijn om de constructie niet te laten bezwijken.

4. UITVOERING VAN HET ONDERZOEK

Zoals reeds is aangegeven zullen er twee typen rekenmodellen moeten worden ontwikkeld. Eén ter bepaling van de energie-absorptiecapaciteit (zie par. 4.1.) en één ter bepaling van de stabiliteit van de RIMOB (zie par. 4.2.).

4.1. Bepaling energie-absorptiecapaciteit

4.1.1. Inleiding

De bepaling van de energie-absorptiecapaciteit van de RIMOB wordt herleid uit de centrale botsingen, aangezien bij dit type botsingen relatief gezien de meeste energie door de rimpelbuizen wordt geabsorbeerd. Bij het ontwikkelen van dit rekenmodel dient met de volgende factoren rekening te worden gehouden:

- variabele massa en snelheid van botsende voertuigen
- variabele basisbreedte van de RIMOB
- variabel aantal segmenten
- variabel aantal rimpelbuizen per segment
- variabele rimpelkracht van de rimpelbuizen

4.1.2. Ontwikkeling energieformule

De hoeveelheid kinetische energie die door de RIMOB moet worden geabsorbeerd is afhankelijk van de kinetische energie van het botsende voertuig. De grootte van deze kinetische energie hangt weer af van de massa en snelheid van het botsende voertuig. In formule: $E_k = \frac{1}{2} mv^2$; waarbij: E_k = kinetische energie; m = voertuigmassa; v = voertuigsnelheid.

Deze kinetische energie moet vrijwel geheel door de RIMOB worden geabsorbeerd. De geabsorbeerde energie is, bij het segment gelineariseerd gedachte proces, het produkt van de optredende krachten en de remweg. In formule wordt dit: $E_a = F * s$; waarbij: E_a = geabsorbeerde energie; F = som van de krachten in de RIMOB; s = vervorming RIMOB.

Bij een botsing geldt: $E_k = E_a$. Dit betekent dat: $\frac{1}{2} mv^2 = F * s$.

Met behulp van de mechanica en op empirische wijze is het produkt van F en s vast te stellen. Dit houdt dus in dat bij de aanname van een be-

paalde voertuigmassa de corresponderende voertuigsnelheid kan worden berekend. Evenzo kan bij de aanname van de massa de snelheid worden berekend.

Bepaling energie-absorptie door het voertuig

Ten gevolge van een aanrijding van een personenauto tegen een RIMOB vindt naast vervorming van de RIMOB ook vervorming van het voertuig plaats. De energie die hiermee door het voertuig wordt vernietigd dient in mindering gebracht te worden op de totale kinetische energie van het voertuig. De kinetische energie die resteert dient volledig door de RIMOB te worden geabsorbeerd.

N.B. De rol- en de wrijvingsweerstand van het voertuig komt verderop in deze paragraaf aan de orde.

Uit proefnemingen is gebleken dat bij energieniveaus, zoals deze volgen uit de beproevingscondities, de vervorming van het voertuig ca 5% bedraagt van de som van de vervorming van het voertuig en de RIMOB. Als gemakshalve wordt aangenomen dat de gemiddelde kracht voor de vervorming van de RIMOB en het voertuig van dezelfde orde zijn, volgt dat ongeveer 5% van de oorspronkelijke energie door het voertuig wordt geabsorbeerd.

Bepaling vervorming van de RIMOB

De vervorming van de RIMOB - in deze paragraaf aangegeven met s - kan, rekening houdend met een variabel aantal segmenten, in een formule worden uitgedrukt.

Er wordt van uit gegaan dat het neussegment volledig vervormt. Van de segmenten wordt aangenomen dat ze maximaal 80% van hun oorspronkelijke lengte vervormen, aangezien van de rimpelbuizen bekend is dat ze eveneens een maximale vervorming van ca 80% hebben. Op grond van deze aannamen wordt de maximale vervormingslengte: $s = l_1 + 0,8 * l_2 * x$; waarin: s = maximale vervorming RIMOB; l_1 = lengte van een neussegment; l_2 = lengte van een segment; x = aantal segmenten.

N.B. Onder het neussegment wordt het voorste ronde gedeelte plus de eerste dwarsdrager verstaan.

Bepaling van de krachten in de RIMOB

De krachten die tijdens een aanrijding in de RIMOB werken - in deze paragraaf aangeduid met F - is een samenstelling van de volgende krachten:

- kracht veroorzaakt door het neussegment;
- kracht veroorzaakt door de rimpelbuizen;
- wrijvings- en vervormingskrachten;

De RIMOB is opgebouwd uit vele onderdelen die één of meer van de hierboven aangegeven krachten opwekken. In het ene geval zijn deze krachten constant als wordt aangenomen dat het krachtenspel een gelineariseerd proces is. Andere krachten zijn niet constant maar afhankelijk van het aantal segmenten. Het is dan ook gewenst de krachten volgens het onderstaande te groeperen.

A. Constante krachten die gedurende de gehele botsing werken en onafhankelijk zijn van het aantal segmenten. Deze krachten zijn de rimpelbuis-kracht (F_r), de wrijvingskracht tussen de flankdelen en de vervormingskrachten van de knikstrippen en afdekplaten (F_{wv}).

B. Constante krachten die eenmalig optreden en onafhankelijk zijn van het aantal segmenten. Deze krachten worden gegenereerd door het neussegment, en worden om praktische redenen gesplitst in de vervormingskracht (F_{n_1}) en de wrijvingskracht (F_{n_2}).

C. Niet-constante krachten vanwege de afhankelijkheid van het aantal segmenten en/of de breedte van de trapeziumvormige segmenten, zoals de wrijvingskracht tussen de constructie en het wegdek en de toename van deze kracht bij het breder worden van de segmenten. Verder diverse wrijvings- en vervormingskrachten die groter worden naarmate meer segmenten worden ingedrukt.

Bij de berekening wordt uitgegaan van de kracht die in één segment (de smalste) worden gegenereerd (F_s) en van de krachten ten gevolge van het breder worden van de segmenten (F_t). Aangezien F_t niet van toepassing is op het eerste segment, levert dit in de te ontwikkelen formule bij toepassing van het segment-volgnummer i de term: $F_t(i-1)$ op.

D. Naast de krachten binnen de RIMOB levert het voertuig eveneens een kracht - tegengesteld aan de botsrichting - die te omschrijven is als: Constante kracht die gedurende de gehele botsing werkt, maar afhankelijk is van de grootte van de voertuigmassa. De kracht wordt veroorzaakt door de weerstand tussen de voertuigbanden en het wegdek (F_{vrt}), geba-

seerd op een combinatie van rollende en glijdende wrijving. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat er tijdens de botsing niet wordt geremd; wordt er wel geremd zal dit de energie-absorptiecapaciteit van de RIMOB ten goede komen.

Bepaling energieformule

Bij het substitueren van alle hiervoor aangegeven factoren ontstaat de volgende formule voor de energievergelijking:

$$\frac{1}{2} mv^2 * 0,95 = (Fn_1 + F_{vrt}) * l_1 + [aF_r * 0,8 l_2 * x_p] +$$

$$(Fn_2 + F_{wv} + F_{vrt}) * 0,8 l_2 * x_t +$$

$$\left\{ \left(F_s \sum_{i=1}^{x_t} i \right) + \left(F_t \sum_{i=1}^{x_t} (i-1) \right) \right\} * 0,8 l_2$$

De krachten zijn hiervoor reeds benoemd. Verder is a = aantal rimpelbuizen per segment; x_p = aantal segmenten met hetzelfde aantal en soort rimpelbuizen; x_t = totaal aantal segmenten; i = volgnummer.

Als het aantal rimpelbuizen per segment gelijk blijft, of als over de gehele constructie rimpelbuizen met dezelfde rimpelkracht worden toegepast, is de formule zonder meer van toepassing.

Worden verschillende typen rimpelbuizen toegepast en/of is het aantal rimpelbuizen per segment voor de gehele constructie niet gelijk, dient het gedeelte van de formule dat tussen de vierkante haken is geplaatst voor deze gevallen één of meerdere keren worden doorgerekend.

Uitgaande van bepaalde dimensies van de RIMOB kunnen diverse factoren in getalswaarden worden aangegeven. Met betrekking tot de standaarduitvoering van de RIMOB - de RIMOB-V, die het meest is beproefd - is de grootte van de krachten in Bijlage 1 nader uitgewerkt.

Na het substitueren van de krachten en afmetingen blijven dan in de formule slechts de volgende relevante variabelen over:

- m = massa van het botsende voertuig (kg)
- v = snelheid van het botsende voertuig (m/s)
- a = het aantal rimpelbuizen per segment

F_r = rimpelkracht van één rimpelbuis (kN)

x = het aantal segmenten

Ter besparing van veel rekenwerk is met behulp van een computer de relatie berekend tussen de voertuigmassa en -snelheid bij een gegeven kracht van de RIMOB. De keuze voor wat betreft het aantal toe te passen segmenten en het aantal en de soort rimpelbuizen per segment is vrij.

4.1.3. Bepaling rimpelkracht van een rimpelbuis

In de afgeleide energieformule van de RIMOB komt de term F_r voor. Dit is de grootte van de rimpelkracht van een rimpelbuis. Bij een wijziging van de diameter of wanddikte wijzigt de F_r -waarde van de rimpelbuis.

De F_r -waarde kan met behulp van een empirische formule (Crocker, 1974) berekend worden. Deze luidt $F_r = \sigma_B \cdot w^2 (62,8 + 0,189 r/w)$; waarin: F_r = rimpelkracht (kN); σ_B = breukgrens (kN/cm^2); w = wanddikte (cm); r = straal rimpelbuis (cm).

In het rapport over het ontwikkelingsonderzoek van de RIMOB (Schoon, 1982) is de toetsing van de formule door middel van full-scale proeven met rimpelbuizen nader beschreven. Ten einde bij deze formule rekenwerk te besparen is de formule uitgedrukt in een nomogram (zie Afbeelding 3). In dit nomogram kunnen door het trekken van een verbindingslijn de volgende drie grootheden op grafische wijze met elkaar in verband worden gebracht: de rimpelkracht F_r , de wanddikte van de rimpelbuis (w) en de straal van de rimpelbuis (r). In Afbeelding 3 zijn de verbindingslijnen van de rimpelbuizen die bij de proeven op ware schaal zijn toegepast, aangegeven.

4.1.4. Nomogram van de energieformule

Zoals hiervoor is aangegeven kunnen met behulp van een computerprogramma de gewenste grootheden uit de energieformule worden berekend. Evenals bij de bepaling van de rimpelkracht is gebeurd, kan ook de energieformule in een nomogram worden verwerkt.

In Afbeelding 4 is een dergelijk nomogram gegeven voor een RIMOB-V met een basisbreedte van 2,70 m (de "standaard"-RIMOB). Met lijnstukken

kunnen verbindingen worden gelegd tusen de volgende drie grootheden: voertuigmassa, voertuigsnelheid en de dimensies van de RIMOB (het rechter blok).

Dit blok is als volgt samengesteld. De RIMOB is opgebouwd uit een neussegment en één tot zes gewone segmenten. Het zevende segment is het buffersegment en is voorzien van zes rimpelbuizen. In de segmenten kunnen zware rimpelbuizen (aangeduid met A) en/of lichte rimpelbuizen (aangeduid met B) worden toegepast.

De standaard-RIMOB die bij de proeven is getest, is opgebouwd uit twee segmenten met B-buizen en vijf segmenten met A-buizen. In Afbeelding 4 is dit type RIMOB met een pijl aangeduid.

In het blok zijn verder de bouwlengte van de RIMOB en de remweg (s) ten gevolge van een aanrijding aangegeven.

Met het nomogram kan als volgt te werk worden gegaan.

Men wil bijvoorbeeld weten welke RIMOB toegepast moet worden als men uitgaat van een aanrijding van een voertuig met een massa van 1000 kg en een snelheid van 100 km/u. Men trekt daartoe de verbindingslijn naar het RIMOB-blok en vindt het snijpunt met bijvoorbeeld de lijn die de "standaard RIMOB-V" voorstelt. Vastgesteld kan worden dat het buffersegment nog niet wordt aangesproken. Wil men de grootte van indrukking van de RIMOB weten, dan trekt men een parallellijn naar links en vindt een totale indrukking van 5,15 m.

Bij een voertuigmassa van 1000 kg en een snelheid van 70 km/u vindt men dat bij de RIMOB met twee segmenten met lichte, en twee segmenten met zware buizen dat er nog een bufferremweg van 0,5 m overblijft (zie de lijn in het nomogram).

Het nomogram is gebaseerd op de twee buistypen die bij de proeven op ware schaal zijn toegepast. Welke buistypen dit zijn wordt in het nomogram aangeduid. Wil men andere buistypen toepassen, kunnen berekeningen alleen maar met behulp van de energieformule van de RIMOB worden uitgevoerd. Op basis hiervan moet een ander nomogram worden opgesteld.

Het nomogram is gebaseerd op de energieformule van de RIMOB-V. Dit type geeft ten opzichte van de RIMOB-P wat meer weerstand. Het betreft hier een grotere weerstand van de flankdelen, knikstrippen en afdekplaten. Verder is de massa groter, wat enige consequenties heeft voor de grootte

van de wrijving. Met behulp van de energieformule is berekend dat de kracht die in de RIMOB-P wordt gegenereerd ca 1% lager is dan die in de RIMOB-V. Dit verschil is dermate klein dat het ten opzichte van de nauwkeurigheid van diverse aannamen te verwaarlozen is. Gesteld kan dan ook worden dat het nomogram voor zowel de RIMOB-V als RIMOB-P kan worden gehanteerd.

4.1.5. Toetsing nomogram aan resultaten full-scale proeven

Het nomogram in Afbeelding 4 is gebaseerd op de zuiver frontale aanrijdingen. Toetsing zal derhalve ook aan deze typen aanrijdingen plaatsvinden. Bij het ontwikkelingsonderzoek van de RIMOB zijn diverse verificatieproeven gedaan. Een aantal betrof de volgende centrale botsingen: F7, F9, F11, en F13. In Tabel 1 zijn de gegevens van deze proeven opgenomen (voertuigmassa en -snelheid en dynamische remweg RIMOB). Verder zijn in deze tabel opgenomen de volgens het nomogram gevonden remweg van de RIMOB en het absolute en relatieve verschil met de proefgegevens.

Het resultaat van de uitgevoerde toetsing is dat de remweg gevonden volgens het nomogram een afwijking van -4,7% tot + 3,5% vertoont ten opzichte van de bij de proeven gemeten remweg. Gezien de vele dynamische effecten die bij een aanrijding optreden, kunnen deze afwijkingen als gering worden beschouwd.

4.2. Bepaling stabiliteit

4.2.1. Inleiding

Bij excentrische aanrijdingen en aanrijdingen op de neus onder een hoek zullen, als de neus uit de geleiding is losgekomen, op de RIMOB zijdelingse krachten uitgeoefend worden. Om het bezwijken van de constructie onder normale botsomstandigheden te voorkomen, moet de stabiliteit ervan voldoende groot zijn om deze krachten te kunnen opvangen. Daarom zullen de berekeningen ten aanzien van deze stabiliteit worden uitgevoerd voor het type aanrijding dat de grootste dwarskrachten tot gevolg heeft. Dit is de aanrijding schuin op de neus. Voor een motivering zal het verloop van beide typen aanrijdingen nader worden besproken. Uitgangspunt hierbij

is de stand van het botsende voertuig ten opzichte van de lengte-as van de RIMOB.

Bij de excentrische aanrijdingen werken de door het voertuig uitgeoefende krachten aanvankelijk in langsrichting op de RIMOB. Mede door de grondgeleiding van het neussegment zal de constructie hierdoor in langsrichting in elkaar worden gedrukt. De reactiekrachten van de RIMOB oefenen echter een koppel uit op het voertuig. De belangrijkste reactiekracht van het voertuig bestaat uit een dwarskracht die aangrijpt op de achterwielen. Naarmate deze dwarskracht groter is - afhankelijk van de verticale kracht op de achterwielen en de wrijving tussen de banden en het wegdek - zal het voertuig minder neiging hebben te roteren. Mocht er rotatie ontstaan, zal deze met een relatief lage rotatiesnelheid beginnen. Als verklaring kan hiervoor worden gegeven dat het op het voertuig werkend koppel ten gevolge van de reactiekracht van de RIMOB aanvankelijk relatief klein is vanwege de kleine armlengte. Deze is ongeveer gelijk aan de afstand tussen de hartlijnen van het voertuig en de RIMOB. Bij rotatie van het voertuig zal de armlengte steeds groter worden, en daarmee het op het voertuig werkend koppel. De in aanvang lage rotatiesnelheid bewerkstelligt dat de RIMOB in de eerste fase van de aanrijding reeds aanzienlijk in de langsrichting in elkaar wordt gedrukt.

Bij de schuine aanrijdingen zal, nadat het neussegment uit de grondgeleiding is losgekomen, een kracht op de RIMOB werken die schuin op zijn lengte-as staat. Dit zal resulteren in een dwarskracht op de RIMOB. Bij rotatie van het voertuig zal deze kracht, afhankelijk van de rotatierichting, kunnen toe- of afnemen. Vooral bij het toenemen zal een grotere uitwijking van de RIMOB in dwarsrichting ontstaan. Daarom is dan ook bij het opstellen van het rekenmodel gekozen voor de schuine aanrijding.

4.2.2. Berekeningswijze (algemeen)

Gedurende de botstijd dat het neussegment van de RIMOB in de grondgeleider zit, wordt een gedeelte van de totale kinetische energie van het botsende voertuig geabsorbeerd. Deze hoeveelheid energie heeft een vaste waarde. De resterende energie ten tijde van het loskomen van de RIMOB uit de neusgeleider wordt hierna geabsorbeerd door de vervorming van de RIMOB in zowel de langs- als dwarsrichting. Daarom zal de kinetische energie dan ook in beide richtingen moeten worden gesplitst.

De dwarsvervorming kan worden berekend uit het koppel dat de RIMOB in zijdelingse richting kan opnemen. Met dit koppel is de kracht te berekenen die bij een gegeven kinetische energie in dwarsrichting een remweg (vervorming) in deze richting geeft. Deze dwarsvervorming dient nog verder te worden met de grootte van de speling van de RIMOB in dwarsrichting om de totale zijdelingse verplaatsing te verkrijgen.

De langsvervorming kan op twee wijzen worden bepaald. In de eerste plaats op de wijze van de dwarsvervorming. Uit de energieformule van par. 4.1. is namelijk een kracht te herleiden, waarmee bij een bepaalde waarde van de kinetische energie in langsricting de remweg (vervorming) in deze richting is te bepalen. De tweede manier is eenvoudiger: de aanvangs-snelheid wordt ontbonden in een langs- en dwarscomponent van de snelheid. Met de langscomponent kan met behulp van het nomogram op Afbeelding 4 de langsvervorming worden afgelezen .

4.2.3. Berekening dwarsverplaatsing

Op het moment van het eerste contact tussen voertuig en RIMOB ($t = t_0$) is de te absorberen hoeveelheid kinetische energie van het voertuig:

$$Ek_0 = \frac{1}{2} mv^2.$$

Hierna vangt de energie-absorptie aan, in eerste instantie over de periode dat de neus van de RIMOB door de geleider wordt geleid. Over deze periode wordt de auto ca 0,5 m ingedrukt en de RIMOB ca 1,5 m (neus ca 0,5 m, 1ste segment ca 0,8 m en 2de segment ca 0,2 m). De hierbij geabsorbeerde hoeveelheid energie is te bepalen. Volgens de wet van Newton is de kracht is het produkt van massa en versnelling (of vertraging). De over deze periode optredende voertuigvertraging is met behulp van de fullscale proeven te herleiden uit de highspeed films en elektronische metingen van de vertragingen. Het produkt van deze voertuigvertraging met de corresponderende voertuigmassa geeft een kracht. Deze kracht, vermenigvuldigd met de remweg over de eerste 2 meter, geeft de hoeveelheid energie die over deze afstand wordt geabsorbeerd ($E_{k,geleider}$).

Bij het loskomen uit de geleider ($t = t_1$) is er nog een energie-overschot van $Ek_0 - E_{k,geleider} = Ek_1$.

De snelheid van het voertuig wordt over de tijd t_0 tot t_1 , gereduceerd van v_0 tot v_1 .

E_{k_1} kan ten tijde van t_1 worden gesplitst in E_{k_1} -langs en E_{k_1} -dwars. De waarden zijn resp. $\frac{1}{2}m(v_1 \cos \beta)^2$ en $\frac{1}{2}m(v_1 \sin \beta)^2$. De hoek β is de gemiddelde hoek tussen de langsassen van het voertuig en de RIMOB van t_1 tot de tijd dat de botsing is beëindigd. Uit de full-scale proef F5 is vastgesteld dat deze hoek ca 25% groter is dan de aanvankelijke inrijhoek. Op grond van deze ene proef kan met de nodige voorbehouden (zie par. 4.2.7.) worden vastgesteld dat $\beta = 1,25 \alpha$.

De E_{k_1} -dwars veroorzaakt een koppel op de RIMOB. Dit koppel dient door de RIMOB te worden opgenomen, wil hij niet bezwijken. Dit tegenwerkend koppel resulteert uit de volgende koppels: koppel van een doosconstructie aan de basis van de RIMOB, koppel van de gezamenlijke segmenten als gevolg van de wrijving met het wegdek en het koppel als gevolg van de wrijving tussen de (voor)wielen van het voertuig en het wegdek.

Het momenten- en krachtenspel ten tijde van $t = t_1$ is in Afbeelding 5 in beeld gebracht, waarin de volgende factoren een rol spelen: de dwarskracht op de RIMOB (F_1); het moment uitgeoefend door het voorlaatste op het laatste segment (M_r); de wrijvingskrachten van alle segmenten (F_{wr}); de wrijvingskracht voertuig-wegdek (F_{vrt}) en de afstand einde geleider tot draaipunt P (a).

Ten gevolge van F_1 zal op het laatste segment van de RIMOB een moment worden uitgeoefend ter grootte van $F_1 * a$. Het punt waar de RIMOB bij een voldoende grote F_1 omheen zal draaien is het punt P dat zich tussen het laatste en voorlaatste segment bevindt, ter hoogte links van de linker rimpelbuis. Het laatste segment is namelijk het buffersegment en bevat meer rimpelbuizen dan de overige segmenten. Het voorlaatste segment zal dan ook het zwaarst worden belast en zal het tegenwerkend koppel M_r opleveren, gebaseerd op de rimpelkrachten van rimpelbuizen.

Het momentenspel is als volgt in een formule weer te geven:

$$F_1 * a = M_r + x F_{wr} * \frac{1}{2} a + F_{vrt} * a \quad (\text{zie ook Afbeelding 5}).$$

Hierin is x het aantal segmenten dat de wrijvingskracht veroorzaakt.

M_r is te herleiden uit de onderste figuur in Afbeelding 5. Het afgebeelde segment zal bij het uitvoeren van een externe belasting om het draaipunt P gaan bewegen. Het tegenwerkend koppel $M_r = c * F_r + (c + b) F_r + (c + 2b) F_r$. Hierin is F_r de rimpelkracht en b de afstand tussen de rimpelbuizen. De afstand c bevindt zich ergens tussen de linker rimpelbuis en de

zijkant van het segment. De afstand c is bij benadering te bepalen uit een statische proef die met een los segment is uitgevoerd. Met deze proef is vastgesteld dat de grootte van het koppel van het beproefde segment 27,7 Nm bedroeg (Schoon, 1982). Uit de hierboven aangegeven formule voor de M_r is bepaald dat de grootte van c ongeveer gelijk is aan $\frac{1}{2}b$. Hieruit volgt dat $M_r = F_r * 4,5b$.

De grootte van F_1 wordt hiermee: $F_1 = F_r * 4,5b/a + \frac{1}{2}x * F_{wr} + F_{vrt}$.

In Tabel 2 zijn de waarden behorend bij de in deze formule aangegeven krachten en afstanden voor enkele typen RIMOB gegeven.

Met de gevonden waarde voor F_1 kan de grootte van de dwarsverplaatsing (s_d) worden berekend uit: $F_1 * s_d = Ek_1 dwars$.

De berekening van de waarde voor s_d is volgens de mechanicawetten tot stand gekomen. Niet te berekenen valt de grootte van de zijdelingse verplaatsing van de RIMOB ten gevolge van speling tussen de flankdelen onderling en tussen de rimpelbuizen en dwarsdraggers. Deze is op empirische wijze vastgesteld en bedraagt ca 10 cm, de s_d -waarde dient met dit getal vermeerderd te worden.

4.2.4. Berekening langsverplaatsing

De voertuigsnelheid ten tijde van t_0 bedraagt v_0 . De inrijhoek is α . Gedurende de tijd dat de neus van de RIMOB in de geleider zit, neemt de inrijhoek iets af omdat het voertuig enigszins wordt bijgedraaid. Is de RIMOB los uit de geleider, zal de neus van de RIMOB in zijdelingse richting gaan bewegen. De auto zal ook meedraaien. Hierdoor wordt de inrijhoek vergroot. In de vorige paragraaf is hiervoor een gemiddelde waarde aangenomen die 25% groter is dan de oorspronkelijke inrijhoek. Ten einde uit het nomogram de langsverplaatsing te kunnen bepalen, dient de grootte van de langskomponent van de oorspronkelijke botssnelheid te worden berekend. Deze bedraagt $v_0 \cos(1,25\alpha)$. Bij een gegeven voertuigmassa kan nu de langsverplaatsing uit het nomogram worden herleid.

full-scale proeven is bepaald, is een zijdelingse verplaatsing ten gevolge van het volledig strekken van de boven- en onderplaten van de doosconstructie waarbij de dwarsdragers parallel ten opzichte van elkaar blijven (vanwege het nog niet bezwijken van de rimpelbuizen).

In Afbeelding 6 zijn de botscondities gehanteerd die ten grondslag hebben gelegen aan het ontwerp van de RIMOB. Het betreft hier de volgende combinatie van inrijnsnelheid en inrijsnelheid, resp: 100 km/u en 10° , 80 km/u en 15° , 60 km/u en 25° . In Afbeelding 7 zijn in meer algemene zin diverse botsomstandigheden aangegeven. De in beide afbeeldingen als parameter opgevoerde voertuigmassa loopt van 800 tot 1500 kg.

Uit Afbeelding 6, waarin de verplaatsing van de RIMOB onder een aantal botscondities is aangegeven, blijkt dat de botscondities $60\text{km/u}-25^{\circ}$ (resp: inrijnsnelheid en -hoek) voor elke voertuigmassa binnen de lijn "begrenzingscurve" blijft. Voor de botscondities $80\text{km/u}-15^{\circ}$ vallen de verplaatsingen bij een voertuigmassa van 1250 en 1500 kg er buiten. Voor de botsconditie $100\text{km/u}-10^{\circ}$ vallen de voertuigmassa's boven de 900 kg erbuiten.

Dat bij een toenemende hoek van inrijden en voertuigsnellheid de "begrenzingscurve" eerder wordt overschreden blijkt uit Afbeelding 7.

De combinatie $100\text{km/u}-10^{\circ}$ is reeds hierboven besproken. Bij de combinatie $100\text{km/u}-15^{\circ}$ wordt de grens al bereikt bij een voertuigmassa van ca 800 kg. Bij de combinatie $80\text{km/u}-25^{\circ}$ ligt de grens ergens tussen de 900 en de 1000 kg.

4.2.6. Toetsing dwars- en langsverplaatsing

Toetsing van de in principe op basis van berekeningen gevonden dwars- en langsverplaatsing kan worden uitgevoerd aan de hand van full-scale proeven die onder een hoek op de neus van de RIMOB hebben plaats gevonden. Onder deze botsconditie zijn twee proeven uitgevoerd: F3 en F5. Bij de eerste proef bestond de RIMOB nog uit acht segmenten met daarin rimpelbuizen met gelijke rimpelkracht. Het koppel dat dit type RIMOB kon opnemen was geringer dan het daarna gemodificeerde type met zeven segmenten en een progressief toenemende rimpelkracht. Toetsing van de berekeningen aan de hand van proef F3 is derhalve minder geschikt.

Proef F5 is uitgevoerd met een inrijsnelheid van 13° en een snelheid van 80

4.2.5. Grafische uitwerking

Op grond van de hiervoor aangegeven berekeningen zijn de langs- en dwarsverplaatsingen van de RIMOB te bepalen. Voor de standaard RIMOB-V, zoals beproefd bij de laatste full-scale proeven, is dit voor diverse botsomstandigheden uitgevoerd. De berekeningen zijn gemaakt voor aanrijdingen schuin op de neus, waarbij er van uit is gegaan dat het voertuig over de duur van de botsing een rotatie zal ondergaan waardoor de hoek tussen de langsassen van het voertuig en van de RIMOB gemiddeld gezien 25% groter is dan de oorspronkelijke inrijhoek. Voor een nadere beschouwing wordt verwezen naar par. 4.2.7. De berekende langs- en dwarsverplaatsingen zijn grafisch uitgezet in de Afbeeldingen 6 en 7.

De assen waarlangs de verplaatsingen zijn uitgezet beginnen op het punt dat de neus van de RIMOB uit de geleider is losgekomen. In langsrichting is de voorpunt van de RIMOB dan reeds 1,5 m verplaatst. De getrokken lijnen in de grafiek geven de combinaties van inrijnsnelheid en -hoek weer. Hierop zijn de voertuigmassa's middels symbolen aangegeven. Tevens is een curve getrokken die de verplaatsing van de RIMOB in zijdelingse richting aangeeft in het geval een segment aan één zijde (volledig) bezwijkt, de zogenaamde "begrenzingscurve". Een dergelijke curve kan als grens worden beschouwd voor de maximaal toelaatbare verplaatsing in zijdelingse richting, aangezien bij het aan één zijde bezwijken van een segment verwacht mag worden dat de RIMOB niet meer goed zal functioneren. De curve is op het volgende gebaseerd. Het segment dat ten gevolge van de dwarskracht als eerste zal bezwijken is het voorlaatste segment; hierop wordt namelijk, als rekening wordt gehouden met het beschikbare rimpelbuis materiaal, het grootste moment uitgeoefend. Het segment zal aan één zijde bezwijken: de rimpelbuis aan deze zijde zal (volledig) worden ingedrukt (80% van de oorspronkelijke lengte). Het segment zal een wigvorm aannemen, hetgeen tot gevolg zal hebben dat de voorzijde van de RIMOB zal uitwijken.

Als de uitwijking grafisch wordt uitgezet, kan worden bepaald dat de RIMOB bij een langsindrukking van ca 2,5 m een uitwijking van ca 2 m kan krijgen. Voor andere waarden van de langsindrukking zijn op analoge wijze corresponderende dwarsverplaatsingen te bepalen. Bij deze verplaatsing dient nog de speling van 10 cm (zie par. 4.2.3.) bijgeteld te worden, en verder nog een verplaatsing van 20 cm per segment. Deze 20 cm, die uit

km/u. De voertuigmassa bedroeg 910 kg. De geteste RIMOB was de standaard RIMOB-V, met rimpelbuizen in de segmenten 3 t/m 7 die een grotere rimpelkracht (22%) hadden dan de rimpelbuizen van de RIMOB die in de laatste versie zijn beproefd. Aangezien de curves van Afbeelding 6 en 7 op deze laatste versie zijn gebaseerd, is een toetsing van proef F5 aan deze curves niet goed mogelijk. Wel is toetsing mogelijk van de rekenwijze die ten grondslag aan de samenstelling van de curves heeft gelegen. De berekening moet dan met een aangepaste waarde van de rimpelkracht worden uitgevoerd. Een dergelijke berekening levert de volgende dwars- en langsverplaatsingen van de RIMOB: resp: 3,35 en 0,78 m. De veldmetingen van proef F5 gaven verplaatsingen van resp: 3,20 en 0,80 m te zien. Geconcludeerd kan worden dat de afwijkingen gering zijn.

4.2.7. Discussie berekeningswijze

Op grond van de Afbeeldingen 6 en 7 is, met inachtneming van een aantal condities, vast te stellen wat de langs- en dwarsverplaatsingen van de RIMOB zullen zijn bij een schuine aanrijding op de neus. De verplaatsingen zijn gebaseerd op een tijdens de duur van de botsing aangenomen gemiddelde inrijhoek die 25% meer bedraagt dan de oorspronkelijke. Dit percentage is bepaald aan de hand van analyse van high-speed films van een uitgevoerde aanrijding schuin op de neus van de RIMOB. Bij deze niet-excentrische aanrijding is vastgesteld dat het voertuig een rotatie ondergaat die het effect van een schuine aanrijding in de zin van een grotere dwarskracht versterkt. Bij een excentrische aanrijding schuin op de neus kan dit effect nog meer worden versterkt, dan wel worden verzwakt. In Afbeelding 8 is dit effect schematisch aangegeven. Afbeelding 8a geeft de centrale aanrijding schuin op de neus. Is de aanrijding excentrisch zal de rotatie ten opzichte van Afbeelding 8a worden versterkt (Afbeelding 8b) dan wel verzwakt (Afbeelding 8c). Het aanrakingspunt waarbij het voertuig niet zal roteren, zal ergens naast het midden van het voertuig liggen (zie Afbeelding 8d). De ligging van dit punt is niet exact aan te geven daar deze van diverse factoren (o.a. de ligging van het zwaartepunt, de dimensies van de auto, grootte van de wrijvingskracht) afhankelijk is.

Bij de aangegeven afzwakking van de rotatie zal het voertuig meer in de richting van de langsas van de RIMOB werken en daarmee de RIMOB in ver-

houding meer in langs- dan in dwarsrichting in elkaar drukken. Bij een versterking van de voertuigrotatie zal het gevolg zijn dat de RIMOB aanvankelijk meer in dwarsrichting zal verplaatsen; door de voertuigrotatie zal de dwarskracht op een gegeven moment echter weer afnemen. Berekeningen omtrent het effect van de dwarskracht op de RIMOB ten gevolge van de voertuigrotatie zijn moeilijk te maken, omdat de grootte van de voertuigrotatie moeilijk te voorspellen is. Deze is afhankelijk van vele factoren, waaronder de voertuigmassa, de ligging van het zwaartepunt van het voertuig en de wrijvingskrachten van de wielen.

In de Afbeeldingen 6 en 7 is een "begrenzingscurve" getekend die is gebaseerd op de zijdelingse verplaatsing in geval het voorlaatste segment aan één zijde volledig bezwijkt. Op zich is de keuze van het "volledig bezwijken" arbitrair, aangezien ook gesteld kan worden dat bij een minder volledig bezwijken de kans bestaat dat de RIMOB niet meer goed zal functioneren. Ten tijde van het experimenteel onderzoek zijn er echter te weinig aanrijdingen onder een hoek uitgevoerd om een eenduidige maat voor een acceptabele vervorming te kunnen vaststellen.

Bij aanrijdingen die zodanige zijdelingse verplaatsingen geven dat deze "begrenzingscurve" wordt overschreden, kan worden gesteld dat de afloop van de aanrijding niet meer goed te voorspellen is, aangezien verwacht mag worden dat de RIMOB dan zeker niet meer goed zal functioneren. Uit Afbeelding 7 is af te leiden bij welke combinaties van inrijhoek en voertuigsnelheid en -massa dit het geval zal zijn. In algemene zin kan wel worden aangegeven dat bij overschrijdingen van deze curve al veel energie van het voertuig zal zijn vernietigd, zodat de resterende voertuigsnelheid gering zal zijn.

De "begrenzingscurve" is niet te toetsen, aangezien er geen aanrijdingen onder zware botscondities zijn uitgevoerd.

4.2.8. Berekening sterkte in zijdelingse richting van RIMOB-varianten

De grootte van de weerstand van de RIMOB in zijdelingse richting kan met de in par. 4.2.3. aangegeven formule worden berekend. Voor de RIMOB-V met een basisbreedte van 2,70 m (de standaard RIMOB-V) zijn met deze formule de zijdelingse verplaatsingen onder diverse omstandigheden bepaald. Zo kan eveneens de grootte van de zijdelingse sterkte van varianten van de RIMOB worden berekend. Voor twee varianten is dit nader uitgewerkt, nl.

de RIMOB-V185 (basisbreedte 1,85 m) en de RIMOB-P (basisbreedte 1,10 m).
Als referentie geldt de sterkte van de RIMOB-V270.

De aangegeven formule luidt: $F_1 = F_r * 4,5 b/a + \frac{1}{2}x * F_{wr} + F_{vrt}$.

In Tabel 2 is de grootte van de diverse factoren van de drie typen RIMOB nader aangegeven. De hieruit resulterende groottes van de F_1 zijn voor de V270, V185 en P resp. 9,2, 8,6 en 10,4 kN. Ondanks de verkleining van de basis van de V185 t.o.v. van de V270 zijn beide constructies nagenoeg even stabiel in dwarsrichting als gevolg van de inkorting van V185 met één segment. De RIMOB-P is met zijn smalle basis ongeveer 25% stabielier dan de V270 vanwege de toepassing van slechts vier segmenten.

De F_1 -kracht kan worden vergroot door in het voorlaatste segment het toepassen van rimpelbuizen met een grotere rimpelkracht, en/of door het vergroten van de afstand tussen de rimpelbuizen van dit segment en/of door vermindering van het aantal segmenten.

AFBEELDINGEN EN TABELLEN

Afbeelding 1. Opengewerkte tekening van de RIMOB-V (V-vormig).

Afbeelding 2. Zij- en bovenaanzicht van de RIMOB-P (parallel-vormig) met vier segmenten.

Afbeelding 3. Nomogram voor de bepaling van de rimpelkracht van aluminium rimpelbuizen aan de hand van de straal en wanddikte.

Afbeelding 4. Nomogram voor de relatie tussen de voertuigmassa, -snelheid en remweg van de RIMOB voor een centrale frontale aanrijding tegen een RIMOB-V met een basisbreedte van 2,70 m.

Afbeelding 5. Momenten- en krachtenspel ten tijde van $t = t_1$.

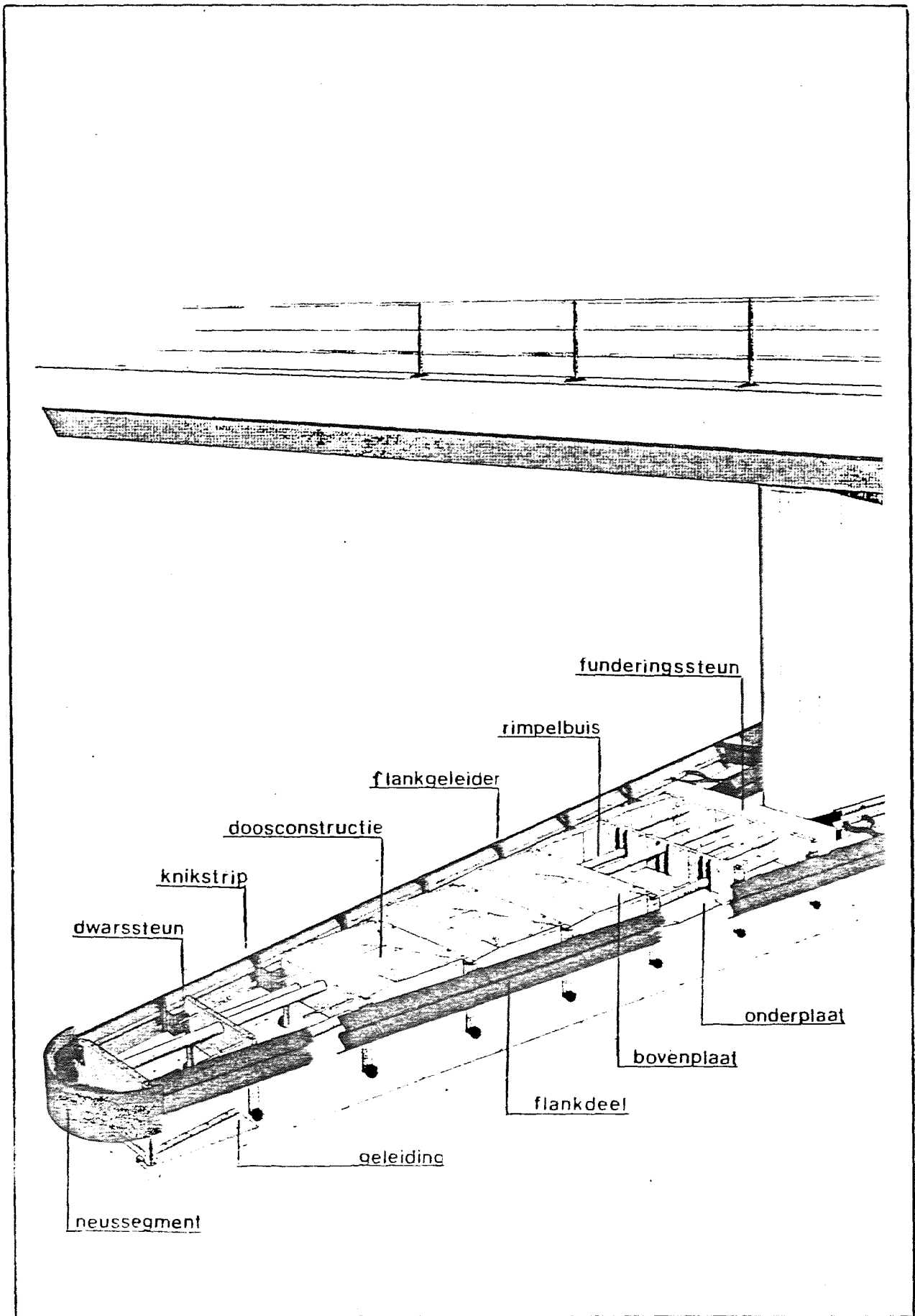
Afbeelding 6. De relatie tussen de langs- en dwarsverplaatsing bij enkele typen aanrijdingen schuin op de neus met een RIMOB-V met een basisbreedte van 2,70 m. De botscondities zijn conform aan die van het ontwikkelingsonderzoek, namelijk $60\text{km/u}-25^\circ$, $80\text{ km/u}-15^\circ$ en $100\text{km/u}-10^\circ$.

Afbeelding 7. De relatie tussen de langs- en dwarsverplaatsing bij diverse typen aanrijdingen schuin op de neus met een RIMOB-V met een breedte van 2,70 m. Aanduidingen in snelheid (km/u)/inrijhoek (graden).

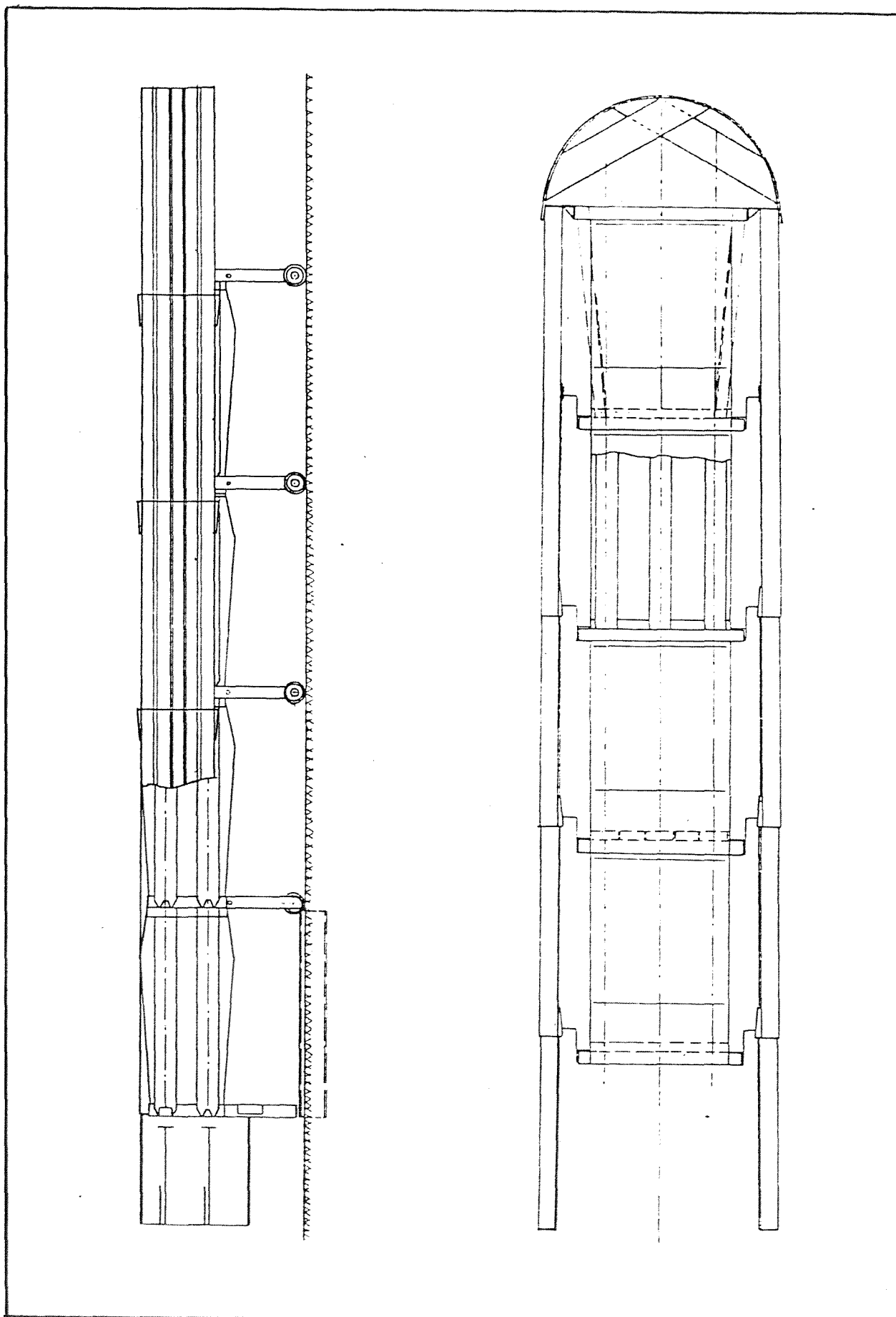
Afbeelding 8. Centrale en excentrische aanrijdingen schuin op de neus en de daaruit resulterende rotatierichting van het voertuig.

Tabel 1. Vergelijking van de remweg in langsrichting van het voertuig bij een frontale aanrijding van full-scale proeven en het rekenmodel (nomogram).

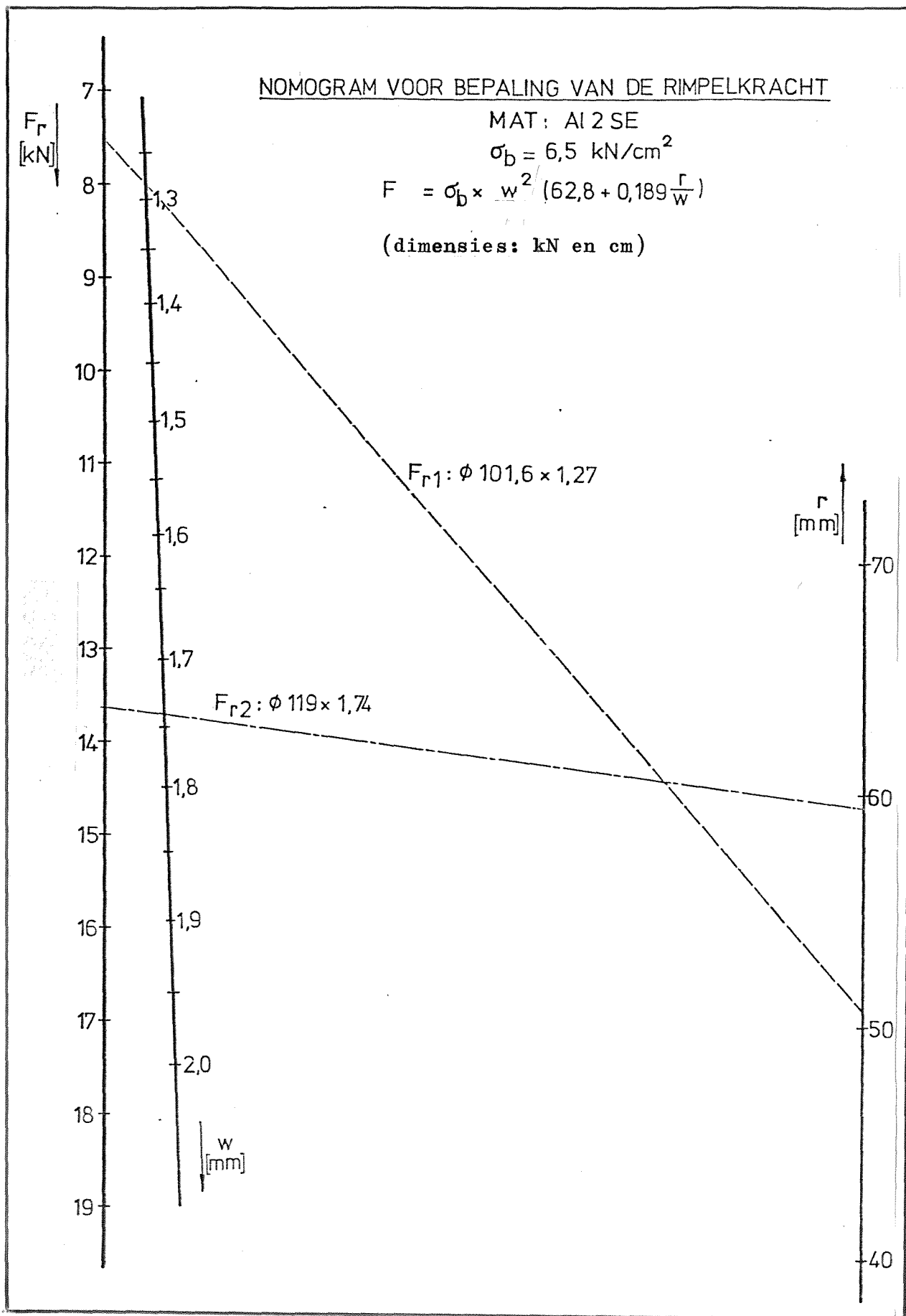
Tabel 2. Gegevens van enkele RIMOB-typen ten bepaling van de sterkte in zijdelingse richting.



Afbeelding 1. Opengewerkte tekening van de RIMOB-V (V-vormig).

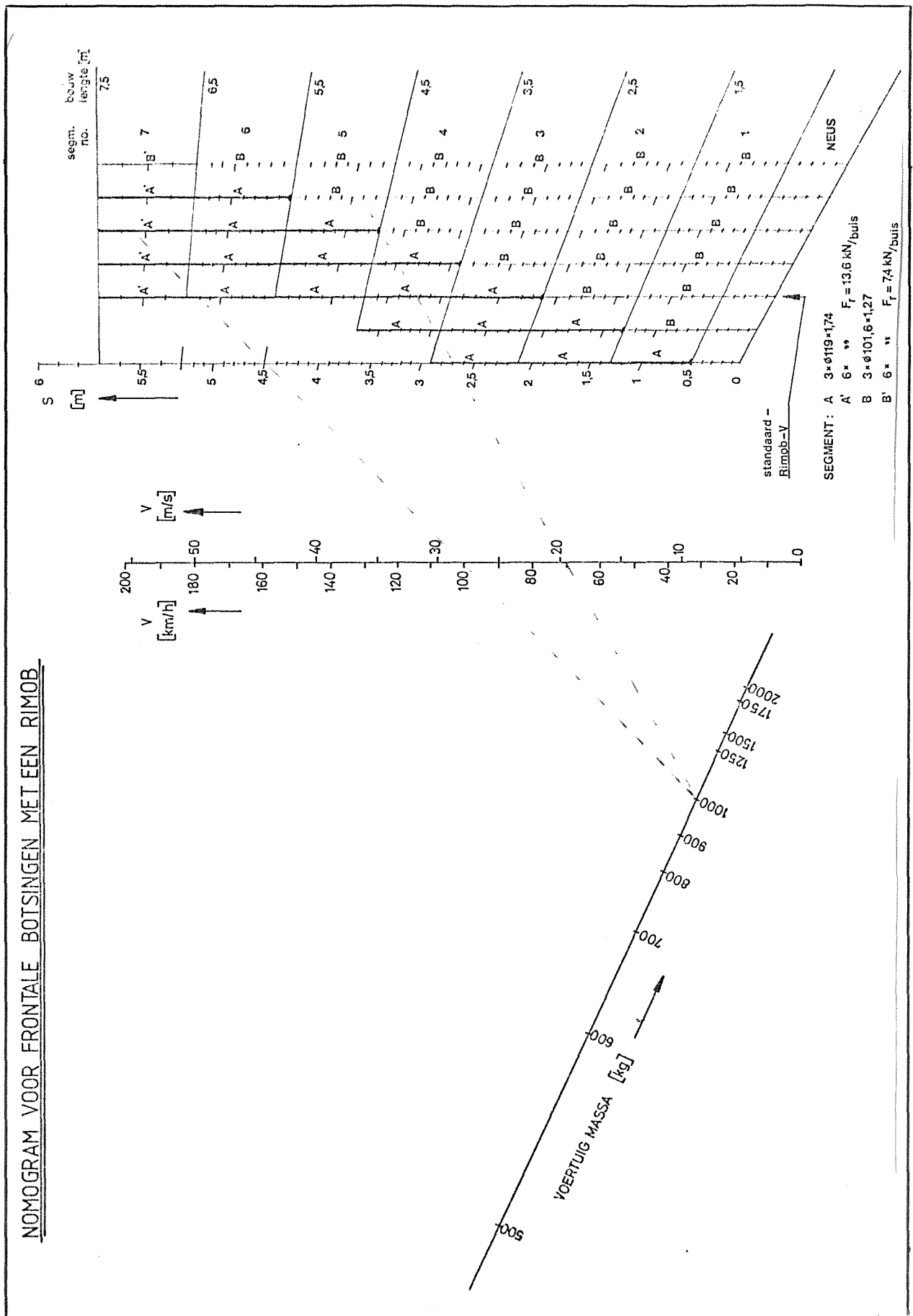


Afbeelding 2. Zij- en bovenaanzicht van de RIMOB-P (parallel-vormig) met vier segmenten.

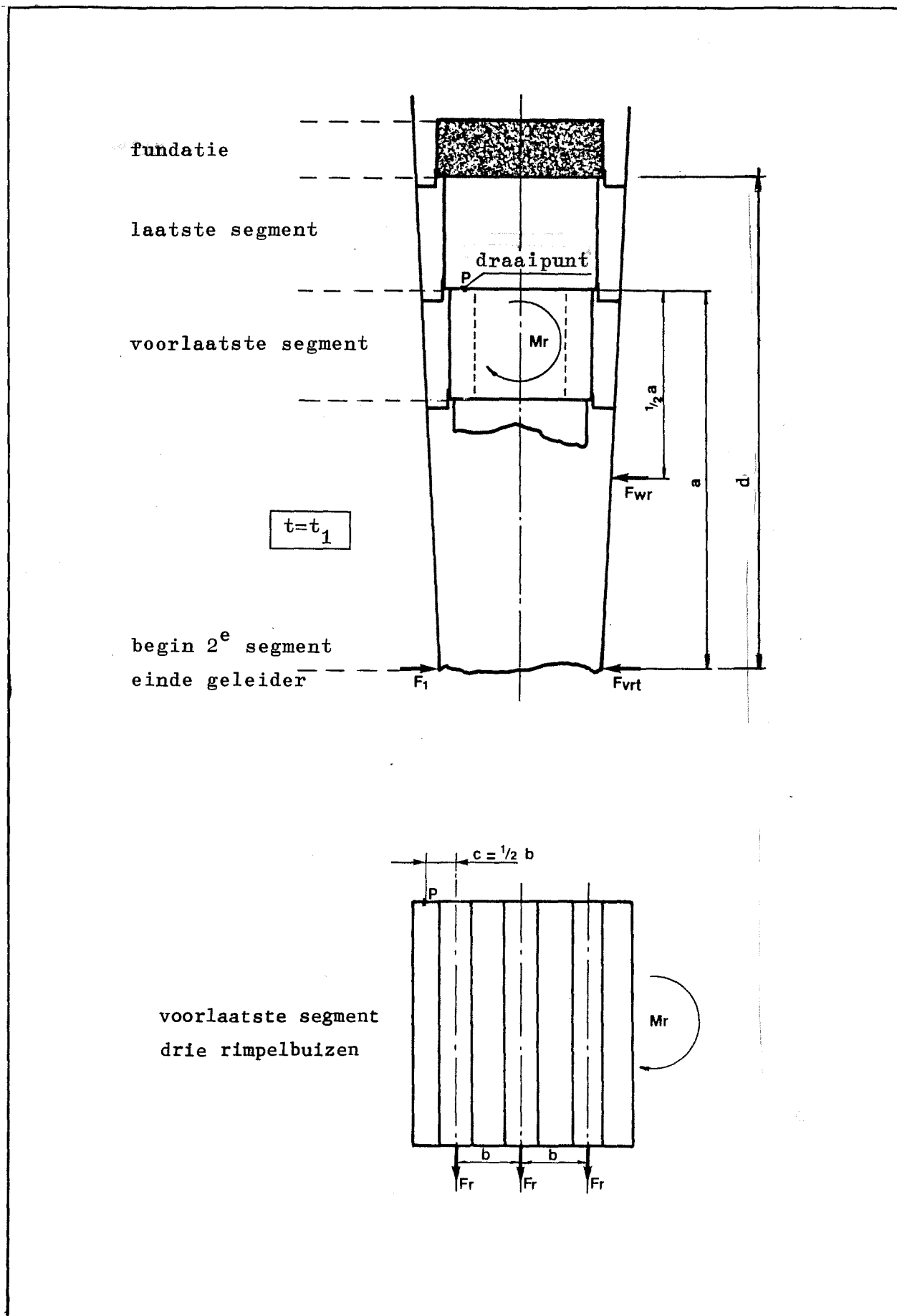


Afbeelding 3. Nomogram voor de bepaling van de rimpelkracht van aluminium rimpelbuizen aan de hand van de straal en wanddikte.

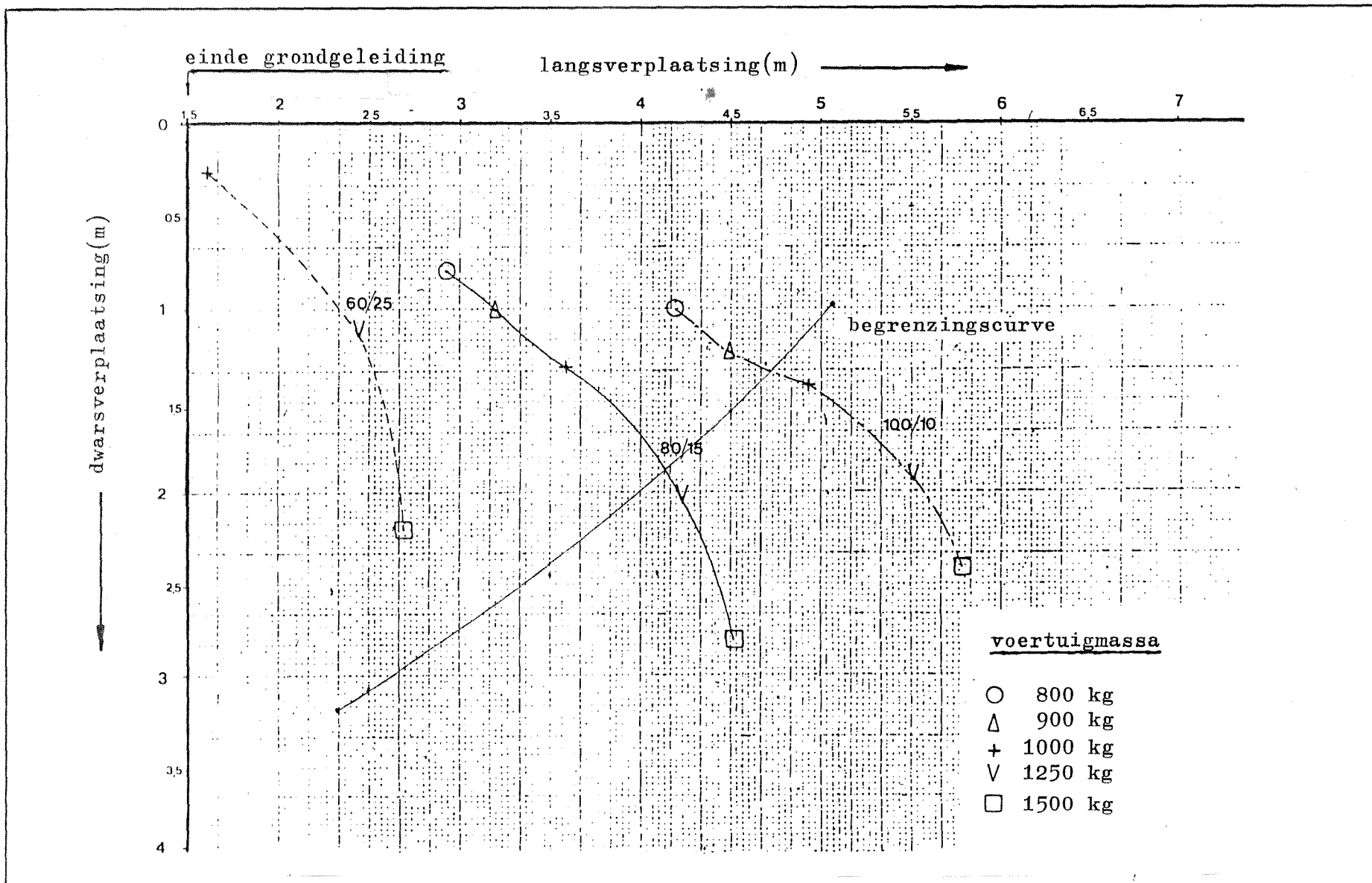
NOMOGRAM VOOR FRONTALE BOTSINGEN MET EEN RIMOB



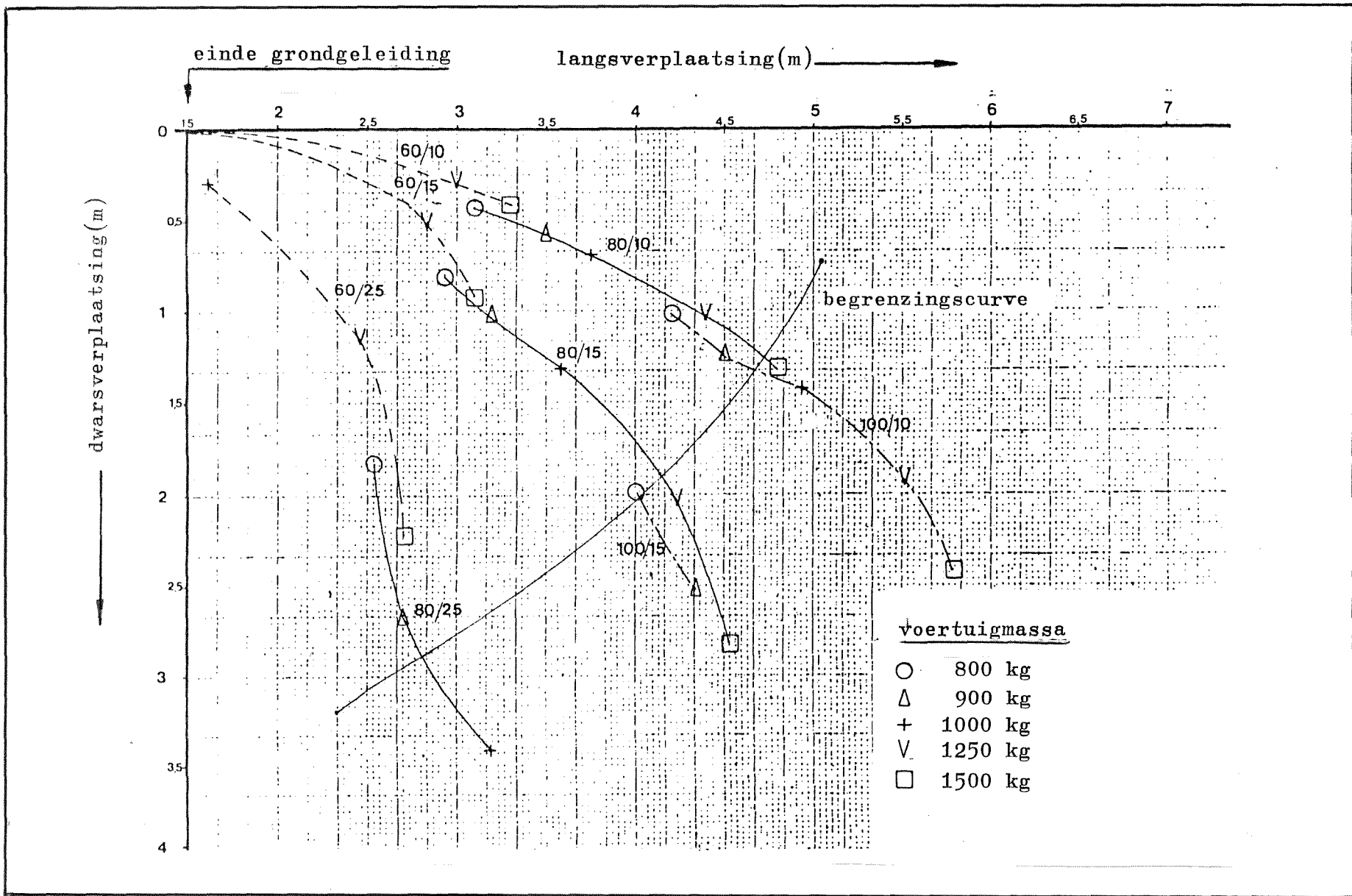
Afbeelding 4. Nomogram voor de relatie tussen de voertuigmassa, -snelheid en remweg van de RIMOB voor een centrale frontale aanrijding tegen een RIMOB-V met een basisbreedte van 2,70 m.



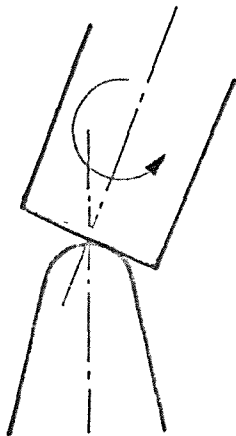
Afbeelding 5. Momenten- en krachtenspel ten tijde van $t = t_1$.



Afbeelding 6. De relatie tussen de langs- en dwarsverplaatsing bij enkele typen aanrijdingen schuin op de neus met een RIMOB-V met een basisbreedte van 2,70 m. De botscondities zijn conform aan die van het ontwikkelingsonderzoek, namelijk $60\text{km/u}-25^\circ$, $80\text{ km/u}-15^\circ$ en $100\text{km/u}-10^\circ$

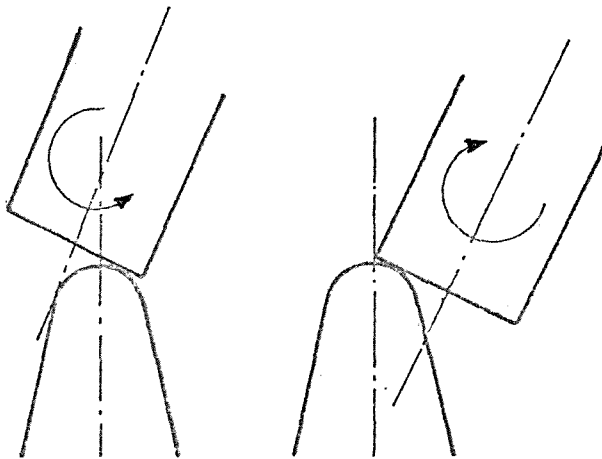


Afbeelding 7. De relatie tussen de langs- en dwarsverplaatsing bij diverse typen aanrijdingen schuin op de neus met een RIMOB-V met een breedte van 2,70 m. Aanduidingen in snelheid (km/u)/inrijhoek (graden).



Afbeelding 8a

Centrale aanrijding schuin op de neus: de hartlijnen van het voertuig en de RIMOB vallen samen.
Rotatierichting van het voertuig: linksom.

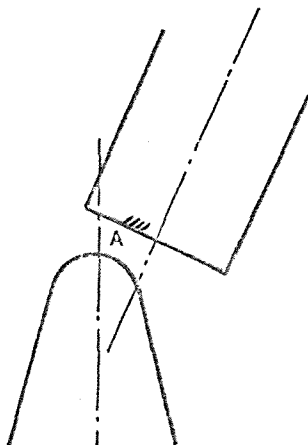


Afb. 8b

Afb. 8c

Afbeelding 8b en 8c

Ex-centrische aanrijdingen schuin op de neus.
De hartlijnen van het voertuig en de RIMOB vallen niet samen.
Afb. 8b: Rotatierichting: linksom
Afb. 8c: Rotatierichting: rechtsom



Afbeelding 8d

Ex-centrische aanrijding schuin op de neus. Bevindt zich het aanrakingspunt voertuig-RIMOB in het gebied A, zal het voertuig niet of in geringe mate roteren.

Afbeelding 8. Centrale en excentrische aanrijdingen schuin op de neus en de daaruit resulterende rotatierichting van het voertuig.

Proef	Proefgegevens			Remweg RIMOB volgens nomogram (m)	Verschil (m)	Afwijking (%)
	Voertuig- massa (kg)	Voertuig- snelheid (km/u)	Dynamische remweg RIMOB (m)			
F7	995	100	5,35	5,10	-0,25	-4,7 %
F9*)	945	70	2,90	3,00	+0,10	+3,5 %
F11	975	100	4,90	5,00	+0,10	+2,0 %
F13	980	100	4,90	5,05	+0,15	+3,1 %

* RIMOB-P

Tabel 1. Vergelijking van de remweg in langsrichting van het voertuig bij een frontale aanrijding van full-scale proeven en het rekenmodel (nomogram)

	Type RIMOB		
	V270	V185	P
Aantal segmenten	7	6	4
Fr (kN)	13,6	13,6	13,6
b (m)	0,51	0,37	0,25
a (m)	5	4	2
x * F _{wr} (kN)	5*0,2	4*0,2	2*0,2
F _{vrt} (kN) indien m _{vrt} is 1000 kg	2,5	2,5	2,5
F ₁ (kN)	9,2	8,6	10,4

De aangegeven termen zijn in Afbeelding 5 terug te vinden. De volgende termen behoeven nadere explicatie.

- F_{wr} is de wrijving tussen een segment en het wegdek. De wrijving is het produkt van de massa van het segment en de wrijvingscoëfficient.

$$F_{wr} = m * g * 0,2 = 100 * 10 * 0,2 \text{ N} = \frac{100 * 10}{1000} * 0,2 \text{ kN} = 0,2 \text{ kN.}$$

Verder geldt dat $x = a/l_2 = a/1 = a$

(l₂ is de lengte van een segment = 1 m).

- F_{vrt} is de wrijvingskracht in dwarsrichting tussen de (voor)wielen van het voertuig en het wegdek. Een praktische aanname is dat de wrijving alleen door de voorwielen wordt geproduceerd. Het gewicht dat op de voorwielen rust wordt gesteld op het halve voertuiggewicht. De wrijvingscoëfficient wordt gesteld op 0,5. Hiermee wordt $F_{vrt} = \frac{1}{2} m * g * 0,5 \text{ N} = \frac{1}{2} \frac{m * g}{1000} * 0,5 \text{ kN} = \frac{1}{2} \frac{m}{100} * 0,5 \text{ kN.}$

Tabel 2. Gegevens van enkele RIMOB-typen ter bepaling van de sterkte in zijdelingse richting.

BIJLAGE 1

FORMULE ENERGIE-ABSORPTIECAPACITEIT RIMOB

De volgende algemene formule voor de energie-absorptie van de RIMOB is als volgt:

$$\frac{1}{2} m v^2 * 0,95 = (F_{n_1} + F_{vrt}) * l_1 + [a F_r * 0,8 l_2 * x_p] + \\ (F_{n_2} + F_{wv} + F_{vrt}) * 0,8 l_2 * x_t + \\ \left\{ \left(F_s \sum_{i=1}^{x_t} i \right) + \left(F_t \sum_{i=1}^{x_t} (i-1) \right) \right\} * 0,8 l_2$$

waarin:

m = voertuigmassa (kg)

v = voertuigsnelheid (m/s)

F_{n_1} = vervormingskracht van het neussegment (kN)

F_{vrt} = wrijvings- en rolweerstand voertuig (kN)

l_1 = lengte neussegment (= 0,5 m)

a = aantal rimpelbuizen per segment

F_r = rimpelkracht van 1 rimpelbuis (kN)

l_2 = lengte segment (= 1,0 m)

x_p = aantal segmenten met hetzelfde aantal en soort rimpelbuizen

F_{n_2} = wrijvingskracht van het neussegment (kN)

F_{wv} = wrijvingskracht tussen de flankdelen en de vervormingskrachten van de knikstrippen en afdekplaten (kN)

x_t = totaal aantal segmenten

F_s = wrijvingskracht van het eerste segment met het wegdek en het variabel deel van de wrijvings- en vervormingskrachten van flankdelen en knikstrippen (kN)

i = volgnummer

F_t = wrijvingskracht en vervormingskracht van de afdekplaten t.g.v. het breder worden bij de RIMOB-V (kN)

Voor de aangegeven termen zijn op grond van een notitie van Technisch Bureau "Van Schie" voor de standaard RIMOB-V270 de volgende waarden vastgesteld.

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{1000} * 0,95:$$

Aangezien de krachten in kN's (kilonewton) worden aangegeven, dient de massa, die in kg moet worden ingevuld, door 1000 te worden gedeeld.

F_{n_1} :

De krachten die in het neusegment worden gegenereerd is de som van de volgende krachten : knikkraft om vier strippen te doen knikken (dit is 11,52 kN) + buigkracht om de omhullende plaat te doen buigen (dit is 0,06 kN); in totaal dus 11,6 kN. Deze waarde kan in de formule worden ingevuld.

F_{vrt} :

Bij de weerstand die het voertuig oplevert wordt uitgegaan van een combinatie van rollende en glijdende wrijving.

De weerstand van het voertuig is het produkt van het voertuiggewicht $G (=m*g)$ en de rol-, of wrijvingsweerstandscoefficient (te stellen op 0,3). De term g is de versnelling van de zwaartekracht ($\approx 10 \text{ m/s}^2$). De massa dient in verband met de eenheid kN door 1000 te worden gedeeld. Hiermee wordt:

$$F_{vrt} = \frac{m}{1000} * 0,3$$

Deze term komt in de formule twee keer voor. Een keer in verband met de energieberekening van de verplaatsing van de RIMOB over de afstand l_1 , en een keer over de afstand l_2 .

aF_r :

De som van de rimpelkracht per segment

F_{n_2} :

Deze kracht betreft de wrijvingskracht tussen het wegdek en de voorste dwarsdrager (die aan het neussegment is bevestigd). De wrijvingskracht is het produkt van het gewicht en de wrijvingscoëfficiënt. De waarde bedraagt 0,2 kN

F_{wv} :

Deze is opgebouwd uit de volgende krachten:

- wrijvingskracht tussen de flankdelen
- vervormingskracht van de knikstrippen
- vervormingskracht van de afdekplaten

De vervormingskracht van de afdekplaten is af te leiden uit een statische proef die met een segment zonder rimpelbuizen is uitgevoerd (zie SWOV R-82-38). Voor de grootte van de vervormingskracht wordt die van het eerste segment genomen. Deze bedraagt voor de boven- en onderplaat 2,3 kN. De toename van de vervormingskracht van de afdekplaten bij de RIMOB-V als gevolg van het breder worden van de constructie wordt bij de F_t -kracht ondergebracht.

De grootte van de wrijvings- en vervormingskrachten van de flankdelen en knikstrippen is bij dynamische belasting nauwelijks te berekenen, en zeker niet als reeds diverse segmenten zijn vervormd. Met behulp van gegevens uit de full-scale proeven is af te leiden dat de grootte van deze krachten over de duur van de botsing gem. 35,6 kN bedraagt. In deze waarde zijn tevens die krachten verdisconteerd die het gevolg zijn van niet te becijferen overige dynamische effecten. Om in de formule te bewerkstelligen dat de wrijvings- en vervormingskrachten groter worden naar mate meer segmenten worden ingedrukt, wordt deze 35,6 kN gesplitst in een constant deel van 17,8 kN (onder te brengen in de F_{wv} -kracht) en in een variabel deel dat gemiddeld eveneens 17,8 kN bedraagt (onder te brengen in de F_s -kracht), en dat varieert van 5,1 kN tot 30,5 kN ingeval resp. één en zes segmenten worden ingedrukt. Het op deze wijze splitsen van de krachten blijkt een goede fit te hebben met de waarden gevonden tijdens de full-scale proeven.

Uit het bovenstaande volgt dat de som van F_{n_2} en F_{wv} 20,3 kN bedraagt. Deze waarde kan in de formule worden gesubstitueerd.

F_s :

Deze kracht is in de eerste plaats de wrijvingskracht tussen een dwarsdrager van een segment en het wegdek. Naarmate meer segmenten in elkaar worden gedrukt, neemt de grootte van de wrijvingskracht toe vanwege de toename van de massa. Als van de wrijvingskracht van het eerste segment wordt uitgegaan - deze bedraagt 0,31 kN - kan de totale kracht worden bepaald door sommatie over het aantal segmenten dat in elkaar wordt gedrukt. Middels het sigma-teken wordt dit bewerkstelligd.

Verder is de F_s -kracht opgebouwd uit het variabel deel van de grootte van de wrijvings- en verwarmingskracht zoals dat hierboven is uiteengezet. Dit aandeel bedraagt 5,1 kN.

De totale waarde die voor F_s in de formule kan worden ingevuld bedraagt 5,4 kN.

F_t :

Bij de F_t -kracht worden die krachten ondergebracht die resulteren uit de verbreding bij de RIMOB-V. Bij de RIMOB-P is F_t dan ook gelijk aan nul.

De volgende twee krachten maken deel uit van F_t :

- de vervormingskracht van het toenemende deel van de boven- en onderplaat; de grootte van deze kracht is 0,45 kN.
- de wrijvingskracht tussen de dwarsdragers en het wegdek ten gevolge van het toenemen van de massa bij het breder worden bij de RIMOB; de grootte van deze kracht is 0,02 kN.

Beide krachten samen bedragen 0,47 kN. Aangezien de waarde voor F_t niet van toepassing is voor het eerste segment, dient bij sommatie van F_t over het aantal ingedrukte segmenten het eerste segment buiten beschouwing te blijven. Dit wordt gerealiseerd door de term $(i-1)$ achter het sigmateken.

Als de aangegeven waarden in de algemene formule worden gesubstitueerd, ontstaat de specifieke formule voor de standaard RIMOB-V270.

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{1000} * 0,95 = (11,6 + \frac{m}{100} * 0,3) * 0,5 + [aF_r * 0,8 * x_p] +$$
$$(20,3 + \frac{m}{100} * 0,3) * 0,8 * x_t + \left\{ \left(5,4 \sum_{i=1}^{x_t} i \right) + \left(0,47 \sum_{i=1}^{x_t} (i-1) \right) \right\} * 0,8$$