

AFLOPENDE TALUDS

De invloed van diverse taludkenmerken op de afloop van taludincidenten,
bepaald met behulp van mathematische simulaties

Deel I: Gesimuleerde taludincidenten zonder voertuigmanoeuvres

R-87-8

Ing. C.C. Schoon & ing. W.H.W. van de Pol

Leidschendam, 1987

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

Steile aflopende taluds langs wegen vormen een gevaar voor voertuigen die van de rijbaan raken. Dit gevaar kan op diverse manieren worden gereduceerd, namelijk door de berm op rijbaanniveau voldoende te verbreden, het talud "veilig" te maken en het talud af te schermen met een beveiligingsconstructie.

Deze studie richt zich op de tweede manier: hoe moet een veilig talud er uit zien om letsel bij een taludongeval te voorkomen. Voor de bepaling van de dimensies van het talud zullen de volgende taludkenmerken worden onderzocht: hellingshoek, hoogte, afrondingsstralen. Op grond van de resultaten van het onderzoek kunnen de bestaande richtlijnen voor autosnelwegen en niet-autosnelwegen worden aangepast.

De resultaten van het onderzoek zijn gebaseerd op de uitvoering van mathematische simulaties van taludongevallen (incidenten) met behulp van een computermodel. Het voordeel van de toepassing van simulatietechnieken is dat op reproduceerbare en goedkope wijze de invloed van diverse parameters op een taludincident kan worden onderzocht.

Het computermodel werkt met interagerende systemen waarmee het voertuig en het talud worden gedefinieerd. De gegevens (datasets) die noodzakelijk zijn voor de kwantitatieve invulling van deze systemen zijn onder meer ontleend aan de resultaten van uitgevoerde proeven op ware schaal. Tevens zijn deze resultaten benut om de uitkomsten van de simulaties te verifiëren en de datasets bij te stellen.

Bij de uitvoering van de simulaties zijn op ongevalgegevens gebaseerde inrijcondities van autosnelwegen gehanteerd (snelheid 100 km/u, inrijhoeken tot 20°) en van niet-autosnelwegen (snelheid 80 en 60 km/u en inrijhoeken tot 30°). Gesimuleerd is dat het voertuig onder een bepaalde hoek rechtuit van het talud reed. In dit stadium van het onderzoek zijn geen voertuigmanoeuvres gesimuleerd.

Uit een ongevalstudie is gebleken dat de personenauto als voertuigtype het meest bij taludongevallen is betrokken. Het taludonderzoek is dan ook tot dit voertuigtype beperkt. Verder is op grond van simulaties met personenauto's uit drie gewichtsklassen vastgesteld dat het middelzware type een redelijk representatief beeld gaf. De resultaten van het taludonderzoek zijn daarom gebaseerd op simulaties met dit type.

De uitkomsten van de simulaties zijn beoordeeld in termen van de kans op ernstig letsel van de voertuiginzittenden. Als criteria zijn hiertoe de grootte van de voertuigvertragingen en de grootte van de rolhoek (i.v.m. roll-over) gehanteerd.

Een belangrijk resultaat van het onderzoek is dat de grootte van de afrondingsstraal van veel invloed is op de grootte van de voertuigvertragingen.

Bij de toepassing van een afrondingsstraal van 12 m voldoen alle onderzochte taludconfiguraties (helling 1:2 en flauwer). Een afrondingsstraal van 6 m geeft te hoge waarden van de voertuigvertragingen bij een helling van 1:2. Hierbij zijn de vertragingsswaarden bij de inrijcondities van autosnelwegen beduidend hoger dan bij die van de niet-autosnelwegen. Een helling van 1:3 met een hoogte van 1 m is op de grens van acceptabel. De relatie tussen de grootte van de voertuigvertragingen en de afrondingsstraal tussen 6 en 12 m, geeft voor een helling van 1:2 een duidelijk knikpunt bij 9 m. Bij de hellingen van 1:3 en 1:4 is sprake van een geleidelijker daling.

Gebleken is dat bij een taludincident de plaats van landing van het voertuig erg van belang is voor de grootte van de optredende vertragingsswaarden: landing op de helling geeft lagere waarden dan landing op het maaiveld aan de voet van het talud. De uitrijssnelheden en -hoeken op dit maaiveld zijn veelal groter dan bovenaan het talud (een toename van maximaal 10 km/u en 10°).

Op grond hiervan wordt geconcludeerd dat de gevonden taluddimensies bij de gehanteerde simulaties zonder voertuigmanoeuvres alleen geldigheid hebben indien zich aan de voet een brede zone zonder obstakels en sloten bevindt. Aangezien een dergelijke zone in de praktijk niet altijd aanwezig is, zal een aanvullend onderzoek (Deel II) worden uitgevoerd waarbij wel stuur- en remmanoeuvres worden uitgevoerd. Bij dit onderzoek zal worden getracht dimensies van het talud vast te stellen waarbij het voertuig niet op het maaiveld zal belanden.

INHOUD

Voorwoord

1. Inleiding
2. Doel van het onderzoek
3. Probleemanalyse
 - 3.1. Ongevallenonderzoek
 - 3.2. Analyse van een taludincident
 - 3.2.1. Taludkenmerken in relatie met het taludincident
 - 3.2.2. Inrijcondities en manoeuvregedrag
 - 3.2.3. Voertuigkenmerken
4. Onderzoekopzet
 - 4.1. Inleiding
 - 4.2. Computermodellen
 - 4.3. Datasets
 - 4.4. Mathematische simulaties
 - 4.5. Indicatoren en criteria
 - 4.6. Proeven op ware schaal
5. Uitvoering vooronderzoek
 - 5.1. Proeven op ware schaal
 - 5.1.1. Locaties
 - 5.1.2. Opzet
 - 5.1.3. Uitvoering
 - 5.1.4. Resultaten
 - 5.2. Verificatie mathematische simulaties
6. Uitvoering onderzoek
7. Resultaten van simulaties
 - 7.1. Verschillende typen personenauto's
 - 7.2. Produktiesimulaties

7.3. Invloed afrondingsstraal

7.4. Relatie tussen ASI-criterium en inzittenden criterium

8. Conclusies

Literatuur

Afbeeldingen 1 t/m 6

Tabellen 1 t/m 8

Bijlagen 1 t/m 5

VOORWOORD

Dit rapport geeft het verslag en de resultaten van een onderzoek dat tot doel heeft de invloed van diverse taludkenmerken op de afloop van een taludongeval (taludincident) vast te stellen. Het betreft hier aflopende taluds bij wegen in "ophoging". De conclusies zijn gebaseerd op de resultaten van mathematische simulaties. Bij de aanvang van dit onderzoek was dit het eerste SWOV-onderzoek over wegberminrichting waarbij een computermodel als onderzoekinstrument is gehanteerd. Voordien vormden alleen proeven op ware schaal de basis voor de resultaten.

Het voordeel van de toepassing van mathematische simula van de wijziging van één enkel kenmerk ondubbelzinnig worden vastgesteld. Aangezien bij het onderzoek "Taluds" deze simulaties voor het eerst zijn toegepast, moest een theoretisch computermodel operationeel worden gemaakt voor praktische doeleinden. Vooral het instellen van de diverse parameters, zowel wat het voertuig als het talud betreft, was een tijdrovende bezigheid.

In kort bestek zal worden aangegeven welke onderzoektechnische verrichtingen tijdens het onderzoek noodzakelijk waren en op welke wijze voorlopige onderzoekresultaten tot dusver zijn gerapporteerd.

Het onderzoek is in 1978 gestart met de uitvoering van proeven op ware schaal. Deze proeven waren noodzakelijk om het mathematische model te valideren en resultaten van de simulaties te verifiëren. De proeven zijn met een middelzware personenauto uitgevoerd op taluds van de nog niet voor het verkeer opengestelde RW A15. De elektronische metingen zijn verricht door het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO en de high-speed filmopnamen zijn gemaakt door Stichting Film en Wetenschap.

De eerste simulaties van de taludincidenten zijn met het mathematische model MAMIAC (Mathematisch model for impact against crashbarriers) uitgevoerd. In 1980 en 1981 zijn de voorlopige resultaten hiervan gerapporteerd aan de toenmalige Begeleidende Overheidswerkgroep (BOWG) "Obstakels in wegbermen". Naast het aangetoonde positieve effect van verkleining van de hellingshoek van het talud, konden als belangrijkste nieuwe gezichtspunten worden vermeld de grote positieve invloed van vergroting van de bovenste afrondingsstraal en het feit dat een geringe taludhoogte (2 m) ongunstiger is dan een grote hoogte (6 m). De resultaten waren voorlopig aangezien de verificatie van de modelresultaten aan de hand van de resul-

taten van de proeven op ware schaal niet geheel naar tevredenheid was. In 1982 kwam het meer geavanceerde en universele computermodel VEDYAC (Vehicle dynamics and crash dynamics) gereed. Nadat het model operationeel was gemaakt voor taludincidenten, is op basis van een aantal simulaties vastgesteld dat de resultaten min of meer afweken van de resultaten met MAMIAC. Bij het instellen van de parameters bleek tevens dat dit met het nieuwe model beter verliep dan met het oude. Op grond hiervan is besloten verder alleen het nieuwe VEDYAC-model te hanteren, te meer daar met dit model ook voertuigmanoeuvres (remmen en sturen) kunnen worden uitgevoerd.

De consequentie van het genomen besluit was dat alle "oude" simulaties opnieuw gedaan moesten worden. Tevens wilde de BOWG de simulaties uitbreiden met twee andere typen personenauto's zodat de resultaten van het taludonderzoek konden worden gebaseerd op een middelzwaar, een licht en zwaar type personenauto.

Genoemde factoren hebben er overigens wel toe geleid dat het project langer heeft geduurd dan was voorzien.

Dit rapport geeft de resultaten van het eerste deel van het taludonderzoek, dat betrekking heeft op taludincidenten waarbij geen voertuigmanoeuvres zijn uitgevoerd. Het voertuig gaat dan onder een bepaalde hoek rechtuit van het talud af. Aangezien het voertuig bij dergelijke incidenten met een hoge snelheid aan de voet van het talud belandt, zijn de uitkomsten alleen van belang voor die situaties waarbij zich onderaan het talud een brede zone zonder obstakels en sloten bevindt. In 1985 zijn de onderzoekresultaten gerapporteerd aan de RONA-Werkgroep "Veiligheid bermen" die de onderzoekbegeleiding van de opgeheven BOWG "Obstakels in wegbermen" heeft overgenomen.

Het tweede deel van het taludonderzoek, waarover afzonderlijk gerapporteerd wordt, gaat in op de diverse taludconfiguraties als wél door de bestuurder wordt gemanoeuvreed. De resultaten van dit deel I zijn daarbij van belang, omdat hierin is aangegeven aan welke algemene condities een talud moet voldoen om het manoeuvreren mogelijk te maken.

Dit onderzoek is verricht in opdracht van de Dienst Verkeerskunde van Rijkswaterstaat. De modelexercities zijn uitgevoerd door ing. W.H.M. van de Pol en het rapport is samengesteld door ing. C.C. Schoon.

1. INLEIDING

De inrichting van de wegberm dient erop gericht te zijn het risico voor van de rijbaan afgeraakte weggebruikers te beperken. Aflopende taluds maken deel uit van de wegbermen. Te steile taluds doen het risico toenemen: het voertuig is niet meer te corrigeren en de kans op een rollover is groot.

De vraag is wat onder te steile taluds verstaan dient te worden. Inzicht hierin maakt het mogelijk de richtlijnen voor het wegontwerp aan te passen en te onderbouwen.

In de huidige richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen (ROA) wordt aangegeven dat taluds met een geleiderailconstructie afgeschermd dienen te worden als de kruinlijn binnen 10 m uit de kantstreep is gelegen, de helling steiler is dan 1:5 à 1:6 en de hoogte meer dan 2 m bedraagt (RWS, 1975). Is de hoogte geringer dan 2 m dient volgens de richtlijnen een helling van 1:3 te worden toegepast; bij voorkeur 1:5 of flauwer. De overgangen tussen de hellingen dienen te worden afgerond met stralen van tenminste 12 m.

De voorlopige richtlijnen voor het ontwerpen van niet-autosnelwegen (RONA) geven het volgende aan (RWS, 1984). Indien de taludhoogte voor wegen die behoren tot de categoriën III t/m V niet meer dan 2 m bedraagt wordt een helling van 1:3 toegepast. Wanneer de zand- en grondbalans en de beschikbare ruimte dit toelaten, kan uit overwegingen van verkeersveiligheid en landschappelijke inpassing een flauwer talud dan 1:3 worden toegepast. De afrondingsstralen bedragen tenminste 6 m. Waar de ophogingen groter zijn dan 2 m is het gebruikelijk tot een hoogte van 2 m boven het maaiveld een helling toe te passen van 1:3, boven deze hoogte niet steiler dan 1:2. Waar de omstandigheden en de kosten dit toelaten kan het gewenst zijn, mede uit overwegingen van verkeersveiligheid en landschappelijke inpassing, een helling van 1:5 of flauwer toe te passen. Afrondingen geschieden ook nu met stralen van tenminste 6 m.

Op diverse wijzen kan het gevaar van een te steile taludhelling worden gereduceerd:

- berm op rijbaanhoogte voldoende verbreden
- talud "veilig" maken
- talud afschermen met een afschermingsvoorziening

De eerste oplossing zal in de meeste gevallen niet aan de orde komen vanwege civiel-technische en economische overwegingen.

Bij de tweede oplossing kan worden gesteld dat naar mate de hellingen een flauwer verloop hebben en de afrondingsstralen groter zijn dit een gunstiger invloed op de kans op letsel voor van de rijbaan afgeraakte weggebruikers zal hebben. Aangezien de hiervoor benodigde ruimte veelal door de beschikbare ruimte zal worden overtroffen, zal mede uit financiële overwegingen, door de wegbeheerder worden gestreefd naar een optimum aangaande veiligheid en kosten.

De toepassing van de derde oplossing (plaatsing van een afschermingsvoorziening) kan worden overwogen als de eerste twee oplossingen niet zijn te realiseren. Bedacht dient te worden dat een aanrijding met een afschermingsvoorziening eveneens niet van gevaar ontbloot is. In de praktijk zal veelal een afweging worden gemaakt tussen de tweede en deze derde oplossing.

Het maken van een goede afweging is dan pas mogelijk als inzicht bestaat in de grootte van de kosten en de mate van veiligheid van bepaalde maatregelen.

Dit rapport beschrijft het onderzoek dat is verricht naar de mate van veiligheid van onafgeschermd taluds. Hierbij is onderzocht wat de invloed is van diverse taludkenmerken op de afloop van een taludincident. Onder een taludincident wordt een gebeurtenis verstaan waarbij een van de rijbaan afgeraakt voertuig op een talud belandt. Een slecht verlopend incident leidt tot een ongeval.

Ongevallen die op taluds plaats vinden, zijn niet direct uit de statistieken van verkeersongevallen te halen. Dergelijke typen ongevallen worden namelijk geregistreerd onder de verzamelnaam "eenzijdige ongevallen", waarvan onder meer ook roll-over ongevallen, sloot-, en te water ongevallen deel uitmaken.

In 1983 zijn 79 eenzijdige ongevallen met dodelijke afloop geregistreerd. Dit is 5% van het totale aantal dodelijke ongevallen. Buiten de bebouwde kom vinden drie maal zoveel eenzijdige ongevallen met dodelijke afloop plaats als binnen de bebouwde kom.

2. DOEL VAN HET ONDERZOEK

Het doel van het onderzoek is voor aflopende taluds te bepalen wat de invloed van diverse taludkenmerken is op de afloop van een taludincident. De afloop wordt aangeduid in termen van de mate van risico voor inzittenden van personenauto's.

Op basis hiervan dient de overheid in staat te zijn richtlijnen voor het ontwerpen van dwarsprofielen van wegen aan te passen of op te stellen. Ook zal met behulp van de onderzoekresultaten de overheid in staat dienen te zijn af te wegen of afscherming van taluds met afschermingsvoorzieningen al dan niet noodzakelijk is.

De resultaten zullen in principe van toepassing dienen te zijn voor de autosnelwegen en de hogere categorieën niet-autosnelwegen.

3. PROBLEEMANALYSE

3.1. Ongevallenonderzoek

Om te kunnen vaststellen welke wegsituaties en voertuigtypen bij taludongevallen zijn betrokken, is gebruik gemaakt van het SWOV-bestand "Aanvullende gegevens van ongevallen met dodelijke afloop". Over een periode van 10 jaar (1968 t/m 1977) konden aan de hand van de beschrijving van het ongeval op het CBS-statistiekformulier (zie Inleiding) 105 taludongevallen worden achterhaald. De belangrijkste kenmerken van deze ongevallen geven de volgende verdeling te zien:

wegbeheerder: gemeente, provincie, rijk: resp. 31, 26 en 43%

wegsituatie: rechte weg, hoek/bocht, kruispunt, plein: resp. 46, 44, 8 en 2%

type vervoermiddel: personenauto, vrachtauto/bus, tweewieler, overig: resp. 75, 6, 10 en 9%.

Op basis van deze verdelingen kan worden gesteld dat taludongevallen redelijk gelijk verdeeld over de drie beschouwde wegbeheerders voorkomen. De problematiek van het taludongeval is het grootst voor de rechte weg en hoek/bocht en voor de categorie personenauto's. Op basis hiervan is besloten het onderzoek te verrichten voor zowel de rechte wegvakken als de bogen (dit laatste door te variëren in de grootte van de inrijhoek). De invloed van de taludkenmerken op de afloop van taludincidenten zal alleen voor personenauto's worden onderzocht.

3.2. Analyse van een taludincident

De te onderzoeken invloed van de taludkenmerken op de afloop van een taludincident maakt het noodzakelijk een analyse van een taludincident te geven. Factoren aangaande de weg(situatie) - van belang voor de vaststelling van de inrijcondities - en het voertuig met de hieraan gekoppelde manoeuvreermogelijkheden zullen hierbij in beschouwing worden genomen.

3.2.1. Taludkenmerken in relatie met het taludincident

Het profiel van het talud is het meest van invloed zijnde kenmerk op het dynamisch gedrag van het voertuig. Dit profiel kan in vijf bestanddelen

(taluddelen) onderscheiden worden: schouder, overgang 1 tussen schouder en helling, helling, overgang 2 tussen helling en maaiveld, en maaiveld. In het algemeen hebben de schouder en het maaiveld zeer flauw verlopende hellingen van 1:10 à 1:20. De overgangen worden in het algemeen afgerond met een afrondingsstraal. De steilheid van de helling wordt meestal aangeduid met de tangens van de hoek tussen de helling en de denkbeeldig verlengde schouder.

Bij een taludincident doorloopt het voertuig successievelijk de aangegeven taluddelen. Ieder deel heeft een zodanige uitwerking op het voertuig dat daarmee het dynamisch gedrag van het voertuig op een volgend taluddeel wordt beïnvloed. Het proces start met de uitrijconditie van het voertuig dat de rijbaan verlaat. Dit zijn tevens de inrijcondities van het voertuig dat vervolgens met de volgende taluddelen in aanraking komt.

Schouder en overgang 1

Het profiel van de schouder en overgang 1 kunnen, afhankelijk van de grootte van de voertuigsnelheid en -inrijhoek, bepalend zijn of het voertuig contact met de grond houdt of loskomt. Dit loskomen heeft een aantal nadelige effecten die van invloed zijn op het verdere verloop van het ongevalsproces op de taludhelling. Naarmate de overgang met een grotere boogstraal wordt afgerond, zal een beter contact tussen voertuig en grond blijven bestaan.

Taludhelling

Indien het voertuig vanaf de schouder contact houdt met de taludhelling, kan de bestuurder zijn voertuig wellicht op deze helling onder controle krijgen. Dit kan resulteren in het tot stilstand brengen van het voertuig of het naar boven of beneden sturen. Naarmate er minder storende krachten op het voertuig inwerken (onder meer afhankelijk van snelheid, taludhellingen, conditie van de grasmat) zal het corrigeren gemakkelijker gaan.

Als een voertuig vanaf de schouder van het talud is gaan zweven, ondergaat het een rotatie in de richting van de helling (dompen en rollen). Als de helling voldoende lang is (bij een grote taludhoogte) en niet te

steil, landt het voertuig op zijn wielen op de helling. Bij een te geringe taludhoogte kan het voertuig op de overgang of op het maaiveld landen. Door een ongunstige voertuigstand kan dit grote voertuigvertragingen geven. Is het talud wel voldoende hoog maar te steil, dan zet de voertuigrotatie te ver door met de kans dat het voertuig niet op zijn wielen belandt maar op carrosseriedelen, hetgeen kan resulteren in te grote voertuigvertragingen en/of in een roll-over.

Overgang 2 en maaiveld

Naarmate overgang 2 beter is afgerond, zal het voertuig "rustiger" van de taludhelling op het maaiveld belanden, zowel in ge- als ongecontroleerde toestand. In het eerste geval (gecontroleerd) zal het maaiveld zodanig breed moeten zijn dat nog enige manoeuvreerruimte wordt geboden. In het tweede geval (ongecontroleerd) dient het maaiveld voldoende breed en obstakelvrij te zijn om ernstige ongevallen te voorkomen.

3.2.2. Inrijcondities en manoeuvregedrag

De inrijcondities worden bepaald door het dynamische gedrag van het voertuig op de rijbaan of vluchtstrook; het wegtype en de wegsituatie (bijvoorbeeld rechte weg of bocht) spelen hierbij een rol.

Naast de inrijcondities worden de voertuigbewegingen voor een belangrijk deel bepaald door het al dan niet uitvoeren van rem- en of stuurmanoeuvres tijdens het taludincident. Of de bestuurder het voertuig onder controle krijgt wordt sterk bepaald door invloeden van buitenaf (met name de interactie tussen voertuig en talud).

In de onderzoeksituatie kunnen niet alle mogelijke combinaties tussen inrijcondities en manoeuvregedrag worden onderzocht. Er zullen diverse keuzen gemaakt moeten worden. Keuzen die bepalen op welke wijze het onderzoek wordt uitgevoerd. Anderzijds zullen de keuzen afhankelijk worden gesteld van de onderzoeksmogelijkheden.

3.2.3. Voertuigkenmerken

Diverse voertuigkenmerken spelen een belangrijke rol bij een taludincident zoals voertuigtype, dimensies, massatraagheidsmomenten, band- en wielophangingskarakteristieken en stand van de voorwielen.

Kenmerken met betrekking tot de dimensies van het voertuig zijn onder andere de spoorbreedte (afstand tussen de wielen op één as) en de wielbasis (afstand tussen voor- en achteras). Naarmate de spoorbreedte in relatie tot de hoogte van het zwaartepunt toeneemt, is het voertuig stabiel en gaat het minder gemakkelijk rollen. Een naar verhouding grote wielbasis maakt een voertuig meer stabiel in langsrichting.

De wielkarakteristieken (voornamelijk veer-, dempings- en bandkarakteristieken) spelen bij een taludincident een belangrijke rol bij de landing. De stand van de wielen bij het neerkomen van het voertuig oefent verder een belangrijke invloed uit op het verdere verloop van het taludincident. Dit geldt ook voor de uit te voeren stuurmanoeuvres en/of de kracht waarmee het stuurwiel wordt vastgehouden. Deze kracht kan variëren van nul tot een maximaal uitgeoefende kracht in het geval het stuurwiel krampachtig wordt vastgehouden.

Aangegeven kenmerken dienen bij de studie betrokken te worden, en hun invloed op een taludincident dient zo goed mogelijk bepaald te worden. De keuzen van de typen personenauto's die bij het onderzoek zullen worden gebruikt, is hierop van veel invloed.

4. ONDERZOEKOPZET

4.1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk is aangegeven dat een groot aantal kenmerken de uiteindelijke afloop van een taludincident bepaalt. Voor het vaststellen van de invloed van de diverse taludkenmerken op het voertuiggedrag, zal gebruik worden gemaakt van een computermodel. Hiermee kunnen op reproduceerbare wijze taludincidenten worden gesimuleerd met als groot voordeel dat de invloed van alle aangegeven taludkenmerken afzonderlijk kunnen worden onderzocht.

In het volgende zal nader ingegaan worden op de computermodellen en de gegevensbestanden van taluds en voertuigen (de zgn. datasets). Als startpunt van een simulatie worden de uitrijcondities genomen van een voertuig dat de rijbaan verlaat; dit zijn voor de simulaties de nader te bespreken inrijcondities.

Voor de beoordeling van de afloop van een taludincident in termen van de mate van risico voor de inzittenden, zullen indicatoren en criteria nodig zijn.

Getoetst moet worden of de resultaten van de computersimulaties overeenkomen met de "werkelijke" situatie. Bij geconstateerde afwijkingen zullen de datasets moeten worden aangepast. Gegevens van de werkelijke situatie zullen worden ontleend aan proeven op ware schaal. Op iteratieve wijze zullen de datasets zodanig aangepast dienen te worden dat de uiteindelijk te verrichten verificatie-simulaties een zo goed mogelijke overeenkomst met de praktijkproeven vertonen. De praktijkproeven zullen onbemand worden uitgevoerd waarbij niet geremd en gestuurd gaat worden (geen manoeuvres).

De in dit rapport beschreven simulaties zullen eveneens zonder voertuigmanoeuvres worden uitgevoerd. In een later stadium zal worden gerapporteerd over simulaties met voertuigmanoeuvres.

4.2. Computermodellen

Voor de uitvoering van de mathematische simulaties zal van twee computermodellen gebruik worden gemaakt te weten VEDYAC en een in VEDYAC geïmplementeerd "inzittendenmodel". Op Bijlage 1 zijn beide modellen beschreven

(zie ook Heijer, 1984). Met het VEDYAC-model kunnen allerlei voertuigma-noeuvres en botsingen worden uitgevoerd. Voertuigbewegingen, krachten, momenten en versnellingen kunnen er mee worden berekend.

Met het "inzittendenmodel" kunnen de bewegingen van één of meer gesimu-leerde inzittende(n) worden aangegeven. De personen zijn hierbij geposi-tioneerd in het voertuigmodel, waarvan de inwendige contouren zijn vast-gelegd. Zodoende is het mogelijk contacten van de inzittenden met het interieur te simuleren. De hierbij optredende hoofdvertragingen worden door het model berekend.

4.3. Datasets

Voertuigen

Bij vorig onderzoek waarbij de resultaten werden ontleend aan proeven op ware schaal, is de Opel Kadett modeltype B als proefvoertuig gehanteerd. Dit type personenauto kan qua massa worden beschouwd als een representant van de middenklasse. Bij de uitvoering van de proeven op ware schaal voor het taludonderzoek ligt het voor de hand ook nu weer van dit voertuigtype gebruik te maken en derhalve hiervan tevens een dataset voor computer-verwerking samen te stellen.

Om de invloed van verschillende voertuigkenmerken op een taludincident na te gaan, moeten ook andere typen personenauto's bij de simulaties betrok-ken worden. De voertuigkenmerken hiervan dienen qua grootte een redelijk onderscheid te vertonen ten opzichte van de gekozen representant van de middenklasse. Hiertoe is gekeken naar kenmerken waarvan reeds een verde-ling aanwezig was over alle personenauto's naar verkoopcijfers (CBS, 1977 en RWS, 1980). Als kenmerken zijn naast de massa voor de wielbasis en spoorbreedte gekozen aangezien deze kenmerken van invloed zijn op de voertuigstabiliteit. In Bijlage 2 zijn hiervan de cumulatieve verdelingen gegeven. De percentielwaarde van de Opel Kadett bedraagt volgens deze verdelingen ca. 50%. Om een grote spreiding te krijgen dienen de te kie-zen andere percentielwaarden hiervan op voldoende wijze af te wijken. Op grond hiervan is op min of meer arbitraire wijze gekozen voor de Fiat 126 en de Volvo 244 met als percentielwaarden resp. ca. 10 en 90%. Evenals bij de Opel zijn ten behoeve van het computermodel van deze voertuigtypen datasets ontleend aan de voertuigkarakteristieken. Enkele van deze ge-

gevens eveneens in Bijlage 2 verwerkt. De massa's van de Fiat, Opel en Volvo bedragen resp. 578 kg, 836 kg en 1245 kg. In het vervolg zullen deze mathematisch gerepresenteerde voertuigen met resp. licht, middelzwaar en zwaar worden aangeduid.

Bij alle drie typen zal het stuurwiel zodanig worden vastgezet dat dit loskomt bij het overschrijden van een belasting daarop van 250 N. Deze belasting is gebaseerd op de aanname dat een "gemiddelde" bestuurder het stuurwiel met een radiaal gemeten kracht tot 250 N kan vasthouden.

Taluds

Door het verbinden van een serie punten kan op mathematische wijze een taludvorm worden vastgelegd. Op deze wijze kunnen datasets van taluds worden gecreëerd waarbij de waarden van de volgende kenmerken kunnen worden gevariëerd: hoogte, hellingshoek, afrondingsstraal en wrijvingscoëfficiënt.

De mate waarin de waarden bij de mathematische simulaties zullen worden gevariëerd, zal bepaald worden op basis van de praktijksituatie en de invloed die een bepaald kenmerk op het taludincident heeft.

Het maaiveld aan de voet van het talud zal worden gesimuleerd als een brede obstakelvrije zone. Bij de simulaties zullen de volgende taludkenmerken in waarde worden gevarieerd:

- hoogte 1, 2, 3 en 5 m
- hellingshoek: 1:2, 1:3, 1:4 en 1:5
- afrondingsstraal: 6 en 12 m (voor een beperkt aantal condities 6 tot 12 m met een stapgrootte van 1 m).

Als motivering voor de hier gemaakte keuze van variabelen het volgende.

De hoogte van 1 m is gekozen vanwege het vrij frequent voorkomen van wegen in "lichte" ophoging. Voor 2 m is gekozen vanwege het voorkomen van deze hoogte in de (voorlopige) richtlijnen. Een 5 m hoog talud wordt aangetroffen bij wegen met viaducten. Daarnaast is een hoogte van 3 m gekozen als een tussenliggende maat.

Voor keuze van de hellingshoeken is een zo ruim mogelijke differentiatie toegepast. Afhankelijk van de resultaten die met de diverse hellinghoeken wordt bereikt, zal worden bekeken of met een beperkter aantal hellings-

hoeken kan worden volstaan, dan wel in welke mate het aantal simulaties kan worden gereduceerd.

De keuze van de afrondingsstralen 6 en 12 m is gebaseerd op de voorkomende maatgeving in de (voorlopige) richtlijnen. Ten einde na te gaan wat de invloed is van de afrondingsstraal op het verloop van het taludincident, zullen tussenliggende waarden met een stapgrootte van 1 m worden onderzocht.

4.4. Mathematische simulaties

De uit te voeren simulaties zijn in twee groepen te splitsen:

- simulaties ten behoeve van de verificatie
- simulaties van taludincidenten

Verificatie-simulaties

Deze simulaties zullen onder dezelfde condities worden uitgevoerd als de proeven op ware schaal. De inrijcondities zullen worden bepaald door de praktische mogelijkheden die het proefterrein biedt (zie par. 4.5.).

Simulaties van taludincidenten

Bij de simulaties van taludincidenten is het uitgangspunt dat het voertuig met een bepaalde snelheid en hoek de rijbaan verlaat en op het talud belandt. Aangezien de resultaten van de simulaties toepasbaar moeten zijn voor taluds langs wegen met verschillende ontwerpsnelheden en breedtes - voor zowel rechte wegvakken als bogen - zal de diversiteit in inrijcondities (inrijsnelheid en -hoek) hierop afgestemd dienen te zijn.

Tot dus ver is er in Nederland geen onderzoek verricht naar de snelheid en hoek van voertuigen die in een ongevalssituatie van de rijbaan zijn afgeraakt. Bij vorige gerapporteerde wegbermonderzoeken is gebruik gemaakt van Amerikaanse literatuurgegevens.

In de twee consulten die betrekking hebben op geleideconstructies langs autosnelwegen is uitgegaan van een inrijsnelheid van 100 km/h en inrijhoeken 10° , 15° en 20° (Schoon, 1985a en b).

In het consult "Afschermingsvoorzieningen voor niet-autosnelwegen" (Schoon, 1985c) worden voor de rechte wegvakken van de niet-autosnelwegen de volgende inrijcondities wenselijk geacht:

inrijsnelheid 80 km/u, inrijhoek 20°

inrijsnelheid 70 km/u, inrijhoek 25°

inrijsnelheid 60 km/u, inrijhoek 30°

Bij de simulaties voor het taludonderzoek zal in eerste instantie van drie snelheden (60, 80 en 100 km/u) worden uitgegaan en van drie inrijhoeken (15° , 20° en 30°). Mochten de resultaten daartoe aanleiding geven, zullen tussenliggende waarden worden genomen. De set inrijcondities die voor elk taludconfiguratie zal worden gehanteerd ziet er dan als volgt uit:

Inrijcondities autosnelweg

inrijsnelheid 100 km/u, inrijhoek 15°

inrijsnelheid 100 km/u, inrijhoek 20°

Inrijcondities voor niet-autosnelwegen

inrijsnelheid 80 km/u, inrijhoek 20°

inrijsnelheid 60 km/u, inrijhoek 30°

Van deze sets inrijcondities wordt aangenomen dat ze in het gebied van de bovengrens zitten van combinaties van inrijsnelheid en -hoek in de ongevalsituaties. In bogen kan sprake zijn van grotere inrijhoeken dan hiervoor bij de rechtstanden is aangegeven (afhankelijk van de richting van de boog). Aangezien de hoekvergroting ten gevolge van het inrijden van een boog klein is ($< 5^{\circ}$), valt dit binnen de marges van de aangegeven relatie tussen de inrijhoeken en inrijsnelheden.

4.5. Indicatoren en criteria

De voertuiginzittenden mogen ten gevolge van het taludincident geen ernstig letsel oplopen. Als indicatoren worden hiervoor de grootte van de voertuigvertragingen gebruikt en het al dan niet plaats vinden van een roll-over.

De grootte van de voertuigvertraging wordt uitgedrukt in de Acceleration Severity Index (ASI). Hierin zijn de voertuigvertragingen in drie richtingen (langs, dwars en vertikaal) samengesteld en per richting gerelateerd aan acceptabele voertuigvertragingen. Als criteria worden twee

dimensieloze waarden gehanteerd die niet overschreden mogen worden: de waarde 1 voor inzittenden zonder het gebruik van de autogordel en de waarde 1,6 voor het geval de autogordel wel wordt gedragen. In Bijlage 3 wordt het ASI-criterium nader beschreven.

Een kanttekening dient echter geplaatst te worden. Bij proefnemingen is geconstateerd dat het ASI-criterium geen goede voorspeller van de kans op letsel lijkt als er binnen een korte tijd grote voertuigrotatie optreedt (Schoon, 1982). Betrouwbaarder is het criterium als de voertuigvertraging voornamelijk in één richting werkt. Ook bij een taludincident treedt bij het neerkomen van het voertuig na een vrije val (vlucht) voertuigrotatie binnen een korte tijd op.

Om na te gaan of de ASI met als grenswaarden 1 en 1,6 bij dergelijke taludincidenten als een hanteerbaar criterium mag worden beschouwd, zullen bij enkele simulaties vertragingswaarden van de inzittenden worden berekend en met de ASI-waarden worden vergeleken. Relevant zijn de vertragingswaarden van het hoofd die met het "inzittendenmodel" van VEDYAC kunnen worden berekend. Als criterium wordt hiervoor een waarde van 80 g (gekoppeld aan een bepaald tijdinterval) aangehouden die ter voorkoming van ernstig letsel niet overschreden mag worden. Echter ook hier geldt dat er nog te weinig wetenschappelijke kennis bestaat om dit als een hard criterium te beschouwen.

Als tweede indicator voor de beoordeling van de kans op ernstig letsel wordt het plaatsvinden van een roll-over beschouwd. Als criterium wordt gesteld dat dit tijdens het taludincident niet mag plaats vinden; uit ongevallenonderzoek is namelijk bekend dat de kans op ernstig letsel hierbij groot is. Als indicator voor de kans op een roll-over kan de grootte van de rolhoek worden gehanteerd. Aangezien onder meer voertuigparameters en de rotatiesnelheid bepalend zijn voor de kritische rolhoek, kan geen exacte waarde worden opgegeven. Als indicatie kan een waarde tussen 45 en 50^o aangehouden worden.

4.6. Proeven op ware schaal

Voor de verificatie van de resultaten van mathematische simulaties zijn gegevens van proeven op ware schaal noodzakelijk. Bij de opzet hiervan dient er vanuit gegaan te worden dat de proefnemingen op mathematische

wijze gesimuleerd moeten kunnen worden. Verder zullen de omstandigheden bij de proeven zodanig gekozen moeten worden dat de verificatie over zo'n groot mogelijk gebied kan plaatsvinden, bijvoorbeeld kleine en grote in-rijhoeken, steile en flauwe taluds.

Voor de uitvoering van de proeven kunnen taluds worden aangelegd of kan gebruik worden gemaakt van bestaande taluds. Voor het laatste is gekozen ter besparing van hoge aanlegkosten en vanwege het feit dat bestaande taluds reeds voldoende zijn ingeklonken en begroeid. Aangezien voor de proeven een lange aanloopbaan voor het proefvoertuig noodzakelijk is, dienen naast het talud voldoende brede rijbanen aanwezig te zijn. Om tijdens de proeven niet gehinderd te worden door wegverkeer, komen alleen wegen in aanmerking die in aanbouw zijn of worden gereconstrueerd. De keuze van bestaande taluds gebruik te maken heeft als nadeel afhankelijk te zijn van het aanbod van geschikte taluds. Dit zal gering zijn, hetgeen consequenties heeft voor de spreiding in de grootte van de te onderzoeken variabelen.

5. UITVOERING VOORONDERZOEK

5.1. Proeven op ware schaal

5.1.1. Locaties

Er is een inventarisatie uitgevoerd van geschikte locaties voor uitvoering van proeven op ware schaal. De eisen die aan dergelijke locaties werden gesteld waren: diversiteit in taludkenmerken, brede aangrenzende rijbanen met (brede) tussenbermen (in verband met het halen van hoge inrijshnelheden), rijbaan afgesloten voor doorgaand verkeer (in verband met het aanleggen van een aanloopbaan).

Twee locaties op A15 ter hoogte van A52 (Arnhem/Nijmegen) kwamen in aanmerking. De hellingshoeken van de taluds bedroegen 1:4 en 1:2,2, de hoogte van de taluds bedroeg resp. 7 en 4 m. Voor de situatieschetsen wordt naar Bijlage 4 verwezen en voor verdere relevante gegevens naar Tabel 1.

5.1.2. Opzet

Met het oog op de verificatie van de mathematische simulaties aan de hand van de proeven op ware schaal, dienen de proeven aan een aantal voorwaarden te voldoen:

- ze moeten op mathematische wijze te simuleren zijn
- ze moeten onder verschillende inrijcondities kunnen worden uitgevoerd om spreiding in de meetresultaten te krijgen
- de uitkomsten van de proeven (meetresultaten e.d.) moeten vergeleken kunnen worden met de uitkomsten van de simulaties.

De voertuigshnelheden die op beide locaties zijn te behalen, zijn afhankelijk van de te realiseren lengte van de aanloopbaan. In Tabel 1 is op basis van de locatiegegevens een schatting aangegeven van de te bereiken voertuigshnelheden. Op basis hiervan is een proefprogramma opgesteld (zie Tabel 2). De inrijshnelheden moeten binnen de volgende drie snelheids categorieën vallen: 70-80 km/u, 80-90 km/u en 90-100 km/u. Bij locatie 1 kunnen in verband met de grotere breedte van de tussenberm hogere snelheden en daarmee grotere inrijhoeken bereikt worden dan bij locatie 2. De gekozen inrijhoeken zijn voor locatie 1 20° en 30° en voor locatie 2 10° en 20° .

Als type proefvoertuig zal overeenkomstig het gestelde in par. 4.3. de middelzware personenauto (Opel Kadett) worden gebruikt. Het stuurwiel van het proefvoertuig zal op een zodanige wijze worden vastgezet dat dit loskomt bij het overschrijden van een belasting van 250 N. Ten einde het effect van al dan niet uitslaande voorwielen op het verloop van een taludincident te kunnen nagaan - mede in verband met de uitvoering van de simulaties - zal het stuurwiel in een aantal gevallen zeer stevig worden vastgezet.

Voor de uit te voeren metingen is het van belang na te gaan met welke kenmerken en grootheden de verificatie van de mathematische simulaties aan de hand van proeven op ware schaal kon worden uitgevoerd. De volgende punten komen hiervoor in aanmerking:

- a. vertragungswaarden van het voertuig
- b. baan van het voertuig
- c. rotaties van het voertuig (rollen, dompen)
- d. contactplaatsen van het voertuig met het talud
- e. vaststelling van de gebeurtenissen op een tijdschaal

Op grond hiervan is besloten de volgende metingen uit te voeren:

- elektronische metingen voor de punten a en e
- high-speed filmopnamen voor b, c, d en e
- foto's voor b, c en d (opgenomen met een camera met en zonder motor-drive)
- veldmetingen voor b en d.

De inrijnsnelheid van het voertuig zal met radar worden bepaald.

5.1.3. Uitvoering

In totaal zijn 11 proeven uitgevoerd. Bij de uitvoering bleek dat voor beide locaties een inrijnsnelheid in de categorie 90-100 km/u niet kon worden bereikt vanwege te geringe capaciteit van de aandrijfunit. In Tabel 2 zijn deze beproevingssnelheden in een kader geplaatst.

In Tabel 3 is een overzicht van de uitgevoerde proeven gegeven. Naast de taludkenmerken en inrijcondities is in deze tabel de toestand van het gras opgenomen. Deze toestand (nat/droog) is van belang voor de bepaling van de grootte van de wrijvingscoëfficiënt ten behoeve van de mathematische simulaties. De massa van de proefvoertuigen varieerde van 805 tot

830 kg. De massa is gemeten met lege benzinetank en zonder reserveband en achterbank, maar inclusief de registratie-apparatuur en één dummy op de bestuurdersplaats.

De elektronische metingen van de voertuigvertragingen zijn uitgevoerd door het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO. Hiertoe zijn versnellingsopnemers gemonteerd die de grootte van de voertuigvertragingen in drie richtingen meten: langs, dwars en vertikaal. In het totaal zijn vier van dergelijke opnemers in het voertuig aangebracht. Met een dergelijk aantal opnemers is het in de eerste plaats mogelijk de grootte van de voertuigvertraging op elke willekeurige plaats in het voertuig te berekenen, zoals bijvoorbeeld in het zwaartepunt en op de plaats van de inzittenden. In de tweede plaats kan de grootte van de hoekversnellingen van het voertuig worden bepaald. De vier opnemers zijn op de hoekpunten van een stijf frame gemonteerd dat was bevestigd in de langsas van het voertuig ter hoogte van de achterbank (afmetingen frame ca. 35x35x35 cm). Met montage op een frame werd bewerkstelligd dat tijdens een taludincident de onderlinge afstand van de opnemers niet zou wijzigen, dit in tegenstelling tot montage van de opnemers aan de carrosserie in geval hierin torsie optreedt.

De meetsignalen van de versnellingsopnemers werden gefilterd en analoog geregistreerd. Na de proefnemingen zijn de signalen bemonsterd en digitaal opgeslagen in een computer data-bestand. De metingen en verwerkingen van de data zijn in een apart onderzoekverslag beschreven (IW/TNO, 1978). De baan en bewegingen van het voertuig werden door Stichting Film en Wetenschap met high-speed filmcamera's vastgelegd. Na de proefnemingen zijn de filmbeelden geanalyseerd.

5.1.4. Resultaten

De resultaten van de proeven zijn eveneens in Tabel 3 opgenomen. Ze zijn uitgedrukt in de grootte van de rolhoek (voertuigrotatie om de langsas) en de grootte van de voertuigvertragingen (de ASI-waarden). De beschreven banen van de voertuigen zijn op de Afbeeldingen la t/m ld weergegeven.

Rolhoeken

Bij geen van de proeven is een roll-over van het proefvoertuig opgetreden.

Op het steile talud zijn bij een inrijhoek van 20° wel zeer grote rolhoeken gemeten (een grootste waarden van 49° ; dit ligt in het kritische gebied met betrekking tot een roll-over). Bij de kleinere inrijhoek van 10° bedroeg de rolhoek maximaal 37° .

Op de flauwer verlopende helling bedroeg bij een inrijhoek van 20° de grootte van de rolhoek 18° ; bij een inrijhoek van 30° is een maximale waarde van 15° gemeten. Dat bij een grotere inrijhoek een kleinere rolhoek is gemeten ten opzichte van de vorige helling komt doordat het voertuig contact met de grond heeft gehouden. De grootte van de rolhoek wordt in dit geval bepaald door de stand van het voertuig op de helling. Als het voertuig loskomt van de grond is de grootte van de rotatie afhankelijk van de zweeftijd.

ASI-waarden

Het steilste talud (helling 1:2,2) heeft bij een inrijhoek van 20° de hoogste ASI-waarden gegeven (waarden van 0,6 tot 1,6). Bij deze proeven bleek dat een geringe stijging van de voertuigsnelheid (van 72 km/u naar 75 km/u) een aanzienlijke verhoging van de ASI-waarden tot gevolg had (van 0,6 naar 1,0). Een toename van de voertuigsnelheid van 75 km/u naar 85 km/u gaf een stijging van de ASI van 1,0 naar 1,6.

Bij een inrijhoek van 10° op dezelfde helling met vergelijkbare voertuigsnelheden als hierboven beschreven, zijn relatief lage voertuigvertragingen geregistreerd (ASI-waarde 0,2).

Het talud met een flauwere helling van 1:4 gaf bij een inrijhoek van 20° aanzienlijk lagere ASI-waarden dan de steilere helling van 1:2,2. Bij een snelheid van ca. 85 km/u is de ASI-waarde 0,3 (ca. factor 5 lager).

Vergroting van de inrijhoek van 20° naar 30° deed de ASI-waarden op deze flauwer verlopende taludhelling iets toenemen (van 0,3 naar 0,4 in de snelheidsklasse 80-90 km/u); een toename die beduidend geringer is dan op de steile helling.

Baan van het voertuig

De baan die het voertuig tijdens de proeven heeft beschreven zijn per locatie en inrijhoek afgebeeld op de Afbeeldingen 1a t/m 1d. Hierin is in het verlengde van de aanloopbaan op de rijbaan een "nullijn" op het talud doorgetrokken die als referentielijn dient voor de vaststelling van de mate van afwijking van de afgelegde baan van het voertuig.

Per afbeelding ontlopen de afgelegde banen elkaar niet veel. Wel volgen de voertuigen op een natte grasmat een lagere baan op het talud dan op een droge; dit kan worden verklaard uit de geringere waarde van de wrijvingscoëfficiënt voor een natte grasmat. Bij drie van de vier beproefde situaties liggen de door het voertuig beschreven banen beneden de nullijn. In de situatie weergegeven op Afbeelding 1c (hellingshoek 1:4 en inrijhoek 20°) liggen de banen erboven. Het is niet duidelijk waaraan dit kan worden toegeschreven. Mogelijk hebben de wielen bij het vastzetten van het stuurwiel een ten opzichte van de rechttuitstand geringe afwijkende stand meegekregen. Ook kan een te grote stuurspeling in de stuurinrichting een rol hebben gespeeld.

Bij de proeven is in zeven van de elf gevallen het stuurwiel zodanig vastgezet dat dit bij het overschrijden van een belasting van 250 N zou losraken. Op de steile helling was hier in drie van de vier gevallen sprake van. In de overige drie gevallen op de flauwer verlopende helling is het stuurwiel vast blijven zitten. In de gevallen dat het stuurwiel is losgeraakt, blijkt uit de afbeeldingen niet dat dit tot een afwijkende baan van het voertuig heeft geleid.

5.2. Verificatie mathematische simulaties

De simulaties ter verificatie zijn onder dezelfde condities uitgevoerd als de proeven op ware schaal. Hierbij zijn dezelfde kenmerken gehanteerd als van de vorige paragraaf: rolhoek, ASI-waarde en baan van het voertuig.

Ter illustratie zijn in Bijlage 5.1 computerplots van een taludsimulatie en foto's van een proef op ware schaal (TA2) afgebeeld. Hieruit blijkt de grote overeenkomst met name wat betreft de rolhoek en de beschreven baan van het voertuig. Uit Bijlage 5.2 blijkt de grote overeenkomst tussen de vertragingswaarden in x-, y- en z-richting.

In Tabel 4 zijn de resultaten van alle proeven en verificatie-simulaties gepresenteerd.

Rolhoeken

De grootte van de maximale waarde van de rolhoek bij de simulaties wijkt niet veel af van die van de proeven op ware schaal. In het kritische gebied van ca. 45° varieert de afwijking van $+4^{\circ}$ tot -7° (in procenten uitgedrukt: +11 tot -14%). Evenals bij de proeven op ware schaal is ook bij de simulaties geen roll-over opgetreden.

ASI-waarden

De berekende ASI-waarden met het computerprogramma vertonen grote overeenkomst met hetgeen tijdens de proeven op ware schaal is geregistreerd. Zowel in het hoge gebied (ASI-waarden 1-1,6) als in het lage gebied (ASI 0,2-0,4) is de afwijking maximaal 0,2. Hoewel in het laatste geval de afwijking relatief groot is, behoeft dit niet direct aan de onnauwkeurigheid van de modelberekeningen toegeschreven te worden. Immers juist in het gebied met lage ASI-waarden is de invloed van oneffenheden van de grasmat relatief groot op de grootte van de voertuigvertragingen. In de dataset van het talud zijn deze oneffenheden niet opgenomen.

Baan voertuig

De afwijking van de gesimuleerde baan van het voertuig ten opzichte van de proeven op ware schaal is op een controlelijn gemeten op een punt waar het voertuig de grootste afstand in langsrichting heeft afgelegd. In Tabel 4 zijn zowel de dwarsafwijking als de afgelegde afstand gegeven; de dwarsafwijking is als projectie gemeten op de controlelijn die loodrecht op de kruinlijn staat. Op Afbeeldingen 1a t/m 1d is de controlelijn met een stippellijn aangegeven.

De dwarsafwijkingen bedragen voor het steile talud +0,9 tot -3,5 m (afgelegde weg 35-55 m) en voor het flauwer verlopend talud -2,9 tot +6,1 (afgelegde weg 75-90 m). Indien de dwarsafstand wordt gerelateerd aan de afgelegde weg bedraagt de afwijking maximaal 8%. De afwijkingen zijn in de meeste gevallen in de richting van het oplopende talud. In twee geval-

len is bij de mathematische simulaties een beduidend lagere baan van het voertuig geconstateerd dan bij de proeven op ware schaal. De oorzaak hiervan moet waarschijnlijk gezocht worden in het afwijkende voertuiggedrag bij de proeven op ware schaal. In par. 5.1.4. is hiervoor een aantal oorzaken genoemd.

Conclusie m.b.t. de verificatie

Met betrekking tot de uitgevoerde verificatie kan worden geconcludeerd dat het model de voertuigbewegingen, uitgedrukt in rolhoek en baan van het voertuig, en de grootte van de voertuigvertragingen, uitgedrukt in de ASI, op redelijk nauwkeurige wijze berekend. Zeker indien in acht wordt genomen dat in de gesimuleerde praktijksituatie zich tal van variaties voordoen die niet of niet eenvoudig zijn te simuleren.

Op grond hiervan kan worden gesteld dat het met het mathematisch model mogelijk is voorspellingen over het voertuiggedrag te doen die voor ten hoogste ca. 20% zullen afwijken van de praktijksituatie.

Hoewel bij verificatie is gebleken dat het gebruikte model bevredigend werkt, kan in het algemeen worden gesteld dat met modelexercities geen exacte representatie van de realiteit mag worden verwacht. Een aantal redenen ligt hieraan ten grondslag.

In de eerste plaats kunnen de natuurlijke oneffenheden van het talud worden genoemd. In de praktijksituatie kunnen afhankelijk van de beschreven voertuigbaan dergelijke oneffenheden in het ene geval een versterkend en in het andere geval een dempend effect op het dynamisch voertuiggedrag hebben. Hoewel met het model oneffenheden kunnen worden gesimuleerd, kan nauwelijks een zodanige dimensionering en situering worden nagebootst dat deze exact bij de werkelijkheid aansluiten.

In de tweede plaats komen in de praktijksituatie talloze combinaties van hardheid en wrijvingscoëfficiënt van het taludoppervlak voor; met name kunnen de weersomstandigheden hierop van grote invloed zijn. Bij de simulaties dienen bepaalde keuzen met betrekking tot deze grootheden gemaakt te worden.

Ook dient met betrekking tot een aantal voertuigparameters een keuze gemaakt te worden. Genoemd kan worden de werking van de schokdempers. Uit een aantal simulaties met het oude model MAMIAC is af te leiden dat

slechte schokdempers de afloop van een taludincident nadelig kunnen beïnvloeden. Vooral de combinatie van grote oneffenheden en slechte schokdempers kan verschillen met de simulatieresultaten opleveren. Het is echter niet goed te voorspellen wat hiervan de invloed is op bijv. de grootte van de rolhoek, het vertragingniveau en de baan van het voertuig.

Voorts laat het model het doorbuigen van de gehele carrosserie niet toe zoals dat bij een aantal praktijkproeven is geconstateerd. Het effect van die doorbuiging op versnellingsniveaus en ASI-waarden kan echter worden verwaarloosd ten opzichte van de totale nauwkeurigheid van de simulaties. Tenslotte moet erop worden gewezen dat het aantal passagiers in het "botsende" voertuig de massa en massatraagheid beïnvloedt. Op grond van de simulaties kan verwacht worden dat door toename van de massa de ASI-waarden enigszins hoger uitvallen; door toename van de massatraagheid zullen de hoekversnellingen geringer in waarde zijn.

6. UITVOERING ONDERZOEK

In eerste instantie zijn met drie voertuigtypen (licht, middelzwaar en zwaar) simulaties uitgevoerd om te kunnen vaststellen wat de onderlinge verschillen bij een taludincident zijn. Als deze groot waren en/of een ongelijkmatig patroon te zien gaven, dienden alle taludsimulaties met de drie voertuigtypen uitgevoerd te worden. Anders kon worden volstaan met één of twee typen.

Deze eerste serie simulaties zijn met de volgende taludconfiguraties uitgevoerd: hoogte 5 m, hellingshoek 1:3 en afrondingsstralen 6, 9 en 12 m. Als inrijcondities zijn genomen: 100 km/u-15^o, 100 km/u-20^o en 60 km/u-30^o.

De eigenlijke "produktie"-simulaties zijn voor twee groepen inrijcondities uitgevoerd: autosnelwegen (snelheden 100 km/u) en niet-autosnelwegen (snelheden 80 en 60 km/u). De relatie is gelegd tussen de afloop van het taludincident en de hellingshoek met als parameters de taludhoogte en afrondingsstraal.

Bij deze simulaties zijn de afrondingsstralen voor twee waarden onderzocht namelijk 6 en 12 m. Aangezien voor de geringe taludhoogte van 1 m geen afrondingsstraal van 12 m kon worden toegepast, is bij deze hoogte volstaan met een afrondingsstraal van 6 m.

Ten einde voor het gebied van de afrondingsstralen tussen de 6 en 12 m inzicht te krijgen in het verloop van een taludincident, zijn nog aanvullende simulaties onder de volgende condities uitgevoerd:

- afrondingsstraal bij 1:3 : 6 t/m 12 m (stapgrootte 1 m)
- afrondingsstraal bij 1:2 en 1:4 : 6, 9 en 12 m
- taludhoogte 5 m
- inrijcondities: 100 km/u-15^o, 100 km/u-20^o, 60 km/u-30^o
- voertuigtype : personenauto middelzwaar

Met het "inzittendenmodel" is een aantal simulaties uitgevoerd teneinde een vergelijking met de ASI-waarden mogelijk te maken. Vanwege de lange runtijd van exercities met dit model (ca. 20 uur), wordt het aantal simulaties beperkt tot drie. Hierbij wordt gestreefd naar het verkrijgen van een voldoende mate van spreiding in de ASI-waarden. Met het inzitten-

denmodel is de grootte van de resulterende versnelling van het hoofd van de inzittende naast de bestuurder vastgesteld. Voor deze zitplaats is gekozen daar bij de gesimuleerde taludincidenten, waarbij het voertuig aan de rechterzijde de rijbaan verlaat, de kans op contact met interieurdelen (met name de zijkant) voor de voorpassagier groter is dan voor de bestuurder.

7. RESULTATEN VAN SIMULATIES

De resultaten zijn per onderdeel in diverse tabellen als volgt weergegeven: maximale rolhoek (rotatie om de langsas), het al dan niet loskomen van de voorwielen, de voertuigvertragingen (uitgedrukt in de ASI op de bestuurdersplaats en de hoogste waarde op een passagiersplaats) en de uitrijcondities (uitrijhoek en uitrijnsnelheid op het maaiveld aan de voet van het talud).

7.1. Verschillende typen personenauto's

De simulaties die noodzakelijk waren voor het vaststellen van de invloed van het type personenauto (licht, middelzwaar en zwaar) zijn voor de volgende taludconfiguratie uitgevoerd: helling van 1:3 en een hoogte van 5 m. In Tabel 5 staan de resultaten vermeld.

Uit deze tabel blijkt dat de ASI-waarde de grootste onderlinge verschillen te zien geeft. Het verschil bij de andere kenmerken (rolhoek, wielcontact, uitrijcondities) is vrij gering.

De ASI-waarden op de bestuurdersplaats zijn voor drie inrijcondities (100 km/u-15°, 100 km/u-20° en 60 km/u-30°) grafisch uitgezet tegen de afrondingsstralen 6, 9 en 12 m (zie Afbeelding 2).

Uit de afbeelding blijkt dat het zware type personenauto in het algemeen de hoogste ASI-waarden geeft en het lichte type de laagste waarden. Het middelzware type geeft waarden die er in de meeste gevallen tussen zitten.

Als reden voor het niveauverschil kan worden genoemd het relatieve verschil in massa-traagheid tussen de voertuigtypen en het verschil in afstand tussen de voertuigassen en zitplaatsen van de inzittenden. De invloeden van deze effecten zijn moeilijk apart te kwantificeren vanwege het ingewikkelde dynamische proces van bewegingen en van krachten tijdens het neerkomen van het voertuig op het talud.

Gezien het regelmatige verloop van de curves onderling en het feit dat de curve van het middelzware type personenauto zich in de meeste gevallen tussen beide andere curves bevindt, is besloten de produktiesimulaties alleen met de middelzware personenauto uit te voeren.

Uit Tabel 5 blijkt ook dat er vrij grote verschillen zijn tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats en de hoogste waarde op één van de

passagiersplaatsen. Ter verduidelijking zijn de waarden op grafische wijze in Afbeelding 3 weergegeven. Hieruit blijkt dat de verschillen tussen het lichte en middelzware voertuigtype groter zijn dan bij het zware type.

Op grond hiervan is besloten ook bij de produktiesimulaties de ASI-waarden zowel op de bestuurdersplaats als op de drie passagiersplaatsen afzonderlijk te registreren. In de tabellen en grafieken is met betrekking tot de passagiersplaatsen steeds de hoogste waarde opgenomen.

7.2. Produktiesimulaties

De produktiesimulaties zijn in Tabel 6 in 4 groepen gepresenteerd:

6A: afrondingsstraal 6 m, inrijcondities autosnelweg

6B: afrondingsstraal 6 m, inrijcondities niet-autosnelweg

6C: afrondingsstraal 12 m, inrijcondities autosnelweg

6D: afrondingsstraal 12 m, inrijcondities niet-autosnelweg

Van de in deze tabellen opgenomen resultaten geeft de grootte van de voertuigvertragingen (uitgedrukt in de ASI) de grootste spreiding te zien. Hiervan zijn grafieken gemaakt die op analoge wijze als de tabellen zijn ingedeeld in de Afbeeldingen 4A t/m 4D.

Aangezien bij de simulaties bleek dat taluds met een helling van 1:4 een gunstige afloop te zien gaven, zijn met de flauwere helling van 1:5 geen simulaties uitgevoerd.

ASI-waarden

Uit de Afbeeldingen 4A t/m 4D blijkt dat met het afnemen van de steilheid van de hellingen (van 1:2 naar 1:4) de waarde voor de ASI eveneens afneemt. De gunstige invloed van de grootte van de afrondingsstraal komt duidelijk naar voren bij vergelijking van de Afbeeldingen 4A en 4B (afrondingsstraal 6 m en maximale ASI-waarde van 1,6) met de Afbeeldingen 4C en 4D (afrondingsstraal 12 m en maximale ASI-waarde van 0,5). Uit deze afbeeldingen blijkt eveneens dat het verschil tussen de ASI-waarden per zitplaats groter is naar mate de ernst van het taludincident toeneemt. Voor de simulaties met de inrijcondities van autosnelwegen (snelheid 100 km/u en inrijhoeken 15° en 20°) met taluds met een afrondingsstraal van 6 m (zie Afbeelding 4A) geven de taluds met een hoogte van 2 en 3 m met

een helling van 1:2 beduidend hogere ASI-waarden (waarde 1,6) dan die met een hoogte van 1 en 5 m (waarden resp. 1 en 0,8). Dit heeft te maken met de plaats van neerkomen op het talud. Om dit duidelijk te maken wordt verwezen naar Afbeelding 6. Hierin zijn bij twee identieke dwarsdoorsneden van het talud de baan van het zwaartepunt van het voertuig getrokken voor de inrijcondities 100 km/u-20° (bovenste dwarsdoorsnede) en 80 km/u-20° (onderste dwarsdoorsnede). Uit de bij de doorsneden afgebeelde ASI-waarden (uitgezet tegen de tijd) blijkt dat in het eerste geval de maximale ASI-waarde ruim 1,6 bedraagt en in het tweede geval 0,35. De stippe lijn geeft de baan van een voertuig aan dat niet van het talud loskomt. Bij de doorsneden is de plaats van neerkomen van het voertuig aangegeven. In het eerste geval is dit in de onderste afronding; de hoek tussen de langsas van het voertuig en de raaklijn van het talud bedraagt hier 19°. In het tweede geval komt het voertuig halverwege de helling terecht: de hoek van neerkomen bedraagt nu 7°. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de plaats van neerkomen van het voertuig (met hieraan gekoppeld de landingshoek) in hoge mate bepalend is voor de grootte van de ASI-waarde.

Voor de simulaties met de inrijcondities van niet-autosnelwegen (80 km/u-20° en 60 km/u-30°) met taluds met eveneens een afrondingsstraal van 6 m (zie Afbeelding 4B) geeft alleen de hoogte van 2 m bij een helling van 1:2 relatief hoge ASI-waarden. Ook dit heeft te maken met de plaats van neerkomen van het voertuig op de afronding onderaan het talud. Uit de beide grafieken blijkt dat de geringe taludhoogte van 1 m relatief hoge ASI-waarden geeft voor zowel de hellingshoek van 1:2 als 1:3. Als oorzaak kan hier genoemd worden dat het voertuig direct op het maaiveld belandde, hetgeen resulteerde in een grote hoek van neerkomen.

De simulaties die met taluds met een afrondingsstraal van 12 m zijn uitgevoerd (zie Afbeeldingen 4C en 4D) geven voor alle hoogtes (2,3 en 5 m) en voor alle hellingen (1:2, 1:3 en 1:4) geringe ASI-waarden (waarden tot 0,5). Dit geldt voor zowel de inrijcondities van autosnelwegen (Afbeelding 4C) als van niet-autosnelwegen (Afbeelding 4D).

N.B. Voor de taludhoogte van 1 m zijn geen simulaties uitgevoerd aangezien de toepassing van een afrondingsstraal van 12 m bij deze hoogte niet mogelijk is.

Als algemene opmerking omtrent de grootte van de geregistreeerde ASI-waarden het volgende. De relatie tussen de ASI-waarden en taludconfiguraties in combinatie met de inrijcondities kan niet als een lineair proces beschouwd worden. Een geringe verandering in één van de parameters kan grote effecten bewerkstelligen. Zoals is aangegeven is de plaats van neerkomen van het voertuig op het talud van groot belang. De hiermee samenhangende voertuigbewegingen (rotaties, in- en uitvering) kan in het ene geval een negatieve uitwerking hebben op de grootte van de ASI-waarden en in het andere geval een positieve.

Rolhoeken

Uit de Tabellen 6A t/m 6D blijkt dat de rolhoek een maximale waarde van 36° bereikt en wel op een talud met een helling van 1:2. Dit is nog beneden het kritische gebied voor een roll-over.

Indien de helling van 1:2 buiten beschouwing blijft, bedraagt de waarde voor de hellingen 1:3 en 1:4 maximaal 23° . Uit de gegevens blijkt dat de invloed van de afrondingsstraal op de rolhoek niet groot is: bij een afrondingsstraal van 6 m ten opzichte van die van 12 m is de grootte van de rolhoek bij dezelfde taludconfiguratie en inrijconditie maximaal 7° groter.

Gesteld kan worden dat bij taludincidenten waarbij geen manoeuvres worden uitgevoerd, het voertuig niet gauw om zijn as zal rollen.

Loskomen van de voorwielen

In de Tabellen 6A t/m 6D is aangegeven in welke gevallen de voorwielen van het voertuig blijvend contact met het talud hebben gehouden.

Bij de afrondingsstraal van 6 m zijn bij nagenoeg alle simulaties beide voorwielen losgekomen en bij de afrondingsstraal van 12 m in de meeste gevallen één voorwiel. In slechts een paar gevallen hebben bij de laatst genoemde afrondingsstraal beide voorwielen contact met het talud gehouden.

In het algemeen kan worden gesteld dat naarmate de afrondingsstraal groter is en de inrijhoek geringer, de voorwielen (en ook de achterwielen) eerder contact met het talud blijven houden.

Uitrijcondities maaiveld

In de Tabellen 6A t/m 6D is aangegeven met welke uitrijhoek en uitrij-snelheid het voertuig het talud heeft verlaten. Voor de registratie hiervan is het moment gekozen dat het voertuig geheel op het maaiveld is belandt. Uit de gegevens blijkt dat de uitrijhoeken in het algemeen groter zijn dan de inrijhoeken. De toename van de hoek bedraagt maximaal 10° . In een enkel geval is de hoek kleiner geworden met een maximale waarde van 3° . Voor de inrijcondities 60 km/u- 30° zijn in gunstige zin twee uitschieters geregistreerd: waarden van de uitrijhoek van 15° en 18° . De uitrij-snelheid is in de meeste gevallen hoger dan de inrij-snelheid. De snelheidsvermeerdering bedraagt maximaal 10 km/u. Bij de inrijcondities 100 km/u- 20° is in drie gevallen geconstateerd dat de snelheid is gereduceerd tot minimaal 95 km/u.

7.3. Invloed afrondingsstraal

Tot dusver zijn resultaten van taludincidenten besproken voor de afrondingsstralen van 6 en 12 m. Aangezien de verschillen onderling groot zijn is nagegaan hoe het verloop is in het gebied tussen beide afrondingsstralen. In Tabel 7 zijn de resultaten van de uitgevoerde simulaties gegeven. De in de tabel opgenomen ASI-waarden van de bestuurdersplaats zijn weergegeven in Afbeelding 5. Voor hellingen van 1:2 en 1:4 zijn alleen simulaties met de afrondingsstralen 6, 9 en 12 m uitgevoerd; voor de helling van 1:3 tevens met de tussenliggende waarden.

Uit Afbeelding 5 blijkt dat met het toenemen van de afrondingsstraal de grootte van de ASI afneemt. Voor de steile helling van 1:2 is de afname van de ASI van 6 m naar 9 m vrij sterk. Bij beide andere hellingen is geen duidelijk knikpunt in de curve aan te geven.

7.4. Relatie tussen ASI-criterium en Inzittenden criterium

In Tabel 8 zijn de resultaten gegeven van de simulaties die met het inzittendenmodel zijn uitgevoerd. Van de twee simulaties met de criteriumwaarde 1,6 van de ASI (berekend op de plaats van de voorpassagier), geeft het inzittendenmodel resulterende versnellingen van het hoofd van de voorpassagier met waarden van 23 en 33 g. Deze waarden liggen bedui-

dend onder de grenswaarde van 80 g die als criterium voor de resulterende hoofdversnelling wordt aangenomen.

De derde uitgevoerde simulatie met een veel lagere ASI-waarde van 0,3, geeft als resulterende hoofdversnelling een waarde van 2 g.

Hieruit kan voorlopig worden geconcludeerd dat de ASI een conservatief criterium is; met de in de vorige paragrafen gepresenteerde resultaten omtrent de ernst van het taludincident, lijken we dan ook aan de veilige kant te zitten. De term "voorlopig" wordt hier gebruikt omdat exercities met het Inzittenden-model zich nog min of meer in het experimentele stadium bevinden.

8. CONCLUSIES

Onderstaande conclusies hebben betrekking op taludconfiguraties die zijn gebaseerd op simulaties van taludincidenten waarbij geen voertuigmanoeuvres zijn uitgevoerd. Het maaiveld onderaan het talud is hierbij voorgesteld als ideaal: breed, zonder obstakels en sloten.

Als indicator voor de beoordeling van de ernst van het taludincident is de Acceleration Severity Index (ASI) gehanteerd met als grenswaarde 1 voor inzittenden zonder gebruik van de autogordel. Van deze ASI is geconcludeerd dat het een vrij conservatief criterium is.

De volgende conclusies zijn gebaseerd op de taludsimulaties:

1. Er zijn geen grote verschillen tussen voertuigtypen onderling geconstateerd. De voertuigvertragingen van de middelzware personenauto lagen in het algemeen tussen de vertragingswaarden van de lichte en zware personenauto in.

2. Vastgesteld is dat de grootte van de afrondingsstraal van veel invloed is op de grootte van de voertuigvertragingen.

Bij toepassing van een afrondingsstraal van 12 m geven alle onderzochte taludconfiguraties (1:2 en flauwer bij diverse hoogten) gunstige vertragingswaarden.

Bij toepassing van een afrondingsstraal van 6 m bleek het volgende voor de inrijcondities van de autosnelwegen (snelheid 100 km/u, inrijhoek 15° en 20°):

- helling 1:2, hoogte 2 en 3 m: zeer hoge vertragingswaarden
- helling 1:2, hoogte 1 m: vertragingswaarden in grensgebied
- helling 1:2, hoogte 5 m: vertragingswaarden iets onder grensgebied
- helling 1:3, hoogte 1 m: vertragingswaarden iets onder grensgebied

Voor de inrijcondities van de niet-autosnelwegen (80 km/u-20° en 60 km/u-30°) bleek bij deze afrondingsstraal:

- helling 1:2, hoogte 2 m: vertragingswaarden in grensgebied
- helling 1:2, hoogte 1 m: vertragingswaarden iets onder grensgebied

De overige taludconfiguraties gaven gunstige vertragingswaarden.

De relatie tussen de grootte van de voertuigvertragingen en de grootte van de afrondingsstraal tussen 6 en 12 m is als volgt:

- bij een helling van 1:2 is er een duidelijke afname van de voertuigvertragingen in het gebied tussen de 6 en 9 m.
- bij hellingen van 1:3 en 1:4 is er een geleidelijke daling van de voertuigvertragingen zonder duidelijke knikpunten.

3. De plaats waar het voertuig op het talud belandt, is zeer van belang voor de grootte van de vertragingsswaarden: landing op de helling geeft relatief lage waarden; landing onderaan het talud (op de afronding of het maaiveld) geeft relatief hoge waarden.

4. Bij taludincidenten, waarbij het voertuig in een rechte lijn het talud afrijdt, is de kans op een roll-over gering.

5. De uitrijhoeken en -snelheden op het maaiveld aan de voet van het talud zijn in de meeste gevallen groter dan de inrijhoeken en -snelheden bovenaan het talud; toename van resp. maximaal 10° en 10 km/u. Voor zover het maaiveld aan de voet breed en vrij van obstakels is, is dit niet problematisch.

De in dit Deel I van het taludonderzoek aangegeven resultaten van taludincidenten waarbij geen voertuigmanoeuvres zijn toegepast, hebben alleen geldigheid voor taluds met aan de voet een brede zone zonder obstakels. Aangezien dit in de praktijk niet altijd zal voorkomen, zal het onderzoek worden uitgebreid (Deel II) waarbij wel stuur- en remmanoeuvres gesimuleerd zullen worden.

Een voorwaarde voor het effectief kunnen uitvoeren van deze manoeuvres is dat in ieder geval beide voorwielen contact met het talud blijven houden. Uit de uitkomsten van het hier gerapporteerde onderzoek bleek dat dit het geval is als het talud een helling heeft met een flauwer verloop dan 1:4.

LITERATUUR

- CBS (1977). Statistiek voor motorvoertuigen 1 augustus 1976. Staatsuitgeverij, Den Haag, 1977.
- Heijer, T. (1984). Mathematische modellen voor veiliger verkeer. R-84-37. SWOV, 1984.
- IW/TNO (1978). Taludproeven. Opdrachtnummer 700160105. Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO, 1978.
- RWS (1975). Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen. Hoofdstuk III, Dwarsprofielen. Rijkswaterstaat, Den Haag, 1975.
- RWS (1980). Ontwerpvoertuigen. Rapport nr. DVK 80-06. Rijkswaterstaat, Den Haag, 1980.
- RWS (1984). Richtlijnen voor het ontwerpen van niet-autosnelwegen (voorlopig). Hoofdstuk II, Dwarsprofielen, Rijkswaterstaat, Den Haag, 1984.
- Schoon, C.C. (1982). RIMOB: Obstakelbeveiliger met rimpelbuizen. R-82-38. SWOV, 1982.
- Schoon, C.C. (1985a). Aanrijdingen met in stijfheid verschillende typen geleiderailconstructies. R-85-63. SWOV, 1985.
- Schoon, C.C.; Van de Pol, W.H.M. & Jordaan, D.J.R. (1985b). Aanrijdingen met de betonnen geleideconstructietypen General Motors en New Jersey. R-85-64. SWOV, 1985.
- Schoon, C.C. (1985c). Afschermingsvoorzieningen voor niet-autosnelwegen. R-85-22. SWOV, 1985.

AFBEELDINGEN 1 T/M 6

Afbeelding 1A. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA1, TA2 en TA3.

Afbeelding 1B. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA5, TA6 en TA7.

Afbeelding 1C. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA8 en TA9.

Afbeelding 1D. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA10, TA11 en TA12.

Afbeelding 2. Relatie tussen de ASI-waarden en afrondingsstraal voor drie voertuigtypen en drie inrijcondities op een talud met een helling van 1:3 en een hoogte van 5 m.

Afbeelding 3. Relatie tussen de ASI-waarden (bestuurdersplaats en een passagiersplaats) en afrondingsstraal voor drie voertuigtypen en twee inrijcondities op een talud met een helling van 1:3 en een hoogte van 5 m.

Afbeelding 4A. Relatie tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 6 m voor de taludhoogtes 1, 2, 3 en 5 en voor de inrijcondities voor autosnelwegen met het personenautotype middelzwaar.

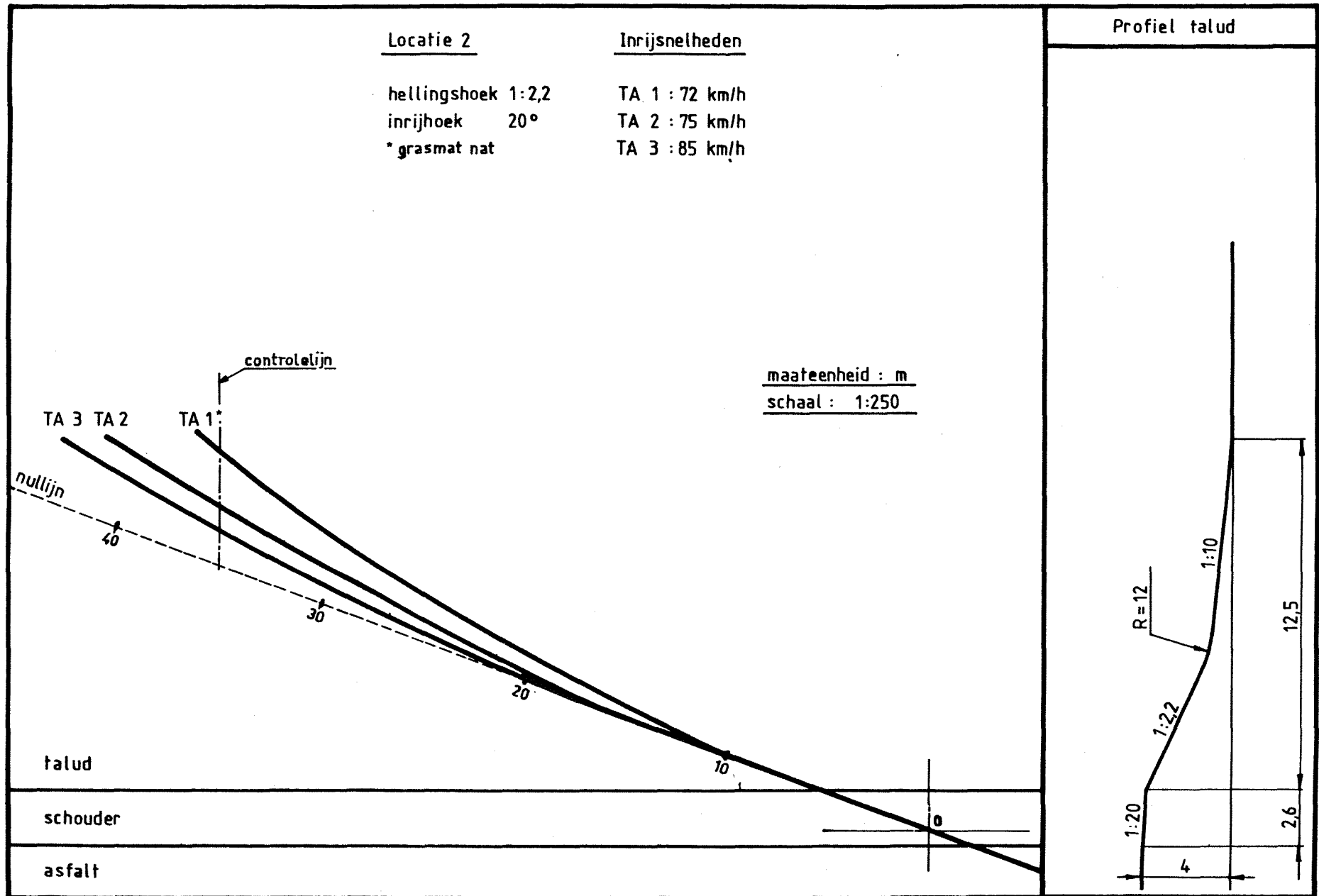
Afbeelding 4B. Relatie tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 6 m voor de taludhoogtes 1, 2, 3 en 5 en voor de inrijcondities voor niet-auto-snelwegen met het personenautotype middelzwaar.

Afbeelding 4C. Relatie tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 12 m voor de taludhoogtes 2, 3 en 5 en voor de inrijcondities voor autosnelwegen met het personenautotype middelzwaar.

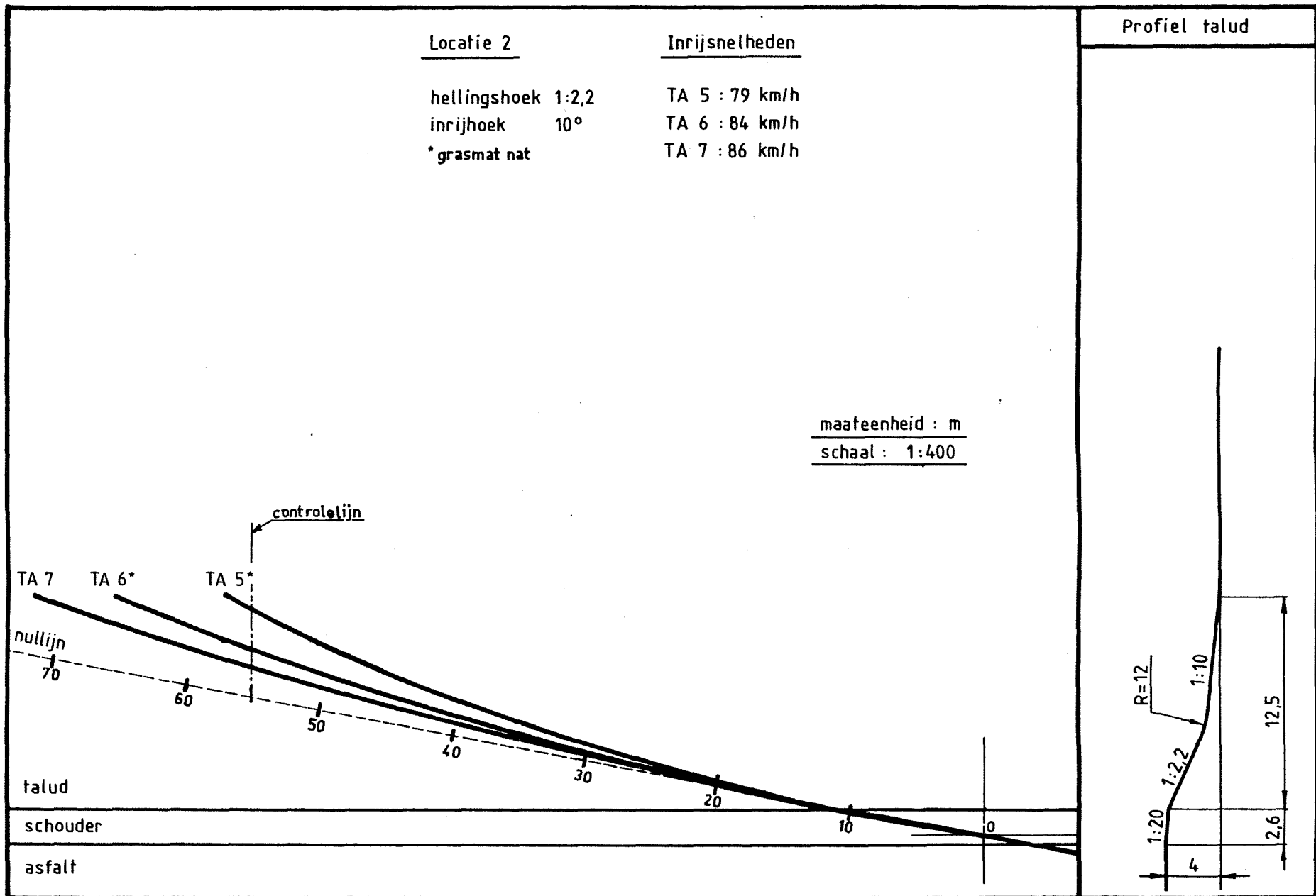
Afbeelding 4D. Relatie tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 12 m voor de taludhoogtes 2, 3 en 5 en voor de inrijcondities voor niet-autosnelwegen met het personenautotype middelzwaar.

Afbeelding 5. Relatie tussen de ASI-waarden en afrondingsstraal voor de taludhellingen 1:2, 1:3 en 1:4 met een hoogte van 5 m voor drie inrijcondities met het personenautotype middelzwaar.

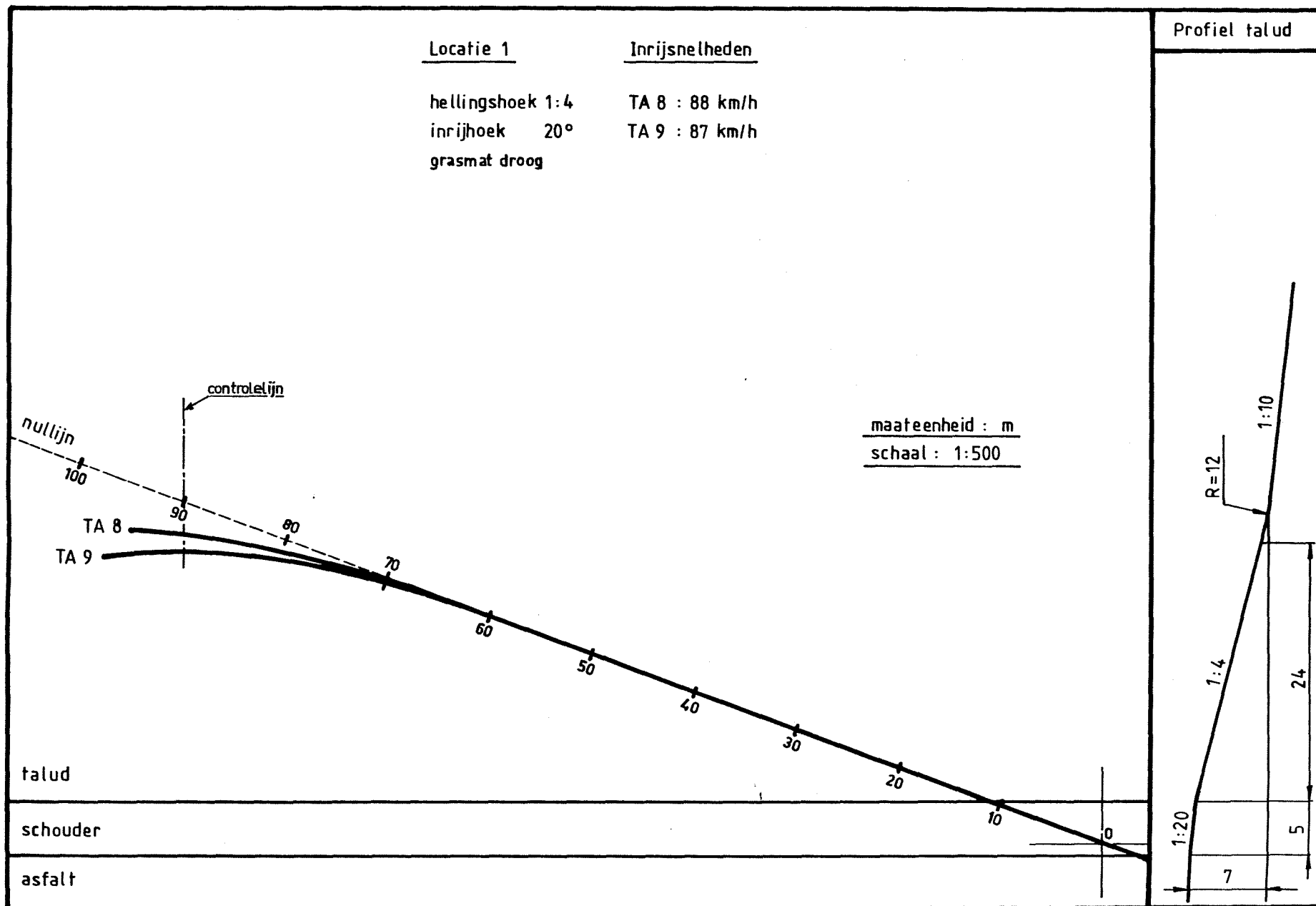
Afbeelding 6. Baan van het voertuig en plaats van neerkomen op een dwarsdoorsnede van het talud met het verloop van de ASI-waarde tegen de tijd.



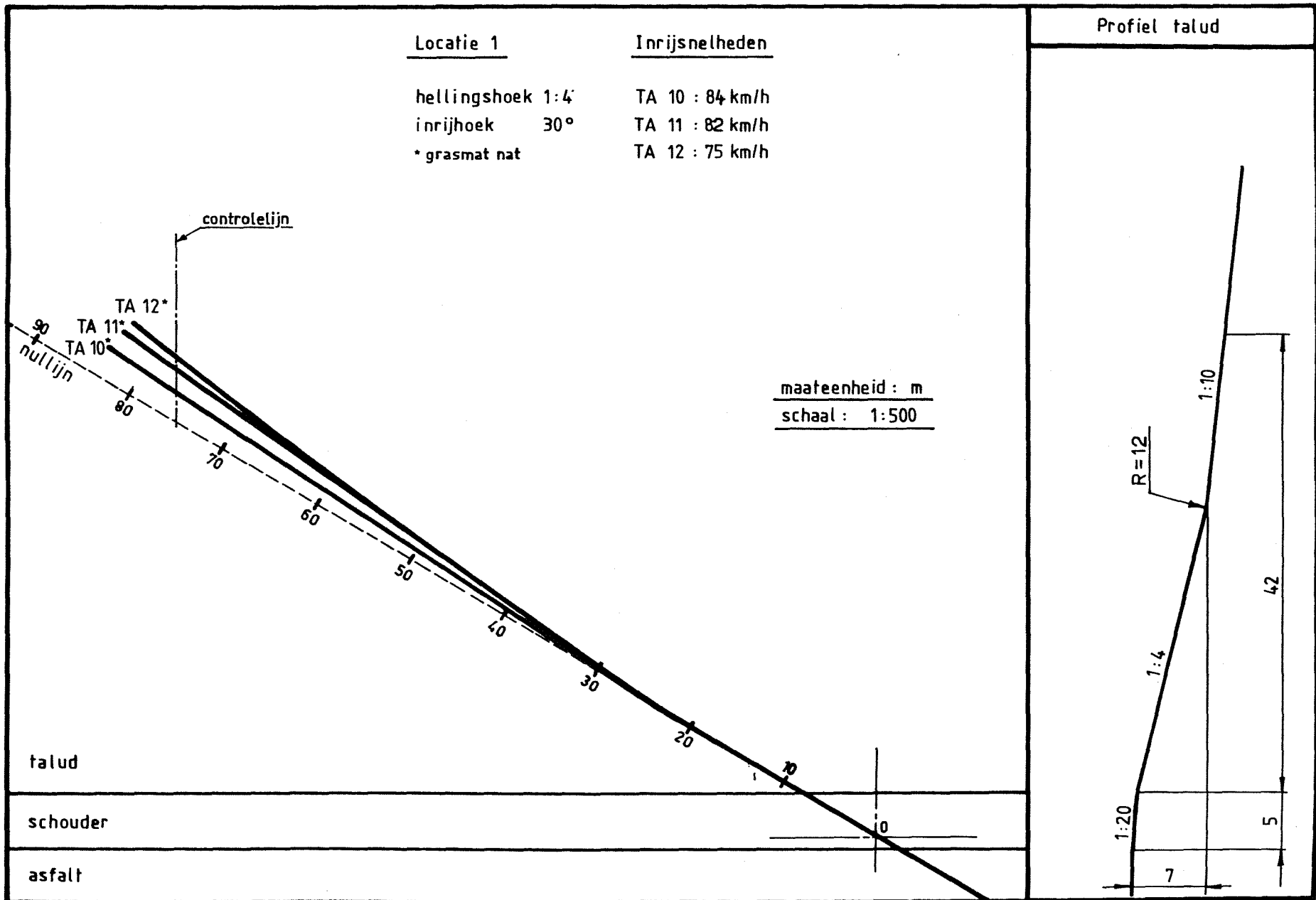
Afbeelding 1A. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA1, TA2 en TA3.



Afbeelding 1B. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA5, TA6 en TA7.



Afbeelding 1C. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA8 en TA9.



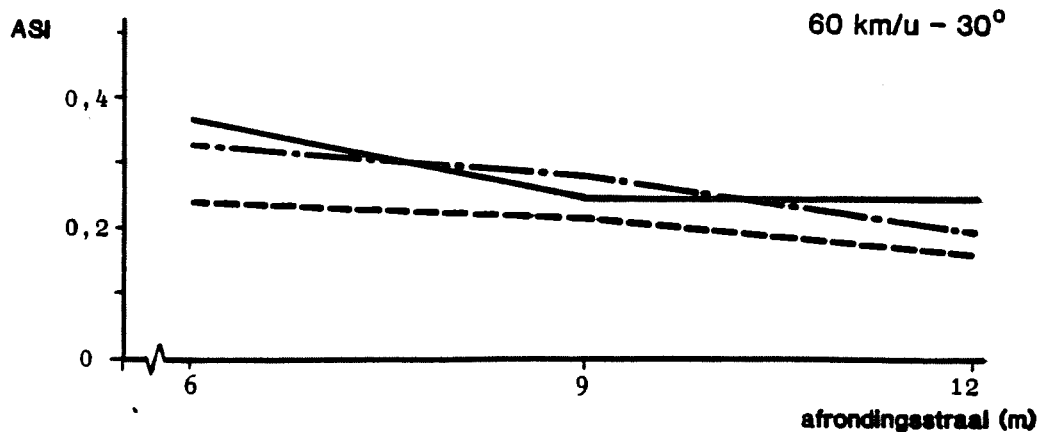
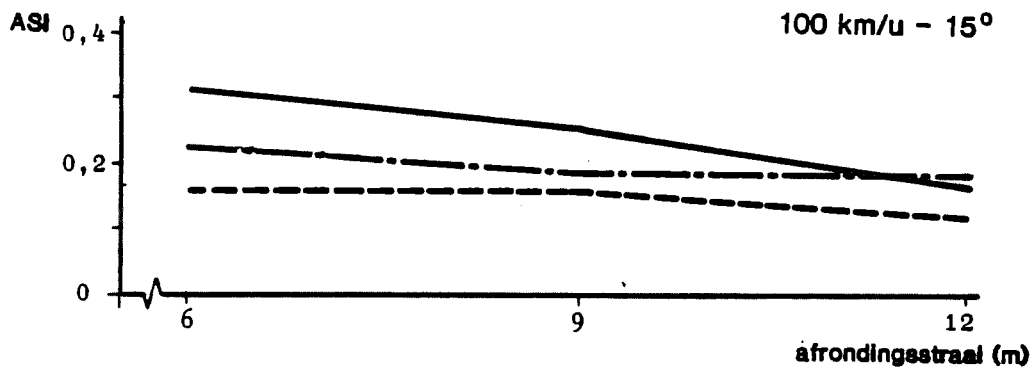
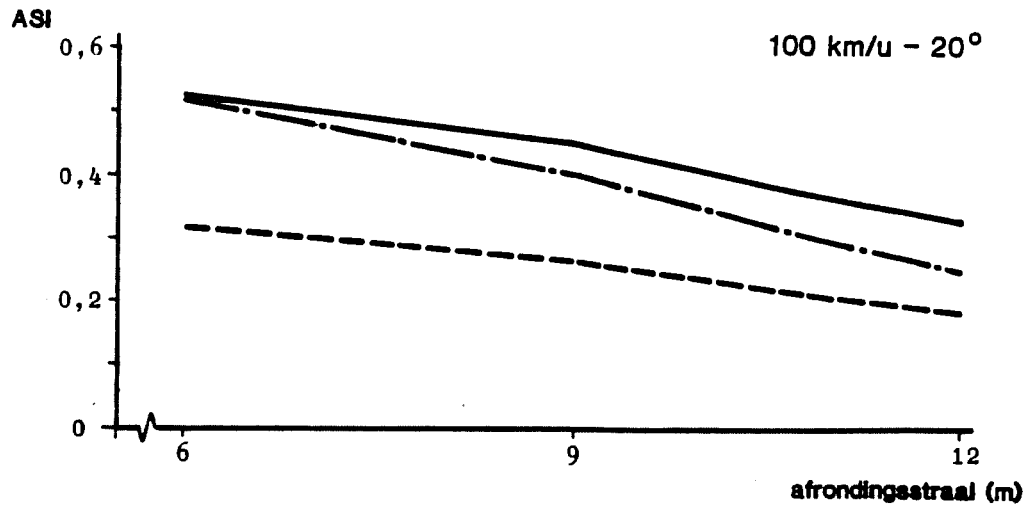
Afbeelding 1D. Baan van het voertuig bij de proeven op ware schaal TA10, TA11 en TA12.

VOERTUIGTYPE

TALUD

- zwaar
- - - - - middelzwaar
- · - · - · licht

Helling: 1 : 3
Hoogte: 5 m

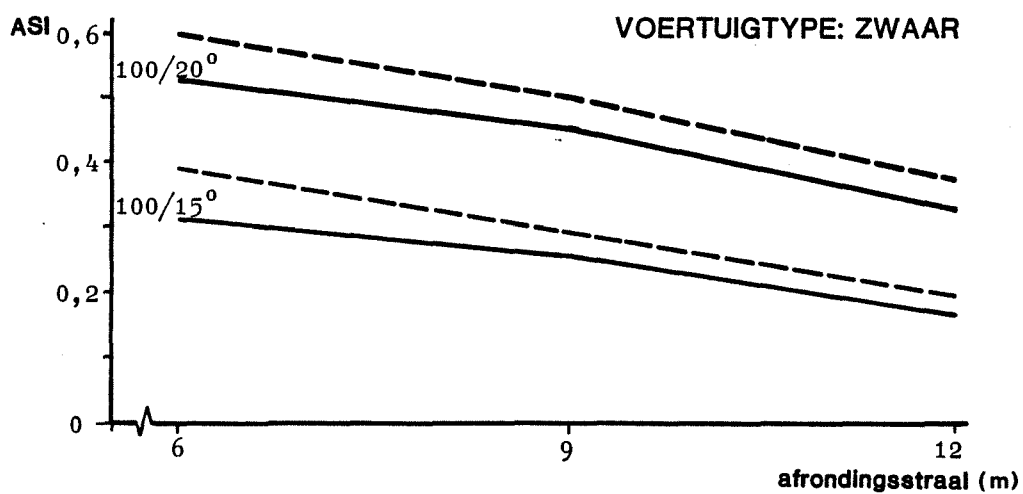
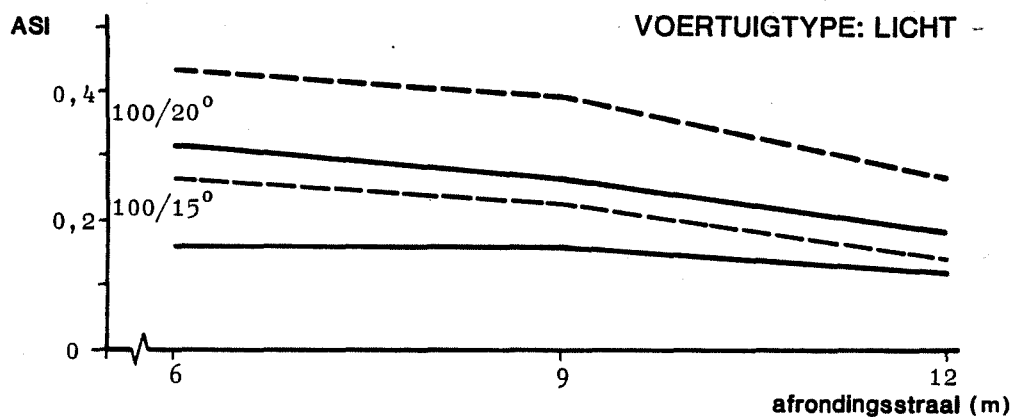
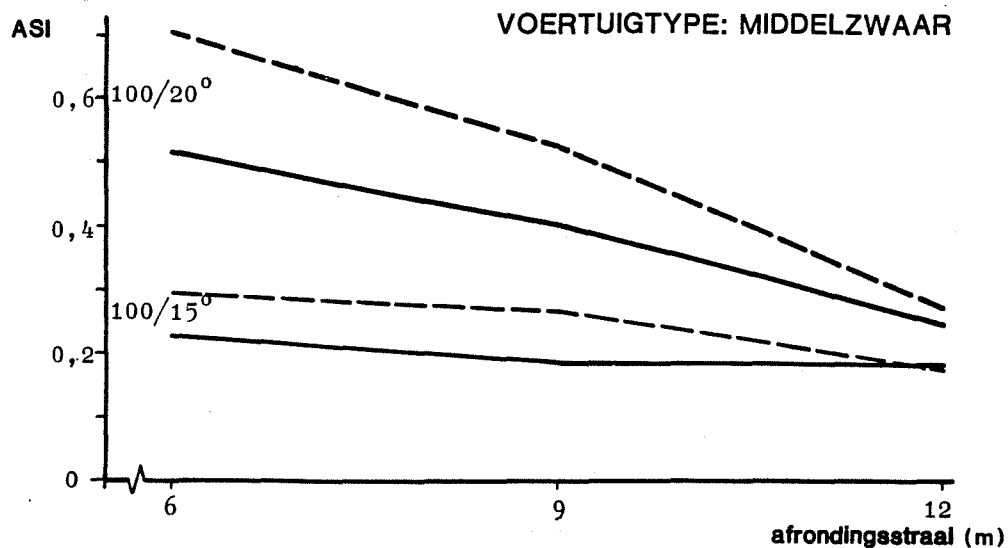


Afbeelding 2. Relatie tussen de ASI-waarden en afrondingsstraal voor drie voertuigtypen en drie inrijcondities op een talud met een helling van 1:3 en een hoogte van 5 m.

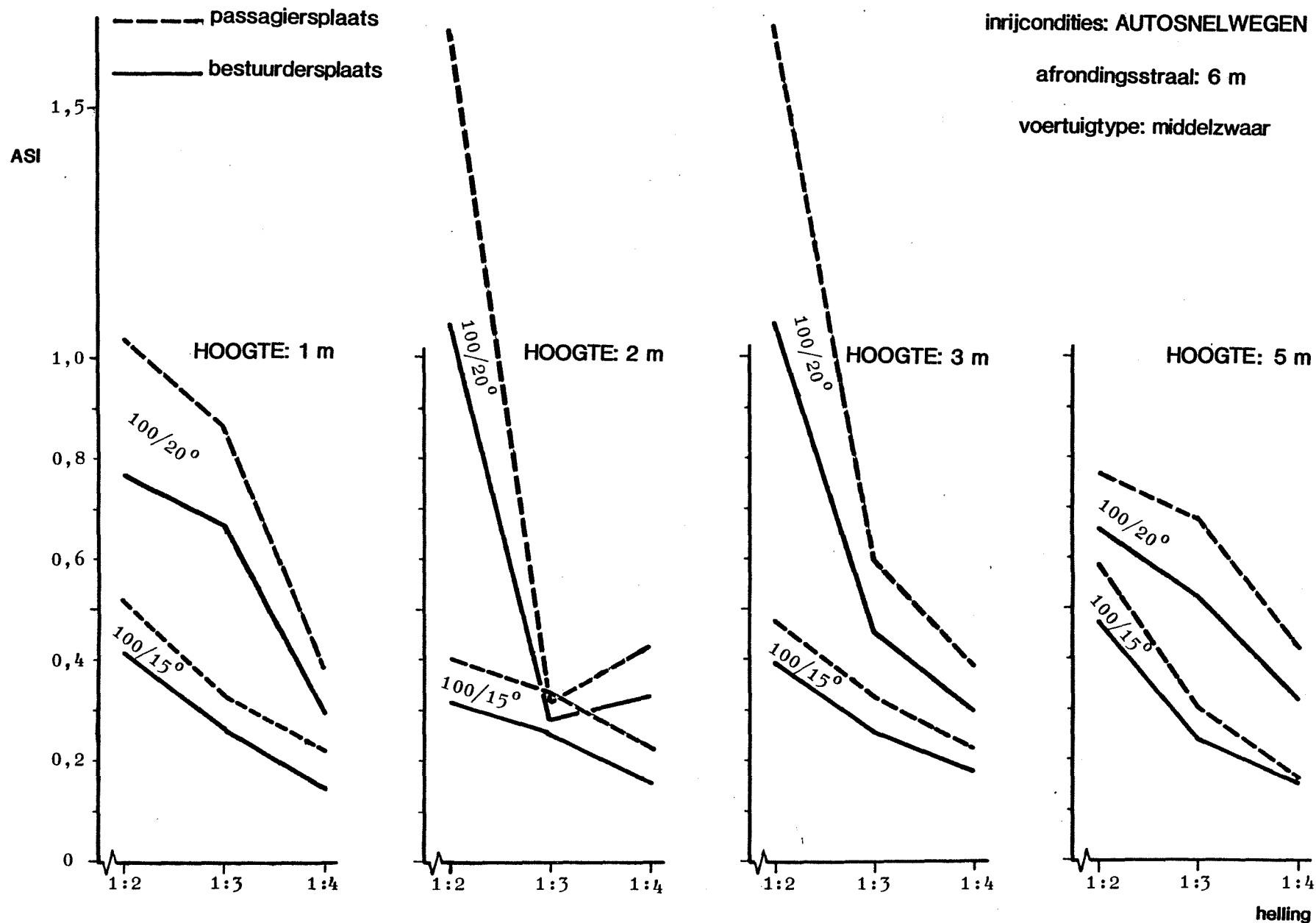
--- passagiersplaats
— bestuurdersplaats

TALUD Helling: 1 : 3

Hoogte: 5 m



Afbeelding 3. Relatie tussen de ASI-waarden (bestuurdersplaats en een passagiersplaats) en afrondingsstraal voor drie voertuigtypen en twee inrijcondities op een talud met een helling van 1:3 en een hoogte van 5 m.



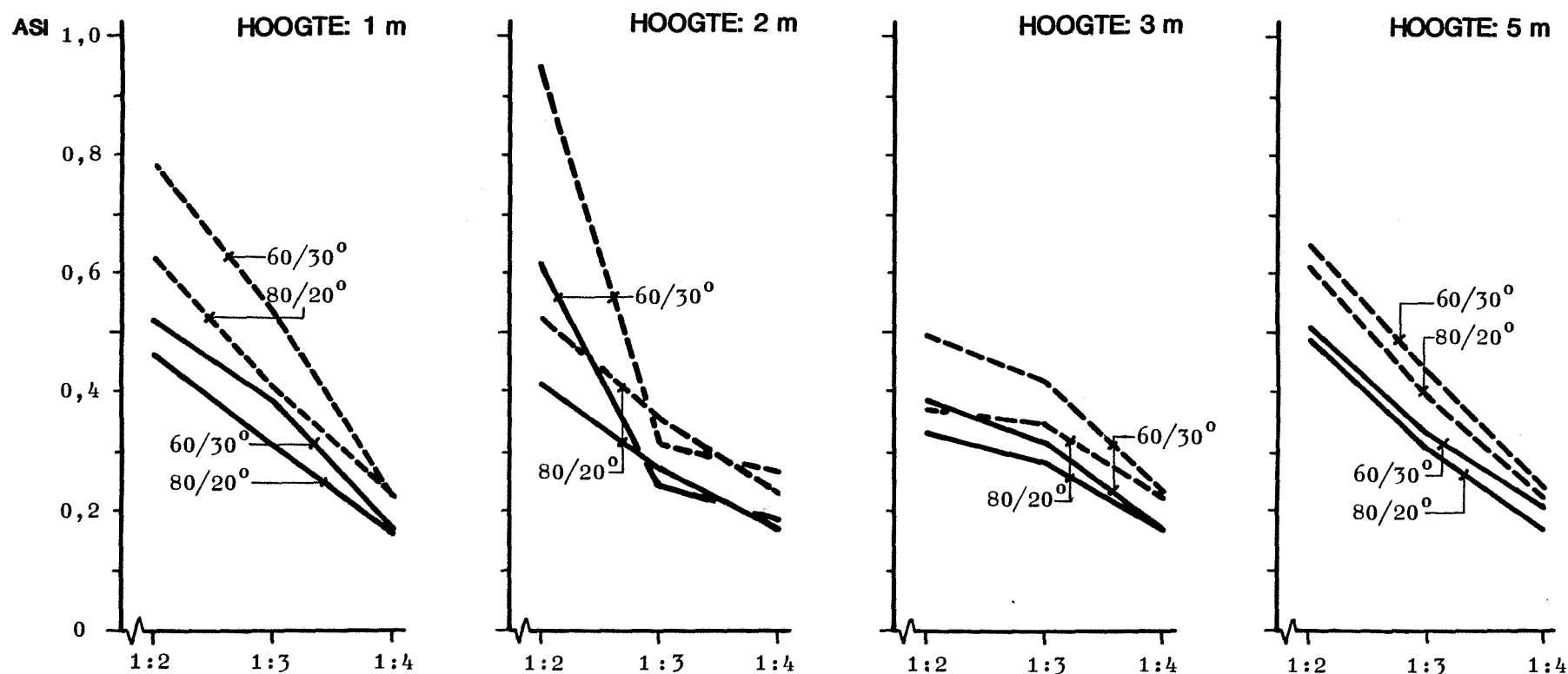
Afbeelding 4a. Relatie tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 6 m voor de taludhoogtes 1, 2, 3 en 5 en voor de inrijcondities van autosnelwegen met het personenautotype middelzwaar.

----- passagiersplaats
 ————— bestuurdersplaats

inrijcondities: NIET-AUTOSNELWEGEN

afrondingsstraal: 6 m

voertuigtype: middelzwaar



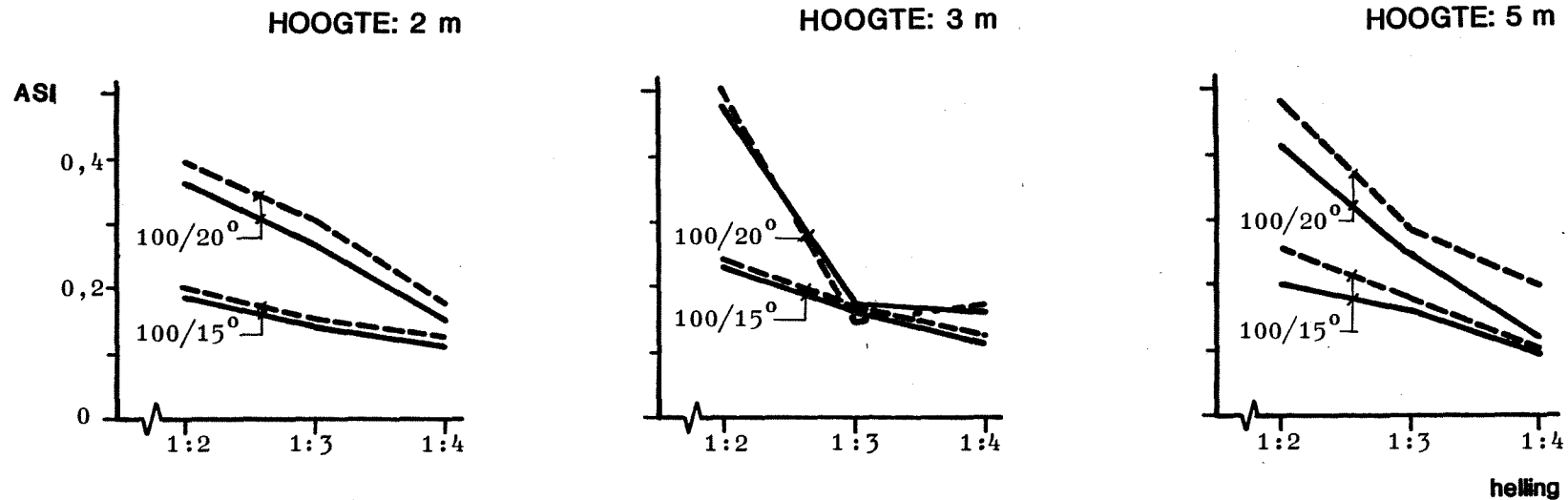
Afbeelding 4b. Relatie tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 6 m voor de taludhoogtes 1, 2, 3 en 5 en voor de inrijcondities van niet-autosnelwegen met het personenautotype middelzwaar.

----- passagiersplaats
 _____ bestuurdersplaats

inrijcondities: AUTOSNELWEGEN

afrondingsstraal: 12 m

voertuigtype: middelzwaar



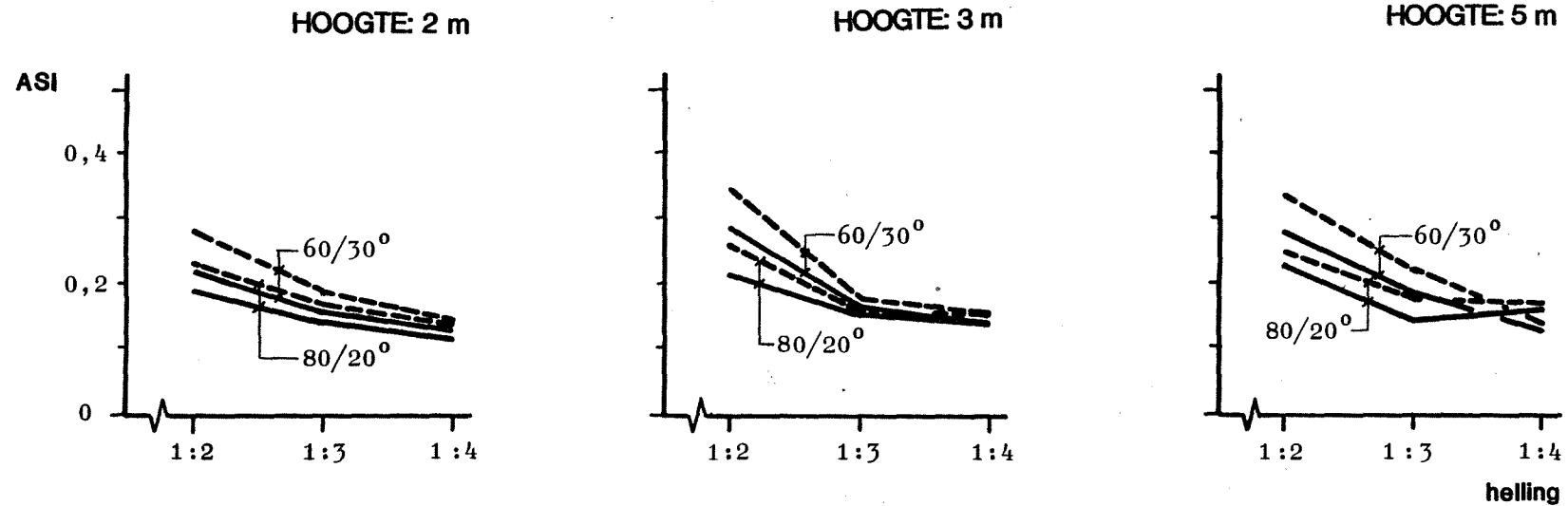
Afbeelding 4c. Relatie tussen de ASI-waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 12 m voor de taludhoogtes 2, 3 en 5 m en voor de inrijcondities van autosnelwegen met het personenautotype middelzwaar.

----- passagiersplaats
 _____ bestuurdersplaats

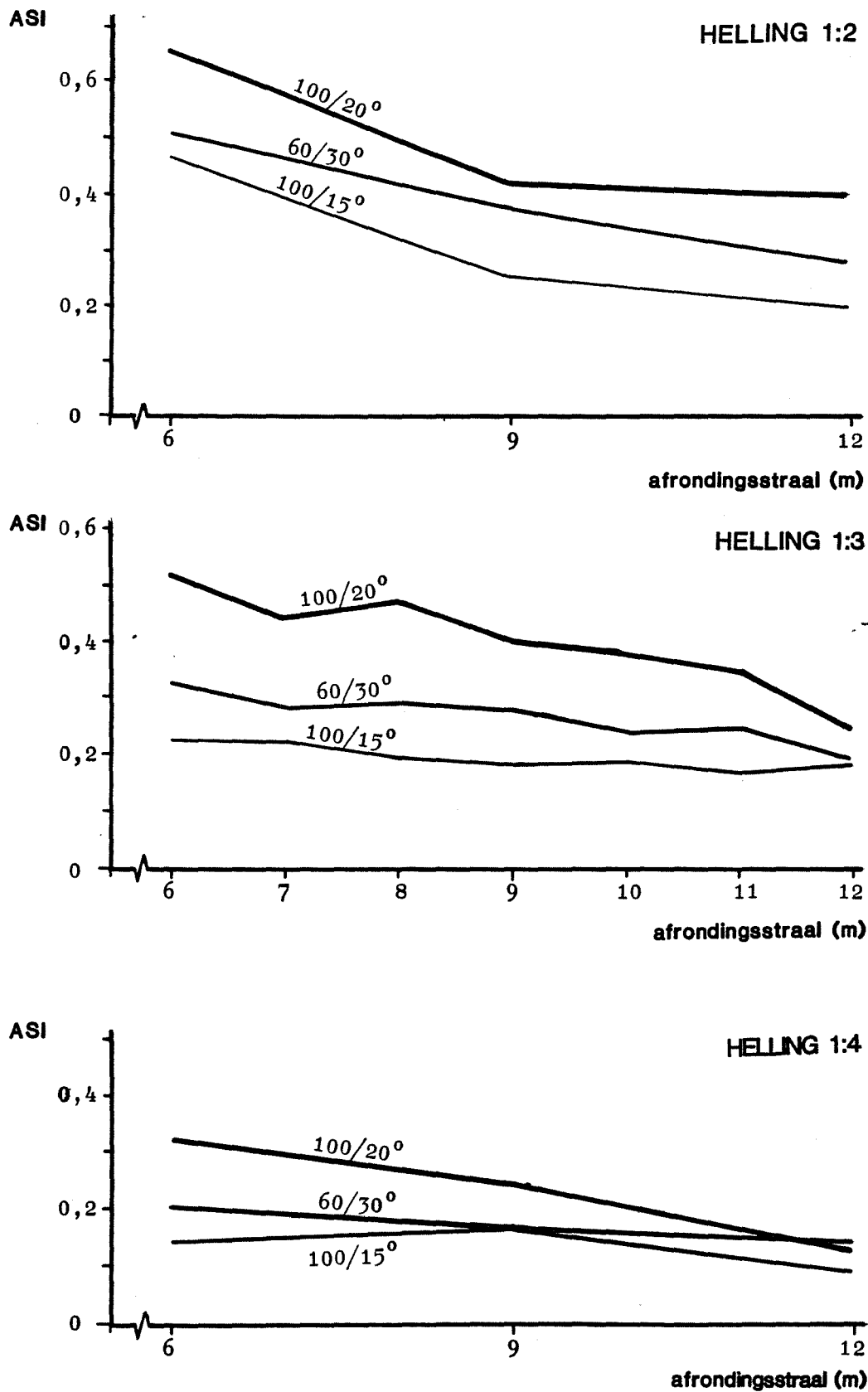
inrijcondities: NIET-AUTOSNELWEGEN

afrondingsstraal: 12 m

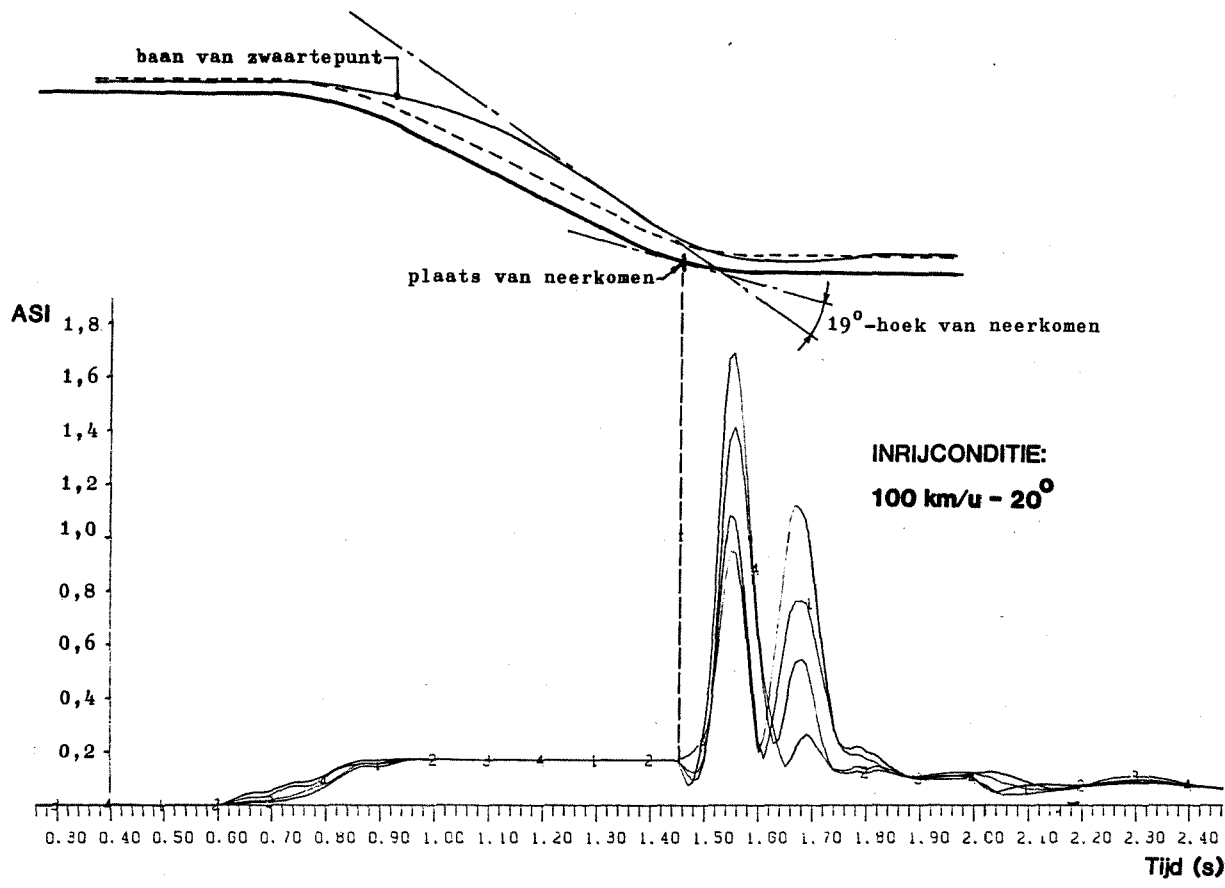
voertuigtype: middelzwaar



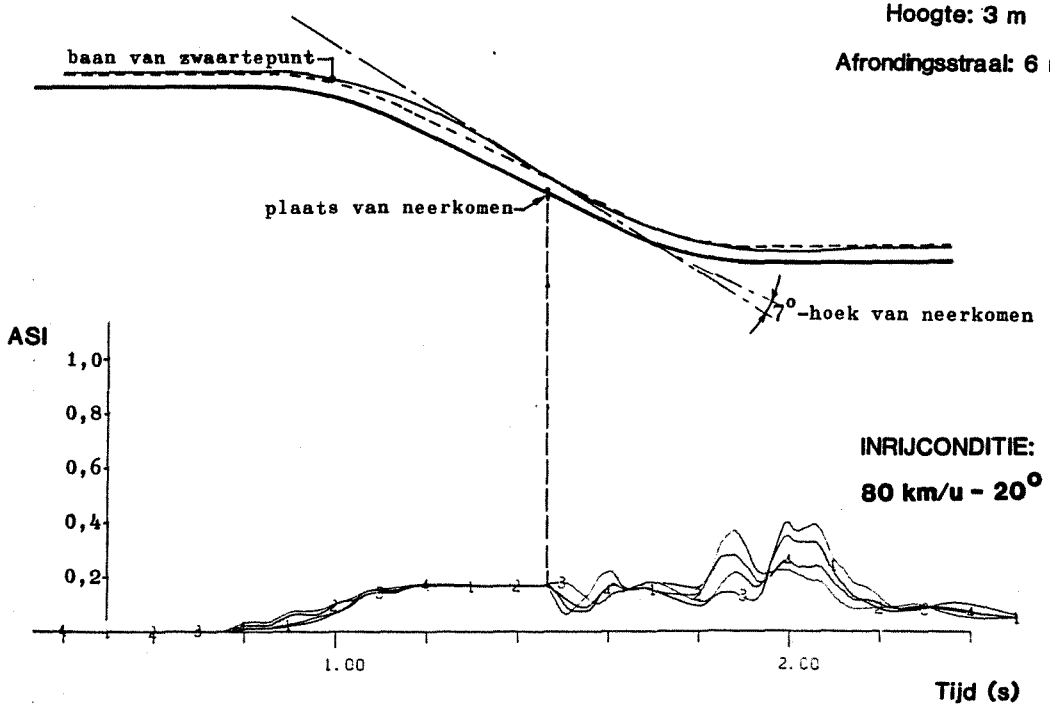
Afbeelding 4d. Relatie tussen de ASI waarden op de bestuurdersplaats plus een passagiersplaats en de helling met een afrondingsstraal van 12 m voor de taludhoogtes 2, 3 en 5 en voor de inrijcondities van niet-autosnelwegen met het personenautotype middelzwaar.



Afbeelding 5. Relatie tussen de ASI-waarden en afrondingsstraal voor de taludhellingen 1:2, 1:3 en 1:4 met een hoogte van 5 m voor drie inrijcondities met het personenautotype middelzwaar.



DWARSDOORSNEDE TALUD
 Helling 1 : 2
 Hoogte: 3 m
 Afrondingsstraal: 6 m



Afbeelding 6. Baan van het voertuig en plaats van neerkomen op een dwarsdoorsnede van het talud met het verloop van de ASI-waarde tegen de tijd.

TABELLEN 1 T/M 8

Tabel 1. Gegevens van de proeflocaties voor de proeven op ware schaal.

Tabel 2. Geplande en gerealiseerde proevenprogramma van de proeven op ware schaal.

Tabel 3. Overzicht van de proefgegevens en resultaten van de uitgevoerde proeven op ware schaal.

Tabel 4. Gegevens voor de verificatie van de mathematische simulaties aan de hand van de resultaten van de proeven op ware schaal. Als proefvoertuig is een middelzware personenauto gebruikt met een massa van ruim 800 kg.

Tabel 5. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met een hoogte van 5 m en een helling van 1:3 voor de voertuigtypen licht, middelzwaar en zwaar.

Tabel 6A. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 6 m en inrijcondities voor autosnelwegen.

Tabel 6B. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 6 m en inrijcondities voor niet-autosnelwegen.

Tabel 6C. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 12 m en inrijcondities voor autosnelwegen.

Tabel 6D. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 12 m en inrijcondities voor niet-autosnelwegen.

Tabel 7. Resultaten van mathematische simulaties voor de hellingen 1:2, 1:3 en 1:4 van taluds met diverse afrondingsstralen en een hoogte van 5 m voor het voertuigtype middelzwaar (vervolg).

Tabel 8. Resultaten van simulaties met het inzittendenmodel vergeleken met ASI-waarden van het voertuigmodel voor drie taludconfiguraties (afrondingsstraal 6 m) en twee inrijcondities.

KENMERKEN	LOCATIE 1	LOCATIE 2
Locatie*	A 15 ter hoogte van A 52	A 15 ter hoogte spoorwegviaduct Arnhem-Nijmegen
Helling	1:4	1:2,2
Hoogte	7 m	4 m
Afrondingsstraal schouder	-	-
Afrondingsstraal voet	ca 12 m	ca 12 m
Grasbegroeiing	ja	ja
Ondergrond	harde klei	harde klei
Vlakheid	redelijk vlak	redelijk vlak
Te realiseren geschatte snelheden bij een inrijhoek van 30 ^o **	80-90 km/u	60-70 km/u

* Voor de situatieschetsen zie Bijlage 4

** Gebaseerd op de lengte van de aan te leggen aanloopbaan.

Tabel 1. Gegevens van de proeflocaties voor de proeven op ware schaal.

INRIJHOEK	STUURWIEL ¹⁾	SNELHEIDSCATEGORIE		
		70-80 km/u	80-90 km/u	90-100 km/u
<u>LOCATIE 1</u>				
20°	250N	-	Ta9(87 km/u)	<input type="checkbox"/> TA9
	vast	-	TA8(88 km/u)	
30°	250N	TA12*(75 km/u)	TA11*(82 km/u)	
	vast	-	TA10*(84 km/u)	
<u>LOCATIE 2</u>				
10°	250N	TA5*(79 km/u)	TA6*(84 km/u)	<input type="checkbox"/> TA7
	vast	-	TA7*(86 km/u)	
20°	250N	TA1*(72 km/u)	-	
	vast	TA2(75 km/u)	TA3(85 km/u)	

1) Stuurwiel geheel vast of met een breekkoord dat bezwijkt bij een belasting boven 250N.

* Grasmatt nat

Geplande proef. Wegens te geringe capaciteit van de aandrijfunit, is de proef in een lagere snelheids categorie terecht gekomen.

Tabel 2. Geplande en gerealiseerde proevenprogramma van de proeven op ware schaal.

GEGEVENS PROEVEN OP WARE SCHAAL

RESULTATEN

Proef- nummer	Talud			Inrijcondities			Rol- hoek (°)	ASI	Breekkoord bezweken 1)
	Helling	Hoogte (m)	Toestand gras	Hoek (°)	Snelh. (km/u)	Stuur- wiel ¹⁾			
<u>LOCATIE 2</u>									
TA 1	1:2,2	4	nat	20	72	250N	45	0,6	ja
TA 2	1:2,2	4	droog	20	75	vast	49	1,0	-
TA 3	1:2,2	4	droog	20	85	vast	49	1,6	-
TA 5	1:2,2	4	nat	10	79	250N	37	0,2	nee
TA 6	1:2,2	4	nat	10	84	250N	37	0,2	ja
TA 7	1:2,2	4	droog	10	86	250N	36	0,2	ja
<u>LOCATIE 1</u>									
TA 8	1:4	7	droog	20	88	vast	18	0,3	-
TA 9	1:4	7	droog	20	87	250N	18	0,3	nee
TA 10	1:4	7	nat	30	84	vast	9	0,4	-
TA 11	1:4	7	nat	30	82	250N	11	0,4	nee
TA 12	1:4	7	nat	30	75	250N	15	0,4	nee

1) Stuurwiel geheel vast of met een breekkoord dat bezwijkt bij een belasting boven 250 N.

Beproevingsvoertuig: Opel Kadett, B-type; massa 805-830 kg.

Tabel 3. Overzicht van de proefgegevens en resultaten van de uitgevoerde proeven op ware schaal.

PROEF - NUMMER	TALUD	INRIJCONDITIES		RESULTATEN						
		Helling	Hoek (°)	Snelheid (km/u)	Max. rolhoek proe-ven(°) sim. (°)		ASI ¹⁾ proe-ven sim.		Afwijkingen van de baan van het voertuig dwarsafwijking ²⁾ afgelegde weg ³⁾ abs.(m) % (m)	
TA 1	1 : 2,2	20	72	45	44	0,6	0,7	-2,6	-7,4	35
TA 2			75	49	43	1,0	1,2	-0,5	-1,4	35
TA 3			85	49	42	1,6	1,5	-1,4	-4,0	35
TA 5	10	79	79	37	38	0,2	0,1	-3,5	-6,4	55
TA 6			84	37	39	0,2	0,1	-0,7	-1,3	55
TA 7			86	36	40	0,2	0,1	+0,9	+1,6	55
TA 12			1 : 4	30	75	15	17	0,4	0,2	-0,6
TA 11	82	11			18	0,4	0,2	-2,4	-3,2	75
TA 10	84	9			18	0,4	0,2	-2,9	-3,9	75
TA 9	20	87	87	18	18	0,3	0,2	+5,0	+5,6	90
TA 8			88	18	18	0,3	0,2	+6,1	+6,8	90

- 1) De ASI is het gemiddelde van vier ASI-waarden berekend van vier versnellingsopnemers die waren gemonteerd op een frame in de langsas van het proefvoertuig ter hoogte van de achterbank.
- 2) Het verschil in dwarsafstand tussen de simulaties en full scale proeven na een gegeven afgelegde weg. De afwijking is als een geprojecteerde afstand op de controlelijn (zie Afbeelding 1) gemeten. Negatieve waarde: een afwijking in de richting van het oplopende talud; positieve waarde: van het talud af. Het gegeven percentage is de dwarsafwijking gerelateerd aan de afgelegde weg van het voertuig.
- 3) De afstand tussen het nulpunt op de schouder van het talud en de controlelijn.

Tabel 4. Gegevens voor de verificatie van de mathematische simulaties aan de hand van de resultaten van de proeven op ware schaal. Als proefvoertuig is een middelzware personenauto gebruikt met een massa van ruim 800 kg.

TALUD	INRIJCONDITIES		RESULTATEN						
Afron- dings- straal	Snel- heid (km/u)	Inrij- hoek (°)	Max. rol- hoek (°)	Blijvend ¹⁾ contact voorwielen		Max. ASI Best. Pass. 2)		Uitrij- condities ³⁾ maaiveld hoek snelheid (°) (km/u)	
				Li.	Re.				
VOERTUIGTYPE: LICHT									
6	100	15	20	ja	-	0.17	0.26	16	105
6	100	20	24	-	-	0.32	0.43	24	105
6	60	30	19	-	-	0.24	0.35	31	69
9	100	15	20	-	-	0.16	0.23	15	105
9	100	20	23	-	-	0.27	0.39	23	105
9	60	30	19	-	-	0.22	0.33	32	68
12	100	15	20	ja	ja	0.12	0.14	15	105
12	100	20	19	ja	-	0.18	0.27	20	105
12	60	30	18	ja	-	0.16	0.17	29	68
VOERTUIGTYPE: MIDDELZWAAR									
6	100	15	20	-	-	0.23	0.30	13	105
6	100	20	22	-	-	0.52	0.70	23	105
6	60	30	19	-	-	0.33	0.43	30	68
9	100	15	20	-	-	0.19	0.27	17	105
9	100	20	22	-	-	0.40	0.53	25	105
9	60	30	18	-	-	0.28	0.36	32	69
12	100	15	19	ja	ja	0.18	0.18	18	105
12	100	20	19	ja	-	0.25	0.27	23	105
12	60	30	17	ja	-	0.19	0.22	27	69
VOERTUIGTYPE: ZWAAR									
6	100	15	22	ja	-	0.31	0.39	16	105
6	100	20	24	-	-	0.53	0.60	28	105
6	60	30	19	-	-	0.37	0.41	32	69
9	100	15	21	ja	ja	0.25	0.29	16	105
9	100	20	23	-	-	0.45	0.50	24	105
9	60	30	19	-	-	0.25	0.31	34	69
12	100	15	20	ja	ja	0.16	0.20	14	105
12	100	20	20	ja	-	0.33	0.38	24	106
12	60	30	18	ja	ja	0.25	0.28	32	69

1) Indien de voorwielen loskomen is een "-" aangegeven

2) De hoogste waarde van een van de drie passagiersplaatsen

3) Geregistreerd op het moment dat het voertuig geheel op het maaiveld is beland

Tabel 5. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met een hoogte van 5 m en een helling van 1:3 voor de voertuigtypen licht, middelzwaar en zwaar.

TALUD		INRIJCONDITIES			RESULTATEN					
Hoogte	Hel- ling	Snel- heid	Inrij- hoek	Max. rol- hoek	Blijvend ¹⁾ contact voorwielen		Max. ASI Best. Pass. 2)		Uitrij- condities ³⁾ maaiveld hoek snelh.	
(m)		(km/u)	(°)	(°)	Li.	Re.			(°)	(km/u)
1	1:2	100	15	23	-	-	0.42	0.53	20	101
1	1:2	100	20	21	-	-	0.77	1.03	24	97
1	1:3	100	15	21	-	-	0.26	0.33	21	101
1	1:3	100	20	19	-	-	0.67	0.86	31	98
1	1:4	100	15	21	ja	-	0.15	0.22	19	101
1	1:4	100	20	19	-	-	0.30	0.38	25	101
2	1:2	100	15	29	-	-	0.32	0.40	18	102
2	1:2	100	20	29	-	-	1.07	1.67	29	101
2	1:3	100	15	21	-	-	0.25	0.33	21	102
2	1:3	100	20	23	-	-	0.28	0.34	26	102
2	1:4	100	15	16	ja	-	0.16	0.22	17	102
2	1:4	100	20	17	-	-	0.33	0.43	24	102
3	1:2	100	15	29	-	-	0.40	0.48	18	103
3	1:2	100	20	34	-	-	1.07	1.66	22	95
3	1:3	100	15	21	-	-	0.25	0.33	20	103
3	1:3	100	20	22	-	-	0.46	0.60	26	103
3	1:4	100	15	16	-	-	0.18	0.23	17	104
3	1:4	100	20	17	-	-	0.30	0.34	22	104
5	1:2	100	15	30	-	-	0.47	0.58	23	105
5	1:2	100	20	36	-	-	0.65	0.77	30	104
5	1:3	100	15	20	-	-	0.23	0.30	13	105
5	1:3	100	20	22	-	-	0.52	0.70	23	105
5	1:4	100	15	16	-	-	0.15	0.15	13	104
5	1:4	100	20	17	-	-	0.31	0.41	21	104

1) Indien de voorwielen loskomen is een "-" aangegeven

2) De hoogste waarde van een van de drie passagiersplaatsen

3) Geregistreerd op het moment dat het voertuig geheel op het maaiveld beland

Tabel 6A. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 6 m en inrijcondities voor autosnelwegen.

TALUD		INRIJCONDITIES		RESULTATEN						
Hoog- te	Hel- ling	Snel- heid	Inrij- hoek	Max. rolhoek	Blijvend ¹⁾ contact <u>voorwielen</u>		Max. ASI Best. Pass. 2)		Uitrij- condities ³⁾ <u>maaiveld</u> hoek snelh.	
(m)		(km/u)	(°)	(°)	Li.	Re.			(°)	(km/u)
1	1:2	80	20	20	-	-	0.46	0.62	22	83
1	1:2	60	30	16	-	-	0.52	0.78	33	60
1	1:3	80	20	20	-	-	0.31	0.40	27	81
1	1:3	60	30	15	-	-	0.38	0.53	36	62
1	1:4	80	20	20	-	-	0.16	0.22	21	81
1	1:4	60	30	15	-	-	0.17	0.22	33	62
2	1:2	80	20	27	-	-	0.41	0.53	27	82
2	1:2	60	30	21	-	-	0.62	0.95	34	61
2	1:3	80	20	20	-	-	0.27	0.35	26	83
2	1:3	60	30	19	-	-	0.24	0.32	35	64
2	1:4	80	20	15	-	-	0.17	0.23	22	83
2	1:4	60	30	14	-	-	0.18	0.26	31	64
3	1:2	80	20	28	-	-	0.33	0.37	28	84
3	1:2	60	30	24	-	-	0.38	0.49	39	66
3	1:3	80	20	20	-	-	0.28	0.35	25	84
3	1:3	60	30	19	-	-	0.31	0.41	35	65
3	1:4	80	20	15	-	-	0.17	0.22	23	84
3	1:4	60	30	15	-	-	0.17	0.23	31	64
5	1:2	80	20	29	-	-	0.49	0.61	30	87
5	1:2	60	30	25	-	-	0.51	0.65	40	68
5	1:3	80	20	20	-	-	0.30	0.39	20	86
5	1:3	60	30	19	-	-	0.33	0.43	30	68
5	1:4	80	20	15	-	-	0.17	0.22	27	87
5	1:4	60	30	14	-	-	0.21	0.24	18	68

1) Indien de voorwielen loskomen is een "-" aangegeven

2) De hoogste waarde van een van de drie passagiersplaatsen

3) Geregistreerd op het moment dat het voertuig geheel op het maaiveld is beland

Tabel 6B. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 6 m. en inrijcondities voor voor niet-autosnelwegen

TALUD		INRIJCONDITIES			RESULTATEN					
Hoogte	Hel- ling	Snel- heid	Inrij- hoek	Max. rol- hoek	Blijvend ¹⁾ contact <u>voorwielen</u>		Max. ASI Best. Pass. 2)		Uitrij- condities ³⁾ <u>maaiveld</u> hoek snelh.	
(m)		(km/u)	(°)	(°)	Li.	Re.			(°)	(km/u)
2	1:2	100	15	23	-	-	0.18	0.19	20	102
2	1:2	100	20	23	-	-	0.36	0.39	26	102
2	1:3	100	15	19	ja	ja	0.14	0.15	18	103
2	1:3	100	20	19	ja	-	0.27	0.31	24	103
2	1:4	100	15	15	ja	-	0.11	0.12	16	102
2	1:4	100	20	14	ja	-	0.15	0.17	21	102
3	1:2	100	15	27	-	-	0.23	0.24	21	104
3	1:2	100	20	27	-	-	0.47	0.50	27	103
3	1:3	100	15	19	ja	ja	0.16	0.15	18	104
3	1:3	100	20	19	ja	-	0.16	0.15	24	104
3	1:4	100	15	15	ja	-	0.11	0.12	16	104
3	1:4	100	20	14	ja	-	0.16	0.17	22	104
5	1:2	100	15	28	ja	-	0.20	0.26	22	105
5	1:2	100	20	28	-	-	0.40	0.48	30	105
5	1:3	100	15	19	ja	ja	0.18	0.18	18	105
5	1:3	100	20	19	ja	-	0.25	0.27	23	106
5	1:4	100	15	15	ja	-	0.09	0.10	16	105
5	1:4	100	20	14	ja	-	0.13	0.13	20	106

1) Indien de voorwielen loskomen is een "-" aangegeven

2) De hoogste waarde van een van de drie passagiersplaatsen

3. Geregistreerd op het moment dat het voertuig geheel op het maaiveld is beland

Tabel 6C. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 12 m en inrijcondities voor autosnelwegen.

TALUD		INRIJCONDITIES			RESULTATEN					
Hoogte	Hel- ling	Snel- heid	Inrij- hoek	Max. rol- hoek	Blijvend ₁₎ contact voorwielen		Max. ASI Best. Pass. 2)		Uitrij- condities ₃₎ maaiveld hoek snelh.	
(m)		(km/u)	(°)	(°)	Li.	Re.			(°)	(km/u)
2	1:2	80	20	23	ja	-	0.19	0.23	24	83
2	1:2	60	30	21	-	-	0.22	0.27	34	64
2	1:3	80	20	19	ja	-	0.15	0.16	22	83
2	1:3	60	30	18	ja	-	0.16	0.19	32	70
2	1:4	80	20	15	ja	-	0.12	0.14	20	83
2	1:4	60	30	13	ja	-	0.12	0.13	15	70
3	1:2	80	20	26	-	-	0.22	0.26	25	84
3	1:2	60	30	24	-	-	0.29	0.35	34	65
3	1:3	80	20	19	ja	-	0.16	0.18	22	84
3	1:3	60	30	17	ja	-	0.16	0.18	32	66
3	1:4	80	20	15	ja	-	0.14	0.15	18	84
3	1:4	60	30	13	ja	-	0.14	0.15	28	66
5	1:2	80	20	27	ja	-	0.23	0.27	23	86
5	1:2	60	30	25	-	-	0.28	0.34	33	68
5	1:3	80	20	19	ja	-	0.16	0.19	21	86
5	1:3	60	30	17	ja	-	0.19	0.22	27	69
5	1:4	80	20	16	ja	-	0.16	0.17	19	84
5	1:4	60	30	13	ja	-	0.13	0.14	28	67

- 1) Indien de voorwielen loskomen is een "-" aangegeven
- 2) De hoogste waarde van een van de drie passagiersplaatsen
- 3) Geregistreerd op het moment dat het voertuig geheel op het maaiveld beland

Tabel 6D. Resultaten van mathematische simulaties met taluds met afrondingsstralen van 12 m en inrijcondities voor niet-autosnelwegen.

TALUD		INRIJCONDITIES		RESULTATEN					
Afron- dings- straal	Snel- heid (km/u)	Inrij- hoek (°)	Max. rol- hoek (°)	Blijvend ¹⁾ contact <u>voorwielen</u>		Max. ASI Best. Pass. 2)		Uitrij- condities ³⁾ <u>maaiveld</u> hoek snelheid (°) (km/u)	
				Li.	Re.				
<u>HELLING 1:2</u>									
6	100	15	30	-	-	0.47	0.58	23	105
6	100	20	36	-	-	0.65	0.77	30	104
6	60	30	25	-	-	0.51	0.65	40	68
9	100	15	27	ja	-	0.26	0.29	22	105
9	100	20	28	-	-	0.42	0.50	29	105
9	60	30	26	-	-	0.38	0.46	37	69
12	100	15	28	ja	-	0.20	0.26	22	105
12	100	20	28	-	-	0.40	0.48	30	105
12	60	30	25	-	-	0.28	0.34	33	68
<u>HELLING 1:3 (zie opmerking 4)</u>									
7	100	15	21	-	-	0.23	0.30	17	105
7	100	20	24	-	-	0.45	0.57	26	105
7	60	30	19	-	-	0.29	0.40	32	69
8	100	15	20	-	-	0.20	0.28	16	105
8	100	20	22	-	-	0.48	0.63	25	105
8	60	30	18	-	-	0.30	0.40	32	69
10	100	15	19	-	-	0.19	0.24	17	105
10	100	20	22	-	-	0.38	0.48	25	105
10	60	30	19	-	-	0.25	0.32	32	69
11	100	15	19	ja	-	0.17	0.23	18	105
11	100	20	21	-	-	0.35	0.42	24	105
11	60	30	18	-	-	0.25	0.29	32	69

Tabel 7. Deel 1.

TALUD	INRIJCONDITIES		RESULTATEN						
Afrondings- straal	Snel- heid (km/u)	Inrij- hoek (°)	Max. rol- hoek (°)	Blijvend ¹⁾ contact voorwielen		Max. ASI Best. Pass. 2)		Uitrij- condities ³⁾ maaiveld hoek snelheid (°) (km/u)	
				Li.	Re.				
<u>HELLING 1:4</u>									
6	100	15	16	-	-	0.15	0.15	13	104
6	100	20	17	-	-	0.31	0.41	21	104
6	60	30	14	-	-	0.21	0.24	18	60
9	100	15	16	ja	-	0.17	0.19	9	102
9	100	20	16	-	-	0.24	0.27	16	104
9	60	30	16	ja	-	0.20	0.22	21	67
12	100	15	15	ja	ja	0.09	0.10	16	105
12	100	20	14	ja	-	0.13	0.13	20	106
12	60	30	13	ja	-	0.13	0.14	28	69

- 1) Indien de voorwielen loskomen is een "-" aangegeven
- 2) De hoogste waarde van een van de drie passagiersplaatsen
- 3) Geregistreerd op het moment dat het voertuig geheel op het maaiveld is beland
- 4) Voor de waarden van de afrondingsstraal van 6, 9 en 12 wordt verwezen naar Tabel 5

Tabel 7. Resultaten van mathematische simulaties voor de hellingen 1:2, 1:3 en 1:4 van taluds met diverse afrondingsstralen en een hoogte van 5 m voor het voertuigtype middelzwaar.

TALUD		INRIJCONDITIES		RESULTATEN		
Hoogte (m)	Helling	Snelheid (km/u)	Hoek (°)	INZITTENDEN- MODEL Hoofdversnelling (g)	1)	VOERTUIG- MODEL ASI-waarde 2)
2	1:2	100	20	23.4		1.67
3	1:2	100	20	32.8		1.66
3	1:3	100	15	2.2		0.33

1) De resulterende maximale hoofdversnelling van de voorpassagier

2) De maximale ASI-waarde van de voorpassagier

Tabel 8. Resultaten van simulaties met het inzittendenmodel vergeleken met ASI-waarden van het voertuigmodel voor drie taludconfiguraties (afrondingsstraal 6 m) en twee inrijcondities.

BIJLAGEN 1 T/M 5

Bijlage 1. Het mathematische model VEDYAC.

Bijlage 2. Voertuigkarakteristieken en hun cumulatieve verdelingen.

Bijlage 3. Het ASI-criterium.

Bijlage 4. Locaties van de proeven op ware schaal.

Bijlage 5. Vergelijking tussen een mathematische simulatie en een proef op ware schaal.

BIJLAGE 1

HET MATHEMATISCHE MODEL VEDYAC

1. Model van het voertuig

De naam van het VEDYAC-model is afgeleid van VEHICLE DYNAMICS AND CRASH DYNAMICS.

VEDYAC is in principe een voertuigmodel, waarbij de mogelijkheden om het voertuig te definiëren zo ruim zijn dat het geschikt is voor de simulatie van een veelheid van bewegende (en interagerende) lichamen.

Binnen een simulatie kunnen twee of meer zogenaamde systemen worden gedefinieerd, die kunnen bewegen zoals een voertuig, of "vast" kunnen zijn zoals een wegoppervlak of een obstakel. Die systemen bestaan uit onvervormbare lichamen waaraan, willekeurig, subsystemen van de volgende aard kunnen worden bevestigd:

- Vlakstructuren, die ofwel een onbegrensd vlak beschrijven, dan wel door een aantal rechte lijnen is begrensd. Elk vlak kent een afzonderlijke hardheid en wrijving. De vlakken worden gebruikt voor de beschrijving van weinig of niet vervormbare delen van een systeem.
 - Cylinders, die, in interactie met vlakken, kunnen vervormen en op een "pneumatische" manier, via druk- en oppervlakteverandering, tot interactiekrachten leiden. De cylinders zijn eenvoudig en goed toepasbaar in gevallen waarin krachten en vervormingen geen al te grote waarden zullen krijgen.
 - Vervormbare, op eindige elementen gebaseerde structuren, die voor grotere vervormingen gebruikt kunnen worden. De elementen zijn vrij eenvoudige vierhoekige elementen die bestaan uit:
 - a. staven die uitsluitend op trek en druk worden belast en elastisch en plastisch vervormen;
 - b. liggers die daarnaast ook elastische en plastische buiging kunnen ondergaan (alleen in de scharnieren aan de uiteinden);
 - c. "afschuifpanelen", die, omdat de elementen altijd vierhoekig zijn, steeds als twee diagonale staven worden gemodelleerd.
- De elementen kunnen onderling interageren, maar kunnen ook met de cylinders botsen, waardoor het mogelijk is eenvoudige en meer ingewikkelde systemen te mengen.
- Wielophangingen, in feite de enige subsystemen met een specifieke voertuigfunctie. Op dit moment kan gekozen worden uit onafhankelijke

wielophanging en starre (tandem)assen, waarbij het aantal wielen per as te variëren is. De veer- en dempingeigenschappen kunnen per as worden bepaald alsmede een aantal bandeigenschappen (druk, wrijving). Het model voorziet ook in de mogelijkheid van anti-rol stabilisatoren.

De wielophanging kan bestuurbaar of vast zijn, sturbewegingen kunnen als tijdfunctie in het model worden opgelegd; ook rem- en acceleratiemomenten op de wielen kunnen als tijdfunctie worden ingevoerd. Het aantal en de plaats van de wielophangingen aan een systeem kan door de gebruiker worden bepaald.

Behalve door interactiekrachten op vlakken e.d., kunnen systemen op één of meerdere punten met elkaar worden verbonden.

Aan die punten kunnen elastische, plastische en bezwijkingseigenschappen worden toegekend, zowel voor translaties als rotaties.

Het is mogelijk een aantal systemen te organiseren in een zogenaamd supersysteem, waarin hun onderlinge posities, verbindingpunten en verbindingseigenschappen in een beginpositie eenmalig worden vastgelegd. Vervolgens kan het supersysteem worden behandeld als een enkel systeem waarbij alleen de begincondities van het eerste systeem binnen het supersysteem worden gegeven.

De integratie van de bewegingsvergelijkingen van deze complexe modellen vindt stapsgewijs op twee manieren plaats:

- bewegingen binnen een systeem, inclusief de beweging van de wielophangingen, worden geïntegreerd met een impliciete methode;
- interacties tussen systemen wordt expliciet geïntegreerd. Het gaat hier om een Newmark-methode met variabele tijdstap; de tijdstap wordt afhankelijk van maximale versnellingsverschillen (door de gebruiker te bepalen) vergroot of verkleind.

2. Model van de voertuiginzittende

Met behulp van de basiselementen van het VEDYAC-model is het mogelijk een mensachtige ketenstructuur op te bouwen. Dit gebeurt door losse elementen, die in feite alle afzonderlijk beweegbare systemen zijn, d.m.v. elasto-platisch vervormbare knooppunten met elkaar te verbinden. De vorm

van de lichaamsdelen wordt daarbij zo goed mogelijk benaderd door cilindrische kontaktlichamen terwijl momentkarakteristieken van gewrichten eveneens door kleine, in de gewrichten aangebrachte kontaktcylinders worden gesimuleerd. Het is op dit moment nog niet mogelijk om zoveel antropometrische gegevens omtrent het menselijk lichaam te verkrijgen dat een dergelijk model ook volledig realistisch gemaakt kan worden; om die reden zijn in dit model de gewrichts- en massaverdelingseigenschappen gebruikt van een veel gebruikte proefpop, de z.g. Part 572 van General Motors. Omdat met name de massaverdeling en de traagheidseigenschappen van de onderdelen van die pop als redelijk realistisch mogen worden beschouwd, kan een dergelijk model toch een aanvaardbare voorspelling opleveren van met die eigenschappen samenhangende fenomenen als hoofd- en borstversnelling, gordelkrachten en, in mindere mate, kontaktkrachten.

Een dergelijk model is samengesteld uit 13, in principe onafhankelijk beweegbare onderdelen en levert daardoor een aanzienlijke toename van de rekentijd van het totale model op (ca. 7 uur). Om die reden is er slechts één mensmodel in het botsende voertuig gezet, op de passagiersplaats rechts voor, omdat op deze plaats het effect van de optredende hoekversnellingen tot gevaarlijk zware botsingen van lichaamsdelen met voertuiginterieur kan leiden.

BIJLAGE 2.

VOERTUIGKARAKTERISTIEKEN EN HUN CUMULATIEVE VERDELINGEN

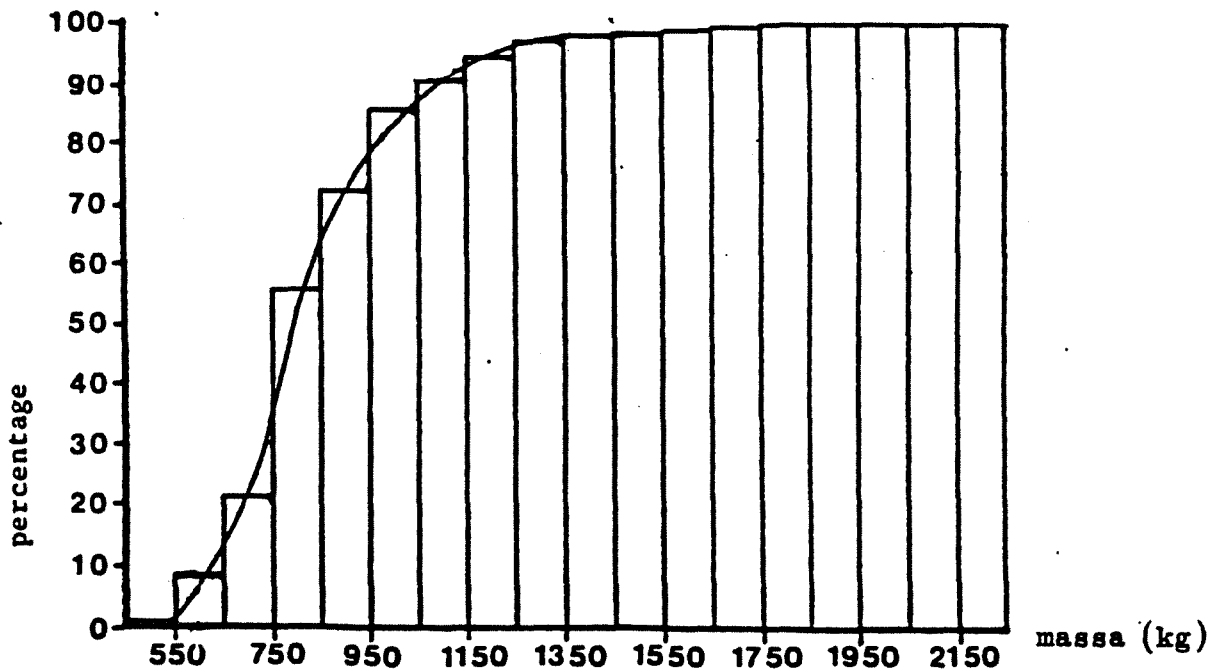
Bij de mathematische simulaties zijn drie typen personenauto's gebruikt. In onderstaande tabel zijn enkele belangrijke gegevens van deze voertuigen opgenomen.

Type voertuig	Massa (kg)	Wielbasis (cm)	Spoorbreedte ¹⁾ (cm)	Massatraag- heidsmoment ²⁾ (kgcm.s)
Fiat 126	578	184	120	5600
Opel Kadett B	836	242	128	12000
Volvo 244	1245	264	142	27300

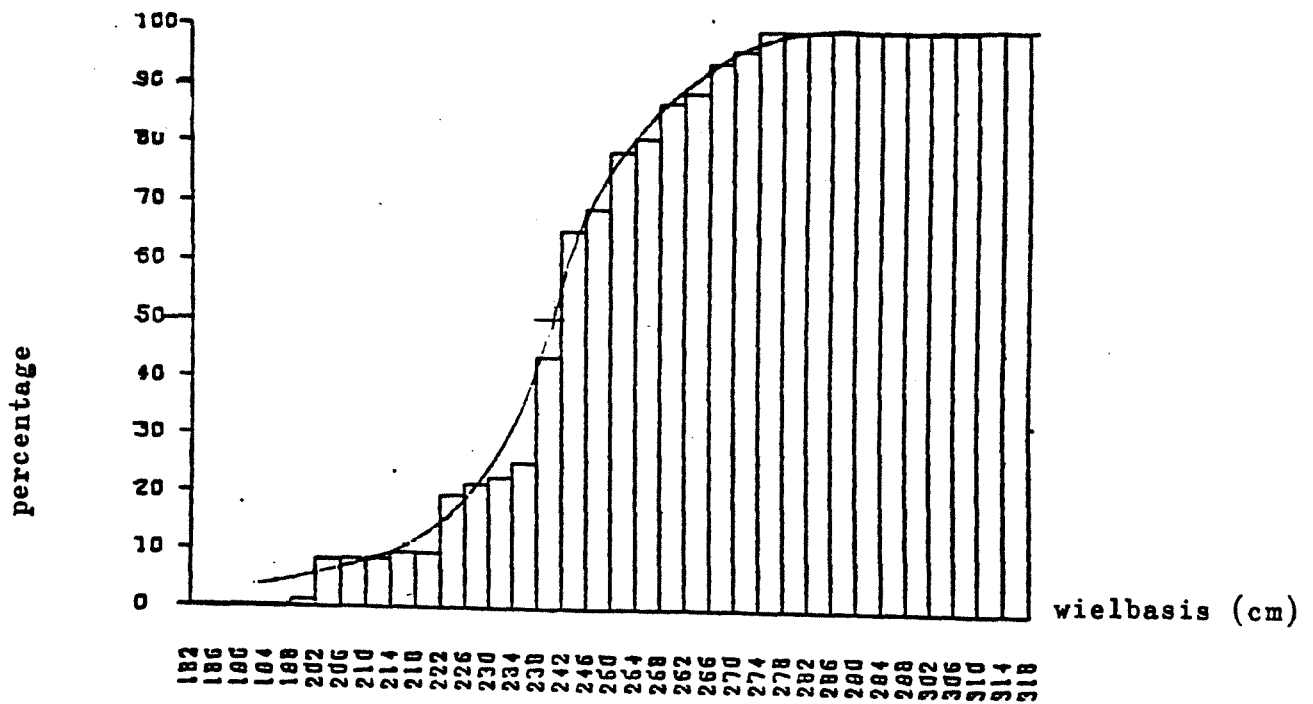
1) Bij verschil tussen voor en achter is de grootste waarde gegeven

2) Het massatraagheidsmoment om de hoogte-as

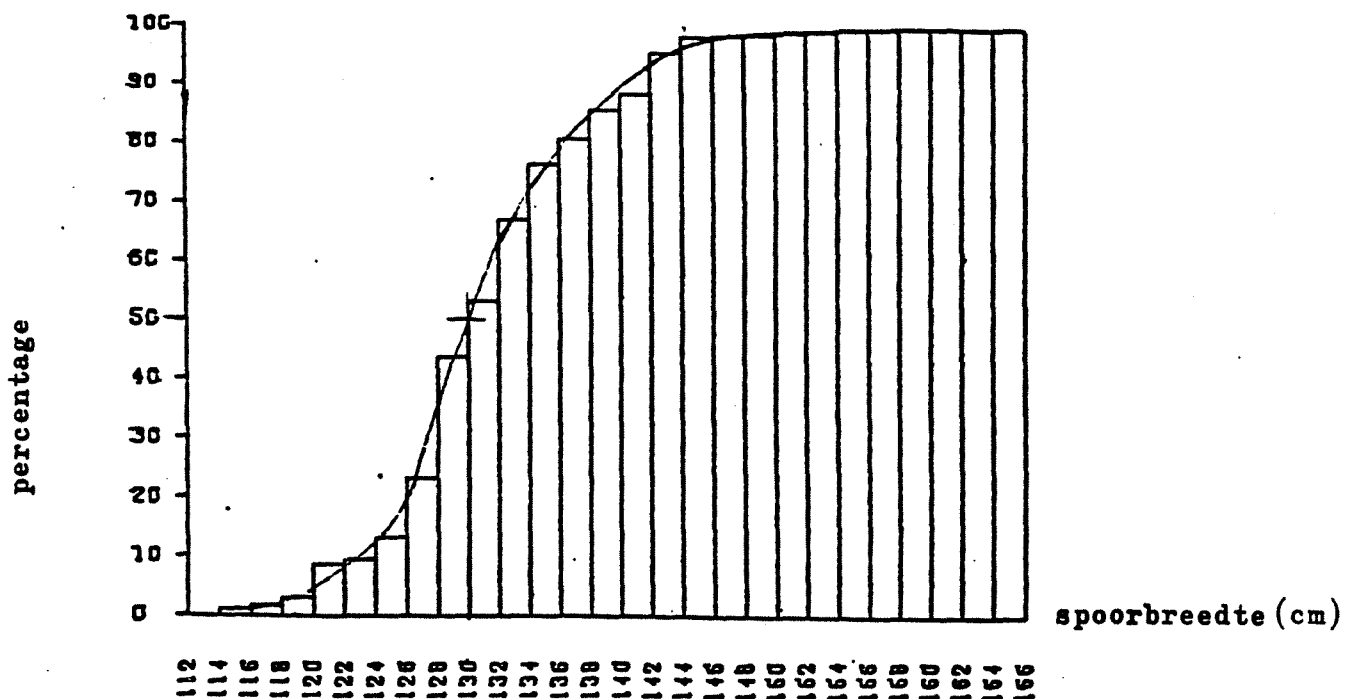
Van deze voertuigkenmerken worden verder de cumulatieve verdelingen gegeven. Ze zijn gebaseerd op de verkoopcijfers van personenauto's over de aangegeven jaren.



Cumulatieve verdeling van de voertuigmassa in onbelaste toestand van personenauto's naar verkoopcijfers over de jaren 1967 t/m 1976 (Bron: CBS, 1977)



Cumulatieve verdeling van de wielbasis van personenauto's naar verkoopcijfers over de jaren 1969 t/m 1975. (Bron: RWS,1980).



Cumulatieve verdeling van de spoorbreedte van personenauto's naar verkoopcijfers over de jaren 1969 t/m 1975. (Bron: RWS,1980).

HET ASI-CRITERIUM

De vertragingen die het voertuig tijdens de botsing ondergaat zijn een belangrijke maatstaf bij de beoordeling van de kans op letsel voor de inzittenden. Naarmate de voertuigvertragingen groter zijn, is ook de kans op (ernstig) letsel voor de inzittenden van het voertuig groter. Naast specifieke voertuigeigenschappen heeft vooral het gebruik van autogordels een belangrijke invloed op de grootte van de kans (ernstig) gewond te raken. De acceptabele voertuigvertragingen zijn voor inzittenden met autogordels groter dan voor inzittenden zonder autogordels. In de meeste gevallen zal een voertuigvertraging niet in één maar in meerdere richtingen werken. Dan is het gewenst een criterium te hebben waaraan de samengestelde vertragingen van het voertuig beoordeeld kunnen worden. Het tot nu toe meest gebruikte criterium is gebaseerd op berekeningen volgens de Acceleration Severity Index (ASI). Hierbij worden de geregistreerde voertuigvertragingen gerelateerd aan "acceptabele" referentiewaarden van het voertuig in de drie volgende richtingen: longitudinaal, lateraal en verticaal.

De formule m.b.t. de ASI luidt (Ross & Post, 1972):

$$ASI = \sqrt{\left(\frac{g_{long}}{g_{long_a}}\right)^2 + \left(\frac{g_{lat}}{g_{lat_a}}\right)^2 + \left(\frac{g_{vert}}{g_{vert_a}}\right)^2}$$

long	=	longitudinaal
lat	=	lateraal
vert	=	verticaal
index a	=	acceptabel

In de tellers van deze formule worden de geregistreerde voertuigvertragingen ingevuld. Als waarden voor deze vertragingen worden uit de vertragingcurven de gemiddelde vertragingen over een periode van 50 ms bepaald. Deze periode wordt zo gekozen dat de waarde voor de gemiddelde vertraging daarmee zo groot mogelijk wordt.

In de noemers worden de genoemde "acceptabele" referentiewaarden ingevuld. Voor inzittenden die geen autogordel dragen zijn deze waarden voor de longitudinale, laterale en verticale richting resp. 7, 5 en 6 g. Als criterium voor de ASI wordt een dimensieloze waarde voor de ASI van 1,0 gehanteerd. Als de waarde voor de ASI onder de 1,0 blijft is de kans groot dat inzittenden die geen autogordel dragen geen ernstig letsel oplopen.

Wordt door de inzittenden wel de autogordel gedragen, dan worden de te verdragen vertragingen groter. Arbitrair worden voor de longitudinale, laterale en verticale richting resp. de volgende waarden gehanteerd: 12, 9 en 10 g. Ingevuld in de formule komt dit per vertragingrichting overeen met een waarde voor de ASI minimaal gelijk aan ca. 1,6 (de referentiewaarden blijven dus 7, 5 en 6 g). Analooq aan de bepaling van de acceptabele ASI-waarde van 1 voor inzittenden zonder autogordel, wordt de waarde van de ASI voor inzittenden met autogordel 1,6. Wordt bij het invullen van de geregistreerde voertuigvertragingen in de formule een waarde beneden de 1,6 gevonden, duidt dit erop dat inzittenden die de autogordel dragen geen ernstig letsel oplopen. Omdat dit ASI-criterium nog niet op een wetenschappelijk geheel verantwoorde wijze kon worden vastgesteld, dient zij met de nodige voorzichtigheid te worden gehanteerd.

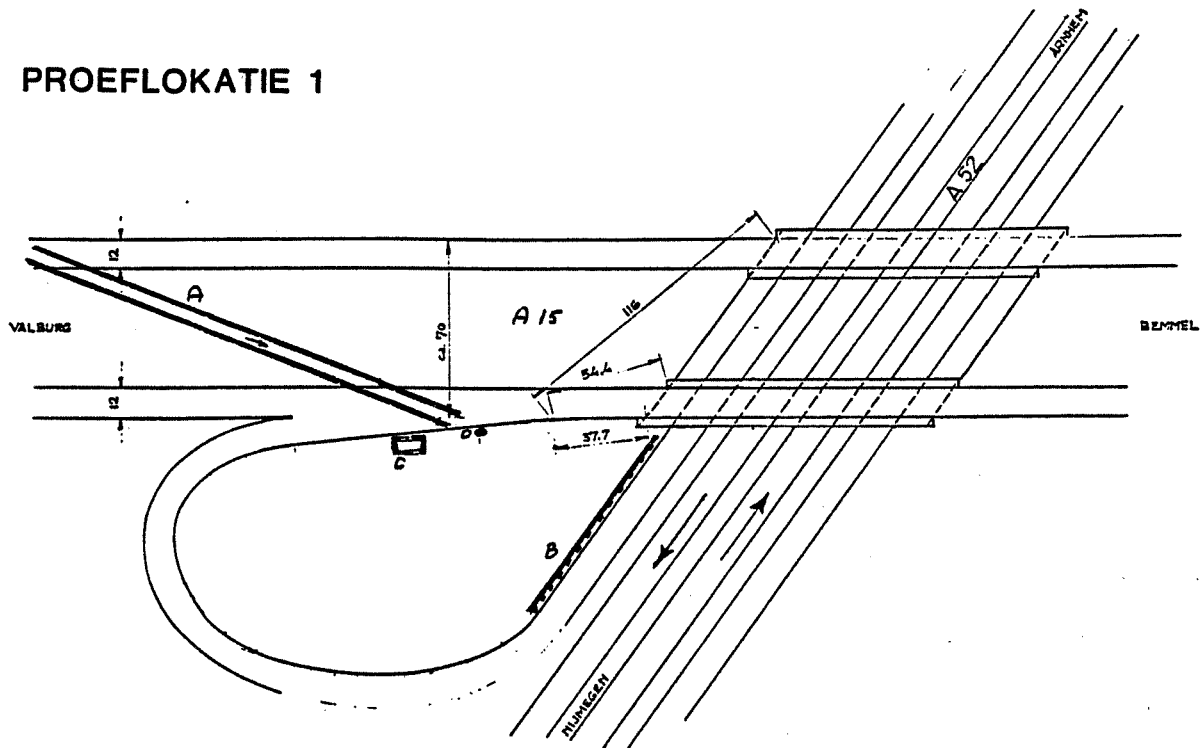
LITERATUUR

Ross, H.E. & Post, E.R. (1972). Criteria for guardrail need and location on embankments; Volume I: Development of criteria. Research Report 140-4. Texas Transportation Institute, 1972.

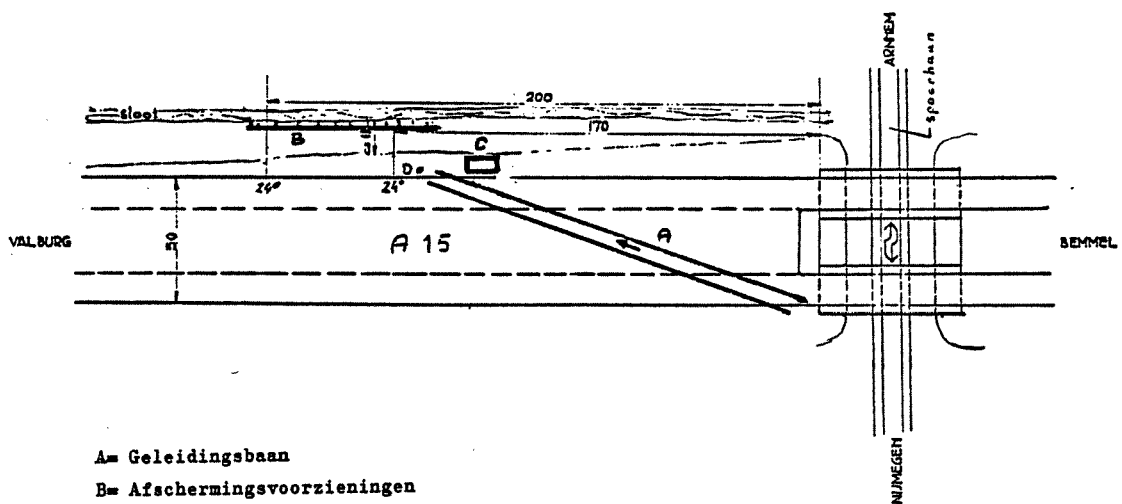
BIJLAGE 4.

LOCATIES VAN DE PROEVEN OP WARE SCHAAL

PROEFLOKATIE 1

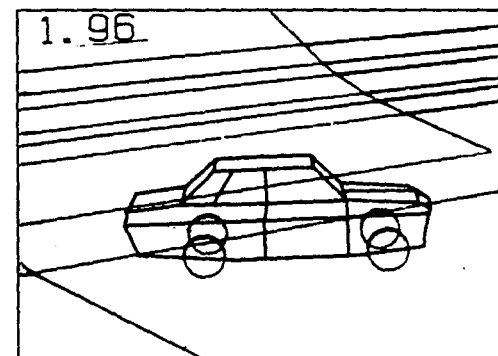
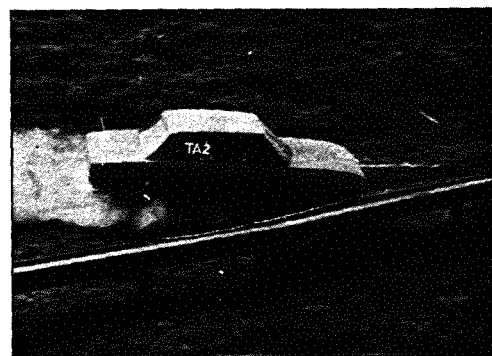
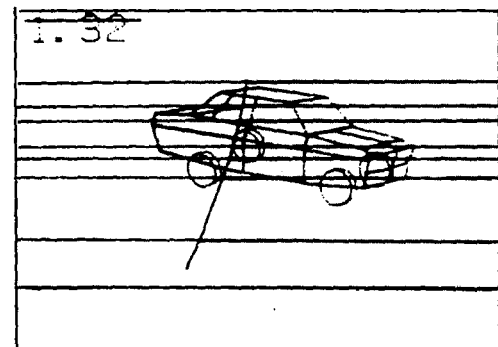
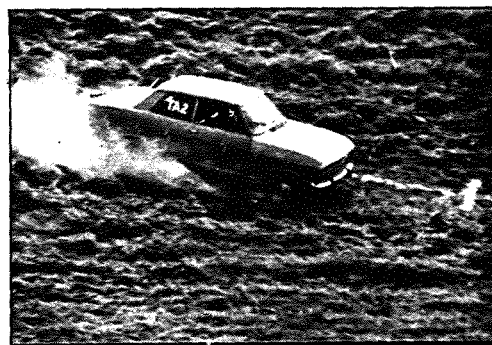
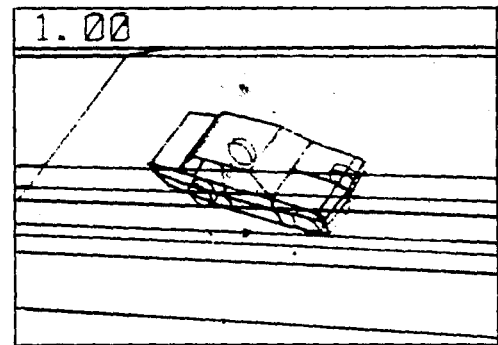
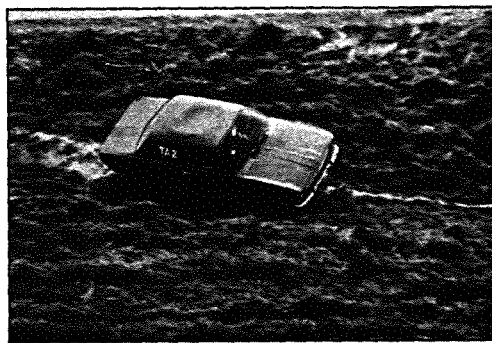
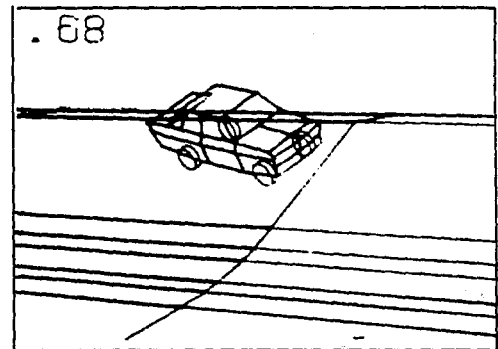
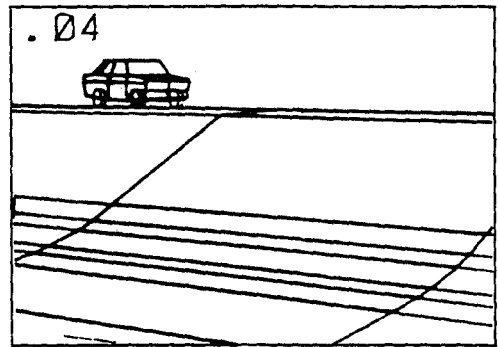


PROEFLOKATIE 2



- A= Geleidingsbaan
 - B= Afschermingsvoorzieningen
 - C= Lierinstallatie
 - D= Keerschijf
- Opgegeven afstanden in meters

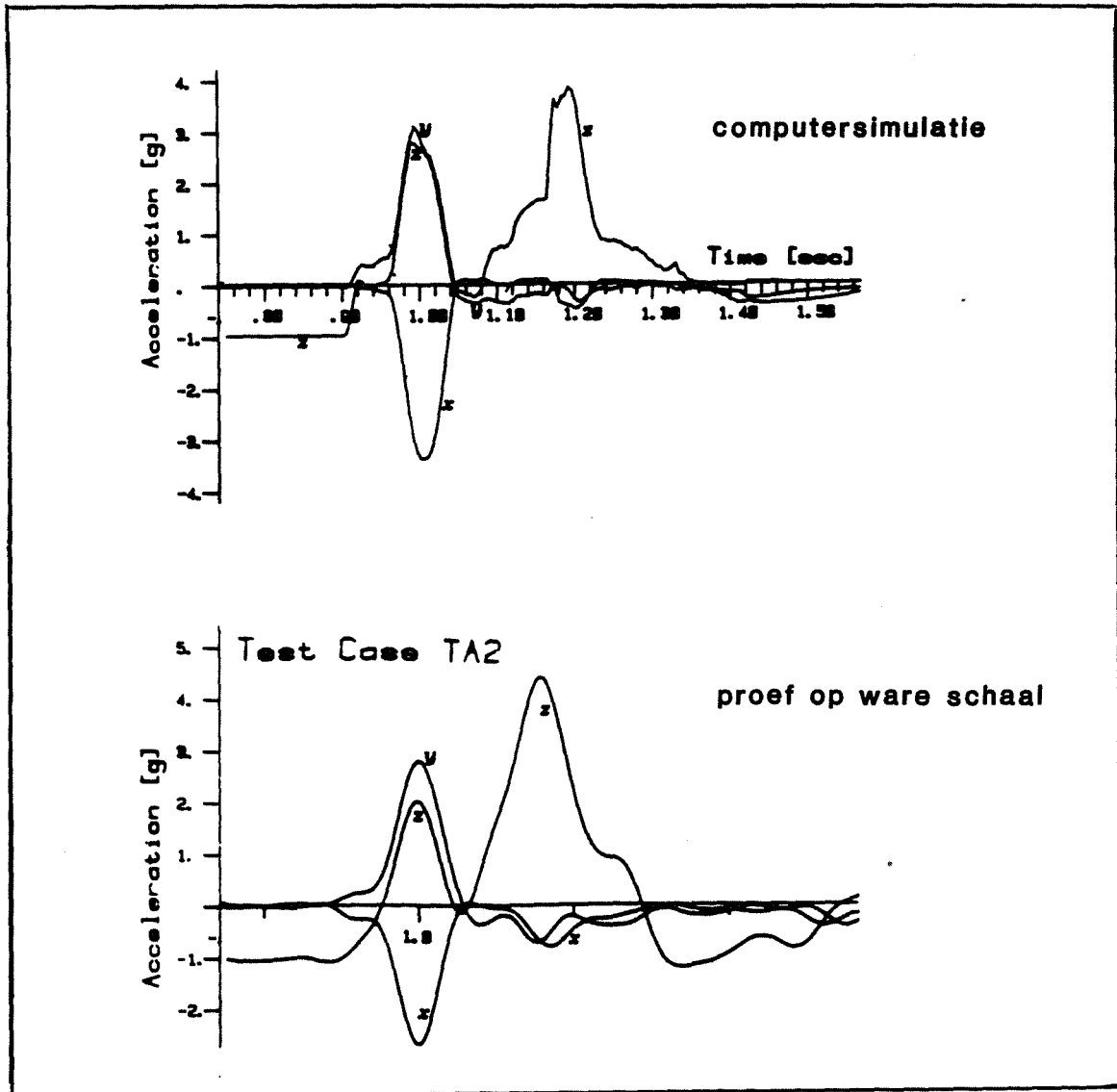
VERGELIJKING TUSSEN EEN MATHEMATISCHE SIMULATIE EN EEN PROEF OP WARE SCHAAL



BIJLAGE 5.2

VERGELIJKING TUSSEN EEN MATHEMATISCHE SIMULATIE EN EEN PROEF OP WARE
SCHAAL

Afgebeeld zijn de grafieken van de voertuigvertraging in drie richtingen - geregistreerd in het zwaartepunt - van de op Bijlage 5.1. afgebeelde proef.



Gegevens van de proef van Bijlage 5.1 en Bijlage 5.2

Proefnummer : TA 2
Taludhelling : 1:2,2
Inrijshnelheid : 75 km/u
Inrijhoek : 20°