

AFLOPENDE TALUDS II

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

Deel II: Gesimuleerde taludincidenten met voertuigmanoeuvres

R-88-15

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

Leidschendam, 1988

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV



## SAMENVATTING

Als aflopende taluds erg steil zijn (bijv. 1:1), slaan voertuigen bij taludincidenten over de kop. Op zich kunnen taluds relatief steil zijn (helling van 1:2 à 1:3) als zich aan de voet een brede obstakelvrije zone bevindt. Dit is gebleken uit Deel I van de studie naar taluds.

Dit Deel II van het onderzoek gaat nader in op de vaststelling van de invloed van diverse taludkenmerken op de afloop van een taludincident. Specifiek wordt de vraag beantwoord hoe taluds er uit moeten zien als het maaiveld onderaan het talud niet obstakelvrij is omdat er zich daar bijvoorbeeld sloten en bomen bevinden. Om in dit geval ernstige ongevallen te voorkomen dient een voertuig bij taludincidenten in ieder geval op het talud te blijven. Gebleken is dat dit alleen mogelijk is als door de bestuurder voertuigmanoeuvres uitgevoerd worden. Onderzocht is op welke taludconfiguraties effectieve correcties mogelijk zijn.

Voor de vaststelling van mogelijk relevante voertuigmanoeuvres is een vooronderzoek uitgevoerd. Deze was gericht op incidenten die in de vlakke berm kunnen plaatsvinden. Verder is een vooronderzoek uitgevoerd naar parameters van de hardheid van de berm of van het talud. Deze speelt namelijk een grote rol bij de uitvoering van voertuigmanoeuvres.

Als onderzoekinstrument is het simuleren van taludincidenten met het computermodel VEDYAC (Vehicle Dynamics and Crash Dynamics) gehanteerd. De simulaties zijn uitgevoerd met een middelzwaar type personenauto. Als taludkenmerken zijn de hoogte en hellingshoek onderzocht. Voor de beoordeling van de diverse taludconfiguraties zijn de uitkomsten gerelateerd aan de mate van veiligheid van de 12 m-vlakke berm van auto-snelwegen.

Als resultaten van het onderzoek kan worden vermeld dat bij de onderzochte taludhoogtes van 2 en 5 m een taludhelling van 1:4 twee maal zoveel onacceptabele simulaties geeft dan de helling van 1:5. De verschillen tussen de flauwer verlopende hellingen zijn gering. De hellingen van 1:6 en flauwer geven bij de taludhoogte van 2 m een even hoog percentage onacceptabele simulaties als de vlakke berm met een obstakelvrije zone van 12 m. Bij de taludhoogte van 5 m geldt dit vanaf de helling van 1:5. Indien wordt geremd geven harde taluds relatief veel overschrijdingen van de teen van het talud; zachte taluds geven relatief veel roll-overs.

Aangezien gegevens (van ongevallen) ontbreken, zijn de bij de simulaties toegepaste inrijcondities, voertuigmanoeuvres en bermtypen voor de beoordeling van de taludconfiguraties even zwaar gewogen. Geconcludeerd wordt dat hier nader onderzoek noodzakelijk is.

INHOUD

<u>Voorwoord</u>	6
1. <u>Inleiding</u>	7
2. <u>Doel en opzet van het onderzoek</u>	8
3. <u>Vooronderzoek</u>	10
3.1. Draagkracht berm	10
3.2. Rem- en stuurmanoeuvres	10
4. <u>Uitvoering onderzoek</u>	14
4.1. Vaststelling overige parameters en criteria	14
4.2. Uitvoering simulaties	15
5. <u>Resultaten</u>	17
5.1. Roll-overs	17
5.2. Laterale voertuigverplaatsingen	18
5.3. Niet-acceptabele simulaties	19
6. <u>Discussie</u>	20
7. <u>Conclusie</u>	21

Afbeelding 1

Tabellen 1 t/m 8

Bijlagen 1 t/m 3

## VOORWOORD

In twee delen is gerapporteerd over de invloed van diverse taludkenmerken (hoogte, hellingshoek e.d.) op de afloop van taludincidenten:

Deel I: Gesimuleerde taludincidenten zonder voertuigmanoeuvres

Deel II: Gesimuleerde taludincidenten met voertuigmanoeuvres.

In Deel I zijn acceptabele taludkenmerken bepaald op basis van de kans op (ernstig) letsel voor de inzittenden van personenauto's. Vastgesteld is dat de hellingen vrij steil kunnen zijn (1:2 à 1:3), mits zich aan de voet een breed maaiveld zonder obstakels en sloten bevindt.

Dit Deel II gaat in op de vraag hoe een acceptabel talud er uit moet zien als zo'n breed maaiveld ontbreekt. Op basis van de resultaten van Deel I is gebleken dat de uitvoering van voertuigmanoeuvres noodzakelijk zijn voor de beantwoording van deze vraag.

Dit rapport is samengesteld door ing. C.C. Schoon. De mathematische simulaties zijn uitgevoerd door ing. W.H.M. van de Pol.

## 1. INLEIDING

De inrichting van de wegberm dient erop gericht te zijn het risico voor 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 roll-over is groot. De vraag is wat onder te steile taluds verstaan dient te worden. Inzicht hierin maakt het mogelijk richtlijnen voor het wegontwerp op te stellen of aan te passen.

Bij het onderzoek Aflopende taluds Deel I (zonder voertuigmanoeuvres) zijn dimensies van een veilig talud onderzocht op basis van de ernst van het taludincident voor de inzittenden.

De belangrijkste resultaten waren:

- bij een afrondingsstraal van 12 m voldoet een helling van 1:2 en flauwer;
- bij een afrondingsstraal van 6 m voldoet in het algemeen een helling van 1:3 en flauwer;
- de voertuigsnelheden en uitrijhoeken aan de voet van het talud zijn meestal groter dan bovenaan.

Deel I had betrekking op taluds met aan de voet brede zones zonder obstakels en sloten. Naast hellingshoek en afrondingsstraal is tevens de taludhoogte onderzocht.

Het bij Deel II te beschouwen talud heeft aan de voet geen brede obstakelvrije zone. Naast de taludkenmerken die bij Deel I zijn onderzocht, lijkt het gewenst aandacht te besteden aan de bermkwaliteit in termen van draagkracht van het oppervlak.

## 2. DOEL EN OPZET VAN HET ONDERZOEK

Het doel van het tweede deel van het taludonderzoek is het vaststellen van de dimensies van veilige taluds die aan de voet geen brede obstakelvrije zone hebben. Onder veilig wordt hier verstaan dat bij een taludongeval (incident) met een personenauto de kans dat de inzittenden (ernstig) letsel oplopen gering is.

De te onderzoeken dimensies dienen betrekking te hebben op de hoogte en hellingshoek; de invloed van de draagkracht van de berm op het voertuiggedrag dient tevens vastgesteld te worden.

De resultaten zullen in een zodanige vorm gepresenteerd moeten worden dat de (on)veiligheid van diverse taludconfiguraties kan worden gerelateerd aan die van de vlakke berm.

Uit de resultaten van Deel I van het onderzoek is bekend dat bij taludincidenten alle voertuigen op het maaiveld onderaan het talud terecht komen als de bestuurder tijdens het incident niet corrigeert. Aangezien dit maaiveld als een gevarezone beschouwd dient te worden, kan een taludincident dan alleen goed aflopen als het voertuig niet van het talud af raakt. Dit houdt in dat een talud als veilig is te beschouwen als het mogelijk is daarop effectieve koerscorrecties uit te voeren. De vraag is wat voor soort correcties dit zijn. Uit ongevallenonderzoek en de literatuur is hierover niets bekend. Een voorstudie zal dan ook noodzakelijk zijn om technische vereisten aan te geven die voor het uitvoeren van dergelijke manoeuvres aan het talud gesteld moeten worden. Dit dient te resulteren in de bepaling van parameters van rem- en stuurmanoeuvres.

De draagkracht van de berm is van invloed op het gedrag van het voertuig. De draagkracht wordt in sterke mate bepaald door de grondsoort, vochtigheid en begroeiing. Hierover zijn geen direct bruikbare empirische gegevens voorhanden. Ook hier zal voorstudie nodig zijn om tot een goede keuze van parameters te komen.

Evenals bij het eerste deel zal het tweede deel van het onderzoek worden uitgevoerd met het simuleren van taludincidenten. Het model dat hierbij wordt gebruikt is het VEDYAC-model (Vehicle Dynamics and Crash Dynamics). Voor de beschrijving hiervan kan worden verwezen naar Deel I van het rapport.



Voor de uitvoering van simulaties zijn gegevens van taluds, voertuigen en inrijcondities noodzakelijk. Voor zover mogelijk zullen deze gegevens worden gebaseerd op de uitvoering en de resultaten van Deel I van het onderzoek.

### 3. VOORONDERZOEK

Een vooronderzoek is uitgevoerd voor de vaststelling van de parameters met betrekking tot de draagkracht van de berm en de rem- en stuurmanoeuvres.

#### 3.1. Draagkracht berm

De draagkracht van de berm zal in drie klassen worden ingedeeld: harde berm, middelzachte berm en zachte berm. In de dataset van het mathematische model zullen deze bermtypen met parameters worden vastgelegd. Deze zijn: de grootte van de rolweerstand, de grootte van de wrijvingscoëfficiënt bij de harde berm en de grootte van de ploegcoëfficiënt bij de zachte berm. Er is sprake van "ploegen" van de wielen als spoorvorming optreedt.

Voor de vaststelling van genoemde waarden is in eerste instantie een literatuurstudie uitgevoerd. In Bijlage 1 zijn de bevindingen vastgelegd. Het bleek dat de gevonden waarden een grote spreiding vertoonden. Daarom waren testsimulaties noodzakelijk om de waarden te klasseren. Bij deze simulaties speelde ook de vaststelling van de relatie tussen de coëfficiënten en de bandenspanning een rol.

De exercities hebben geleid tot een keuzebepaling van de parameters voor de draagkracht van droge en natte bermen (in totaliteit 8 parameters; zie Bijlage 1).

Teneinde het aantal te onderzoeken parameters te beperken - en daarmee het aantal uit te voeren simulaties - zullen alleen de parameters van de droge berm (4 stuks) bij de simulaties worden betrokken. Deze zijn:

- rolweerstand : 0,08
- wrijvingscoëfficiënt bij de harde berm : 0,37
- ploegcoëfficiënt bij de middelzachte berm : 0,45
- ploegcoëfficiënt bij de zachte berm : 0,53

#### 3.2. Rem- en stuurmanoeuvres

##### Opzet vooronderzoek

Vele denkbare rem- en stuurmanoeuvres kunnen door bestuurders die met hun voertuig van de rijbaan zijn geraakt, worden uitgevoerd. Uit ongevallenonderzoek en de literatuur is hierover niets bekend.

Door middel van reconstructie zal worden getracht hier inzicht in te krijgen.

Voor een dergelijke reconstructie wordt de situatie in de vlakke berm als uitgangspunt gekozen. Uit de literatuur is bekend dat ca. 90% van de rijbaan afgeraakte voertuigen niet verder de berm indringt dan 12 m. Op grond hiervan mag aangenomen worden dat de meeste bestuurders tijdens dergelijke incidenten effectieve correcties uitvoeren (of dat de berm een afremmend vermogen heeft). Als deze correcties vastgesteld zouden kunnen worden en vertaald in rem- en stuurmanoeuvres, kunnen ze bij de uitvoering van taludincidenten gehanteerd worden als een set inrijcondities. De invloed van de draagkracht van de berm dient hierbij te worden betrokken. Voor de vaststelling van effectieve correcties zullen simulaties in de vlakke berm met verschillende rem- en stuurmanoeuvres worden uitgevoerd. Dringt een voertuig bij een bepaalde combinatie van rem- en stuurmanoeuvres verder dan 12 m de berm in, dan kan worden gesteld dat deze combinatie in de praktijk tot een onveilige situatie zal leiden. Blijft het voertuig binnen de 12 m bermbreedte, dan kan van een veilige situatie worden gesproken. Door het uittesten van diverse combinaties van rem- en stuurmanoeuvres met als variabele diverse bermhardheden, ontstaat een overzicht van veilige en onveilige situaties in de vlakke berm. Dit zal als referentie dienen voor de beoordeling van de resultaten van uit te voeren simulaties op taluds.

#### Uitvoering vooronderzoek

Voor het vaststellen van de bij de simulaties in de vlakke berm te hantieren wieluitslagen van de voorwielen is gebruik gemaakt van gegevens uit de literatuur. Hieruit bleek dat de potentiëel haalbare stuurbewegingen tussen de 15° en 30° wieluitslag per seconde liggen. Deze beide waarden zijn in eerste instantie bij de simulaties met de vlakke berm gehanteerd. Uit een aantal simulaties bleek dat in veel gevallen slip van het voertuig optrad. Teneinde ook een inrijconditie te hebben waarbij geen slip optreedt, is middels berekeningen een theoretische wieluitslag bij de diverse inrijnelheden vastgesteld (zie Bijlage 2). Met deze berekende waarden zijn vervolgens een paar simulaties uitgevoerd. Hieruit bleek dat de theoretische waarden van de wieluitslag iets vergroot mochten worden zodat nog juist geen slip optrad.

Op grond van deze exercities zullen bij de simulaties de volgende stuuruitslagen worden gehanteerd:

- voor 100 km/u - 15° : 0,85°
- voor 80 km/u - 20° : 1,29°
- voor 60 km/u - 30° : 2,2°
- tevens voor alle inrijsnelheden en inrijhoeken : 15° en 30° per seconde

De vaststelling van de te simuleren remmanoeuvres is problematisch vanwege de vele variaties die mogelijk zijn: niet remmen, pompend remmen, remmen waarbij juist geen slip optreedt en blokkerend remmen. Verder zijn in de tijd gezien combinaties mogelijk.

Uit de literatuur is niets bekend hoe bij ongevallen in wegbermen wordt geremd. Voor de simulaties is gekozen voor de extreemste condities: niet remmen en blokkerend remmen.

Bij de simulaties zijn verder de volgende parameters voor de combinatie inrijsnelheid - inrijhoek gekozen: 100 km/u-15°, 80 km/u-20° en 60 km/u-30°. Als voertuigtype is gekozen voor de Opel Kadett. In totaliteit zijn 54 simulaties met rem- en stuurmanoeuvres in de vlakke berm uitgevoerd.

### Resultaten

De resultaten van de simulaties met de vlakke berm zijn in Tabel 1 (simulaties zonder remmen) en Tabel 2 (simulaties met remmen) weergegeven. Voor de drie inrijcondities en de drie wieluitslagen worden voor de drie bermtypen de volgende uitkomsten gegeven: laterale verplaatsing, rolhoek voertuig en de voertuigsnellheid ( $v_{12}$ ) in de gevallen dat overschrijding van de 12 m-grens plaats vindt.

Uit de tabellen blijkt dat roll-overs voornamelijk optreden bij de zachte berm en bij de hogere snelheden; hierbij is er weinig verschil of er aldan-niet wordt geremd.

Uit Tabel 1 blijkt dat met betrekking tot de grootte van de laterale verplaatsingen er wel duidelijke verschillen zijn tussen wel en niet remmen. Als niet wordt geremd blijft het voertuig in bijna alle gevallen binnen de 12 m. Wordt wel geremd dan is het bermtypen van invloed op de laterale afstand: de harde berm geeft afstanden tussen de 15 en 19 m, terwijl de zachte bermtypen afstanden geven van 8 tot 12 m.

In de gevallen dat de 12 m-grens wordt overschreden, zijn de voertuig-snelheden nog hoog.

Conclusie

Van de 54 combinaties van rem- en stuurmanoeuvres met verschillende inrijnelheden en inrijhoeken is in 11 gevallen een roll-over opgetreden.

In 13 gevallen is het voertuig verder dan 12 m de berm ingedrongen.

In verband met de uit te voeren simulaties op taluds kan worden gesteld dat de combinaties van inrijcondities die in de vlakke berm een roll-over te zien gaven, kunnen komen te vervallen, aangezien ze op taluds eveneens zullen leiden tot roll-overs.

Hieruit volgt dat per taludhelling 43 simulaties zullen worden uitgevoerd. Aangezien voor de vlakke berm van de 43 simulaties in 13 gevallen een overschrijding van de 12 m-grens heeft plaatsgevonden, komt het aantal acceptabele simulaties voor de vlakke berm hiermee op 70% (zie Tabel 8).

#### 4. UITVOERING ONDERZOEK

Met het vooronderzoek zijn de parameters met betrekking tot rem- en stuurmanoeuvres en bermhardheid vastgesteld. Van overige talud- en voertuigkenmerken en inrijcondities zullen ten behoeve van de uitvoering van de taludsimulaties tevens nog parameters vastgesteld dienen te worden. In de onderzoekopzet is aangegeven dat deze zullen worden gebaseerd op de uitvoering en resultaten van het eerste deel van het taludonderzoek. Verder zullen criteria worden aangegeven voor de bepaling van "technisch" veilige taludconfiguraties.

##### 4.1. Vaststelling overige parameters en criteria

###### Taludkenmerken: hoogte en hellingshoek

Bij de simulaties beschreven in Deel I zijn de volgende vier hoogtes onderzocht: 1, 2, 3 en 5 m. Aangezien de wegbeheerder de hoogtes van 2 en 5 m het meest relevant acht, zullen alleen deze hoogtes als parameters worden gehanteerd.

Voor de vaststelling van het aantal te onderzoeken taludhellingen en afrondingsstralen is als uitgangspunt gekozen dat alleen die hellingen en afrondingsstralen in aanmerking komen waarbij het voertuig tijdens het incident contact met het talud houdt. Als de helling namelijk te steil is en (of) de afrondingsstraal te klein is, komen de (voor)wielen los van het talud en is effectief sturen en remmen niet meer mogelijk.

Uit Deel I bleek dat bij taluds met een helling van 1:4 en flauwer en met een afrondingsstraal van 12 m de voorwielen contact met het talud houden. Deze waarden zullen als uitgangspunt worden gehanteerd.

###### Inrijcondities: inrijsnelheid en inrijhoek

In Deel I zijn bij de simulaties de volgende inrijcondities gehanteerd: 100 km/u-15°; 100 km/u-20°; 80 km/u-20° en 60 km/u-30°.

Daar de inrijconditie 100 km/u-20° als vrij extreem kan worden beschouwd, is mede uit het oogpunt het aantal uit te voeren simulaties te reduceren, besloten deze inrijconditie te laten vervallen.

###### Voertuigkenmerk: type

Uit de resultaten van de simulaties zonder manoeuvres in Deel I blijkt dat de verschillen tussen de gesimuleerde voertuigen klein zijn. Gezien

het regelmatige verloop van de curves van de Opel Kadett tussen de curves van de Fiat 126 en de Volvo 244, is besloten de simulaties alleen met de Opel Kadett uit te voeren. Deze is als een representant van de voertuigklasse "middelzwaar" op te vatten.

#### Vaststelling criteria

Aangezien het maaiveld onderaan het talud als een gevarenzone beschouwd dient te worden, zullen de simulaties worden beoordeeld op het feit of het voertuig al-dan-niet op het talud blijft. Verder is het plaatsvinden van een roll-over niet acceptabel.

De mate van veiligheid van de diverse taludconfiguraties zal worden gerefereerd aan de mate van veiligheid van de vlakke berm. Bij de vaststelling van de rem- en stuurmanoeuvres is uitgegaan van een obstakelvrije bermbreedte van 12 m.

#### 4.2. Uitvoering simulaties

De veiligheid van aflopende taluds is met het simuleren van taludincidenten onderzocht. Resumerend zijn de volgende parameters en condities hierbij betrokken:

##### taluds:

- hoogte: 2 en 5 m (voor een doorsnede zie Afbeelding 1)
- hellingshoeken: 1:4, 1:5, 1:6 en 1:7
- afrondingsstraal: 12 m
- draagkracht berm: hard, middelzacht en zacht

##### voertuig:

- personenauto, middelzwaar (massa 836 kg)

##### inrijcondities:

- snelheid-hoek 100 km/u-15°, 80 km/u-20° en 60 km/u-30°
- stuurmanoeuvre (wieluitslag): 30°, 15° en afhankelijk van snelheid 0,85°, 1,29° en 2,20°
- remmanoeuvre: niet remmen en blokkerend remmen.

De manoeuvres zijn ingezet als het voertuig met een bepaalde inrijsnelheid en onder een bepaalde inrijhoek de verharde rijbaan juist heeft verlaten.

De uitkomsten van de simulaties zijn beoordeeld op het feit of er al-dan-niet een roll-over plaatsvindt en welke afstand het voertuig in laterale richting af legt. Deze afstand wordt vanaf de verharde rijbaan gemeten.

Als alle mogelijke combinaties gesimuleerd zouden worden, zou dit neerkomen op een totaal van 432 simulaties. Het schrappen van die simulaties die in de vlakke berm een roll-over te zien gaven, leverde reeds een besparing van 88 simulaties op.

In principe zouden dus 344 simulaties moeten worden uitgevoerd. Dit aantal kon aanzienlijk worden beperkt door het doen van de volgende twee aannamen:

1. Als een taludhelling van bijv. 1:7 een roll-over te zien geeft, mag worden aangenomen dat dit op steilere hellingen ook het geval zal zijn.
2. Als bij een helling van bijv. 1:4 het voertuig niet op het maaiveld onderaan het talud belandt, zal dit met minder steile hellingen ook niet gebeuren.



## 5. RESULTATEN

De uitkomsten van simulaties zijn in de vorm van listings en plots weergegeven. Ter illustratie zijn als Bijlage 3 plots van 5 karakteristieke simulaties afgebeeld:

Plot 1: het niet slippend voertuig raakt net niet van het talud af en rijdt vervolgens weer in de richting van de rijbaan.

Plot 2: het voertuig maakt een slip van ruim 90°, kantelt en glijdt vervolgens achterwaarts het talud af.

Plot 3: het voertuig neemt ongeveer halverwege het talud een stand in die evenwijdig is aan de rijbaan; zeer geleidelijk daalt het voertuig verder naar de voet van het talud.

Plot 4: slippend overschrijdt het voertuig de teen van het talud en belandt op het maaiveld.

Plot 5: het voertuig slipt 270° en gaat op het talud over de kop.

In de Tabellen 3 t/m 6 zijn de resultaten van de simulaties in getalwaarden weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt in bermtypen (naar draagkracht) en inrijcondities. Als uitkomsten zijn vermeld de laterale verplaatsing, de rolhoek (c.q. roll-over) en de snelheid bij het eventueel overschrijden van de teen van het talud. Soms zijn bij de laterale verplaatsing twee waarden opgenomen: dan is er sprake van een situatie zoals bij plot 2 en 3 is beschreven (eerste waarde is de eerste grootste afstand waarbij het voertuig een stand inneemt die evenwijdig is aan de rijbaan, tweede waarde is de eindsituatie). Bij de uitwerking van de tabellen zijn de eerste waarden gebruikt. De argumentatie hiervoor is dat de voertuigpositie bij deze afstand zodanig is dat de bestuurder in de praktijksituatie in staat is te voorkomen dat het voertuig verder van het talud afraakt of dat het voertuig verder doorslipt. Daar waar een eerste laterale afstand niet duidelijk uit de plot bleek (zoals bij plot 3), is de afstand geschat. In de Tabellen 3 t/ 6 is dit kenbaar gemaakt met de aanduiding "\*\*\*".

Op basis van de gegevens van de Tabellen 3 t/m 6 is in Tabel 7 een overzicht van de resultaten van alle simulaties gegeven.

### 5.1. Roll-overs

Van alle 344 mogelijke combinaties van inrijcondities en taludkenmerken (exclusief de roll-overs van de vlakke berm) is bij 34 simulaties (10%)

een roll-over opgetreden. Bij de taludhellingen van 1:4 vond dit frequenter plaats (4%) dan bij de drie overige hellingen (aandeel elk ca. 2%).

Indien de roll-overs worden uitgesplitst naar de taludhoogten 2 m en 5 m zijn de verschillen gering. Dit zelfde geldt voor de uitsplitsing naar wel en niet remmen. Groter is het verschil bij de diverse bermhardheden: de harde berm gaf geen roll-overs; de middelzachte en zachte bermen gaven in resp. 4% en 6% van de gevallen een roll-over.

## 5.2. Laterale voertuigverplaatsingen

Onderaan de Tabellen 3 t/m 6 is bij de betreffende taludhellingen de taludbreedte (de afstand van de rijbaan tot aan de teen van het talud) aangegeven. Deze kan nogal variëren: van 16,5 m bij een helling van 1:4 en een taludhoogte van 2 m tot 43,5 m bij 1:7 en 5 m-hoogte.

Uit het overzicht (Tabel 7) is af te leiden dat van alle simulaties - exclusief de roll-overs - het voertuig in 29% van de gevallen de teen van het talud heeft overschreden. De overschrijdingen waren bij de 2 m hoge taluds frequenter (factor 1,5) dan bij de 5 m hoge taluds. Voor beide hoogtes is de helling van 1:4 het meest overschreden (15%). De overschrijdingspercentages voor de hellingen 1:5, 1:6 en 1:7 bedroegen resp. 6%, 5% en 4%.

Het uitvoeren van remmanoeuvres heeft veel invloed op de laterale verplaatsing van het voertuig. Indien wordt geremd vindt in 21% van de simulaties een overschrijding van de teen van het talud plaats en indien dit niet het geval is in 8% van de simulaties. Het verschil zit vooral in de taludhoogte van 2 m en in het bijzonder bij het harde bermtype.

Als nader onderscheid wordt gemaakt in de niet-acceptabele simulaties naar hardheid van het talud blijkt dat ruim de helft van deze simulaties plaatsvinden op het harde talud en voornamelijk bij de uitvoering van remmanoeuvres. Uit de plots blijkt dat een remmend voertuig op het harde talud 'rechtuit' gaat, ondanks het feit dat er gelijktijdig een stuurmanoeuvre wordt uitgevoerd. Dit resulteert in veel overschrijdingen van de teen van het talud. Als de berm zachter is, ondervinden de voorwielen meer weerstand waardoor een stuurmanoeuvre ook bij een remmend voertuig meer afbuigend effect heeft.

### 5.3. Niet-acceptabele simulaties

Voor de beoordeling van de mate van onveiligheid van de diverse taludhellingen is in Tabel 8 een overzicht gegeven van de niet-acceptabele en acceptabele simulaties. Onderscheid is gemaakt in de vlakke berm en de taludhoogtes van 2 m en 5 m. In geval een simulatie als onacceptabel is aangeduid, voldoet het talud niet aan de "technische" eisen voor een veilige afloop van een incident.

Gegeven de inrijcondities en de drie bermtypen naar hardheid blijkt uit deze tabel dat voor de vlakke berm in 30% van de simulaties de eindsituatie onacceptabel is. Voor de diverse taludhellingen varieert dit percentage van 70% tot 14%.

Bij de taludhoogte van 2 m geeft de hellingshoek van 1:4 in 70% van de simulaties een onacceptabele uitkomst; de percentages van de hellingen 1:5, 1:6 en 1:7 zijn resp. 40%, 30% en 28%. Bij de taludhoogte van 5 m liggen de percentages voor de corresponderende hellingen lager dan bij de hoogte van 2 m; voor de hellingen van 1:4 t/m 1:7 bedragen ze resp. 65%, 26%, 19% en 14%.

Uit de percentages van de niet-acceptabele simulaties bij beide taludhoogtes valt op dat er een forse daling is bij de helling van 1:5 ten opzichte van de helling van 1:4 (een daling van 30 à 40 percentagepunten). De sprongen tussen de overige hellingen bedragen maximaal 7 percentagepunten.

De hellingen van 1:6 en flauwer van het 2 m-hoge talud geven een even hoog percentage onacceptabele simulaties als de vlakke berm. Bij het talud van 5 m geldt dit vanaf de helling van 1:5.

## 6. DISCUSSIE

### Onveilige taluds in relatie met inrijcondities

Met de wijze van kwalificeren van de taludhellingen in termen van het percentage onacceptabele gesimuleerde taludincidenten, dienen wij ons er rekenschap van te geven dat telkens het aantal combinaties van inrijcondities is geteld. Indien we het aantal of percentage onacceptabele simulaties als norm voor de veiligheid van een bepaalde conditie zouden willen gebruiken, moeten we ons realiseren dat de diverse combinaties niet in dezelfde mate zullen voorkomen. Verder zal ook niet bij iedere eindsituatie van een gelijke ernst van de afloop sprake zijn. Tenslotte zullen bestuurders niet altijd adequaat reageren, hetgeen bij sommige situaties in sterkere mate een rol kan spelen dan bij andere situaties. Dit vraagt om een weging van de resultaten om tot een totaal oordeel te komen.

Hoe een dergelijke weging zou moeten plaatsvinden is niet bekend omdat de benodigde gegevens ontbreken. Wel kan met deze methode worden aangegeven welke situaties vanuit de veiligheid gezien technisch gesproken onacceptabel zijn en voor welke condities dit met name geldt.

### Draagkracht taludoppervlak

De draagkracht van het taludoppervlak is in dit rapport uitgedrukt in drie hardheden. Uit de resultaten blijkt de grote invloed hiervan. In het mathematisch model is de hardheid als volgt gesimuleerd: de harde berm die geen spoorvorming door de wielen geeft, de middelzachte berm met 1 cm spoordiepte en de zachte berm met 2 cm spoordiepte. Zonder het verrichten van nader onderzoek is niet aan te geven in welke mate deze spoordiepten corresponderen met de praktijksituatie.

### Wegtypen

De vaststelling van de stuur- en remmanoeuvres bij dit onderzoek is gebaseerd op een obstakelvrije vlakke bermbreedte van 12 m. Deze afstand wordt gehanteerd bij autosnelwegen.

Aangezien de mate van onveiligheid van de diverse taludhellingen gerelateerd is aan de inrijcondities van de vlakke berm, is de geldigheid van de resultaten van dit onderzoek beperkt tot taluds langs de autosnelwegen.

Voor de niet-autosnelwegen kunnen soortgelijke exercities worden uitgevoerd, gebaseerd op de in de richtlijnen aangegeven breedtes van de obstakelvrije zone voor de diverse typen wegen.

## 7. CONCLUSIE

Met de uitvoering van mathematische simulaties met rem- en stuurmanoeuvres zijn resultaten verkregen van de mate van onveiligheid van aflopende taluds bij het optreden van incidenten. De mate van onveiligheid is uitgedrukt in het percentage onacceptabele simulaties van taludincidenten. Voor beide onderzochte taludhoogtes (2 en 5 m) blijkt het aantal onacceptabele simulaties bij een helling van 1:4 twee keer zo groot als de daarop volgende onderzochte helling van 1:5. Het verschil tussen de overige onderzochte hellingen (1:5, 1:6 en 1:7) is relatief gering.

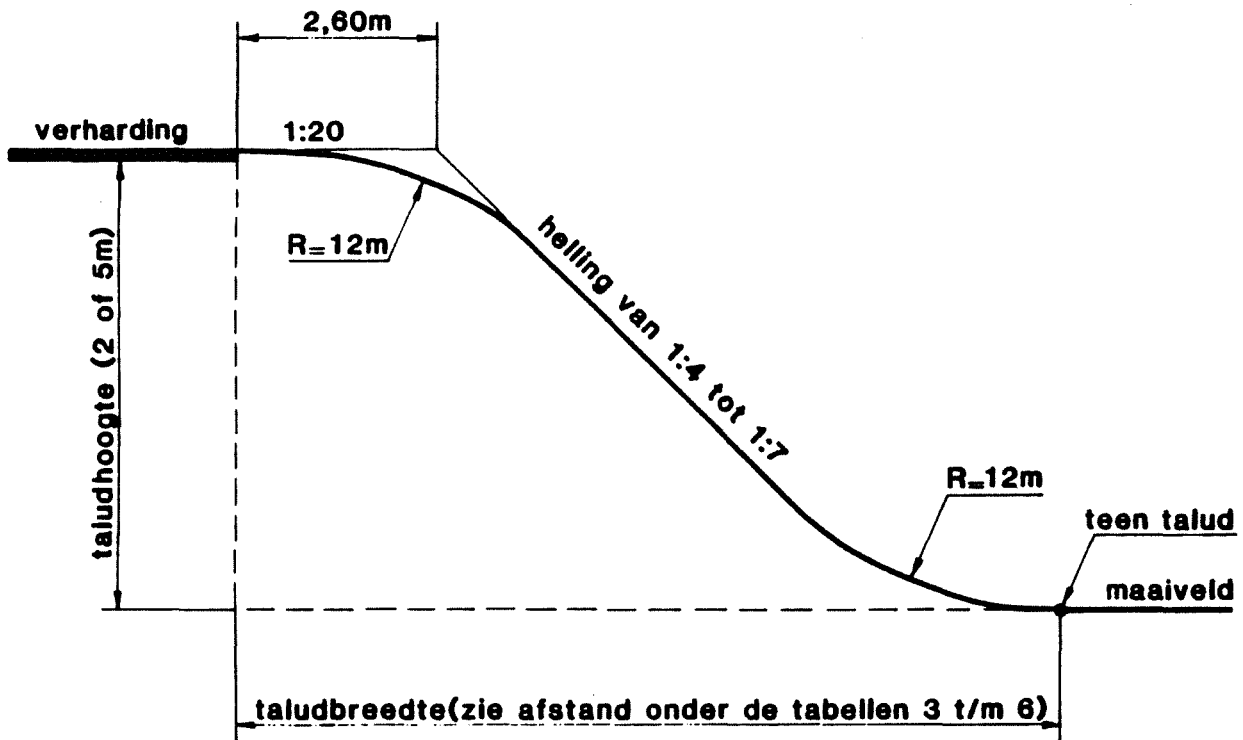
Bij het 2 m-hoge talud geven de hellingen van 1:6 en flauwer een even hoog percentage onacceptabele simulaties als de vlakke berm met een obstakelvrije zone van 12 m. Bij het talud van 5 m geldt dit vanaf de helling van 1:5.

De invloed van de gehanteerde inrijcondities (inrijsnelheid, inrijhoek, manoeuvres) is groot op de uitkomsten van de taludsimulaties. Bij de hierboven aangegeven resultaten is elke combinatie van inrijcondities even zwaar gewogen. Deze aanname is noodzakelijk omdat gegevens ontbreken om een weging toe te passen. Nader onderzoek naar inrijcondities is gewenst.

De hardheid van het talud is eveneens van veel invloed op de resultaten van de simulaties. Evenals bij de inrijcondities zijn de simulatieresultaten van de diverse bermsoorten naar hardheid even zwaar gewogen. Indien wordt geremd geven harde taluds relatief veel overschrijdingen van de teen van het talud; zachte taluds geven relatief veel roll-overs.

De resultaten hebben betrekking op personenauto's en hebben geldigheid voor autosnelwegen. Voor de niet-autosnelwegen kan op analoge wijze de mate van onveiligheid van taluds worden vastgesteld.





Afbeelding 1. Doorsnede van een gemodelleerd talud zoals dat bij de mathematische simulaties is toegepast.





## TABELLEN 1 T/M 8

Tabel 1. Resultaten van simulaties met de vlakke berm met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 2. Resultaten van simulaties met de vlakke berm met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 3. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:4) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 3.2. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:5) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 3.3. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:6) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 3.4. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:7) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 4.1. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:4) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 4.2. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:5) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 4.3. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:6) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 4.4. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:7) met stuurmanoeuvres zonder remmen.

Tabel 5.1. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:4) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 5.2. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:5) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 5.3. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:6) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 5.4. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1:7) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 6.1. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:4) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 6.2. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:5) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 6.3. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:6) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 6.4. Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1:7) met stuurmanoeuvres met blokkerend remmen.

Tabel 7. Resultaten van taludsimulaties in getotaliseerde vorm op basis van de gegevens van de Tabellen 3 t/m 6.

Tabel 8. Overzicht van de niet-acceptabele en acceptabele simulaties met de vlakke berm en de taludhoogtes 2 en 5 m (hellingshoeken 1:4, 1:5, 1:6 en 1:7).

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)				zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V 12 m	laterale verplaatsing	roll hoek	V 12 m	laterale verplaatsing	roll hoek	V 12 m	
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	
100/15	-	30	821	2.2	--	662/ 926	5.8	--	581	roll-over		
	-	15	838	2.2	--	725	roll-over		659	roll-over		
	-	.85	1028	2.0	--	1106	1.9	--	1101	2.4	--	
80/20	-	30	916	2.2	--	734/ 1170	6.1	--	643	roll-over		
	-	15	940	2.2	--	810	roll-over		737	roll-over		
	-	1.29	1070	2.3	--	1102	1.9	--	1104	2.1	--	
60/30	-	30	1120	2.1	--	878	4.6	--	769	29.5	--	
	-	15	1154	2.2	--	984	4.1	--	896	5.2	--	
	-	2.20	1235 *	2.1	58	1242 *	2.1	53	1221 *	2.1	50	

\* terug op rijbaan

obstakelvrije zone 12 m

**Tabel 1 : Resultaten van simulaties met de vlakke berm met stuurmanoeuvres ZONDER REMMEN**

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V 12 m	laterale verplaatsing	roll hoek	V 12 m	laterale verplaatsing	roll hoek	V 12 m
(km/u)	(grd/s)		(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	blok	30	1750	2.3	69	1093	4.3	--			roll-over
	blok	15	1556	1.8	68	1044	6.1	--	739		roll-over
	blok	.85	1836	2.7	70	1210	49.5	2	1037		roll-over
80/20	blok	30	1794	1.9	52	1102	4.4	--	828		roll-over
	blok	15	1691	1.7	52	1085	6.4	--	810		roll-over
	blok	1.29	1666	2.7	52	1146	5.8	--	1042	5.0	--
60/30	blok	30	1677	1.8	36	1073	3.5	--	832	5.1	--
	blok	15	1571	1.7	36	1111	3.4	--	928	4.4	--
	blok	2.20	1556	2.0	36	1188	2.5	--	1083	2.5	--

obstakelvrije zone 12 m

**Tabel 2** : Resultaten van simulaties met de vlakke berm met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN



manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	-	30	1201/ >2330	13.4	27				roll-over		
	-	15				vlakke berm	roll-over		vlakke berm	roll-over	
	-	.85	1603/ >2340	13.8	91						
80/20	-	30	1486/ >1850	13.8	??	/ 2097	14.6	--	vlakke berm	roll-over	
	-	15				vlakke berm	roll-over		vlakke berm	roll-over	
	-	1.29	1676/ >2140	13.6	62						
60/30	-	30	1814 *	13.6	--	/ca2300	14.9	12		roll-over	
	-	15				1327/ca2650	14.6	11		roll-over	
	-	2.20	1876 *	13.5	58	1733	13.8	--			

\* terug op rijbaan

teen talud 18:5 m

Tabel 3.2 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1 : 5) met stuurmanoeuvres ZONDER REMMEN



manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	-	30				2100	12.8	--	vlakke berm		roll-over
	-	15	zie 1 : 5			vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	.85									
80/20	-	30							vlakke berm		roll-over
	-	15	zie 1 : 5			vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	1.29									
60/30	-	30									roll-over
	-	15	zie 1 : 6			zie 1 : 6					roll-over
	-	2.20									

teen talud 22.5 m

**Tabel 3.4** : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1 : 7) met stuurmanoeuvres ZONDER REMMEN

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	-	30	/ >4400	16.0	43	/ca2100	18.8	--	vlakke berm		roll-over
	-	15	/ >4400	15.6	47	vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	.85	/ >4400	16.2	100	/ >4400	16.3	92	/ 3000	16.6	67
80/20	-	30	/ >4400	16.3	27	/ca2350	18.2	--	vlakke berm		roll-over
	-	15	/ >4400	16.4	27	vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	.29	/ >4400	16.3	86	3500	16.4	64	2012/ >2850	16.9	51
60/30	-	30	3600	16.1	19	1180/ 3000	17.4				roll-over
	-	15	/ >4400	16.1	14	1370/ 3500	17.2	23			roll-over
	-	2.20	/ >4400						1870/	16.6	--

teen talud 28.5 m

**Tabel 4.1** : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 4) met stuurmanoeuvres ZONDER REMMEN



manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	-	30	1216/ >3350	13.4	ca20	/ca2600	16.9	--	vlakke berm		roll-over
	-	15	1223	13.8	--	vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	.85	1640 **	13.8		2091 **	13.6		2025 **	14.4	
80/20	-	30	1483/ >3350	13.8	ca22				vlakke berm		roll-over
	-	15				vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	1.29	1730/ >3350	13.6	ca61	1769 **	13.7				
60/30	-	30	2013/ >3350	13.6	ca10						roll-over
	-	15				zie 1 : 4					roll-over
	-	2.20	2129/ >3800	13.5	43						

\*\* geïnterpreteerde afstand

teen talud 33.5 m

**Tabel 4.2 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 5) met stuurmanoeuvres ZONDER REMMEN**

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	-	30							vlakke berm		roll-over
	-	15	zie 1 : 5			vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	.85									
80/20	-	30							vlakke berm		roll-over
	-	15	zie 1 : 5			vlakke berm		roll-over	vlakke berm		roll-over
	-	1.29									
60/30	-	30									roll-over
	-	15	zie 1 : 5					zie 1 : 4			roll-over
	-	2.20									

teen talud 38.5 m.

Tabel 4.3 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 6) met stuurmanoeuvres ZONDER REMMEN

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	-	30							vlakke berm		roll-over
	-	15	zie 1 : 5			vlakke berm			vlakke berm		roll-over
	-	.85									
80/20	-	30							vlakke berm		roll-over
	-	15	zie 1 : 5			vlakke berm			vlakke berm		roll-over
	-	1.29									
60/30	-	30									roll-over
	-	15	zie 1 : 5			zie 1 : 4					roll-over
	-	2.20									

teen talud 43.5 m

**Tabel 4.4** : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 7) met stuurmanoeuvres ZONDER REMMEN

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	blok	30	/ >3100	14.5	68						
	blok	15	/ >3100	14.7	69				roll-over		
	blok	.85	/ >3100	14.9	71	1803	17.4	54	roll-over		
80/20	blok	30	2780	14.7	51	1639	16.2	--	vlakke berm		roll-over
	blok	15	2720	14.9	52	1670	16.6	12	vlakke berm		roll-over
	blok	1.29	2595	14.7	53	1771	17.0	36	1529	17.4	--
60/30	blok	30	2404	14.3	39	1550	19.5	--			roll-over
	blok	15				1629	17.9	--	1265	21.3	--
	blok	2.20	2314	14.0	37	1758	15.5	23	1529	17.0	--

teen talud 16.5 m

**Tabel 5.1** : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1 : 4) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond. (km/u)	rem (km/u)	wiel (grd/s)	laterale verplaatsing (cm)	roll hoek (grd)	V teen (km/u)	laterale verplaatsing (cm)	roll hoek (grd)	V teen (km/u)	laterale verplaatsing (cm)	roll hoek (grd)	V teen (km/u)
100/15	blok	30	>3100	12.0	64		roll-over		vlakke berm	roll-over	
	blok	15					roll-over		vlakke berm	roll-over	
	blok	.85	>3100	12.5	66				vlakke berm	roll-over	
80/20	blok	30	2805	12.4	47	1723	13.7	--	vlakke berm	roll-over	
	blok	15							vlakke berm	roll-over	
	blok	1.29	2630	12.3	--	1821	13.8	--			
60/30	blok	30	2421	12.0	31	1565	14.0	--	1130	15.8	--
	blok	15									
	blok	2.20	2334	11.8	32	1780	13.7	--			

teen talud 18.5 m

**Tabel 5.2 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1 : 5) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN**

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)	(grd/s)		(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	blok	30	>3320	10.4	58	1722	11.3	--	vlakke berm	roll-over	
	blok	15						roll-over	vlakke berm	roll-over	
	blok	.85	>3006	10.7	59				vlakke berm	roll-over	
80/20	blok	30	>2788	10.5	42				vlakke berm	roll-over	
	blok	15						zie 1 : 5	vlakke berm	roll-over	
	blok	1.29	2650	10.7	41						
60/30	blok	30	2435	10.3	29						
	blok	15						zie 1 : 5			zie 1 : 5
	blok	2.20	2351	10.4	24						

teen talud 20.5 m

**Tabel 5.3 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1 : 6) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN**

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	blok	30	3247	9.1	50				vlakke berm	roll-over	
	blok	15	3123	9.3	52		roll-over		vlakke berm	roll-over	
	blok	.85	>3300	9.6	51				vlakke berm	roll-over	
80/20	blok	30	2807	9.5	34				vlakke berm	roll-over	
	blok	15	2758	9.6	34		zie 1 : 5		vlakke berm	roll-over	
	blok	1.29	2703	9.5	32						
60/30	blok	30	2441	9.0	17						
	blok	15	2420	8.8	17		zie 1 : 5			zie 1 : 5	
	blok	2.20	2365	9.6	13						

teen talud 22.5 m

**Tabel 5.4 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 2 m, helling 1 : 7) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN**

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)	(grd/s)		(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	blok	30	>4500	14.6	54				roll-over		
	blok	15							roll-over		
	blok	.85							roll-over		
80/20	blok	30	3742	14.8	36	1732	18.0	--	vlakke berm		roll-over
	blok	15				1745	19.7	--	vlakke berm		roll-over
	blok	1.29	3586	15.0	36	2300	16.4	--			roll-over
60/30	blok	30	3254	15.2	25	1620	19.6	--			roll-over
	blok	15				1750	18.1	--	1260	21.1	--
	blok	2.20	3193	15.2	22	2040	19.0	--	1630	17.6	--

teen talud 28.5 m

**Tabel 6.1 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 4) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN**



manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	blok	30	>4300	12.0	43	1860	12.2	--	vlakke berm		roll-over
	blok	15							vlakke berm		roll-over
	blok	.85				ca2400	41.6	--	vlakke berm		roll-over
80/20	blok	30	3793	12.4	25				vlakke berm		roll-over
	blok	15						zie 1 : 4	vlakke berm		roll-over
	blok	1.29	3652	12.7	20				ca1700	14.8	--
60/30	blok	30	3360	12.6	ca 2				1128	15.8	--
	blok	15						zie 1 : 4			
	blok	2.20	3186	13.2	--						

teen talud 33.5 m

**Tabel 6.2** : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 5) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN

manoeuvre condities voertuig.			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			tussenwaarde (spoordiepte 1cm).			zachte berm (spoordiepte 2cm).		
inrij- cond. (km/u)	rem (km/u)	wiel (grd/s)	laterale verplaatsing (cm)	roll hoek (grd)	V teen (km/u)	laterale verplaatsing (cm)	roll hoek (grd)	V teen (km/u)	laterale verplaatsing (cm)	roll hoek (grd)	V teen (km/u)
100/15	blok	30	>4432	10.5	26	roll-over			vlakke berm	roll-over	
	blok	15							vlakke berm	roll-over	
	blok	.85	>4574	10.8	38				vlakke berm	roll-over	
80/20	blok	30	3955	10.5	10	zie 1 : 4			vlakke berm	roll-over	
	blok	15	3787	11.0	--				vlakke berm	roll-over	
	blok	1.29	>4000	11.0	10						
60/30	blok	30	ca3008	10.8	--	zie 1 : 4			zie 1 : 5		
	blok	15									
	blok	2.20	2792	11.3	--						

teen talud 38.5 m

**Tabel 6.3 : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 6) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN**

manoeuvre condities voertuig			draagkrachtige berm (spoordiepte 0cm)			middelzachte berm (spoordiepte 1cm)			zachte berm (spoordiepte 2cm)		
inrij- cond.	rem	wiel	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen	laterale verplaatsing	roll hoek	V teen
(km/u)		(grd/s)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)	(cm)	(grd)	(km/u)
100/15	blok	30	4434	9.7	9				vlakke berm		roll-over
	blok	15	4490	9.3	12			roll-over	vlakke berm		roll-over
	blok	.85	4510	9.6	14				vlakke berm		roll-over
80/20	blok	30	3876	9.5	--				vlakke berm		roll-over
	blok	15	ca3400	9.5	--			zie 1 : 4	vlakke berm		roll-over
	blok	1.29	ca3900	9.5	--						
60/30	blok	30									
	blok	15	zie 1 : 6					zie 1 : 4	zie 1 : 5		
	blok	2.20									

teen talud 43.5 m

**Tabel 6.4** : Resultaten van simulaties met taluds (hoogte 5 m, helling 1 : 7) met stuurmanoeuvres MET BLOKKEREND REMMEN

Helling	Bermhardheid	Roll-overs	Uitgevoerde sumu-laties	Resultaten van simulaties					
				Niet acceptabel				Acceptabel	
		in de vlakke berm		niet-remmen roll-over	remmen van talud af	remmen roll-over	van talud af	totaal	
<u>Taludhoogte 2 m</u>									
1 : 4	hard	0	18	0	5	0	9	14	4
	middelzacht	2	16	1	4	2	4	11	5
	zacht	9	9	2	2	1	0	5	4
1 : 5	hard	0	18	0	1	0	9	10	8
	middelzacht	2	16	1	2	2	0	5	11
	zacht	9	9	2	0	0	0	2	7
1 : 6	hard	0	18	0	0	0	9	9	9
	middelzacht	2	16	1	0	1	0	2	14
	zacht	9	9	2	0	0	0	2	7
1 : 7	hard	0	18	0	0	0	9	9	9
	middelzacht	2	16	0	0	1	0	1	15
	zacht	9	9	2	0	0	0	2	7
Totaal			172	11	14	7	40	72	100
<u>Taludhoogte 5 m</u>									
1 : 4	hard	0	18	0	9	0	9	18	0
	middelzacht	2	16	0	2	3	0	5	11
	zacht	9	9	2	1	2	0	5	4
1 : 5	hard	0	18	0	0	0	8	8	10
	middelzacht	2	16	0	0	1	0	1	15
	zacht	9	9	2	0	0	0	2	7
1 : 6	hard	0	18	0	0	0	5	5	13
	middelzacht	2	16	0	0	1	0	1	15
	zacht	9	9	2	0	0	0	2	7
1 : 7	hard	0	18	0	0	0	3	3	15
	middelzacht	2	16	0	0	1	0	1	15
	zacht	9	9	2	0	0	0	2	7
Totaal			172	8	12	8	25	53	119

Tabel 7. Resultaten van taludsimulaties in getotaliseerde vorm op basis van de gegevens van de Tabellen 3 t/m 6.

Vlakke berm/ hellingshoek	Aantal uitgevoerde simulaties					
	Niet-acceptabel		Acceptabel		Totaal	
	A	%	A	%	A	%
<u>Vlakke berm</u>						
simulaties incl. roll-overs	24	44	30	56	54	100
simulaties zonder roll-overs	13	30	30	70	43	100
<u>Taludhoogte 2 m</u>						
1 : 4	30	70	13	30	43	100
1 : 5	17	40	26	60	43	100
1 : 6	13	30	30	70	43	100
1 : 7	12	28	31	72	43	100
<u>Taludhoogte 5 m</u>						
1 : 4	28	65	15	35	43	100
1 : 5	11	26	32	74	43	100
1 : 6	8	19	35	81	43	100
1 : 7	6	14	37	86	43	100

Tabel 8. Overzicht van de niet-acceptabele en acceptabele simulaties met de vlakke berm en de taludhoogtes 2 en 5 m (hellingshoeken 1 : 4, 1 : 5, 1 : 6 en 1 : 7).



BIJLAGEN 1 T/M 3

Bijlage 1. Bepaling wrijvings- en ploegcoëfficiënten.

Bijlage 2. Berekening theoretische wieluitslagen.

Bijlage 3. Enkele plots van karakteristieke simulaties.

## BIJLAGE 1

### BEPALING WRIJVINGS- EN PLOEGCOËFFICIËNTEN

Om met VEDYAC op een reële manier manoeuvres te kunnen simuleren zijn ten minste 4 "weerstandscoefficiënten" noodzakelijk:

f-roll met en zonder spoorvorming

f-blokken met en zonder spoorvorming (bij spoorvorming is sprake van "ploegen").

Voor elk bermtypen (gras, grondsoort, nat, droog, vlakheid, draagvermogen) gelden andere waarden voor de coëfficiënten.

In het rapport "Rolweerstand metingen in diverse bermsoorten" (1) worden meetgegevens en een literatuuronderzoek gegeven. Noch uit de meetgegevens, noch uit het literatuuroverzicht (2, 3 en 4) is een volledig beeld van de benodigde weerstandscoefficiënt te krijgen.

Vergelijking van de weerstandscoefficiënt van de verschillende onderzoeken laat een grote spreiding zien (Tabel A).

Uit de beschikbare gegevens is de volgende keuze gemaakt, die voornamelijk gebaseerd is op de in Tabel A vermelde gegevens omtrent kort en lang gras.

		droog		nat	
$f_{rol}$	=	.08	=	.08	
$f_{b1}$	=	.37	=	.27	<sup>1</sup> minder betrouwbare
$f_{b1} + 1 \text{ cm}$	=	.44 <sup>1</sup>	=	.33	waarden
$f_{b1} + 2 \text{ cm}$	=	.53	=	.38 <sup>1</sup>	

Met behulp van het VEDYAC-programma is nagegaan in hoeverre deze waarden met elkaar overeenstemmen. Hierbij is van twee veronderstellingen uitgegaan:

1. de ploegcoëfficiënt is gelijk bij de verschillende spoordiepten;
2. de onderlinge verhouding van f-waarden is bij droog en nat ongeveer gelijk.



Met de volgende formule kan in het VEDYAC-model de invloed van het ploegen van de wielen in niet-draagkrachtige bermen worden berekend.

$$F = \eta \times \mu_{p1} \times A \times p \times \text{tank} \frac{v}{v_p}$$

waarin:

F = weerstandskracht door ploegen  
 A = doorsnijding oppervlak (4 banden)  
 p = druk band

$\text{tank} \frac{v}{v_p}$  = niet-lineaire demping

$\mu_{p1}$  = ploegcoëfficiënt  
 $\eta$  = 0 alleen band vervormd  
 $\eta$  = 1 alleen ondergrond vervormd  
 $\eta$  = 0-1 beide vervormen

Aanname ter vereenvoudiging  $\eta = 1$

$$\text{tank} \frac{v}{v_p} = 1$$

De weerstandskracht door het ploegen is massa voertuig x totale wrijvingscoëfficiënt - massa voertuig x wrijvingscoëfficiënt blokkeren.

De formule voor het berekenen van de ploegcoëfficiënt wordt nu:

$$\mu_{p1} = \frac{m \times f_{tot} - m \times f_{b1}}{A \times p}$$

Voor droge bermen

spoorvorming 2 cm:

$$\mu_{p1} = \frac{820 \times .53 - 820 \times .37}{(2 \times 15 \times 4) \times 1.8} = .607$$

spoorvorming 1 cm:

$$.607 = \frac{820 \times f_{tot} - 820 \times .37}{(1 \times 15 \times 4) \times 1.8} \rightarrow f_{tot} = .45$$

Voor natte bermen

spoorvorming 1 cm:

$$\mu_{p1} = \frac{820 \times .33 - 820 \times .27}{(1 \times 15 \times 4) \times 1.8} = .455$$

spoorvorming 2 cm:

$$.455 = \frac{820 \times f_{tot} - 820 \times .27}{(2 \times 15 \times 4) \times 1.8} \rightarrow f_{tot} = .39$$

De ploegcoëfficiënt is voor de droge berm .607 en voor de natte berm .455.

Definitieve keuze:

	droog	nat
$f_{r01}$	= .08	.08
$f_{b1}$	= .37	.27
$f_{b1 + 1 \text{ cm}}$	= .45	.33
$f_{b1 + 2 \text{ cm}}$	= .53	.39

Afbeelding A geeft het verband tussen de wrijvingscoëfficiënt en de daarbij behorende wielbelastingen en remmomenten. Afbeelding B toont het verband tussen de referentiedruk voor de berm en de wielbelastingen met betrekking tot de spoordiepte. Deze referentiedruk vertegenwoordigt een bepaalde waarde van de draagkracht van de berm.

In Afbeelding A kunnen de wielbelasting voor en achter worden afgelezen voor een bepaalde wrijvingscoëfficiënt. In Afbeelding B kunnen voor deze wielbelasting en voor een bepaalde spoordiepte de bijbehorende referentiedrukken worden afgelezen. Het gemiddelde van de twee waarden wordt in het model gebruikt om de draagkracht van de berm weer te geven.

Voor de harde berm is deze waarde 3.5, voor de middelzachte berm 0.94 en voor de zachte berm 0.67.

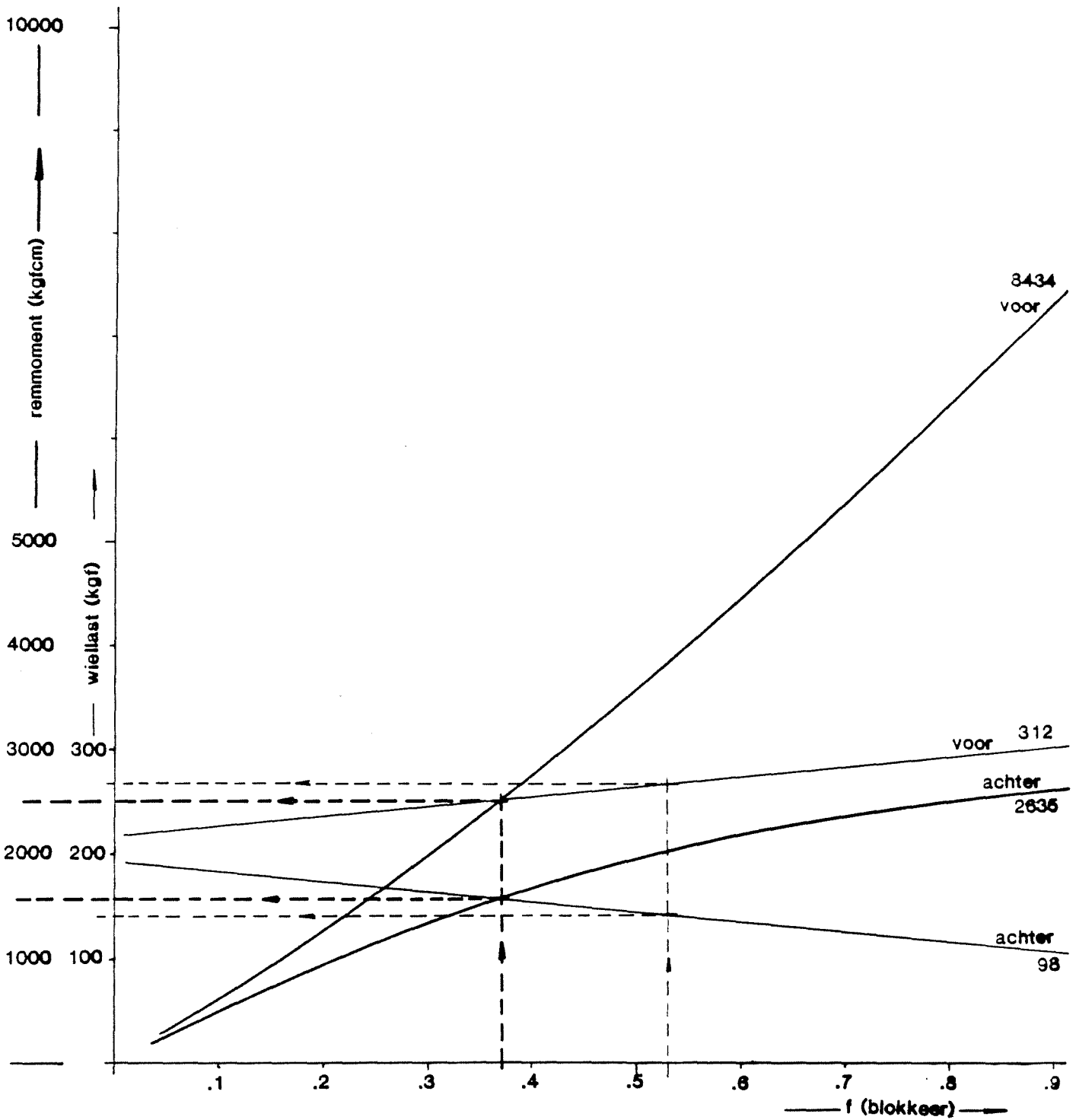
#### Literatuur met betrekking tot Bijlage 1

1. Rolweerstand metingen in diverse bermsoorten. Technisch Bureau Van Schie. April 1987.
2. Spurenkatalog, 1973. Fahrbahntyp - Spurentyp. TÜV, 1973.
3. ATZ 84, 1979. Automobiltechnische Zeitschrift. Bosch, Düsseldorf.
4. Kraftfahrtechnisches Taschenbuch.
5. Metingen uitgevoerd door de SWOV.
6. Literatuurstudie Baanbeschrijving Voertuigen. AGV adviesgroep voor Verkeer en Vervoer b.v. Februari 1983.

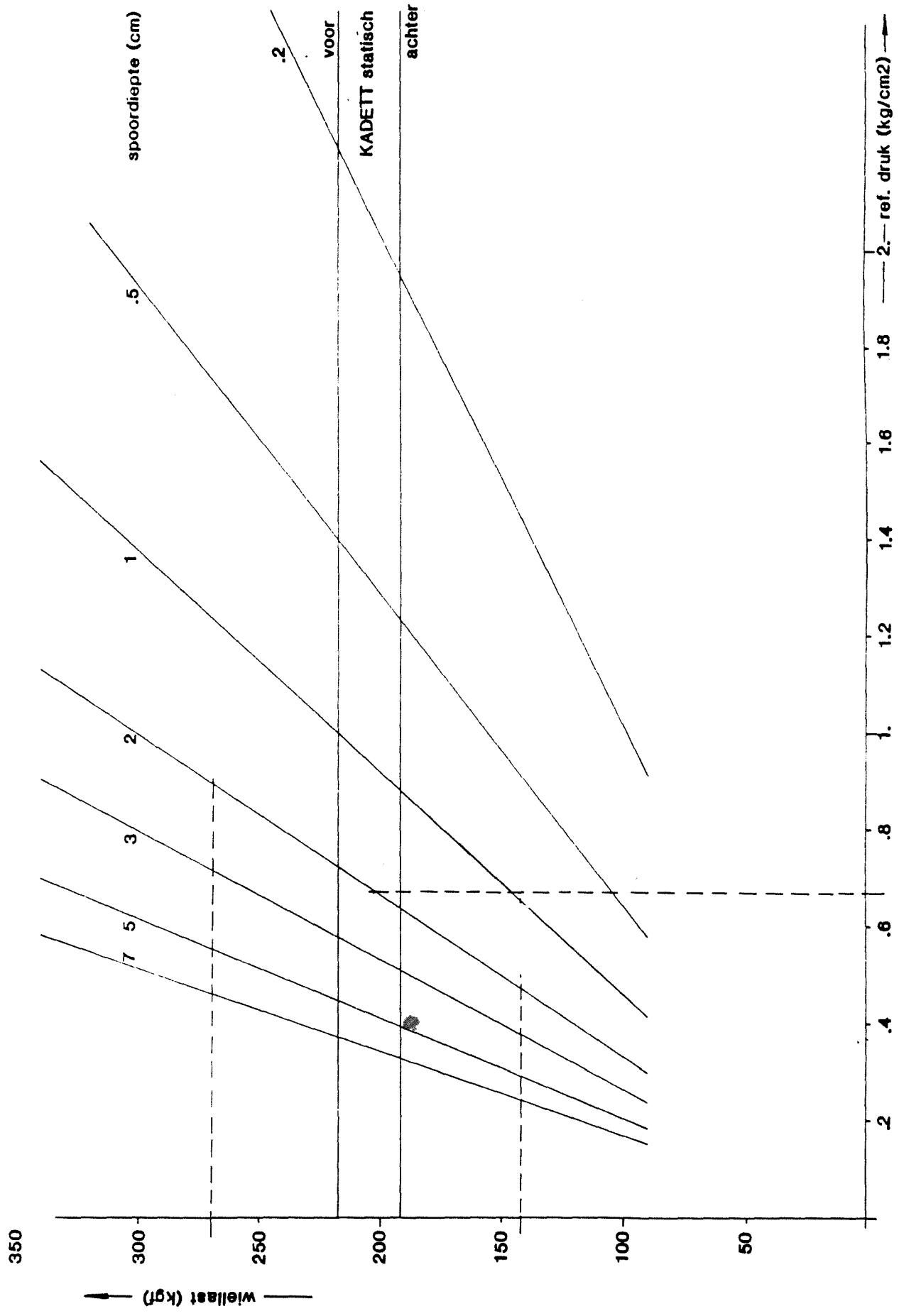
Grondsoort	Rol- en wrijvingscoëfficiënten						Bron
	rol	droog		rol	nat		
		blokke- ren	dwars			blokke- ren	dwars
kort gras	.08-.11	.27-.45	.72	.1	.16	.55-.65	
*	-	1 - 2	1+k	-	1	1	1
lang gras	.04	.33	.72	.11	.5	.39	
*	-	1	1	-	-	1	
klei	.06	1.	1.0	.33	-	-	
*	1	5	k	5	-	-	
los zand	.1-.25	.45-.9	-	.1-.25	.44-.9	-	
*	2	7	-	2	7	-	
gras kort/-	-	.45/.61	-	-	.39	-	2
*		+1			1		
lang	-	.59	-	-	.22;.33	-	
vastgereden zand/kiezel	-	.48-.6	-	-	-	-	
harde aarden							
baan	.02-.04	-	-	-	-	-	3
zachte aarden							
baan	.08	-	-	-	-	-	
los zand	.1-.15	-	-	-	-	-	
	.2-.4	-	-	-	-	-	
zandweg	.05	-	-	-	-	-	4
akkerland	.1-.35	-	-	-	-	-	
gras				.04	.38	-	5

\* spoorvorming (cm)      k = kantelen voertuig

Tabel A. Rol- en wrijvingscoëfficiënten van diverse grondsoorten gebaseerd op literatuurgegevens (bronnen: zie literaturopgave).



Afbeelding A. Verband tussen wrijvingscoëfficient, wiellast en remnoment.



Afbeelding B. Verband tussen draagkracht berm en wiellast.

## BIJLAGE 2

### BEREKENING THEORETISCHE WIELUITSLAGEN

Met behulp van de geselecteerde wrijvingscoëfficiënten van bermen kunnen de bijbehorende theoretische wieluitslagen worden berekend. De centrifugale kracht die op het voertuig in een bocht werkt, wordt verkregen uit de formule:

$$F_c = \frac{m \times v^2}{R}$$

m = massa voertuig (kg)  
v = snelheid (m/s)  
R = straal (m)

De centrifugale kracht op het voertuig is gelijk aan de normaal kracht (4 wielen) maal de wrijvingscoëfficiënt:

$$F_c = K \times \mu$$

K = gewicht voertuig (N)  
 $\mu$  = wrijvingscoëfficiënt

$$\text{zodat } K \times \mu = \frac{m \times v^2}{R}$$

voor 100 km/u:

$$9.81 \times 820 \times .39 = \frac{820 \times 27.8^2}{R}$$

$$R = 213 \text{ m}$$

voor 80 km/u: R = 136 m

voor 60 km/u: R = 77 m

De bijbehorende wieluitslagen bij deze boogstralen worden verkregen met de formule:

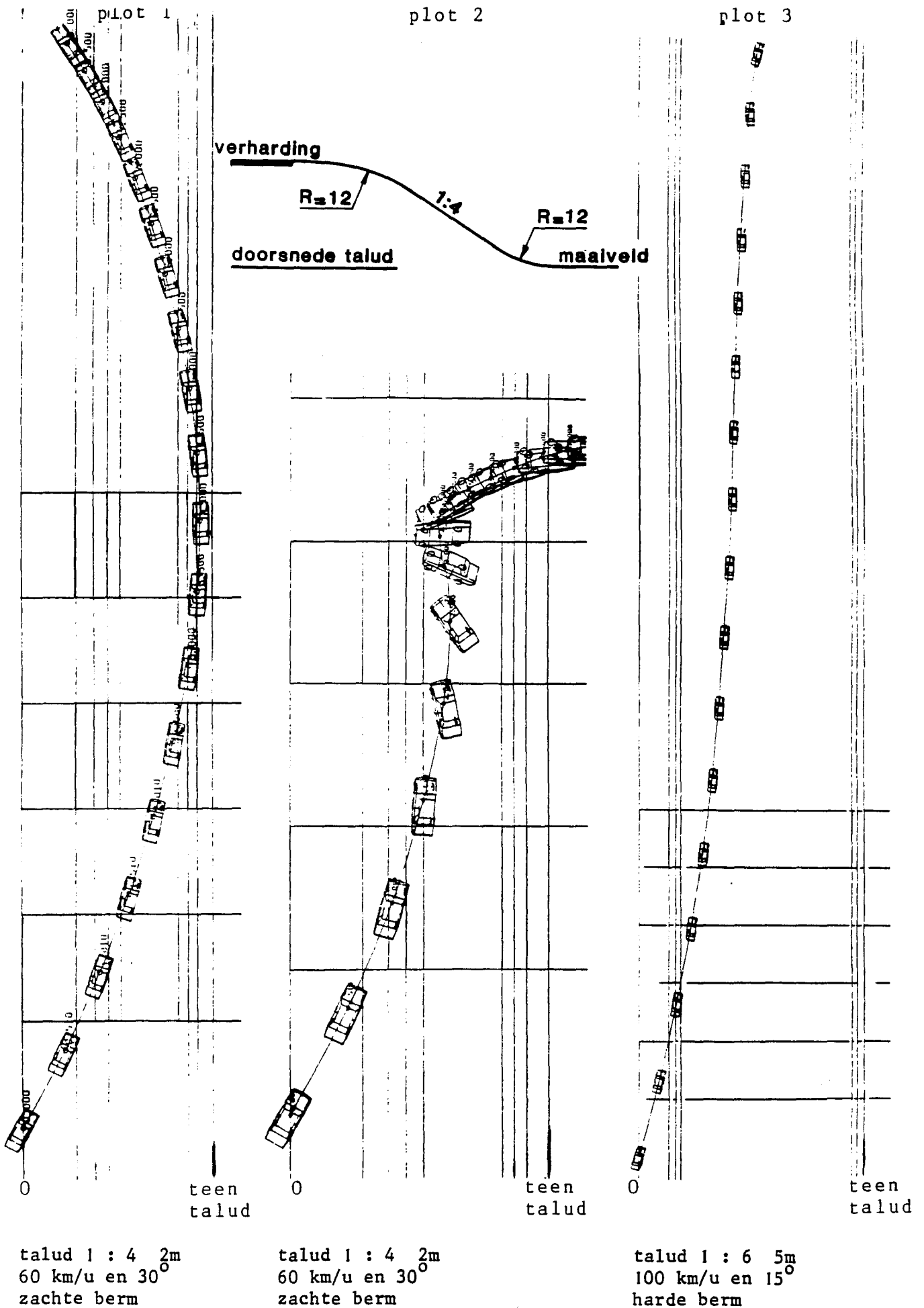
$$\text{tg} \alpha = \frac{\text{wielbasis}}{\text{boogstraal}} ; \text{ de wielbasis van de Opel Kadett bedraagt } 2.42 \text{ m.}$$

$$\text{voor } 100 \text{ km/u: } \alpha_{\text{wiel}} = .65^\circ$$

$$\text{voor } 80 \text{ km/u: } \alpha_{\text{wiel}} = 1.02^\circ$$

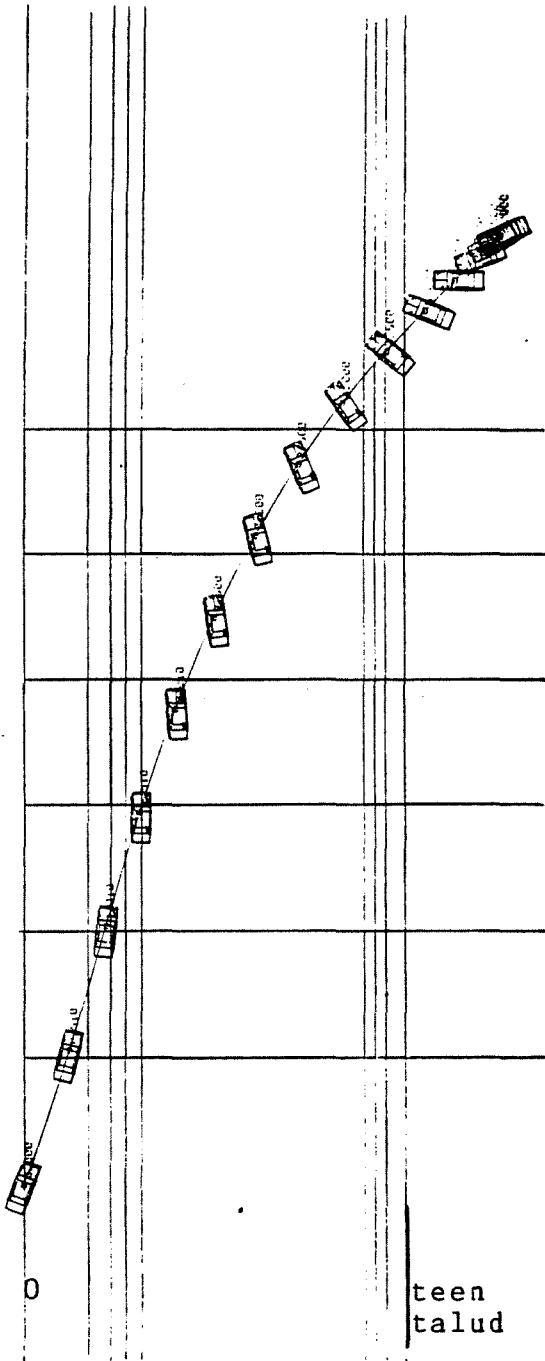
$$\text{voor } 60 \text{ km/u: } \alpha_{\text{wiel}} = 1.80^\circ$$

BIJLAGE 3, Enkele plots van karakteristieke simulaties



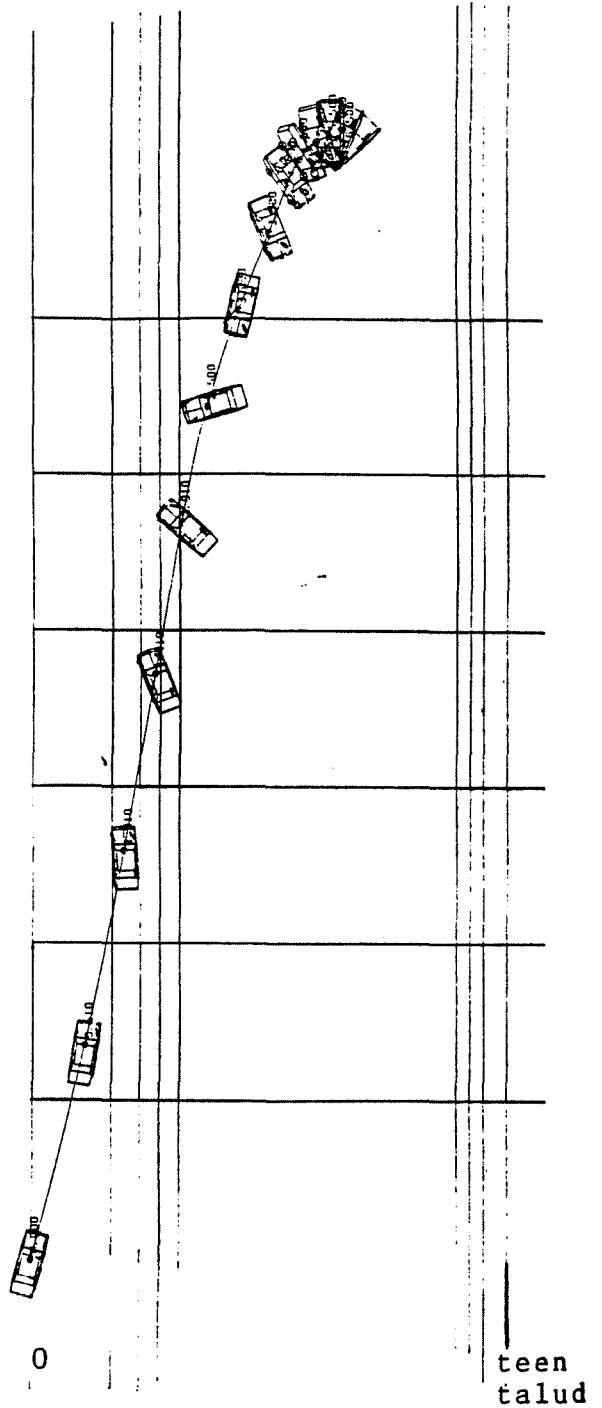
BIJLAGE 3 (vervolg).

plot 4



talud 1 : 4 5m  
80 km/u en 20°  
zachte berm

plot5



talud 1 : 4 5m  
100 km/u en 15°  
zachte berm