

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van het afstudeeronderzoek van Mark van den Bos. Het onderzoek is uitgevoerd aan de sectie Verkeerskunde van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft in samenwerking met de Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) van Rijkswaterstaat. De opdracht bestond uit het ontwikkelen van een aanvulling van het microsimulatieprogramma FOSIM¹ met betrekking tot hellingen.

De auteur wil bij deze de leden van de beoordelingscommissie bedanken, te weten; prof.dr. H.J. van Zuylen als afstudeerhoogleraar van de commissie, ir. P.B.L. Wiggeraad als afstudeercoördinator van de sectie Verkeerskunde, interne begeleider ir. T. Dijkster van de TU Delft, de externe begeleiders ir. H. Schuurman van AVV en ir. C.A. Verweij van de Bouwdienst Rijkswaterstaat en ir. M.B. Duinkerken van de sectie Transporttechniek en Logistieke Systemen van de faculteit Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek van de TU Delft.

Ook ir. R.G.M.M. Vermijs van de Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat wordt bij deze van harte bedankt voor het leveren van de nodige informatie ten aanzien van de meetgegevens. Verder wil ik de medewerkers van de sectie Verkeerskunde bedanken voor hun medewerking en met name ir. H. Botma voor zijn uitleg bij allerlei wiskundige problemen (onder andere paragraaf 4.2.2.1), ir. P. Knoppers voor zijn deskundige medewerking wat betreft de modelimplementatie en natuurlijk Thomas Dijkster, die naast mijn afstudeerbegeleider tevens mijn dagelijkse gezelschap vormde.

Mijn grootste dank gaat uit naar mijn ouders. Zonder hun belangeloze steun was dit rapport niet tot stand gekomen.

Delft/'s-Gravenzande, januari 2002

Mark van den Bos

¹ Eigendom van de Adviesdienst Verkeer en Vervoer van Rijkswaterstaat en in beheer en ontwikkeling bij de Technische Universiteit Delft.

Samenvatting

Het programma FOSIM² (Freeway Operations SIMulation) is een microsimulatiemodel dat de verkeersafwikkeling op Nederlandse autosnelwegen nabootst. Microsimulatie betekent dat het gedrag van ieder afzonderlijk voertuig wordt gemodelleerd. FOSIM wordt gebruikt om meer inzicht te verkrijgen in de verkeersafwikkeling op strengen van autosnelwegen.

Met FOSIM kunnen de meeste typen wegvakken worden gesimuleerd. Dit zijn echter wel vlakke wegvakken. FOSIM houdt geen rekening met de invloed van hellingen op de verkeersafwikkeling. Hoewel in het Nederlandse landschap maar weinig hoogteverschillen voorkomen, kan het desondanks bij Nederlandse wegvakken relevant zijn om het effect van hellingen in de FOSIM-simulatie mee te nemen. Hierbij moet worden gedacht aan bruggen, viaducten, tunnels en enkele natuurlijke hellingen in Gelderland en Limburg. Een verbetering van FOSIM ten aanzien van hellingen is daarom zinvol.

Het doel van dit onderzoek is dan ook het ontwikkelen van een model voor hellingen, dat in FOSIM kan worden geïmplementeerd. Hierbij is het onderzoek beperkt tot de studie van *opgaande* hellingen, omdat wordt verwacht dat opgaande hellingen de grootste invloed hebben op de verkeersafwikkeling.

Het resultaat van het onderzoek is een hellingmodel op voertuigniveau, geïmplementeerd in FOSIM, dat bestaat uit een nieuw model voor de maximale acceleratie en een aangepast strookwisselmodel. Een helling in een wegvak beïnvloedt namelijk vooral het acceleratievermogen van de voertuigen en het strookwisselgedrag van de bestuurders. Ook het deceleratievermogen van de voertuigen wordt door een helling beïnvloed, maar er wordt verwacht dit geen significant effect heeft op de verkeersafwikkeling. Ditzelfde geldt voor het volgedrag van bestuurders.

Het acceleratievermogen van een voertuig wordt in sterke mate bepaald door het specifiek vermogen van het voertuig en het hellingspercentage van de weg. Met het specifiek vermogen wordt de verhouding tussen het motorvermogen en de massa van een voertuig bedoeld. Met name bij vrachtwagens is dit specifiek vermogen relatief laag, zodat voornamelijk bij vrachtwagens het acceleratievermogen sterk afneemt bij toenemende hellingspercentages. Wanneer het acceleratievermogen van een voertuig negatief wordt, gaat zijn snelheid dalen. Dit heeft een invloed op de verkeersafwikkeling.

Het strookwisselgedrag op een helling kenmerkt zich door een groter risico dat bestuurders van personenauto's willen accepteren bij het strookwisselen. De oorzaak hiervan is dat de lichte personenauto's in veel mindere mate worden afgeremd door een helling dan de zware vrachtwagens. De bestuurders van personenauto's willen vermijden dat ze worden gehinderd door de langzaam rijdende vrachtwagens en nemen daardoor meer risico bij het strookwisselen dan dat ze gewoonlijk doen. Dit veroorzaakt een afwijkende verkeersafwikkeling op hellingen.

Bij de implementatie van het hellingmodel in FOSIM zijn de voertuigkenmerken specifiek vermogen, rendement, luchtweerstand en rolweerstand geïntroduceerd. Hiervan zijn het specifiek vermogen en de luchtweerstand als kalibratieparameters geïmplementeerd. Een derde kalibratieparameter vormt de standaardafwijking van de specifieke vermogens van vrachtwagens. Het rendement en de rolweerstand zijn als "verborgen" parameters (constanten) geïmplementeerd.

De schatting (kalibratie) van de voertuigparameters van personenauto's (in FOSIM de voertuig-bestuurdercombinaties 1 t/m 3) is gericht op het benaderen van het acceleratieverloop volgens het huidige maximale-acceleratiemodel in FOSIM. Daarentegen is de kalibratie van de voertuigparameters van vrachtwagens (in FOSIM voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5) uitgevoerd aan de hand van empirische voertuiggegevens.

De validatie van het hellingmodel op *voertuigniveau* is onderverdeeld in een validatie ten aanzien van vlakke wegen en een validatie ten aanzien van hellingen. Bij de validatie van het

² Eigendom van de Adviesdienst Verkeer en Vervoer van Rijkswaterstaat en in beheer en ontwikkeling bij de Technische Universiteit Delft.

hellingmodel ten aanzien van vlakke wegen is geprobeerd het acceleratie- en snelheidsverloop op vlakke wegen, zoals in de huidige versie van FOSIM (FOSIM 4.1), te benaderen. Bij de validatie van het hellingmodel ten aanzien van hellingen is het voertuigmodel SimVra+ gebruikt. SimVra+ is een programma (ontwikkeld door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat) waarmee het snelheidsverloop van vrachtwagens over een bepaald verticaal alignement (het verticale verloop van het wegprofiel) kan worden berekend. Deze validatie heeft geresulteerd in realistische snelheidsverlopen van vrachtwagens op vlakke en hellende wegen in FOSIM.

De FOSIM-versie waarin het hellingmodel is geïmplementeerd is FOSIM-Hellingen genoemd. De validatie van FOSIM-Hellingen op *verkeersstroomniveau* is eveneens uitgevoerd ten aanzien van zowel vlakke wegen als van hellingen. De validatie ten aanzien van vlakke wegen heeft geresulteerd in grote overeenkomsten tussen de uitkomsten van FOSIM-Hellingen en FOSIM 4.1. De validatie ten aanzien van hellingen is uitgevoerd met behulp van empirische data. Deze data zijn afkomstig van een helling op de A50 bij Arnhem. Bij de validatie met de meetgegevens van de A50 is het niet gelukt om met FOSIM-Hellingen de gewenste uitkomsten te genereren. De door FOSIM-Hellingen gegenereerde capaciteiten zijn hoger dan de capaciteiten die volgen uit de metingen. Er zijn meerdere verklaringen voor dit verschil te noemen, die met name moeten worden gezocht in het strookwisselmodel of het volgmodel in FOSIM-Hellingen. Deze modellen zijn waarschijnlijk nog niet geschikt genoeg om het bestuurdersgedrag op hellingen na te bootsen. Ook kan het zijn dat het bestuurdersgedrag in het gebied van de meetlocatie (ruraal) afwijkt van het bestuurdersgedrag dat in FOSIM wordt gemodelleerd (urbaan).

Omdat er geen goede overeenkomst tussen meetgegevens van de A50 en de simulatieresultaten van FOSIM-Hellingen is bereikt, wordt aanbevolen meer (gedetailleerde) gegevens te verzamelen van de meetlocatie op de A50. Wat betreft het voertuigniveau zijn volgafstanden en rijstrookwisselingen essentiële gegevens om FOSIM-Hellingen te verbeteren. Op verkeersstroomniveau is het voornamelijk van belang dat er *rijstrookgegevens* worden verzameld in plaats van *rijbaangegevens*. Ook wordt aanbevolen FOSIM-Hellingen met andere meetlocaties te valideren.

Summary

The microscopic model FOSIM³ (Freeway Operations SIMulation) simulates traffic operations on Dutch freeways by describing the behavior of individual drivers. FOSIM can be used to analyze a large variety of geometric designs, but the model does not take grades into account because the terrain in the Netherlands is generally rather level. There are, however, some locations in the Dutch freeway system where grades significantly influence traffic operations, specifically in the provinces of Gelderland and Limburg where the terrain can be slightly rolling and at some bridges, fly-overs and tunnels. Consequently, it was decided to include the influence of grades on traffic in FOSIM. The model extension was limited to upgrades only, because it was expected that these have the most significant impact. This report describes the development of the new model.

The result of the research was a grade model which determines the impact of upgrades on microscopic level, this is, the model determines the effect of grades for each individual vehicle-driver combination. The model consisted of a new maximum acceleration model and an adjusted lane change model because a grade particularly affects the acceleration ability of vehicles and the lane change behavior of drivers. Further, a vehicle's deceleration ability is affected by grades, but it is expected that this does not have a significant effect on the traffic flow. The same goes for the driver's follow behavior as well.

Vehicle acceleration power strongly depends on a vehicle's power-weight ratio and the roadway gradient. Particularly trucks have low power-weight ratios. This is why the ability of trucks to accelerate decreases strongly as a result of increasing gradients. When a vehicle's acceleration ability becomes negative the vehicle starts to slow down. This affects the traffic operations.

Lane change behavior at a grade is expected to be characterized by a higher risk that passenger car drivers are willing to accept. This is caused by the light weight passenger cars which are slowed down to a lesser degree (or not at all) than the heavy trucks. Because passenger car drivers try to avoid being slowed down by trucks, passenger car drivers may accept higher risks when changing lanes compared with level roadways. This may result in traffic characteristics different from traffic characteristics on level freeway segments.

The implementation of the grade model led to the introduction of several new parameters for each vehicle class in FOSIM power-weight ratio (average and standard deviation), air resistance, engine efficiency, and rolling resistance. The latter two were implemented as constants, while the first were used for model calibration. The estimation of the parameters (calibration) for passenger cars (in FOSIM represented by vehicle-driver combinations 1, 2 and 3) was achieved by setting the parameters in such a way that the acceleration abilities of the passenger cars according to the new acceleration model resembled the acceleration abilities of passenger cars in the conventional FOSIM version. The calibration for trucks (in FOSIM represented by vehicle-driver combinations 4 and 5) was based on empirical vehicle data.

The validation of the grade model on *vehicle level* was divided in a validation with regard to level roads and a validation with regard to grades. The validation with regard to level roads determined whether the acceleration and speed curves at level roads remained the same as in the conventional FOSIM version (FOSIM 4.1). The validation of the grade model with regard to grades determined whether the new acceleration model for FOSIM performed similar to the vehicle dynamics model SimVra+ (developed by the Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management; Department of Road Design). This model calculates the speed curves of individual trucks for a given vertical alignment at a very detailed level and was validated extensively for trucks common in the Netherlands. It was found that the acceleration model developed for FOSIM and SimVra+ calculated similar results for both level roads and grades.

³ FOSIM is property of the Transport Research Centre (Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management) and under development at the Delft University of Technology.

The validation of the extended FOSIM model, further to be called FOSIM-Slopes, on *traffic flow level* was also been done for both level roads and grades. The validation with regard to level roads resulted in a good similarity between the output of FOSIM-Slopes and FOSIM 4.1, the latter of which has been validated frequently with empirical data. The validation with regard to grades was executed with empirical data which were collected at an grade (maximum grade of 2,2%) on the A50 freeway near Arnhem.

The traffic operations at the A50 site were simulated with FOSIM-Slopes and the results were compared with the empirical data. The simulation results and the A50 data did not agree well. In particular, the capacity values generated by FOSIM-Slopes were higher than the measured capacity values. There are several explanations to the differences that were found, which mainly have to be sought in the lane change model and the car-following model in FOSIM-Slopes. It seems that these models are not fully suitable for driver behavior at grades. Also, it is possible that driver behavior at the rural A50 site significantly differs from the urban freeways for which FOSIM is most commonly used.

Because good agreement between model results and empirical data was not achieved for the A50, it is recommended to collect more (detailed) data from the measurement location at the A50. On a microscopic level it is essential to have data on following distances and lane changes to improve FOSIM-Slopes. On traffic flow level it is important to have *lane* data instead of *carriageway* data. It is also recommended to validate FOSIM-Slopes with data from other measurement locations.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	III
SAMENVATTING	V
SUMMARY	VII
INHOUDSOPGAVE	IX
1. INLEIDING	1
1.1. MODELLERING VAN DE VERKEERSAFWIKKELING OP AUTOSNELWEGEN	1
1.2. PROBLEEM- EN DOELSTELLING	1
1.3. AANPAK VAN HET PROBLEEM	3
1.4. INDELING RAPPORT	3
2. PROBLEEMANALYSE	5
2.1. INLEIDING	5
2.2. DE NEDERLANDSE ONTWERPRICHTLIJNEN MET BETREKKING TOT HELLINGEN VAN AUTOSNELWEGEN	5
2.2.1. Algemeen	5
2.2.2. De helling	6
2.2.3. De verticale bogen	6
2.3. DE INVLOED VAN HELLINGEN OP DE VERKEERSAFWIKKELING	7
2.3.1. Voertuigkenmerken	7
2.3.1.1. Acceleratievermogen	7
2.3.1.2. Deceleratievermogen	8
2.3.2. Bestuurderskenmerken	8
2.3.2.1. De mate van benutting van het beschikbare motorvermogen	8
2.3.2.2. De reactie op het snelheidsverval als gevolg van een helling	9
2.3.2.3. Het schakelgedrag van bestuurders	9
2.3.2.4. Het volgedrag	9
2.3.2.5. Het strookwisselgedrag	10
2.4. RELEVANTE MICROSCOPISCHE VERKEERSKENMERKEN VOOR HET HELLINGMODEL	10
2.4.1. De voertuigkenmerken	11
2.4.2. De bestuurderskenmerken	11
2.5. MODELLERING VAN HELLINGEN IN ANDERE SIMULATIEMODELLen	11
2.5.1. INTEGRATION	12
2.5.2. CORSIM	12
2.5.3. HUTSIM	13
2.5.4. Conclusies	13
3. HET HELLINGMODEL	15
3.1. INLEIDING	15
3.2. UITGANGSPUNTEN EN AANNAMEN	15
3.2.1. Uitgangspunten	15
3.2.2. Aannamen	15
3.3. HET MAXIMALE-ACCELERATIEMODEL	16
3.3.1. De voertuigmechanica	16
3.3.2. Modelimplementatie	20
3.3.2.1. Beperking van het aantal parameters	20
3.3.2.2. De implementatie ten aanzien van snelheidsonderdrukking	21
3.3.3. Vergelijking van het maximale-acceleratiemodel met het maximale-acceleratiemodel van FOSIM 4.1	21
3.4. HET STROOKWISSELMODEL	22
3.4.1. Het huidige strookwisselmodel	22
3.4.2. Het aangepaste strookwisselmodel	23
4. KALIBRATIE EN VALIDATIE VAN HET MAXIMALE-ACCELERATIEMODEL OP VOERTUIGNIVEAU	25

4.1. INLEIDING.....	25
4.2. KALIBRATIE.....	25
4.2.1. Inleiding.....	25
4.2.2. De kalibratie van de vrachtwagenparameters.....	26
4.2.2.1. Het specifiek vermogen.....	26
4.2.2.2. Het rendement.....	29
4.2.2.3. De luchtweerstandcoëfficiënt.....	29
4.2.3. De kalibratie van de personenautoparameters.....	30
4.3. VALIDATIE.....	31
4.3.1. Inleiding.....	31
4.3.2. Validatie van het maximale-acceleratiemodel ten aanzien van vlakke wegen.....	31
4.3.3. Validatie van het maximale-acceleratiemodel ten aanzien van hellingen.....	33
4.4. VOOR- EN NADELEN VAN HET MAXIMALE-ACCELERATIEMODEL.....	34
5. VALIDATIE VAN HET HELLINGMODEL OP VERKEERSSTROOMNIVEAU	35
5.1. INLEIDING.....	35
5.2. VALIDATIE TEN AANZIEN VAN VLAKKE WEGEN.....	35
5.2.1. Inleiding.....	35
5.2.2. Toets voor verschil in gemiddelden.....	37
5.2.3. Toets voor verschil in standaardafwijking.....	37
5.2.4. Resultaten.....	38
5.3. DE VALIDATIE TEN AANZIEN VAN HELLINGEN.....	42
5.3.1. Inleiding.....	42
5.3.2. Videodata.....	44
5.3.2.1. Beschrijving en resultaten.....	44
5.3.2.2. Conclusies.....	46
5.3.3. Snelheidsverlopen.....	46
5.3.3.1. Beschrijving en resultaten.....	46
5.3.3.2. Conclusies.....	49
5.3.4. MARE-data.....	50
5.3.4.1. Inleiding.....	50
5.3.4.2. Meetresultaten en interpretatie.....	51
5.3.4.3. De simulatie met FOSIM-Hellingen.....	55
5.3.4.4. Validatie.....	57
5.3.5. Conclusies.....	62
6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	65
6.1. CONCLUSIES.....	65
6.1.1. Probleemstelling.....	65
6.1.2. Doelstelling.....	65
6.1.3. Verricht onderzoek.....	65
6.1.4. Modelontwikkeling.....	65
6.1.5. Modelimplementatie.....	66
6.1.6. Validatie.....	66
6.2. DISCUSSIE.....	66
6.3. AANBEVELINGEN.....	67
REFERENTIES.....	69
BIJLAGEN.....	71
BIJLAGE 1. ENKELE BEGRIPPEN UIT DE VERKEERSSTROOMTHEORIE.....	71
BIJLAGE 2. WIJZIGINGEN IN DE PROGRAMMACODE VAN FOSIM.....	71
BIJLAGE 3. BESCHRIJVING VAN HET VOERTUIGMODEL SIMVRA+.....	71
BIJLAGE 4. VOERTUIGKARAKTERISTIEKEN.....	71
BIJLAGE 5. DE LOG-NORMALE VERDELING VAN DE SPECIEKE VERMOGENS VAN VRACHTWAGENS.....	71
BIJLAGE 6. VALIDATIE VAN HET HELLINGMODEL MET SIMVRA+.....	71
BIJLAGE 7. T-VERDELING.....	71
BIJLAGE 8. F-VERDELING.....	71
BIJLAGE 9. POGINGEN OM FOSIM-HELLINGEN TE VERBETEREN BIJLAGE 1. ENKELE BEGRIPPEN UIT DE VERKEERSSTROOMTHEORIE.....	71
BIJLAGE 1. ENKELE BEGRIPPEN UIT DE VERKEERSSTROOMTHEORIE.....	73

<i>De drie basisgrootheden van de verkeersstroomtheorie</i>	73
<i>Het basisdiagram</i>	73
<i>Momentane, harmonische en lokale gemiddelde snelheid</i>	74
<i>De schokgolftheorie</i>	75
<i>Moving bottleneck met inhaalmogelijkheid</i>	75
BIJLAGE 2. WIJZIGINGEN IN DE PROGRAMMACODE VAN FOSIM.....	77
<i>VehicleInfo</i>	77
<i>AMaxV</i>	78
<i>MoveForward</i>	78
<i>PerformLanechange</i>	79
BIJLAGE 3. BESCHRIJVING VAN HET VOERTUIGMODEL SIMVRA+	81
<i>Inleiding</i>	81
<i>Invoergegevens</i>	81
<i>Kalibratie en validatie</i>	82
<i>Uitvoer</i>	82
BIJLAGE 4. VOERTUIGKARAKTERISTIEKEN.....	83
BIJLAGE 5. DE LOG-NORMALE VERDELING VAN DE SPECIFIEKE VERMOGENS VAN VRACHTWAGENS	109
BIJLAGE 6. VALIDATIE VAN HET HELLINGMODEL MET SIMVRA+	111
BIJLAGE 7. T-VERDELING	117
BIJLAGE 8. F-VERDELING	119
BIJLAGE 9. POGINGEN OM FOSIM-HELLINGEN TE VERBETEREN	121
<i>Verandering van de invoergegevens</i>	121
<i>Het risico bij het strookwisselen</i>	121
<i>De maximale strookwisseldeceleratie</i>	121
<i>Het remmen voor langzame voertuigen op de rechter rijstrook</i>	121
AANVULLING (ACHTERAF TOEGEVOEGD)	123
INLEIDING.....	123
THEORIE	123
VOORSTEL VOOR MODEL AANVULLING	123
RESULTATEN	123
REFERENTIES.....	129

1. Inleiding

1.1. Modellerings van de verkeersafwikkeling op autosnelwegen

Het autoverkeer in Nederland is onderhevig aan een constante groei. De overheid probeert deze toenemende verkeersvraag te beantwoorden met verbeteringen van het huidige wegennet. Deze verbeteringen bestaan uit het zorgen voor een betere benutting van de huidige wegen, het weghalen van knelpunten, het completeren van ontbrekende schakels in het hoofdwegennet en in sommige gevallen het aanleggen van geheel nieuwe verbindingen. Bij al deze maatregelen is inzicht nodig in de verkeersafwikkeling op een autosnelweg. Er zijn dan ook verschillende handleidingen die hulp bieden bij het ontwerpproces, zoals de ROA (Richtlijnen voor het Ontwerpen van Autosnelwegen) [Rijkswaterstaat, 1989-1993] en de HCM (Highway Capacity Manual) [TRB, 2000]. Bij ingewikkelde gevallen bieden deze handleidingen echter geen uitkomst meer. Een simulatiemodel kan dan de mogelijkheid bieden om meer inzicht te verkrijgen in bepaalde verkeersprocessen. Het model FOSIM (Freeway Operations SIMulation) is een dergelijk simulatiemodel. FOSIM is in eigendom van de Adviesdienst voor Verkeer en Vervoer (AVV) van Rijkswaterstaat en wordt ontwikkeld door het Laboratorium voor Verkeerskunde (LvV) van de TU Delft [De Leeuw, 2000].

FOSIM is een zogenaamd microscopisch simulatiemodel voor Nederlands autosnelwegverkeer. Microscopisch betekent in dit geval dat tijdens de simulatie het gedrag van elk afzonderlijk voertuig wordt nagebootst. Dit houdt in dat bij de invoer geen verkeersstroomkenmerken gegeven hoeven worden, maar dat deze een uitkomst van de simulatie zijn. De invoer van FOSIM bestaat uit voertuig-, bestuurders- en wegkenmerken.

1.2. Probleem- en doelstelling

In het microsimulatiemodel FOSIM zijn lang niet alle aspecten verwerkt die de verkeersafwikkeling op een autosnelweg kunnen beïnvloeden. Eén van de aspecten waarmee FOSIM nog geen rekening houdt, is de invloed van hoogteverschillen in het wegverloop.

Hoewel in het Nederlandse landschap weinig hoogteverschillen voorkomen, wordt de verkeersafwikkeling in enkele verkeerssituaties echter wel beperkt door het hoogteverschil in het wegverloop. Hierbij moet worden gedacht aan bruggen, viaducten, tunnels en enkele natuurlijke hellingen die in Nederland voorkomen. Met name bij bruggen en tunnels worden in de praktijk lagere capaciteiten gemeten dan bij wegen op maaiveldniveau. Deze lagere capaciteiten worden verklaard door verschillende factoren. Bij bruggen worden bijvoorbeeld een krappere dwarsprofiel en het hoogteverschil vaak als verklaringen voor de lagere capaciteit gegeven. Bij tunnels worden deze factoren ook genoemd, waaraan meestal ook de factor "tunnelvrees" wordt toegevoegd.⁴ Men kan zich afvragen hoe de genoemde factoren zich tegenover elkaar verhouden. Wellicht is het hoogteverschil de belangrijkste capaciteitsbeperkende factor van bruggen en tunnels.

In tabel 1.1. wordt een aantal (door de Regionale Directies van Rijkswaterstaat genoemde) locaties opgesomd waar de aanwezigheid van een helling *mogelijkerwijs* van invloed is op de verkeersafwikkeling.

⁴ Bij tunnels speelt ook nog mee dat sommige vrachtwagens met een hogere snelheid de neergaande helling van tunnel kunnen afrijden zodat zij met een hogere beginsnelheid de opgaande helling van de tunnel op kunnen rijden.

Tabel 1.1. Locaties waar de aanwezigheid van een helling <i>mogelijkerwijs</i> van invloed is op de verkeersafwikkeling (genoemd door de Regionale Directies van Rijkswaterstaat)				
Regionale Directie	Locatie	Maximaal hellingspercentage	Lengte	Opmerking
Oost-Nederland	A50 tussen Arnhem en Apeldoorn	2,2%	± 2 km	-
Limburg	A2 tussen Meerssen en Beek: Kruisberg	3,5%	± 1,5 km	Extra kruipstrook aanwezig
	A76 tussen Kunderberg en Bocht	-	-	3 rijstroken meestal vrij lage intensiteiten
Noord-Holland	A10: Opeenvolging van Zeeburgertunnel en Zeeburgerbrug	-	± 1 km	-
	A9: Velsertunnel	-	-	Door oude ontwerprichtlijnen zijn de opritten bij de Velsertunnel steiler dan normaal
Zuid-Holland	Knooppunt Prins Clausplein	4,4%	± 0,8 km	-
	A16: Brienenoordbrug	3,3%	± 1 km	Aparte vrachtwagenstrook aanwezig
	A15: Tunnel onder de Noord (Alblasserdam)	4,5%	± 0,8 km	
	A16: Moerdijkbrug	-	-	-
	A4 tussen Zoeterwoude-Rijndijk en Hoogmade: brug bij Leiden	-	-	smaller dwarsprofiel
	A29: Knooppunt Hellegatsplein	-	-	-

Een tweede relevant aandachtspunt met betrekking tot hellingen is het inhaalverbod voor vrachtwagens. Uit onderzoek van Schuurman & Vermijs [1994] blijkt dat een inhaalverbod voor vrachtwagens geen positief effect heeft op de verkeersafwikkeling. Dit onderzoek betrof echter de verkeersafwikkeling op vlakke wegen. Brilon & Drews [1996] bevestigen de conclusie van Schuurman & Vermijs, waarbij zij opmerken dat op stijgende hellingen een inhaalverbod wel leidt tot een verbetering van de verkeersafwikkeling.

De verkeersafwikkeling op hellingen verschilt met de verkeersafwikkeling op vlakke wegen. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat een aantal voertuig- en bestuurderskenmerken afhankelijk is van een helling.

Wat betreft de voertuigkenmerken nemen bij opgaande hellingen het acceleratievermogen en de maximaal haalbare snelheid af en de maximale deceleratie neemt toe. Bij neergaande hellingen geldt het omgekeerde.

Wat betreft de bestuurderskenmerken kunnen het volg- en strookwisselgedrag van bestuurders op zowel op- als neergaande hellingen door een helling worden beïnvloed. Verder veranderen de zichtlengten bij de voet- en topbogen van een helling. Dit kan ook van invloed zijn op het volgedrag.

De hoogteverschillen worden overbrugd door een aaneenschakeling van opgaande en neergaande hellingen. In dit onderzoek wordt enkel de probleemstelling aangepakt ten aanzien van opgaande hellingen, omdat wordt verwacht dat opgaande hellingen de grootste invloed hebben op de verkeersafwikkeling. Bij opgaande hellingen wordt immers een gedeelte van de voertuigen zodanig afgeremd dat zij een grote negatieve invloed krijgen op de verkeersafwikkeling. Bij neergaande hellingen bereiken langzame voertuigen iets hogere snelheden dan op een vlakke weg. Er wordt verwacht dat dit slechts een kleine positieve invloed heeft op de verkeersafwikkeling.

Bij lange steile neergaande hellingen gaat een gedeelte van de voertuigen juist langzamer rijden dan op een vlakke weg. Dit voertuig-bestuurdergedrag heeft een negatieve invloed op de verkeersafwikkeling [TRB, 2000]. In Nederland komen deze lange steile neergaande hellingen (op autosnelwegen) niet voor. Omdat FOSIM wordt ontwikkeld voor Nederlandse verkeerssituaties, wordt dit voertuig-bestuurdergedrag in dit onderzoek niet meegenomen. Uit deze korte probleemomschrijving kan de volgende *probleemstelling* worden geformuleerd:⁵

Opgaande hellingen in autosnelwegtrajecten beïnvloeden het longitudinale en laterale gedrag van voertuigen. Dit kan een verandering van de verkeersafwikkeling veroorzaken. Het effect van opgaande hellingen op de verkeersafwikkeling van autosnelwegen is echter niet verwerkt in het simulatiemodel FOSIM.

Hieruit volgt de *doelstelling* van het onderzoek:

Het implementeren van een microscopisch model voor opgaande hellingen in autosnelwegtrajecten in het simulatieprogramma FOSIM.

Wanneer in het vervolg van dit rapport over een helling wordt gesproken, dan wordt hiermee een opgaande helling bedoeld, tenzij anders vermeld.

1.3. Aanpak van het probleem

De aanpak van de probleemstelling begint met een uitgebreide analyse van het probleem. Hierbij wordt het probleem op voertuig-bestuurdersniveau bestudeerd en vervolgens een verband gelegd met het verkeersstroomniveau. Uit deze probleemanalyse volgt een aantal relevante voertuig-bestuurderskenmerken voor een model voor hellingen. Ook wordt er aandacht besteed aan de modellering van hellingen in andere verkeerssimulatieprogramma's. Met de voertuig-bestuurderskenmerken uit de probleemanalyse wordt een model voor hellingen in FOSIM ontwikkeld. Dit hellingmodel wordt eerst gekalibreerd en daarna gevalideerd op voertuigniveau. Tot slot wordt het hellingmodel in FOSIM (FOSIM-Hellingen) gevalideerd op verkeersstroomniveau.

1.4. Indeling rapport

In hoofdstuk 2 wordt de probleemstelling nader geanalyseerd. Deze probleemanalyse is onderverdeeld in het voertuiggedrag en het bestuurdersgedrag op hellingen. Er zal worden beargumenteerd welke aspecten uit de probleemanalyse worden gebruikt in het hellingmodel. Aan het eind van hoofdstuk 2 wordt de modellering van hellingen in andere verkeerssimulatieprogramma's belicht. Hierna volgt in hoofdstuk 3 een beschrijving van het ontwikkelde hellingmodel voor FOSIM. In hoofdstuk 4 wordt het model op voertuigniveau gekalibreerd en gevalideerd. De validatie van het hellingmodel op verkeersstroomniveau wordt behandeld in hoofdstuk 5. Tenslotte wordt in hoofdstuk 6 een aantal conclusies en aanbevelingen gegeven.

In het rapport worden sommige verkeerskundige basisbegrippen als bekend verondersteld. Hiervoor wordt verwezen naar bijlage 1.

⁵ Een uitgebreide analyse van het probleem wordt in het volgende hoofdstuk gegeven.

2. Probleemanalyse

2.1. Inleiding

In de verkeerskunde wordt onderscheid gemaakt in een microscopisch en een macroscopisch niveau. Bij onderzoek op microscopisch niveau wordt ieder afzonderlijk voertuig in de verkeersstroom bestudeerd. Op macroscopisch niveau worden verkeersstroomkenmerken bestudeerd. Het verband tussen microscopische en macroscopische verkeerskenmerken is dat veranderingen op microscopisch niveau ten grondslag liggen aan macroscopisch niveau.

In de literatuur is vrij veel documentatie te vinden over acceleratie en deceleratie van verschillende voertuigtypen op een helling (microscopische verkeerskenmerken), maar vrij weinig over de capaciteit van hellingen en het ontstaan van congestie op hellingen (macroscopische verkeerskenmerken). Bovendien is de documentatie die daarover is gevonden redelijk oud (20 tot 30 jaar). De data die hierin wordt gepresenteerd kan daardoor achterhaald zijn, omdat de motorvermogens van vrachtwagens in de loop der tijd zijn toegenomen [AASHTO, 1990].

Uit hoofdstuk blijkt dat de hellingen in Nederland relatief kort en niet zo steil zijn. Desondanks wordt in hoofdstuk 1 beargumenteerd dat onderzoek naar het effect van hellingen zinvol wordt geacht. In dit hoofdstuk worden in paragraaf 2.2. de Nederlandse ontwerprichtlijnen met betrekking tot hellingen van autosnelwegen genoemd (ROA-eisen [Rijkswaterstaat, 1989-1993]). Vervolgens zullen in paragraaf 2.3 de microscopische verkeerskenmerken worden genoemd die kunnen worden beïnvloed door een helling. Er wordt telkens uitgelegd hoe een verandering van een microscopisch verkeerskenmerk doorwerkt op de macroscopische verkeerskenmerken. In paragraaf 2.4 wordt aan de hand hiervan beargumenteerd welke kenmerken relevant zijn voor het hellingmodel. Tenslotte wordt in paragraaf 2.5 ingegaan op gevonden informatie over hellingmodellen in andere verkeerssimulatieprogramma's.

2.2. De Nederlandse ontwerprichtlijnen met betrekking tot hellingen van autosnelwegen

Voordat de verkeersafwikkeling op hellingen kan worden bestudeerd, dient eerst het geometrisch ontwerp van hellingen van (autosnel)wegen bekeken te worden. In Nederland is dit geometrisch ontwerp vastgelegd in de Richtlijnen voor het Ontwerpen van Autosnelwegen (ROA) [Rijkswaterstaat, 1989-1993].

2.2.1. Algemeen

De Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) van Rijkswaterstaat hanteert vaste richtlijnen voor het ontwerp van autosnelwegen; de ROA. In de ROA zijn ook eisen ten aanzien van het verticaal verloop van het wegprofiel (het verticaal alignement) vastgelegd. Het verticaal alignement van een weg bepaalt de wijze waarop hoogteverschillen worden overwonnen. In het verticaal alignement worden uitsluitend rechtstanden en cirkelbogen toegepast. Rechtstanden zijn bedoeld voor het overwinnen van (grote) hoogteverschillen. Cirkelbogen worden toegepast om schoksgewijze overgangen tussen rechtstanden te voorkomen. Een cirkelboog onderaan een helling wordt een *voetboog* genoemd, een cirkelboog bovenaan een helling een *topboog*.

In de ROA wordt bij hoofdrijbanen onderscheid gemaakt tussen *kleine* en *grote* *hoogteverschillen*:

- Bij kleine hoogteverschillen, zoals bij ongelijkvloerse kruisingen, worden voet- en topbogen meestal direct op elkaar aangesloten;
- Bij grote hoogteverschillen, zoals bij tunnels of grote verschillen in maaiveldhoogte, wordt tussen de voet- en topboog een rechtstand aangebracht.

Deze indeling is niet van toepassing op op- en afritten. De rechtstand kan daar algemeen worden toegepast zonder negatieve gevolgen voor het wegbeeld.

Het hellingspercentage en de lengte van de helling alsmede de grootte van voet- en topbogen voldoen, mede afhankelijk van de gehanteerde ontwerpsnelheid, aan bepaalde eisen. Hierbij spelen overwegingen ten aanzien van verkeersafwikkeling en verkeersveiligheid een rol.

2.2.2. De helling

Het maximaal toelaatbare hellingspercentage wordt bepaald aan de hand van de ontwerpsnelheid (zie tabel 2.1).

Tabel 2.1. Maximale hellingspercentages bij verschillende ontwerpsnelheden [Rijkswaterstaat 1989-1993]				
Ontwerpsnelheid [km/h]	50	70	90	120
Maximaal toelaatbaar hellingspercentage voor hoofdrijbaan [%]	-	-	4*	3*
Maximaal toelaatbaar hellingspercentage voor overige rijbanen [%]	7	6	5	-

* Bij bijzondere constructies, zoals tunnels en rivierovergangen worden in verband met de hoge kosten hellingen tot 4,5% geaccepteerd

Bij relatief grote hoogteverschillen wordt in principe gekozen tussen:

- een flauwe helling zonder uitbreiding van het aantal rijstroken;
- steilere helling waar de veiligheid voldoende gewaarborgd worden door toevoeging van een extra rijstrook.

In de ROA wordt voor de keuze voor een extra rijstrook de veiligheidseis genoemd, dat de snelheidsreductie van vrachtwagens als gevolg van een helling de 20 km/h niet mag overschrijden. Hierbij wordt het 15-percentiel-voertuig als referentievoertuig gebruikt. Dit is het voertuig vergeleken waarmee 15% van alle vrachtauto's in Nederland trager is. De extra rijstrook wordt aan de linkerzijde van de rijbaan aangebracht. Anders dan bij een kruipstrook aan de rechterzijde (wat in het buitenland gebruikelijk is) behoeft het vrachtverkeer niet van rijstrook te wisselen en wordt de strook goed benut.

2.2.3. De verticale bogen

Voor de afronding van verschillende hellingspercentages worden voet- en topbogen gebruikt. Royale voet- en topbogen zijn van belang voor een vloeiend wegbeeld. Bij voetbogen mag uit het oogpunt van rijcomfort de toename van de verticale versnelling niet meer dan $1,0 \text{ m/s}^2$ zijn. Bij topbogen zijn minimale zichtafstanden bepalend voor de minimum boogstraal van topbogen bij autosnelwegen. De richtlijn die in de ROA wordt gehanteerd is dat de boogstraal van een voetboog tweemaal zo groot is als de daaropvolgende topboog ($R_{\text{voet}} = 2 \cdot R_{\text{top}}$). In tabel 2.2 zijn de minimale topboogstralen R_{top} en de bijbehorende voetboogstralen R_{voet} weergegeven.

Het kan voorkomen, dat er vanwege een onsaamhangend wegbeeld een ander criterium voor voetbogen toegepast wordt (zie tabel 2.3).

Tabel 2.2. Ondergrenzen van boogstralen van top- en voetbogen bij verschillende ontwerpsnelheden [Rijkswaterstaat 1989-1993]		
Ontwerpsnelheid [km/h]	Minimale topboogstraal R_{top} [m]	Minimale voetboogstraal R_{voet} [m]
120	12400	24800
90	6500	13000
70	3700	7400
50	1400	2800

Tabel 2.3. Verhouding voet- en topboogstraal bij variërende hoogteverschillen (alleen toegepast bij een kans op een onsaamhangend wegbeeld) [Rijkswaterstaat 1989-1993]	
Te overwinnen hoogteverschil [m]	Voetboogstraal R_{voet} [m]
1,5	$> 0,5 \cdot R_{top}$
3,0	$> 2,0 \cdot R_{top}$
4,5	$> 3,0 \cdot R_{top}$
6,0	$> 4,5 \cdot R_{top}$
7,5	$> 6,0 \cdot R_{top}$
9,0	$> 7,0 \cdot R_{top}$

2.3. De invloed van hellingen op de verkeersafwikkeling

Microscopische verkeerskenmerken worden bepaald door twee factoren; voertuig- en bestuurderskenmerken. Het grote verschil tussen voertuigkenmerken en bestuurderskenmerken is dat het gedrag van individuele voertuigen redelijk consistent is, terwijl het gedrag van individuele bestuurders van dag tot dag of zelfs per uur van de dag kan verschillen.

In principe is het bestuurdersgedrag onafhankelijk van het voertuig. Hiermee wordt bedoeld dat zowel personenautobestuurders als vrachtwagenchauffeurs kunnen worden onderverdeeld in vlotte of trage bestuurders. Echter, bij vrachtwagens zullen vlotte bestuurders in veel sterkere mate beperkt worden in hun mogelijkheden dan bij personenauto's.

2.3.1. Voertuigkenmerken

Er zijn twee voertuigkenmerken die door hellingen worden beïnvloed:

- het acceleratievermogen;
- het deceleratievermogen.

2.3.1.1. Acceleratievermogen

Het acceleratievermogen bepaalt het snelheidsverloop van een voertuig. Op een helling wordt het acceleratievermogen van voertuigen verlaagd. Wanneer een voertuig, dat op een vlakke weg zijn maximale acceleratievermogen gebruikt, een helling oprijdt, verandert zijn snelheidsverloop ten opzichte van een vlakke weg. Dit uit zich in een minder grote positieve acceleratie of een negatieve acceleratie. Bij een negatieve acceleratie zal de snelheid van een voertuig gaan afnemen. Deze afname zet door totdat een bepaalde minimumsnelheid wordt bereikt. Deze snelheid wordt de kruipsnelheid genoemd. Deze kruipsnelheid is eveneens de maximaal haalbare snelheid die kan worden bereikt bij het accelereren van het voertuig op een helling. Overigens zijn de hellingen in Nederland dermate kort, dat de meeste vrachtwagens niet tot aan hun kruipsnelheid worden afgeremd.

De meest invloedrijke factor voor het acceleratievermogen van voertuigen is het specifiek vermogen. Dit is de verhouding tussen het motorvermogen en de massa van het voertuig. Deze verhouding is bij vrachtwagens relatief laag. Hierdoor wordt het acceleratievermogen, en dus ook de kruipsnelheid, met name bij vrachtwagens sterk beïnvloed door een helling.

Een capaciteitstoestand wordt bereikt bij een bepaalde capaciteitssnelheid. Wanneer de snelheid van de vrachtwagens onder deze capaciteitssnelheid komt te liggen, kan de

capaciteit niet worden bereikt. In dat geval, gaat het vrachtwagenpercentage in de verkeersstroom een belangrijke rol spelen met betrekking tot de capaciteit. De vrachtwagens vormen dan zogenaamde zich verplaatsende (*moving*) bottlenecks [Daganzo, 1997] (zie bijlage 1). Dit betekent dat de capaciteit van de helling afneemt.

Buiten deze moving bottleneckproblematiek heeft het vrachtwagenpercentage op vlakke wegen ook al een redelijk grote invloed op de capaciteit van wegen, onder andere omdat vrachtwagens vanwege hun lengte meer ruimte innemen in de verkeersstroom.

De verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens vertoont in de praktijk een grote spreiding. Deze spreiding wordt met name veroorzaakt door een grote variatie in het maximum laadvermogen en de beladingsgraad van de vrachtwagens. Omdat de specifieke vermogens van vrachtwagens indirect zo'n grote invloed hebben op de verkeersafwikkeling is dus de verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens een ook bepalende factor voor de verkeersafwikkeling.

2.3.1.2. Deceleratievermogen

Op een helling ondervindt een voertuig een extra tegenkracht. Het gevolg hiervan is dat de maximale deceleratie op een helling groter is dan op een vlakke weg. In theorie betekent dit dat er kortere volgafstanden aangehouden kunnen worden, zodat de capaciteit op een helling kan toenemen. Er bestaan echter geen empirische data die dit principe bevestigen.

2.3.2. Bestuurderskenmerken

Het bestuurdersgedrag is moeilijker in bepaalde grootheden vast te leggen dan het voertuiggedrag. Hierdoor is veel minder bekend over het bestuurdersgedrag dan over het voertuiggedrag. Daarom kan van sommige bestuurderskenmerken slechts worden vermoed dat ze op hellingen anders zijn dan op een vlakke weg. In deze probleemanalyse worden de volgende *mogelijk* hellingafhankelijke bestuurderskenmerken beschouwd:

- de mate van benutting van het beschikbare motorvermogen;
- de reactie op het snelheidsverval als gevolg van een helling;
- het schakelgedrag;
- het volgggedrag;
- het strookwisselgedrag.

2.3.2.1. De mate van benutting van het beschikbare motorvermogen

St. John & Kobett [1978] beschrijven een onderzoek uit Canada [Werner, 1974], waaruit blijkt dat bestuurders van personenauto's en recreatievoertuigen hun vraag naar motorvermogen op lange hellingen beperken tot ongeveer 70% van het maximale beschikbare motorvermogen. Dit geldt voor zowel voor het behalen van de maximale snelheid als het behalen van de maximale acceleratie. St. John & Kobett nemen aan dat een vergelijkbaar begrengsgedrag door bestuurders ook wordt toegepast op vlakke en licht hellende wegen en geven drie redenen voor dit bestuurdersgedrag:

- De bestuurders van personenauto's en recreatievoertuigen willen het motorgeluid beperken;
- De bestuurders van personenauto's en recreatievoertuigen willen het brandstofverbruik beperken;
- De meeste personenautomotoren zijn niet gebouwd op het in een lange tijd opereren in maximumvermogen in tegenstelling tot vrachtwagenmotoren, die zijn gebouwd voor lagere snelheden, maar wel voor lange operaties in maximumvermogen.

De onderzoeken van St. John & Kobett en Werner zijn al redelijk oud. Daarom kan worden afgevraagd of het door Werner genoemde percentage van 70% nog wel als maatstaf kan dienen en of de door St. John & Kobett genoemde redenen nog wel toepasbaar zijn voor de moderne voertuigen van tegenwoordig. Ondanks deze bezwaren wordt ervan uitgegaan dat er toch wel enige mate van beperking van het beschikbare vermogen bij bestuurders van personenauto's aanwezig is.

2.3.2.2. De reactie op het snelheidsverval als gevolg van een helling

Uit de voorgaande subparagraaf is gebleken dat de meeste voertuigen over een overcapaciteit aan motorvermogen beschikken, ook op hellingen. Een gedeelte van de bestuurders zal bij de overgang van een vlakke naar een hellende weg pas na een bepaalde tijdsperiode reageren op het snelheidsverval die zij op de helling ondervinden. Dit kan een beperkende factor zijn voor de capaciteit van een hellende weg, want de snelheid is plaatselijk lager dan noodzakelijk. Hiervan zijn echter geen empirische data beschikbaar. Verwacht wordt, dat dit bestuurdersgedrag een verwaarloosbaar klein effect heeft op de macroscopische verkeerskenmerken.

2.3.2.3. Het schakelgedrag van bestuurders

De snelheid en acceleratie van een voertuig zijn afhankelijk van de gebruikte versnelling. Het gebruik van de versnellingen wordt bepaald door de bestuurders. Hierbij kunnen het moment van schakelen en de schakeltijd per bestuurder variëren, zodat dit invloed kan hebben op het snelheidsverloop van voertuigen. Vooral bij zware voertuigen op een helling kan het schakelgedrag grote gevolgen hebben op het snelheidsverloop. Echter, uit onderzoek van TNO [Schoorman, 1989] is gebleken dat het rijgedrag van meerdere chauffeurs bij hetzelfde experiment onderling ongeveer gelijke verschillen te zien geeft als verschillen tussen meerdere experimenten bij dezelfde chauffeur. Er wordt daarom aangenomen dat het verschil in schakelgedrag van bestuurders een verwaarloosbaar effect heeft op de macroscopische verkeerskenmerken.

2.3.2.4. Het volgggedrag

Guyt & Papendrecht [1985] stellen dat de anticipatieruimte de afstand is die een bestuurder tijdens het rijden vooruit kijkt. Deze afstand blijkt ongeveer overeen te komen met de afstand die de bestuurder in 10 à 12 seconden aflegt. De anticipatieruimte is dus afhankelijk van de operationele snelheid van het voertuig. Het belang van deze theorie is, dat aangenomen wordt, dat bestuurders hun snelheid verlagen als de zichtafstand op een (snel)weg onder de grens van de anticipatieruimte uitkomt. De aangepaste snelheid is dan gelijk aan de snelheid waarbij de anticipatieruimte weer overzien kan worden. Op hellingen, en met name bij topbogen, kan dit verschijnsel zich voordoen als de zichtafstand onder de grens van de anticipatieruimte uitkomt.

Bij hoge vraagintensiteiten kunnen te korte zichtafstanden leiden tot het capaciteitstrechtereffect [Buckley & Yagar, 1974]. Het mechanisme van het capaciteitstrechtereffect is vooral bekend van plaatsen waar voertuigen verplicht worden om van strook te wisselen, zoals bij in- en uitvoeringen en rijstrookverminderingen, en werkt als volgt:

Bij het strookwisselen wordt een bestuurder verplicht om in te voegen. Hierbij wordt een klein hiaat geaccepteerd, zodat tijdelijk kleinere volgafstanden dan gewenst ontstaan.

Stroomafwaarts van de rijstrookvermindering probeert een bestuurder zijn gewenste volgafstand te bereiken door even in te houden. Als dit gebeurt op een moment dat de vraagintensiteit rond de capaciteitsgrens ligt, is voor deze grotere volgafstanden geen ruimte. Zodoende ontstaat er congestie.

Bij situaties waar de zichtafstand beperkt wordt, zoals op hellingen, kan men zich hetzelfde capaciteitstrechtereffect voorstellen: bestuurders wensen een grotere volgafstand aan te houden dan dat zij in eerste instantie hadden. Deze grotere volgafstand wordt bereikt door even snelheid te minderen. Als dit gebeurt op een moment dat de vraagintensiteit rond de capaciteitsgrens ligt, is voor deze grotere volgafstanden geen ruimte. Zodoende ontstaat er congestie.

Een tweede volgggedragkenmerk wat ten aanzien hellingen relevant kan zijn, is de hypothese dat bestuurders "slomer" gaan rijden wanneer zij zich in een file bevinden. Dit houdt in dat ze grotere volgafstanden aanhouden, waardoor de capaciteit afneemt [Dijker e.a., 1998]. Omdat de verkeersstroom op hellingen trager wordt, kan dit voor sommige bestuurders eruit zien als congestievorming. Hierdoor kan het voorkomen dat bestuurders ook op hellingen dit volgggedrag gaan vertonen. Hierdoor neemt de capaciteit op hellingen af.

2.3.2.5. Het strookwisselgedrag

Het strookwisselgedrag wordt beïnvloed door de aanwezigheid van hellingen (zie onder andere Brannolte [1978] en Müller [1976]). Brannolte [1978, blz. 5] beschrijft het strookwisselgedrag op hellingen als volgt:

Op een helling worden vrachtwagens in veel sterkere mate afgeremd dan personenauto's. Een gedeelte van de personenauto's die zich aan het begin van een helling op de rechterrijstrook bevindt, zal de hinder van langzame vrachtwagens willen vermijden en gaat daardoor van rijstrook wisselen. Er ontstaat dus een soort bottlenecksituatie. Voor personenauto's kan deze bottlenecksituatie gezien worden als een rijstrookvermindering. Voor vrachtauto's bestaat de bottleneck uit een snelheidsverval. Het punt op de helling waar vrachtwagens hun kruipsnelheid bereiken, kan als het begin van de bottleneck voor vrachtwagens worden gezien.

Ook op vlakke wegen willen bestuurders van personenauto's de hinder van langzame voertuigen vermijden. Toch is deze druk op hellingen groter, omdat men dan weet dat de vertraging van het langzame voertuig een langere periode zal gaan duren en dat de snelheid alleen nog maar verder zal gaan dalen.

De beschrijving van Brannolte geldt met name voor lange en steile hellingen zoals die in het buitenland te vinden zijn. Er zijn drie bezwaren tegen het toepassen van idee van een "virtuele" bottleneck op Nederlandse snelwegen:

- Ten eerste zijn in Nederland de hellingen dermate kort, dat de kruipsnelheid door slechts een klein percentage voertuigen gehaald wordt;
Als deze kruipsnelheid niet wordt bereikt, kan het punt waar de laagste snelheden gereden worden (aan het eind van de helling of op het steilste gedeelte van de helling) als het begin van de bottleneck worden gezien. De vraag is echter of de bestuurders van personenauto's op de rechter rijstrook in grotere mate geneigd zijn van rijstrook te wisselen. De hellingen zijn in Nederland immers maar kort en hun hinder is daardoor beperkt.
- Verder beschrijft Brannolte niet waar zich het begin van de bottleneck voor personenauto's bevindt;
Dit punt is moeilijker te definiëren omdat het geen fysieke rijstrookvermindering is. Wel kan worden gezegd dat het einde van de bottleneck voor zowel personenauto's als voor vrachtauto's ligt op het punt waar de vrachtauto's weer kunnen gaan accelereren. Dit is in principe geen vast punt maar een sectie, omdat elk voertuig op een ander punt van de topboog weer in staat is te accelereren, afhankelijk van het specifiek vermogen.
- Ten derde kan de door Brannolte genoemde bottlenecksituatie pas ontstaan wanneer de snelheden van vrachtwagens onder de capaciteitssnelheid komen te liggen. Pas dan vormen de vrachtwagens moving bottlenecks. Als dit niet het geval is, wordt enkel de gemiddelde snelheid van de verkeersstroom door de langzamere vrachtwagens verlaagd. Een capaciteitsdaling treedt dan echter niet op.

Blikman en Papendrecht [1986] noemen een berekeningsmethode van Müller [1976] waarmee de capaciteit van hellingen berekend kan worden. Hierbij gaat Müller net als Brannolte uit van het feit dat personenauto's door de aanwezigheid van langzame vrachtwagens worden gedwongen om van rijstrook te wisselen.

2.4. Relevante microscopische verkeerskenmerken voor het hellingmodel

In paragraaf 2.3 is besproken hoe op een helling een aantal microscopische verkeerskenmerken kan wijzigen, waardoor de verkeersstroom wordt beïnvloed. In deze paragraaf wordt van elk kenmerk beargumenteerd wat de relevantie is voor het hellingmodel.

2.4.1. De voertuigkenmerken

Van de genoemde voertuigkenmerken zijn de kenmerken acceleratievermogen en kruipsnelheid op een helling van groot belang. Deze kenmerken vormen dan ook de basis van het hellingmodel.

Van de genoemde extra grote maximale deceleratie op een helling wordt verwacht dat de effecten op de verkeersafwikkeling verwaarloosbaar klein zijn. Hier zijn twee argumenten voor:

- Ten eerste is de maximale deceleratie die in FOSIM wordt gebruikt een maximale deceleratie die ongeveer in de praktijk voorkomt en niet de fysiek maximaal haalbare deceleratie. Ondanks dat voor een gedeelte van deze twee deceleraties geldt dat ze aan elkaar gelijk zijn, wordt een gedetailleerde modellering van de fysiek maximale deceleratie daarom niet zinvol geacht;
- Ten tweede is het de vraag of bestuurders het zich beseffen dat hun maximale remvertraging op een helling groter is, en bovendien of ze deze kennis in praktijk brengen door hun volgedrag aan te passen.

2.4.2. De bestuurderskenmerken

De mate van benutting van het motorvermogen is per bestuurder verschillend, maar het hangt tevens van het bestuurde voertuig af. Dit gegeven wordt als relevant voor het hellingmodel beschouwd.

De reactie op het snelheidsverval als gevolg van een helling wordt als verwaarloosbaar klein geacht. Ten eerste is het de vraag, of dit bestuurdersgedrag zich überhaupt voordoet. Ten tweede is het de vraag of dit bestuurderskenmerk een relevante invloed heeft op de verkeersafwikkeling. Verwacht wordt, dat dit niet het geval is.

Uit onderzoek is gebleken dat het rijgedrag van meerdere chauffeurs bij hetzelfde experiment onderling ongeveer gelijke verschillen te zien geeft als verschillen tussen meerdere experimenten bij dezelfde chauffeur. Er wordt daarom aangenomen dat het verschil in schakelgedrag van bestuurders een verwaarloosbaar effect heeft op de macroscopische verkeerskenmerken.

Het volgedrag heeft een grote invloed op de macroscopische verkeerskenmerken. Hierbij is de zichtafstand één van de invloedsfactoren. Alle topbogen in het Nederlandse autosnelwegennet zijn volgens de ROA-eisen ontworpen, zodat het dus in principe niet voor kan komen dat de zichtafstand onder de anticipatieruimte uitkomt.⁶ Daarom wordt gesteld dat dit bestuurderskenmerk met betrekking tot hellingen niet te verwachten is. Ook van het tweede genoemde bestuurderskenmerk met betrekking tot het volgedrag (bestuurders die op een helling een trager volgedrag vertonen omdat ze denken dat ze in congestie rijden) wordt aangenomen dat dit zich op hellingen niet voordoet.

De invloed van hellingen op het strookwisselgedrag wordt als relevant voor het hellingmodel beschouwd. Het is echter moeilijk om de wens tot strookwisselen op een vlakke weg en een hellende weg met elkaar te vergelijken. In het volgende hoofdstuk zal duidelijk worden gemaakt hoe dit gedrag is gemodelleerd. In de volgende paragraaf zal worden ingegaan op hellingmodellen in andere simulatiemodellen.

2.5. Modelling van hellingen in andere simulatiemodellen

In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de informatie die is verkregen over hellingmodellen in de verkeerssimulatiemodellen INTEGRATION, CORSIM en HUTSIM. Van de simulatieprogramma's Paramics en Vissim zijn geen gegevens bekend over de berekening van de acceleratie en snelheid op een helling.

⁶ In de praktijk blijkt dat het niet altijd mogelijk is om aan al de ROA-eisen te voldoen.

De hellingmodellen in INTEGRATION, CORSIM en HUTSIM zijn enkel gericht op voertuigkenmerken. Microscopische hellingmodellen ten aanzien van het volgedrag of het strookwisselgedrag in andere simulatiemodellen zijn niet gevonden.

2.5.1. INTEGRATION

INTEGRATION is een Canadese verkeerssimulatieprogramma dat in Nederland wordt gebruikt en verkocht door Goudappel Coffeng. In de nieuwste versie van INTEGRATION is een model voor hellingen toegevoegd [Rakha e.a., 2001]. In dit model wordt de maximale acceleratie berekend met de vergelijking:

$$a_{\max} = \frac{F - R}{m} \quad (2.1)$$

Met:

$a_{\max}$ = maximale acceleratie [m/s^2];
 F = aandrijfkraft van de motor [N];
 R = totaal van alle weerstanden op het voertuig [N];
 m = massa van het voertuig.

Zowel de aandrijfkraft F als de totaalweerstand R worden berekend aan de hand van een groot aantal (voertuig)parameters. Omdat bij de ontwikkeling van FOSIM wordt gestreefd naar het beperken van het aantal voertuigparameters, wordt dit hellingmodel niet als geschikt geacht voor de toepassing in FOSIM.

2.5.2. CORSIM

CORSIM is een samenvoeging van de simulatiemodellen FRESIM en NETSIM. St. John & Kobett [1978] hebben voor FRESIM een model voor hellingen ontwikkeld dat er als volgt uitziet:

$$a_{\max} = a_0 \left(1 - \frac{v}{v_{\max}} \right) - g \cdot \frac{h}{100} \quad (2.2)$$

Met:

$a_{\max}$ = de maximale acceleratie op een helling [m/s^2];
 a_0 = de maximale acceleratie bij snelheid 0 [m/s^2];
 v = actuele snelheid van het voertuig [m/s];
 $v_{\max}$ = maximaal haalbare snelheid van het voertuig [m/s];
 g = zwaartekrachtsversnelling [m/s^2];
 h = hellingspercentage [%].

De maximale acceleratie a_0 is de acceleratie bij snelheid 0. St. John & Kobett gebruiken hiervoor de vergelijking:

$$a_0 = c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{r_1 \cdot r_2}{m/P} \right) \quad (2.3)$$

Met:

a_0 = de maximale acceleratie bij snelheid 0 [m/s^2];
 c_1 = 0,86;
 c_2 = 31,38;
 r_1 = transmissieverhouding in de eerste versnelling;
 r_2 = transmissieverhouding achteras;
 m = massa van het voertuig [kg];
 P = bruto motorvermogen [kW].

De eerste component in vergelijking 2.1 lijkt sterk op het huidige maximale-acceleratiemodel in FOSIM (zie paragraaf 3.3.3). Hieraan is een component voor de zwaartekracht ($-g \cdot h/100$) toegevoegd. Echter, de maximale snelheid $v_{\max}$ is geen vaste voertuigparameter (zoals in FOSIM), maar wordt berekend met een vergelijking waarin een groot aantal (voertuig)parameters wordt gebruikt.

Vergelijking 2.2 bestaat uit twee constanten c_1 en c_2 . Deze zijn gekalibreerd met een aantal metingen met verschillende voertuigen. De r_1 en r_2 zijn voertuigparameters. r_1 is de transmissieverhouding in de eerste versnelling. Met r_2 wordt de verhouding tussen de diameters van de achteras en het achterwiel bedoeld.

Bij navraag bij de producent van CORSIM bleek dat CORSIM voor de bepaling van de maximale acceleratie en de maximale snelheid van een voertuig gebruikt maakt van data die in tabellen zijn opgeslagen. Het hellingmodel van St. John & Kobett wordt dus in CORSIM niet direct in de simulatie gebruikt.

Gezien het grote aantal voertuigparameters en het gebruik van opgeslagen data in de simulatie, wordt ook dit hellingmodel niet als een geschikt model beschouwd om in FOSIM toe te passen.

2.5.3. HUTSIM

HUTSIM is een microscopisch simulatieprogramma dat wordt ontwikkeld door de universiteit van Helsinki. Recent is voor HUTSIM een hellingmodel ontwikkeld door I. Kosonen. Van dit onderzoek is nog geen publicatie beschikbaar.

In het hellingmodel van HUTSIM is de maximale acceleratie van een voertuig op een helling afhankelijk van de snelheid v , het specifiek vermogen P/m (=de verhouding tussen motorvermogen P en massa m) en het hellingspercentage h :

$$a_{\text{helling}}(v, P/m, h) = a_{\text{vlak}}(v, P/m) - g \cdot h/100 \quad (2.4)$$

Met:

- a_{helling} = maximale acceleratie op een helling [m/s^2];
- a_{vlak} = maximale acceleratie op een vlakke weg [m/s^2];
- v = snelheid van het voertuig [m/s];
- P/m = specifiek vermogen [kW/ton];
- g = zwaartekrachtsversnelling [m/s^2];
- h = hellingspercentage [%].

De vergelijking voor de maximale acceleratie op een vlakke weg a_{vlak} ziet er als volgt uit:

$$a_{\text{vlak}} = \frac{1}{p_1 - p_2 \cdot v} - \frac{7,35 - P/m}{p_3 - p_4 \cdot v} \quad (2.5)$$

De parameters p_1 t/m p_4 zijn gekalibreerd met acceleratiemetingen van voertuigen. Waarvan de waarde 7,35 is afgeleid is onduidelijk.

Dit hellingmodel in HUTSIM is pas in een later stadium van dit FOSIM-onderzoek bekend geworden. Daarom is het niet gebruikt bij de modelontwikkeling van het hellingmodel in FOSIM. Echter, ook in dit model worden een redelijk groot aantal (voertuig)parameters gebruikt. Bovendien is niet helemaal duidelijk hoe vergelijking 2.5 is afgeleid.

2.5.4. Conclusies

De hellingmodellen in andere verkeerssimulatieprogramma's zijn op de één of andere manier afgeleid uit voertuigmechanische modellen. Deze hellingmodellen bestaan uit een groot aantal (voertuig)parameters. Omdat bij de ontwikkeling van FOSIM wordt gestreefd naar het beperken van het aantal (voertuig)parameters, zijn de gevonden hellingmodellen niet geschikt

bevonden om toe te passen in FOSIM. Daarom is voor FOSIM een eigen hellingmodel ontwikkeld. Dit hellingmodel wordt eveneens afgeleid van de voertuigmechanica, maar dan met een beperking van het aantal voertuigparameters. In het volgende hoofdstuk zal dit worden behandeld.

3. Het hellingmodel

3.1. Inleiding

In hoofdstuk 2 blijkt dat een aantal voertuig-bestuurderskenmerken hellingafhankelijk is. Ook volgt uit hoofdstuk 2 welke voertuig-bestuurderskenmerken als relevant worden geacht voor het hellingmodel. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van deze voertuig-bestuurderskenmerken het hellingmodel afgeleid. Dit hellingmodel is onderverdeeld in twee (sub-)modellen; een maximale-acceleratiemodel, gericht op het voertuiggedrag, en een strookwisselmodel, gericht op het bestuurdersgedrag. Hiervan is het maximale-acceleratiemodel het meest omvangrijk.

Bij de ontwikkeling van het hellingmodel is uitgegaan van een lijst met uitgangspunten en aannamen die in paragraaf 3.2 wordt gegeven. Aan de hand van deze uitgangspunten zijn het maximale-acceleratiemodel en het strookwisselmodel ontwikkeld. Het maximale-acceleratiemodel wordt afgeleid uit “elementaire” (voertuig-)mechanica. Deze afleiding zal in paragraaf 3.3 worden gegeven. In deze paragraaf wordt eveneens de modelimplementatie in FOSIM alsmede een vergelijking met het huidige maximale-acceleratiemodel gegeven. Tenslotte belicht paragraaf 3.4 het strookwisselmodel.

3.2. Uitgangspunten en aannamen

In deze paragraaf worden de uitgangspunten en aannamen genoemd die bij de ontwikkeling van het hellingmodel in acht zijn genomen. Deze uitgangspunten en aannamen hebben betrekking op de werking van het hellingmodel op zowel het voertuig- als het verkeersstroomniveau. Enkele uitgangspunten hebben betrekking op de implementatie het hellingmodel in FOSIM.

3.2.1. Uitgangspunten

- Het aantal parameters in FOSIM moet beperkt blijven;
- De runtijd van FOSIM mag niet disproportioneel toenemen;
- Het model moet in ieder geval gelden voor hellingspercentages tussen de 0 en 7%; Volgens de ROA [Rijkswaterstaat, 1989-1993] is het hellingspercentage op hoofdrijbanen van autosnelwegen maximaal 4,5%. Op verbindingswegen van autosnelwegen, zoals op- en afritten of knooppunten is een maximaal hellingspercentage van 7% toegestaan (zie paragraaf 2.2.2).
- De snelheden die worden berekend met het maximale-acceleratiemodel moeten goed overeenkomen met simulatiegegevens van het voertuigmodel SimVra+⁷ [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998] en met praktijkmetingen;
- De validiteit van FOSIM moet gewaarborgd blijven; Dit betekent dat de simulatieresultaten van FOSIM-Hellingen (= FOSIM 4.1⁸ waarin het hellingmodel is geïmplementeerd) overeen moeten komen met simulatieresultaten van FOSIM 4.1. Hierbij worden invoerbestanden gebruikt. Er wordt aangenomen dat FOSIM 4.1 met deze invoerbestanden valide capaciteiten genereert. Hierbij wordt een betrouwbaarheidsniveau van 95% in acht genomen.
- De capaciteiten die met FOSIM-Hellingen worden gegenereerd moeten vergelijkbaar zijn met meetresultaten uit de praktijk;

3.2.2. Aannamen

- Het voertuigmodel SimVra+ is voldoende realistisch om te gebruiken voor de validatie van het maximale-acceleratiemodel;

⁷ In bijlage 3 is een beschrijving van het voertuigmodel SimVra+ opgenomen.

⁸ Versie 4.1, met een aanpassing met betrekking tot de anticipatieruimte

Dit betekent dat is geprobeerd om het snelheidsgedrag als gevolg van het maximale-acceleratiemodel in FOSIM-Hellingen zoveel mogelijk overeen te laten komen met de uitkomsten van SimVra+. Bovendien wordt een aantal voertuigkenmerken die in het SimVra+-model worden gebruikt in het maximale-acceleratiemodel van FOSIM overgenomen.

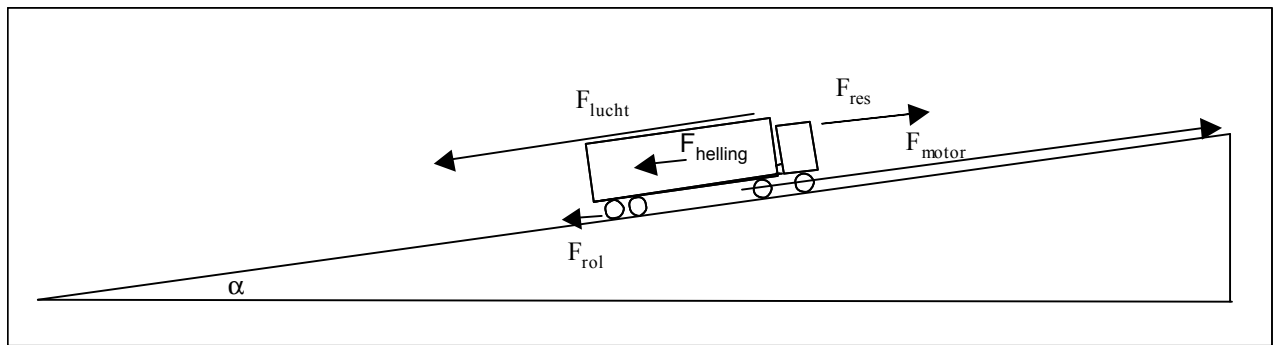
- De maximale deceleraties (die in de praktijk voorkomen) op een helling zijn gelijk aan de maximale deceleraties op een vlakke weg.
- Helling-afhankelijke bestuurderskenmerken kunnen worden verwaarloosd, behalve de bestuurderskenmerken met betrekking tot het strookwisselgedrag.

3.3. Het maximale-acceleratiemodel

3.3.1. De voertuigmechanica

De maximale acceleratie van een vrij rijdend voertuig bepaalt de snelheid en de verplaatsing van een voertuig. Hieruit volgt het snelheidsverloop. Het nieuwe maximale-acceleratiemodel is afgeleid uit de “elementaire” (voertuig-)mechanica [Ryba, 1992; en Pline, 1992]. Het doel van deze afleiding is het vinden van een vergelijking voor de maximale acceleratie die afhankelijk is van de actuele snelheid v en het hellingspercentage h .

Op een voertuig dat een helling op rijdt, werkt in het vlak van de helling een aantal krachten (zie figuur 3.1).



Figuur 3.1. Krachten op een voertuig in het vlak van de helling

In het vlak van de helling zijn deze krachten de hellingsweerstand F_{helling} , de luchtweerstand F_{lucht} , de rolweerstand F_{rol} en de kracht die de motor levert F_{motor} . De hellingsweerstand F_{helling} is een component van de zwaartekracht F_z (zie figuur 3.2):

$$F_{\text{helling}} = F_z \cdot \sin(\alpha) \quad (3.1)$$

Met:

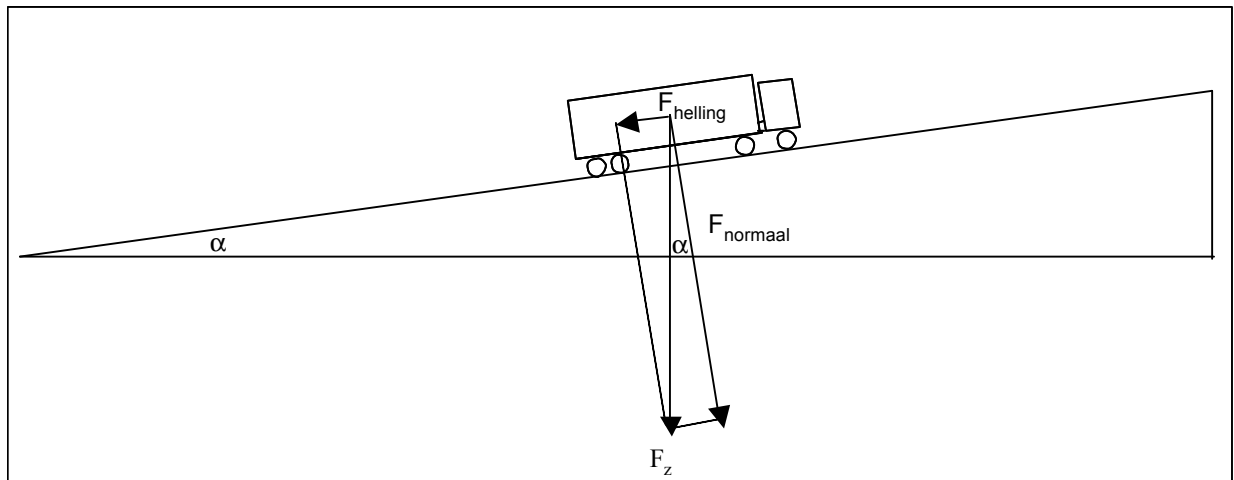
F_{helling} = hellingsweerstand [N];
 F_z = zwaartekracht [N];
 α = hellingshoek [° of rad].

De zwaartekracht F_z wordt berekend met:

$$F_z = m \cdot g \quad (3.2)$$

Met:

F_z = zwaartekracht [N];
 m = massa voertuig [kg];
 g = zwaartekrachtsversnelling (in Nederland gemiddeld $9,81 \text{ m/s}^2$).



Figuur 3.2. De componenten van de zwaartekracht

Het hellingspercentage h wordt gedefinieerd als de hoogte die wordt overbrugd in verhouding tot de afgelegde afstand (in procenten). Dit betekent dat:

$$\frac{h}{100} = \sin(\alpha) \quad (3.3)$$

Met:

h = hellingspercentage [%];
 α = hellingshoek [° of rad].

Zodoende geldt:

$$F_{\text{helling}} = \frac{F_z \cdot h}{100} \quad (3.4)$$

De luchtweerstand F_{lucht} en de rolweerstand F_{rol} hangen van zeer veel factoren af. Bij de luchtweerstand spelen factoren als luchtdruk en windkracht een rol. Bij de rolweerstand kan gedacht worden aan het wegdek (zoals ruwheid, nat/droog) en de banden (zoals profiel, banddruk).

De luchtweerstand wordt berekend met:

$$F_{\text{lucht}} = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot A_{\text{front}} \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot v^2 \quad (3.5)$$

Met:

F_{lucht} = luchtweerstand [N];
 C_w = luchtweerstandcoëfficiënt [-];
 A_{front} = frontaal oppervlak voertuig in vooraanzicht [m²];
 ρ_{lucht} = dichtheid lucht (gemiddeld 1,3 kg/m³ op zeeniveau [Pline, 1992]);
 v = snelheid lucht t.o.v. voertuig [m/s].

De luchtweerstandcoëfficiënt C_w geeft de mate van aërodynamische vorm van het voertuig weer. Voor personenauto's is deze C_w -waarde circa 0,5. Bij gestroomlijnde (sport)auto's kan deze waarde dalen tot 0,3. Vrachtwagens hebben doorgaans een luchtweerstandcoëfficiënt die tussen de 0,5 en 0,8 ligt [Pline, 1992]. Het frontaal oppervlak A_{front} kan bij benadering worden berekend uit de voertuigafmetingen [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]:

$$A_{\text{front}} = 0,8 \cdot \text{hoogte} \cdot \text{breedte} \quad (3.6)$$

Hierbij is:

A_{front} = frontaal oppervlakte voertuig in vooraanzicht [m²];

hoogte = hoogte van het voertuig [m];
 breedte = breedte van het voertuig [m].

Voor de rolweerstand worden in de literatuur verschillende vergelijkingen gegeven. Er zijn onderzoeken geweest waaruit bleek dat de rolweerstand constant is tot een kritieke snelheid (circa 50 mph $\approx$ 80 km/h) waarboven de rolweerstand een snelle stijging ondergaat [St. John & Kobett, 1978]. In andere bronnen wordt de rolweerstand uitgedrukt als een functie van de snelheid v of zelfs v^2 [Pline, 1992]:

$F_{rol} = f(F_z, v^2)$ voor personenauto's;

$F_{rol} = f(F_z, v)$ voor vrachtwagens.

De rolweerstand die in het hellingmodel is gebruikt wordt uitgedrukt als een relatie tussen de zwaartekracht F_z en een rolweerstandcoëfficiënt [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]:

$$F_{rol} = F_z \cdot \cos(\alpha) \cdot f_{rol} \quad (3.7)$$

Met:

F_{rol} = rolweerstand [N];

F_z = zwaartekracht [N];

α = hellingshoek [$^\circ$ of rad];

f_{rol} = rolweerstandcoëfficiënt [-].

Omdat geldt:

$$\cos^2(\alpha) = 1 - \sin^2(\alpha) \quad (3.8)$$

kan met invulling van vergelijking 3.3 gezegd worden dat:

$$\cos(\alpha) = \sqrt{1 - \left(\frac{h}{100}\right)^2} \quad (3.9)$$

Het hellingmodel moet gelden voor hellingspercentages tot 7% (zie paragraaf 3.2.1). Met $h=7\%$ is $\cos(\alpha)$ gelijk aan 0,99754. Er wordt aangenomen dat dit gelijk is aan 1. Dit betekent dat:

$$F_{rol} = F_z \cdot f_{rol} \quad (3.10)$$

Zolang de resulterende kracht F_{res} groter is dan nul, zorgt deze voor een positieve acceleratie a :

$$F_{res} = F_{motor} - (F_{helling} + F_{lucht} + F_{rol}) = m \cdot a \quad (3.11)$$

Met:

F_{res} = resulterende kracht [N];

F_{motor} = kracht geleverd door de motor [N];

F_{rol} = rolweerstand [N];

F_{lucht} = luchtweerstand [N];

$F_{helling}$ = hellingsweerstand [N];

m = massa voertuig [kg];

a = acceleratie van het voertuig [m/s^2].

De kracht F_{motor} is dus:

$$F_{motor} = F_{res} + F_{helling} + F_{lucht} + F_{rol} \quad (3.12)$$

De arbeid W_{motor} die de motor levert kan uitgedrukt worden als:

$$W_{\text{motor}} = F_{\text{motor}} \cdot s \quad (3.13)$$

Met:

W_{motor} = door de motor geleverde arbeid [J];
 F_{motor} = kracht geleverd door de motor [N];
 s = afgelegde weg [m].

Het vermogen dat de motor levert (P_{motor}) is de hoeveelheid arbeid per tijdseenheid:

$$P_{\text{motor}} = \frac{W_{\text{motor}}}{\beta \cdot t} \quad (3.14)$$

Met:

P_{motor} = motorvermogen [W];
 W_{motor} = door de motor geleverde arbeid [J];
 β = rendement [-];
 t = tijd [s].

Over het algemeen neemt het rendement β toe afhankelijk van de toename van de snelheid van een voertuig [Pline, 1992; en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]. Volgens Pline [1992] is het rendement β voor personenauto's bij een snelheid van 60 mph (96 km/h) ongeveer 60% ($\beta = 0,6$). Voor zware vrachtwagens is circa 94% van het motorvermogen beschikbaar voor de aandrijving ($\beta = 0,94$).

Invulling van (3.13) in (3.14) geeft:

$$P_{\text{motor}} = \frac{F_{\text{motor}} \cdot s}{\beta \cdot t} = \frac{F_{\text{motor}} \cdot v}{\beta} \quad (3.15)$$

Hierbij is v de snelheid van het voertuig in m/s.

Uit vergelijking 3.12 en 3.15 volgt:

$$P_{\text{motor}} = \frac{1}{\beta} \cdot (F_{\text{lucht}} + F_{\text{rol}} + F_{\text{helling}} + F_{\text{res}}) \cdot v \quad (3.16)$$

Als alle vergelijkingen van de weerstanden worden ingevuld, kan afgeleid worden dat:

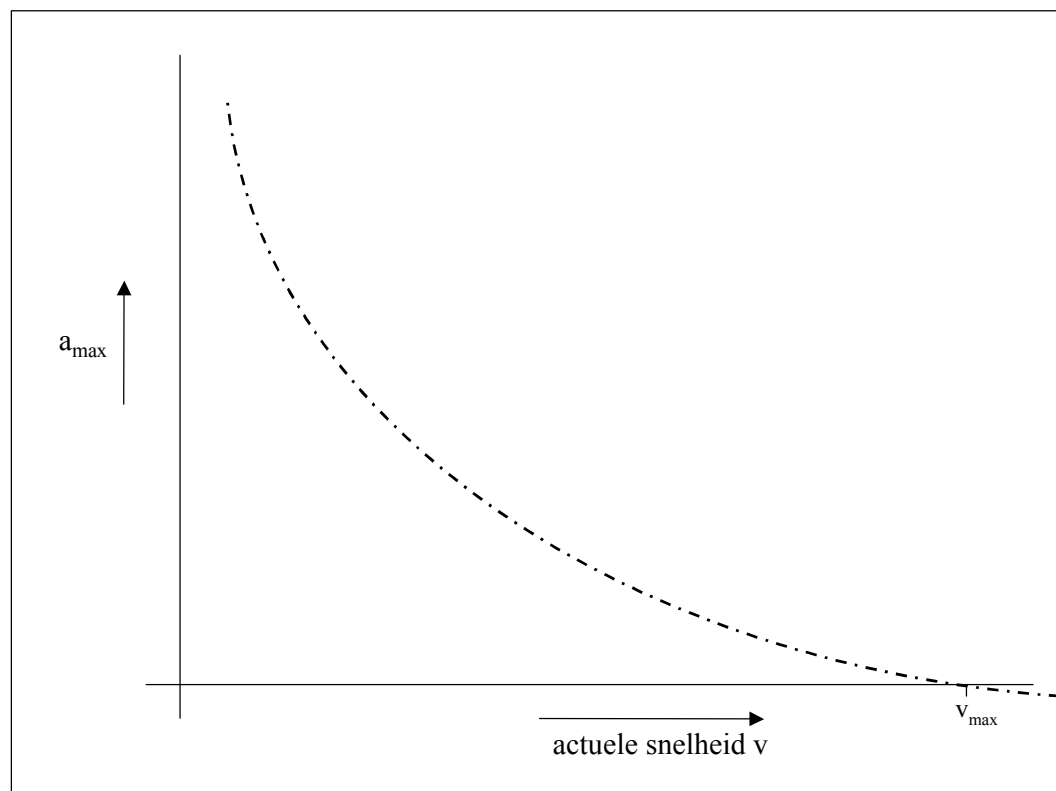
$$\frac{P_{\text{motor}}}{m} = \frac{0,5 \cdot C_w \cdot A_{\text{front}} \cdot s_{\text{lucht}} \cdot v^3 + (g \cdot (f_{\text{rol}} + h/100) + a) \cdot v}{\beta} \quad (3.17)$$

Hierbij dient opgemerkt te worden, dat bij deze afleiding is uitgegaan van een windstille toestand, waardoor de snelheid van de lucht ten opzichte van het voertuig gelijk is aan de snelheid van het voertuig. Deze aanname is verantwoord, omdat in FOSIM eveneens wordt uitgegaan van "ideale omstandigheden". Bovendien geldt voor vrachtwagens, waarvoor het hellingmodel in eerste instantie is ontwikkeld, dat de luchtweerstand een niet te verwaarlozen doch verhoudingsgewijs lage weerstand is [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]. In vergelijking 3.17 is de verhouding P_{motor}/m (in het vervolg P/m genoemd) het specifiek vermogen (in W/kg of kW/ton). Een voertuig met een bepaald specifiek vermogen gebruikt een gedeelte van zijn specifiek vermogen voor het behouden van zijn snelheid (v) en een gedeelte voor acceleratie (a). Omdat het specifiek vermogen P/m constant is, neemt de acceleratie af naarmate de snelheid toeneemt. Dit gaat door, totdat de maximale snelheid is bereikt. De acceleratie a is dan gelijk aan 0. Verder is uit vergelijking 3.17 af te leiden, dat naarmate het

hellingspercentage h toeneemt, zowel de maximale acceleratie als de maximale snelheid afneemt.

Uit vergelijking 3.17 kan een vergelijking voor de maximale acceleratie $a_{\max}$ afgeleid worden (zie figuur 3.3):

$$a_{\max} = \beta \cdot \frac{P}{m} \cdot \frac{1}{v} - \frac{0,5 \cdot C_w \cdot A_{\text{front}} \cdot \sigma_{\text{lucht}}}{m} \cdot v^2 - g \cdot (f_{\text{rol}} + h/100) \quad (3.18)$$



Figuur 3.3. Verband tussen de maximale acceleratie en de snelheid volgens de analytische afleiding

3.3.2. Modelimplementatie⁹

3.3.2.1. Beperking van het aantal parameters

Elke nieuwe parameter in FOSIM moet zijn nut hebben. Het nadeel van een nieuwe parameter is namelijk dat de kalibratieprocedure heel snel toeneemt bij het groter worden van het aantal parameters. Het streven bij de ontwikkeling van het hellingmodel is dan ook het zoveel mogelijk beperken van het aantal (nieuwe) parameters. Daarom wordt vergelijking 3.18 vereenvoudigd tot:

$$a_{\max} = \beta \cdot \frac{P}{m} \cdot \frac{1}{v} - L_{\text{vtype}} \cdot v^2 - g \cdot (f_{\text{rol}} + h/100) \quad (3.19)$$

Hierbij is L_{vtype} de luchtweerstandcoëfficiënt. Deze parameter is een samenvoeging van de C_w -waarde, het frontaal oppervlak A_{front} , de dichtheid van lucht σ_{lucht} en de massa m . Verder worden de zwaartekrachtsversnelling g en de rolweerstandcoëfficiënt f_{rol} als constanten aangenomen:

$$\begin{aligned} g &= 9,81 \text{ m/s}^2; \\ f_{\text{rol}} &= 0,006 \text{ [Pline, 1992; en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998].} \end{aligned}$$

⁹ De wijzigingen in de programmacode zijn te vinden in bijlage 2.

In figuur 3.3 (zie paragraaf 3.3.1) is te zien dat als de snelheid gelijk is aan 0 de maximale acceleratie oneindig groot is. In de praktijk is dit niet het geval, omdat de maximale acceleratie wordt begrensd door de maximale wrijvingskracht tussen de aangedreven wielen en het wegdek. In het nieuwe maximale-acceleratiemodel wordt daarom de maximale acceleratie begrensd. Deze begrenzing wordt gedaan met een voertuigparameter die reeds in FOSIM wordt gebruikt.

Verder is in figuur 3.3 te zien dat de acceleratie negatief wordt als de actuele snelheid boven de maximale snelheid $v_{\max}$ komt te liggen. Deze acceleratie blijft negatief, totdat het voertuig zijn kruipsnelheid heeft bereikt. Hieruit blijkt dat vergelijking 3.19 zowel kan worden gebruikt voor de acceleratie op een helling als voor de deceleratie als gevolg van een helling.

3.3.2.2. De implementatie ten aanzien van snelheidsonderdrukking

In FOSIM kan voor een wegvak een bepaalde snelheidsonderdrukking opgelegd worden. Snelheidsonderdrukking is een waarde tussen 0 en 1, waarmee de wenssnelheid ter plaatse van het wegvak wordt verlaagd. Snelheidsonderdrukking wordt gebruikt bij de simulatie van allerlei situaties waarvan bekend is, dat er een snelheidsremmende factor aanwezig is, maar dat niet in FOSIM is gemodelleerd. Deze situaties zijn bijvoorbeeld krappe bogen bij in- en uitvoeringen en werk-in-uitvoering-situaties. Sommige FOSIM-gebruikers werken met snelheidsonderdrukking om een helling na te bootsen. Dit is echter niet erg realistisch. Op hellingen zijn het voornamelijk de vrachtwagens die afgeremd worden, terwijl bij snelheidsonderdrukking juist de personenauto's de grootste snelheidsverlaging ondergaan. Bij de berekening van de maximale acceleratie in FOSIM 4.1 wordt de wenssnelheid gebruikt bij de berekening van de maximale acceleratie (zie paragraaf 3.3.3). Dit betekent dat bij snelheidsonderdrukking tevens de maximale acceleratie van de voertuigen lager wordt. Hoewel dit niet echt realistisch lijkt, is dit in het nieuwe maximale-acceleratiemodel gehandhaafd. Het is nodig om de validiteit van FOSIM te waarborgen (zie paragraaf 5.2). Daarom is de snelheidsonderdrukking een tweede begrenzing van de maximale acceleratie. Dit houdt in dat op weggedeelten waar een snelheidsonderdrukking geldt de maximale acceleratie volgens het huidige maximale-acceleratiemodel (zie vergelijking 3.20 in paragraaf 3.3.3) wordt berekend. Als deze waarde lager is dan de waarde volgens het nieuwe maximale-acceleratiemodel, wordt dit de waarde voor de maximale acceleratie.

3.3.3. Vergelijking van het maximale-acceleratiemodel met het maximale-acceleratiemodel van FOSIM 4.1

Bij de ontwikkeling het maximale-acceleratiemodel in FOSIM zijn de volgende aannamen gedaan [Schoorman & Vermijs, 1993, blz. 44 en 45]:

- *De maximale acceleratie van een voertuig neemt kwadratisch af met de snelheid. Ten grondslag hieraan ligt de overheersende invloed van de luchtweerstand op de acceleratiekarakteristiek van een voertuig. De luchtweerstand neemt kwadratisch toe met het toenemen van de snelheid;*
- *Het acceleratievermogen van een vrachtauto bij toenemende snelheid is gelijkvormig met die van een personenauto;*
- *De "restacceleratie" bij het bereiken van de wenssnelheid is 10% van de acceleratie bij een snelheid van 0 km/h.*

Uit deze aannamen volgt de volgende vergelijking:

$$a_{\max, v} = a_{\max, \text{vtype}} \cdot \left(1 - 0,9 \cdot \left(\frac{v_{\text{actueel}}}{v_{\text{wens, vtype}}} \right)^2 \right) \quad (3.20)$$

Met:

$a_{\max, v}$ = maximaal haalbare acceleratie i.v.m. de actuele snelheid [m/s^2];

v_{actueel} = actuele snelheid [m/s];

$v_{\text{wens, vtype}}$ = wenssnelheid van het voertuigtype [m/s];

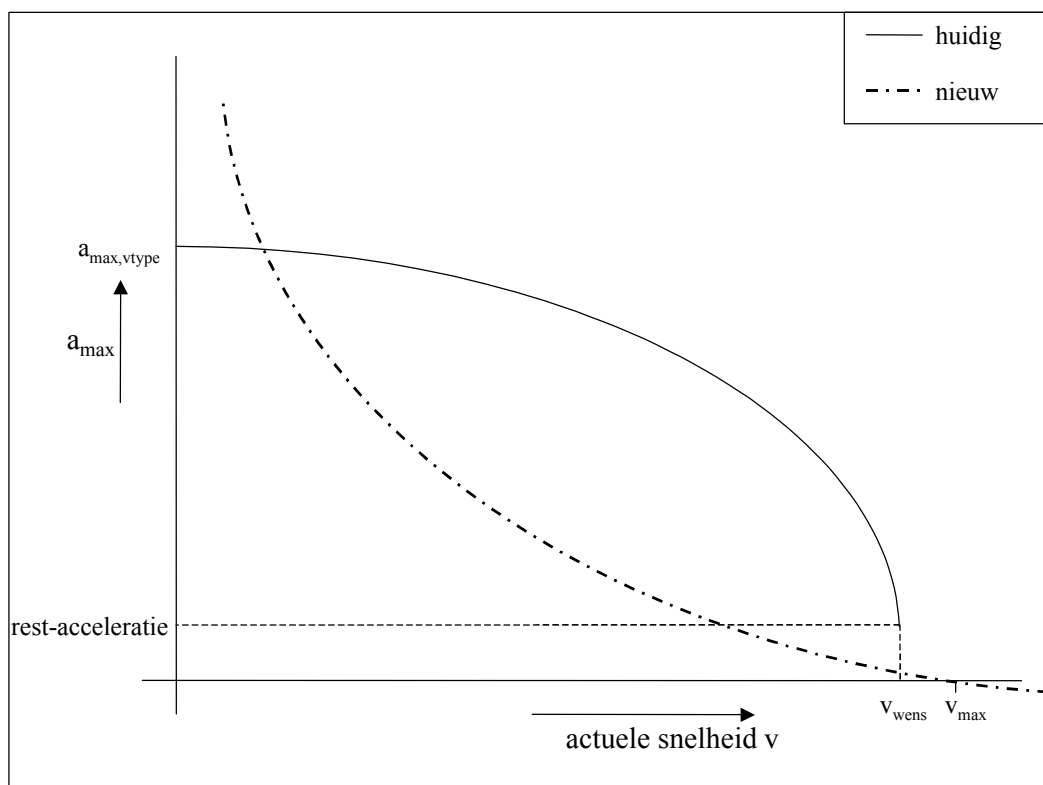
$a_{\max, \text{vtype}}$ = maximale acceleratie van het voertuigtype bij snelheid 0 [m/s^2].

Bij deze vergelijking dient opgemerkt te worden, dat het bij de maximale acceleratie van het voertuigtype $a_{\max, \text{vtype}}$ gaat om een modellering van het voertuig-bestuurdergedrag. De maxima zijn derhalve niet de maxima waartoe voertuigen in staat zijn, doch de maxima die in de praktijk voorkomen [AVV en Grontmij, 1996]. Verder wordt in de FOSIM-simulaties ook nog de sprong in de maximale acceleratie begrensd. Deze begrenzing wordt bij het nieuwe maximale-acceleratiemodel eveneens toegepast.

In figuur 3.4 zijn de curven van het huidige maximale-acceleratiemodel en nieuwe maximale-acceleratiemodel op een vlakke weg weergegeven. Figuur 3.4 is enkel bedoeld om het verschil in acceleratiecurven te tonen. In paragraaf 4.3.2. wordt pas ingegaan op de validiteit van beide maximale-acceleratiemodellen.

In figuur 3.4 is te zien dat de maximale acceleratie inderdaad kwadratisch afneemt met de snelheid (zoals door Schuurman & Vermijs is aangenomen), doch op een andere manier dan bij de ontwikkeling van het huidige maximale-acceleratiemodel is aangenomen (convex in plaats van concaaf). In het nieuwe maximale-acceleratiemodel is deze afname zelfs meer dan kwadratisch, omdat het specifiek vermogen P/m wordt gedeeld door de snelheid v (zie vergelijking 3.19).

Het huidige maximale-acceleratiemodel is dus op voertuigniveau minder realistisch dan het nieuwe maximale-acceleratiemodel. Desondanks leidt dit verschil niet tot problemen bij de validatie van het hellingmodel op voertuigniveau (zie hoofdstuk 4) en de validatie van FOSIM-Hellingen op verkeersstroomniveau (zie hoofdstuk 5).



Figuur 3.4. Vergelijking van de maximale acceleratie volgens het huidige en het nieuwe maximale-acceleratiemodel

3.4. Het strookwisselmodel

Het strookwisselmodel voor hellingen is gebaseerd op het huidige strookwisselmodel in FOSIM. Daarom wordt in deze paragraaf eerst het huidige strookwisselmodel uitgelegd en vervolgens het aangepaste strookwisselmodel in FOSIM-Hellingen behandeld.

3.4.1. Het huidige strookwisselmodel

Het huidige strookwisselmodel in FOSIM is een vrij omvangrijk en complex geheel. Daarom zal dit in dit rapport niet in detail worden uitgelegd. Er wordt enkel ingegaan op het gedeelte

waarin het strookwisselmodel is gewijzigd. Voor meer informatie over het strookwisselgedrag in FOSIM wordt verwezen naar De Leeuw [2000].

De beslissing voor de uitvoering van een strookwisseling wordt bepaald door het gebruik van een bepaald risico. Dit risico wordt weergegeven door een maximale deceleratie die bij een strookwisseling nog door een bestuurder wordt geaccepteerd. Deze maximale strookwisseldeceleratie geldt als maatstaf voor zowel de bestuurder van het voertuig zelf als voor de nieuwe volger van het voertuig. Voor de bestuurder van het voertuig mag de deceleratie die nodig is om de nieuwe leider te ontwijken niet groter zijn dan de berekende strookwisseldeceleratie (de *acceleratie* mag niet *negatiever* zijn). Voor de nieuwe volger mag de deceleratie die nodig is om het voertuig te ontwijken niet groter zijn dan de berekende strookwisseldeceleratie. Bij niet-verplichte strookwisselingen is de maximale strookwisseldeceleratie afhankelijk van de actuele snelheid van het voertuig volgens de formule [De Leeuw, 2000]:

$$a_{\text{risk}} = \left(1 - \frac{v}{v_{\text{wens}}}\right) \cdot \text{MaxLCD} \quad (3.21)$$

Met:

a_{risk} = Het geaccepteerde risico bij niet-verplicht strookwisselen (maximale strookwisseldeceleratie) [m/s^2];

v = Huidige snelheid van het actuele voertuig [m/s];

v_{wens} = Wenssnelheid van het actuele voertuig [m/s];

MaxLCD = Maximale strookwisseldeceleratie (LaneChangeDeceleration) van het voertuigtype [m/s^2].

3.4.2. Het aangepaste strookwisselmodel

Hoe meer de snelheid onder de wenssnelheid ligt, des te meer risico zal een bestuurder willen accepteren om een strookwisseling uit te voeren. In principe is dit bestuurdersgedrag gemodelleerd met vergelijking 3.21. Echter, op een helling neemt de snelheid van (een gedeelte van) de vrachtwagens af. In de probleemanalyse (zie paragraaf 2.3.2.5) is genoemd dat bestuurders van personenauto's de hinder van deze langzame voertuigen willen vermijden, omdat zij veel minder of helemaal geen snelheidsverval op de helling ondervinden. Bovendien weet een bestuurder van een personenauto dat het snelheidsverval van vrachtwagens op een helling een langere periode gaat duren. Hoe steiler de helling, hoe groter het snelheidsverval van vrachtwagens en des te meer risico een bestuurder van een personenauto wil accepteren om niet af te hoeven remmen voor de langzamere vrachtwagens.

Om dit verschijnsel te modelleren is vergelijking 3.21 veranderd in:

$$a_{\text{risk}} = \left(1 - \left(\frac{v}{v_{\text{wens}}}\right)^h\right) \cdot \text{MaxLCD} \quad ? \quad h > 1 \% \quad (3.22)$$

Het geaccepteerde risico neemt dus niet alleen toe naarmate de snelheid lager wordt, maar ook naarmate het hellingspercentage toeneemt. Deze vergelijking geldt enkel voor hellingspercentages groter dan 1%. Bij hellingspercentages onder de 1% wordt vergelijking 3.21 toegepast.

Dit aangepaste strookwisselmodel hoeft niet te worden gekalibreerd, omdat er geen nieuwe parameters worden geïntroduceerd. Het aangepaste strookwisselmodel wordt ook niet gevalideerd op *voertuigniveau*, omdat over het strookwisselgedrag op *voertuigniveau* geen empirische gegevens beschikbaar zijn (dit is nauwelijks meetbaar). Enkel het *effect* van dit aangepaste strookwisselmodel op de *verkeersafwikkeling* kan worden gevalideerd met rijstrookverdelingen (zie paragraaf 5.3.4.4).

Daarom zal hier pas verder op ingegaan worden bij de validatie van FOSIM-Hellingen op *verkeersstroomniveau* in hoofdstuk 5. In het volgende hoofdstuk zal het maximale-acceleratiemodel worden gekalibreerd en gevalideerd op *voertuigniveau*.

4. Kalibratie en validatie van het maximale-acceleratiemodel op voertuigniveau

4.1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk is een hellingmodel ontwikkeld dat bestaat uit een maximale-acceleratiemodel en een strookwisselmodel. In dit hoofdstuk wordt het maximale-acceleratiemodel op voertuigniveau gekalibreerd en gevalideerd. Het strookwisselmodel wordt op dit niveau niet gekalibreerd omdat het model geen nieuwe parameters introduceert. Ook wordt dit strookwisselmodel niet gevalideerd op voertuigniveau, omdat hiervoor geen empirische data beschikbaar zijn. Het zal enkel worden gevalideerd op verkeersstroomniveau.

Bij de kalibratie en validatie van de parameters van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 (de vrachtwagens in FOSIM) wordt getracht de realiteit zo goed mogelijk te benaderen. De kalibratie en validatie van de parameters van voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3 (de personenauto's in FOSIM) zijn daarentegen meer gericht op het waarborgen van de validiteit van FOSIM-Hellingen ten aanzien van vlakke wegen (FOSIM 4.1). Deze aanpak wordt verkozen boven het handhaven van het huidige maximale-acceleratiemodel voor voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3. Het nadeel van de extra voertuigparameters weegt niet op tegen het voordeel van éénzelfde maximale-acceleratiemodel voor alle voertuig-bestuurdercombinaties, temeer omdat bij de validatie op voertuigniveau (zie paragraaf 4.3.2) en de validatie op verkeersstroomniveau (zie paragraaf 5.2.4) blijkt dat het nieuwe maximale-acceleratiemodel valide is voor vlakke wegen.

Als eerste zal in paragraaf 4.2 het maximale-acceleratiemodel op voertuigniveau worden gekalibreerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van gegevens van AVV [1998] en de Bouwdienst van Rijkswaterstaat [1998]. Vervolgens beschrijft paragraaf 4.3 de validatie van het maximale-acceleratiemodel op voertuigniveau aan de hand van het huidige maximale-acceleratiemodel in FOSIM en het voertuigmodel SimVra+ [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]. Tenslotte wordt in paragraaf 4.4 een aantal voor- en nadelen van het maximale-acceleratiemodel genoemd.

4.2. Kalibratie

4.2.1. Inleiding

In FOSIM wordt onderscheid gemaakt in vijf voertuig-bestuurdercombinaties: drie voor personenauto's (type 1 t/m 3), en twee voor vrachtwagens (type 4 en 5). Elke voertuig-bestuurder-combinatie heeft zijn eigen kenmerken [zie De Leeuw, 2000]. In het vorige hoofdstuk is bij de ontwikkeling van het maximale-acceleratiemodel een aantal nieuwe voertuigparameters geïntroduceerd. Deze parameters zullen in deze paragraaf op voertuigniveau worden gekalibreerd. De kalibratie van de voertuigparameters is bij voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 gericht op het zo goed mogelijk benaderen van de werkelijkheid. Daarentegen worden de waarden van de parameters van voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3 zo gekozen, dat het verloop van de maximale acceleratie volgens het nieuwe maximale-acceleratiemodel ongeveer gelijk blijft aan het huidige maximale-acceleratiemodel. Dit is gedaan om de validiteit van FOSIM zo veel mogelijk te waarborgen.

In het rapport "Voertuigkarakteristieken van het Nederlandse autopark" [AVV, 1998] worden de resultaten van een groot onderzoek naar de voertuigkarakteristieken van het Nederlandse autopark gegeven. Per voertuigcategorie wordt van een groot aantal voertuigkarakteristieken een histogram met bijbehorend gemiddelde en standaardafwijking gegeven (zie bijlage 4). Bij dit onderzoek is wat betreft de categorie vrachtauto's onderscheid gemaakt in ongelede vrachtauto's, vrachtauto's met aanhangwagen en trekker met oplegger. Aangenomen wordt dat voertuig-bestuurdercombinatie 4 in FOSIM kan worden beschouwd als de categorie ongelede vrachtauto's en voertuig-bestuurdercombinatie 5 de categorie vrachtauto's met

aanhangwagens en trekker met oplegger. De gegevens voor voertuig-bestuurdercombinatie 5 zijn verkregen door de karakteristieken van beide categorieën te middelen in de verhouding 1:3, omdat dit in Nederland de verhouding tussen het aantal vrachtauto's met aanhanger en trekkers met oplegger is [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998].

4.2.2. De kalibratie van de vrachtwagenparameters

4.2.2.1. Het specifiek vermogen

De verdeling van het specifiek vermogen van vrachtwagens

Het specifiek vermogen P/m wordt in het hellingmodel als één parameter gezien. In de probleemanalyse (zie paragraaf 2.3.1) is gebleken dat deze parameter een zeer invloedrijke factor is voor de maximale acceleratie van een voertuig op een helling. Hieruit is in paragraaf 2.3.1.1 afgeleid dat de verdeling van de specifieke vermogens een bepalende invloedsfactor is voor de verkeersafwikkeling. Daarom worden in het hellingmodel de specifieke vermogens van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 (de vrachtwagens in FOSIM) geloot uit een verdeling van het specifiek vermogen. De voertuig-bestuurdercombinaties 1 t/m 3 (de personenauto's in FOSIM) hebben per voertuig-bestuurdercombinatie een vaste waarde voor het specifiek vermogen. Er is een aantal argumenten voor dit onderscheid te noemen:

- Bij vrachtwagens kunnen de specifieke vermogens sterk variëren. De massa varieert namelijk als gevolg van verschillen in het maximum laadvermogen en de beladingsgraad van de vrachtwagens. Bij personenauto's daarentegen is de variatie van de massa's veel minder groot en verschillen de specifieke vermogens meestal door een kleine variatie in de motorvermogens;
- In FOSIM worden drie verschillende voertuig-bestuurdercombinaties gebruikt die de personenauto's representeren. Daardoor variëren de specifieke vermogens van de personenauto's in FOSIM toch nog enigszins;
- Door hun grote massa zijn het vooral de vrachtwagens met een laag specifiek vermogen die op een helling een groot snelheidsverval en dus een groot negatief aandeel hebben in de verkeersafwikkeling op een autosnelweg;
- De snelheid van personenauto's wordt meer beperkt door de snelheidslimiet (die in sommige gevallen overeenkomt met de wenssnelheid van bestuurders) en niet door een maximaal haalbare snelheid. De meeste personenauto's beschikken over een grote overcapaciteit aan motorvermogen en kunnen daarom op de meeste hellingen van het Nederlandse autosnelwegennet hun wenssnelheid behouden.

Log-normale verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens

Uit gegevens van AVV [1998] blijkt dat de verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens in Nederland de vorm heeft van een log-normale verdeling (zie bijlage 4 en 5). In tabel 4.1 zijn de gemiddelden en de standaardafwijking van de log-normale verdeling van de specifieke vermogens gegeven die in het hellingmodel worden gebruikt (zie bijlage 4).

Tabel 4.1. Gemiddelde en standaardafwijking van het specifiek vermogen [kW/ton] zoals die in FOSIM-Hellingen worden gebruikt		
	Ongelede vrachtauto (voertuig-bestuurdercombinatie 4)	Gelede vrachtauto (voertuig-bestuurdercombinatie 5)
Gemiddelde	13	10
Standaardafwijking	5	5

Implementatie van de log-normale verdeling in FOSIM-Hellingen

Bij de implementatie van de log-normale verdeling in FOSIM-Hellingen wordt gebruik gemaakt van het gegeven dat voor loting uit een log-normale verdeling geldt:

$$z(p) = e^{y(p)} \quad \text{met} \quad y(p) = \mu_{\text{normaal}} + s_{\text{normaal}} \cdot x(p) \quad (4.1)$$

Hierin zijn:

$z(p)$ = gelote waarde uit de log-normale verdeling;

p = uniformverdeelde variabele tussen 0 en 1;

μ_{normaal} = gemiddelde van de normale verdeling [kW/ton];

σ_{normaal} = standaardafwijking van de normale verdeling [kW/ton];
 $x(p)$ = gelote standaard-normaal-verdeelde variabele ($x \in N(0,1)$).

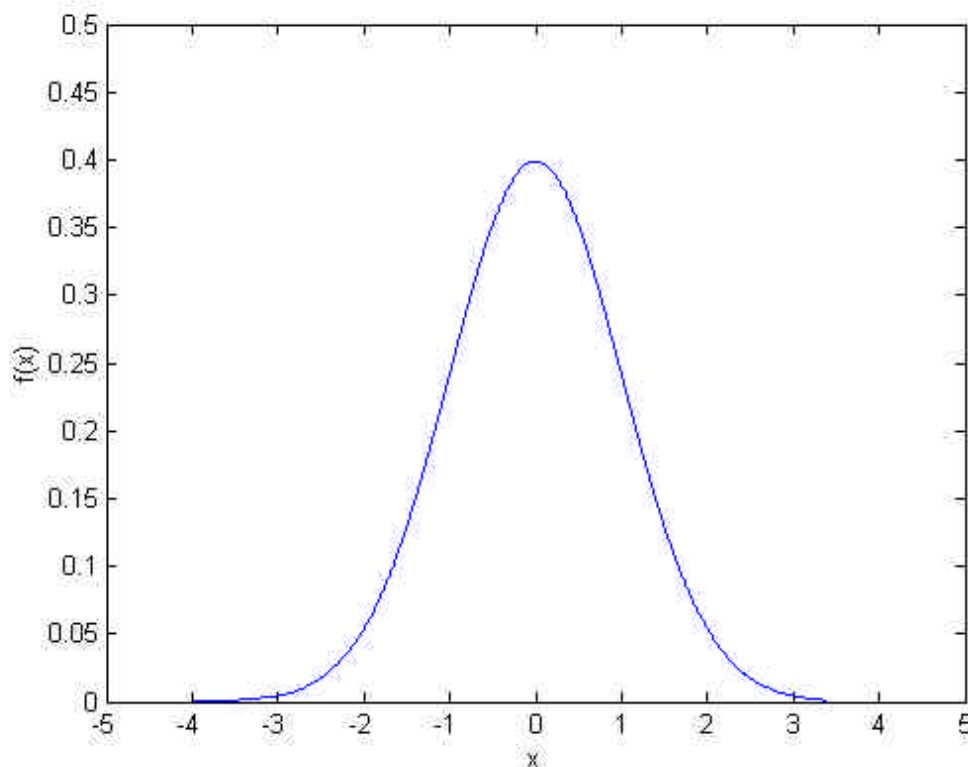
Uit vergelijking 4.1 blijkt dat bij het trekken van een getal uit de log-normale verdeling gebruik gemaakt kan worden van de normale verdeling. Een benadering van de (standaard-)normale verdeling $N(0,1)$ is reeds in FOSIM 4.1 geïmplementeerd aan de hand van een numerieke benadering [Abramowitz & Stegun, 1968, blz. 933 par. 26.2.22.]:

$$x(p) = \frac{t - (c_1 + c_2 \cdot t)}{(1 + c_3 \cdot t + c_4 \cdot t^2)} \quad \text{met} \quad t = \sqrt{\log\left(\frac{1}{p^2}\right)} \quad ? \quad 0 < p \leq 0,5$$

$$x(p) = -\frac{t - (c_1 + c_2 \cdot t)}{(1 + c_3 \cdot t + c_4 \cdot t^2)} \quad \text{met} \quad t = \sqrt{\log\left(\frac{1}{(1-p)^2}\right)} \quad ? \quad 0,5 < p \leq 1$$
(4.2)

Hierin zijn:

$x(p)$ = gelote standaard-normaal-verdeelde variabele ($x \in N(0,1)$);
 p = uniformverdeelde variabele tussen 0 en 1;
 c_1 = 2,30753;
 c_2 = 0,27061;
 c_3 = 0,99229;
 c_4 = 0,04481.



Figuur 4.1. Benadering van de standaardnormale verdeling met vergelijking 4.2 [Abramowitz & Stegun, 1968]

Bij een normale verdeling horen twee parameters: het gemiddelde μ_{normaal} en de standaardafwijking σ_{normaal} . Daarentegen zijn de in tabel 4.1 weergegeven parameters het gemiddelde μ_{log} en de standaardafwijking σ_{log} van de log-normale verdeling. Deze parameters moeten dus eerst worden omgerekend voor het gebruik in de normale verdeling. Hastings & Peacock [1975] geven hiervoor de volgende vergelijkingen:

$$\mu_{\log} = e^{\mu_{\text{normaal}}} \cdot e^{0,5 \cdot s_{\text{normaal}}^2} \quad (4.3)$$

$$\text{Variantie}_{\log} = s_{\log}^2 = e^{2 \cdot \mu_{\text{normaal}}} \cdot e^{s_{\text{normaal}}^2} \cdot (e^{s_{\text{normaal}}^2} - 1) \quad (4.4)$$

Dit zijn twee vergelijkingen met twee onbekenden, zodat hieruit afgeleid kan worden:

$$\mu_{\text{normaal}} = \log \left(\frac{\mu_{\log}}{\sqrt{1 + C_{v,\log}^2}} \right) \quad (4.5)$$

$$s_{\text{normaal}} = \sqrt{\log(1 + C_{v,\log}^2)} \quad (4.6)$$

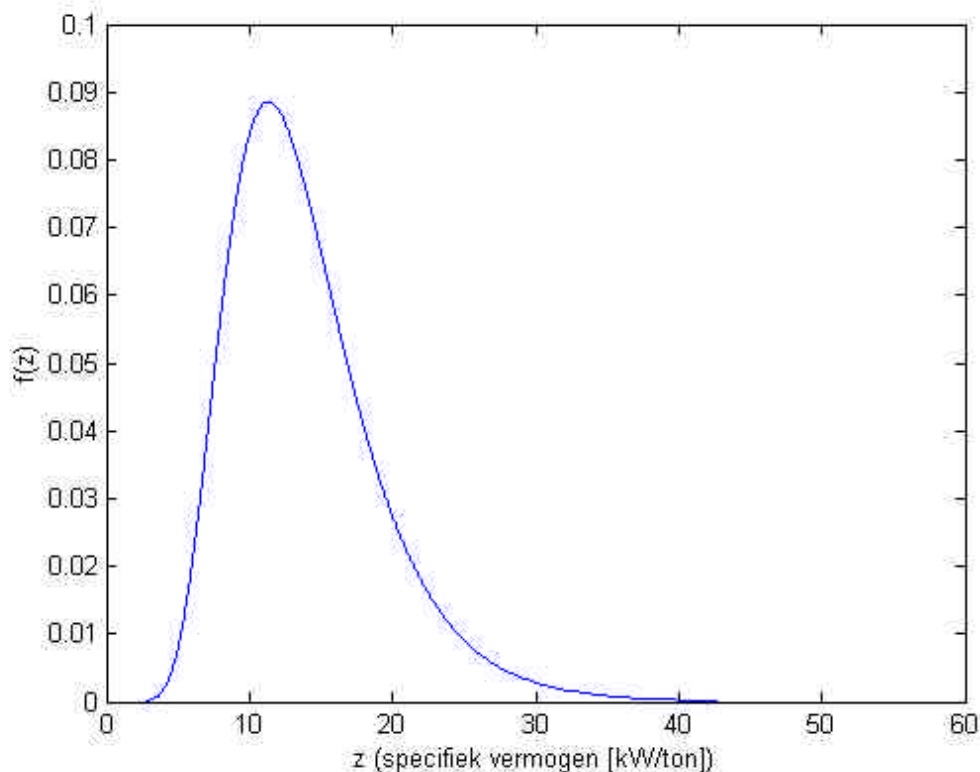
De variantiecoëfficiënt C_v van een verdeling is het quotiënt van de standaardafwijking en het gemiddelde [Hastings & Peacock, 1975], ofwel:

$$C_{v,\log} = \frac{s_{\log}}{\mu_{\log}} \quad (4.7)$$

In tabel 4.2 zijn de uitkomsten van deze omrekening weergegeven. In figuur 4.2 wordt als voorbeeld de log-normale verdeling van de specifieke vermogens van voertuig-bestuurdercombinatie 4 weergegeven ($\mu_{\log} = 13 \text{ kW/ton}$, $\sigma_{\log} = 5 \text{ kW/ton}$).

Tabel 4.2. $\mu_{\log}$ en $\sigma_{\log}$ met bijbehorende μ_{normaal} en σ_{normaal}				
	invoer		intern	
	$\mu_{\log}$ [kW/ton]	$\sigma_{\log}$ [kW/ton]	μ_{normaal} [log(kW/ton)]	σ_{normaal} [log(kW/ton)]
Voertuig-bestuurdercombinatie 4	13,0	5,0	2,50	0,37
Voertuig-bestuurdercombinatie 5	10,0	5,0	2,19	0,47

De gelote specifieke vermogens worden begrensd met een minimumwaarde van 4,4 kW/ton. Lagere waarden voor het specifiek vermogen zijn niet realistisch. Uit praktijkgegevens blijkt namelijk dat een specifiek vermogen van 4,4 kW/ton de 1-percentiel-waarde is [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]. Er ontstaat zodoende een kleine piek in de verdeling bij de ondergrens van 4,4 kW/ton. Hiervan wordt verwacht dat dit geen significante gevolgen heeft voor de verkeersafwikkeling in de simulaties.



Figuur 4.2. Log-normale verdeling van de specifieke vermogens van voertuig-bestuurdercombinatie 4

4.2.2.2. Het rendement

Het rendement van de overbrenging bestaat uit het rendement van de gebruikte versnelling en het rendement van de voertuigonderdelen die de aandrijfkraft vanaf de motor moeten doorgeven naar de wielen. Het rendement van de versnelling is afhankelijk van de tandwielen in de versnellingsbak. Bij optrekken met een slippende koppeling is het rendement slechts 50%. Een slippende koppeling wordt circa 2 seconden aangehouden. In de lagere versnellingen is het rendement circa 96%, terwijl in de hoogste versnelling het rendement kan oplopen tot 99% en bijna 100%. Het rendement van de overbrenging van de voertuigonderdelen tussen de motor en de wielen is circa 90% [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998].

Om het nieuwe maximale-acceleratiemodel niet te gedetailleerd te maken, wordt voor het rendement β voor vrachtwagens een waarde van 0,9 gekozen. Dit is de waarde van het rendement bij hogere snelheden. Dit snelheidsgebied is het meest relevant in FOSIM.

4.2.2.3. De luchtweerstandcoëfficiënt

In paragraaf 3.3.2.1 is een aantal parameters samengevoegd in een luchtweerstandcoëfficiënt L_{vtype} :

$$L_{\text{vtype}} = 0,5 \cdot s_{\text{lucht}} \cdot \frac{C_w \cdot A_{\text{front}}}{m} \quad (4.8)$$

De C_w -waarde, het frontaal oppervlak A_{front} en de massa m zijn voertuigafhankelijk. De dichtheid van lucht σ_{lucht} wordt als een constante aangenomen. Hiervoor wordt een waarde van $1,3 \text{ kg/m}^3$ aangenomen. Dit is de gemiddelde waarde van de luchtdichtheid op zeeniveau [Pline, 1992].

Het ligt voor de hand om de massa te bepalen door deling van het motorvermogen met het specifiek vermogen. Toch wordt gekozen voor de massa als vaste parameter, ter beperking

van het aantal parameters. Wanneer de massa variabel zou zijn (omdat het specifiek vermogen variabel is) is deze samenvoeging van parameters (L_{vtype}) niet mogelijk. Bovendien is de component waarin de massa voorkomt de component voor de luchtweerstand. Zoals reeds eerder is gezegd, geldt voor vrachtwagens dat de luchtweerstand een niet te verwaarlozen doch verhoudingsgewijs lage weerstand is [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]. Voor personenauto's geldt dit niet, maar omdat voor de personenauto's in het hellingmodel een vaste waarde voor het specifiek vermogen wordt gebruikt, kan ook voor de massa een vaste waarde worden aangenomen.

Voor alle voertuigen van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 wordt uitgegaan van een C_w -waarde van 0,7. Deze waarde wordt in het SimVra+-model gebruikt en wordt ook door Pline [1992] als mogelijke waarde genoemd.

Het frontale oppervlak kan bij benadering worden berekend uit de voertuigafmetingen [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]:

$$A_{\text{front}} = 0,8 \cdot \text{hoogte} \cdot \text{breedte} \quad (4.9)$$

Hierbij is:

A_{front} = frontaal oppervlakte voertuig in vooraanzicht [m^2];

Hoogte = hoogte van het voertuig [m];

Breedte = breedte van het voertuig [m].

Voor de waarden van de hoogte en breedte worden de gemiddelde waarden genomen uit de gegevens van AVV [1998] (zie bijlage 4). In tabel 4.3 zijn de waarden voor het frontaal oppervlak van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 gegeven.

Tabel 4.3. Waarden voor het frontaal oppervlak A_{front} voor voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5					
Voertuig-Categorie	Gemiddelde breedte [m]	Gemiddelde hoogte [m]	Frontaal oppervlak [m^2]	Voertuig-bestuurder-combinatie	Frontaal oppervlak [m^2]
Ongelede vrachtauto	2,49	3,51	6,99	4	6,99
Vrachtauto met aanhangwagen	2,46	3,63	7,14	5	6,85
Trekker met oplegger	2,41	3,50	6,75		

Voor de massa wordt de gemiddelde massa voor de beide voertuig-bestuurdercombinaties genomen uit de gegevens van AVV [1998]. Dit is voor voertuig-bestuurdercombinatie 4 (ongelede vrachtauto's) 15,0 ton en voor voertuig-bestuurdercombinatie 5 (gelede vrachtauto's) 31,1 ton (zie bijlage 4).

Uit deze gegevens volgen de waarden van de luchtweerstandcoëfficiënt L_{vtype} voor de vrachtwagens:

- Voertuig-bestuurdercombinatie 4: $L_{vtype} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$;
- Voertuig-bestuurdercombinatie 5: $L_{vtype} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$.

4.2.3. De kalibratie van de personenautoparameters

De waarden van de parameters van voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3 (de personenauto's in FOSIM) zijn zo gekozen, dat het verloop van de maximale acceleratie volgens het nieuwe maximale-acceleratiemodel ongeveer gelijk blijft aan het huidige maximale-acceleratiemodel. Dit is gedaan om de validiteit van FOSIM-Hellingen zo veel mogelijk te waarborgen.

In tabel 4.4 worden de parameterwaarden van de personenauto's in FOSIM-Hellingen gegeven. Bovendien wordt aangegeven welke voertuigkarakteristieken hiermee zouden kunnen corresponderen.

Tabel 4.4. Parameterwaarden van voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3							
Voertuig- bestuurder- combinatie	Specifiek vermogen [kW/ton]	Rendement β [-]	L_{vtype} [m ⁻¹]	Corresponderende voertuigkarakteristieken			
				Vermogen [kW]	Massa [kg]	C_w - waarde [-]	A_{front} [m ²]
1	80	0,6	$6 \cdot 10^{-4}$	80	1000	0,5	2
2	50	0,6	$5 \cdot 10^{-4}$	50	1000	0,5	2
3	35	0,6	$4 \cdot 10^{-4}$	105	3000	0,6	3

Het rendement van personenauto's ligt wat lager dan bij vrachtwagens. Er is gekozen voor een waarde van 0,6 [Pline, 1992]. Dit lijkt wellicht aan de lage kant, maar in deze waarde is ook verdisconteerd de veronderstelling dat bestuurders van personenauto's zelden hun maximale motorvermogen aanspreken (zie paragraaf 2.3.2.1).

4.3. Validatie

4.3.1. Inleiding

Het hellingmodel moet zowel voor vlakke wegen als voor hellingen valide simulatieresultaten geven. Daarom wordt het maximale-acceleratiemodel op voertuig-bestuurderniveau gevalideerd voor zowel vlakke als hellende wegen. Bij de validatie van vlakke wegen wordt het huidige maximale-acceleratiemodel van FOSIM gebruikt, omdat FOSIM tot nu toe is gebruikt voor vlakke wegen. Om de validiteit van FOSIM te waarborgen, mag het huidige acceleratieverloop in FOSIM niet te veel verschillen met het nieuwe acceleratieverloop. Voor hellende wegen wordt gebruik gemaakt van het voertuigmodel SimVra+ van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat [1998].

Ter volledigheid worden in tabel 4.5 alle voertuigparameterwaarden samengevat.

Tabel 4.5. Waarden voor de voertuigparameters in FOSIM-Hellingen					
Voertuig- bestuurder combinatie	Gemiddeld Specifiek vermogen [kW/ton]	Standaardafwijking specifiek vermogen [kW/ton]	Luchtweerstand- coëfficiënt L_{vtype} [m ⁻¹]	Rendement β [-]	Rolweerstand- coëfficiënt f_{rol} [-]
1	80	0	$6 \cdot 10^{-4}$	0,6	0,006
2	50	0	$5 \cdot 10^{-4}$	0,6	0,006
3	35	0	$4 \cdot 10^{-4}$	0,6	0,006
4	13	5	$2 \cdot 10^{-4}$	0,9	0,006
5	10	5	$1 \cdot 10^{-4}$	0,9	0,006

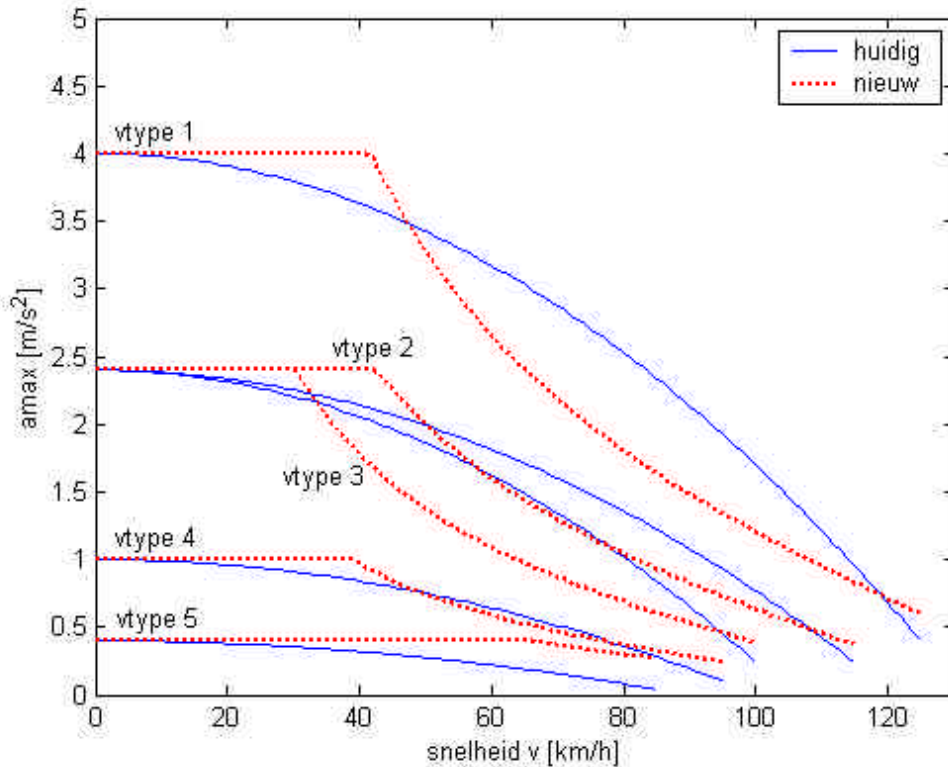
Het gemiddelde en de standaardafwijking van het specifiek vermogen en de luchtweerstandcoëfficiënt L_{vtype} zijn de kalibratieparameters in FOSIM-Hellingen. Het rendement β en de rolweerstandcoëfficiënt f_{rol} zijn als "verborgen" parameters in FOSIM-Hellingen geïmplementeerd.

4.3.2. Validatie van het maximale-acceleratiemodel ten aanzien van vlakke wegen

De validatie van het maximale-acceleratiemodel ten aanzien van vlakke wegen wordt gedaan aan de hand van het huidige maximale-acceleratiemodel van FOSIM. Hierbij wordt het acceleratieverloop en het snelheidsverloop volgens de huidige en het nieuwe maximale-acceleratiemodel met elkaar vergeleken.

In figuur 4.3 zijn de maximale-acceleratiecurven van de voertuigtypen weergegeven die volgen uit beide modellen. In paragraaf 3.3.3 is reeds opgemerkt dat de curven verschillen in hun verloop. Omdat gebruik gemaakt wordt van de huidige voertuigparameter maximale acceleratie (de horizontale lijnen in de acceleratiecurven waarmee de maximale acceleratie wordt afgekapt) is het verloop van de huidige maximale-acceleratievergelijking toch redelijk te benaderen.

In figuur 4.3 is te zien dat het verloop van de maximale acceleratie van voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3 is gevalideerd ten aanzien van het nieuwe maximale-acceleratiemodel. Het verloop van de maximale acceleratie van voertuig-bestuurdercombinatie 4 komt eveneens goed overeen met het huidige maximale-acceleratiemodel, in tegenstelling tot voertuig-bestuurdercombinatie 5. Omdat bij voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 wordt geprobeerd de realiteit te benaderen, wordt dit niet als een groot bezwaar gezien. Bovendien is in figuur 4.3 het verloop van de maximale acceleratie weergegeven met de *gemiddelde waarden* van de specifieke vermogens van de voertuig-bestuurdercombinaties 4 en 5. In het huidige maximale-acceleratiemodel is blijkbaar (bewust of onbewust) uitgegaan van vrachtwagens met een *laag* specifiek vermogen voor voertuig-bestuurdercombinatie 5.



Figuur 4.3. Verband tussen de snelheid en de maximale acceleratie van het huidige maximale-acceleratiemodel en het nieuwe maximale-acceleratiemodel van de verschillende voertuig-bestuurdercombinaties op vlakke wegen

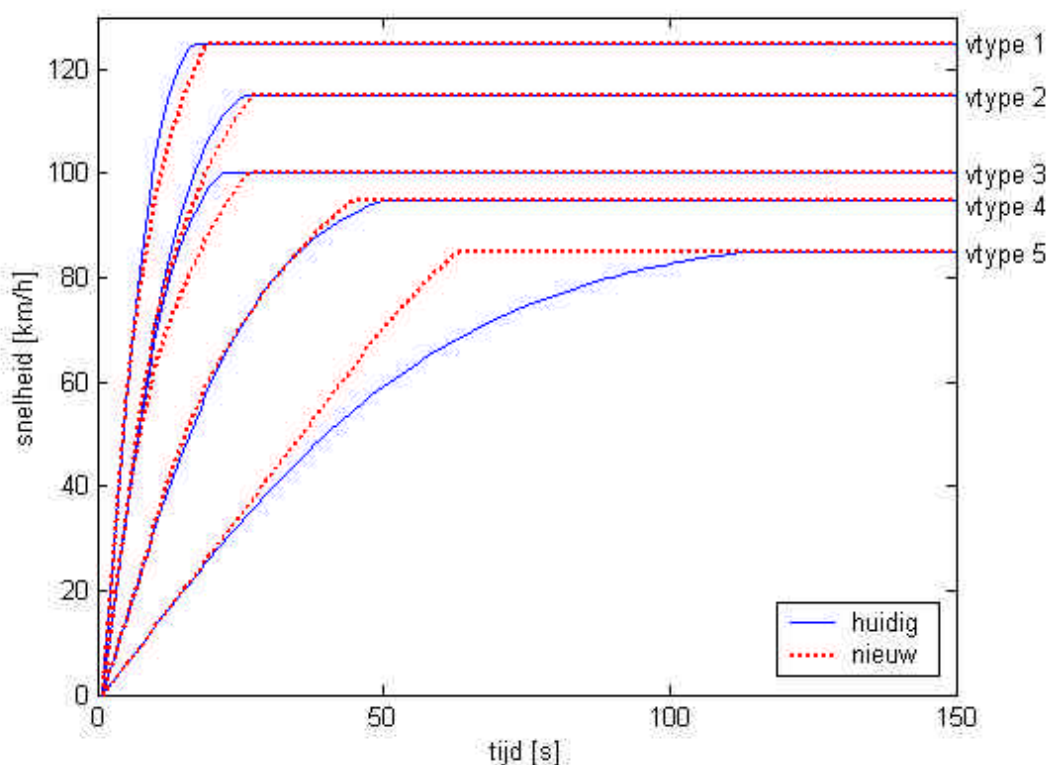
De maximale acceleratie die uit het hellingmodel volgt, wordt in FOSIM gebruikt bij het bepalen van de snelheid en de plaats in de volgende tijdstep. Hierbij worden de elementaire mechanica-vergelijkingen gebruikt:

$$x_t = x_0 + v_0 \cdot t + 0.5 \cdot a \cdot t^2 \quad (4.10)$$

en

$$v_t = v_0 + a \cdot t \quad (4.11)$$

In figuur 4.4 is het snelheidsverloop als gevolg van het huidige en het nieuwe maximale-acceleratiemodel weergegeven (zonder de in paragraaf 3.3.3. genoemde maximale sprong in de acceleratie). In figuur 4.4 is te zien, dat de snelheidsverlopen niet zoveel verschillen. Enkel het snelheidsverloop van voertuig-bestuurdercombinatie 5 is redelijk veranderd. Zoals ook al bij figuur 4.3 is opgemerkt, betreft het hier het snelheidsverloop bij de gemiddelde waarde van het specifiek vermogen. Voertuigen waarbij een lager specifiek vermogen geloot is, zullen het snelheidsverloop van voertuig-bestuurdercombinatie 5 beter benaderen.



Figuur 4.4. Snelheidsverloop als gevolg van het huidige en het nieuwe maximale-acceleratiemodel

4.3.3. Validatie van het maximale-acceleratiemodel ten aanzien van hellingen

Bij de validatie van het maximale-acceleratiemodel ten aanzien van hellingen wordt gebruik gemaakt van het voertuigmodel SimVra+. ¹⁰ In bijlage 6 is voor verschillende situaties het snelheidsverloop weergegeven, berekend met SimVra+ en met het maximale-acceleratiemodel, van de DAF FT 95XF.380 (een vrachtauto met aanhangwagen, voorbeeld van voertuig-bestuurdercombinatie 5 in FOSIM) en de DAF FT75 XF.380 (een ongelede vrachtauto, voorbeeld van voertuig-bestuurdercombinatie 4 in FOSIM). Hierbij is onderscheid gemaakt in hellingspercentages van 0, 2, 4 en 6%, een aantal verschillende specifieke vermogens en het snelheidsverloop vanuit stilstand en vanaf de wenssnelheid. De voertuigparameters in het maximale-acceleratiemodel zijn overgenomen uit SimVra+.

In bijlage 6 is te zien, dat het snelheidsverloop volgens het maximale-acceleratiemodel redelijk overeenkomt met het snelheidsverloop volgens het SimVra+-model. Het snelheidsverval op een helling wordt door het maximale-acceleratiemodel beter gemodelleerd dan de acceleratie vanuit stilstand. Deze acceleratie is volgens SimVra+ kleiner dan volgens het maximale-acceleratiemodel, omdat in SimVra+ het schakelen van het voertuig wordt gemodelleerd. Dit wordt echter niet als een groot bezwaar gezien, omdat de capaciteit van een weg bij redelijk hoge snelheden (tussen de 60 en 100 km/h) ligt. Enige afwijkingen bij lagere snelheden zijn dus toegestaan.

Verder is in bijlage 6 te zien, dat de begrenzing van de maximale acceleratie met de huidige voertuigparameter maximale acceleratie bij hoge specifieke vermogens te laag is. Om de validiteit van FOSIM-Hellingen ten opzichte van vlakke wegen te waarborgen is toch besloten om deze maximale acceleratie niet te verhogen.

¹⁰ Hoewel het maximale-acceleratiemodel van FOSIM 4.1 niet is gevalideerd met SimVra+, wordt de validatie van het nieuwe maximale-acceleratiemodel met SimVra+ als essentieel beschouwd, omdat het nieuwe maximale-acceleratiemodel een extra dimensie geeft aan de berekening van de maximale acceleratie (letterlijk en figuurlijk).

4.4. Voor- en nadelen van het maximale-acceleratiemodel

Ter afsluiting van dit hoofdstuk volgt hier een aantal voor- en nadelen van het nieuwe maximale-acceleratiemodel, te beginnen met de voordelen:

Het nieuwe maximale-acceleratiemodel

- is gebaseerd op “elementaire” (voertuig-)mechanica;
- is toepasbaar op alle voertuigen;
- is geschikt voor zowel lage als hoge hellingspercentages;
- kan eventueel ook worden gebruikt voor afdalingen;
- voldoet voor zowel acceleratie als deceleratie op een helling;
- veroorzaakt nauwelijks extra rekentijd.

De nadelen:

- Het nieuwe maximale acceleratiemodel heeft een redelijk groot aantal parameters. Dit aantal is beperkt door drie parameters als kalibratieparameters te beschouwen en de overige parameters als constanten;
- De acceleratie bij lage snelheden is iets minder realistisch gemodelleerd dan bij hoge snelheden. Het schakelen van voertuigen beperkt de acceleratie bij lage snelheden. Dit is niet expliciet in het nieuwe maximale-acceleratiemodel meegenomen.

In het volgende hoofdstuk wordt het hellingmodel (FOSIM-Hellingen) gevalideerd op verkeersstroomniveau.

5. Validatie van het hellingmodel op verkeersstroomniveau

5.1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk is het hellingmodel, voor wat betreft het maximale-acceleratiemodel, gevalideerd op voertuigniveau. In dit hoofdstuk wordt het hellingmodel in zijn geheel gevalideerd op verkeersstroomniveau.

De FOSIM-versie waarin het hellingmodel is geïmplementeerd is FOSIM-Hellingen genoemd. FOSIM-Hellingen moet zowel voor vlakke wegen als voor hellingen valide simulatieresultaten geven. Daarom wordt net als bij de validatie op voertuigniveau onderscheid gemaakt in vlakke wegen en hellingen. Hierbij zijn twee verschillende validatiemethoden toegepast:

- De validatie ten aanzien van vlakke wegen wordt uitgevoerd met invoerbestanden. Deze invoerbestanden bestaan uit vlakke wegvaktypen. Er wordt aangenomen dat FOSIM 4.1 met deze invoerbestanden valide en realistische uitkomsten genereert. FOSIM-Hellingen moet met deze vlakke wegvaktypen dezelfde uitkomsten geven als FOSIM 4.1. De capaciteit wordt bij deze validatie als grootheid gebruikt. Per invoerbestand wordt met beide FOSIM-versies 100 maal de capaciteit bepaald. De beide verdelingen van de gegenereerde capaciteiten moeten overeenkomen. Hierbij wordt een betrouwbaarheidsniveau van 95% in acht genomen.¹¹
- De validatie ten aanzien van hellingen wordt gedaan aan de hand van meetgegevens afkomstig van rijksweg A50 tussen Arnhem en Apeldoorn. Deze meetgegevens bestaan niet uit een groot aantal capaciteitsmetingen, maar uit snelheids- en intensiteitgegevens van een aantal verschillende dagen. Daarom kan de methode die bij de validatie ten aanzien van vlakke wegen is gebruikt niet worden toegepast. Er is gekozen voor een vergelijking van snelheid-intensiteitsdiagrammen ($u(q)$ -diagrammen) van de meetgegevens en de simulatie met FOSIM-Hellingen. Verder worden ook de rijstrookverdelingen gevalideerd door van videodata afgeleide rijstrookverdelingen te vergelijken met rijstrookverdelingen volgens FOSIM-Hellingen.

In paragraaf 5.2 wordt de validatie ten aanzien van vlakke wegen belicht. Paragraaf 5.3 behandelt de validatie ten aanzien van hellingen.

5.2. Validatie ten aanzien van vlakke wegen

5.2.1. Inleiding

Bij validatie van FOSIM-Hellingen ten aanzien van vlakke wegen worden invoerbestanden van FOSIM gebruikt. Deze invoerbestanden zijn vlakke wegvaktypen. Er wordt aangenomen dat FOSIM 4.1 met deze invoerbestanden valide en realistische capaciteiten genereert. De resultaten van FOSIM-Hellingen mogen daarom niet te veel verschillen met de uitkomsten van de invoerbestanden volgens FOSIM 4.1.

De capaciteit van een wegvaktype is de toetsingsgrootheid bij deze validatie. De capaciteit is in dit geval gedefinieerd als de hoogst gemeten 5-minutenintensiteit gedurende de simulatie. In werkelijkheid heeft de capaciteit van een wegvaktype een stochastisch karakter. Dit wordt in FOSIM met behulp van randomwaarden nagebootst. Om een betrouwbare gemiddelde intensiteit te berekenen moeten daarom per wegvaktype meerdere simulaties worden uitgevoerd.

De invoerbestanden van FOSIM zijn weergegeven in tabel 5.1.

¹¹ Het zou overigens beter zijn om de validatie ten aanzien van vlakke wegen uit te voeren met de oorspronkelijke meetgegevens die ten grondslag liggen aan de invoerbestanden. Hiervoor wordt niet gekozen, omdat dit veel meer tijd kost.

Tabel 5.1. De invoerbestanden van FOSIM	
Omschrijving wegvaktype	Bestandsnaam (.fos)
Afvallende rijstrook van 2 naar 1 rijstrook	<Afv_21>
Afvallende rijstrook van 3 naar 2 rijstroken	<Afv_32>
1-strooks-invoeging met een hoofdrijbaan van 2 rijstroken	<Inv_21>
2-strooks-invoeging overgaand in 1 strook met een hoofdrijbaan van 2 rijstroken	<Inv_21B>
1-strooks-invoeging met een hoofdrijbaan van 3 rijstroken	<Inv_31>
Taperinvoeging met 2+2 rijstroken overgaand in 3 rijstroken	<Tap_43>
1-strooks-uitvoeging met een hoofdrijbaan van 2 rijstroken	<Uitv_21>
1-strooks-uitvoeging met een hoofdrijbaan van 3 rijstroken	<Uitv_31>
Weefvak met 1+1 rijstroken	<Weef_11>
Weefvak met 2+1 rijstroken	<Weef_21>
Weefvak met 2+2 rijstroken	<Weef_22>
Weefvak met 3+1 rijstroken	<Weef_31>
Weefvak met 3+2 rijstroken	<Weef_32>
Weefvak met 4+1 rijstroken	<Weef_41>
Weefvak met 4+2 rijstroken	<Weef_42>
Asymmetrisch weefvak met 2+2 rijstroken, overgaand in 3+1 rijstroken	<Wf_22_31>
Werk in uitvoering op de linker rijstrook van een rijbaan met 2 rijstroken	<Wiul_2>
Werk in uitvoering op de rechter rijstrook van een rijbaan met 2 rijstroken	<Wiur_2>

Bij deze invoerbestanden is het vrachtwagenpercentage per rijbaan 10%. Het intensiteitenverloop wordt lineair opgehoogd vanaf het starttijdstip tot aan 900 seconden. Hierbij wordt de intensiteitenverhouding tussen de verschillende voertuiggeneratoren van één rijbaan constant gehouden in verband met het in stand houden van het juiste percentage vrachtverkeer. Na verloop van tijd loopt het intensiteitenpatroon terug. De maximale simulatieduur is 4 uur en de tijdstapgrootte is 0,5 seconden. Als de gemiddelde snelheid (over 5 minuten) op één van de detectoren de 40 km/h onderschrijft, stopt de simulatie bij de volgende meting van de detectoren (dus na 5 minuten). De hoogste gemeten intensiteit die gedurende de simulatie op de meest stroomafwaarts gelegen detector is gemeten, wordt als de capaciteit beschouwd.

Met elk invoerbestand zijn 100 simulaties uitgevoerd. Bij elke simulatie is een andere startwaarde van de randomgenerator gebruikt.

De verdelingen van de gegenereerde capaciteiten van FOSIM 4.1 en FOSIM-Hellingen moeten overeenkomen. Dit wordt gecontroleerd aan de hand van het vergelijken van de gemiddelden en de standaardafwijkingen van de gegenereerde capaciteitsverdelingen. Bij deze validatie worden de T-toets (voor gemiddelden) en de F-toets (voor

standaardafwijkingen) gebruikt. Bij beide toetsen wordt een betrouwbaarheidsniveau van 95% in acht genomen.

5.2.2. Toets voor verschil in gemiddelden

De gemiddelde capaciteit van FOSIM-Hellingen ($\hat{\mu}_{\text{helling}}$) moet gelijk zijn aan de gemiddelde capaciteit van FOSIM 4.1 ($\hat{\mu}_{4.1}$). Deze voorwaarde kan worden getoetst met de T-toets [o.a. Botma, 2000]. De nulhypothese H_0 en de alternatieve hypothese H_a zijn:

$$H_0 : \hat{\mu}_{4.1} = \hat{\mu}_{\text{helling}}$$

$$H_a : \hat{\mu}_{4.1} \neq \hat{\mu}_{\text{helling}}$$

De toetsingsgrootte T is gelijk aan:

$$T = \frac{(\hat{\mu}_{4.1} - \hat{\mu}_{\text{helling}})}{\sqrt{s_{4.1}^2/n_{4.1} + s_{\text{helling}}^2/n_{\text{helling}}}} \quad (5.1)$$

De standaardafwijkingen van de gegenereerde capaciteiten $s_{4.1}$ en s_{helling} zijn bekend, evenals de steekproefgrootten $n_{4.1}$ en n_{helling} ($n_{4.1} = n_{\text{helling}} = 100$).

Het aantal vrijheidsgraden van T bedraagt $(n_{4.1} - 1) + (n_{\text{helling}} - 1) = 99 + 99 = 198$. Het gemiddelde van FOSIM-Hellingen mag zowel groter als kleiner zijn dan het gemiddelde van FOSIM 4.1. Dit betekent voor toetsingswaarde t bij een betrouwbaarheidsniveau van 95% (zie bijlage 7) dat:

$$P(-1,96 < t < 1,96) = 0,95 \quad (5.2)$$

H_0 wordt dus aangenomen als geldt:

$$-1,96 < T < 1,96 \quad (5.3)$$

5.2.3. Toets voor verschil in standaardafwijking

De standaardafwijking van FOSIM-Hellingen (s_{helling}) moet gelijk zijn aan de standaardafwijking van FOSIM 4.1 ($s_{4.1}$). Deze voorwaarde kan worden getoetst met de F-toets [o.a. Botma, 2000]. De nulhypothese H_0 en de alternatieve hypothese H_a zijn:

$$H_0 : s_{4.1} = s_{\text{helling}}$$

$$H_0 : s_{4.1} > s_{\text{helling}} \quad \text{of} \quad s_{\text{helling}} > s_{4.1}$$

De toetsingsgrootte T is in dit geval:

$$T = \frac{s_{4.1}^2}{s_{\text{helling}}^2} \quad ? \quad s_{4.1} = s_{\text{helling}} \quad (5.4)$$

$$T = \frac{s_{\text{helling}}^2}{s_{4.1}^2} \quad ? \quad s_{\text{helling}} > s_{4.1}$$

Het aantal vrijheidsgraden voor de teller van T is ($n_{4.1} - 1$), voor de noemer van T ($n_{\text{helling}} - 1$), dus beiden $100 - 1 = 99$. Dit betekent voor de toetsingswaarde bij een betrouwbaarheid van 95% (zie bijlage 8) dat:

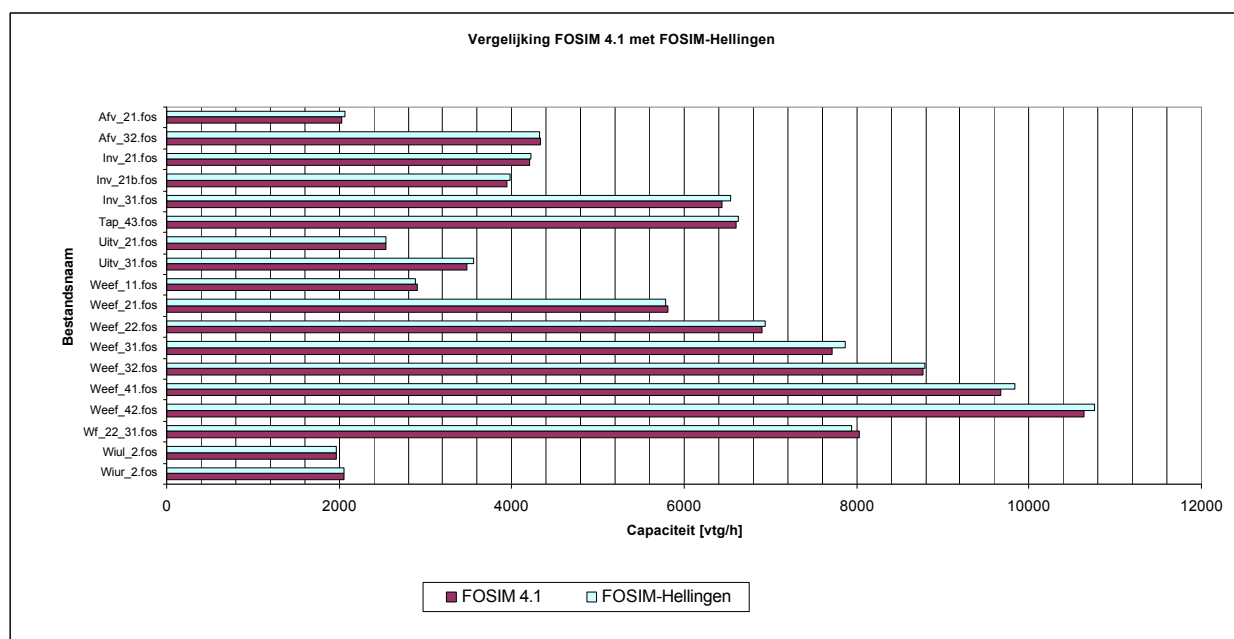
$$P(t < 1,70) = 0,95 \quad (5.5)$$

H_0 wordt dus aangenomen als geldt:

$$T < 1,70 \quad (5.6)$$

5.2.4. Resultaten

In figuur 5.1 zijn de gemiddelde capaciteiten van de genoemde invoerbestanden weergegeven, zoals die door FOSIM 4.1 en FOSIM-Hellingen worden gesimuleerd. Hierbij zijn de parameterwaarden gebruikt die volgen uit de kalibratie en validatie op voertuigniveau in hoofdstuk 4 (zie tabel 4.5).



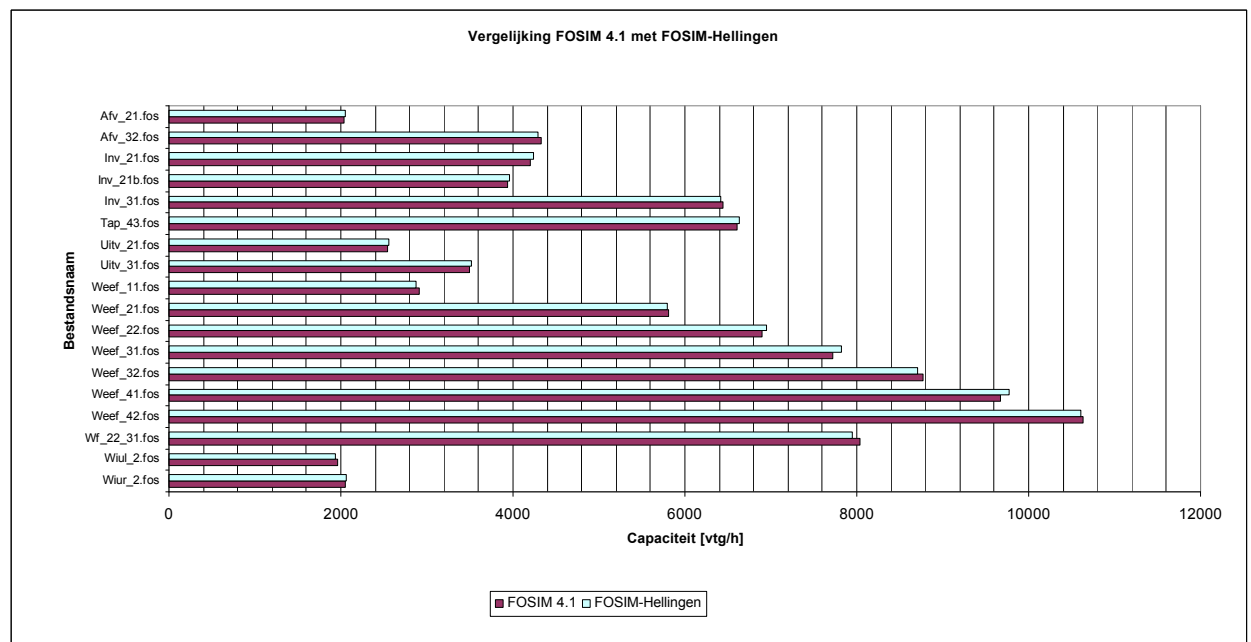
Figuur 5.1. Capaciteitsvergelijking van FOSIM-Hellingen met FOSIM 4.1

In tabel 5.2 zijn per invoerbestand de gemiddelde capaciteiten en de standaardafwijkingen weergegeven. In tabel 5.2 is te zien dat bij vier invoerbestanden de T-toets negatief uitvalt. Wat betreft de F-toets is enkel bij het invoerbestand <Wiul_2> een kleine overschrijding van de toetsingswaarde te constateren.

Tabel 5.2. Capaciteitsvergelijking van FOSIM-Hellingen met FOSIM 4.1

Bestandsnaam	FOSIM 4.1		FOSIM-Hellingen		T-toets			F-toets		
	gem.	st.dev.	gem.	st.dev.	T =	t=	H ₀ = waar	T =	t<	H ₀ = waar
Afv_21.fos	2034	164,1	2065	161,0	1,35	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,04	1,70	ja
Afv_32.fos	4329	176,4	4324	217,8	-0,17	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,52	1,70	ja
Inv_21.fos	4204	232,8	4226	237,9	0,65	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,04	1,70	ja
Inv_21b.fos	3940	204,6	3981	182,9	1,50	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,25	1,70	ja
Inv_31.fos	6438	322,4	6536	329,7	2,12	<-1,96 ; 1,96>	nee	1,05	1,70	ja
Tap_43.fos	6605	332,4	6625	336,3	0,41	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,02	1,70	ja
Uitv_21.fos	2547	155,2	2544	138,8	-0,13	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,25	1,70	ja
Uitv_31.fos	3488	173,9	3555	164,1	2,80	<-1,96 ; 1,96>	nee	1,12	1,70	ja
Weef_11.fos	2910	151,4	2880	160,3	-1,36	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,12	1,70	ja
Weef_21.fos	5816	390,9	5782	319,6	-0,68	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,50	1,70	ja
Weef_22.fos	6903	427,5	6933	456,5	0,49	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,14	1,70	ja
Weef_31.fos	7718	430,1	7863	397,0	2,48	<-1,96 ; 1,96>	nee	1,17	1,70	ja
Weef_32.fos	8766	449,3	8792	477,1	0,40	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,13	1,70	ja
Weef_41.fos	9669	516,6	9833	433,1	2,43	<-1,96 ; 1,96>	nee	1,42	1,70	ja
Weef_42.fos	10630	609,0	10756	619,4	1,45	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,03	1,70	ja
Wf_22_31.fos	8032	458,4	7947	433,2	-1,35	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,12	1,70	ja
Wiul_2.fos	1962	118,9	1973	155,9	0,56	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,72	1,70	nee
Wiur_2.fos	2056	123,8	2051	134,9	-0,29	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,19	1,70	ja

Omdat de toetsingswaarden worden overschreden, moeten voor de validatie van FOSIM-Hellingen de specifieke vermogens van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 worden verlaagd van 13 naar 12 kW/ton (voertuig-bestuurdercombinatie 4) en van 10 naar 9 kW/ton (voertuig-bestuurdercombinatie 5). Figuur 5.2 en tabel 5.3 laten zien dat FOSIM-Hellingen met deze parameterwaarden wel valide is voor alle invoerbestanden. Bij geen enkele invoerbestand wordt de toetsingswaarde van de T- of F-toets overschreden (zie tabel 5.3).



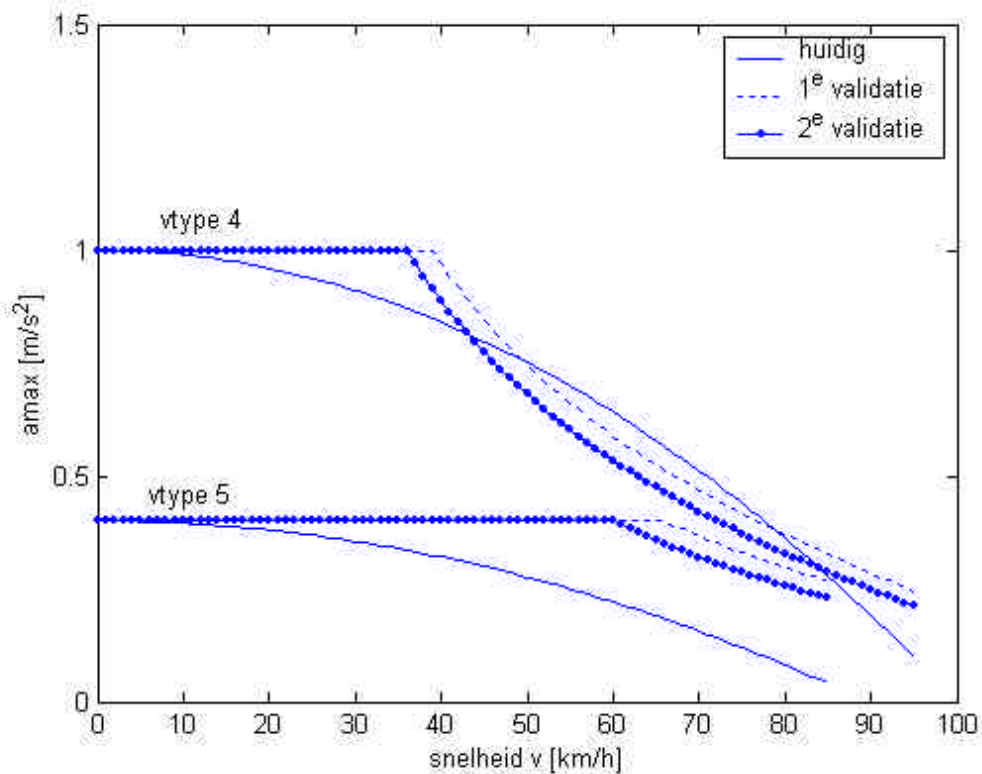
Figuur 5.2. Capaciteitsvergelijking van FOSIM-Hellingen (specifiek vermogen: vtype 4 = 12 kW/ton, vtype 5 = 9 kW/ton) met FOSIM 4.1

Tabel 5.3. Capaciteitsvergelijking van FOSIM-Hellingen (specifiek vermogen: vtype 4 = 12 kW/ton, vtype 5 = 9 kW/ton) met FOSIM 4.1

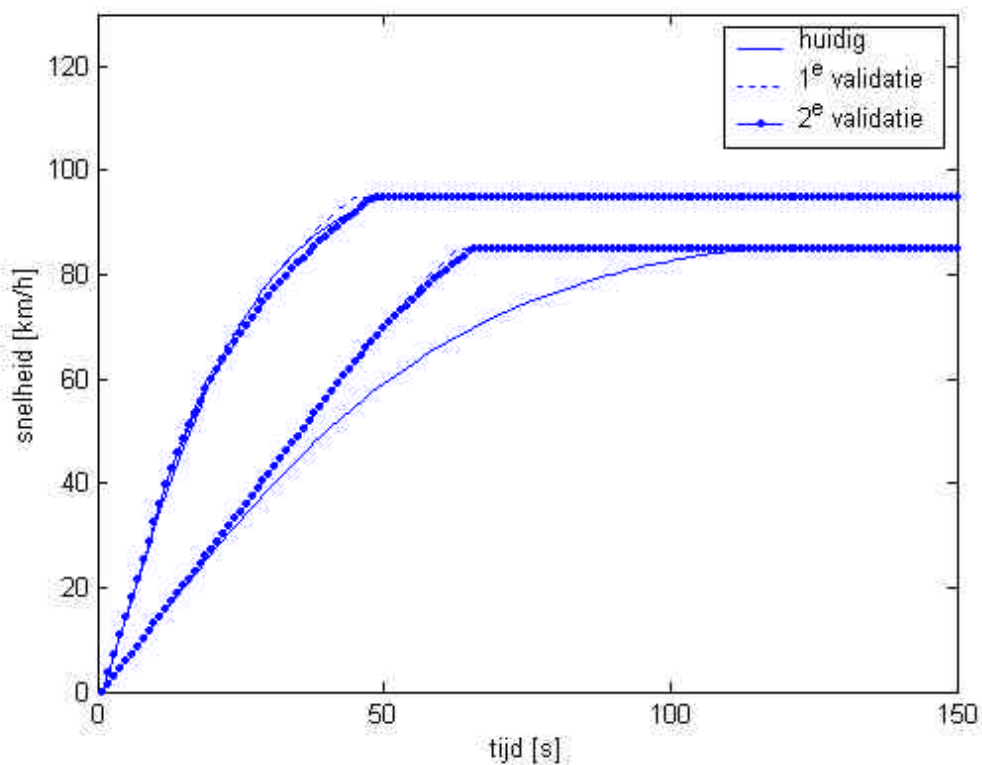
Bestandsnaam	FOSIM 4.1		FOSIM-Hellingen		T-toets			F-toets		
	Gem.	st.dev.	gem.	St.dev.	T =	T=	H ₀ = waar	T =	t<	H ₀ = waar
Afv_21.fos	2056	123,8	2068	127,9	0,66	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,07	1,70	ja
Afv_32.fos	1962	118,9	1931	138,3	-1,69	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,35	1,70	ja
Inv_21.fos	8032	458,4	7947	413,2	-1,37	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,23	1,70	ja
Inv_21b.fos	10630	609,0	10606	648,0	-0,27	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,13	1,70	ja
Inv_31.fos	9669	516,6	9777	496,5	1,51	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,08	1,70	ja
Tap_43.fos	8766	449,3	8714	421,5	-0,84	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,14	1,70	ja
Uitv_21.fos	7718	430,1	7827	403,0	1,85	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,14	1,70	ja
Uitv_31.fos	6903	427,5	6948	447,6	0,73	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,10	1,70	ja
Weef_11.fos	5816	390,9	5798	351,2	-0,36	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,24	1,70	ja
Weef_21.fos	2910	151,4	2878	150,3	-1,50	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,01	1,70	ja
Weef_22.fos	3488	173,9	3525	181,4	1,48	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,09	1,70	ja
Weef_31.fos	2547	155,2	2551	140,5	0,20	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,22	1,70	ja
Weef_32.fos	6605	332,4	6635	338,4	0,63	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,04	1,70	ja
Weef_41.fos	6438	322,4	6417	318,1	-0,47	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,03	1,70	ja
Weef_42.fos	3940	204,6	3957	174,3	0,63	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,38	1,70	ja
Wf_22_31.fos	4204	232,8	4238	231,9	1,02	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,01	1,70	ja
Wiul_2.fos	4329	176,4	4287	192,7	-1,59	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,19	1,70	ja
Wiur_2.fos	2034	164,1	2056	150,7	0,99	<-1,96 ; 1,96>	ja	1,19	1,70	ja

De verlaging van de specifieke vermogens van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 heeft als gevolg dat de in paragraaf 4.2.2.1. genoemde piek van 4,4 kW/ton bij de ondergrens van de verdelingen van de specifieke vermogens iets groter zal worden. Dit wordt niet als bezwaarlijk beschouwd.

Het acceleratie- en snelheidsverloop met de *gemiddelde* waarden van de specifieke vermogens van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 verschilt nauwelijks ten opzichte van de figuren 4.3 en 4.4. (zie figuur 5.3 en 5.4).



Figuur 5.3. Acceleratieverloop van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 op vlakke wegen met het huidige maximale-acceleratiemodel en het nieuwe maximale-acceleratiemodel met de gemiddelde specifieke vermogens van respectievelijk 13 en 10 kW/ton (1^e validatie) en 12 en 9 kW/ton (2^e validatie)



Figuur 5.4. Snelheidsverloop van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 op vlakke wegen met het huidige maximale-acceleratiemodel en het nieuwe maximale-acceleratiemodel met de gemiddelde specifieke vermogens van respectievelijk 13 en 10 kW/ton (1^e validatie) en 12 en 9 kW/ton (2^e validatie)

5.3. De validatie ten aanzien van hellingen

5.3.1. Inleiding

In paragraaf 5.2 is FOSIM-Hellingen ten aanzien van vlakke wegen gevalideerd. Deze paragraaf beschrijft de validatie van FOSIM-Hellingen ten aanzien van hellingen. Hierbij worden enkele basisbegrippen uit de verkeersstroomtheorie als bekend verondersteld. In bijlage 1 is een toelichting te vinden over de begrippen die in deze paragraaf worden gebruikt.

De validatie van FOSIM-Hellingen gebeurt aan de hand van $u(q)$ -diagrammen. In paragraaf 5.1 is beargumenteerd waarom voor deze validatiemethode is gekozen. De $u(q)$ -diagrammen zijn afgeleid uit meetgegevens en vergeleken met $u(q)$ -diagrammen die door FOSIM-Hellingen worden gegenereerd. Om te beschikken over voldoende invoergegevens voor de simulatie met FOSIM-Hellingen, is een tweetal aanvullende metingen uitgevoerd. Als eerste zullen deze aanvullende meetgegevens worden beschreven, gevolgd door de validatie van FOSIM-Hellingen ten aanzien van hellingen.

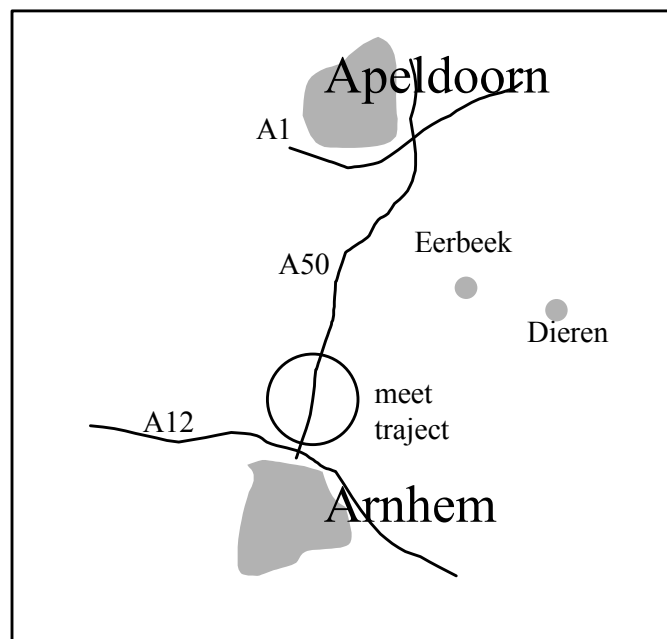
De meetgegevens zijn afkomstig van één locatie: rijksweg A50 tussen Arnhem en Apeldoorn (zie figuur 5.5). Op dit traject loopt de snelweg over een gedeelte van de Veluwe, waarbij de weg enig hoogteverschil overbrugt. In de richting Arnhem-Apeldoorn gaat het om een hoogteverschil van 40 meter over een afstand van 2 km. Dit betekent een maximaal hellingspercentage van 2,2%. De twee kilometer stroomopwaarts van deze helling zijn eveneens licht stijgend (zie figuur 5.6).

Er zijn drie argumenten te noemen waarom voor deze locatie is gekozen:

1. Het traject is voorzien van detectielussen;
2. Op het traject komt regelmatig congestie voor, waarschijnlijk als gevolg van de helling;
3. Op het traject bevinden zich geen in- en uitvoegstroken.¹²

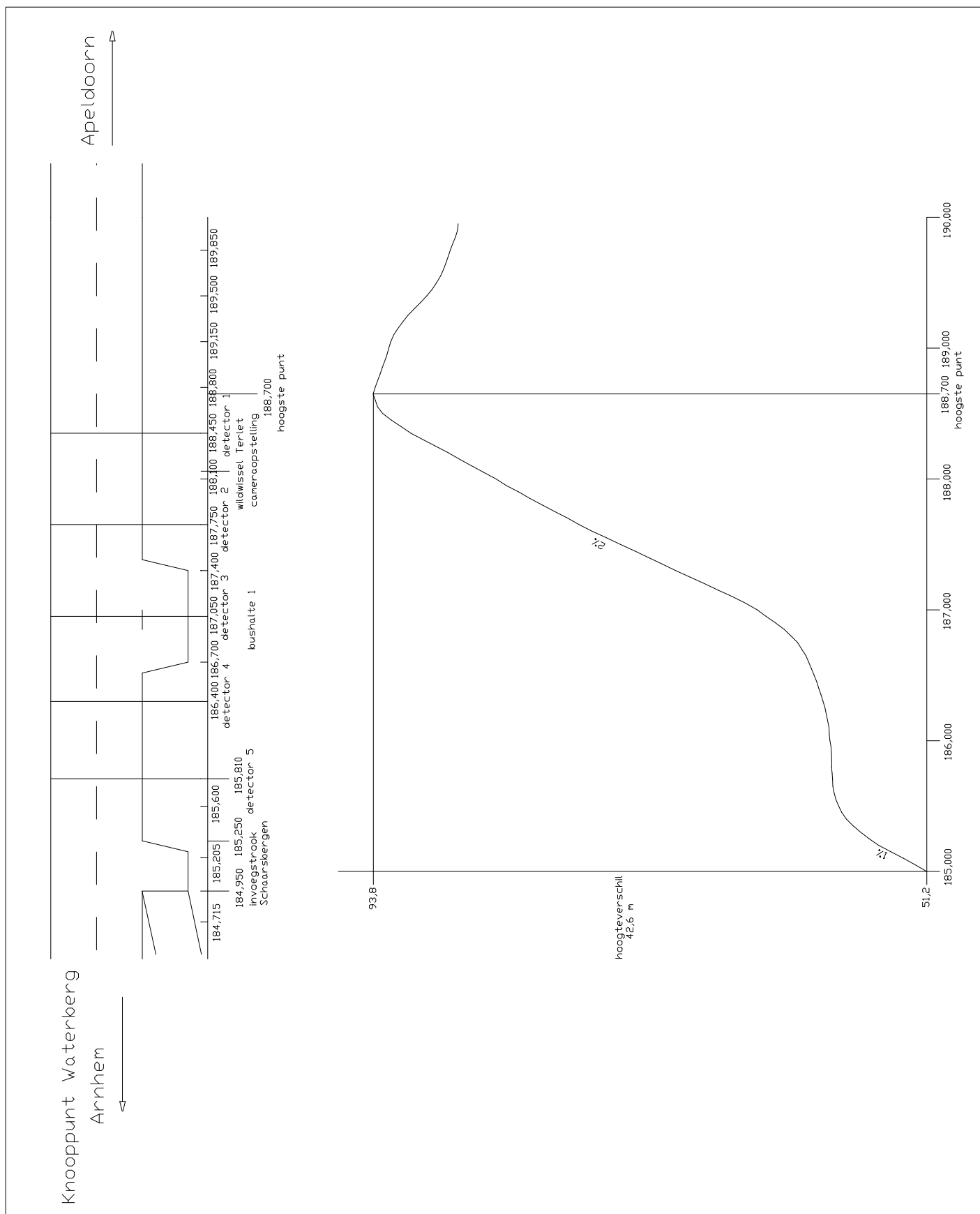
De meetgegevens bestaan uit:

- Videodata (TU Delft, Laboratorium voor Verkeerskunde);
- Snelheidsverlopen (TU Delft, Laboratorium voor Verkeerskunde);
- MARE-data (Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland).



Figuur 5.5. Overzichtskartaal meettraject

¹² De laatste invoegstrook bevindt zich aan het begin van het traject waar de weg begint te stijgen (zie figuur 5.6). Halverwege de helling ligt een bushalte. Gezien de lage intensiteit van de bussen (2 of 4 maal per uur) en het redelijk hoge specifiek vermogen van de bussen ten opzichte van vrachtauto's wordt aangenomen, dat de bushalte een verwaarloosbare invloed heeft op de verkeersafwikkeling op het traject.



Figuur 5.6. Meetlocatie rijksweg A50 tussen Arnhem en Apeldoorn (bron: Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland en Bouwdienst Rijkswaterstaat)

De videodata en de snelheidsverlopen zijn verzameld om de invoergegevens van de simulaties met FOSIM-Hellingen te kunnen bepalen. Bovendien dienen zij als ondersteuning voor de MARE-data. De videodata worden ook nog gebruikt om de rijstrookverdelingen te kunnen valideren.

De videodata zijn gebruikt voor het bepalen van de intensiteiten van personenauto's en vrachtauto's op zowel de rechter- als de linkerrijstrook. Hiermee is een indicatie verkregen van het vrachtwagenpercentage binnen en buiten de spitsuren, wat als invoer voor FOSIM-Hellingen is gebruikt.

Verder is van een aantal zware vrachtwagens het snelheidsverloop op het traject bepaald. Deze meetgegevens dienen als validatie van SimVra+ en het maximale-acceleratiemodel (op voertuigniveau).

De MARE-data vormen de basisgegevens voor de validatie van FOSIM-Hellingen op verkeersstroomniveau. Deze MARE-data zijn afkomstig van detectielussen in het wegdek, die de intensiteit en de gemiddelde snelheid over het gehele traject registreren. De detectielussen registreren *rijbaangegevens* en geen *rijstrookgegevens*. Van deze gegevens is een selectie gemaakt van dagen waarop er congestievorming op het traject aanwezig was.

In de volgende paragrafen zullen deze afzonderlijk meetgegevens en de resultaten behandeld worden.

5.3.2. Videodata

5.3.2.1. Beschrijving en resultaten

Op dinsdag 30 oktober 2001 is met een videocamera van het Laboratorium voor Verkeerskunde (LvV) tussen 7:00 uur en 17:45 uur het verkeer op de A50 in de richting Apeldoorn vastgelegd. De videocamera stond onzichtbaar voor het verkeer op het wildviaduct Terlet ter hoogte van hectometerpunt 188,1 (zie figuur 5.6). De weersomstandigheden op die dag waren zonnig en helder.

Aan de hand van deze videogegevens zijn de passages van personenauto's en vrachtauto's op zowel de rechter- als de linkerrijstrook geregistreerd. Hierbij dient opgemerkt te worden, dat het werkelijk aantal personenauto's op de linkerrijstrook wellicht iets hoger is dan het geregistreerde aantal, omdat mogelijk sommige personenauto's die zich naast een vrachtwagen bevonden, niet zijn waargenomen. Deze meetfout wordt echter verwaarloosbaar klein geacht.

Met de voertuigaantallen zijn per 5-minuten-interval intensiteiten bepaald. In figuur 5.7 zijn deze intensiteiten van personenauto's en vrachtauto's op de rechter- en linkerrijstrook over de gehele tijdperiode in een grafiek weergegeven.

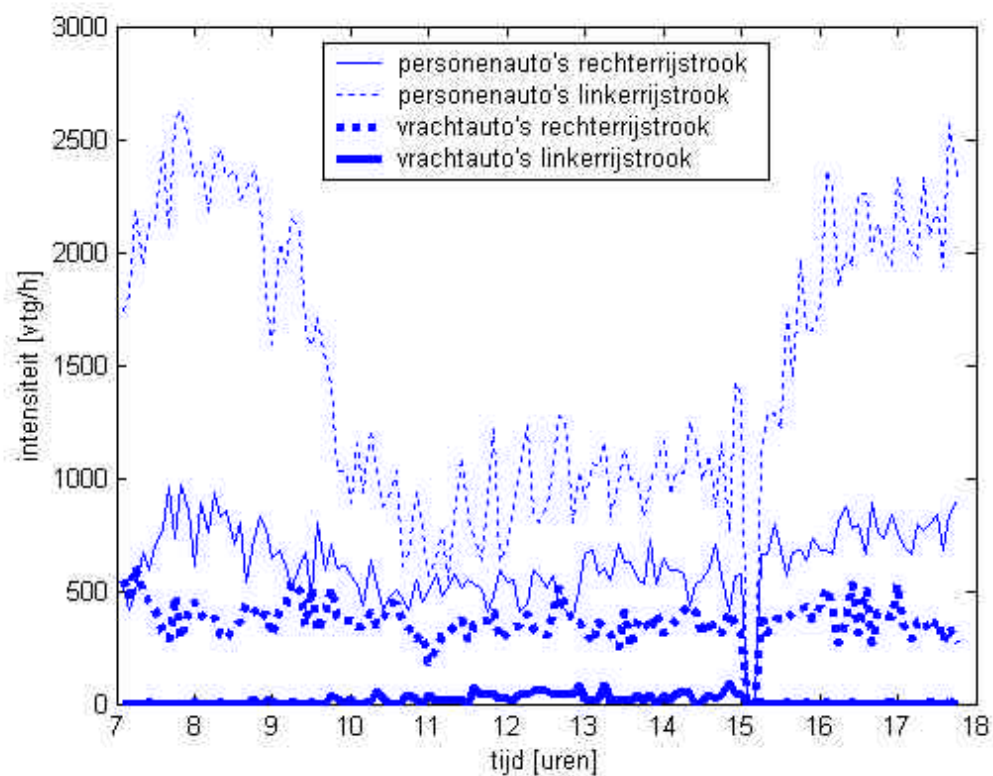
Rond 11:00 uur en 15:00 uur heeft er een vervanging van videoband plaatsgevonden. Om 11:00 uur heeft dit maar een korte tijd geduurd, zodat dit bijna niet te zien is in figuur 5.7.

Rond 15:00 uur heeft de registratie een wat langere tijd stilgestaan, zodat in de grafiek van figuur 5.7 een dal te zien is tussen 15:00 uur en 15:10 uur. Het grillige verloop van de grafieken kan worden verklaard door het feit dat het verkeer vaak in clusters (moving bottlenecks) voorbijrijdt. De regelmaat die hierin te zien is, kan niet worden verklaard.

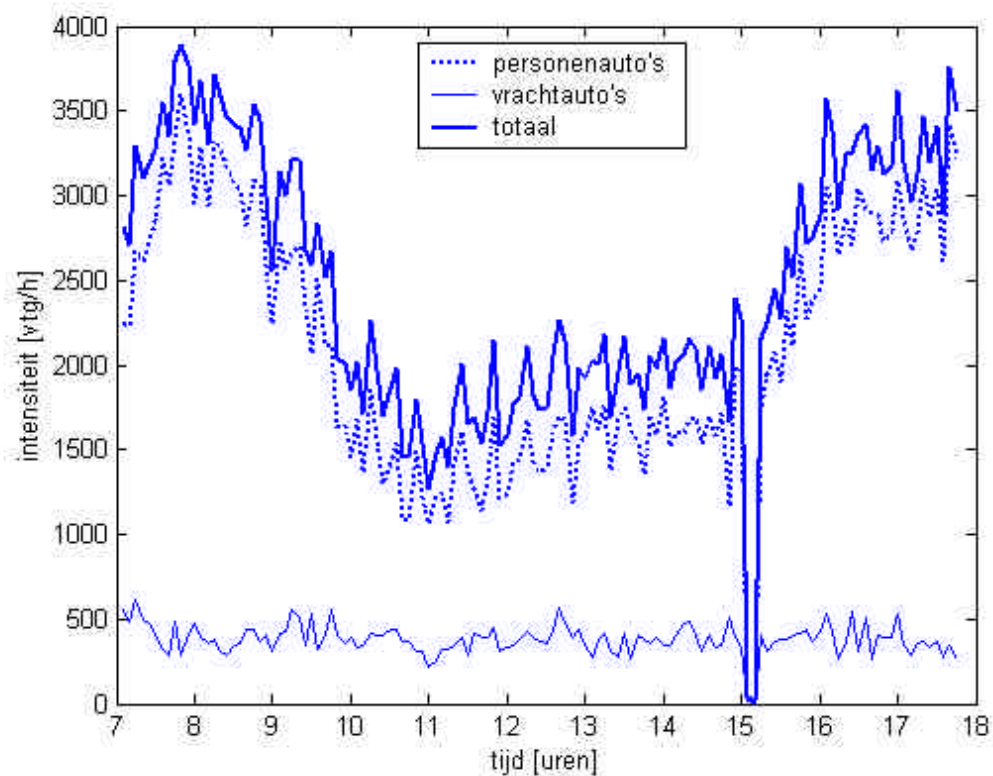
Verder is duidelijk te zien dat het inhaalverbod voor vrachtwagens, dat geldt tussen 6:00 uur en 10:00 uur en 15:00 uur en 19:00 uur vrij redelijk wordt nageleefd.

In figuur 5.8 zijn de intensiteiten van personenauto's, vrachtauto's en de totale intensiteit weergegeven. De personenauto-intensiteit vertoont grote pieken, terwijl de vrachtauto-intensiteit vrij constant is gedurende de gehele dag.

Uit figuur 5.7 en 5.8 is afgeleid dat op de dag van meting de spitsperioden lagen tussen 7:00 uur en 9:30 uur 's-ochtends en tussen 16:00 uur en 17:45 uur 's-avonds. In deze perioden is het vrachtautopercentage gemiddeld 12%. In de daluren (de periode tussen 9:30 uur en 16:00 uur, waarbij de tijdperioden tussen 11:00-11:05 uur en 15:00-15:10 uur niet zijn meegenomen) is het vrachtwagenpercentage gemiddeld 20%.



Figuur 5.7. Uurintensiteiten afgeleid uit 5-minuten-aantallen van personenauto's en vrachtauto's op rechter- en linkerrijstrook



Figuur 5.8. Personenauto-, vrachtauto- en totale intensiteit

5.3.2.2. Conclusies

Op de videobeelden is duidelijk te zien dat sommige vrachtwagens met redelijk lage snelheid passeren. Omdat er een op het wegvak een inhaalverbod voor vrachtverkeer geldt, vormen zich achter deze langzame vrachtwagens clusters van meerdere vrachtwagens. In de probleemanalyse (zie paragraaf 2.3.1.1.) wordt gesteld dat trage vrachtwagens moving bottlenecks gaan vormen als de snelheid van de vrachtwagens onder de capaciteitssnelheid komt te liggen. De indruk bij videobeelden is, dat er hier mag worden gesproken van moving bottlenecks.

Uit de videodata is afgeleid dat de absolute vrachtwagenintensiteit gedurende de gehele dag rond de 400 vrachtwagens per uur ligt. In de spitsuren is dit een vrachtwagenpercentage van 12%.

Helaas was er op de meetdag geen congestievorming, zodat uit de videodata geen capaciteitswaarde kan worden afgeleid. De indruk bestaat dat de capaciteit tegen de 4000 vtg/h moet liggen (zie figuur 5.8). Dit is in overeenstemming met de gegevens van de MARE-data (zie paragraaf 5.3.4.2). Verder betekent dit dat in capaciteitstoestand het vrachtwagenpercentage rond de 10% ligt. Dit gegeven wordt gebruikt bij de simulaties met FOSIM-Hellingen.

De videodata zullen in paragraaf 5.3.4.4. worden gebruikt bij de validatie van de rijstrookverdelingen.

5.3.3. Snelheidsverlopen

5.3.3.1. Beschrijving en resultaten

Op de dag van de video-opname (dinsdag 30 oktober 2001) zijn er ook snelheidsverloopmetingen gedaan van een aantal (op het oog) zware vrachtwagens op het traject. Dit is gedaan door middel van het achtervolgen van de vrachtwagens met een meetvoertuig van het LvV.¹³ Tijdens het achtervolgen werd ter plaatse van elk hectometerpunt langs de snelweg het tijdstip van passeren geregistreerd. Met deze tijdstippen is de snelheid op ieder hectometerpunt achterhaald. Dit snelheidsverloop bleek een vrij grillig karakter te hebben. Dit wordt veroorzaakt door:

- een foutmarge in het tijdstip van registreren;
- een foutmarge in de afstand tussen de hectometerpaaltjes¹⁴;
- het ontbreken van enkele hectometerpaaltjes¹⁵.

Het grillige snelheidsverloop is afgevlakt door een voortschrijdend gemiddelde te berekenen over een afstand van 500 meter. In figuur 5.9 zijn deze voortschrijdende gemiddelde snelheden van de gemeten voertuigen uitgezet met daaronder het hoogteprofiel van het traject (bron: Bouwdienst Rijkswaterstaat).¹⁶

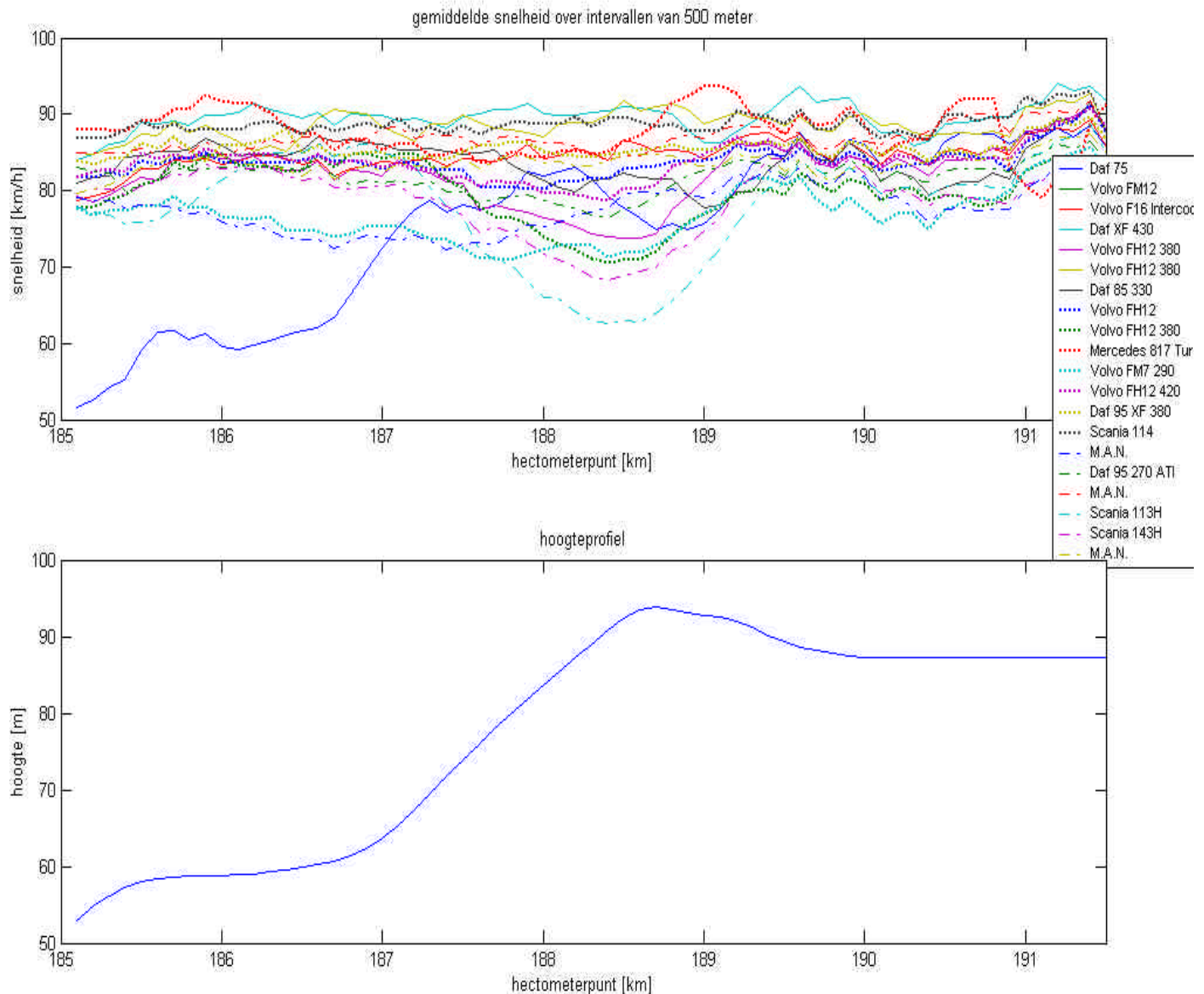
¹³ Er wordt verwacht dat het meetvoertuig van het LvV de meting niet heeft beïnvloed.

¹⁴ Bij sommige hectometerpunten werd telkens dezelfde afwijking geregistreerd. Dit duidt op een variatie in de afstanden tussen de hectometerpaaltjes.

¹⁵ Bij het ontbreken van het hectometerpaaltje aan de kant van de weg is het hectometerpaaltje aan de andere zijde van de weg als meetpunt genomen.

¹⁶ De beschikbare gegevens van het hoogteprofiel betreffen het gedeelte tussen de hectometerpunten 185,0 en 190,0. Op de dag van de metingen is waargenomen dat na hectometerpunt 190,0 de weg nog een lichte stijging vertoont. In figuur 5.6 en figuur 5.9 is dit niet weergegeven.

Er zijn twee voertuigen gemeten waarvan de meetgegevens niet als representatief mogen worden beschouwd. De snelheid van de Daf 75 werd gemeten tijdens de ochtendspits, op het moment dat er lichte congestie aanwezig was. De snelheid aan het begin van het traject was daarom een stuk lager. Verder is de meting van de Mercedes 817 Turbo na hectometerpunt 190,0 onbetrouwbaar, omdat deze vrachtwagen na dit hectometerpunt een inhaalmanoeuvre uitvoerde. Hierdoor waren de hectometerpunten niet goed waar te nemen. Deze twee voertuigen worden bij de verdere analyse niet meegenomen.

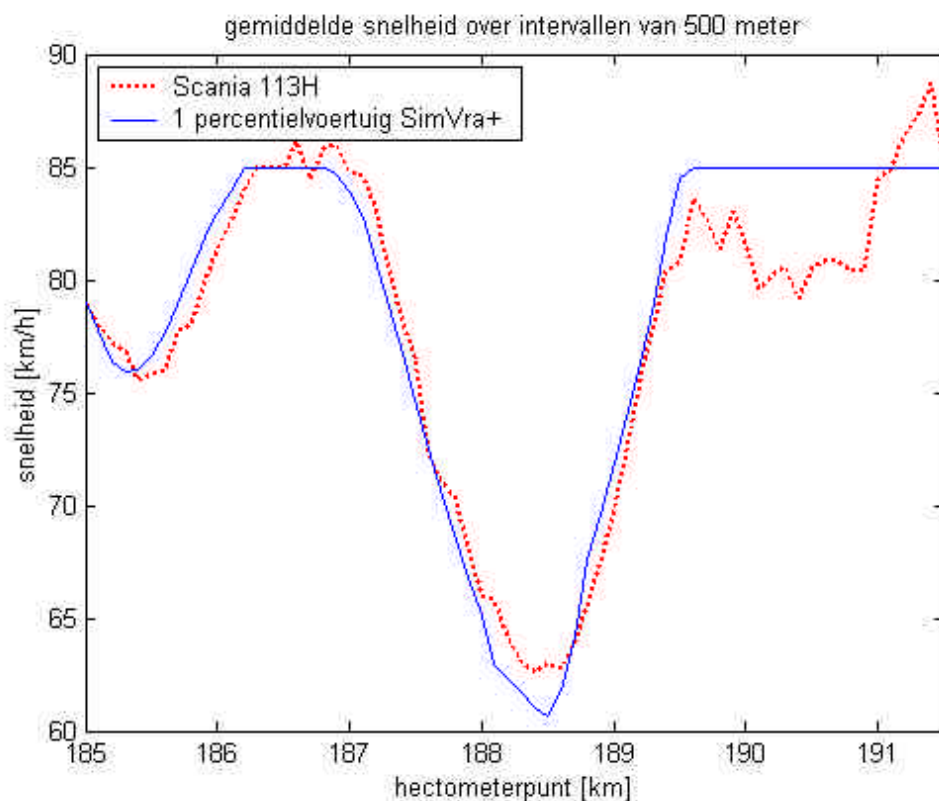


Figuur 5.9. Snelheidsverlopen van de voertuigen met de bijbehorende merknamen en type

Uit figuur 5.9 is af te leiden, dat de meeste gemeten vrachtauto's nauwelijks snelheidsverval ondervinden. Omdat bij de meting is getracht de zware vrachtauto's te selecteren, kan worden afgeleid dat het grootste gedeelte van het totale vrachtautopark op vlakke trajecten over een overschot aan motorvermogen beschikken. Dit overschot kan worden gebruikt om hellingen van 2% met dezelfde wenssnelheid (80 à 90 km/h) te nemen.

In figuur 5.10 is het snelheidsverloop van het meest langzame voertuig uit de meting (Scania 113H) uitgezet tegen het 1-percentiel-voertuig in SimVra+ (het voertuig vergeleken waarmee 1% van alle vrachtauto's in Nederland trager is). Er is een grote overeenkomst tussen beide

snelheidsverlopen te zien.¹⁷ De snelheidsverlaging van de Scania 113H na hectometerpunt 190,0 wordt veroorzaakt door een kleine stijging in het traject (zie voetnoot 16). In de SimVra+-simulatie is deze stijging niet meegenomen. De iets lagere minimumsnelheid van het 1-percentiel-voertuig kan worden verklaard met het feit dat het snelheidsverloop van de metingen een voortschrijdend gemiddelde over intervallen van 500 meter is en het snelheidsverloop van het 1-percentiel-voertuig niet.

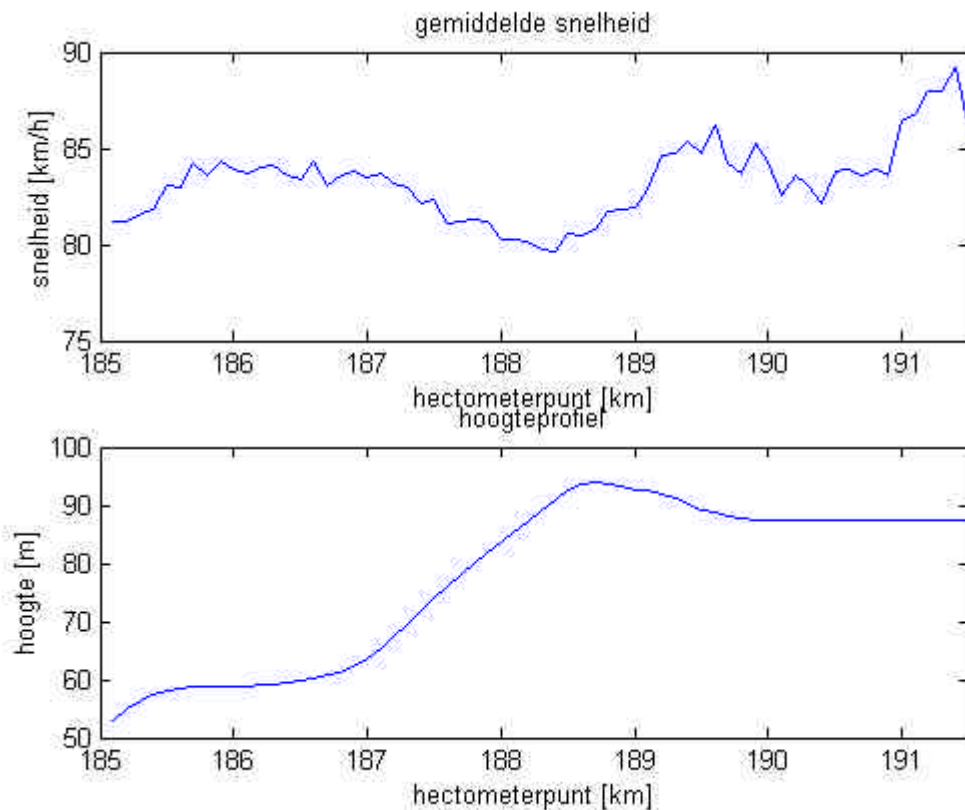


Figuur 5.10. Vergelijking van het traagste voertuig uit de meting met het 1-percentiel-voertuig uit SimVra+

Het 33-percentiel-voertuig uit SimVra+ ondervindt nog een lichte vertraging op de helling. Het 50-percentiel-voertuig kan zijn beginsnelheid van 85 km/h op het gehele traject vasthouden. Op basis hiervan en op basis van figuur 5.10 kan worden afgeleid dat de specifieke vermogens van de gemeten vrachtauto's tussen de 1 percentiel- en minimaal 50 percentielwaarde moeten hebben gelegen.

In figuur 5.11 is de gemiddelde snelheid van alle voertuigen uit de meting (met uitzondering van de Daf 75 en de Mercedes 817 Turbo) weergegeven. Hierin is een lichte daling van de snelheid te zien op het stijgende gedeelte van het traject.

¹⁷ Het 1-percentiel-voertuig in SimVra+ heeft een specifiek vermogen van 4,4 kW/ton. Er is achterhaald, dat een Scania 113H een motorvermogen heeft tussen de 235 en 262 kW. Uitgaande van de veronderstelling dat het voertuig met volvermogen reed, moet de massa van het voertuig dus tussen de 53 en 60 ton gelegen hebben. Het voertuig was dus te zwaar beladen (het wettelijk maximum is 50 ton).



Figuur 5.11. Gemiddelde snelheid van de gemeten voertuigen, m.u.v. de Daf 75 en de Mercedes 817 Turbo

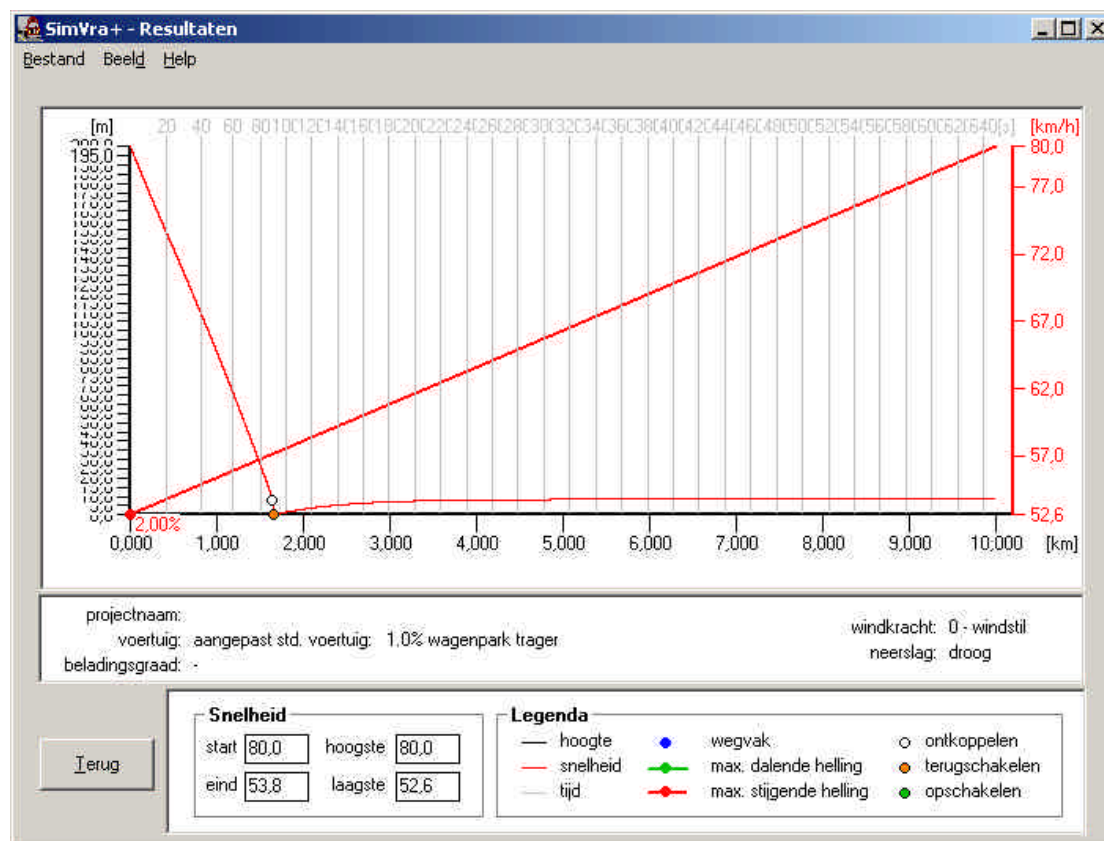
5.3.3.2. Conclusies

Uit de snelheidsdata kan worden geconcludeerd dat de uitkomsten van SimVra+ en het maximale-acceleratiemodel goed overeenkomen met meetgegevens uit de praktijk. Wat betreft de meetlocatie is op te merken dat de minimumsnelheden van de meest langzame voertuigen rond 60 km/h liggen. Hierbij moet wel worden vermeld dat dit snelheden zijn die bereikt worden bij een beginsnelheid van 85 km/h. Met lagere beginsnelheden worden nog lagere snelheden gehaald, want uit figuur 5.10 blijkt (gezien het spitse snelheidsverloop), dat de kruipsnelheid nog niet wordt bereikt. SimVra+ berekent een kruipsnelheid van het 1-percentielvoertuig op een helling van 2% rond de 53 km/h (zie figuur 5.12).

Verder is uit figuur 5.11 te concluderen, dat gemiddeld gesproken de minimale snelheid van de vrachtwagens net onder de top ligt; De top van de helling ligt op hectometerpunt 188,7 en rond hectometerpunt 188,4 ligt het punt waar de gemiddelde snelheid het laagst is (zie figuur 5.11). De verklaring voor dit verschil is dat het steilste gedeelte van de helling halverwege de helling ligt. Na dit gedeelte kunnen de meeste gemeten vrachtwagens weer licht accelereren. Enkel de zwaarste vrachtwagen (zie figuur 5.9) kan pas net onder de top van de helling een acceleratie inzetten.

Uit de probleemanalyse (paragraaf 2.3.2.5) is gebleken dat het punt waar de vrachtwagens de laagste snelheid bereiken als het beginpunt (en in dit geval tevens het eindpunt) van de bottleneck op een helling gezien kan worden [Brannolte, 1978]. Dit punt is variabel en ligt bij de meetlocatie op de A50 rond hectometerpunt 188,4.

Al deze gegevens moeten terug te vinden zijn in de simulatieresultaten van FOSIM-Hellingen.



Figuur 5.12. Snelheidsverloop van het 1-percentiel-voertuig op een helling van 2% volgens SimVra+

5.3.4. MARE-data

5.3.4.1. Inleiding

De beschikbare MARE-data zijn gegevens van april 2001. Uit deze gegevens is een aantal ochtend- en avondspitsen geselecteerd, waarbij er congestie optrad. Hiervan is gecontroleerd of er tijdens de congestieperiodes geen rijstrook afgesloten was.

De MARE-data vormen de meetgegevens waarmee FOSIM-Hellingen voor hellingen wordt gevalideerd. Deze validatie gebeurt aan de hand van $u(q)$ -diagrammen. De MARE-data zijn afkomstig van detectielussen van MTM2-onderstations. Deze onderstations registreren rekenkundige gemiddelde intensiteiten en snelheden over de gehele rijbaan over tijdsintervallen van 1 minuut.¹⁸ De geregistreerde snelheden zijn dus gemiddelde *lokale* snelheden u_L . In het basisdiagram (dus bij $u(q)$ -diagrammen) moeten echter gemiddelde *momentane* snelheden u_M worden gebruikt (zie bijlage 1). De gemiddelde momentane snelheid is altijd lager dan de gemiddelde lokale snelheid, behalve wanneer de standaardafwijking van de snelheden gelijk is aan nul [Leutzbach, 1988] (zie bijlage 1). Wanneer de MARE-data in een basisdiagram worden uitgezet, moet dus in acht worden genomen dat de gemiddelde snelheden lager behoren te zijn. Voor de dichtheden betekent dit dat ze in werkelijkheid hoger zijn dan wanneer ze worden berekend met de gemiddelde snelheden uit de MARE-data.

De detectoren in FOSIM registreren de harmonische gemiddelde snelheid (zie bijlage 1). Omdat de harmonische gemiddelde snelheid u_H een goede benadering is van de gemiddelde momentane snelheid u_M , kan ook u_H in het basisdiagram worden gebruikt.

In de FOSIM-simulaties worden 5-minutengegevens gebruikt. Daarom worden de intensiteiten en snelheden van de MARE-data ook omgerekend naar 5-minutengegevens.

¹⁸ Een MTM2-onderstation registreert ook gemiddelde snelheden onder de 18 km/h. Bij oudere typen onderstations is dit niet altijd het geval. Bovendien registreren sommige oude typen onderstations exponentieel afgevlakte waarden in plaats van rekenkundige gemiddelden.

Omdat het rekenkundige gemiddelde intensiteiten en snelheden zijn, kan deze omrekening direct plaatsvinden.

5.3.4.2. Meetresultaten en interpretatie

In de figuren 5.13a t/m e zijn van de geselecteerde spitsperioden de MARE-data van de A50 uitgezet in u(q)-diagrammen. Elk figuur geeft het basisdiagram van een detector op de A50 weer (zie figuur 5.6). Elk punt in de diagrammen correspondeert met een gemiddelde snelheid en een gemiddelde intensiteit in een 5-minuteninterval. In de figuren 5.13a t/m e zijn geen noemenswaardig grote verschillen te constateren in de verschillende spitsperioden. Daarom worden alle gegevens van de verschillende dagen als één dataset gebruikt bij de interpretatie en de validatie.

Uit de figuren 5.13 a t/m e kan een gemiddelde capaciteit van circa 3800 à 3900 vtg/h worden afgeleid. Vergeleken met metingen van bijvoorbeeld de A9, waar op een tweestrooks rijbaan een capaciteit van circa 4500 vtg/h is gemeten [Dijker e.a., 1998], is dit erg laag. De vraag is of het verschil in vrachtwagenpercentages (10% bij de A50, 5% bij A9) en de invloed van de helling zo'n groot verschil kunnen verklaren. Overigens komt een gemiddelde capaciteit van circa 3800 à 3900 vtg/h wel goed overeen met de videowaarnemingen (zie paragraaf 5.3.2). Op de desbetreffende meetdag is waargenomen dat er net geen congestie ontstond. In figuur 5.8 is te zien dat intensiteit in zowel de ochtendspits als de avondspits in korte perioden deze capaciteitswaarden bereikte.

Op de videobeelden uit paragraaf 5.3.2 is waargenomen dat er tijdens (bijna) congestie een duidelijk verschil is tussen de snelheden van de personenauto's en de vrachtwagens. De gemiddelde lokale snelheden zijn dus niet gelijk aan de gemiddelde momentane snelheden. Zodoende kan uit de figuren 5.13 a t/m e helaas geen capaciteitssnelheid worden bepaald.

Hier volgt een analyse van de figuren 5.13 a t/m e afzonderlijk, in stroomafwaartse richting.

Hectometerpunt 185,8 (figuur 5.13a)

Op hectometerpunt 185,8 loopt de weg nog vlak. Er is al wel een korte helling van 1% stroomopwaarts van dit punt (zie figuur 5.6). In figuur 5.13a is een duidelijke congestietak te zien. De snelheden tijdens de niet-congestieve afwikkeling zijn redelijk hoog.

Hectometerpunt 186,4 (figuur 5.13b)

Hectometerpunt 186,4 ligt op de voetboog, dus nog net voor de helling. In figuur 5.13b is in de congestietak al een grotere spreiding van snelheden te zien. Dit kan worden verklaard met vrachtwagens die door de voetboog van de helling worden afgeremd.

Hectometerpunt 187,1 (figuur 5.13c)

Hectometerpunt 187,1 ligt op het beginpunt van de werkelijke helling van 2%. In figuur 5.13c beginnen ook de snelheden in de niet-congestieve tak een kleine verlaging aan te tonen. Dit duidt op nog lagere snelheden van de vrachtwagens. Maar ook een kleine snelheidsdaling van de personenauto's zou een verklaring kunnen zijn (gezien het verwachte bestuurdersgedrag in paragraaf 2.3.2.2).

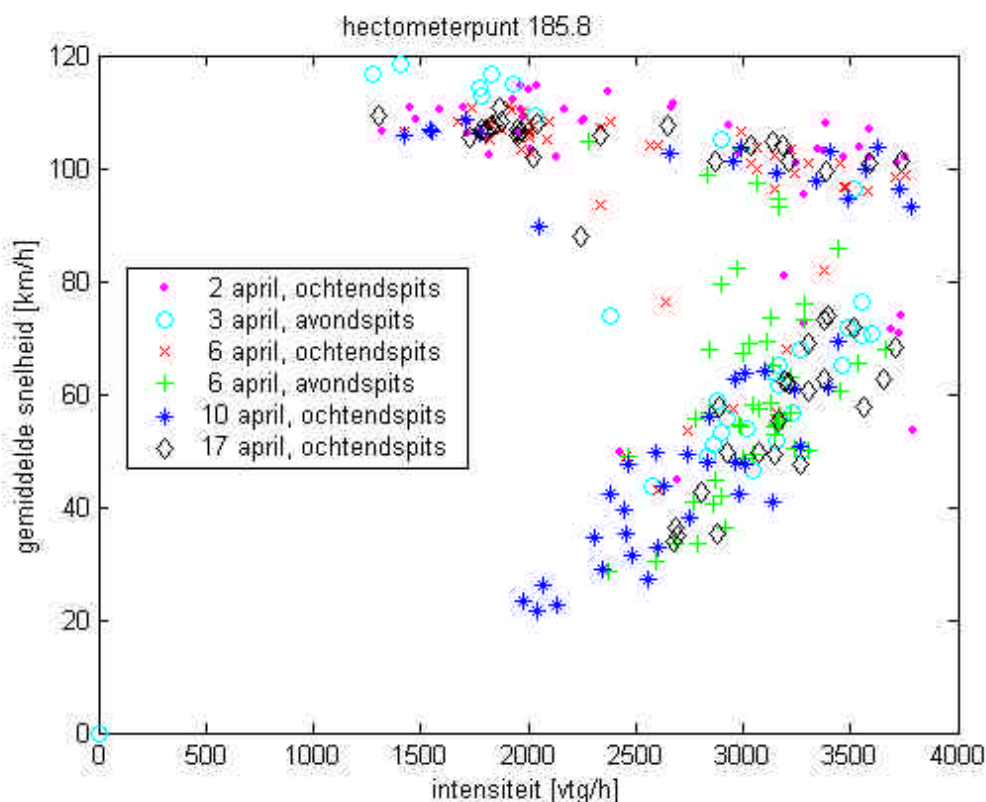
Hectometerpunt 187,8 (figuur 5.13d)

Hectometerpunt 187,8 ligt op het steilste gedeelte, halverwege de helling. In figuur 5.13d is de congestietak bijna verdwenen. Het weggedeelte dat de bottleneck vormt, begint dus ongeveer op dit punt. Op dit punt wordt het steilste gedeelte van de helling bereikt, dus hierna kan een gedeelte van de vrachtwagens weer een acceleratie inzetten. Dit verklaart waarom het beginpunt van de bottleneck op dit hectometerpunt ligt.

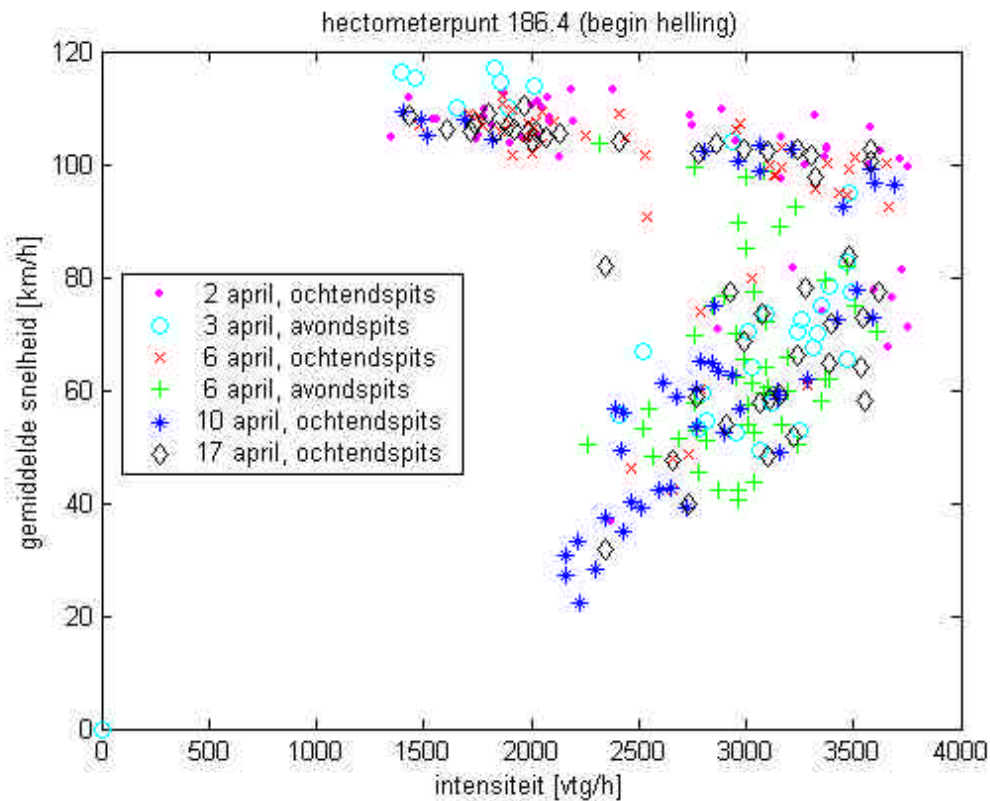
Hectometerpunt 188,5 (figuur 5.13e)

Hectometerpunt 188,5 ligt halverwege de topboog. Het grootste gedeelte van de vrachtwagens kan dan weer accelereren. In figuur 5.13e is te zien dat de congestietak is verdwenen. Dit punt ligt dus in, of net voorbij het weggedeelte dat de bottleneck vormt.

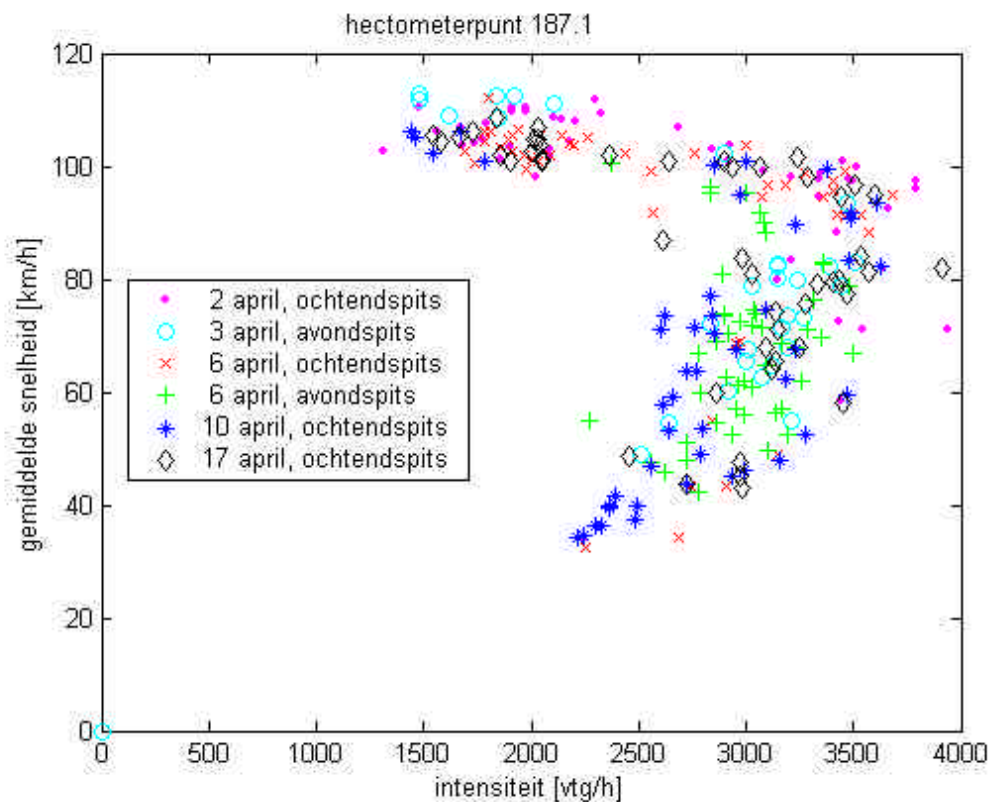
Uit deze analyse blijkt dat de bottleneck gemiddeld rond het hectometerpunt 188,0 ligt. Dit is net voorbij het steilste gedeelte van de helling. In de probleemanalyse (paragraaf 2.3.2.5) wordt gesteld dat de bottleneck van een helling ligt op het gedeelte waar de snelheden van vrachtwagens het laagst is. Uit paragraaf 5.3.3.2 blijkt dat de gemiddelde snelheid van de vrachtwagens rond hectometerpunt 188,4 het laagst is. Echter, bij deze meting zijn de (op het oog) traagste vrachtwagens gemeten. Het is heel goed mogelijk dat gemiddeld genomen de snelheid van alle vrachtwagen rond hectometerpunt 188,0 het laagst is.



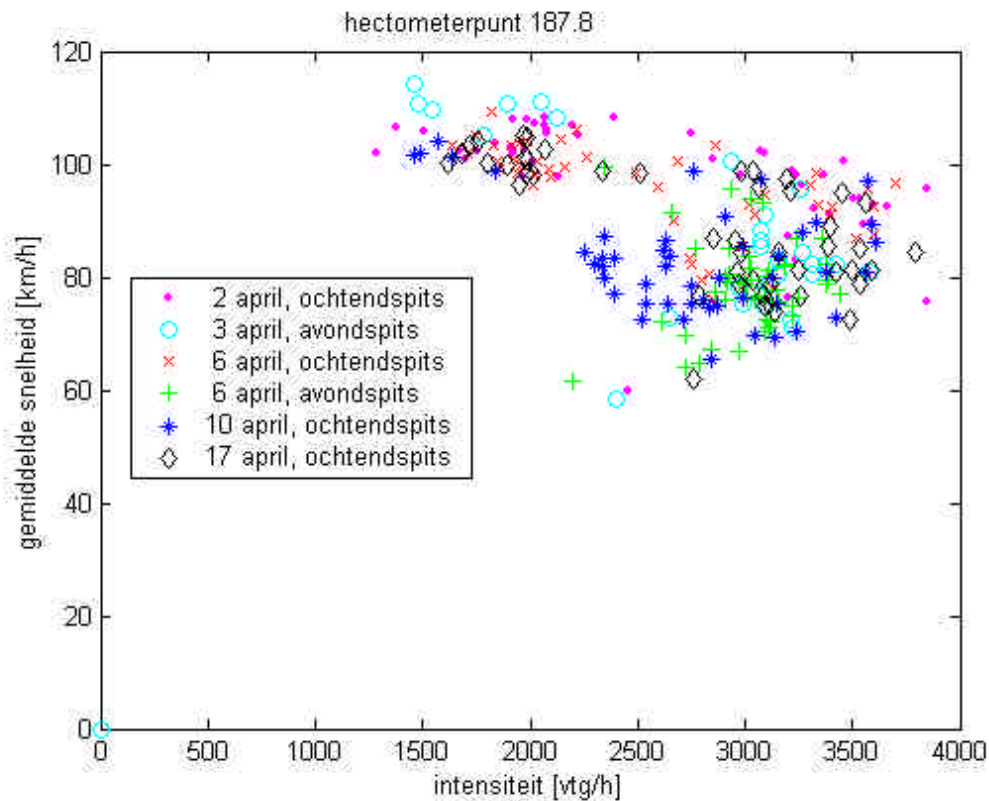
Figuur 5.13a. u(q)-diagram op hectometerpunt 185.8



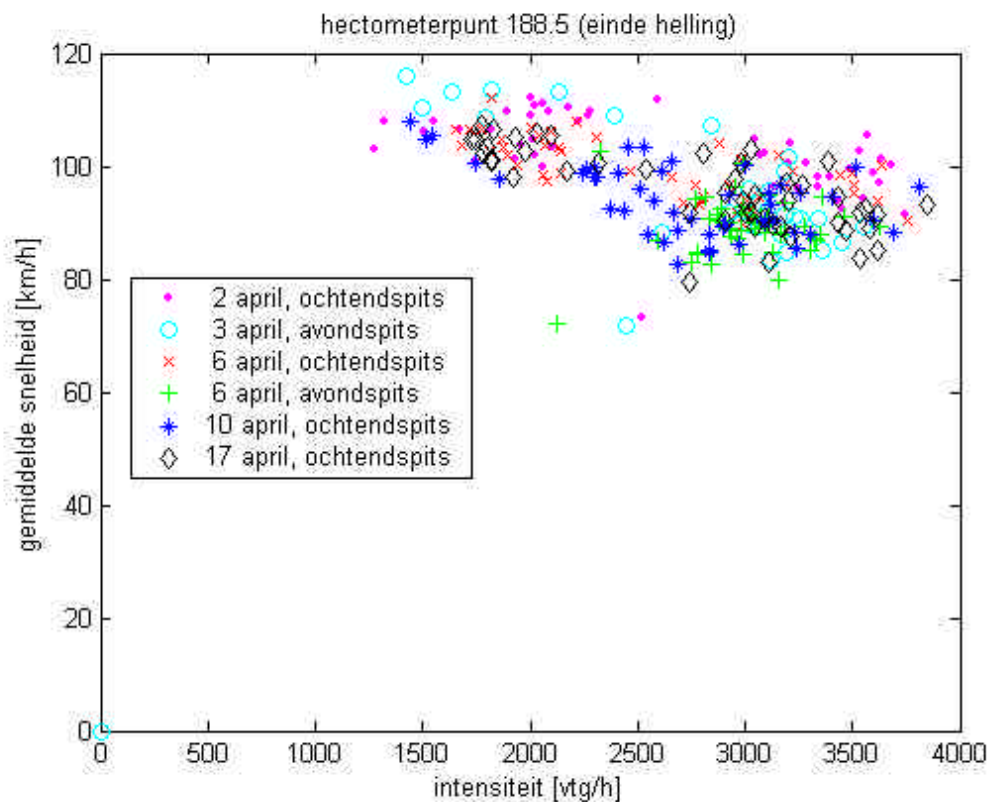
Figuur 5.13b. u(q)-diagram op hectometerpunt 186.4, het begin van de helling



Figuur 5.13c. u(q)-diagram op hectometerpunt 187.1

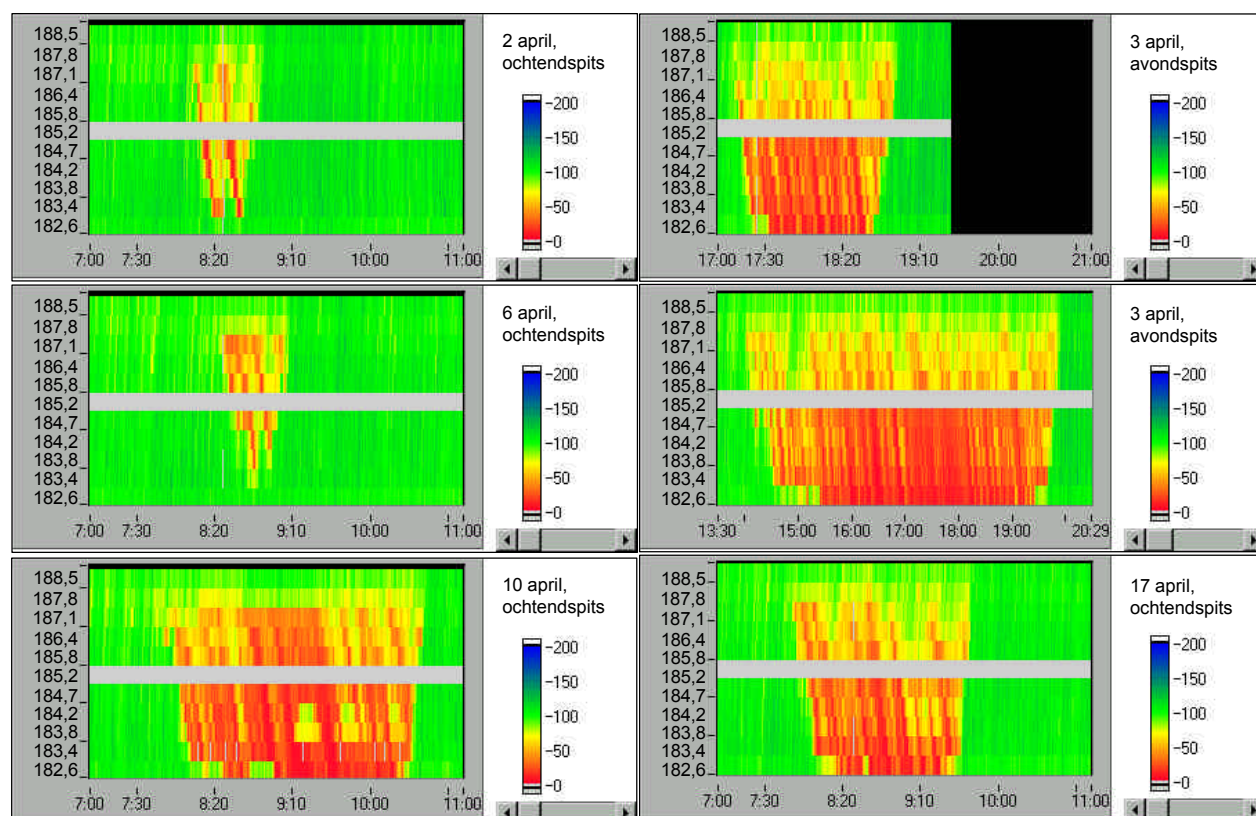


Figuur 5.13d. u(q)-diagram op hectometerpunt 187.8



Figuur 5.13e. u(q)-diagram op hectometerpunt 188.5, het einde van de helling

In figuur 5.14 zijn de snelheidscontouren weergegeven van de geselecteerde spitsperiodes. Ook hierin is duidelijk de congestievorming op het traject en de bottleneck rondom hectometerpunt 188,0 te zien.



Figuur 5.14 Snelheidscontouren van de geselecteerde spitsperiodes

5.3.4.3. De simulatie met FOSIM-Hellingen

Bij de simulatie van de A50 met FOSIM-Hellingen zijn de invoergegevens gebruikt zoals deze zijn weergegeven in figuur 5.15 en 5.16 en tabel 5.4. en 5.5.

De hellingspercentages zijn in tienden van procenten ingevoerd. In figuur 5.15 is dit hellingspromillage weergegeven. De detectoren in figuur 5.15 zijn de detectoren zoals die er in werkelijkheid liggen (de hectometerpunten van figuur 5.14).

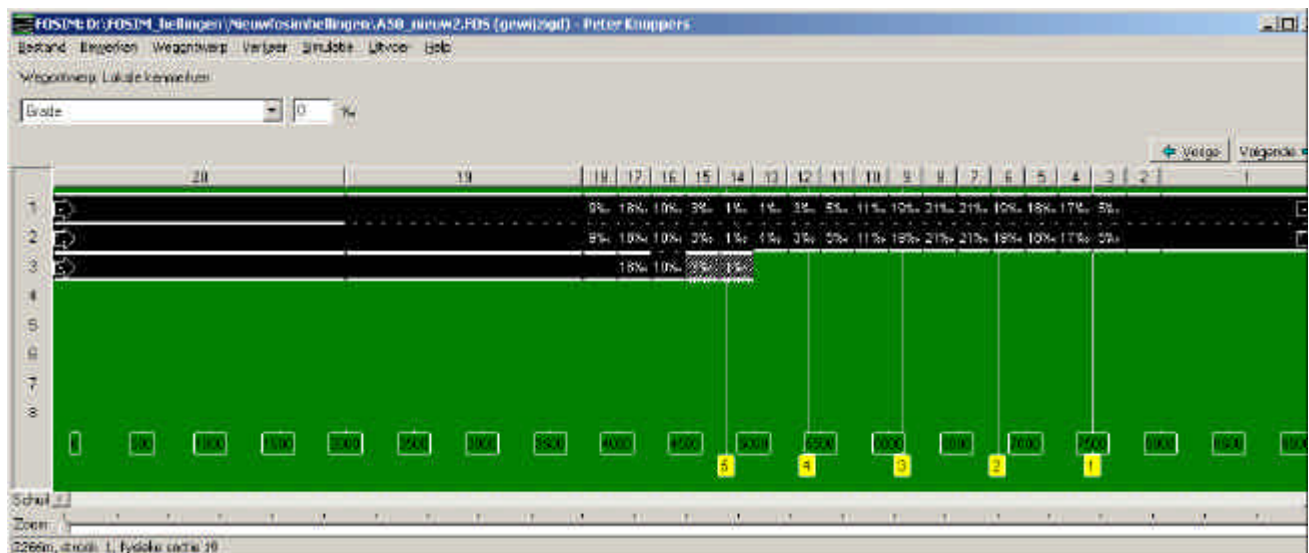
Er wordt gesimuleerd met een inhaalverbod voor vrachtwagens. Dit betekent dat de voertuigbestuurdercombinaties 4 en 5 in de simulatie niet inhalen.

De vraagintensiteiten zijn ruimschoots boven de geschatte capaciteit gekozen. Over intensiteiten vanaf de oprit zijn geen gegevens beschikbaar. De indruk bij de metingen was, dat deze intensiteiten laag zijn. Ook uit de MARE-data blijkt, dat de helling de bottleneck vormt en niet de oprit.

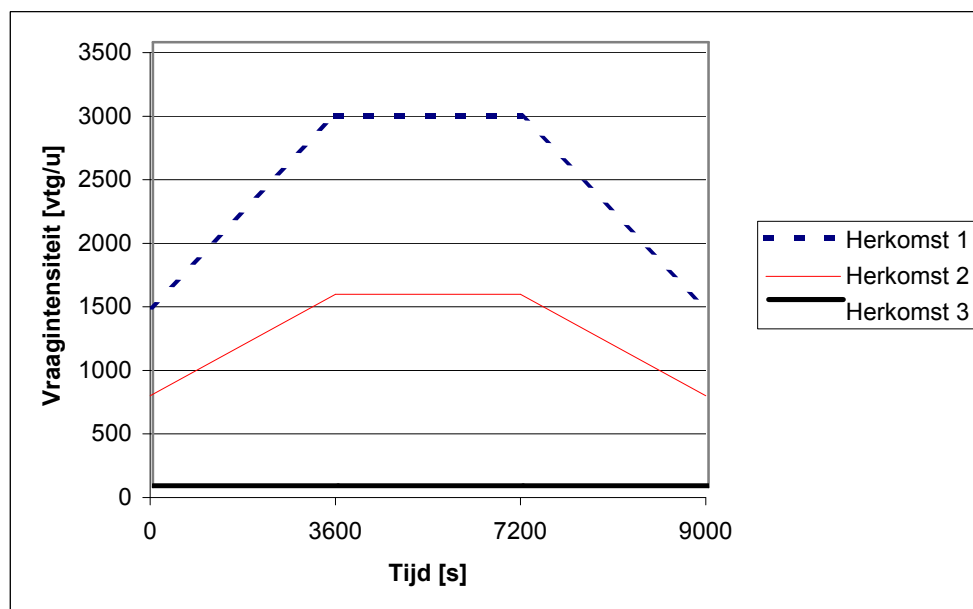
Bij de verkeerssamenstelling wordt uitgegaan van een vrachtwagenpercentage van 10% (zie paragraaf 5.3.2.2). Bij de maximale intensiteit van 4600 vtg/h wordt dit een vrachtwagenpercentage van $460/1600 = 29\%$ op de rechter rijstrook. De personenauto-intensiteit tijdens de maximale intensiteit is $4600 - 460 = 4140$ vtg/h. Per voertuigbestuurdercombinatie is dat $4140/3 = 1380$ vtg/h. Hiervan wordt voertuigbestuurdercombinatie 3 zoveel mogelijk over de rechter rijstrook verdeeld. Op die manier zijn de percentages in tabel 5.4 tot stand gekomen. Omdat de verhouding tussen de gegenereerde intensiteiten op de beide rijstroken gelijk blijft, blijven deze voertuigverhoudingen ook gelijk.

De gegevens in tabel 5.5 volgen uit de validatie ten aanzien van vlakke wegen (zie paragraaf 5.2).

In de volgende paragraaf zal FOSIM-Hellingen worden gevalideerd ten aanzien van hellingen aan de hand van de MARE-data.



Figuur 5.15. Schematisering van de meetlocatie in FOSIM-Hellingen



Figuur 5.16. Vraagintensiteiten FOSIM-simulatie

Tabel 5.4. Verkeerssamenstelling van de simulatie met FOSIM-Hellingen					
Herkomst / Voertuig- bestuurdercombinatie	Percentage voertuigen per voertuig-bestuurdercombinatie [%]				
	1	2	3	4	5
Herkomst 1	46	46	8	0	0
Herkomst 2	0	0	71	14	15
Herkomst 3	30	30	30	5	5

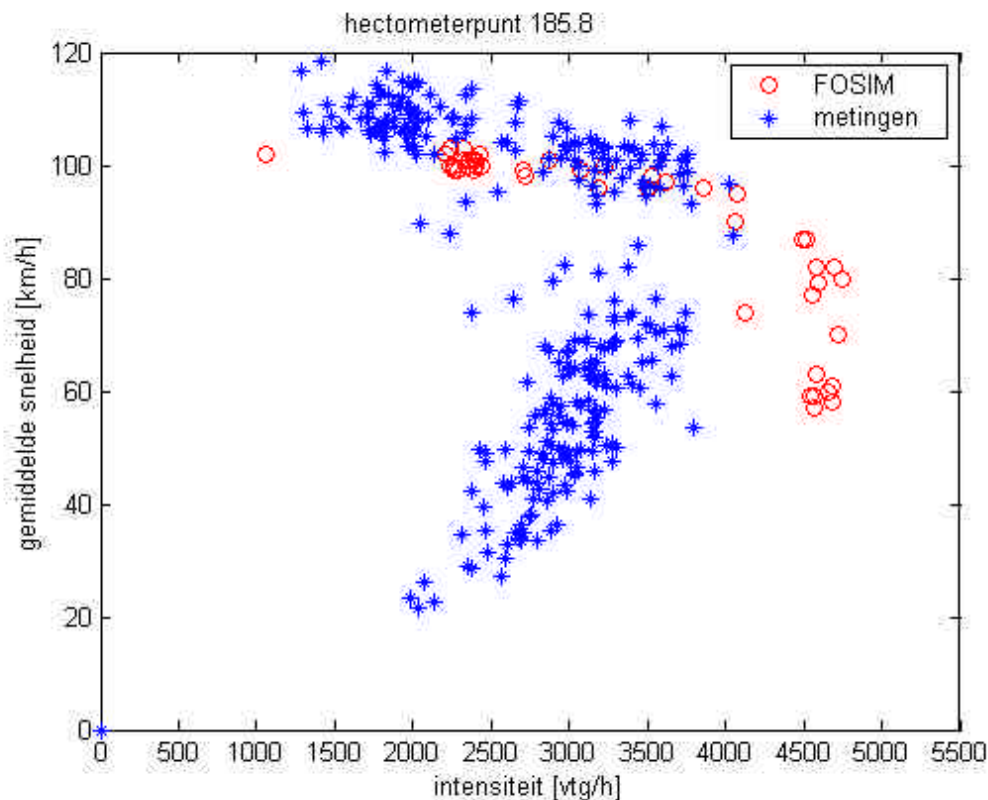
Tabel 5.5. Voertuigparameters van de simulatie met FOSIM-Hellingen			
Voertuig- bestuurder combinatie	Gemiddeld Specifiek vermogen [kW/ton]	Standaardafwijking specifiek vermogen [kW/ton]	Luchtweerstand- coëfficiënt L_{vtype} [m ⁻¹]
1	80	0	$6 \cdot 10^{-4}$
2	50	0	$5 \cdot 10^{-4}$
3	35	0	$4 \cdot 10^{-4}$
4	12	5	$2 \cdot 10^{-4}$
5	9	5	$1 \cdot 10^{-4}$

5.3.4.4. Validatie

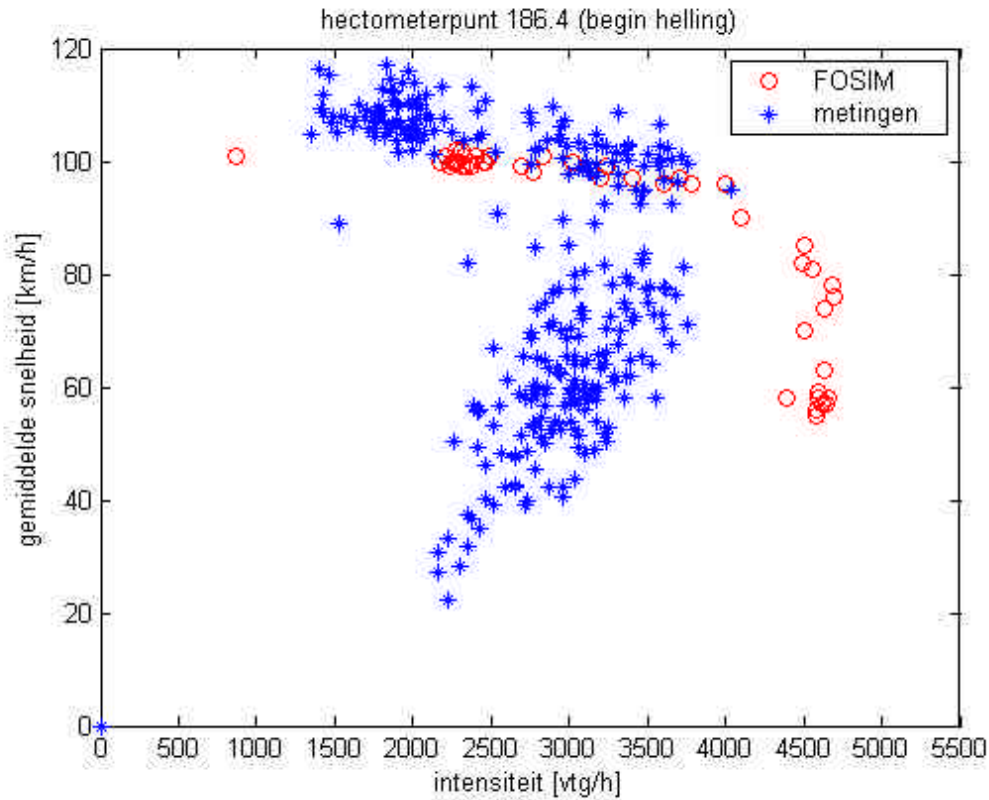
In figuur 5.17a t/m e zijn u(q)-diagrammen van de meetgegevens en de simulatieresultaten van FOSIM-Hellingen weergegeven. In deze diagrammen is te zien dat snelheden tijdens de vrije afwikkeling van de metingen hoger zijn dan bij FOSIM-Hellingen. Dit kan deels worden verklaard met het feit dat in FOSIM de inhalende voertuigen remmen voor langzame voertuigen op de rechter rijstrook (zie paragraaf 5.3.5.5). Een tweede verklaring kan zijn dat de metingen geregistreerde gemiddelde *lokale* snelheden in plaats van gemiddelde *momentane* snelheden zijn. In paragraaf 5.3.4.1 is hierover opgemerkt dat de snelheden van de metingen dus wat lager moeten zijn.

Verder is in de diagrammen te zien dat de capaciteit zoals die in de simulatie met FOSIM-Hellingen wordt gehaald veel hoger ligt dan bij de meetgegevens. Bovendien ontbreekt er een duidelijke congestietak. Er ontstaat bij de simulatie wel een snelheidsverlaging, doch er vindt geen duidelijke congestievorming plaats. Uit figuur 5.17a t/m e is een maximale intensiteit van 4600 vtg/h af te lezen. Dit is de intensiteit die gegenereerd wordt. Wanneer de vraagintensiteiten nog verder verhoogd worden, kan dit niet meer door de generatoren aan het begin van de rijstroken gegenereerd worden. Een capaciteitsbepaling met FOSIM-Hellingen is in dit geval dus niet mogelijk.

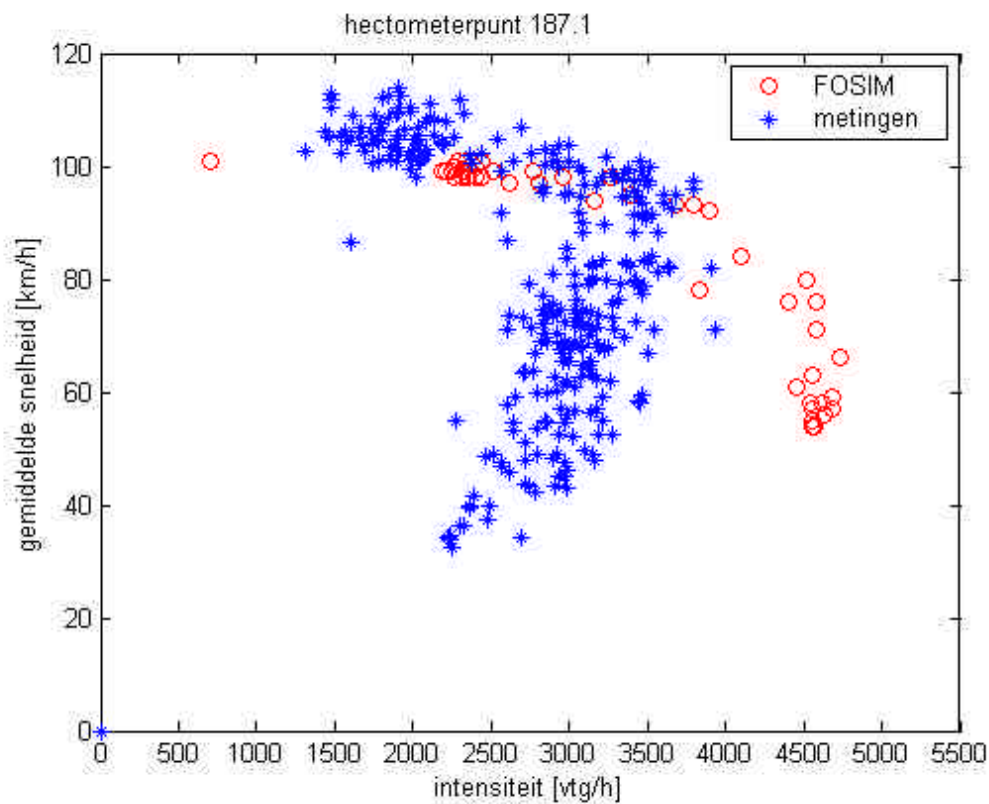
In de probleemanalyse (zie paragraaf 2.3.2.5) is genoemd dat een helling pas een bottleneck vormt als de snelheden van de langzame vrachtwagens onder de capaciteitssnelheid komen te liggen. Het is mogelijk dat in de simulatie met FOSIM-Hellingen de capaciteitssnelheid lager ligt dan bij de meetlocatie. Een andere interpretatie hierop is dat het feit dat de snelheid onder de capaciteitssnelheid komt te liggen in FOSIM-Hellingen veel minder grote gevolgen heeft voor de capaciteit dan bij de meetlocatie. Dit zou betekenen dat het volggedrag in FOSIM-Hellingen afwijkt van het volggedrag op de meetlocatie.



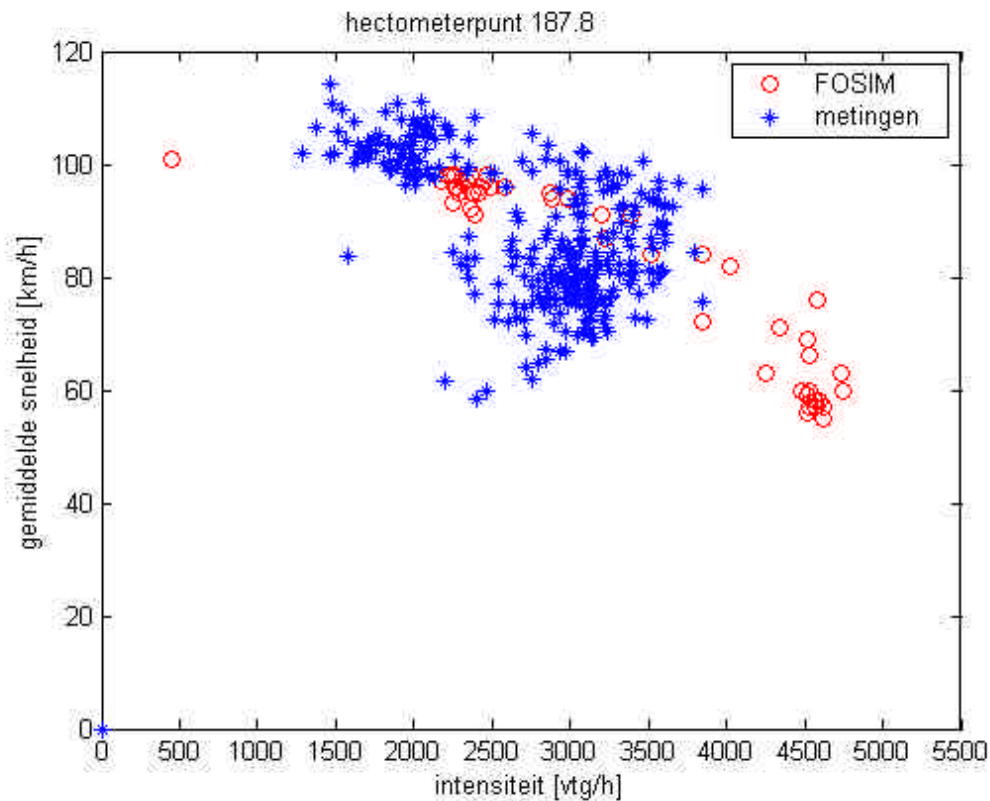
Figuur 5.17a. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 185.8



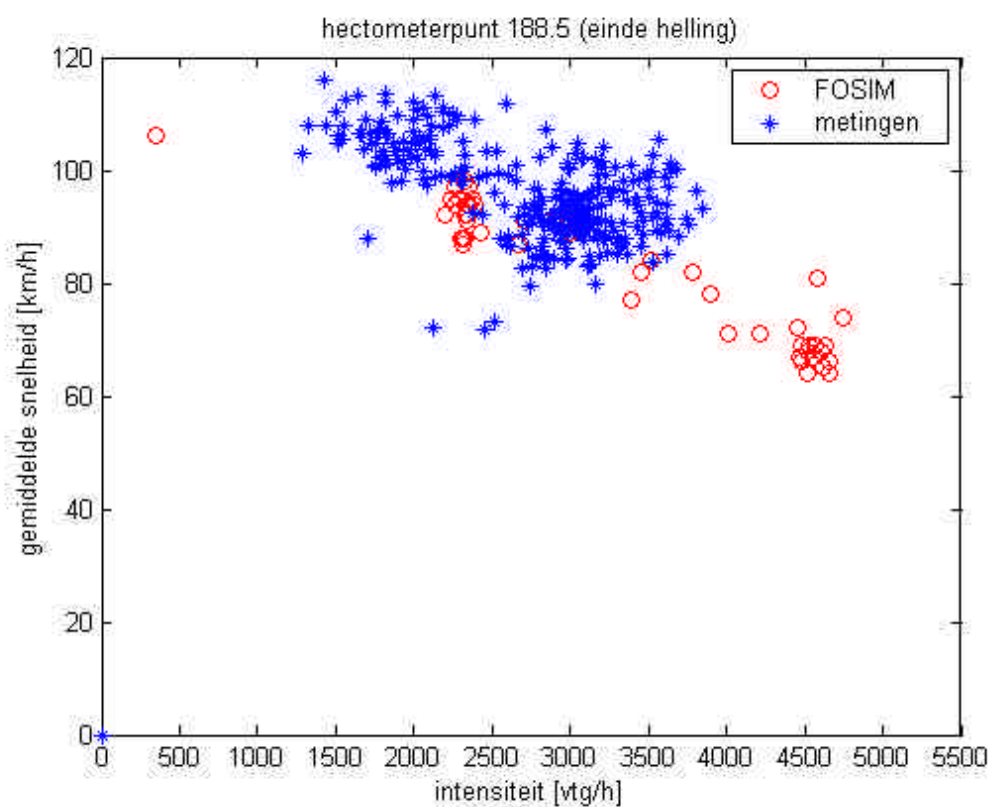
Figuur 5.17b. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 186.4, het begin van de helling



Figuur 5.17c. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 187.1



Figuur 5.17d. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 187.8

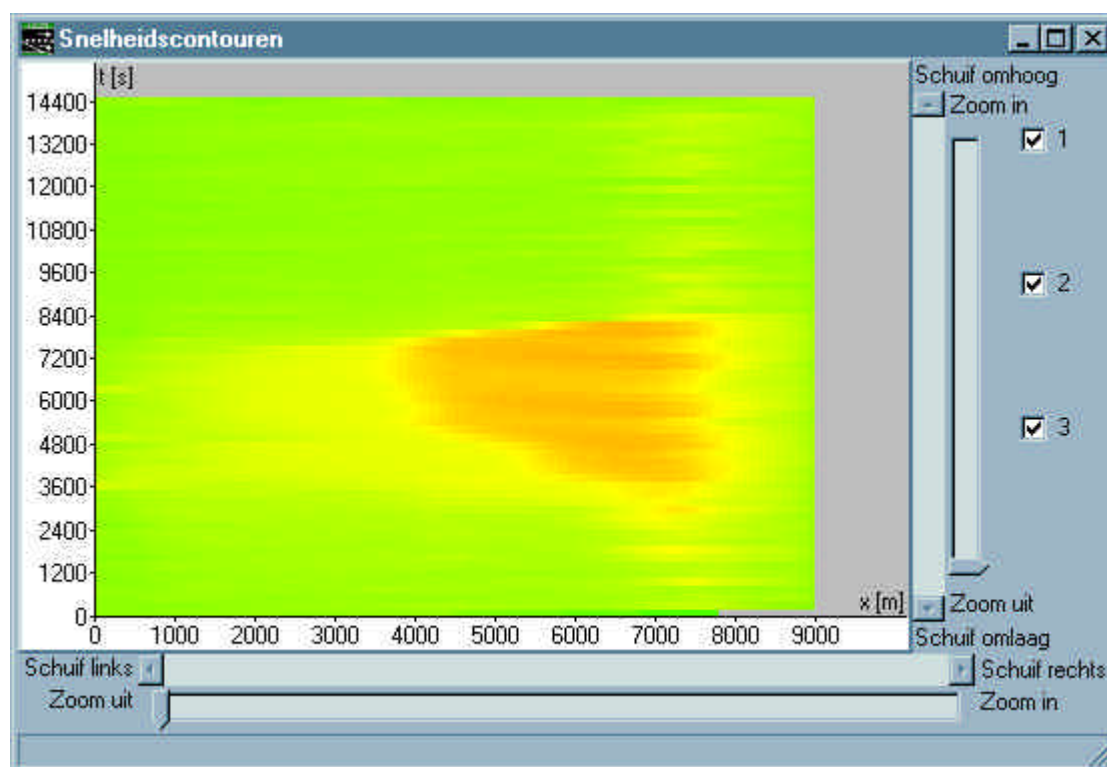


Figuur 5.17e. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 188.5, het einde van de helling

In figuur 5.18 is een voorbeeld gegeven van de snelheidscontouren die door FOSIM-Hellingen worden gegenereerd. Het nulpunt van de x-as correspondeert met hectometerpunt 181,0. De vorm van de snelheidscontouren in figuur 5.18 is vergelijkbaar met de vorm van de snelheidscontouren in figuur 5.14 (de assen zijn verwisseld);

- De gemiddelde snelheden nemen net als in figuur 5.14 weer toe tussen hectometerpunt 188,0 ($x=7000\text{m}$) en 189,0 ($x=8000\text{m}$);
- Er ook een schokgolf in stroomopwaartse richting en later in stroomafwaartse richting te herkennen.

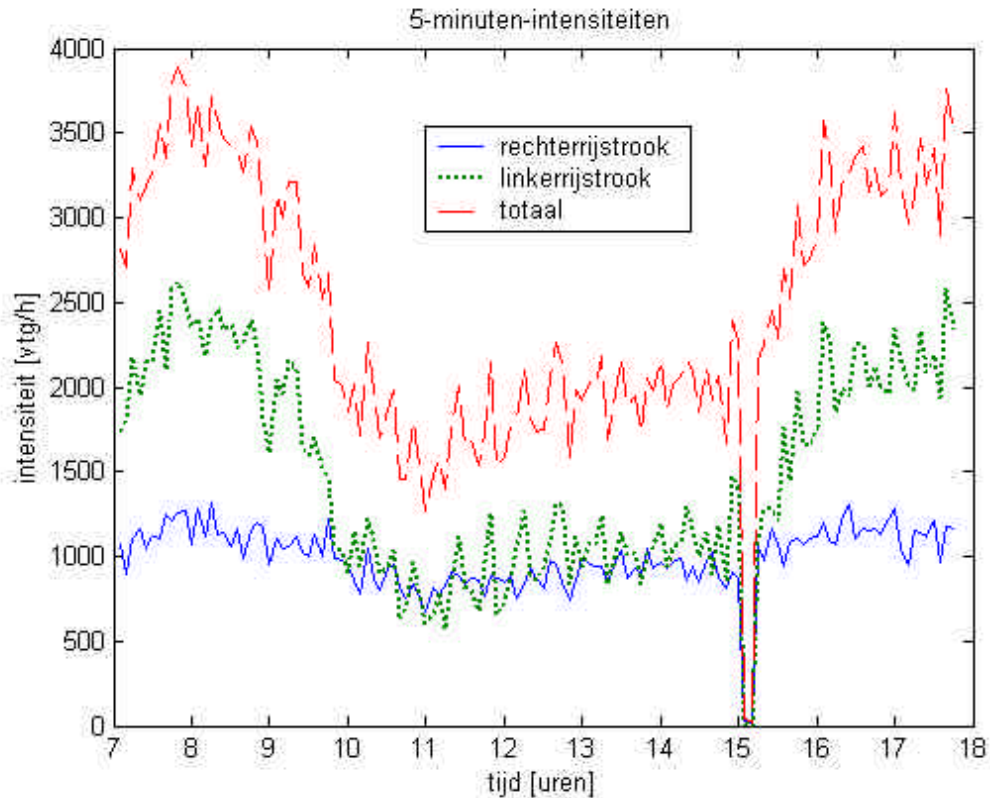
Het grote verschil tussen de snelheidscontouren van de metingen en van FOSIM-Hellingen is dat de gemiddelde snelheden stroomopwaarts van de bottleneck bij de simulatie van FOSIM-Hellingen veel hoger liggen dan bij de metingen. Dit duidt erop dat het bestuurdersgedrag (het strookwisselgedrag of het volgedrag) stroomopwaarts van de bottleneck in FOSIM-Hellingen niet overeenkomt met de werkelijkheid.



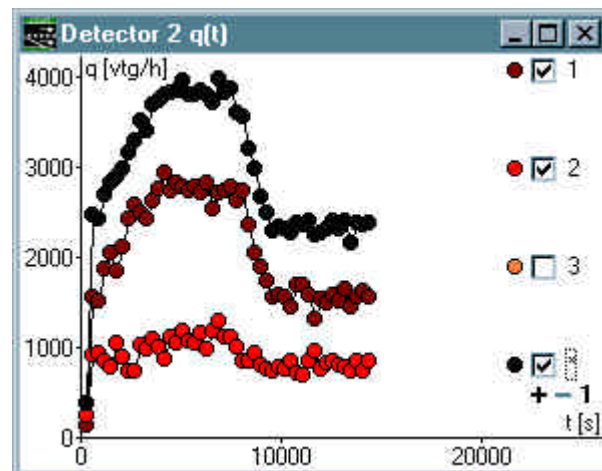
Figuur 5.18. Voorbeeld van een snelheidscontourenplot van de A50 volgens FOSIM-Hellingen

Om de rijstrookverdeling in de simulatie met FOSIM-Hellingen te valideren is de situatie nagebootst die met de videobeelden in paragraaf 5.3.2 is waargenomen. Uit de videodata is gebleken dat een vraagintensiteit van 3800 vtg/h op hectometerpunt 188,1 wordt verdeeld in een intensiteit van circa 1250 vtg/h op de rechter rijstrook en een intensiteit van 2550 vtg/h op de linker rijstrook (zie figuur 5.19). Dit betekent een verhouding van 33:67.

Deze situatie is met FOSIM-Hellingen nagebootst. In figuur 5.20 is de rijstrookverdeling weergegeven op hetzelfde hectometerpunt zoals die door FOSIM-Hellingen wordt gesimuleerd. Hierbij lopen de vraagintensiteiten op zoals bij de voorgaande validatie (tabel 5.16), maar dan tot aan een vraagintensiteit van 3800 vtg/h. In figuur 5.20 is te zien dat de rijstrookverdeling volgens FOSIM-Hellingen bestaat uit een intensiteit van circa 1100 vtg/h op de rechter rijstrook (2) en een intensiteit van 2700 op de linker rijstrook (1). Dit betekent een verhouding van 29:71, terwijl de intensiteiten in de verhouding 35:65 worden gegenereerd. Het verschil in rijstrookintensiteiten is dus bij de simulatie in FOSIM-Hellingen iets groter dan bij de metingen. Dit zou het gevolg kunnen zijn van de aanpassing van het strookwisselmodel, waarbij op een helling het risico tijdens een rijstrookwisseling is verhoogd (zie paragraaf 3.4.2).

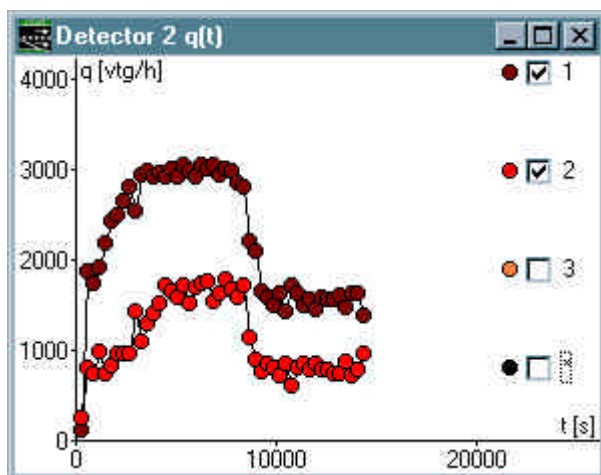


Figuur 5.19. Waargenomen rijstrookverdeling op de A50



Figuur 5.20. Rijstrookverdeling bij een vraagintensiteit van 3800 vtg/h volgens FOSIM-Hellingen

In figuur 5.21 is de rijstrookverdeling weergegeven bij een intensiteit van 4600 vtg/h (zoals bij de validatie met de $u(q)$ -diagrammen) volgens FOSIM-Hellingen. Te zien is een rijstrookverdeling van ongeveer 1600 vtg/h op de rechter rijstrook en 3000 vtg/h op de linker rijstrook. Dit is een verhouding van 35:65 (de verhouding waarin het verkeer wordt gegenereerd). Het verschil in rijstrookintensiteiten is dus afgenomen. Dit betekent dat de grotere capaciteiten in FOSIM-Hellingen voornamelijk worden afgewikkeld op de rechter rijstrook. Hierbij worden nauwelijks strookwisselingen uitgevoerd. De detector in FOSIM-Hellingen registreert immers precies dezelfde intensiteiten zoals die aan het begin van de rijstroken worden gegenereerd.



Figuur 5.21. Rijstrookverdeling bij een vraagintensiteit van 4600 vtg/h volgens FOSIM-Hellingen

Uit deze analyse van de rijstrookverdelingen blijkt dat er in de simulatie met FOSIM-Hellingen bij toenemende vraagintensiteiten een bepaald omslagpunt ligt, waarbij een *toename* van het verschil tussen de rijstrookintensiteiten overgaat in een *afname* van dit verschil. In figuur 5.21 is (rondom tijdstip $t=4000s$) een verstoring in de intensiteitenverlopen te zien, wat wellicht dit omslagpunt aantoont. Het vermoeden bestaat dat in de praktijk bij dit omslagpunt de capaciteit wordt bereikt. In de simulatie van FOSIM-Hellingen ontstaat er bij dit omslagpunt echter een situatie waarbij er nauwelijks meer rijstrookwisselingen worden uitgevoerd en de toename van de vraagintensiteit voornamelijk op de rechter rijstrook wordt afgewikkeld. Met andere woorden; in de praktijk wordt de rechter rijstrook veel minder goed benut dan in de simulaties in FOSIM-Hellingen, waardoor er in FOSIM-Hellingen hogere capaciteiten kunnen worden gesimuleerd. Hieruit kan worden afgeleid dat het strookwisselmodel in FOSIM-Hellingen nog niet de gewenste resultaten geeft. Het kan zijn dat er te weinig strookwisselingen naar de linker rijstrook worden uitgevoerd. Maar ook is het mogelijk dat er in de simulatie strookwisselingen naar de rechter rijstrook plaatsvinden, die in werkelijkheid niet optreden.¹⁹

5.3.5. Conclusies

Ondanks dat het acceleratiegedrag in FOSIM-Hellingen op voertuigniveau en wat betreft vlakke wegen op verkeersstroomniveau is gevalideerd, geeft FOSIM-Hellingen dus onjuiste uitvoer ten aanzien van hellingen. De oorzaken kunnen zowel worden gezocht aan de kant van FOSIM-Hellingen als aan de kant van de metingen.

Wat betreft de simulatie met FOSIM-Hellingen worden de volgende verklaringen genoemd:

- Het volgmodel in FOSIM-Hellingen is nog niet geschikt voor hellingen;
- Het volgmodel in FOSIM-Hellingen is nog niet geschikt voor hellingen;
- De invoer is onjuist, bijvoorbeeld de voertuigverdeling.

De laatstgenoemde verklaring wordt minder waarschijnlijk geacht. Verschillende analyses van de metingen duiden er namelijk op dat het strookwisselmodel en/of het volgmodel in FOSIM-Hellingen nog niet geschikt is voor de simulatie van hellingen. Er zijn wellicht enige bestuurderskenmerken uit de probleemanalyse (paragraaf 2.2.3.) ten onrechte als niet relevant beschouwd.

Wat betreft de metingen zijn de volgende verklaringen te noemen:

- FOSIM is vooral ontwikkeld voor verkeer in stedelijk gebied. De capaciteiten in ruraal gebied kunnen lager zijn dan in stedelijk gebied;
- De metingen van de detectielussen bevatten een systematische fout, bijvoorbeeld dat een (klein) percentage van de passerende voertuigen niet wordt geregistreerd;
- De verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens kan ter plaatse van de meting afwijken van de gebruikte gegevens;

¹⁹ In bijlage 9 worden een aantal succesvolle pogingen beschreven om het strookwisselmodel te verbeteren.

- De wildwissel Terlet (zie figuur 5.6) kan een bottleneck vormen als gevolg van tunnelvrees van bestuurders;
- Er zijn bij de videometingen enkele inhalende vrachtwagens geregistreerd. In de simulatie met FOSIM-Hellingen komt dit niet voor, omdat er wordt gesimuleerd met een inhaalverbod voor vrachtwagens.

De eerstgenoemde verklaring wordt als meest waarschijnlijk geacht. Het bestuurdersgedrag in rurale gebieden kan afwijken ten opzichte van stedelijke gebieden, zodat dit gevolgen heeft voor capaciteitsmetingen.

In het volgende hoofdstuk zullen de conclusies en aanbevelingen ten aanzien van het onderzoek worden gegeven.

6. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zal het onderzoek worden geëvalueerd. Als eerste wordt in paragraaf 6.1 een aantal conclusies ten aanzien van de verschillende onderzoeksstadia gegeven. Vervolgens belicht paragraaf 6.2 enige discussiepunten met betrekking tot de resultaten van het onderzoek. Tenslotte worden in paragraaf 6.3 de uit het onderzoek voortkomende aanbevelingen gegeven.

6.1. Conclusies

6.1.1. Probleemstelling

De probleemstelling in dit onderzoek was dat het effect van opgaande hellingen op de verkeersafwikkeling van autosnelwegen niet is verwerkt in het simulatiemodel FOSIM. Hierbij werd beargumenteerd dat dit ook voor Nederlandse situaties relevant kan zijn. Uit meetgegevens is gebleken dat er in Nederland inderdaad congestie voorkomt dat wordt veroorzaakt door een opgaande helling. Een voorbeeld hiervan is de A50 tussen Arnhem en Apeldoorn. Hieruit wordt geconcludeerd dat het goed mogelijk is dat ook opgaande hellingen van tunnels of hoge bruggen in het Nederlandse hoofdwegennet als bottleneck kunnen worden beschouwd.

6.1.2. Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek was het implementeren van een microscopisch model voor hellingen in autosnelwegtrajecten in het simulatieprogramma FOSIM. Uit het onderzoek is gebleken dat het bereiken van deze doelstelling redelijk gecompliceerd is. Om de validiteit van FOSIM in stand te houden, mag het snelheidsverloop van de voertuig-bestuurdercombinaties op een vlakke weg niet te grote veranderingen ondergaan. Daar tegenover staat het belang van het modelleren van zo realistisch mogelijke snelheidsverlopen op hellingen voor vijf verschillende voertuig-bestuurdercombinaties, waarbij bovendien moet worden gelet op het beperken van het aantal parameters van het model.

6.1.3. Verricht onderzoek

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat in de literatuur vrij veel documentatie is te vinden over acceleratie en deceleratie van verschillende voertuigtypen op een helling, maar vrij weinig over de capaciteit van hellingen en het ontstaan van congestie op hellingen. Bovendien is de documentatie die is gevonden redelijk oud (20 tot 30 jaar). De data die hierin worden gepresenteerd kunnen daardoor achterhaald zijn, omdat de motorvermogens van vrachtwagens in de loop der tijd zijn toegenomen.

Na een inventarisatie van andere verkeerssimulatiemodellen is gebleken dat de hellingmodellen in andere verkeerssimulatieprogramma's op de één of andere manier zijn afgeleid uit voertuigmechanische modellen. Deze hellingmodellen bestaan uit een groot aantal (voertuig)parameters. Omdat bij de ontwikkeling van FOSIM wordt gestreefd naar het beperken van het aantal (voertuig)parameters, zijn de gevonden hellingmodellen niet geschikt bevonden om toe te passen in FOSIM. Daarom is voor FOSIM een eigen hellingmodel ontwikkeld. Dit hellingmodel is eveneens afgeleid van de voertuigmechanica, maar dan met een beperking van het aantal voertuigparameters.

6.1.4. Modelontwikkeling

Het voor FOSIM ontwikkelde hellingmodel bestaat uit een nieuw model voor de maximale acceleratie en een aangepast strookwisselmodel. Een helling in een wegvak beïnvloedt namelijk vooral het acceleratievermogen van de voertuigen en het strookwisselgedrag van de bestuurders.

Het acceleratievermogen van een voertuig wordt in sterke mate bepaald door het specifiek vermogen van het voertuig het hellingspercentage van de weg. Met het specifiek vermogen wordt de verhouding tussen het motorvermogen en de massa van een voertuig bedoeld. Met name bij vrachtwagens is dit specifiek vermogen relatief laag, zodat voornamelijk bij vrachtwagens het acceleratievermogen sterk afneemt bij toenemende hellingspercentages. Wanneer de acceleratievermogens van de vrachtwagens negatief worden, gaan de snelheden dalen. Dit heeft zijn invloed op de verkeersafwikkeling. Daarom spelen de specifieke vermogens van vrachtwagens een grote rol in het hellingmodel.

Het strookwisselgedrag op een helling kenmerkt zich door een groter risico dat bestuurders van personenauto's willen accepteren bij het strookwisselen. De oorzaak hiervan is dat de lichte personenauto's in veel mindere mate worden afgeremd door een helling dan de zware vrachtwagens. De bestuurders van personenauto's willen vermijden dat ze worden gehinderd door de langzaam rijdende vrachtwagens en nemen daardoor meer risico bij het strookwisselen dan dat ze gewoonlijk doen. Dit veroorzaakt een afwijkende verkeersafwikkeling op hellingen en is dus in het hellingmodel meegenomen.

6.1.5. Modelimplementatie

Ondanks de complicaties die de doelstelling van het onderzoek met zich meebracht is gebleken dat het mogelijk is in FOSIM een relatief eenvoudig acceleratiemodel te implementeren waarmee realistische voertuigacceleraties en -snelheden op hellingspercentages tussen de 0 en 7% kunnen worden berekend. Bij dit hellingmodel zijn de voertuigkenmerken specifiek vermogen, rendement, luchtweerstand en rolweerstand geïntroduceerd. Hiervan zijn het specifiek vermogen en de luchtweerstand als kalibratieparameters geïmplementeerd. Een derde kalibratieparameter vormt de standaardafwijking van de specifieke vermogens van vrachtwagens. Het rendement en de rolweerstand zijn als "verborgen" parameters (constanten) geïmplementeerd. Ondanks dit grote aantal parameters is gebleken dat de kalibratie van deze parameters goed mogelijk was.

6.1.6. Validatie

De FOSIM-versie waarin het hellingmodel is geïmplementeerd is FOSIM-Hellingen genoemd. Hoewel de acceleratiecurven van het huidige maximale-acceleratiemodel in FOSIM 4.1 en het nieuwe maximale-acceleratiemodel in FOSIM-Hellingen niet geheel overeenkomen, vertonen de gegenereerde snelheidsverlopen geen grote verschillen. Daardoor was het mogelijk om met een kleine aanpassing van de nieuwe voertuigparameters de validiteit van FOSIM-Hellingen ten aanzien van vlakke wegen in stand te houden. Dit betekent dat FOSIM-Hellingen voor vlakke wegvaktypen dezelfde resultaten genereert als FOSIM 4.1. FOSIM-Hellingen is dus in principe beter dan FOSIM 4.1, want met FOSIM-Hellingen kunnen (na nog wat aanpassingen) ook wegvaktypen met hellingen worden gesimuleerd.

FOSIM-Hellingen is ten aanzien van hellingen gevalideerd met meetgegevens afkomstig van de A50 bij Arnhem. Bij deze validatie is gebleken dat het verloop van het hellingspercentage nauwkeurig moet worden ingevoerd. Dit is essentieel voor de bepaling van de plaats van de bottleneck en voor de bepaling van de capaciteit. Het hellingspercentage is namelijk een redelijk gevoelige invoervariabele met betrekking tot de capaciteit.

Ook is bij de validatie met de meetgegevens van de A50 bevestigd dat FOSIM-Hellingen realistische voertuigsnelheden simuleert. Helaas zijn de gemeten capaciteiten lager dan de door FOSIM-Hellingen gesimuleerde capaciteiten. Er kan dus worden geconcludeerd dat de doelstelling van het onderzoek slechts ten dele is bereikt.

6.2. Discussie

Ondanks dat het acceleratiegedrag in FOSIM-Hellingen op voertuigniveau en wat betreft vlakke wegen op verkeersstroomniveau is gevalideerd, geeft FOSIM-Hellingen dus onjuiste uitvoer ten aanzien van hellingen. De oorzaken kunnen zowel gezocht worden aan de kant van FOSIM-Hellingen als aan de kant van de metingen.

Wat FOSIM-Hellingen betreft worden de onjuiste simulatieresultaten toegeschreven aan het strookwisselmodel en/of het volgmodel in FOSIM-Hellingen:

- Het strookwisselmodel is geanalyseerd aan de hand van een vergelijking van de rijstrookverdelingen van de metingen en FOSIM-Hellingen. Hieruit blijkt dat er in de simulatie met FOSIM-Hellingen bij toenemende vraagintensiteiten een bepaald omslagpunt ligt, waarbij een *toename* van het verschil tussen de rijstrookintensiteiten overgaat in een *afname* van dit verschil. De te grote capaciteiten in de simulaties met FOSIM-Hellingen worden dus deels bereikt doordat op de rechter rijstrook te grote intensiteiten worden afgewikkeld. Hieruit kan worden afgeleid dat het strookwisselmodel in FOSIM-Hellingen nog niet de gewenste resultaten geeft. Het kan zijn dat er te weinig strookwisselingen naar de linker rijstrook worden uitgevoerd. Maar ook is het mogelijk dat er in de simulatie strookwisselingen naar de rechter rijstrook plaatsvinden, die in werkelijkheid niet optreden. Het strookwisselmodel in FOSIM-Hellingen is dus waarschijnlijk te beperkt aangepast om het bestuurdersgedrag op hellingen realistisch te simuleren.
- Het volggedrag is geanalyseerd aan de hand van de capaciteitssnelheid. Een helling vormt pas een bottleneck als de snelheden van de langzame vrachtwagens onder de capaciteitssnelheid liggen. Het is mogelijk dat in de simulatie met FOSIM-Hellingen de capaciteitssnelheid lager ligt dan bij de meetlocatie. Een andere interpretatie hierop is dat het feit dat de snelheid onder de capaciteitssnelheid komt te liggen in FOSIM-Hellingen veel minder grote gevolgen heeft voor de capaciteit dan bij de meetlocatie. Dit zou betekenen dat het volggedrag in FOSIM-Hellingen afwijkt van het volggedrag op de meetlocatie.

Een derde verklaring die minder waarschijnlijk wordt geacht is dat bepaalde invoervariabelen onjuist in FOSIM-Hellingen worden ingevoerd. Het effect van de meeste invoervariabelen is namelijk tijdens het onderzoek geanalyseerd.

Wat betreft de metingen zijn de volgende verklaringen voor de onjuiste simulatieresultaten te noemen:

- FOSIM is vooral ontwikkeld voor verkeer in stedelijk gebied. De capaciteiten in rurale gebied kunnen lager zijn dan in stedelijk gebied;
- De detectielussen bevatten een systematische fout, bijvoorbeeld dat een (klein) percentage van de passerende voertuigen niet wordt geregistreerd;
- De verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens kan ter plaatse van de meting afwijken van de gebruikte gegevens;
- De wildwissel Terlet (zie figuur 5.6) kan een bottleneck vormen als gevolg van tunnelvrees van bestuurders;
- Er zijn bij de videometingen enkele inhalende vrachtwagens geregistreerd. In de simulatie met FOSIM-Hellingen komt dit niet voor, omdat er wordt gesimuleerd met een inhaalverbod voor vrachtwagens.

Bij deze verklaringen wordt de eerstgenoemde als meest waarschijnlijk beschouwd. Het is mogelijk dat de capaciteiten in rurale gebieden 5 tot 10 % lager zijn dan in stedelijke gebieden.

6.3. Aanbevelingen

Omdat er geen goede overeenkomst tussen meetgegevens van de A50 en de simulatieresultaten van FOSIM-Hellingen is bereikt, is de belangrijkste aanbeveling dat er meer (gedetailleerde) empirische data moeten worden verzameld. Deze empirische data zijn nodig om te kunnen onderzoeken hoe capaciteitssituaties op hellingen tot stand komen. Met de nu beschikbare gegevens is het niet mogelijk verder te komen met de modelontwikkeling. Ten eerste kan de meetlocatie op de A50 beter worden bestudeerd. Hierbij is het van belang dat de meetgegevens bestaan uit rijstrookgegevens in plaats van rijbaangegevens, zoals bij de MARE-data van de A50. Verder zijn gegevens van rijstrookwisselingen van rechts naar links én van links naar rechts over de gehele helling en het gedeelte ervoor van essentieel belang. Zodoende kan het strookwisselgedrag op hellingen beter worden bestudeerd. Ook

worden volgtijdgegevens en waardevol geacht, om meer inzicht te verkrijgen in het volgedrag op hellingen.

Tevens wordt aanbevolen andere meetlocaties te kiezen.

Een tweede belangrijke aanbeveling is dat de aanpassingen van FOSIM-Hellingen, die uit de nieuwe meetgegevens kunnen volgen, in eerste instantie moeten worden gericht op het strookwisselgedrag en het volgedrag. Er wordt afgeraden de waarden van de in dit onderzoek geïntroduceerde voertuigparameters (het gemiddelde en de standaardafwijking van het specifiek vermogen en de luchtweerstandcoëfficiënt) te wijzigen. Deze voertuigparameters zijn namelijk op voertuigniveau gekalibreerd en gevalideerd voor hellingen en op verkeersstroomniveau gevalideerd voor vlakke wegen.

Verder wordt aanbevolen bij de invoer van een verticaal alignement rekening te houden met de voet- en topboog van een helling. Bovendien is het hellingspercentage een gevoelige invoervariabele, zodat deze ook nauwkeurig moet worden ingevoerd.

Een andere aanbeveling is dat het wellicht mogelijk is het maximale-acceleratiemodel nog wat verder te vereenvoudigen. Dit is in het onderzoek niet aan bod gekomen. In een vervolgonderzoek kan worden geanalyseerd of het mogelijk is de luchtweerstandcoëfficiënt en de rolweerstandcoëfficiënt uit de berekening van de maximale acceleratie weg te laten. Verder kan het rendement worden verdisconteerd in het specifiek vermogen. Dit kan het *benutte* specifiek vermogen $(P/m)_{\text{nuttig}}$ worden genoemd. Het maximale-acceleratiemodel ziet er dan als volgt uit:

$$a_{\text{max}} = \left(\frac{P}{m} \right)_{\text{nuttig}} \cdot \frac{1}{v} - g \cdot h/100 \quad (6.1)$$

Hierbij is:

a_{max}	= maximale acceleratie van het voertuig [m/s^2];
$(P/m)_{\text{nuttig}}$	= het <i>benutte</i> specifiek vermogen [kW/ton];
v	= actuele snelheid van het voertuig [m/s];
g	= zwaartekrachtsversnelling ($9,81 \text{ m/s}^2$);
h	= hellingspercentage [%].

Vergelijking 6.1 is de vereenvoudiging van vergelijking 3.19.

Het voordeel van deze vereenvoudiging is dat er nog maar twee voertuigparameters overblijven, namelijk het gemiddelde en de standaardafwijking van het specifiek vermogen. Het nadeel van deze vereenvoudiging is dat het snelheidsverloop van de voertuigen waarschijnlijk minder realistisch wordt. Mogelijke waarden voor de benutte specifieke vermogens van de voertuig-bestuurdercombinaties zijn:

- Voertuig-bestuurdercombinatie 1: 45 kW/ton;
- Voertuig-bestuurdercombinatie 2: 25 kW/ton;
- Voertuig-bestuurdercombinatie 3: 22 kW/ton;
- Voertuig-bestuurdercombinatie 4: 9 kW/ton;
- Voertuig-bestuurdercombinatie 5: 3,5 kW/ton.

Met deze waarden van de benutte specifieke vermogens wordt het snelheidsverloop, volgend uit het huidige maximale-acceleratiemodel, goed benaderd. Echter, met deze waarden kan de standaardafwijking van het specifieke vermogen van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 (5 kW/ton) niet gehandhaafd blijven. De beide voertuigparameters moeten met deze vereenvoudiging dus opnieuw worden gevalideerd ten aanzien van vlakke wegen.

Tot slot wordt aanbevolen het vergelijken van resultaten van FOSIM-Hellingen met buitenlandse data pas uit te voeren als FOSIM-Hellingen voor Nederlandse hellingen is gevalideerd.

Referenties

American Association of State Highway and Transport Officials (AASHTO), *A policy on geometric design of highways and streets*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transport Officials (AASHTO), 1990.

Abramowitz, M., en I.A. Stegun (editors), *Handbook of mathematical functions*. New York: Dover, 1968.

Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), *Calibratie en validatie FOSIM, Fase 3: Bepaling waarden van enkele parameters*. Zeist: Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) en Grontmij, Afdeling Ruimtelijke Inrichting, 1996.

Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), *Voertuigkarakteristieken van het Nederlandse autopark*. Rotterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), 1998.

Blikman, G., en J.H. Papendrecht, *De verkeersafwikkeling op hellingen, een literatuurstudie, deel I*. Delft: Technische Hogeschool Delft, Vakgroep Verkeer, en Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde, 1986.

Botma, H., *Dictaat verkeersafwikkeling Volume A: Traffic Flow*. Delft: Technische Universiteit Delft, faculteit Geowetenschappen en Civiele Techniek, Sectie Verkeerskunde, 2000.

Bouwdienst Rijkswaterstaat, *Vrachtauto's op hellingen, resultaten van een internationale enquête naar simulatieprogramma's en richtlijnen voor het wegontwerp*. Apeldoorn: Ministerie van Verkeer en Vervoer, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Afdeling Wegontwerp, 1997.

Bouwdienst Rijkswaterstaat, *Maatgevende vrachtauto's voor het ontwerpen van autosnelwegen, onderzoek ten behoeve van het computerprogramma SimVra+*. Apeldoorn: Ministerie van Verkeer en Vervoer, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, en Directie Zuid Holland, 1998.

Bouwdienst Rijkswaterstaat, *Handleiding SimVra+*. Apeldoorn: Ministerie van Verkeer en Vervoer, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, en Directie Zuid Holland, 1998.

Brilon, W., en O. Drews, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Verkehrliche und ökologische Auswirkungen der Anordnung von Überholverboden für LKW auf Autobahnen*. Bochum: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, 1996.

Brannolte, U., *Verkehrsaulauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1978.

Buckley, D.J., en S.Yagar, 'Capacity funnels near on-ramps'. In: University of New South Wales, *Transportation and Traffic Theory; Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Sydney: University of New South Wales, 1974, p.105-123.

Daganzo, C.F., *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*. Berkeley: Pergamon, 1997.

Dijker, T., P.H.L. Bovy, en R.G.M.M. Vermijs, 'Car-following under congested conditions, empirical findings'. In: Transportation Research Board, *Transportation Research Record no. 1644*. Washington D.C.: National Research Council, 1998, p. 20 t/m 28.

Guyt, L., en J.H. Papendrecht, *Verkeerstechniek en exploitatie*. Delft: TH Delft, Afdeling der Civiele Techniek, Vakgroep Verkeer, Delft, 1985.

Hastings, N.A.J., en J.B. Peacock, *Statistical distributions; A Handbook for students and practitioners*. New York: John Wiley & Sons, 1975.

De Leeuw, A.M., *FOSIM 4.1, Programmabeschrijving*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Laboratorium voor Verkeerskunde, en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, 2000.

Leutzbach, W., *Introduction to the theory of traffic flow*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.

Mood, A.M, F.A. Graybill en D.C. Boes, *Introduction to the theory of statistics*. Tokyo: McGraw-Hill, 1982.

Müller, R., *Zusatzspuren*, Zürich: Vereinigung Schweizerischer Strassenfachmänner, Kommission 2, 1976.

Pline, J.L. (editor), *Traffic Engineering Handbook*. 4^e druk. Washington D.C.: Institute of Transportation Engineers, 1992.

Rakha, H., I. Lucic, S.H. Demarchi, J.R. Setti, en M. van Aerde, 'Vehicle Dynamics Mode for Predicting Maximum Truck Acceleration Levels'. In: *Journal of Transportation Engineering*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2001.

Rijkswaterstaat, *Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen*. Den Haag: Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde, 1989-1993.

Ryba, D., *Automobieltechniek deel I & II*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit Ontwerp, Constructie en Productie, Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek, Vakgroep Transporttechnologie, Sectie Voertuigtechniek, 1992.

Schuurman, H., en R.G.M.M. Vermijs, *Ontwikkeling van het mikrosimulatiemodel FOSIM voor weefvakken en invoegingen*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Infrastructuur, Sectie Verkeerskunde, en Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, 1993.

Schuurman, H., en R.G.M.M. Vermijs, *Simulatie benuttingsmaatregelen; effectenstudie m.b.v. het mikrosimulatiemodel FOSIM*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Infrastructuur, Sectie Verkeerskunde, 1994.

Schuurman, R.E., *Verslag van rijproeven op een aantal verschillende hellingen ter verificatie van het rekenprogramma SimVra*. Delft: Instituut voor wegtransportmiddelen TNO, en Rijkswaterstaat Dienst Verkeerskunde, 1989.

St. John, A.D., en D.R. Kobett, *National Cooperative Highway Research Program Report 185: Grade effects on traffic flow stability and capacity*. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1978.

Transportation Research Board (TRB), *Highway Capacity Manual 2000*. Washington D.C.: Transportation Research Board (TRB), National Research Council, 2000

Werner, A., *Effect of Recreational vehicles on highway capacity*. Calgary: University of Calgary, Department of Civil Engineering, 1974.

Bijlagen

Bijlage 1. Enkele begrippen uit de verkeersstroomtheorie

Bijlage 2. Wijzigingen in de programmacode van FOSIM

Bijlage 3. Beschrijving van het voertuigmodel SimVra+

Bijlage 4. Voertuigkarakteristieken

Bijlage 5. De log-normale verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens

Bijlage 6. Validatie van het hellingmodel met SimVra+

Bijlage 7. t-verdeling

Bijlage 8. F-verdeling

Bijlage 9. Pogingen om FOSIM-Hellingen te verbeteren

Bijlage 1. Enkele begrippen uit de verkeersstroomtheorie

De drie basisgrootheden van de verkeersstroomtheorie

De drie basisgrootheden van de verkeersstroomtheorie zijn:

- intensiteit q ;
- dichtheid k ;
- snelheid u .

De relatie tussen de basisgrootheden op macroscopisch niveau ziet er als volgt uit:

$$q = k \cdot u \quad (\text{B1.1})$$

Met:

- q = intensiteit [vtg/h];
- k = dichtheid [vtg/km];
- u = snelheid [km/h].

Deze vergelijking is erg belangrijk in de verkeersstroomtheorie. Ze is onder andere te gebruiken in het basisdiagram.

Het basisdiagram

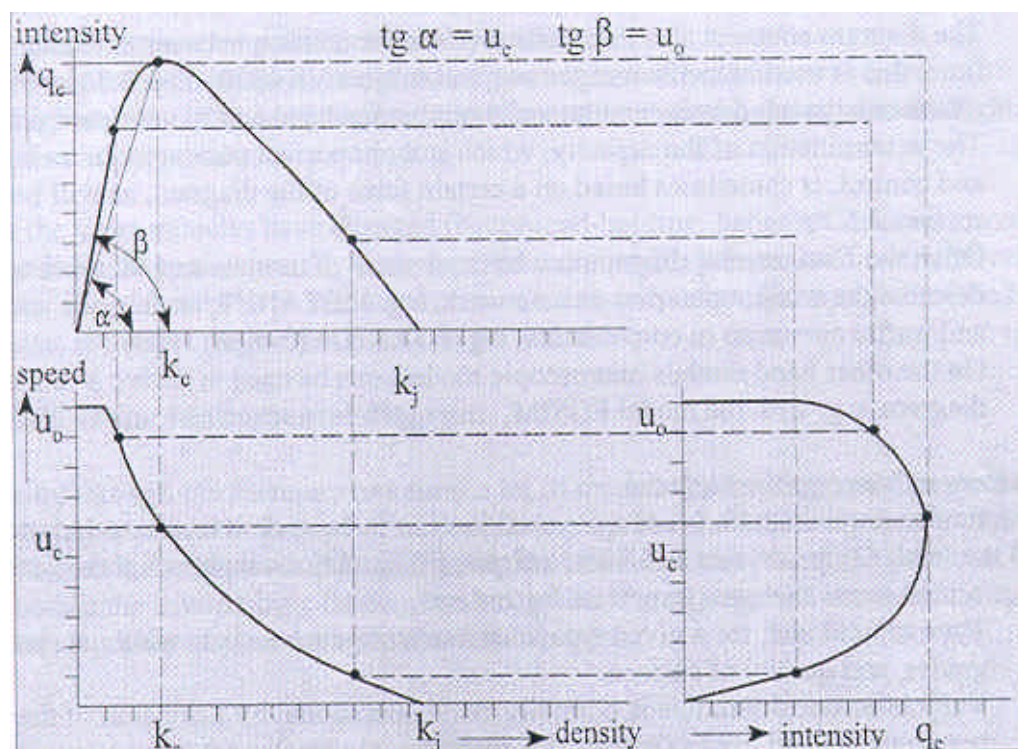
De grootheden q , k en u kunnen in een zogenoemd basisdiagram worden uitgezet. De essentie van het basisdiagram is dat niet alle combinaties van q , k en u kunnen voorkomen. Met een basisdiagram kan de kwaliteit van de verkeersafwikkeling (het zogenaamde serviceniveau) op een bepaald wegvak inzichtelijk gemaakt worden.

Het basisdiagram bestaat uit een vrije-afwikkelingstak en een congestietak. Het verkeer in de vrije-afwikkelingstoestand rijdt met een hoge snelheid bij een lage dichtheid. Als vervolgens de vraagintensiteit de capaciteit overschrijdt gaat de vrije-afwikkelingstoestand over in een congestiesituatie, waarin de snelheid laag is en de dichtheid hoog (zie figuur B1.1).

Het basisdiagram kan op drie verschillende manieren worden getekend [o.a. Botma, 2000]:

- $q = q(k)$;
- $u = u(k)$;
- $u = u(q)$.

In figuur B1.1 zijn de drie basisdiagrammen getekend [Botma, 2000].



Figuur B1.1 Het basisdiagram [Botma, 2000]

Enkele waarden in de grafieken zijn belangrijk om te herkennen:

- q_c = de capaciteit [vtg/h];
- k_c = de dichtheid waarbij de capaciteit wordt bereikt [vtg/km];
- k_j = de stremingsdichtheid (dichtheid waarbij alle voertuigen met minimale afstand van elkaar stilstaan) [vtg/km];
- u_0 = vrije snelheid (voertuigen hoeven hun snelheid niet aan andere voertuigen aan te passen) [km/h];
- u_c = de snelheid waarbij de capaciteit bereikt wordt [km/h].

Verder geldt: $\text{tg}(\alpha) = u_c$ en $\text{tg}(\beta) = u_0$.

Het is van belang de juiste snelheid in het basisdiagram te gebruiken. Dit is namelijk de gemiddelde *momentane* snelheid u_M .

Momentane, harmonische en lokale gemiddelde snelheid

De gemiddelde momentane snelheid u_M is het gemiddelde van de snelheden van de voertuigen die zich op één moment op een bepaald wegvak bevinden:

$$u_M = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i \quad (\text{B1.2})$$

Met:

- u_M = gemiddelde momentane snelheid [m/s of km/h];
- m = aantal voertuigen dat zich op één moment op een bepaald wegvak bevindt;
- v_i = snelheid van voertuig i [m/s of km/h].

De gemiddelde momentane snelheid u_M kan worden benaderd door de harmonisch gemiddelde snelheid u_H [Leutzbach, 1988]:

$$u_H = \frac{n}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{v_j}} \quad (\text{B1.3})$$

Met:

- u_H = harmonisch gemiddelde snelheid [m/s of km/h];
- n = aantal voertuigen dat binnen een bepaalde tijd een wegdoorsnede passeert;
- v_j = snelheid van voertuig j [m/s of km/h].

De gemiddelde lokale snelheid u_L is het gemiddelde van de snelheden van de voertuigen die op één doorsnede gedurende een bepaalde periode worden gemeten:

$$u_L = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p v_k \quad (\text{B1.4})$$

Met:

- u_L = de gemiddelde lokale snelheid [m/s of km/h];
- p = aantal voertuigen dat binnen een bepaalde tijd een wegdoorsnede passeert;
- v_k = snelheid van voertuig k [m/s of km/h].

Leutzbach [1988, blz 53 t/m 59] laat zien dat de gemiddelde momentane snelheid u_M altijd kleiner is dan de gemiddelde lokale snelheid u_L , met uitzondering van de situatie dat alle voertuigen dezelfde gemiddelde snelheid hebben (standaardafwijking $\sigma_M = 0$):

$$u_L = u_M + \frac{\sigma_M^2}{u_M} \quad (\text{B1.5})$$

Wanneer de standaardafwijking σ_M gelijk is aan 0, geldt dat $u_L = u_M$.

De schokgolftheorie

Een schokgolf in een verkeersstroom is een grens van twee verkeerstoestanden die zich met een bepaalde snelheid voortplant. De snelheid van deze schokgolf kan worden berekend met:

$$\omega = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad (\text{B1.6})$$

Hierbij is:

- ω = snelheid van de schokgolf [m/s];
- Δq = verschil in intensiteiten q_1 en q_2 tussen de verkeerstoestanden 1 en 2 [vtg/h];
- Δk = verschil in dichtheden k_1 en k_2 tussen de verkeerstoestanden 1 en 2 [vtg/km].

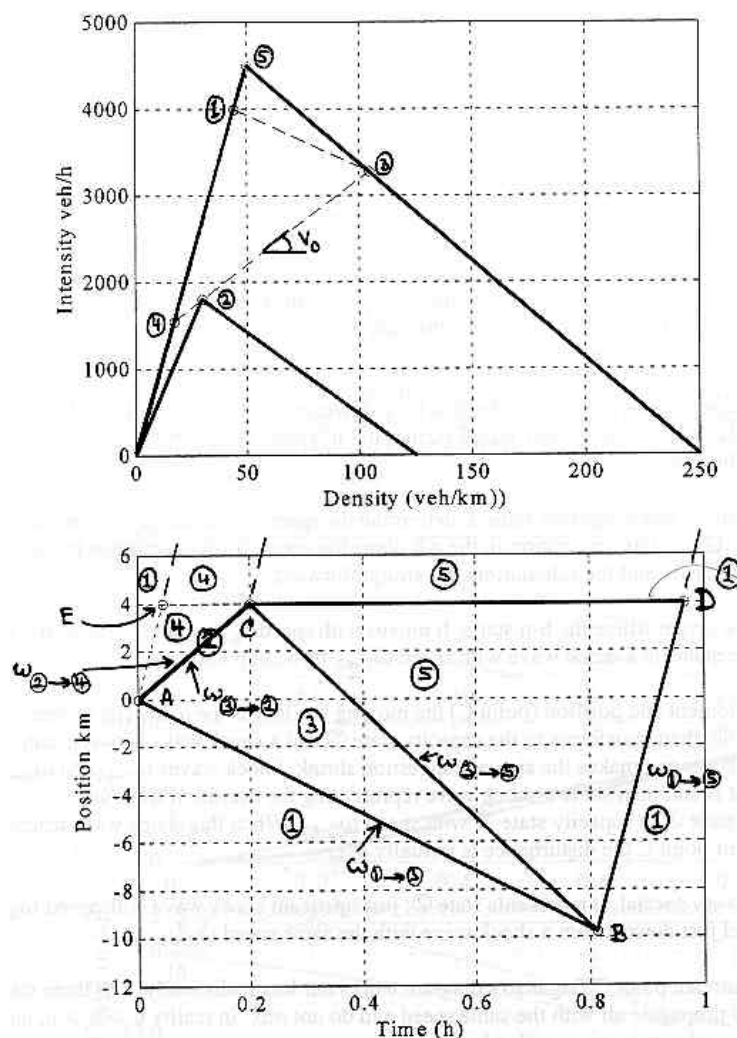
De schokgolftheorie maakt het mogelijk op basis van verkeerstoestanden de verkeersafwikkeling in plaats en tijd te bepalen. Voor meer uitleg over de schokgolftheorie of het basisdiagram wordt verwezen naar onder andere Daganzo [1997] en Botma [2000].

Met de schokgolftheorie kunnen verschillende soorten bottlenecks worden geanalyseerd, bijvoorbeeld een *moving* bottleneck [Daganzo, 1997]. Moving bottlenecks zijn langzame voertuigen in een verkeersstroom.

Moving bottleneck met inhaalbaarheid

Een voorbeeld van een moving bottleneck is een zware vrachtwagen op een helling. Zo'n langzaam voertuig kan dan beschouwd worden als een zich verplaatsende bottleneck

(moving bottleneck). De capaciteit van deze bottleneck is de maximale intensiteit van voertuigen die de moving bottleneck kunnen inhalen. Hierbij horen een bepaalde dichtheid en gemiddelde momentane snelheid. In figuur B1.2 zijn de (vereenvoudigde) basisdiagrammen gegeven van het wegvak zonder moving bottleneck (met een capaciteit van 4500 vtg/h) en de moving bottleneck (met een capaciteit van 1800 vtg/h). De snelheid van het langzame voertuig is 20 km/h (v_0). Voordat het langzame voertuig op het wegvak verschijnt, is de verkeersstroom in toestand 1. Het langzame voertuig veroorzaakt stroomopwaarts een toestand 3, met een schokgolfsnelheid 1-3. Ter plaatse van de moving bottleneck ontstaat toestand 2. Hierbij horen dus een inhaaldichtheid van 30 vtg/km en een inhaalsnelheid van $1800/30 = 60$ km/h. Stroomafwaarts van het langzame voertuig ontstaat de toestand zoals in punt 4. In figuur B1.2 wordt het hierboven beschreven voorbeeld van een moving bottleneck geïllustreerd in een x-t-diagram. Hierin is te zien dat het langzame voertuig zich verplaatst over een afstand van 4 km en daarna óf de weg verlaat, óf zijn snelheid verhoogt (bijvoorbeeld doordat het einde van een helling wordt bereikt). In dit laatste geval zal het x-t-diagram er iets anders uitzien. De lijn A-C zal dan naar boven afbuigen.



Figuur B1.2. Beschrijving van een moving bottleneck in een $q(k)$ -diagram en $x(t)$ -diagram [Botma, 2000]

Bijlage 2. Wijzigingen in de programmacode van FOSIM

De programmacode van FOSIM heeft een aantal wijzigingen ondergaan. In deze bijlage zijn de veranderingen van de programmacode met betrekking tot de verkeersafwikkeling te vinden.

De verkeersafwikkeling is in FOSIM geprogrammeerd in het bestand <kernel.ccp>. Dit bestand bestaat uit een groot aantal functies, die worden beschreven door De Leeuw [2000]. De volgende functies zijn vanwege het hellingmodel aangepast:

- VehicleInfo
- AmaxV
- MoveForward
- PerformLanechange

In deze bijlage worden de wijzigingen in de programmacode van FOSIM in de verschillende functies weergegeven en toegelicht.

VehicleInfo

In de functie VehicleInfo worden de gegevens van een voertuig bewaard. Deze functie is aangevuld met de loting van het specifiek vermogen. Dit wordt gedaan als de standaard afwijking van het specifiek vermogen (SpecificPowerStd) groter is dan nul. Eerst worden de variantiecoëfficiënt (varcoeff), het gemiddelde (mean_normal) en standaardafwijking (std_normal) van de normale verdeling berekend. Vervolgens wordt uit de *standaard* normale verdeling een waarde geloot (X(p)). Met deze waarde wordt het specifiek vermogen volgens de normale verdeling bepaald (samplenorm). Tenslotte wordt hiermee de waarde volgens de log-normale verdeling berekend (thisspecificpower). Dit specifiek vermogen wordt begrensd met een minimum specifiek vermogen van 4,4 kW/ton. Dit is de 1-percentielwaarde van het specifiek vermogen in Nederland [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998].

```
#ifdef SLOPES
float samplenorm;
if (VehicleParamSet -> SpecificPowerStd () != 0.0)
{
    float p;
    int trycount = 0;
    float varcoeff = VehicleParamSet -> SpecificPowerStd () /
        VehicleParamSet -> SpecificPower ();
    float mean_normal = log (VehicleParamSet -> SpecificPower () /
        sqrt (1.0 + varcoeff * varcoeff));
    float std_normal = sqrt (log (1.0 + varcoeff * varcoeff));

    for (p = ran (); (p < 0.0023) || (p > 0.9987); p = ran ())
        if (++trycount > MAXTRIES)
        {
            ShowError (ENVIRONMENTERROR, "VehicleInfo::VehicleInfo",
                "Unable to generate prefV above PrefVmin");
            samplenorm = mean_normal;
            break;
        }
    if (trycount < MAXTRIES)
        samplenorm = X (p) * std_normal + mean_normal;
    thisspecificpower = exp (samplenorm);
    if (thisspecificpower < 4.4)
        thisspecificpower = 4.4;
}
else
    thisspecificpower = VehicleParamSet -> SpecificPower ();
#endif // SLOPES
```

AMaxV

De maximale acceleratie afhankelijk van de snelheid (AMaxV) wordt in FOSIM in een aparte functie berekend. De berekening van AMaxV is vervangen door een nieuwe berekening. Het rendement (yield) wordt bepaald aan de hand van de lengte van het voertuig: voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 (de vrachtwagens) zijn langer dan 7 meter en hebben een rendement van 0,9. De voertuig-bestuurdercombinaties 1 t/m 3 (de personenauto's) zijn korter dan 7 meter en hebben een rendement van 0,6. AMaxV wordt niet uitgerekend als de snelheid gelijk is aan 0, want dan wordt in de berekening gedeeld door 0. Als de snelheid gelijk is aan 0, wordt de maximale acceleratie MaxA toegepast. MaxA is tevens de begrenzing van AMaxV. Tot slot wordt de maximale acceleratie ook nog begrensd door de maximale acceleratie ter plaatse van snelheidsonderdrukking (amax_v).

```
#ifdef SLOPES
    PhysicalLaneInfo * pli =
        (PhysicalLaneInfo *) (GetSection (RO_PHYS_BOUND) -> GetExtras ());
    float slope = pli -> Slope (Lane ());
    float amax_slope;
    float specificpower = vi -> ThisSpecificPower ();
    float airresistancecoeff = vi -> AirResistanceCoeff () / 1000;
    float speed = vi -> GetSpeed ();
    float yield = vi -> Length () > 7 ? 0.9 : 0.6; // 7: min. length of truck
    float retval;
#endif // SLOPES

#ifdef SLOPES
    if (speed < 0.0001)
        amax_slope = vi -> MaxA ();
    else
    {
        amax_slope = yield * specificpower / speed
            - airresistancecoeff * speed * speed
            - (0.006 + slope) * 9.81;
        // 0.006: rolling resistance
        // 9.81: g
        if (vi -> MaxA () < amax_slope)
            amax_slope = vi -> MaxA ();
    }
    if (vi -> PrefV () > AimSpeed ())
    {
        float amax_v = (1.0 - 0.9 * vratio * vratio) * vi -> MaxA ();
        if (amax_v < amax_slope)
            amax_slope = amax_v;
    }
    retval = amax_slope;
    return (retval);
#else // SLOPES
    return ((1.0 - 0.9 * vratio * vratio) * vi -> MaxA ());
#endif // SLOPES
```

MoveForward

In de functie MoveForward wordt het voertuig een tijdstap vooruit gezet. Na een aantal controles (aanrijding, negatieve snelheid en snelheid boven de wenssnelheid) wordt aan het eind van de functie gecheckt of het voertuig door een helling wordt afgeremd. Dit is het geval als de in MoveForward berekende acceleratie (Acceleration) groter is dan de maximale acceleratie (AMaxV). De nieuwe acceleratie wordt dan de maximale acceleratie AMaxV. Hiermee wordt de nieuwe snelheid (speed) en positie (position) van het voertuig berekend.

```
#ifdef SLOPES
    if (Acceleration > Vehicle -> AMaxV ())
    {
        float t = timestepsize - t_react;
        Acceleration = Vehicle -> AMaxV ();
        speed = currentspeed + Acceleration * (timestepsize - t_react);
        position = Vehicle -> Position () + currentspeed * timestepsize
            + 0.5 * Acceleration * (t * t);
    }
#endif // SLOPES
```

PerformLanechange

In PerformLanechange wordt bepaald of een strookwissel kan worden toegepast. Hiervoor wordt een bepaald risico (a_risk) gehanteerd. Om het strookwisselen op hellingen voor personenauto's (voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3) te stimuleren, is het geaccepteerde risico afhankelijk gemaakt van het hellingspercentage. Dit treedt in werking bij hellingspercentages groter dan 1 ($slope > 0.01$).

```
#ifdef SLOPES
    PhysicalLaneInfo * pli =
        (PhysicalLaneInfo *) (Vehicle -> GetSection (RO_PHYS_BOUND) ->
        GetExtras ());
    float slope = pli -> Slope (Vehicle -> Lane ());
    float n = 100.0 * slope;
    if (n < 1.0)
        n = 1;
    a_risk = (1 - pow(ratio,n)) * vi -> MaxLCD ();
#else // NOT SLOPES
    a_risk = (1 - ratio) * vi -> MaxLCD ();
#endif // SLOPES
```


Bijlage 3. Beschrijving van het voertuigmodel SimVra+

[Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998]

Inleiding

Uit onderzoek van Rijkswaterstaat [Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1997] is gebleken, dat er in het buitenland geen geschikte simulatieprogramma's ontwikkeld zijn die het snelheidsverloop van individuele voertuigen op hellingen kunnen simuleren. Daarom heeft Rijkswaterstaat besloten om het door haar ontwikkelde en verouderde simulatieprogramma SimVra te verbeteren tot wat uiteindelijk het programma SimVra+ is geworden. SimVra+ is een simulatiemodel (ontwikkeld door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat) waarin het snelheidsverloop van voertuigen (vrachtwagens) kan worden gesimuleerd. SimVra+ gebruikt hiervoor een groot aantal voertuigtechnische aspecten zoals de luchtweerstand, de rolweerstand, het motorvermogen, het koppel, de transmissie en het rendement van motor en de overbrenging. Deze aspecten zullen verder niet worden besproken.

Invoergegevens

De invoergegevens van SimVra+ hebben betrekking op de weg, het voertuig, de omstandigheden en het systeem.

De invoergegevens met betrekking tot de weg zijn lengte, hoogte en boogstraal en kunnen zowel handmatig of als bestand worden ingevoerd. Ook kunnen opgeslagen bestanden (MOSS- of ASCII-bestanden) worden opgevraagd. Een weg kan worden onderverdeeld in wegvakken met elk zijn eigen maximumsnelheid.

De voertuiggegevens kunnen op een aantal manieren worden ingevoerd:

- Het standaardvoertuig:
Het standaardvoertuig in SimVra+ is het maatgevende voertuig dat door Rijkswaterstaat gebruikt wordt bij het bepalen van het maximale hellingspercentage en de maximale hellingslengte. De richtlijn hierbij is, dat het snelheidsverval op een helling maximaal 20 km/h mag zijn. Het standaardvoertuig is het 15-percentiel-voertuig, waarmee bedoeld wordt, dat 15% van alle vrachtwagens trager is dan dit voertuigtype (zie paragraaf 2.2.2)
- Standaard aangepast:
Ook kan in SimVra+ een voertuig met een andere percentielwaarde dan 15% worden opgevraagd. De ondergrens van deze verdeling is het 1-percentielvoertuig. De bovengrens vormt het 50-percentielvoertuig, omdat bij praktijkmetingen de vrachtwagens die geen snelheidsverval ondervonden enkel geregistreerd konden worden, maar verder niet konden worden gebruikt bij het bepalen van de verdeling van het specifieke vermogen.
- Standaard per wegtype:
Per wegtype kan het standaardvoertuigtype licht verschillen ten opzichte het normale standaardvoertuigtype. In SimVra+ wordt onderscheid gemaakt in *achterlandverbinding grensprovincies*, *achterlandverbinding overig*, *hoofdtransportas grensprovincies* en *hoofdtransportas overig*.
- Standaard afhankelijk van verkeerssamenstelling:
Ook kan afhankelijk van de verkeerssamenstelling het standaardvoertuig worden aangepast. Hierbij kan de verhouding middelzware/zware voertuigen worden opgegeven.
- Voorbeeldvrachtauto:
Van een aantal vrachtwagens uit de praktijk zijn de voertuigkenmerken in SimVra+ op te vragen. Van deze vrachtwagens kan ook de beladingsgraad worden gevarieerd.
- Gedefinieerde vrachtauto:
Ten slotte kunnen ook nog handmatig (vracht-)autogegevens worden ingevoerd. Deze voertuiggegevens zijn echter wel zeer specifiek.

De invoergegevens met betrekking tot de omstandigheden zijn beginsnelheid, windrichting en windkracht en toestand van het wegdek (droog, nat of glad). Deze wind- en wegdekgegevens hebben, met uitzondering van een glad wegdek, slechts een gering effect op het snelheidsverloop van de voertuigen.

Bij de invoergegevens met betrekking tot het systeem kunnen een aantal simulatie-invoergegevens aangepast worden.

Kalibratie en validatie

SimVra+ is gekalibreerd met meetgegevens uit een praktijkproef met de Mercedes Actros 4140. De meting bestond uit acceleratie- en deceleratiemetingen.

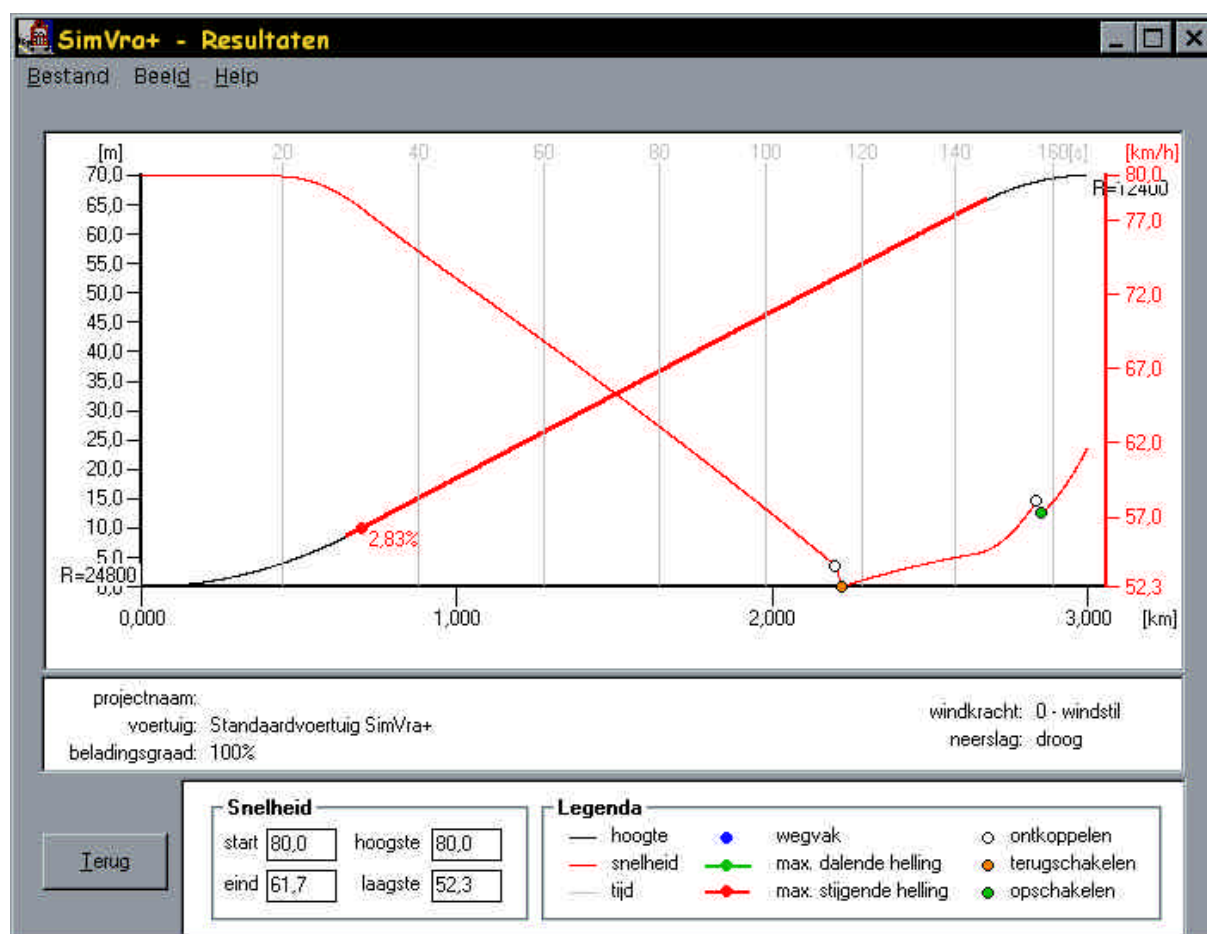
Bij de acceleratiemetingen is gemeten hoeveel tijd nodig was om achtereenvolgens snelheden te bereiken van respectievelijk 20, 30, 40 en 50 km/h. Het grootste verschil tussen de simulatieresultaten van SimVra+ en de meetresultaten was 12%. Bij het bereiken van de snelheid van 20 km/h bleek dit verschil het grootst, als gevolg van het samenvallen van het moment van schakelen en de tijdsmeting. Zou men corrigeren voor dat effect dan zou de simulatie nog slechts 6% afwijken.

Bij de deceleratiemetingen werd de snelheid gemeten na intervallen van 10 seconden. Hieruit bleek, dat het grootste verschil tussen de simulatieresultaten van SimVra+ en de meetresultaten 3% bedroeg.

SimVra+ is vervolgens gevalideerd met resultaten van een computerprogramma van DAF. DAF beschikt over een gedetailleerd voertuigmodel voor voertuigtechnische toepassingen (TOPEC). Hieruit bleek een goede overeenkomst van de resultaten uit beide modellen.

Uitvoer

De uitvoer van SimVra+ is de behaalde maximale snelheid over het verloop van een afgelegde weg en in het verloop van de tijd uitgezet in een grafiek. De uitvoergegevens kunnen als ASCII-bestand worden weggeschreven.



Bijlage 4. Voertuigkarakteristieken

(bron: AVV, 1998)

- Ongelede vrachtauto (vrachtauto solo) en gelede vrachtauto (vrachtauto met aanhangwagen en trekker met oplegger)
- Specifiek vermogen, breedte, hoogte en massa

Bijlage 5. De log-normale verdeling van de specifieke vermogens van vrachtwagens

De histogrammen van de specifieke vermogens van vrachtwagens in de gegevens van AVV [1998] (zie bijlage 4) lijken de vorm van een log-normale verdeling te hebben. Om te analyseren of deze verdeling ook inderdaad aangenomen kan worden, is de Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-fit Test [Mood e.a., 1982] uitgevoerd. Deze test verloopt in de volgende stappen:

1. Het uitlezen²⁰ van de histogrammen van AVV [1998] (zie bijlage 4);
2. Bepaling van het gemiddelde en de standaardafwijking van de afgelezen waarden;
3. Een controle op afleesfouten door middel van het vergelijken van het gemiddelde en standaard afwijking met het door AVV berekende gemiddelde en standaardafwijking;
4. Het genereren van een grote dataset (bijvoorbeeld $n=1000$);
Hierbij wordt n maal een random getal tussen 0 en 1 gegenereerd uit een uniforme verdeling. Aan de hand van de afgelezen kansverdeling uit de histogrammen van AVV wordt de waarde van de trekking bepaald.
5. Het uitvoeren van de Kolmogorov-Smirnov-Test.
Hierbij wordt de Kolmogorov-Smirnov-afstand (K-S-afstand) bepaald. Deze K-S-afstand kan procentueel worden uitgedrukt. Wanneer dit percentage kleiner is dan 10%, wordt aangenomen dat de gegenereerde dataset verdeeld is volgens een log-normale verdeling.

Omdat bij het genereren van de dataset een randomvariabele wordt gebruikt, is de uitkomst van de K-S-test stochastisch. Om een voldoende betrouwbare uitkomst te verkrijgen, wordt de K-S-test een groot aantal keren herhaald ($n=100$) en de uitkomsten gemiddeld. Uit dit gemiddelde wordt geconcludeerd of aangenomen mag worden of de specifieke vermogens van vrachtauto's lognormaal verdeeld zijn.

In tabel B5.1 zijn de afgelezen waarden weergegeven. Te zien is, dat de afgelezen waarden goed overeenkomen met de waarden volgens AVV. De verschillen worden veroorzaakt door afleesfouten en door de onnauwkeurigheid van het histogram.

B5.1. Gemiddelde en standaardafwijking van het specifiek vermogen (in kW/ton) van het histogram van het onderzoek van AVV en na aflezen van dit histogram			
	Ongelede vrachtauto	Vrachtauto met aanhangwagen	Trekker met oplegger
Gemiddelde histogram (AVV)	13,04	9,36	10,14
Gemiddelde na aflezen	12,99	9,30	10,07
Standaardafwijking (AVV)	4,97	4,29	4,91
Standaardafwijking na aflezen	4,98	4,06	4,79

Bij het genereren van de datasets voor de ongelede vrachtwagens zijn per dataset 1000 trekkingen uitgevoerd. Bij het genereren van de datasets van gelede vrachtauto's is zijn per dataset 250 trekkingen gedaan uit het histogram van de vrachtauto met aanhanger en 750 trekkingen uit het histogram van de trekker met oplegger. Dit is gedaan vanwege de verhouding 1:3 tussen het aantal vrachtwagens met aanhanger en trekkers met oplegger.

Uit 100 K-S-tests blijkt dat de gemiddelde K-S-afstand (in %) bij de gelede vrachtauto's hoger ligt dan bij de ongelede vrachtauto's (zie tabel B5.2 en B5.3).

²⁰ De oorspronkelijke gegevens zijn helaas niet beschikbaar.

Tabel B5.2. K-S-afstanden ongelede vrachtauto's [%]

4,7	4,0	6,3	6,3	6,8	6,4	5,4	7,3	6,3	4,9	6,0	5,8
5,3	5,2	6,2	6,2	6,2	5,3	6,7	6,4	5,7	6,6	5,9	6,9
5,8	6,1	6,2	6,7	6,2	5,5	5,0	7,0	4,7	4,9	4,1	5,0
6,8	4,9	5,4	7,6	5,6	5,1	6,5	5,0	6,5	5,2	5,4	5,8
6,4	6,3	5,4	6,2	5,9	4,3	4,2	5,3	7,7	5,4	5,9	8,0
6,9	8,4	5,6	6,0	4,7	6,0	5,8	7,2	5,0	5,1	6,5	5,6
6,5	5,5	5,7	6,2	7,4	5,4	5,5	5,9	6,3	6,7	8,0	5,8
5,4	5,9	6,0	5,7	5,9	6,4	5,4	5,6	5,5	5,5	5,6	6,6
5,0	6,8	5,0	6,4								
gem = 5,9											

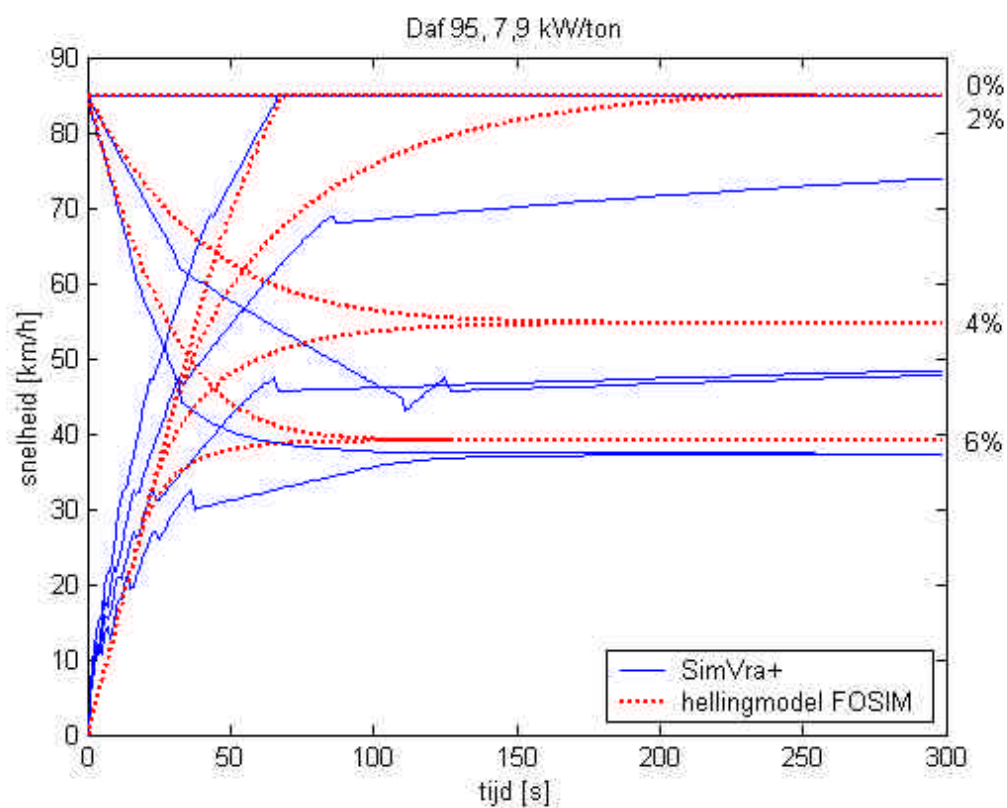
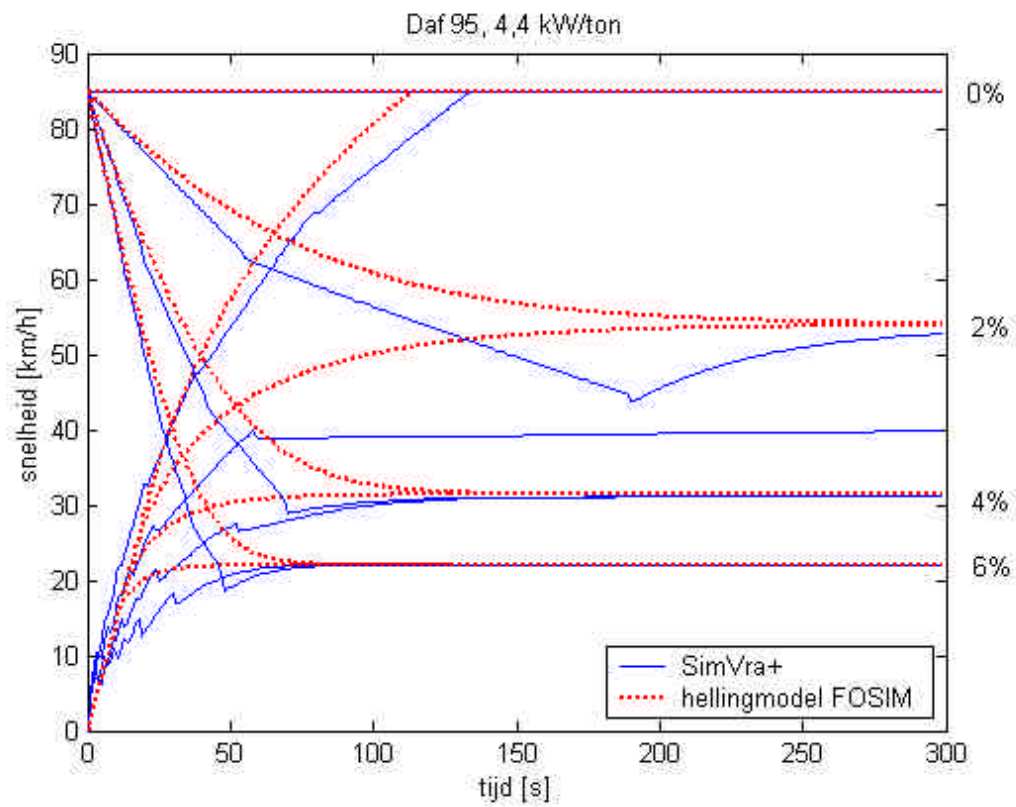
Tabel B5.3. K-S-afstanden gelede vrachtauto's [%]

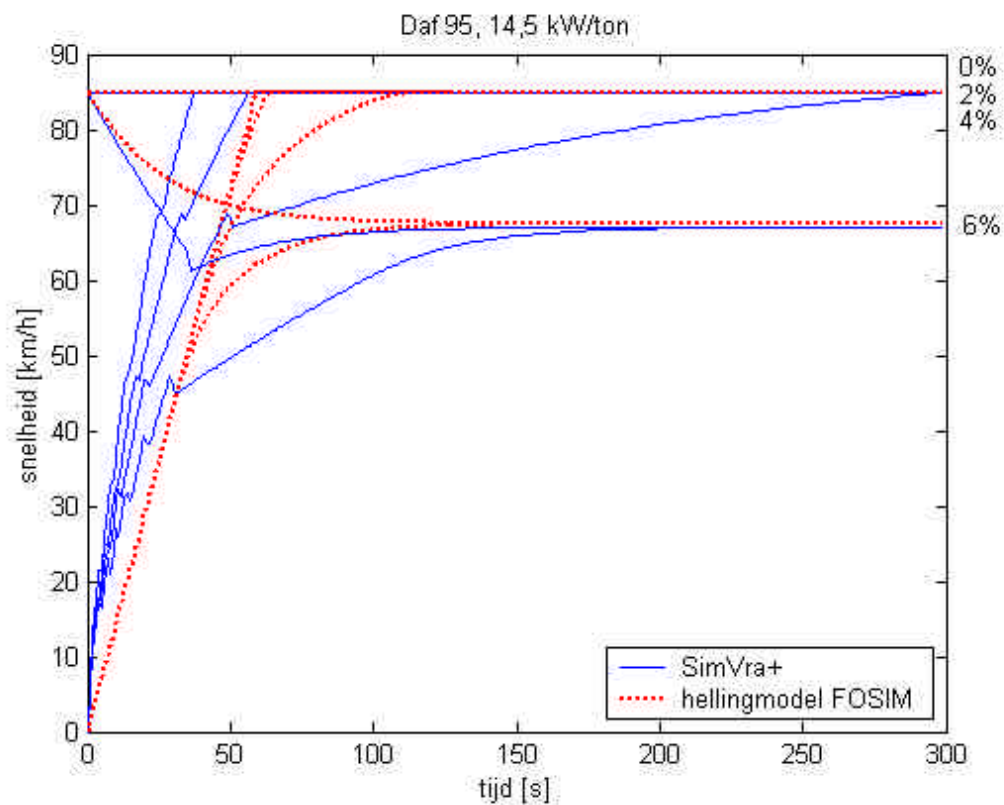
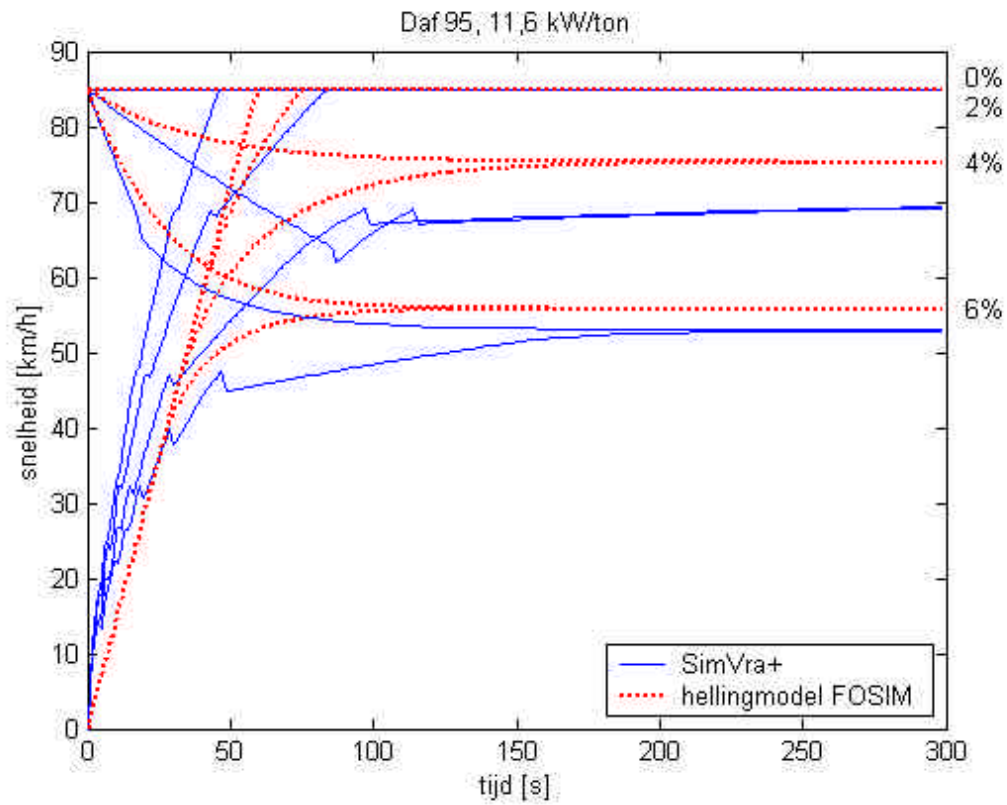
10,0	11,4	10,3	8,6	11,7	9,4	10,4	10,6	10,7	9,0	10,9	9,8
11,0	9,4	11,8	10,5	10,0	10,6	9,3	10,4	12,5	8,8	9,5	10,8
9,3	8,9	11,2	10,6	8,7	9,3	9,6	10,2	10,4	9,6	10,5	9,1
10,6	10,8	10,2	9,7	11,1	9,7	10,4	10,2	9,9	10,3	11,0	9,1
10,6	9,8	9,7	9,9	10,3	9,9	9,7	10,4	11,4	10,8	11,7	9,9
9,3	9,3	11,5	9,2	9,8	8,9	10,6	10,8	11,2	11,3	9,3	8,7
10,7	9,6	10,5	9,1	10,2	11,2	10,4	9,8	10,6	9,0	10,4	11,5
10,4	9,0	10,0	10,6	10,9	9,8	9,4	10,2	11,1	9,6	9,7	11,1
11,4	10,3	12,0	9,4								
gem = 10,2											

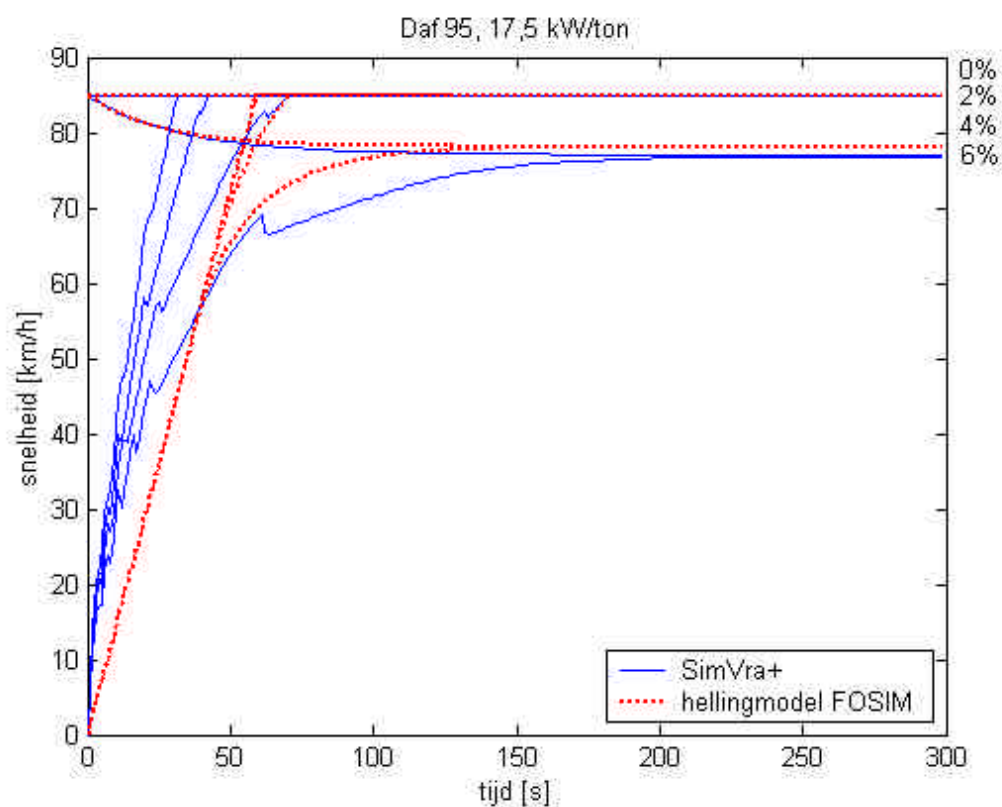
De gemiddelde K-S-afstand van de gelede vrachtauto's valt net buiten de marge van 10%. Desondanks wordt een log-normale verdeling van de specifieke vermogens aangenomen.

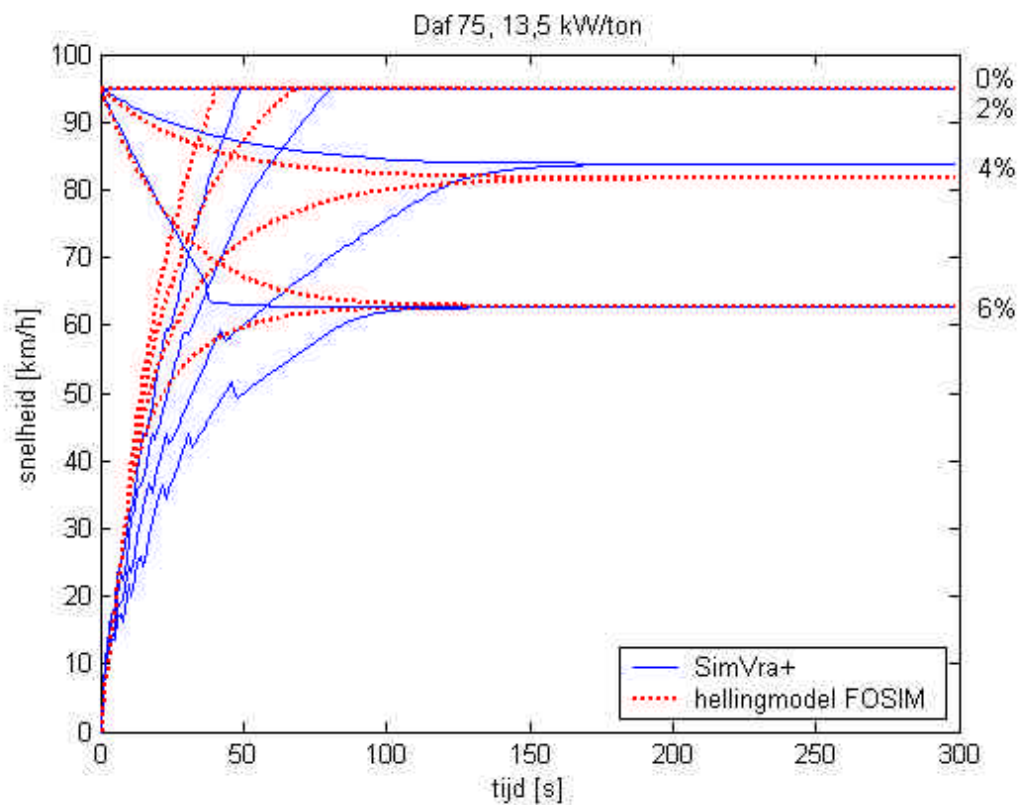
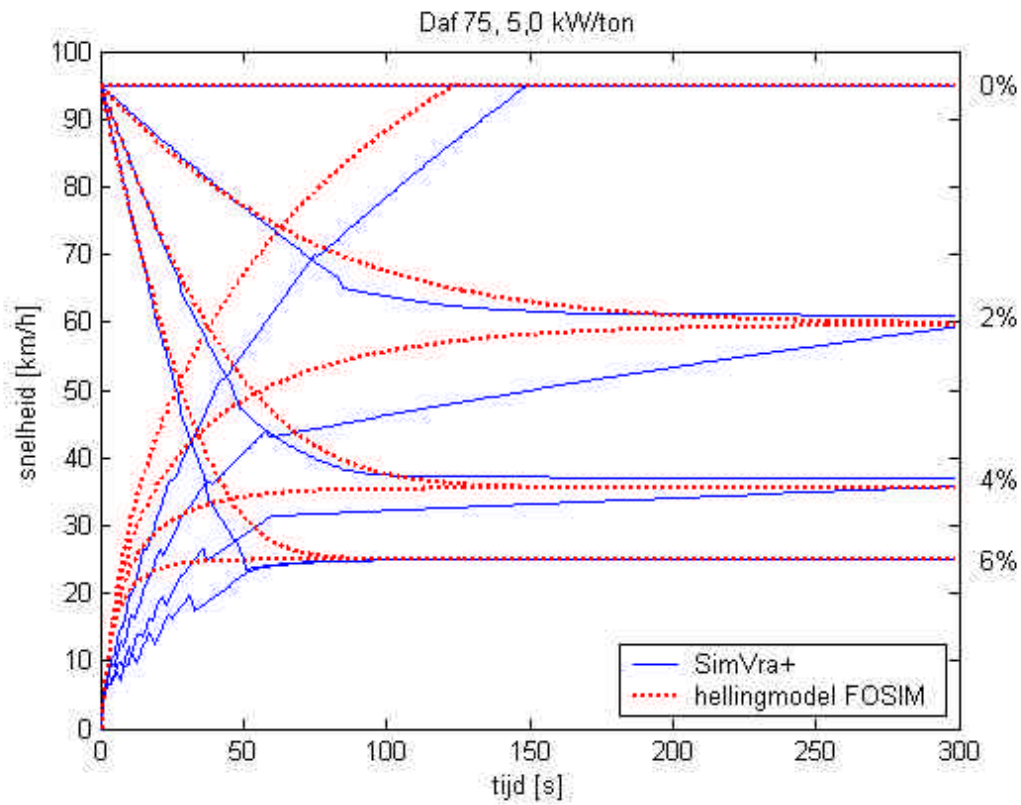
Bijlage 6. Validatie van het hellingmodel met SimVra+

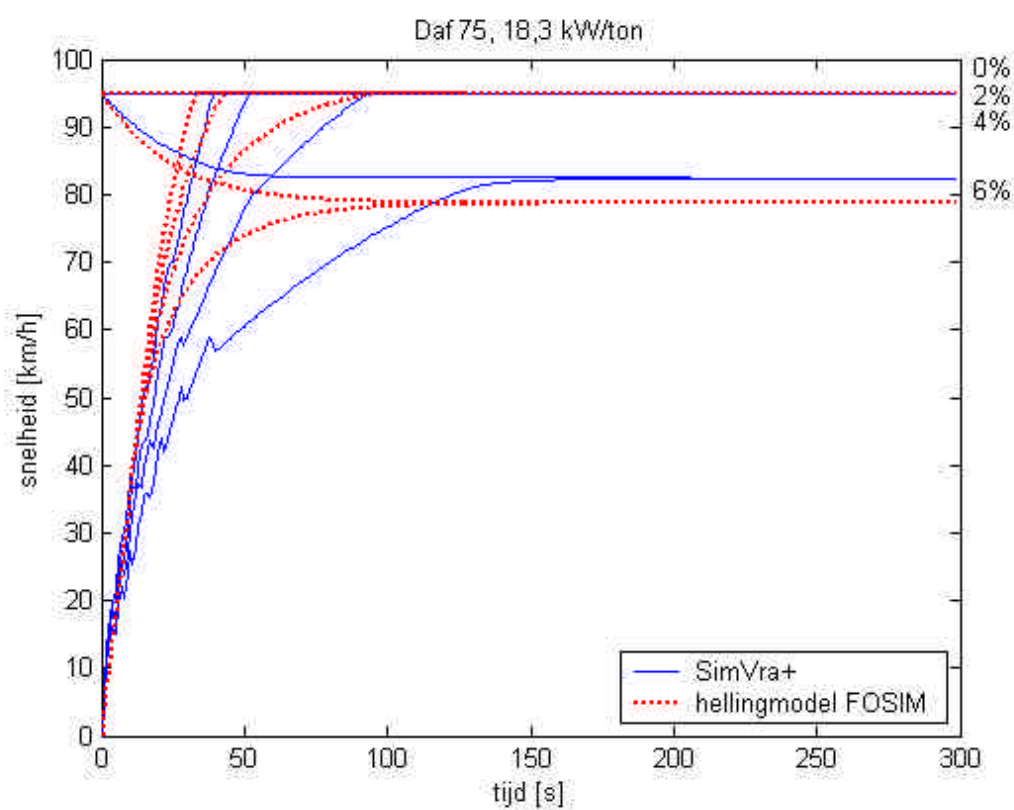
- Daf 95: 4.4, 7.9, 11.6, 14.5 en 17.5 kW/ton
- Daf 75: 5.0, 13.5 en 18.3 kW/ton
- 0, 2, 4 en 6%
- Acceleratie en deceleratie











Bijlage 7. t-verdeling

(bron: Botma, 2000)

Bijlage 8. F-verdeling

(bron: Botma, 2000)

Bijlage 9. Pogingen om FOSIM-Hellingen te verbeteren

Er is gepoogd om de verschillen tussen de meetresultaten en de simulatieresultaten te verkleinen. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op deze pogingen, waarbij wordt vermeld waarom ze niet tot het gewenste resultaat hebben geleid.

Verandering van de invoergegevens

De volgende invoergegevens in de simulatie met FOSIM-Hellingen zijn veranderd:

- Het vrachtwagenpercentage is verhoogd;
- Het hellingspercentage is verhoogd;
- Het inhaalverbod voor vrachtwagens is opgeheven;
- De gemiddelde specifieke vermogens van voertuig-bestuurdercombinatie 4 en 5 is verlaagd;
- De startwaarde van de randomgenerator is veranderd.

Geen van deze veranderingen leiden tot de gewenste resultaten van FOSIM-Hellingen ten aanzien van de meetgegevens. Bij sommige veranderingen is een kleine verlaging van de gesimuleerde capaciteit te bereiken, maar niet voldoende om de capaciteit volgens de metingen te benaderen.

Het risico bij het strookwisselen

In paragraaf 3.4.1. is het huidige strookwisselmodel voor wat betreft het geaccepteerde risico bij het strookwisselen behandeld. In paragraaf 3.4.2. een aanpassing voor de berekening van dit risico geïntroduceerd.

Een mogelijkheid is om op hellingen de maximale strookwisseldeceleratie (MaxLCD) toe te laten. Echter, dit leidt wel tot iets meer strookwisselingen, maar niet tot een significante capaciteitsverlaging op de helling.

De maximale strookwisseldeceleratie

Een verhoging van de maximale strookwisseldeceleratie van het voertuigtype (MaxLCD) leidt tot een groter aantal strookwisselingen, met name op de helling. Echter, met name bij lage intensiteiten en bij lage snelheden worden ongeoorloofde risico's geaccepteerd, wat resulteert in aanrijdingen in de simulatie. Dit is niet de bedoeling en ook niet realistisch. De aanrijdingen kunnen voor een gedeelte worden tegengegaan door de maximale deceleratie van de voertuigen te verhogen. Deze aanpassingen zijn echter niet bevorderlijk voor de validiteit van FOSIM-Hellingen wat betreft de invoerbestanden.

Het remmen voor langzame voertuigen op de rechter rijstrook

In FOSIM is gemodelleerd, dat bestuurders afremmen wanneer zij een voertuig op de rechter rijstrook met meer dan 18 km/h snelheidsverschil inhalen. Dit gedrag gaat pas in als het langzame voertuig langzamer dan 72 km/h rijdt [De Leeuw, 2000].

Dit bestuurdersgedrag is bedoeld voor het modelleren van het bestuurdersgedrag bij het passeren van een file. Op hellingen is hiervan geen sprake wanneer een voertuig wordt afgeremd door de helling. Voor de validiteit van FOSIM-Hellingen wat betreft de invoerbestanden (de vlakke wegvaktypen) is deze modellering echter essentieel.

Het is mogelijk om een voorwaarde in te brengen waarbij dit bestuurdersgedrag niet op hellingen voorkomt. Maar de vraag is dan hoe een in- of uitvoeging op een hellende weg kan worden gemodelleerd.

Overigens leidt het uitschakelen van dit bestuurdersgedrag niet tot lagere een capaciteit, integendeel. De voertuigen op de linker rijstrook rijden met een hogere snelheid langs de langzamere voertuigen op de rechter rijstrook. De voertuigen op de rechter rijstrook kunnen

daardoor minder gemakkelijk inhalen, omdat de hiaten kleiner zijn. Er is dan nog minder sprake van moving bottlenecks en van het capaciteitstrechtereffect.

Aanvulling (achteraf toegevoegd)

Inleiding

Onderzoek naar de verkeersafwikkeling op hellingen ten behoeve van FOSIM heeft geresulteerd in een hellingmodel, geïmplementeerd in FOSIM: FOSIM-Hellingen. De uitkomsten van FOSIM-Hellingen kwamen echter niet overeen met meetresultaten afkomstig van de A50. Deze aanvulling beschrijft een verbetering van FOSIM-Hellingen, waarbij het bestuurdersgedrag tijdens congestie is meegenomen (zie [Dijker e.a., 1998]).

Theorie

Tijdens congestie rijden bestuurders (van personenauto's) minder alert, waardoor grotere volgafstanden worden aangehouden. Dit resulteert in lagere capaciteiten. Op een helling worden de gemiddelde snelheden lager, waardoor (een gedeelte van) de bestuurders dit als congestie ervaren en dit afwijkende volgedrag gaan vertonen.

Voorstel voor modelaanvulling

Wanneer de snelheid van de personenauto's in FOSIM-Hellingen onder de 70 km/h komt te liggen, veranderen de waarden van de volgfactoren z_2 en z_3 . In tabel 1 zijn de volgfactoren z_2 en z_3 tijdens boven de 70 km/h (geen congestie) en onder de 70 km/h (congestie) weergegeven. Deze zijn overgenomen uit Dijker e.a. [1998].

Tabel 1. Volgfactoren z_2 en z_3 van voertuig-bestuurdercombinatie 1 t/m 3 boven de 70 km/h (geen congestie) en onder de 70 km/h (congestie)						
Volgfactor	Voertuig- bestuurdercombinatie 1		Voertuig- bestuurdercombinatie 2		Voertuig- bestuurdercombinatie 3	
	> 70 km/h	≤ 70 km/h	> 70 km/h	≤ 70 km/h	> 70 km/h	≤ 70 km/h
z_2 [s]	0.56	1.48	0.72	1.44	1.28	1.16
z_3 [s ² /m]	0.0050	0.0013	0.0050	0.0039	0.0050	0.0441

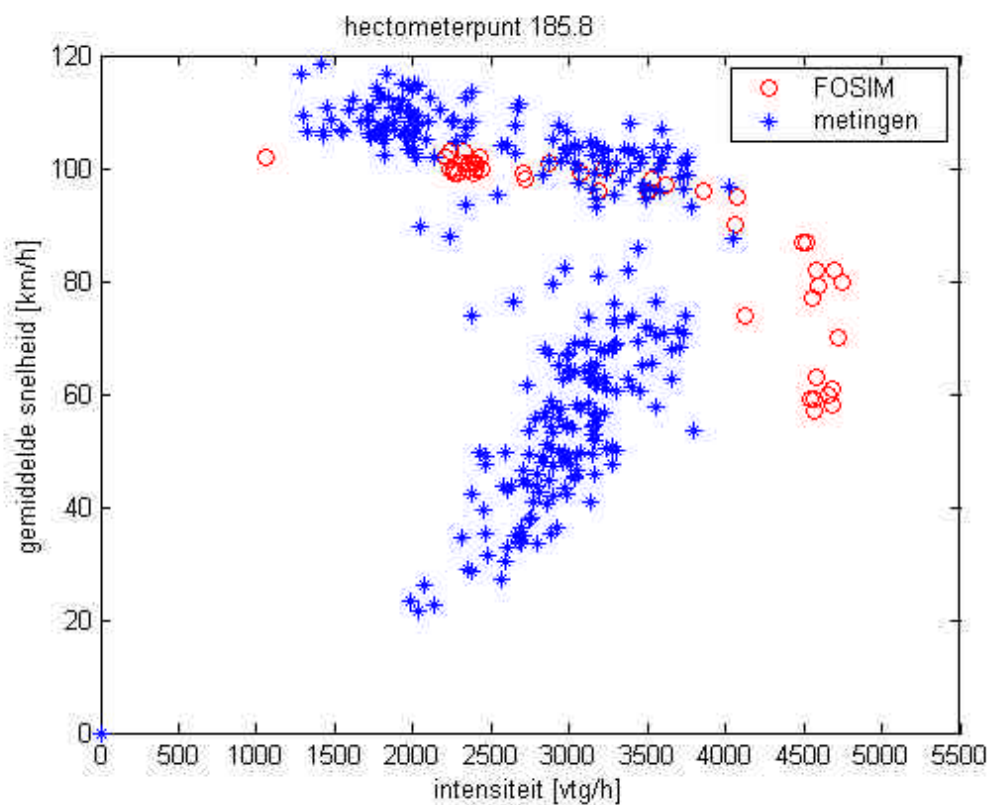
Verder kan in FOSIM-Hellingen de voorwaarde worden toegevoegd, waarbij op een helling de voertuigen op de linker rijstrook niet meer afremmen voor langzamere voertuigen op de rechter rijstrook.

Resultaten

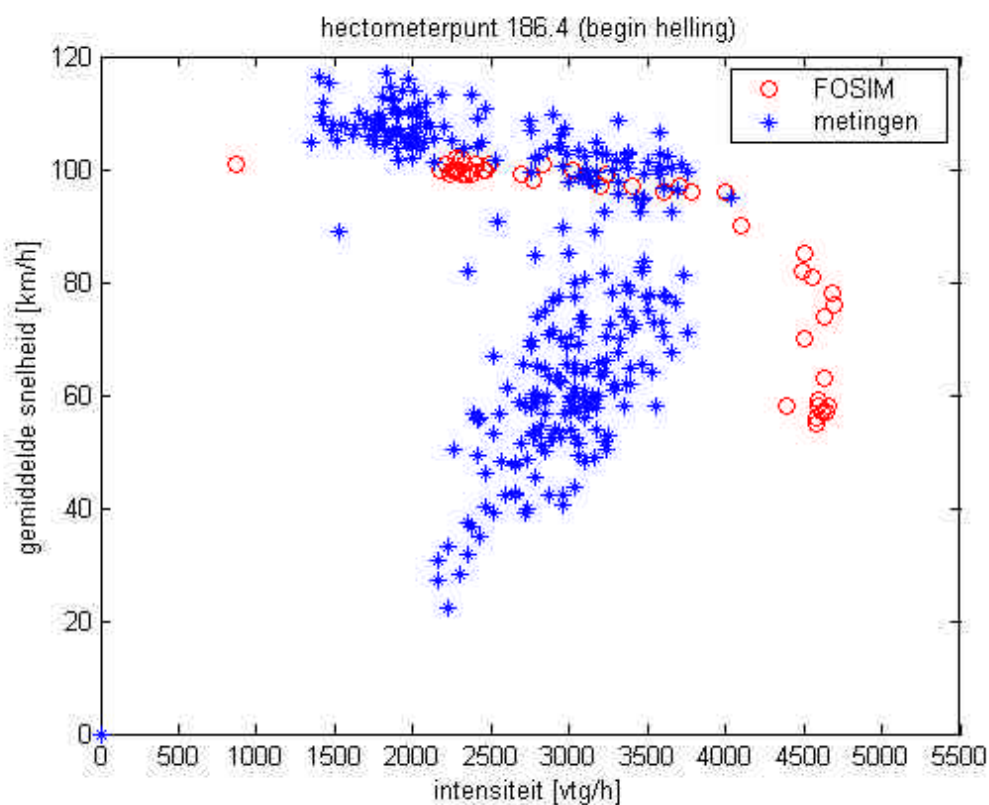
In figuur 1a t/m e zijn de snelheids-instensiteitsdiagrammen weergegeven zoals die in het afstudeerrapport worden gepresenteerd. In figuur 2a t/m e worden de snelheids-instensiteitsdiagrammen weergegeven die volgen uit deze aanvulling. Hierbij dient opgemerkt te worden dat bij de aanvulling de vraagintensiteit oploopt tot 4000 vtg/h, terwijl in het onderzoek de vraagintensiteit tot aan 4600 vtg/h is opgevoerd. De verhouding tussen de linker- en rechterrijstrook is wel gehandhaafd.

Er is te zien dat de aanvulling een duidelijke verbetering is, met name wat betreft de snelheids-instensiteitsdiagrammen stroomopwaarts van de bottleneck (ongeveer rond hectometerpunt 188,0). Stroomafwaarts van de bottleneck zijn de gemiddelde snelheden nog wat te laag. Bovendien is de capaciteit volgens FOSIM-Hellingen nu iets lager dan de metingen. Dit zou wellicht opgelost kunnen worden door de grenssnelheid waarbij het afwijkende volgedrag weer wordt opgeheven lager te kiezen dan 70 km/h.

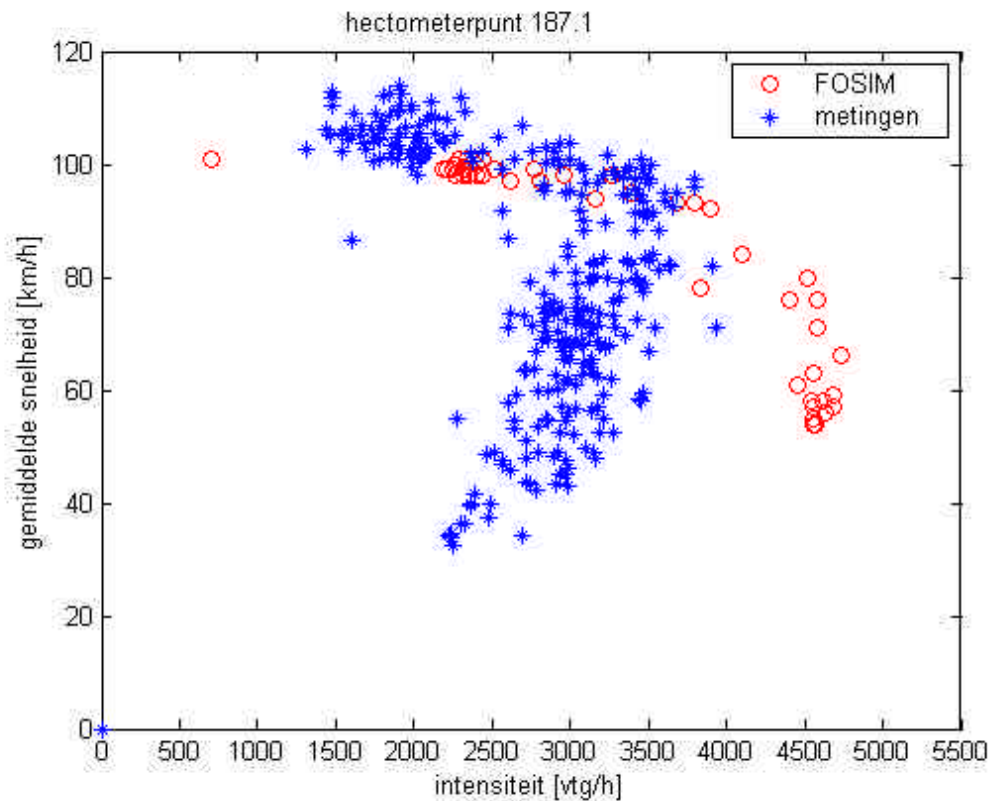
Overigens wordt aanbevolen de rijstrookverdelingen opnieuw te vergelijken, omdat deze ook enigszins zijn veranderd.



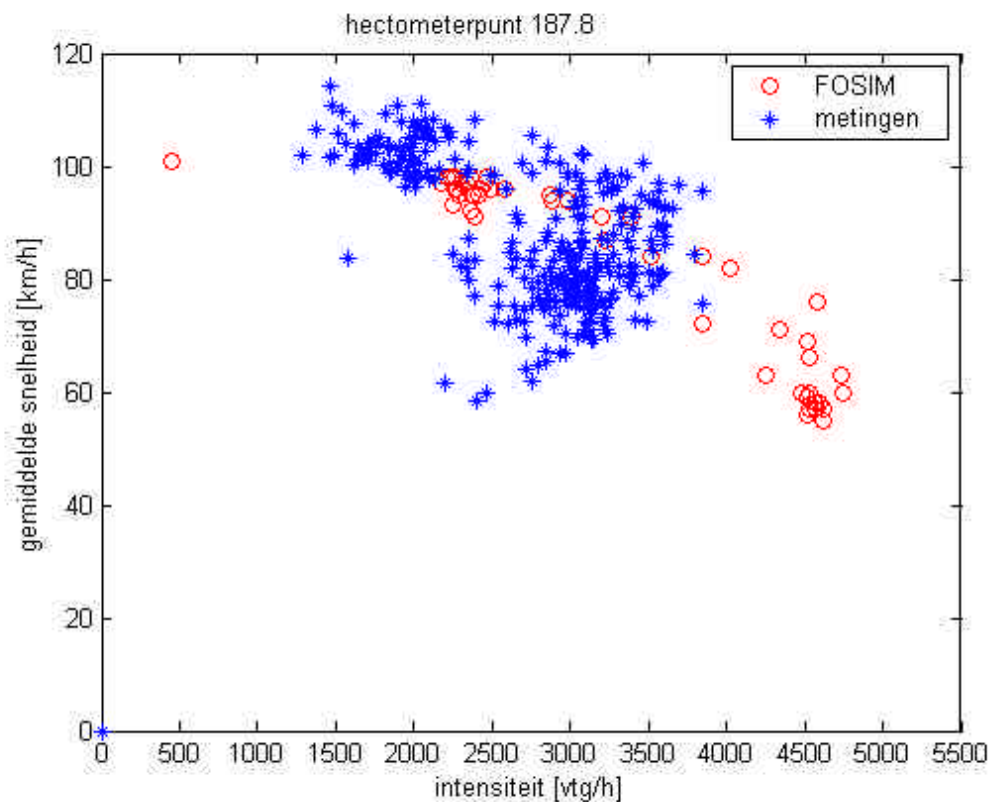
Figuur 1a. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 185.8



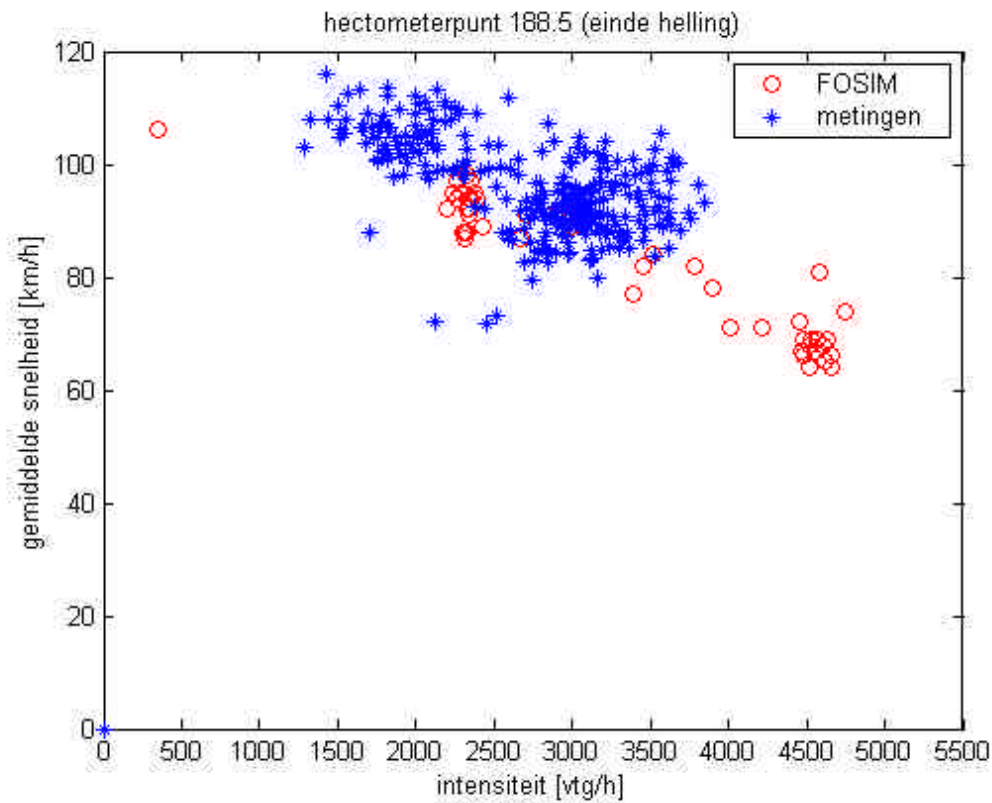
Figuur 1b. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 186.4, het begin van de helling



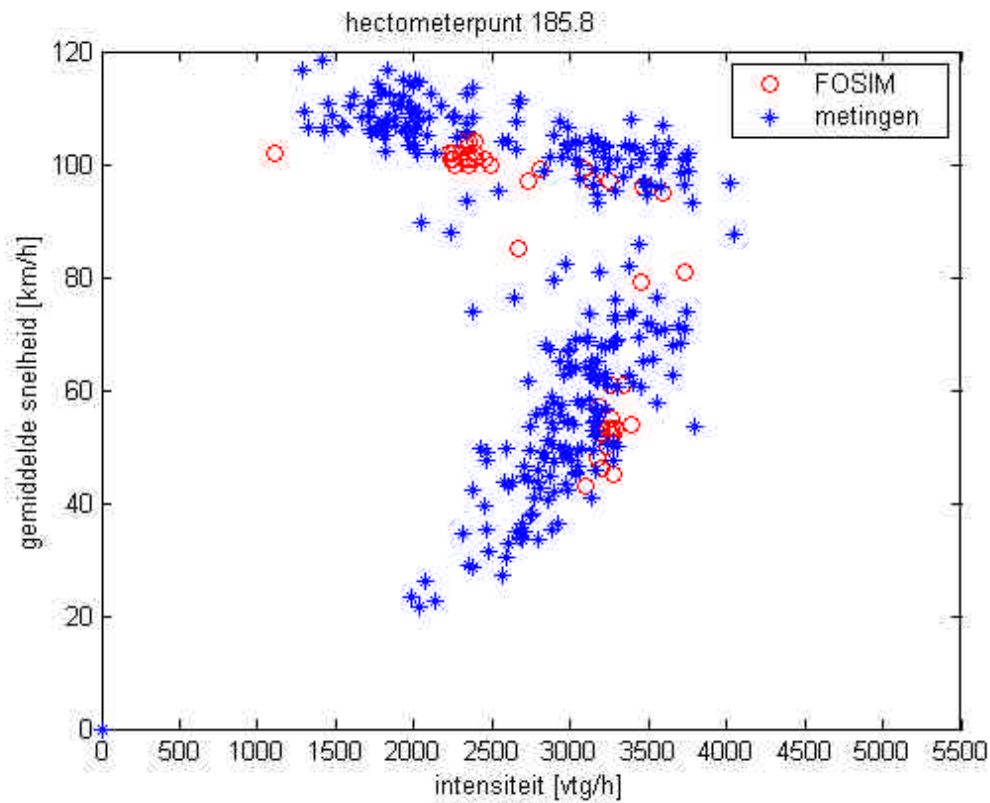
Figuur 1c. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 187.1



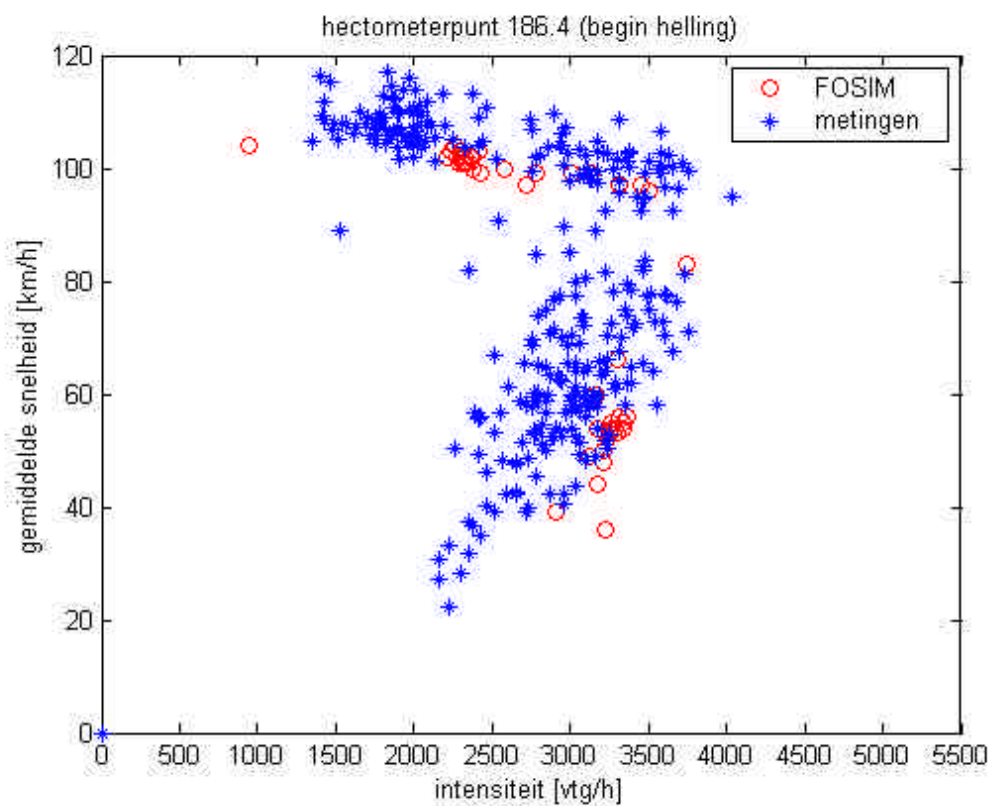
Figuur 1d. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 187.8



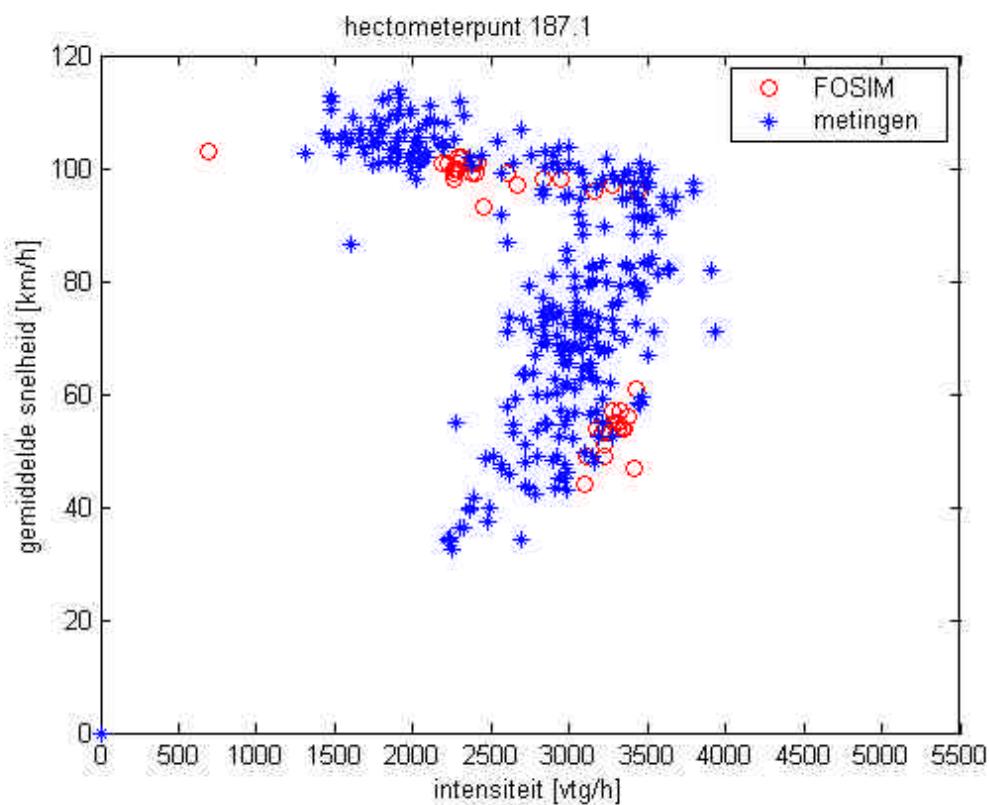
Figuur 1e. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 188.5, het einde van de helling



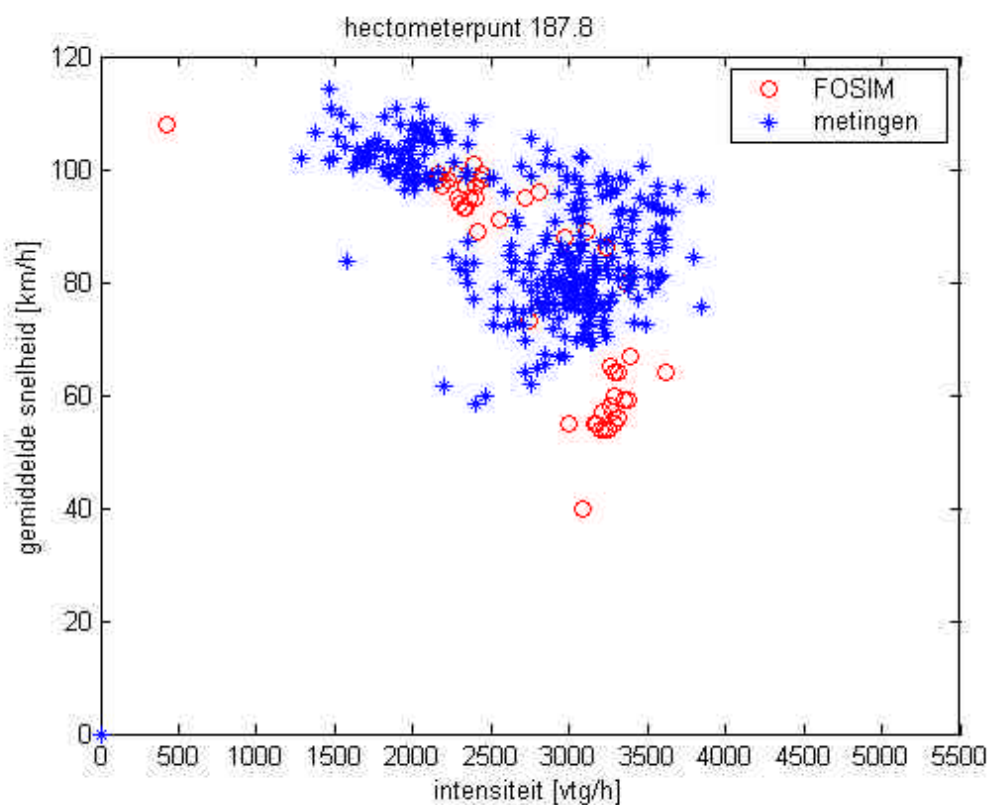
Figuur 2a. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 185.8



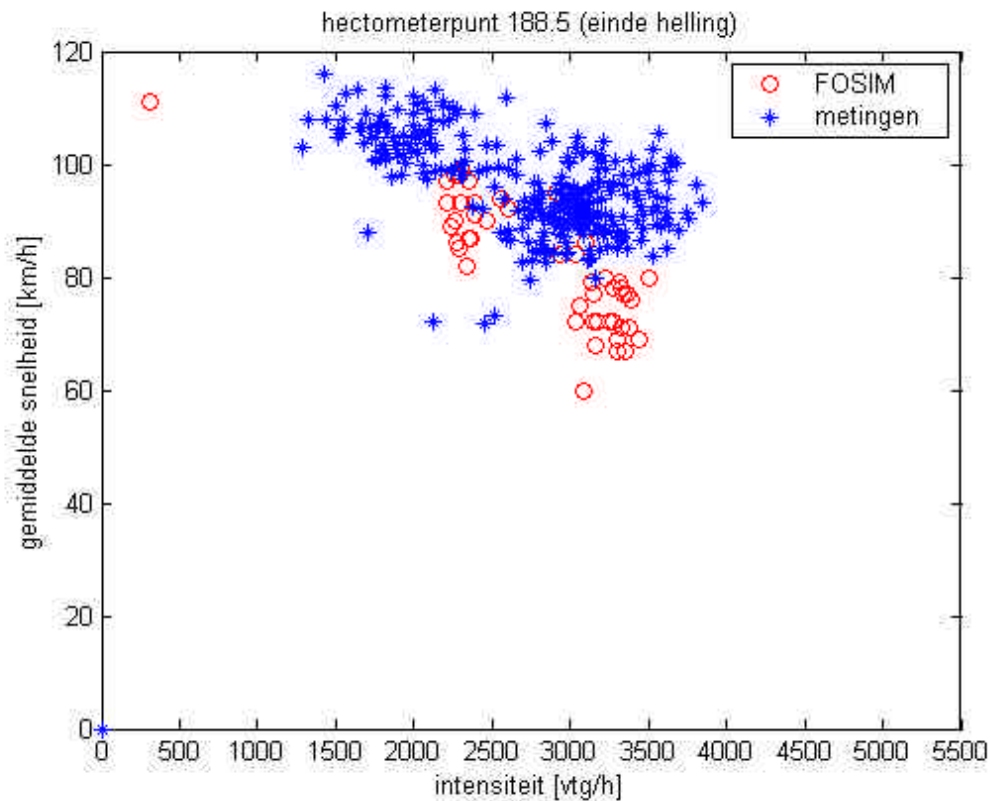
Figuur 2b. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 186.4, het begin van de helling



Figuur 2c. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 187.1



Figuur 2d. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 187.8



Figuur 2e. u(q)-diagrammen van de metingen en de simulatie met FOSIM-Hellingen op hectometerpunt 188.5, het einde van de helling

Referenties

Dijker, T., P.H.L. Bovy, en R.G.M.M. Vermijs, 'Car-following under congested conditions, empirical findings'. In: Transportation Research Board, *Transportation Research Record no. 1644*. Washington D.C.: National Research Council, 1998, p. 20 t/m 28.