

Langsonvlakheid van wegen

”relatie van comfort tot restzettingseisen”

November 2007

J.J.S.A. Coremans



Langsonvlakheid van wegen

“Relatie van comfort tot restzettingseisen”

Eindrapport

J.J.S.A. Coremans

Afstudeercommissie:

prof. dr. ir. A.A.A. Molenaar

dr.ir. M. Huurman

ir. S. Robroch

ir. J.P.Oostveen

ir. L.J.M. Houben

Afstudeerhoogleraar TU Delft sectie Road and Railway Engineering

Begeleider TU Delft sectie Road and Railway Engineering

Begeleider Ingenieursbureau van Kleef

Begeleider TU Delft sectie Geo-engineering

Afstudeer coördinator Structural Engineering

Delft, november 2007

CT5060 MSc Thesis

Delft University of Technology

Faculty of Civil Engineering and Geosciences

Road and Railway Engineering

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van een afstudeeronderzoek bij de sectie Weg- en Railbouwkunde aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. In dit eindrapport zijn de resultaten weergegeven van het onderzoek met betrekking tot de langsonvlakheid van wegen.

Mijn dank gaat uit naar de leden van de afstudeercommissie en alle betrokkenen bij Ingenieursbureau van Kleef voor hun advies, suggesties en deskundige commentaar. Speciale dank gaat hierbij uit naar Sietse Robroch mijn dagelijks begeleider van Ingenieursbureau van Kleef.

Langs deze weg wil ik ook graag de personen bedanken die hier niet met naam en toenaam genoemd zijn, maar wel een bijdrage geleverd hebben aan het tot stand komen van dit rapport. Zonder de hulp van al deze personen zou de uitvoering van het onderzoek niet in deze vorm mogelijk zijn geweest.

Jasper Coremans
Delft, november 2007

Samenvatting

Al sinds jaar en dag wordt er onderzoek gedaan om wegen zo comfortabel mogelijk aan te leggen en comfortabel te houden. Een belangrijk onderdeel van het comfort van de weg wordt bepaald door de langsonvlakheid van een weg. Dit is vooral in Nederland van belang aangezien de ondergrond op veel plaatsen zettingsgevoelig is. Op deze zettingsgevoelige locaties is er een behoorlijke kans op restzettingsverschillen en langsonvlakheid.

Het is daarom van groot belang om de langsonvlakheid goed te kunnen controleren en bij ontwerp en aanleg al rekening te houden met een mogelijke langsonvlakheid. Momenteel zijn er eisen met betrekking tot de toelaatbare zettingen cq. restzettingsverschillen van de ondergrond en zijn er eisen die gerelateerd zijn aan het comfort van de weggebruiker. Het probleem hierbij is dat er tussen deze eisen geen directe relatie is.

Tot op heden zijn de restzettingseisen niet optimaal onderbouwd. Deze situatie wordt gegeven de nieuwe contractvormen steeds meer als ongewenst ervaren door zowel de opdrachtgever als de opdrachtnemer. Een meer objectief criterium voor de maximale toelaatbare restzettingsverschillen zal enerzijds meer houvast bieden voor de geotechnisch ontwerper en hem tevens ondersteunen bij het aantonen van de noodzaak tot bijzondere maatregelen en/of voldoende bouwduur. Anderzijds zijn er situaties mogelijk waarin grotere restzettingsverschillen onvermijdelijk blijven, zoals rond kunstwerken. Hierbij kan een objectief criterium de verhardingsadviseur ondersteunen bij zijn keuze voor een bepaalde verhardingconstructie en fasering.

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het verkrijgen van een betere relatie tussen het comfortniveau van de weg en de eisen voor restzettingen van de ondergrond van de weg.

Om dit doel te bereiken is eerst een comfortmodel opgesteld waarmee het mogelijk is om vanuit een bepaald langsprofiel het comfortniveau van een wegvak te bepalen. Met behulp van dit comfortmodel is het mogelijk om twee belangrijke comfortparameters vast te stellen.

- **a_w**
Deze comfortparameter geeft een waarde aan een wegvak die gebaseerd is op de gemiddelde versnellingen van een bestuurder over het gehele wegvak.
- **MTVV**
De MTVV geeft een waarde aan de voorkomende piekwaarde die volgen uit onvlakheden die lokaal, over een korte, optreden.

Bij het bepalen van deze parameters is rekening gehouden met de trillingen die een weggebruiker ondergaat bij het passeren van een bepaald wegvak. Er is ook rekening gehouden met de frequentie van trillingen waar het menselijk lichaam gevoelig voor is. Daarna is het comfortmodel gekalibreerd aan de hand van praktijkmeetgegevens. Hierbij is er gebruik gemaakt van een meetrapport van de N11 tussen Alphen aan den Rijn en Bodegraven. Als grenswaarde voor comfort zijn $0,5 \text{ m/s}^2$ voor de a_w en $0,8 \text{ m/s}^2$ voor de MTVV bepaald. Deze grenswaarden dienen echter als een "eerste generatie" versie te worden beschouwd. Als er daadwerkelijk met het comfortmodel gewerkt gaat worden dient er zeker verder onderzoek en dienen er meer praktijk experimenten gedaan te worden.

Op basis van het onderzoek valt uiteindelijk te concluderen dat het mogelijk is om een relatie te ontwikkelen tussen comfort- en zettingseisen. Voor verschillende standaardsituaties is aangetoond dat er een lineaire relatie bestaat tussen de comfortparameters en het over een bepaalde lengte opgetreden zettingsverschil. Hierdoor is het mogelijk om vanuit een bepaalde comfortparameter het toegestane zettingsverschil te bepalen dat over een bepaalde lengte mag optreden. Met behulp van deze gegevens zijn dan ontwerpgrafieken samen te stellen voor bepaalde standaardsituaties die afhankelijk zijn van de voertuigsnelheid. Als voorbeelden zijn de ontwerpgrafieken voor een eenmalig onvlakheid, een reeks onvlakheden en de toegestane (rest-)zettingen rond kunstwerken samengesteld. In de voorbeelden is steeds gewerkt met vier verschillende voertuigsnelheden (50, 80, 100, 120 km/h). De belangrijkste conclusie die uit de ontwerpgrafieken valt af te leiden was dat alle ontwerpgrafieken een exponentiële vorm laten zien. De grafieken gaan namelijk bij kortere lengten naar een lage constante waarde en voor grotere lengten neemt deze exponentieel toe. Verder zijn de ontwerpgrafieken zeer afhankelijk van de snelheid, bij lagere snelheden heeft het toegestane zettingsverschil veel sneller een exponentiële trend dan bij de hogere snelheden.

De resultaten zijn vergeleken met de huidige eisen met betrekking tot de langsonvlakheid van een weg. Hieruit valt te concluderen dat het comfortmodel beter gebruikt kan worden dan de IRI als het om het comfort van de weggebruiker gaat. De reden is dat het comfortmodel rekening houdt met verticale versnellingen die de bestuurder zelf ondergaat en de IRI betrekking heeft op het verschil van de verplaatsing van de ongedempte massa ten opzichte van de gedempte massa. De verschillen zijn echter niet groot, het is wel zo dat de IRI tot op heden alleen bepaald wordt bij een snelheid van 80 km/h. Als de IRI bepaald zal worden bij een andere snelheid blijkt de IRI echter minder gevoelig te zijn dan het nieuwe comfortmodel voor aanpassing van de snelheid.

Verder blijkt dat zettingsverschillen over de kortere lengten een veel grotere invloed hebben op het comfort van de weggebruiker dan welke optreden voor grotere lengten.

Inhoud

Voorwoord.....	III
Samenvatting.....	V
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding onderzoek.....	1
1.2 Probleembeschrijving	2
1.3 Doelstelling	2
1.4 Structuurbeschrijving	3
2 Huidige meetmethoden en langsonvlakheidsparameters.....	5
2.1 Viagraaf.....	5
2.2 Rolrei	7
2.3 ARAN	7
2.3.1 IRI	8
2.3.2 Hoogteverschil over een bepaalde afstand	9
2.3.3 Helling stootplaat.....	9
2.4 Conclusies.....	10
3 Het comfortmodel.....	11
3.1 Het dynamische voertuig model.....	11
3.1.1 Uitleg van het voertuigmodel	11
3.1.2 Theoretische controle van het model	15
3.1.3 Toetsing van het model met behulp van velddata	16
3.2 Beoordelingsprocedure voor comfort [6].....	22
3.2.1 algemeen.....	22
3.2.2 De standaardevaluatiemethode	24
3.2.3 Aanvullende evaluatiemethoden.....	27
3.3 Conclusies t.a.v. de comfortparameters	29
4 Modelkalibratie met praktijkvoorbeelden	31
4.1 Drempelexperimenten in Hoorn	31
4.2 Metingen aan de N11 Alphen-Bodegraven.....	33
4.2.1 Uitwerking van de meetresultaten volgens huidige methoden	33
4.2.2 Uitwerking meetresultaten volgens het comfort model en vergelijking	34
4.3 Conclusie	37
5 Criteria voor restzettingsverschillen	39
5.1 Voorwaarden voor restzettingsverschillen in het algemeen	39
5.1.1 Voorwaarde voor restzettingsverschillen bij eenmalig omlaag gerichte onvlakheid	41
5.1.2 Voorwaarde voor restzettingsverschillen bij een reeks.....	45
5.2 Rond kunstwerken.....	48
5.2.1 Een enkele stootplaat.....	49
5.2.2 Invloed van de lengte van het kunstwerk.....	51
5.3 Conclusies.....	54
6 Vergelijken van resultaten met de huidige methoden	55
6.1 IRI	55
6.1.1 IRI versus comfortparameter bij 80 km/h	55
6.1.2 Invloed van de snelheid op de IRI.....	59
6.2 Hoogteverschil over bepaalde afstand	62
6.3 Helling stootplaat	64

7	Foutenanalyse	65
7.1	Vergelijking van Peugeot 504 met een tweede voertuig	65
7.2	Invloed van de dempingsconstante op de uitvoer	67
7.3	Gevoeligheidsanalyse	69
8	Conclusies en aanbevelingen	71
8.1	Conclusies met betrekking tot het comfortmodel	71
8.2	Conclusies met betrekking tot het opstellen van nieuwe zettingseisen	71
8.3	Aanbevelingen.....	72
	Literatuur	73
	Symbolenlijst	75
	Bijlage.....	77
I	Evenwichtsvergelijkingen betreffende het voertuigmodel [17].....	B-1
II	Vergelijkingen tbv het opstellen van matrix A and B	B-3
III	Power Spectral Density	B-5
IV	Fast Fourier Transformation.....	B-7
V	Het comfortmodel.....	B-13
VI	Uitwerking meetresultaten N11	B-21
VII	Uitwerkingen algemeen zettingsprofiel	B-27
VIII	Uitwerkingen van kunstwerk onderzoek	B-45
IX	Uitwerkingen IRI	B-65
X	Uitwerking tbv foutenanalyse.....	B-77
XI	Gevoeligheidsanalyse.....	B-85

1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

Al sinds jaar en dag wordt er onderzoek gedaan om wegen zo comfortabel mogelijk aan te leggen en comfortabel te houden. Een belangrijk onderdeel van het comfort van de weg wordt bepaald door de langsonvlakheid van een weg. Dit is vooral in Nederland van belang aangezien de ondergrond op veel plaatsen zettingsgevoelig is. Op deze zettingsgevoelige locaties is de kans op restzettingsverschillen groter, wat weer een grotere langsonvlakheid tot gevolg heeft.

Daarom is het van groot belang om de langsonvlakheid goed te kunnen controleren en bij ontwerp en aanleg al rekening te houden met een mogelijke langsonvlakheid. Momenteel zijn de eisen met betrekking tot de langsonvlakheid gerelateerd aan verschillende meetmethoden die bij oplevering of tijdens gebruik uitgevoerd kunnen worden. Deze eisen vallen op te delen in twee groepen namelijk:

- a) eisen degene die gerelateerd zijn aan comfort
- b) eisen die direct betrekking hebben op het langsprofiel.

Voor er verder gegaan wordt met de probleemstelling is het handig om eerst de definitie van langsonvlakheid verder toe te lichten. Vlakheid is te definiëren als een maat voor de grootte en aard van de relatieve afwijkingen in een wegdek ten opzichte van het vooraf gewenste absolute hoogteniveau. Hierbij heeft langsonvlakheid betrekking op de deformaties van het wegoppervlak in de langsrichting. Deze deformaties worden gewoonlijk geschematiseerd met behulp van golven. Het zijn vaak golvingen in de weg die groter zijn dan het contactvlak van de band met de weg die voor problemen betreffende discomfort zorgen. Voor deze deformaties in de langsrichting zijn globaal twee oorzaken aan te wijzen:

- ongelijkmatige zettingen van de ondergrond,
- de verkeersbelasting,
- wijze van aanleg.

De langsonvlakheid door zettingen ontstaan vooral doordat het gewicht van de wegconstructie op een zettingsgevoelige ondergrond drukt. Als het gaat over zettingen die langsonvlakheid veroorzaken, heeft dit voornamelijk betrekking op de restzettingen van de ondergrond. Restzettingen zijn zettingen die zich voordoen in een bepaalde periode vanaf oplevering van de bovenbouw. Door het verschil in restzettingen ontstaan dan golvingen in het wegdek.

Langsonvlakheid van wegen resulteert in grotere verticale versnellingen van het voertuig en de inzittende. Deze grotere versnellingen resulteren weer in het beschadigd raken van voertuigen en klachten vanuit de bestuurders met betrekking tot comfort en veiligheid. Daarom is het zeer van belang dat wegen voldoen aan goed gestelde langsvlakheidseisen en hier aan blijven voldoen

Tot een aantal jaren geleden lag de verantwoordelijkheid voor de kwaliteit van de wegen vooral bij de opdrachtgever. Dit werd veroorzaakt doordat de opdrachtgever bijna alle infrastructurele werken op traditionele wijze aanbesteedde. Dit betekende dat de opdrachtgever een ontwerp liet maken en verantwoordelijk was voor het ontwerp. Daarna werd dit ontwerp door de aannemer uitgevoerd. Als er later problemen ontstonden aan de weg kwamen die vaak voor rekening van de opdrachtgever, zeker indien de aannemer aan zijn verplichtingen volgens ontwerp voldaan had. Daarnaast lag de verantwoordelijkheid van het in goede staat houden van de weg altijd bij de beheersplichtige zijnde de rijks-, provinciale of gemeentelijke overheid.

Tegenwoordig gaan de opdrachtgevers steeds meer over naar "Design, Construct and Maintenance" contracten, waarbij de opdrachtgever het geheel van ontwerp tot en met de garantie van de levensduur bij de opdrachtnemer komt te liggen. Het probleem hierbij is dat de opdrachtgever eisen stelt met betrekking tot comfort voor de weggebruiker. Maar deze eisen zijn niet direct te vertalen in geotechnische eisen. Dit probleem is het onderwerp van deze afstudeerscriptie; het wordt verder toegelicht in de probleembeschrijving.

1.2 Probleembeschrijving

Tot op heden is er altijd subjectief met restzettingseisen omgegaan. Deze situatie wordt echter door de nieuwe contractvormen steeds meer als ongewenst ervaren door zowel de opdrachtgever als de opdrachtnemer. Een meer objectief criterium voor de maximale toelaatbare restzettingsverschillen zal enerzijds meer houvast bieden voor de geotechnisch ontwerper en hem tevens ondersteunen bij het aantonen van de noodzaak tot bijzondere maatregelen en/of voldoende bouwtijd. Anderzijds zijn er situaties mogelijk waarin grotere restzettingsverschillen onvermijdelijk blijven, zoals rond kunstwerken. Hierbij kan een objectief criterium de verhardingsadviseur ondersteunen bij zijn keuze voor een bepaalde verhardingconstructie en fasering.

Zoals in de voorgaande paragraaf ook al vermeld is zijn de eisen met betrekking tot langsonvlakheid op te delen in twee groepen:

- a) de eisen die gerelateerd zijn aan comfort,
- b) de eisen die direct betrekking hebben op het langsprofiel.

Het probleem hierbij is dat er vanuit de comforteisen thans geen relatie te leggen is naar de geotechnische eisen en het geotechnisch onderzoek, dat nodig is voor het bepalen van de te verwachten restzettingen van de ondergrond, waaruit de te verwachte langsonvlakheid te bepalen is. Op basis van dit geotechnisch onderzoek kunnen de risico's met betrekking tot zettingen, gekwantificeerd en geminimaliseerd worden waarmee gedurende de levensduur een comfortabele weg kan worden gegarandeerd.

Vanuit het geotechnisch onderzoek kan er een relatie worden gelegd naar de eisen met betrekking tot langsprofiel. Het probleem hierbij is dat de eisen aan het langsprofiel niet direct gerelateerd zijn aan comfort. Hierdoor ontbreekt de link tussen het comfort van een weggebruiker en de zettingsverschillen. Met andere woorden, vanuit de huidige vlakheideisen is niet direct een norm af te leiden voor de maximale restzettingsverschillen in relatie tot comfort.

Tegenwoordig komen er ook steeds vaker klachten van weggebruikers over de onvlakheid van wegen terwijl die door de huidige eisen als comfortabel gekenmerkt worden. Hieruit blijkt dus dat de huidige eisen niet goed het comfort van de weggebruiker dekken. Of dit veroorzaakt wordt doordat niet alles in de eisen wordt meegenomen of dat de eisen te ruim zijn is niet bekend.

Probleemstelling

Momenteel zijn er eisen met betrekking tot de zettingen van de ondergrond en er zijn eisen die gerelateerd zijn aan het comfort van de weggebruiker. Het probleem hierbij is dat er tussen deze eisen geen directe relatie is.

Een bijkomend probleem is ook dat de eisen voor comfort niet als goed de comfortbelasting van de weggebruiker dekken.

1.3 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het verkrijgen van een betere relatie tussen het comfortniveau van de weg en de eisen voor restzettingen van de ondergrond van de weg. Voor het realiseren van deze hoofddoelstelling worden de volgende neven doelstellingen geformuleerd:

1. Welke golflengten zijn kritisch voor een weg (afhankelijk van snelheid).
2. Wat is voor deze golflengten het maximale zettingsverschil om nog aan een bepaalde comfortgrens te voldoen.
3. Het verkrijgen van criteria voor zettingen rond zettingsvrije kunstwerken.
4. Foutenanalyse, wat is de invloed van de verschillende invoerparameters.

Om tot deze doelstellingen te komen wordt er eerst een relatie gelegd tussen het langsprofiel en het comfortniveau. Hierna wordt bepaald wat de toegestane restzettingen zijn bij een bepaald comfortniveau.

1.4 Structuurbeschrijving

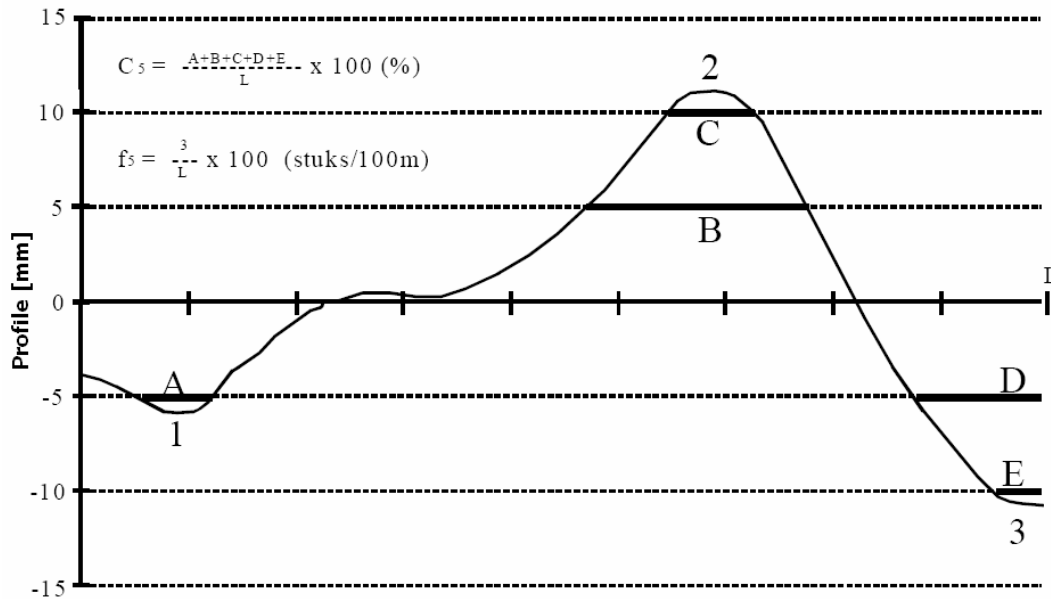
Om de doelstellingen van dit onderzoek te bereiken is het onderzoek op te delen in verschillende delen. Als eerste wordt er in hoofdstuk 2 beschreven wat de huidige meetmethoden en langsonvlakheidsparameters zijn. In dit hoofdstuk worden de verschillende voor- en nadelen van de huidige methoden en parameters tegen elkaar afgewogen en wordt er gekeken waar nog verbetering nodig is.

Daarna wordt er in hoofdstuk 3 een comfortmodel samengesteld. Met dit comfortmodel is het mogelijk om nieuwe langsonvlakheid-/comfortparameters op te stellen. Bij het samenstellen van het comfortmodel is er gebruik gemaakt van een voertuigmodel om te bepalen wat de versnellingen zijn die een bestuurder in de auto ervaart bij een bepaalde onvlakheid. Verder is er gebruik gemaakt van de ISO 2631-1 voor het kwantificeren van trillingen in relatie tot comfort. In hoofdstuk 4 vindt u hoe het voertuigmodel gekalibreerd is aan de hand van praktijkvoorbeelden. Deze kalibratie is toegepast voor het opstellen van grenzen aan de nieuwe comfortparameters.

In het vijfde hoofdstuk zijn er voor verschillende standaard onvlakheden ontwerpgrafieken opgesteld. Met behulp van deze ontwerpgrafieken is het mogelijk om te bepalen wat het toegestane zettingsverschil is over een bepaalde lengte. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een eenmalig voorkomende onvlakheid, een reeks onvlakheden en zettingen rondom kunstwerken waarbij er gebruik gemaakt is van stootplaten gewerkt met wegvakken 212 meter.

In hoofdstuk 6 worden de resultaten die volgen uit de nieuwe comfortparameters vergeleken met de huidige eisen voor langsvlakheid (hoofdstuk 2). In dit hoofdstuk worden verschillende voor- en nadelen van de verschillende methoden en onvlakheden tegen elkaar afgewogen.

Een foutenanalyse waarin gekeken wordt wat de invloed is als er met andere voertuigparameters gewerkt wordt, is terug te vinden in hoofdstuk 7. Waarna het verslag in hoofdstuk 8 wordt afgesloten met de belangrijkste conclusies en aanbevelingen die uit het gehele onderzoek volgen.



Figuur 2-2: Verwerkte uitvoer van de viagraaf [8]

Uit deze uitvoer vallen verschillende grootheden te bepalen, namelijk:

- A_5 -waarde: het aantal afwijkingen (bulten en kuilen) in een meetvak. Een afwijking is geldig als de profiellijn de eerste positieve of negatieve rechte minimaal 100 mm aan één stuk heeft bereikt of overschreden.
- F_5 -waarde: de frequentie van het aantal afwijkingen over een wegvak van 100 meter, zie Vergelijking 2-1.
- C_5 -waarde: het afwijkingspercentage zijnde de som van de horizontale lengten per onder- en overschrijding van de verschillende intervalgrenzen uitgedrukt in procenten van de wegvaklengte, zie Vergelijking 2-2.

Vergelijking 2-1

$$F_5 = A_5 * \frac{100.000}{N * d}$$

Vergelijking 2-2

$$C_5 = \frac{A + B + C + D + E}{N * d} * 100\%$$

Met:

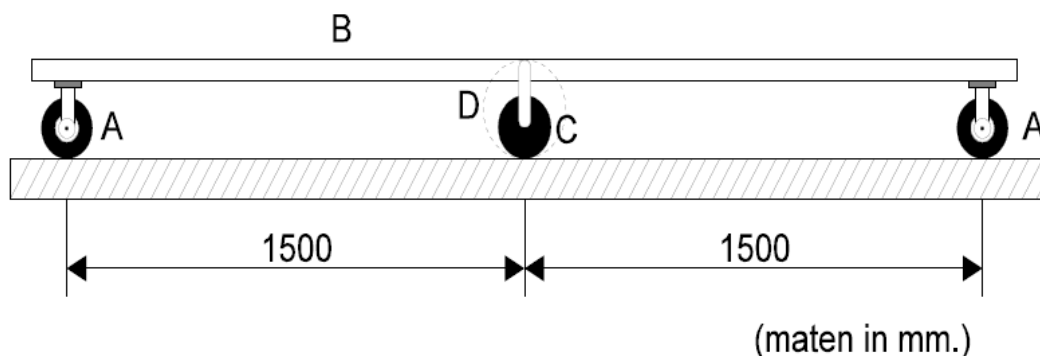
- F_5 = overschrijdingsfrequentie in aantal/100 [-]
- A_5 = aantal afwijking per wegvak [-]
- N = het aantal samples van profielhoogte per wegvak[-]
- d = de sample afstand in [mm]
- C_5 = afwijkingspercentage [%]
- A, B, C, D, E = koorde lengten volgend uit Figuur 2-2 [mm].

De gebruikelijke sampleafstand van de viagraaf en rolrei is gelijk aan tien millimeter. Tevens is het gebruikelijk dat de genoemde parameters over wegvakken van 100 meter worden bepaald. $N*d$ is dan gelijk aan 100.000 en daarmee zijn de waarden A_5 en F_5 gelijk aan elkaar.

Door de beperkte lengte van de viagraaf is deze meetmethode niet gevoelig voor golflengten langer dan 18 meter. Deze golflengten komen dan ook niet terug in het geregistreerde profiel. Voor een uitgebreidere toelichting van de meetmethode en berekeningswijze wordt er verwezen naar Proef 149 van de standaard RAW bepaling 2005 [2].

2.2 Rolrei

De rolrei wordt toegepast als aanvulling op de vlakheidsmetingen met de viagraaf bij weggedeelten met een afwijkende geometrie of weggedeelten korter dan het toepassingsgebied van de viagraaf (zie paragraaf 2.1). De werking van de rolrei blijkt uit de principeschets weergegeven in Figuur 2-3. De onderlinge afstand tussen de draagwielen (A) is 3 meter, midden tussen de wielen bevindt zich het meetwiel dat het wegprofiel aftast. Met behulp van de rolrei worden net zoals bij de viagraaf de verticale verplaatsing ten opzichte van een steeds veranderde referentielijn bepaald.



Figuur 2-3: Principe schets rolrei [9]

De verwerking van de uitvoer is hetzelfde als bij de viagraaf. Het belangrijkste verschil is dat bij de rolrei bepaalde golflengten niet waargenomen worden en sommige weer extreem. Hierdoor komt het gemeten profiel niet goed overeen met het werkelijke profiel. Dit is ook het geval bij de viagraaf, maar door het toepassen van meerdere bruggen is dit beperkt.

2.3 ARAN

Het ARAN-meetsysteem bestaat uit een voertuig met diverse meetinstrumenten, videocamera's, een boordcomputer en een verwerkingconsole voor de verwerking van de meet- en beeldgegevens. Het ARAN-meetvoertuig bevat apparatuur voor het meten en vastleggen van:

- afstand,
- dwarsonvlakheid,
- dwarshelling,
- langsprofiel,
- langsonvlakheid,
- textuur,
- wegbeeld en wegdekschade.

Doordat de metingen met de ARAN met een hoge snelheid (maximaal 90 km/h) kan worden uitgevoerd, ondervindt het verkeer geen of zeer weinig hinder van de meetactiviteiten. In dit verslag alleen de metingen met betrekking tot de langsonvlakheid en het langsprofiel besproken worden.

Het langsprofiel wordt gemeten in het rechter wielspoor en tussen de beide sporen in. Ieder meetsysteem bestaat uit een 64 kHz laser gecombineerd met een versnellingsopnemer. Een dergelijk systeem wordt ook wel South Dakota Profilometer (laser SDP) genoemd. De laser zorgt voor een snelle aftasting van het wegooppervlak, terwijl de versnellingsopnemer het mogelijk maakt het resultaat te corrigeren voor de verticale voertuigbewegingen. Het resultaat is een werkelijk langsprofiel in het golflengtegebied van 0,6 tot 90 meter. De voertuigsnelheid mag tijdens de metingen licht variëren rond een gekozen snelheid uit het interval 40 tot 90 km/h.

Aan het gemeten langsprofiel dienen grootheden toegekend te worden die gecontroleerd kunnen worden. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar, namelijk:

- de IRI,
- hoogteverschil over bepaalde afstand, zowel in het algemeen als de hoogte verschillen die optreden bij stootplaten.

In de volgende subparagrafen worden deze methoden verder toegelicht.

2.3.1 IRI

De IRI is een maat voor de verplaatsing die de carrosserie ondergaat ten opzichte van de wielophanging bij het rijden over een onvlakke weg. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een model dat een kwart voertuig (zie Figuur 2-4) met een snelheid van 80 km/h over het geregistreerde langsprofiel laat rijden. Met behulp van dit model worden dan de verticale verplaatsingen en versnellingen van dit voertuig berekend. Om deze parameters te kunnen bepalen dienen de veercharacteristieken van een standaard voertuig bekend te zijn. Bij de IRI wordt hiervoor gebruik gemaakt van de "Golden Car-gegevens" die zijn samengesteld door De Wereldbank [13, 14].

Uit deze versnellingen wordt met behulp van Vergelijking 2-3 de IRI waarde berekend. Voor de volledige berekening van de IRI wordt er verwezen naar de "World Bank Technical Papers 45 en 46 [13, 14]. Hierin is ook het gehele dynamisch kwart voertuig model uitgelegd.

Vergelijking 2-3

$$IRI = \frac{1}{B} \int_0^T |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt$$

Met: IRI = International Roughness Index [m/km]

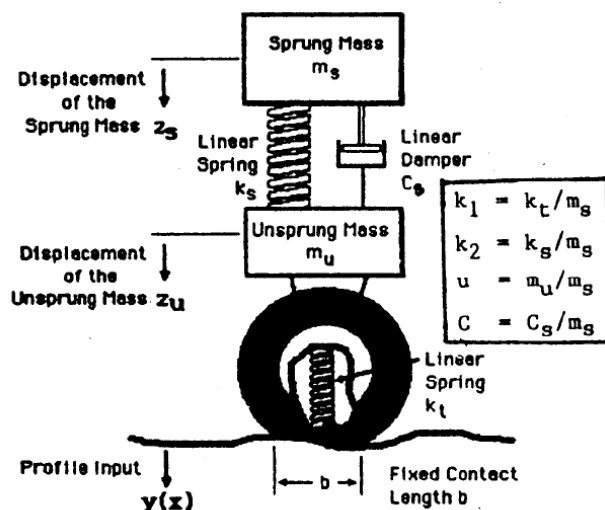
B = de basislengte van het onderzochte wegvlak [km]

T = tijdsduur van de meting [s]

$\dot{z}_s$ = 1^{ste} afgeleide naar tijd van de verplaatsing van de gedempte massa [m/s]

$\dot{z}_u$ = 1^{ste} afgeleide naar tijd van de verplaatsing van de ongedempte massa [m/s]

dt = tijdsinterval [s]



Figuur 2-4: Kwart voertuigmodel [12]

De IRI geeft eigenlijk een waarde aan de verplaatsingen van de demper van de wielophanging weer. Dus eigenlijk de krachten die op deze demper werken. Om die reden is de IRI niet direct gerelateerd aan de versnellingen die een bestuurder ondergaat die vaak in verband worden gebracht met het comfortniveau van de weggebruiker. Er is wel een verband tussen de verplaatsingen van de demper en de verplaatsingen van de carrosserie.

De basislengte, B in Vergelijking 2-3, kan iedere willekeurige lengte zijn. Voor de internationaal geldende waarden wordt er als basislengte 100 meter genomen (IRI 100). Deze basislengte dient altijd samen met de IRI-waarde vermeld te worden. Het nadeel van een basislengte van 100 meter is dat piekwaarden van onvlakheden over een korte afstand uitgevlakt worden. Daarom wordt door Rijkswaterstaat steeds vaker een IRI-waarde bepaald met een basislengte van 20 meter (IRI 20). Het voordeel van de IRI 20 is dat korte onvlakheden duidelijk zichtbaar zijn in de uitvoer.

Vanuit het CROW zijn richtlijnen opgesteld betreffende IRI 100. In deze richtlijnen zijn verder nog geen waarden voor de IRI 20 gegeven. Vanuit Rijkswaterstaat zijn voor de IRI 20 wel praktijkgrenswaarden opgesteld, die zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2-1: Richtlijnen voor IRI waarden

	Wegtype*	Richtlijn [m/km]
IRI 100 [3]	1, 2	3,5
	3, 4, 5, 6	5,1
IRI 20 [20]	1, 2	5,0
	3, 4, 5, 6	-

* Wegtype 1 en 2 staan hier voor autosnelwegen en hoofdwegen, 4 t/m 6 voor overige wegen

2.3.2 Hoogteverschil over een bepaalde afstand

Vaak wordt er voor langsonvlakheid een eis gesteld voor het zettingsverschil over een bepaalde afstand. Voor hogere-orde-wegen zoals autosnelwegen en hoofdwegen volgen uit CROW publicatie 204 [4] de volgende eisen:

- maximaal restzettingsverschil van 0,05 m over een afstand van 25 meter,
- maximaal restzettingsverschil van 0,10 m over een afstand van 50 meter.

Dit zijn arbitrair opgestelde grenswaarden waarbij de verwachting is dat er aan de vlakheidseisen (betreffende comfort) voldaan wordt. Deze grenzen worden vaak gebruikt om eisen te kunnen stellen aan het geotechnische gedrag van de constructie en daarmee aan het geotechnisch ontwerp. Vermeld dient te worden dat deze waarden niet zijn gebaseerd op een relatie tussen restzettingsverschillen en comfort.

2.3.3 Helling stootplaat

Nabij onderheide kunstwerken, die niet aan zetting onderhevig zijn, wordt in verband met de veiligheid een eis gesteld aan de maximale helling van het wegdek. Een te grote helling leidt in het bijzonder bij vrachtwagens tot te grote versnellingskrachten waardoor de stabiliteit van de lading in gevaar kan komen. Deze eisen betreffende de helling van een stootplaat zijn in CROW publicatie 204 [4] als volgt weergegeven:

- autosnelweg maximale helling 1:100,
- wegen van lagere orde maximale helling 1:70.

2.4 Conclusies

Uiteindelijk valt te concluderen dat er in Nederland twee soorten meetmethoden zijn die op verschillende manier te verwerken zijn. Het belangrijkste verschil tussen de methoden is dat de ene alleen wordt toegepast bij de oplevering (Viagraaf, Rolrei) en de andere (ARAN) vooral gebruikt wordt om periodieke controles uit te voeren.

Aan de Viagraaf en de Rolrei zitten verschillende nadelen: Ten eerste kan de meting alleen uitgevoerd worden bij lage snelheden. Ten tweede worden bij de metingen golflengten langer dan 18 meter niet waargenomen.

De meetmethode van de ARAN heeft minder beperkingen dan de Viagraaf en Rolrei, aangezien er gewerkt kan worden met relatief hoge snelheden (tot 90 km/h) en de metingen een golflengtegebied beslaat van 0,6 tot 90 meter. Daarom kan er gesteld worden dat de ARAN een geschiktere meetmethode is.

Voor het verder verwerken van de meetresultaten kunnen er verschillende langsonvlakheidsparameters bepaald worden. Hiervan geeft de IRI-methode de beste weergave als er gekeken wordt naar het comfortniveau. Al dient hierbij wel vermeld te worden dat de IRI niet direct gerelateerd is aan het comfort van de bestuurder maar aan de bewegingen die de dempers ondergaan. Een ander nadeel is dat er vanuit de IRI geen eisen zijn vast te stellen voor de zettingen van de ondergrond.

Duidelijk is dat een relatie tussen comfort, langsonvlakheid en restzettingen van belang is om realistische restzettingseisen te kunnen formuleren. Het ontwikkelen van een dergelijke relatie is onderwerp van dit afstudeerproject.

3 Het comfortmodel

Voor het verkrijgen van een relatie tussen het comfortniveau van een weggebruiker en de langsonvlakheid van een weg zijn er nieuwe langsonvlakheidsparameters benodigd. Deze dienen gebaseerd te zijn op het comfort van een weggebruiker. De reden hiervoor is dat er bij de huidige langsonvlakheidsparameters geen directe relatie ligt tussen het wegprofiel en het comfortniveau van de weggebruiker.

Voor het samenstellen van de nieuwe parameters is er gebruik gemaakt van de ISO 2631-1. In de ISO 2631-1 zijn methoden gedefinieerd voor het kwantificeren van vibratie/trillingen in relatie tot comfort. Dit alles wordt verder uitgelegd in paragraaf 3.2. Om gebruik te maken van deze ISO 2631-1 is het nodig dat de versnellingen bekend zijn die de weggebruiker ondergaat. Voor het bepalen van deze versnellingen wordt er gebruik gemaakt van een dynamisch voertuigmodel. Dit model wordt verder toegelicht in paragraaf 3.1. Uiteindelijk is het geheel gemodelleerd in Excel. De uitleg van dit Excel bestand is gegeven in Bijlage V.

3.1 *Het dynamische voertuig model*

Om de versnellingen die een weggebruiker ondergaat bij een bepaalde langsonvlakheid te bepalen dienen er gegevens van het voertuig bekend te zijn. Hiervoor zijn vooral de gegevens van de veren en dempers in de wielophanging van belang. Deze zijn echter niet voor ieder voertuig hetzelfde. Daarom is er voor een voertuigmodel gekozen waarbij de voertuigkarakteristieken gevarieerd kunnen worden. In paragraaf 3.1.1 is dit model verder uitgelegd. Dit voertuigmodel is daarna eerst op de theoretische correctheid gecontroleerd (zie paragraaf 3.1.2) en daarna nog getoetst aan veld data (paragraaf 3.1.3).

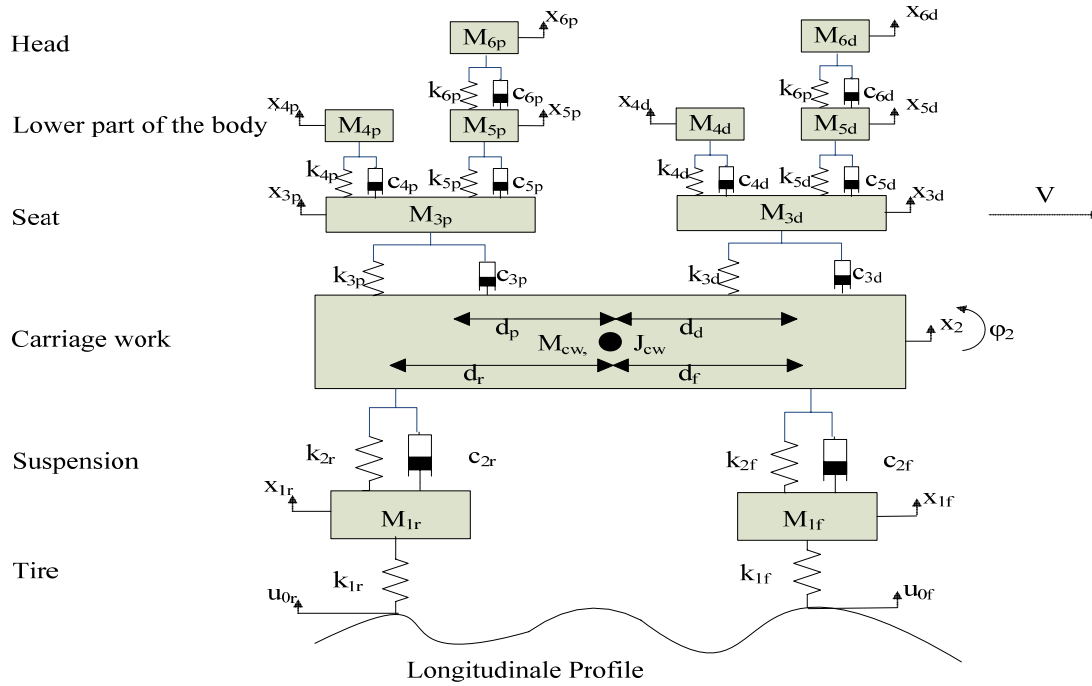
3.1.1 Uitleg van het voertuigmodel

Bij het beoordelen van een bepaald wegvak op langsonvlakheid wordt de dwarssonvlakheid meestal buiten beschouwing gelaten. Om die reden zijn de voertuiggegevens met betrekking tot de dwarsrichting van het voertuig niet van belang en kan het model worden vereenvoudigd tot een half-voertuigmodel (zie Figuur 3-1). Dit betekent dat er geen verschil wordt gemaakt tussen het wegprofiel van het linker of rechter rijspoor. Omdat er alleen rekening gehouden wordt met de langsonvlakheid komen er ook alleen maar verticale versnellingen voor in het model. Hier is de aanname gemaakt dat de horizontale versnellingen nihil zijn ten opzichte van de verticale versnellingen.

Het half-voertuigmodel is gebaseerd op het artikel "Theoretical investigation of a linear planar model of a passenger car with seated people" [17]. Zoals uit Figuur 3-1 blijkt bestaat het voertuigmodel uit een meervoudig massaveersysteem met 12 vrijheidsgraden.

Het totale model is opgebouwd uit een voertuig met een bestuurder voorin en een passagier die achter in de auto zit. Het voertuig zelf is opgebouwd uit een chassis (Carriage work) en een voor- en achterwielophanging (Suspension). Deze wielophanging bestaat uit een ongeveerde massa (M_{1f} , M_{1r}), de banden van het voertuig (gemodelleerd als lineaire veren k_{1f} en k_{1r}) en de dempers (c_{2f} , c_{2r}) en veren (k_{1f} , k_{1r}) van de wielophanging zelf.

Het chassis zelf is gemodelleerd als massa, $M_{2,cw}$ met een bepaald traagheidsmoment, $J_{2,cw}$. Deze massa verbindt de voor- en achteras met elkaar en heeft ook ruimtelijke parameters als een zwaartepunt en een lengte. De afstand van de voor- en achteras tot het zwaartepunt is gegeven als respectievelijk d_f en d_r .



Figuur 3-1: Half voertuigmodel [17]

Op het chassis zijn twee zittende personen gemodelleerd, een bestuurder en een passagier. De autostoel waar ze in zitten is gemodelleerd als een massa (M_{3d} , M_{3p}) met bepaalde veer- en dampingkarakteristieken (k_{3d} , c_{3d} , k_{3p} , c_{3p}). De locatie van deze stoelen kan gevarieerd worden met behulp van d_d en d_p , wat de locatie weergeeft ten opzichte van het zwaartepunt van het chassis.

Om een zittende persoon te modeleren is gebruik gemaakt van ISO 5982:2001 [7]. Uit deze ISO 5982 volgt dat een zittend persoon is te modeleren als een massaveersysteem met 3 vrijheidsgraden (x_{4d} , x_{5d} , x_{6d}). Hierbij stelt x_{4d} de verticale verplaatsing van het lichaam van de bestuurder voor, en x_{5d} van het hoofd van de bestuurder. Verder zijn in de ISO 5982 alle karakteristieke waarden (massa, veer- en dampingkarakteristieke) van een gestandaardiseerd persoon gegeven. Deze gegevens hebben betrekking op een persoon van 80 kilo.

Het totale model bestaat uit twaalf vrijheidsgraden: de verticale verplaatsing van de verschillende massa's (x_{ij}) en de rotatie van het chassis (φ_2). Uiteindelijk valt het model te schrijven in twaalf evenwichtvergelijkingen die zijn gegeven in Bijlage I. Om het dynamische probleem op te lossen zijn er nog enkele kinematische vergelijkingen nodig om de verplaatsing van verschillende locaties in het chassis te bepalen. Deze relaties zijn weergegeven in Vergelijking 3-1. Hierbij is de aanname gemaakt dat de verdraaiingshoek (φ_2) van het chassis klein is zodat er gesteld kan worden dat " $\sin \varphi_2 \approx \varphi_2$ ". Deze aanname is later nog gecontroleerd en bleek correct te zijn.

Vergelijking 3-1

$$x_{2f} = x_2 + d_f * \sin \varphi_2 = x_2 + d_f * \varphi_2$$

$$x_{2r} = x_2 - d_r * \sin \varphi_2 = x_2 - d_r * \varphi_2$$

$$x_{2d} = x_2 + d_d * \sin \varphi_2 = x_2 + d_d * \varphi_2$$

$$x_{2p} = x_2 - d_p * \sin \varphi_2 = x_2 - d_p * \varphi_2$$

Om de 12 evenwichtvergelijkingen op te lossen worden ze omgeschreven naar een matrixvorm als weergegeven in Vergelijking 3-2. De uiteindelijk benodigde vergelijkingen om matrix A en B te krijgen zijn weergegeven in bijlage II.

Vergelijking 3-2

$$[\dot{X}(t)] = [A] * [X(t)] + [B] * [U(t)]$$

$$[\dot{X}(t)] = [\dot{x}_{1f}, \ddot{x}_{1f}, \dot{x}_{1r}, \ddot{x}_{1r}, \dot{x}_2, \ddot{x}_2, \dot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_2, \dot{x}_{3d}, \ddot{x}_{3d}, \dot{x}_{3p}, \ddot{x}_{3p}, \dot{x}_{4d}, \ddot{x}_{4d}, \dot{x}_{4p}, \ddot{x}_{4p}, \dot{x}_{5d}, \ddot{x}_{5d}, \dot{x}_{5p}, \ddot{x}_{5p}, \dot{x}_{6d}, \ddot{x}_{6d}, \dot{x}_{6p}, \ddot{x}_{6p}]^T$$

$$[X(t)] = [x_{1f}, \dot{x}_{1f}, x_{1r}, \dot{x}_{1r}, x_2, \dot{x}_2, \varphi_2, \dot{\varphi}_2, x_{3d}, \dot{x}_{3d}, x_{3p}, \dot{x}_{3p}, x_{4d}, \dot{x}_{4d}, x_{4p}, \dot{x}_{4p}, x_{5d}, \dot{x}_{5d}, x_{5p}, \dot{x}_{5p}, x_{6d}, \dot{x}_{6d}, x_{6p}, \dot{x}_{6p}]^T$$

$$[U(t)] = [u_{0f}, u_{0r}]^T$$

Met: $\ddot{x}_{ii}(t)$ = de verticale versnelling van de verschillende massa's [m/s²]

$\dot{x}_{ii}(t)$ = de verticale verplaatsingssnelheid van de verschillende massa's [m/s]

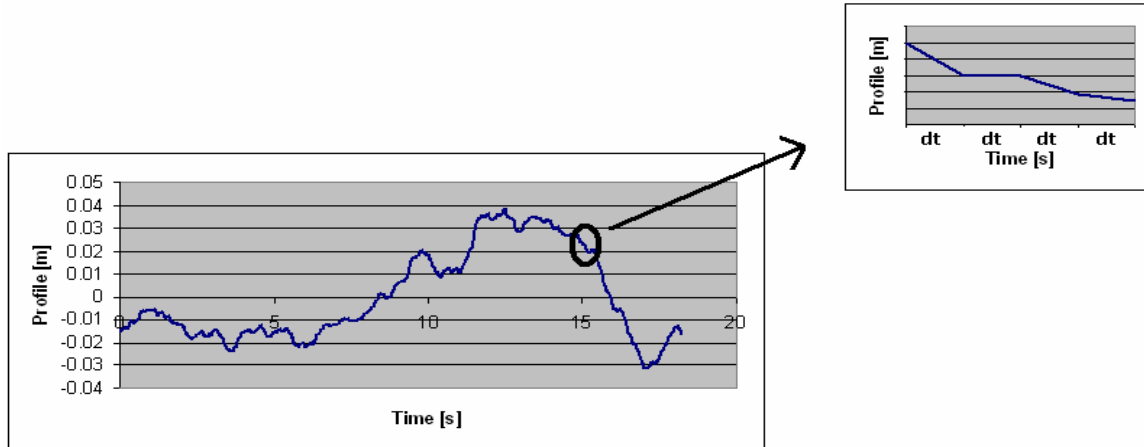
$x_{ii}(t)$ = de verticale verplaatsing van de verschillende massa's [m]

φ_2 : = hoekverdraaiing van het frame werk [rad]

[A], [B] = matrix met parameters welke volgen uit bijlage II

[U(t)] = de verticale verplaatsing van het wegooppervlak bij de voor- (u_{0f}) en achteras (u_{0r}) [m]

Om Vergelijking 3-2 nu op te lossen wordt er gebruik gemaakt van wiskundige relaties die volgen uit de literatuur [15]. De benodigde relaties staan weergegeven in Vergelijking 3-3 and 3-4. Om gebruik te maken van de relatie dient wel de aanname gedaan te worden dat de helling van het langsprofiel ($\dot{U}(\tau)$) constant is over een bepaalde tijdsinterval (dt). Dit is correct aangezien de helling van de invoerprofielen over een bepaalde tijd constant zijn (zie Figuur 3-2). Als de evenwichtvergelijkingen voldoen aan Vergelijking 3-3 dan geldt de relatie die in Vergelijking 3-4 is weergegeven. Met deze vergelijking is het mogelijk om uit de versnellingen en snelheid van een eerder tijdstip en de helling van het profiel van het huidige tijdstip, de versnellingen en de snelheid op ieder tijdstip te bepalen.



Figuur 3-2: Lengte profiel uitgezet tegen tijd

Vergelijking 3-3

$$\begin{aligned} [\dot{X}(t)] &= [A] * [X(t)] + [B] * [U(t)] \\ \left[\frac{d\dot{X}(t)}{dt} \right] &= [A] * [\dot{X}(t)] + [B] * [\dot{U}(t)] \end{aligned}$$

Vergelijking 3-4

$$[\dot{X}(t)] = e^{[A]*dt} * [\dot{X}(t-1)] + \int_{\tau=0}^t \left\{ e^{[A]*(dt-\tau)} * [B] * [\dot{U}(\tau)] \right\} d\tau$$

when $\dot{U}(\tau) = \text{constant} = c$

$$[\dot{X}(t)] = e^{[A]*dt} * [\dot{X}(t-1)] + \int_{\tau=0}^t \left\{ e^{[A]*(dt-\tau)} \right\} d\tau * [B] * [c]$$

$$[\dot{X}(t)] = e^{[A]*dt} * [\dot{X}(t-1)] + \left[-\frac{1}{[A]} * e^{[A]*(dt-\tau)} \right]_{\tau=0}^t * [B] * [c]$$

$$[\dot{X}(t)] = e^{[A]*dt} * [\dot{X}(t-1)] + \frac{1}{[A]} * \left(e^{[A]*dt} - [I] \right) * [B] * [\dot{U}(t)]$$

Met: $[\dot{X}(t)]$ = versnelling en snelheid van de verschillende massa's op een bepaalde tijd (t),
 $[\dot{X}(t-1)]$ = versnelling en snelheid van de massa's op een voorgelegen tijdstip (t-1),
 $[\dot{U}(t)]$ = de helling van het wegvak bij de voor- en achteras op tijdstip (t),
 $[I]$ = eenheidsmatrix.

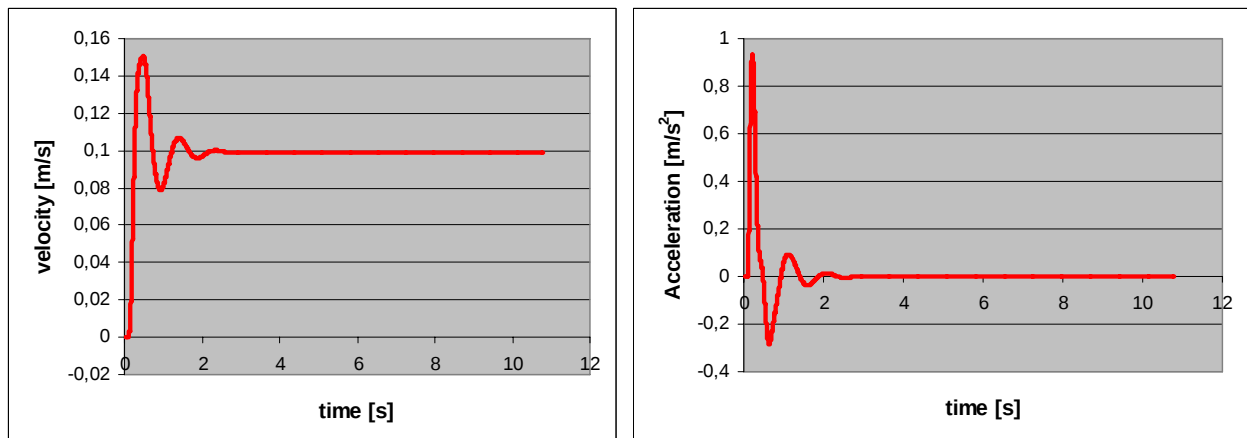
Als de voertuiggegevens en de dynamische gegevens van een zittend persoon (M_{ij} , k_{ij} , c_{ij}) bekend zijn, kunnen de verticale versnellingen en snelheden van de verschillende massa's berekend worden. Hiervoor dient er dan wel een bepaald wegprofiel en een bepaalde voertuigsnelheid (v) ingevoerd te worden. Ook dient er de kanttekening gemaakt te worden dat de wiskundige relaties gebaseerd zijn op een tijdsschaal en dus tijdsafhankelijk zijn. Aangezien de meeste langsprofielen een lengteschaal hebben, dienen deze omgezet te worden van lengteschaal naar tijdsschaal. Dit is mogelijk door de afstandsstep te delen door de snelheid van het voertuig.

Nu is het uiteindelijk mogelijk om vanuit ieder willekeurig langsprofiel bij een bepaalde voertuigsnelheid de verticale versnellingen en snelheden te bepalen. Om te controleren of het model correct is wordt in paragraaf 3.1.2 eerst een theoretische controle uitgevoerd. Daarna wordt in paragraaf 3.1.3 het model gevalideerd met behulp van velddata.

3.1.2 Theoretische controle van het model

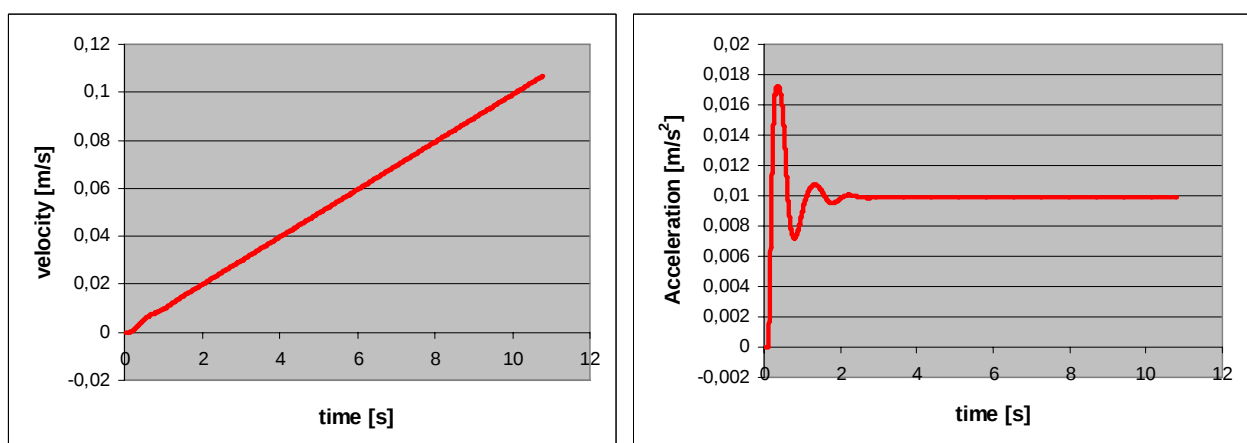
Om te controleren of het dynamische voertuigmodel correct is worden er nu eerst twee standaardprofielen ingevoerd. Één standaardprofiel bestaat uit een profiel met een constante helling en het andere bestaat uit een profiel met een constante versnelling (parabolische vorm). Als het goed is gaan alle versnellingen van de verschillende massa's bij de eerste invoer naar nul en de snelheid naar een constante waarde. Bij de tweede invoer gaan de versnellingen naar een constante waarde toe en neemt de snelheid lineair toe.

De controle wordt uitgevoerd bij een snelheid van 100 km/h en het invoerprofiel heeft een helling van 0,1 m/s. Verder worden de startwaarde van alle versnellingen en snelheden van de verschillende massa's op nul gesteld. De uitvoer van de snelheid en versnelling als functie van tijd is voor M_{4d} weergegeven in Figuur 3-3.



Figuur 3-3: Uitvoer van M_{4d} bij een invoer profiel met een constante helling van 0,1 m/s

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur 3-3 gaan de versnellingen van M_{4d} naar nul en de snelheid naar een constante waarde van 0,1 m/s. Dit is ook het resultaat van alle andere massa's. In Figuur 3-4 is de uitwerking gegeven van invoerprofiel met een constant tweede afgeleide van 0,01 m/s². Hierin is ook duidelijk zichtbaar dat het model theoretisch correct is, want ondanks dat de startwaarde op nul is gesteld gaat alles toch naar een bepaalde constante waarde.



Figuur 3-4: Uitvoer van M_{4d} bij een parabolisch profiel met een constante versnelling van 0,01 m/s²

3.1.3 Toetsing van het model met behulp van velddata

Nadat het model theoretisch gecontroleerd is dient het ook nog getoetst te worden aan praktijk voorbeelden. Hiervoor wordt een experiment gebruikt dat is uitgevoerd in Hoorn. Eerst wordt kort het experiment uitgelegd. Daarna worden de meetresultaten van de versnellingen vergeleken met die met het model zijn berekend.

Uitleg van het uitgevoerde experiment in Hoorn

In februari 2001 zijn er verschillende experimenten uitgevoerd in Hoorn. Het doel van deze experimenten was het valideren van een ontwerpmodel ten behoeve van het ontwerpen van verkeersdrempels.

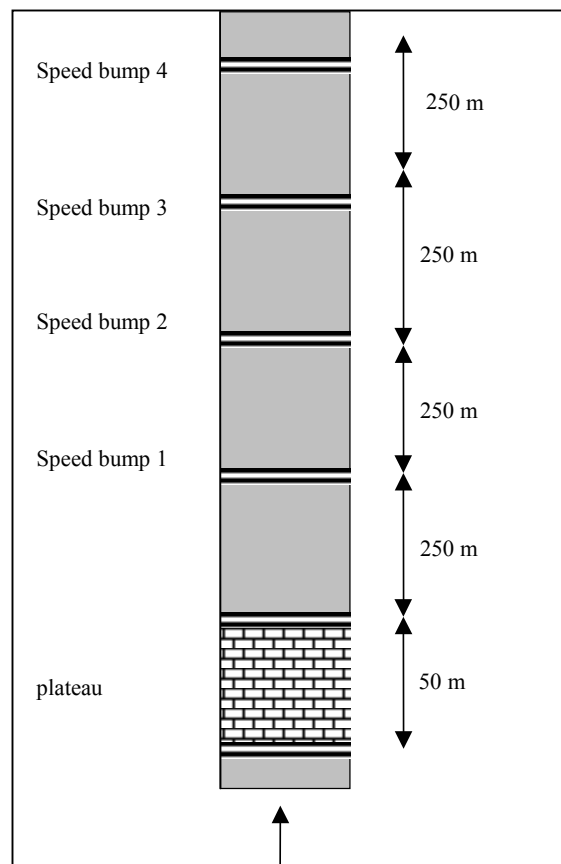
Dit onderzoek was in opdracht van het CROW door KOAC-WMD uitgevoerd ten behoeve van de realisatie van CROW-publicatie 172, "Richtlijn Verkeersdrempels". Bij deze publicatie behoort ook een Technisch Rapport Verkeersdrempels waarin de uitgevoerde onderzoeken en experimenten beschreven staan [19]. Het uiteindelijke doel van het onderzoek was om voor verschillende snelheden drempels te ontwerpen. Deze drempels diende wel het snelheidsbeperkende effect te hebben maar met zo min mogelijk kans op schade aan het voertuig.

Voordat het drempelexperiment werd uitgevoerd was er eerst met behulp van het ontwerpmodel een aantal drempels ontworpen, die daarna tijdens het experiment getoetst werden. Voor het experiment zijn uiteindelijk vier korte drempels en een verkeersplateau getoetst, zoals weergegeven in Figuur 3-5 en Tabel 3-1.

Het gebruikte ontwerpmodel was gebaseerd op een dynamisch voertuigmodel met als invoer de karakteristieken van een Peugeot 504. Deze gegevens waren afkomstig van een onderzoek uit begin jaren tachtig [18]. Het is dan ook de vraag of die gegevens nog wel overeenkomen met die van auto's van de huidige generatie voertuigen. Omdat het zeer moeilijk was deze benodigde informatie bij de autofabrikanten te verkrijgen is er voor gekozen om toch de Peugeot 504 te gebruiken. Aan het experiment zelf namen zes verschillende personenauto's deel waaronder ook een Peugeot 504. Uit deze experimenten is gebleken dat de uitkomsten van de Peugeot 504 goed overeen kwamen met de resultaten van de modernere voertuigen (o.a. Ford focus, Toyota avansis).

Tijdens de experimenten werd bij een constante voertuigsnelheid de versnellingen om de middel van de bestuurder en op de bodem van het voertuig bij de rijder gemeten. Dit werd gedaan bij snelheden variërend van 20 tot 40 km/h.

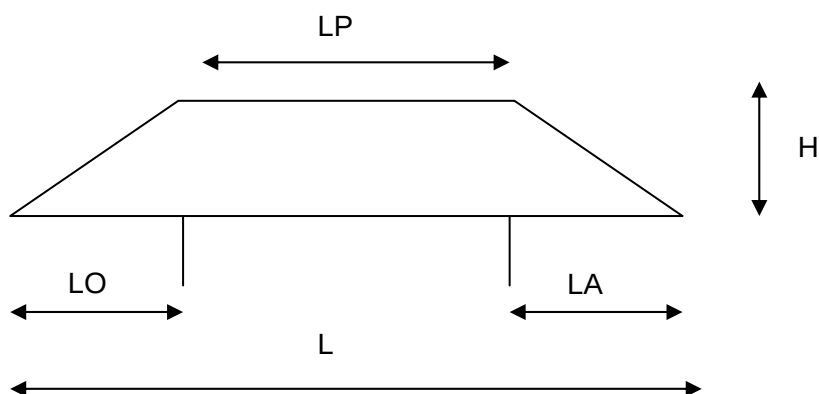
Figuur 3-5: Schematische voorstelling van de drempels [19]



Tabel 3-1: Afmetingen drempels experiment [19]

drempel	vorm oprit	helling [1:x]	H* [m]	LO=LA* [m]	LP* [m]	L* [m]
plateau	recht	9,84	0,08	0,79	50	51,6
1	recht	9,84	0,10	0,98	0,21	2,17
2	sinus	9,84	0,08	1,25	0	2,50
3	recht	9,84	0,08	0,79	0,21	1,79
4	recht	9,84	0,06	0,59	0,21	1,39

*: zie voor afkortingen Figuur 3-6.



Figuur 3-6: Model van de drempels

Relatie van experiment naar het huidige onderzoek

Voor het valideren van het voertuigmodel als beschreven in paragraaf 3.1.1 wordt er gebruik gemaakt van de versnellingen die gemeten zijn bij de Peugeot 504 die met een snelheid van 20 km/h over het plateau rijdt. De gemeten versnellingen aan het lichaam van de bestuurder worden vergeleken met de verticale versnellingen van M_{4d} van het model. De versnellingen op de bodem van het voertuig worden vergeleken met de verticale versnellingen van M_{2d} .

De reden dat alleen het plateau bekeken is en niet de resultaten van de korte drempels, is omdat er bij het plateau voldoende ruimte is tussen de oprit en afrit zodat deze afzonderlijk beschouwd kunnen worden. Bij de korte drempels is dit niet het geval en hebben de oprit en de afrit invloed op elkaar, waardoor dit moeilijker te modeleren is. Aangezien het onderzoek als hoofddoel heeft om eisen met betrekking tot zettingen van de ondergrond te genereren zijn vooral de langere onvlakheden van belang en niet de zeer korte zoals bij de korte drempels.

Er is gekozen om de vergelijking uit te voeren bij een snelheid van 20 km/h omdat bij toename van de snelheid het comfortniveau zo snel afneemt dat het normaal gesproken op de hoofdwegen niet voorkomt. Er dient ook rekening gehouden te worden met het feit dat tijdens het experiment de bestuurders de onvlakheden verwachten en daarop kunnen anticiperen. De reden dat de resultaten van een Peugeot 504 vergeleken worden met de resultaten van het model is omdat alle benodigde parameters voor de invoer van dat voertuig bekend zijn.

De invoergegevens voor het model

Om het drempel experiment na te bootsen met het model als uitgelegd in paragraaf 3.1.1 en Figuur 3-1 zijn er nog verschillende invoergegevens benodigd, namelijk:

- voertuig parameters,
- parameters betreffende een zittend persoon,
- een wegprofiel met een verkeersplateau.



Figuur 3-7: Peugeot 504

Als eerste worden de gegevens betreffende de Peugeot 504 gegeven. Deze zijn in Tabel 3-2 weergegeven. De gegevens zijn afkomstig uit "Voortgezette modelvorming van de auto in verband met het verkeersdrempelonderzoek; Vakgroep Voertuigtechniek TH Delft" [18]. Verder staan in de tabel de parameters van een zittend persoon die volgen uit de bijlage van de ISO 5982 "Mechanical vibration and shock - range of idealized values to characterize seated- body biodynamic response under vertical vibration" [7]. Bij het modeleren is er verder geen rekening gehouden met een passagier omdat tijdens het experiment slechts de bestuurder in de auto zat.

Tabel 3-2: Input parameters Peugeot 504 [7, 18]

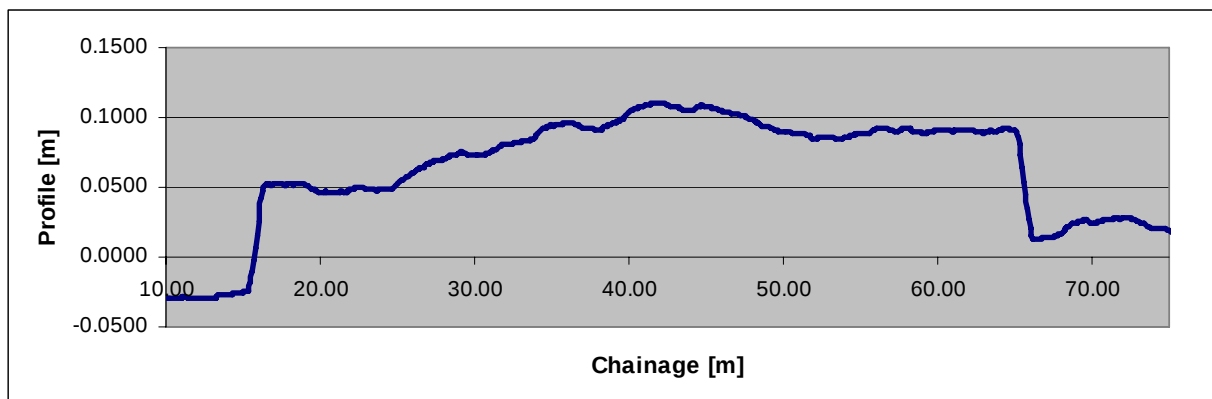
i^*	Massa (M_i) [kg]	Dampings- constante (c_i) [N•s/m]	Stijfheids- constante (k_i) [N/m]	Traagheids- moment (I_i) [kg•m ²]
1f	70	0	250.000	-
1r	70	0	250.000	-
2f	-	4500	28.000	-
2r	-	4000	35.000	-
2	1.090	0	0	1.896
3d	2	276	50.210	-
4d	45	1390	36.190	-
5d	6	387	9.999	-
6d	2	234	34.400	-

$d_f =$	1,27 m
$d_r =$	1,47 m
$d_d =$	-0,10m

*: De indexen staan verder uitgelegd in paragraaf 3.1.1 en Figuur 3-1.

Het nog missende invoergegeven is een langsprofiel. Dit profiel wordt opgebouwd uit een glad drempelprofiel met daarover een bepaalde standaard onvlakheid. Het gladde drempelprofiel volgt uit Figuur 3-6 met de gegevens van het plateau (Tabel 3-1). Voor een standaard onvlakheidsprofiel wordt uitgegaan van de onvlakheid van een pas aangelegde elementenverharding. Dit is niet geheel correct aangezien het een asfaltweg is, maar de aangelegde drempels bestaan wel uit betonstraatstenen. Er wordt aangenomen dat de fout die gemaakt wordt klein is aangezien de invloed van de drempels zelf vele malen groter is dan de invloed van de standaard onvlakheid.

Om een standaard onvlakheid te genereren wordt er gebruik gemaakt van een Power Density Spectrum (zie bijlage III). De benodigde gegevens volgde uit het onderzoek betreffende: "Permanent deformation in concrete block pavements"[5]. Voor dit onderzoek zijn verschillende betonsteenverhardingen gemeten met behulp van de ARAN. Als standaard wegprofiel wordt de Pascalweg uit dat onderzoek gebruikt. Dit omdat deze weg pas was aangelegd en dus beter overeenkomt met het net aangelegde plateau wat getoetst werd bij het experiment. De gegevens van deze weg waren een "a5m" van $497 \cdot 10^{-9}$ m en een "ang" van 0,81. Het uiteindelijke resultaat van het profiel staat weergegeven in Figuur 3-8.



Figuur 3-8: Invoer profiel t.b.v. een drempel bestaande uit elementenverharding

Toetsing van het model aan uitgevoerde experimenten

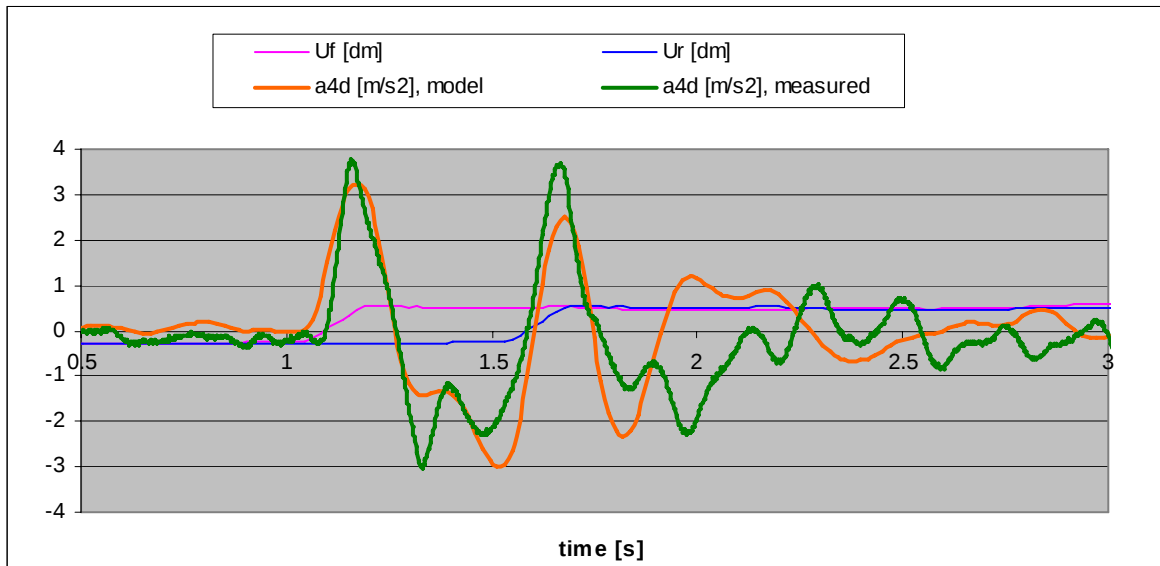
Nu alle benodigde invoergegevens bekend zijn is het mogelijk om de verticale versnellingen van iedere massa in het model te berekenen. Hiermee worden zowel de versnellingen van de verschillende locaties in het voertuig als de verschillende benoemde lichaamsdelen bedoeld. Deze versnellingen kunnen nu voor iedere willekeurige snelheid bepaald worden en worden uitgezet tegen een tijdsschaal.

Zoals al eerder gemeld, worden de metingen die aan het lichaam van de bestuurder gedaan zijn, vergeleken met de verticale versnellingen van de massa die het lichaam van de bestuurder voorstelt (M_{4d}). Om een overzichtelijke vergelijking te maken zijn de resultaten van het model en de gemeten waarden weergegeven in Figuur 3-9 en Figuur 3-10.

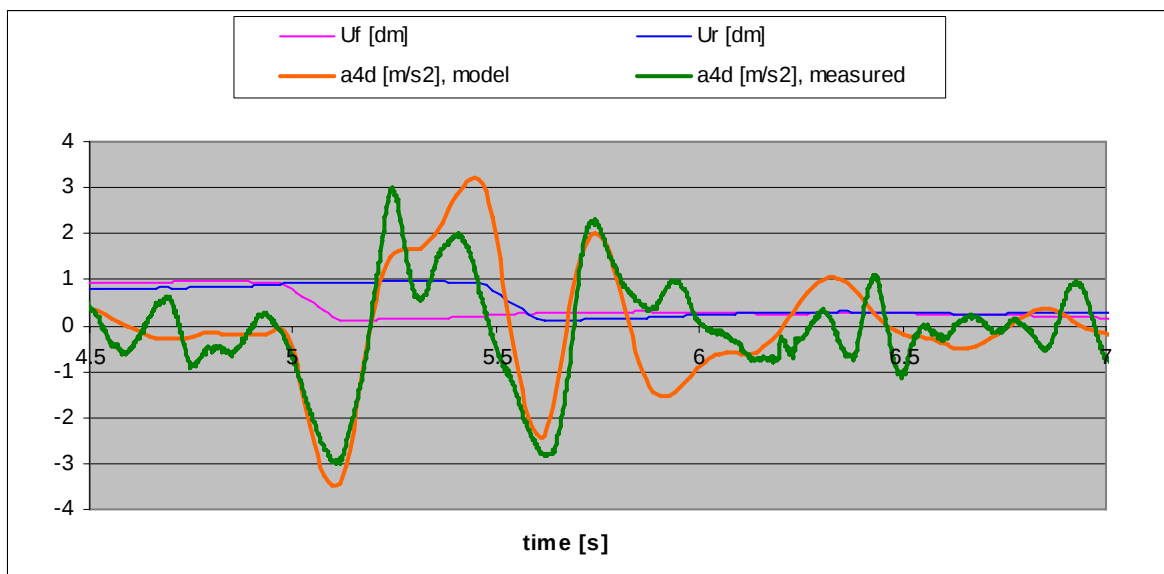
Uit de figuren volgen twee belangrijke overeenkomsten, namelijk:

- De periode van beide versnellingsuitvoeren komen overeen. Dit betekent dat de frequenties van de door de helling veroorzaakte versnellingsuitvoer gelijk is bij zowel de gemeten waarden gedurende het experiment als die volgde uit het voertuigmodel.
- De maxima van de versnellingen komen overeen. Wat betekent dat de absolute waarden van de versnellingen uit het voertuigmodel als realistisch beschouwd kunnen worden voor deze situatie.

Deze twee overeenkomsten zijn van belang voor de verdere verwerking van de uitvoer.



Figuur 3-9: Verticale versnelling van de bestuurder bij het oprijden van het plateau



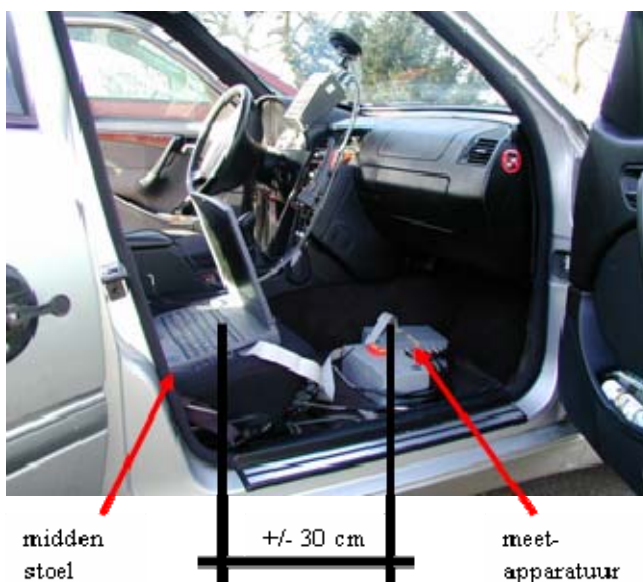
Figuur 3-10: Verticale versnelling van de bestuurder bij het afrijden van het plateau

Er dient alleen nog wel duidelijk vermeld te worden dat de resultaten van het model volgen uit een invoerprofiel dat gebaseerd is op een ideale vlakke drempelvorm met een bepaalde ruis er overeen. Deze aanname diende gemaakt te worden omdat tijdens het experiment het werkelijke langsprofiel niet gemeten is. Of de drempels exact volgens ontwerp zijn aangelegd valt nu niet meer te controleren. Om deze reden zijn waarschijnlijk de kleine afwijkingen tussen de resultaten van het model en de praktijk te verklaren.

De metingen die tijdens het experiment op de bodem van het voertuig zijn gedaan worden vergeleken met de verticale versnellingen van het voertuig (M_2). Alleen dient deze waarde nog wel bepaald te worden aangezien de metingen zijn gedaan voor de stoel en niet onder de stoel (zie Figuur 3-11). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van Vergelijking 3-5, die gebaseerd is op Vergelijking 3-1. De d_b dient nu bepaald te worden. Hiervoor is aangenomen dat het meetapparaat 30 cm voor het midden van de stoel is geplaatst. Dit resulteert in een d_b van +0,2 meter.

Vergelijking 3-5

$$x_{2pp} = x_2 + d_b * \varphi_2$$

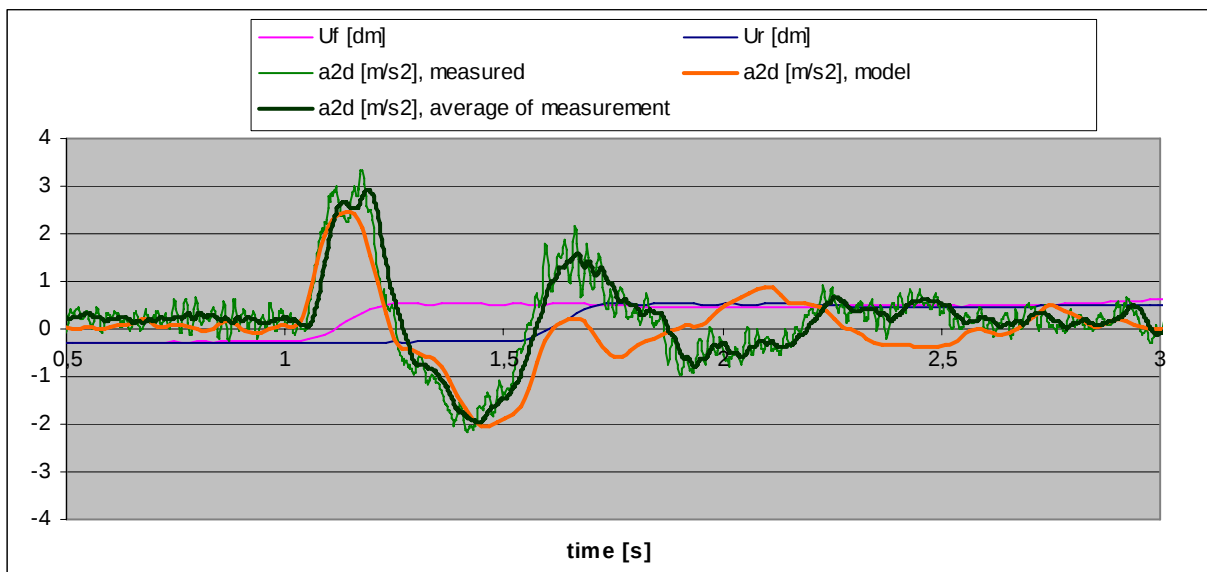


Figuur 3-11: Situatie in de auto

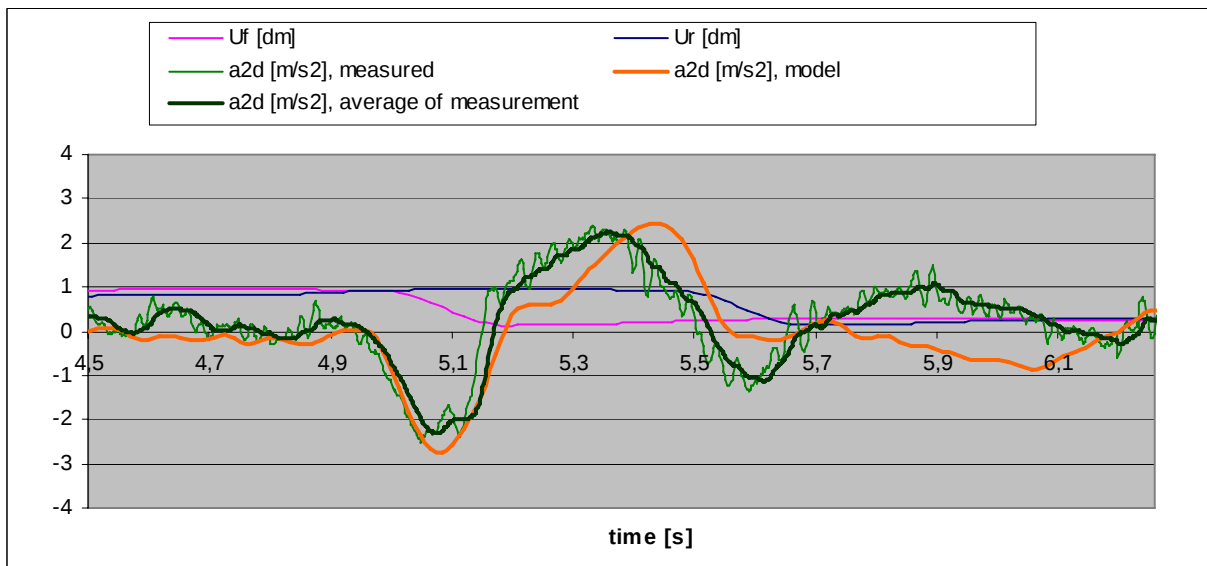
De uitvoer van het model en de resultaten van de metingen staan samen weergegeven in Figuur 3-12 en Figuur 3-13. Hierbij kunnen dezelfde conclusies getrokken worden als bij de metingen aan het lichaam van de bestuurder; namelijk dat de periodes en de maximale waarde weer goed overeenkomen.

Hier valt alleen nog wel op te merken dat de invloed van de achteras (u_r) bij het model minder is dan de gemeten waarde, wat af te leiden valt aan het tweede maximum. Daarom is gekeken of dit door de invoerparameters van het voertuig kan worden verklaard. Om dit te bepalen worden aan de dempings- en veerconstanten enkele kleine aanpassingen gedaan en is er gekeken wat de invloed is op het resultaat. Telkens kwam echter het model met de startwaarde (zoals deze in Tabel 3-2 gegeven zijn) nog het beste overeen met de gemeten waarde uit het experiment. Daarom is er voor gekozen om met deze startwaarden, verder te werken.

Een andere reden voor de verschillen kan zijn dat de versnellingen ($a_{2d, \text{model}}$) uit model betrekking hebben op het chassis. Omdat de meetapparaat waarschijnlijk op de bodem is geplaatst en niet momentvast verbonden zit aan het chassis bestaat de mogelijkheid dat de meetapparaat zich verplaatst kan hebben ten opzichte van het chassis.



Figuur 3-12: Verticale versnelling op de bodem van het voertuig bij het oprijden van het plateau



Figuur 3-13: Verticale versnelling op de bodem van het voertuig bij het afrijden van het plateau

Op basis van de vergelijking van de resultaten van het drempel experiment met de resultaten van het voertuigmodel kan geconcludeerd worden dat er een behoorlijk goede overeenkomst tussen beide is. Tevens kan er geconcludeerd worden dat het voertuigmodel gebruikt kan worden ter bepaling en toetsing van de versnellingen die een persoon ervaart. Wel dient nogmaals vermeld te worden dat het één en ander gebaseerd is op de resultaten van een Peugeot 504. Uit het onderzoek in Hoorn volgde echter dat de resultaten van de andere voertuigen een overeenkomstig beeld gaven. Daarom is voor dit onderzoek de Peugeot 504 als "standaard" voertuig genomen. In hoofdstuk 6 zal er op deze aanname teruggekomen worden door te kijken wat de invloed is van de verschillende invoerparameters op het resultaat van de berekeningen is.

3.2 Beoordelingsprocedure voor comfort [6]

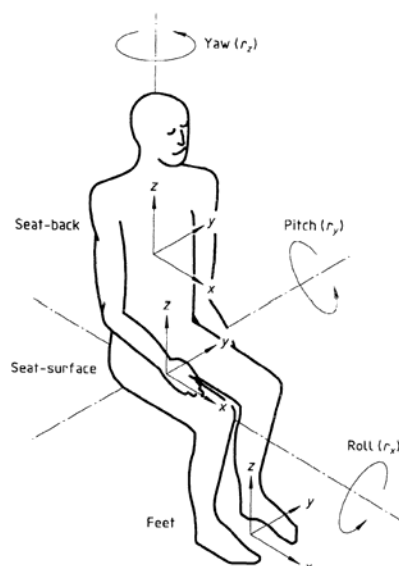
In de voorgaande paragraaf is geconcludeerd dat met het voertuigmodel de verticale versnellingen van een weggebruiker bepaald kunnen worden. Deze uitvoer geeft echter geen waardeoordeel over hoe een gebruiker deze versnellingen ervaart. Daarom dient deze uitvoer nog zodanig verwerkt te worden zodat er aan elk wegvak een bepaalde comfortwaarde toegekend kan worden. Voor deze verwerking wordt er gebruik gemaakt van de ISO 2631-1 [6] "Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration".

In deze paragraaf worden de verschillende beoordelingsprocedures voor de versnellingen uitgelegd. Als eerste wordt in sub-paragraaf 3.2.1 een algemene inleiding en de relatie van de ISO 2631-1 naar het comfortniveau betreffende het wegvak gelegd. Daarna worden in sub-paragraaf 3.2.2 en 3.2.3 de verschillende evaluatie methoden besproken.

3.2.1 algemeen

In de ISO 2631-1 worden algemene aanbevelingen gegeven over de invloed van trillingen op het menselijk lichaam. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de invloed van trillingen op gezondheid, comfort en bewegingsziekte (wagenziekte). Verder wordt er in de ISO 2631-1 verschil gemaakt tussen een zittend, staand en liggend persoon. Omdat dit onderzoek betrekking heeft op een weggebruiker worden alleen de invloeden van trillingen op een zittend persoon onderzocht.

Verder is het van belang in welke richting de trillingen ervaren worden en op welke locatie deze invloed hebben. Het belangrijkste contactoppervlak tussen het lichaam en het trillende oppervlak is niet altijd duidelijk vast te stellen. Daarom wordt er in de ISO 2631-1 gebruik gemaakt van drie hoofdcontactlocaties, het zittende oppervlak (Seat-surface), de voeten en de rug. Verder wordt er ook nog onderscheid gemaakt in de drie hoofdrichtingen: evenwijdig aan de rijrichting (x), dwars op de rijrichting (y) en verticaal (z). Al deze vrijheidsgraden zijn weergegeven in Figuur 3-14. Om een keuze van de locatie te maken dient er gelet te worden op wat het belangrijkste contactvlak van een zittend persoon is. Verwacht wordt dat een automobilist de meeste trillingen ervaart via het zittende oppervlak.



Figuur 3-14: Vrijheidsgraden van een zittend persoon

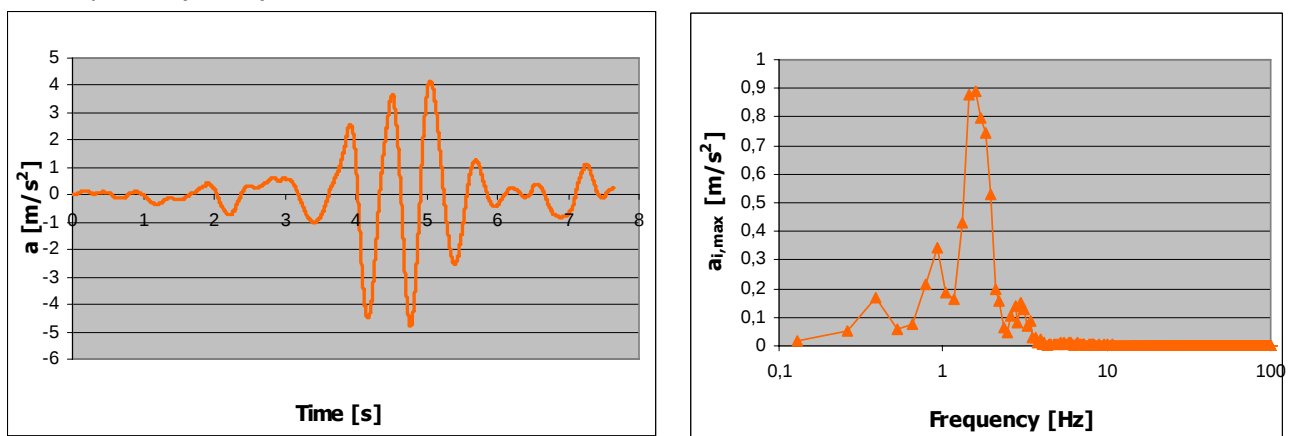
In de ISO 2631-1 is verder nog beschreven dat wanneer de versnelling in een bepaalde richting (x, y of z) kleiner is dan 25 procent van de versnelling in een andere richting, je deze kunt verwaarlozen. Zoals al eerder gesteld, wordt er verwacht dat de langsonvlakheid vooral invloed heeft op de verticale versnelling van een weggebruiker. Dit bleek ook uit de resultaten van experimenten in Hoorn. Bij deze experimenten werden de versnellingen in de drie hoofdrichtingen gemeten. Hieruit volgde duidelijk dat de langsonvlakheid vooral versnellingen veroorzaken in de verticale richting.

Daarom wordt er in het verdere onderzoek alleen naar de verticale versnellingen gekeken en worden de versnellingen in horizontale richting, als verwaarloosbaar verondersteld ten opzichte van de verticale versnellingen. Vanaf nu wordt er in het verslag met versnellingen de verticale versnellingen van het zittend oppervlak van de bestuurder bedoeld (a_{4d}), tenzij anders vermeld.

De invloed van trillingen op het menselijk lichaam zijn zeer afhankelijk van de frequentie van de trilling. Om die reden wordt er een wegingsfunctie gebruikt voor de versnellingen die afhankelijk is van de frequentie van de trilling. Daarom dienen de versnellingen die uitgezet zijn als functie van tijd (a_{4d}) omgezet te worden naar versnellingen als functie van frequentie ($a_{i,max}$).

Iedere willekeurige versnellingsuitvoer als functie van tijd bestaat uit een combinatie van amplitudes horende bij verschillende frequenties. Met andere woorden, iedere versnellingsuitvoer is opgebouwd uit een reeks golven met verschillende golflengten en amplitudes. Een versnellingsuitvoer als functie van frequentie geeft de amplitude van de versnelling horende bij een bepaalde frequentie.

In Figuur 3-15 is een voorbeeld gegeven van een versnelling als functie van tijd (links) en als functie van frequentie (rechts).



Figuur 3-15: Verticale versnelling van bestuurder als functie van tijd (l) en frequentie (r)

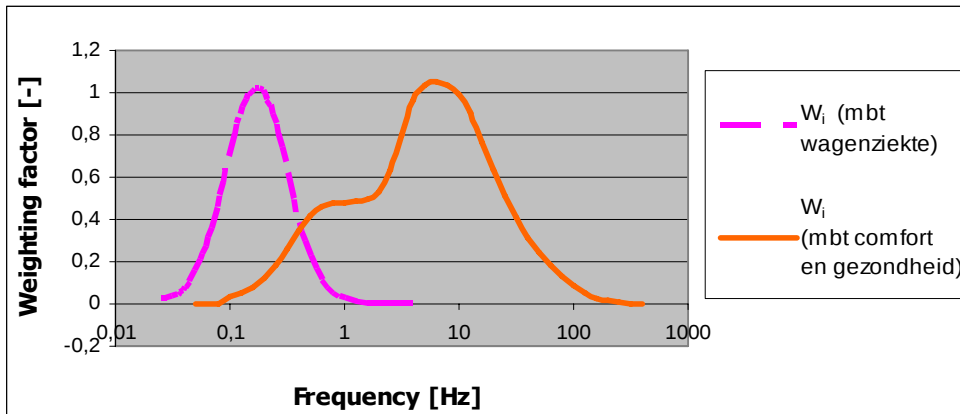
Om deze omzetting te kunnen realiseren wordt er gebruik gemaakt van de Fast Fourier Tranformation (FFT). Met behulp van deze transformatie is het mogelijk om iedere willekeurige getallenreeks om te zetten naar een eindig aantal sinussen en cosinussen, mits de getallenreeks aan een aantal voorwaarden voldoet. Uit deze reeks sinussen en cosinussen valt dan de amplitude van de versnellingen te bepalen bij een bepaalde frequentie (zoals weer gegeven in Figuur 3-15, rechts). Voor een verdere uitleg en de voorwaarden van de FFT en onderbouwing wordt er verwezen naar bijlage IV.

Nu de verticale versnellingen die de weggebruiker ervaart weergegeven kunnen worden als functie van frequentie, is het mogelijk om de gewogen verticale versnellingen te bepalen, als weergegeven in Vergelijking 3-6. De onbekende hierin is nog de wegingsfactor (W_i) die afhankelijk is van de frequentie van de versnellingen. De wegingsfuncties voor de verticale versnellingen van het zittend oppervlak zijn weergegeven in Figuur 3-16 [6]. Hierbij bestaat er verschil tussen de wegingsfactoren met betrekking tot comfort en gezondheid en de wegingsfactoren met betrekking tot wagenziekte. Omdat het onderzoek in eerste instantie betrekking heeft op het comfort van de weggebruiker wordt er verder gewerkt met de wegingsfactor horende bij comfort en gezondheid.

Vergelijking 3-6

$$a_{w,i,max} = W_i * a_{i,max}$$

Met: $a_{i,max}$ = de maximale versnellingen voor de i^{de} frequentie [m/s^2];
 W_i = de wegingsfactor voor de i^{de} frequentie [-];
 $a_{w,i,max}$ = de gewogen maximale versnelling voor de i^{de} frequentie [m/s^2];



Figuur 3-16: Wegingsfuncties (W_i) voor verticale versnellingen [6]

In dit onderzoek wordt de invloed van het langsprofiel op wagenziekte verder buiten beschouwing gelaten maar het verdient wel aanbeveling om dit verder te onderzoeken. Voor wagenziekte zijn vooral de langere golflengte van belang.

3.2.2 De standaardevaluatiemethode

Bij de standaard evaluatiemethode wordt er gebruik gemaakt van het kwadratische gemiddelde van de gewogen versnellingsuitvoer. Het kwadratische gemiddelde is een statistische maatstaf om een grootheid toe te kennen aan een variërende getallenreeks. Deze maatstaf is vooral bruikbaar bij golfbewegingen met negatieve en positieve waarden zoals veelal bij trillingen voorkomt.

Voor het bepalen van het kwadratische gemiddelde dient de getallenreeks weer omgezet te worden van frequentiedomein ($a_{w,i,max}$) naar tijdsdomein tijd ($a_w(t)$). Dit wordt gedaan met behulp van de inverse Fast Fourier Transformation die werkt zoals de FFT maar dan omgekeerd. Dit is verder uitgelegd in Bijlage IV. In Figuur 3-17 is een voorbeeld van deze omzetting weergegeven.

Nu de gewogen versnelling bekend is als functie van tijd ($a_w(t)$) is het mogelijk om de standaard evaluatiemethode toe te passen. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van Vergelijking 3-7.

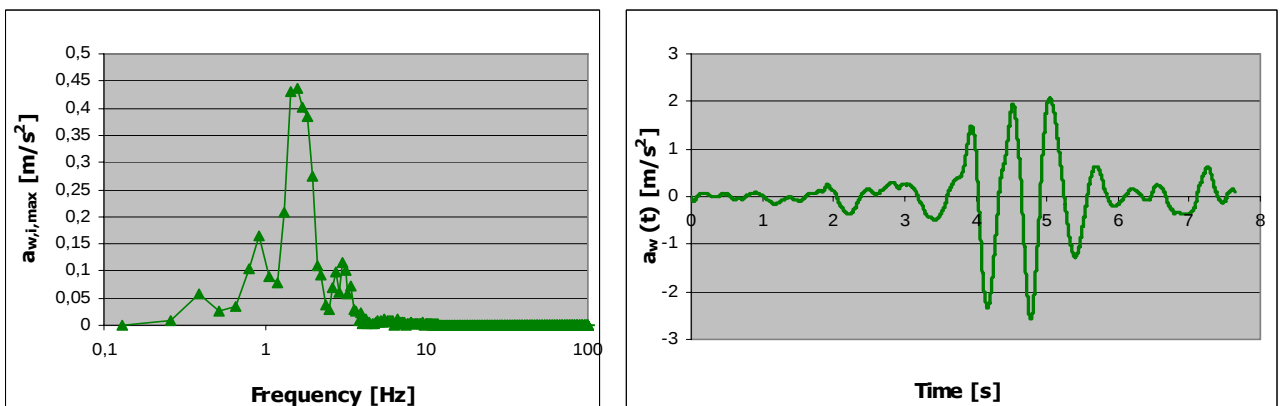
Vergelijking 3-7

$$a_w = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Met: a_w = kwadratisch gemiddelde van de gewogen versnellingsuitvoer voor een wegvak [m/s^2];

$a_w(t)$ = de gewogen verticale versnelling als functie van tijd [m/s^2];

T = de duur van de meting [s];



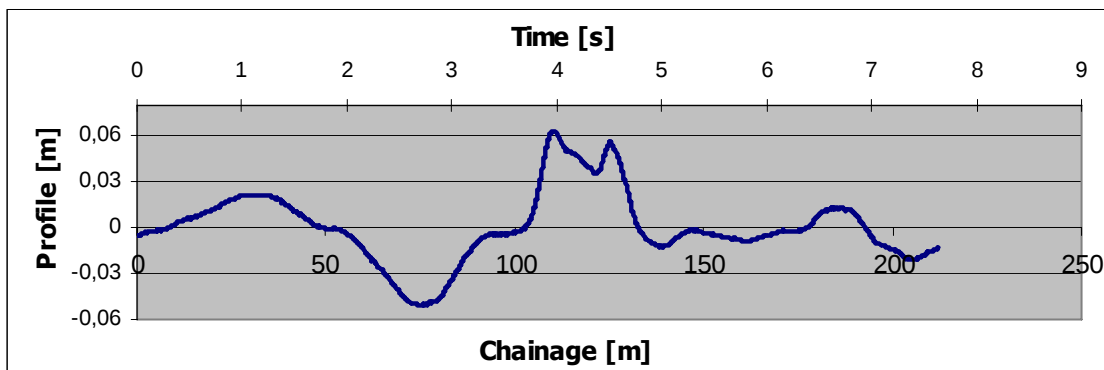
Figuur 3-17: Gewogen verticale versnelling van bestuurder als functie van frequentie (l) en tijd (r)

Om een oordeel te geven over de waarde van het kwadratische gemiddelde (a_w) is er in de bijlage van de ISO 2631-1 [6] een richtlijn gegeven voor wat comfortabel is en wat niet. De aanbevelingen die volgen uit deze richtlijn zijn hieronder kort weergegeven. Hierbij dient vermeld te worden dat de aanbevelingen met betrekking tot comfort zeer afhankelijk zijn van de aard en duur van de versnellingen.

Als a_w :	kleiner dan $0,315 \text{ m/s}^2$	: comfortabel,
	$0,315$ tot $0,63 \text{ m/s}^2$	: merkbaar,
	$0,5$ tot 1 m/s^2	: redelijk oncomfortabel,
	$0,8$ tot $1,6 \text{ m/s}^2$	: oncomfortabel,
	$1,25$ tot $2,5 \text{ m/s}^2$	: erg oncomfortabel,
	Groter dan 2 m/s^2	: extreem oncomfortabel.

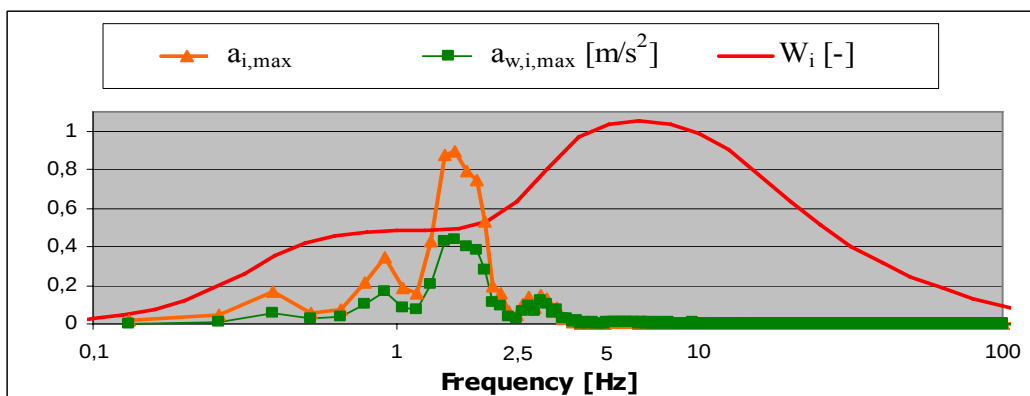
Voorbeeld

De beoordelingsprocedure wordt aan de hand van een voorbeeld uitgelegd. Dit voorbeeld bestaat uit een wegvak wat gelegen is in zettingsgevoelig gebied en waar ook een duiker in de ondergrond aanwezig is. De lengte van het wegvak is 212 meter. Het langsprofiel is verder weergegeven in Figuur 3-18. Uit dit profiel volgt duidelijk waar de duiker gelegen is (+/- 110 m). Dit gedeelte is namelijk hoger gelegen dan het omliggende gebied. De oorzaak hiervan is dat de duiker gefundeerd is op palen en dus als zettingsvrij beschouwd kan worden.



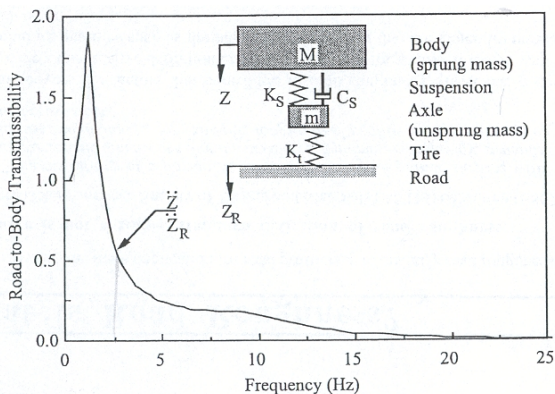
Figuur 3-18: Gebruikte profiel uitgezet tegen tijd (7.6 s) en afstand (212 m)

Met behulp van het voertuigmodel uit paragraaf 3.1 wordt de verticale versnelling die de weggebruiker ondergaat bepaald. In dit voorbeeld wordt dat gedaan bij een snelheid van 100 km/h. In Figuur 3-15 zijn de resultaten van het voertuigmodel gegeven. Hierin is duidelijk zichtbaar dat vooral de duiker verticale versnellingen veroorzaakt voor de weggebruiker (tussen de 4 en 5 seconden). Met behulp van Vergelijking 3-6 kan nu de gewogen versnelling bepaald worden. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 3-19. Hierin zijn de verticale versnelling (voor en na de wegingsfunctie) samen met de wegingsfunctie weergegeven.



Figuur 3-19: Versnellingen van de bestuurder voor ($a_{i,max}$) en na ($a_{w,i,max}$) het toepassen van de wegingsfunctie mbt tot comfort gezondheid (W_i)

Uit Figuur 3-19 volgt dat de frequentie van de versnellingen voor dit voorbeeld rond de 1 Hz liggen. Uit de gemiddelde dynamische eigenschappen van een voertuig volgt dat de carrosserie van een voertuig



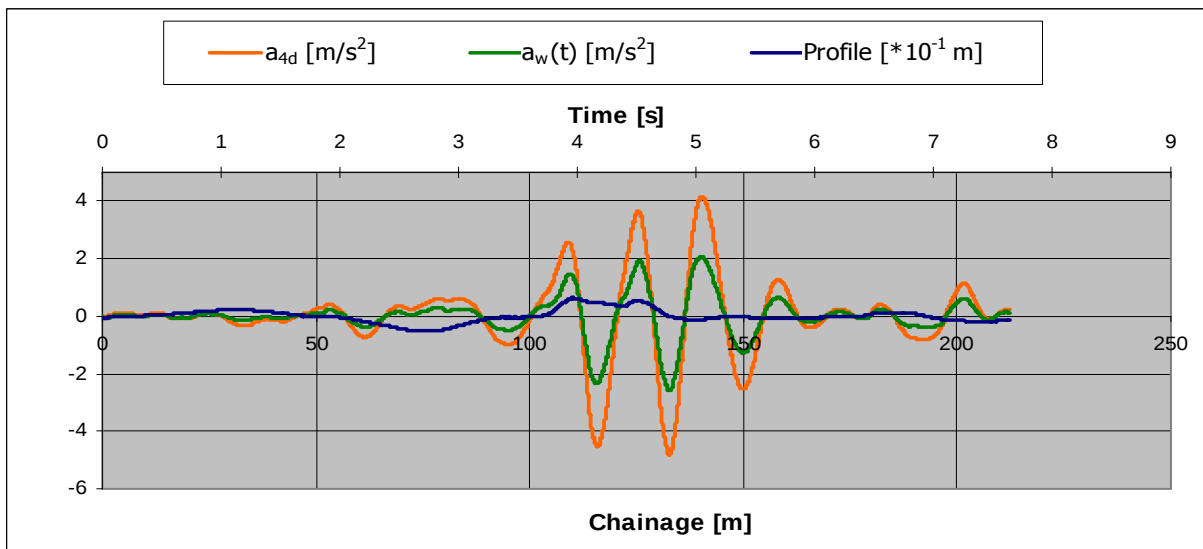
gaat resoneren voor een frequentie rond de 1 Hz, zie Figuur 3-20. Door deze resonantie is verplaatsing van de carrosserie van het voertuig 1,5 tot 3 keer zo groot dan de verplaatsing van het wegprofiel. Deze factor is afhankelijk van het soort voertuig en de snelheid.

Verder volgt hier ook uit dat frequenties groter dan 5 Hz worden uitgedempt door de wielophanging, dus dat korte onvlakheden ($< 0,5$ meter) geabsorbeerd worden door de wielophanging. En dat lage frequenties één op één doorgegeven worden aan de carrosserie.

Figuur 3-20: Overdrachtsfunctie voor een wielophanging [15]

Wanneer dit terugkoppeld wordt naar Figuur 3-19 kan gesteld worden dat de frequentie die het grootste discomfort veroorzaakt (rond de 10 Hz, volgend uit de wegingsfunctie) niet voorkomt in het voertuig, en dat de belangrijkste frequentie rond de 2 Hz ligt. Hierdoor kan gesteld worden dat de invloed van de wegingsfactor op de uitkomsten gering is en dat de grootte van de wegingsfactor vooral rond de 0,5 ligt, voor dit voorbeeld.

De factor van 0,5 komt ook naar voren als de gewogen versnelling uitgezet wordt als functie van tijd, zie Figuur 3-21. Hierin is zichtbaar dat de gewogen versnellingen ongeveer overal gehalveerd zijn ten opzichte van de resultaten uit het voertuigmodel.



Figuur 3-21: Versnellingen als functie van tijd (7,6 seconden = 212 meter)

Met behulp van Vergelijking 3-7 kan nu de effectieve waarde (a_w) van het wegvak bepaald worden. Voor dit voorbeeld bedraagt deze $0,685 \text{ m/s}^2$. Deze waarde geeft een bepaald comfortniveau van het gehele wegvak aan. Hierbij geldt net zoals bij de bepaling van de IRI, dat eenmalige voorkomende piekwaarden uitgevlakt worden over het gehele wegvak. Om piekwaarden wel mee te kunnen nemen is een aanvullende methode noodzakelijk. Deze methode wordt verder toegelicht in sub-paragraaf 3.2.3.

Volgens de aanbevelingen als weergegeven bovenaan pagina 25 is het voorbeeld wegvak te classificeren als redelijk oncomfortabel. Dit is redelijk realistisch aangezien er onvlakheden in het wegprofiel zitten. Voor vaststellen van werkelijke grenzen aan de comfortparameter dient echter meer onderzoek gedaan te worden. In deze master thesis is hier een aanzet voor gemaakt in hoofdstuk 4.

3.2.3 Aanvullende evaluatiemethoden

De standaardmethode is geschikt om het comfort van een wegvak te beoordelen. Echter kleine en lokale oneffenheden worden met deze methode uitgevlakt, terwijl deze door de weggebruiker als zeer oncomfortabel worden ervaren. Daarom is er voor deze situaties een aanvullende methode benodigd. Hiervoor zijn er in de ISO 2631-1 [6] twee methoden beschreven, namelijk de "running RMS method" en de "fourth power vibration dose value method". Met behulp van deze methoden is het mogelijk om een waarde toe te kennen aan de piekwaarde van de versnellingen die veroorzaakt worden door de kleine lokale onvlakheden. De methoden worden hieronder verder toegelicht.

"The running RMS" methode

De running Root Mean Square methode is letterlijk vertaald het lopend kwadratisch gemiddelde. Met andere woorden het is eigenlijk hetzelfde als de standaard evaluatie methode, alleen wordt bij deze methode het kwadratisch gemiddelde niet bepaald over het gehele wegvak maar over een kleiner gedeelte hiervan. Met deze methode wordt er rekening gehouden met incidentele schokken en kortstondige versnellingen. Dit wordt gedaan door een kortere integratietijd toe te passen bij het bepalen van het kwadratisch gemiddelde. In formule vorm ziet dat er als volgt uit:

Vergelijking 3-8:

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{MTVV} = \max \{a_w(t_0)\}$$

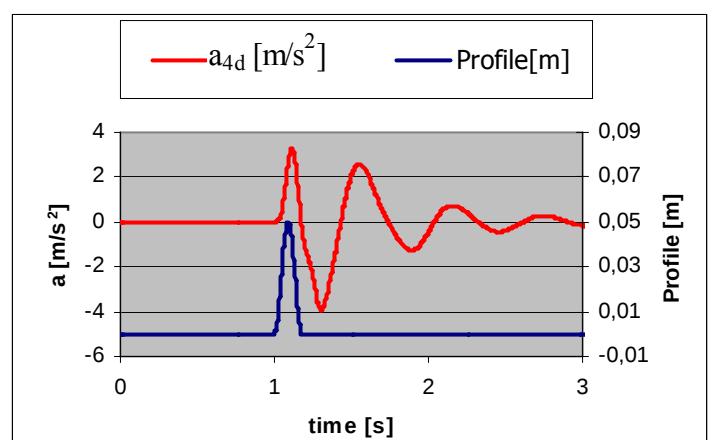
Met:

- $a_w(t_0)$ het lopend kwadratisch gemiddelde van de gewogen versnelling op tijdstip t_0 [m/s^2];
- $a_w(t)$ de gewogen verticale versnelling als functie van tijd [m/s^2];
- τ de integratie-interval voor het lopend gemiddelde [s];
- t de integratie variabele [s];
- t_0 het tijdstip van waarnemen [s];
- MTVV de Maximum Transient Vibration Value [m/s^2].

De grootheid die volgens de ISO 2631-1 wordt toegekend aan deze methode is de "maximum transient vibration value" (MTVV), met andere woorden: de maximale incidentele versnellingswaarde. Dit is het maximum van het lopend kwadratisch gemiddelde van de gewogen versnellingen ($a_w(t_0)$).

Om de methode te gebruiken dient er een integratietijd (τ) bepaald te worden, waarbij in de ISO 2631-1 een tijd van 1 seconde voor wordt aanbevolen. Bij deze methode lijkt het of er nog steeds met een gemiddelde waarde gewerkt wordt en dus dat extreme piekwaarden (korter dan 1 seconde) nog steeds uitgevlakt kunnen worden.

Maar als er gekeken wordt wat de invloed is van een zeer korte onvlakheid op de versnellingen van de bestuurder (zie Figuur 3-22) blijkt de aanname van een integratietijd van 1 seconde realistisch.



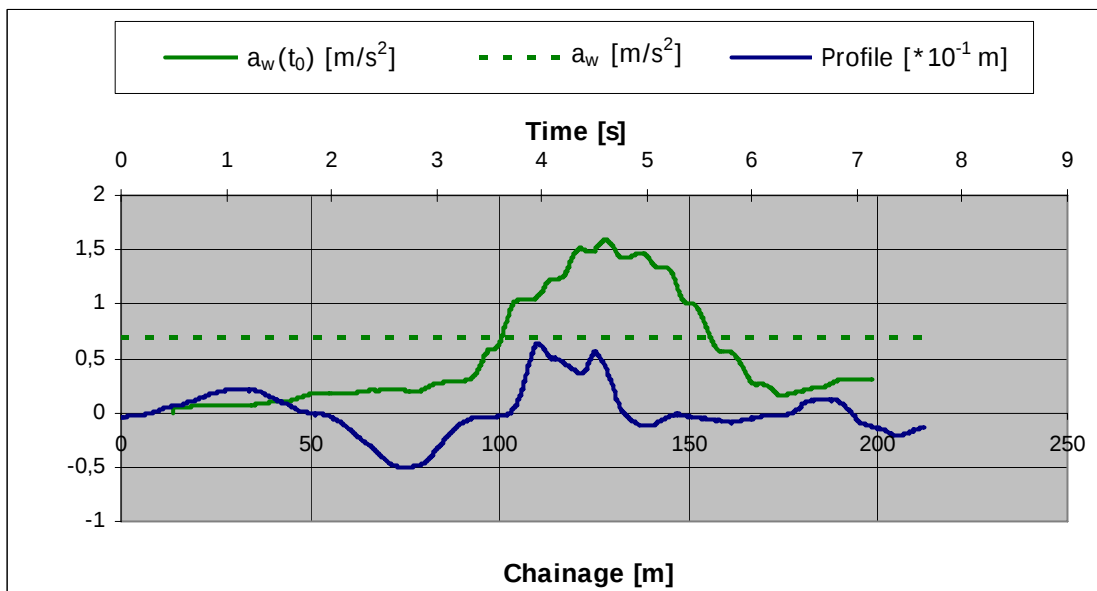
Figuur 3-22: Invloed van een lokale onvlakheid

In het voorbeeld gegeven in Figuur 3-22 is een onvlakheid van 0,05 meter over 2,5 meter gemodelleerd. Er is gekeken wat dit voor invloed heeft op de verticale versnellingen van een weggebruiker die de onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h passeert. Uit de uitvoer blijkt dat de versnellingen veroorzaakt door de korte onvlakheid ongeveer 1 seconde doorwerken in het voertuigmodel. Om die reden kan er gesteld worden dat een integratie tijd van 1 seconde een goede aanname is om de MTVV te bepalen.

In de ISO 2631-1 is verder aangegeven dat de MTVV gerapporteerd dient te worden als deze een grotere waarde heeft dan anderhalf keer de standaardevaluatiemethode (a_w).

Voorbeeld

Om de running RMS methode ook beter toe te lichten wordt deze toegepast op het voorbeeld. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de gewogen versnellingen als weergegeven in Figuur 3-21. Hierna wordt er met behulp van Vergelijking 3-8 het lopend kwadratisch gemiddelde van de gewogen versnelling bepaald ($a_w(t_0)$). Deze uitvoer is weergegeven in Figuur 3-23. Hierin is tevens de waarde van de standaard evaluatiemethode en het langsprofiel van het wegvak gegeven. Zoals al eerder vermeld geeft de standaard evaluatiemethode (a_w) maar één waarde aan een heel wegvak. Daarom is deze waarde als een constante waarde weergegeven in de figuur ($0,685 \text{ m/s}^2$), dit om het verschil van beide methoden duidelijk weer te geven.



Figuur 3-23: MTVV uitgezet tegen wegvak

De MTVV van dit wegvak is $1,595 \text{ m/s}^2$ en is, zoals duidelijk zichtbaar, gelegen rond de 125 meter in het wegvak. Wat er verder in de grafiek opvalt, is dat het eerste dal in het profiel (75 meter) niet terugkomt in de uitvoer van de running RMS en dat de duiker (100 tot 130 meter) wel duidelijk terugkomt. Op de reden van deze verschillen wordt verder in hoofdstuk 5 en 6.

De waarde van de MTVV is ook groter dan anderhalf keer de standaardevaluatiemethode (a_w) en dient volgens de ISO 2631-1 gerapporteerd te worden. Verder is duidelijk zichtbaar wat het voordeel van de running RMS methode is ten opzichte van de standaardevaluatiemethode. Uit de running RMS methode volgt duidelijk waar de problemen liggen in een bepaald wegvak. Wat vooral wordt veroorzaakt door dat de running RMS bepaald is over een kortere afstand/tijd.

"The fourth power vibration dose method"

Deze methode is net zoals de running RMS methode ook op de standaardevaluatiemethode gebaseerd. Alleen wordt er in plaats van het kwadratische gemiddelde, de 4^{de} macht gemiddelde bepaald. Hierdoor hebben de grotere versnellingen meer invloed op de te bepalen grootte. In formule vorm ziet dat er als volgt uit:

Vergelijking 3-9:

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{1/4}$$

Met: VDV = de Vibration Dose Value [$m/s^{1.75}$];
T = e duur van de meting [s]

Een nadeel van deze methode ten opzichte van de running RMS methode is dat er bij deze methode weer alleen één waarde aan het gehele wegvak wordt toegekend. Hierdoor is het niet direct mogelijk de locatie van de kleine oneffenheid te bepalen. Een ander voordeel van de running RMS methode is dat deze gevoeliger is voor kleine oneffenheden dan de VDV-methode. Als je bij de VDV-methode net zoals bij de running RMS een kleiner tijdsinterval toepast, geeft de VDV-methode de lokale onvlakheden wel beter aan. Maar dit is in de ISO 2631-1 niet toegepast.

Om die reden wordt er in dit verslag verder gewerkt met de running RMS methode en de VDV-methode buiten beschouwing gelaten.

3.3 Conclusies t.a.v. de comfortparameters

Gebaseerd op de informatie zoals in dit hoofdstuk behandeld, kan geconcludeerd worden dat het mogelijk is om twee belangrijke comfortparameters te bepalen:

- **a_w**
De effectieve waarde van de gewogen versnellingsuitvoer voor een geheel wegvak (a_w), waarbij een waarde wordt verkregen die gebaseerd is op de gemiddelde versnellingen die over het gehele wegvak worden ondergaan.
- **MTVV**
Het maximum van het lopend kwadratische gemiddelde van de gewogen versnellingen ($a_w(t_0)$) over een periode van 1 seconde. De MTVV geeft een waarde aan de voorkomende piekwaarde die volgen uit lokaal optredende onvlakheden.

Bij het bepalen van deze parameters wordt er rekening gehouden de frequentie van trillingen waarvoor het menselijk lichaam gevoelig is. Verder dient er voor het bepalen van deze parameters gebruik te worden gemaakt van een voertuigmodel. Bij dit voertuigmodel zijn de voertuiggegevens te variëren. Het voertuigmodel is getoetst aan praktijkexperimenten die in 2001 door het CROW uitgevoerd zijn en waar een Peugeot 504 aan deelnam. Uit deze toetsing blijkt dat het model (met de voertuiggegevens van een Peugeot 504) een goed overeenstemmend beeld geeft met de gemeten waarden bij de Peugeot 504.

Een andere belangrijke conclusie uit de drempelexperimenten is dat de resultaten van een Peugeot 504 redelijk overeenkomen met modernere voertuigen (Ford focus, Toyota avansis). Uit het voertuigmodel volgen uiteindelijk versnellingen die een weggebruiker ondervindt in het voertuig. Deze versnellingen kunnen daarna met behulp van de ISO 2631-1 omgezet worden naar de comfortparameters (a_w en MTVV).

Deze parameters kunnen bepaald worden voor ieder type weg en voor iedere voertuigsnelheid. Ook kunnen de voertuigparameters aangepast worden. In dit verslag wordt met een Peugeot 504 als standaard voertuig gewerkt. Het totale model is verder uitgewerkt in Excel. De uitleg van dit Excel werkblad is weergegeven in Bijlage V.

4 Modelkalibratie met praktijkvoorbeelden

Voor een eerste bepaling van de grenzen van de comfortparameters wordt gebruik gemaakt van toetsingsvoorbeelden uit de praktijk. Als eerste wordt in paragraaf 4.1 op basis van het experimenten in Hoorn (zie paragraaf 3.1.3) een vergelijking gemaakt tussen het comfort van de weggebruikers bij drempels en de resultaten die volgen uit het model.

Vervolgens wordt in paragraaf 4.2 gebruik gemaakt van de meetgegevens van de N11. Deze zijn getoetst aan de huidige langsonvlakheidsparameters. Daarna zijn deze resultaten vergeleken met de resultaten die volgen uit het comfortmodel.

4.1 Drempelexperimenten in Hoorn

Bij de drempelexperimenten in Hoorn die beschreven zijn in sub-paragraaf 3.1.3 werd, na de drie ritten die de bestuurder met een zekere snelheid had uitgevoerd, gevraagd een beoordeling van het discomfort ten gevolgen van de betreffende drempel te geven. De bestuurders hadden hierbij de mogelijkheid uit de volgende beoordelingen:

- 1 Voelbaar,
- 2 zeer voelbaar,
- 3 onaangenaam,
- 4 is voor mij de maximale passeersnelheid,
- 5 met deze snelheid zal ik normaliter niet passeren.

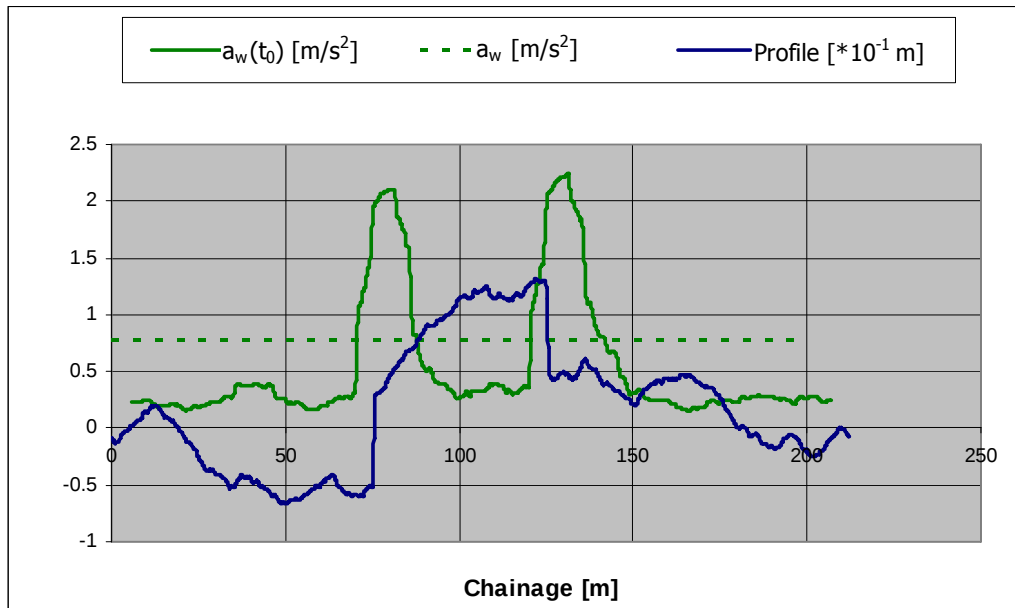
Totaal hebben 8 verschillende personenauto's aan het experiment deelgenomen. De individuele beoordelingen van de verschillende bestuurders voor de verschillende drempels waren behoorlijk gelijklopend. Voor een volledige toelichting op dit experiment wordt er verwezen naar het [18]. Voor mijn afstudeeronderzoek wordt alleen ingegaan op de resultaten verkregen bij het drempelplateau als weergegeven in Figuur 3-5 en Figuur 3-6.

De experimenten werden uitgevoerd bij verschillende voertuigsnelheden variërend van 20 tot 40 km/h. In Tabel 4-1 zijn de beoordelingen weergegeven voor het oprijden en afrijden van het plateau. Daarna zijn met behulp van het comfortmodel en de profielgegevens, als bepaald in sub-paragraaf 3.1.3, de comfortparameters bepaald.

Figuur 4-1 is een grafische weergave van de comfortparameters bij een snelheid van 40 km/h. Uit het lopend kwadratisch gemiddelde ($a_w(t_0)$) van de gewogen versnelling is de invloed van de op- en afrit van het plateau duidelijk zichtbaar. Daarom is vooral de MTVV waarde interessant om te vergelijken met de beoordeling van de bestuurder. Deze waarden zijn ook in Tabel 4-1 weergegeven.

Tabel 4-1: Comfort parameters bij de start en het einde van de verkeersdrempel/plateau

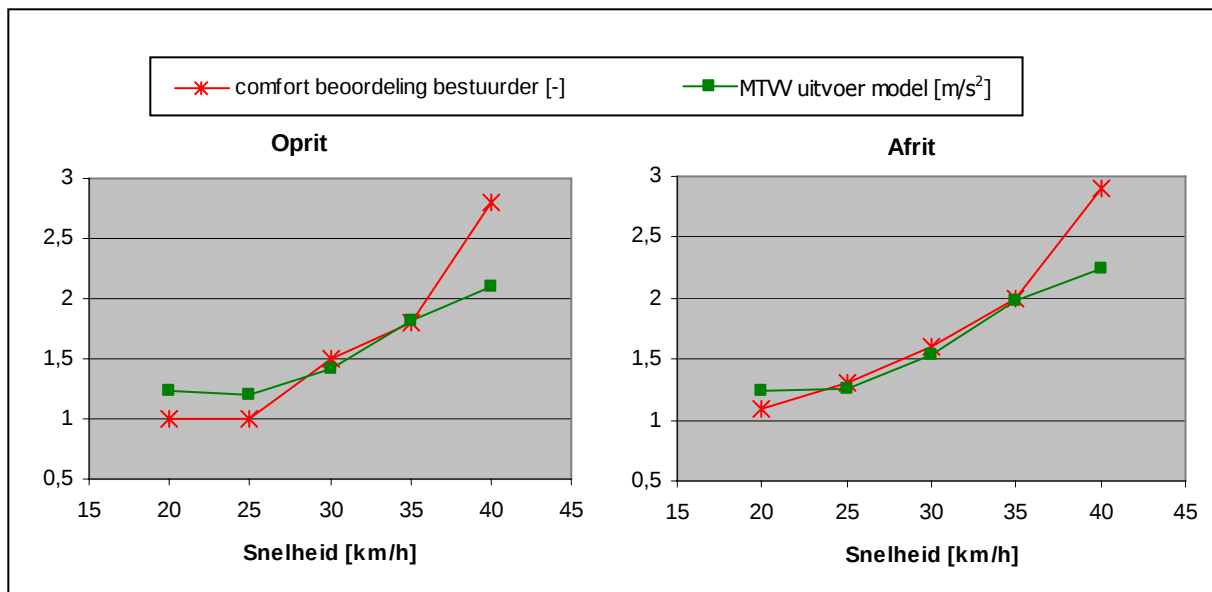
Oprit plateau			Afrit plateau		
v [km/h]	comfort [-]	MTVV [m/s ²]	v [km/h]	comfort [-]	MTVV [m/s ²]
20	1	1,24	20	1,1	1,23
25	1	1,20	25	1,3	1,26
30	1,5	1,42	30	1,6	1,54
35	1,8	1,82	35	2	1,98
40	2,8	2,10	40	2,9	2,25



Figuur 4-1: Uitvoer van de comfortparameters bij een plateau, met een snelheid van 40 km/h

Om een beter beeld te krijgen zijn deze waarden grafisch weergegeven in Figuur 4-2. Uit deze figuur valt duidelijk af te leiden dat de bestuurder het plateau als onaangenaam gaat ervaren bij snelheden boven de 35 km/h. Het plateau wordt als voelbaar tot zeer voelbaar ervaren voor snelheden tot de 35 km/h. Als deze grens vergeleken wordt met de resultaten van het comfortmodel komt dit overeen met een MTVV waarde van 2 m/s^2 , voor zowel de op- als de afrit.

Bij deze redenering dient te worden vermeld dat de bestuurder de onvlakheid verwacht en er dus rekening mee houdt. Verder is er het probleem dat het werkelijke langsprofiel niet ingemeten is en dat er gewerkt is met een gemodelleerd profiel zoals uitgelegd in subparagraaf 3.1.3. In de volgende paragraaf wordt een situatie beschouwd van een autoweg waarvan het wegprofiel is ingemeten en wat beoordeeld is op comfort bij hogere snelheden.



Figuur 4-2: Grafische weergave van de comfortparameters (experiment en comfortmodel)

4.2 Metingen aan de N11 Alphen-Bodegraven

Voor het verkrijgen van een betere relatie tussen het comfort van de weggebruiker en de langsonvlakheid van een weg wordt er gebruik gemaakt van metingen op de N11. De N11 is een autoweg gelegen in het westen van Nederland en vormt een verbinding tussen Leiden en Bodegraven (zie Figuur 4-3). De gehele weg is gelegen in een zettingsgevoelig gebied, waarbij de kans op langsonvlakheid veroorzaakt door zettingen zeer groot is. Het laatste gedeelte van deze autoweg, het gedeelte tussen Alphen aan den Rijn en Bodegraven werd opgeleverd in mei 2004. Na 1 jaar kwamen er al veel klachten binnen bij Rijkswaterstaat dat de weg oncomfortabel was, door problemen met de langsonvlakheid.

Om die reden heeft Rijkswaterstaat ARAN metingen laten uitvoeren met betrekking tot de langsonvlakheid. In paragraaf 4.2.1 worden de resultaten gegeven van deze ARAN metingen. Daarna worden in paragraaf 4.2.2 de resultaten bepaald die volgen uit het comfortmodel.



Figuur 4-3: Locatie N11

4.2.1 Uitwerking van de meetresultaten volgens huidige methoden

Het onderzoek van Rijkswaterstaat betrof het gehele weggedeelte van Alphen aan den Rijn (km 12.0) tot Bodegraven (km 21.3) op zowel de linker als rechter hoofdrijbaan. De gehele weg was verder opgedeeld in wegvakken met een lengte van 100 meter.

Het onderzoek van Rijkswaterstaat is beschreven in [20]. Uit de metingen bleek dat voor alle wegvakken aan de IRI 100 eis van 3,5 mm/m voldaan was. Maar omdat de weg toch als oncomfortabel beschouwd werd is er vooral ook naar de andere criteria gekeken:

- IRI 20
- Hoogte verschil over 25 meter
- Helling van de stootplaten

Omdat niet alle wegvakken even relevant zijn voor het kalibreren van het comfortmodel is er een selectie uit de wegvakken gemaakt. Zes locaties van de rechter rijstrook (rijrichting Alphen aan den Rijn – Bodegraven) zijn gekozen omdat er bij de rechter rijstrook de meeste problemen waren opgetreden. De gekozen locaties zijn weergegeven in Tabel 4-2.

Tabel 4-2: Beschouwde locaties

	Start [km]	Eind [km]	Toelichting
1	15,100	15,300	Een wegvak zonder problemen (Goed)
2	15,850	16,050	Een wegvak met een onderdoorgang in de ondergrond (KW 5)
3	17,200	17,400	Een duiker in de ondergrond (KW 6)
4	18,100	18,300	Een overkluizing tbv een hoge drukleiding in de ondergrond (KW 10)
5	18,300	18,500	Een brug over een boezem (KW 11)
6	19,500	19,700	Een slechte locatie zonder een kunstwerk in de ondergrond (geen KW)

* Met KW wordt kunstwerk nummer bedoeld wat tijdens ontwerp gebruikt is

Zoals uit Tabel 4-2 blijkt is er één wegvak gekozen die een goede vlakheid heeft. Bij de andere vijf zijn al ongewenste onvlakheden opgetreden. In Bijlage VI zijn de uitwerkingen van de huidige meetresultaten met betrekking tot de beschouwde locaties weergegeven. In deze bijlage is voor ieder wegvak de IRI 100 weergegeven, de andere waarden zijn alleen weergegeven als de contracteisen overschreden zijn (als gesteld in paragraaf 2.3).

Uit deze resultaten valt het volgende te concluderen:

- op locatie 2 tot en met 6 is de contracteis van maximaal 5 centimeter zetting over 25 meter meerdere keren per locatie overschreden,
- op elke locatie waar stootplaten liggen is de eis van een helling van 1:100 overschreden,
- op de locaties rond kunstwerken is telkens de grenswaarde voor de IRI 20 (5 mm/m) overschreden.

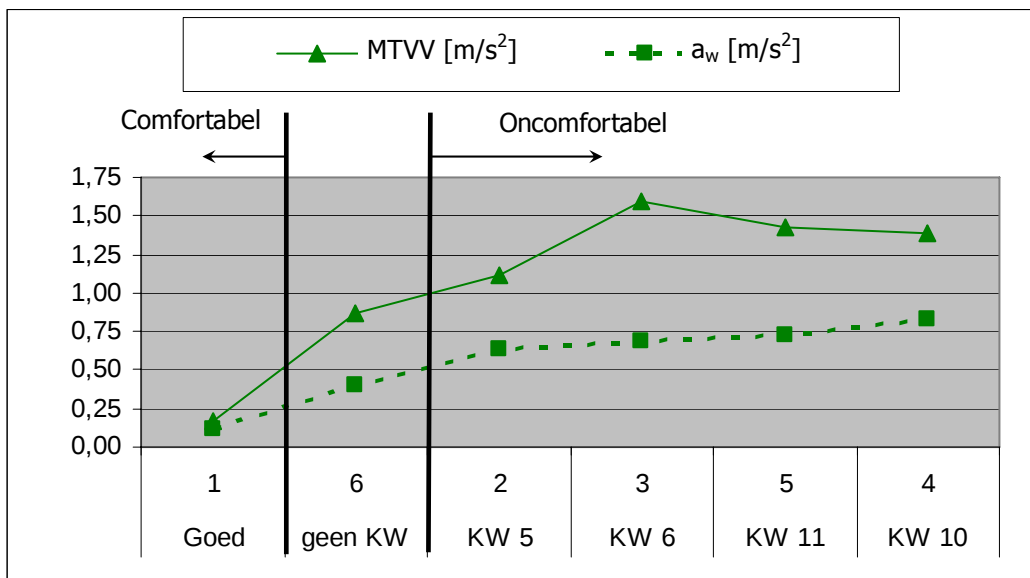
De belangrijkste conclusies uit de rapportage van Rijkswaterstaat is dat de locatie 2 tot en met 5 in ieder geval niet voldoen aan de eisen voor een comfortabele weg. Locatie 6 voldoet alleen op enkele plekken niet aan de restzettingseis van een zettingsverschil van 5 centimeter over 25 meter. Omdat locatie 6 op de grens lijkt te liggen, het voldoet wel aan de IRI-eisen maar niet aan de zettingseisen over een bepaalde afstand, wordt hierop dieper ingegaan in de volgende subparagraaf. Dit kan namelijk data geven over mogelijke comfortgrenzen.

4.2.2 Uitwerking meetresultaten volgens het comfort model en vergelijking

Om een eerste aanname te maken van de grenzen voor het comfort model worden nu voor de zes locaties de comfortparameters bepaald. Dit zijn de effectieve waarden van de versnellingen (a_w) en de MTVV-waarde over het gehele wegvak. De waarden worden bepaald bij een voertuigsnelheid van 100 km/h, deze snelheid is hier genomen aangezien dit de maximale toegestane snelheid is. De uitvoerwaarden van het comfortmodel staan weergegeven in Tabel 4-3 en Figuur 4-4. De MTVV volgde uit een lopend gemiddelde van de effectieve waarde over een integratietijd van 1 seconde ($a_w(t_0)$). Deze $a_w(t_0)$ staat in de figuren van Bijlage VI voor iedere locatie uitgezet tegen de hectometerring, in deze figuren is ook het langprofiel uitgezet.

Tabel 4-3: Resultaten uit het comfort model bij een snelheid van 100 km/h

	1 Goed	2 KW 5	3 KW 6	4 KW 10	5 KW 11	6 geen KW
$a_w [m/s^2]$	0,111	0,641	0,685	0,830	0,720	0,403
MTVV $[m/s^2]$	0,165	1,110	1,595	1,388	1,432	0,868



Figuur 4-4: Comfortparameters volgens uit het comfort model bij een snelheid van 100 km/h inclusief beoordeling Rijkswaterstaat

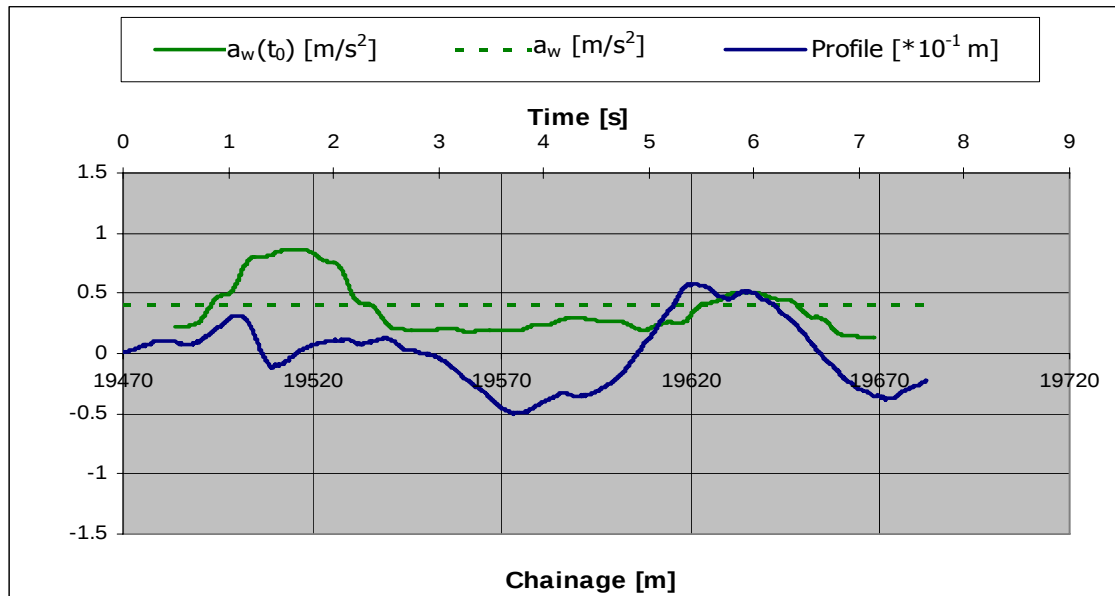
In Figuur 4-4 zijn de resultaten van het comfortmodel uitgezet op volgorde van comfortabel tot ernstig oncomfortabel. Hieruit blijkt weer dat locatie twee tot en met vijf er het slechts uit komen net zoals ook geconcludeerd werd in het onderzoek van Rijkswaterstaat. Om een beter beeld te krijgen van waar ongeveer de grens ligt wordt er dieper ingegaan op locatie zes. De reden hiervan is vooral dat de MTVV waarde van deze locatie significant hoger is dan een goed wegvak als locatie 1.

In Tabel 4-4 zijn de resultaten van de huidige methoden en het comfortmodel nog eens gegeven. In Figuur 4-5 is de uitvoer van de $a_w(t_0)$ en het langsprofiel weergegeven. Een opvallende conclusie die hieruit gehaald kan worden is dat volgens de huidige methoden het tweede gedeelte (km 19,60- 19,65) niet voldoet aan de eis van 5 centimeter zettingsverschil over 25 meter. Maar dat volgens het comfortmodel vooral het eerste gedeelte (km 19,50-19,55) oncomfortabeler is ten opzichte van het tweede gedeelte. Dus het eerste gedeelte lijkt volgens de eisen van Rijkswaterstaat vlakker dan het tweede gedeelte, maar het eerste gedeelte heeft volgens het comfortmodel een grotere invloed op het discomfort.

De oorzaak hiervan is vooral dat het nieuwe comfortmodel gevoeliger is voor kleinere onvlakheden. Hier wordt verder op ingegaan bij het vergelijken van het nieuwe comfortmodel aan de huidige meetmethoden in hoofdstuk 6.

Tabel 4-4: Meetresultaten van locatie 6

	Huidige eis	Gemeten waarde	Locatie [km]
IRI 100 [m/km]	3,5	1,4 1,1	19,5-19,6 19,6-19,7
IRI 20 [m/km]	5,0	-	-
ΔH over 25m [cm]	5	9 8	19,60-19,625 19,635-19,66
Helling stootplaat [m/m]	1:100	-	-
a_w [m/s²]	-	0,403	19,47-19,67
$a_w(t_0)$ [m/s²]	-	0,868 0,506	19,51 19,64



Figuur 4-5: Het langsprofiel van het wegvlak en de uitvoer van het comfortmodel voor locatie 6

Het doel van deze vergelijking van de verschillende methoden was om een aannemelijke grens te bepalen voor de parameters die volgen uit het comfort model. Zoals al gezegd in paragraaf 4.2.1 kunnen locatie 2 tot met 5 als oncomfortabel beschouwd worden. Daarom kan geconcludeerd worden dat waarden van $0,6 \text{ m/s}^2$ voor a_w en $1,0 \text{ m/s}^2$ voor de MTVV in ieder geval boven de grens liggen.

Uit locatie 6 (Figuur 4-5) kan verder afgeleid worden dat kleine onvlakheden zoals deze zich voordoen rond km 19,5 als oncomfortabel beschouwd worden in het model. Om deze aanname te bekrachtigen is verder onderzoek nodig naar hoe een weggebruiker deze onvlakheid daadwerkelijk ondervindt. Omdat hier verder geen gegevens over bekend zijn wordt voor dit onderzoek aangenomen dat het als oncomfortabel beschouwd wordt. Hierbij dient wel duidelijk vermeldt te worden dat het nu een eerste grove aanname betreft en voor daadwerkelijk gebruik van het comfortmodel er zeker verder onderzoek benodigd is. Bij dit onderzoek is het benodigd de methoden als beschreven in deze paragraaf, objectieve benadering van onvlakheid, en in paragraaf 4.1, de subjectieve benadering van onvlakheid (comfort), te combineren in één project.

Uiteindelijk kan er uit deze paragraaf geconcludeerd worden dat de grenzen voor comfort, dus wanneer er onderhoudsmaatregelen genomen dienen te worden, gesteld kunnen worden op:

- $a_w = 0,5 \text{ m/s}^2$
- $a_w(t_0) = 0,8 \text{ m/s}^2$

Deze waarden komen overeen met redelijk oncomfortabel en oncomfortabel volgens de gestelde richtlijnen in de ISO 2631-1, en lijken realistisch.

Dit alles is gebaseerd op een onderzoek dat betrekking heeft op een autoweg met een maximale snelheid van 100 km/h . In eerste instantie kan er aangenomen worden dat het comfort alleen afhankelijk is van de verticale versnellingen die de weggebruiker ondergaat. Hierdoor kan er gesteld worden dat de bepaalde grenzen geldig zijn voor alle snelheden aangezien de invloed van de snelheid op de verticale versnellingen van een weggebruiker in het model opgenomen zijn.

Het is alleen wel zo dat een bestuurder een bepaalde versnelling bij een snelheid van 120 km/h anders ervaart dan eenzelfde versnelling bij 50 km/h . Wat hiervan de invloed is dient nader onderzocht te worden.

4.3 Conclusie

Naar aanleiding van de vergelijkingen tussen de resultaten van het comfortmodel en de praktijkvoorbeelden (het drempelexperiment en het meetrapport van de N11), valt te concluderen dat: voor het kalibreren van het comfortmodel de volgende stappen moeten worden ondernomen:

- Het in een wegvak aanbrengen van bepaalde onvlakheden, die variëren in lengte en hoogte.
- Het inmeten van het daadwerkelijke profiel met behulp van laser apparatuur (ARAN) gevolgd door het beoordelen van de resultaten (subparagraaf 4.2.1).
- Het met het comfortmodel bepalen van de twee comfortparameters daarbij uitgaande van de gemeten profielen.
- Het uitvoeren van testritten bij verschillende snelheden en voertuigen. Tijdens deze testritten dienen de versnellingen van de bestuurders en het voertuig gemeten te worden (subparagraaf 3.1.3).
- Het laten beoordelen door de bestuurder van de verschillende onvlakheden. Deze beoordeling dient betrekking te hebben op comfort (subparagraaf 4.1).

Door de verschillende resultaten met elkaar te vergelijken is het mogelijk te bepalen of het voertuigmodel ook realistisch is bij hogere snelheden (80 tot 120 km/h) en kunnen er comfortgrenzen gesteld worden voor de comfortparameters (a_w , MTVV) bij verschillende snelheden.

Aanname

De resultaten van een experiment zoals hier boven is uitgelegd waren niet beschikbaar en het was niet mogelijk om een soortgelijk experiment uit te voeren voor dit onderzoek. Om die reden wordt er in de volgende hoofdstukken verder gewerkt met de aanname dat het comfortmodel realistisch is en wordt er gebruik gemaakt van de grenzen die volgen uit paragraaf 4.2:

- **a_w grens van $0,5 \text{ m/s}^2$**
Geldend voor het gehele wegvak.
- **MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$**
Geldend voor de piekwaarden volgend uit lokaal optredende onvlakheden.

5 Criteria voor restzettingsverschillen

Het uiteindelijke doel van het onderzoek is om aanbevelingen te doen voor de toegestane restzettingsverschillen van de ondergrond. Om dit te bereiken worden er in dit hoofdstuk verschillende standaard situaties gemodelleerd waarin het zettingsverschil over bepaalde afstanden gevarieerd worden.

Als eerste wordt in paragraaf 5.1 een profiel gemodelleerd waarbij de restzettingsverschillen en de golflengten van een onvlakheid gevarieerd kunnen worden. Hieruit volgt voor welke golflengten de weggebruiker gevoelig is en wat over bepaalde lengten het toegestane zettingsverschil is. Daarna wordt in paragraaf 5.2 de situatie gemodelleerd die voorkomt rond zettingsvrije kunstwerken.

5.1 Voorwaarden voor restzettingsverschillen in het algemeen

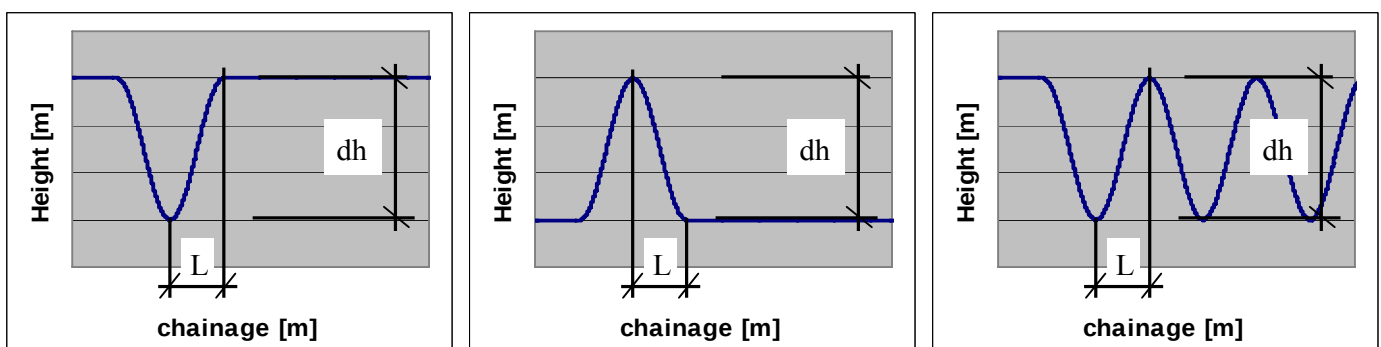
Zoals in de inleiding van het verslag genoemd is treden er in de ondergrond zettingen op. Die worden veroorzaakt door de verkeersbelasting en de belastingen van de wegconstructie zelf. Deze zettingen zijn nooit gelijk voor een heel wegtracé, waardoor er restzettingsverschillen ontstaan. De restzettingsverschillen veroorzaken een bepaalde langsonvlakheid in het wegprofiel. Voor deze optredende zettingsverschillen kan er gedacht worden aan zettingen die optreden door:

- slecht verdicht zijn van de ondergrond,
- aanwezigheid van oude sloten waar mogelijk extra zettingen optreden of juist minder (afhankelijk van de situatie),
- het aanwezig zijn van een constructie in de ondergrond waardoor er lokaal minder zettingen optreden,
- verschil in de bovenbelasting waardoor zettingsverschillen optreden,
- variatie in eigenschappen van de ondergrond.

Om eisen te kunnen stellen aan deze restzettingsverschillen, worden er standaard situaties gemodelleerd van een mogelijk optredend restzettingsverschil. Dit is gedaan door een opgelegde onvlakheid te modelleren die bestaat uit een sinusvormig profiel. Hierbij kan het optredende zettingsverschil en de lengte waarover dit zettingsverschil optreedt gevarieerd worden. De volgende situaties zijn gemodelleerd:

- een eenmalig optredende onvlakheid (subparagraaf 5.1.1),
- een reeks aan onvlakheden (subparagraaf 5.1.2).

Bij een eenmalig optredende onvlakheid kan er onderscheid gemaakt worden tussen een eenmalige omlaag gerichte onvlakheid (Figuur 5-1, l) die kan voorkomen als er op één locatie meer zettingen optreden en een eenmalige omhoog gerichte onvlakheid (Figuur 5-1, m) als er juist op één locatie minder zettingen optreden, bijvoorbeeld bij gefundeerde constructies in de ondergrond.



Figuur 5-1: Invoer profielen: eenmalige onvlakheid (links, midden) en reeks (rechts)

Aangezien er gewerkt wordt met een lineair model kan er geconcludeerd worden dat de resultaten van een omlaag gerichte onvlakheid dezelfde zijn als van een omhoog gerichte. Daarom zal ook enkel een omlaag gerichte onvlakheid uitgewerkt worden. In werkelijkheid werken de dempers van een voertuig niet lineair maar gegevens over niet lineaire dempers waren voor de Peugeot 504 niet beschikbaar.

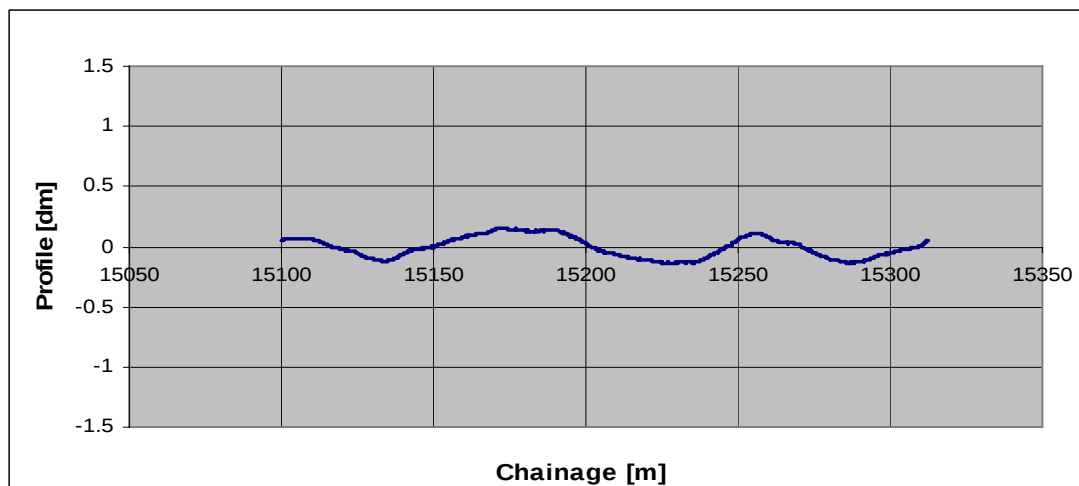
De invloed van een niet lineaire dampingconstante wordt in hoofdstuk 7 nog wel bekeken. Verder wordt er in subparagraaf 5.1.2 onderzocht wat de invloed is van een reeks onvlakheden (Figuur 5-1, r) op de comfortparameters.

De verschillende onvlakheden als weergegeven in Figuur 5-1, zijn gemodelleerd als een cosinus met:

- een golflengte die gelijk is aan tweemaal de lengte waarover het zettingsverschil optreedt (L),
- een amplitude gelijk aan de helft van het absolute opgelegde zettingsverschil (dh).

Dit zijn geen realistische situaties aangezien er telkens gewerkt wordt met een gelijkblijvende golflengte en gelijkblijvende amplitude voor iedere situatie. In werkelijkheid bestaat een langsprofiel meestal uit een combinatie van onvlakheden die voorkomen over verschillende lengten. Maar om tot aanbevelingen te komen voor toegestane zettingen over bepaalde lengten wordt er in dit onderzoek verder gewerkt met een gelijkblijvende golflengte voor iedere situatie.

Over de gemodelleerde situaties wordt nog wel een basisonvlakheid aangebracht, dit omdat ieder willekeurig wegvak altijd een bepaalde onvlakheid heeft. Hiervoor wordt in dit onderzoek het profiel van een wegvak van de N11 (zie paragraaf 4.2) dat als vlak beoordeeld is gebruikt als basis; deze basis is weergegeven in Figuur 5-2. Er is voor dit profiel gekozen omdat het afkomstig is van een werkelijke meting op een autoweg die door Rijkswaterstaat als comfortabel beschouwd wordt. Dit wegprofiel werd ook door het comfortmodel als comfortabel beschouwd ($0,11 \text{ m/s}^2$ voor de a_w en $0,165 \text{ m/s}^2$ voor de MTVV).



Figuur 5-2: Basisonvlakheid volgend uit locatie 1 van de N11 (zie paragraaf 4.2)

Het onderzoek wordt verder nog afgebakend door de volgende randvoorwaarde:

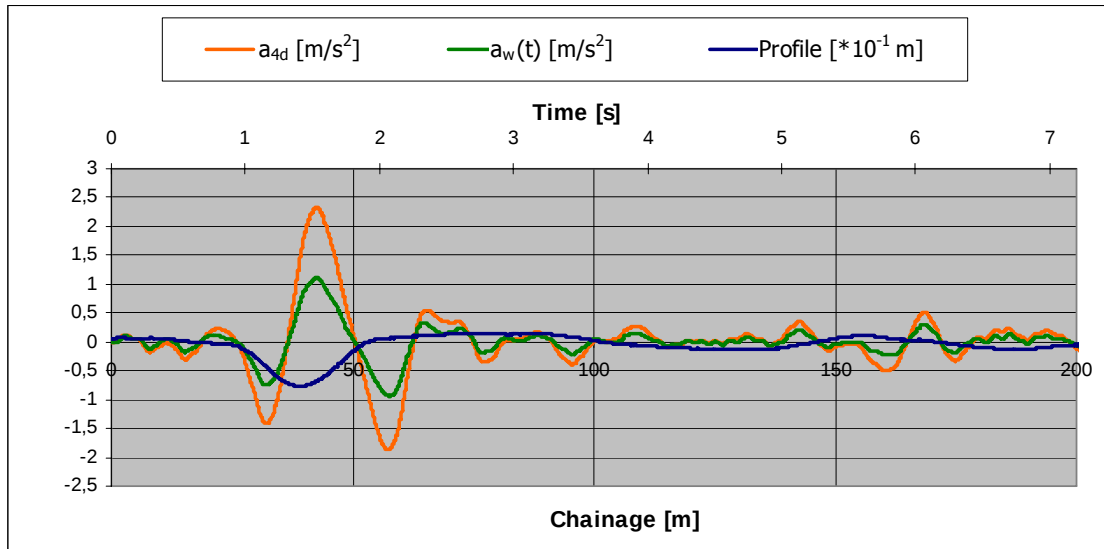
- L van 2,5 tot 30 meter,
- dh van 0,01 meter tot 0,4 meter.

Deze grenzen zijn aangenomen aangezien er verwacht wordt dat hoogteverschillen over een lengte groter dan 30 meter bijna geen invloed meer hebben op het comfort. Verder wordt er verwacht dat onvlakheden die optreden over lengten kleiner dan 2,5 meter over het algemeen optreden als gevolg van onvoldoende stabiliteit van de bovenste lagen van de wegoopbouw en niet veroorzaakt worden door de zettingen van de ondergrond. Rond kunstwerken is de kans wel aanwezig dat er zettingsverschillen optreden over kortere lengten; hier wordt verder op ingegaan in paragraaf 5.2. De randvoorwaarde met betrekking tot het zettingsverschil zijn gesteld op een minimum van 0,01 meter en een maximum van 0,4 meter. Verwacht wordt dat zettingsverschillen kleiner dan 0,01 meter geen invloed hebben op comfort en verschillen groter dan 0,4 meter de grens van comfort ruim passeren. Deze aannamen worden achteraf nog gecontroleerd.

5.1.1 Voorwaarde voor restzettingsverschillen bij eenmalig omlaag gerichte onvlakheid

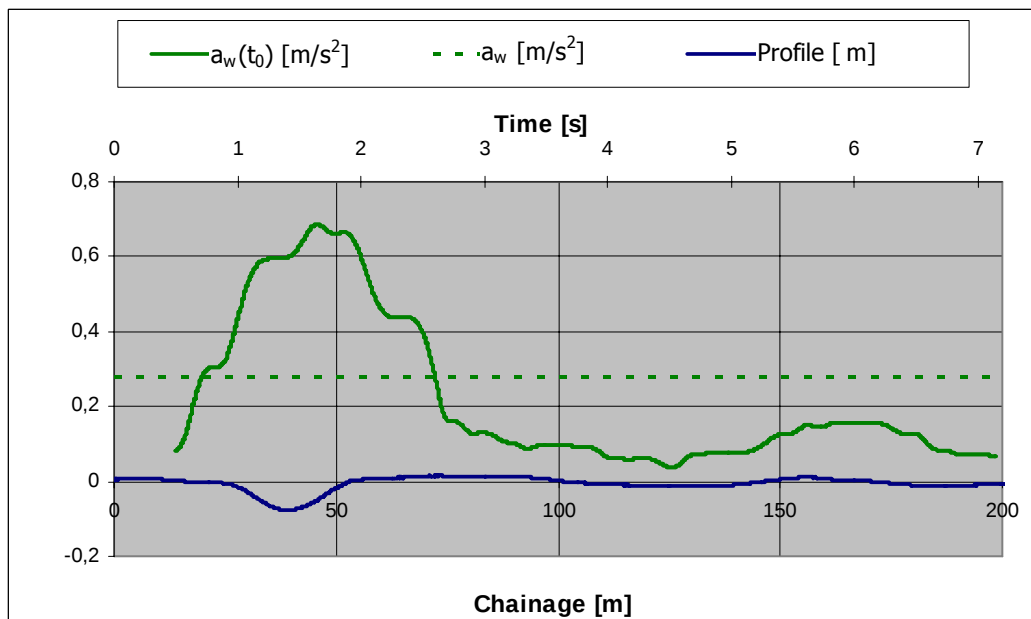
Als eerste wordt er een situatie gemodelleerd van het voorkomen van een omlaag gericht zettingsverschil in een bepaald langsprofiel. Hiervoor worden het zettingsverschil (dh) en de lengte (L) waarover het zettingsverschil optreedt, gevarieerd.

Om het geheel beter toe te kunnen lichten wordt van een voorbeeld de uitvoer stap voor stap uitgewerkt. De opgelegde onvlakheid in dit voorbeeld bestaat uit een profiel met een dh van 0,07 meter over 15 meter. Over dit profiel wordt een voertuig gemodelleerd met een snelheid van 100 km/h. In Figuur 5-3 zijn de versnellingen van de bestuurder (a_{4d}), de gewogen versnellingen ($a_w(t)$) en het gemodelleerde profiel weergegeven. Uit deze figuur is duidelijk de invloed van de kuil zichtbaar (Chainage 25 tot 55 meter). Op deze locatie komen namelijk de maximale versnellingen voor.



Figuur 5-3: Versnellingen bij een dh van 0,07 m. over 15 m. bij een snelheid van 100 km/h

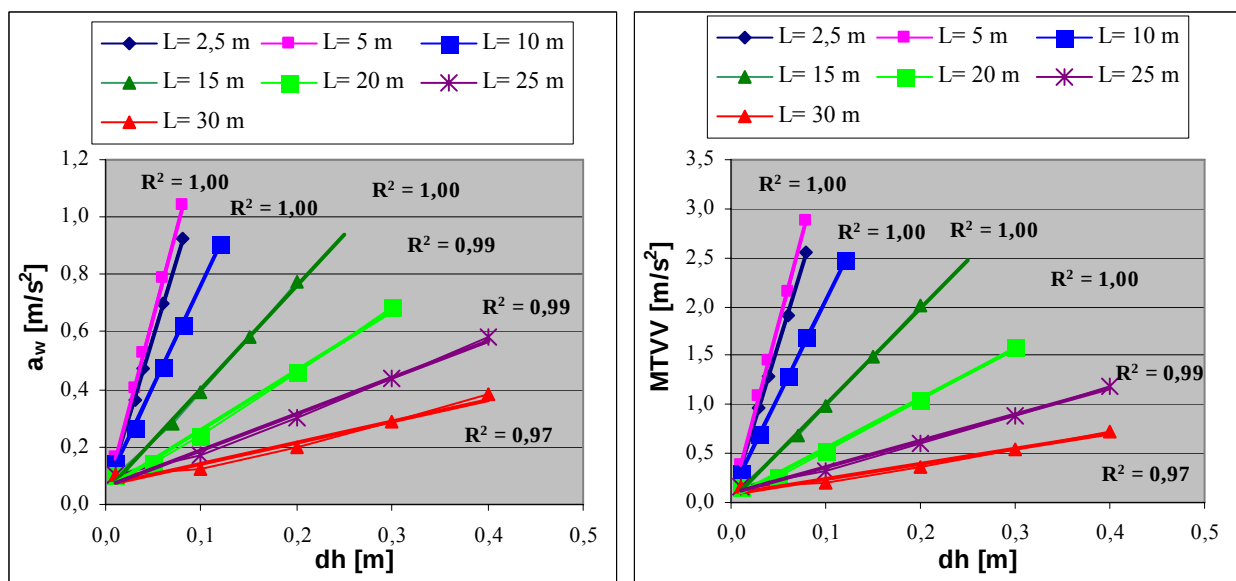
Van de gewogen versnellingen zijn het kwadratische gemiddelde over het gehele wegvak (a_w) en over een periode van 1 seconde ($a_w(t_0)$) bepaald. Deze resultaten staan weergegeven in Figuur 5-4, en uit deze figuur valt een a_w waarde af te leiden van 0,28 m/s^2 . Dit ligt ruim onder de grens van 0,5 m/s^2 . De MTVV waarde ($\max\{a_w(t_0)\}$) ligt met een waarde van 0,69 m/s^2 dicht bij de grens van 0,8 m/s^2 .



Figuur 5-4: Uitvoer van het model bij een dh van 0,07 m. over 15 m. bij een snelheid van 100 km/h

Er valt te concluderen dat voor deze situatie de MTVV waarde een belangrijker eis is dan de a_w -waarde. Voor het bepalen van eisen aan de zettingsverschillen worden in eerst instantie beide waarden nog meegenomen.

Het uiteindelijke doel is om ontwerpgrafieken samen te stellen waaruit volgt wat de maximale verschilzetting mag zijn over een bepaalde lengte. Om dit te bereiken wordt er voor een aantal zettingsverschillen tot een maximum van 40 centimeter over een lengte variërend van 5 tot 30 meter de MTVV en de a_w bepaald. Deze resultaten staan voor een snelheid van 100 km/h weergegeven in Bijlage VII.2.3. Uit deze resultaten lijkt er een lineaire relatie te zijn tussen de comfortparameters (de a_w en MTVV) en het restzettingsverschil voor de verschillende lengten waarover het zettingsverschil is bepaald. Dit is zichtbaar in Figuur 5-5. In deze figuren zijn de MTVV en de a_w uitgezet tegen het gemodelleerde zettingsverschil (dh), voor de verschillende lengten (L) waarover het verschil optreedt. Uit Figuur 5-5 blijkt dat aan de comfortparameters een zekere ondergrens zit, namelijk dat de opgelegde dh naar nul gaat als de comfortparameters nog steeds een waarde geven. Dit wordt veroorzaakt door de basisonvlakheid die over iedere gemodelleerde situatie wordt aangebracht.



Figuur 5-5: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuig snelheid van 100 km/h

De lineaire relatie zoals die volgt uit Figuur 5-5 is te schrijven in formulevorm als weergegeven in Vergelijking 5-1. De te bepalen constanten kunnen worden afgeleid uit de resultaten als gegeven in bijlage VII.2.3 en zijn weergegeven in Tabel 5-1. In deze tabel is ook de invloed van de basisonvlakheid zichtbaar: de constanten "B" en "D" geven immers een positieve waarde.

Vergelijking 5-1

$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met: a_w = het kwadratisch gemiddelde van de gewogen versnellingen [m/s^2],
 MTVV = de Maximum Transient Vibration Value $\max \{a_w(t_0)\}$ [m/s^2],
 dh = de absolute restzetting rond een kunstwerk [m],
 A, C = te bepalen constante [$1/s^2$],
 B, D = te bepalen constante [m/s^2].

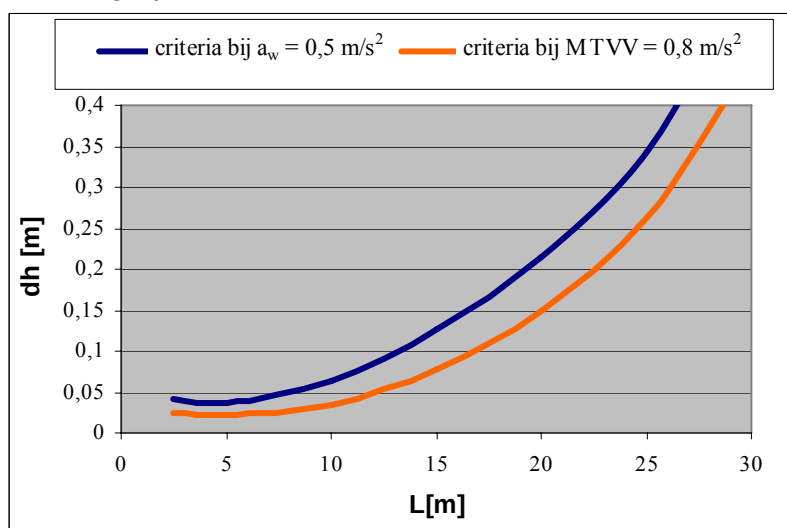
Tabel 5-1: Constante tbv Vergelijking 5-1 bij een snelheid van 100 km/h

L [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
2,5	11,01	0,04	31,28	0,04
5	12,56	0,03	35,50	0,03
10	6,96	0,07	19,76	0,11
15	3,57	0,05	9,79	0,03
20	2,07	0,05	5,04	0,05
25	1,26	0,07	2,71	0,09
30	0,74	0,07	1,53	0,09

Met behulp van deze gegevens is het mogelijk bij een bepaalde eis voor de a_w of de MTVV het toegestane restzettingsverschil te bepalen. In Figuur 5-6 is hiervan de uitwerking gegeven voor de grenzen zoals in paragraaf 4.2 bepaald ($a_w=0,5$ m/s² en MTVV=0,8 m/s²). Uit de figuur blijkt dat de MTVV-grens van 0,8 m/s² kleinere restzettingsverschillen toestaat dan een a_w -grens van 0,5 m/s². Hieruit kan geconcludeerd worden dat de MTVV-grens als maatgevend beschouwd kan worden.

Het is mogelijk dat de comfortgrenzen nog bijgesteld dienen te worden maar voor de eenmalig voorkomende onvlakheid wordt er wel verwacht dat de MTVV-grens maatgevend is. Dit is te verklaren doordat de MTVV-waarde bepaald wordt door de piekwaarden die voorkomen in een versnellingsuitvoer. Aangezien het hier een eenmalig voorkomende onvlakheid betreft die een redelijke piekwaarde veroorzaakt in de versnellingsuitvoer is de verwachting dat de MTVV-waarde als maatgevend beschouwd kan worden. Deze verwachting komt terug in Figuur 5-3 en Figuur 5-4, waaruit blijkt dat deze piekwaarde in de a_w flink uitgevlakt is. Dit aangezien de a_w -waarde een gemiddelde betreft over het gehele wegvak.

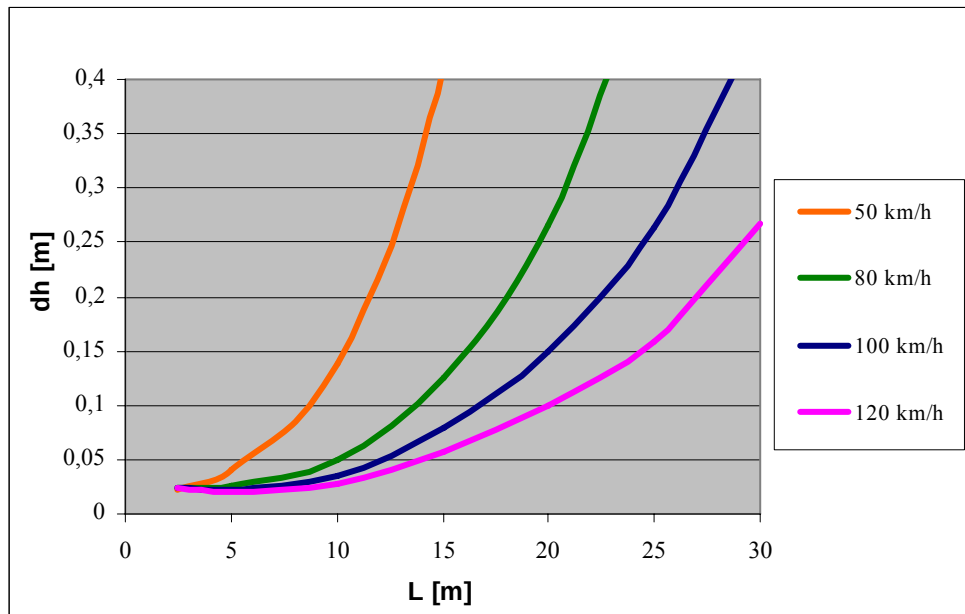
Wat verder nog opvalt is dat beide uitvoeren dezelfde vorm hebben. Dit wordt veroorzaakt doordat beide parameters op dezelfde methode gebaseerd zijn (het kwadratische gemiddelde van de versnellingen).



Figuur 5-6: Ontwerpgrafieken voor 100 km/h gebaseerd op a_w en MTVV bij een eenmalige onvlakheid

Uit de ontwerpgrafieken zoals weergegeven in Figuur 5-6 zijn nu de toelaatbare restzettingsverschillen af te leiden. Als de eis van 0,8 m/s² geldt voor de MTVV dan valt uit de grafiek af te lezen dat over een lengte van 20 meter het toegestane restzettingsverschil gesteld kan worden op 0,15 meter, en over een lengte van 10 meter op 0,035 meter.

De ontwerpgrafieken kunnen ook bepaald worden voor andere snelheden. In Figuur 5-7 zijn de ontwerpgrafieken volgend uit een MTVV-grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ weergegeven voor snelheden van 50, 80, 100 en 120 km/h. Voor de totale uitwerkingen en de tussenstappen van deze snelheden wordt er verwezen naar bijlage VII.2. Telkens is dezelfde werkwijze toegepast als voor 100 km/h.



Figuur 5-7 Ontwerp grafiek bij een MTVV eis van $0,8 \text{ m/s}^2$ bij verschillende snelheden (voor een eenmalige onvlakheid)

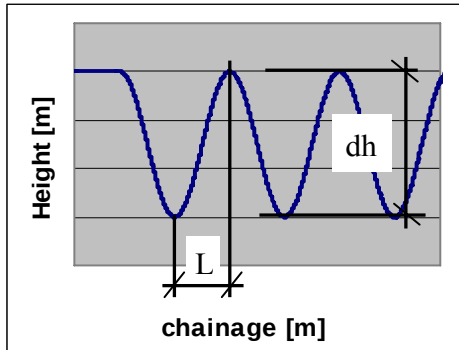
Uit deze figuur is de invloed van de verschillende snelheden duidelijk af te lezen. Zo is het toegestane restzettingsverschil over 15 meter bij 120 km/h een verschil van 0,06 meter maar voor 50 km/h mag dit 0,4 meter zijn. Hieruit valt af te leiden dat voor lage snelheden de invloed van restzettingsverschillen van de ondergrond een veel kleinere invloed hebben op het comfortniveau van de bestuurder. Maar bij de hogere snelheden is dit zeker wel het geval, al geldt dit vooral voor de zetting over de middenlange lengten (tot ongeveer 25 meter). Deze bevindingen onderbouwen de redenering van Rijkswaterstaat, om bij het voorkomen van veel onvlakheden de maximale snelheid te verlagen.

Verder valt op dat het toegestane zettingsverschil een exponentiële vorm heeft als deze uitgezet is tegen de lengte waarover het zettingsverschil optreedt. Dit wil zeggen dat het toegestane zettingsverschil over de kortere lengten constant is (rond de 0,025 meter voor de hogere snelheden) en voor de grotere lengten steeds extremer stijgen, hierbij blijft het toegestane zettingsverschil voor de hogere snelheden langer constant.

Hieruit blijkt dat de randvoorwaarden correct gekozen zijn. Dit aangezien er voor grotere lengten dan 30 meter de toegestane zettingsverschillen exponentieel toenemen naar zettingsverschillen van groter dan 0,4 meter. Verder is het interessant om te zien dat het toegestane zettingsverschil en voor kleinere lengten naar een constante waarde toegaat. Bij 100 km/h bijvoorbeeld is het toegestane zettingsverschil over 10 meter 0,035 meter en over een lengte van 2,5 meter 0,025 meter.

5.1.2 Voorwaarde voor restzettingsverschillen bij een reeks

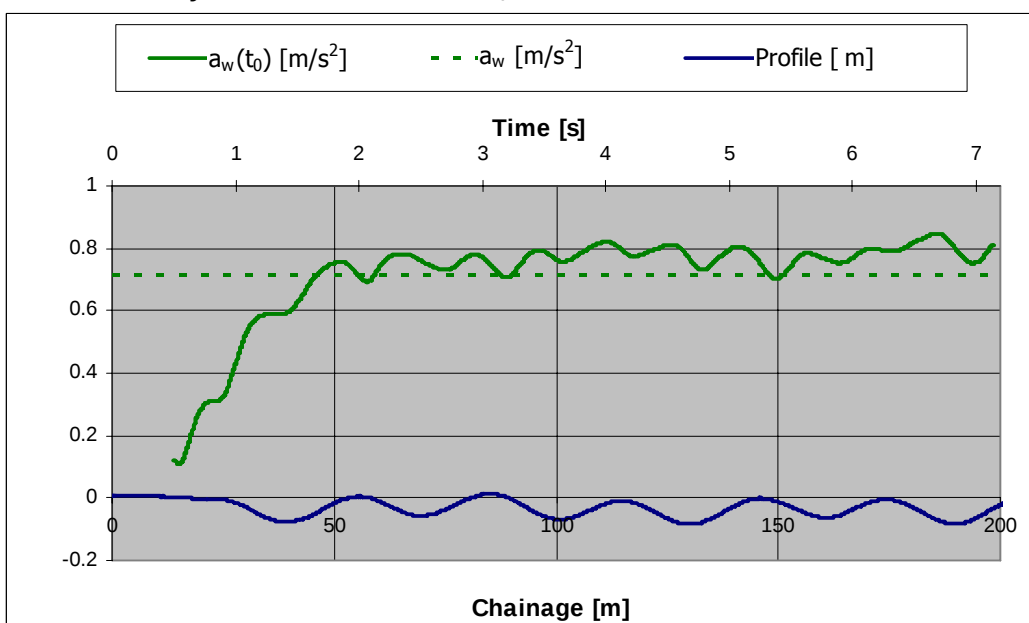
In deze paragraaf wordt bekeken wat de invloed is als er zich een reeks onvlakheden achter elkaar bevinden. Hierbij bestaat de opgelegde onvlakheid wel steeds uit dezelfde parameters (L en dh) verder wordt dit profiel gemodelleerd als een sinusvorm als weergegeven in Figuur 5-8.



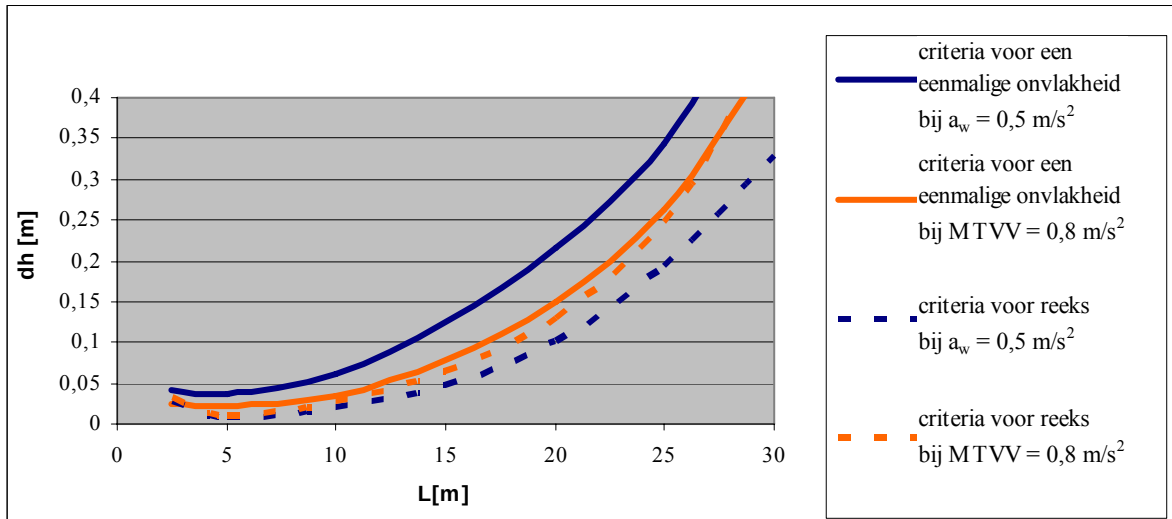
Figuur 5-8 Modellering van een reeks

Om te bekijken wat de invloed van een reeks is ten opzichte van een enkele onvlakheid worden eerst de versnellingen en comfortparameters bij een sinus met dezelfde amplitude en golflengte als in paragraaf 5.1.1 gebruikt ($L=15$ meter en $dh=0,07$ meter). Hiervan zijn de uitvoerparameters volgend uit het comfortmodel weergegeven in Figuur 5-9. Als dit vergeleken wordt met uitvoer van een eenmalige voorkomende onvlakheid (Figuur 5-4) valt er op dat de MTVV iets is toegenomen naar $0,848 \text{ m/s}^2$, en dat vooral de a_w toegenomen is naar een waarde van $0,715 \text{ m/s}^2$. Dit was ook te verwachten aangezien de invloed van een enkele onvlakheid gelijk is en vooral de invloed van de totale onvlakheid toeneemt. Het lijkt er dus op dat de a_w -grens maatgevend is voor deze situatie. Dit omdat deze ruim de grens van $0,5 \text{ m/s}^2$ overschrijdt, terwijl de MTVV-grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ net overschreden wordt.

Om dit verder te onderzoeken wordt er ook voor deze situatie de MTVV en a_w waarden bepaald voor een variatie van zettingsverschillen over de bepaalde lengte (5-30 meter). Hier bleek er telkens weer een lineaire relatie te zijn tussen de comfortparameters en het restzettingsverschil voor de verschillende lengten. Deze resultaten staan weergegeven in bijlage VII.3.3 Uit deze gegevens is het mogelijk ontwerpgrafieken samen te stellen die gebaseerd zijn op een bepaalde comfortgrens. In Figuur 5-10 zijn de ontwerpgrafieken weergegeven voor een comfortgrens van $0,5 \text{ m/s}^2$ voor de a_w en $0,8 \text{ m/s}^2$ voor de MTVV bij een snelheid van 100 km/h .



Figuur 5-9: Uitvoer van het model bij een dh van $0,07 \text{ m}$. over 15 m . bij een snelheid van 100 km/h

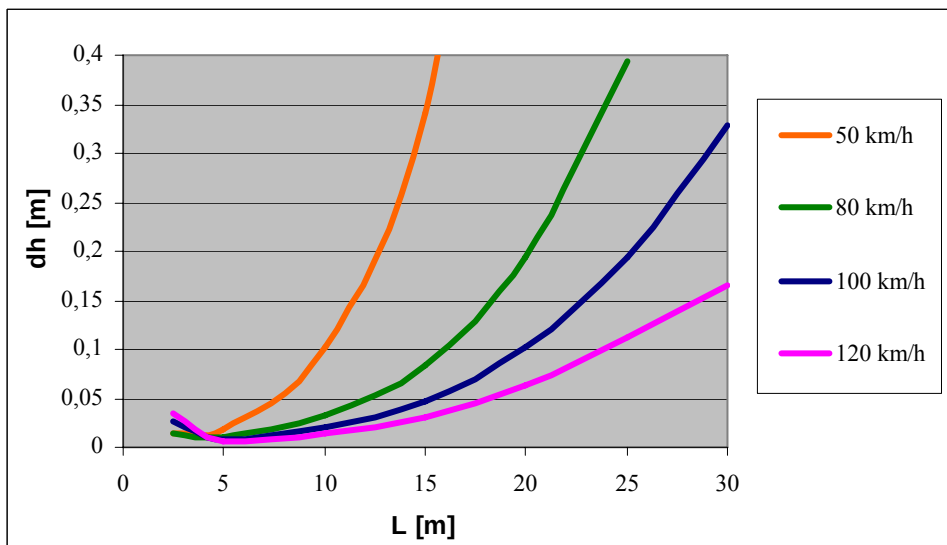


Figuur 5-10 Ontwerpgrafieken voor 100 km/h bij een kuil en een reeks

In Figuur 5-10 zijn de resultaten van een reeks weergegevens samen met de resultaten van een eenmalige voorkomende onvlakheid. De overeenkomsten en verschillen tussen de twee situaties zijn hierdoor duidelijk zichtbaar. Het blijkt dat er voor de criteria volgend uit de MTVV-grens bij een reeks bijna geen verschil ten opzichte van de criteria volgend uit de MTVV-grens bij een eenmalige onvlakheid. Voor zowel bij de kortere als de langere lengten liggen de criteria zo goed als gelijk.

Bij de a_w -grens echter is er wel duidelijk verschil zichtbaar tussen de criteria voor een eenmalige onvlakheid of een reeks onvlakheden. Uit Figuur 5-10 volgt dat de a_w -eis maatgevend is (bij de gestelde grenswaarden van $0,5 \text{ m/s}^2$). Deze situatie is ook kenmerkend voor de andere snelheden (50, 80, 100 en 120 km/h). Hieruit valt af te leiden dat bij een reeks onvlakheden er een strengere eis geldt dan als het maar éénmalig voorkomt. Voor een éénmalig voorkomende kuil geldt namelijk een eis van een dh van 0,15 meter over 20 meter, bij een reeks geldt hier een eis van 0,10 meter over 20 meter.

Dit alles kan nu ook weer bepaald worden voor de andere snelheden. In Figuur 5-11 zijn de ontwerpgrafieken gegeven bij snelheden van 50, 80, 100 en 120 km/h, dit voor een grens van $0,5 \text{ m/s}^2$ voor de a_w . Voor de totale uitwerkingen en tussenstappen van deze snelheden wordt er verwezen naar bijlage VII.3.



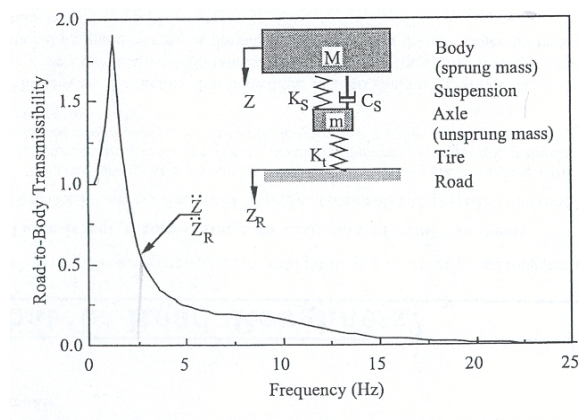
Figuur 5-11: Ontwerp grafiek bij een a_w eis van $0,5 \text{ m/s}^2$ bij verschillende snelheden voor een reeks

De belangrijkste conclusies die zijn af te leiden uit Figuur 5-11 zijn dat ze dezelfde vorm hebben als de ontwerpgrafieken horende bij een eenmalige onvlakheid. Een belangrijk verschil is dat de criteria voor een reeks onvlakheden strenger zijn dan voor een eenmalige onvlakheid.

Een tweede opvallend verschil is dat de criteria voor een onvlakheid over lengte van 2,5 meter meer zettingsverschil toestaat dan over een lengte van 5 meter bij een snelheid van 100 km/h. Dit kan mogelijk veroorzaakt worden door de overdrachtsfunctie van de wielophanging (Figuur 5-12). Een onvlakheid over een lengte van 5 meter bij een snelheid van 120 km/h overeenkomt met een frequentie van 3,33 Hz en een onvlakheid van 2,5 meter met een frequentie van 6,67 Hz.

Als dit teruggekoppeld wordt naar de overdrachtsfunctie zie je dat deze flink afneemt van 3,33 naar 6,67 Hz. Wat dus neerkomt dat deze onvlakheden minder doorwerken in het voertuig en dat er dus een grotere onvlakheid is toegestaan bij een bepaald comfortniveau.

Hierbij dient wel vermeld te worden dat de wielophanging maar een klein gedeelte is van het gehele comfortmodel. Als de oorzaak ervan daadwerkelijk achterhaald dient te worden is het aan te bevelen een gehele gevoeligheidsanalyse over het model te doen.

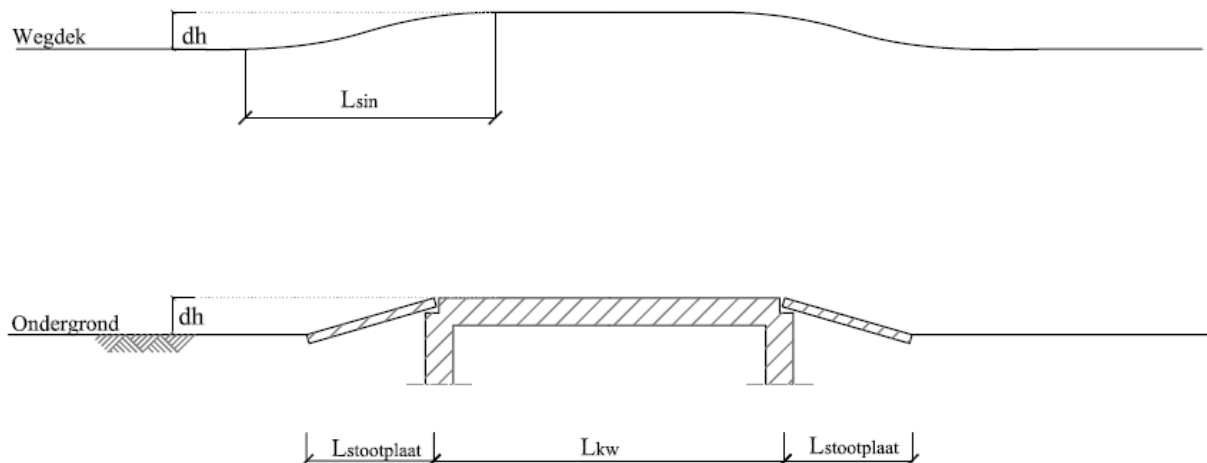


Figuur 5-12: Overdrachtsfunctie voor een wielophanging [15]

5.2 Rond kunstwerken

Bij het aanleggen van kunstwerken in zettingsgevoelige gebieden dient er extra aandacht besteed te worden aan de optredende zettingen. Dit omdat er een groot aantal kunstwerken gefundeerd is op palen, waardoor de kans op zettingsverschillen in het langsprofiel van een wegvak erg groot is. Daarom wordt er bij zettingsvrije kunstwerken meestal gebruik gemaakt van stootplaten om het zettingsverschil gedeeltelijk op te vangen.

Om te kijken wat de invloed van de zettingsvrije kunstwerken is op het comfort van een weggebruiker wordt er een situatie gemodelleerd als weergegeven in Figuur 5-13.



Figuur 5-13 : Modelling van een zettingsvrije constructie

Zoals zichtbaar in het figuur is, wordt er uitgegaan van een redelijk ideale situatie waarbij het kunstwerk niet zakt en de ondergrond in de omgeving van het kunstwerk overal evenveel zakt. Hierdoor treedt er enkel een zettingsverschil op over de stootplaat. Voor de stootplaten is verder aangenomen dat er geen problemen optreden zoals:

- het afschuiven van de stootplaat van het kunstwerk.
- het optreden van onderspoeling rond het kunstwerk,
- het voorkomen van meer zakkingen aan de voet van de stootplaat.

Deze aannamen zijn gedaan zodat enkel de invloed van zettingen op een goede stootplaat beschouwd worden. Maar het dient zeker de aanbeveling om in verder onderzoek te kijken wat de invloed is van de problemen, als net toegelicht, is op de resultaten volgend uit het comfortmodel.

Bij het modelleren van een standaard langsprofiel bij een kunstwerk met stootplaten wordt er in eerste instantie gewerkt vanuit een opgelegde onvlakheid die optreedt rond kunstwerken als weergegeven in Figuur 5-13. Over deze opgelegde onvlakheid wordt een willekeurige onvlakheid heen geplaatst zoals beschreven is in de paragraaf 5.1. Deze willekeurige onvlakheid (zie Figuur 5-2) is afkomstig uit een werkelijk profiel van de autoweg N11 die door Rijkswaterstaat als comfortabel beschouwd wordt.

Bij het samenstellen van het invoerprofiel is er rekening gehouden met het feit dat de zettingen die de stootplaat ondergaat niet één op één doorwerken op het wegdek. De scherpe punten bij het begin en het einde van de stootplaat werken namelijk niet geheel door op het wegdek, deze worden afgerond. Een uitgebreidere beschrijving hiervan is weergegeven in bijlage VIII.1.

Verder word het onderzoek betreffende het kunstwerk afgebakend binnen de volgende grenzen:

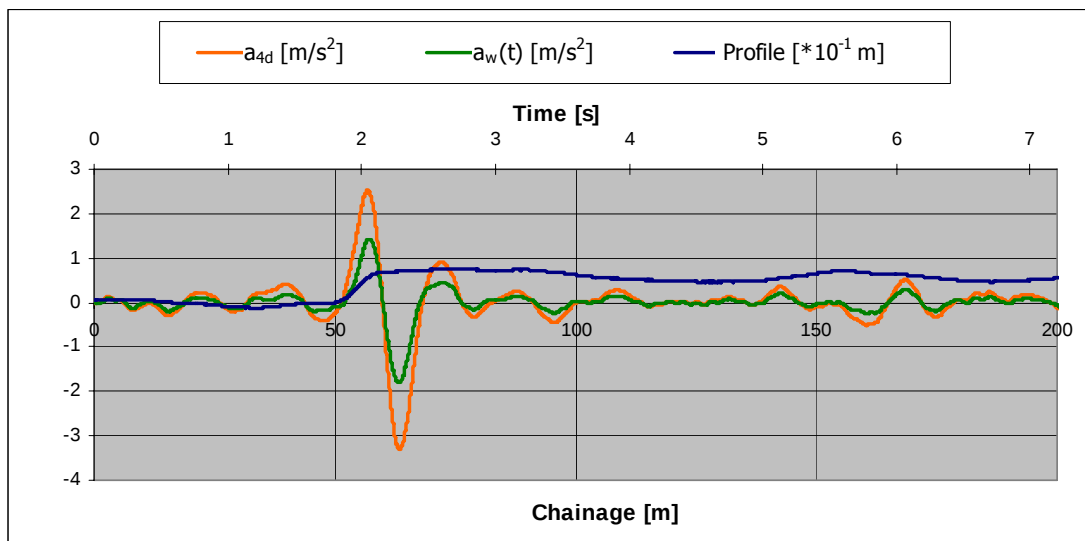
- stootplaatlengten ($L_{\text{stootplaat}}$) van 1 meter tot 12 meter,
- absolute restzettingsverschil (dh) van 0,01 meter tot 0,40 meter.

In het vervolg van deze paragraaf wordt eerst de invloed van de stootplaat individueel beschouwd (subparagraaf 5.2.1). Daarna wordt er gekeken wat de invloed van de lengte van het kunstwerk (L_{kw}) is op het comfort (subparagraaf 5.2.2).

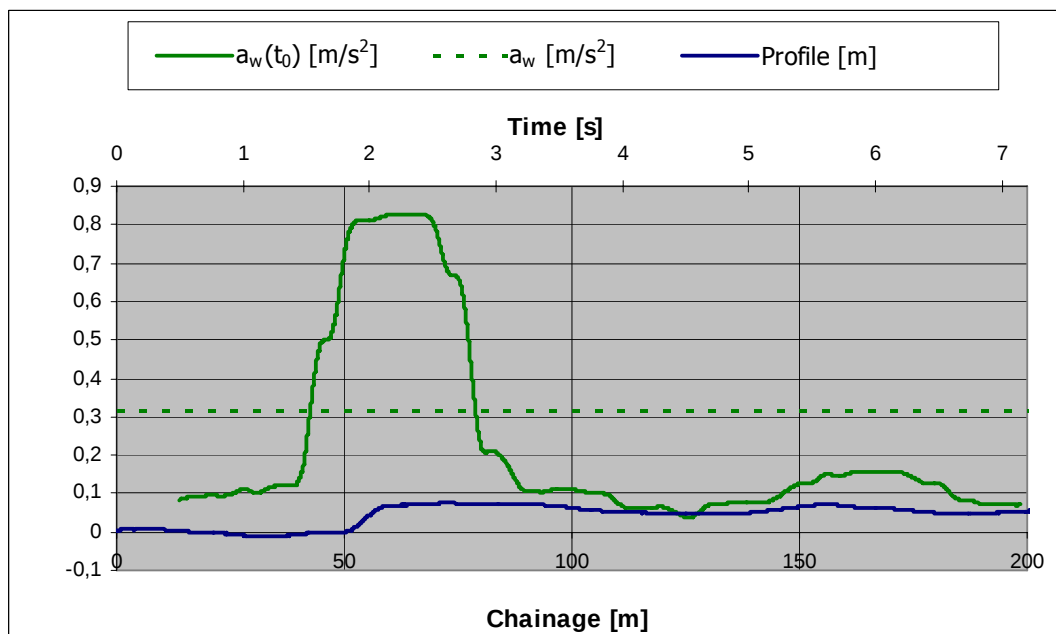
5.2.1 Een enkele stootplaat

Om eisen te kunnen stellen aan het zettingsverschil bij verschillende lengten van de stootplaat wordt in eerste instantie alleen een oplopende stootplaat gemodelleerd. Verder wordt er voor deze situatie aangenomen dat de MTVV maatgevend is omdat het hier een enkele onvlakheid betreft.

Voor deze situatie wordt dezelfde werkwijze toegepast als bij de eenmalig voorkomende onvlakheid als uitgelegd in paragraaf 5.1.1. Als voorbeeld wordt de uitvoer gegeven van een simulatie van een oplopende stootplaat met een lengte van 6 meter en zettingsverschil van 0,06 meter. Volgens de huidige eisen voldoet deze stootplaat nog aangezien de helling gelijk is aan 1:100. In Figuur 5-14 is het invoerprofiel samen met de optredende verticale versnellingen (a_{4d}) weergegeven voor een voertuigsnelheid van 100 km/h. De invloed van het zettingsverschil over de stootplaat op de versnellingen is duidelijk zichtbaar (stootplaat loopt van 50 tot 56 meter). Dit is ook zichtbaar in resultaten van de comfortparameters (Figuur 5-15).



Figuur 5-14: Versnellingen bij stootplaat van 6 meter en met een dh van 0,06 meter ($v= 100$ km/h)

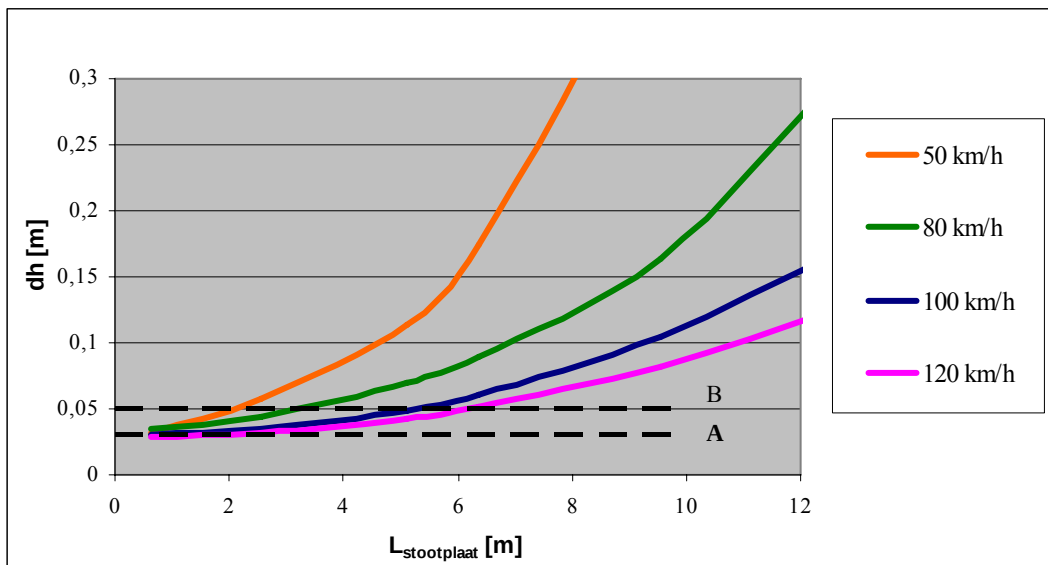


Figuur 5-15 : Uitvoer van het model bij een stootplaat ($L_{stootplaat}= 6m$, $dh = 0,06$ m, $v= 100$ km/h)

Verder valt er uit Figuur 5-15 te concluderen dat de invloed van de stootplaat op het comfort van de bestuurder de grens (voor de MTVV-waarde) van $0,8 \text{ m/s}^2$ net overschrijdt ($\text{MTVV} = 0,83 \text{ m/s}^2$). Dus dat een zettingsverschil van $0,06$ meter over een stootplaat met een lengte van 6 meter de grens van oncomfortabel nadert. De a_w waarde blijft met een waarde van $0,31 \text{ m/s}^2$ juist weer ruim onder de grens van $0,5 \text{ m/s}^2$. Dit toont nogmaals aan dat de MTVV methode veel geschikter is om het effect van locale onvlakheden op het comfort aan te geven.

Teneinde een beter beeld te verkrijgen zijn de simulaties ook uitgevoerd voor verschillende snelheden bij verschillende lengten van de stootplaat en zettingsverschillen. Deze resultaten zijn gegeven in bijlage VIII.2. Hieruit volgt een lineaire relatie tussen de comfortparameters en het zettingverschil over een bepaalde lengte bij een bepaalde snelheid net zoals in de vorige paragraaf.

Uiteindelijk zijn ontwerpgrafieken samengesteld welke zijn weergegeven in Figuur 5-16. Deze ontwerpgrafieken zijn weer gebaseerd op een MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$.



Figuur 5-16: Criteria voor het zettingsverschil (dh) over een stootplaat (voor MTVV van $0,8$)

Uit de resultaten van de oplopende stootplaat zijn verschillende conclusies te trekken, namelijk:

- Voor kleinere stootplaatlengten (bij 120 km/h is dat een lengte kleiner dan 6 meter) is het maximaal toegestane zettingsverschil 3 à 5 cm voor een MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ (gebied tussen lijn A en lijn B in Figuur 5-16),
- boven een bepaalde lengte van de stootplaat neemt het toelaatbare zettingsverschil sterk toe (bij 50 km/h is dat een lengte groter dan 6 meter),
- invloed van de snelheid is heel groot.

Als de ontwerpgrafieken vergeleken worden met de toegestane restzettingsverschillen bij een eenmalig voorkomende onvlakheid valt op dat er bij de stootplaat een groter restzettingsverschil is toegestaan. Dit terwijl de MTVV grens bij beide op $0,8 \text{ m/s}^2$ is gesteld. Dit wordt mede veroorzaakt doordat er bij de modellering rekening is gehouden met het feit dat de zettingen van de stootplaat niet geheel doorlopen in het wegprofiel. Een tweede reden is dat bij de eenmalige onvlakheid een omlaaggaande en omhooggaande beweging is gemodelleerd en bij de stootplaat alleen een omhooggaande.

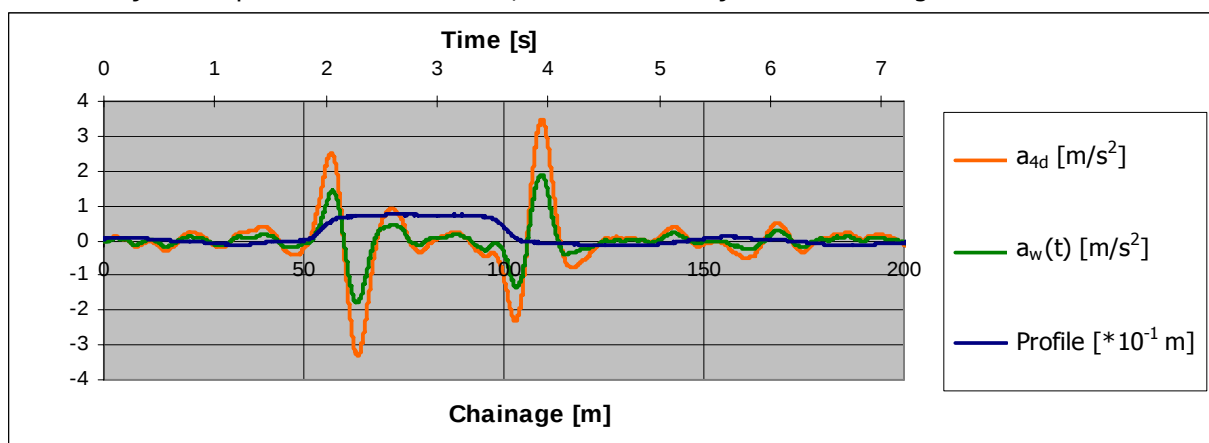
5.2.2 Invloed van de lengte van het kunstwerk

Bij kunstwerken is de lengte van het zettingsvrije gedeelte meestal afhankelijk van het te overbruggen object. Om te bepalen wat de invloed van de lengte van het kunstwerk op het comfort is, wordt de gehele situatie als weergegeven in Figuur 5-13 gemodelleerd.

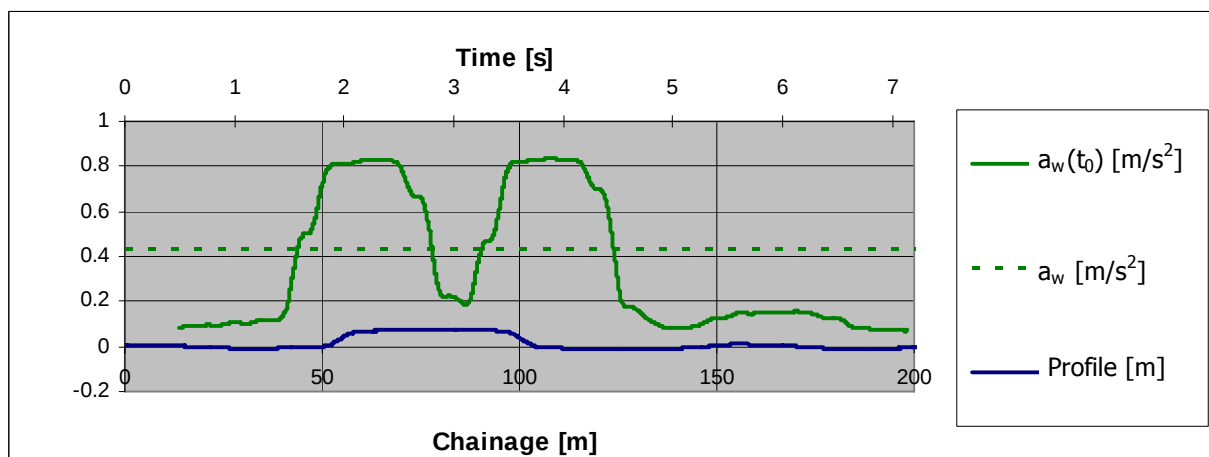
Hiervoor wordt dezelfde werkwijze gehanteerd als in voorgaande paragrafen is gebruikt. Als eerste worden er twee voorbeelden toegelicht waarbij er gewerkt is met een kunstwerklengte van 40 en van 6 meter. De verwachting is dat bij een kunstwerklengte van 40 meter de op- en afritten van het kunstwerk als onafhankelijk worden ervaren en dat bij een lengte van 6 meter dit niet het geval is. Verder is er in het voorbeeld met dezelfde randvoorwaarden gewerkt als bij de enkele stootplaat.

Als voorbeeld worden de resultaten gegeven verkregen op een gemodelleerd profiel samengesteld uit twee stootplaten ieder met een lengte van 6 meter waarover een zettingsverschil van 0,06 meter optreedt, daarna zijn de optredende versnellingen voor de weggebruiker (a_{4d}) bepaald bij een snelheid van 100 km/h.

De voor een kunstwerklengte van 40 meter berekende versnellingen zijn weergegeven in Figuur 5-17. Hieruit volgt duidelijk dat de op- en afritten van het kunstwerk elkaar niet beïnvloeden. Daarna zijn er van deze versnellingen de comfortparameters bepaald die staan weergegeven in Figuur 5-18. Numeriek komt dat neer op een MTVV-waarde van $0,83 \text{ m/s}^2$ en een a_w -waarde van $0,43 \text{ m/s}^2$. Als dit vergeleken wordt met de uitvoer van een enkele stootplaat kan er gesteld worden dat de MTVV-waarde gelijk is gebleven en de a_w -waarde is toegenomen. Dit was ook de verwachting aangezien er eigenlijk twee onafhankelijke stootplaten bekeken worden; dit is ook duidelijk zichtbaar in Figuur 5-18.

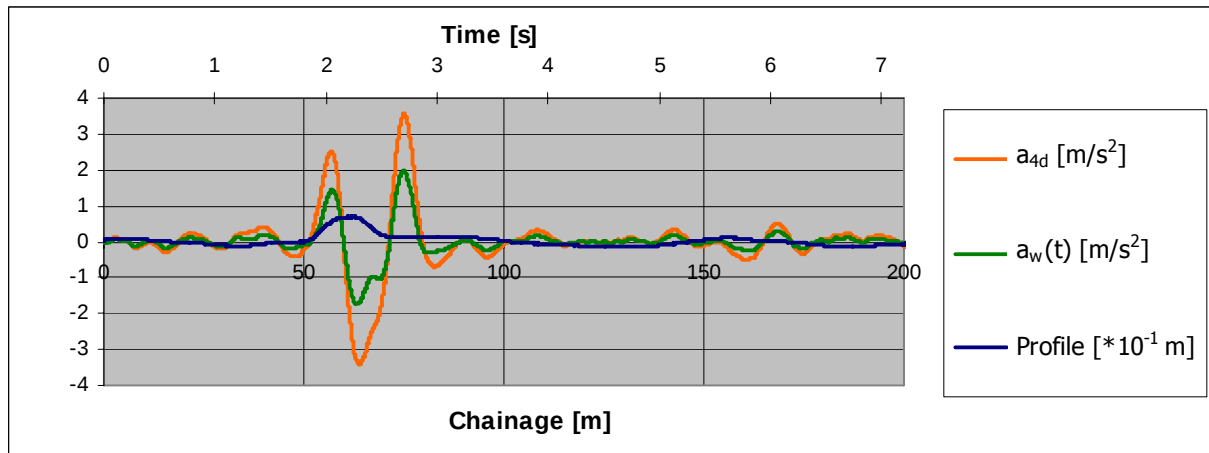


Figuur 5-17: Versnellingen bij een kunstwerk met de lengte van 40 meter, stootplaatlengten van 6 meter en een dh van 0,06 meter

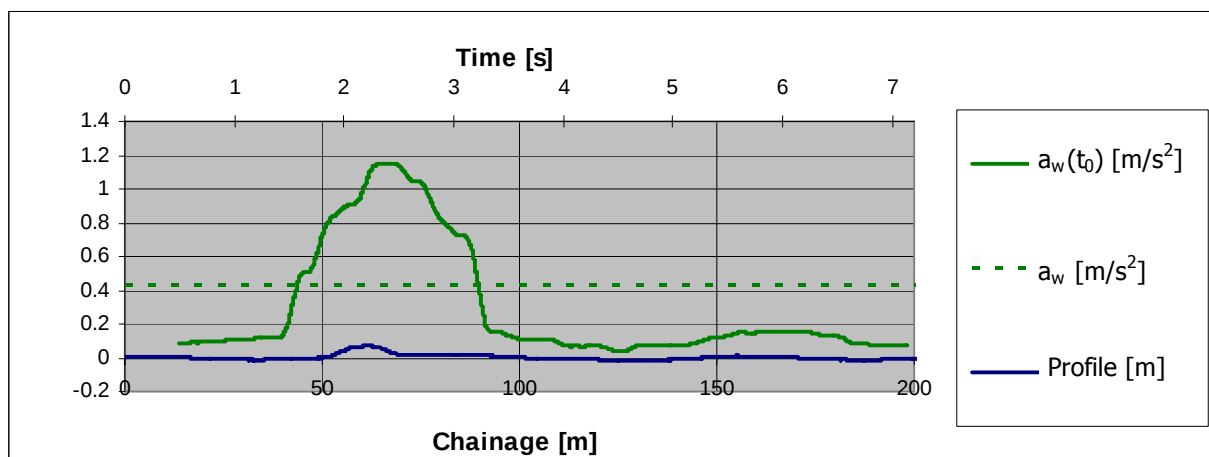


Figuur 5-18: Uitvoer van het model bij een kunstwerk ($L_{kw}=40 \text{ m}$, $L_{stootplaat}=6 \text{ m}$, $dh=0,06 \text{ m}$)

Om nu te bepalen wat de invloed is van de lengte van het kunstwerk op het comfort wordt hetzelfde invoerprofiel gebruikt alleen wordt de lengte van het kunstwerk op 6 meter gesteld. De berekende versnellingen van de bestuurder zijn weergegeven in Figuur 5-19 en de resultaten van het comfortmodel staan weergegeven in Figuur 5-20.



Figuur 5-19: Versnellingen bij een kunstwerk met de lengte van 6 meter, stootplaatlengten van 6 meter en een dh van 0,06 meter

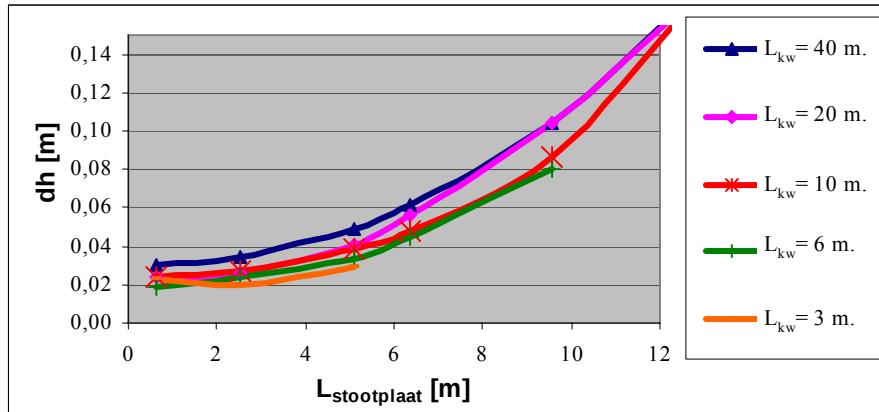


Figuur 5-20: Uitvoer van het model bij een kunstwerk ($L_{kw}=6$ m, $L_{stootplaat}=6$ m, $dh=0,06$ m)

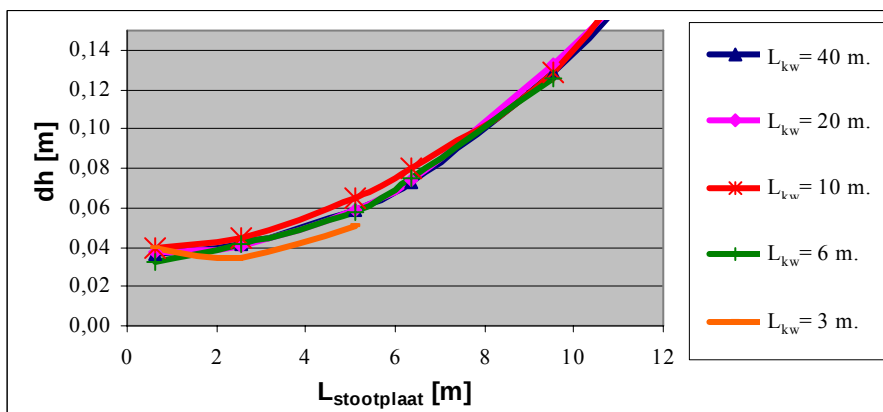
In beide figuren is zichtbaar dat de op- en afrit elkaar nu wel beïnvloeden. De numerieke waarde van de comfortparameters is gelijk aan $0,43 \text{ m/s}^2$ voor de a_w en $1,15 \text{ m/s}^2$ voor de MTVV. Het tweede dat opvalt, is dat de a_w waarde van het gehele wegvak gelijk is gebleven en dat dus de lengte van het kunstwerk alleen de MTVV-waarde beïnvloed. Het verdient daarom de aanbeveling om bij het ontwerp en het stellen van eisen aan de onvlakheid bij kunstwerken in zettingsgevoelige gebieden rekening te houden met de lengte van het kunstwerk.

In dit onderzoek is er voor een snelheid van 100 km/h voor verschillende kunstwerkenlengten verder onderzoek verricht naar de invloed hiervan op de comfortparameters. Dit is gedaan op dezelfde wijze als voor de andere standaard situaties. De gehele uitvoer hiervan is weergegeven in bijlage VIII.3. Hieruit bleek weer een lineaire relatie tussen het opgelegde zettingsverschil (dh) en de comfortparameters bij een bepaalde stootplaatlengte (net zoals in Figuur 5-5). Ook nu is het weer mogelijk om voor deze situaties ontwerpgrafieken op te stellen. Dit is gedaan voor een MTVV-grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ en een a_w -grens van $0,5 \text{ m/s}^2$, en hierbij is de lengte van het kunstwerk gevarieerd van 3 tot 40 meter.

In Figuur 5-21 en Figuur 5-22 zijn deze ontwerpgrafieken weergegeven. Voor de kortere kunstwerken (lengte van 6 en 3 meter) zijn alleen ontwerpgrafieken opgesteld voor de kortere stootplaat lengten. De oorzaak hiervan was dat het niet mogelijk was grotere stootplaatlengten te modelleren (zie Figuur 5-23). Het verdient de aanbeveling de invloed van deze beperking nader te onderzoeken. Verder dient er ook nog gekeken te worden naar het effect van de snelheid, door andere snelheden toe te passen.



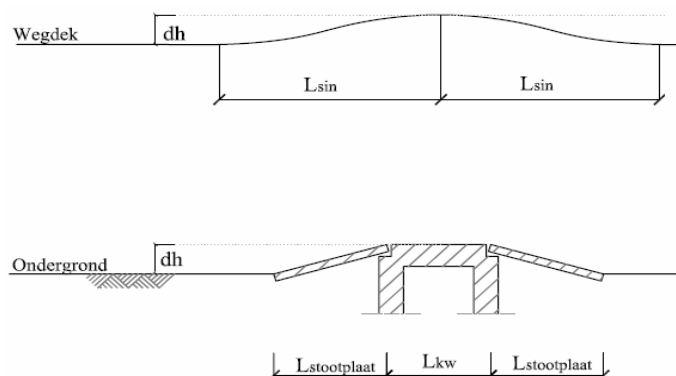
Figuur 5-21: Ontwerpgrafiek voor het toegestane zettingsverschil over stootplaten bij een MTVV-grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ voor verschillende lengten van kunstwerken (L_{kw}), bij een snelheid van 100 km/h



Figuur 5-22: Ontwerpgrafiek voor het toegestane zettingsverschil over stootplaten bij een a_w -grens van $0,5 \text{ m/s}^2$ voor verschillende lengten van kunstwerken (L_{kw}), bij een snelheid van 100 km/h

Uit de ontwerpgrafieken zijn de volgende conclusies af te leiden:

- de lengte van het kunstwerk is vooral van invloed op de ontwerpgrafieken volgend uit de MTVV-grens,
- de MTVV-grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ is maatgevend ten opzichte van de a_w -grens van $0,5 \text{ m/s}^2$.



Figuur 5-23: Invloed van het sinusvormig profiel

5.3 Conclusies

Op basis van de in dit hoofdstuk gegeven resultaten valt te concluderen dat het mogelijk is om een relatie samen te stellen tussen het comfort van de weggebruiker en de toegestane restzettingsverschillen. Voor verschillende standaardsituatie bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameter en het over een bepaalde lengte optredende zettingsverschil. Hierdoor is het mogelijk om vanuit een bepaalde comfort parameter het toegestane zettingsverschil te bepalen voor deze verschillende lengten. Met behulp van deze gegevens zijn dan ontwerpgrafieken samen te stellen voor bepaalde standaardsituaties. Uit deze grafieken volgt dat het comfort van de bestuurder mede afhankelijk is van de voertuigsnelheid.

In dit hoofdstuk zijn verder ook nog drie standaard situaties uitgewerkt voor vier verschillende voertuigsnelheden (50, 80, 100, 120 km/h), namelijk:

1. ontwerpgrafieken opgesteld voor een eenmalige onvlakheid,
2. ontwerpgrafieken opgesteld voor een reeks onvlakheden,
3. ontwerpgrafieken voor de toegestane (rest-)zettingen rond kunstwerken.

Uit de ontwerpgrafieken zijn de volgende conclusies af te leiden.

- Alle ontwerpgrafieken hebben een exponentiële vorm. De grafieken gaan namelijk voor kortere lengten naar een lage constante waarde en voor grotere lengten neemt deze exponentieel toe.
- De ontwerpgrafieken zijn zeer afhankelijk van de snelheid, bij lagere snelheden neemt het toegestane zettingsverschil veel sneller exponentieel toe dan bij de hogere snelheden. Verder gaat het maximaal toegestane zettingsverschil over de kortere lengten voor verschillende snelheden naar een gelijke constante waarde (0,025 meter voor de eenmalige onvlakheid bij een MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$).
- De a_w grens wordt als maatgevend beschouwd voor een reeks onvlakheden en de MTVV grens wordt als maatgevend beschouwd voor een eenmalige onvlakheid.
- Bij de ontwerpgrafieken voor het toegestane zettingsverschil over een stootplaat geldt verder dat de helling van de stootplaat geen maatgevende parameter is voor comfort, maar dat ook de lengte van de stootplaat in de beschouwing moet worden betrokken.
- Als de lengte van de kunstwerken kort is, ten opzicht van de snelheid van het voertuig, dient dit meegenomen te worden bij het bepalen van ontwerpgrafieken voor het toegestane zettingsverschil over stootplaten (bij een snelheid van 100 km/h geldt dit bij kunstwerk lengten korter dan 20 meter).

6 Vergelijken van resultaten met de huidige methoden

Zoals in het begin van het verslag al gemeld is komen er steeds vaker klachten van weggebruikers over de vlakheid van wegen terwijl die wel voldoen aan huidige eisen (als toegelicht in paragraaf 2). Of dit veroorzaakt wordt doordat niet alles in de eisen wordt meegenomen of dat de eisen te ruim zijn is niet bekend. Daarom worden in dit hoofdstuk de huidige langsonvlakheidseisen vergeleken met de criteria als opgesteld in hoofdstuk 5.

Als eerste worden in paragraaf 6.1 de comfortparameters vergeleken met de IRI-waarden die toegekend kunnen worden aan een bepaald wegvak. Daarna worden de ontwerpgrafieken volgend uit de comfortparameters (a_w , MTVV) vergeleken met de eis van het huidige toegestane zettingsverschil over een bepaalde afstand. Tenslotte vindt er in paragraaf 6.3 de vergelijking plaats tussen de huidige eisen voor de helling van een stootplaat en de eisen die volgen uit het nieuwe comfortmodel.

6.1 IRI

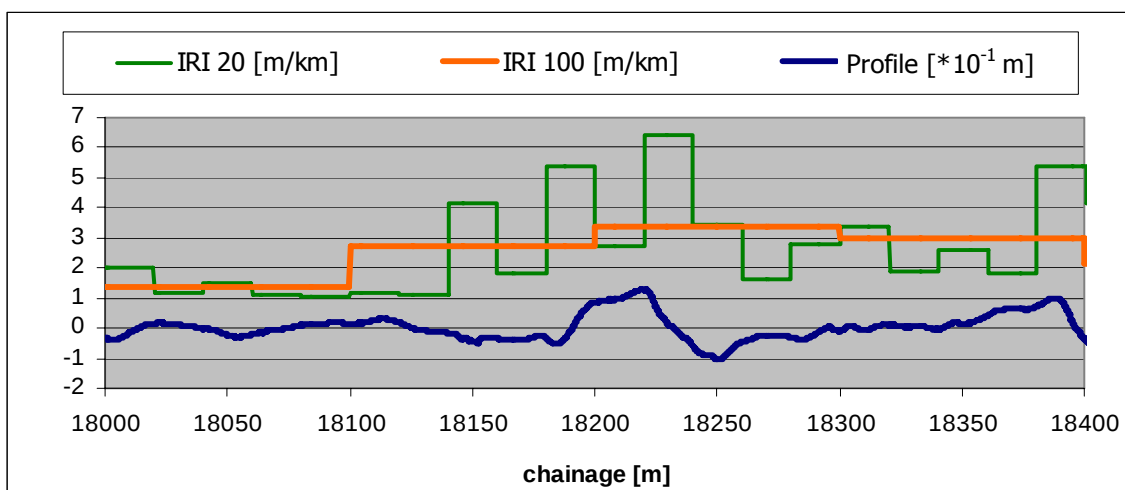
Het belangrijke verschil tussen de IRI berekening en het comfortmodel is dat de IRI gebaseerd is op de verplaatsing die de demper ondergaat in een kwartvoertuigmodel en het comfortmodel gebaseerd is op de versnelling van de bestuurder bij een half voertuigmodel.

Verder wordt momenteel de IRI alleen bepaald bij een snelheid van 80 km/h en wordt deze snelheid verder niet in beschouwing meegenomen. Om die reden worden allereerst in subparagraaf 6.1.1 de IRI-waarden vergeleken met de comfortparameter bepaald bij een snelheid van 80 km/h. Daarna wordt er in subparagraaf 6.1.2 ook de invloed van de snelheid ook meegenomen bij de IRI bepaling en wordt bekeken wat daarvan de invloed is.

6.1.1 IRI versus comfortparameter bij 80 km/h

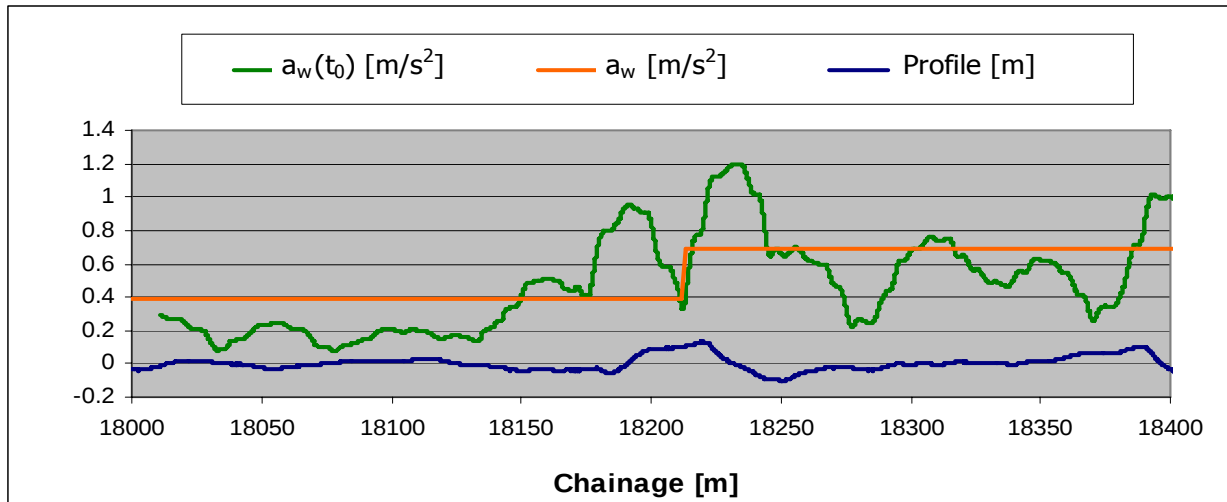
Om de comfortparameters te vergelijken met de IRI parameters wordt er gebruik gemaakt van een wegvak van de Rijksweg N11 (zie paragraaf 4.2). Van dit wegvak is het wegprofiel bekend en zijn de IRI 100 waarden en comfortparameters bekend, zodat een vergelijking kan worden gemaakt tussen deze parameters. De IRI 20 waarden zijn echter alleen bepaald voor de locaties die volgens de beoordeling van Rijkswaterstaat [20] niet voldoen (IRI 20 groter dan 5 m/km). Om de IRI 20 waarden voor iedere locatie te bepalen wordt daarom gebruik gemaakt van het IRI model als uitgelegd in bijlage IX.1.

In Figuur 6-1 zijn de IRI-waarden gegeven, de IRI 100 is een waarde die constant is voor een wegvak met een lengte van 100 meter en de IRI 20 is constant over een lengte van 20 meter. Het is wel mogelijk om deze waarden als lopend gemiddelde te bepalen maar ze zijn hier als constante weergegeven omdat bij de beoordelingen van wegen door Rijkswaterstaat gewerkt wordt met één waarde voor één vak (van 100 of 20 meter).



Figuur 6-1: IRI-waarden tpv KW 10 op de N11

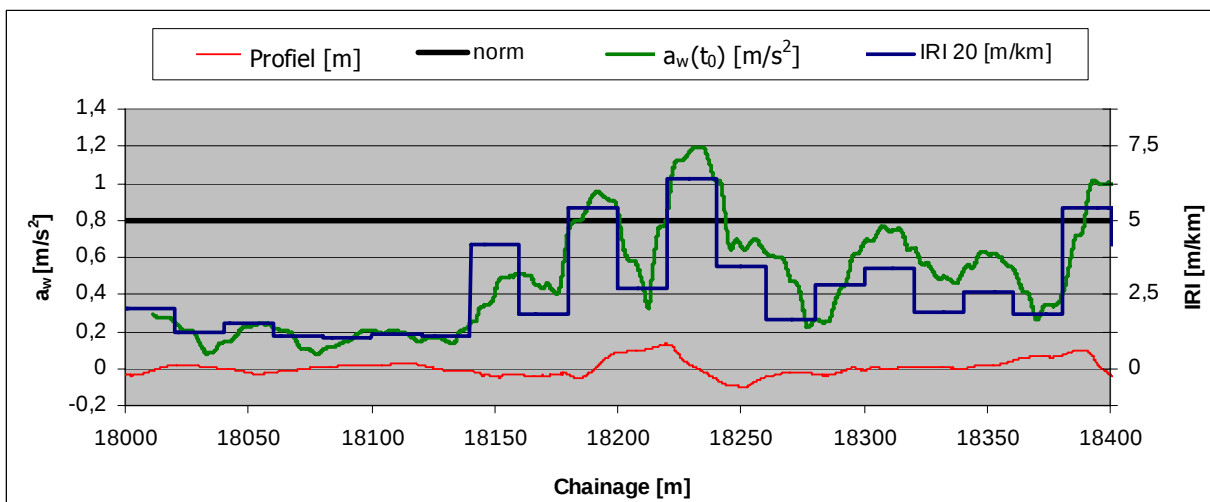
Verder zijn in Figuur 6-2 de comfortparameters weergegeven voor 80 km/h. Dit is gedaan omdat de IRI-waarden ook gebaseerd zijn op 80 km/h. Hiervan zijn de a_w waarden bepaald voor een wegvak van 212 meter. De reden hiervan is dat in het gehele onderzoek er gewerkt is met a_w waarden bepaald op een lengte van 212 meter. Deze lengte volgde uit het model (zie bijlage V)



Figuur 6-2: Comfortparameters bij 80 km/h tpv KW 10 op de N11

IRI 20 versus MTVV

Globaal kan worden gesteld dat de $a_w(t_0)$ waarden vergeleken kunnen worden met de IRI 20 waarden, de IRI 20 is immers ook gevoelig voor korte onvlakheden. De IRI 20 is een gemiddelde waarde over 20 meter wat overeenkomt met 0,9 seconden bij een voertuig snelheid van 80 km/h en de $a_w(t_0)$ waarde is een gemiddelde over 1 seconde wat weer overeenkomt met 22 meter. Om de twee parameters beter met elkaar te kunnen vergelijken zijn ze in onderstaande figuur samen weergegeven. Hieruit komt onder andere naar voren dat de grens van 5 en 0,8 voor respectievelijk de IRI en de MTVV op dezelfde locaties overschreden worden.



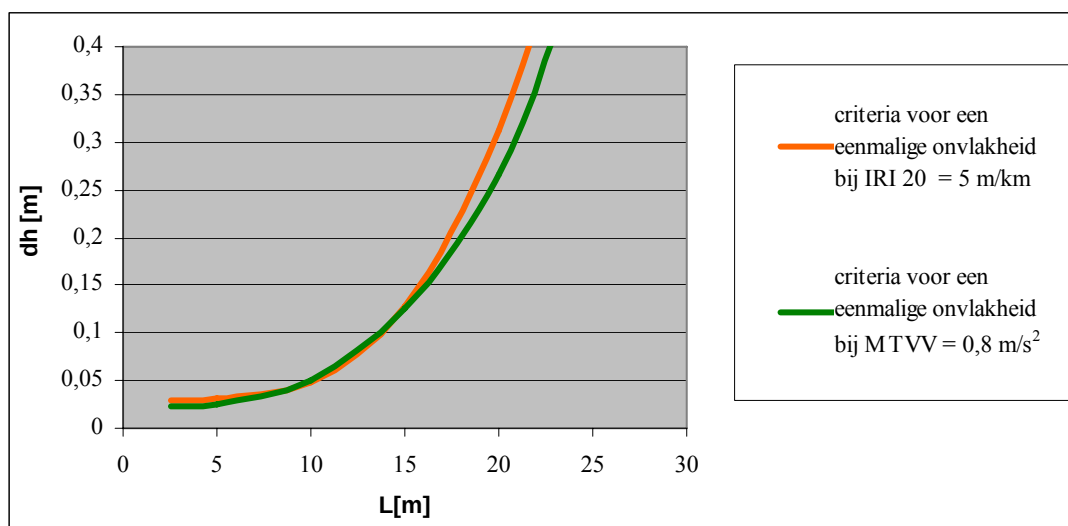
Figuur 6-3: IRI 20 vs MTVV tpv KW 10 om de N11

Zoals verwacht geven beide methoden een redelijk overeenstemmend beeld aangezien beide methoden gebaseerd zijn op een meervoudig massaveer systeem van de wielophanging. Zo zijn de twee maximale waarden van de $a_w(t_0)$ duidelijk terug te vinden bij de uitvoer van de IRI 20 (rond km 18.2). Maar de piek in de IRI 20 bij km 18,15 is bij de $a_w(t_0)$ minder extreem zichtbaar. Het belangrijkste wat opvalt als de IRI 100 met de a_w waarde vergeleken wordt is dat bij de IRI 100 de eis van 3,5 m/km niet overschreden wordt, en dat bij de a_w de eis van 0,5 m/s² wel overschreden wordt.

Deze verschillen worden mogelijk veroorzaakt doordat de IRI bepaald is uit de verplaatsing van de dempers van een kwartvoertuig model en de comfortparameters (a_w en MTVV) bepaald worden uit de versnelling van de bestuurder met behulp van een half-voertuigmodel. Verder geldt dat de karakteristieken van een Peugeot 504 niet gelijk zijn aan de karakteristieken toegepast bij de bepaling van de IRI.

Om te kijken wat de invloed van de verschillende methoden is op de ontwerpgrafieken als samengesteld in hoofdstuk 5, zijn er ook ontwerpgrafieken opgesteld volgend uit de IRI-eisen. Dit wordt gedaan door de IRI waarden te bepalen bij dezelfde variatie aan invoerprofielen bij de eenmalig voorkomende onvlakheid en bij de reeks onvlakheden.

Voor de eenmalig voorkomende onvlakheid is de IRI 20 bepaald; de resultaten zijn in bijlage IX.2.1 weergegeven. Uit deze resultaten is voor de verschillende lengten waarover de onvlakheden gemiddeld werden weer een lineaire relatie af te leiden tussen de IRI 20 waarde en het opgelegde zettingsverschil over een bepaalde lengte. Daardoor is het mogelijk om met behulp van de IRI waarden soortgelijke ontwerpgrafieken samen te stellen als voor de comfortparameters. Deze ontwerpgrafiek staat voor een snelheid van 80 km/h weergegeven in Figuur 6-4. In deze figuur is zowel de ontwerpgrafiek voor een IRI 20 grens van 5 m/km als de ontwerpgrafiek volgend uit een MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ gegeven.

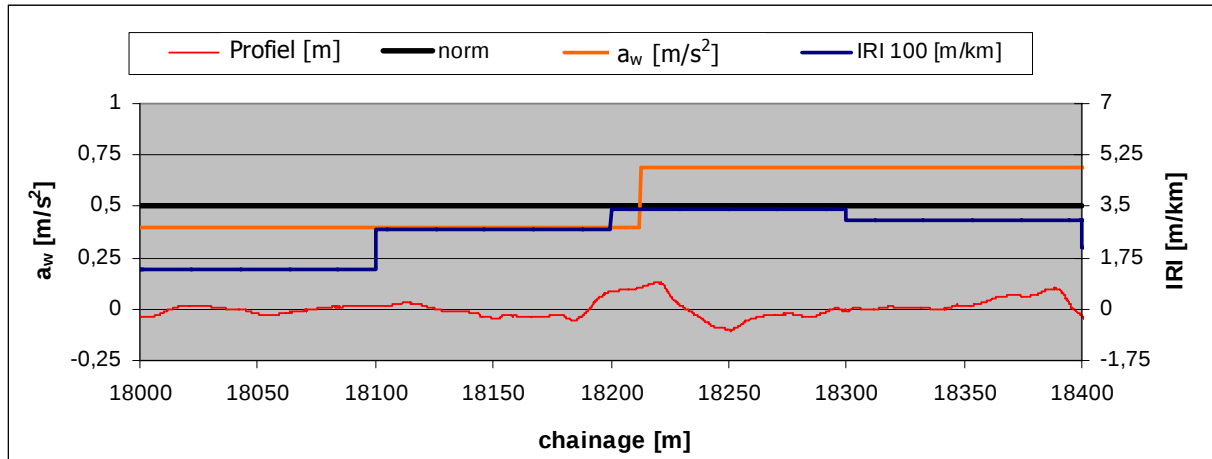


Figuur 6-4 Ontwerpgrafiek gebaseerd op de IRI 20 en de MTVV tegen een snelheid van 80 km/h

Zoals uit bovenstaande figuur blijkt komt de ontwerpgrafiek volgend uit IRI 20 eis van 5 m/km bijna overeen met de ontwerpgrafiek volgend uit een MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$. Er kan dus gesteld worden dat er uit de IRI 20 en de $a_w(t_0)$ dezelfde ontwerpgrafieken volgen bij een snelheid van 80 km/h. Het enige nadeel van de IRI is dat alleen gekeken wordt naar een snelheid van 80 km/h. Daarom wordt er in de subparagraaf 6.1.2 ingegaan op de invloed van de snelheid op de IRI-waarden en de comfortparameters.

IRI 100 versus a_w

De a_w waarden volgens uit het comfortmodel worden vergeleken met de IRI 100 waarden. Hierbij dient vermeld te worden dat de IRI 100 op een wegvak van 100 meter is en de a_w waarde op een wegvak van 212 meter. Doordat de a_w waarde op een langere afstand gebaseerd is worden er in deze methode de piekwaarden meer uitgevlakt dan bij de IRI 100 bepaling.



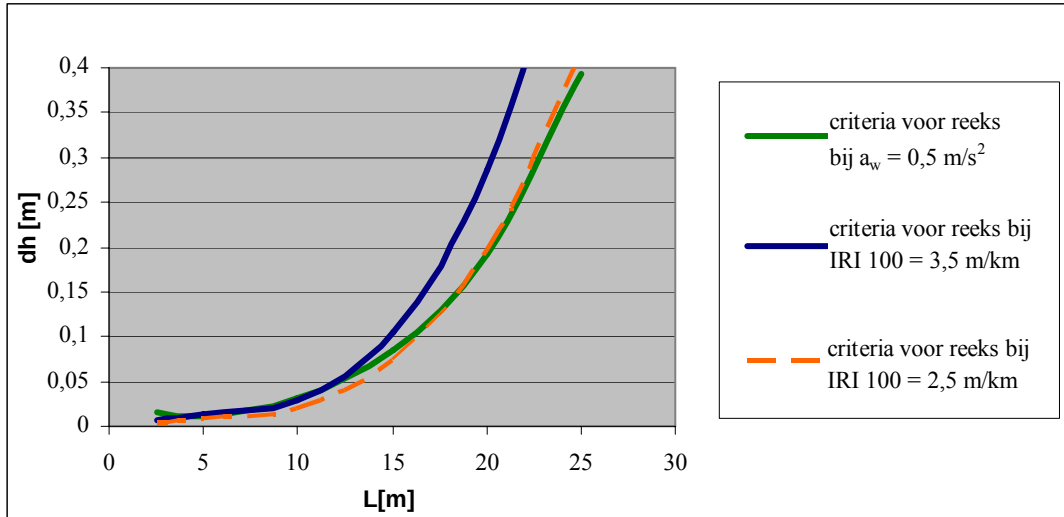
Figuur 6-5 IRI 100 vs a_w tpv KW 10 om de N11

Als de uitvoer van de twee methoden van het voorbeeld vergeleken worden (zie Figuur 6-5) is het duidelijk dat door beide methoden het tweede gedeelte (km 18,2 tot km 18,4) als meest oncomfortabel beschouwd wordt. Het verschil is dat de grens voor de IRI 100 eis van 3,5 m/km wel voldoet en dat de comfortgrens van 0,5 m/s² voor a_w ruim wordt overschreden.

Daarom kan gesteld worden dat als aan de IRI 100 eis van 3,5 m/km voldaan wordt de comfortgrens van 0,5 m/s² nog wel overschreden kan worden.

De locatie rond kunstwerk 10 van de N11 (het voorbeeld) werd in ieder geval door Rijkswaterstaat ook als locatie vastgesteld waar de verkeersveiligheid in gevaar kan komen vanwege de langsonvlakheid [20]. Daarom lijkt er voor dit voorbeeld te gelden dat de a_w grens van 0,5 m/s² een beter beeld geeft dan de IRI 100 eis. Om te bepalen of dit ook geldt voor de langsonvlakheid in het algemeen is meer onderzoek nodig naar de a_w grens. De a_w grens die tot nu toe is gebruikt is immers op enkele aannamen gebaseerd. Dit is uitgelegd in hoofdstuk 4.

Ook is gekeken of er een lineair verband bestaat tussen de IRI 100 waarden en het zettingsverschil over een bepaalde lengte, net zoals is gedaan voor de a_w waarden. De resultaten van deze analyse staan weergegeven in bijlage IX.3.1. Met behulp van deze resultaten is het mogelijk om ontwerpgrafieken gebaseerd op de IRI 100 samen te stellen. Deze ontwerpgrafieken staan voor een snelheid van 80 km/h weergegeven in Figuur 6-6. In deze figuur is zowel de ontwerpgrafiek voor een IRI 100 grens van 3,5 m/km gegeven als voor een IRI 100 grens van 2,5 en een a_w grens van 0,5 m/s².



Figuur 6-6 Ontwerpgrafieken bepaald op basis van de IRI en de a_w bij een snelheid van 80 km/h

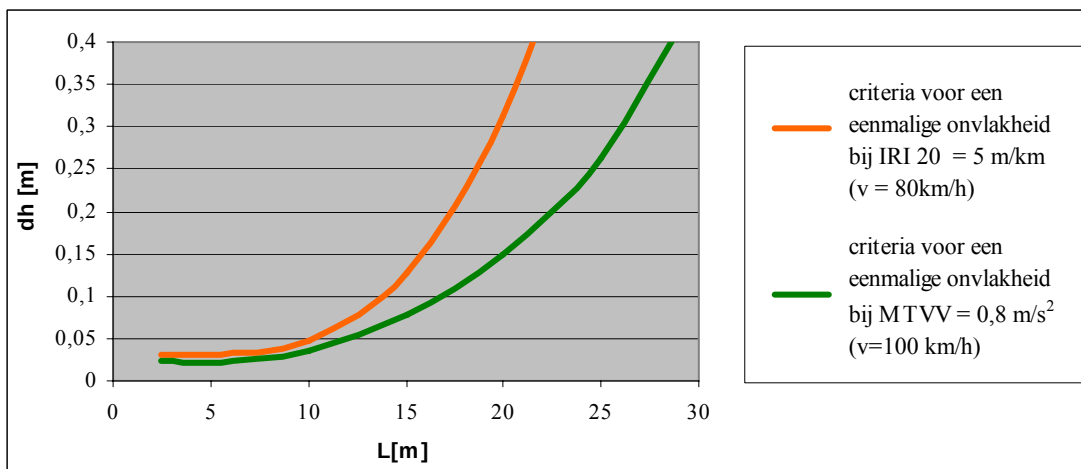
Als de comforteis van $0,5 \text{ m/s}^2$ van de a_w waarde als maatgevend wordt gesteld, dan kan uit Figuur 6-6 worden afgeleid dat het IRI 100 criterium van $3,5 \text{ m/km}$ bijgesteld dient te worden naar $2,5 \text{ m/km}$. Uit de uitvoerresultaten blijkt ook dat om de a_w grens bij te stellen naar de IRI eis van $3,5 \text{ m/km}$ deze een waarde krijgt van $0,7 \text{ m/s}^2$.

Welke waarde het meest realistisch beeld geeft dient verder onderzocht te worden, maar uit het voorbeeld van KW 10 op de N11 blijkt de a_w grens van $0,5$ het meest realistisch.

6.1.2 Invloed van de snelheid op de IRI

Zoals al meerdere malen is gemeld wordt de IRI bepaald bij een snelheid van 80 km/h , de maximale snelheid op Nederlandse rijkswegen bedraagt echter 100 tot 120 km/h . om na te gaan of de IRI gemeten bij 80 km/h wel representatief is voor het comfortgevoel bij 100 km/h worden nu de IRI waarden vergeleken met de uitvoer van het comfortmodel bij een voertuigsnelheid van 100 km/h . Hiertoe zijn in Figuur 6-7 de ontwerpgrafieken die volgen uit een bepaalde IRI 20 eis en uit een MTVV grens bij een eenmalige onvlakheid samengevoegd.

De ontwerpgrafiek volgend uit de MTVV grens is bepaald bij een snelheid van 100 km/h en voor de IRI 20 bij een snelheid van 80 km/h . Uit Figuur 6-7 volgt dat als een weg aan de IRI 20 eis van 5 m/km voldoet er niet aan de comfortgrens voldaan wordt. Uit het oogpunt van het nieuw opgestelde comfortmodel volgt dus dat er rekening gehouden dient te worden met wat de werkelijke snelheid is.

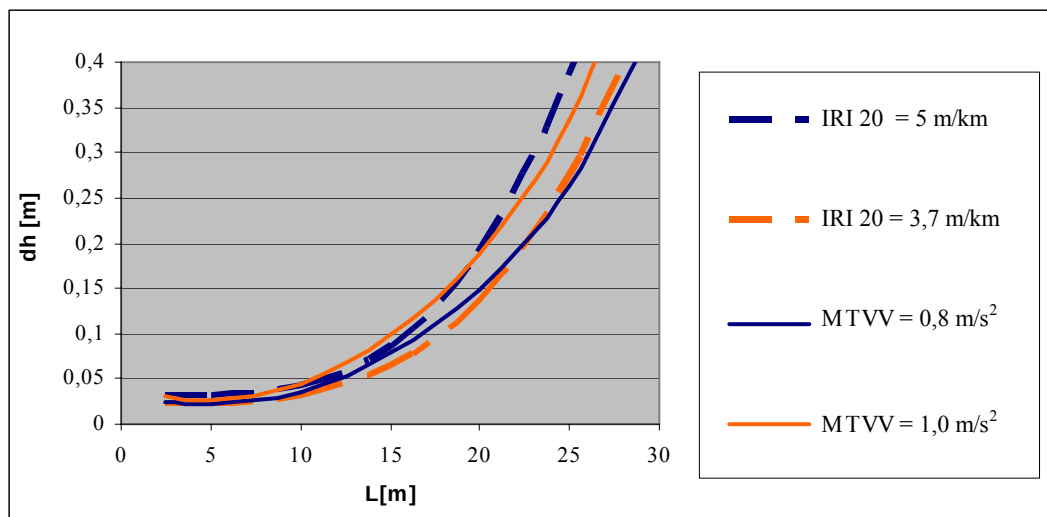


Figuur 6-7: Uitvoer IRI 20 (80 km/h) en MTVV (100 km/h) voor kuil

Bij de bepaling van de IRI waarden is de snelheid ook een invoerparameter, en daarom is het mogelijk IRI waarden te bepalen bij hogere snelheden (zie bijlage IX.1). Het is alleen zo dat de huidige eisen gebaseerd zijn op een snelheid van 80 km/h, en dat er nooit gekeken wordt naar de IRI waarden bij hogere snelheden.

Bij het comfortmodel is er gesteld dat de verticale versnelling die de weggebruiker ondergaat maatgevend is waarbij is aangenomen dat de grens van $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,8 \text{ m/s}^2$ geldend zijn voor de versnellingen die ondergaan worden bij verschillende snelheden (hoofdstuk 4). Of bij IRI-eisen ook aangenomen kan worden of ze gelden bij een IRI bepaling met behulp van een hogere snelheid is niet duidelijk. Dit omdat het niet duidelijk met behulp van wat voor onderzoek de IRI eisen bepaald zijn.

Om nu te kijken wat de invloed van de snelheid is op de IRI waarden, wordt de IRI 20 bepaald bij dezelfde variatie aan invoerprofielen als bij de eenmalig voorkomende onvlakheid. Dit wordt nu alleen gedaan bij een snelheid van 100 km/h, de IRI 20 is dan bepaald over een periode van 0,72 seconde (=20 meter). Deze resultaten staan weergegeven in bijlage IX.2.2. Hierna zijn uit deze resultaten ontwerpgrafieken bepaald voor een IRI grenswaarde van 5 m/km en voor 3,7 m/km. Deze ontwerpgrafieken zijn samen met de ontwerpgrafiek van 100km/h horende bij de MTVV grens weergegeven in Figuur 6-8. De waarde van 3,7 m/km is zo gekozen zodat de ontwerpgrafiek gelijk valt met de ontwerpgrafiek volgend uit een MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$.

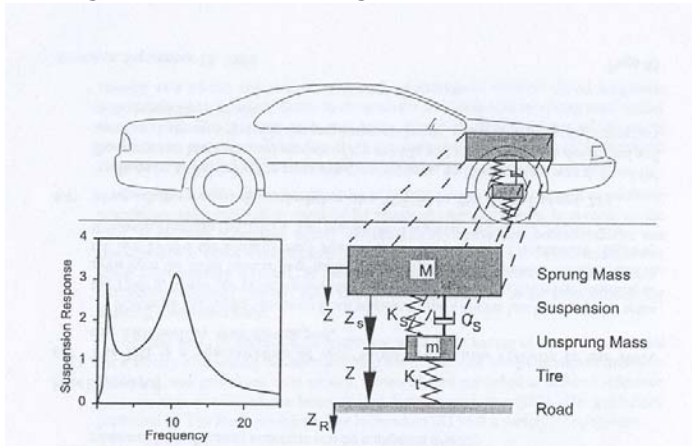


Figuur 6-8: Criteria voor een eenmalige onvlakheid bij een IRI 20 en MTVV voor een snelheid van 100 km/h

Uit de figuur blijkt dat de criteria die volgen uit een MTVV grens van $0,8 \text{ m/s}^2$ overeen komen met de criteria volgend uit een IRI 20 grenswaarde van 3,7 m/km. Een IRI 20 grenswaarde van 5 m/km komt juist weer overeen met een MTVV grenswaarde van $1,0 \text{ m/s}^2$.

Uit Figuur 6-8 blijkt verder dat de ontwerpgrafiek die volgt uit de IRI 20 ten opzichte van de ontwerpgrafiek van de MTVV sterker toeneemt bij onvlakheden die over grotere lengten optreden. Als de ontwerpgrafiek volgend uit een IRI 20 met een grenswaarde van 5m/km vergeleken wordt met de ontwerpgrafiek horende bij MTVV waarde van $1,0 \text{ m/s}^2$, valt er op dat deze tot een lengte van 10 meter zo goed als gelijk lopen en dat de ontwerpgrafiek van de IRI 20 bij grotere lengte meer toeneemt. Het comfortmodel is dus gevoeliger voor aanpassingen aan de voertuigsnelheid.

Er kan geconcludeerd worden dat het comfortmodel gevoeliger is voor de voertuigsnelheid, maar ook gevoeliger is voor de invloeden over grotere lengten. Dit tweede wordt mogelijk veroorzaakt doordat de IRI gebaseerd is op de verplaatsing die de dempers ondergaat. In Figuur 6-9 is een standaard karakteristiek van een wielophanging weergegeven. Hieruit volgt welke frequenties er vooral door de wielophanging opgenomen worden. Uit deze figuur blijkt dat als de frequentie naar nul gaat, wat overeenkomt met langere golflengten, de dempers bijna niks meer opnemen en wordt de verplaatsing één op één doorgegeven aan het voertuig en de bestuurder [15]. Aangezien de IRI waarden gebaseerd zijn op de beweging die een demper ondergaat worden de grotere golflengten, afhankelijk van de voertuigsnelheid, minder meegenomen in de IRI methode.



Figuur 6-9 Algemeen wielophangingskarakteristiek [15]

Aanbevolen wordt om het comfortmodel verder te toetsen op de invloed van snelheid op het comfort. Dit kan gedaan worden met behulp van een experiment zoals uitgelegd in paragraaf 4.3. Uit dit experiment kan dan blijken welke methode een realistisch beeld geeft, het nieuwe comfortmodel of de IRI.

Het lijkt er verder op dat het comfortmodel beter gebruikt kan worden dan de IRI aangezien deze het comfort van de weggebruiker in ogenschouw neemt. Het comfortmodel houdt rekening met verticale versnellingen die de bestuurder zelf ondergaat. De IRI heeft betrekking op het verschil van de verplaatsing van de ongedempte massa ten opzichte van de gedempte massa.

6.2 Hoogteverschil over bepaalde afstand

Een belangrijke zettingseis die voor het ontwerp van wegen veel gebruikt wordt is de toegestane zetting over een bepaalde afstand zoals beschreven in CROW publicatie 204 [4]. De belangrijkste eisen die hieruit volgen zijn voor de hogere orde wegen als volgt:

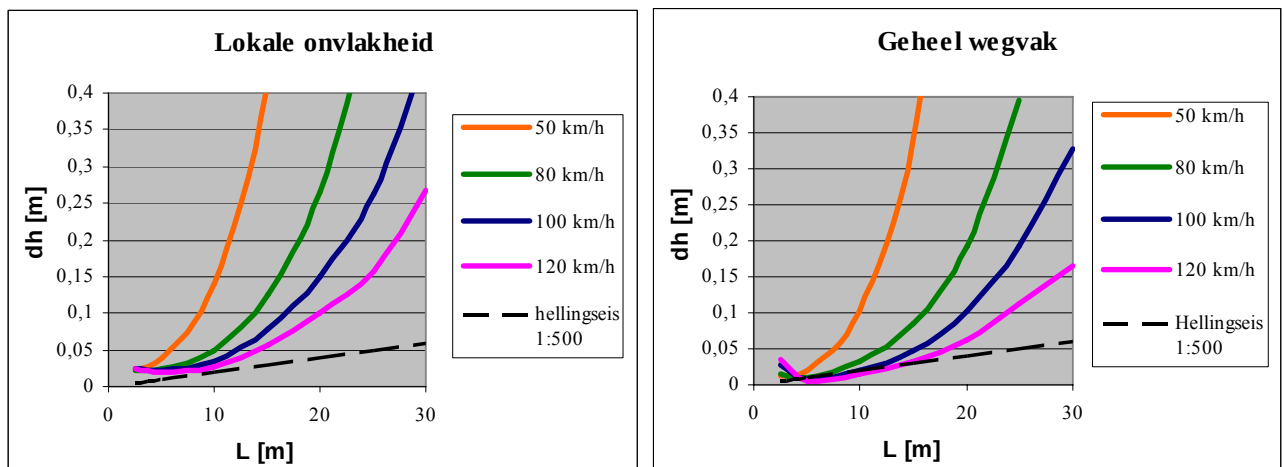
- maximaal restzettingsverschil van 0,05 m over een afstand van 25 meter,
- maximaal restzettingsverschil van 0,10 m over een afstand van 50 meter.

Om de huidige eisen te vergelijken met de ontwerpgrafieken die bepaald zijn in hoofdstuk 5 worden de huidige eisen zodanig geformuleerd. Dat ze ook grafisch weergegeven kunnen worden net zoals de ontwerpgrafieken. De huidige eis kan namelijk ook als een maximale toegestane helling geformuleerd worden van 1:500.

Verder word er bij de huidige eisen geen onderscheid gemaakt tussen een eenmalig voorkomende onvlakheid of een reeks onvlakheden. Om die reden worden zowel de ontwerpgrafieken die volgen uit een eenmalige onvlakheid als uit een reeks onvlakheden vergeleken met een hellingseis van 1:500.

In Figuur 6-10 zijn de ontwerpgrafieken samen met de hellingseis grafisch weergegeven. Hieruit blijkt gelijk de grote verschillen tussen de huidige eisen en de ontwerpgrafieken. De belangrijkste verschillen zijn:

- de nieuwe ontwerpgrafieken zijn afhankelijk van de snelheid,
- over de langere lengten zijn volgens de ontwerpgrafieken veel grotere zettingen toegestaan dan volgens de huidige eisen.



Figuur 6-10: Ontwerpgrafieken voor onvlakheden volgend uit de MTVV (I) en de $a_w(r)$

Er kan gesteld worden dat de eis van 0,05 meter over 25 meter een zeer conservatieve eis is. Aangezien er over een lengte van 25 meter uit alle ontwerpgrafieken grotere toegestane zettingsverschillen valt af te lezen. Het is van groter belang om eisen op te stellen over voor zettingsverschillen over kortere lengten.

Om concretere zettingseisen op te stellen die gebaseerd zijn op het comfort model, zijn er in Tabel 6-1 en Tabel 6-2 de maximale toegestane restzettingsverschillen weergegeven voor verschillende lengten en snelheden die volgen uit de ontwerpgrafieken.

Tabel 6-1: Maximaal toegestane restzettingsverschil bij het MTVV criteria van $0,8 \text{ m/s}^2$ voor een eenmalige onvlakheid

Snelheid	50 km/h	80 km/h	100km/h	120 km/h
Over een lengte van 25 meter	-	0,52 m	0,26 m	0,16 m
Over een lengte van 20 meter	0,96 m	0,26 m	0,15 m	0,10 m
Over een lengte van 15 meter	0,41 m	0,13 m	0,08 m	0,06 m
Over een lengte van 10 meter	0,14 m	0,05 m	0,03 m	0,03 m

Tabel 6-2: Maximaal toegestane restzettingsverschil bij het a_w criteria van $0,5 \text{ m/s}^2$ voor een reeks

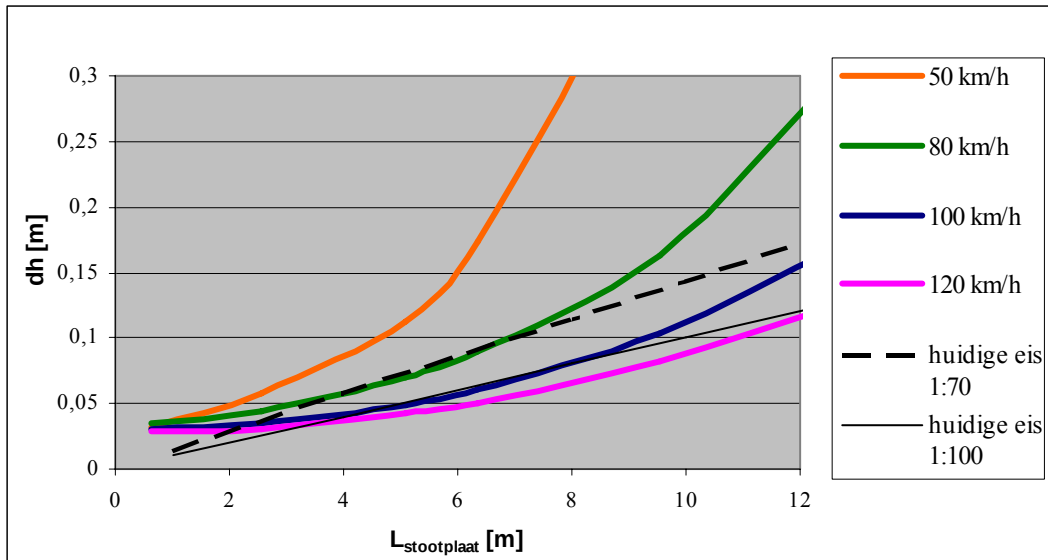
Snelheid	50 km/h	80 km/h	100km/h	120 km/h
Over een lengte van 25 meter	-	0,39 m	0,19 m	0,11 m
Over een lengte van 20 meter	0,94 m	0,19 m	0,10 m	0,06 m
Over een lengte van 15 meter	0,34 m	0,08 m	0,05 m	0,03 m
Over een lengte van 10 meter	0,10 m	0,03 m	0,02 m	0,02 m

Uit deze tabellen komt duidelijk naar voren dat het vooral van belang is de restzettingsverschillen over kortere lengten te controleren. Bij het ontwerp dient hier ook al rekening meegehouden te worden. Het volgende advies wordt dan ook gegeven:

- Als bij het ontwerp van wegen gegarandeerd dient te worden dat de weg gedurende de levensduur aan bepaalde comforteisen voldoet, dient meer onderzoek gedaan te worden op geotechnisch gebied zodat over de kortere lengten de verwachte restzettingsverschillen bepaald kunnen worden.

6.3 Helling stootplaat

In paragraaf 5.2 zijn ontwerpgrafieken bepaald ten behoeve van toegestane restzettingen rond kunstwerken. Hierbij is er gekeken naar wat de restzettingsverschillen bij een bepaalde stootplaat lengte mogen zijn. Tegenwoordig wordt er een eis voor de maximale helling van stootplaten gesteld, dit is voor autosnelwegen 1:100 en voor de overige wegen 1:70 [4]. Om deze eisen te vergelijken met de ontwerpgrafieken als bepaald uit het comfortmodel, zijn de verschillende eisen samen in één figuur geplot (Figuur 6-11).



Figuur 6-11: Toegestane restzettingsverschillen rond kunstwerken volgens uit het comfortmodel (bij MTVV eis van $0,8 \text{ m/s}^2$) en uit de huidige eisen.

Uit Figuur 6-11 blijkt dat het comfort niet alleen afhankelijk is van de helling maar ook van de lengte van de stootplaat en van de voertuigsnelheid. Het stellen van een snelheids onafhankelijke hellingseis is dus in principe onjuist.

Als de huidige eisen vergeleken worden met de ontwerpgrafieken valt het op dat de huidige eis van 1:70 het meest overeen komt met de ontwerpgrafiek horende bij een voertuigsnelheid van 80 km/h en de eis van 1:100 met een voertuigsnelheid van 100 km/h. Dit geldt tenminste voor stootplaatlengten zoals die in de praktijk meestal worden gebruikt (stootplaatlengten van +/- 3 tot 8 meter).

7 Foutenanalyse

Zoals al in het begin uitgelegd is, is het gehele onderzoek gebaseerd op de voertuiggegevens van een Peugeot 504. De reden hiervoor was dat er van dit voertuig de massa, veer en demper gegevens bekend waren en dat er experimenten mee waren uitgevoerd. Bij deze experimenten werd er onderzoek gedaan naar de versnellingen die een bestuurder ondervindt bij verschillende drempels. Uit deze experimenten volgden dat er bij de modernere voertuigen overeenkomstige resultaten qua ondervonden versnellingen gevonden werden. Om die reden is de Peugeot 504 als standaardvoertuig gebruikt.

Om te analyseren wat de invloed van een aanpassing van voertuiggegevens is, wordt er in paragraaf 7.1 gewerkt met andere invoergegevens van het voertuig en wordt gekeken wat daar de invloed van is op de ontwerpgrafieken.

Daarna wordt er in paragraaf 7.2 gekeken wat de invloed is van de dempingconstante als er onderscheid gemaakt wordt tussen een ingaande en een uitgaande beweging van de dempers.

7.1 Vergelijking van Peugeot 504 met een tweede voertuig

Voor het verkrijgen van de gegevens voor een tweede voertuig wordt er gebruik gemaakt van de voertuigparameters die volgden uit het artikel "Theoretical investigation of a linear planar model of a passenger car with seated people" [17]. In dit artikel is een voertuig gehanteerd waarvan het alleen niet helder is welk voertuig beschreven is. Het enige wat er van deze voertuigparameters bekend was, was dat het een middenklasse auto betrof.

De voertuiggegevens volgend uit het [17] zijn weergegeven in Tabel 7-1. Voor de gegevens van de stoel en de bestuurder worden dezelfde waarden gebruikt als weergegeven in Tabel 3-1. Als de twee voertuigen verder vergeleken worden valt op dat alle gegevens wel gewijzigd zijn maar nog steeds dezelfde orde van grootte hebben. Om nu te analyseren wat de invloed hiervan is op de ontwerpgrafieken worden de stappen van een eenmalige onvlakheid voor deze gegevens doorlopen.

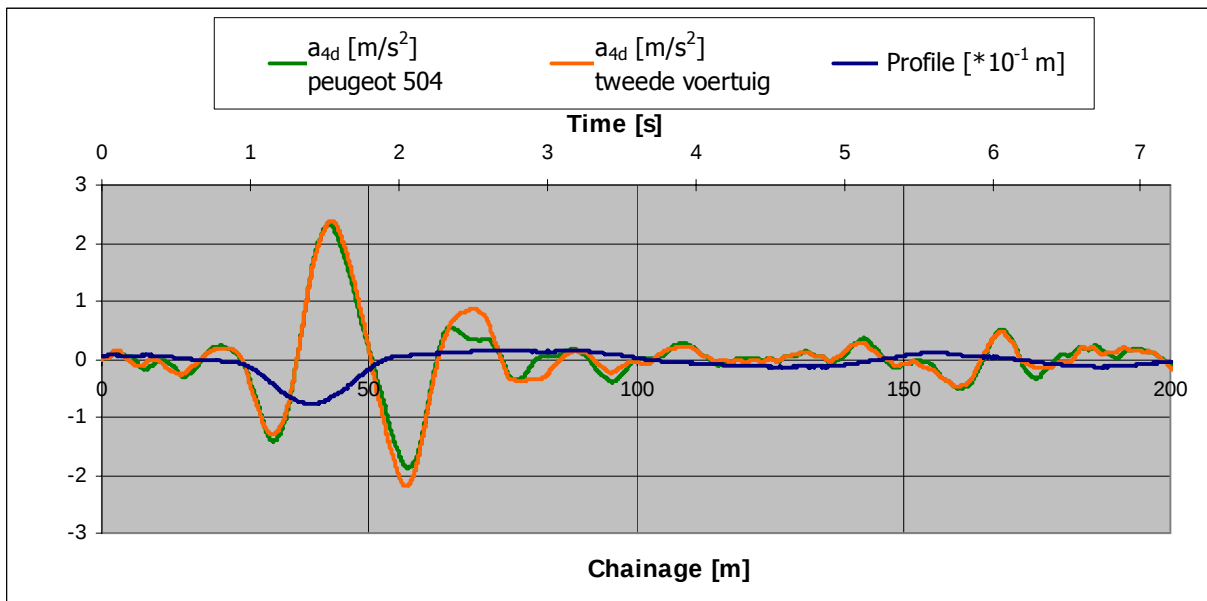
Tabel 7-1: Input parameters 2^{de} voertuig [17]

i^*	Massa (M_i) [kg]	Damping- constante (c_i) [N•s/m]	Stijfheid- constante (k_i) [N/m]	Traagheids- moment (I_i) [kg•m ²]
1f	70	0	300.000	-
1r	50	0	300.000	-
2f	-	2822	30.000	-
2r	-	2462	27.000	-
2	1.000	0	0	1.430

$d_f =$	1,1 m
$d_r =$	1,3 m
$d_d =$	0,42m

*: De indexen staan verder uitgelegd in paragraaf 3.1.1 en Figuur 3-1.

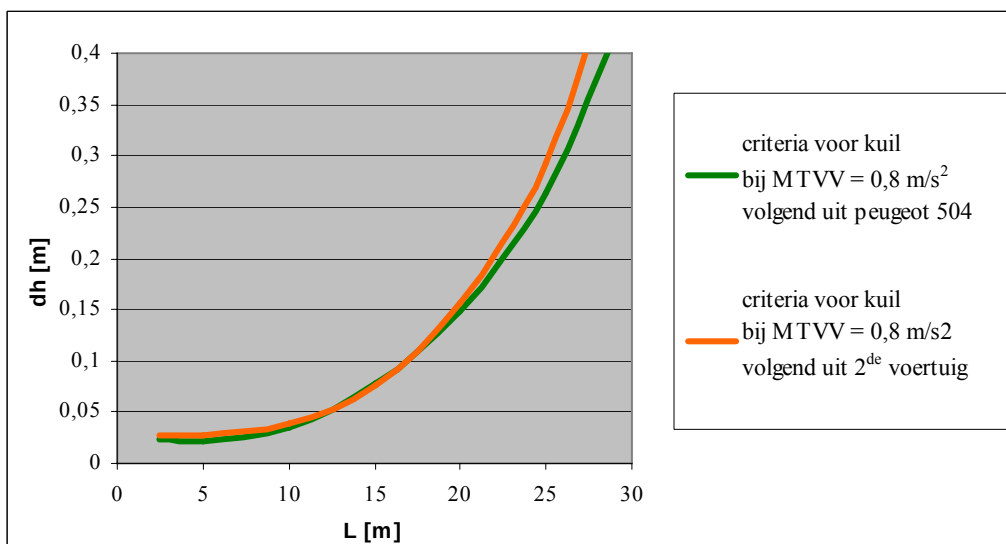
In Figuur 7-1 zijn de verticale versnellingen van de Peugeot 504 en het tweede voertuig samen weergegeven. Hieruit volgt dat de versnellingen veroorzaakt door de opgelegde onvlakheid voor beide voertuigen bijna gelijk zijn.



Figuur 7-1: Versnellingen bij een dh van 0,12 m over 15 meter bij een snelheid van 80 km/h

Daarna zijn voor het tweede voertuig ook de ontwerpgrafieken bepaald. Hiervan is in Figuur 7-2 de ontwerpgrafiek bij een snelheid van 100 km/h weergegeven dit samen met de ontwerpgrafiek gebaseerd op de Peugeot 504. De numerieke uitvoer van deze gegevens is bijgevoegd in bijlage X.1. Uit Figuur 7-2 valt af te leiden dat de ontwerpgrafiek volgend uit het tweede voertuig dezelfde vorm heeft. De toegestane zettingsverschillen volgend uit het tweede voertuig blijken iets groter te zijn, maar dit is wel minimaal.

De verwachting is dat dit resultaat ook geldt voor de andere snelheden maar dat is niet verder onderzocht.



Figuur 7-2: Invloed van voertuig parameters bij een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 100 km/h

7.2 Invloed van de dempingsconstante op de uitvoer

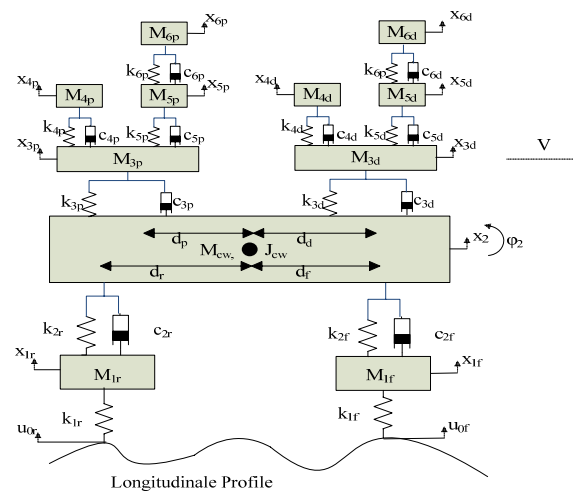
Zoals al gemeld in paragraaf 5.1 is in werkelijkheid de dempingkarakteristiek niet constant maar afhankelijk van de beweging van de demper. Over het algemeen geldt dat een de dempingswaarde van de ingaande beweging 30 tot 50% kleiner is dan de uitgaande beweging. Om de invloed hiervan te bepalen is het voertuigmodel zo aangepast dat het mogelijk is onderscheid te maken tussen de ingaande en uitgaande demperbeweging.

Bepaling ontwerpgrafieken bij een variërende dempingkarakteristiek

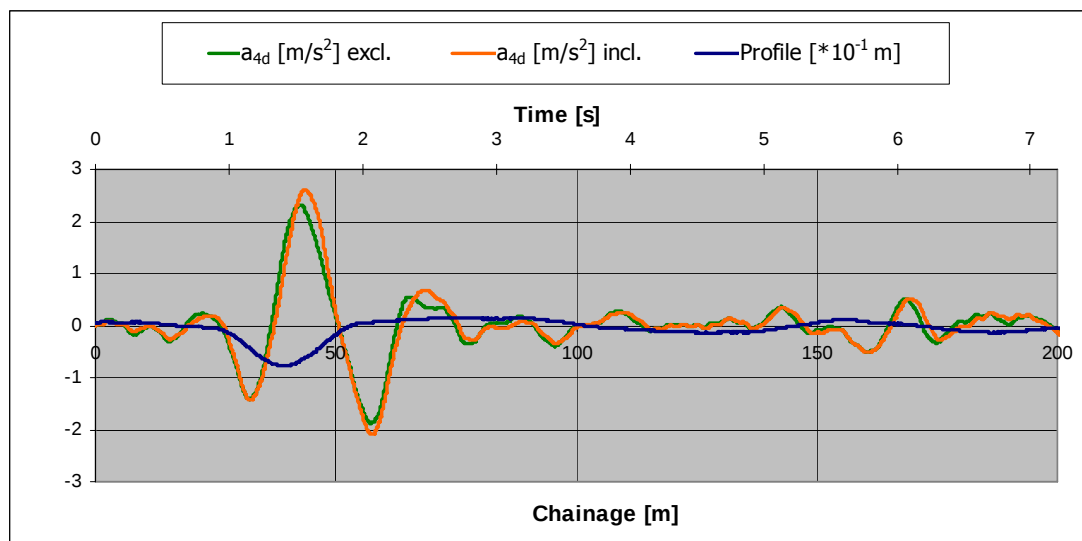
Als eerste wordt de situatie als uitgelegd in paragraaf 5.1 behandeld alleen is nu het model zo aangepast dat de dempingsconstante van de ingaande slag 50% is van de uitgaande. De numerieke waarden van de dempers zijn weergegeven in Tabel 7-2, de overige gegevens van het voertuig blijven hetzelfde als van de Peugeot 504 (Tabel 3-2).

Tabel 7-2 Gebruikte dempingkarakteristiek

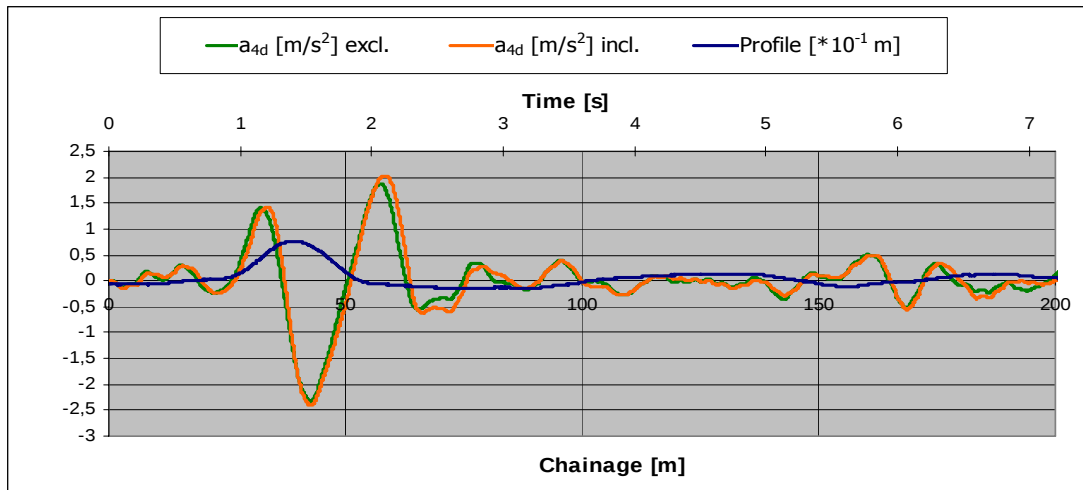
	Ingaande slag	Uitgaande slag
	$\frac{dx_{1i}}{dt} - \frac{dx_{2i}}{dt} > 0$	$\frac{dx_{1i}}{dt} - \frac{dx_{2i}}{dt} < 0$
C_{2f}	2250 Ns/m	4500 Ns/m
C_{2r}	2000 Ns/m	4000 Ns/m



Om een goede vergelijking te maken van de invloed van de variërende dempingkarakteristiek worden de verticale versnellingen van een bestuurder bij hetzelfde invoerprofiel als in paragraaf 5.1.1 bepaald. Dit profiel bestond uit een opgelegde onvlakheid van 0,07 meter over een lengte van 15 meter. De versnellingen worden daarna bepaald met behulp van het voertuigmodel bij een voertuigsnellheid van 100 km/h. De versnellingen van de originele invoer parameters (exclusief demper variatie) staan samen met de vernieuwde invoerparameters (inclusief demper variatie) weergegeven in Figuur 7-3. Hier is duidelijk zichtbaar dat de invloeden van de dempingsparameter klein is op de versnellingen van de bestuurder volgend uit de opgelegde onvlakheid.



Figuur 7-3: Versnelling van de bestuurder exclusief en inclusief een variërende dempingkarakteristiek bij een omlaag gerichte onvlakheid ($L=15\text{ m}$ $dh=0,07\text{ m}$)



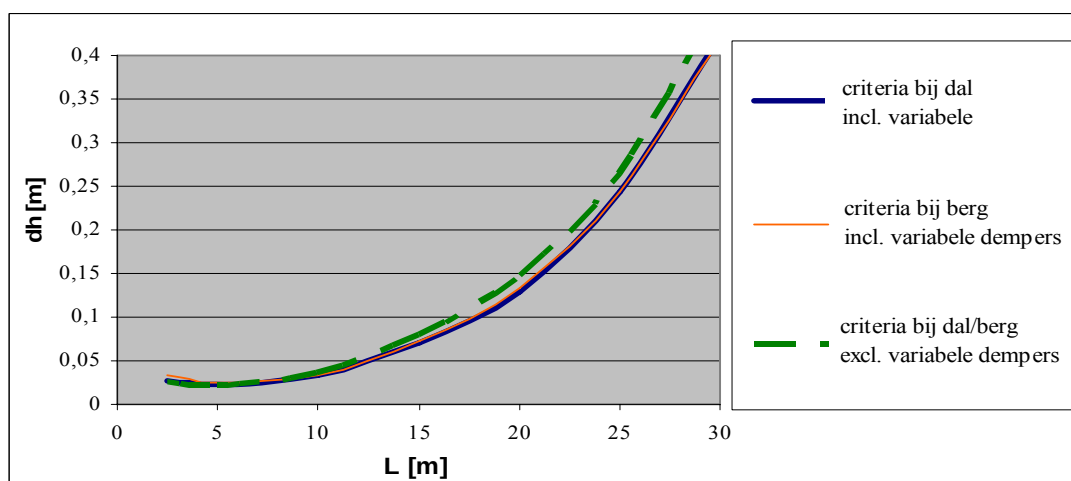
Figuur 7-4: Versnelling van de bestuurder exclusief en inclusief een variërende dempingkarakteristiek bij een omhoog gerichte onvlakheid ($L=15$ m $dh=0,07$ m)

Omdat in het model nu onderscheid gemaakt kan worden tussen het in- en uitveren van de dempers is het geen lineair model meer en bestaat er de mogelijkheid dat resultaten van een omhoog gerichte onvlakheid anders zijn dan een omlaag gerichte onvlakheid. Om die reden wordt er ook een simulatie van een omhoog gerichte onvlakheid gemaakt. Hiervan zijn de resultaten in Figuur 7-4 weergegeven. Uit deze resultaten blijkt weer dat de invloed van de dempingskarakteristieken op de versnellingen, die de bestuurder ondergaat, klein is.

Hierna zijn er voor de variërende dempingkarakteristieken ontwerpgrafieken bepaald voor een snelheid van 100 km/h en een MTVV grens van $0,8$ m/s². Voor de numerieke uitvoer ten behoeven van deze ontwerpgrafieken wordt verwezen naar bijlage X.2. De ontwerpgrafieken voor een omlaaggerichte (dal) en een omhooggerichte (berg) onvlakheid zijn weergegeven in Figuur 7-5. In deze figuur is ook de ontwerpgrafiek weergegeven die uit de standaard voertuigkarakteristieken (Peugeot 504) volgden, zoals in paragraaf 5.1.1 is bepaald.

Als deze ontwerpgrafieken vergeleken worden blijkt de invloed van de aangepaste dempingkarakteristiek minimaal te zijn voor deze situatie. Dit bij de aanname dat de dempingsconstante van de ingaande slag 50% is van de uitgaande. Deze aanname dient zeker nog wel verder onderzocht en gecontroleerd te worden of het correct is en of dit ook hetzelfde resultaat geeft bij andere snelheden en andere vormen van onvlakheden.

Voor dit voorbeeld kan er in ieder geval gesteld worden dat invloeden van de dempingskarakteristiek van minimale invloed zijn op de ontwerpgrafieken.



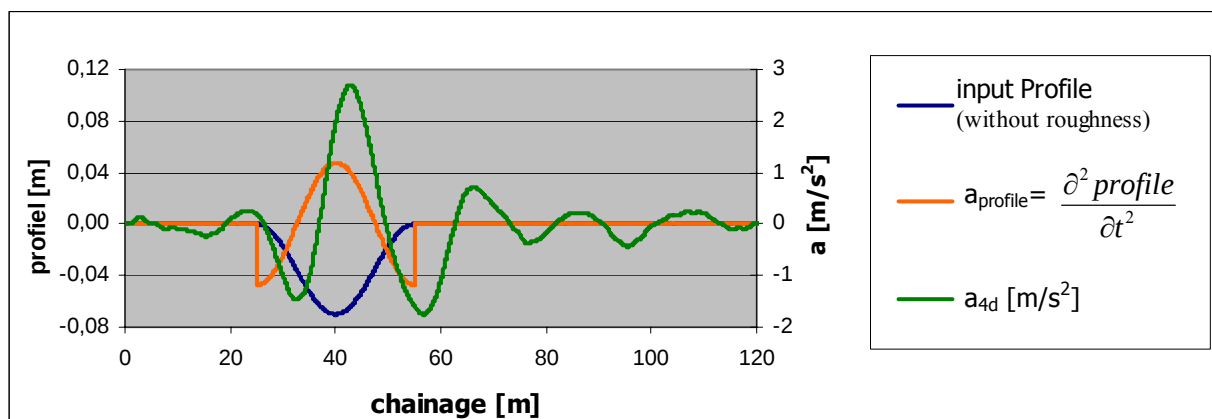
Figuur 7-5: Ontwerpgrafieken inclusief en exclusief de variërende dempingkarakteristiek, voor een snelheid van 100 km/h en een MTVV grens van $0,8$ m/s².

7.3 Gevoeligheidsanalyse

Naar aanleiding van de vergelijkingen zoals gemaakt in dit hoofdstuk valt er te concluderen dat de invloed van het wijzigen van de voertuigparameters op de ontwerpgrafieken klein is. Of dit veroorzaakt wordt doordat de voertuiggegevens niet van invloed zijn bij de opgelegde onvlakheden, of dat dit meer aan het voertuigmodel zelf ligt, dient verder onderzocht te worden. Hierbij kan een onderzoek als toegelicht in paragraaf 4.3 gebruikt worden.

Het is ook mogelijk om de gevoeligheid van ieder onderdeel van het voertuig te onderzoeken zodat het duidelijk wordt wat precies de invloed is van ieder onderdeel van het comfortmodel op de versnellingen. Dit is in bijlage XI verder uitgewerkt. De belangrijkste conclusies hieruit zijn de volgende.

- De invloed van de 2^{de} afgeleide naar tijd (versnellingen) van de opgelegde onvlakheid bij een weg komt terug in de versnellingen die de bestuurder ondergaat (zie Figuur 7-6). De 2^{de} afgeleide is hierbij wel afhankelijk van de voertuigsnellheid. Deze overeenkomst is waarschijnlijk ook de reden van de lineaire relatie tussen de comfortparameters en het zettingsverschillen (dh).
- De invloed van het voertuigmodel op de versnellingen is wel zichtbaar aangezien er een faseverschil zit tussen de 2^{de} afgeleide van het profiel en de versnellingen die de bestuurder ondergaat (a_{4d}). Ook de absolute waarde verschillen.
- Versnellingen met een hoge frequentie (ten gevolge van onvlakheden die over een korte lengte plaatsvinden) worden door de banden en assen voor een groot deel uitgefilterd.
- Versnellingen die de weggebruiker ondergaat (a_{4d}) worden vooral bepaald door de banden en de assen aangezien de versnellingen van het chassis (a_z) bijna gelijk zijn aan de versnellingen van de bestuurder.
- Er kan gesteld worden dat bij onvlakheden met een lage frequentie de comfortparameters gekoppeld zijn aan de 2^{de} afgeleide naar tijd van het profiel, bij een bepaalde voertuigsnellheid. Hierdoor is het mogelijk om vanuit een bepaald profiel, mits sinusvormig, direct de comfortparameters te bepalen. Deze relatie geldt wel alleen bij situaties waar een enkele sinus optreedt zoals steeds is gemodelleerd in hoofdstuk 5. Voor deze directe bepaling is een eerst aanzet gemaakt in bijlage XI.2.
- Met behulp van de directe bepaling van de comfortparameters is gekeken wat de invloed van wagenziekte is op de ontwerpgrafieken. Hieruit bleek dat voor onvlakheden over lengten groter dan 30 a 40 meter (voor een snelheid van 100 km/h) wagenziekte een rol gaat spelen. Daarom dient de invloed van de wegingsfunctie met betrekking tot wagenziekte verder onderzocht te worden.



Figuur 7-6: Invoerprofiel met een zettingsverschil (dh) over een lengte (L) van 15 meter, en het resultaat hiervan op de verticale versnellingen van de bestuurder (a_{4d}) bij een voertuigsnellheid van 100 km/h.

8 Conclusies en aanbevelingen

In dit laatste hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies betreffende het afstudeerwerk samengevat en aanbevelingen voor verder onderzoek gegeven. De conclusies zijn onder te verdelen in verschillende groepen. Als eerste worden hier de conclusies gegeven met betrekking tot het nieuwe comfortmodel wat samengesteld is gedurende het onderzoek. Daarna volgen conclusies betreffende de nieuw opgestelde eisen die volgden uit het nieuwe comfortmodel. Ook de overeenkomsten en verschillen met de huidige meetmethoden worden belicht. Uiteindelijk volgen er nog enkele aanbevelingen voor verder onderzoek.

8.1 Conclusies met betrekking tot het comfortmodel

- Met behulp van het comfortmodel is het mogelijk om twee comfortparameters te bepalen voor een wegvak. Deze parameters zijn gerelateerd aan de versnellingen die een weggebruiker ondergaat ze bestaan uit:
 - de gewogen effectieve waarde van de versnellingsuitvoer voor een geheel wegvak (a_w),
 - een waarde die aan voorkomende piekwaarden worden toegekend die volgen uit lokaal optredende onvlakheden (MTVV).
- Het gebruikte voertuigmodel, dat deel uitmaakte van het comfortmodel, is getoetst aan veldgegevens. Deze gegevens bestaan uit de versnellingen die een persoon ondergaat bij het passeren van verschillende drempels. Hieruit volgde een redelijk overeenstemmend beeld. Hierbij dient vermeld te worden dat het werkelijke langsprofiel niet ingemeten is geweest en dat er alleen de gemodelleerde afmetingen van de drempels bekend waren.
- De twee comfortparameters zijn gekalibreerd met behulp van een uitgewerkt meetrapport van de Rijksweg N11 tussen Alphen aan den Rijn en Bodegraven. Hieruit volgden een aanname van $0,5 \text{ m/s}^2$ voor de a_w en $0,8 \text{ m/s}^2$ voor de MTVV als grens voor wat nog net als comfortabel beschouwd kan worden.

8.2 Conclusies met betrekking tot het opstellen van nieuwe zettingseisen

Naar aanleiding van het onderzoek valt er te concluderen dat het mogelijk is om een relatie op te stellen tussen comfort- en zettingseisen. Voor verschillende standaardsituaties bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameter en het zettingsverschil over een bepaalde lengte. Hierdoor is het mogelijk om vanuit een bepaald comfort parameter het toegestane zettingsverschil te bepalen voor de verschillende lengten waarover de onvlakheid optreedt. Met behulp van deze gegevens zijn dan ontwerpgrafieken samen te stellen voor bepaalde standaardsituaties die afhankelijk zijn van de voertuigsnelheid.

Uit de ontwerpgrafieken zijn de volgende conclusies af te leiden.

- De ontwerpgrafieken hebben een exponentiële vorm die voor kortere lengte naar een lage constante waarde gaat en voor grotere lengten exponentieel toeneemt.
- De MTVV grens wordt als maatgevend beschouwd voor een lokaal op tredende onvlakheid en de a_w grens wordt als maatgevend beschouwd bij een geheel wegvak (lengte van 212 meter).
- Bij de ontwerpgrafieken voor het toegestane zettingsverschil over een stootplaat geldt verder dat de helling van de stootplaat geen maatgevende parameter is voor comfort, maar dat ook de lengte van de stootplaat in de beschouwing moet worden betrokken.
- Als de lengte van de kunstwerken klein is dient dit meegenomen te worden bij het bepalen van ontwerpgrafieken voor het toegestane zettingsverschil over stootplaten.

Als de ontwerpgrafieken vergeleken worden met de huidige eisen volgen er de volgende conclusies.

- De IRI methode heeft veel overeenkomsten met het nieuwe comfortmodel, maar:
 - de geldende IRI 100 eis van 3,5 m/km wordt veel eerder bereikt werd dan de grenswaarde van 0,5 m/s² voor de a_w ,
 - het comfortmodel is gevoeliger voor de voertuigsnelheid dan de IRI.
- Het is mogelijk om vanuit de comforteisen zettingseisen op te stellen. Het is echter van belang het maximale restzettingsverschil afhankelijk te maken van de snelheid. Zo valt er bij 100 km/h te stellen dat er een restzettingsverschil is toegestaan van 0,05 meter over 15 meter, en bij 80 km/h is er over deze lengte een restzettingsverschil toegestaan van 0,08 meter.
- Als de ontwerpgrafiek betreffende het zettingsverschil bij stootplaten vergeleken wordt met de huidige eisen van 1:100 en 1:70, dan valt te concluderen dat het een overeenstemmend beeld geeft bij respectievelijk 100 en 80 km/h voor stootplaatlengte van 3 tot 10 meter. Voor de kortere en langere lengten is een grotere zetting toegestaan.
- De invloed van de voertuigparameters op de ontwerpgrafieken volgend uit het comfortmodel is maar gering.

8.3 Aanbevelingen

- Voordat het comfort model daadwerkelijk toegepast kan worden dient het model eerst verder getoetst en gekalibreerd te worden.
- Het verdient de aanbeveling om een experiment uit te voeren waarbij van te voren van een bepaald wegvak (met bepaalde aangelegde onvlakheden) het langsprofiel ingemeten wordt. Daarna worden bij verschillende snelheden de verticale versnellingen van de bestuurder bepaald, en geeft de bestuurder aan wat zijn beleving is van het wegvak.
Bij dit onderzoek zullen gelijktijdig de verschillen van de huidige en nieuwe eisen meegenomen kunnen worden zodat bekeken kan worden welke het meest realistische beeld geven.
- Onderzoek of dezelfde grenswaarde voor de comfortparameters toegepast kunnen worden bij verschillende snelheden.
- Aanbevolen wordt om het comfortmodel verder te toetsen op de invloed van snelheid op het comfort. Dit kan gedaan worden met behulp van een experiment zoals uitgelegd in paragraaf 4.3. Uit dit experiment kan blijken welke methode een realistisch beeld geeft, het nieuwe comfortmodel of de IRI.
- Als bij het ontwerp van wegen gegarandeerd dient te worden dat deze gedurende de levensduur aan bepaalde comforteisen voldoet, dan dient meer onderzoek gedaan te worden zodat ook over de kortere lengten de verwachte restzettingsverschillen bepaald kunnen worden.
- Onderzoek wat de invloed is als er gewerkt wordt met een niet sinusvormige onvlakheid. Dit geldt specifiek voor het modelleren van een stootplaat aangezien de aansluiting tussen de stootplaat en het kunstwerk niet sinusvormig hoeft te zijn.
- Onderzoek wat de invloed van een zettingsverschil over grote lengte is op wagenziekte.
- Bepaal wat de invloed van de verschillende onvlakheden is bij vrachtwagens. Hierbij kan er onderscheidt gemaakt worden tussen:
 - het comfort van de bestuurder,
 - de versnellingen/verplaatsingen van de lading.

Literatuur

1. Burden, R.L., en Douglas Faires, J., Numerical Analysis. Seventh Edition, Pacific Grove, 2001
2. Standaard RAW bepalingen 2005, CROW, Ede, 2005.
3. CROW-publicatie 147. Wegbeheer, Ede, 2001.
4. CROW-publicatie 204. Betrouwbaarheid van zettingsprognoses, Ede, 2004.
5. Huurman, M., Permanent deformation in concrete block pavement. PHD thesis, Delft University of Technology, Delft, 1997.
6. ISO: International Organization for Standardization, ISO2631-1 Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part1: General requirements, Genève, 1997.
7. ISO: International Organization for Standardization, ISO5982 Mechanical vibration and shock - range of idealized values to characterize seated- body biodynamic response under vertical vibration. second edition, Genève, 2001.
8. KOAC-NPC, Appendix VIA vlakheidsmeting met de viagraaf, Apeldoorn, juli 2004.
9. KOAC-NPC, Appendix ROL vlakheidsmeting met de rolrei, Apeldoorn, oktober 2005.
10. KOAC-NPC, Appendix ARAN-metingen, Geïntegreerde wegdekmetingen met de ARAN, Apeldoorn, juli 2004.
11. Metrikine, A.V., Dynamics of slender structures and an introduction to continuüm mechanics. Module, Dynamics of mechanical Systems and Slender Structures. CT4145. Delft University of Technology, Delft.
12. Molenaar, A.A.A., en Houben, L.J.M, College dictaat CT3041 Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen. Deel C: Constructief ontwerp van wegen, Delft, September 2005.
13. Sayers, M.W., Gillespie, T.D., en Paterson, W.D.O., Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements, World Bank technical paper number 46, Washington, 1986.
14. Sayers, M.W., Gillespie, T.D., en Queiroz, C., The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and Calibration Standard for Measurements. World Bank technical paper number 45, Washington, 1986.
15. Sayers, M.W., en Karamihas, S.M., The little book of profiling, Basic information about measuring and interpreting road profiles, September 1998.
16. Schultz, D.G., en Melsea, J.I., State functions and linear control systems. McgGraw-Hill Book Co, NewYork, 1967.
17. Stein, G.J., en Múčka, P., Theoretical investigation of linear planar model of a passenger car with seated people. Institute of Materials and Machine Mechanics. Slovak Academy of Sciences. Bratislava. Slovak Republic, Bratislava, 2003.
18. Voortgezette modelvorming van de auto in verband met het verkeersdrempelonderzoek; Vakgroep Voertuigtechniek TH Delft. Rapport 0156, Delft, 1980.
19. Westera, G.E., Technisch Rapport Verkeersdrempels. CROW project 2431/2288, 2002.
20. Wit, L.B. de, ARAN metingen 09-11-05 Alphen Bodegraven, Delft, juli 2006.

Symbolenlijst

$a_{i,max}$:	De amplitude van de versnelling bij de i^{de} frequentie	[m/s ²]
a_{ii} :	Verticale versnelling van massa i	[m/s ²]
$a_w(t)$:	De gewogen verticale versnelling als functie van tijd	[m/s ²];
$a_w(t_0)$:	Lopend gemiddelde van de effectieve waarde over een integratie tijd van 1 seconde	[m/s ²];
$a_{w,i,max}$:	De amplitude van de gewogen versnelling bij de i^{de} frequentie	[m/s ²]
a_w :	De effectieve waarde van de gewogen versnellingsuitvoer voor een bepaald wegvak	[m/s ²];
c_{2f} :	Dampingconstante van de vooras	[Ns/m]
c_{2r} :	Dampingconstante van de achteras	[Ns/m]
c_{4i} to c_{6i} :	Dampingconstanten voor een zittend persoon	[Ns/m]
d_d :	Afstand van de bestuurder tot het zwaartepunt van het voertuig	[m]
d_f :	Afstand van de vooras tot het zwaartepunt van het voertuig	[m]
d_h :	Een optredend restzettingsverschil over een bepaalde lengte L	[m]
d_p :	Afstand van de passagier tot het zwaartepunt van het voertuig	[m]
d_r :	Afstand van de achteras tot het zwaartepunt van het voertuig	[m]
IRI 100:	International Roughness Index over wegvak met een lengte van 100 meter	[m/km]
IRI 20:	International Roughness Index over wegvak met een lengte van 20 meter	[m/km]
J_{cw} :	Traagheidsmoment van het voertuig	[kg m ²]
k_{1f} :	Stijfheid van het voorwiel	[N/m]
k_{1r} :	Stijfheid van het achterwiel	[N/m]
k_{2f} :	Stijfheid van de vooras	[N/m]
k_{2r} :	Stijfheid van de achteras	[N/m]
k_{4i} to k_{6i} :	Stijfheidconstanten voor een zittend persoon	[N/m]
L :	Lengte waarover een bepaald restzettingsverschil optreedt ($=1/2*\lambda$)	[m]
L_{kw} :	Lengte van een kunstwerk	
$L_{stootplaat}$:	Lengte van een stootplaat	[m]
M_{1f} :	Massa van de vooras inclusief de banden	[kg]
M_{1r} :	Massa van de achteras inclusief de banden	[kg]
M_2 :	Massa van het totale voertuig	[kg]
M_{3d} :	Massa van de bestuurdersstoel	[kg]
M_{3p} :	Massa van de passagiersstoel	[kg]
M_{4d} :	Massa van het zittend gedeelte van de bestuurder	[kg]
M_{4p} :	Massa van het zittend gedeelte van de passagier	[kg]
M_{6d} :	Massa van het hoofd van de bestuurder	[kg]
M_{6p} :	Massa van het hoofd van de passagier	[kg]
M_{cw} :	Massa van het voertuig	[kg]
MTVV:	The Maximum Transient Vibration Value. Maximum van $\{a_w(t_0)\}$	[m/s ²]
u_{0f} :	Onvlakheid van het langsprofiel ten plaatsen van het voorwiel als functie van tijd	[m]
u_{0r} :	Onvlakheid van het langsprofiel ten plaatsen van het achterwiel als functie van tijd	[m]
v :	Voertuigsnelheid	[m/s]
v_{ii} :	Verticale verplaatsingssnelheid van massa i	[m]
W_i :	de wegingsfactor voor de i^{de} frequentie	[-]
x_{2d} :	Verticale verplaatsing van het voertuig ten plaatse van de bestuurder	[m]
x_{2f} :	Verticale verplaatsing van het voertuig ten plaatse van de vooras	[m]
x_{2p} :	Verticale verplaatsing van het voertuig ten plaatse van de passagiers stoel	[m]
x_{2r} :	Verticale verplaatsing van het voertuig ten plaatse van de achteras	[m]
x_{ii} :	Verticale verplaatsing van massa i	[m]
φ_2 :	Hoekverdraaiing van het chassis van het voertuig	[rad]

Bijlage

Inhoud Bijlagen

I	Evenwichtsvergelijkingen betreffende het voertuigmodel [17]	B-1
II	Vergelijkingen tbv het opstellen van matrix A and B	B-3
III	Power Spectral Density	B-5
IV	Fast Fourier Transformation	B-7
IV.1	Werking van de FFT	B-7
IV.2	Werking van de FFT in Excel	B-8
IV.3	Tapering functie	B-11
V	Het comfortmodel	B-13
V.1	Invoer van de voertuiggegevens	B-13
V.2	Invoer van wegprofiel	B-14
V.3	Berekening	B-16
V.4	FFT	B-17
V.5	Inverse FFT	B-19
VI	Uitwerking meetresultaten N11	B-21
VII	Uitwerkingen algemeen zettingsprofiel	B-27
VII.1	Inleiding	B-27
VII.2	Uitvoer eenmalige onvlakheid	B-28
VII.2.1	Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 50 km/h	B-28
VII.2.2	Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 80 km/h	B-30
VII.2.3	Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 100 km/h	B-32
VII.2.4	Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 120 km/h	B-34
VII.3	Uitvoer reeks onvlakheden	B-36
VII.3.1	Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 50 km/h	B-36
VII.3.2	Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 80 km/h	B-38
VII.3.3	Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 100 km/h	B-40
VII.3.4	Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 120 km/h	B-42
VIII	Uitwerkingen van kunstwerk onderzoek	B-45
VIII.1	Modellering van een zettingsvrije constructie	B-45
VIII.2	Een enkele stootplaat	B-46
VIII.2.1	Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 50 km/h	B-46
VIII.2.2	Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 80 km/h	B-48
VIII.2.3	Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 100 km/h	B-50
VIII.2.4	Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 120 km/h	B-52
VIII.3	Lengte van het kunstwerk	B-54
VIII.3.1	Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 3 meter	B-54
VIII.3.2	Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 6 meter	B-56
VIII.3.3	Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 10 meter	B-58
VIII.3.4	Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 20 meter	B-60
VIII.3.5	Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 40 meter	B-62
IX	Uitwerkingen IRI	B-65
IX.1	Bepaling IRI	B-65
IX.2	Uitvoer IRI bij eenmalige onvlakheid	B-68
IX.2.1	Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 80 km/h	B-68
IX.2.2	Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 100 km/h	B-70
IX.3	Uitvoer IRI bij reeks onvlakheden	B-72
IX.3.1	Resultaten van reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 80 km/h	B-72
IX.3.2	Resultaten van reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 100 km/h	B-74
X	Uitwerking tbv foutenanalyse	B-77
X.1	Uitvoer 2 ^{de} voertuig bij eenmalige onvlakheid	B-77
X.2	Variërende dempingkarakteristiek	B-79
X.2.1	Aanpassing aan het model	B-79
X.2.2	Resultaten van eenmalige omlaag gerichte onvlakheid	B-80
X.2.3	Resultaten van eenmalige omhoog gerichte onvlakheid	B-82
XI	Gevoeligheidsanalyse	B-85
XI.1	Wat doet het voertuigmodel	B-85
XI.2	Bepaling comfortparameters op directe wijze	B-88

I Evenwichtsvergelijkingen betreffende het voertuigmodel [17]

$$1) \quad \ddot{x}_{1f} = \frac{k_{1f}}{m_{1f}}(u_{0f} - x_{1f}) - \frac{k_{2f}}{m_{1f}}(x_{1f} - x_{2f}) - \frac{c_{2f}}{m_{1f}}(\dot{x}_{1f} - \dot{x}_{2f})$$

$$2) \quad \ddot{x}_{1r} = \frac{k_{1r}}{m_{1r}}(u_{0r} - x_{1r}) - \frac{k_{2r}}{m_{1r}}(x_{1r} - x_{2r}) - \frac{c_{2r}}{m_{1r}}(\dot{x}_{1r} - \dot{x}_{2r})$$

$$3) \quad \ddot{x}_2 = \frac{k_{2f}}{m_2}(x_{1f} - x_{2f}) + \frac{c_{2f}}{m_2}(\dot{x}_{1f} - \dot{x}_{2f}) + \frac{k_{2r}}{m_2}(x_{1r} - x_{2r}) + \frac{c_{2r}}{m_2}(\dot{x}_{1r} - \dot{x}_{2r}) - \frac{k_{3d}}{m_2}(x_{2d} - x_{3d}) - \frac{c_{3d}}{m_2}(\dot{x}_{2d} - \dot{x}_{3d}) - \frac{k_{3p}}{m_2}(x_{2p} - x_{3p}) - \frac{c_{3p}}{m_2}(\dot{x}_{2p} - \dot{x}_{3p})$$

$$4) \quad \ddot{\varphi}_2 = \frac{k_{2f} * d_f}{I_2}(x_{1f} - x_{2f}) + \frac{c_{2f} * d_f}{I_2}(\dot{x}_{1f} - \dot{x}_{2f}) - \frac{k_{2r} * d_r}{I_2}(x_{1r} - x_{2r}) - \frac{c_{2r} * d_r}{I_2}(\dot{x}_{1r} - \dot{x}_{2r}) \\ - \frac{k_{3d} * d_d}{I_2}(x_{2d} - x_{3d}) - \frac{c_{3d} * d_d}{I_2}(\dot{x}_{2d} - \dot{x}_{3d}) + \frac{k_{3p} * d_p}{I_2}(x_{2p} - x_{3p}) + \frac{c_{3p} * d_p}{I_2}(\dot{x}_{2p} - \dot{x}_{3p})$$

$$5) \quad \ddot{x}_{3d} = \frac{k_{3d}}{m_{3d}}(x_{2d} - x_{3d}) + \frac{c_{3d}}{m_{3d}}(\dot{x}_{2d} - \dot{x}_{3d}) - \frac{k_{4d}}{m_{3d}}(x_{3d} - x_{4d}) - \frac{c_{4d}}{m_{3d}}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_{4d}) - \frac{k_{5d}}{m_{3d}}(x_{3d} - x_{5d}) - \frac{c_{5d}}{m_{3d}}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_{5d})$$

$$6) \quad \ddot{x}_{3p} = \frac{k_{3p}}{m_{3p}}(x_{2p} - x_{3p}) + \frac{c_{3p}}{m_{3p}}(\dot{x}_{2p} - \dot{x}_{3p}) - \frac{k_{4p}}{m_{3p}}(x_{3p} - x_{4p}) - \frac{c_{4p}}{m_{3p}}(\dot{x}_{3p} - \dot{x}_{4p}) - \frac{k_{5p}}{m_{3p}}(x_{3p} - x_{5p}) - \frac{c_{5p}}{m_{3p}}(\dot{x}_{3p} - \dot{x}_{5p})$$

$$7) \quad \ddot{x}_{4d} = \frac{k_{4d}}{m_{4d}}(x_{3d} - x_{4d}) + \frac{c_{4d}}{m_{4d}}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_{4d})$$

$$8) \quad \ddot{x}_{4p} = \frac{k_{4p}}{m_{4p}}(x_{3p} - x_{4p}) + \frac{c_{4p}}{m_{4p}}(\dot{x}_{3p} - \dot{x}_{4p})$$

$$9) \quad \ddot{x}_{5d} = \frac{k_{5d}}{m_{5d}}(x_{3d} - x_{5d}) + \frac{c_{5d}}{m_{5d}}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_{5d}) - \frac{k_{6d}}{m_{5d}}(x_{5d} - x_{6d}) - \frac{c_{6d}}{m_{5d}}(\dot{x}_{5d} - \dot{x}_{6d})$$

$$10) \quad \ddot{x}_{5p} = \frac{k_{5p}}{m_{5p}}(x_{3p} - x_{5p}) + \frac{c_{5p}}{m_{5p}}(\dot{x}_{3p} - \dot{x}_{5p}) - \frac{k_{6p}}{m_{5p}}(x_{5p} - x_{6p}) - \frac{c_{6p}}{m_{5p}}(\dot{x}_{5p} - \dot{x}_{6p})$$

$$11) \quad \ddot{x}_{6d} = \frac{k_{6d}}{m_{6d}}(x_{5d} - x_{6d}) + \frac{c_{6d}}{m_{6d}}(\dot{x}_{5d} - \dot{x}_{6d})$$

$$12) \quad \ddot{x}_{6p} = \frac{k_{6p}}{m_{6p}}(x_{5p} - x_{6p}) + \frac{c_{6p}}{m_{6p}}(\dot{x}_{5p} - \dot{x}_{6p})$$

II Vergelijkingen tbv het opstellen van matrix A and B

$$\begin{aligned}
 1) \quad \ddot{x}_{1f} &= \left(-\frac{k_{1f} + k_{2f}}{m_{1f}} \right) * x_{1f} + \left(-\frac{c_{2f}}{m_{1f}} \right) * \dot{x}_{1f} + \left(\frac{k_{2f}}{m_{1f}} \right) * x_2 + \left(\frac{c_{2f}}{m_{1f}} \right) * \dot{x}_2 + \left(d_f * \frac{k_{2f}}{m_{1f}} \right) * \varphi_2 + \left(d_f * \frac{c_{2f}}{m_{1f}} \right) * \dot{\varphi}_2 + \left(\frac{k_{1f}}{m_{1f}} \right) * u_{0f} \\
 2) \quad \ddot{x}_{1r} &= \left(-\frac{k_{1r} + k_{2r}}{m_{1r}} \right) * x_{1r} + \left(-\frac{c_{2r}}{m_{1r}} \right) * \dot{x}_{1r} + \left(\frac{k_{2r}}{m_{1r}} \right) * x_2 + \left(\frac{c_{2r}}{m_{1r}} \right) * \dot{x}_2 + \left(-d_r * \frac{k_{2r}}{m_{1r}} \right) * \varphi_2 + \left(-d_r * \frac{c_{2r}}{m_{1r}} \right) * \dot{\varphi}_2 + \left(\frac{k_{1r}}{m_{1r}} \right) * u_{0r} \\
 3) \quad \ddot{x}_2 &= \left(\frac{k_{2f}}{m_2} \right) * x_{1f} + \left(\frac{c_{2f}}{m_2} \right) * \dot{x}_{1f} + \left(\frac{k_{2r}}{m_2} \right) * x_{1r} + \left(\frac{c_{2r}}{m_2} \right) * \dot{x}_{1r} + \left(-\frac{k_{2f} + k_{2r} + k_{3d} + k_{3p}}{m_2} \right) * x_2 + \left(-\frac{c_{2f} + c_{2r} + c_{3d} + c_{3p}}{m_2} \right) * \dot{x}_2 + \\
 &\quad \left(\frac{-d_f * k_{2f} + d_r * k_{2r} - d_d * k_{3d} + d_p * k_{3p}}{m_2} \right) * \varphi_2 + \left(\frac{-d_f * c_{2f} + d_r * c_{2r} - d_d * c_{3d} + d_p * c_{3p}}{m_2} \right) * \dot{\varphi}_2 + \left(\frac{k_{3d}}{m_2} \right) * x_{3d} + \left(\frac{c_{3d}}{m_2} \right) * \dot{x}_{3d} + \left(\frac{k_{3p}}{m_2} \right) * x_{3p} + \left(\frac{c_{3p}}{m_2} \right) * \dot{x}_{3p} \\
 &\quad \ddot{\varphi}_2 = \left(\frac{k_{2f} * d_f}{I_2} \right) * x_{1f} + \left(\frac{c_{2f} * d_f}{I_2} \right) * \dot{x}_{1f} + \left(-\frac{k_{2r} * d_r}{I_2} \right) * x_{1r} + \left(-\frac{c_{2r} * d_r}{I_2} \right) * \dot{x}_{1r} + \left(-\frac{k_{2f} * d_f}{I_2} \right) * x_2 + \left(-\frac{k_{2f} * d_f^2}{I_2} \right) * \varphi_2 \\
 4) \quad &\quad + \left(-\frac{c_{2f} * d_f}{I_2} \right) * \dot{x}_2 + \left(-\frac{c_{2f} * d_f^2}{I_2} \right) * \dot{\varphi}_2 + \left(\frac{k_{2r} * d_r}{I_2} \right) * x_2 + \left(-\frac{k_{2r} * d_r^2}{I_2} \right) * \varphi_2 + \left(\frac{c_{2r} * d_r}{I_2} \right) * \dot{x}_2 + \left(-\frac{c_{2r} * d_r^2}{I_2} \right) * \dot{\varphi}_2 \\
 &\quad + \left(-\frac{k_{3d} * d_d}{I_2} \right) * x_2 + \left(-\frac{k_{3d} * d_d^2}{I_2} \right) * \varphi_2 + \left(-\frac{c_{3d} * d_d}{I_2} \right) * (\dot{x}_2 + \left(-\frac{c_{3d} * d_d^2}{I_2} \right) * \dot{\varphi}_2) + \left(\frac{k_{3p} * d_p}{I_2} \right) * x_2 + \left(-\frac{k_{3p} * d_p^2}{I_2} \right) * \varphi_2 \\
 5) \quad \ddot{x}_{3d} &= \left(\frac{k_{3d}}{m_{3d}} \right) * x_2 + \left(\frac{c_{3d}}{m_{3d}} \right) * \dot{x}_2 + \left(d_d * \frac{k_{3d}}{m_{3d}} \right) * \varphi_2 + \left(d_d * \frac{c_{3d}}{m_{3d}} \right) * \dot{\varphi}_2 + \left(-\frac{k_{3d} + k_{4d} + k_{5d}}{m_{3d}} \right) * x_{3d} + \left(-\frac{c_{3d} + c_{4d} + c_{5d}}{m_{3d}} \right) * \dot{x}_{3d} \\
 &\quad + \left(\frac{k_{4d}}{m_{3d}} \right) * x_{4d} + \left(\frac{c_{4d}}{m_{3d}} \right) * \dot{x}_{4d} + \left(\frac{k_{5d}}{m_{3d}} \right) * x_{5d} + \left(\frac{c_{5d}}{m_{3d}} \right) * \dot{x}_{5d}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
6) \quad \ddot{x}_{3p} = & \left(\frac{k_{3p}}{m_{3p}} \right) * x_2 + \left(\frac{c_{3p}}{m_{3p}} \right) * \dot{x}_2 + \left(-d_p * \frac{k_{3p}}{m_{3p}} \right) * \varphi_2 + \left(-d_p * \frac{c_{3p}}{m_{3p}} \right) * \dot{\varphi}_2 + \left(-\frac{k_{3p} + k_{4p} + k_{5p}}{m_{3p}} \right) * x_{3p} + \left(-\frac{c_{3p} + c_{4p} + c_{5p}}{m_{3p}} \right) * \dot{x}_{3p} \\
& + \left(\frac{k_{4p}}{m_{3p}} \right) * x_{4p} + \left(\frac{c_{4p}}{m_{3p}} \right) * \dot{x}_{4p} + \left(\frac{k_{5p}}{m_{3p}} \right) * x_{5p} + \left(\frac{c_{5p}}{m_{3p}} \right) * \dot{x}_{5p}
\end{aligned}$$

$$7) \quad \ddot{x}_{4d} = \left(\frac{k_{4d}}{m_{4d}} \right) * x_{3d} + \left(\frac{c_{4d}}{m_{4d}} \right) * \dot{x}_{3d} + \left(-\frac{k_{4d}}{m_{4d}} \right) * x_{4d} + \left(-\frac{c_{4d}}{m_{4d}} \right) * \dot{x}_{4d}$$

$$8) \quad \ddot{x}_{4p} = \left(\frac{k_{4p}}{m_{4p}} \right) * x_{3p} + \left(\frac{c_{4p}}{m_{4p}} \right) * \dot{x}_{3p} + \left(-\frac{k_{4p}}{m_{4p}} \right) * x_{4p} + \left(-\frac{c_{4p}}{m_{4p}} \right) * \dot{x}_{4p}$$

$$9) \quad \ddot{x}_{5d} = \left(\frac{k_{5d}}{m_{5d}} \right) * x_{3d} + \left(\frac{c_{5d}}{m_{5d}} \right) * \dot{x}_{3d} + \left(-\frac{k_{5d} + k_{6d}}{m_{5d}} \right) * x_{5d} + \left(-\frac{c_{5d} + c_{6d}}{m_{5d}} \right) * \dot{x}_{5d} + \left(\frac{k_{6d}}{m_{5d}} \right) * x_{6d} + \left(\frac{c_{6d}}{m_{5d}} \right) * \dot{x}_{6d}$$

$$10) \quad \ddot{x}_{5p} = \left(\frac{k_{5p}}{m_{5p}} \right) * x_{3p} + \left(\frac{c_{5p}}{m_{5p}} \right) * \dot{x}_{3p} + \left(-\frac{k_{5p} + k_{6p}}{m_{5p}} \right) * x_{5p} + \left(-\frac{c_{5p} + c_{6p}}{m_{5p}} \right) * \dot{x}_{5p} + \left(\frac{k_{6p}}{m_{5p}} \right) * x_{6p} + \left(\frac{c_{6p}}{m_{5p}} \right) * \dot{x}_{6p}$$

$$11) \quad \ddot{x}_{6d} = \left(\frac{k_{6d}}{m_{6d}} \right) * x_{5d} + \left(\frac{c_{6d}}{m_{6d}} \right) * \dot{x}_{5d} + \left(-\frac{k_{6d}}{m_{6d}} \right) * x_{6d} + \left(-\frac{c_{6d}}{m_{6d}} \right) * \dot{x}_{6d}$$

$$12) \quad \ddot{x}_{6p} = \left(\frac{k_{6p}}{m_{6p}} \right) * x_{5p} + \left(\frac{c_{6p}}{m_{6p}} \right) * \dot{x}_{5p} + \left(-\frac{k_{6p}}{m_{6p}} \right) * x_{6p} + \left(-\frac{c_{6p}}{m_{6p}} \right) * \dot{x}_{6p}$$

III Power Spectral Density

De onvlakheid van een weg kan beschreven worden als een reeks van sinusoides, waarover een Fourier Analyses toegepast kan worden. Het belangrijkste wat volgt uit deze analyse is dat ieder willekeurig profiel te schrijven is als een reeks sinusoides waarbij de amplitude van een bepaalde golflengte bekend is.

Om vanuit deze sinusoides een beter inzicht te krijgen in de onvlakheid van een weg dienen ze omgezet te worden naar een zogenaamd "Power Density Spectrum", PDS. Dit spectrum geeft een weergave van de vermogensdichtheid van een bepaald langspoor als functie van de golflengte. Om een verdere uitleg van de PDS te geven dient eerst de term energievermogen van een langspoor verder toegelicht te worden.

De energie als aanwezig in een bepaald signaal wordt bepaald door de integraal van de gekwadrateerde profielhoogte over een bepaalde lengte te nemen, zie Vergelijking III-1. Dit is dan de energie van de onvlakheid van een geheel wegvak. Om nu het vermogen van dit wegvak te bepalen dient de totale energie gedeeld te worden door de lengte van het wegvak.

Vergelijking III-1

$$E_t = \int_0^L y^2(x) dx$$

$$P_t = \frac{E_t}{L}$$

Met: E_t : de energie van de vlakheid van een wegvak
 P_t : vermogen van een wegvak [m^2]
 L : lengte van het wegvak [m]
 $y(x)$: wegprofiel als functie van x [m]

Als dit energie verhaal wordt toegepast op de uitvoer van de Fourier analyse volgt dat iedere golflengte zijn individuele bijdrage (P_i) heeft aan het totale vermogen (P_t), zie Vergelijking III-2.

Vergelijking III-2

$$P_i = \frac{1}{2} A_{u,i}^2$$

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_i$$

$$A(\lambda_i) = \frac{dP_t}{d\lambda} = \frac{P_i}{\lambda_i - \lambda_{i+1}}$$

Met: $A_{u,i}$: amplitude van de onvlakheid met golflengte λ_i [m]
 P_i : bijdrage van de onvlakheid met de golflengte λ_i bij het totale vermogen van het wegvak [m]
 $A(\lambda_i)$: Vermogensdichtheid bij golflengte λ_i [m]

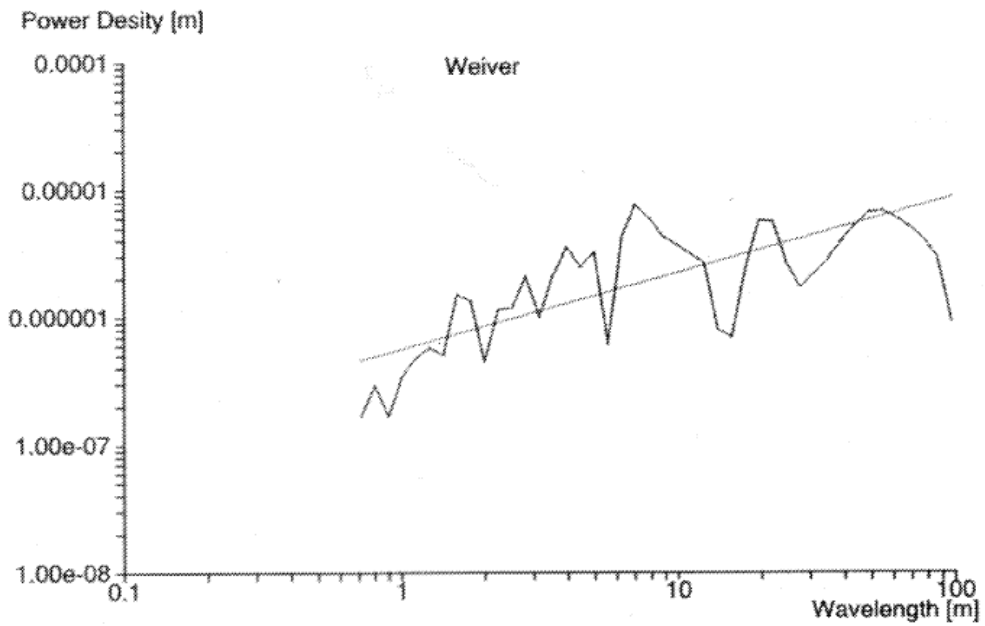
Om nu de vermogensdichtheid (Power Density) te bepalen dient de afgeleide van het vermogen naar golflengte bepaald te worden, zie Vergelijking III-2. Door deze vermogensdichtheid uit te zetten tegen de golflengte wordt het vermogensdichtheid spectrum (PDS) gegenereerd. In Figuur III-1 is een voorbeeld van een vermogensdichtheid spectrum gegeven. In deze figuur is ook een regressie lijn weergegeven van de PDS, deze regressie lijn is als formule vorm weergegeven in Vergelijking III-3.

Nu is het mogelijk om bij ieder willekeurig wegvak deze regressieparameters te bepalen, ook is het mogelijk uit deze regressieparameters een profiel terug te genereren.

Vergelijking III-3

$$A(\lambda) = a5m * \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{ang}$$

Met a5m: een regressie parameter, dit is de vermogensdichtheid bij een golflengte van 5 meter [m]
 ang: een regressie parameter, dit is de hoek van de regressie lijn [-]
 λ_0 : referentie golflengte van 5 meter [m]
 λ : golflengte [m]



Figuur III-1: Voorbeeld uitvoer van een vermogensdichtheid spectrum [5]

IV Fast Fourier Transformation

In deze bijlage wordt de werking van de Fast Fourier Transformation (FFT) toegelicht. Als eerste zal in paragraaf IV.1 in een inleiding toegelicht worden wat de FFT inhoud en waarop die gebaseerd is. Daarna zal er in paragraaf IV.2 uitgelegd worden hoe de FFT is toegepast in Excel en wat de werking is. Uiteindelijk zal er in paragraaf IV.3 een toelichting gegeven worden op een beperking van de FFT.

IV.1 Werking van de FFT

De Fast Fourier Transform is een algoritme van de numerieke wiskunde waarmee een Fouriertransformatie van een signaal (een array met n punten) op een snellere manier uitgerekend kan worden. De tijdwinst die hiermee gemoeid is, kan voor een grote array zeer groot zijn.

De Fourier transformatie ontbindt een functie in een continu spectrum van frequenties. In de mathematische fysica kan de Fourier getransformeerde van een signaal worden gezien als dat signaal in het "frequentiedomein". De Fouriertransformatie veralgemeent dus voor niet-periodieke functies de Fourierreeks van een periodieke functie.

Gebruikelijk is het om een fourierreeks van een periodieke functie te schrijven als som van sinus- en cosinusgolven van de genoemde frequenties. Vervolgens kan de periodieke functie, mits deze bijvoorbeeld stuksgewijs continu is, worden uitgedrukt als een superpositie van harmonische functies met cirkelfrequenties ω , 2ω , 3ω , etc. wat weer omgezet kan worden in perioden T , $T/2$, $T/3$, etc.

Kort gezegd de FFT is een methode om ieder willekeurig signaal op te bouwen uit een eindige reeks sinus- en cosinussen. In formule vorm kan dit als volgt geschreven worden:

Vergelijking IV-1 [1]

$$S_m(t) = \sum_{k=0}^m \{a_k * \cos(k * t) + b_k * \sin(k * t)\}$$

Met $m = n/2$
 n is het aantal data punten wat ingevoerd wordt
 a_k , b_k zijn nader te bepalen constanten

Om nu de constante (a_k en b_k) te bepalen wordt er gebruik gemaakt van Vergelijking IV-2, uit de vergelijking volgt telkens een complex getal waar bij het reële deel betrekking heeft op de cosinus en het imaginaire deel op de sinus.

Vergelijking IV-2 [1]

Voor $k = 0, 1, \dots, m$ geldt:

$$a_k + ib_k = \frac{(-1)^k}{m} * c_k$$
$$a_k + ib_k = \frac{1}{m} * \sum_{j=0}^{2m-1} y_j \{ \cos(k * t_j) + i \sin(k * \pi * t_j) \}$$

IV.2 Werking van de FFT in Excel

De Fourier analyse kan uitgevoerd worden in Excel, hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de invoegtoepassing "gegevensanalyse/ data analyse". Deze Fourier analyse wordt uitgevoerd op een willekeurige data reeks (y_k) bestaande uit 2^n getallen. De uitvoer van de gegevensanalyse is een reeks complexe getallen ($a_k + ib_k$). Om uiteindelijk een uitvoer te krijgen in de vorm als weergegeven in Vergelijking IV-3 dienen de complexe getallen nog aangepast te worden zodat de invloed van de stapgrote (dt) en het gegevens aantal (n) meegenomen worden. Dit kan gedaan worden met de vergelijkingen als weergegeven in Vergelijking IV-4

Vergelijking IV-3

$$\sum_{k=0}^m \{A_k \cos(2 * \pi * f_k * t) + B_k \sin(2\pi * f_k * t)\}$$

Vergelijking IV-4

$$A_k = \frac{a_k}{m}$$

$$B_k = \frac{-b_k}{m}$$

$$f_k = \frac{k}{2 * dt * m}$$

$$m = n / 2$$

Met: n : is het ingevoerde aantal data

k : is een array van 0 tot m

a_k, b_k : is het reële en imaginaire deel van de uitvoer van de gegevensanalyse

A_k : is amplitude horende bij de cosinus en een bepaalde frequentie (f_k)

B_k : is amplitude horende bij de sinus en een bepaalde frequentie (f_k)

dt : de ingevoerde tijdstap horende bij de gegevens reeks

Om nu het maximum te bepalen horende bij een bepaalde frequentie dient de absolute waarde bepaald te worden van de twee uitvoer amplitudes ($\sqrt{A_k^2 + B_k^2}$).

Verder is het mogelijk in Excel om een inverse FFT toe te passen hiervoor wordt kan er ook gebruik gemaakt van de Fourier analyse in Excel. Deze werkt omgekeerd aan de gewone FFT en kan uit een reeks complexe getallen horende bij een bepaalde frequentie een reeks als functie van de opgegeven waarde weergeven.

Theoretische controle FFT in Excel

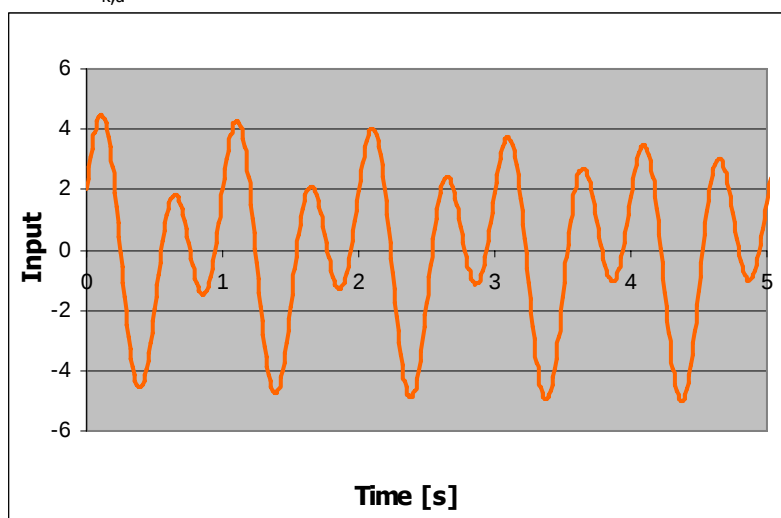
Nu uitgelegd is hoe de FFT in het algemeen en in Excel werkt wordt hier met behulp van een opgegeven profiel nog aangetoond dat de werking van FFT in Excel correct is en dit zowel voor de FFT als de inverse FFT.

Als invoer profiel wordt er gewerkt met een sinus en cosinus als gegeven in Vergelijking IV-5. Hierna zijn hiervan de uitvoeren van Excel grafisch weergegeven in Figuur IV-2. Uit deze uitvoer komt duidelijk de invoerparameters (a_k , b_k horende bij de frequentie $f_{k,a}$ en $f_{k,b}$) terug naar voren.

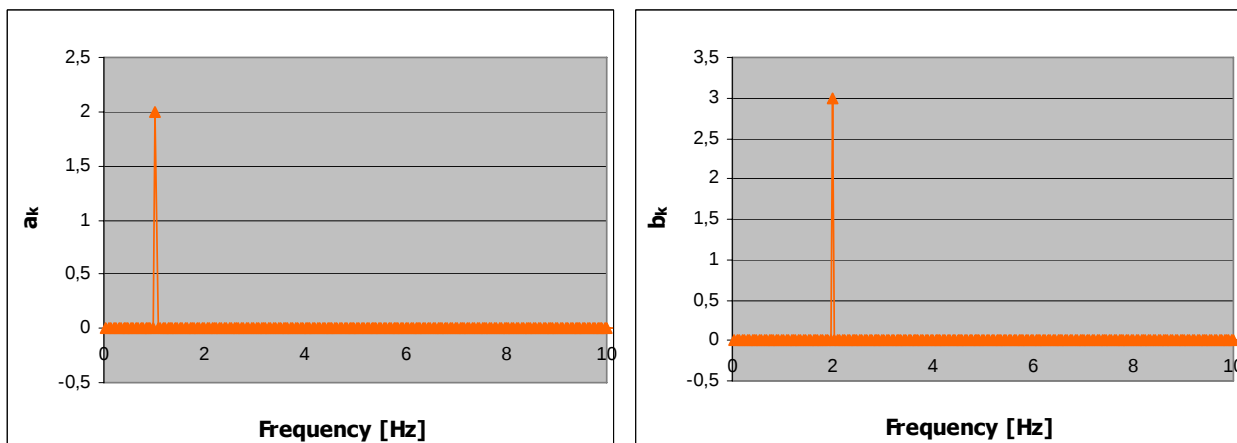
Vergelijking IV-5

$$A_k \cos(2 * \pi * f_{k,a} * t) + B_k \sin(2\pi * f_{k,b} * t)$$

Met: $A_k = 2$ -
 $B_k = 3$ -
 $f_{k,a} = 1$ Hz
 $f_{k,b} = 2$ Hz



Figuur IV-1: invoer profiel



Figuur IV-2: Uivoer van Excel in frequentie domein

Om nu de inverse FFT te controleren wordt er eerst wiskundige een complex getal gemaakt voor de gebruikte invoer als net gebruikt, dit komt neer op

Voor A

$$a_k + ib_k = 2 * m + i * 0$$

horende bij

$$k = f_{k,a} * 2 * dt * m = 21$$

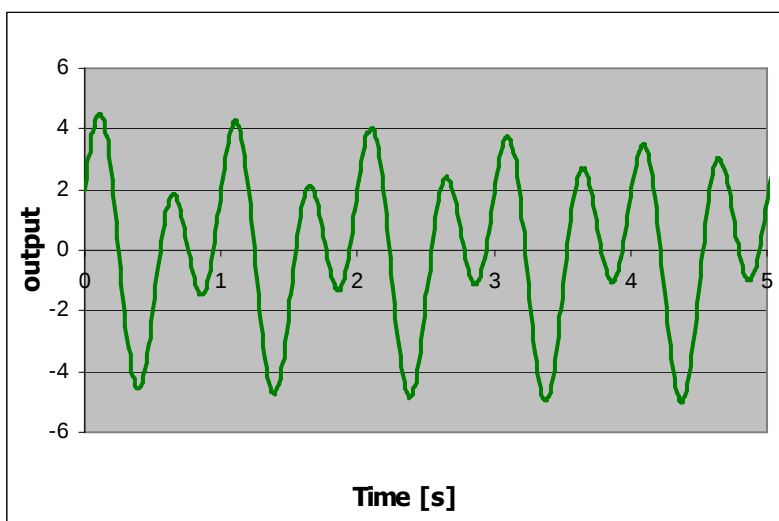
Voor B

$$a_k + ib_k = 0 + i * -3 * m$$

horende bij

$$k = f_{k,a} * 2 * dt * m = 42$$

De overige reeks complexe getallen wordt op nul gesteld zodat er enkel de invloed van deze gegevens bekeken wordt. De uiteindelijke uitvoer is gegeven in Figuur IV-3, dit figuur geeft het zelfde weer als de invoer in Figuur IV-1.



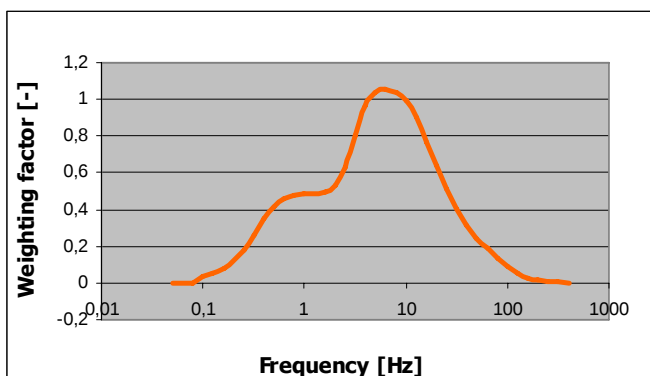
Figuur IV-3: Uitvoer van de Inverse FFT van Excel

IV.3 Tapering functie

Bij het uitvoeren van een fourier-analyse wordt er gewerkt vanuit de gedachte dat ieder signaal een onderdeel is van een periodiek geheel. Dit wil dus zeggen dat ieder eind van een reeks aansluit op het begin van de reeks.

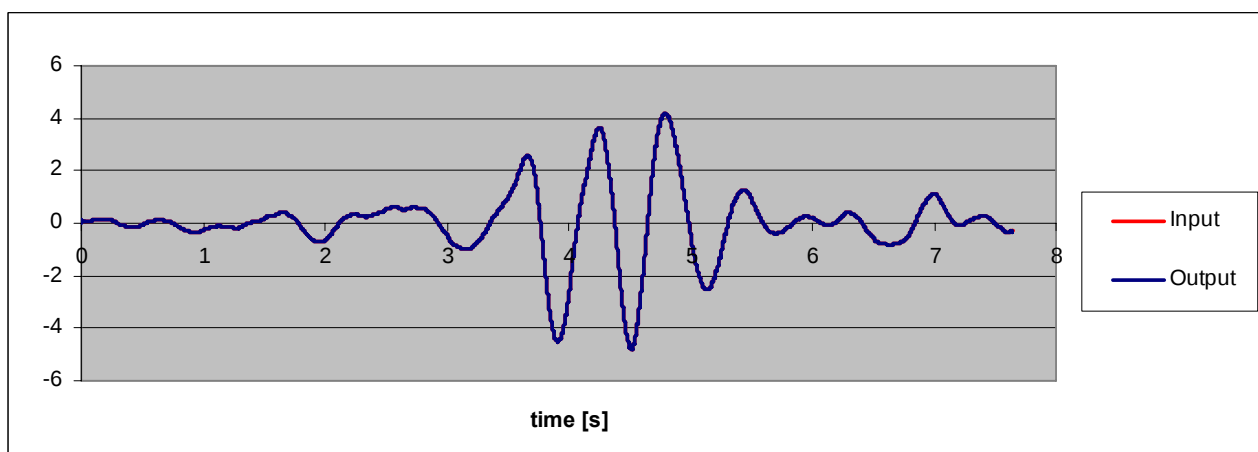
Het probleem is alleen dat dit met een werkelijk invoer data niet altijd zo is, dit kan leiden tot het voorkomen van hoge frequentie in een fourier-analyse terwijl die in werkelijkheid niet voorkomen. Daarom is het mogelijk om een tapering function in te voeren. Een tapering function wordt gebruikt om discontinuïteiten en de hoge frequentie aan het begin en eind van een stuk data te vermijden.

In dit onderzoek is er geen gebruik gemaakt van een tapering functie, dit aangezien er in het model gebruik wordt gemaakt van een wegingsfunctie die voor hogere frequentie naar nul gaat (zie Figuur IV-4).

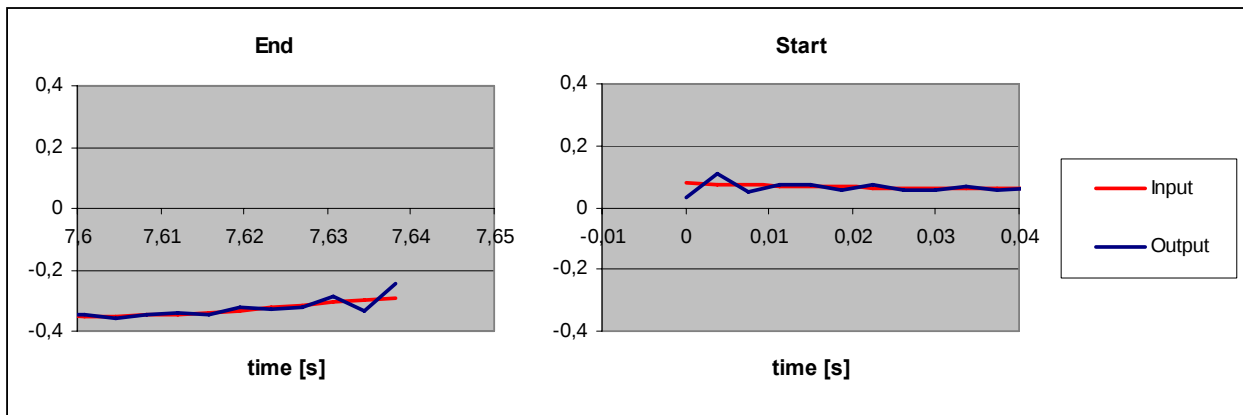


Figuur IV-4: wegingsfunctie mbt comfort en gezondheid volgens de ISO 2631-1 [6]

Om te controleren of het weglaten van de hogere frequentie geen grote invloed heeft op de resultaten is er gekeken wat de invloed is van het weglaten van frequenties hoger dan 100 Hz op een willekeurig profiel. Dit willekeurige profiel bestaat uit een datareeks met een n van 2048 en een dt van 0,037 seconden. De invoer is samen met de uitvoer weergegeven in Figuur IV-5. Zoals zichtbaar is, is alleen de uitvoer te zien dit komt doordat de uitvoer bijna exact over de invoer heen valt. Het weg vallen van de hogere frequentie is enkel zichtbaar als er op het begin en eind ingezoomd wordt, zie Figuur IV-6.



Figuur IV-5: In- en uitvoer van een willekeurige reeks getallen, enkel is in de uitvoer de trillingen met een frequentie hoger dan 100 Hz niet meegenomen



Figuur IV-6: Details van Figuur IV-5

Uiteindelijk kan er gesteld worden dat de fout die er gemaakt wordt door de FFT, met betrekking tot de discontinuïteiten aan het begin en het eind, nihil is. Het is alleen mogelijk dat als er een extreme onvlakheid op de grens ligt dat het nader onderzocht dient te worden.

V Het comfortmodel

Het comfortmodel is in Excel uitgewerkt in verschillende werkbladen zoals hieronder weergegeven. Deze verschillende werkbladen worden één voor één verder toegelicht.

- Invoer van de voertuiggegevens (input car properties)
- Invoer van het wegprofiel (road profile)
- Bepaling verschil vooras en achteras (Difference front and rear)
- Berekening van de verschillende versnellingen (calculation)
- Toepassen van de Fast Fourier Transformatie (FFT)
- Toepassen van de Inverse FFT en de beoordelingsprocedure voor comfort (invFFT)

V.1 Invoer van de voertuiggegevens

In het eerste werkblad dienen de gegevens van het voertuig ingevoerd te worden zoals weergegeven in Figuur V-1. Uit deze gegevens kunnen dan met behulp van bijlage II de matrix A en B bepaald worden ten behoeven van Vergelijking V-1.

Vergelijking V-1

$$[\dot{X}(t)] = [A] * [X(t)] + [B] * [U(t)]$$

Geometric property			Dynamic property				
			i	mi kg	ci N*s/m	ki N/m	li kg*m2
df=	1,27	m	1f	70	-	250000	-
dr=	1,47	m	1r	70	-	250000	-
dd=	-0,10	m	2f	-	4500	28000	-
dp=	1,00	m	2r	-	2000	35000	-
p_band=	200	kPa	2	1090	-	-	1898
			3d	2	276	50210	-
			3p	2	276	50210	-
			4d	45	1390	36190	-
			4p	45	1390	36190	-
			5d	6	387	9999	-
			5p	6	387	9999	-
			6d	2	234	34400	-
			6p	2	234	34400	-

Figuur V-1: Invoer voertuiggegevens

Verder dient de banddruk (p_{band}) ingevoerd te worden, dit is benodigd om het raakvlak van de band met het wegdek te bepalen. Hiervoor is er aangenomen dat het raakvlak cirkelvormig is zodat de volgende formules gebuikt kunnen worden:

Vergelijking V-2

$$D_{contact_area} = \sqrt{\frac{4 * P_{band}}{\pi p_{band}}}$$

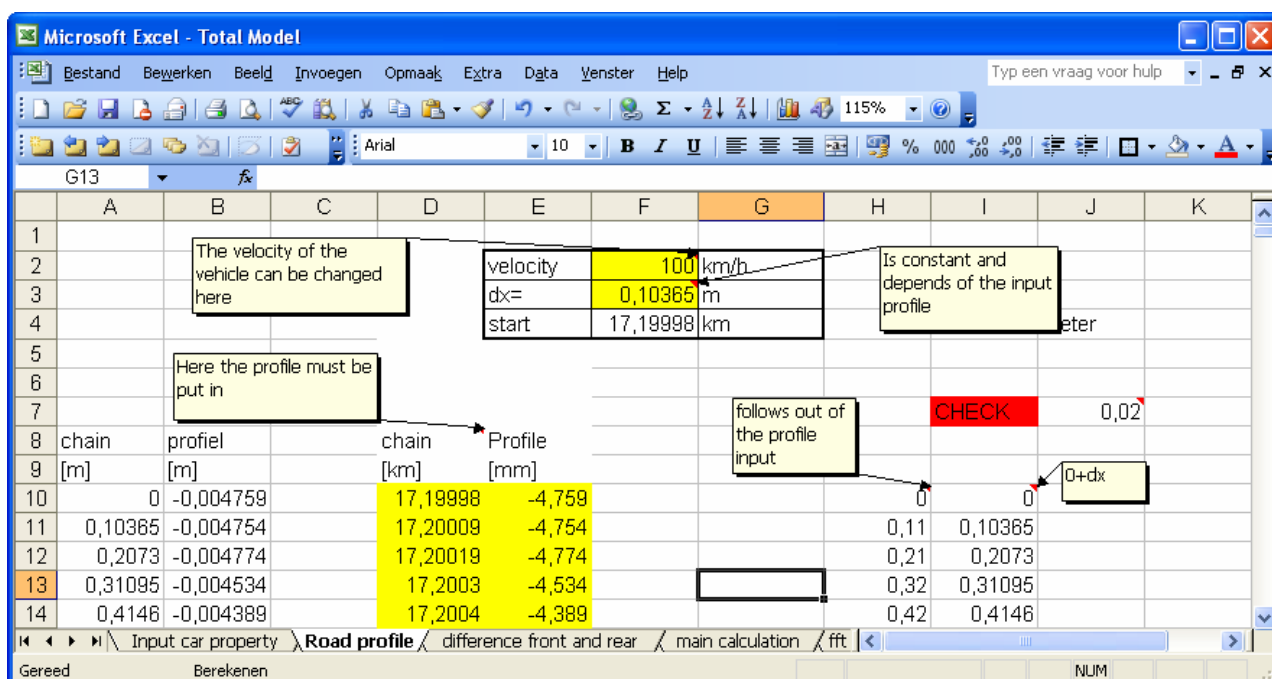
$$P_{band} = \frac{\sum m_i * g}{4 * 1000}$$

Met: $D_{contact_area}$ = de diameter van het contactvlak tussen de weg en de band [m]
 P_{band} = de kracht die 1 band op het wegdek [kN]
 p_{band} = de banddruk [kPa]
 $\sum m_i$ = de sommatie van alle massa's van het voertuig [kg]
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

V.2 Invoer van wegprofiel

In dit werkblad dient het profiel van de weg ingevoerd te worden, dit kan zowel een zelf gemodelleerd profiel als een uitvoer van metingen zijn. In dit voorbeeld is er een uitvoer van een ARAN ten plaatse van de N11 ingevoerd. Deze data reeks was gegeven als twee array's. De eerste gaf de kilometrering van de weg aan in km en de tweede gaf de afwijking van het wegprofiel in mm.

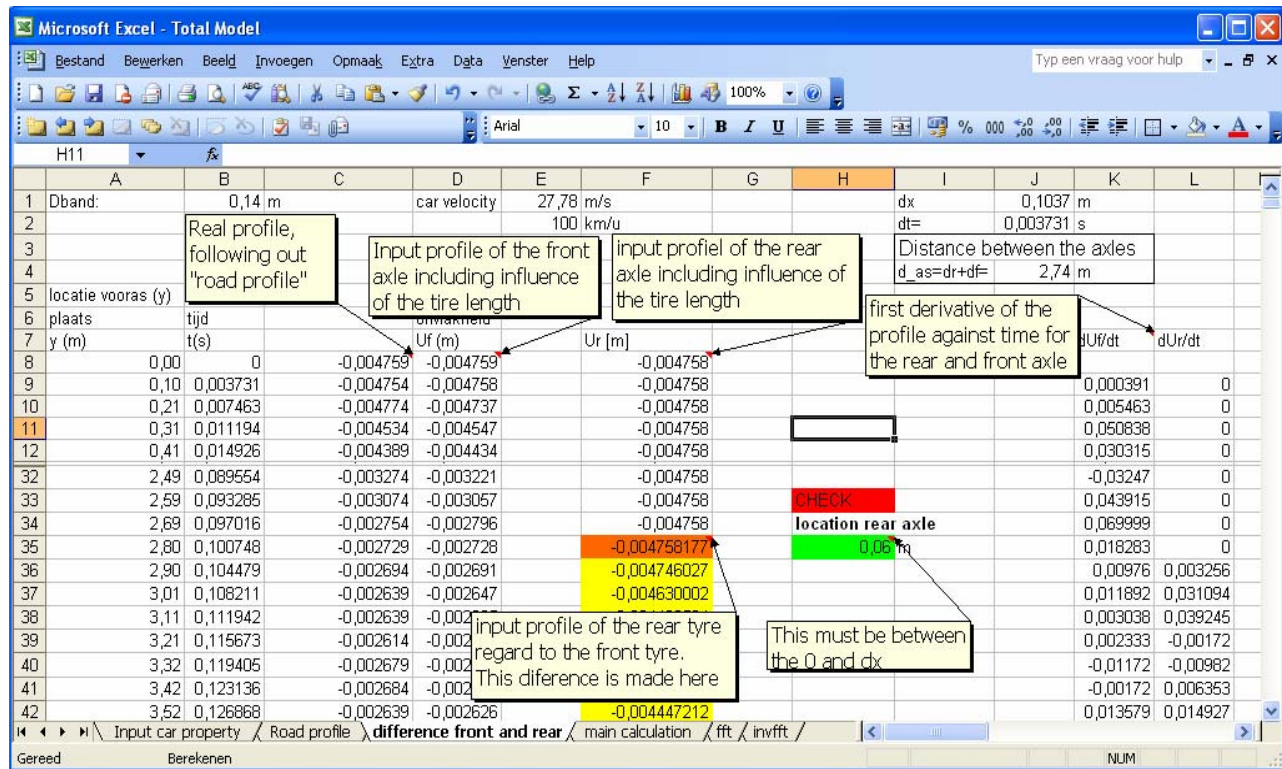
De stapgrootte van de kilometrering bleek alleen niet constant, wat waarschijnlijk veroorzaakt wordt doordat de snelheid niet constant is geweest. De stapgrootte dient alleen voor het model wel constant te zijn om die reden wordt er een best passende stapgrootte bepaald zodat de afwijking geminimaliseerd wordt. Bij deze ARAN meting bleek dit een stapgrootte te zijn van 0,10365 meter. Deze stapgrootte is voor het gehele onderzoek toegepast dit omdat er in het onderzoek telkens een gedeelte van de N11 als basis is gebruikt. Verder wordt er in dit werkblad de snelheid van het voertuig ingevoerd, in dit voorbeeld is er steeds gewerkt met een voertuigsnelheid van 100 km/h.



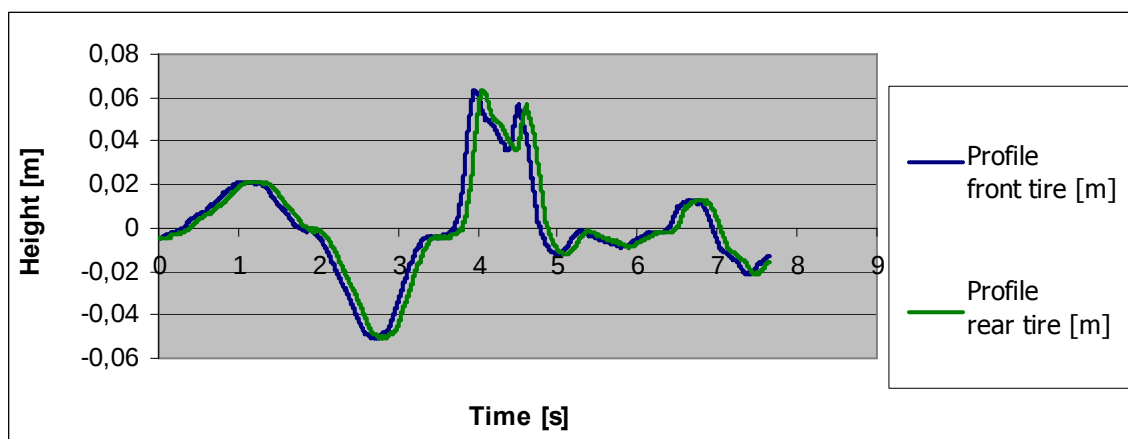
Figuur V-2 : invoer wegprofiel

Er dient alleen nog wel onderscheid gemaakt te worden tussen het invoer profiel van het voorwiel (U_{front}) en achterwiel (U_{rear}). Omdat het voorwiel een andere verplaatsing ondergaat op eenzelfde tijdstip dan het achterwiel. Dit is afhankelijk van de afstand tussen de vooras en de achteras, voor een Peugeot 504 is deze afstand gelijk 2,74 meter.

Omdat dit niet een veelvoud van de stapgrootte is dient er telkens een interpolatie gemaakt te worden om het profiel voor de achteras te modeleren. Deze bepaling is uitgevoerd in het 3^{de} werkblad "difference front and rear", wat weergegeven is in Figuur V-3. Een uitvoer van beide profielen is weergegeven in Figuur V-4 Als functie van tijd.



Figuur V-3: bepaling wegprofiel ten plaatse van het achterwiel



Figuur V-4 Wegprofiel als functie van tijd voor het voor- en achterwiel

V.3 Berekening

Nu alle invoergegevens bekend zijn kunnen de versnellingen van de verschillende massa's in het voertuig bepaald worden voor een bepaalde snelheid en horende bij een bepaald profiel en bepaalde voertuig karakteristiek. Voor deze berekening wordt er gebruik gemaakt van Vergelijking V-3. De enige onbekende is nu nog de startwaarde (t=0) van de versnelling en snelheid van de verschillende massa's, deze zijn hierbij op nul gesteld.

Vergelijking V-3

$$[\dot{X}(t)] = e^{[A]*dt} * [\dot{X}(t-1)] + \frac{1}{[A]} * (e^{[A]*dt} - [I]) * [B] * [\dot{U}(t)]$$

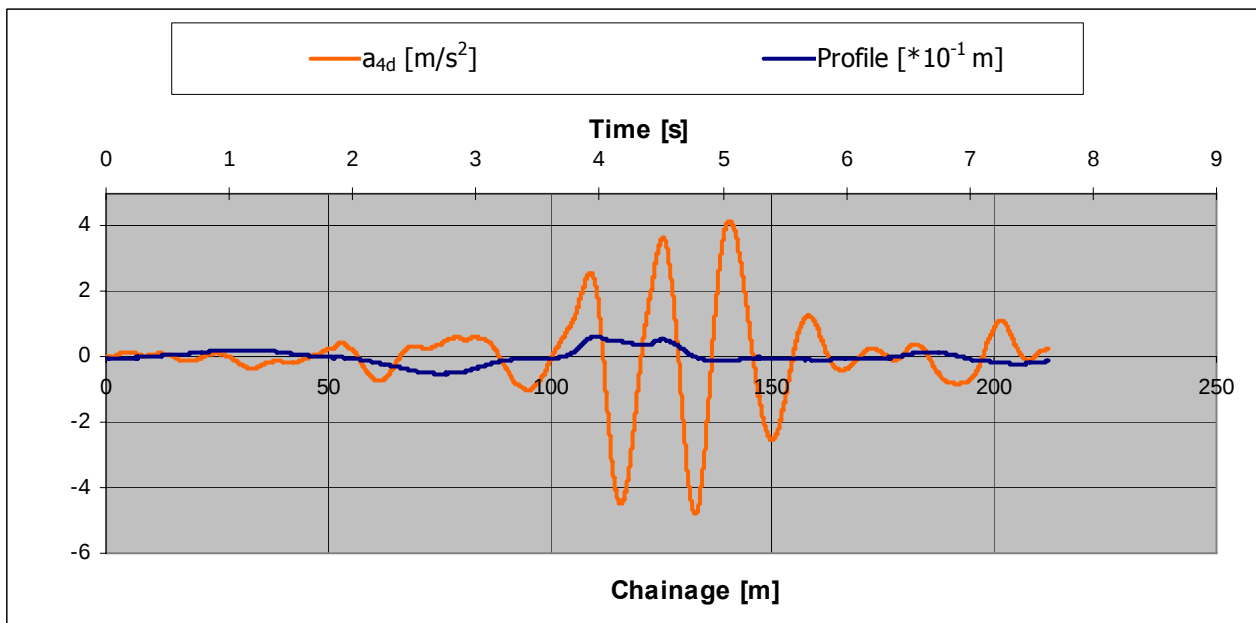
$$[\dot{X}(t)] = [\dot{x}_{1f}, \ddot{x}_{1f}, \dot{x}_{1r}, \ddot{x}_{1r}, \dot{x}_2, \ddot{x}_2, \dot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_2, \dot{x}_{3d}, \ddot{x}_{3d}, \dot{x}_{3p}, \ddot{x}_{3p}, \dot{x}_{4d}, \ddot{x}_{4d}, \dot{x}_{4p}, \ddot{x}_{4p}, \dot{x}_{5d}, \ddot{x}_{5d}, \dot{x}_{5p}, \ddot{x}_{5p}, \dot{x}_{6d}, \ddot{x}_{6d}, \dot{x}_{6p}, \ddot{x}_{6p}]^T$$

$$e^{[A]*t} = I + [A] * dt + [A]^2 * \frac{dt^2}{2!} + [A]^3 * \frac{dt^3}{3!} + \dots$$

$$[\dot{U}(t)] = \left[\frac{du_{0f}}{dt}, \frac{du_r}{dt} \right]^T$$

Met $[\dot{X}(t)]$: versnelling en snelheid van de verschillende massa's op een bepaalde tijd (t)
 $[\dot{X}(t-1)]$: versnelling en snelheid van de massa's op een voorgelegen tijdstip (t-1)
 $[\dot{U}(t)]$: de helling van het wegvak bij de voor- en achteras op tijdstip (t)
 $[I]$: eenheidsmatrix
 $[A], [B]$: Matrix met parameters welke volgen uit bijlage II

Hierna wordt er enkel met versnellingen die het lichaam van de bestuurder (a_{4d}) ervaart verder gewerkt, deze uitvoer staat voor het voorbeeld gegeven in Figuur V-5.

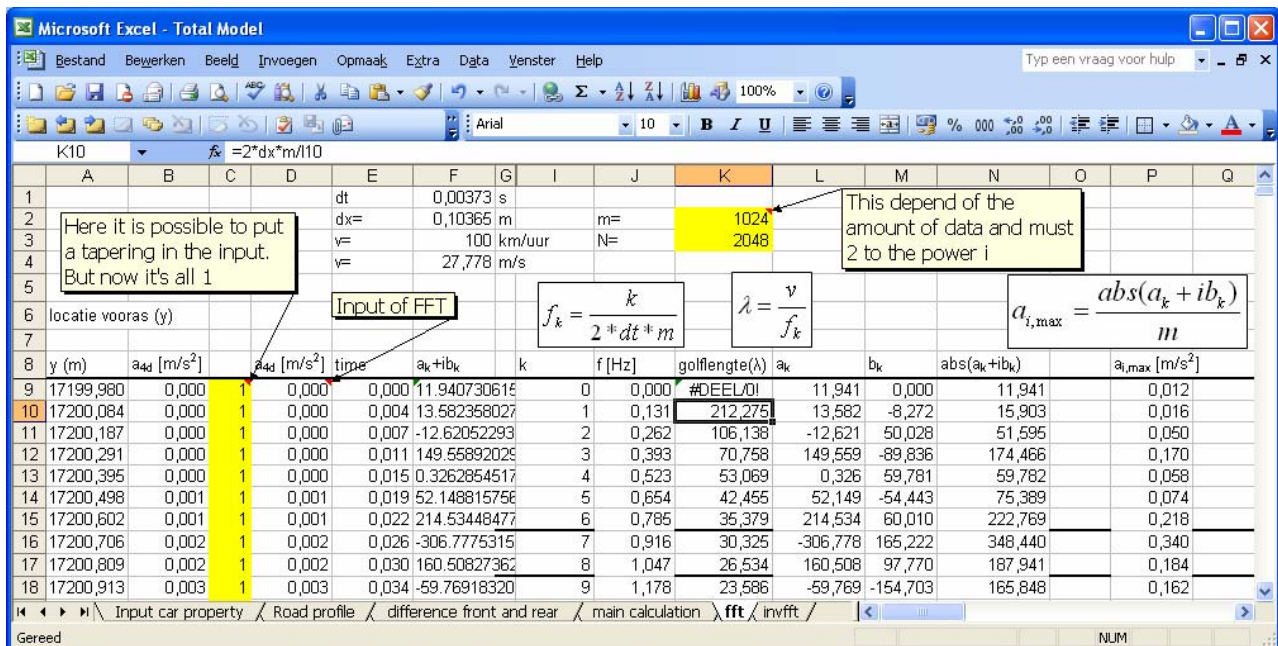


Figuur V-5: Uitvoer van versnelling van de bestuurder bij een bepaald wegprofiel

V.4 FFT

De volgende stap in het model is het toepassen van de wegingsfunctie op de versnellingen die een persoon ondergaat. Daarvoor is er gebruik gemaakt van de beoordelingsprocedure met betrekking tot comfort die in de ISO 2631-1 [6] is gegeven. Bij deze procedure worden er een wegingsfunctie toepast die gerelateerd is aan de frequentie van de ondergaande versnelling. Daarom dient de versnellingsuitvoer van de bestuurder uitgezet te worden in een frequentie domein. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de Fast Fourier Transformatie als uitgelegd in Bijlage IV.

In het gehele onderzoek is er gebruik gemaakt van een reeks bestaande uit 2048 getallen wat neer komt op een lengte van 212,3 meter en bij een snelheid van 100 km/h op een tijdsduur van 7,6 seconden. Als de snelheid aangepast wordt blijft de dx constant omdat deze afhankelijk is van het invoerprofiel en die is gegeven voor een constante dx. Om die reden verandert de dt als de snelheid verandert. In Figuur V-7 is de in- en uitvoer van de FFT gegeven voor het voorbeeld



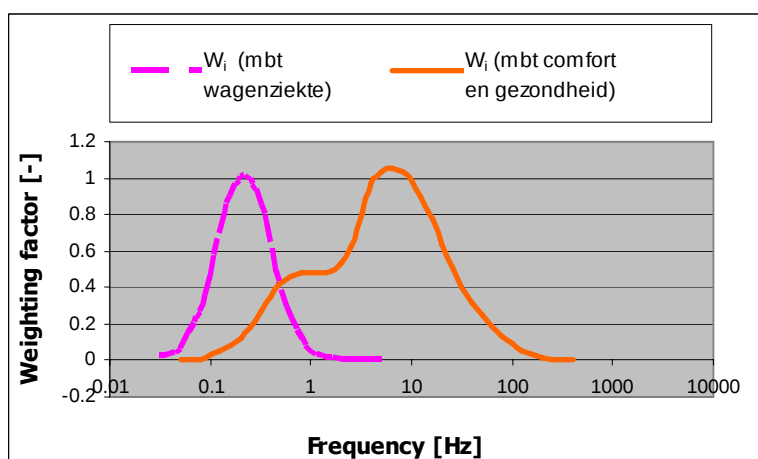
De Wegingsfunctie

In de ISO 2631 [6] zijn verschillende wegingsfunctie gegeven aangezien er in dit onderzoek alleen met de verticale versnellingen gewerkt zijn hier enkel deze wegingsfunctie W_k en W_f verder toegelicht. Deze zijn weergegeven in Tabel V-1, naast de tabel zijn de wegingsfunctie ook nog grafisch weergegeven.

Omdat de frequenties in de tabel niet exact overeenkomen met de frequentie volgend uit de FFT dient er een interpolatie toegepast te worden op de wegingsfunctie. Zodat voor ieder uitvoerfrequentie van de FFT de wegingsfactor bekend is. Als deze wegingfactor alle bekend zijn kan de gewogen versnellingen bepaald worden in het frequentie domein.

Tabel V-1: wegingsfuncties voor verticale versnellingen

f [Hz]	Wegingsfunctie (W_i)	
	W_i [-] mbt wagenziekte	W_i [-] mbt comfort en gezondheid
0	0	0
0	0	0
0,02	0	0,00242
0,025	0	0,00377
0,0315	0	0,00597
0,04	0	0,0157
0,05	0	0,0267
0,063	0	0,0461
0,08	0	0,0695
0,1	0,0312	0,0895
0,125	0,0486	0,1006
0,16	0,079	0,0992
0,2	0,121	0,0854
0,25	0,182	0,0619
0,315	0,263	0,0384
0,4	0,352	0,0224
0,5	0,418	0,0116
0,63	0,459	0,0053
0,8	0,477	0,00235
1	0,482	0,000998
1,25	0,484	0,000377
1,6	0,494	0,000155
2	0,531	0,000064
2,5	0,631	0,000025
3,15	0,804	9,7E-06
4	0,967	0
5	1,039	0
6,3	1,054	0
8	1,036	0
10	0,988	0
12,5	0,902	0
16	0,768	0
20	0,636	0
25	0,513	0
31,5	0,405	0
40	0,314	0
50	0,246	0
63	0,186	0
80	0,132	0
100	0,0887	0
125	0,054	0
160	0,0285	0
200	0,0152	0
250	0,0079	0
315	0,00398	0
400	0,00195	0



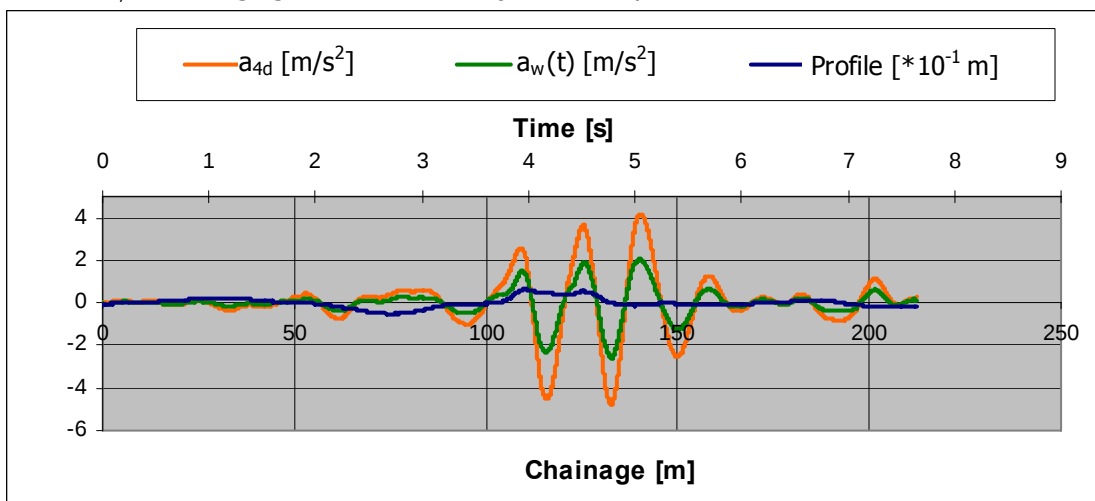
V.5 Inverse FFT

Om uiteindelijk de comfortparameters op te stellen dient de gewogen versnellingsuitvoer weer teruggezet te worden in een tijdsdomein. Hiervoor wordt er weer gebruik gemaakt van de fourier-analyse in Excel alleen wordt die nu als inverse toegepast. De invoer voor deze inverse FFT is de uitvoer van de FFT vermenigvuldigd met de wegingsfunctie (zie Vergelijking V-4). De uitvoer van de inverse FFT zijn de gewogen versnellingen van de bestuurder ($a_w(t)$). De uitvoer van het voorbeeld is weergegeven in Figuur V-8.

Vergelijking V-4

$$\text{Invoer} = (a_k + ib_k) * W_{i,k}$$

Met : a_k is de reële uitvoer van de FFT horende bij de k^{de} frequentie
 b_k is de imaginaire uitvoer van de FFT horende bij de k^{de} frequentie
 $W_{i,k}$ is de wegingsfactor horende bij de k^{de} frequentie



Figuur V-8: De versnellingen van bestuurder volgend uit het voertuigmodel (a_{4d}) en na wegingsfunctie ($a_w(t)$)

Nu de gewogen versnellingen bepaald kunnen worden horende bij een willekeurige snelheid en/of profiel is het mogelijk om voor deze situatie de comfortparameters te bepalen. De te bepalen comfortparameters zijn als volgt gedefinieerd:

- **a_w**
De effectieve waarde van de gewogen versnellingsuitvoer voor een geheel wegvak (a_w), deze comfortparameter geeft een waarde aan een wegvak die gebaseerd is op de gemiddelde ondergaande versnellingen over het gehele wegvak.
- **MTVV**
Het maximum van het lopend kwadratische gemiddelde van de gewogen versnellingen ($a_w(t_0)$) over een periode van 1 seconde. De MTVV geeft een waarde aan de voorkomende piekwaarde die volgen uit korte onvlakheden.

De bepaling van deze comfortparameters wordt uitgevoerd in het werkblad "invFFT" zoals weergegeven in Figuur V-9 en zal verder toegelicht worden op de volgende pagina

Voor het bepalen van de a_w parameter wordt er integraal toegepast over de gehele gewogen versnellingsuitvoer. Om dit uit te voeren in Excel wordt deze integraal omgezet naar een sommatie als weergegeven Vergelijking V-5 .

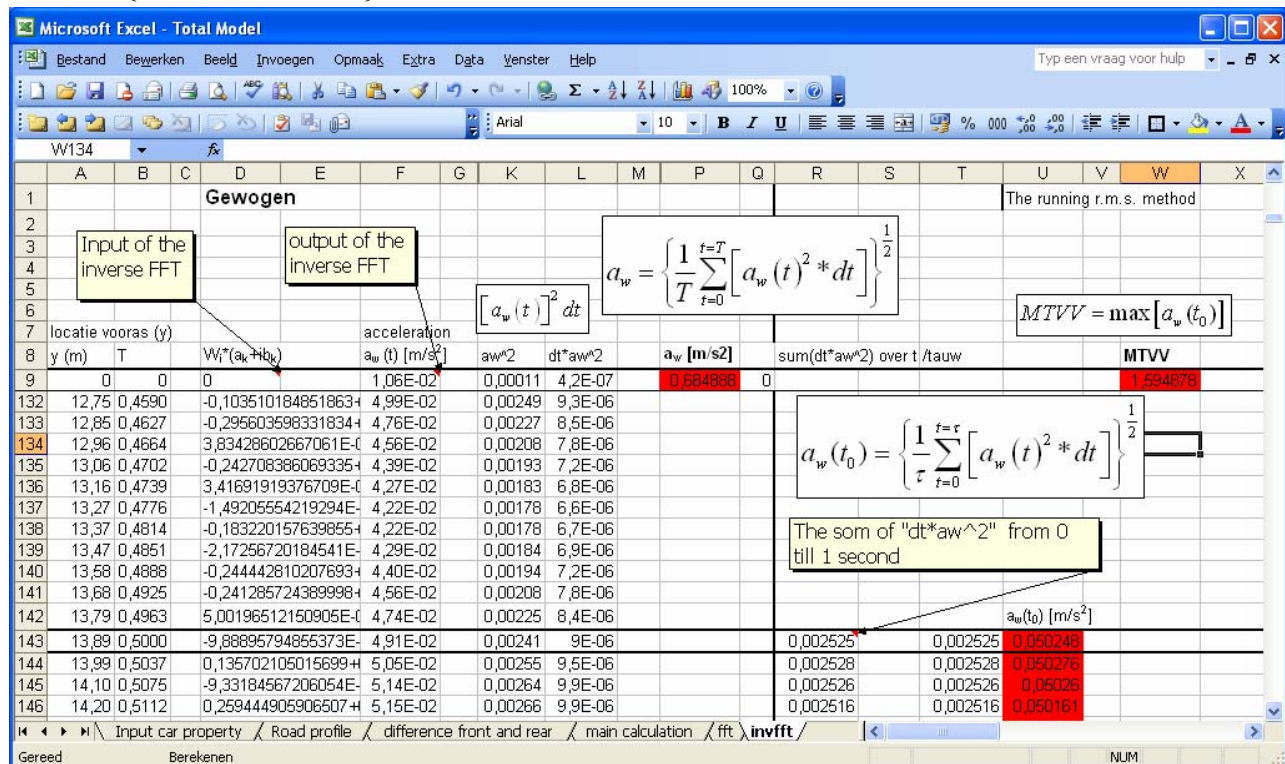
Vergelijking V-5

$$a_w = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{t=T} [a_w(t)]^2 * dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Voor het bepalen van de MTVV dient eerst een lopend kwadratisch gemiddelde bepaald te worden over een periode van 1 seconde dit wordt gedaan met behulp van Vergelijking V-6. Hierbij is in het onderzoek τ gesteld op 1 seconde, het maximum van het lopende kwadratische gemiddelde is de comfortparameter MTVV.

Vergelijking V-6

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=0}^{t=\tau} [a_w(t)]^2 * dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$



Figuur V-9: toepassen van de inverse FFT en de bepaling van de comfortparameters in Excel.

VI Uitwerking meetresultaten N11

In deze bijlage is de beoordeling gegeven van de beschouwde locaties van de N11 zoals weergegeven in Tabel VI-1. Van deze locatie zijn telkens de volgende parameters bepaald:

- IRI 100
- IRI 20
- Hoogte verschil over 25 meter
- Helling van de stootplaten

Deze resultaten waren afkomstig uit een onderzoek van Rijkswaterstaat [20]

Tabel VI-1: beschouwde locaties

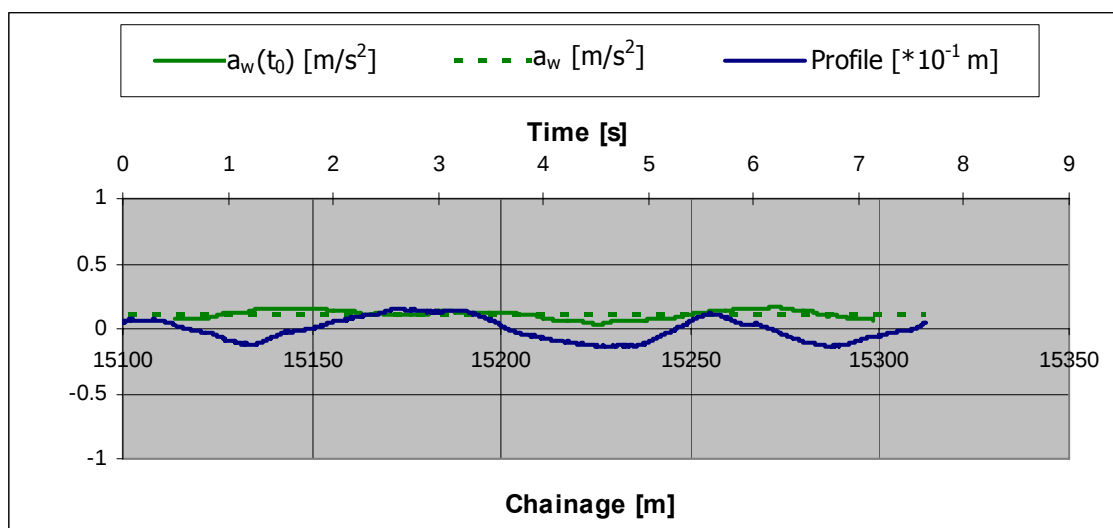
	Start [km]	End [km]	Toelichting
1	15.100	15.300	Een wegvak zonder problemen (Goed)
2	15.850	16.050	Een wegvak met een onderdoorgang in de ondergrond (KW 5)
3	17.200	17.400	Een duiker in de ondergrond (KW 6)
4	18.100	18.300	Een overkluizing tbv een hoogdrukleiding in de ondergrond (KW 10)
5	18.300	18.500	Een brug over een boezem (KW 11)
6	19.500	19.700	Een slechte locatie zonder een kunstwerk in de ondergrond (geen KW)

Verder zijn er met behulp van het comfortmodel de nieuwe comfortparameters (a_w , MTVV) bepaald, welke ook voor ieder locatie in het vervolg van de bijlage is weergegeven. Deze uitvoer is ook telkens grafisch weergegeven.

Locatie 1, een wegvak zonder problemen

Tabel VI-2: resultaten van huidige meetmethodes en het comfortmodel

	waarde	locatie [km]
IRI 100 [mm/m]	0.6	15.1-15.2
	0.6	15.2-15.3
IRI 20 [mm/m]	-	-
ΔH over 25m [cm]	-	-
Helling stootplaat [m/m]	-	-
a_w [m/s ²]	0.111	15.1-15.3
MTVV [m/s ²]	0.165	15.27

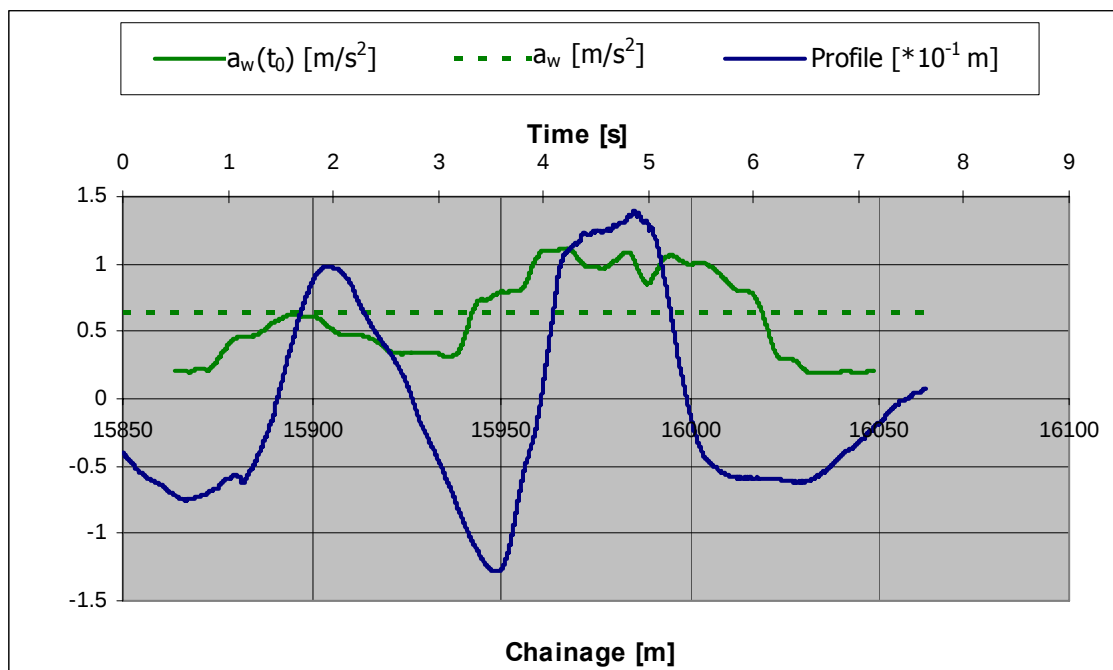


Figuur VI-1: Het langsprofiel van het wegvak en de uitvoer van het comfortmodel voor locatie 1

Locatie 2, een wegvlak met onderdoorgang (KW5)

Tabel VI-3 resultaten van huidige meetmethodes en het comfortmodel

	waarde	locatie [km]
IRI 100 [mm/m]	1.2	15.8-15.9
	2.6	15.0-16.0
IRI 20 [mm/m]	5.1	15.95-15.97
ΔH over 25m [cm]	9	15.825-15.85
	14	15.875-15.9
	9	15.9-15.925
	13	15.925-15.95
	25	15.95-15.975
	21	15.975-16.0
Helling stootplaat [m/m]	1:50	15.97
	1:60	15.99
a_w [m/s ²]	0.641	15.8-16.0
MTVV [m/s ²]	1.110	15.97

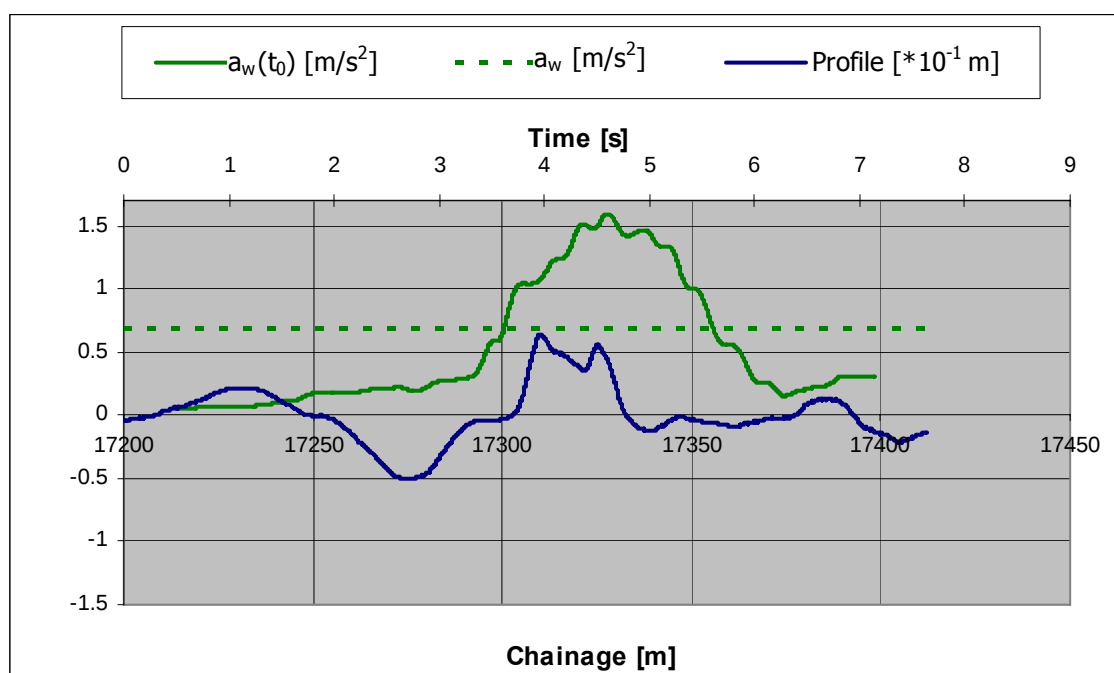


Figuur VI-2: Het langsprofiel van het wegvlak en de uitvoer van het comfortmodel voor locatie 2

Locatie 3, een wegvlak met een duiker in de ondergrond (KW 6)

Tabel VI-4: resultaten van huidige meetmethodes en het comfortmodel

	waarde	locatie [km]
IRI 100 [mm/m]	0.7	17.2-17.3
	3.0	17.3-17.4
IRI 20 [mm/m]	6.9	17.30-17.32
ΔH over 25m [cm]	9	17.285-17.31
	6	17.32-17.345
Helling stootplaat [m/m]	-	-
a_w [m/s ²]	0.685	17.2-17.4
MTVV [m/s ²]	1.595	17.33

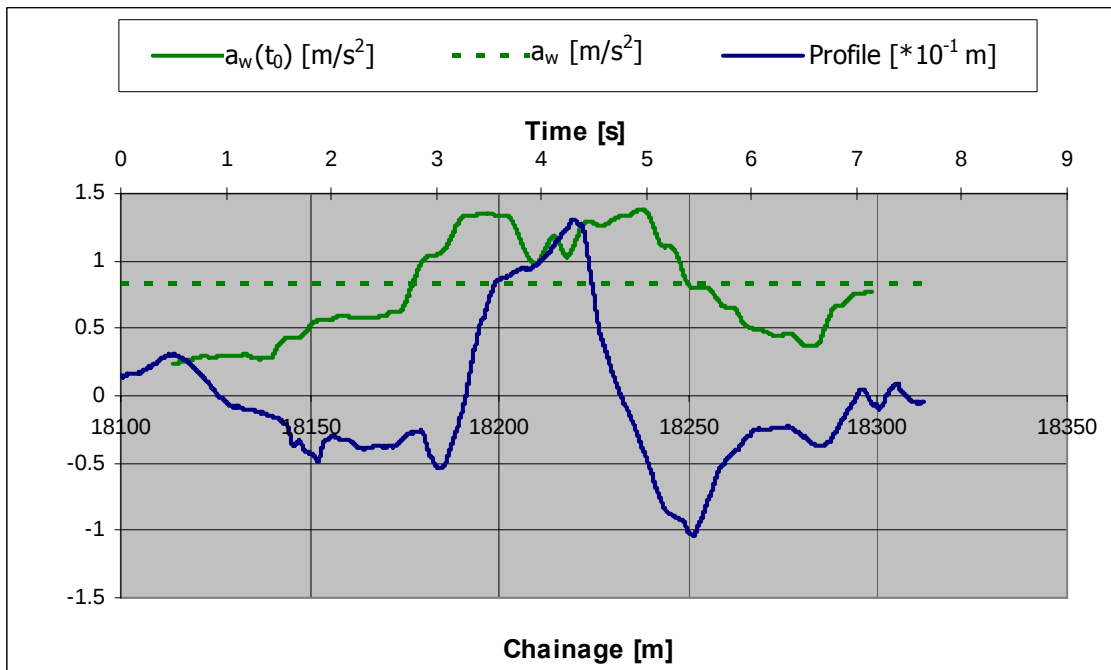


Figuur VI-3: Het langsprofiel van het wegvlak en de uitvoer van het comfortmodel voor locatie 3

Locatie 4 een wegvlak met een overkluizing tbv een hoogdrukleiding in de ondergrond (KW10)

Tabel VI-5: resultaten van huidige meetmethodes en het comfortmodel

	waarde	locatie [km]
IRI 100 [mm/m]	2.6	18.1-18.2
	3.1	18.2-18.3
IRI 20 [mm/m]	5.4	18.18-18.20
	6.5	18.22-18.24
ΔH over 25m [cm]	16	18.18-18.205
	23	18.225-18.25
	8	18.25-18.275
Helling stootplaat [m/m]	1:80	18.19
	1:50	18.22
a_w [m/s ²]	0.830	18.1-18.3
MTVV [m/s ²]	1.388	18.24

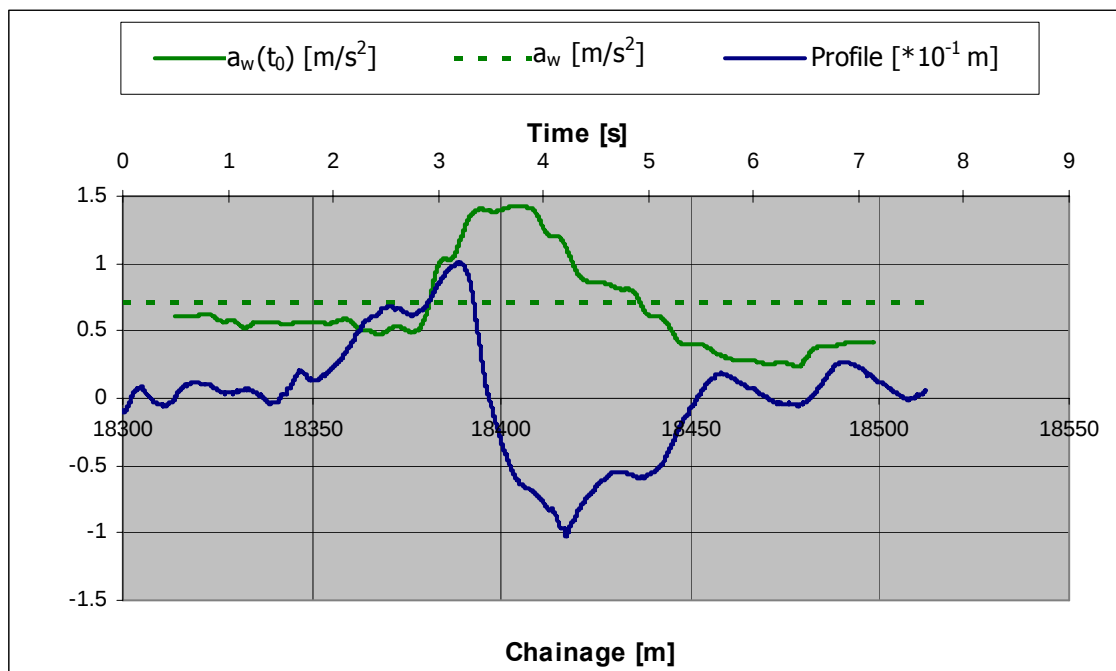


Figuur VI-4: Het langsprofiel van het wegvlak en de uitvoer van het comfortmodel voor locatie 4

Locatie 5 een wegvak met een brug over een boezem water heen(KW 11)

Tabel VI-6: resultaten van huidige meetmethodes en het comfortmodel

	waarde	locatie [km]
IRI 100 [mm/m]	2.9	18.3-18.4
	1.9	18.4-18.5
IRI 20 [mm/m]	5.3	18.38-18.40
ΔH over 25m [cm]	22	18.29-18.315
	8	18.43-18.455
Helling stootplaat [m/m]	1:50	18.40
a_w [m/s ²]	0.720	18.3-18.5
MTVV [m/s ²]	1.432	18.40

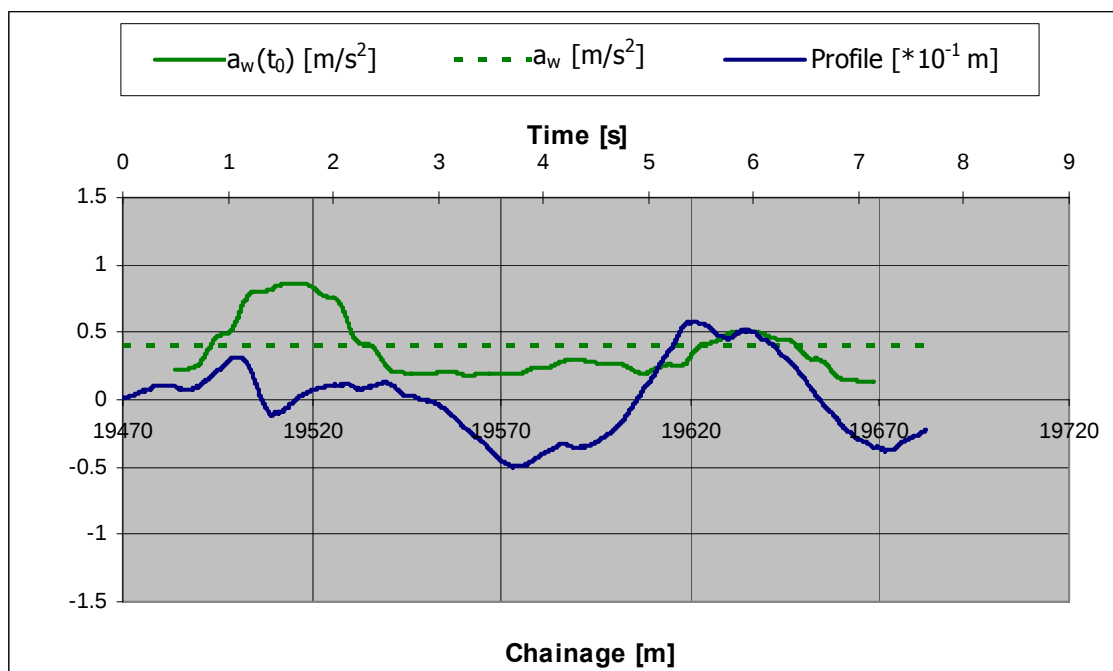


Figuur VI-5: Het langsprofiel van het wegvak en de uitvoer van het comfortmodel voor locatie 5

Locatie 6 Een slecht wegvlak zonder een kunstwerk in de ondergrond(No KW)

Tabel VI-7: resultaten van huidige meetmethodes en het comfortmodel

	waarde	locatie [km]
IRI 100 [mm/m]	1.4	19.5-19.6
	1.1	19.6-19.7
IRI 20 [mm/m]	-	-
ΔH over 25m [cm]	9	19.60-19.625
	8	19.635-19.66
Helling stootplaat [m/m]	-	-
a_w [m/s ²]	0.403	19.47-19.67
MTVV [m/s ²]	0.868	19.51
	0.506	19.64



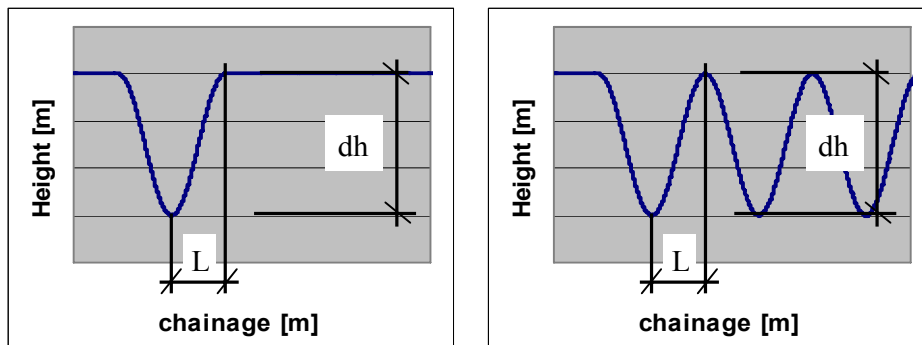
Figuur VI-6: Het langsprofiel van het wegvlak en de uitvoer van het comfortmodel voor locatie 6

VII Uitwerkingen algemeen zettingsprofiel

VII.1 Inleiding

Voor het opstellen van ontwerpgrafieken voor het bepalen van het toegestane zettingsverschil bij verschillende standaard situatie is er gebruik gemaakt van de standaard situaties als weergegeven in Figuur VII-1. Van deze standaard situatie is steeds de dh en de L zoals in de figuur is weergegeven gevarieerd, dit binnen de volgende grenzen:

- L van 2,5 tot 30 meter
- dh van 0,01 meter tot 0,40 meter



Figuur VII-1: Invoer profielen: eenmalige onvlakheid (links) en reeks (rechts)

Verder zijn er in bijlage VII.2 de resultaten weergegeven van een eenmalige onvlakheid en in bijlage VII.3 van een reeks onvlakheden. Telkens bleek er een lineaire relatie te zijn tussen het opgelegde zettingverschil en de comfortparameters voor de verschillende lengten en snelheden. Om die reden was het mogelijk om vanuit de resultaten ontwerpgrafieken op te stellen. Deze zijn voor de snelheden van 50, 80, 100 en 120 km/h weergegeven op de volgende pagina's.

VII.2 Uitvoer eenmalige onvlakheid

VII.2.1 Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 50 km/h

Tabel VII-1 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

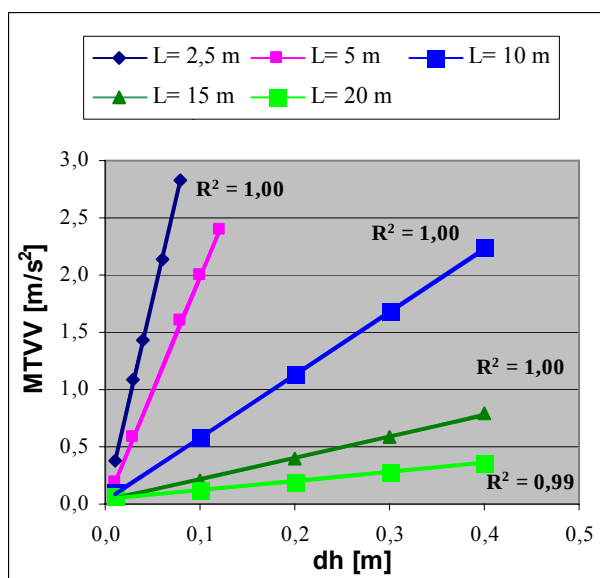
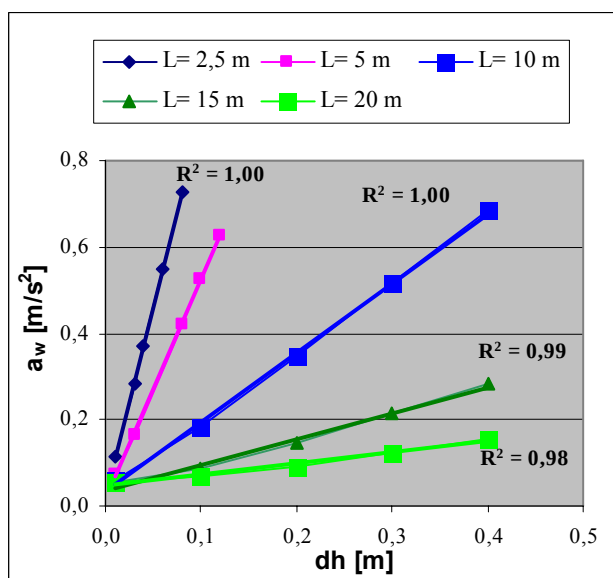
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,11	0,39
2,5	0,03	0,28	1,08
2,5	0,04	0,37	1,43
2,5	0,06	0,55	2,13
2,5	0,08	0,73	2,83

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,07	0,20
5	0,03	0,16	0,59
5	0,08	0,42	1,60
5	0,10	0,52	2,00
5	0,12	0,63	2,40

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,06	0,10
10	0,10	0,18	0,58
10	0,20	0,35	1,13
10	0,30	0,52	1,68
10	0,40	0,68	2,23

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,06	0,08
15	0,10	0,09	0,20
15	0,20	0,15	0,39
15	0,30	0,21	0,59
15	0,40	0,28	0,78

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,06	0,08
20	0,10	0,07	0,11
20	0,20	0,09	0,20
20	0,30	0,12	0,28
20	0,40	0,16	0,37



Figuur VII-2: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 50 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-2 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-1, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-2. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-3 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van $0,4 \text{ m/s}^2$, $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,6 \text{ m/s}^2$ en MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$).

Vergelijking VII-1

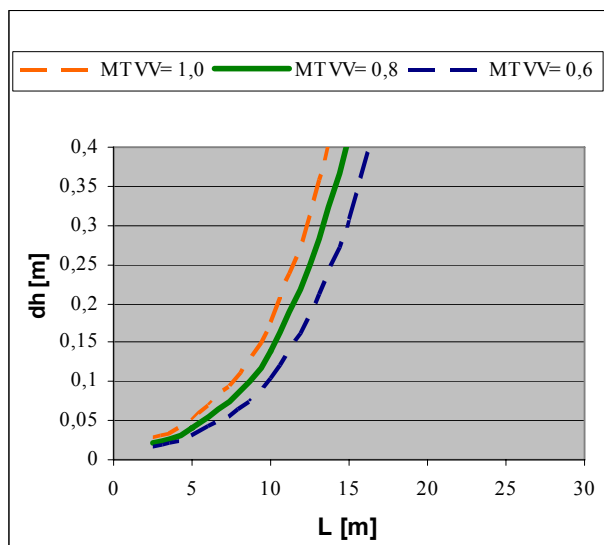
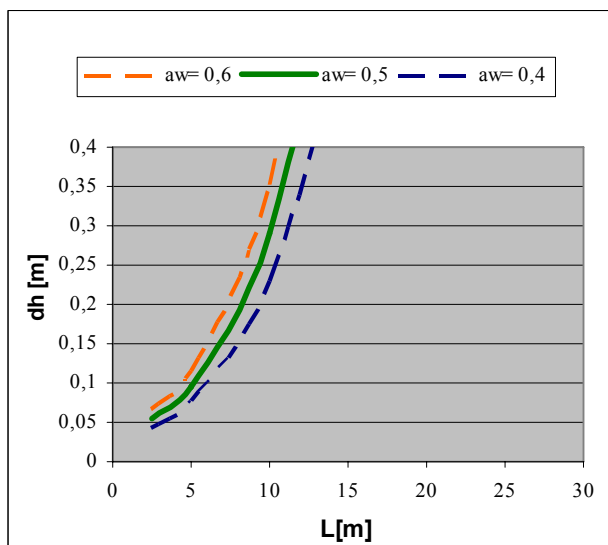
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s^2
 MTVV in m/s^2
 dh in m
 A en C in $1/\text{s}^2$
 B en D in m/s^2

Tabel VII-2: constante tbv Vergelijking VII-1

L [m]	a_w [m/s^2]		MTVV [m/s^2]	
	A	B	C	D
2,5	8,80	0,02	34,92	0,04
5	5,06	0,02	20,05	-0,01
10	1,61	0,03	5,48	0,04
15	0,59	0,04	1,84	0,04
20	0,26	0,05	0,77	0,05



Figuur VII-3 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 50 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VII.2.2 Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 80 km/h

Tabel VII-3 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,14	0,37
2,5	0,03	0,34	1,02
2,5	0,04	0,44	1,35
2,5	0,06	0,65	2,01
2,5	0,08	0,87	2,66

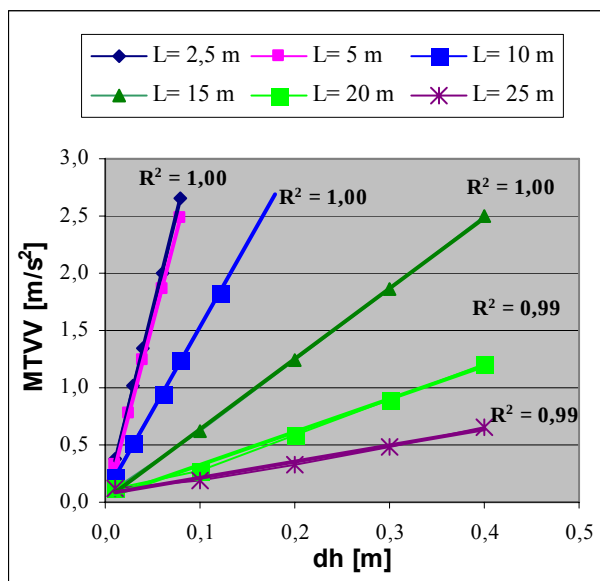
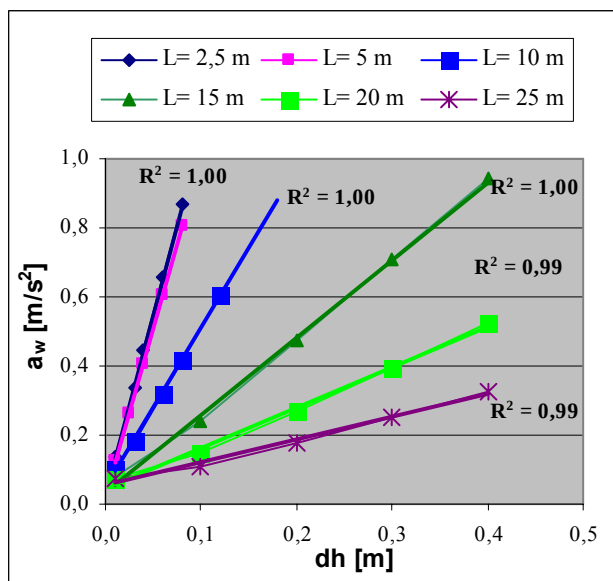
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,13	0,32
5	0,03	0,26	0,78
5	0,04	0,41	1,24
5	0,06	0,61	1,86
5	0,08	0,81	2,48

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,10	0,23
10	0,03	0,18	0,51
10	0,06	0,32	0,95
10	0,08	0,42	1,24
10	0,12	0,61	1,82

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,08	0,12
15	0,10	0,24	0,61
15	0,20	0,47	1,24
15	0,30	0,71	1,87
15	0,40	0,94	2,49

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,08	0,12
20	0,10	0,15	0,28
20	0,20	0,27	0,59
20	0,30	0,39	0,90
20	0,40	0,52	1,21

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,08	0,12
25	0,10	0,11	0,19
25	0,20	0,18	0,34
25	0,30	0,25	0,48
25	0,40	0,33	0,65



Figuur VII-4: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 80 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-4 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-2, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VI-4. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-5 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²).

Vergelijking VII-2

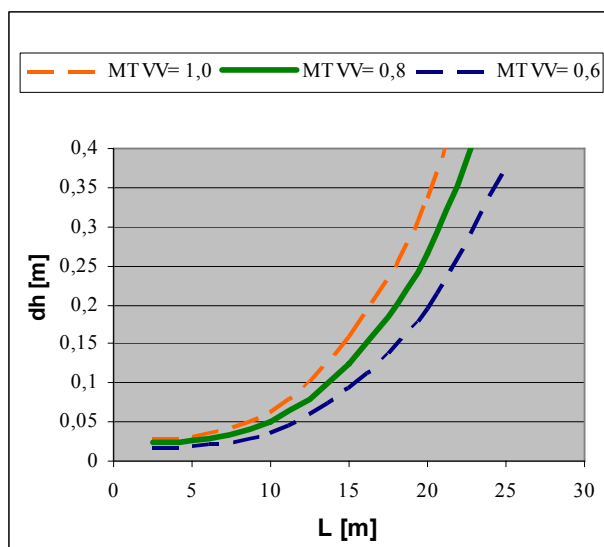
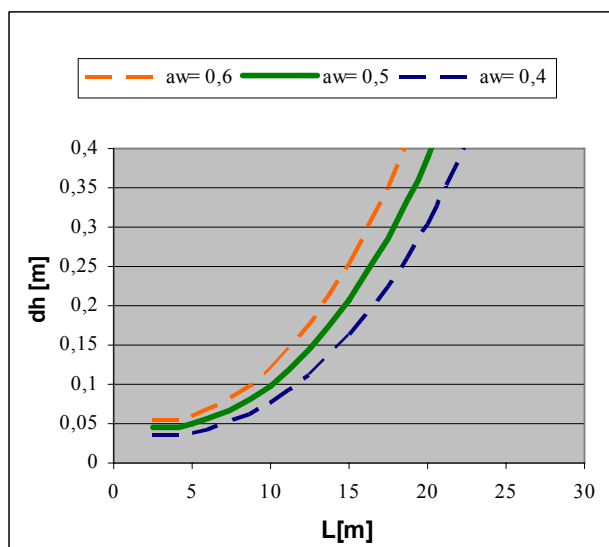
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel VII-4: constante tbv Vergelijking VII-2

L [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
2,5	10,43	0,03	32,77	0,04
5	9,78	0,02	30,84	0,01
10	4,62	0,05	14,55	0,08
15	2,24	0,03	6,11	0,03
20	1,17	0,05	2,84	0,05
25	0,66	0,06	1,38	0,08



Figuur VII-5 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 80 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VII.2.3 Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 100 km/h

Tabel VII-5 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,16	0,36
2,5	0,03	0,36	0,97
2,5	0,04	0,47	1,29
2,5	0,06	0,70	1,92
2,5	0,08	0,93	2,55

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,17	0,39
5	0,03	0,40	1,09
5	0,04	0,53	1,44
5	0,06	0,79	2,16
5	0,08	1,04	2,87

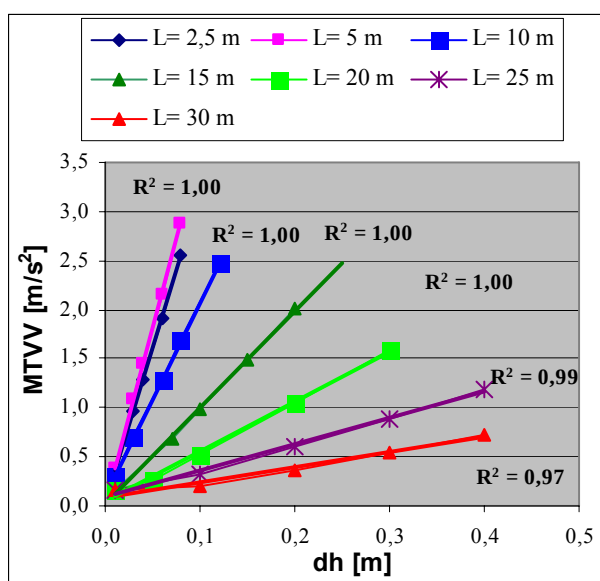
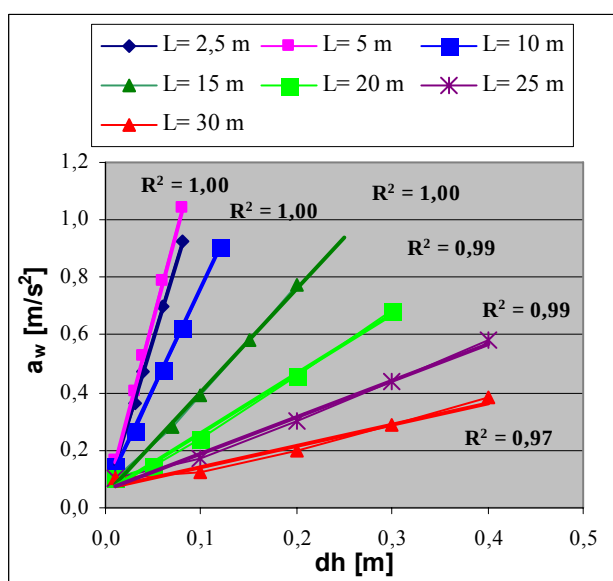
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,14	0,31
10	0,03	0,27	0,70
10	0,06	0,48	1,29
10	0,08	0,62	1,69
10	0,12	0,91	2,48

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,11	0,16
15	0,07	0,28	0,69
15	0,10	0,39	0,99
15	0,15	0,58	1,50
15	0,20	0,78	2,01

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,10	0,16
20	0,05	0,15	0,26
20	0,10	0,24	0,52
20	0,20	0,46	1,05
20	0,30	0,69	1,58

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,10	0,16
25	0,10	0,17	0,32
25	0,20	0,30	0,59
25	0,30	0,44	0,89
25	0,40	0,58	1,20

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
30	0,01	0,10	0,16
30	0,10	0,13	0,21
30	0,20	0,20	0,36
30	0,30	0,29	0,55
30	0,40	0,38	0,73



Figuur VII-6: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-6 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-3, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-6. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-7 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van $0,4 \text{ m/s}^2$, $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,6 \text{ m/s}^2$ en MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$).

Vergelijking VII-3

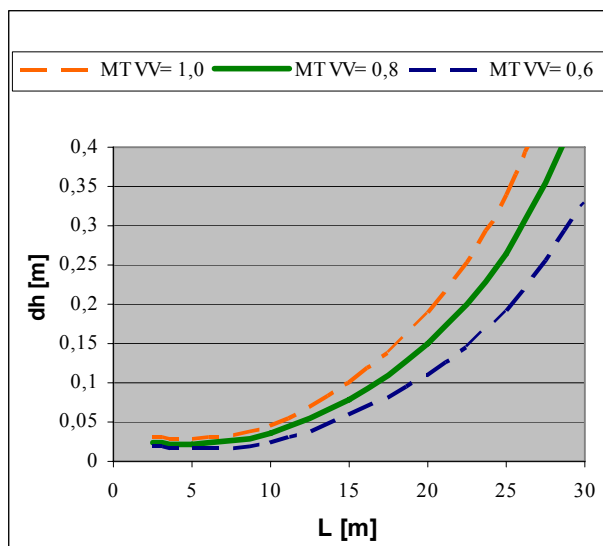
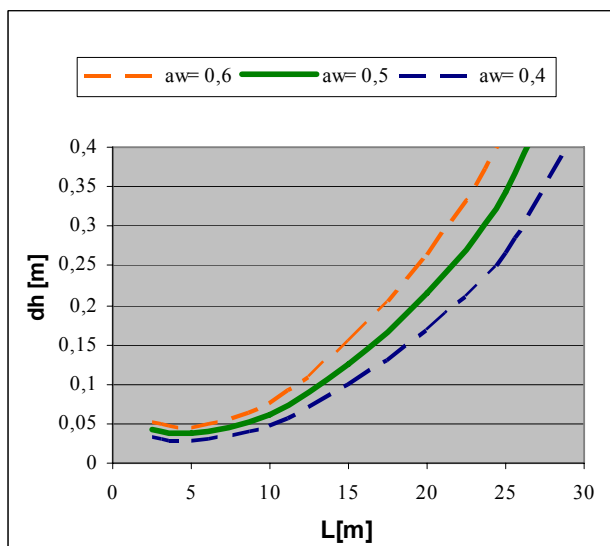
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s^2
 MTVV in m/s^2
 dh in m
 A en C in $1/\text{s}^2$
 B en D in m/s^2

Tabel VII-6: constante tbv Vergelijking VII-3

L [m]	a_w [m/s^2]		MTVV [m/s^2]	
	A	B	C	D
2,5	11,01	0,04	31,28	0,04
5	12,56	0,03	35,50	0,03
10	6,96	0,07	19,76	0,11
15	3,57	0,05	9,79	0,03
20	2,07	0,05	5,04	0,05
25	1,26	0,07	2,71	0,09
30	0,74	0,07	1,53	0,09



Figuur VII-7 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VII.2.4 Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 120 km/h

Tabel VII-7 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,19	0,38
2,5	0,03	0,35	0,83
2,5	0,04	0,53	1,31
2,5	0,06	0,78	1,95
2,5	0,08	1,03	2,58

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,21	0,44
5	0,03	0,49	1,21
5	0,04	0,64	1,60
5	0,06	0,95	2,38
5	0,08	1,26	3,17

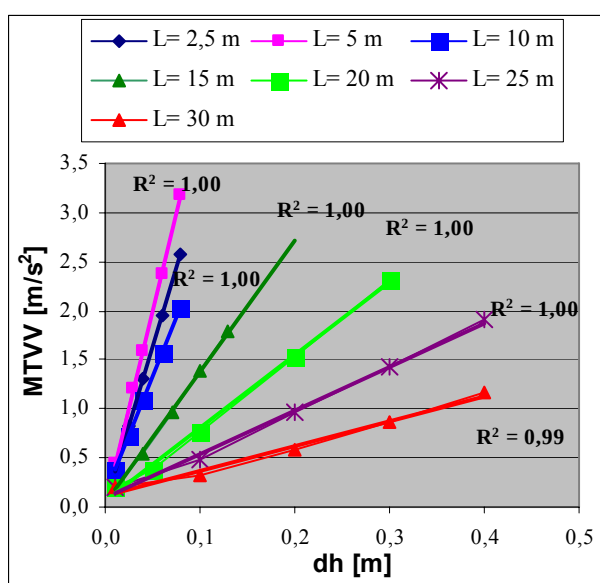
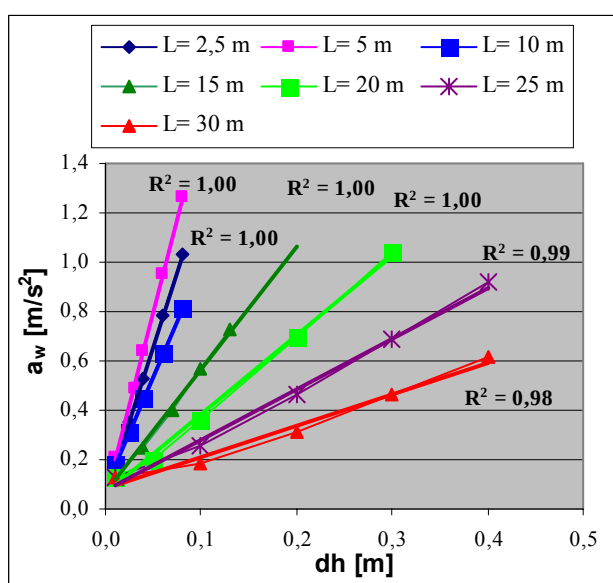
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,19	0,38
10	0,03	0,31	0,73
10	0,04	0,44	1,08
10	0,06	0,63	1,56
10	0,08	0,82	2,04

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,14	0,20
15	0,04	0,25	0,55
15	0,07	0,40	0,96
15	0,10	0,57	1,38
15	0,13	0,73	1,80

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,13	0,20
20	0,05	0,20	0,39
20	0,10	0,36	0,76
20	0,20	0,69	1,54
20	0,30	1,04	2,31

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,13	0,20
25	0,10	0,25	0,49
25	0,20	0,47	0,96
25	0,30	0,69	1,43
25	0,40	0,92	1,91

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
30	0,01	0,13	0,20
30	0,10	0,18	0,32
30	0,20	0,31	0,59
30	0,30	0,46	0,87
30	0,40	0,62	1,17



Figuur VII-8: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 120 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-8 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-4, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-8. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-9 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²).

Vergelijking VII-4

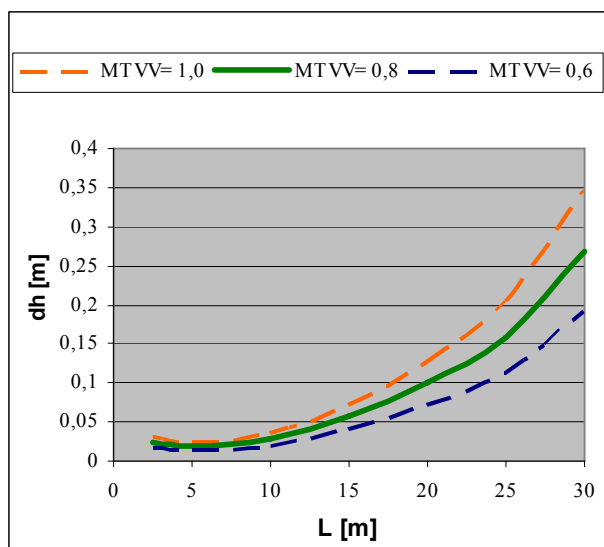
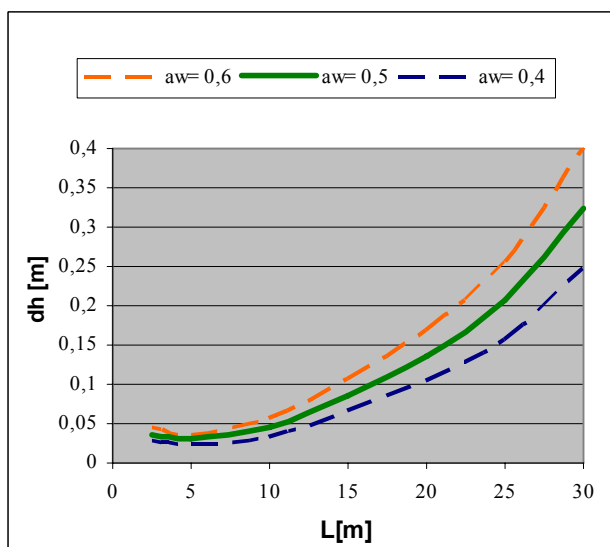
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel VII-8: constante tbv Vergelijking VII-4

L [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
2,5	12,13	0,05	31,61	0,05
5	15,13	0,05	39,08	0,04
10	9,03	0,09	23,75	0,14
15	5,00	0,07	13,42	0,04
20	3,20	0,06	7,43	0,06
25	2,05	0,08	4,46	0,10
30	1,28	0,08	2,55	0,12



Figuur VII-9 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 120 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VII.3 Uitvoer reeks onvlakheden

VII.3.1 Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 50 km/h

Tabel VII-9 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

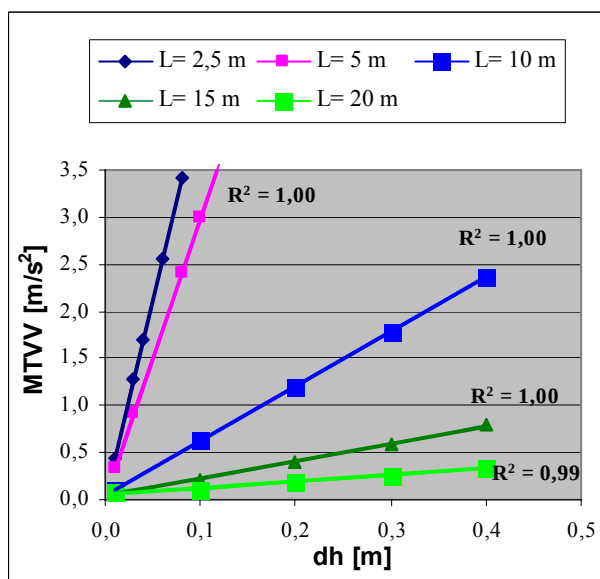
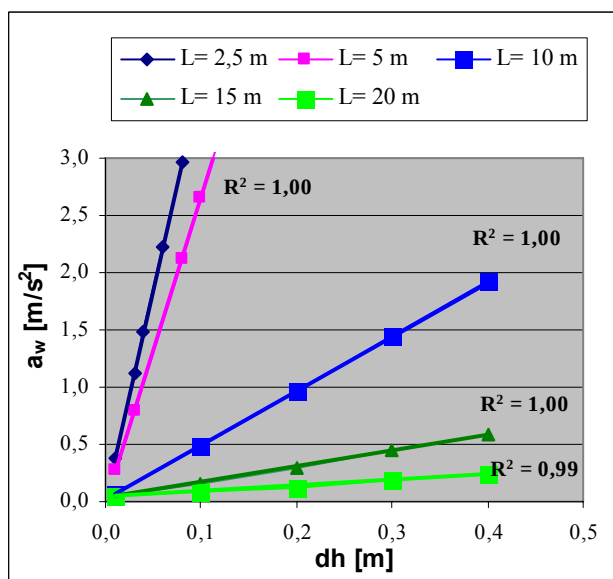
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,376	0,436
2,5	0,03	1,116	1,281
2,5	0,04	1,487	1,708
2,5	0,06	2,229	2,561
2,5	0,08	2,971	3,415

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,27	0,33
5	0,03	0,80	0,92
5	0,08	2,12	2,40
5	0,10	2,65	3,00
5	0,12	3,18	3,59

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,07	0,10
10	0,10	0,48	0,62
10	0,20	0,96	1,20
10	0,30	1,44	1,79
10	0,40	1,93	2,37

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,06	0,08
15	0,10	0,16	0,20
15	0,20	0,30	0,39
15	0,30	0,44	0,59
15	0,40	0,59	0,79

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,06	0,08
20	0,10	0,08	0,11
20	0,20	0,13	0,18
20	0,30	0,18	0,25
20	0,40	0,24	0,34



Figuur VII-10: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 50 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-10 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-5, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-10. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-11 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van $0,4 \text{ m/s}^2$, $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,6 \text{ m/s}^2$ en MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$).

Vergelijking VII-5

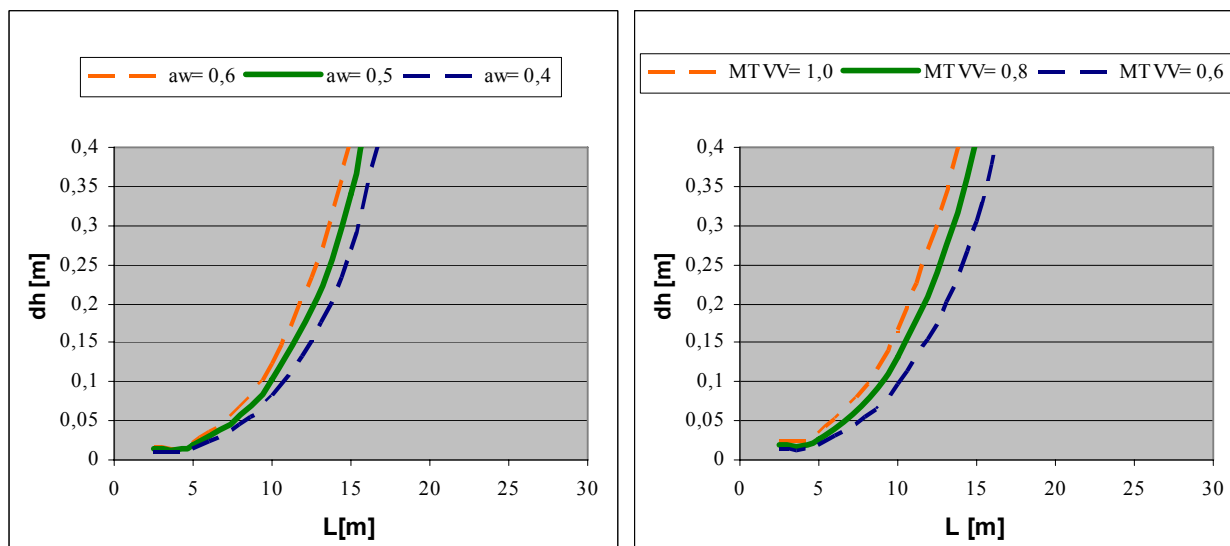
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s^2
 MTVV in m/s^2
 dh in m
 A en C in $1/\text{s}^2$
 B en D in m/s^2

Tabel VII-10: constante tbv Vergelijking VII-5

L [m]	a_w [m/s^2]		MTVV [m/s^2]	
	A	B	C	D
2,5	37,09	0,00	42,58	0,01
5	26,51	0,00	29,69	0,03
10	4,77	0,01	5,82	0,04
15	1,38	0,03	1,84	0,04
20	0,49	0,04	0,68	0,05



Figuur VII-11 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 50 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VII.3.2 Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 80 km/h

Tabel VII-11 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,35	0,36
2,5	0,03	1,02	1,04
2,5	0,04	1,35	1,38
2,5	0,06	2,03	2,06
2,5	0,08	2,70	2,75

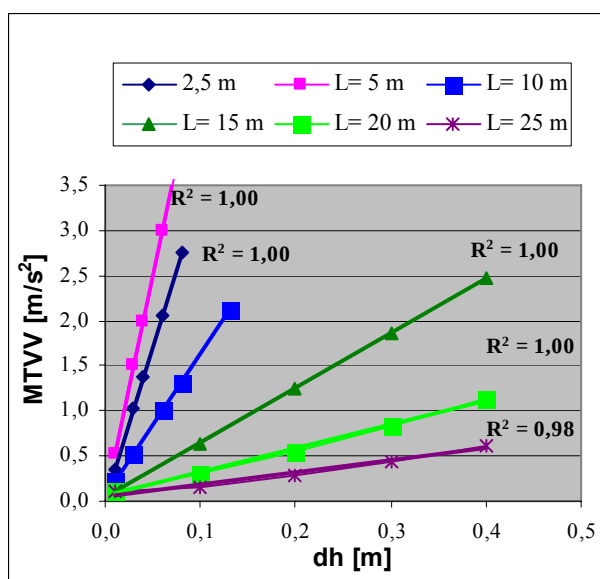
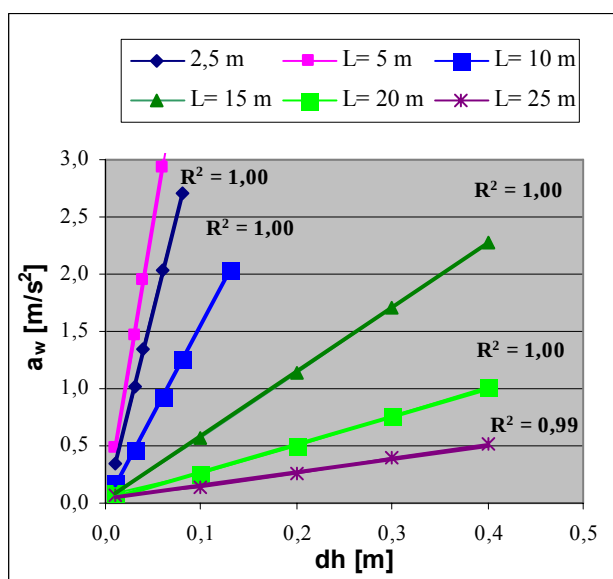
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,49	0,53
5	0,03	1,46	1,51
5	0,04	1,95	2,00
5	0,06	2,93	2,99
5	0,08	3,91	3,99

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,16	0,22
10	0,03	0,47	0,53
10	0,06	0,94	1,00
10	0,08	1,25	1,32
10	0,13	2,04	2,12

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,09	0,13
15	0,10	0,57	0,64
15	0,20	1,14	1,25
15	0,30	1,71	1,86
15	0,40	2,28	2,48

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,08	0,12
20	0,10	0,26	0,30
20	0,20	0,50	0,55
20	0,30	0,76	0,84
20	0,40	1,01	1,13

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,08	0,11
25	0,10	0,14	0,16
25	0,20	0,26	0,29
25	0,30	0,39	0,45
25	0,40	0,52	0,60



Figuur VII-12: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 80 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-12 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-6, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-12. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-13 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²).

Vergelijking VII-6

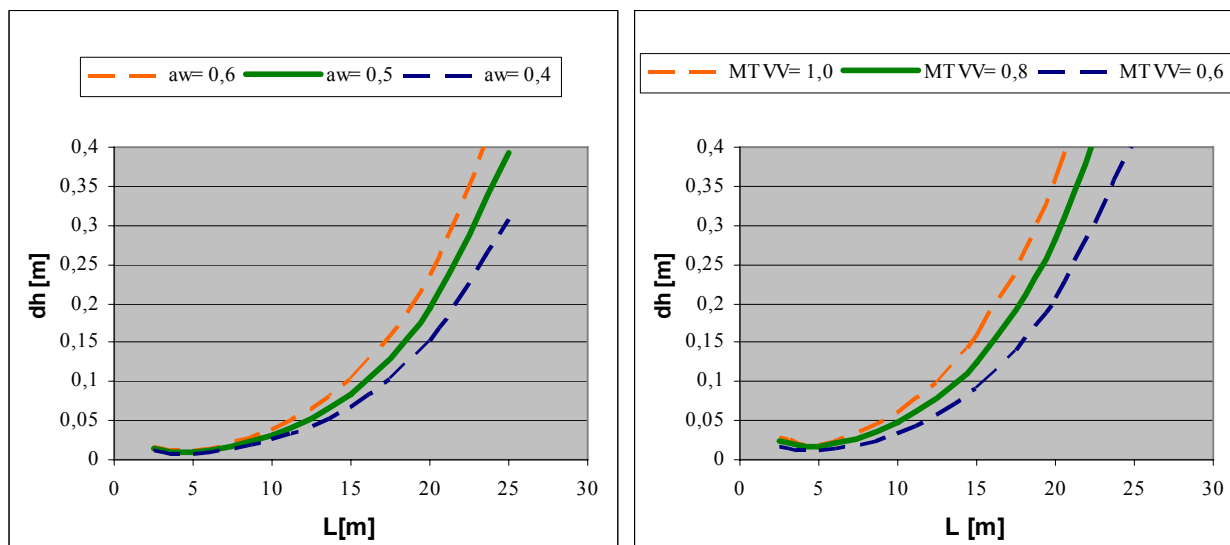
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel VII-12: constante tbv Vergelijking VII-6

L [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
2,5	33,66	0,01	34,15	0,01
5	48,91	0,00	49,48	0,03
10	15,68	0,00	15,86	0,05
15	5,62	0,02	6,05	0,05
20	2,41	0,03	2,63	0,06
25	1,15	0,05	1,31	0,06



Figuur VII-13 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 80 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VII.3.3 Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 100 km/h

Tabel VII-13 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,50	0,01	0,21	0,30
2,50	0,03	0,56	0,76
2,50	0,04	0,74	1,00
2,50	0,06	1,10	1,48
2,50	0,08	1,47	1,97

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5,00	0,01	0,64	0,76
5,00	0,03	1,92	2,18
5,00	0,04	2,57	2,90
5,00	0,06	3,85	4,33
5,00	0,08	5,14	5,76

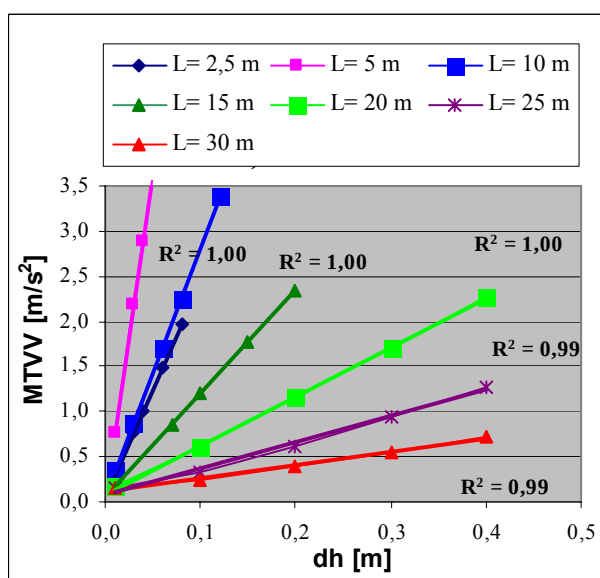
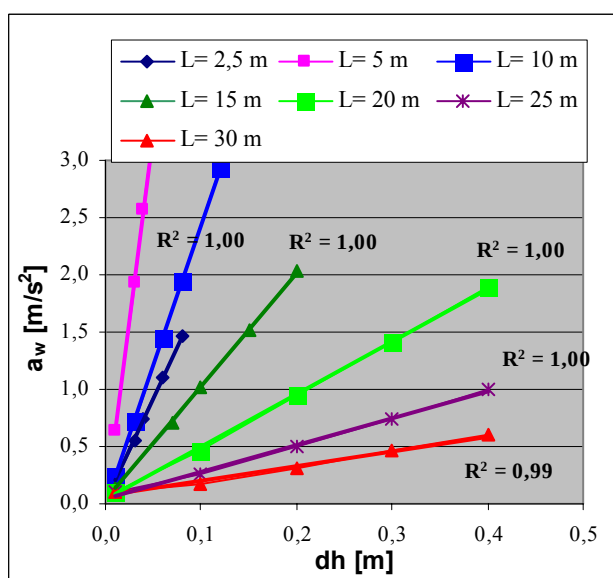
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10,00	0,01	0,25	0,35
10,00	0,03	0,72	0,88
10,00	0,06	1,46	1,70
10,00	0,08	1,94	2,26
10,00	0,12	2,92	3,38

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15,00	0,01	0,14	0,20
15,00	0,07	0,71	0,85
15,00	0,10	1,02	1,19
15,00	0,15	1,52	1,77
15,00	0,20	2,03	2,35

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20,00	0,01	0,11	0,17
20,00	0,10	0,47	0,60
20,00	0,20	0,94	1,16
20,00	0,30	1,42	1,72
20,00	0,40	1,89	2,28

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25,00	0,01	0,10	0,15
25,00	0,10	0,26	0,32
25,00	0,20	0,50	0,62
25,00	0,30	0,75	0,94
25,00	0,40	1,00	1,27

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
30,00	0,01	0,10	0,16
30,00	0,10	0,18	0,25
30,00	0,20	0,31	0,39
30,00	0,30	0,46	0,54
30,00	0,40	0,61	0,73



Figuur VII-14: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-14 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-7, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-14. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-15 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van $0,4 \text{ m/s}^2$, $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,6 \text{ m/s}^2$ en MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$).

Vergelijking VII-7

$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s^2

MTVV in m/s^2

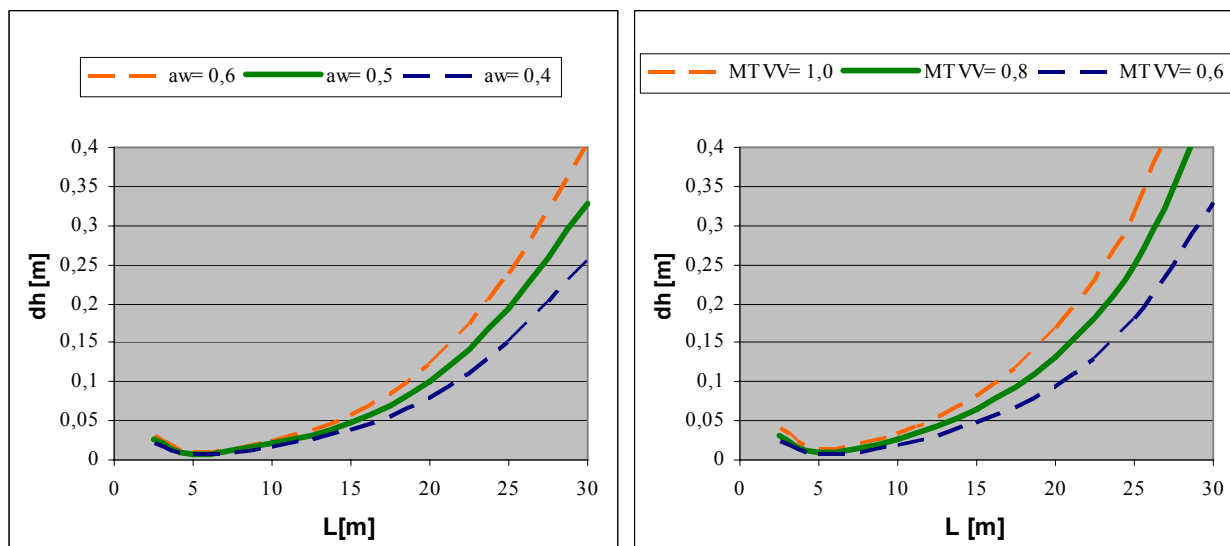
dh in m

A en C in $1/\text{s}^2$

B en D in m/s^2

Tabel VII-14: constante tbv Vergelijking VII-7

L [m]	$a_w [\text{m/s}^2]$		MTVV $[\text{m/s}^2]$	
	A	B	C	D
2,5	17,96	0,03	23,87	0,05
5	64,23	0,00	71,55	0,04
10	24,33	0,00	27,58	0,06
15	9,94	0,03	11,36	0,07
20	4,61	0,03	5,44	0,09
25	2,33	0,05	2,91	0,07
30	1,31	0,07	1,46	0,12



Figuur VII-15 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VII.3.4 Resultaten van een reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 120 km/h

Tabel VII-15 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,20	0,30
2,5	0,03	0,44	0,69
2,5	0,04	0,57	0,89
2,5	0,06	0,83	1,31
2,5	0,08	1,10	1,73

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,81	0,95
5	0,03	2,44	2,75
5	0,04	3,25	3,66
5	0,06	4,88	5,47
5	0,08	6,50	7,28

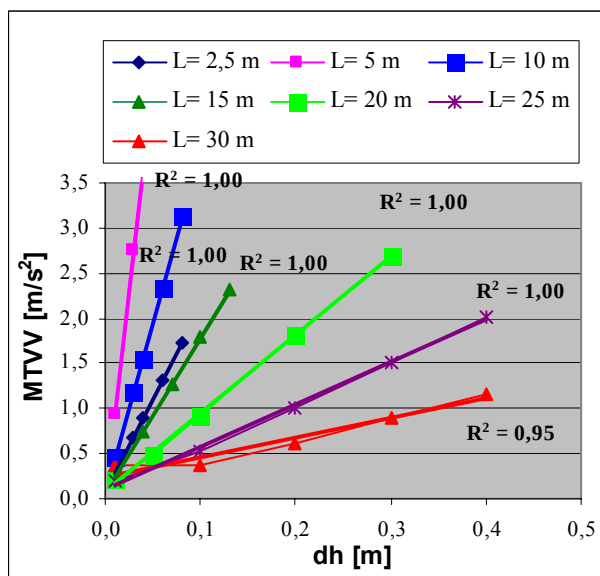
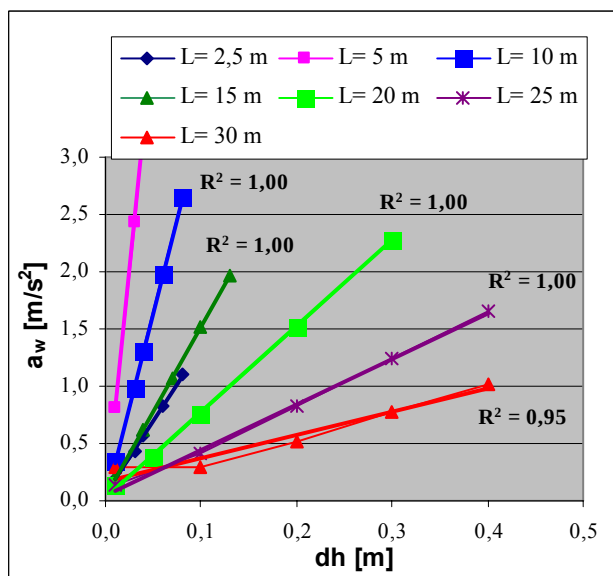
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,34	0,46
10	0,03	0,99	1,18
10	0,04	1,32	1,55
10	0,06	1,98	2,34
10	0,08	2,65	3,13

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,20	0,27
15	0,04	0,62	0,75
15	0,07	1,06	1,26
15	0,10	1,51	1,79
15	0,13	1,96	2,32

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,14	0,22
20	0,05	0,38	0,49
20	0,10	0,75	0,92
20	0,20	1,52	1,81
20	0,30	2,28	2,70

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,13	0,19
25	0,10	0,42	0,52
25	0,20	0,83	1,01
25	0,30	1,24	1,51
25	0,40	1,66	2,01

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
30	0,01	0,28	0,37
30	0,10	0,28	0,37
30	0,20	0,52	0,62
30	0,30	0,77	0,89
30	0,40	1,02	1,16



Figuur VII-16: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 120 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VII-16 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VII-8, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-16. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-17 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van $0,4 \text{ m/s}^2$, $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,6 \text{ m/s}^2$ en MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$).

Vergelijking VII-8

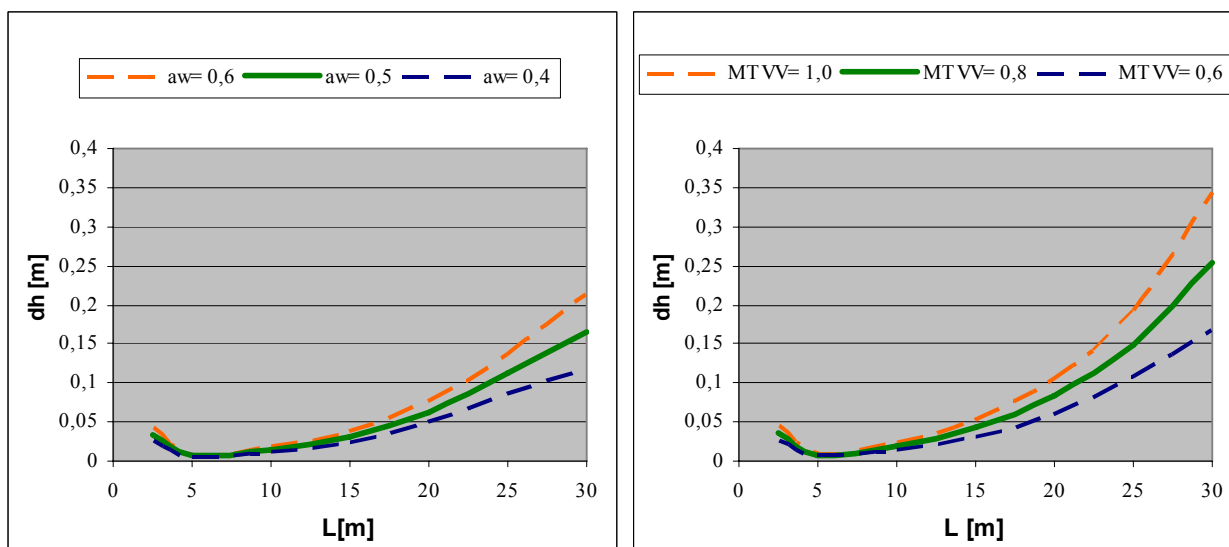
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s^2
 MTVV in m/s^2
 dh in m
 A en C in $1/\text{s}^2$
 B en D in m/s^2

Tabel VII-16: constante tbv Vergelijking VII-8

L [m]	a_w [m/s^2]		MTVV [m/s^2]	
	A	B	C	D
2,5	12,95	0,05	20,53	0,08
5	81,29	0,00	90,41	0,04
10	33,05	0,00	38,17	0,05
15	14,76	0,04	17,15	0,08
20	7,47	0,03	8,66	0,08
25	3,97	0,05	4,72	0,10
30	2,01	0,17	2,16	0,24

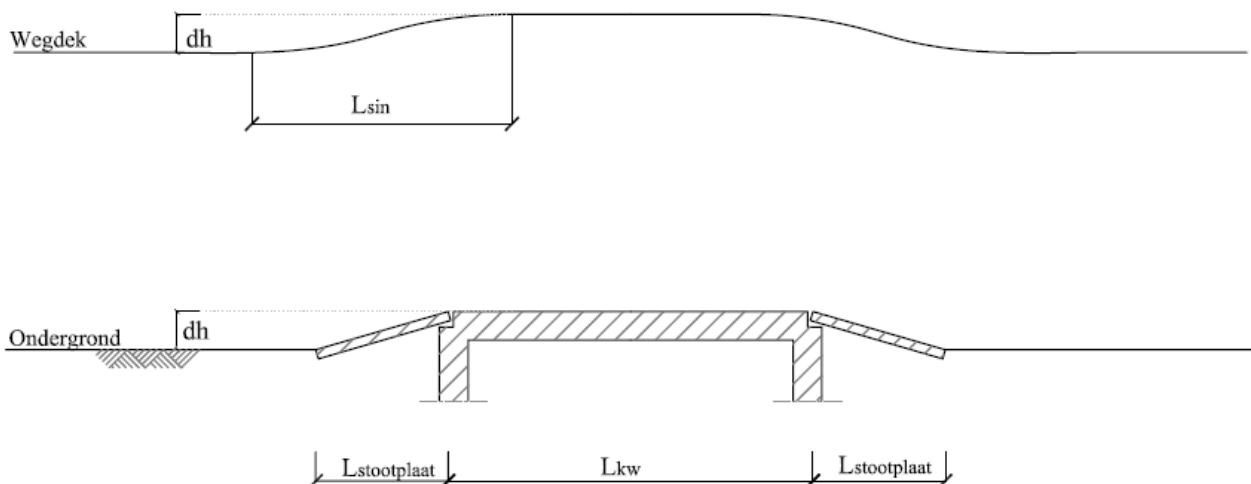


Figuur VII-17 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 120 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VIII Uitwerkingen van kunstwerk onderzoek

VIII.1 Modelleren van een zettingsvrije constructie

Het profiel van het wegdek komt niet overeen met het zettingsprofiel dat de stootplaat ondergaat. Om toch een goede aanbeveling te maken betreffende de zettingen rond een kunstwerk gerelateerd aan het wegprofiel dienen hier een aantal aannames gemaakt te worden. De gehele situatie is weergegeven in Figuur VIII-1, hieruit volgen de benodigde parameters ($L_{\text{stootplaat}}$, dh) om een aanbeveling te maken.



Figuur VIII-1 : overzicht van het zettingsvrije kunstwerk

In het figuur is duidelijk het verschil tussen de zetting van de stootplaat en het profiel van de weg zichtbaar, het profiel van de stootplaat is een rechte met scherpe hoeken en het profiel van het wegdek heeft meer een sinusvorm door de afrondingen. Al zal de afrondingen bij de aansluiting tussen de stootplaat en het kunstwerk minder zijn dan onderaan de stootplaten, maar voor dit onderzoek is er aangenomen dat het wegdek een sinusvormig profiel aan gaat nemen als de stootplaat gaat zetten.

Het dient hier wel de aanbeveling om de invloed hiervan nog verder te onderzoeken en te kijken wat het meest realistische is.

Als aanname wordt nu gedaan dat de absolute restzetting (dh) over de stootplaat gelijk is aan de absolute restzetting van het wegdek. Verder wordt er ook nog aangenomen dat de helling van de stootplaat gelijk is aan de maximale helling van het wegdek.

Als invoer voor het profiel wordt nu een sinus-vormige helling genomen met een bepaalde lengte (L_{sin}) en een bepaalde hoogte (dh), zie Vergelijking VIII-1.

Vergelijking VIII-1

$$P.rofile = \frac{1}{2} * dh * \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi * x}{2 * L_{\text{sin}}}\right) \right)$$

In Vergelijking VIII-2 is weergegeven hoe de gegevens van de stootplaat nu bepaalt kunnen worden uit een zeker sinusvormig wegprofiel, als er gebruik gemaakt wordt van de aannames.

Vergelijking VIII-2

$$(1): dh_{\text{stootplaat}} = dh_{\text{wegdek}}$$

$$(2): \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{\text{stootplaat}} = \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{\text{wegdek, max}} = \frac{1}{2} * dh * \left(\frac{2\pi}{2 * L_{\text{sin}}} \right) = \frac{dh * \pi}{2 * L_{\text{sin}}}$$

$$\text{dan geldt: } L_{\text{stootplaat}} = \frac{\text{absolute_restzetting}}{\text{helling_stootplaat}} = \frac{dh}{\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{\text{stootplaat}}} = \frac{2}{\pi} * L_{\text{sin}}$$

VIII.2 Een enkele stootplaat

VIII.2.1 Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 50 km/h

Tabel VIII-1 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
1	0,64	0,01	0,25
1	0,64	0,03	0,74
1	0,64	0,05	1,23
1	0,64	0,08	1,97

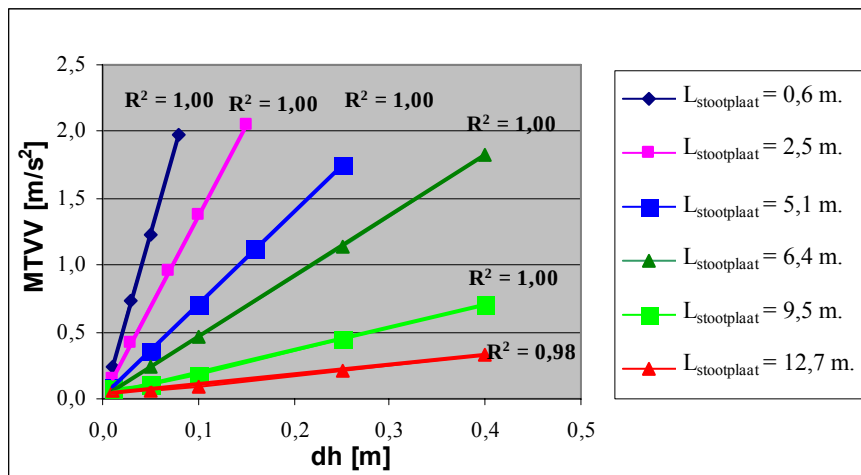
L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
4	2,55	0,01	0,15
4	2,55	0,03	0,42
4	2,55	0,07	0,96
4	2,55	0,10	1,37
4	2,55	0,15	2,05

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
8	5,09	0,01	0,08
8	5,09	0,05	0,36
8	5,09	0,10	0,71
8	5,09	0,16	1,13
8	5,09	0,25	1,75

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
10	6,37	0,01	0,06
10	6,37	0,05	0,23
10	6,37	0,10	0,46
10	6,37	0,25	1,14
10	6,37	0,40	1,83

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
15	9,55	0,01	0,07
15	9,55	0,05	0,10
15	9,55	0,10	0,18
15	9,55	0,25	0,45
15	9,55	0,40	0,71

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
20	12,73	0,01	0,06
20	12,73	0,05	0,06
20	12,73	0,10	0,09
20	12,73	0,25	0,21
20	12,73	0,40	0,33



Figuur VIII-2: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 50 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-2 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameter (MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde stootplaatengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-3, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VII-2. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VIII-3 gedaan voor verschillende grenswaarden (MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²).

Vergelijking VIII-3

$$MTVV = C * dh + D$$

Met MTVV in m/s²

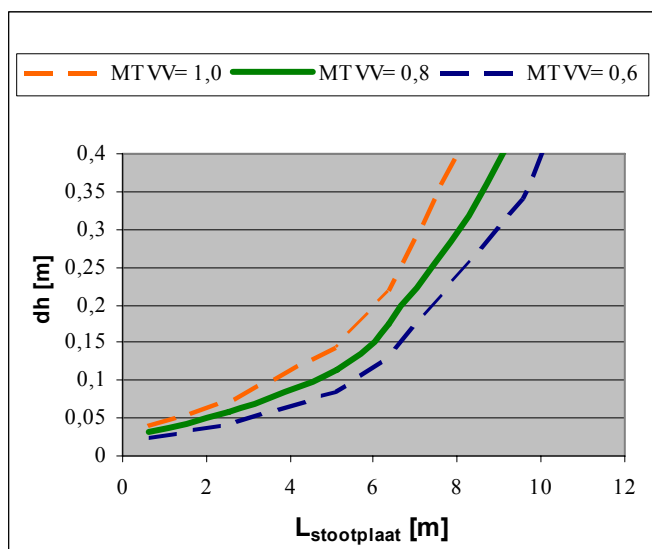
dh in m

C in 1/s²

D in m/s²

Tabel VIII-2: constante tbv Vergelijking VIII-3

L _{stootplaat} [m]	MTVV [m/s ²]	
	C	D
0,64	24,68	0,00
2,55	13,63	0,01
5,09	6,95	0,01
6,37	4,53	0,01
9,55	1,68	0,03
12,73	0,73	0,03



Figuur VIII-3 ontwerpgrafieken voor een enkele stootplaat bij een snelheid van 50 km/h bij een bepaalde MTVV grens

VIII.2.2 Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 80 km/h

Tabel VIII-3 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
1	0,64	0,01	0,25
1	0,64	0,03	0,69
1	0,64	0,05	1,14
1	0,64	0,08	1,71
1	0,64	0,10	2,27

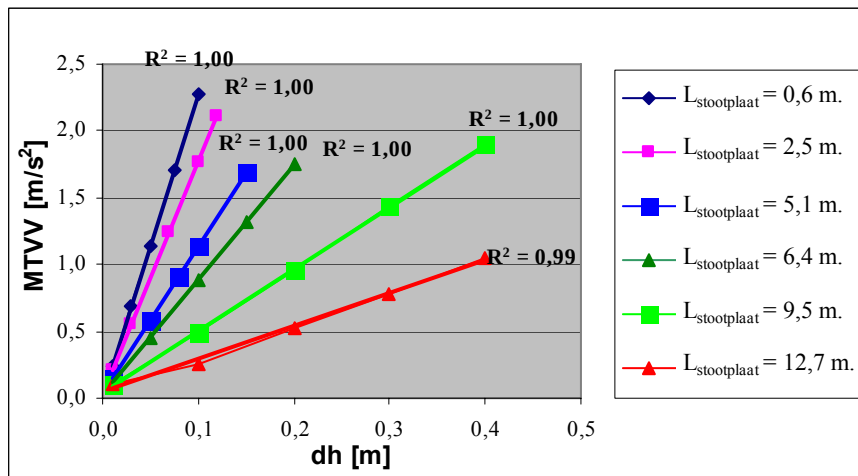
L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
4	2,55	0,01	0,21
4	2,55	0,03	0,55
4	2,55	0,07	1,24
4	2,55	0,10	1,77
4	2,55	0,12	2,12

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
8	5,09	0,01	0,15
8	5,09	0,05	0,58
8	5,09	0,08	0,91
8	5,09	0,10	1,14
8	5,09	0,15	1,69

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
10	6,37	0,01	0,12
10	6,37	0,05	0,45
10	6,37	0,10	0,88
10	6,37	0,15	1,32
10	6,37	0,20	1,75

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
15	9,55	0,01	0,11
15	9,55	0,10	0,49
15	9,55	0,20	0,96
15	9,55	0,30	1,43
15	9,55	0,40	1,90

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
20	12,73	0,01	0,11
20	12,73	0,10	0,26
20	12,73	0,20	0,52
20	12,73	0,30	0,78
20	12,73	0,40	1,04



Figuur VIII-4: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 80 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-4 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameter (MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde stootplaatengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-4, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-4. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VIII-5 gedaan voor verschillende grenswaarden (MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$).

Vergelijking VIII-4

$$MTVV = C * dh + D$$

Met MTVV in m/s^2

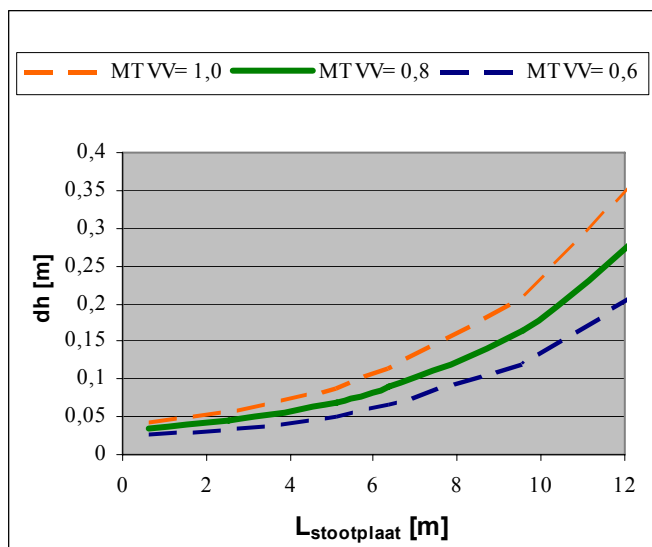
dh in m

C in $1/\text{s}^2$

D in m/s^2

Tabel VIII-4: constante tbv Vergelijking VIII-4

L _{stootplaat} [m]	MTVV [m/s^2]	
	C	D
0,64	22,54	0,02
2,55	17,38	0,03
5,09	11,02	0,03
6,37	8,57	0,03
9,55	4,61	0,05
12,73	2,44	0,05



Figuur VIII-5 ontwerpgrafieken voor een enkele stootplaat bij een snelheid van 80 km/h bij een bepaalde MTVV grens

VIII.2.3 Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 100 km/h

Tabel VIII-5 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
1	0,64	0,01	0,29
1	0,64	0,03	0,78
1	0,64	0,05	1,29
1	0,64	0,08	1,93
1	0,64	0,10	2,57

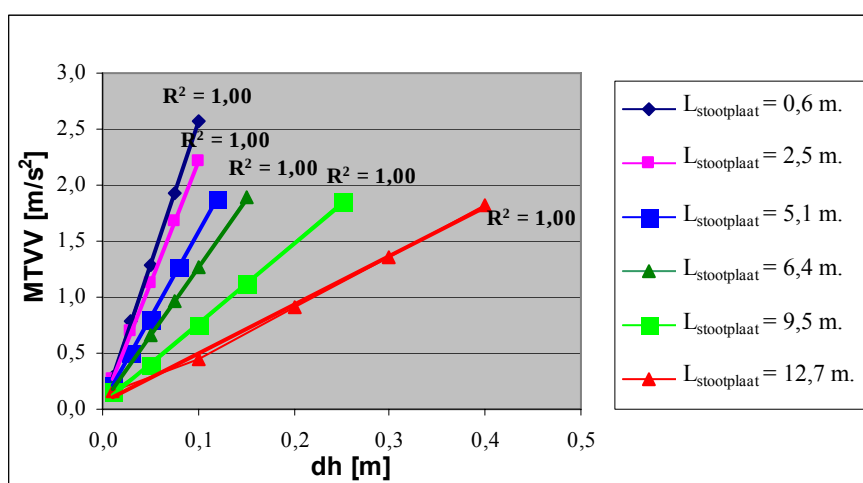
L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
4	2,55	0,01	0,27
4	2,55	0,03	0,69
4	2,55	0,05	1,13
4	2,55	0,08	1,68
4	2,55	0,10	2,22

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
8	5,09	0,01	0,22
8	5,09	0,03	0,50
8	5,09	0,05	0,81
8	5,09	0,08	1,27
8	5,09	0,12	1,88

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
10	6,37	0,01	0,19
10	6,37	0,05	0,66
10	6,37	0,08	0,96
10	6,37	0,10	1,27
10	6,37	0,15	1,89

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
15	9,55	0,01	0,16
15	9,55	0,05	0,40
15	9,55	0,10	0,76
15	9,55	0,15	1,12
15	9,55	0,25	1,86

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
20	12,73	0,01	0,16
20	12,73	0,10	0,45
20	12,73	0,20	0,91
20	12,73	0,30	1,36
20	12,73	0,40	1,82



Figuur VIII-6: Grafische weergave van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-6 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameter (MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde stootplaatengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-5, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-6. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VIII-7 gedaan voor verschillende grenswaarden (MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$). Uit deze ontwerpgrafieken kunnen de toegestane zettingsverschillen bepaald worden over de verschillende stootplaat lengten en bij een bepaald MTVV grens.

Vergelijking VIII-5

$$MTVV = C * dh + D$$

Met MTVV in m/s^2

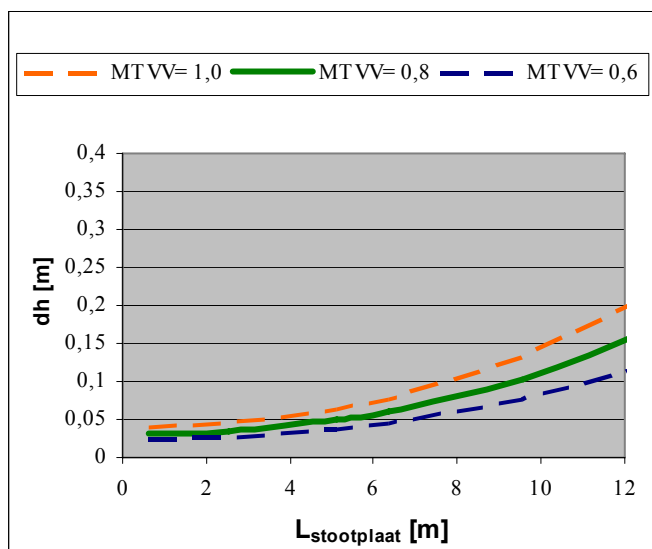
dh in m

C in $1/\text{s}^2$

D in m/s^2

Tabel VIII-6: constante tbv Vergelijking VIII-5

L _{stootplaat} [m]	MTVV [m/s^2]	
	C	D
0,64	25,33	0,03
2,55	21,70	0,05
5,09	15,13	0,06
6,37	12,16	0,06
9,55	7,14	0,06
12,73	4,33	0,06



Figuur VIII-7 ontwerpgrafieken voor een enkele stootplaat bij een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde MTVV grens

VIII.2.4 Resultaten bij een enkele stootplaat en een voertuigsnelheid van 120 km/h

Tabel VIII-7 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
1	0,64	0,01	0,32
1	0,64	0,03	0,84
1	0,64	0,05	1,38
1	0,64	0,06	1,65
1	0,64	0,08	2,19

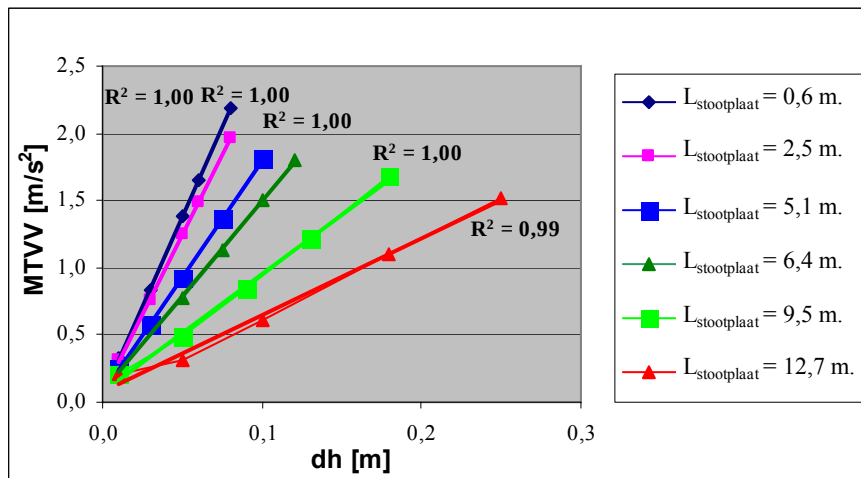
L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
4	2,55	0,01	0,31
4	2,55	0,03	0,77
4	2,55	0,05	1,25
4	2,55	0,06	1,49
4	2,55	0,08	1,97

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
8	5,09	0,01	0,26
8	5,09	0,03	0,58
8	5,09	0,05	0,93
8	5,09	0,08	1,37
8	5,09	0,10	1,81

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
10	6,37	0,01	0,23
10	6,37	0,05	0,77
10	6,37	0,08	1,14
10	6,37	0,10	1,50
10	6,37	0,12	1,79

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
15	9,55	0,01	0,20
15	9,55	0,05	0,50
15	9,55	0,09	0,85
15	9,55	0,13	1,22
15	9,55	0,18	1,68

L_{sin} [m]	$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	dh [m]	MTVV [m/s^2]
20	12,73	0,01	0,20
20	12,73	0,05	0,32
20	12,73	0,10	0,61
20	12,73	0,18	1,10
20	12,73	0,25	1,53



Figuur VIII-8: Grafische weergave van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 120 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-8 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameter (MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde stootplaatengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-6, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-8. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VIII-9 gedaan voor verschillende grenswaarden (MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$). Uit deze ontwerpgrafieken kunnen de toegestane zettingsverschillen bepaald worden over de verschillende stootplaat lengten en bij een bepaald MTVV grens.

Vergelijking VIII-6

$$MTVV = C * dh + D$$

Met MTVV in m/s^2

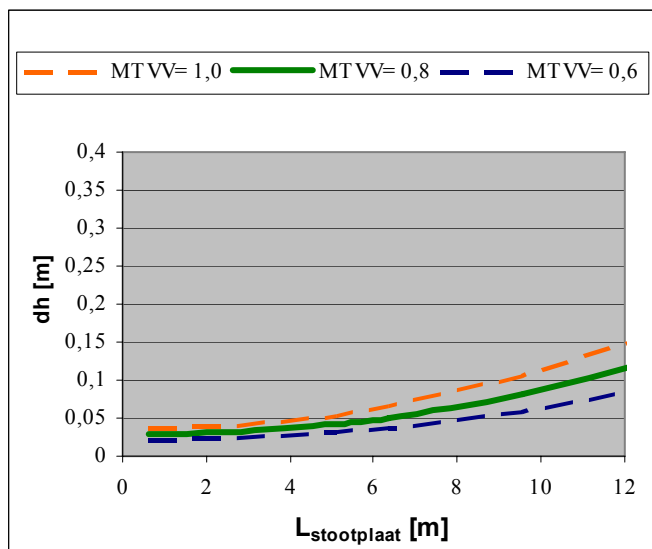
dh in m

C in $1/\text{s}^2$

D in m/s^2

Tabel VIII-8: constante tbv Vergelijking VIII-6

L _{stootplaat} [m]	MTVV [m/s^2]	
	C	D
0,64	26,77	0,04
2,55	23,76	0,06
5,09	17,37	0,07
6,37	14,26	0,08
9,55	8,75	0,08
12,73	5,68	0,08



Figuur VIII-9 ontwerpgrafieken voor een enkele stootplaat bij een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde MTVV grens

VIII.3 Lengte van het kunstwerk

Om te kijken wat de invloed van de lengte van het kunstwerk (L_{kw}) op de comfortparameters is zijn er ontwerpgrafieken voor verschillende L_{kw} samengesteld. Hierbij is alleen gekeken bij een voertuig snelheid van 100 km/h.

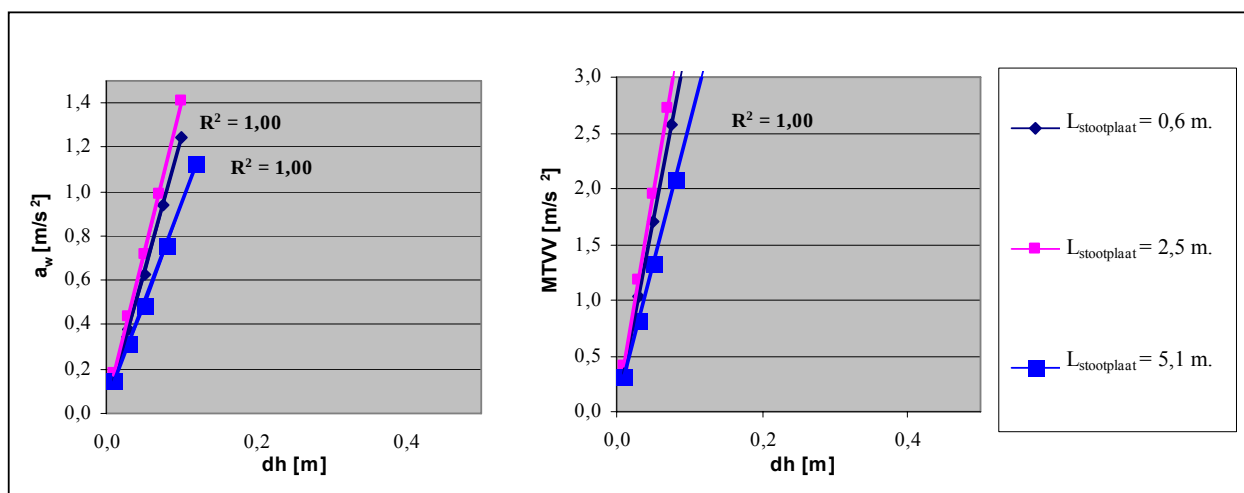
VIII.3.1 Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 3 meter

Tabel VIII-9 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
1	0,64	0,01	0,16	0,35
1	0,64	0,03	0,38	1,02
1	0,64	0,05	0,63	1,71
1	0,64	0,08	0,94	2,57
1	0,64	0,10	1,25	3,43

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
4	2,55	0,01	0,18	0,42
4	2,55	0,03	0,44	1,18
4	2,55	0,05	0,71	1,95
4	2,55	0,07	0,99	2,73
4	2,55	0,10	1,41	3,89

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
8	5,09	0,01	0,15	0,31
8	5,09	0,03	0,31	0,81
8	5,09	0,05	0,49	1,32
8	5,09	0,08	0,76	2,08
8	5,09	0,12	1,13	3,10



Figuur VIII-10: Grafische weergaven van de resultaten bij een kunstwerk met een lengte (L_{kw}) van 3 meter en een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-10 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-7, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-10. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VIII-11 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²). Uit deze ontwerpgrafieken kunnen de toegestane zettingsverschillen bepaald worden over de verschillende stootplaat lengten en bij een bepaald a_w of MTVV grens.

Vergelijking VIII-7

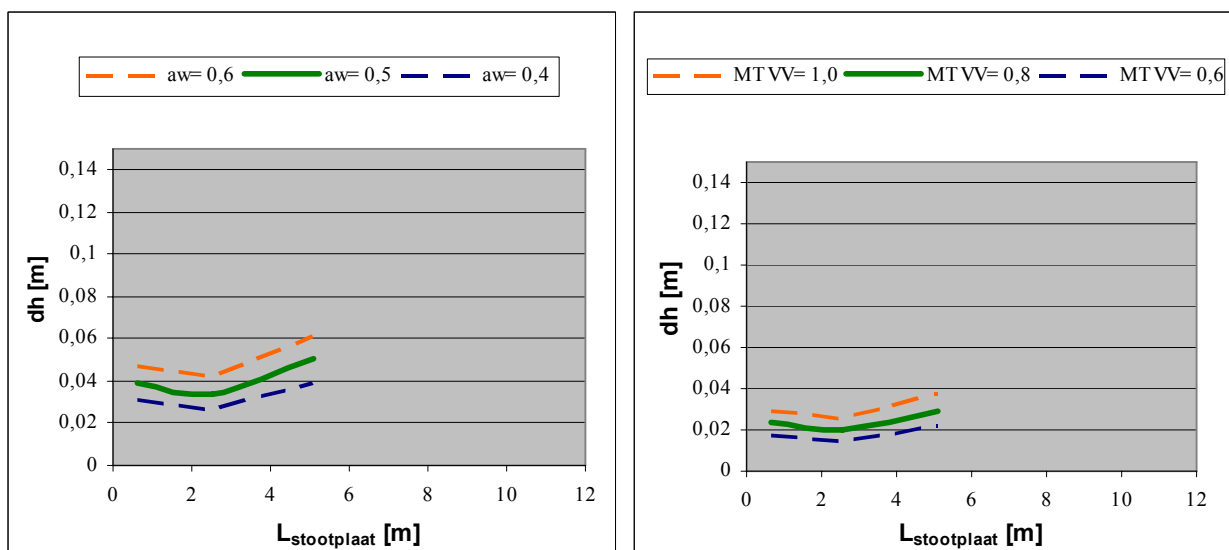
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel VIII-10: constante tbv van Vergelijking VIII-7

$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
0,64	12,16	0,02	34,29	0,00
2,55	13,72	0,03	38,54	0,03
5,09	8,97	0,05	25,42	0,05



Figuur VIII-11 ontwerpgrafieken voor een kunstwerk met een lengte van 3 meter bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VIII.3.2 Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 6 meter

Tabel VIII-11 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

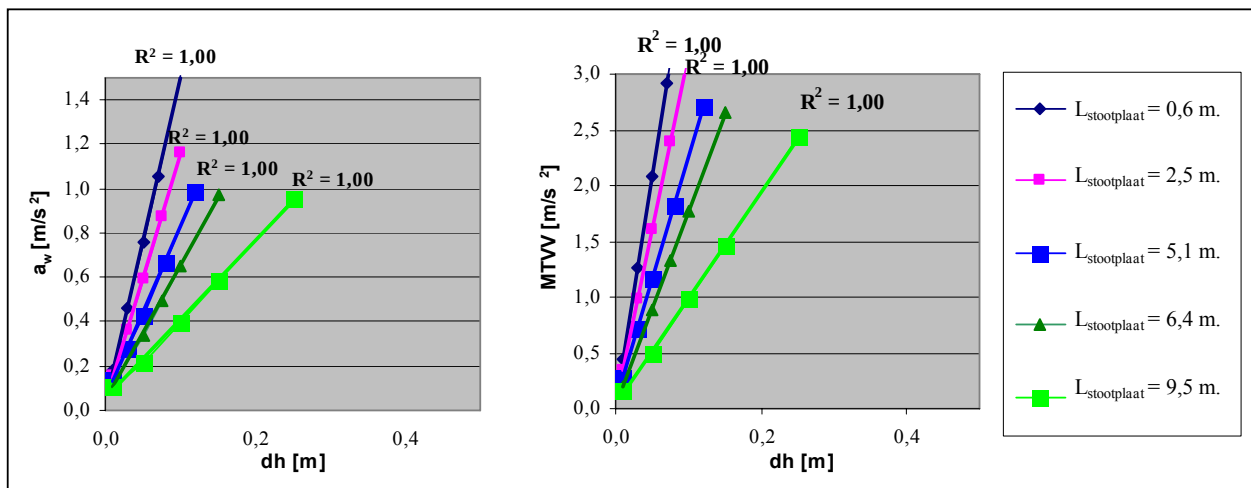
L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
1	0,64	0,01	0,18	0,44
1	0,64	0,03	0,46	1,25
1	0,64	0,05	0,76	2,08
1	0,64	0,07	1,06	2,91
1	0,64	0,10	1,51	4,15

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
4	2,55	0,01	0,16	0,35
4	2,55	0,03	0,37	0,98
4	2,55	0,05	0,59	1,61
4	2,55	0,08	0,87	2,39
4	2,55	0,10	1,16	3,18

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
8	5,09	0,01	0,14	0,28
8	5,09	0,03	0,28	0,72
8	5,09	0,05	0,43	1,16
8	5,09	0,08	0,67	1,82
8	5,09	0,12	0,99	2,71

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	6,37	0,01	0,12	0,20
10	6,37	0,05	0,34	0,89
10	6,37	0,08	0,49	1,33
10	6,37	0,10	0,65	1,77
10	6,37	0,15	0,97	2,65

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	9,55	0,01	0,11	0,16
15	9,55	0,05	0,22	0,49
15	9,55	0,10	0,40	0,98
15	9,55	0,15	0,58	1,47
15	9,55	0,25	0,96	2,44



Figuur VIII-12: Grafische weergaven van de resultaten bij een kunstwerk met een lengte (L_{kw}) van 6 meter en een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-12 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-8, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-12. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VIII-13 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van $0,4 \text{ m/s}^2$, $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,6 \text{ m/s}^2$ en MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$). Uit deze ontwerpgrafieken kunnen de toegestane zettingsverschillen bepaald worden over de verschillende stootplaat lengten en bij een bepaald a_w of MTVV grens.

Vergelijking VIII-8

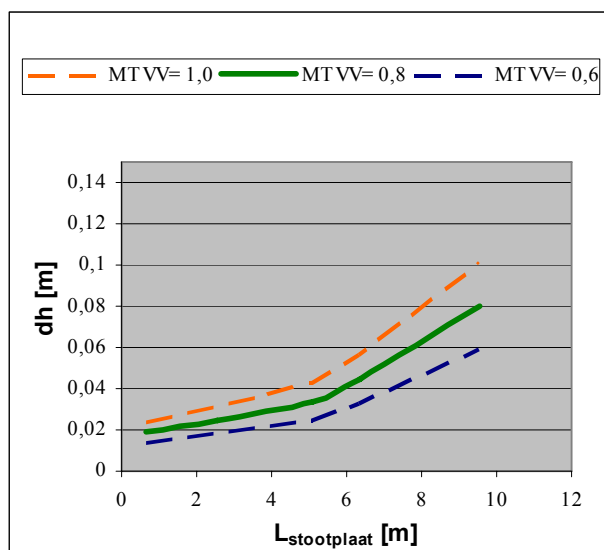
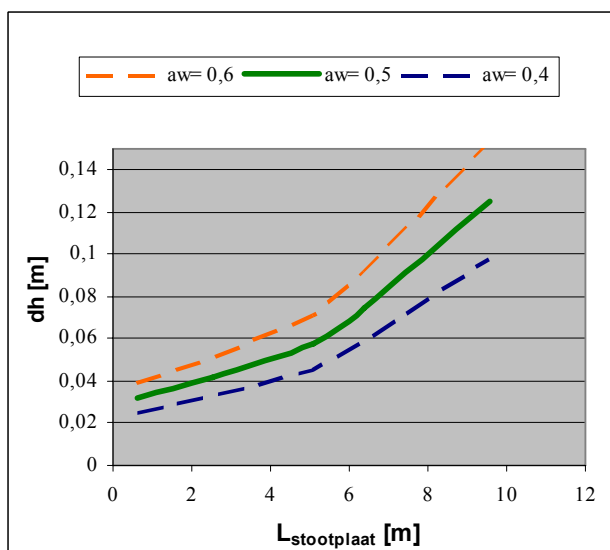
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s^2
 MTVV in m/s^2
 dh in m
 A en C in $1/\text{s}^2$
 B en D in m/s^2

Tabel VIII-12: constante tbv van Vergelijking VIII-8

$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	a_w [m/s^2]		MTVV [m/s^2]	
	A	B	C	D
0,64	14,74	0,03	41,31	0,02
2,55	11,14	0,04	31,48	0,03
5,09	7,75	0,05	22,04	0,06
6,37	6,12	0,04	17,50	0,02
9,55	3,58	0,05	9,59	0,03



Figuur VIII-13 ontwerpgrafieken voor een kunstwerk met een lengte van 6 meter bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VIII.3.3 Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 10 meter

Tabel VIII-13 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
1	0,64	0,01	0,17	0,38
1	0,64	0,03	0,40	1,08
1	0,64	0,05	0,54	1,47
1	0,64	0,08	0,98	2,68
1	0,64	0,10	1,30	3,56

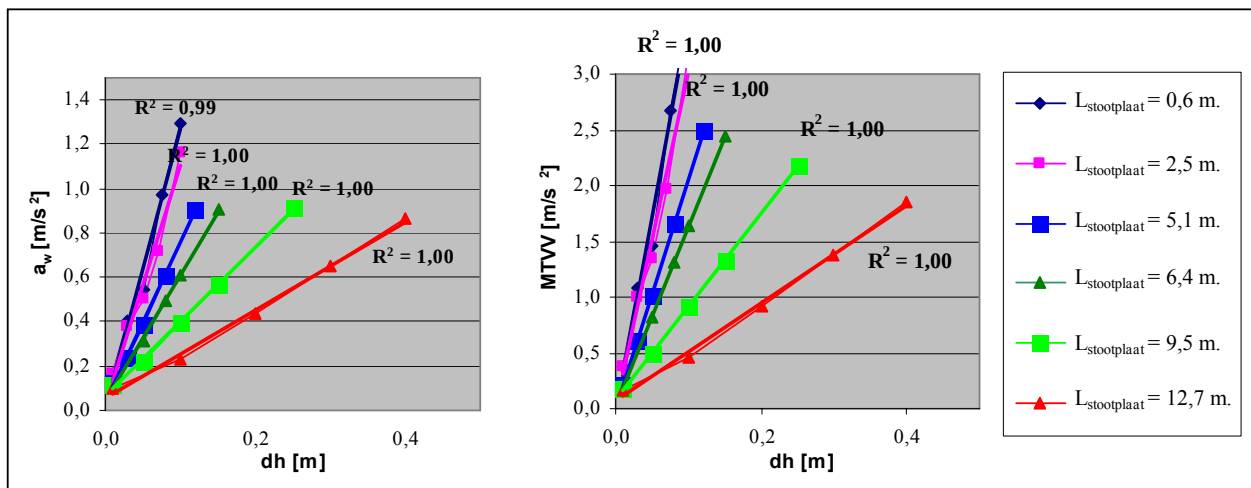
L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
4	2,55	0,01	0,17	0,38
4	2,55	0,03	0,38	1,00
4	2,55	0,05	0,50	1,35
4	2,55	0,07	0,72	1,97
4	2,55	0,10	1,16	3,19

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
8	5,09	0,01	0,12	0,22
8	5,09	0,03	0,24	0,61
8	5,09	0,05	0,38	1,02
8	5,09	0,08	0,61	1,65
8	5,09	0,12	0,91	2,49

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	6,37	0,01	0,12	0,19
10	6,37	0,05	0,32	0,82
10	6,37	0,08	0,49	1,31
10	6,37	0,10	0,61	1,63
10	6,37	0,15	0,91	2,45

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	9,55	0,01	0,12	0,17
15	9,55	0,05	0,23	0,49
15	9,55	0,10	0,39	0,91
15	9,55	0,15	0,57	1,33
15	9,55	0,25	0,92	2,18

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	12,73	0,01	0,10	0,16
20	12,73	0,10	0,23	0,46
20	12,73	0,20	0,43	0,92
20	12,73	0,30	0,65	1,38
20	12,73	0,40	0,86	1,85



Figuur VIII-14: Grafische weergaven van de resultaten bij een kunstwerk met een lengte (L_{kw}) van 10 meter en een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-14 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-9, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-14. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VII-17 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²). Uit deze ontwerpgrafieken kunnen de toegestane zettingsverschillen bepaald worden over de verschillende stootplaat lengten en bij een bepaald a_w of MTVV grens.

Vergelijking VIII-9

$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²

MTVV in m/s²

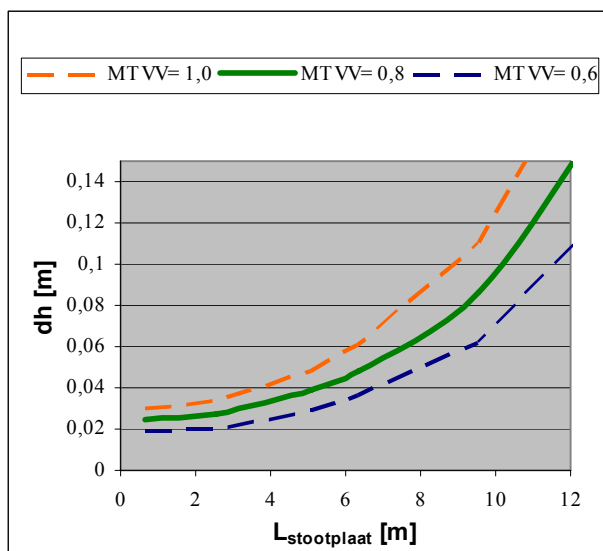
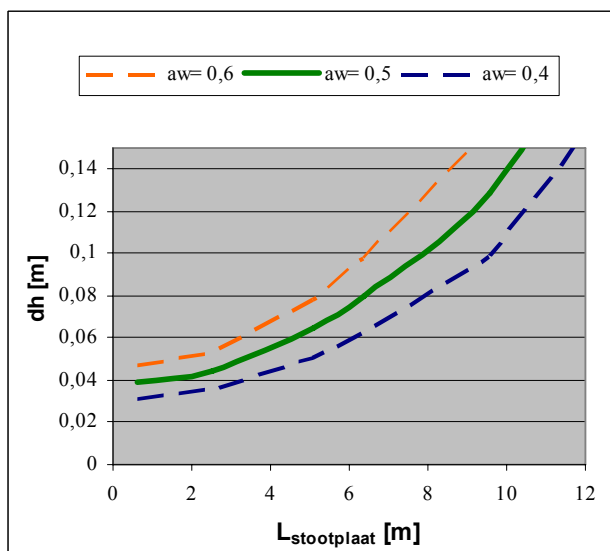
dh in m

A en C in 1/s²

B en D in m/s²

Tabel VIII-14: constante tbv van Vergelijking VIII-9

$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
0,64	12,66	0,01	35,63	-0,06
2,55	10,74	0,03	30,30	0,00
5,09	7,25	0,03	20,68	0,00
6,37	5,70	0,04	16,18	0,02
9,55	3,37	0,07	8,40	0,08
12,73	1,99	0,05	4,40	0,07



Figuur VIII-15 ontwerpgrafieken voor een kunstwerk met een lengte van 10 meter bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VIII.3.4 Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 20 meter

Tabel VIII-15 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
1	0,64	0,01	0,16	0,33
1	0,64	0,03	0,40	1,01
1	0,64	0,05	0,66	1,70
1	0,64	0,08	0,98	2,56
1	0,64	0,10	1,31	3,42

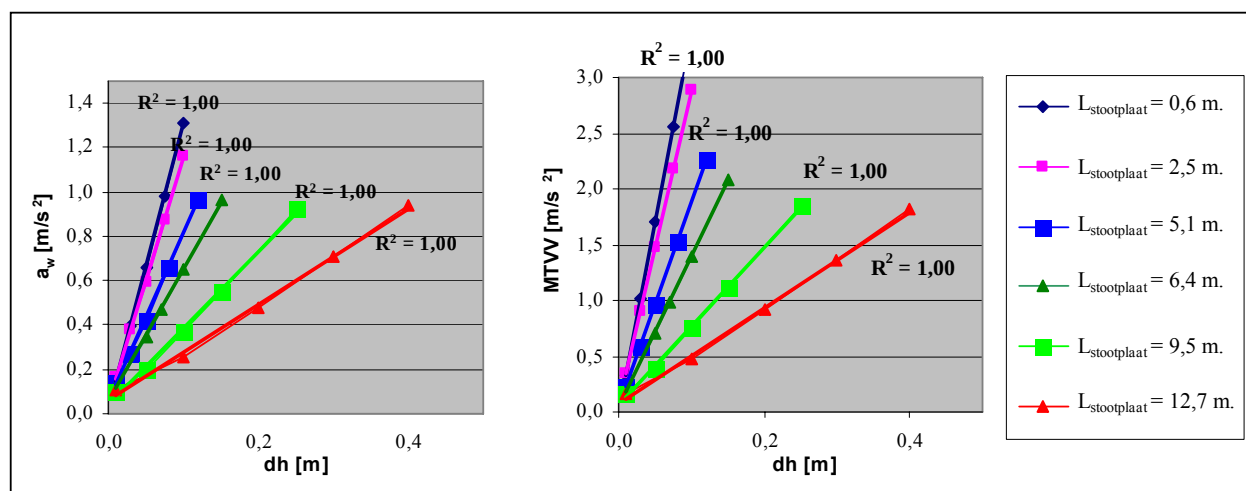
L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
4	2,55	0,01	0,17	0,35
4	2,55	0,03	0,38	0,90
4	2,55	0,05	0,60	1,47
4	2,55	0,08	0,88	2,17
4	2,55	0,10	1,16	2,88

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
8	5,09	0,01	0,14	0,23
8	5,09	0,03	0,27	0,59
8	5,09	0,05	0,42	0,96
8	5,09	0,08	0,66	1,52
8	5,09	0,12	0,97	2,26

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	6,37	0,01	0,13	0,19
10	6,37	0,05	0,34	0,71
10	6,37	0,07	0,47	0,99
10	6,37	0,10	0,65	1,40
10	6,37	0,15	0,97	2,08

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	9,55	0,01	0,10	0,16
15	9,55	0,05	0,20	0,40
15	9,55	0,10	0,37	0,75
15	9,55	0,15	0,55	1,12
15	9,55	0,25	0,92	1,85

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	12,73	0,01	0,10	0,16
20	12,73	0,10	0,25	0,47
20	12,73	0,20	0,48	0,91
20	12,73	0,30	0,71	1,36
20	12,73	0,40	0,94	1,81



Figuur VIII-16: Grafische weergaven van de resultaten bij een kunstwerk met een lengte (L_{kw}) van 20 meter en een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-16 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-10, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-16. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur VIII-17 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²). Uit deze ontwerpgrafieken kunnen de toegestane zettingsverschillen bepaald worden over de verschillende stootplaat lengten en bij een bepaald a_w of MTVV grens.

Vergelijking VIII-10

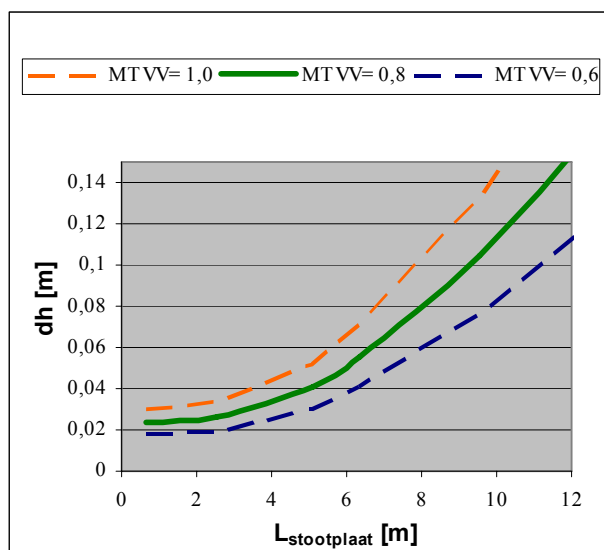
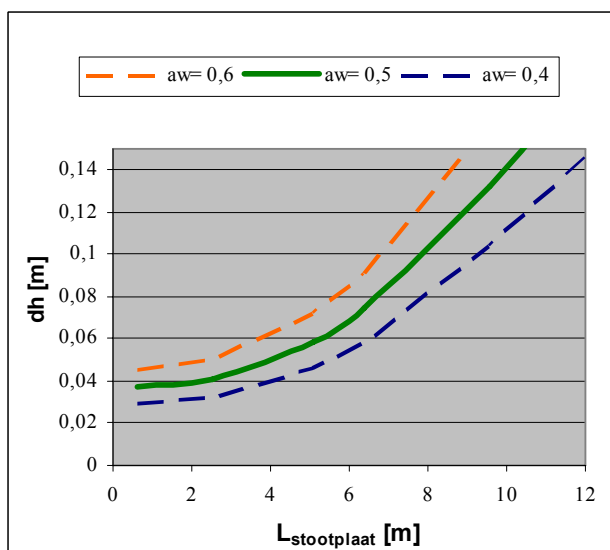
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel VIII-16: constante tbv van Vergelijking VIII-10

$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
0,64	12,85	0,02	34,33	-0,01
2,55	11,05	0,05	28,16	0,06
5,09	7,57	0,05	18,44	0,04
6,37	6,02	0,05	13,57	0,04
9,55	3,47	0,04	7,11	0,06
12,73	2,17	0,06	4,29	0,08



Figuur VIII-17 ontwerpgrafieken voor een kunstwerk met een lengte van 20 meter bij een bepaalde a_w en MTVV grens

VIII.3.5 Resultaten bij een kunstwerk lengte (L_{kw}) gelijk aan 40 meter

Tabel VIII-17 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
1	0,64	0,01	0,17	0,31
1	0,64	0,03	0,41	0,80
1	0,64	0,05	0,67	1,31
1	0,64	0,08	1,00	1,95
1	0,64	0,10	1,32	2,59

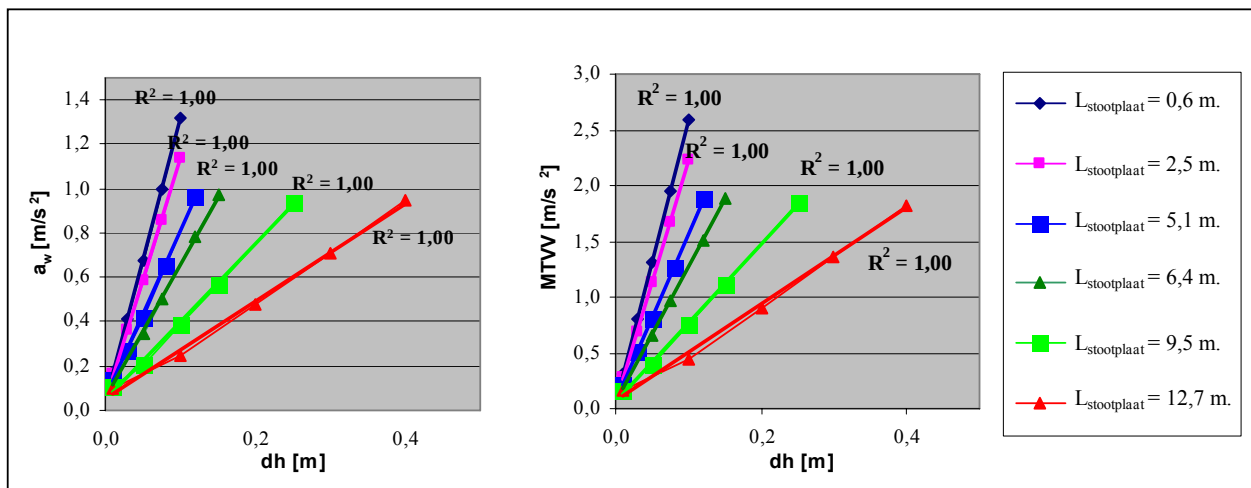
L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
4	2,55	0,01	0,16	0,27
4	2,55	0,03	0,36	0,70
4	2,55	0,05	0,58	1,13
4	2,55	0,08	0,86	1,68
4	2,55	0,10	1,14	2,23

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
8	5,09	0,01	0,14	0,22
8	5,09	0,03	0,27	0,51
8	5,09	0,05	0,42	0,81
8	5,09	0,08	0,65	1,27
8	5,09	0,12	0,97	1,88

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	6,37	0,01	0,13	0,19
10	6,37	0,05	0,35	0,66
10	6,37	0,08	0,50	0,96
10	6,37	0,12	0,78	1,52
10	6,37	0,15	0,97	1,89

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	9,55	0,01	0,11	0,16
15	9,55	0,05	0,21	0,40
15	9,55	0,10	0,39	0,76
15	9,55	0,15	0,57	1,12
15	9,55	0,25	0,94	1,86

L_{sin} [m]	$L_{stootplaat}$ [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	12,73	0,01	0,10	0,16
20	12,73	0,10	0,25	0,45
20	12,73	0,20	0,47	0,90
20	12,73	0,30	0,71	1,36
20	12,73	0,40	0,94	1,82



Figuur VIII-18: Grafische weergaven van de resultaten bij een kunstwerk met een lengte (L_{kw}) van 40 meter en een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur VIII-18 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking VIII-11, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel VIII-18. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Vergelijking VIII-7 Figuur VIII-19 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van $0,4 \text{ m/s}^2$, $0,5 \text{ m/s}^2$ en $0,6 \text{ m/s}^2$ en MTVV van $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$ en $1,0 \text{ m/s}^2$). Uit deze ontwerpgrafieken kunnen de toegestane zettingsverschillen bepaald worden over de verschillende stootplaat lengten en bij een bepaald a_w of MTVV grens.

Vergelijking VIII-11

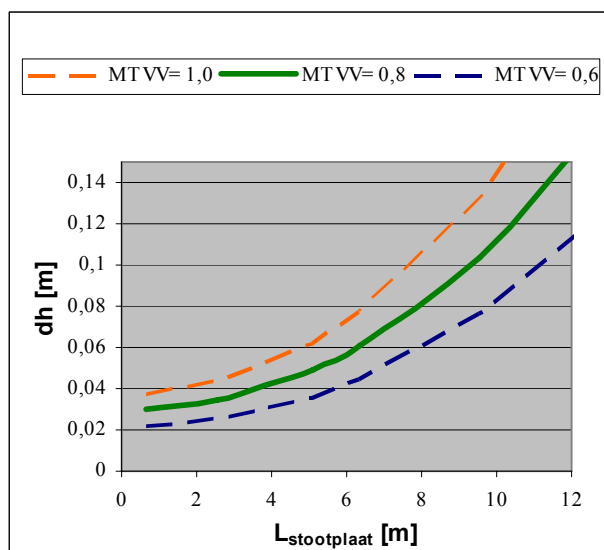
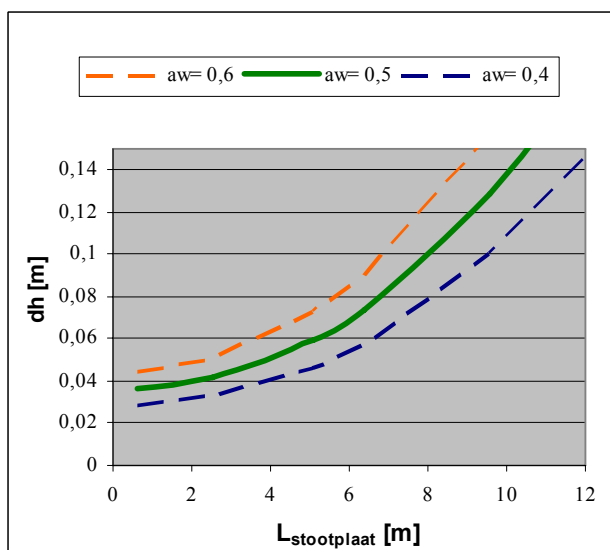
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s^2
 MTVV in m/s^2
 dh in m
 A en C in $1/\text{s}^2$
 B en D in m/s^2

Tabel VIII-18: constante tbv van Vergelijking VIII-11

$L_{\text{stootplaat}}$ [m]	a_w [m/s^2]		MTVV [m/s^2]	
	A	B	C	D
0,64	12,81	0,04	25,42	0,04
2,55	10,92	0,04	21,74	0,05
5,09	7,56	0,05	15,15	0,06
6,37	6,04	0,06	12,16	0,06
9,55	3,53	0,05	7,13	0,06
12,73	2,19	0,05	4,33	0,06



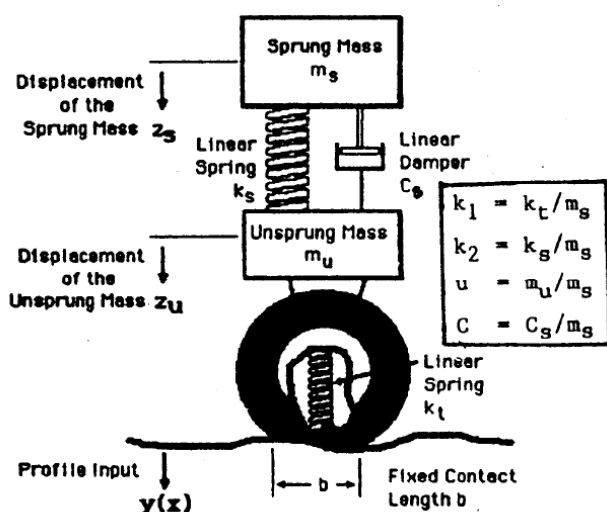
Figuur VIII-19 ontwerpgrafieken voor een kunstwerk met een lengte van 40 meter bij een bepaalde a_w en MTVV grens

IX Uitwerkingen IRI

In deze bijlage worden de uitwerkingen van de IRI berekeningen gegeven. Als eerste zal er in paragraaf IX.1 uitgelegd worden hoe de IRI berekend wordt en hoe de snelheid in deze berekeningen aan te passen is. Daarna volgen de IRI-resultaten bij een eenmalige onvlakheid (paragraaf IX.2) en bij een reeks (paragraaf IX.3), dit beide voor de snelheden 80 en 100 km/h.

IX.1 Bepaling IRI

Het principe van het berekenen van de IRI-waarde is gebaseerd op een virtueel veerresponsie systeem. Een wiskundig algoritme wordt uitgevoerd op een digitaal verkregen profiel. Het model berekent de veerbeweging van een kwart voertuig model (zie Figuur IX-1) met de veercharacteristieken van de "Golden Car".



Figuur IX-1: kwart voertuigmodel [12]

De procedure voor het berekenen van de IRI is vastgelegd door de Wereldbank [13]. De IRI-waarde wordt berekend aan de hand van vier variabelen ($[Z]$, zie Vergelijking IX-1) als functie van het gemeten profiel. Deze vier variabelen geven een beeld van de dynamische responsie van het voertuig dat over het gemeten profiel rijdt met een bepaalde snelheid.

Vergelijking IX-1 [13]

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix}$$

Met Z_1 : de verticale snelheid van de geveerde massa m_s gedeeld door de voertuigsnelheid [m/m]
 Z_2 : de verticale versnelling van de geveerde massa m_s gedeeld door de voertuigsnelheid [m/m*s]
 Z_3 : de verticale snelheid van de ongeveerde massa m_u gedeeld door de voertuigsnelheid [m/m]
 Z_4 : de verticale versnelling van de ongeveerde massa m_u gedeeld door de voertuigsnelheid [m/m*s]

Om nu de vier variabele voor iedere locatie van een bepaald wegvak te bepalen wordt er gebruik gemaakt van de volgende vergelijkingen:

Vergelijking IX-2 [13]

$$[Z(i)] = [ST] * [Z(i-1)] + [PR] * y_i'$$

Met: $[Z(i)]$: de vier variabele op locatie i,
 $[Z(i-1)]$: de waarde van de vector $[Z]$ op het voorgelegen punt,
 y_i' : de helling van het profiel op locatie i [m/m],
 $[ST]$: state transition matrix volgend uit Vergelijking IX-3,
 $[PR]$: partial response matrix volgend uit Vergelijking IX-3.

Vergelijking IX-3 [13]

$$[ST] = e^{[A]*t} = I + [A] * dt + [A]^2 * \frac{dt^2}{2!} + [A]^3 * \frac{dt^3}{3!} + \dots$$

$$[PR] = [A]^{-1} (ST - I) * [B]$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_2/u & C/u & -(K_1 + K_2)/u & C/u \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_1/u \end{bmatrix}$$

Met: dt = tijdsinterval [s] = dx/v
 dx = stapgrootte [m]
 v = voertuig snelheid m/s
 $K_1 = k_t/m_s = 653 \text{ [1/s}^2\text{]}$
 $K_2 = k_s/m_s = 63,3 \text{ [1/s}^2\text{]}$
 $C = C_s/m_s = 6 \text{ [1/s}^2\text{]}$
 $u = m_u/m_s = 0,15$
 Zie Figuur IX-1 voor verder beschrijving van de onbekende constanten

Met behulp van deze vergelijkingen is het nu mogelijk om bij een bepaald profiel en een bepaalde snelheid de Z-matrix op iedere locatie te berekenen wat benodigd is voor het bepalen van de IRI. Alleen dienen er nog wel startwaarde van deze matrix bepaald te worden, hiervoor is er door de wereld bank vastgelegd dat de gemiddelde helling over de eerste 11 meter wordt gebruikt om de startwaarden te bepalen. Dit komt neer op het volgende:

Vergelijking IX-4

$$Z_1(0) = Z_3(0) = \frac{y_a - y_0}{11}$$

$$Z_2(0) = Z_4(0) = 0$$

$$a = \frac{11}{dx}$$

Met: y_a is de a^{de} meetwaarde van het profiel [m]
 y_0 is de startwaarde van het gemeten profiel [m]
 dx is de stapgrootte (in dit onderzoek telkens 0,10365 m)

Nu het mogelijk is om de Z-matrix op iedere locatie te bepalen kan de IRI berekend worden met behulp van Vergelijking IX-5. Met behulp van de formules is het mogelijk zowel de IRI 100 als de IRI 20 te berekenen. Hierbij heeft het getal 100 en/of 20 betrekking op de basislengte waarover de IRI-waarde bepaald dient te worden. Hieruit blijkt verder dat er gemakkelijk een lopend gemiddelde met betrekking tot de IRI bepaald kan worden en dat de snelheid gevarieerd kan worden omdat dit een invoerparameter is in Vergelijking IX-3.

Vergelijking IX-5

$$RS_i = |Z_3 - Z_1|$$

$$IRI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=0} RS_i$$

IX.2 Uitvoer IRI bij eenmalige onvlakheid

Bij deze resultaten is zowel de IRI 100 als de IRI 20 wel bepaald als maximum van het lopende gemiddelde over het gehele profiel.

IX.2.1 Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 80 km/h

Tabel IX-1 In- en uitvoergegevens van de IRI

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
2,5	0,01	0,84	1,91
2,5	0,03	1,46	4,95
2,5	0,04	1,79	6,58
2,5	0,06	2,48	9,91
2,5	0,08	3,18	13,28

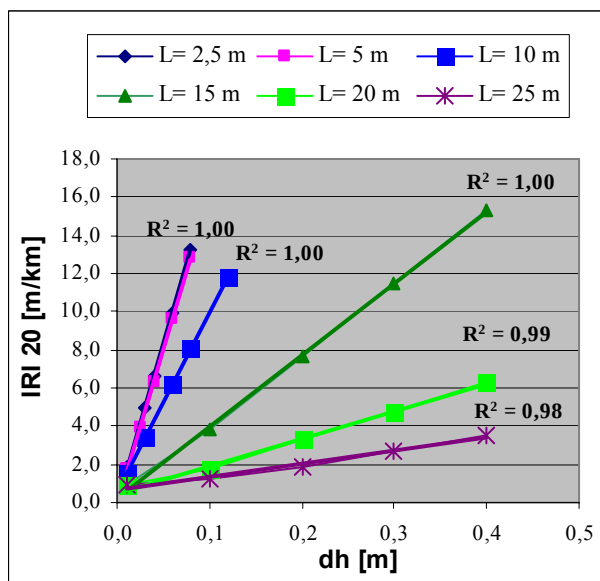
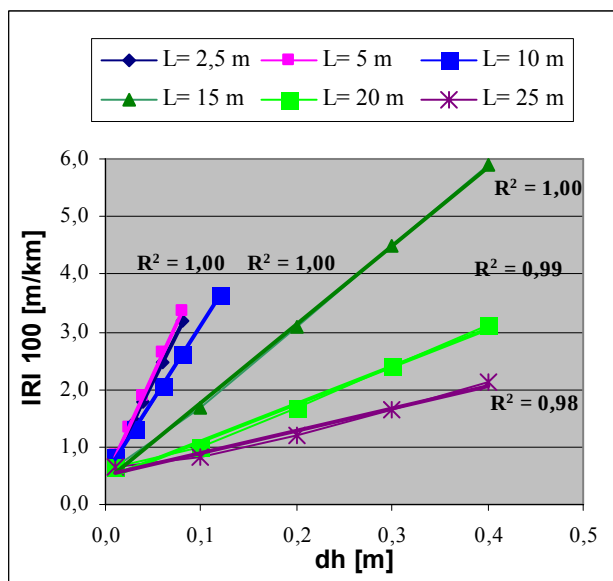
L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
5	0,01	0,85	1,78
5	0,03	1,35	3,96
5	0,04	1,89	6,35
5	0,06	2,63	9,57
5	0,08	3,37	12,80

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
10	0,01	0,81	1,52
10	0,03	1,30	3,37
10	0,06	2,07	6,18
10	0,08	2,60	8,05
10	0,12	3,64	11,80

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
15	0,01	0,65	0,89
15	0,10	1,67	3,78
15	0,20	3,08	7,61
15	0,30	4,49	11,45
15	0,40	5,90	15,30

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
20	0,01	0,65	0,89
20	0,10	0,99	1,73
20	0,20	1,67	3,27
20	0,30	2,38	4,81
20	0,40	3,11	6,35

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
25	0,01	0,65	0,89
25	0,10	0,82	1,19
25	0,20	1,21	1,87
25	0,30	1,66	2,68
25	0,40	2,12	3,53



Figuur IX-2: Grafische weergaven van de IRI-waarden bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 80 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur IX-2 bestaat er een lineaire relatie tussen de IRI waarden en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking IX-6, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel IX-2. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde IRI 100 en IRI 20, dit is in Figuur IX-3 gedaan voor verschillende grenswaarden (IRI 100 van 3 m/km, 3,5 m/km en 4 m/km en IRI 20 van 4 m/km, 5 m/km en 6 m/km).

Vergelijking IX-6

$$IRI_{100} = A * dh + B$$

$$IRI_{20} = C * dh + D$$

Met IRI 100 in m/km

IRI 20 in m/km

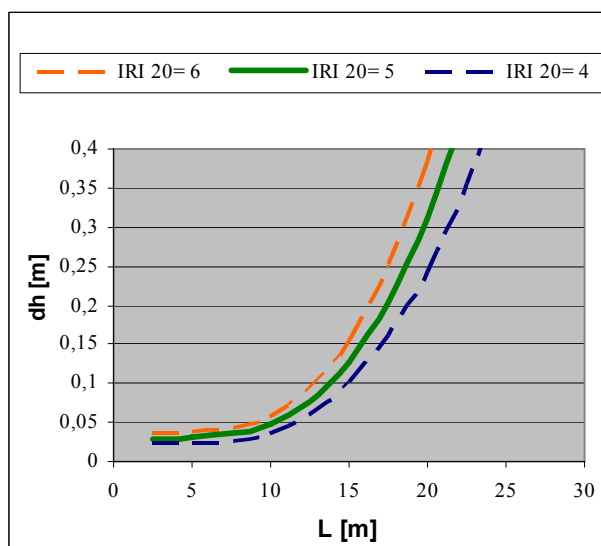
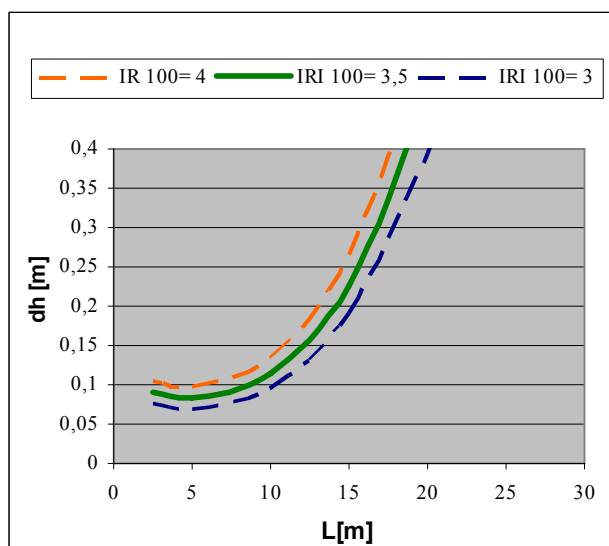
dh in m

A en C in 1/km

B en D in m/km

Tabel IX-2: constante tbv Vergelijking IX-6

L [m]	IRI 100 [m/km]		IRI 20 [m/km]	
	A	B	C	D
2,5	33,55	0,47	163,02	0,15
5	36,23	0,46	158,19	0,09
10	25,81	0,54	93,53	0,57
15	13,59	0,41	37,26	0,28
20	6,46	0,46	14,30	0,52
25	3,86	0,51	6,92	0,63



Figuur IX-3 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 80 km/h bij een bepaalde IRI 100 en IRI 20 grens

IX.2.2 Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 100 km/h

Tabel IX-3 In- en uitvoergegevens van de IRI

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
2,5	0,01	0,82	1,90
2,5	0,03	1,46	4,96
2,5	0,04	1,80	6,53
2,5	0,06	2,47	9,68
2,5	0,08	3,16	12,86

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
10	0,01	0,82	1,63
10	0,03	1,41	3,64
10	0,06	2,35	6,80
10	0,08	2,98	8,92
10	0,12	4,26	13,15

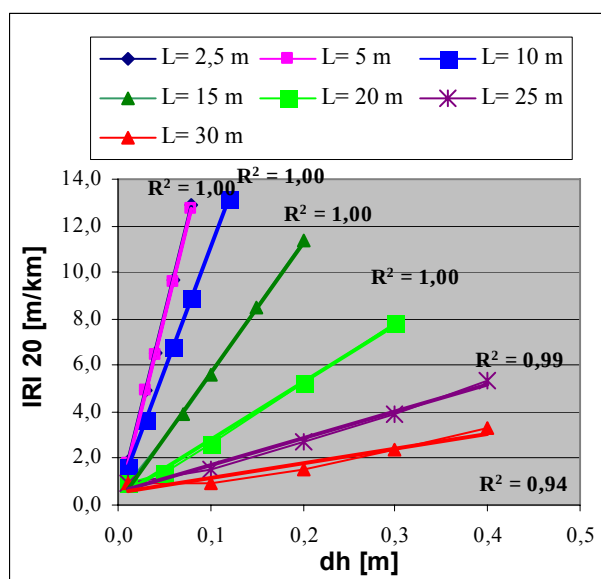
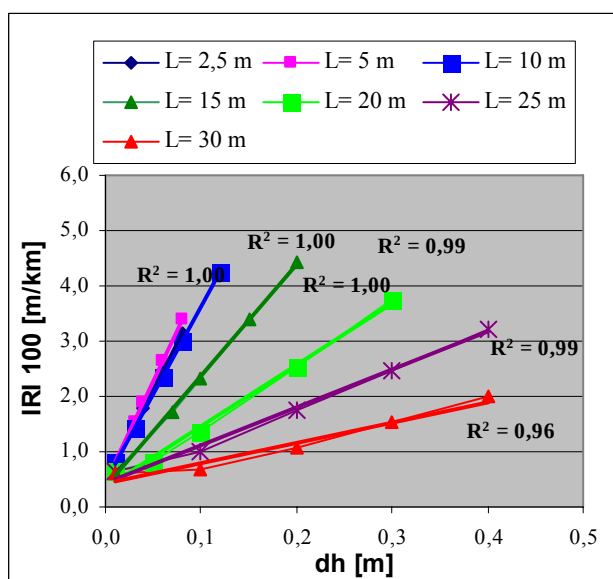
L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
20	0,01	0,63	0,90
20	0,05	0,81	1,38
20	0,10	1,34	2,66
20	0,20	2,53	5,23
20	0,30	3,73	7,79

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
30	0,01	0,62	0,90
30	0,10	0,68	0,90
30	0,20	1,07	1,55
30	0,30	1,53	2,41
30	0,40	1,99	3,28

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
5	0,01	0,82	1,79
5	0,03	1,54	4,90
5	0,04	1,91	6,46
5	0,06	2,65	9,58
5	0,08	3,38	12,70

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
15	0,01	0,63	0,90
15	0,07	1,72	3,89
15	0,10	2,34	5,59
15	0,15	3,38	8,48
15	0,20	4,43	11,38

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
25	0,01	0,64	0,90
25	0,10	1,01	1,49
25	0,20	1,74	2,71
25	0,30	2,48	3,94
25	0,40	3,23	5,30



Figuur IX-4: Grafische weergaven van de IRI-waarden bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur IX-4 bestaat er een lineaire relatie tussen de IRI waarden en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking IX-7, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel IX-4. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde IRI 100 en IRI 20, dit is in Figuur IX-5 gedaan voor verschillende grenswaarden (IRI 100 van 3 m/km, 3,5 m/km en 4 m/km en IRI 20 van 4 m/km, 5 m/km en 6 m/km).

Vergelijking IX-7

$$IRI_{100} = A * dh + B$$

$$IRI_{20} = C * dh + D$$

Met IRI 100 in m/km

IRI 20 in m/km

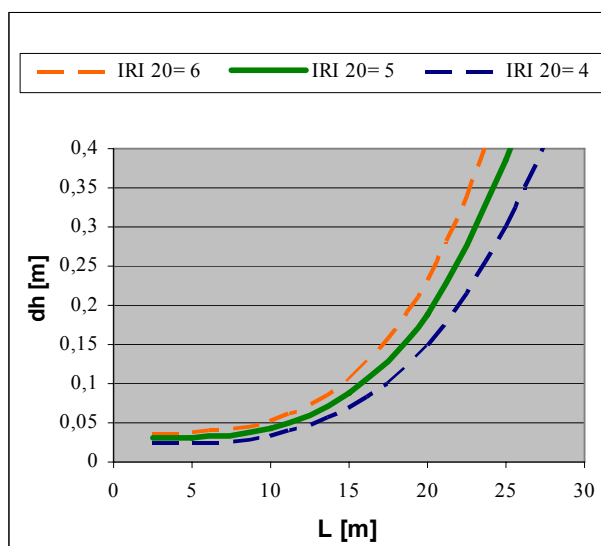
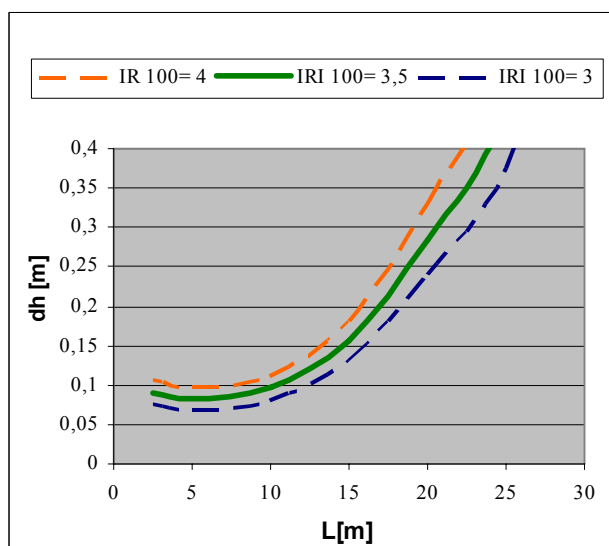
dh in m

A en C in 1/km

B en D in m/km

Tabel IX-4: constante tbv Vergelijking IX-7

L [m]	IRI 100 [m/km]		IRI 20 [m/km]	
	A	B	C	D
2,5	33,49	0,47	156,82	0,29
5	36,62	0,45	155,79	0,23
10	31,37	0,48	104,94	0,53
15	20,09	0,37	55,50	0,17
20	11,06	0,35	24,45	0,37
25	6,80	0,45	11,52	0,54
30	3,67	0,44	6,43	0,51



Figuur IX-5 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde IRI 100 en IRI 20 grens

IX.3 Uitvoer IRI bij reeks onvlakheden

Bij deze resultaten is zowel de IRI 100 als de IRI 20 wel bepaald als maximum van het lopende gemiddelde over het gehele profiel.

IX.3.1 Resultaten van reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 80 km/h

Tabel IX-5 In- en uitvoergegevens van de IRI

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
2,5	0,01	4,74	4,96
2,5	0,03	14,07	14,28
2,5	0,04	18,74	18,96
2,5	0,06	28,11	28,35
2,5	0,08	37,49	37,83

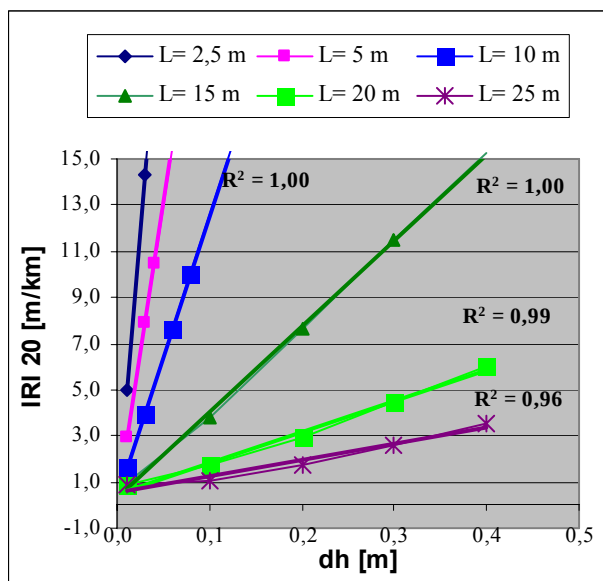
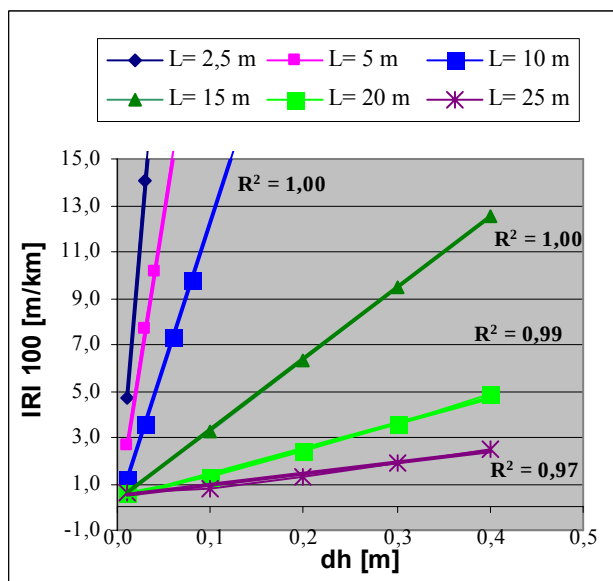
L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
5	0,01	2,63	2,92
5	0,03	7,65	7,93
5	0,04	10,17	10,43
5	0,06	15,20	15,54
5	0,08	20,27	20,80

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
10	0,01	1,25	1,65
10	0,03	3,63	3,92
10	0,06	7,32	7,61
10	0,08	9,78	10,08
10	0,13	15,95	16,24

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
15	0,01	0,71	0,99
15	0,10	3,22	3,78
15	0,20	6,32	7,61
15	0,30	9,43	11,45
15	0,40	12,56	15,30

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
20	0,01	0,65	0,90
20	0,10	1,31	1,70
20	0,20	2,42	2,97
20	0,30	3,62	4,50
20	0,40	4,84	6,05

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
25	0,01	0,65	0,89
25	0,10	0,82	1,01
25	0,20	1,31	1,70
25	0,30	1,89	2,59
25	0,40	2,49	3,53



Figuur IX-6: Grafische weergaven van de IRI-waarden bij een reeks onvlakheden voor een voertuigsnelheid van 80 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur IX-6 bestaat er een lineaire relatie tussen de IRI waarden en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking IX-8, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel IX-6. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde IRI 100 en IRI 20, dit is in Figuur IX-7 gedaan voor verschillende grenswaarden (IRI 100 van 3 m/km, 3,5 m/km en 4 m/km en IRI 20 van 4 m/km, 5 m/km en 6 m/km).

Vergelijking IX-8

$$IRI_{100} = A * dh + B$$

$$IRI_{20} = C * dh + D$$

Met IRI 100 in m/km

IRI 20 in m/km

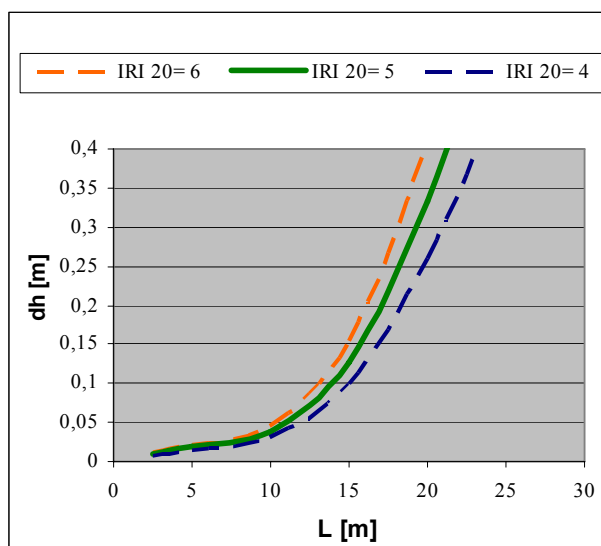
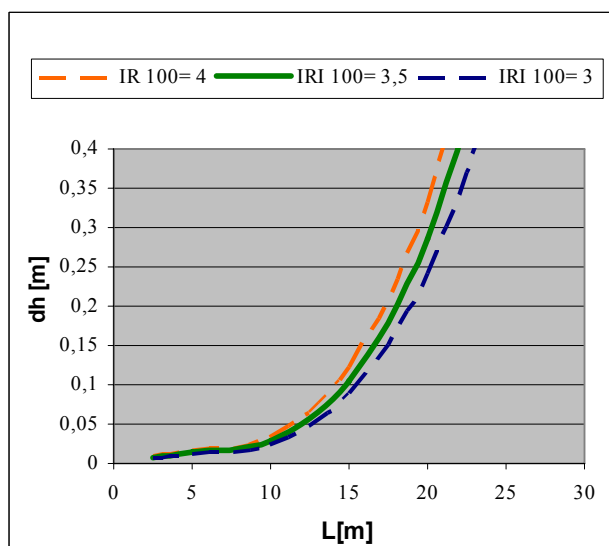
dh in m

A en C in 1/km

B en D in m/km

Tabel IX-6: constante tbv Vergelijking IX-8

L [m]	IRI 100 [m/km]		IRI 20 [m/km]	
	A	B	C	D
2,5	467,80	0,05	469,56	0,22
5	251,99	0,09	255,35	0,29
10	122,73	-0,02	122,03	0,34
15	30,55	0,28	37,06	0,34
20	10,94	0,36	13,40	0,52
25	4,87	0,45	7,03	0,52



Figuur IX-7 ontwerpgrafieken voor een reeks onvlakheden bij een snelheid van 80 km/h bij een bepaalde IRI 100 en IRI 20 grens

IX.3.2 Resultaten van reeks onvlakheden bij een voertuigsnelheid van 100 km/h

Tabel IX-7 In- en uitvoergegevens van de IRI

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
2,5	0,01	5,04	5,29
2,5	0,03	14,95	15,17
2,5	0,04	19,92	20,13
2,5	0,06	29,87	30,13
2,5	0,08	39,83	40,21

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
10	0,01	1,54	1,93
10	0,03	4,55	4,81
10	0,06	9,15	9,42
10	0,08	12,22	12,50
10	0,12	18,37	18,65

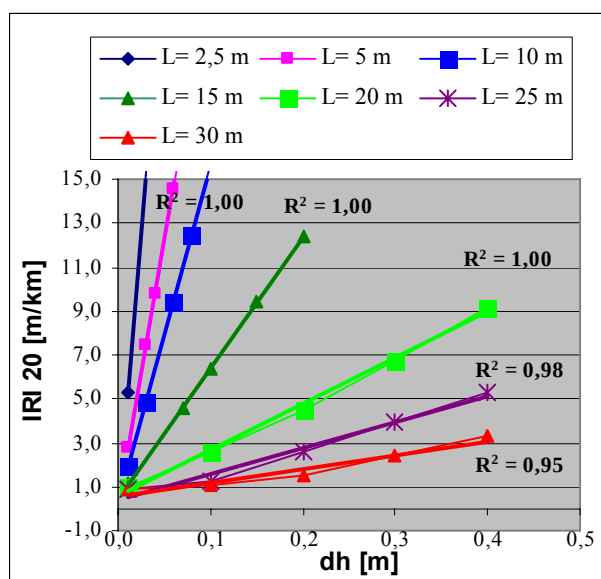
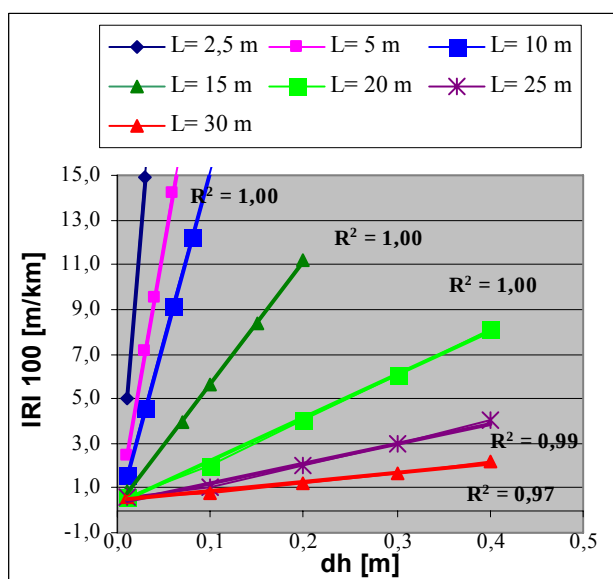
L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
20	0,01	0,63	0,95
20	0,10	2,04	2,58
20	0,20	4,01	4,52
20	0,30	6,04	6,75
20	0,40	8,07	9,17

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
30	0,01	0,63	0,90
30	0,10	0,80	1,03
30	0,20	1,17	1,55
30	0,30	1,66	2,41
30	0,40	2,18	3,28

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
5	0,01	2,47	2,76
5	0,03	7,16	7,44
5	0,04	9,51	9,79
5	0,06	14,22	14,58
5	0,08	18,97	19,51

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
15	0,01	0,85	1,13
15	0,07	3,99	4,56
15	0,10	5,64	6,37
15	0,15	8,41	9,39
15	0,20	11,18	12,42

L [m]	dh [m]	IRI 100 [m/km]	IRI 20 [m/km]
25	0,01	0,63	0,90
25	0,10	1,06	1,26
25	0,20	2,03	2,56
25	0,30	3,01	3,93
25	0,40	4,00	5,30



Figuur IX-8: Grafische weergaven van de IRI-waarden bij een reeks onvlakheden met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur IX-8 bestaat er een lineaire relatie tussen de IRI waarden en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking IX-9, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel IX-8. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde IRI 100 en IRI 20, dit is in Figuur IX-9 gedaan voor verschillende grenswaarden (IRI 100 van 3 m/km, 3,5 m/km en 4 m/km en IRI 20 van 4 m/km, 5 m/km en 6 m/km).

Vergelijking IX-9

$$IRI_{100} = A * dh + B$$

$$IRI_{20} = C * dh + D$$

Met IRI 100 in m/km

IRI 20 in m/km

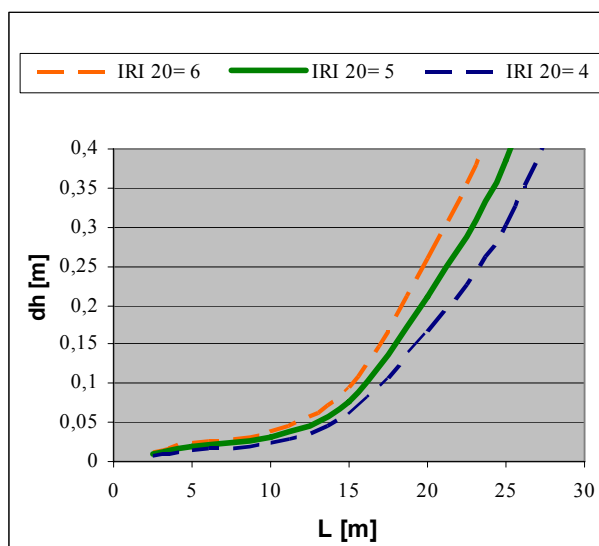
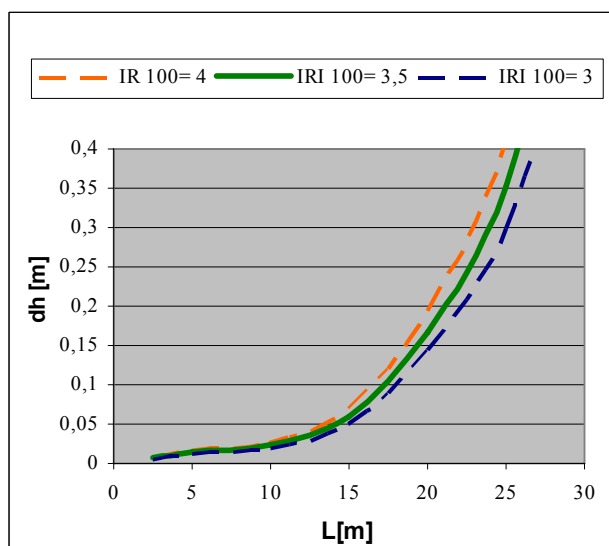
dh in m

A en C in 1/km

B en D in m/km

Tabel IX-8: constante tbv Vergelijking IX-9

L [m]	IRI 100 [m/km]		IRI 20 [m/km]	
	A	B	C	D
2,5	497,04	0,05	498,93	0,23
5	235,68	0,09	239,22	0,29
10	153,09	-0,02	152,48	0,31
15	54,52	0,23	59,57	0,46
20	19,28	0,27	21,04	0,54
25	8,87	0,35	11,76	0,42
30	4,06	0,47	6,29	0,56



Figuur IX-9 ontwerpgrafieken bij een reeks onvlakheden bij een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde IRI 100 en IRI 20 grens

X Uitwerking tbv foutenanalyse

X.1 Uitvoer 2^{de} voertuig bij eenmalige onvlakheid

Resultaten van een eenmalige onvlakheid bij een voertuigsnelheid van 100 km/h

Tabel X-1 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,14	0,31
2,5	0,03	0,32	0,85
2,5	0,04	0,42	1,12
2,5	0,06	0,61	1,67
2,5	0,08	0,81	2,22

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,14	0,31
5	0,03	0,32	0,86
5	0,04	0,42	1,14
5	0,06	0,62	1,70
5	0,08	0,83	2,26

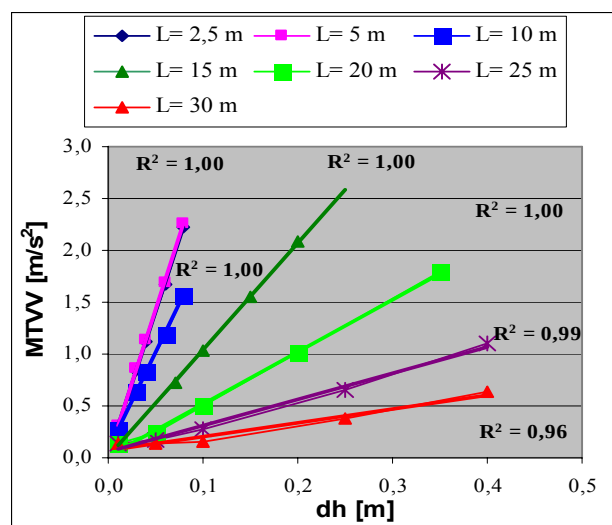
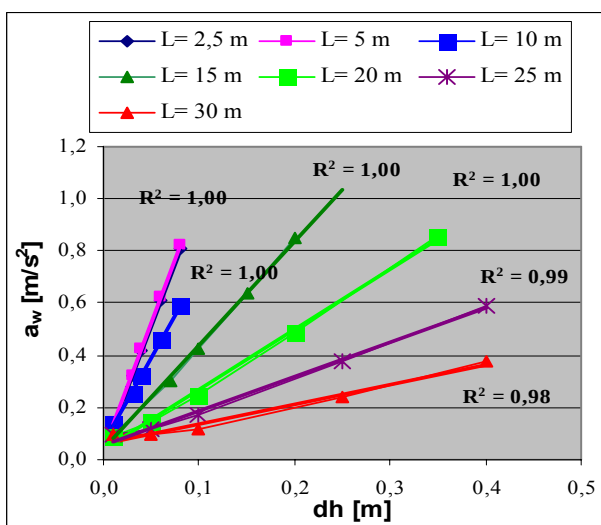
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,13	0,28
10	0,03	0,26	0,65
10	0,04	0,32	0,83
10	0,06	0,46	1,20
10	0,08	0,59	1,57

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,10	0,14
15	0,07	0,30	0,72
15	0,10	0,43	1,03
15	0,15	0,64	1,56
15	0,20	0,85	2,09

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,09	0,14
20	0,05	0,14	0,24
20	0,10	0,25	0,49
20	0,20	0,49	1,01
20	0,35	0,86	1,79

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,09	0,14
25	0,05	0,11	0,17
25	0,10	0,17	0,28
25	0,25	0,37	0,66
25	0,40	0,59	1,10

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
30	0,01	0,09	0,14
30	0,05	0,09	0,14
30	0,10	0,12	0,16
30	0,25	0,24	0,37
30	0,40	0,38	0,63



Figuur X-1: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur X-1 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking X-1, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel X-2. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur X-2 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²).

Vergelijking X-1

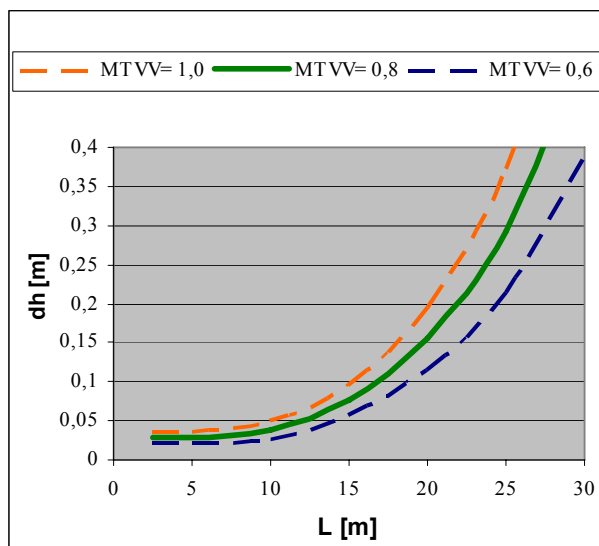
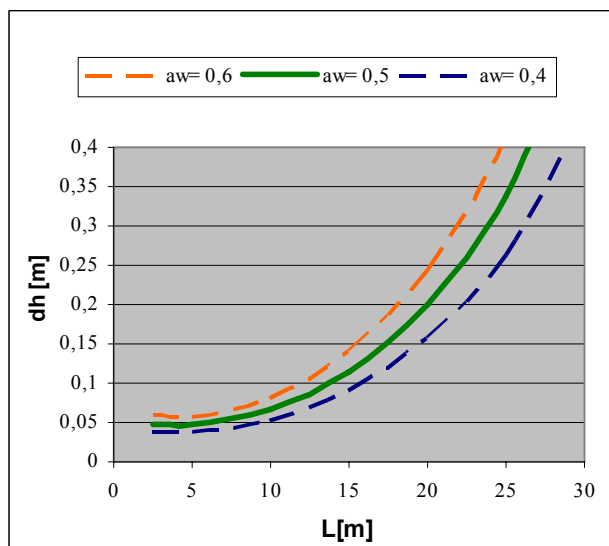
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel X-2: constante tbv Vergelijking X-1

L [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
2,5	9,60	0,04	27,36	0,03
5	9,81	0,04	27,78	0,03
10	6,57	0,06	18,35	0,10
15	3,99	0,04	10,30	0,01
20	2,31	0,04	4,99	0,03
25	1,31	0,06	2,53	0,06
30	0,75	0,06	1,33	0,07



Figuur X-2 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

X.2 Variërende dempingkarakteristiek

X.2.1 Aanpassing aan het model

Aangezien het model een lineair systeem is kan er eigenlijk geen variërende dempingkarakteristiek toegepast worden. Maar om een eerste indruk te krijgen wat de invloed hiervan is op de resultaten is er in de berekening van het gehele model (werkblad "main calculation" in bijlage V.3) een "if" functie ingebouwd zodat er bij het inveren van de dempers een andere waarde ingevoerd kan word dan bij het uitveren. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt uit de volgende vier situaties:

- Het uitveren van de voor- en achteras,
- Het uitveren van de vooras en het inveren van de achteras,
- Het inveren van de vooras en het uitveren van de achteras,
- Het inveren van de voor- en achteras.

Voor ieder situatie wordt daarna de A en B Matrix berekend hierin zit dan alleen wel een vertraging aangezien de situatie van de voorgaande iteratie uitvoer als uitgangspunt van de nieuwe iteratie genomen wordt.

X.2.2 Resultaten van eenmalige omlaag gerichte onvlakheid

In deze paragraaf zijn de resultaten van het aangepaste comfortmodel gegeven voor omlaag gerichte onvlakheid bij een snelheid van 100 km/h

Tabel X-3 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,15	0,33
2,5	0,03	0,32	0,86
2,5	0,04	0,42	1,13
2,5	0,06	0,61	1,66
2,5	0,08	0,80	2,20

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,16	0,37
5	0,03	0,37	0,99
5	0,04	0,48	1,31
5	0,06	0,71	1,94
5	0,08	0,94	2,57

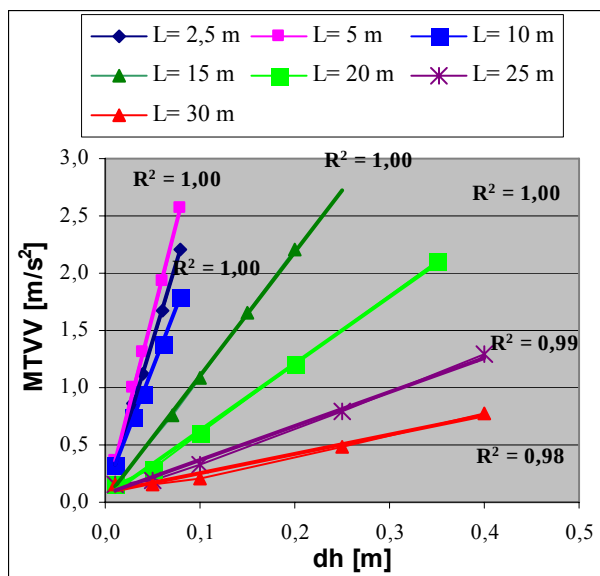
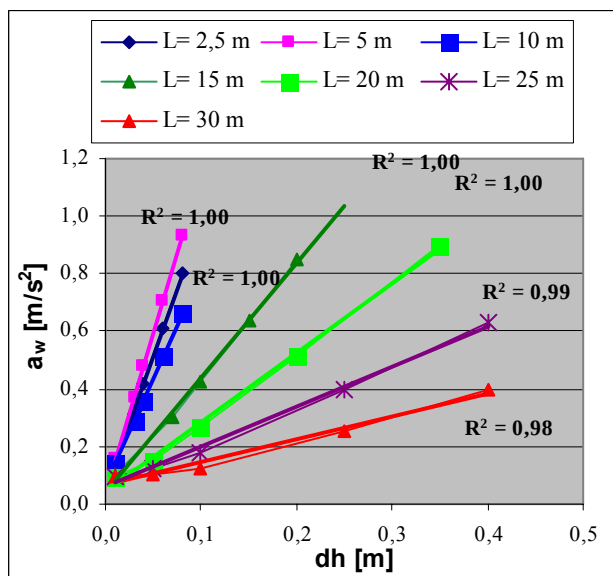
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,15	0,32
10	0,03	0,28	0,74
10	0,04	0,36	0,95
10	0,06	0,51	1,37
10	0,08	0,66	1,80

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,10	0,16
15	0,07	0,30	0,76
15	0,10	0,43	1,09
15	0,15	0,64	1,65
15	0,20	0,85	2,21

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,10	0,16
20	0,05	0,15	0,30
20	0,10	0,27	0,60
20	0,20	0,51	1,20
20	0,35	0,90	2,11

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,10	0,16
25	0,05	0,12	0,20
25	0,10	0,18	0,33
25	0,25	0,40	0,79
25	0,40	0,63	1,29

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
30	0,01	0,10	0,16
30	0,05	0,10	0,16
30	0,10	0,13	0,21
30	0,25	0,25	0,48
30	0,40	0,40	0,78



Figuur X-3: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur X-3 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking X-2, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel X-4. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur X-4 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²).

Vergelijking X-2

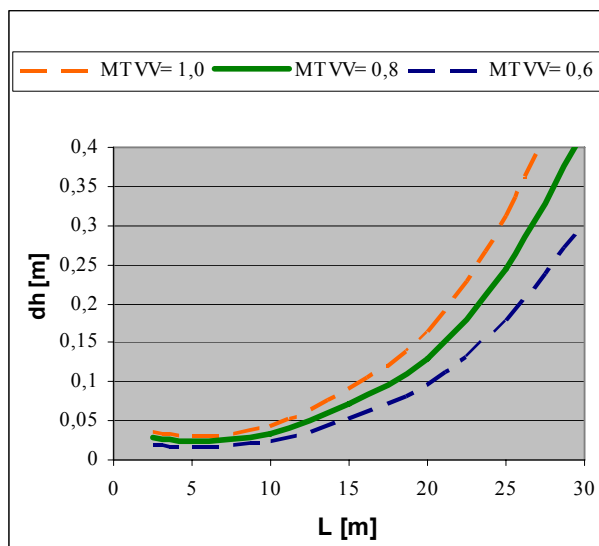
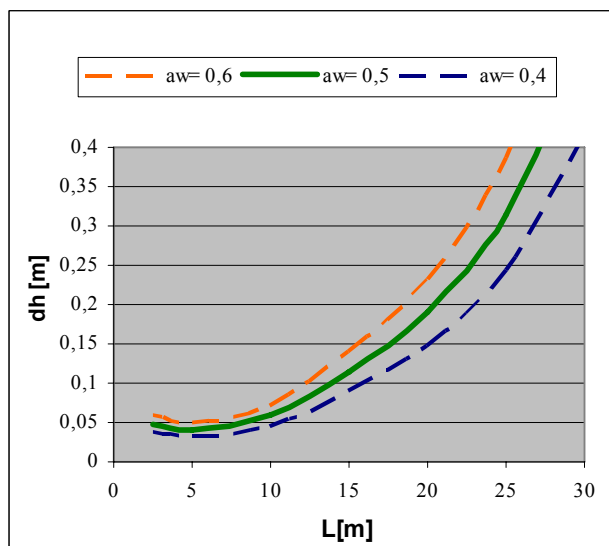
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel X-4: constante tbv Vergelijking X-2

L [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
2,5	9,38	0,05	26,75	0,06
5	11,11	0,04	31,43	0,05
10	7,42	0,07	21,09	0,11
15	3,98	0,04	10,84	0,02
20	2,39	0,05	5,84	0,04
25	1,39	0,06	2,99	0,07
30	0,80	0,07	1,67	0,09



Figuur X-4 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

X.2.3 Resultaten van eenmalige omhoog gerichte onvlakheid

In deze paragraaf zijn de resultaten van het aangepaste comfortmodel gegeven voor omhoog gerichte onvlakheid bij een snelheid van 100 km/h

Tabel X-5 In- en uitvoergegevens van het comfortmodel

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
2,5	0,01	0,13	0,24
2,5	0,03	0,27	0,70
2,5	0,04	0,35	0,94
2,5	0,06	0,52	1,43
2,5	0,08	0,70	1,91

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
5	0,01	0,16	0,35
5	0,03	0,36	0,97
5	0,04	0,48	1,29
5	0,06	0,71	1,93
5	0,08	0,94	2,57

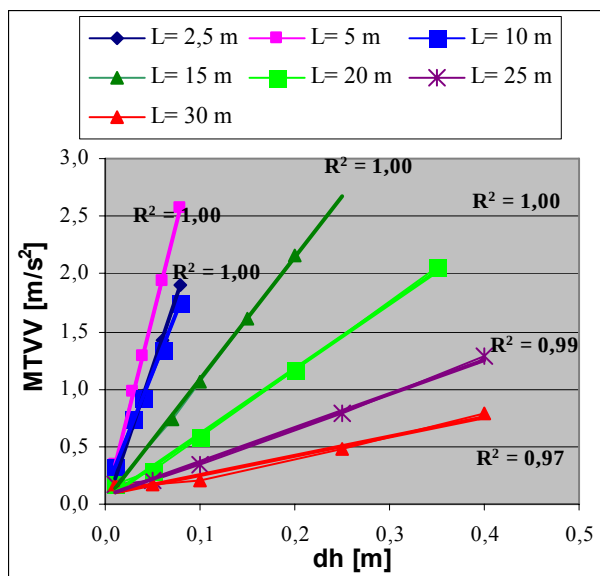
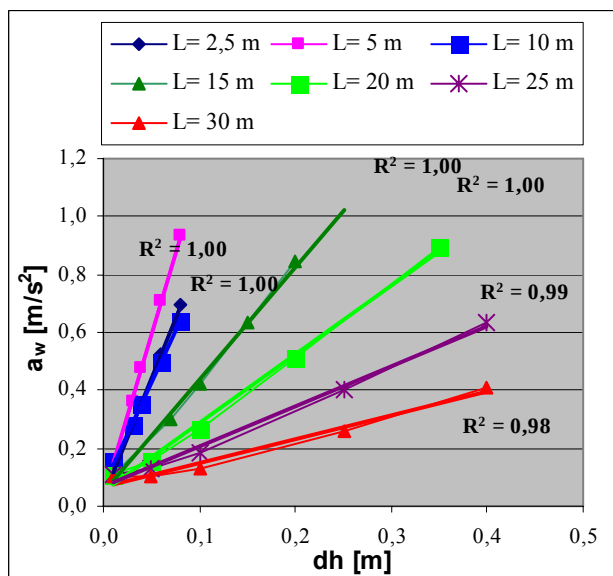
L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
10	0,01	0,15	0,33
10	0,03	0,28	0,73
10	0,04	0,35	0,93
10	0,06	0,50	1,34
10	0,08	0,64	1,75

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
15	0,01	0,11	0,17
15	0,07	0,30	0,74
15	0,10	0,42	1,07
15	0,15	0,63	1,62
15	0,20	0,84	2,17

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
20	0,01	0,11	0,17
20	0,05	0,16	0,29
20	0,10	0,27	0,58
20	0,20	0,51	1,17
20	0,35	0,89	2,05

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
25	0,01	0,11	0,17
25	0,05	0,13	0,20
25	0,10	0,18	0,34
25	0,25	0,40	0,79
25	0,40	0,63	1,28

L [m]	dh [m]	a_w [m/s ²]	MTVV [m/s ²]
30	0,01	0,10	0,17
30	0,05	0,11	0,17
30	0,10	0,13	0,21
30	0,25	0,26	0,48
30	0,40	0,41	0,79



Figuur X-5: Grafische weergaven van de resultaten bij een eenmalige onvlakheid met een voertuigsnelheid van 100 km/h

Zoals duidelijk zichtbaar is in Figuur X-5 bestaat er een lineaire relatie tussen de comfortparameters (a_w en MTVV) en het opgelegde zettingsverschil (dh) over een bepaalde lengte. Deze relatie is te schrijven in een vergelijkingvorm als weergegeven in Vergelijking X-3, de benodigde constante staan weergegeven in Tabel X-6. Daarna is het mogelijk om met behulp van deze gegevens ontwerpgrafieken op te stellen voor een bepaalde a_w en MTVV waarde, dit is in Figuur X-6 gedaan voor verschillende grenswaarden (a_w van 0,4 m/s², 0,5 m/s² en 0,6 m/s² en MTVV van 0,6 m/s², 0,8 m/s² en 1,0 m/s²).

Vergelijking X-3

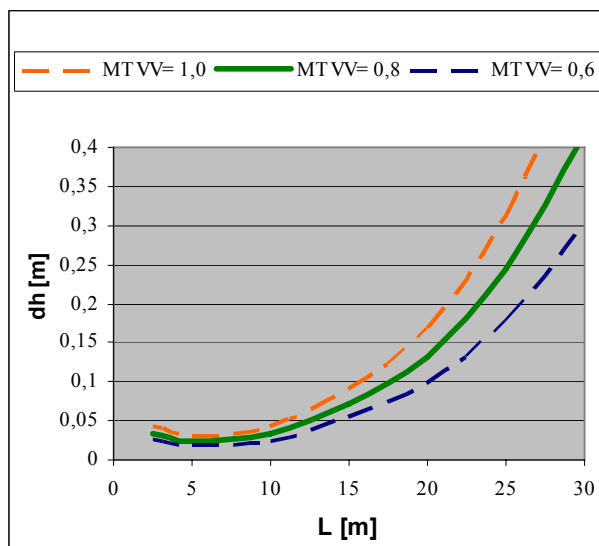
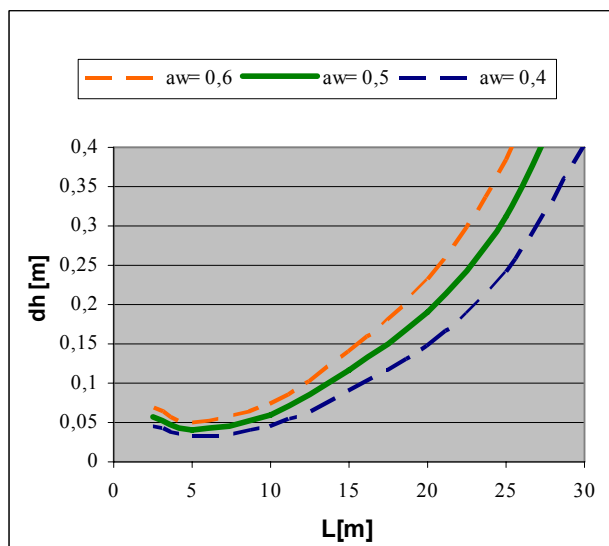
$$a_w = A * dh + B$$

$$MTVV = C * dh + D$$

Met a_w in m/s²
 MTVV in m/s²
 dh in m
 A en C in 1/s²
 B en D in m/s²

Tabel X-6: constante tbv Vergelijking X-3

L [m]	a_w [m/s ²]		MTVV [m/s ²]	
	A	B	C	D
2,5	8,21	0,03	23,89	-0,01
5	11,18	0,04	31,76	0,02
10	7,04	0,08	20,22	0,13
15	3,90	0,05	10,58	0,03
20	2,36	0,05	5,67	0,05
25	1,39	0,07	2,94	0,08
30	0,81	0,07	1,67	0,09



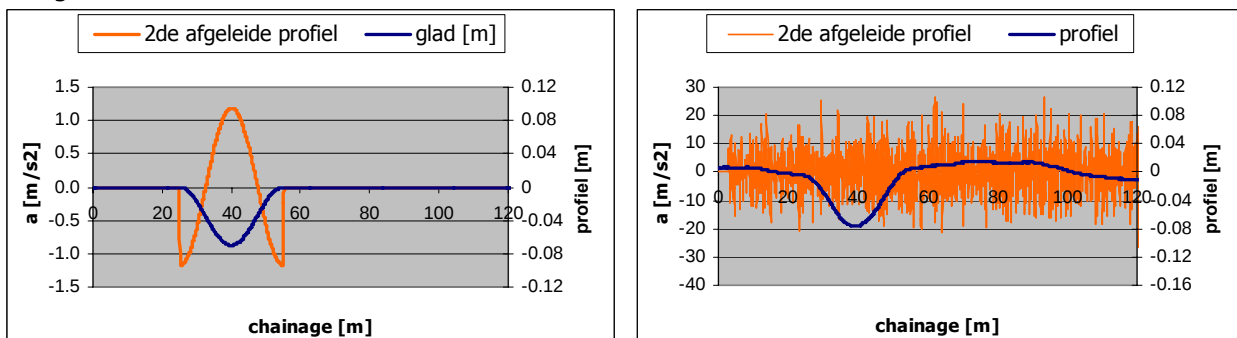
Figuur X-6 ontwerpgrafieken voor een eenmalige onvlakheid voor een snelheid van 100 km/h bij een bepaalde a_w en MTVV grens

XI Gevoeligheidsanalyse

Om te kijken waardoor de overeenkomsten bij de verschillende voertuiggegevens veroorzaakt worden, worden verschillende stappen kort doorlopen. Als basis is hierbij steeds de invoer van een eenmalige onvlakheid met een zettingsverschil (Δh) van 0,07 meter over een lengte (L) van 15 meter. Er is telkens gewerkt met een voertuigsnelheid van 100 km/h.

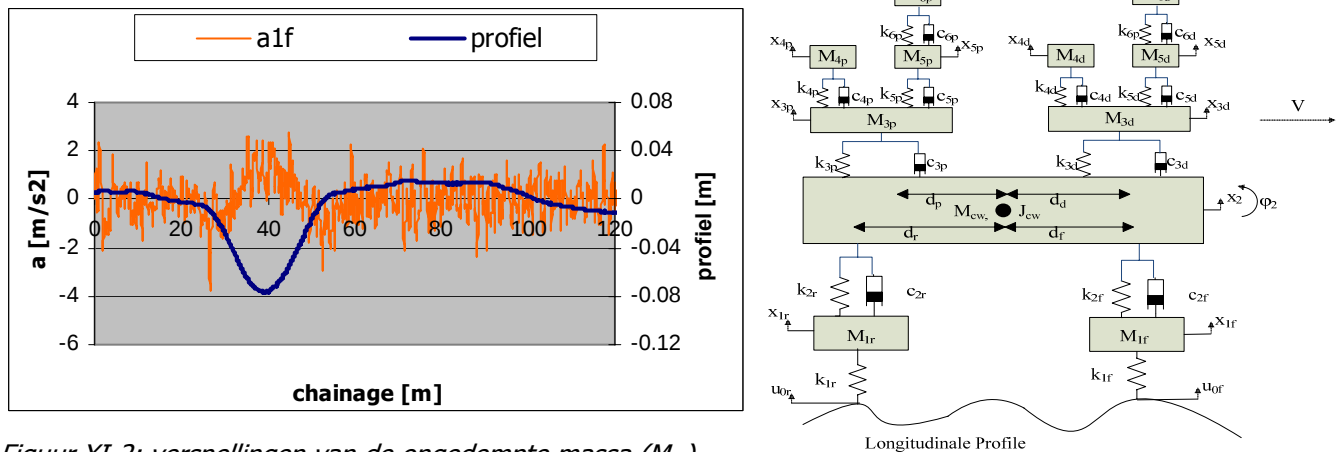
XI.1 Wat doet het voertuigmodel

De eerste stap is dat er gebruik wordt gemaakt van het voertuigmodel. Dit kan eigenlijk als een soort filter gezien worden wat over het wegprofiel geplaatst wordt. Om dit toe te lichten worden de stappen van het model één voor één doorgelopen. De eerste stap is een standaard onvlakheid die opgelegd wordt (Figuur XI-1) hierbij is ook de tweede afgeleide naar tijd (de versnellingen) weergegeven. Over deze standaard onvlakheid wordt daarna nog een basisonvlakheid geplaatst die bestaat uit een werkelijk wegprofiel wat als vlak geclassificeerd is.



Figuur XI-1: invoer profiel exclusief (l) en inclusief (r) basisonvlakheid

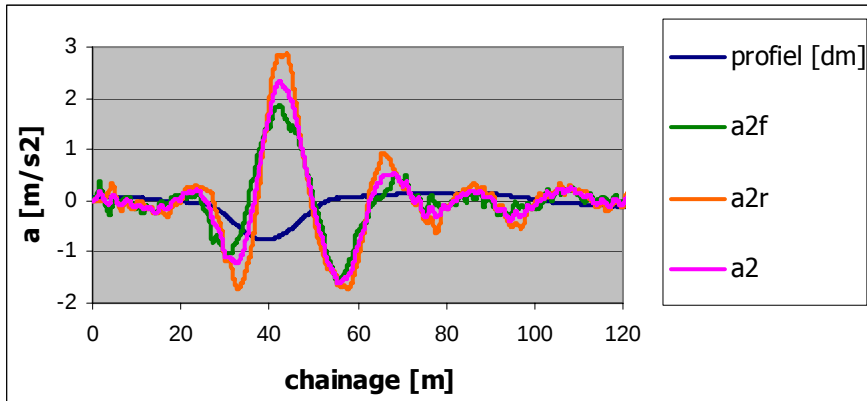
Nu word er bekeken wat de versnellingen van de verschillende voertuigonderdelen zijn om zo te bepalen wat de invloeden zijn van de verschillende dempers- en veer karakteristieken.



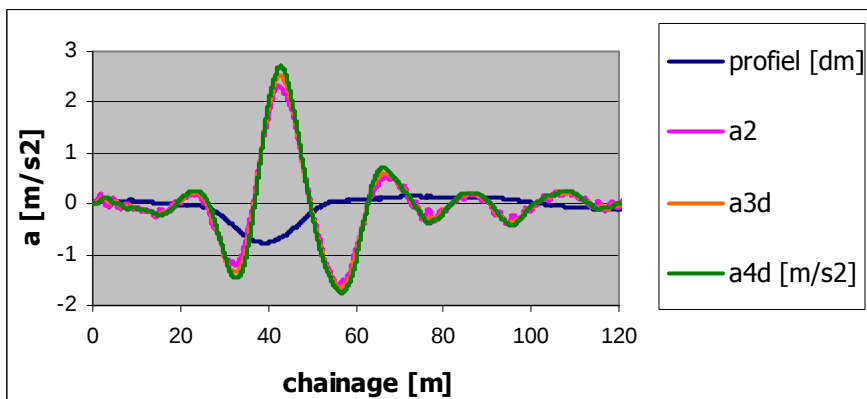
Figuur XI-2: versnellingen van de ongedempte massa (M_{1f})

In Figuur XI-2 zijn de versnellingen van de ongedempte massa van de vooras weergegeven. Hieruit blijkt dat de banden veel invloed hebben op de filtering van de versnellingen van het profiel. De invloed van de opgelegde onvlakheid komt hierin terug naar voren.

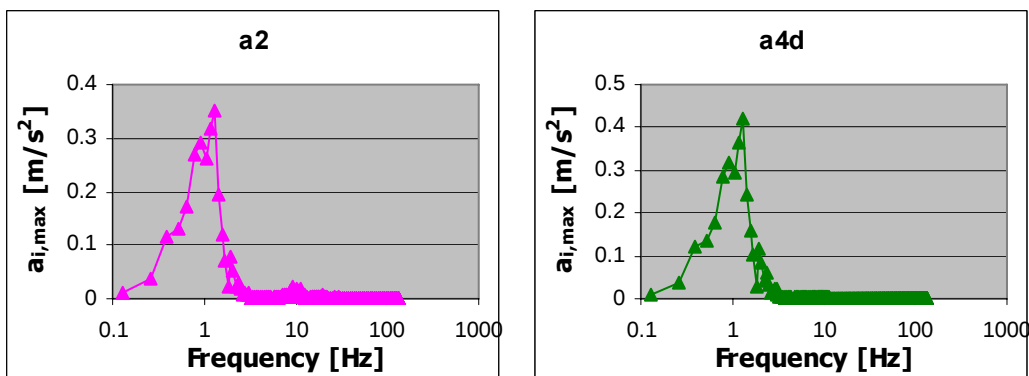
In Figuur XI-3 en Figuur XI-4 zijn de versnellingen van de verschillende onderdelen gegeven. Hieruit blijkt vooral dat de wielophanging veel invloed heeft op welke versnellingen je als bestuurder ervaart. De invloed van de andere onderdelen is veel kleiner op de versnellingen van de bestuurder, aangezien de versnellingsuitvoer dezelfde vormen houden. Het enige is dat er tussen het de versnellingen van het chassis (a_2) en die van de bestuurder (a_{4d}) de versnellingen met een frequenties rond de 10 Hz nog uitgefilterd worden (zie Figuur XI-5).



Figuur XI-3: versnelling op de verschillende locatie van het chassis



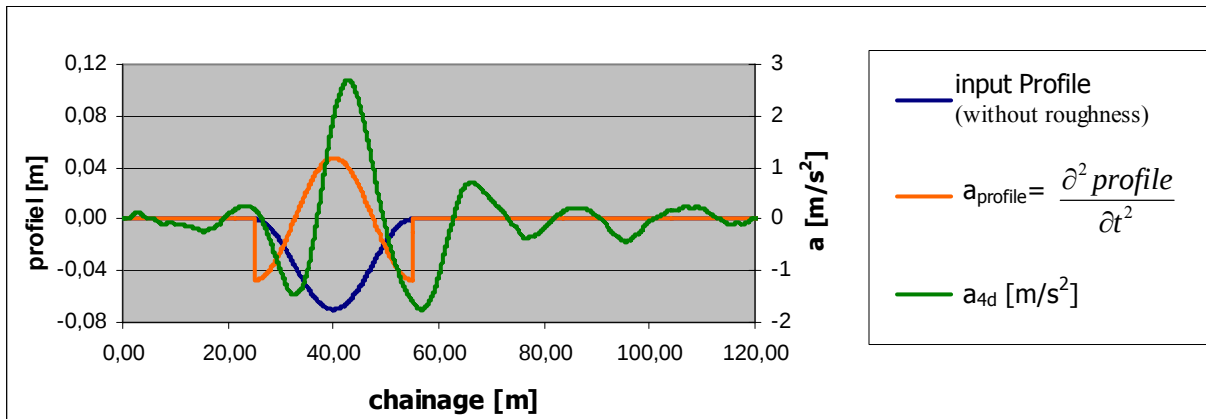
Figuur XI-4: versnellingen van voertuig, de stoel en de persoon



Figuur XI-5: versnellingen van het chassis (a_2) en het lichaam van de bestuurder (a_{4d}) in frequentie domein

Er kan dus gesteld worden dat de karakteristieken van de wielophanging en de banden de meeste invloed hebben in het voertuigmodel. Wat verder ook opvalt, is dat de versnellingsuitvoer veel weg heeft van de versnelling van het invoer profiel (Figuur XI-6). Zij het dat de absolute waarde verschillen en er een fase verschil is. Maar de overeenkomsten zijn zichtbaar, dit verklaart waarschijnlijk ook de lineaire relatie tussen de comfortparameters en het zettingsverschil (dh).

Het lijkt er op dat de toppen van de versnellingen gerelateerd zijn aan de 2^{de} afgeleide van het profiel, dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat er gewerkt is met een sinusvormig profiel. Het dient ook zeker de aanbeveling om andere vormen van onvlakheid te onderzoeken.



Figuur XI-6: invoerprofiel met een zettingsverschil (dh) over een lengte (L) van 15 meter, en het resultaat hiervan op de verticale versnellingen van de bestuurder (a_{4d}) bij een voertuigsnelheid van 100 km/h.

XI.2 Bepaling comfortparameters op directe wijze

Met de veronderstelling dat de versnellingen van de bestuurder gerelateerd zijn aan de 2^{de} afgeleide van het profiel, als het tenminste een sinusvormig profiel is, kan er gesteld worden dat direct uit het wegprofiel een comfortparameter af te leiden is. Dit kan gedaan worden met behulp van Vergelijking XI-1.

Vergelijking XI-1

$$a_w = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Als versnellingsuitvoer uit een enkele sinusoïde bestaat geldt er:

$$a_w = \frac{1}{2} (a_w(t))^2 = \frac{1}{2} (w * a)^2 = \frac{1}{2} \left(w * \frac{\partial^2 y}{\partial t^2_{\max}} \right)^2$$

Met: a_w = comfortparameter [m/s²],
 $a_w(t)$ = de gewogen verticale versnelling als functie van tijd [m/s²];
 $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ = de 2^{de} afgeleide naar tijd van een sinusvormig invoerprofiel (zie Vergelijking XI-2),
 w = een wegingsfunctie bestaande uit de comfortwegingsfunctie en een wegingsfunctie volgend uit het voertuigmodel.

Vergelijking XI-2

$$y = \frac{dh}{2} * \cos(f * 2\pi * t) = \frac{dh}{2} * \cos\left(\frac{v}{2L} * 2\pi * t\right)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{dh}{2} \left(\frac{v * \pi}{L}\right)^2 * \cos\left(\frac{v * \pi}{L} * t\right)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2_{\max}} = -\frac{dh}{2} \left(\frac{v * \pi}{L}\right)^2$$

Met: f = frequentie van de opgelegde onvlakheid [Hz]
 dh = opgelegde zettingsverschil [m]
 L = lengte waarover het zettingsverschil optreedt [m]
 V = voertuigsnelheid [m/s]

Met behulp van deze vergelijkingen is het nu mogelijk om het toegestane zettingsverschil te bepalen bij bepaalde sinusoïdes. Dit kan gedaan worden met behulp van Vergelijking XI-3. De enige onbekende in deze vergelijking is de wegingsfunctie die bestaat uit de wegingsfuncties met betrekking tot comfort als bepaald in ISO 2631-1 [6] en een wegingsfunctie die afhankelijk is van het voertuigmodel.

Vergelijking XI-3

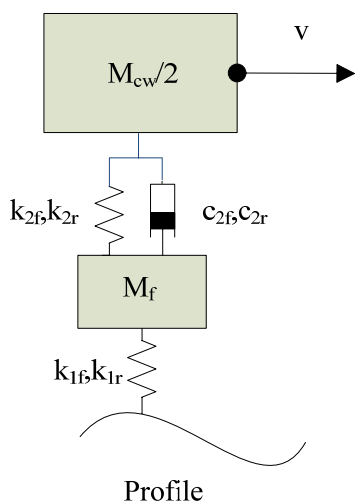
$$dh = \sqrt{2 * a_w} * \frac{2}{w} * \left(\frac{L}{v * \pi}\right)^2$$

Met: dh = het toegestane zettingsverschil horende bij een bepaalde a_w [m]
 L = lengte waarover het zettingsverschil optreedt [m]
 V = voertuigsnelheid [m/s]
 a_w = comfortparameter [m/s²]
 w = een wegingsfunctie bestaande uit de comfort wegingsfunctie en een wegingsfunctie volgend uit het voertuigmodel

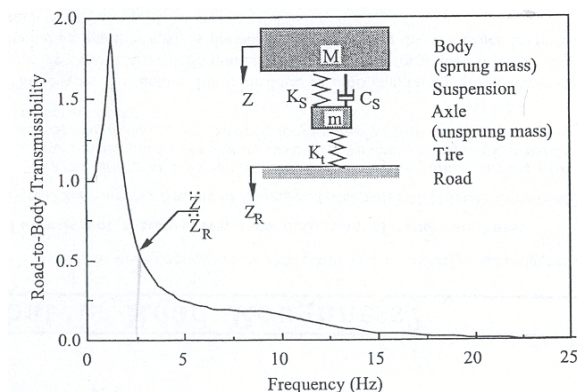
Bepaling wegingsfunctie "w"

Zoals net al gesteld is, is de wegingsfunctie "w" afhankelijk van de gegevens in het voertuigmodel en van de wegingsfuncties met betrekking tot comfort. Als eerst wordt er verder ingegaan op de wegingsfunctie met betrekking tot het voertuigmodel.

Uit bijlage XI.1 volgden dat de wielophanging en banden de meeste invloed hebben in het voertuigmodel, daarom wordt het voertuigmodel nu eerst vereenvoudigd tot een kwartvoertuigmodel als weergegeven in Figuur XI-7. In het algemeen geldt er voor dit voertuigstelsel een responsfunctie als weergegeven in Figuur XI-8.

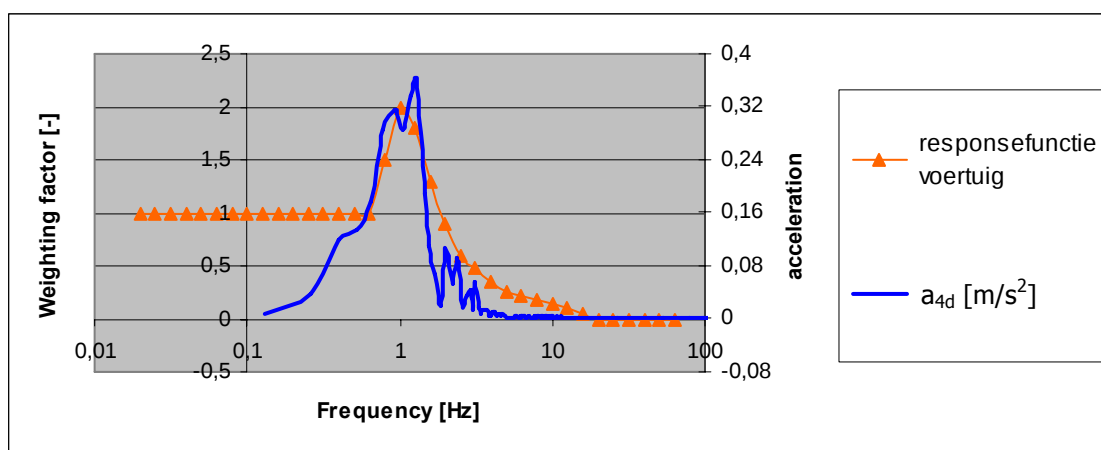


Figuur XI-7 kwart voertuigmodel



Figuur XI-8: responsefunctie voor een enkelvoudig massaveer systeem [15]

De vorm van deze responsfunctie komt duidelijk terug als deze vergeleken wordt met de uitvoer van het complete voertuigmodel (a_{4d}), zie Figuur XI-9. Alleen de lage frequenties komen niet terug in de uitvoer. Dit wordt mogelijk veroorzaakt omdat deze versnellingen in het invoer profiel niet voorkomen, aangezien de ARAN ze niet meet (golflengten groter dan 90 meter worden niet gemeten).



Figuur XI-9 responsefunctie versus uitvoer voertuigmodel (a_{4d})

De responsefunctie in Figuur XI-8 is eigenlijk een afleiding van de "dynamic amplification factor" (DAF). Deze factor is voor een enkelvoudig massaveersysteem (Figuur XI-10) te bepalen met behulp van Vergelijking XI-4.

Vergelijking XI-4 [11]

$$DAF =: \frac{u_{\max}}{u_{\text{static}}} = \frac{|X|}{X_{\text{static}}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \gamma^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}}$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

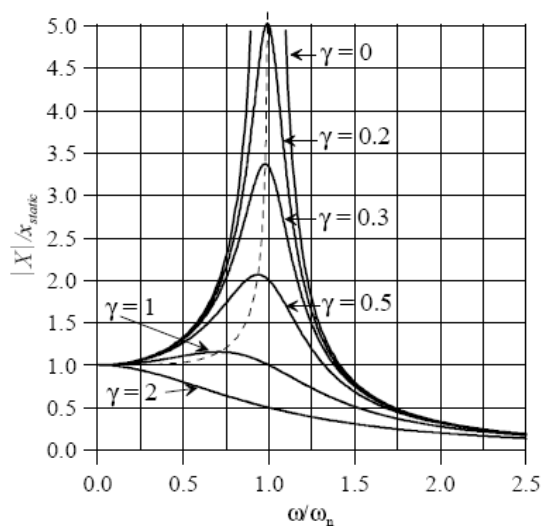
$$f = \frac{v}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\omega = f * 2\pi$$

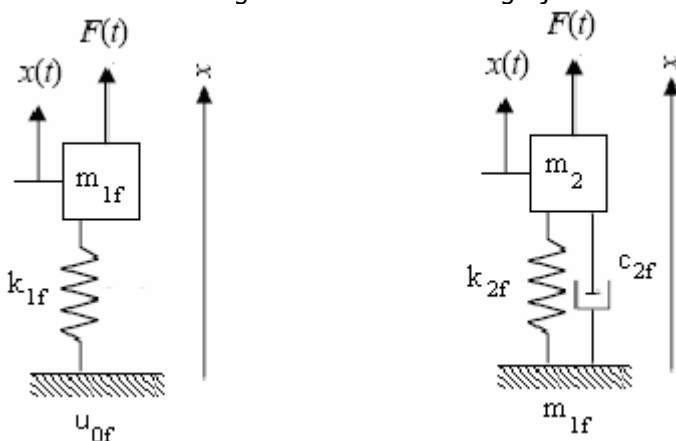
$$\gamma = \frac{c}{\sqrt{k * m}}$$

Met: k = veerconstante [N/m]
 m = massa [kg]
 c = dempingsconstante [N/ms]



Om nu een aanname te maken voor een wegingsfunctie met betrekking tot het voertuigmodel wordt het volgende vereenvoudigingen toegepast:

- Het uitgebreide model wordt vereenvoudigd tot twee losstaande enkelvoudige massaveersystemen (zie Figuur XI-10).
- De versnellingen van het chassis is gelijk aan de versnellingen van de bestuurder ($a_2 \approx a_{4d}$)



Figuur XI-10: vereenvoudigde voertuigmodel

Aangezien de ontwerpgrafieken in onderzoek zijn opgesteld voor onvlakheden over een lengte (L) variërend van 2,5 tot 30 meter wordt nu ook enkel dit domein bekeken. Daarvoor wordt voor iedere opgelegde onvlakheid de bijhorende frequentie bepaald bij een snelheid van 100 km/h, het resultaat hiervan is weergegeven in Tabel XI-1

Tabel XI-1: bepaling ω van de verschillende standaard profielen bij een snelheid van 100 km/h

L [m]	λ [m]	f [Hz]	ω [1/rad]
2,5	5	5,56	34,91
5	10	2,78	17,45
10	20	1,39	8,73
15	30	0,93	5,82
20	40	0,69	4,36
25	50	0,56	3,49
30	60	0,46	2,91

Met behulp van Vergelijking XI-4 is het nu mogelijk de dynamic amplification factor te bepalen voor de banden en assen van de Peugeot 504 [18] en het tweede voertuig [17]. Hiervoor zijn eerst de eigenfrequenties (ω_n) en de dempingsfactoren (γ) bepaald met behulp van de gegevens als weergegeven in Tabel XI-2 en Tabel XI-3. De resultaten zijn weergegeven in Tabel XI-4 en Tabel XI-5. In Figuur XI-11 zijn de uiteindelijke dynamic amplification factor weergegeven voor het domein van L is 2,5 meter tot L is 30 meter.

Tabel XI-2: Input parameters Peugeot 504 [18]

i^*	Massa (M_i) [kg]	Dempings-constante (c_i) [N•s/m]	Stijfheids-constante (k_i) [N/m]	Traagheidsmoment (I_i) [kg•m ²]
1f	70	0	250.000	-
1r	70	0	250.000	-
2f	-	4500	28.000	-
2r	-	4000	35.000	-
2	1.090	0	0	1.896

Tabel XI-3: inputparameters 2^{de} voertuig [17]

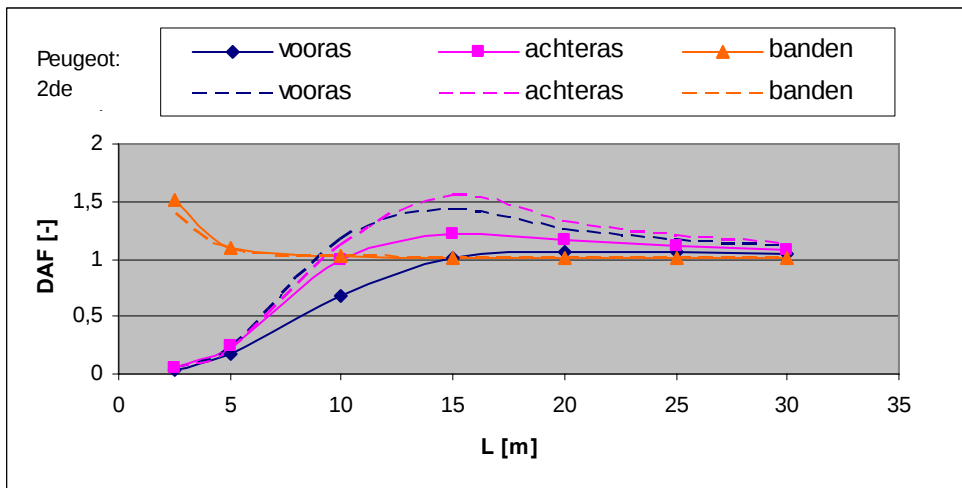
i^*	Massa (M_i) [kg]	Damping-constante (c_i) [N•s/m]	Stijfheid-constante (k_i) [N/m]	Traagheidsmoment (I_i) [kg•m ²]
1f	70	0	300.000	-
1r	50	0	300.000	-
2f	-	2822	30.000	-
2r	-	2462	27.000	-
2	1.000	0	0	1.430

Tabel XI-4 bepaling ω en γ voor verschillende onderdelen van de Peugeot 504

	banden		assen	
	voor	achter	voor	achter
ω_n	59,76143	59,76143	7,167716	8,01375
γ	-	-	1,151954	0,915857

Tabel XI-5 bepaling ω en γ voor verschillende onderdelen van het 2^{de} voertuig

	banden		assen	
	voor	achter	voor	achter
ω_n	65,46537	77,45967	7,745967	7,348469
γ	-	-	0,728637	0,670072

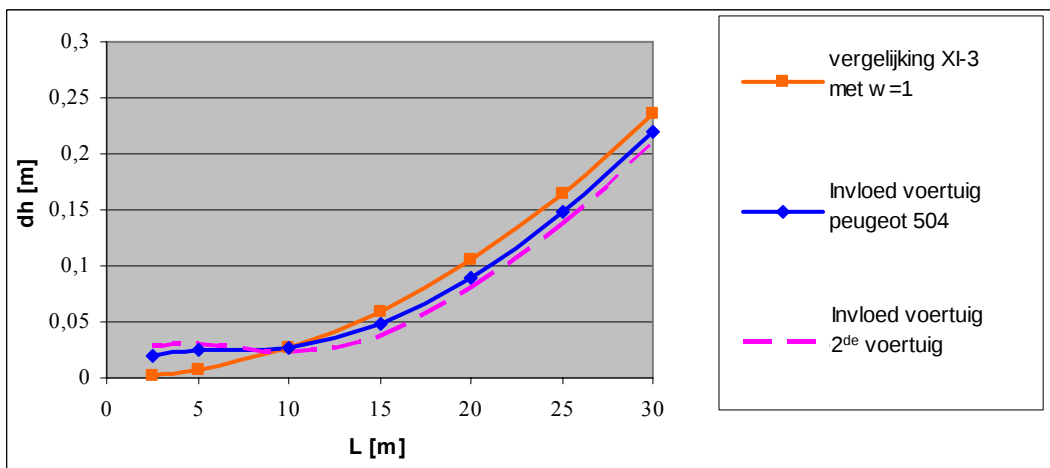


Figuur XI-11: DAF-functie volgend uit as en band gegevens Peugeot 504

Het is nu mogelijk om een eerste aanname te maken van de wegingsfactor voor het voertuigmodel, dit door de as en de band responsfunctie onafhankelijk van elkaar te beschouwen (wat eigenlijk niet realistisch is). En deze daarna met elkaar te vermenigvuldigen.

Ondanks dat de DAF-functies niet realistisch zijn wekt het wel de indruk dat de voertuiggegevens wel degelijk van invloed zijn op de wegingsfuncties voor het beschouwde domein. Dit aangezien de invloed van de dempingskarakteristiek goed zichtbaar is bij lengten van 10 in 15 meter.

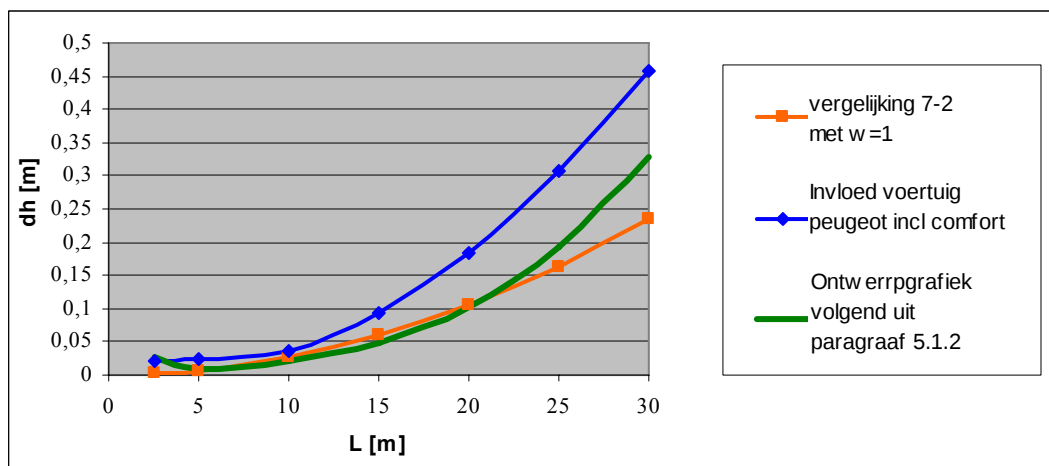
Als dit teruggekoppeld wordt naar Vergelijking XI-3 is het nu mogelijk de invloed van de voertuiggegevens in ontwerpgrafieken te bepalen. Hiervoor is er gebruik gemaakt van een wegingsfactor w die bestaat uit de DAF van de achteras en de achterband, en een a_w criterium van $0,5 \text{ m/s}^2$, het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur XI-12. In dit figuur is zichtbaar dat de invloed van de wegingsfactor in absolute zin gering is. Verder blijkt er uit de grafiek dat het toegestane zettingsverschil over lengtes kleiner dan 10 meter constant blijft. Dit komt doordat de wegingsfunctie van het voertuig afneemt. Wat in hoeverre meewerkt, dient verder onderzocht te worden. Maar hieruit blijkt wel dat het profiel mee van het belangrijks is waaruit de ondergaande versnellingen van afhankelijk is. Dit aangezien de ontwerpgrafiek waarin de invloed van het voertuig betrokken is niet veel afwijkt van een ontwerpgrafiek met een wegingsfactor " w " gelijk aan 1.



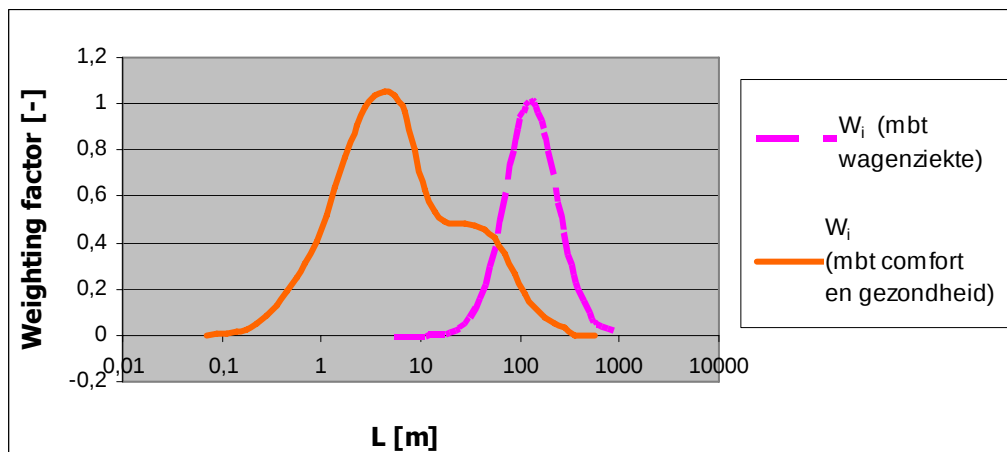
Figuur XI-12 invloed van voertuiggegevens op ontwerpgrafieken voor een reeks onvlakheden ($a_w=0,5 \text{ m/s}^2$) en bij voertuigsnellheid van 100 km/h.

Daarna is er in Figuur XI-13 de invloed van de wegingsfactoren voor comfort ook meegenomen. De wegingsfunctie met betrekking tot comfort volgen uit de ISO 2631-1 [6], en zijn voor een snelheid van 100 km/h weergegeven in Figuur XI-14. Als dit vergeleken wordt met de resultaten uit paragraaf 5.1.2 is duidelijk zichtbaar dat de aannames die gemaakt zijn niet geheel realistisch zijn ten opzichte van de resultaten van het comfort model.

Maar het belangrijkste wat hier uit afgeleid kan worden is dat de basis van de ontwerpgrafieken eigenlijk gelegd word door Vergelijking XI-3 en dat daarna de voertuiggegevens voor zorgen dat de ontwerpgrafiek naar een constante waarde gaat voor de toegestane zettingsverschillen over kortere lengten. Een tweede wat geldt is dat de wegingsfunctie met betrekking tot het comfort van het menselijk lichaam er voor zorgt dat er een groter zettingsverschil is toegestaan bij de grotere lengten.



Figuur XI-13: ontwerpgrafieken volgend uit de vergelijking en uit het totale model voor een reeks onvlakheden bij een snelheid van 100 km/h

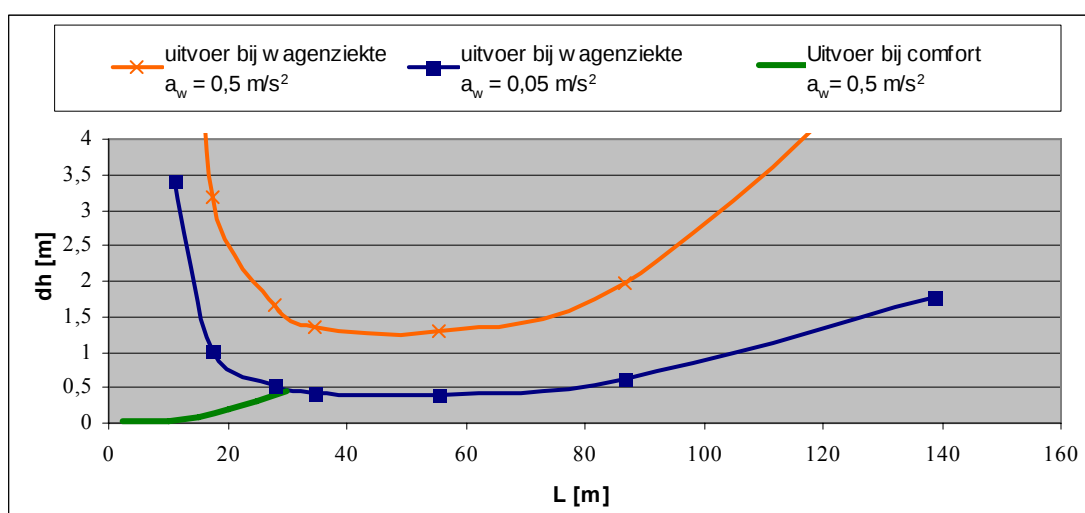


Figuur XI-14: Wegingsfuncties (W_i) voor verticale versnellingen bij een snelheid van 100 km/h [6]

Een voordeel van het bepalen van de ontwerpgrafieken met behulp van Vergelijking XI-3 is dat het eenvoudig is om een aanname te maken wat de vorm is van de ontwerpgrafieken met andere randvoorwaarde. Zo is het eenvoudig te kijken wat de invloed is van de wegingsfunctie met betrekking tot wagenziekte (zie Figuur XI-14) op de ontwerpgrafieken.

Bij het opstellen van het comfortmodel is er gekozen om enkel verder te werken met de wegingsfunctie met betrekking tot comfort, maar in de ISO 2631-1 is ook een wegingsfunctie gegeven die betrekking heeft op wagenziekte. De ontwerpgrafieken volgend uit de wegingsfunctie van wagenziekte zijn weergegeven in Figuur XI-15, hieruit blijkt dat de wagenziekte vooral veroorzaakt wordt door de zettingsverschillen over de grotere lengten (20 tot 80 meter). Maar als de grens van de versnellingen voor wagenziekte hetzelfde is als bij comfort zijn er grotere zettingsverschillen toegestaan.

Het is alleen niet bekend waar ongeveer de grens ligt van de gewogen waarde voor de versnellingen met betrekking tot wagenziekte, daarom dient dit ook zeker verder onderzocht te worden. Ook omdat deze ontwerpgrafieken zijn samengesteld op grove aannames maar het belangrijkste dat er uit volgt is dat als er problemen zijn met betrekking tot zettingsverschillen over grotere lengten dit zeker verder onderzocht dient te worden.



Figuur XI-15: invloed van de wegingsfunctie mbt wagenziekte op de ontwerpgrafieken van reeksonvlakheden bij een voertuigsnelheid van 100 km/h