

Kampweg 5
3769 DE Soesterberg
Postbus 23
3769 ZG Soesterberg

www.tno.nl

T +31 88 866 15 00
F +31 34 635 39 77

TNO-rapport

TNO 2018 R10097 | Eindrapport

Gladheid op voegovergangen: subjectieve en objectieve metingen

Datum	30 januari 2018
Auteur(s)	J.H. Hogema
Aantal pagina's	43 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Projectnaam	Rijbeleving en testauto-metingen op voegovergangen
Projectnummer	060.27742

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

Samenvatting

In de verbindingsweg VWh van knooppunt Amstel liggen twee voegovergangen waarover Rijkswaterstaat (RWS) veel klachten krijgt ten aanzien van stroefheid en subjectieve onveiligheid. Dit ondanks dat de voegovergangen voldoen aan de vereiste profieldiepte. In maart 2017 heeft RWS onderzoek uitgevoerd waarin conventionele stalen voegovergangen zijn vergeleken met twee nieuwe, stroeve typen. In dat onderzoek bleek dat de nieuwe voegovergangen door zowel motorrijders als automobilisten beter gewaardeerd worden dan de voegovergangen met het standaard profiel. Uit camerabeelden was echter niet objectief af te leiden waarom dit het geval was. Daarmee werd een kennisleemte geconstateerd ten aanzien van de stroefheid op voegovergangen, namelijk (a) hoe deze verstoring werkt op passerende voertuigen en (b) hoe chauffeurs dit beoordelen.

In oktober 2017 heeft RWS de bestaande voegovergangen (met standaardprofiel, en gladder dan het aangrenzende asfalt) op de VWh laten vervangen door een ander type, waarbij op het standaard profiel een slijtlaag was aangebracht (stroever dan het aangrenzende asfalt). In het hier gerapporteerde project zijn in de oude situatie en nieuwe situatie subjectieve metingen verricht om de chauffeursbeleving tijdens het rijden over de voegovergang in kaart te brengen. Tegelijkertijd werden objectieve data gelogd, zodat in de analyse gekeken kon worden naar het effect van de voegovergangen in termen van de stuurinput (stuurwielhoek en -koppel) en van de voertuigbeweging.

Op de gladde voegovergang nam de subjectieve gladheid toe als functie van de snelheid: van 'helemaal niet' tot 'nauwelijks' glad bij 70 km/u, tot en met 'zeer glad' bij 100 km/u. Op de stroeve voegovergang bleef het oordeel nabij 'helemaal niet' glad, bij alle beproefde snelheden (70 t/m 100 km/u). De gladheid van de voegovergang kwam ook tot uiting in de objectieve metingen, zowel in de stuurmaten als in de voertuigbeweging. Er was een hoge correlatie tussen de objectief gemeten verstoringen en de subjectieve gladheid. De hier ontwikkelde testmethode kan daarom goed worden toegepast om nieuwe voegovergang-concepten te beproeven, of om stroefheidseisen toe te voegen aan de ontwerpisen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
1.1	Voegovergangen - algemeen	4
1.2	De projectcasus en aanpak	4
2	Methode	6
2.1	Het wegvak en de overgangsvoegen	6
2.2	Meetvoertuig en data-logging	10
2.3	Testchauffeurs	11
2.4	Vragenlijst	11
2.5	Procedure	12
2.6	Analyse	12
3	Resultaten	17
3.1	Vragenlijst	17
3.2	Voertuigdata	18
3.3	Correlaties	25
4	Integratie.....	27
5	Discussie en conclusies	30
6	Referenties	31
7	Ondertekening	33
	Bijlagen	
	A Details meetvoertuig	
	B Stroefheidsmetingen	
	C Statistiek	
	D Vlakheidsmetingen	

1 Inleiding

1.1 Voegovergangen - algemeen

Voegovergangen vormen de schakel tussen wegen en bruggen of viaducten. Ze moeten constructief sterk genoeg zijn om het verkeer te dragen, daarbij rek en krimp opvangen, en uiteraard moeten ze veilig zijn om overheen te rijden.

In de RTD 1007-2 (RWS, 2014) staan eisen die worden gesteld aan voegovergangen. De voegovergang moet ten aanzien van stroefheid zodanig zijn “dat onder normale omstandigheden er geen gevaar ontstaat voor de weggebruikers.” Specifieker: *“Voor alle delen van de voegovergang met een oppervlak groter dan 150 x 150 mm dient een minimaal reliëf (textuur) aanwezig te zijn met een diepte van 1,2 mm, of dient met testen aangetoond te zijn dat de stroefheid minimaal gelijk is aan de aansluitende wegverharding”* (RWS, 2014, paragraaf 5.3.4).

Aan deze laatste eis kan worden voldaan door een stalen voegovergang te voorzien van een slijtlaag. Deze oplossing heeft als nadeel dat de stroeve toplaag eraf slijt, waarna een nieuwe slijtlaag moet worden aangebracht om voldoende stroefheid te behouden.

1.2 De projectcasus en aanpak

In de verbindingsweg h (VWh) van knooppunt Amstel (A2 naar A10-west) liggen twee voegovergangen waar Rijkswaterstaat (RWS) veel klachten over krijgt ten aanzien van stroefheid en subjectieve onveiligheid. Dit ondanks dat de voegovergangen voldoen aan vereiste profieldiepte.

In maart 2017 heeft RWS laboratorium- en praktijkonderzoek uitgevoerd waarin conventionele stalen voegovergangen zijn vergeleken met twee nieuwe typen voegovergangen (RWS, 2017). In het huidige project wordt dezelfde typeaanduiding gehanteerd als in RWS (2017). Vergeleken zijn:

- Type 0.1: stalen voegovergangen die zijn voorzien van een reliëf dat voldoet aan de RTD 1007-2, versie 3.0. Dit zijn voegovergangen uit de bestaande situatie.
- Type 1: stalen voegovergangen waarin een “wybertjesprofiel” is aangebracht.
- Type 2: stalen voegovergangen waarin groeven zijn aangebracht.

Praktijkmetingen zijn uitgevoerd op de VWh in de nacht van 24 op 25 maart 2017. Hierbij is eerst gemeten op de bestaande situatie (profiel type 0.1). Na deze metingen zijn de voegovergangen vervangen door de alternatieve profileringen: type 1 op de eerste en type 2 op de tweede voegovergang. Na afloop van de metingen zijn de oude platen weer teruggeplaatst. Alle metingen zijn onder natte omstandigheden uitgevoerd.

Uit stroefheidsmetingen bleek dat de stroefheid van voeg typen 1 en 2 significant hoger was dan van type 0.1, maar nog steeds lager dan van de aangrenzende deklaag.

Ook zijn in de praktijkproef testritten gemaakt door diverse motorrijders, die met vaste opgegeven snelheid over de verbindingsboog reden. Na elke passage werd hun subjectieve oordeel over de ervaren stroefheid gevraagd. Deze testritten zijn vastgelegd met behulp van een High-Speed camera die geplaatst was in een camerawagen die voor de motorrijder uit reed. De subjectieve oordelen van de chauffeurs van de camerawagen en van een ander voertuig waarmee geluidsmetingen zijn gedaan werden eveneens geanalyseerd.

De resultaten lieten zien dat de alternatieve voegovergangen typen 1 en 2 door zowel motorrijders als automobilisten beter gewaardeerd werden dan de voegovergangen met het standaard profiel. Uit de camerabeelden was echter niet af te leiden waarom dit het geval was. In deze beelden was namelijk niets waarneembaar van een verstoring in de beweging van de auto of motor bij het passeren van de voegovergang. Hierdoor vond RWS het prematuur om op basis hiervan in de RTD 1007-2 een Type Test met bijbehorende stroefheidseisen op te nemen.

In de nacht van 13 op 14 oktober 2017 liet RWS de originele voegovergangen (type 0.1) vervangen door stalen voegovergangen met dezelfde profilering en met een slijtlaag (type 0.2). Dit in de verwachting dat type 0.2 de klachten grotendeels zal verhelpen. RWS wilde van deze gelegenheid gebruik maken om grip te krijgen op de beleving van weggebruikers bij voegovergangen en hoe deze mogelijk ook objectief meetbaar gemaakt kan worden. RWS heeft aan TNO opdracht verleend om hierbij te ondersteunen met opzet, uitvoering en analyse van een meetprogramma. De scope van dit project was een vergelijking van de subjectieve beleving en objectief gedrag van de slecht presterende voeg type 0.1 met de naar verwachting goed presterende voeg type 0.2.

Specifiek heeft TNO tijdens de ombouw professionele testchauffeurs en een geïnstreunde auto ingezet. Bij verschillende snelheden is met een vragenlijst de chauffeursbeleving tijdens het rijden over de voegovergang in kaart gebracht. Tegelijkertijd zijn objectieve voertuigdata gelogd, zodat het effect onderzocht kon worden van de voegovergangen op stuur-input (stuurwielhoek en -koppel) en voertuigbeweging. In de analyse zijn deze subjectieve en objectieve metingen onderling met elkaar in verband gebracht en is kwalitatief gekeken hoe deze samenhangen met de stroefheid en vlakheid van de voegovergangen.

2 Methode

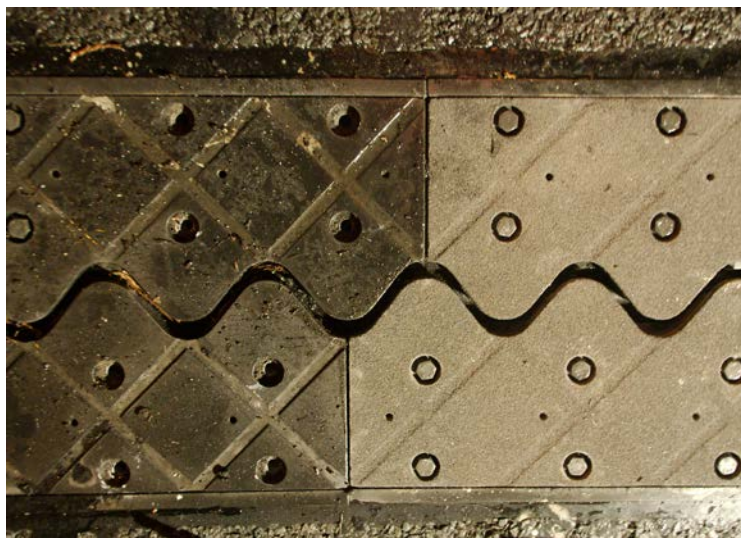
2.1 Het wegvak en de overgangsvoegen

Het onderzoek is uitgevoerd op de verbindingsweg h (VWh) van knooppunt Amstel. Deze verbindingsweg verbindt de A2 (komend vanuit de richting Utrecht) met de A10 (richting Schiphol). Deze weg heeft een boogstraal van circa 200 meter met een verkanting van respectievelijk 4.6% bij de eerste en 4.9% bij de tweede voegovergang. De ontwerpsnelheid en de snelheidslimiet zijn 70 km/u, terwijl het 85^e percentiel van de snelheid tussen de 95 en 100 km/u ligt (RWS, 2017).

De voegen liggen bij hm 30,9 respectievelijk hm 30,82. De eerste voeg ligt onder een hoek van 52 graden met de as van de weg en de tweede onder 76 graden (RWS, 2017). De voegovergang heeft een breedte van 0,50 m. Rekening houdend met de hoeken waaronder ze geplaatst zijn is de effectieve breedte voor het verkeer 0,63 respectievelijk 0,52 m. De duur van het contact tussen een band en de beide voegen hangt af van de snelheid; deze varieert in onze metingen van 19 tot 33 ms (zie Tabel 1).

Tabel 1 Contactduur (ms) als functie van snelheid op de beide voegen.

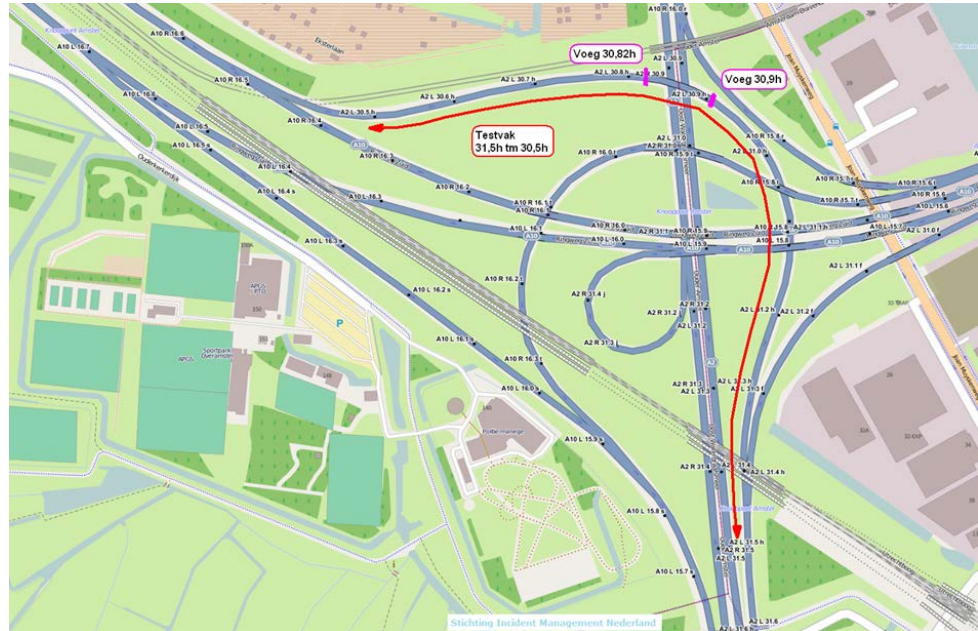
Snelheid (km/u)	Voeg 1 (0,63 m)	Voeg 2 (0,52 m)
70	33	27
85	27	22
100	23	19



Figuur 1 Bovenaanzicht van de toegepaste voegen: type 0.1 (links) en type 0.2 (rechts).

In dit onderzoek waren twee voegtypen betrokken (zie Figuur 1). Deze worden aangeduid met type 0.1 en type 0.2 (conform de aanduidingen in RWS 2017):

- Type 0.1 is het standaard profiel, zonder slijtlaag
- Type 0.2 is het standaard profiel, met Sika Poxitar F slijtlaag



Figuur 2 Locatie verbindingsboog VWV en daarin de voegovergangen (Bron: RWS, 2017).



Figuur 3 Wegbeeld circa 300 m voor de voegovergangen



Figuur 4 Wegbeeld circa 100 m voor de eerste voegovergang.



Figuur 5 Wegbeeld vlak voor de eerste voegovergang.



Figuur 6 Wegbeeld vlak voor de tweede voegovergang.

Om te kunnen rekenen aan de benodigde stroefheid om veilig te kunnen rijden wordt de volgende evenwichtsvergelijking gebruikt. Deze geldt voor een voertuig dat een cirkelvormig pad volgt (AASHTO, 2001).

$$\frac{0.01e+f}{1-0.01e\cdot f} \cdot g = \frac{v^2}{R} = CA \quad (1)$$

Hierin is v de snelheid van het voertuig (m/s), R de boogstraal (m), e de verkanting (%), f de laterale wrijvingscoëfficiënt (-) en g de versnelling t.g.v. de zwaartekracht (9.8 m/s^2). CA is de centrifugaalversnelling, benodigd om het voertuig deze cirkelvormige baan te laten volgen. N.B.: deze formule is equivalent met Vergelijking (2) zoals gegeven in Ruijs, Van der Horst en Broeren (2012). Hierin is V de snelheid in km/u.

$$R = \frac{V^2}{127(0.01\cdot e+f)} \quad (2)$$

Gegeven v , R en e kan de bijbehorende waarde voor f uit deze vergelijkingen worden opgelost. De resulterende waarden voor de constante snelheden die in dit project zijn aangehouden worden getoond in Tabel 2.

Tabel 2 Centrifugaalversnelling CA en benodigde laterale wrijvingscoëfficiënt in een cirkelvormige baan, als functie van snelheid (bij boogstraal $R=200 \text{ m}$, verkanting $e=5\%$).

v (km/h)	CA (m/s^2)	f (-)
70	1,89	0,142
85	2,79	0,231
100	3,86	0,337

2.2 Meetvoertuig en data-logging

Het testvoertuig was een Volkswagen Jetta uit 2009 met een 2.0 liter TSI benzinemotor en een met DSG automatische versnelling (Figuur 7). Het voertuig was voorwiel-aangedreven, had een rijklaargewicht van 1466 kg en een wielbasis van 258 cm. Meer technische details worden gegeven in Bijlage A.



Figuur 7 Het testvoertuig.

Banden

Tijdens de metingen was de Jetta uitgerust met banden in de afmetingen 205/55/16 V met een bandendruk van 2,4 bar. Praktische omstandigheden maakten dat op de vooras en achteras verschillende bandtypen gebruikt zijn:

- vooras: Goodyear Efficient grip Performance, dotcode 4015, profieldiepte tussen de 4,2 en 5,0 mm,
- achteras: 205/55 16 91 V Michelin Energy Saver, dotcode 2713, profieldiepte tussen de 4,0 en 4,8 mm.

Data logging

Het testvoertuig was uitgerust met een aantal sensor-systemen, waarvan de output door middel van een Busdaq data acquisitie systeem gelogd is met een frequentie van 100 Hz.

- Een OxTS RT-3003 systeem; dit systeem omvat een dGPS en sensoren voor het meten van longitudinale, laterale en verticale acceleraties en de bijbehorende hoekversnellingen. Het systeem levert ook de bijbehorende snelheden, posities en hoekverdraaiingen. De positie ten opzichte waarvan deze metingen gedaan worden komt overeen met de positie van de OxTS in de Jetta, te weten: 700 mm achter de achteras en 250 mm rechts van het midden van het voertuig.
- Stuurwielhoek en stuurwielkoppel zijn gelogd op basis van sensoren die vanuit de productie in het voertuig aanwezig zijn. Deze zijn via de voertuig CAN-bus gelogd.

Te analyseren variabelen

In de laterale voertuigcontrole (koershouden binnen de rijstrook inclusief het sturen door bochten) spelen de volgende variabelen een rol.

- De *stuurwielhoek* (in dit rapport uitgedrukt in graden) die de bestuurder realiseert.
- De kracht die de bestuurder op het stuurwiel uitoefent, of correcter: het *stuurkoppel*, waarbij het koppel is gedefinieerd als 'kracht maal arm'. Kracht wordt gemeten in Newton, de 'arm' komt overeen met de straal van het stuurwiel in meters, zodat de eenheid van koppel wordt uitgedrukt in Newtonmeters (Nm).

Rijdend in een stationaire situatie in een bocht oefent de bestuurder een constant koppel uit op het stuurwiel, dat nodig is om het stuurwiel in de gewenste constante hoek te houden, benodigd om het voertuig door de bocht te sturen. Dit gaat gepaard met een constante waarde voor de volgende variabelen:

- de laterale snelheid (m/s; lateraal is dwars op de lengte-as van het voertuig)
- laterale versnelling (m/s²)
- koershoeknelheid (°/s: verandering van de koershoek van het voertuig, d.w.z. de snelheid van rotatie om de verticale voertuig-as. Ook wel aangeduid als gierhoeknelheid, Engels: 'yaw rate').

De onderlinge relaties (statisch en dynamisch) tussen al deze variabelen zijn typisch niet-lineair, voertuig-specifiek en snelheidsafhankelijk. Zie voor een uitwerking van dergelijke verbanden bijvoorbeeld Kost (2014) en Pfeffer & Braess (2014).

2.3 Testchauffeurs

Aan het experiment namen twee testrijders deel. De testrijders hadden jarenlange testervaring met het rijden in en het ontwikkelen van auto's en subsystemen. Ze hebben ervaring met verschillende typen auto's en zijn getraind om zowel objectieve testen alsook subjectieve beoordelingen te geven door te voelen en te beoordelen hoe een voertuig zich gedraagt. Ze zijn getraind om zowel te testen met een defensief rijgedrag op de openbare weg met of zonder verkeer alsook op een testcircuit tot aan de limiet. Hun opleiding en training bestond onder andere uit:

- ATP (Automotive Testing Papenburg): "Proving ground driving license" B.
- BMW M- training en: "M Perfection" en "M Fascination".

2.4 Vragenlijst

De subjectieve gladheid van de voeg werd aangegeven op de Likert-schaal, met de vijf labels zoals hieronder aangegeven. Desgewenst konden de testchauffeurs hun oordeel in decimale scores geven.

In welke mate geeft deze voeg het gevoel van gladheid onder wielen?

1=Helemaal niet glad

2=Nauwelijks glad

3=Redelijk glad

4= Zeer glad

5=Uitermate glad

Direct na het passeren van een voegovergang gaf de testrijder mondeling zijn score. De proefleider noteerde deze. Eventuele opmerkingen over wat de testrijder ervaren had werden ook genoteerd.

2.5 Procedure

De metingen zijn verricht in de nacht van vrijdag 13 op zaterdag 14 oktober 2017. In deze nacht was er geen sprake van neerslag; de temperatuur bedroeg circa 15° C. Tijdens de metingen was de verbindingsweg h geheel afgesloten voor het normale verkeer. De metingen in de oorspronkelijke situatie (voeg 0.1) zijn uitgevoerd tussen 0:00 u en 01:15 u. De metingen in de nieuwe situatie (voeg 0.2) zijn uitgevoerd tussen 02:15 u en 04:10 u.

Alle metingen zijn uitgevoerd met een nat wegdek en natte voegovergangen. De natte stroefheid is namelijk maatgevend (RWS, 2008). Met een hogedrukreiniger werd daarom tussen de passages van het meetvoertuig de weg over een lengte van 2 m voor tot en met 2 m na de voegovergang nat gehouden. Daarmee had het voertuig in ieder geval een volledige wielomwenteling op nat asfalt gereden voordat de voegovergang werd bereikt.

De twee testchauffeurs wisselden tijdens de metingen van rol: terwijl de een reed fungeerde de ander als meettechnicus en als proefleider om de subjectieve scores te noteren.

Net als tijdens de eerdere test (RWS, 2017) zijn alle metingen uitgevoerd in de rijstrook 2 (de rechter van de twee rijstroken).

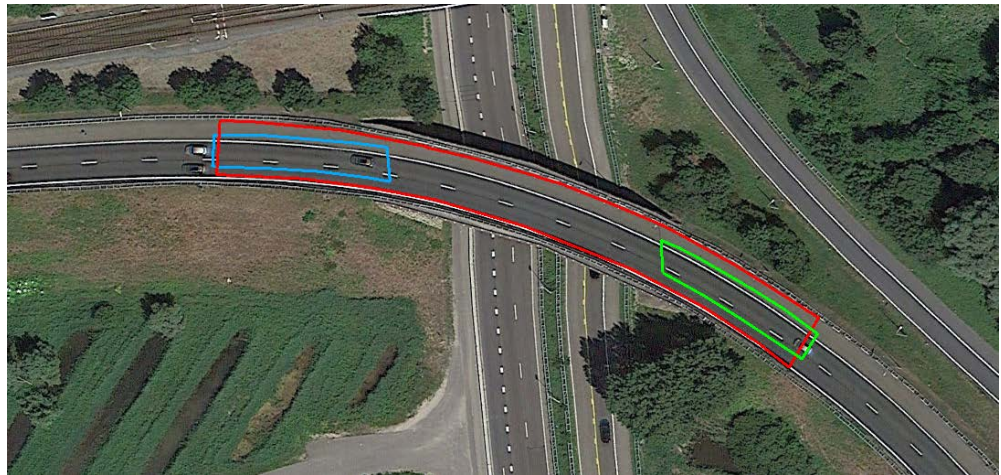
Beide chauffeurs reden in de volgende condities:

- Voegtype (type 0.1 versus type 0.2)
- Rijrichting: 'heen' versus 'terug'. Fysiek werd altijd gereden in strook nummer 2. Bij de richting 'heen' kwam dat overeen met de rechter rijstrook. De richting 'terug' is tegen de normale rijrichting in; deze metingen waren mogelijk omdat de verbindingsweg volledig was afgesloten voor het normale verkeer. Voor de chauffeurs kwam deze conditie over als rijden in de linker rijstrook van een snelweg, in een boog naar rechts.
- Snelheid: de metingen zijn uitgevoerd bij de geïnstrueerde snelheden 70, 85 en 100 km/u. De ontwerpsnelheid en de snelheidslimiet zijn 70 km/u. Volgens RWS (2017) ligt het 85^e percentiel van de snelheid in deze boog tussen de 95 en 100 km/u.

De metingen zijn herhaaldelijk uitgevoerd: drie herhalingen bij 85 en 100 km/u en (door de beperkte beschikbare meettijd) twee herhalingen bij 70 km/u. De volgorde van aanbieden van de snelheids- en richtingcondities is zoveel mogelijk gebalanceerd.

2.6 Analyse

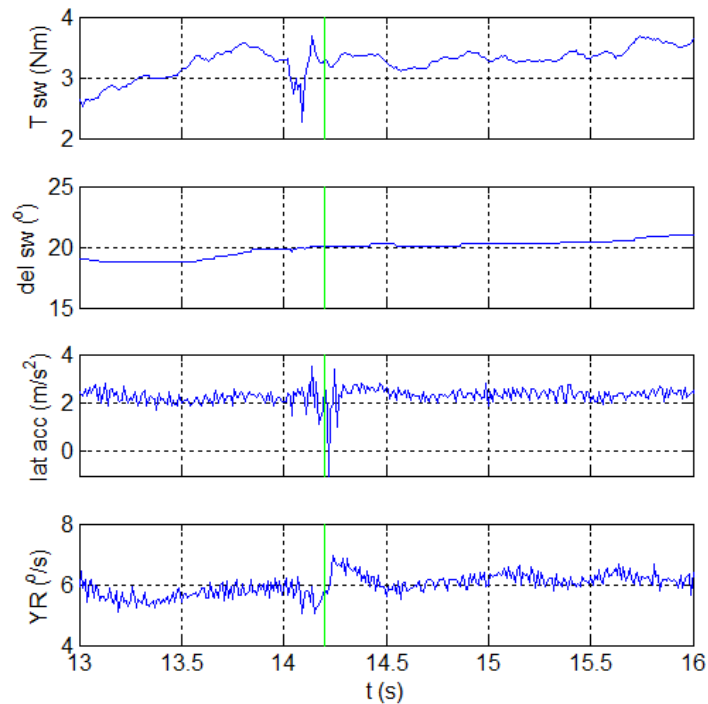
In de data zijn de momenten van het passeren van de voegovergangen geïdentificeerd met behulp van de GPS-data. Hierbij is gebruik gemaakt van de drie polygonen uit Figuur 8.



Figuur 8 Polygonen gebruikt bij de identificatie van de voegovergangen op basis van de GPS-data.

In eerste instantie zijn de delen van de rit geselecteerd waar de GPS-locatie binnen het rode polygoon vielen. In tweede instantie zijn de passages van de voegovergangen gemarkeerd op de momenten dat het groene respectievelijk het blauwe polygoon werd betreden of verlaten.

Om (gegeven de snelheid) door de bocht te rijden hebben diverse voertuigvariabelen een waarde die afwijkt van nul, terwijl hun teken afhangt van de richting van de bocht. Dit zijn de stuurwielhoek, het stuurkoppel, de koershoeksnelheid, de laterale versnelling en de laterale snelheid. Voorafgaand aan de analyse zijn deze variabelen zodanig getransformeerd dat de stationaire waarden in de bocht altijd positief waren (d.w.z. waar nodig met -1 vermenigvuldigd).



Figuur 9 Voorbeeld van enkele signalen bij het passeren van een voegovergang (gemarkeerd door de groene streep): stuurkoppel (T_{sw}), stuurwielhoek (del_{sw}), laterale versnelling (lat_{acc}) en koershoekssnelheid (YR).

Een typisch voorbeeld van ruwe data rondom het passeren van een voegovergang wordt getoond in Figuur 9. Hierin valt het volgende te zien.

- Op het stuurkoppel is een kortdurende ‘dip’ waar te nemen (in de orde van grootte van tienden van een seconde). Deze dip treft al op vóór de markering die het passeren van de voeg aangeeft. Dit komt doordat het effect op het stuurkoppel optreedt wanneer de voorwielen over de voeg rijden, terwijl het detecteren van “passeren van de voeg” gebaseerd is op de GPS-data, die overeenkomen met een punt nabij de achteras (zie paragraaf 2.2).
- In de stuurwielhoek is in deze figuur geen verstoring zichtbaar.
- Op de laterale versnelling en de koershoekssnelheid zijn (iets later dan op het stuurkoppel) verstoringen zichtbaar.

De verstoring op het stuurkoppel lijkt vooral te bestaan uit een korte ‘dip’ in het signaal. Bij de laterale versnelling en zeker bij de koershoekssnelheid lijkt de verstoring zich zowel ‘omhoog’ als ‘omlaag’ te manifesteren ten opzichte van het stationaire niveau.

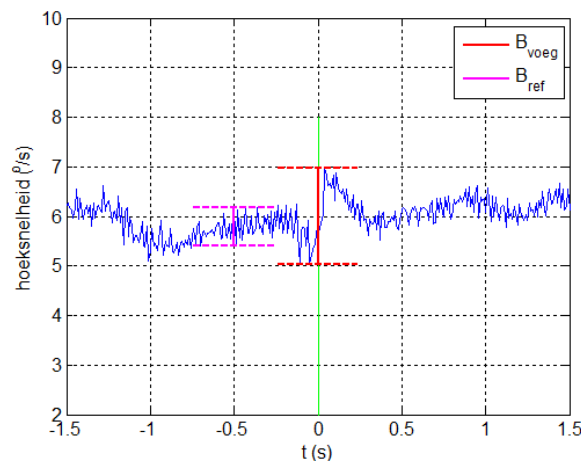
Diverse signalen in Figuur 9 vertonen de gebruikelijke meetruis: zeker de laterale versnelling en de koershoekssnelheid, in mindere mate ook het stuurkoppel. Dergelijke ruis kan normaal gesproken worden gereduceerd door een geschikt laagdoorlaatfilter toe te passen. Echter, de verstoringen ten gevolge van de voegovergangen zijn typisch kortdurend, zoals verwacht op grond van Tabel 1. Toepassing van een laagdoorlaatfilter reduceert niet alleen de meetruis, maar ook de verstoring die we hier willen kwantificeren. Daarom wordt geen filter toegepast.

In plaats daarvan wordt als belangrijkste afhankelijke maat het ‘relatieve bereik’ B_{rel} van de diverse signalen bepaald. Deze wordt als volgt gedefinieerd:

$$B_{rel} = B_{voeg} - B_{ref}$$

Waarin:

- B_{rel} = het ‘relatieve bereik’ van een signaal bij het passeren van de voegovergang;
 - B_{voeg} = het bereik van het signaal tussen $t=-0.25$ s en $t=+0.25$ s;
 - B_{ref} = het bereik van het signaal tussen $t=-0.75$ s en $t=-0.25$ s;
 - het bereik van een signaal gelijk is aan de hoogst voorkomende waarde minus de laagst voorkomende waarde, en
 - $t=0$ het moment is dat volgens de GPS de voegovergang bereikt wordt.
- Dit wordt geïllustreerd in Figuur 10.



Figuur 10 Illustratie van het bereik B_{voeg} en B_{ref} .

De tijdsintervallen die worden gebruikt in het berekenen van B_{voeg} en B_{ref} zijn even lang. De duur van het interval is gekozen op basis van visuele inspectie van de ruwe data, zodanig dat het mogelijke verstoringen op de signalen bij het passeren van de voegovergang omvat. Met deze maat worden verstoringen gedetecteerd ongeacht de richting waarin deze zich manifesteert.

- Als er sprake is van een verstoring rond het moment van de voegovergang zal B_{voeg} groter zijn dan B_{ref} , met als resultaat een positieve waarde van B_{rel} .
- Als er *geen* sprake is van een verstoring rond het moment van de voegovergang zal B_{voeg} typisch ongeveer even groot zijn als B_{ref} . Na middeling over meerdere herhalingen zal het gemiddelde niet significant afwijken van 0.

2.6.1 Statistische analyse

De data zijn geanalyseerd met behulp van variantieanalyse (zie Bijlage C voor een toelichting). De afhankelijke variabelen waren het relatieve bereik van de diverse voertuigvariabelen en de subjectieve rating.

De onafhankelijke variabelen kwamen overeen met de condities waarin de testrijders gereden hebben:

- De geïnstrueerde snelheid (70, 85 en 100 km/u).
- Het voegtype (0.1 en 0.2).
- De rijrichting (heen en terug).
- Het voeg-ID (ID 1 en ID 2: de eerste en tweede voeg in de normale rijrichting).

Voeg ID 1 en ID 2 liggen in ieder geval onder verschillende hoeken met de as van de weg (zie paragraaf 2.1). Mogelijk verschillen ze ook enigszins in lokale verkanting of boogstraal. Deze aspecten kunnen mede van invloed zijn op de afhankelijke variabelen. Daarom wordt ook het voeg-ID als onafhankelijke variabele meegenomen in de analyses.

3 Resultaten

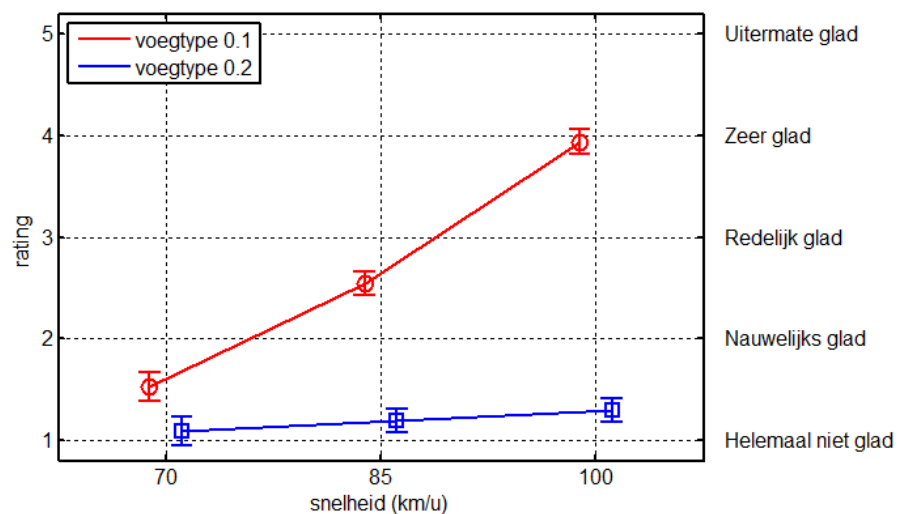
3.1 Vragenlijst

De subjectieve gladheid is geanalyseerd in een variantieanalyse (ANOVA). De afhankelijke variabele was de subjectieve gladheid. Onafhankelijke variabelen waren de geïnstrueerde snelheid (70, 85, 100 km/u), voegtype (0.1, 0.2), voeg-ID (nr 1, nr 2) en rijrichting (heen, terug).

De resultaten van de ANOVA lieten de volgende effecten zien.

- Een significant effect van snelheid [$F(2, 2)=41$, $p=0,02$]¹, dat een stijgende subjectieve gladheid liet zien met toenemende snelheid.
- Een marginaal significant effect van het voegtype [$F(1, 1)=72$, $p=0,07$]. De gemiddelden bedroegen 2.7 op voegtype 0.1 en 1.2 op voegtype 0.2.
- Een significante interactie tussen voegtype en snelheid [$F(2, 2)=45$, $p=0,02$], zie Figuur 11.
- Overige significante (interactie-)effecten zijn niet gevonden.

Een Tukey HSD test liet zien dat bij voegtype 0.1 de drie snelheidscondities onderling allen significant van elkaar verschilden [p -waarden $<0,001$]. Binnen voegtype 0.2 waren de verschillen tussen ratings bij de drie snelheden geen van allen significant. Binnen elke snelheidsconditie was het verschil tussen beide voegtypen wel significant [p -waarden $<0,001$].



Figuur 11 Gladheidsoordeel als functie van snelheid en voegtype (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

Het commentaar van de testrijders liet zien dat de ervaren verstoring bij voegtype 0.2 niet zozeer ervaren werd als laterale verstoring (passend bij gladheid) maar eerder als een verticale verstoring (passend bij een minimaal 'drempeltje').

¹ Zie Bijlage C voor een toelichting op de statistiek

3.2 Voertuigdata

De voertuigdata zijn geanalyseerd in variantieanalyses met als onafhankelijke variabelen (binnen-proefpersoon gevarieerd): de geïnstrueerde snelheid (70, 85, 100 km/u), voegtype (0.1, 0.2), voeg-ID (1, 2) en rijrichting (heen, terug).

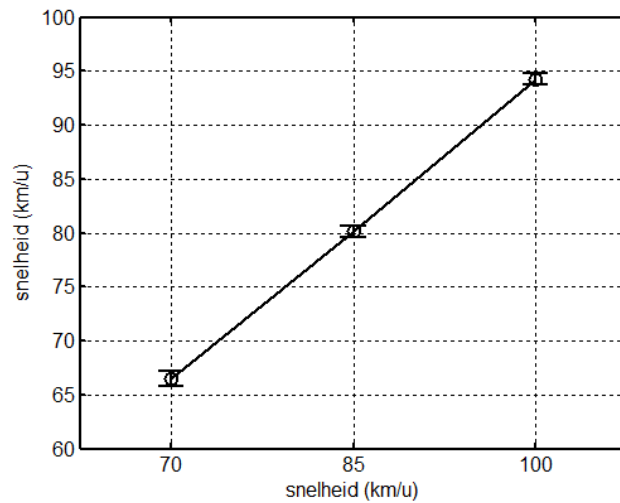
De kern van de analyse is hoe de voegovergangen zich manifesteren in *verstoringen* van de diverse voertuigvariabelen, uitgedrukt in het relatieve bereik. De resultaten hiervan worden gepresenteerd in paragraaf 3.2.2 en verder. Voor goed begrip hiervan kan het ook van belang zijn om te weten ten opzichte van welke *stationaire waarde* de verstoring plaatsvond. Immers, rijdend met een zeker snelheid door de verbindingsboog hoort een zekere stuurinput (hoek en koppel) en een stationaire waarde van de voertuigvariabelen (laterale versnelling, koershoekensnelheid enzovoort). Om de stationaire waarden van de diverse variabelen in kaart te brengen is de mediaan van deze variabelen bepaald in een interval van 0,5 s rond het passeren van de voegovergang. De resultaten van dit onderdeel worden gepresenteerd paragraaf 3.2.1.

3.2.1 Stationair gedrag

De mediaan van de snelheid in een interval van 0,5 s rond het passeren van de voeg is geanalyseerd. Deze zegt niet iets over het effect van de voeg maar over hoe precies en nauwkeurig de metingen zijn uitgevoerd.

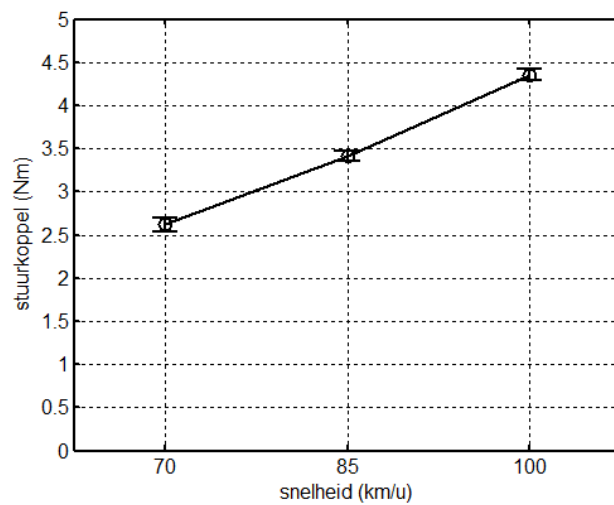
Het effect van de geïnstrueerde snelheid was significant [$F(2, 2)=1343$, $p<0,001$]. Zoals Figuur 12 laat zien lag in alle condities de gerealiseerde snelheid circa 5% onder de wenssnelheid. Dit verschil laat zich toeschrijven aan het standaard verschil tussen de werkelijk gereden snelheid en de waarde zoals aangegeven op de snelheidsmeter in een personenauto. Bij het interpreteren van de resultaten moet worden bedacht dat de werkelijke snelheid lager lag dan de geïnstrueerde snelheidsconditie van 70, 85 of 100 km/u.

Het effect van voegtype was niet significant [$F(1, 1)=0$, $p=1$], evenmin als de interactie tussen voegtype en snelheid [$F(2, 2)=0,9$; $p=0,5$]. Dit betekent dat de gerealiseerde snelheden op de oude en de nieuwe voegovergangen niet van elkaar verschilden. Eventuele verschillen in andere voertuigvariabelen kunnen dus niet aan verschillen in snelheid worden toegeschreven.

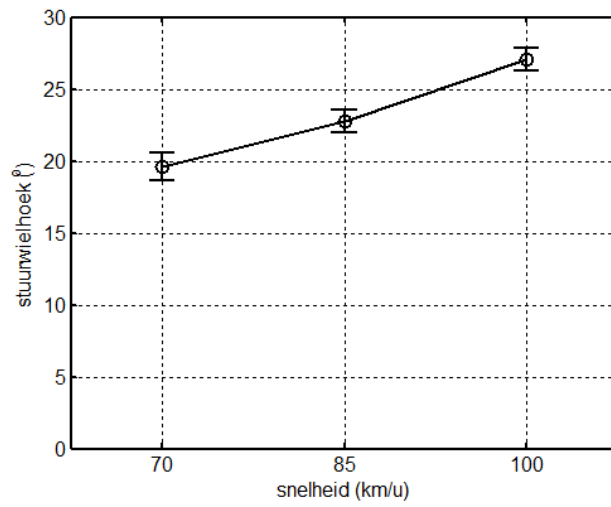


Figuur 12 Mediaan van de gerealiseerde snelheid als functie van beoogde snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

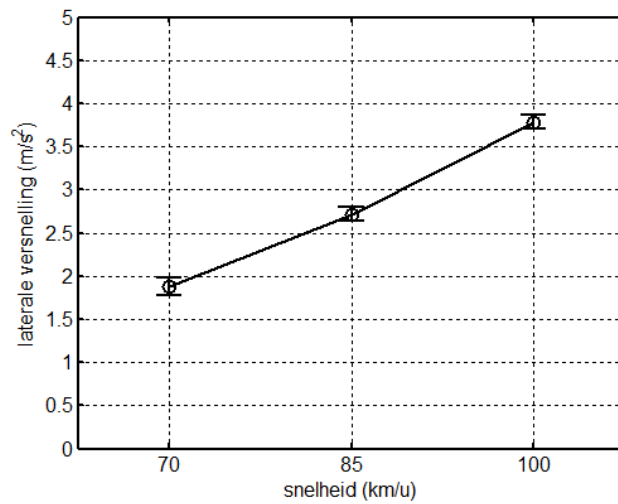
Ook bij de overige voertuigvariabelen werd nergens een effect gevonden van het voegtype, voeg-ID of de rijrichting. Wel was in alle gevallen het effect van geïnstrueerde snelheid significant [p 's < 0,01]. Verder wordt volstaan met het tonen van de gemiddelden van de afhankelijke variabelen als functie van de geïnstrueerde snelheid in Figuur 13 tot en met Figuur 17.



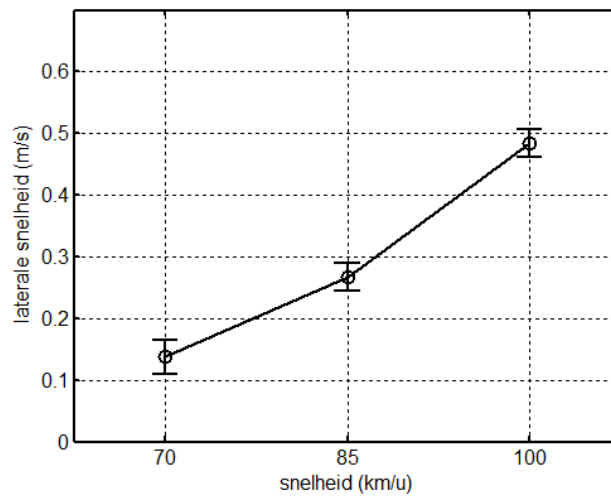
Figuur 13 Mediaan van het stuurkoppel als functie van beoogde snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).



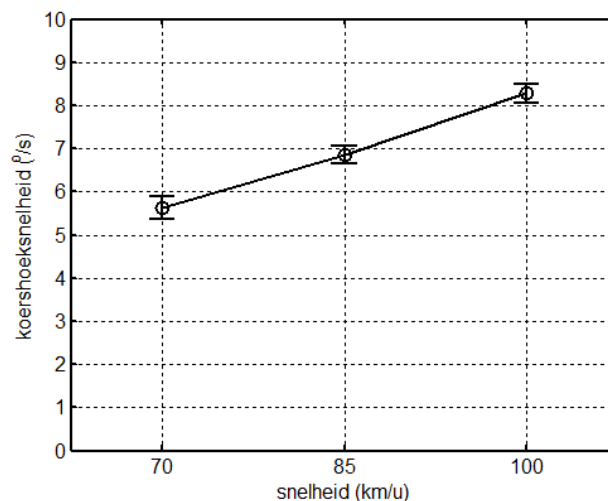
Figuur 14 Mediaan van de stuurwielhoek als functie van beoogde snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).



Figuur 15 Mediaan van de laterale versnelling als functie van beoogde snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).



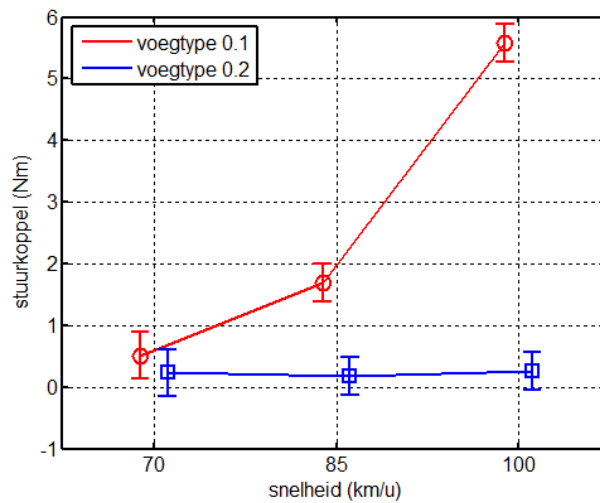
Figuur 16 Mediaan van de laterale snelheid als functie van beoogde snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).



Figuur 17 Mediaan van de koershoek(snelheid) als functie van beoogde snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

3.2.2 *Stuurkoppel*

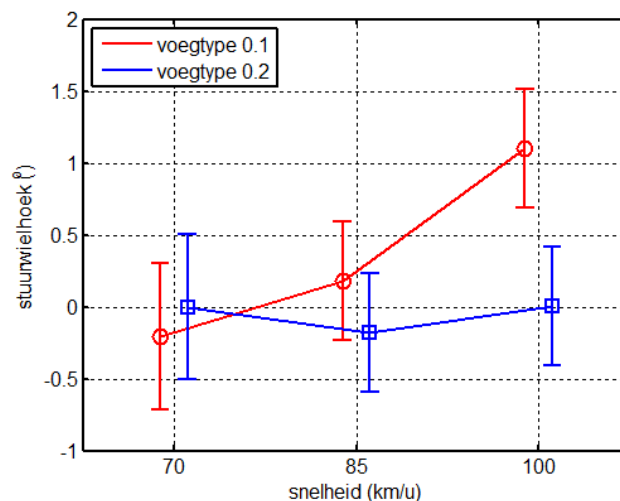
Het relatieve bereik van het stuurwielkoppel wordt als functie van snelheid en voegtype getoond in Figuur 18. De resultaten van de ANOVA gaven een marginaal significant effect van voegtype te zien [$p=0,07$]: B_{rel} in het stuurwielkoppel was groter was op voegtype 0.1 dan op voegtype 0.2. Het hoofdeffect van snelheid was significant [$p=0,02$]: bij hogere snelheid trad er een grotere verstoring op het stuurkoppel op. Ook de interactie tussen snelheid en voegtype was significant [$p=0,03$], zie Figuur 18. Een Tukey test liet zien dat bij 85 km/u en bij 100 km/u het verschil tussen beide voegtypes significant was [beide $p<0,001$], maar bij 70 km/u niet [$p=0,9$].



Figuur 18 Relatief bereik van het stuurwielkoppel bij passage van de voegovergang (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

3.2.3 Stuurwielhoek

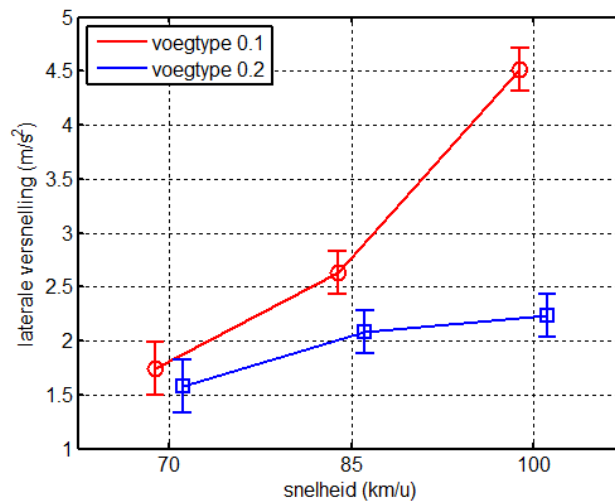
In het relatieve bereik B_{rel} van de stuurwielhoek werd een significant effect gevonden van snelheid [$F(2, 2)=92, p=0,01$]: met toenemende snelheid was er een grotere verstoring op de stuurwielhoek. Er was een marginaal significant effect het voegtype [$F(1, 1)=39, p=0,10$] en een significante interactie tussen snelheid en voegtype [$F(2, 2)=98, p=0,01$]. Deze interactie wordt getoond in Figuur 19. Een Tukey-test liet zien dat alleen bij 100 km/u het verschil tussen de voegtypen significant was [$p<0,001$].



Figuur 19 Relatief bereik van de stuurwielhoek bij passage van de voegovergang (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

3.2.4 Laterale versnelling

Er was een significant effect van voegconditie [$F(1,1)=145, p=0,05$]: het relatieve bereik van de laterale versnelling was hoger op voeg type 0.1 ($3,0 \text{ m/s}^2$) dan op voeg type 0.2 ($2,0 \text{ m/s}^2$). Ook het effect van snelheid was significant [$F(2, 2)=27, p=0,035$], evenals de interactie tussen snelheid en voegtype [$F(2, 2)=24, p=0,04$] (zie Figuur 20). Een Tukey-test liet zien dat alleen bij 100 km/u het verschil tussen beide voegtypen significant was [$p<0,03$].



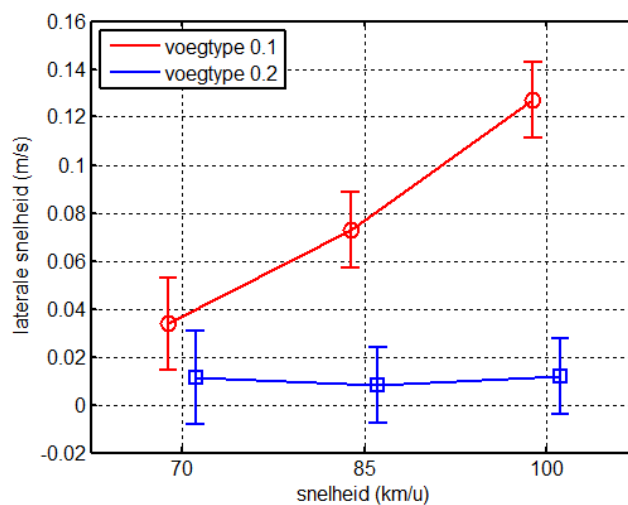
Figuur 20 Relatief bereik van de laterale versnelling bij passage van de voegovergang (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

3.2.5 Laterale snelheid

Er werd een marginaal significant effect gevonden van voegconditie [$F(1, 1)=78$, $p=0,07$]: op voegtype 0.1 was de verstoring op de laterale snelheid groter dan op voegtype 0.2 (0,08 respectievelijk 0,01 m/s). Ook was er een significant effect van snelheid [$F(2, 2)=22$, $p=0,04$] en een interactie-effect tussen voegconditie en snelheid [$F(2, 2)=20$, $p=0,05$]; zie Figuur 21.

Een Tukey-test liet het volgende zien:

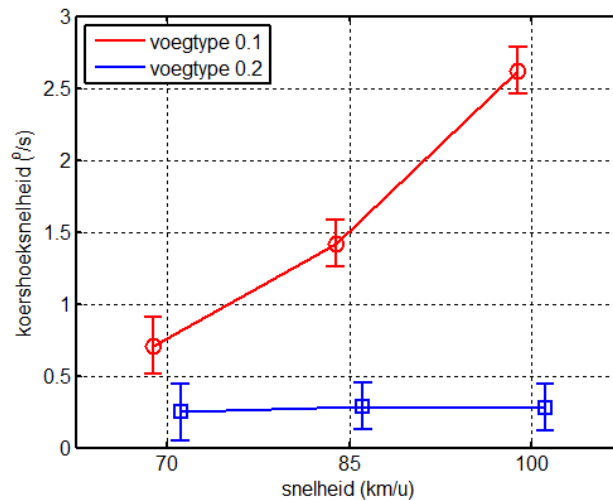
- Binnen voegtype 0.1 waren de verschillen tussen de drie snelheden allen significant;
- Binnen voegtype 0.2 waren de verschillen tussen de drie snelheden geen van allen significant.
- Bij 70 km/u was het verschil tussen de voegtypen niet significant [$p=0,5$]; bij beide andere snelheden wel [p -waarden $<0,001$].



Figuur 21 Relatief bereik van de laterale snelheid bij passage van de voegovergang (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

3.2.6 Koershoeksnelheid

Het effect van voegtype was significant [$F(1, 1)=598, p=0,02$], evenals het effect van snelheid [$F(1, 1)=144, p<0,01$] en de interactie tussen deze beide onafhankelijke variabelen [$F(2, 2)=29,3, p=0,01$] (zie Figuur 22).



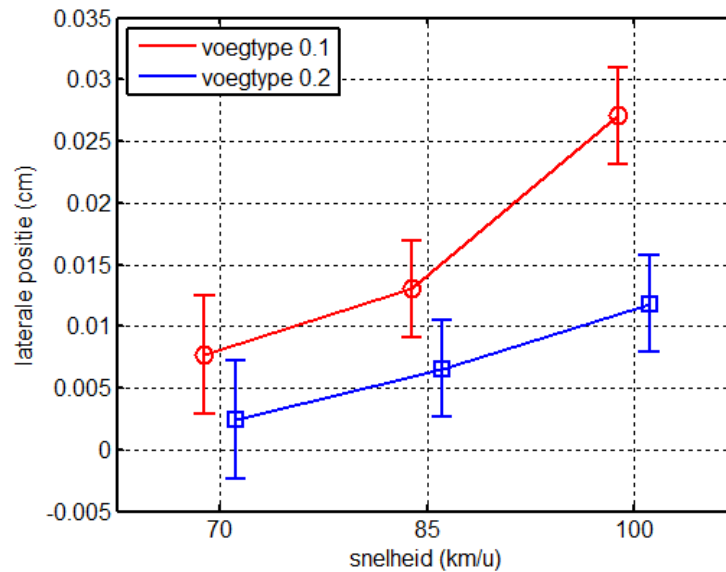
Figuur 22 Relatief bereik van de koershoeksnelheid bij passage van de voegovergang (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

Een Tukey-test liet het volgende zien:

- Binnen voegtype 0.1 waren de verschillen tussen de drie snelheden allen significant;
- Binnen voegtype 0.2 waren de verschillen tussen de drie snelheden geen van allen significant.
- Bij alle snelheden was het verschil tussen de voegtypen significant [p-waarden $<0,02$].

3.2.7 Laterale positie

De ANOVA liet een marginaal significant effect van snelheid zien [$F(2, 2)=16, p=0,06$]. Het effect van voegtype was niet significant [$p=0,17$], evenmin als de interactie van deze factor met snelheid [$p=0,13$], zie Figuur 23. Een Tukey test op deze interactie liet zien dat alleen bij 100 km/u er een significant verschil was tussen beide voegtypen [$p<0,001$].



Figuur 23 Relatief bereik van de laterale positie bij passage van de voegovergang (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval).

3.2.8 Verticale versnelling

De ANOVA op het relatieve bereik van de verticale versnelling liet alleen een significant effect zien van voeg-ID [$F(1, 1)=208, p=0,04$]. Op de eerste voeg (ID 1) was het gemiddelde significant hoger dan op de tweede voeg (ID 2; 6,0 respectievelijk 3,5 m/s²). Overige (interactie-)effecten zijn niet aangetroffen.

3.3 Correlaties

In de voorafgaande paragrafen zijn effecten van de voegovergangen geanalyseerd in termen van de subjectieve data en in termen van de voertuigdata. In deze paragraaf wordt verder gekeken hoe al deze afhankelijke variabelen onderling samenhangen door middel van een correlatie-analyse. Zie Bijlage C voor een toelichting.

De correlaties tussen de afhankelijke worden getoond in Tabel 3. Al deze correlaties waren significant [p -waarden $<0,05$] behalve die tussen de stuurwielhoek en de laterale positie [$p=0,76$].

Tabel 3 Correlaties tussen de afhankelijke variabelen (rating = subjectief oordeel; T_{sw} = stuurwielkoppel; del_{sw} = stuurwielhoek; lat_{acc} = laterale versnelling; YR = koershoeksnelheid; lat_v = laterale snelheid; lat_{pos} = laterale positie).

	Rating	T_{sw}	del_{sw}	lat_{acc}	YR	lat_v	lat_{pos}
Rating		0,800	0,430	0,666	0,879	0,910	0,436
T_{sw}			0,349	0,693	0,839	0,844	0,424
del_{sw}				0,289	0,504	0,534	-0,027
lat_{acc}					0,691	0,683	0,354
YR						0,920	0,300
lat_v							0,385

De correlatie tussen de subjectieve oordelen en de voertuigmetingen worden compleet met statistische details getoond in Tabel 4.

Tabel 4 Correlatie tussen de subjectieve ratings en de voertuig-variabelen (correlatie r ; proportie verklaarde variantie r^2 ; t-waarde t ; significantie p ; T_{sw} = stuurwielkoppel; del_{sw} = stuurwielhoek; lat_{acc} = laterale versnelling; YR = koershoeksnelheid; lat_v = laterale snelheid; lat_{pos} = laterale positie).

variabele	r	r^2	t	p
T_{sw}	0,800	0,639	14,8	<0,001
del_{sw}	0,430	0,185	5,3	<0,001
lat_{acc}	0,666	0,444	9,9	<0,001
YR	0,879	0,772	20,5	<0,001
lat_v	0,910	0,829	24,5	<0,001
lat_{pos}	0,436	0,190	5,4	<0,001

4 Integratie

Subjectieve gladheid in relatie tot stroefheidsmetingen

Bij klachten over (subjectieve) gladheid ligt het voor de hand om te beginnen bij de stroefheid van de betrokken elementen. De stroefheid van een wegdek is gedefinieerd als de wrijvingscoëfficiënt gemeten onder gestandaardiseerde condities (Vos et al., 2015). Tijdens het huidige project heeft RWS stroefheidsmetingen laten verrichten die worden gerapporteerd in Bijlage B. De resultaten van RWS (2017) en het huidige project ten aanzien van stroefheid worden samengevat in Tabel 5.

Tabel 5 Overzicht van de stroefheidsmetingen op de verbindingsweg H: de wrijvingscoëfficiënt uit RWS (2017) en uit dit project.

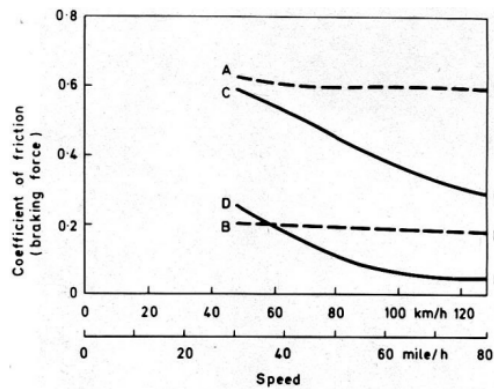
	RWS (2017)	Huidige metingen
Voegtype 0.1	0.22	0.27
Voegtype 0.2	-	0.76
Voegtype 1	0.39	-
Voegtype 2	0.51	-
deklaag	0.58	0.56

De beide sets stroefheidsmetingen zijn goed met elkaar in overeenstemming. Kwalitatief kan worden vastgesteld dat de voegovergang met slijtlaag (type 0.2) stroever is dan de aangrenzende deklaag, terwijl de originele voegovergang zonder slijtlaag gladder is dan de deklaag.

In Tabel 2 werd weergegeven welke wrijvingscoëfficiënt op de VWh nodig is als functie van de snelheid. Om meerdere redenen laten die wrijvingscoëfficiënten zich niet rechtstreeks in verband brengen met de stroefheidsmetingen uit Tabel 5. Om te beginnen leveren de stroefheidsmeting een wrijvingscoëfficiënt in *langsrichting*, terwijl de vereiste wrijvingscoëfficiënt uit Tabel 2 betrekking heeft op de *dwarsrichting*. De relatie tussen deze beide componenten is complex (Li, Wang, & Zhou, 2006). Verder is de wrijvingscoëfficiënt niet constant voor een gegeven wegdek, maar is deze (1) snelheidsafhankelijk en (2) variërend met vele variabelen die zich als volgt laten groeperen (Vos et al., 2015).

- Wegdekoppervlak-kenmerken (micro- en macrostructuur).
- Bandkenmerken (o.a. type, dimensies, profiel, materiaal).
- Omgevingskenmerken (o.a. waterlaag, temperatuur).

Hoe de wrijvingscoëfficiënt op verschillende wegdekken varieert als functie van de snelheid wordt getoond in Figuur 24, afkomstig van Sabey e.a. (1970). Van recenter datum, en voor de Nederlandse situatie met ZOAB, laat RWS (2008) eveneens zien dat de stroefheid afneemt als functie van de snelheid.



Figuur 24 Wrijvingscoëfficiënt (nat wegdek, gladde band) als functie van snelheid en wegdektuur. A: ruw micro en macro; B: ruw macro, glad micro; C: glad macro, ruw micro; D: glad micro en macro. Bron: Fig. 3 uit Sabey e.a. (1970).

Het voert in het kader van dit project te ver om deze materie verder uit te diepen. Wel kunnen we constateren dat de subjectieve gladheidsoordelen van de testrijders opliepen van 'helemaal niet' tot 'nauwelijks' glad bij 70 km/u, tot en met 'zeer glad' bij 100 km/u. De subjectieve gladheid hangt dus sterk samen met de snelheid: hoe hoger de snelheid, hoe groter de ervaren gladheid. Bij hogere snelheid wordt de voegovergang weliswaar in minder tijd gepasseerd, maar tegelijkertijd neemt de benodigde dwarskracht kwadratisch toe met de snelheid (zie vergelijking 1). Netto resulteert dit in de toenemende subjectieve gladheid bij toenemende snelheid. Bij een snelheid van 100 km/u is op de VW h volgens de evenwichtsformule een laterale wrijvingscoëfficiënt van 0,337 nodig. Zoals Tabel 5 laat zien was er bij voegtype 0.1 een wrijvingscoëfficiënt beschikbaar in de orde van grootte van 0,24. Met alle bovengenoemde onzekerheden van dien is het waarschijnlijk dat bij 100 km/u de stroefheid op de voegovergang lager is dan volgens de evenwichtsformule benodigd is. Dit maakt het begrijpelijk dat er bij deze snelheid sprake is van subjectieve gladheid.

Voegtype 0.2 heeft een stroefheid die beduidend groter is dan die van de deklaag. Geheel in lijn hiermee rapporteren de testrijders bij deze voeg een gladheid die nabij 'helemaal niet' lag, en wel bij alle beproefde snelheden (70 t/m 100 km/u).

Subjectieve gladheid en voertuigmetingen

Bij het passeren van de voegovergangen is het eerst waarneembare fenomeen een kortdurende daling van het **stuurkoppel**. Het patroon van resultaten dat wordt gevonden (kijkend naar de gecombineerde effecten van voegtype en snelheid) vertoont grote overeenkomst met de subjectieve resultaten. Dit uit zich ook in een sterke correlatie ($r=0,8$) tussen de verstoring op het stuurkoppel en de subjectief gerapporteerde gladheid. Op de **stuurwielhoek** is de verstoring ook aantoonbaar, maar minder sterk dan op het koppel en met een beduidend lagere correlatie tussen de verstoring en de subjectieve gladheid ($r=0,4$). Verder blijken de voegovergangen een aantoonbare verstoring te hebben op de **voertuigbeweging**. In volgorde van aflopende sterkte (tevens aflopende correlatie met subjectieve gladheid) zijn effecten aangetoond in:

- laterale snelheid en koershoeknelheid (correlatie rond de 0,9),
- laterale versnelling ($r = 0,7$) en
- laterale positie ($r = 0,4$).

De effectgrootte op laterale positie lag in orde van grootte van tienden van millimeters. Deze effecten waren wel met de huidige instrumentatie aan te tonen, maar ze zijn zo klein dat niet verwonderlijk is dat ze op camerabeelden niet zichtbaar waren (RWS 2017).

Vlakheid

RWS heeft de vlakheidsmetingen uit laten voeren tijdens dit project (zie Bijlage D). In de normale rijrichting is de eerste voegovergang (ID 1) iets breder en iets hoger ten opzichte van de aangrenzende deklaag dan de tweede (ID 2). Vlakheidskenmerken van de voegovergang kunnen mede van invloed zijn op de ervaren gladheid. Het passeren van de voegovergang zorgt voor verticaal aanstoten van het systeem banden-wielophanging-voertuigchassis. Dit leidt tot een korte verandering van de normaalkracht, en daarmee tot een verandering van de beschikbare wrijvingskracht. In de huidige beproeving werd geen significant verschil gevonden tussen voeg ID 1 en 2 (subjectief of objectief). Kennelijk was deze variatie in vlakheid te klein om zich als verandering in gladheid te manifesteren.

Verschillen tussen voeg ID 1 en ID 2 kwamen overigens wel tot uiting in de verticale versnelling bij het passeren van de voegovergangen. Daarmee is het effect van vlakheid objectief kwantificeerbaar in de voertuigbeweging, maar binnen de condities van dit experiment staat dat los van de stroefheid.

5 Discussie en conclusies

De oorspronkelijke voegovergangen in de VWh voldoen aan de eisen uit de RTD 1007-2 over een minimaal reliëf met een diepte van 1,2 mm. Bij de ontwerpsnelheid van 70 km/u is de verstoring door deze voegovergang zeer gering. Echter, bij een snelheid van 100 km/u (die in de praktijk veel voorkomt) en bij nat wegdek wordt deze voegovergang als 'zeer glad' ervaren. De verstoring door de gladde voegovergang is objectief meetbaar in het voertuig, zowel in stuurwiel als in de voertuigbeweging.

Een verbetering van de stroefheid van de voegovergang kan op verschillende manieren worden verkregen.

- Het patroon van het reliëf kan anders gekozen worden, met een voldoende hoge spatiele resolutie in verhouding tot het contactoppervlak tussen band en wegdek. Deze aanpak is eerder in 2017 al beproefd door RWS (2017). De profieltypen 1 en 2 ('wybertjes' respectievelijk 'groefjes') gaven een verbetering van de objectieve en subjectieve stroefheid, al bleef de stroefheid van de voegovergang lager dan die van de deklaag. Voertuigmetingen zijn in die studie niet verricht.
- Een slijtlaag op de voegovergang (zoals in het huidige project toegepast) zorgt voor een sterke toename van de stroefheid. Na deze aanpassing van de voegovergangen is de stroefheid zelfs *hoger* dan op de aangrenzende deklaag. Nadeel van deze methode is dat de laag slijt in het gebruik, zodat na verloop van tijd de stroefheid terugloopt. RWS (2017) rapporteerde laboratoriummetingen die laten zien hoe de stroefheid van de slijtlaag afneemt onder invloed van polijsten. Hoe deze reductie van stroefheid zich in de praktijk manifesteert (afhankelijk van de verkeersbelasting) is niet bekend.

De evaluatiemethode zoals ontwikkeld in dit project maakt het mogelijk om nieuwe varianten te beproeven of ontwikkeling van stroefheid over tijd te blijven volgen. In principe kan dit rijdend in het verkeer, mits bij lage verkeersintensiteit zodat er vrijheid is in de snelheidskeus zonder hinder of gevaar te creëren.

RWS kan overwegen om stroefheidseisen toe te voegen aan de RTD 1007-2. Het is prematuur om dat uitsluitend op de nu verzamelde dataset te baseren en (i) te interpoleren naar andere stroefheden tussen de typen 0.1 en 0.2, of (ii) te extrapoleren naar situaties met andere boogstralen, verkantingen of deklaagstroefheden. Met aanvullende metingen maakt de hier ontwikkelde evaluatiemethode het mogelijk om die eisstelling te onderbouwen, aangezien subjectieve gladheid zich goed laat objectiveren in voertuigmetingen.

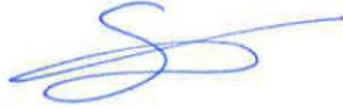
6 Referenties

- AASHTO (2001). *A Policy on Geometric Design of Highway and Streets* (Fourth edition). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- APA (2010). *Publication Manual of the American Psychological Association* (Sixth Edition). American Psychological Association.
- Belia, S., Fidler, F., Williams, J., & Cumming, G. (2005). Researchers misunderstand confidence intervals and standard error bars. *Psychological Methods*, 10(4), 389–396.
- CROW. (2017). *CROW-Ringonderzoek HSRP-systemen 2017* (No. Rapport D17-04). CROW.
- Greig, B., & Mulhern, G. (2002). *Making sense of data and statistics in psychology*. Houndmills, UK: Palgrave.
- Howell, D. C. (1989). *Fundamental Statistics for the Behavioural Sciences*. Boston, MA: PWS-Kent Publishing Company.
- Kost, F. (2014). Basic principles of vehicle dynamics. In K. Reif (Ed.), *Fundamentals of Automotive and Engine Technology: Standard Drives, Hybrid Drives, Brakes, Safety Systems* (pp. 114–129). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Li, L., Wang, F.-Y., & Zhou, Q. (2006). Integrated longitudinal and lateral tire/road friction modeling and monitoring for vehicle motion control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(1), 1–19.
- Pfeffer, P., & Braess, H.-H. (2014). Chapter 5 Basics of Lateral Vehicle Dynamics. In M. Harrer & P. Pfeffer (Eds.), *Steering Handbook* (pp. 91–120). Cham, Germany: Springer.
- Ruijs, P., Horst, R. Van der, & Broeren, P. (2012). *Ontwerpen van horizontale bogen; plan van aanpak voor het bepalen van veiligheidsfactoren voor het ontwerpen van horizontale bogen* (versie 1.0). RWS-DVS.
- RWS (2008). *Normstelling natte stroefheid van rijkswegen - herijking stroefheidsniveau en uitbreiding met een meetsnelheid van 70 km/u*. Rijkswaterstaat.
- RWS (2014). *Eisen voor voegovergangen* (Rijkswaterstaat Technisch Document (RTD) 1007-2, Versie 3.0 dd 1-12-2014). Rijkswaterstaat.
- RWS (2017). *Alternatief profiel in stalen voegovergang ter verbetering van de stroefheid in bochten; Vergelijk oude en nieuwe voegovergangen in de verbindingsboog VWh van knooppunt Amstel* (Document nr 728620, versie 1.0). RWS Steunpunt Wegen en Geotechniek.
- Sabey, B., Williams, T., & Lupton, G. (1970). *Factors Affecting the Friction of Tires on Wet Roads* (SAE Technical Paper 700376). Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.
- Stevens, J. (1996). *Applied multivariate statistics for the social sciences*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Vos, E., Bennis, T., Bouman, F., Kuijper, P., Voskuilen, J., & Groenendijk, J. (2015). *Stroefheid op rijkswegen*. Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud.
- Vromans, E., & Van Gurp, C. (2014). Relatie waarde Viagraaf/Rolrei en High Speed Road Profiler. *CROW Infradagen 2014*.
- Wolfe, R., & Hanley, J. (2002). If we're so different, why do we keep overlapping? When 1 plus 1 doesn't make 2. *CMAJ: Canadian Medical Association Journal*, 166(1), 65–66.

Wright, D. B. (1997). *Understanding statistics; an intruduction for the social sciences*. London: Sage Publishing.

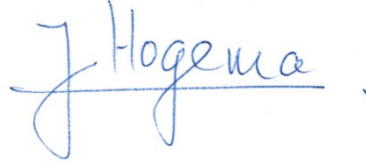
7 Ondertekening

Soesterberg, 30 januari 2018



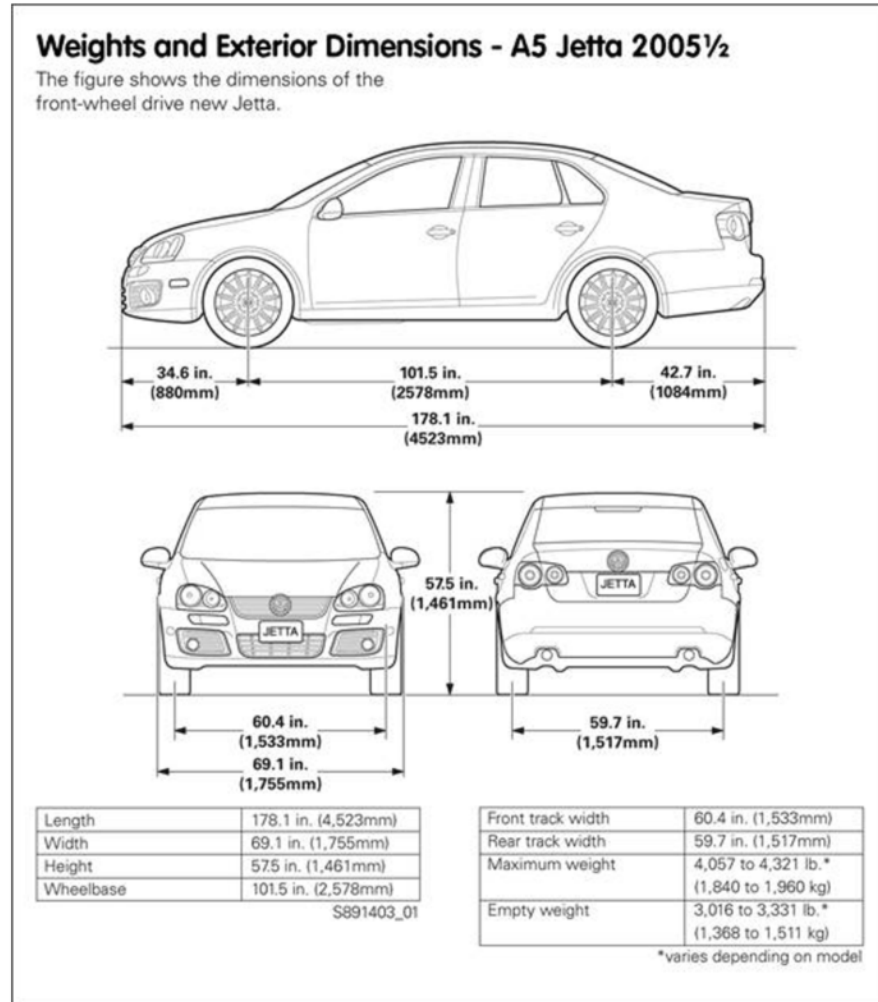
S.G. Huveneers
Afdelingshoofd

TNO



J.H. Hogema
Auteur

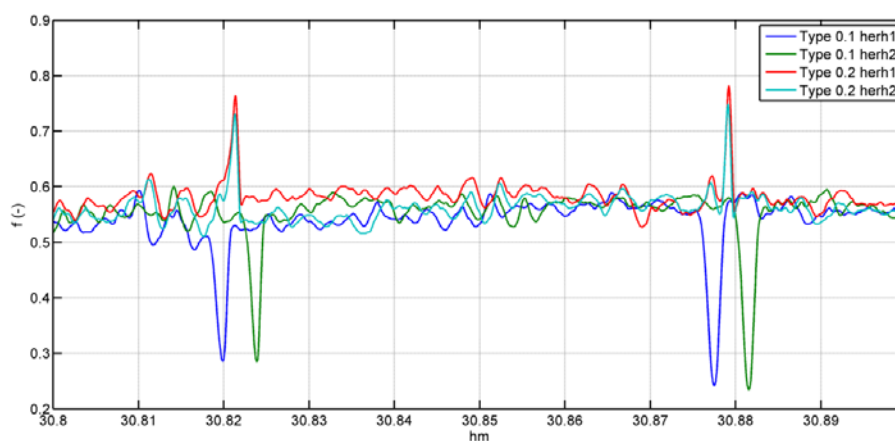
A Details meetvoertuig



B Stroefheidsmetingen

RWS heeft door de firma Aveco de Bondt stroefheidsmetingen uit laten voeren op de verbindingsweg VWh. RWS heeft deze data beschikbaar gesteld voor de analyse door TNO.

De metingen zijn uitgevoerd met een snelheid van 70 km/u, rijdend in de rechter rijstrook. Dit is gebeurd op 13 oktober 2017 voor voegtype 0.1 en op 14 oktober 2017 voor voegtype 0.2. Zie Vos et al. (2015) voor meer details over dit type metingen. Volgens opgave van RWS was de snelheid van 70 km/u gebaseerd op de snelheidsmeter van het meetvoertuig. De ruwe dataset bevat stroefheidsmetingen met een spatiale resolutie van 5 cm. Er wordt hier gewerkt met de waarde van de stroefheid die is gecorrigeerd voor de normaalkracht.



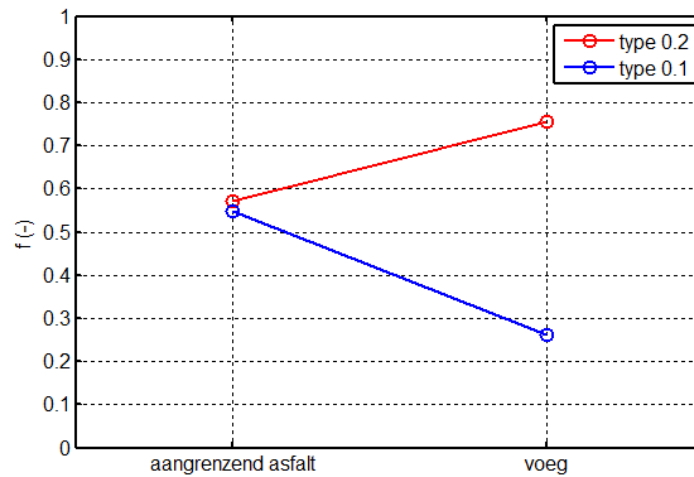
Figuur 25 Wrijvingscoëfficiënt f (-) gecorrigeerd voor normaalkracht, als functie van de positie op de weg (hm-aanduiding). Twee voormetingen (voegtype 0.1) en twee nametingen (voegtype 0.2).

In Figuur 25 is de locatie van de voegovergang te herkennen aan de pieken: een uitschieter naar beneden (=gladder) in de voormetingen en een uitschieter naar boven (=stroevert) in de nametingen.

Voor de verdere analyses zijn hieruit afgeleid:

- De stroefheid ter plaatse van de voeg (gekozen als het lokale minimum/maximum ter plaatse van de voeg)
- De stroefheid van het aangrenzende asfalt (bepaald als de mediaan van de stroefheid van 10 m voor de voeg tot en met 10 m na de voeg).

Hierbij is gemiddeld over de beide herhalingen. Resultaten worden getoond in Figuur 26.



Figuur 26 Wrijvingscoëfficiënt, als functie van voegtype en meetlocatie (gemiddeld over de beide voegovergangen).

De wrijvingscoëfficiënt op voegtype 0.1 is lager dan die van de aangrenzende deklaag terwijl de wrijvingscoëfficiënt op voegtype 0.2 juist hoger is dan die van de deklaag.

De waarden uit Tabel 6 zijn gebruikt in de analyse in Hoofdstuk 3.

Tabel 6 Wrijvingscoëfficiënt als functie van voegtype, voeg-ID en meetlocatie.

type	ID	deklaag	voeg
0.1	1	0.54	0.29
0.1	2	0.56	0.24
0.2	1	0.57	0.75
0.2	2	0.58	0.77

C Statistiek

Variantieanalyse

In een variantieanalyse (*Analysis of Variance*, ANOVA) worden twee of meer groepen met elkaar vergeleken. Formeel wordt er getoetst of twee of meer gemiddelden statistisch significant van elkaar verschillen. Zie voor verdere achtergrond en toelichting bijvoorbeeld

- Stevens (1996),
- Greeg en Mulhern (2002), of
- Howell (1989).

Formeel wordt er uitgegaan van een nulhypothese H_0 en een alternatieve hypothese H_1 :

- H_0 : “alle gemiddelden zijn aan elkaar gelijk”
- H_1 : “niet alle gemiddelden zijn aan elkaar gelijk”

Een gebruikelijk format voor het rapporteren van de statistische details van een ANOVA is als volgt (APA, 2010):

$F(df_i, df_n)=f\text{-waarde}$, $p<p\text{-waarde}$.

Bijvoorbeeld:

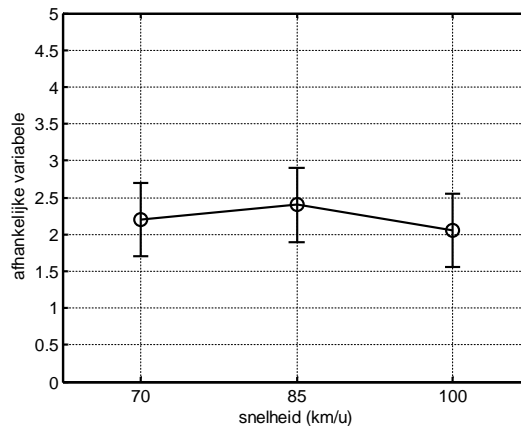
$F(2,19)=6.23$, $p<0.02$.

Hierin verwijst de letter F naar de zogenaamde F-verdeling. De bijbehorende *f-waarde* volgt uit berekeningen op de data; df_i is het aantal vrijheidsgraden in de teller; df_n het aantal vrijheidsgraden in de noemer. Het eindresultaat van de statistische toets is de ‘p-waarde’. Gebruikelijk is om bij $p<0.05$ te spreken van een statistisch significant effect; de nulhypothese wordt dan verworpen. Bij p-waarden tussen 0.05 en 0.1 wordt gesproken van een ‘marginaal significant effect’ of een ‘trend’.

Als er een significant effect wordt gevonden moeten aanvullende tests (post-hoc tests of *planned comparisons*) worden uitgevoerd om na te gaan welke specifieke gemiddelden onderling wel of niet statistisch van elkaar verschillend zijn. Aan de hand van fictieve resultaten wordt de interpretatie van ANOVA-resultaten hieronder toegelicht.

ANOVA met één onafhankelijke variabele

Een relatief eenvoudige variantieanalyse is een design met één onafhankelijke variabele. In dit voorbeeld is dat de factor ‘snelheid’, die wordt toegepast met drie niveaus: 70, 85 en 100 km/u. Bij die snelheid worden metingen gedaan aan een fictieve afhankelijke variabele. Mogelijke patronen van uitkomsten worden getoond in Figuur 27 en verder.



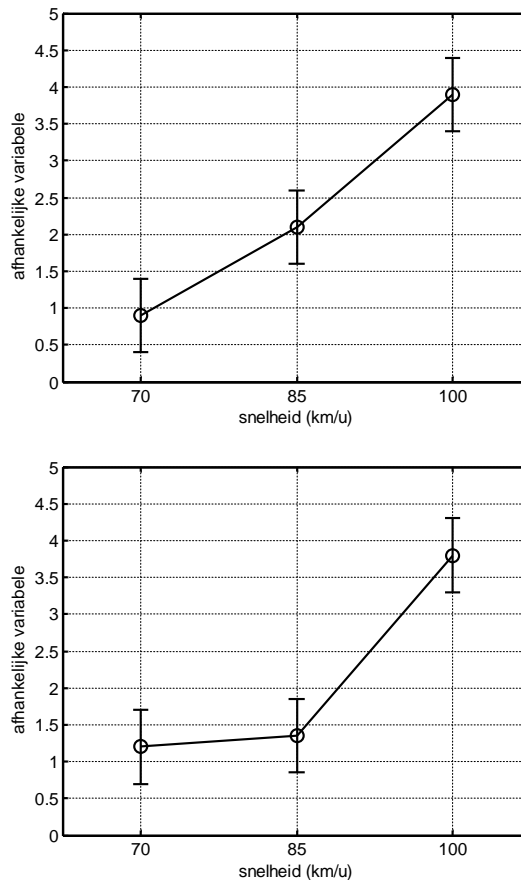
Figuur 27 Fictieve ANOVA resultaten: afhankelijke variabele als functie van snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval), typisch voor 'geen significant effect'.

Figuur 27 laat een typisch voorbeeld zien dat past bij een resultaat als "geen significant effect [$p=0.6$]". De verschillen tussen de drie gemiddelden zijn zo klein (in verhouding tot de spreiding rondom het gemiddelde) dat er geen betekenis aan kan worden toegekend. Met andere woorden, de drie gemiddelden moeten worden geïnterpreteerd als 'niet van elkaar verschillend'.

Figuur 27 laat naast de gemiddelden van de afhankelijke variabele ook het 95% betrouwbaarheidsinterval zien. Dit interval geeft de lezer enigszins zicht op de grootte van de effecten in relatie tot de grootte van de spreiding. Het is echter te kort door de bocht om het al dan niet overlappend zijn van betrouwbaarheidsintervallen rechtstreeks te vertalen in het al dan niet significant zijn van verschillen (Belia, Fidler, Williams, & Cumming, 2005; Wolfe & Hanley, 2002).

Figuur 28 laat typische voorbeelden zien dat past bij een resultaat als "significant effect [$p<0.001$]". Dit geeft aan dat de drie gemiddelden onderling niet allemaal aan elkaar gelijk zijn. Een post-hoc toets kan vervolgens bijvoorbeeld laten zien:

- Dat alle drie de gemiddelden onderling significant verschillend zijn (bovenste voorbeeld), of
- Dat de gemiddelden bij 70 en 85 onderling niet significant van elkaar verschillen, terwijl het gemiddelde bij 100 km/u hier wel van afwijkt.



Figuur 28 Fictieve ANOVA resultaten: afhankelijke variabele als functie van snelheid (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval), typisch voor 'een significant effect'. Boven: alle drie de gemiddelden onderling verschillend; onder: alleen het gemiddelde bij 100 km/u verschilt.

ANOVA met twee of meer onafhankelijke variabelen

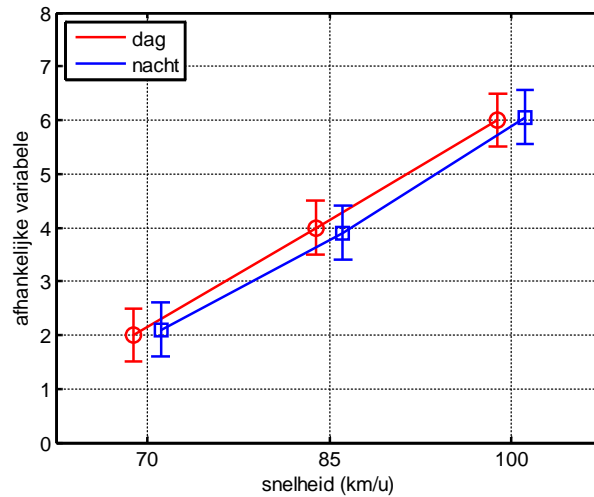
Een ANOVA kan ook worden uitgevoerd met twee of meer onafhankelijke variabelen. Dat wordt hier toegelicht aan de hand van een fictief voorbeeld van een experiment waarin twee factoren beschouwd worden:

- Snelheid (gevarieerd op drie niveaus: 70, 85 en 100 km/u)
- Meetmoment (op twee niveaus: bij dag en bij nacht).

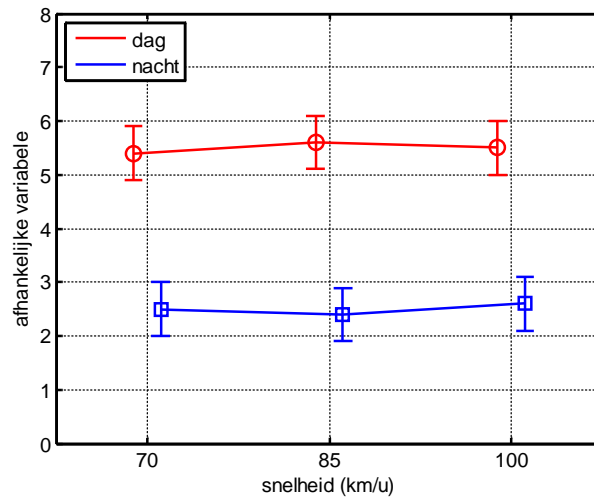
In alle $2 \times 3 = 6$ de mogelijke combinaties van deze factoren worden meerdere metingen gedaan (een 'volledig factorieel design'). Daarna wordt een ANOVA uitgevoerd, waarin beide onafhankelijke variabelen worden opgenomen. De analyse resulteert in F- en p-waarden voor:

- Het hoofdeffect van de factor *snellheid*: is er (gemiddeld over beide meetmomenten) een verschil tussen de drie snelheidscondities?
- Het hoofdeffect van de factor *meetmoment*: is er (gemiddeld over de drie snelheden) een verschil tussen de dag- en nachtmeting?
- Het interactie-effect tussen deze twee factoren. Als er sprake is van een significante interactie dan wordt het effect van snelheid op de afhankelijke variabele beïnvloed door het meetmoment (en andersom).

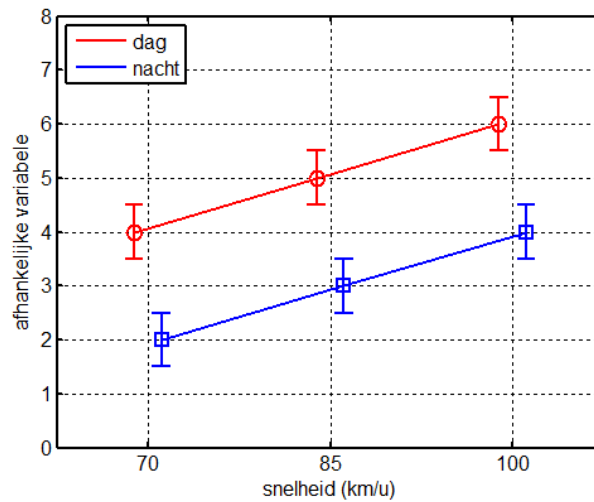
Elk van deze effecten kan wel of niet significant zijn, en opnieuw zijn post-hoc tests nodig om te toetsen welke specifieke gemiddelden onderling significant van elkaar verschillen. Figuur 29 en verder laten enkele fictieve voorbeelden zien.



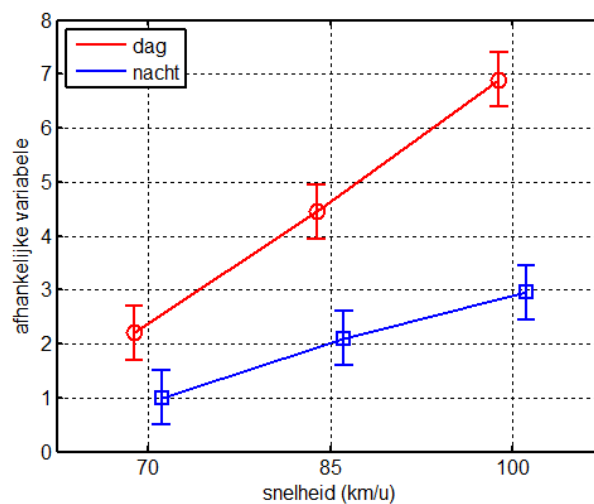
Figuur 29 Fictieve ANOVA resultaten: afhankelijke variabele als functie van snelheid en meetmoment (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval), typisch voor 'een significant effect van snelheid'.



Figuur 30 Fictieve ANOVA resultaten: afhankelijke variabele als functie van snelheid en meetmoment (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval), typisch voor 'een significant effect van meetmoment'.



Figuur 31 Fictieve ANOVA resultaten: afhankelijke variabele als functie van snelheid en meetmoment (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval), typisch voor 'een significant effect van snelheid en van meetmoment, geen interactie'.



Figuur 32 Fictieve ANOVA resultaten: afhankelijke variabele als functie van snelheid en meetmoment (gemiddelde en 95% betrouwbaarheidsinterval), typisch voor 'twee hoofdeffecten en een interactie'.

Correlatie

Als er twee continue variabelen onderling samenhangen is er sprake van correlatie (Wright, 1997). De sterkte deze samenhang is wordt tot uiting gebracht in een correlatiecoëfficiënt. Deze kan variëren tussen -1 (perfecte negatieve lineaire samenhang) via 0 (in het geheel geen samenhang) tot +1 (perfecte positieve lineaire samenhang). Naast de (absolute) grootte van de correlatiecoëfficiënt kan worden gekeken naar de statistische significantie van de correlatie. Deze resulteert een p-waarde die tot uitdrukking brengt of de correlatie sterk genoeg is om hem als 'ongelijk aan nul' te kunnen classificeren. Zie Wright (1997) voor een verdere toelichting op de t-test die hierbij wordt uitgevoerd.

D Vlakheidsmetingen

RWS heeft de langsvlakheid op de verbindingsweg VWh laten meten door Kiwa KOAC B.V. RWS heeft de metingen beschikbaar gesteld voor dit onderzoek.

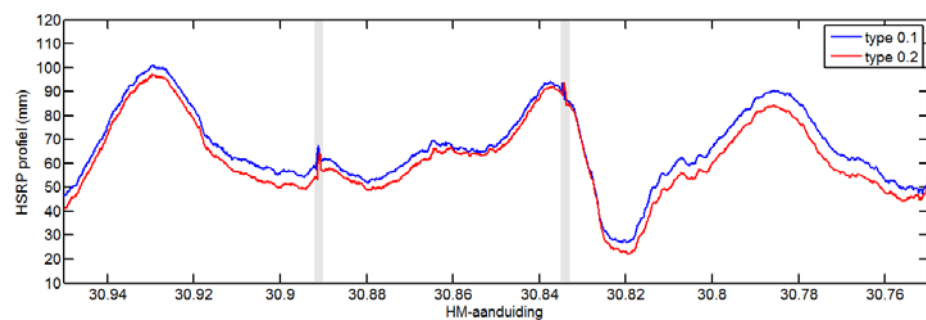
De toegepaste methode bestond uit High Speed Road Profiler-metingen HSRP-metingen, zie CROW (2017). HSRP maakt gebruik van sensorsystemen waarin een (afstand)lasersensor en een versnellingsopnemer gecombineerd worden. De metingen zijn uitgevoerd op 13 en 16 oktober 2017, rijdend in de rechter rijstrook. De data zijn gesampled met een spatiele resolutie van 1 cm en een meetresolutie van 0.1 mm.

Gebruikelijk is om HSRP-data om te rekenen naar waarnemingen die zouden zijn gedaan met een viagraaf (Vromans & Van Gurp, 2014). Hierbij wordt de weg in vakken van 100 m ingedeeld. Per 100m-vak worden twee prestatie maten bepaald: de afwijkingsoppervlakte en het afwijkingspercentage C5. Deze waarden worden getoond in Tabel 7. RWS eist dat er geen grotere staphoogte dan 5 mm mag zijn.

Tabel 7 Viagraaf-waarden afgeleid uit de HSRP-metingen.

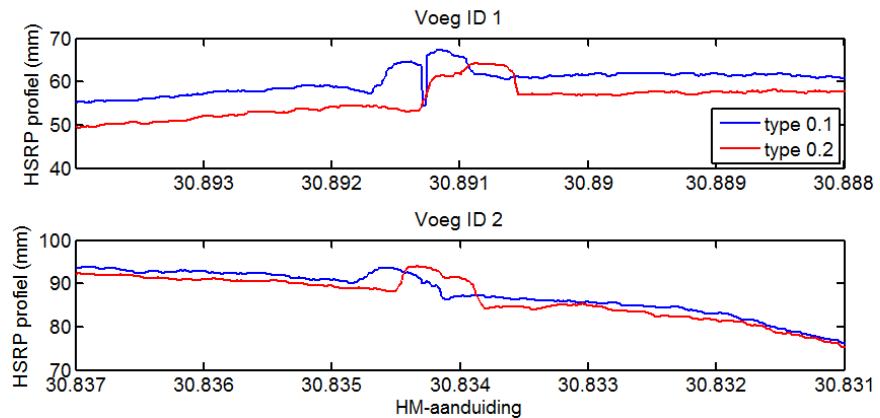
Voegtype	A-waarde	C5-waarde
0.1	5	5.6
0.2	3	5.4

De viagraaf-waarden zijn gebaseerd op wegvakken met een lengte van 100 m. Dit is te grof voor het beoordelen van voegovergangen. Daarom wordt hier verder gebruik gemaakt van de ruwe HSRP-metingen. Deze worden getoond in Figuur 33.



Figuur 33 HSRP data (grijze balken geven de voegovergangen weer).

Ingezoomd op de voegovergangen zien de HSRP-data er uit als in Figuur 34.

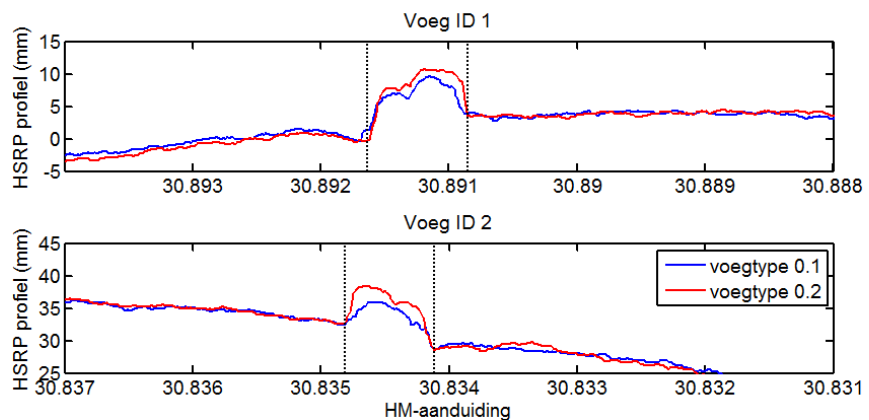


Figuur 34 HSRP data, ingezoomd op de voegovergangen.

Hierin valt op:

- Dat de voormeting (voegtype 0.1) en nameting (voegtype 0.2) kennelijk niet helemaal gelijk horizontaal zijn uitgelijnd
- Dat het profiel een verticale offset heeft tussen voor- en nameting
- Dat in de voormeting op voeg ID 1 een korte 'dip' zit ter hoogte van de voegovergang, vermoedelijk doordat de laser tussen de openingen van de sinusplaten door scheen.

Na handmatige correctie voor deze factoren ontstaat Figuur 35.



Figuur 35 HSRP data ingezoomd op de voegovergangen, na correctie van offsets.

Hierin valt het volgende te zien.

- Voeg ID 1 lijkt iets breder te zijn dan voeg ID 2 (ca 0.8 respectievelijk 0.7 m), wat in lijn is met de verschillende hoeken ten opzichte van de rijrichting (zie paragraaf 2.1).
- Bij voeg ID 1 ligt het brugdek ca 4 mm hoger dan de stroomopwaarts aangrenzende deklaag, terwijl bij voeg ID 2 het brugdek en het de deklaag na de voeg meer op een (dalende) lijn liggen.
- Bij voeg type 0.2 is de voeg rond de 3 mm hoger dan bij voeg type 0.1. Een mogelijke verklaring is de epoxy slijtlaag die op de voeg is aangebracht.