

Het stroefheid voorspellend model voor bitumineuze wegdekken

Paul Kuijper

Rijkswaterstaat GPO, Griffioenlaan 2, 3526 LA Utrecht

Jan Telman

CQM B.V., Vonderweg 16, Eindhoven

Wim Courage

TNO, Anna van Buerenplein 1, 2509 JE Den Haag

Hans Schevers

BuildingBits B.V., Oude baan 64, 5244 JB Rosmalen

Jacob Groenendijk

Groenendijk Wegenbouwadvis, Kinkelenburg 14, 7339 DL Ughelen

Samenvatting

In deze paper wordt verslag gedaan van de validatie van het in 2014 ontwikkelde stroefheidvoorspellende model. Deze validatie geeft ertoe geleid dat er een nieuw model is ontwikkeld voor diverse typen deklagen. Met dit model, dat uitsluitend geldig is voor rechtstanden, kan op basis van de volgens de SWF-methode gemeten stroefheid, bepaald worden waar zich in de toekomst stroefheidsproblemen zullen voordoen. Hierdoor kan tijdig worden ingegrepen waardoor de verkeerveiligheid wordt verhoogd. Met het model kunnen planjaren op het gebied van stroefheid worden bepaald maar het is ook mogelijk om ermee te bepalen of er in een wegvak steenslag met een hoge weerstand tegen polijsten (steenslag 3) is verwerkt. Dit is nuttig in het kader van circulariteit, maar ook bij de interpretatie van eventuele calamiteiten.

Aanbevolen wordt aanbevolen om ook voor (krappe) boogstralen een dergelijk model te ontwikkelen.

Steekwoorden

Polijstgetal (PSV), mineralogie, stroefheid, Friction after Polishing (FAP)

Het stroefheidvoorspellende model

1. Inleiding

In juni 2014 verscheen het rapport “*Modellering van de stroefheidontwikkeling van bitumineuze deklagen*” [1]. De aanleiding voor het in dat rapport beschreven onderzoek was in eerste instantie de stroefheidproblematiek in Zuid-Holland in het najaar van 2004. Ten gevolge daarvan is de toenmalige eis voor de in situ gemeten stroefheid een harde norm geworden voor de stroefheidwaarde bij 50 km/uur. Deze norm bedroeg indertijd 0,38 en elk vak met een lagere waarde diende hersteld te worden [2]. Aangezien het een harde norm betrof, ontstond de wens om de planjaren voor stroefheid met een nauwkeurigheid van 1 jaar te voorspellen. Bij een juiste voorspelling kan tijdig worden ingegrepen waardoor de verkeersveiligheid wordt verhoogd.

1.1 Regelgeving

Momenteel worden de planjaren voor de stroefheid door Rijkswaterstaat bepaald op basis van de stroefheidsindex (SI) [3]. Onder de SI wordt verstaan het verschil tussen het gemiddelde van meerdere meetwaarden van stroefheidmetingen en de bij de betreffende meting van toepassing zijnde interventiewaarde. In de berekening wordt een tijdnormering en tijdweging toegepast. De tijdnormering betreft een lineair afnemende waarde van 0,01 punt per jaar van de stroefheid. Op basis van de SI worden drie situaties onderscheiden. Indien de SI groter is dan 0,02 worden geen stroefheidsproblemen verwacht en is er geen actie noodzakelijk. Indien de stroefheidsindex kleiner is dan -0,03 dan wordt de stroefheid als onvoldoende gekwalificeerd. In dat geval zijn direct veiligheidsmaatregelen en aansluitend het verbeteren van de stroefheid noodzakelijk. Indien de SI in het gebied van 0,02 tot en met -0,03 ligt moet de wegbeheerder volgens een afgesproken protocol een beheerdersoordeel geven om uit te wijzen of veiligheidsmaatregelen en aanvullend onderhoud wel of niet nodig zijn.

1.2 Vraag- en probleemstelling

Uit [4 en 5] blijkt dat de SI geen goede waarde is voor het doen van stroefheidsprognoses. Echter door de invoering van de SI is het in de inleiding genoemde stroefheidvoorspellende model niet in gebruik genomen. Door het programma Asfalt Impuls is het model echter weer in de belangstelling gekomen en ontstond de noodzaak voor validatie van het oorspronkelijke model. Het model uit 2014 was gebaseerd op meetdata uit Zuid-Holland. Het nieuwe model dient gebaseerd te zijn op data van het gehele Hoofdwegennet (HWN). Daarnaast zijn er, naast de invoering van de SI vanaf 2014, nog meer veranderingen opgetreden:

- De SWF-methode is ingevoerd;
- Behalve DAB en ZOAB komen er andere typen deklagen op het HWN voor zoals ZOABTW, ZOABDI, ZOEAB, SMA, etc.
- Het in deze deklagen gebruikte steenslag dient te voldoen aan de eisen voor steenslag 3. Het model uit 2014 bevat nog veel data, verkregen op deklagen met steenslag dat hier niet aan voldeed.

2. Validatie van het oorspronkelijke model

Door de firma's Q-Consult en CQM is het oorspronkelijke door TNO ontwikkelde stroefheidvoorspellende model gevalideerd. De relatie tussen de percentielwaarden van de stroefheid [1], gemeten bij 70 km/uur en de intensiteit is te schrijven volgens het model:

$$\text{Str70} = a + b * 10^{\log(\text{totale intensiteit in mln}/365)}$$

Hierin is:

Str70 = gemiddelde stroefheid bij 70 km/uur en bij het 50% punt

a = het intercept, afhankelijk van type asfalt en percentielpunt

b = de helling, afhankelijk van type asfalt

totale intensiteit in mln = de cumulatieve dagelijkse verkeersintensiteit, gemeten in miljoen (10^6) voertuigpassages

De waarden voor de factoren a en b zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: regressiecoëfficiënten op $10\log$ mediaan van de cumulatieve intensiteit

	Intercept bij 50% punt (a)	Helling (b)
ZOAB	0.470	-0.0845
DAB	0.481	-0.0384

Het model is gebaseerd op:

- data uit de meetperiode 2000 t/m 2007, hetgeen betekent dat:
 - de metingen zijn uitgevoerd conform RAW proef 72;
 - er een tweejaarlijkse monitoring heeft plaatsgevonden;
 - er nog veel steenslag aanwezig is die niet voldoet aan de huidige eisen voor steenslag 3;
- uitsluitende meetdata van het HWN in Zuid-Holland.

Idealiter kent elk hectometervak zijn eigen stroefheidsverloop. Logischerwijs zou het stroefheidvoorspellende model een gemiddelde moeten zijn van al deze afzonderlijke stroefheidsverlopen.

Bij de bepaling van het oude model zijn de metingen gegroepeerd in 20 klassen omdat er per meetgeneratie te weinig meetdata waren en het stroefheidsverloop per hectometervak dus moeilijk te bepalen is.

Door de uitbreiding van de dataset zijn er nu wel voldoende data beschikbaar om per hectometervak een stroefheidsverloop te bepalen. Er zijn diverse regressiemethoden uitgetest waarbij het lineair mixed model als meest zuivere aanpak voor de modelfit werd beschouwd. In dit rapport wordt nader ingegaan op deze fit volgens een lineair mixed model, waarin de vakniveaus over de hectometervakken worden gemodelleerd als een normaal verdeelde variatiebron met een gemiddelde en een standaardafwijking.

Het model wordt geschreven als:

$$STR_t = a_i + b \times 10^{\log(I_t/365)} + \text{restspreiding, waarin}$$

STR_t = de stroefheid bij een leeftijd van t jaar, gemeten volgens proef 72, bij 70 km/u

a_i = intercept voor een specifiek hectometervak i

b = helling voor de gemeenschappelijke trend

I_t = de cumulatieve dagelijkse verkeersintensiteit, gemeten in miljoen (10^6) voertuigpassages

Voor DAB en ZOAB zijn linear mixed models gefit waarbij diverse uitbreidingsstappen zijn gedaan [4 en 5]. In deze paper wordt uitsluitend ingegaan op de volgende uitbreidingen in de data:

- De vakken uit het eerdere onderzoek [1] uitgebreid met recentere meetdata en conform de conversieregels omgerekend van RAW070 naar SWF080.
- De voorgaande stap aangevuld met alle meetgegevens uit M13 t/m M19 op de buitenste rijstrook die voldoen aan de volgende voorwaarden:
 - De leeftijd op het moment van meten was minimaal twee jaar;
 - De vakken liggen niet op een verbindingsweg omdat daar vaak andere boogstralen, meetsnelheden, etc. gelden;
 - Alleen metingen bij een hoge snelheid zijn meegenomen, dus RAW070 en SWF080;
 - Onderscheid is gemaakt naar buitenste en niet-buitenste rijstrook. In deze paper worden uitsluitend de resultaten van de buitenste rijstrook besproken.

In tabel 2 zijn de resultaten van de modelfit vermeld. De koppen in de tabel hebben de volgende betekenis:

a_{50}	=	intercept bij het 50 percentielpunt
se_{a50}	=	standaardafwijking van het intercept
b	=	helling
se_b	=	standaardafwijking van de helling
S_a	=	spreiding tussen vakken
S_{rest}	=	restspreiding
perc verkl	=	percentage verklaarde variantie

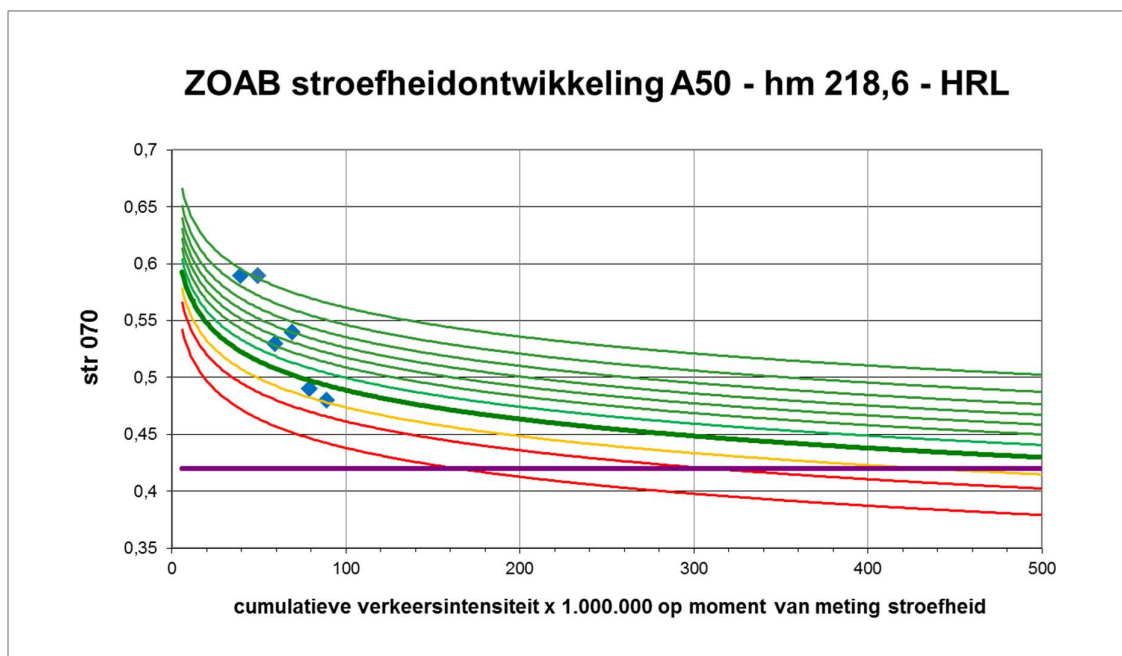
Tabel 2: Resultaten modelfit op DAB en ZOAB.

Deklaag	Data	a_{50}	se_{a50}	b	se_b	S_a	S_{rest}	% verkl l
DAB	Oorspronkelijke vakken op basis van klassen	0,4810	0,0034	-0,0384	0,0059	0,0436		
	Alle vakken op basis van mixed linear model	0,6253	0,0007	-0,0145	0,0013	0,0536	0,0320	73%
ZOAB	Oorspronkelijke vakken op basis van klassen	0,4700	0,0030	-0,0845	0,0038	0,0368		
	Alle vakken op basis van mixed linear model	0,6227	0,0003	-0,1247	0,0008	0,0527	0,0442	61%

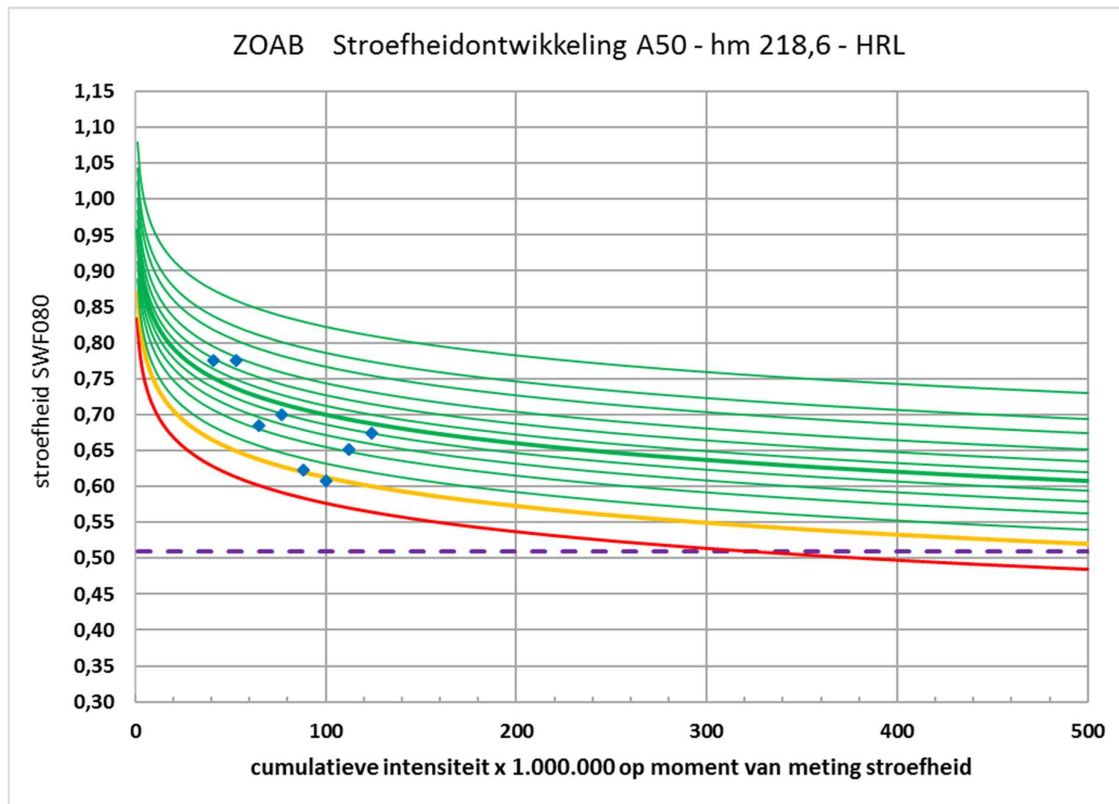
Uit tabel 2 blijkt dat het intercept (a_{50}) wel een stuk hoger ligt. Dit komt niet door de nieuwe wijze van modelleren maar door de omrekening van RAW070 naar SWF080.

Voor wat betreft de helling (b) blijkt uit tabel 5 dat die bij DAB ten gevolge van de uitbreiding ongeveer gehalveerd is. Voor ZOAB geldt dat de helling in negatieve zin sterk is toegenomen. Ook dit effect is vooral te wijten aan de omrekening van RAW070 in SWF080. Deze steilere helling houdt niet automatisch in dat er nu een kortere levensduur berekend wordt. Uit figuur 1 blijkt dat de 99% lijn (onderste rode lijn) de eis bij ongeveer 175 miljoen voertuigpassages overschrijdt terwijl dat in figuur 2 pas bij 330 miljoen voertuigpassages het geval is.

De verschillen tussen het oude en het nieuwe model worden grafisch weergegeven in de figuren 1 en 2. De dikke groene gebogen lijn geeft het stroefheidsverloop weer waar 50% van de 100m wegvakken onder ligt. De overige lijnen geven de percentages van 1 tot 99% aan. De horizontale lijn geeft de eis voor de minimum stroefheidswaarde aan.



Figuur 1: Oorspronkelijke model voor ZOAB en STR070 resultaten



Figuur 2: Nieuwe model voor ZOAB en SWF 080 resultaten

Tot slot is gekeken of de nu bepaalde modellen voor DAB en ZOAB ook geldig zijn voor andere deklaagtypen. Hierbij is ingezoomd op de zes meest voorkomende deklaagtypen in de M13 t/m M19 data, te weten DGD, SMA, DZOAB (ZOAB+) en ZOABTW.

Tabel 3: Overzicht aantallen.

Deklaag	Aantal metingen	Aantal verschillende hectometervakken	Aantal meetgeneraties per hectometervak	Aantal uitbijters
DAB	24.136	7.751	3,1	252
DGD	4.300	1.348	3,2	9
SMA	12.068	3.167	3,8	65
ZOAB	116.353	31.772	3,7	811
DZOAB	84.167	22.507	3,7	374
ZOABTW	38.027	9.783	3,9	162

Uit tabel 3 blijkt dat ZOAB nog steeds het meest voorkomende deklaagtype is met DZOAB als tweede meest voorkomende type.

In tabel 4 zijn de resultaten van de modelfit vermeld. De koppen in de tabel hebben de volgende betekenis:

a_{50}	=	intercept bij het 50 percentielpunt
se_{a50}	=	standaardafwijking van het intercept
b	=	helling
se_b	=	standaardafwijking van de helling

Het stroefheidvoorspellende model

S_a = spreiding tussen vakken
 S_{rest} = restspreiding
 perc verkl = percentage verklaarde variantie

Tabel 4: Resultaten modelfit op de buitenste rijstrook.

Deklaag	a_{50}	se_{a50}	b	se_b	S_a	S_{rest}	% verkl
DAB	0,6253	0,0007	-0,0145	0,0013	0,0536	0,0320	73%
DGD	0,6901	0,0021	-0,0259	0,0037	0,0714	0,0406	73%
SMA	0,5999	0,0013	-0,0414	0,0028	0,0690	0,0491	65%
ZOAB	0,6227	0,0003	-0,1247	0,0008	0,0527	0,0442	61%
DZOAB	0,6280	0,0004	-0,1455	0,0007	0,0484	0,0343	74%
ZOABTW	0,6940	0,0006	-0,0944	0,0012	0,0517	0,0376	62%

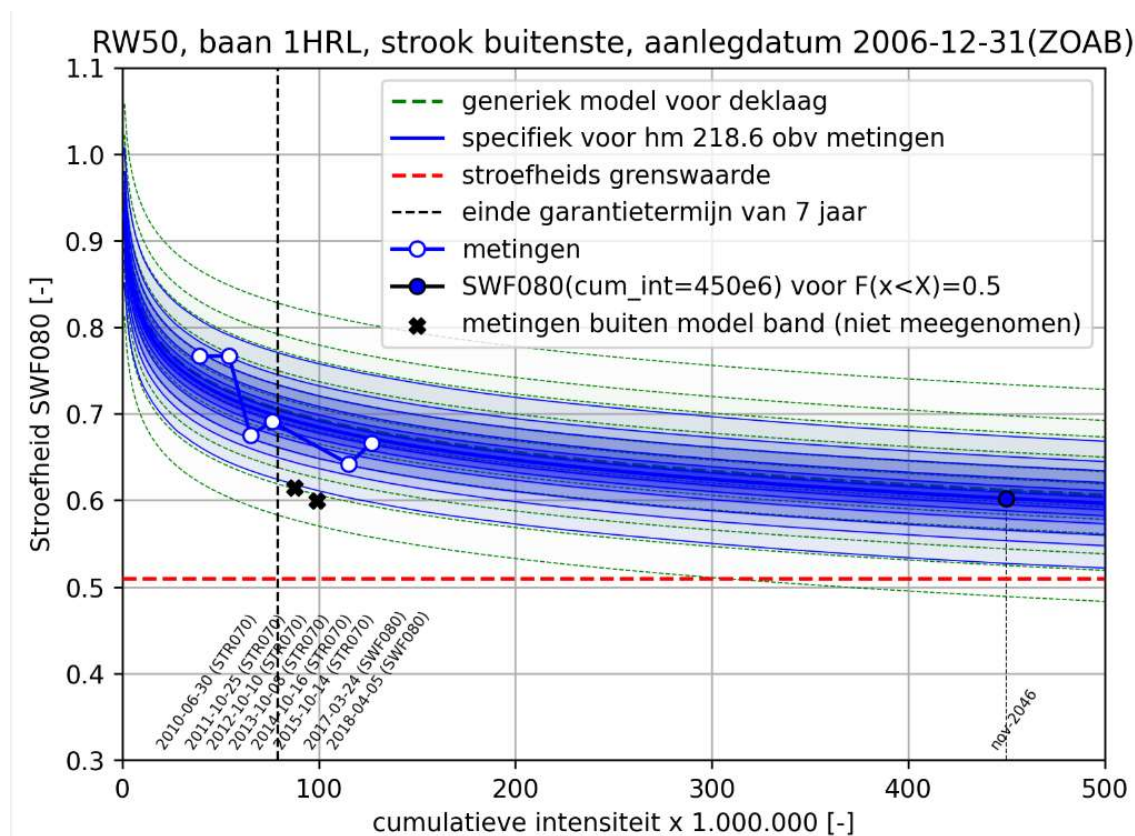
Alle hellingen zijn significant en op basis van het percentage verklaarde variantie wordt geconcludeerd dat het verband tussen de cumulatieve verkeersintensiteit en de afnemende stroefheid sterk is [6]. Het intercept ligt bij alle deklaagtypen in dezelfde orde grootte maar de helling (b) verschilt sterk per deklaagtype.

3. Stroefheidvoorspellend model (Bayesian variant)

Met behulp van het in paragraaf 2 beschreven stroefheidvoorspellende model is het mogelijk om van elke afzonderlijke meetgeneratie een planjaar te berekenen. Dat planjaar geeft aan wanneer de stroefheid onder de norm zakt. Ook is het mogelijk om op basis van een afzonderlijke meetgeneratie te bepalen of er in een wegvak een steenslag is toegepast met onder andere een hoge weerstand tegen polijsten (steenslag 3). In zo'n geval zal dat vak minimaal 20 jaar meegaan bij een gemiddelde verkeersintensiteit van 60.000 voertuigen per etmaal. Dit komt overeen met een totaal van circa 450 miljoen voertuigen. Deze grenswaarden zijn arbitrair bepaald en worden momenteel door Rijkswaterstaat nader onderzocht.

Zowel met het algemene stroefheidvoorspellende model uit paragraaf 2 als met behulp van de SI is het niet mogelijk om specifiek per hectometervak een trend over de jaren heen te bepalen. Daarom is door TNO een Bayesian variant ontwikkeld. Buiten het feit dat met deze variant de trend met behulp van een aantal meetgeneraties bepaald kan worden is het ook mogelijk om het model als een validator voor nieuwe meetdata te gebruiken. Zo kunnen afwijkende waarden worden herkend. Dit kan een initiator zijn voor aanvullende acties. Tevens kan het model zichzelf updaten op basis van nieuwe meetgegevens.

In figuur 3 is hetzelfde vak dat in de figuren 1 en 2 is weergegeven uitgerekend en geplot met behulp van de Bayesian statistiek.



Figuur 3: Bayesian model voor ZOAB en SWF 080 resultaten

Hieronder wordt aan de hand van de legenda het model nader toegelicht.

Het stroefheidvoorspellende model

- **Generiek model voor deklaag:** Het stroefheidvoorspellende model kent voor elke type deklaag een apart model. De buitenste groene lijnen geven de 99%-band aan waarbinnen alle metingen op ZOAB van het hoofdwegennet vallen. Dit zijn dezelfde lijnen als in figuur 2.
- **Specifiek voor hm 218,6 obv metingen:** Deze blauwe band in de grafiek geeft de band weer waarbinnen 99% van de metingen op dit 100m vak vallen. Deze band is gebaseerd op de eerste drie meetresultaten waarbij geldt dat de eerste meting niet jonger mag zijn dan 2 jaar na aanleg.
- **Stroefheids grenswaarde:** Dit is de minimum eis waaraan de stroefheid van een 100m vak moet voldoen. De eis (voor de open deklaag op het vak in de grafiek) bedraagt 0,51, gemeten volgens de Side Way Force methode bij een snelheid van 80 km/uur (SWF080). Dit wegvak is nog ver verwijderd van de grenswaarde en zal ruimschoots de 450 miljoen voertuigpassages halen. Er is dus een steenslag gebruikt met onder andere een hoge weerstand tegen polijsten (steenslag 3).
- **Einde garantietermijn van 7 jaar:** Deze verticale lijn markeert het tijdstip waarop de garantie verloopt. Dit wegvak heeft voor wat betreft de stroefheid de garantietermijn (ruimschoots) gehaald.
- **Metingen:** De met een open bolletje gemarkeerde metingen zijn de metingen die binnen de 99% band van alle op het betreffende 100m vak verrichte metingen vallen. Deze metingen worden in de voorspelling meegenomen.
- **SWF080(cum_int=450*6 voor $F(x < X) = 0,5$):** Met dit blauwe bolletje wordt het punt gemarkeerd waarbij 450 miljoen voertuigen het vak gepasseerd hebben. Het gemiddelde van alle metingen geeft op dit wegvak aan dat dat punt in november 2046 wordt bereikt.
- **Metingen buiten model band (niet meegenomen):** Met de zwarte kruisjes worden de meetresultaten gemarkeerd die buiten de voor dit 100m vak geldende 99% band vallen. Dit zijn de zogenoemde uitbijters die niet in de voorspelling worden meegenomen. Deze punten verdienen mogelijk een nader onderzoek.

Met behulp van het Bayesian stroefheidvoorspellende model komt het datagedreven werken ten aanzien van de stroefheidontwikkeling van een 100m wegvak een stuk dichterbij. Met behulp van het model kunnen planjaren ten aanzien van de stroefheid worden berekend. Net als nu bij de SI gebeurt kan ook in dit geval een beheerdersoordeel ingesteld worden. Dit zal vooral noodzakelijk zijn in het geval van uitbijters (zie figuur 3). Naast negatieve uitbijters kunnen echter ook positieve uitbijters voorkomen wanneer er bijvoorbeeld een nieuwe deklaag is aangebracht die nog niet in de systemen is doorgevoerd.

5. Conclusie

De validatie van het oorspronkelijke model heeft ertoe geleid dat er een nieuw mixed linear model voor diverse deklagen is ontwikkeld. Met dit nieuwe model kan per meetgeneratie een voorspelling worden gemaakt op basis van een deklaagafhankelijke trend. Door middel van Bayesian statistiek is het mogelijk om meer specifiek per hectometervak voorspellingen op basis van meerdere meetgeneraties te maken. Tevens kunnen nieuwe data gevalideerd worden en is het model simpeler te updaten.

6. Aanbevelingen

Het model dient verder getuned te worden en vervolgens te worden geïmplementeerd in de Meer Jaren Planning Verhardingsonderhoud (MJPV).

Er dient een proces ontwikkeld te worden hoe omgegaan moet worden met uitbijters in de stroefheidsmetingen en hoe het model periodiek wordt geüpdatet.

Het model is niet geldig op wegvakken met (krappe) boogstralen. Aanbevolen wordt om ook voor dit soort situaties een stroefheidvoorspellend model te ontwikkelen omdat met name in (krappe) bogen veel aanspraak op de stroefheid van het wegdek wordt gemaakt.

Een verdere aanbeveling is om het model nogmaals te valideren door op vakken met een hoge verkeersintensiteit ($> 500 \times 10^6$ voertuigpassages), een gemiddelde verkeersintensiteit (300×10^6 tot 500×10^6 voertuigpassages) en een lage verkeersintensiteit ($< 300 \times 10^6$ voertuigpassages) kernen te boren en het steenslag mineralogisch te onderzoeken op polijstgedrag. Hierdoor wordt een beter inzicht verkregen in de prestaties van steenslag 2 en 3 op het gebied van de stroefheidontwikkeling.

7. Literatuurlijst

1. Kuijper, P.M., “Modellering van de stroefheidontwikkeling van bitumineuze deklagen”, 2014, Rijkswaterstaat, Utrecht
2. Peijs, K, “[Achtergronden stroefheidsproblematiek rijkswegen \(SDG/Prod/2005/657\)](#)”, 2005, Den Haag
3. Vreugdenhil, B., “Schadebeoordeling- en Meetmethoden Bovenbouw”, 2019, Rijkswaterstaat, Utrecht
4. Telman, J., “Eindrapport validatie stroefheid voorspellend model”, 2020, Q-Consult, Waardenburg
5. Telman, J., “Aanvullende analyses stroefheid voorspellend model”, 2020, CQM, Eindhoven
6. <http://www.let.leidenuniv.nl/history/RES/stat/html/les10.html>

Bijschrift figuren (Times New Roman 12, cursief)