

Asfalt-Impuls - LAM Fase 5 - WP2

Doorontwikkeling levensduurvoorspellend asfaltmodel

TNO 2024 R10278 – 18 maart 2024

Doorontwikkeling levensduurvoorspellend asfaltmodel

Asfalt-Impuls - LAM Fase 5 - WP2

Auteurs	Ir. G.A. Leegwater Ir. W.C. van Aalst Dr. ir. W.M.G. Courage Drs. ir. M. Moenielal Ir. S.J. Wang Dr.ir. H.M. Böhms Dr.ir. G.T. Luiten
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Aantal pagina's	97 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Stichting CROW - TKI HTSM
Projectnaam	TKI LAM 2022-2023
Projectnummer	060.51294

Alle rechten voorbehouden

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

© 2024 TNO

Managementsamenvatting

Betere voorspellingen van de (rest)levensduur van asfaltwegdekken kunnen een grote bijdrage leveren aan de gewenste verduurzaming van de asfaltsector. In de eerste plaats kan door een betere voorspelling van de restlevensduur onderhoud korter op het moment van einde levensduur worden gepland, waardoor de beschikbare levensduur beter wordt uitgenut. Daarnaast wordt het mogelijk om levensduurbeïnvloedende factoren te identificeren, waardoor het ontwerp en de uitvoeringsmethode kunnen worden geoptimaliseerd, zodat de ontwerplevensduur wordt verlengd. Een langere levensduur zorgt er voor dat de milieu-impact per jaar kleiner wordt, waarmee de weg als geheel duurzamer wordt.

Om deze verduurzaming van de asfaltsector te realiseren werken wegbeheerders, aannemers en kennisinstituten binnen het programma Asfalt-Impuls aan een Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM), waarmee de (rest)levensduur van asfaltdekken voorspeld kan worden. Het LAM-model combineert hiervoor theoretische modellen met data van prestaties in de praktijk. In de voorgaande fases van het LAM-onderzoek zijn voor rafeling van SMA en ZOAB, en stroefheid in het algemeen, Proof of Concepts levensduurmodellen geformuleerd. Er is gekozen voor deze specifieke degradatiemechanismen, omdat rafeling voor de levensduur van ZOAB en SMA het meest relevant is en omdat stroefheid het meest kansrijk is voor modelvorming.

Dit rapport beschrijft de laatste fase van het LAM-onderzoek, waarin de genoemde modellen zijn doorontwikkeld en de bijbehorende rafelingsdata van het hoofdwegennet verder is geanalyseerd. In deze laatste fase zijn stappen gezet de relevante data beter te structureren, nauwkeuriger te maken en te voorzien van de juiste metadata. Met deze data van hogere kwaliteit zijn vervolgens de levensduurmodellen doorontwikkeld. De volgende producten zijn gerealiseerd:

1. Een geüniformeerde dataset van historische rafelingsdata (o.b.v. DOS/LCMS-data) voor onderzoek naar trends en levensduuranalyses, die over een periode van 10 jaar (2012 – 2021) jaarlijkse rafelingsdata van het hele Nederlandse hoofdwegennet (van ~90km²) op meterniveau bevat;
2. Proof of Concept model voor een restlevensduurvoorspelling van ZOAB voor het schademechanisme rafeling, op basis van (een eerste deel van) de rafelingsdata van het hoofdwegennet;
3. SMA datamodel dat beschrijft welke data op welke wijze gekoppeld dient te worden om te komen tot voorspellingen over levensduurfases heen. Inclusief een automatische bewerking om data vanuit historische pdf-documenten in te lezen in numerieke bestanden en een aanzet voor het levensduurmodel. De set van beschikbaar gemaakte en gekoppelde data is op dit moment nog te klein voor het maken van een betrouwbaar levensduurmodel voor rafeling van SMA.
4. Restlevensduurmodel voor stroefheid op basis van jaarlijkse meetgegevens en implementatie in software die ingezet wordt bij Rijkswaterstaat. Hierdoor is het mogelijk in een eerder stadium onderhoud van de toplaag als gevolg van de afname van de stroefheid op te nemen in de onderhoudsplanning.

Gedurende het LAM-onderzoek is het duidelijk geworden dat het essentieel is voor het ontwikkelen van betrouwbare praktijkmodellen dat data over prestaties, belastingen en

asfaltmengsels in detail en nauwkeurigheid beschikbaar zijn. Daarnaast dient deze data voorzien te zijn van goede metadata, zodat deze koppelbaar zijn. Hierbij vormt vooral de koppeling over de verschillende fases van de levensduur heen, zoals ontwerp, aanleg, oplevering en gebruik, een grote uitdaging. Helaas wijst de praktijk uit dat de beschikbare data hieraan niet voldoet. De inspanning die in dit project gedaan is voor het verder analyseren van rafelingsdata voor het hoofdwegennet was succesvol, maar heeft veel inspanning gekost en was afhankelijk van een wegbeheerder die bereid was, en hopelijk zal blijven, hierin te investeren. Zolang iets dergelijks niet voor alle relevante data gebeurt, zijn algemeen geaccepteerde, data-gebaseerde levensduurmodellen, die betrouwbare voorspellingen kunnen doen op basis van asfaltmengselontwerp en praktijkprestaties, nog ver weg. Het is aan de sector samen te werken aan een betere informatievoorziening voor onze hoofd- en secundaire wegennet. Hiervoor zien we in de sector, met bijvoorbeeld PIM, ASPARI, Asphalt-Impuls en het komende Transitiepad Duurzame Wegverhardingen, gelukkig al wel goede, breed gedragen ontwikkelingen.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Inhoudsopgave	5
1 Inleiding	7
1.1 Asfalt-Impuls.....	7
1.2 Aanpak Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM) in fase 5	8
1.3 Leeswijzer	9
2 Historische DOS/LCMS rafeling data	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Rafeling toolbox 2023.....	11
2.3 Beschikbare DOS/LCMS Data	12
2.4 Kentallen en vlaggen	13
2.5 Export	16
2.6 Bevindingen en toekomst	17
3 Levensduurmodel ZOAB	19
3.1 Data	19
3.2 Levensduurmodel.....	23
3.3 Resultaten	26
3.4 Discussie	28
3.5 Conclusies en aanbevelingen.....	29
4 Levensduurmodel SMA.....	30
4.1 Inleiding	30
4.2 Datasets.....	31
4.3 Levensduurmodel SMA.....	32
4.4 Data toegankelijk maken en structureren	34
4.5 Resultaten Levensduurmodel SMA.....	41
4.6 Conclusies en aanbevelingen.....	64
5 Stroefheid	68
5.1 Inleiding	68
5.2 Stroefheid op basis van FAP-data	69
5.3 LAM-Stroefheidsmodel en -Applicatie	74
5.4 Conclusie.....	79
6 Interactie met de sector	80
6.1 Interactie binnen Asfalt-Impuls.....	80
6.2 Expertsessie LAM-Modellen	81
6.3 Workshop provincie Gelderland en TNO.....	82
7 Conclusies en aanbevelingen	85
7.1 Conclusies.....	85
7.2 Aanbevelingen.....	86
Referenties	88
Ondertekening.....	89

Bijlagen

Bijlage A:	Woordenlijst	90
Bijlage B:	Werking Excel sheet t.b.v. conversie PDF bestanden	92
Bijlage C:	Linked data code voorbeelden	96

1 Inleiding

1.1 Asfalt-Impuls

Wegbeheerders, asfaltaannemers, asfaltleveranciers, wegontwerpers, kwaliteitsborgers en kennisinstellingen staan de komende jaren gesteld voor grote uitdagingen bij het beheer- en onderhoud van ons wegennet. Voorbeelden van deze uitdagingen zijn o.a. invulling geven aan de circulaire economie, het Klimaatakkoord van Parijs en de Green Deal Duurzaam GWW 2.0. Dit alles tegen de algemene achtergrond van minder kosten, minder hinder voor weggebruikers en omgeving én een gezonde economische omgeving voor de asfaltproducerende en -verwerkende bedrijven. Waarbij ook nog sprake is van materiaalveranderingen als gevolg van ontwikkelingen in de olie- en gassector, waardoor materiaalgedrag significant aan het veranderen is en de bitumen van nu anders is dan die van 20 jaar geleden.

In het programma Asfalt-Impuls is gedurende een periode van 6 jaar (2018 – 2023) door ketenpartijen in de sector gewerkt aan oplossingen voor deze uitdagingen. Dit rapport is opgesteld in het kader van het programma Asfalt-Impuls en is tot stand gekomen dankzij inspanningen en financiële bijdragen van de partners van Asfalt-Impuls. In het kader van het topsectorenbeleid van het Ministerie van Economische zaken en Klimaat werken Nederlandse partijen uit de bouw, verenigd in Asfalt-Impuls en met CROW als vertegenwoordiger, samen met TNO aan het TKI-project Levensduurmodel Asfalt. Het TKI-project wordt financieel ondersteund door het TKI HTSM, Topconsortium voor Kennis en Innovatie, programma High Tech Systemen en Materialen.

Dit rapport richt zich op de voortgang die is geboekt in fase 5 van werkpakket 2 van het Levensduurvoorspellend Asfalt-Model (LAM) project. Werkpakket 2 wordt ook wel LAM-modellen genoemd en focust zich op het formuleren van een levensduurmodel voor asfaltwegen. Een overzicht van alle fases die binnen LAM-modellen zijn uitgevoerd is weergegeven in Tabel 1.1. Dit zal in paragraaf 1.2 nader worden toegelicht. Naast dit werkpakket bestaan binnen het LAM-project nog twee werkpakketten, namelijk werkpakket 1 Data en werkpakket 3 Regelgeving. Verslaglegging van deze werkpakketten het gehele programma Asfalt-Impuls is terug te vinden op www.crow.nl/asfalt-impuls. In deze rapportage is de databewerking van de DOS/LCMS-data ook beschreven, terwijl dit formeel onderdeel is van werkpakket 1 Data. Hiervoor is gekozen omdat dit werk essentieel was voor het maken van een levensduurmodel voor ZOAB en daarmee ook invloed heeft op dit model. Daarnaast zijn deze werkzaamheden zijn ook uitgevoerd door TNO en ondergebracht in hetzelfde TKI-project, waardoor het in de verantwoording ook passend is de resultaten hier te rapporteren.

Tabel 1.1 Fases in WP-2 LAM-modellen

Fase	Jaar	Belangrijkste onderwerp(en)
1	2018	Opstart en modelinventarisatie
2	2019	Uitwerking Proof of Concept LAM-model rafeling ZOAB
3	2020	Uitwerking Proof of Concept LAM-model stroefheid
4	2021	Verfijning Proof of Concept LAM-model stroefheid, Uitwerking Proof of Concept LAM-model rafeling SMA
5	2022-2023	Databewerking DOS/LCMS (onderdeel WP1 Data), Proof of Concept Datagedreven LAM-Model rafeling ZOAB, Validatie Proof of Concept LAM-model rafeling SMA, Implementatie Proof of Concept LAM-model stroefheid.

In bijlage A is een woordenlijst opgenomen waarin afkortingen en definities zijn opgenomen die relevant zijn voor LAM-modellen.

1.2 Aanpak Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM) in fase 5

In de voorgaande fases zijn voor rafeling van SMA en ZOAB, en stroefheid in het algemeen Proof of Concepts voor levensduurmodellen geformuleerd. Deze modellen richten zich op deze specifieke degradatiemechanismen omdat deze in 2018 zijn geselecteerd als het meest relevant (rafeling van ZOAB en SMA) of het meest kansrijk en relevant voor de praktijk (stroefheid). Na het afronden van de vorige fase (fase 4) waren deze modellen nog niet klaar voor gebruik. Ook was ieder van de modellen specifiek ontwikkeld voor één gebruiksfase, in plaats van gebruik over meerdere fases heen. Er is daarom besloten om de PoC modellen in fase 5 door te ontwikkelen. Omdat de modellen verschillen, verschilt ook de vereiste doorontwikkeling. In deze laatste fase zijn per model de meest kansrijke stappen voor doorontwikkeling, die mogelijk waren binnen het beschikbare budget en tijdbestek, uitgevoerd. Hierbij was het doel om zo duidelijk mogelijk te demonstreren welke modelopbouw en -aanpak de meeste potentie heeft voor implementatie in de praktijk. De uitgevoerde stappen zijn in de volgende paragrafen beschreven.

Geüniformeerde dataset

Voor het rafelingsmodel van ZOAB is in fase 4 gebleken dat ondanks dat prestatiedata in hoge kwaliteit wordt ingewonnen, deze niet netwerkbreed in hoge kwaliteit beschikbaar is voor levensduuranalyses. Om deze reden is in samenspraak met Werkpakket 1 Data afgesproken te investeren in het bewerken van de DOS/LCMS-data van het hoofdwegennet, onder beheer van Rijkswaterstaat (RWS), zodat deze data wel geschikt komt voor nadere analyses. Deze investering is relevant voor dit project, omdat het kansen biedt om het model dat in fase 2 is ontwikkeld te valideren. Daarnaast biedt het ook kansen voor andere partijen om inzicht te verwerven in praktijkprestaties van bepaalde asfalttypen, -mengsels, uitvoeringsomstandigheden, etc. Het genereren van deze dataset kost naast programmeertijd voor goede algoritmes, ook erg veel rekentijd. Dit is niet verwonderlijk als men zicht realiseert dat het 10 jaar aan data betreft, welke op mm niveau is ingewonnen over een lengte van 6000km en een oppervlak van ~90km².

Doorontwikkeling PoC rafelingsmodel van ZOAB

Op basis van een eerste set van de beschikbaar gemaakte rafelingsdata van het hoofdwegennet is een Proof of Concept van een datagedreven levensduurmodel voor ZOAB gemaakt. Naast rafelingsdata gebruikt dit model ook informatie over het type deklaag en

aanleg- en onderhoudsmomenten. Dat informatie over aanlegmoment essentieel was voor het bepalen van een levensduur was al in fase 2 vastgesteld, aangezien degradatietrends uit de praktijk alleen informatie bevatten over het moment van einde levensduur. Aangezien de totale DOS/LCMS-dataset vanwege de hoge resolutie erg veel tijd kostte om te genereren, is deze Proof of Concept op een sample van de dataset gebouwd.

Validatie PoC rafelingsmodel SMA

In fase 4 was door de provincie Gelderland ontwerp- en opleverdata van 24 bestekken voor provinciale wegen met SMA aangeleverd. Aangezien deze data vast was vastgelegd in pdf's, was deze data nog niet toegankelijk voor analyse. In deze fase 5 zijn deze data geautomatiseerd omgezet naar een database, waardoor deze beschikbaar zijn gemaakt voor analyses. Hierbij is ook een datastructuur aangebracht, die ervoor zorgt dat deze data toegankelijker is voor toekomstig gebruik. Op basis van deze data is in deze fase 5 het Proof of Concept voor het rafelingsmodel van SMA gevalideerd.

Implementatie PoC stroefheidsmodel

In fase 4 van LAM, was het Proof of Concept voor een levensduurmodel van stroefheid ontwikkeld voor de gebruiksfase. In fase 5 is de ambitie om de stap te maken naar de ontwerpfase door data van de Friction After Polishing (FAP) proef te combineren met prestaties in de praktijk. Hiertoe is een brede uitvraag gedaan naar deze data bij aannemers en beheerders. Daarnaast is gewerkt aan verdere validatie en implementatie van het eerdere stroefheidsmodel voor de gebruiksfase binnen RWS-systemen.

Afstemming ketenpartners

Gedurende het project is op verschillende manieren contact gehouden met de sector om hen te informeren over de voortgang, na te gaan of er meer data beschikbaar was en te zorgen dat eindproducten zo veel mogelijk aansluiten bij behoeften die bestaan vanuit de markt. Dit betrof zowel de modellen, als de DOS/LCMS-dataset.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is beschreven welke bewerkingen er zijn uitgevoerd op de DOS/LCMS-data en welke dataset er is gegenereerd. In hoofdstuk 3 is de ontwikkeling van een datagedreven levensduurmodel voor rafeling van ZOAB beschreven. Hoofdstuk 4 beschrijft de validatie van het rafelingsmodel voor SMA. In hoofdstuk 5 wordt de doorontwikkeling van het stroefheidsmodel beschreven. De interactie met verschillende spelers in de sector om afstemming van de projectresultaten te bewaken is beschreven in hoofdstuk 6. Tot slot zijn conclusies en aanbevelingen beschreven in hoofdstuk 7.

2 Historische DOS/LCMS rafeling data

2.1 Inleiding

Rijkswaterstaat wint sinds 2011 gegevens in over rafeling met het DOS/LCMS-systeem ([Figuur 2.1](#), [4]). TNO verzorgt voor Rijkswaterstaat een groot deel van de verwerking van deze DOS/LCMS data. De data worden met name gebruikt om de onderhoudsplanning (Meer Jaren Planning Verhardingen (MJPV)) mee op te stellen. Hiervoor wordt op basis van een meerdere nauwkeurige metingen een voorspelling geaggregeerd op hectometerniveau. Echter, er is veel meer uit deze data te halen door bijvoorbeeld de rafeling in de tijd mee te nemen en op meter niveau te kijken is deze data in potentie extreem waardevol voor het bepalen van levensduurtrends in rafeling.



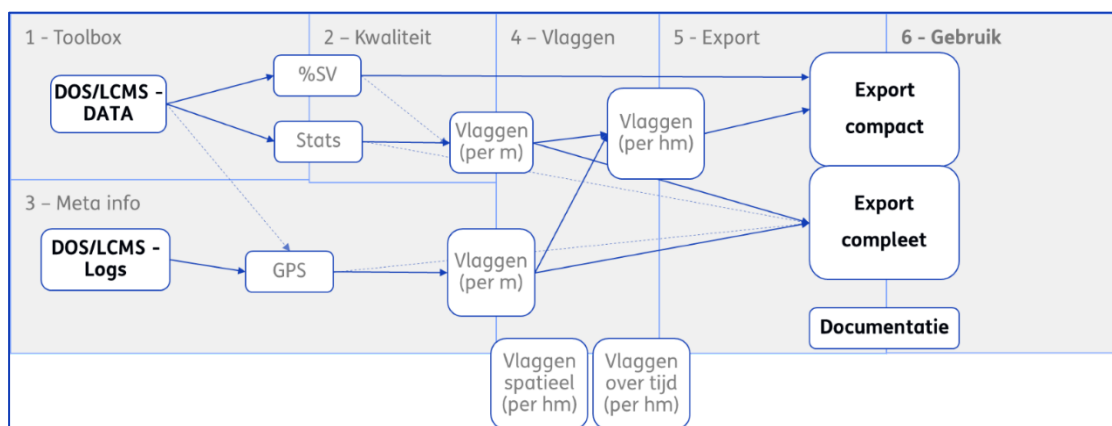
Figuur 2.1: Voormalig RWS DOS/LCMS meetvoertuig

De algoritmen en werkwijzen die in de afgelopen jaren zijn gebruikt voor de inwinning en analyse van deze data waren gericht op het maken van een onderhoudsplanning (MJPV). In de output voor de onderhoudsplanning worden beperkte eisen gesteld aan de vergelijkbaarheid van data over jaren heen en het moment van schade-initiatie. Hierdoor is aan deze aspecten vrijwel geen aandacht besteed. Daarnaast is zonder diepgaande kennis van het proces van data-inwinning en verwerking de bestaande MJPV rafelingsdata niet bruikbaar door derden.

Dit onderzoek heeft als doel gehad om historische rafelingsdata uniform en bruikbaar te maken voor onderzoek naar trends en levensduuranalyses. Hiervoor zijn grofweg de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Toolbox ontwikkelen om historische DOS/LCMS data te verwerken tot rafelingsgetallen en nieuwe kwaliteitskentallen; hierbij doen rafelingsgetallen een uitspraak over het steenverlies op een specifieke locatie en kwaliteitskentallen doen een uitspraak hoe betrouwbaar deze rafelingsgetallen zijn.
- Algoritmes ontwikkelen om op basis van de DOS/LCMS data en de toolbox output vlaggen te definiëren welke o.a. de kwaliteit en bruikbaarheid van de data beschrijven.
- Zoveel mogelijk DOS/LCMS-data afkomstig uit de periode 2011-2021 doorrekenen met de ontwikkelde toolbox en algoritmes.
- De verwerkte rafelingsdata exporteren in een formaat bruikbaar voor gebruik door derden.
- Opstellen van documentatie bij de geëxporteerde data.

Deze hierboven genoemde werkzaamheden hebben een bepaalde volgorde, omdat een aantal van de vlaggen die betrekking hebben op kwaliteit afhankelijk zijn van de rafelingsdata en de locatiekwaliteit en pas bepaald kunnen worden kan worden op het moment dat de toolbox daadwerkelijk is ingezet om de data te bewerken. De volgorde van de stappen wordt weergegeven in **Figuur 2.2**.



Figuur 2.2: Schematisch overzicht van het proces en stappen om te komen tot historische rafelingsgetallen bruikbaar voor derden. %SV (percentage steenverlies) = maat voor rafeling.

Deze werkzaamheden hebben geleid tot het volgende resultaat:

Hoge kwaliteit rafelingsdata met bijbehorende documentatie van de periode van 2011 tot en met 2021 t.b.v. van verder onderzoek naar schadeontwikkeling. Deze data en bijbehorende documentatie worden digitaal beschikbaar gesteld aan Rijkswaterstaat [6].

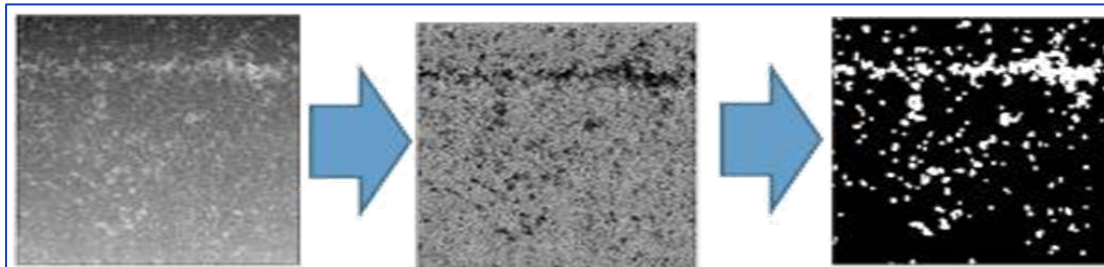
In bovengenoemde documentatie is ook een uitgebreidere beschrijving van het resultaat gegeven dan in deze rapportage.

2.2 Rafeling toolbox 2023

De bestaande MJPV toolbox voor het berekenen van rafeling uit DOS/LCMS data is aangepast en uitgebreid. Hier zijn o.a. de volgende zaken aangepakt:

- Extra kentallen toegevoegd (intensiteit)
- Randeffect bij bepaling van rafeling opgelost
- Opslaan gebruikte rijspoorpositie
- Structurering kentallen missende lijnen en punten
- Voegovergang detectie upgrade

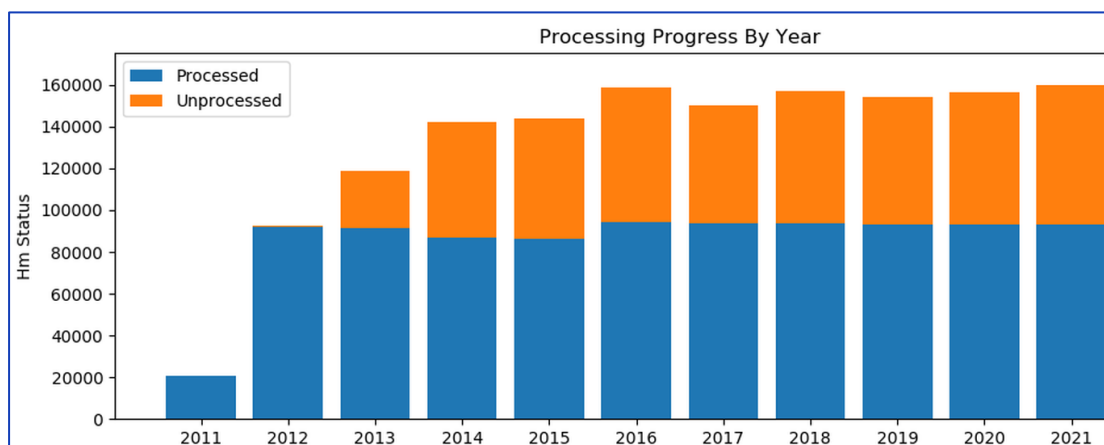
In **Figuur 2.3** hieronder is een voorbeeld weergegeven van de bepaalde rafeling uit DOS/LCMS data.



Figuur 2.3: Voorbeeld van rafeling bepaling. Links de ruwe DOS/LCMS hoogte data, midden de gecorrigeerde data en rechts de gevonden rafeling (witte puntjes) Bron: [4]

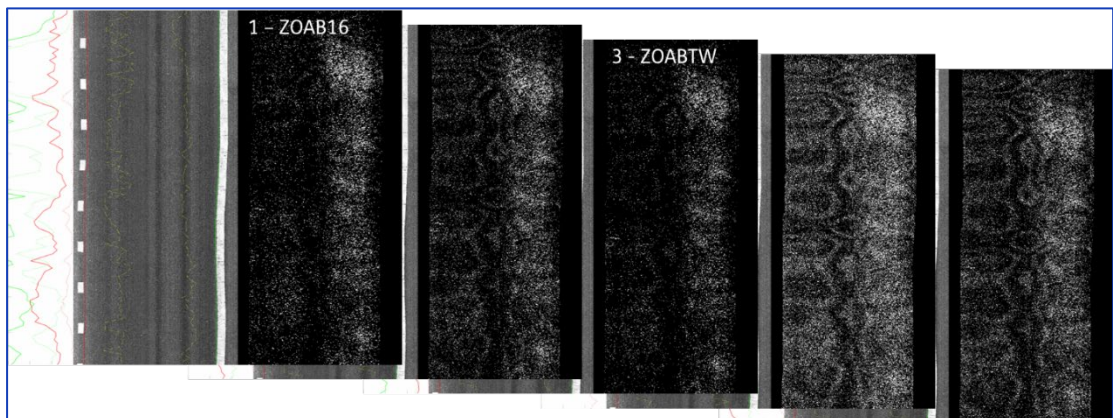
2.3 Beschikbare DOS/LCMS Data

Binnen dit project is zoveel mogelijk van alle DOS/LCMS data uit 2011 t/m 2021 doorgerekend. Dit betrof ongeveer ~1.500.000 metingen van een hectometer lengte (rijstrook breed). In **Figuur 2.4** is een output weergegeven van de voortgang van de verwerking van de data door de toolbox. De hoogte van de staven per jaar laat zien hoeveel hectometers er per jaar beschikbaar zijn. In de periode 2011 tot en met 2013, was het meetsysteem nog sterk in ontwikkeling en zijn mede daardoor minder wegvakken bemeten, vanaf 2014 wordt jaarlijks ongeveer het gehele netwerk bemeten.



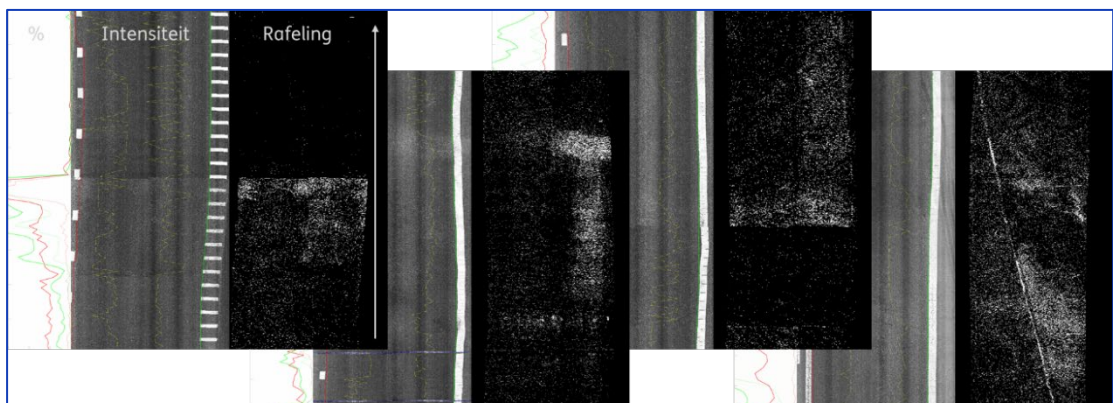
Figuur 2.4: overzicht van de aantallen hectometers per jaar en de status van de verwerking (verwerkt en onverwerkt) op een willekeurig moment tijdens het project.

Het zogenaamde ‘muntje’ is onderdeel van het analyse-algoritme, dit is de maat voor een cilindervormige projectie van een missende steen. Als de geobserveerde leegte in het asfalt groter is dan het gekozen muntje wordt er geconcludeerd dat er een steen ontbreekt [4]. Bij het doorreken van de data is voor dezelfde instellingen van het ‘muntje’ gekozen als in de MJPV. In onderstaand **Figuur 2.5** is een voorbeeld te zien van ‘debug’ output van een hectometer, waarbij het resultaat van de rafelingsanalyse zichtbaar is voor vijf verschillende muntjes (R012, 1HRR, 3RR, 19.8-19.9).



Figuur 2.5: voorbeeld van ‘debug’ output van een hectometer, links is de ruwe data van het wegvak te zien, vervolgens wordt de rafelingsinterpretatie weergegeven voor vijf verschillende muntjes, aflopend van groot (links) naar klein (rechts). De patronen die in de twee meest rechter plaatjes optreden suggereren dat hier artefacten optreden en dat een analyse met deze kleinste muntjes niet zinvol is (R012, 1HRR, 3RR, 19.8-19.9).

In **Figuur 2.6** zijn een viertal willekeurige maar typische hectometers weergegeven met daarin duidelijk zichtbaar de verschillende patronen van rafeling binnen een hectometer. Deze geven een beeld op welke wijze schade zichtbaar wordt in de DOS/LCMS data.



Figuur 2.6: voorbeeld van ‘debug’ output van een viertal hectometers, waarbij de rafeling zichtbaar is (als witte puntjes in zwarte beeld) in verschillende patronen binnen een hectometer.

2.4 Kentallen en vlaggen

Om de data bruikbaar te maken voor derden zonder diepgaande kennis van het DOS/LCMS meetsysteem is er gepoogd om kentallen en vlaggen te maken welke een uitspraak doen over de kwaliteit en bruikbaarheid van de data.

De kentallen zijn gebaseerd op twee informatie stromen:

1. DOS/LCMS data: is de DOS/LCMS meting logisch en bruikbaar?
2. GPS data: is de positie van de data logisch?

In de volgende twee secties worden deze stromen beide kort beschreven. In de documentatie [6] is een volledig overzicht van de kentallen en vlaggen beschreven.

2.4.1 DOS/LCMS data

Tijdens het verwerken van de DOS/LCMS data worden er een aantal kentallen bepaald. Deze kentallen zijn te verdelen in een aantal categorieën:

- Indicatie van de kwaliteit van de data
- Kenmerken van de data
- Kenmerken van de verwerking

Een aantal voorbeelden van kentallen zijn:

- Lengte meting (GPS, meters, ...)
- Missende meetpunten/lijnen
- 'Witheid' van de m2 (pijlen, markeringen)
- #m velgspoor
- Breedte rijstrook

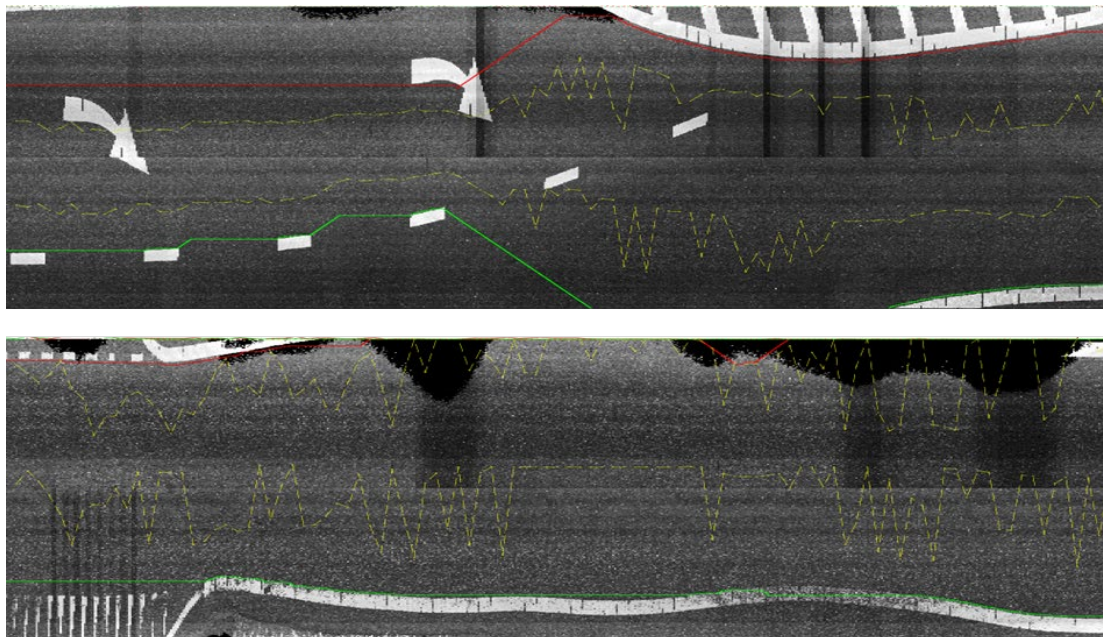
Veel voorkomende 'meetfouten' welke we met deze kentallen willen ondervangen zijn bijvoorbeeld: strookwisselingen (hierdoor is BPS (Beschrijvende Plaatsaanduiding Systematiek)) niet eenduidig), vochtig of nat wegdek (missende meetpunten), sensor defect, of te snel gereden (missende data) of de sensor buiten meetbereik (missende data). In [Figuur 2.7](#) zijn twee van deze situaties weergegeven.

Daarnaast zijn er onwenselijke verstoringen welke voor kunnen komen zijn bijvoorbeeld: markeringen in beeld (witte objecten), velgschade en naden/voegen. Deze moeten ook aangemerkt worden met vlaggen.

Op basis van de gegenereerde kentallen worden een aantal vlaggen gegenereerd welke een indicatie geven over de bruikbaarheid van een meting:

- 1: hectometer lijkt goed bruikbaar
- 0: onbekend/onzekeer of deze hectometer bruikbaar is
- -1: hectometer lijkt niet bruikbaar

Tot slot is er ook wenselijke informatie, welke is af te leiden uit de kentallen, bijvoorbeeld: positie rijspoor (positie maximum schade) of de breedte van de rijstrook.



Figuur 2.7: twee voorbeelden van hectometers met meetfouten, boven: strookwisseling binnen een hectometer en onder: meetdata buiten meetbereik (zwarte secties bovenin), deze rafelingsgetallen van deze wegvakken zullen dus met behulp van vlaggen worden aangemerkt als onbetrouwbaar (-1), waarbij in het bovenste geval het kenmerk strookwisseling betreft en in het onderste geval het kenmerk buiten meetbereik.

2.4.2 GPS data

Belangrijk bij het gebruik van rafelingsgetallen over de tijd, is erop te kunnen vertrouwen dat de rafelingsgetallen steeds op hetzelfde stuk weg (BPS) betrekking hebben. Ondanks dat de BPS over data van verschillende jaren gelijk is kan het toch zo zijn dat de data betrekking heeft op verschillende stukken asfalt. Redenen hiervoor kunnen o.a. zijn dat er rijstroken zijn bijgekomen en de BPS nummering is gewijzigd, maar ook dat er met het meten een verkeerde strook of weg is ingevoerd, vooral in de eerste jaren zitten er nog wel eens menselijke fouten in de BPS van een hectometer. In de recente metingen (>2018) is het BPS proces meer geautomatiseerd en is de kans op fouten verkleind. Echter doordat RWS niet beschikt over een rijstrook nauwkeurige areaalbeschrijving en de meetsystemen niet allemaal over een nauwkeurige GPS, blijven er fouten en afwijkingen in allocatie van metingen aan BPS mogelijk.

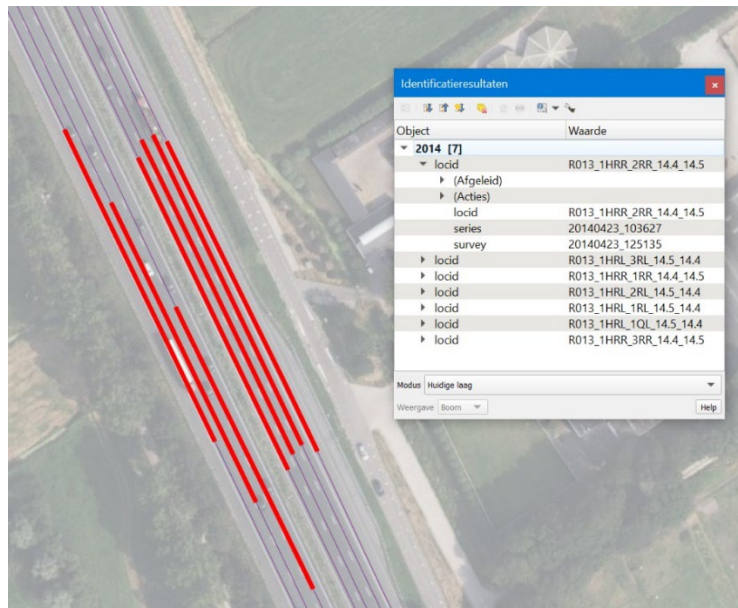
Binnen dit project is daarom alle aanwezige historische GPS data bij de metingen verzameld. In de oudere meetjaren zijn hiervoor oude logbestanden verzameld, ingelezen en geconverteerd naar een GPS positie voor het begin en einde van iedere hectometer. Voor recente metingen is deze GPS informatie standaard al beschikbaar.

Op basis van de GPS (of rijksdriehoeks-) coördinaten van het begin en einde van iedere gemeten hectometer zijn een aantal kentallen en vlaggen gedefinieerd waarmee de correctheid en bruikbaarheid van de BPS van iedere hectometer is ingeschat. Hiervoor zijn metingen zowel vergeleken in de tijd: ligt de rijstrook over de jaren heen op dezelfde locatie, als binnen de rijbaan: is de volgorde van rijstroken logisch.

Het belangrijkste resultaat van deze exercitie is dat er aan iedere gemeten hectometer vlaggen zijn gekoppeld welke een uitspraak doen over de bruikbaarheid:

- 1: hectometer lijkt goed bruikbaar
- 0: onbekend/onzekeer of deze hectometer bruikbaar is
- -1: hectometer lijkt niet bruikbaar

Ter illustratie van de relevantie van deze exercitie is in [Figuur 2.8](#) is een voorbeeld te zien van de GPS positie van alle metingen binnen een hectometer over de volledige breedte van een weg. Hierin is duidelijk een significante afwijking te zien bij een aantal van deze metingen ten opzichte van de anderen.



Figuur 2.8: voorbeeld van GPS positie van metingen

2.5 Export

De historische rafelingsgetallen worden in Excel formaat (.xlsx) geëxporteerd. Er is bewust gekozen om geen database of dataframe op te leveren, om zo de data voor iedereen eenvoudig benaderbaar te maken. Tevens comprimeert het .xlsx formaat de data enigszins waardoor de bestandsgrootte beperkt blijft.

In [Figuur 2.9](#) zijn een aantal screenshots van delen van deze data weergegeven.

	A	B
1	weg	R006
2	baan	1HRR
3	strook	2UR
4	bps_start	73,9
5	bps_stop	74
6	lengte	97,885
7	resolutie	0,004735538
8	voertuig	1
9	meetserie	20170610_103434
10	meetsurvey	20170610_105301
11	locid	R006_1HRR_2UR_73.9_74.0
12	district	MN Noord
13	gps_start_x	161674,1977
14	gps_stop_x	161749,9263
15	gps_start_y	498234,0351
16	gps_stop_y	498296,018
17	readme	©TNO 2023
18		

	A	B
valid		1
processed		1
lane_width_delta_ok		1
path_delta_ok		1
road_markings_ok		1
sections_missing_points_ok		1
sections_missing_lines_ok		1
diff_length_logical		1
diff_length_year_logical		1
diff_length_years_logical		1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_10	m_11	m_12	m_13	m_14	m_15	m_16	m_17	m_18
2	sv	0,38	0,35	0,26	0,31	0,21	0,23	0,27	0,3	0,35	0,53	0,47	0,79	0,41	0,76	0,73	0,67	0,51	0,5
3	sv_l	0,63	0,65	0,54	0,64	0,43	0,45	0,45	0,4	0,34	0,59	0,56	0,64	0,47	0,85	0,77	0,81	0,58	0,67
4	sv_r	0,26	0,2	0,16	0,17	0,11	0,15	0,19	0,32	0,48	0,69	0,46	1,19	0,37	0,92	1,04	0,77	0,6	0,47

algemene_informatie	vlaggen_hectometer	kentallen_hectometer	steenverlies_-2_6	steenverlies_-3_3	steenverlies_...
---------------------	--------------------	----------------------	-------------------	-------------------	------------------

Figuur 2.9: aantal screenshots van een test export voor een random hectometer.

Er zal een compacte en een complete versie beschikbaar zijn, waarbij de compacte versie alleen vlaggen en kentallen per hectometer zal bevatten naast het steenverlies per meter. De complete versie bevat alle geëxporteerde data, inclusief vlaggen en kentallen per meter, textuurmaten per meter, cluster steenverlies en kentallen welke de distributie van het steenverlies binnen een meter beschrijven.

Bij deze export is beschrijvende documentatie opgesteld met als doel het gebruik van de data door derden (niet experts) mogelijk te maken, zie: [6].

2.6 Bevindingen en toekomst

Binnen dit project is succesvol gewerkt aan het uniform en bruikbaar maken van historische rafelingsgetallen voor onderzoek naar trends en levensduuranalyses.

Er is gebleken dat de historische koppeling van meetdata aan de BPS zeker niet optimaal is voor het vergelijken van metingen op meter niveau over de jaren heen. De data is nooit ingewonnen om zo nauwkeurig te zijn.

Voor de toekomst zou men deze data zeker nog beter en bruikbaarder kunnen maken. De volgende secties beschrijven een aantal suggesties om dit te realiseren.

2.6.1 Schuiven/matchen van data (mm nauwkeurig)

Binnen TNO is in 2022 en 2023 ([5]) onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om DOS/LCMS data van verschillende metingen exact over elkaar te kunnen leggen. In dit onderzoek is op kleine schaal aangetoond dat het mogelijk is om DOS/LCMS metingen op de cm/mm nauwkeurig (in de tijd) over elkaar te leggen. Deze aanpak kan ingezet worden om de

historische data van het gehele netwerk goed op te lijnen. Hierdoor ontstaan zeer interessante en nuttige toepassingen. Vanwege de grote hoeveelheid rekentijd en het verwachte handwerk voor uitzonderingssituaties zal hiervoor een significante inspanning voor moeten worden gedaan.

2.6.2 Recente DOS/LCMS data toe voegen (2022 en verder)

Binnen dit project is de DOS/LCMS data t/m 2021 verwerkt. Meer recente DOS/LCMS data van 2022 en daarna is natuurlijk zeer waardevol om ook mee te nemen. Tevens zou men kunnen nadenken over het structureel (jaarlijks) toevoegen van nieuwe metingen aan deze dataset.

2.6.3 GPS offset per historisch meetvoertuig bepalen en meenemen

De GPS positie op alle historische meetvoertuigen is niet eenduidig en komt niet altijd exact overeen met de positie van de LCMS sensoren op het voertuig. Op basis van de historische GPS data zou een inschatting gemaakt kunnen worden van eventuele offset (in rijrichting of dwarspositie) en hiervoor zou gecorrigeerd kunnen worden.

2.6.4 Verfijningen op basis feedback en ervaringen

De gebruikers van deze data gaan ongetwijfeld feedback en ervaringen terugkoppelen. Op basis hiervan zouden zaken verbeterd kunnen worden in eventuele volgende versies van de opgeleverde data.

3 Levensduurmodel ZOAB

In dit hoofdstuk wordt de vraag beantwoord of het mogelijk is een data-gedreven levensduurmodel van 1 laags ZOAB 0/16 te maken op basis van data van rafelingsontwikkeling en aanlegdata die beschikbaar zijn voor het hoofdwegennet van RWS.

In paragraaf 3.1 worden de databronnen en de selectie van de uiteindelijke data voor het model toegelicht. De achtergronden van het levensduurmodel met de verschillende toegepaste functies en beschrijving van Bayesian inference techniek staan beschreven in paragraaf 3.2, terwijl de validatie van het levensduurmodel op 1 m DOS/LCMS data in paragraaf 3.3 en 3.4 te vinden is. De conclusies en aanbevelingen staan in de laatste paragraaf 3.5.

3.1 Data

Voor het levensduurvoorspellend model ZOAB zijn drie databronnen gebruikt:

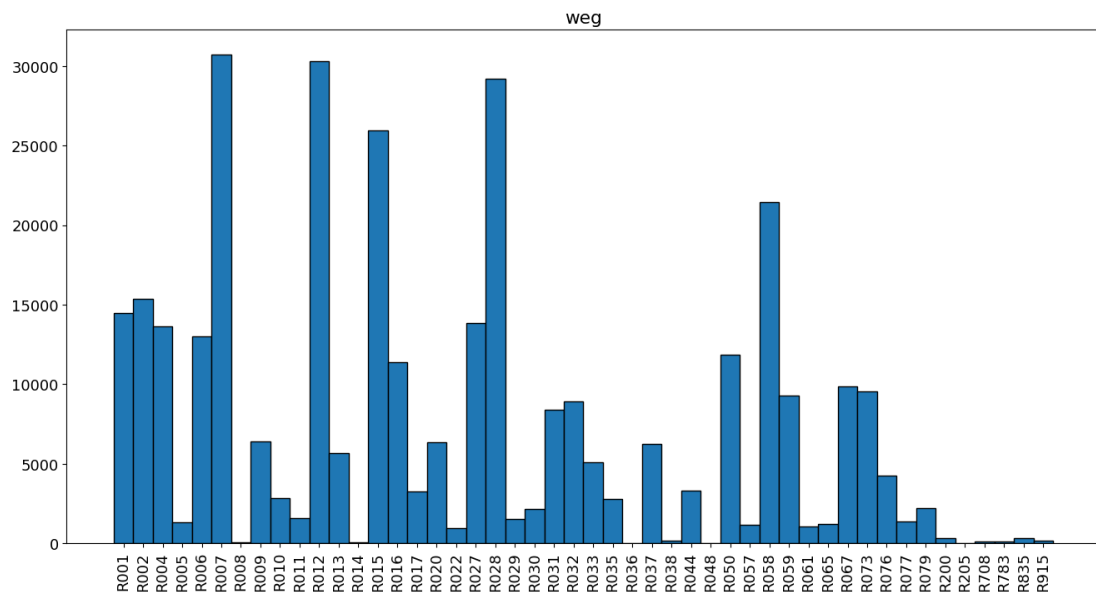
1. Strooksegmenten bestand RWS
2. 1m DOS/LCMS data
3. TOEKAN

Het strooksegmentenbestand bevat data over het type deklaag en het aanlegjaar van alle hectometervakken in het hoofdwegennet. De DOS/LCMS-data beschrijven jaarlijks het gemeten steenverliespercentage per meter voor het hoofdwegennetwerk. TOEKAN bevat data over het aanlegjaar en de vervangingsjaren met deklaagwijzigingen voor de hectometervakken in het areaal van RWS. Meer informatie over de 1 m DOS/LCMS data is in hoofdstuk 2 te vinden en met name de “muntjes” in paragraaf 2.3.

Het strooksegmenten bestand is gebruikt om een selectie van wegvakken te maken met een filter op type deklaag en rijstrook. Voor de deklaagfilter is er gefilterd op 1 laags ZOAB 0/16, onderverdeeld in ZOAB en ZOAB+. Voor de rijstrook is er gefilterd op de zwaarbelaste rechter rijstrook, omdat op deze rijstrook rafeling zich het snelst ontwikkelt [2]. Het toepassen van deze filters heeft geresulteerd in zo'n ~22 procent van het hoofdwegennet.

Voor de selectie van 22 procent areaal is een aanvraag gedaan voor DOS/LCMS data en voor de volledige 22 procent selectie is er DOS/LCMS data beschikbaar. Hierdoor kan een koppeling worden gemaakt tussen de gefilterde wegvakken en het steenverlies percentage per jaar, over de periode 2011-2022. In Figuur 3.1 is er een histogram gemaakt voor het aantal hectometervakken, ofwel rijstrook brede ~100 m vakken, met 1 m DOS/LCMS data per rijksweg.

Met TOEKAN kan vervolgens het steenverliespercentage van losse inspectiejaren gekoppeld worden aan de leeftijd van de geselecteerde wegvakken. Door het constructiejaar van het inspectiejaar af te halen kan de leeftijd van het wegdek bepaald worden tijdens een bepaalde inspectie. Met het vervangingsjaar kunnen de relevante inspectiejaren tussen 2011-2022 bepaald worden, die voor het vervangingsjaar plaats vonden, voor de geselecteerde wegvakken. Omdat de TOEKAN-data slechts ~400 hm-vakken omvatte, zorgt de koppeling met TOEKAN voor een zeer kleine set aan data, te weten: ~50 hm-vakken.



Figuur 3.1: Aantal hm-vakken 1 m DOS/LCMS data per rijksweg voor 22% areaal, 2011-2022.

3.1.1 Input data levensduurmodel

Vanwege de beperkte overlap tussen de TOEKAN dataset en de geselecteerde wegvakken kon er geen generiek model gemaakt worden voor een gemiddelde levensduurprestatie. In plaats hiervan is ervoor gekozen om op basis van een subset, bestaande uit een deel van de overlap, de potentie van een levensduurmodel te demonstreren. De gekozen subset bestaat uit 10 opeenvolgende wegvakken van rijksweg 2, de details zijn samengevat in Tabel 3.1. Door te kiezen voor 10 opeenvolgende vakken is het mogelijk om voor een specifieke situatie een levensduurmodel te maken. De subset zal verder aangeduid worden als de dataset.

Tabel 3.1: Subset data voor het levensduurmodel

BPS code	Deklaag	Aanlegjaar (jjjj-mm-dd)	Vervangingsjaar (jjjj-mm-dd)
R002_1HRL_2RL_171.5_171.4	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_171.6_171.5	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_171.7_171.6	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_171.8_171.7	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_171.9_171.8	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_172.0_171.9	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_172.1_172.0	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_172.2_172.1	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_172.3_172.2	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15
R002_1HRL_2RL_172.4_172.3	ZOAB	2003-11-01	2018-03-15

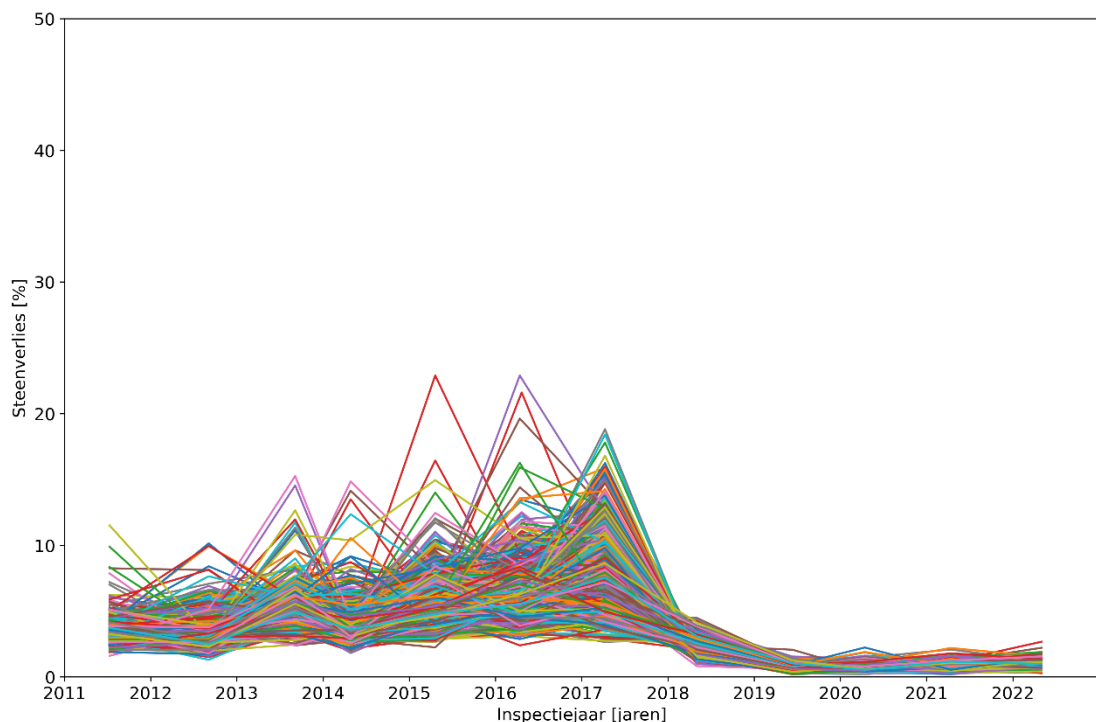
De ontwikkeling van het steenverliespercentage voor de periode 2011-2022 van de dataset is te zien in Figuur 3.2. Hier is voor iedere positionele 1m van de dataset een verloop over de

tijd geplot, in totaal zijn dit 1000 lijnen. Verder vallen een paar fenomenen op. Ten eerste tussen oktober 2011 en april 2017 is in het algemeen een stijging van de schade in de tijd te zien. Ten tweede, is tussen april 2017 en mei 2018 een duidelijke vermindering van het steenverliespercentage waarneembaar.

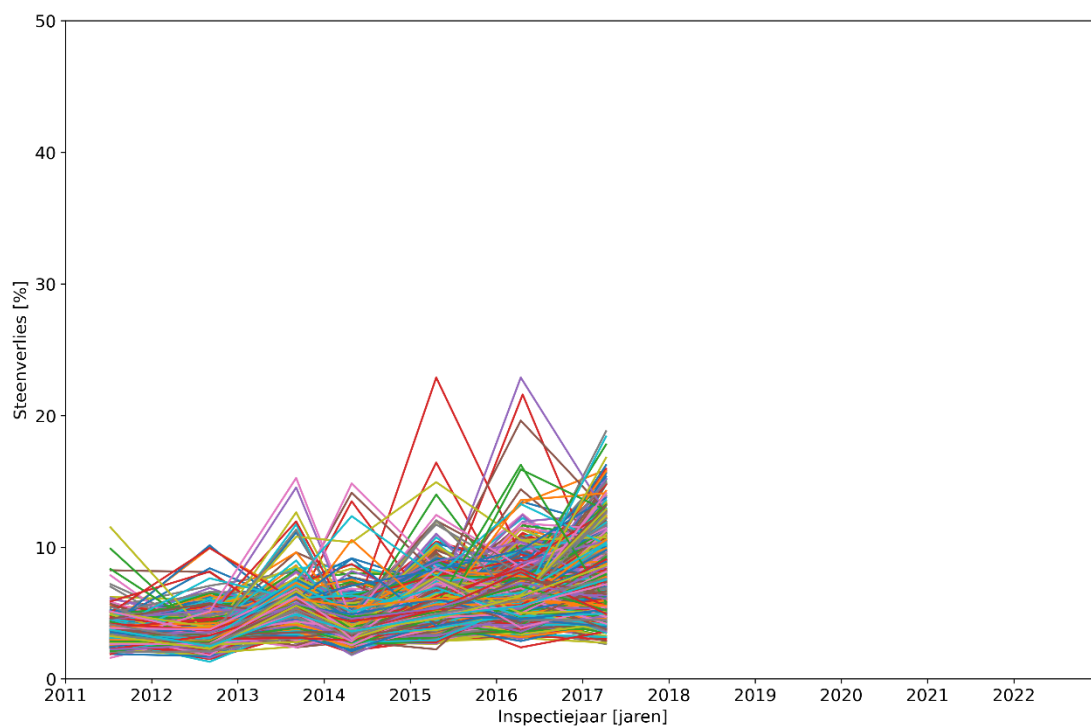
De eerste observatie komt overeen met de verwachting: naarmate de deklaag door meer verkeer wordt belast, wordt er ook meer rafeling verwacht en dus meer steenverlies.

De tweede observatie kan verklaard worden met het vervangingsmoment afkomstig van TOEKAN. Met TOEKAN kan bepaald worden dat de deklaag vervangen is op 15 maart 2018. De DOS/LCMS meting die na die vervangingsdatum komen, zijn metingen van een nieuwe deklaag. De eerstvolgende inspectiedatum na de vervangingsdatum is op 3 mei 2018, dus dat jaar en de jaren daarna zijn metingen van de nieuwe deklaag. Dit verklaart waarom het steenverliespercentage voor die periode hierna is verminderd. Daarom is er voor het maken van een model gekozen om alleen de DOS/LCMS data te gebruiken tot 3 maart 2018, deze dataset is weergegeven in Figuur 3.3.

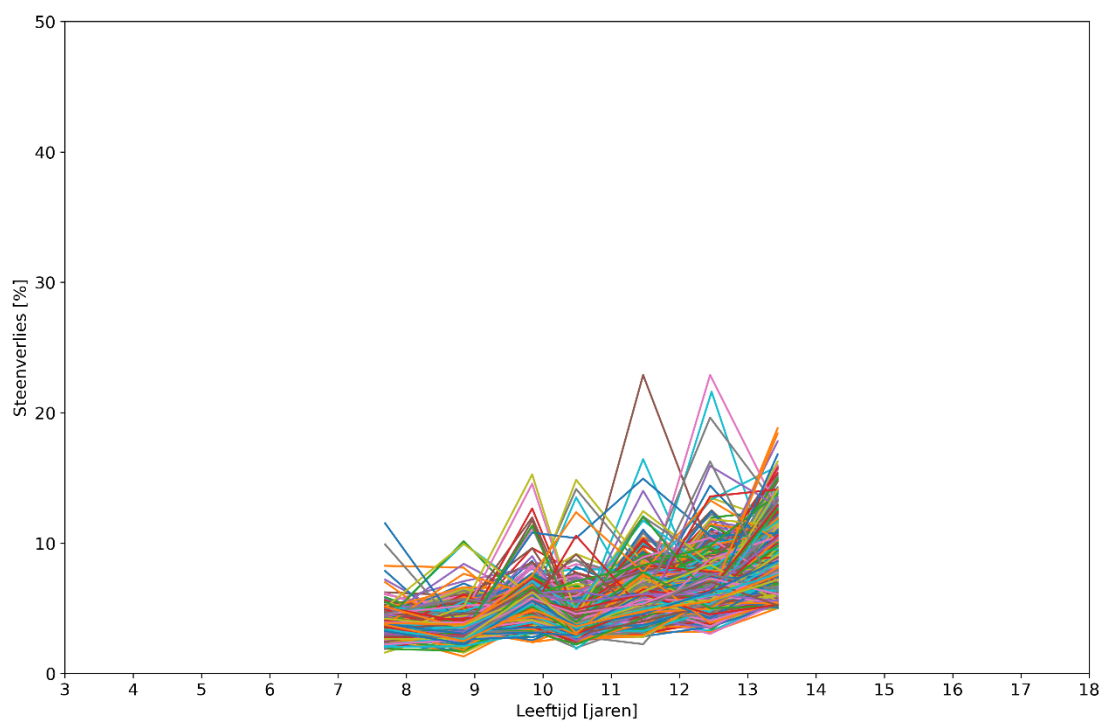
Tenslotte is het belangrijk voor het maken van een model de steenverliespercentages te koppelen aan de leeftijd van de wegvakken op het moment dat de metingen gedaan zijn. Hiervoor wordt de datum van aanleg gebruikt afkomstig van TOEKAN, voor de betreffende dataset is dit 1 november 2003. Als voorbeeld: De eerste DOS/LCMS meting van de dataset vond plaats op 11 juli 2011, dus de wegvakken waren op die meetdatum ~7,7 jaar oud. De rest van de vertaling naar leeftijd is te vinden in Figuur 3.4. De dataset die weergegeven wordt in Figuur 3.4 zal gebruikt worden voor het kalibreren van het levensduurmodel.



Figuur 3.2: DOS/LCMS van de dataset over de periode 2011-2022.



Figuur 3.3: Relevante DOS/LCMS data van de dataset, 2011-2017



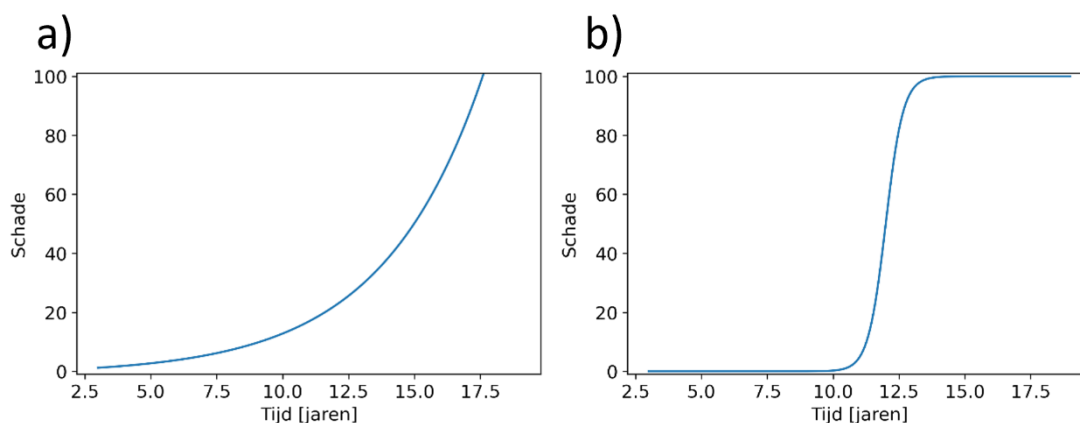
Figuur 3.4: Relevante DOS/LCMS data vertaald naar leeftijd hectometervakken

3.2 Levensduurmodel

In deze paragraaf worden alle aannames/keuzes beschreven die gebruikt worden voor het trainen van het levensduur voorspellende model en de uiteindelijke voorspelling van levensduren. De aannames/keuzes die hier beschreven zijn staan niet vast en kunnen aangepast worden aan de hand van expertkennis, betere modellen en betere data.

3.2.1 Modelkeuze

Er zijn twee wiskundige vergelijkingen die het gedrag uit Figuur 3.4 goed kunnen representeren. Dit zijn de exponentiële functie, te zien in [Figuur 3.5a](#) en de S-curve, te zien in [Figuur 3.5b](#). Beide functies representeren de data in het gebied met weinig schade (< 30% steenverlies) in een exponentiële wijze, alleen vlakt de S-curve weer af bij 100% schade terwijl de exponentiële functie door gaat tot in het oneindige.



Figuur 3.5: Twee wiskundige schademodelen a) Exponentiële functie, b) S-curve/Sigmoid functie

Er is in dit project gekozen om de exponentiële functie te gebruiken ten opzichte van de S-curve, omdat de functie een minder steile helling heeft, de functievariabelen beter verklaard kunnen worden en het gebied wat het model uiteindelijk moet beschrijven het gebied met weinig schade is. De S-curve zou een realistischer beeld kunnen geven als er ook genoeg data is in het gebied met veel schade. Dit zou van toepassing zijn bij schades die in het gebied zitten van de S-curve waarbij de groei van schade afneemt en dit geldt voor schade > 50%.

De exponentiële functie die gebruikt is heeft de algemene vorm volgens [Vergelijking 3.1](#). Hierbij moeten de modelparameters a , b , c , s als stochasten worden gezien die afgeschat worden door middel van de data.

Vergelijking 3.1: Vorm gebruikte Exponentiële functie

$$sv = a + b^{c \cdot t - s},$$

Met:

- sv steenverliespercentage [%]
- t leeftijd van de wegvakken [jaren]
- a verticale translatie van het model, bepalend voor steenverlies percentage op jaar 0
- b groei van de schade
- c horizontale schaling van het model ten opzichte van de tijd-as
- s horizontale translatie van het model ten opzichte van de tijd-as

3.2.2 Modelkalibratie

Voor de modelkalibratie is gekozen voor een statistische methode genaamd Bayesian Inference. De methode is gebaseerd op de Bayesiaanse statistiek en maakt gebruik van het theorema van Bayes om de modelparameters af te schatten met betrekking tot de dataset.

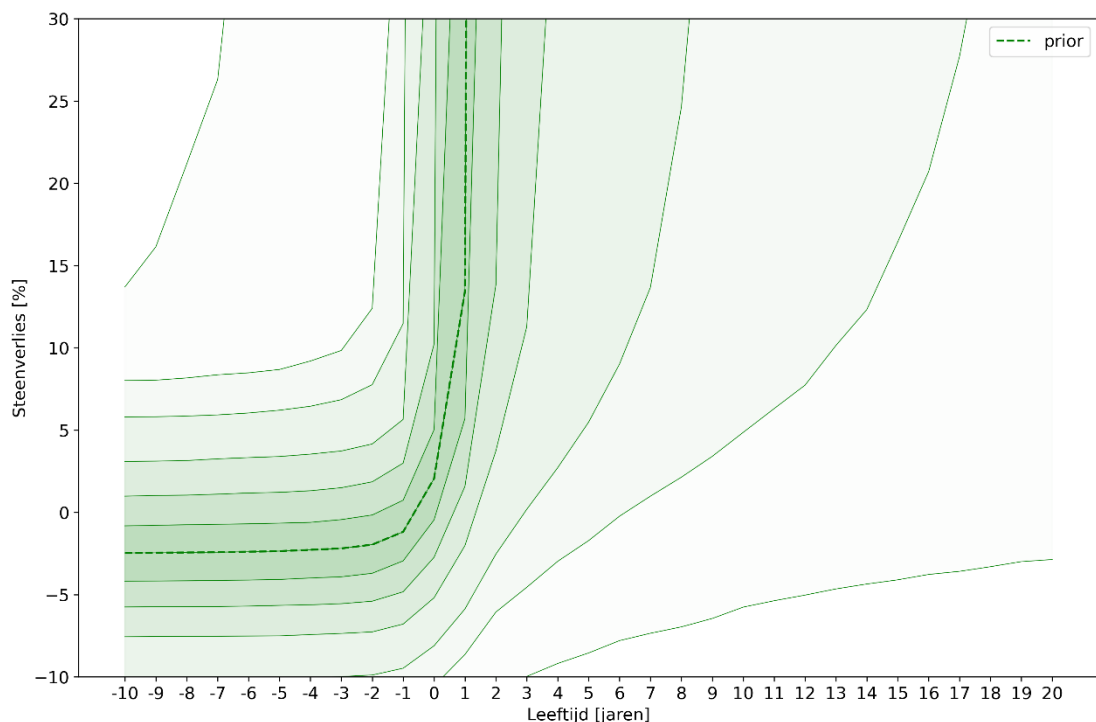
Een voordeel van deze methode is het combineren van expertkennis op verschillende componenten met nieuwe correlaties afkomstig uit de data. Dit creëert een samenspel tussen fysische/expertkennis en data-gedreven kennis. Een tweede voordeel is het kwantificeren van onzekerheden, wat een maat kan zijn voor de spreiding van de data-populatie. Het expliciet kwantificeren van onzekerheden is belangrijk bij het voorspellen van levensduur waarbij faalkansen van toepassing zijn.

Een plek om expertkennis toe te voegen is bij de eerste schatting van de modelparameters, ook wel prior genoemd. De eerste schatting kan onderbouwd worden uit de literatuur of zelfs uit eigen ervaring. Doordat er nog niet zoveel literatuur is omtrent degradatie van ZOAB is er gekozen om weinig expertkennis toe te voegen voor de modelparameters. Hierdoor wordt het model voornamelijk gekalibreerd door de data en zal het meer een data-gedreven model worden. In vervolgonderzoeken heeft dit het voordeel dat dit model dan kan gebruikt worden als prior voor soortgelijke modellen zonder dat er te veel aannames zijn meegenomen door expertkennis.

De kansverdeling voor de modelparameters zijn gekozen als niet-informatieve uniforme verdelingen. Dit betekent dat het domein van de modelparameters allemaal hetzelfde gewicht hebben. Hierbij is ook voor een groot domein gekozen om zo min mogelijk voorkennis toe te voegen en zodat de data de vrijheid heeft om het model te sturen zonder begrensd te zijn door voorkennis. Een samenvatting van de gekozen modelparameters voor de prior is weergegeven in [Tabel 3.2](#). Een visueel beeld van de gekozen prior is te zien in [Figuur 3.6](#); hier is de stippellijn het gemiddelde van de prior en daaromheen zijn onzekerheidsbanden van verschillende percentielen weergegeven. In [Figuur 3.6](#) is te zien dat de prior het volledige bereik van steenverliespercentages omvat. Deze prior is gebruikt bij het trainen van het model, maar omdat deze eigenlijk weinig informatie bevat is ervoor gekozen hem verder niet te tonen in de resultaten.

Tabel 3.2: Uniforme prior kansverdelingen van de modelparameters die geschat moeten worden.

Model parameter	Uniform ondergrens	Uniform bovengrens
<u>a</u>	<u>-10</u>	<u>1</u>
<u>b</u>	<u>1</u>	<u>8</u>
<u>c</u>	<u>0.001</u>	<u>5</u>
<u>s</u>	<u>-5</u>	<u>5</u>



Figuur 3.6: Niet informatieve prior/domeinkennis voor kalibratie exponentiële model.

3.2.3 Criteria einde levensduur

Voor het voorspellen van de levensduur is nog een keuze nodig voor criteria die bepalen wanneer het einde van de levensduur bereikt is. De MJPV-criteria werken met behulp van planjaren, waarbij ernst en omvang bepalende factoren zijn. Een vertaling van de ernst en omvang is te zien in [Figuur 3.7](#). De ernst-omvangmatrix geeft inzicht in welke combinaties van ernst en omvang belangrijk zijn voor het bepalen van einde levensduur; zowel een grote omvang als het voorkomen van ernstige schade zijn einde levensduur criteria.

		Omvang		
		X	Y	Z
Ernst		Geringe omvang	Beperkte omvang	Grote omvang
I	Lichte schade			
II	Matige schade		INTERVENTIENIVEAU ZOAB	
III	Ernstige schade			

Figuur 3.7: Interventieniveau ernst/omvang categorie [2]

In dit project is er een keuze gemaakt om in het kader van ernst en omvang een criterium op te stellen die toepasselijk is voor het statistische model en het Bayesiaanse framework. Er moet expliciet vermeld worden dat dit een voorbeeld is om de potentie te laten zien van het

levensduurmodel. Dit criterium is zo belangrijk dat er eigenlijk op dit gebied een afzonderlijk onderzoek gedaan zou moeten worden wat het meest passende criterium is. Zeker gezien het feit dat de ernst en omvang criteria geformuleerd zijn in tijden dat er nog niet geïnspecteerd werd met de DOS/LCMS methode.

De gekozen einde levensduur voorwaarden zijn:

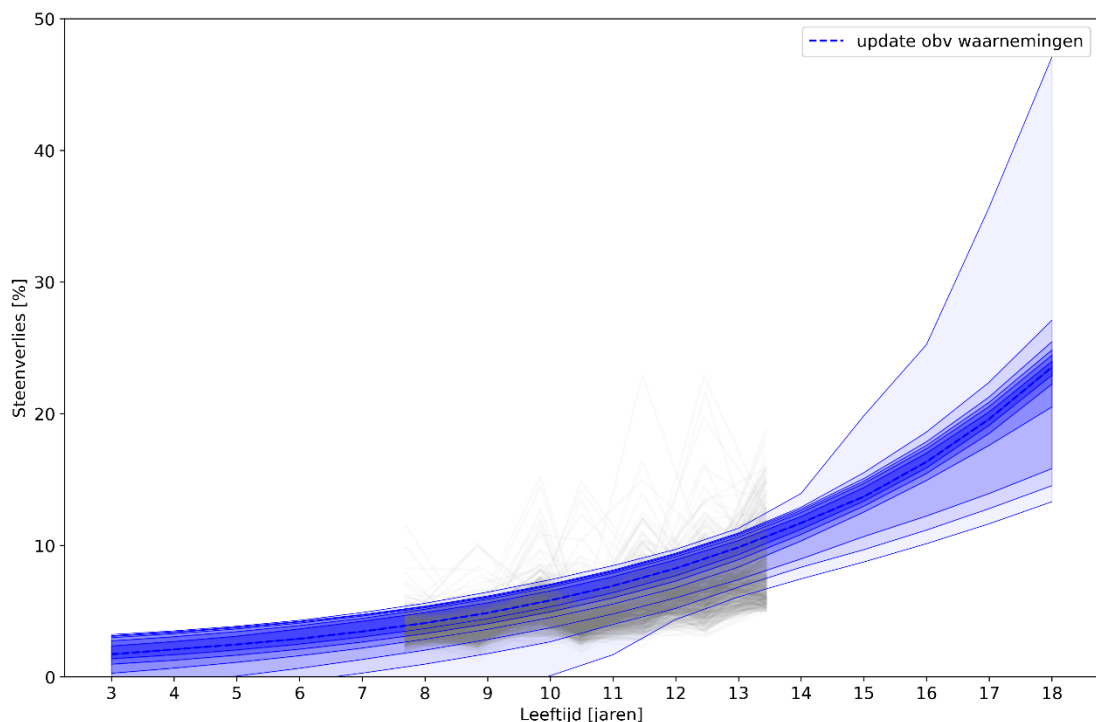
1. Ernst: 20% steenverlies
2. Omvang: 10% van de populatie

De twee voorwaarden zijn als volgt geïmplementeerd: Als 10% van de hectometervakken populatie boven de 20% steenverlies uitkomt, dan is einde levensduur bereikt. Met de populatie wordt hier bedoeld de hm-vakken die samen onderzocht moeten worden voor einde levensduur. Dit kan ter grootte van een rijksweg zijn of zoals in paragraaf 3.1.1 10 hm-vakken.

3.3 Resultaten

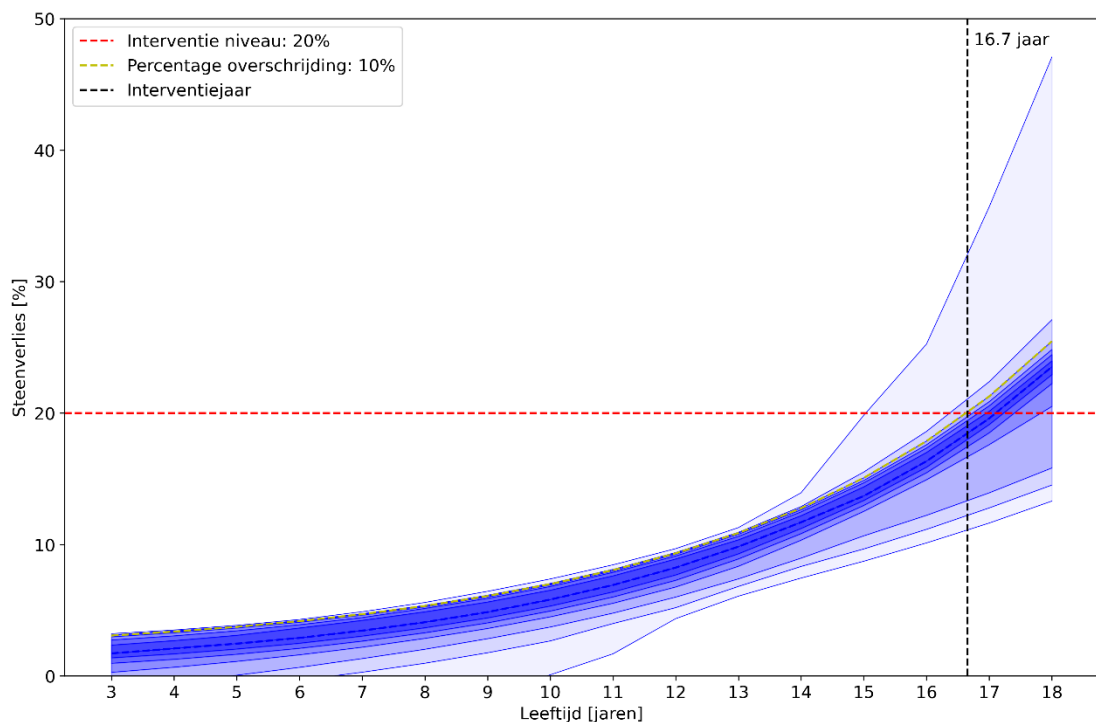
Met de data uit [Figuur 3.4](#), het model uit paragraaf 3.2.1 en prior uit paragraaf 3.2.2, kan het levensduurmodel gekalibreerd worden met behulp van de dataset (paragraaf 3.1.1). Het gekalibreerde model is te zien in [Figuur 3.8](#). Hierbij is de data in doorzichtig grijs weergegeven, zodat datalijnen die over elkaar heen lopen donkerder van kleur zijn. De donkerblauwe stippellijn is de gemiddelde fit over de data en de blauw gearceerde banden om de gemiddelde fit zijn percentielen die de spreiding van de populatie weergeven als gevolg van de onzekerheden van het model.

Het gekalibreerde model uit [Figuur 3.8](#) volgt in het algemeen het gedrag van de data over de leeftijd van de wegvakken. Wel valt op dat het model voornamelijk wordt gefit op het gedeelte met veel data, het donkere grijze gebied. Als de wegvakken nog jong zijn dan loopt het steenverlies percentage asymptotisch richting enkele procenten. Als laatst valt nog op dat de onzekerheid van het model groter wordt voor de leeftijden die geen DOS/LCMS data hebben: wanneer de leeftijd $< \sim 7,5$ jaar en als leeftijd $> \sim 13,5$ jaar is.



Figuur 3.8: Het gekalibreerde exponentiële model op basis van DOS/LCMS data.

Met het gekalibreerde model en het einde levensduurcriteria uit paragraaf 3.2.3 kan een levensduur voorspelling gedaan worden, te zien in Figuur 3.9. Met de voorwaarden uit paragraaf 3.2.3 wordt er gezocht wanneer 10% van de populatie boven het interventieniveau uitkomt. In Figuur 3.9 wordt het interventieniveau aangegeven met een horizontale rode stippellijn en de slechtst presterende 10% van de populatie wordt aangegeven met een gele stippellijn die het model volgt. De kruising tussen deze twee lijnen geeft aan wanneer de einde levensduur criteria van toepassing is en bepaald de levensduur van de wegvakken. De levensduur is aangegeven met een zwarte verticale stippellijn. In dit voorbeeld is er een levensduur van 16,7 jaar gevonden als levensduurverwachting voor de 10 hectometervakken samen.



Figuur 3.9: Een voorbeeld van levensduurvoorspelling op basis van het gekalibreerde model en einde levensduur criteria.

3.4 Discussie

Het gekalibreerde model wordt nu vooral bepaald door de plek met de meeste data, dit is terug te zien in [Figuur 3.8](#) doordat het model met onzekerheid vooral door het donkergrijze gebied heen gaat. De reden dat het donkergrijze gebied veel lager ligt dan de maximale gemeten steenverliespercentage is omdat een hectometervak wordt vervangen als er een aantal 1m metingen zijn die boven een bepaald steenverliespercentage uitkomen. Als gevolg wordt een hele hectometervak (of meer) vervangen terwijl op dat moment de meerderheid van 1m delen nog goed presteren. In de geselecteerde dataset worden de maatgevende 1m-metingen met veel schade als minder belangrijk meegenomen bij het kalibreren van het model. Om dit te verhelpen zou een gewicht toegevoegd kunnen worden aan de 1m metingen die veel schade hebben.

Het gekalibreerde model is een stuk onzekerder buiten het gebied met data (leeftijd < ~7,5 jaar en leeftijd > ~13,5 jaar) en dit komt voornamelijk door de keuze van prior. De prior is zo gekozen dat er enorme onzekerheden zijn in de voor/expert-kennis (zie 3.2.2). Hierdoor kan de onzekerheid van het model alleen worden gekwantificeerd door de data. Zodra er geen data meer is kan de onzekerheid ook niet meer gekalibreerd worden en zal langzaam toenemen naarmate er verder wordt geëxtrapoleerd. Het toevoegen van fysica of expertkennis kan de onzekerheden in de gebieden zonder data verkleinen.

De levensduurvoorspelling van 16,7 jaar voor een ZOAB-deklaag is hoger dan wat er verwacht wordt [3]. In [Figuur 3.8](#) wordt het model gefit aan de hand van de gemiddelde 1m. Het feit dat een gemiddelde 1 m beter presteert dan de MJPV-criteria, resulteert in een gemiddelde levensduur die hoger ligt dan de verwachting.

3.5 Conclusies en aanbevelingen

In dit project is er een werkwijze getoond in het Bayesiaanse framework om tot een levensduur voorspellend model voor rafeling van ZOAB16 deklagen te komen dat gebruik maakt van data en gelimiteerde expertkennis. Er is met de werkwijze een Proof of Concept (PoC) levensduurmodel gemaakt op basis van een beperkte dataset en een aantal keuzes omtrent het model en einde levensduur criteria.

Het PoC laat zien dat er niet veel verschillende databronnen nodig zijn om tot een basis levensduur voorspellend model te komen. In essentie zijn het type deklaag, aanlegjaar, vervangingsjaar en DOS/LCMS metingen van belang.

Het gekozen exponentiële model in het PoC wordt goed gefit door de data, maar wel is te zien dat het gedomineerd wordt door de goed presterende 1m DOS/LCMS metingen. Dit zorgt ervoor dat de voorspelde levensduur langer is dan de verwachting. Verder is het mogelijk om met een gekozen einde levensduur criterium, die toepasselijk is voor het gekozen framework, om het moment van einde levensduur te voorspellen van wegvakken die in de dataset zitten.

Ondanks dat het PoC op een beperkte dataset is gemaakt, zou dit model in vervolgonderzoeken kunnen dienen als voorkennis/prior in soortgelijke modellen. Dit heeft als voordeel dat de prior dan al op data is gefit en dus de werkelijkheid al voor een deel nabootst, wat een verbetering is ten opzichte van de niet-informatieve prior die op dit moment is gebruikt.

Voor een robuuster en betrouwbaarder levensduurmodel worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Om de voorspellingskracht van het model te verbreden is er meer TOEKAN data nodig; Toekan data over aanlegjaar en vervangingsjaar van meer hectometervakken kan worden gebruikt om de dataset te verbreden.
- Koppeling met andere domein databronnen (bijv. mengselsamenstelling, ASPARI, weer (aantal vorst/dooi-wisselingen)) om een onverwacht DOS/LCMS verloop uit te leggen.
- Introduceren van expertkennis en/of fysica om de leeftijdsgebieden waar geen data is zekerder te maken.
- Onderzoeken van een technische eis voor einde levensduur die gebruikt kan worden in het Bayesiaanse framework.

4 Levensduurmodel SMA

4.1 Inleiding

Rafeling van SMA-deklagen is in de LAM-workshop uit 2019 geïdentificeerd als één van de belangrijke schademechanismen waar het LAM op zou moeten focussen. Meer specifiek is het doel geformuleerd als het ontwikkelen van een rafelingsmodel voor SMA NL 11B deklagen.

In de voorgaande fase (fase 4 van LAM WP 2 [1]) is een eenvoudig model ontwikkeld dat ervan uitgaat dat verschillen in de realisatie ten opzichte van het ontwerp de levensduur van SMA negatief beïnvloedt. Hierbij is gebruik gemaakt van data over levensduur en samenstelling beschikbaar gesteld door de provincie Gelderland. Op basis van dit uitgangspunt is met behulp van de beperkte dataset een Proof of Concept (PoC) gemaakt voor een rafelings-model voor SMA. Uit dit PoC bleek dat vooral afwijkingen in verdichtingsgraad gedurende de realisatie van invloed zijn op de verwachte levensduur.

Het doel van fase 5, die in dit hoofdstuk wordt beschreven, was het reeds ontwikkelde rafelingsmodel uit fase 4 verder te valideren door meer data te gebruiken. In fase 4 was slechts een gedeelte van de beschikbare data bij de provincie Gelderland toegankelijk gemaakt, vanwege beperkingen in beschikbare tijd en budget. In deze fase zijn alle data beschikbaar gemaakt van de 24 bestekken die door de provincie zijn aangeleverd. In tegenstelling tot de verwachting leverde dit slechts een beperkte hoeveelheid extra data op, waardoor deze niet tot verdere modelvalidatie heeft geleid. De beperkte extra data sprak zelfs de eerder gevonden correlaties tegen. Vervolgens is op verschillende manieren naar de data gekeken om na te gaan of er andere betrouwbare correlaties gevonden konden worden om een model op te baseren. Deze zijn niet eenduidig gevonden. In dit hoofdstuk worden de gehanteerde werkmethoden analyseresultaten beschreven met interpretatie van de resultaten. Dit geeft inzicht in welke paden reeds bewandeld zijn in de analyse van SMA-data en geven handvatten welke stappen in de toekomst wellicht waardevol zijn.

Sectie 4.2 beschrijft de vereisten voor de data en de aangeleverde prestatiedata (periode 2015-2022) van de provincie Gelderland. Sectie 4.3 geeft een beschrijving van de uitgangspunten van het SMA levensduurmodel. Sectie 4.4 beschrijft de werkmethode die gebruikt is voor de conversie van Pdf-bestanden naar de Excel bestanden. Tevens is een toelichting gegeven op het koppelen van de drie types data (mengselontwerp, opleveringscontrole en prestatie) en het verder structureren van de data met behulp van Linked Data. Vervolgens zijn in sectie 4.5 de resultaten getoond van het SMA-rafelingsmodel op basis van de uitgebreide dataset. Hierbij maakt de opzet van het levensduurmodel het mogelijk om de betrouwbaarheid van de levensduurvoorspelling voor verschillende factoren expliciet te maken. Tot slot worden de conclusies en aanbevelingen gegeven in resp. sectie 4.6.

Op basis van de opgedane ervaringen met het verzamelen en structureren van data is een workshop gehouden tussen wegbouwkundige specialisten, data-analisten en modelbouwers van provincie Gelderland en TNO. Het doel van de workshop was om kennis

en ervaring uit te wisselen over structureren van data, datakwaliteit en data-analyses. Het verslag van de workshop is te vinden in hoofdstuk 6.

4.2 Datasets

Voor het verkrijgen van data over rafeling van SMA is een samenwerking gestart met de provincies Gelderland en Zeeland. Beide provincies zijn in het project vertegenwoordigd door een van hun specialisten van de afdeling assetmanagement. De provincie Gelderland werd vertegenwoordigd door de heer Remco Hermesen en de provincie Zeeland door de heer Wilko Heij. Om te komen tot goede data is eerst een beschrijving geformuleerd van de benodigde data met de bijbehorende eisen. Vervolgens worden de eerste observaties beschreven van de ontvangen data.

4.2.1 Data-vereisten voor levensduurmodel SMA

Ervaringen uit het verleden hebben uitgewezen dat de mengselsamenstelling van een SMA-deklaag invloed heeft op de levensduur¹, waarbij het van belang is te weten dat er in de regel verschillen bestaan tussen het mengselontwerp en de gerealiseerde mengselsamenstelling bij oplevering. Aangezien het levensduurmodel deze verschillen als basis neemt voor een levensduurmodel is essentieel om over data te beschikken van zowel het mengselontwerp, als de mengselsamenstelling bij oplevering en over de prestatie van de deklaag.

Data van het mengselontwerp betreffen de CE-verklaring en een verkort verslag. Data van de realisatie betreffen bedrijfscontroles van de oplevering. Data van de levensduur betreffen inspectiedata afkomstig van verschillende momenten gedurende de levensduur. Hierbij is het geen bezwaar om data op te nemen van vakken waarbij de deklaag vroegtijdig is bezweken, omdat hier ook lessen uit worden gehaald. Daarnaast is het wenselijk om ook informatie over de opgetreden belastingen te hebben, zoals de gemiddelde verkeersbelasting. Op basis van deze data kan een eerste versie van het model worden gebouwd. Als dit model goed kan voorspellen, kunnen in vervolgstappen ook wegvakken met incomplete data worden toegevoegd om het model te verbeteren en te verfijnen.

4.2.2 Provincie Gelderland

Bij de provincie Gelderland is informatie beschikbaar van het ontwerp, de oplevering en de prestatie (CE-verklaring, verkort verslag, oplevering, enz.). Deze data zijn echter niet beschikbaar in het gebruikte assetmanagementsysteem, maar moeten opgediept worden uit kwaliteitsdossiers van uitgevoerde werken. De provincie heeft zicht bereid getoond om, ten behoeve van dit project, deze informatie te achterhalen van werken uit de voorgaande ca. 10 jaar. Dit is in twee series gedaan, waarvan de eerste set in 2022 beschikbaar is gemaakt [1] en de tweede set in 2023 is ontsloten. Met set wordt hier bedoeld: alle data van ontwerp, oplevering en prestatie voor een aantal wegvakken. Voor consistentie en herkenning worden de twee sets in dit rapport verder aangeduid als “dataset 1” en de “dataset 2”. De combinatie van deze datasets vormt samen “dataset 3”.

Dataset 1 betrof data van de N317 aangelegd in 2015. Deze dataset is geselecteerd omdat het een SMA 0/11 deklaag betrof waarvan ontwerp en aanleggegevens beschikbaar waren en het wegvak al een redelijke mate van schadeontwikkeling liet zien. Deze data is in 2022 gebruikt voor de eerste formulering van het model en bestaat uit de drie types data

¹ Voorkomen van vroegtijdige schade aan steenskeletmengsels, CROW, 2018

(ontwerp, oplevering en prestatie) van 1 bestek bestaande uit 21 wegvakken. Als prestatiedata is de rafelingsbeoordeling gebruikt uit de inspecties. Van deze vakken zijn de CE-verklaring, het verkort verslag, de opleveringscontrole en de prestatieresultaten beschikbaar gemaakt door de provincie.

Dataset 2 bevat data van een groter aantal wegvakken afkomstig van 24 bestekken van SMA 0/11 deklagen. Deze dataset bevat daarmee orde grootte 10 keer zoveel data als dataset 1. Naast de gegevens die ook bij dataset 1 verzameld zijn (ontwerp, oplevering en inspectiegegevens) is in deze dataset ook voor ~150 wegvakken informatie uit boorkernen aanwezig (2 per wegvak, in totaal ~300 boorkernen). De prestatiedata in dataset 2 is aangeleverd in Excel, met daarin een rafelingsscore per wegvak, per inspectiejaar. Dit resulteert in 9402 regels aan rafelingsscores (#wegvakken * #inspectiejaren in de periode 2015-2022).

4.3 Levensduurmodel SMA

Uitgangspunt voor het levensduurmodel van SMA deklagen is dat rafeling het maatgevende schadebeeld is en dat het model zich hierop richt. Bij de ontwikkeling van dit rafelingslevensduurmodel is in eerste instantie uitgegaan van invoerparameters die op dit moment beschikbaar zijn in de praktijk. Van SMA is bekend dat het volumetrisch ontwerp en de nauwkeurige realisatie hiervan een belangrijke uitdaging is. Bij SMA-mengsels luistert het vrij nauw om voldoende bindmiddel in het mengsel te krijgen om een goede rafelingsweerstand te verkrijgen, zonder het mengsel te ‘overvullen’ met bindmiddel waardoor instabiliteit ontstaat. Kleine afwijkingen in de steenslagfracties tijdens de realisatie kunnen al grote gevolgen hebben voor deze balans, waardoor kwaliteitsproblemen kunnen ontstaan die een negatief effect hebben op de levensduur. Parameters die deze verschillen beschrijven tussen ontwerp en realisatie worden daarom in eerste instantie gebruikt om een datagedreven levensduurmodel te maken voor rafeling van SMA.

Om de duurzaamheid te waarborgen wordt bij het mengselontwerp van SMA een vast hoog bitumenpercentage aangehouden, waarbij proefstukken worden vervaardigd met verschillende steengehaltes om de vereiste “ontwerp holle ruimte” in het mengsel te realiseren. Als gevolg hiervan verandert de samenstelling van de mastiek (bitumen+ vulstof+zand), want er wordt volumetrisch gecompenseerd door het zand/vulstof mengsel bij een constant bitumengehalte te vermeerderen of te verminderen. Hierbij wordt de massaverhouding van zand/vulstof gelijk gehouden (65% zand: 35% vulstof). Bij hoge steenpercentages ontstaat hierdoor een mastiek met een relatief laag aandeel zand en vulstof, waardoor een mastiek ontstaat met een vrij hoog bitumengehalte. Deze mastiek zal instabieler zijn dan de standaard mastiek. Bij een laag steengehalte zal een mastiek ontstaan met relatief hoog gehalte zand en vulstof, waardoor deze mastiek juist stugger zal zijn dan de standaard mastiek. Het verschil in de samenstelling van de mastiek zal invloed hebben op de bindingskracht van het steenskelet en daarmee op de stabiliteit en de weerstand tegen rafeling. Om deze reden wordt in het model expliciet gekeken naar parameters die invloed hebben op de samenstelling van de mastiek, zoals het bindmiddelpercentage, het percentage zand en vulstof en het percentage vulstof ende vulling van de holle ruimte.. Dit heeft geleid tot onderstaande selectie van modelparameters:

- Verdichtingsgraad
- Holle ruimte
- Bindmiddelpercentage
- Korrelverdeling door 2 mm zeefpercentage (‘zand + vulstof’)
- Korrelverdeling door 63 µm zeefpercentage (‘vulstof’)

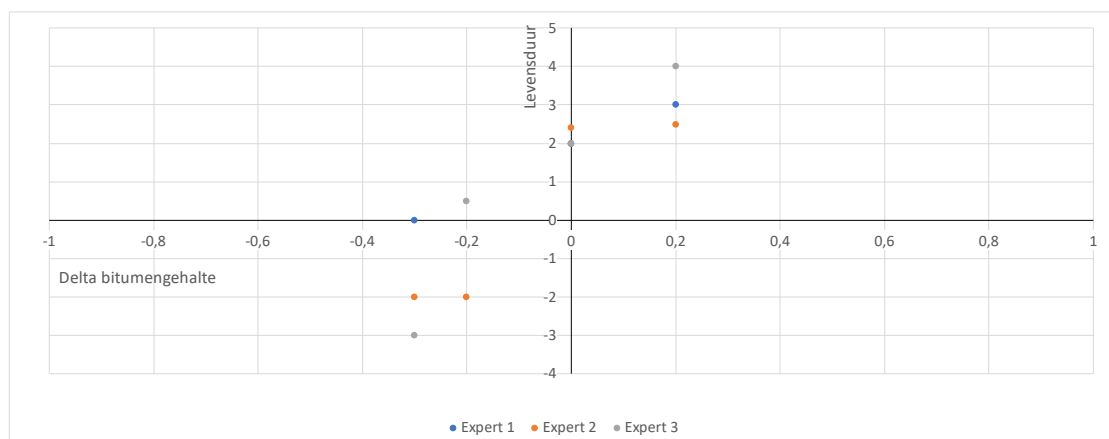
Bij de voorspelling van de levensduur zal worden gekeken naar het verschil tussen mengselontwerp en oplevering voor de bovengenoemde parameters in relatie tot de rafelingsontwikkeling uit de prestatiemetingen van opeenvolgende jaren vanaf het jaar van aanleg van de deklaag, zie ook Figuur 4.1. Hierbij is dus de aanname dat als deze verschillen klein zijn, de deklaag een langere levensduur zal hebben dan wanneer de verschillen groot zijn.



Figuur 4.1 Verschillen mengselontwerp-realisatie als basis voor datagedreven levensduurmodel

In 2022 is een eerste stap gezet voor het PoC van het levensduurmodel door de verschillen (delta's) tussen mengselontwerp en realisatie te bepalen en deze te correleren met de geobserveerde levensduur op basis van inspectieresultaten. Het model is gemaakt op basis van Bayesiaanse statistiek. Deze aanpak maakt het mogelijk om correlaties gevonden in data te combineren met inzicht dat reeds bestaat over hoe de parameters elkaar beïnvloeden.

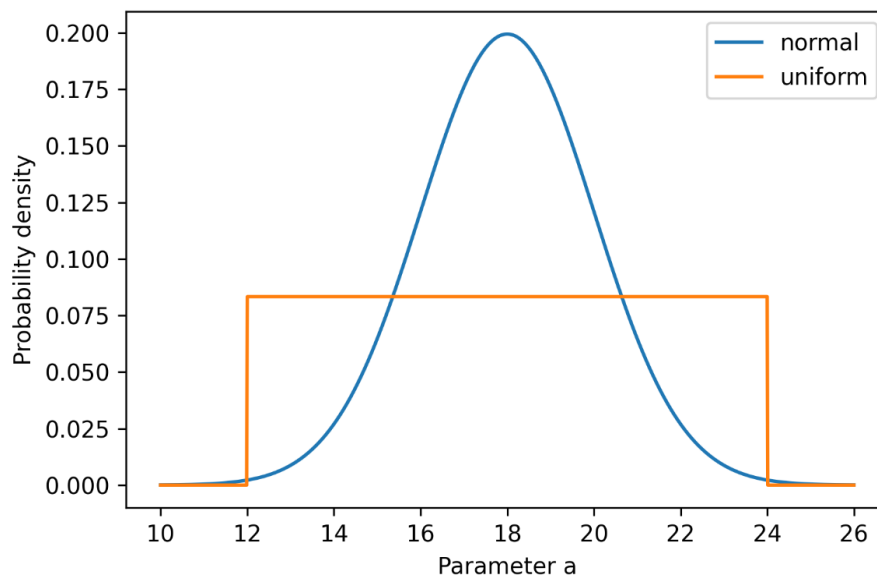
Dit model begint met het formuleren van een zogenaamde prior. Deze prior is gebaseerd op een inschattingen van correlaties door experts (expert judgement) op basis van kennis en ervaring met keuring en oplevering van asfaltverhardingen. Als voorbeeld wordt in Figuur 4.2 het ingeschatte effect van afwijkingen in het bitumengehalte op de gemiddelde levensduur grafisch weergegeven. De afwijkingen ten opzichte van het bitumengehalte in het mengselontwerp staan op de horizontale as en de inschatting (expert judgment) van de gevolgen van deze afwijking op de levensduur staan op de verticale as. In dit fictieve voorbeeld is te zien dat als gevolg van een gemiddeld tekort van 0,3% t.o.v. het bitumengehalte in het mengselontwerp, de levensduur met gemiddeld 2,5 jaar wordt verkort. Stel dat de gemiddelde levensduur van de zwaarst belaste rechterrijstrook van een 2x2-strooks provinciale weg 18 jaar bedraagt, dan leidt een gemiddelde afwijking van 0,3% van het bitumengehalte tot een levensduurvoorspelling van 15,5 jaar.



Figuur 4.2 Data over afwijking bitumengehalte uitgezet tegen de geschatte levensduur van verschillende experts

Naast de prior waarbij domeinkennis wordt gebruikt, is er ter referentie ook een niet informatieve prior gebruikt, d.w.z. een prior die geen of slechts gelimiteerde domeinkennis

bevat over de levensduur van asfalt. Hierbij zijn dus alle levensduren even waarschijnlijk. Een voorbeeld hiervan is als volgt. Een SMA wegvak heet een gemiddelde levensduur van 18 jaar met een standaard deviatie van 2,5 jaar. Dat betekent dat ~68% van de wegvakken een levensduur hebben die valt binnen 15,5 jaar en 20,5 jaar. Met een niet informatieve prior wordt er gezegd dat een wegvak gelijke kans heeft om een levensduur tussen 12 en 24 jaar te bereiken, zie Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Voorbeeld normale en uniforme verdeling voor a-priori levensduurvoorspelling

4.4 Data toegankelijk maken en structureren

4.4.1 Conversie PDF

De samenstelling van de deklagen bij oplevering is vastgelegd in Pdf-documenten met tabellen waarin asfalteigenschappen van verschillende monsters (boorkernen) worden beschreven. In 1 pdf-bestand worden eigenschappen van meerdere monsters beschreven. Een wegvak (aangelegd tracé) bestaat veelal uit meerdere Pdf-bestanden. Helaas is het interpreteren van data uit een Pdf-bestand niet rechtstreeks uitvoerbaar. Om deze reden worden alle Pdf-bestanden omgezet en samengevoegd tot een Excel bestand met voor ieder monster 1 regel waarin alle relevante bijbehorende eigenschappen worden beschreven. Voor de conversie van pdf-bestanden naar een Excel-bestand zijn de volgende stappen gevolgd.

Om een Pdf om te zetten naar Excel kan gebruik worden gemaakt van al bestaande conversie tools. Er is daarbij gekozen voor "smallpdf", aangezien deze initieel de beste structuur in Excel opleverde om weer verder te interpreteren. Toch is deze Excel nog niet leesbaar daar het nog de structuur van de PDF volgt met meerdere tabellen per monster. De eerste tabel bevat een beschrijving van de boorkern (locatie, laag, type mengsel, ...), de tweede tabel eigenschappen die na analyse van het monster zijn bepaald.

In een speciaal voor dit project gemaakt Excelbestand, waarin ook een script/macro (programma) is opgenomen, kan in de sheet setup een folder worden gekozen. Deze folder moet verwijzen naar een map (met eventueel submappen) waarin alle Excel bestanden

staan die met “smallpdf” zijn gegenereerd uit de Pdf-bestanden. Daarna kan het script worden geactiveerd en wordt één voor één iedere Excel geopend en “sheet” voor “sheet” gelezen.

Bij het lezen wordt gezocht naar specifieke tekst elementen die herkenbaar zijn voor de verschillende tabellen en eigenschappen die gelezen moeten worden. Hierbij kan het script zelfs functioneren ondanks kleine fouten in tekst omzetting bij conversie van PDF naar Excel. Alle geïnterpreteerde data worden aan de sheet “Automated Parser” toegevoegd en eventuele fouten of onmogelijkheden worden benoemd in de Setup sheet. Na alles te hebben ingelezen bevat “Automated Parser” de data zoals afkomstig uit de Pdf-bestanden zoals het ook daar beschreven was (op mogelijk nog wat typo's in de waarden na). De sheet “CorrectedOutput” is daarna ook gevuld, en zet tevens getallen om waar nodig (denk aan ‘bitumengehalte op’ wordt vervangen door ‘bindmiddel in’, en ‘% op zeef’ wordt vervangen door ‘% door zeef’).

Hiermee wordt 1 dataset gegenereerd met data van diverse boorkernen welke gebruikt wordt om het SMA-model verder te voeden. Het verwerken van de PDF's levert als resultaat een Microsoft Excel Workbook genaamd ‘sma_24_bestekken_sainput.xlsx’ met daarin drie sheets:

- OntwerpSpecificatie
- MonsterLaag
- MonitoringMeting

Meer details over de werking van de Excel sheet met script zijn gegeven in bijlage C (in het Engels).

4.4.2 Linked Data transformatie

In het project is besloten de verkregen data om te zetten/vast te leggen in een semantisch ‘Linked Data (LD)’ model. Dit betekent dat de data een standaard vorm (‘syntax’) krijgt welke onafhankelijk is van een specifieke applicatie (zoals bijvoorbeeld Microsoft Excel) volgens een data structuur (‘semantiek’) ook wel ‘ontologie’ (in NL vaak aangeduid met Object Type Library (OTL)).

Hierdoor kan in de toekomst makkelijker aangesloten worden bij datastructuren die ook van deze LD technologie gebruik maken zoals het ‘Pavement Information Model’ (PIM) van Boskalis/Heijmans of zelfs een breder gedragen Wegenbouw (Eng.: Road Construction (RC)) OTL voor zowel vraag en aanbod in de wegenbouw sector.

Dit is gedaan om twee redenen; in de eerste plaats wordt de data hierdoor toegankelijker voor toekomstig gebruik, in de tweede plaats draagt het implementeren van de semantiek op deze data ook bij aan de verdere ontwikkeling van een keten breed afgestemd semantisch model.

Vergeleken met de eerdere fase [1] is er nu meer data beschikbaar voor de integratie in en transformatie naar het semantische Linked Data model. Met integratie en transformatie word bedoeld het verwerken van de beschikbare data naar een semantische Linked Data model. Een ander verschil met de voorgaande fase is dat de gehanteerde ontologie zoals die uit de data gegenereerd wordt, niet eerst geconverteerd wordt naar een opgeschoonde versie (waar bv ‘externe keys’ tussen tabellen/relaties omgezet worden naar semantische relaties, bijvoorbeeld: elk tabel bevat het kolom ‘wegnummer’ en dit kan gebruikt worden om de link te leggen tussen tabellen). Deze relaties worden nu ‘on-the-fly’ gelegd in de

query door de juiste filters toe te passen. In een later stadium zou geconverteerd kunnen worden naar een neutrale ontologie zoals het huidige PIM of een toekomstige brede Wegenbouw ontologie (OTL). In termen van FAIR data: de data is nu FAI (findable, accessible, interoperable) maar nog niet direct (zonder conversie) R (reusable).

De relevante Excel sheets, direct beschikbaar of gegenereerd uit pdf's zoals hierboven beschreven, worden vertaald in 'W3C Linked Data' formaat door de juiste import in de gehanteerde semantische softwaretool toe te passen.

De volgende semantische tool is hierbij gebruikt:

- TopQuadrant TopBraid Composer (TBC) Maestro Edition (ME) version 7.1.1.

Het verwerken van de PDF's levert als resultaat een Microsoft Excel Workbook genaamd 'sma_24_bestekken_sainput.xlsx' met daarin drie sheets:

- **OntwerpSpecificatie**
Hierin zijn de eigenschappen van het mengselontwerp van de SMA-deklaag gerapporteerd door de betreffende aannemer conform de eisen van de CE-markering, zoals van toepassing was bij aanleg van de SMA.
- **MonsterLaag**
Hierin zijn de eigenschappen uit de opleveringsrapportage gerapporteerd. De opdrachtgever heeft de werkzaamheden door een onafhankelijk laboratorium laten uitvoeren. Er zijn boorkernen genomen van de vooraf bepaalde uitvoeringseenheden. Er zijn 3 boorkernen (A-B-C) genomen op $\pm 0,5$ m van elkaar. Deze drie boorkernen vertegenwoordigen 1 boorlocatie. Op één boorkern wordt de verdichtingsgraad bepaald, op de tweede kern wordt na extractie van de bitumen de korrelverdeling, bitumengehalte en holle ruimte bepaald. De derde boorkern is meestal het reserveproefstuk. Er worden dus per wegvak resultaten van 2 boorkernen gerapporteerd.
- **MonitoringMeting**
De conditie van de asfaltverhardingen wordt door de provincie Gelderland 1x/jaar c.q. 1x/2 jaar vastgesteld met behulp van visuele inspecties om inzicht te krijgen in de toestand van de deklaag. Vanaf 2006 zijn de conditiedata eens per twee jaar verzameld per rijstrook m.b.v. visuele inspectie. Vanaf 2015 zijn de inspectiedata van rafeling verzameld o.b.v. de visuele beoordelingen van HD-beelden. Sinds 2020 wordt voor elke richting de zwaarst belaste rijstrook jaarlijks bemeten. De schadebeoordeling van al deze inwinningen vindt plaats conform de CROW wegbeheersystematiek. Hierbij wordt de rafeling beoordeeld met behulp van een categorie van ernst/omvang. Ten behoeve van de analyse is categorieaanduiding ernst/omvang omgezet in een cijfer, zie kolom "Cijferbeoordeling Gelderland in tabel 4.1. Met behulp van deze numerieke waarde wordt een eenduidige interpretatie mogelijk, waardoor de snelheid van de rafelingsontwikkeling kan worden berekend en de restlevensduur kan worden bepaald.

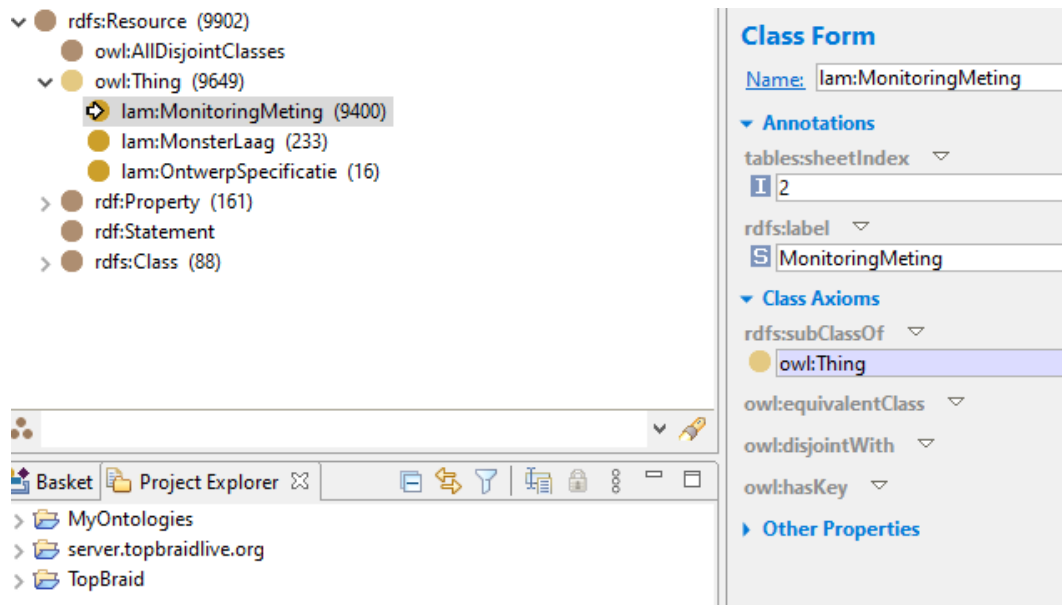
Tabel 4.1 Vertaling van ernst/omvang conform CROW naar eenduidig cijfer voor analyse

Categorie ernst/omvang	Cijferbeoordeling Gelderland	Omschrijving schade
L1	1	Lichte rafeling in kleine omvang
L2	2	
L3	3	
M1	4	Matige rafeling in kleine omvang (interventieniveau CROW)
M2	5	
M3	6	
E1	7	
E2	8	
E3	9	Ernstige rafeling in grote omvang

Dit workbook wordt direct ingelezen door de semantische tool TBC. Hierbij wordt de data geclassificeerd naar een direct met de data corresponderende ontologie.

Na inlezen wordt deze via een standaard export omgezet naar een Turtle file genaamd 'lam.ttl' met de juiste base URI's en prefixen.

Op dat moment zijn alle concepten (de sheet tabs), eigenschappen (de kolommen) en instanties (de rijen) beschikbaar als 'Linked Data' (Figuur 4.4).



Figuur 4.4 Concepten als OWL klassen in de ontologie (in de TBC tool)

Een voorbeeld van de code vorm voor MonsterLaag staat in bijlage C.1

Ook de eigenschappen komen allemaal terug volgens ‘semantic web / linked data’ definities:

The screenshot shows a web-based form titled "Datatype Property Form" for the file "lam.ttl". The form is used to define an OWL property. The "Name" field is set to "lam:bindmiddelPercentage". Under the "Annotations" section, there are two entries: "tables:columnIndex" with a value of "25", and "rdfs:label" with a value of "bindmiddelPercentage". The "Property Axioms" section includes "rdfs:domain" set to "lam:MonsterLaag" and "rdfs:range" set to "xsd:double". At the bottom, there are three tabs: "Form", "Graph", and "Source Code", with "Form" currently selected.

Figuur 4.5 Attributen als OWL properties in de ontologie (in de TBC tool)

Voor de code vorm zie bijlage C.2

Een voorbeeld van doorklikken op 1 specifieke rij voor monitoringmeting (1 van de 9400 rijen):

lam.ttl

Resource Form

Name: lam:Row2-1012

▼ **Annotations**

tables:rowIndex ▼
 I 1012

▼ **Other Properties**

rdf:type ▼
 lam:MonitoringMeting

lam:bpsEindKilometreering ▼
 I 5000

lam:bpsStartKilometreering_0 ▼
 I 4900

lam:bpsStrook ▼
 S RSL

lam:bpsWeg_1 ▼
 S N811

lam:hmp ▼
 I 4900

lam:jaar ▼
 I 2017

lam:maatregelBestek ▼
 S 1714

lam:somVanInspectieJaar ▼
 I 2017

lam:somVanRafeling ▼
 I 1

lam:somVanSurfaceJaarVan ▼
 I 2011

lam:surfaceFamilie ▼
 S SMA

lam:surfaceOmschrijving ▼
 S SMA-NL 11B

▼ **Incoming References**

Figuur 4.6 Voorbeeld rij in de TBC tool

De code vorm van dit voorbeeld in turtle is terug te vinden in bijlage C.3

In de toekomst kan deze data op standaard wijze (via SHACL-AF/'SPARQL Construct' regels) geconverteerd (verrijkt) naar een afgesproken doelontologie zoals de PIM-OTL en/of NEN 2660/CEN SML top-level ontologie.

Belangrijk voor de verdere integrale ondervraging van deze data is de situatie van de sleutelkolommen ('keys'), zowel intern als extern (naar de andere concepten) met een selectie van relevante attributen (kolommen):

OntwerpSpecificatie

bpsWeg

mengselVoldoetAanDeEisenVoor

algemeneEisPercentageDoorZeef2mm

algemeneEisPercentageDoorZeef0dot063mm

minimalePercentageBindmiddel

minimumPercentageHolleRuimte

maximumPercentageHolleRuimte

MonsterLaag

ontvangstDatum

locatie

monster

bpsWeg_0

bpsStartKilometrering

laag

mengselType

monsterLaag

verdichtingsgraad

holleruimtePercentage

bindmiddelPercentage

doorZeef2millimPercentage

doorZeef63micromPercentage

MonitoringMeting

bpsWeg_1

hmp

bpsStrook

SurfaceOmschrijving

jaar

bpsStrook

somVanSurfaceJaarVan

somVanRafeling

De combinatie van **rood**, **blauw** en **groen** vormt steeds de samengestelde sleutel voor een concept: intern maar ook extern om uniek te kunnen refereren.

Op basis hiervan is een SPARQL select-query ontwikkeld die een relationele JOIN-operatie uitvoert, de code hiervan is terug te vinden in bijlage C. Merk op dat voor kolommen die lege cellen kunnen/mogen hebben in de data de 'OPTIONAL' aanduiding toegevoegd moet

worden. In de filters geef je aan welke beperkingen er op de sleutels liggen tussen de verschillende sheets.

De ‘result-set’ van deze query kun je (o.a.) exporteren in JSON (klein fragment voorbeeld in volgende figuur):

```
{ "head": {
  "vars": [ "bpsWeg", "bpsStartKilometrering", "mengselType", "algemeneEisPercentageDoorZeeF2mm", "algemeneEisPercentageDoorZeeF8dot863mm", "minimalePercentageBindmiddel",
    "minimumPercentageHolleRuimte", "maximumPercentageHolleRuimte", "laag", "ontvangstDatum", "monster", "locatie", "verdichtingsgraad", "holleruimtePercentage",
    "bindmiddelPercentage", "doorZeeF2millimPercentage", "doorZeeF63micromPercentage", "jaar", "bpsStrook", "somVanSurfaceJaarVan", "somVanRafeling" ]
},
"results": {
  "bindings": [
    {
      "bpsWeg": { "type": "literal", "value": "N811" },
      "bpsStartKilometrering": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "5700" },
      "mengselType": { "type": "literal", "value": "SMA-NL 11B" },
      "algemeneEisPercentageDoorZeeF2mm": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "23" },
      "algemeneEisPercentageDoorZeeF8dot863mm": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "8.2" },
      "minimalePercentageBindmiddel": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "6.6" },
      "minimumPercentageHolleRuimte": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "5" },
      "maximumPercentageHolleRuimte": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "6" },
      "laag": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "1" },
      "ontvangstDatum": { "type": "literal", "value": "22-04-2011" },
      "monster": { "type": "literal", "value": "258" },
      "locatie": { "type": "literal", "value": "km | 5,75 | rijbaan links" },
      "verdichtingsgraad": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "98.9" },
      "holleruimtePercentage": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "5.1" },
      "bindmiddelPercentage": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "6.6" },
      "jaar": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "2021" },
      "bpsStrook": { "type": "literal", "value": "RSL" },
      "somVanSurfaceJaarVan": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "2011" },
      "somVanRafeling": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "5" }
    },
    {
      "bpsWeg": { "type": "literal", "value": "N811" },
      "bpsStartKilometrering": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "5700" },
      "mengselType": { "type": "literal", "value": "SMA-NL 11B" },
      "algemeneEisPercentageDoorZeeF2mm": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "23" },
      "algemeneEisPercentageDoorZeeF8dot863mm": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "8.2" },
      "minimalePercentageBindmiddel": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "6.6" },
      "minimumPercentageHolleRuimte": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double", "value": "5" },
      "maximumPercentageHolleRuimte": { "type": "literal", "datatype": "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer", "value": "6" }
    }
  ]
}
```

Figuur 4.7 Fragment JSON output van query

Deze file vormt de neutrale/gestandaardiseerde input voor het levensduurmodel SMA.

Omdat er maar een beperkte ‘overlap’ is wat betreft de drie soorten data (ontwerpspecificaties, boorkernen, monitoring) is er ook geprobeerd meer output te krijgen door de matching van startkilometrering flexibeler te maken m.b.v.:

`FILTER (?bpsStartKilometrering - ?hmp < 300) .`

De analyse van de overlapactie is in paragraaf 4.5.4 beschreven.

4.5 Resultaten Levensduurmodel SMA

In deze paragraaf wordt de data van dataset 2, afkomstig van de 24 bestekken, ingezet om het eerder gemaakte model te valideren en te verfijnen. Voor deze analyse wordt er daarom nog steeds voor gekozen om het model op 1 parameter te trainen, d.w.z. levensduurmodellen als functie van telkens een parameter, bijvoorbeeld verdichtingsgraad.

Bij deze exercitie wordt gebruik gemaakt van 3 datasets :

1. Dataset 1: alleen data van de N317,
2. Dataset 2: alleen data van de 24 bestekken
3. Dataset 3 oftewel, de gecombineerde dataset waarin dataset 1 en 2 zijn samengevoegd.

De resultaten zullen voornamelijk weergegeven worden voor ‘dataset 2’ en ‘dataset 3’, waarbij de eerste dataset, d.w.z. ‘dataset 1’, gebruikt wordt als referentie wanneer dat nodig is. Voor een volledige analyse van de eerste dataset wordt gerefereerd naar [1].

4.5.1 Evaluatie dataset 2

Uit de conversie van de pdf-bestanden zijn er 1818 boorkernen met verschillende mengseltypes gevonden. Daarvan zijn 460 boorkernen met het mengsel SMA 0/11 gevonden.

Voor 160 boorkernen is geen “project omschrijving”, “datum monsternamen” en “ontvangst monster” gevonden (BLANKS). In een later stadium van het project is geconstateerd dat deze gegevens er in een aantal gevallen toch in bleken te staan, maar dat deze niet waren meegenomen in de automatische Pdf-conversie door ofwel een matige kwaliteit van de scan, ofwel een de scheve uitvoering van de scan. Er is voor gekozen om dit niet te repareren, aangezien de kosten van deze reparatie niet zouden opwegen tegen de opbrengsten. Uit de levensduuranalyse in paragraaf 4.5.3 volgt dat van de ~300 boorkernen, die wel verwerkt zijn, er ~80 wegvakken zijn met volledige informatie en daarvan 19 wegvakken die einde levensduur hebben bereikt en gebruikt kunnen worden voor de einde levensduuranalyse. De verwachting is daarom dat uit deze missende 160 boorkernen er ook slechts een beperkt aantal extra wegvakken zullen komen en dat die dus ook een beperkte bijdrage zouden hebben aan de levensduuranalyse.

Gegeven de beperkte meerwaarde is er besloten om te adviseren deze verbetering pas uit te voeren op het moment dat meer vakken einde levensduur hebben bereikt, omdat dan de inspanningen ook opwegen tegen de resultaten. In dit geval betekent dit te wachten totdat er meer prestatiedata beschikbaar is van deze 24 bestekken. Dit voorbeeld illustreert hoe eenvoudig het is om fouten te maken bij geautomatiseerde data-reparatie.

4.5.2 Trends en observaties

Uitgangspunten

Uit de semantische linked data van 4.4.2 kunnen objecten gehaald worden die geclusterd zijn op basis van rijstrook (links/rechts), hm-van (hectometer wegvak vanaf) en aanlegdatum. Hieruit komen 79 vakken die verder worden onderzocht op eigenschappen en prestatiedata op basis van inspectiegegevens (hier verder performance genoemd). De performance van deze vakken wordt aangeduid met de ‘som van rafeling’ wat een cijfermatige beoordeling is van de ernst van rafeling ten tijde van de laatst uitgevoerde inspectie, zie Tabel 4.1. De ‘somVanRafeling’ is een eenvoudige indicator opgesteld voor de rafelingsontwikkeling in de tijd die verwijst naar de waarde van de cijfermatige beoordeling ten tijde van de laatste genoteerde meting (cijfer van 1 tot 9).

Voor de eigenschappen worden de mengselafwijkingen (delta's) tussen de realisatie (oplevering) en de ontwerpspecificatie bepaald, waarbij de volgende 5 eigenschappen gekozen zijn:

- Verdichtingsgraad
- Holle ruimte
- Bindmiddelpercentage
- Korrelverdeling door 2 mm zeefpercentage ('zand + vulstof')
- Korrelverdeling door 63 µm zeefpercentage ('vulstof')

Voor deze 5 eigenschappen kan nu een trend geschetst worden waarbij de ‘som van rafeling’ over de tijd uitgezet wordt tegen de individuele eigenschap. Deze zijn te vinden in Figuur 4.8 tot en met Figuur 4.12 voor dataset 2.

Voor de rafelingsontwikkeling in de tijd is een eenvoudige indicator voor de prestatie opgesteld: de ‘somVanRafeling’ gedeeld door de leeftijd ten tijde van de laatst genoteerde meting. Dit is grafisch te duiden als een maat voor de rafelingssnelheid. Let wel, vanwege

het niet-lineaire karakter van de rafelingsontwikkeling is dit ook niet meer dan een indicator en wordt deze ook alleen in deze paragraaf gebruikt voor een eerste duiding van trends. Gaan we uit van een te bereiken leeftijd van 18 jaar, dan geldt als streven voor een gemiddelde rafelingssnelheid een waarde van 0,22 somVanRafeling-punt per jaar (interventieniveau CROW= 4/ leeftijd in jaar=18 --> 0,222). Deze gemiddelde rafelingssnelheid is een aanname en is voor het moment niet meer dan een waarde ter referentie.

Evaluatie rafelingsontwikkeling

De figuren kunnen als volgt geïnterpreteerd worden:

- Linker plaatje geeft aan voor elk wegvak wat de bijbehorende rafelingssnelheid is, als deze snelheid lager dan een bepaalde grens is, bereikt dit wegvak einde levensduur later dan 18 jaar (volgens expertkennis).
 - X-as is de delta van een specifieke eigenschap.
 - Y-as is de snelheid van rafeling als lineair verband ([laatste gemeten rafeling – eerst gemeten rafeling] gedeeld door de leeftijd (in jaren ten tijde van de laatst uitgevoerde meting).
 - Verticale en horizontale blauwe lijnen om $\Delta = 0$ en rafelingsnelheid = 0 aan te geven.
 - De zwarte punten zijn de individuele wegvakken waar een bijbehorende rafelingsnelheid is bepaald door de laatste performance score te delen door het laatste inspectiejaar. Dit geeft een lineair verband aan voor de rafelingssnelheid, maar zou met de gegeven levensduren (>15 jaar) een goede indicatie moeten zijn.
 - Rode lijn om aan te geven wat de rafelingssnelheid moet zijn om einde levensduur te bereiken in 18 jaar.
- Rechter plaatje geeft de rafeling weer over de leeftijd van elke wegvak voor de verschillende delta's.
 - X-as is de leeftijd van een wegvak in jaren.
 - Y-as is de som van rafeling bij de bijhorende leeftijd.
 - In de legenda de verschillende delta's die gevonden zijn voor een specifieke eigenschap.
 - De lijnen geven voor individuele wegvakken de som van rafeling over de leeftijd weer. Voor iedere individuele wegvak hoort een bepaalde delta en de unieke delta's worden in de legenda getoond met unieke kleuren. De legenda geeft alleen de eerste 10 weer. Sommige eigenschappen hebben meer dan 10 verschillende delta's en zouden ervoor zorgen dat de figuur niet meer zichtbaar is.

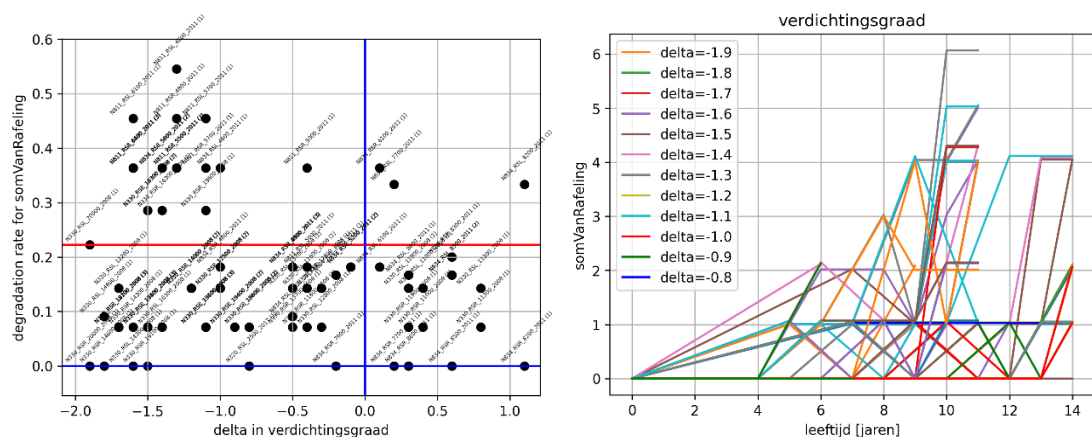
In deze figuren is niet voor ieder van de 79 wegvakken een punt zichtbaar, dit komt doordat sommige punten/lijnen over elkaar heen vallen.

In de linker figuren van Figuur 4.8 t/m Figuur 4.12 valt als eerste op dat het merendeel van de punten onder de rode grens blijft. Het model wordt enkel gekalibreerd op wegvakken met schade boven het interventieniveau, dus punten die boven de rode grens uitkomen. Dit aantal punten is erg beperkt, waardoor de mate van kalibratie op basis van deze data beperkt is. De spreiding in de data voor holle ruimte percentage en Korrelverdeling 63 μm van wegvakken met schade (punten boven rode lijn) is redelijk goed. Voor de andere eigenschappen zijn deze punten sterk geclusterd, waardoor de data minder zeggingskracht hebben voor deze eigenschappen. De rechter figuur toont de schadeontwikkeling in relatie tot de levensduur en laat nogmaals zien dat er weinig wegvakken zijn die einde levensduur (som van rafeling = 4) bereiken. Uit de rechter figuur kan ook worden afgeleid dat de meeste wegvakken die einde levensduur bereiken dit doen bij een levensduur tussen de 9 en 11 jaar.

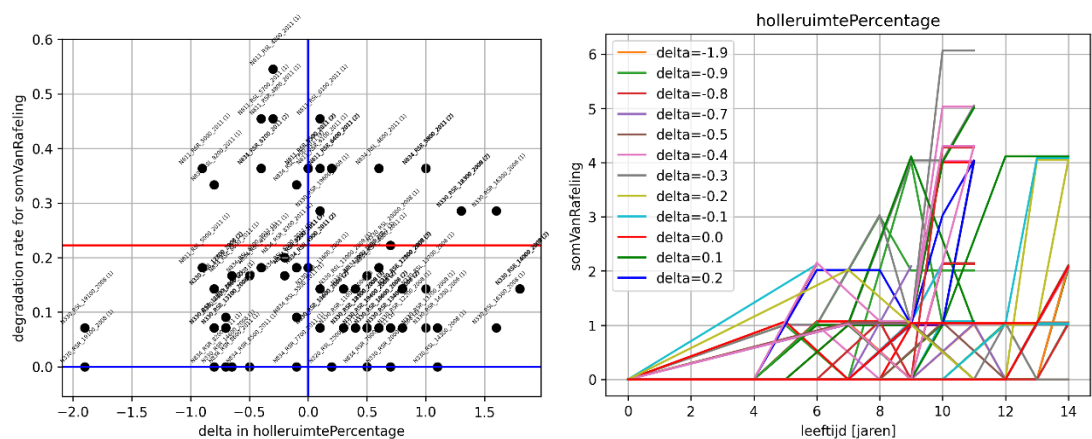
Deze punten liggen ver van het gemiddelde van de dataset zelf, waarin het merendeel van de punten een vergelijkbare leeftijd hebben gecombineerd met een lage som van rafeling score. Omdat het model wordt gekalibreerd aan de hand van alleen de wegvakken die einde levensduur hebben bereikt kan dit leiden tot een ongewenste bias in de voorspellingen.

In de linker figuren is te zien dat de punten onder de rode streep in het algemeen een grotere spreiding hebben over de delta's dan de punten boven de rode streep. Dit kan duiden op een relatie tussen de delta en som van rafelingsnelheid die voor specifieke delta's een hoge rafelingsnelheid heeft. Deze punten zijn in de toekomst interessant om mee te nemen voor de analyse wanneer einde levensduur is bereikt.

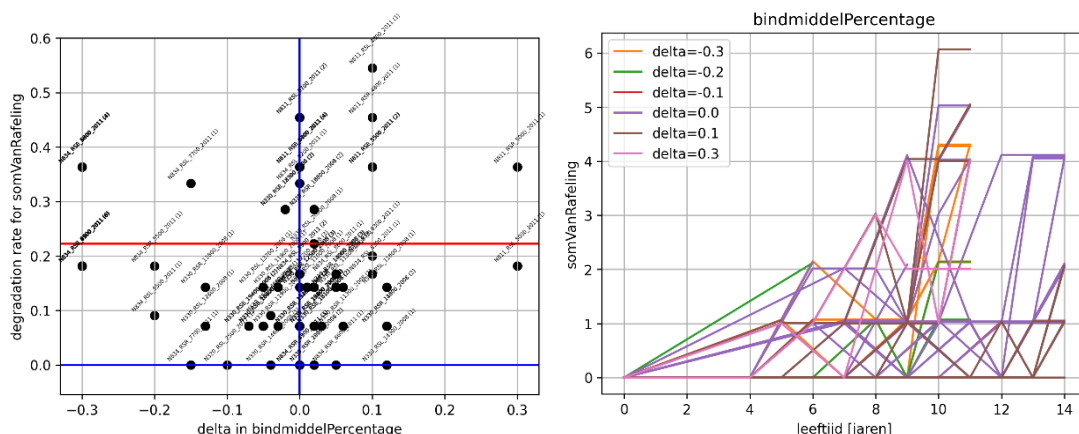
De herkomst van de opvallende waarde van -7,5 bij de 2 mm delta korrelverdeling is gecontroleerd en teruggevonden in de gescande pdf's. Aangezien de som van rafeling voor dit punt minder dan 4 is, heeft dit punt geen invloed op de uitgevoerde analyse.



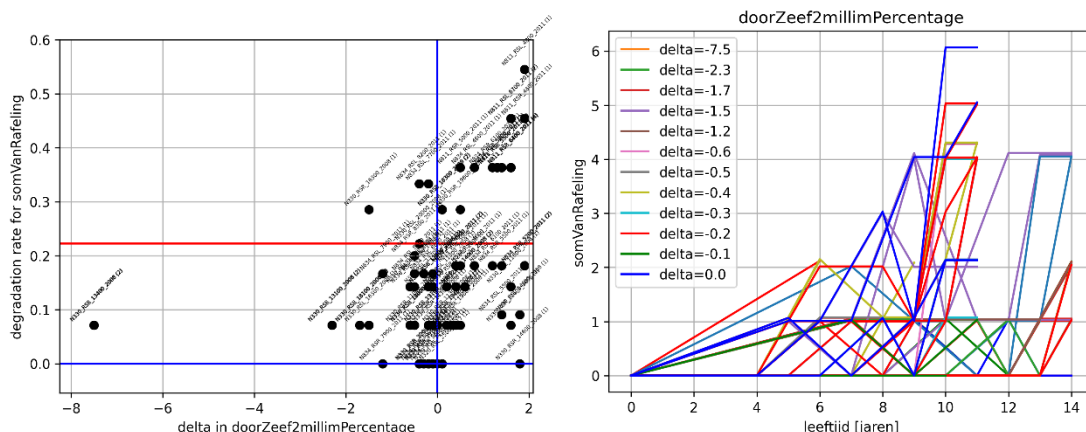
Figuur 4.8 Trends voor dataset 2 van somVanRafeling als functie van leeftijd en bij verschillende waarden voor delta's in verdichtingsgraad (rechts) en voor een rafelingsnelheid indicator als functie van de delta's in verdichtingsgraad (links).



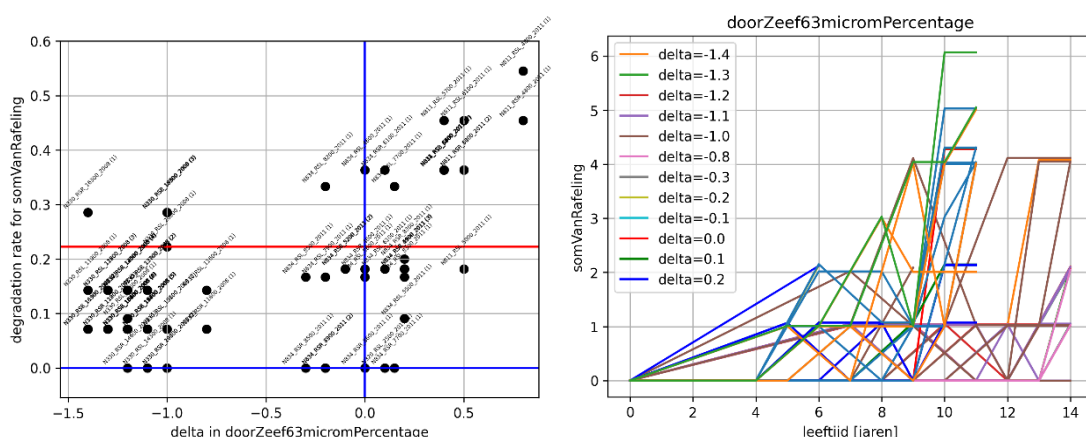
Figuur 4.9 Trends voor dataset 2 van somVanRafeling als functie van leeftijd en bij verschillende waarden voor delta's in holleruimte percentage (rechts) en voor een rafelingsnelheid indicator als functie van de delta's in holleruimte percentage (links).



Figuur 4.10 Trends voor dataset 2 van somVanRafeling als functie van leeftijd en bij verschillende waarden voor delta's in bindmiddel percentage (rechts) en voor een rafelingssnelheid indicator als functie van de delta's in bindmiddel percentage (links).



Figuur 4.11: Trends voor dataset 2 van somVanRafeling als functie van leeftijd en bij verschillende waarden voor delta's in 2 mm doorzeefpercentage (rechts) en voor een rafelingssnelheid indicator als functie van de delta's in 2 mm doorzeefpercentage (links).

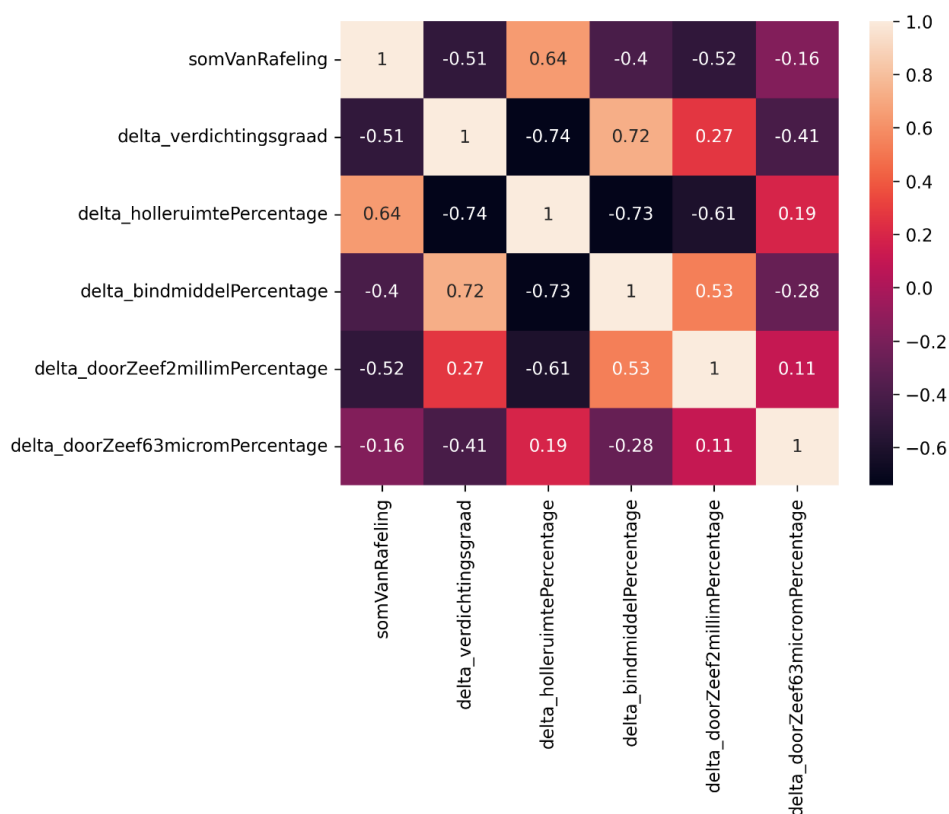


Figuur 4.12: Trends voor dataset 2 van somVanRafeling als functie van leeftijd en bij verschillende waarden voor delta's in 63 µm doorzeefpercentage (rechts) en voor een rafelingssnelheid indicator als functie van de delta's in 63 µm doorzeefpercentage (links).

Correlatiematrix dataset 1

Voor een indicatieve kwantificering van de relatiesterkte is een correlatiematrix opgesteld voor de drie datasets. De correlaties worden weergegeven voor de delta's ten opzichte van som van rafeling (eerste kolom van de matrix) en ten opzichte van elkaar. Hier betekent 0 "geen correlatie", 1 betekent "sterk positief gecorreleerd" en -1 betekent "sterk negatief gecorreleerd". Een eigenschap is altijd 1 (100%) met zichzelf gecorreleerd. Voor het berekenen van de correlaties worden alle wegvakken genomen en dus ook degene die nog geen einde levensduur hebben bereikt. Belangrijk om te vermelden is dat het model alleen de wegvakken mee neemt die einde levensduur bereikt hebben. Dit kan ervoor zorgen dat het model niet 100% overeenkomt met de correlatiematrix, maar zou in grote lijnen dezelfde trend moeten volgen. Er is bewust gekozen om alle wegvakken te gebruiken voor de correlaties om inzicht te krijgen in algemene relaties tussen de eigenschappen.

In Figuur 4.13 is de verbeterde correlatiematrix te zien van de dataset 1 met daarin alleen de N317. Er wordt gesproken over verbeterd omdat er een aantal fouten bleken te zitten in deze dataset doordat er soms waarden overschreven werden door de andere rijstrook. Vergeleken met de correlatieplot uit het vorige rapport [1] is in het algemeen de correlatie sterkte gedaald (de waarden zijn meer richting de 0), maar de tekens van de waarden komen wel overeen. Datsaset 1 wordt in deze rapportage als referentie gebruikt voor dataset 2.

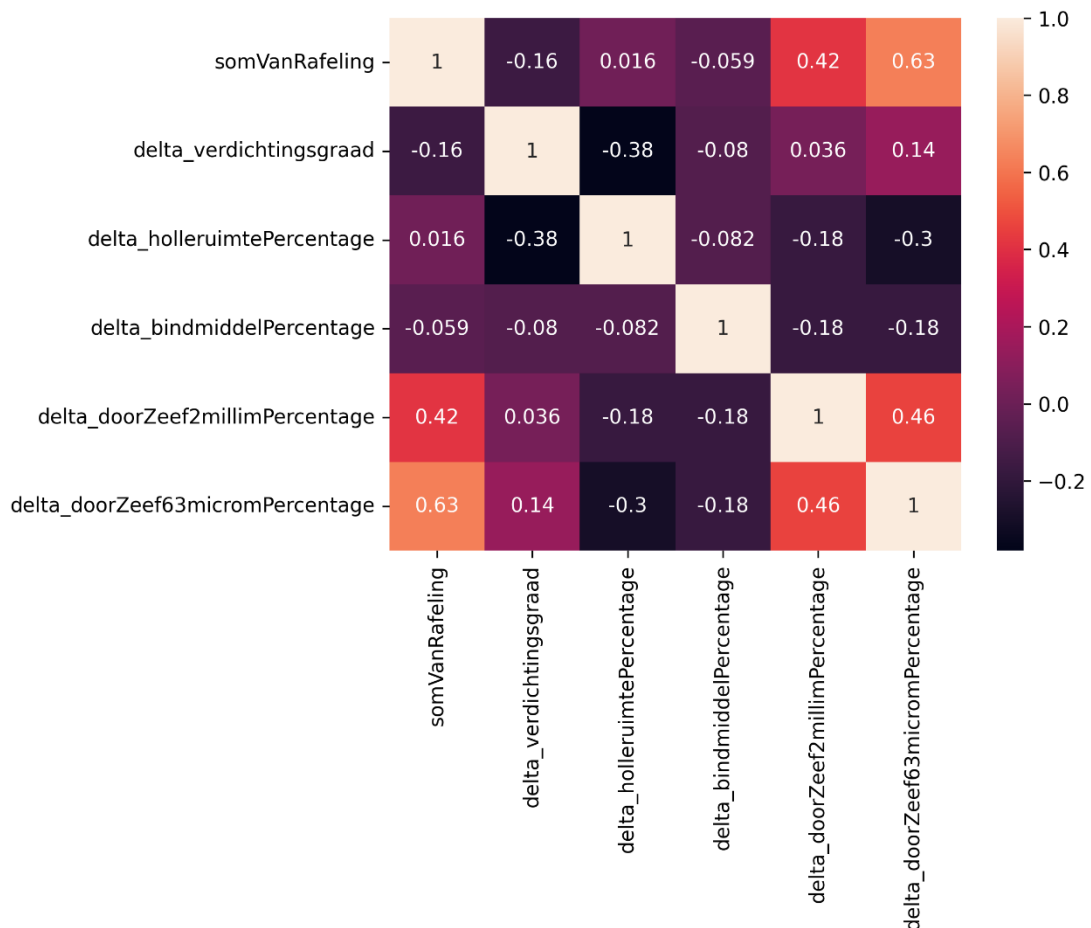


Figuur 4.13 Correlatiematrix voor somVanRafeling en de delta's ten opzichte van het ontwerp voor dataset 1.

Correlatiematrix dataset 2

De correlatiematrix voor dataset 2 is te vinden in Figuur 4.14. Hier valt op dat de drie sterk gecorreleerde eigenschappen uit dataset 1 (verdichtingsgraad -0.51, holle ruimte

percentage 0.64 en bindmiddel percentage -0.4) nu veel minder sterk gecorreleerd zijn. Zoveel minder dat deze drie eigenschappen nu bijna geen relatie meer lijken te hebben met de som van rafeling. Verder zijn de korrelverdelingen door zeef 2 mm en 63 μ m een stuk sterker gecorreleerd, maar zijn de tekens omgedraaid. Dit betekent dat meer zand en vulstof in de realisatie ten opzichte van de ontwerpspecificatie lijken te zorgen voor meer rafeling.



Figuur 4.14 Correlatiematrix voor somVanRafeling en de delta's t.o.v. het ontwerp voor dataset 2.

Het is belangrijk om nogmaals te vermelden dat de correlaties die hier worden weergegeven opgesteld zijn voor alle wegvakken, dus ook de wegvakken die nog geen einde levensduur hebben bereikt. Als deze wegvakken de meerderheid vormen, dan kan de correlatie gestuurd worden door die wegvakken. Dit gedrag is terug te vinden als er gekeken wordt naar de gemeten performance scores over de tijd in Figuur 4.15. Voor dataset 2 (rechter figuur) is het zichtbaar dat er veel meer wegvakken (60 van de 79) onder de som van rafeling score 4 blijft. Terwijl in dataset 1 (linker figuur) de verdeling boven en onder de rafelingscore 4 meer uniform verspreid is. De algemene degradatietrend is ook anders tussen de twee datasets, bij dataset 1 is de som van rafeling “soort van” lineair over de tijd terwijl deze in dataset 2 een tijd lang laag blijft en dan in een paar jaar flink omhoog schiet.

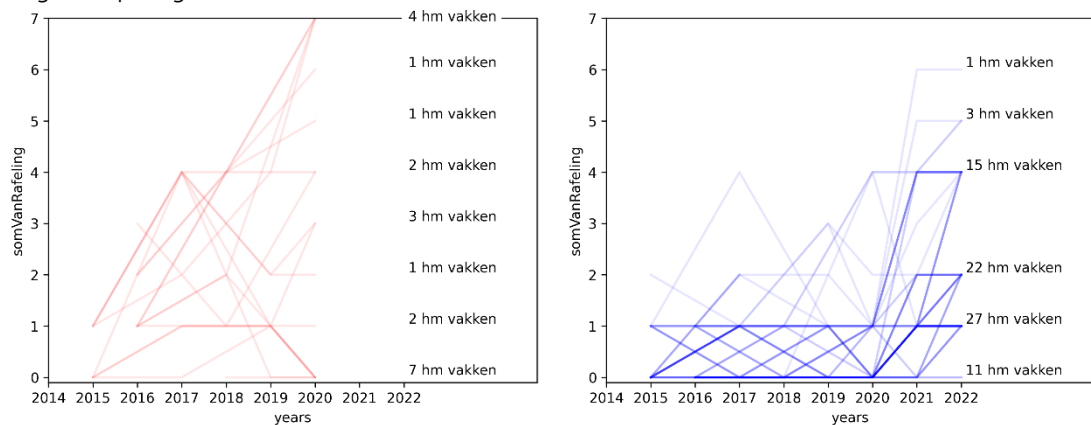
Als de verschillen in correlatiesterkte inderdaad verband houden met de degradatietrend wordt verwacht dat indien dataset 2 wordt gefilterd, opdat deze qua degradatietrend meer op dataset 1 lijkt, er een meer vergelijkbare correlatieplot wordt gevonden in dataset 2. De correlatiematrix, waarbij de data gefilterd is op een som van rafeling van minimaal 2, is weergegeven als Figuur 4.16. Hieruit is zichtbaar dat de correlatiesterktes groter zijn, maar

dat de meeste tekens niet overeenkomen met dataset 1. Dit toont aan dat de andere degradatietrend in ieder geval niet de enige verklaring kan zijn voor het geobserveerde verschil in correlaties.

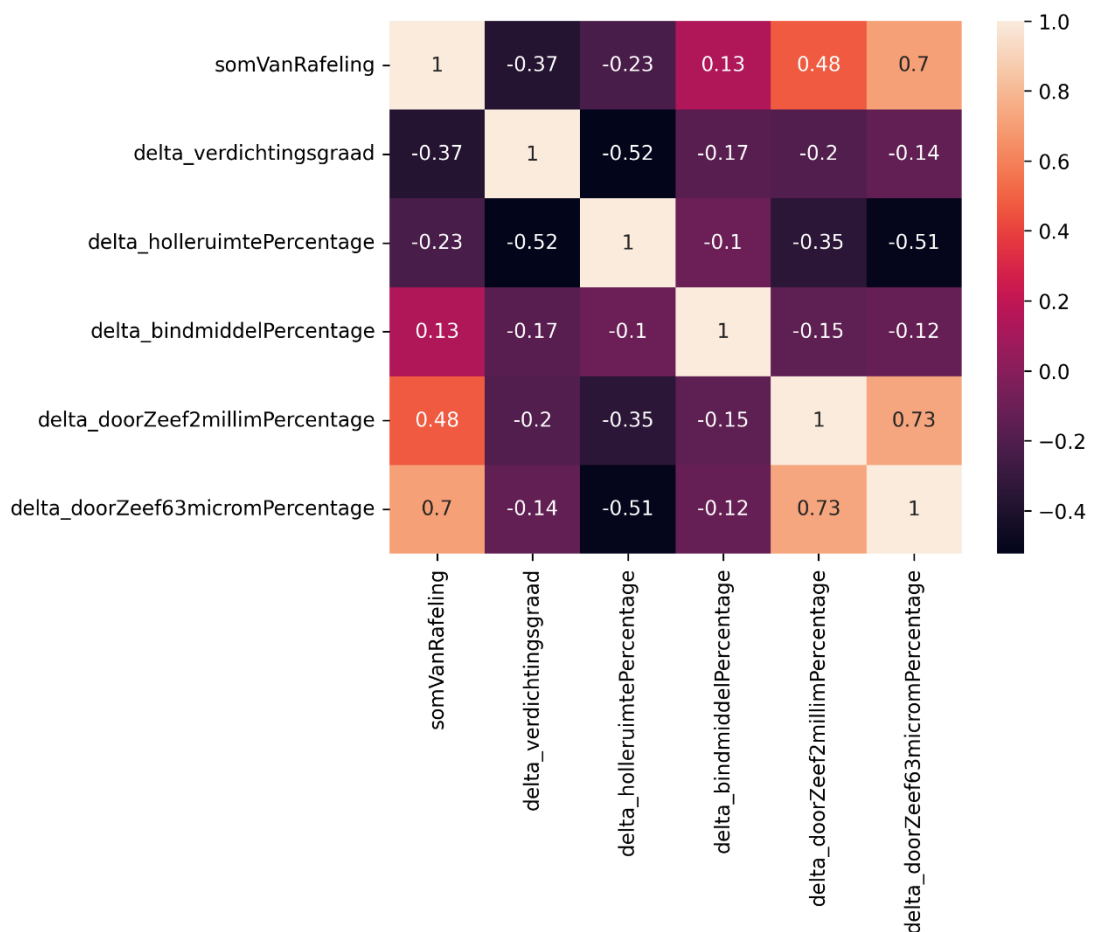
Het resultaat is dat dataset 2 voor veel eigenschappen een omgekeerde relatie heeft met de som van rafeling vergeleken met de dataset 1, dit is het geval bij:

- bindmiddelpercentage
- Korrelverdeling door 2 mm zeefpercentage ('zand + vulstof')
- Korrelverdeling door 63 μm zeefpercentage ('vulstof')

Dataset 2 vindt sterke correlaties tussen somVanRafeling en de korrelverdelingen, terwijl dataset 1 sterke correlaties vindt tussen somVanRafeling en de eigenschappen verdichtingsgraad en holle ruimte percentage. Vooral de omgekeerde relaties zullen een effect hebben op de kalibratie van het model, dit zal verder onderzocht worden in de volgende paragraaf.



Figuur 4.15 SomVanRafeling score over de jaren heen voor de dataset 1 (links) en dataset 2 (rechts). Doorzichtigheid geeft aan hoeveel lijnen er over elkaar lopen, doorzichtiger is minder overlappende lijnen.



Figuur 4.16 Correlatie matrix voor somVanRafeling en de delta's voor dataset 2 vanaf cijfer 2.

4.5.3 Resultaten lineair model

Inleiding modelkeuze

Voor het kalibreren van het model wordt gebruik gemaakt van Bayesiaanse inference (gevolgtrekking). De techniek combineert model, meetdata en domeinkennis om tot een nauwkeuriger model te komen. Met het model kunnen vervolgens levensduurvoorspellingen worden gedaan voor wegvakken die nog geen einde levensduur hebben bereikt. Voor het eerste model als functie van de verschillende delta's wordt de eenvoudigste modelvorm gebruikt, namelijk een lineaire relatie:

$$L = a + b \cdot \Delta + \epsilon$$

Met:

L levensduur voor de deklaag realisatie [jaren]

a verwachtingswaarde/gemiddelde levensduur voor het deklaag ontwerp [jaren]

b de verandering van de levensduur per afwijking in eigenschap (bijv. verdichting) [jaren/%]

Δ de afwijking in percentage eigenschap (≤ 0) [%] t.o.v. het mengselontwerp

ϵ de modelfout [jaren]

De coëfficiënten a, b en ϵ worden gezien als stochasten, d.w.z. het zijn geen deterministische en vaste waarden maar variabelen met geschikte en vast te stellen verdelingsfuncties en

bijbehorende parameters. Gegeven de vorm van het model heeft de modelfout ϵ een verwachtingswaarde gelijk aan 0, maar een nog niet precies bekende waarde voor de standaardafwijking. Voor deze standaardafwijking (s) wordt daarom een aparte stochast gedefinieerd. De coëfficiënten a , b en ϵ (s) worden in eerste instantie als onderling onafhankelijk gezien.

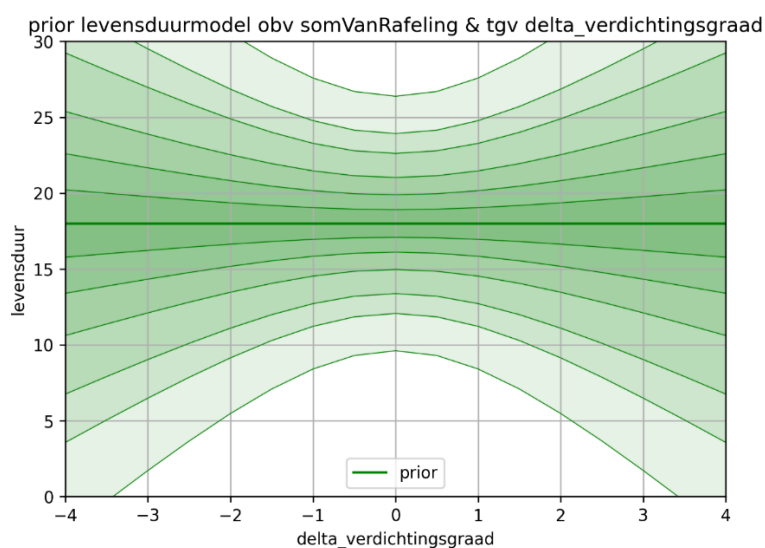
Domeinkennis (prior)

voor de domeinkennis worden de waarden uit tabel 4.2 aangehouden. Dit komt overeen met een persoon die nog niet zeker is over de relaties tussen verschillende eigenschappen. Hier wordt gezegd dat een gemiddelde weg 18 jaar levensduur met een standaard deviatie van 3 jaar heeft bij een delta van 0 (realisatie en ontwerpspecificatie komt overeen). Verder is er geen kennis over de relatie tussen levensduur en de delta, dus de helling is op 0 jaar/delta met een standaard afwijking van 2 jaar/delta. Het gekalibreerde model berust hiermee meer op de data dan op de domeinkennis (prior). De helling van het gekalibreerde levensduurmodel wordt sterk bepaald door de data. Deze aanpak verschilt met het gekozen model van het voorgaande rapport [1], omdat hiermee geen betrouwbare en onlogische voorspellingen werden gevonden voor dataset 2.

Tabel 4.2 Prior waarden voor coëfficiënten in levensduurmodel

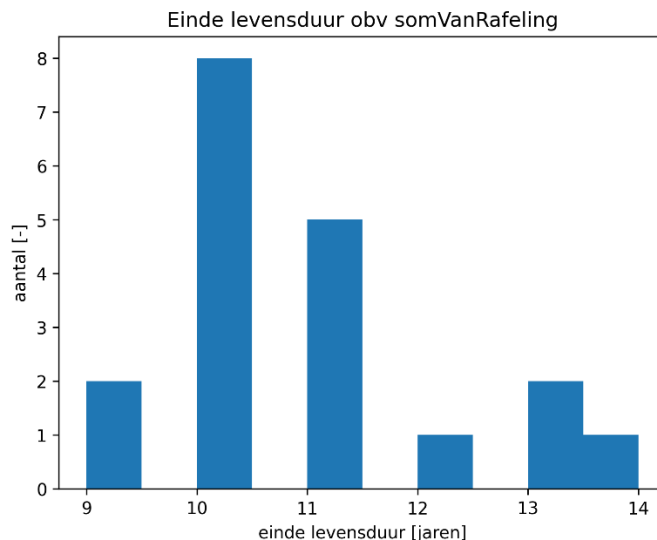
coëfficiënt	Verdelingsfunctie	Gemiddelde μ	Standaardafwijking σ
A	Normaal	18.0	3.0
B	Normaal	0.0	2.0
E	Normaal	0	S
S	Lognormaal	2.0	1.6

Een model gemaakt van de domeinkennis voor verdichtingsgraad ziet er uit als in Figuur 4.17. Er is een gemiddelde lijn voor alle delta's voor 18 jaar met onzekerheid als bandbreedte, waarbij de uiterste band het 99 percentiel aangeeft. Dezelfde domeinkennis zal gebruikt worden voor alle delta's. Te zien is dat de gebruikte domeinkennis nauwelijks informatief is: voorspellingen hebben een grote bandbreedte en er is nog modelruimte om het effect van een delta op de levensduur positief of negatief te laten zijn.



Figuur 4.17 Prior levensduur model voor deklaag met verdichtingsgraad als modelparameter.

Uit de eerdere observaties en trends zijn er 19 wegvakken gevonden die einde levensduur hebben bereikt (som van rafeling score van 4), zie Figuur 4.18.



Figuur 4.18 Aantallen realisaties einde levensduur bij interventieniveau provincie Gelderland; totaal 19 uit 79.

Deze wegvakken worden gebruikt om het model te kalibreren. Het valt op dat de meeste wegvakken rond de 10 á 11 jaar meegaan en dan zijn er een paar uitschieters die 13 jaar en 14 jaar hebben bereikt. Hier kan op dit moment geen verklaring voor worden gegeven, maar er is wel een klein onderzoek gedaan naar de delta's. Dit wordt in paragraaf 4.5.4 uitgelicht.

Resultaten levensduurmodellen dataset 2

Door de gekozen prior heel algemeen te nemen wordt de modelkalibratie voornamelijk gestuurd door de meetdata. Als het model wordt toegepast op de 5 verschillende eigenschappen apart, dan komt er voor iedere delta een model dat levensduur voorspelt op basis van de dan beschouwde delta. De resultaten voor de verschillende delta's zijn te vinden in Figuur 4.19 en de numerieke waarden voor het model zijn te vinden in Tabel 4.3.

Voor het interpreteren van de figuur:

- X-as is de specifieke delta
- Y-as is de levensduur in jaren
- Groen gestippelde lijn is het gemiddelde van de domeinkennis
- Groene banden geven de onzekerheid weer van het domeinkennis model
- Blauwe streep is het gemiddelde van het gekalibreerde model op basis van de metingen
- Blauwe banden geven de onzekerheid van het gekalibreerde model
- Blauwe driehoeken zijn de datapunten van dataset 2, de wegvakken die einde levensduur hebben bereikt.
- (optioneel alleen voor de gecombineerde dataset) Grijs bollen zijn datapunten uit dataset 1 die einde levensduur hebben bereikt, dit is alleen het geval in Figuur 4.20.

Tabel 4.3 Posterior waarden voor coëfficiënten in levensduurmodel.

Eigenschap	a (gem., std.) [jaar]	b (gem., std.) [jaar/delta]	ε (gem., std.) [jaar]	s (gem., std.) [jaar]
Verdichtingsgraad	10.13, 0.81	-0.55, 0.64	0.0, s	1.37, 0.23
Holle ruimte percentage	10.39, 0.26	1.45, 0.36	-0.01, s	1.04, 0.28
Bindmiddel percentage	10.77, 0.32	-0.27, 1.42	0.0, s	1.4, 0.25
Korrelverdeling 2mm	11.87, 0.47	-1.06, 0.35	0.03, s	1.28, 0.12
Korrelverdeling 63 μm	10.83, 0.29	-1.26, 0.40	-0.02, s	1.26, 0.14

Voor de 5 eigenschappen kan op basis van de resultaten (gekalibreerd model) het volgende afgeleid worden:

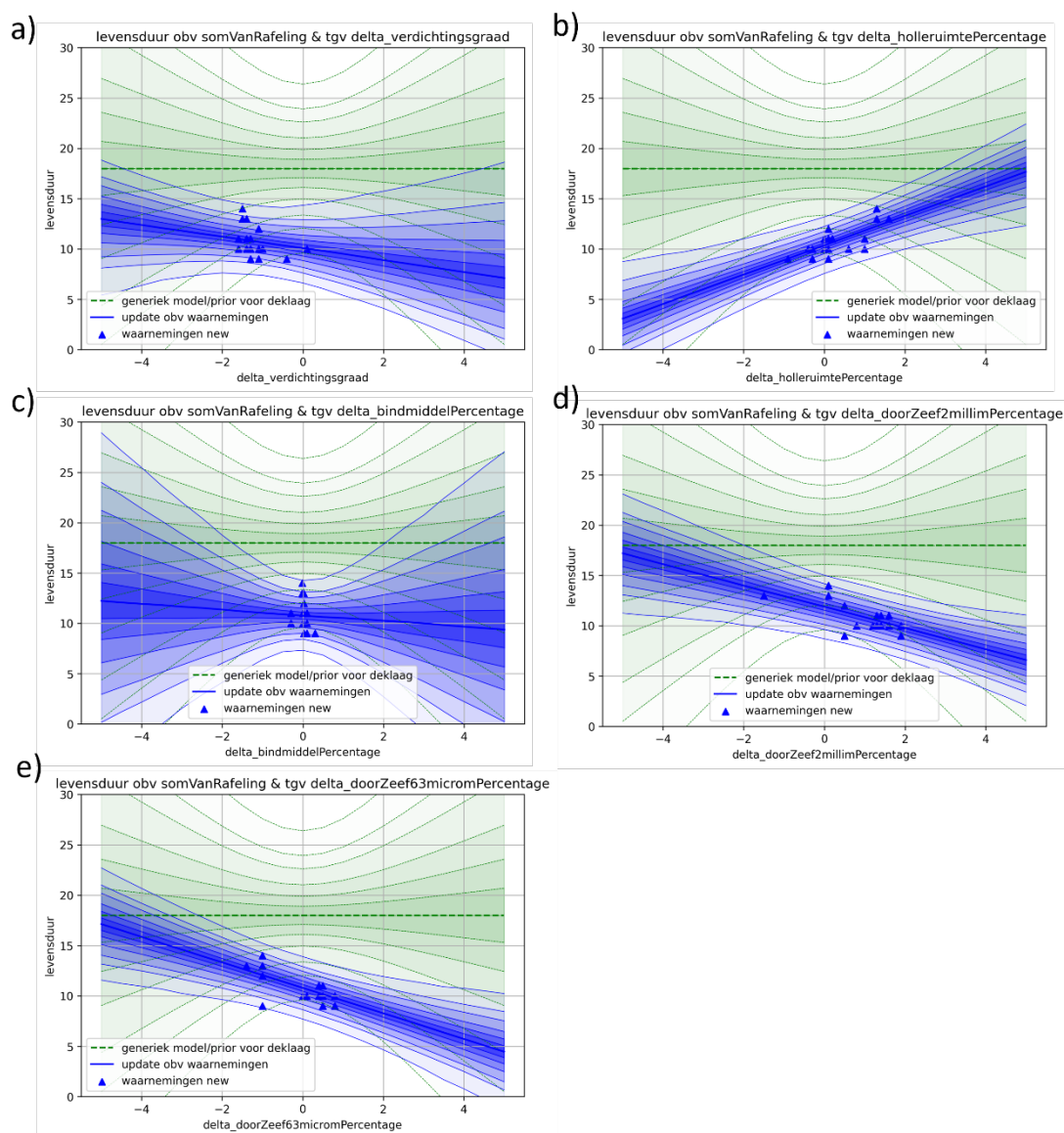
- Verdichtingsgraad: omgekeerde relatie, hogere verdichting in realisatie in vergelijking met de ontwerpwaarde geeft een kortere levensduur dan verwacht op basis van domeinkennis.
- Holle ruimte percentage: recht evenredige relatie, hoger percentage holle ruimte in realisatie in vergelijking met de ontwerpwaarde geeft een langere levensduur dan verwacht op basis van domeinkennis.
- Bindmiddel percentage: uniforme relatie, de beschikbare data is te geclusterd om een duidelijk relatie in te vinden. Dit betekent dat in het model het bindmiddel percentage geen invloed heeft op de levensduur.
- Korrelverdeling 2 mm: omgekeerde relatie, hoger percentage 2 mm korrels in realisatie in vergelijking met de ontwerpwaarde geeft een kortere levensduur dan verwacht op basis van domeinkennis.
- Korrelverdeling 63 μm : omgekeerde relatie, hoger percentage 63 μm korrel in realisatie in vergelijking met de ontwerpwaarde geeft een kortere levensduur dan verwacht op basis van domeinkennis.

In het algemeen voorspelt het getrainde model een kortere levensduur dan de algemene domeinkennis. Dit is te verklaren doordat het model alleen getraind is met wegvakken die een korte levensduur hebben, zie 4.5.1 en Figuur 4.19.

Een aantal correlaties die worden gevonden zijn niet direct verklaarbaar vanuit de domeinkennis. Een voorbeeld hiervan is de holle ruimte percentage: Uit de domeinkennis wordt er in het algemeen verwacht dat een hogere holle ruimte percentage in de realisatie ten opzichte van het ontwerp voor een kortere levensduur zorgt. Het model wat getraind is met de metingen geeft juist een omgekeerde relatie weer, zie Figuur 4.19 b. Voor de verdichtingsgraad wordt er juist wel verwacht dat een hogere verdichtingsgraad voor een langere levensduur zorgt. Uit het model komt een omgekeerde relatie naar voren, zie figuur 4.19a.

Het bindmiddelpercentage (bitumen) is geclusterd in de resultaten, dit komt overeen met wat er uit domeinkennis wordt verwacht. Zoals bekend uit het mengselontwerp van SMA blijft het bitumengehalte percentage redelijk constant en wordt het zand/vulstofmengsel vermeerderd of verminderd afhankelijk van laag of hoog steenpercentage. Als gevolg hiervan verandert de samenstelling van de mastiek. Vanuit domeinkennis is de verwachting is dat een vette mastiek de duurzaamheid zal verbeteren (d.w.z.: de levensduur verlengen), terwijl een schrale mastiek tot een rafelingsgevoelig mengsel zal leiden. Aanbevolen wordt

om na te gaan of voor de betreffende vakken een vette mastiek of juist een schrale mastiek is ontstaan.



Figuur 4.19 Posterior/bijgesteld levensduurmodel voor dataset 2 op basis van waarnemingen voor de volgende modelparameters: a) verdichtingsgraad, b) holle ruimte percentage, c) bindmiddelpercentage, d) korrelverdeling 2 mm en e) korrelverdeling 63 μm .

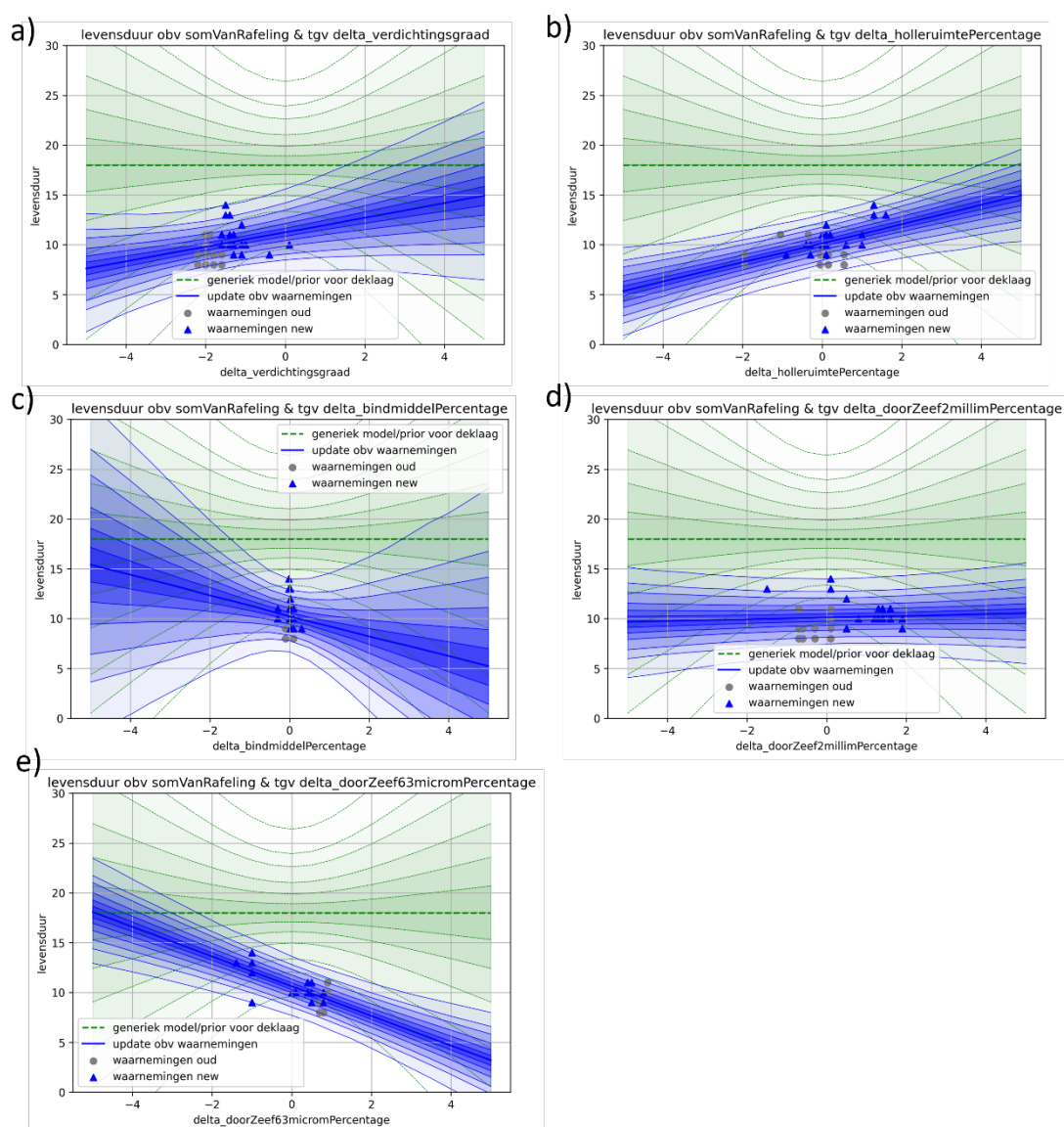
Van de 79 wegvakken (100 m) van dataset 2 die gekoppeld konden worden zijn er 19 die einde levensduur hebben bereikt. Deze vakken hebben in verhouding tot de populatie een relatief korte levensduur van tussen 9 en 11 jaar, terwijl de overige 60 punten waarschijnlijk uiteindelijk een langere levensduur zullen hebben. Immers de gemiddelde levensduurverwachting is 18 jaar.

De spreiding van de nieuwe 19 punten is iets beter over de oplossingsruimte dan dataset 1 van N317, maar voor veel van de eigenschappen waar naar wordt gekeken is ook deze nieuwe data nog steeds te geclusterd om een goede basis voor een model te vormen. Daarnaast zijn 19 datapunten erg weinig voor een analyse. Uit bestudering van de data blijkt dat de spreiding van de overige 60 punten over de totale oplossingsruimte een stuk beter is.

Het is daarom de moeite waard om deze analyse nogmaals uit te voeren als al deze wegvakken het moment einde levensduur hebben bereikt.

Resultaten levensduurmodellen gecombineerde dataset

Dezelfde analyse voor de gecombineerde dataset geeft vergelijkbare relaties tussen levensduur en de delta's als de analyse van dataset 2, zie figuur 4.20. Hierbij geldt nog steeds dat de relatie tussen holle ruimte percentage en levensduur niet conform de verwachting (domeinkennis) is. Echter de relatie tussen delta verdichtingsgraad en levensduur is nu wel in overeenstemming met de verwachting uit domeinkennis. Uit Figuur 4.20 is ook zichtbaar dat de drie uitschieters van 13/14 jaar voor een aantal delta's de bepalende waarden zijn voor de helling van het model. Dit laat zien dat met deze kleine dataset (totaal 30 punten, waarvan 11 uit dataset1 en 19 uit dataset 2) de 3 uitschieters het model gedeeltelijk naar zich toe trekken.



Figuur 4.20 Posterior/bijgesteld levensduur model voor de gecombineerde dataset op basis van waarnemingen voor de volgende model parameters: a) verdichtingsgraad, b) holle ruimte percentage, c) bindmiddel percentage, d) korrelverdeling 2 mm en e) korrelverdeling 63 μm .

De gecombineerde dataset heeft een betere spreiding van punten dan enkel dataset 1 waardoor hieruit ook duidelijkere relaties te vinden zijn. Uit deze relaties volgt dat verdichtingsgraad en holle ruimte percentage als individuele parameter een lineaire relatie hebben met de levensduur. Bindmiddelpercentage op zichzelf heeft te weinig variatie, alle punten zitten geclusterd rond delta is 0, waardoor het model niet goed getraind kan worden op deze data. Korrelverdeling 2 mm en korrelverdeling 63 μm lijken wel iets van een verband te hebben, maar als individuele parameters die het model aansturen zijn ze niet bepalend genoeg.

Op basis van deze resultaten en vooral de omgekeerde relaties, zijn een aantal nadere analyses uitgevoerd en dit wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

4.5.4 Nader onderzoek data-analyse

In deze paragraaf worden een aantal analyses beschreven die zijn gedaan om te verifiëren of de dataverwerking goed is gedaan en de invloed te onderzoeken van kleine aanpassingen op de uiteindelijke resultaten. De analyses die leiden tot een specifiek resultaat worden nader toegelicht in subparagrafen.

Het volgende is nader geanalyseerd:

1. Absolute waarden bekijken in plaats van delta's. Hiermee wordt de invloed van verschillende ontwerpspecificaties verwijderd en kan er een directe relatie gemaakt worden tussen levensduur en oplevering.
2. Uitschieters levensduur onderzoeken. Hiermee wordt onderzocht wat de invloed van deze uitschieters zijn op de uiteindelijke levensduur voorspelling en of ze dus relevant zijn.
3. Samenvoegen van delta's: bitumen op zich zelf verandert niet veel, maar de combinatie van bitumen en korrelverdeling onderzoeken. Dit zorgt voor een analyse op de mastiek als geheel in plaats van de componenten apart.
4. Alternatieve manier voor het bepalen van correlaties tussen de delta's en som van rafeling door middel van generieke machine learning methode. Hiermee kunnen ook hogere orde correlaties onderzocht worden naast de lineaire correlaties die al onderzocht zijn.
5. Verificatie van de aard van het wegontwerp voor de 19 punten: meer specifiek betreft het wegvak een rechtstand of wringende belastingen in een bocht of rotonde, etc.
6. Asfaltontwerp toleranties, beschouwing van de gevonden delta's in vergelijking met de toegestane toleranties.
7. Relaxatie van de boorkern kilometrering, een boorkern voor 300 m laten tellen in plaats van alleen 100 m. Dit kan leiden tot een mogelijke uitbreiding van het aantal 100 m wegvakken die gebruikt kunnen worden voor het levensduur voorspellend model.
8. Voor de 19 punten, die einde levensduur hebben bereikt, expliciet checken of de data uit de pdf goed zijn uitgelezen.

Voor punten 1 t/m 4 zijn de analyses in subparagraaf 4.5.4.1 t/m 4.5.4.4 te vinden.

Punt 5 is onderzocht om te verifiëren of de punten die einde levensduur hebben bereikt afkomstig zijn van rechte stukken wegen of niet. Dit heeft tot de volgende lijst gezorgd:

Weg	wegsoort
N811_RSL_5700_2011	zeer flauw tot flauw bocht
N811_RSR_5700_2011	zeer flauw tot flauw bocht
N811_RSR_6400_2011	recht; maar voorgaande is zeer flauw tot flauw
N811_RSL_6400_2011	recht; maar voorgaande is zeer flauw tot flauw
N811_RSR_4800_2011	zeer flauw tot flauw bocht
N811_RSL_4800_2011	zeer flauw tot flauw bocht
N811_RSR_5500_2011	recht
N811_RSL_5500_2011	recht
N811_RSL_6100_2011	recht
N811_RSR_6100_2011	recht
N811_RSR_5000_2011	recht; maar voorgaande is zeer flauw tot flauw
N330_RSL_18300_2008	recht
N330_RSR_18300_2008	recht
N330_RSR_16300_2008	recht
N834_RSL_4600_2011	recht; maar tussen twee zeer flauw tot flauw
N834_RSR_6100_2011	recht; maar tussen twee zeer flauw tot flauw
N834_RSL_5800_2011	zeer flauw tot flauw bocht
N834_RSR_5800_2011	zeer flauw tot flauw bocht

Hieruit volgt dat alle wegvakken die gebruikt zijn behoren tot rechtstanden en zeer flauwe bochten waar sprake is van doorgaand verkeer en niet van wringend, optrekkend of afremmend verkeer. Bij wringende belastingen is namelijk bekend dat SMA-deklagen een de kortere levensduur hebben dan in rechtstanden. Dit betekent dat type verkeersbelasting geen reden kan zijn voor het vroegtijdig rafelen van de SMA in deze vakken.

Punt 6 is onderzocht om inzicht te krijgen in het bereik van de delta's. De toleranties zijn in Tabel 4.4 te vinden. De delta's die aanwezig zijn in de data vallen binnen de toleranties van de RAW Bepalingen.

Tabel 4.4 Toleranties SMA NL11B / SMA 0/11 type 2 conform RAW 2020

Eigenschap	Afwijking 1 monster	Onthouding van goedkeuring als afwijking groter is dan
Verdichtingsgraad	3,00 % VG>97% en VG < 103%	5,40 % VG< 94,6
Holle ruimte percentage	4,00%	5,40% (max. H.R < 11,4%)
Bindmiddelgehalte	0,6%	0,8%
Korrelverdeling door zeef 2 mm	5% (St. RAW 2005 <4%)	-
Korrelverdeling door zeef 63 µm	2,3% (St. RAW 2005 <1,5%)	-

Punt 7 is onderzocht om met de huidige set aan data te kijken of een mogelijke uitbreiding van het aantal 100 m wegvakken die alle data bevatten (mengselsamenstelling, oplevering en prestatie). Een van de beperkende factor voor het aantal 100 m wegvakken met volledige data is dat een enkele boorkern geldt voor een enkele 100 m wegvak. Door deze regel te relaxeren en een boorkern ook voor de aanliggende 100 m wegvakken te laten gelden, zal dit resulteren in meer wegvakken die alle data bevatten. De methode was om een boorkern 300 m te laten representeren in plaats van enkel de hectometer (100 m) waar de boorkern van is genomen. Deze aanpak heeft tot meer datapunten geleid. Echter het is ook gebleken dat deze aanpak meer vragen oproept dan dat het oplost. Een duidelijk probleem die ontstaat is dat er wegvakken kunnen zijn die aan meerdere boorkernen uit dezelfde inspectiedatum te koppelen zijn. Dit zorgt voor slecht plaatsbare dubbelingen. Hieruit concluderend dat dit geen meerwaarde heeft.

Bij de uitwerking van punt 8 is onderzocht of alle einde levensduur data (19 punten) uit de verschillende pdf's goed zijn overgenomen en of alle data van die punten goed aan elkaar zijn gekoppeld met linked data. Hieruit is gebleken dat alle waarden goed zijn overgenomen.

4.5.4.1 Analyse absolute waarden

Uitgangspunt van het model is dat vooral de delta's tussen ontwerp en uitvoering invloed hebben op de verwachte levensduur. Het is echter ook denkbaar dat juist de absolute waarden van de gerealiseerde boorkernen een zichtbaardere correlatie met de levensduur kan hebben vergeleken met wat de delta's hebben laten zien. Om dit te onderzoeken zijn de absolute correlaties tussen de boorkern waarden en de levensduur in deze paragraaf geanalyseerd. Door informatie uit de ontwerpspecificaties weg te halen, worden er variabelen verwijderd. Dit maakt de analyse eenvoudiger, daarnaast wordt de kans op eventuele fouten kleiner doordat fouten in de ontwerpspecificatie niet meer worden meegenomen.

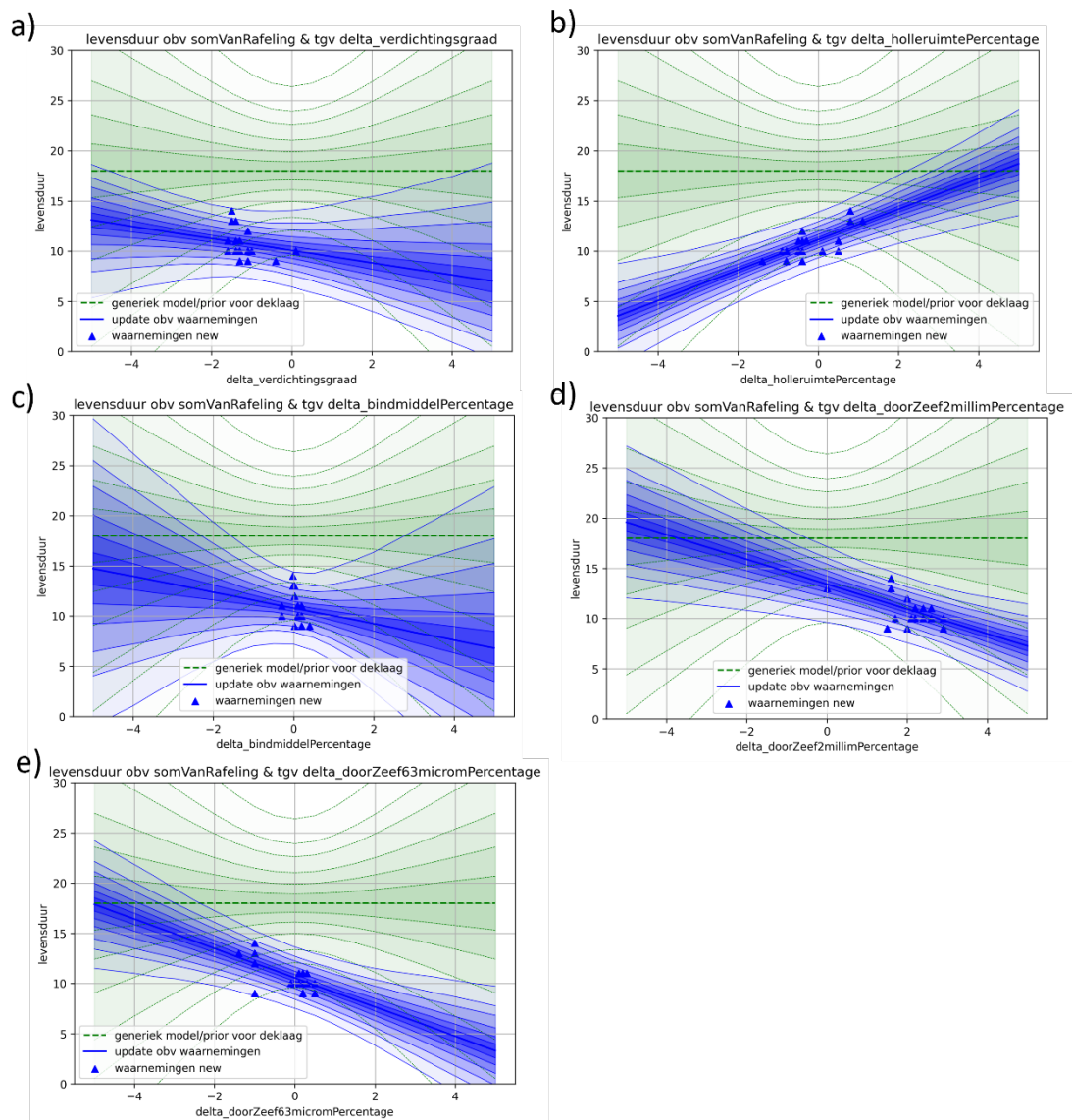
Om de analyse uit te voeren is één algemene referentie specificatie gemaakt waarvan vervolgens een delta wordt berekend. Deze benadering is gekozen om het effect van absolute waarde te onderzoeken met de reeds ontwikkelde "tooling" en geen extra modellen te hoeven bouwen.

De referentiespecificatie is te vinden in Tabel 4.5. Deze referentie is gevormd door gemiddeldes te nemen en dan af te ronden naar de eerste halve getal, verder heeft deze geen betekenis.

Tabel 4.5 Referentie om absolute waarde te simuleren.

Eigenschap	Referentie waarde
Verdichtingsgraad	100
Holle ruimte percentage	6
Bindmiddel percentage	6,5
Korrelverdeling door 2 mm	22
Korrelverdeling door 63 µm	8,5

De resultaten zijn te vinden in Figuur 4.21. Het grootste verschil is te zien in de korrelverdelingen waar de punten een net iets andere spreiding geven dan in Figuur 4.19. Echter, de verschillen in spreiding zorgen niet voor een andere relatie dan die gevonden is in de eerder gepresenteerde deltastudie. Een conclusie die hieruit kan worden getrokken is dat de ontwerpspecificaties niet ver van elkaar liggen en dat de absolute waarde onderzoek dezelfde relatie geeft als de deltastudie.



Figuur 4.21 Posterior/bijgesteld levensduurmodel voor dataset 2 bij een vaste referentie voor alle punten.

4.5.4.2 Drie uitschieters

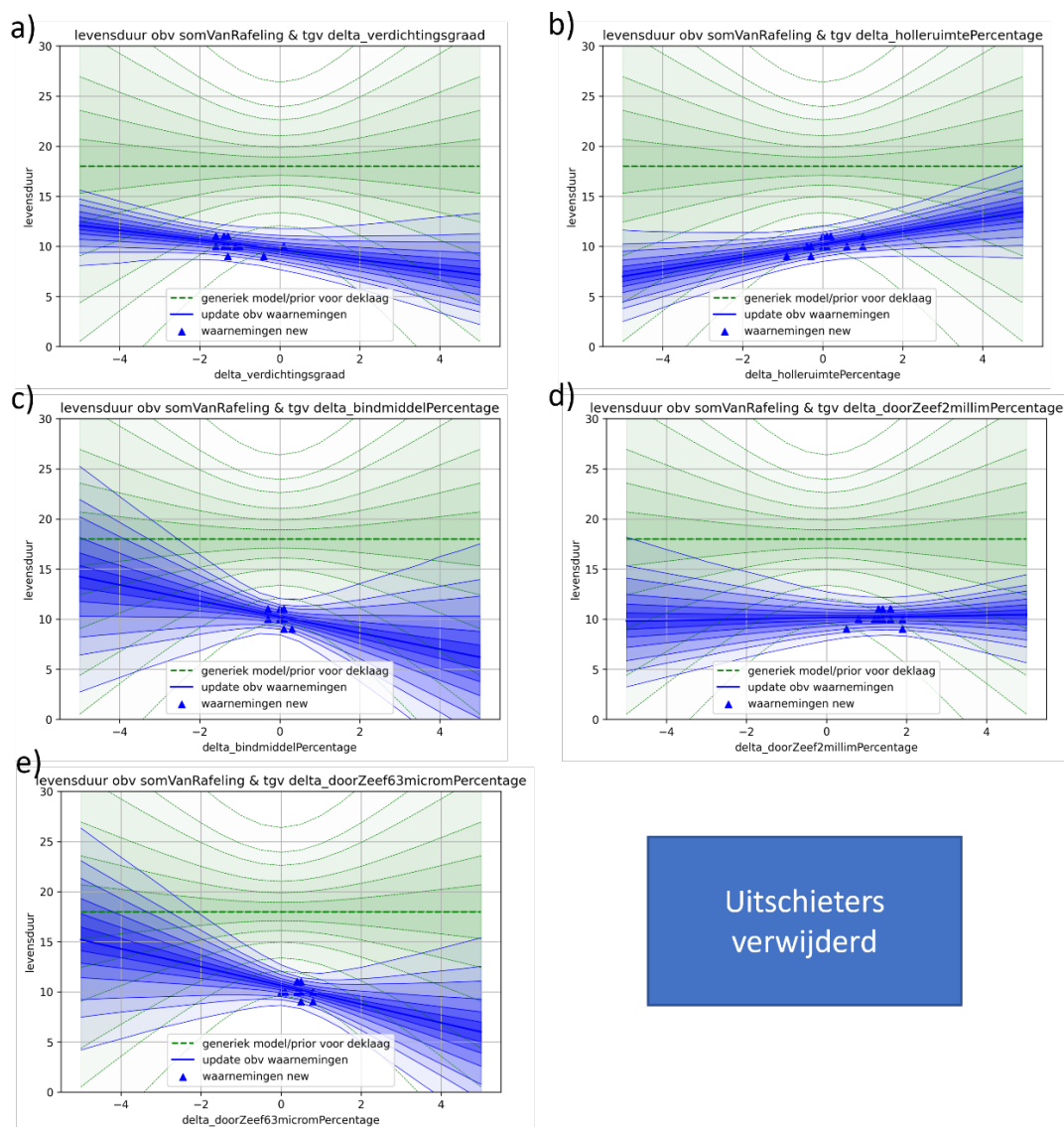
In de N330 is er sprake van drie uitschieters in de data die langere levensduren laten zien, dit betreft de volgende punten:

1. N330, rijstrook links, start km 18300 m, aanlegdatum 2008
2. N330, rijstrook rechts, start km 18300 m, aanlegdatum 2008
3. N330, rijstrook rechts, start km 16300 m, aanlegdatum 2008

Uit de resultaten in Figuur 4.19 is zichtbaar dat de uitschieters een grote invloed hebben op het gekalibreerde model. Voor de uitschieters valt op dat ze een veel hogere holle ruimte

percentage (hoge positieve delta), lagere korrelverdeling 2 mm en veel lagere korrelverdeling 63 μm (lage negatieve delta) hebben vergeleken met de andere punten.

Voor illustratieve doeleinden is de analyse gedaan waarbij de punten verwijderd zijn, zie Figuur 4.22. Het moet nadrukkelijk vermeld worden dat dit gedaan is zonder dat deze verwijdering gerechtvaardigd is en daarmee dit dus fictieve (“wat als”) resultaten zijn geworden. Hieruit volgt dat de helling van het gekalibreerde model veel horizontaler is voor holle ruimte percentage, korrelverdeling 2 mm en 63 μm . Dit zou betekenen, dat deze delta's individueel weinig invloed hebben op de levensduur. Verder zijn de modellen gebaseerd op verdichtingsgraad en bindmiddel percentage nauwkeuriger geworden, omdat de spreiding in de y-as kleiner is geworden. Hiermee wordt bevestigd dat die uitschieters grote invloed hebben op het model en dat het dus erg belangrijk is om na te gaan of deze data wel of geen onderdeel van de analyse zou moeten zijn.



Figuur 4.22 Posterior/bijgesteld levensduur model voor dataset 2, waarbij uitschieters verwijderd zijn.

Met de hoeveelheid data, die er op dit moment is, is het niet te bepalen of deze uitschieters wel of geen onderdeel van de analyse moeten zijn. Het is namelijk niet bekend dat een bijzonder mengsel is gebruikt welke niet past bij deze analyse,. Het verzamelen van meer data is op dit moment de enige optie omdat met meer data geverifieerd kan worden of de uitschieters foutief zijn (het blijven uitschieters) of juist correct zijn omdat er worden meer datapunten rond het gebied gevonden).

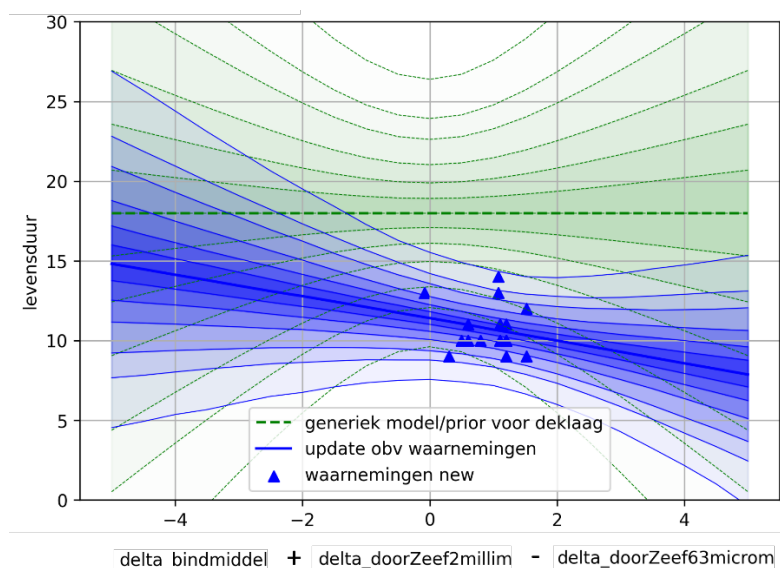
Als blijkt dat deze punten geen uitschieters zijn, dan verdient het aanbeveling om relatie tussen een hoog holle ruimte percentage en lagere waardes voor korrelverdeling 2 mm en 63 μ m te onderzoeken zodat dit in de prior kan worden verwerkt.

4.5.4.3 Samenvoegen delta's

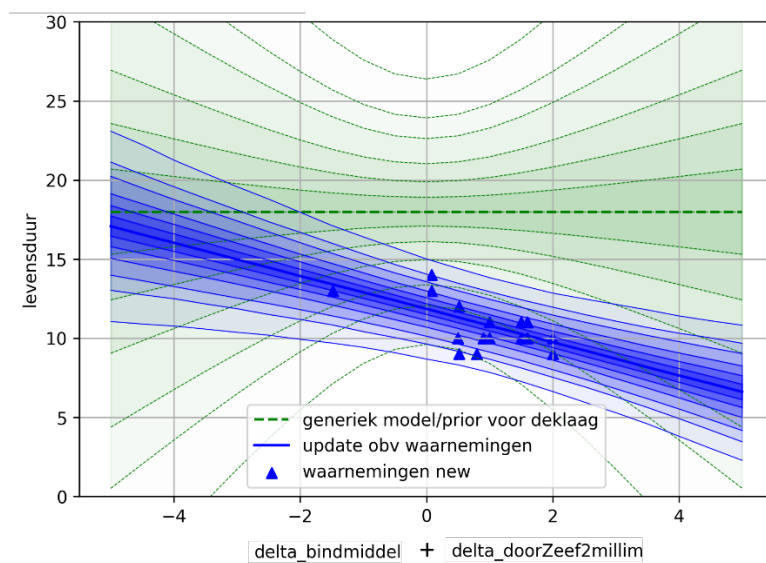
Uit de resultaten van Figuur 4.19 is goed te zien dat er in bindmiddelpercentage bijna geen delta aanwezig is. Dit is ook wat er uit domeinkennis bekend is, namelijk dat bindmiddelpercentage goed wordt nagestreefd aan de hand van de ontwerpspecificatie. Doordat er bijna geen delta in bindmiddelpercentage zit, kunnen er mogelijk betere modelresultaten zijn als ervoor wordt gekozen om bindmiddelpercentage en korrelverdelingen samen te nemen als een gecombineerde delta. Hiermee wordt er een directere link gelegd tussen mastieksamenstelling en levensduur. De resultaten zijn te vinden in Figuur 4.23, Figuur 4.24 en Figuur 4.25 voor $[\Delta \text{ bindmiddel} + \Delta 2 \text{ mm} - \Delta 63 \mu\text{m}]$, $[\Delta \text{ bindmiddel} + \Delta 2 \text{ mm}]$ en $[\Delta \text{ bindmiddel} + \Delta 63 \mu\text{m}]$ respectievelijk.

In Figuur 4.24 en Figuur 4.25 heeft de kleine spreiding van delta in het bindmiddel-percentage de voorspelling voor door zeef 2 mm en 63 μ m naar een positievere delta verschoven (naar rechts in de figuur) t.o.v. Figuur 4.19. In bindmiddel + 2 mm zijn er nu een paar punten met een delta van 2. Voor bindmiddel + 63 μ m zijn er nu wat meer negatieve delta punten. Echter, de globale trend is niet veranderd ten op zichte van wat er in Figuur 4.19 geconstateerd is. Dit komt ook overeen met de verwachting uit de data zijde; aangezien de delta waardes van bindmiddelpercentage klein zijn, zal het optellen van deze delta bij een andere delta niet voor erg grote veranderingen in delta waarden moeten zorgen.

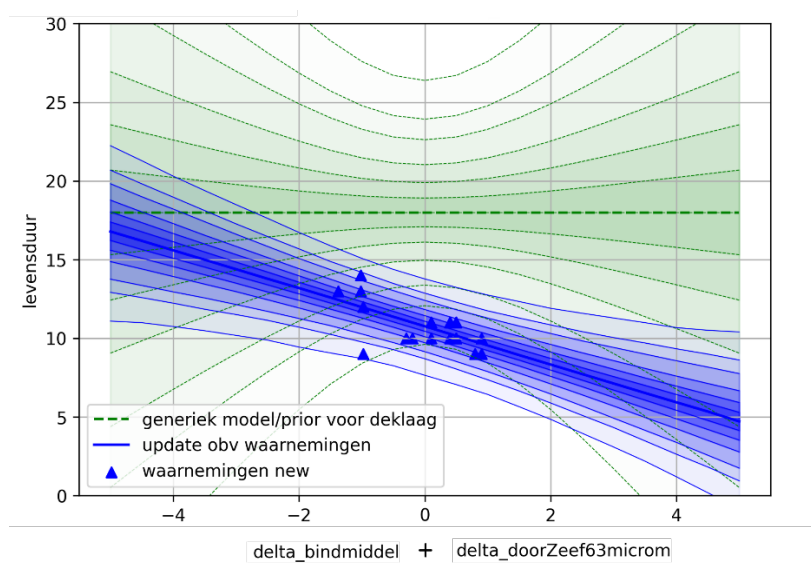
Voor Figuur 4.23 geldt dat de punten in de delta combinatie nu vooral in het positieve gedeelte zitten tussen 0 en 2 delta. In de eerste instantie is dit niet wat er verwacht wordt, bindmiddel zit vooral rond delta 0, dus die heeft niet veel invloed op de spreiding van de punten. Voor korrelverdeling 2 mm zitten de punten ook vooral in het positieve gedeelte tussen 0 en 2 delta. Van de twee hiervoor genoemde eigenschappen worden de delta's van 63 μ m eraf gehaald, dus de negatieve delta's hebben een positiever effect en de positieve delta's hebben een negatiever effect. Voor 63 μ m geldt ook dat de meeste punten positief zijn tussen 0 en 1 delta. Met dit gegeven wordt er verwacht dat de punten in de combinatie van alle drie meer richting de delta is 0 zou gaan en ook meer negatieve delta's tevoorschijn zouden komen. De relatie voor deze delta combinatie is nu omgekeerd, dus meer $[\Delta \text{ bindmiddel} + \Delta 2 \text{ mm} - \Delta 63 \mu\text{m}]$ zorgt voor een lagere levensduur. Voor deze combinatie is nog geen verklaring, het verdient aanbeveling om deze relatie vanuit domeinkennis verder te onderzoeken.



Figuur 4.23 Posterior/bijgesteld levensduur model voor dataset 2 voor modelparameter $[\Delta \text{ bindmiddel} + \Delta 2 \text{ mm} - \Delta 63 \mu\text{m}]$.



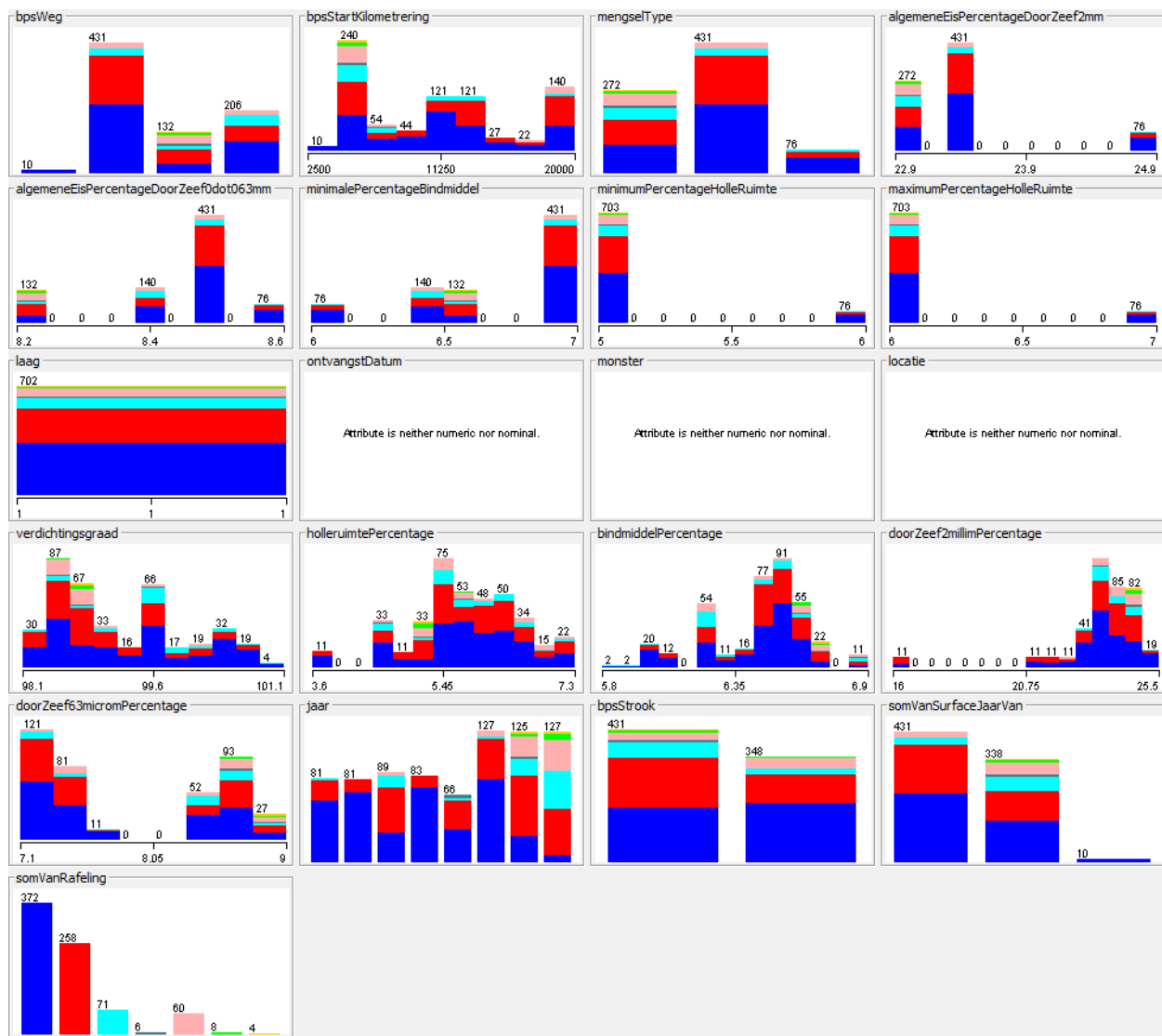
Figuur 4.24 Posterior/bijgesteld levensduur model voor dataset 2 voor modelparameter $[\Delta \text{ bindmiddel} + \Delta 2 \text{ mm}]$.



Figuur 4.25 Posterior/bijgesteld levensduur model voor dataset 2 voor modelparameter [Δ bindmiddel + Δ 63 μm].

4.5.4.4 Machine Learning

Met generieke Machine Learning (ML, met behulp van de open source Weka 3.8.6 software)) zijn de verwachte correlaties tussen levensduur en de som van rafeling getoetst. Echter ook hier zijn deze niet mee gevonden.



Figuur 4.26 Resultaten analyse Machine Learning

In Figuur 4.26 zijn de som van rafeling scores 1 tot en met 7 weergegeven met een kleur (zie sub-figuur linksonder). In de sub figuren daarboven is in geen van de subfiguren een duidelijke trend zichtbaar. Dit betekent dat ook met ML geen correlatie is gevonden tussen de levensduur en som van rafeling scores. .

4.6 Conclusies en aanbevelingen

4.6.1 Conclusies

Ondanks dat er meer data beschikbaar is gemaakt is er nog steeds te weinig data om een voldoende betrouwbaar levensduurmodel voor SMA te bouwen. Er is veel data van de provincie Gelderland verzameld opgeschoond maar doordat veel data niet gekoppeld kan worden, zijn er in totaal maar 40 datapunten beschikbaar. In de analyses is gebruik gemaakt van zowel dataset 1 die in 2022 is gemaakt, en dataset 2 die in 2023 is gemaakt. Indien uitspraken worden gedaan over deze datasets samen, wordt gesproken van gecombineerde data.

Dataset 2 is gegenereerd door het uitlezen van een groot aantal pdf-bestanden. De tool om de pdf-bestanden van de 24 bestekken om te zetten naar één Excel-bestand met de gewenste structuur is aangepast en succesvol toegepast om invoer voor het levensduurmodel te genereren. In dit Excel-bestand wordt per boorkern 1 regel gebruikt om alle relevante bijbehorende eigenschappen te beschrijven. Bij het uitlezen van de pdf-bestanden zijn er 1818 boorkernen met verschillende mengseltypes gevonden. Daarvan zijn 460 boorkernen met het mengsel SMA 0/11 gevonden, de overige boorkernen betreffen andere asfaltmengsels. Voor 160 van deze 460 boorkernen is geen “project omschrijving”, “datum monstername” en “ontvangst monster” gevonden (BLANKS). Er is geconstateerd dat deze gegevens voor een aantal boorkernen wel in de pdf-bestanden staan, maar dat deze niet zijn overgenomen in de conversie als gevolg van een slechte kwaliteit van de scans door ofwel een gebrek aan resolutie of dat de scan scheef is gemaakt. Hierdoor blijven er 300 bruikbare boorkernen over die gebruikt worden semantische linked data.

De verkregen data uit het Excelbestand zijn vastgelegd in een semantisch ‘Linked Data (LD)’ model, waarbij de juiste gegevens van een boorkern en prestatie van een wegvak zijn gekoppeld aan een hectometervak. Hierdoor is het in de toekomst makkelijker aan te sluiten bij datastructuren die ook van deze LD technologie gebruik maken zoals het ‘Pavement Informatie Model (PIM)’ of andere toepassingen die gebruik maken van een breder gedragen Wegenbouw OTL. Uit de LD transformatie volgen 158 boorkernen, dat overeenkomt met 79 wegvakken (100 m) die bruikbaar zijn voor de analyse.

Van de 79 wegvakken (100 m) van dataset 2 die gekoppeld konden worden zijn er 19 die einde levensduur hebben bereikt. Deze vakken hebben in verhouding tot de populatie een relatief korte levensduur van tussen 9 en 11 jaar, terwijl de overige 60 punten waarschijnlijk uiteindelijk een langere levensduur zullen hebben. Immers de gemiddelde levensduurverwachting is 18 jaar. De spreiding in de data van dataset 2 is iets beter dan die van dataset 1 (N317). Echter, voor veel van de eigenschappen waar naar wordt gekeken is ook de data in dataset 2 nog steeds te veel geclusterd om een goede basis voor een model te vormen. Daarnaast zijn 40 datapunten (21 uit dataset 1 en 19 uit dataset 2) erg weinig voor een analyse van correlaties tussen meerdere parameters. De spreiding over de totale oplossingsruimte van de 60 datapunten uit dataset 2, die op dit moment nog niet het moment ‘einde levensduur’ hebben bereikt, is een stuk beter. Het is daarom de moeite waard om deze analyse nogmaals uit te voeren als alle 79 wegvakken het moment einde levensduur hebben bereikt.

De gevonden correlaties in dataset 2 zijn veel minder sterk voor de eigenschappen verdichtingsgraad, holle ruimte percentage en bindmiddel percentage dan de correlaties voor dataset 1. Voor veel van de gevonden correlaties voor deze eigenschappen zijn zelfs de tekens omgedraaid vergeleken met dataset 1. De lage correlaties kunnen deels verklaard worden uit het rafelingsgedrag. In dataset 1 lijkt het gedrag van de rafeling over de tijd lineair te zijn, terwijl dit in dataset 2 meer exponentieel verloopt. Een lineair model voor de rafelingsontwikkeling zal een exponentieel gedrag gelimiteerd kunnen beschrijven.

De dataverificatiestappen hebben geleid in vertrouwen in de automatische dataverwerking. Daarnaast is ook gebleken dat de datapunten afkomstig zijn van wegvakken overwegend in rechtstanden. Dit betekent dat type verkeersbelasting geen reden kan zijn voor het vroegtijdig rafelen van de SMA in deze vakken.

4.6.2 Aanbevelingen

De aanbevelingen ten aanzien van het ontwikkelde levensduurmodel voor SMA, zijn hieronder puntsgewijs opgesomd.

1. Beschouwen van een andere aanpak om de levensduur te modelleren.
De basis voor het levensduurmodel is nu de delta tussen ontwerp en oplevering, waarbij op verschillende manieren gezocht is naar betrouwbare correlaties, maar die niet eenduidig zijn gevonden. Een andere insteek zou kunnen zijn om een levensduur-model te maken o.b.v. parameters van opleveringscontrole en metingen en niet op basis van het verschil tussen mengselontwerp en oplevering. Op deze manier worden we minder afhankelijk van de beschikbaarheid van ontwerp-specificaties. Daarnaast hebben de analyses laten zien dat de delta's voor enkele parameters maar beperkt zijn, omdat de mengselspecificaties ook goed worden gerealiseerd. Het is ook mogelijk het model uit te breiden met andere parameters van SMA 11 deklagen wat de rafelings-ontwikkeling beter beschrijft. Dit kunnen andere parameters zijn, parameters met een andere relatie dan een deltamodel, een heel ander probabilistisch model, enz.
2. Verbeteren van het model door validatie met meer data van SMA 11B wegvakken door:
 - a. Meer prestatiedata te verzamelen van alle vakken die nu in de dataset zitten (bijvoorbeeld de komende circa 5 jaar). Wanneer de nu nog goede wegvakken (rafelingscijfer 1-3) einde levensduur bereiken kan er een nieuwe analyse worden gedaan op alle 79 wegvakken in plaats van de 19 wegvakken die tot nu toe einde levensduur hebben behaald. Dit is relatief een eenvoudige analyse aangezien veel voorwerk al is gedaan (mengsel en ontwerp data al in LD, modelvorming staat klaar). Daarnaast is het ook waardevol om handmatig de blanks uit de pdf-conversie te repareren, aangezien dit de dataset waarschijnlijk met 30% vergroot.
 - b. Meer prestatiedata (mengselontwerp, oplevering, prestatie) van ander andere wegen met SMA 11B te verzamelen, bijvoorbeeld van Gelderland of andere provincies. Hierbij is het van belang vooraf te verifiëren welke variatie er aanwezig is in de mengseleigenschappen, opdat wordt geïnvesteerd in het ontsluiten van datasets die echt bijdragen aan het begrijpen van de schadeontwikkeling en de betrouwbaarheid van de voorspelling van de levensduur.
 - c. Meer prestatiedata van 'slechte' SMA11B vakken met grotere afwijkingen te vinden om het onderscheidend vermogen van het levensduurmodel te verbeteren. De gekozen 5 parameters van mengseleigenschappen zijn niet onderscheidend genoeg om de levensduur te voorspellen. De afwijkingen blijken te passen binnen de toleranties van de Standaard RAW bepalingen en zijn daarmee niet sprekend genoeg om verschillen van 5 jaar in levensduur te verklaren.
3. Verbeteren van het levensduurmodel door toevoegingen/aanpassingen te doen, zoals:
 - a. Toevoegen analyse "goede" wegvakken (rafelingscijfer ≤ 4). Het model gebruikt nu alleen de einde levensduur wegvakken (rafelingscijfer ≥ 4). Omdat het huidige model nu wordt gekalibreerd aan de hand van alleen deze wegvakken die einde levensduur hebben bereikt kan dit leiden tot een

ongewenste bias in de voorspellingen. In dataset 2 is duidelijk dat er nog veel goede vakken zijn (rafelingscijfer 1-3) waar niets mee wordt gedaan in het model. Een toevoeging zou kunnen zijn om het model ook de goede vakken mee te laten nemen in de analyse. Door extrapolatie kan dan einde levensduur bepaald worden voor de goede wegvakken.

- b. Aanpassing relatie rafeling – levensduur. I. Er wordt nu uitgegaan van een lineaire relatie tussen rafeling en levensduur, maar in dataset 2 is juist een exponentiële relatie gevonden voor de rafeling. Het verdient aanbeveling om het model te laten werken met een exponentiële relatie of een combinatie van lineair en exponentieel.
 - c. Model laten werken op meerdere delta's tegelijkertijd. Uit de resultaten volgt dat sommige eigenschappen niet eenduidig genoeg zijn om het model te kalibreren. Een combinatie van deze eigenschappen kan wel een betere aanduiding geven. Bij combineren moet gedacht worden aan bijvoorbeeld optellen of vermenigvuldigen.
 - d. Toevoegen van andere invloedsparameters aan het model zoals bijvoorbeeld aanlegcondities, verkeersbelastingen, weers/klimaatinvloeden.
 - i. steenverlies (periode 2006-2018) bepaald m.b.v. RSAT-test op laboratoriumbereide proefstukken en/of proefstukken uit het veld;
 - ii. verkeersbelasting in periode 2006-heden: percentage vrachtverkeer en aslastverdelingen zijn hierbij maatgevend;
 - iii. Boorkernen verrichten in een aantal vakken die al einde levensduur hebben bereikt en de mastieksamenstelling bepalen en vergelijken met de ontwerpsamenstelling van de mastiek. Vervolgens nagaan in hoeverre sprake is van een vrij vette mastiek (sterk overvulde mastiek) of een schrale mastiek (ondervulde mastiek). Een schrale mastiek zou kunnen verklaren waarom de huidige verwerkte SMA rafelingsdata ruim onder de gemiddelde levensduur van 18 jaar ligt. Wellicht kan worden gebruik gemaakt van boorkernen die non-destructief worden verricht voor andere onderzoeken (teerhoudendheid, draagkracht, enz.).
4. Objectiviteit verbeteren van de beoordelingsmethode.
Rafelingscijfers worden in de praktijk toegekend door een inspecteur op basis van een visuele beoordeling van het steenverlies. Een rafelingscijfer ≥ 4 betekent einde levensduur. De overgang van 3 naar 4, is hierdoor erg belangrijk. Aanbevolen wordt de beoordeling van het steenverlies objectiever vast te stellen m.b.v. bijvoorbeeld LCMS-metingen. Hierdoor wordt de data getalsmatig, in plaats van een subjectieve verdeling over klassen en ontstaat meer resolutie. Dit betekent bijvoorbeeld dat de kans kleiner wordt dat een beoordeling verspringt van een klasse 3 naar een klasse 4, als gevolg van een andere inspecteur.

5 Stroefheid

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de ontwikkelingen met betrekking tot een levensduurmodel voor stroefheid worden beschreven. Een samenvattende beschrijving van stroefheidsmodellen is beschikbaar in [7]. Een verslag van de ontwikkelingsopties en stand van zaken in LAM-stroefheid is in 2020 in een separaat Kiwa-KOAC-rapport vastgelegd [8]. In 2020 is bovendien door derden een validatie uitgevoerd van de oorspronkelijke stroefheidsmodellen op inmiddels uitgebreidere datasets [9], [10]. Dit leidde o.a. tot aangepaste coëfficiënten in de bestaande modellen voor ZOAB en DAB en bovendien tot coëfficiënten voor een uitgebreidere set van deklaagtypen (ZOAB+, ZOABTW, SMA ...). De voornoemde onderzoeken zijn binnen LAM als basis gebruikt voor een implementatie van stroefheidsmodellen op basis van een Bayesiaanse modeleringstechniek. De ontwikkelingen en eigenschappen van deze stroefheidsmodellen staan beschreven in [1] en zijn tevens gepresenteerd op de CROW Infradagen 2022, [11]. In fase 5 van LAM zijn deze stroefheidsmodellen opgenomen in de BIM applicatie BIM-PROVESY van Rijkswaterstaat. In paragraaf 5.3 zal deze applicatie verder worden geïllustreerd.

In [7] wordt binnen LAM al een voornemen geopperd om voor stroefheid niet alleen de gebruiksfase te beschouwen maar een link te leggen naar de ontwerpfase. Dit kan worden ingevuld door in de ontwerpfase de stroefheid van een asfaltmengsel te bepalen met behulp van een Friction After Polishing (FAP) test (EN 12697-49:2022) die in een laboratorium kan worden uitgevoerd. Essentie van deze proef is dat een asfaltkern wordt gepolijst door het laten passeren van rubberen wieltes terwijl water met polijstmiddel op het oppervlak wordt aangebracht. Deze belasting wordt aangebracht in drie cycli van 90.000 polijstovergangen door de rubberen wieltes waarbij na elke cyclus de stroefheid van het oppervlak wordt gemeten. Deze proef bepaald dus de initiële stroefheid van een asfaltmengsel en de snelheid waarmee deze degradeert onder invloed van versnelde belasting.

Het gebruik van de FAP-test in de ontwerpfase is o.a. al in [12] onderzocht en leidde tot de bevinding dat de FAP-test in staat is om goed presterende wegvakken te onderscheiden van slecht presterende wegvakken. Echter, is deze bevinding gestoeld op relatief weinig data en bovendien zijn in [12] voornamelijk ZOAB deklagen beschouwd, met daarnaast enkele AC Surf (DAB) deklagen.

Reden om dit binnen LAM stroefheid in 2023 op te pakken is om te onderzoeken of meer data beschikbaar is waarmee de bestaande kennis wordt bevestigd maar waarmee mogelijk ook:

- Een betere relatie wordt gelegd tussen stroefheid voorspellende modellen vanuit ontwerp naar gebruiksmodellen.
- Deze relaties ook voor andere deklagen types geldig zijn of waar mogelijk specifiek kunnen worden gemaakt.

Nadat in paragraaf 5.2 is ingegaan op stroefheid op basis van FAP-data uit 2023, wordt in paragraaf 5.3 de applicatie in BIM-PROVESY besproken voor het voorspellend model in gebruiksfase. Het hoofdstuk wordt afgesloten met paragraaf 0 conclusies.

5.2 Stroefheid op basis van FAP-data

5.2.1 Dataverzameling

TNO heeft contact opgenomen met markt- en overheidspartijen voor het verzamelen van FAP-data. TNO was op zoek naar zowel FAP-data vanuit boorkernen uit de weg (oplevering) als vanuit FAP-metingen van op het lab vervaardigde asfaltmengsels (ontwerpfase). Naast de resultaten van de FAP-test, heeft TNO ook gevraagd om onderstaande aanvullende informatie (de **dikgedrukte** informatie is daarbij kritiek, indien deze informatie ontbreekt draagt de data niet bij aan de modelontwikkeling):

Indien het een boorkernen uit de weg betreft:

- **BPS (wegnaam, baan, strook)**
- **Km van boring (of hectometervak)**
- **Boordatum**
- **Type mengsel (Dicht/Open)**
- **Soort mengsel (AC Surf/SMA/ZOAB/DZOAB/2L-ZOAB)**
- Aanlegjaar van de weg
- Nominale korrelmaat
- Type steenslag
- PSV-waarde steenslag

Indien het de ontwerpfase betreft:

- **BPS (wegnaam, baan)**
- **Hectometervak**
- **Type mengsel (Dicht/Open)**
- **Soort mengsel (AC Surf/SMA/ZOAB/DZOAB/2L-ZOAB)**
- **Aanlegjaar van de weg** (*correleren met aanvangsstroefheid*)
- Nominale korrelmaat
- Type steenslag
- PSV-waarde steenslag

Hieronder staan de markt- en overheidspartijen die TNO van FAP-data hebben voorzien (in alfabetische volgorde):

- AsfaltNu
- Boskalis
- Dura Vermeer
- Mourik
- Rijkswaterstaat

5.2.2 Verkenning FAP-data

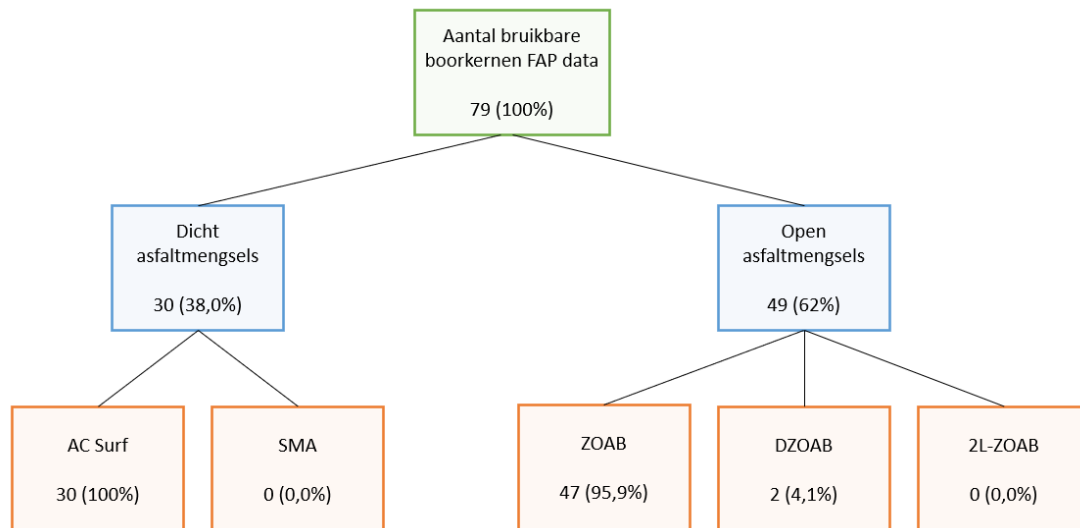
Als resultaat van de dataverzameling zijn in totaal 146 FAP-datasets binnengekomen waarvan 113 (77,4%) FAP-data van boorkernen uit de weg betreffen en 33 (22,6%) FAP-data van de ontwerpfase in het lab zijn.

In Tabel 5.1 zijn de aantallen FAP-data weergegeven die beschikbaar zijn van boorkernen uit de weg, met daarbij vermeld welke extra informatie (zoals benoemd in sectie 5.2.1) bekend is.

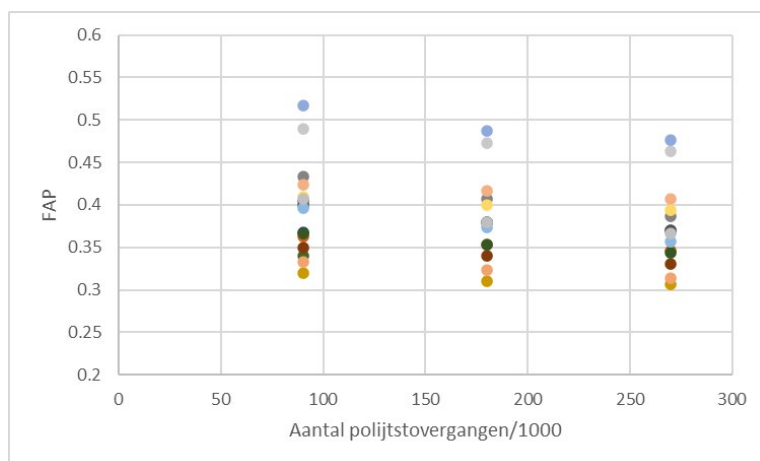
Tabel 5.1 Aantal boorkernen uit de weg met bekende informatie.

Informatie	Aantal boorkernen FAP-data	% van de totale boorkernen FAP-data (113)
Wegnaam	113	100,0
Baan	113	100,0
Strook	97	85,8
Km van boring (of vak hectometer)	113	100,0
Boordatum	92	81,4
Type mengsel (Dicht/Open)	113	100,0
Soort mengsel (AC Surf/SMA/ZOAB/DZOAB/2L-ZOAB)	104	92,0
Aanlegjaar van de weg	77	68,1
Nominale korrelnat	104	92,0
Type steenslag	15	13,3
PSV-waarde steenslag	21	18,6

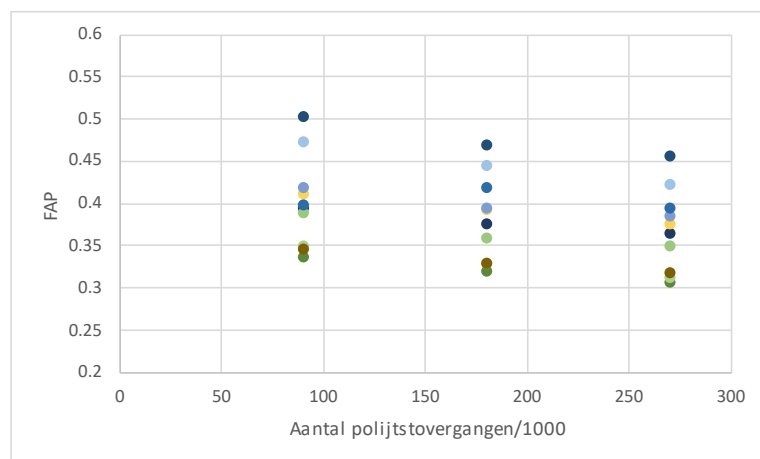
Zoals aangegeven in 5.2.1, zijn FAP-data bruikbaar voor modelvorming als er informatie beschikbaar zijn over BPS (weg naam, baan, strook), Km van boring (of vak hectometer), boordatum, type mengsel en soort mengsel. Volgens deze definitie, zijn van de 113 boorkernen 79 (69,9%) bruikbaar. De verkenning van wat voor type en soort asfaltmengsels in dit resterende aantal van 79 zitten, is weergegeven in [Figuur 5.1](#).

**Figuur 5.1** Type en soort asfaltmengsels binnen de bruikbare boorkernen uit de weg.

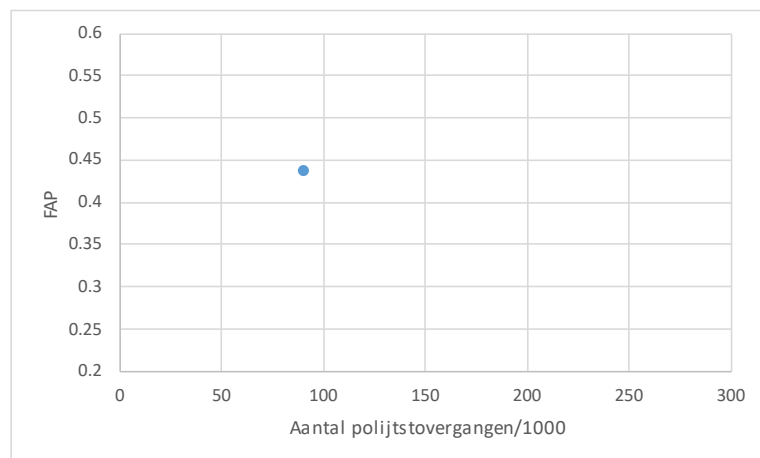
De boorkernen bestaan uit sets van 2 à 3 per locatie waarna de afzonderlijke FAP-meetwaarden worden gemiddeld per set. Ter illustratie worden deze gemiddelde FAP-waarden als functie van het aantal polijstovergangen getoond in [Figuur 5.2](#). Voor ZOAB resulteert dit in 16 reeksen, voor AC Surf in 10 reeksen en voor DZOAB in 1 waarde (hier is alleen FAP90 bepaald).



(a):
ZOAB



(b):
AC Surf



(c):
DZOAB

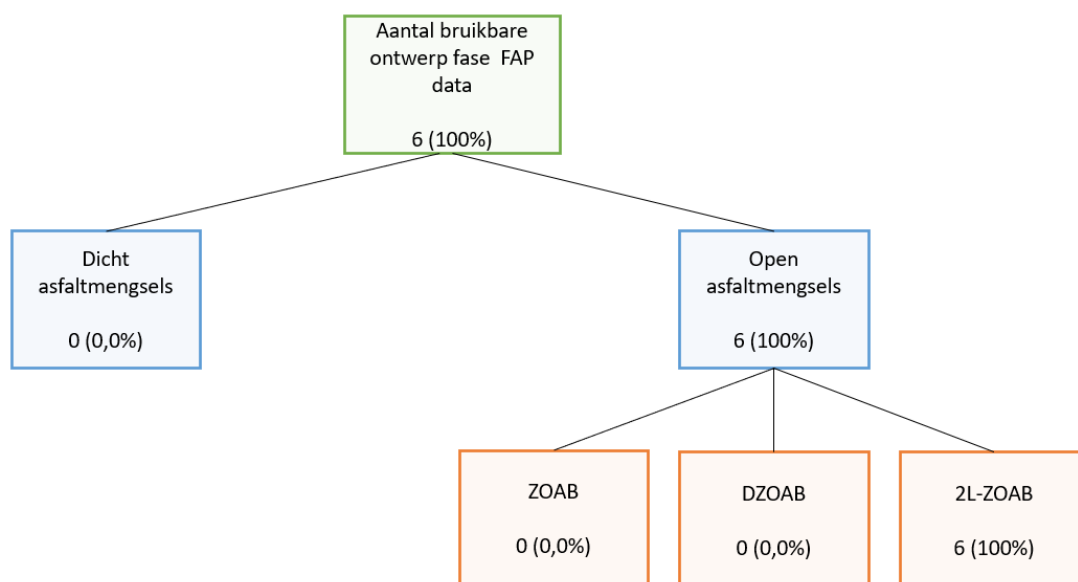
Figuur 5.2: Meetreeksen met gemiddelde FAP-waarde (boorkernen) voor respectievelijk ZOAB (a), AC SURF (b) en DZOAB (c).

In Tabel 5.2 zijn de aantallen FAP-data weergegeven vanuit de **ontwerpfase**, waarvan de extra informatie (zoals die in sectie 5.2.1 benoemd zijn) bekend zijn.

Tabel 5.2 Aantal ontwerpfase FAP-data met bekende informatie.

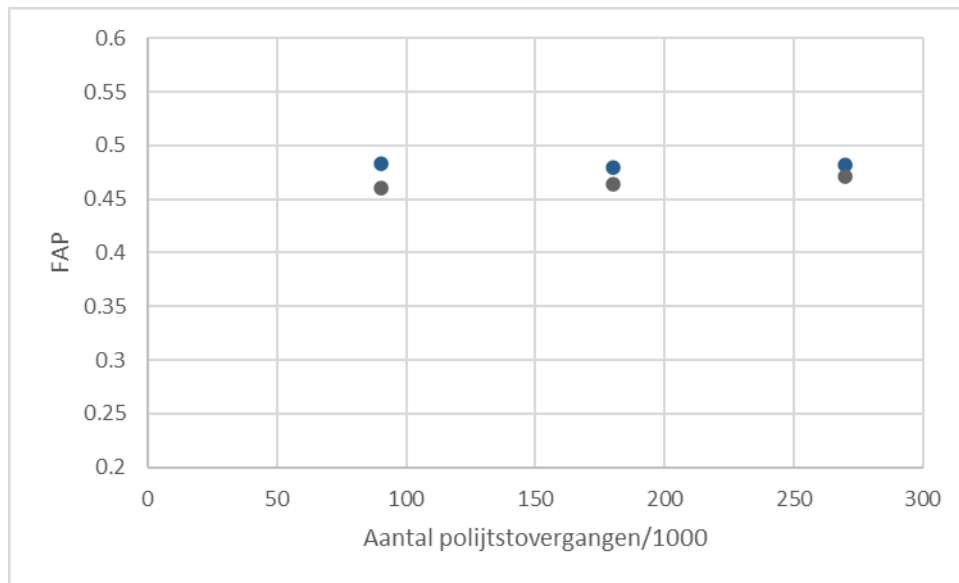
Informatie	Aantal boorkernen FAP-data	% van de totale ontwerp fase FAP-data (33)
Wegnaam	12	36,4
Baan	6	18,2
Vak hectometer	6	18,2
Type mengsel (Dicht/Open)	33	100,0
Soort mengsel (AC Surf/SMA/ZOAB/DZOAB/2L-ZOAB)	33	100,0
Aanlegjaar van de weg	6	18,6
Nominale korrelnat	33	100,0
Type steenslag	33	100,0
PSV-waarde steenslag	6	18,6

De ontwerpfase FAP-data worden als bruikbaar gezien, indien er informatie beschikbaar is over BPS (weg naam, baan), vak hectometer, type mengsel, soort mengsel en aanlegjaar van de weg. Volgens deze definitie, zijn van de 33 ontwerpfase FAP-data 6 (18,2%) bruikbaar voor de modelvorming. De verkenning van wat voor type en soort asfalmengsels in dit resterende aantal van 6 zitten, is weergegeven in [Figuur 5.3](#)



Figuur 5.3 Type en soort asfalmengsels binnen de bruikbare ontwerpfase FAP-data.

De boorkernen bestaan uit sets van 2 à 3 per locatie waarna de afzonderlijke FAP meetwaarden worden gemiddeld per set. Ter illustratie worden deze gemiddelde FAP waarden als functie van het aantal polijstovergangen getoond in [Figuur 5.4](#) (de 6 boorkernen resulteren dan in 2 meetreeksen).



Figuur 5.4: Twee meetreeksen met gemiddelde FAP waarde (ontwerpfase, 2L-ZOAB).

5.2.3 Ontwikkeling stroefheidsmodellen op basis van FAP

De verkenning van de FAP-data in paragraaf 5.2.2 laat zien dat er nog steeds weinig data beschikbaar is om verdere ontwikkelingen in de modelvorming op te baseren. Van de beschikbare data is bovendien een groot deel al gebruikt in 2013, [12], leidend tot de in de inleiding genoemde bevinding dat de FAP-test in staat is om goed presterende wegvakken te onderscheiden van slecht presterende wegvakken voor ZOAB en AC Surf (DAB) deklagen. Daarnaast vallen ook nog een aantal datasets af wanneer een relatie gelegd moet worden tussen FAP-testen en daadwerkelijke reeksen van stroefheidsmetingen in gebruik: stroefheidsmetingen van voor 2013 blijken niet beschikbaar.

Besloten is om de weinige data nog niet verder te gebruiken voor modelontwikkeling, c.q. uitbreiding. De reden hiervoor is dat de verwachting is dat in relatie tot de inspanning het te weinig toevoegt aan de bestaande kennis.

Wel is de overtuiging dat FAP-testen een goede voorspellende waarde hebben voor de stroefheid. Deze proeven kunnen in de ontwerpfase op mengselniveau worden gedaan. Dit betekent dat het handvatten biedt om stroefheid functioneel te bepalen in de ontwerpfase in plaats van het bindend voorschrijven van specifieke bouwstoffen. Een dergelijke functionele aanpak kan kansen bieden in combinatie met de wens van de sector om in de toekomst meer hergebruik in deklagen toe te staan om te voldoen aan duurzaamheidseisen. Van niet al het gerecyclede asfalt is bekend welk steenslagtype erin zit en of dit mogelijk al gepolijst is waardoor de stroefheid is afgenomen. Het zou zonde zijn om op basis van deze reden grote delen van gerecyclede asfalt uit deklagen uit te sluiten voor hoogwaardige toepassingen. Om een tool te hebben voor het bewaken van stroefheid in een meer circulaire keten is het daarom de aanbeveling om meer onderzoek hierop uit te voeren en meer data hiervoor te verkrijgen en te delen. Doel - maar ook winst - is dan om de voorspelling van de stroefheidontwikkeling voor deze mengsels met asfalt van diverse herkomst met de FAP-test betrouwbaar te kunnen doen.

5.3 LAM-Stroefheidsmodel en -Applicatie

Het binnen LAM ontwikkelde model voor de gebruiksfase, [1, 11], is in 2023 beperkt doorontwikkeld en als python applicatie opgeleverd aan RWS om opgenomen te worden in de BIM-PROVESY tool.

De python applicatie zelf heeft 3 modaliteiten om vanuit BIM-PROVESY aangeroepen te worden:

- Het verwerken van een invoerfile met stroefheidsdata (meetreeksen over jaarlijkse meetcampagnes) naar voorspellende trendlijnen voor de betreffende locaties.
- Gegeven de berekende trendlijnen, het maken van figuren (*.png) met deze trendlijnen.
- Gegeven de berekende trendlijnen, het beschikbaar maken van noodzakelijk data zodat figuren interactief binnen BIM-PROVESY kunnen worden gegenereerd.

Alle drie modaliteiten werken met input- en outputfiles in json-formaat.

Bij het verwerken van de tijdsreeksen berekent en bepaalt de python applicatie:

- Trendlijnen voor het verloop van de stroefheid als functie van tijd of de cumulatieve verkeersintensiteit (voertuigpassages).
- Trendlijnen bestaan uit een gemiddelde (verwachtingswaarde) lijn en bandbreedte lijnen, met de buitenste lijnen overeenkomend met 1% onderschrijdingskans respectievelijk de 99% onderschrijdingskans (=1% overschrijdingskans).
- Voor de gemiddelde en de buitenste percentiel lijnen de tijdstippen en corresponderend aantal cumulatieve voertuigpassages waarop het beheerdersoordeel wordt bereikt.
- Een voorspelling, respectievelijk constatering of de garantietermijn wordt gehaald.
- Een voorspelling van de stroefheidswaarde bij 450 miljoen voertuigpassages.
- Een indicatie/kleurcode of de gemiddelde lijn boven/onder het beheerdersoordeel zit en wanneer de meetwaarde in het beheerdersoordeel zit dan een indicatie/kleurcode voor de tijd dat de voorspellingslijn boven de onderste grenswaarde blijft.
- Een indicatie of een meetwaarde significant afwijkt van de tot dan toe bestaande trendlijnen, d.w.z. of de recente meetwaarde buiten de buitenste percentiellijnen valt.

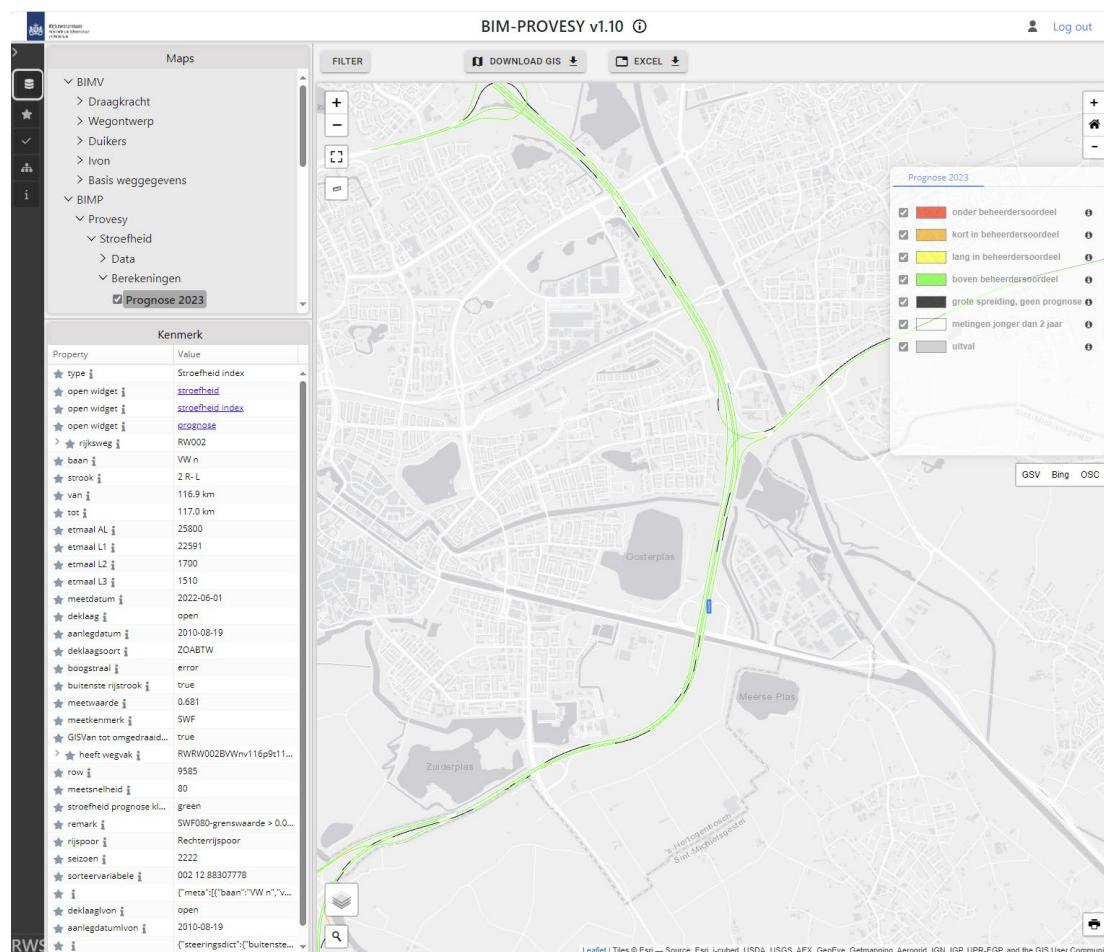
Naast berekende waarden worden de volgende kleurcodes voor de actuele stroefheid waarde (AS) gegenereerd:

- groen AS > 0.03
- geel AS in interval [-0.02;0.03] voor een periode langer dan 5 jaar
- oranje AS in interval [-0.02;0.03] voor een periode korter dan 5 jaar
- rood AS < -0.02
- zwart meetwaarde valt buiten de bandbreedte van de buitenste percentiel lijnen, een indicatie voor de beheerder om de meetgegevens na te lopen

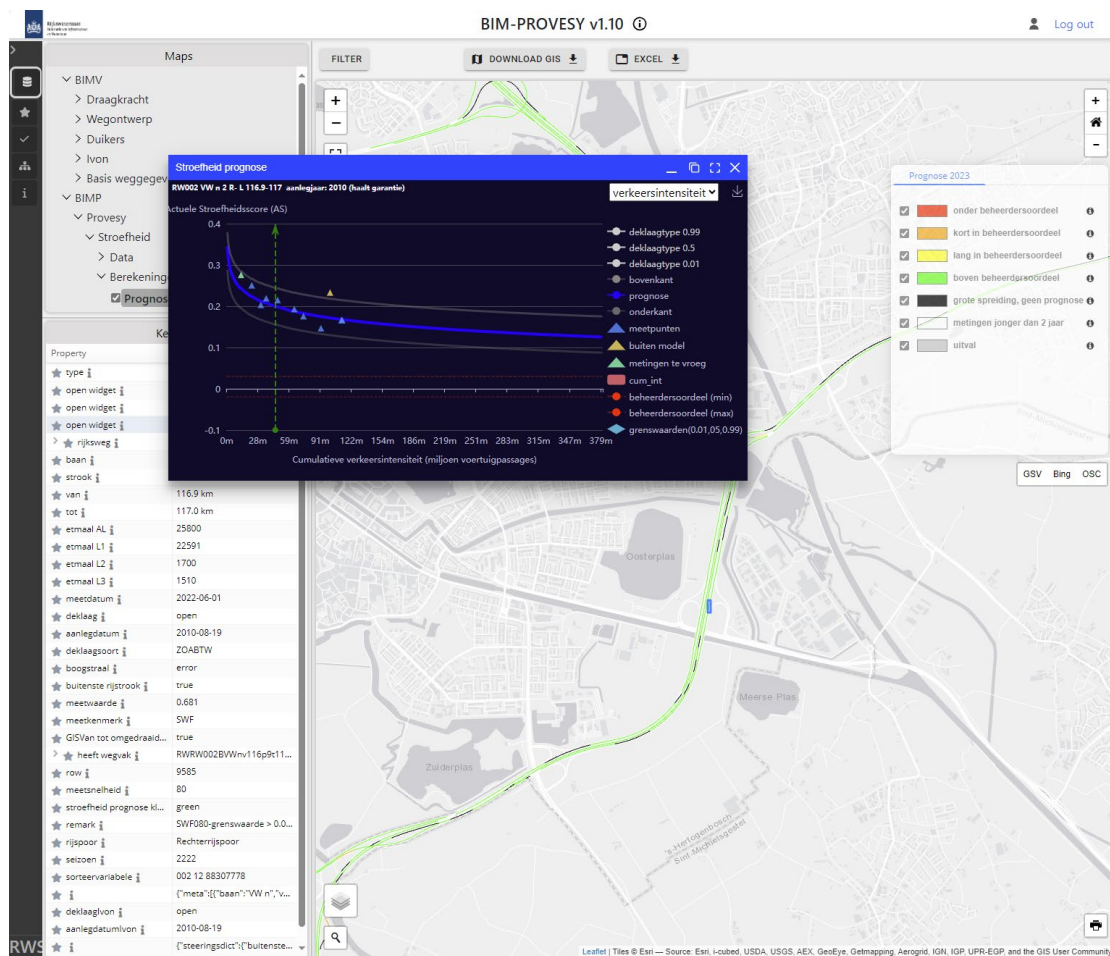
In onderstaande [Figuur 5.5](#) tot en met [Figuur 5.11](#) worden een aantal gebruiksvoorbeelden gegeven. De gebruiker/beheerder heeft de mogelijkheid om de indicatoren/kleurcodes te visualiseren op een kaart van het rijkswegennet. In [Figuur 5.5](#) een voorbeeld van een dergelijke kaart, ingezoomd op een deel van de A2. In de figuur is te zien dat een specifiek 100m vak is geselecteerd. Wanneer een 100m vak is geselecteerd worden de gegevens en kenmerken van het vak zichtbaar in de lijst links beneden. Door in deze lijst op de 'prognose widget' te klikken wordt een figuur zichtbaar gemaakt met daarin de prognoses met trendlijnen en meetwaarden voor de actuele stroefheidswaarden, zie [Figuur 5.6](#) en [Figuur 5.7](#). In [Figuur 5.8](#) is een 100m vak geselecteerd waarvan op de kaart de indicatie oranje

zichtbaar was (vergelijk de kleur in [Figuur 5.5](#)). De prognoselijnen in de bijbehorende widget ([Figuur 5.9](#)) laten zien hoe de trendlijnen nog maar kort in het beheerdersoordeel zullen vallen. Ook is in de widget te zien dat de garantietermijn niet is gehaald.

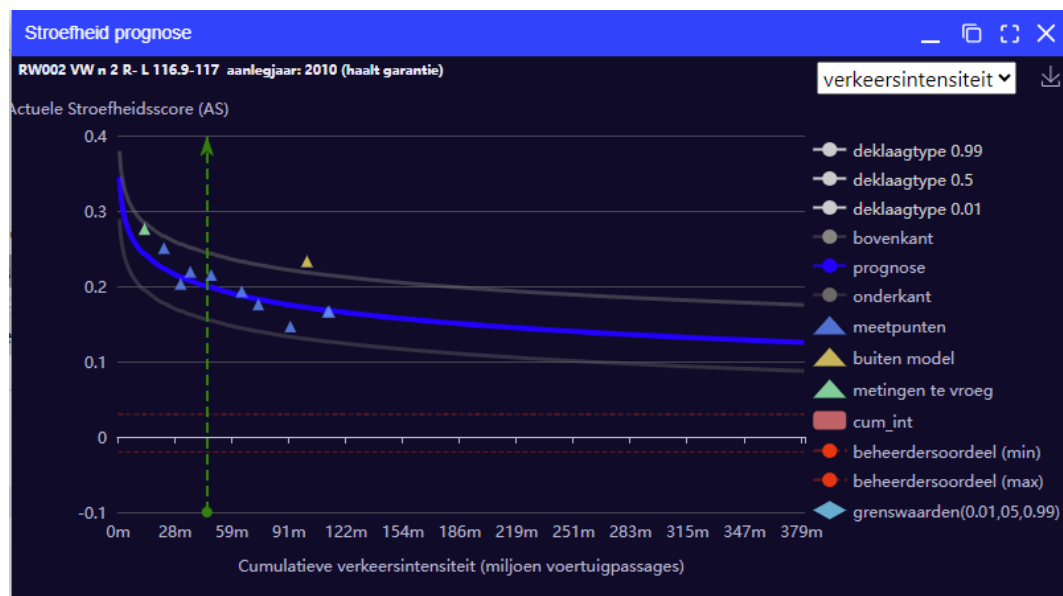
Tenslotte in [Figuur 5.10](#) een voorbeeld (zwart op de wegenkaart in [Figuur 5.5](#)) waarbij twijfel bestaat over de laatste meetwaarden: deze vallen buiten de verwachte bandbreedte op basis van voorgaande metingen (zie ook [Figuur 5.11](#)). Op basis van dit resultaat wordt de gebruiker/beheerder erop geattendeerd na te gaan wat hier aan de hand kan zijn.



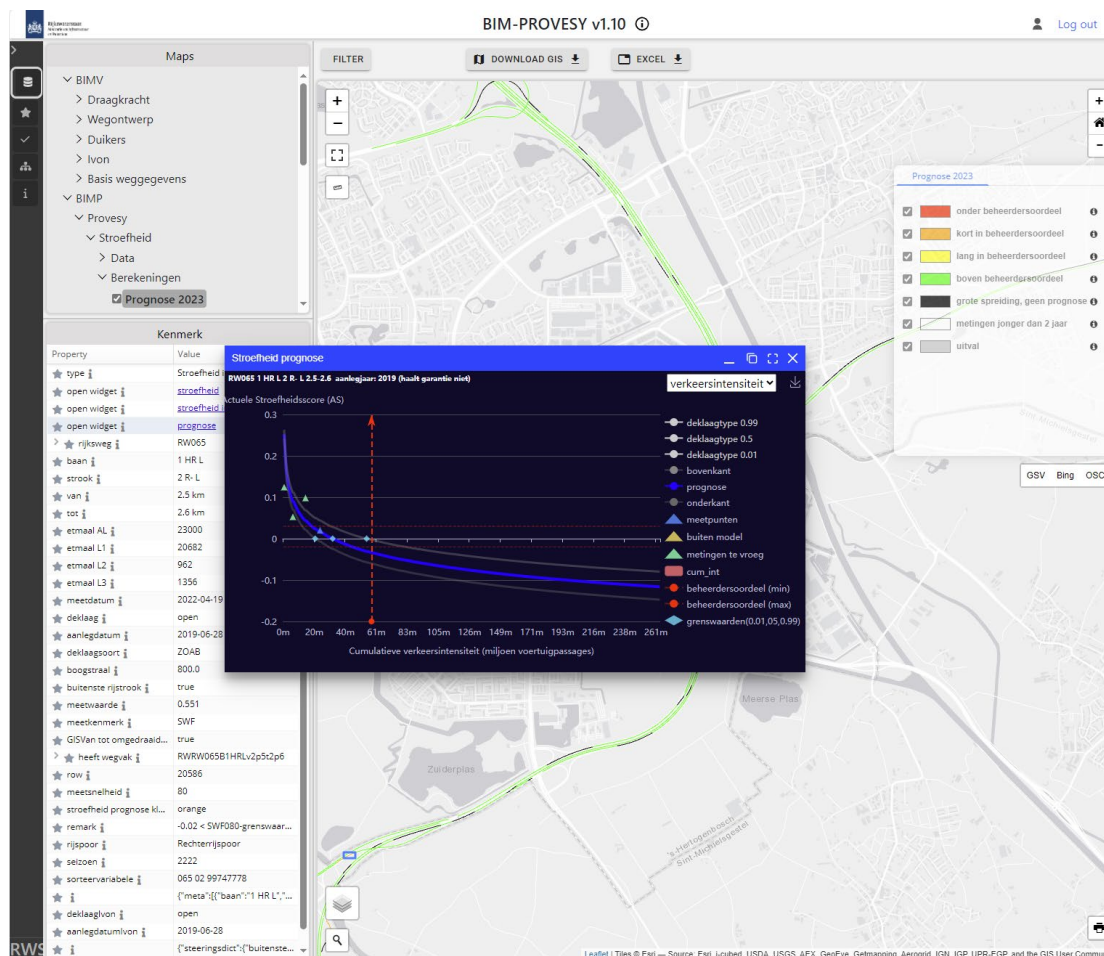
Figuur 5.5: PIM-POVESY kaart met een deel van de A2, met blauw is door de gebruiker een 100m vak geselecteerd. In de lijst links onder zijn gegevens en kenmerken voor dit vak zichtbaar (na selectie) zichtbaar geworden.



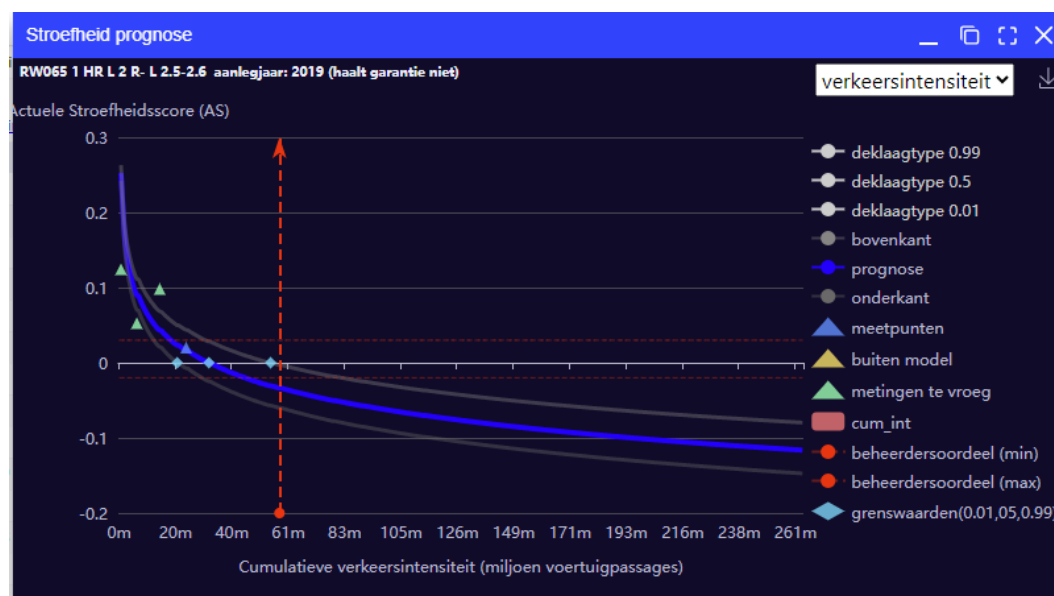
Figuur 5.6: Voor een geselecteerd 100m vak kan (links) de prognose widget worden geklikt, waarna de prognoses met trendlijnen en meetwaarden voor de actuele stroefheidswaarden zichtbaar worden.



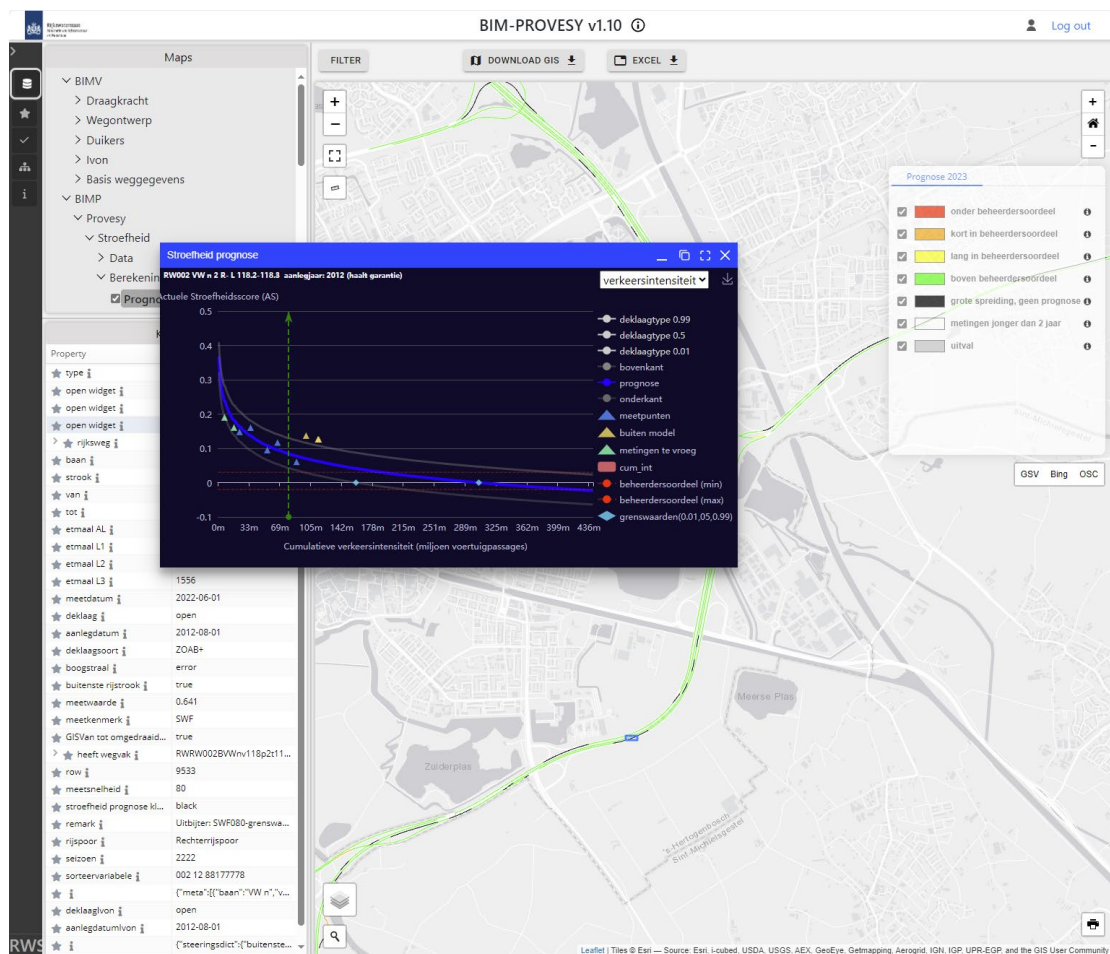
Figuur 5.7: Uitvergroting van de prognose widget uit figuur 5.6. De groene verticale lijn geeft aan dat de garantietermijn is gehaald.



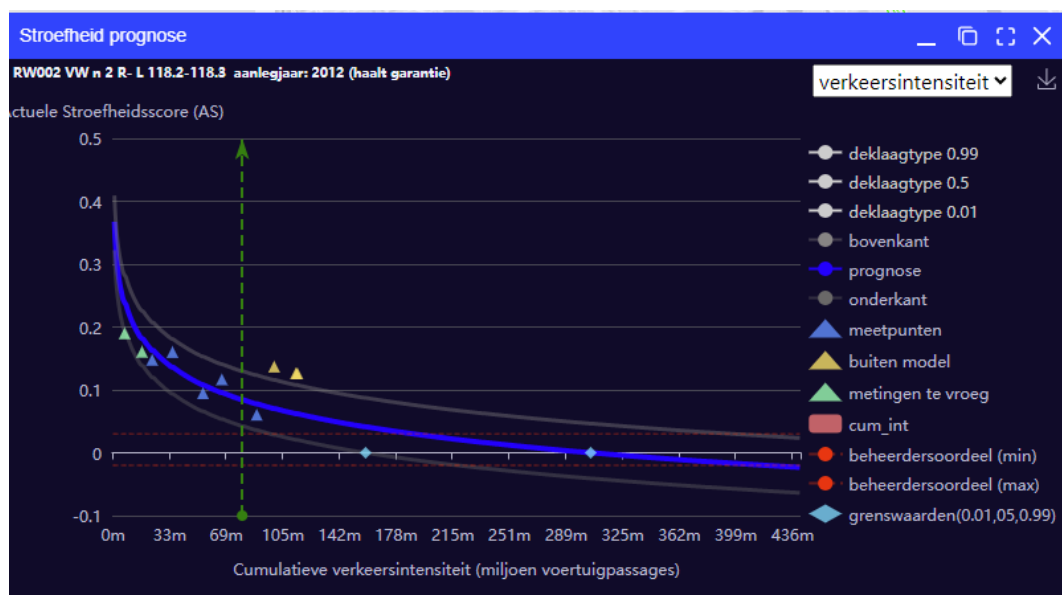
Figuur 5.8: Een voorbeeld met een 100m vak (links beneden) waarvoor de trendlijn nog maar minder dan 5 jaar in het beheerdersoordeel blijkt te blijven (kleurcode oranje op de kaart).



Figuur 5.9: Uitvergroting van de prognose widget uit figuur 5.8. De rode verticale lijn geeft aan dat de garantietermijn niet is gehaald.



Figuur 5.10: Een voorbeeld met een 100m vak (onder midden) waarvoor de laatste meting(en) buiten de bandbreedte van de trendlijnen vallen (kleurcode zwart op de kaart).



Figuur 5.11: Uitvergroting van de prognose widget uit figuur 5.10. De gele driehoeken geven aan dat de metingen buiten het verwachte meetbereik vallen.

5.4 Conclusie

Hoewel is onderkend dat FAP-proeven een goed voorspellend vermogen kunnen/zullen hebben voor stroefheidverlopen van de mengsels in de gebruiksfase en dit ook bijval vindt in de verhardingenwereld, blijkt er nog weinig data beschikbaar om dit verder te onderbouwen en door te ontwikkelen.

Gegeven de eigenschap dat FAP proeven goed algemeen uit te voeren zijn op verschillende mengselsoorten en dat in Nederland in de toekomst veel aan hergebruik van deklaagmaterialen zal worden gedaan, is de aanbeveling om meer onderzoek hierop uit te voeren en meer data hiervoor te verkrijgen en te delen. Doel - maar ook winst - is dan om de voorspelling van de stroefheidontwikkeling voor deze mengsels met asfalt van diverse herkomst met de FAP-test betrouwbaar te kunnen doen.

Het bayesiaanse stroefheidsmodel per 100m vak voor de gebruiksfase is deels binnen het LAM onderzoeksproject ontwikkeld en in 2023 succesvol geïmplementeerd in de BIM applicatie BIM-PROVESY van RWS. Voordeel is het gebruiksgemak, het jaarlijks kunnen bijstellen van de prognoses op basis van de nieuwe metingen. Een deel van het gebruiksgemak bestaat ook uit het feit dat alle data die nodig is (naast de metingen zelf), bijvoorbeeld deklaagtypen, aanlegdata, voertuigpassages op een gestructureerde en geborgde manier verzameld zijn en blijven.

6 Interactie met de sector

Gedurende 2023 is op diverse wijzen interactie geweest met de sector om enerzijds resultaten terug te koppelen aan de sector en anderzijds te zorgen dat de resultaten van het project zo goed mogelijk aansloten bij de behoeften van de sector. In dit hoofdstuk wordt een kort verslag gegeven van de belangrijkste interacties. De interactie met de organisatie van de Asphalt-Impuls is beschreven in paragraaf 6.1. Een verslag van een georganiseerde expertsessie voor disseminatie aan de markt is beschreven in 6.2. Een verslag van een workshop bij de provincie Gelderland over het gestructureerd vastleggen van asfaltdata voor modellen is vastgelegd in 6.3.

6.1 Interactie binnen Asphalt-Impuls

6.1.1 LAM-trekkers

De LAM-trekkers zijn de leiders van de drie werkpakketten binnen het LAM-programma en geven gezamenlijk inhoudelijke sturing aan het project LAM binnen het sectorbrede programma Asphalt-Impuls. Gedurende fase 5 welke liep in 2023, waren de trekkers Rutger Krans (RWS), Wouter Heijsser (Heijmans), Frits Stas (Heijmans) en Greet Leegwater (TNO). Met deze LAM-trekkers is gedurende het jaar, 1 maal per 3 weken overleg gevoerd, behalve in de vakantieperiodes. In deze overleggen zijn projectvoortgang, interacties tussen de werkpakketten, ontwikkelingen in de markt en nieuwe ontwikkelrichtingen besproken. Hierdoor is gezorgd voor monitoring van de projectvoortgang, afstemming tussen de werkpakketten en oplijning met ontwikkelingen in Asphalt-Impuls en in de markt.

6.1.2 Asphalt-Impuls organisatie

Tenminste eens per kwartaal is overleg geweest tussen de LAM-trekkers en de programmamanager van Asphalt-Impuls. Deze programmamanager was gedelegeerd opdrachtgever namens het dagelijks bestuur van Asphalt-Impuls. Zaken met betrekking tot voortgang en budget ten opzichte van planning zijn in dit overleg gecoördineerd.

6.1.3 Disseminatie in het kader van Asphalt-Impuls

Om resultaten van Asphalt-Impuls terug te koppelen aan de sector is er informatie gedeeld op de website en op de LinkedIn pagina van Asphalt-Impuls. Vanuit LAM is er meegewerkt aan de genereren van content in de vorm van een filmpje en het leveren van input voor presentaties. Daarnaast zijn alle geproduceerde rapporten gedeeld op de Asphalt-Impuls website (www.crow.nl/asfalt-impuls).

Daarnaast zijn de resultaten van het LAM-programma op hoofdlijnen gedeeld op het afsluitende Asphalt-Impuls symposium op 9 november 2023.

6.1.4 Interactie met RWS over bewerking DOS/LCMS-data

Rijkswaterstaat is eigenaar van de DOS/LCMS-data. Daarnaast zal RWS in de toekomst een belangrijke gebruiker zijn van deze data. Verdere doorontwikkeling van deze dataset hangt

ook nauw samen met beslissingen die RWS neemt op het gebied van inwinning en bewerking. Om deze reden was er gedurende de ontwikkeling van de DOS/LCMS-dataset maandelijks overleg met Rijkswaterstaat. Hierbij waren mensen betrokken van het GPO programma DaVa (DataWegverhardingen) en de afdeling Instandhouding Constructies (ICO). Gedurende dit overleg is afstemming geweest, welke zaken aangemerkt moeten worden in de data met behulp van vlaggen, om de data ook relevant te maken voor andere toepassingen. Daarnaast zijn door het projectteam tussentijdse resultaten gedeeld.

6.2 Expertsessie LAM-Modellen

Op 22 november 2023 is een expertsessie Levensduurmodellen georganiseerd om de resultaten van LAM-Modellen behaald binnen Asphalt-Impuls in detail terug te koppelen aan de markt.

Het doel van deze sessie was om met de sector te delen welke modellen er zijn ontwikkeld, hoe volwassen deze modellen zijn en hoe ze gezien hun volwassenheid ingezet kunnen worden in de markt. Gedurende deze sessie zijn alle resultaten die gepresenteerd zijn in de rapport gedeeld met de sector. Dit betekende presentaties over het rafelingsmodel voor ZOAB, voor het rafelingsmodel voor SMA, en het stroefheidsmodel. Daarnaast is ook terugkoppeling gegeven over het waarom en op welke wijze de DOS/LCMS-data is verwerkt, zoals ook is toegelicht in hoofdstuk 2. Tot slot is de stand van zaken met betrekking tot informatiemodellen, conform de NEN 2660, in de wegenbouw gedeeld. Dit laatste is niet beschreven in deze rapportage, maar was relevant voor de conclusies en aanbevelingen van LAM.

De expertsessie is goed ontvangen door de markt. Het geschikt maken voor trendanalyses van DOS/LCMS-data werd als erg relevant beoordeeld. Vervolg vragen zijn wie onder welke voorwaarden toegang krijgt tot deze data. En hoe deze data aan meer relevante informatie gekoppeld kan worden zoals Aspari-data of PIM-data. Daarnaast werd interesse getoond in de geschetste optie dat de data niet alleen op basis van BPS of GPS coördinaten kon worden gematched, maar op basis van camerabeelden echt jaar op jaar op elkaar kan worden gelegd. De technische mogelijkheid is op kleine schaal aangetoond, maar dit moet nog op netwerkniveau worden uitgewerkt.

De behoefte aan datastandaardisatie werd breed gedragen. De sector erkent dat dit een essentiële voorwaarde is om het type modellen dat in LAM is ontwikkeld te laten slagen. Er wordt erkend dat dit alleen werkt als we met zijn allen samenwerken. Op dit moment ontbreekt een duidelijke centrale roadmap, wat betekent dat we elkaar actief op moeten zoeken op het moment dat we stappen (willen) zetten, opdat deze geïntegreerd raken in het geheel.

Gedurende deze workshop werd ook aangegeven dat het goed is dat er nu meer mogelijk is voor datagedreven levensduurmodellen, echter dat er ook aandacht zou moeten blijven voor echte theoretische levensduurmodellen. Deze modellen kijken naar functionele prestaties van asfaltmengsels en bindmiddelen en koppelen dit aan levensduur. Dit was niet mogelijk binnen LAM, omdat uitgangspunt van dit programma was om voort te bouwen op beschikbare, bestaande modellen. Er werd ook opgemerkt dat, indien we dergelijke theoretische modellen willen valideren voor de praktijk, er ook goed gestructureerde praktijkdata nodig zijn, waarbij de complexe parameters uit de theoretische modellen ook voor deze praktijkcases dienen te zijn vastgelegd.

6.3 Workshop provincie Gelderland en TNO

6.3.1 Aanleiding

In het kader van het LAM-project heeft TNO aangeboden een workshop bij provincie Gelderland te organiseren specifiek voor data-specialisten van beide organisaties, die betrokken zijn bij digitalisering in de wegenbouw. Aanleiding is dat momenteel veel data wordt gegenereerd (bij een aantal aannemers vanuit de PIM-database) wanneer een nieuwe SMA-deklaag wordt aangebracht. Dit wordt aan het projectteam van de provincie aangeleverd, die vervolgens de datastroom in de organisatie in gang zet. Hoewel Gelderland een eigen object-type library (OTL) heeft, blijkt het toch lastig te zijn om de data vervolgens naar de systemen te krijgen ofwel gestructureerd op te slaan. Hierdoor wordt de aangeleverde data niet gebruikt om bijvoorbeeld onderhoud van asfaltdekkingen nauwkeuriger te kunnen voorspellen, waarmee onderhoud efficiënter zou kunnen worden gepland.

Bij TNO is in het LAM-project² [1] ervaring opgedaan met de voorspelling van de levensduur van een SMA 0/11 deklaag voor 1 provinciale weg. Uitgangspunt waren de beschikbare data over mengselontwerp, oplevering en prestatie van de SMA-deklaag. Dit SMA-levensduurmodel is ontwikkeld door wegbouwkundige specialisten, data-analisten en modelbouwers. Doel van de workshop was om kennis en ervaring uit te wisselen tussen de verschillende specialisten van TNO en Gelderland over analyse van data die beschikbaar is en gebruikt wordt om de levensduur van asfaltdekkingen te voorspellen. Hierbij is ingegaan op de volgende vragen:

1. Welke informatie wordt hoe en waar gegenereerd, welke data is op welke plek aanwezig en hoe komt het op de juiste plek in de organisatie vanaf het moment dat een SMA-deklaag is aangebracht, in beheer en onderhoud komt en weer vervangen wordt?
2. Wat zijn de eisen aan de inhoud en nauwkeurigheid van data? Denk aan vastlegging van aanlegcondities, wegvakgrenzen en boorkernen?
3. In welke structuur moet de data worden uitgevraagd aan de aannemer, zodat het (her)bruikbaar is voor BIM en beheer en onderhoud?

² Levensduur Asfalt Model, onderdeel van AsfaltImpuls

6.3.2 Verslag workshop 22 maart 2023

Het programma van de workshop is weergegeven in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Programma workshop Gelderland-TNO databeheer wegverhardingen.

Nr.	Onderdeel	Prov. Gelderland	TNO
1	Inleiding Case N317: voorspellend levensduurmodel: Keuze parameters SMA uit beschikbare data in relatie tot de 'Datacyclus van de levensduur van een asfaltdeklaag. Welke andere beschikbare parameters zijn ook bruikbaar voor de levensduur van SMA?	Welkom/aanleiding door Remco	Context digitalisering wegenbouw; Aanpak en resultaten case N317: Door Mahesh
2	Data toetsing kwaliteit SMA-deklaag Welke data wordt uitgevraagd voor toetsing van asfalt-deklagen, geleverd en verspreid? In het verleden werden PDF'jes aangeleverd voor eenmalige toets, maar niet verder gebruikt voor beheer en onderhoud. Tegenwoordig levert elke aannemer kwaliteitsdata met eigen tool aan. Hoe wordt dit opgeslagen in BIM en gekoppeld aan systemen in de provincie?	Dick Hermesen: kwaliteitsadviseur	
3	Conversie PDF-bestanden Welke tools zijn er nodig? Welke bestanden wel en welke niet te converteren/		Shang-Jen Wang
4a	Datastructuur, linked data en opslag (OTL)	Joost Damen of Niels Reyngoud: BIM OTL specialist	Michel Böhms
4b	Datastructuur, linked data en opslag (OTL)		Michel Böhms
5	Levensduurmodel: Welke parameters meegenomen? Welke methodiek is toegepast om de gemiddelde levensduur en spreiding te berekenen	Niels den Boer: Business intelligence specialist	Shang-Jen Wang

De leerpunten en struikelblokken n.a.v. de case N317 vanuit LAM werden zeer goed ontvangen door de provincie. Bij leerpunten kan worden gedacht aan de noodzaak van de datakwaliteit voor een goed levensduurmodel en op welke wijze je met een kleine dataset een levensduurmodel kunt bouwen m.b.v. Bayesiaanse technieken. Het werd duidelijk wat het opwaarderen van oude data (2006-2012) oplevert en dat zal ook nu worden uitgezocht

bij de provincie. Vanwege de lange levensduur van SMA-deklagen (18 jaar) is het cruciaal dataopslagsystemen te kiezen, die hiermee kunnen omgaan.

Vanuit de presentaties Gelderland werd ons het volgende duidelijk:

- De gekozen parameters van het Delta model zijn akkoord, maar het Delta-model wordt gezien als 1 van de tools om de levensduur van SMA te kunnen voorspellen. Denk aan andere van invloed zijnde parameters zoals de aanlegcondities, veroudering van bitumen (Asfalt Wegdek Test) en de verhouding van bouwstoffen in mastic. De provincie ziet graag dat deze parameters toegevoegd worden aan het SMA rafelingsmodel.
- Voor mengselontwerpen en opleveringen zijn PDF-bestanden zijn nog steeds de standaard. Er gaat nu wel een standaard format worden uitgevraagd door de provincie.
- De provincie is zelf vooral bezig met de data. Het verzamelen en toegankelijk maken van al hun data, structureren en visualiseren van de data. Aan de volgende stap om iets met de data te doen komt de provincie nog niet toe. Bijvoorbeeld data combineren met modellen of relaties te vinden in de data door machine learning technieken toe te passen.
- Er is meer data beschikbaar, maar versnipperd aanwezig in verschillende projectbestanden. De OTL-specialist heeft bijvoorbeeld meer informatie van bepaalde werken; zoals asfalttemperaturen, maar zij weten niet of er behoefte aan is en op welk detailniveau (asfalmolen, achter de balk, enz.). Beheer en onderhoud weet hier vaak niet van af en heeft ook geen toegang tot de data.
- Er zit in de OTL-Gelderland maar een klein stukje Linked Data (LD). LD is nog een stap te ver voor de provincie ('niemand binnen de provincie kan hier mee werken'), voorkeur gaat uit naar simpele oplossingen. Gelderland is huiverig m.b.t. LD., omdat ze geen positieve ervaringen hebben uit de COINS tijd. Voor hen was het zo complex dat het een black box werd die alleen nog 'gehandled' kon worden door een beperkt aantal externe partijen. Michel heeft aangegeven dat het vooral /ook ging om de complexe toepassing van LD (combi complexe RWS-OTL & weer anders complexe COINS CBIM). Wellicht geeft het gegeven LAM voorbeeld nu inzicht dat het ook simpeler kan (disclaimer: nu wel de allersimpelste property modelling variant vanuit de spreadsheet data).
- Op dit moment werkt Gelderland vooral met MS technologie (SQL Server/PowerBI etc.). En ook met GIS best practices/packages waar we wat dieper in moeten duiken (o.a. via Hans Schevers van Building Bits).
- Nauwkeurige levensduurvoorspelling van SMA-deklagen geeft beheer en onderhoud meer en beter inzicht in beheerkosten, waardoor budgetten beter kunnen worden aangepast en het onderhoud optimaler kan worden geprogrammeerd.

Remco Hermsen was tevreden na afloop gezien zijn databehoeft in de provincie en waar intern de datastroom beter op elkaar aan kan sluiten. De workshop heeft Remco geholpen om intern de volgende vragen beter te bespreken:

1. Wat doet beheer en onderhoud met data?
2. Waarom doen ze dit en wat levert het op?
3. Wat heb je aan input nodig om levensduurmodellen te maken?

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

In het modellendeel van het Asphalt-Impuls LAM-Programma zijn belangrijke stappen gezet in de ontwikkeling van Levensduurvoorspellende asphaltmodellen. De ontwikkelde modellen hebben verschillende niveaus van volwassenheid. Het model voor de voorspelling van de restlevensduur met betrekking tot stroefheid werkt goed en is door Rijkswaterstaat in productie genomen. De modellen voor voorspellingen van de restlevensduur met betrekking tot rafeling voor open-asfalt- en SMA-deklagen zijn minder volwassen en nog niet gevalideerd. Van deze is daarom beschreven welke stappen nog nodig zijn om tot in de praktijk bruikbaar modellen te komen. Hieronder volgt een opsomming van de stappen die zijn gemaakt in het Modellen deel van het LAM-programma. De aanbevelingen volgen in sectie 7.2.

Er is succesvol gewerkt aan het uniform en bruikbaar maken van historische rafelingsgetallen (DOS/LCMS-data) voor onderzoek naar trends en levensduuranalyses. Het resultaat is een dataset die 10 jaar (2012 – 2021) aan rafelingsdata op meterniveau beschrijft. Er is ook een basis gelegd waarmee de komende jaren nieuwe data aan deze dataset kan worden toegevoegd. Bij het maken van deze dataset is gebleken dat de historische geografische koppeling van meetdata aan de Beschrijvende Plaatsaanduiding Systematiek (BPS) niet optimaal is voor het vergelijken van metingen op meterniveau over de jaren heen. Zonder extra bewerking leidt dit tot een zekere mate van ruis in de data.

Er is een Proof of Concept (PoC) van levensduurvoorspellend model voor rafeling van ZOAB gemaakt op basis van een Bayesiaans framework. Dit model richt zich op het voorspellen van een restlevensduur in de gebruiksfase. Er is een goede fit tussen het gekozen exponentiële model in het PoC en de data. Het is echter wel waarneembaar dat de fit gedomineerd wordt door de goed presterende 1m DOS/LCMS metingen, terwijl vervanging van wegvakken juist gedomineerd wordt door de slechtst presterende vakken. Dit zorgt ervoor dat de voorspelde levensduur langer is dan de verwachting op basis van ervaringen. Het PoC laat zien dat slechts een beperkt aantal typen data nodig is om tot een basis levensduur voorspellend model te komen. In essentie zijn het deklaagtype, aanlegjaar, vervangingsjaar en DOS/LCMS metingen van belang. Echter ondanks dat dit een beperkte set is, is de informatie over aanlegjaar en vervangingsjaar niet altijd betrouwbaar. Voor een voorspellend model over levensfasen heen zijn meer databronnen nodig, zoals ontwerpdata die bijvoorbeeld mengselsamenstelling beschrijft.

Gedurende het project is veel energie gestoken in het in voldoende kwaliteit beschikbaar en koppelbaar maken van rafelingsdata van SMA. Er is gestart met de data van de provincie Gelderland, aangezien zij het grootste onderliggende wegennet van Nederland beheren, en tevens bekend staan als een wegbeheerder die ontwerp en beheerdata goed op orde heeft. In de betreffende dataset was informatie beschikbaar van het ontwerp, de opleveringscontrole en de prestaties in de weg. Ondanks deze zorgvuldige dataselectie en

de opvolgende datareparatie en organisatie, bleek er nog steeds te weinig data beschikbaar om een voldoende betrouwbaar model te bouwen voor rafeling van SMA. In totaal hebben analyses van 24 bestekken van werken geleid tot data van 40 hectometervakken (21 uit dataset 1 en 19 uit dataset 2), waarvan ontwerp- en opleverinformatie gekoppeld kon worden aan het moment van einde levensduur. De geïdentificeerde trends in deze data bleken vervolgens niet eenduidig, waardoor is geoordeeld dat hier geen betrouwbaar rafelingsmodel op gebouwd kan worden.

Er is een model gemaakt voor een restlevensduurvoorspelling van de stroefheid. Dit model gaat uit van een ontwikkeling van de stroefheid als gevolg van passerende voertuigassen op basis van praktijkdata. Vervolgens wordt met behulp van één of meerdere stroefheidsmetingen in combinatie met een Bayesiaanse benadering een restlevensduurvoorspelling per 100m-vak gemaakt. Dit model is reeds geïmplementeerd in tooling die ingezet wordt bij Rijkswaterstaat genaamd BIM-Provesie. Met behulp van dit model kan vereist onderhoud als gevolg van stroefheidsproblemen beter worden gepland.

Er is een start gemaakt om te komen tot een model dat ook in staat was om stroefheid over levensduurfases heen te voorspellen. Uitgangspunt hierbij was de Friction After Polishing (FAP) proef. Met deze proef kan op asfaltkernen worden bepaald hoeveel weerstand ze hebben tegen polijsten, wat een maat is voor de levensduur van de stroefheid. Deze proef wordt niet standaard uitgevoerd in Nederland, maar is in de afgelopen jaren wel incidenteel of als onderdeel van onderzoeksprojecten uitgevoerd. Gedurende het project is op meerdere manieren gezocht naar zoveel mogelijk FAP resultaten, welke in verband konden worden gebracht met de jaarlijkse stroefheidsmetingen. Echter, ook hier bleek er wel data beschikbaar te zijn, maar deze data was onvoldoende om een levensduurmodel op te baseren.

Levensduurmodellen die in staat zijn ontwerpparameters te koppelen aan praktijkgedrag konden binnen dit project voor geen enkel schademechanisme worden gerealiseerd. Dit komt omdat wegdata op dit moment geen geüniformeerde metadata bevat, waardoor de koppeling over de verschillende fases van de levensduur heen, zoals ontwerp, aanleg, oplevering en gebruik niet op voldoende grote schaal mogelijk is tegen redelijke inspanning. Hierdoor is het dus ook niet mogelijk om informatie over deze fases heen te koppelen voor het voeden van een model. Het is aan de sector samen te werken aan een betere informatievoorziening voor onze hoofd- en secundaire wegennet. Hiervoor zien we in de sector, met bijvoorbeeld PIM, ASPARI, Asphalt-Impuls en het komende Transitiepad Duurzame Wegverhardingen, gelukkig al wel goede, breed gedragen ontwikkelingen.

7.2 Aanbevelingen

Er zijn in de verschillende hoofdstukken per onderwerp en model aanbevelingen gedaan. Bij het inrichten van vervolgonderzoek is het belangrijk deze aanbevelingen in overweging te nemen. De belangrijkste aanbevelingen per onderwerp zijn hieronder overgenomen.

In het algemeen verdient het aanbeveling om binnen de sector data gestructureerd vast te leggen en afspraken te maken over waar data wordt opgeslagen en onder welke voorwaarden het door wie waarvoor kan worden gebruikt.

Met betrekking tot de DOS/LCMS metingen zijn de volgende twee aanbevelingen het meest relevant:

- Alle DOS/LCMS metingen op de cm/mm nauwkeurige (in de tijd) over elkaar te leggen door het matchen en verschuiven van patronen. Hierdoor wordt de ontwikkeling in de tijd op een specifiek locatie nauwkeuriger, wat levensduurvoorspellingen nauwkeuriger maakt en matching met andere data preciezer.
- Toevoegen van rafelingsdata van 2022 en verder en dit structureel te organiseren.

Er is extreem veel data beschikbaar gekomen over rafelingsontwikkeling van deklagen toegepast op het hoofdwegennet. Om de volle potentie van deze data te realiseren zou deze nog verder geanalyseerd dienen te worden. Daarnaast zijn vele datakoppelingen nog erg interessant. Op dit moment liggen de volgende acties het meest voor de hand:

- Machine Learning modellen inzetten voor het maken van datagedreven restlevensduurvoorspellingen.
- Een nieuw (eventueel datagedreven) formulering maken van het moment van einde levensduur.
- Koppeling met data van andere bronnen, zoals informatie over aanlegcondities (Aspari), weer (KNMI), mengelsamenstellingen (Asfalt Informatie Systeem en Pavement Information Model).
- Introduceren van expertkennis en/of fysica om de leeftijdsgebieden waar geen data is zekerder te maken.

De bruikbaarheid van het ontwikkelde levensduurmodel voor SMA is nog beperkt. Er zijn nog veel potentiële oplossingsrichtingen om dit model te verbeteren. Op dit moment vormen de beperkte datakwaliteit, datatoegankelijkheid en beschikbaarheid van metadata van wegen die beheerd worden door provincies en gemeenten, de grootste uitdaging. Als gevolg hiervan kunnen grote stappen in de ontwikkeling van een datagedreven rafelingsmodel pas gemaakt worden op het moment dat relevante data significant beter georganiseerd wordt. Deze transitie zal tijd kosten en pas op langere termijn vruchten afwerpen. Op de kortere termijn kunnen al stappen worden gezet door te werken aan onderstaande zaken:

- Over 5 jaar hebben een groot aantal vakken waarvoor de data is gestructureerd wel het moment van einde levensduur bereikt. Op dat moment zal er ongeveer 5 keer zoveel data koppelbaar zijn in vergelijking met nu. Dezelfde analyse daarom over 5 jaar nog een keer uitvoeren.
- Er zou nog informatie gehaald kunnen worden uit de niet bezwaken vakken. Mogelijk zouden hier Machine Learning (ML) technieken voor ingeschakeld kunnen worden.
- Het ontwikkelde model is uitgegaan van een correlatie tussen levensduur en verschillen tussen het ontworpen en het gerealiseerde asfaltmengel. Het verdient aanbeveling om andere modelbenaderingen te formuleren en na te gaan of deze meer voorspellend vermogen hebben.

Aangezien het in de toekomst de norm zal zijn dat deklagen hoge percentages gerecycled asfalt bevatten, is het waardevol om over een levensduurmodel voor stroefheid te beschikken, dat op basis van een mengselontwerp of een proefstuk een levensduurvoorspelling kan doen. Daarom verdient het aanbeveling om een onderzoeksprogramma en/of praktijkprogramma met de FAP-test in te richten, opdat er voldoende data beschikbaar komt voor het realiseren van zo'n model, te beginnen met een Proof of Principle.

Referenties

1. G.A. Leegwater, W.M.G. Courage, M. Moenielal, D. Q. van Lent, G.T. Luiten, Asphalt-Impuls - LAM – Fase 4 – WP2: Verdere doorontwikkeling van het Proof of Concept van een levensduurvoorspellend asfaltmodel, TNO 2022 R10169.
2. Schadebeoordeling- en Meetmethoden Bovenbouw, Dienst GPO, Rijkswaterstaat, 2019.
3. Verificatie Geschiktheid Wegenbouwmaterialen en - technieken (VGW), dienst GPO, RWS, 2019
4. Raveling algorithm for PA and SMA on 3D data, W. van Aalst, P. Piscaer, B. Vreugdenhil, F. Bouman, M. van Antwerpen, G. van Antwerpen, J. Baan, Roads and Airports Pavement Surface Characteristics, Proceedings of the 9th Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2022, 12 – 14 September 2022, Milan, Italy), 9781003429258
[Raveling algorithm for PA and SMA on 3D data | 38 | Roads and Airports \(taylorfrancis.com\)](#)
5. DOS/LCMS KIP project 2023: schuiven DOS/LCMS data mm nauwkeurig
6. Dutch HiRav Dataset - TNO-RWS Dutch Highway Raveling Dataset v2023.1
7. Kuiper, P.M., “Modellering van de stroefheidontwikkeling van bitumeuze deklagen”, 2014, Rijkswaterstaat, Utrecht
8. Groenendijk, J. (2021), AI-LAM: Implementatie Stroefheidvoorspellende Modellen, Kiwa KOAC B.V., februari 2021
9. Telman, J., “Eindrapport validatie stroefheid voorspellend model”, 2020, Q-Consult, Waardenburg
10. Telman, J., “Aanvullende analyses stroefheid voorspellend model”, 2020, CQM, Eindhoven
11. Kuiper, P., Telman, J., Courage, W., Schevers, H., Groenendijk, J., “Het stroefheid voorspellend model voor bitumeuze wegdekken”, CROW Infradagen 2022, Rotterdam.
12. Het valideren van de Friction After Polishing test conform pr EN 12697-49:201, Rijkswaterstaat, 2013

Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Delft, 18 maart 2024

Jok Tang
Research Manager DBE

Greet Leegwater
Auteur

Bijlage A

Woordenlijst

Tabel 7.1: Voorkeurstermen en hun betekenis

Term – NL	Term – UK	Betekenis	Gebruik in LAM
LAM	(ASLAM)	Levensduurvoorspellend Asphalt Model / (Asphalt Service Life Assessment Model)	LAM-project: het project binnen Asphalt-Impuls LAM-concept: het concept dat levensduur van asfalt voorspeld kan worden LAM-model: model dat ontwikkeld wordt in het LAM-project LAM-applicatie: applicatie die gemaakt wordt LAM-trekkers: de trekkers van de drie werkpakketen, LAM-Data, LAM-modellen en LAM-regelgeving.
Model	Model	Vereenvoudiging van de werkelijkheid, bedoelt om een stukje van de werkelijkheid beter te snappen, bijv. t.b.v. voorspellen	LAM-model: model gericht op voorspelling (rest-) levensduur van asfalt Materiaalmodel: model gericht op gedrag van materiaal, bijv. APAS-temperatuursvermoeiingsmodel; kan component zijn van het LAM-model Mechanisch model: model gericht op de spannings-rek-relatie van het materiaal of de constructie, bijv. FEM model; kan component zijn van het LAM-model
Component		Deel van een geheel	LAM-component: onderdeel van het LAM-model; voorbeelden zijn: materiaalmodellen, mechanische modellen, proeven en databestanden
Raamwerk	(Framework)	Structuur van een model	LAM-raamwerk: Structuur of opbouw van het LAM-model (zeg maar het PowerPoint plaatje van het hele LAM-model)
Concept	Concept	Idee achter een aanpak	LAM-concept: idee dat levensduur van asfalt is te voorspellen door prestatiedata en asfaltschademodelen te combineren per schadebeeld
Bayesiaans netwerk	(Bayesian network)	Model op basis een datastructuur met probabilistische redeneringen; opgebouwd uit knopen (variabelen in het vraagstuk) en pijlen (relaties tussen variabelen), waarbij de sterkte van relaties aangeduid wordt in termen van kansen.	In het LAM-model wordt een Bayesiaans netwerk toegepast op asfaltschademodelen in combinatie met prestatie-data om de levensduur van asfalt per schadebeeld te voorspellen.

Term – NL	Term – UK	Betekenis	Gebruik in LAM
(KI)	AI	(Kunstmatige Intelligentie) / Artificial Intelligence	In het LAM-project worden bijvoorbeeld de AI technologieën van Bayesiaanse netwerken en gradient boosting gebruikt
Schadebeeld		Beschrijving van de schade, waarop de eigenaar / beheerder besluit over beheer en onderhoud	Binnen het LAM-project besteden we aandacht aan de twee schadebeelden die maatgevend zijn voor beheer en onderhoud van asfalt: rafeling en stroefheid
(Bewijs dat het concept werkt)	PoC	Proof of Concept = computer-implementatie die moet bewijzen dat het concept werkt	PoC voor LAM-rafeling is de applicatie met het LAM-rafelingsmodel in een Bayesiaans Netwerk
Applicatie	(Tool)	Implementatie van een model in een computerapplicatie	LAM-applicatie: Het computerprogramma waarmee levensduur van asfalt voorspeld kan worden bij ontwerp, oplevering en/of gebruik, gebaseerd op het LAM-model. NB het LAM-model kan later ook in een andere LAM-applicatie geïmplementeerd worden.

Vetgedrukt geeft aan dat dit de voorkeursterm is, inclusief voorvoegsel; (...) geeft aan dat die term in die taal bij voorkeur niet gebruikt wordt

Dus liever niet meer gebruiken

- Niet Degraderingsmechanisme en Schademechanisme, maar Schadebeeld.
- Niet Computertool, computersysteem, computerprogramma, tool, systeem of programma, maar Applicatie.
- Geen losse generieke, multi-interpretabele termen zonder nadere duiding, zoals model en LAM.
- Niet Architectuur, maar Raamwerk.
- Niet LAM-aanpak, maar LAM-concept.
- Niet variabele of grootte (in een Bayesiaans netwerk), maar parameter.
- Niet validatie maar verificatie.

Bijlage B

Werking Excel sheet t.b.v. conversie PDF bestanden

The first step is converting the PDF to an Excel file via existing tooling like acrobat or smallPDF. SmallPDF has a downloadable application that can convert multiple files at once (other tools possibly have similar options).

The Excel created is not yet well structured (merged cells sometimes containing multiple values), contains multiple sheets and could contain some issues in header names (columns and or rows). The multisheetExcel2SingleSheetExcel3.xmlx is created to solve all these issues and even combine multiple files resulting from the PDF to Excel conversion. The reports that have been used for now are structured according to Fugro's report of "opleveringsmetingen van asfalt wegen (boorkernen)". Other files from different contractors might work as well when the tables have similar headings and structure.

The first sheet in the excel should contain in cell B1 the folder containing the excel documents (output of smallpdf or other alike tool). After clicking "Lees files" a script is being started that opens one-by-one all excel files in the given folder. Of each file opened, all sheets will be parsed by the script and data in these sheets will be inserted in the Sheet "Automated Parser". Each "boorkern" will get its own row in the "Automated Parser" sheet.

After the script is finished, the data is not yet compliant as input to the "Life Cycle predicting algorithm" since data within each row can be given as numbers "op zeef" and "door zeef". A conversion of these numbers is implemented in "CorrectedOutput". This sheet takes the rows from "Automate Parser" and copies or calculates the values as they are required by the algorithm. Currently only the first 2000 rows of data will be handled by the "CorrectedOutput" sheet, if more is needed, the formulas in columns A till AR can be copied into more needed rows.

How the algorithm works:

In the automated parser each column has 2 header fields (one with the name as expected and one with a regular expression). Each sheet is read row by row. If the first field in the row contains a specific value (recognizes the table being read). The parser is set to a certain state in which each next line will be interpreted matching that table, until another specific value is found. The specific values are:

- Onderzoeksrapport
- Onderzoek asfaltboorkernen
- Resultaten
- Opmerkingen
- Zanddriehoek

The first 3 values will initiate reading of the following lines, where the least 2 values will make sure the next rows will be ignored till one of the first 3 values is found.

ONDERZOEKSRAPPORT			
Project	60709036 bestek 1314, N786 tussen 7.360 en 5.655 Loenen fase 2	Opdrachtnummer	1707-0488-000
Opdrachtgever	Provincie Gelderland Dienst Wegen, Verkeer en Vervoer te Arnhem	Datum rapport	20-11-2007
Contactpersoon	de heer M.C.A.J. van den Hurk	Datum ontvangst	17-08-2007
Monstername	Uitgevoerd door Aannemer		

The “onderzoeksrapport” table describes the metadata of the “boorkernen” once and is applicable for the following “boorkernen”. This table has a fixed structure where the value type is stored in column 1 and 3 and the value in 2 and 4. Values of column 1 and 3 are compared with the regular expression of each column until a match is found. The value will be written to the column of the matching expression in the “Automated Parser” sheet.

ONDERZOEK ASFALTBOORKERNEN							
monster	boor-kern	omschrijving	laag	mengsel	soort/type	EVT bitumen	opmerkingen
7A	ø100	km 6.860 rechts	1	StAB 0/22	vk4	151°C	
8A	ø100	km 6.780 rechts	1	StAB 0/22	vk4	151°C	
8A	ø100	km 6.780 rechts	2	StAB 0/22	vk4	151°C	
9A	ø100	km 6.600 links	1	StAB 0/22	vk4	151°C	
9A	ø100	km 6.600 links	2	StAB 0/22	vk4	151°C	
9A	ø100	km 6.600 links	3	StAB 0/22	vk4	151°C	
10A	ø100	km 6.450 links	1	StAB 0/22	vk4	150°C	
10A	ø100	km 6.450 links	2	StAB 0/22	vk4	150°C	
11A	ø100	km 6.200 rechts	1	StAB 0/22	vk4	150°C	
11A	ø100	km 6.200 rechts	2	StAB 0/22	vk4	150°C	
12A	ø100	km 5.800 links	1	StAB 0/22	vk4	150°C	
12A	ø100	km 5.800 links	2	StAB 0/22	vk4	150°C	

Table “Onderzoek asfaltboorkernen” contains metadata of each “boorkern” described per row. The more rows are filled with data, the more rows that will be added to the “Automated Parser” sheet. Now the header row of this table has to be found, to compare its values against the regular expressions. The first cell containing the text “monster”, indicates this row is the header-row. For each column in the header-row the value is compared to the regular expression in “Automated Parser”. When it is found a mapping is created for the given input column (header-row) to the output column (regular expression). After reading the header row the following rows are being read and values copied to new rows in the “Automated Parser” sheet using the mappings. Empty rows (without values) are neglected. The in “onderzoeksrapport” found metadata will be copied to each new line in the output.

RESULTATEN														
Parameter/verrichting	Monster												eenheid	methode van onderzoek Std RAW
	7A	8-1A	8-2A	9-1A	9-2A	9-3A	10-1A	10-2A	11-1A	11-2A	12-1A	12-2A		
laagdikte	69	52	70	74	52	50	68	45	54	47	72	53	mm	proef 152
dichtheid kern	2379	2339	2377	2386	2389	2374	2413	2344	2375	2373	2381	2396	kg/m ³	proef 67
Q dichtheid proefstuk	- 2485	- 2495	- 2480	- 2486	- 2496	- 2483	- 2497	- 2472	- 2516	- 2481	- 2513	- 2507	kg/m ³	proef 67
Q dichtheidmengsel													kg/m ³	proef 68
verdichtingsgraad Q													%	proef 66.1
holle ruimte Q	4,3	6,2	4,2	4,0	4,3	4,4	3,4	5,2	5,6	4,4	5,3	4,4	% (v/v)	proef 69
bitumengehalte "op" Q	4,51	4,33	4,46	4,46	4,23	4,26	4,42	4,52	4,54	4,56	4,07	4,16	% (m/m)	proef 65.1
% op zeef C 31,5 Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	% (m/m)	proef 6
% op zeef C 22,4 Q	-	-	-	-	-	-	1.2	-	- 10.3	1.7	-	2.1		
% op zeef C 16 Q	1.8	1.0	1.5	4.6	5.2	2.3	10.2	6.9	26.9	8.5	7.5	13.1		
Q	10.1	13.6	11.6	15.5	26.3	13.2	22.3	21.1	34.7	27.9	21.7	25.1		
% op zeef C 11,2 Q	31.3	31.7	27.7	31.3	45.2	31.2	32.2	33.5	41.8	33.8	32.2	36.0		
% op zeef C 8 Q	46.0	43.7	39.8	40.8	52.7	43.5	37.7	44.1	56.7	42.9	39.0	40.6		
Q	54.1	55.3	53.1	52.8	56.2	55.1	53.2	56.1	68.6	55.3	54.0	55.3		
% op zeef C 5,6 Q	65.9	67.2	65.6	64.9	67.4	67.0	66.0	69.0	87.1	67.0	66.5	67.2		
% op zeef 2 mm Q	87.4	87.3	87.1	86.6	87.2	87.4	87.3	89.3	93.6	88.1	86.0	85.3		
% op zeef 500 µm Q	93.4	93.8	93.7	93.6	93.6	93.7	93.8	93.6		93.2	93.7	93.3		
% door zeef 63 µm Q	6,6	6,2	6,3	6,4	6,4	6,3	6,2	6,4	6,4	6,8	6,3	6,7	% (m/m)	proef 6
zanddriehoek:														
2 mm - 500 µm	30	31	31	30	30	31	32	34	32	31	32	31	%	proef 56
500 µm - 180 µm	55	52	53	53	53	53	52	54	50	56	49	48	(m/m)	
180 µm - 63 µm	15	17	16	17	17	16	16	12	18	13	19	21		

The “resultaten” table is more complicated. It contains columns representing the “boorkernen” and the first column is a header column indicating what a value represents. Depending on the values the order of reading can be reversed, due to errors caused by merged row-cells in combination with empty values (in the example above this is the case for the “dichtheid...” and “% op zeef...” values).

The table is read row by row ignoring all rows till it finds “parameter” in the first cell (indicating the header rows started). The next cell in this row that contains “monster” is a reference to the first row that can contain a “boorkern” result with the actual name of the “boorkern” one or two rows later. Each row found with a name for the “boorkern” is added in a lookup of input column to output row. This is not done by matching values, but only by ignoring the empty columns. Until the row containing monster finds another column with a value (in the example this is the text “eenheid”).

After reading the header rows, the value rows are read. The rows that start with “%” should be read reversed order to overcome issues with blanks (here minus signs are used, so this would not cause issues). Otherwise forward order is fine. Both will do the same and try to match all text in the first cell of a row with the regular expressions (although order can be reversed) and generate a list of columns (1 or multiple) to which output rows the input has to be mapped. When reading the values of a row, these are also split and in order assigned to a column according to the mapping in the list.

For the normal order values there is also a fix for the values “dichtheid proefstuk” and “dichtheid mengsel” depending on the occurrence of “holle ruimte”. This also has to do with merged empty cells in the values. “Holle ruimte” having a value means “dichtheid proefstuk” should be empty and “dichtheidmengsel” should have a value. If this is not the case, the value of “dichtheidmengsel” was falsely assigned to “dichtheid proefstuk”.

In case matching was not done, a line is written in the “Setup” sheet, that can help fixing the regular expression (allowing more name errors) to pass correctly and get assigned to the correct output column. Changing the regular expression is most likely to action to get this sheet to work on other documents as well. At most the case statement inside the VBA of the excel needs tweaking due to other naming of the tables or other markers used to find specific parts in the table.

Bijlage C

Linked data code voorbeelden

C.1 Linked data MonsterLaag tab

```
lam:MonsterLaag
  rdf:type owl:Class ;
  tables:sheetIndex "1"^^xsd:int ;
  rdfs:label "MonsterLaag" ;
.
```

C.2 Linked data eigenschap bindmiddelpercentage

```
lam:bindmiddelPercentage
  rdf:type owl:DatatypeProperty ;
  tables:columnIndex "25"^^xsd:int ;
  rdfs:domain lam:MonsterLaag ;
  rdfs:label "bindmiddelPercentage" ;
  rdfs:range xsd:double ;
.
```

C.3 Een monitoring meting in linked data

```
lam:Row2-1012
  rdf:type lam:MonitoringMeting ;
  tables:rowIndex "1012"^^xsd:int ;
  lam:bpsEindKilometrerings 5000 ;
  lam:bpsStartKilometrerings_0 4900 ;
  lam:bpsStrook "RSL" ;
  lam:bpsWeg_1 "N811" ;
  lam:hmp 4900 ;
  lam:jaar 2017 ;
  lam:maatregelBestek "1714" ;
  lam:somVanInspectieJaar 2017 ;
  lam:somVanRafeling 1 ;
  lam:somVanSurfaceJaarVan 2011 ;
  lam:surfaceFamilie "SMA" ;
  lam:surfaceOmschrijving "SMA-NL 11B" ;
.
```

C.4 SPARQL select-query

```

SELECT ?bpsWeg ?bpsStartKilometrering ?mengselType
?algemeneEisPercentageDoorZeef2mm ?algemeneEisPercentageDoorZeef0dot063mm
?minimalePercentageBindmiddel ?minimumPercentageHolleRuimte
?maximumPercentageHolleRuimte ?laag ?ontvangstDatum ?monster ?locatie
?verdichtingsgraad ?holleruimtePercentage ?bindmiddelPercentage
?doorZeef2millimPercentage ?doorZeef63micromPercentage ?jaar ?bpsStrook
?somVanSurfaceJaarVan ?somVanRafeling

WHERE {

  ?Specificatie rdf:type lam:OntwerpSpecificatie .
  ?Specificatie lam:bpsWeg ?bpsWeg .
  ?Specificatie lam:mengselVoldoetAanDeEisenVoor ?mengselVoldoetAanDeEisenVoor .
  ?Specificatie lam:algemeneEisPercentageDoorZeef2mm .
  ?algemeneEisPercentageDoorZeef2mm .
  ?Specificatie lam:algemeneEisPercentageDoorZeef0dot063mm .
  ?algemeneEisPercentageDoorZeef0dot063mm .
  ?Specificatie lam:minimalePercentageBindmiddel ?minimalePercentageBindmiddel .
  ?Specificatie lam:minimumPercentageHolleRuimte ?minimumPercentageHolleRuimte .
  ?Specificatie lam:maximumPercentageHolleRuimte ?maximumPercentageHolleRuimte .

  ?Laag rdf:type lam:MonsterLaag .
  ?Laag lam:bpsWeg_0 ?bpsWeg_0 .
  ?Laag lam:mengselType ?mengselType .
  OPTIONAL { ?Laag lam:bpsStartKilometrering ?bpsStartKilometrering } .
  OPTIONAL { ?Laag lam:laag ?laag } .
  ?Laag lam:ontvangstDatum ?ontvangstDatum .
  ?Laag lam:monster ?monster .
  ?Laag lam:locatie ?locatie .
  OPTIONAL { ?Laag lam:verdichtingsgraad ?verdichtingsgraad } .
  OPTIONAL { ?Laag lam:holleruimtePercentage ?holleruimtePercentage } .
  OPTIONAL { ?Laag lam:bindmiddelPercentage ?bindmiddelPercentage } .
  OPTIONAL { ?Laag lam:doorZeef2millimPercentage ?doorZeef2millimPercentage } .
  OPTIONAL { ?Laag lam:doorZeef63micromPercentage ?doorZeef63micromPercentage } .

  ?Meting rdf:type lam:MonitoringMeting .
  ?Meting lam:bpsWeg_1 ?bpsWeg_1 .
  ?Meting lam:surfaceOmschrijving ?surfaceOmschrijving .
  ?Meting lam:jaar ?jaar .
  ?Meting lam:hmp ?hmp .
  ?Meting lam:bpsStrook ?bpsStrook .
  ?Meting lam:somVanSurfaceJaarVan ?somVanSurfaceJaarVan .
  ?Meting lam:somVanRafeling ?somVanRafeling .

  FILTER (?bpsWeg = ?bpsWeg_0) .
  FILTER (?bpsWeg = ?bpsWeg_1) .
  FILTER (?mengselVoldoetAanDeEisenVoor = ?mengselType) .
  FILTER (?mengselVoldoetAanDeEisenVoor = ?surfaceOmschrijving) .
  FILTER (?bpsStartKilometrering = ?hmp) .
}

```

Mobility & Built Environment

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
www.tno.nl