

TNO-rapport**TNO 2020 R10637****Asfalt-Impuls - LAM – Fase 2 – WP2:
Proof of Concept van een
levensduurvoorspellend asfaltmodel****Buildings, Infrastructure &
Maritime**Stieltjesweg 1
2628 CK DELFT
Postbus 155
2600 AD DELFT

www.tno.nl

T +31 88 866 20 00

Datum	13 mei 2020
Auteur(s)	Ir.G.A. Leegwater (TNO) Dr.ir. W.M.G. Courage (TNO) Dr.ir. D.Q. van Lent (TNO) Drs.ir. M. Moenielal (TNO) Ir. G. Martini (TNO) Dr.ir. G.T. Luiten (TNO)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	47 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	12
Opdrachtgever	Stichting CROW
Projectnaam	Asfalt-Impuls LAM WP2 Fase 2
Projectnummer	060.41140 en 060.37824

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2020 TNO

Management samenvatting

Dit rapport is opgesteld in het kader van het programma Asphalt-Impuls en is tot stand gekomen dankzij inspanningen en financiële bijdragen van Asphalt-Impuls partners. Hoofddoelstellingen van Asphalt-Impuls zijn verdubbeling van de gemiddelde levensduur van onze asfaltwegen, halvering van spreiding in levensduur en halvering van CO₂-productie, tegen gelijke of lagere kosten. Het project LAM – Levensduurvoorspellend Asphalt Model – is onderdeel van dit programma en heeft als doel het opstellen van een objectief en betrouwbaar asfaltlevensduurmodel dat toepasbaar is in de ontwerp-, gebruiks-, en onderhoudsfase. Dit rapport beschrijft het werk en de resultaten die uitgevoerd zijn in het LAM-project, fase 2, werkpakket 2 (het modeldeel). Focus was het maken van een Proof of Concept (PoC) voor een applicatie, waarin één schadebeeld is geïmplementeerd, namelijk dat voor rafeling. Deze PoC-applicatie voor rafeling zal in het vervolg ingezet worden als proeftuin voor de PoC-applicaties voor andere schadebeelden.

Bij de ontwikkeling van de PoC-applicatie zijn keuzes gemaakt met betrekking tot het rafelingsmodel en het raamwerk. Uitgangspunt bij de invulling van het LAM-model voor het schadebeeld rafeling is gebruik te maken van bestaande modellen en deze waar mogelijk te combineren en verrijken met data. In paragraaf 3.1 wordt uitgelegd waarom in deze eerste implementatie is gekozen voor het APAS-model (Accelerated Pavement Assessment). Voordeel van dit model is dat het invloedsparameters combineert die reeds eerder zijn geïdentificeerd als relevant voor rafeling. Ook is de achtergrond van dit materiaalmodel goed beschikbaar, daar het reeds langere tijd bij TNO wordt gebruikt. Par. 3.2 beschrijft waarom is gekozen voor een model op basis van Bayesiaanse netwerken. Deze aanpak heeft geleid tot een PoC-applicatie die is beschreven in par. 3.3. Invoerparameters voor de applicatie zijn o.a. mengselsamenstelling, bindmiddelleigenschappen en temperatuursbelasting. Deze input wordt verwerkt tot een levensduurvoorspelling met een bepaalde betrouwbaarheid, zoals is toegelicht in par. 3.4. Omdat nog maar beperkt data van prestaties in de praktijk beschikbaar waren, was verificatie maar beperkt mogelijk. Dit zal gebeuren in latere fasen van het LAM-project.

Aangezien acceptatie in de sector essentieel is voor het slagen van het LAM-project, wordt in hoofdstuk 4 expliciet stilgestaan bij de interactie met de sector. Belangrijkste activiteit hierbij was de presentatie aan de sector op 13 februari 2020. Hier kwam naar voren dat er vertrouwen is in het LAM-concept, maar dat nog meer aandacht nodig is voor de invulling van het rafelingsmodel. Dit is dan ook geïdentificeerd als aandachtspunt voor de verdere ontwikkeling van het LAM-rafelingsmodel.

Hoofdstuk 5 beschrijft het werkplan voor fase 3 van WP2, het modeldeel van het LAM-project. Dit is gebaseerd op bevindingen uit fase 2. Dit werkplan zal in overleg met de betrokkenen bij het LAM-project en Asphalt-Impuls verder worden uitgewerkt, o.a. met een prioritering.

Samengevat heeft de PoC-applicatie voor rafeling laten zien dat ontwikkeling van een levensduurmodel technisch haalbaar is. De toegevoegde waarde in de markt is nog moeilijk te kwantificeren, maar er is duidelijk behoefte aan een onafhankelijk model voor levensduurvoorspelling. Het LAM-project heeft de potentie dit te leveren.

Inhoudsopgave

	Management samenvatting	2
1	Inleiding	4
1.1	Asfalt-Impuls	4
1.2	Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM).....	4
1.3	Leeswijzer.....	5
2	Het LAM-concept	6
3	PoC-applicatie Rafeling	8
3.1	Achterliggende schademodel	8
3.2	Bayesiaanse Netwerken als modelleertechniek.....	15
3.3	PoC uitwerking voor LAM-rafeling met Bayesiaanse Netwerken.....	19
3.4	Resultaten PoC-applicatie LAM-rafeling	23
3.5	Verificatie a.d.h.v. beschikbare levensduurdata.....	25
3.6	Conclusie PoC-applicatie LAM-rafeling.....	26
4	Interactie binnen Asfalt-Impuls	28
4.1	Workshop PoC-applicatie LAM- Rafeling, 13 februari 2020.....	28
4.2	AI-LAM WP1: data en data-analyse	29
4.3	Programma van Eisen PoC-applicatie LAM-Stroefheid	30
4.4	Interactie met andere Asfalt-Impuls projecten.....	30
5	Werkplan LAM WP2 Fase 3.....	31
5.1	Asfalttechnologie	31
5.2	Implementatie in PoC-applicatie LAM	32
5.3	Verbinding met data (LAM WP1).....	32
5.4	Stimuleren gebruik in de sector	33
5.5	Vorbereiden acceptatie LAM in de sector	33
6	Literatuur	34
7	Ondertekening	35
	Bijlage(n)	
	A Resultaten AI-LAM werksessie 13 februari 2020, Delft	blz.36 t/m 41
	B Brainstorm ontwikkelpad LAM	blz. 42
	C Verslag dataverzameling AI-LAM, fase 2, WP1	blz. 43 t/m 45
	D Woordenlijst, zoals gebruikt binnen LAM-project WP2	blz. 46 t/m 47

1 Inleiding

1.1 Asfalt-Impuls

Wegbeheerders, asfaltaannemers, leveranciers, ontwerpers, kwaliteitsborgers en kennisinstellingen staan de komende jaren gesteld voor grote uitdagingen bij het beheer- en onderhoud van ons wegennet. Voorbeelden van deze uitdagingen zijn invulling geven aan de circulaire economie, het Klimaatakkoord van Parijs en de Green Deal duurzaam GWW 2.0. En dit tegen de algemene achtergrond van minder kosten, minder hinder voor weggebruikers en omgeving én een gezonde economische omgeving voor de asfaltproducerende en verwerkende bedrijven. In het programma Asfalt-Impuls worden door ketenpartijen in de sector gewerkt aan projecten om oplossingen te leveren 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.

Dit rapport is een deelrapportage van het LAM-project en wel voor Fase 2 – 2019, WP2 Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM-model): de Proof of Concept applicatie voor het LAM-model voor rafeling.

1.2 Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM)

Randvoorwaarden voor het LAM-model zijn dat het breed geaccepteerd is, voldoende representatief, bruikbaar in de praktijk en op te nemen in voorschriften en aanbestedingen. Het voldoende eenvoudig en representatief voorspellen van de (rest)levensduur van asfalt verhardingen is op dit moment niet mogelijk door onvoldoende kennis van op welke wijze, welke parameters de levensduur beïnvloeden. Het kunnen bepalen van de (rest)levensduur is echter cruciaal voor zowel assetmanagementsystemen, als het uitvoeren van eerlijke LCA en LCC analyses. Er zijn op dit moment allerlei bronnen binnen bereik die dit inzicht in levensduur van asfalt kunnen vergroten. Deze informatie is echter op dit moment versnipperd. Binnen het LAM-project bundelen we de kennis, informatie, data en modellen over de levensduur van asfalt in de sector tot een algemeen levensduurvoorspellend model voor asfalt – het LAM-model. De gevonden data en informatie worden in het project geanalyseerd met behulp van geavanceerde data-analyse technieken. De resulterende correlaties worden in combinatie met bestaande schademodelen ingezet om voorspellingen te doen over de (rest)levensduur van asfaltwegdekken om zo te komen tot een State of the Art asfalt levensduurmodel dat breed wordt geaccepteerd, voldoende representatief, bruikbaar in de praktijk én op te nemen in voorschriften en aanbestedingen is.

Als onderdeel van de opstart van het LAM-project in fase 1 hebben TNO en Kiwa-KOAC een inventarisatie gedaan van beschikbare levensduurvoorspellende modellen en de kennis hierover (Leegwater e.a., 2019).

Het LAM-project, werkpakket 2 richt zich in fase 2 op het ontwikkelen van een eerste Proof of Concept applicatie voor het LAM-model voor het voorspellen van de levensduur voor rafeling gedurende de ontwerpfase voor nieuwe of te vernieuwen wegdekken. In deze eerste PoC-applicatie is het Accelerated Pavement Assessment (APAS)-degradatiemodel geïmplementeerd in een Bayesiaans

netwerk, samen met correlaties uit data-analyses over waargenomen prestaties van asfaltdeklagen en met expert meningen. Deze PoC-applicatie is geëvalueerd met stakeholders en experts in een werksessie op 13 februari 2020. Hieruit zijn waardevolle lessen getrokken voor het vervolg.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bespreekt het LAM-concept dat gevolgd wordt voor het ontwikkelen van de LAM-applicatie. Hiervoor beginnen we met een Proof of Concept (PoC) van die applicatie om te bepalen of het gekozen concept werkt.

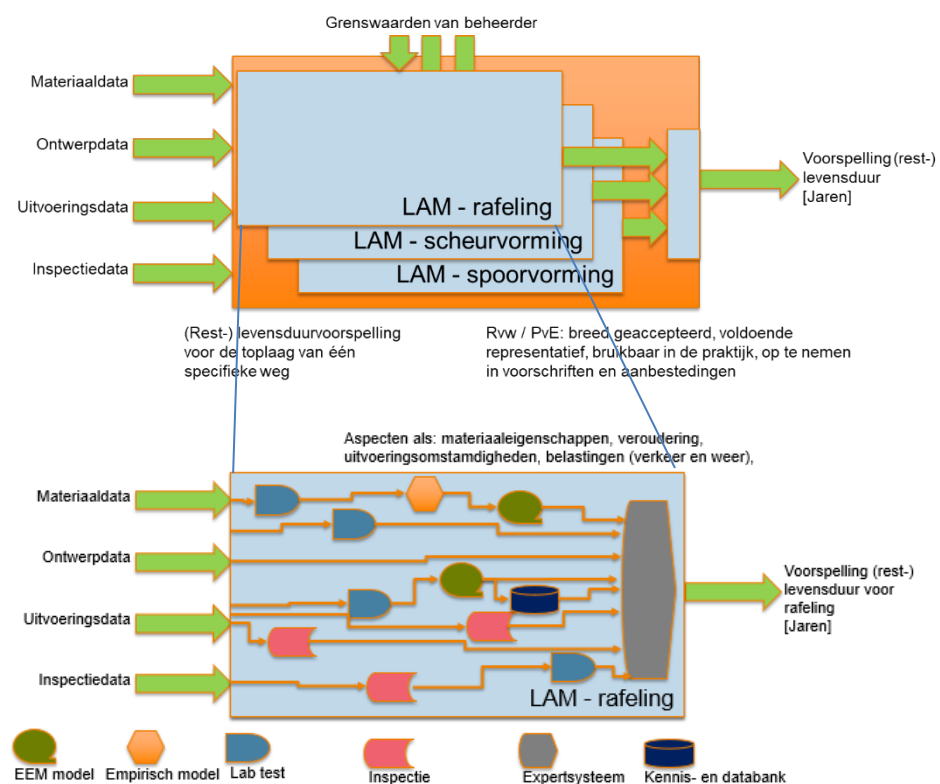
Hoofdstuk 3 beschrijft de ontwikkelde PoC-applicatie voor het schadebeeld rafeling. Besproken wordt aan welke eisen de applicatie dient te voldoen, hoe de applicatie geïmplementeerd is en wat de leerpunten uit de verificatie en demonstratie waren. Dit werk is voornamelijk uitgevoerd door TNO.

In dit WP2 van het LAM-project is samengewerkt met stakeholders uit de sector, de andere werkpakketen van het LAM-project en ander Asphalt-Impuls projecten. Deze interactie wordt omschreven in hoofdstuk 4

Tenslotte beschrijft hoofdstuk 5 de plannen voor fase 3 van het LAM-project WP2. Deze zullen worden opgepakt vanaf maart 2020.

2 Het LAM-concept

In werkpakket 2, fase 1 van het LAM-project (Leegwater e.a., 2019) is een inventarisatie gemaakt die gericht was op het verzamelen van kennis en modellen met betrekking tot de levensduur van asfalt. In een parallel lopende inventarisatie is onder leiding van RWS gewerkt aan het verzamelen van informatie en data die betrekking hebben op eigenschappen en prestaties van wegen in Nederland. In de inventarisatie van modellen is een onderverdeling gemaakt naar schadebeelden, opdat per schadebeeld duidelijk wordt welke modellen beschikbaar zijn voor het maken van een levensduurvoorspelling (Zie Figuur 1). De schadebeelden die in deze inventarisatie werden onderscheiden zijn rafeling, scheurvorming, onvlakheid, stroefheidsverlies en verlies van geluidsreductie.



Figuur 1 Het LAM-concept waarin eerst kennis, modellen en data wordt gecombineerd om tot levensduurvoorspelling per schadebeeld te komen (onder). Vervolgens vormen de combinaties van kennis, modellen en data van de schadebeelden samen een geavanceerd alomvattend levensduurmodel (boven).

In de modellering definiëren we de levensduur van asfalt voor een schadebeeld als het aantal jaren dat het wegvak nog mee kan voor er vervangingsmaatregelen genomen moeten worden voor dat schadebeeld, zonder levensduurverlengende maatregelen. Deze benadering sluit aan bij zowel de ontwerp-, aanleg- als beheerfase. De beheerder neemt een besluit tot vervanging als de kwaliteit van het wegdek een bepaalde grenswaarde overschrijdt. De beheerder kijkt dat per schadebeeld. De (rest-) levensduur is dan de verwachting voor het aantal jaren dat die grenswaarde voor dat schadebeeld nog niet overschreden is. De gebruikte criteria en grenswaarden verschillen per schadebeeld. Voor het schadebeeld rafeling wordt de toestand over het algemeen uitgedrukt in percentage steenverlies;

voor spoorvorming bijvoorbeeld in diepte van het spoor. De te verwachten restlevensduur voor rafeling kan heel anders zijn dan die voor spoorvorming. Het is dus van belang altijd de levensduur per schadebeeld te bekijken. En vervolgens aan te geven welk schadebeeld maatgevend is.

De werkzaamheden van het gehele LAM-project uitgevoerd in fase 2 van juni 2019 tot en met maart 2020 richten zich op vier doelen:

- 1) Werkpakket 1: De potentie van geavanceerde data-analyses op wegebouwdata demonstreren, door in een pilot gericht data te verzamelen, deze data te ordenen en instrumenten te ontwikkelen die deze data kunnen analyseren.
- 2) Werkpakket 2a: Het ontwikkelen van een eerste implementatie van het LAM-concept in een Proof of Concept (PoC) applicatie voor het voorspellen van de levensduur voor het schadebeeld rafeling van nieuwe wegdekken gedurende het ontwerp.
- 3) Werkpakket 2b: Het voorbereiden van de PoC-applicatie voor het schadebeeld stroefheid.
- 4) Werkpakket 3: Begeleiding van een verkenning naar behoefte en mogelijkheden voor een dataplatform in de sector.

In fase 2 zijn de modellen voor de schadebeelden rafeling en stroefheid in meer detail uitgewerkt om te demonstreren hoe fysische modellen, expert meningen en data-analyses worden gecombineerd in een model voor de voorspelling van de levensduur gedurende het ontwerp van nieuwe asfaltmengsels. Hierbij wordt voor het schadebeeld rafeling een implementatie gemaakt in een PoC-applicatie, terwijl de implementatie in een PoC-applicatie voor het schadebeeld stroefheid wordt voorbereid. Er is gekozen voor deze gefaseerde aanpak om ervoor te zorgen dat er stap voor stap gedeeltes van de LAM-applicaties kunnen worden opgeleverd en in elke nieuwe stap de lessons learned uit de vorige stap kunnen worden meegenomen.

Deze rapportage focust zich op de uitwerking van het tweede doel van deze tweede fase, namelijk het ontwikkelen een eerste PoC-applicatie van het LAM-rafelingsmodel. Deze PoC-applicatie laat zien hoe het LAM-concept gebruikt wordt om de levensduur te voorspellen van een asfalt deklaag wat betreft het schadebeeld rafeling. De uiteindelijke LAM-applicatie zal levensduurvoorspellingen voor verschillende schadebeelden combineren tot één overkoepelende voorspelling.

Voor de implementatie wordt in deze fase gewerkt aan een Proof of Concept (PoC) applicatie. Met een PoC-applicatie wordt getoetst of het gekozen concept (de aanpak) werkt, dat wil zeggen of de implementatie van het gekozen concept haalbaar is en voldoende toegevoegde waarde heeft. Eerst zal gekeken worden of de implementatie technisch haalbaar is. Vervolgens wordt de toegevoegde waarde t.o.v. huidige modellen en applicaties afgewogen. Het maken van een inschatting van de kosten en baten van de LAM-applicatie is op basis van deze PoC-applicatie nog niet goed mogelijk en zal daarom op kwalitatieve wijze worden ingevuld.

3 PoC-applicatie Rafeling

In hoofdstuk 2, Figuur 1, is het concept geschetst van het Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM) – het LAM-concept. Een raamwerk dat hieraan voldoet zal eerst in een Proof of Concept applicatie worden geïmplementeerd voor het schadebeeld rafeling, waarmee de technische haalbaarheid en de toegevoegde waarde van het concept worden bepaald. Paragraaf 3.1 gaat daartoe eerst in op een voor de PoC-applicatie gekozen rafelingsmodel. In paragraaf 3.2 wordt uitgelegd waarom gekozen is voor een Bayesiaans netwerk als modelleertechniek, waarna in de navolgende paragrafen het LAM-rafelingsmodel en de PoC-applicatie verder wordt uitgewerkt en geverifieerd. Tenslotte worden conclusies over deze PoC-implematie getrokken.

3.1 Achterliggende schademodel

Startpunt voor de PoC-applicatie voor het schadebeeld rafeling is een overzicht van die parameters, waarvan in de literatuur beargumenteerd wordt dat ze invloed hebben op de schadeontwikkeling van rafeling en daarmee op de levensduurvoorspelling voor rafeling (de Rooij e.a. 2008, de Rooij e.a. 2010, Leegwater e.a. 2019). Uitgangspunt voor deze invloedsparementers is de long-list van geselecteerde parameters die invloed hebben op rafeling, zoals gebruikt binnen het TNO-LOT model (de Rooij e.a. 2008). Voor de eerste implementatie wordt het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel gekozen als vermoeiingsmodel, waarmee de long-list wordt teruggebracht naar een short-list van meest relevante invloedsparementers. In het APAS-model worden daarmee een aantal parameters uit de short-list ingevuld. In het APAS-model voor deze PoC worden verkeersbelastingen en uitvoeringsomstandigheden nog niet meegenomen.

3.1.1 *Invloedsparementers rafeling*

Binnen het eerste Levensduur Optimalisatie Tool (LOT) voor 2-laags ZOAB van TNO (TNO-LOT) (de Rooij e.a. 2008) is vooral gebruik gemaakt van de expertmeningen om de rafeling te voorspellen. Op basis van deze expertmeningen is een lijst opgesteld met parameters die van invloed worden geacht voor rafeling. In de lijst in zitten momenteel 138 parameters. De opzet van TNO-LOT kan in principe met alle parameters rekenen. Echter, niet al deze parameters zijn even belangrijk voor de voorspelling van de rafeling. Om de invoer van benodigde parameters voor de LOT te beperken is destijds een selectie uit de lijst van parameters gemaakt.

Deze selectie is tot stand gekomen aan de hand van de volgende criteria:

- Lokale en incidentele verschijnselen zoals olie en lijkvocht worden niet meegenomen; deze zijn niet representatief voor de algemene rafeling van het 2-laags ZOAB.
- Om een parameter als belangrijk te bestempelen moeten minimaal 3 experts iets over de parameter gezegd hebben;
- Om een als belangrijke bestempelde parameter vervolgens mee te nemen in het model, moet die parameter aan minstens één van de volgende punten voldoen:
 - de gemiddelde invloed op de levensduur > 3 jaar;
 - de standaardafwijking van de invloed op de levensduur > 2 jaar;

- de parameter werd toch als zeer belangrijk bestempeld in de parametersessie waarbij alle parameters doorgesproken zijn, ondanks dat ze niet aan de eerder genoemde voorwaarden voldoen.

Na het toepassen van deze criteria ontstond er een lijst van 45 parameters, zoals o.a. remvertraging, visuele inspectie bij oplevering (kan ervoor zorgen dat er intensiever onderhoud gepleegd wordt) of inzet shuttle buggy. Een aantal parameters voldeden niet aan de selectiecriteria, zoals bijvoorbeeld verkeersintensiteit. Door de experts werd ingeschat dat deze slechts een verandering van 2,5 jaar op de levensduur heeft, hetgeen minder is dan het selectie criterium van 3 jaar. Als parameter in het achterliggende TNO-LOT model bleef de verkeersintensiteit wel beschikbaar, maar doordat het uit de geselecteerde lijst is gevallen, is het geen invoerparameter.

Het toepassen van het laatste selectiepunt (parameter als belangrijk bestempeld tijdens parametersessie) heeft voor een aantal aanpassingen gezorgd. De resulterende lijst van 45 parameters is nog eens uitvoerig bekeken samen met de opmerkingen die experts over de parameters gemaakt hadden. Hierdoor zijn de volgende parameters, met bij genoemde reden nog uit de invoerlijst gehaald:

- Verhouding steenslag:vulstof:zand (27). Deze parameter was door de experts niet eenduidig beantwoord waardoor hij op dit moment geen toegevoegde bijdrage kan leveren als invoer parameter.
- T_Wals (64). Bij de parameterworkshop eind september 2007 is voorgesteld om deze parameter te splitsen in “begin- (306) en eindtemperatuur (307) van asfalt bij verdichting”. Deze laatste twee parameters zijn wel als invoerparameter meegenomen.
- Verdichtingsgraad (100). Bij de CROW workshop is deze parameter besproken en vervangen door “doelichtheid bij optimale korrelstapelning” (405).
- Plaats van het werk (303). Deze parameter bleek achteraf op deze manier geformuleerd niet geschikt voor de huidige vraagstelling en is daarom niet meegenomen in de lijst.

Tabel 1 geeft de uiteindelijke lijst met 41 parameters die dienden als invoer voor TNO-LOT, die als long-list startpunt is voor de PoC-applicatie Rafeling.

Tabel 1 Lijst met 41 invoerparameters voor TNO-LOT (de Rooij e.a. 2010), die dienen als long-list voor de PoC-applicatie Rafeling .

Parameter nummer	Invoerparameter
3	Soort bitumen
4	Bitumengehalte [%]
6	Percentage polymeren in bitumen [%]
9	Klasse steenslag (i.p.v. soort) (1 of 2 of 3)
12	Verbrijzeling [%]
41	Steenslaggradering
44	Percentage holle ruimte [%]
46	Temperatuur molen (meng) (absolute afwijking t.o.v. van gewenst (=0) [°C])
47	Mengtijd [s]
48	Vochtigheid steenslag na drogen[%]
49	Duur transport [uur]

Parameter nummer	Invoerparameter
50	Temperatuur tijdens transport (absolute afwijking t.o.v. van gewenst (=0) [°C])
51	Laagdikte toplaag [mm]
52	Neerslag [nee=0/ja=1]
53	Windsnelheid [m/s]
55	Temperatuur buitenlucht [°C]
56	Temperatuur asfalt in hopper (absolute afwijking t.o.v. van gewenst (=0) [°C])
57	Temperatuur achter hopper (absolute afwijking t.o.v. van gewenst (=0) [°C])
58	Temperatuur achter balk (absolute afwijking t.o.v. van gewenst (=0) [°C])
59	Afkoelingstijd tot 60 graden [min]
61	Aantal walsovergangen [-] (% afwijking t.o.v. optimum (=0))
66	Temperatuurverschil onder- en bovenlaag [°C]
79	Boogstraal (centrifugaalkracht) [m]
97	Visuele inspectie bij oplevering [niet = 0/ wel =1]
98	Percentage holle ruimte [%] (gerealiseerd)
99	Percentage bitumen [%] (gerealiseerd)
114	Cantabro [ongunstig of veel = 0 / gunstig of weinig = 1]
116	RSAT/ rafeling (meeste (=1) - minste (=0) steenverlies)
201	Percentage polymeer in bindmiddel [%] (gerealiseerd)
203	Remvertraging [m/s ²] (gerealiseerd)
205	Wisselingen rond 0-punt [# wisselingen/jaar]
301	Isolatiegraad vrachtauto [slecht =0/ goed =1]
302	Afstand werk-molen [km]
304	Homogeniteit temperatuur achter balk (niet homogeen = 0/homogeen = 1)
305	Inzet shuttlebuggy [niet = 0/ wel = 1]
306	Begintemperatuur asfalt bij verdichting
307	Eindtemperatuur asfalt bij verdichting
308	Afstand wals-balk [m]
401	Verbranding in de molen [nee=0/ja=1]
403	Soort wals (2 of 3 roller of anders)
405	Doeldichtheid bij optimale korrelstapeling [%]

3.1.2 *Introductie APAS-temperatuursvermoeiingsmodel*

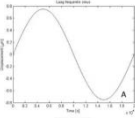
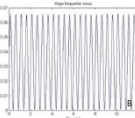
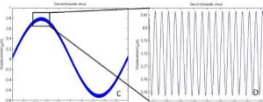
De 41 geselecteerde invoerparameters van TNO-LOT vormen de longlist voor de PoC applicatie voor rafeling. Aan de hand van deze long-list is gekeken naar (deel)rafelingsmodellen die makkelijk beschikbaar zijn voor een eerste implementatie in de PoC-applicatie. Als eerste implementatie is gekozen voor het temperatuursvermoeiingsmodel binnen APAS (van Lent e.a. 2015). Voordeel van dit model is dat het invloedsparameters combineert die reeds eerder zijn geïdentificeerd als relevant voor rafeling. Ook is de achtergrond van dit materiaalmodel goed beschikbaar, daar het reeds langere tijd bij TNO wordt gebruikt. Dit deelmodel zal in de volgende paragraaf verder worden beschreven. In een later stadium zullen andere en aanvullende (deel)rafelingsmodellen worden geïmplementeerd in de uiteindelijke LAM-applicatie.

Asfalt is samengesteld uit mineraal-aggregaat en bitumen, waarbij bitumen het bindmiddel is. Bitumen is een visco-elastisch materiaal. Asfalt gedraagt zich daardoor ook als een visco-elastisch materiaal. Dit betekent dat de mechanische eigenschappen van asfalt als gevolg van (cyclische) belasting tijd- en temperatuurafhankelijk zijn. Bij een korte belastingtijd en lage temperaturen zal het asfalt zich meer elastisch gedragen. Bij een lange belastingtijd en hoge temperaturen gedraagt asfalt zich meer viskeus; als er op het asfalt een constante spanning staat, zal het asfalt gaan kruipen. Als er een verplaatsing wordt opgelegd zal de spanning ten gevolge van deze verplaatsing afnemen in de tijd, met andere woorden er treedt relaxatie op.

In de praktijk is asfalt onderhevig aan verschillende belastingen. In onderzoek van TNO (Jansen 2013) zijn de worstcase scenario's van werkelijke belastingen onderzocht. Hierbij is gekeken naar verkeersbelasting en temperatuurbelasting, welke beide cyclisch van aard zijn (Tabel 2). Als er op asfalt een dynamische sinusvormige rek (zoals temperatuurfluctuaties en/of verkeer) wordt uitgeoefend, zal de spanning in het proefstuk ook een sinusvorm hebben. Deze spanningssinus is echter uit fase en zal "achter" de reksinus aanlopen. Het optredende faseverschil wordt ook wel de fasehoek genoemd. Dit faseverschil betekent dat een deel van de spanning gebruikt wordt om energie in het materiaal op te slaan (het elastische gedeelte) en een deel gedissipeerd wordt (het viskeuze effect). Wanneer een dynamische belasting voor lange tijd wordt opgelegd, kan vermoeiing optreden. Door vermoeiing ontstaan (micro-)scheurtjes in het asfalt en wordt de integriteit van het materiaal aangetast. De stijfheid is één van de materiaaleigenschappen die een indicator is voor de schadeopbouw in asfalt. Door het ontstaan van scheurtjes, als gevolg van de dynamische belasting, zal de stijfheid met verloop van tijd afnemen.

Schade door vermoeiing kan worden afgeleid uit een afname van de dynamische materiaalstijfheid en een toename van het faseverschil. Beide parameters zijn als standaard karakteristieke parameters genomen voor het bepalen van de levensduur van het asfaltproefstuk (Jansen 2013). In het onderzoek zijn vierpuntsbuigproeven uitgevoerd om de afname van de dynamische materiaalstijfheid en de toename van het faseverschil te bepalen.

Tabel 2 Gehanteerde parameters voor de 4P buigtesten in APAS onderzoek (Jansen 2013)

		Frequenties (Hz)	Amplitudes (μm)	Testtemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
Temperatuursbelasting	 dag-nacht cyclus: 0 tot -10°C	$5,0 \cdot 10^{-5}$	750,0	-5,0
Verkeersbelasting	 40.000 voertuigen per dag	2,0	33,0	-5,0
Gecombineerde belasting		$5,0 \cdot 10^{-5}$ & 2,0	750,0 & 33,0	-5,0

De resultaten van dit onderzoek hebben laten zien dat voor verouderd materiaal, de temperatuur de maatgevende belasting is voor het optreden van schade. Voor vers materiaal heeft verkeersbelasting de grootste invloed op het ontwikkelen van schade.

Een ZOAB deklaag gaat ongeveer 10 jaar mee¹. In de praktijk is de “verse” fase relatief kort. Uit de bitumenverouderingsdatabase blijkt dat deze fase ca. 1 jaar is (van Lent 2014). Dus vanaf het moment dat het wegdek 1 jaar oud is, wordt de temperatuurbelasting maatgevend. Dat betekent dus ook dat temperatuurbelasting de grootste bijdrage zal hebben gedurende de levensduur van het asfalt.

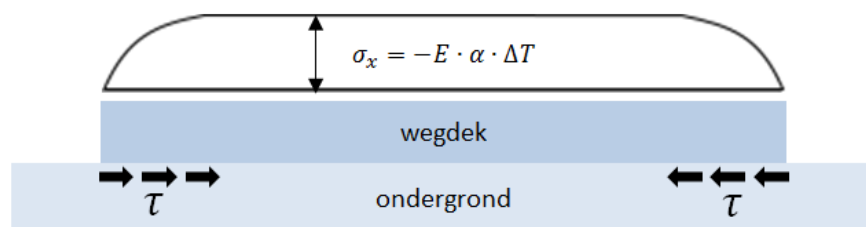
3.1.3 Modelomschrijving

Het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel dat in bovengenoemde projecten is ontwikkeld heeft als fundament de formule die de spanning van verhinderde vervorming door temperatuursveranderingen omschrijft. De spanning bij verhinderde vervorming door de temperatuurverandering wordt berekend met:

$$\sigma_x = -E \frac{\Delta l}{l} = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

σ_x	spanning (MPa)
E	stijfheid (MPa)
Δl	lengte toe/afname (mm)
l	lengte (mm)
α	lineaire uitzettingscoëfficiënt ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
ΔT	temperatuurverschil ($^{\circ}\text{C}$)

Schematisch is dit weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Schematische weergave van de spanning ten gevolge van de temperatuursverandering op een asfaltweg.

In het APAS-temperatuurvermoeiingsmodel worden vermoeiingslijnen bepaald voor de door te rekenen asfaltmengsels. Indien geen vermoeiingsexperimenten zijn uitgevoerd, wordt een standaard vermoeiingslijn gebruikt. De huidige standaard-vermoeiingslijn voor asfaltmengsels is uit de literatuur overgenomen (Li 2013) en is als volgt:

$$N_f = k \cdot \epsilon^b = k \cdot [|E| \cdot \sigma]^b = 1,6 \times 10^{17} \cdot [|E| \cdot \sigma]^{-6,03} \quad (2)$$

N_f aantal wisselingen

¹ http://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/feiten_en_cijfers/zoab/

k	<i>constante</i>
ε	<i>rek</i>
b	<i>materiaalconstante</i>
E	<i>stijfheid (MPa)</i>
σ	<i>spanning (MPa)</i>

Met behulp van de berekende spanning die in het wegdek aanwezig is als het gevolg van temperatuur, en de stijfheid van het materiaal, kan de bijdrage per dag van de vermoeiing aan de schadeontwikkeling berekend worden als $n_i = 1/N_i$. Met behulp van Miner's Rule kan vervolgens de bijdrage van iedere lastherhaling aan de vermoeiing worden opgeteld:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C \quad (3)$$

Met deze vergelijkingen rekent het model het aantal wisselingen tot bezwijken als gevolg van temperatuursveranderingen door.

3.1.4 *Inputparameters*

Voor het uitrekenen van de hiervoor gepresenteerde formules zijn een aantal invoerparameters nodig. De focus van het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel ligt op de materiaaleigenschappen in combinatie met de temperatuurbelasting. De parameters in Tabel 3 zijn invoerparameters in dit model.

Tabel 3 Parameters die zijn meegenomen in het model

Klimatologische gegevens	• Temperatuur
	• Belastingduur
Materiaaleigenschappen	• Volumetrische samenstelling
	• Stijfheid
	• Lineaire uitzettingscoëfficiënt/relaxatie

De materiaaleigenschappen zijn afhankelijk van geometrie/afmetingen/laagdikte, de samenstelling van het asfaltmengsel en de leeftijd van het asfalt. Zowel de materiaaleigenschappen als de temperatuur zijn geen constanten, daardoor varieert de schadetoename per last en neemt deze gemiddeld gezien toe in de tijd.

Er is nog een aantal andere parameters die het mechanisch gedrag van asfalt beïnvloeden. Deze zijn in de huidige APAS-temperatuursvermoeiingsmodel (nog) buiten beschouwing gelaten, en dus ook niet zijn opgenomen in de LAM-PoC-applicatie.

Het gaat hierbij om:

- verkeersbelasting (hoeveelheid verkeer en aslastgrootte), en
- omstandigheden tijdens aanleg.

3.1.5 *Aannames en uitgangspunten*

3.1.5.1 *Klimatologische gegevens in Nederland (ΔT)*

Om het gedrag van asfalt in de praktijk te simuleren is kennis nodig van de temperatuur in Nederland. Niet alleen de temperatuurvariëaties in Nederland over het jaar zijn van belang, maar ook de temperatuurvariëaties in Nederland over de dagen.

Om een temperatuurprofiel van de weg vast te stellen dient een locatie in Nederland te worden gekozen. In het model is ieder (willekeurig) temperatuurprofiel te laden. Ter toelichting, in Twente zijn de temperatuurswisselingen over het algemeen extremer dan bijvoorbeeld in De Bilt of Vlissingen. Hierdoor worden door het laden van een temperatuurprofiel uit Twente over het algemeen meer discriminerende resultaten verkregen uit het model voor verschillende mengsels.

Voor de temperatuurvariaties in Twente zijn de weergegevens verzameld van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Uit deze gegevens zijn de maximum en minimum temperatuur van de dag gefilterd en is de temperatuurverandering per dag (ΔT) berekend. De klimaatgegevens kunnen per situatie worden gespecificeerd. Indien bijvoorbeeld de weg in september 2006 is aangelegd kunnen de gegevens vanaf deze datum worden gebruikt.

3.1.5.2 *Samenstelling en stijfheid van het materiaal (S_{mix})*

Voor alle materialen geldt dat de samenstelling van het materiaal van invloed is op de uiteindelijke sterkte en stijfheid van een constructie. In het geval van asfalt is de samenstelling van steenslag, zand, vulstoffen en bindmiddel van belang. De stijfheid van het asfaltmengsel is afhankelijk van de temperatuur en de samenstelling. Indien niet gemeten, kunnen de stijfheden van de verschillende asfaltmengsels worden berekend, gebaseerd op BANDS (Shell), dit op basis van de bitumenstijfheden en de asfaltsamenstellingen. Uit de KNMI gegevens kan de gemiddelde temperatuur per dag bepaald worden. Hiermee kan de gemiddelde stijfheid over de dag voor mengsels worden berekend.

Naast de temperatuurinvloeden neemt de stijfheid van het asfalt over de tijd toe ten gevolge van veroudering. Uit het IQ2012-29 DSR-vliegwiel onderzoek (Mookhoek 2012) blijkt het effect van veroudering van teruggewonnen bindmiddel op de stijfheid een logaritmisch verloop te hebben. De snelheid waarop deze veroudering verloopt is afhankelijk van het gekozen bindmiddel. De logaritmische veroudering in de stijfheid is in het model meegenomen analoog aan de veroudering van teruggewonnen bindmiddel.

De stijfheid van het bindmiddel wordt bepaald aan de hand van de volgende formule, waarbij P_n en Q_n constanten zijn:

$$|G^*| = P_n \ln(t) + Q_n \quad (4)$$

Deze formule is gefit op alle in TNO's bitumenverouderingsdatabase beschikbare gegevens (van Lent 2014). Deze gefitte formule is een benadering van de verouderingsrelatie van bitumen over de tijd in de praktijk. De asfaltstijfheid wordt berekend op basis van deze berekende verouderde bitumenstijfheid en neemt dus toe in de tijd.

In het huidige model worden de reologische eigenschappen gemeten van het teruggewonnen bitumen voor en na veroudering. De reologie van het teruggewonnen bitumen vóór veroudering wordt in het model gelijkgesteld aan materiaal direct na aanleg van een weg in de praktijk. De reologie van bitumen teruggewonnen uit asfalt bij 85°C en voor 3 weken kunstmatig verouderd komt gemiddeld genomen overeen met de reologie van teruggewonnen bitumen uit de

praktijk van ongeveer 3 jaar in de weg (van Lent 2014). In het model is de reologie van teruggewonnen bitumen uit kunstmatig verouderd asfalt (bij 85°C en voor 3 weken) daarom gelijkgesteld aan drie jaar.

3.1.5.3 *lineaire uitzettingscoëfficiënt (α) / relaxatie*

De lineaire uitzettingscoëfficiënt (α) van ZOAB wordt geschat op $3,0 \cdot 10^{-5}$ (m/m)/°C. De resulterende temperatuurspanning is echter ook afhankelijk van de belastingduur vanwege de optredende relaxatie.

Om betrouwbare inputparameters te hebben voor de optredende temperatuurspanning worden er metingen uitgevoerd aan specifieke asfaltmengsels op verschillende temperaturen.

3.1.6 *Short-list invoerparameters voor de PoC-applicatie Rafeling*

Het gebruikte APAS-temperatuursvermoeiingsmodel en de aannames en uitgangspunten leiden tot een short-list van invoerparameters die meegenomen worden in de eerst PoC-applicatie Rafeling, zoals weergegeven in Tabel 4. Deze shortlist bevat ontwerpparameters van het asfalt. De uitvoeringparameters in deze fase worden nog niet meegenomen.

Tabel 4 Short-list invoerparameters voor de PoC-applicatie Rafeling.

Invoerparameter
Bitumengehalte [%]
Steenslaggradering
Percentage holle ruimte [%]
Reologische eigenschappen bitumen
Relaxatie mengsel
Veroudering mengsel
Temperatuur tijdens gebruiksfase

3.2 **Bayesiaanse Netwerken als modelleertechniek**

In hoofdstuk 2, Figuur 1, is het concept geschetst van het Levensduurvoorspellend Asfalt Model (LAM) – het LAM-concept. Basisidee achter het LAM-concept is dat per schadebeeld de (rest-)levensduur wordt bepaald uit data van de gebruikte materialen, het ontwerp, de uitvoering en inspecties, door (bestaande) modellen te koppelen aan laboratoriumproeven, prestatiedata uit het verleden en expertmeningen. Het LAM-model dient uitbreidbaar te zijn, bijv. met nieuwe schadebeelden en andere nieuwe inzichten. Het LAM-model moet als het ware kunnen leren van in de praktijk gemeten waarden.

De hiervoor vereiste flexibiliteit van de aanpak in combinatie met “in principe moet alles kunnen”, leidt tot de volgende kenmerken van de modelleertechniek achter de implementatie:

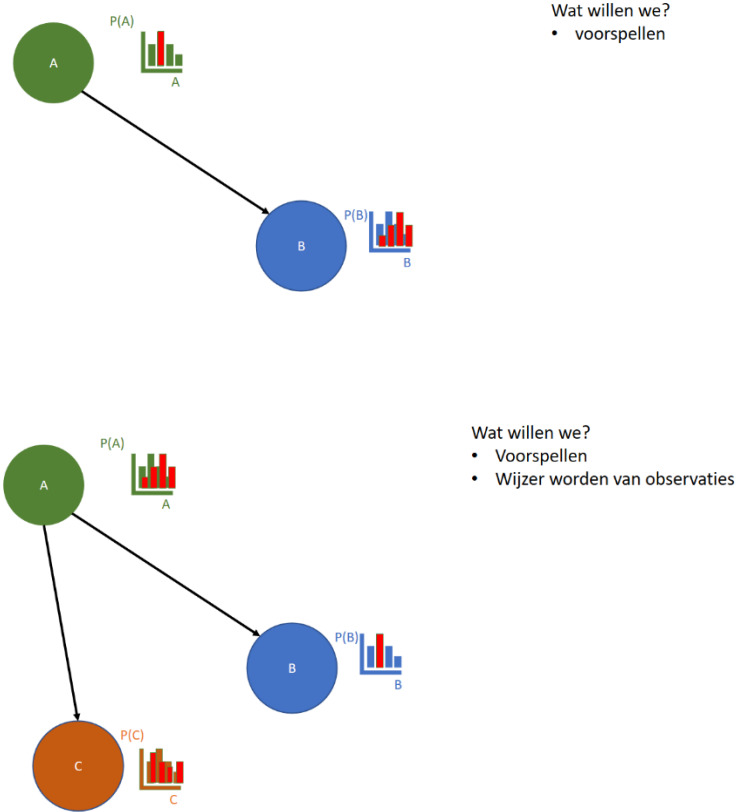
- Het raamwerk moet het mogelijk maken om verschillende schadebeelden te modelleren.
- Deze modellen moeten vervolgens op een onderbouwd gewogen manier kunnen worden gecombineerd naar een levensduurvoorspelling.
- Verschillende kennisbronnen moeten kunnen worden benut waar nodig: zowel data, fysische modellen, laboratoriumproeven als expertmeningen.

- De model moet waar van toepassing expliciet kunnen omgaan met ontwerp-, uitvoerings- en gebruiksfase.
- De modellen moeten openstaan voor het inbrengen van nieuwe (bijgestelde, nieuw verkregen) data gedurende deze fasen. Bijvoorbeeld van ontwerpdata naar opleveringsdata of naar inspectiedata en labtesten gedurende de gebruiksfase.
- In die zin moet het model faciliteren dat specifiek ook waargenomen prestatie-data (doorgaans de voorspelde schade-indicatoren (of prestatie-parameters) voor het schadebeeld) kunnen worden teruggevoerd in het model.

Vanuit deze kenmerken wordt gekozen voor **Bayesiaanse netwerken** als onderlegger voor de modellering van het LAM-model. Dit wordt ook gevoed vanuit het besef dat asfaltlevensduurmodellen verre van deterministisch kunnen/zullen zijn. De vele aspecten, mechanismen en invloedsparameters maken het noodzakelijk expliciet rekening te houden met optredende variabiliteit en onzekerheden.

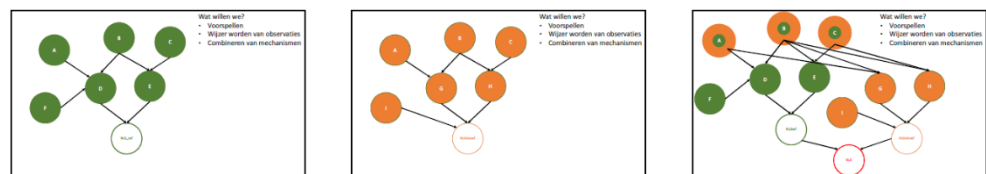
Bayesiaanse netwerken (Kjaerulff & Madsen, 2008) worden typisch toegepast voor het modelleren van een domein dat onderhevig is aan onzekerheden. Bayesiaanse netwerken zijn opgebouwd uit knopen (parameters in het vraagstuk) en pijlen (relaties tussen parameters). De sterkte van de relaties wordt aangeduid in termen van kansen. Door deze structuur is de logica van de resultaten gemakkelijk te interpreteren en presenteren. Bayesiaanse Netwerken zijn interactief en staan het bovendien toe om flexibel te beredeneren (bottom-to-top, top-to-bottom, explaining away). Bayesiaanse netwerken kunnen worden vervaardigd middels (fysische of empirische) relaties uit de literatuur, expert kennis of aan de hand van data. Het 'updaten' van het model indien nieuwe data binnen is gekomen is relatief eenvoudig.

In het navolgende zal het gebruik van een op een Bayesiaans Netwerk (BN) gebaseerd model worden toegelicht, waarbij de benoemde modelkenmerken de revue zullen passeren.



Figuur 3 Basisberekeningen van een Bayesiaans Netwerk (BN).

In Figuur 3 worden de basisberekeningen van een BN schematisch weergegeven. Aan de bovenzijde wordt een parameter A aangeduid die een tweede parameter B beïnvloedt: een verandering van A, bijvoorbeeld door A in een specifieke toestand te plaatsen, doet de (mogelijke) toestanden/uitkomsten voor de afhankelijke parameter B veranderen. Aan de onderzijde van Figuur 3 wordt geïllustreerd hoe informatie van een uitkomst/afhankelijke parameter (parameter B wordt in een toestand gezet) uitwerkt op het systeem (o.a. parameter A) en vervolgens ook aangepaste voorspellingen/voorwaartse-berekeningen oplevert voor parameter C.



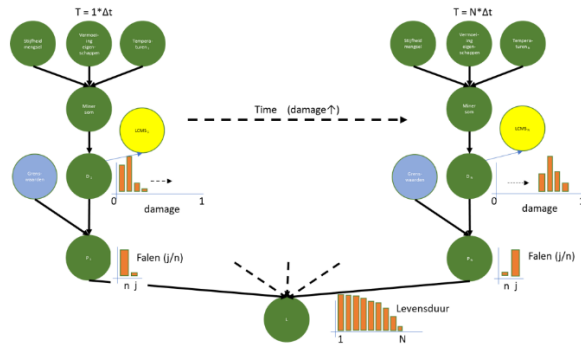
Figuur 4 Combinatie van mechanismen middels BN.

Figuur 4 toont het combineren van schadebeelden. Bijvoorbeeld aan de linkerzijde een BN modellering voor rafeling. In het midden een vergelijkbaar model voor stroefheid. Beide modellen zijn conceptueel: ze eindigen in een knoop voor de (rest)levensduur en de waarden worden bepaald door een aantal invloedparameters. De figuur aan de rechterzijde toont het resulterende netwerk wanneer beide schadebeelden worden opgenomen in één model. Een aantal invloedparameters zullen/kunnen een rol spelen in beide schadebeelden, andere

zijn specifiek voor een van de twee schadebeelden. Beide afzonderlijke levensduren worden op het eind gecombineerd tot een maatgevende levensduur.

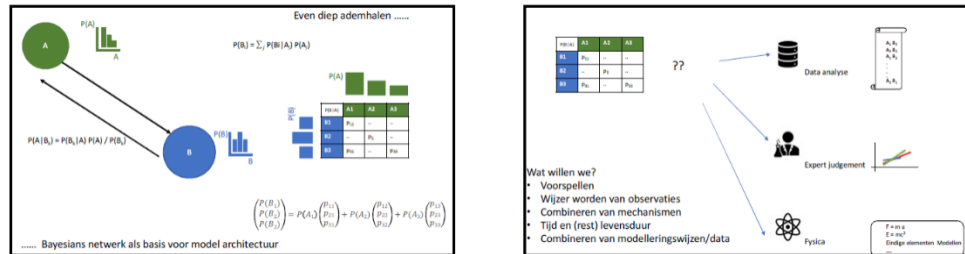
Wat willen we?

- Voorspellen
- Wijzer worden van observaties
- Combineren van mechanismen
- Tijd en (rest) levensduur



Figuur 5 Processen in de tijd middels DBN.

Bayesiaanse netwerken kunnen worden geconfigureerd als een dynamisch netwerk (DBN). Hierbij worden (discrete) tijdstipmomenten nader uitgewerkt en kunnen toestanden op een tijdstipmoment afhankelijk worden gemaakt van parameters in een voorgaand tijdstipmoment. Doorgaans zijn dit vaak dezelfde fysische parameters en worden hiermee de evoluties over de tijd van deze parameters gemodelleerd. Zie als voorbeeld Figuur 5, hierin wordt ontwikkeling van de schade-indicatoren over de tijd als functie van een beperkt aantal parameters gemodelleerd.



Figuur 6 Introductie van Conditional Probability Tables (CPT's).

Tot dusver is nog niet gesproken over de berekeningswijze en het vastleggen van de onderlinge relaties tussen de parameters. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van conditionele kansen, bijvoorbeeld $P(B_j | A_k)$: de kans dat parameter B in toestand B_j is, gegeven het feit dat parameter A in toestand A_k is. Op basis van het total probability theorema geldt dan:

$$P(B_i) = \sum_j P(B_i|A_j) P(A_j)$$

M.a.w. als de kansverdeling voor A en de conditionele kansen $P(B_i|A_j)$ bekend zijn dan kan de kansverdeling voor B eenvoudig berekend worden. Dit wordt geïllustreerd aan de linkerkant van Figuur 6. Bij een voorwaartse berekening (van A naar B) ontstaat het resultaat door een eenvoudige matrixvermenigvuldiging. Voor de weg terug (van B naar A) wordt gebruikgemaakt van de regel van Bayes:

$$P'(A) = P(A|B_k) = P(B_k|A) P(A) / P(B_k)$$

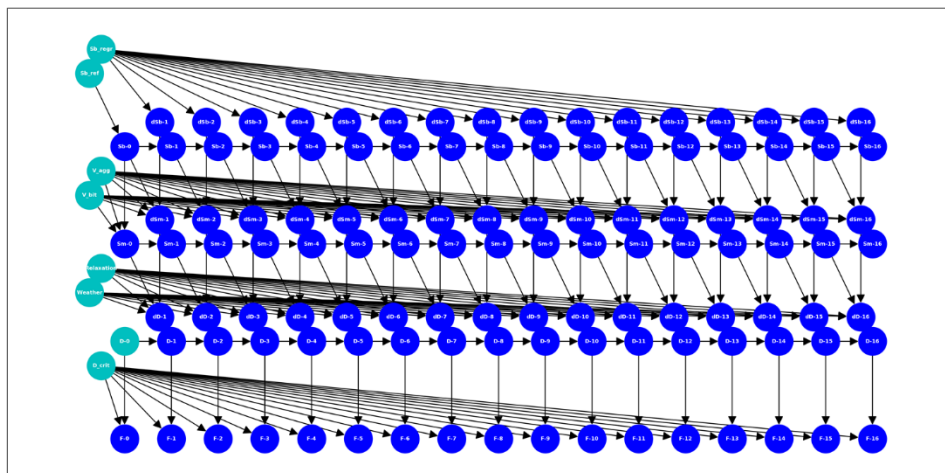
Hierin wordt de 'oorspronkelijke' kennis of kansverdeling voor parameter A, i.e. $P(A)$, bijgesteld tot $P'(A)$, namelijk de kansen voor de mogelijke toestanden van A gegeven de waarneming dat B zich in toestand B_k bevindt. Deze berekening is in feite een orde complexer dan de voorwaartse berekening, echter deze worden tegenwoordig gefaciliteerd door bijvoorbeeld opensource pakketten en hoeven niet meer ontwikkeld te worden.

Wat wel natuurlijk van belang is, is dat de conditionele kansen voor het model bekend zijn. Ook hier toont een architectuur met BN zijn flexibiliteit: de waardes voor deze kansen kunnen op meerdere manieren worden verkregen. Zie de afbeelding aan de rechterzijde in Figuur 6: de conditionele kansen kunnen worden afgeleid rechtstreeks uit (alleen) data of waarnemingen; worden verkregen door het uitvoeren van labproeven, het bevragen van experts of het gebruiken van bijvoorbeeld numerieke of analytische modellen voor de fysische processen.

3.3 PoC uitwerking voor LAM-rafeling met Bayesiaanse Netwerken

Een eerste Proof of Concept (PoC) applicatie van het LAM-model is uitgewerkt voor rafeling. Hierbij is het APAS-temperatuurvermoeiingsmodel uit paragraaf 3.1 als uitgangspunt gekozen. Door nu nog alleen rafeling in de PoC-applicatie op te nemen is de scope voor de PoC-applicatie verkleind ten opzichte van de oorspronkelijke scope. Dit betreft het nu nog achterwege laten van de feitelijke PoC implementatie van stroefheid en het nog niet meenemen van een aantal invloedsparameters uit de short-list uit paragraaf 3.1, bijvoorbeeld een aantal mengseleigenschappen (afdruip, affiniteit bitumen-steen, enz.) en de verkeersbelasting. Invloedsparameters die wel zijn meegenomen worden in deze paragraaf aan de hand van de gerealiseerde PoC-applicatie besproken. Voor het LAM-concept geldt dat het gaat om een groeipad. Modellen ontstaan en worden toegevoegd, modellen veranderen en verbeteren en modellen kunnen worden vervangen door andere modellen. Insgelijks ook met betrekking tot parameters die in het raamwerk opgenomen raken: ook dit zal een adaptief proces zijn in aantal en soort ten dienste van het bereiken van gewenste nauwkeurigheid en betrouwbaarheid.

Het rafelingsmodel is in de PoC-applicatie opgezet met Python als programmeertaal en voor de calculus van Bayesiaanse Netwerken wordt gebruik gemaakt van het Python pakket Pomegranate (zie <https://pomegranate.readthedocs.io/en/latest/>). Python is een moderne programmeertaal die wereldwijd inmiddels zeer veel wordt gebruikt en een community genereert waarbinnen veel (deel-)pakketten en bibliotheken open met elkaar worden gedeeld. Het is daarom heel geschikt voor deze explorerende fase.



Figuur 7 Het Bayesiaanse netwerk model van knopen en relaties van het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel.

Figuur 7 toont een netwerk voor het LAM-rafelingsmodel gebaseerd op het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel. De blauwe knopen representeren dynamische parameters die door de tijd evalueren. Cyaan kleurige knopen zijn hetzij statische parameters, invoerparameters of beginwaarden van parameters. De in het huidige model gebruikte dynamische parameters zijn:

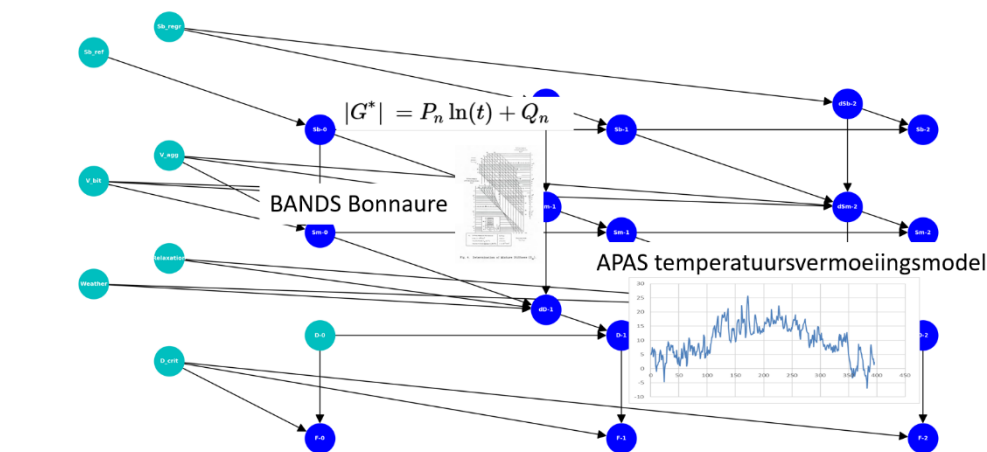
- Sb-0, Sb-i: de bitumen stijfheid (bij -10° C) respectievelijk bij aanleg en in jaar i,
- Sm-0, Sm-i: de mengsel stijfheid (bij -10° C) respectievelijk bij aanleg en in jaar i,
- (D-0), D-i: de schade-indicator (damage) respectievelijk bij aanleg en in jaar i,
- F-0, F-i: de faalkans respectievelijk bij aanleg en in jaar i.

Het model is incrementeel gemaakt, d.w.z. per periode komt er een mogelijk increment bij voor een parameter ten opzichte van zijn waarden in de vorige periode. Dit betreft:

- dSb-i: de bitumen stijfheidstoename (bij -10° C) voor jaar i t.o.v. jaar (i-1),
- dSm-i: de mengsel stijfheidstoename (bij -10° C) voor jaar i t.o.v. jaar (i-1),
- dD-i: de schadetoename voor jaar i t.o.v. jaar (i-1).

Met betrekking tot de statische parameters, invoerparameters of beginwaarden geldt:

- Sb_regr: regressie coëfficiënt voor het laten toenemen van de bitumenstijfheid,
- Sb_ref: de ontwerp bitumen stijfheid (bij -10° C),
- Vagg: het volume percentage van aggregaat in het mengsel,
- Vbit: het volume percentage van het bitumen/bindmiddel in het mengsel,
- Relaxation: relaxatie modeltypen voor het relaxatie gedrag van het mengsel,
- Wheater: temperatuur scenario's met dagelijkse temperaturen,
- D0: de schade-indicator bij aanleg,
- D_crit: het schade-criterium ter bepaling van de kans op falen.



Figuur 8 Gebruikte relaties in rafeling het Bayesiaanse netwerk model van het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel.

Figuur 8 geeft schematisch de gebruikte relaties weer voor het Bayesiaanse netwerk model van het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel voor rafeling:

- Bitumen stijfheid (bij -10° C) over de tijd: logaritmsch verloop, zie paragraaf 3.1.5.2.
- Mengsel stijfheid (bij -10° C) over de tijd: Bands Bonnaure, zie paragraaf 3.1.5.2.
- Schade toename: APAS-temperatuursvermoeiingsmodel, zie paragraaf 3.1.3.

Binnen het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel worden actuele dagtemperaturen in rekening gebracht voor respectievelijk: de stijfheid, het relaxatiegedrag en de spanningswisselingen.

Voor de PoC-applicatie is een eenvoudig interface gemaakt om verschillende discretisaties in waarden voor parameters en in tijd te kunnen variëren. Deze interface is bedoeld voor de ontwikkelaar en niet voor de gebruiker. Voor de laatste zal t.z.t. een specifieke gebruikersinterface worden ontwikkeld.

Er zijn 2 stappen te onderscheiden:

- De gewenste modelconfiguratie:
 - de waarden/discretisaties voor de parameters,
 - de kansverdelingen voor statische parameters,
 - het aantal te modelleren jaren,
 - stuurparameters voor het rekenen.
- De modelberekeningen:
 - het specificeren van specifieke invoer, bijvoorbeeld ontwerp/uitvoering,
 - het inbrengen van observaties, bijvoorbeeld waargenomen schade-indicator in jaar i.

Beide stappen worden middels de interface apart aangestuurd middels respectievelijk “Training” voor modelconfiguraties (zie Figuur 9) en “Prediction” voor de modelberekeningen (zie Figuur 10). De term “Training” is gebruikt omdat later in voorbereidende stappen hier ook data-analyse kan worden aangestuurd voor het definiëren van relaties bij op data-gebaseerde modellen.

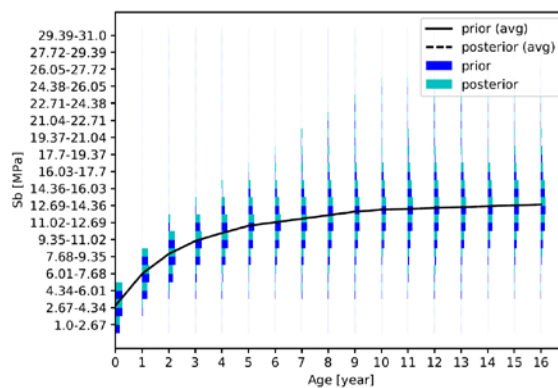
Figuur 9 Invoerscherm voor **training**-deel PoC-applicatie LAM-rafeling (interface ten behoeve van modelontwikkeling).

Figuur 10 Invoerscherm voor **predictie**-deel PoC-applicatie LAM-rafeling (interface ten behoeve van modelontwikkeling).

3.4 Resultaten PoC-applicatie LAM-rafeling

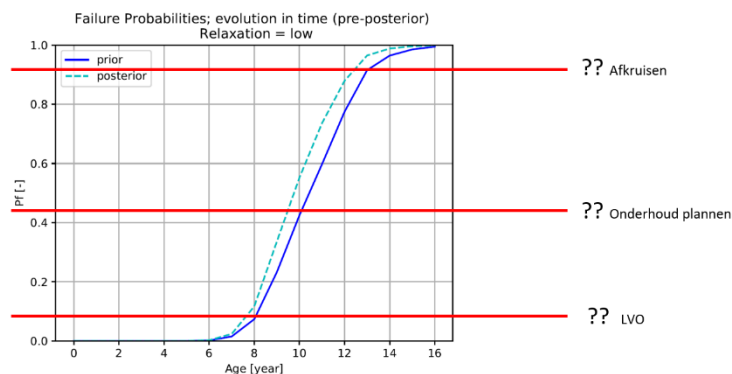
3.4.1 Introductie

De PoC-applicatie LAM-rafeling rekent met kansverdelingen van parameters en derhalve ook met kansverdelingen die veranderen over de tijd. Figuur 11 toont een voorbeeld van hoe de resultaten dan kunnen worden gepresenteerd. Het voorbeeld betreft de bitumen stijfheid S_b . Op de verticale as zijn de waarden voor S_b gediscretiseerd in intervallen. Per jaar wordt de kans berekend dat de waarde van het bitumen zich in een interval bevindt. Voor jaar 0 (uitvoering) een kans van 0.2 voor interval [1-2.67] en 0.4 voor de intervallen [2.67-4.34] en [4.34-6.01]. Naarmate de jaren verstrijken, het bitumen verouderd, verschuiven de kanswaarden naar hogere intervallen. Het gemiddelde, als ook de spreiding neemt toe.



Figuur 11 Voorbeeld van kansverdelingen over de tijd (Bitumen stijfheid bij -10°C), PoC-applicatie LAM-rafeling .

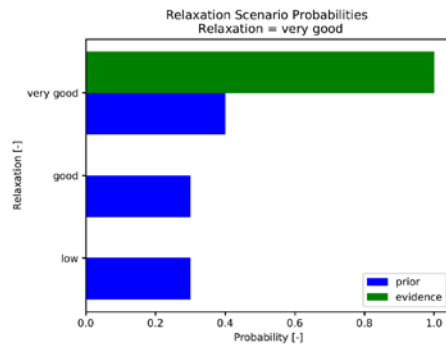
Figuur 12 toont de kansen voor falen over de tijd. Een prior (zonder specifieke invoer) en een posterior (nadat specifieke invoer is opgegeven). Verschillende waarden van faalkansen kunnen als grenswaarden worden gebruikt om verschillende interventie tijdstippen en acties te definiëren.



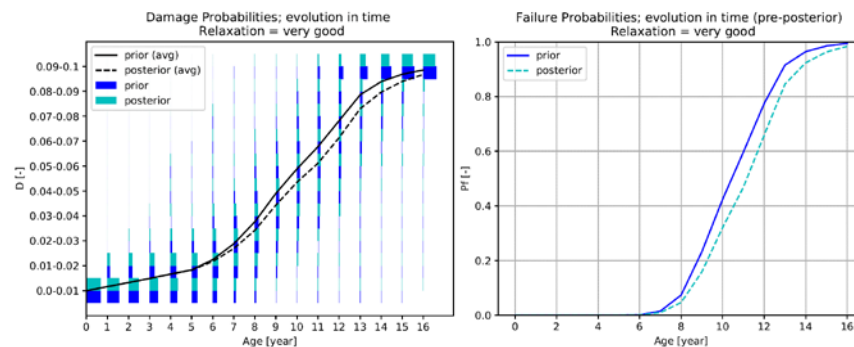
Figuur 12 Voorbeeld toename van faalkans over de tijd, PoC-applicatie LAM-rafeling.

3.4.2 Predictie met hoge relaxatie

Wanneer het model wordt gedraaid met als invoer een zekerheid omtrent heel goed relaxatie gedrag, zie Figuur 13, ontstaat een posterior voorspelling voor schadeontwikkeling en een faalkans zoals weergegeven in Figuur 14. De schade-indicator neemt minder snel toe (zie stippellijn) en ook de faalkans ontwikkelt zich minder snel ten opzichte van de situatie zonder deze specifieke invoer (de prior voorspellingen).



Figuur 13 Specifieke invoer waarde: 100% zekerheid op relaxatie eigenschap “very good”, PoC-applicatie LAM-rafeling.



Figuur 14 Prior en posterior verdelingen van schade-indicator (links) en toename van kans op falen (rechts) over de tijd, PoC-applicatie LAM-rafeling.

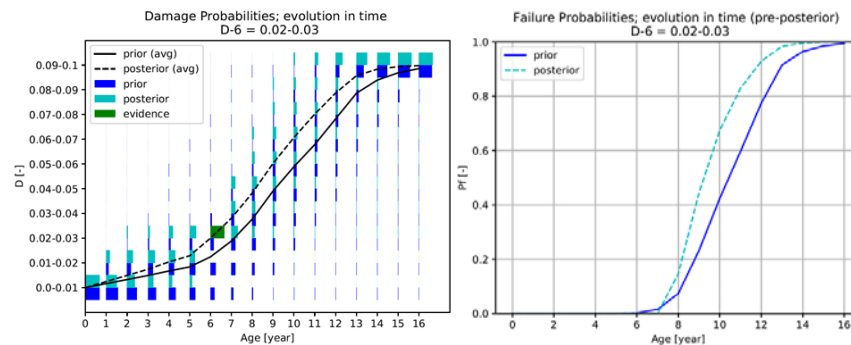
3.4.3 Update van predictie na waargenomen schade

Stel men heeft in jaar 6 waargenomen dat de schade-indicator zich op dat moment in interval $[0.02-0.03]$ bevindt. Deze kennis kan dan in het model worden ingevoerd waarop de voorspellingen zullen worden bijgesteld.

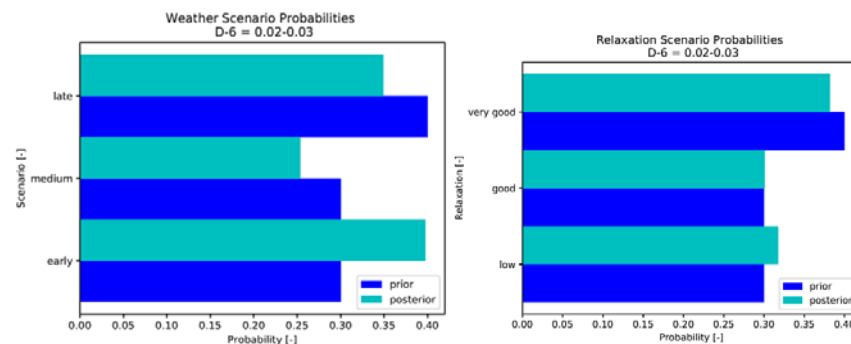
Figuur 15 toont links de ingevoerde waarde voor de waarneming in jaar 6 en de bijgestelde voorspelling (posterior) voor de schadeontwikkeling. De waarneming ligt hoger dan de prior voorspelling en bijbehorende verwachtingswaarde in jaar 6. De posterior voorspelling laat dan ook een snellere ontwikkeling van de schade-indicator zien. Dit vertaalt zich natuurlijk in een snellere toename voor de faalkans ten opzichte van de oorspronkelijke voorspelling, zie Figuur 15 (rechts).

Daarnaast zal het model ook berekenen wat meer aannemelijke toestanden voor het model kunnen zijn die hebben geleid tot de waarneming in jaar 6. Figuur 16 laat hier 2 voorbeelden van zien. Er wordt een hogere kans toegedacht aan het scenario dat er al strenge winters zijn geweest in de eerste jaren (“early” in Figuur

16 links). Ook is de kans vergroot dat het een mengsel met slechte relaxatie eigenschappen betreft ("low" in Figuur 16 rechts).



Figuur 15 Specifieke invoerwaarde: 100% zekerheid op schade-indicator in interval [0.02-0.03] in jaar 6 (links) en prior en posterior verdelingen voor de faalkans (rechts), PoC-applicatie LAM-rafeling.



Figuur 16 Prior en posterior verdelingen van temperatuur scenario's (links) en relaxatie scenario's (rechts), PoC-applicatie LAM-rafeling.

3.5 Verificatie a.d.h.v. beschikbare levensduurdata

Binnen de PoC-applicatie LAM-rafeling is het niet mogelijk gebleken al een verificatie uit te voeren met daadwerkelijke levensduurdata. Reden hiervoor is het niet beschikbaar kunnen krijgen van deze data gedurende de looptijd van fase 2.

Verificatie zal worden opgenomen in de vervolgfases van het LAM-project. Voor het schadebeeld rafeling wordt dan een koppeling voorzien met data uit het RWS Meerjarenplanningssysteem voor verhardingsonderhoud (IVON) en het Laser Crack Measurement System (LCMS).

Met een puur data-gebaseerde aanpak, bijvoorbeeld met gradiënt boosting², zal een deel van de verificatie plaatsvinden door een subset van de data uit de trainings-analyse te houden en deze subset te gebruiken ter verificatie van de gevonden relaties. Deze eerste verificatie is dan specifiek binnen het bestreken domein van de trainingsdata. Daarnaast moet uiteraard het dan verkregen model worden geverifieerd op nieuwe data en meer specifiek ook op data die buiten het oorspronkelijke bestreken domein van de trainingsdata kan liggen. Afhankelijk van

² Zie voor een korte uitleg Bijlage A, onderdeel 4.

de model-performance kan een nieuwe training of een update van de training nodig zijn.

Wanneer bijvoorbeeld het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel wordt geverifieerd, zal het model eerst uitgebreid worden met een relatie die de schade-indicator (D) relateert aan LCMS data. Dit kan directe rafelingsdata zijn (ernst en omvang van steenverlies over de tijd) of uit LCMS meetwaarden afgeleide data zoals planjaar of restlevensduur. Een belangrijke te kwantificeren en dus ook te verifiëren parameter zal dan het interventieniveau bij de schade-indicator zijn.

Wanneer het schadebeeld rafeling in zijn eindvorm gaat bestaan uit een mengvorm van bijvoorbeeld een APAS-temperatuursvermoeiingsmodel in een Bayesiaans netwerk met daarbinnen een op data-gebaseerde modellering voor bijvoorbeeld alleen de mengselstijfheid, zal verificatie uit een mengvorm bestaan van de hierboven beschreven stappen.

Opgemerkt zij dat gebruik van levensduurdata voor verificatie van de modellen betekent dat de modellen dan puur in hun voorspellingsmodus worden aangesproken.

Uiteraard zal de LAM-applicatie ook moeten faciliteren dat specifieke data bijdraagt aan een verbetering van de relaties bij projecten, zij het in ontwerp-, uitvoerings- of gebruiksfase. In dat geval worden parameters en correlaties project-specifiek bijgesteld. Zowel de puur data-gebaseerde methoden alsook de voorgestelde opzet met Bayesiaans netwerken maken dit mogelijk.

3.6 Conclusie PoC-applicatie LAM-rafeling

De PoC-applicatie LAM-rafeling toont dat het ontworpen Bayesiaanse netwerkmodel gevuld kan worden met bestaande asfaltlevensduurmodellen (in dit geval is het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel geïmplementeerd). Met behulp van het Bayesiaanse netwerk kan vervolgens de verwachte gemiddelde levensduur worden afgegeven van een specifiek asfaltmengsel, met daarbij de verwachte spreiding. In deze zin beantwoordt het concept aan de ambitie van het LAM-project. Het geeft een levensduurvoorspelling van een asfaltmengsel met daarbij inzicht hoe de spreiding in levensduur kan worden beperkt.

Deze gekozen invulling is echter maar heel beperkt geverifieerd. Dit is vooral te wijten aan het feit dat er nauwelijks data van werkelijke wegvakken beschikbaar was. De aard van het model vereist dat er voor de verificatie zowel informatie is van het asfaltmengsel, als van de daadwerkelijke prestaties in het veld.

Mengselsamenstellingsdata van wegvakken, waarvan we al een beeld hebben van de levensduur, zijn nauwelijks nog te achterhalen. Er wordt op dit moment hard gezocht naar complete datasets en we verwachten dat we op termijn een aantal complete sets in ons bezit zullen hebben. Echter, we zullen er ook rekening mee moeten gaan houden dat deze volledige sets de komende 5 jaar nog erg beperkt zullen zijn en de mate van verificatie van het model dus beperkt zal zijn. Dit betekent dat de sector voorbereid moet worden op een bepaalde onzekerheid in de voorspelling, waar vervolgens goede afspraken over gemaakt moeten worden.

Deze proof of concept applicatie bevat maar een beperkt aantal invoerparameters, zo zijn bijvoorbeeld uitvoeringsinvloeden zoals opleveringsomstandigheden en gebruiksfase-invloeden als verkeersintensiteit niet mee genomen. Dit betekent dat er in de toekomst nog veel parameters kunnen worden toegevoegd. Het concept toont al wel dat er veel ruimte is om verschillende informatiebronnen met elkaar te combineren en in die zin is het raamwerk in staat om de huidige kennis te bundelen. De meerwaarde van het combineren van verschillende bronnen zal in vervolgfases van het LAM-project nog meer worden aangetoond.

Samengevat betekent dit dat het PoC heeft laten zien dat het maken van een levensduurmodel technisch haalbaar is. De toegevoegde waarde in de markt is nog moeilijk te kwantificeren, maar op kwalitatief niveau is er duidelijk een behoefte aan een onafhankelijk model voor levensduurvoorspelling, hetgeen dit model kan leveren.

Het PoC toont ook dat er nog heel veel moet gebeuren voordat we een geaccepteerd levensduurmodel hebben. Hierbij zijn twee hoofdzaken te noemen. In de eerste plaats is het belangrijk om te zorgen dat de degradatiemodellen die worden opgenomen in het framework een breed draagvlak hebben. Gezien de beperkte mate van alle modellen die er bestaan is deze stap verre van triviaal. Echter het framework biedt ook mogelijkheden om modelvoorspellingen te vergelijken, wat wellicht kan bijdragen aan acceptatie van bepaalde modellen. In de tweede plaats toont dit proof of concept ook het belang van hoogwaardige data. Dit is momenteel een grote uitdaging en wellicht is het ook de moeite waard om voor de toekomst te schetsen hoe het gebruik van het model kan bijdragen aan het vergroten van de hoeveelheid hoogwaardige data.

4 Interactie binnen Asfalt-Impuls

Gedurende het project is op diverse wijzen interactie geweest binnen het Asfalt-Impuls programma. Zo is met stakeholders in de sector gespard over de PoC-applicatie LAM-Rafeling, met LAM-partners gewerkt aan de dataverzameling en aan het opstellen van de eisen aan de PoC-applicatie voor Stroefheid en is uitwisseling geweest van resultaten en ideeën met andere Asfalt-Impuls projecten. Deze interactie is essentieel voor het creëren van draagvlak voor de in het LAM-project te ontwikkelen modellen en applicaties.

4.1 Workshop PoC-applicatie LAM- Rafeling, 13 februari 2020

Op 13 februari 2020 is in een workshop het werk dat is beschreven in hoofdstuk 3 van dit rapport gepresenteerd aan een selecte groep van stakeholders in de sector. Er is gekozen voor een selecte groep om de ruimte te hebben voor inhoudelijke diepgang en te borgen dat alle aanwezigen hun mening konden geven. Bij de selectie van deelnemers is gepoogd om zowel een brede als een inhoudelijk zware vertegenwoordiging uit de sector te waarborgen. Een uitgebreid verslag van deze workshop met daarin een deelnemerslijst is te vinden in bijlage A.

Doel van de deze workshop was de Proof of Concept (PoC) applicatie voor het eerste schadebeeld binnen het asfaltlevensduurmodel te bespreken en na te gaan in hoeverre dit concept aansluit bij de verwachtingen van de sector. De besproken PoC-applicatie implementeert een model dat in detail is uitgewerkt voor één potentieel schadebeeld, namelijk dat voor rafeling (beschreven in hoofdstuk 3 van dit rapport). Ten behoeve van verdere vulling van het model met andere schadebeelden is het werk van Kiwa KOAC gepresenteerd over opties voor het deelmodel voor stroefheid dat in een latere fase toegevoegd zal worden toegevoegd aan het LAM-model.

Zowel tijdens als na de presentaties vond een levendige discussie plaats over het concept, het raamwerk, het gekozen APAS-temperatuursvermoeiingsmodel voor rafeling en de zin van het toevoegen van een stroefheidsmodel aan het LAM.

Het getoonde model op basis van het Bayesiaanse netwerk aangevuld met de gradient boosting techniek werd positief beoordeeld. Daarnaast werd het ook duidelijk dat het bepalen van het 'beste' materiaalmodel voor rafelingsontwikkeling een flinke uitdaging is. Het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel dat op dit moment is geïmplementeerd om schadeontwikkeling te berekenen wordt bekritiseerd. Hoe te komen tot een goede invulling van het model komt daardoor naar voren als de grote uitdaging voor het vervolg. Het is daarom van belang om op zoek te gaan naar andere concrete schadeontwikkelingsmodellen die in het model kunnen worden opgenomen. En vervolgens te zoeken naar verificatiecriteria voor de bepaling van de toegevoegde waarde van een model of een modelcomponent.

Met betrekking tot de stroefheidsmodellen werd opgemerkt dat wellicht niet alle onderdelen hiervan veel zouden toevoegen aan de huidige praktijk. Met uitzondering van het model dat is gebaseerd op de FAP-proef. Deze proef wint op dit moment aan relevantie doordat recyclingpercentages van deklagen omhoog gaan. Kiwa-KOAC neemt de aanbevelingen mee bij het gereed maken van de stroefheidsmodellen voor implementatie.

4.2 AI-LAM WP1: data en data-analyse

De gevolgde werkwijze van de dataverzameling wordt hier toegelicht, zoals beschreven in WP1 van het Projectplan Asphalt-Impuls Fase 2-2019. Het verslag van de dataverzameling is in bijlage C opgenomen.

De volgende stappen zijn ondernomen voor het verzamelen van de benodigde data:

1. Inventarisatie benodigde informatie.
2. Het indelen van categorieën en het formuleren van vragen (“metadata”).
3. Gesprek bij Heijmans (Edwin van Osch).
4. Selectie geschikte wegvakken.
5. Aanleveren van mengselinformatie, bedrijfscontroles/opleveringen, hoppermonsters, enz.
6. Toetsen van de aangeleverde informatie op juistheid en volledigheid.
7. Terugkoppeling naar Heijmans.
8. Opvragen gegevens rafelingsontwikkeling bij RWS.
9. Vertalen informatie naar input data-analyse LAM-rafeling.

De benodigde informatie is in de volgende categorieën ingedeeld³:

- Locatie wegvak (nr. 1-5).
- Verkeersbelasting (nr. 6-7).
- Mengselsamenstelling (nr. 8-16 en 21-26).
- Aanleg (nr. 17-20).
- Prestatie (nr. 27-28).

Als invoer heeft het LAM-model in eerste informatie nodig over de volumetrische mengselsamenstelling van de ZOAB-deklaag en de reologische eigenschappen van het bindmiddel. De voorspelling van het model kan bijgesteld worden op basis van de inspectiedata over de rafelingsontwikkeling. Bij de prestatie wordt gekeken naar jaarlijkse inspecties en/of metingen vanaf aanleg tot heden (gebruiks-fase). De nummers tussen haakjes verwijzen naar de vragen die aan Heijmans zijn voorgelegd⁴. Aangegeven dat wij bij voorkeur informatie nodig hebben van wegen met ZOAB-deklagen die geruim aantal jaren (> 8 jaar) in gebruik is, waarbij al sprake kan zijn van enige schade. Als uitgangspunt geldt: “liever veel informatie over 1 weg, dan een beetje informatie over veel wegen”. Op basis van de uitgangspunten heeft Edwin van Osch voorgesteld om gegevens van Randweg Eindhoven (A2/N2) te gebruiken. Voorwaarde van Heijmans is dat de aangeleverde data vertrouwelijk worden behandeld (niet verspreiden zonder toestemming) en dat zij gevrijwaard worden van claims door RWS voor het betreffende werk.

Uitgangspunt is de hoofdrijbaan (HRR) en parallelbaan (PRR) richting het zuiden tussen knooppunt Ekkersweijer en afrit Veldhoven, ter lengte van circa 6 km. Als deklaag is 2 laags ZOAB (Twinlay) toegepast. Voor de toplaag ZOAB 8 zijn de CE verklaring en resultaten van hoppermonsters aangeleverd. Omdat de toplaag (25 mm) zeer dun is, is het niet mogelijk de verdichting van de toplaag 4/8 te meten. Daarom zijn resultaten van hoppermonsters aangeleverd waaruit de samenstelling afgeleid kan worden. De volumetrische eigenschappen zijn afgeleid van de

³ Met een verwijzing naar de nummering van de vragen in het informatieverzoek aan Heijmans, zie Bijlage C

⁴ Idem

samenstelling in massapercentages. Voor de toegepaste polymeermodificatie (Cariphalte XS) zijn de stijfheid en fasehoek bepaald op basis van ervaringscijfers uit de 'bitumenverouderingsdatabase' van TNO.

Léon Schouten (RWS) heeft interventiejaren aangeleverd van hectometervakken zoals bepaald in het MJPV met behulp van visuele inspecties in de periode 2001-2019. Gaandeweg is gebleken dat de gevraagde data niet eenduidig uit de systemen is te achterhalen, zoals wel verwacht vooraf. In overleg met RWS is daarom afgesproken niet te snel specifiek conclusies te trekken uit de data en vooral te zien of er een trend waarneembaar is in de aangeleverde data.

4.3 Programma van Eisen PoC-applicatie LAM-Stroefheid

Met Jacob Groenendijk van Kiwa-Koac is diverse malen gesproken over de PoC-implementatie voor het levensduurvoorspellend model voor het schadebeeld stroefheid. De eerste resultaten hiervan zijn gepresenteerd aan stakeholders op de werksessie op 13 februari 2020. Kiwa-Koac zal het resulterende programma van eisen in de loop van 2020 rapporteren, Daarna zal Kiwa-Koac samen met TNO de PoC-implementatie oppakken.

4.4 Interactie met andere Asphalt-Impuls projecten

Gedurende de uitvoering van fase 2 is door presentaties bij de Asphalt-Impuls Kernteam bijeenkomsten de voortgang in het LAM-project gedeeld met andere Asphalt-Impuls projecten. Met een aantal Asphalt-Impuls projecten is veel interactie voorzien aangezien deze informatie en/of modellen kunnen leveren die bij kunnen dragen aan het LAM-project. Hierbij wordt gedacht aan de projecten Functioneel Opleveren, HighTech LowCost, op termijn Asphalt in Contracten. Tot op heden is deze interactie vormgegeven in overleggen tussen trekkers en deelprojectleiders die vooral gericht zijn om elkaar te informeren wat er in de diverse projecten gebeurt. Zo zijn er twee overleggen geweest met Berwich Sluer (Boskalis, Functioneel Opleveren) en is er een keer overleg geweest met Andre Houtepen (Gemeentewerken Rotterdam, HighTech LowCost).

Op het moment dat er concretere projectresultaten zijn in de verschillende projecten, wordt het ook mogelijk om elkaars producten te gebruiken en te integreren met eigen producten. Dit is tot op heden nog niet gebeurd, maar wordt wel in de toekomst voorzien.

5 Werkplan LAM WP2 Fase 3

Resultaten van LAM-project fase 2 zijn uitgebreid besproken met LAM-partners en stakeholders, o.a. in de workshop van 13 februari 2020. Doel van die besprekingen was de evaluatie van wat we bereikt hebben in fase 2 en samen keuzes voor het vervolg te maken over fase 3 in 2020. Dit vervolg dient te passen binnen de kaders die gelegd zijn in eerdere afspraken, zoals het projectplan van het TKI project Levensduurmodel asfalt (Luiten, 2019), het LAM-jaarplan 2020, zoals goedgekeurd door de stuurgroep, en het initiële LAM-projectplan.

Met de betrokkenen binnen TNO is een brainstorm gehouden over het ontwikkelpad voor het LAM-concept. Hierin zijn de resultaten van de bespreking met stakeholders meegenomen. Dit heeft geleid tot een schematische aanpak welke is weergegeven in bijlage B. De hierin gedefinieerde activiteiten voor 2020, samen met de eerder afgesproken kaders, hebben geleid tot het volgende werkplan voor het LAM-project WP2 Fase 3, vanaf maart 2020. Er is gekozen om de plannen te verdelen in 5 hoofdlijnen, namelijk asfalttechnologie, implementatie in de PoC-applicatie LAM, verbinding met werkpakket data (WP1), stimuleren acceptatie in de sector en voorbereiden implementatie LAM-applicatie.

5.1 Asfalttechnologie

5.1.1 *LAM Rafeling modellen*

In fase 2 is gekeken naar het schadebeeld rafeling van ZOAB (op het hoofdwegennet van RWS) en is het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel (van Lent e.a. 2015) de kern van het degradatiemodel gemaakt. In de PoC implementatie hiervan was de ontwikkeling van de rafeling over de tijd, zoals gemeten bij jaarlijkse inspecties, tot het punt waarop de rafeling een bepaalde limietwaarde overschrijdt, nog niet voldoende specifiek gedefinieerd. Oftewel, de zogenaamde Limit state function met een bezwijkniveau ('threshold'), dat voor de beheerder het falen aangeeft, was nog niet specifiek genoeg opgesteld en geïmplementeerd.

In 2020 zullen we de volgende onderwerpen oppakken:

- Nagaan in hoeverre het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel kan worden verfijnd op basis van verbeterpunten die ook naar voren kwamen in de workshop, zoals het meenemen van verkeersbelasting en uitvoeringsomstandigheden.
- Een tweede rafelingsmodel implementatieklaar maken, waarvan de voorspellende waarde kan worden vergeleken met het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel. Dit in samenspraak met de wetenschappelijke commissie o.l.v. Sandra Erkens.
- Een betere limit state function voor rafeling opstellen dan in fase 2 is gebruikt, die aansluit bij de interventienormen en de inspectieresultaten.
- Een ontwikkelpad formuleren hoe de ZOAB degradatiemodellen geschikt kunnen worden gemaakt voor SMA, met daarbij ook een visie welke data er nodig is voor training, voorspelling en verificatie.
- Een visie ontwikkelen voor toepassing van de modellen voor nieuwe materialen, zoals bijv. Recycled Asphalt Pavement (RAP), lignine bitumen en epoxy bitumen.

5.1.2 *LAM Stroefheid modellen*

In fase 2 is door Kiwa-Koac een begin gemaakt met het nader analyseren van de 4 degradatiemodellen voor het schadebeeld stroefheid. Uit de analyse volgde dat implementatie van deze modellen vroeg om een stochastische aanpak. De aanpak met Bayesiaanse netwerken, zoals gebruikt voor het schadebeeld rafeling, lijkt ook hier goed te passen. In 2020 zal Kiwa-Koac de degradatiemodellen voor stroefheid klaar maken voor implementatie in een Bayesiaans netwerk.

5.2 **Implementatie in PoC-applicatie LAM**

5.2.1 *LAM-Rafeling implementatie*

In fase 2 is het LAM raamwerk ontwikkeld en is het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel succesvol geïmplementeerd in de PoC ZOAB Rafeling met een Bayesiaans netwerk.

In fase 3 worden de volgende activiteiten voorzien om deze PoC uit te breiden:

- Implementeren van de ontwikkelde limit state functie voor rafeling.
- Implementeren van een tweede degradatiemodel, waarbij in deze fase de gebruiker kan kiezen welk degradatiemodel gebruikt wordt.
- Om de kwaliteit van de analyse van beschikbare data te verhogen, onderzoeken hoe gradient boosting kan worden gecombineerd met Bayesiaanse netwerken.
- Extra aandacht besteden aan welke onderdelen in het model nu grote invloed hebben op de onzekerheden. Dit moet de stakeholders meer gevoel geven voor de waarde van de voorspelling en aanwijzingen geven voor nut en noodzaak van het investeren in nauwkeurigere modellen en zorgvuldigere data-acquisitie.

5.2.2 *LAM-Stroefheid implementatie*

Voor het LAM Stroefheid wordt in nauwe samenwerking met Kiwa-Koac een eerste PoC ontwikkeld, bouwend op de ervaringen met het PoC voor Rafeling.

5.3 **Verbinding met data (LAM WP1)**

In fase 2 is al veel energie gestoken in het verzamelen en delen van data. Dit heeft inzicht opgeleverd dat niet alle data die beschikbaar is ook inzetbaar is voor levensduurmodellen doordat datasets niet compleet zijn of meta-data ontbreekt. Soms kan dit nog hersteld worden door datareparatie, maar het beeld dat alle data uit assetmanagement systemen direct bruikbaar is, moet nodig worden bijgesteld. Ten behoeve van de modelverificatie is gepoogd om voor een specifiek wegvak van een rijksweg met 2 laags ZOAB, namelijk de Randweg N2/A2 Eindhoven een zo compleet mogelijke dataset te verkrijgen. Deze data is geordend en op compleetheid getoetst. Met name uitgebreide aanlegdata en data over de degradatie en het falen ontbreken nog. Een dergelijke actie zal ook voor andere wegvakken moeten worden uitgevoerd. Daarnaast is ook een doorstart gemaakt van data van provincies en grote gemeentes te verzamelen. Hierbij wordt eerst gewerkt aan een hele concrete data-uitvraag op basis van de bestaande assetmanagement systemen, opdat er vooral bruikbare data wordt verzameld.

Ook in fase 3 zal Rijkswaterstaat, als WP1 trekker, de lead hebben voor het verzamelen van data. Onder leiding van RWS zal o.a. data van provincies worden verzameld en geanalyseerd. WP2 zal nauw met WP1 samenwerken om te zorgen

dat juiste data beschikbaar komt en die analyses gedaan worden die bij zullen dragen aan het model. Vanuit WP2 zijn dan de volgende data-gerelateerde activiteiten voorzien voor fase 3:

- Nader analyseren van beschikbare data.
- Zo nodig wensen voor data en data-analyses formuleren en bespreken met WP1. Denk hierbij aan data uit boorkernen, LCMS, stroefheid en SMA.
- Verifiëren van de PoC-applicaties met prestatiedata uit de praktijk.
- Trainen van PoC-applicaties met data uit de praktijk.

5.4 Stimuleren gebruik in de sector

In eerdere fasen is al veel aandacht geschonken aan het betrekken van stakeholders, door regelmatig en intensief contact met de LAM-projectpartners (RWS, Heijmans en Kiwa-Koac), de mede-eigenaren vanuit de Asfalt-Impuls Stuurgroep, de andere projectleiders van Asfalt-Impuls-projecten en de werksessies met stakeholders uit de sector. In de werksessie van 13 februari 2020 (zie paragraaf 4.1) is veel feedback op de resultaten tot nu toe opgehaald.

In fase 3 wordt de interactie met de sector actief doorgezet met de volgende activiteiten:

- In de Asfalt-Impuls werkconferentie welke nog ingepland zal worden, zal een visie op de toepassing van de LAM-applicatie in de sector hoofdonderwerp van discussie zijn.
- Oprichten van een wetenschappelijk commissie (zeg maar 'het geweten') o.l.v. Sandra Erkens.
- Continueren van regelmatig en intensief contact met de LAM-projectpartners (RWS, Heijmans en Kiwa-Koac), de mede-eigenaren vanuit de Asfalt-Impuls Stuurgroep, de andere projectleiders van Asfalt-Impuls-projecten en de werksessies met stakeholders uit de sector.
- Een eerste exploratie van mogelijke toepassing van de PoC-applicatie LAM bij een provincie.

5.5 Vorbereiden acceptatie LAM in de sector

Met name in fase 1 van het LAM-project is in werkpakket 3 (WP3) de discussie opgestart over de verwachtingen, eisen en wensen vanuit de sector voor een breed toegepast LAM-applicatie.

In fase 3 zal deze discussie worden doorgezet vanuit LAM-WP3, met als doel een eerste plan op te stellen voor een organisatie die de LAM-applicatie breed beschikbaar gaat stellen in de sector. Een eerste gegadigde hiervoor lijkt CROW, gezien hun positie in de markt en hun ervaringen met dergelijke sectorbrede toepassingen, zoals OIA.

Een punt van de aandacht hierbij is de naam. LAM staat nu voor het hele project. Het lijkt ons goed een aansprekende naam te verzinnen voor de applicatie die pragmatische en betrouwbare asfaltlevensduurvoorspellingen beschikbaar gaat stellen voor de hele Nederlandse asfaltsector.

6 Literatuur

Jansen, S. (2013), Accelerated pavement assessment– het versneld beoordelen van de mechanische eigenschappen van zeer open asfalt beton', Haagse Hogeschool/TNO, Delft

Kjaerulff, Uffe B., Madsen, Anders L. (2008), Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis. Springer, ISBN: 978-0-387-74100-0

Leegwater Greet, Kirsten Roetert Steenbruggen, Diederik van Lent, Bart Luiten, Jacob Groenendijk en Martijn Schipper (2019), Asfalt-Impuls – LAM – inventarisatie levensduurmodellen asfalt.

Lent, D.Q. van (2014), Literatuurstudie verouderingsrelatie in blackspace-grafieken van bitumineuze mengsels, TNO rapportage, TNO Delft

Lent, D.Q. van, Giezen, C. en Mookhoek, S. D. (2015). APAS 3.0, vermoeiingsmodel voor asfalt (TNO 2015 R11787). TNO, Delft.

Li, N. (2013), Asphalt Mixture Fatigue Testing, Influence of Test Type and Specimen Size, proefschrift, Technische Universiteit Delft

Mookhoek, S.D. et al (2012), IQ2012-29 Eindrapport Analyse en interpretatie van DSR data uit praktijksituaties ten behoeve van het opstellen van een schadecriterium voor (2L)ZOAB DSR-vliegwiel onderzoek, TNO 2012 R10772, Delft

Luiten, G.T., e.a. (2019), Projectplan Levensduurmodel asfalt, TKI Toeslag project Topsector HTSM, Versie 1.1, d.d. 14-10-2019

Rooij, M.R. de, Courage, W.M.G., Koster, T., Wit, M.S. de, Wiel, W.D van der, Vrouwenvelder, A.C.W.M. en Waarts, P.H. (2008), Eindrapportage Levensduur Optimalisatie Tool (LOT) voor 2-laags ZOAB, TNO-rapport 2007-D-R1230/B, 4 april 2008

Rooij, M.R. de, Leegwater, G.A., Morales Nápoles, O., Koster, T., Courage, W.C.M. en Aanhold, J.E. van (2010), LOT 2.0: naar één tool voor levensduur optimalisatie, TNO-rapport TNO-034-DTM-04945, 21 december 2010

7 Ondertekening

Delft, 13 mei 2020



Ir. G.A. Leegwater
Auteur



Dr.ir. G.T. Luiten
Project Manager



Dr. P.C. Rasker
Research manager Structural Reliability

A Resultaten AI-LAM werksessie 13 februari 2020, Delft

Aan

Deelnemers LAM workshop

Van

Drs.ir. M. Moenielal

Aanwezig

Kumar Anupam (TU Delft), Stefan Bouman (Gemeentewerken Rotterdam), Wim Courage (TNO), Sandra Erkens (TU Delft/RWS), Jacob Groenendijk (Kiwa KOAC), Remco Hermsen (Provincie Gelderland), Rien Huurman (BAM), Rutger Krans (RWS), Greet Leegwater (TNO), Diederik van Lent (TNO), Giulia Martini (TNO), Mahesh Moenielal (TNO), Edwin van Osch (Heijmans), Leon Schouten (RWS), Berwich Sluer (Boskalis), Frits Stas (Heijmans)

Onderwerp

Verslag LAM Workshop 13 februari 2020

Beste deelnemers,

Hierbij ontvangt u het verslag van de LAM workshop van 13 februari. Doel van de deze workshop was het Proof of Concept (PoC) voor een asfaltlevensduurmodel te bespreken en na te gaan in hoeverre deze opzet aansluit bij de verwachtingen van de sector. Het PoC dat in deze workshop is gedeeld, bestaat uit een modelopzet dat in detail is uitgewerkt voor één potentieel deelmodel voor het schademechanisme rafeling. De uitwerking van het deelmodel is gedaan op basis van het bij TNO beschikbare APAS-temperatuursvermoeiingsmodel. Doel van deze uitwerking was om inzicht verwerven in hoeverre bestaande modellen ingebracht kunnen worden in de modelarchitectuur en vervolgens leiden tot een levensduurvoorspelling. De invulling met het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel moet dus worden gezien als voorbeeld, welke kan worden aangevuld of vervangen bij verdere ontwikkeling van het levensduurmodel.

Ten behoeve van verdere vulling van het model met schademechanismen werkt Kiwa KOAC aan het formuleren van een deelmodel voor stroefheid dat in een latere fase toegevoegd zal worden aan het model. Gedurende de workshop wordt ook de stand van zaken met betrekking tot het bepalen van de stroefheidsmodellen gedeeld.

In dit verslag wordt een samenvatting gegeven van iedere presentatie en de belangrijkste discussiepunten. Tenslotte is een resumé opgenomen met de belangrijkste bevindingen.

1 APAS temperatuursvermoeiingsmodel voor deklagen (Diederik van Lent)

Het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel wordt gebruikt in de ontwerp- en gebruiksfase om de schade-ontwikkeling in open deklagen te voorspellen t.g.v. (cyclische) temperatuurbelasting (frequentie 24 uur) waarbij de materiaaleigenschappen van het bindmiddel invoer zijn van het model. Verschillen t.o.v. andere modellen zijn:

- Interactie bitumen-steenslag.
- Database mengsels gebouwd, uit te breiden met nieuwe mengsels.
- Invloed veroudering bindmiddel op stijfheid ZOAB-deklaag meegenomen.

De voorspelling van de verouderingsparameters van het bindmiddel wordt vergeleken met de praktijk d.m.v. TNO's bitumenverouderingsdatabase met gegevens van ZOAB-, ZOAB+, 2L-ZOAB-deklagen van verschillende leeftijden. Voor de bepaling van de spanningsopbouw t.g.v. temperatuurswisselingen wordt gebruik gemaakt van de relaxatieproef, afgeleid van de proefnorm EN12697-46 waar het proefstuk wordt belast tot dat het breekt. De relaxatieproef wordt zowel op verse als verouderde proefstukken toegepast. De levensduur wordt uitgedrukt in het aantal lastherhalingen tot bezwijken m.b.v. de vermoeiingslijn voor ieder specifiek mengsel. Als standaard wordt indien nodig, gebruik gemaakt van de vermoeiingslijn van het promotieonderzoek van Li (2013). De schade wordt berekend met behulp van de Miner som, waarbij elke temperatuurswisseling zorgt voor een bijdrage aan de schade en de spanningen ten gevolge van temperatuurswisselingen in de tijd toenemen, doordat het relaxatievermogen van het materiaal afneemt als gevolg van veroudering. Momenteel worden inspectiedata en materiaaleigenschappen van proefvakken gebruikt om de voorspelling van het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel te valideren.

Vragen, opmerkingen en suggesties

1. Bepaling van de stijfheid van het asfaltmengsel gebeurt m.b.v. het nomogram van Bonnaure en Ugé. Uitgangspunt voor dit nomogram is een DAB-mengsel. Op welke wijze is hier rekening mee gehouden voor ZOAB?
Reactie: Bij de bepaling van de stijfheid van het ZOAB-mengsel is rekening gehouden met afwijkende samenstelling t.o.v. DAB.
2. De voorspelde schade heeft betrekking op de rafeling van '1 steentje' uit de ZOAB. Theoretisch kan 1 hechtbrug zijn bezwaken, maar in de praktijk zal nog geen steenverlies zichtbaar zijn omdat de omringende stenen het 'steentje' helpen.
Suggestie: Zorg voor koppeling van de berekende schade met omschrijving van matige/ernstige rafeling zoals wordt toegepast in interventieniveaus.
3. Er is discussie over welk Miner-getal een representatieve maat zou zijn voor de schade aan rafeling. Als we doorgaan met het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel, verdient uitwerking van dit onderdeel extra aandacht.
4. Is het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel geschikt om over 5 jaar alle nieuwe mengsels (hergebruik ZOAB/verjongers/kunststof vezels) te kunnen voorspellen? Het model kijkt nu naar huidige ZOAB-mengsels met 70/100 en gemodificeerde bitumen.
Reactie: Het model houdt nu inderdaad rekening met eigenschappen van huidige ZOAB-mengselsamenstellingen. Het model kan verder worden ontwikkeld om ook uitspraken te doen voor innovatieve mengsels. Naarmate we buiten het bekende gebied komen zullen voorspellingen echter wel een grotere onzekerheid krijgen. Dit is iets waar de sector gezien de wens voor verandering oplossingen voor zal moeten vinden.

2 LAM modelarchitectuur (Wim Courage)

Bij de opzet van de architectuur van het LAM is met de volgende kenmerken rekening gehouden:

- Combineren van verschillende mechanismen.
- Benutten verschillende kennisbronnen: data, fysische modellen en expertmeningen.
- Toepasbaar in ontwerp-, uitvoerings-, en gebruiksfase.
- Waargenomen prestaties terugvoeren in model.

- Vastleggen onderlinge relaties tussen parameters.

Er is gekozen om het model te bouwen op basis van een Bayesiaanse netwerk. Hierbij wordt de sterkte van relaties tussen parameters uitgedrukt in kansen. Door deze structuur kun je de logica van de resultaten eenvoudig interpreteren en presenteren.

Er is aangegeven welke invloedsparameters van toepassing zijn op één schademechanisme, hoe combinaties worden gemaakt tussen verschillende mechanismen (rafeling en stroefheid) en hoe tenslotte de (rest)levensduur wordt bepaald. Het vastleggen van de onderlinge relaties tussen de parameters vindt plaats m.b.v. conditionele kansen die direct uit data of waarnemingen worden afgeleid, denk aan het bevragen van experts of het gebruik van analytische of numerieke modellen. Het model is opgezet met Python, dit is een opensource programmeertaal waardoor de code breed toegankelijk is.

De eerste uitwerking van het PoC voor rafeling is gepresenteerd uitgaande van het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel, zoals gepresenteerd door Diederik. In het huidige model wordt uitgegaan van statische parameters (onafhankelijk van de tijd) en dynamische parameters die zich in de tijd kunnen ontwikkelen. Als modelinput wordt naast mengselsamenstelling, ook gewerkt met loggings van weerstations van dagtemperaturen over de gehele levensfase het asfalt, de relaxatie-eigenschappen en interventieniveaus van schade. Uitput van het model is de kans op bezwijken op een bepaald moment. De modelopzet is flexibel waardoor het eenvoudig mogelijk is om andere relaties of parameters (verkeersbelasting, inspecties) toe te voegen. Daarnaast kan bij de uitvoer de gevoeligheid van de verschillende parameters worden bepaald.

Vragen, opmerkingen en suggesties

1. Is het mogelijk parameters met verschillende kansverdelingen in te voeren?
Reactie: ja, je kunt willekeurige verdelingen invoeren, mits gediscrètiseerd.
2. Is het mogelijk om extreem snelle temperatuur variaties in model in te voeren als belasting?
Reactie: Dit is niet mogelijk binnen de huidige APAS invulling van het model, deze gaat uit van geleidelijke temperatuurswisselingen. Indien we ervan overtuigd zijn dat dit een extreem belangrijk schademechanisme is, biedt de opzet van het model de ruimte om een modelcomponent toe te voegen dat het effect van extreem snelle temperatuur variatie meeneemt. Het is echter nu vooral de vraag welke modelcomponenten het meest waardevol zijn om in te investeren, we kunnen immers niet alles doen. Het idee is dat er genoeg parameters in het model te stoppen om schade-ontwikkeling met een gewenste betrouwbaarheid te voorspellen. Maar het is niet triviaal welke modelcomponenten dit zijn en we kunnen zeker niet alles in het model stoppen.
3. Er zijn veel vragen over wanneer het model goed genoeg is, welke kennisleemtes er zijn en hoe deze de komende jaren gevuld gaan worden.
Vraag is analyse te maken van de gekozen route en wat nodig is om het beoogde doel te halen.
Reactie: Het gepresenteerde Proof of Concept moet echt gezien worden als een eerste stap. Het is nu aan de betrokkenen om samen de route bepalen hoe te komen tot een gefaseerd ontwikkeltraject waarbij het model ook richting geeft waar verder onderzoek nodig is. TNO zal als vervolgactie van deze workshop een voorstel doen voor een ontwikkelpad.

4. Door de spreiding in de datawolken lijkt het model vooral in de ontwerp- en gebruiksfase geschikt op netwerkniveau en niet op projectniveau, dus ook niet voor specifieke mengsels. Kijk dus ook naar waar de spreiding in projectparameters vandaan komt.
Reactie: Tot welk detailniveau (1 m²) moet je gaan? Je hebt met verschillende soorten spreidingen (binnenvak/ tussenvak) te maken. Het huidige Proof of Concept is nog onvoldoende ontwikkeld om echt aan te geven waar de spreiding precies zit en hoe deze afneemt door meer data. Deze vraag is echter wel heel relevant in verdere ontwikkeling en zal dus ook mee worden genomen.

5. De toegepaste methode moet meer van fysische en zelflerende modellen uitgaan.
Reactie: Uitgangspunt voor de huidige versie van het LAM levensduurmodel is dat gebruik wordt gemaakt van beschikbare modellen, data en huidige inzichten. Het raamwerk staat echter open om meer en andere fysische modellen, bijvoorbeeld op basis van numerieke berekeningen, en/of meer en andere data mee te nemen. Er gaat binnenkort op de TU Delft een promovendus starten die o.a. onderzoek gaat doen naar fysische modellen die gebruikt kunnen worden binnen LAM. We verwachten dat dit de fysische kant van het model zal verdiepen.
Wat betreft zelflerendheid van het model zijn we erg afhankelijk van de beschikbare data. De hoeveelheid data waar LAM op dit moment over beschikt is nog erg beperkt. Hier wordt echter wel hard aan gewerkt. Er wordt momenteel een case van de Randweg Eindhoven uitgezocht, waar Heijmans data over het mengselontwerp en aanleg van de toplaag 2LZOAB heeft verstrekt aan TNO. Uitgangspunt is dat RWS gegevens over inspecties en verkeersintensiteiten aanlevert. Voorwaarde is dat zorgvuldig met de aanlegdata wordt omgegaan en niet voor andere doeleinden wordt gebruikt.

3 Levensduur voorspelling stroefheid in LAM (Jacob Groenendijk)

Kiwa KOAC heeft een voorbereidende stap gedaan voor het gereed maken van stroefheidsmodellen voor implementatie in het modelframework. Dit werk is nog niet gereed, maar Jacob stelt ons op de hoogte van de uitgangspunten die hij nu heeft bij deze actie.

Er zijn 4 stroefheidsmodellen (STR01 t/m STR04) bekeken die in de inventarisatie zijn beschreven. De modellen zijn getoetst op geschiktheid ("drijft het"), betrouwbaarheid en de toepasbaarheid in de praktijk. Belangrijke eisen zijn dat het model onderscheid kan maken naar:

- soort steenslag,
- verschillende type deklagen,
- de verkeersintensiteit.

Tevens moet er de mogelijkheid zijn om het model uit te breiden met nieuw type deklagen (bijv. hergebruik ZOAB-granulaat) en variatie in polijstgetal van één steensoort. Daarnaast moet het model geschikt zijn bij conversie van proeven (RAW →SKM) of wijziging in normen (andere controlesteen).

De meeste interesse gaat uit naar het STR04-model. Dit model is gebaseerd op de FAP (Friction After Polishing) test, die kan worden uitgevoerd op kernen en aangeeft welke stroefheidslevensduur kan worden verwacht. De beperkingen van het huidige model is dat het enkel voor ZOAB is ontwikkeld en slechts met behulp van 5 proefvakken is gevalideerd. Vooral deze test zou meerwaarde hebben voor de innovatieve asfaltmengsels in de toekomst. Voorwaarde is dat de volgende zaken uit gezocht moeten worden:

1. verificatie van het model o.b.v. meer gegevens,
2. uitbreiden naar andere type deklagen,
3. helling gebruiken, naast intercept, in grafiek FAP (bij 60 km/uur) steenslag tegen aantal FAP-passages.

Berwich Sluer (Boskalis) heeft FAP-gegevens van mengsels (toplaag 2L ZOAB) met verschillende steensoorten. Die wil hij onder voorwaarden beschikbaar stellen voor correlatie met praktijkgegevens over stroefheidsontwikkeling van wegvakken met deze mengsels/steenslagen. Voorwaarde is o.a. dat zorgvuldig met de aanlegdata wordt omgegaan en dat deze niet voor andere doeleinden wordt gebruikt. Rutger Krans neemt hierover contact met Berwich Sluer.

4 Application of machine learning in pavement engineering (Giulia Martini)

Machine learning (ML) kan helpen om complexe relaties nauwkeurig te modelleren. Gradient boosting is een regressietechniek uit de ML ('lerend model') die in staat is om niet lineaire correlaties goed te kunnen reproduceren en kan daardoor veel meerwaarde leveren in het gebruiken van correlaties voor praktijkdata. Om inzicht te geven in de mogelijkheden van gradient boosting heeft Giulia getoond hoe asfaltstijfheid kan worden geschat op basis van bepaalde parameters (afstudeeronderzoek Giulia). Belangrijk uitgangspunt is dat modellen worden bepaald o.b.v. training van de aangeleverde datasets. De gelijkvormigheid van de data is essentieel om te kunnen zoeken naar correlaties. Voor LAM rafeling kan gradient boosting ingezet worden om zo veel mogelijk informatie uit de beschikbare data te halen.

Vragen, opmerkingen en suggesties

1. In het voorbeeld wordt een betere fit van de data gerealiseerd door minder ('explanatory') parameters mee te nemen. Nadeel van deze benadering is dat je hierdoor relevante parameters weg laat in de beschouwing.
Reactie: Dit kan ook veroorzaakt worden doordat belangrijke parameters niet aanwezig zijn.

5 Discussie

Aan het eind van de bijeenkomst aan de deelnemers gevraagd naar hun mening over de gevolgde route en de beschikbare uitkomsten. Zie onderstaand een greep van de commentaren,

1. Hoe gaat een provincie of gemeente iets aan een dergelijk model hebben?
Reactie: We zullen een doorkijk proberen te maken wat voor rol dit model kan gaan spelen voor provincies en gemeenten.
2. Verwachtingen met betrekking tot meer data over gebruiksfase bij het LAM model rafeling. Is het mogelijk om verzamelde aanleginformatie bijvoorbeeld uit ASPARi mee te nemen?
Reactie: Ja, dat is mogelijk. Greet zal de ontwikkelroute hiervoor schetsen en aan de deelnemers verstrekken. Tegelijk wordt vermeld dat TNO bezig is met de case van Randweg Eindhoven.
3. Wat hebben we nu? Wanneer is het model goed genoeg, welke kennisleemtes er zijn en hoe gaat dit de komende jaren gevuld worden? Welke prioriteiten zijn er voor de korte termijn? Voorkom de indruk van de 'black box'. Zo wordt het makkelijker om over onderwerpen te praten en focus te leggen daar waar nodig is.

4. Voor het leggen van de focus wordt het volgende geadviseerd:
 - a. Modelarchitectuur behouden
 - b. Model rafeling verbeteren, meer fysische en chemische mechanismen in verwerken. Denk bijvoorbeeld aan de affiniteit tussen bitumen en steenslag.
 - c. Stroefheid voorlopig weglaten, omdat model rafeling meer aandacht nodig heeft. Opmerking is dat bij hogere rafelingsweerstand de stroefheid wel eens het maatgevende schadebeeld zal worden.
5. Neem naast de ZOAB-deklaag ook andere typen deklagen (SMA, DGD, DAB) mee.
6. Zorg voor een goede specificatie van de format van datasets die je gaat uit vragen. Houd er rekening mee dat gemeentes en provincies hun data beheren o.b.v. de CROW wegbeheersystematiek, wat verschilt met RWS.
7. Denk aan de koppeling met schadebeelden in de praktijk. Welke definities houd je aan bijvoorbeeld voor ernstige schade? Houd zo veel mogelijk aansluiting met bestaande stramienen (bijv. oplevering) die in contracten worden gebruikt.
8. Ten aanzien van het gebruik van de modellen:
 - De toegepaste modellen voor bepaling van de asfaltstijfheid gaan uit van mengsels t/m de jaren '90. Houd er rekening dat in de huidige ZOAB-deklagen allerlei nieuwe toevoegingen (vezels, verjongingsmiddelen, enz.) aanwezig zijn.
 - Invoerparameters moeten zo praktisch mogelijk zijn.
 - Geef de grenzen van het toepassingsgebied duidelijk aan naar de gebruikers toe.
 - Valideer ook tussentijds de ontwikkeling.
 - *Zo grof als het kan en zo fijn als het moet.*
9. Voor verdere uitwerking van het stroefheidsmodel is meer data benodigd.

Actie:
Berwich Sluer (Boskalis) heeft FAP-gegevens van mengsels (toplaag tweelaags ZOAB) met verschillende steensoorten. Die wil hij onder voorwaarden beschikbaar stellen voor correlatie met praktijkgegevens over stroefheidsontwikkeling van wegvakken met deze mengsels/steenslagen. Voorwaarde is o.a. dat zorgvuldig met de aanlegdata wordt omgegaan en dat deze niet voor andere doeleinden wordt gebruikt. Rutger Krans neemt hierover contact met Berwich Sluer.

6 Resumé

De getoonde modelarchitectuur op basis van het Bayesiaanse netwerk aangevuld met de Gradient Boosting techniek is positief beoordeeld. Duidelijk is geworden dat het bepalen van het 'beste' model voor de voorspelling van de rafelingsontwikkeling een flinke uitdaging is. Het APAS-temperatuursvermoeiingsmodel is een manier om de schadeontwikkeling te berekenen, maar wordt niet als het enige schademodel gezien. Het is van belang om op zoek te gaan naar andere concrete schademodelen die in het model kunnen worden opgenomen. En vervolgens te zoeken naar verificatiecriteria voor de toegevoegde waarde van een model of een modelcomponent. Kiwa KOAC neemt de aanbevelingen mee voor het gereed maken van stroefheidsmodellen en zal bekijken hoe de aan te leveren data gebruikt kan worden voor het valideren van de modellen.

B Brainstorm ontwikkelpad LAM

Interne brainstorm bij TNO over het ontwikkelpad van de LAM-applicatie op 4 maart 2020. De activiteiten benoemd voor Fase 3 zijn de basis voor de nadere uitwerking van eerdere plannen voor 2020.

	Fase 1 en 2 - 2019	Fase 3 - 2020	Fase 4 - 2021	2022 en verder
Asfalt	Rafeling ZOAB obv APAS model Begin limit state raf. obv MJPV Begin limit state stroefheid	Visie op nieuwe materialen Andere raf. modellen Rafeling ook SMA Limit state function rafeling	Toepassing voor RAP (Doorzetten 2020)	Voorspelling ZOAB, SMA Meerdere mechanismen Met limit state functions Ook voor RAP
Systeem	Raamwerk PoC Rafeling Start PvE Stroefheid	Impl. limit state rafeling Impl. andere modellen Gradient boosting Inzicht geven in onzekerheid PoC Stroefheid	(Doorzetten 2020)	Keuze bestaande modellen Werken met onzekerheid voorspelling Uitbreidbaar met nieuwe mechanismen en modellen
Data	Data verzameld A2, van Heijmans en RWS	Analyseer data Data wensen naar WP1 (kernen, LCMS, SMA, ...) Valideer PoC met data Train PoC met data	(Doorzetten 2020)	Incl. op data gebaseerde modellen Gevalideerd met performance data
Acceptatie	Actieve disseminatie in workshop feb. 2020 met positieve feedback LAM partners, mede-eig., Stuurgroep	AI werkconf. 25-3 Visie op toepassing LAM Wetenschappelijke cie Exploratie provincies	(Doorzetten 2020)	Geaccepteerd door sector Bruikbaar voor ontwerp, contractering en asset mgt Aansluitend op praktijk data (bijv. BIM, PIM, Aspari, OIA)
Organisatie	Discussie met sector over PvE toekomstige orga vd tool	Plan maken, met WP3	Bespreken met CROW	Plan voor implementatie en beheersorganisatie

Figuur 17 Brainstorm ontwikkelpad LAM systeem, TNO, 4 maart 2020

C Verslag dataverzameling AI-LAM, fase 2, WP1

In het oorspronkelijke TNO projectplan voor fase 2 was opgenomen dat de resultaten van de dataverzameling in WP1, zoals uitgevoerd door TNO, zouden worden opgenomen in het rapport van WP1-Fase 2. Dit rapport is echter nog niet gemaakt. De werkzaamheden van TNO in WP1 zijn daarom separaat vastgelegd in dit verslag. Dit verslag dus komt in de plaats van het geplande aparte hoofdstuk over deze dataverzameling in het WP1-Fase 2 rapport.

Inleiding

Dit verslag beschrijft de dataverzameling uitgevoerd bij Heijmans, zoals beschreven in WP1 van het Projectplan Asphalt-Impuls Fase 2-2019. Dit verslag komt in de plaats van het RWS rapport dat oorspronkelijk was voorzien in het bovengenoemde Projectplan.

Het nationale programma Asphalt-Impuls wil een impuls geven aan het product 'asfalt'. Hoofddoelstelling van Asphalt-Impuls is een verdubbeling van de gemiddelde levensduur van onze asfaltwegen, een halvering van de spreiding in levensduur en een halvering van CO₂-productie, tegen gelijke of lagere kosten. Eén van de thema's in dit programma is levensduurvoorspelling. Hiervoor is het project LAM – Levensduurvoorspellend Asphalt Model – opgezet. Het doel van LAM is het opstellen van een objectief en betrouwbaar asfaltlevensduur-raamwerk dat toepasbaar is voor zowel de ontwerp-/gebruiks-/onderhoudsfase.

Aanpak

De volgende stappen zijn ondernomen voor het verzamelen van de benodigde data voor het LAM-model rafeling:

1. Inventarisatie benodigde informatie.
2. Het indelen van categorieën en het formuleren van vragen ("metadata").
3. Gesprek bij Heijmans (Edwin van Osch).
4. Selectie geschikte wegvakken.
5. Aanleveren van mengselinformatie (CE verklaringen), bedrijfscontroles/opleveringen, resultaten hoppermonsters, enz.
6. Toetsen van de aangeleverde informatie op juistheid en volledigheid.
7. Terugkoppeling naar Heijmans.
8. Opvragen gegevens rafelingsontwikkeling in de tijd bij RWS.
9. Vertalen informatie naar input data-analyse LAM-rafeling.

De benodigde informatie is in de volgende categorieën in te delen:

- Locatie wegvak (nr. 1-5.)
- Verkeersbelasting (nr. 6-7).
- Mengselsamenstelling (nr. 8-16 en 21-26).
- Aanleg (nr. 17-20).
- Prestatie (nr. 27-28).

Als invoer heeft het model in eerste informatie nodig over de volumetrische mengselsamenstelling van de ZOAB-deklaag en de reologische eigenschappen van het bindmiddel. De voorspelling van het model kan bijgesteld worden op basis van de inspectiedata over de rafelingsontwikkeling. Bij de

prestatie wordt gekeken naar jaarlijkse inspecties en/of metingen vanaf aanleg tot heden (gebruiksfasen).

De nummers tussen haakjes verwijzen naar de vragen. De vragenlijst in Tabel 5 opgenomen.

Gesprek Heijmans en selectie geschikte wegvakken

De vragenlijst is besproken bij Heijmans met Edwin van Osch (EVO). EVO gaf aan welke data zij hebben. Ten eerste zijn er data van Variabele Onderhoudscontracten (VOC) van wegvakken van Rijkswaterstaat die zij voor 4 jaar inspecteren en onderhouden. De inspectiedata van het specifieke areaal in beheer zijn verzameld in een dashboard. Hieruit volgt wanneer en waar onderhoud benodigd is. Aanleg- en uitvoeringsdata van de lopende projecten zijn echter niet in hun bezit.

Ten tweede zijn er D&C (Design&Construct) of DCM (Design, Construct&Maintain) contracten waar veel data over toegepaste mengsels, aanleg en uitvoering aanwezig zijn. Echter ontbreken gegevens van inspecties, metingen en verkeersbelasting in de gebruiksfasen.

Aangegeven dat wij bij voorkeur informatie nodig hebben van wegen met ZOAB-deklagen die geruim aantal jaren (> 8 jaar) in gebruik is, waarbij al sprake kan zijn van enige schade. Als uitgangspunt geldt: "liever veel informatie over 1 weg, dan een beetje informatie over veel wegen".

Op basis van de uitgangspunten heeft EVO voorgesteld om gegevens van Randweg Eindhoven (A2/N2) te gebruiken. Voor de betreffende vakken kan Heijmans gegevens over de mengselsamenstelling (CE Verklaring), bedrijfs-controles/opleveringen en aanlegcondities verstrekken. Voor gegevens over inspecties en verkeersbelasting verwijst EVO naar RWS. Indertijd had Heijmans geen DSR tot haar beschikking om de stijfheid (G^*) en fasehoek van het bindmiddel te bepalen. Verzoek aan TNO is om bij de toegepaste bitumenmodificatie (Cariphalte XS) hun ervaringscijfers over het toegepaste bitumen te gebruiken. Voorwaarde van EVO is dat de aangeleverde data betrouwbaar worden behandeld (niet verspreiden zonder toestemming) en dat zij gevrijwaard worden van claims door RWS voor het betreffende werk.

Ontvangst data Heijmans en toetsing informatie

Heijmans heeft aanlegdata aangeleverd van het wegvak knooppunt Ekkersweijer – knooppunt Leendertheide op hoofd- en parallelrijbaan (A2/N2) over alle asfaltlagen en de (AGRAC-) fundering van de verhardingsconstructie. Uitgangspunt is de hoofdrijbaan (HRR) en de parallelbaan (PRR) richting het zuiden tussen knooppunt Ekkersweijer en afrit Veldhoven, ter lengte van circa 6 km. Als deklaag is 2-laags ZOAB (Twinlay) toegepast. Voor de onderlaag ZOAB 16 zijn de mengselsamenstelling (CE verklaring), bedrijfscontroles (incl. verdichting) aangeleverd.

Voor de toplaag ZOAB 8 zijn de CE verklaring en resultaten van hoppermonsters aangeleverd. Omdat de toplaag (25 mm) zeer dun is, is het niet mogelijk de verdichting van de toplaag 4/8 te meten. Daarom zijn resultaten van hoppermonsters aangeleverd waaruit de samenstelling afgeleid kan worden. De volumetrische eigenschappen zijn afgeleid van de samenstelling in massapercentages. Voor de toegepaste polymeermodificatie (Cariphalte XS) zullen de stijfheid en fasehoek worden bepaald op basis van ervaringscijfers uit de 'bitumenverouderings-database' bij TNO.

Ontvangst data RWS en bewerking data

Er is contact geweest met RWS (Léon Schouten) over de rafelingsontwikkeling op het wegvak knooppunt Ekkersweijer – knooppunt Leendertheide op de Randweg Eindhoven (A2/N2). Omdat het een 2-laags ZOAB betreft met een fijne textuur, is de bepaling van de rafelingsontwikkeling met behulp van de LCMS niet voldoende nauwkeurig. Daarom is gebruik gemaakt van de interventiejaren zoals bepaald in het MJPV met behulp van visuele inspecties in de periode 2001-2019. Hiertoe zijn door RWS scripts geschreven om relevante data van het betreffende wegvak te filteren uit de achterliggende databestanden. Dit heeft geresulteerd in overzichten van hectometervakken met type deklaag en de rafelingsontwikkeling uitgedrukt in interventiejaren als functie van de tijd. Gaandeweg is gebleken dat de gevraagde data niet

eenduidig uit de systemen is te achterhalen zoals verwacht vooraf. In overleg met RWS is daarom afgesproken kritisch om te gaan en te zien of er een trend waarneembaar is in de aangeleverde data.

Table 5 Vragenlijst dataverzameling uitgevoerd bij Heijmans

Variable name [NL]	Variable name [ENG]	Unit	Type	Description
1 Weg_ID	road_id	NA	categorical	road id such as the name of the motorway from which the sample was
2 Rijstrook notatie (BPS)	road_segment_id	NA	categorical	a unique ID of the road segment from where the sample was taken (more specific than road_id)
3 Weg_strook	road_lane	NA	categorical	lane type from which the sample was collected, e.g. slow_lane,
4 Aannemer_ID	contractor_id	NA	categorical	contractor involved in the realization of the road segment from which the sample was collected
5 Laag_nummer	layer_position	NA	categorical	the layer and the location in the layer from which the sample was collected, e.g. top_bottom refers to the bottom part of the top layer
6 Verkeersintensiteit: aantal mvt/etmaal/richting	Traffic volume per day per lane per direction	NA	numerical	number of vehicles passing by per day
7 Aantal vrachtwagens per dag voor zwaarbelaste strook	Number of trucks per day for slow lane	NA	numerical	number of trucks passing by per day for the slow lane or most heavy trafficked lane
8 Asphalt_mengsel	asphalt_mix_type	NA	categorical	type of mix used. It is contractor dependent.
9 G* modulus DSR	Shear_modulus DSR	Pa	numerical	asphalt bitumen shear modulus
10 Fasehoek DSR	Phase_angle DSR	deg	numerical	asphalt bitumen phase angle
11 Type steenslag	Type stone (coarse aggregate)	NA	categorical	Type stone used in Type Test
12 Type zand	Type sand (fine aggregate)	NA	categorical	Type sand used in Type Test
13 Type vulstof	Type filler	NA	categorical	Type filler used in Type Test
14 Verdichtingsgraad	degree_compaction	%	numerical	degree of compaction
15 Verschil holle ruimte aanleg t.o.v. ontwerp	deviation_air_void	%	numerical	deviation of the air void content in the field from the design air void content
16 holle ruimte gerealiseerd	air_void_field	%	numerical	air void content recorded in the field
17 buitenluchttemperatuur bij aanleg	outside_temperature_construction	deg	numerical	outside temperature at the moment of construction
18 temperatuur asfalt in hopper	hopper_temperature_construction	deg	numerical	temperature of the asphalt in the hopper
19 Temperatuur asfalt achter balk	behind_beam_temperature_construction	deg	numerical	temperature of the asphalt behind (?) the paver's beam
20 Afkoelingstijd asfalt	cooling_time	minute	numerical	Cooling time asphalt
21 Gemiddelde laagdikte	thickness_average	mm	numerical	average thickness of the layer
22 Gegevens korrelverdeling	sieve_xx_passing	%	numerical	percentage of aggregates passing at the sieve with diameter d=xx mm
23 Bitumengehalte ontwerp	bitumen_content_design	%	numerical	bitumen content of the mix according to the design
24 Bitumengehalte check in lab	bitumen_content_lab_check	%	numerical	bitumen content of the mix recorded in the lab
25 Verificatie bitumengehalte door externe partij	bitumen_content_lab_verification	%	numerical	bitumen content of the mix recorded in the lab. The cores are made by another company as verification
26 Teruggewonnen bitumengehalte uit boorkern	bitumen_content_field	%	numerical	penetration bitumen of the mix recovered from asphalt cores in the field
Penetratie bitumen	Penetration bitumen	deg	numerical	bitumen content of the mix recovered from asphalt cores in the field
27 Jaar inspectie na aanleg	pavement_age	year	numerical	the age of the pavement when the inspection was made (sample was taken); the pavement is assumed to be born when it was laid, compacted and finished
28 Monitoring rafeling sinds aanleg als functie van leeftijd deklaag (jaar1, 2, enz. na aanleg]	Condition data stone loss as function of age toplayer	%	numerical / categorical	Monitoring data stone loss from initial start to now

D Woordenlijst, zoals gebruikt binnen LAM-project WP2

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
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 asfaltschademodellen 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 asfaltschademodellen in combinatie met prestatie-data om de levensduur van asfalt per schadebeeld te voorspellen.
(KI)	AI	(Kunstmatige Intelligentie) / Artificial Intelligence	In het LAM-project worden bijvoorbeeld de AI technologieën van Bayesiaanse netwerken en gradient boosting gebruikt

Term – NL	Term - UK	Betekenis	Gebruik in LAM
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: De 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 Degradatiemechanisme 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.