

UNIVERSITEIT TWENTE.



ASPARI

Paving the way forward

Verlicht asfalteren



*Over de haalbaarheid van Fiber Bragg Grating
sensoren in het asfaltverwerkingsproces*

Jurian van der Vegt

s1450662

Eindopdracht Bachelor Civiele Techniek

Begeleider: dr. ir. S.R. Miller

Colofon

Titel: Verlicht asfalteren

Ondertitel: *Over de haalbaarheid van Fiber Bragg Grating sensoren in het asfaltverwerkingsproces*

Status: Openbaar

Versie: Definitief eindverslag 1.0

Pagina's: 57 (79 incl. bijlagen)

Datum: 29 juli 2016

Auteur: Jurian van der Vegt

Studentnummer: s1450662

E-mail: g.j.vandervegt@student.utwente.nl

Onderwijsinstelling: Universiteit Twente

Faculteit: Construerende Technische Wetenschappen (CTW)

Opleiding: Bachelor Civiele Techniek

Opdrachtgever: ASPARi

Samenwerkende bedrijven: Technobis Alkmaar; Boskalis Nieuw-Vennep

Begeleider: dr. ir. Seirgei Miller

Voorwoord

Dit rapport is het eindproduct van mijn afstudeeropdracht voor de Bachelor Civiele Techniek. Tijdens mijn afstudeeropdracht heb ik vanaf april onderzoek mogen doen naar ultramoderne glasvezel-sensoren, zogenaamde FBG-sensoren. De titel van dit onderzoeksrapport, “Verlicht asfalteren”, kan op drie manieren worden uitgelegd. Verlicht; (1) de sensoren maken gebruik van het licht, (2) zijn licht van gewicht en (3) zijn een gevolg van en een bijdrage aan de ‘Verlichting’ die sinds enige jaren gaande is in de branche van de wegenbouw.

Rond de jaarwisseling was ik op zoek naar een geschikte opdrachtgever bij wie ik mijn afstudeeropdracht kon gaan uitvoeren. Na enkele docenten te hebben gepolst, kwam ik terecht bij Seirgei Miller. Hij vertelde mij dat de organisatie waar hij werkzaam voor is, ASPARi, nog een aantal opdrachten ‘op de plank had liggen’. Van die verschillende opdrachten sprong voor mij de opdracht-beschrijving eruit waarin de term ‘glasvezel’ genoemd werd. Een term die de laatste tijd veel in opkomst is, voor zowel leken als deskundigen. Het leek me een echte win-win situatie om mijn eindopdracht te doen over een onderwerp waarin ik mezelf zonder eindopdracht ook wel in zou willen verdiepen.

Het onderzoek is voor het overgrote deel uitgevoerd bij ASPARi, een samenwerkingsverband van verschillende Nederlandse wegenbouwbedrijven welke gevestigd is op de Universiteit Twente. Ook heb ik het onderzoek deels uitgevoerd bij Technobis te Alkmaar, een bedrijf dat gespecialiseerd is in de verwerking van glasvezelsensoren en de hard- en software daaromheen. Daarnaast heb ik experimenten mogen uitvoeren in het lab van wegenbouwer Boskalis uit Nieuw-Vennep.

Ondanks wat tegenslag in de vorm van onvoorziene uitloop (late levering van de sensoren), heb ik er nog steeds geen spijt van dat ik hiervoor heb gekozen; de afgelopen weken konden nog wel eens de meest leerzame weken zijn geweest van de driejarige Bachelor-opleiding.

Graag spreek ik mijn waardering uit naar verschillende werknemers van Technobis, waaronder Rolf Evenblij en Vincent Docter. Met name Vincent wil ik bedanken voor zijn rustige en vriendelijke hulp waar ik altijd op kon rekenen, ongeacht de tijdsdruk van al zijn andere projecten. Bij Boskalis heb ik veel te danken gehad aan André, Rens en Mohamad. Naast dat ik enorm veel van jullie heb geleerd over de productie van asfalt, wil ik jullie hartelijk bedanken voor de tijd, moeite en materialen die zijn besteed aan mijn project. Ook heb ik materiaal mogen gebruiken dat afkomstig is van Roelofs Den Ham, waar ik Albertus Steenbergen en Henk Bosger voor wil bedanken.

Bij ASPARi heb ik ook samengewerkt met Denis en Joy, twee PDEng-studenten. Thank you guys for your help and input, and also for the gezelligheid in the office.

En ten slotte, Seirgei, het was zeer leerzaam, en ook erg leuk om een tijdje vlakbij jouw kantoor te hebben gewerkt. Dankzij jou weet ik nu wat een Zuid-Afrikaanse braai inhoudt. Jouw enthousiasme en vriendelijkheid hebben mij zeker geholpen in het proces. Baie dankie.

Ik wens de lezer veel plezier!

Jurian van der Vegt
Enschede, 12 augustus 2016

Inhoudsopgave

Colofon	- 1 -
Voorwoord	- 2 -
Samenvatting.....	- 5 -
Summary.....	- 6 -
1. Inleiding.....	- 7 -
1.1 Introductie	- 7 -
1.2 Probleemstelling.....	- 8 -
1.3 Onderzoeksdoel en onderzoeksvraag.....	- 9 -
1.4 Deelvragen en methoden	- 9 -
1.6 Projectkader.....	- 12 -
2. Achtergrond Fiber Bragg Grating sensoren	- 13 -
2.1 Inleiding.....	- 13 -
2.2 Hoofdtypen optische vezelsensoren.....	- 13 -
2.3 Historie FBG	- 14 -
2.4 Werking FBG.....	- 15 -
2.5 Toepassingen FBG in civiele techniek	- 16 -
2.6 Conclusie.....	- 16 -
3. DV 1: Wat is de invloed van het verdichte asfalt op de prestatie van de optische vezels?	- 17 -
3.1 Inleiding.....	- 17 -
3.2 Eerdere toepassingen FBG-sensoren in asfalt	- 17 -
3.2.1 Gemeten grootheden	- 17 -
3.2.2 Installatiemethoden	- 18 -
3.2.3 Bevindingen.....	- 18 -
3.2.4 Invloed van het asfaltverwerkingsproces.....	- 19 -
3.3 Experimenten met FBG-sensoren – Fase 1.....	- 20 -
3.3.1 Gebruikte hardware & software in beide fasen.....	- 20 -
3.3.2 Fase 1 – Doelen.....	- 20 -
3.3.3 Fase 1 – Materialen en werkwijze.....	- 20 -
3.3.4 Fase 1 – Resultaten.....	- 22 -
3.3.4 Fase 1 – Tussentijdse conclusies	- 23 -
3.4 Experimenten met FBG-sensoren – Fase 2.....	- 24 -
3.3.1 Fase 2 – Doelen.....	- 24 -
3.3.2 Fase 2 – Materialen en werkwijze.....	- 24 -
3.3.3 Fase 2 – Assemblage en kalibratie sensoren	- 24 -
3.3.4 Fase 2 – Resultaten.....	- 25 -
3.5 Conclusie.....	- 32 -

4. DV 2: Hoe betrouwbaar is de data verkregen via optische vezels, vergeleken met data die verkregen is middels bestaande PQI-methodieken?	- 33 -
4.1 Inleiding.....	- 33 -
4.2 Theoretisch kader	- 33 -
4.3 Statistische analyse.....	- 34 -
4.4 Conclusie.....	- 34 -
5. DV 3: Hoe kan de data verzameld met Fiber Bragg Grating-sensoren gebruikt worden om een performance model op te zetten?.....	- 36 -
5.1 Inleiding.....	- 36 -
5.2 Indicatoren voor toekomstige prestaties van het asfalt	- 36 -
5.3 Tijdens het asfaltverwerkingsproces gemeten gegevens.....	- 37 -
5.4 Opzet Performance Model	- 38 -
5.5 Conclusie.....	- 40 -
6. DV 4: Hoe kan de data gebruikt worden om voertuigbelastingen inzichtelijk te maken?.....	- 41 -
6.1 Inleiding.....	- 41 -
6.2 Theoretisch kader – Materiaaleigenschappen asfalt.....	- 41 -
6.3 Voorwaarden voor geschiktheid van FBG-data voor input FEM-modellen.....	- 42 -
6.4 Theoretisch kader – Berekening belastingen.....	- 42 -
6.5 Output FBG als mogelijke input voor FEM-modellen	- 44 -
6.6 Validatie gemeten gegevens.....	- 45 -
6.7 Conclusie.....	- 48 -
7. DV 5: In hoeverre geven de metingen een indicatie van het energieverbruik tijdens het asfaltverwerkingsproces?	- 49 -
7.1 Inleiding.....	- 49 -
7.2 Berekening energieverbruik.....	- 49 -
7.3 Conclusie.....	- 49 -
8. Conclusies.....	- 50 -
9. Discussie.....	- 52 -
10. Aanbevelingen.....	- 53 -
11. Literatuurlijst.....	- 55 -
Bijlage 1 – Experimenten fase 1.....	- 58 -
Bijlage 2 – Experimenten fase 2.....	- 70 -
Bijlage 3 – Kalibratie sensoren fase 2.....	- 75 -
Bijlage 4 – Statistische analyse	- 77 -
Bijlage 5 – Performance model: MATLAB-script.....	- 78 -
Bijlage 6 – Belastingenmodel	- 79 -

Samenvatting

Doordat opdrachtnemers in de wegenbouw de laatste jaren steeds innovatiever dienen om te springen met de door de EMVI-regelgeving gestelde eisen, is er meer vraag ontstaan naar het onderzoek naar proces- en productverbetering in de wegenbouw. Als gevolg van deze toegenomen vraag is ASPARi ontstaan, een onderzoekseenheid van de Universiteit Twente die samenwerkt met verschillende wegenbouwbedrijven door heel Nederland.

ASPARi richt zich op het verbeteren van het asfaltverwerkingsproces. Dit wordt onder andere geprobeerd door middel van het implementeren en ontwikkelen van nieuwe technologieën en software. Verschillende apparaten behoren inmiddels tot de door ASPARi-ontwikkelde PQI-methodiek, zoals thermokoppels, infrarood-camera's en laser-line scanners. Een nieuwe technologie die in aanmerking komt om het instrumentenarsenaal van ASPARi aan te vullen, bestaat uit glasvezels met daarin Fiber Bragg Grating-sensoren (FBG). Deze sensoren reageren op rek, welke het gevolg kan zijn van zowel mechanische als thermische omstandigheden. Het uitgevoerde onderzoek stond in het licht van de mogelijke haalbaarheid van de implementatie van deze sensoren in het asfaltverwerkingsproces.

Daarvoor is begonnen met een literatuuronderzoek, waarin de werking en de achtergrond van de sensoren werd bestudeerd. Uit de bestudeerde literatuur kwam naar voren dat de FBG-sensoren reeds met succes worden gebruikt in verscheidene facetten van de civiele techniek, waardoor deze technologie overkomt als veelbelovend voor de toekomst. De sensoren zijn ook al meer dan eens toegepast in een bestaande asfaltverharding, met bruikbare resultaten. In dit onderzoek wordt echter onderzocht of het ook haalbaar is om de sensoren te installeren alvorens het warme asfalt er overheen wordt gespreid en vervolgens wordt verdicht.

Na het literatuuronderzoek zijn er verschillende tests gedaan met de FBG-sensoren, op kleine schaal. Deze experimenten werden uitgevoerd in twee fasen. In die tests werd onder andere onderzocht wat een praktische manier is om de sensoren te bevestigen en te beschermen in het asfalt en welke parameters invloed hebben op de door de sensoren geleverde waarden. Deze waarden (thermische rek → temperatuur) werden vergeleken met thermokoppeldraden die ook in het asfalt werden geplaatst. De data afkomstig van de FBG-sensoren die de mechanische rek representeerden, werden naast een door de onderzoeker ontwikkeld rekenmodel gelegd.

Vervolgens werd beoordeeld of de output van de FBG-sensoren gebruikt kunnen worden voor modellen die mogelijk een meerwaarde vormen voor aannemers in de wegenbouw. Daaruit werd geconcludeerd dat de waarden die geleverd worden door de FBG's, omgezet kunnen worden naar input van modellen die een uitspraak doen over lange termijnprestaties, voertuigbelastingen na het asfaltverdichtingsproces en tijdens het proces verbruikte energie.

Qua resultaten bleek dat het goed mogelijk is om de sensoren op de gewenste positie in het asfalt te bevestigen. Echter is het beschermen van de sensoren een moeilijkere opgave; enkele sensoren gingen stuk als gevolg van de experimenten. Ook bleek dat er nog een niet te verwaarlozen afstand zit tussen de verwachte verkregen waarden en de daadwerkelijk verkregen waarden.

Al met al concludeert de onderzoeker dat de FBG-sensoren, mede door hun veelzijdigheid, nog steeds een veelbelovende technologie zijn, maar dat er nog te weinig specifieke kennis is om ze op zeer korte termijn al toe te passen in het beoogde, vroege stadium van het asfaltverwerkingsproces. Daarom is het een vereiste dat er meer onderzoek wordt gedaan naar de mogelijke toepassing van FBG-sensoren in de wegenbouw. Daardoor worden de in dit onderzoek ontwikkelde modellen voornamelijk nog in de wachtkamer gezet tot het moment dat hun input, hetgeen gevormd wordt door de gemeten gegevens afkomstig van FBG-sensoren, betrouwbaarder, nauwkeuriger en robuuster is.

Summary

Because contractors in the road construction have to deal with the requirements originated from the EMVI-regulations in a more and more innovative approach, there has been a raised demand in research on process and product improvement in the road construction. As a result, ASPARi was founded, the research unit from the University of Twente which cooperates with several road construction companies throughout the Netherlands.

ASPARi focuses on improvements of the asphaltting process. These are realized through the implementing of new technologies and software in the process. Various instruments already belong to the Process Quality improvement-method (PQi) developed by ASPARi, such as thermocouples, infrared cameras and laser-line scanners. A new technology which qualifies for adding to ASPARi's instruments arsenal, consists of glass fibers in which Fiber Bragg Grating-sensors are positioned. These sensors respond to strain, which can be induced by either mechanical or thermal circumstances. The executed research dealt with the possible feasibility of these FBG-sensors in the asphaltting process.

This began with a literature study, in which the operating principle and (historical) background of the sensors was examined. From the literature it was derived that the FBG have been successfully applied in multiple fields of Civil Engineering, which deems this technology as promising for the future. Also the sensors have been more than once installed in existing asphalt layers with usable results. In this research, however, the focus is on installing the sensors on the roadbed before the spreading and compacting of the asphalt mix.

After the literature study several tests have been performed on a small scale. These experiments were carried out in two phases. In these tests it was investigated what could be a practical way to install and protect the sensors, and which parameters influence the values delivered by the FBG-sensors. These (thermal) values were compared with thermocouples. The results from the FBG-sensors that measured the occurrence of the mechanical strain were paralleled with a calculation model developed by the researcher.

Subsequently, the output of the FBG-sensors was investigated to be suitable for models which could be of added value for contractors. From that, the researcher concluded that the values obtained from the FBG's could be converted into the input for models. These models make a statement about long-term performance, vehicle induced loads after the compaction process and the amount of energy used during the asphaltting process.

Concerning the results it turned out that it is very well possible to install the sensors on the desired position in the asphalt. However, the protecting of the sensors is a more complicated task; some of the sensors were broken as a result of the experiments. It also appeared that there is a not negligible discrepancy between the obtained values and the expected values.

All in all, the researcher concludes that the FBG's, partly due to their versatility, still prove to be a promising technology. However, there is still a lack of specific knowledge about deployment technology for the early stage of the asphaltting process. Therefore it is required that more research is conducted on the possible adaptation of the FBG by the road construction industry. As a result, the models developed in this research have to wait until the input, which consists of the data acquired from the FBG-sensors will be more reliable, accurate and robust.

1. Inleiding

1.1 Introductie

Tot voor een paar jaar geleden waren opdrachtgevers die een weg wensten te realiseren, geneigd om te kiezen voor de wegenbouwaannemer die het meest tijds- en kostenefficiënt de weg kon opleveren. Dit was de gebruikelijke wijs van aanbesteden totdat de wegenbouwindustrie werd blootgesteld aan politiek geïnduceerde veranderingen. Als een gevolg hiervan worden aannemers niet langer alleen geselecteerd op hun efficiëntie op de korte termijn, maar ook op de manier waarop zij rekening houden met het milieu en de wijze waarop de aannemer prestaties garandeert op de lange termijn. (Rijkswaterstaat, 2016)

Door deze verschuiving voelen aannemers de druk om een meer compleet en duurzaam product op te leveren. Echter wordt deze ontwikkeling ook gezien als een kans om zich te onderscheiden van concurrerende aannemers. (Dorée, Miller, & Ter Huerne, 2008) Vandaag de dag bezitten de aannemers niet alleen de mogelijkheid om zich te onderscheiden in de uitvoeringsfase van een project, aangezien aannemers tegenwoordig in stadia zoals ontwerp, onderhoud en financiering ook meer te zeggen hebben. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om (bij de gunning) boven concurrenten uit te stijgen in meerdere facetten van een project.

Men zou verwachten dat aannemers in dit technocratische tijdperk allang de mogelijkheden hebben geïmplementeerd die ICT-systemen aanreiken. In feite is het echter zo dat aannemers blijven vertrouwen op traditionele methoden van wegenbouw, negerend de potentiële toepassingen van high-tech instrumenten die het aanlegproces en sleutelparameters daarin kunnen monitoren. Daardoor hebben aannemers weinig informatie waarop zij hun evaluatie kunnen baseren van wat goed en slecht ging in het proces. (Bijleveld, 2015) Een ander kenmerk van traditionalisme in de wegenbouw blijkt uit de verhouding tussen impliciete en expliciete kennis: bestuurders van walsen en andere asfaltmachines gaan bij het maken van operationele keuzes doorgaans uit van hun gevoel en ervaringen uit vorige projecten. (Dorée & ter Huerne, 2005); (Miller, 2010) Wegwerkers worden niet aangemoedigd om deze kennis te delen om zodoende de kennis expliciet te maken. De kennis blijft als gevolg grotendeels impliciet en individueel. Dit gegeven kan leiden tot een algemene teloorgang van kennis in de wegenbouwindustrie, daar meer ervaren machinebestuurders met pensioen gaan dan dat er jonge wegwerkers bijkomen. (Bijleveld, 2015)

Het dient echter opgemerkt te worden dat er het nodige werk en studie is gedaan teneinde het conservatisme tegen te gaan. Een paar jaar geleden is de methodiek *Process Quality improvement* (PQi) ontwikkeld door Miller (2010). Dit kader van procesregistratie voorziet in een methode waarmee ongewenste variabiliteit in de asfaltverwerking kan worden gemonitord en aangetoond. Deze PQi-aanpak gaat uit van datametingen in het proces door nieuwe technologieën te gebruiken, alsmede visualisaties welke asfalteringsteams helpen om de kwaliteit van het proces te verbeteren.

Afgezien van deze recente inspanningen staat de technologische groei van de wegenbouw nog in de kinderschoenen, hetgeen veel ruimte en kansen laat om te experimenteren in nog relatief onbekende terreinen. (Bijleveld, 2015; Vasenev, 2015)

1.2 Probleemstelling

Zoals beschreven in de voorgaande paragraaf, nieuwe technologieën worden toegepast in het asfaltverwerkingsproces. De instrumenten die worden gebruikt in de PQi-methodieken staan hieronder in Tabel 1. (Bijleveld, 2015)

Instrument	Task	Method	Variables
Weather station	Monitor weather conditions	Set up a weather station at the construction site	Temperature, wind speed, humidity, sun radiation (every minute)
Laserlinescanner (Raytek)	Measure initial surface temperature behind the screed	Mount the scanner behind the screed of the paver	Surface temperature behind the screed in 20 zones (every second)
Infrared cameras	Measure cooling surface temperature at fixed positions	Cameras on tripod at fixed positions	Thermo-graphic picture (every minute)
Thermocouples	Measure cooling in-asphalt temperature at fixed positions	Insert thermocouples in the middle and in the bottom of the asphalt layer	In-asphalt temperatures (every minute)
Density measurements (nuclear and electromagnetic)	Measure density progression at cooling measurement locations	Measure density after every roller pass	Type of roller pass and density
Memo recorders (Sony)	Record circumstances	Record circumstances during the process	Observations of circumstances in a logbook (stopping places, lunch, delays etc.)

Tabel 1, Instrumenten in het PQi-framework

De verschillende instrumenten die hierboven staan, geven de mogelijkheid om twee sleutelparameters van het asfaltverdichtingsproces te meten: temperatuurhomogeniteit en verdichtingsconsistentie van het asfalt.

Het probleem van het gebruik van deze meetinstrumenten is de tijd en arbeid die het kost om de instrumenten op te zetten of te monteren, hetgeen ook een financiële kostenpost vormt. Verder, wanneer het wegdek is voltooid, worden de instrumenten verwijderd van de bouwplaats, waardoor monitoren van lange termijneffecten niet mogelijk is. (Miller, 2010; Bijleveld, 2015)

In het ideale geval kunnen wegwerkers op hun positie blijven terwijl ze de data verzamelen, zonder dat ze (infrarood)camera's e.d. hoeven op te zetten. Bovendien zullen aannemers gebaat zijn bij de mogelijkheid om temperaturen en spanningen in het asfalt ook op de lange termijn, dus na oplevering, te kunnen meten.

Een mogelijke oplossing kan bestaan uit het implementeren van Fiber Bragg Grating (FBG) sensoren; glasvezelsensoren die temperaturen en rekkingen kunnen meten in het asfalt. Deze sensoren kunnen worden aangesloten op een interrogator (*gator*) om zodoende die parameters direct, real-time en continu aan te leveren aan de wegwerkers. Uitgebreidere toelichting volgt in het volgende hoofdstuk. Het kan alhoewel een heuse uitdaging zijn om deze fragiele en breekbare sensoren toe te passen in een proces waar ruwe materialen worden verwerkt door zware machines. (Canning et al., 2012)

1.3 Onderzoeksdoel en onderzoeksvraag

Het onderzoek zal zich richten op de studie van praktische haalbaarheid aangaande het plaatsen van FBG-sensoren in de asfaltlaag, en ook wordt getest en nagegaan of de verkregen data net zo nauwkeurig, betrouwbaar en bruikbaar zijn als de data die verkregen is middels reeds gevestigde PQi-methodieken. Verder tracht dit onderzoek om een methode aan te reiken om m.b.v. de data een (*prediction of*) *performance model* op te zetten, welke een verwachte prestatie geeft van het asfaltwegdek op de lange termijn. Een ander doel van dit onderzoek is om te bepalen of de data uit optische sensoren gebruikt kunnen worden als input voor een visualisatie van voertuigbelastingen. Als laatste poogt dit onderzoek om een op de FBG-data gefundeerde inschatting te maken waarmee de hoeveelheid energie kan worden benaderd die is verbruikt in het asfaltverwerkingsproces.

Wanneer de bovenstaande doelen worden samengevat, ontstaat het in deze bachelor-thesis centraal staande onderzoeksdoel, welke luidt: *De haalbaarheid beoordelen van het gebruik van optische FBG-sensoren in de wegenbouw.*

“Haalbaarheid” wordt hier gedefiniëerd als praktisch toepasbaar in een asfaltlaag alsmede betrouwbare en nauwkeurige resultaten genererend welke ook bruikbaar zijn voor het gebruik in verschillende rekenmodellen en/of andere visualisaties.

Vanuit het onderzoeksdoel wordt de onderzoeksvraag afgeleid, met het bijbehorende doel om deze te beantwoorden in de conclusie van dit onderzoek. De onderzoeksvraag is als volgt geformuleerd:

Wat is de haalbaarheid van het gebruik van optische sensoren om asfalttemperatuur en voertuigbelastingen te meten, gedurende en na het asfaltverdichtingsproces?

1.4 Deelvragen en methoden

1. Wat voor invloed heeft het verdichte asfalt op de prestaties van de FBG-sensoren?

- Hoe kunnen de FBG-sensoren geplaatst worden tijdens het asfaltverdichtingsproces?
- Wat is de invloed van het verdichte asfalt op het meten van de temperatuur?
- Wat is de invloed van het verdichte asfalt op het meten van de rekkingen?
- Hoe kunnen temperatuur- en rekdrempels bepaald worden?

Om antwoorden te geven op de eerste deelvraag zal als eerste een literatuurstudie worden uitgevoerd. In deze literatuurstudie worden eerder opgezette projecten met FBG-sensoren bestudeerd. Hiermee wordt de basis gelegd voor de experimenten die de onderzoeker zelf gaat uitvoeren. In de eerste experimenten worden de sensoren in een mal gelegd, die daarna gevuld wordt met koud asfalt. Vervolgens wordt een geschikte bevestigingswijze bepaald, alsmede het effect van temperatuur- en belastingsveranderingen op de respons van de sensoren. Bij deze deelvraag ligt de focus vooral op de praktische haalbaarheidsaspect van de implementatie van FBG-sensoren in asfalt.

2. Hoe betrouwbaar is de data verzameld met FBG-sensoren vergeleken met data verkregen middels de bestaande PQi-methodieken?

- Op welke manier is de data verzameld met de optische vezels?
- Hoe kunnen de beide datasets vergelijkbaar worden gemaakt?
- Zullen de eventuele verschillen in betrouwbaarheid veranderen na verloop van tijd?

Wanneer de tests zijn uitgevoerd, zullen zij voorzien in resultaten (data) die een centrale rol gaan spelen in dit onderzoek. Deze gegevens zullen worden beoordeeld op hun betrouwbaarheid en nauwkeurigheid door ze te vergelijken met (data gegenereerd middels) gevestigde PQi-methodieken.

3. Hoe kunnen de met FBG-sensoren verkregen data gebruikt worden om een performance model te ontwikkelen?

- Hoe kunnen tijd en temperatuur tijdens een walsverdichting gepresenteerd worden?

In dit deel van het onderzoek zal een korte literatuuronderzoek worden uitgevoerd om bekend te worden met de impact van de twee eerder genoemde procesparameters op de uiteindelijke prestatie van het asfalt. Wanneer de impact van deze parameters wordt bestudeerd is het evenwel noodzakelijk om te achterhalen in welke eenheden de prestatie van het asfalt kan worden uitgedrukt. Hierna is het doel om de twee procesparameters tezamen met de verwachte prestaties te verenigen in een model. Dat model zal dus voorspellend van aard zijn.

4. Hoe kan de FBG-data gebruikt worden om voertuigbelastingen inzichtelijk te maken?

- Is het mogelijk om met de data een Eindige Elementen Methode-model te ontwikkelen?
- Kan de door de FBG-sensoren gemeten rek gevalideerd worden met theoretische rekenmodellen?
- Hoe zijn spanningsverschillen in aslastzones en niet-aslastzones te detecteren?

In de op een na laatste deelvraag wordt bekeken of de FBG-sensoren de belastingen als gevolg van de walsen en andere machines tijdens het asfaltverdichtingsproces en die van voertuigen na het asfaltverdichtings-proces nauwkeurig kunnen detecteren. Dit wordt gedaan met behulp van vergelijkingen uit de statica.

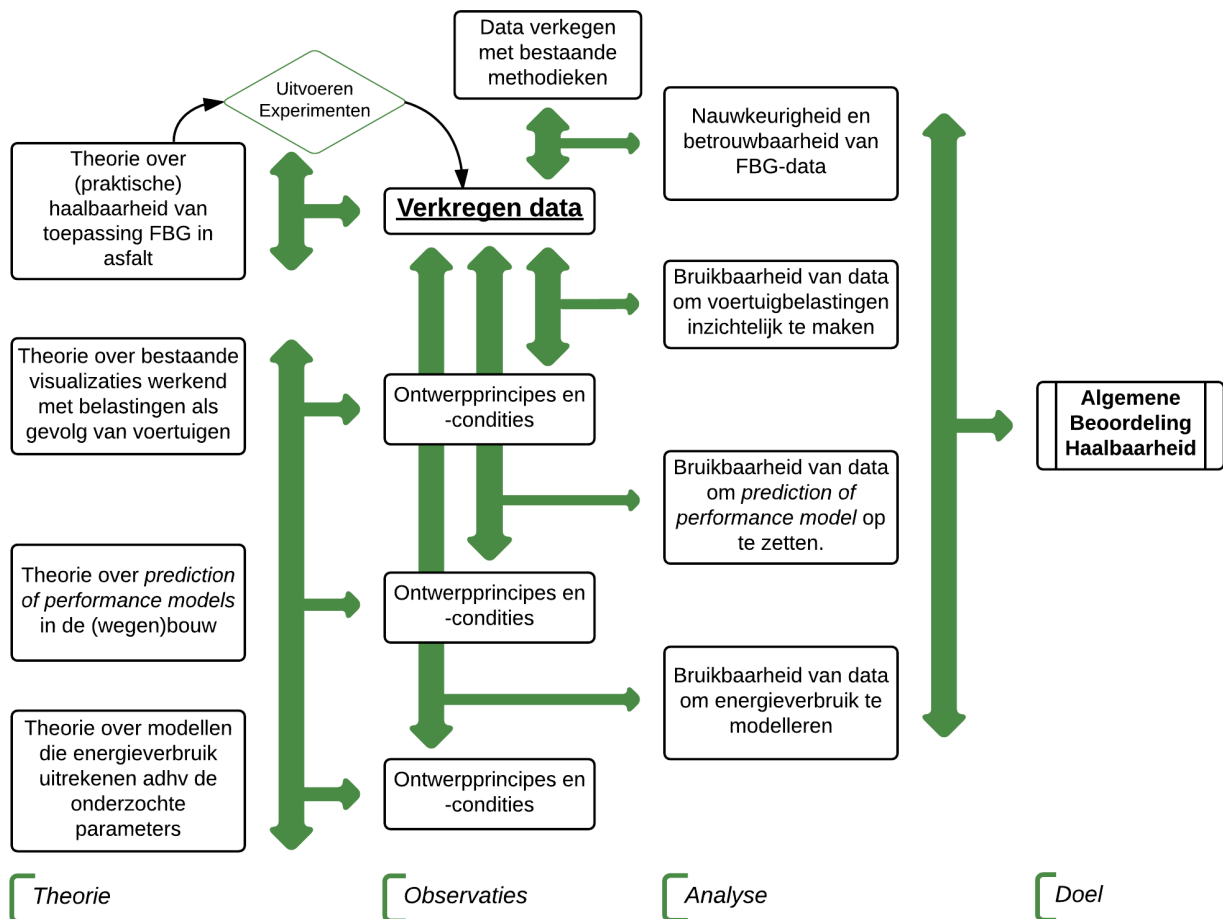
5. Wat zegt de verkregen FBG-data over de hoeveelheid verbruikte energie tijdens het asfalt-verdichtingsproces?

- Kunnen de FBG-sensoren de snelheid van passerende voertuigen bepalen?

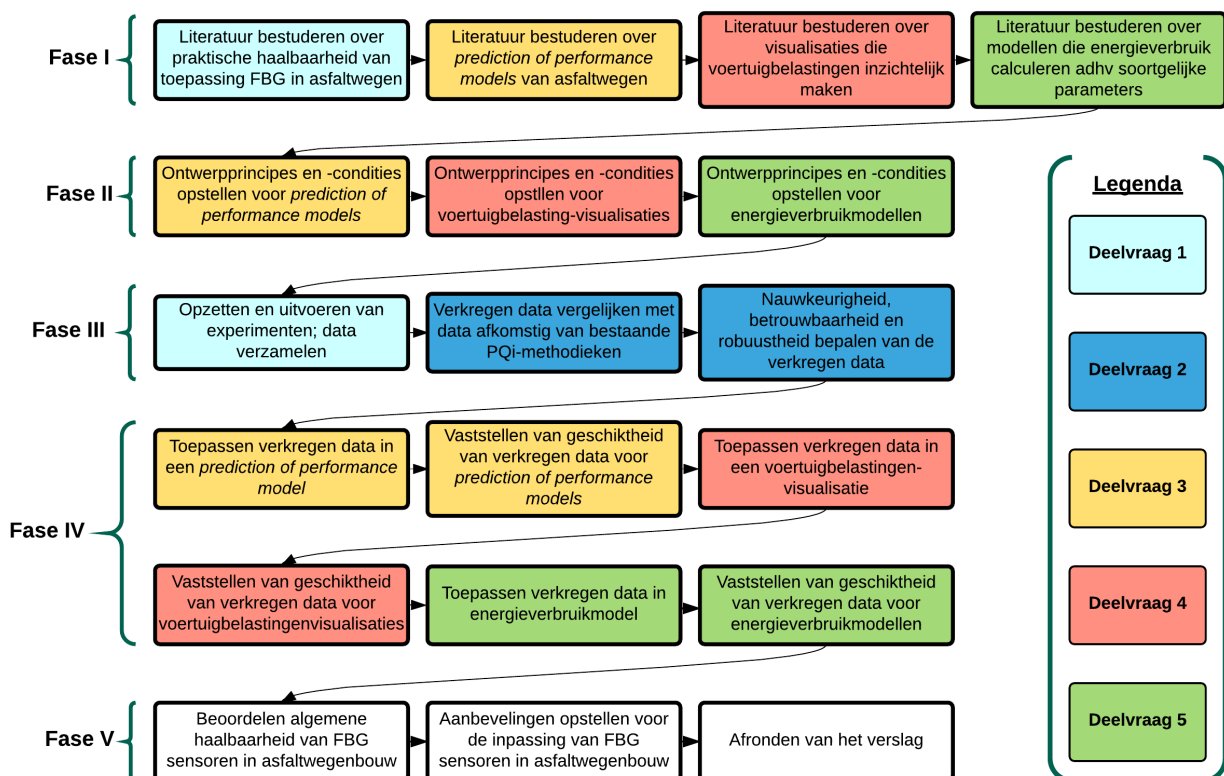
Het mogelijke antwoord op deze laatste deelvraag zegt niet direct iets over de haalbaarheid van het gebruik van vezeloptica in de wegenbouw, aangezien het bepalen van de hoeveelheid verbruikte energie zeer zeker niet de hoofdtak vormt van een aannemer. Echter zegt het mogelijke antwoord wel degelijk iets over de potentiële veelzijdigheid van het gebruik van FBG-sensoren en geeft het daardoor de milieubewuste aannemer een aanbeveling over hoe hij energieverbruik in het asfaltverwerkingsproces kan monitoren. Om deze deelvraag te beantwoorden, wordt gepoogd een beschrijvend model op te zetten dat de gemeten parameters gebruikt als (deel van de) input om als output het geschatte totaal aan verbruikte energie te genereren.

In de laatste fase van het onderzoek zullen de toepasbaarheid, betrouwbaarheid en bruikbaarheid worden samengevat in een algemene haalbaarheidsbeoordeling, van waaruit de onderzoeker aanbevelingen zal formuleren.

Op de volgende pagina staan twee figuren gepresenteerd. Figuur 1 wordt een onderzoeksmodel genoemd. Het idee is ontleend aan Doorewaard en Verschuren (2015). In dit onderzoeksmodel is zichtbaar gemaakt hoe de onderzochte zaken aan elkaar gerelateerd worden. Men leest een dergelijk onderzoeksmodel van links naar rechts. Een verticale pijl geeft aan dat de gegevens aan de linkerkant en uiteinden van die pijl worden samengenomen, waardoor er kennis wordt geproduceerd welke vervolgens gepositioneerd wordt in het verlengde van de naar rechts wijzende pijlen. Figuur 2 is een meer logistieke schematisatie welke de opeenvolging van onderzoeksactiviteiten verbeeldt. De planning die gemaakt is voor dit onderzoek, is gebaseerd op deze sequentie van activiteiten.



Figuur 1, Onderzoeksmodel



Figuur 2, Flow chart van onderzoeksactiviteiten

1.6 Projectkader

De tien weken waarin dit bachelor-onderzoek dient te worden uitgevoerd, is uiteraard een beperkte periode. Hierdoor is het essentieel dat het onderzoek duidelijk is afgebakend.

Er zal slechts een type FBG-sensor worden gebruikt en getest. De eigenschappen en samenstelling van het glasvezelmateriaal zal dus uniform blijven gedurende het gehele onderzoekstraject.

De focus zal liggen op het meten van de twee parameters temperatuur en mechanische rek, welke mogelijk vertaald kunnen worden naar temperatuurhomogeniteit en verdichtingsconsistentie, aangezien deze procesparameters grotendeels de uiteindelijke kwaliteit van het asfalt beïnvloeden. (Miller, 2010; Bijleveld, 2015)

Wanneer de data die verkregen is middels FBG-sensoren wordt vergeleken met data die verzameld is met PQi-instrumenten, zullen alleen de bestaande technieken die door ASPARi zijn ontwikkeld worden meegenomen in het onderzoek. (Miller, 2010) Deze PQi-data zullen in dit onderzoek fungeren als de standaard, omdat de wijze waarop deze PQi-data verkregen zijn, beschouwd worden als nauwkeurige, betrouwbare en gevestigde methodieken.

Verscheidene eigenschappen van het asfalt, zoals viscositeit, vochtigheid en samenstelling zullen buiten beschouwing worden gelaten, ondanks dat het belangrijke asfaltkarakteristieken zijn. Verder wordt de directe, fysieke invloed van de aanwezigheid van glasvezels op de prestatie van het asfalt verwaarloosd; onderzoek heeft uitgewezen dat de presentie van zeer kleine objecten in het asfalt de sterkte van het asfalt niet meetbaar aantast. (Schwartz, Khan, Pfeiffer, & Mustafa, 2014)

2. Achtergrond Fiber Bragg Grating sensoren

2.1 Inleiding

Dit onderzoek heeft zoals gezegd als doel om de bruikbaarheid van FBG-sensoren in het asfalteringsproces op waarde te schatten. Hierbij wordt aangenomen dat men in de wegenbouw reeds voldoende kennis bezit over de bereiding en verwerking van asfalt, dit in tegenstelling tot de veronderstelling dat het onderwerp 'vezeloptica' hier nog enige toelichting behoeft. In dit hoofdstuk vindt die toelichting plaats; er wordt eerst vanuit een breed perspectief gekeken naar de kenmerken van vezeloptica, waarna er steeds verder wordt toegespitst op de specifieke toepassingen van vezeloptica in de civiele techniek. Vervolgens wordt het onderzoek verder vernauwd naar de toepassing van vezeloptica in asfaltwegen, maar omdat dat een *core part* van dit onderzoek vormt, wordt dat in het volgende hoofdstuk besproken als onderdeel van het antwoord op de eerste deelvraag.

2.2 Hoofdtypen optische vezelsensoren

H.-N. Li, Li, and Song (2004) onderscheiden drie typen optische vezelsensoren, te weten:

- *Local sensors*, met als voorbeeld een Fabry-Perot optische sensor. Deze *local sensors* registreren het faseverschil tussen twee golven teneinde de spanning en/of verplaatsing te kunnen uitrekenen. (Culshaw et al., 1996; Choquet, Juneau, & Dadoun, 1999)
- *Quasi-distributed sensors*. Hier worden FBG-sensors onder geschaard. Deze type sensoren kenmerken zich doordat ze de golflengtes van het licht meten. Op dit type wordt hieronder dieper ingegaan, daar 'FBG-sensoren' het onderwerp vormen van dit onderzoek.
- *Distributed sensors*, de zogenoemde Raman/Rayleigh en Brillouin worden gecategoriseerd als zijnde *distributed sensors*. Dit type optische vezelsensor meet de intensiteit van het licht dat zich door de vezelkern voortbeweegt. (Kwon, Kim, & Choi, 2002; Xu, 2014)

De voordelen van het gebruik van optische vezelsensoren, die bovenstaande types alledrie gemeenschappelijk hebben, zijn: (Aspecten 1-8 via Li et al., 2004.)

- 1) Lange levensduur. De vezels zijn vervaardigd middels een zeer duurzaam materiaal (silica, SiO_2) dat corrosiebestendig is.
- 2) Weerstandsvermogen tegenover trekkrachten. De silica vezelkern kan 5% verlenging oftewel 50.000 μe verdragen.
- 3) Weerstandsvermogen tegenover temperatuur. Temperaturen in het bereik van -200 tot 800 $^{\circ}\text{C}$ kunnen gemeten worden.
- 4) Flexibel. De vezelkabels kunnen geïmplementeerd worden op complexe oppervlakten en in nauwe ruimtes.
- 5) Immuniteit jegens elektro-magnetische interferentie (EMI). Optische sensoren kunnen data versturen over lange afstanden zonder EMI-besmetting.
- 6) Isolierend. De van siliciumdioxide gemaakte vezels geleiden geen elektriciteit.
- 7) Veelzijdig. De vezeloptica kunnen lokaal of gedistribueerd in-situ metingen verrichten op verscheidene locaties en kunnen vervoevoudigd worden.
- 8) Economisch. Qua kosten wordt er geconcurrereerd met traditionele sensoren en de verwachtingen zijn dat de prijzen van optische vezels verder af zullen nemen in de toekomst.
- 9) Accuraat. Tegenwoordig is de technologie op het gebied van optische sensoren zo geavanceerd en accuraat dat het spanning en temperatuur meet met resoluties van respectievelijk 1 μe en 0,1 $^{\circ}\text{C}$. (Yin et al., 2007; Zhu 2009)

Het grootste nadeel van optische vezels is hun breekbaarheid. Optische vezels zijn fragiel en kunnen breken tijdens het verpakken, transporteren of installeren.

De *quasi-distributed* (FBG-) *sensors* worden extra belicht in het onderzoek van Li *et al.* Zij stellen dat FBG-sensoren zich op een positieve wijze onderscheiden van andere typen vezeloptica doordat ze een golflengte encoderen, hetgeen een absolute parameter is in de zin dat de golflengte niet lijdt onder verstoringen in de baan van het licht. Verder stellen zij dat “*FBG sensors are preferred in many civil engineering applications and have been successfully employed in several full-scale structures.*” (Li *et al.*, 2004)

Vanaf nu beperkt het onderzoek naar vezeloptica zich tot Fiber Bragg Grating sensoren. Alle andere typen en toepassingen op het gebied van optische vezels worden buiten beschouwing gelaten. Wanneer de lezer ergens in dit verslag “optische sensoren” of een andere, minder specifiek afgebakende term tegenkomt, mag de lezer aannemen dat het dan om FBG-sensoren gaat.

2.3 Historie FBG

In 1978 stelden Kenneth O. Hill en zijn collegaonderzoekers van het Communications Research Centre Canada (CRC) het volgende vast:

We have reported the presence of a photosensitive mechanism in a Ge-doped silica core fiber manifested by light-induced refractive-index changes. We have utilized this phenomenon to form high-quality long-length reflection filters in fibers. (K. O. Hill, Fujii, Johnson, & Kawasaki, 1978)

De lichtgevoeligheid van de vezelkernen werd aangetoond door te experimenteren met een laser die zichtbare argonionen uitstraalde. Deze straling werd door een vezelkern van siliciumdioxide geleid die gedoteerd was met het element Germanium. (‘Doteren’ is het opzettelijk aanbrengen van onzuiverheden in een materiaal om de eigenschappen van dat materiaal te veranderen.) Kort gezegd was het zo dat naarmate de tijdsduur toenam, er meer licht vanuit de vezelkern werd teruggekaatst. Deze toegenomen reflectie was het gevolg van een tralie (ook wel diffractierooster genoemd, Engels: *grating*) die in de vezelkern werd ‘geschreven’ door de interferentie tussen de ingaande lichtgolven en de lichtgolven die gereflecteerd werden door het achterste uiteinde van de vezelkern. (Kashyap, 1999)

In datzelfde onderzoek werd voorspeld dat de lichtgevoeligheid van deze vezelkernen vele mogelijkheden met zich meebracht. Kenneth O. Hill werd hiermee een van de grondleggers van het hedendaagse gebruik van vezeloptica. (CAP, 1998)

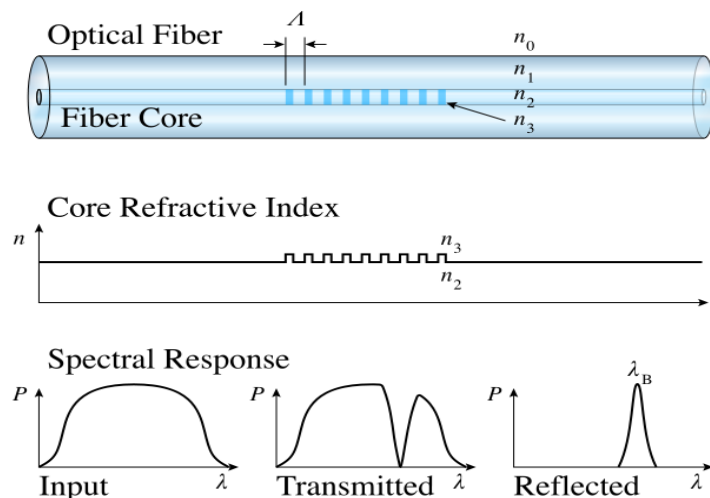
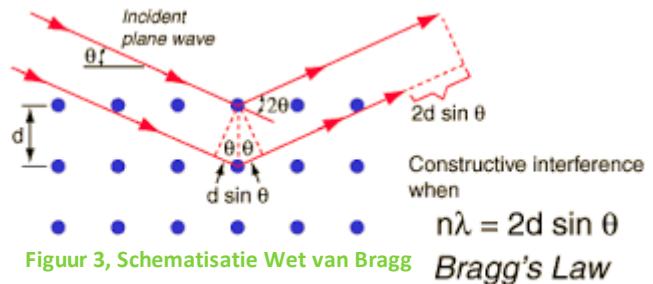
Na 1978 bleef bijna een decennium lang het domein van sommige onderzoekers beperkt tot enkel het fenomeen van de lichtgevoelige vezelkernen. Dat kwam onder andere doordat het lastig was om geschikte experimenten op te zetten. Er werd zelfs gedacht dat het fenomeen zich beperkte tot de ene ‘magische’ vezel van het CRC uit 1978. Wat het onderzoek verder bemoeilijkte, was het feit dat de lichtgolven die door het geschreven tralie werden teruggekaatst en geobserveerd, beperkt waren tot het zichtbare spectrum, dus van 390 tot 700 nm. (Kashyap, 1999)

Een grote doorbraak in het onderzoek naar lichtgevoeligheid in vezelkernen vond plaats in het jaar 1989, toen Gerald Meltz *et al.* een nieuwe methode hadden opgezet, waardoor de diffractieroosters op een zogenoemde holografische wijze geschreven konden worden. Dit maakte het mogelijk om reflectietralies te fabriceren die in staat waren om golflengtes te weerkaatsen (o.a. 1530 nm) die geschikt zijn voor telecommunicatieve doeleinden. (Meltz, Morey, & Glenn, 1989; Kashyap, 1999) Sindsdien zijn er vele nieuwe ontwikkelingen ontstaan, welke verderop in dit hoofdstuk belicht zullen worden.

Hill en Meltz schreven in 1997 *"Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview"*. Hierin blikten zij terug op de voorgaande twintig jaren. Ook gaven ze middels een tabel een overzicht van de toepassingen die tot dusver mogelijk waren gemaakt door de eigenschappen van lichtgevoeligheidstechnologie. Grofweg zijn hier twee groepen in te onderscheiden: Toepassingen op het gebied van telecommunicatie, en toepassingen op andere gebieden. "Grating-based sensors" wkorden in deze tweede categorie geplaatst. Aangezien "Grating-based sensors" het onderwerp van dit onderzoek zijn, is het interessant om te constateren dat de auteurs van dit overzicht dat het meest veelbelovende soort toepassing van FBG achten. (Kenneth O. Hill & Meltz, 1997)

2.4 Werking FBG

In het onderzoeksrapport van Hill et al. (1978) komt de term 'Bragg' niet voor; de tijdens de experimenten ontstane interne tralies worden enkel 'gratings' genoemd. Aansluitend aan dit onderzoek werden de tralies getypeerd als 'Hill gratings'. (Hill & Meltz, 1997) Door de jaren heen werd duidelijk dat dit fenomeen (deels) beantwoordt aan de wet van Bragg, welke stelt dat de (piek)intensiteit van een teruggekaatste straling afhangt van de golflengte (λ) van de straling, de afstand (d_{hkl}) tussen de vlakken in het materiaal dat terugkaatsing veroorzaakt en de hoek (θ) tussen de inkomende stralen en de vlakken. (Bragg & Bragg, 1913) Hiernaast staat in Figuur 3 het principe van deze wet weergegeven. Een piekintensiteit als gevolg van constructieve interferentie is waar te nemen indien de vergelijking rechtsonder in Figuur 3 kloppend is.



Figuur 4, Structuur van een Fiber Bragg Grating

De gratings in een vezelkern fungeren als een tralie, dat een specifiek deel van de inkomende stralen niet doorlaat maar reflecteert. Bij een Bragg Grating is in een segment van een vezelkern een serie van deze tralies aangebracht, die een afwijkende brekingsindex (n_i) hebben ten opzichte van het materiaal in de rest van de vezelkern. Hierdoor wordt een specifiek deel van de ingaande golflengtes weerkaatst, namelijk de golflengtes waarvoor de vergelijking geldt:

$$\lambda = 2n\Lambda \quad [1]$$

n is hier de brekingsindex van de FBG

en Λ is de afstand tussen twee tralies in de FBG. De rest van de golflengtes wordt doorgelaten. Dit proces is geïllustreerd in Figuur 4.

Tijdens hun experimenten constateerden Hill en zijn collega's dat *"In particular, temperature fluctuations and gradients as well as mechanical stress acting on the fiber guide affect the response of the filters dramatically."* (Hill et al., 1978) Dit gegeven legt de basis voor het gebruik van FBG als sensoren: uit de geobserveerde teruggekaatste golflengtes is af te leiden wat de temperatuur is rondom de vezelkern ter hoogte van de Bragg Gratings, idem voor de spanning. Het kwantitatieve verband tussen de teruggekaatste golflengtes en de spanning of temperatuur komt in het volgende hoofdstuk aan bod.

2.5 Toepassingen FBG in civiele techniek

In deze paragraaf worden enkele voorbeelden gegeven waarin FBG-sensoren een onderdeel vormen van een civiel kunstwerk. Deze lijst van voorbeelden is verre van compleet; het dient slechts ter illustratie van de veelzijdigheid van FBG-sensoren. Bij elk projectverslag worden de ervaringen van de schrijvers met het gebruik van FBG-sensoren geciteerd, zie hieronder Tabel 2.

Rapport	Kunstwerk	Evaluatie
Kersey, 1996, <i>Optical fiber sensors for permanent downhole monitoring applications in the oil and gas industry</i>	Pijpleiding	<i>"Due to their multiplexing capabilities and versatility, the use of Bragg grating sensors appears to be particularly suited for this application."</i>
Vohra et al., 2000, <i>Distributed strain monitoring with arrays of fiber Bragg grating sensors on an in-construction steel box-girder bridge.</i>	Brug	<i>"Data obtained from two tests were shown to reveal interesting features of the box-girder strain response during the push and pull phases, particularly with regard to limit loads and local buckling."</i>
Baldwin et al., 2001, <i>Structural monitoring of composite marine piles using fiber optic sensors.</i>	Palen	<i>"Based on the results of these tests, fiber optic sensor systems can not only survive the harsh conditions of the pile driving process, but also maintain their functionality, providing useful data on the installation and operational loads. (...) Finally, it should be recognized that this technology is not limited to composite piles, but can be implemented on many structural components, such as bridges, buildings, space structures, and naval vessels."</i>
Iwaki et al., 2001, <i>Health monitoring system using FBG-based sensors for a 12th story building with column dampers.</i>	Gebouw	<i>"All developed sensors exhibited good accuracy and durability. The FBG-based sensors have many advantages over conventional electric sensors. One of the most significant features is multiplexing capability. (...) The FBG-based sensors are concluded to be ideal for long time monitoring of a large building structure or a large civil structure. They are durable and reliable, and require less labor for installation."</i>
Chuan Li et al., 2010, <i>Combined interrogation using an Encapsulated FBG Sensor and a Distributed Brillouin Tilted Buffered Fiber Sensor in a Tunnel.</i>	Tunnel	<i>"By combining FBG and Brillouin OTDR, the combined interrogation system cannot only obtain the high precision sensing information of FBG sensors, but also obtain vast sensing information also of the distributed Brillouin fibers."</i>
Xu, 2014, <i>Development of two optical fiber sensing technologies and applications in monitoring geotechnical structures.</i>	Grond	<i>"It evidenced that the FBG-LDT is capable of measuring small strains with greater accuracy as compared to electrical circuit based external LVDT (...) The study in this chapter also asserts the need for promoting, adopting and implementing the FBG-technique while investigating the soil behavior, as it has numerous inherent advantages as compared to other electrical strain measuring devices."</i>

Tabel 2, Enkele evaluaties van het gebruik van FBG-sensoren in de civiele techniek

Volgens het merendeel van bovenstaande auteurs heeft het gebruik van FBG-sensoren veel potentie. Het is op te merken dat sommige evaluaties rond de vijftien jaar oud zijn. In de vijftien jaar na hun evaluaties is de technologie geavanceerder geworden, hetgeen de potentie van FBG ten goede komt.

2.6 Conclusie

De achtergrond, historie en de werking van FBG-sensoren is belicht in dit hoofdstuk. Tevens werd duidelijk gemaakt dat FBG-sensoren in verschillende facetten van de civiele techniek als een zeer geschikte toepassing worden geacht, zowel tegenwoordig als in de nabije toekomst. De toepassing van FBG-sensoren in asfaltverhardingen is echter nog niet uiteengezet; dat gebeurt op een uitgebreidere manier in het volgende hoofdstuk als onderdeel van het antwoord op deelvraag 1.

3. Deelvraag 1

Wat is de invloed van het verdichte asfalt op de prestatie van de optische vezels?

3.1 Inleiding

Om in dit hoofdstuk een antwoord te krijgen op bovenstaande vraag, worden er twee strategieën toegepast. Als eerste zal gekeken worden naar eerder uitgevoerde, soortgelijke projecten waarin werd gepoogd om FBG-sensoren te implementeren in het asfalt. Vervolgens zal de onderzoeker zelf aan de slag gaan met het uitvoeren van experimenten. De aspecten in dit hoofdstuk waar extra op gelet gaat worden, zijn achtereenvolgens: de manier waarop FBG in het asfalt kunnen worden geplaatst tijdens asfaltverdichting; de invloed van het verdichte asfalt op het meten van Key Performance Indicators 1 en 2, resp. temperatuur en spanning (= oorzaak van rek); de wijze waarop temperatuur- en druklimieten kunnen worden vastgesteld en ten slotte of er sprake is van een limiet aangaande de trillingen en oscillaties van de passerende walsen.

3.2 Eerdere toepassingen FBG-sensoren in asfalt

3.2.1 Gemeten grootheden

Om op de lange termijn de prestaties van het wegdek te monitoren, dus ná het asfaltverwerkingsproces, zijn de spanningen in het asfalt een betere indicatie van de staat van het asfalt dan de temperatuur van dat asfalt. Omdat veruit de meeste projecten als doel hadden om op de lange termijn het asfalt te registreren, had geen enkele van die projecten ‘temperatuur’ als doelparameter. Echter neemt dat niet weg dat de temperatuur wel degelijk gemeten is door FBG-sensoren in het asfalt. Sterker nog, het is soms noodzakelijk om de temperatuur te weten van het asfalt alvorens men de spanningen in het asfalt kan bepalen. (J.-L. T. Jian-Neng Wang, 2008; Zhou et al., 2012) Dit komt door de kruisgevoeligheid van spanning en temperatuur die in FBG-sensoren heerst. Welke golflengte teruggekaatst wordt, hangt af van de totale rek, hetgeen de som is van de mechanische rek en de thermische rek, zoals te zien is in formules [2], [3] en [4]. (Formules 2-7 afkomstig van Kreuzer (2006))

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k * \varepsilon + \alpha_\delta * \Delta T \quad [2]$$

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_T \quad [3]$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k * (\varepsilon_m + \alpha_{sp} * \Delta T) + \alpha_\delta * \Delta T \quad [4]$$

Hierin is $\Delta\lambda$ de verandering in de teruggekaatste golflengte als gevolg van spanning en temperatuur; $k, \varepsilon, \alpha_{sp}, \alpha_\delta, T$ zijn respectievelijk de *gage factor*, de rek, de thermische expansiecoëfficiënt, de thermische opticoëfficiënt (hoeveel de brekingsindex verandert als gevolg van temperatuurfluctuaties) en de temperatuur.

Wanneer men een verandering in de teruggekaatste golflengte ($\Delta\lambda$) waarneemt en meet, kan er niet direct gezegd in hoeverre de verandering veroorzaakt wordt door de spanning dan wel de temperatuur. Volgens Li et al. (2004) is een oplossing het aanbrengen van een tweede referentievezel. Deze methode werd toegepast door o.a. Whelan et al. (2012). Deze referentievezel wordt geïmplementeerd in hetzelfde thermische milieu, maar op een zodanige manier verpakt zodat het geen mechanische invloeden ondervindt van het omliggende materiaal. Hierdoor neemt deze referentievezel enkel thermische rek waar. Zodoende zijn formules [5] en [6] van toepassing:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (k * \alpha_{sp} + \alpha_\delta) \Delta T \quad [5]$$

$$\Delta T = \frac{1}{(k * \alpha_{sp} + \alpha_\delta)} * \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad [6]$$

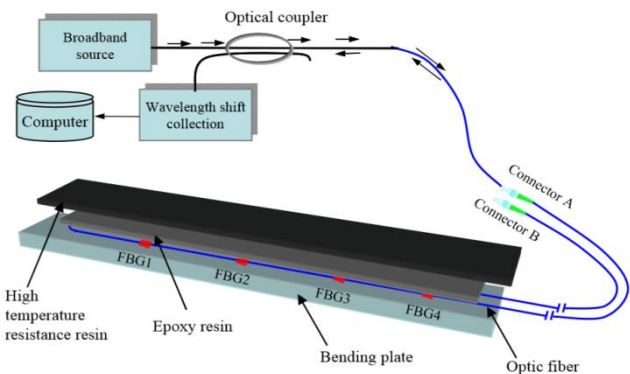
Wanneer ΔT bekend is en formule [4] wordt omgeschreven naar formule [7], kan de waarde van ε_m worden berekend. Zo wordt de mechanische rek gecalculleerd van een sensor die wel mechanische invloeden ondervindt van het omliggende materiaal, mits deze in hetzelfde temperatuurregime ligt als de referentievezel waarmee ΔT is uitgerekend.

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} * \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} - \left(\alpha_{sp} + \frac{\alpha_\delta}{k} \right) * \Delta T \quad [7]$$

Waar meerdere projecten als doel hadden om de spanning in een of twee richtingen te meten, slaagden Zhou en zijn collega's (2012) erin om de spanning 3D in longitudinale, transversale en de verticale richting te meten.

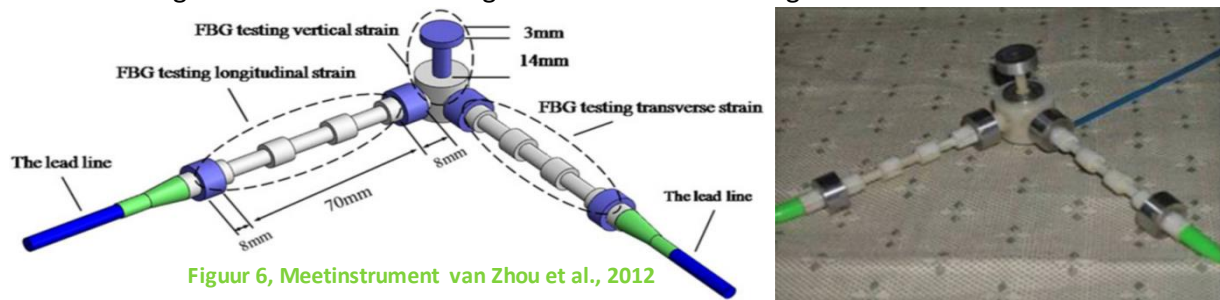
3.2.2 Installatiemethoden

Verscheidene onderzoekers kozen ervoor om de glasvezels, nadat ze in een in het wegdek gefreesde sleuf zijn gelegd, te bedekken met epoxyhars, dat geacht wordt als zijnde een stevig, lichtgewicht, weer- en waterbestendig materiaal. (Udd et al., 2001; Canning et al., 2012) Het gebruik van epoxyhars kan in combinatie met een stalen plaat of buis als extra omhulsel, zoals in Figuur 5. (Maher, Tabrizi, Prohaska, & Snitzer, 1996; Tang & Wang, 2010; Xu, 2014)



Figuur 5, Meetopstelling van Xu Dong-Sheng, 2014

Zhou et al. (2012) installeerden hun FBG-sensoren in meerdere lagen van het wegdek, waaronder het substraat. Daar zou epoxyhars minder goed hechten aan het omringende materiaal, mede daarom kozen zij voor vezelversterkte kunststof als verpakkingsmateriaal voor de FBG-sensoren, vanwege de voor hen unieke eigenschappen als lineaire elasticiteit, goede weerstand tegen materiaalmoedheid en weerstand tegen corrosie van het lichtgewicht materiaal. Zie Figuur 6.



Figuur 6, Meetinstrument van Zhou et al., 2012

Heet asfalt in combinatie met benzine bleek ook een mogelijkheid te zijn om de FBG-sensoren te verpakken en te laten hechten aan het aangrenzende asfalt. (Weng et al., 2014) Nadat de benzine was verdampt, bleek het resterende asfalt erg gelijkende mechanische eigenschappen te hebben met de rest van het asfalt. Verder geven Dong et al. (2012) notie van de noodzaak om de FBG-vezelkabels zoveel mogelijk te bundelen en te fixeren met bijvoorbeeld tie-wraps.

3.2.3 Bevindingen

De onderzoekers die zijn aangehaald in dit hoofdstuk zijn allemaal positief over het gebruik van FBG-sensoren in asfalt als instrument om spanningen in het wegdek te registreren. De doelen die de onderzoekers aan het begin van hun rapport stelden, zijn behaald doordat de FBG-sensoren in het algemeen naar behoren werkten. Het wil nog wel eens voorkomen dat enkele sensoren de installatie niet overleven; zo sneuvelden in het onderzoek van Weng et al. (2014) twee van de honderdtwintig FBG-sensoren, wat dus alsnog neerkomt op een overlevingspercentage van 98,3%.

Verder werden de resultaten getypeerd als plausibel, robuust, betrouwbaar en precies. Bij Udd et al. (2001) bleek dat het systeem gevoelig genoeg is om de aanwezigheid van personen te detecteren. Wang en Tang (2005) bepaalden de meetfouten van FBG-sensoren in asfalt op $\pm 6 \mu\epsilon$ en $\pm 0,13^\circ\text{C}$. Uit de testen van Maher et al. (1996) kwam naar voren dat de sensoren in ieder geval temperaturen van 150°C en drukspanningen van $10,34 \text{ MPa}$ kunnen overleven. In 2006 verifieerden Wang et al. hun resultaten door middel van een Eindige Elementen Methode (FEMLAB). Zij constateerden dat *“The measured strains from the packaged FBG sensor agreed with values calculated from FEM.”*

Jian-Neng Wang heeft in de periode 2003-2011 diverse onderzoeken opgezet omtrent het gebruik van FBG-sensoren in wegverhardingen. In 2005 concluderen Wang en zijn collega Tang het volgende:

“This shows that the performance of this FBG sensor is comparable with that of conventional high-resolution sensors such as thermocouple. (...) The excellent stability performance of this FBG sensor has made it possible to monitor pavement structures under rugged conditions at a reasonable accuracy for a very long period of time.”

3.2.4 Invloed van het asfaltverwerkingsproces

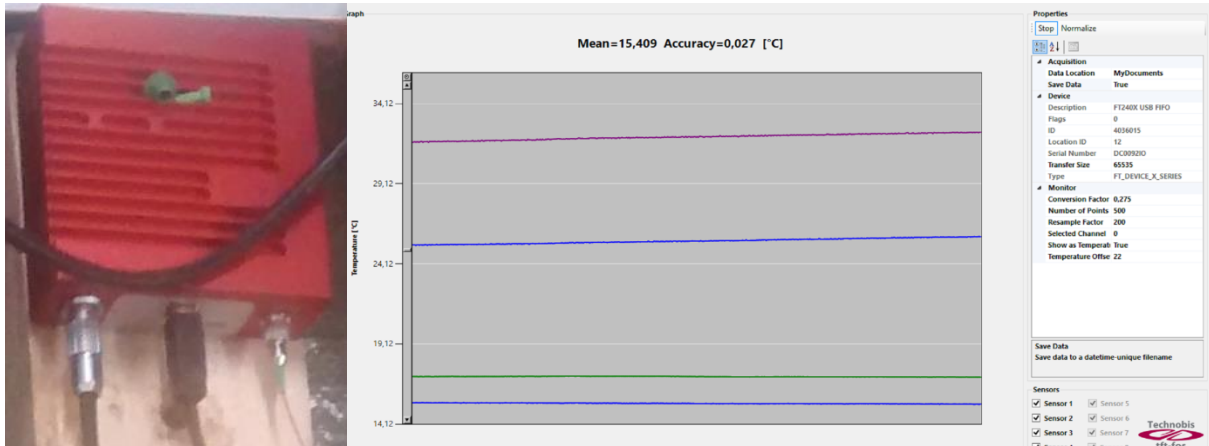
Zoals gezegd, de onderzoeken die zijn gedaan, richtten zich veelal op het monitoren van de spanningen in het wegdek op de lange termijn. De omstandigheden tijdens het verwerkingsproces zijn in de literatuur zodoende enigszins onderbelicht gebleven, al is wel gebleken dat het mogelijk is om sensoren te plaatsen in verschillende lagen van het wegdek, en dat pas daarna de deklaag werd verwerkt. Zhou et al. (2012) houden wel rekening met het asfaltverwerkingsproces in de zin dat ze aanbevelen de sensoren snel te installeren om zo het asfaltverwerkingsproces niet te vertragen. Verder wordt in het onderzoek van Dong et al. (2012) aangedragen dat na de installatie van de sensoren, het asfalt eerst twee keer statisch verdicht dient te worden, dus zonder walsvibraties.

Uit het magere aanbod van literatuur dat verhaalt over de directe invloed van het asfaltverwerkingsproces op de werking van FBG-sensoren blijkt de noodzaak van het zelf onderzoeken van en testen met FBG-sensoren tijdens het asfaltverwerkingsproces. Dat empirische onderzoek zal plaats gaan vinden in de hierna volgende paragrafen.

3.3 Experimenten met FBG-sensoren – Fase 1

De experimenten worden in twee fasen uitgevoerd bij Technobis te Alkmaar en Boskalis uit Nieuw-Vennep. In de eerste fase (geheel bij Technobis met materialen van Boskalis) heeft de onderzoeker de beschikking over een fiber met in daarin vier sensoren, alsmede enkele fibers zonder sensor, zogenoemde 'dummyfibers'. Voor de experimenten wordt hier gebruik gemaakt van grind en koudasfalt. Dit koudasfalt (0-4 mm) wordt normaliter gebruikt bij het repareren van bestaande wegdekken en kan, zoals de naam al suggereert, bij lagere temperaturen aangebracht en verdicht worden. Het koudasfalt is vacuüm verpakt in zakken; wanneer het in aanraking komt met zuurstof begint het verhardingsproces.

3.3.1 Gebruikte hardware & software in beide fasen



Als hardware is de van Technobis afkomstige interrogator gebruikt, kortweg “Gator” genoemd. Het bijbehorende softwareprogramma heet eveneens Gator (v4). Hierboven staat een voorbeeld van de interface gegeven, en ook een afbeelding van de interrogator inclusief bijbehorende aansluitingen. (v.l.n.r. Voedingskabel; USB-kabel naar PC; Fiber connector.)

3.3.2 Fase 1 – Doelen

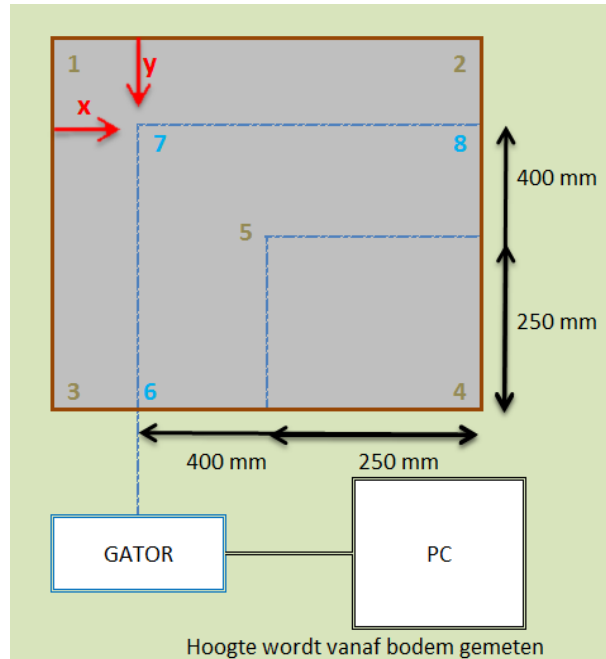
In de eerste fase wordt met name onderzocht wat een goede bevestigingsmethode is om de fiber met bescherming aan het omringende asfalt te laten hechten. Hierbij wordt gekeken naar zeven verschillende criteria, te weten: Economisch; Robuustheid; Installatiegemak; Invloed op positie - vastheid fiber; Invloed op asfalt; Invloed op metingen sensor en Reproduceerbaarheid in veldtesten. Het gewicht van deze criteria en de meer specifieke werkwijze, alsmede de aanvullende doelen en hypothesen gesteld in fase 1, staan weergegeven in Bijlage 1.

3.3.3 Fase 1 – Materialen en werkwijze

De fiber wordt in fase 1 bij wijze van bescherming in deze eerste fase door een flexibel teflon buisje (ø1,6 mm) gevoerd. De fiber ervaart bewegingsvrijheid in deze buis, waardoor het geen mechanische rekkingen in het omringende aggregaat meet, maar enkel de temperatuur. Weliswaar wordt de temperatuur van binnenin de buis gemeten, en niet direct de temperatuur van het omringende materiaal, echter wordt aangenomen dat de buis de warmte van het aggregaat snel genoeg opneemt en geleidt, zodat de temperatuur binnenin de buis een goede indicatie is voor de temperatuur van het omringende asfalt. Aanvankelijk was het plan om als bescherming een flexibele stalen buis te gebruiken, hetgeen robuuster is dan de nu gebruikte bescherming. Deze stalen buis was ten tijde van fase 1 niet aanwezig bij Technobis. Niettemin werd de lichtere bescherming van het teflon buisje als voldoende geacht, mede omdat het in fase 1 gesimuleerde verdichtingsproces ook minder intensief is dan normaliter het geval zou zijn.

Het fiberbuisje wordt aangebracht in een mal met afmetingen 500x500x80 mm³. Er zijn twee gaten in de zijkanten van de mal geboord waar het buisje doorheen kan. Omdat er maar een beperkt aantal mallen aanwezig is, worden de mallen bij de eerste tests gevuld met fijn grind (2-5 mm) en vervolgens verdicht middels een gazonrol. Dit grind kan later weer uit de mal gehaald en opnieuw gebruikt worden voor een andere testopstelling, hetgeen bij uitgehard asfalt niet het geval is. In Figuur 7 staan de dimensies van de opstelling weergegeven. De cijfers in de mal staan zijn de punten waarop de laagdikte of de positie van het teflon buisje wordt bepaald.

De verschillende bevestigingsmethoden staan vermeld in Tabel 3. Afbeeldingen zijn te vinden in Bijlage 1. Elke bevestigingsmethode wordt eerst een keer getest in grind met een dummyfiber. Het dient opgemerkt te worden dat de verbinding tussen het fiberbuisje en de mal wordt aangebracht op een buissegment waar zich geen sensor bevindt. Dit omdat de sensor eigenschappen van het omringende asfalt moet registreren, en niet de eigenschappen van de bevestiging aan de mal.



Figuur 7, Bovenanzicht mal met dummyfiber en kale fiber

Nadat het fiberbuisje met een bevestiging in de mal is aangebracht en de resterende ruimte is opgevuld met aggregaat, wordt de fiber door het buisje geregen. De dikte van de aangebrachte laag wordt opgemeten, net als de positie van de fiber ter hoogte van de bocht. Vervolgens wordt middels een met water gevulde handroller van 49 kg het aggregaat verdicht. Na afloop van dit verdichten wordt wederom zowel de laagdikte als de positie van de fiber opgemeten. Tevens wordt nagegaan of de sensor het gesimuleerde verdichtingsproces wel of niet heeft geregistreerd, wat in principe niet het geval zou moeten zijn. Ook wordt er licht door de dummyfiber geschoten; wanneer het licht er aan het andere uiteinde van de fiber weer uitkomt, kan er geconcludeerd worden dat de fiber nog steeds intact is.

Wanneer alle bevestigingsmethoden zijn getest in het grind en vervolgens de meest geschikte bevestigingsmethode middels een multi-criteria analyse (MCA) bepaald is, worden de vier fiberbuisjes in de vier mallen gelegd welke daarna gevuld worden met koudasfalt. Pas ná het vullen, echter vóór het verdichten wordt de fiber door het buisje geregen. De fiber (met sensoren waar er dus maar een van is) kan er op deze manier ook weer uitgetrokken worden waardoor slechts het buisje achterblijft in het uithardende asfalt. Er wordt gekozen om naast de meest geschikte bevestigingsmethode de fiber ook zonder bevestiging in de mal te leggen, omdat daar bij voorbaat al duidelijk is dat die methode het minste tijd en geld kost. Daardoor kan onderzocht worden of het überhaupt loont om in asfalt extra bevestigingen aan te brengen. Naast het verdichten en opmeten van deze laag wordt er in de experimenten G1b, K1b en K2b nog een handeling verricht, namelijk het opwarmen van het asfalt. Dit opwarmen gebeurt door middel van een elektrische verfblander, waarmee het grind/koudasfalt plekgewijs wordt verhit. De opwarming van het asfalt wordt naast de FBG ook geregistreerd door een RFID-chip en een IR-camera.

Experiment#	Materiaal	Fiber	Bevestiging
G1a	Grind	Dummy	Geen, bovenop onderlaag
G1b	Grind	FBG	Geen, bovenop onderlaag
G2a	Grind	Dummy	Kroonsteentjes
G3a	Grind	Dummy	Gespannen nyldraad
G4a	Grind	Dummy	Blokken bitumenband
G5a	Grind	Dummy	Bouten
K1a	Koudasfalt	Dummy	Geen, bovenop onderlaag
K1b	Koudasfalt	FBG	Geen, bovenop onderlaag
K2a	Koudasfalt	Dummy	< Meest geschikte >
K2b	Koudasfalt	FBG	< Meest geschikte >

Tabel 3, De onderzochte bevestigingsmethoden

3.3.4 Fase 1 – Resultaten

Er werd verdicht met een roller van 49 kg. De onderzoeker steunde ook met een deel van zijn gewicht op de roller, aangenomen wordt dat dat deel minstens gelijk is aan een derde deel van zijn lichaamsgewicht. Hierdoor bedraagt de totale rollerbelasting ca. 80 kilogram oftewel 785 N. Verdeeld over de breedte van de roller (0,495 m) leidt dat tot een lineaire belasting van 1,6 kN/m. In twee van de vijf gevallen is de fiber die onbeschermd in de mal lag, gebroken. De fibers die door het teflon buisje werden geleid, overleefden de verdichtingssimulaties in alle gevallen. Zodoende wordt geconcludeerd dat dit buisje de fiber voldoende bescherming biedt tegen belastingen tot 1,6 kN/m.

De bevestigingsmethode die als meest geschikt werd beoordeeld, waren de verhogingsblokjes van bitumenband. Enkele strips bitumenband van ± 8 cm lang werden op elkaar gelegd en vervolgens verhit, waardoor ze aan elkaar smolten. Voor een aannemer is het niet moeilijk om aan bitumenband te komen, waardoor dit op economisch vlak gunstig is. Ook bleven deze blokjes door hun massa prima op hun plek liggen en konden ze, eenmaal afgekoeld en uitgehard, de nodige belasting incasseren. Bij het eruithalen bleek dat de grinddeeltjes niet in de gladde en afgeronde bovenkant waren doorgedrongen. Er plakten wel steentjes aan de zijkanten van het bitumen-blokje, met een penetratie van maximaal 1 mm. Wanneer het bitumen was



Figuur 8, Verhogingsblok van bitumenband

uitgehard, bleef het kleverig genoeg om het buisje aan zich te laten plakken. Doordat bitumen een bestanddeel is van het omringende asfalt, is de invloed die de bitumenblokken hebben op het omringende asfalt, beperkt. Deze blokken kunnen makkelijk geprepareerd worden, ook voor veldtesten, hoeven niet speciaal op maat gemaakt te worden en zijn vervaardigd van recyclebaar materiaal. (Eshalas Infra Solutions BV, 2015) Al met al kwam de onderzoeker tot de conclusie dat de blokken bitumenband het beste zijn om de fiber op zijn plek te laten houden. Voor meer afbeeldingen en de uitkomsten van de multi-criteria analyse en bijbehorende gevoeligheidsanalyse van de gewichten wordt verwezen naar Bijlage 1.

Criterium	Weging	G1 - los	G2 - kroonsteen	G3 - draad	G4 - bitumenband	G5 - bouten
Economisch	0,05	10 0,5	9 0,45	6 0,3	4 0,2	3 0,15
Robuustheid	0,10	4 0,4	5 0,5	7 0,7	8 0,8	9 0,9
Installatiegemak	0,20	9 1,8	8 1,6	5 1	8 1,6	4 0,8
Invloed op positievastheid fiber	0,15	2 0,3	6 0,9	8 1,2	9 1,35	10 1,5
Invloed op asfalt	0,15	9 1,35	8 1,2	4 0,6	7 1,05	5 0,75
Invloed op metingen sensor	0,20	10 2	9 1,8	4 0,8	8 1,6	7 1,4
Reproduceerbaar in veldtesten	0,15	7 1,05	7 1,05	4 0,6	8 1,2	4 0,6
<i>Totaal</i>	1	7,4	7,5	5,2	7,8	6,1

Tabel 4, Multi-Criteria Analyse

In bovenstaande tabel zijn de gewichten en scores toegekend door de onderzoeker. In Bijlage 1 worden de gekozen waarden van zowel de gewichten en scores verantwoord. Ook is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarvan de uitkomsten eveneens te vinden zijn in Bijlage 1. Uit bovenstaande tabel, inclusief de gevoeligheidsanalyse, blijkt dat *G4 – bitumenband* het beste uit de test komt.

3.3.4 Fase 1 – Tussentijdse conclusies

Voor de doelen en hypothesen die zijn gesteld voor de experimenten in fase 1 wordt verwezen naar Bijlage 1.

De fibers blijven met de bescherming in de vorm van een teflon buisje intact tijdens het verdichten, dat geschiedde met een lineaire belasting van ca. 1,6 kN/m. Uit het breken van de kale fibers blijkt de noodzaak tot een beschermingsmateriaal. De sensoren, die los in het buisje lagen, registreerden geen rek tijdens het verdichten. Dit is in lijn met de hypothese.

Wanneer G1 – los buiten beschouwing wordt gelaten, zijn G2 – kroonsteentjes en G4 – bitumenband het makkelijkst te installeren. Bovendien is G4 een universele bevestigingsmethode; het past altijd, ongeacht de dikte van de buis. G4 – bitumenband en G5 – bouten leiden tot de geringste verplaatsing van de fiber en buis. Doordat is afgezien van de testen G2b, G3b, G4b en G5b kan geen onderbouwde uitspraak worden gedaan over welke bevestigingsmethode het minste invloed heeft op de metingen van de FBG-sensoren. De randvoorwaarde dat de bevestigingsmaterialen geen invloed mogen hebben op de sensoren, blijft bestaan.

Op dit moment is er nog te weinig referentie om te bepalen of de FBG-sensoren betrouwbare en nauwkeurige waardes geven, vergeleken met de gegevens vanuit de IR-camera en RFID-sensoren.

De bitumenband kan ook bescherming bieden voor de fiber ter hoogte van een mechanische reksensor, de vraag blijft alleen nog in hoeverre de rek in het asfalt en de bitumen wordt overgebracht op de sensor, en uiteraard of de bescherming voldoende is.

3.4 Experimenten met FBG-sensoren – Fase 2

In fase 2 zijn twee fibers beschikbaar met elk acht sensoren. Deze fase werd deels uitgevoerd bij Technobis in Alkmaar en deels bij Boskalis in Nieuw-Vennep. Eerst werd bij Technobis de aangeleverde sensor geassembleerd en gekalibreerd. Daarna werd de sensor en bijbehorende hardware meegenomen naar Boskalis in Nieuw-Vennep. Daar werden de sensoren in mallen geïnstalleerd, werden de mallen gevuld met asfalt en werden vervolgens experimenten uitgevoerd.

3.3.1 Fase 2 – Doelen

Bij Technobis is het vooral zaak om de sensoren te kalibreren en te assembleren aan de beschermingsmaterialen. Ook wordt hier bepaald in hoeverre de bitumenband de rek overdraagt op de reksensor. Daarna wordt in het lab van Boskalis bepaald of de sensoren het verdichten met een wals overleven. Ook wordt hier de data verkregen voor de input van de statistische analyse van deelvraag 2, voor de performance model van deelvraag 3 en voor de berekeningsmethode van de belastingen van deelvraag 4. Alle afzonderlijke doelen, tezamen met een uitgebreidere toelichting van de in fase 2 uitgevoerde activiteiten inclusief afbeeldingen staan vermeld in Bijlage 2.

3.3.2 Fase 2 – Materialen en werkwijze

Bij Boskalis wordt er getest met drie verschillende testvoorwerpen: Een geassembleerde fiber met een lengte van 2790 mm met daarin acht sensoren. Deze fiber is bij de reksensoren omringd door bitumenband en een composietplaatje. Bij de overige segmenten is de fiber verlijmd in een flexibele stalen buis. Dan is er nog een ongeassembleerde fiber met acht sensoren. Deze heeft dezelfde afmetingen als de geassembleerde sensor, echter wordt deze niet verlijmd in een stalen buis in een bitumenband gelegd. Hierdoor kan deze fiber in en uit een flexibele stalen buis gevoerd worden. Verder heeft de onderzoeker nog beschikking over enkele dummyfibers van ca. 1600 mm lang. Een dummyfiber wordt bij mallen B en C voor de eerste walsovergang los in de stalen buis gelegd, waarna ze na de walsovergang er worden uitgehaald en gecheckt op hun staat van gezondheid. Vervolgens wordt meteen de ongeassembleerde fiber met sensoren in de stalen buis geleid en kan de meting beginnen, mits de buis uiteraard nog heel is.

Deze testvoorwerpen en hun bescherming worden geïnstalleerd in mallen met afmetingen 500*500*80 mm³. De testvoorwerpen worden op hun gewenste positie gehouden door verhogingsblokjes van bitumenband. Nadat de testvoorwerpen op hun plek liggen, wordt de mal gevuld met Hot Mix Asphalt (HMA). Er worden in totaal drie mallen gevuld (B-D). Mal B en C worden voorzien van een flexibele stalen buis welke op zijn plek wordt gehouden door bitumenblokken. Bij mal B ligt het niet aangesloten uiteinde in het asfalt; het niet aangesloten uiteinde van de fiber zal bij mal C buiten de mal liggen. Verder is de opstelling bij B en C nagenoeg hetzelfde. In mal D (500*160*80 mm³) wordt de geassembleerde sensor geïnstalleerd, deze opstelling ziet er anders uit dan bij B en C.

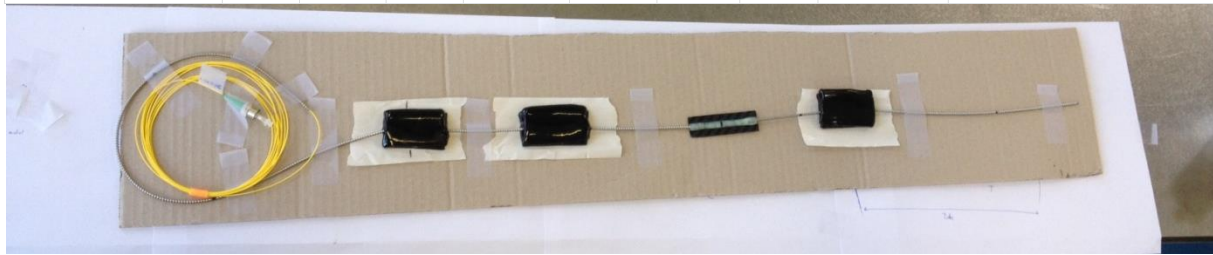
Tijdens het afkoelen van het asfalt wordt het enkele keren verdicht middels een wals. Het afkoelen wordt geregistreerd door de FBG-sensoren, thermokoppels en een IR-camera. Als het asfalt eenmaal is uitgehard en afgekoeld, worden er op de asfaltplaat van mal D verschillende gewichten op het midden van de balk geplaatst om zo de resulterende mechanische rek van de sensoren te registreren.

3.3.3 Fase 2 – Assemblage en kalibratie sensoren

Van de twee fibers met acht sensoren werd een fiber geassembleerd door het te verlijmen in een stalen buis en op een composietplaatje en het te verpakken tussen twee strips bitumenband. (De lijm tussen het buisje en de fiber werd alleen bij de uiteinden van het buisje aangebracht.) Dit werd gedaan volgens het ontwerp dat te zien is in Figuur 9a, net als het resultaat (9b). Er zijn in deze geassembleerde fiber vier sensoren voor de temperatuur (in het stalen buisje) en vier sensoren voor de mechanische rek (drie in bitumenband en een op een composietplaatje).

Deze geassembleerde fibersensor werd verticaal gehangen en belast met gewichtjes aan zowel de stalen buis als de stukken bitumen om zo de rekoeverdracht van de bitumen op de fiber te bepalen. Het bleek dat de bitumenstrips de optredende spanning (en rek) in nagenoeg dezelfde mate overbrachten als wanneer de belasting niet op de bitumen werd aangebracht, maar op een stuk buis dat middels verlijming in direct contact staat met de daarboven hangende sensor in de bitumen. Uitgebreidere resultaten en beschrijving van de gehele kalibratie staan beschreven in Bijlage 3.

150	150	110		140	70	40	130	Afstanden tussen sensoren (mm)
275+	50	60	50	85	60	55	50	105+
Steel tube	Bitumenband	Steel tube	Bitumenband	Steel tube	Composietplaatje	Steel tube	Bitumenband	Steel tube
Lengtes soort bevestigingsmateriaal (mm)								



Figuur 9, ontwerp geassembleerde sensor (boven) en het uiteindelijke resultaat (onder)

Deze geassembleerde sensor werd, net als de ongeassembleerde sensor, ook gekalibreerd op temperatuurgevoeligheid. In een kleine oven werden begin- en eindtemperatuur gemeten met thermokoppels. Het verschil in begin en eind-golflengte van elk van de sensoren werd gedeeld door het temperatuurverschil. Zo ontstaat er een golflengteverandering per graad Celsius voor alle zestien FBG-sensoren. Deze temperatuurgevoeligheid wordt aangeduid met de zelfgekozen letter 'J' en staat per sensor weergegeven in Tabel 5.

$$\Delta T = \frac{1}{(k * \alpha_{sp} + \alpha_{\delta})} * \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0 (k * \alpha_{sp} + \alpha_{\delta})} \quad [8]$$

$$\Delta T = \frac{\Delta \lambda}{J} \quad [9]$$

ongeassembleerd	sensor 1	sensor 2	sensor 3	sensor 4	sensor 5	sensor 6	sensor 7	sensor 8
nm/°C	0,008533	0,006033	0,008087	0,008803	0,010963	0,010118	0,007629	0,006972
pm/°C	8,533	6,033	8,087	8,803	10,963	10,118	7,629	6,972
geassembleerd	sensor 1	sensor 2	sensor 3	sensor 4	sensor 5	sensor 6	sensor 7	sensor 8
nm/°C	0,008276	0,007091	0,007935	0,010789	0,026209	0,011848	0,008976	0,007647
pm/°C	8,276	7,091	7,935	10,789	26,209	11,848	8,976	7,647
bescherming	buis	buis	bitumen	bitumen	plaatje	buis	bitumen	buis

Tabel 5, temperatuurgevoeligheid J voor de zestien sensoren

3.3.4 Fase 2 – Resultaten

Op de bodem van de mal werden de blokjes bitumen als eerste gelegd, waarna het stalen buisje op de blokken werd geplakt. Met een buigradius van ± 70 mm van het stalen buisje werd er nog genoeg kleefkracht door de bitumenblokken uitgeoefend om het buisje op zijn plek te houden. De buis kon zover buigen dat er een bocht van 180 graden ontstaat met een buigradius van ± 10 mm. Zie Figuur 12a. Hierbij dient opgemerkt te worden dat hoe kleiner de buigradius wordt, hoe groter de spanning wordt op het buisje en dus des te moeilijker om het buisje op zijn plek te houden. Wat betreft de fiber in het buisje: deze kan net zover buigen totdat zij knikt, en dat is nog niet het geval bij een bocht met radius 10 mm. Daardoor kan de fiber een dergelijke bocht maken zonder schade en lichtuittreding.

Gedurende de tests werd het duidelijk dat de stalen buis sterk genoeg was om – in het asfalt – de krachten van de wals op te vangen en dus sterk genoeg om de fiber te beschermen. Een stukje van de stalen buis werd platgewalst toen het direct onder de wals lag. (Figuur 12b) De belasting van de wals op een stuk asfalt van 500 mm breed wordt geschat op 21,6 kN/m. Voor berekening: Bijlage 2.

De afkoeling (en tussentijdse verdichting) van het asfalt in de mal werd zoals gezegd gemeten door de FBG-sensoren, thermokoppels en een Infrarood-camera. Er zijn vier temperatuurmetingen gedaan bij drie malen: B, C, C2 en D. C2 is uit noodzaak voortgekomen aangezien de onderzoeker halverwege meting C constateerde dat de thermologger geen data meer registreerde doordat een USB-kabel was losgeschoten. De metingen met de daarbij gebruikte meetinstrumenten staan beschreven in onderstaande tabel.

Instrument \ Meting	Mal B	Mal C	Mal C2	Mal D
FBG-sensoren	X	X	X	X
Thermokoppels	X		X	X
Infrarood-camera	X	X		

Tabel 6, overzicht gebruikte meetinstrumenten

De kwantitatieve analyse van de temperatuurmetingen (alleen FBG en thermokoppels, dus B-C2-D) wordt gedaan in het volgende hoofdstuk. Naast temperatuurmetingen zijn er ook tests gedaan met mechanische rek, deze worden belicht in hoofdstuk 6.

Doordat de thermokoppels niet functioneerden bij meting C, is het lastig om daar een nauwkeurige weergave van de werkelijke temperatuur te bewerkstelligen. Daardoor is eveneens lastig om het verschil in afkoeling te analyseren tussen een stalen buis met een uiteinde in het asfalt en een stalen buis met beide uiteindes buiten de mal. Wel is te zien dat in de eerste vijf minuten van de metingen, de temperaturen bij C sneller dalen dan bij B. (Figuur 13 & Figuur 14) Dit is mogelijk te verklaren doordat bij C de lucht in het buisje aan twee uiteinden in verbinding staat met de 'buitenlucht' van 24 graden Celsius en zodoende hier de lucht door het buisje heen kan stromen.

Bij het verdichten van mal D viel het op dat het asfalt ter hoogte van het grootste bitumenblok in Figuur 12 scheuren vertoonde aan het oppervlak en 'sponzig' was. Zoveel bitumen in een kleine ruimte heeft dus direct (negatief) effect op de sterkte van het asfalt.

Op de volgende pagina's zijn de afkoelingscurves van de asfaltplaten weergegeven. De thermokoppels werden steeds direct naast een temperatuur-sensor geplaatst, op dezelfde hoogte. Bij malen B en C bevonden thermokoppels 1 en 2 zich respectievelijk naast FBG-sensoren 1 en 5. Bij mal D lag thermokoppel 1 bij FBG-sensor 2 en thermokoppel 2 werd naast sensor 6 geplaatst. In de grafieken hebben deze paren gelijkende kleuren gekregen.



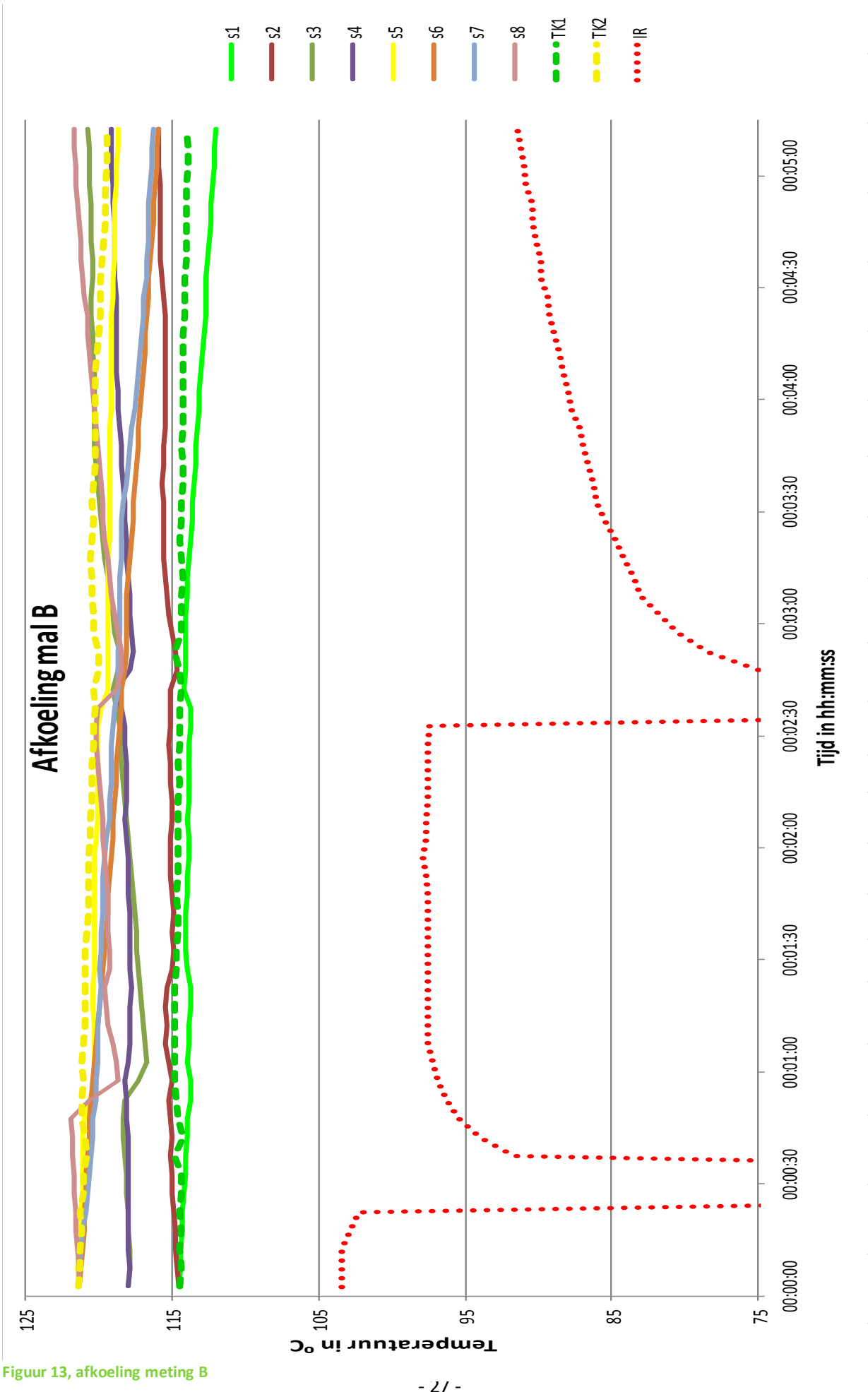
Figuur 12a, minimale buigradius



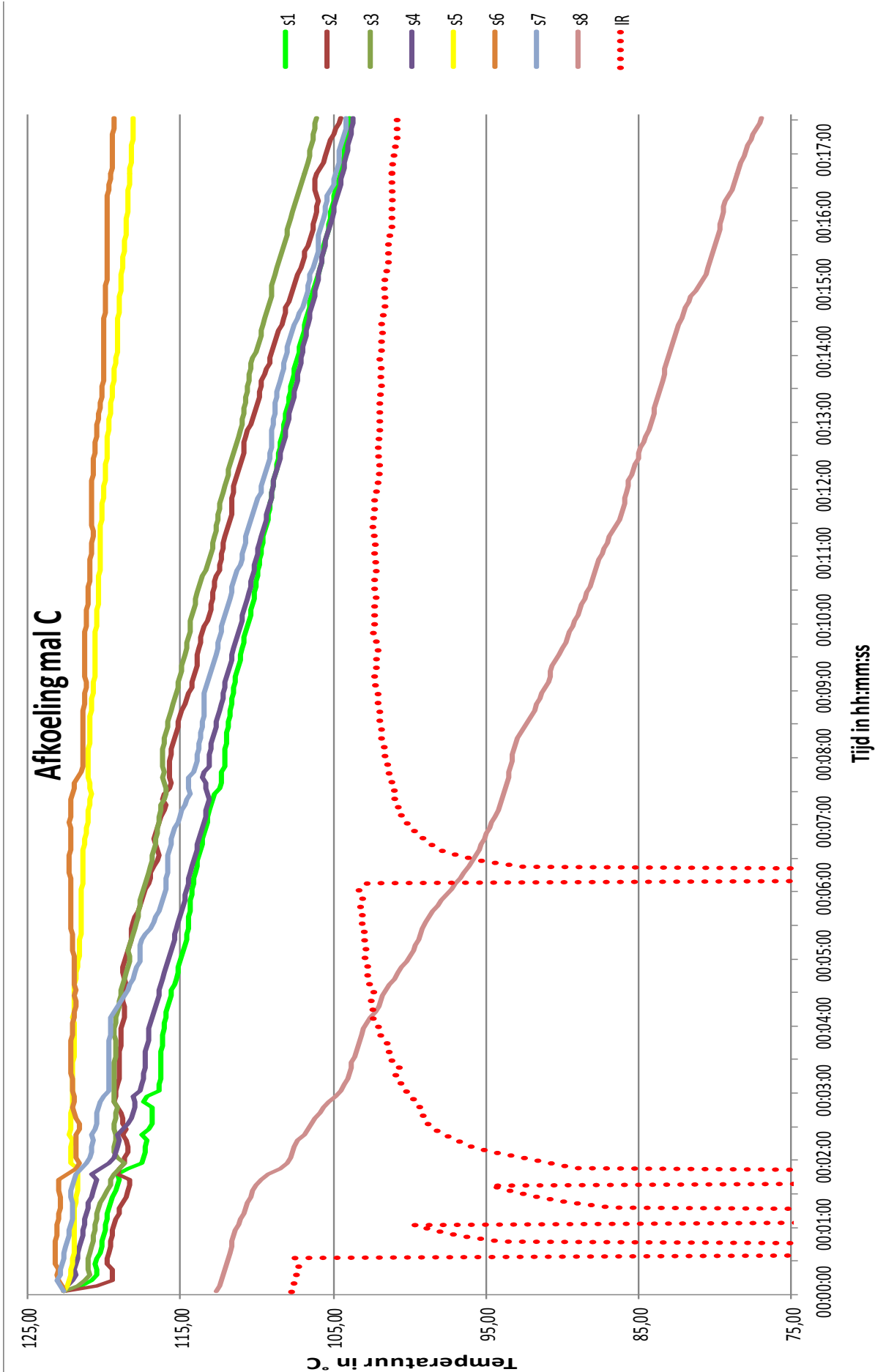
Figuur 12b, platgewalst buisje



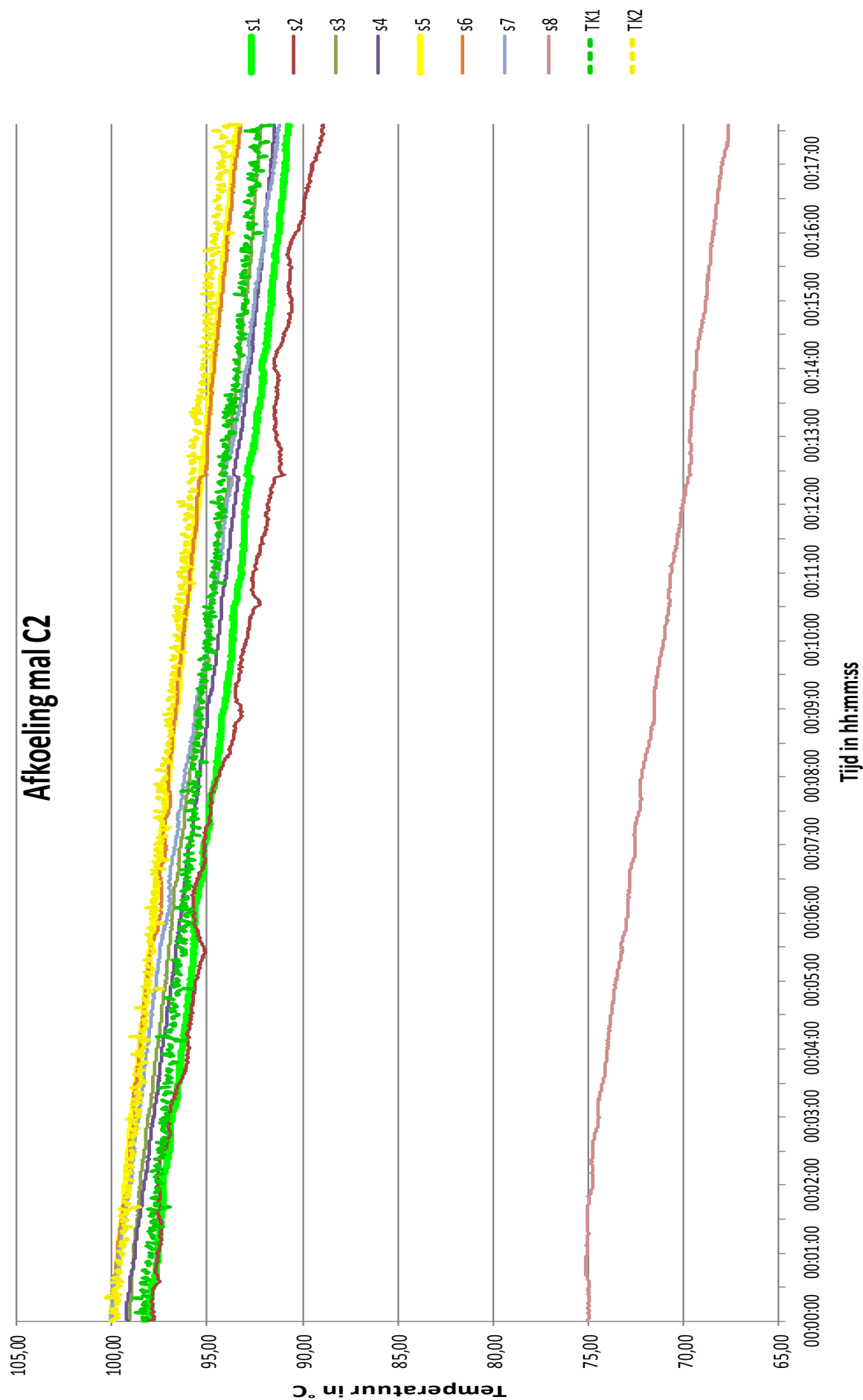
Figuur 12, bevestiging sensor mal D



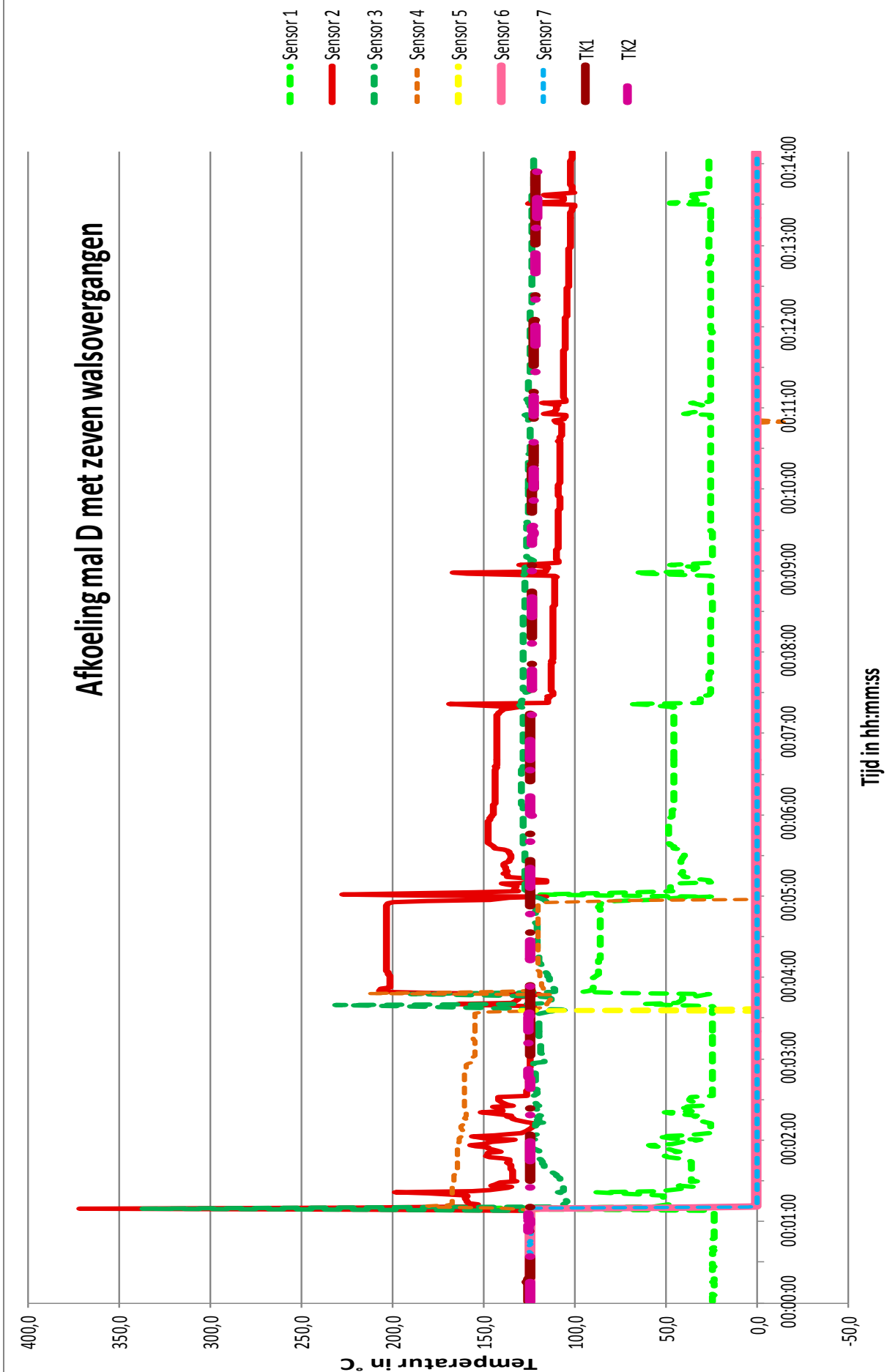
Figuur 13, afkoeling meting B



Figuur 14, afkoeling meting C



Figuur 15, afkoeling meting C2



Figuur 16, afkoeling meting D

De data afkomstig van de infraroodcamera representeren een lagere temperatuur dan de andere meetinstrumenten. Dit komt omdat die andere meetinstrumenten in het asfalt liggen, waar het mindersnel afkoelt dan aan de oppervlakte, waar de IR-camera op gericht is. Bij mal C geeft sensor 8 een lagere temperatuur aan dan de overige sensoren. Dit komt omdat hier sensor 8 buiten de mal ligt, weliswaar in het buisje. Dit is ook het geval met sensor 1 bij mal D. Uit de grafiek bij mal C2 (en in mindere mate ook bij mal B) is af te lezen dat de sensoren die lager in de mal liggen (1 en 2) een lagere temperatuur bereiken dan de sensoren die meer in het midden van de laag asfalt liggen (5-7).

Een walsovergang is in de grafiek te zien door een extreme daling in de temperatuurwaarden afkomstig van de IR-camera doordat deze dan de temperatuur van de wals registreert in plaats van het warme asfalt. Tijdens een walsovergang bleek dat de sensoren die niet verlijmd maar los in de stalen buis lagen (mal B en C) geen rek ondervonden. Dit was ook de verwachting en de bedoeling; sensoren in het stalen buisje dienen geen mechanische rek te ondervinden.

Bij mal D, waar de geassembleerde sensor vast in het asfalt lag, zie Figuur 12, zijn de walsovergangen wel terug te vinden in de grafiek. Dit is zelfs het geval bij sensoren waarbij dat eigenlijk niet het geval zou moeten zijn, aangezien sensoren 1 en 2 verlijmd zijn in het stalen buisje en alleen temperatuurveranderingen zouden moeten detecteren. Er is zeven keer een walspassage geweest, en er zijn zeven pieken in de grafiek te vinden. De verhoogde waarden van sensoren 1 en 2 tussen de tweede en de derde piek zijn het gevolg van het 180° draaien van de mal ten behoeve van een alternatieve, tegengestelde walsrichting. De pieken worden steeds lager aangezien het asfalt door het verdichten sterker wordt en dus een grotere (dynamische) elasticiteitsmodulus krijgt, waardoor de rek bij een gelijkblijvende spanning kleiner wordt.

Sensor 8 was bij meting D vanaf het begin al defect, en sensoren 4-7 gingen stuk als gevolg van een walsovergang. Van de reksensoren in bitumen/composiet overleefde alleen sensor 3 de walsovergangen. Deze sensor zou de walsovergangen zeker moeten detecteren, echter is de zien dat de donkergroene lijn in Figuur 16 het laatste stuk vlak blijft, waar sensor 1 en 2 wel rektoenames registreren. De oorzaak hiervan is mogelijk dat sensor 3 zich direct onder de eveneens in twee bitumenstrips verpakte sensor 7 bevindt. Zodoende ligt sensor 3 onder drie lagen van vijf millimeter dik bitumenband en zal het de rek in het asfalt waarschijnlijk niet goed hebben overgenomen. Deze extra bescherming verklaart dan ook direct waarom sensor 3 de walsverdichtingen wel heeft overleefd.

Om onverklaarbare redenen krijgen sensoren 4 en 5 later in de meting bij D ineens een *short revival*. Bij sensor 5 is de ligging van de (gele) piek nog wel plausibel, maar bij sensor 4 (bruine piek naar beneden op 11:00) is dat zeker niet het geval.

3.5 Conclusie

Het is mogelijk om de sensoren met hun bescherming zodanig te manoeuvreren dat ze op de gewenste positie terechtkomen. Door middel van bitumen verhogingsblokken is het vervolgens ook mogelijk om ze op die positie te behouden. Wanneer er echter teveel bitumenblokken op een kleine afstand bij elkaar staan, gaat dit ten koste van de sterkte van het asfalt. Volgens de sensoren heeft de hoogteligging van de sensoren in het asfalt wel degelijk invloed op de uiteindelijke temperatuur. Zeer waarschijnlijk maakt het ook verschil of de sensoren aan twee uiteinden verbonden zijn met de buitenlucht of slechts aan een uiteinde.

Qua bescherming voldoet het stalen buisje. Twee strips bitumen waartussen de fiber wordt geleid, bieden geen voldoende bescherming tegen de verdichting van het asfalt. Ook is een enkel composietplaatje niet robuust genoeg om de fiber intact te houden.

De reksensor die rek zou moeten meten, en uiteindelijk onder drie strips bitumen en een deel van de fiber lag, registreerde geen rektoename ten tijde van een walsovergang. Drie strips bitumen zijn dus te veel bescherming om een walsovergang te detecteren. Sensoren 1 en 2 waren verlijmd aan de uiteinden van een stalen buisje. Deze zouden alleen temperatuurveranderingen moeten registreren. Echter gaven deze twee sensoren wel een respons bij een toename van mechanische rek als gevolg van een walsovergang.

Wanneer sensoren in een stalen buisje niet zijn verlijmd, maar gewoon los in dat buisje liggen, registreren ze geen mechanische rek; hun respons verandert alleen wanneer de temperatuur verandert.

4. Deelvraag 2

Hoe betrouwbaar is de data verkregen via optische vezels, vergeleken met data die verkregen is middels bestaande PQi-methodieken?

4.1 Inleiding

Waar in het vorige hoofdstuk de resultaten meer kwalitatief van aard werden beschreven, worden in dit hoofdstuk de kwantitatieve uitkomsten nader belicht. Zoals gezegd, er is ook gemeten met thermokoppels en een infraroodcamera. Het verloop van de temperatuur als weergegeven door de FBG-sensoren wordt vergeleken met het door de thermokoppels (=PQi) gemeten temperatuur. Na een statistische analyse wordt beoordeeld of de temperatuurdatasets verkregen middels FBG-sensoren betrouwbaar zijn. De nauwkeurigheid van de door de FBG-sensoren gemeten rek wordt in hoofdstuk 6 getoetst.

4.2 Theoretisch kader

De data verkregen middels de thermokoppels worden gezien als betrouwbaar en vormen daardoor de norm om te bepalen of de FBG-gegevens betrouwbaar zijn. Als er weinig of geen verschil zit tussen de FBG-data en de PQi-data, kan er geconcludeerd worden dat de (gegevens verzameld met) FBG-sensoren betrouwbaar genoeg zijn om te gaan gebruiken naast thermokoppels en andere PQi-instrumenten om de temperatuur van het asfalt te monitoren.

De FBG-data en de PQi-data worden beschouwd als twee gepaarde waarnemingen, aangezien ze op hetzelfde moment een uitspraak doen over een eigenschap van hetzelfde materiaal. In dit geval wordt de nulhypothese gedefinieerd als: $H_0: \mu_D = 0$ [$\mu_{FBG} - \mu_{PQi} = 0$], waarbij μ_D staat voor het gemiddelde gemeten temperatuurverschil tussen PQi-data en FBG-data. Wanneer na een t-test blijkt dat de nulhypothese verworpen dient te worden, wordt de alternatieve hypothese aangenomen, welke luidt: $H_A: \mu_D \neq 0$. Dit impliceert dan dat de FBG-data niet zo nauwkeurig zijn als gewenst.

Om de toetsingsgrootheid t te berekenen wordt gebruik gemaakt van formule 10.

$$t = \frac{\bar{x}_D}{s_D / \sqrt{n_D}} \quad [10]$$

Waarbij:

$\bar{x}_D$ = het gemiddelde verschil van de steekproef.

s_D = standaardafwijking van de verschillen van de steekproef.

n_D = aantal verschillen = aantal paren.

Bij een significantieniveau $\alpha = 0,05$ wordt H_0 verworpen als $t > t_{0,025}$, waarbij $t_{0,025}$ gebaseerd is op $(n_D - 1)$ vrijheidsgraden. In dit geval ($df_B = 61$ en $df_{C2,D} \gg 120$) dient de toetsingsgrootheid t groter te zijn dan 2,000, resp. 1,960 alvorens de nulhypothese verworpen moet worden. (McClave et al., 2011)

De verwachting is dat de FBG-sensoren minder zullen opwarmen door het warme asfalt en sneller zullen afkoelen door de geleidende eigenschappen van het stalen buisje dat in direct contact staat met de 'buitenlucht'.

4.3 Statistische analyse

In onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven van de statistische analyse. Er zijn voor de drie malen B, C2 en D steeds twee thermokoppels direct naast een FBG-sensor geplaatst, dus er zijn zes analyses uitgevoerd.

Meting	x_D	n_D	s_D	df	$t_{crit}(0,025)$	t	H_0
Mal B: s1-TK1	-0,857	62	0,465	61	2,000	-14,50	Verworpen
Mal B: s5-TK2	-0,642	62	0,381	61	2,000	-13,26	Verworpen
Mal C2: s1-TK1	-1,024	1055	0,467	1054	1,960	-71,18	Verworpen
Mal C2: s5-TK2	-0,216	1055	0,313	1054	1,960	-22,38	Verworpen
Mal D: s2-TK1	4,699	848	28,393	847	1,960	4,82	Verworpen
Mal D: s6-TK2	-113,397	848	33,620	847	1,960	-98,22	Verworpen

Tabel 7, Resultaten t-test

Vanuit Tabel 7 wordt direct duidelijk dat alle zes de nul-hypotheses verworpen dienen te worden. (min-tekens worden in feite genegeerd bij $t > t_{crit}$) Dat wekt de indruk dat de FBG-sensoren geen betrouwbare data leveren. Wanneer er echter gekeken wordt naar de gemiddelde verschillen van mal B en C2, de tweede kolom in Tabel 7, dan is te zien dat het gemiddelde verschil tussen de FBG- en PQi-datasets niet veel hoger wordt dan $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bij mal D zijn deze gemiddelde verschillen wel veel hoger; dat is het gevolg van het uitvallen van FBG-sensor 6 en de pieken van FBG-sensor 2, al moet hierbij gezegd worden dat aan het einde van de meting het verschil wel $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ is, ondanks de afwezigheid van een walsovergangpiek.

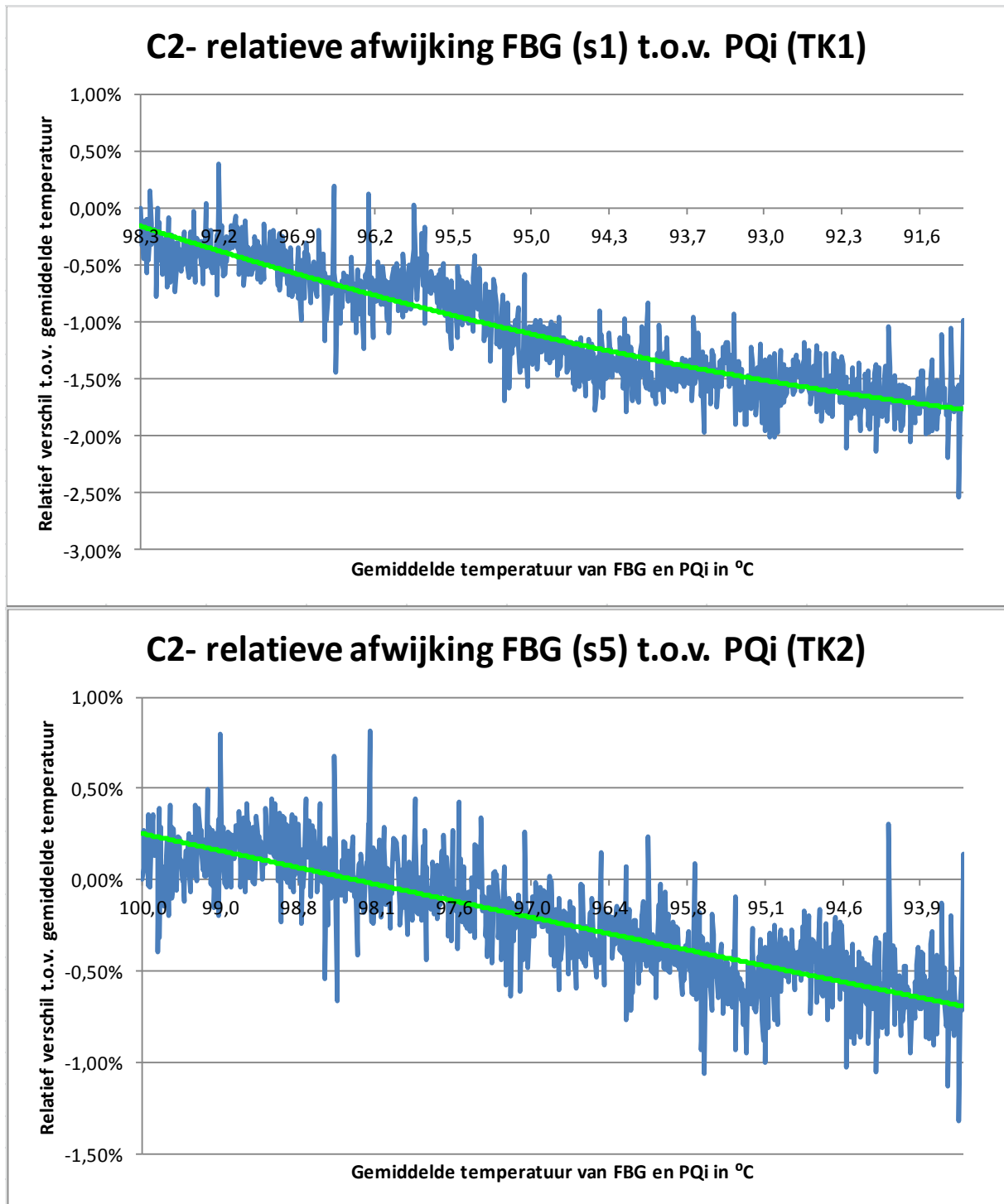
De verwachting dat de FBG-sensoren gemiddeld een lagere temperatuur aangeven dan de thermokoppels, blijkt te kloppen, al is het verschil niet heel groot. Dit is mogelijk een gevolg van de positie van de FBG-sensoren in een stalen buisje, waar de warmte van het asfalt eerst nog doorheen moet dringen. Naarmate het asfalt afkoelt, wordt het relatieve temperatuurverschil tussen de FBG-sensoren en de thermokoppels wel steeds groter, wat ook te zien is in de grafieken op de volgende pagina. Daar is het verschil tussen FBG en thermokoppel uitgedrukt als percentage en uitgezet tegen de (gemiddelde) temperatuur die de FBG en thermokoppels aangeven. De metingen bij C2 zijn uitvoeriger weergegeven dan de metingen bij B, dit omdat C2 de metingsduur langer is dan bij B en zo een meer volledig beeld geeft van het verloop van het relatieve verschil. De grafieken zouden nog interessanter kunnen door een volgende keer de gehele afkoeling van het asfalt tot kamertemperatuur te registreren.

Een manier om de invloed van dit stalen buisje in een later stadium te onderzoeken is dan ook wellicht om de thermokoppels eveneens door een stalen buisje te leiden, dat dezelfde afmetingen heeft als het stalen buisje om de FBG-sensoren.

4.4 Conclusie

Voor alle zes analyses geldt de alternatieve hypothese $H_A: \mu_D \neq 0$. Dit wekt de indruk dat de FBG-sensoren een onbetrouwbare weergave van de werkelijkheid geven ten opzichte van de tot norm verheven PQi-methodiek 'thermokoppels'. Wanneer er echter gekeken wordt naar de vier analyses waarbij de FBG-sensoren de afkoeling zonder verstoringen hebben doorstaan, blijkt dat gemiddelde verschillen in temperatuur beperkt blijven tot de grootte van ca. $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, wat minder dan 1% is bij temperaturen van boven de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alleen is het zo dat het relatieve verschil toeneemt wanneer de temperaturen dalen.

Al met al geven de FBG-sensoren op zijn minst een goede indicatie van de werkelijke temperatuur. Bij hoge temperaturen liggen de temperaturen van de FBG dichtbij de temperaturen van de thermokoppels dan bij lagere temperaturen. Bij toekomstige metingen kunnen de thermokoppels worden verpakt in stalen buisjes en zou de metingsduur (sterk) verlengd kunnen worden.



Figuur 17, grafieken met relatief verschil FBG-PQi. (Met 'PQi' worden de thermokoppels aangeduid als zijnde een onderdeel van die methodiek)

In bovenstaande figuren is het relatieve verschil weergegeven van de FBG-sensoren ten opzichte van de naastgelegen thermokoppeldraad. Op de x-as staat het verloop van de afkoeling, terwijl op de y-as het relatieve verschil staat. ($= 100\% \cdot \text{Waarde FBG} / \text{Waarde thermokoppel}$) Voor mal B staan deze figuren in Bijlage 4. Het is te zien dat het relatieve verschil steeds groter (negatief) wordt naarmate de temperatuur daalt.

5. Deelvraag 3

Hoe kan de data verzameld met Fiber Bragg Grating-sensoren gebruikt worden om een performance model op te zetten?

5.1 Inleiding

Zoals gezegd, de FBG-sensoren kunnen zowel thermische als mechanische rek registreren. Onderzocht wordt of deze tijdens het verdichtingsproces gemeten gegevens te herleiden zijn tot twee belangrijke procesparameters: temperatuurhomogeniteit en verdichtingsconsistentie. Wanneer uit de FBG-metingen blijkt dat de verdichting heeft plaatsgevonden onder homogene asfalttemperaturen en heeft geleid tot een consistente en gewenste dichtheid, biedt dat zowel de opdrachtgever als de aannemer een garantie voor de toekomstige prestaties van het asfalt.

Het asfaltverwerkingsproces kan opgedeeld worden in vier stadia: Het produceren van asfalt, het transporteren, het neerleggen en het verdichten van het asfalt. Aangezien de FBG-sensoren pas in aanraking komen met het asfalt tijdens het aanlegproces, kunnen ze geen factoren uit het productie- en transportproces registreren die mogelijk van invloed zijn op de uiteindelijke prestatie en levensduur van het asfalt. Vandaar dat de in dit hoofdstuk beschouwde indicatoren die de prestatie van het asfalt beïnvloeden, louter voortkomen uit het aanleg- en verdichtingsproces van het asfalt.

In de komende paragrafen wordt eerst kennis gegeven van factoren tijdens het verdichtingsproces die een rol gaan spelen bij het toekomstige gedrag van het wegdek. Daarna wordt gekeken in hoeverre de gemeten grootheden kunnen wijzen op deze bepalende factoren. Vervolgens wordt een model ontwikkeld dat gebaseerd is op tijdens het verdichtingsproces geregistreerde gegevens en als output een prestatie-indicatie voor de toekomst geeft.

5.2 Indicatoren voor toekomstige prestaties van het asfalt

Lytton et al. (1993) beschouwen de variabelen die de prestatie van het asfalt beïnvloeden als onder te verdelen in vier categorieën: belastingvariabelen, omgevingsvariabelen, constructievariabelen en materiaalkenmerkende variabelen. Van deze categorieën zijn omgevingsvariabelen en materiaal-kenmerkende variabelen niet geschikt om te meten middels FBG-sensoren, daarom richt dit onderzoek zich op de variabelen die tijdens het verdichtingsproces gemeten worden door FBG's en die van invloed zijn op de uiteindelijke prestatie van het asfalt: Optredende belastingen (tijdens het verdichtingsproces) en constructievariabelen. Van deze constructievariabelen wordt in dit onderzoek de behaalde verdichting en de variabiliteit hierin als belangrijkste variabele gezien.

Er zijn in de literatuur vele bronnen te vinden welke stellen dat het behalen van een bepaalde streefdichtheid een essentiële voorwaarde is voor een asfalt dat naar behoren moet gaan functioneren. (Decker, 2006) Die streefdichtheid wordt behaald door het asfalt te verdichten. Tijdens dat verdichten worden luchtporiën uit het asfaltmengsel verdreven, waardoor het specifieke volume van het mengsel verkleint. (Ter Huerne, 2004) Het behalen van een specifieke dichtheid leidt tot een optimalisatie van gewenste mengseleigenschappen zoals sterkte, duurzaamheid en weerstand tegen vervormingen en vocht. (Bijleveld, 2015)

Ter Huerne (2004) stelt dat de temperatuur van het materiaal geen invloed heeft op de verdichtingsprogressie. Ook Lytton et al. (1993) en Decker (2006) verwaarlozen de mogelijke invloed van de temperatuur op het behalen van de streefdichtheid. In feite is dit in lijn met de bevindingen van Bijleveld (2015), die eveneens stelt dat een streefdichtheid ook met verschillende (lagere) temperaturen behaald kan worden. Echter blijkt uit het onderzoek van Bijleveld dat de temperatuur tijdens het verdichten wel bepalend is voor de uiteindelijke sterkte van het asfalt, ongeacht het feit dat de streefdichtheid behaald is. Onder de (vele) medestanders van Bijleveld die stellen dat de temperatuur van invloed is op de uiteindelijke prestatie van het asfalt, bestaat wel onenigheid wat het optimale temperatuurvenster is waarbinnen verdichting dient plaats te vinden. Van deze

medestanders zijn Chadbourn en zijn collega's (1998) van mening dat de verdichtingstemperatuur niet alleen van invloed is op de uiteindelijke sterkte, maar ook op de daaraan ten grondslag liggende verdichting. Hiermee staan hun bevindingen in tegenstelling met die van Decker en Ter Huerne.

Bovenstaande in acht genomen is de onderzoeker van mening dat de temperatuur ten tijde van het verdichten van invloed is op de uiteindelijke prestatie van het asfalt. Om deze invloed te kwantificeren wordt gebruik gemaakt van de resultaten van Bijleveld (2015).

5.3 Tijdens het asfaltverwerkingsproces gemeten gegevens

Zoals gezegd kunnen met de FBG's de thermische rek en de mechanische rek gemeten worden. Met behulp van formules [5] en [6] kan de thermische rek vertaald worden naar een verschil in temperatuur (ΔT) en van daaruit naar een geldende temperatuur van het asfalt. Wanneer eenmaal de temperatuur ter plaatse bekend is, dan kan de door een FBG-sensor ondervonden mechanische rek bepaald worden. Hoeveel mechanische rek de sensor meet, hangt af van de belasting op het wegdek, de locatie van de belasting (x, y), de diepte van de sensor in de laag (z) en de mechanistische eigenschappen van het asfaltmengsel. Deze eigenschappen hangen af van welke grondstoffen zich in welke verhouding in het asfalt bevinden, alsmede de dichtheid en de temperatuur van het asfalt. De gemeten mechanische rek staat dus in verband met de dichtheid, echter hangt de gemeten rek ook af van andere factoren. Enkele van deze factoren blijven niet constant tijdens het verdichtingsproces, zoals de sensordiepte (want laagdikte wordt kleiner) en de mechanistische eigenschappen (want oplopende dichtheid en afnemende temperatuur). Hierdoor wordt het opstellen van een 1-op-1-relatie tussen mechanische rek en asfaltdichtheid bemoeilijkt. Wanneer echter alle overige variabele factoren constant (maar nog niet per sé bekend) worden gehouden, kan er wel bepaald worden of de dichtheid van het asfalt op verschillende plekken consistent is. Dat wordt in de volgende alinea uitgelegd.

Wanneer er op twee verschillende plekken een sensor (1 en 2) is geïnstalleerd in hetzelfde asfaltmengsel M , en wanneer er bij eenzelfde temperatuur T een kracht F , welke zich op eenduidige afstanden x, y en z t.o.v. de sensoren bevindt, wordt uitgeoefend, zal in theorie de gemeten rek van sensor 1 hetzelfde moeten zijn als de gemeten rek van sensor 2. Wanneer dit niet het geval is, kan daaruit geconcludeerd worden dat de dichtheid van het asfalt niet overal hetzelfde is. Het lastige van deze theorie is dat het in de praktijk onmogelijk is om op twee verschillende locaties in het asfalt exact dezelfde temperatuur te hebben en te behouden. Tevens dient dan de locatie van de sensoren t.o.v. de belasting hetzelfde te zijn, hetgeen in de praktijk moeilijk te bewerkstelligen is. Wanneer blijkt dat het wel degelijk mogelijk lijkt om bovenstaande variabelen constant te houden, dan is het mogelijk om daarmee een methode te ontwikkelen die de verdichtingsconsistentie van asfalt kan bepalen, met als voordeel dat het een asfaltbesparende methode is. Vanwege de complexiteit van het in de praktijk brengen van deze theorie, is ervoor gekozen om hiermee geen experimenten uit te voeren en dus ook geen modellen te maken op basis van dit gedachte-experiment.

De temperatuur van het asfalt als veroorzaker van de thermische rek van de sensor kan dus wel vrij direct bepaald worden, zij het met enige afwijking doordat de warmte van het asfalt nog de stalen beschermingsbuis moet doordringen alvorens het de sensor bereikt. Hierdoor kan door twee FBG-sensoren (een temperatuur- en een reksensor) afgeleid worden wat de temperatuur van het asfalt was ten tijde van een walsverdichting, mits deze sensoren vlakbij elkaar liggen. Wanneer de temperatuursensor een bepaalde asfalt-temperatuur meet, kan worden aangenomen dat de nabijgelegen reksensor zich in hetzelfde temperatuurregime bevindt. Deze reksensor zal in het geval van een walspassage een toename van mechanische rek ondervinden. Hoeveel die rek zal bedragen, is moeilijk te voorspellen, zoals uitgelegd in bovenstaande alinea. Er wordt echter wel verondersteld dat er een toename van rek zal optreden in het wegdek onder de wals. Deze gedetecteerde - maar nog niet gekwantificeerde - belastingtoename ten tijde van een bekende temperatuur zal de basis vormen voor de *performance model* dat in de volgende paragraaf ontwikkeld wordt.

5.4 Opzet Performance Model

Bijleveld (2015) concludeert dat verdichten buiten de optimale temperaturen leidt tot een daling van de breukenenergie van 30%. In dit onderzoek wordt vervolgens geen indicatie gegeven wat het effect is op de langere termijn. Bijleveld is hierin niet de enige. Er is veel onderzoek gedaan naar wat het optimale temperatuurdomein is voor verdichten (Chadbourn et al. 1998; Timm et al., 2001; Decker 2006; Commuri & Zaman 2008), maar er wordt eigenlijk nooit een indicatie gegeven wat de gevolgen hiervan zijn voor de prestatie van het asfalt op de lange termijn. (Dorée et al., 2012)

Dergelijke performance modellen die op basis van een verdichting ten tijde van bepaalde temperaturen een prestatie-indicatie van het asfalt geven voor de lange termijn, zijn er dus (nog) niet. Daarom wordt er in dit onderzoek gebruik gemaakt van een gesimplificeerd performance model. De gedachte hierachter is dat wanneer de FBG-data te implementeren is in dit gesimplificeerde performance model, het ook te implementeren is in een gedetailleerder en robuuster performance model. Voor dit gesimplificeerde performance model wordt zoals gezegd gebruik gemaakt van de resultaten van Bijleveld (2015). In dit gesimplificeerde performance model wordt zodoende gesteld dat wanneer er buiten het optimale temperatuurdomein wordt verdicht (130-150 °C), er een sterktereductie is van 30%.

Uit 3.3.4 *Fase 2 – Resultaten* is gebleken dat de FBG-sensoren in staat zijn om een walsovergang te detecteren door middel van een rektoename. Het ontwikkelde performance model telt het aantal geregistreerde rektoenames, welke worden beschouwd als het aantal walspassages. Op hetzelfde tijdstip van elke rektoename wordt de output van de nabijgelegen temperatuur-FBG vergeleken. Wanneer de rektoename bleek te hebben plaatsgevonden bij een temperatuur tussen de 130 en 150°C, krijgt deze walspassage een 'score' van 1. Wanneer de rektoename optrad buiten de hiervoor genoemde temperaturen, dan krijgt de walspassage een score van $(1 - 30\%) = 0,7$.

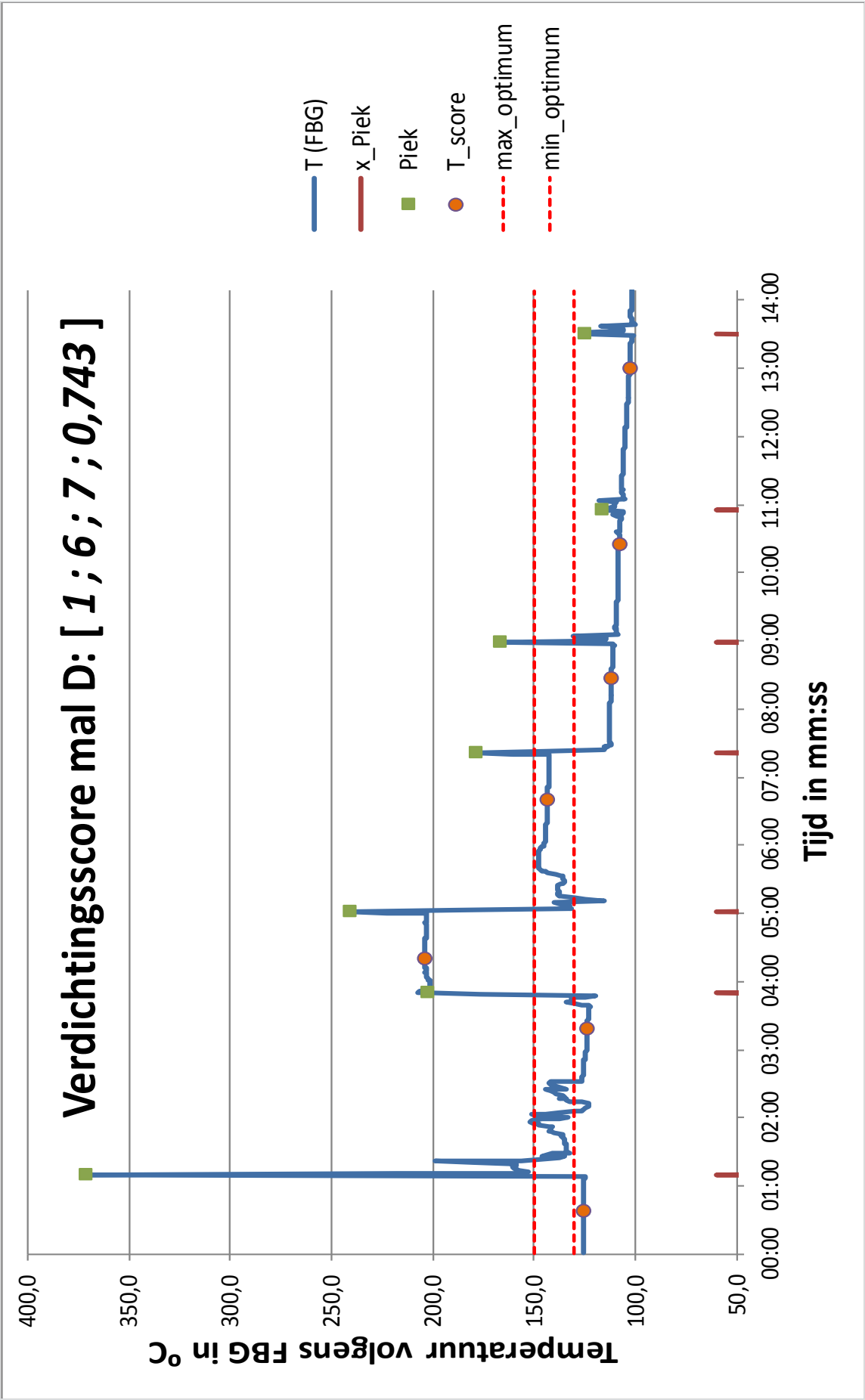
Als output levert het model een vector met daarin vier waarden, te weten achtereenvolgens: *Aantal rektoenames binnen optimale temperatuurdomein; aantal rektoenames buiten optimale temperatuurdomein; totaal aantal rektoenames; gemiddelde verdichtingsscore*.

De gemiddelde verdichtingsscore wordt verkregen door het gemiddelde te nemen van de scores van elke afzonderlijke rektoename. Zodoende heeft deze gemiddelde score altijd een waarde tussen 1 en 0,7. Het MATLAB-script waarmee dit model gemaakt is, is te vinden in Bijlage 5.

Deze gemiddelde verdichtingsscore kan worden toegevoegd als extra factor in een bestaand performance model dat nog geen rekening houdt met de temperatuur tijdens het verdichten, bijvoorbeeld in een performance model van Pearson (2012) met als output *million standard axle loads* (msa).

Op de volgende pagina is de output verwerkt in een grafiek. (Figuur 18) De blauwe lijn staat voor de data van FBG-sensor 2 bij meting D. De groene vierkantjes geven aan waar de (top van de) piek zich bevindt. Omdat dat niet de werkelijke temperatuur is, wordt bij die piek de temperatuur genomen van een halve minuut eerder, welke wordt weergegeven door de oranje bolletjes. De twee rode streeplijnen geven aan wat het optimale temperatuurbereik is. Volgens de modeloutput zal het asfalt in deze situatie een kwart minder prestatie ($< 75\%$) leveren dan wanneer het asfalt in de optimale temperatuurzone was verdicht.

Het derde en vierde bolletje geven een temperatuur aan die erg onwaarschijnlijk lijkt. Een verbeterd model zou de daadwerkelijke temperatuur moeten baseren op een tweede sensor die geen walspassage-pieken kent, wat nu wel het geval is.



Figuur 18, Output gesimplificeerd performance model op basis van FBG-output

5.5 Conclusie

In het verleden is er weinig of geen onderzoek gedaan naar de relatie tussen de verdichtings-temperaturen en de prestaties van het asfalt op de lange termijn. Het in dit hoofdstuk ontwikkelde model is gebaseerd op de weinige gekwantificeerde gegevens die er wel zijn. Hierdoor is het model sterk gesimplificeerd.

Hoe dan ook, een model dat niet gesimplificeerd is, zal gebouwd moeten zijn op dezelfde output van de FBG's als het in dit hoofdstuk ontwikkelde model.

De data van de sensoren werd in dit performance model vertaald naar de temperatuur ten tijde van een rektoename, hetgeen een walspassage veronderstelt. Door alle rektoenames dan te verzamelen en te onderzoeken bij welke temperaturen dit gebeurde, kan er beoordeeld worden of er is verdicht in een bepaalde, optimale temperatuurzone.

Wanneer men over ten minste twee werkende sensoren beschikt, waarbij de ene sensor de rektoenames kan registreren, en de andere nabijgelegen sensor de temperatuur meet, maar niet de walspassages, dan is het mogelijk om met de door de FBG-sensoren verzamelde data een performance model op te zetten.

6. Deelvraag 4

Hoe kan de data gebruikt worden om voertuigbelastingen inzichtelijk te maken?

6.1 Inleiding

Waar in dit hoofdstuk onderzoek naar gedaan wordt, is de geschiktheid van de data afkomstig van FBG-sensoren voor het berekenen van krachten in het asfalt. Als eerste zullen de karakteristieke materiaaleigenschappen van asfalt belicht worden. Vervolgens wordt beoordeeld hoe de output van de FBG-sensoren om te zetten is naar de input van een Eindige Elementen Methodemodel. Als laatste wordt de in de experimenten gemeten mechanische rek gevalideerd met een rekenmodel.

6.2 Theoretisch kader – Materiaaleigenschappen asfalt

Ter Huerne (2004) maakt zijn onderzoek een vergelijking tussen het gedrag tijdens verdichting van de materialen asfalt en grond:

“Beide materialen (mengsels) bestaan uit vaste deeltjes, een vloeistof (bitumen of water) en poriën gevuld met lucht. Tijdens belasting van een initieel relatief onverdicht materiaal verandert de korrelrangschikking (de dichtheid van het deeltjesskelet) en hierdoor wordt de lucht uitgedreven. Het specifieke volume van het materiaal verandert en de dichtheid van het materiaal neemt toe. De vloeistof in het mengsel ‘smeert’ de contactvlakken tussen de korrels en maakt het schuiven van de korrels ten opzichte van elkaar lichter. Het materiaalgedrag kan worden gekarakteriseerd als elastisch (totdat de korrels gaan schuiven) en plastisch (tijdens het schuiven).”

Tijdens het verdichtingsproces houdt het materiaalgedrag van het visceuze asfalt het midden aan van het gedrag van een vaste stof en dat van een vloeistof. (Ter Huerne, 2004) Het afkoelen van het asfalt zorgt ervoor dat het gedrag van het asfalt zich meer richting het gedrag van een vaste stof beweegt. Door deze complexe en niet-constante materiaaleigenschappen is het praktisch onmogelijk om met alleen de geregistreerde plaatsgewijze mechanische rek de grootte en de locatie van de optredende voertuigbelastingen inzichtelijk te maken tijdens het afkoelings- en verdichtingsproces.

Wanneer het asfalt eenmaal is verdicht en afgekoeld, vertoont het lineaire viscoelastische materiaal - kenmerken wanneer de belastingen met een hoge frequentie optreden (Thom, 2013) en de temperatuur laag ($< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) wordt gehouden (Lytton et al., 1993). ‘Viscoelastisch’ wil zeggen dat de respons van het materiaal niet alleen afhangt van de grootte van de belasting, maar ook van de duur (of frequentie) van de belasting. Hierdoor wordt er gebruik gemaakt van een dynamische elasticiteitsmodulus. Deze elasticiteitsmodulus verandert naarmate de duur van de belasting (spanning) verandert en wordt weergegeven met E^* . Ook kunnen er na het verdichten en afkoelen monsters worden geboord, waardoor mechanistische eigenschappen zoals stijfheid van het asfalt nauwkeurig kunnen worden vastgesteld. Verder is het aantal verschillende voertuigen (walsen en asfaltspreidmachine) dat tijdens het verdichtingsproces voor voertuigbelastingen zorgt, beperkt en bovendien is de massa en bijbehorende belasting van deze machines van te voren bekend. Het wordt daarom interessanter geacht om met de FBG-sensoren de voertuigbelastingen te bepalen van voertuigen die daarvoor zorgen wanneer het wegdek al in gebruik is. Van al deze vele verschillende voertuigen (personenauto’s, vrachtwagens, motoren e.d.) is de massa namelijk niet bij voorbaat bekend.

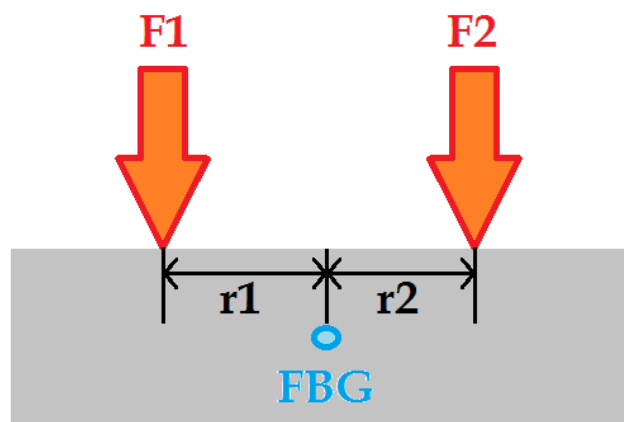
Om te resumeren: de in dit onderzoek beschouwde voertuigbelastingen treden op in een asfalt-mengsel dat al is verdicht en afgekoeld en waarvan wordt aangenomen dat het visceus-elastisch reageert op belastingen. Van dit asfaltemengsel wordt de (dynamische) stijfheid bepaald zonder tussenkomst van de FBG-sensoren; daar zijn tegenwoordig gevestigde methodieken voor.

6.3 Voorwaarden voor geschiktheid van FBG-data voor input FEM-modellen

Het doel en het nut van een FEM-analyse (of EEM-analyse) is om te voorspellen hoe een materiaal zich gaat gedragen als gevolg van een bepaalde belasting en met een gegeven stijfheid van het materiaal. Dat wordt bewerkstelligd door het gehele materiaal op te delen in een eindig aantal elementen. Van elk element wordt afzonderlijk dan de spanning en de resulterende verplaatsing en verlenging bepaald. Hoe hoger het aantal elementen waarin het materiaal wordt verdeeld, hoe hoger de nauwkeurigheid. Echter draagt een hoger aantal elementen ook bij aan de verlenging van de benodigde rekentijd.

In het verleden is reeds aangetoond dat het mogelijk is om een FEM-model te maken van het gedrag van asfalt onder een bepaalde belasting. (De Beer, 2002; Ter Huerne, 2004; Wang et al., 2006) Het ontwikkelen van een nieuw FEM-model is dan ook niet het beoogde doel van de onderzoeker. Het onderzoek richt zich wel op de mogelijkheid dat enkel en alleen de output van de FBG-sensoren (plaatsgewijze mechanische rek) te herleiden is tot spanningen, verlengingen en verplaatsingen van elementen op andere plekken in het asfalt. (De stijfheid van elk element wordt dan al wel reeds bekend verondersteld.)

Om een mechanische rek te herleiden tot de grootte van de veroorzakende belasting (beschouwd als één enkele puntlast), moet eerst de belasting gelokaliseerd worden. Wanneer twee krachten $F1$ en $F2$ gelijk aan elkaar zijn op eenzelfde afstand ($r1 = r2$) aan weerszijden van de FBG-sensor liggen, zal de mechanische rek gemeten door de FBG als gevolg van $F1$ gelijk zijn aan de mechanische rek veroorzaakt door $F2$. Echter zal de asfaltlaag in zijn geheel anders reageren onder $F1$ dan onder



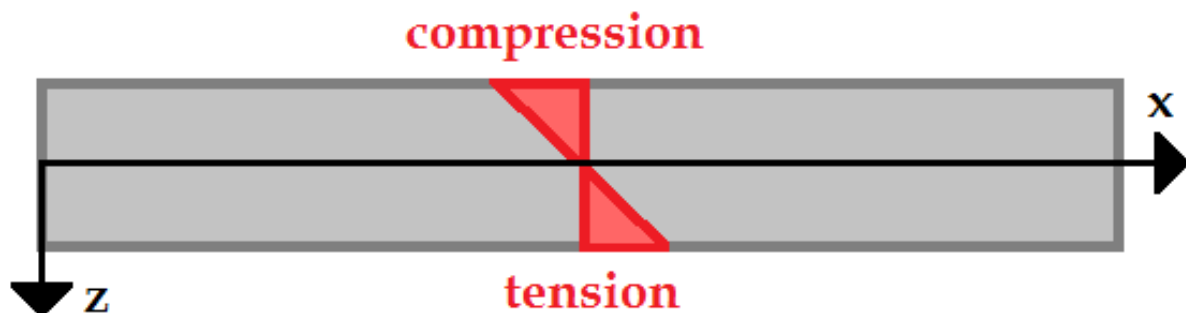
Figuur 19, 2 belastingen leidend tot eenzelfde gemeten rek

$F2$. Om de spanningen, rekkingen en vervormingen in de gehele asfalt laag te berekenen, zal dus eerst bepaald moeten worden wat de positie is van de optredende belasting. De oplosstrategie daarvoor zal worden belicht in de volgende paragraaf.

6.4 Theoretisch kader – Berekening belastingen

Vooralsnog wordt aangenomen dat mogelijke belastingen van positievariëren op alleen de x-as, dus loodrecht op de rijrichting. De y-coördinaten van de belastingen (langsrichting) worden op 0 gehouden, de z-coördinaten zijn bepaald en liggen vast door de diepteligging van de sensor. Onderstaande vergelijkingen geven de berekeningswijze weer en zijn afkomstig uit de wetten van de mechanica (statica).

Wanneer een deel van het wegdek in de dwarsrechting wordt losgemaakt en wordt beschouwd als een balk ondersteund op twee opleggingen, ontstaat het model in Figuur 20.



Figuur 20, doorsnede asfaltwegdek

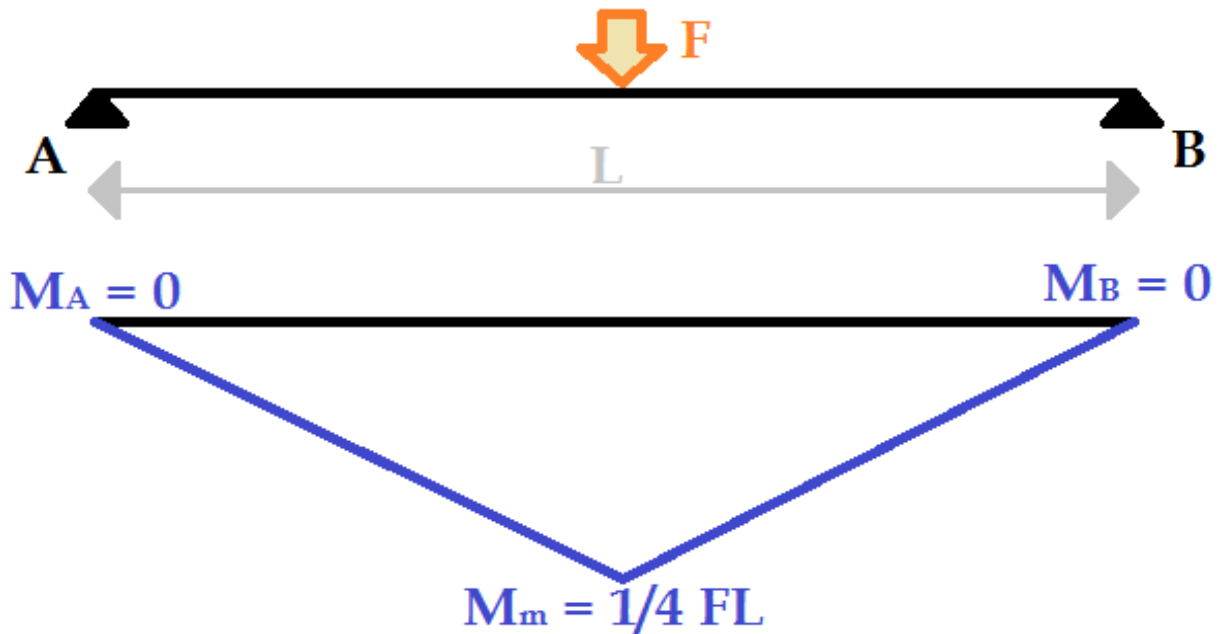
De spanning in een balk wordt berekend met de volgende formules. Wanneer er geen zijwaartse krachten werken op de balk, is er geen normaalkracht N , dus mag de spanning berekend met formule [12]. Doordat de lijn $z = 0$ door het midden van de balk loopt, zijn de spanningen in de bovenste helft van de balk negatief, waar ze in de onderste helft positief zijn. Een negatieve spanning zorgt voor een negatieve rek (krimp) en een positieve spanning zorgt voor een positieve rek (uitrekking).

$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M_z * z}{I_{zz}} \quad [11]$$

$$\sigma_z = \frac{M_z * z}{I_{zz}} \quad [12]$$

$$\sigma_{z,midden} = \frac{\frac{1}{4} * F * l * z}{I_{zz}} \quad [13]$$

Waarbij σ_z de spanning op hoogte z (mm) weergeeft in N/mm^2 ; M_z staat voor het moment in de balk (Nmm) en I_{zz} het traagheidsmoment in mm^4 representeert. F (in N) is de puntlast op het midden van de balk met lengte l (mm).



Figuur 21, momentenlijn bij belasting op het midden van een opgelegde balk

Het verloop van het moment in de balk als gevolg van een puntlast op het midden van de balk staat weergegeven in Figuur 21. Hierdoor kan het de spanning als functie van x en z als volgt worden uitgerekend en vervolgens ook de rek d.m.v. de dynamische stijfheid.

$$\sigma_{x,z} = \frac{\frac{1}{2} F (\frac{1}{2} l - (|\frac{1}{2} l - x|)) z}{4 * I_{zz}} \quad [14]$$

$$\sigma = E * \varepsilon \quad [15]$$

$$\varepsilon_{x,z} = \frac{F (\frac{1}{2} l - (|\frac{1}{2} l - x|)) z}{8 * I_{zz} * E^*} \quad [16]$$

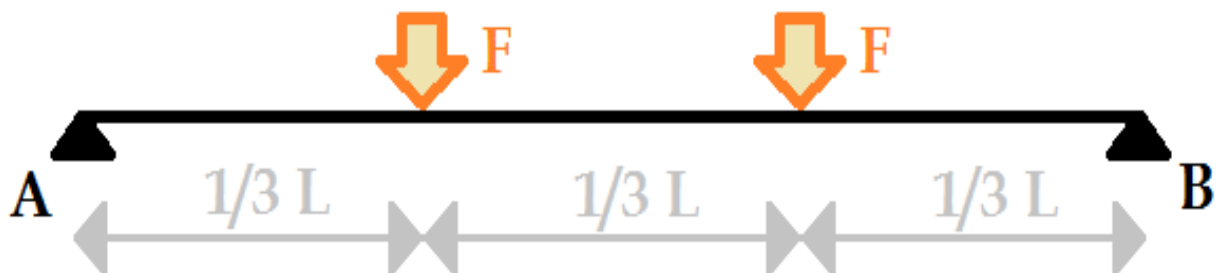
x is hierbij de afstand tot de linkerkant van de balk en z staat voor de diepte t.o.v. het midden van de balk, beide in mm. E^* is de dynamische elasticiteitsmodulus (N/mm^2) en ten slotte representeert ε (dimensieloos) de rek.

Om van een gemeten rek tot een berekende puntlast te komen, dient [16] te worden omgeschreven naar formule [17], welke hieronder staat weergegeven.

$$F_{x,z} = \frac{8 * I_{zz} * E^* * \varepsilon}{\left(\frac{1}{2}l - \left(\left|\frac{1}{2}l - x\right|\right)\right)z} \quad [17]$$

6.5 Output FBG als mogelijke input voor FEM-modellen

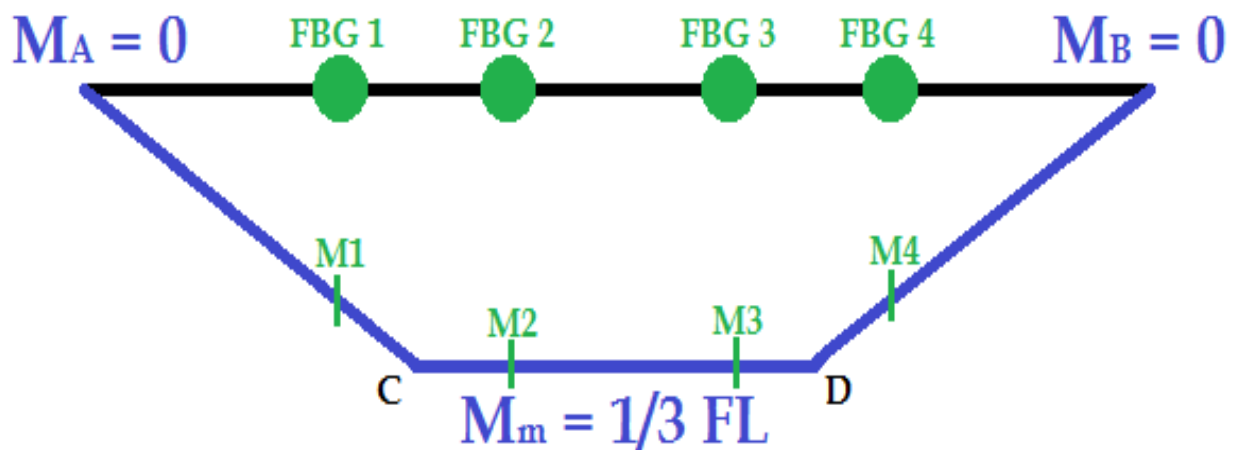
De mogelijkheid om van de gemeten rek tot een berekening van de grootte en de positie van de belastingen te komen, wordt in deze paragraaf belicht aan de hand van een scenario dat lijkt op de situatie geschetst in Figuur 21. In dit scenario zijn er twee (gelijke) belastingen op gelijke afstanden van elkaar en van de opleggingen. Deze twee belastingen kunnen worden voorgesteld als contactpunten van een voertuig met het wegdek. De twee posities van de belastingen worden daarmee aangeduid als aslastzones. Zie Figuur 22. Het eigen gewicht van de balk wordt verwaarloosd, aangezien deze niet voor een rektoename van de FBG zou moeten zorgen.



Figuur 22, aslasten op een wegdek

Wanneer er aan weerszijden van de aslastzone een FBG-sensor in het asfalt wordt geplaatst, kan daarmee het verloop van de momentenlijn worden bepaald. Voorwaarde is wel dat de posities van de FBG-sensoren (\$x\$) bekend zijn. Ook moeten eerst vergelijkingen [12] en [15] worden gecombineerd zodat formule [18] ontstaat. Zie Figuur 23 voor de illustratie van het principe.

$$M_z = \frac{E^* \varepsilon * I_{zz}}{z} \quad [18]$$



Figuur 23, momentenlijn bij twee symmetrische belastingen

Nu is 'toevallig' de grootte van het veldmoment in het midden bekend doordat de belastingen symmetrisch optreden. Echter hoeft dat niet altijd het geval te zijn; niet elk voertuig rijdt in een vooraf uitgetekende aslastzone en de lading van het voertuig kan asymmetrisch geplaatst zijn waardoor de linkerbelasting groter of kleiner is dan de rechterbelasting.

Niettemin kan met het model van Figuur 23 het verloop van het veldmoment nog altijd bepaald worden, ongeacht de eventuele asymmetrie van de optredende belastingen. De vier sensoren worden (op enige afstand) aan weerszijden van een verwachte aslastzone gelegd. Op die manier zijn namelijk in elk van de drie momentenlijn-segmenten AC, CD en DB twee momenten bekend, en dus kent het model dan in totaal zes waarden voor momenten op zes verschillende posities. In opleggingen A en B is het moment altijd gelijk aan 0 Nm, en op de andere vier posities (M1-M4) kan het moment middels vergelijking [18] worden uitgerekend door de aldaar via de FBG verkregen rek.

Doordat er per segment twee momenten bekend zijn, kan de helling van de momentenlijn in dat segment worden berekend. Vervolgens kunnen de twee snijpunten van de drie segment-momentenlijnen berekend worden, welke gelijk zijn aan de locatie van de belastingen. Dan is ook het verloop van de momentenlijn in zijn geheel bekend. Omdat de helling van een momentenlijn gelijkstaat aan de grootte van de dwarskracht in de balk op dat punt, kan via de dwarskracht berekend worden hoe groot de belastingen zijn die op het wegdek werken. Op elk punt in de balk kan nu ook de spanning worden berekend.

Overigens dient er bij elke sensor een extra sensor te worden geplaatst voor de temperatuurcompensatie. Zo is er voor dit model een fiber nodig met daarin acht sensoren. Dit is een zeer gangbaar aantal wat betreft de hoeveelheid sensoren in een fiber.

6.6 Validatie gemeten gegevens

Om te bepalen of het model uit de vorige paragraaf niet alleen in de theorie werkt, maar ook in de praktijk, zijn er in Fase 2 metingen gedaan waarbij verschillende belastingen op het midden van een balk asfalt (mal D met afmetingen $500 \times 160 \times 80 \text{ mm}^3$) zijn gelegd. Wat betreft de mechanische rek zijn er zes metingen gedaan, D1-D6. In D1, D2 en D3 werden respectievelijk 1, 2 en 4 gewichten op het midden van de balk gelegd. Elk gewicht had een massa van 2,65 kg. De balk asfalt werd na meting D3 een kwartslag gedraaid (Figuur 25) en in de metingen D4-D6 werden er weer 1, 2 en 4 gewichten op het midden gelegd. De gewichten werden voor een duur van 5 seconden op de balk gelegd. Bij die belastingfrequentie van 0,2 Hz en het gebruikte asfaltmengsel hoort een dynamische elasticiteits-modulus van 1290 N/mm^2 . (Boskalis, 2016)

De berekening van de rek in elke meting staat op de volgende pagina in Tabel 8. De grafieken met de resultaten staan eveneens op de volgende pagina's. Er is alleen data beschikbaar van sensor 3: dat is de enige sensor die het verdichten heeft overleefd en in directe verbinding staat met het omringende asfalt. De posities (x,z) van de sensoren zijn vooraf bekend bij de onderzoeker. De verwachting is dat de rekwaardes bij D4-D6 negatief zullen zijn, aangezien sensor 3 zich dan in de bovenste helft van de balk bevindt, dus in de drukzone. Aangenomen wordt dat ΔT tijdens de meting van 6 seconden gelijk is aan 0°C .



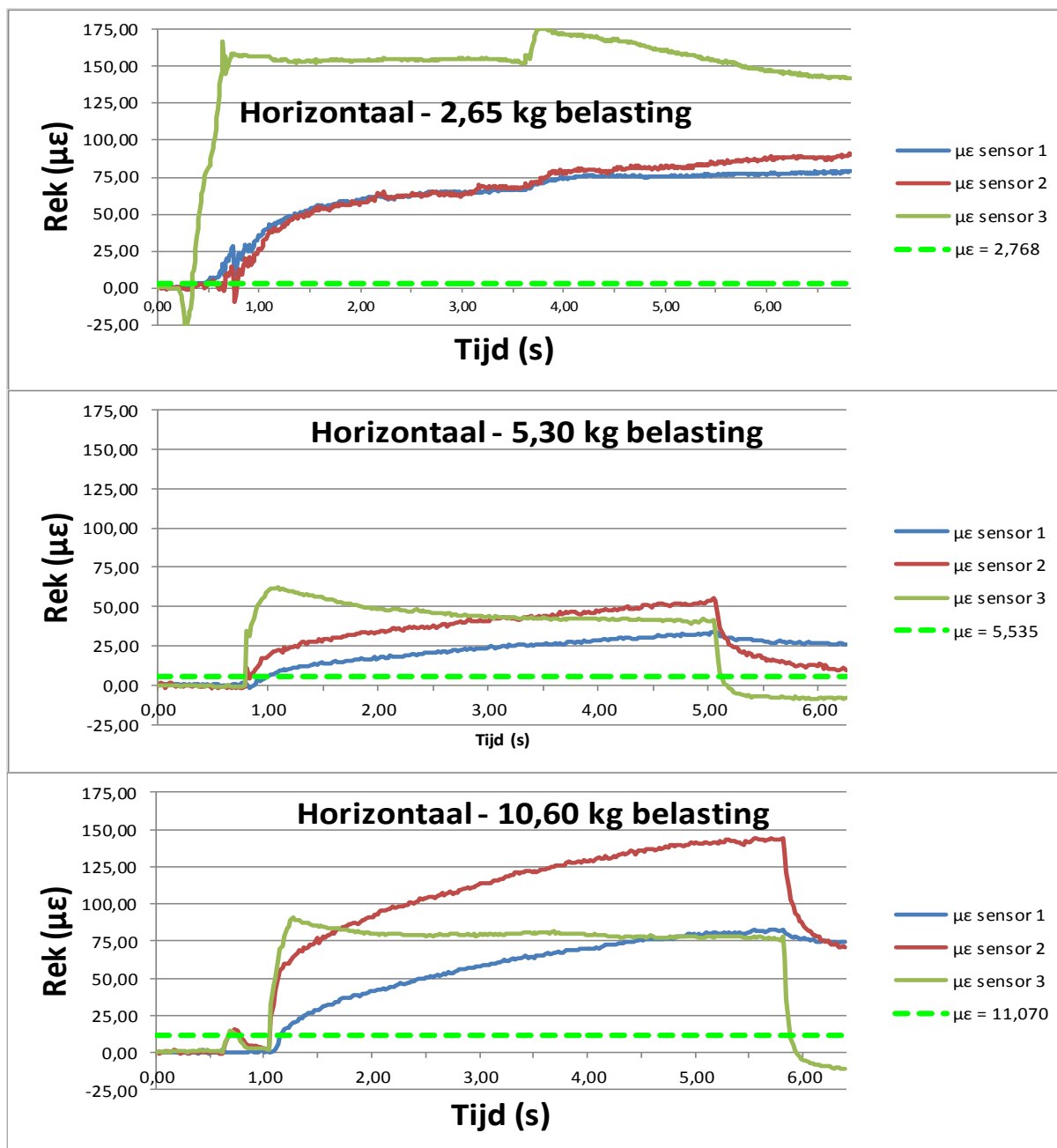
Figuur 24, asfaltbalk voor rekmetingen



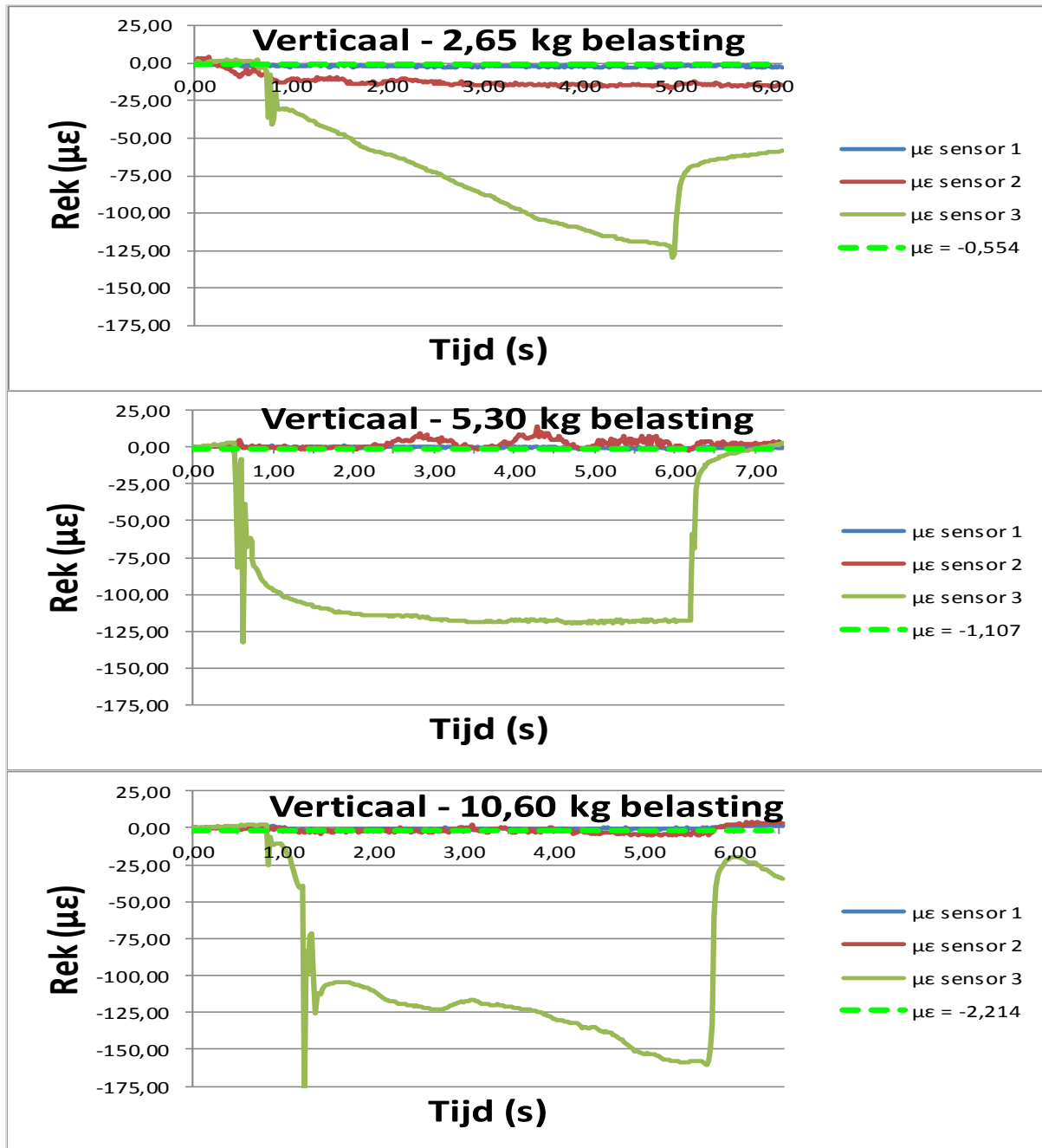
Figuur 25, asfaltbalk op de zijkant gelegd

Meting	m (kg)	F (N)	b (mm)	h (mm)	I_{zz} (mm ⁴)	E^* (N/mm ²)	x (mm)	z (mm)	$\mu\epsilon$
D1	2,65	26,0	160	80,0	6,83E+06	1,29E+03	250	30,0	2,77
D2	5,30	52,0	160	80,0	6,83E+06	1,29E+03	250	30,0	5,54
D3	10,6	104	160	80,0	6,83E+06	1,29E+03	250	30,0	11,1
D4	2,65	26,0	80,0	160	2,73E+07	1,29E+03	250	-24,0	-0,554
D5	5,30	52,0	80,0	160	2,73E+07	1,29E+03	250	-24,0	-1,11
D6	10,6	104	80,0	160	2,73E+07	1,29E+03	250	-24,0	-2,21

Tabel 8, berekende rek voor elke meting



Figuur 26, van boven naar beneden: metingen D1, D2 en D3



Figuur 27, van boven naar beneden: metingen D4, D5 en D6

Er kan direct geconstateerd worden dat de berekende rek op geen enkel moment in de buurt komt van de daadwerkelijke rek van sensor 3. Wat verder opvalt bij metingen D1-D3 is dat temperatuursensoren 1 en 2 (verlijmd in buisje) significant meerekken, bij D3 zelfs meer dan sensor 3. Bij metingen D4-D6 bevonden alledrie de sensoren zich in de drukzone van de balk, waardoor ze theoretisch gezien een negatieve rek moesten registreren. Dat bleek in de praktijk ook zo te zijn. Er werd zelfs verwaarloosbaar weinig rek gemeten door sensoren 1 en 2.

Ook is te zien er een bepaalde mate van rek blijft nadat de belasting is weggehaald. Dit impliceert dat de balk asfalt deels plastisch is vervormd. Dit heeft invloed op de metingen die nog moeten volgen. Zo is te zien dat wanneer de belasting (en dus de spanning) twee keer zo groot wordt, de rek niet twee keer zo groot wordt.

De duur van de optredende belasting is in de meeste gevallen wel af te lezen uit de grafiek.

6.7 Conclusie

Het wordt mogelijk en relevant geacht om de voertuigbelastingen inzichtelijk te maken in asfalt dat reeds verdicht en afgekoeld is. Van dit asfalt moeten mechanistische eigenschappen, zoals de dynamische elasticiteitsmodulus al wel bekend zijn. Deze materiaaleigenschappen kunnen niet bepaald worden door de FBG-sensoren, daar zijn andere instrumenten voor nodig. Omdat het asfalt zich visco-elastisch gedraagt, is het van belang dat de duur (of frequentie) van de belasting ook bekend is.

Er is een model ontwikkeld dat in staat is om een of twee puntlasten op een dwarsdoorsnede van het asfalt te lokaliseren en te kwantificeren. Dit model gaat uit van de gemeten mechanische rek door de FBG's. Vanaf de rek kunnen achtereenvolgens de pleksgewijze spanning; het plaatselijke moment; het momentverloop; het verloop van de spanning en ten slotte de lokatie en grootte van de puntlasten worden bepaald. De dwarsdoorsnede wordt dan beschouwd als een balk dat aan beide zijden is opgelegd op twee scharnieropleggingen. Het eigen gewicht van de balk wordt hierbij verwaarloosd.

De houdbaarheid van dit model is enigzins onzeker geworden doordat het theoretische rekenmodel niet parallel liep met de verkregen metingen uit de praktijk. In de toekomst zal er dus een verbeterd rekenmodel moeten komen. Een model dat mogelijk wel rekening houdt met het eigen gewicht van het asfalt en ook anticipeert op de plastische vervormingen van het asfalt als gevolg van de belastingen en/of eigen gewicht.

Overigens werd het onderscheid tussen positieve en negatieve rekkingen wel juist voorspeld door het gekozen rekenmodel.

7. Deelvraag 5

In hoeverre geven de metingen een indicatie van het energieverbruik tijdens het asfaltverwerkingsproces?

7.1 Inleiding

Tegenwoordig is er bij de ontwikkeling van producten de nodige aandacht voor het milieu, of beter gezegd de impact van het product op het milieu. In de wegenbouw is het daarom interessant om te bepalen hoe 'groen' de weg is. Naast de duurzaamheid is de in het productieproces verbruikte energie een indicator voor de impact op het milieu. In dit hoofdstuk wordt onderzocht of dit energieverbruik tijdens het proces gekwantificeerd kan worden middels de FBG-sensoren.

7.2 Berekening energieverbruik

Tijdens het asfalteringsproces gaat de meeste energie verloren bij twee processen: de warmte (= energie) die uit het asfalt verdampt waardoor het afkoelt en het brandstofverbruik van de machines die het asfalt leggen, verwerken en verdichten. Daarom wordt hier gesteld:

$$E_{\text{totaal}} = Q_{\text{afkoeling}} + E_{\text{brandstof}} \quad [19]$$

De in het afkoelingsproces verloren energie kan vrij gemakkelijk worden gekwantificeerd op basis van de gegevens van de FBG-sensoren. Met de bekend veronderstelde warmtecapaciteit van het asfalt (vergelijking 20) kan worden uitgerekend hoeveel energie het asfalt heeft verlaten.

$$\Delta Q = C * \Delta T = C * (T_{\text{eind}} - T_{\text{begin}}) \quad [20]$$

Waarbij ΔQ staat voor het energieverval in Joule, C voor de warmtecapaciteit in $J.K^{-1}$ en de T voor de temperatuur die zoals gezegd door de FBG-sensoren kan worden gemeten.

De berekening van het brandstofverbruik vergt wat meer berekeningsstappen. Het brandstofverbruik per machine wordt bekend verondersteld (bij de aannemer). Verder is het hiervoor nodig dat er twee sensoren zijn die op enige afstand van elkaar liggen in de lengterichting. Net als in hoofdstuk 5 wordt aangenomen dat een overgang van een machine leidt tot een rektoename. Wanneer er bij sensor A een rektoename is op $t = t_1$ en bij sensor B een dergelijke piek op $t = t_2$, en men de onderlinge afstand tussen de sensoren weet, kan deze afstand gedeeld worden door het tijdsverschil om zodoende een gemiddelde snelheid (v) van de machine te berekenen. Door middel van videorecorders kan beoordeeld worden of de machine deze snelheid redelijk aanhield of dat het in de tussentijd even stilstond. Ook moet uiteraard bepaald worden of het wel dezelfde machine is die over A en B reed. Bij deze snelheid hoort een bepaald verbruik, dat voor elk type machine anders kan zijn. De stookenergie van de brandstof dient eveneens bekend te zijn. Ten slotte is ook de lengte van de nieuw aan te leggen asfaltweg bekend verondersteld, tezamen met het aantal keer dat de machine deze afstand moet afleggen. Dit alles leidt tot de volgende vergelijking:

$$E_{\text{brandstof}} = \rho_{\text{energie}} * U(v) * L * n \quad [21]$$

Waarbij:

ρ_{energie} staat voor de stookwaarde van de brandstof; (Diesel: 35,8 MJ/L)

$U(v)$ het verbruik van de machine representeert bij een bepaalde snelheid, in L/km; (Wordt bekend verondersteld bij de aannemer)

L voor de weglengte in kilometers staat, en n voor het aantal keer dat deze afstand wordt afgelegd. (η , het rendement van de machine wordt hier gesteld op 100%, wat in werkelijkheid niet zo zal zijn.)

7.3 Conclusie

De metingen van de FBG-sensoren kunnen dus wel degelijk een indicatie geven van de in het proces verbruikte energie. Naast de FBG-sensoren dient het proces dan ook gemonitord te worden door een of meerdere videocamera's om een en ander te verifiëren.

8. Conclusies

In het begin van het onderzoek heeft de onderzoeker zich tot doel gesteld om een antwoord te geven op de volgende vraag: *“Wat is de haalbaarheid van het gebruik van optische sensoren om asfalttemperaturen voertuigbelastingen te meten, gedurende en na het asfaltverdichtingsproces?”* In dit hoofdstuk wordt die vraag beantwoord aan de hand van de antwoorden op de deelvragen.

1. Wat voor invloed heeft het verdichte asfalt op de prestaties van de FBG-sensoren?

Allereerst gaan er als gevolg van het verdichte asfalt de niet goed beschermde sensoren stuk door het verdichten met een statische wals. De sensoren die wel goed beschermd zijn middels een stalen buisje, geven de in het verdichte asfalt geldende omstandigheden weer, zowel temperatuur als rek. Sensoren die niet verlijmd, maar los in een stalen buisje liggen, registreren alleen de temperatuur van het asfalt. Wanneer een sensor te goed beschermd is, bijvoorbeeld door drie lagen bitumenstrips, zal de sensor de rekkingen in het asfalt niet goed meer overnemen.

2. Hoe betrouwbaar is de data verzameld met FBG-sensoren vergeleken met data verkregen middels de bestaande PQI-methodieken?

Kwantitatief gezien zijn de FBG-sensoren alleen vergeleken met data afkomstig van thermokoppels. De waardes afkomstig van de sensoren lopen bij hogere temperaturen vrij parallel met de waardes aangegeven door de thermokoppels. Bij lagere temperaturen gaan de FBG-waardes steeds meer onder de PQI-waardes liggen. Dit verschil in temperatuur hoeft niet per sé het gevolg te zijn van een mogelijke onnauwkeurigheid van de FBG-sensoren; het komt mogelijk doordat de lucht in het stalen buisje, waar zich de FBG-sensoren ook bevinden, in contact staat met de relatief koude buitenlucht. Niettemin, volgens de statistische tests (tweezijdige t-tests met gepaarde waarnemingen) moest de gestelde nulhypothese ($H_0: \mu_{FBG} - \mu_{PQI} = 0$) voor alle zes de metingen verworpen worden. Hoewel dit de indruk wekt dat de sensoren onbetrouwbaar zijn, kan er gezegd worden dat de temperaturen, in ieder geval bij hogere temperaturen, de werkelijke temperatuur op een heel goed mogelijke manier weergeven en dus op zijn minst een goede indicatie zijn van de warmte van het asfalt.

3. Hoe kunnen de met FBG-sensoren verkregen data gebruikt worden om een performance model te ontwikkelen?

De output van de FBG-sensoren blijken een geschikte input te zijn voor een performance model dat gebaseerd is op walsovergangen bij bepaalde temperaturen.

Doordat de sensoren een walsovergang visualiseerden als zijnde een piek in de optredende rek, kan er uitgezocht worden wat de temperatuur van het asfalt was ten tijde van die piek. Het aantal walsovergangen kan geteld worden en uiteindelijk kan er een score worden gegeven aan het verdichtingsproces.

4. Hoe kan de FBG-data gebruikt worden om voertuigbelastingen inzichtelijk te maken?

Het wordt mogelijk en relevant geacht om, op basis van de FBG-sensoren, de voertuigbelastingen inzichtelijk te maken in asfalt dat reeds verdicht en afgekoeld is.

Wanneer het wegdek middels een dwarsdoorsnede wordt geschematiseerd tot een op twee scharnieren opgelegde balk, dan kunnen een of twee op deze balk werkende puntlasten worden gelokaliseerd en worden gekwantificeerd met behulp van de FBG-sensoren. Het model dat hiervoor ontwikkeld is, wordt door de experimenten wel sterk in twijfel getrokken, aangezien de theoretisch berekende rek vele malen lager bleek te zijn dan de daadwerkelijk opgetreden en gemeten rek.

5. Wat zegt de verkregen FBG-data over de hoeveelheid verbruikte energie tijdens het asfalt-verdichtingsproces?

Doordat de sensoren het gehele afkoelingsproces in kaart kunnen brengen, en een goede indicatie kunnen geven van zowel de door de machines afgelegde afstand als een benadering van de snelheid waarmee die machines dat deden, kan er een onderbouwde uitspraak worden gedaan aangaande de hoeveelheid in het asfalteringsproces verbruikte energie.

Uiteindelijk kan er gesteld worden dat de temperatuurwaardes afkomstig van de FBG-sensoren wel betrouwbaar en robuust zijn, maar dat het de vraag is of ze net zo nauwkeurig zijn als de reeds door ASPARi gebruikte thermokoppels. Wat betreft de mechanische rek is de data voornamelijk niet nauwkeurig, betrouwbaar en robuust. Daarom concludeert de onderzoeker dat er nog een afstand zit tussen de theorie en de praktijk. Deze afstand is zodanig groot dat het volgens de onderzoeker niet haalbaar is om de sensoren op korte termijn al te gaan gebruiken in het asfaltverwerkingsproces.

Echter heeft het gebruik van FBG-sensoren nog altijd veel potentie, vooral wat betreft hun veelzijdigheid. Er dient alleen nog veel werk en onderzoek verricht te worden om het gat tussen de theorie en de praktijk te dichten.

9. Discussie

Over het algemeen geldt dat het mogelijk is om de flexibele fibers met sensoren in het asfalt te bevestigen op de gewenste positie en ze op die plek te laten zitten. Het is nog wel moeilijk om een geschikte beschermingsmethode te vinden, welke de reksensoren beschermt maar tegelijkertijd ook de spanningen in het asfalt overbrengt op de (sensor in de) fiber.

Wat betreft de temperatuur van het asfalt, geven de FBG-sensoren plausibele resultaten, die nog wel wat afwijken van thermokoppels. Op dit moment is de data afkomstig van de FBG's op zijn minst een goede indicatie van de temperatuur in het asfalt, maar het valt nog te bezien of dat ook geldt bij lagere temperaturen doordat de lucht in het stalen buisje mogelijk sneller afkoelt dan het asfalt daaromheen.

Om de FBG-sensoren data te laten genereren die bijna of net zo betrouwbaar is als de huidige methodieken, is er nog wat meer vervolgonderzoek nodig, bijvoorbeeld naar het afkoelingsgedrag van stalen buisjes in asfalt.

Doordat de sensoren wel geloofwaardige resultaten leveren qua temperatuur, is hun output bruikbaar voor performance modellen. Hetzelfde geldt voor modellen die het energieverbruik tijdens het proces berekenen.

Qua voertuigbelastingen lijkt het praktisch onmogelijk om de gemeten rek tijdens het asfalt-verdichtingsproces om te zetten naar voertuigbelastingen. Dit is het gevolg van de constant veranderende eigenschappen van het asfalt als gevolg van het afkoelen en verdichten. Na het afkoelen en verdichten zou dat wel mogelijk (en relevant) zijn. Er is een model ontwikkeld dat met de gemeten rek en via het momentverloop in een dwarsdoorsnede van het asfalt de positie en grootte van voertuigbelastingen zichtbaar maakt.

Echter is er op dit moment nog te weinig bekend over het (plastische) rekgedrag van een segment asfalt en hoe het asfalt deze rek overbrengt op de sensoren. Daardoor kan het voertuigbelastingenmodel dat gebaseerd is op de FBG-data nog niet in werking worden gesteld; wat het niet mogelijk maakt om te zeggen dat de gegevens afkomstig van de sensoren bruikbaar is voor dergelijke modellen.

10. Aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd bij welke aspecten aangaande de haalbaarheid van FBG-sensoren in het asfaltverwerkingsproces er nog een afstand zit tussen de theorie en de praktijk, en waarom deze kloof er wel of niet is. Ook worden enkele suggesties gegeven om dit gat te dichten in de toekomst.

In theorie hebben de FBG-sensoren veel potentie en zouden ze geschikt moeten zijn voor elk civiel-technisch kunstwerk, zoals is aangetoond in hoofdstukken 2 en 3. Doordat het is gelukt om zeven van de acht sensoren te positioneren op de gewenste positie onder een gebied met een oppervlakte van slechts 300 cm³, is de flexibiliteit van de optische vezels in dit onderzoek bevestigd. Dit positioneren kan bewerkstelligd worden door middel van *G4 - bitumen verhogingsblokken*. *G1 - los* (fiber op zijn plek houden door er eerst bultjes HMA op en onder te strooien) kan wellicht ook nog getest worden, dit is alleen met grind getest in fase 1. Mocht het zo zijn dat in HMA de fiber op die manier ook wel goed op zijn plek blijft liggen, dan kan er overwogen worden om geen gebruik meer te maken van bitumen verhogingsblokken; zo hebben deze geen mogelijke negatieve invloed meer op het asfalt en het bespaart tijd en geld aangezien bevestigingsmethode *G1* sneller is.

Vanuit de literatuur werd ook beweerd dat de glasvezels als nadeel hebben dat ze erg fragiel zijn. Ook dat is in dit onderzoek naar voren gekomen. De wijze van bescherming is een essentieel onderdeel van het werken met FBG-sensoren. In het onderzoek is het duidelijk geworden dat een stalen buisje voldoende bescherming biedt voor sensoren in dat buisje. Twee strips bitumenband (5 mm onder en 5 mm boven de sensor) en een dun composietplaatje zijn dat niet. Bij het kiezen van de beschermingswijze dient men naast de overlevingskansen van de fiber ook rekening te houden met de rekoverdracht.

Sensoren die in een stalen buisje lagen dat aan de uiteinden was verlijmd aan de fiber, werden geacht om geen mechanische rek waar te nemen. In de experimenten bleek dat sensoren in een stalen buisje wel rekkingen in het asfalt detecteerden. Daar is geen verklaring voor gevonden in dit onderzoek. De enige sensor die de wals passages had overleefd en niet in een stalen buisje lag, had de rekkingen in het asfalt wel waar moeten nemen, maar deed dat op den duur niet meer. Een verklaring is mogelijk dat deze sensor onder 15 mm bitumenband + een ander deel van de fiber lag, wat misschien te veel bescherming is geweest. Maar ook dit is niet met zekerheid te zeggen. Daarom dient er in de toekomst meer onderzoek te worden gedaan naar een beschermingswijze die de sensoren de gewenste hoeveelheid mechanische rek laat waarnemen uit het omringende asfalt.

In dat onderzoek, dat vrij technisch van aard zal zijn, is het wellicht ook relevant om de thermische eigenschappen van het stalen buisje te onderzoeken. Uit de experimenten bleek dat volgens de sensoren in het stalen buisje het asfalt sneller afkoelde dan volgens de thermokoppels die direct in het asfalt lagen. Het is op dit moment nog niet duidelijk of deze snellere afkoeling te wijten is aan de (on)nauwkeurigheid van de sensoren of aan de thermische eigenschappen van (de lucht in) het buisje. In een mogelijk experiment in dat onderzoek zouden thermokoppeldraden ook door een dergelijk stalen buisje geleid kunnen worden. In het uitgevoerde onderzoek is 'maar' een dagdeel uitgetrokken voor de kalibratie van de sensoren en zijn de kalibratiewaarden gebaseerd op relatief weinig data. Bij een mogelijk vervolgonderzoek doet de toekomstige onderzoeker er verstandig aan om een meer uitvoerige kalibratie uit te voeren, om zo veel mogelijk zekerheid in te bouwen.

Ook dient er in de toekomst een verbeterd rekenmodel te komen, dat de in het asfalt optredende rekkingen beter voorspelt dan het huidige rekenmodel. Dat verbeterde rekenmodel zal waarschijnlijk rekening moeten gaan houden met het eigen gewicht van het asfalt, alsmede de complexe vervormingseigenschappen van het asfalt. Een extra dimensie kan aan dit verbeterde model worden gegeven door het te laten rekenen aan spanningen en rekkingen in alle drie de dimensies, dus X, Y en Z. In dit model is Y (de as in de langsrichting van de weg) volledig genegeerd.

Tijdens het project constateerde de onderzoeker dat er in het verleden genoeg modellen zijn gemaakt die de toekomstige prestatie van het asfalt voorspellen, net als dat er genoeg onderzoek is gedaan naar de impact van het verdichten bij verschillende temperaturen van het asfalt. Echter zijn er niet of nauwelijks modellen beschikbaar die beide bovenstaande zaken met elkaar in verband brengen. Een toekomstig project is dan mogelijk om een performance model te maken van het asfalt, gebaseerd op de temperaturen waarbij dat asfalt verdicht is.

Om de het in hoofdstuk 7 ontwikkelde energieverbruikmodel optimaal te laten werken, is het raadzaam om kennis te hebben m.b.t. het brandstofverbruik van de machines die het asfalt verwerken en hun bijbehorend mechanisch rendement.

Verder wil de onderzoeker opmerken dat er in dit project weinig aandacht is geweest voor het financiële aspect van de sensoren. In de toekomst dient de vraag worden gesteld hoeveel sensoren er nodig zijn per aan te leggen wegdek. Hierbij is te denken aan een (maatschappelijke) kosten/baten-analyse. Ook zou er dan, in tegenstelling tot in dit onderzoek, een onderbouwde afweging kunnen worden gemaakt m.b.t. de meetfrequentie van de sensoren.

Ten slotte dient er het besef te zijn dat de FBG-sensoren, hoe succesvol ook geïnstalleerd en geïnterpreteerd, nooit alle conventionele (PQi-)technieken zullen gaan verdrijven. Zo zullen geboorde proefmonsters en nucleaire dichtheidsmetingen geschiktere instrumenten blijven om mechanistische eigenschappen van het asfalt te bepalen dan de via de FBG's verkregen mechanische rek, net zoals dat het geval is met infraroodcamera's ten aanzien van de oppervlaktetemperatuur.

11. Literatuurlijst

- 1) (CAP), C. A. o. P. (1998). CAP-INO Medal awarded to dr. Kenneth O. Hill [Press release]
- 2) Baldwin, C., Poloso, T., Chen, P., Niemczuk, J., Kiddy, J., & Ealy, C. (2001). Structural monitoring of composite marine piles using fiber optic sensors. *SPIE*, 4330.
- 3) Beer, M. D., & Fisher, C. (2002). Evaluation of non-uniform tyre contact stresses on thin asphalt pavements. *Response Models*, 1.
- 4) Bijleveld, F. R. (2015). *Professionalising the asphalt construction process: aligning information technologies, operators' knowledge and laboratory practices*.
- 5) Boskalis. (2016). *Zwick 4PB Stiffness Analysis_B40*.
- 6) Bragg, W. H., & Bragg, W. L. (1913). The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 88(605), 428-438.
- 7) Canning, J., Whelan, B. E., Peng, G., Brunton, M., Nosenzo, G., Kay, D., & Buys, H. (2012). Continuous monitoring of mining induced strain in a road pavement using fibre Bragg grating sensors. 8351, 83513I. doi:10.1117/12.921488
- 8) Chadbourn, B. A., Newcomb, D. E., Voller, V. R., Sombre, R. A. D., Luoma, J. A., & Timm, D. H. (1998). *An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions*.
- 9) Choquet, P., Juneau, F., & Dadoun, F. (1999). New generation of fiber-optic sensors for dam monitoring. *In Proceedings of the 1999 International Conference on Dam Safety and Monitoring*, 19-22.
- 10) Commuri, S., & Zaman, M. (2008). A novel neural network-based asphalt compaction analyzer. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(3), 177-188.
- 11) Culshaw, B., Michie, C., Gardiner, P., & McGown, A. (1996). Smart structures and applications in civil engineering. *IEEE*, 84, 78-86.
- 12) Decker, D. S. (2006) State-of-the-Practice for Cold-Weather Compaction of Hot-Mix Asphalt Pavements. *Vol. E-C105*. Washington DC: Transportation Research Board.
- 13) Dong, Z. J., Li, S. L., Wen, J. Y., & Chen, H. C. (2012). Asphalt Pavement Structural Health Monitoring Utilizing FBG Sensors. *Advanced Engineering Forum*, 5, 339-344. doi:10.4028/www.scientific.net/AEF.5.339
- 14) Doorewaard, H., & Verschuren, P. (2015). Flitscolleges - het ontwerpen van een onderzoek. Verkregen via <http://www.hetontwerpenvaneenonderzoek.nl/flitscolleges> (Website bezocht op 04/04/2016)
- 15) Doree, A. G., Bijleveld, F. R., Miller, S. R., Beuving, E., Dewez, P., Malkoc, G., & Southern, M. . (2012). Paving below zero centigrade-how a project exposed two different approaches to innovation. *In 5th Eurasphalt and Eurobitume Congress, Istanbul, Turkey*, 13-15.
- 16) Dorée, A. G., Miller, S. R., & Ter Huerne, H. L. (2008). Asphalt, wat bakken we ervan? *In Workshop proceedings. Department of Civil Engineering and Management, University of Twente, Enschede*.
- 17) Dorée, A. G., & ter Huerne, H. L. (2005). Development of Tools and Models for the Improvement of Asphalt Paving Process. *In Workshop proceedings. Department of Civil Engineering and Management, University of Twente, Enschede*.
- 18) Eshalas Infra Solutions BV. (2015). Productblad Eshalas AB. Groningen.
- 19) Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., & Kawasaki, B. S. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 32(10), 647. doi:10.1063/1.89881
- 20) Hill, K. O., & Meltz, G. (1997). Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *Journal of Lightwave Technology*, 15.
- 21) Iwaki, Yamakawa, & Mita. (2001). Health Monitoring System Using FBG-Based Sensors for a 12-Story Building with Column Dampers. *SPIE*, 4330.
- 22) Jian-Neng Wang, J.-L. T. (2008). Optical fiber grating-based sensing system for use in pavement health monitoring. *SPIE*, 6932.

- 23) Jian-Neng Wang, J.-L. T., Hsiang-Ping Chang. (2006). Fiber Bragg grating sensors for use in pavement structural strain-temperature monitoring. *SPIE*, 6174.
- 24) Kashyap, R. (1999). *Fiber Bragg Gratings*: Academic Press.
- 25) Kersey, A. D. (1996). *A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology*.
- 26) Kreuzer, M. (2006). Strain measurement with fiber Bragg grating sensors. In G. HBM: Darmstadt (Deutschland).
- 27) Kwon, I. B., Kim, C. Y., & Choi, M. Y. (2002). Continuous measurement of temperature distributed on a building construction. *Smart Structures and Materials*, 283.
- 28) Li, C., Zhao, Y. G., Liu, H., Zhang, Z. L., Wan, Z., Chen, Y., ... & Xu, J. C. (2010). Combined interrogation using an encapsulated FBG sensor and a distributed Brillouin tight buffered fiber sensor in a tunnel. *Structural Health Monitoring*, 9(4), 341-346.
- 29) Li, H.-N., Li, D.-S., & Song, G.-B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, 26(11), 1647-1657. doi:10.1016/j.engstruct.2004.05.018
- 30) Lytton, R. L., Uzan, J., Fernando, E. G., Roque, R., Hiltunen, D., & Stoffels, S. M. (1993). *Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes*.
- 31) Maher, M. H., Tabrizi, K., Prohaska, J. D., & Snitzer, E. (1996). Fiber Bragg Gratings for Civil Engineering Applications. *SPIE*, 2682.
- 32) McClave, J. T., Benson, P. G., Knypstra, S., & Sincich, T. (2011). *Statistiek, een inleiding*. Amsterdam: Pearson Benelux B.V.
- 33) Meltz, G., Morey, W. W., & Glenn, W. H. (1989). Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, 14.
- 34) Miller, S. R. (2010). *Hot Mix Asphalt Construction - Towards a More Professional Approach*.
- 35) Pearson. (2012). *Deterioration and Maintenance of Pavements*. London: ICE Publishing.
- 36) Rijkswaterstaat. (2016). Economisch Meest Voordelige Inschrijving (EMVI). Verkregen via <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/zakendoen-met-rijkswaterstaat/inkoopbeleid/aanbesteden/economische-meest-voordelige-inschrijving.aspx> (Website bezocht op 14/04/2016)
- 37) Schwartz, C. W., Khan, J. S., Pfeiffer, G. H., & Mustafa, E. (2014). Radio Frequency Identification Applications in Pavements No. *FHWA-HRT-14-061*.
- 38) Tang, J. L., & Wang, J. N. (2010). Error analysis and measurement uncertainty for a fiber grating strain-temperature sensor. *Sensors (Basel)*, 10(7), 6582-6593. doi:10.3390/s100706582
- 39) Ter Huerne, H. L. (2004). *Compaction of asphalt road pavements: using finite elements and critical state theory*.
- 40) Thom, N. (2013). *Principles of Pavement Engineering*. Nottingham: ICE Publishing.
- 41) Timm, D. H., Voller, V. R., Lee, E.-b., & Harvey, J. (2001). Calcool: A multi-layer Asphalt Pavement Cooling Tool for Temperature Prediction During Construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 2(3), 169-185. doi:10.1080/10298430108901725
- 42) Udd, E., Kunzler, M., Laylor, M., Schulz, W., Kreger, S., Coronas, J., ... Edgar, R. (2001). Fiber Grating Systems for Traffic Monitoring. *SPIE*, 4337.
- 43) Vasenev, A. N. (2015). *Visualizing asphalt roller trajectories in context: acquiring, processing, and representing sensor readings*.
- 44) Vohra, S., Johnson, G., Michael, T. O. D. D., Danver, B., & Althouse, B. (2000). Distributed strain monitoring with arrays of fiber Bragg grating sensors on an in-construction steel box-girder bridge. *IEICE*, 83(3), 454-461.
- 45) Wang, J.-N., & Tang, J.-L. (2005). Part 4: Fiber-Optic Sensor and Three-Dimensional Data Applications in Transportation: Using Fiber Bragg Grating Sensors to Monitor Pavement Structures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1913, 164-176. doi:10.3141/1913-16

- 46) Weng, X., Zhu, H. H., Chen, J., Liang, D., Shi, B., & Zhang, C. C. (2014). Experimental investigation of pavement behavior after embankment widening using a fiber optic sensor network. *Structural Health Monitoring*, 14(1), 46-56. doi:10.1177/1475921714548935
- 47) Xu, D.-S. (2014). *Development of two optical fiber sensing technologies and applications in monitoring geotechnical structures*, PhD-thesis.
- 48) Yin, J. H., Zhu, H. H., Jin, W., Yeung, A. T., & Mak, L. M. (2007). Performance evaluation of electrical strain gauges and optical fiber sensors in field soil nail pullout tests. *The HKIE Geotechnical Division Annual Seminar, 2007*, 249-254.
- 49) Zhou, Z., Liu, W., Huang, Y., Wang, H., Jianping, H., Huang, M., & Jinping, O. (2012). Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 36-49. doi:10.1016/j.ymssp.2011.10.003
- 50) Zhu, H. (2009). *Fiber optic monitoring and performance evaluation of geotechnical structures*

Bijlage 1 – Experimenten fase 1

Doel experimenten

- I. Bepalen of de fiber in de gekozen bescherming en de losse fiber, heel blijven.
- II. Bepalen of het verdichtingsproces van invloed is op de temperatuursensor.
- III. Bepalen welke bevestigingsmethode het meest praktisch en tijdsefficiënt is.
- IV. Bepalen welke bevestigingsmethode tot de geringste verplaatsing van de fiber leidt.
- V. Bepalen welke bevestigingsmethode het geringste effect op de metingen van de fiber leidt. (G1 = referentie)
- VI. Valideren of de FBG-sensor een betrouwbaar lijkende meting geeft, vergeleken met metingen middels een IR-camera en een RFID-sensor.
- VII. Bepalen hoever het aggregaat doordringt in de bitumenband, dus bepalen of bitumenband een geschikte bescherming blijkt te zijn voor een reksensor.

Hypotheses experimenten

- I. De verwachting is dat de fiber in het teflon buisje (gekozen bescherming) heel blijft, na het verdichten. Er wordt vanuit gegaan dat de fiber die los in de grindlaag ligt, de meeste experimenten waarbij het verdichten wordt gesimuleerd niet overleeft.
- II. Het verdichtingsproces zal niet van invloed zijn op de respons van de sensor. De fiber ligt immers los in het beschermingsbuisje. Wanneer de fiber een belasting ondervindt, zal deze onmiddellijk gaan verplaatsen en zal de optredende spanning en dus mechanische rek, nihil zijn.
- III. Bij voorbaat is dit uiteraard G1, omdat er daar geen extra materialen in de grindlaag worden aangebracht. Afgezien van G1, komt dan G2 het beste naar voren in de ogen van de onderzoeker. Dit omdat er per kroonsteen slechts twee kleine boutjes iets moeten worden aangedraaid.
- IV. In fase 1 is de verwachting dat de fiber niet veel zal verplaatsen, ongeacht de methode van bevestiging. Dit komt omdat de te overbruggen afstand niet heel groot is. (afmetingen mal = 500 mm bij 500 mm) Zou die afstand worden vergroot naar enkele meters, dan lijkt G5 – *opstaande bouten* – het beste uit de verf te komen.
- V. Aangezien G1 hier niet wordt meegenomen omdat het als ‘nulmeting’ fungeert, schijnt het volgens de onderzoeker dat G3 – *gespannen nylondraad* – hier het minste invloed op de metingen heeft, aangezien de kabel daar heel los opligt en het contactoppervlak tussen de kabel en de bevestigingsmateriaal minimaal is. Het dient hier echter wel opgemerkt te worden dat dit alleen geldt m.b.t. temperatuurmetingen, aangezien de verwachting is dat de nylondraden de mechanische rek over zullen nemen waardoor dit de metingen later kan verstoren.
- VI. Wanneer het asfalt wordt opgewarmd, meten de FBG- en de RFID-sensor een verhoging van de temperatuur op een later tijdstip dan de IR-camera. Dit komt omdat de IR-camera de temperatuur van het oppervlak van de laag meet, en niet het midden van de laag zoals de RFID- en de FBG-sensor.
De gedachte is dat de FBG zowel **later** als **lager** de temperatuur weergeeft van het omringende materiaal ten opzichte van de RFID-sensor, aangezien de warmte bij de fiber eerst nog moet doordringen door een buis dat andere en naar verwachting meer isolerende materiaaleigenschappen heeft dan de bitumen die om de RFID-chip heen zit.
- VII. Het grind met steengroottes variërend van 2 tot 5 mm zal maximaal 2,5 mm doordringen in het bitumenband, waarbij wordt aangenomen dat een steentje uiterlijk tot de helft van zijn grootte zal doordringen in een andersoortige laag.

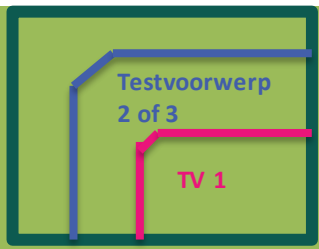
Testvoorwerpen:

1. **Fiber zonder connector, bescherming en bevestiging | 5* | 0,75 meter p.s.**
2. **Dummyfiber in een teflonbuisje | 1* | connector aan 1 uiteinde | 0,75 meter p.s.**
3. **Fiber met FBG-sensor in een teflonbuisje | 1* | connector aan 1 uiteinde | 0,75 meter p.s.**

Te testen bevestigingsmaterialen:

- 1) Los. (Op een laag grind/koudasfalt met laagdikte 40 mm.

$$= \frac{1}{2} * \text{hoogte mal}$$
)
- 2) Kroonsteentjes op een laag grind met laagdikte 40 mm.
- 3) Nyldraad, gespannen op een hoogte van 40 mm.
- 4) Blokjes bitumenband van 40 mm hoog.
- 5) Opstaande bouten. Deze worden met behulp van rampamoeren in de bodem van de mal bevestigd. Met andere moeren op de bout kon de gewenste hoogte van 40 mm handmatig worden bereikt en eventueel worden bijgesteld.



Experiment #	Materiaal	Fiber	Bevestiging
G1a	Grind	Dummy + Losse	Geen, bovenop onderlaag
G1b	Grind	FBG	Geen, bovenop onderlaag
G2a	Grind	Dummy + Losse	Kroonstrips
G2b	Grind	FBG	Kroonstrips
G3a	Grind	Dummy + Losse	Gespannen nyldraad
G3b	Grind	FBG	Gespannen nyldraad
G4a	Grind	Dummy + Losse	Bitumen verhogingsblok
G4b	Grind	FBG	Bitumen verhogingsblok
G5a	Grind	Dummy + Losse	Bouten
G5b	Grind	FBG	Bouten
K1a	Koudasfalt	Dummy	Geen, bovenop onderlaag
K1b	Koudasfalt	FBG	Geen, bovenop onderlaag
K2a	Koudasfalt	Dummy	< Meest geschikte >
K2b	Koudasfalt	FBG	< Meest geschikte >

Werkwijze (representatief voor alle experimenten in Fase 1)

- Mal prepareren en bevestigingsmaterialen aanbrengen
- Buisje door de mal en bevestigingsmateriaal (met evt. onderlaag) geleiden
- Losse fiber halverwege de laag leggen
- Mal aanvullen met grind
- Fiber door het buisje rijgen
- Dikte laag en diepte fiber opmeten
- Verdichten met handroller
- Dikte laag en diepte fiber opmeten
- Checken gezondheid fiber
- (Opwarmen mengsel en respons fiber checken)
- Bovenste laag grind eruithalen tot fiber blootligt (en gezondheid losse, kale fiber checken)
- Beoordelen hoe grind zich rondom fiber heeft gepositioneerd
- Opmeten horizontale verplaatsing
- Fiber eruithalen
- Rest van het grind eruithalen, tezamen met het buisje en de kale fiber.



Het plan was eerst om elke bevestigingsmethode twee keer in grind te testen; de eerste keer met een dummyfiber en de tweede keer met een fiber met sensoren. Bij de tweede keer zou dan het grind verhit worden met een verfblander, om zo het effect op de temperatuursensoren te bekijken. Zo kon dan bepaald worden wat het effect was van de betreffende bevestigingsmethode op het verloop van de temperatuurregistratie, waarbij dat vergeleken werd met de oppervlaktetemperatuur gemeten door een IR-camera.

Na het uitvoeren van Experiment G1b werd echter duidelijk dat het erg veel tijd kostte om een dergelijke meting op te zetten en uit te voeren. Verder werd tijdens het uitvoeren van G1b ook duidelijk dat het een tijd duurde voordat de sensor middenin de grindlaag een temperatuurstijging registreerde, terwijl de oppervlaktetemperatuur op dat moment al boven de 200 graden Celsius was. Bij afwezigheid van extra bevestigingsmaterialen was deze vertraging dus in zijn geheel te wijten aan de isolerende materiaaleigenschappen van een grindlaag van 40 mm. De verwachting was daarna dat bij toekomstige experimenten de extra bevestigingsmaterialen een marginale invloed zouden hebben op de vertraging in het meten van de temperatuur. Aangezien de eigenschappen van het verdichte grind niet tot het onderwerp van het onderzoek behoren, heeft de onderzoeker besloten om de tests waarbij de grindmengsels werden verhit, niet uit te voeren. (G2b, G3b, G4b en G5b)

Criteria geschiktheid bevestigingsmethodes (beoordeling is cijfer tussen 0 en 10)

- Economisch, gewicht 5%

Hier wordt gekeken hoeveel geld het kost om de bevestigingsmaterialen aan te schaffen. Omdat het in combinatie met het sensorsysteem relatief weinig kost, is het belang dat aan dit criterium wordt gehecht ook laag gehouden. Hoe hoger de kostprijs, des te lager de beoordeling.

- Robuustheid, gewicht 10%

Of de bevestigingsmaterialen zelf ook belastingen kunnen verduren en in welke mate, is eveneens van belang. Omdat de bevestigingsmaterialen zelf wel plastisch vervormd mogen zijn na het verdichten, is het gewicht van dit aspect nog relatief laag.

- Installatiegemak, gewicht 20%

De arbeid die nodig is om de sensoren aan te brengen is evenredig met de gemaakte kosten. En het asfaltverdichtingsproces dient uiteraard zo weinig mogelijk verstoord te worden door het aanbrengen van de FBG's. Om deze redenen is het gewicht dat aan dit criterium wordt gehangen, relatief hoog.

- Invloed op positievastheid fiber, gewicht 15%

Het voornaamste nut van de bevestigingsmaterialen is dat ze de fiber op de gewenste plek houden en dat de fiber later makkelijk kan worden gelokaliseerd. Echter is de verwachting dat door het verdichten de fiber in ieder geval iets gaat verschuiven, ongeacht de wijze van bevestiging. Hierdoor blijft achteraf opmeten noodzakelijk en hierdoor is de toegekende waarde op dit punt wel hoog, maar niet extreem hoog.

- Invloed op asfalt, gewicht 15%

Het omringende asfalt mag in sterkte niet afnemen door het aanbrengen van extra materialen. Hoe hoger de invloed op het omringende asfalt, des te lager de beoordeling

- Invloed op metingen sensor, gewicht 20%

De bevestigingsmaterialen moeten de procesparameters - temperatuur en mechanische rek - van het omringende asfalt zo weinig mogelijk beïnvloeden. Wanneer de sensor de materiaaleigenschappen van het bevestigingsmateriaal zou registreren, zou de sensor zijn doel compleet voorbijschieten, vandaar het hoge percentage dat toegekend wordt aan dit criterium. Hoe hoger de invloed, des te lager de beoordeling. (Omdat is afgezien van de experimenten G2b, G3b, G4b en G5b, is dit een meer hypothetische waarde waardoor deze 'uitgevinkt' zou kunnen worden.)

- Reproduceerbaarheid in veldtesten, gewicht 15%

Testen op een klein oppervlak waarbij het makkelijk is om de bevestigingsmaterialen aan de zijkanten van de mal aan te brengen, is anders dan wanneer het gebeurt op een plek waar de geldende afstanden eerder in de tientallen meters liggen

Verder zijn er nog twee criteria die niet direct worden meegenomen, maar in theorie wel van doorslaggevend belang kunnen zijn. Dit zijn duurzaamheid (impact op milieu) en veelzijdigheid (*one size fits all* vs. op maat gemaakte bevestigingsmaterialen).

Afmetingen materialen:

Gewicht gazonrol, gevuld met water: 49 kg.
Daarbovenop komt nog een deel van het gewicht van de persoon die de gazonrol gebruikt. Breedte gazonrol: 49,5 cm. De binnenmaten van de malen:
Lengte*breedte*hoogte mal 1: 511*511*77 mm³.
Lengte*breedte*hoogte mal 2: 514*513*77 mm³.
Lengte*breedte*hoogte mal 3: 512*510*78 mm³.
Lengte*breedte*hoogte mal 4: 511*510*79 mm³.
De cijfers in de figuur rechts staan voor de punten waarop de laagdikte (1-5) of fiberpositie (6-8) wordt bepaald. (d.m.v. een schuifmaat)

Kroonsteentje: $l*b*h = 9*23*18 \text{ mm}^3$.

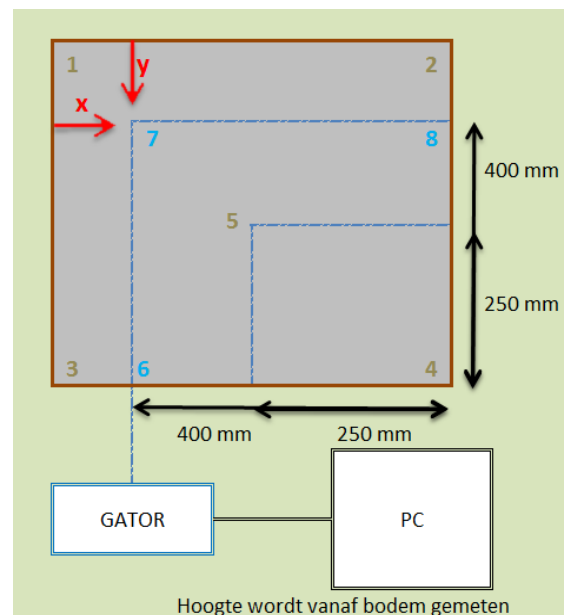
Nylondraad: $\varnothing 1,5 \text{ mm}$.

Bitumenband: 6mm dik en 35mm breed.

Bouten: M6 * 100 mm.

Korrelgrootte grind: 2-5 mm.

Korrelgrootte koudasfalt: 0-4 mm.



Bevindingen m.b.t. bevestiging:

MAL 1	G1a			G1b			G2a			G3a			G4a			G5a		
Positie	Voor	Na	Δz	Voor	Na	Δz	Voor	Na	Δz	Voor	Na	Δz	Voor	Na	Δz	Voor	Na	Δz
1	84	77	7	83	76	7	82	75	7	82	77	5	83	76	7	85	70	15
2	84	77	7	83	76	7	82	76	6	82	77	5	83	76	7	85	70	15
3	83	78	5	82	76	6	81	78	3	82	79	3	81	77	4	85	85	0
4	84	78	6	83	81	2	81	78	3	82	79	3	81	79	2	85	85	0
5	85	77	8	90	75	15	82	70	12	86	75	11	85	71	14	87	71	16
gem1:5	84	77,4	6,6	84,2	76,8	7,4	81,6	75,4	6,2	82,8	77,4	5,4	82,6	75,8	6,8	85,4	76,2	9,2
ΔVol	1650000	mm^3		1850000	mm^3		1550000	mm^3		1350000	mm^3		1700000	mm^3		2300000	mm^3	
ΔVol	1,65	dm^3		1,85	dm^3		1,55	dm^3		1,35	dm^3		1,7	dm^3		2,3	dm^3	
ΔVol	1,65	Liter		1,85	Liter		1,55	Liter		1,35	Liter		1,7	Liter		2,3	Liter	
vert. 6	40	40	0	40	40	0	40	40	0	40	40	0	40	40	0	40	40	0
x 6	11,5	11,5	0	11,5	11,5	0	11,5	11,5	0	11,5	11,5	0	11,5	11,5	0	11,5	11,5	0
vert. 7	52	69	-17	33	42	-9	35	38	-3	39	37	2	32	32	0	36	36	0
x 7	14,5	13,5	1	12,2	12,2	0	12	15,5	-3,5	13,7	13,7	0	12,7	12,7	0	13	13	0
y 7	14,5	15,5	-1	12,4	12,5	-0,1	11	9,5	1,5	11,7	11,7	0	12,7	12,7	0	11	11	0
vert. 8	35	35	0	35	35	0	35	35	0	35	35	0	35	35	0	35	35	0
y 8	10,5	10,5	0	10,5	10,5	0	10,5	10,5	0	10,5	10,5	0	10,5	10,5	0	10,5	10,5	0
Intact?	dummy	fiber	ja	sensor	ja		dummy	fiber	ja	dummy	fiber	ja	dummy	fiber	ja	dummy	fiber	ja
	kale	fiber	ja				kale	fiber	nee	kale	fiber	ja	kale	fiber	ja	kale	fiber	nee

In bovenstaande tabel staan beknopt de verschuivingen ter hoogte van de verschillende posities weergegeven. Per experiment staat onder 'Voor' de positie/laagdikte voordat er werd verdicht, onder 'Na' is de positie/laagdikte weergegeven na afloop van het verdichten, waarna er bij 'Δz' de zakking wordt weergegeven. Aangenomen wordt dat de gemiddelde dikte van de laag gelijk is aan de gemiddelde dikte van de laag op de vijf meetposities.

Bij G1 - los viel het op dat het fiberbuisje omhoogkwam als gevolg van het verdichten. Daarom scoort G1 zeer laag op het criterium 'positievastheid'. Deze (negatieve) zakking is zoals verwacht tegengegaan door het aanbrengen van de bevestigingsmaterialen, vooral de blokken bitumenband en de bouten scoorden goed op de positievastheid van de fiber. Verder kan er over G1 gezegd worden dat het weinig kostte om te installeren, zowel qua geld als tijd. Ook had het vanzelfsprekend geen extra invloed op het omringende materiaal, dus op al deze punten scoorde deze bevestigingsmethode wel hoog.



G2 – *kroonsteentjes* bleek een simpele maar effectieve manier te zijn om het buisje op zijn positie te laten blijven, al is het nog niet heel robuust. Doordat ze zo weinig ruimte innemen, hebben ze weinig invloed op het omringende asfalt en de metingen. Er moest wel op gelet worden dat de boutjes in de kroonsteentjes niet te strak worden aangedraaid, anders kan de fiber er niet doorheen geregen worden, of zelfs breken wanneer de fiber al in het buisje zit. Mocht er later getest worden met een zwaardere en grotere buis om de fiber, dan kunnen ook buisklemmen of drukzadels gebruikt worden, dat berust op hetzelfde principe.





Het gespannen nylondraad bij G3 hield de buis vrij goed op zijn plek. Wanneer het draad eenmaal gespannen was, hield het de vezelbuis prima op zijn plek, dus het geheel bleek zeker robuust. Echter duurde het zeker wel een kwartier voordat het draad eenmaal strak stond gespannen in de mal. Om deze reden scoort G3 laag op 'installatiegemak'. Wat misschien wel het grootste manco is van deze bevestigingsmethode is dat deze draden zeer waarschijnlijk de rekkingen in het asfalt gaan overnemen, waardoor de metingen niet meer zo betrouwbaar zijn. Verder is het ook lastig om dit *grid* aan te brengen in een groot wegooppervlak. Vanwege deze nadelen komt G3 – *draad* dan als slechtste uit de MCA-test. G5 – *bouten* had deze nadelen ook wel, maar in een iets mindere mate. Het duurde echter langer om alle bouten in de bodem van de mal te installeren, en de aanschaf van die materialen was ook vele malen duurder. Op het criterium 'positievastheid' kwam G5 wel als beste uit de test; eenmaal bevestigd ging het vezelbuisje geen kant meer op. Hierdoor kwam de eindbeoordeling van G5 uit op bovenmatig.



Verlicht asfalteren Over de haalbaarheid van FBG-sensoren in het asfaltverwerkingsproces



Criterium	Weging	G1 - los		G2 - kroonsteen		G3 - draad		G4 - bitumenband		G5 - bouten	
Economisch	0,05	10	0,5	8	0,4	7	0,35	7	0,35	4	0,2
Robuustheid	0,10	4	0,4	5	0,5	7	0,7	8	0,8	9	0,9
Installatiegemak	0,20	9	1,8	8	1,6	5	1	8	1,6	4	0,8
Invloed op positievastheid fiber	0,15	2	0,3	6	0,9	8	1,2	9	1,35	10	1,5
Invloed op asfalt	0,15	9	1,35	8	1,2	4	0,6	7	1,05	5	0,75
Invloed op metingen sensor	0,20	10	2	9	1,8	4	0,8	8	1,6	7	1,4
Reproduceerbaar in veldtesten	0,15	7	1,05	7	1,05	4	0,6	8	1,2	4	0,6
Totaal	1	7,4		7,45		5,25		7,95		6,15	

In bovenstaande tabel zijn gewichten gekozen die de onderzoeker geschikt achtte. Omdat men hierover van mening kan verschillen, is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd m.b.t. de gewichten. Voor de scores is geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd aangezien de onderzoeker zich in de beste positie bevindt om dat te beoordelen. Zo bleven de scores gedurende de gevoeligheidsanalyse gelijk. De criteria *duurzaamheid* en *veelzijdigheid* werden hierin beschouwd als onderdeel uitmakend van het criterium *economisch*.

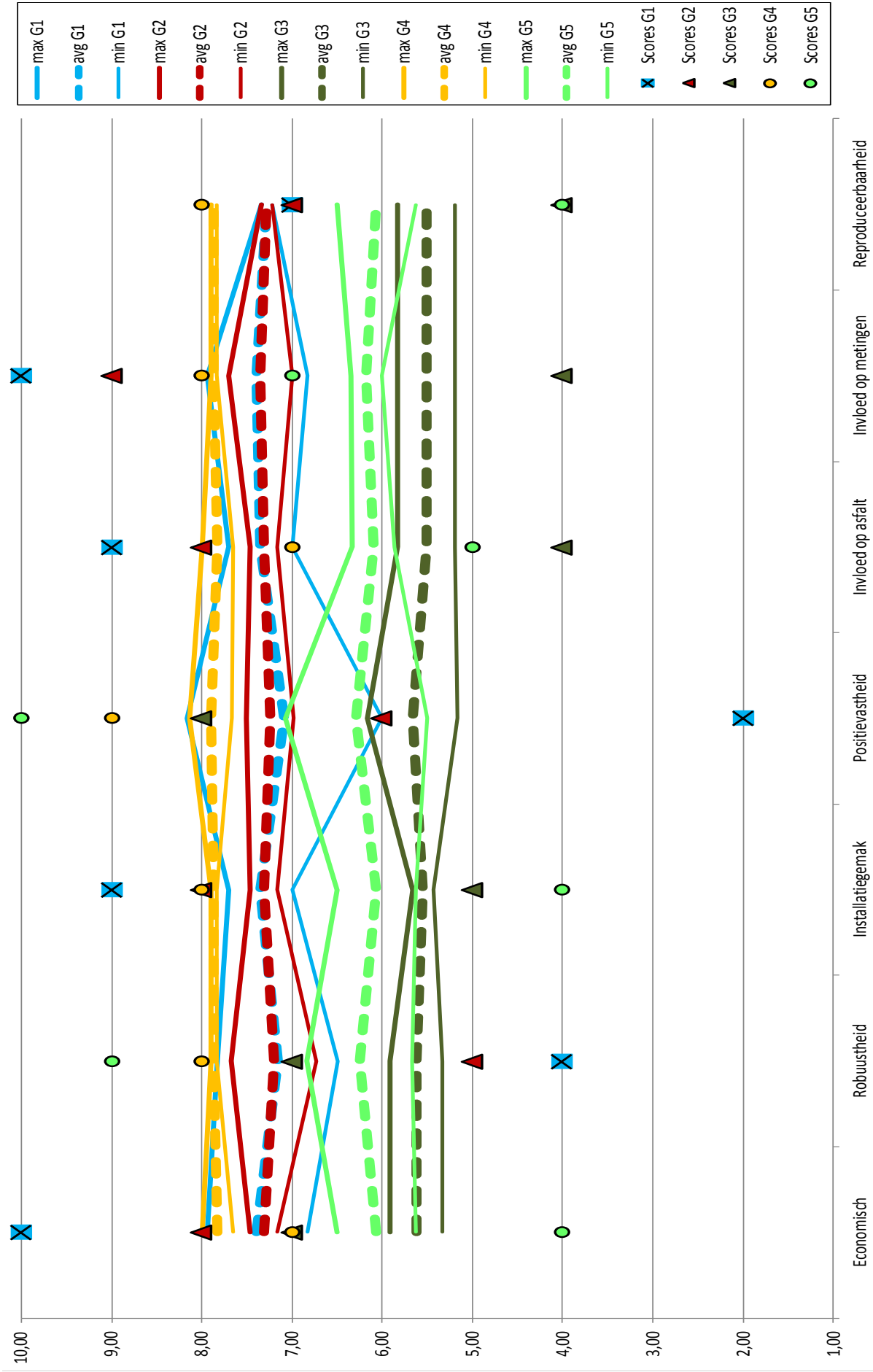
Voor elk criterium werd elk gewicht gevarieerd van 0 tot en met 0.35 (=35%), met tussenstappen van 0.05. Elk criterium werd afzonderlijk gevarieerd; de resterende criteria kregen elk een gelijk gewicht toegekend, namelijk het overgebleven gewicht gedeeld door zes. Wanneer het gewicht 0 werd gehangen aan het op dat moment beschouwde criterium, kreeg elk ander criterium $(1-0)/6 = 0.167$ als gewicht. Wanneer gewicht 0.35 werd gehecht aan het beschouwde criterium, kreeg elk ander criterium dus $(1-0.35)/6 = 0.108$ als gewicht toegekend.

Op de volgende pagina staat de uit de gevoeligheidsanalyse voortvloeiende grafiek weergegeven. Elke bevestigingsmethode heeft zijn eigen kleur. Per kleur en dus bevestigingsmethode worden vier gegevens weerspiegeld: Een maximale totaalscore (dus op basis van alle zeven criteria) bij een bepaald toegekend gewicht aan dat criterium [bovenste lijn]; een minimale totaalscore bij een bepaald toegekend gewicht aan dat criterium [onderste lijn]; de gemiddelde totaalscore daartussen [dikke streep] en ten slotte de van de andere criteria losstaande score voor het beschouwde criterium [markers in de grafiek]. Wanneer de score-marker zich boven de streep van dezelfde kleur bevindt, correspondeert de maximale totaalscore bij dat criterium met een gewicht van 0.35, maar wanneer de score-marker onder de streep ligt, correspondeert de maximale totaalscore met een aan dat criterium toegekend gewicht van 0.

Wanneer er gelet wordt op de gemiddelde totaalscores van elk criterium is het te zien dat G3 en G5 matig uit de gevoeligheidsanalyse komen. G1 en G2 doen het beter, maar G4 blijkt het 'sterkst' uit de gevoeligheidsanalyse te komen. Dit is te verklaren doordat G4 – *bitumenband* op elk criterium een ruim voldoende score heeft gekregen, zonder al te veel uitschieters, naar boven of naar onderen.

Alleen wanneer het criterium *positievastheid* als volkomen irrelevant wordt geacht, of wanneer de *invloed op metingen* als meest essentieel wordt beschouwd (toegekende score hiervoor is nog hypothetisch), alleen dan heeft G1 – *los* een iets grotere totaalscore dan G4.

Als gevolg van deze met een gevoeligheidsanalyse gecombineerde multi-criteria analyse wordt geconcludeerd dat G4 – *bitumenband* als meest geschikte bevestigingsmethode is bevonden.



Bevindingen m.b.t. metingen

MAL 1 K1a - los				MAL 2 K1b - los				MAL 3 K2a - bitumenband				MAL 4 K2b - bitumenband			
Positie	Voor	Na	Δz	Positie	Voor	Na	Δz	Positie	Voor	Na	Δz	Positie	Voor	Na	Δz
1	90		90	1	90		90	1	90		90	1	100		##
2	90		90	2	88		88	2	90		90	2	95		95
3	85		85	3	85		85	3	90		90	3	95		95
4	85		85	4	85		85	4	95		95	4	100		##
5	90		90	5	93		93	5	100		100	5	105		##
gem1:5	88	#DIV/0!	88	gem1:5	88,2	#DIV/0!	88,2	gem1:5	93	#DIV/0!	93	gem1:5	99	#DIV/0!	99
ΔVol	2,2E+07	mm^3		ΔVol	2,2E+07	mm^3		ΔVol	2,3E+07	mm^3		ΔVol	2,5E+07	mm^3	
ΔVol	22	dm^3		ΔVol	22,05	dm^3		ΔVol	23,25	dm^3		ΔVol	24,75	dm^3	
ΔVol	22	Liter		ΔVol	22,05	Liter		ΔVol	23,25	Liter		ΔVol	24,75	Liter	
vert. 6	40	40	0	vert. 6	39	39	0	vert. 6	38	38	0	vert. 6	39	39	0
x 6	11,5	11,5	0	x 6	11,3	11,3	0	x 6	10,8	10,8	0	x 6	11,4	11,4	0
vert. 7	45		45	vert. 7	40		40	vert. 7	37		37	vert. 7	34		34
x 7	12		12	x 7	12		12	x 7	11,3		11,3	x 7	10,9		11
y 7	18		18	y 7	18		18	y 7	15,5		15,5	y 7	17,5		18
vert. 8	35	35	0	vert. 8	36	36	0	vert. 8	40	40	0	vert. 8	36	36	0
y 8	10,5	10,5	0	y 8	11,2	11,2	0	y 8	11,6	11,6	0	y 8	11,7	11,7	0
heel?	dummy	fiber	ja	heel?	sensor	ja		heel?	dummy	fiber	ja	heel?	sensor	ja	
					kale fiber								kale fiber		

Na een paar weken uitharden bleek dat de platen koudasfalt nog steeds niet helemaal waren uitgehard. Daardoor was het niet mogelijk om de locatie te bepalen van de sensoren. Die locaties zouden anders worden ingevuld op de gele plekken in bovenstaande tabel.

Bij de experimenten waar zich sensoren in de mal bevonden, werd er tijdens het verdichten met de roller geen rek gedetecteerd door het programma. Dit is in overeenstemming met de hypothese en komt omdat de fiber los in het buisje zat en daardoor vrij kon bewegen. Het zou alleen gaan rekken in geval van temperatuurveranderingen.

In fase 1 zijn er drie metingen uitgevoerd. De eerste keer (G1b) met de vier FBG-sensoren en de IR-camera, en bij de laatste twee tests kwam daar een RFID-chip bij. Deze RFID-chip werd op dezelfde hoogte en vlak naast de sensoren gelegd. In onderstaande tabel staan de tijdstippen waarop enkele gebeurtenissen optraden, weergegeven. De metingen en de verhitting startten op t = 0 seconden.

Tijd in seconden	Temperatuurstijging IR-camera na	Temperatuurstijging RFID-chip na	Temperatuurstijging FBG-sensor na	Duur verhitting	Duur meting	Screenshot op tijdstip
G1b	15	-	90	120	300	270
K1b	15	Niet	90	120	300	Niet
K2b	20	420	540	600	900	600

Duidelijk wordt dat de temperatuur binnenin de laag grind/koudasfalt veel later stijgt dan aan het oppervlak. Bovenstaande gegevens zijn te beperkt om de basis te vormen voor een statistische analyse. Meer uitvoerige en gedetailleerde testen vinden dan ook plaats in fase 2.

Conclusies fase 1:

- I. De fibers blijven met de bescherming in de vorm van een teflon buisje intact tijdens het verdichten, dat geschiedde met een lineaire belasting van ca. 1,6 kN/m. Uit het breken van de kale fibers blijkt de noodzaak tot een beschermingsmateriaal.
- II. De sensoren registreerden geen rek tijdens het verdichten. Dit is in lijn met de hypothese.
- III. Wanneer G1 – *los* buiten beschouwing wordt gelaten, zijn G2 – *kroonsteentjes* en G4 – *bitumenband* het makkelijkst te installeren. Bovendien is G4 een universele bevestigingsmethode; het past altijd, ongeacht de dikte van de buis.
- IV. G4 – *bitumenband* en G5 – *bouten* leiden tot de geringste verplaatsing van de fiber en buis.
- V. Doordat is afgezien van de testen G2b, G3b, G4b en G5b kan geen onderbouwde uitspraak worden gedaan over welke bevestigingsmethode het minste invloed heeft op de metingen van de FBG-sensoren. De randvoorwaarde dat de bevestigingsmaterialen geen invloed mogen hebben op de sensoren, blijft bestaan.
- VI. Op dit moment is er nog te weinig referentie om te bepalen of de FBG-sensoren betrouwbare en nauwkeurige waardes geven, vergeleken met de gegevens vanuit de IR-camera en RFID-sensoren.
- VII. De bitumenband biedt ook voldoende bescherming voor de fiber ter hoogte van een mechanische reksensor, de vraag blijft alleen nog in hoeverre de rek in het asfalt en de bitumen wordt overgebracht op de sensor.

Bijlage 2 – Experimenten fase 2

Doel experimenten bij Technobis (fase 2a)

- I. Kalibratiefactoren m.b.t. *totale rek* → *thermische rek* → *temperatuur* vaststellen.
- II. Gemak van installeren bitumenband als bescherming beoordelen.
- III. Overdrachtsfactor bepalen voor de mechanische rek van *bitumenband* → *fiber*.
- IV. Beoordelen van composietplaatje als mogelijke tweede optie voor bescherming.

Doel experimenten bij Boskalis (fase 2b)

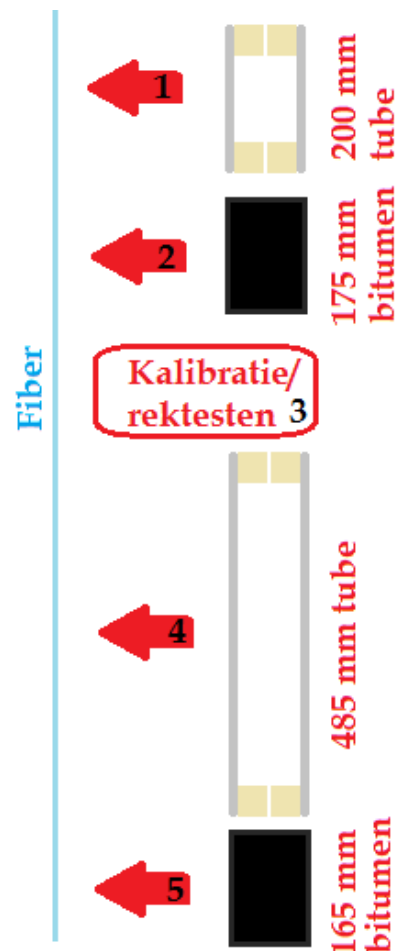
- I. Vaststellen of de FBG-data betrouwbaar is vergeleken met PQi (thermokoppels)**
- II. Vaststellen of een walsovergang te traceren is middels de data.**
- III. Vaststellen of het gekozen rekenmodel geschikt is voor het berekenen en lokaliseren van de belastingen.**
- IV. Ontwikkelen van optimale volgorde van installeren fiber inclusief bevestigingsmaterialen.
- V. Opmeten van minimale straal van de bochten die de tube kan maken.
- VI. Verifiëren of de (dummy)fiber het verdichten met de wals overleeft.
- VII. Verzekeren of de los in de tubing liggende sensoren geen mechanische rek registreren tijdens het verdichten.
- VIII. Invloed van de steel tube op het omringende asfalt.
- IX. Nagaan of een 'open circuit' (2 fiberuiteinden uit de mal stekend) verschil maakt ten opzichte van een 'gesloten circuit' (1 fiberuiteinde uit de mal stekend.)
- X. Invloed van hoogteligging sensor (z) op gemeten temperatuur.
- XI. Verifiëren of de fibersensor met deels bitumenband als bescherming het verdichten overleeft.
- XII. Vaststellen wat de invloed is van de x-, y-, en z-ligging van de sensoren op de gemeten mechanische rek (hangt samen met doel II).

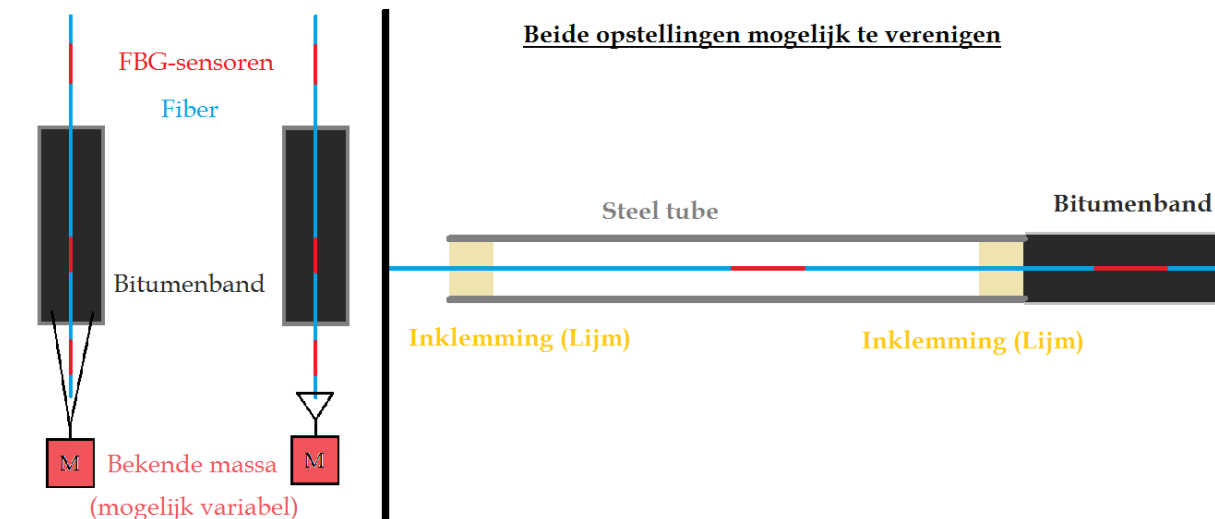
Testvoorwerpen:

1. 1 Geassembleerde fiber (verlijmd in steel tube en bitumenband) met daarin acht sensoren. (2790 mm lang)
2. 1 Ongeassembleerde fiber die los in en uit de steel tube kan. (2790 mm lang)
3. 2 Dummyfibers (1600 mm lang)

Werkwijze fase 2a bij Technobis

Eerst worden de sensoren kaal in een temperatuurgeregelde oven gelegd om zodoende te kalibreren op thermische eigenschappen. Daarna wordt één van die twee sensoren al voor een deel geassembleerd (zie figuur hiernaast, 1 en 2). Vervolgens wordt beoordeeld in hoeverre de rek van de bitumenband wordt overgedragen op de fiber. Dit wordt gedaan door verschillende massa's aan zowel de bitumenband als de fiber zelf te hangen. Zie tabel en figuur op de volgende pagina. Wanneer het kalibreren voltooid is, wordt de fiber verder geassembleerd (3 en 4). Mocht de rekoverdracht tussen bitumen en fiber nihil of niet aanwezig zijn, dan wordt gekeken naar een plan B wat betreft de beschermingswijze, vooralsnog zal dat een composietplaatje zijn waar de fiber op wordt gelijmd.





Massa	Bevestiging	Gemiddelde rektoename, sensor ligt:	
		In bitumenband	Buiten bitumenband
M1	Fiber	...	...
M1	Bitumenband		
M2	Fiber		
M2	Bitumenband		

Materialen fase 2b bij Boskalis

Afkomstig van Aspari	Afkomstig van Boskalis	Afkomstig van Technobis	Eigen
IR-camera	4 mallen 500*500*80	Fiber met 8 sensoren (los)	PC met software
Thermokoppels	Bekende uniforme asfaltmix	Fiber met 8 sensoren (geassembleerd met steel tube en bitumenband)	Bitumenband
	Wals	3 dummy-fibers (ca. 1,6 meter)	Dekzeil 3*4 m
	Temperatuurgeregelde oven?	Steel tube (in totaal minimaal 3 meter)	Gewichten
		Eindkap voor steel tube (1x)	Verbrander
	Meetgerei	Gator met aansluitingen	
	Gereedschap (boormachine)	(Laser light met connector voor gezondheidscheck?)	
		(Plan B bescherming - composietplaatje)	
	Weegschaal		

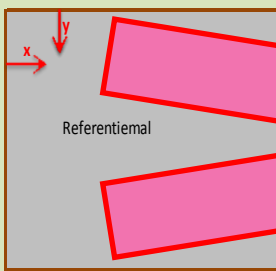
Werkwijze fase 2b bij Boskalis

Mallen B en C worden als eerst geprepareerd. Wanneer de tests met B en C zijn voltooid, wordt begonnen met mal D. De bitumen verhogingsblokken worden in de mal gelegd om de fiber op de juiste positie te krijgen en te houden. De gator wordt tussen de laptop en een uiteinde van de fiber geïnstalleerd om het licht de fiber in te schieten en het teruggekaatste licht vervolgens te meten. De exacte ligging en hoogte van het verloop van de fiber wordt vooralsnog eerst alleen op papier getekend. Verdere werkwijze per mal/experiment staat hieronder.

Statische wals

Het asfalt zal worden verdicht middels een statische wals. Deze heeft een gewicht van 21,6 kN. Aangenomen wordt dat dit gewicht zich gelijkmatig verdeelt over de beide assen. Alleen de voorste as zal over de mal bewegen, waarbij het gewicht van de vooras opgevangen wordt door het asfalt in de mal, met een breedte van 500 mm. Daardoor wordt de belasting als gevolg van de wals gesteld op $21,6 / (2 * 0,500) = 21,6 \text{ kN/m}$.

Verlicht asfalteren Over de haalbaarheid van FBG-sensoren in het asfaltverwerkingsproces

Bovenaanzicht mal	Benodigde materialen	Bevestigingen	Bescherming	Te onderzoeken	Werkwijze
	A	-	-	Invloed geen steel tube op eigenschappen asfalt	Vullen met asfalt
VERVALT					
Proefstukken boren/zagen om de tests doen					

Werkwijze tests met FBG bij Boskalis – Experimenten B en C

Als allereerste worden de bitumen verhogingsblokken op de juiste plek in de mal gelegd. Daarna wordt de steel tube –nog zonder fiber erin– over de bitumenblokken geleid. Vervolgens wordt de dummyfiber in de tubing gestoken. De thermokoppels worden geïnstalleerd op eenzelfde hoogte als de FBG-sensoren. Dan wordt de mal gevuld met HMA. Nadat er een eerste walsovergang is geweest, wordt de dummyfiber eruit gehaald en gecheckt of deze nog in goede staat is. Als de dummyfiber nog heel is, dan wordt de echte sensor in de tube gestoken. Wanneer alle software en hardware klaarstaat, kan er gemeten worden. De thermokoppel en de FBG zullen tegelijkertijd starten met dataloggen. De metingen met temperatuur zullen duren tot het moment dat het asfalt een temperatuur heeft bereikt van 80 graden Celsius. In de tussentijd zal de wals nog een paar keer over het asfalt gaan om het te verdichten.

Werkwijze tests met FBG bij Boskalis – Experiment D

Hetzelfde als bij B en C, alleen kan hier geen gebruik worden gemaakt van een dummyfiber, omdat de fiber met sensoren al ‘vast’ in de bitumenband en steel tubing ligt. Er moet goed gemarkeerd en gemeten worden om de exacte positie van de sensoren te bepalen en te onthouden.

Verder vinden bij mal D experimenten plaats m.b.t. mechanische rek. Er worden belastingen op de asfalt plaat gelegd, en m.b.v. vergelijkingen die gebruik maken van de door de FBG's gemeten rek, wordt getracht de grootte en de lokatie van deze belastingen uit te rekenen. (validatie)

Planning:

Planning Fase 2	ma 4/7	di 5/7	wo 6/7	do 7/7	vr 8/7
Aankomst Technobis					
Sensoren kalibreren (temperatuur)					
Sensoren assembleren met steel tube en bitumenband					
Sensoren kalibreren/testen met steel tube en bitumenband					
Van Technobis --> Boskalis					
Mallen A B C prepareren					
Experimenten ABC uitvoeren					
Balkjes zagen/boren ABC					
Mechanistische tests ABC					
Mal D prepareren					
Experiment D uitvoeren					
Balkjes zagen/boren D					
Mechanistische tests D					
Uitloop					
(Spullen terugbrengen)					





Bijlage 3 – Kalibratie sensoren fase 2

	bitwaardes	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8
T0	25,5	14846	47385	79655	112876	145842	179206	211181	243271
Teind	48,9	15573	47899	80344	113626	146776	180068	211831	243865
dT	23,4	727	514	689	750	934	862	650	594
bereik	1514	1586	72			262144	bitwaardes (=2^18)		
golflengtes	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	
nm	1518,1	1527,0	1535,9	1545,0	1554,1	1563,2	1572,0	1580,8	
nm	1518,3	1527,2	1536,1	1545,2	1554,3	1563,5	1572,2	1581,0	
nm	0,1997	0,1412	0,1892	0,2060	0,2565	0,2368	0,1785	0,1631	
per gr. C (nm)	0,008533	0,006033	0,008087	0,008803	0,010963	0,010118	0,007629	0,006972	
in pm	8,533	6,033	8,087	8,803	10,963	10,118	7,629	6,972	

1 - Thermische kalibratie ongeassembleerde sensor

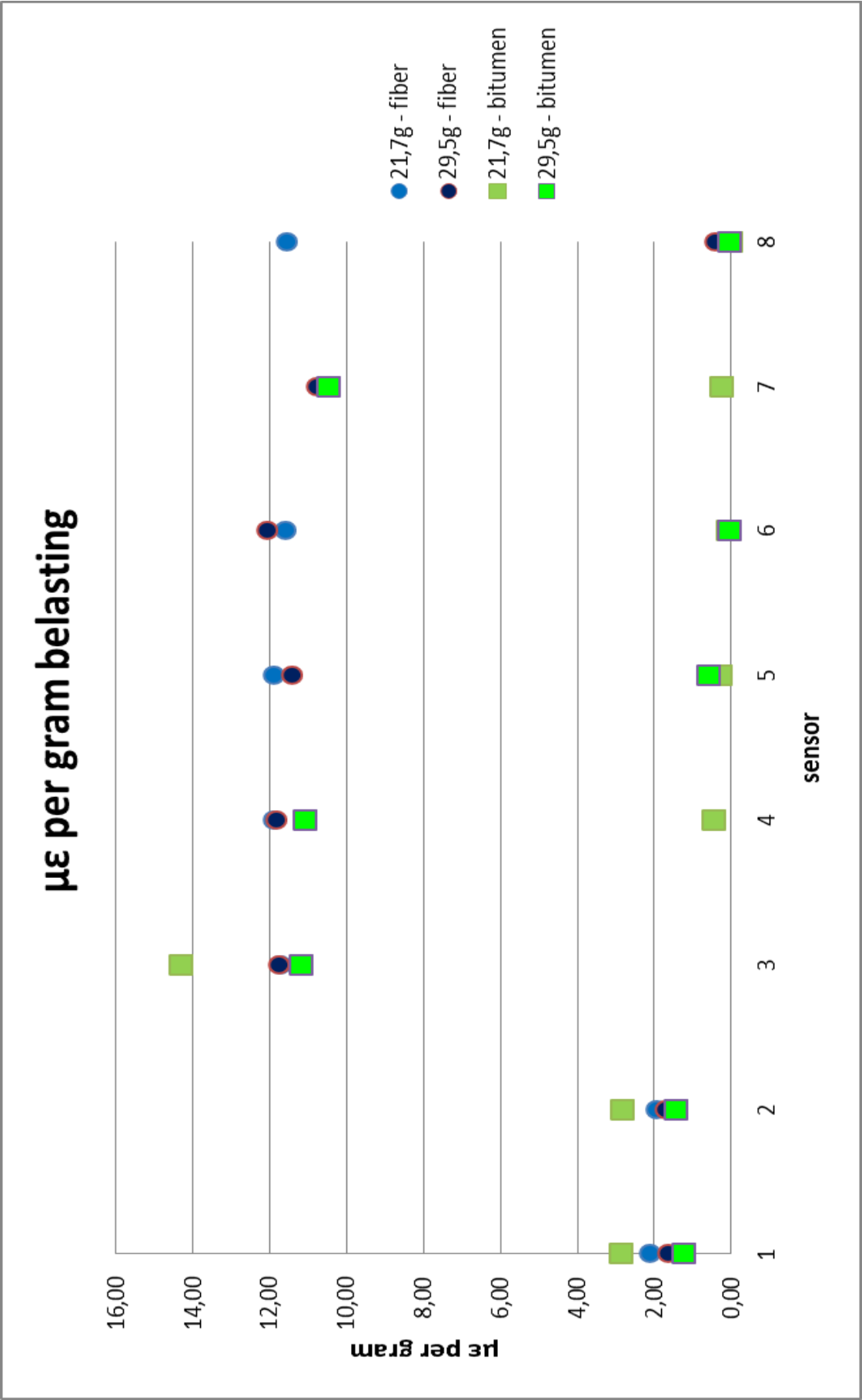
	bitwaardes	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8
T0	25,3	14530	47662	80112	112913	145035	179154	211106	243683
Teind	40,6	14991	48057	80554	113514	146495	179814	211606	244109
dT	15,3	461	395	442	601	1460	660	500	426
bereik	1514	1586	72			262144	bitwaardes (=2^18)		
golflengtes	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	
nm	1518,0	1527,1	1536,0	1545,0	1553,8	1563,2	1572,0	1580,9	
nm	1518,1	1527,2	1536,1	1545,2	1554,2	1563,4	1572,1	1581,0	
nm	0,1266	0,1085	0,1214	0,1651	0,4010	0,1813	0,1373	0,1170	
per gr. C (nm)	0,008276	0,007091	0,007935	0,010789	0,026209	0,011848	0,008976	0,007647	
in pm p. gr. C	8,276	7,091	7,935	10,789	26,209	11,848	8,976	7,647	

2 - Thermische kalibratie geassembleerde sensor

Bevestiging massa aan:	m (g)	µε	sensor 1	sensor 2	sensor 3	sensor 4	sensor 5	sensor 6	sensor 7	sensor 8
fiber (na sensor 8)	21,7	T1R44006	45,93	42,43	254,25	258,00	258,30	251,61	229,39	250,60
fiber (na sensor 7)	29,5	T2R50006	48,48	50,27	346,64	349,40	336,93	355,69	317,88	12,03
bitumen (na sensor 3)	21,7	T3R31506	62,16	61,34	310,19	9,57	6,12	1,80	5,15	0,22
bitumen (na sensor 7)	29,5	T4R241	36,87	42,41	329,99	326,74	17,45	0,90	309,33	1,34
		µε per gram	sensor 1	sensor 2	sensor 3	sensor 4	sensor 5	sensor 6	sensor 7	sensor 8
		T1	2,12	1,96	11,72	11,89	11,90	11,60	10,57	11,55
		T2	1,64	1,70	11,75	11,84	11,42	12,06	10,78	0,41
		T3	2,86	2,83	14,29	0,44	0,28	0,08	0,24	0,01
		T4	1,25	1,44	11,19	11,08	0,59	0,03	10,49	0,05
gemiddelde waarde fiber (T1 en T2)			1,88	1,83	11,73	11,87	11,66	11,83	10,67	5,98
T4/(T1&T2) * 100% =			66%	79%	95%	93%	5%	0%	98%	1%
			tube	tube	bit	bit	comp	tube	bit	tube

3 - Kalibratie op rekoeverdracht bij geassembleerde sensor

Op de volgende pagina staan de waardes T1-T4 uit de tweede tabel van 3 in een grafiek.

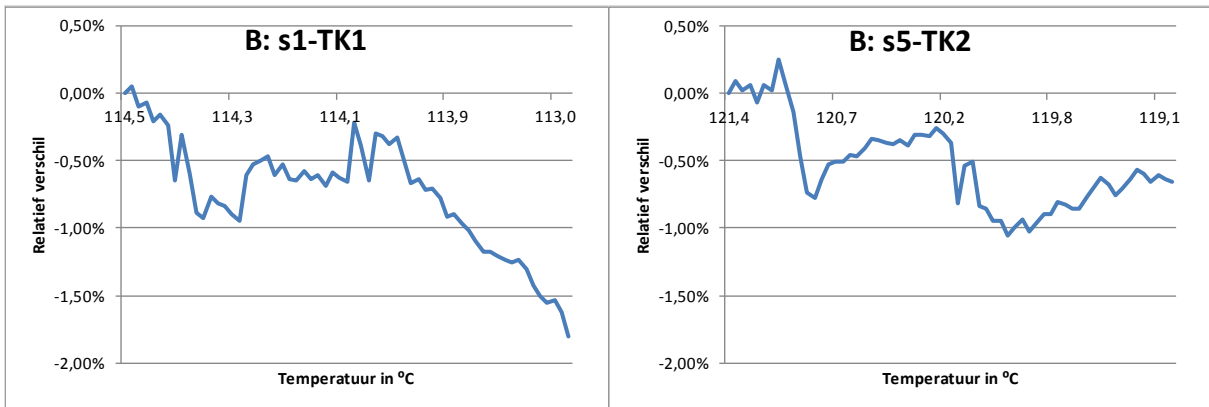


Bijlage 4 – Statistische analyse

s1	TK1	dif						
114,5	114,5	0,000	x	(dif-x)^2	Var	sD		t
114,5	114,4	0,063	-0,857	0,845	0,216265	0,465043		-14,5025
114,4	114,5	-0,106		0,563				
114,3	114,4	-0,073	n	0,615		x = AVERAGE(C3:C64)		
114,3	114,5	-0,240	62	0,380		n = COUNT(C3:C64)		
114,2	114,4	-0,180		0,457		df = n-1		
114,1	114,4	-0,266	df	0,349				
114,1	114,8	-0,741	61	0,013		Var = SUM(E3:E64)		
114,0	114,3	-0,344		0,263		sD = SQRT(F3)		
113,9	114,6	-0,686	t_crit	0,029				
113,7	114,7	-1,010	0,025	0,023		t = D3/(G3/SQRT(D6))		
113,7	114,8	-1,057	2,000	0,040				
113,9	114,8	-0,881		0,001				
113,9	114,8	-0,928		0,005				
113,8	114,8	-0,954		0,010				
113,8	114,8	-1,018		0,026				
113,7	114,8	-1,081		0,050				
114,0	114,7	-0,691		0,027				
114,1	114,7	-0,607		0,062				
114,0	114,6	-0,569		0,083				
114,1	114,6	-0,527		0,108				
114,0	114,7	-0,689		0,028				
114,0	114,6	-0,604		0,064				
113,9	114,6	-0,726		0,017				
113,9	114,6	-0,742		0,013				
113,9	114,6	-0,663		0,037				
113,9	114,6	-0,723		0,018				
113,8	114,5	-0,696		0,026				
113,8	114,6	-0,786		0,005				
113,8	114,5	-0,673		0,034				
113,8	114,5	-0,714		0,020				
113,8	114,5	-0,747		0,012				
114,2	114,4	-0,246		0,373				
114,1	114,5	-0,446		0,169				
114,1	114,8	-0,737		0,014				
114,1	114,4	-0,340		0,266				
114,0	114,4	-0,362		0,244				
114,0	114,4	-0,425		0,186				
113,9	114,3	-0,375		0,232				
113,8	114,4	-0,565		0,085				
113,7	114,5	-0,758		0,010				
113,7	114,4	-0,731		0,016				
113,6	114,4	-0,820		0,001				
113,5	114,3	-0,800		0,003				
113,4	114,3	-0,880		0,001				
113,4	114,4	-1,044		0,035				
113,3	114,3	-1,018		0,026				
113,2	114,3	-1,097		0,058				
113,1	114,3	-1,151		0,087				
113,1	114,3	-1,240		0,147				
113,0	114,3	-1,330		0,224				
112,9	114,2	-1,330		0,224				
112,7	114,1	-1,366		0,260				
112,7	114,1	-1,404		0,299				
112,7	114,1	-1,420		0,318				
112,6	114	-1,404		0,299				
112,5	114	-1,481		0,391				
112,4	114	-1,615		0,575				
112,3	114	-1,702		0,715				
112,2	114	-1,757		0,811				
112,2	113,9	-1,731		0,765				
112,1	113,9	-1,832		0,951				
112,0	114	-2,039		1,397				

1 - Als voorbeeld is de analyse genomen van mal B met sensor 1 <> TK 1

In onderstaande figuren is het relatieve verschil weergegeven van de FBG-sensoren ten opzichte van de naastgelegen thermokoppel. Op de x-as staat de temperatuur, terwijl op de y-as het relatieve verschil staat. Voor mal C staan deze figuren in het rapport zelf. Het is te zien dat het relatieve verschil steeds groter (negatief) wordt naarmate de temperatuur daalt.



Bijlage 5 – Performance model: MATLAB-script

```
clear, clc

%% Parameters inladen
T = xlsread('PM_matlab', 'A1:A849'); %Temperatuurwaardes sensor 2 mal D.
T = T';
y = length(T);
x = zeros(size(T));
XT = zeros(size(T));
Tscore = zeros(size(T));

Td = 6; %Benodigde temperatuurverschil voor detectie walsovergang.
Tn = 6; %Aantal waardes dat na walsovergang niet wordt meegenomen.
Tpre = 30; %Verschil in tijdstip waarvan waarde als echte T wordt genomen.

n = 0; %Aantal walsovergangen.
S = []; %Vector met scores van alle walsovergangen.
A = 1.0; %Score bij walsovergang in optimale temperatuurdomein.
nA = 0; %Aantal walsovergangen in optimale temperatuurdomein.
B = 0.7; %Score bij walsovergang buiten optimale temperatuurdomein.
nB = 0; %Aantal walsovergangen buiten optimale temperatuurdomein.

%% For-loop
for t = 1:y-1
    if T(t+1) > T(t)+Td & T(t+1) >= max(T(t-Tn+1):T(t+Tn+1)) %Piek wanneer
        n = n+1; %een bepaalde waarde boven alle andere
        x(t+1) = 1; %waardes uitsteekt.
        if T(t-Tpre) <= 150 & T(t-Tpre) > 130 %Wanneer T in het optimale
            S(n) = A; %temperatuurbereik ligt,
            nA = nA+1; %dan score 1,0 toekennen.
            Tscore(t-Tpre) = T(t-Tpre);
        else S(n) = B; %In elk ander geval
            nB = nB+1; %moet de score 0,7
            Tscore(t-Tpre) = T(t-Tpre); %worden toegekend.
        end
    end
end

%% Output ordenen
XT = x.*T;
x=x.*60;
x=x'; % (in grafiek) Rode streepjes op x-as ter hoogte van piek.
XT=XT'; % (in grafiek) Groen vierkantje op de top van een piek.
Tscore=Tscore'; % (in grafiek) Oranje bolletje net voor de piek.

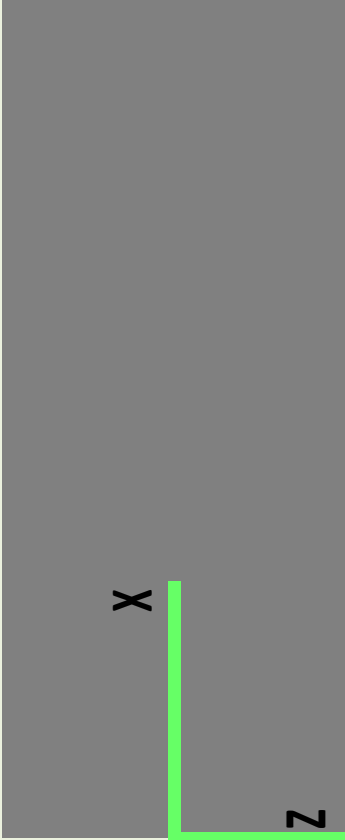
Performance = [nA nB n mean(S)] % = OUTPUT VAN HET MODEL
xlswrite('PM_matlab.xlsx', x, 1, 'B2');
xlswrite('PM_matlab.xlsx', XT, 1, 'C2');
xlswrite('PM_matlab.xlsx', Tscore, 1, 'D2');
```

Bijlage 6 – Belastingenmodel

Sensor 3 - horizontaal		Sensor 3 - verticaal	
x =	250 mm	x =	250 mm
z =	30 mm	z =	-24 mm
l =	250 mm	l =	250 mm

m (kg)	F (N)	rek ($\mu\epsilon$)	m (kg)	F (N)	rek ($\mu\epsilon$)
D1 - m*1	2,65	26	2,65	25,9965	-0,5535
D1 - m*2	5,3	51,99	5,3	51,993	-1,107
D1 - m*4	10,6	104	10,6	103,986	-2,214

D4 - m*1	D5 - m*2	D6 - m*4
----------	----------	----------



$E^* (0,2 \text{ Hz}) =$	1290 N/mm ²
hHor =	80 mm
bHor =	160 mm
lzzHor =	6,83E+06 mm ⁴
8IE*(Hor)	7,05E+10 Nmm ²
hVert =	160 mm
bVert =	80 mm
lzzVert =	2,73E+07 mm ⁴
8IE*(Vert)	2,82E+11 Nmm ²
L =	500 mm
L/2 =	250 mm
z0 =	40 mm
m =	2,65 kg
g =	9,81 N/kg

2 - Berekening theoretische rek (zie vergelijking [16] in paragraaf 6.4)