



Van Amstelpark 8  
2629 JJ DELFT

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 30 00

**TNO 2022 R11977**

## Toepasbaarheid van COTS-sensoren in asfalt

Datum	24 oktober 2022
Auteur(s)	TNO & imec J. Oudenhoven (imec) K.V. Roetert Steenbruggen (TNO)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	36 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat T.a.v. mevrouw C. Giezen
Projectnaam	COTS in asfalt
Projectnummer	060.49001

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2022 TNO

## Management samenvatting

Aan TNO en imec is gevraagd vanuit een multidisciplinaire werkgroep (bestaande uit vertegenwoordiging van RWS, imec en TNO) om ervaring op te doen met het plaatsen van sensoren in asfalt en te ontdekken welke specifieke uitdagingen hier spelen. In het onderzoek zijn daarom verkennende experimenten in een gecontroleerde laboratorium-omgeving uitgevoerd om de geschiktheid van verschillende commerciële off the shelf sensoren (COTS) met de standaard sensorbehuizing dan wel inkapseltechniek in asfalt te bepalen.

De in dit onderzoek toegepaste sensoren zijn op de markt geselecteerd op basis van temperatuurbestendigheid, beschikbaarheid, afmetingen en materialen. Ze worden immers blootgesteld aan hoge temperaturen en mechanische belastingen tijdens het asfaltverwerkingsproces. Er zijn 12 typen RFID-sensoren geselecteerd voor verder onderzoek, hiervan heeft één een geïntegreerde temperatuursensor. In de eerste fase van het onderzoek zijn deze sensoren beproefd op temperatuurbestendigheid. Vervolgens zijn de sensoren geselecteerd welke voldoende temperatuurweerstand om het asfaltproductieproces te overleven. De RFID-sensor met de temperatuursensor, welke volgens de specificaties niet tegen deze temperaturen bestand is, blijkt na inkapseling met een polymeer ook bestand tegen de vereiste temperaturen.

In een tweede fase van het onderzoek zijn de sensoren in laboratorium geproduceerde asfaltplaten verwerkt. Veel van de RFID-sensoren hebben het asfaltproductieproces doorstaan. Wel neemt de uitleesafstand van de sensoren duidelijk af als gevolg van het plaatsen in een asfaltplaat. Grotere RFID-sensoren, hebben door hun grotere antenne een grotere uitleesafstand. Echter, vanwege hun grote afmetingen kunnen deze grotere tags enkel gepositioneerd worden in de kleeflaag. De kleinere, robuuste sensoren zijn geschikt om in de asfaltmixer dan wel in het asfaltmengsel aan te brengen, maar hebben dan wel weer kleinere uitleesafstanden.

De resultaten van dit onderzoek dienen als stepping-stone voor verdere sensorontwikkeling. Bij de ontwikkeling van een nieuwe RFID-sensor wordt voor het ontwerp meerwaarde gezien in het optimaliseren van afmetingen en de toevoeging van meerdere sensorfunctionaliteiten. Ook zal er aandacht moeten worden besteed aan antenne-modificatie wat zorgt voor verbetering van de datatransmissie tijdens de productie-, aanleg- en gebruiksfase.

De uitgevoerde experimenten hebben aangetoond dat het technisch mogelijk is om RFID-sensoren in asfalt aan te brengen. Echter, voordat deze sensoren klaar zijn voor toepassing in de praktijk moet er ervaring opgedaan worden in de praktijk door middel van opschaling van dit onderzoek nodig naar proefvkniveau.

# Inhoudsopgave

<b>Management samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Selectie van Commerciële RFID-sensoren .....</b>	<b>6</b>
2.1 Inleiding .....	6
2.2 Selectie van commerciële RFID-sensoren .....	6
<b>3 Temperatuurbestendigheid .....</b>	<b>10</b>
3.1 Inleiding .....	10
3.2 Temperatuurproeven .....	10
<b>4 Toepassing van sensoren in het asfalt .....</b>	<b>14</b>
4.1 Inleiding .....	14
4.2 Methode .....	14
4.3 Resultaten – uitleesbaarheid .....	20
4.4 Resultaten – uitleesafstand van RFID-sensoren in het asfalt .....	27
<b>5 Toepasbaarheid van COTS in asfalt .....</b>	<b>28</b>
5.1 Inleiding .....	28
5.2 Toepassing van COTS RFID-sensoren .....	28
5.3 Aanbevelingen .....	28
<b>6 Conclusies.....</b>	<b>30</b>
<b>7 Ondertekening .....</b>	<b>31</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A GO/NO-GO meeting 1 – Proof of concept – COTS sensoren voor asfalt</b>	
<b>B Overige meetresultaten temperatuursensoren in asfalt</b>	

# 1 Inleiding

Begin 2021 is door een multidisciplinaire werkgroep experts (bestaande uit vertegenwoordiging van RWS, imec en TNO) een haalbaarheidsstudie afgerond voor de toepassing van sensoren voor asfalt. Hierin zijn de bevindingen van de tot nu toe opgedane inzichten over 'sensoren voor asfalt' middels literatuurstudie en interviews met experts beschreven<sup>1</sup>. De conclusie van deze rapportage is dat informatie, verkregen met de sensoren, het mogelijk maken om een zogenaamde digital twin te realiseren van een wegdek. Daarnaast draagt de ingewonnen informatie ook bij aan verbeterde levensduurmodellen, welke bijdragen aan langere levensduren en efficiënter beheer. Dit zorgt ervoor dat de CO<sub>2</sub>-impact kan worden gereduceerd. Tot slot is uit deze studie naar voren gekomen dat er passende commerciële off the shelf sensoren (COTS) beschikbaar zijn die toepasbaar lijken voor asfalt.

De grootste uitdaging voor de toepassing in asfalt wordt gevormd door de productie en het verwerkingsproces. De sensoren moeten gedurende deze processen hoge temperaturen en krachten weerstaan, zoals de mechanische belasting van het mengen en de walsdrukken tijdens het verdichten. Commercieel verkrijgbare RFID (Radio Frequency Identification) sensoren claimen bestand te zijn tegen de hoge temperaturen van het asfaltverwerkingsproces. Deze bestandheid is echter in de praktijk nog niet onderzocht. Er zijn namelijk in het recente verleden ook behoorlijk teleurstellende resultaten behaald met RFID-sensoren die een vergelijkbare claim deden.

Aan TNO en imec is gevraagd om ervaring op te doen met het plaatsen van sensoren in asfalt en te ontdekken welke specifieke uitdagingen hier spelen. Hierbij worden de sensoren blootgesteld aan een aantal van de specifieke belastingen die optreden tijdens productie en verwerking. De toepasbaarheid van deze COTS wordt gezien als steppingstone voor verdere sensor ontwikkeling.

In dit onderzoek zullen verkennende experimenten in een gecontroleerde laboratorium-omgeving worden uitgevoerd om de geschiktheid van verschillende commercieel verkrijgbare sensortechnieken (RFID) met de standaard sensorbehuizing dan wel een inkapseltechniek te onderzoeken. Standaard RFID-sensoren zijn in staat om informatie op te slaan ter identificatie. Daarnaast zal er specifiek gekeken worden naar RFID-sensoren die tevens temperatuur kunnen meten.

Er is gekozen voor een getrapte opzet van het onderzoek. Dit betekent dat er voordat de sensoren in het asfalt zijn verwerkt er onderzoek is gedaan naar de temperatuurbestendigheid en uitleesafstand van de verschillende sensoren. Indien er uit deze eerste analyse bleek dat sensoren niet geschikt waren om in het asfalt te verwerken, zijn deze niet in een volgende fase in het asfalt verwerkt. Tussen deze eerste fase en de vervolgfase is een zogenaamd Go/No-go moment ingelast om te besluiten of het zinvol was om het onderzoek te vervolgen.

---

<sup>1</sup> Haalbaarheidsstudie sensoren in asfalt – 30 maart 2021 – imec, RWS en TNO

Het rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt de afweging tussen kosten, beschikbaarheid, betrouwbaarheid en technische mogelijkheden besproken om op de markt beschikbare RFID-sensoren te werven. In hoofdstuk 3 zijn de resultaten beschreven van de temperatuurproeven die zijn uitgevoerd op de in hoofdstuk 2 geselecteerde sensoren. Deze proeven kijken naar temperatuurbestendigheid en (het effect van inkapselen op) de uitleesafstand. Vervolgens is in hoofdstuk 4 de uitleesbaarheid van de sensoren getoetst na de verwerking van de sensoren in een asfaltplaat. In hoofdstuk 5 wordt de toepasbaarheid van de commercieel verkrijgbare sensoren in asfalt bediscussieerd. Tot slot geeft hoofdstuk 6 een overzicht van de belangrijkste conclusies die opgedaan zijn tijdens het onderzoek.

## 2 Selectie van Commerciële RFID-sensoren

### 2.1 Inleiding

In de eerste fase heeft imec zich georiënteerd op de op de markt beschikbare identificatie- en temperatuur- RFID-sensoren. Afhankelijk van de beschikbaarheid, levertijd en specificaties is in deze fase een keuze gemaakt met welke sensoren het onderzoek in wordt gegaan en de volgende fases worden doorlopen.

### 2.2 Selectie van commerciële RFID-sensoren

Er zijn zeer veel RFID-tags of sensoren op de markt, maar het grootste gedeelte daarvan is ontworpen voor toepassingen rond kamertemperatuur en beperkte mechanische belasting. De eisen aan een RFID-sensor voor toepassing in asfalt (en vooral tijdens de asfaltproductie) zijn veel hoger. In asfalt kunnen de temperaturen oplopen tot 200 °C daarnaast is er een niet geringe mechanische belasting op de sensoren als gevolg van mengen en verdichten. Ook zijn er eisen aan de afmetingen van de sensoren. De typische dikte van een asfaltlaag is 5-20 cm, en de dikte van de sensoren zal dus veel kleiner dan 10 cm, en bij voorkeur zelfs <5 cm moeten zijn.



Bij verschillende leveranciers binnen Nederland en Europa is het assortiment van RFID-sensoren met deze eigenschappen geëvalueerd. Helaas zijn er weinig leveranciers die relatief kleine aantallen RFID-sensoren met verschillende afmetingen, temperaturen, materialen, ontwerp en uitleesbereik kunnen leveren, de meeste leveranciers leveren grote aantallen RFID-sensoren voor specifieke opdrachten. Daarom zijn voor dit project diverse RFID-sensoren besteld bij het Amerikaanse bedrijf RFID.inc. Dit bedrijf is geselecteerd omdat zij een ruime keuze aan verschillende RFID-sensoren beschikbaar hebben, met een breed bereik aan eigenschappen zoals frequentie, afmetingen, uitleesbereik en materialen.

Voor de geplande tests zijn UHF (Ultra High Frequency) sensoren besteld. In het huidige stadium van het project zijn de belangrijkste criteria de afmetingen, materialen en hittebestendigheid. Een overzicht van de bestelde en geëvalueerde RFID-sensoren is weergegeven in Tabel 1. Daarin staat een aantal typen RFID-sensoren die, wanneer beschikbaar, in verschillende afmetingen zijn besteld. RFID-sensor (A) is interessant, omdat dit de enige RFID-sensor is die ook temperatuur kan meten, maar is gefabriceerd op een folie die niet bestand is tegen hoge temperaturen. Daarom wordt gekeken naar inkapselingstechnieken die deze folie tegen de hitte kunnen beschermen. Er is ook een tweede sensor (B) op een flexibele folie besteld. Deze is wel bestand tegen hoge temperaturen, maar heeft alleen een identificatie functionaliteit. Daarnaast is een serie keramische- en FR4 gecoate sensoren met verschillende afmetingen besteld. FR4 is een composietstructuur van glasvezelversterkte kunsthars, dat vaak gebruikt wordt voor het produceren van printplaten. Het is brandwerend (Flame Retardant, FR) en bestand tegen hoge temperaturen. Daarnaast zijn er sensoren met een kunststof coating: ABS (E) en een combinatie van ABS/Nylon (G) geselecteerd.


Tot slot is er een RFID-sensorlezer besteld, die gemakkelijk aan een paal gemonteerd kan worden. Deze kan in dit onderzoek gebruikt worden voor de eerste

testen, maar dankzij de flexibele montage mogelijkheden ook in een later stadium bij metingen aan een echt wegdek. Deze uitleesunit is ook opgenomen in Tabel 1.

Tabel 1 Geselecteerde RFID-sensoren en lezer voor de eerste proeven voor de haalbaarheidsstudie voor sensoren in asfalt. De sensorcode (A-N) wordt in dit verslag gebruikt om de type RFID-sensoren te identificeren, de nummering (01-14) zijn de eerste twee getallen voor identificatiecode van individuele sensoren bij experimenten. Vanwege grote verschillen in afmetingen zijn de foto's niet op schaal.

Sensor code	Beschrijving	Leverancier	Foto	Type
<b>Reader</b>	Model SPR/A10-8030-9H Single Piece 915 MHz UHF RFID Reader/Antenna combo, 10" sq., Serial/USB, 9dBi, Horizontal Polarized			Lezer: antenne en elektronica
<b>A - 01</b>	Model 9824-TMP Temperature Sensing White PET Label Tag, 98x24mm, NMV2D CABO memory chip, UHF 902-928 MHz passive RFID			Sensor met temperatuur-sensor
<b>B - 02</b>	Model FPC7111-H3, FPC flexible Tag, high temp 280C, no sticky backing, 71x11mm, Alien Higgs3 chip, UHF 902-928 MHz passive RFID			Hoge temperatuur flexibele sensor
<b>C - 03</b>	Model F11009-M4E FR4 Tag, 110x09mm, UHF 902-928 MHz passive RFID, Impinj Monza 4E chip			Sensor met FR4 coating
<b>D - 04</b>	Model F9525 FR4 Tag, Mount on Metal High Temperature 200C, 95x25mm, UHF 902-928 MHz passive RFID			Sensor met FR4 coating
<b>E - 05</b>	Model A15023-HT ABS Pallet Tag, High Temperature 200C, Black, 150x23x18mm, UHF 902-928 MHz passive RFID			ABS
<b>F - 06</b>	Model C5151 UHF Tag, Ceramic 51x51x3mm, High Temp 320C/5min, 300C/45min, 260C/90min, UHF 902-928 MHz passive RFID			Keramische sensor
<b>G - 07</b>	Model A7628M-HT ABS/Nylon High Temp 300C Tag, Metal Mount, charcoal, 76x28x17mm, UHF 902-928 MHz passive RFID			ABS/Nylon
<b>H - 08</b>	Model F5313 FR4 Tag, Mount on Metal High Temperature 200C, 53x13mm with Peel & Stick Backing, UHF 902-928 MHz passive RFID			Sensor met FR4 coating



<b>I - 09</b>	Model C1309 Ceramic Tag, 13mm x 9mm x 3mm Thick, UHF 902-928 MHz passive RFID		Keramische sensor
<b>J - 10</b>	Model C10 Ceramic Tag, 10mm x 2mm, UHF 902-928 MHz passive RFID		Keramische sensor
<b>K - 11</b>	Model C0404 Ceramic Tag High Temperature 200C, 4x4x4mm, UHF 902-928 MHz passive RFID		Keramische sensor
<b>L - 12</b>	Model F05 FR4, Mount on Metal High Temperature 200C, 5mm dia., UHF 902-928 MHz passive RFID		Keramische sensor
<b>M - 13</b>	Model F1004 FR4 Tag, Mount on Metal High Temperature 200C, 10x4mm, UHF 902-928 MHz passive RFID		Sensor met FR4 coating
<b>N - 14</b>	Model C0505 Ceramic Tag High Temperature 200C, 5x5x5mm, UHF 902-928 MHz passive RFID		Keramische sensor

## 3 Temperatuurbestendigheid

### 3.1 Inleiding

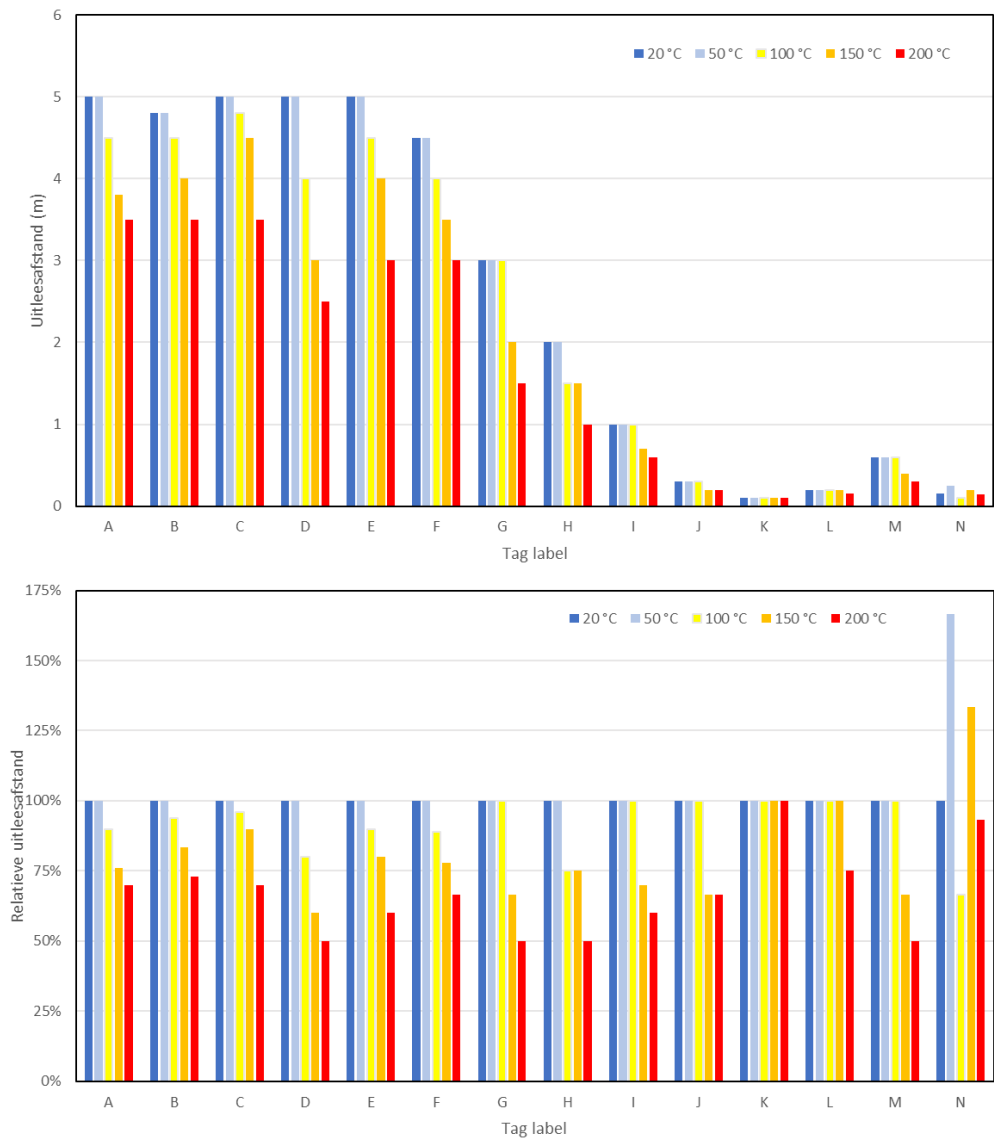
In fase 2 zijn sommige van de in fase 1 gekozen RFID-sensoren, welke claimen tegen de asfaltverwerkingstemperaturen te kunnen, ingekapseld met de geselecteerde inkapselmaterialen. Vervolgens is met labproeven nagegaan of de gekozen sensor (voor sommige in combinatie met een specifieke inkapseltechniek) daadwerkelijk bestand is tegen de hoge temperaturen van het asfaltverwerkingsproces. Hierna is er gekeken naar de invloed van temperatuurbelasting en het effect van inkapselen op de uitleesafstand voor de verschillende sensoren.

De hieronder te lezen resultaten van fase 2 zijn besproken met experts van RWS, TNO en imec bij het eerste go/no-go moment.

### 3.2 Temperatuurproeven

In het algemeen zijn COTS RFID-sensoren, en in het bijzonder de RFID-sensor met een temperatuursensor (A), ontworpen voor gebruik bij omgevingstemperaturen. Veel van de geselecteerde sensoren zijn volgens de datasheets geschikt voor de hoge temperatuur waarbij asfalt wordt geproduceerd, maar niet voor de mechanische belasting. In deze testen wordt bestudeerd tot welke temperatuur de tags daadwerkelijk toegepast kunnen worden, en of dit verbeterd kan worden met behulp van een coating om de tags.

Als eerste experiment voor de temperatuurbestendigheid zijn de tags getest zoals ze zijn ontvangen, zonder inkapseling. Om de bruikbaarheid van de tags te bepalen is de uitleesafstand als criterium gebruikt: als de uitleesafstand van de tag ernstig was verminderd na blootstelling aan een hoge temperatuur is deze niet bruikbaar in het asfalteringsproces. De uitleesafstand is eerst bepaald bij kamertemperatuur (20 °C), en daarna zijn de tags gedurende 30 minuten in de oven gelegd bij een temperatuur van achtereenvolgens 50-100-150 en 200 °C. Na elke temperatuurstap is voor elke tag bepaald vanaf welke afstand ze nog uit te lezen waren. De resultaten van dit experiment zijn weergegeven in Figuur 1.



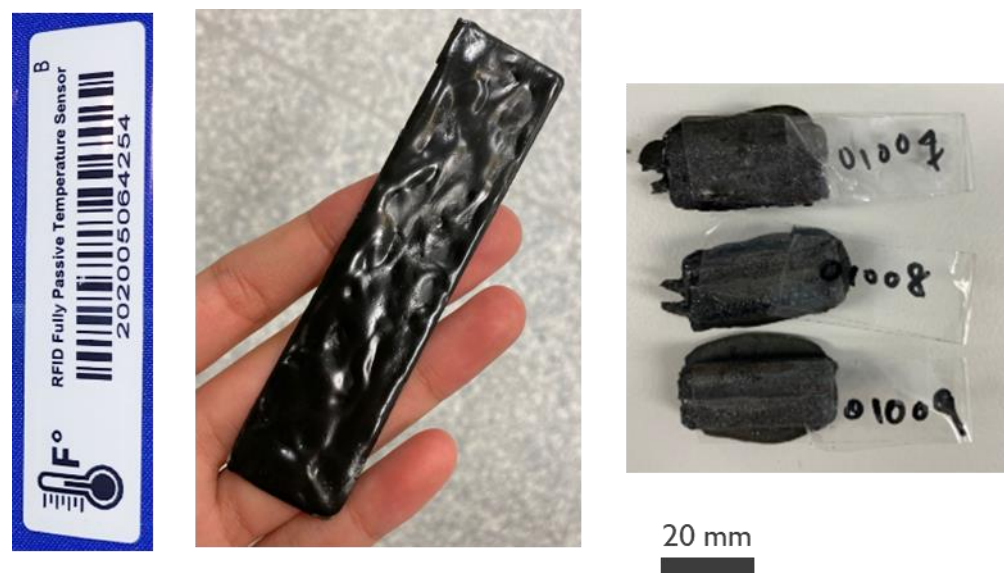
Figuur 1 Resultaten van de metingen van de uitleesafstand van de RFID tags bij kamertemperatuur en na blootstelling aan temperatuurstappen. Boven: absolute uitleesafstand bij kamertemperatuur en na temperatuurstappen, Onder: Relatieve verslechtering van de uitleesafstand na temperatuurstappen (20 °C is 100%).

De resultaten laten zien dat bij kamertemperatuur, de grotere tags (A t/m G) een grotere uitleesafstand hebben dan de kleinere tags (I t/m N). De grote tags hebben een uitleesafstand van enkele meters, wat ze bijvoorbeeld geschikt maakt om uit te lezen vanaf een voertuig of vanaf een lichtmast. Ook opvallend is dat verhitting tot 50 °C in de meeste gevallen geen invloed heeft op de uitleesafstand, maar dat bij hogere temperaturen de uitleesafstand afneemt. Dat is vooral duidelijk te zien bij de relatieve verandering van de uitleesafstanden: waar bij 150 °C bij de meeste tags de uitleesafstand nog meer dan 70% is van de originele waarde, is bij 200 °C in veel gevallen de uitleesafstand gehalveerd. Tag N is later toegevoegd, en ontbrak bijvoorbeeld nog aan de gemeten tags bij de go / no-go meeting. Deze is op een ander moment gemeten dan de andere tags. Omdat de meetafstand erg klein is (het gaat hier om 10-25 cm) geven kleine afwijkingen toch grote relatieve

verschillen. Opvallend is dat alle tags na deze temperatuurstappen wel uitleesbaar blijven en er geen tags zijn uitgevallen tijdens de proeven.

De aanpak voor de inkapseling is gericht om een materiaal te gebruiken dat bestand is tegen hoge temperaturen en dat de RFID-sensor mechanische sterkte geeft. De hypothese is dat een polymeer het meest geschikte materiaal is om RFID-sensoren in te kapselen. De reden hiervoor is dat polymeren voldoende hittebestendig zijn en dat ze daarnaast flexibel zijn om niet bros te breken als gevolg van de mechanische belasting. De beoogde materialen voor inkapseling zijn epoxy-kunstharsen. Inkapselingsproeven zijn uitgevoerd met tag A en B. Deze sensoren zijn gekozen, omdat deze als voordeel hebben dat ze een grote uitleesafstand hebben en daarnaast flexibel zijn. Daarnaast is tag A voorzien van een temperatuursensor en is deze daarom het meest interessant voor vervolgentoelagen. Echter, doordat ze zijn gemaakt op een folie als dragermateriaal zijn ze niet goed bestand tegen mechanische vervorming. De weerstand tegen mechanische belasting zou kunnen worden verbeterd door de inkapseling.

Deze RFID-sensoren zijn op twee manieren ingekapseld, zie ook Figuur 2. De eerste manier is vlak, waarbij de RFID-sensoren handmatig zijn voorzien van een epoxycoating. Bij de tweede methode zijn de RFID-sensoren opgerold en in een mal geplaatst. Deze tweede vorm van inkapseling is gekozen, omdat de sensoren op deze manier voldoende klein zijn om in het asfaltmengproces te worden meegenomen. Na het aanbrengen van de kunsthars is deze vervolgens uitgehard voor 3 uur in een oven bij 70 °C.



Figuur 2 Van links naar rechts: RFID-sensor A, vlak ingekapselde sensor A en opgerolde ingekapselde sensor A.

Deze procedure is getest en de vlakke sensoren werkten na de inkapseling nog naar behoren. Bij het oprollen van de tags werd de uitleesafstand veel kleiner en was deze nog maar 20-30 cm in plaats van 4-5 meter. De vlakke tags zijn na inkapseling getest na blootstelling aan hoge temperaturen en waren na blootstelling

aan 200°C nog uit te lezen vanaf 4,5 meter. Dit is meer dan voldoende om deze methode toe te passen bij de testen met asfalt.

De resultaten van de temperatuur- en inkapselingsproeven zijn besproken bij de go/no-go meeting op 11-02-2022 (zie bijlage A). Daar is een keuze gemaakt met welke RFID-sensoren door te gaan naar de asfaltproeven. Het is besloten om sensor E en F niet te testen in het vervolgonderzoek. Sensor E vertoonde na de temperatuurtest ernstige vervorming en de behuizing was gebarsten, waardoor deze niet meer waterdicht is. Sensor F bestaat uit een dun plaatje van een breekbaar materiaal, en het werd verwacht dat deze de mechanische belasting niet zou overleven. Tot slot is sensor H ook niet meegenomen in de vervolgfase, omdat deze relatief groot is en er slechts een beperkt aantal grote tags in een asfaltplaat kunnen worden geplaatst. Het materiaal en de materiaalkundige eigenschappen van sensor H zijn vergelijkbaar met C, D en M. Hierdoor is geoordeeld dat de resultaten van deze sensor relatief weinig toegevoegde waarde zouden hebben.

## 4 Toepassing van sensoren in het asfalt

### 4.1 Inleiding

De uitkomsten van de temperatuurproeven in hoofdstuk 3 laten zien welke sensoren hittebestendig zijn en wat het is effect op de uitleesafstand. Een selectie van de beschikbare sensoren op basis van hittebestendigheid is in deze fase van het onderzoek geplaatst in laboratorium geproduceerde asfaltplaten. Dit geeft inzicht in welke resultaten er daadwerkelijk kunnen worden gerealiseerd met COTS in asfalt.

### 4.2 Methode

#### 4.2.1 *Asfaltmengsels en asfaltproductie*

De sensoren zijn in twee typen asfaltmengsels toegepast, namelijk: 1. DZOAB-mengsel (open mengsel) en 2. AC11-Surf mengsel (dicht mengsel). Beide mengsels verschillen in de steenslaggrootteverdeling, waarbij het AC11-Surf mengsel o.a. meer steenslag <8 cm bevat. Dit zorgt voor een mogelijk verschil in puntlasten die de sensoren tijdens het walsen ondergaan.

De asfaltproductie is uitgevoerd in het Bouw Innovatie Lab in Delft. Hierbij is gebruik gemaakt van een batch mixer (Figuur 3).



Figuur 3 Batchmixer, zoals gebruikt voor het mengen van de asfaltmengsels

Ter voorbereiding is het granulaat in de oven voorverwarmd tot 160 °C en het bitumen tot 180 °C.

De materialen die nodig zijn om het asfalt te produceren zijn vervolgens in de mixer samengebracht volgens de volgende procedure:

1. Het voorverwarmde granulaat wordt samen met vulstof van groot naar klein in de mixer gebracht.
2. Het mengsel wordt voor 10 sec. gemengd.
3. Het mengsel wordt weer op temperatuur van 160 °C gebracht.
4. Cellulose vezels worden indien van toepassing toegevoegd.
5. Het voorverwarmde bitumen wordt toegevoegd.

Aansluitend is het mengsel in de mixer gehomogeniseerd volgens de mengprocedure beschreven in Tabel 2.

Tabel 2 Mengprocedure asfaltmengsels

Stap	Mengtemperatuur (°C)	Tijd (s)	Snelheid (rpm)
1	160	30	15
2	160	90	30
3	160	60	30

Na het voltooien van bovenstaande mengprocedure is een afgewogen hoeveelheid (t.b.v. de juiste dichtheid) van het mengsel in een metalen mal van 50x50x5 cm gestort. Hierna is het mengsel met de mal vervoerd naar de buitenplaats waar het mengsel is verdicht met ca. 15-20 walsovergangen tot een op het oog uitziend goed verdicht mengsel (Figuur 4).



Figuur 4 Asfaltwals waarmee het asfalt wordt verdicht. Om de metalen paal hangt de RFID uitlezer.

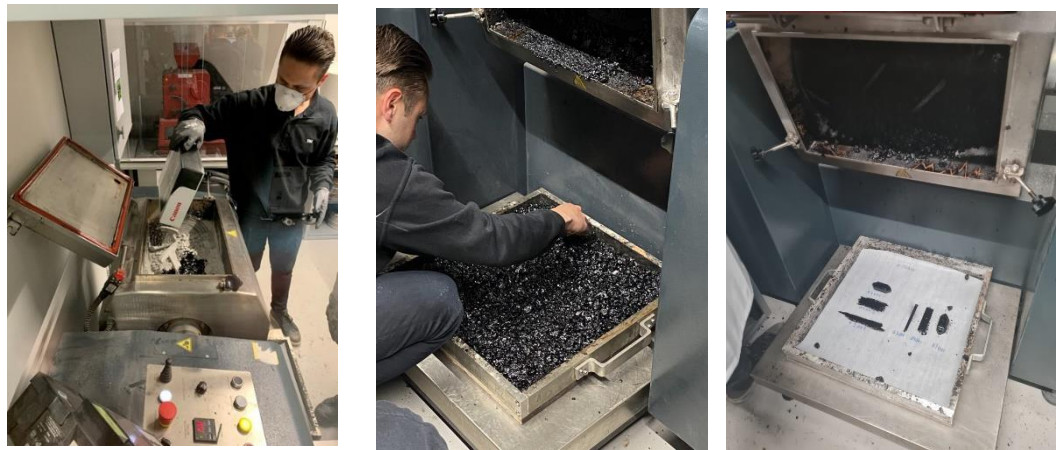
#### 4.2.2 Verwerking RFID-sensoren in asfalt

De identificatie sensoren (RFID-tag) zijn voor de toepassing onderverdeeld in grote (van enkele cm) en kleinere sensoren (ca. <1 cm). Op basis van hun grootte zijn ze op verschillende manieren in het asfalt verwerkt.

De kleinere sensoren worden als 'korrel' in het asfalt ingebed op twee manieren:

1. Willekeurig, door ze in de mixer bij het mengsel te gooien (Figuur 5, linker foto).
2. Gepositioneerd, door de RFID-sensoren halverwege het vullen van de asfaltmal in de het asfaltbed te plaatsen (Figuur 5, midden foto).

De grotere sensoren kunnen door de afmetingen enkel tussen asfaltlagen, op de kleeflaag, worden geplaatst. De sensoren zijn immers net zo groot als de asfaltdikte, indien dergelijke sensoren willekeurig in het materiaal worden geplaatst vormen ze een zo'n grote discontinuïteit dat de integriteit van het asfalt geschaad wordt. Om plaatsing in de kleeflaag na te bootsen zijn de RFID-sensoren op de bodem van de asfaltmal geplaatst, voordat het asfalt hierover heen is gestort (Figuur 5, rechter foto). De grotere sensoren zijn met een kwast bestreken met een dun laagje bitumen primer, zodat ze goed hechten aan de onderkant van het mengsel. Dit simuleert de kleeflaag, waar ze in de praktijk op zouden kunnen worden toegepast.



Figuur 5 Links: sensoren worden door in de mixer aan het mengsel toegevoegd. Midden: sensoren worden in het asfaltbed geplaatst wanneer de mal halfvol is. Rechts: sensoren worden op de bodem van de mal geplaatst.

De RFID-sensoren zijn op de volgende verschillende momenten in het productieproces uitgelezen om eventuele schade aan de sensoren aan de verschillende belastingen (mixer, wals, temperatuur) te kunnen koppelen:

- Na het mengen en het storten van het mengsel in de mal.
- Na het walsen van het mengsel.
- Na het afkoelen van het mengsel.

Er is bij de productie van de asfaltplaten een overmaat van asfaltmengsels gemaakt. Daarbij ontstond het risico dat er sensoren (die in de menger waren gebracht) in de mixer achterbleven, na het storten van het mengsel. In dit geval



konden deze sensoren niet meer worden gedecteerd, terwijl ze wel mogelijk wel nog werkten. Daarom zijn ter controle de mengselrestanten in de mixer gescand op aanwezige werkende sensoren met het uitleesapparaat.

#### 4.2.3 Verwerking RFID-temperatuursensor

De temperatuursensor is flexibel en qua grootte niet geschikt om als korrel door het asfaltmengsel te mengen. Om deze reden zijn de temperatuursensoren net als de grotere RFID-sensoren op de bodem van de asfaltmal geplaatst, voordat het asfalt hierover heen is gestort.

Ter validatie zijn er ook 3 thermokoppels (T1, T2 en T3) op de bodem van de asfaltmal aangebracht (Figuur 6). Op deze manier kan de asfalttemperatuur op verschillende plekken in de mal worden gemonitord en vergeleken met de data afkomstig van de RFID-temperatuursensoren. Een vierde thermokoppel (T4) werd op de positie van T1 midden in de asfaltplaat geplaatst, ca. 2,5 cm boven de bodem van de mal.



Figuur 6 Er zijn 3 thermokoppels (T1, T2, T3) op de bodem van de mal aangebracht ter validatie van de data afkomstig van de RFID temperatuursensoren. De blauwe cirkels refereren naar de positie van de thermokoppelsensoren. Een vierde thermokoppel T4 (niet weergegeven) is ca 2,5 cm boven T1 geplaatst, halverwege de asfaltplaat.

De sensoren zijn getracht uit te lezen vanaf het moment dat het asfalt in de mal werd gestort, gedurende het verdichten, en tijdens het afkoelen (tot ca. 4 uur na de productie), Figuur 7.



Figuur 7 Temperatuurmonitoring tijdens de asfaltproductie (links en midden) en tot 4 uur van het afkoelen (rechts).


















#### 4.2.4 Onderzoeksopzet

In het onderzoek zijn 5 asfaltplaten gemaakt:

- Plaat 1: DZOAB met enkel "kleine" RFID-sensoren.
- Plaat 2: AC-11 Surf met dezelfde "kleine" RFID-sensoren als plaat 1.
- Plaat 3: DZOAB met voornamelijk "grote" RFID-sensoren.
- Plaat 4: AC-11 Surf met dezelfde RFID-sensoren als plaat 3.
- Plaat 5: DZOAB met RFID-temperatuursensoren en een enkel type van de "grote" RFID-sensoren.

De verschillende sensoren zijn over de platen verdeeld, zoals zichtbaar in . De sensorcodes van de gebruikte RFID-sensoren zijn weergegeven om de sensoren in het mengsel te kunnen identificeren.

Tabel 3 Schematische onderzoeksopzet met de verdeling van de RFID-sensoren over de verschillende asfaltplaten.

	Sensorcode (plaat #)	Type RFID-sensor	Plaatsing	Type asfalt (plaat #)
A	 01005 (5) 01006 (5) 01010 (5) 01011 (5) 01012 (5) 01013 (5) 01014 (5) 01016 (5) 01017 (5)	Temperatuur sensor	Tussen asfaltlagen 	DZOAB (5)
B	 02001 (5) 02018 (5) 02017 (5)	Grote ID-tag (enkele cm)		
C	 03001 (3) 03002 (3) 03003 (4) 03004 (4)	Grote ID-tag (enkele cm)	Tussen asfaltlagen 	DZOAB (3) AC11-surf (4)
D	 04001 (3) 04001 (3) 04003 (4) 04004 (4)	Grote ID-tag (enkele cm)		
G	 07001 (3) 07002 (3) 07003 (4) 07004 (4)	Grote ID-tag (enkele cm)		
B	 02007 (3) 02008 (3) 02010 (3) 02005 (4) 02011 (4) 02021 (4)	Kleine ID-tag (<1 cm)	Random (mixer) 	
I	 09001 (1) 09002 (1) 09003 (1) 09004 (1) 09007 (2) 09008 (2) 09009 (2) 09010 (2)	Kleine ID-tag (<1 cm)	Random (mixer) 	
J	 10001 (1) 10002 (1) 10003 (1) 10004 (1) 10007 (2) 10008 (2) 10009 (2) 10010 (2)	Kleine ID-tag (<1 cm)	Gepositioneerd (asfaltmengsel) 	DZOAB (1) AC11-surf (2)
K	 11001 (1) 11002 (1) 11003 (1) 11004 (1) 11007 (2) 11008 (2) 11009 (2) 11010 (2)	Kleine ID-tag (<1 cm)		
L	 12001 (1) 12002 (1) 12003 (1) 12004 (1) 12007 (2) 12008 (2) 12009 (2) 12010 (2)	Kleine ID-tag (<1 cm)		
M	 13001 (1) 13002 (1) 13003 (1) 13004 (1) 13007 (2) 13008 (2) 13009 (2) 13010 (2)	Kleine ID-tag (<1 cm)		
N	 14001 (1) 14002 (1) 14003 (1) 14004 (1) 14007 (2) 14008 (2) 14009 (2) 14010 (2)	Kleine ID-tag (<1 cm)		

#### 4.2.5 Data-acquisitie

Voor de data-acquisitie is de RFID-antenne via een USB-poort aangesloten op een laptop. Via een terminal-programma wordt de output van de antenne gemonitord en opgeslagen. Hieronder is een voorbeeld gegeven van de opgeslagen meetdata:

```
[2022-05-31 15:36:08.919] 34040000000000000000000000001017 46.24C  
[2022-05-31 15:36:08.919] 34040000000000000000000000001013 53.72C  
[2022-05-31 15:36:08.919] 34040000000000000000000000001016 40.95C  
[2022-05-31 15:36:08.919] 34040000000000000000000000001013 53.72C  
[2022-05-31 15:36:09.149] 34040000000000000000000000001017 45.69C  
[2022-05-31 15:36:09.623] 34040000000000000000000000001016 45.14C
```

Dit is een fragment van een meetbestand tijdens de afkoelperiode van asfaltplaat 5. Hierbij is op elke regel het eerste deel de datum en tijd van de meting (opgeslagen bij de test voor de temperatuurprofielen), vervolgens een lange numerieke code, waarvan de laatste 5 getallen het sensortype (hier 01, dus sensor tag A) en het nummer van de individuele RFID-tag (hier 013, 016 en 017) bevatten. Voor sensor A wordt dit gevolgd door de temperatuur in °C. De temperatuurwaarden worden weergegeven in stapjes van ongeveer 0,18 °C en zijn dus niet op 0,01 °C nauwkeurig. Dit komt door het feit dat de ruwe meetdata van de sensor omgerekend wordt naar de temperatuur via een formule van de fabrikant<sup>2</sup>:

$$T = (N + TUNE - 500)/5.4817 + 24.9$$

waarbij N en TUNE gehele getallen zijn, ruwe meetwaarden van de RFID sensor. Als bijvoorbeeld  $N+TUNE = 500$ , dan is de berekende temperatuur 24.9 °C, terwijl bij  $N+TUNE = 501$  het resultaat 25.08 °C zal zijn.

Een meting met de RFID-antenne levert een continue datastroom op die in sommige gevallen, zoals hierboven, zelfs meerdere meetpunten van de verschillende sensoren per seconde opslaat.

Een meting met de RFID-antenne levert een continue datastroom op die in sommige gevallen, zoals hierboven, zelfs meerdere meetpunten van de verschillende sensoren per seconde opslaat.

Als referentie zijn ook 4 thermokoppels in asfaltplaat 5 geplaatst, waarvan de temperatuurwaarde elke 10 seconde wordt opgeslagen.

### 4.3 Resultaten – uitleesbaarheid

#### 4.3.1 RFID-sensoren

Zoals hierboven beschreven is het doel van deze experimenten om te zien in hoeverre de RFID-sensoren na aanbrengen in de asfaltlaag nog detecteerbaar zijn. Om dit vast te stellen is de asfaltplaat op diverse momenten van de fabricage uitgelezen met de antenne: na het storten van de plaat, na het verdichten en na het afkoelen. Daarnaast is gekeken of er sensoren zijn achtergebleven in de

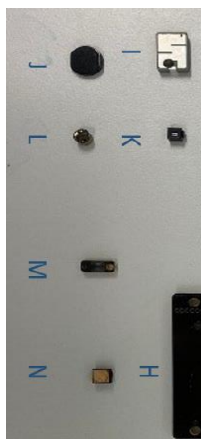
---

<sup>2</sup> Te vinden op: <https://www.rfidinc.com/amfile/file/download/file/707/>

asfaltmixer, omdat niet 100% van het mengsel is gebruikt voor het maken van de asfaltplaat. De resultaten staan weergegeven in onderstaande tabellen.

Tabel 4 Resultaten van de sensoren in asfaltplaten 1 en 2: de identificatiecodes van de geobserveerde sensoren zijn aangegeven per meetmoment. X refereert naar ontbrekende data, omdat er geen meting is uitgevoerd. In kolom 2,3,4: Groen betekent dat de sensor is gedetecteerd. Zwart betekent dat de sensor niet is gedetecteerd.

Sensoren in plaat 1 en 2	Na starten	Na verduchten	Na afkoelen	In mixer achtergebleven	Gedetecteerd
I Random (mixer)	09001 (1) 09002 (1) 09009 (2) 09010 (2)	09001 (1) 09002 (1) 09009 (2) 09010 (2)	09001 (1) 09002 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 1/2 Plaat 2: 1/2
I Gepositioneerd	09003 (1) 09004 (1) 09007 (2) 09008 (2)	09003 (1) 09004 (1) 09007 (2) 09008 (2)	09003 (1) 09004 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 2/2 Plaat 2: 2/2
J Random (mixer)	10001 (1) 10002 (1) 10009 (2) 10010 (2)	10001 (1) 10002 (1) 10009 (2) 10010 (2)	10001 (1) 10002 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 1/2 Plaat 2: 2/2
J Gepositioneerd	10003 (1) 10004 (1) 10007 (2) 10008 (2)	10003 (1) 10004 (1) 10007 (2) 10008 (2)	10003 (1) 10004 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 2/2 Plaat 2: 1/2
K Random (mixer)	11001 (1) 11002 (1) 11009 (2) 11010 (2)	11001 (1) 11002 (1) 11009 (2) 11010 (2)	11001 (1) 11002 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 2/2 Plaat 2: 2/2
K Gepositioneerd	11003 (1) 11004 (1) 11007 (2) 11008 (2)	11003 (1) 11004 (1) 11007 (2) 11008 (2)	11003 (1) 11004 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 2/2 Plaat 2: 1/2
L Random (mixer)	12001 (1) 12002 (1) 12010 (2)	12001 (1) 12002 (1) 12010 (2)	12001 (1) 12002 (1) X	12009	Plaat 1: 1/2 Plaat 2: 2/2
L Gepositioneerd	12003 (1) 12004 (1) 12007 (2) 12008 (2)	12003 (1) 12004 (1) 12007 (2) 12008 (2)	12003 (1) 12004 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 1/2 Plaat 2: 1/2
M Random (mixer)	13001 (1) 13002 (1) 13009 (2) 13010 (2)	13001 (1) 13002 (1) 13009 (2) 13010 (2)	13001 (1) 13002 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 0/2 Plaat 2: 0/2
M Gepositioneerd	13003 (1) 13004 (1) 13007 (2) 13008 (2)	13003 (1) 13004 (1) 13007 (2) 13008 (2)	13003 (1) 13004 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 1/2 Plaat 2: 0/0
N Random (mixer)	14001 (1) 14002 (1) 14009 (2) 14010 (2)	14001 (1) 14002 (1) 14009 (2) 14010 (2)	14001 (1) 14002 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 0/2 Plaat 2: 2/2
N Gepositioneerd	14003 (1) 14004 (1) 14007 (2) 14008 (2)	14003 (1) 14004 (1) 14007 (2) 14008 (2)	14003 (1) 14004 (1) X X	n.v.t.	Plaat 1: 0/2 Plaat 2: 0/2



Tabel 5 Resultaten van de sensoren in asfaltplaten 1 en 2: de identificatiecodes van de geobserveerde sensoren zijn aangegeven per meetmoment. X refereert naar ontbrekende data, omdat er geen meting is uitgevoerd. In kolom 2,3,4: Groen betekent dat de sensor is gedetecteerd. Zwart betekent dat de sensor niet is gedetecteerd.



Sensoren in plaat 3 en 4	Na storten	Na verlichten	Na afkoeLEN	In mixer achtergebleven	Gedetecteerd
<b>C</b> Gepositioneerd	03001 (3) 03002 (3) 03003 (4) 03004 (4)	03001 (3) 03002 (3) 03003 (4) 03004 (4)	03001 (3) 03002 (3) 03003 (4) 03004 (4)	n.v.t.	Plaat 3: 2/2 Plaat 4: 2/2
<b>D</b> Gepositioneerd	04001 (3) 04001 (3) 04003 (4) 04004 (4)	04001 (3) 04001 (3) 04003 (4) 04004 (4)	04001 (3) 04001 (3) 04003 (4) 04004 (4)	n.v.t.	Plaat 3: 2/2 Plaat 4: 2/2
<b>G</b> Gepositioneerd	07001 (3) 07002 (3) 07003 (4) 07004 (4)	07001 (3) 07002 (3) 07003 (4) 07004 (4)	07001 (3) 07002 (3) 07003 (4) 07004 (4)	n.v.t.	Plaat 3: 2/2 Plaat 4: 2/2
<b>B</b> Random (mixer)	02007 (3) 02008 (3) 02010 (3) 02005 (4) 02011 (4) 02021 (4)	02007 (3) 02008 (3) 02010 (3) 02005 (4) 02011 (4) 02021 (4)	02007 (3) 02008 (3) 02010 (3) 02005 (4) 02011 (4) 02021 (4)	n.v.t.	Plaat 3: 0/3 Plaat 4: 0/3
Sensoren in plaat 5	Na storten	Na verlichten	Na afkoeLEN	In mixer achtergebleven	Gedetecteerd
<b>A</b> Gepositioneerd	01005 01006 01010 01011 01012 01013 01014 01016 01017	01005 01006 01010 01011 01012 01013 01014 01016 01017	01005 01006 01010 01011 01012 01013 01014 01016 01017	n.v.t.	Plaat 5: 9/9
<b>B</b> Gepositioneerd	02001 02018 02017	02001 02018 02017	02001 02018 02017	n.v.t.	Plaat 5: 2/3

Deze resultaten geven een goed beeld van de toepasbaarheid van RFID-sensoren in asfalt. Voor de grote RFID-sensoren, die in plaat 3 en 4 zijn toegepast, kunnen alle sensoren gedetecteerd worden, en kan geconcludeerd worden dat deze voor de uitleesbaarheid zonder problemen toegepast kunnen worden in asfalt. Dit geldt ook voor de temperatuursensoren in asfaltplaat 5, hoewel van tag B één exemplaar niet gedetecteerd kon worden. De opgerolde tags type B (02) zijn niet geschikt om in de asfaltmixer mee te nemen, geen daarvan is na het storten van de asfaltlaag nog gedetecteerd in plaat 3 en 4.

Voor de kleine RFID-sensoren is het beeld wisselender. Een groot deel van de sensoren wordt niet gedetecteerd in de asfaltplaat. Opvallend hierbij is dat er geen groot verschil zit tussen de uitval van sensoren die in de mixer is gemengd, en van die tussen de asfaltlagen zijn geplaatst. Hierbij moet wel de kanttekening geplaatst worden dat bijvoorbeeld tags J, K en L (zelfs in lucht) alleen van een veel kleinere afstand uitgelezen konden worden (<20 cm). Daarom is het ook moeilijker om deze tags te vinden in de asfaltplaat, waar het signaal hinder ondervindt van het

tussenliggende asfalt. De tijd tussen het storten en walsen is vrij kort, en daarom is het aantal gedetecteerde tags op dat moment ook het kleinst.

#### 4.3.2 *RFID-temperatuursensoren*

Bij de productie van de vijfde plaat zijn de sensoren van het type A zo continue mogelijk uitgelezen, zodat een temperatuurprofiel is verkregen. Daarbij worden meerdere keren per seconde uitleespogingen gedaan waarbij alle 9 temperatuursensoren van type A en de 3 RFID-sensoren van type B tegelijk worden gescand. Dit levert een dataset op volgens de reeds in paragraaf 4.2.5 beschreven structuur. Het aantal meetpunten is afhankelijk van het aantal succesvolle uitleespogingen.

Tijdens het afkoelen is de uitlezer vlak boven de asfaltplaat geplaatst, en zijn er relatief veel meetpunten, terwijl bijvoorbeeld vlak na het storten of tussen de walsovergangen de uitleesomstandigheden minder optimaal zijn waardoor er minder metingen van de sensoren worden ontvangen. In deze gevallen was de afstand van de antenne tot de asfaltplaat bijvoorbeeld groter, doordat de metingen werden gedaan terwijl de asfaltplaat verplaatst werd naar de locatie waar de verdichting plaatsvond. Daarnaast worden de metingen tussen de walsovergangen enigszins verstoord als gevolg van interferentie met de metalen wals.

Na het uitlezen is de data gesorteerd, waarbij bijvoorbeeld zoals in Figuur 8 de temperatuurgegevens van één specifieke RFID-temperatuursensor worden geselecteerd. In onderstaande grafiek worden de gegevens van één van de temperatuursensoren (type A, tag 01006) getoond samen met de metingen van het dichtstbijzijnde thermokoppel (thermokoppel 2 uit Figuur 6).

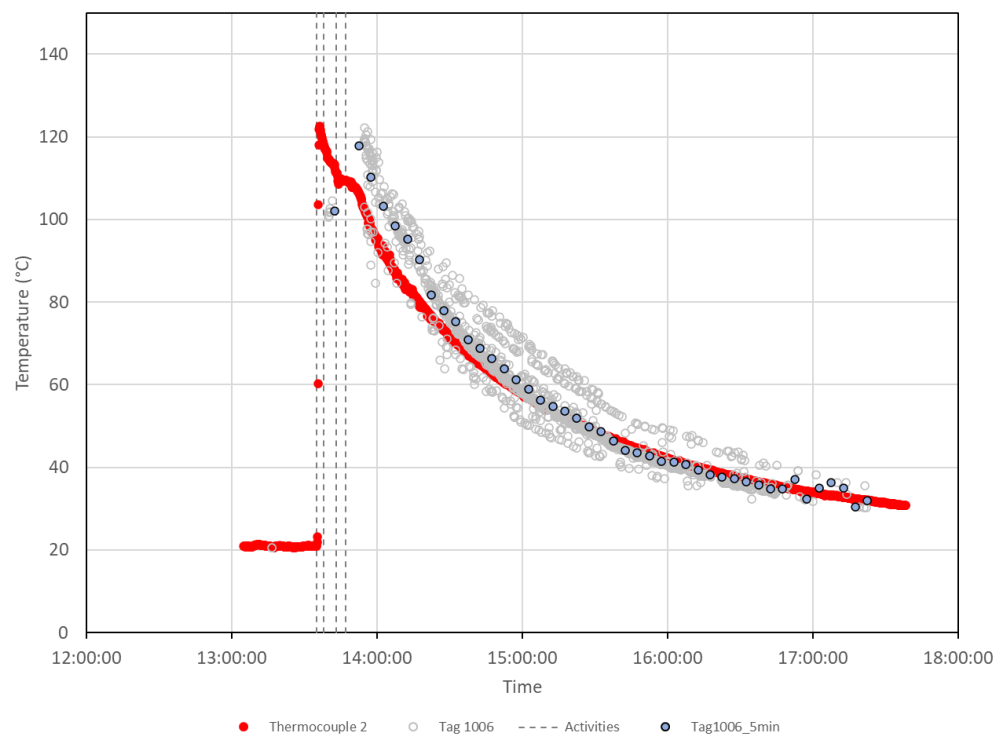






Ook ontbreekt in deze dataset de temperatuur bij de laatste terugkoppeling van sensor 01013 (b), terwijl dit wel een type A sensor betreft. Tot slot is het ook onwaarschijnlijk dat in de eerste regels de twee verschillende tags 01006 en 01017 beide precies 45,51 °C (c) meten. Hier lijkt dus inderdaad sprake van interferentie tussen de tags.

Het ligt daarom voor de hand om van de waarden van de temperatuurtags in dit geval het gemiddelde te nemen. De temperatuurwaarden van de tag 01006 zijn in Figuur 9 gemiddeld over een periode van 5 minuten. In dit geval is het resultaat veelbelovend. Het afkoelprofiel komt in dit voorbeeld goed overeen tussen de gemeten waarden van het thermokoppel en de gemiddelde waarde van de tag. Ook bij de andere tags die zich dicht bij de thermokoppels bevonden waren de resultaten vergelijkbaar, uitgebreidere resultaten van de temperatuur-experimenten zijn weergegeven in bijlage B.



Figuur 9 Afkoelprofiel bepaald met het 5-minuten gemiddelde van de temperatuursensor 01006 vergeleken met het dichtstbijzijnde thermokoppel in de asfaltplaat.

Het nemen van het gemiddelde werkte goed in bovenstaand voorbeeld, waarbij ondanks de interferentie het grootste deel van de meetpunten waarschijnlijk correct was en de afwijkende waarden zowel boven als onder de referentiewaarden lagen. Bij een asymmetrische afwijking zorgt het nemen van het gemiddelde voor een verschuiving, zoals bijvoorbeeld gebeurt bij tag 01012 in Figuur 11 in bijlage B. Voor vervolgonderzoek wordt dus aangeraden om interferentie zo veel mogelijk te beperken, dit kan onder andere bereikt worden door de instellingen van de RFID-uitleesapparatuur te optimaliseren. Tijdens de tot nu toe uitgevoerde experimenten waren de instellingen van de reader gekozen om de uitleesafstand

en het aantal meetpunten te maximaliseren. Om interferentie te verminderen kunnen bijvoorbeeld het zendvermogen en positie van de reader aangepast worden. Aanvullend wordt er aangeraden om te kijken naar zogenaamde *anti-collision* methodes die beschikbaar zijn voor RFID-apparatuur. Bij deze methodes worden niet alle tags tegelijk aangesproken, maar één voor één. Wanneer bekend is welke RFID-sensoren zich in het asfalt bevinden is dit redelijk recht-toe recht-aan, maar er bestaan ook methodes om slim te zoeken welke RFID's zich in het bereik van een antenne bevinden en ze vervolgens individueel uit te lezen. Ook kan het aantal tags in de asfaltlaag verminderd worden nu uit de experimenten blijkt dat alle ingekapselde tags die de temperatuur kunnen meten het asfalt productieproces hebben overleefd.

#### 4.4 Resultaten – uitleesafstand van RFID-sensoren in het asfalt

De uitleesafstanden van alle RFID-sensoren in de asfaltplaten zijn in het open veld bepaald, om zo min mogelijk interferentie van de omgeving te krijgen. Bij dit experiment werd de uitleesantenne eerst dicht bij de asfaltplaat geplaatst en vervolgens steeds verder tot de tags niet meer uitgelezen konden worden. Het resultaat staat weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Uitleesafstand van RFID tags in asfaltplaten. De uitleesafstand in lucht is afkomstig uit Figuur 1.

Asfaltplaat	RFID-type	Uitleesafstand in asfaltplaat (cm)	Uitleesafstand in lucht (cm)
1	N	Niet uitgelezen	15
	L, M	< 5	20 (L), 60 (M)
	I, J, K	5	100 (I), 30 (J), 10 (K)
2	M, N	5	60 (M), 15 (N)
	L	10	20
	J	20	30
	K	25	10
	I	65	100
3	C, D	250	500 (C, D)
	G	400	300
4	D, G	135	500 (D), 300 (G)
	C	285	500
5	B	40	480
	A	110	500

Deze metingen zijn slechts indicatief, omdat deze resultaten niet laten zien hoe gemakkelijk een sensor tag uit te lezen is, bijvoorbeeld hoeveel uitleespogingen nodig zijn om de sensor te detecteren. Dit resultaat laat wel zien dat de grote sensoren (A, C, D en G) vanuit de asfaltplaat op enkele meters uit te lezen zijn. De vraag is echter of het signaal echt door de plaat heen komt. Deze sensoren zijn namelijk op de bodem van de asfaltplaat gepositioneerd, en doordat de uitleesafstand (veel) groter is dan de asfaltplaat zelf is het mogelijk dat het signaal om de plaat heen gaat, in plaats van door de asfaltplaat. Bij de kleinere tags is de uitleesafstand vaak beperkt tot enkele centimeters, en daar speelt dit dus niet.

De afstand waarvan een RFID-sensor kan worden uitgelezen wordt in het algemeen kleiner wanneer de sensor in een asfaltplaat is aangebracht. Dit is vooral duidelijk te zien voor sensor A,B,C, D, I en G, welke in lucht vanaf een afstand van 1 meter of meer konden worden uitgelezen. Sensor G in asfaltplaat 3 vormt hierop een uitzondering. Voor de kleinere sensoren geldt ook dat de uitleesafstand afneemt, met uitzondering van sensor K in asfaltplaat 2. De aantallen RFID-sensoren zijn echter beperkt. Daarnaast zijn de meetomstandigheden ook verschillend omdat de metingen aan asfaltplaten buiten zijn uitgevoerd, terwijl de metingen in lucht binnen in het laboratorium zijn gedaan. Doordat buiten minder factoren zijn die een meting kunnen verstoren zijn metingen die binnen zijn uitgevoerd niet één op één te vergelijken met metingen buiten. Als gevolg hiervan moeten de verschillen als indicatief worden beschouwd.

## 5 Toepasbaarheid van COTS in asfalt

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de toepasbaarheid van de commercieel verkrijgbare sensoren in asfalt bediscussieerd n.a.v. de in dit onderzoek verkregen onderzoeksresultaten. Daarnaast worden er verbeter- en onderzoeksmogelijkheden aangedragen indien er wordt overgegaan op het ontwikkelen van een sensor speciaal voor de toepassing in asfalt.

### 5.2 Toepassing van COTS RFID-sensoren

De uitgevoerde experimenten hebben aangetoond dat het technisch mogelijk is om RFID-sensoren in asfalt aan te brengen. Er zijn verschillende RFID-sensoren te verkrijgen die voldoende temperatuurweerstand hebben om het asfaltproductieproces te overleven en daarnaast de mechanische belasting kunnen weerstaan gedurende de verwerking in de deklaag. Er zijn kleine robuuste RFID-sensoren beschikbaar die zelfs het mengen van het asfalt overleven, al gaan er doorgaans bij deze stap wel een aantal sensoren verloren. De beschikbaarheid van robuuste RFID-sensoren met temperatuursensor op de markt is beperkter. Er is in dit onderzoek immers maar één geschikte temperatuursensor toegepast, welke inkapseling nodig had voor het weerstaan van de mechanische belasting. Of the shelf was deze RFID-temperatuursensor niet klein genoeg en robuust genoeg om in de asfaltmixer danwel middenin het asfaltmengsel te plaatsen.

In het algemeen kunnen grotere RFID-sensoren beter uitgelezen worden vanaf een grotere afstand. Ook zijn deze gemakkelijker terug te vinden in een asfaltproefstuk. De uitleesafstand schaalt ruwweg met de afmeting van de sensoren. De uitleesafstand neemt duidelijk af als de RFID-sensoren in een asfaltplaat zijn ingebed. Wanneer het nodig is de tags op afstand uit te lezen is het dus noodzakelijk om voor de grotere RFID-sensoren te kiezen. Deze grotere RFID-sensoren zijn echter niet toe te passen in de asfaltmixer of midden in het asfaltmengsel en zullen daarom op de kleeflaag geplaatst moeten worden voordat de asfaltdeklaag aangebracht wordt.

### 5.3 Aanbevelingen

De verkregen resultaten zijn gebaseerd op in het lab geproduceerde asfaltplaten. De opschaling van de toepassing van COTS-RFID-sensoren naar een proefvakniveau is een interessante volgende stap, om de validatie uit te breiden naar praktijkschaal. Door de sensoren in een proefvak toe te passen wordt inzichtelijk of deze daadwerkelijk optredende walsdrukken en belasting uit asfaltmenginstallaties overleven. Ook kan op deze manier de maximale snelheid worden bepaald waarmee de RFID-sensoren kunnen worden uitgelezen. Hierdoor wordt het inzichtelijk voor de gebruikersscenarios of de informatie van de sensoren bijvoorbeeld vanuit een rijdend voertuig of vanaf de kant van de weg kan worden verkregen. De opschaling naar proefvakniveau geeft daarnaast ook inzicht in de praktische uitdagingen die spelen op het gebied van de sensordistributie in het

asfaltmengsel en de data-acquisitie en -opslag. Daarnaast kan de levensduur van de sensoren in het asfalt op de langere termijn worden bepaald alsmede de mogelijke invloed die de sensoren op de levensduur van het wegdek hebben. Tot slot biedt een proefvak ook de mogelijkheid om de uitdagingen die spelen rondom recycling van asfalt met sensoren te onderzoeken.

In het huidige onderzoek is uitgegaan van een selectie van commercieel beschikbare RFID-sensoren, welke direct of met kleine aanpassingen toegepast konden worden in het asfalt. Aan de hand van de eisen van de toepassing kan naast de opschaling naar proefvakniveau ook met de opgedane ervaring de eerste stap gezet worden in het ontwikkelen van een nieuwe RFID-sensor, met optimale afmetingen en toevoeging van functionaliteiten zoals andere sensoren die relevant zijn in het asfalt. Hierbij kunnen ervaringen met COTS in de praktijk als input dienen voor het optimale sensorontwerp.

Een van de problemen bij het gebruik van RFID-sensoren is dat de sensoren zijn ontworpen om te functioneren in lucht, en wanneer deze in een ander medium (in dit geval asfalt) worden gebruikt, kunnen ze “verstemmen”: de golflengte waarbij het signaal wordt ontvangen of verstuurd verschuift, wat de efficiëntie van de communicatie met de RFID-sensor vermindert of in het ergste geval onmogelijk maakt. Om dit op te lossen kunnen aanpassingen gedaan worden aan het ontwerp van de antenne. Hier loopt op dit moment nader onderzoek aan met behulp van modellen en simulaties.

## 6 Conclusies

In dit onderzoek is er ervaring op gedaan met het plaatsen van verschillende commerciële off the shelf sensoren (COTS) in asfalt. Het onderzoek toont aan dat het technisch mogelijk is om RFID-sensoren in asfalt aan te brengen.

Voordat de verschillende typen RFID-sensoren in het asfalt zijn verwerkt is er onderzoek gedaan naar de temperatuurbestendigheid en uitleesafstand van de sensoren. Deze experimenten laten zien dat:

- In het algemeen kunnen grotere RFID-sensoren door hun grotere antenne, beter uitgelezen worden vanaf een grotere afstand.
- Verhitting tot 50 °C heeft voor de meeste sensoren geen invloed op de uitleesafstand, maar bij hogere temperaturen neemt de uitleesafstand wel af.
- Een polymeren inkapseling kan de temperatuurbestendigheid van de RFID-sensoren verbeteren.

De toepassing van de sensoren in laboratorium geproduceerde asfaltplaten laat zien dat:

- De uitleesafstand duidelijk af neemt als de RFID-sensoren in een asfaltplaat zijn ingebed.
- Grotere RFID-sensoren zijn niet toe te passen in de asfalmixer of midden in het asfalmengsel en zullen daarom op de kleeflaag geplaatst moeten worden voordat de asfaltdeklaag aangebracht wordt.
- Wanneer de sensoren in een ander medium (in dit geval asfalt) dan waarvoor ze ontworpen zijn worden gebruikt kunnen ze verstemmen, waardoor de efficiëntie van de communicatie met de RFID sensor verminderd of in het ergste geval onmogelijk wordt gemaakt.

De opschaling van de toepassing van COTS-RFID-sensoren naar een proefvkniveau is een interessante volgende stap, om de validatie uit te breiden naar praktijkschaal. De resultaten van dit onderzoek, alsmede de resultaten uit de praktijk, kunnen als input dienen voor het optimale sensorontwerp bij de ontwikkeling van een nieuwe RFID-sensor. Bij de ontwikkeling van een nieuwe RFID-sensor wordt voor het ontwerp meerwaarde gezien in het optimaliseren van afmetingen en de toevoeging van meerdere sensorfunctionaliteiten. Ook zal er aandacht moeten worden besteed aan antenne-modificatie wat zorgt voor verbetering van de datatransmissie tijdens de productie-, aanleg- en gebruiksfase.

## 7 Ondertekening

Delft, 24 oktober 2022

TNO

K.V. Roetert Stenebruggen  
Auteur

i.a.  
Ir. A.D. Pikaart  
Research Manager Structural Reliability

Eindhoven, 17 oktober 2022

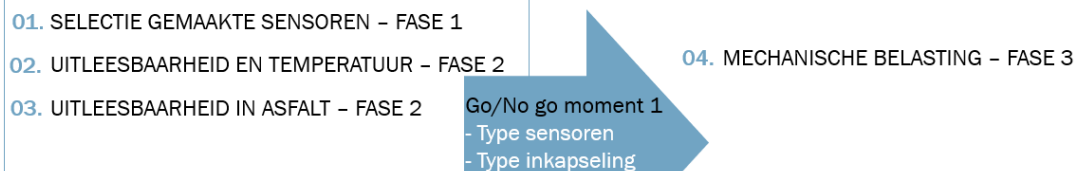
**imec**

J. Oudenhoven  
Auteur

## A GO/NO-GO meeting 1 – Proof of concept – COTS sensoren voor asfalt

### Doel

### AGENDA – GO/NO-GO MEETING 1 9/2/2022



### Datum

11/2/2022

### Tijd

11:00-12:00

### Locatie

TEAMS – online

### Aanwezig

Kirsten Roetert Steenbruggen (TNO) – notulist

Greet Leegwater (TNO)

Cecile Giezen (RWS)

Yawar Abbas (imec)

### Afwezig

Jos Oudenhoven (imec)



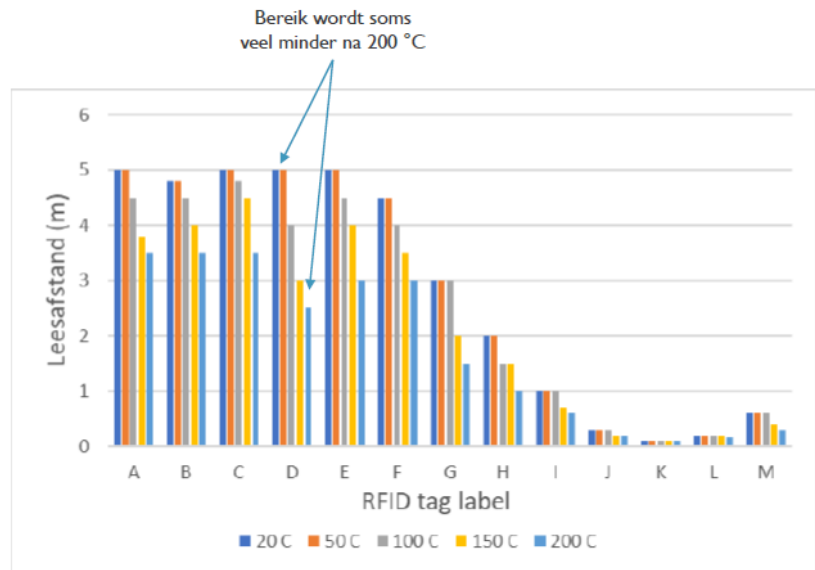
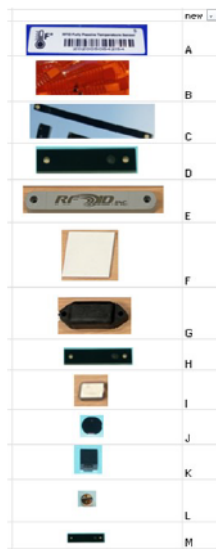
### Notulen

Yawar deelt in een Powerpoint de door imec aangekochte (Fase 1) en beproefde sensoren (Fase 2) tijdens de Go/No-go meeting. Het betreft een 13-tal sensoren – A t/m M, waarvan sensor A de temperatuur kan meten en de sensoren B t/m M kunnen worden gebruikt als identificatie tags.

De temperatuur proeven laten zien dat tag F niet geschikt is voor de toepassing

## Temperatuur

### Oven-test



imec

5

confidential

onder hoge temperaturen. Deze tag overleefde namelijk de hoge temperaturen niet, waardoor deze dan ook niet is meegenomen in de evaluatie van de tags. De overige sensoren konden wel de hoge (asfalt verwerkings) temperaturen aan in het lab. De grotere sensoren (ca. 10 cm) A t/m H laten een grotere uitleesafstand zien dan de kleinere sensoren (<1 cm) I t/m M.

Als Yawar vertelt dat het mogelijk is om de tags tijdens het uitlezen van elkaar te kunnen onderscheiden en te identificeren, lijkt het een logische stap om de in het plan van aanpak geplande Fase 3 (mechanische belasting) over te slaan en de tags direct in het asfalt te verwerken (Fase 4). Bij het opzetten van het plan van aanpak was het namelijk nog niet duidelijk of en hoeveel sensoren er in Fase 1 konden worden geselecteerd en of de sensoren dicht naast elkaar in het asfalt door de uitlezer nog te identificeren waren. Een pre-selectie op basis van de mechanische belasting lijkt daarom niet meer relevant.

Cecile suggereert dat het interessant kan zijn, dat wanneer de sensoren niet kunnen worden uitgelezen, om te onderzoeken of ze nog intact zijn na de verwerking.

De sensoren A t/m H zijn relatief groot, waardoor deze niet goed in het asfaltmengsel zouden kunnen worden verwerkt, omdat dit op een negatieve manier de hechting tussen de steentjes kan beïnvloeden. Omdat dit wel interessant kan zijn, gaat TNO nadenken over de mogelijke relevante toepassing hiervan (bijv. plaatsing tussen tussenlagen) en hoe dit in het lab kan worden gerealiseerd.

Sensoren A (temperatuur sensor) en B (identificatie tag) zijn als enige sensoren heel flexibel. Yawar stelt voor om A en B op te rollen tot ca. 1 cm en deze in epoxy te gieten. Hierdoor kunnen ze mogelijk wel in het asfalt als 'steentje' worden verwerkt.

Wat het effect van oprollen en inkapseling van de sensoren is op de uitleesafstand zal nader worden onderzocht.

### Uitkomst Go/No-go meeting 1

“Go”

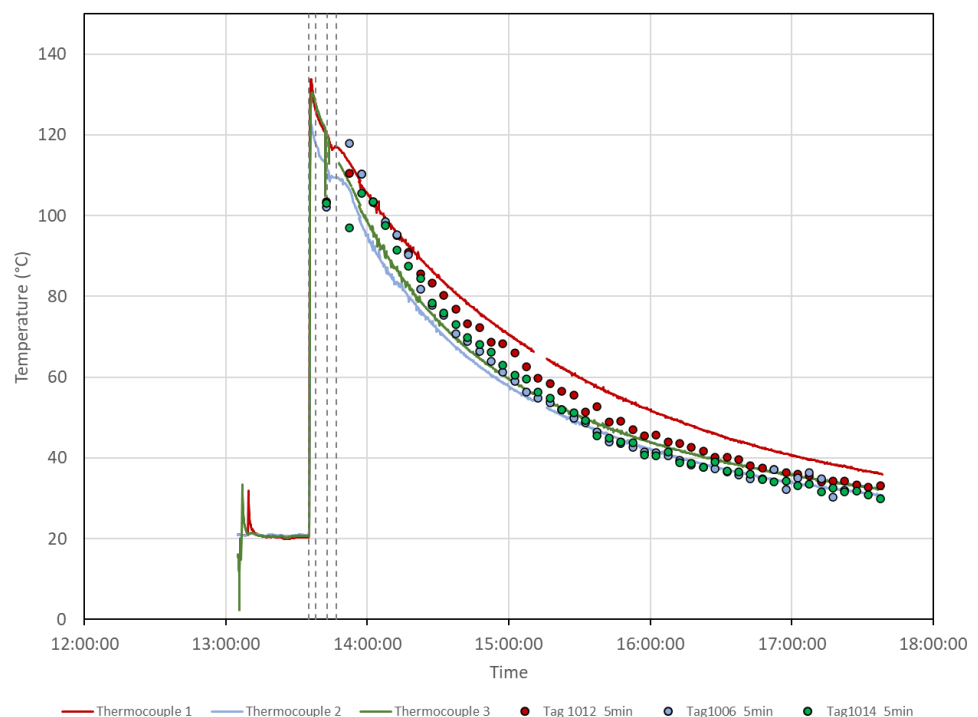
- Flexibele Sensoren A en B zullen worden opgerold en worden ingekapseld in epoxy, zodat ze alsnog als 'steentje' in het asfaltmengsel zouden kunnen verwerkt. Resultaten volgen.
- Over de toepassing en verwerking van de relatief grote en niet flexibele sensoren C, D, E, G, H in het asfalt wordt verder nagedacht.
- De sensoren slaan Fase 3 over en zullen direct in het asfalt worden verwerkt in Fase 4.

### To do's

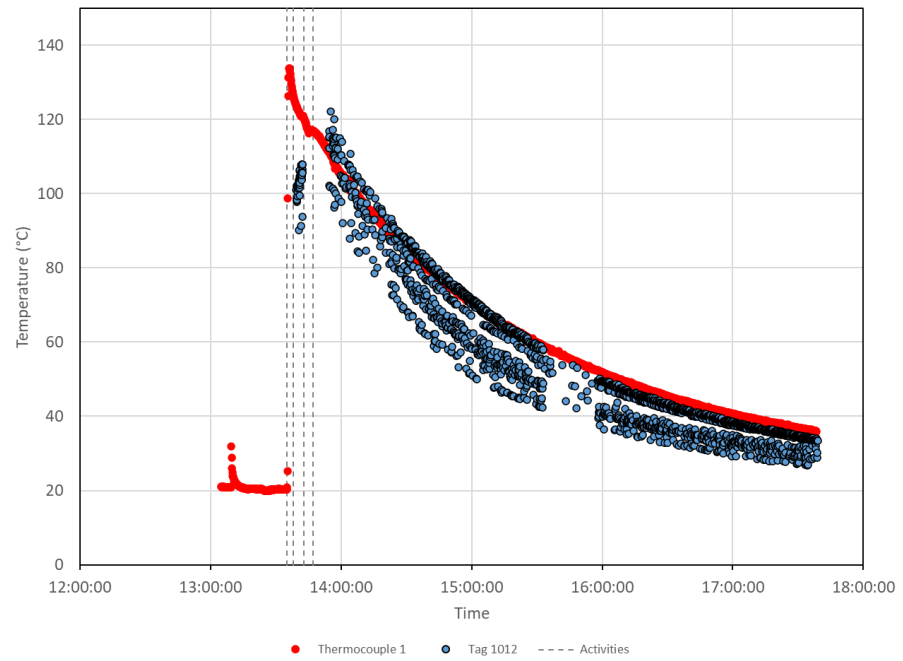
imec	Opsturen PP presentatie naar TNO en RWS
imec	Delen laatste testresultaten
TNO	Nadenken over toepassing en verwerking van grotere sensoren in het asfalt
imec	Oprollen van sensoren A en B vóór het inkapselen en effect van uitleesafstand bepalen.
TNO	Neemt contact op met imec over verwerking van sensoren in asfaltplaten en aanwezigheid van imec hierbij na ontvangen van laatste resultaten.
imec	Delen mixdesign asfaltmengsel met imec

## B Overige meetresultaten temperatuursensoren in asfalt

Tijdens de temperatuurproeven zijn 3 thermokoppels aangebracht op de bodem van de mal waarin het asfalt werd gemaakt. Twee daarvan (nummer 2 en 3) waren dicht bij de rand geplaatst en één in het midden. In Figuur 10 is te zien dat thermokoppel 2 en 3 bijna dezelfde temperatuurwaarden geven terwijl de temperatuur van de thermokoppel in het midden van de asfaltplaat veel hoger was (tot 10 °C hoger). De RFID-temperatuursensoren bij de thermokoppels laten een vergelijkbaar beeld zien: ook hier geeft tag 01012 die in het midden van de plaat is geplaatst de hoogste waarden, maar het verschil is veel kleiner dan bij de thermokoppels. In dit geval blijkt de beperking van het nemen van het gemiddelde voor 5 minuten, wat duidelijk te zien is in de ruwe data in Figuur 11. Deze data lijkt op de metingen weergegeven in Figuur 8, met als belangrijkste verschil dat de metingen van het thermokoppel samenvallen met de bovenste reeks meetpunten van de sensor. Het nemen van een gemiddelde resulteert dan in een systematische afwijking, waarbij de temperatuur wordt onderschat.

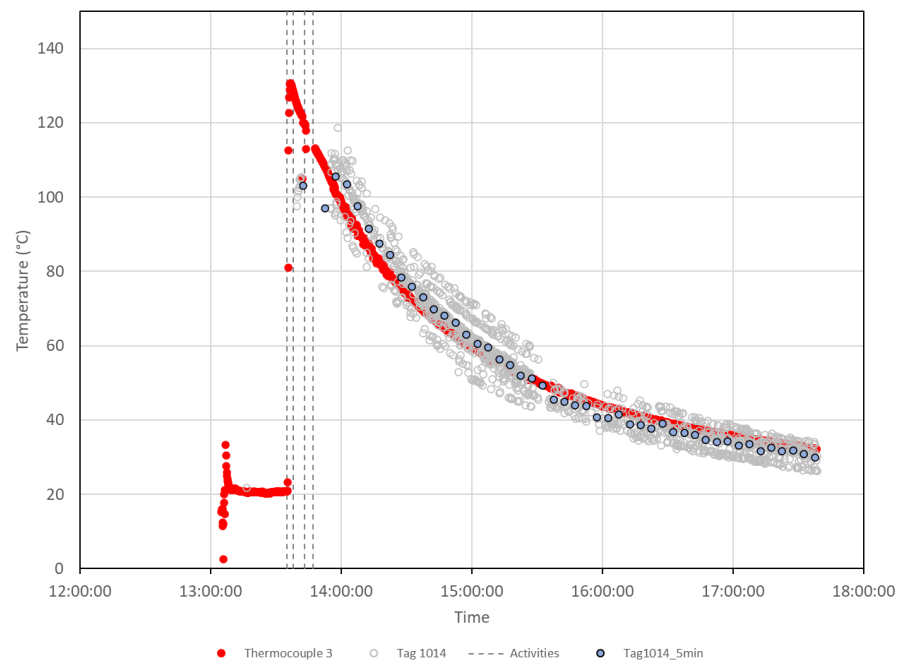


Figuur 10 Resultaten van de drie thermokoppels (lijn) en de gemiddelden over 5 minuten voor de drie temperatuursensoren (cirkels) die het dichtst bij dat thermokoppel waren geplaatst. De sensoren en tags die bij elkaar liggen zijn weergegeven in dezelfde kleur.



Figuur 11 Ruwe meetdata voor Thermokoppel 1 en sensor 01012

Tot slot geeft de meting met thermokoppel 3 en tag 01014 (Figuur 12) wel zeer vergelijkbare resultaten als de metingen met thermokoppel 2 en sensor 01006 (Figuur 9).



Figuur 12 Meetdata van Thermokoppel 3 en temperatuursensor 01014