

RFID sensoren voor asfaltmetingen

Sjon van Dijk
Universiteit Twente

Sergei Miller
ASPARi, Universiteit Twente

Marco Oosterveld
BAM Wegen

Samenvatting

RFID technologie, een technologie om contactloos informatie over te zetten, is onderzocht op de bruikbaarheid voor temperatuur en drukmetingen in asfalt. De technologie kan mogelijk als platform dienen voor het uitlezen van vele verschillende parameters in asfalt. Het doel van dit project was om te testen of RFID technologie inderdaad klein en robuust genoeg is om de hoge asfalt temperaturen en hoge verdichtingsdruk van walsen te kunnen weerstaan. Daarnaast wordt getracht de asfalt temperatuur tijdens vorst-dooi cyclussen expliciet te maken.

Er is gekozen om passieve sensoren in dit onderzoek te testen vanwege hun mogelijke voordelen. Passieve sensoren zijn klein, gebruiken een externe energie bron (reader) en zijn relatief goedkoop vergeleken met actieve sensoren. Door gebrek aan druksensoren, is dit gedeelte van het project gestopt en is de focus volledig gericht op temperatuursensoren.

De sensoren zijn in verschillende fasen in de laboratorium en op de bouwplaats getest. In het lab is onderzocht hoe de sensoren worden geplaatst en of ze de hoge temperatuur overleven. Op verschillende bouwplaatsen zijn diverse plaatsingsmethodieken afzonderlijk getest. Een aantal sensoren zijn vervolgens binnen nieuwe wegdekken rondom Enschede geplaatst.

Uiteindelijk bleken de sensoren te functioneren in asfalt. Asfalt temperatuur onder de 125°C (lage temperatuur mengsels) en druk van walsen leveren geen problemen voor de sensoren. Hoewel de temperaturen boven de 130°C slecht werden uitgelezen. Verschillende manieren om sensoren op de plaats te houden bleken te werken. Door combinatie van deze resultaten lijkt het dat RFID sensoren kunnen dienen als platform voor het verkrijgen van informatie uit het asfalt. Verder onderzoek is benodigd naar sensoren met een betere uitleesafstand en een hoger temperatuur meetbereik. Daarnaast kan er worden overgestapt op andere data dan temperatuur alleen. Het onderzoek naar de vorst- en dooi cyclussen is reeds begonnen en wordt verder doorgezet. Tot nu toe werken de gebruikte sensoren goed en is er nog geen temperatuur onder de 0°C in het binnenste van het asfalt waargenomen.

1. Inleiding

Met welke temperatuur is het walsen van een asfaltweg het efficiëntst? Waarom is onder gelijke weer- en omgevingsinvloeden de levensduur van de ene weg korter dan de andere? Dit zijn voorbeelden van vragen gerelateerd aan het invloedrijke verwerkingsproces van asfalt, waar de asfaltsector geen concreet antwoord op heeft.

Hoe kan het, dat na al die jaren de asfaltsector geen antwoord heeft op dit soort cruciale vragen? Een belangrijke reden hiervoor is een gebrek aan feedback vanuit het asfalt. Asfalt wordt aangelegd met gebruik van het “fingerspitzengefühl”. Op gevoel en ervaring geeft men het proces vorm en deze methode heeft Nederland jarenlang goede wegen opgeleverd. Maar wat als het tijdens de aanleg mogelijk was vanuit het asfalt informatie te krijgen over temperatuur, druk, vochtgehalte en andere belangrijke parameters? Dan kan worden gezien hoe het verwerkingsproces is verlopen en worden onderzocht wat de invloed is van verwerking op de levensduur van het eindresultaat. Op deze manier kunnen aanpassingen worden gemaakt om de verwerking efficiënter en effectiever te laten verlopen. Daarnaast is het mogelijk om het asfalt over de volledige levensduur te controleren en te zien of te voorspellen wanneer het asfalt toe is aan reparaties.

Radio Frequency Identification (RFID) is een techniek die dit in de nabije toekomst eventueel mogelijk maakt. RFID wordt al tijden toegepast als identificatie in kleding om diefstal te voorkomen. Maar sinds die tijd is de techniek verder ontwikkeld en zijn de sensoren nu in staat om veel meer informatie te bevatten en metingen uit te voeren.

Tegenwoordig zijn er fabrikanten die beweren dat RFID sensoren de zware omstandigheden in het asfalt kunnen overleven. In dit project is onderzocht of er sensoren zijn die daadwerkelijk robuust genoeg zijn om het asfalt te overleven en of de sensoren goed toepasbaar zijn als meetsysteem in asfalt. Daarnaast moet de technologie goed toepasbaar zijn, om op grote schaal gebruik mogelijk te maken. Het onderzoek is uitgevoerd in verschillende fasen:

1. Een literatuuronderzoek om de geschikte sensor voor gebruik in asfalt te vinden,
2. Laboratoriumtesten om te onderzoeken hoe de sensoren in de asfaltlaag worden geplaatst,
3. Een experimentele toepassing van de sensoren op vier verschillende bouwplaatsen,
4. Het installeren en testen van sensoren in nieuw aangelegde wegen in Enschede om op lange termijn de asfalttemperatuur te controleren.

2. Methodiek

Om het meeste uit nieuwe technologie te halen, is een uitgebreid testtraject benodigd. Naast het weten wat de sensor kan, moet er ook een vaste manier van toepassen worden opgesteld. Aan de hand van de vier eerder benoemde fasen is dit proces verlopen.

Eerst is bepaald aan welke eisen de sensor moet voldoen en wat RFID sensoren zijn. Daarnaast is het asfaltverwerkingsproces bestudeerd en is uiteindelijk bepaald welke sensor benodigd is. Dit wordt verder besproken in paragraaf 0.

In het lab is onderzocht hoe de sensor in het asfalt wordt geplaatst. Hierbij werd rekening gehouden met de temperatuurverschillen in het asfalt, de manier van verwerken en hoe de sensor uiteindelijk wordt uitgelezen. De volgende conclusies zijn getrokken voor de start van de test:

- Verankering van de sensor is benodigd. Door de walsen en spreidmachine ontstaat beweging in het asfalt, waardoor de sensor verplaatst.
- De sensor moet niet in de baan van de rupsbanden van de spreidmachine worden geplaatst.
- Plaatsing moet vooraf gebeuren, naderhand moet het asfalt niet worden beschadigd.
- Voor een goed beeld van de temperatuur in het asfalt, moet de sensor in het midden van de laag worden geplaatst.
- De sensor moet veilig uit te lezen zijn.

Verscheidene methodes voor het vastzetten en stabiliseren van de sensor zijn getest. Onder andere het bevestigen van de sensoren met metalen bouten, gietasfalt en bitumenstrips. De stabiliteit geleverd via de verschillende methodes is getest met behulp van een gyator en een handmatig asfalt walsproces.

De volgende belangrijke stap in het project waren de veldtesten. Op bouwplaatsen in Apeldoorn en Elst zijn sensoren in de weg geplaatst. De resultaten van de temperatuursensor werden vergeleken met resultaten van een infrarood camera en thermokoppeldraden. De veldtesten zijn daarnaast gebruikt om de toepasbaarheid te beoordelen.

Een half jaar na de veldtesten is er begonnen met de plaatsing van sensoren Enschede. Bij verschillende bouwprojecten zijn de sensoren toegepast, waarna de sensoren zullen worden gemonitord. Dit gedeelte van het onderzoek laat zien of de sensoren over langere tijd blijven functioneren. Vooral tijdens de wintermaanden worden de sensoren vaak uitgelezen, om mede het verband tussen buitentemperatuur en in-asfalt temperatuur te meten.

3. Literatuuronderzoek

Het asfaltverwerkingsproces zorgt voor verschillende eisen waar de sensor aan moet voldoen. Tijdens de verwerking zijn er drie belangrijke factoren die een probleem vormen: De temperatuur, de druk en bewegingen binnen het asfalt.

Binnen Nederland wordt er gebruik gemaakt van verschillende soorten asfaltmengsels. De mengsels die het vaak worden gebruikt vallen in de categorie Hot Mix Asphalt (HMA). Deze mengsels worden gemengd met temperaturen hoger dan 175°C. Vervolgens worden deze mengsels verwarmd vervoerd en uiteindelijk op de bouwplaats aangelegd met een temperatuur van circa 150°C. Warm Mix Asphalt (WMA) is een minder gebruikt asfaltmengsel wat met een temperatuur van ongeveer 130°C wordt gemengd. Voor dit project is een RFID sensor nodig die piektemperaturen tot 175°C kan overleven.

De verdichting wordt verkregen met behulp van de asfaltspreidmachine en verschillende walsen. De asfaltspreidmachine krijgt het asfalt aangeleverd door trucks en verdeelt het asfalt over de weg met behulp van een verdeelworm. De spreidmachine heeft direct achter de verdeelworm een trilplaat en een stamper zitten, die het asfalt verdichten. Asfalt dat de spreidmachine verlaat is daardoor al voor circa 90% verdicht (CROW, 2010). De laatste verdichting wordt bereikt met behulp van walsen met gewichtsklassen tussen de 2 en 18 ton. Dit betekent dat de sensor de oppervlaktedruk van de spreidmachine en walsen aan moet kunnen. Daarnaast bestaat asfalt uit steentjes, bijeengebonden met bitumen, wat betekent dat de krachten uiteindelijk niet gelijkmatig worden verdeeld over het oppervlak van de sensor, maar dat de krachten worden overgebracht op de plaatsen waar de verschillende stenen de sensor raken. Dit zorgt voor hoge puntlasten op de sensor. Om deze puntlasten op te vangen wordt vaak gekozen om de sensor te voorzien van een dikke coating die de krachten opvangt en gelijkmatiger verdeeld. Het nadeel van een coating is dat de opwarming van de sensor hierdoor vertraagd, wat voor afwijkingen in de metingen zorgt.

Het laatste probleem komt ook voor tijdens de aanleg van het asfalt als de vervormbaarheid van de asfaltweg nog hoog is. Tijdens de verdichting ontstaan veel vervormingen en bewegingen in het asfalt. Dit betekent dat als de sensor op een gefixeerd punt moet meten, de sensor niet mee mag bewegen. Daarom moet gekeken worden naar een manier om de sensor vast te zetten.

4. RFID

Radio Frequency Identification is een technologie dat met radiogolven draadloze overdracht van data mogelijk maakt. Informatie wordt gemeten en opgeslagen door RFID sensoren en kunnen met behulp van een RFID reader worden uitgelezen. Naast de eerder besproken eisen in sterkte moeten de sensoren ook goed toepasbaar zijn in de asfaltlaag. Om een goede sensor te vinden, moeten twee belangrijke factoren worden meegenomen in het onderzoek: de manier waarop de RFID sensor van energie wordt voorzien en de frequentie waarmee de RFID techniek de data verzendt.

4.1 Energietoevoer

RFID sensoren worden met betrekking op energietoevoer onderverdeeld in twee categorieën: actief en passief (Smith, 2004). Actieve RFID sensoren gebruiken een interne elektrische bron voor energievoorziening. Deze sensoren hebben door de interne stroomtoevoer de capaciteit om te continue te meten. Daarnaast kunnen actieve sensoren op grote afstand worden afgelezen. (Dressen, z.d.). Nadelen van Active RFID is dat er bedrading nodig is voor de stroomtoevoer. Dit zorgt ervoor dat de plaatsing lastiger wordt, en als de sensor op grote schaal wordt toegepast, moeten er speciale stroomnetwerken worden opgezet. Ook is de sensor relatief duur, gemiddeld ongeveer 15 tot 100 dollar (Jovix, 2015).

Passieve RFID sensoren hebben geen bedrading nodig. Deze vorm van sensoren gebruiken het signaal van de reader als energiebron. Daardoor hebben ze een sterk signaal nodig en zijn ze op een minder grote afstand afleesbaar (Dressen, z.d.). Het grote voordeel aan passieve sensoren zijn de lage kosten en het gebrek aan bedrading. Passieve sensoren kunnen door hun externe energievoorziening voor de volledige levensduur in het asfalt worden geplaatst.

Naast passief en actief zijn er ook semi-actieve sensoren. Deze maken gebruik van batterijen om van stroom te worden voorzien. Alleen zijn deze batterijen niet bestand tegen hoge temperaturen.

4.2 Frequentie

RFID technologie is op basis van frequentie onderverdeeld in vier klassen. Lage frequentie(LF), 30 – 300kHz; Hoge frequentie(HF), 3 – 30MHz, Ultra Hoge Frequentie(UHF), 300- 3000MHz en Microwave, 3 - 30 GHz (Dressen, z.d.). Elke frequentie heeft voor en nadelen. De perfecte sensor heeft een groot geheugen, een snelle data transitie,

		Communication Range							
Frequency Band	System Type	3 cm	10 cm	30 cm	1m	3m	10m	> 10m	
LF	Passive	■	■	■	■	■	■	■	
HF	ISO14443	■	■	■	■	■	■	■	
	ISO15693	■	■	■	■	■	■	■	
UHF	Passive	■	■	■	■	■	■	■	
	Active	■	■	■	■	■	■	■	
Microwave	Passive	■	■	■	■	■	■	■	
	Active	■	■	■	■	■	■	■	

		Memory Capacity (Bytes)								
Frequency Band	System Type	16	64	256	512	1K	8K	16K	32K	128K
LF	Passive ISO	■	■	■	■	■	■	■	■	■
HF	ISO14443	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ISO15693	■	■	■	■	■	■	■	■	■
UHF	Passive	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Microwave	Passive	■	■	■	■	■	■	■	■	■

en groot bereik om de sensor af te lezen. Alleen is dit niet mogelijk. Snelheid waarmee data wordt uitgelezen en bereik zijn van elkaar afhankelijk (Dressen, z.d.). In Tabel 1 zijn de belangrijkste parameters aangegeven waar de keuze op wordt gebaseerd. De sensoren komen maximaal 10 cm in het asfalt te liggen. Een veel groter bereik is alleen voor lokalisatie handig. Hoge Frequentie kan het snelst data overzetten (Schwartz, Khan, Pfeiffer, & Mustafa, 2014), maar veel data wordt niet overgezet, alleen de

Tabel 1 -Eigenschappen frequenties

temperatuur.

4.3 Uiteindelijke RFID keuze

Voor asfaltmetingen tijdens het verwerkingsproces wordt een passieve SAW RFID chip aangeraden welke gebruik maakt van Microwave golven tot 2,45 GHz. De keuze voor deze sensor berust op de volgende argumenten:

- Passief heeft geen bedrading of interne bron nodig.
- SAW RFID werkt goed tussen metalen en vloeistoffen, dit levert mogelijk minder problemen met de bitumen in het asfalt(RFSAW, 2015).
- De reader voor SAW technologie is draagbaar.
- De sensor is over grote afstand van tot wel 15 meter af te lezen (Tentacle Technologies, 2015)

In dit onderzoek werd door gebrek aan SAW RFID opties, gebruik gemaakt van een andere RFID sensor dan in eerste instantie aanbeveelt. Een passieve UHF sensor was de basis voor dit onderzoek. De Microsensus Telid 412 met een piektemperatuur tot 175°C. Om de chips uit te lezen wordt gebruik gemaakt van de Casio IT800 met een RFID Module.

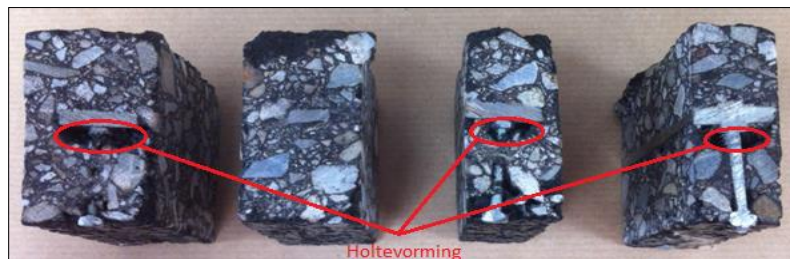
5. Resultaten

5.1 Laboratoriumtesten

Tijdens de testen in het lab zijn vier verschillende plaatsingsmethodieken getest: plaatsing zonder verankering, verankering met gietasfalt, verankering met bitumenstrips en verankering met bouten. De sensoren zijn ingebracht in asfalt proefmonsters. De plaatsing zonder verankering wordt gezien als nulmeting. Doordat verplaatsing in asfalt zeer lastig te meten is, wordt de verplaatsing aangetoond met behulp van doorsnedes.

De nulmeting had direct onverwachte resultaten. Na het verwerken en de uiteindelijke meting bleek dat er geen kanteling of verplaatsing kon worden gemeten. De sensor is daarnaast ook in een gyrator getest, maar ook daar kwam geen verplaatsing voor.

De verankering met bouten had negatieve resultaten. Onder de sensoren



Figuur 1 Plaatsing met bouten

ontstaan holtes, waar lucht in gaat zitten. In figuur 1 is aangegeven waar deze holtevorming ontstaat. In deze test werd zichtbaar dat de roestvrij stalen bouten verbogen waren tijdens het proces, wat laat zien dat er veel kracht op de sensor wordt uitgeoefend.

De verbinding met gietasfalt toonde geen holtevorming of verplaatsing. Daarnaast ontstaat er een verbinding tussen het verhitte gietasfalt en het omliggende asfalt. De sensoren verhuuld in gietasfalt worden beschermd tegen omliggend aggregaat, dit is ook te zien in figuur 2. Onder het gietasfalt komen geen holtes voor, wat positief is voor het overbrengen van krachten op de onderlaag.



Figuur 2 Aggregaat in gietasfalt

Figuur 3 Sensor met gietasfalt

5.2 Veldtesten

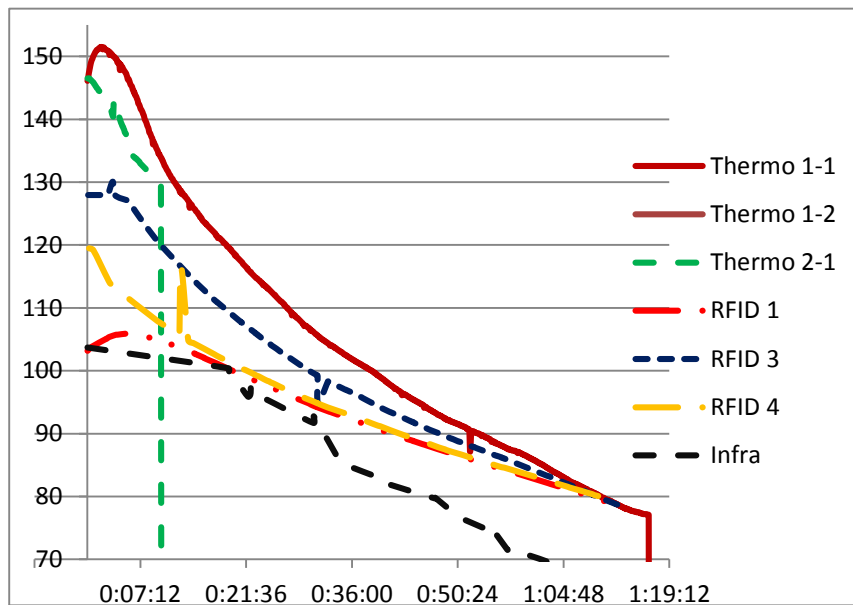
Na de laboratoriumtesten is de sensor in het veld getest. Ondanks dat de testen in het lab uitwezen dat de sensoren weinig verplaatsen, is er in overleg met verscheidene asfaltdeskundigen toch gekozen om de sensoren wel te verankeren. De proefmonsters in het lab zijn allemaal ingesloten door een stalen mal. Deze mal belemmert de beweging in het asfalt, waardoor de sensoren niet verplaatsen. In het veld is er geen sprake van omsloten asfalt, hierdoor ontstaat veel meer beweging in het asfalt. Met de veldtesten zijn de bitumenstrips en de gietasfaltverankering wederom getest. De resultaten van de testen zijn vergeleken met andere meetmethodes.

De sensoren worden op het ondergelegen wegdek vastgezet, waarna de spreidmachine het nieuwe wegdek erover aanlegt. Figuur 4 laat het resultaat zien van de eerste uitgevoerde

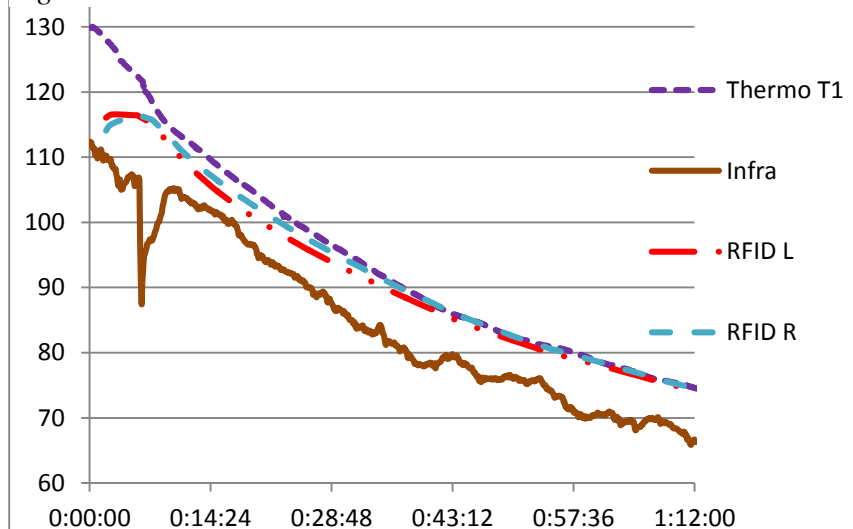
test. Er zijn in deze test vier sensoren toegepast, drie thermokoppels en een infraroodcamera. De eerste test laat goed zien wat een heftig verwerkingsproces er aan de pas komt. Aan het eind van de test zijn twee thermokoppeldraden en een RFID sensor gesneuveld.

De thermokoppel wordt van deze drie technieken gezien als de meest nauwkeurige techniek om de temperatuur te meten. Hoe dichter de meting bij de thermokoppel zit, hoe nauwkeuriger de sensor. Maar asfalttemperaturen verschillen veel door het wegdek heen, daarom is het mogelijk dat twee thermokoppels afwijkende metingen hebben. De infraroodcamera heeft de grootste afwijking tijdens de testen. Gemiddeld wijkt de

infraroodcamera circa 10 °C af. Dit is niet omdat de infraroodcamera onnauwkeurig is, maar omdat de infraroodcamera de oppervlakte van het asfalt meet. De oppervlakte van het asfalt verliest sneller warmte dan de binnenkant. De thermokoppeldraden geven volledige afkoelingscurves als ze niet breken. Wat tijdens de testen in meer dan 50% van de gevallen is voorgekomen. De RFID sensoren geven een volledige afkoelingscurve, maar hebben aan het begin van de test een vertraging in de meting. De sensor begint pas met asfaltmetingen vanaf 128 °C, waardoor aan het begin van de test, de temperatuurwaarnemingen lager zijn dan in de werkelijkheid. Figuur 5 laat een later uitgevoerde



Figuur 4 Eerste veldtest



Figuur 5 Landurige veldmeting

twee RFID sensoren en de infraroodcamera. Eén thermokoppel heeft deze test overleefd. De RFID sensoren zitten dicht in de buurt met de temperaturen en binnen de afwijking die kan ontstaan door de inconsistente asfalttemperaturen. Toch is weer zichtbaar dat de sensor eerst moet opwarmen voordat de thermokoppel curve wordt gevolgd. De infraroodcamera meet gedurende de test weer gemiddeld 10 °C lager dan de thermokoppel, omdat de oppervlakte temperatuur wordt gemeten.

test zien. In deze test werd gebruik gemaakt van twee thermokoppels,

5.3 Project Enschede

De testprocedure is opgestart in Enschede en twee sensoren zijn tot nu toe geplaatst. In de lente zullen nog meer sensoren in het wegennetwerk van Enschede worden geplaatst. Het doel is deze sensoren wekelijks uit te lezen en te controleren op temperatuur vergeleken met de buitentemperatuur.

Tot nu toe zijn de temperaturen circa 6 keer uitgelezen. De sensoren werken nog en daarnaast zijn ze goed uit te lezen. Wat nu al opvalt, is dat de temperatuur in het binnenste van het asfalt maar zelden onder de 0 °C komt. Zelfs met temperaturen van -6 °C blijven de temperaturen in het asfalt op 0,5 °C. De oppervlakte van het asfalt daarentegen bereikt wel temperaturen onder de 0 °C.

6. Conclusie

Uit dit onderzoek blijkt dat passieve RFID een toepasbare techniek is om tot 125°C afkoelingscurves van asfaltmengsels te meten. De draadloze toepassing en de relatief lage kosten maken de sensor bruikbaar voor grootschalige asfaltmetingen gedurende de winterperiodes, als de vries en dooi cyclussen de asfaltlagen beschadigen. Verdere metingen van de geïnstalleerde sensoren zullen meer inzicht geven voor de validatie van het laatste.

Hoewel RFID technologie een veelbelovende techniek lijkt, heeft dit onderzoek een aantal uitdagingen en beperkingen belicht. Ten eerste is het ontbreken van een bruikbare druksensor voor het controleren van de verdichting in het asfalt teleurstellend. Ten tweede zorgt het gelimiteerde temperatuurbereik ervoor, dat de RFID sensor nog niet volledig toepasbaar is voor het grootste gedeelte van de HMA mengsels gebruikt in Nederland. Ten derde is het uitlezen van de sensor een hinderlijke en arbeid kostende taak omdat de reader nog te dicht bij de sensor moet zijn (minder dan 20cm), om de temperatuur uit te lezen. Dit zorgt voor significante problemen met betrekking tot de veiligheid, door de zware machines en het vrachtverkeer welke gebruik maken van de wegen. Tot slot heeft het onderzoek een methodologie ontwikkeld om druk en temperatuurgegevens om te zetten in energieverbruik. Maar door het gebrek aan druksensoren is dit doel niet bereikt.

Het toepassen van geschikte sensortechnologie in het asfaltverwerkingsproces vraagt voorspelbare en reproduceerbare sensorprestaties, gezien de wisselende uitvoering van het asfaltverwerkingsproces. De zware omstandigheden binnen het proces (hoge asfalt mengtemperaturen en het gebruik van zware machines) samen met de zware omgevingscondities (vries- dooi cyclussen) vragen uitgebreide testen en analyses. Het plaatsen van sensoren in asfalt is een uitdaging, maar ook een veelbelovende ontwikkeling. De uitdaging is het toepassen op niet indringende manier, zonder dat het een negatieve invloed heeft op de kwaliteit van het asfalt zelf. Maar als de sensor goed wordt geplaatst, kan de RFID technologie dienen als platform voor het meten van een groot scala aan eigenschappen in het asfalt, gezien de snelle ontwikkelingen in de sensortechnologie. Het zoeken naar bruikbare sensoren, draadloze communicatie en toepassingen gaat door na de veelbelovende resultaten van dit project. De volgende aanbevelingen worden gedaan voor gebruik van RFID in asfalt:

- Gebruik voor asfaltmetingen een Passieve SAW RFID chip, met een temperatuurbereik van minstens 175°C en een leesbereik van minsten twee meter.
- Plaats de sensor voor een goede temperatuurmeting in het midden van de asfaltlaag en op maximaal 40cm van de rand van de asfaltweg.
- Veranker de sensor om verplaatsing te voorkomen. Voor het verankeren moet gebruik worden gemaakt van gietasfalt waar de sensor op vast is gesmolten. Het gietasfalt zelf kan vervolgens verhit worden voor het vast smelten aan de ondergelegen asfaltlaag.

De volgende aanbevelingen worden gedaan voor vervolgonderzoek met RFID in asfalt:

- Test SAW RFID om te onderzoeken of een groter leesbereik mogelijk is.
- Onderzoek de mogelijkheid voor gebruik van actieve RFID, voor langdurig asfaltonderzoek. Plaatsing kan door middel van gietasfalt.
- Verder onderzoek moet worden gedaan naar de verankering van RFID sensoren aan de onderste funderingslaag. Gietasfalt is hiervoor geen oplossing, maar de boutbevestiging kan een uitkomst zijn.

7. Bronvermelding

CROW. (2010, Augustus 20). *Asfalt in weg- en waterbouw*. Den Haag, Nederland: CROW.

Dressen, D. (z.d.). Considerations for RFID selection. *Atmel applications journal*, 45 - 47.

Jovix. (2015, 05 15). *Active RFID vs Passive RFID*. Retrieved from Jovix RFID solution company: <http://atlasrfid.com/jovix-education/auto-id-basics/active-rfid-vs-passive-rfid/>

Schwartz, C., Khan, J. S., Pfeiffer, G. H., & Mustafa, E. (2014). *Radio Frequency Identification Applications in Pavements*. University of Maryland , Department of Civil and Environmental Engineering. College Park: National Technical Information Service.

Tentacle Technologies. (2015, March 4). *Surface Acoustic Wave Radio Frequency Identification*. Retrieved from Tentacletech: <http://tentacletech.com/rfid/>