



# Re-recycling asfalt met nieuwe bouwstoffen

Plastic toevoegingen/modificaties

Rijkswaterstaat

24 maart 2023

Project Re-recycling asfalt met nieuwe bouwstoffen  
Opdrachtgever Rijkswaterstaat

Document Plastic toevoegingen/modificaties  
Status Definitief  
Datum 24 maart 2023  
Referentie 134239/23-004.958

Projectcode 134239  
Projectleider Ir. S.H.L. Lamerichs  
Projectdirecteur Ir. J.F. Kramer

Auteur(s) Ir. C.H. Huurman  
Gecontroleerd door Ir. R.L.T. Oppers, ir. S.H.L. Lamerichs  
Goedgekeurd door Ir. S.H.L. Lamerichs

Paraaf



Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.  
Leeuwenbrug 8  
Postbus 233  
7400 AE Deventer  
+31 (0)570 69 79 11  
www.witteveenbos.com  
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veeelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

## INHOUDSOPGAVE

1	<b>INLEIDING</b>	<b>4</b>
2	<b>LITERATUURSTUDIES</b>	<b>5</b>
3	<b>MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN</b>	<b>6</b>
3.1	Laboratoriumonderzoek	6
3.2	Praktijkonderzoek	7
3.3	Laboratorium- en praktijkonderzoek	7
4	<b>TOEPASSEN VAN PLASTIC</b>	<b>8</b>
4.1	Proces	8
4.2	Kwaliteit en duurzaamheid	8
4.3	Gerecycled plastic asfalt	9
5	<b>INTERVIEWS</b>	<b>10</b>
	<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>12</b>
	Laatste pagina	13
	<b>Bijlage(n)</b>	<b>Aantal pagina's</b>
	-	

# 1

## INLEIDING

### Aanleiding

Rijkswaterstaat werkt toe naar klimaatneutrale en circulaire wegverhardingen in 2030. Bij de inkoop van asfalt wordt gestuurd op het verduurzamen van asfalt(verhardingen). Dit betekent dat Rijkswaterstaat innovatieve asfaltmengsels krijgt aangeboden waarin steeds hogere percentages hergebruik (PR-asfalt<sup>1</sup>) worden toegepast. Hierbij wordt tevens steeds meer gebruik gemaakt van asfalt-vreemde secundaire materialen in verschillende samenstellingen.

Conventioneel asfalt kan, onder voorwaarden, zeer goed en meermaals hergebruikt worden, zonder dat dit ten koste gaat van de prestaties. Hierdoor blijft het asfalt 'in de keten' en wordt de milieu-impact beperkt. De impact van het vaker en in grotere percentage toepassen van secundaire materialen is onbekend. Rijkswaterstaat wenst inzicht te krijgen in wat bekend is over het gebruik van asfalt met asfaltvreemde secundaire materialen en het hergebruik ('re-recycling') van datzelfde asfalt naar verloop van tijd.

Rijkswaterstaat werkt toe naar sturing op het aandeel PR-asfalt en asfaltvreemde stoffen in de asfaltverhardingen. Hiermee kan voorkomen worden dat het hergebruik van asfalt binnen de eigen keten in de toekomst ingewikkeld of zelfs onmogelijk wordt. Echter, om tot goede sturing te komen, is veel onderzoek nodig.

### Dit rapport

Dit rapport bevat een overzicht van de literatuur naar het gebruik van plastic toevoegingen/modificaties in asfalt. Dit onderzoek maakt onderdeel uit van een breder literatuuronderzoek dat zich richt op een viertal asfaltvreemde stoffen:

- 1 dakleer(granulaat) als (gedeeltelijke) vervanging van bitumen;
- 2 epoxy modificaties;
- 3 rubbergranulaat toevoegingen;
- 4 **plastic toevoegingen/modificaties.**

### Methodiek

De literatuur die in dit onderzoek gebruikt is, is voor een deel afkomstig uit documentatie van Rijkswaterstaat. De literatuur die bij Rijkswaterstaat bekend is, heeft als basis gediend voor dit onderzoek. Naast de bij Rijkswaterstaat beschikbare literatuur, is in literaire databases (onder andere Scopus, Google Scholar) gezocht naar aanvullende vakliteratuur.

In de bibliografie van dit rapport is de literatuur waar expliciet naar gerefereerd is opgesomd. Daarnaast is separaat aan de deelrapporten een overzicht opgesteld met gebruikte zoektermen en een compleet literatuuroverzicht.

### Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zijn de literatuuronderzoeken naar plastic in asfalt beschreven. Hoofdstuk 3 vat de literatuur over de mechanische eigenschappen van plastic in asfalt samen en hoofdstuk 4 toont papers over de toepassing van plastic in asfalt. Hoofdstuk 7 vat de resultaten van de interviews met de onderzoeksinstituten, beheerders en marktpartijen samen. Als laatste volgt een literatuurlijst met de gevonden literatuur.

---

<sup>1</sup> pr staat voor 'Partiële Recycling'.

# 2

## LITERATUURSTUDIES

Literatuurstudies vatten de algemene bevindingen van een onderwerp samen. Papers die (onder andere) een literatuurstudie hebben uitgevoerd, zijn:

- *Urban mining for asphalt pavements: A review* (Piao, et al., 2021)  
Deze paper beschrijft het gebruik van plastic in asfalt. Er is onderscheid gemaakt tussen polyethyleen (PE), polyethyleentereftalaat (PET), polyvinylchloride (PVC), en polypropyleen (PP);
- *Recycled Plastics in Asphalt Part A: State of the Knowledge* (Willis, Yin, & Moraes, 2020)  
Dit rapport beschrijft de voortgang van de huidige kennis over plastic in asfalt. Er wordt ingegaan op de typen plastic. Tevens bevat dit rapport een classificatie van de gevonden literatuur op verschillende thema's;
- *Recycled Plastics in Asphalt Part B: Literature Review* (Yin, Moraes, & Anand, 2020)  
Dit is een uitgebreide literatuurstudie over het gebruik van gerecycled plastic in asfaltbindmiddelen en -mengsels, waarin meer dan 110 onderzoeksrapporten, tijdschriftartikelen, vakpublicaties, nieuwsbrief- en tijdschriftartikelen en persoonlijke e-mailcommunicatie zijn beschouwd;
- *Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review* (Xu, Zhao, & Li, 2021)  
Deze review presenteert analyses en vergelijkingen van verschillende vormen van plastic die worden gebruikt bij asfaltmodificatie. Ook zijn de laboratorium- en praktijkonderzoeken en milieueffecten samengevat;
- *Recent development, utilization, treatment and performance of solid wastes additives in asphaltic concrete worldwide: A review* (Wong, Hasan, & Peng, 2022)  
Dit onderzoek beschouwt het gebruik van diverse afvalstoffen en bijproducten in asfaltbindmiddelen en -mengsels. Plastic is een van die afvalstoffen;
- *Recycling van plastics in asfalt – een analyse* (De Bock, Destrée, Vansteenkiste, & Vanelstraete, 2020)  
Dit betreft een Belgisch literatuuronderzoek naar de mogelijkheden en beperkingen om plastic te recyclen in asfalt. Hierbij ligt de focus op bitumineuze asfaltmengsels van warm mix asphalt (WMA).
- *Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials* (You, et al., 2022)  
De haalbaarheid van verschillende gerecyclede plastics in asfaltverhardingen is uitgebreid geëvalueerd met betrekking tot de eigenschappen van compatibiliteit, opslagstabiliteit, microstructuur, thermoreologie en mechanische prestaties. Bovendien zijn uitdagingen en aanbevelingen voor de toekomst geïdentificeerd;
- *The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review* (Ma, et al., 2021)  
Deze studie geeft een uitgebreid overzicht van verschillende soorten plastic in asfalt via natte en droge processen. Ook bevat het een kort overzicht van praktijkonderzoeken, economische effecten en milieueffecten;
- *Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review* (Wu & Montalvo, 2021)  
Deze studie biedt een uitgebreid en diepgaand literatuuronderzoek over de haalbaarheid en de state-of-the-art recycling van plastic in asfalt. Daarnaast beschrijft het economische effecten, milieueffecten en uitdagingen bij het omgaan met plastic in asfalt.

Ook is er een boek geschreven over het gebruik van plastic in asfalt: *Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads* (Giustozzi & Nizamuddin, 2021). Het boek is gefocust op academici, praktijkmensen, studenten en besluitvormers uit verschillende sectoren.

# 3

## MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN

Dit hoofdstuk beschrijft de literatuur over de mechanische eigenschappen van plastic in asfalt. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen laboratoriumonderzoek en onderzoek in de praktijk.

### 3.1 Laboratoriumonderzoek

Papers die een laboratoriumonderzoek beschrijven, zijn:

- *Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer* (Mashaan, Chegenizadeh, Nikraz, & Rezagholilou, 2021)  
en  
*Laboratory Properties of Waste PET Plastic-Modified Asphalt Mixes* (Mashaan, Chegenizadeh, & Nikraz, 2021)  
Deze twee papers omschrijven hetzelfde onderzoek, wat gericht is op de impact van het gebruik van polyethyleentereftalaat (PET). De evaluatie van verschillende samenstellingen van PET-gemodificeerde bitumen is uitgevoerd in twee fasen met niet-verouderde en verouderde omstandigheden;
- *Recycled Waste Plastic for Extending and Modifying Asphalt Binders* (White & Reid, 2018)  
Dit artikel beoordeelt het gebruik van drie verkrijgbare gerecyclede plastics voor bindmiddelmodificatie in asfaltmengsels: twee asfaltmengsels uit het Verenigd Koninkrijk en één Australisch asfaltmengsel;
- *Recycled waste plastic modification of bituminous binder* (White & Reid, 2019)  
Twee verschillende soorten plastic afvalproducten voor modificatie en 'binder extension' van asfaltbindmiddel zijn in het laboratorium geanalyseerd. De mengsels zijn getest op het voldoen aan de prestatie-eigenschappen die zijn opgesteld in de Britse specificatie voor gemodificeerd asfalt;
- *Laboratory Evaluation of Asphalt Containing Recycled Plastic as a Bitumen Extender and Modifier* (White & Magee, 2019)  
In dit onderzoek zijn twee verkrijgbare gerecyclede plastic afvalproducten in het laboratorium geëvalueerd. Het ene product is gebruikt als plastomeer, het ander product als elastomeer;
- *The utilization of palm kernel shells and waste plastics in asphaltic mix for sustainable pavement construction* (Tagbor, et al., 2022)  
Deze studie onderzocht de mogelijkheden van het gebruik van plasticafval als bindmiddel, in combinatie met palmpitschilfers als gedeeltelijke vervanging van natuurlijke aggregaten;
- *Incorporation of Waste Plastic in Asphalt Binders to Improve their Performance in the Pavement* (Costa, Silva, Oliveira, & Fernandes, 2012)  
Dit onderzoek evalueert de voordelen van het modifieren van bitumen met verschillende soorten plastic afval, namelijk polyethyleen (HDPE met hoge dichtheid en LDPE met lage dichtheid), ethyleen-vinylacetaat (EVA), en acrylonitril-butadien-styreen (ABS). Naast deze vier gerecyclede plastics, worden ook SBS en EVA als nieuw plastic materiaal geanalyseerd. Het doel is om de eigenschappen van de bindmiddelen voor gebruik in hoogwaardige asfaltmengsels te verbeteren. De prestaties van de asfaltmengsels zijn vergeleken met asfaltmengsels met conventioneel bitumen en met een commercieel gemodificeerd bindmiddel (Styrelf);
- *On the sustainable use of recycled plastics in flexible asphalt pavements* (Ma, Nawarathna, & Hesp, 2022)  
Als onderdeel van een voorbereidende studie voor een groot praktijkonderzoek waarbij gebruik wordt gemaakt van gerecyclede plastic in Ontario, documenteert en beschrijft dit rapport de testresultaten van met plastic gemodificeerde bindmiddelen en mengsels;

- *Assessing impact of chemical compatibility of additives used in asphalt binders: A case study using plastics* (Sreeram, et al., 2022)

Dit onderzoek beschrijft de toepassing van de Hansen Solubility Parameters (HSP) om de prestaties van gemodificeerde asfaltmengsels beter te begrijpen en te voorspellen. Deze aanpak wordt specifiek toegepast op plastic. Twee verschillende soorten polyethyleen (PE) plastic met verschillende eigenschappen zijn bestudeerd.

## 3.2 Praktijkonderzoek

Papers die een praktijkonderzoek beschrijven, zijn:

- *Field Trials of Plastic- and Latex-Modified Asphalt Concrete* (Krater, Wolfe, & Epps, 1988)  
Meer dan 30 jaar geleden is onderzoek gedaan naar plastic in asfalt. In dit onderzoek is polyolefine gebruikt. Zeven mengsels, gemaakt van verschillende combinaties van twee soorten plastics en een synthetisch rubber, zijn beoordeeld in vijf teststroken in verschillende delen van de Verenigde Staten.

## 3.3 Laboratorium- en praktijkonderzoek

Papers die zowel een laboratorium- als een praktijkonderzoek beschrijven, zijn:

- *A complete study on an asphalt concrete modified with graphene and recycled hard-plastics: A case study* (Russo, Eskandarsefat, Venturini, & Viscione, 2022)

Dit onderzoek presenteert een compleet praktijkonderzoek over een asfaltverharding die is samengesteld uit gerecyclede harde plastics en grafeen-nanoplaatjes. Dit asfalt is vergeleken met SBS polymeer-gemodificeerd bitumen in een laboratorium- en praktijkonderzoek. Het praktijkonderzoek bestaat uit het twee jaar monitoren van een proefvak.

# 4

## TOEPASSEN VAN PLASTIC

Dit hoofdstuk beschrijft de literatuur naar de toepassing van plastic toevoegingen in asfalt in de praktijk. Eerst is het proces bij het gebruik van plastic in asfalt beschreven. Daarna is beschreven wat de toevoeging van plastic aan asfalt voor impact heeft op de kwaliteitsborging en duurzaamheid.

### 4.1 Proces

Papers die het proces van plastic in asfalt beschrijft, zijn:

- *Selection of recycled waste plastic for incorporation in sustainable asphalt pavements: A novel multi-criteria screening tool based on 31 sources of plastic* (Audy, Enfrin, Boom, & Giustozzi, 2022)

Dit onderzoek heeft een nieuw classificatieschema ontwikkeld om elke soort gerecycled plastic afval te rangschikken op basis van hun chemische en fysische eigenschappen ten opzichte van die van bitumen of asfalt. Dit schema is ontwikkeld voor recyclingbedrijven en bitumen/asfaltaannemers om door middel van een reeks experimentele technieken de geschiktheid van gerecycled plasticasfalt voor asfaltverhardingen te bepalen.

### 4.2 Kwaliteit en duurzaamheid

Papers die de kwaliteit of duurzaamheidsaspecten beschrijven bij het gebruik van plastic, zijn:

- *Life cycle assessment of incorporating recycled materials in pavement design* (Assaf & Abdo, 2022)  
Deze studie heeft een life cycle assessment (LCA) uitgevoerd om de milieu- en economische effecten te onderzoeken van alternatieve verhardingsontwerpen met teruggewonnen asfaltverharding (RAP) en gerecycled plastic. Er zijn 25 alternatieve verhardingsontwerpen onderzocht voor een 8 km lang snelweggedeelte met vier rijstroken;

- *Exploring the effect on the environment of encapsulated micro- and nano-plastics into asphalt mastics for road pavement* (Veropalumbo, et al., 2023)

Dit onderzoek beschrijft het toepassen van plastic in asfalt om duurzamere flexibele wegverhardingen te creëren. Bovendien evalueert dit onderzoek potentiële afgifte van micro- en nanoplastics in het oppervlakte- en bodemwater;

- *Recycling waste plastics in roads: A life-cycle assessment study using primary data* (Santos, Pham, Stasinopoulos, & Giustozzi, 2021)

Deze studie onderzoekt – vanuit een milieuperspectief – de processen die leiden tot de omzetting van plasticafval in gerecycleerde plastic pellets die ofwel als additief (natte methode) of als vervanging van natuurlijk aggregaat (droge methode) gebruikt kunnen worden bij de productie van asfalmengsels. Gegevens van recyclingfaciliteiten in Australië, zijn verzameld en gebruikt als basis voor een life cycle assessment (LCA).



### 4.3 Gerecycled plastic asfalt

Papers die informatie over gerecycled plastic asfalt beschrijven of benoemen, zijn:

- *Future recyclability of hot mix asphalt containing recycled plastics* (Lu, Enfrin, Boom, & Giustozzi, 2023)  
Dit onderzoek focust op de mogelijkheden om plastic asfalt (P-RAP) te recyclen. Er zijn drie verschillende methoden onderzocht: droge, natte en gemengde methode. Ook benoemt het onderzoek dat het gebrek aan studies over het recyclen van P-RAP voornamelijk is te wijten aan een gebrek van verouderd materiaal uit het veld. Dit toont aan dat de toepassing van gerecycled plastic-asfalt zich nog voornamelijk in de onderzoeksfase bevindt, en daarom in de praktijk nog niet breed is toegepast.

# 5

## INTERVIEWS

Dit hoofdstuk beschrijft de bevindingen over het gebruik van plastic in asfalt die uit de interviews met de onderzoeksinstituten, beheerders en marktpartijen zijn gekomen. Doordat de informatie vanuit interviews is verkregen, is context en toelichting niet beschikbaar. Voor verdere informatie wordt daarom verwezen naar de betrokken partij(en).

### Onderzoeksinstituten

De partijen aanwezig bij het interview waren TU Delft, Universiteit Twente, Universiteit Antwerpen en TNO. Een onderzoek van Filippo Giustozzi toont aan dat het re-recyclen van asfalt met plastic resultaten geeft die vergelijkbaar zijn met standaard asfaltmengsels met RAP. In dit onderzoek zijn ook de emissies en duurzaamheid geanalyseerd. Verder zijn er weinig onderzoeken naar het re-recyclen van plastic in asfalt, doordat er weinig praktijkonderzoeken zijn uitgevoerd.

Plastic met een hoog smeltpunt is moeilijker te verwerken in asfalt dan plastic met een laag smeltpunt. Onderzoek uit Hong Kong toont een behandeling op plastic waardoor het smeltpunt verlaagd kan worden. Door het toepassen van deze behandeling kan er een makkelijker verwerkingsproces van plastic in bitumen ontstaan.

### Beheerders

De partijen aanwezig bij het interview waren de provincies Gelderland, Overijssel en Friesland. Provincies Overijssel, Gelderland en Friesland hebben geen ervaringen met plastic in asfalt. Provincie Overijssel benoemt dat secundaire materialen in asfalt toegepast kunnen worden in de toekomst zolang de kwaliteit en de eigenschappen bewezen kunnen worden. Voor de provincie Friesland is het belangrijk om aandacht te besteden aan de emissies die vrij komen bij de verwerking van plastic in asfalt. De vraag is of plastic nog een relevant materiaal is om te verwerken in asfalt als het in de toekomst minder gebruikt gaat worden.

### Marktpartijen

De partijen aanwezig bij het interview waren Strukton, Ballast Nedam, BAM, BMI group, Roof2road, Dura Vermeer, KWS en AsfaltNu. Toepassing van PET in bitumen lost niet op, maar werkt als een soort vulstof of vezel in het bitumen van asfalt. Volgens de marktpartijen levert het gebruik van plastic primair geen meerwaarde aan de eigenschappen van het asfalt. Het is alleen een manier om van het plastic afval af te komen.

De marktpartijen hebben enige kennis over de toepassing van plastic in asfalt in andere landen. In de Verenigde Staten is er een methode waarbij PET gecontroleerd kan worden afgebroken tot monomeren en opnieuw als grondstof gebruikt kan worden voor nieuw plastic of andere polymeren. In Duitsland wordt plastic met een laag smeltpunt toegepast in asfalt in het havengebied. Het wordt gezien als een risicovol product, omdat er scheuren in komen als het mengsel te snel afkoelt. Ook kunnen scheuren ontstaan door een gebrek aan homogeniteit in het asfaltmengsel. In India wordt ook plastic in asfalt toegepast. Er is alleen niet bekend op wat voor manier en wat voor resultaten het geeft.

De algemene strekking van de marktpartijen over de verwerking van secundaire materialen in asfalt is dat er nog veel vragen spelen over de effecten, kwaliteit, emissies, blootstelling aan medewerkers tijdens productie/constructie, herbruikbaarheid, benodigde technieken, etc. De marktpartijen zien graag een algemeen toetsingskader voor de toepassing van secundaire materialen in asfalt. Ook vinden marktpartijen

het belangrijk om in kaart te brengen wat voor soort asfalt op welke plek in Nederland ligt. Zeker op het moment dat er meer secundaire materialen in asfalt gebruikt gaan worden.

## BIBLIOGRAFIE

- Assaf, H., & Abdo, A. A. (2022). Life cycle assessment of incorporating recycled materials in pavement design. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*.
- Audy, R., Enfrin, M., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2022). - Selection of recycled waste plastic for incorporation in sustainable asphalt pavements: A novel multi-criteria screening tool based on 31 sources of plastic. *Science of the Total Environment*.
- Costa, L., Silva, H., Oliveira, J., & Fernandes, S. (2012). Incorporation of Waste Plastic in Asphalt Binders to Improve their Performance in the Pavement.
- De Bock, L., Destrée, A., Vansteenkiste, S., & Vanelstraete, A. (2020). Recycling van plastics in asfalt - een analyse. *Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw*.
- Giustozzi, F., & Nizamuddin, S. (2021). *Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads*. Woodhead Publishing.
- Krater, K., Wolfe, D., & Epps, J. (1988). Field Trials of Plastic- and Latex-Modified Asphalt Concrete. *Transportation Research Record*.
- Lu, D. X., Enfrin, M., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2023). Future recyclability of hot mix asphalt containing recycled plastics. *Construction and Building Materials*.
- Ma, J., Nawarathna, H., & Hesp, S. (2022). On the sustainable use of recycled plastics in flexible asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*.
- Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., Xiao, R., Zhang, M., & Huang, B. (2021). The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review. *Cleaner Materials*.
- Mashaan, N., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2021). Laboratory Properties of Waste PET Plastic-Modified Asphalt Mixes. *Recycling*.
- Mashaan, N., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., & Rezagholilou, A. (2021). Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer. *Ain Shams Engineering Journal*.
- Piao, Z., Mikhailenko, P., Kakar, M. R., Bueno, M., Hellweg, S., & Poulikakos, L. D. (2021). Urban mining for asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*.
- Russo, F., Eskandarsefat, S., Venturini, L., & Viscione, N. (2022). A complete study on an asphalt concrete modified with graphene and recycled hard-plastics: A case study. *Case Studies in Construction Materials*.
- Santos, J., Pham, A., Stasinopoulos, P., & Giustozzi, F. (2021). Recycling waste plastics in roads: A life-cycle assessment study using primary data. *Science of the Total Environment*.
- Sreeram, A., Filonzi, A., Komaragiri, S., Roja, K., Masad, E., & Bhasin, A. (2022). Assessing impact of chemical compatibility of additives used in asphalt binders: A case study using plastics. *Construction and Building Materials*.
- Tagbor, T. A., Mohammed, L., Mohammed, M., Bruce-Mensah, M. M., Tekpetey, S., Armo, E. A., . . . Kirghiz, M. S. (2022). The utilization of palm kernel shells and waste plastics in asphaltic mix for sustainable pavement construction. *Scientific African*.
- Veropalumbo, R., Oreto, C., Viscione, N., Pirozzi, F., Pontoni, L., Trancone, G., . . . Russo, F. (2023). Exploring the effect on the environment of encapsulated micro- and nano-plastics into asphalt mastics for road pavement. *Environmental Research*.
- White, G., & Magee, C. (2019). Laboratory Evaluation of Asphalt Containing Recycled Plastic as a Bitumen Extender and Modifier. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*.
- White, G., & Reid, G. (2018). Recycled Waste Plastic for Extending and Modifying Asphalt Binders. *8th Symposium on Pavement Surface Characteristics: SURF 2018 – Vehicle to Road Connectivity*.
- White, G., & Reid, G. (2019). Recycled waste plastic modification of bituminous binder. *7th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*.
- Willis, R., Yin, F., & Moraes, R. (2020). Recycled Plastics in Asphalt Part A: State of the Knowledge. *National Asphalt Pavement Association (NAPA)*.
- Wong, T. L., Hasan, M. R., & Peng, L. C. (2022). Recent development, utilization, treatment and performance of solid wastes additives in asphaltic concrete worldwide: A review. *Journal of Traffic and Transportations Engineering*.
- Wu, S., & Montalvo, L. (2021). Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review. *Journal of Cleaner Production*.
- Xu, F., Zhao, Y., & Li, K. (2021). Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review. *Materials*.

- Yin, F., Moraes, R., & Anand, A. (2020). Recycled Plastics in Asphalt Part B: Literature Review. *National Asphalt Pavement Association*.
- You, L., Long, Z., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., . . . Diab, A. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*.

