

Op weg naar systematische asfaltverdichting

Evaluatie van temperatuurdrempels aan de hand van de
verwerkbaarheid van asfalt



Wido de Witte

Universiteit Twente | Boskalis Nederland

Colofon

Titel	Op weg naar systematische asfaltverdichting
Ondertitel	Evaluatie van temperatuurdrempels aan de hand van de verwerkbaarheid van asfalt

Versie	Definitief
Datum	December 2020
Pagina's	74

Uitgevoerd door:	Wido de Witte
Studentnummer:	s1831607
E-mail:	w.r.dewitte@student.utwente.nl
Opleiding:	Bachelor Civiele Techniek
Onderwijsinstelling:	Universiteit Twente
Externe organisatie:	Boskalis Nederland

Begeleiding universiteit:	Dr. Ir. S. R. Miller
Begeleiding universiteit:	D. Makarov
Begeleiding extern:	Ir. B. Sluer
Begeleiding extern:	Ir. N. Poeran

Voorwoord

Voor u ligt het eindverslag ter afronding van mijn Bachelor opleiding Civiele Techniek. Ik heb voor mijn afstudeeropdracht onderzoek mogen doen bij *Boskalis Nederland* naar het verdichtingsproces van asfalt. Het was een interessant onderzoek waarbij ik veel verschillende activiteiten heb mogen doen. Van labproeven met zelfgemaakte asfaltmengsels tot asfaltwerkzaamheden midden in de nacht. Dit was een leerzame en interessante ervaring. Ik heb verschillende aspecten van de Civiele Techniek kunnen zien tijdens mijn afstudeeropdracht.

Ik wil graag mijn begeleiders bedanken voor hun ondersteuning. Als eerst Berwich en Natascha vanuit Boskalis voor hun ondersteuning en mij betrekken bij het bedrijf. Het was fijn om met hen te mogen samenwerken. Daarnaast wil ik de andere collega's binnen de organisatie bedanken die mij geholpen hebben bij het uitvoeren van de labproeven, veldmetingen en analyses. Hun bijdrage was van grote waarde voor mijn onderzoek. Als laatst wil ik ook de Sergei en Denis bedanken voor hun begeleiding vanuit de universiteit. Ik heb meer geleerd over de context van het onderzoek en wil Denis daarnaast ook bedanken voor de benodigde materialen die hij heeft geleverd voor de veldmetingen.

Het afronden van mijn afstudeeropdracht heeft wat moeite gekost. Deze afstudeeropdracht komt na een zware periode van persoonlijke gebeurtenissen. Ik ben tevreden over het resultaat en eindig hiermee een leerzaam traject op zowel educatief als persoonlijk vlak.

Wido de Witte

Zwolle, 4 december 2020

Inhoud

Colofon	i
Voorwoord	ii
Inhoud.....	iii
Samenvatting (Nederlands).....	v
Summary (English)	vii
1 Inleiding.....	1
1.1 Achtergrond en context	1
1.2 Probleemstelling.....	1
1.3 Doel.....	2
1.4 Onderzoekkader.....	3
1.5 Onderzoeksvragen.....	3
1.6 Opzet	4
2 Literatuuronderzoek.....	5
2.1 Methodologie	5
2.2 Asfalt	5
2.3 Verdichtingsproces.....	6
2.4 Verwerkbaarheid.....	7
2.5 Deelconclusie literatuuronderzoek	11
3 Methodiek.....	12
3.1 Verwerkbaarheidsproef.....	12
3.2 Analyse verwerkbaarheidsproef	14
3.3 Veldmeting	18
3.4 Dichtheidsprogressie.....	20
3.5 Vergelijkende analyse.....	22
4 Resultaten.....	24
4.1 Verwerkbaarheidsproef.....	24
4.2 Dichtheidsprogressie.....	29
4.3 Vergelijkende analyse.....	35
5 Discussie.....	40
5.1 Verwerkbaarheidsproef.....	40
5.2 Dichtheidsprogressie.....	41
5.3 Verdichtingsproces.....	43
5.4 Evaluatie	44
6 Conclusie.....	46
6.1 Deelconclusie proeven en metingen.....	46
6.2 Eindconclusie.....	47

6.3	Aanbevelingen	47
7	Bibliografie.....	49
8	Bijlage.....	51
8.1	Mengseloverzicht	51
8.2	Stappenplan veldmeting	52
8.3	Verwerkbaarheidsproef.....	53
8.4	Bepaling omslagpunten.....	60
8.5	Veldmetingen.....	61
8.6	Temperatuurvariabiliteit	64
8.7	Afkoeling.....	65

Samenvatting (Nederlands)

Ontwikkelingen in de asfaltindustrie zorgen voor de behoefte om het asfalteerproces te professionaliseren. Een belangrijke stap in het asfalteerproces is het verdichten van het asfalt. Het verdichtingsproces is een belangrijke factor voor de asfaltkwaliteit en hierbij zijn er veel variabelen die rol spelen. Om het verdichtingsproces van asfalt beter te beheersen, wilt *Boskalis* een vaste methodiek ontwikkelen voor het verdichtingsproces.

Hierop heeft *Boskalis* een verwerkbaarheidsproef ontwikkeld waarmee de koppel-temperatuur relatie van een asfaltmengsel kan worden bepaald. Aan de hand van deze relatie worden temperatuurdrempels bepaald voor het verdichtingsproces. Echter, de uitkomsten van de verwerkbaarheidsproef zijn nog niet vergeleken met de praktijk. Het doel van dit onderzoek is om temperatuurdrempels te vergelijken en evalueren met veldmetingen en -observaties.

De hoofdvraag van het onderzoek was: Welke relatie is er, indien aanwezig, tussen de verwerkbaarheidsgrens van een asfaltmengsel bepaald in het laboratorium, en de (streef)dichtheid bepaald in het veld?

De opzet van het onderzoek bestond uit verwerkbaarheidsproeven en dichtheidsprogressiemetingen. Deze zijn parallel aan elkaar verricht. Vervolgens zijn met de resultaten van de verwerkbaarheidsproef en een rekenmodel van *Boskalis* twee temperatuurdrempels bepaald. Uiteindelijk zijn de dichtheidsprogressie en het verdichtingsproces geanalyseerd ten opzichte van de temperatuurdrempels.

De dichtheidsprogressie is aan het begin van het verdichtingsproces groter dan tegen het eind van de meting. Walsovergangen boven de tweede temperatuurdrempel zijn effectiever dan daaronder, variërend van 3,5 tot 58,7 Kg/m³ per walsovergang. De streefdichtheid wordt bij alle veldmetingen bereikt. Hiervoor is het niet noodzakelijk dat voor de eerste temperatuurdrempel wordt begonnen en/of dat na de tweede temperatuurdrempel wordt doorgegaan met walsen. De dichtheid neemt na de tweede temperatuurdrempel 84 tot 167 Kg/m³ toe.

Het verdichtingsproces vindt op een lagere temperatuur plaats ten opzichte van de temperatuurdrempels. De temperatuur van het asfalt kan bij het aanleggen tientallen graden Celsius dalen en vertoont spreiding over de hoogte. Verder komt de afkoeling van het asfalt redelijk overeen met het afkoelingsmodel *PaveCool*. De walsstrategie is op het type wals na inconsistent. Er wordt geen rekening gehouden met temperatuur(drempels) en de frequentie van walsovergangen.

Meerdere beperkingen in de uitvoering, data en analyse zijn van invloed op de kwaliteit en kwantiteit van de data in dit onderzoek. De belangrijkste beperking was de grote mate van ontmenging van het asfaltmengsel tijdens de verwerkbaarheidsproef. Die werd naarmate de proef voortduurde steeds groter en maakt het gemeten koppel minder representatief.

De conclusie van het onderzoek is dat er een relatie is tussen de temperatuurdrempels en de dichtheidsprogressie maar deze is beperkt en dient verder onderzocht te worden. Vastgesteld kan worden dat walsovergangen effectiever zijn boven de tweede temperatuurdrempel dan daaronder. De dichtheidsprogressie en het behalen van de streefdichtheid blijft mogelijk na de tweede temperatuurdrempel. Volgens het literatuuronderzoek zou dit wel ten koste kunnen gaan van de asfaltkwaliteit.

De belangrijkste aanbeveling van het onderzoek is om de verwerkbaarheidsproef verder te ontwikkelen en onderzoeken. Problemen met ontmenging en beperkingen in de dataverzameling moeten worden verholpen. Verder zou in het vervolg ook de mechanische eigenschappen worden meegenomen om meer inzicht in de asfaltkwaliteit te krijgen. Daarnaast wordt aanbevolen om in het verdichtingsproces meer rekening te houden met een snelle temperatuurafname en daarmee

het gunstige verdichtingsvenster kort is. In het onderzoek zijn verder nog specifieke aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

Summary (English)

Due to developments in the asphalt industry, there is a desire for a more professional approach towards the asphalt construction process. An important step in the asphalt construction process is the compaction of the asphalt. The compaction process is an important factor for the asphalt quality and many variables are hereby involved. In order to increase control over the compaction process, *Boskalis* wants to develop a systematic approach for the compaction process.

Boskalis has developed a workability test which determines the torque-temperature relationship of an asphalt mixture. From this relationship, multiple temperature thresholds for the compaction process can be determined. However, the results from the workability test have not yet been compared and evaluated with field projects. The goal of this research was to compare and evaluate the temperature thresholds with field measurements and observations.

The main research question was: *What relationship is there, if any, between the asphalt mix workability limit as determined in the laboratory, and the target density as determined in the field?*

The research approach consisted workability tests and density progression measurements. These were carried out parallel to each other. Subsequently, the results of the workability test and a model from *Boskalis* were used to determine two temperature thresholds. Finally, the density progression and the compaction process were analysed and compared to the temperature thresholds.

The density progression at the start of the compaction process is larger than at the end of the measurement. Rolling passes performed before the second temperature threshold are more effective, varying 3,5 to 58,7 Kg/m^3 per rolling pass. The target density was reached at every field measurement. It is not necessary that the compaction process starts before the first temperature threshold and/or that the compaction continues after the second temperature threshold is reached. The density increase after the second temperature threshold varies from 84 to 167 Kg/m^3 .

The compaction process takes place at a lower temperature than the temperature thresholds. The temperature of the asphalt decreases multiple degrees Celsius and has a lot of deviation. The cooling of the asphalt temperature is similar compared towards the cooling model *PaveCool*. The applied rolling strategy is, besides the used rolling stock, inconsistent. The temperature (thresholds) and the frequency of the rolling passes are not taken into account.

Multiple limitations in the execution, data and analysis influence the quality and quantity of the data for this research. A major limitation was the large amount of segregation of the asphalt mixture during the workability tests. The segregation of the asphalt mixture increased during the laboratory experiments. This leads to the measured torque becoming less representative.

The conclusion of this research is that there is a relationship between the temperature thresholds and the density progression. However, this relationship is limited and needs further research. Rolling passes above the second temperature threshold are more effective than below. However, the density progression and reaching the target density remains possible after the second temperature threshold. According to the literature review, this could possibly lower the asphalt quality.

The main recommendation of this research is to further develop and research the workability test. Issues with asphalt mixture segregation and limitations in the data collection should be resolved. Furthermore, mechanical properties of the asphalt could be taken into account to get more insight into the asphalt quality. For the compaction process it is recommended to be aware that the temperature of the asphalt can decrease rapidly, which shortens the favourable compaction window. Further specific recommendations are made in this research.

1 Inleiding

Bij het aanbrengen van asfalt is de verdichting ervan een belangrijke stap in het aanlegproces. Het verdichten van asfalt verhoogt de dichtheid wat belangrijk is voor de kwaliteit van het asfalt (VBW-Asfalt, 2003; Speight, 2015). Ontwikkelingen in de asfaltindustrie, toegelicht in sectie 1.1, zorgen voor de behoefte aan een vaste methodiek voor het verdichtingsproces. Hierop is er bij *Boskalis Nederland* een proef ontworpen (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014) die de verwerkbaarheid van een mengsel bepaald. Met deze proef kunnen temperatuurdrempels voor het verdichtingsproces worden bepaald. In dit onderzoek zal de verwerkbaarheidsproef worden vergeleken en geëvalueerd met de dichtheidsprogressie en het verdichtingspraktijk in de praktijk.

1.1 Achtergrond en context

De asfaltsector heeft de afgelopen 20 jaar vele veranderingen ondergaan. In 2002 kwam er een grote bouwfraude aan het licht (PDC, sd) waarna veranderingen werden doorgevoerd in de aanbesteding en contracten. Gerelateerd aan deze ontwikkelingen was de implementatie van nieuwe richtlijnen in 2008 aangaande kwaliteitsprestatie. Het oude systeem zorgde voor weinig innovatie doordat de focus lag op het bieden van de laagste prijs. Aannemers hadden beperkte deelname in projecten en voerden alleen opdrachten uit volgens strenge contracteisen wat ten koste kon gaan van de kwaliteit. De nieuwe richtlijnen introduceerden meer eisen voor kwaliteitsprestatie (Sluer, 2018). De aannemer moet bewijzen dat het werk aan bepaalde functionele eisen voldoet. De aannemer kreeg hierbij meer ontwerpruimte waarmee ook eigen asfaltmengsels ontwikkeld konden worden.

De kennis, het ontwerp en de risico's van het project verschoven van de opdrachtgever naar de aannemer. Aannemers doen nu meer onderzoek naar het verbeteren van de asfaltkwaliteit. Om het onderzoek daarvan te verbeteren, is er tussen verschillende organisaties een onderzoekverband opgericht. Dit verband, *ASPARi* (ASPARi, sd), probeert bestaande kennis binnen de asfaltsector meer expliciet te maken en het asfalterproces te professionaliseren en verbeteren. *Boskalis*, lid van *ASPARi*, is bezig het verdichtingsproces meer te standaardiseren om zo de variabiliteit in kwaliteitsprestatie te verminderen.

Het verdichten van asfalt is een belangrijke stap in het asfalterproces omdat het de dichtheid van het asfalt verhoogt en daarmee een belangrijke factor is voor de asfaltkwaliteit (VBW-Asfalt, 2003). Er zijn veel variabelen die een rol spelen in hoe makkelijk verdichting kan worden aangebracht. Wanneer asfalt bij te lage of hoge temperatuur verdicht wordt, kan het asfalt niet de juiste mechanische eigenschappen behalen (Bijleveld F., 2015). Het gevolg is dat de aannemer niet de kwaliteit uit het contract kan garanderen, er vroegtijdig schade ontstaat en de aannemer een boete moet betalen of reparaties moet uitvoeren.

Wanneer asfalt verdicht wordt, zijn er vele handelingen gebaseerd op impliciete kennis van asfaltwerkers (Bijleveld, Miller, & Dorée, 2014). Voor een lange tijd was dit voldoende, echter met de nieuwe ontwikkelingen wordt dit steeds lastiger. Het volgen van de ontwikkeling van de dichtheid, ook wel de dichtheidsprogressie, geeft meer inzicht in het verdichtingsproces. Hiermee kan ook het effect van meerdere factoren op de dichtheid worden gevolgd.

1.2 Probleemstelling

Aan de hand van de voorgenoemde context is de volgende probleemstelling geformuleerd:



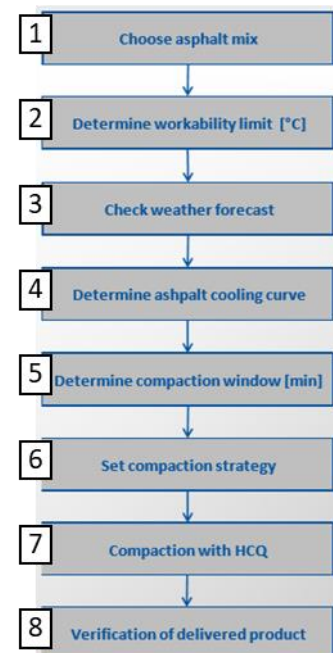
Er is geen methodiek voor het vaststellen van temperatuurdrempels voor het verdichtingsproces op basis van de verwerkbaarheid van asfalt. Huidige kennis is gelimiteerd tot impliciete kennis van asfaltwerkers.

Al kort benoemd in het begin van dit hoofdstuk, is er een verwerkbaarheidsproef ontworpen. De proef is ontworpen als mogelijke oplossing voor de zojuist benoemde probleemstelling. De proef meet het koppel en de temperatuur terwijl het asfaltmengsel afkoelt door middel van een mengarm dat in het mengsel roert (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014). In Figuur 1 staat een foto van de verwerkbaarheidsproef. Het doel van de proef is om aan de hand van de gemeten data meerdere temperatuurdrempels te bepalen waarmee een temperatuurvenster wordt gevormd. Binnen het gevonden temperatuurvenster zou de gewenste verdichting van het asfalt voltooid of vergevorderd moeten zijn. De verwerkbaarheidsproef zou daarmee een onderdeel kunnen vormen voor een richtlijn voor asfaltwerkers om een walsstrategie vast te stellen.



Figuur 1: Verwerkbaarheidsproef ontwikkeld door Boskalis (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014).

De resultaten van de verwerkbaarheidsproef zijn nog niet vergeleken met de praktijk. Dit is dan ook de focus binnen de probleemstelling van dit onderzoek. De vergelijking en evaluatie is een belangrijke stap in het verbeteren en toepassen van de verwerkbaarheidsproef. In Figuur 2 staat het beoogde asfaltverwerkingsproces. Op dit moment zijn stappen 1 tot en met 4 mogelijk. De volgende stap in de ontwikkeling is de koppeling tussen de eerste vier stappen en vijfde stap.



Figuur 2: Beoogd asfaltverwerkingsproces (Sluer, 2018).

1.3 Doel

Aan de hand van de probleemstelling en de voorgenoemde onderzoekrichting, is het volgende doel opgesteld:



Het vergelijken en evalueren van temperatuurdrempels voor het verdichtingsproces, verkregen aan de hand van een verwerkbaarheidsproef van Boskalis, met veldmetingen en -observaties.

Het eerste gedeelte van de doelstelling is het vergelijken van de temperatuurdrempels met het verdichtingsproces uit praktijk. De verwerkbaarheidsproef wordt uitgevoerd om hiermee temperatuurdrempels te bepalen. Vervolgens worden de temperatuurdrempels vergeleken met veldmetingen en -observaties. Hierbij wordt bepaald hoe de dichtheidsprogressie zich verhoudt tot de temperatuur(drempels).

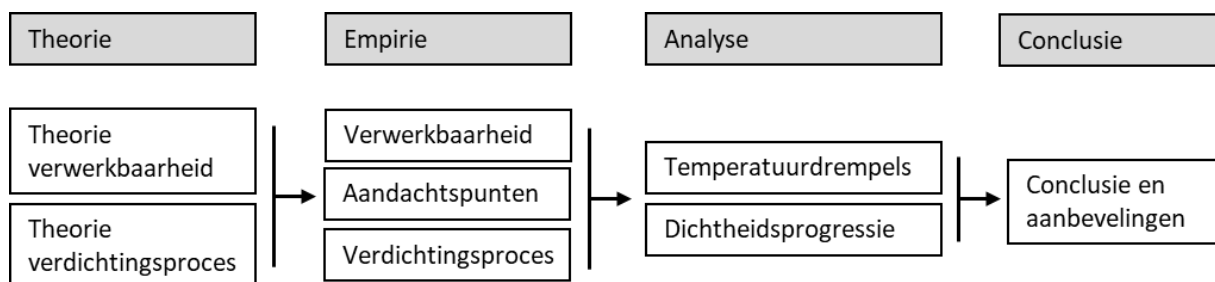
Aansluitend is de evaluatie van de temperatuurvensters van de verwerkbaarheidsproef. Hierbij wordt beoordeeld of de verwerkbaarheidsproef toepasbaar is om een verdichtingsvenster te

bepalen en een verbetering is ten opzichte van andere methoden. De evaluatie zal ingaan op eventuele verbeteringen voor de verwerkbaarheidsproef of de bijbehorende berekeningen. Dit geeft de ontwerper van de verwerkbaarheidsproef, *Boskalis*, inzicht of er verdere ontwikkeling nodig.

1.4 Onderzoekskader

Het onderzoek betreft verwerkbaarheidsproeven en dichtheidsprogressiemetingen. Hierbij wordt alleen gekeken naar de relatie tussen dichtheid en temperatuur. Mechanische eigenschappen en -proeven vallen buiten het onderzoekskader. De opzet van het onderzoek is te zien aan de hand van het onderzoeksmodel in Figuur 3. Het model is een overzicht van stappen die genomen moeten worden om het onderzoeksdoel te bereiken (Verschuren & Doorewaard, 2007). Het model bestaat uit confrontatie (horizontale lijnen) waaruit een conclusie (verticale lijnen) moet worden getrokken.

Als eerste wordt de theorie vastgesteld van de verwerkbaarheid en het verdichtingsproces. Hieruit volgen aandachtspunten waarmee in de uitvoering en analyse van de labproeven en veldmetingen rekening mee wordt gehouden. Vervolgens worden tegelijkertijd verwerkbaarheidsproeven en veldmetingen uitgevoerd. Uit de resultaten van de verwerkbaarheidsproef worden temperatuurdrempels bepaald en tijdens het verdichtingsproces wordt de dichtheidsprogressie bepaald. Uiteindelijk volgt uit de vergelijking van de temperatuurdrempels met de dichtheidsprogressie de conclusie en aanbevelingen.



Figuur 3: Onderzoeksmodel

1.5 Onderzoeksvragen

De hoofdvraag van dit onderzoek is als volgt:



Welke relatie is er, indien aanwezig, tussen de verwerkbaarheidsgrens van een asfaltmengsel bepaald in het laboratorium, en de (streef)dichtheid bepaald in het veld?

De bovenstaande hoofdvraag is opgesteld aan de hand van het onderzoeksdoel. Ter ondersteuning van de hoofdvraag zijn vijf sub-vragen opgesteld die bestaan uit een extra niveau sub-vragen.

1. Welke bestaande informatie kan er worden verkregen over de verwerkbaarheid van asfalt (tijdens afkoelen) in relatie tot het verdichtingsproces en de asfaltkwaliteit?
 - a. Welke factoren beïnvloeden de verwerkbaarheid van asfalt?
 - b. Op welke manier is de dichtheidsprogressie gerelateerd aan de dichtheid en asfaltkwaliteit?
 - c. Wat kan er geleerd worden over eerdere pogingen met verwerkbaarheid om een verdichtingsvenster te bepalen?
 - d. Welke andere methoden voor het bepalen van een verdichtingsvenster zijn er?
2. Welke minimum temperatuurbereik is er bepaald met de verwerkbaarheidsproef?
 - a. Welke metingen zijn er gedaan met de verwerkbaarheidsproef?
 - b. In hoeverre zijn de resultaten van de verwerkbaarheidsproef herhaalbaar?

- c. In hoeverre is de verwerkbaarheidsproef toepasbaar op verschillende asfalmengsels?
 - d. In hoeverre zijn de resultaten in lijn met de verwachtingen?
- 3. Hoe verloopt de dichtheidsprogressie en het verdichtingsproces op veldprojecten?
 - a. Wat zijn de temperatuur en dichtheid gedurende het verdichtingsproces over de tijd?
 - b. Welke temperatuurvariabiliteit wordt er gemeten in de asfaltlaag?
 - c. Wat is het afkoelingsverloop gedurende de dichtheidsprogressie?
 - d. Welke walsen, walspassages en walstechnieken worden geobserveerd gedurende het verdichtingsproces?
- 4. Welke relatie kan er worden gevonden bij het vergelijken van de resultaten van de verwerkbaarheidsproef en de veldmetingen?
 - a. Welke relatie kan er worden gevonden tussen het temperatuurvenster van de verwerkbaarheidsproef en het verdichtingsvenster van de veldmetingen?
 - b. Bij welke temperatuur is de streefdichtheid behaald en hoe staat dit in verband met de minimumtemperatuur van de verwerkbaarheidsproef?
 - c. Welk verschil in dichtheid is er als het asfalt verdicht wordt voordat of nadat de minimumtemperatuur is behaald?
- 5. Hoe kunnen de resultaten het verdichtingsproces verbeteren?
 - a. Heeft de bepaling van de omslagpunten verbetering nodig?
 - b. In hoeverre kunnen de resultaten dit onderzoek worden toegepast in het uitvoeringsproces?
 - c. Hoe staat de verwerkbaarheidsproef in verhouding tot andere proeven?
 - d. In hoeverre wordt de asfaltkwaliteit verbeterd met de verwerkbaarheidsproef?

1.6 Opzet

Dit onderzoek is een empirisch onderzoek waarbij door het uitvoeren van proeven en metingen een relatie kan worden vastgesteld. Het onderzoek bestaat uit een literatuuronderzoek, proeven en metingen en een analyse.

Voor beantwoording van de eerste onderzoeksvraag is er een literatuuronderzoek gedaan. Het literatuuronderzoek wordt behandeld in hoofdstuk 2. Het literatuuronderzoek levert de aandachtspunten die in het vervolg van het onderzoek worden gebruikt.

Vervolgens zijn er experimenten gedaan in het laboratorium met een verwerkbaarheidsproef en dichtheidsprogressiemetingen bij asfalteerwerkzaamheden. De proeven en metingen zijn parallel aan en onafhankelijk van elkaar uitgevoerd. Wel is bij beide onderdelen hetzelfde type mengsels gebruikt. Uiteindelijk is er een analyse en evaluatie uitgevoerd met de verzamelde data. Uit de analyse moet de relatie tussen het temperatuurvenster en het verdichtingsproces worden vastgesteld.

In hoofdstuk 3 wordt de methodiek doorgenomen voor het onderzoek. Dit hoofdstuk is opgedeeld in 5 secties: verwerkbaarheidsproef (3.1 en 3.2), veldmeting (3.3 en 0) en vergelijkende analyse (3.5).

In hoofdstuk 4 zijn alle resultaten van de verwerkbaarheidsproef en gevonden omslagpunten (4.1), de dichtheidsprogressiemeting (4.2) en de vergelijkende analyse (4.3) gepresenteerd.

In hoofdstuk 5 staat de discussie. De gevonden resultaten zijn besproken en geïnterpreteerd in de context van dit onderzoek. In dit hoofdstuk is ook onderzoeksvraag 5 besproken.

In hoofdstuk 6 staan de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

2 Literatuuronderzoek

Het literatuuronderzoek richt zich op bestaande informatie over verwerkbaarheid in relatie tot het verdichtingsproces (tijdens afkoelen). Het literatuuronderzoek geeft aandachtspunten en context voor het lab- en veldonderzoek en het uitvoeren van de analyse. Hierbij gaat het om welke mogelijke factoren en verbanden de verwerkbaarheid en het verdichtingsproces beïnvloeden. Het literatuuronderzoek sluit hiermee aan op onderzoeksvraag 1.

2.1 Methodologie

Het literatuuronderzoek is uitgevoerd aan de hand van wetenschappelijke artikelen en documentatie. Voor het vinden van wetenschappelijke artikelen is gebruik gemaakt van de wetenschappelijke zoekmachines *Scopus* en *Web of Science*. Daarnaast zijn er artikelen en documenten aangedragen vanuit *Boskalis*. Ook is er gebruik gemaakt van eerder onderzoek verricht in kader van het *ASPARi*-netwerk en binnen *Universiteit Twente*. Er is gezocht naar artikelen over temperatuurdrempels, mengtemperaturen, verwerkbaarheid, verwerkbaarheidsproeven en het verdichtingsproces in relatie tot asfalt.

2.2 Asfalt

Voordat er wordt ingegaan op de verschillende onderwerpen van het literatuuronderzoek, zullen enkele begrippen worden toegelicht die als achtergrond fungeren voor het literatuuronderzoek en het vervolg van dit onderzoek.

Grondstoffen asfalt

Asfalt is een mengsel van de materialen zand, steenslag, bitumen en vulstoffen (Mechanische eigenschappen van wegebouwmaterialen). Steenslag, zand en vulstof vormen samen het 'aggregaat' en worden afhankelijk van de korrelgrootte gespecificeerd in de drie categorieën (Molenaar, 2010), zie Tabel 1. Het aggregaat neemt de drukspanning op het asfalt op (Mechanische eigenschappen van wegebouwmaterialen). Het bitumen is het bindmiddel van het asfalmengsel. Het bindmiddel en de vulstof vormen samen de mortel. De samenstelling van het asfalmengsel heeft invloed op het aanleggen en de prestatie van het asfalt (Molenaar, 2010). Hierbij zijn voornamelijk de volumetrische samenstelling en de eigenschappen van het bitumen van belang.

Tabel 1: Overzicht van drie categorieën waarin aggregaat verdeeld kan worden (Molenaar, 2010).

Aggregaat	Diameter korrelgrootte
Steenslag	$\varnothing \geq 2 \text{ mm}$
Zand	$63 \mu \leq \varnothing < 2 \text{ mm}$
Vulstof	$\varnothing < 63 \mu$

De bitumina spelen een grote rol in de prestatie van het asfalmengsel (Molenaar, 2010). Bitumina vertonen visco-elastisch en visco-plastisch gedrag. Het precieze gedrag is afhankelijk van de temperatuur en belasting. Op lagere temperatuur gedraagt bitumen zich elastisch, terwijl het zich op hogere temperatuur viskeus gedraagt (Mechanische eigenschappen van wegebouwmaterialen).

Naast het conventionele bitumen bestaat er ook polymeer-gemodificeerde bitumen welke de functionele eigenschappen van asfalt kan verbeteren (BituNed bv, sd). Bij het normale bitumen, ofwel penetratiebitumen, worden polymeren toegevoegd. Polymeer-gemodificeerde bitumina hebben een hogere viscositeit bij dezelfde temperatuur (Micaelo, Santos, & Duarte, 2012). Daarnaast vertonen ze non-Newtoniaans gedrag wat inhoudt dat de schuifspanning niet recht evenredig is aan de stroomsnelheid. Wanneer bij gemodificeerde bitumina de schuifsnelheid toeneemt, neemt de viscositeit af. Hierdoor kan de viscositeit op dezelfde temperatuur lager zijn wanneer het asfalt met een hogere schuifspanning wordt bewerkt.

Asfaltmengsels

In Nederland zijn er drie veel gebruikte asfaltmengsels: asfaltbeton (AC), steenmastiekasfalt (SMA) en Zeer Open Asfaltbeton (ZOAB of PA). De asfaltmengsels onderscheiden zich op mengseleigenschappen (CROW, 2014). ZOAB is een type asfaltmengsel waarbij er een grote volume-percentages van het asfalt bestaat uit open ruimtes (Rijkswaterstaat, sd). De open ruimtes zorgen ervoor dat er water kan worden opgenomen en dat het geluid van overgaande autobanden wordt verminderd. In Nederland wordt ZOAB op bijna alle snelwegen toegepast.

Het is mogelijk dat oud asfalt wordt hergebruikt en aan het asfaltmengsel wordt toegevoegd. Hergebruikt asfalt, ook wel PR of RAP genoemd, wordt gemaakt door oud asfalt te frezen en te breken en toe te voegen aan het nieuwe mengsel (Speight, 2015). Doordat in het oude asfalt verouderde bitumina zitten, kunnen de mechanische eigenschappen veranderen. Naarmate het percentage asfaltgranulaat toeneemt, neemt de viscositeit toe van het mengsel en daarmee de optimale meng- en verdichtingstemperatuur (Wu, et al., 2007).

2.3 Verdichtingsproces

Asfalt wordt kort voor aanleg geproduceerd in een asfaltcentrale. Wanneer het asfalt per vrachtwagen aankomt op locatie, gaat het naar de spreidmachine (Speight, 2015). De spreidmachine spreidt het asfalt op juiste breedte waarna een balk het asfalt op de juiste hoogte aanbrengt en voorverdicht (Speight, 2015).

Vervolgens zullen de walsen het asfalt verder verdichten (VBW-Asfalt, 2003). Het asfalt moet op een hoge temperatuur worden verdicht (Speight, 2015). Voor conventionele asfaltmengsels kan een temperatuurbereik van 100°C-140°C worden aangehouden. Wanneer het asfalt te koud is, neemt de viscositeit toe en daarmee ook de benodigde verdichtingsenergie. Op hoge temperatuur vermindert het bindmiddel namelijk de interne wrijving van het aggregaat. Wanneer op hogere temperatuur wordt verdicht, is naast de dichtheid ook de kwaliteit van het asfalt hoger, bestaande uit verdichtingsgraad, stabiliteit en stijfheid (Ismail, et al., 2019). Wanneer op een te lage temperatuur wordt gewalst, kan de dichtheid afnemen (Hainin, Oluwasola, & Brown, 2016). Ook de verhouding tussen de maximale korrelgrootte en de laagdikte heeft invloed op het verdichtingsproces (Hainin, Oluwasola, & Brown, 2016). Afhankelijk van het type mengsel moet de laagdikte minstens 3,0 (fijn gegradeerde mengsels) of 4,0 (grof gegradeerde mengsels) zo groot zijn ten opzichte van de maximale korrelgrootte. Anders is er extra verdichtingsenergie nodig.

In het verdichtingsproces kan onderscheid worden gemaakt tussen drie fases. In de eerste fase wordt het korrelskelet gerangschikt. Het hete bindmiddel zorgt ervoor dat het aggregaat makkelijk kan verschuiven. Het volume neemt af en de dichtheid neemt toe. In de tweede fase neemt de dichtheid verder toe terwijl het asfalt verder afkoelt. De mortel wordt steeds stugger waardoor het asfalt zich verend kan gedragen (VBW-Asfalt, 2003). In de derde fase is na verdere afkoeling verdichting met een zwaardere wals mogelijk.

De uiteindelijke dichtheid van het asfalt moet na het verdichtingsproces aan de streefdichtheid voldoen. De streefdichtheid van een asfaltmengsel wordt bepaald aan de hand van de 'Standaard RAW bepaling' (CROW, 2014). Hierbij wordt met een gyrator het mengsel oververdicht waarna met een berekening de streefdichtheid wordt bepaald. Ten slotte wordt aan het einde van het verdichtingsproces het asfalt afgewalst om oneffenheden in het asfalt weg te halen (VBW-Asfalt, 2003).

Bijleveld (2010) heeft onderzoek gedaan naar een verdichtingsvenster op basis van tijd en temperatuur. Uit het onderzoek volgde dat wanneer buiten het temperatuurvenster werd gewalst, de dichtheid wel behaald kon worden maar dat de mechanische eigenschappen wel minder zullen zijn. Het temperatuurvenster dat werd aangehouden in dit onderzoek liep van 150/140°C tot 60°C.

Aandachtspunten volgens het onderzoek zijn onder andere de temperatuurverdeling en de temperatuur in het spreid- en verdichtingsproces. Thermokoppels werden als een goede manier beschouwd om de (verticale) temperatuur(verdeling) te meten. Verder werd geconcludeerd dat er een terugveereffect plaatsvond gedurende het verdichtingsproces wat resulteerde in een lagere dichtheid. Het effect hiervan is afhankelijk van de verdichtingstemperatuur. In sommige gevallen duurde het 23 uur voordat het volledige terugveereffect was geobserveerd. De auteur schrijft het terugveereffect toe aan de elastische eigenschap van asfalt. Daarnaast werd geconcludeerd dat de nucleaire dichtheidsmeting vaak hoger is dan werkelijke dichtheid.

De operationele strategie van asfaltploegen voor het verdichten is niet consistent maar heeft wel veel invloed op de kwaliteit (Bijleveld, Miller, & Dorée, 2014). De aanpak van de asfaltploegen is gebaseerd op impliciete kennis. Er is veel variabiliteit in het temperatuur(verloop), verdichtingsproces en de dichtheidsprogressie. In het verdichtingsproces is er niet altijd een vaste inzet van de walsen. De nucleaire dichtheidsmeter is onnauwkeurig en daardoor lastig te gebruiken.

Uit onderzoek van Bijleveld et al. (2015) naar het verdichtingsproces en de invloed van temperatuur daarop, blijkt dat de streefdichtheid gehaald kan worden binnen een groot temperatuurbereik. Het onderzoek geeft aan dat een verdichtingsvenster op basis van temperatuur overwogen moet worden in plaats van een enkele temperatuur(drempel) gebaseerd op viscositeit van het bindmiddel. Daarnaast stelden zij dat wanneer de verdichting buiten het optimale temperatuurvenster wordt gestart, de gewenste dichtheid nog steeds kan worden behaald, maar dit zal ten koste gaan van de mechanische eigenschappen.

2.4 Verwerkbaarheid

Gudimettla et al. (2003) hebben uitgebreid onderzoek gedaan naar de verwerkbaarheid van asfalt. De onderzoekers hebben gekeken naar de invloed van de verschillende eigenschappen van het asfalt op de verwerkbaarheid. Hiervoor hebben ze een verwerkbaarheidsproef ontworpen die het koppel meet die op een roterende mengarm wordt uitgeoefend. Het ontwerp was volgens de auteurs succesvol en zij hebben vervolgens de volgende conclusies getrokken over mengseleigenschappen die van invloed zijn op de verwerkbaarheid:

- Steenslag dat meer grof en hoekig is, is minder verwerkbaar dan fijne steenslag.
- Des te groter de nominale korrelgrootte was, des te minder verwerkbaar het mengsel was.
- De korrelverdeling leek niet van grote invloed te zijn op de verwerkbaarheid.
- Het bindmiddel had grote invloed op de verwerkbaarheid. Gemodificeerde mengsels waren minder verwerkbaar.
- Temperatuur heeft grote invloed op de verwerkbaarheid. Een hogere temperatuur zorgde voor een betere verwerkbaarheid.

De conclusies over verwerkbaarheid komen grotendeels overeen met ervaringen in de praktijk (VBW-Asfalt, 2003).

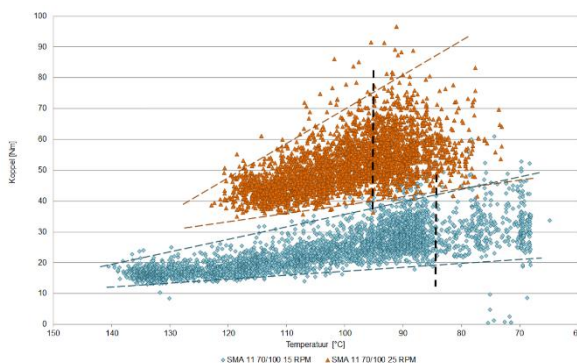
De auteurs hebben ook gekeken naar eventuele verdichtingsmethoden. Zij stellen dat verandering in verwerkbaarheid wordt bepaald door een verandering in de viscositeit van het bindmiddel en dat de grootte van de verwerkbaarheid wordt bepaald door eigenschappen van het aggregaat en het bindmiddel. De eerste overwogen methode bepaalde het verdichtingsvenster aan de hand van gelijke koppelwaarden. Echter, het bezwaar bij deze methode was dat bij een mengsel met gemodificeerde bitumen te hoge temperaturen werden bepaald omdat die minder goede verwerkbaar zijn. Uiteindelijk is gekozen om de verdichtingstemperatuur vast te stellen waar het koppel stabiliseert. In het onderzoek wordt een regressielijn bepaald maar er wordt niet uitgelegd hoe het moment van stabilisatie is bepaald.

Verwerkbaarheidsproef *Boskalis*

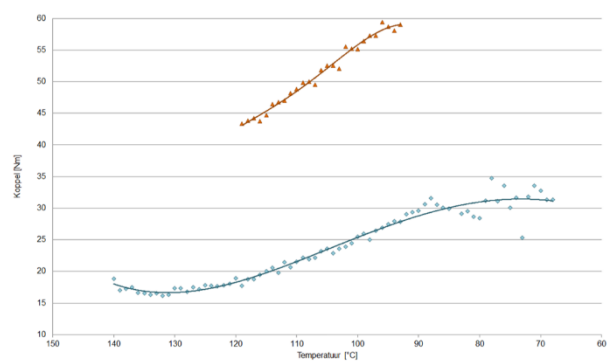
Over de ontwikkeling van de verwerkbaarheidsproef van Boskalis zijn twee artikelen geschreven. In 2014 (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014) werd de ontwikkeling van de verwerkbaarheidsproef beschreven. In 2016 (Poeran & Sluer, 2016) is er vervolgonderzoek met de verwerkbaarheidsproef gedaan waarbij verbeteringen zijn aangebracht en een analysemethode is ontwikkeld voor het bepalen van omslagpunten.

In het eerste artikel (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014) wordt het ontwerp van de verwerkbaarheidsproef doorgenomen. Meerdere draaisnelheden van de mengarm zijn uitgetest en verschillende massa's zijn overwogen. Er zijn draaisnelheden van 5, 15 en 25 RPM geprobeerd waarna is gekozen voor 15 RPM omdat hiermee de minste ruis en spreiding werd gemeten. De analyse wordt gedaan door het koppel uit te zetten tegen de temperatuur en vervolgens wordt bepaald wanneer het mengsel dof uitslaat. De analyse is uitgevoerd voor meerdere draaisnelheden van de mengarm. Bij een hogere draaisnelheid (25 RPM) is het gemeten koppel meer dan twee keer zo groot en slaat het mengsel eerder dof volgens de analyse.

Bij de gevonden verwerkbaarheidskarakteristieken kwam een S-vormige patroon naar voren. Het koppel werd hierbij afgezet tegen de temperatuur zoals is te zien in Figuur 4 en Figuur 5. In het begin moest de weerstand van het mengsel worden overwonnen waarna een constante koppel werd gemeten. Vervolgens was er een fase waarin het koppel steeg. Uiteindelijk eindigde de toename en was het koppel weer constant ten opzichte van de temperatuur. Daarna daalde het koppel wat door de auteurs wordt verklaard vanwege een gebrek aan cohesie. Wat opvalt aan de gepresenteerde data is dat er veel spreiding is in het koppel tegen het einde van de proef bij alleen het SMA- en ZOAB-mengsel en niet bij de AC-mengsels.

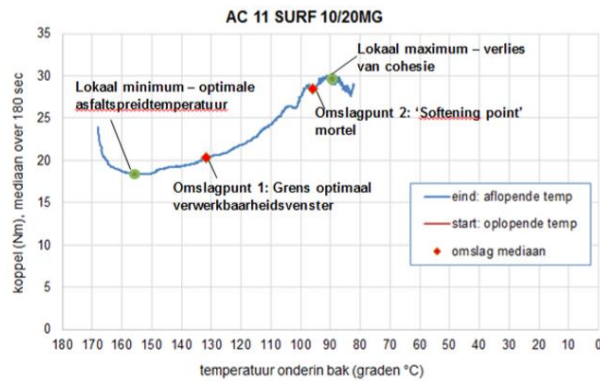


Figuur 4: Koppel uitgezet tegen de temperatuur (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014).

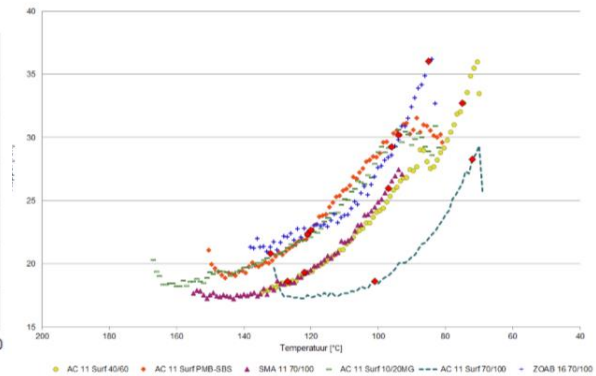


Figuur 5: Gemiddelde koppel per temperatuur (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014).

In het vervolgonderzoek (Poeran & Sluer, 2016) zijn verbeteringen aan de verwerkbaarheidsproef aangebracht. Aanpassingen zijn verricht aan de mengarm en mengkom om klontvorming te voorkomen. In Figuur 6 en Figuur 7 zijn de resultaten van het vervolgonderzoek te zien. Die laten soortgelijke resultaten zien als bij het eerste onderzoek. Het koppel is eerst constant, vervolgens stijgt het en uiteindelijk is het weer constant en is er meer spreiding. De temperatuur is dit keer gemeten van de onderkant van de kom. Hier wordt het mengsel minder goed geroerd waardoor de gemeten temperatuur minder representatief is voor het mengsel. Er werd minder ontmenging en aankoeking geconstateerd met het nieuwe ontwerp wat de gevonden resultaten meer representatief maakt.



Figuur 6: Bepaling omslagpunten (Poeran & Sluer, 2016).

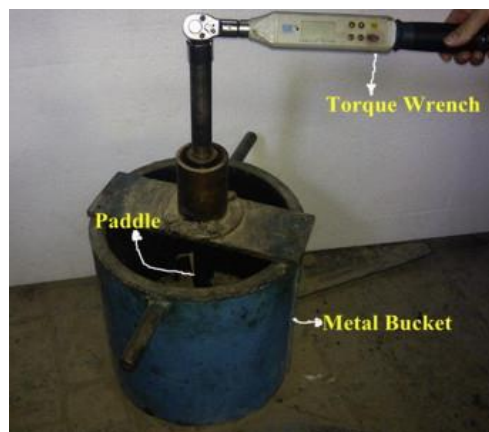


Figuur 7: Omslagpunten van meerdere mengsels (Poeran & Sluer, 2016).

Andere verwerkbaarheidsproeven

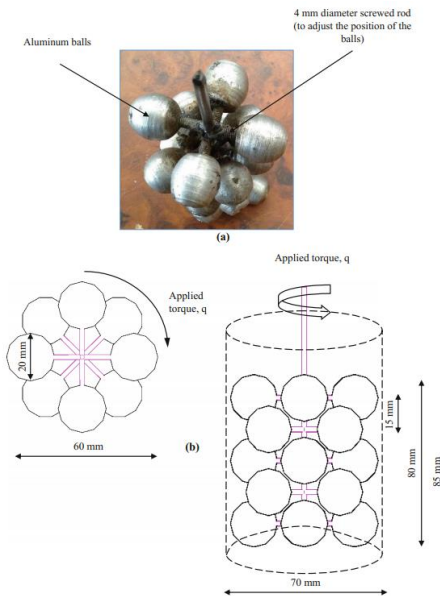
Naast de ontwikkeling van de verwerkbaarheidsproef door *Boskalis*, zijn er enkele onderzoeken van soortgelijke proeven naar de verwerkbaarheid van asfalt.

Wang et al. (2013) hebben een proef ontwikkeld waarbij het koppel wordt gemeten die wordt uitgeoefend door het roteren van een mengarm in het asfaltmengsel. In Figuur 8 is de proefopzet te zien. In tegenstelling tot de verwerkbaarheidsproef van *Boskalis*, wordt de proef uitgevoerd op een vooraf bepaalde temperatuur. Het mengsel wordt meerdere keren verwarmd op verschillende temperaturen om de meting uit te voeren. In de analyse wordt het koppel tegen de temperatuur uitgezet waarna de verbinding van de verschillende meetpunten leidt tot mogelijke trends. Voor een mengsel met een bestaand temperatuurvenster is het corresponderende koppelvenster bepaald. Dit koppelvenster wordt gebruikt om bij andere mengsels een temperatuurvenster te vinden.



Figuur 8: Proefopzet gebruikt door Wang et al. (2013).

Diab & You (2017) hebben een proef ontwikkeld die verwerkbaarheid bepaald door het meten van de koppel. De verwerkbaarheid is voor enkele temperaturen bepaald en tegen elkaar uitgezet. De proef kon onderscheid maken in de verwerkbaarheid. Op hogere temperatuur werd een lagere verwerkbaarheid vastgesteld. Er werd vastgesteld dat polymeer gemodificeerde mengsels minder verwerkbaar zijn. Het onderzoek gaat beperkt in op de analysemethode om temperatuurvenster te bepalen. De auteurs geven aan de hun ontwerp verder moet worden ontwikkeld.

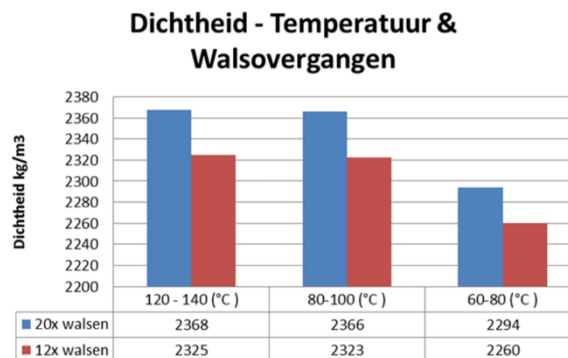


Figuur 9: Impressie verwerkbaarheidsproef Diab & You (2017).

Toepassing verwerkbaarheidsproef

In vervolg op de verwerkbaarheidsproef van *Boskalis* is er onderzoek gedaan (Bahçeci, 2015) naar het effect van de verdichtingstemperatuur en -energie op de asfaltkwaliteit. In het onderzoek werden meerdere asfaltplaten verdicht op verschillende temperaturen en met verschillende aantal walsspassages. De temperatuurintervallen werden bepaald met de verwerkbaarheidsproef. De hiervoor gevonden omslagpunten waren 126°C en 82°C. Het aantal walsspassages was 12 of 20. Uiteindelijk werden uit de asfaltplaten meerdere boorkernen geboord waarvan de dichtheid is bepaald en splijt- en triaxiaalproeven zijn uitgevoerd.

In Figuur 10 zijn de resultaten te zien. De temperatuurvensters boven het tweede omslagpunt (120°C-140°C en 80°C-100°C) hebben nauwelijks een verschil in dichtheid ten opzichte van elkaar. Bij het temperatuurvenster van 60°C-80°C dat onder de tweede temperatuurdrempel ligt, is de dichtheid wel lager ten opzichte van de andere temperatuurzones. Uit de splijt- en triaxiaalproef kwam naar voren dat walsen boven de tweede temperatuurdrempel met 20 walsspassages beter is voor de mechanische eigenschappen. In tegenstelling tot wat in eerder onderzoek (Poeran & Sluer, 2016) werd aangegeven om het eerste omslagpunt te gebruiken als ondergrens voor het temperatuurvenster, kan het tweede omslagpunt als ondergrens worden gebruikt.



Figuur 10: Resultaten dichtheid (Bahçeci, 2015).

In de aanbeveling geeft de auteur aan dat de dichtheidsprogressie en in de praktijk meten belangrijk zijn om te onderzoeken of hier een soortgelijk effect optreedt. Verder wordt aanbevolen om het verdichtingsproces (grotendeels) afgerond te hebben voor het tweede omslagpunt.

2.5 Deelconclusie literatuuronderzoek

In het literatuuronderzoek is ingegaan op basisbegrippen, het verdichtingsproces en de verwerkbaarheid. De volgende conclusies zullen worden meegenomen in het vervolg van het onderzoek:

- Basisbegrippen zijn vastgesteld.
- Het verdichtingsproces is in kaart gebracht. Het proces bestaat uit drie fases. Temperatuur en verdichtingsenergie zijn belangrijk voor een goede verdichting
- Het verdichtingsproces vertoont veel variabiliteit en heeft veel invloed op asfaltkwaliteit.
- Als er onder de minimumtemperatuur van het verdichtingsvenster wordt gewalst, kan de streefdichtheid nog worden behaald maar dit gaat ten koste van de mechanische eigenschappen.
- Factoren die verwerkbaarheid beïnvloeden zijn vastgesteld. De belangrijkste factoren zijn het type bindmiddel en de temperatuur van het asfalt.
- De ontwikkeling en toepassing van de verwerkbaarheidsproef van *Boskalis* is doorgenomen. Enkele vergelijkbare verwerkbaarheidsproeven zijn doorgenomen.

Naast de bovengenoemde conclusies blijven er op enkele punten nog onduidelijkheden. Zo zijn er meerdere onderzoeken gedaan naar de verwerkbaarheid van asfalt en het verdichtingsproces. Echter, er is weinig gekeken naar de relatie tussen deze twee onderwerpen. Er zijn geen onderzoeken waarbij de uitkomsten van een verwerkbaarheidsproef worden vergeleken, gevalideerd of geëvalueerd met de dichtheidsprogressie bij veldmetingen. Verder is er in het verdichtingsproces voornamelijk naar de einddichtheid gekeken maar minder naar de dichtheid (en temperatuur) gedurende het verdichtingsproces. Hierdoor kan er geen link worden gelegd tussen de temperatuur van het asfalt en de staat van verdichting.

Doordat er weinig literatuur te vinden is over de relatie tussen de verwerkbaarheid, temperatuur en het verdichtingsproces, kan dit onderzoek bijdragen aan nieuwe inzichten. In dit onderzoek zal gekeken worden naar de link tussen verwerkbaarheid en de dichtheidsprogressie. Meerdere onderzoeken doen wel aanbevelingen om praktijkmetingen te doen en hierbij te kijken naar het verloop van de dichtheid. De aandachtspunten in dit hoofdstuk zullen worden meegenomen in het vervolg van dit onderzoek.

3 Methodiek

In dit hoofdstuk zal de methodiek van het onderzoek worden doorgenomen. De methodiek bestaat uit verschillende onderdelen die gericht zijn op het uitvoeren van proeven en metingen en het analyseren van de verzamelde data. Er worden parallel aan elkaar meerdere experimenten uitgevoerd met de verwerkbaarheidsproef en veldmetingen verricht. Vervolgens wordt er een analyse uitgevoerd waarbij de resultaten van de proeven en metingen met elkaar worden vergeleken.

Het hoofdstuk is opgedeeld in vijf secties. In 3.1 en 3.2 wordt de methodiek voor de verwerkbaarheidsproef en bijbehorende analyse behandeld. In 3.3 wordt de methodiek voor de veldmetingen toegelicht en in 0 en de bepaling van de dichtheidsprogressie. In 3.5 wordt de methodiek toegelicht voor de vergelijkende analyse van de temperatuurdrempels met de dichtheidsprogressie.

Om de uiteindelijke vergelijkende analyse te kunnen uitvoeren, dienen dezelfde mengsels beproefd te worden in het gehele onderzoek. Op basis van beschikbare veldmetingen gedurende dit onderzoek worden de volgende mengsels beproefd:

- PA 16 Periphalt HZ90 40% PR
- AC 16 bin 40/60 eco 60% PR
- AC 16 surf SFB 5-50HS Bestone
- AC 22 base 70/100 eco 60% PR

In Bijlage 8.1 kan de samenstelling van de bovenstaande mengsels worden gevonden.

3.1 Verwerkbaarheidsproef

Ter beantwoording van de tweede onderzoeksvraag zal de verwerkbaarheid van verschillende mengsels worden beproefd. Dit wordt gedaan met de verwerkbaarheidsproef ontwikkeld door *Boskalis*. In de verwerkbaarheidsproef worden warme asfaltmengsels beproefd door gedurende afkoeling het koppel en de temperatuur te meten. Hierbij wordt het door *Boskalis* ontwikkelde meetplan gebruikt. Per mengsel zullen twee metingen worden uitgevoerd om de herhaalbaarheid te bepalen, wat aansluit op onderzoeksvraag 2B.

Meetopstelling

De meetopstelling bestaat uit een koppelmeter, mengkom en mengarm. De opstelling is weergegeven in Figuur 11. De meetopstelling staat in het laboratorium van *Boskalis* waar over het algemeen de kamertemperatuur heerst.



Figuur 11: Meetopstelling verwerkbaarheidsproef (Poeran & Sluer, 2016).

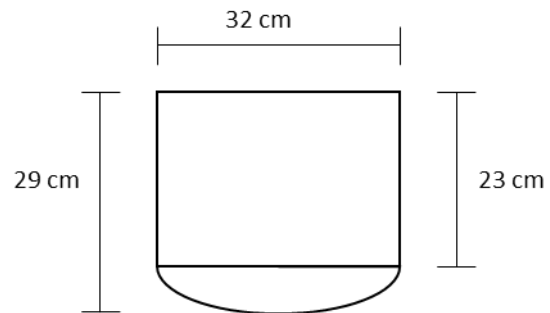
De mengkom is gemaakt van roestvrij staal (Poeran & Sluer, 2016). In Figuur 12 is de mengkom met de mengarm te zien en in Figuur 13 een schematische weergave van de mengkom. De hoogte van de mengkom is instelbaar en wordt bepaald aan de hand van de maximale korrelgrootte. Op deze manier wordt voorkomen dat door een vastzittende steen een hoge piek in weerstand wordt gemeten. Tegelijkertijd wordt de hoogte zo minimaal mogelijk gehouden om te voorkomen dat er asfalt achterblijft en gaat aankoeken. In Tabel 2 staan de gebruikte hoogtes tussen de mengarm en de bodem van de mengkom.



Figuur 12: Mengkom en mengarm.

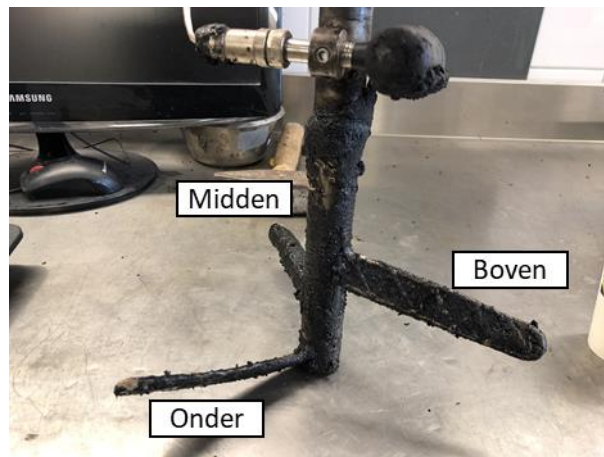
Tabel 2: Nominale zeefmaat (linker kolom) en bakhoogte (rechter kolom).

D (mm)	h (mm)
5	8
8	12
11	14
16	19
22	25



Figuur 13: Schematische weergave mengkom.

In Figuur 14 is de mengarm te zien en in Tabel 3 staan afmetingen van de mengarm. De mengarm bestaat uit drie componenten die verschillende hoogtes hebben. Naast de lengte en de breedte van de componenten, is in Tabel 3 ook de hoogte van de onder- en bovenkant van elk component aangegeven (h_{onder} en h_{boven}).



Figuur 14: Mengarm verwerkbaarheidsproef.

Tabel 3: Eigenschappen mengarm van de verwerkbaarheidsproef.

Component	Lengte (cm)	Breedte (cm)	h_{onder} (cm)	h_{boven} (cm)
Boven	13	$\approx 2,6$	$\approx 7,5$	≈ 10
Midden	13	≈ 2	≈ 4	≈ 6
Onder	13,5	$\approx 2,8$	0	≈ 2

Meetplan

De bereiding van het mengsel voor de verwerkbaarheidsproef gebeurt in het laboratorium. De verschillende componenten van het mengsel worden verwarmd naar voorgeschreven mengtemperatuur. Kort voordat de proef begint worden de verschillende componenten gemixt in een menger. Er wordt gebruik gemaakt van een dwangmenger op labschaal ('ARP-menger') of een planeetmenger ('Bear-menger'). De voorkeur gaat uit naar een ARP-menger aangezien die het mengproces van een asfaltcentrale simuleert (Arp engineering b.v., sd), maar de toepassing van een Bear-menger is voor PA-mengsels eenvoudiger. Wanneer het mengsel voldoende is gemengd en opgewarmd, kan er een meting plaatsvinden.

Er wordt 20 Kg van het mengsel in de mengkom gestopt en vervolgens wordt de meting gestart. De mengarm begint met draaien en de mengkom wordt verhoogd tot de juiste hoogte is bereikt. De mengarm heeft een toerental van 15 R/min. Naast het koppel wordt ook de temperatuur gemeten op drie plekken: een sensor in de mengarm, op de bodem van de mengkom en een infraroodcamera op de oppervlakte van het mengsel. Hiermee kan een eventueel verschil in temperatuur worden bepaald.

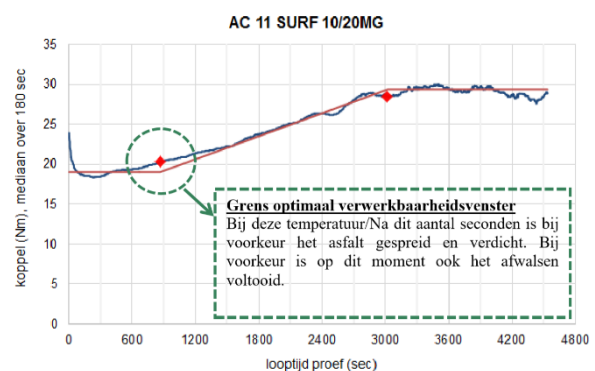
Er zijn drie manieren waarop de proef stopt: indien de maximum tijdsduur van 1 uur is bereikt, het maximum koppel van 100 Nm is bereikt of het mengsel is afgekoeld tot onder 10°C. Het is niet mogelijk om de maximum tijdsduur in te stellen op langer dan één uur.

3.2 Analyse verwerkbaarheidsproef

In 3.1 is de methodiek van de verwerkbaarheidsproef beschreven. Wanneer de proef is uitgevoerd, moeten de omslagpunten worden bepaald. Uit de omslagpunten volgen temperatuurdrempels waarmee een temperatuurvenster kan worden bepaald. In eerder onderzoek met de verwerkbaarheidsproef (Poeran & Sluer, 2016) door Boskalis is er een rekenmodel ontworpen dat de omslagpunten bepaald. Dit rekenmodel wordt gebruikt voor de bepaling van de omslagpunten. Aansluitend zal een regressielijn worden bepaald ter vergelijking en evaluatie.

Oorspronkelijke en alternatieve methodiek

Uit eerder onderzoek (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014) kwam naar voren dat er veel spreiding zat in het gemeten koppel. Om de spreiding van de waarden van het koppel te verminderen, wordt er per tijdstap de mediaan berekend van de afgelopen 180 tijdstappen. Het rekenmodel berekent vervolgens twee omslagmomenten. Het eerste omslagpunt is het moment waarbij er een stijgende trend is te zien in het koppel. Het tweede omslagpunt is het moment waarbij de stijgende trend eindigt. In Figuur 15 zijn de omslagpunten gevisualiseerd.



Figuur 15: Bepaling omslagpunten (Poeran & Sluer, 2016).

Bij het evalueren van dit rekenmodel kwamen meerdere fouten en bijzonderheden naar voren:

- Het model neemt voor het berekenen van de omslagpunten de verandering over de tijd. Het doel van de verwerkbaarheidsproef is om een verdichtingsvenster te bepalen aan de hand van temperatuur. Dit kan als gevolg hebben dat onterecht een omslagpunt wordt aangegeven vanwege een andere afkoelsnelheid. Er wordt dus aangenomen dat de temperatuurafname in het genomen bereik van 180 seconden laag is.
- De standaarddeviatie wordt niet gebruikt om een omslagpunt te bepalen die is weergegeven in Figuur 15. In eerder onderzoek (Poeran & Sluer, 2016) lijkt de standaarddeviatie te

worden gebruikt voor het bepalen van het eerste omslagpunt. In het rekenmodel wordt dit als een derde omslagpunt beschouwd die los staat van de omslagpunten weergegeven in Figuur 15.

- De omslagpunten worden bepaald op het moment waar drie lijnstukken elkaar kruisen. De data waarmee de lijnstukken worden bepaald wordt handmatig geselecteerd. De vergelijking voor lineair stijgende lijn wordt berekend door middel van lineaire regressie over een gedeelte van de data. Wanneer de data niet lineair is, wordt de berekende vergelijking minder nauwkeurig. Dit heeft ook invloed op de omslagpunten aangezien de lineaire lijn de constante lijnstukken dan op een andere temperatuur kruist. Hierdoor kunnen het eerste- en tweede omslagpunt dichter of verder van elkaar af liggen.
- De gebruikte data wordt geselecteerd aan de hand van de tijdwaarden ingevoerd in het rekenmodel. Wanneer een minder representatieve selectie wordt genomen, zijn de lineaire lijn en omslagpunten minder nauwkeurig. De handmatige selectie heeft dus veel invloed en de omslagpunten worden niet op een onafhankelijke en systematische manier bepaald.
- Het model houdt geen rekening met verschillende intervallen tussen de tijdstappen. Hierdoor wordt niet altijd 180 seconden genomen maar 180 tijdstappen van rond de 360 seconden (wegens het gemiddelde 2 seconden interval).
- De methode neemt de mediaan over de afgelopen 180 seconden terwijl in het ideale geval dit 90 seconden voor- en achteraf zijn, aannemend dat het koppel geleidelijk toeneemt over de tijd.
- Het model gaat uit van een lineair verband tussen de temperatuur en koppel. Dit hoeft niet altijd het geval te zijn zoals blijkt uit eerdere metingen (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014) (Poeran & Sluer, 2016).

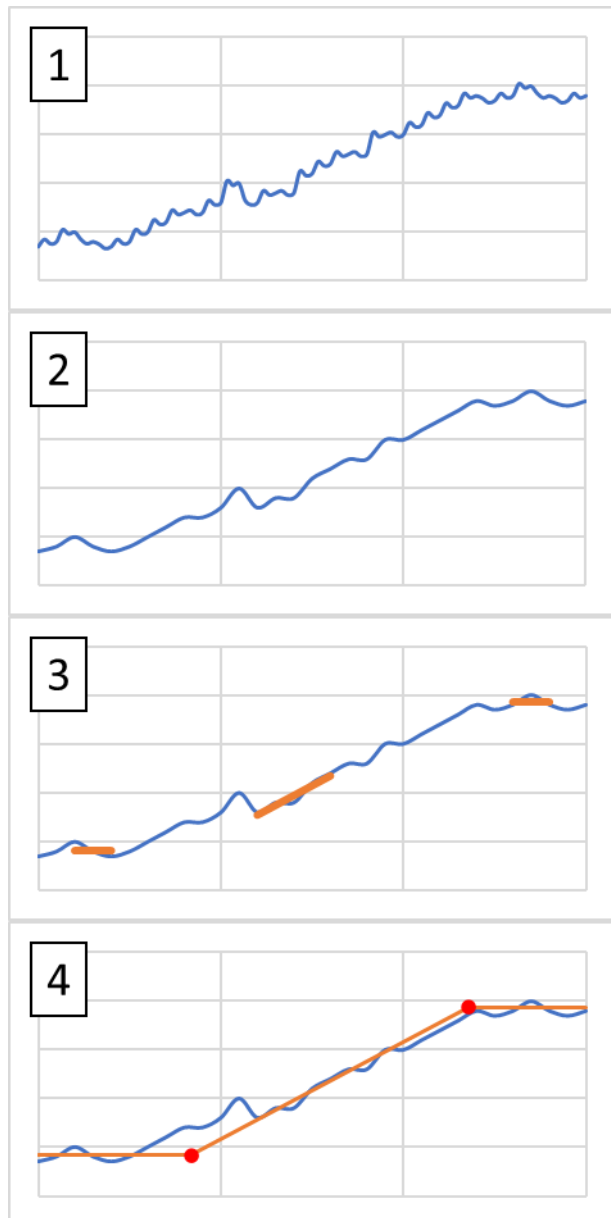
Vanwege de zojuist genoemde bezwaren, is er besloten om het rekenmodel van *Boskalis* te wijzigen. Er kan voor worden gekozen om enkele wijzigingen in het model aan te brengen of een gehele nieuwe methodiek te ontwikkelen. Op basis van de beschikbare onderzoekstijd en -ruimte is ervoor gekozen om een beperkt aantal wijzigingen aan het rekenmodel te doen. Het gaat dan om het corrigeren van de intervallen en het nemen van de mediaan over de 90 seconden voor en na de betreffende tijdstap.

Tekst gaat op volgende pagina verder.

Analysemethode

De analysemethode wordt aan de hand van Figuur 16 beschreven. De bepaling van de omslagpunten gebeurt in vier stappen.

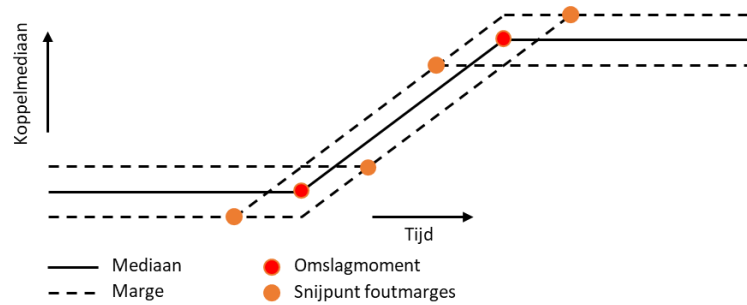
1. De eerste stap is het uitzetten van de koppel tegen de tijd. Dit is de originele data en deze vertoont veel spreiding.
2. Als tweede wordt voor elke tijdstap de koppelmediaan en standaarddeviatie berekend. De koppelmediaan is berekend door de mediaan te nemen over een doorlopend bereik van $-90 \leq t(s) \leq 90$ (in plaats van $-180 \leq t(s) \leq 0$). De standaarddeviatie wordt op dezelfde manier berekend.
3. Vervolgens moeten er drie tijdsvensters worden gekozen waarvan het gemiddelde koppel wordt berekend. Dit zijn de horizontale en lineair stijgende lijnen. De horizontale lijnen zijn het gemiddelde van de gekozen tijdsvensters. De toenemende lijn is de regressielijn van de koppelmediaan. De regressielijn is een lineaire functie van de data binnen de gekozen tijdwaarden.
4. De uiteindelijke omslagmomenten zijn het moment waar de twee constante lijnen kruisen met de lineair stijgende lijn.



Figuur 16: Visualisatie bepaling omslagpunten met het rekenmodel.

Hieruit volgt het driedelige patroon te zien in Figuur 17. Uiteindelijk bepaalt het rekenmodel de kwaliteit van de omslagpunten op drie manieren:

- Verschil tussen werkelijke koppelmediaan en gemiddelde koppelmediaan op de omslagmomenten.
- Temperatuurverschil tussen de snijpunten van de foutmarges.
- Verhouding gemiddelde standaarddeviatie tussen constante en lineaire lijnstukken.



Figuur 17: Visualisatie bepaling omslagpunten met rekenmodel.

De standaarddeviatie geeft inzicht in de spreiding van de koppelmediaan. In eerder onderzoek (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014) nam de standaarddeviatie gedurende de verwerkbaarheidsproef toe, zeker op het moment dat het mengsel dof begint te slaan. Het nadeel van het bepalen van de standaarddeviatie is dat bij een andere afkoelsnelheid, de spreiding anders zal zijn waardoor ten onrechte een verandering in de standaardafwijking wordt bepaald. Het rekenmodel geeft de mogelijkheid om een extra omslagmoment te bepalen waarop de standaarddeviatie boven een bepaalde waarde uitkomt. Deze functie wordt niet gebruikt.

Regressielijn

Het vergelijken van de regressielijn met de omslagpunten geeft inzicht in hoe de omslagpunten zich verhouden ten opzichte van de koppel-temperatuurrelatie. In eerder onderzoek Gudimettla et al. (2003) werd voor de analyse een regressielijn bepaald met exponentiele functie. Voor dit onderzoek is de regressielijn een polynoom tot de derde macht.

$$f(x) = c_1x^3 + c_2x^2 + c_3x + c_4$$

De extreme waarden en buigpunt van de regressielijn worden bepaald. Deze drie waarden zullen worden vergeleken met de omslagpunten.

Temperatuurdrempels en -venster

De omslagpunten vormen de temperatuurdrempels. Omdat er meerdere verwerkbaarheidsproeven met hetzelfde mengsels zijn gedaan, moet er gekozen worden tussen de omslagpunten van de meerdere metingen. Voor dit onderzoek is ervoor gekozen om voor de eerste temperatuurdrempel het laagste omslagpunt en voor de tweede temperatuurdrempel het hoogste omslagpunt te nemen. De reden hiervoor is dat er dan meer zekerheid is dat het gekozen temperatuurvenster de verwerkbaarheid geschikt is.

De temperatuurdrempels vormen een temperatuurvenster waarin idealiter een grote mate van verdichting wordt bereikt. Uit eerder onderzoek (Poeran & Sluer, 2016) kwam naar voren dat op de eerste temperatuurdrempel het asfalt gelegd en verdicht is en de tweede temperatuurdrempel het verwekingspunt van het mengsel is. Wanneer het mengsel verder is afgekoeld, zou dan alleen nog de naverdichting moeten plaatsvinden.

Met de bepaalde temperatuurdrempels zal de dichtheidsprogressiemeting in meerdere zones worden opgedeeld:

- Zone 1: vanaf mengtemperatuur tot eerste temperatuurdrempel.
- Zone 2: vanaf eerste temperatuurdrempel tot tweede temperatuurdrempel.
- Zone 3: vanaf tweede temperatuurdrempel.

In het vervolg van het onderzoek zullen de temperatuurdrempels worden geanalyseerd.

3.3 Veldmeting

Het doel van de veldmeting is om de dichtheidsprogressie te bepalen gedurende het verdichtingsproces, als gesteld in onderzoeksvraag 3. De temperatuurdrempels bepaald in 3.2 kunnen worden vergeleken met de dichtheidsprogressie in de praktijk. Daarom zal de dichtheidsprogressie in relatie tot de temperatuur worden gemeten. De veldmetingen worden parallel aan en onafhankelijk van het verwerkbaarheidsonderzoek uitgevoerd. Er wordt rekening gehouden met gebruikte walsen, temperatuurvariabiliteit en afkoeling.

Aangezien het niet mogelijk is om het verdichtingsproces aan te sturen, worden er alleen metingen en observaties verricht en wordt er geen invloed uitgeoefend op het verdichtingsproces. Dit beperkt de verzamelde data en maakt het onderzoek afhankelijk van het uitgevoerde proces. Tegelijkertijd geven de veldmetingen wel meteen inzicht hoe het verdichtingsproces zich in de praktijk verhoudt.

Binnen het onderzoeksnetwerk *ASPARi* is er een handleiding voor afkoelings- en dichtheidsmetingen (*ASPARi*, 2018). *Boskalis* heeft hiermee eerder veldmetingen uitgevoerd en beschikt over daarvoor benodigde apparatuur. De handleiding sluit aan op het gestelde doel van de veldmetingen en wordt daarom gebruikt als basis voor dit onderzoek. Voor de veldmetingen is er een stappenplan opgesteld en deze kan worden gevonden in Bijlage 8.2. In Figuur 18 is een impressie van de verschillende meetapparatuur te zien, bestaande uit (1) dataloggers, (2) infraroodcamera, (3) nucleaire dichtheidsmeter en (4) extra infraroodcamera.



Figuur 18: Meetapparatuur veldmeting.

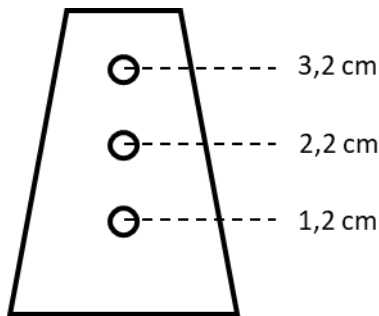
De dichtheid van het asfalt wordt op twee manieren bepaald. Tijdens de meting zullen er dichtheidsmetingen worden gedaan met een nucleaire dichtheidsmeter. Dit wordt gedaan wanneer het asfalt net is aangelegd en na iedere walsovergang. Een nucleaire dichtheidsmeter heeft als nadeel dat het minder nauwkeurig is. Daarom zullen na het verdichtingsproces boorkernen worden geboord waarvan de dichtheid zal worden bepaald. De dichtheid bepaald met de boorkern is nauwkeuriger dan bepaald met een nucleaire dichtheidsmeter, echter de boorkern kan alleen na het verdichtingsproces worden geboord.

Aangezien de walsen de verdichting toebrengen aan het asfalt, zullen het type wals en het aantal walspassages worden genoteerd. Hiermee kan onderscheid worden gemaakt tussen de verschillende type walsen en kan de effectiviteit van de walsovergangen worden bepaald. In Tabel 4 staat een overzicht van walsen die gebruikt worden door *Boskalis* en enkele eigenschappen.

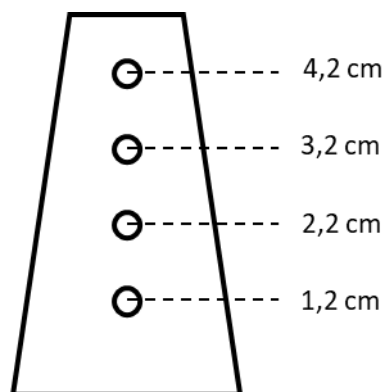
Tabel 4: Overzicht van walsen toegepast tijdens het verdichtingsproces.

Wals	Type	Klasse
GRW 280	Bandenwals	16 ton
DV70	Oscillatie-en trilrolwals	Onbekend
DVi70+	Oscillatie-en trilrolwals	Onbekend
HW 90	Statische wals	10 ton
HD10	Tandem trilrolwals	2,5 ton
HD120	Oscillatie-en trilrolwals	12 ton

De temperatuur wordt vlak voor en gedurende het verdichtingsproces gemeten. Vlak voordat het verdichtingsproces begint, wordt de temperatuur gemeten van de ondergrond en de asfaltspecie in de spreidmachine. Vervolgens wordt het asfalt aangebracht en begint het verdichtingsproces. De temperatuur van het asfalt kan verschillen over de hoogte. Daarom wordt de temperatuur gemeten in de laag zelf en aan het oppervlak met respectievelijk thermokoppels en een infraroodcamera. Een schematische weergave van de afstandshouders is te zien in Figuur 19 en Figuur 20 met daarin de hoogtes van de verschillende sensoren. Voor asfaltlagen met een dikte van 6 cm en 5 cm worden respectievelijk afstandshouders met een hoogte van 5 cm en 4 cm gebruikt.

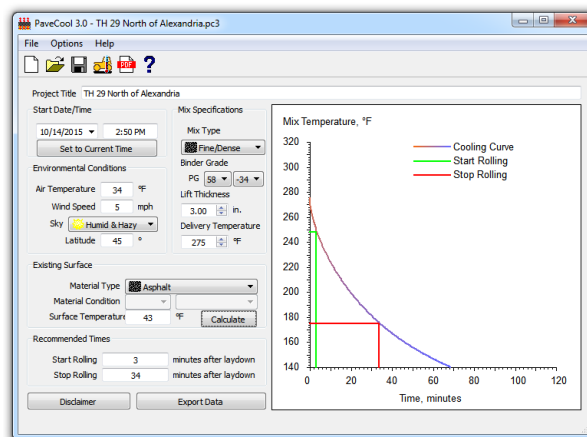


Figuur 19: Afstandshouder met een hoogte van 4 cm.



Figuur 20: Afstandshouder met een hoogte van 5 cm.

Om de praktische toepassing van het temperatuurdrempels te onderzoeken, wordt het verloop van de afkoeling van het asfalt vergeleken met de verwachte afkoeling. Met het programma *PaveCool* (3.0) kan de afkoeling worden gesimuleerd aan de hand van asfalteigenschappen en weeromstandigheden. Via de weerapplicatie van *Bouwend Nederland* (Bouwend Nederland, sd) kan informatie van weerstations in de buurt van het project worden opgevraagd. Dit is minder nauwkeurig dan met een lokaal opgezet weerstation, wat onderdeel is van de *ASPARi*-handleiding. Echter, dit weerstation is niet beschikbaar en daarnaast zijn de weergegevens van *Bouwend Nederland* nauwkeurig genoeg voor *PaveCool*. In Figuur 21 is het hoofdscherm te zien van *PaveCool* en een mogelijke uitkomst.

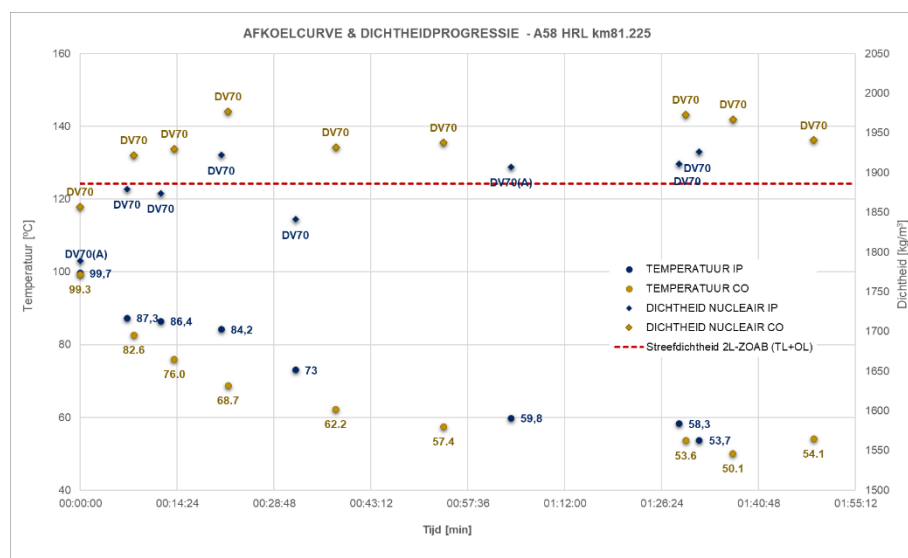


Figuur 21: Hoofdscherm *PaveCool* 3.0 (Minnesota Department of Transportation, 2020).

3.4 Dichtheidsprogressie

Nadat tijdens de veldmetingen de dichtheidsprogressie is gemeten, moet de verzamelde data worden verwerkt om de koppeling te kunnen maken met de temperatuurdrempels. In deze analyse wordt de dichtheidsprogressie vastgesteld waarbij rekening wordt gehouden met de temperatuur en toegepaste walsen. De analyse in deze sectie heeft overlap met onderzoeksvraag 3 en 4.

Bij eerdere dichtheidsprogressiemetingen uitgevoerd door *Boskalis*, werden de dichtheid en temperatuur tegen tijd uitgezet. Daarnaast werd in de uiteenzetting aangegeven wat de streefdichtheid was. Het aantal walsovergangen en type wals werden in een apart tabel getoond. Een impressie van gebruikte analyseweergave is te zien in Figuur 22. Hierin geven de cirkels de temperatuur aan die op de linker as is uitgezet en geven de ruiten de dichtheid aan die op rechter as is uitgezet. Ook is bij de ruiten de gebruikte wals aangegeven. De rode lijn geeft de streefdichtheid aan. De grafiek geeft inzicht hoe bij twee verschillende metingen de dichtheid toeneemt door meerdere walsovergangen terwijl de temperatuur afneemt.



Figuur 22: Dichtheidsprogressie gebruikt bij eerdere onderzoeken door *Boskalis*.

Aangezien de temperatuurdrempels die bepaald zijn in de verwerkbaarheidsproef op basis van temperatuur zijn gedaan, is ervoor gekozen om de dichtheidsprogressiemeting uit te zetten tegen de temperatuur. Op deze manier kan in de vergelijkende analyse elke walsovergang worden vergeleken ten opzichte van de temperatuurdrempels.

Dichtheidsprogressie

Het bepalen van de dichtheid is redelijk eenvoudig aangezien de enige data die beschikbaar is van de nucleaire dichtheidsmetingen en boorkernen zijn.

Het bepalen van de temperatuur is lastiger omdat er veel verschillende data is. De temperatuur van het asfalt is over de hoogte gemeten. Hieruit moet een waarde worden bepaald die wordt gekoppeld aan de dichtheid. Dit gebeurt in twee stappen:

1. Eerst wordt voor elk meetpunt een doorlopende mediaan berekend met een bereik van $t - 30 \leq t \leq t + 30$. De walsovergangen worden met een stopwacht op de seconde nauwkeurig genoteerd, echter het kalibreren van de meetdata kan niet zo nauwkeurig. Daarnaast kan er een toevallige foute waarde in de data zitten op de desbetreffende tijdstap. Aangenomen wordt dat de afkoeling binnen het bereik geleidelijk en beperkt is.
2. De tweede stap is het gemiddelde te nemen van de medianen van de verschillende meetpunten. De gemiddelde temperatuur wordt gekoppeld aan de dichtheid. De minimale

en maximale temperatuur bij het berekende gemiddelde wordt ook meegenomen en aangeven als spreiding in de temperatuur.

Nadat de dichtheidsprogressie is vastgesteld, worden de streefdichtheid, maximale dichtheid en einddichtheid bepaald.

De uiteindelijke dichtheid van het asfalt moet voldoen aan de streefdichtheid. Hiervoor moet de einddichtheid binnen de tolerantie van de streefdichtheid zitten. De streefdichtheid kan uit de mengseleigenschappen verkregen worden. De bijbehorende tolerantie is bepaald volgens de *RAW bepalingen* (CROW, 2014). In Tabel 5 staat welke afwijkingen de verdichtingsgraad mag hebben. De verdichtingsgraad is de gemeten dichtheid als percentage van de streefdichtheid (ρ_{str}). De dichtheid van de boorkern ($\rho_{boorkern}$) moet binnen de tolerantiezone zitten die wordt begrensd door een onder- en bovengrens (ρ_{onder} en ρ_{boven}). De waarden van deze grootheden wordt met de volgende formules bepaald:

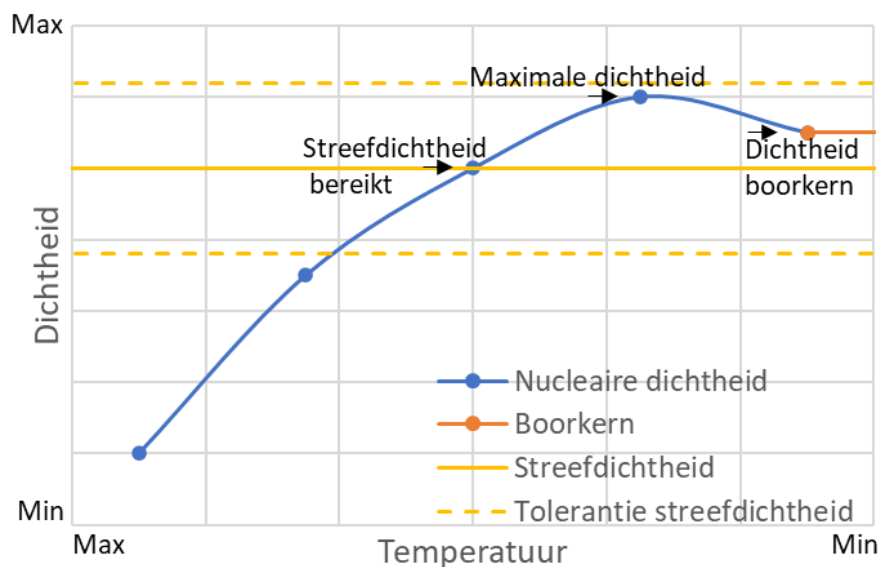
$$\rho_{onder} = (100 - \text{tolerantie}) \cdot \rho_{str} \text{ en } \rho_{boven} = (100 + \text{tolerantie}) \cdot \rho_{str}$$

waarna indien $\rho_{onder} \leq \rho_{boorkern} \leq \rho_{boven}$ de streefdichtheid is behaald.

Tabel 5: Afwijking in procentpunt van de verdichtingsgraad volgens Standaard RAW Bepalingen 2015 (CROW, 2014)

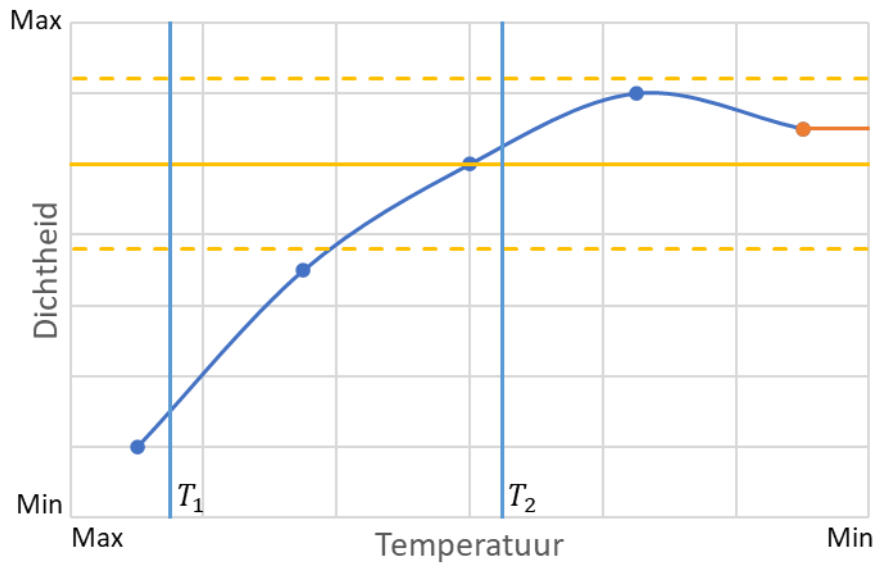
Mengselgroep asfaltmengsels	tolerantie	Onthouding van goedkeuring als de afwijking groter is dan
Asfaltbeton	2,0	4,4
Zeer open asfaltbeton	3,0	5,4

De maximale dichtheid is de hoogste dichtheid gemeten met de nucleaire dichtheidsmeter of bepaald via de boorkern. De einddichtheid is de dichtheid van de boorkern. In Figuur 23 is de analyse gevisualiseerd.



Figuur 23: Impressie dichtheidsprogressiemeting en analyse.

De temperatuurdrempels bepaald volgens de methodiek in 3.2 worden geprojecteerd op dichtheidsprogressiemeting. Een visualisatie van de uiteindelijke dichtheidsprogressie staat in Figuur 24.



Figuur 24: Dichtheidsprogressie met temperatuurdrempels aangegeven.

3.5 Vergelijkende analyse

Nadat de dichtheidsprogressie is bepaald en de gegevens zijn verwerkt, volgt de vergelijkende analyse waarin de alle metingen in het geheel worden beschouwd. De vergelijkende analyse sluit aan op onderzoeksvraag 4 en gaat in op de overeenkomsten en verschillen in de dichtheidsprogressie ten opzichte van de temperatuurdrempels. Ook zal er gekeken worden naar de praktische toepassing.

Zoals er in 2.5 is vastgesteld, is er weinig tot geen onderzoek gedaan naar de relatie tussen de temperatuurdrempels bepaald met verwerkbaarheid en het verdichtingsproces van asfalt. Hierdoor kan bestaande methodiek niet worden geraadpleegd.

Voor elke meting wordt het verschil in dichtheid voor en na de minimumtemperatuur (T_2) vastgesteld. Hierbij wordt gekeken of dichtheid toeneemt en hoe effectief de walsovergangen zijn. Hiermee kan worden bepaald of de minimumtemperatuur een grens is voor het verdichtingsproces doordat geen of nauwelijks toename in dichtheid meer mogelijk is. Indien er geen of nauwelijks toename van de dichtheid is, betekent dit dat de minimumtemperatuur een grens is voor het verdichtingsproces. Wanneer de dichtheid na de minimumtemperatuur nog substantieel toeneemt, is de dichtheidsprogressie niet begrensd door de minimumtemperatuur maar mogelijk kan dit ten koste gaan van de mechanische eigenschappen.

Aangezien de streefdichtheid gekoppeld is aan de kwaliteit en keuring van het asfalt, is het belangrijk om te weten of die wordt behaald voor of na de temperatuurdrempels. In eerder onderzoek kwam naar voren dat op de eerste temperatuurdrempel de gewenste dichtheid is bereikt maar dat dit ook voor de tweede temperatuurdrempel kan.

De toepassing van de walsen zal worden geanalyseerd. Het type wals en de toepassing ervan is per meting bepaald. Er kan per mengseltype worden vastgesteld hoeveel overlap is in walsstrategie. Daarnaast kan een eventueel verschil tussen de verschillende asfaltsoorten worden vastgesteld. Uit de dichtheidsprogressie bepaald in 4.2 kan een eventueel patroon in de walsstrategie worden bepaald. Er wordt gekeken naar frequentie en volgorde en of er rekening wordt gehouden met de dichtheid of temperatuur.

Verder zal worden gekeken naar het temperatuursverloop gedurende de meting en hoe dit verhoudt tot de temperatuurdrempels. Het gaat dan om de temperatuur aan het begin van de proef, de temperatuurvariabiliteit over de hoogte en het verschil met de gesimuleerde afkoeling.

De starttemperatuur van het asfalt wordt geanalyseerd. De temperatuur wordt vergeleken met de temperatuur van het asfaltmengsel in de vrachtwagen, de ondergrond en de mengtemperatuur. Hiermee kan een eventueel temperatuurverschil worden bepaald. Een groot temperatuurverschil verkort de beschikbare tijd op een gunstige temperatuur te walsen.

Het temperatuurverschil over de asfaltheogte wordt bepaald door de gemiddelde deviatie te berekenen voor de volledig duur van de meting. Voor de analyse is lage temperatuurvariabiliteit gunstig aangezien het de toepassing van temperatuurdrempels vereenvoudigd. Echter, uit de literatuuronderzoek kwam naar voren dat de temperatuur over de hoogte kan verschillen.

De temperatuurprogressie wordt vergeleken met de voorspelde afkoeling. Het verschil tussen de gemiddelde temperatuur en de voorspelde temperatuur wordt bepaald voor de volledige duur van de meting. Wanneer de voorspelde afkoeling overeenkomt met de werkelijke afkoeling, is de toepassing van de verwerkbaarheidsproef mogelijk. De voorspelde afkoeling zou de temperatuurdrempels kunnen omzetten naar tijdswaarden waardoor de temperatuur niet gemeten hoeft te worden. Daarnaast kan de vergelijking inzicht geven of de afkoeling gemeten in dit onderzoek representatief is voor de werkelijke situatie.

De vergelijkende analyse vormt het sluitstuk van de analysefase benoemd in 1.4. In deze setie zijn alle resultaten van hoofdstuk 4 met elkaar verbonden. De uitkomsten van 3.5 sluiten aan op onderzoeksvraag 4 en leiden tot de beantwoording van onderzoeksvraag 5 en de hoofdvraag van dit onderzoek.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de uitgevoerde proeven, metingen, observaties en analyses worden getoond en toegelicht. Dit hoofdstuk is opgedeeld in drie delen. 4.1 bestaat uit de resultaten van de verwerkbaarheidsproef en bepaling van de temperatuurdrempels. 4.2 bestaat uit de resultaten van de veldproef en de dichtheidsprogressie. In 4.3 staan de resultaten van de vergelijkende analyse tussen de temperatuurdrempels en dichtheidsprogressie.

4.1 Verwerkbaarheidsproef

Er zijn met de verwerkbaarheidsproef in totaal 10 proeven uitgevoerd met 4 verschillende mengsels. In Tabel 6 staat een overzicht van uitgevoerde proeven. In de linker kolom staat de verwijzing die gebruikt wordt in dit rapport om de leesbaarheid te vergroten. Voor twee mengsels was er nog genoeg asfaltspecie over om een derde meting uit te voeren. Hiervoor is niet de standaard 20 kg gebruikt. Voor één meting was de massa tussen de 15 en 20 Kg maar de precieze massa is onbekend.

Tabel 6: Overzicht van beproefde mengsels met de verwerkbaarheidsproef.

Verwijzing	Asfaltemengsel	Meting	Massa mengsel (Kg)
PA16-HZ90-LM1	PA16 Periphalt HZ90 40% PR	1	20
PA16-HZ90-LM2		2	20
AC16-40/60-LM1	AC16 Bin 40/60 eco 60% PR	1	20
AC16-40/60-LM2		2	20
AC16-40/60-LM3		3	18
AC16-SFB-LM1	AC16 Surf SFB 5-50 HS	1	20
AC16-SFB-LM2		2	20
AC16-SFB-LM3		3	15-20
AC22-70/100-LM1	AC 22 base 70/100 eco 60% PR	1	20
AC22-70/100-LM2		2	20

In Tabel 7 staan specificaties van de voorbereiding en uitvoering van de beproefde mengsels. Voor AC22-mengsel is de Bear-menger gebruikt in plaats van de ARP-menger omdat die op dat moment niet beschikbaar was.

Tabel 7: Specificaties voorbereiding en uitvoering van beproefde mengsels in het laboratorium.

Mengsel	Mengtemperatuur	Mengapparaat	Bakhoogte
PA16 Periphalt HZ90	165	Bear-menger	19 mm
AC16 Bin 40/60 eco 60% PR	165	ARP-menger	19 mm*
AC16 Surf SFB 5-50 HS	185	ARP-menger	19 mm
AC 22 base 70/100 eco 60% PR	165	Bear-menger	25 mm

*Bij meting AC16-40/60-LM1 was de bakhoogte verkeerd ingesteld op 18 mm.

In Bijlage 8.3 staat een volledig overzicht van de aantekening en verzamelde data.

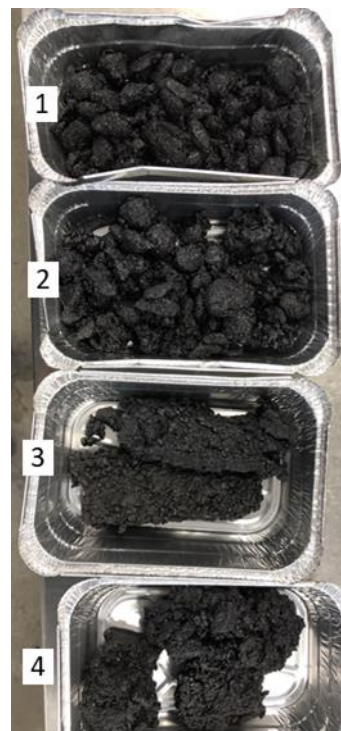
Bijzonderheden uitvoering

Er waren wat problemen met de dataregistratie. Hierdoor moesten meerdere proeven opnieuw worden voorbereid en uitgevoerd. Door een programmeerfout duurden enkele metingen iets langer dan de ingestelde maximum tijd. Verder was op sommige momenten de omgevingstemperatuur iets lager door een open buitendeur.

Bij alle proeven was er sprake van (veel) ontmenging van het mengsel. Geleidelijk ontstond er aan de wand van de mengkom een laag van mortel terwijl grotere stenen naar het midden trokken. Soms werd de mortel aan de wand zo dik dat het op gegeven moment terug in de kom viel. Bij een meting is ook de temperatuur aan het eind gemeten en bleek er 20°C verschil te zitten tussen het midden en de rand van het mengsel. Bij enkele metingen maakt het mengsel na verloop van tijd een krakend geluid. Het viel op dat het mengsel dan voor een groot deel niet geroerd wordt maar alleen wordt 'opgetild'.

Na twee metingen zijn extracties genomen van het asfaltmengsel om de samenstelling te controleren. De monsters zijn genomen van de *AC16 SFB* en *PA16 HZ90*. De resultaten van extracties bevestigden de observaties dat aan de rand van het mengsel meer bindmiddel en vulstof zat terwijl in het midden meer grotere stenen zaten. In Figuur 25 is de asfaltextractie van *AC16 SFB* te zien, waarbij extracties 1 en 2 uit het midden van de kom genomen en extracties 3 en 4 van de rand van de kom.

Het temperatuurverschil tussen de mengarm en het mengsel aan het begin van de meting was vaak groot. Het duurde enkele minuten voordat dit temperatuurverschil was geminimaliseerd. Hierdoor is het niet mogelijk om de relatie tussen het koppel en de temperatuur in het begin van de proef goed in beeld te krijgen. Verder was bij enkele proeven te veel asfalt in de mengkom.



Figuur 25: Asfaltextractie van *AC16 Surf HS* Meting 2.

In Tabel 8 staat een overzicht met enkele eigenschappen van de uitgevoerde metingen. Dit overzicht bestaat uit de duur van de meting, de reden voor afschakeling van de meting en het temperatuurverschil tussen de mengarm en het mengsel. Het temperatuurverschil wordt bepaald door het verschil tussen maximale- en begintemperatuur te berekenen.

Tabel 8: Overzicht resultaten verwerkbaarheidsproeven.

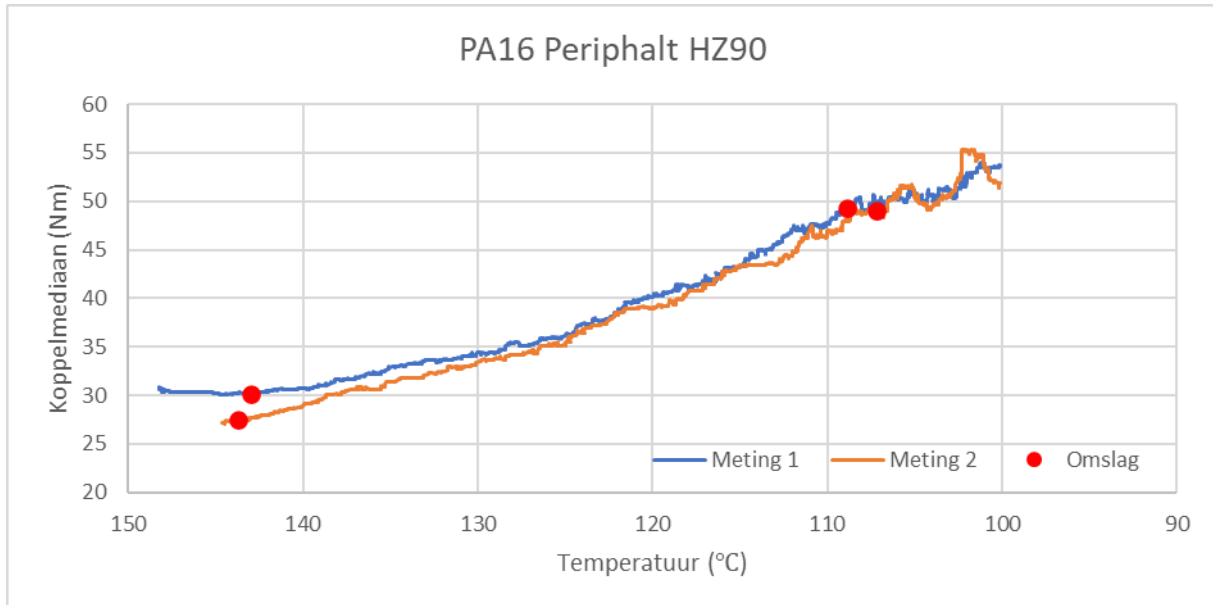
Meting	Duur (h: min: s)	Afgeschakeld op	$T_{max} - T_{start}$ (°C)
PA16-HZ90-LM1	01:03:15	Maximum tijd	17
PA16-HZ90-LM2	01:00:55	Maximum tijd	0*
AC16-40/60-LM1	00:49:02	Maximum koppel	4
AC16-40/60-LM2	00:58:04	Maximum koppel	22
AC16-40/60-LM3	01:05:17	Maximum tijd	8
AC16-SFB-LM1	00:45:43	Maximum koppel	54
AC16-SFB-LM2	00:38:06	Maximum koppel	108
AC16-SFB-LM3	00:49:33	Maximum koppel	83
AC22-70/100-LM1	01:04:52	Maximum tijd	6
AC22-70/100-LM2	01:00:42	Maximum tijd	12

*Temperatuur mengarm hoger dan mengsel.

Per mengsel zal een toelichting op de resultaten van de proef en de bepaling van de omslagpunten worden gegeven. Het resultaat bestaat uit de koppelmiddaan uitgezet tegen de temperatuur en de gevonden omslagpunten. De uiteenzetting is vanaf de maximumtemperatuur. De bepaling van de omslagpunten is gedaan door het koppel tegen de tijd uit te zetten en kan worden gevonden in Bijlage 8.4.

PA16-HZ90

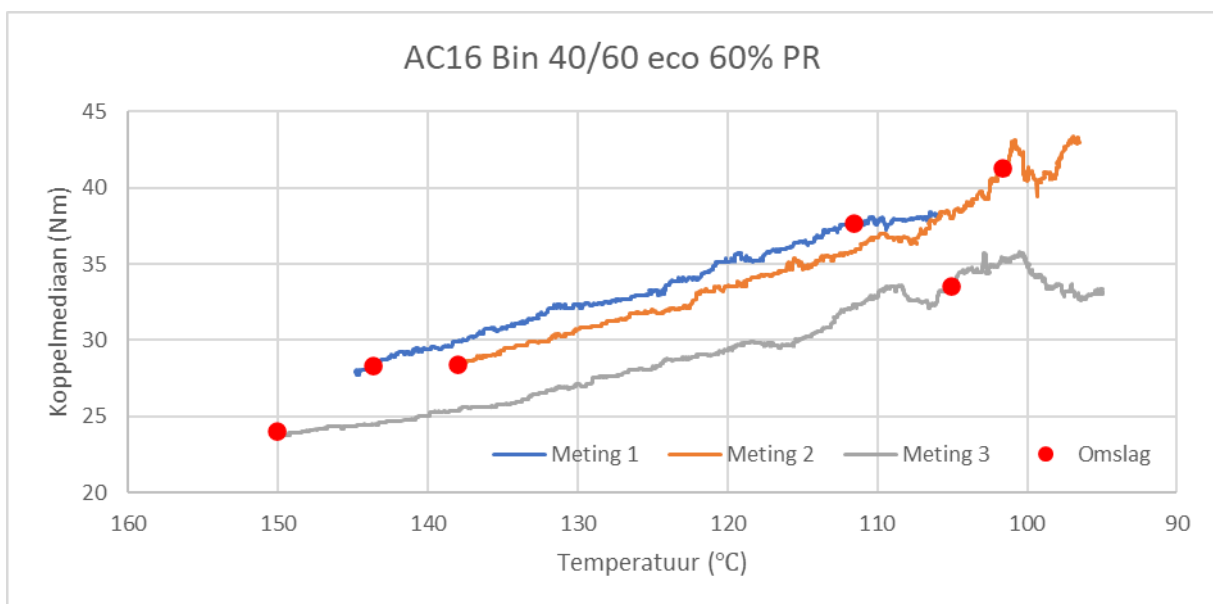
In Figuur 26 staan de resultaten van *PA16 Periphalt HZ90 40% PR*. Bij de tweede meting begint de temperatuur op 155,1°C en koelt wat sneller af doordat de mengarm te veel was opgewarmd. Beide metingen volgen redelijk hetzelfde patroon. Rond de 125°C lijkt het koppel sneller toe te nemen ten opzichte van de temperatuur. Ten einde van de meting is er meer fluctuatie in het koppel.



Figuur 26: Resultaten verwerkbaarheidsproef met PA16 Periphalt HZ90.

AC16 Bin 40/60 eco 60% PR

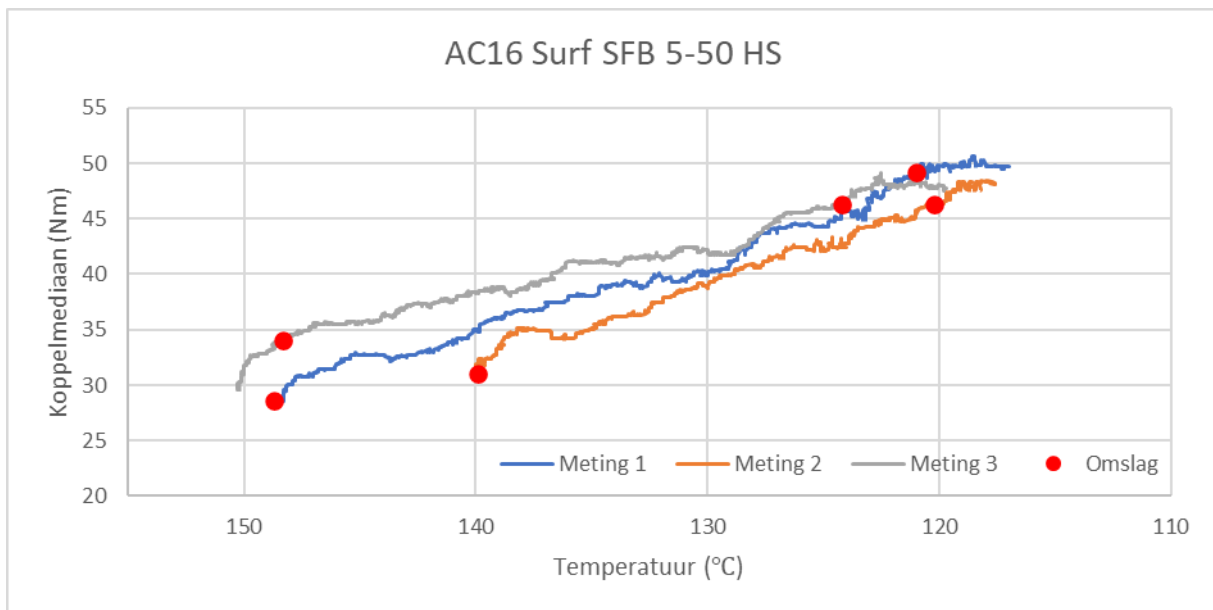
In Figuur 27 staan de resultaten van *AC16 Bin 40/60 eco 60% PR*. Alle drie de mengsels vertonen een gelijke koppeltoename. Bij meting 2 en 3 zijn er tussen de 100 en 105°C meer schommelingen in het koppel te zien en lijkt er een omslagmoment te hebben plaatsgevonden. Na een daling stijgt het koppel weer. Meting 1 stopt boven de 105°C en vertoont alleen een afvlakking. Voor Meting 3 had de proef een lagere massa.



Figuur 27: Resultaten verwerkbaarheidsproef met AC16 Bin 40/60 eco 60% PR.

AC16 Surf SFB 5-50 HS

In Figuur 28 staan de resultaten van *AC16 Surf SFB 5-50 HS*. Het koppel stijgt relatief snel. Rond 130°C lijkt het koppel sneller toe te nemen en meer te fluctueren. Bij alle drie de metingen was de mengarm aan de start van de proef onder de 100°C waardoor het vaak enkele minuten duurde voordat de juiste temperatuur werd gemeten. Hierdoor ontbreekt enkele minuten aan data voor de koppel-temperatuurvergelijking. Direct na uitvoering van Meting 3 was er temperatuurverschil tussen het midden en de rand van kom meer dan 15°C. De koppel-temperatuurrelatie van de drie metingen lijkt redelijk overeen te komen.

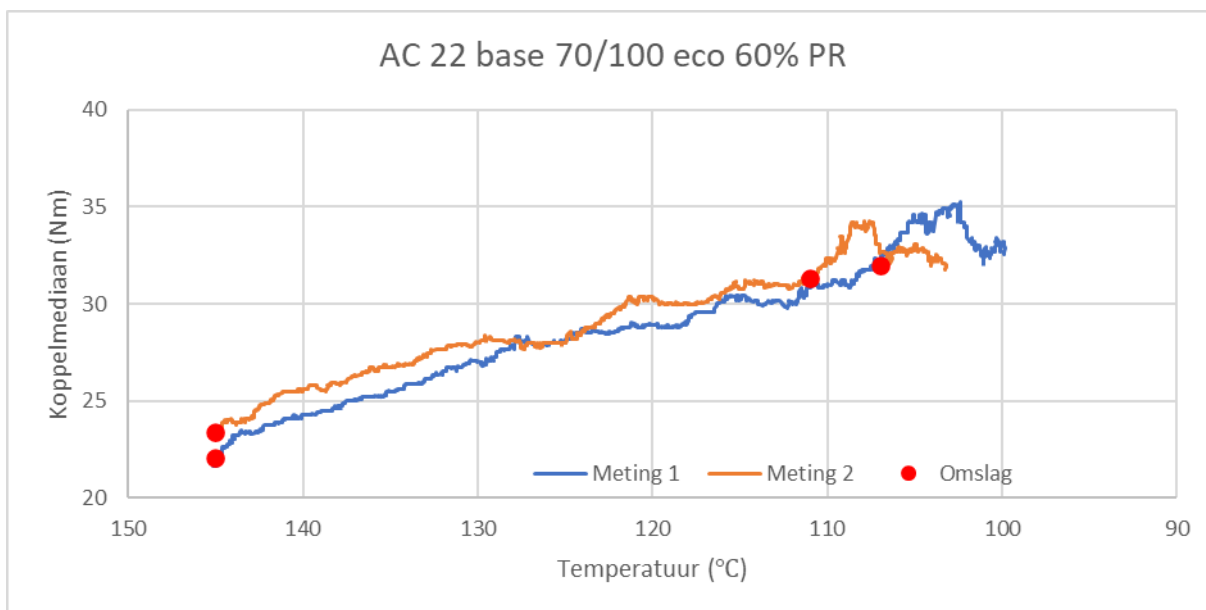


Figuur 28: Resultaten verwerkbaarheidsproef met AC16 Surf SFB 5-50 HS.

AC 22 base 70/100 eco 60% PR

In Figuur 29 staan de resultaten van *AC 22 base 70/100 eco 60% PR*. Beide metingen vertonen tot 110°C een redelijk gelijke koppeltoename. Tussen de 130°C en 120°C lijkt er voor beide mengsels korte tijd geen toename in koppel te zijn. Vanaf 110°C neemt het koppel meer toe waarna het vervolgens daalt en afvlakt. Het moment van afvlakking en fluctuatie lijkt niet hetzelfde voor beide metingen.

Tekst gaat op volgende pagina verder.



Figuur 29: Resultaten verwerkbaarheidsproef met AC 22 base 70/100 eco 60% PR.

Omslagpunten

In Tabel 9 staat een overzicht van de omslagpunten bepaald met het rekenmodel. In de laatste twee kolommen staan het bereik en het grootste temperatuurverschil tussen de omslagpunten.

Tabel 9: Overzicht omslagpunten.

Mengsel	Omslagpunt	Meting (°C)			Bereik (°C)	Verschil (°C)
		1	2	3		
PA16HZ90	1	143	144	-	143-144	1
	2	109	107	-	107-109	2
AC16 40/60	1	144	138	150	138-150	12
	2	112	102	105	102-112	10
AC16SFB	1	149	140	148	140-149	9
	2	121	120	124	120-124	4
AC22	1	145	145	-	145-145	0
	2	107	111	-	107-111	4

In Tabel 10 staan het minimum, buigpunt en maximum van de regressielijn. De regressielijn is bepaald met data vanaf de maximumtemperatuur. De eerste omslagpunten komen redelijk overeen met de koppelminima. De tweede omslagpunten liggen vaak tussen het buigpunt en de maxima in.

Tekst gaat op volgende pagina verder.

Tabel 10: Minima, buigpunt en maxima van het koppel bepaald met de regressielijn.

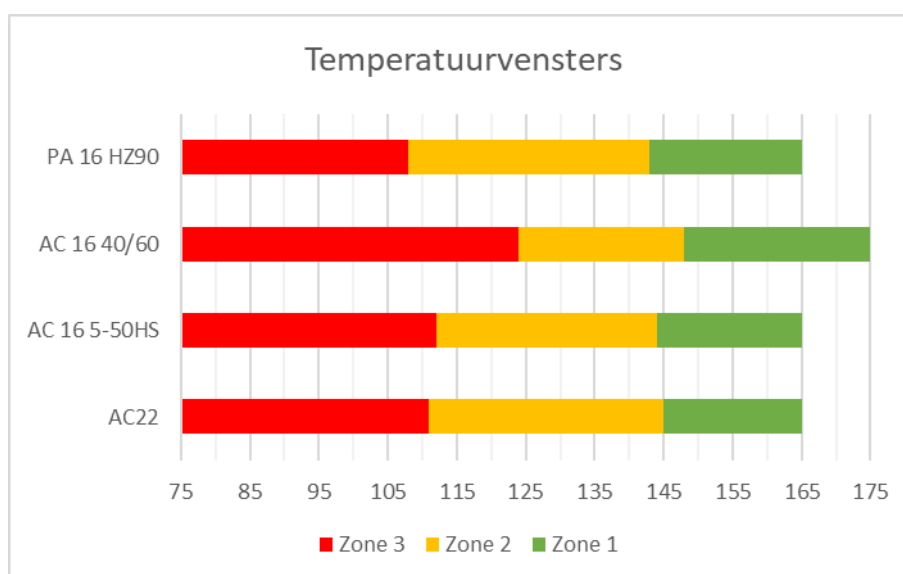
Mengsel	Koppel	Meting (°C)			Bereik (°C)	Verschil (°C)
		1	2	3		
PA16HZ90	Minimum	143	146,8	-	143-146,8	3,8
	Buigpunt	118,6	117,4	-	117,4-118,6	1,2
	Maximum	100,1	100,1	-	100,1-100,1	0
AC16 40/60	Minimum	142,2	138,1	145	138,1-145	6,9
	Buigpunt	128	116,2	122,8	116,2-128	11,8
	Maximum	113,8	96,5	100,6	96,5-113,8	17,3
AC16SFB	Minimum	148,8	139,3	150,3	139,3-150,3	11
	Buigpunt	136	130,4	137,4	130,4-137,4	7
	Maximum	120,1	121,4	119,7	119,7-121,4	1,7
AC22	Minimum	145,1	144,6	-	144,6-145,1	0,5
	Buigpunt	131	128,4	-	128,4-131	2,6
	Maximum	99,8	104,4	-	99,8-104,4	4,6

In Tabel 11 staan de temperatuurdrempels die met de omslagpunten zijn bepaald. De temperatuurzones die daaruit volgen, staan in Figuur 30. Er zijn enkele uitzonderingen gedaan in de bepaling van de omslagpunten. Bij AC16 40/60 en AC16 SBF is bij de bepaling van de eerste temperatuurdrempel de tweede meting niet meegenomen omdat een deel van de initiële temperatuurdata mist.

Tabel 11: Temperatuurdrempels per mengsel.

Meting	T_1 (°C)	T_2 (°C)
PA16 HZ90	143	109
AC16 40/60	144*	112
AC16 5-50HS	148*	124
AC22	145	111

*Gewijzigde bepaling



Figuur 30: Temperatuurvensters per mengsel gevisualiseerd.

4.2 Dichtheidsprogressie

Voor het veldonderzoek zijn er in totaal 9 metingen verricht. De metingen zijn grotendeels uitgevoerd op de snelweg A58 nabij Etten-Leur en enkele op een industrieterrein in Amsterdam. De metingen vonden overdag en 's nachts plaats. Enkele metingen waren (deels) mislukt door problemen met de meetapparatuur of uitvoering. In Tabel 12 staat een overzicht van de uitgevoerde veldmetingen.

De eerste metingen zijn mislukt of beperkt in data. Dit kwam door een combinatie van onderschatting in de voorbereiding en niet goed werkende apparatuur. Echter, de eerste meetdag gaf veel ervaring en inzicht in het spreid- en verdichtingsproces. Gedurende het onderzoekstraject zijn het draaiboek en stappenplan verbeterd door verkregen inzichten tijdens de uitvoering. De veldmeting met *AC 22 base 70/100 eco 60% PR* was mislukt waardoor hiervan geen dichtheidsprogressie beschikbaar is. Dit mengsel zal dan ook niet verder worden behandeld.

Tabel 12: Overzicht van de veldmetingen.

Meting	Mengsel	Dagdeel	Type weg	Bijzonderheden
1	PA16 Periphalt HZ90 40% PR	Nacht	Snelweg	Alleen dichtheid- en temperatuur genoteerd
2.1	PA16 Periphalt HZ90 40% PR	Nacht	Snelweg	Alleen temperatuurprogressie gemeten
2.2	PA16 Periphalt HZ90 40% PR			
3.1	AC16 Surf SFB 5-50 HS	Dag	Snelweg	
3.2	AC16 Bin 40/60 eco 60% PR			Mislukt
3.3	AC16 Bin 40/60 eco 60% PR			
3.4	PA16 Periphalt HZ90 40% PR			
4.1	AC 22 base 70/100 eco 60% PR	Dag	Haventerrein	Mislukt
4.2	AC16 Bin 40/60 eco 60% PR			Gedeeltelijke meting: mislukt

In Tabel 13 is de laagdikte aangeven van het asfalt.

Tabel 13: Laagdikte asfalt bij veldmetingen.

Mengsel	Laagdikte (mm)
PA16 Periphalt HZ90 40% PR	50
AC16 Bin 40/60 eco 60% PR	50
AC16 Surf SFB 5-50 HS	50
AC 22 base 70/100 eco 60% PR	60

Tijdens de uitvoering van de veldmetingen waren er de volgende bijzonderheden:

- De afstandshouders waren vaak niet goed vast te krijgen aan de onderlaag waardoor ze konden omvallen wanneer het asfalt werd aangebracht. Hierdoor was bij enkele metingen de temperatuur niet verticaal gemeten.
- In sommige gevallen werd er een schep asfalt op verbindingssnoer of thermokoppel heen gelegd om de thermokoppel te stabiliseren. Dit gebeurde dan enkele seconden of soms paar minuten voordat de proef begon. Door de lagere omgevingstemperatuur heeft dit stuk asfalt sneller kunnen afkoelen dan de rest van het asfalt.
- In sommige gevallen kon er aan de start van de proef niet de dichtheid worden gemeten omdat het asfalt te warm was voor de nucleaire dichtheidsmeter. Hierdoor ontbrak soms de initiële dichtheid.

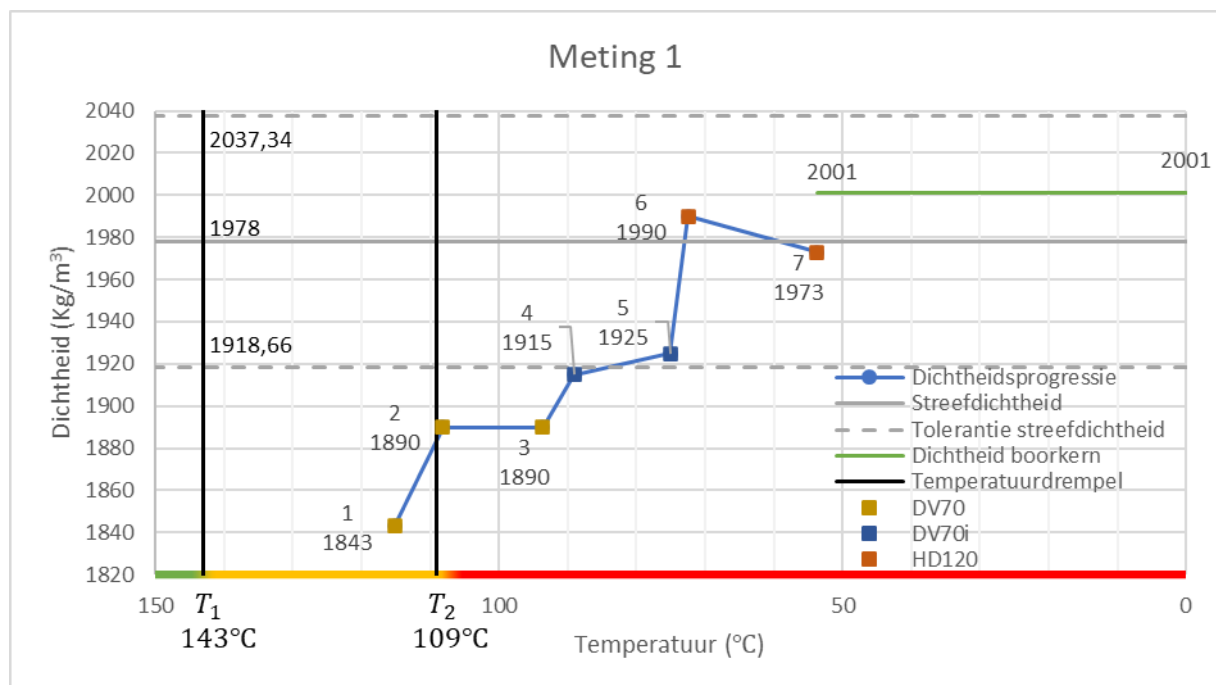
Hieronder zal per meting een toelichting worden gegeven. De dichtheidsprogressie wordt getoond in relatie tot de temperatuur. De temperatuurdrempels, gebruikte walsen, de streefdichtheid met de bijbehorende tolerantie en de dichtheid boorkern zijn aangegeven. Een overzicht van alle data in tabelvorm kan worden gevonden in Bijlage 8.5.

PA 16 Periphalt HZ90 (40%pr)

Voor PA16 Periphalt HZ90 zijn drie dichtheidsprogressiemetingen uitgevoerd. Er is nog een vierde meting waarbij alleen de temperatuur is gemeten.

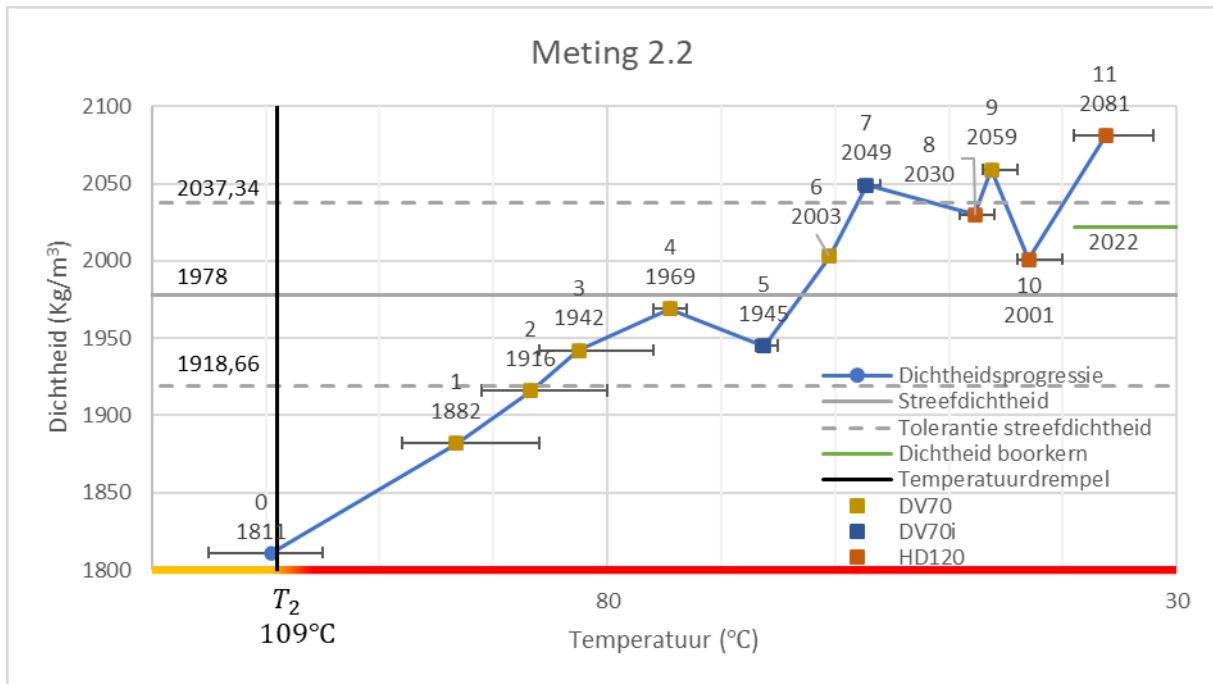
In Figuur 31 is de dichtheidsprogressie van Meting 1 te zien. De dichtheid neemt geleidelijk toe. Walspassage 6 is ondanks de lagere temperatuur een grote toename in dichtheid te zien. Ondanks het feit dat het verdichtingsproces grotendeels in de derde zone plaatsvindt, wordt de streefdichtheid bereikt.

Door problemen met de dataloggers waren alleen temperatuurgegevens beschikbaar van de infraroodcamera. Doordat het asfalt in het begin te warm was voor de nucleaire dichtheidsmeter, is initiële dichtheid niet bekend. Verder is de boorkern op een naastgelegen rijkstrook geboord.



Figuur 31: Dichtheidsprogressie van Meting 1 met het mengsel PA16 Periphalt HZ90 40%PR.

In Figuur 32 staat de dichtheidsprogressie van Meting 2.2. Het asfalt is nog net in Zone 2 aangebracht maar de verdichting vindt plaats in Zone 3. Na de vierde walsovergang neemt de dichtheid af om vervolgens met wat schommelingen te stijgen. De streefdichtheid wordt uiteindelijk behaald ondanks de relatief late start maar de laatste nucleaire dichtheidsmeting komt boven de tolerantiezone uit. Ook hier is de boorkern op een naastgelegen rijkstrook geboord. Er kan dus niet bevestigd worden of de dichtheid werkelijk te hoog is.

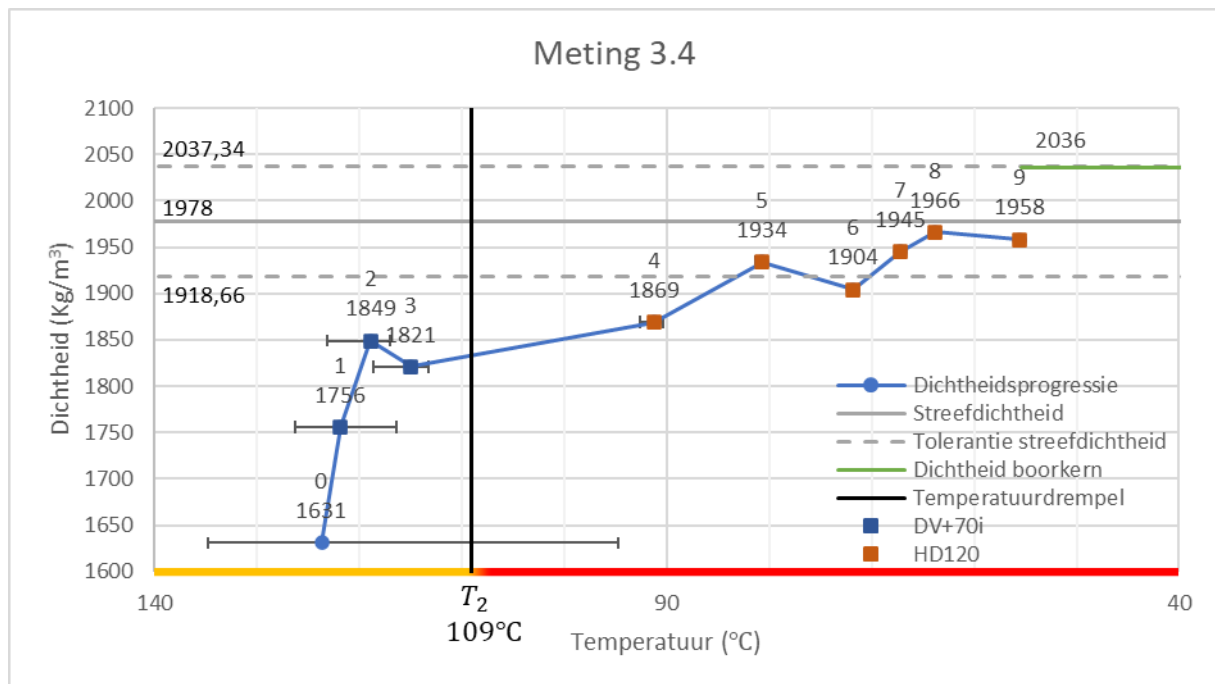


Figuur 32: Dichtheidsprogressie ten opzichte van de temperatuur van Meting 2.2 met PA16 Periphalt HZ90 40%PR.

In Figuur 33 staat de dichtheidsprogressie van Meting 3.4. De eerste drie walsovergangen zorgen voor een grote stijging in dichtheid. Deze walsovergangen, uitgevoerd met een DV+70i wals, zorgen ervoor dat de dichtheid gemiddeld met 63 Kg/m^3 stijgt en 47% van de verdichting wordt bereikt. Vervolgens is er ongeveer 12 minuten niet gewalst. Wanneer er op een lagere temperatuur met de HD120 wals weer wordt verdergegaan, lijkt de dichtheid minder snel toe te nemen. De dichtheid stijgt in Zone 3 gemiddeld 23 Kg/m^3 per walsovergang, wat meer dan een halvering is ten opzichte van Zone 2.

Aan het begin van de meting is er een grote spreiding in temperatuur te zien. Dit komt omdat een thermokoppel en infraroodcamera een lage temperatuur maten. Bij de eerste walsovergang is spreiding wel een stuk afgenomen. Er is met twee thermologgers gemeten waarbij er een na verloop van tijd uitviel. Hierdoor waren na verloop van tijd nog maar 3 in plaats van 6 meetpunten over.

Tekst gaat op volgende pagina verder.



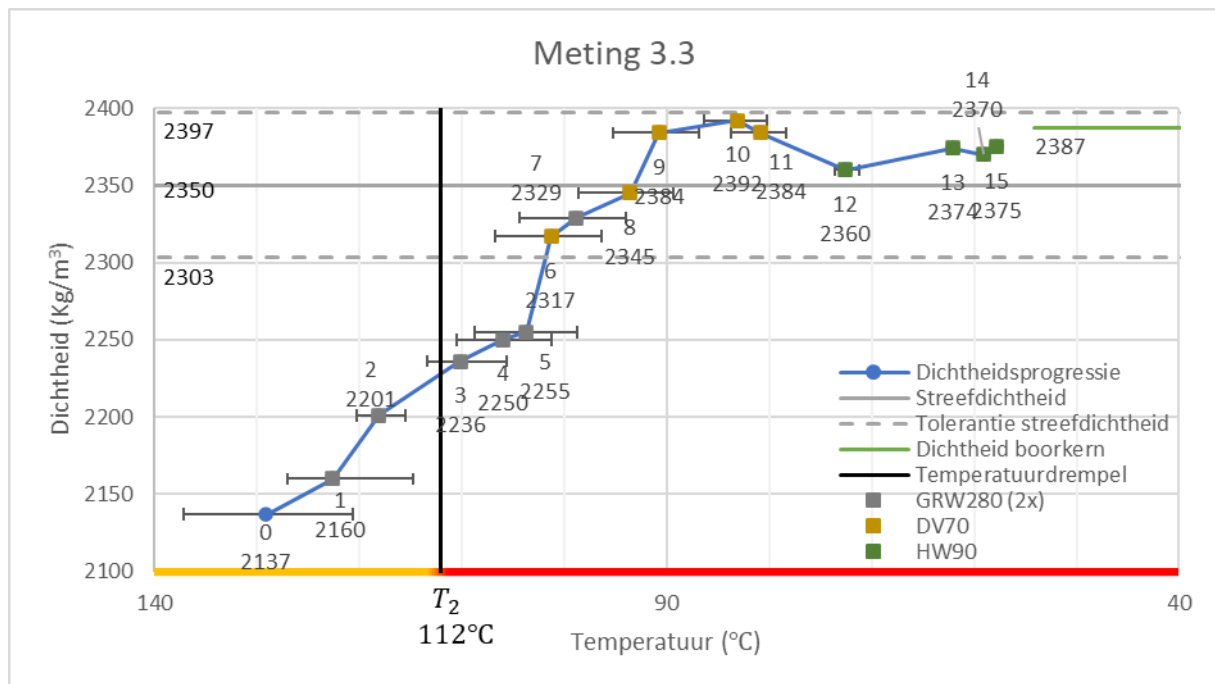
Figuur 33: Dichtheidsprogressie van Meting 3.4 met PA16 Periphalt HZ90.

AC16 Bin 40/60 eco 60% PR

Bij Meting 3.3 is gebruik gemaakt van twee sets thermokoppels die vlak bij elkaar stonden. Bij de eerste set thermokoppels waren twee thermokoppels meteen defect. Na verloop van tijd viel een datalogger uit waardoor na walsovergang 12 nog maar een thermokoppel functioneerde. Dit levert een flinke beperking op de beschikbare temperatuuraanpak.

In Figuur 34 is de dichtheidsprogressie van Meting 3.3 te zien. De temperatuur is het gemiddelde van beide sets thermokoppels. In Zone 2 wordt begonnen met verdichten met de *GRW280* wals. Deze wals maakt bij elke passage twee overgangen achter elkaar waardoor er in totaal 12 walsovergangen hiermee zijn uitgevoerd. De eerste drie walsovergangen zorgen voor veel verdichting en vinden (deels) voor de tweede temperatuurdrempel plaats. Na de inzet van *DV70* vindt er nog een grote toename in dichtheid plaats, ondanks dat op lagere temperatuur na de tweede temperatuurdrempel wordt gewalst. Deze wals is op lagere temperatuur effectiever dan de *GRW280* en bereikt ook de streefdichtheid. Tegen het eind van de meting wanneer ook de *HW90* wordt ingezet, daalt en vakt de dichtheid af. Voor de laatste walpassage was de dichtheid niet gemeten met nucleaire dichtheidsmeter, maar aan de hand van boorkern is die wel bekend.

Tekst gaat op volgende pagina verder.



Figuur 34: Dichtheidsprogressie van Meting 3.3 met AC16 40/60.

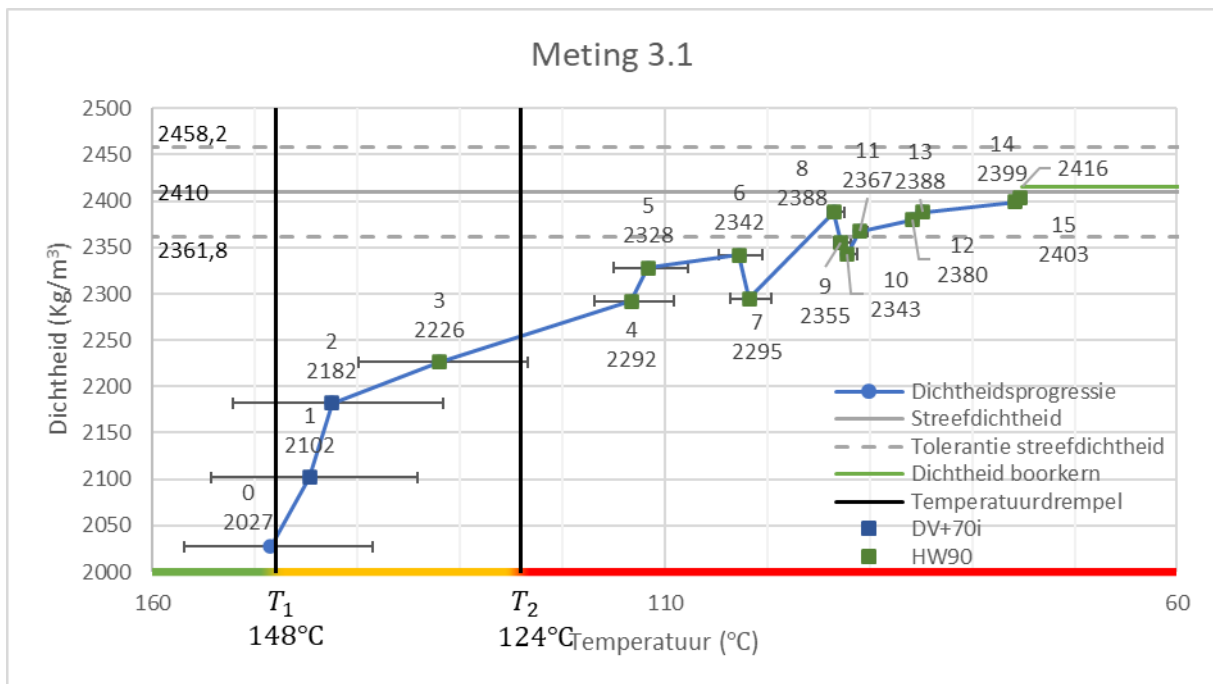
AC16 Surf SFB 5-50 HS

Bij Meting 3.1 werden twee sets thermokoppels gebruikt. De temperatuur van de tweede set thermokoppels was gemiddeld de hele meting hoger dan de eerste set thermokoppels terwijl die enkele meters verwijderd was van de eerste set thermokoppels. Dit kan worden verklaard door lokale temperatuurverschillen in het asfalt en doordat het asfalt op hoge temperatuur wordt aangebracht en verdicht. Aangezien de dichtheid bij de eerste set thermokoppels werd gemeten, is het temperatuurgemiddelde van de eerste set thermokoppels gebruikt voor de analyse.

In Figuur 35 is de dichtheidsprogressiemeting van Meting 3.1 weergegeven. In vergelijking met andere veldmetingen wordt AC16 SFB bij hoge temperatuur aangebracht en gewalst. In Zone 2 is er veel spreiding in de temperatuur te zien. De eerste drie walsovergangen vinden plaats tussen de eerste en tweede temperatuurdrempel waarbij de temperatuur zelfs overlap heeft met Zone 1. De eerste drie walsovergangen zorgen ervoor dat Zone 2 het effectiefst is en hierin meer dan de helft van de dichtheidstoename wordt behaald.

Gedurende het verdichtingsproces is er een korte tijd gestopt met walsen. Hierom is er een groot verschil in temperatuur tussen walspassage 3 en 4. Na walsovergang 4 neemt de dichtheid langzamerhand toe. Pas na 8 walsovergangen en meer dan 50°C lager vanaf de start van de verdichting, wordt de streefdichtheid behaald.

Tekst gaat op volgende pagina verder.



Figuur 35: Dichtheidsprogressie van Meting 3.1 met AC16 SFB.

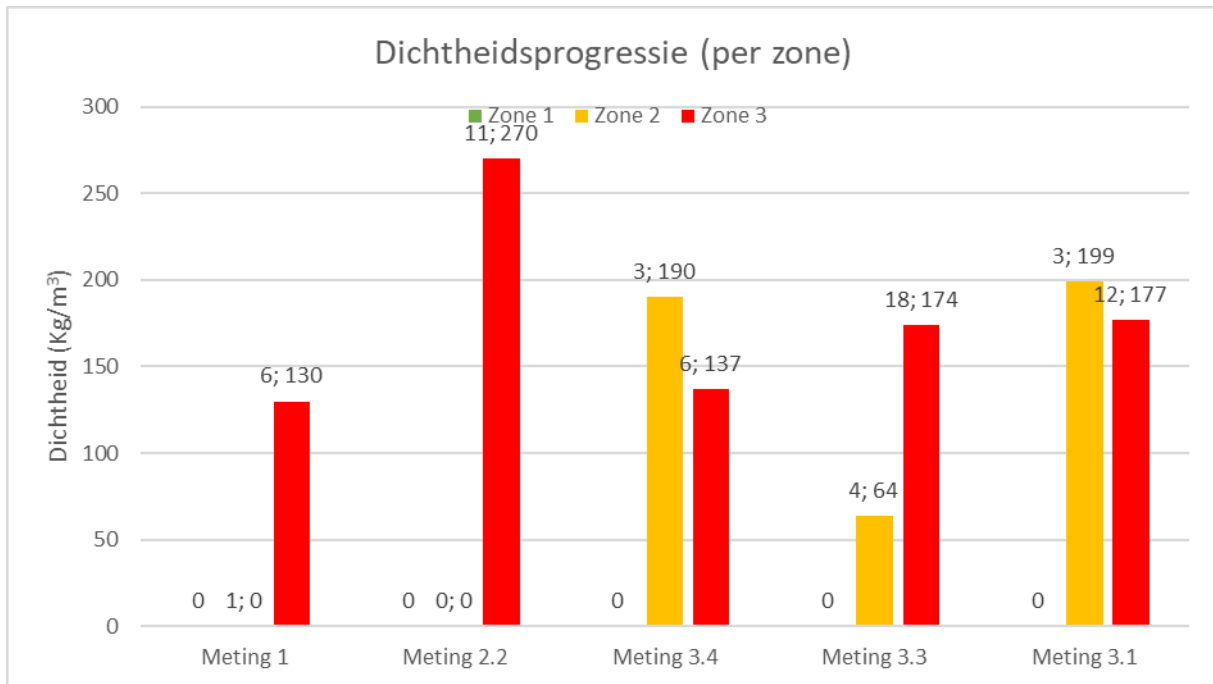
4.3 Vergelijkende analyse

In deze sectie staan de resultaten van de vergelijkende analyse. In 4.2 is de dichtheidsprogressie vastgesteld en individueel geanalyseerd. De vergelijkende analyse worden de resultaten in het geheel geanalyseerd.

Dichtheidsprogressie

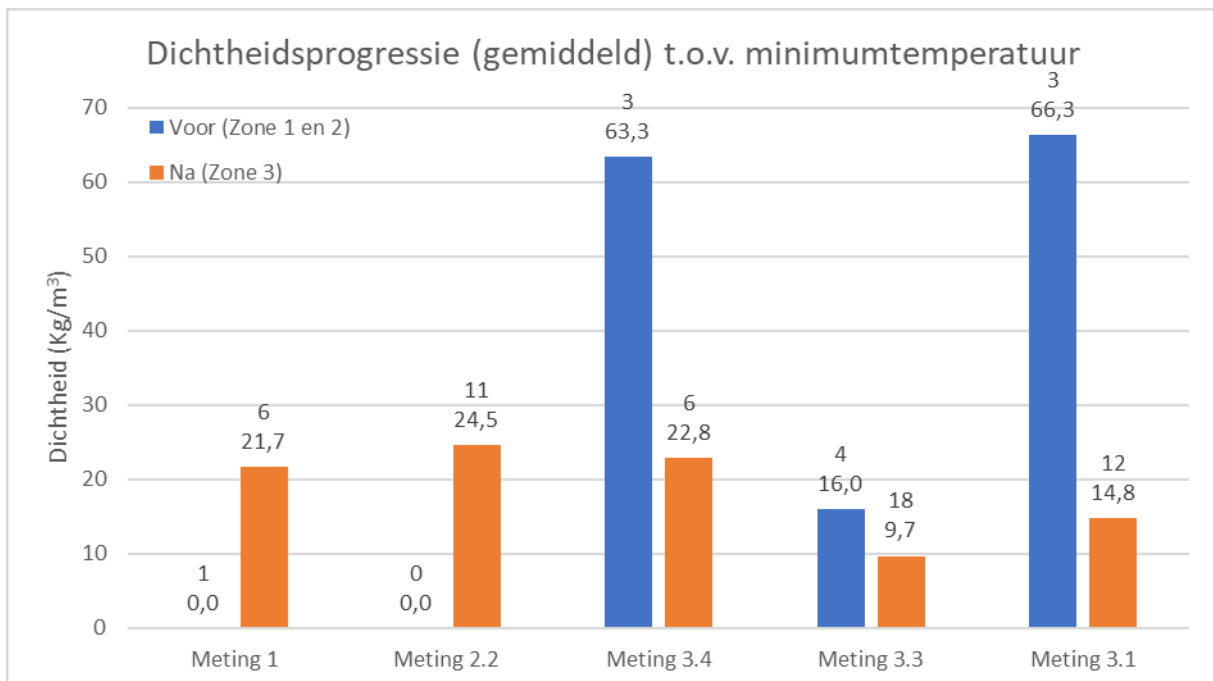
In Figuur 36 is de dichtheidsprogressie per temperatuurzone te zien met boven elke kolom het aantal walsovergangen en de toename in dichtheid. Er waren geen walsovergangen in Zone 1. Bij alle metingen vonden de meeste walsovergangen plaats in Zone 3. Desondanks is er bij twee metingen een hogere dichtheidstoename in Zone 2. Zone 1 en 2 zitten boven de minimumtemperatuur (T_2) en Zone 3 zit daaronder. Bij een meerderheid van de metingen vindt de meeste verdichting dus plaats na de minimumtemperatuur.

Tekst gaat op volgende pagina verder.



Figuur 36: Dichtheidsprogressie per temperatuurzone.

Aangezien de meeste walsovergangen plaatsvinden na de minimumtemperatuur (T_2), is er in Figuur 37 de gemiddelde dichtheidsprogressie per walsovergang uiteengezet tegen de minimumtemperatuur. Ook hier is boven elke kolom het aantal walsovergangen en de gemiddelde toename in dichtheid te zien. Ondanks dat de meeste walsovergangen na de minimumtemperatuur plaatsvinden, zijn de walsovergangen voor de minimumtemperatuur effectiever.



Figuur 37: Gemiddelde dichtheidsprogressie per walspassage ten opzichte van de minimumtemperatuur.

Dichtheid

In Tabel 14 staat het verschil in dichtheid tussen de laatste nucleaire dichtheidsmeting en de boorkern. Bij Meting 1 en 2.2 is de boorkern van een naastgelegen rijstrook genomen waardoor de

vergelijking met de nucleaire dichtheidsmeter niet representatief is. De dichtheid van de boorkern is bij alle metingen, met uitzondering van Meting 2.2, hoger dan die van de laatste nucleaire dichtheidsmeting. Bij AC-mengsels ligt het verschil tussen de 12-13 Kg/m^3 terwijl bij PA-mengsels het verschil ligt tussen 26-78 Kg/m^3 . Bij AC-mengsels is het verschil dus kleiner dan bij PA-mengsels.

Tabel 14: Dichtheid veldmetingen.

Meting	Laatste nucleaire dichtheidsmeting	Boorkern	Vershil
1	1973	2001*	28
2.2	2081	2022*	-59
3.4	1958	2036	78
3.1	2403	2416	13
3.3	2375	2387	12

*Boorkern naastgelegen rijstrook

In de onderstaande tabellen staat de gemeten maximumdichtheid. In Tabel 15 staat de maximum dichtheid inclusief de boorkern en in Tabel 16 exclusief de boorkern. Bij alle metingen was of bij de laatste twee metingen of bij de boorkern de maximum dichtheid gemeten, met uitzondering van Meting 3.3.

Tabel 15: Maximumdichtheid veldmetingen inclusief boorkernen.

Meting	Maximum	Walsovergang	Totaal	T(°C)	Zone
1	2001	Boorkern	-	-	-
2.2	2081	11 uit 11	37,7	3	
3.4	2036	Boorkern	-	-	-
3.1	2416	Boorkern	-	-	-
3.3	2387	Boorkern	-	-	-

Tabel 16: Maximumdichtheid veldmetingen exclusief boorkernen.

Meting	Maximum	Walsovergang	Totaal	T(°C)	Zone
1	1990	6	7	72,5	3
2.2	2081	11	11	37,7	3
3.4	1966	8	9	63,8	3
3.1	2403	15	15	73,9	3
3.3	2392	10	15	83,1	3

In Tabel 17 staat aangegeven bij welke temperatuur de streefdichtheid is behaald. Daarnaast is ook de minimumtemperatuur (T_2) aangegeven en het verschil met de temperatuur waarop de streefdichtheid is behaald. Bij alle metingen is de tolerantiezone rondom de streefdichtheid pas na de tweede temperatuurdrempel bereikt.

Tabel 17: Temperatuur streefdichtheid.

Meting	$T_{streefdichtheid}$	T_2	$T_{verschil}$	Zone	Aantal walsovergangen
1	75,1	109	32,9	3	5
2.2	84,67	109	23,33	3	3
3.4	80,67	109	27,33	3	5
3.1	91,67	124	32,33	3	8
3.3	101,27	112	10,73	3	10

*Bij deze metingen daalde de dichtheid weer buiten de tolerantiezone na een latere walsovergang. De tolerantiezone en streefdichtheid zijn uiteindelijk bereikt.

Walsen

In Tabel 18 staat een overzicht van welke walsen zijn gebruikt en de bijbehorende frequentie. Er is een zekere overlap tussen walsen gebruikt voor PA-mengsels en AC-mengsels. Bij *PA16* mengsels wordt gestart met een *DV70* of *DVi70+* wals gevolgd door een *HD120* wals. *AC16* en *AC16SFB* eindigen beide met een *HW90* wals.

Tabel 18: Overzicht van gebruikte walsen en frequentie bij de veldmetingen.

Meting	Mengsel	DV70	DVi70+	HD120	HD10	GRW 280	HW 90
1	PA16	3	2	2			
2.2		6	2	3			
3.4			3	6			
3.1	AC16		2				13
3.3	AC16SFB	5				6	5

Temperatuur

In Tabel 19 zijn de weeromstandigheden en temperatuur aan het begin van de meting te zien. In Tabel 20 staat een vergelijking van de starttemperatuur met de mengtemperatuur en de temperatuur van het asfalt in de vrachtwagen. Het meten van de temperatuur is in de praktijk lastig door de vele handelingen die in korte tijd verricht moeten worden. Een deel van de data ontbreekt daardoor. Het grootste verschil in temperatuur is te zien bij Meting 3.1 en 3.4, waarbij de temperatuur ongeveer 32°C en 25°C daalt tussen de vrachtwagen en de start van de meting. Bij deze twee metingen ligt de $T_{vrachtwagen}$ nog boven de eerste temperatuurdrempel. Binnen enkele minuten koelt het asfalt dus snel af waardoor de tijd kort is waarin de verwerkbaarheid gunstig is.

Meting	T_{weer}	v_{wind}	$T_{ondergrond}$	$T_{vrachtwagen}$	T_{start}
1	8,3 °C	4 m/s	-	-	140
2.2	10,3 °C	5 m/s	8,3	80-110	110
3.4	5,9 °C	7 m/s	-	154	129,2
3.1	3,9 °C	7 m/s	3,7	178	145,6
3.3	5,2 °C	9 m/s	6,0	-	129,1

Tabel 19: Weeromstandigheden en temperatuur aan begin meting.

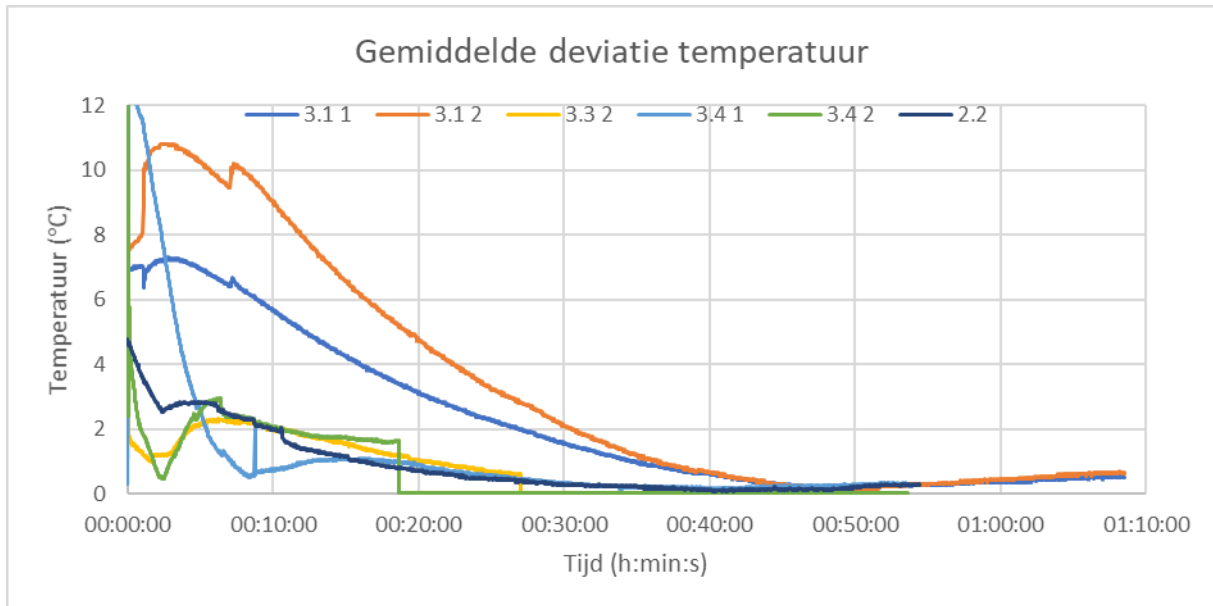
Meting	Mengtemperatuur		$T_{vrachtwagen}$		T_{start}	
	T	Zone	T	Zone	T	Zone
1	165	1	-	-	140	2
2.2	165	1	80-110	2-3	110	3
3.4	165	1	154	1	129,2	2
3.1	195	1	178	1	145,6	1
3.3	165	1	-	-	129,1	2

Tabel 20: Vergelijking temperatuur aan begin meting.

In Figuur 38 is de gemiddelde deviatie van de temperatuur over de tijd uiteengezet. In enkele gevallen is er aan de start van de proef een gemiddelde deviatie van hoger dan 12°C, maar voor de leesbaarheid van de grafiek is dit achterwegen gelaten. Verder ontbreekt het resultaat van 3.3 1. De thermokoppel gaf onjuiste informatie waardoor er een heel groot verschil was in temperatuur. In Bijlage 8.6 kan 3.3 1 gevonden worden samen met de data van boven 12°C.

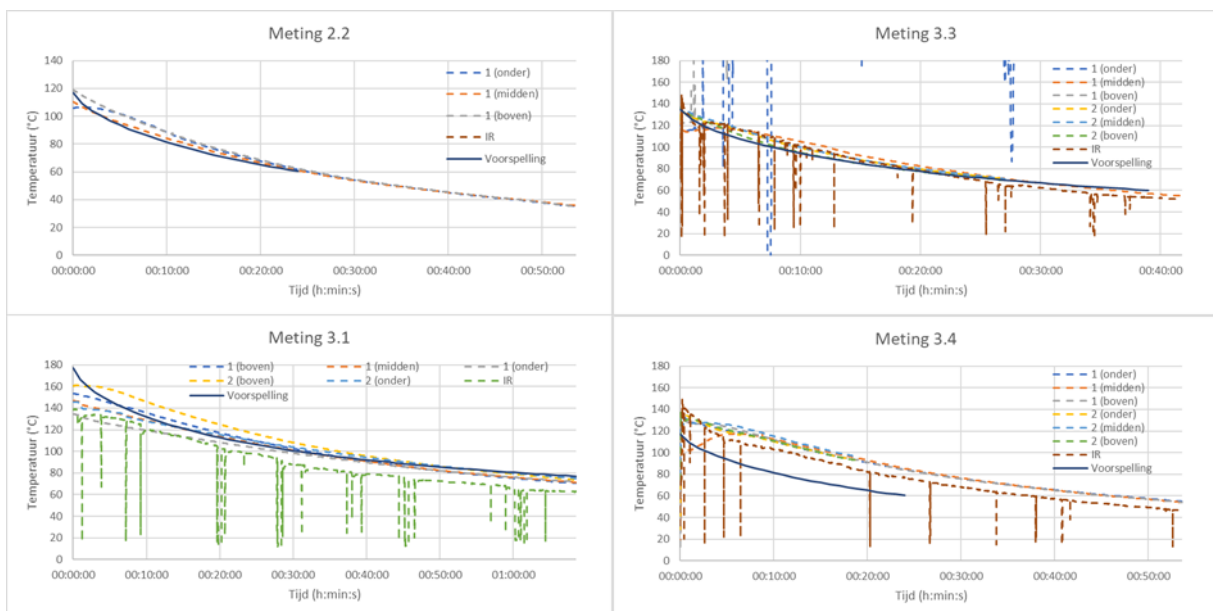
Voor alle metingen neemt de gemiddelde deviatie gedurende de meting af. De meting met *AC16 Surf SFB 5-50 HS* (Meting 3.1) heeft het grootste verschil in temperatuur. Dit kan verklaart worden

doordat dit mengsel op een hogere temperatuur wordt verdicht. De overige metingen vertonen in de eerste 10 minuten een grote deviatie maar deze neemt snel af. Enkele dataloggers of thermologgers vielen gedurende de meting uit wat de abrupte daling verklaart bij 3.3 2 en 3.4 2.



Figuur 38: Gemiddelde deviatie temperatuur per afstandshouder.

De temperatuurprogressie is ook vergeleken met de voorspelde afkoeling uit *PaveCool*. In Figuur 39 staat een impressie en in Bijlage 8.7 staan dezelfde grafieken in een groter formaat. Bij Meting 3.4 is door de grote temperatuurspreiding aan het begin van de meting een te lage temperatuur in het simulatieprogramma ingevoerd.



Figuur 39: Vergelijking voorspelde afkoeling met werkelijke afkoeling.

5 Discussie

Dit hoofdstuk is de discussie van het onderzoek. De resultaten worden geïnterpreteerd in de context van de onderzoeksvragen en het onderzoekskader. 5.1 bestaat uit discussie van de verwerkbaarheidsproef en de bepaling van de temperatuurdrempels. 5.2 bestaat uit de discussie van de veldmetingen en -observaties en bepaling van de dichtheidsprogressie. 5.3 bestaat uit de discussie van de vergelijkende analyse.

5.1 Verwerkbaarheidsproef

Het doel van het labonderzoek was het meten van de verwerkbaarheid om daarmee temperatuurdrempels te bepalen voor het verdichtingsproces. De proeven waren uitgevoerd op verschillende soorten mengsels en twee of drie keer herhaald om de betrouwbaarheid en toepasbaarheid te onderzoeken. Vervolgens is er een rekenmodel van *Boskalis* gebruikt om omslagpunten te bepalen waarmee de temperatuurdrempels zijn vastgesteld.

In 4.1 zijn de resultaten van de verwerkbaarheidsproef doorgenomen. Bij alle proeven is er een stijging in koppel zien naarmate de temperatuur afneemt. De verhouding in koppeltoename ten opzichte van de temperatuur verschilt per mengsel. Een belangrijke observatie tijdens de proeven was de grote mate van ontmenging en het aankoeken van het asfaltmengsel. Daarnaast waren er nog enkele beperkingen in de dataverzameling waaronder het ontbreken van een deel van de temperatuurdata aan de start van de proef.

Het eerste omslagmoment geeft aan wanneer het koppel begint toe te nemen. Echter, bij nagenoeg alle metingen is het koppel op hoge temperatuur niet constant maar is er al een stijgende trend te zien. Hierdoor is het eerste omslagmoment niet het startmoment van de lineaire toename. Een mogelijke verklaring is dat bij meerdere proeven de temperatuurdata aan het begin van de proef ontbreekt, waardoor het mogelijk startmoment wordt gemist. Dit zou betekenen dat het eerste omslagmoment waarschijnlijk op een hogere temperatuur ligt.

Na het eerste omslagpunt neemt het koppel toe. In eerder onderzoek en het rekenmodel is aangenomen dat de toename geheel lineair is. In de proeven neemt het koppel niet altijd lineair toe en op meerdere momenten vlakkt het koppel af of daalt het. Bij *PA16* en *AC22* begon de toename lineair maar nam het na verloop van tijd respectievelijk geleidelijk toe of af. Dit beïnvloedt de lineaire lijn waarmee de omslagpunten worden bepaald. In 3.2 is ingegaan op de gevolgen voor de omslagpunten.

Het tweede omslagmoment is niet altijd even duidelijk. Dit is het moment waarop de lineaire toename van het koppel stopt, afvlakt en afneemt doordat het asfalt verstijft. Bij alle metingen is er een afvlakking te zien alleen gebeurt dit vaak geleidelijk. Ook waren er meerdere momenten waarbij de toename in koppel leek te stoppen en af te vlakken maar waarna vervolgens toch weer een stijging plaatsvond. Bij de tweede en derde meting van *AC16 40/60* nam het koppel na een korte afname weer toe. Een mogelijke verklaring voor het gedrag is de grote mate van ontmenging, wat het gemeten koppel minder representatief maakt. In 4.1 is opgemerkt dat de ontmenging gedurende de proef toenam, wat de toenemende spreiding aan het einde van de proef veroorzaakt. Daarnaast is het mogelijk dat het omslagpunt op een lagere temperatuur ligt en dat de ontmenging van het asfalt de data verstoort. Door het vroegtijdig stoppen van de proef kan hier geen uitspraak worden over gedaan.

De omslagpunten bepaald met de regressielijn zijn vergeleken met de omslagpunten uit het rekenmodel. Hierbij is gekeken naar het temperatuurbereik van de omslagpunten. De koppelminima hebben overlap met het eerste omslagpunt terwijl het tweede omslagpunt vaak tussen de buigpunten en koppelmaxima zitten. Dit duidt erop dat de gevonden omslagpunten realistisch zijn. Wel valt op dat het koppelmaxima na het tweede omslagpunt ligt wat mogelijk zou

betekenen dat het tweede omslagpunt te vroegtijdig is. Het model dient alleen ter indicatie en zou verder uitgewerkt en verkend kunnen worden bij doorontwikkeling van de verwerkbaarheidsproef. Het gebruik van de regressielijn om omslagpunten en temperatuurdrempels te bepalen kan dan als alternatief dienen voor het rekenmodel gebruikt door *Boskalis*.

Qua herhaalbaarheid komen de meeste omslagpunten redelijk overeen. In Tabel 9 is te zien dat het uiterste verschil per mengsel 12°C is terwijl bij de meeste omslagpunten het verschil uiterst 4°C is. Bij drie omslagpunten ligt het verschil tussen de 9°C en 12°C maar dit kan komen doordat een deel van de temperatuurdata ontbreekt. Deze afwijking valt ook op in de grafieken (Figuur 26-Figuur 29) waar *PA16* en *AC 22* metingen meer hetzelfde patroon en dezelfde richtingscoëfficiënt en schommelingen lijken te hebben dan de *AC16* en *AC16 SFB* metingen. Daarnaast is bij de derde meting van zowel *AC16* als *AC16 SFB* een lagere massa mengsel beproefd. De lagere massa zorgt voor minder weerstand waardoor het mengsel beter verwerkbaar is.

De verwerkbaarheidsproef is toegepast op verschillende type mengsels, die verschilden in aggregaat en type bitumen. Hierbij viel op dat mengsels met gemodificeerde bitumen meer weerstand vertoonden ten opzichte van de mengsels met penetratiebitumen. Het koppel steeg bij mengsels met gemodificeerde bitumen sneller en lag hoger dan bij normale bitumen. Dit is in lijn met wat in het literatuuronderzoek is vastgesteld aangaande de moeilijkere verwerkbaarheid van gemodificeerde bitumina.

De temperatuurdrempels bepaald aan de hand van de verwerkbaarheidsproef en het rekenmodel komen in het algemeen overeen. Wel zijn enkele beperkingen naar voren gekomen die van invloed zijn op de metingen en uitkomsten. Daarom zijn er voor toekomstig onderzoek met de verwerkbaarheidsproef enkele verbeteringen nodig:

- De veranderde mengselsamenstelling, als gevolg van de grote mate van ontmenging en aankoeking van het asfalt, maakt het gemeten koppel minder representatief voor de werkelijke situatie. De proefopzet is niet geschikt en een aanpassing moet worden ontwikkeld die de ontmenging tegengaat. Anders zou de proef ingekort moeten worden totdat de ontmenging begint op te treden en op meerdere temperaturen worden herhaald.
- Bij enkele metingen was de mengkom te vol waardoor het handvat aan de bovenkant van de mengarm af en toe asfalt meenam. Dit beïnvloedt de resultaten aangezien er extra asfalt wordt geroerd. In het eerste onderzoek met de verwerkbaarheidsproef (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2014) hebben de auteurs een bereik tussen 5 en 20 *Kg* overwogen en uiteindelijk gekozen voor 20 *Kg*. Een lagere massa van enkele kilo's zal waarschijnlijk voldoende zijn.
- De proeven in dit onderzoek werden beëindigd door het bereiken van de maximum tijd of koppel. Bij de meeste metingen moest de proef stoppen door de maximum duur terwijl het onduidelijk was of er een omslagpunt plaatsvond. Daarnaast vertoont het koppel veel spreiding en doordat er voor een kort moment de maximum waarde werd overschreden, stopte de proef, terwijl het koppel telkens onder de 50 *Nm* lag. Door het opheffen van de tijdrestrictie en eventueel verhogen van de maximale koppelwaarde, kan er meer data verzameld worden waardoor het tweede omslagpunt eventueel op lager temperatuur kan worden vastgesteld.

5.2 Dichtheidsprogressie

Het doel van het veldonderzoek was om dichtheidsprogressiemetingen te verrichten gedurende het verdichtingsproces van het asfalt. De opzet van het veldonderzoek was om alleen metingen te verrichten en observaties te doen maar geen aanpassingen aan het verdichtingsproces te doen. In de analyse is de dichtheid uitgezet tegen de temperatuur. Hiermee kon de ontwikkeling van de dichtheid in relatie tot de temperatuur(drempels) worden beschouwd. Hierbij werd gekeken naar de temperatuur waarop de streefdichtheid was behaald en naar de dichtheidsprogressie ten

opzichte van de temperatuurdrempels uit de verwerkbaarheidsproef. Daarnaast is naar meerdere aspecten van het verdichtingsproces gekeken.

In deze sectie worden de resultaten van 4.2 en 4.3 doorgenomen. Vanwege de grote van de discussie zal in deze sectie de dichtheidsprogressie worden doorgenomen en in de volgende sectie het verdichtingsproces.

Uit de dichtheidsprogressie in Figuur 31-Figuur 35 (4.2) kan een patroon worden afgeleid. De dichtheidsprogressie bestaat uit een fase waarin de dichtheid toeneemt en een fase waarin geen of nauwelijks toename is in dichtheid. De overgang tussen deze twee fases is niet altijd even duidelijk. Tegen het eind van de meting is er op gegeven moment geen toename in dichtheid. De dichtheid fluctueert zonder grote toe- of afname. Dit kan betekenen dat er een grens is waarna geen verdichting meer wordt aangebracht. Het asfalt wordt dan naverdicht om oneffenheden te verwijderen. Een tussenfase, waarin de dichtheid met minder snel toeneemt, komt niet bij elke meting duidelijk naar voren.

Bij alle metingen was er fluctuatie in de dichtheid. Voornamelijk tegen het eind van de meting, wanneer de dichtheid na meerdere walspassages weinig toenam, vonden er meer schommelingen plaats. Een mogelijke oorzaak zou het terugveren van het asfalt kunnen zijn wat naar voren kwam in 2.3. Daarnaast kan de fluctuatie ook komen door onnauwkeurigheid van de nucleaire dichtheidsmeter. Hoe groot deze onnauwkeurigheid is en welk effect het heeft op de verschillende asfaltmengsels is onbekend. Bij elke walsovergang werd één keer de dichtheid gemeten, maar door dit vaker te doen kan de onnauwkeurigheid in kaart worden gebracht.

Bij alle metingen werd de maximumdichtheid gemeten bij de boorkern of de laatste nucleaire dichtheidsmeting. Wanneer de boorkernen buitenwegen worden gelaten, wordt in vier van de vijf metingen de maximumdichtheid gemeten in de laatste twee nucleaire dichtheidsmetingen. Al deze metingen vinden tientallen graden Celsius na de tweede temperatuurdrempel plaats. Dit betekent dat de dichtheid blijft toenemen ondanks dat op zo een lage temperatuur wordt gewalst.

Het verschil tussen de laatste nucleaire dichtheidsmeting en de dichtheid van de boorkern is bij AC-mengsels lager dan bij PA-mengsels. Bij AC-mengsels was dit verschil $12\text{--}13\text{ Kg/m}^3$ terwijl bij PA-mengsels dit verschil tussen $26\text{--}78\text{ Kg/m}^3$ lag. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij twee van de drie PA-veldmetingen de boorkern van een naastgelegen rijstrook werd geboord. Bij AC16 veldmeting was de laatst gemeten dichtheid onbekend, echter waren de drie meting daarvoor binnen 5 Kg/m^3 van elkaar. Deze constatering zou erop kunnen wijzen dat de nucleaire dichtheidsmeter nauwkeurig is voor AC-mengsel. Echter, er zijn te weinig (nauwkeurige) metingen om hierover een conclusie te trekken.

Het doel van de analyse was om een relatie vast te stellen tussen de temperatuurdrempels uit de verwerkbaarheidsproef en het verdichtingsproces. De verschillende temperatuurzones zijn met elkaar vergeleken.

Bij alle veldmetingen lag de einddichtheid (boorkern) binnen de tolerantiezone van de streefdichtheid. De temperatuur waarop gestart werd met walsen had geen duidelijke invloed op het behalen van de streefdichtheid. Het maakt niet uit in welke temperatuurzone het asfalt wordt gelegd, in alle gevallen wordt de streefdichtheid bereikt. Bij alle metingen werd de streefdichtheid na de tweede temperatuurdrempel behaald met een verschil variërend van 10°C tot 33°C .

Na de minimumtemperatuur (T_2) blijft een toename in dichtheid mogelijk. Bij meerdere metingen neemt de dichtheid nog ver na de minimumtemperatuur toe, variërend van 84 tot 167 Kg/m^3 . In 4.1 is vastgesteld dat de verwerkbaarheid vaak nog tientallen graden toeneemt na de tweede temperatuurdrempel. Dit in combinatie met de toename in dichtheid na de minimumtemperatuur zou erop kunnen wijzen dat de minimumtemperatuur lager ligt.

De effectiviteit per walsovergang verschilt ten opzichte van de minimumtemperatuur. Walsovergangen uitgevoerd voor de minimumtemperatuur zijn namelijk effectiever. Bij de vier metingen waarbij voor de minimumtemperatuur werd gewalst, was de gemiddelde dichtheidsprogressie voor de minimumtemperatuur groter. Dit verschil varieerde van 3,5 tot 58,7 Kg/m^3 per walsovergang. Vaak wordt aan het begin van het verdichtingsproces een andere wals gebruikt wat van invloed kan zijn op de effectiviteit. In de analyse kan geen eenduidig beeld worden vastgesteld of een individuele wals effectiever is ten opzichte van de minimumtemperatuur. Er zijn namelijk te weinig walspassages in de verschillende temperatuurzones.

5.3 Verdichtingsproces

Het verdichtingsproces komt in de praktijk vaak niet overeen met wat gewenst wordt. In eerder onderzoek (Poeran & Sluer, 2016) met de verwerkbaarheidsproef is gesteld dat wanneer het koppel het laagst is, het asfalt wordt gelegd en voor de eerste temperatuurdrempel grotendeels is verdicht. In werkelijkheid werd het asfalt vaak na de eerste temperatuurdrempel gelegd en gaat het verdichten na de tweede temperatuurdrempel nog lang door. De veldmetingen vonden plaats in de winter waardoor het asfalt sneller afkoelt. Dit verkort de tijdsduur van het gunstige verdichtingsvenster. Desondanks duurt het verdichtingsproces vaak langer dan een uur en wordt er op zeer lage temperaturen gewalst, tot wel onder de 40°C.

In 4.2 zijn drie bijzonderheden benoemd die tijdens het verdichtingsproces voorkwamen. De beperkingen hebben invloed op de kwantiteit en kwaliteit van de data. Het vroegtijdig plaatsen van een stuk asfalt bij de thermkoppels heeft een grote invloed. Dit stuk asfalt koelt sneller af dan de rest van het asfalt waardoor de gemeten temperatuur minder representatief is voor de werkelijke situatie. Bij toekomstige veldmetingen is dit een belangrijke punt voor verbetering.

Voor elke mengsel werd er een andere volgorde en combinatie van walsen gebruikt die in grote lijnen overeenkomen. De *DV70*, *DV+70i* en *GRW280* werden aan het begin van het verdichtingsproces gebruikt terwijl de *HD120* en *HW90* voornamelijk aan het einde werden gebruikt. Buiten deze overeenkomsten is er geen consistentie in de frequentie en volgorde van verschillende walsen en er wordt geen rekening gehouden met dichtheid of temperatuur. Bij de drie metingen met *PA16*, is de frequentie van de ingezette walsen verschillend. Bij Meting 2.2 en 3.3 worden twee walsen door elkaar gebruikt. Ook is er geen wisseling van type wals wanneer de streefdichtheid of een temperatuurdrempel wordt bereikt. Kortom, de walsstrategie staat in grote lijnen vast maar is inconsistent en houdt geen rekening met de staat van verdichting. Dit komt overeen met de bevindingen van het literatuuronderzoek.

Wanneer het asfalt werd gelegd, kon de temperatuur snel afnemen. In twee metingen werd de temperatuur in de vrachtwagen, ondergrond en asfalt gemeten waarna er een grote daling in temperatuur werd vastgesteld. Bij aankomst van de vrachtwagen met asfalt kon de temperatuur al 10 tot 60 graden zijn afgenomen ten opzichte van de mengtemperatuur. Als het asfalt werd geplaatst, nam de temperatuur weer tientallen graden af. Zo kon het zijn dat de temperatuur van het asfalt in de vrachtwagen nog in de eerste zone lag maar zodra het verdichtingsproces begon, lag de temperatuur al in de tweede zone.

De spreiding in de temperatuur in de asfaltaag is in het begin van de meting groot. Naarmate het asfalt afkoelt, neemt de spreiding af. Bij de meeste metingen blijft de gemiddelde deviatie onder de 3°C. De toepassing van de huidige analysemethode, waarbij gebruik wordt gemaakt van een gemiddelde temperatuur, is hierdoor goed mogelijk. Wel is bij meerdere metingen de spreiding in temperatuur aan het begin van de meting groot. Er is dan overlap tussen verschillende zones wat de analyse minder nauwkeurig kan maken.

De werkelijke afkoeling kwam, op één meting na, goed overeen met de voorspelde afkoeling. In het begin was de voorspelde afkoeling vaak enkele graden Celsius lager dan de werkelijke afkoeling

maar na verloop van tijd was dit verschil miniem. Doordat de voorspelling redelijk overeenkomt met de werkelijke afkoeling, kan op basis van de voorspelde afkoeling het tijdsvenster worden bepaald dat overeenkomt met de temperatuurdrempels. Dit is een vervolgstap van de verwerkbaarheidsproef zoals aangegeven in 1.2. Aangezien de vergelijking met de voorspelde afkoeling maar voor enkele metingen en omstandigheden is gedaan, is op dit punt eerst verder onderzoek nodig voordat een definitieve conclusie kan worden getrokken.

Uit de bovenstaande punten aangaande de temperatuur van het asfalt kan worden afgeleid dat plaatsing van het asfalt een cruciale fase is voor de temperatuur. Het is gewenst om het asfalt te plaatsen wanneer de temperatuur het hoogst is. Echter, uit de resultaten blijkt dat de temperatuur tijdens het spreiden van het asfalt zodanig afneemt dat het geschikte temperatuurvenster een stuk kleiner wordt. Daarnaast is de spreiding in temperatuur in het begin van de proef groot. De voorspelde afkoeling komt redelijk overeen met de werkelijke situatie. Echter, wanneer de temperatuur in het begin meer afneemt dan verwacht, is de rest van de voorspelling niet meer nauwkeurig. Dit alles maakt de eerste fase cruciaal en daarom moet in toekomstig onderzoek gelet worden op temperatuurontwikkeling in de aanlegfase.

5.4 Evaluatie

Er is een beperkte relatie vastgesteld tussen de temperatuurdrempels en de dichtheidsprogressie. Walsovergangen uitgevoerd voor de tweede temperatuurdrempel, ook wel de minimumtemperatuur, brachten meer verdichting aan dan walsovergangen erna. Een toename in dichtheid blijft mogelijk na beide temperatuurdrempels. Bij alle metingen nam na de tweede temperatuurdrempel de dichtheid nog toe en werd de streefdichtheid behaald.

De temperatuurdrempels bepaald met de verwerkbaarheidsproef moeten worden verbeterd voordat die verder onderzocht en toegepast kunnen worden. Ontmenging en het aankoeken zorgen ervoor dat het gemeten koppel minder representatief is. Door beperkingen in de dataverzameling te verhelpen, kan het koppel voor een groter temperatuurbereik worden gemeten. Hiermee kan de volledige verwerkbaarheid worden vastgesteld en zou een eventuele lagere temperatuurdrempel kunnen worden gevonden. Aangezien in de dichtheidsprogressie wel een moment naar voren komt wanneer walsovergangen weinig effect hebben, zou een lagere temperatuurdrempel mogelijk toch een drempelwaarde zijn waarna geen verdichting meer mogelijk is.

De praktische toepassing van de verwerkbaarheidsproef is goed mogelijk maar moet nog verder worden onderzocht. De voorspelde afkoeling van het asfalt kwam redelijk overeen met de werkelijke situatie. Wel moet op de temperatuurontwikkeling in het begin van de meting gelet worden. In het verdichtingsproces moet rekening worden gehouden dat het asfalt zeer snel afkoelt en de gunstige verdichtingstijd daardoor een stuk korter wordt. De walsstrategie moet hiervoor eventueel worden aangepast.

In dit onderzoek is er weinig gekeken naar andere methoden waardoor er geen goede vergelijking kan worden gedaan. In het literatuuronderzoek zijn weinig andere methoden naar voren gekomen die vergelijkbaar zijn met de verwerkbaarheidsproef. Veel onderzoek focussen alleen op veldmetingen bij verschillende omstandigheden. Hier wordt dan geen rekening gehouden met de eigenschappen van het asfalt of gewerkt met temperatuurdrempels. Hierdoor kan geen duidelijk antwoord worden gegeven op onderzoeksvraag 5C.

Ook voor onderzoeksvraag 5D is geen duidelijk antwoord te geven anders dan dat de verwerkbaarheidsproef inzicht geeft op welke temperatuur de verdichting minder effectief is. Wel is uit 2.3 bekend dat wanneer op lage temperatuur wordt gewalst om de streefdichtheid te behalen, dit ten koste kan gaan van de asfaltkwaliteit. Uit de dichtheidsprogressiemetingen is bekend dat de laatste walsovergangen voor weinig extra verdichting zorgen en de streefdichtheid werd buiten het temperatuurvenster behaald. Daarnaast wordt het verdichtingsproces op relatief lage temperatuur

gestart, vaak rond de tweede temperatuurdrempel. Dit kan ten koste gaan van de asfaltkwaliteit. Echter, dit is niet met zekerheid te zeggen aangezien de mechanische eigenschappen buiten het onderzoekskader vielen.

Bij het analyseren van de dichtheidsprogressie over de verschillende zones zijn er veel variabelen die een rol spelen. Zo zijn er meerdere omslagpunten gevonden via verschillende methoden waardoor ook verschillende temperatuurdrempels mogelijk zijn. In de veldmeting is met verschillende walsen niet even vaak en op dezelfde temperaturen gewalst. Ook waren de temperaturen van de veldmeting relatief lager dan die van de verwerkbaarheidsproef. De nucleaire dichtheidsmeter is niet altijd nauwkeurig. De combinatie van deze variabelen maakt het lastig om een nauwkeurige analyse te doen. Zo kan een zwaardere en effectievere wals in de ene zone wel gebruikt worden en de andere niet. De grotere toename in dichtheid komt dan door het gebruik van een andere wals en niet door de temperatuur.

In dit onderzoek zijn wel ervaringen opgedaan die bijdragen aan toekomstig onderzoek. De verwerkbaarheidsproef is nog niet goed vergeleken door te weinig onderzoek en gegevens maar is wel veelbelovend. Bij vervolgonderzoek is het belangrijk de beperkingen te verminderen. Verder kunnen de mechanische eigenschappen worden meegenomen in toekomstig onderzoek. Daar kunnen verschillen zijn ten opzichte van de temperatuurdrempels die anders niet in de dichtheidsprogressie naar voren komen.

6 Conclusie

In de probleemstelling werd vastgesteld dat er geen vaste methode was voor het bepalen van temperatuurdrempels voor het verdichtingsproces. Bij *Boskalis* is er daarom een verwerkbaarheidsproef ontwikkeld waarmee het koppel en de temperatuur kan worden gemeten. Aan de hand van de gemeten data kunnen er temperatuurdrempels worden bepaald. Echter, er was nog geen vergelijking gemaakt met het verdichtingsproces in de praktijk.

Het doel van het onderzoek was om de temperatuurdrempels van de verwerkbaarheidsproef te vergelijken met de dichtheidsprogressie gedurende het verdichtingsproces. Voor het onderzoek zijn er parallel aan elkaar verwerkbaarheidsproeven en veldmetingen uitgevoerd. Vervolgens zijn er respectievelijk temperatuurdrempels en de dichtheidsprogressie vastgesteld. Uiteindelijk is er een vergelijkende analyse uitgevoerd en zijn de uitkomsten geëvalueerd.

Dit hoofdstuk bestaat uit de deelconclusie van de verschillende onderdelen, eindconclusie van het onderzoek en aanbevelingen.

6.1 Deelconclusie proeven en metingen

In deze sectie wordt de deelconclusie voor de verwerkbaarheidsproef, veldmetingen, vergelijkende analyse en evaluatie doorgenomen.

Verwerkbaarheidsproef

Voor onderzoeksvraag 2 was het doel om verwerkbaarheidsproeven uit te voeren om daarmee temperatuurdrempels te bepalen. De opzet van het onderzoek bestond uit proeven en het analyseren van de data.

- Naarmate het mengsel afkoelt, neemt het koppel toe. Op lagere temperatuur neemt de spreiding toe. De verhouding tussen het koppel en de temperatuur is niet altijd lineair.
- Er waren enkele beperking in de uitvoering van de proeven die de kwantiteit en kwaliteit van de data beperken. Een belangrijke beperking was de hoge mate van ontmenging en het aankoeken van asfaltmengsel.
- De bepaling van omslagpunten is afhankelijk van handmatige dataselectie en gebeurt niet op een systematische manier. Dit beïnvloedt de bepaling van de omslagpunten.
- Herhaalde metingen kwamen redelijk overeen.
- De omslagpunten uit de verwerkbaarheidsproef kwamen redelijk overeen met de extreme waarden en buigpunt van de regressielijn. De regressielijn kan als aanvulling of alternatief dienen op het rekenmodel van *Boskalis*.
- Mengsels met gemodificeerde bitumen waren minder goed verwerkbaar wat in lijn is met de literatuur.

Dichtheidsprogressie en dichtheid

Het doel van de dichtheidsprogressiemetingen was om het verdichtingsproces in kaart te brengen. Dit doel komt overeen met onderzoeksvraag 3 en 4.

- De dichtheid neemt toe met het verdichtingsproces. Eerst is er een fase waarin de dichtheid toeneemt gevolgd door een fase waarin geen tot nauwelijks toename is in dichtheid.
- Er is een fluctuatie in de dichtheid gemeten met de nucleaire dichtheidsmeter.
- Er waren enkele beperkingen in de uitvoering van de dichtheidsprogressiemetingen.
- Er is nog een toename in dichtheid na de tweede temperatuurdrempel uit de verwerkbaarheidsproef, variërend van 84 tot 167 Kg/m^3 .
- De streefdichtheid wordt altijd bereikt in de metingen uitgevoerd in dit onderzoek. Voor het behalen van de streefdichtheid is het niet noodzakelijk om op de eerste temperatuurdrempel te starten met walsen en/of klaar te zijn voor de tweede

temperatuurdrempel. De streefdicht kan namelijk ook na de tweede temperatuurdrempel worden behaald.

- Walsovergangen uitgevoerd boven de tweede temperatuurdrempel zijn effectiever dan daaronder. Dit verschil varieerde van 3,5 tot 58,7 Kg/m^3 per walsovergang.

Verdichtingsproces

Naast de vergelijking van de dichtheid ten opzichte van de temperatuurdrempels is er ook gekeken naar de walsstrategie en het temperatuurverloop tijdens het verdichtingsproces.

- Het verdichtingsproces in de praktijk komt niet overeen met wat wordt gewenst met eerder onderzoek van *Boskalis* uit 2014. Het asfalt wordt op lagere temperatuur gelegd en gewalst dan de temperatuurdrempels.
- Er is een patroon vastgesteld in de toepassing van het type wals en de volgorde ervan. Daarentegen is er inconsistentie in de frequentie en er wordt geen rekening gehouden met de dichtheid en temperatuur.
- Bij het aanleggen van asfalt kan de temperatuur tientallen graden afnemen. De plaatsing van het asfalt is een belangrijke fase voor de verdichting.
- De spreiding in temperatuur is aan de start van de meting groot en neemt af naarmate de meting voortduurt.
- De afkoeling van het asfalt komt redelijk overeen met de afkoeling volgens het afkoelingsmodel.

Evaluatie

De evaluatie bestaat uit de verbeteringen voor de verwerkbaarheidsproef en de praktische toepassing.

- Er zijn verbeteringen nodig voor de bepaling van de omslagpunten.
- De praktische toepassing van de verwerkbaarheidsproef is goed mogelijk, maar moet nog verder onderzocht worden.
- In dit onderzoek is er weinig gekeken naar andere methodes voor het verdichtingsproces, waardoor er geen goede vergelijking kan worden gedaan.
- Wanneer op lage temperatuur wordt gewalst kan dit te koste gaan van de asfaltkwaliteit. Echter, een mogelijke afname van de mechanische eigenschappen is niet onderzocht.

6.2 Eindconclusie

Er is een relatie tussen de temperatuurdrempels en de dichtheidsprogressie maar deze is beperkt en dient verder te worden onderzocht. Walsovergangen uitgevoerd voor de tweede temperatuurdrempel uit de verwerkbaarheidsproef verhogen de dichtheid meer dan walsovergangen erna. Echter, toename in dichtheid is mogelijk na de temperatuurdrempels, zelfs wanneer dan met de verdichting wordt gestart. De streefdichtheid kan ook na de tweede temperatuurdrempel worden behaald, zelfs als vlak voor de tweede temperatuurdrempel wordt begonnen met het verdichtingsproces. Echter, dit zou ten koste van de asfaltkwaliteit kunnen gaan.

Er waren beperkingen in de uitvoering, data en analyse die de kwaliteit en kwantiteit van het onderzoek beïnvloeden. Herhalend en meer onderzoek is nodig aangezien de resultaten wel mogelijkheden laten zien. De ervaringen opgedaan in dit onderzoek en de hierna genoemde aanbevelingen helpen bij toekomstig onderzoek en ontwikkeling van de verwerkbaarheidsproef.

6.3 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om de verwerkbaarheidsproef verder door te ontwikkelen. Meerdere beperkingen van de verwerkbaarheidsproef, het rekenmodel en de veldmetingen zijn vastgesteld. Ervaring opgedaan in dit onderzoek moet worden meegenomen om de temperatuurdrempels bij

meerdere omstandigheden te bepalen. Als eerste moeten de problemen met ontmenging en aankoeken van het asfalt worden opgelost en de beperkingen in dataverzameling. Als na herhalend onderzoek dezelfde conclusie wordt getrokken, kunnen de mechanische eigenschappen worden onderzocht.

In het verdichtingsproces moet rekening worden gehouden dat temperatuur snel afneemt en daarmee het gunstige verdichtingsvenster kort is. Wanneer het verdichtingsproces wordt gestart kan de temperatuur al tientallen graden Celsius zijn gedaald waardoor de beschikbare tijd voor juiste verdichting korter is. Verdichting op lage temperatuur blijft mogelijk maar zou ten koste kunnen gaan van de mechanische eigenschappen. Door aan het begin van het verdichtingsproces meerdere walsovergangen uit te voeren, zijn walsovergangen effectiever.

Er zijn daarnaast specifieke aanbevelingen voor de verwerkbaarheidsproef en veldmetingen die voortkomen uit de discussie.

Voor de verwerkbaarheidsproef worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Indien de ontmenging en het aankoeken van het asfalt niet kan worden verholpen, moet de proefopzet worden gewijzigd. De proef zou verkort kunnen worden en meerdere keren kunnen worden uitgevoerd op verschillende temperaturen.
2. Het temperatuurverschil tussen de mengarm en het mengsel moet zo min mogelijk zijn om verlies aan data te voorkomen. Hierdoor kan er een beter beeld van de temperatuurontwikkeling in de eerste minuten van de proef worden verkregen. Indien mogelijk kan de mengarm samen met het asfaltmengsel worden opgewarmd.
3. De massa van het mengsel moet lager zijn om te voorkomen dat het handvat meeroert. Dit is in eerder onderzoek overwogen en met de problemen ondervonden in dit onderzoek zou een lagere mengselmassa opnieuw overwogen moeten worden.
4. De maximum duur van proef moet langer zijn dan 1 uur om meer inzicht te krijgen in de verwerkbaarheid op lagere temperatuur. Een lagere temperatuurdrempel kan dan eventueel worden gevonden.
5. Om meer inzicht te krijgen in minder verwerkbare mengsels moet het apparaat een hogere koppelwaarde aankunnen. Hiermee kan uiteindelijk voor een groter temperatuurbereik het koppel worden gemeten.

Voor de veldmeting worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Er is meer inzicht nodig in de nauwkeurigheid van de dichtheid gedurende het verdichtingsproces. Dit kan worden gedaan door na elke walsovergang vaker de dichtheid te meten met de nucleaire dichtheidsmeter. Hiermee kan de nauwkeurigheid van de nucleaire dichtheidsmeter worden vastgesteld en kunnen fluctuaties in de dichtheid mogelijk worden verklaard.
2. De mechanische en functionele eigenschappen van het asfalt moeten worden onderzocht of die ook voldoen bij het verdichten op lagere temperaturen. In het literatuuronderzoek kwam naar voren dat de streefdichtheid op lagere temperatuur kan worden behaald, maar ten koste van de mechanische eigenschappen.
3. Het asfalt rondom de thermokoppels moet tegelijkertijd worden geplaatst met de rest van het asfalt. Wanneer een kleine hoeveelheid asfalt te vroeg wordt geplaatst, koelt het asfalt sneller af wat de data minder representatief maakt.
4. De afstandshouders moeten stabiel zijn tijdens het aanleggen van asfalt en niet omvallen. Er moet worden gezocht naar oplossingen om dit te voorkomen.
5. In de analyse moet rekening worden gehouden met een lokaal temperatuurverschil.

7 Bibliografie

- Arp engineering b.v. (sd). *Labinstallaties*. Opgeroepen op maart 9, 2020, van Arp engineering b.v.: https://www.arpengineering.nl/#xl_xr_page_labinstallaties
- ASPARi. (sd). Opgehaald van ASPARi: aspari.nl
- ASPARi. (2018). Handleiding PQi Afkoelingsmeting 2018 v2. Nederland.
- Bahçeci, M. (2015). *Het effect van de verdichtingstemperatuur en de verdichtingsenergie op de kwaliteit van het asfalt*. Afstudeeropdracht, Universiteit Twente, Nieuw-Vennep. Opgeroepen op Februari 11, 2020
- Bijleveld, F. (2010). *Asfaltwegenbouw, op weg naar professionalisering - Op basis van mechanische eigenschappen het bepalen van temperatuur- en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels*. Afstudeerrapport, Universiteit Twente. Opgehaald van https://essay.utwente.nl/59418/1/scriptie_F_Bijleveld.pdf
- Bijleveld, F. (2015). *Professionalising the asphalt construction process*. Universiteit Twente, Enschede. Opgehaald van https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6054696/thesis_F_Bijleveld.pdf
- Bijleveld, F. R., Miller, S. R., & Dorée, A. G. (2014). Making Operational Strategies of Asphalt Teams. *Journal of construction engineering and management*, 141(5), 12. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000969
- Bijleveld, F., Miller, S., Bondt, A. d., & Dorée, A. (2015). Aligning laboratory and field compaction practices for asphalt – the influence of compaction temperature on mechanical properties. *International Journal of Pavement Engineering*. doi:10.1080/10298436.2015.1019494
- BituNed bv. (sd). *Polymeergemodificeerd bindmiddel*. Opgeroepen op Maart 3, 2020, van Bituned: <https://bituned.nl/polymeergemodificeerd-bindmiddel/>
- Bouwend Nederland. (sd). *Bouwweer*. Opgeroepen op November 20, 2019, van Bouwend Nederland: <https://www.bouwendnederland.nl/service/praktische-tools/bouwweer>
- CROW. (2014, December). Standaard RAW Bepalingen 2015. 8e, 1491. Ede, Gelderland, Nederland: CROW.
- Diab, A., & You, Z. (2017). A Bitumen-Based Prototype to Predict. *Advancement in the Design and Performance of Sustainable Asphalt Pavements* (pp. 14-30). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-61908-8
- Gudimettla, J. M., L. Allen Cooley, J., & Brown, E. R. (2003, April). Workability of Hot Mix Asphalt. *TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATL RESEARCH COUNCIL*, 229-237. Opgeroepen op November 18, 2019
- Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., & Brown, E. R. (2016, September 15). Density profile of hot mix asphalt layer during compaction with various types of rollers and lift thickness. *Construction and Building Materials*, 121, 265-277. doi:<https://doi-org.ezproxy2.utwente.nl/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.129>
- Ismail, S., Hassan, N., Yaacob, H., Hainin, M. R., Ismail, C. R., Mohamed, A., & Idham, M. (2019, Februari). Properties of dense-graded asphalt mixture compacted at different temperatures. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. doi:10.1088/1755-1315/220/1/012010

- Mechanische eigenschappen van wegebouwmaterialen. (sd).
- Micaelo, R., Santos, A., & Duarte, C. (2012). Mixing and compaction temperatures of asphalt mixtures with modified bitumen. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 5, p. 12. Istanbul.
- Minnesota Department of Transportation. (2020, Januari). PaveCool. Minnesota, Verenigde Staten. Opgeroepen op Mei 12, 2020, van <http://www.dot.state.mn.us/app/pavecool/>
- Molenaar, A. (2010). Road Paving Materials.
- PDC. (sd). *Parlementaire enquête bouwnijverheid (2002-2003)*. Opgeroepen op Februari 18, 2020, van https://www.parlement.com/id/vh8lnhrpmxwh/parlementaire_enquete_bouwnijverheid Parlement.com:
- Poeran, N., & Sluer, B. (2016). *Verwerkbaarheid van asfaltmengsels – Van prototype naar praktijk*. Boskalis Nederland.
- Poeran, N., Sluer, B., & Andeweg, B. (2014). Verwerkbaarheid van asfaltmengsels., (p. 16).
- Rijkswaterstaat. (sd). *Zoab*. Opgeroepen op Maart 18, 2020, van Rijkswaterstaat: <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/aanleg-wegen/zoab.aspx>
- Sluer, B. (2018, Oktober 17). Quality control of pavement.
- Speight, J. G. (2015). *Asphalt Materials Science and Technology*. Elsevier. doi:10.1016/C2013-0-15469-4
- VBW-Asfalt. (2003, Februari). Waarom walsen? Breukelen, Nederland.
- Verschuren, P., & Doorewaard, H. (2007). *Het ontwerpen van een onderzoek* (Vierde druk ed.). Nederland: Boom Lemma uitgevers.
- Wang, C., Hao, P., Ruan, F., Zhang, X., & Adhikari, S. (2013). Determination of the production temperature of warm mix asphalt by workability test. *Construction and Building Materials*, 48, 1165-1170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.097>
- Wu, S., Qiu, J., Mo, L., Yu, J., Zhang, Y., & Li, B. (2007). Investigation of temperature characteristics of recycled hot mix asphalt mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 610-620. Opgehaald van <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.11.005>.

8 Bijlage

In dit hoofdstuk staan de bijlages van het rapport. De bijlages staan in volgorde wanneer ze voor het eerst worden verwezen.

8.1 Mengseloverzicht

Voor dit onderzoek zijn 4 mengsels beproefd waarvan de samenstelling in deze bijlage staat. In het eerste tabel staat de samenstelling van het grove toeslagmateriaal. In het tweede tabel staat de samenstelling van het mengsel.

PA16-HZ90

Samenstelling grove toeslagmateriaal		
Omschrijving	Verhouding	
Bestone 11/16 Amsterdam	38%	
Bestone 8/11 Amsterdam	33%	
Bestone 4/8 Amsterdam	29%	
Samenstelling mengsel		
	Omschrijving	Massa (g)
Fijn toeslagmateriaal	Bestone 0/2 Amsterdam	72
Zeer fijn toeslagmateriaal	Wigro 60K 0/0 Winterswijk	327
	Eigen stof 0/0 Productie	300
Asfaltgranulaat	ZOAB Frees 0/20 APT	12000
Toeslagmateriaal	Afdruipemmer Duitsland	60
Grof toeslagmateriaal	16-22,4 mm	765
	11,2-16 mm	5157
	8-11,2 mm	5193
	5,6-8 mm	3276
	2-5,6 mm	1698
	< 2 mm	138
Bindmiddelen	HZ90 Eco-Periphalt HZ90	1014
Totale massa		30000

AC16 Bin 40/60 eco 60% PR

Samenstelling grove toeslagmateriaal		
<i>Omschrijving</i>		Verhouding
<i>ECO-granulaat 0/2 Rotterdam</i>		24%
<i>ECO-granulaat 8/16 Rotterdam</i>		76%
Samenstelling mengsel		
	Omschrijving	Massa (g)
<i>Fijn toeslagmateriaal</i>	ECO-granulaat 0/2 Rotterdam	2625
<i>Zeer fijn toeslagmateriaal</i>	Wigro 40K 0/0 Winterswijk	165
	Eigen stof 0/0 Productie	57
<i>Asfaltgranulaat</i>	Asfaltgranulaat gebroken 0/20	18000
	APA	
<i>Grof toeslagmateriaal</i>	16-22,4 mm	114
	11,2-16 mm	1230
	8-11,2 mm	822
	5,6-8 mm	2583
	2-5,6 mm	2874
	< 2 mm	1086
<i>Bindmiddelen</i>	Penetratiebitumen 70/100 EU	444
<i>Totale massa</i>		30000

AC16 Surf SFB 5-50 HS

Samenstelling grove toeslagmateriaal					
Omschrijving			Verhouding		
Bestone 11/16 Amsterdam			63%		
Bestone 2/5 Amsterdam			37%		
Samenstelling mengsel					
	Omschrijving		Massa (g)		
Fijn toeslagmateriaal	Rivierzand 0/2 Nederland		4698		
Zeer fijn toeslagmateriaal	Wigro 50K 0/0 Winterswijk		894		
Grof toeslagmateriaal	16-22,4 mm		903		
	11,2-16 mm		7359		
	8-11,2 mm		1773		
	5,6-8 mm		10413		
	2-5,6 mm		1746		
	< 2 mm		414		
Bindmiddelen	Sealoflex	SFB	5-50	HS	1800
	Schagen				
Totale massa			30000		

AC 22 base 70/100 eco 60% PR

Samenstelling grove toeslagmateriaal		
Omschrijving	Verhouding	
Bestone 4/8 Amsterdam	3%	
Schots graniet 16/22 Amsterdam	28%	
ECO-granulaat 8/16 Rotterdam	69%	
Samenstelling mengsel		
	Omschrijving	Massa (g)
Fijn toeslagmateriaal	ECO-granulaat 0/2 Rotterdam	2691
Zeer fijn toeslagmateriaal	Eigen stof 0/0 Productie	204
Asfaltgranulaat	Asfaltgranulaat gebroken 0/20	18000
	APA	
Grof toeslagmateriaal	22,4-31,5 mm	72
	16-22,4 mm	132
	11,2-16 mm	246
	8-11,2 mm	2667
	5,6-8 mm	2580
	2-5,6 mm	2544
	< 2 mm	420
Bindmiddelen	Penetratiebitumen 70/100 EU	444
Totale massa		30000

8.2 Stappenplan veldmeting

Hieronder staat het stappenplan gebruikt voor de dichtheidsprogressiemetingen. In een eerdere versie van het stappenplan was nog het plaatsten van een weerstation opgenomen.

Algemene voorbereiding

1. Plek kiezen voor meting in overleg met Technoloog en hoofduitvoerder
 - a. Locatie afspreken
 - b. Streefdichtheid volgens Technoloog opvragen

- c. Serienummer en normale/dunne laag type vragen aan technoloog
 - d. Leverbon spreidmachine opvragen
- 2. Meetspullen klaarzetten
 - a. Infraroodcamera's klaarzetten
 - b. Thermokoppels verbinden met dataloggers
- 3. Locatie voor dichtheidsmeting en boorkern
 - a. Locatie voor dichtheid meting is op 1 meter van de locatie van de thermokoppels en aangeven
 - b. Boorkern op dezelfde locatie als dichtheidsmeting

Laatste voorbereiding en meting

- 1. Zorg ervoor dat thermologgers niet op het bandenpad van de spreidmachine komen. Plaats de thermokoppels wanneer de spreidmachine nadert.
- 2. Net voor de meting begint
 - a. Meet de temperatuur van de ondergrond.
 - b. Meet de temperatuur van het asfalt in de vrachtwagen.
 - c. Noteer de starttijd
- 3. Wanneer de spreidmachine overheen gaat, wordt de meting gestart.
 - a. Start de dataloggers voor de thermometer
 - b. Start de datalogger voor de infraroodcamera
 - c. Noteer de starttijd
 - d. Noteer temperatuur en dichtheid (meteen) na de balk
- 4. Na iedere walsovergang
 - a. Laat de dichtheid meten door een technoloog en noteer de tijd
 - b. Noteer de tijd
 - c. Noteer de walsmachine
 - d. Noteer de temperatuur gemeten door de thermologgers en infraroodcamera
 - e. Maak eventueel een foto van asfaltoppervlak met de grote infraroodcamera
 - f. Maak eventueel een foto van het proces
- 5. Wanneer er niet meer wordt gewalst, wordt de meting gestopt.
 - a. Noteer eindtijd (en dichtheid)
 - b. Stop de dataloggers voor de thermometer en knip de kabels door.
 - c. Stop de infraroodcamera
 - d. Noteer walsstrategie
 - e. Noteer opmerkingen
 - f. Ruim spullen op
 - g. Overleg met Technoloog voor het maken van boorkernen

8.3 Verwerkbaarheidsproef

In deze bijlage staan alle observaties gedaan gedurende de metingen. In de eerste kolom staat het moment van de observatie en in de tweede kolom staat de observatie zelf. Niet in alle gevallen is het moment van de observatie genoteerd.

PA16-HZ90

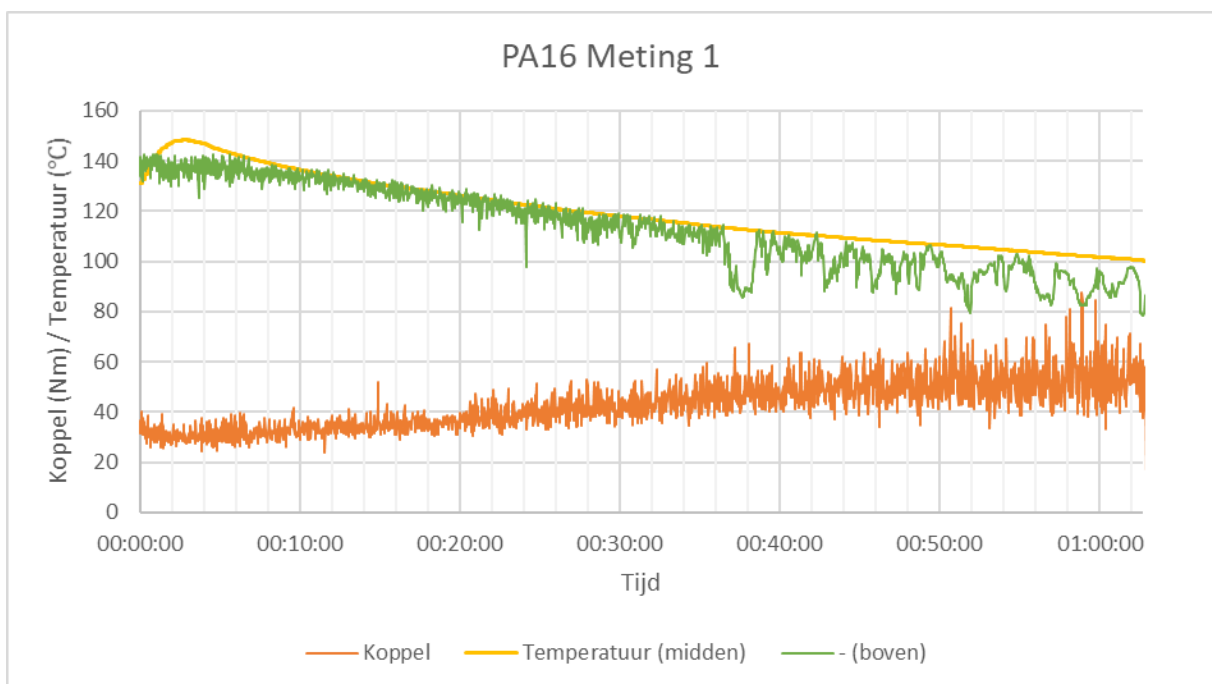
Observaties meting 1

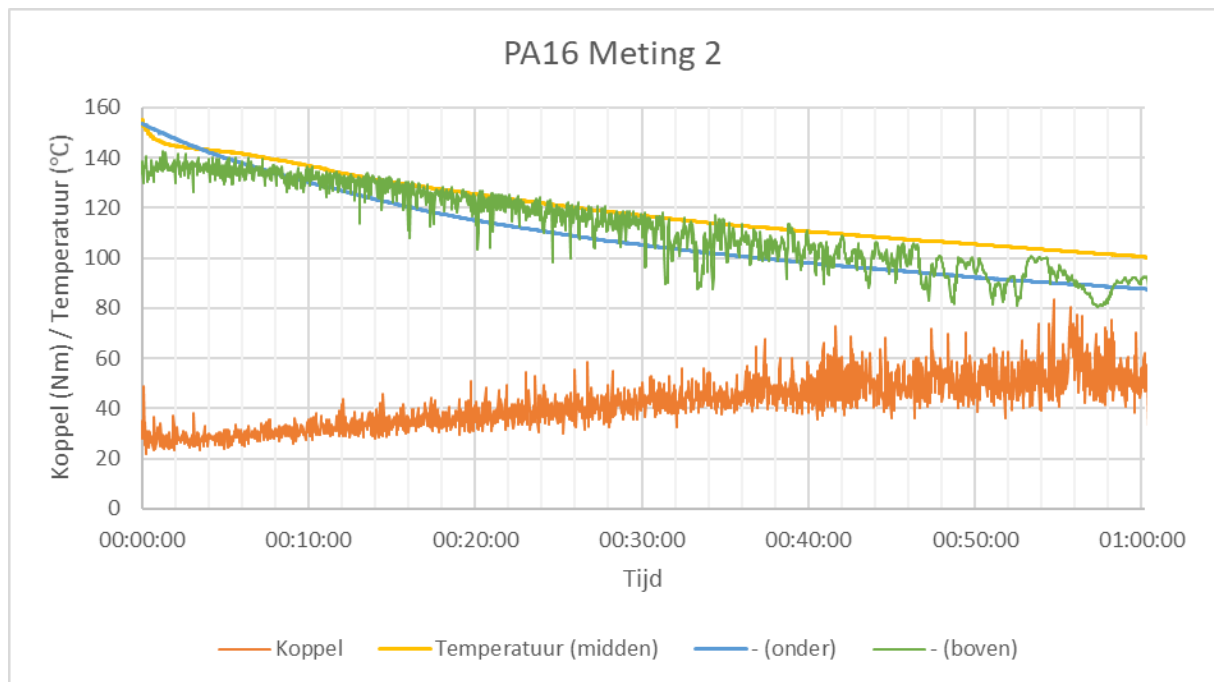
[Voor proef]	146 [°C] in mengbak (proef) [vlak voor de proef begint]
Na 7 minuten	temperatuur nog uniform
14.25 [minuut 21-22 van de proef]	lichte aankoeving, midden $\approx 122^{\circ}\text{C}$, rand $\approx 100^{\circ}\text{C}$

14:46 [minuut 42-43 van de proef]	midden $\approx 110^{\circ}\text{C}$, rand $\approx 90^{\circ}\text{C}$
14:48 [minuut 44-45 van de proef]	veel gekraak, minder groot verschil aankoeking en kern
[14].48 [minuut 42-43 van de proef]	groot deel wordt niet geroerd
[14].57 [minuut 42-43 van de proef]	midden $\approx 105^{\circ}\text{C}$, rand $\approx 75^{\circ}\text{C}$
[Na eind proef]	[Thermostaat:] - onder in de mengkom aan de rand en in de kern: $\approx 90 - 100^{\circ}\text{C}$ - boven in de mengkom in de kern: $\approx 90^{\circ}\text{C}$

Observaties meting 2

[Voor proef]	Mengarm $\approx 160^{\circ}\text{C}$ opgewarmt wat hoger is dan de temperatuur van het mengsel
12:06 □	Heel dunne rand [aankoeking]
12:26 □	Gekraak. Beetje kleving aan de rand, maar niet heel vast
13:42 □	Veel aankoeking aan de rechterzijde van de kom, zwarte handel neemt soms asfalt mee
[Na proef]	Asfaltspecie genomen





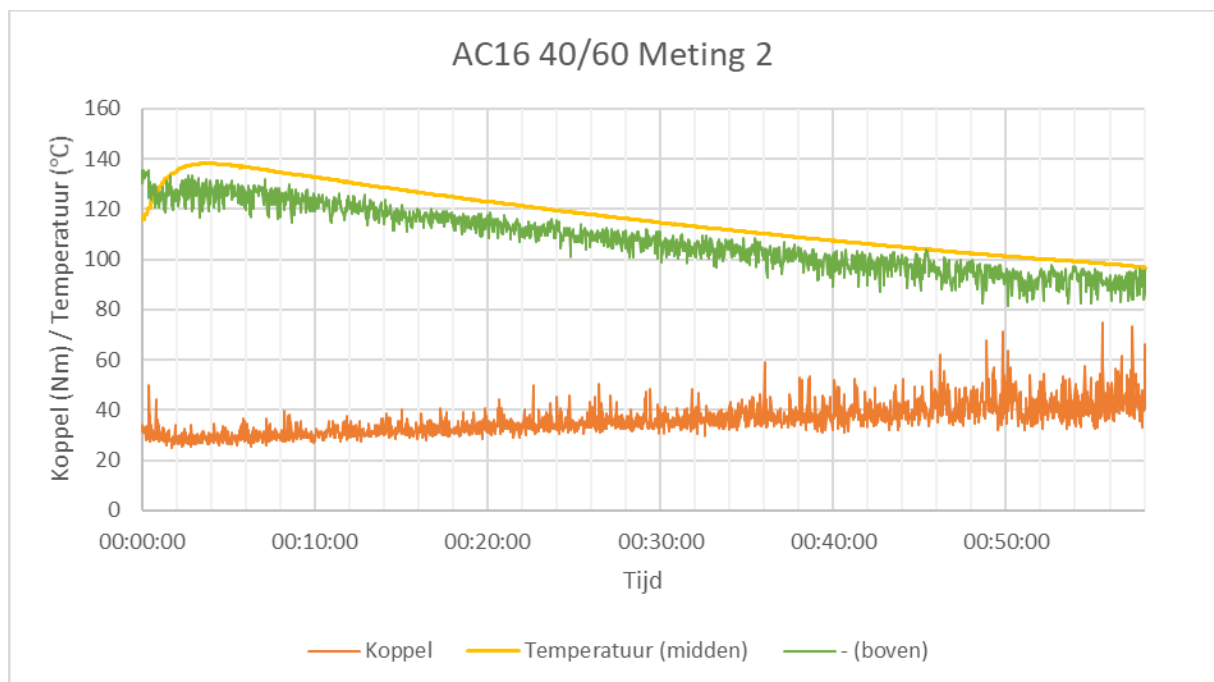
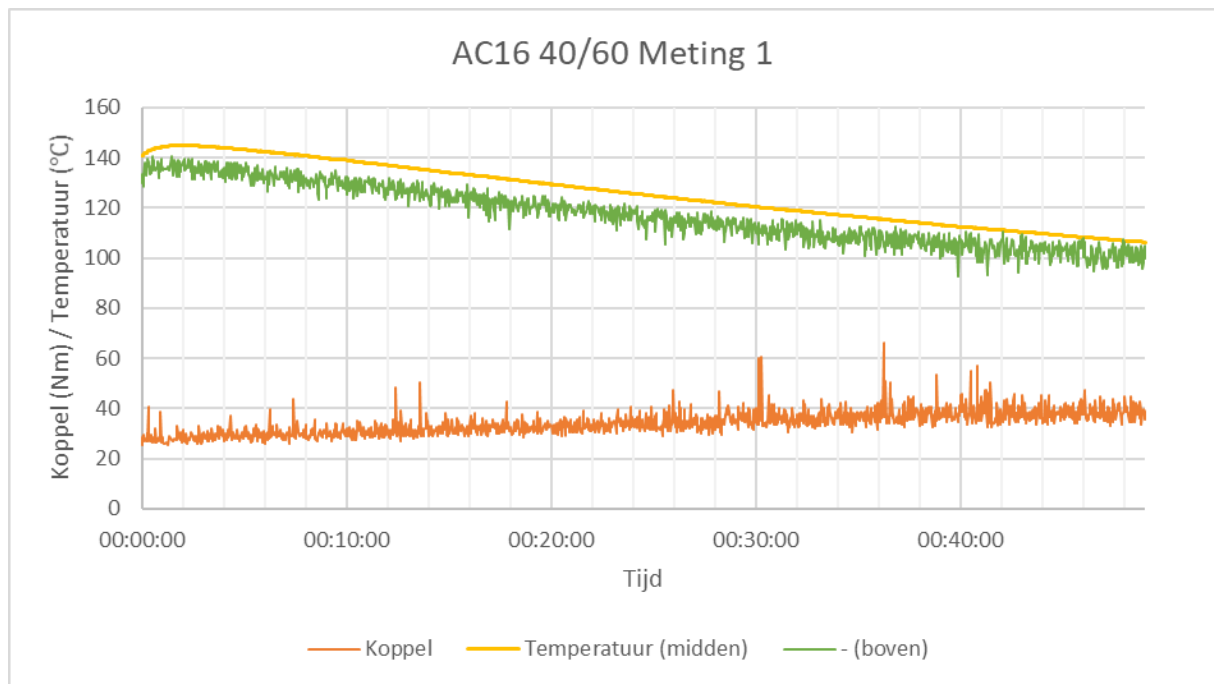
AC16 Bin 40/60 eco 60% PR

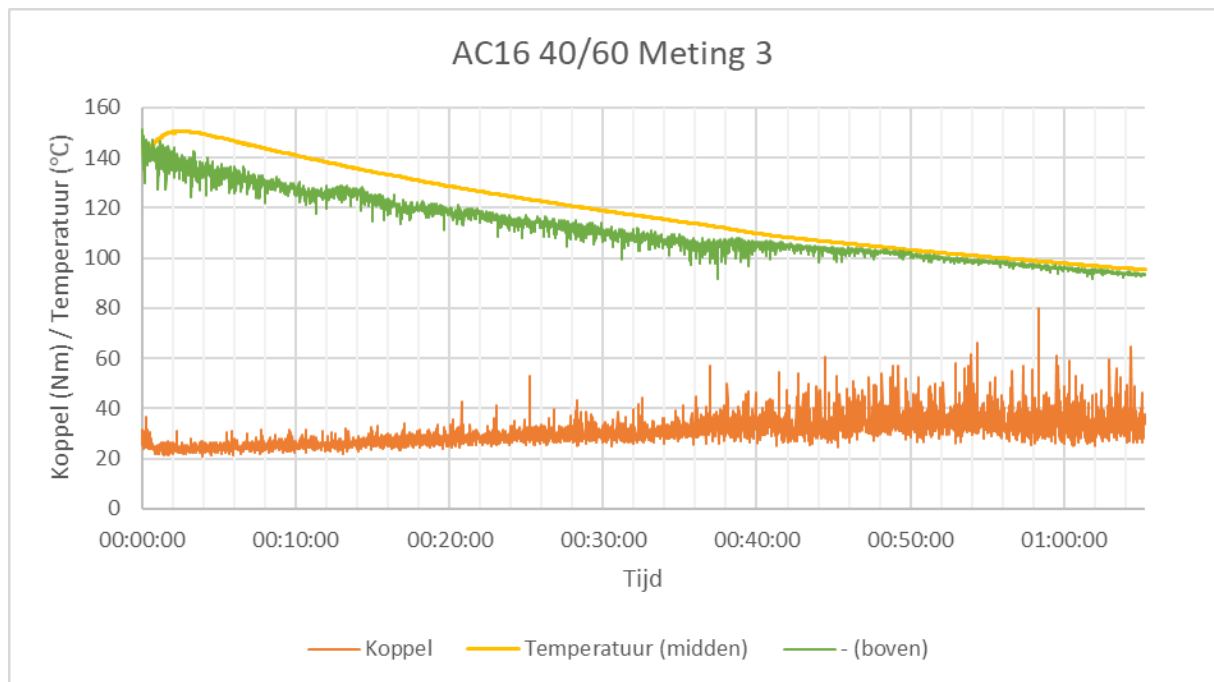
Observaties meting 2

	Temperatuur omgeving lager [door open buitendeur]
13:45 □	Ontmenging: grote stenen midden, kleinere stenen rand
13:49 □	Buitendeur gesloten
□:25	36 – 46 Nm met uitschieters ± 30 Nm

Observaties meting 3

14:55 □	$\approx 154^{\circ}\text{C}$, 18,04 Kg
14:58 □	Buitendeur open (geconstateerd), kort daarna gesloten
15:55 □	Aankoeking aan de zijkant





AC16 Surf SFB 5-50 HS

Observaties meting 1

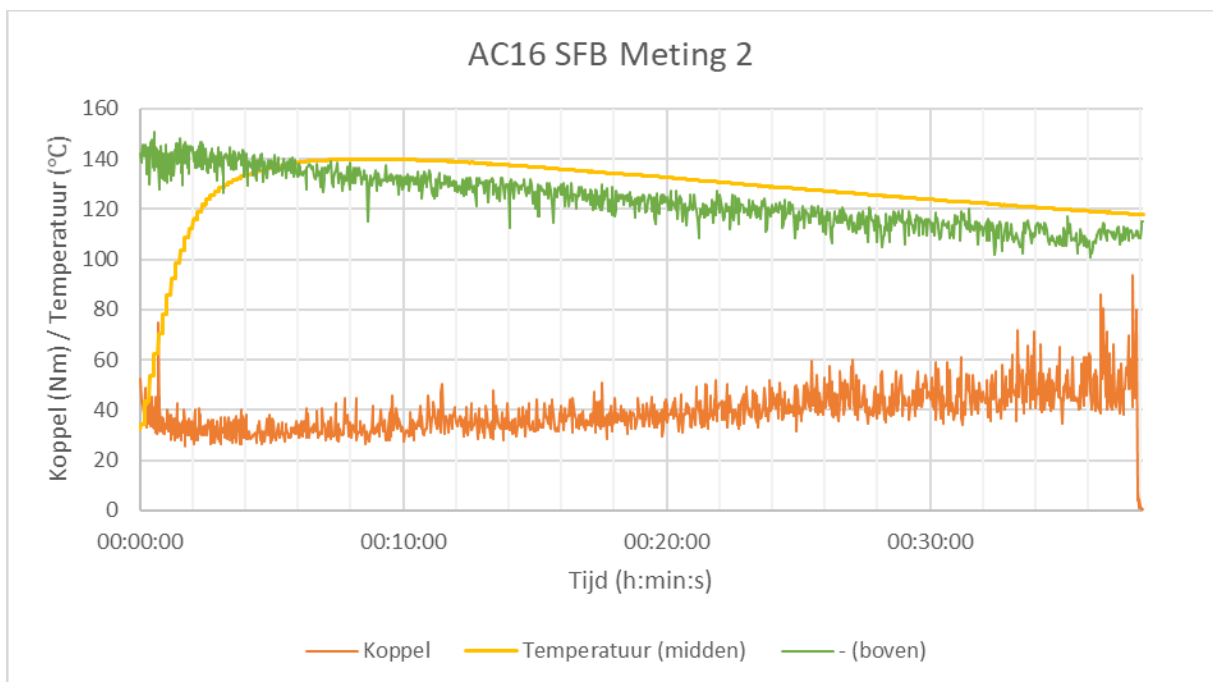
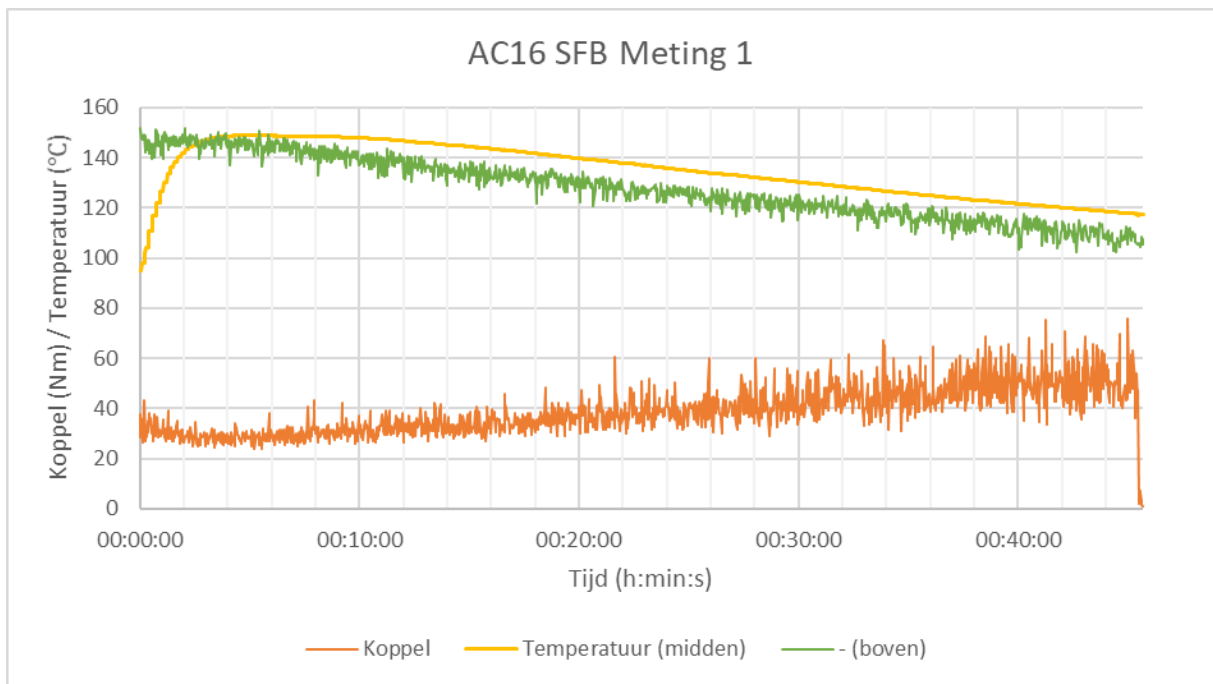
	ARP-menger [gebruikt voor mengen]
	Temperatuur oven: 185°C
	Bakhoogte 19 mm

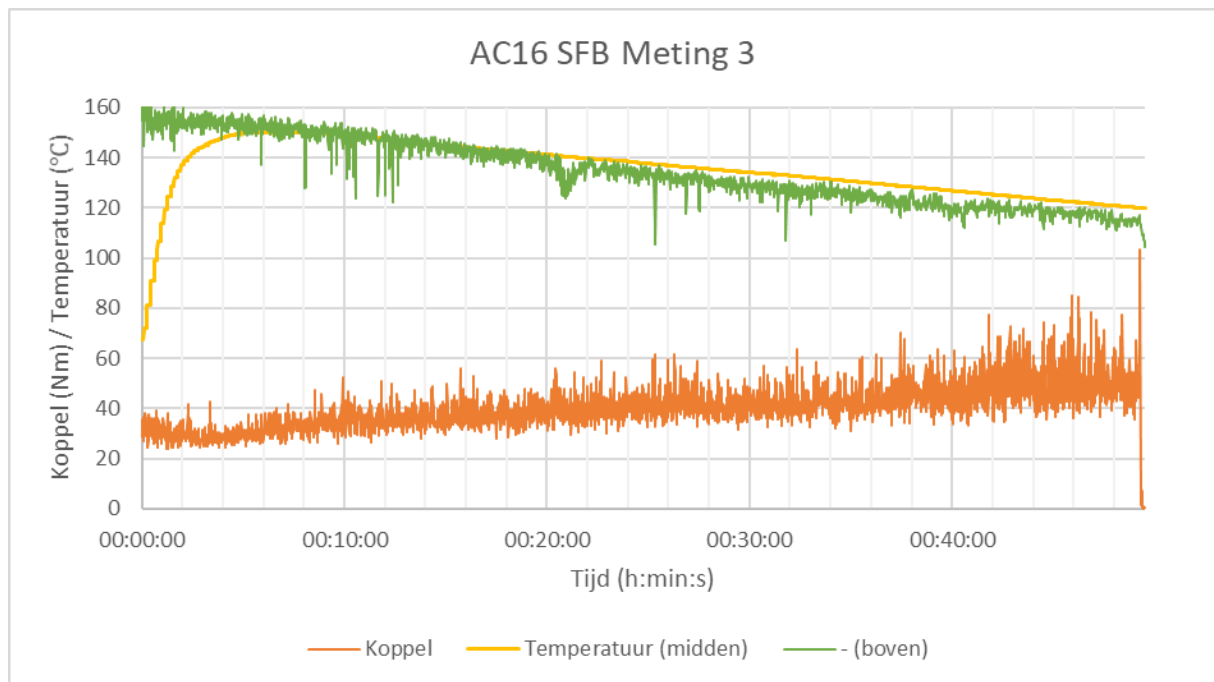
Observaties meting 2

	ARP-menger [gebruikt voor mengen]
	Bakhoogte 19 mm
Rond 13:00 []	Aankoeking [geconstateerd]
	Na de proef zijn 2 (*2) scheppen [extractie] van midden en rand mengkom genomen. Hiermee kan de gradering bepaalt worden

Observaties meting 3

14:56 []	Veel aankoeking, vooral rechterzijde kom
15:05 []	Zeer veel aankoeking
Eind proef	Thermostaat (meetpen):
	- Midden: $\approx 115^{\circ}\text{C}$
	- Rand: $\approx 97^{\circ}\text{C}$





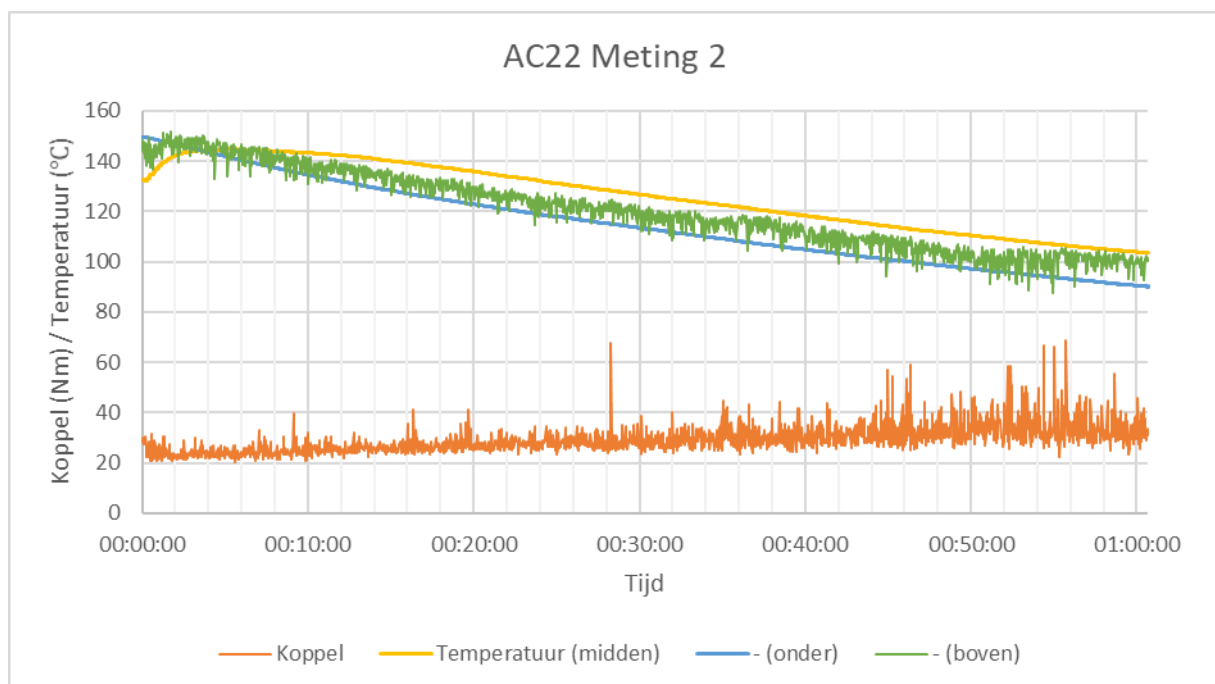
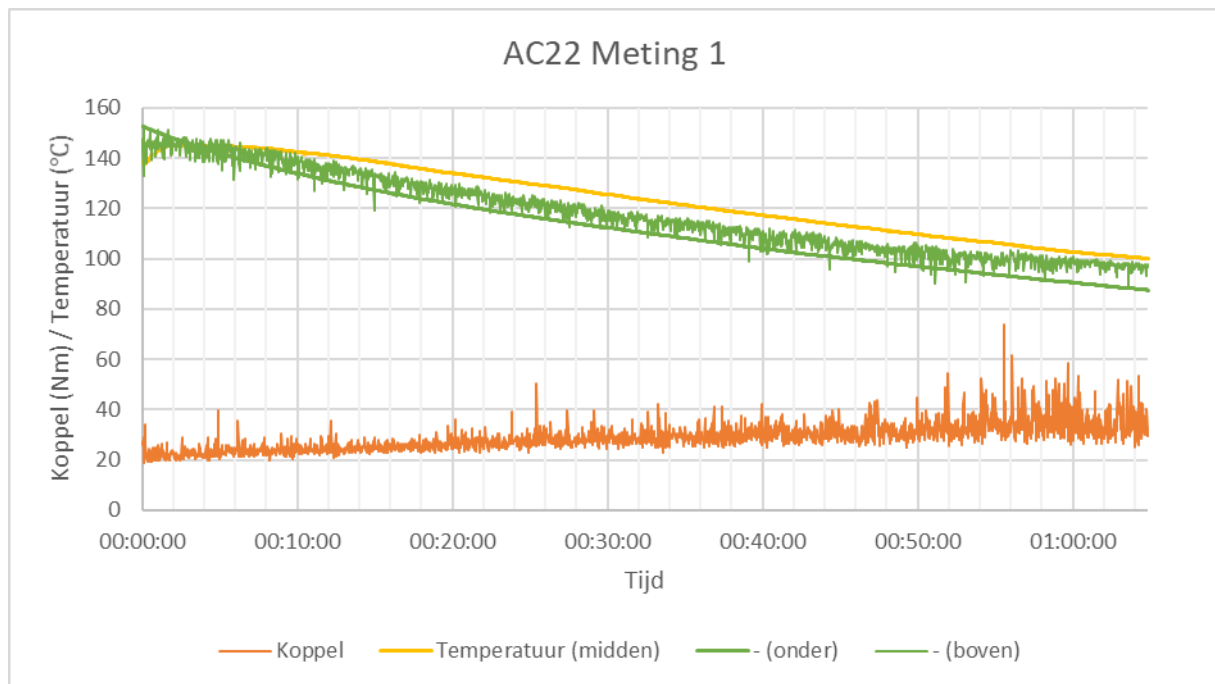
AC 22 base 70/100 eco 60% PR

Observaties meting 1

13:42 □	Weinig bindmiddel lijkt aanwezig
13:43 □	Temperatuurverschil tussen midden en onder: ≈ 8°C [waarbij midden hogere temperatuur heeft]
13:46 □	Koppel lijkt niet toe te nemen
13:50 □	Grote stenen binnen, kleine stenen buiten

Observaties meting 2

[Voor proef]	Mengarm: ≈ 147°C, mengarm is beetje vies
	??? 15 cm a.h.v. restjes
	??? 10,5
15:46 □	Er vindt ontmenging plaats



8.4 Bepaling omslagpunten

Hieronder staan de gevonden omslagpunten. De resultaten bestaan uit de tijdstap en bijbehorende koppel en temperatuur. Ook is de kwaliteit gegeven van de omslagpunten.

<i>Meting</i>	<i>S/E*</i>	<i>Seconde</i>	<i>Koppel</i>	<i>Temperatuur</i>	<i>kwaliteit</i>
PA16	S	382	30,3	138	goed
	E	1606	50,4	107	goed
PA16	S	200	27,3	141	goed
	E	1511	50,2	108	matig
AC16	S	304	28,5	141	goed
	E	1393	37,3	111	goed
AC16	S	256	28,9	136	goed
	E	1807	40,6	99	matig

AC16	S	420	24,0	145	goed
	E	2996	34,8	103	goed
AC16SFB	S	291	28,7	148	goed
	E	1276	46,0	121	matig
AC16SFB	S	435	31,1	139	goed
	E	1217	46,4	119	goed
AC16SFB	S	700	34,7	148	matig
	E	2830	47,4	121	Goed
AC22	S	82	21,3	145	#
	E	1936	33,3	104	goed
AC22	S	346	23,1	143	goed
	E	1603	32,2	112	goed

*S = start toename, E = eind toename

8.5 Veldmetingen

In deze bijlage staan per meting de gemeten dichtheid, aantal walsovergangen, walsen, temperatuur en opmerkingen.

Meting 1

#	Wals	Aantal overgangen	Dichtheid	Temperatuur oppervlak
0	START	0	Onbekend	140
1	DV70	1	1843	115,2
2	DV70	1	1890	108,2
3	DV70	1	1890	93,6
4	DV70i	1	1915	89,1
5	DV70i	1	1925	75,1
6	HD120	1	1990	72,5
7	HD120	1	1973	53,7
Eind			2001	

#	Opmerking
0	Start meting
4	Infraroodcamera viel even om
7	1947 eerste meting
Eind	Boorkern naastgelegen rijstrook

Meting 2.2

#	Tijd	Wals	Aantal overgangen	Dichtheid	Temperatuur			
					Onder	Midden	Boven	Oppervlak
0	00:00:00	START	0	1811	119	110	106	
1	00:07:00	DV70	1	1882	92	97	98	86
2	00:10:00	DV70	1	1916	85	91	91	80
3	00:12:00	DV70	1	1942	82	86	86	76
4	00:16:00	DV70	1	1969	73	76	76	73
5	00:22:00	DV70i	1	1945	65	67	67	66
6	00:25:00	DV70	1	2003	60	61	61	60
7	00:28:00	DV70i	1	2049	58	58	57	56
8	00:37:00	HD120	1	2030	48	49	48	46
9	00:39:00	DV70	1	2059	47	47	47	44
10	00:43:00	HD120	1	2001	44	44	44	40
11	00:49:00	HD120	1	2081	39	37	37	32

<i>Eind</i>	2022
-------------	------

#	Opmerking
0	Start meting
5	1
Eind	Boorkern naastgelegen rijstrook

Meting 3.1

#	Tijd	Wals type	Aantal overgang	Dichtheid	1 (boven)	1 (midden)	1 (onder)
0	00:00:00	START	0	2027	154,1	147,2	135,6
1	00:02:26	DV+70i	1	2102	151	142,3	130,9
2	00:04:19	DV+70i	1	2182	147,9	139,4	127,4
3	00:10:29	HW90	1	2226	136,3	129,3	119,8
4	00:22:34	HW90	1	2292	114,2	111,3	106,5
5	00:23:44	HW90	1	2328	112,4	109,7	105,2
6	00:30:49	HW90	1	2342	102,6	101	98,3
7	00:31:40	HW90	1	2295	101,5	100,1	97,5
8	00:39:34	HW90	1	2388	92,3	92	90,7
9	00:40:17	HW90	1	2355	91,7	91,3	90,1
10	00:40:58	HW90	1	2343	91	90,7	89,5
11	00:42:14	HW90	1	2367	89,7	89,6	88,5
12	00:48:11	HW90	1	2380	84,1	84,5	83,9
13	00:49:30	HW90	1	2388	83	83,4	83
14	01:03:17	HW90	1	2399	73,8	74,6	74,8
15	01:04:08	HW90	1	2403	73,3	74,1	

#	2 (boven)	2 (onder)	Oppervlak
0	159,9	145,6	50,35
1	160,1	138,9	148,7
2	159,5	138,1	138,4
3	146,4	128,2	129
4	121,3	113	106,2
5	119,2	111,6	13,6
6	108	103,8	94,5
7	106,8	102,9	12,1
8	96,9	95,5	82,5
9	96,2	94,7	81,5
10	95,4	94,2	81,4
11	94,1	93,1	78,3
12	88,5	88,3	76,8
13	87,2	87,3	72,7
14	77,3	78,3	66,4
15	76,8	77,8	18,1

#	Opmerking
5	De wals leek maar voor de helft over de meetzone te gaan
7	De wals leek maar voor de helft over de meetzone te gaan
8	De wals leek maar voor de helft over de meetzone te gaan

Meting 3.3

#	Tijd	Wals type	Aantal overgang	Dichtheid	1 (onder)	1 (midden)	1 (boven)
0	00:00:00	START	0	2137	120,6	125,1	124,5
1	00:01:58	GRW280	2	2160		114,8	
2	00:04:01	GRW280	2	2201		117,6	
3	00:06:31	GRW280	2	2236		113,4	
4	00:07:46	GRW280	2	2250		110,5	
5	00:08:36	GRW280	2	2255		108,8	
6	00:09:29	DV70	1	2317		106,7	
7	00:10:26	GRW280	2	2329		104,4	
8	00:12:47	DV70	1	2345		98,6	
9	00:13:57	DV70	1	2384		95,2	
10	00:18:05	DV70	1	2392		86,4	
11	00:19:24	DV70	1	2384		83,7	
12	00:25:29	HW90	1	2360		73,6	
13	00:34:11	HW90	1	2374		62,1	
14	00:37:01	HW90	1	2370		59,1	
15	00:38:13	HW90	1	2375		57,8	
16	00:42:55	HW90	1	Onbekend		54,2	

#	2 (onder)	2 (midden)	2 (boven)	Oppervlakte
0	132,6	137,1	134,6	105,95
1	123,8	127	124,8	121,1
2	119	120,3	115,5	118,7
3	110,4	111,1	105,6	113,2
4	105,8	106,4	101,2	108,9
5	103,4	103,9	98,7	105,5
6	100,8	101,3	96,3	102,3
7	98,2	98,7	94	100
8	93	93,4	89,3	94,2
9	90,3	90,6	86,8	90,8
10	82,8	83	80,2	81,8
11	80,6	80,8	78,3	79,5
12	72,6	72,7	71,2	68,1
13				57,2
14				54,8
15				53,8
16				50,5

#	Opmerking
0	Asfalt is met een schep geplaatst

Meting 3.4

#	Tijd	Wals type	Aantal overgang	Dichtheid	1 (onder)	1 (midden)	1 (boven)
0	00:00:00	START	0	1631	132,9	94,7	126,7
1	00:04:40	DV+70i	1	1756	121,8	116,4	124,4

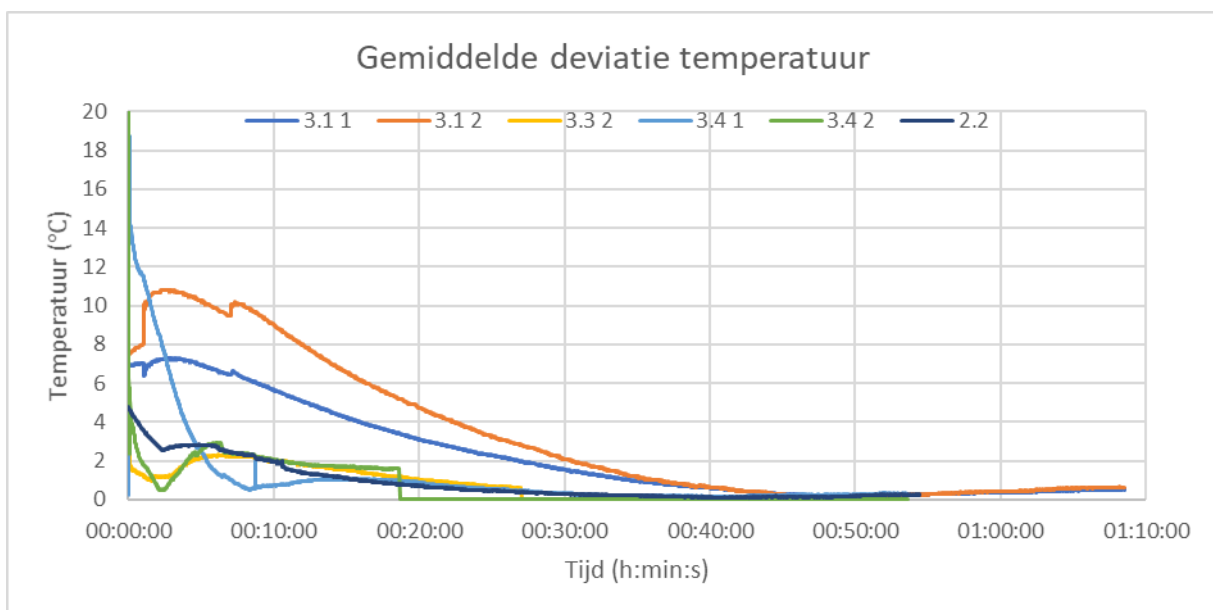
2	00:06:40	DV+70i	1	1849	117,8	117,2	120,3
3	00:08:43	DV+70i	1	1821	113,8	114,9	115,3
4	00:20:15	HD120	1	1869	90,4	92,6	90,7
5	00:26:43	HD120	1	1934	80,4	81,4	80,2
6	00:33:47	HD120	1	1904	71,9	72,1	71,5
7	00:38:01	HD120	1	1945	67,4	67,3	67
8	00:41:44	HD120	1	1966	64	63,8	63,6
9	00:51:57	HD120	1	1958	56	55,3	55,4

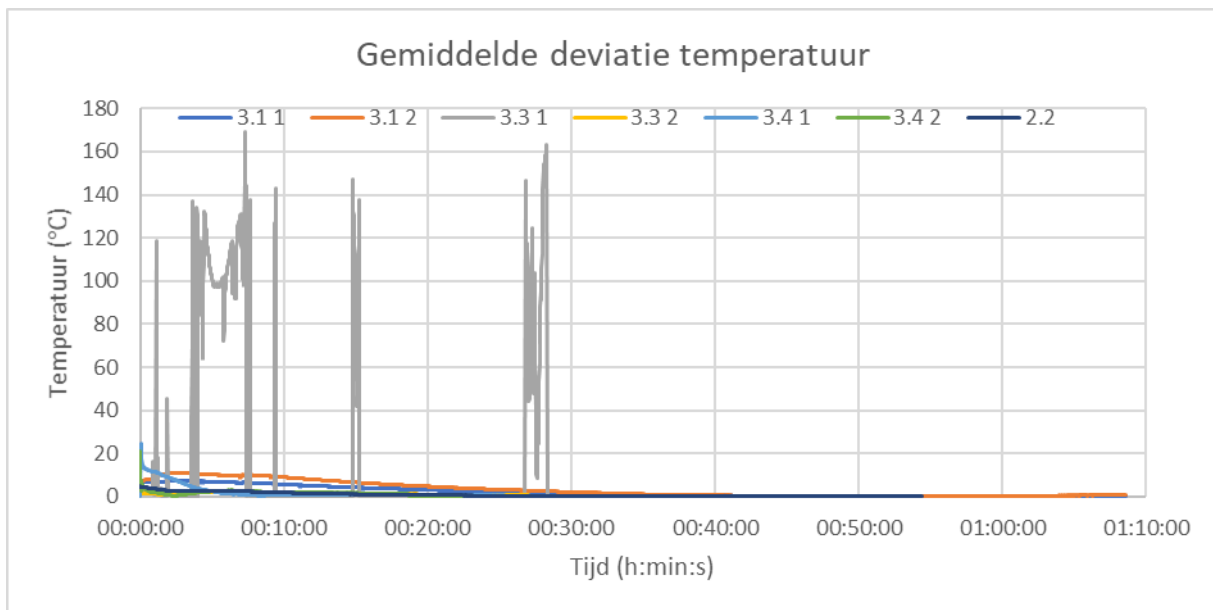
#	2 (onder)	2 (midden)	2 (boven)	Oppervlakte
0	134,8	124,5	128,4	77,75
1	119,9	126,3	122,1	111,4
2	117	123,1	118	107,2
3	113,3	118,6	113,8	105,3
4				81,9
5				72,7
6				63,2
7				59,5
8				55,6
9				47,3

#	Opmerking
0	DT4 leek te kantelen (lichtjes)
6	1928

8.6 Temperatuurvariabiliteit

In de eerste grafiek staat de temperatuurvariabiliteit van elke meting met uitzondering van 3.3 1. In de tweede grafiek staat ook de temperatuurvariabiliteit van 3.3 1. De hoge spreiding komt door een defecte thermokoppel.





8.7 Afkoeling

In de volgende grafieken is de temperatuur van de verschillende thermokoppels uitgezet tegen de voorspelde afkoeling. De data van de infraroodcamera vertoont veel spreiding doordat de nucleaire dichtheidsmeter in de weg stond voor een meting.

