

21 FEBRUARI 2020



VALIDEREN VAN VOORSPELLINGSMODELLEN VOOR ASFALTAFKOELING

BSC-OPDRACHT CIVIELE TECHNIEK

PETER BAARS

ROELOFS & ASPARI - UNIVERSITY OF TWENTE

VALIDEREN VAN VOORSPELLINGSMODELLEN VOOR ASFALTAFKOELING

Een onderzoek naar de nauwkeurigheid van twee verschillende voorspellingsmodellen voor de afkoeling van asfalt tijdens koude en variërende weersomstandigheden

Auteur:	P. C. M. Baars
Studentnummer:	s1835610
E-mailadres:	p.c.m.baars@student.utwente.nl
Soort opdracht:	Bachelor eindopdracht
Opleiding:	BSc Civil Engineering
Onderwijsinstelling:	University of Twente
Begeleidend docent:	Dr. S. Miller
Externe organisatie:	Roelofs
Externe begeleider:	Ing. H. Siedenburg
Afstudeerperiode:	november 2019 tot en met februari 2020
Datum en locatie uitgave:	Huissen, 21 februari 2020

Voorwoord

Voor u ligt het verslag van mijn bachelor onderzoek naar voorspellingsmodellen voor asfaltafkoeling. De opdrachtgever van dit onderzoek is ASPARi en het onderzoek zelf is uitgevoerd bij Roelofs, zowel op de asfalteerlocaties als op kantoor in Den Ham. Met dit onderzoek hoop ik een bijdrage te kunnen leveren aan verbetering en innovatie binnen de asfaltindustrie en hoop ik een aanzet te kunnen geven tot verdere onderzoeken naar dit soort voorspellingsmodellen.

Ik zou meteen van deze gelegenheid gebruik willen maken om een aantal mensen te bedanken. Voordat ik aan deze opdracht begon, heb ik erg veel moeite gehad om een opdracht te vinden. Toen ik in contact kwam met een van mijn docenten en latere begeleider Seirgei Miller, kreeg ik onmiddellijk het vertrouwen en de kansen om een opdracht namens ASPARi uit te voeren. Bij dezen wil ik daarom als eerste Seirgei heel erg bedanken voor de mogelijkheden die u mij vanaf het begin heeft geboden. Uw passie en enthousiasme voor uw vakgebied heeft mij absoluut ervan overtuigd deze opdracht uit te voeren. Ook ben ik u dankbaar voor uw hulp en nuttige feedback, waarmee ik gedurende het afstuderen erg ben geholpen voor het schrijven van een wetenschappelijk verslag, wat nog niet zo makkelijk is als het lijkt.

Ook wil ik Denis Makarov heel erg bedanken voor zijn hulp, feedback en inzet tijdens dit onderzoek. Denis, your direct approach of solving problems was sometimes a bit too direct for me, but it always really helped me during this research. I would also like to thank you for providing me all the equipment I needed for the measurements and the help with these measurements and getting all the data, which would not be possible without you.

Daarnaast wil ik mijn externe begeleider Hans Siedenburg erg bedanken. Ook u heeft mij vanaf het begin het vertrouwen en de mogelijkheden gegeven om een tijdje te kunnen werken bij een civiel ingenieursbureau als Roelofs, waar ik veel van heb geleerd. Ook ben ik u dankbaar voor uw nuttige feedback gedurende het onderzoek en uw humor die voor een goede sfeer zorgt op de werkvloer.

Verder wil ik nog alle medewerkers van Roelofs waar ik de afgelopen tijd mee heb gewerkt bedanken. Mijn tijdelijke collega's op kantoor hebben mij vanaf het eerste moment dat ik binnenstapte heel open en gastvrij ontvangen, wat ik erg waardeer. Daarnaast heeft de asfaltploeg mij altijd het vertrouwen en de ruimte gegeven om de metingen uit te kunnen voeren. Ondanks dat ik ze niet altijd even goed kon verstaan, heb ik heel veel geleerd over de asfaltindustrie en heel veel praktijkervaring opgedaan gedurende de periode dat ik meeliep met de asfaltploeg.

Ik hoop dat ik u als lezer met dit onderzoek veel bij kan leren over dit onderwerp, zoals ik veel heb geleerd tijdens de uitvoering van dit onderzoek en het schrijven van dit verslag. Veel leesplezier!

Huissen, 21 februari 2020

Peter Baars

Samenvatting (Nederlands)

(English summary on next page)

In dit onderzoek worden voorspellingsmodellen voor asfaltafkoeling geanalyseerd en gevalideerd. Voor de kwaliteit van het asfalt is het namelijk belangrijk dat het verdichten binnen een zo optimaal mogelijk temperatuurinterval plaatsvindt. Daarom is het wenselijk om van tevoren te weten hoe snel het asfalt afkoelt. Dit onderzoek zou moeten bijdragen aan verbetering en innovatie binnen de asfaltindustrie en eventueel aanzetten tot vervolgonderzoek naar dit soort voorspellingsmodellen.

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van twee verschillende voorspellingsmodellen die de asfalttemperatuur kunnen voorspellen tijdens het asfalteren en verdichten: PaveCool en ASPARiCool. PaveCool genereert voorspellingen op basis van een thermodynamisch model, waarbij warmte-eigenschappen van materialen een grote rol spelen. ASPARiCool maakt gebruik van een Machine Learning-algoritme, waarmee voorspellingen kunnen worden gegenereerd op basis van reële data. Het grootste probleem van beide modellen is echter een gebrek aan reële data. Zo is voor ASPARiCool bijvoorbeeld nog te weinig data beschikbaar om nauwkeurige voorspellen te kunnen genereren.

Namens ASPARi en Roelofs, een van de partnerbedrijven binnen het ASPARi-netwerk, worden in dit onderzoek deze beide modellen geanalyseerd en gevalideerd. Dit gebeurt aan de hand van temperatuurgegevens die in de periode november-december 2019 zijn verkregen op asfalterprojecten van Roelofs. Het doel van dit onderzoek is dan ook om de voorspellingsmodellen te valideren met data die verkregen is onder relatief koude, variërende weersomstandigheden, zoals in de periode november-december het geval is.

De hoofdvraag die hierbij is gesteld is als volgt:

Wat is de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van theoretische en praktische voorspellingsmodellen onder variërende Nederlandse weersomstandigheden?

Voor het beantwoorden van de hoofdvraag is eerst literatuuronderzoek gedaan naar de belangrijkste factoren van asfaltafkoeling en de belangrijkste verschillen tussen PaveCool en ASPARiCool. Vervolgens zijn temperatuurmetingen uitgevoerd en zijn met beide modellen voorspellingen gegenereerd. Met de data van de metingen en de voorspellingen is een vergelijkingsanalyse uitgevoerd met behulp van statistische vergelijkingswaarden, waarmee de overeenkomsten qua verloop en het absolute temperatuurverschil tussen de gemeten en voorspelde curves zijn bepaald. Daarnaast is alle geanalyseerde data gecontroleerd op validiteit, om na te gaan in hoeverre de verbanden tussen de verschillende afkoelingsfactoren en de afkoelsnelheden van de gemeten en voorspelde curves overeenkomen met de literatuur en historische data uit de ASPARi-database.

De uiteindelijke conclusie van het onderzoek is dat op basis van het temperatuurverschil de nauwkeurigheid van beide modellen matig is, aangezien in de meeste gevallen een verschil van tussen de 10 en 20 °C te zien was en dit niet wenselijk is wanneer gebruikers een optimaal verdichtingsinterval willen bepalen.

Belangrijke aanbevelingen op basis van dit onderzoek zijn het vergroten van de hoeveelheid beschikbare data voor gebruik van ASPARiCool, meer focussen op het voorspellen van kerntemperatuur van asfalt en het voortzetten van de metingen door Roelofs voor het creëren van een eigen database en het uitbreiden van de ASPARi-database, met betrekking tot het verbeteren van de nauwkeurigheid van ASPARiCool.

De belangrijkste boodschap van dit onderzoek is dat met name ASPARiCool wel veel potentie heeft om nauwkeurige voorspellingen te kunnen doen, maar dat de voorspellingen in de huidige staat nog niet nauwkeurig genoeg zijn en dat er nog veel meer reële data nodig is om de nauwkeurigheid te vergroten.

Summary (English)

In this research, asphalt cooling prediction models are analysed and validated. For the asphalt quality, it is important that the compaction is done within an optimal temperature window. Therefore, it is desirable to know what the cooling rate of asphalt is. This research should contribute to improvement and innovation within the asphalt industry and should eventually encourage to further research to these prediction models.

In this research, two different prediction models that can predict asphalt temperature during paving and compacting will be used: PaveCool and ASPARiCool. PaveCool generates predictions on the basis of a thermodynamic model. Therefore, thermal properties of the materials are considered. ASPARiCool uses a Machine Learning algorithm, which makes it possible to generate predictions on the basis of real temperature data. The biggest problem of both models is the lack of real data. For example, there is not enough data to generate accurate predictions with ASPARiCool.

On behalf of ASPARi and Roelofs, one of the partner companies within the ASPARi network, the theoretical model PaveCool and the practical model ASPARiCool are analysed and validated. This will be done using asphalt temperature data that is retrieved from asphalt paving projects, executed by Roelofs, in the period of November and December 2019. The aim of this research is therefore to validate the prediction models with data that is collected under relatively cold and varying weather conditions, which is normal in the period of November and December.

The main research question that is answered with this research is:

What is the reliability and accuracy of the theoretical and practical prediction models under varying Dutch weather conditions?

First of all, in order to answer the main research question, a literature research to the main factors of asphalt cooling and to the main differences between PaveCool and ASPARiCool is done. Then, asphalt temperature measurements are executed and predictions are generated with both models. With the results of the measurements and the predictions, a comparison analysis is conducted, using statistical comparison values that describe to what extent the course of the predicted and measured graphs match each other and describe the average temperature differences between both graphs. In addition, all data is assessed on validity to check to what extent the relations between the cooling factors and the cooling rates of the measured and predicted curves match with literature and historical data from the ASPARi database.

The overall conclusion is that considering the temperature difference, the accuracy of both models is poor, since in most cases the temperature difference is between 10 and 20 °C and this is not desirable for users who want to determine an optimal compaction window.

Important recommendations are expanding the amount of available data for the usage of ASPARiCool, executing more predictions on core temperature and continuation of the measurements by Roelofs in order to create an own database and to expand the ASPARi database, regarding the improvement of the accuracy of the ASPARiCool predictions.

The main message of this research is that especially ASPARiCool shows a lot of potential to generate accurate predictions. However, in the current status of the model the predictions are not accurate enough and there is much more real data needed to achieve a higher accuracy.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting (Nederlands).....	3
Summary (English)	4
Lijst van tabellen	9
Lijst van figuren.....	10
1. Introductie.....	11
1.1. Probleemstelling	11
1.2. Onderzoeksdoel	12
1.3. Onderzoekskader	12
1.4. Opdrachtgevers.....	13
1.5. Onderzoeksvragen	14
1.6. Onderzoeksmodel	15
1.7. Leeswijzer	16
2. Theoretisch kader.....	17
2.1. Factoren afkoeling asfalt	17
2.1.1. Asfaltmengsels.....	17
2.1.2. Dikte van de asfaltlaag	18
2.1.3. Onderliggende laag.....	18
2.1.4. Weersomstandigheden	19
2.2. PaveCool	22
2.2.1. Input parameters.....	23
2.2.2. Aannames	27
2.2.3. Verdichting.....	27
2.2.4. Discussie PaveCool	28
2.3. ASPARiCool	28
2.3.1. Input parameters.....	29
2.3.2. Machine Learning.....	30
2.3.3. Discussie ASPARiCool	31
2.4. Conclusie.....	32
3. Methodiek temperatuurmetingen	34
3.1. Process Quality improvement (PQi)	34
3.2. Materialen	35
3.3. Uitvoering metingen	37
3.4. Meetverslagen.....	39

3.5.	Samenvatting.....	39
4.	Resultaten temperatuurmetingen	40
4.1.	Analyse kern- en oppervlaktetemperatuur	40
4.2.	Analyse meetresultaten en factoren (validiteit)	42
4.2.1.	Laagdikte	42
4.2.2.	Type asfaltmengsel	44
4.2.3.	Weersomstandigheden	45
4.3.	Conclusie	48
5.	Verantwoording voorspellingen.....	50
5.1.	Hoeveelheid voorspellingen	50
5.2.	Input.....	50
5.2.1.	Verantwoording input PaveCool.....	50
5.2.2.	Verantwoording input ASPARiCool	51
5.3.	Datasets ASPARiCool.....	52
5.4.	Voorspellings- en vergelijkingsverslagen.....	53
5.5.	Overfitting.....	53
5.6.	Samenvatting en conclusie.....	55
6.	Vergelijkingsanalyse nauwkeurigheid meetresultaten en voorspellingen	56
6.1.	Gemeten data in grafieken	56
6.2.	Correlatiecoëfficiënt en RMSE.....	56
6.2.1.	Pearson's correlatiecoëfficiënt	57
6.2.2.	Root Mean Square Error (RMSE)	57
6.2.3.	Output.....	59
6.3.	Vergelijking datasets.....	59
6.4.	Analyse voorspellingen en factoren	60
6.4.1.	Laagdikte	60
6.4.2.	Type asfaltmengsel	61
6.4.3.	Omgevingstemperatuur	61
6.4.4.	Regen.....	63
6.5.	Nauwkeurigheid per voorspelling	65
6.6.	Samenvatting en conclusie.....	66
7.	Validiteit voorspellingen	67
7.1.	Relatieafkoelsnelheid en laagdikte	67
7.2.	Relatie afkoelsnelheid en type asfaltmengsel	68
7.3.	Relatie afkoelsnelheid en omgevingstemperatuur.....	69

7.4.	Relatie afkoelsnelheid en regen.....	69
7.5.	Conclusie.....	70
8.	Discussie, conclusie en aanbevelingen	71
8.1.	Discussie	71
8.2.	Beantwoording deelvragen	73
8.3.	Conclusie (beantwoording hoofdvraag).....	77
8.4.	Overige bevindingen onderzoek.....	79
8.5.	Aanbevelingen	80
8.5.1.	Algemene aanbevelingen	80
8.5.2.	Aanbevelingen ASPARiCool	81
8.5.3.	Aanbevelingen Roelofs.....	83
8.5.4.	Aanbevelingen voor de praktijk	83
	Bibliografie.....	84
	Bijlage A: Tabellen warmte-eigenschappen PaveCool	86
	Bijlage B: Meetverslagen	87
B.1.	Introductie.....	87
B.2.	Aannames.....	90
	Meetverslag 1	91
	Meetverslag 2	97
	Meetverslag 3	102
	Meetverslag 4	107
	Meetverslag 5	112
	Meetverslag 6-1 (Onderlaag)	118
	Meetverslag 6-2 (Deklaag).....	123
	Meetverslag 7-1 (Onderlaag).....	130
	Meetverslag 7-2 (Tussenlaag)	134
	Meetverslag 7-3 (Deklaag)	138
	Meetverslag 8-1 (Onderlaag 1).....	143
	Meetverslag 8-2 (Onderlaag 2)	147
	Meetverslag 8-3 (Tussenlaag)	151
	Meetverslag 9-1 (Onderlaag 1).....	156
	Meetverslag 9-2 (Deklaag).....	158
	Bijlage C: Voorspellings- en vergelijkingsverslagen	163
C.1.	Introductie.....	163
C.2.	Aannames en opmerkingen	163

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 1.....	164
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 2	167
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 3.....	170
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 5	173
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 6-1	176
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 6-2	179
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 7-1.....	182
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 7-2	185
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 7-3.....	188
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 8-1	191
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 8-3	194
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 9-1	197
Voorspellings- en vergelijkingsverslag 9-2	200
Bijlage D: Vergelijkingswaarden en nauwkeurigheid	203
D.1. Correlatiecoëfficiënten en RMSE-waarden	203
D.2. Nauwkeurigheid per voorspelling	204
Bijlage E: Voorbeelden en toelichtingen berekeningen.....	205

Lijst van tabellen

Tabel 1: Verbanden tussen factoren en afkoeling asfalt	32
Tabel 2: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van kern- en oppervlaktetemperatuur	41
Tabel 3: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van kern- en oppervlaktetemperatuur (meting 6-2) ..	42
Tabel 4: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van metingen 6-1C (5 cm laag) en 6-1D (8 cm laag) ..	43
Tabel 5: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van verschillende dunne en dikke asfaltlagen	44
Tabel 6: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van een AC-laag en een SMA-laag	45
Tabel 7: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van metingen bij relatief koude en warme weersomstandigheden	46
Tabel 8: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van metingen bij droge en natte weersomstandigheden	48
Tabel 9: Vergelijking relaties afkoeling asfalt en factoren	49
Tabel 10: Verantwoording input PaveCool	50
Tabel 11: Verantwoording input ASPARiCool	51
Tabel 12: Gegevens dataset 1	52
Tabel 13: Gegevens dataset 2	52
Tabel 14: Omslagpunten temperatuur door overfitting per meting	54
Tabel 15: Informatie datasets gebruikt voor de ASPARiCool-voorspellingen	55
Tabel 16: Verschillende categorieën van nauwkeurigheid op basis van correlatiecoëfficiënt (Tilburg University, sd)	57
Tabel 17: Verschillende categorieën van nauwkeurigheid op basis van RMSE	58
Tabel 18: Gemiddelde correlatiecoëfficiënt en RMSE per voorspelde afkoelcurve	59
Tabel 19: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per voorspelling voor iedere laagdikte	60
Tabel 20: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per type voorspelling voor de asfaltmengsels AC en SMA	61
Tabel 21: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per type voorspelling voor drie categorieën omgevingstemperatuur	62
Tabel 22: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per type voorspelling bij droge en natte weersomstandigheden	63
Tabel 23: Gemiddelde hellingen voorspellingen en empirische data	64
Tabel 24: Gemiddelde nauwkeurigheid voorspellingen en aantal per categorie nauwkeurigheid	65
Tabel 25: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor de asfaltmengsels AC en SMA	68
Tabel 26: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor droge en natte weersomstandigheden ..	69
Tabel 27: Vergelijking relaties afkoelsnelheid en factoren	70
Tabel 28: Verschillen PaveCool en ASPARiCool	74
Tabel 29: Vergelijking relaties afkoelsnelheden en factoren	77
Tabel 30: Gemiddelde nauwkeurigheid voorspellingen en aantal per categorie nauwkeurigheid	78
Tabel 31: Standaardwaarden van de warmte-eigenschappen van alle materialen die PaveCool in beschouwing neemt (bron: PaveCool Help)	86
Tabel 32: Warmtegeleiding voor verschillende typen onderlagen (Chadborn, 1998)	86
Tabel 33: Standaardwaarden vochtgehalte per materiaal (bron: PaveCool Help)	86
Tabel 34: Correlatiecoëfficiënten per voorspelde meting	203
Tabel 35: RMSE-waarden per voorspelde meting	203
Tabel 36: Nauwkeurigheid verloop per voorspelling	204
Tabel 37: Nauwkeurigheid temperatuurverschil per voorspelling	204

Lijst van figuren

Figuur 1: Onderzoeksmodel.....	15
Figuur 2: Verband tussen laagdikte en verdichtingstijd (Wise & Lorio, 2004)	18
Figuur 3: Afkoeling asfalt van 160 naar 80 °C bij verschillende hoeveelheden regen (Hashim et al. (2018))	20
Figuur 4: Invloed van windsnelheid op verdichtingstijd (Wise & Lorio, 2004)	21
Figuur 5: Invloeden van omgeving op warmteoverdracht bij HMA asfaltlaag (Wang, Zhu & Wong, 2014)	21
Figuur 6: Relatie tussen afkoelsnelheid en warmtegeleidingscoëfficiënt (Chadbourn, 1998)	25
Figuur 7: Relatie tussen afkoelsnelheid en thermische diffusie (Chadbourn, 1998).....	26
Figuur 8: Input format voor nieuw voorspellingsmodel (Ong-A-Fat, Miller & Makarov, 2019)	30
Figuur 9: Bestaande en voorspelde afkoelingscurve in ASPARiCool (Ong-A-Fat, Miller & Makarov, 2019)	31
Figuur 10: PQi-cyclus (Miller, 2010).....	34
Figuur 11: Thermokoppel (type K).....	35
Figuur 12: Datalogger	35
Figuur 13: Infraroodcamera.....	36
Figuur 14: Handmatige infraroodscanner	36
Figuur 15: Weerstation en bijbehorende console	36
Figuur 16: Opstelling meetapparatuur vóór (links) en na (rechts) aanbrengen asfalt.....	38
Figuur 17: Enkele voorbeelden van grafieken die elkaar na verloop van tijd naderen.....	40
Figuur 18: Voorbeelden van lagere oppervlaktetemperaturen t.o.v. kerntemperaturen	41
Figuur 19: Meetpunten C en D uit meetverslag 6-1	43
Figuur 20: Relatie afkoelsnelheid en laagdikte (historische data) (toelichting: zie Bijlage E)	44
Figuur 21: Relatie afkoelsnelheid en omgevingstemperatuur (historische data) (toelichting: zie Bijlage E)	46
Figuur 22: Verschillen in temperatuurverloop tussen droge (links) en natte (rechts) weersomstandigheden.....	47
Figuur 23: Enkele voorbeelden van 'overfitting'	53
Figuur 24: Verdichtingstemperaturen (BOMAG, 2009)	58
Figuur 25: Gemiddelde correlatiecoëfficiënt versus laagdikte.....	60
Figuur 26: Gemiddelde RMSE-waarde versus laagdikte.....	61
Figuur 27: Gemiddelde correlatiecoëfficiënt versus omgevingstemperatuur	62
Figuur 28: Gemiddelde RMSE versus omgevingstemperatuur	62
Figuur 29: Verschil in verloop voorspellingen t.o.v. metingen onder droge en natte omstandigheden (linksboven: 9-1, linksonder: 2, rechtsboven: 6-1, rechtsonder: 7-3)	63
Figuur 30: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor verschillende laagdiktes (toelichting: zie Bijlage E)	67
Figuur 31: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor verschillende categorieën omgevingstemperatuur (toelichting: zie Bijlage E)	69

1. Introductie

Asfalt is bij uitstek het meest gebruikte materiaal binnen de Nederlandse wegenbouw (Huurman & Demmink, 2016). Vergeleken met andere landen over de hele wereld is de kwaliteit van de wegen in Nederland zeer hoog (World Economic Forum, 2018). De Nederlandse overheid stelt elk jaar dan ook veel financiële middelen beschikbaar voor infrastructuur en een groot deel daarvan wordt besteed aan innovatie en nieuwe technologieën (European Commission, 2019). Als gevolg daarvan besteden veel bedrijven als Heijmans, Dura Vermeer en KWS en instituties als Rijkswaterstaat en CROW aandacht aan asfaltonderzoek. Een van de huidige onderwerpen binnen dit asfaltonderzoek is asfalttemperatuur tijdens verdichten.

De temperatuur van de asfaltlaag is een van de belangrijkste factoren die invloed hebben op de kwaliteit van het asfalt (Wang, Zhu, & Wong, 2014). De reden hiervan is dat asfalt wordt gedicht wanneer het net aangelegde mengsel nog heet is (Miller, 2010). Om de gewenste dichtheid van het asfalt te bereiken is het van belang dat het asfalt wordt gedicht binnen het best mogelijke temperatuurinterval, aangezien de asfaltlaag afkoelt zodra het is aangelegd (Poeran, Sluer, & Andeweg, 2012). Verdichten bij te hoge of te lage asfalttemperaturen kan een negatieve invloed hebben op de kwaliteit van het asfalt (Bijleveld, 2015).

1.1. Probleemstelling

Omdat asfalt het best binnen een bepaald temperatuurinterval verdicht kan worden voor het bereiken van de gewenste verdichtingsgraad, zou het wenselijk zijn om te weten hoe snel het asfalt afkoelt nadat het uit de asfalmachine komt (Bijleveld, Miller, De Bondt, & Dorée, 2012). Volgens Bijleveld (2012) hangt de afkoelsnelheid van asfalt echter af van veel verschillende factoren, zoals de weersomstandigheden, de asfalttemperatuur op het moment dat het uit de asfalmachine komt en het type asfalt dat is gebruikt. Voor asfalteerbedrijven bemoeilijkt dit het bepalen van een geschikte verdichtingsstrategie. Aangezien het afkoelgedrag van asfalt per project verschilt, is het toepassen van een vaste strategie niet altijd even wenselijk (Bijleveld, Miller, De Bondt, & Dorée, 2012).

Om asfalteerbedrijven te helpen een geschikte verdichtingsstrategie te bepalen zijn in het verleden verschillende voorspellingsmodellen ontwikkeld (Chadbourn, 1998) (Timm, 2001) (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Deze tools kunnen een voorspelling genereren van de afkoeling van het asfalt over de tijd, aan de hand van verschillende parameters zoals de weersomstandigheden tijdens het te voorspellen project en eigenschappen van het aangelegde type asfalt. Er zijn twee verschillende soorten voorspellingsmodellen: theoretische modellen zoals *PaveCool* en *MultiCool* (Chadbourn, 1998) (Timm, 2001) en praktische modellen zoals *ASPARiCool* (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Theoretische modellen zijn ontwikkeld op basis van vaste eigenschappen van materialen, die in laboratoria onderzocht zijn (Chadbourn, 1998). Praktische modellen zijn ontwikkeld met behulp van algoritmes die empirische data gebruiken om voorspellingen te genereren (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019).

Het probleem met deze modellen is echter een gebrek aan empirische data (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Zo is het theoretische model *PaveCool* bijvoorbeeld getest op slechts tien projecten waarbij slechts vier verschillende asfalmengsels werden aangelegd (Chadbourn, 1998). Het praktische model *ASPARiCool*, dat door de onderzoeksgroep *ASPARi* is ontwikkeld, gebruikt zoals hierboven vermeld empirische data om voorspellingen te doen. Echter is deze software nog volop in ontwikkeling en heeft meer empirische data nodig om de nauwkeurigheid van de voorspellingen te verhogen (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019).

Daar komt nog bij dat de meeste empirische data die is gebruikt voor de validatie van ASPARiCool is verkregen onder relatief gunstige weersomstandigheden, met temperaturen van rond de 20 graden Celsius (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Van de in totaal twaalf metingen zijn er slechts twee uitgevoerd bij temperaturen rond het vriespunt (0 °C) en slechts één meting bij 7 graden Celsius. In het onderzoek van Ong-A-Fat, Miller en Makarov (2019) is te zien dat de gemeten en voorspelde afkoelingscurves onder koude weersomstandigheden met name in het begin erg van elkaar verschillen wanneer de afkoelsnelheid het hoogst is. Na enige tijd naderen beide curves elkaar. Ter vergelijking; de meeste andere uitgevoerde validaties vertonen constante verschillen gedurende de gehele meting (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019).

1.2. Onderzoeksdoel

Uit de hierboven beschreven probleemstelling kan worden geconcludeerd dat empirische data nodig is om de nauwkeurigheid van de voorspellingen van asfaltafkoeling te verbeteren. Met name is het wenselijk om meer data onder koude weersomstandigheden te verkrijgen, aangezien hier voor ASPARiCool nog weinig mee gevalideerd is. Daarom is het doel van dit onderzoek om de voorspellingsmodellen van asfaltafkoeling te valideren met data die verkregen is in de maanden november en december, wanneer de temperatuur in Nederland relatief laag is en het weer van dag tot dag kan variëren (KNMI, n.d.).

1.3. Onderzoekskader

Wegens de beperkt beschikbare tijd en complexiteit van het project is het belangrijk om een duidelijk overzicht te hebben van het kader van het onderzoek. Een van de 'ultieme doelen', oftewel doelen die buiten dit onderzoekskader liggen, is om bij te dragen aan verbetering van de asfaltkwaliteit, aangezien de verbeterde voorspellingen in de toekomst gebruikt zouden kunnen worden voor het bepalen van geschikte verdichtingsstrategieën. Dit moet onder meer het verdichten bij te hoge of te lage temperaturen in de toekomst voorkomen.

Het gebruik maken van voorspellingsmodellen is een van de activiteiten binnen dit onderzoek. Zoals in de probleemstelling staat vermeld zijn er twee soorten voorspellingsmodellen: theoretische en praktische modellen. Voor beide soorten modellen zal één tool worden gebruikt: PaveCool als theoretisch model, onder meer vanwege de beschikbare literatuur, en ASPARiCool als praktisch model, omdat daar de analyses en aanbevelingen het meest op gericht zullen zijn, aangezien deze tool nog volop in ontwikkeling is. De reden dat slechts één tool van beide soorten modellen wordt gekozen is onder andere een beperkte tijd en het inperken van de complexiteit van dit onderzoek.

Verder dient vermeld te worden dat dit onderzoek zich specifiek richt op de afkoeling van asfalt. Zodra het asfalt uit de asfalteermachine komt, koelt het af en wordt het tevens verdicht met walsmachines. Dit verdichtingsproces is in dit onderzoek echter buiten beschouwing gelaten. Zowel het bepalen van een geschikte verdichtingsstrategie of -interval als mogelijke invloeden van verdichting op de afkoeling van asfalt zijn dus niet meegenomen in dit onderzoek.

1.4. Opdrachtgevers

De opdrachtgevers van dit onderzoek zijn ASPARi en Roelofs.

ASPARi is een netwerk van onderzoekers en bedrijven in Nederland dat zich bezighoudt met de ontwikkeling en verbetering van de (Nederlandse) asfaltindustrie. Het doel van ASPARi is “om de variabiliteit in de constructiefase te verminderen en ondertussen de algehele kwaliteit van het asfalteer- en verdichtingsproces te verbeteren” (ASPARi, sd).

Een van de manieren om dit doel te bereiken is het nauwkeurig kunnen voorspellen van asfalttemperatuur tijdens het verdichten. Daarvoor heeft de onderzoeksgroep het model ASPARiCool ontwikkeld. Dit voorspellingsmodel is nog volop in ontwikkeling en dit onderzoek draagt daaraan bij. ASPARi streeft ernaar om ASPARiCool in 2020 beschikbaar te stellen voor aannemers (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019).

Als partnerbedrijf is ingenieursbureau **Roelofs** betrokken bij de ontwikkelingen die door ASPARi worden uitgevoerd. Dit onderzoek is dan ook uitgevoerd bij Roelofs en de metingen die voor dit onderzoek zijn gedaan hebben plaatsgevonden op asfalteerprojecten van Roelofs. Indien Roelofs is geïnteresseerd in het gebruiken van ASPARiCool in de toekomst, kan het ook na dit onderzoek een actieve bijdrage leveren aan de ontwikkeling ervan. Een van de streefdoelen van dit onderzoek is daarom om een aanzet te geven tot verdere ontwikkeling en onderzoek waarbij Roelofs een belangrijke rol kan spelen, door bijvoorbeeld datasets uit te breiden of door de validatie van het model voort te zetten.

1.5. Onderzoeksvragen

Op basis van de probleemstelling, het onderzoeksdoel en het onderzoekskader is de volgende hoofdvraag voor dit onderzoek opgesteld:

Wat is de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van theoretische en praktische voorspellingsmodellen onder variërende Nederlandse weersomstandigheden?

De betrouwbaarheid van de modellen is getoetst doormiddel van statistische vergelijkingsmethoden. Deze vergelijkingsmethoden geven prestatie-indicatoren/vergelijkingswaarden die de nauwkeurigheid van de voorspelde afkoelingscurves aangeven. Op basis van deze indicatoren zijn conclusies getrokken over hoe nauwkeurig de modellen zijn bij relatief koude weersomstandigheden. Met deze conclusie is vervolgens bovenstaande onderzoeksvraag beantwoord.

De empirische data die gebruikt is voor dit onderzoek is verzameld in de periode van november en december, wanneer het weer verandert van herfstige naar winterse omstandigheden, resulterend in variërende en meestal ook koude weersomstandigheden.

Bovenstaande onderzoeksvraag is beantwoord aan de hand van onderstaande deelvragen. De eerste deelvraag is beantwoord aan de hand van een literatuuronderzoek, waarbij het doel was om meer te leren over hoe de voorspellingen tot stand komen en welke parameters daarbij betrokken zijn.

De tweede deelvraag is beantwoord door de verzamelde empirische data te vergelijken met de voorspelde data van beide modellen. Zoals eerder aangegeven zijn hiervoor statistische vergelijkingsmethoden toegepast. De uitkomst van deze methoden geven een indicatie over de nauwkeurigheid van de modellen, waarmee ook meteen deelvraag 3 beantwoord is.

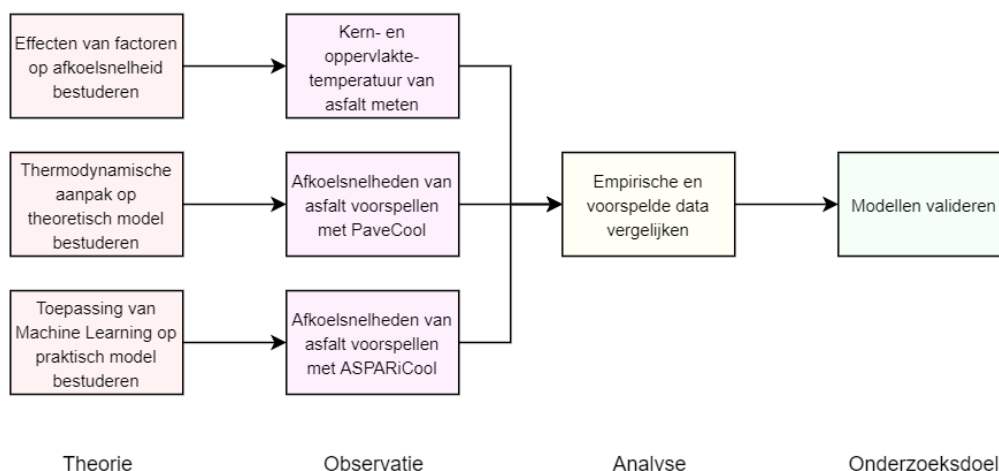
De vierde en laatste deelvraag bestaat uit het laatste deel van het gehele validatieproces dat is uitgevoerd in dit onderzoek. Voor het beantwoorden van deze deelvraag is de geanalyseerde data vergeleken met historische data van de ASPARi-database en data afkomstig van literatuur. Deze laatste stap in de validatie is van belang voor het nagaan van de betrouwbaarheid van de geanalyseerde data.

De vier deelvragen die bovenstaande onderzoeksvraag beantwoorden zijn:

1. Wat zijn de verschillen tussen het theoretische (PaveCool) en praktische (ASPARiCool) voorspellingsmodel?
2. Hoe verhouden de gemeten afkoelingscurves van de asfaltmengsels zich tot de voorspelde afkoelingscurves?
3. Wat is de betrouwbaarheid van de voorspelde afkoelingscurves onder koude weersomstandigheden?
4. Hoe kunnen de gemeten en voorspelde afkoelingscurves met historische data en literatuur worden gevalideerd?

1.6. Onderzoeksmodel

In **Figuur 1** is het onderzoeksmodel van dit onderzoek te zien. Dit model geeft een duidelijk en beknopt overzicht van de stappen die genomen dienen te worden om het onderzoeksdoel te bereiken.



Figuur 1: Onderzoeksmodel

Dit onderzoeksmodel is opgedeeld in vier delen. In het eerste deel genaamd **theorie** is het literatuuronderzoek uitgevoerd. De drie belangrijkste onderwerpen voor dit onderzoek zijn in het model weergegeven.

Aansluitend op het literatuuronderzoek volgt het tweede deel van het model, de **observatie**. In deze fase van het onderzoek is alle benodigde data verzameld. De empirische data is verkregen door deze te meten op asfalterprojecten. De voorspelde data is verkregen door gebruik te maken van de beide voorspellingsmodellen.

Het derde deel van het model, **analyse**, beschrijft de vergelijkingen die zijn uitgevoerd tussen de gemeten data en de voorspelde data. Hiervoor zijn statistische vergelijkingsmethoden gebruikt zoals de Pearson moment-product correlatiecoëfficiënt en de kwadratisch gemiddelde fout (ook wel bekend als root mean square error of RMSE) (McClave, Sincich, & Knypstra, 2016).

In de vierde en laatste fase van het onderzoek is de laatste validatiestap uitgevoerd en is de hoofdvraag beantwoord. In deze fase is onder meer gekeken of de geanalyseerde data relevant is, op basis van de bestudeerde literatuur en historische data, afkomstig van ASPARi. Validatie slaat in dit deel van het onderzoek op het begrip validiteit, waarmee wordt bedoeld op geldigheid of juistheid van de resultaten. Specifieker wordt het begrip criteriumvaliditeit gehandhaafd, waarmee wordt bedoeld op de samenhang tussen twee testresultaten, namelijk de onderzoeksresultaten en een andere meting, oftewel een criterium (Tilburg University, sd). De criteria zijn in dit geval de literatuur en de historische dataset.

Als laatste is een conclusie opgesteld aan de hand van het gehele validatieproces. Daarnaast zijn ook nog aanbevelingen gedaan voor onder meer ASPARiCool en Roelofs.

1.7. Leeswijzer

Hieronder is beknopt samengevat hoe de hoofdstukken zijn ingedeeld:

- [Hoofdstuk 2 'Theoretisch kader' \(pagina's 17-333\)](#)
 - o In dit hoofdstuk wordt het literatuuronderzoek naar de factoren van asfaltafkoeling, het theoretische model PaveCool en het praktische model ASPARiCool beschreven. Hiermee wordt tevens deelvraag 1 beantwoord.
- [Hoofdstuk 3 'Methodiek temperatuurmetingen' \(pagina's 34-39\)](#)
 - o Hierin wordt uitgelegd hoe de metingen zijn uitgevoerd en welke materialen daarvoor zijn gebruikt.
- [Hoofdstuk 4 'Resultaten temperatuurmetingen' \(pagina's 40-49\)](#)
 - o In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen geanalyseerd om de data beter te kunnen begrijpen en worden de resultaten gecontroleerd op validiteit, als onderdeel van het beantwoorden van deelvraag 4.
- [Hoofdstuk 5 'Verantwoording voorspellingen' \(pagina's 50-55\)](#)
 - o Hierin wordt duidelijk gemaakt welke parameters en welke inputdata voor de voorspellingen zijn toegepast en wordt een eerste analyse gedaan op de resultaten van deze voorspellingen.
- [Hoofdstuk 6 'Vergelijkingsanalyse nauwkeurigheid meetresultaten en voorspellingen' \(pagina's 56-66\)](#)
 - o In dit hoofdstuk worden de gemeten en voorspelde afkoelcurves aan de hand van de vergelijkingswaarden met elkaar vergeleken en beoordeeld op nauwkeurigheid. In dit hoofdstuk worden deelvraag 2 en 3 beantwoord.
- [Hoofdstuk 7 'Validiteit voorspellingen' \(pagina's 67-70\)](#)
 - o Hierin wordt de validiteit van de voorspellingen gecontroleerd, aan de hand van de afkoelsnelheden in de beginfase van de voorspellingen. Hiermee wordt tevens deelvraag 4 beantwoord.
- [Hoofdstuk 8 'Discussie, conclusie en aanbevelingen' \(pagina's 71-83\)](#)
 - o In dit laatste hoofdstuk zijn de discussie, de antwoorden op de hoofd- en deelvragen (conclusie) en de aanbevelingen te vinden.
- [Bijlage A 'Tabellen warmte-eigenschappen PaveCool' \(pagina 86\)](#)
 - o Deze bijlage bevat enkele tabellen ter ondersteuning van het literatuuronderzoek naar de werking van PaveCool (sectie 2.2)
- [Bijlage B 'Meetverslagen' \(pagina's 87-162\)](#)
 - o In deze bijlage zijn van iedere meting die voor dit onderzoek is uitgevoerd de omstandigheden, gebruikte materialen en resultaten te vinden, ter ondersteuning van hoofdstuk 3.
- [Bijlage C 'Voorspellings- en vergelijkingsverslagen' \(pagina's 163-202\)](#)
 - o In deze bijlage zijn voor iedere voorspelling de input, output en berekende vergelijkingswaarden te vinden, ter ondersteuning van hoofdstuk 5.
- [Bijlage D 'Vergelijkingswaarden en nauwkeurigheid' \(pagina's 203-204\)](#)
 - o Deze bijlage bevat tabellen met alle vergelijkingswaarden per voorspelling en voor iedere voorspelling de mate van nauwkeurigheid, ter ondersteuning van hoofdstuk 6.
- [Bijlage E 'Voorbeelden en toelichtingen berekeningen' \(pagina's 205-207\)](#)
 - o In het verslag komen veel hellingen/afkoelsnelheden en grafieken voor. In deze bijlage worden een aantal voorbeelden gegeven van hoe deze waarden zijn berekend en wordt toegelicht hoe sommige grafieken tot stand zijn gekomen.

2. Theoretisch kader

In dit hoofdstuk is alle benodigde achtergrondinformatie voor dit onderzoek besproken. Als eerste wordt aandacht besteed aan de belangrijkste factoren die zorgen voor de koeling van het asfalt. Vervolgens wordt ingegaan op de beide voorspellingsmodellen, waarbij onder meer de gebruikte parameters en de werking worden beschreven.

2.1. Factoren afkoeling asfalt

Het afkoelgedrag van asfalt wordt beïnvloed door verschillende factoren (Bijleveld, Miller, De Bondt, & Dorée, 2012). Deze factoren bepalen hoe snel een asfaltlaag afkoelt. In deze sectie worden vier verschillende factoren besproken, namelijk het type mengsel dat wordt gebruikt, de dikte van de asfaltlaag, de onderliggende laag waar het asfalt op wordt aangebracht en de weersomstandigheden tijdens het asfalteren.

2.1.1. Asfaltmengsels

Ten eerste wordt gebruik gemaakt van verschillende soorten asfaltmengsels. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van asfaltbeton en steenmastiekasfalt.

Asfaltbeton (AC) is een mengsel bestaande uit steenslag, zand, vulstof en asfaltbitumen, dat gegrond is op nagenoeg gehele of gedeeltelijke poriënvulling (V.B.W., 1973). Dit mengsel is opgebouwd volgens het 'betonprincipe', waarmee wordt geduid op een zo dicht mogelijke korrelverpakking en een zo laag mogelijke holle ruimte (CROW, 2010).

Asfaltbeton wordt veel gebruikt voor alle lagen van de asfaltweg, waarbij de samenstelling per laag iets verschilt. Zo wordt bijvoorbeeld voor onderlagen grind gebruikt als toeslagmateriaal bij lage verkeersbelasting en voor zware belasting steenslag, wat een hogere weerstand biedt tegen blijvende vervorming dan grind (CROW, 2010). Voor deklagen wordt een zo hoog mogelijk bitumengehalte gehanteerd, om voldoende weerstand te kunnen bieden tegen de inwerking van weer en verkeer (CROW, 2010).

Tijdens het onderzoek zijn verschillende subtypen asfaltbeton gebruikt. Deze worden allen aangeduid met AC, gevolgd door een aanduiding van de korrelgrootte (in dit onderzoek 8, 11, 16 of 22). Vaak worden ook functionele eigenschappen toegevoegd aan de benaming. Zo wordt aangeduid welke laag wordt aangelegd met de aanduidingen 'BASE' (onderlaag), 'BIND' (tussenlaag) of 'SURF' (deklaag) en de aanduidingen 'OL', 'TL' en 'DL', gevolgd door een categorie-aanduiding van de vrachtauto-intensiteit. Deze laatste aanduiding geeft aan hoeveel vrachtwagens (of hoeveel ritten) nodig zijn tijdens het aanleggen.

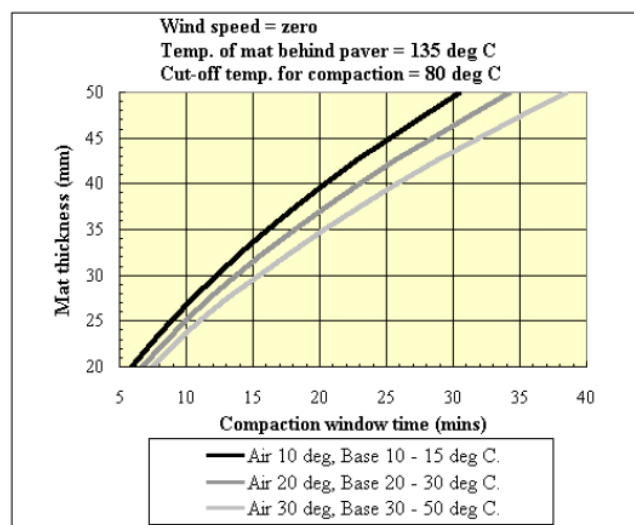
Steenmastiekasfalt (SMA) is een asfaltmengsel dat bestaat uit een skeletachtige structuur van steen, met een relatief hoog percentage holle ruimtes (CROW, 2010). Deze holle ruimtes worden grotendeels opgevuld door mastiek, bestaande uit zand, vulstof en bitumen. De mastiek heeft onder meer een hoge weerstand tegen vervorming, waardoor SMA bijvoorbeeld goed toepasselijk is op wegen waar veel zwaar verkeer voorkomt. SMA is dan ook een mengsel dat is bedoeld voor deklagen (CROW, 2010).

Het type SMA dat is gebruikt tijdens dit onderzoek is SMA-NL 11B, waarbij 'SMA-NL' aanduidt dat het steenmastiekasfalt betreft, '11' de korrelgrootte aanduidt en 'B' het gehalte aan materiaal kleiner dan 2 mm aangeeft (ten opzichte van type A, dat een groter gehalte betreft) (Dienst Grote Projecten en Onderhoud, 2013). Zo heeft SMA-NL 11A een ontwerp holle ruimte van 4,0 %(V/V) en SMA-NL 11B een ontwerp van 5,0 %(V/V).

In sectie 2.2.1 worden de thermische eigenschappen van beide soorten asfaltmengsels onderzocht. Op basis daarvan kan worden geconcludeerd dat asfaltbeton sneller afkoelt dan SMA, onder vergelijkbare omstandigheden.

2.1.2. Dikte van de asfaltlaag

De laagdikte van het asfalt heeft invloed op hoe snel het asfalt afkoelt nadat het uit de asfaltmachine komt (Wise & Lorio, 2004). Uit onderzoek van Wise en Lorio (2004) blijkt dat dunne asfaltlagen sneller afkoelen dan dikke asfaltlagen. In **Figuur 5** is te zien dat de tijd waarin de verdichting plaats kan vinden toeneemt bij toename van de dikte van de asfaltlaag. Hierbij is uitgegaan van een starttemperatuur van 135 °C en een grenstemperatuur voor het walsen van 80 °C (Wise & Lorio, 2004). Onder deze grenstemperatuur is het volgens Wise en Lorio (2004) niet wenselijk om te verdichten, aangezien het steeds moeilijker wordt om de gewenste dichtheid te verkrijgen naarmate het asfalt afkoelt. Omdat de verdichtingstijd in **Figuur 5** toeneemt bij dikkere asfaltlagen, kan worden aangenomen dat daarbij de koelsnelheid afneemt.



Figuur 2: Verband tussen laagdikte en verdichtingstijd (Wise & Lorio, 2004)

Bovenstaande beweringen worden bekrachtigd door Bijleveld (2015). Die ondervond in zijn onderzoek dat dikkere asfaltlagen 15 tot 30% minder snel afkoelen dan dunne lagen. Een reden is dat dikke asfaltlagen hun warmte langer kunnen vasthouden doordat, ten opzichte van dunne lagen, een groot deel van het warme asfalt niet in contact staat met koude lucht of oppervlaktes (Wise & Lorio, 2004) (Bijleveld, 2015).

2.1.3. Onderliggende laag

Ook de onderliggende laag heeft invloed op de afkoelsnelheid van het asfalt (Wise & Lorio, 2004). Deze staat in direct contact met de asfaltlaag en koelt met name de onderkant van deze laag af. De temperatuur van de onderliggende laag is meestal vergelijkbaar met de omgevingstemperatuur. Het verschil tussen beide temperaturen is groter bij hogere omgevingstemperaturen (Wise & Lorio, 2004).

In sommige gevallen worden op één dag meerdere asfaltlagen aangebracht. In dat geval is de onderliggende laag een asfaltlaag die aanzienlijk warmer is dan de gemiddelde grondtemperatuur, aangezien deze asfaltlaag nog niet volledig is afgekoeld.

De invloed van de temperatuur van de onderliggende laag op de afkoelsnelheid van het aangebrachte asfalt kan worden verklaard aan de hand van onderstaande formule voor warmtegeleiding (tussen twee vaste objecten):

$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{d} \quad (1)$$

Waarbij:

Q = warmtegeleiding (in J/s)

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt (in J/(K·m))

A = Oppervlakte (in m²)

ΔT = temperatuurverschil (in K)

d = Dikte (in m)

Wanneer het temperatuurverschil ΔT tussen twee verschillende objecten toeneemt, neemt ook de warmtegeleiding, en dus de afkoelsnelheid toe. Dat wil zeggen dat hoe lager de temperatuur van de onderliggende laag (bij een constante starttemperatuur van het aan te leggen asfalt), hoe sneller het asfalt afkoelt.

Daarnaast speelt ook de soort onderliggende laag een rol bij de afkoeling van het asfalt dat erop ligt. Ieder materiaal heeft een eigen warmtegeleidingscoëfficiënt. Tijdens dit onderzoek waren asfalt en zand de typen onderliggende lagen waar de metingen op zijn uitgevoerd. In [Tabel 31](#) in Bijlage A zijn voor verschillende materialen, waaronder asfalt en zand, de warmtegeleidingscoëfficiënten weergegeven. Daaruit kan worden opgemaakt dat de warmtegeleidingscoëfficiënt van asfalt groter is dan die van zand, en dus geleidt asfalt warmte sneller dan zand. Met andere woorden, de aangebrachte asfaltlaag koelt sneller af wanneer het op (bestaand) asfalt wordt aangelegd ten opzichte van zand.

Echter verandert dit wanneer de onderliggende zandlaag nat en/of bevroren is. In dat geval is de warmtegeleidingscoëfficiënt van zand juist groter dan die van (bestaand) asfalt en koelt de aangebrachte asfaltlaag dus sneller af op nat en/of bevroren zand dan op (bestaand) asfalt.

2.1.4. Weersomstandigheden

Het weer speelt een belangrijke rol in de koeling van een asfaltlaag. Naast de omgevingstemperatuur beïnvloeden de wind, regen, luchtvochtigheid en ook zonnestraling de snelheid van het afkoelproces.

Omgevingstemperatuur

Ten eerste speelt de omgevingstemperatuur/luchttemperatuur een rol bij de afkoeling van de asfaltmat. Uit onderzoek van Wang et al. (2014) blijkt dat afkoeling van asfalt toeneemt bij lagere omgevingstemperaturen. Dit is door Wang et al. (2014) verantwoord door de volgende formule:

$$Q_{conv} = h_c(T_s - T_a) \quad (2)$$

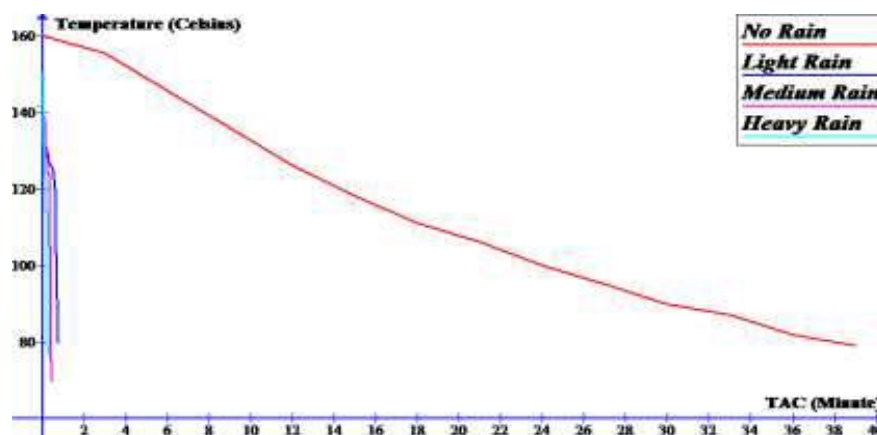
In bovenstaande formule staat Q_{conv} voor de convectieve warmteflux (warmteoverdracht) tussen het asfaltoppervlak en de lucht. De term h_c is een warmteoverdrachtscoëfficiënt die in het onderzoek van Wang et al. (2014) empirisch wordt bepaald aan de hand van de windsnelheid. De termen T_s en T_a staan respectievelijk voor de oppervlaktetemperatuur van het asfalt (surface temperature) en de omgevingstemperatuur (air temperature).

De bovenstaande formule geeft aan dat het verschil tussen de oppervlaktetemperatuur van de asfaltlaag en de omgevingstemperatuur een verband heeft met de warmteoverdracht tussen het oppervlak en de lucht. Hoe groter het verschil tussen de twee temperaturen, hoe groter de warmteoverdracht. Uitgaande van een constante of constant verlopende oppervlaktetemperatuur en een constante warmteoverdrachtscoëfficiënt kan worden geconcludeerd dat een lage omgevingstemperatuur zorgt voor een groter temperatuurverschil. Dit heeft als gevolg dat de warmteoverdracht, wat vertaald zou kunnen worden naar de koeling/koelsnelheid, dus toeneemt.

Regen

De aanwezigheid van regen geeft vaak problemen tijdens het asfalteren (Hashim, Arshad, Shaffie, & Md Noh, 2018). Regelmatig zijn asfalteerbedrijven gedwongen de werkzaamheden uit te stellen als er veel regen wordt voorspeld. Het regenwater zorgt er onder meer voor dat de bitumen in het asfalt, dat ervoor zorgt dat het mengsel aan elkaar blijft kleven, zo snel afkoelt dat het asfalt niet voldoende kan hechten (Meijerink, 2010). Daardoor kan de asfaltlaag dus niet goed genoeg worden gewalst.

Niet alleen de bitumen koelt snel af door het regenwater, maar ook de rest van de asfaltlaag daalt flink in temperatuur (Hashim, Arshad, Shaffie, & Md Noh, 2018). Verschillende tests op Hot Mix Asphalt (HMA) door Hashim et al. (2018) tonen aan dat het asfalt tot wel 99% sneller kan afkoelen bij regen, vergeleken met asfalt dat zonder regen is aangelegd (zie [Figuur 3](#)). Bij dit onderzoek is uitgegaan van een starttemperatuur van 160 °C en een minimum temperatuur van 80 °C, dat in dit onderzoek wordt beschouwd als de minimale grenstemperatuur voor het verdichtingsproces. Daarnaast is gemeten met drie soorten regen: regendruppels van 2 mm, 3 mm en 5 mm grootte, geclassificeerd als respectievelijk lichte, matige en hevige regen. Ook werd geconcludeerd uit het onderzoek van Hashim et al. (2018) dat de oppervlaktetemperatuur bij regen sneller afkoelt dan de kerntemperatuur.

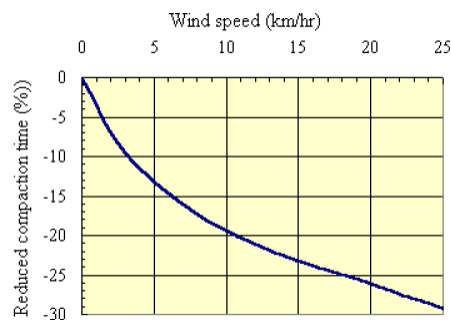


Figuur 3: Afkoeling asfalt van 160 naar 80 °C bij verschillende hoeveelheden regen (Hashim et al. (2018))

Wind

De windsnelheid kan ook van grote invloed zijn op het afkoelen van de asfaltlaag (Wang, Zhu, & Wong, 2014). Uit onderzoek van Wang et al. (2014) op HMA blijkt dat de gemeten afkoelcurves aanzienlijk worden beïnvloed door de wind. In dat onderzoek wordt de windsnelheid in verband gebracht met een warmteoverdrachtscoëfficiënt, met als conclusie dat deze coëfficiënt toeneemt bij hogere windsnelheden (Wang, Zhu, & Wong, 2014). Dit veroorzaakt onder meer grote verschillen tussen de oppervlakte- en de kerntemperatuur van de asfaltlaag, aangezien de wind veel meer invloed kan uitoefenen op het oppervlak dan op de kern.

Uit onderzoek van Wise en Lorio (2004) op dunne HMA-lagen (lagen tot 50 mm dikte) blijkt dat de verdichtingstijd afneemt wanneer de windsnelheid toeneemt. Dit is te zien in **Figuur 4**. Dat wil zeggen dat een toename van de windsnelheid zorgt voor een snellere afkoeling van het asfalt, aangezien de verdichtingstijd afneemt (Wise & Lorio, 2004).



Figuur 4: Invloed van windsnelheid op verdichtingstijd (Wise & Lorio, 2004)

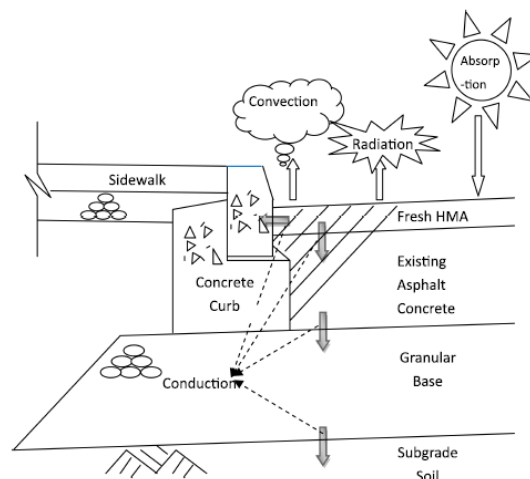
Luchtvochtigheid

Ook de luchtvochtigheid kan bijdragen aan de afkoeling van asfalt (Khan, Islam, & Tarefder, 2019). Uit onderzoek van Khan et al. (2019) blijkt dat wanneer de relatieve luchtvochtigheid toeneemt, terwijl andere parameters zoals omgevingstemperatuur en zonnestraling constant blijven, de temperatuur van het asfalt toeneemt door een verlies aan warmteoverdracht. Dus wanneer de relatieve luchtvochtigheid toeneemt, neemt de afkoelsnelheid van asfalt af. Dit wordt door Khan et al. (2019) verklaard door te hebben waargenomen dat luchtvochtigheid nooit alleen verandert zonder dat ook de omgevingstemperatuur, de hoeveelheid zonnestraling en de windsnelheid veranderen. De verbanden tussen deze parameters zijn dan ook niet lineair.

Zonnestraling

De invloed van zonnestraling op de afkoeling van asfalt is vrij complex. Dat komt onder meer doordat een deel van het zonlicht wordt weerkaatst, maar ook een deel wordt geabsorbeerd (Wang, Zhu, & Wong, 2014). Deze verschijnselen hebben ieder een ander effect op de koeling van de asfaltlaag (Wang, Zhu, & Wong, 2014). Doormiddel van onderstaande formule en **Figuur 5**, afkomstig uit het onderzoek van Wang et al. (2014) worden de invloeden van de verschillende stralingen verklaard.

$$\sum Q = Q_{solar} - \alpha \cdot Q_{solar} + Q_{abs} - Q_{rad} - Q_{conv} - Q_{cond} \quad (3)$$



Figuur 5: Invloeden van omgeving op warmteoverdracht bij HMA asfaltlaag (Wang, Zhu & Wong, 2014)

In de formule hierboven, waarmee de som van de warmteoverdracht op het asfaltoppervlak wordt berekend, staat Q_{solar} voor de warmteoverdracht door de hoeveelheid zonnestraling en staat $\alpha \cdot Q_{solar}$ voor de hoeveelheid zonnestraling dat door het asfaltoppervlak wordt gereflecteerd aan de hand van een reflectiefactor α . Verder staat Q_{abs} voor de hoeveelheid absorptie van langgolvlige straling afkomstig uit de atmosfeer, Q_{rad} voor de hoeveelheid langgolvlige straling dat wordt uitgestoten door de asfaltlaag, Q_{conv} voor de hoeveelheid warmteoverdracht tussen het asfaltoppervlak en de lucht (beïnvloed door omgevingstemperatuur en windsnelheid, zie sectie 'Omgevingstemperatuur') en staat Q_{cond} voor de warmteconductie/warmteoverdracht op het asfaltoppervlak.

In de formule is Q_{solar} , de term die de hoeveelheid zonnestraling indiceert, een positieve term. Dat wil zeggen dat bij een toename van de hoeveelheid zonnestraling de som van de warmteoverdracht op het asfaltoppervlak ook toeneemt.

De vraag is nu of de hoeveelheid zonnestraling zorgt voor een snellere of minder snelle koeling van het asfalt. Eerder is duidelijk geworden dat bij een toename van het temperatuurverschil tussen het asfaltoppervlak en de lucht, de koelsnelheid toeneemt (zie sectie 'Omgevingstemperatuur'). In formuletermen zou dan bij een afname van de omgevingstemperatuur T_a de warmteoverdracht tussen het oppervlak en de lucht Q_{conv} toenemen (zie vergelijking (1)). Deze term Q_{conv} is echter een negatieve term in vergelijking (2), wat dus wil zeggen dat de som van de warmteoverdracht in vergelijking (2) kan worden gezien als een warmtetoeename van het asfalt. Omdat Q_{solar} in vergelijking (2) een positieve term is, zorgt een toename van zonnestraling dus tot een afname van de koelsnelheid. Uit vergelijking (2) kan dus geconcludeerd worden dat de asfaltlaag minder snel afkoelt bij veel zonneschijn.

Deze conclusie wordt bijgestaan door Khan et al. (2019), die in hun onderzoek aantoonde dat bij een grote hoeveelheid zonnestraling de oppervlaktetemperatuur hoger was dan wanneer er geen zonnestraling was. Hierbij werden andere parameters zoals omgevingstemperatuur, relatieve luchtvochtigheid en windsnelheid constant gehouden (Khan, Islam, & Tarefder, 2019). Uit het onderzoek van Khan et al. (2019) kan dus worden geconcludeerd dat zonnestraling de asfaltlaag opwarmt. Dit betekent dus ook dat wanneer een pas aangelegde asfaltmat afkoelt, een grote hoeveelheid zonnestraling deze koeling 'tegengaat', en zo neemt dus de koelsnelheid af.

De factoren die in sectie 2.1 zijn beschreven worden voor het voorspellen van de asfaltafkoeling in beschouwing genomen door de modellen PaveCool en ASPARiCool. Deze twee modellen worden in de volgende secties nader besproken.

2.2. PaveCool

PaveCool is een computerprogramma dat is ontwikkeld door de Universiteit van Minnesota (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Met PaveCool kan de afkoeling van een asfaltlaag worden gesimuleerd en kan aan de hand daarvan een tijdsinterval voor de verdichting worden bepaald (Chadbourn, 1998). De simulatietool is ontwikkeld om onzekerheden te minimaliseren als het gaat om asfalteren bij koude weersomstandigheden, wat regelmatig het geval is in met name het noordelijke deel van de Verenigde Staten, waar onder meer de staat Minnesota onder valt.

De voorspellingen die met deze simulatietool kunnen worden gegenereerd zijn gebaseerd op een thermodynamisch model. Daarvoor zijn onder meer laboratoriumonderzoeken uitgevoerd voor het bepalen van asfalteigenschappen zoals thermische diffusie en warmtegeleiding (Chadbourn, 1998).

2.2.1. Input parameters

Om tot een voorspelling van de afkoelcurves van een aangelegde asfaltlaag te komen, neemt PaveCool de volgende input parameters in beschouwing:

Datum en tijd

Ten eerste dienen de datum en tijd van het asfaltproject te worden ingevoerd. De tijd die ingevoerd dient te worden is het tijdstip dat de asfaltlaag door de asfaltmachine wordt aangelegd. De tijd wordt door PaveCool gebruikt om te bepalen in wat voor hoek de zon op het asfaltoppervlak staat. Met dit gegeven wordt de hoeveelheid zonnestraling op het asfalt bepaald. De effecten van zonnestraling op de afkoeling van asfalt zijn behandeld in sectie 2.1.4.

Weersomstandigheden (Omgevingstemperatuur, windsnelheid, bewolking, breedtegraad)

Na het invoeren van de datum en tijd dienen de weersomstandigheden te worden ingevoerd. In het geval dat vóór het project de koeling voorspeld wordt, kan deze informatie worden opgehaald van weersvoorspellingen. Indien de voorspelde afkoelcurves achteraf worden geraadpleegd, zoals in dit onderzoek het geval is, kunnen de weersgegevens worden opgehaald van een (lokaal) weerstation, indien aanwezig.

De omgevingstemperatuur die wordt ingevoerd wordt door PaveCool gebruikt om te berekenen hoe snel de warmte in het asfalt verloren zal gaan door de buitenlucht. De minimale temperatuur die kan worden ingevoerd is -40 °C en het maximum is 49 °C.

De windsnelheid die ingevoerd dient te worden wordt gebruikt om te berekenen hoe snel het asfalt afkoelt door de wind. Zoals in sectie 2.1.4 is besproken, kan de wind een grote rol spelen in de koelsnelheid van de asfaltlaag. De windsnelheid dient te worden ingevoerd in de eenheid km/h. In de helpdesk van PaveCool is een tabel toegevoegd waarmee de windsnelheid omgerekend kan worden van windkracht (in Bft) naar windsnelheid (in km/h of mph). De tabel kan tevens worden gebruikt om de windsnelheid te schatten aan de hand van waarnemingen, indien de windkracht of windsnelheid onbekend is.

Ook de hoeveelheid bewolking kan worden ingevoerd in PaveCool. Deze omstandigheden bepalen in hoeverre de door PaveCool toegepaste vergelijkingen voor zonnestraling kunnen worden gebruikt bij daglicht en hetzelfde geldt voor de vergelijkingen voor stralingskoeling tijdens de nacht. In PaveCool wordt onderscheid gemaakt tussen vijf verschillende weerssituaties: Helder en droog (lage luchtvochtigheid en/of hoge hoogteligging), nevelig (typisch zonnige dag tijdens zomerdagen), licht bewolkt (zonlicht wordt voor 50% bedekt), overwegend bewolkt (zonlicht wordt voor 75% bedekt) en bewolkt (zonlicht wordt volledig bedekt).

De breedtegraad die dient te worden ingevoerd wordt door PaveCool gebruikt, samen met de ingevoerde datum en tijd, om de positie van de zon te bepalen op het moment van asfalteren. Voor de breedtegraad kan een waarde tussen -90 en 90 worden ingevoerd, waarbij met een negatieve waarde het zuidelijk halfrond wordt aangeduid en met een positieve waarde het noordelijk halfrond. Nederland bevindt zich tussen de 51^e en 53^e breedtegraad.

Type asfaltmix, laagdikte en starttemperatuur

PaveCool neemt twee verschillende typen asfalt in beschouwing: 'fine' (fijn) asfalt, in PaveCool aangeduid als 'Dense-graded' (waar o.a. HMA en asfaltbeton onder vallen) en 'coarse' (grof) asfalt, aangeduid als SMA. De laagdikte van de asfaltlaag die wordt aangelegd kan worden ingevoerd in millimeters, met een minimum van 13 mm en een maximum van 254 mm. De starttemperatuur die ingevoerd dient te worden is de temperatuur van het asfalt waarin het wordt aangeleverd. Vanaf deze waarde begint de afkoelcurve die door PaveCool wordt gegenereerd. De minimum starttemperatuur die kan worden ingevoerd is 66 °C en het maximum is 177 °C.

De voorspellingen die worden gegenereerd door PaveCool zijn grotendeels gebaseerd op de karakteristieken en eigenschappen van de twee mengsels die door de tool worden beschouwd. Deze warmte-eigenschappen, hoofdzakelijk de eigenschappen warmtegeleiding en thermische diffusie, zijn in het onderzoek van Chadbourn (1998) in het laboratorium getest en onderzocht.

Warmtegeleiding

Ten eerste werd onderzocht wat het effect van warmtegeleiding op de afkoeling van asfalt heeft. Warmtegeleiding is een maatstaf voor de hoeveelheid warmte die een materiaal door kan geven. Voor de berekening van de warmtegeleiding in PaveCool is gebruik gemaakt van de Wet van Fourier, met de volgende bijbehorende formule:

$$q_z = -k \left(\frac{dT}{dz} \right) \quad (4)$$

Waarbij:

q_z = warmteoverdracht (in de richting z) (in W)

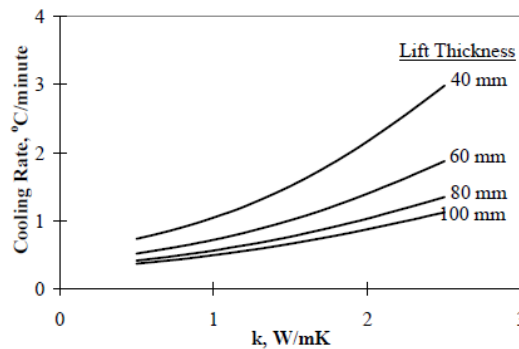
k = warmteoverdrachtscoëfficiënt (in W/mK)

dT/dz = temperatuurverschil (in K)

Met name naar de warmteoverdrachtscoëfficiënt k is onderzoek gedaan door Chadbourn (1998). Uit dit onderzoek bleek de warmtegeleiding van 'dense-graded' mengsels en van SMA aanzienlijk van elkaar verschillen. De warmtegeleidingscoëfficiënt van 'dense-graded' mengsels bleek aanzienlijk hoger dan die van SMA.

Ook bleek dat deze coëfficiënt kleine veranderingen laat zien wanneer temperatuur en dichtheid toenemen. Onderzoek op de relatie tussen warmtegeleiding en temperatuur liet zien dat de warmtegeleiding licht afneemt bij toename van temperatuur. Hierbij werd de temperatuur opgevoerd van 25 naar 75 °C en hierbij nam de warmtegeleidingscoëfficiënt af met ongeveer 0,2 W/mK. Onderzoek op de relatie tussen warmtegeleiding en dichtheid liet grotere verschillen zien. Bij 'dense-graded' mengsels verandert de warmtegeleidingscoëfficiënt nauwelijks wanneer de dichtheid toeneemt (hooguit 0,1 W/mK tijdens het gehele verdichtingsproces). De warmtegeleidingscoëfficiënt van SMA verandert echter aanzienlijk bij verandering in dichtheid. Wanneer de dichtheid toeneemt met 100 kg/m³ neemt deze coëfficiënt met ongeveer 0,2 W/mK toe. Tijdens het gehele verdichtingsproces kan deze warmtegeleidingscoëfficiënt zelfs toenemen met ongeveer 0,6 tot 0,7 W/mK.

De belangrijkste vraag is uiteindelijk wat het effect van warmtegeleiding is op de afkoelsnelheid van het asfalt. In **Figuur 6**, afkomstig uit het onderzoek van Chadbourn (1998) is dit duidelijk weergegeven. In deze grafiek is het verband tussen de warmtegeleidingscoëfficiënt en de afkoelsnelheid (in °C per minuut) weergegeven. Uit deze grafiek blijkt dat hoe groter de warmtegeleiding, hoe sneller het asfalt afkoelt. Daarbij is dit verband in het onderzoek van Chadbourn (1998) getest op meerdere laagdiktes. Hieruit blijkt dat bij dünnere lagen het asfalt sneller afkoelt wanneer de warmtegeleiding toeneemt.



Figuur 6: Relatie tussen afkoelsnelheid en warmtegeleidingscoëfficiënt (Chadbourn, 1998)

Op basis van het onderzoek naar warmtegeleiding en bovenstaande grafiek kan worden geconcludeerd dat mengsels met een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt sneller afkoelen dan mengsels met een lage warmtegeleidingscoëfficiënt. Aangezien de warmtegeleidingscoëfficiënt van 'dense-graded' mengsels hoger is dan die van SMA, kan worden geconcludeerd dat op basis van warmtegeleiding asfaltbeton sneller afkoelt dan SMA. Deze informatie wordt door PaveCool in beschouwing genomen bij het voorspellen van de afkoelingscurves voor beide mengsels.

Diffusie

Vervolgens werd het effect van thermische diffusie van asfalt op de temperatuur onderzocht. Thermische diffusie wordt door Chadbourn (1998) beschreven als een maatstaf voor de voortplantingssnelheid van warmte. De formule voor thermische diffusie die door PaveCool wordt toegepast is:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (5)$$

Waarbij:

α = Thermische diffusie (in m²/s)

k = Warmtegeleidingscoëfficiënt (in W/mK)

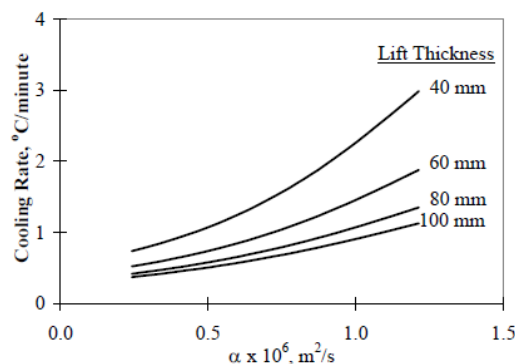
ρ = Dichtheid (in kg/m³)

C_p = Soortelijke warmte (in J/(kg·K))

Ook voor deze warmte-eigenschap is de relatie met de temperatuur en de dichtheid onderzocht door Chadbourn (1998). Daaruit blijkt dat bij een toename van de temperatuur van de asfaltmengsels 'dense-graded' en SMA de thermische diffusie in de meeste gevallen afneemt. Waar de meeste onderzochte mengsels een duidelijke afname lieten zien tussen 70 en 140 °C, liet alleen SMA met een lage dichtheid een vrijwel constant verloop van de thermische diffusie noteren. De verandering bij dit mengsel was verwaarloosbaar.

Uit onderzoek naar de relatie tussen dichtheid en thermische diffusie van de asfaltmengsels bleek dat de thermische diffusie van de 'dense-graded' mengsels toeneemt bij toename van de dichtheid tot ongeveer 2150 kg/m³, maar dat na dit punt de diffusie weer afneemt. De onderzochte SMA mengsels lieten enkel een stijging van de diffusie zien bij toename van de dichtheid. Echter is bij dit onderzoek niet duidelijk of ook hier sprake was van een piekwaarde tussen de extreme dichtheidswaarden in, aangezien voor dit onderzoek naar SMA slechts twee datapunten zijn gebruikt; een voor de laagste dichtheid en een voor de hoogste.

Uiteindelijk is ook hier de belangrijkste vraag wat het effect van thermische diffusie is op de afkoelsnelheid van asfalt. In **Figuur 7** is het verband ertussen duidelijk weergegeven. De grafieken komen aardig overeen met de grafieken uit **Figuur 6**, waar het verband tussen de afkoelsnelheid en de warmtegeleiding is weergegeven. In dit geval geldt dus dat een hogere diffusie zorgt voor een snellere afkoeling van het asfalt en dat bij dunne asfaltlagen deze afkoelsnelheid sneller toeneemt dan bij dikkere asfaltlagen.



Figuur 7: Relatie tussen afkoelsnelheid en thermische diffusie (Chadbourn, 1998)

Uit bovenstaand onderzoek van Chadbourn (1998) werd ook duidelijk dat de thermische diffusie van 'dense-graded' asfalt en SMA niet veel van elkaar verschillen, maar dat deze vooral temperatuurafhankelijk zijn. Ook andere warmte-eigenschappen zoals warmtegeleiding en soortelijke warmte spelen hierbij een rol (Chadbourn, 1998). Ook dit wordt door PaveCool meegenomen in het bepalen van de voorspellingen.

In **Tabel 31** in Bijlage A zijn van beide materialen de standaardwaarden voor de warmte-eigenschappen die door PaveCool in beschouwing worden genomen te vinden. Deze tabellen zijn afkomstig uit PaveCool.

Bestaande onderlaag (type onderlaag, staat onderlaag, oppervlaktetemperatuur onderlaag)

In PaveCool kan gekozen worden voor vier verschillende typen onderlaag waar de asfaltlaag op wordt aangebracht. Deze lagen zijn: Asfalt, beton, zand/gravel en slib/klei. Naast het kiezen van de type onderlaag kan ook, voor de typen zand/gravel en slib/klei, de staat van de onderlaag worden aangegeven. Hierbij kan de vochtigheid van de onderlaag worden aangegeven door te kiezen tussen 'dry' (droog) en 'wet' (nat). Daarbij kan ook nog worden aangegeven of de onderlaag wel of niet bevroren is, door te kiezen tussen 'frozen' (bevroren) en 'unfrozen' (niet bevroren). Verder kan de oppervlaktetemperatuur van deze onderlaag worden ingevoerd (in °C).

Ook voor de typen onderlagen zand/gravel en slib/klei is door Chadbourn (1998) onderzoek gedaan naar de warmte-eigenschappen van deze materialen. Daarbij worden door PaveCool de volgende formules voor het bepalen van de warmtegeleidingscoëfficiënt per staat in beschouwing genomen:

Zand/gravel, niet bevroren	$k = (0,07 \log(\omega) + 0,4) \cdot 10^{0,01\gamma_d}$	voor $\omega \geq 1$	(6.1)
Zand/gravel, bevroren	$k = 0,076 (10)^{0,013\gamma_d} + 0,032 (10)^{0,0146\gamma_d} \omega$	voor $\omega \geq 1$	(6.2)
Slib/klei, niet bevroren	$k = (0,9 \log(\omega) - 0,2) \cdot 10^{0,01\gamma_d}$	voor $\omega \geq 7$	(6.3)
Slib/klei, bevroren	$k = 0,01 (10)^{0,022\gamma_d} + 0,085 (10)^{0,008\gamma_d} \omega$	voor $\omega \geq 7$	(6.4)

Waarbij:

k = warmtegeleidingscoëfficiënt

γ_d = gewicht per volume-eenheid (droog) (in pcf)

ω = vochtgehalte (in %)

Voor verschillende waarden van de grootheden γ_d en ω zijn in Tabel 32 in Bijlage A de warmtegeleidingscoëfficiënten voor de verschillende materialen weergegeven. Uit deze tabel kan worden geconcludeerd dat bij een hoger vochtgehalte de warmtegeleiding en dus ook de koelsnelheid toeneemt. Verder zorgen ook bevroren ondergronden voor een snellere afkoeling dan niet-bevroren ondergronden.

2.2.2. Aannames

In het onderzoek van Chadbourn (1998) wordt PaveCool onder meer vergeleken met eerder ontwikkelde modellen. Dit simulatiemodel verschilt op de volgende punten met deze andere modellen (Chadbourn, 1998) (Bijleveld, 2010):

- In eerdere modellen werd aangenomen dat de laagdikte van het asfalt niet verandert. In werkelijkheid verandert de laagdikte tijdens het verdichten van het asfalt. In PaveCool wordt rekening gehouden met het effect van verdichting en warmteoverdracht tijdens de vervorming van de asfaltaag.
- In eerdere modellen worden vaste waarden voor de warmte-eigenschappen beschouwd. Deze eigenschappen veranderen in werkelijkheid echter met de temperatuur, de laagdikte en het asfalmengsel. In PaveCool wordt daarom rekening gehouden met deze veranderingen, en dan met name veranderingen van eigenschappen tijdens verdichting.
- De afkoelingscurve die door PaveCool wordt geplot is een weergave van de afname van de gemiddelde temperatuur over de gehele dikte van de laag.

2.2.3. Verdichting

Een van de hoofddoelen van PaveCool is om een zo goed mogelijke verdichtingsstrategie te kunnen bepalen voordat een asfalteerproject plaatsvindt (Chadbourn, 1998). Daarom worden bij de afkoelcurves ook indicaties gegeven van het begin- en eindtijdstip van verdichten.

Voor het bepalen van deze verdichtingsstrategieën door PaveCool is onder meer door Chadbourn (1998) onderzoek gedaan naar de krachten van de walsen en de schuifspanning van asfalt tijdens verdichten. Ook kan in PaveCool voor iedere voorspelling een zogeheten Asphalt Performance Grade (PG) worden ingevoerd die bepaalt wat de meest optimale starttemperatuur voor het walsen is.

Echter wordt in dit onderzoek alleen gekeken naar de afkoeling van asfalt en dus niet naar verdichting en dichtheid. Daarom worden deze functies van PaveCool buiten beschouwing gelaten.

2.2.4. Discussie PaveCool

Er zijn een aantal beperkingen van PaveCool die belangrijk zijn om te vermelden. Zo zijn de voorspellingen puur gebaseerd op theorie en is er tevens een gebrek aan data uit de praktijk. De theorie die door de tool wordt gebruikt komt voort uit tests onder 'perfecte' laboratoriumomstandigheden (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Daar komt nog bij dat PaveCool is getest en gevalideerd op slechts tien verschillende projecten uit de praktijk, waarbij in totaal vier verschillende soorten asfaltmengsels werden gebruikt. Dit had als gevolg dat sommige voorspellingen vrij nauwkeurig waren ten opzichte van de 'echte' afkoelcurve, maar ook dat sommige voorspellingen flinke verschillen lieten zien met de praktijk. Een van de aanbevelingen van Chadbourn (1998) als gevolg van het geringe aantal vergelijkingen met de praktijk is om dit continue voort te zetten.

Daarnaast zorgt een gebrek aan asfaltmengsels in PaveCool ervoor dat niet van alle asfalteerprojecten voorspellingen gedaan kunnen worden. Zo is de tool onder meer getest op Nederlandse asfalteerprojecten en dit gaf zeer uiteenlopende resultaten. Bij het onderzoek van Ong-A-Fat, Miller en Makarov (2019) werd gekeken naar de afwijking in minuten op het moment dat het asfalt tot 60 °C was afgekoeld. Hierbij was van 15 onderzochte projecten in één geval de afwijking slechts een minuut, maar in sommige gevallen ook maar liefst 35 minuten. Uiteindelijk was de gemiddelde afwijking bijna 11 minuten.

Wat verder opvalt tijdens het gebruik van de tool is dat er bij de input geen optie is voor regen. Alleen voor de onderlaag kan worden geselecteerd of deze nat of droog is. Echter is eerder gebleken dat regenwater ook een aanzienlijke invloed kan hebben op de koeling van het asfalt (Hashim, Arshad, Shaffie, & Md Noh, 2018).

Ten slotte valt op dat de voorspelde curves niet lager gaan dan 60 °C. Dit komt doordat PaveCool vooral is bedoeld om het verdichtingsinterval te voorspellen, en daarvoor wordt aangenomen dat verdichten onder de 60 °C niet mogelijk of wenselijk is (Chadbourn, 1998). Daarom worden temperaturen lager dan 60 °C gezien als irrelevant en dus niet weergegeven.

2.3. ASPARiCool

Om de beperkingen van PaveCool te overwinnen heeft ASPARi de software ASPARiCool ontwikkeld. Met deze tool moeten afkoelingscurves van in Nederland gebruikte asfaltmengsels beter en nauwkeuriger voorspeld kunnen worden. Het grote verschil met PaveCool is dat de voorspellingen niet worden gegeneerd op basis van theorie, maar grotendeels op basis van gegevens uit de praktijk met behulp van een Machine Learning-algoritme. Een algoritme dat met Machine Learning is ontwikkeld kan uit bestaande data patronen identificeren die gebruikt kunnen worden voor het genereren van nieuwe data (Lantz, 2013). Voorbeelden van Machine Learning in de praktijk zijn onder meer het identificeren en classificeren van ongewenste e-mails, zelfrijdende auto's en het voorspellen van verkiezingsuitslagen (Lantz, 2013).

Een groot voordeel van een Machine Learning-model ten opzichte van een theoretisch model (zoals PaveCool) is dat dit model gebruik maakt van patronen uit bestaande data. Door meer bestaande data toe te voegen aan de dataset die een Machine Learning-model raadpleegt, kan dat model meerdere patronen herkennen. Hoe meer patronen het model kan herkennen, hoe nauwkeuriger de voorspellingsmodellen vervolgens kunnen worden gemaakt. Daardoor kan een Machine Learning-model beschouwd worden als toekomstbestendig.

2.3.1. Input parameters

Er zijn twee verschillende manieren om tot een voorspelde afkoelingscurve te komen in ASPARiCool. Een daarvan is doormiddel van het handmatig invoeren van de benodigde parameters als input. De input parameters (te selecteren met dropdown menu's) die hiervoor moeten worden ingegeven zijn:

Asfaltmengsel

Ten eerste kan het type asfaltmengsel dat wordt aangelegd worden ingegeven. Wat meteen opvalt is dat er ten opzichte van PaveCool veel meer verschillende soorten mengsels ingegeven kunnen worden. De drie 'hoofdmengsels' die geselecteerd kunnen worden zijn asfaltbeton, SMA en ZOAB. Daarnaast wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende korrelgroottes van die mengsels. In totaal kan uit de volgende opties worden gekozen:

- AC 22 (asfaltbeton, maximale korrelgrootte van 22 mm)
- AC 16 (asfaltbeton, maximale korrelgrootte van 16 mm)
- AC 11 (asfaltbeton, maximale korrelgrootte van 11 mm)
- AC 8 (asfaltbeton, maximale korrelgrootte van 8 mm)
- PA 16 (ZOAB, maximale korrelgrootte van 16 mm)
- PA 11 (ZOAB, maximale korrelgrootte van 11 mm)
- PA 8 (ZOAB, maximale korrelgrootte van 8 mm)
- PA 5 (ZOAB, maximale korrelgrootte van 5 mm)
- SMA-NL
- SMA-NL 11B (maximale korrelgrootte van 11 mm)
- SMA-NL 8G (maximale korrelgrootte van 8 mm)
- SMA-NL 5 (maximale korrelgrootte van 5 mm)

Al deze beschikbare asfaltmengsels hebben verschillende samenstellingen. Hierbij wordt het percentage holle ruimte, percentage aggregaat, korrelgrootte en percentage bitumen in beschouwing genomen. Deze parameters hebben allemaal invloed op de warmte-eigenschappen van de asfaltmengsels.

Laagdikte

Vervolgens dient de laagdikte te worden ingevoerd. De beschikbare laagdiktes zijn weergegeven in mm en variëren van 10 tot 100 mm, waarbij enkel de tientallen kunnen worden geselecteerd (10, 20, 30, enz.).

Type onderlaag

Er zijn drie verschillende typen onderlaag die geselecteerd kunnen worden: Zand, asfalt en steen.

Temperatuur onderlaag

Ook de temperatuur van deze onderlaag kan worden geselecteerd. De temperaturen die geselecteerd kunnen worden zijn gegeven in graden Celsius en variëren, net als bij de laagdikte, van 10 tot 100 °C, waarbij alleen de tientallen kunnen worden geselecteerd.

Begintemperatuur

Daarna kan de starttemperatuur van het aan te leggen asfalt, oftewel de temperatuur waarin het mengsel wordt aangeleverd, worden geselecteerd. De beschikbare temperaturen (in °C) variëren van 100 tot 200, waarbij elk vijftal (100, 105, 110, 115, enz.) kan worden geselecteerd. Vanaf de geselecteerde temperatuur zal de afkoelingscurve worden geplott.

Windsnelheid

Ook de windsnelheid tijdens het project kan worden ingevoerd. De beschikbare windsnelheden variëren van 0 tot 12 km/h.

Buitemtemperatuur

De omgevingstemperatuur tijdens het project die kan worden ingevoerd in de tool varieert van -10 °C tot 40 °C, waarbij ieder tweetal kan worden geselecteerd (-10, -8, -6, -4, enz.).

Weer

Vervolgens kan het type weer worden geselecteerd. De beschikbare opties zijn: bewolkt, zonnig en regenachtig. Deze optie bepaalt de hoeveelheid zonnestraling die op het asfalt terecht kan komen.

Regen

In tegenstelling tot PaveCool kan in ASPARiCool de hoeveelheid regen tijdens het project worden ingevoerd. Hierbij kan de hoeveelheid regen in mm worden geselecteerd, variërend van 0 tot 5,5 mm, met 0,5 verschil tussen iedere beschikbare optie (0; 0,5; 1; 1,5; enz.).

Duur project (min)

Als laatste kan de duur van het project worden geselecteerd. Met deze optie kan worden bepaald tot welk tijdstip de voorspelling wordt geplot. De beschikbare opties variëren van 5 tot 100 minuten, waarbij ieder vijftal kan worden geselecteerd (5, 10, 15, 20, enz.).

2.3.2. Machine Learning

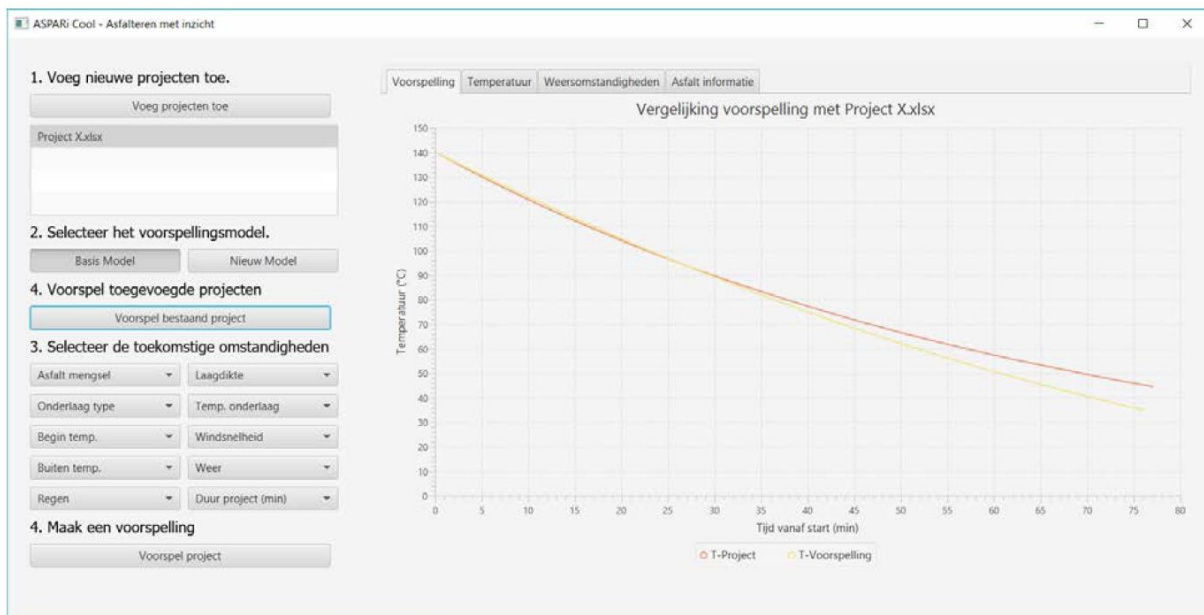
Naast toekomstige projecten, die met bovenstaande parameters kan worden ingevoerd, kunnen ook de bestaande projecten worden voorspeld. Deze bestaande kunnen van tevoren worden toegevoegd, waarna ASPARiCool op basis van alle toegevoegde data een voorspelling genereert. Deze data dient te worden ingevoerd in onderstaande vorm (**Figuur 8**) in Excel. In **Figuur 8** is te zien dat de meeste input parameters die hiervoor zijn behandeld ook in deze vorm terugkomen. Het Excel-bestand kan uiteindelijk door ASPARiCool worden gebruikt voor het ontwikkelen van een voorspellingsmodel voor het project waarvan de bestaande data in dat bestand is ingevoerd.

Asphalt Mixture	Layer Thickness (mm)	Sublayer Type	Temp. Sublayer (°C)	Windspeed (km/h)	Outside temp. (°C)	Solar (w/m2)	Rain (mm)
Time	Surface temp.						

Figuur 8: Input format voor nieuw voorspellingsmodel (Ong-A-Fat, Miller & Makarov, 2019)

Bij het ontwikkelen van een dergelijk voorspellingsmodel speelt het Machine Learning-algoritme waar ASPARiCool gebruik van maakt een grote rol. De bestaande data die is ingegeven in bovenstaande vorm is de koeling van een gemeten asfaltlaag. Het algoritme berekent van deze bestaande afkoelingscurve de afkoelsnelheid en gebruikt dit als classificatieklasse. Dit zorgt ervoor dat de voorspellingen op basis van de afkoelsnelheden worden gegenereerd en niet op basis van de temperaturen op de gegeven tijdstippen. De input parameters, die de omstandigheden tijdens het te voorspellen project weergeven, zeggen namelijk meer over de afkoelsnelheid van asfalt dan over de temperatuur van het asfalt op een bepaald moment.

Uiteindelijk wordt in ASPARiCool op basis van bovenstaand algoritme een voorspelde afkoelingscurve weergegeven (**Figuur 9**, gele curve). Zoals te zien is in **Figuur 9** wordt in diezelfde grafiek ook de bestaande curve weergegeven (rood). Zo kunnen beide curves met elkaar worden vergeleken en kan direct worden geconstateerd hoe nauwkeurig de voorspelling van een project is ten opzichte van de bestaande data.



Figuur 9: Bestaande en voorspelde afkoelingscurve in ASPARiCool (Ong-A-Fat, Miller & Makarov, 2019)

2.3.3. Discussie ASPARiCool

De ASPARiCool-software is nog volop in ontwikkeling. Dat wil zeggen dat er nog verschillende discussiepunten zijn.

Een van de discussiepunten is de kwaliteit van de gebruikte datasets. Eerder is gesteld dat hoe meer data er aan de dataset wordt toegevoegd, hoe nauwkeuriger de voorspellingen gegenereerd kunnen worden. Echter staat niet vast dat alle bestaande data ook nauwkeurig is. Tijdens het meten van dergelijke data kan namelijk veel misgaan, met als gevolg dat de verkregen data niet representatief is. Het algoritme van ASPARiCool kan echter niet herkennen of data wel of niet representatief is en zal van iedere dataset die het krijgt een patroon creëren, ongeacht de nauwkeurigheid van die data. Dit kan een negatief effect hebben op de nauwkeurigheid van de voorspellingen.

Daarnaast is het belangrijk om rekening te houden met het feit dat ASPARiCool voorspellingen doet aan de hand van wat de gebruiker invoert als inputdata. Dat wil zeggen dat wanneer gegevens over oppervlaktetemperatuur wordt toegevoegd, de output beschouwd dient te worden als een voorspelling van de oppervlaktetemperatuur. Wanneer oppervlakte- én kerntemperatuur wordt toegevoegd aan de dataset, is de voorspelling op beide gebaseerd. Echter is het verschil tussen de kern- en oppervlaktetemperatuur niet te verwaarlozen (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Het is daarom van belang dat de juiste data aan de dataset wordt toegevoegd en dat de voorspellingen juist worden begrepen.

Verder zijn er nog verschillende discussiepunten over de input parameters. Een daarvan is het ontbreken van weersparameters zoals luchtvochtigheid. In het rapport van Ong-A-Fat, Miller en Makarov (2019) wordt vermeld dat het mogelijk is om deze toe te voegen en dat dit zou kunnen leiden tot een toename van nauwkeurigheid van de voorspellingen, maar dat in verband met de complexiteit dit tot dusver nog niet is gedaan. De voornaamste reden is dat het van tevoren bepalen van de luchtvochtigheid tijdens een toekomstig project erg ingewikkeld kan zijn en om die reden zou het gebruik van de software complexer worden.

Een ander discussiepunt over de input parameters is dat er geen gewichten zijn toebedeeld aan deze parameters voor het classificeren door het algoritme tijdens de ontwikkeling van een nieuw voorspellingsmodel. Hiermee wordt bedoeld in hoeverre de ene parameter meeweegt ten opzichte van andere parameters bij het bepalen van de afkoelcurve.

Zoals eerder vernoemd zit ASPARiCool nog volop in de ontwikkelingsfase en zal in de toekomst door ASPARi verder worden gewerkt aan deze software. Ook aan de dataset zal de komende jaren door de onderzoekers en de partnerbedrijven worden gewerkt, zodat er meer data beschikbaar is voor de software. Het doel van ASPARi is om ASPARiCool in 2020 beschikbaar te stellen voor aannemers.

2.4. Conclusie

In dit hoofdstuk zijn drie onderwerpen besproken, namelijk de factoren die de afkoeling van asfalt beïnvloeden, het theoretische model PaveCool en het praktische model ASPARiCool.

Factoren afkoeling asfalt

Ten eerste is literatuuronderzoek gedaan naar de factoren voor afkoeling. Daarbij is gekeken naar de asfaltmengsels, de laagdikte, de onderliggende laag en de weersomstandigheden. De asfaltmengsels die in dit onderzoek zijn gemeten zijn asfaltbeton (AC) en steenmastiekasfalt (SMA). De conclusie uit onderzoek naar deze mengsels is dat AC sneller afkoelt dan SMA, onder vergelijkbare omstandigheden.

Uit onderzoek naar de dikte van de asfaltlaag bleek dat dunne lagen sneller afkoelen dan dikke lagen. Daarnaast wees onderzoek naar de onderliggende laag uit dat hoe lager de temperatuur van deze onderlaag, hoe sneller het asfalt afkoelt. Daar komt nog bij dat asfalt als onderliggende laag zorgt voor een snellere afkoeling dan zand als onderliggende laag, behalve wanneer de zandlaag nat of bevroren is.

Uit onderzoek naar de weersomstandigheden kan worden geconcludeerd dat hoe lager de omgevingstemperatuur, hoe sneller de afkoeling van het asfalt. Ook bleek dat asfalt sneller afkoelt bij aanwezigheid van regen en bij toename van windsnelheid. Toename van relatieve luchtvochtigheid en zonnestraling zorgen juist voor een afname van de afkoelsnelheid van asfalt.

In onderstaande **Tabel 1** zijn bovenstaande verbanden nog een keer beknopt weergegeven.

Tabel 1: Verbanden tussen factoren en afkoeling asfalt

Factor	Oorzaak factor		Gevolg afkoeling		Verband
Warmtegeleidingscoëfficiënt*	Neemt toe	↑	Neemt toe	↑	Evenredig
Laagdikte	Neemt toe	↑	Neemt af	↓	Omgek. evenredig
Omgevingstemperatuur	Neemt toe	↑	Neemt af	↓	Omgek. evenredig
Regen	Neemt toe	↑	Neemt toe	↑	Evenredig
Windsnelheid	Neemt toe	↑	Neemt toe	↑	Evenredig
Relatieve luchtvochtigheid	Neemt toe	↑	Neemt af	↓	Omgek. evenredig
Zonnestraling	Neemt toe	↑	Neemt af	↓	Omgek. evenredig

*Zie Bijlage A voor waarden warmtegeleidingscoëfficiënt voor AC, SMA en onderlagen

PaveCool

Vervolgens is literatuuronderzoek gedaan naar het theoretische model PaveCool. De belangrijkste punten uit dit literatuuronderzoek zijn:

- De voorspellingen zijn gebaseerd op een thermodynamisch model, dat onder meer kijkt naar de thermische eigenschappen zoals diffusie en warmtegeleiding van asfalt. Aan de hand van deze eigenschappen kan onder meer worden geconcludeerd dat 'dense-graded' mengsels (asfaltbeton) in het model van PaveCool sneller afkoelen dan SMA-mengsels.
- PaveCool houdt rekening met veranderingen van laagdikte en warmte-eigenschappen tijdens het verdichten.
- De voorspelde afkoelingscurve is een weergave van de afname van de gemiddelde temperatuur van het asfalt over de gehele dikte van de laag.
- De voorspellingen in PaveCool gaan niet lager dan 60 °C. Dit in verband met de verdichting die bij voorkeur niet onder een asfalttemperatuur van 60 °C wordt uitgevoerd. Een van de belangrijkste doelen van PaveCool is namelijk om een indicatie te geven van het verdichtingsinterval. Daarom worden bij iedere voorspelling een start- en stoptijd voor het verdichten gegeven.

ASPARiCool

Ook naar ASPARiCool, het praktische model, is onderzoek gedaan. Hieronder de belangrijkste punten uit dit literatuuronderzoek:

- De voorspellingen door ASPARiCool worden gegeneerd met behulp van een Machine Learning-algoritme, dat van de reële afkoelingscurves de afkoelsnelheid berekent en gebruikt als classificatieklasse. Dit algoritme maakt het mogelijk om voorspellingen te baseren op reële data die door de gebruiker zelf van tevoren kan worden toegevoegd.
- Er zijn twee verschillende manieren om een voorspelling uit te voeren. Zo kunnen de toegevoegde projecten worden voorspeld aan de hand van de input parameters die in het Excel-format zijn ingevoerd. Ook kunnen nieuwe projecten worden voorspeld door de toekomstige omstandigheden te selecteren.
- De kwaliteit van de inputdata is erg belangrijk om rekening mee te houden. Het algoritme creëert uit ieder ingevoerd project bepaalde patronen en herkent niet of bepaalde data wel of niet betrouwbaar is.
- De voorspelde data moet juist worden begrepen. Daarvoor dient ook de juiste inputdata aan het model te worden toegevoegd. ASPARiCool doet voorspellingen aan de hand van wat de gebruiker invoert, dus wanneer de gebruiker de oppervlaktetemperatuur wil voorspellen, dient deze alleen gegevens van de oppervlaktetemperatuur toe te voegen, om zo betrouwbare voorspellingen hierover te verkrijgen.
- ASPARiCool zit volop in de ontwikkelingsfase en door de partners en onderzoekers van ASPARi wordt gewerkt aan uitbreiding van de dataset. In 2020 wil ASPARi het model beschikbaar stellen voor gebruik.

Met de kennis over de invloed van de factoren op de afkoeling van asfalt kunnen de resultaten van de metingen beter worden begrepen. Deze resultaten en factoren worden nader bekeken in hoofdstuk 4. Echter wordt in hoofdstuk 3 eerst duidelijk gemaakt hoe die meetresultaten zijn verkregen.

De kennis over de beide voorspellingsmodellen kan worden gebruikt om de totstandkoming van de voorspellingen die voor dit onderzoek zijn uitgevoerd beter te begrijpen. De uitvoering en verantwoording van de voorspellingen is nader besproken in hoofdstuk 5.

3. Methodiek temperatuurmetingen

Voor het verzamelen van data die kan worden vergeleken met de voorspellingen van PaveCool en ASPARiCool zijn temperatuurmetingen uitgevoerd op asfalteerprojecten van Roelofs. Hierbij is zowel de kerntemperatuur als de oppervlaktetemperatuur van het asfalt gemeten. In dit hoofdstuk wordt eerst een methodiek besproken, waarvan een deel in dit onderzoek wordt gehandhaafd. Vervolgens worden alle materialen die zijn gebruikt voor de metingen behandeld en ook wordt uitgelegd hoe de uitvoering van de metingen in het algemeen verliep.

3.1. Process Quality improvement (PQi)

Tijdens dit onderzoek is de Process Quality improvement (PQi)-methode deels toegepast. De PQi-methode is een aanpak voor het verbeteren van proceskwaliteit binnen de asfaltsector en kan worden toegepast voor het monitoren en weergeven van variabiliteit in het asfalteerproces (Miller, 2010). Deze methode kan asfalteerploegen helpen om gesystematiseerd toe te werken naar een professionelere aanpak van het asfalteerproces (Miller, 2010).

In **Figuur 10** is de PQi-cyclus weergegeven. Aan die cyclus is te zien dat de PQi-methode is opgedeeld in vijf verschillende fases:



Figuur 10: PQi-cyclus (Miller, 2010)

- Voorbereiden en definiëren (Prepare)
 - o In deze eerste fase worden de inrichting en condities van het werkterrein vastgelegd en worden de meetmethodiek en de belangrijkste parameters gedefinieerd
- Meten/data verzamelen (Measure)
 - o In deze fase vinden de metingen plaats. Onder meer asfalttemperatuur, de positie en bewegingen van walsen en weersomstandigheden worden gemeten en gemonitord. Ook worden uiteindelijk alle resultaten verzameld in deze fase.
- Analyseren (Analyse)
 - o De verzamelde data uit de vorige fase worden in deze fase geanalyseerd. Daarnaast worden visualisaties en animaties van de verzamelde data opgesteld.
- Beoordelen (Feedback)
 - o In deze vierde fase worden de resultaten, visualisaties en animaties besproken met alle betrokkenen van het project.
- Verbeteren (Improve)
 - o Aan de hand van de feedback uit de vorige fase worden voorstellen voor verbetering voor toekomstige projecten gedaan.

De PQi-methode levert direct en indirect resultaten op, zoals 2D-weergaven van het temperatuurverloop van het asfalt, walsstrategieën in beeld en beter inzicht in de verschillen tussen asfalteerploegen.

Voor dit onderzoek zijn met name de fases 'Meten/data verzamelen' en 'Analyseren' geraadpleegd. De focus bij dit onderzoek was expliciet gericht op de asfalttemperatuur. Daarvoor zijn de kern- en oppervlaktetemperatuur geregistreerd met infraroodcamera's en thermokoppels en zijn de weersomstandigheden geregistreerd met behulp van een weerstation op locatie. Omdat verdichting buiten het onderzoekskader ligt, zijn de posities en bewegingen van de walsen niet gemonitord.

Voor de analyse-fase van de PQi-methode zijn de verzamelde gegevens gevisualiseerd in 2D en is de data uitvoerig geanalyseerd. Hierbij is met name gekeken naar de relatie tussen afkoeling en de factoren die dit beïnvloeden.

Ook de fase 'Verbeteren' is in mindere mate toegepast in dit onderzoek. Aan het eind worden namelijk aanbevelingen gedaan voor de voorspellingsmodellen en de methodiek die de betrokkenen kunnen handhaven bij vervolgonderzoek.

3.2. Materialen

Voor de metingen zijn de volgende materialen en attributen gebruikt:

Thermokoppels, thermokoppelhouders en dataloggers

Voor het meten van de kerntemperatuur van asfalt vlak nadat het is aangelegd zijn thermokoppels gebruikt. Een **thermokoppel** bestaat uit twee draden van twee verschillende metalen die aan het uiteinde, meestal door samensmelting, met elkaar verbonden zijn (Delta OHM, sd). Doordat twee verschillende metalen worden gebruikt ontstaat er een spanning. Bij een temperatuurverschil tussen beide metalen ontstaat een potentiaalverschil. Door hiervan gebruik te maken kunnen thermokoppels worden gebruikt als temperatuursensor, die het temperatuurverschil meten tussen de zogeheten warme las (samengesmolten uiteinde) en de koude las (daar waar de spanning wordt gemeten door een meetinstrument).



Figuur 11: Thermokoppel (type K)

De gebruikte thermokoppels zijn van het type K (Figuur 11), dat bestaat uit de metalen NiCr (Chromel) en NiAl (Alumel). Met dit type thermokoppel kunnen temperaturen tussen -200 °C en 1200 °C worden gemeten (Delta OHM, sd).

De thermokoppels werden tijdens de metingen aangesloten aan **dataloggers** zoals weergegeven in Figuur 12. Deze dataloggers hebben vier stekkingangen, dus er kunnen vier thermokoppels tegelijkertijd worden aangesloten. Met dit meetinstrument kan vanaf een bepaald moment de temperatuur gelogd worden. Tijdens dit loggen wordt de gemeten temperatuur per seconde opgeslagen op een SD-kaart. Wanneer de meting erop zit kan het loggen worden stopgezet.

Om de kerntemperatuur op verschillende hoogtes binnen de asfaltlaag te kunnen meten én om te voorkomen dat de thermokoppels teveel verplaatsen tijdens de meting (bijvoorbeeld door walsen) werden de thermokoppels geplaatst in zogeheten **thermokoppelhouders**. In deze houders is het onderlinge hoogteverschil tussen de thermokoppels ongeveer 1 cm. De thermokoppelhouders worden op de onderliggende laag bevestigd, waarna het asfalt er overheen wordt gelegd. De hoogte van deze houders hangt af van de dikte van de asfaltlaag. In de meeste gevallen was de hoogte van de houders 1 tot 2 cm lager dan de dikte van het asfalt.



Figuur 12: Datalogger

Infraroodcamera

Voor het meten van de oppervlaktetemperatuur van het asfalt zijn **infraroodcamera's** zoals weergegeven in **Figuur 13** gebruikt. Zoals de naam al doet vermoeden maakt deze camera gebruik van infrarode straling. Ieder object straalt zulke IR-straling uit. De lens van de camera vangt deze straling op en de hoeveelheid van deze opgevangen straling staat maat voor de oppervlaktetemperatuur van dit object (Conrad, sd).

Net als de dataloggers kan ook deze infraroodcamera de gemeten data loggen. Ook hierbij wordt de gemeten temperatuur per seconde opgeslagen op de interne opslag van de camera. Wanneer de meting is afgerond kan het loggen door de infraroodcamera worden stopgezet.



Figuur 13: Infraroodcamera

Handmatige infraroodscanner

Wanneer voor het meten van de oppervlaktetemperatuur niet gebruik kon worden gemaakt van een infraroodcamera (bijvoorbeeld doordat een andere meting nog plaatsvindt), is gebruik gemaakt van een infraroodscanner, in dit verslag aangeduid als **handmatige infraroodscanner**. Het principe van deze scanner is hetzelfde als die van de infraroodcamera. Het verschil met de camera is echter dat dit meetinstrument bestaat uit twee delen: een datalogger en een infraroodthermometer (zie **Figuur 14**). Een ander groot verschil is dat deze datalogger de gemeten gegevens niet op kan slaan. Daarom moet bij gebruik van deze thermometer de gemeten temperatuur handmatig worden genoteerd, vandaar de term 'handmatige infraroodscanner'.



Figuur 14: Handmatige infraroodscanner

Weerstation

Tijdens iedere meting zijn gedurende het gehele project (tot aan de laatste meting op een project) de weersgegevens gemeten. Hiervoor is gebruik gemaakt van een weerstation zoals weergegeven in **Figuur 15**. Daarmee kunnen onder meer de omgevingstemperatuur, de hoeveelheid neerslag en de windsnelheid worden gemeten. De weersgegevens worden bijgehouden en opgeslagen (per minuut) op de console die ook in **Figuur 15** is weergegeven.



Figuur 15: Weerstation en bijbehorende console

3.3. Uitvoering metingen

Tijdens de temperatuurmetingen op de asfalteerprojecten werden de volgende acties uitgevoerd:

Installeren weerstation

Bij aankomst op de projectlocatie werd als eerste het weerstation geïnstalleerd. Dit weerstation werd geplaatst op een centrale locatie op het werkgebied, bij voorkeur zo dicht mogelijk bij de meetpunten en waar het weerstation niet in de weg staat voor de asfaltploeg. In enkele gevallen werd het weerstation verplaatst van het ene naar het andere meetpunt, maar in de meeste gevallen bleef het weerstation staan op één punt.

Bij voorkeur wordt het weerstation ruim voor de eerste meting geïnstalleerd. De reden daartoe is dat in de weerdata was te zien dat de gemeten omgevingstemperatuur in het begin hoger uitvalt dan de daadwerkelijke omgevingstemperatuur. Dit komt zeer waarschijnlijk doordat het weerstation enigszins is 'opgewarmd' in de auto waarmee de meetapparatuur werd vervoerd, waardoor dus hogere temperaturen door het weerstation werden geconstateerd. Het duurde meestal ongeveer een halfuur voordat de gemeten en de daadwerkelijke omgevingstemperatuur overeen kwamen. Om zeker te weten dat dit verschijnsel niet meer te zien is in de data tijdens de eerste meting, kan bijvoorbeeld worden aangenomen dat het weerstation minimaal een uur van tevoren geïnstalleerd dient te worden.

Bepalen meetpunten

Na het installeren van het weerstation werden de meetpunten bepaald. De locaties en onderlinge afstanden van deze meetpunten hangen af van de lengte/grootte van het aan te leggen traject of gebied en van de asfalteerstrategie. Bij voorkeur liggen de meetpunten niet verder dan 100 tot 150 meter uit elkaar.

Installeren thermokoppels en infraroodcamera

Wanneer de asfaltploeg begon met asfalteren werden de thermokoppelhouders en infraroodcamera geïnstalleerd. De thermokoppelhouders werden op 10 tot 20 centimeter van de kant op de onderliggende laag bevestigd. Op asfalt werden deze met behulp van spijkers bevestigd. In het geval van een zachte ondergrond, zoals in de meeste gevallen zand, werd de houder enigszins in het zand geplaatst en aangedrukt met zand, zodat deze enigszins vastzat op het moment dat het asfalt er overheen werd gelegd.

De infraroodcamera werd bevestigd op een statief (driepoot) en langs het traject gezet. De camera werd gericht op de thermokoppelhouder, zodat thermokoppels en de camera op nagenoeg hetzelfde punt maten.

Vlak voordat het asfalt op het meetpunt werd aangelegd werden de logs op de datalogger en de camera gestart. Zo kon bijvoorbeeld de infraroodcamera nog de oppervlaktetemperatuur van de onderliggende laag op het meetpunt meten, voordat er asfalt overheen lag.

De meetpunten werden steeds aan één kant van de weg geplaatst. Het plaatsen van een extra meetpunt aan de overkant van de weg zou een beter idee geven van het temperatuurverloop over de gehele breedte van het traject. Echter is gekozen om dit niet te doen en hierbij is dus aangenomen dat het verschil in temperatuurverloop over de gehele breedte verwaarloosbaar is.

In **Figuur 16** is een impressie te zien van de opstelling van de thermokoppelhouder en de infraroodcamera. Op de linker afbeelding is te zien hoe de thermokoppelhouder geplaatst is op de onderliggende laag, nog voordat de asfaltmachine langs is geweest. Op de rechter afbeelding is diezelfde opstelling te zien vlak nadat het asfalt door de machine is aangebracht. Op die afbeelding is goed te zien hoe de thermokoppeldraden van de datalogger, door het asfalt, naar de houder in het asfalt lopen.



Figuur 16: Opstelling meetapparatuur vóór (links) en na (rechts) aanbrengen asfalt

De bovenstaande methode werd op ieder meetpunt toegepast voordat het asfalt op dat meetpunt werd aangelegd. Op ieder meetpunt is geprobeerd om minimaal 60 minuten te meten. In enkele gevallen kon dit wegens omstandigheden echter niet altijd worden bereikt. Ook werd bij iedere meting de start- en eindtijd genoteerd en welke meetapparatuur er voor die meting is gebruikt. Dit was van belang voor het verwerken van de data na afloop van de metingen.

Gebruik infraroodscanner

Wanneer er geen infraroodcamera beschikbaar was omdat andere metingen nog plaatsvinden, werd voor het meten van de oppervlaktetemperatuur de handmatige infraroodscanner ingezet. Hierbij werd gedurende 60 minuten lang iedere minuut de oppervlaktetemperatuur gemeten en genoteerd. Het was daarom van belang om zoveel mogelijk aanwezig te zijn op dit meetpunt tijdens een dergelijke meting, zodat zo min mogelijk 'minuten' werden gemist.

Notities metingen

Tijdens de metingen werden, naast de start- en eindtijd van iedere meting en de gebruikte meetapparatuur, nog meer verschillende notities gemaakt. Zo werd bijvoorbeeld genoteerd welke walsen zijn gebruikt voor de verdichting en hoeveel er van iedere soort wals aanwezig was. Ook werd zo nu en dan genoteerd wat de weersomstandigheden waren op dat moment. Dit gaat vooral om informatie over wel of geen regen, de hoeveelheid bewolking en een indicatie van de windsnelheid.

Na de metingen

Na afloop van elke meting werden de thermokoppeldraden afgeknipt en werd de meetapparatuur opgeruimd. Wanneer alle metingen erop zaten werd ook het weerstation opgeruimd.

3.4. Meetverslagen

In Bijlage B zijn de meetverslagen van de metingen toegevoegd. In deze meetverslagen zijn alle gegevens en resultaten van alle metingen verwerkt. In ieder meetverslag zijn onderdelen te vinden zoals een situatiebeschrijving van het asfalteerproject, de gebruikte materialen, resultaten met daarbij opmerkingen en de weersgegevens tijdens de metingen.

3.5. Samenvatting

In dit hoofdstuk is de methodiek van de metingen die voor dit onderzoek zijn uitgevoerd besproken. Eerst is de PQi-methode, die deels wordt gehandhaafd in dit onderzoek, besproken. Van de vijf fases uit de PQi-cyclus (zie [Figuur 10](#)) worden met name de fases 'Meten/data verzamelen' en 'Analyseren' toegepast in dit onderzoek. Ook wordt in mindere mate de fase 'Verbeteren' toegepast.

Verder zijn de verschillende gebruikte materialen besproken en vervolgens is uitgelegd hoe en in welke volgorde de metingen zijn uitgevoerd. Alle resultaten van de metingen zijn vastgelegd in de meetverslagen die in Bijlage B zijn te vinden. Deze resultaten worden in het volgende hoofdstuk nader bekeken en geanalyseerd op verschillende factoren, om zowel de resultaten als de invloed van de factoren beter te kunnen begrijpen.

4. Resultaten temperatuurmetingen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de temperatuurmetingen, die in het vorige hoofdstuk zijn besproken, nader bekeken. Het doel is hierbij om de resultaten beter te begrijpen, voordat ze vergeleken worden met de voorspellingen uit de theoretische- en praktische voorspellingsmodellen. Daarom wordt eerst gekeken naar de verschillen tussen de gemeten kern- en oppervlaktetemperatuur.

Een ander doel is om na te gaan of de relaties tussen de afkoelsnelheden en de invloeden van de factoren van de meetresultaten overeenkomen met die uit de literatuur en van historische data. De literatuur is in sectie 2.1 beschreven. De historische data is een dataset afkomstig van ASPARi. Deze data bestaat uit meetresultaten van de oppervlaktetemperatuur, uitgevoerd bij verschillende bedrijven binnen het ASPARi-netwerk.

Er is voor vier verschillende factoren een analyse gedaan, namelijk van laagdikte, type asfaltmengsel, omgevingstemperatuur en regen. Voor de analyse tussen de meetresultaten en de historische data zijn van die vier factoren echter alleen de laagdikte en de omgevingstemperatuur geraadpleegd. De reden daarvan is dat de historische dataset geen data bevat over SMA, waar in dit onderzoek wel metingen op zijn uitgevoerd. Ook bevat de historische dataset geen data die is verkregen onder regenachtige omstandigheden, wat in dit onderzoek wel het geval is.

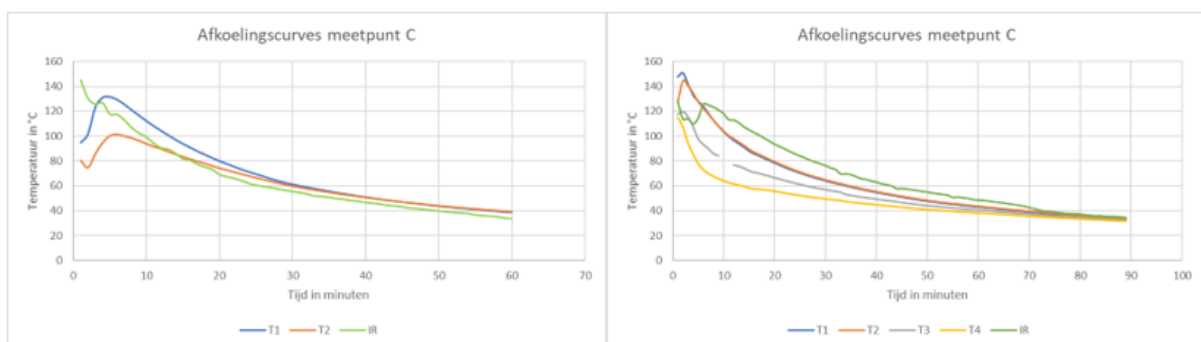
Bij deze analyse wordt grotendeels gebruik gemaakt van de hellingsgraden in tijdsintervallen van 10 minuten en van het absolute temperatuurverschil tussen $t=0$ en $t=60$. Deze hellingen zijn verkregen door in elk tijdsinterval de gemiddelde temperatuurafname per minuut te berekenen. Door de grafieken te kwantificeren en uit te drukken in getallen kunnen de resultaten eenvoudig met elkaar worden vergeleken. De historische data is weergegeven in grafieken waarbij de gemiddelde helling tussen $t=0$ en $t=20$ is geraadpleegd, om eenvoudig het verband tussen de afkoelsnelheid en de factoren te kunnen zien.

4.1. Analyse kern- en oppervlaktetemperatuur

Na het verzamelen van alle afkoelcurves kunnen deze geanalyseerd worden. De conclusies van deze analyse zijn grotendeels gebaseerd op de hellingsgraden van de grafieken over tijdsintervallen van 10 minuten.

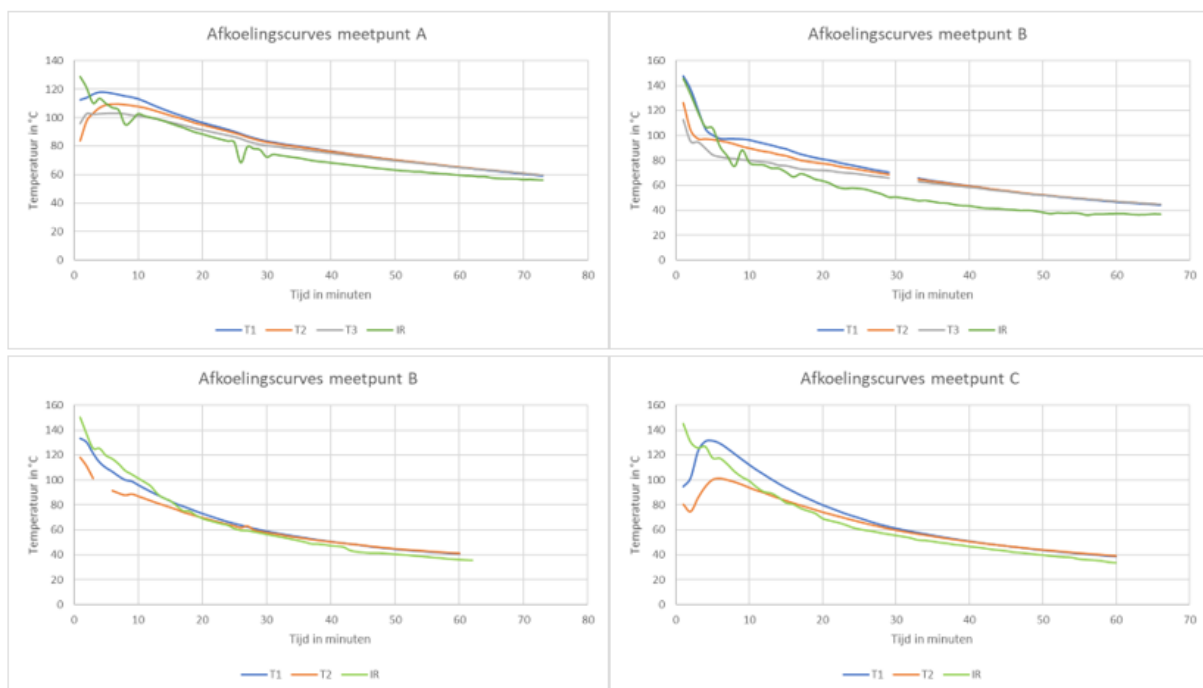
Wat direct opvalt aan de resultaten, zijn de verschillen tussen de kern- en oppervlaktetemperatuur. De kerntemperatuur is gemeten op verschillende hoogtes (zie sectie 3.2) en dat is ook te zien aan de resultaten.

In veel gevallen verschillen de temperaturen op de verschillende hoogtes in het begin het meest, maar naderen deze elkaar na verloop van tijd. In [Figuur 17](#) zijn enkele voorbeelden hiervan te zien.



Figuur 17: Enkele voorbeelden van grafieken die elkaar na verloop van tijd naderen

Wat ook aan die grafieken opvalt, zijn de verschillen in temperatuur tussen de verschillende hoogtes en de oppervlaktetemperatuur. In de rechter grafiek in **Figuur 17** is bijvoorbeeld te zien dat de temperatuur op T1 (op 5,2 cm boven de onderliggende laag in een laag van 8 cm) en T2 (4,2 cm) over het algemeen hoger is dan op T3 (3,2 cm) en T4 (2,2 cm). Ook bij de meeste andere grafieken is dit het geval, zoals te zien is in de voorbeelden van onderstaande **Figuur 18**. Deze voorbeelden tonen aan dat de kerntemperatuur aan de bovenkant hoger is dan aan de onderkant. Een mogelijke oorzaak is het directe contact met de (in de meeste gevallen) koude onderliggende laag. De onderkant van het nieuwe asfalt heeft daar sneller 'last van' dan de bovenkant. Toch heeft de bovenkant ook te maken met grote temperatuurverschillen, namelijk tussen het warme asfalt en de vaak koude lucht. Desondanks blijkt uit de data dat de lucht minder invloed uitoefent op het dalen van de kerntemperatuur dan de onderliggende laag.



Figuur 18: Voorbeelden van lagere oppervlaktetemperaturen t.o.v. kerntemperaturen

Tabel 2: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van kern- en oppervlaktetemperatuur

Meting: (Positie Figuur 18):	8-2A (linksboven)		6-1B (rechtsboven)		9-2B (linksonder)		3C (rechtsonder)	
	kern	opp.	kern	opp.	kern	opp.	kern	opp.
Helling $0 \leq t \leq 10$	-0,59	-2,61	-4,01	-6,76	-3,43	-4,86	-2,13	-4,59
Helling $10 < t \leq 20$	-1,32	-1,41	-1,07	-1,30	-1,78	-2,92	-2,27	-2,52
Helling $20 < t \leq 30$	-1,16	-1,30	-0,78	-1,10	-1,15	-1,11	-1,47	-1,19
$T_{opp} \leq T_{kern,gem}$ vanaf:	t = 6		t = 6		t = 19		t = 8	

Voorbeelden van berekeningen van de hellingen/afkoelsnelheden zijn te vinden in Bijlage E

Uit de resultaten blijkt verder dat de oppervlaktetemperatuur in veel gevallen lager uitvalt dan de kerntemperatuur, zoals te zien is in de voorbeelden in **Figuur 18** en in **Tabel 2**. Echter is ook te zien dat de oppervlaktetemperatuur in de beginfase wél hoger uitvalt dan de kerntemperatuur, maar dat deze dan snel daalt en uiteindelijk lager is in het vervolg. In **Tabel 2** is duidelijk op te maken dat de grafiek van de oppervlaktetemperatuur met name in de eerste 10 minuten steiler is dan de grafiek van de gemiddelde kerntemperatuur. De (negatieve) hellingsgraad is namelijk hoger voor de oppervlaktetemperatuur.

Een mogelijke oorzaak is de invloed van het weer op de koeling van het asfalt. Er zijn veel verschillende weersomstandigheden die invloed uit kunnen oefenen op de asfalttemperatuur en de oppervlakte krijgt daar als eerste mee te maken. Dit is goed te zien wanneer er bijvoorbeeld regen op het asfalt terecht komt.

In **Tabel 3** is dit verschil goed te zien. Deze gegevens zijn afkomstig van meetverslag 6-2. De temperatuurgegevens van meting 6-2A zijn gemeten in een tunnel, waar geen regen valt. De temperatuurgegevens van meting 6-2D zijn iets verderop buiten de tunnel gemeten, waar wel regen viel. De gevolgen voor de oppervlaktetemperatuur is in deze tabel goed te zien. Waar de asfalttemperatuur op het oppervlak in de tunnel boven de gemiddelde kerntemperatuur blijft, duikt de oppervlaktetemperatuur er in de regen al vrij snel onder. Ook is te zien dat in de regen de temperatuurdaling per minuut (helling) op het oppervlak in het begin groter is dan in de kern, in tegenstelling tot de situatie in de tunnel. Daar is de helling op het oppervlak juist kleiner in het begin en over de rest van de tijd wijken beide hellingen niet veel van elkaar af.

Tabel 3: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van kern- en oppervlaktetemperatuur (meting 6-2)

Meting:	6-2A		6-2D	
	kern	opp.	kern	opp.
Helling $0 \leq t \leq 10$	-4,73	-4,00	-4,96	-5,65
Helling $10 < t \leq 20$	-2,10	-2,55	-1,71	-1,95
Helling $20 < t \leq 30$	-1,22	-0,95	-1,08	-1,60
Helling $30 < t \leq 40$	-0,68	-0,70	-0,69	-0,61
$T_{\text{opp}} \leq T_{\text{kern,gem}}$ vanaf:	-		$t = 12$	

Uit de analyse van de kern- en oppervlaktetemperatuur kan, op basis van de gemeten data, geconcludeerd worden dat de oppervlaktetemperatuur in het begin hoger is dan de kerntemperatuur, maar dat deze wel sneller afkoelt dan de temperatuur in de kern. Ook kan geconcludeerd worden dat de kerntemperatuur in de bovenkant over de tijd dat het asfalt afkoelt hoger ligt dan de temperatuur aan de onderkant. Wel koelt het asfalt bovenin sneller af dan onderin, maar dat komt vaak doordat de temperatuur onderin in veel gevallen al in het begin lager is. Na verloop van tijd is ook te zien dat de temperaturen elkaar naderen, en de verschillen over de asfalthoogte dus kleiner worden.

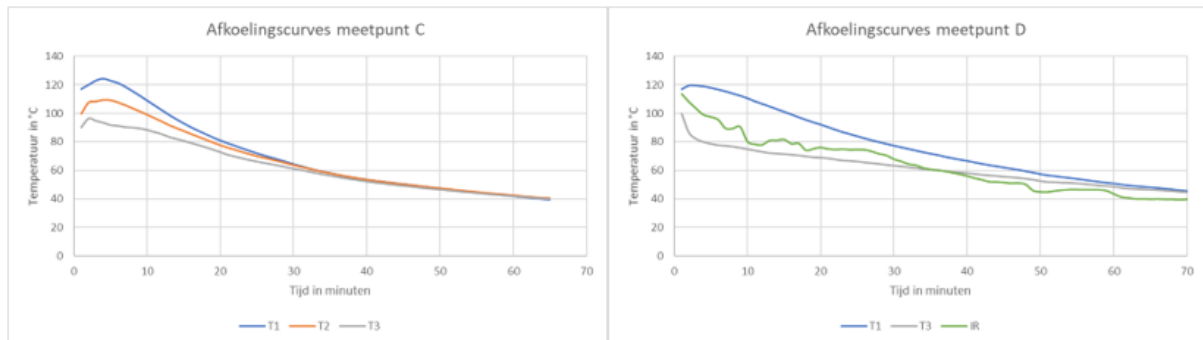
4.2. Analyse meetresultaten en factoren (validiteit)

Hieronder worden de resultaten van de metingen geanalyseerd op enkele factoren die de afkoeling van asfalt beïnvloeden. Ook hierbij wordt de analyse grotendeels gebaseerd op de hellingsgraden over tijdsintervallen van 10 minuten. Het doel van deze analyse is om na te gaan of de theorie die besproken is in sectie 2.1 terug te zien is in de gemeten data en of de verbanden tussen de factoren en de afkoelsnelheid die te zien zijn in de meetdata overeenkomen met die van historische data, afkomstig van ASPARi. Ook kunnen met deze analyse zowel de meetresultaten als de invloed van de verschillende factoren beter worden begrepen.

4.2.1. Laagdikte

De eerste analyse is gedaan op de grafieken in **Figuur 19** hieronder. De metingen zijn afkomstig uit meetverslag 6-1. Het interessante aan deze twee grafieken is dat een groot deel van de omstandigheden vrijwel gelijk zijn bij beide metingen, maar dat de laagdiktes verschillend zijn (5 en 8 cm). Ondanks de verschillende diktes is wel hetzelfde type mengsel gebruikt en omdat beide metingen binnen anderhalf uur van elkaar zijn uitgevoerd zijn de weersomstandigheden vergelijkbaar. Naast de laagdiktes is het type onderliggende laag ook verschillend tussen beide metingen. Op meetpunt C is de dikte 5 cm en is

bestaand asfalt de onderliggende laag. Op meetpunt D is de dikte 8 cm en is het asfalt aangebracht op een natte zandlaag.



Figuur 19: Meetpunten C en D uit meetverslag 6-1

Tabel 4: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van metingen 6-1C (5 cm laag) en 6-1D (8 cm laag)

Meting:	6-1C	6-1D
Laagdikte:	5 cm	8 cm
Helling $0 \leq t \leq 10$	-1,83	-2,15
Helling $10 < t \leq 20$	-1,93	-0,78
Helling $20 < t \leq 30$	-1,22	-0,84
Helling $30 < t \leq 40$	-0,88	-0,81
Helling $40 < t \leq 50$	-0,52	-0,76
Helling $50 < t \leq 60$	-0,45	-0,34
$T_{\text{start}} - T_{t=60}$	87,9 °C	72,3 °C

Het verschil in laagdiktes is goed te zien in Tabel 4. Hierbij is de gemiddelde temperatuur (inclusief kern- én oppervlaktetemperatuur) per meting in beschouwing genomen. De laag van 5 cm koelt de eerste 20 minuten relatief snel af, waarna na verloop van tijd de hellingsgraad snel afneemt. De laag van 8 cm koelt al snel wat constanter af, gezien het kleine verschil in hellingsgraad tussen $t=20$ en $t=50$.

Ook het verschil tussen de starttemperatuur en de temperatuur op $t=60$ is in Tabel 4 af te lezen. Daaruit blijkt dat de 'dunne' laag in 60 minuten aanzienlijk meer is afgekoeld dan de 'dikke' laag.

Daar komt nog bij dat de laag op meetpunt D op nat zand is aangebracht. Uit literatuuronderzoek naar de factoren (zie sectie 2.1.3) blijkt dat nat zand een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt heeft dan asfalt, en dus sneller afkoelt. Echter koelt de laag op asfalt in dit geval sneller af dan die op het natte zand. De invloed van de dikte van de laag op de afkoelsnelheid van het asfalt is dus duidelijk te zien in Figuur 19.

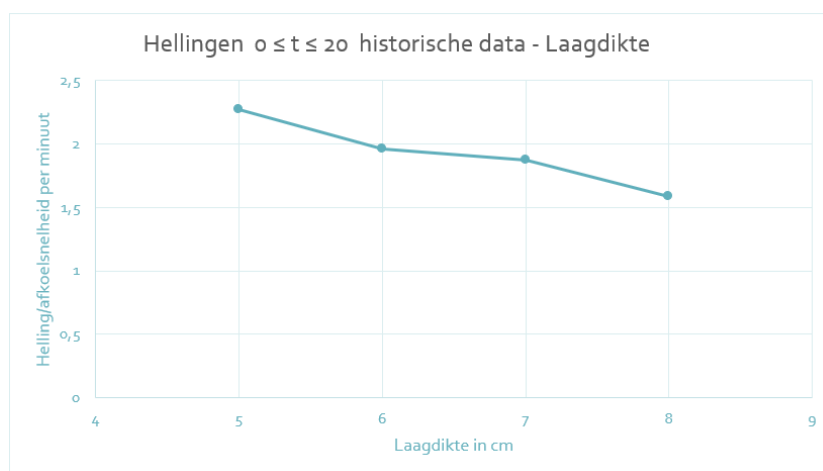
In onderstaande Tabel 5 zijn nog enkele voorbeelden te zien van lagen met verschillende diktes, waarbij duidelijk te zien is dat bij de dunneren lagen (3 tot 4 cm) de helling in het begin relatief groot is en na verloop van tijd flink afvlakt, terwijl het verloop van de helling bij dikkere lagen (7 tot 8 cm) veel minder varieert over de tijd. Ook de absolute afname van temperatuur in een uur is bij dunneren lagen groter dan bij dikkere lagen.

Tabel 5: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van verschillende dunne en dikke asfaltlagen

Meting:	2A	3B	6-2A	1D	7-1A	8-2B
Laagdikte:	3 cm	4 cm	3 cm	8 cm	8 cm	7 cm
Helling $0 \leq t \leq 10$	-4,49	-4,68	-4,48	-2,57	-2,12	-1,32
Helling $10 < t \leq 20$	-2,47	-1,89	-2,25	-0,77	-0,91	-1,20
Helling $20 < t \leq 30$	-1,22	-1,08	-1,13	-0,62	-0,89	-1,08
Helling $30 < t \leq 40$	-0,65	-0,69	-0,68	-0,58	-0,67	-0,68
Helling $40 < t \leq 50$	-0,40	-0,50	-0,43	-0,49	-0,72	-0,70
Helling $50 < t \leq 60$	-0,25	-0,36	-0,35	-0,38	-0,45	-0,52
$T_{\text{start}} - T_{t=60}$	102,8 °C	97,8 °C	103,7 °C	81,0 °C	75,9 °C	76,1 °C

Zoals al in sectie 2.1.2 werd aangegeven koelen dunne lagen sneller af dan dikke lagen. Ook de meetresultaten laten zien dat het asfalt sneller afkoelt bij een kleinere laagdikte.

In onderstaande **Figuur 20** is de relatie tussen de helling/afkoelsnelheid van de historische data en de laagdikte weergegeven. Daarin is duidelijk te zien dat de afkoelsnelheid afneemt bij toename van de dikte van de asfaltlaag.



Figuur 20: Relatie afkoelsnelheid en laagdikte (historische data) (toelichting: zie Bijlage E)

Zowel de theorie als de historische data laten zien dat hoe dikker de asfaltlaag, hoe lager de afkoelsnelheid van het asfalt. Dit verschijnsel is ook terug te zien in de meetresultaten. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de meetresultaten op het gebied van laagdikte overeenkomen met de literatuur en de historische data.

4.2.2. Type asfalmengsel

Vervolgens is gekeken naar de verschillen in afkoeling tussen asfaltbeton en SMA. Uit het literatuuronderzoek in sectie 2.1.1 blijkt dat asfaltbeton sneller afkoelt dan SMA, omdat asfaltbeton een grotere warmtegeleidingscoëfficiënt heeft. Echter zijn de meetresultaten van de SMA-lagen moeilijk te vergelijken met andere meetresultaten, omdat er vergeleken met asfaltbeton erg weinig metingen zijn uitgevoerd op SMA. Van de in totaal 38 metingen waren er namelijk slechts 4 uitgevoerd op SMA, op twee verschillende momenten. Dit komt doordat er in de periode van dit onderzoek vooral asfaltbeton werd aangelegd en slechts in enkele gevallen SMA. Deze zijn ook nog eens gemeten onder vrij extreme omstandigheden. De ene meting is uitgevoerd onder koude en regenachtige weersomstandigheden, terwijl de andere meting is uitgevoerd onder relatief warme weersomstandigheden. De metingen op

asfaltlagen van een vergelijkbare dikte zijn onder andere weersomstandigheden gemeten. Daarom is het moeilijk om een goede vergelijking tussen beide mengsels te maken.

In **Tabel 6** zijn twee metingen te zien die qua weersomstandigheden en starttemperatuur nog enigszins met elkaar vergeleken kunnen worden. Het nadeel is echter dat de gegevens van de kerntemperatuur van de rechter grafiek niet beschikbaar zijn, in verband met het niet functioneren van sommige thermokoppels.

De hellingen van beide curves bevestigen niet de theorie uit sectie 2.1.1, omdat uit de hellingen in **Tabel 6** blijkt dat de SMA-laag juist sneller afkoelt dan de AC-laag. Ook de absolute afname in een uur is bij SMA groter dan bij asfaltbeton.

Tabel 6: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van een AC-laag en een SMA-laag

Meting:	6-2A	9-2A
Type asfaltmengsel:	AC 8	SMA-NL 11B
Helling $0 \leq t \leq 10$	-4,48	-5,15
Helling $10 < t \leq 20$	-2,25	-2,57
Helling $20 < t \leq 30$	-1,13	-1,33
Helling $30 < t \leq 40$	-0,68	-0,73
Helling $40 < t \leq 50$	-0,43	-0,66
Helling $50 < t \leq 60$	-0,35	-0,24
$T_{\text{start}} - T_{t=60}$	103,7 °C	115,7 °C

Hierbij dient wel nogmaals vermeld te worden dat de grafieken van SMA en AC moeilijk te vergelijken zijn. Ook de omstandigheden in bovenstaand voorbeeld zijn niet op alle punten gelijk. Zo is de AC-laag gemeten in een tunnel, terwijl de SMA is gemeten onder een vrijwel onbewolkte lucht. Ook is bij de SMA-laag zoals eerder aangegeven alleen de oppervlaktetemperatuur gemeten. Uit de analyse in sectie 4.1 bleek dat de oppervlaktetemperatuur sneller afkoelt dan de kerntemperatuur. Mogelijk had de kerntemperatuur bij de SMA-laag uit **Tabel 6** de stelling uit sectie 2.1.1 wel bekrachtigd.

4.2.3. Weersomstandigheden

Ten slotte zijn de verschillen in hellingen van de grafieken geanalyseerd om te zien wat de verschillende weersomstandigheden voor invloed hebben op de meetresultaten en of dit overeenkomt met de theorie en de historische data. Hierbij is specifiek gekeken naar de invloed van de omgevingstemperatuur en van regen.

Omgevingstemperatuur

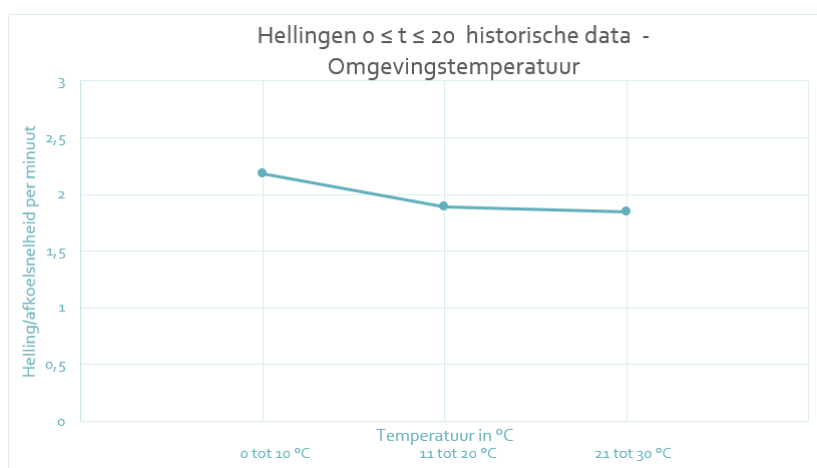
In **Tabel 7** hieronder is duidelijk het verschil te zien in temperatuurverloop tussen metingen bij koude en warme weersomstandigheden. De grafieken bij warme temperaturen lopen vergeleken met die onder koude temperaturen aanzienlijk constanter, gezien het kleine verschil tussen de hellingen aan het begin en na verloop van tijd. De hellingen bij relatief koude weersomstandigheden zijn groter in de beginfase van de meting dan de hellingen bij relatief warme weersomstandigheden. Ook het absolute verschil na een uur bij lage omgevingstemperaturen is groter dan bij hogere omgevingstemperaturen.

Tabel 7: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van metingen bij relatief koude en warme weersomstandigheden

Meting:	3C	9-1B	5D	8-3A
Omgevingstemperatuur:	6,2 °C	7,7 °C	13,3 °C	16 °C
Type asfaltmengsel:	AC 16	AC 16	AC 22	AC 16
Laagdikte:	4 cm	5 cm	6 cm	5 cm
Temperatuur onderlaag:	7 °C	9 °C	15 °C	34 °C
Helling $0 \leq t \leq 10$	-3,55	-4,74	-1,73	-2,24
Helling $10 < t \leq 20$	-4,70	-2,19	-2,00	-1,56
Helling $20 < t \leq 30$	-2,15	-1,14	-1,39	-1,17
Helling $30 < t \leq 40$	-1,66	-0,66	-0,93	-0,63
Helling $40 < t \leq 50$	-1,23	-0,46	-0,70	-0,62
Helling $50 < t \leq 60$	-0,96	-0,34	-0,48	-0,47
$T_{\text{start}} - T_{t=60}$	112,8 °C	107,1 °C	87,2 °C	75,9 °C

Wel dient hierbij vermeld te worden dat bovenstaande constatering ook mogelijk een gevolg zijn van de temperatuur van de onderlaag. Bij hogere omgevingstemperaturen is ook de temperatuur van de onderliggende laag hoger zoals in Tabel 7 is te zien. Verder valt op dat de temperatuur van de onderlaag bij meting 8-3A aanzienlijk hoger ligt dan de rest. Deze onderliggende asfaltlaag was namelijk eerder die dag aangelegd en nog niet volledig afgekoeld.

In Figuur 21 hieronder is voor de historische data de relatie tussen de afkoelsnelheid van asfalt en de omgevingstemperatuur te zien. Hierbij zijn de metingen ingedeeld in drie verschillende temperatuurcategorieën, zoals in de figuur te zien is. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat asfalt sneller afkoelt bij lage omgevingstemperaturen.

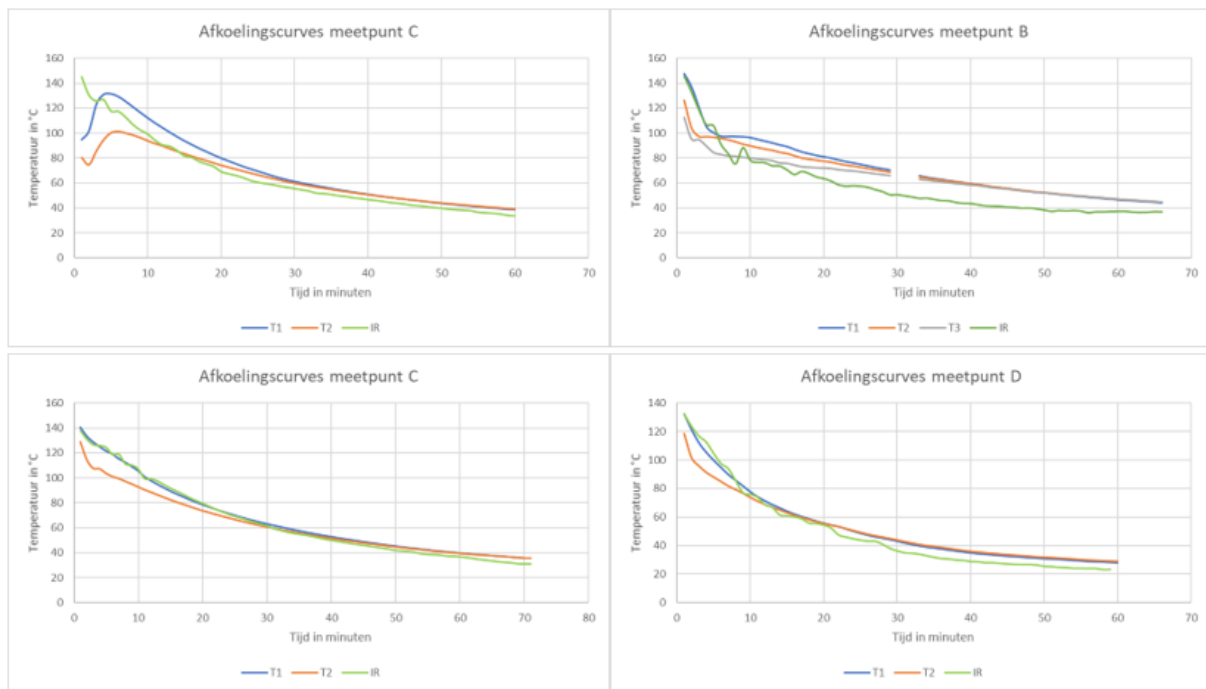


Figuur 21: Relatie afkoelsnelheid en omgevingstemperatuur (historische data) (toelichting: zie Bijlage E)

Zowel de theorie, beschreven in sectie 2.1.4, als de historische data tonen aan dat hoe lager de omgevingstemperatuur, hoe sneller de afkoeling van asfalt verloopt. Ook de geanalyseerde meetresultaten laten deze relatie tussen de afkoelsnelheid en de omgevingstemperatuur zien, waarmee deze dus op basis van die relatie overeenkomen met de theorie en de historische data.

Regen

Wanneer wordt gekeken naar de grafieken onder regenachtige omstandigheden, valt op dat deze grafieken wat grilliger verlopen dan de grafieken onder droge omstandigheden (zie Figuur 22). Dit heeft waarschijnlijk vooral te maken met de meetapparatuur die op onregelmatige momenten in aanraking komt met koud regenwater, en zo dus met enige regelmaat lage temperaturen registreert.



Figuur 22: Verschillen in temperatuurverloop tussen droge (links) en natte (rechts) weersomstandigheden

Toch beïnvloedt het koude regenwater de asfalttemperatuur niet zodanig dat het zeer snel afkoelt, zoals in het literatuuronderzoek in sectie 2.1.4 duidelijk werd. Wel koelt in veel gevallen het asfalt, met name in de beginfase, sneller af onder natte omstandigheden, vergeleken met droge omstandigheden. Deze verschillen in afkoeling worden weergegeven in onderstaande **Tabel 8**. Het grote verschil tussen de afkoeling onder droge en natte omstandigheden is te zien aan de hellingen in de beginfase. Bij natte omstandigheden is de helling in de eerste 10 minuten relatief groot, waarna de grafiek snel afvlakt. Bij droge omstandigheden is het verschil in hellingsgraad tussen de eerste 10 minuten en de rest van de tijd kleiner en neemt de helling wat constanter af. Aan het absolute verschil is te zien dat in beide gevallen het asfalt in een uur tijd redelijk gelijk afkoelt, maar gezien de hellingen is het verloop van de grafieken erg verschillend.

De hellingen/afkoelsnelheden in **Tabel 8** laten zien dat, vooral in de beginfase, het asfalt sneller afkoelt wanneer het regent. Ook uit literatuuronderzoek (zie sectie 2.1.4) bleek dat asfalt sneller afkoelt onder regenachtige omstandigheden. De meetresultaten en de theorie laten dus een vergelijkbaar verband tussen afkoelsnelheid en regen zien.

Tabel 8: Hellingen per tijdsinterval van 10 minuten van metingen bij droge en natte weersomstandigheden

Meting: (Positie Figuur 22):	3C (linksboven)	2C (linksonder)	6-1B (rechtsboven)	6-2D (rechtsonder)
Regen	Nee	Nee	Ja	Ja
Omgevingstemperatuur:	6,2 °C	10,2 °C	9 °C	10,4 °C
Type asfaltmengsel:	AC 16	AC 8	AC 22	AC 8
Laagdikte:	4 cm	3 cm	5 cm	3 cm
Temperatuur onderlaag:	7 °C	7 °C	11 °C	19 °C
Helling $0 \leq t \leq 10$	-3,55	-3,41	-4,01	-5,19
Helling $10 < t \leq 20$	-4,70	-1,97	-1,07	-1,79
Helling $20 < t \leq 30$	-2,15	-1,36	-0,78	-1,25
Helling $30 < t \leq 40$	-1,66	-0,89	-0,55	-0,67
Helling $40 < t \leq 50$	-1,23	-0,67	-0,63	-0,34
Helling $50 < t \leq 60$	-0,96	-0,47	-0,49	-0,07
$T_{\text{start}} - T_{t=60}$	112,8 °C	101,4 °C	105,6 °C	101,5 °C

4.3. Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de meetresultaten, afkomstig van de temperatuurmetingen, geanalyseerd. Uit de analyse van de kern- en oppervlaktetemperatuur bleek dat in 21 van de 29 gevallen waar de kerntemperatuur op meerdere hoogtes werd gemeten de temperatuur bovenin de asfaltlaag hoger ligt dan de temperatuur onderin de asfaltlaag. In 14 van de 26 metingen waarbij kern- én oppervlaktetemperatuur zijn gemeten bleek ook dat de oppervlaktetemperatuur in de beginfase hoger ligt dan de kerntemperatuur, maar vervolgens sneller afneemt en na verloop van tijd lager is vergeleken met de kerntemperatuur. Aan de resultaten was verder te zien dat de temperaturen op alle hoogtes elkaar na verloop van tijd naderen.

Na het analyseren van de meetresultaten op de verschillende factoren, kan worden geconcludeerd dat dunne asfaltlagen sneller afkoelen dan dikke asfaltlagen. Met name in de beginfase neemt de temperatuur bij dunne lagen snel af om vervolgens na verloop van tijd af te vlakken, terwijl de afname van temperatuur bij dikke lagen over de tijd veel minder varieert. De relatie tussen de laagdikte en de afkoelsnelheid die terug te zien was in de meetresultaten komt overeen met wat beschreven is in de theorie en wat ook uit de historische data kon worden opgemaakt.

De analyse naar het verschil in afkoeling tussen asfaltbeton en SMA leverde een andere conclusie op dan wat in de theorie (sectie 2.1.1) werd gesteld. Waar in de theorie werd beweerd dat asfaltbeton sneller afkoelt dan SMA, bleek uit de resultaten juist dat SMA sneller afkoelde. Wel dient vermeld te worden dat de omstandigheden redelijk verschillen tussen de vergeleken metingen, in verband met een gebrek aan SMA-data. Een duidelijke conclusie over het verschil tussen beide asfaltmengsels is daarom moeilijk op te stellen.

Ten slotte werden de meetresultaten geanalyseerd op de invloed van omgevingstemperatuur en regen. Daaruit kan worden geconcludeerd dat asfalt sneller afkoelt bij koude weersomstandigheden en bij regen. De data die in de regen was gemeten liet met name in het begin een snelle afkoeling zien, ten opzichte van de data die onder droge omstandigheden was gemeten. Beide relaties kwamen overeen met wat in de theorie was beschreven. Voor de omgevingstemperatuur was tussen de meetresultaten en de historische data een vergelijkbaar verband te zien tussen de omgevingstemperatuur en de afkoelsnelheid van asfalt.

In onderstaande **Tabel 9** zijn de conclusies uit bovenstaande analyse nog eens kort samengevat. Daarin is duidelijk te zien dat in de meeste gevallen de relaties tussen de afkoelsnelheid van asfalt en de factoren voor de theorie/historische data en de meetresultaten overeenkomen. Alleen voor de factor 'asfalmengsel' is geen overeenkomst tussen de theorie/historische data en de meetresultaten.

Tabel 9: Vergelijking relaties afkoeling asfalt en factoren

Factor:	Laagdikte	Asfalmengsel	Omg.temp.	Regen
Oorzaak/verschijnsel factor:	Neemt toe	AC of SMA	Neemt toe	Neemt toe
Gevolg afkoelsnelheid: Theorie en historische data	Neemt af	AC (koelt sneller af)	Neemt af	Neemt toe
Meetresultaten	Neemt af	SMA	Neemt af	Neemt toe
Overeenkomst relaties?	Ja	Nee	Ja	Ja

De kennis over de invloed van factoren op de meetresultaten draagt niet alleen bij aan het beter begrijpen van de meetresultaten; het geeft ook beter weer wat er van de voorspellingen uit hoofdstuk 5 wordt verwacht. Deze kennis kan namelijk uiteindelijk van pas komen wanneer de meetresultaten en de voorspellingen met elkaar worden vergeleken in hoofdstuk 6.

5. Verantwoording voorspellingen

In dit hoofdstuk worden de voorspellingen besproken, die zijn uitgevoerd met behulp van PavCool en ASPARiCool. In Bijlage C zijn al deze voorspelde curves te vinden. Het doel van dit hoofdstuk is om duidelijk te maken hoe de voorspellingen tot stand zijn gekomen en welke data daarvoor is gebruikt. Als eerste wordt ingegaan op de hoeveelheid voorspellingen. Er is namelijk niet voor iedere uitgevoerde meting een voorspelling gedaan. Vervolgens wordt per model besproken welke input parameters zijn gebruikt en waar deze parameters van zijn geraadpleegd. Daarna wordt ingegaan op de verschillende datasets die zijn gebruikt bij de totstandkoming van de ASPARiCool-voorspellingen, aangezien deze voortkomen uit reële data die door de gebruiker zelf wordt toegevoegd aan het model. Als laatste wordt een korte eerste analyse gedaan over de output van de modellen. De rest van deze analyse volgt in het volgende hoofdstuk, wanneer de gemeten en voorspelde data met elkaar wordt vergeleken.

5.1. Hoeveelheid voorspellingen

Er zijn in totaal 38 metingen uitgevoerd, met bij iedere meting andere omstandigheden. Zo kan onder meer de omgevingstemperatuur of de starttemperatuur tussen twee meetpunten verschillen, ook al worden metingen binnen korte tijd van elkaar uitgevoerd. Echter is in plaats van iedere meting, per meetverslag één voorspelling uitgevoerd*. Daarbij is uit ieder meetverslag één meetpunt gekozen waar de voorspelling op is gebaseerd. Bij voorkeur is er op dit meetpunt zoveel mogelijk data beschikbaar en zijn er geen of weinig bijzonderheden waargenomen tijdens de meting. Er is voor dit aantal voorspellingen gekozen om de voorspellingen te kunnen vergelijken met zo betrouwbaar mogelijke data en om de analyse overzichtelijk te houden.

**Voor de meetverslagen 4 en 8-2 zijn in verband met een gebrek aan betrouwbare data geen voorspellingen uitgevoerd*

5.2. Input

De gebruikte input is zeer van belang, omdat deze bepaalt hoe de voorspelde curves tot stand komen. In de voorspellings- en vergelijkingsverslagen in Bijlage C is te zien dat voor beide modellen een inputtabel is opgesteld, waarin duidelijk wordt wat in het programma is ingevoerd om vervolgens tot de voorspelde afkoelcurve te komen. Deze tabellen zijn voor beide modellen verschillend, omdat de input op sommige vlakken verschilt.

5.2.1. Verantwoording input PavCool

De volgende gegevens zijn gebruikt als input voor PavCool:

Tabel 10: Verantwoording input PavCool

Input parameter (Eenheid)	Gebruikte gegevens en verantwoording
Datum (mm/dd/jjjj)	De datum dat de meting is uitgevoerd
Tijd (mm:ss)	De starttijd van de betreffende meting
Omgevingstemperatuur (°C)	De gemiddelde omgevingstemperatuur tijdens de meting die is gemeten door het weerstation
Windsnelheid (km/h)	Omdat het weerstation de windsnelheid niet heeft gemeten en de lokale windgegevens enkel zijn gebaseerd op schattingen, is de door het KNMI gemeten windsnelheid ingevoerd

Bewolking (Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt)	De bewolking die is ingevoerd is de op waarneming gebaseerde hoeveelheid bewolking
Breedtegraad (°)	De breedtegraad is bepaald met behulp van Google Maps
Type asfalmix (‘Dense-graded’/asfaltbeton of SMA)	Bij gebruik van asfaltbeton (AC) is ‘Dense-graded’ ingevoerd. Bij gebruik van SMA is ‘SMA’ ingevoerd.
Laagdikte (mm)	De dikte van het asfalt zoals vermeld in de planning van Roelofs
Starttemperatuur (°C)	De ingevoerde starttemperatuur is afkomstig van de meetverslagen
Type onderlaag (Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei)	Het type onderlaag dat is ingevoerd is bepaald op basis van waarneming
Staat onderlaag (Droog of nat; bevroren of niet bevroren)	In geval van regen is gekozen voor ‘nat’, in alle andere gevallen is gekozen voor droog In alle gevallen is gekozen voor ‘niet bevroren’
Temperatuur onderlaag (°C)	De ingevoerde onderlaagtemperatuur is afkomstig van de meetverslagen

5.2.2. Verantwoording input ASPARiCool

De volgende gegevens zijn gebruikt als input voor ASPARiCool:

Tabel 11: Verantwoording input ASPARiCool

Input parameter (Eenheid)	Gebruikte gegevens en verantwoording
Asfalmengsel (Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB)	Het gebruikte asfalmengsel tijdens het asfalteren, gekozen uit ‘AC 8’, ‘AC 16’, ‘AC 22’ en ‘SMA-NL 11B’
Laagdikte (mm)	De dikte van het asfalt zoals vermeld in de planning van Roelofs
Type onderlaag (Zand, asfalt of steen)	Het type onderlaag dat is ingevoerd is bepaald op basis van waarneming
Temperatuur onderlaag (°C)	De ingevoerde onderlaagtemperatuur is afkomstig van de meetverslagen
Windsnelheid (km/h)	Omdat het weerstation de windsnelheid niet heeft gemeten en de lokale windgegevens enkel zijn gebaseerd op schattingen, is de door het KNMI gemeten windsnelheid ingevoerd
Omgevingstemperatuur (°C)	De gemiddelde omgevingstemperatuur tijdens de meting die is gemeten door het weerstation
Weer/zonnestraling (W/m ²)	De ingevoerde hoeveelheid zonnestraling is afkomstig van de weersgegevens van het KNMI. Bij 100% bewolking is de waarde o gehanteerd.
Regen (mm)	De ingevoerde hoeveelheid regen is afkomstig van de weersgegevens van het KNMI.

5.3. Datasets ASPARiCool

In tegenstelling tot PaveCool zijn in ASPARiCool voor iedere voorspelde meting vier verschillende voorspellingen gegenereerd. Hierbij is gebruik gemaakt van drie verschillende datasets, namelijk 'dataset 1', 'dataset 2' en 'dataset 3'. De eerste dataset bestaat uit historische data, afkomstig van ASPARiCool, waar ook de validiteit van de resultaten mee is uitgevoerd (zie sectie 4.2 en hoofdstuk 7). Deze data is gemeten op projecten die uitgevoerd zijn door verschillende bedrijven binnen het ASPARi-netwerk. De tweede dataset is de verzameling data die enkel voor dit project is gemeten. Dataset 3 gebruikt dezelfde inputparameters als dataset 2, maar de ingevoerde temperatuurgegevens zijn die van de gemeten kerntemperaturen, in plaats van de oppervlaktetemperatuur die bij de andere twee datasets is gebruikt.

In **Tabel 12** en **Tabel 13** zijn voor datasets 1 en 2 een aantal gegevens weergegeven. Zo is te zien dat de omgevingstemperatuur in dataset 1 aanzienlijk gevarieerder was dan bij dataset 2, maar dat er ook minder verschillende asfaltmengsels werden gebruikt en dat de asfaltdiktes minder van elkaar verschilden in dataset 1, ten opzichte van de tweede dataset.

Tabel 12: Gegevens dataset 1

Dataset 1	Laagdikte	Onderlaag temp.	Windsn.	Omgevings-temp.	Zonnestr.	Regen
Min.	50 mm	-0,2 °C	0 km/h	-0,4 °C	0 W/m ²	0 mm
Max.	80 mm	22 °C	8 km/h	24,6 °C	668 W/m ²	0 mm
	Asfaltmix	Aantal		Onderlaag	Aantal	
	AC 16	4		Steen	31	
	AC 22	20				
	PA 16	7				

Tabel 13: Gegevens dataset 2

Dataset 2	Laagdikte	Onderlaag temp.	Windsn.	Omgevings-temp.	Zonnestr.	Regen
Min.	30 mm	5 °C	8 km/h	5 °C	0 W/m ²	0 mm
Max.	80 mm	36 °C	23 km/h	17 °C	6 W/m ²	1,1 mm
	Asfaltmix	Aantal		Onderlaag	Aantal	
	AC 8	5		Asfalt	20	
	AC 11	1		Zand	11	
	AC 16	7				
	AC 22	14				
	SMA-NL 11B	4				

Voor het voorspellen van de oppervlaktetemperatuur zijn steeds drie verschillende voorspellingen uitgevoerd in ASPARiCool, namelijk een voorspelling met dataset 1 als input, een voorspelling met dataset 2 als input en een voorspelling met beide datasets als input. Hiermee kan worden gecontroleerd in hoeverre de gebruikte dataset invloed heeft op de nauwkeurigheid van de voorspellingen, vergeleken met de gemeten waarden. Met dataset 1 als input zijn de voorspellingen gegenereerd op basis van historische data van ASPARi. Met dataset 2 als input zijn de voorspellingen gebaseerd op de metingen die voor dit onderzoek zijn uitgevoerd. Het voordeel van het gebruik van dataset 2 ten opzichte van dataset 1 is dat er meer bekend is over de uitvoering van de metingen. Deze zijn namelijk vrijwel allemaal op dezelfde manier uitgevoerd bij asfalteerprojecten van één bedrijf en, vergeleken met dataset 1, uitgevoerd onder minder gevarieerde weersomstandigheden, kijkend naar onder meer de omgevingstemperatuur en de zonnestraling (zie **Tabel 12** en **Tabel 13**). Over de uitvoering van de

metingen van dataset 1 is minder bekend, maar aangezien deze zijn uitgevoerd bij meerdere bedrijven, is het aannemelijk dat er meer variatie zit in de uitvoering van de metingen.

Met beide datasets als input zijn de voorspellingen gegenereerd op basis van zoveel mogelijk data. Deze dataset (1 en 2) is twee keer zo groot als de beide datasets apart (62 om 31). Uit het onderzoek van Ong-A-Fat, Miller en Makarov (2019) naar ASPARiCool bleek dat naar verwachting meer data nodig is om tot betere voorspellingen te komen. Met het gebruik van beide datasets als input en door de resultaten te vergelijken met de andere twee voorspellingen, kan worden gecontroleerd of die bewering juist is.

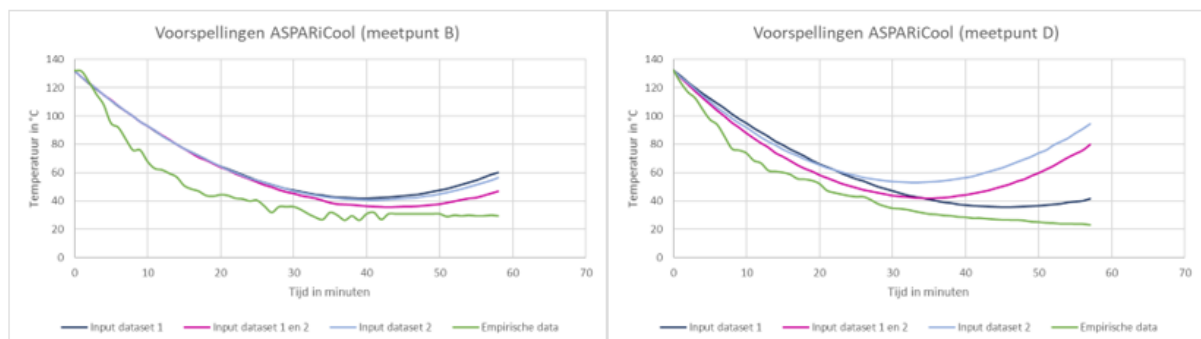
Met dataset 3 als input zijn voorspellingen gedaan over de kerntemperatuur. De metingen van de kerntemperatuur zijn consistentiever verlopen ten opzichte van die van de oppervlaktetemperatuur. Dit is te zien in de data, waar de afkoelcurves van de kerntemperatuur een minder grillig verloop vertonen dan de afkoelcurves van de oppervlaktetemperatuur. Het gebruik van dataset 3 ten opzichte van de andere twee datasets geeft een goed beeld van de invloed van consistentie in de gemeten data op de voorspellingen.

5.4. Voorspellings- en vergelijkingsverslagen

Alle voorspelde curves zijn weergegeven in Bijlage C, in de zogeheten voorspellings- en vergelijkingsverslagen. In deze verslagen zijn tevens alle inputwaarden te vinden en in de grafieken is ook de gemeten data weergegeven.

5.5. Overfitting

Wat vrijwel meteen opvalt aan de voorspelde curves van ASPARiCool, is dat in veel gevallen de temperatuur volgens het model na verloop van tijd weer stijgt, wat niet in de lijn der verwachting ligt (zie [Figuur 23](#)). Dit is het gevolg van 'overfitting'.



Figuur 23: Enkele voorbeelden van 'overfitting'

Het algoritme in het model van ASPARiCool wordt getraind met de datasets die van tevoren worden toegevoegd. Deze datasets bevatten gemeten afkoelcurves, die gezien kunnen worden als voorbeelden waarvan de gewenste output bekend is (Schrijver, 2006). Het algoritme herkent vervolgens bepaalde patronen in de trainingsdata en aan de hand daarvan worden voorspellingen gedaan door het model. Echter kan het ook voorkomen dat het model te lang traint, waardoor irrelevante of willekeurige details in de trainingsdata ook worden herkend. In dit geval zijn dat onregelmatige temperatuurverschillen in de gemeten data. Een goed voorbeeld daarvan is de groene lijn in de linker grafiek in [Figuur 23](#). Deze lijn geeft de gemeten data weer. Echter is te zien dat op sommige momenten de temperatuur hoger is ten opzichte van de minuut daarvoor, wat komt door foutieve metingen. Het algoritme gaat in geval van overfitting deze stijgingen in temperatuur ook herkennen en past het deze toe op de output van het model. Als gevolg daarvan beschouwt het model deze stijgingen als normaal gedrag en zo stijgt de temperatuur volgens het model na verloop van tijd weer (Schrijver, 2006).

Er lijkt niet echt een duidelijk patroon te zijn van wanneer overfitting optreedt. Bij zowel de oppervlaktetemperatuur als de kerntemperatuur komt overfitting ongeveer evenveel voor, binnen de gemeten tijdsintervallen. Dat laatste is belangrijk om te vermelden, want naar verwachting zal bij alle voorspellingen overfitting optreden. Echter zal de grafiek in sommige gevallen pas stijgen na het einde van de meting en is dit dus niet zichtbaar in de grafieken.

Bij alle voorspellingen zal naar verwachting dus overfitting optreden, maar het moment dat de grafiek weer stijgt ligt per grafiek anders. Aan de data is te zien dat sommige grafieken relatief vroeg stijgen, bij relatief hoge asfalttemperaturen (temperaturen tussen de 70 en 90 °C). Andere grafieken stijgen pas weer tegen het einde van de meting, wanneer het asfalt rond de 30 of 40 °C is.

Wanneer per meting wordt bekeken welke voorspelling als eerste overfitting toont, kan geconstateerd worden dat de voorspellingen afkomstig van datasets 1 (historische data) en 3 (projectdata kerntemperatuur) het eerst van de voorspellingen weer stijgen (zie [Tabel 14](#)). Slechts in twee gevallen stijgt de voorspelling afkomstig van dataset 2 (projectdata oppervlaktetemperatuur) of 1+2 het eerst.

Verder zijn in [Tabel 14](#) de temperaturen op het omslagpunt door overfitting weergegeven. Ook het aantal gevallen van overfitting per dataset is gegeven. In de tabel is te zien dat bij datasets 1 en 3 overfitting het vaakst voorkomt binnen de gemeten tijdsintervallen. Ook is te zien dat de gemiddelde temperatuur op het omslagpunt bij dataset 1 het hoogst is. Hieruit kan worden geconcludeerd dat overfitting bij dataset 1 het meest voorkomt en ook in de meest extreme vorm, waarmee wordt bedoeld op de relatief hoge gemiddelde temperatuur op het omslagpunt.

Tabel 14: Omslagpunten temperatuur door overfitting per meting

Meting	Voorspelling waarbij overfitting als eerste voorkomt	Temperatuur op omslagpunt per dataset			
		1	1 + 2	2	3
1	Dataset 3	?	?	?	77,75 °C
2	Dataset 3	56	?	59,5 °C	68 °C
3	Dataset 1	82,75 °C	49,75 °C	44,75 °C	39 °C
5	Dataset 1	62,25 °C	?	?	?
6-1	Dataset 1	92,5 °C	78 °C	70 °C	82 °C
6-2	Dataset 2	35,5 °C	42 °C	53 °C	52 °C
7-1	Dataset 3	55 °C	?	?	63,5 °C
7-2	Dataset 1	76 °C	?	?	48,5 °C
7-3	Dataset 1	41,75 °C	35,75 °C	40,5 °C	31,25 °C
8-1	Dataset 1	96 °C	?	?	?
8-3	Dataset 3	94,5 °C	?	90,5 °C	95,25 °C
9-1	Dataset 1+2	55 °C	70 °C	51,25 °C	67,75 °C
9-2	Dataset 3	46 °C	61,75 °C	57,75 °C	52 °C
Gemiddelde temperatuur op omslagpunt:		66,1 °C	56,2 °C	58,4 °C	61,5 °C
Aantal gevallen van overfitting per dataset: (binnen de gemeten tijdsintervallen)		12	6	8	11

Een vraagteken (?) geeft aan dat het omslagpunt (mogelijk) pas na het einde van de meting ligt (buiten het tijdsinterval)

Wat verder erg opvalt aan de gegevens in [Tabel 14](#) is dat overfitting het minst voorkomt wanneer dataset 1 en 2 samen worden gebruikt, terwijl deze dataset bestaat uit twee datasets waar overfitting juist vaker voorkomt. Het lijkt er daarom op dat het gebruik van een grotere dataset ervoor zorgt dat overfitting later of minder vaak voorkomt. Een mogelijke oorzaak daarvoor is dat stijging in temperatuur bij een grotere dataset relatief gezien minder vaak voorkomt in de reële data, waardoor het algoritme deze pas later herkent en beschouwt als normaal gedrag.

Wanneer gekeken wordt naar de grafieken afkomstig van PaveCool is te constateren dat overfitting daarbij niet voorkomt. Ten eerste omdat in sommige gevallen de grafiek al snel stopt (bij 60 °C) en dus niet geconstateerd kan worden wat er gebeurt bij lagere temperaturen, en omdat overfitting een verschijnsel is dat expliciet voorkomt bij Machine Learning (Schrijver, 2006). Omdat het PaveCool-algoritme niet gebaseerd is op Machine Learning is de verwachting dat overfitting bij de PaveCool-voorspellingen niet voorkomt.

5.6. Samenvatting en conclusie

In dit hoofdstuk zijn de voorspellingen die zijn uitgevoerd met de modellen PaveCool en ASPARiCool verantwoord. Op meetverslagen 4 en 8-2 na zijn per meetverslag voorspellingen zijn uitgevoerd op één meting. In totaal zijn dus voor 13 metingen voorspellingen gedaan. Uit de verantwoording van de input parameters kan worden opgemaakt dat voor de weersgegevens zowel de gegevens van het weerstation (omgevingstemperatuur) als van het KNMI (regen, windsnelheid, zonnestraling) zijn geraadpleegd. Ook zijn enkele parameters gebaseerd op waarnemingen tijdens de metingen, zoals de hoeveelheid bewolking.

Met ASPARiCool zijn vier verschillende voorspellingen uitgevoerd, op basis van vier verschillende datasets. In **Tabel 15** hieronder is enkele informatie over de datasets die worden gebruikt weergegeven.

Tabel 15: Informatie datasets gebruikt voor de ASPARiCool-voorspellingen

Dataset	Temperatuur	Afkomst	Voordelen gebruik dataset
1	Oppervlakte	Historische data ASPARi (periode 2007-2012)	Meer verschillende weersomstandigheden, o.a. hoge omgevingstemperaturen
1 + 2	Oppervlakte	Historische data ASPARi en metingen uitgevoerd voor dit onderzoek	Grote hoeveelheid data
2	Oppervlakte	Metingen uitgevoerd voor dit onderzoek (periode nov-dec 2019)	Minder variatie in uitvoering metingen, meer bekend over metingen
3	Kern	Metingen uitgevoerd voor dit onderzoek (periode nov-dec 2019)	Minder grilligheid in meetresultaten

Tenslotte is een korte analyse uitgevoerd op een veel voorkomend verschijnsel genaamd overfitting. Overfitting zorgt ervoor dat de voorspellingsgrafieken na verloop van tijd weer stijgen. Dit komt doordat het machine-learning algoritme in de gebruikte datasets constateert dat op sommige momenten de temperatuur stijgt, als gevolg van foutieve metingen. Een echt duidelijk patroon of verband is er niet, maar wanneer wordt gekeken naar de hoeveelheid gevallen en de gemiddelde temperatuur op het omslagpunt (van dalen naar stijgen), kan worden geconcludeerd dat bij gebruik van dataset 1 overfitting het meest voorkomt (binnen het gemeten tijdsinterval) en de temperatuur op het omslagpunt gemiddeld het hoogst is. Ook kan op basis van de geanalyseerde data worden geconcludeerd dat gebruik van een grotere dataset ervoor zorgt dat overfitting minder vaak of pas later voorkomt. Verder is geconstateerd dat overfitting bij de PaveCool-voorspellingen niet voorkomt.

Met dit hoofdstuk is duidelijk gemaakt hoe de voorspellingen, die in de volgende hoofdstukken worden geanalyseerd, tot stand komen. Verder is de kennis over overfitting belangrijk om rekening mee te houden bij de analyse van de voorspellingen, aangezien deze de nauwkeurigheid van de voorspellingen beïnvloeden.

6. Vergelijkingsanalyse nauwkeurigheid meetresultaten en voorspellingen

In dit hoofdstuk worden de gemeten en voorspelde afkoelcurves met elkaar vergeleken aan de hand van nauwkeurigheidswaarden. Eerst wordt ingegaan op de gemeten data die voor beide modellen is gebruikt voor de vergelijking. Vervolgens worden de correlatiecoëfficiënt en de RMSE besproken. Deze waarden kunnen goed worden gebruikt voor het vergelijken van de voorspellingen en bepalen tevens de mate van nauwkeurigheid. Ten slotte worden de afkoelcurves en de berekende vergelijkingswaarden geanalyseerd.

6.1. Gemeten data in grafieken

In de grafieken in de voorspellings- en vergelijkingsverslagen in Bijlage C zijn naast de voorspelde afkoelcurves ook de gemeten afkoelcurves weergegeven. Echter zijn die voor PavCool en ASPARiCool niet hetzelfde.

In sectie 2.2.2 is aangegeven dat de voorspellingen door PavCool gebaseerd zijn op de gemiddelde temperatuur van het asfalt over de gehele dikte van de asfaltlaag. Daarom is de weergegeven afkoelcurve in de grafieken van PavCool in Bijlage C een weergave van de gemiddelde temperatuur op alle gemeten hoogtes. Dit bevat dus de gemeten temperaturen op de hoogtes T₁ tot en met T₄ (afhankelijk van hoeveel er werden gebruikt en hoeveel er functioneerden) en de oppervlaktetemperatuur.

Met ASPARiCool zijn de kern- en oppervlaktetemperatuur apart voorspeld. De historische ASPARi-data van dataset 1 bestaat namelijk alleen uit gegevens over de oppervlaktetemperatuur. De voorspellingen die volgen uit die dataset zijn dan ook expliciet van de oppervlaktetemperatuur van het asfalt. Om een goede vergelijking tussen de historische data en de voor dit onderzoek gemeten data (dataset 2) te kunnen maken, is in dit geval alleen de oppervlaktetemperatuur van de metingen geraadpleegd. Ook de kerntemperatuur is met ASPARiCool voorspeld. Daarvoor is alleen de voor dit onderzoek gemeten data gebruikt, omdat alleen in die dataset de kerntemperatuur is gemeten.

Omdat de voorspelde data afkomstig van ASPARiCool verschilt van die van PavCool, zijn ook de groene curves in Bijlage C (empirische data) verschillend. Waar in de PavCool-grafieken de groene curve de gemiddelde temperatuur over de gehele dikte van het asfalt (kern- én oppervlaktetemperatuur) weergeeft, zijn de groene curves in de ASPARiCool-grafieken een weergave van de oppervlakte- en kerntemperatuur afzonderlijk.

6.2. Correlatiecoëfficiënt en RMSE

Om de overeenkomsten en verschillen tussen de verschillende afkoelcurves te kwantificeren, zijn voor iedere voorspelde curve, ten opzichte van de meetresultaten, de correlatiecoëfficiënt en de RMSE berekend. Hieronder is te lezen hoe deze zijn berekend en wat de uitkomsten voor de voorspelde afkoelcurves zijn.

6.2.1. Pearson's correlatiecoëfficiënt

De samenhang tussen twee variabelen wordt ook wel correlatie genoemd (Van Heijst, 2018). Deze correlatie kan uitgedrukt worden in een getal, namelijk Pearson's correlatiecoëfficiënt. De formule waarmee deze correlatiecoëfficiënt kan worden berekend is:

$$r = \frac{\text{Cov}(x, y)}{s(x)s(y)} = \frac{\frac{\sum((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{N - 1}}{s(x)s(y)} \quad (7)$$

Waarbij:

r = correlatiecoëfficiënt

$\text{Cov}(x, y)$ = covariantie tussen variabelen x en y

x_i, y_i = observatie (in dit geval x en y als respectievelijk voorspelde en gemeten asfalttemperatuur)

$\bar{x}$ = gemiddelde van de steekproef

$s(x)$ = standaarddeviatie

N = grootte van de steekproef (in dit geval het aantal gemeten temperatuurwaarden)

De coëfficiënt r is een waarde tussen -1 en 1. Bij een waarde van 0 is er geen samenhang tussen beide variabelen en bij een waarde van -1 of 1 is er een perfect verband. Een positieve coëfficiënt geeft aan dat variabele y toeneemt wanneer ook variabele x toeneemt en een negatieve coëfficiënt betekent dat variabele y afneemt bij toename van variabele x (McClave, Sincich, & Knypstra, 2016).

Met de correlatiecoëfficiënt kan aan de afkoelcurves worden gezien in hoeverre het verloop van beide grafieken overeenkomt. Wanneer beide curves bijvoorbeeld op gelijke tijdstippen eenzelfde afname van temperatuur laten zien, is de correlatiecoëfficiënt 1. Wanneer het verschil in afname per tijdstip groot is, zal de correlatiecoëfficiënt afnemen.

Bepalen nauwkeurigheid

Om aan de hand van de correlatiecoëfficiënt te bepalen wat de nauwkeurigheid van het verloop van de voorspellingen (ten opzichte van de meetresultaten) is, is een richtlijn opgesteld. De richtlijn die hiervoor wordt gebruikt is weergegeven in onderstaande **Tabel 16** (Tilburg University, sd).

Tabel 16: Verschillende categorieën van nauwkeurigheid op basis van correlatiecoëfficiënt (Tilburg University, sd)

Correlatiecoëfficiënt	Mate van correlatie	Mate van nauwkeurigheid	Categorie
$\langle 0,900 ; 1]$	Zeer hoge correlatie	Zeer nauwkeurig	I
$\langle 0,700 ; 0,900]$	Hoge correlatie	Nauwkeurig	II
$\langle 0,500 ; 0,700]$	Middelmatige correlatie	Geringe nauwkeurigheid	III
$\langle 0,300 ; 0,500]$	Lage correlatie	Lage nauwkeurigheid	IV
$[0 ; 0,300]$	Nauwelijks of geen correlatie	Onnauwkeurig	

6.2.2. Root Mean Square Error (RMSE)

Een hoge correlatiecoëfficiënt wil nog niet zeggen dat beide grafieken ook overeenkomen. Het verschil in temperatuur tussen beide curves kan bijvoorbeeld continu 40 °C zijn, maar dan is de correlatiecoëfficiënt nog steeds 1, omdat de afname van beide grafieken per tijdstip steeds hetzelfde is. Om het gemiddelde onderlinge verschil tussen beide grafieken te bepalen, is de Root Mean Square Error (RMSE) berekend, in het Nederlands de kwadratisch gemiddelde fout. De formule waarmee de RMSE berekend kan worden is:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - x_i)^2}{n}} \quad (8)$$

Waarbij:

n = grootte van de steekproef (in dit geval het aantal gemeten temperatuurwaarden)

y_i = voorspelde temperatuurwaarde

x_i = gemeten temperatuurwaarde

De RMSE wordt gebruikt om de spreiding van meetwaarden ten opzichte van een regressielijn te meten (McClave, Sincich, & Knypstra, 2016). In dit geval kan daarom de voorspelde afkoelcurve worden gezien als regressielijn en wordt de kwadratisch gemiddelde fout tussen de gemeten temperatuurwaarden en de voorspelde regressielijn berekend. Als alle meetpunten op de regressielijn liggen, is de RMSE-waarde 0.

Bepalen nauwkeurigheid

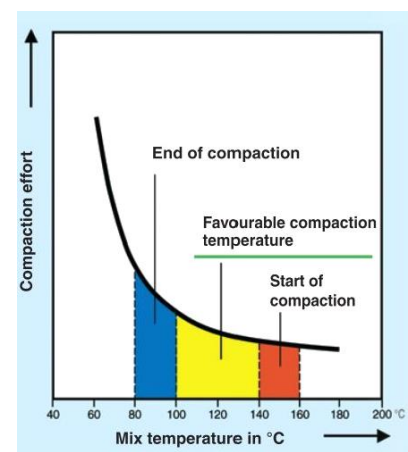
Om aan de hand van de RMSE te bepalen wat de nauwkeurigheid van het verschil in temperatuur van de voorspellingen (ten opzichte van de meetresultaten) is, is een richtlijn opgesteld. In deze richtlijn is de mate van nauwkeurigheid opgedeeld in vier categorieën, zoals is weergegeven in **Tabel 17** hieronder.

Tabel 17: Verschillende categorieën van nauwkeurigheid op basis van RMSE

RMSE (in °C)	Mate van nauwkeurigheid	Categorie
[0 , 5)	Zeër nauwkeurig	I
[5 , 10)	Nauwkeurig	II
[10 , 20)	Gering	III
[20 , →)	Onnauwkeurig	IV

Bovenstaande temperatuurintervallen zijn gebaseerd op literatuur. Het temperatuurinterval voor de categorie 'zeër nauwkeurig' is gebaseerd op de onderzoeken van Herb (2009), Wang (2014) en Khan (2019). In deze onderzoeken werd ook gebruik gemaakt van de RMSE-waarden voor het vergelijken van gemeten en gesimuleerde temperatuurwaarden. Hierbij liepen de resultaten uiteen van 0 tot 5 °C, wat in die onderzoeken werd beschouwd als 'betrekkelijk klein' (Wang, Zhu, & Wong, 2014).

Ook is de minimale asfalttemperatuur voor verdichting in beschouwing genomen en is als richtlijn hiervoor **Figuur 24** gebruikt. In dit onderzoek van BOMAG (2009) ligt de wenselijke minimale verdichtingstemperatuur tussen de 80 en 100 °C. Ervan uitgaande dat de voorspellingsmodellen worden gebruikt voor het bepalen van een verdichtingsinterval, kan op basis van **Figuur 24** een (gemiddelde) temperatuurafwijking van maximaal 10 °C worden beschouwd als nauwkeurig en een temperatuurafwijking tussen de 10 en 20 °C als gering of gangbaar. Op basis van **Figuur 24** is bepaald dat temperatuurafwijkingen van meer dan 20 °C kunnen worden beschouwd als onnauwkeurig.



Figuur 24: Verdichtingstemperaturen (BOMAG, 2009)

6.2.3. Output

Voor iedere voorspelde afkoelcurve is zowel de correlatiecoëfficiënt als de RMSE berekend. Zoals vermeld in hoofdstuk 5 zijn er per meetpunt vijf verschillende soorten voorspellingen uitgevoerd; één met gebruik van PaveCool en vier met gebruik van ASPARiCool. De voorspellingen zijn uitgevoerd voor in totaal 13 meetpunten. De correlatiecoëfficiënt en de RMSE per meetpunt zijn te vinden in [Tabel 34](#) en [Tabel 35](#) in Bijlage D. In onderstaande [Tabel 18](#) zijn de gemiddelden per type voorspelling van alle meetpunten weergegeven.

Tabel 18: Gemiddelde correlatiecoëfficiënt en RMSE per voorspelde afkoelcurve

	PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
		1	1 + 2	2	3
Gemiddelde correlatiecoëfficiënt	0,989	0,931	0,973	0,970	0,983
Gemiddelde RMSE	11,34	20,64	16,31	16,29	12,30

6.3. Vergelijking datasets

Uit [Tabel 18](#) kan worden opgemaakt dat de correlatiecoëfficiënt van de voorspellingen van PaveCool gemiddeld het hoogst is. Dat wil zeggen dat het verloop van de voorspelde curve door PaveCool ten opzichte van die van ASPARiCool het meest overeenkomt met de gemeten afkoelcurve. Verder is te zien dat van de ASPARiCool-voorspellingen voor de oppervlaktetemperatuur de voorspelling waarbij gebruik is gemaakt van beide datasets de correlatiecoëfficiënt gemiddeld het hoogst is. Dat zou erop kunnen duiden dat het gebruik van een grotere dataset een beter verloop van de afkoeling van asfalt voorspelt, al is de coëfficiënt van de voorspellingen met gebruik van dataset 2 niet veel lager.

Van alle ASPARiCool-voorspellingen is echter de correlatiecoëfficiënt van de voorspellingen van de kerntemperatuur het hoogst. Het verschil in verloop tussen de gemeten en voorspelde kerntemperatuur is dus kleiner dan het verschil tussen de gemeten en voorspelde oppervlaktetemperatuur.

Kijkend naar de gemiddelde RMSE-waarden in [Tabel 18](#), kan worden opgemaakt dat die van PaveCool het laagst is. Dat wil zeggen dat de temperatuurwaarden per tijdstip van PaveCool ten opzichte van die van ASPARiCool gemiddeld het dichtst bij de gemeten waarden liggen. Daarnaast is te zien dat de ASPARiCool-voorspellingen met dataset 1+2 en dataset 2 een vergelijkbare gemiddelde RMSE-waarde laten zien.

De gemiddelde RMSE-waarde van de kerntemperatuurvoorspellingen is echter het kleinst van alle ASPARiCool-voorspellingen, wat wil zeggen dat het verschil in temperatuur per tijdstip tussen de gemeten en voorspelde kerntemperatuur kleiner is dan het verschil tussen de gemeten en voorspelde oppervlaktetemperatuur.

Zoals eerder vermeld in sectie 5.3 verloopt de data uit dataset 3 veel vloeiender dan de meeste data van dataset 2, waar veel grilligheden te zien zijn. Uitgaande van bovenstaande vergelijkingswaarden kan worden geconcludeerd dat het gebruik van een constantere dataset leidt tot een grotere nauwkeurigheid van de voorspellingen. De verschillen tussen de correlatie- en RMSE-waarden van de oppervlakte- en kerntemperatuur zijn relatief groot, wat een duidelijk verschil in nauwkeurigheid aanduidt.

6.4. Analyse voorspellingen en factoren

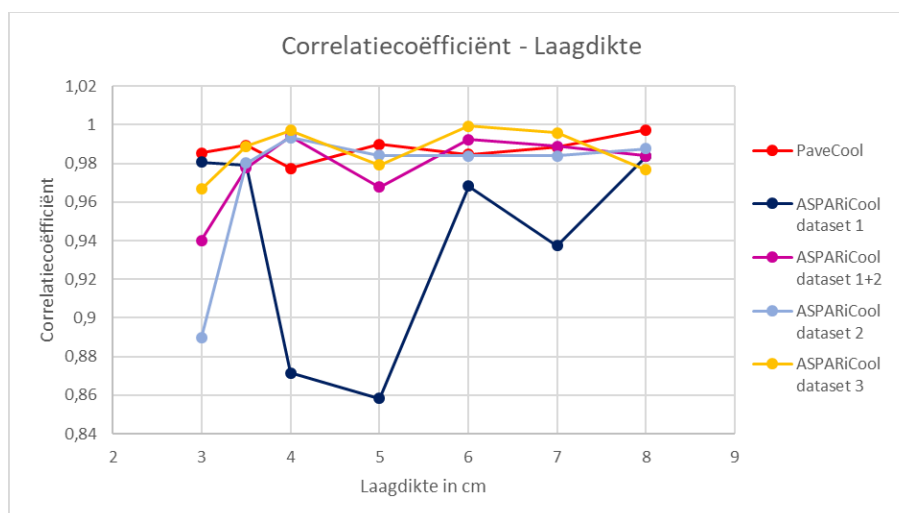
In deze sectie worden de voorspellingen van PaveCool en ASPARiCool per factor nader bekeken. Net als bij de analyse van de meetresultaten en de factoren in sectie 4.2 worden de voorspellingen geanalyseerd aan de hand van de laagdikte van het asfalt, het gebruikte asfaltmengsel, de omgevingstemperatuur en de aanwezigheid van regen. Bij deze analyse worden de berekende correlatie- en RMSE-waarden geraadpleegd om de nauwkeurigheid van de voorspellingen voor elke geanalyseerde factor te bepalen.

6.4.1. Laagdikte

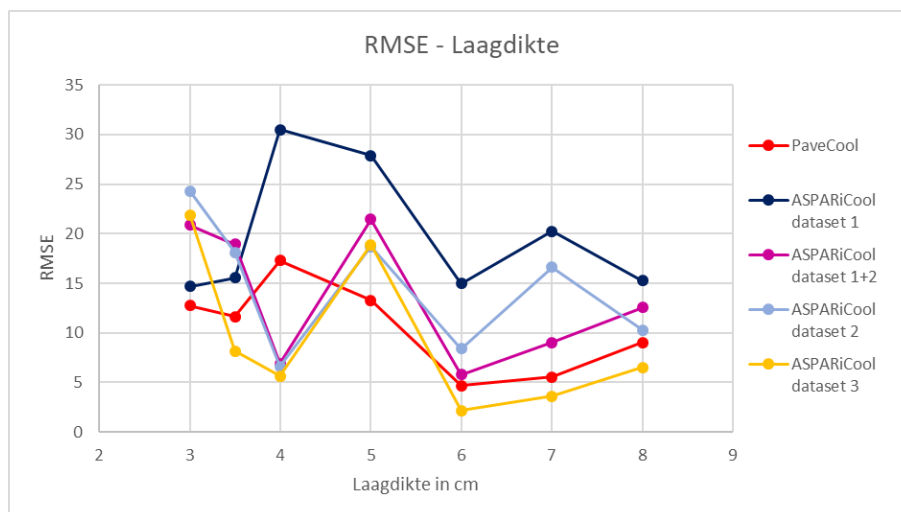
In onderstaande **Tabel 19** zijn per laagdikte de gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden voor iedere type voorspelling weergegeven. In de meest rechter kolom is aangegeven hoeveel voorspellingen er per laagdikte zijn uitgevoerd. Ter ondersteuning van **Tabel 19** zijn in **Figuur 25** en **Figuur 26** de gemiddelde vergelijkingswaarden weergegeven in een grafiek.

Tabel 19: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per voorspelling voor iedere laagdikte

Laag- dikte (in cm)	Correlatie					RMSE					#
	Pave- Cool	ASPARiCool, dataset:				Pave- Cool	ASPARiCool, dataset:				
		1	1+2	2	3		1	1+2	2	3	
3	0,985	0,981	0,940	0,890	0,967	12,72	14,67	20,86	24,29	21,87	2
3,5	0,989	0,979	0,978	0,980	0,989	11,65	15,55	18,92	18,14	8,14	2
4	0,977	0,871	0,994	0,993	0,997	17,31	30,52	6,91	6,59	5,64	1
5	0,990	0,858	0,968	0,984	0,979	13,26	27,90	21,45	18,69	18,88	4
6	0,985	0,968	0,992	0,984	0,999	4,67	14,98	5,77	8,39	2,15	1
7	0,989	0,937	0,989	0,984	0,996	5,53	20,26	9,00	16,60	3,59	1
8	0,997	0,984	0,984	0,988	0,977	9,04	15,26	12,53	10,30	6,49	2



Figuur 25: Gemiddelde correlatiecoëfficiënt versus laagdikte



Figuur 26: Gemiddelde RMSE-waarde versus laagdikte

Wanneer de resultaten van PavCool en ASPARiCool met elkaar worden vergeleken, is te zien dat de resultaten van PavCool minder variëren dan die van ASPARiCool. Ook is te zien in de grafieken dat de voorspellingen voor dikkere lagen (6, 7, 8 cm) iets nauwkeuriger zijn dan de voorspellingen voor dunneren lagen.

6.4.2. Type asfaltmengsel

In onderstaande **Tabel 20** zijn de vergelijkingswaarden weergegeven voor de twee bij dit onderzoek gebruikte asfaltmengsels.

Tabel 20: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per type voorspelling voor de asfaltmengsels AC en SMA

Meng-sel	Correlatie					RMSE					#
	Pave-Cool	ASPARiCool, dataset:				Pave-Cool	ASPARiCool, dataset:				
		1	1+2	2	3		1	1+2	2	3	
AC	0,988	0,935	0,966	0,954	0,979	11,76	20,16	16,67	17,33	14,83	11
SMA	0,989	0,979	0,978	0,980	0,989	11,65	15,55	18,92	18,13	8,14	2

Uit bovenstaande tabel is op te maken dat in de meeste gevallen de voorspellingen op SMA nauwkeuriger zijn dan voor asfaltbeton. Vooral het verschil in verloop tussen de gemeten en voorspelde grafieken was klein bij de SMA-voorspellingen. Bij de absolute verschillen in temperatuur (RMSE) is wel iets meer variatie te zien in de resultaten, maar ook daar is in de meeste gevallen het verschil kleiner bij de SMA-voorspellingen.

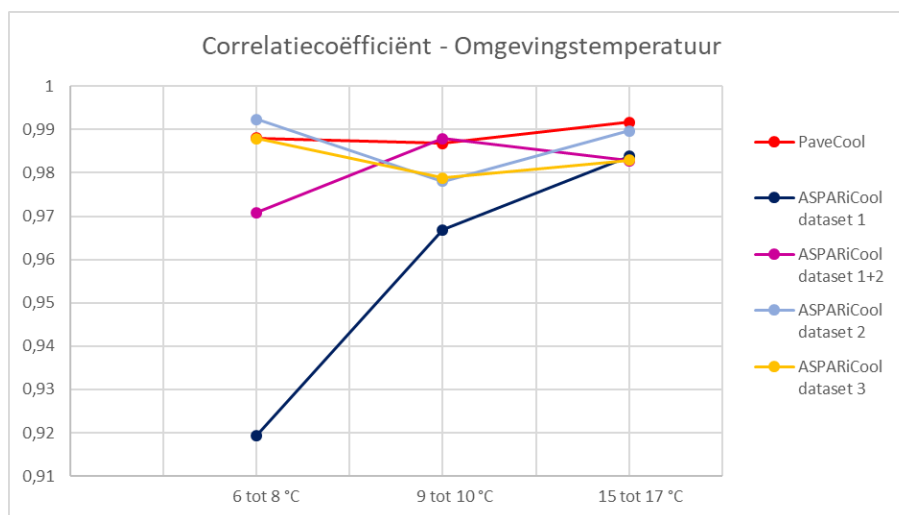
Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat het aantal metingen/voorspellingen van beide mengsels ver uiteen ligt, zoals in de rechter kolom in **Tabel 20** is weergegeven.

6.4.3. Omgevingstemperatuur

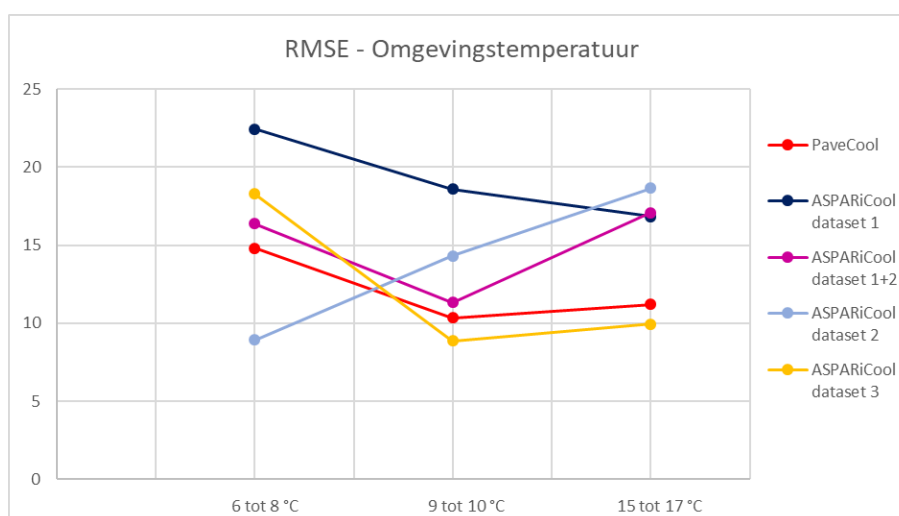
In onderstaande **Tabel 21**, **Figuur 27** en **Figuur 28** zijn de resultaten van de relatie tussen de vergelijkingswaarden en de omgevingstemperatuur weergegeven. Voor deze vergelijking zijn de metingen/voorspellingen opgesplitst in drie verschillende categorieën voor de omgevingstemperatuur, zoals in de tabel te zien is. Ook dient vermeld te worden dat alleen de metingen/voorspellingen zijn gebruikt waarbij geen regen aanwezig was, zodat die factor geen invloed heeft op onderstaande resultaten.

Tabel 21: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per type voorspelling voor drie categorieën omgevingstemperatuur

T _{omgev.} (in °C)	Correlatie					RMSE					#
	Pave-Cool	ASPARiCool, dataset:				Pave-Cool	ASPARiCool, dataset:				
		1	1+2	2	3		1	1+2	2	3	
6 – 8	0,988	0,919	0,971	0,992	0,988	14,79	22,43	16,38	8,92	18,30	2
9 – 10	0,987	0,967	0,988	0,978	0,979	10,33	18,61	11,33	14,32	8,86	4
15 – 17	0,992	0,984	0,983	0,990	0,983	11,20	16,84	17,09	18,64	9,95	2



Figuur 27: Gemiddelde correlatiecoëfficiënt versus omgevingstemperatuur



Figuur 28: Gemiddelde RMSE versus omgevingstemperatuur

Afgaande op bovenstaande resultaten lijkt er een verband te zijn tussen de omgevingstemperatuur en de nauwkeurigheid van de metingen. Zowel PaveCool als ASPARiCool geeft volgens bovenstaande resultaten betere voorspellingen bij hogere omgevingstemperaturen. Wel zijn de verschillen in nauwkeurigheid tussen de verschillende categorieën bij de PaveCool-voorspellingen kleiner dan bij de ASPARiCool-voorspellingen.

Gezien de correlatiecoëfficiënten per categorie (Figuur 27) lijkt vooral het verloop van de voorspellingen beter overeen te komen met de meetresultaten onder warmere weersomstandigheden.

6.4.4. Regen

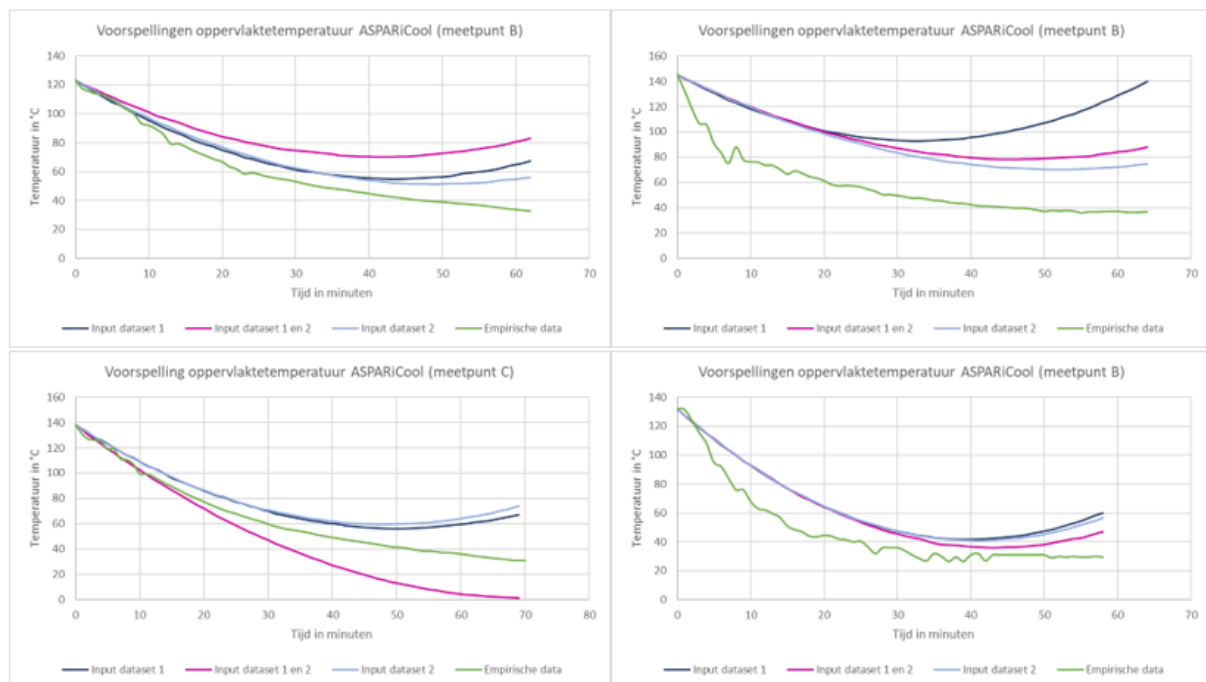
In onderstaande [Tabel 22](#) zijn de resultaten van de vergelijkmingsmethoden bij droge en natte weersomstandigheden te zien.

Tabel 22: Gemiddelde correlatie- en RMSE-waarden per type voorspelling bij droge en natte weersomstandigheden

Regen	Correlatie					RMSE					#
	Pave-Cool	ASPARiCool, dataset:				Pave-Cool	ASPARiCool, dataset:				
		1	1+2	2	3		1	1+2	2	3	
Nee	0,988	0,959	0,982	0,985	0,982	11,67	19,12	14,03	14,05	11,49	8
Ja	0,989	0,885	0,958	0,947	0,983	10,81	23,06	19,97	19,88	13,59	5

In de tabel is te zien dat de voorspellingen van PaveCool het nauwkeurigst zijn onder regenachtige omstandigheden. Ook is het verschil in nauwkeurigheid tussen de voorspellingen bij droge en natte omstandigheden erg klein. Beide constatering zijn opvallend, omdat PaveCool, op een droge of natte ondergrond na (alleen bij zachte ondergronden), regen buiten beschouwing laat. Hoewel ASPARICool wel een input parameter heeft voor de regen, zijn de voorspellingen van PaveCool toch nauwkeuriger in de regen dan die van ASPARICool.

Wanneer naar de ASPARICool-voorspellingen wordt gekeken, valt op dat het verschil in nauwkeurigheid tussen droge en natte omstandigheden relatief groot is bij de metingen en voorspellingen van de oppervlaktetemperatuur van het asfalt. Dit valt te verklaren door de grafieken nader te bekijken. Enkele voorbeelden daarvan zijn weergegeven in onderstaande [Figuur 29](#).



Figuur 29: Verschil in verloop voorspellingen t.o.v. metingen onder droge en natte omstandigheden (linksboven: 9-1, linksonder: 2, rechtsboven: 6-1, rechtsonder: 7-3)

In bovenstaande voorbeelden is het verschil tussen de voorspellingen en de metingen bij regen (grafieken rechts) goed te zien. In de eerste 10 minuten van de metingen daalt de gemeten oppervlaktetemperatuur aanzienlijk sneller dan de voorspelde oppervlaktetemperatuur. Dit is bij de meeste metingen/voorspellingen onder natte omstandigheden te zien. Bij de metingen/voorspellingen onder droge omstandigheden zijn de verschillen in verloop in de eerste 10 minuten veel kleiner. Bij droge weersomstandigheden daalt de gemeten oppervlaktetemperatuur ook aanzienlijk minder snel dan bij regen, bleek eerder in de analyse van de meetresultaten (zie sectie 4.2.3).

ASPARiCool lijkt, gezien bovenstaande voorbeelden, moeite te hebben met grote afnames in temperatuur. Dit verschijnsel is in meerdere gevallen te zien, ook bij droge omstandigheden. In onderstaande **Tabel 23** zijn de gemiddelde hellingen/afkoelsnelheden tussen $t=0$ en $t=10$ te zien van zowel de voorspellingen als de empirische data. In die tabel is te zien dat de hellingen van de ASPARiCool-voorspellingen in het begin aanzienlijk lager zijn dan de empirische data. Tegelijkertijd zijn de hellingen van de PaveCool-voorspellingen in de eerste 10 minuten juist hoger dan de empirische data.

Tabel 23: Gemiddelde hellingen voorspellingen en empirische data

	Helling/afkoelsnelheid $0 \leq t \leq 10$ in °C/min				
	PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
		1	1 + 2	2	3
Voorspellingen	4,30	2,44	2,37	2,32	2,11
Empirische data	3,34	3,71	3,71	3,71	3,19

Bovengenoemd verschijnsel zorgt ervoor dat al vanaf het begin van de meting de temperaturen relatief ver uiteenlopen. Zo ontstaat ook een hoge RMSE-waarde. Een ander probleem dat hierbij op kan treden is dat in dit geval de voorspelde temperatuur aanzienlijk hoger ligt dan de daadwerkelijke temperatuur, in onderstaande voorbeelden gemiddeld ongeveer 20 °C hoger. Wanneer bijvoorbeeld bij het verdichten uit wordt gegaan van de voorspellingen en er wordt vervolgens verdicht tot een bepaalde temperatuur, kan het zijn dat de verdichting nog plaatsvindt onder te lage temperaturen, wat negatieve gevolgen kan hebben voor de kwaliteit van het asfalt.

6.5. Nauwkeurigheid per voorspelling

In onderstaande **Tabel 24** is de gemiddelde nauwkeurigheid per type voorspelling weergegeven. Ook zijn per categorie het aantal voorspellingen dat aan die categorie voldoet weergegeven voor zowel het verloop van de voorspellingen ten opzichte van de metingen (correlatiecoëfficiënt) als het temperatuurverschil tussen de voorspellingen en de meetresultaten (RMSE).

Tabel 24: Gemiddelde nauwkeurigheid voorspellingen en aantal per categorie nauwkeurigheid

Nauwkeurigheid:	Gemiddelde nauwkeurigheid voorspellingen*				
	PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
		1	1 + 2	2	3
Verloop (correlatiecoëfficiënt)	I	I	I	I	I
Temperatuurverschil (RMSE)	III	IV	III	III	III
Verloop/correlatiecoëfficiënt – Aantal per categorie nauwkeurigheid					
Zeernauwkeurig (I)	13	11	12	12	13
Nauwkeurig (II)	0	1	1	1	0
Geringe nauwkeurigheid (III)	0	1	0	0	0
Onnauwkeurig (IV)	0	0	0	0	0
Temperatuurverschil/RMSE – Aantal per categorie nauwkeurigheid					
Zeernauwkeurig (I)	2	0	0	0	1
Nauwkeurig (II)	4	1	4	3	7
Geringe nauwkeurigheid (III)	6	7	4	8	1
Onnauwkeurig (IV)	1	5	5	2	4

*I = Zeernauwkeurig, II = Nauwkeurig, III = Geringe nauwkeurigheid, IV = Onnauwkeurig

In de tabel is te zien dat op basis van de richtlijnen voor de nauwkeurigheid (zie sectie 6.2) het verloop van de grafieken gemiddeld zeer nauwkeurig is te noemen. Bijna alle voorspellingen lieten een zeer nauwkeurig verloop zien en slechts één voorspelling was gering.

Wanneer echter naar de nauwkeurigheid van het verschil in temperatuur tussen de voorspellingen en de reële data wordt gekeken, kan worden geconstateerd dat deze over het algemeen veel minder nauwkeurig zijn. De ASPARiCool-voorspellingen van dataset 1 kunnen gemiddeld zelfs worden beschouwd als onnauwkeurig, alle andere voorspellingen hebben gemiddeld een geringe nauwkeurigheid.

Wanneer de aantallen per categorie worden bekeken voor het temperatuurverschil, wordt iets meer duidelijk over de nauwkeurigheid per type voorspelling. Daarbij is te zien dat PaveCool 2 voorspellingen heeft gegenereerd die zeer nauwkeurig zijn, terwijl ASPARiCool er in totaal maar 1 heeft gegenereerd die zeer nauwkeurig is.

Tussen de verschillende typen voorspellingen zijn duidelijk verschillen in aantallen per categorie nauwkeurigheid te zien. De ASPARiCool-voorspellingen over de kerntemperatuur bevatten de meeste nauwkeurige voorspellingen (7), terwijl de historische data (dataset 1) slechts 1 nauwkeurige voorspelling oplevert en de projectdata (dataset 2) slechts 3. Deze twee datasets leveren ook minder nauwkeurige voorspellingen dan de twee datasets gecombineerd, wat erop duidt dat een grotere dataset op basis van bovenstaande categorieën voor de nauwkeurigheid meer nauwkeurige voorspellingen oplevert.

6.6. Samenvatting en conclusie

In dit hoofdstuk heeft de vergelijking tussen de voorspelde en gemeten afkoelcurves plaatsgevonden en zijn de voorspelde afkoelcurves geanalyseerd op enkele koelingsfactoren. Voor de vergelijkingen zijn twee statistische vergelijkingswaarden berekend. De correlatiecoëfficiënt indiceert in hoeverre het verloop van de voorspelde- en gemeten afkoelcurves overeenkomen. De RMSE (root mean square error) kan worden gezien als een gemiddeld temperatuurverschil tussen beide curves. Voor beide vergelijkingswaarden is een richtlijn opgesteld om de mate van nauwkeurigheid te bepalen.

Als eerste werden de gemiddelde vergelijkingswaarden geanalyseerd. Daaruit kon worden opgemaakt dat de PaveCool-voorspellingen gemiddeld het nauwkeurigst waren voor zowel het verloop als het gemiddelde verschil in temperatuur. Van de verschillende ASPARiCool-voorspellingen waren de voorspellingen over de kerntemperatuur het nauwkeurigst. De voorspellingen voortkomend uit de historische dataset waren gemiddeld het minst nauwkeurig.

Vervolgens is de nauwkeurigheid van de voorspellingen per factor bekeken. Uit die analyse kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Laagdikte
 - o De voorspellingen waren bij de dikkere lagen (6, 7, 8 cm) iets nauwkeuriger dan bij de dunne lagen (3 tot 4 cm).
- Type asfaltmengsel
 - o De voorspellingen op SMA waren over het algemeen iets nauwkeuriger dan die op asfaltbeton. Echter is dit geconcludeerd op basis van slechts twee metingen op SMA, dus is het moeilijk hiervoor een duidelijke conclusie op te stellen.
- Omgevingstemperatuur
 - o Over het algemeen zijn voorspellingen onder warmere omstandigheden nauwkeuriger dan onder koudere omstandigheden. Vooral qua verloop zijn de voorspellingen nauwkeuriger.
- Regen
 - o De voorspellingen die zijn uitgevoerd op metingen onder droge omstandigheden zijn nauwkeuriger dan die onder regenachtige omstandigheden. Ook leverde PaveCool van alle voorspellingen de meest nauwkeurige voorspellingen bij regen.

Aansluitend op de analyse op de factor regen is een korte analyse uitgevoerd op de hellingen/afkoelsnelheden van de voorspelde en gemeten afkoelcurves tijdens de eerste 10 minuten. Daaruit blijkt dat de afkoelsnelheden in het begin van de ASPARiCool-grafieken veel lager uitvallen dan de afkoelsnelheden van de gemeten curves en de curves afkomstig van PaveCool. De PaveCool-voorspellingen lieten in het begin juist een hogere afkoelsnelheid zien dan de gemeten data.

Tenslotte is gekeken naar de nauwkeurigheid per voorspelling. Daarvoor zijn de richtlijnen in sectie 6.2 gebruikt om te bepalen of de voorspellingen zeer nauwkeurig, nauwkeurig, gering nauwkeurig of onnauwkeurig genoemd kunnen worden. Uit die analyse kan worden geconcludeerd dat, op basis van de richtlijnen, het verloop van vrijwel alle grafieken zeer nauwkeurig is.

Op het gebied van temperatuurverschil tussen de voorspelde en gemeten afkoelcurves hebben de voorspellingen echter een geringe nauwkeurigheid. De voorspellingen afkomstig van de historische dataset kunnen zelfs onnauwkeurig genoemd worden. Wanneer naar alle voorspellingen afzonderlijk werd gekeken kon onder meer worden opgemaakt dat grotere datasets meer nauwkeurige voorspellingen leveren en dat voorspellingen over kerntemperatuur (door ASPARiCool) de meeste nauwkeurige voorspellingen oplevert.

7. Validiteit voorspellingen

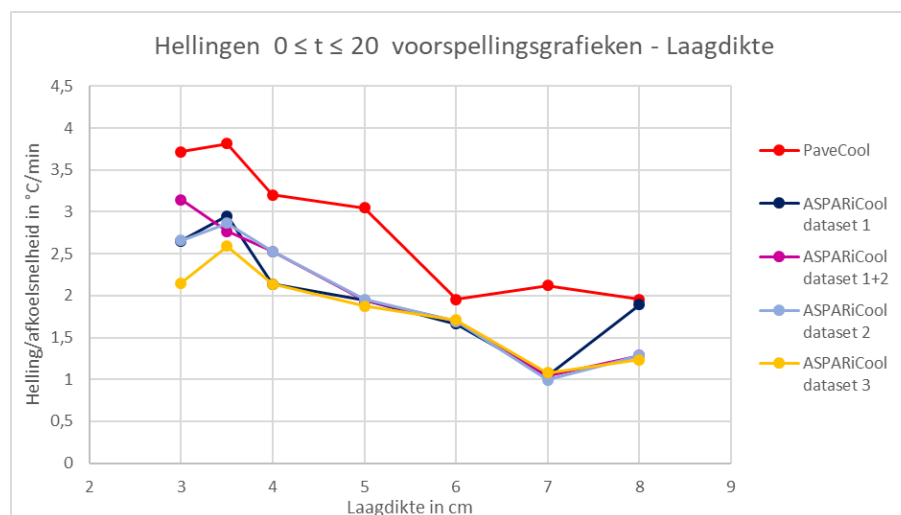
In dit hoofdstuk worden de voorspellingen vergeleken met de literatuur en de historische data. Het doel is hierbij om na te gaan of de relaties tussen de afkoelsnelheid en de factoren voor de voorspellingen overeenkomen met wat in de theorie (sectie 2.1) staat beschreven en wat de historische data en de meetresultaten (sectie 4.2) laten zien. Voor deze analyse wordt beroep gedaan op de hellingen van de voorspelde grafieken tussen $t=0$ en $t=20$.

7.1. Relatieafkoelsnelheid en laagdikte

In onderstaande **Figuur 30** is de relatie tussen de hellingen en de laagdikte weergegeven voor ieder type voorspelling. De weergegeven hellingen zijn gemiddelden van de hellingen tussen $t=0$ en $t=20$ per laagdikte. Ook dient vermeld te worden dat de hellingen van de voorspellingsgrafieken zijn vermenigvuldigd met -1 , zodat ze positief zijn weergegeven in de figuur.

Uit onderstaande grafiek kan worden opgemaakt dat dünnere asfaltlagen volgens beide modellen sneller afkoelen. Ook valt op dat er weinig verschil is tussen de verschillende ASPARiCool-voorspellingen, wat erop duidt dat het wat betreft laagdikte voor de afkoelsnelheid niet veel uitmaakt welke dataset wordt gebruikt voor het genereren van voorspellingen.

Het verband tussen de laagdikte en de afkoelsnelheid dat is weergegeven in **Figuur 30** komt overeen met zowel de theorie als de meetresultaten. In de theorie (zie sectie 2.1.2) werd namelijk duidelijk dat hoe dünnere de asfaltlaag, hoe sneller het asfalt afkoelt. Ook de meetresultaten voor dit onderzoek (zie sectie 4.2) lieten zien dat de dünnere lagen (3 tot 4 cm) sneller afkoelden dan de dikke lagen (7 tot 8 cm). Daarnaast werd in sectie 4.2 duidelijk dat ook de historische data een daling van afkoelsnelheid laat zien bij toename van de laagdikte. De relatie tussen de laagdikte en de afkoelsnelheid die de voorspellingen laten zien komen dus overeen met die van zowel de theorie als de historische data en de meetresultaten.



Figuur 30: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor verschillende laagdiktes (toelichting: zie Bijlage E)

7.2. Relatie afkoelsnelheid en type asfaltmengsel

In **Tabel 25** hieronder zijn de gemiddelde hellingen/afkoelsnelheden per minuut weergegeven voor de asfaltmengsels AC en SMA (tussen $t=0$ en $t=20$). Hierbij dient wel vermeld te worden dat voor de berekening van de gemiddelde hellingen van AC slechts de asfaltlagen van 3 en 4 cm dik zijn meegenomen, omdat de SMA-lagen alleen een laagdikte van 3,5 cm hadden. Zo worden de gemiddelde hellingen voor AC zo min mogelijk beïnvloed door dikkere asfaltlagen, die een aantoonbaar lagere afkoelsnelheid hebben, blijkt uit de sectie 6.4.1 hiervoor.

Tabel 25: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor de asfaltmengsels AC en SMA

Asfaltmengsel	Helling/afkoelsnelheid $0 \leq t \leq 20$ in °C/min				
	PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
		1	1 + 2	2	3
Asfaltbeton (AC)*	3,55	2,48	2,94	2,61	2,15
SMA	3,81	2,95	2,77	2,86	2,59

*Alleen lagen van 3 en 4 cm dikte zijn meegenomen bij de berekening van de gemiddelde hellingen voor AC

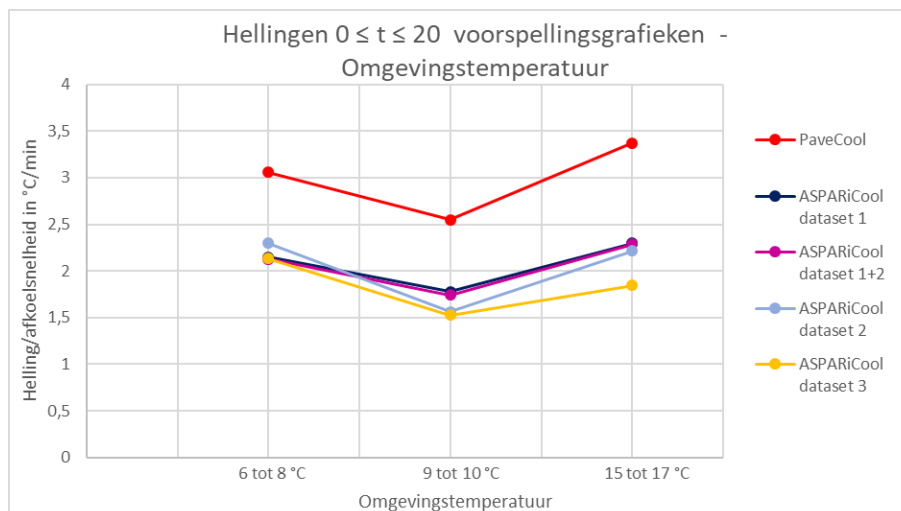
In bovenstaande tabel is te zien dat voor de meeste voorspellingen de afkoelsnelheid hoger is bij SMA. Alleen de ASPARiCool-voorspellingen waarbij datasets 1 en 2 zijn gebruikt tonen een hogere afkoelsnelheid voor asfaltbeton. De relatie tussen de afkoelsnelheid en het type asfaltmengsel voor deze voorspelling komt, in tegenstelling tot de andere voorspellingen, overeen met de theorie beschreven in sectie 2.1.1. Daarin werd beschreven dat onder vergelijkbare omstandigheden asfaltbeton sneller afkoelt dan SMA (op basis van de warmtegeleidingscoëfficiënt van beide materialen). Echter liet de analyse op de meetresultaten in sectie 4.2 zien dat tijdens het onderzoek juist SMA sneller afkoelde dan asfaltbeton. De meeste voorspellingen laten dit verschijnsel ook zien, gezien de gemiddelde afkoelsnelheden in **Tabel 25**.

Omdat in de meetresultaten SMA sneller afkoelde dan asfaltbeton, is het niet geheel onverwacht dat de meeste ASPARiCool-voorspellingen dit verschijnsel ook laten zien. Echter is het wel opvallend dat ook de PaveCool-voorspellingen een hogere afkoelsnelheid voor SMA vertonen. Het literatuuronderzoek voor de asfaltmengsels was namelijk grotendeels gebaseerd op de warmtegeleidingscoëfficiënten die PaveCool ook raadpleegt bij het genereren van de voorspellingen. Omdat zowel de meetresultaten als de meeste voorspellingen wat anders vertonen dan de theorie, is het de vraag of de in sectie 2.1.1 beschreven theorie juist is.

Wel dient nogmaals vermeld te worden dat er erg weinig data beschikbaar is voor SMA en voor asfaltbeton met vergelijkbare omstandigheden. Dit gebrek aan data zorgt ervoor dat bovenstaande constatering niet zomaar aangenomen kunnen worden en meer data een beter beeld zal geven van de relatie tussen afkoelsnelheid en het type asfaltmengsel.

7.3. Relatie afkoelsnelheid en omgevingstemperatuur

In onderstaande **Figuur 31** is de relatie tussen de gemiddelde hellingen/afkoelsnelheden en de omgevingstemperatuur weergegeven. Hierbij dient vermeld te worden dat, net als bij bovenstaande vergelijkingswaarden, alleen de metingen/voorspellingen onder droge weersomstandigheden zijn meegenomen in de berekening van de gemiddelde hellingen.



Figuur 31: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor verschillende categorieën omgevingstemperatuur (toelichting: zie Bijlage E)

Wat direct opvalt is dat de afkoelsnelheid afneemt van de categorie 6 tot 8 °C naar categorie 9 tot 10 °C, maar opeens weer toeneemt bij de hoogste temperatuurcategorie. Dit komt niet helemaal overeen met de theorie (sectie 2.1.4) en de meetresultaten en historische data (sectie 4.2), waarin is geconstateerd dat de afkoeling van asfalt afneemt bij toename van de oppervlaktetemperatuur.

7.4. Relatie afkoelsnelheid en regen

In **Tabel 26** hieronder is de relatie tussen de hellingen/afkoelsnelheden van de voorspellingen en regen weergegeven.

Tabel 26: Hellingen/afkoelsnelheden per type voorspelling voor droge en natte weersomstandigheden

Weersomstandigheden	Helling/afkoelsnelheid $0 \leq t \leq 20$ in °C/min				
	PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
		1	1 + 2	2	3
Droog (geen regen)	2,88	2,00	1,97	1,91	1,76
Nat (regen)	3,08	2,32	2,33	2,28	2,06

In bovenstaande tabel is te zien dat in alle gevallen de afkoeling bij regen in de eerste 20 minuten sneller verloopt dan onder droge omstandigheden. Ook in de theorie (sectie 2.1.4) en in de meetresultaten (sectie 4.2) zorgde regen voor een snellere afkoeling van het asfalt. Dat betekent dat, op basis van bovenstaande hellingsgraden/afkoelsnelheden, geconcludeerd kan worden dat het verband tussen de voorspellingen en regen overeenkomt met de verbanden beschreven in de theorie en in de analyse van de meetresultaten.

7.5. Conclusie

In dit hoofdstuk werd de validiteit (voor begrip zie sectie 1.6) van de voorspellingen bekeken. Hierbij is gebruik gemaakt van de hellingen/afkoelsnelheid per minuut tussen de tijdstippen $t=0$ en $t=20$. Dit leverde per factor de volgende conclusies op:

- Laagdikte
 - o Volgens de voorspelde afkoelcurves koelen de dunnere lagen (3 tot 4 cm) sneller af dan de dikkere asfalten (6 tot 8 cm). Dit komt overeen met zowel de theorie/historische data als de meetresultaten.
- Type asfalmengsel
 - o De voorspellingen toonden aan dat SMA sneller afkoelt dan asfaltbeton. De meetresultaten van dit onderzoek toonden dit ook al aan. Echter koelt asfaltbeton volgens de onderzochte literatuur juist sneller af dan SMA.
- Omgevingstemperatuur
 - o De voorspelde curves gaven niet een duidelijk verband tussen de omgevingstemperatuur en de afkoelsnelheid. Voor de koudste (6 tot 8 °C) en warmste (15 tot 17 °C) temperatuurcategorie waren de afkoelsnelheden namelijk zo goed als gelijk, terwijl voor de middelste categorie (9 tot 10 °C) de gemiddelde afkoelsnelheden juist lager vielen. Dit komt niet helemaal overeen met de theorie en de historische data, die aantoonde dat de afkoelsnelheid afneemt bij toename van de oppervlaktetemperatuur. Ook de meetresultaten toonden dit aan.
- Regen
 - o Volgens de voorspellingen koelt asfalt sneller af wanneer het regent tijdens het asfalteren. Dit komt overeen met zowel de theorie/historische data als de meetresultaten.

Bovenstaande conclusies zijn in **Tabel 27** hieronder nog eens beknopt samengevat. Daarin is te zien dat voor twee van de vier factoren de relaties overeenkomen, maar dat er tegenstellingen te zien zijn voor de omgevingstemperatuur en het type asfalmengsel.

Tabel 27: Vergelijking relaties afkoelsnelheid en factoren

Factor:	Laagdikte	Asfalmengsel	Omg.temp.	Regen
Oorzaak/verschijnsel factor:	Neemt toe	AC of SMA	Neemt toe	Neemt toe
Gevolg afkoelsnelheid: Theorie en historische data	Neemt af	AC (koelt sneller af)	Neemt af	Neemt toe
Voorspellingen	Neemt af	SMA	Varieert	Neemt toe
Overeenkomst relaties?	Ja	Nee	Nee	Ja

8. Discussie, conclusie en aanbevelingen

In dit laatste hoofdstuk wordt gereflecteerd op het onderzoek. Ten eerste worden enkele discussiepunten besproken waar rekening mee gehouden dient te worden. Vervolgens worden de belangrijkste bevindingen en uitkomsten van het onderzoek samengevat. Mede op basis daarvan worden de onderzoeksvragen (zie sectie 1.5) beantwoord en als laatste worden aan de hand van de discussie en de conclusie (bevindingen en antwoorden onderzoeksvragen) enkele aanbevelingen gedaan voor eventueel verder onderzoek.

8.1. Discussie

Tijdens het onderzoek zijn een aantal discussiepunten naar voren gekomen, die in deze sectie worden besproken.

Verdichting niet meegenomen in onderzoek

Tijdens het onderzoek is de focus gelegd op verschillende factoren die de afkoeling van asfalt beïnvloeden (zie sectie 2.1). Daarvan zijn de factoren 'laagdikte', 'type asfaltmengsel', 'omgevingstemperatuur' en 'regen' uitvoerig geanalyseerd. Een factor die mogelijk wel degelijk invloed heeft op de afkoeling van asfalt, maar niet is meegenomen in dit onderzoek, is de invloed van het verdichten. In sectie 2.2 wordt bijvoorbeeld duidelijk dat de warmte-eigenschappen van asfalt kunnen veranderen tijdens het verdichten (en dat PaveCool hier rekening mee houdt). Ook kan water dat afkomstig is van de walsmachines invloed uitoefenen op de afkoeling. Dit is mogelijk ook een van de oorzaken van het grillige verloop van veel grafieken voor de oppervlaktetemperatuur. Zoals gezegd is in dit onderzoek geen rekening gehouden met verdichting en is deze (mogelijke) factor dus buiten beschouwing gelaten.

Nauwkeurigheid apparatuur metingen

Tijdens de metingen zijn verschillende apparaten gebruikt voor het bepalen van de kern- en oppervlaktetemperatuur van asfalt, zoals een infraroodcamera en dataloggers met thermokoppels. Er is echter geen rekening gehouden met de nauwkeurigheid van deze apparatuur. De gebruikte apparaten zijn van tevoren niet gekalibreerd of gecheckt op nauwkeurigheid. Er is tijdens dit onderzoek daarom aangenomen dat de gemeten temperatuurwaarden voldoende overeenkwamen met de daadwerkelijke asfalttemperatuur.

Wel is tijdens de metingen bijgehouden welke apparaten zijn ingezet op de verschillende meetpunten. De meetresultaten kunnen daarom worden gekoppeld aan de apparatuur waarmee het is gemeten. Zo zou er nog onderzoek gedaan kunnen worden naar de eventuele verschillen en meetonnauwkeurigheden tussen de gebruikte apparaten.

Weersgegevens als input voor voorspellingen

Tijdens de metingen zijn de weersomstandigheden bijgehouden met behulp van een weerstation en waarneming tijdens het meten. Ook zijn gegevens van het KNMI geraadpleegd. Deze weersgegevens zijn samengevat in de meetverslagen en gebruikt als input voor het genereren van de voorspellingen door PaveCool en ASPARiCool. Wanneer de modellen echter in gebruik worden genomen door asfalteerploegen (bijvoorbeeld om een verdichtingsinterval te bepalen), zullen voor het invoeren van de weersgegevens de weersverwachtingen geraadpleegd moeten worden. Deze komen niet altijd overeen met de weersomstandigheden op het moment van asfalteren.

Tijdens het onderzoek is geen rekening gehouden met het verschil tussen de weersverwachtingen en de daadwerkelijke weersomstandigheden tijdens de metingen. Het is dan ook niet bekend of dit invloed heeft op de voorspelde afkoelcurves en zo ja, hoeveel invloed dat heeft.

Hoeveelheid data

Tijdens het onderzoek zijn een aantal vergelijkingen gedaan tussen verschillende afkoelcurves om de invloeden van factoren in beeld te brengen. Met name bij de analyse van de meetresultaten werden bij voorkeur curves met elkaar vergeleken die, op de geanalyseerde factor na, qua omstandigheden zoveel mogelijk overeenkomsten hadden. Echter was dit in veel gevallen erg moeizaam door de vele verschillende variabelen. Zo waren er bijvoorbeeld in totaal slechts vier metingen uitgevoerd op SMA, doordat er in de periode dat de metingen werden uitgevoerd relatief weinig SMA is aangelegd. Dit geringe aantal metingen zorgde er bijvoorbeeld voor dat het zeer moeizaam was om een goede vergelijking te kunnen uitvoeren tussen asfaltbeton en SMA, ook doordat andere variabelen (o.a. omgevingstemperatuur en regen) erg van elkaar verschilden. De hoeveelheid beschikbare data die bij dit onderzoek is gebruikt is daarom zeker een belangrijk punt van discussie.

Interpretatie onderlaag type 'steen' (ASPARiCool)

In sectie 2.3.1 staat beschreven dat er in ASPARiCool tussen drie verschillende typen onderliggende lagen gekozen kan worden, namelijk 'asfalt', 'zand' en 'steen'. Uit de meetverslagen in Bijlage B kan worden opgemaakt dat, op basis van waarneming, alleen asfalt en zand als onderlaag waren gebruikt. Echter bestond in sommige gevallen de onderlaag uit puinfundering, wat tijdens de metingen mogelijk ten onrechte is waargenomen als zand. De reden daarvoor is dat het type onderlaag 'steen' hierbij mogelijk verkeerd is geïnterpreteerd en dat dit type onderlaag vermoedelijk een andere benaming is voor puinfundering. Er is uiteindelijk geen verdere navraag of onderzoek gedaan naar de werkelijke betekenis van de onderlaag 'steen' en de voorspellingen die mogelijk 'steen' als onderliggende laag hadden, zijn in ASPARiCool gegenereerd met 'zand' als onderliggende laag. Of dit uiteindelijk grote verschillen oplevert is onduidelijk, aangezien hier verder geen onderzoek naar is gedaan.

Invloed van overfitting op resultaten

In sectie 5.5 werd duidelijk dat bij de meeste ASPARiCool-voorspellingen overfitting voorkomt, waardoor de voorspelde temperatuur na verloop van tijd weer stijgt (binnen het gemeten tijdsinterval). Bij het berekenen van de vergelijkingswaarden is geen rekening gehouden met de gevolgen van overfitting en zijn dus alle resultaten meegenomen in de berekening. Overfitting heeft echter wel degelijk een negatieve invloed op deze vergelijkingswaarden. Met name de RMSE stijgt als gevolg van overfitting, doordat na verloop van tijd het temperatuurverschil tussen de stijgende voorspellingscurve en de dalende gemeten curve snel toeneemt. In veel gevallen vallen de correlatiecoëfficiënt en de RMSE dus hoger uit als gevolg van overfitting. Wanneer vervolgens uitspraken worden gedaan over de mate van nauwkeurigheid van de voorspellingen dient hiermee rekening gehouden te worden.

Bepaling mate van nauwkeurigheid (richtlijnen correlatiecoëfficiënt en RMSE)

Ook de manier van het bepalen van de richtlijnen voor nauwkeurigheid van de voorspellingen (zie sectie 6.2) is een belangrijk discussiepunt. Voor de correlatiecoëfficiënt is een richtlijn gebruikt die in de literatuur veelvuldig wordt gebruikt (bijvoorbeeld waarbij waarden boven 0,90 een zeer hoge correlatie aangeeft). Echter toonden vrijwel alle voorspellingen een zeer hoge correlatie, terwijl in veel gevallen de verschillen in verloop vrij duidelijk te zien waren. Voor verder onderzoek zou daarom overwogen kunnen worden om de eisen voor nauwkeurigheid qua verloop aan te scherpen. Hierbij is het wel weer de vraag hoe groot de correlatiecoëfficiënt moet zijn om het verloop van een voorspelling 'nauwkeurig' of 'zeer nauwkeurig' te kunnen noemen.

Voor de RMSE bestaat geen richtlijn voor het bepalen van de mate van nauwkeurigheid, omdat de grootte van de RMSE-waarde afhangt van de data die wordt geanalyseerd. Verder geldt dat hoe dichter de RMSE-waarde bij 0 ligt, hoe nauwkeuriger de voorspelling is. De RMSE is daarom een goede graadmeter voor het vergelijken van de nauwkeurigheid van verschillende voorspellingen, maar zegt nog niets over hoe nauwkeurig een voorspelling eigenlijk is.

Om dat mogelijk te maken is voor dit onderzoek een richtlijn opgesteld, die aan de hand van de RMSE-waarde aangeeft wat de mate van nauwkeurigheid van een voorspelling is. Het opstellen van deze richtlijn is echter niet helemaal wetenschappelijk bepaald. Zo zijn de grenswaarden voor de categorie 'zeer nauwkeurig' bepaald op basis van waarden uit de literatuur, die in die onderzoeken als 'nauwkeurig' of 'betrekkelijk klein' werden beschouwd. In die onderzoeken, waarbij dus ook gebruik werd gemaakt van de RMSE, werd verder geen gebruik gemaakt van een bepaalde richtlijn of vuistregel die de mate van nauwkeurigheid bepaalt. De andere waarden zijn bepaald op basis van grenswaarden voor het verdichtingsinterval (zie sectie 6.2.2), waarbij uiteindelijk werd bepaald dat een gemiddelde temperatuurafwijking van meer dan 20 °C kan worden gezien als onnauwkeurig.

De vraag bij het bepalen van een richtlijn voor de RMSE-waarde is vooral hoe groot het verschil tussen de reële en voorspelde temperatuur mag zijn met betrekking tot het bepalen van een verdichtingsinterval. Als het verschil namelijk te groot is en er bijvoorbeeld nog verdicht wordt bij lagere temperaturen dan is voorspeld, kan dat negatieve gevolgen hebben voor de kwaliteit van het asfalt. Een onderzoek naar de maximaal gewenste grootte van dit temperatuurverschil zou hierover uitsluitel kunnen geven.

8.2. Beantwoording deelvragen

Voordat de hoofdvraag wordt beantwoord en dus de uiteindelijke conclusie van het onderzoek wordt opgesteld, worden in deze sectie eerst de vier deelvragen apart beantwoord.

1. Wat zijn de verschillen tussen het theoretische (PaveCool) en praktische (ASPARiCool) voorspellingsmodel?

PaveCool en ASPARiCool zijn beide modellen die de afkoeling van asfalt kunnen voorspellen. De manier waarop deze voorspellingen tot stand komen verschilt echter. In het theoretische model PaveCool zijn de voorspellingen gebaseerd op een thermodynamisch model. Dit model neemt onder meer de thermische eigenschappen van asfalt, zoals diffusie en warmtegeleiding, in beschouwing. Voor alle materialen die in PaveCool beschikbaar zijn, gebruikt het model waarden voor onder meer de dichtheid, de warmtegeleidingscoëfficiënt en de soortelijke warmte. Verder houdt PaveCool bij het genereren van een voorspellingscurve rekening met onder meer de veranderingen van laagdikte en warmte-eigenschappen tijdens het verdichten.

De voorspellingen van het praktische model ASPARiCool worden gegenereerd met behulp van een Machine Learning-algoritme. Door dit algoritme is het mogelijk om voorspellingen te baseren op een verzameling reële data, die van tevoren kan worden toegevoegd. De gegenereerde voorspellingen hangen dus af van de data die door de gebruiker aan het model wordt toegevoegd. Daarnaast kan ASPARiCool voorspellingen doen voor zowel de ingevoerde inputdata als voor toekomstige projecten, door de input parameters in te voeren doormiddel van de dropdown menu's.

Het belangrijkste verschil tussen PaveCool en ASPARiCool is dus de totstandkoming van de voorspellingen. PaveCool maakt gebruik van theorie en vaste waarden voor warmte-eigenschappen, terwijl ASPARiCool gebruik maakt van reële data die eerder is gemeten op asfalt. Dat maakt ASPARiCool toekomstbestendiger dan PaveCool. Het gebruik van reële data maakt ASPARiCool echter ook kwetsbaarder dan PaveCool, aangezien meetfouten of -onnauwkeurigheden ook door het algoritme

worden gezien, maar niet worden herkend als fout of onnauwkeurig. Andere verschillen tussen beide modellen zijn onder meer het aantal beschikbare asfaltmengsels waaruit gekozen kan worden, het wel of niet bevatten van een regenparameter en de manier van het invoeren van parameters. In onderstaande **Tabel 28** zijn de belangrijkste verschillen nog eens samengevat.

Tabel 28: Verschillen PavCool en ASPARiCool

Onderwerp	PavCool	ASPARiCool
Totstandkoming voorspellingen	Thermodynamisch model, neemt warmte-eigenschappen van materialen in beschouwing. Houdt rekening met veranderingen van laagdikte en warmte-eigenschappen tijdens verdichting.	Machine Learning-algoritme, voorspellingen op basis van verzameling (reële) data die van tevoren kan worden toegevoegd aan model.
Toekomstbestendigheid model	Niet of nauwelijks toekomstbestendig. Eventuele veranderingen in asfaltsector dienen in model aangepast te worden door ontwikkelaar.	Toekomstbestendig. Eventuele veranderingen in asfaltsector kunnen worden 'opgevangen' door model door reële data van deze veranderingen toe te voegen, geen of weinig aanpassingen door ontwikkelaar aan model nodig.
Kwetsbaarheid model	Niet of nauwelijks kwetsbaar. Voorspellingen gebaseerd op theorie en vaste waarden, inputwaarden worden door gebruiker ingevoerd, dus onrealistische waarden zijn verantwoordelijkheid gebruiker.	Kwetsbaar. Algoritme herkent niet wat 'goed' of 'fout' is, dus neemt ook meetfouten en -onnauwkeurigheden in beschouwing bij genereren voorspellingen (voorbeeld: overfitting).
Aantal asfaltmengsels	2 soorten asfaltmengsels: - 'Dense-graded' asfalt (fine) - SMA (coarse)	12 soorten asfaltmengsels in totaal, verschillende soorten asfaltbeton, SMA en ZOAB
Parameter regen	Geen parameter voor regen of neerslag. Wel kan gekozen worden voor droge of natte onderliggende laag.	Parameter voor regen of neerslag aanwezig (gegeven in mm).
Parameter zon	Stand van de zon, wordt bepaald op basis van ingevoerde datum/tijd en breedtegraad. Hoeveelheid zonneschijn bepaald door percentage bewolking.	Voor bestaande projecten kan hoeveelheid zonnestraling worden ingevoerd (in W/m ²) en voor toekomstige projecten kan gekozen worden voor 'zonnig', 'bewolkt' of 'regenachtig'.
Invoering parameters	Meeste parameters kunnen ingetypt worden, met voor elke parameters minimum- en maximumwaarde.	Voor bestaande projecten kunnen parameters getypt worden (in Excel-format). Voor toekomstige projecten kunnen parameters geselecteerd worden in de dropdown menu's.

2. Hoe verhouden de gemeten afkoelingscurves van de asfalmengsels zich tot de voorspelde afkoelingscurves?

Voor het bepalen van de nauwkeurigheid van de voorspellingen ten opzichte van de gemeten afkoelcurves (met andere woorden: in hoeverre de gemeten en voorspelde curves overeenkomen) zijn voor elke voorspelling de correlatiecoëfficiënt en de RMSE berekend. De correlatiecoëfficiënt geeft aan in hoeverre het verloop van de gemeten en voorspelde curves overeenkomt en de RMSE geeft aan hoe groot het gemiddelde temperatuurverschil tussen beide curves is. De resultaten van deze vergelijkingswaarden gaven aan dat het verloop van de voorspellingen, op basis van de opgestelde richtlijnen voor nauwkeurigheid, over het algemeen zeer nauwkeurig is te noemen, dus het verloop van de gemeten en voorspelde curves komen erg overeen. Qua temperatuurverschil zijn de voorspellingen veel minder nauwkeurig. De gemiddelde temperatuurverschillen tussen de voorspellingen en de gemeten waarden lopen uit van 11 °C tot zelfs 21 °C.

Kijkend naar de verschillende typen voorspellingen kan worden geconcludeerd dat de PaveCool-voorspellingen gemiddeld het nauwkeurigst waren, voor zowel het verloop als voor het temperatuurverschil. Van de ASPARiCool-voorspellingen kwamen de voorspellingen voor de kerntemperatuur het meest overeen met de gemeten data. Kijkend naar de individuele voorspellingen gaf de kerntemperatuur-dataset van alle typen voorspellingen het grootste aantal nauwkeurige of zeer nauwkeurige voorspellingen. De ASPARiCool-voorspellingen met de historische data als input kwamen het minst overeen met de gemeten afkoelcurves.

3. Wat is de betrouwbaarheid van de voorspelde afkoelingscurves onder koude weersomstandigheden?

Zoals eerder werd aangegeven kan het verloop van alle typen voorspellingen gemiddeld 'zeer nauwkeurig' worden genoemd, op basis van de opgestelde richtlijnen voor nauwkeurigheid. Het temperatuurverschil tussen de voorspellingen en de gemeten data is zodanig dat het op basis van de richtlijnen voor nauwkeurigheid in de meeste gevallen slechts 'gering nauwkeurig' te noemen is. Als voor het temperatuurverschil naar de individuele voorspellingen wordt gekeken, is te concluderen dat het grootste deel van de voorspellingen over het algemeen 'gering' of 'onnauwkeurig' is.

Wanneer specifiek wordt gekeken naar de typische weersomstandigheden in de gemeten periode (november-december) en de invloed van de nauwkeurigheid daarop, kan worden opgemaakt dat de nauwkeurigheid over het algemeen lager is bij lagere omgevingstemperaturen. Sommige metingen zijn tijdens het onderzoek uitgevoerd bij relatief hoge temperaturen voor deze tijd van het jaar (15 tot 17 °C) en vertoonden in veel gevallen een iets hogere nauwkeurigheid dan de meeste andere voorspellingen, die zijn uitgevoerd onder omgevingstemperaturen van tussen de 6 en 10 °C.

Ook regen komt in de periode november-december regelmatig voor. Wanneer specifiek wordt gekeken naar de invloed van regen op de nauwkeurigheid van de voorspellingen, kan worden geconcludeerd dat de voorspellingen bij droge weersomstandigheden over het algemeen nauwkeuriger waren dan de voorspellingen bij regen. Ook werd duidelijk dat het verschil in nauwkeurigheid voor de PaveCool-voorspellingen en voor de ASPARiCool-voorspellingen van de kerntemperatuur (dataset 3) zeer klein was. De voorspellingen over de oppervlaktetemperatuur bij regen waren dus ten opzichte van de gemeten data minder nauwkeurig.

Wat verder opviel is de hoge afkoelsnelheid in de eerste 10 minuten na het aanbrengen van de asfaltlaag. Gemiddeld gezien dalen de ASPARiCool-curves aanzienlijk minder snel dan de gemeten afkoelcurves, terwijl de PaveCool-curves in het begin juist sneller dalen. Met name in gevallen waarbij de gemeten

temperatuur in het begin snel daalde, zoals bij lage omgevingstemperaturen of bij regen, was duidelijk zichtbaar dat de ASPARiCool-grafieken in het begin een heel ander, veel minder extreem verloop lieten zien. Hieruit kan dus worden geconcludeerd dat de grondslag van het verschil tussen de metingen en de voorspellingen onder koude omstandigheden vooral in het begin ligt, waar de afkoelsnelheden aanzienlijk van elkaar verschillen. Daardoor is, zeker gezien het onderlinge temperatuurverschil, de nauwkeurigheid van de voorspellingen onder koude weersomstandigheden 'gering' te noemen.

4. Hoe kunnen de gemeten en voorspelde afkoelingscurves met historische data en literatuur worden gevalideerd?

De gemeten en voorspelde afkoelcurves zijn gevalideerd door de verbanden tussen de factoren en de afkoelsnelheden met elkaar te vergelijken. Hierbij zijn de hellingen/afkoelsnelheden van de gemeten en voorspelde afkoelcurves tijdens de eerste 20 minuten van de meting geraadpleegd. De validatie is voor vier verschillende factoren uitgevoerd, namelijk laagdikte, type asfaltmengsel, omgevingstemperatuur en regen.

Bij deze analyse/validatie stond het begrip validiteit centraal, waarmee bedoeld wordt op het controleren van samenhang tussen twee verschillende resultaten. Enerzijds waren dat bij deze validatie de gemeten en voorspelde curves en anderzijds de theorie en de historische data.

Uit de theorie en de historische data kon worden opgemaakt dat hoe dikker de asfaltlaag, hoe lager de afkoelsnelheid. Dit was ook in zowel de gemeten als de voorspelde afkoelcurves terug te zien. De conclusie is dus dat het verband tussen de laagdikte en de afkoelsnelheid die terug zijn te zien in de gemeten en voorspelde data overeenkomt met het verband dat de uit de theorie en de historische data kan worden opgemaakt.

Wanneer werd gekeken naar de verbanden tussen het type asfaltmengsel en de afkoelsnelheid, waren tegenstrijdigheden te zien. Waar in de theorie werd gesteld dat asfaltbeton sneller afkoelt dan SMA, was het tegenovergestelde terug te zien in zowel de gemeten als de voorspelde data. Wel moet hierbij opgemerkt worden dat het geringe aantal metingen (vooral op SMA) ervoor zorgt dat het moeizaam is om een eenduidig verband te kunnen waarnemen.

Vervolgens is gekeken naar het verband tussen de omgevingstemperatuur en de afkoelsnelheid. Volgens de theorie en de historische data koelt asfalt sneller af bij lagere omgevingstemperaturen. De gemeten data liet een vergelijkbaar verband zien, maar de voorspelde data niet. Daarin was geen eenduidig verband te zien tussen de omgevingstemperatuur en de afkoelsnelheid. De voorspellingen koelden gemiddeld namelijk sneller af bij de hoogste (15 tot 17 °C) en laagste (6 tot 8 °C) temperatuurcategorie, maar de afkoelsnelheid lag bij de middelste temperatuurcategorie (9 tot 10 °C) het laagst. Hieruit kan dus geconcludeerd worden dat op het gebied van omgevingstemperatuur de gemeten data wel overeenkomt met de theorie en de historische data, maar de voorspelde data niet.

Tenslotte is de relatie tussen regen en de afkoelsnelheid van asfalt geanalyseerd en daaruit bleek dat volgens de theorie asfalt sneller afkoelt bij regen. Zowel de gemeten als de voorspelde data lieten een vergelijkbaar verband tussen regen en afkoelsnelheid zien.

In onderstaande **Tabel 29** zijn de conclusies uit deze analyse nog eens kort samengevat. Daarin is te zien dat in de meeste gevallen de relaties tussen de factoren en de afkoelsnelheid overeenkomen, ondanks de tegenstellingen bij de factoren 'typen asfaltmengsel' en 'omgevingstemperatuur'. Voor de analyse op het type asfaltmengsel was te weinig data beschikbaar voor een goede analyse. Daarnaast bleek uit de analyse op de omgevingstemperatuur dat er geen eenduidig verband was te zien in de voorspellingen tussen de afkoelsnelheid en de omgevingstemperatuur. Echter zou het kunnen dat bepaalde data

zodanig afweek van de rest dat resultaten in deze analyse aanzienlijk hoger of lager uitvielen. Echter is hier verder geen onderzoek naar gedaan.

Tabel 29: Vergelijking relaties afkoelsnelheden en factoren

Factor:	Laagdikte	Asfaltmengsel	Omg.temp.	Regen
Oorzaak/verschijnsel factor:	Neemt toe	AC of SMA	Neemt toe	Neemt toe
Gevolg afkoelsnelheid: Theorie en historische data	Neemt af	AC (koelt sneller af)	Neemt af	Neemt toe
Meetresultaten	Neemt af	SMA	Neemt af	Neemt toe
Overeenkomst relaties?	Ja	Nee	Ja	Ja
Voorspellingen	Neemt af	SMA	Varieert	Neemt toe
Overeenkomst relaties?	Ja	Nee	Nee	Ja

Ondanks enkele tegenstrijdigheden die kunnen worden opgemaakt uit de validatie wordt op basis van deze analyse aangenomen dat de voorspelde en gemeten temperatuurdata over het algemeen een realistische weerspiegeling is van de daadwerkelijke asfalttemperatuur.

8.3. Conclusie (beantwoording hoofdvraag)

De hoofdvraag van dit onderzoek was:

Wat is de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van theoretische en praktische voorspellingsmodellen onder variërende Nederlandse weersomstandigheden?

De metingen zijn uitgevoerd in de maanden november en december 2019. Zoals verwacht werden de metingen uitgevoerd onder veel verschillende weersomstandigheden. Zo was het verschil in omgevingstemperatuur tussen de koudste en warmste dag bijvoorbeeld groot (5 om 17 °C), zelfs voor de tijd van het jaar. Ook is een deel van de metingen uitgevoerd onder regenachtige omstandigheden.

Deze variatie in weersomstandigheden tussen de verschillende metingen had zo zijn voor- en nadelen. Het voordeel is dat er voor veel verschillende (weer)situaties data beschikbaar was. Het nadeel is echter dat door de vele verschillende situaties data soms moeilijk te vergelijken was.

Uiteindelijk is voor 13 verschillende situaties een voorspelling gegenereerd met zowel het theoretische model PaveCool als met het praktische model ASPARiCool. De parameters die in beide modellen zijn ingevoerd komen zoveel mogelijk overeen met de weersomstandigheden op dat moment. Deze weersgegevens zijn met behulp van een weerstation, het KNMI en waarneming verzameld.

In onderstaande **Tabel 30** is weergegeven wat gemiddeld de mate van nauwkeurigheid per type voorspelling is voor zowel het verloop als het gemiddelde verschil in temperatuur. Ook het aantal individuele voorspellingen per categorie nauwkeurigheid is weergegeven.

Tabel 30: Gemiddelde nauwkeurigheid voorspellingen en aantal per categorie nauwkeurigheid

Nauwkeurigheid:	Gemiddelde nauwkeurigheid voorspellingen*				
	PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
		1	1 + 2	2	3
Verloop (correlatiecoëfficiënt)	I	I	I	I	I
Temperatuurverschil (RMSE)	III	IV	III	III	III
Verloop/correlatiecoëfficiënt – Aantal per categorie nauwkeurigheid					
Zeer nauwkeurig (I)	13	11	12	12	13
Nauwkeurig (II)	0	1	1	1	0
Geringe nauwkeurigheid (III)	0	1	0	0	0
Onnauwkeurig (IV)	0	0	0	0	0
Temperatuurverschil/RMSE – Aantal per categorie nauwkeurigheid					
Zeer nauwkeurig (I)	2	0	0	0	1
Nauwkeurig (II)	4	1	4	3	7
Geringe nauwkeurigheid (III)	6	7	4	8	1
Onnauwkeurig (IV)	1	5	5	2	4

*I = Zeer nauwkeurig, II = Nauwkeurig, III = Geringe nauwkeurigheid, IV = Onnauwkeurig

Op basis van de richtlijnen die zijn toegepast in bovenstaande tabel kan worden geconcludeerd dat het verloop van alle voorspellingen gemiddeld zeer nauwkeurig is. Het gemiddelde verschil in temperatuur is echter zodanig dat op dat gebied de nauwkeurigheid gemiddeld gering was, wat duidt op een gemiddeld temperatuurverschil van minstens 10 °C. Uit de aantallen per categorie kan worden opgemaakt dat het aantal nauwkeurige of zeer nauwkeurige gevallen per voorspelling verschilt, maar wel aanzienlijk in de minderheid is ten opzichte van de geringe en onnauwkeurige voorspellingen.

Van de twee verschillende voorspellingsmodellen leverde het theoretische model (PaveCool) gemiddeld de meest nauwkeurige voorspellingen op. De ASPARiCool-voorspellingen waren over het algemeen minder nauwkeurig, maar op basis van de resultaten van dit onderzoek kan wel worden geconcludeerd dat het gebruik van verschillende datasets als input een grote rol speelt voor de nauwkeurigheid van de output van het model.

Uit dit onderzoek kon ook worden geconcludeerd dat de nauwkeurigheid verschilt onder verschillende (weers)omstandigheden. Er waren hierbij ook enkele verbanden te zien. Zo waren in de meeste gevallen de voorspellingen onder relatief warme weersomstandigheden iets nauwkeuriger ten opzichte van de voorspellingen die onder relatief lage omgevingstemperaturen zijn uitgevoerd. Verder werden over het algemeen dikkere lagen iets nauwkeuriger voorspeld dan dunneren lagen en waren de voorspellingen bij regen in de meeste gevallen minder nauwkeurig.

Op basis van dit onderzoek en de resultaten die dit opleverde kan uiteindelijk worden geconcludeerd dat op basis van het temperatuurverschil de nauwkeurigheid van beide modellen matig is. Een gemiddeld temperatuurverschil van tussen de 10 en 20 °C is niet wenselijk wanneer gebruikers een optimaal verdichtingsinterval willen bepalen. Met name wanneer de voorspelde asfalttemperatuur hoger uitvalt dan de daadwerkelijke temperatuur is dat niet wenselijk, zoals in veel gevallen werd geconstateerd. Dit kan uiteindelijk de kwaliteit van het asfalt niet ten goede komen.

Wel werden gedurende het onderzoek constatering gedaan voor mogelijke verbetering van het praktische model (ASPARiCool). In sectie 8.5 (Aanbevelingen) worden enkele voorstellen gedaan om de nauwkeurigheid van dit model te verbeteren.

8.4. Overige bevindingen onderzoek

Tijdens het onderzoek werden verschillende bevindingen gedaan, waarvan niet alle bevindingen de hoofd- en deelvragen beantwoordden. De belangrijkste bevindingen die (deels) los staan van de hoofd- en deelvragen zijn hieronder samengevat:

- Analyse kern- en oppervlaktetemperatuur
 - o Uit de analyse van de gemeten kern- en oppervlaktetemperatuur bleek dat de kerntemperatuur bovenin de asfaltlaag over het algemeen hoger is dan de kerntemperatuur onderin de asfaltlaag.
 - o De gemeten oppervlaktetemperatuur was in 14 van de 26 gevallen hoger dan de kerntemperatuur in de beginfase, maar koelde na verloop van tijd sneller af.
- Overfitting
 - o Bij 37 van de in totaal 52 ASPARiCool-voorspellingen komt overfitting voor binnen het gemeten tijdsinterval, waardoor grafieken na verloop van tijd weer stijgen. De verwachting is dat alle ASPARiCool-grafieken te maken hebben met overfitting, maar dat dat in sommige gevallen niet te zien is doordat de meting al is gestopt voor het omslagpunt (van dalen naar stijgen).
 - o Het gebruik van een grotere dataset lijkt de kans op overfitting te verkleinen, blijkt uit analyse op het aantal gevallen van overfitting binnen het gemeten tijdsinterval.
- Vergelijking datasets (op basis van correlatiecoëfficiënt en RMSE)
 - o Afgaande op de vergelijkingswaarden waren van de verschillende typen voorspellingen die van PaveCool het meest nauwkeurig. Van de ASPARiCool-voorspellingen waren de voorspellingen voor de kerntemperatuur (dataset 3) het meest nauwkeurig. De voorspellingen met de historische data (dataset 1) als input had gemiddeld de laagste nauwkeurigheid. De nauwkeurigheid van de voorspellingen met de grote dataset (dataset 1+2) en met de projectdata (dataset 2) als input was erg vergelijkbaar.
 - o Op basis van de vergelijkingswaarden kan geconcludeerd worden dat het gebruik van een constantere dataset (data met weinig of geen grilligheden) leidt tot een hogere nauwkeurigheid van de voorspellingen.
- Nauwkeurigheid voorspellingen per factor
 - o De voorspellingen waren over het algemeen iets nauwkeuriger bij dikkere lagen en van de twee typen asfaltmengsels waren de voorspellingen op SMA het meest nauwkeurig.
- Hellingen/afkoelsnelheden tijdens beginfase
 - o Gemiddeld is de door ASPARiCool voorspelde afkoelsnelheid tijdens de eerste 10 minuten na het aanbrengen van de asfaltlaag aanzienlijk lager dan die van de gemeten temperaturen. De PaveCool-voorspellingen vertonen tijdens de eerste 10 minuten gemiddeld juist een aanzienlijk hogere afkoelsnelheid.

8.5. Aanbevelingen

In deze sectie worden enkele aanbevelingen en voorstellen gedaan met betrekking tot vervolgonderzoek of verbetering van het onderzoek of de geanalyseerde modellen. Het doel is om hiermee aan te zetten tot uitbreiding en verbreding van dit onderzoek en andere onderzoeken naar met name ASPARiCool.

Deze sectie is opgedeeld in drie delen. Ten eerste worden algemene aanbevelingen gedaan die dit onderzoek of een vergelijkbaar vervolgonderzoek kunnen verbeteren. Vervolgens worden, op basis van het gebruik en de resultaten van ASPARiCool, aanbevelingen en voorstellen gedaan voor verbetering van dit praktische model. Tenslotte worden enkele aanbevelingen gedaan over eventuele voortzetting van dit onderzoek of medewerking bij vervolgonderzoeken door Roelofs.

8.5.1. Algemene aanbevelingen

Hoeveelheid data

Zoals bijvoorbeeld al in eerder onderzoek naar ASPARiCool werd aangegeven is zoveel mogelijk data wenselijk bij dit soort onderzoeken (Ong-A-Fat, Miller, & Makarov, 2019). Ook gedurende dit onderzoek werd meerdere keren ondervonden dat er een gebrek aan data was. Zo was het moeizaam om bijvoorbeeld meetresultaten met elkaar te vergelijken, door een gebrek aan metingen op SMA. Ook zorgden enkele extremere en voor deze tijd van het jaar ongewone gevallen ervoor dat de gemiddelde resultaten al snel afweken van de verwachtingen, bijvoorbeeld met betrekking tot het controleren van de validiteit van de resultaten. Een grotere hoeveelheid data zorgt er in die gevallen voor dat dit in mindere mate voorkomt. Bij dit soort onderzoeken wordt dan ook ten eerste aanbevolen dat er zoveel mogelijk data wordt verzameld en geraadpleegd.

Aanscherpen eisen nauwkeurigheid

Tijdens dit onderzoek zijn richtlijnen opgesteld die de mate van nauwkeurigheid van de voorspellingen bepalen, op basis van de correlatiecoëfficiënt en de RMSE. Voor het bepalen van die grenswaarden is de literatuur geraadpleegd. In de discussie werd al duidelijk dat het bepalen van deze waarden niet helemaal wetenschappelijk is uitgevoerd, maar dat ook in de literatuur niet helemaal duidelijk werd in hoeverre bepaalde vergelijkingswaarden als 'nauwkeurig' konden worden beschouwd.

Het is voor vervolgonderzoek ten eerste aan te raden om veelvuldig de nauwkeurigheid van de modellen te controleren, om bij te kunnen houden of er verbetering in nauwkeurigheid zichtbaar is en wanneer dit niet het geval is, wat dan mogelijke oorzaken zijn. Hierbij is het wenselijk om na te denken over een meer wetenschappelijke manier om de grenswaarden voor de nauwkeurigheid te bepalen. Verder is aan te raden om in de toekomst, wanneer de modellen hopelijk steeds nauwkeuriger worden, de eisen voor nauwkeurigheid aan te scherpen. Zo is voor dit onderzoek bijvoorbeeld aangenomen dat een correlatiecoëfficiënt van 0,90 of hoger een zeer nauwkeurig verloop aanduidt en uiteindelijk bleken vrijwel alle voorspellingen op het gebied van verloop zeer nauwkeurig. Wanneer voor het bepalen van de nauwkeurigheid van de voorspellingen in de toekomst ook van de correlatiecoëfficiënt gebruik wordt gemaakt, kan worden overwogen om deze eis aan te scherpen en dus de minimale grenswaarde voor het label 'zeer nauwkeurig' te verhogen. Ook voor het gemiddelde temperatuurverschil (RMSE) is dit aan te raden, met betrekking tot verbetering van de modellen.

In dit onderzoek zijn de correlatiecoëfficiënt en de RMSE toegepast voor het controleren voor de nauwkeurigheid van de voorspellingsmodellen, maar natuurlijk kan ook nog worden gekeken naar meerdere manieren om deze nauwkeurigheid te controleren.

8.5.2. Aanbevelingen ASPARiCool

Overfitting beperken

Een veel voorkomend verschijnsel in de ASPARiCool-grafieken was overfitting, waardoor grafieken na verloop van tijd weer stegen. Hierdoor werden onder meer de vergelijkingswaarden negatief beïnvloed. Tijdens het onderzoek is overwogen om de stijgende delen van de grafieken niet mee te nemen in de analyse, maar uiteindelijk is besloten om dit wel te doen en om meer te focussen op het voorkomen of beperken van overfitting.

Er zijn verschillende mogelijke opties waarmee stijgende grafieken als gevolg van overfitting zouden kunnen worden voorkomen. Overfitting ontstaat in dit geval doordat het algoritme zich na verloop van tijd teveel richt op de details, waardoor ook de stijgende delen van de reële data wordt waargenomen en beschouwd als normaal gedrag. Deze stijgingen in de reële data komen bijvoorbeeld door meetfouten of -on nauwkeurigheden. Een manier om overfitting daarom tegen te gaan is om stijgingen in de inputdata zoveel mogelijk te voorkomen. Daarvoor zouden afwijkende of extreme waarden uit de data gefilterd moeten worden, zodat een vloeiende temperatuurafname ontstaat. Echter bleek uit de analyse op overfitting (zie sectie 5.5) dat dit niet direct een oplossing lijkt te zijn. De grafieken voor de kerntemperatuur (dataset 3) vertoonden namelijk veel minder grilligheden dan de andere datasets, maar het aantal gevallen van overfitting (binnen het gemeten tijdsinterval) was niet lager.

Wat ook bleek uit diezelfde analyse op overfitting is dat het minste aantal gevallen van overfitting voorkwam bij de voorspellingen waarbij de grootste dataset (dataset 1+2) als input is gebruikt. Op basis daarvan kan worden aangenomen dat het gebruik van een grotere dataset zorgt voor een afname van het aantal gevallen van overfitting (binnen het gemeten tijdsinterval). Om overfitting zoveel mogelijk in te perken wordt daarom aangeraden om zoveel mogelijk inputdata te gebruiken voor het genereren van voorspellingen met ASPARiCool.

Meer voorspellingen uitvoeren op kerntemperatuur

Uit de resultaten van het onderzoek bleek dat van alle ASPARiCool-voorspellingen de voorspellingen op kerntemperatuur het meest nauwkeurig waren. Ook konden de meeste voorspellingen van de kerntemperatuur worden beschouwd als 'nauwkeurig' of 'zeer nauwkeurig'. Het verschil in nauwkeurigheid tussen de oppervlakte- en kerntemperatuur was vrij groot. Zo was het gemiddelde temperatuurverschil van de kerntemperatuurvoorspellingen bijvoorbeeld 4 °C kleiner dan die van de oppervlaktetemperatuurvoorspellingen. Ook waren voor vrijwel alle factoren de voorspellingen van de kerntemperatuur nauwkeuriger.

Een mogelijke oorzaak hiervan is dat de gemeten kerntemperatuur zoals eerder aangegeven minder grilligheden vertoont dan de gemeten oppervlaktetemperatuur. Deze grilligheden worden onder meer veroorzaakt door verstoringen bij de infraroodcamera tijdens de meting, bijvoorbeeld wanneer walsmachines of asfaltermedewerkers voor de camera lopen of wanneer er water op het asfalt staat. Bij het meten van de kerntemperatuur (op meerdere hoogtes) wordt hier geen hinder van ondervonden, waardoor de grafieken vloeiender lopen. Ook blijkt uit onderzoek naar de verschillen tussen de kern- en oppervlaktetemperatuur (zie sectie 4.1) dat de oppervlaktetemperatuur in sommige gevallen in het begin sterk daalt ten opzichte van de kerntemperatuur. Ook blijkt uit sectie 6.4.4 dat de ASPARiCool-grafieken moeite hebben met deze grote hellingen in het begin van de meting, waardoor in veel gevallen de temperatuurverschillen tussen de gemeten en voorspelde curves al vanaf het begin aanzienlijk groot zijn.

Omdat de kerntemperatuur een veel vloeiender verloop en minder steile hellingen vertoont en omdat de nauwkeurigheid in vrijwel alle gevallen tijdens dit onderzoek het hoogst bleek te zijn, wordt aangeraden om met ASPARiCool meer voorspellingen uit te voeren op kerntemperatuur in plaats van op oppervlaktetemperatuur. Daarvoor is het nodig om in de toekomst zoveel mogelijk metingen uit te voeren op kerntemperatuur.

Aanbevelingen interface ASPARiCool

Tijdens dit onderzoek is veelvuldig gebruik gemaakt van ASPARiCool, waarbij werd opgemerkt dat ook in het gebruik een aantal verbeteringen mogelijk zijn.

Ten eerste zou, indien dit mogelijk is, het toevoegen van een optie om de voorspelde curves/temperatuurwaarden te exporteren naar bijvoorbeeld Excel of een tekstbestand een handige toevoeging zijn. Voor het berekenen van de vergelijkingswaarden waren namelijk de voorspelde temperaturen per minuut nodig. Omdat deze, voor zover bekend, nergens te verkrijgen zijn en ASPARiCool alleen de grafiek weergeeft, zijn al deze grafieken afgelezen, waarbij per minuut de temperatuur werd genoteerd. Deze genoteerde temperatuurwaarden zijn vervolgens verwerkt in Excel om eenvoudig de data met de gemeten waarden te kunnen vergelijken. Het aflezen van de grafieken was erg tijdrovend. In het belang van verder onderzoek zou een exporteer-optie in ASPARiCool, waarbij in ieder geval in het programma een duidelijke optie te zien is, een gewenste toevoeging zijn.

Ten tweede viel op dat bij het invoeren van de parameters in veel gevallen geen eenheden in het programma te zien zijn. Uit het rapport van Ong-A-Fat, Miller en Makarov (2019) is wel een Excel-format weergegeven, waarbij ook de eenheden zijn weergegeven. Voor extra duidelijkheid voor de gebruiker zou het wenselijk zijn om ook in het programma zelf de eenheden van de parameters weer te geven.

Tenslotte een opmerking over de dropdown menu's in ASPARiCool. Hier is tijdens het onderzoek weinig gebruik van gemaakt, maar wel is gemerkt dat dit de mogelijkheden voor het invoeren van de parameters redelijk beperkt. Zo is voor de temperatuur van de onderlaag alleen te kiezen tussen alle tientallen tussen 10 en 100 °C, terwijl tijdens de metingen in veel gevallen de temperatuur nog onder de 10 °C lag. Voor de windsnelheid zijn alleen waarden tot 12 km/h te kiezen, terwijl uit de gegevens van het KNMI bleek dat tijdens de metingen in veel gevallen de windsnelheid nog veel hoger was. Wanneer gebruikers toekomstige projecten willen voorspellen, zullen ze gebruik moeten maken van deze dropdown menu's. Om de beperkingen tegen te gaan zouden de beschikbare opties in de dropdown menu's uitgebreid kunnen worden. Indien mogelijk zouden de dropdown menu's bij voorkeur zelfs vervangen kunnen worden voor balken waar de parameters ingetypt kunnen worden, zoals bij PaveCool ook het geval is. Daarbij is het in het Excel-format voor de inputdata voor ASPARiCool wel mogelijk om voor diezelfde parameters de informatie in te typen. Door het uitbreiden of vervangen van de huidige dropdown menu's zouden toekomstige projecten nauwkeuriger kunnen worden benaderd.

8.5.3. Aanbevelingen Roelofs

Als partnerbedrijf van ASPARi kan Roelofs bijdragen aan het onderzoek naar voorspellingsmodellen voor asfaltafkoeling. Indien Roelofs in de toekomst gebruik zou willen maken van ASPARiCool, kan het op verschillende manieren bijdragen aan de ontwikkeling van het model.

De belangrijkste bijdrage die geleverd kan worden is het uitvoeren van temperatuurmetingen, zoals ook voor dit onderzoek is gedaan. Hierbij kan dezelfde methodiek worden toegepast zoals beschreven in sectie 3.3. Bij voorkeur worden zoveel mogelijk metingen gedaan op kerntemperatuur, waarvoor dus thermokoppels, thermokoppelhouders en dataloggers nodig zijn (zie sectie 3.2). Daarbij wordt aangeraden om zoveel mogelijk gebruik te maken van dezelfde apparatuur en om deze apparatuur van tevoren te kalibreren, om meetfouten en -on nauwkeurigheden zoveel mogelijk in te perken.

Bij voorkeur en indien mogelijk worden de metingen uitgevoerd door iemand die zich tijdens het asfalteerproject volledig focust op het uitvoeren van de metingen. Wanneer de meetpunten continu in de gaten worden gehouden is de kans veel groter dat de oorzaak van mogelijke opvallende afwijkingen in de data worden ontdekt. Deze persoon kan dan ook het verdichtingsproces bijhouden en de gevolgen voor de afkoeling van asfalt waarnemen en analyseren. De gevolgen van verdichting op de asfaltafkoeling is tijdens dit onderzoek namelijk niet in beschouwing genomen, maar heeft naar verwachting wel invloed (zie discussie).

Met het uitvoeren van temperatuurmetingen kan Roelofs een eigen database creëren/uitbreiden die kan worden gebruikt bij het genereren van voorspellingen door ASPARiCool. Daarnaast kan deze data ook door ASPARi en andere partnerbedrijven worden gebruikt voor de voorspellingen, waarmee gezamenlijk een nog grotere dataset kan worden gecreëerd. Dit alles kan uiteindelijk de nauwkeurigheid van de door ASPARiCool gegenereerde voorspellingen bevorderen.

8.5.4. Aanbevelingen voor de praktijk

Zoals in de vorige sectie al duidelijk werd, kan Roelofs een bijdrage leveren aan onderzoeken die door ASPARi worden uitgevoerd door op hun eigen asfalteerprojecten de asfalttemperatuur te meten. Wanneer wat breder naar de praktijk wordt gekeken, kan dit advies ook worden opgevolgd door meer bedrijven en instanties binnen de asfaltindustrie. Met betrekking tot verbetering en innovatie binnen de asfaltindustrie kan daarom op basis van dit onderzoek worden aanbevolen om zoveel mogelijk temperatuurmetingen uit te voeren tijdens het asfalteren, bij voorkeur op kerntemperatuur. Temperatuurgegevens van asfalt tijdens asfalteren en verdichten zijn niet alleen van belang voor ASPARi, maar ook voor andere onderzoeksgroepen en bedrijven die zelf onderzoek doen naar asfalt. Uit dit onderzoek en aanbevelingen in de vorige secties, en ook uit andere onderzoeken naar voorspellingsmodellen, blijkt namelijk dat zoveel mogelijk data nodig is om de voorspellingen in de toekomst te kunnen verbeteren. Ook kan met grotere hoeveelheden beter onderzoek worden gedaan naar de gevolgen van verschillende factoren.

Bibliografie

- ASPARi. (sd). *ASPARi: What we do*. Opgehaald van ASPARi: <https://www.aspari.nl/what-we-do>
- Bijleveld, F. (2010). *Op basis van mechanische eigenschappen het bepalen van temperatuur en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels*. Enschede: Universiteit Twente.
- Bijleveld, F. (2015). *Professionalising the asphalt construction process*. Enschede: ASPARi, University of Twente.
- Bijleveld, F., Miller, S., De Bondt, A., & Dorée, A. (2012). *Too hot to handle, too cold to control - Influence of compaction temperature on the mechanical properties of asphalt*. Istanbul: 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress.
- Chadbourne, B. A. (1998). *An Asphalt Paving Tool For Adversed Conditions*. Minneapolis: University of Minnesota.
- Conrad. (sd). *Voltcraft IR1000-50CAM Infrared Thermometer -50 to +1000 °C*. Opgehaald van Conrad: <https://www.conrad.com/p/voltcraft-ir1000-50cam-infrared-thermometer-50-to-1000-c-100959>
- CROW. (2010). *Asfalt in weg- en waterbouw*. Ede: CROW.
- CROW. (2010). *Deelhoofdstuk 31.2 Asfaltverhardingen*. Ede: CROW.
- Delta OHM. (sd). *Thermokoppel principe*. Opgehaald van Delta OHM: <https://www.deltaohm.nl/home/thermokoppel-principe>
- Dienst Grote Projecten en Onderhoud. (2013). *Specificaties Ontwerp Asfaltverhardingen*. Ede: CROW.
- European Commission. (2019). *Mobility and Transport: Netherlands*. Retrieved from European Commission: https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/countries/netherlands/investments-infrastructure_en
- Gite, B. E., & Abjal, M. S. (sd). *Stone Mastic Asphalt*. Opgehaald van Civil Engineering Portal: <https://www.engineeringcivil.com/stone-mastic-asphalt.html>
- Hashim, W., Arshad, A., Shaffie, E., & Md Noh, N. (2018). The Cooling Rate of Hot Mix Asphalt Pavement Due to Various Raining Condition. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 1887-1895.
- Herb, W., Velasquez, R., Stefan, H., Marasteanu, M. O., & Clyne, T. (2009). Simulation and Characterization of Asphalt Pavement Temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, Volume 10 – No. 1/2009, pagina's 233-247.
- Huurman, M., & Demmink, E. (2016). *De landing van de asfaltindustrie*. Ede: CROW.
- Khan, Z. H., Islam, R., & Tarefder, R. A. (2019). Determining asphalt surface temperature using weather parameters. *Journal of Traffic and Transport Engineering (English Edition)*.
- KNMI. (n.d.). *Grafieken van het afgelopen jaar*. Retrieved from Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/grafieken/jaar>
- Lantz, B. (2013). *Machine Learning with R*. Birmingham: Packt Publishing.
- McClave, J. T., Sincich, T., & Knyppstra, S. (2016). *Statistiek*. Amsterdam: Pearson Benelux BV.

- Meijerink, A. (2010). *Asfalttemperatuur- en dichtheidanalyse ter bevordering van asfaltkwaliteit*. Enschede: Universiteit Stellenbosch, Universiteit Twente.
- Miller, S. (2010). *Hot Mix Asphalt Construction; Towards a more professional approach*. Enschede: PhD thesis, University of Twente.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2009). Chapter 4. Pavement Friction and Surface Texture. In *Guide for Pavement Friction* (pp. 21-54). Washington, DC: The National Academies Press.
- Ong-A-Fat, K., Miller, S., & Makarov, D. (2019). *Asphalt Cooling Rate Prediction*. Enschede: ASPARi, University of Twente.
- Poeran, N., Sluer, B., & Andeweg, B. (2012). *Verwerkbaarheid van asfaltmengsels*. Ede: CROW.
- Rijkswaterstaat. (2012). *Asfalteren bij lage temperaturen*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Roelofs. (n.d.). *Over ons*. Retrieved from Roelofs: <https://www.roelofsgroep.nl/over-ons/>
- Schrijver, B. J. (2006). *Classificeren met vertrouwen*. Enschede: Carp Technologies B.V., Universiteit Twente.
- Tilburg University. (sd). *SPSS: Betrouwbaarheid en validiteit*. Opgehaald van Tilburg University: <https://www.tilburguniversity.edu/nl/studenten/studie/colleges/spsshelpdesk/edesk/betrouwba>
- Tilburg University. (sd). *SPSS: Correlaties*. Opgehaald van Tilburg University: <https://www.tilburguniversity.edu/nl/studenten/studie/colleges/spsshelpdesk/edesk/correlat>
- Timm, D. H. (2001). Calcool: A multi-layer Asphalt Pavement Cooling Tool for Temperature Prediction During Construction. *International Journal of Pavement Engineering* 2(3), 169 - 185.
- V.B.W. (1973). *Asfalt in Wegen- en Waterbouw*. Breukelen: Vereniging voor Bitumineuze Werken.
- V.B.W. (2016). *Richtlijn Tweelaags ZOAB*. Zoetermeer: Vakgroep Bitumineuze Werken (VBW).
- Van Heijst, L. (2018, oktober 12). *Wat is correlatie en hoe bereken je het?* Opgehaald van Scribbr: <https://www.scribbr.nl/statistiek/correlatie/>
- Wang, Y., Zhu, S., & Wong, A. S. (2014). Cooling Time Estimation of Newly Placed Hot-Mix Asphalt Pavement in Different Weather Conditions. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 140, Issue 5.
- Wise, J., & Lorio, R. (2004). A Practical Guide For Estimating The Compaction Window Time For Thin-Layer Hot Mix Asphalt. *CAPSA 2004*, 1311-1316.
- World Economic Forum. (2018). *The Global Competitiveness Report*. Geneva: World Economic Forum.

Bijlage A: Tabellen warmte-eigenschappen PaveCool

Tabel 31: Standaardwaarden van de warmte-eigenschappen van alle materialen die PaveCool in beschouwing neemt (bron: PaveCool Help)

Materiaal	Dichtheid kg/m ³	Warmtegeleidingscoëfficiënt W/mK	Soortelijke warmte J(kg·K)
'Dense-graded' asfalt	2000	2,0	1000
SMA	2010	1,5	1010
Bestaand asfalt (onderlaag)	2000	1,51	1025
Beton (onderlaag)	2000	0,92	1090
Zand/gravel (droog, niet bevr.)	2000	1,16	963
Zand/gravel (nat, niet bevr.)	2000	1,22	1172
Zand/gravel (droog, bevroren)	2000	2,00	858
Zand/gravel (nat, bevroren)	2000	3,55	963
Slib/klei (droog, niet bevroren)	1800	1,35	1172
Slib/klei (nat, niet bevroren)	1800	1,87	1591
Slib/klei (droog, bevroren)	1800	1,40	963
Slib/klei (nat, bevroren)	1800	2,38	1172

Tabel 32: Warmtegeleiding voor verschillende typen onderlagen (Chadbourn,1998)

Warmtegeleidingscoëfficiënt, W/mK									
Materiaal	Y _d kg/m ³	Vochtgehalte, %							
		4	5	6	7	8	10	15	20
Zand/gravel, niet bevr.	1800				1,08	1,18	1,35	1,65	1,87
Zand/gravel, bevroren	1800				1,11	1,21	1,40	1,89	2,38
Slib/klei, niet bevroren	2000	1,14	1,16	1,18	1,19	1,20	1,22		
Slib/klei, bevroren	2000	1,70	2,00	2,31	2,62	2,93	3,55		

Tabel 33: Standaardwaarden vochtgehalte per materiaal (bron: PaveCool Help)

Materiaal onderlaag	ω _{droog}	ω _{nat}
Zand/gravel	5 %	10 %
Slib/klei	10 %	20 %

Bijlage B: Meetverslagen

B.1. Introductie

In deze bijlage zijn de meetverslagen van alle metingen te vinden. Bovenaan ieder meetverslag staan de datum en de locatie van het project genoteerd. Verder zijn de volgende onderdelen te vinden:

Situatieschets

In ieder meetverslag is een plattegrond van het werkgebied weergegeven. In deze plattegrond zijn het traject, de afstanden, meetpunten, locatie van het weerstation en de richting van het noorden aangegeven. De legenda van deze situatieschetsen is hieronder weergegeven:

Symbool	Betekenis
	Traject van de aan te leggen asfaltweg
	Locatie meetpunt
	Label meetpunt
	Locatie weerstation
	Label weerstation
	Indicatie afstand (t.o.v. begin traject)
	Noordpijl

Belangrijk om te vermelden is dat de afstanden die zijn weergegeven gebaseerd zijn op schattingen. Deze afstanden zijn bepaald met behulp van Google Maps en zijn vooral bedoeld om een indicatie te geven van de onderlinge afstanden van de meetpunten.

Verder zijn de meetpunten op chronologische wijze ingedeeld. Dat wil zeggen dat meetpunt A het eerste meetpunt is en op de meetpunten B, C, D enz. als respectievelijk tweede, derde en vierde (en verder) is gemeten.

Situatiebeschrijving

De situatiebeschrijving bestaat uit een tabel met alle gegevens die van belang zijn voor de metingen. In deze tabel worden de volgende punten benoemd:

- Type weg
 - o Het type weg gebaseerd op het gebruik. Dit kan bijvoorbeeld een fietspad zijn of bijvoorbeeld een erftoegangsweg tot een bepaald terrein, wat dus alleen door bestemmingsverkeer of een bepaald type verkeer wordt gebruikt.
- Geschatte lengte traject
 - o De totale lengte van de aangelegde asfaltweg, geschat met behulp van Google Maps
- Geschatte breedte traject
 - o De breedte van de aangelegde asfaltweg, geschat met behulp van Google Maps
- Mengsel
 - o Het type asfalmengsel dat is aangelegd, zoals AC 8, AC 16, AC 22 of SMA
- Laag
 - o Hierbij wordt aangegeven of het om de onderlaag, de tussenlaag of de deklaag van de aangelegde asfaltweg gaat
- Laagdikte
 - o De dikte in centimeters van de aangelegde asfaltlaag

- Oppervlakte asfalt
 - o De totale oppervlakte (in m²) van de aangelegde asfaltweg, zoals aangegeven in de planning van de asfaltploeg van Roelofs
- Hoeveelheid asfalt
 - o De hoeveelheid asfalt (in ton) dat is gebruikt voor de aanleg van de asfaltweg, zoals aangegeven in de planning van de asfaltploeg van Roelofs
- Bijzonderheden
 - o Indien er bijzonderheden zijn zoals een ongewone situatie tijdens het asfalteren of een belangrijke melding over de metingen, zijn deze ook in de tabel van de situatiebeschrijving weergegeven

In sommige meetverslagen is onder de tabel ook een beschrijving van de omgeving weergegeven, als deze zodanig van belang is voor het begrijpen van de resultaten. Om die reden zijn in sommige gevallen ook de weersomstandigheden tijdens die dag beschreven.

Materialen

In deze sectie is aangegeven welke materialen er allemaal zijn gebruikt. In totaal was er de beschikking over de volgende materialen:

- 2 infraroodcamera's*
 - o Deze infraroodcamera's worden gebruikt voor het meten van de oppervlaktetemperatuur van het asfalt. De data wordt per seconde gemeten en dit wordt vervolgens opgeslagen wanneer de meting wordt stopgezet.
**Na meting 3 is een van de twee camera's gestopt met functioneren, waardoor deze niet meer kon worden gebruikt. Als alternatief werd een handmatige infraroodscanner ingezet (zie hieronder).*
- 1 handmatige infraroodscanner
 - o Ook met deze infraroodscanner kan de oppervlaktetemperatuur worden gemeten. Hierbij kan de scanner op het oppervlak worden gericht en door een knop ingedrukt te houden kan de oppervlaktetemperatuur worden afgelezen. Het grote verschil met de infraroodcamera is dat deze scanner de gegevens niet op kan slaan. Wanneer gebruik werd gemaakt van deze scanner werd daarom een uur lang iedere minuut de oppervlaktetemperatuur genoteerd.
- Thermokoppels, thermokoppelhouders en 4 dataloggers
 - o Voor het meten van de kerntemperatuur van de asfaltlaag werden thermokoppels gebruikt. Om op meerdere hoogtes de kunnen meten én om (zoveel mogelijk) te voorkomen dat deze verplaatsen tijdens het meten (door o.a. walsovergangen) werden deze thermokoppels bevestigd in thermokoppelhouders, die op de onderliggende laag werden vastgezet. Deze houders verschilden van hoogte, afhankelijk van de dikte van de asfaltlaag. Als vuistregel was de hoogte van een dergelijke houder 1 tot 2 cm lager dan de dikte van het asfalt.
 - o In ieder meetverslag is een dwarsdoorsnede van een meetpunt weergegeven, waarin een indicatie wordt gegeven van de positie van de houder en de thermokoppels in het asfalt. Hierin zijn tevens de hoogtes van de thermokoppels, de labels van de thermokoppels (T1 t/m T4), de hoogte van de houder en de dikte van het asfalt weergegeven.

- De thermokoppels werden bevestigd aan een datalogger, waarvan er vier ter beschikking waren. Deze dataloggers meten de data per seconde en kunnen deze data vervolgens opslaan op een SD-kaart. Op deze SD-kaart is de gemeten data opgeslagen in een Excel-format, met de temperaturen per gebruikte poort weergegeven per seconde.

Informatie walsen

In ieder meetverslag is tevens kort weergegeven wat ongeveer de verdichtingsstrategie was tijdens de asfaltprojecten. Deze informatie is gebaseerd op waarnemingen die zijn gedaan tijdens de metingen. In deze sectie wordt onderscheid gemaakt tussen drie fases van verdichting: De egalisatiefase, waarin het net aangelegde asfaltmengsel wordt vlakgewalst; de hoofdverdichting, waarbij het grootste deel van de verdichting plaatsvindt; en de afwerking, waarbij de streefdichtheid zoveel mogelijk wordt genaderd en eventuele plooien worden weggewalst.

Per fase wordt aangegeven wat voor soort wals er tijdens de verdichting is gebruikt. In de meeste gevallen is dit een kleine of een grote walsmachine en in enkele gevallen wordt een bandenwals gebruikt. Ook de hoeveelheid walsen per type wordt vermeld.

Afkoelingscurves per meetpunt

In deze sectie worden alle resultaten van de metingen weergegeven. Per meetpunt worden de afkoelingscurves van zowel de oppervlaktetemperatuur als de kerntemperatuur weergegeven. De benaming van de weergegeven grafieken is als volgt:

- T₁ t/m T_n
 - Kerntemperatuur op de hoogte zoals weergegeven in de dwarsdoorsnede in de sectie 'Materialen'
- IR
 - Oppervlaktetemperatuur, gemeten met infraroodcamera's

Onder iedere grafiek staat tevens informatie over de temperatuur van het asfalt op het moment dat het uit de asfaltmachine komt (starttemperatuur), het type onderlaag waar het asfalt op wordt geplaatst en de oppervlaktetemperatuur van die onderliggende laag vlak voordat het asfalt erop wordt geplaatst.

Bij veel grafieken worden daarnaast opmerkingen en waarnemingen benoemd die van belang zijn voor het begrijpen van de data. Hierbij kan bijvoorbeeld worden aangegeven dat bepaalde thermokoppels niet functioneerden tijdens de meting en daardoor ontbreken, of bijvoorbeeld wanneer er een ongewone situatie ontstond tijdens het asfalteren, waardoor de data zichtbaar afwijkt van de verwachte afkoelingscurves.

Weersgegevens

Aan het eind van ieder meetverslag is ook informatie over de weersomstandigheden tijdens de metingen toegevoegd. Deze informatie is deels afkomstig van het weerstation dat bij iedere meting is gebruikt en deels van waarnemingen tijdens de metingen. Onder meer een grafiek van de omgevingstemperatuur tijdens de metingen is weergegeven. In diezelfde grafiek is tevens aangegeven wanneer iedere meting heeft plaatsgevonden. Onder de grafiek wordt voor iedere meting de gemiddelde omgevingstemperatuur weergegeven. Hierbij wordt ook de geschatte windsnelheid, de hoeveelheid regen, de bewolgingsgraad en de luchtvochtigheid weergegeven.

Daarnaast zijn de gegevens van het KNMI voor de gemeten uren toegevoegd. Deze informatie is afkomstig van meerdere weerstations van het KNMI en is gemeten per uur. Voor ieder project is het dichtstbijzijnde weerstation geraadpleegd. Van deze informatie is in de meetverslagen de gemiddelde omgevingstemperatuur, de gemiddelde windsnelheid per uur, de gemiddelde neerslag per uur, de bewolgingsgraad en de globale zonnestraling weergegeven.

Algemene opmerkingen weersgegevens

- In sommige grafieken is te zien dat de temperatuur tijdens de eerste minuten aanzienlijk hoger is dan de rest van de gemeten temperaturen. Ook is vanaf de eerste minuut tijdens de eerste minuten een flinke afdaling te zien. Dit heeft hoogstwaarschijnlijk te maken met het feit dat het weerstation op die momenten pas net uit de auto is gehaald, waarin het aanzienlijk warmer is dan buiten. Daardoor lijkt het weerstation tijdens de eerste minuten nog even te moeten 'wennen' aan de buitentemperatuur.
- Wanneer de weersgegevens niet of onvoldoende waargenomen zijn (zonder gebruik van het weerstation) is dit aangeduid in de tabellen met 'n.b.' (niet bekend).

B.2. Aannames

Voor de metingen is een aantal belangrijke aannames gedaan:

- Van tevoren is de meetapparatuur niet gekalibreerd of gecheckt op nauwkeurigheid. Er is daarom aangenomen dat alle meetapparatuur met een voldoende nauwkeurigheid heeft gemeten.
- De meetpunten zijn telkens aan één kant van de weg geplaatst. Voor een extra nauwkeurige meting zou een extra meetpunt aan de andere kant van de weg geholpen hebben. Echter is gekozen om dit niet te doen en is hierbij aangenomen dat het verschil in temperatuurverloop over de gehele breedte van de weg verwaarloosbaar is.

Meetverslag 1

Datum: 13 november 2019

Locatie: Burgemeester Matsersingel, Arnhem
(Traject tussen de Batavierenweg en de Randweg)

Situatieschets:

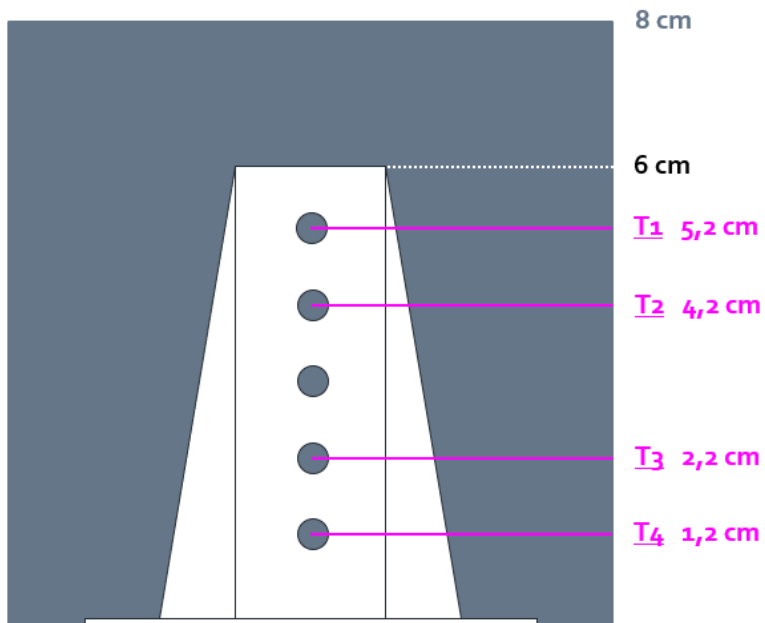


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Fietspad
Geschatte lengte traject:	450 m
Geschatte breedte traject:	3,5 m
Mengsel:	AC 22 Base OL-B
Laag:	Onderlaag
Laagdikte:	8 cm
Oppervlakte asfalt:	587 m ²
Hoeveelheid asfalt:	118 ton
Bijzonderheden:	Onderlaag aangebracht in stukken. Meetpunten A en C zijn geplaatst op overgangen van bestaande onderlaag naar nieuwe onderlaag, meetpunten B en D zijn geplaatst in het midden van nieuwe 'vakken'.

Materialen:

- 2 infraroodcamera's (camera 2 op meetpunt A, camera 1 op meetpunt C)
- 4 thermokoppelhouders (6 cm) met ieder 4 thermokoppels

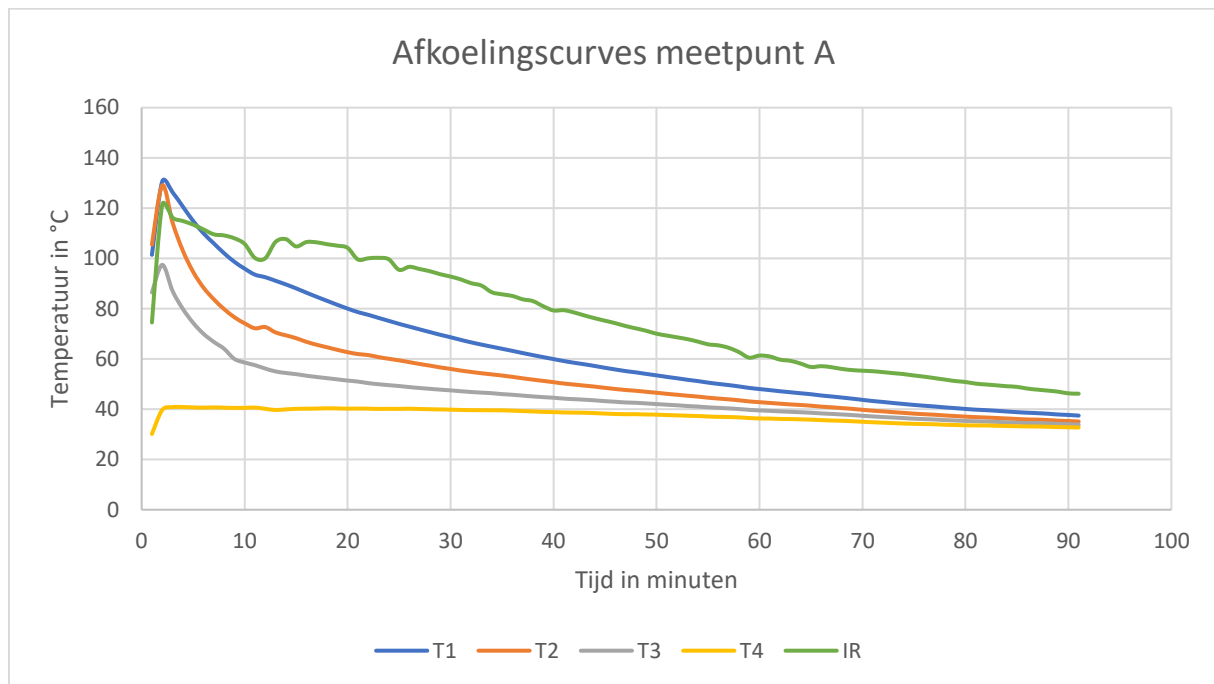


Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- | | |
|--|----------------------|
| - Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: | Kleine wals |
| - Hoofdverdichting: | Grote en kleine wals |
| - Afwerking: | Grote wals |

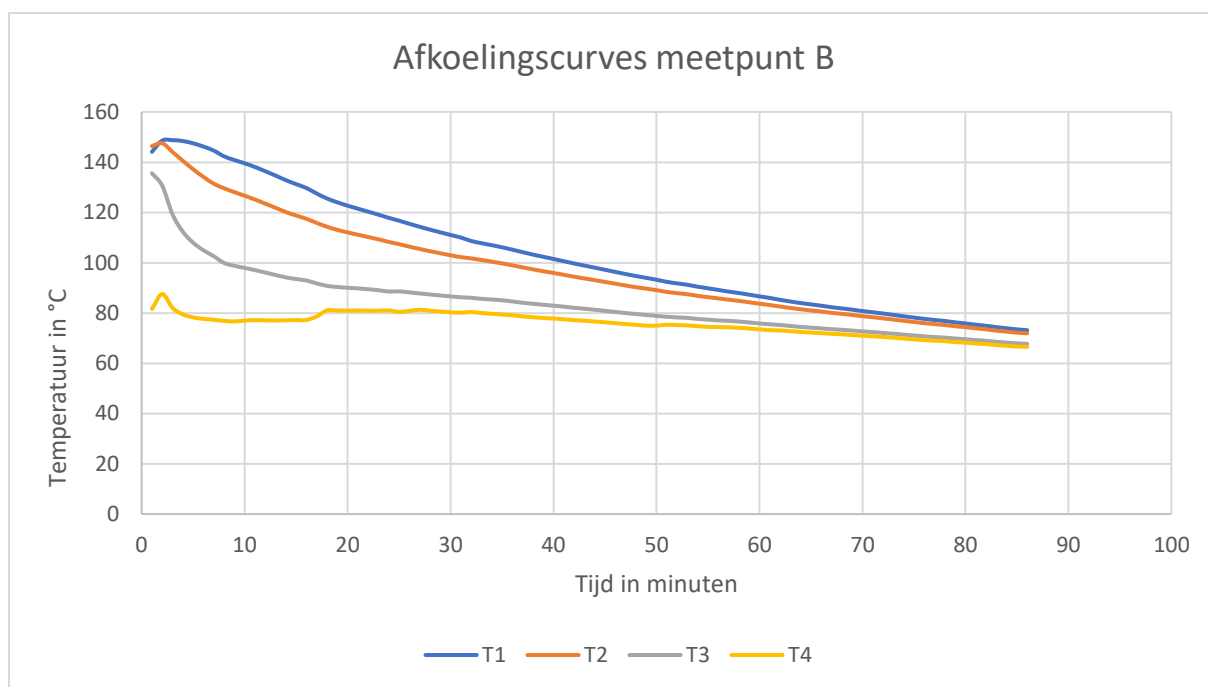
Afkoelingscurves per meetpunt



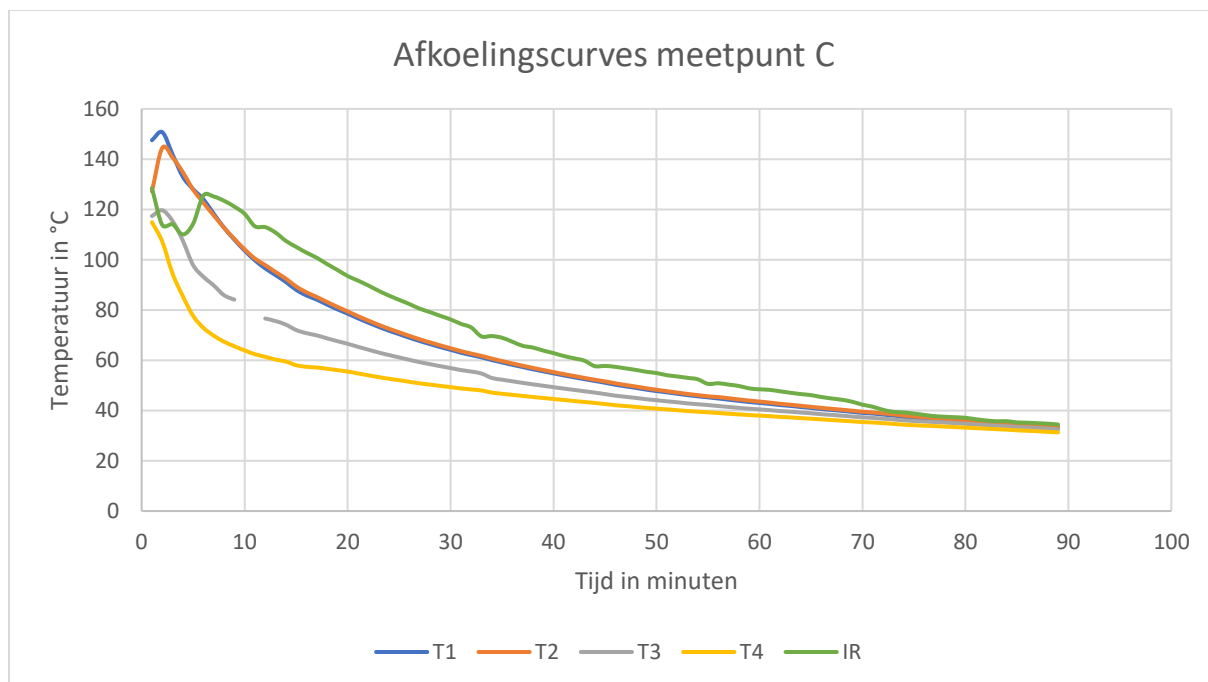
Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	6 °C

Opmerkingen en waarnemingen materialen:

- Dit meetpunt ligt, zoals in de bijzonderheden aangegeven, op een overgang van een bestaand wegdeel naar een nieuw geasfalteerd wegdeel. Omdat dit meetpunt zeer dicht op het bestaande wegdeel is gepositioneerd, koelt de nieuwe asfaltlaag bij deze rand sneller af dan in het midden dan dit nieuwe deel, waar meetpunt B is gepositioneerd. Dit komt vermoedelijk door de warmteoverdracht tussen deze wegdelen, waardoor niet alleen van de onderliggende laag, maar ook van de zijkant 'koude' stromen worden overgedragen. De verschillen tussen de afkoelcurves van meetpunten A en B zijn hierdoor duidelijk te zien.
- Aan de afkoelcurves valt op dat door thermokoppel T₄ vrijwel de gehele meettijd een constante temperatuur wordt gemeten. De reden hiervan is onbekend, maar een vermoedelijke oorzaak is dat deze in direct contact is geweest met de onderlaag of het bestaande wegdeel, en dus niet met het nieuwe asfalt.



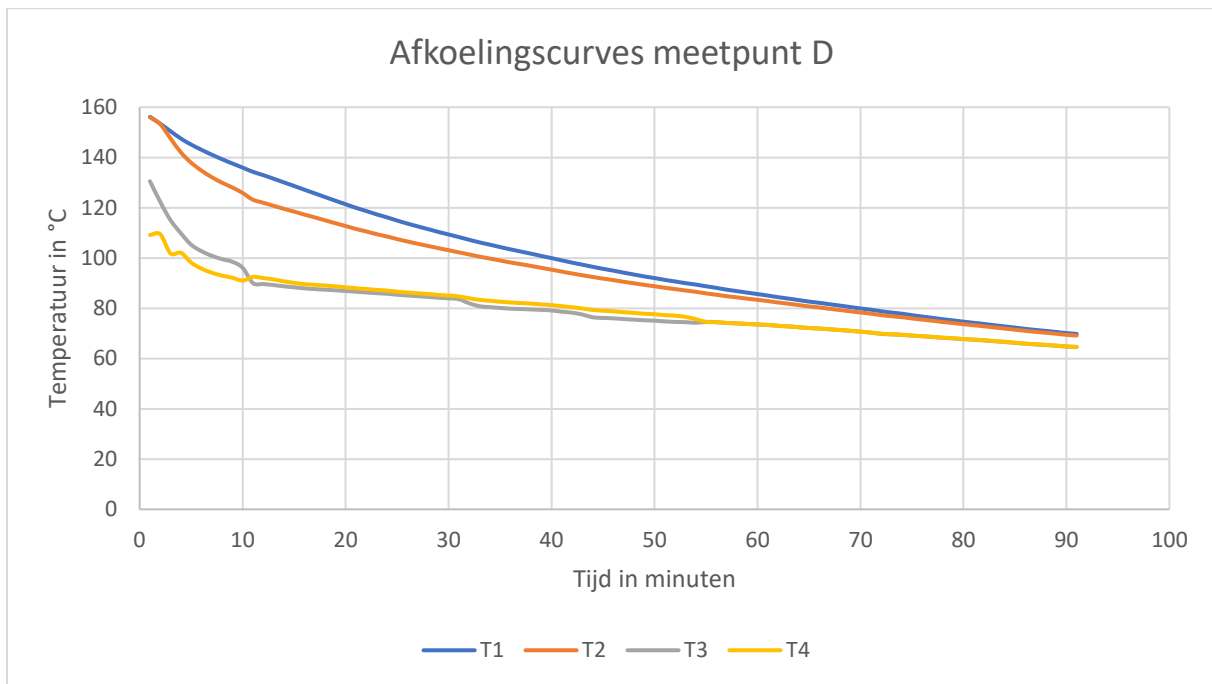
Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	6 °C



Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	6 °C

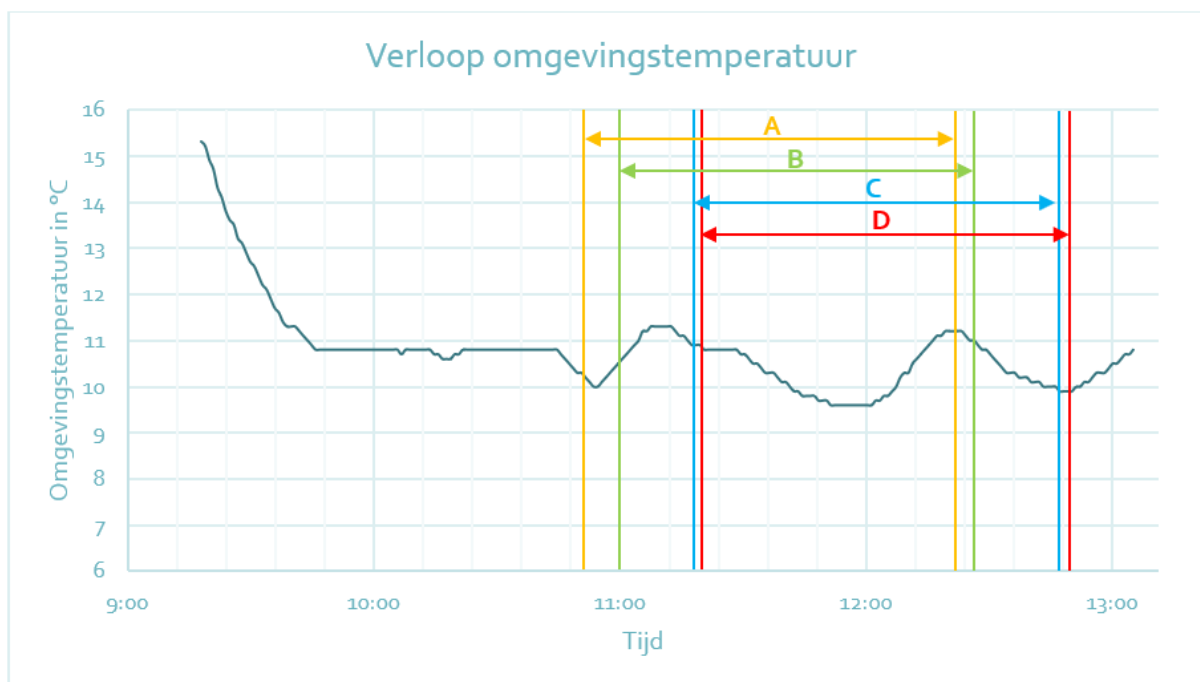
Opmerkingen en waarnemingen meetpunt C:

- Net als meetpunt A ligt dit meetpunt op een overgang van een bestaand wegdeel naar het nieuwe wegdeel. Hierdoor koelt het nieuwe asfalt aanzienlijk sneller af, wat te zien is aan de data als meetpunten C en D met elkaar worden vergeleken.
- Opvallend aan de afkoelcurve van meetpunt C is dat de gegevens van $t=10$ en $t=11$ ontbreken. Op deze tijdstippen werden extreme data gemeten, die eruit zijn gefilterd. Omdat deze gemiddelden daardoor niet-representatieve data weergaven, zijn ook deze gemiddeldes uit de data gefilterd.



Starttemperatuur asfalt	160 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	6 °C

Weersgegevens



Meetpunt:	A	B	C	D
Gemiddelde omgevingstemperatuur	10,4 °C	10,5 °C	10,3 °C	10,3 °C
Geschatte windsnelheid	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Regen	Nee	Nee	Nee	Nee
Bewolgingsgraad	75 %	75 %	75 %	75 %
Luchtvochtigheid	63 %	64 %	64 %	64 %

Gemeten weergegevens door KNMI (station Deelen):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	7,2 °C
Gemiddelde windsnelheid	17 km/h
Regen	0 mm
Bewolking	100 %
Globale zonnestraling	5 W/m ²
Relatieve vochtigheid	90 %

Meetverslag 2

Datum: 14 november 2019

Locatie: Burgemeester Matsersingel, Arnhem
(Traject tussen de Batavierenweg en de Randweg)

Situatieschets:

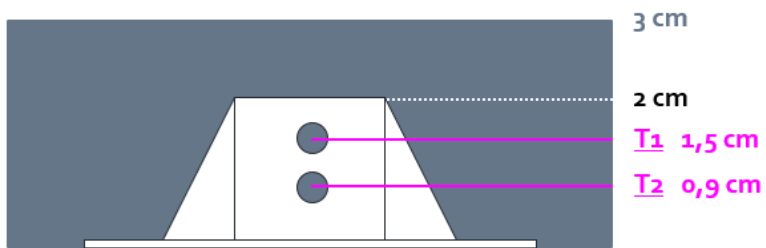


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Fietspad
Geschatte lengte traject:	450 m
Geschatte breedte traject:	3,5 m
Mengsel:	AC 8 Surf DL-B Rood
Laag:	Deklaag
Laagdikte:	3 cm
Oppervlakte asfalt:	1584 m ²
Hoeveelheid asfalt:	119 ton
Bijzonderheden:	Geen

Materialen:

- 2 infraroodcamera's (camera 1 voor meetpunt A, camera 2 voor meetpunt C)
- 3 thermokoppelhouders (2 cm) met ieder 2 thermokoppels

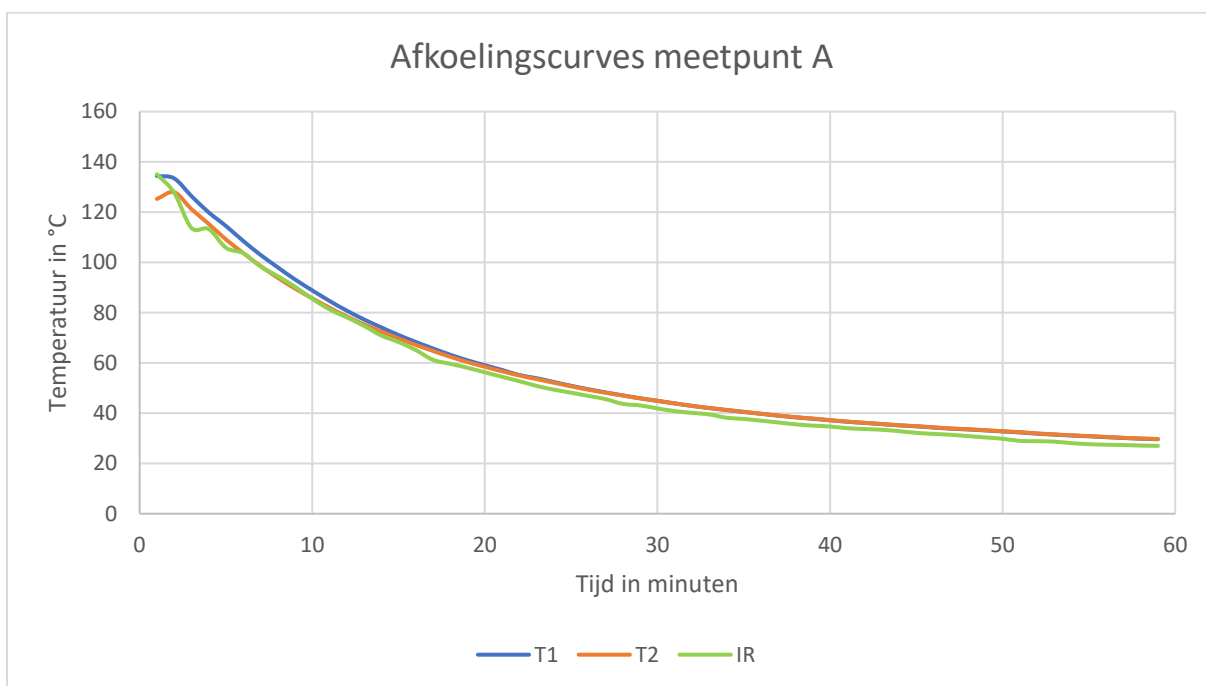


Informatie walsen

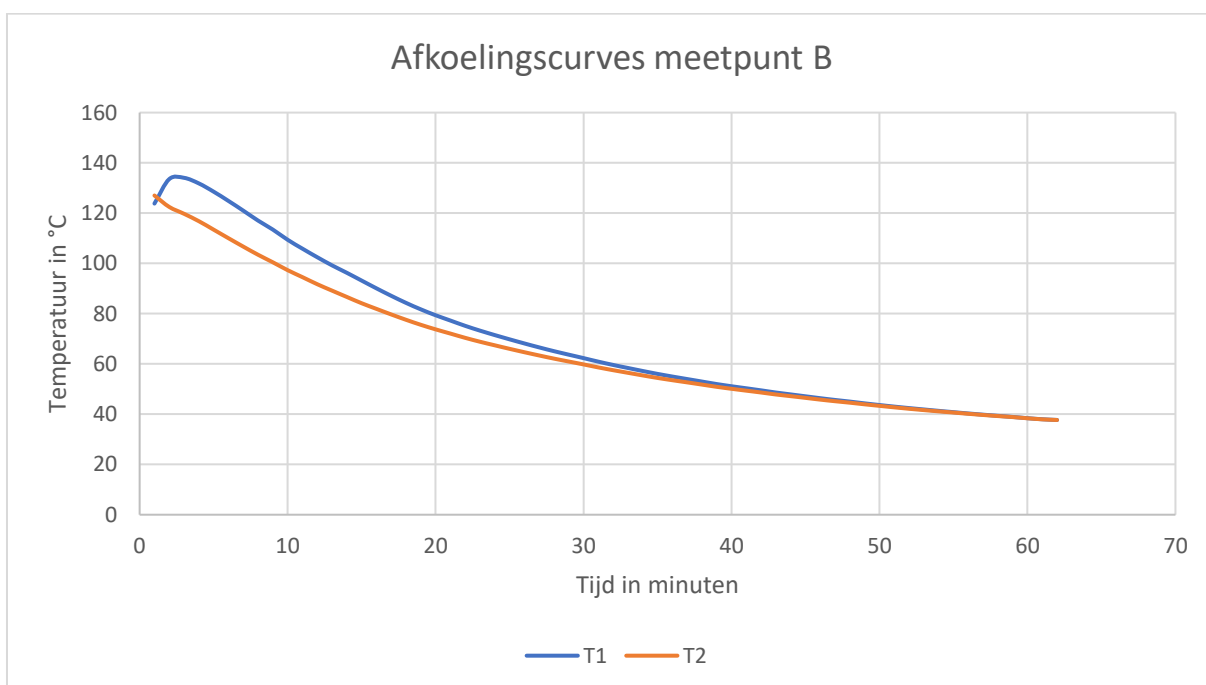
Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- | | |
|--|----------------|
| - Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: | 2 grote walsen |
| - Hoofdverdichting: | 2 grote walsen |
| - Afwerking: | 2 grote walsen |

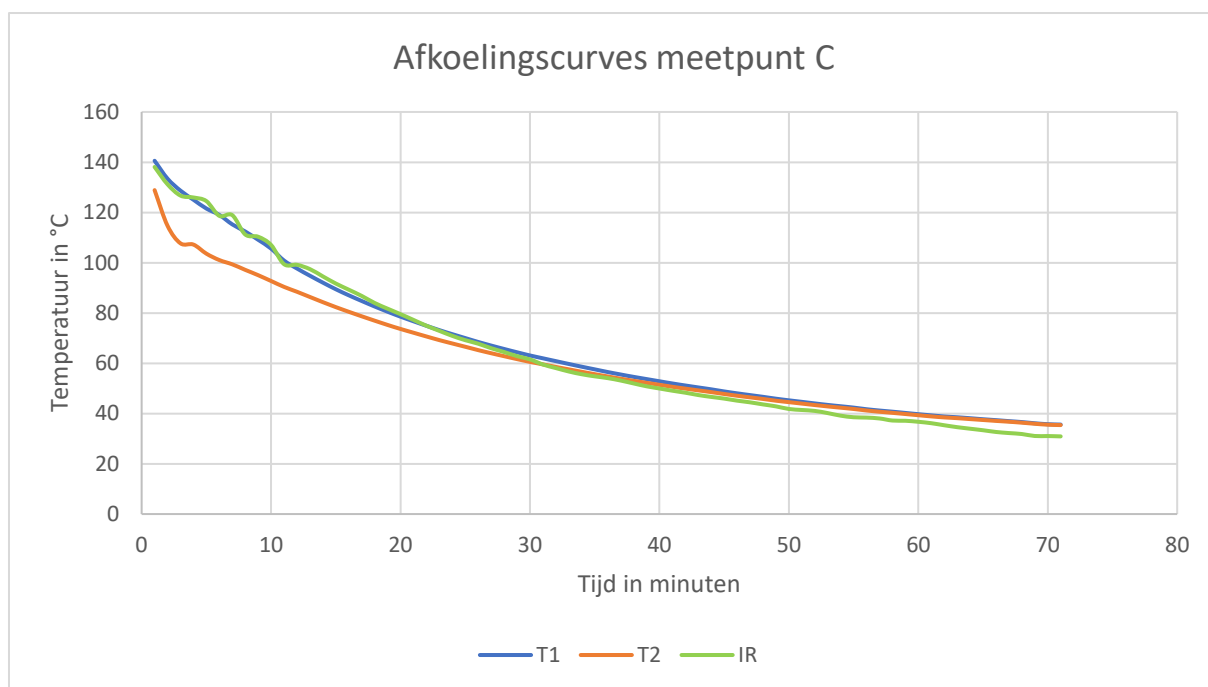
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	5 °C

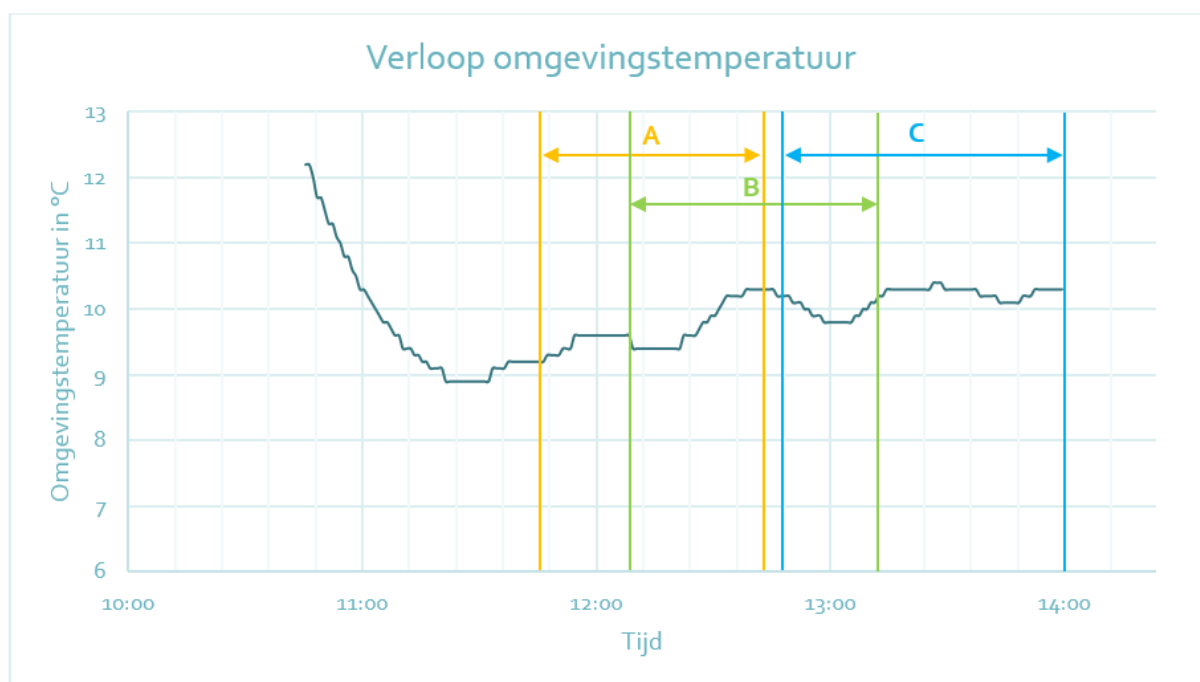


Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C



Starttemperatuur asfalt	140 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Weersgegevens



Meetpunt:	A	B	C
Gemiddelde omgevingstemperatuur	9,6 °C	9,9 °C	10,2 °C
Geschatte windsnelheid	15 km/h	15 km/h	15 km/h
Regen	Nee	Nee	Nee
Bewolgingsgraad	75 %	75 %	75 %
Luchtvochtigheid	68 %	68 %	68 %

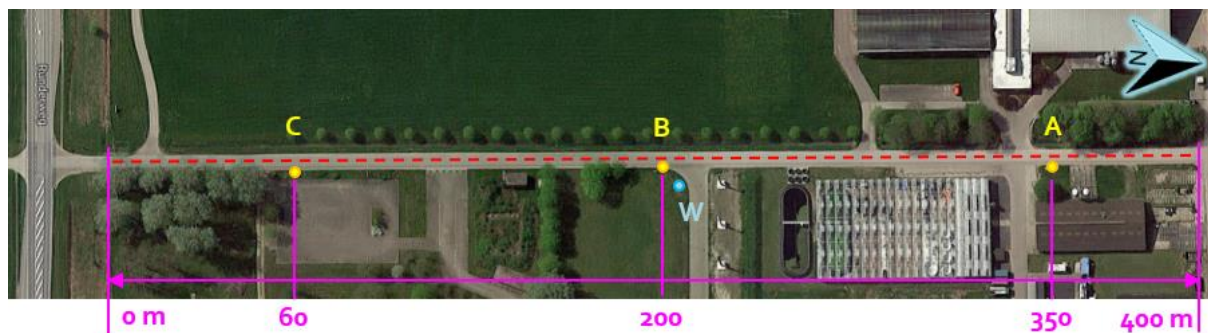
Gemeten weergegevens door KNMI (station Deelen):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	7,2 °C
Gemiddelde windsnelheid	17 km/h
Regen	0 mm
Bewolking	100 %
Globale zonnestraling	6 W/m ²
Relatieve vochtigheid	79 %

Meetverslag 3

Datum: 15 november 2019
Locatie: Runderweg 6, Lelystad

Situatieschets:

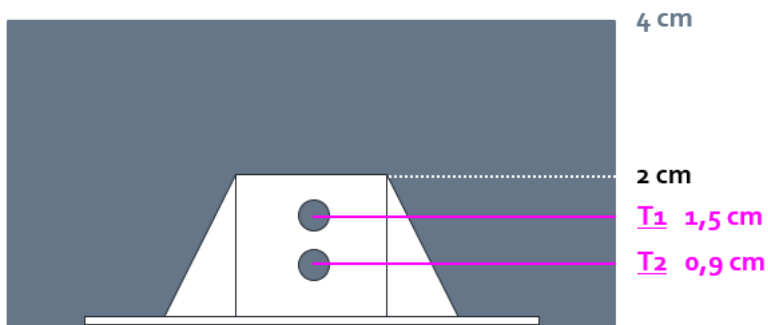


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Privé asfaltweg
Geschatte lengte traject:	400 m
Geschatte breedte traject:	6 m
Mengsel:	AC 16 Surf DL-C
Laag:	Deklaag
Laagdikte:	4 cm
Oppervlakte asfalt:	2750 m ²
Hoeveelheid asfalt:	275 ton
Bijzonderheden:	Weerstation is verplaatst van B naar C vlak na begin meting punt C

Materialen

- 2 infraroodcamera's (nummer 1 voor meetpunt B, nummer 2 voor meetpunt A en C)
- 3 thermokoppelhouders (2 cm) met ieder 2 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

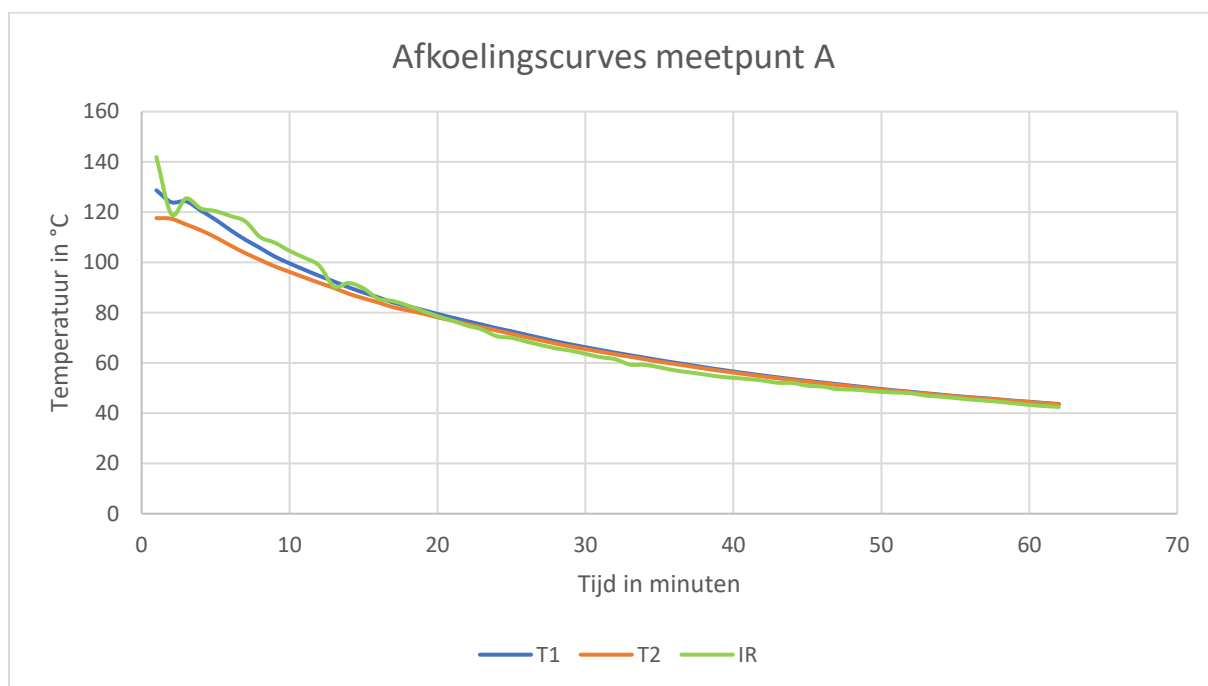
- Na de meting op meetpunt B is infraroodcamera 1 gestopt met functioneren. Daardoor kon ook de data niet langer van deze infraroodcamera worden gehaald.

Informatie walsen

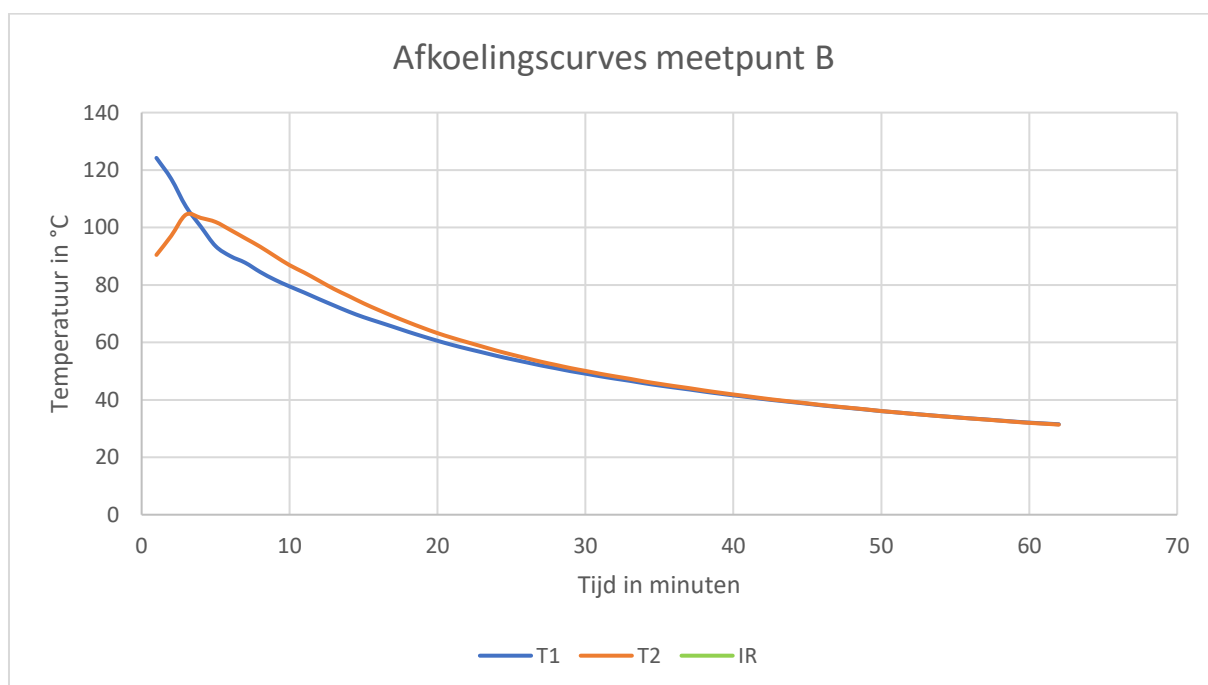
Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: 3 grote walsen
- Hoofdverdichting: 3 grote walsen
- Afwerking: 3 grote walsen

Afkoelingscurves per meetpunt



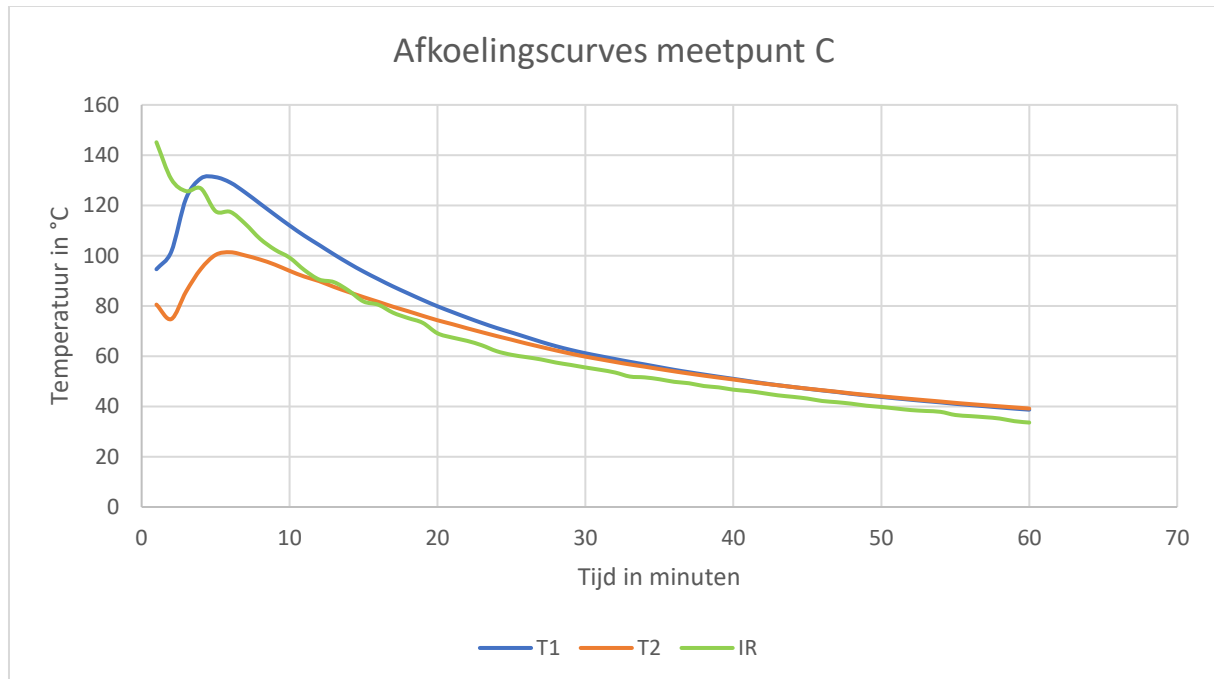
Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

- Op dit meetpunt is de oppervlaktetemperatuur gemeten. Echter kon deze data achteraf niet worden verwerkt, vanwege het niet functioneren van infraroodcamera 1 na de meting.
- Opvallend aan de afkoelcurve van T2 is dat deze tot aan $t=4$ stijgt en niet daalt, zoals de verwachting is. Dat zou kunnen komen doordat deze thermokoppel de eerste paar minuten nog niet direct contact heeft met het asfalt. Na een aantal keer walsen lijkt dit wel het geval.

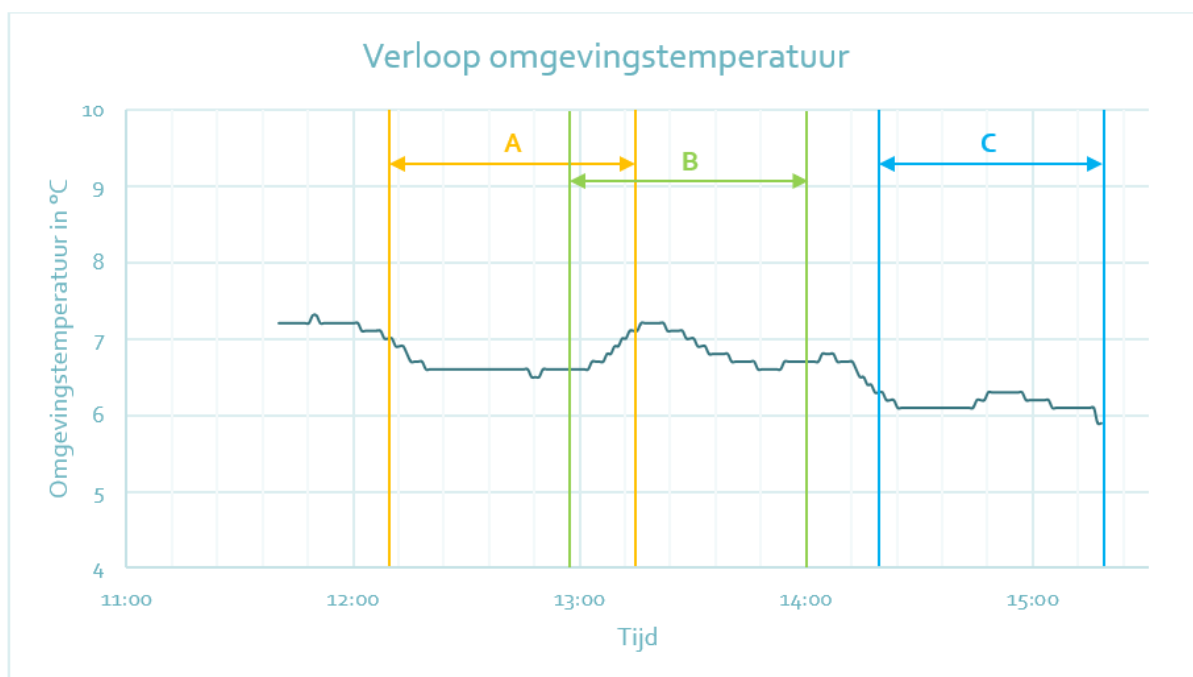


Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt C:

- Net als bij T2 op meetpunt B stijgen ook deze thermokoppels tijdens de eerste minuten van de meting. Ook hier is een mogelijke oorzaak het niet directe contact van de thermokoppels met het asfalt. Vanaf $t=5$ lijken deze thermokoppels na een aantal walsovergangen wel direct in contact te staan met het asfalt.

Weersgegevens



Meetpunt:	A	B	C
Gemiddelde omgevingstemperatuur	6,7 °C	6,8 °C	6,2 °C
Geschatte windsnelheid	20 km/h	20 km/h	20 km/h
Regen	Nee	Nee	Nee
Bewolkingsgraad	100 %	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	60 %	63 %	65 %

Gemeten weergegevens door KNMI (station Lelystad):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	4,9 °C
Gemiddelde windsnelheid	21 km/h
Regen	0 mm
Bewolking	100 %
Globale zonnestraling	1 W/m ²
Relatieve vochtigheid	88 %

Meetverslag 4

Datum: 18 november 2019
Locatie: Adriaan Tripweg 11, Veendam
(Terrein Mineralz)

Situatieschets:



Situatiebeschrijving:

Type weg:	Terrein afvalverwerkingsbedrijf
Geschatte lengte traject:	n.v.t. (zie bijzonderheden)
Geschatte breedte traject:	n.v.t. (zie bijzonderheden)
Mengsel:	AC 11 Surf DL-B
Laag:	Deklaag
Laagdikte:	4 cm
Oppervlakte asfalt:	778 m ²
Hoeveelheid asfalt:	79 ton
Bijzonderheden:	Vakvulling, vakken waar metingen zijn uitgevoerd met rode stippellijn gemarkeerd in situatieschets hierboven

De vakvulling vond plaats op een afvalverwerkingsterrein dat vrijwel volledig is geasfalteerd. Er was van tevoren veel regen gevallen en ook tijdens het asfalteren regende het nog licht. Omdat er weinig afwatering aanwezig was, waren er veel plassen regenwater op het terrein, die ook snel op het nieuwe asfalt terecht kwamen.

Materialen:

- 1 infraroodcamera (meetpunt A en B)

Opmerkingen materialen

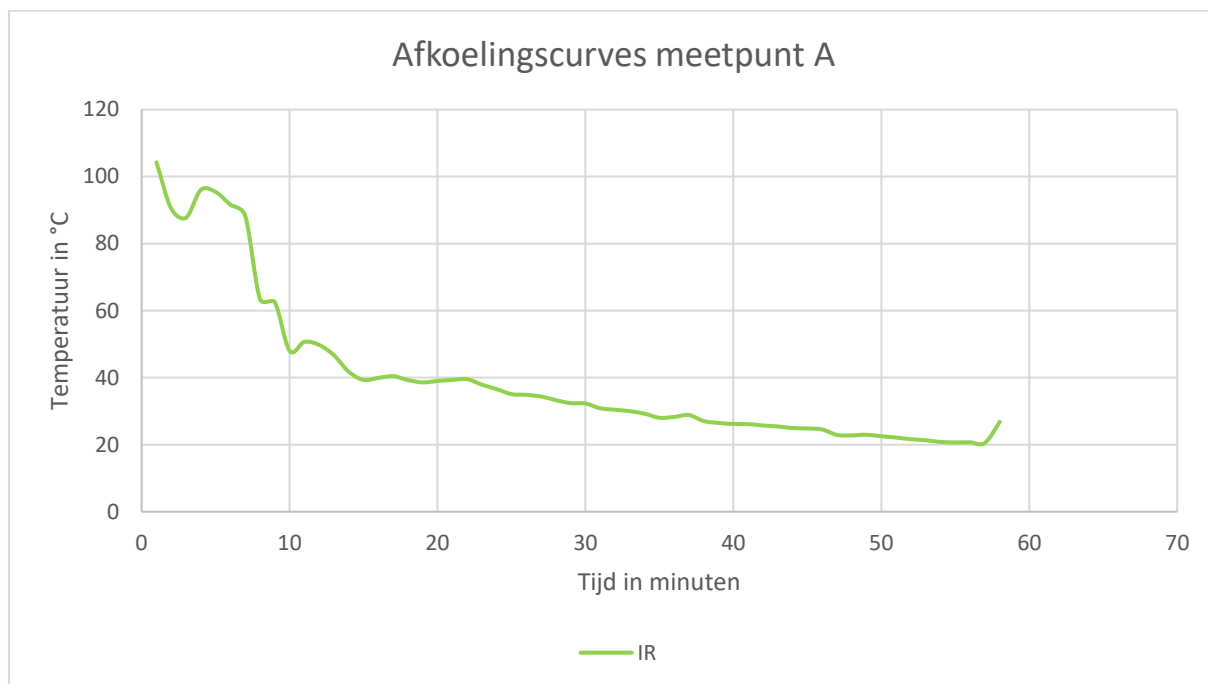
- Voor de meting is besloten om niet gebruik te maken van de thermokoppels. Deze waren wel meegenomen voor de metingen, maar om de meetapparatuur te beschermen is geen risico genomen. De reden hiervan is dat de walsen tot ver over de rand van het nieuw aangelegde vak kwamen, waardoor deze ook over de thermokoppeldraden zouden rijden. Omdat gevreesd werd dat door de kracht van de walsen de meetapparatuur meegetrokken zou worden, zijn deze metingen niet uitgevoerd.

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- | | |
|--|----------------------|
| - Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: | Kleine wals |
| - Hoofdverdichting: | Grote en kleine wals |
| - Afwerking: | Grote wals |

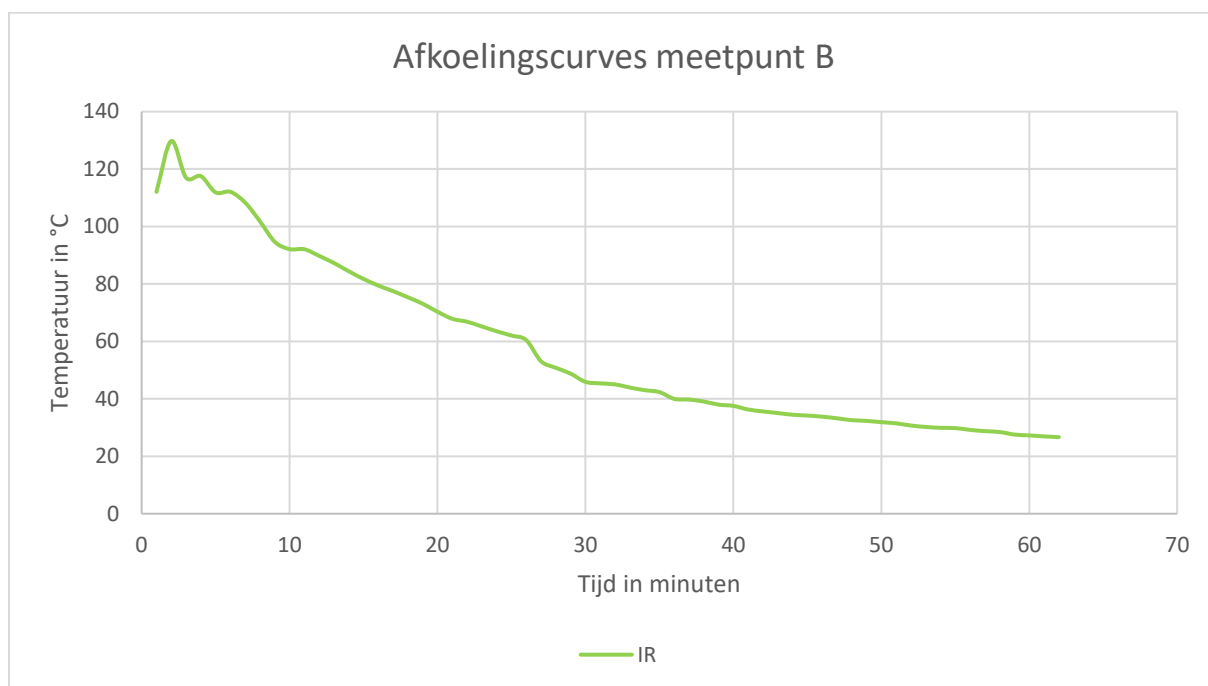
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	110 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A:

Op en rond dit meetpunt waren, op basis van waarnemingen, veel plassen water aanwezig. Door de walsen werden deze plassen ook verspreid over de nieuw aangelegde asfaltmat. Deze plassen kwamen daardoor ook terecht bij het meetpunt, waar een infraroodcamera opgesteld stond. Op de plek waar de infraroodcamera op gericht stond, kwam ook regelmatig water te staan. Daardoor is tijdens een aanzienlijk deel van de meting de temperatuur gemeten van het water op het asfalt, en dus niet het asfalt zelf. Hierdoor is bovenstaande grafiek niet helemaal representatief.



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

In tegenstelling tot meetpunt A was er op en rond dit meetpunt, op basis van waarnemingen, aanzienlijk minder oppervlaktewater aanwezig. Op dit punt leek de afwatering beter geregeld dan bij meetpunt A. Hierdoor is de gemeten afkoelcurve die hierboven is weergegeven naar verwachting meer representatief van de afkoelcurve van meetpunt A.

Weersgegevens

Voor deze metingen zijn geen weersgegevens beschikbaar van het weerstation, omdat achteraf bleek dat deze de gegevens tijdens de metingen niet heeft geregistreerd. Onderstaande gegevens zijn daarom puur gebaseerd op waarnemingen tijdens de metingen.

Meetpunt:	A	B
Gemiddelde omgevingstemperatuur	n.b.	n.b.
Geschatte windsnelheid	n.b.	n.b.
Regen	Ja	Ja
Bewolkingsgraad	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	n.b.	n.b.

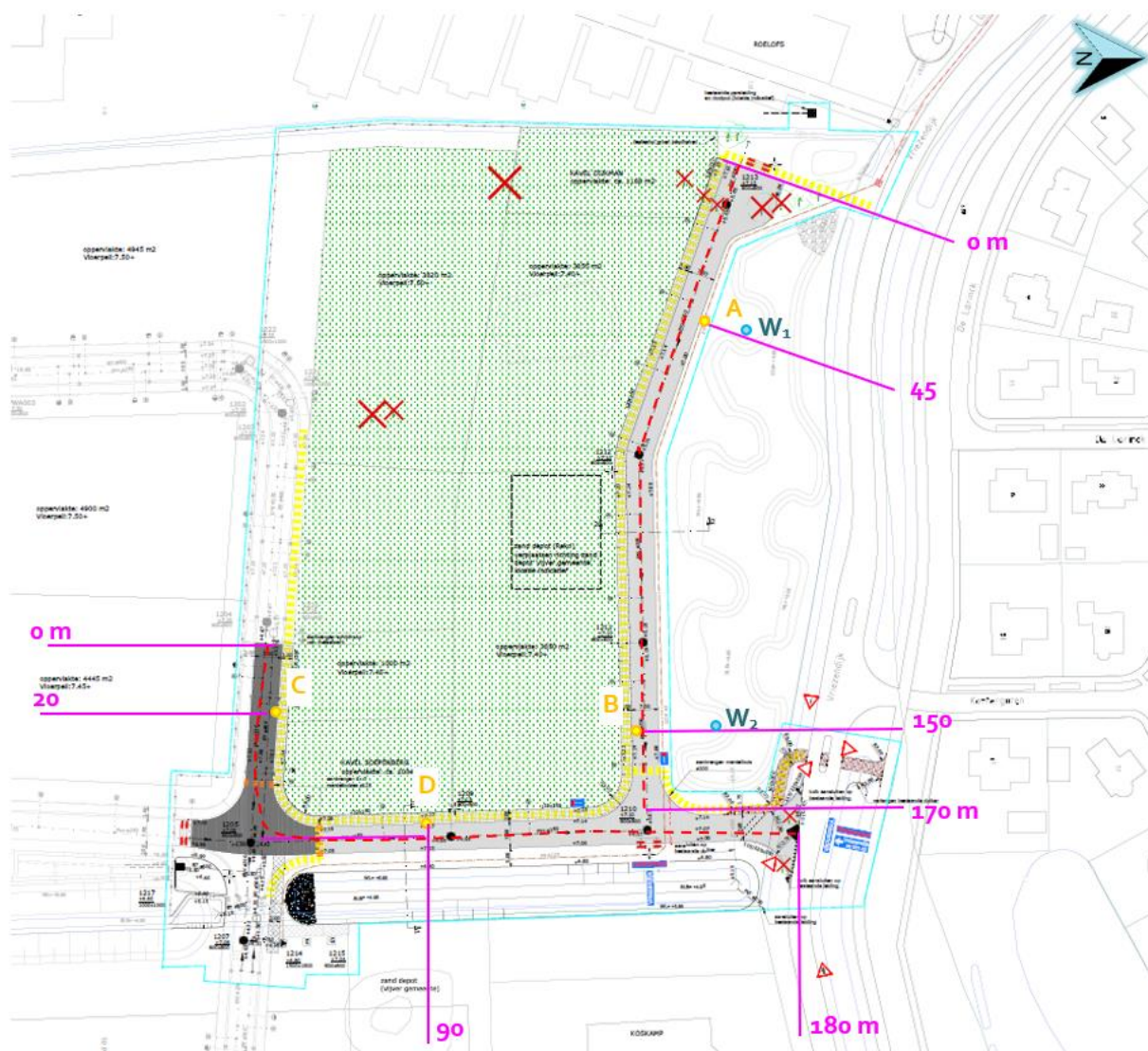
Gemeten weergegevens door KNMI (station Eelde):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	7,6 °C
Gemiddelde windsnelheid	15 km/h
Regen	0,1 mm
Bewolking	100 %
Globale zonnestraling	1 W/m ²
Relatieve vochtigheid	92 %

Meetverslag 5

Datum: 26 november 2019
 Locatie: Kroezenhoek-West, Den Ham
 (Nieuw industrieterrein aan de Vriezendijk)

Situatieschets:



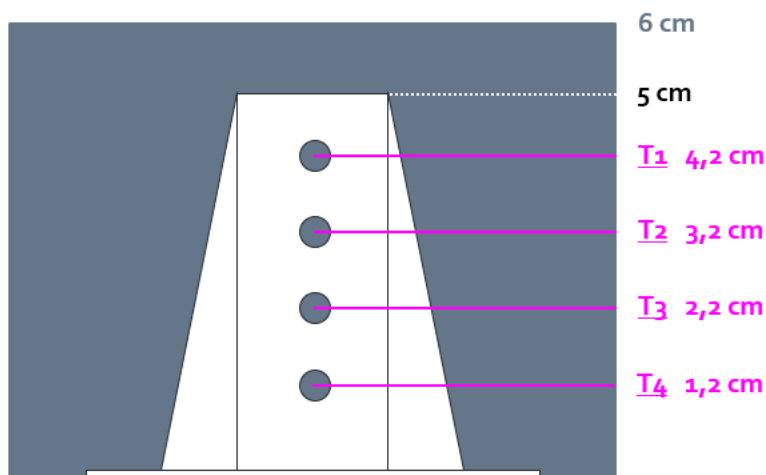
Situatiebeschrijving:

Type weg:	Erftoegangsweg industrieterrein
Geschatte lengte traject:	350 m (170 m + 180 m)
Geschatte breedte traject:	7 m
Mengsel:	AC 22 Base OL-B
Laag:	Onderlaag
Laagdikte:	6 cm
Oppervlakte asfalt:	3175 m ²
Hoeveelheid asfalt:	477 ton

Bijzonderheden:	- In de situatieschets hierboven is het totale werkgebied opgedeeld in twee trajecten. Meetpunt A en B vallen onder het eerste traject van 170 m lang, meetpunt C en D vallen onder het tweede traject van 180 m lang. - De aangegeven lengtes in de situatieschets hierboven zijn enkel schattingen op basis van de ontwerptekening en Google Maps. - Het weerstation is tijdens de metingen verplaatst van punt W_1 naar punt W_2 (zie situatieschets).
------------------------	---

Materialen:

- 1 infraroodcamera (meetpunten A, B en C)
- 1 handmatige infraroodscanner (meetpunt D)
- 3 thermokoppelhouders (5 cm) met ieder 4 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

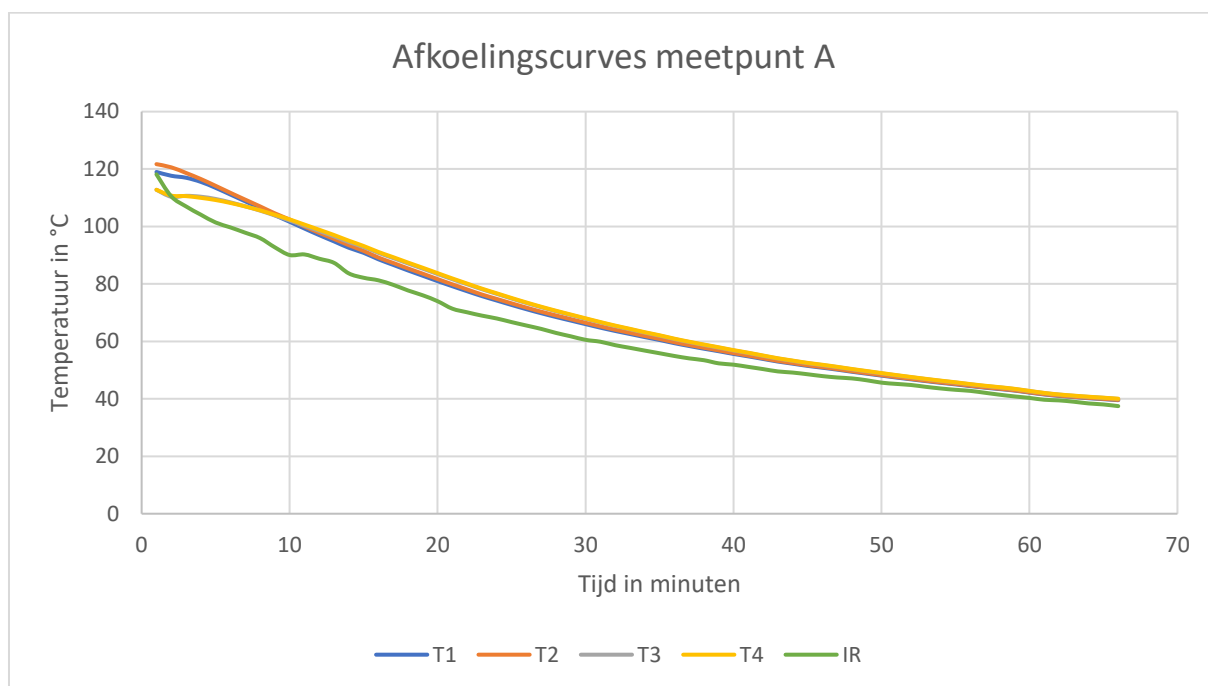
- Vlak voor de meting op meetpunt B werd ontdekt dat de stekkertjes van de thermokoppels verschillen van dikte. Sommigen stekkertjes waren daardoor te groot voor de dataloggers. Hierdoor konden niet alle thermokoppels worden gebruikt voor het meten van de kerntemperatuur.

Informatie walsen

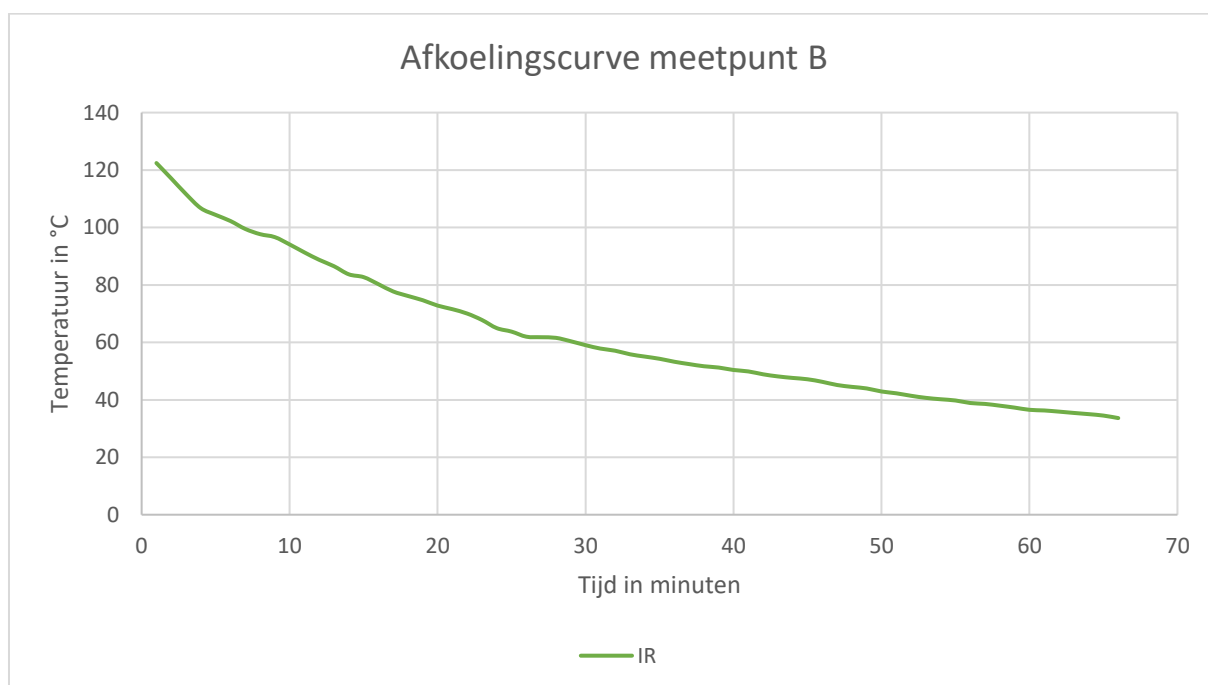
Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: Bandenwals
- Hoofdverdichting: Bandenwals en 2 grote walsen
- Afwerking: 2 grote walsen

Afkoelingscurves per meetpunt



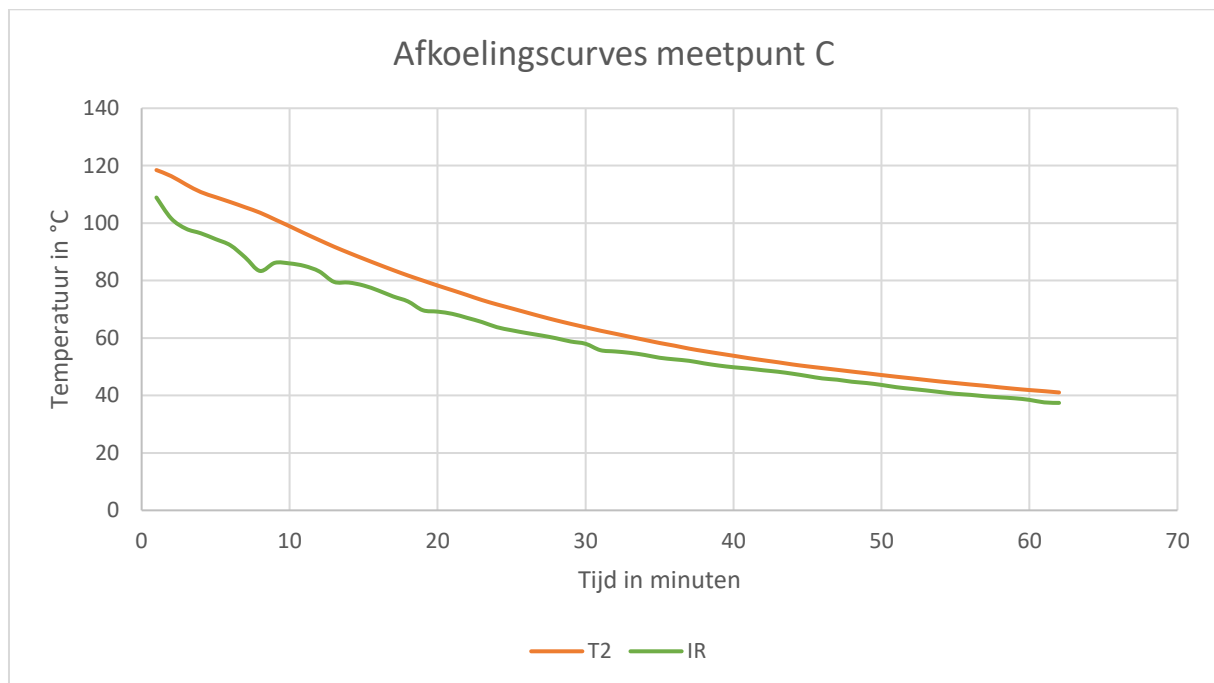
Starttemperatuur asfalt	120 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	8 °C



Starttemperatuur asfalt	120 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	8 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

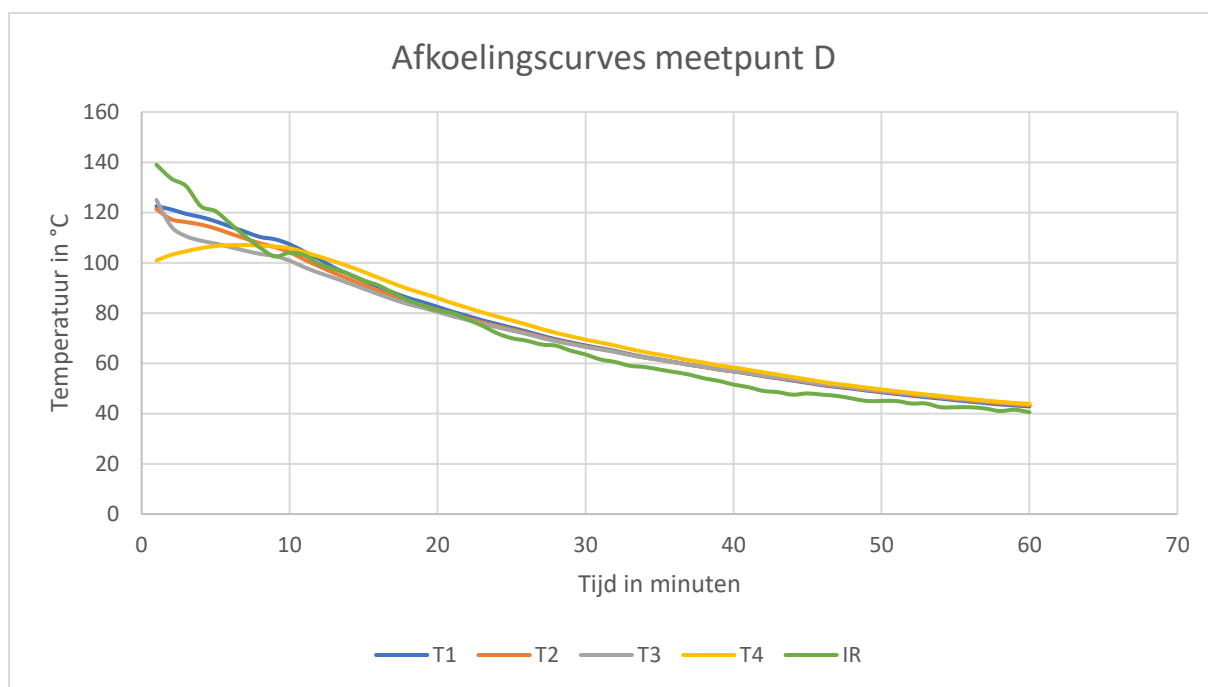
- Vlak voor de meting werd ontdekt dat de stekkertjes van de thermokoppels te dik waren voor de datalogger, waardoor op dit meetpunt de kerntemperatuur niet kon worden gemeten. Er was geen tijd meer om deze te vervangen voor andere thermokoppels op dit meetpunt, dus in dit geval is alleen de oppervlaktetemperatuur op dit punt gemeten.



Starttemperatuur asfalt	120 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	10 °C

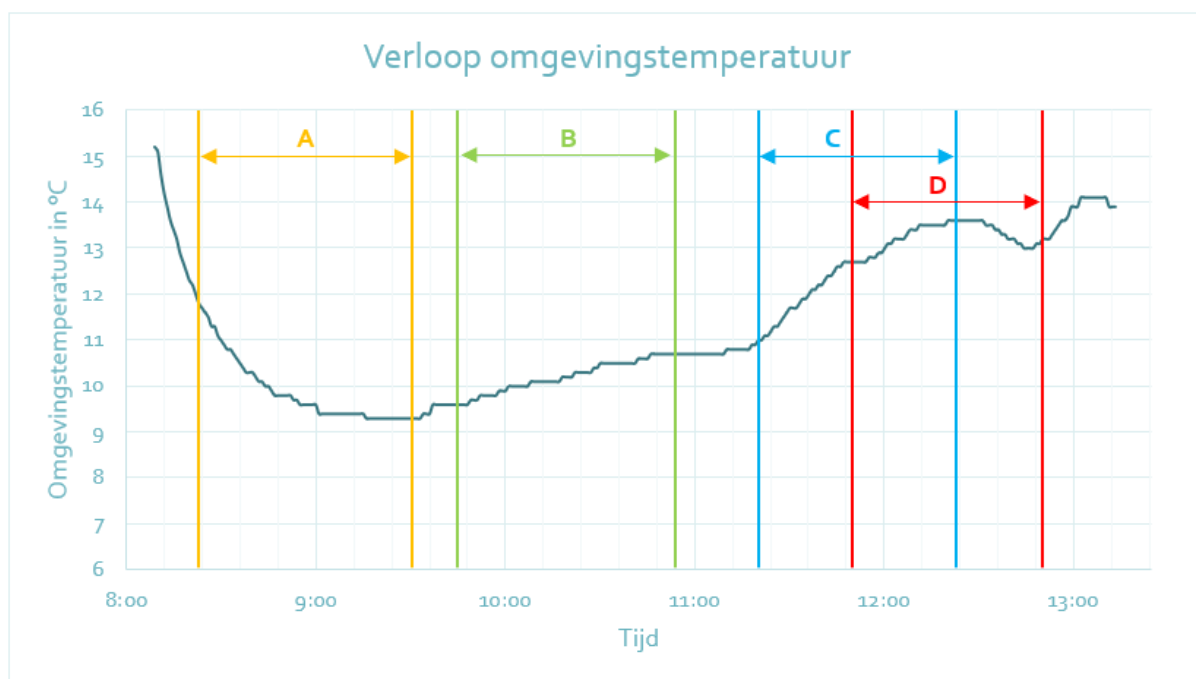
Opmerkingen en waarnemingen meetpunt C:

- De stekkertjes van de thermokoppels T₁, T₃ en T₄ waren te dik voor de datalogger, waardoor deze thermokoppels niet konden worden gebruikt voor het meten van de kerntemperatuur. Thermokoppel T₂ kon wel worden gebruikt, dus de kerntemperatuur is op dit meetpunt op één hoogte (3,2 boven de onderlaag) gemeten.



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	15 °C

Weersgegevens



Meetpunt:	A	B	C	D
Gemiddelde omgevingstemperatuur	9,9 °C	10,2 °C	12,5 °C	13,3 °C
Geschatte windsnelheid	25 km/h	25 km/h	25 km/h	25 km/h
Regen	Nee	Nee	Nee	Nee
Bewolgingsgraad	100 %	100 %	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	65 %	69 %	68 %	68 %

Gemeten weergegevens door KNMI (station Heino):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	9,5 °C
Gemiddelde windsnelheid	11 km/h
Regen	0 mm
Bewolking	100 %
Globale zonnestraling	2 W/m ²
Relatieve vochtigheid	93 %

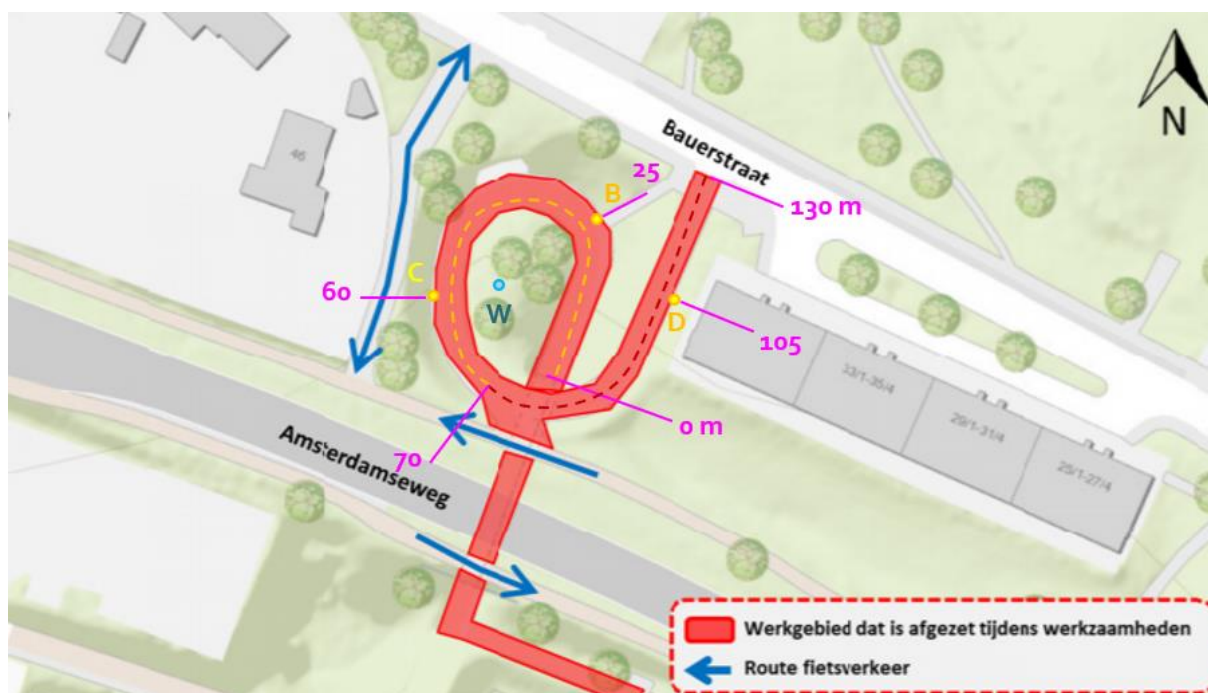
Meetverslag 6-1 (Onderlaag)

Datum: 28 november 2019

Locatie: Amsterdamseweg, Arnhem

(Fietspad tussen Amsterdamseweg en Bauerstraat)

Situatieschets:



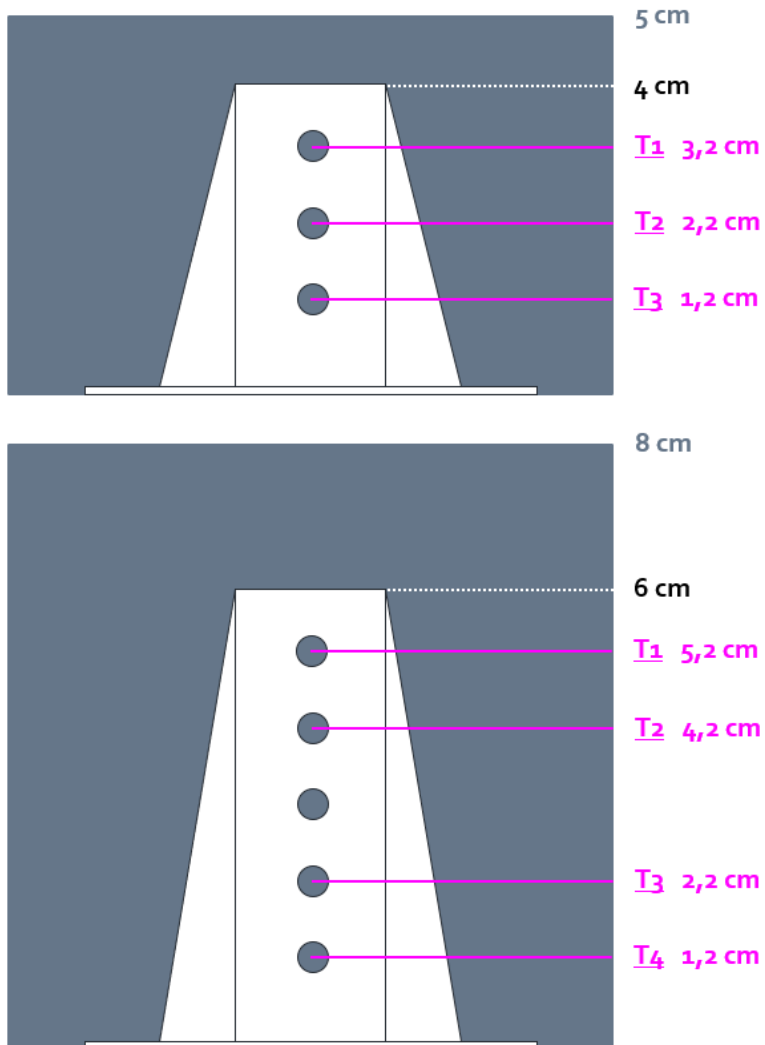
Situatiebeschrijving:

Type weg:	Fietspad
Geschatte lengte traject:	160 m
Geschatte breedte traject:	2,80 m
Mengsel:	AC 22 Base OL-C
Laag:	Onderlaag
Laagdikte:	5 cm – 8 cm
Oppervlakte asfalt:	99 m ² – 278 m ²
Hoeveelheid asfalt:	20 ton – 35 ton
Bijzonderheden:	Traject opgedeeld in twee delen; halverwege van 5 cm (oranje lijn) naar 8 cm (donkerrode lijn) asfaltlaag

Het gemeten traject bestaat uit een fietspad met een redelijk hellingspercentage, waardoor de meetpunten op verschillende hoogtes gepositioneerd zijn. Zo ligt meetpunt B bijvoorbeeld ongeveer 2 tot 3 meter lager dan meetpunt D.

Materialen:

- 1 infraroodcamera (voor meetpunten B en D)
- 2 thermokoppelhouders (4 cm) met ieder 3 thermokoppels (meetpunten B en C)
- 1 thermokoppelhouder (6 cm) met 4 thermokoppels (meetpunt D)

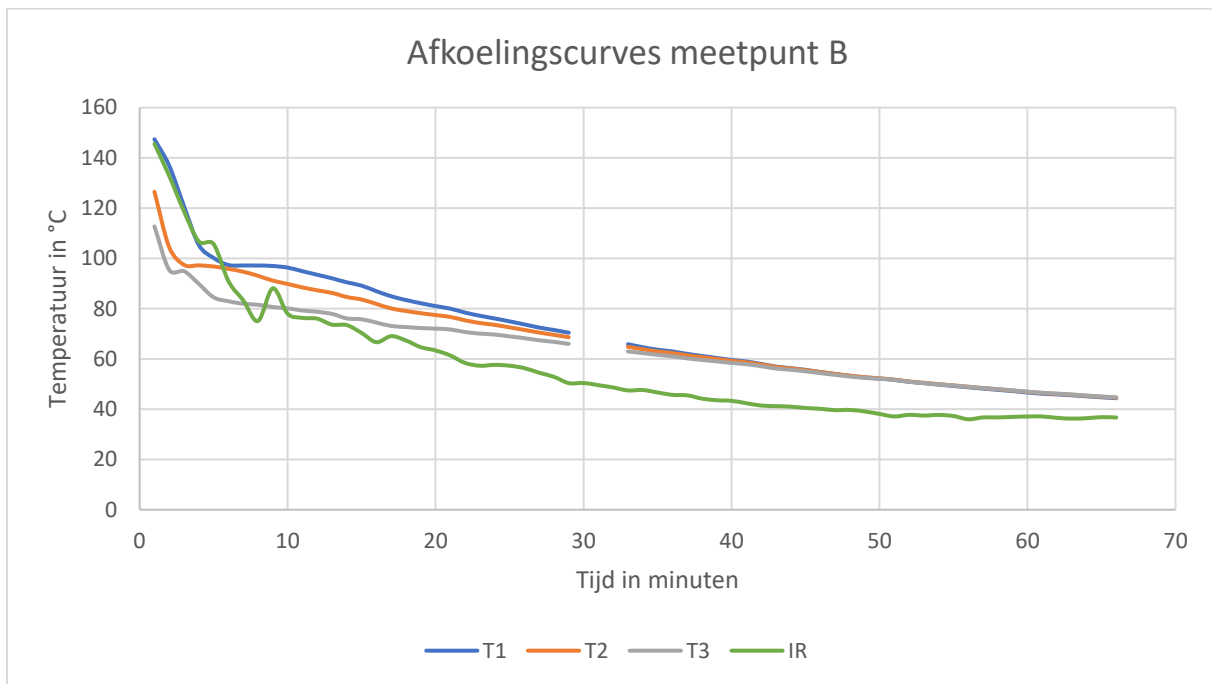


Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: 2 kleine walsen
- Hoofdverdichting: 2 kleine walsen
- Afwerking: 2 kleine walsen

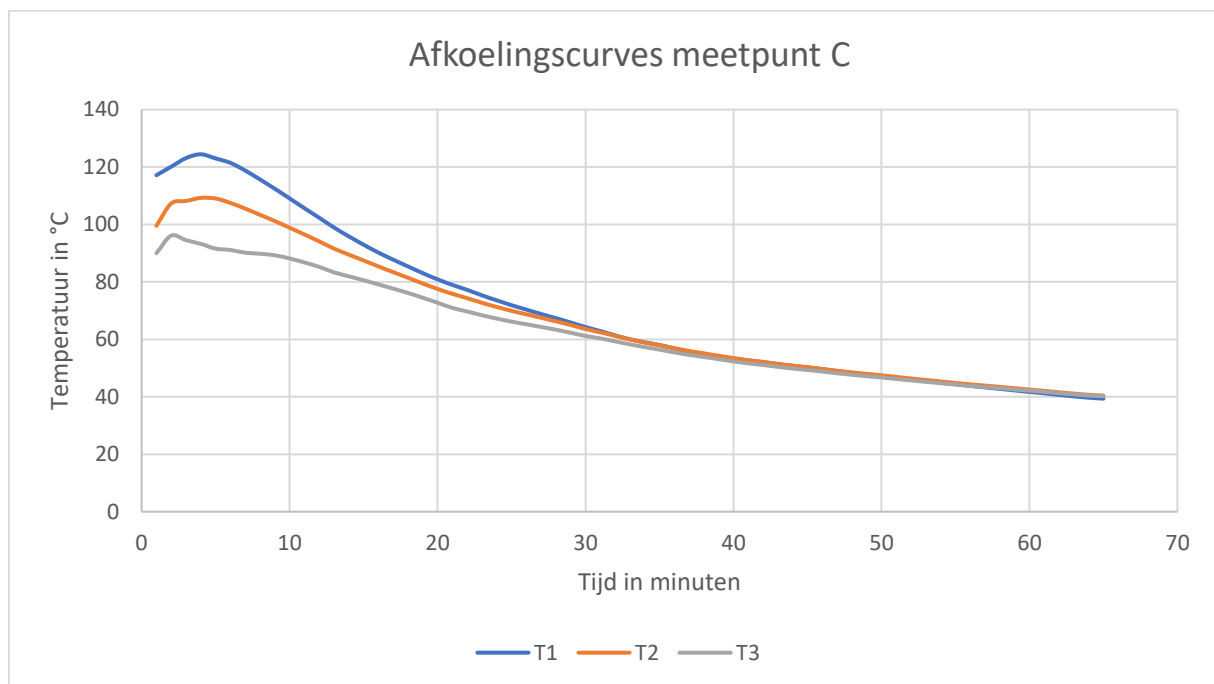
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	11 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

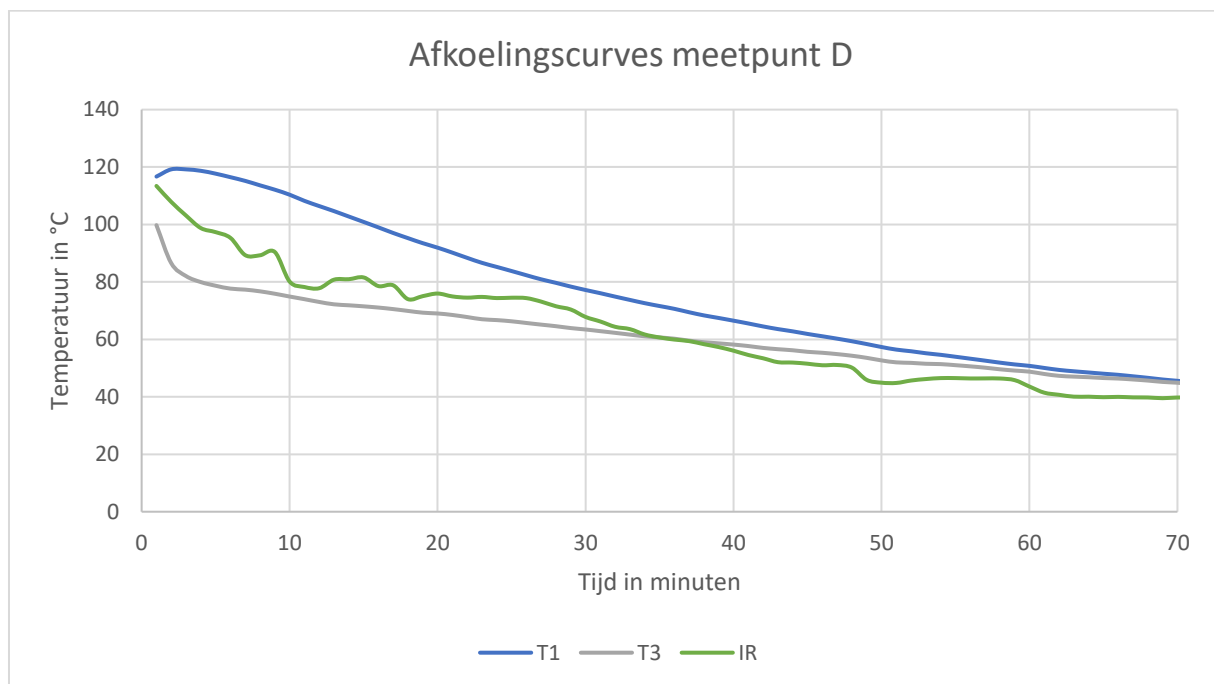
- Wat meteen opvalt aan de afkoelcurves is dat een klein deel van de data ontbreekt in de grafiek van de kerntemperatuur. Van $t=29$ tot en met $t=31$ gaven alle drie de thermokoppels een grote hoeveelheid extreme waarden aan. Door deze eruit te filteren kwam het gemiddelde van deze periode aanzienlijk lager te liggen dan de rest van de data, en dus was deze data niet representatief. Daarom is ervoor gekozen om deze data niet mee te nemen in de grafiek.



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	11 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt C:

- Opvallend aan de afkoelcurves is dat de grafieken van T1 en T2 tot en met t=4 stijgen en vanaf t=5 pas beginnen te dalen. Een stijging in temperatuur ligt echter niet in de lijn der verwachting. Een mogelijke oorzaak van deze stijging is dat de thermokoppels de eerste paar minuten nog niet direct contact hebben met het asfalt, waardoor deze thermokoppels dus lagere temperaturen meten dan de daadwerkelijke asfalttemperatuur. Na een aantal keer walsen lijken de thermokoppels wel in contact te komen met het asfalt, waardoor de gemeten data vanaf dat moment meer representatief lijkt.



Starttemperatuur asfalt	120 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	11 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt D:

- Tijdens de meting functioneerden de thermokoppels T2 en T4 niet goed, waardoor deze beide zijn komen te vervallen.
- Wat opvalt aan de afkoelcurves is dat de gemeten kerntemperaturen van T1 en T3 met name in het begin ver uit elkaar liggen. Naarmate de tijd vordert naderen de twee grafieken elkaar. De oppervlaktetemperatuur ligt in het eerste halfuur nog tussen deze twee kerntemperaturen in, maar vanaf $t=36$ valt de oppervlaktetemperatuur ook lager uit dan de kerntemperatuur gemeten door T3. Uit deze afkoelcurves kan geconcludeerd worden dat er binnen deze asfaltlaag grote verschillen in temperatuur zijn gemeten.

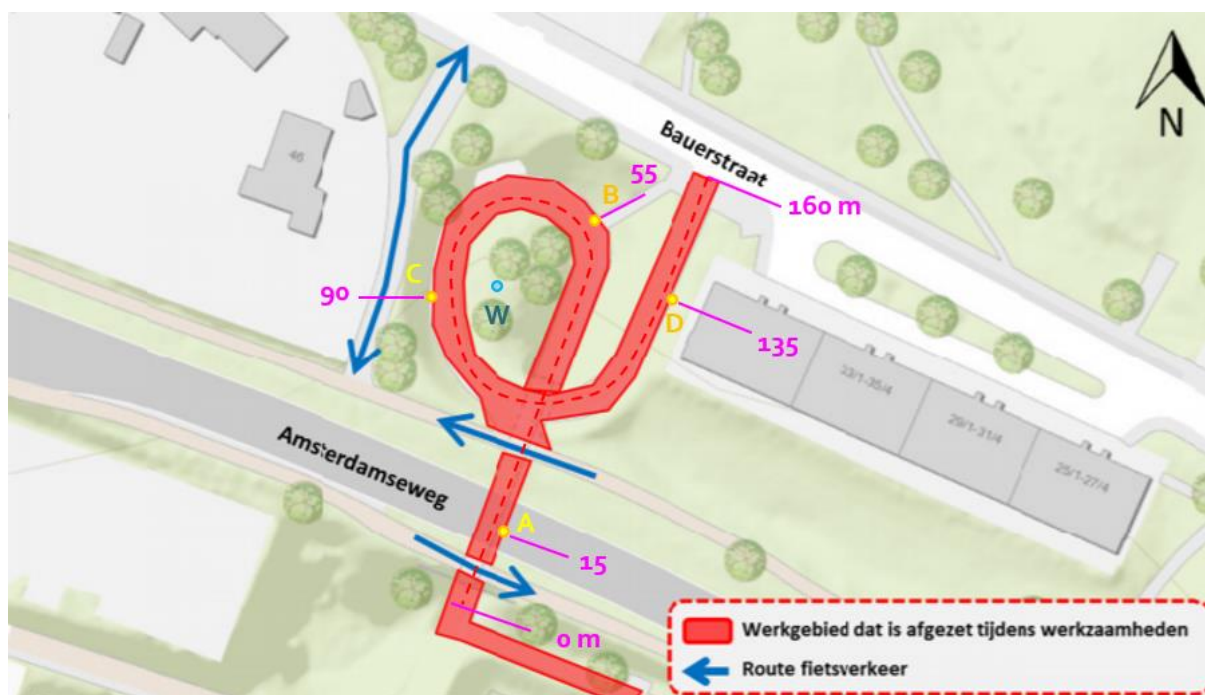
Meetverslag 6-2 (Deklaag)

Datum: 28 november 2019

Locatie: Amsterdamseweg, Arnhem

(Fietspad tussen Amsterdamseweg en Bauerstraat)

Situatieschets:



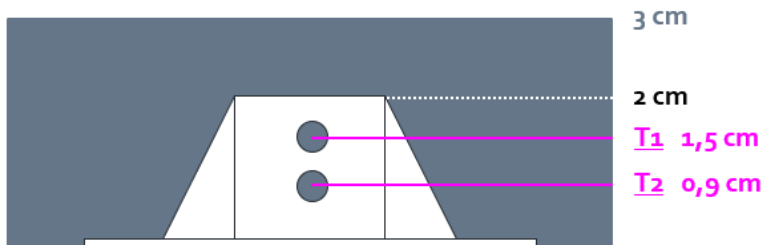
Situatiebeschrijving:

Type weg:	Fietspad
Geschatte lengte traject:	160 m
Geschatte breedte traject:	2,80 m
Mengsel:	AC 8 Surf DL-B
Laag:	Deklaag
Laagdikte:	3 cm
Oppervlakte asfalt:	468 m ²
Hoeveelheid asfalt:	35 ton
Bijzonderheden:	Traject deels in tunnel, meetpunt A gepositioneerd in deze tunnel

Het gemeten traject bestaat uit een fietspad met een redelijk hellingspercentage, waardoor de meetpunten op verschillende hoogtes gepositioneerd zijn. Zo ligt meetpunt B bijvoorbeeld ongeveer 2 tot 3 meter lager dan meetpunt D. Ook bestaat een deel van het traject uit een tunnel. Zoals in bovenstaande tabel te lezen is, is meetpunt A gepositioneerd in deze tunnel.

Materialen:

- 1 infraroodcamera (voor meetpunten B en D)
- 1 handmatige infraroodscanner (voor meetpunt A)
- 4 thermokoppelhouders (2 cm) met ieder 2 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

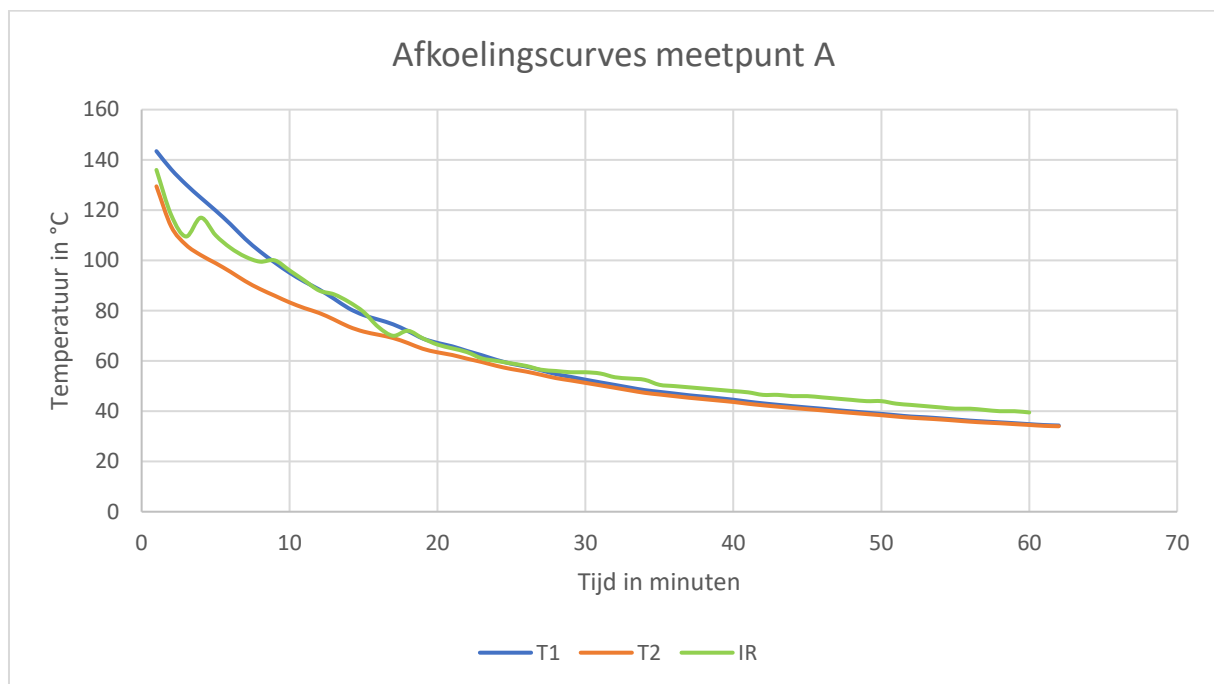
- Tijdens een van de metingen is de thermokoppelhouder stuk gegaan. Dit is verder uitgebreid beschreven bij de resultaten van meetpunt C.

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: 2 kleine walsen
- Hoofdverdichting: 2 kleine walsen
- Afwerking: 2 kleine walsen

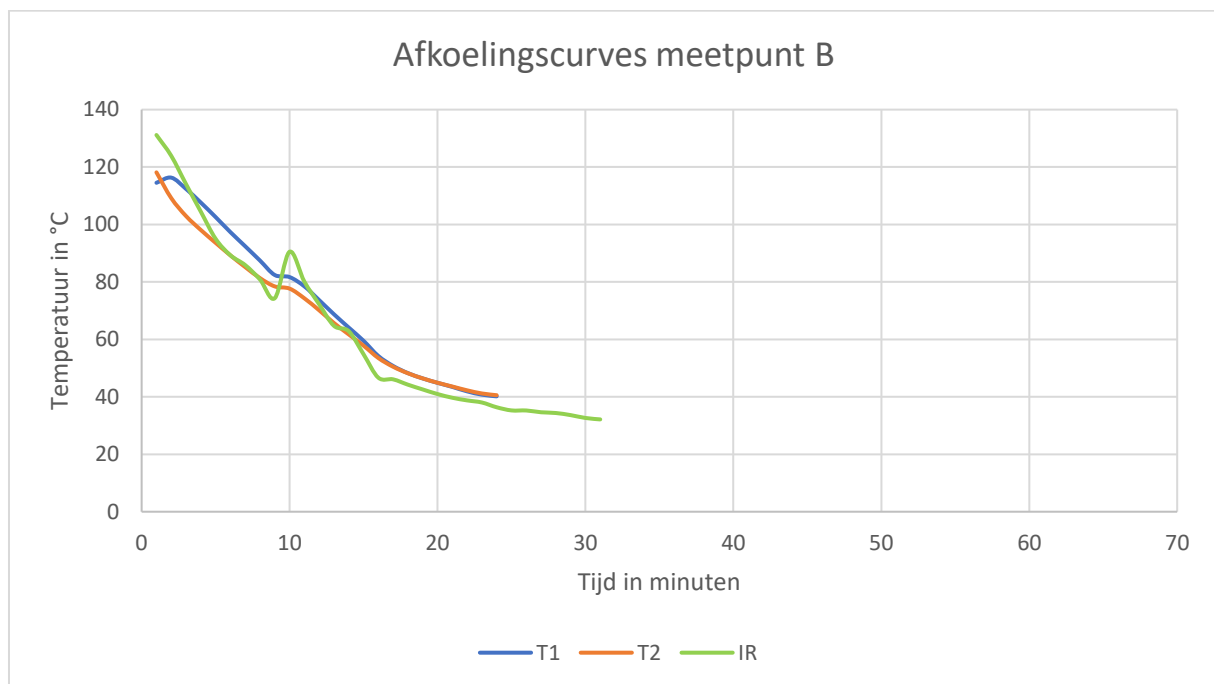
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	140 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	10 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A:

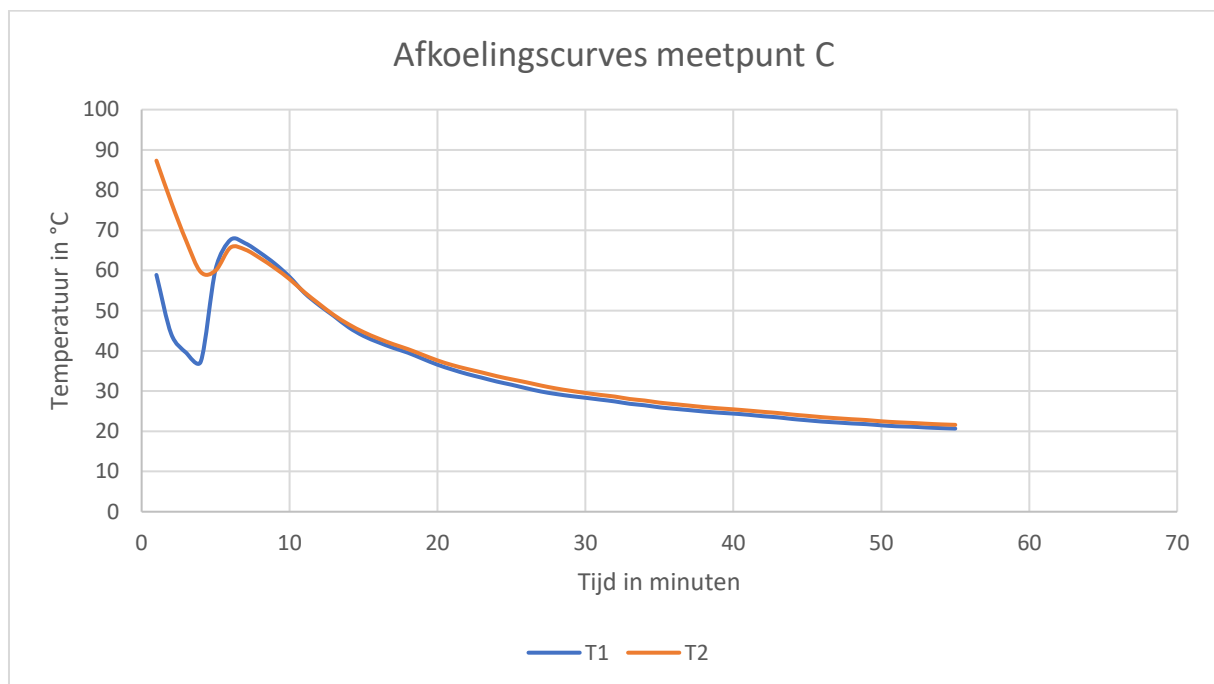
- Gepositioneerd in tunnel, waardoor de omstandigheden ten opzichte van de andere meetpunten anders waren. Zo was er bijvoorbeeld geen regen bij dit meetpunt en was er een onbekend temperatuurverschil. De omstandigheden bij dit meetpunt zijn echter niet gemeten met het weerstation, dus de exacte weersomstandigheden binnen deze tunnel zijn onbekend.
-



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	16 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

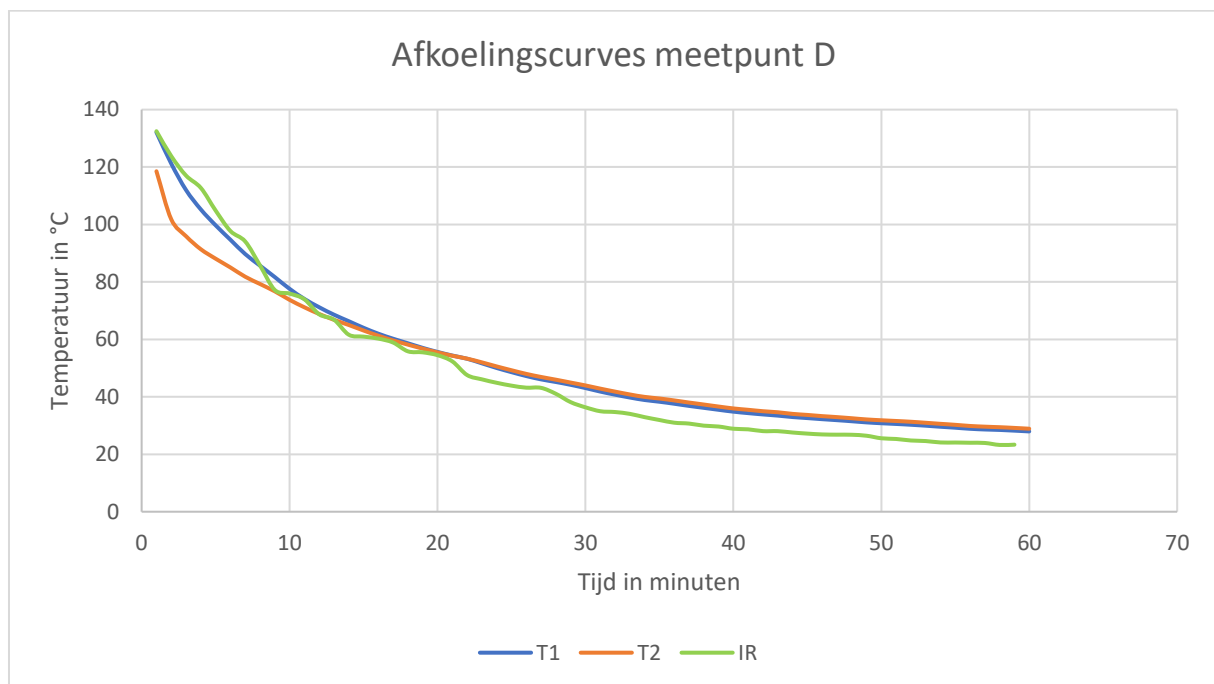
- De meting van de kerntemperatuur is na $t=24$ gestopt. Pas zes minuten later werd waargenomen dat de thermokoppels waren losgehaald van de datalogger (reden onbekend). Omdat op dat moment niet bekend was hoelang de data niet meer werd gemeten, werd besloten de meting op dit punt na $t=31$ te staken.



Starttemperatuur asfalt	≈ 90 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	16 °C

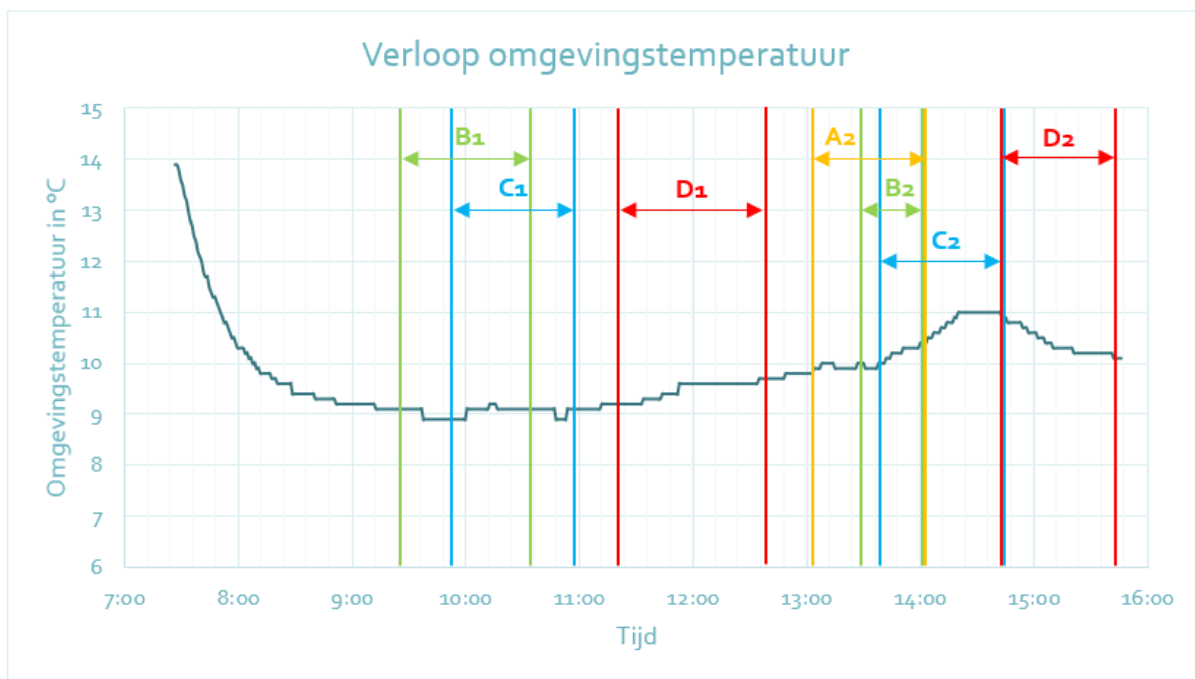
Opmerkingen en waarnemingen meetpunt C:

- Tijdens deze meting was de asfaltlaag die werd aangebracht door de asfaltmachine te dun. Doordat de asfaltmachine te laag over dit meetpunt kwam, brak de thermokoppelhouder. Daardoor verplaatste de thermokoppels tijdens het meten. Het verplaatsen was echter niet het grootste probleem. Doordat de aangebrachte laag te dun was, werden de thermokoppels (met name T1) nog deels blootgesteld aan de buitenlucht, waardoor de gemeten temperaturen veel lager uitvielen dan de daadwerkelijke asfalttemperatuur op dat moment. Vanaf $t=6$ werd de resterende hoeveelheid asfalt aangebracht op de hoeveelheid asfalt die er al zes minuten lag, waardoor de thermokoppels alsnog werden 'afgedekt'. Echter werd in dit geval een asfaltlaag gemeten die in twee lagen is aangebracht, waardoor de gemeten temperaturen heel anders uitvallen dan de daadwerkelijke asfalttemperatuur in andere gevallen. Het temperatuurverloop op dit meetpunt is daardoor niet geheel representatief te noemen.



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	19 °C

Weersgegevens (voor metingen 6-1 en 6-2)



Meetpunt:	B1	C1	D1
Gemiddelde omgevingstemperatuur	9 °C	9,1 °C	9,5 °C
Geschatte windsnelheid	n.b.	n.b.	n.b.
Regen	Ja	Ja	Ja
Bewolkingsgraad	100 %	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	80 %	80 %	81 %

Meetpunt:	A2	B2	C2	D2
Gemiddelde omgevingstemperatuur	10,1 °C	10,1 °C	10,7 °C	10,4 °C
Geschatte windsnelheid	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Regen	Nee	Ja	Ja	Ja
Bewolkingsgraad	100 %	100 %	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	82 %	82 %	82 %	82 %

Gemeten weergegevens door KNMI (station Deelen):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	9,3 °C
Gemiddelde windsnelheid	23 km/h
Regen	0,5 mm
Bewolking	100 %
Globale zonnestraling	1 W/m ²
Relatieve vochtigheid	96 %

Meetverslag 7-1 (Onderlaag)

Datum: 6 december 2019
Locatie: IPC Groene Ruimte, Arnhem
(Toegangsweg naar terrein IPC Groene Ruimte)

Situatieschets:



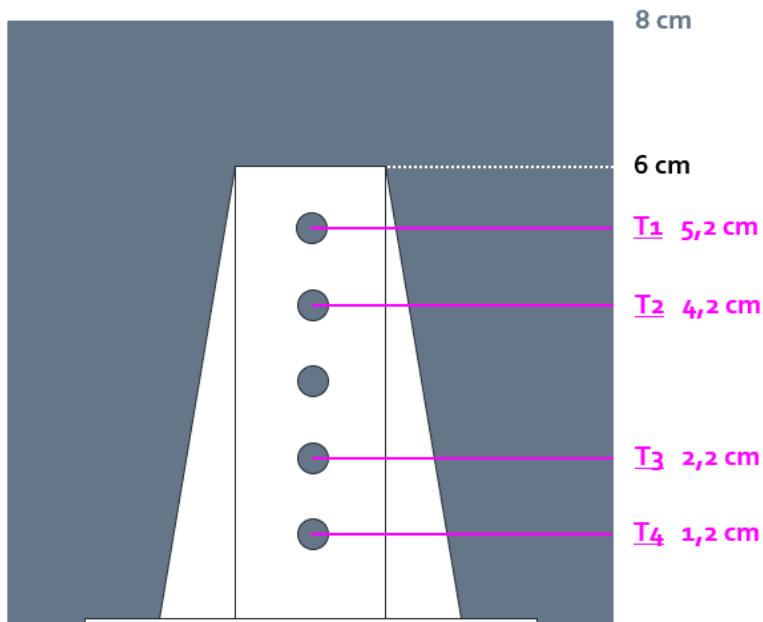
Situatiebeschrijving:

Type weg:	Erftoegangsweg
Geschatte lengte traject:	100 m
Geschatte breedte traject:	4,5 m
Mengsel:	AC 22 Base OL-C
Laag:	Onderlaag
Laagdikte:	8 cm
Oppervlakte asfalt:	577 m ²
Hoeveelheid asfalt:	115 ton
Bijzonderheden:	Geen

De metingen vonden plaats op een traject dat in een bos is gesitueerd. Dat betekent dat langs de weg veel (grote) bomen staan en dus boven het traject veel boomtakken hangen. Tijdens de metingen regende het vrijwel continu, variërend tussen lichte regen en flinke regenbuien. Er stond die dag niet veel wind, maar door windvlagen vielen er op onregelmatige momenten flinke hoeveelheden regenwater van de boomtakken die boven het traject hingen op het asfalt. Dit is terug te zien in de afkoelcurves die verderop in dit meetverslag zijn weergegeven.

Materialen:

- 1 infraroodcamera (meetpunt A)
- 1 handmatige infraroodscanner (meetpunt B)
- 2 thermokoppelhouders (6 cm) met ieder 4 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

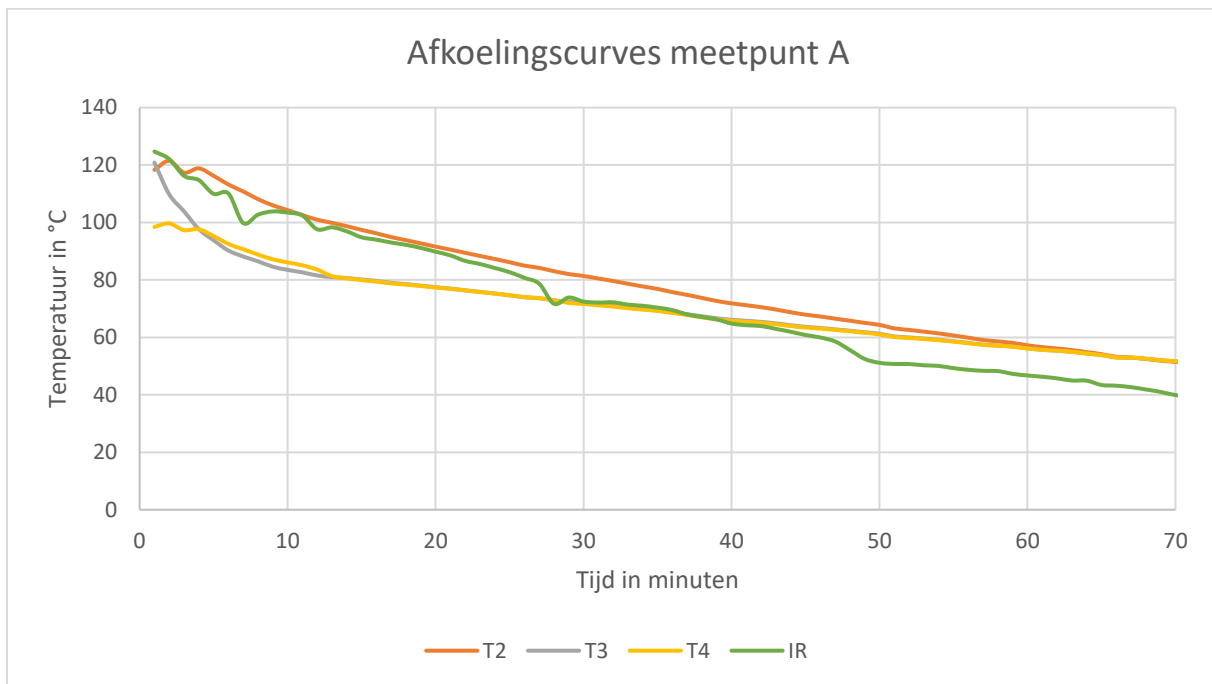
- Zowel bij meetpunt A als bij meetpunt B is niet op alle hierboven aangegeven hoogtes de kerntemperatuur gemeten. Dit heeft te maken met de kwetsbaarheid van de gebruikte thermokoppels. Sommige thermokoppels functioneerden tijdens de meting niet of niet goed en gaven daardoor niet-representatieve data. In de onderstaande grafieken zijn de niet (goed) werkende thermokoppels niet weergegeven.

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: 1 kleine wals, 1 grote wals
- Hoofdverdichting: 1 kleine wals, 2 grote walsen
- Afwerking: 2 grote walsen

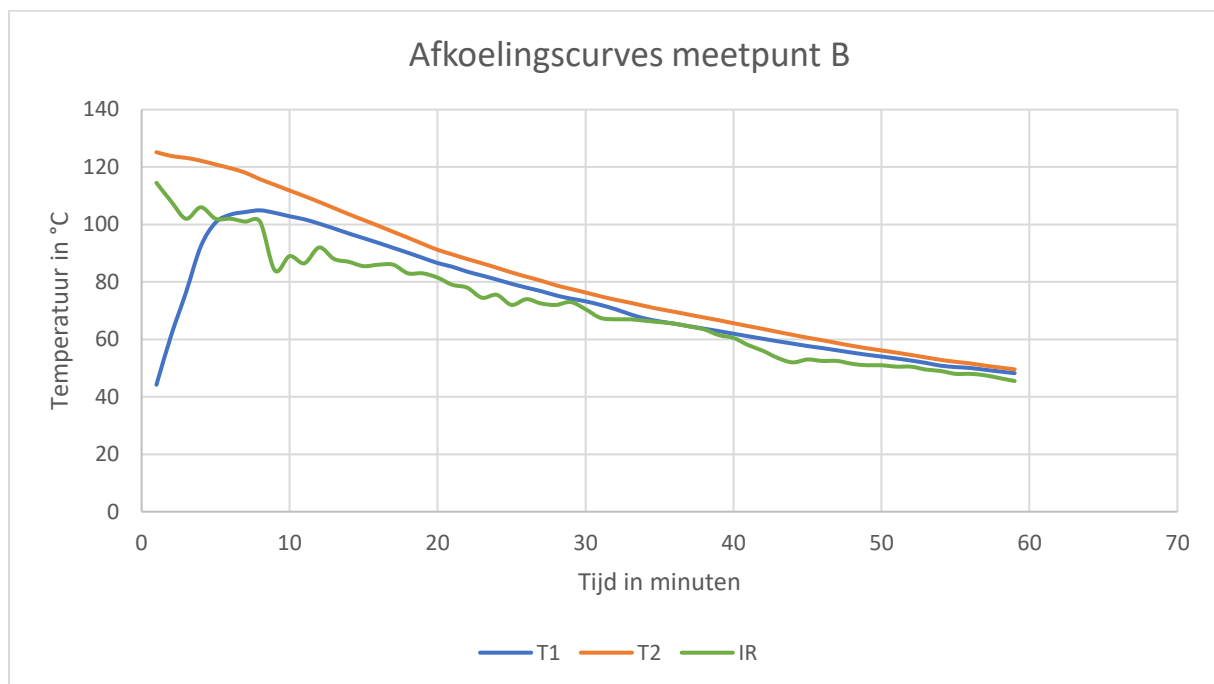
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	5 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A:

- Tijdens de meting functioneerde thermokoppel T1 niet, waardoor deze afkoelcurve is komen te vervallen.
- Tijdens de meting werd waargenomen dat de oppervlaktetemperatuur sterk afkoelde wanneer er een grote hoeveelheid regenwater op het asfalt terecht kwam. Dit is terug te zien in de IR-afkoelcurve op de punten waar de helling in korte tijd flink toeneemt (zoals bij o.a. $t=27$ en $t=48$).



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	5 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

- Tijdens de meting functioneerden de thermokoppels T₃ en T₄ niet (goed), waardoor deze afkoelcurves zijn komen te vervallen
- Net als bij meetpunt A is aan de IR-afkoelcurve goed te zien wanneer er tijdens de meting een grote hoeveelheid regenwater op het asfalt terecht kwam, door de flink toenemende hellingen bij onder meer t=8, t=30 en t=42.
- Aan de afkoelcurve van T₁ valt op dat deze de eerste 8 minuten stijgt i.p.v. daalt, wat eerder in de lijn der verwachtingen ligt. Een mogelijke oorzaak is dat deze thermokoppel in het begin van de meting nog niet in contact was met het asfalt, en dit pas na een aantal keer walsen wel het geval was. Pas vanaf t=8 geeft de afkoelcurve van T₁ representatieve informatie.

Meetverslag 7-2 (Tussenlaag)

Datum: 6 december 2019
Locatie: IPC Groene Ruimte, Arnhem
(Toegangsweg naar terrein IPC Groene Ruimte)

Situatieschets:



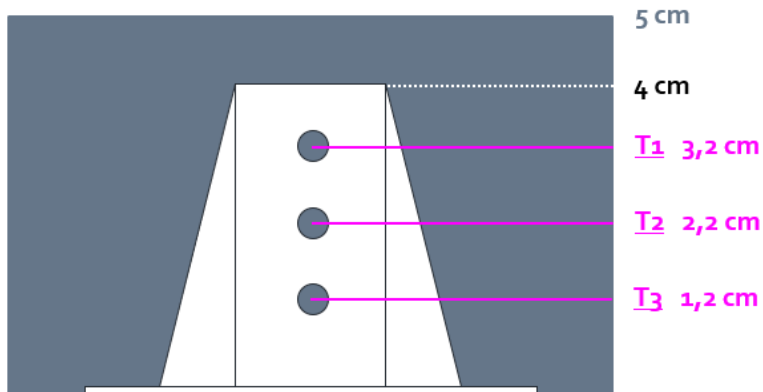
Situatiebeschrijving:

Type weg:	Erftoegangsweg
Geschatte lengte traject:	100 m
Geschatte breedte traject:	4,5 m
Mengsel:	AC 16 Bind TL-B
Laag:	Tussenlaag
Laagdikte:	5 cm
Oppervlakte asfalt:	595 m ²
Hoeveelheid asfalt:	74 ton
Bijzonderheden:	Geen

De metingen vonden plaats op een traject dat in een bos is gesitueerd. Dat betekent dat langs de weg veel (grote) bomen staan en dus boven het traject veel boomtakken hangen. Tijdens de metingen regende het vrijwel continu, variërend tussen lichte regen en flinke regenbuien. Er stond die dag niet veel wind, maar door windvlagen vielen er op onregelmatige momenten flinke hoeveelheden regenwater van de boomtakken die boven het traject hingen op het asfalt. Dit is terug te zien in de afkoelcurves die verderop in dit meetverslag zijn weergegeven.

Materialen:

- 1 infraroodcamera (meetpunt A)
- 1 handmatige infraroodscanner (meetpunt B)
- 2 thermokoppelhouders (4 cm) met ieder 3 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

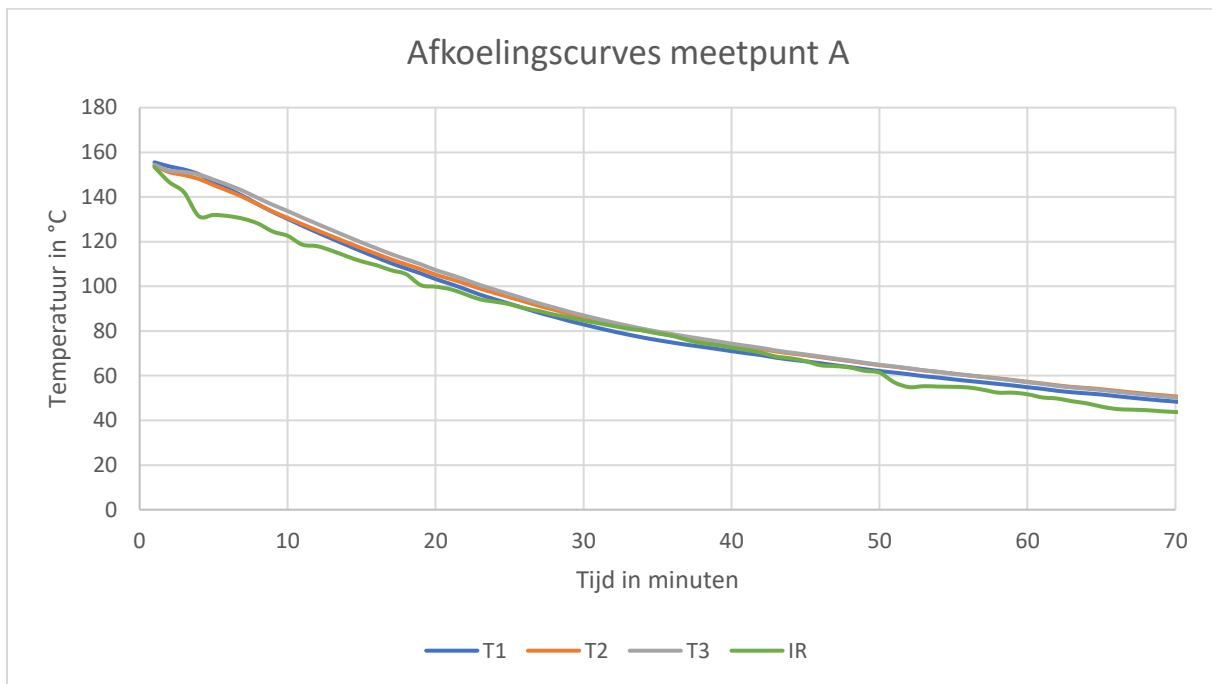
- Tijdens de meting op meetpunt B is op twee van de drie hoogtes de kerntemperatuur niet gemeten. Dit komt door de kwetsbaarheid van de gebruikte thermokoppels. Deze thermokoppels functioneerden tijdens de meting niet of niet goed en gaven daardoor niet-representatieve data. In de onderstaande grafieken zijn de niet (goed) werkende thermokoppels niet weergegeven.

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- | | |
|--|-------------------------------|
| - Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: | 1 kleine wals, 1 grote wals |
| - Hoofdverdichting: | 1 kleine wals, 2 grote walsen |
| - Afwerking: | 2 grote walsen |

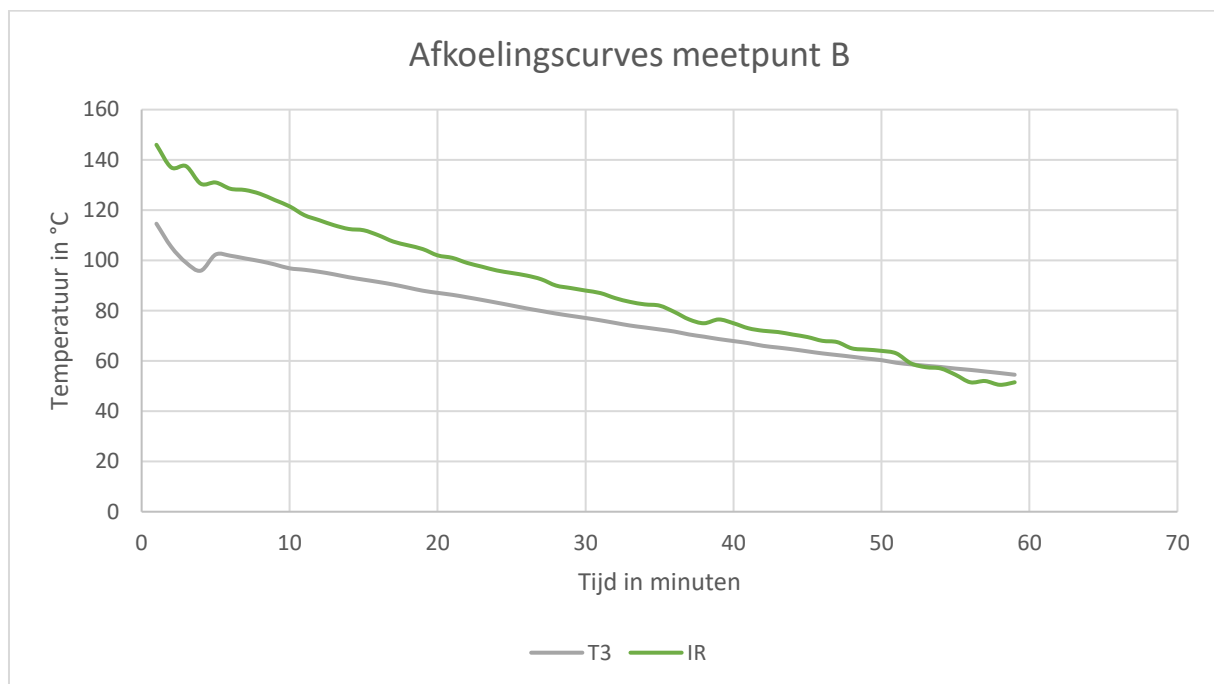
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	160 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	6 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A:

- Tijdens de meting werd waargenomen dat de oppervlaktetemperatuur sterk afkoelde wanneer er een grote hoeveelheid regenwater op het asfalt terecht kwam. Dit is terug te zien in de IR-afkoelcurve op de punten waar de helling in korte tijd flink toeneemt (zoals bij o.a. $t=4$, $t=18$ en $t=51$).
- Aan de afkoelcurves valt op dat de kerntemperaturen tijdens het koelen de gehele meettijd erg dicht bij elkaar lagen. De oppervlaktetemperatuur van het asfalt was vrijwel de gehele meettijd lager dan de kerntemperatuur. Alleen tussen $t=25$ en $t=45$ lijkt de oppervlaktetemperatuur hoger dan of gelijk aan de kerntemperatuur van het asfalt te liggen. Het verschil tussen de kern- en oppervlaktetemperatuur was het grootst in het eerste kwartier van de afkoeling.



Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	6 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

- Tijdens de meting functioneerden de thermokoppels T1 en T2 niet, waardoor deze beide zijn komen te vervallen.
- Aan de afkoelcurves valt op dat de oppervlaktetemperatuur, in tegenstelling tot de afkoelcurves op meetpunt A, vrijwel de gehele meettijd aanzienlijk hoger uitvalt dan de kerntemperatuur. Pas vanaf $t=53$ is de oppervlaktetemperatuur lager dan de kerntemperatuur. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat alleen de laagste kerntemperatuur van het asfalt is gemeten, en deze dus het dichtst bij de 'relatief koude' onderlaag ligt. De hoger gepositioneerde thermokoppels T1 en T2 zouden naar verwachting hogere temperaturen dan T3 hebben gemeten.

Meetverslag 7-3 (Deklaag)

Datum: 6 december 2019
Locatie: IPC Groene Ruimte, Arnhem
(Toegangsweg naar terrein IPC Groene Ruimte)

Situatieschets:



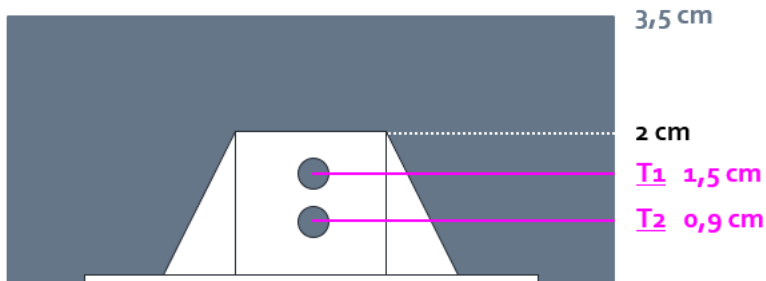
Situatiebeschrijving:

Type weg:	Erftoegangsweg
Geschatte lengte traject:	100 m
Geschatte breedte traject:	4,5 m
Mengsel:	SMA-NL 11 B
Laag:	Deklaag
Laagdikte:	3,5 cm
Oppervlakte asfalt:	610 m ²
Hoeveelheid asfalt:	53 ton
Bijzonderheden:	Geen

De metingen vonden plaats op een traject dat in een bos is gesitueerd. Dat betekent dat langs de weg veel (grote) bomen staan en dus boven het traject veel boomtakken hangen. Tijdens de metingen regende het vrijwel continu, variërend tussen lichte regen en flinke regenbuien. Er stond die dag niet veel wind, maar door windvlagen vielen er op onregelmatige momenten flinke hoeveelheden regenwater van de boomtakken die boven het traject hingen op het asfalt. Dit is terug te zien in de afkoelcurves die verderop in dit meetverslag zijn weergegeven.

Materialen:

- 1 infraroodcamera (meetpunt A)
- 1 handmatige infraroodscanner (meetpunt B)
- 2 thermokoppelhouders (2 cm) met ieder 2 thermokoppels

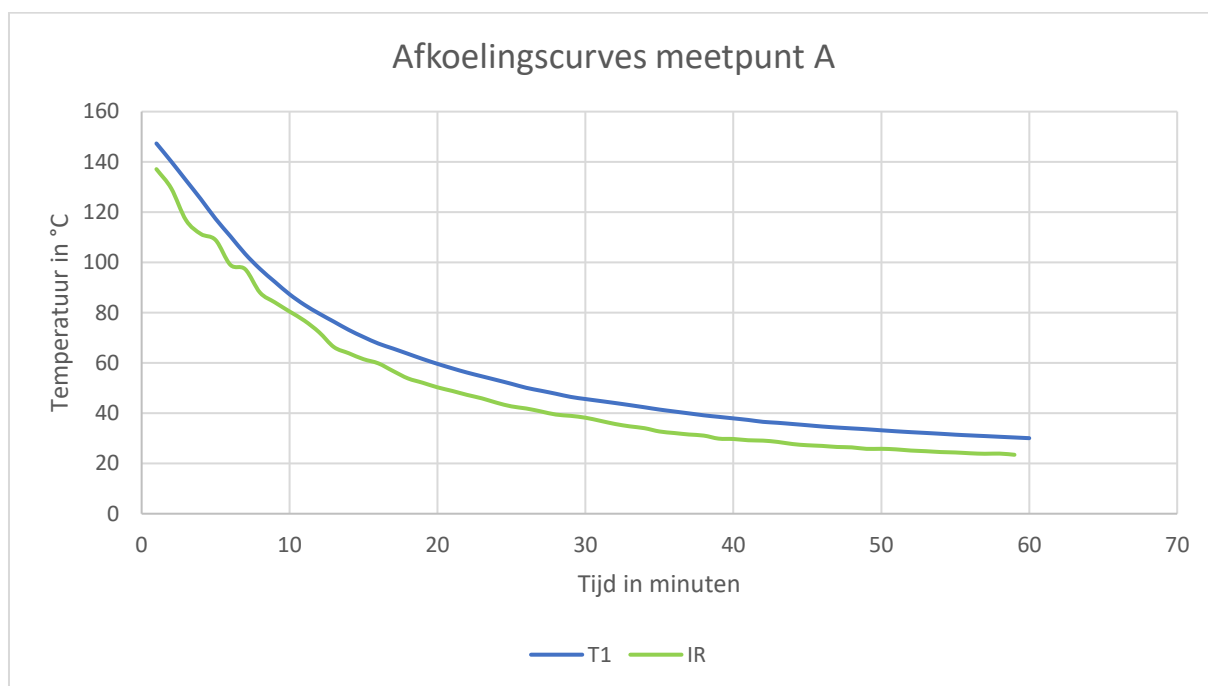


Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- | | |
|--|-------------------------------|
| - Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: | 1 kleine wals, 1 grote wals |
| - Hoofdverdichting: | 1 kleine wals, 2 grote walsen |
| - Afwerking: | 2 grote walsen |

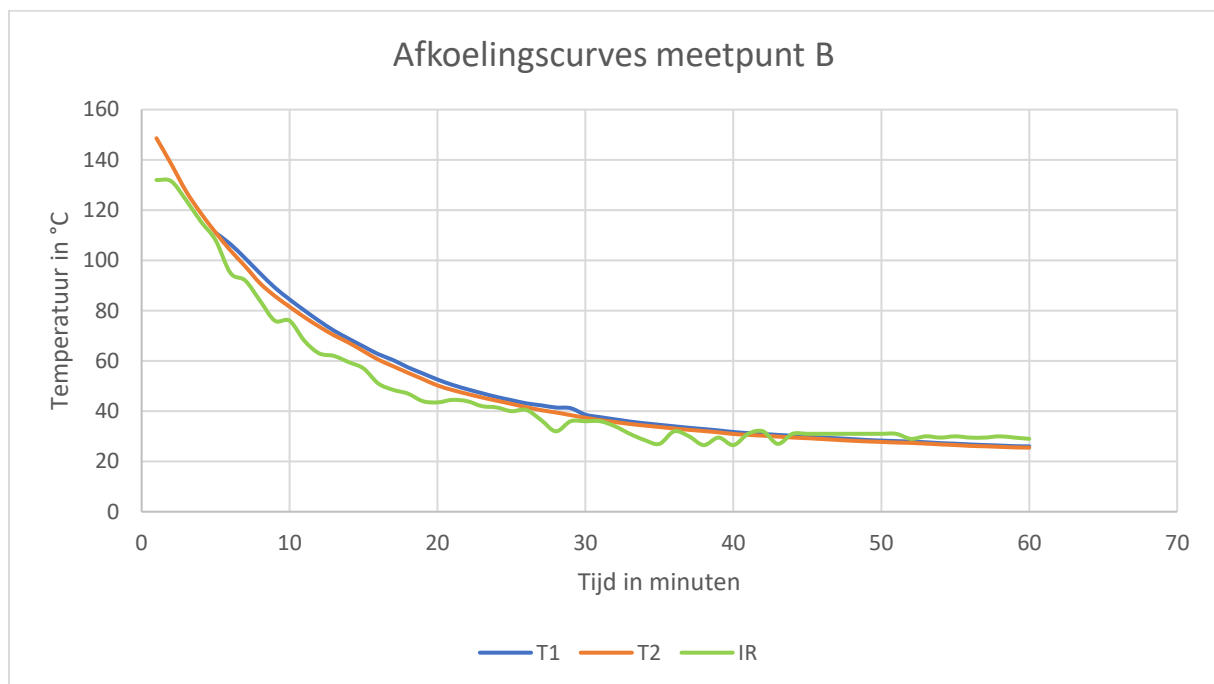
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A:

- Tijdens de meting functioneerde thermokoppel T2 niet, waardoor deze afkoelcurve is komen te vervallen.
-

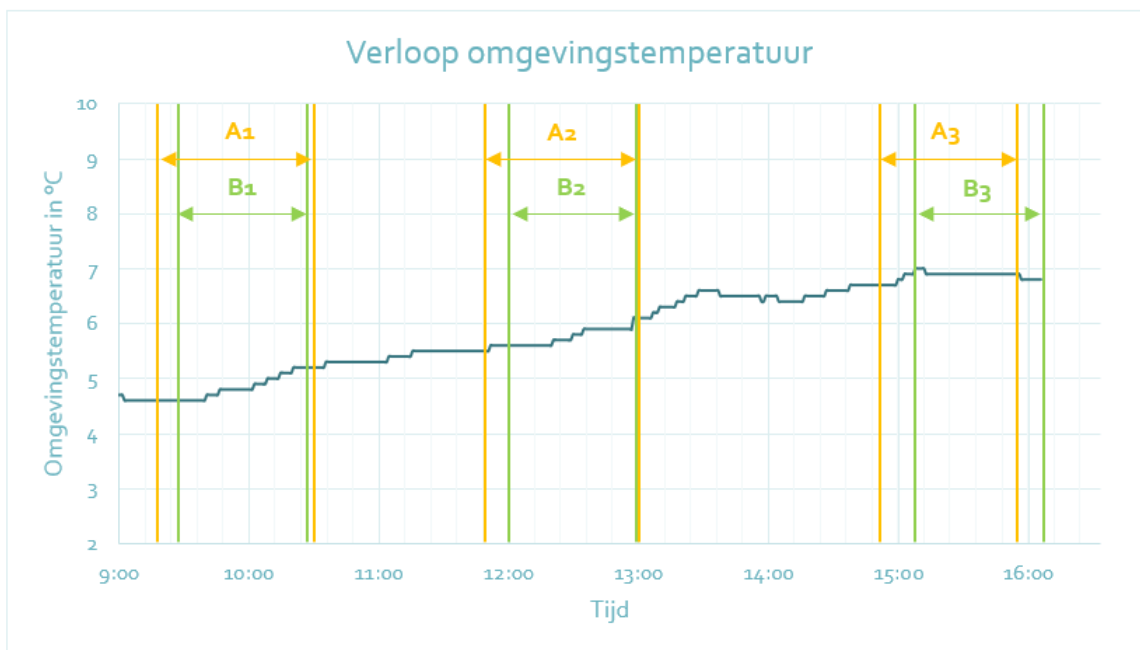


Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B:

- Tijdens de eerste vijf minuten van de meting functioneerde thermokoppel T1 niet goed. Daarna gaf deze thermokoppel wel grotendeels representatieve waarden, dus in dit geval begint de afkoelcurve van T1 bij t=6. De extreme waarden die tussen de representatieve waarden werden gemeten zijn eruit gefilterd.
- Tijdens de metingen werd waargenomen dat op verschillende momenten grote hoeveelheden regenwater op het asfalt terecht kwam. Dit is in de grafiek te zien aan de schommelingen die de IR-curve weergeeft, met name tussen t=25 en t=45. Deze schommelingen vallen in dit geval extra op, doordat met het gebruik van de handmatige infraroodscanner per minuut één waarde wordt meegenomen, in plaats van een gemiddelde waarde over 60 waarden binnen een minuut, die wordt gemeten door de infraroodcamera. Deze gemiddelde waarden zorgen dat deze schommelingen worden gerelativeerd en zo ontstaat bij het gebruik van de infraroodcamera een wat constanter verlopende lijn.

Weersgegevens (voor metingen 7-1, 7-2 en 7-3)



Meetpunt:	A1	B1
Gemiddelde omgevingstemperatuur	4,8 °C	4,8 °C
Geschatte windsnelheid	n.b.	n.b.
Regen	Ja	Ja
Bewolkingsgraad	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	85 %	85 %

Meetpunt:	A2	B2
Gemiddelde omgevingstemperatuur	5,7 °C	5,7 °C
Geschatte windsnelheid	n.b.	n.b.
Regen	Ja	Ja
Bewolkingsgraad	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	88 %	88 %

Meetpunt:	A3	B3
Gemiddelde omgevingstemperatuur	6,9 °C	6,9 °C
Geschatte windsnelheid	n.b.	n.b.
Regen	Ja	Ja
Bewolkingsgraad	100 %	100 %
Luchtvochtigheid	90 %	90 %

Gemeten weergegevens door KNMI (station Deelen):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	5,8 °C
Gemiddelde windsnelheid	8 km/h
Hoeveelheid neerslag	1,1 mm
Bewolkingsgraad	100 %
Globale zonnestraling	1 W/m ²
Relatieve luchtvochtigheid	98 %

Meetverslag 8-1 (Onderlaag 1)

Datum: 17 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem

Situatieschets:

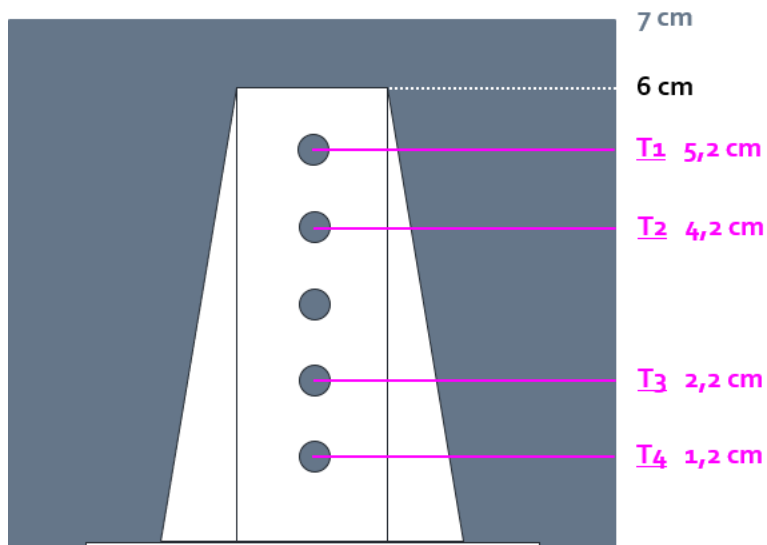


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Industrieweg
Geschatte lengte traject:	n.v.t.
Geschatte breedte traject:	Variërend
Mengsel:	AC 22 Lynpave
Laag:	Onderlaag
Laagdikte:	7 cm
Oppervlakte asfalt:	730 m ²
Hoeveelheid asfalt:	128 ton
Bijzonderheden:	Geen

Materialen:

- 1 infraroodcamera
- 2 thermokoppelhouders (6 cm) met ieder 4 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

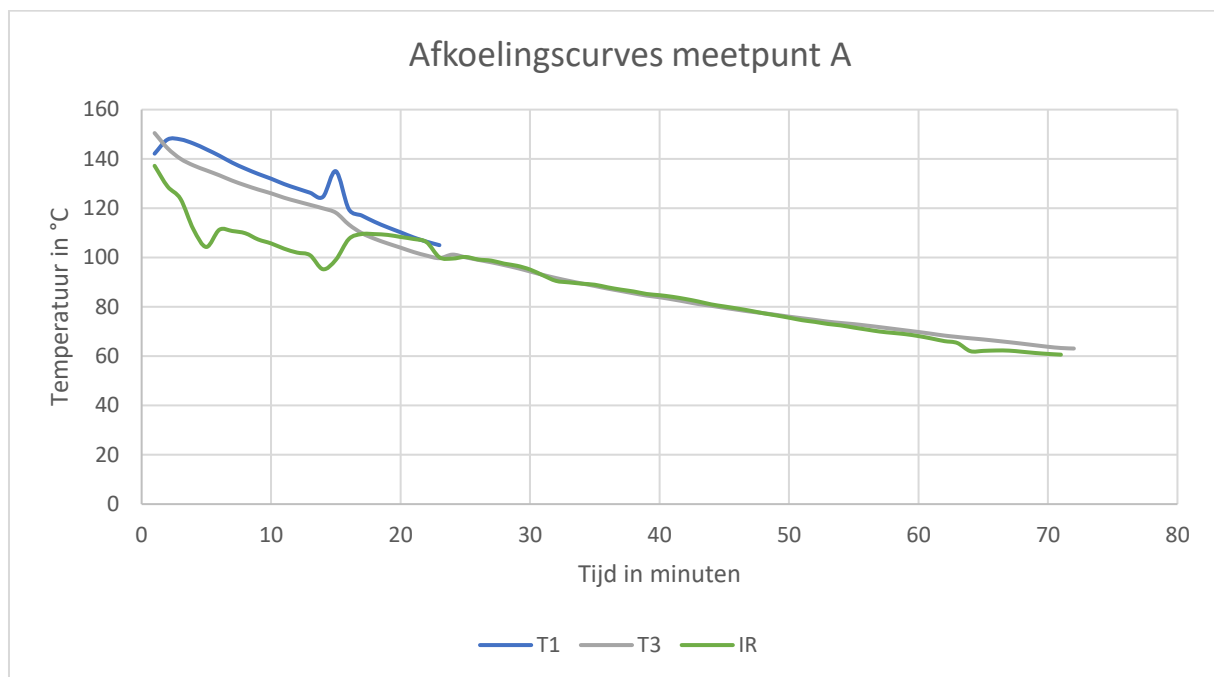
- Zowel bij meetpunt A als bij meetpunt B is niet op alle hierboven aangegeven hoogtes de kerntemperatuur gemeten. Dit heeft te maken met de kwetsbaarheid van de gebruikte thermokoppels. Sommige thermokoppels functioneerden tijdens de meting niet of niet goed en gaven daardoor niet-representatieve data. In de onderstaande grafieken zijn de niet (goed) werkende thermokoppels niet of deels weergegeven.

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: 1 bandenwals
- Hoofdverdichting: 1 bandenwals, 1 grote wals
- Afwerking: 1 grote wals

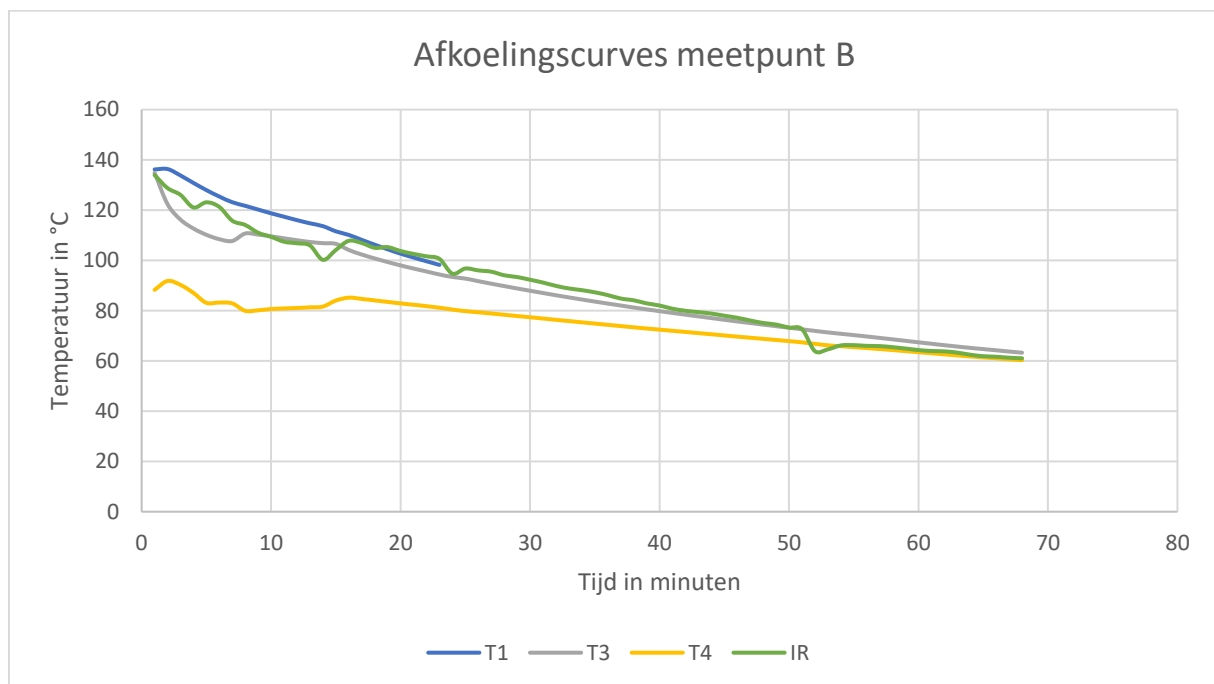
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A

- Na $t=23$ stopte thermokoppel T1 door de kracht van de walsen met functioneren. Daardoor is alle data na $t=23$ komen te vervallen.
- Tijdens de meting functioneerden de thermokoppels T2 en T4 niet, waardoor deze beide zijn komen te vervallen.



Starttemperatuur asfalt	140 °C
Type onderlaag	Zand
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	7 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B

- Na $t=24$ stopte thermokoppel T1 door de kracht van de walsen met functioneren. Daardoor is alle data na $t=24$ komen te vervallen.
- Tijdens de meting functioneerde thermokoppel T2 niet, waardoor deze is komen te vervallen.

Meetverslag 8-2 (Onderlaag 2)

Datum: 17 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem

Situatieschets:

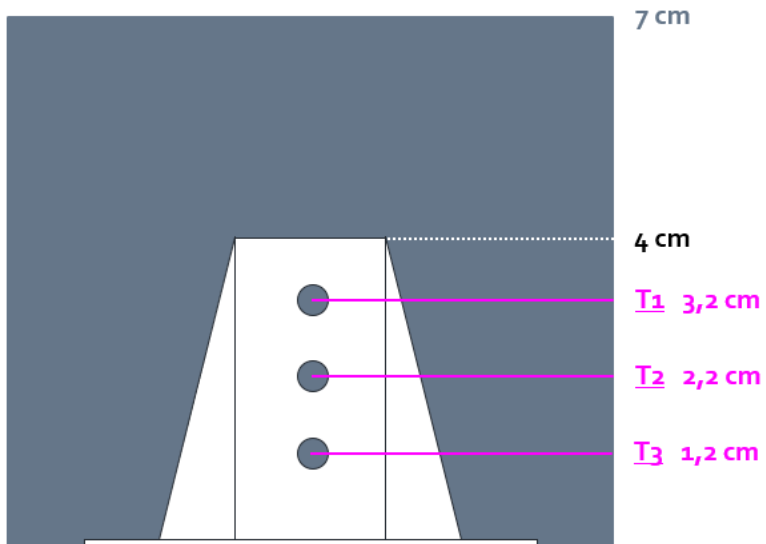


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Industrieweg
Geschatte lengte traject:	n.v.t.
Geschatte breedte traject:	Variërend
Mengsel:	AC 22 Lynpave
Laag:	Onderlaag
Laagdikte:	7 cm
Oppervlakte asfalt:	730 m ²
Hoeveelheid asfalt:	128 ton
Bijzonderheden:	Geen

Materialen:

- 1 infraroodcamera (meetpunt A)
- 1 handmatige infraroodscanner (meetpunt B)
- 2 thermokoppelhouders (4 cm) met ieder 3 thermokoppels



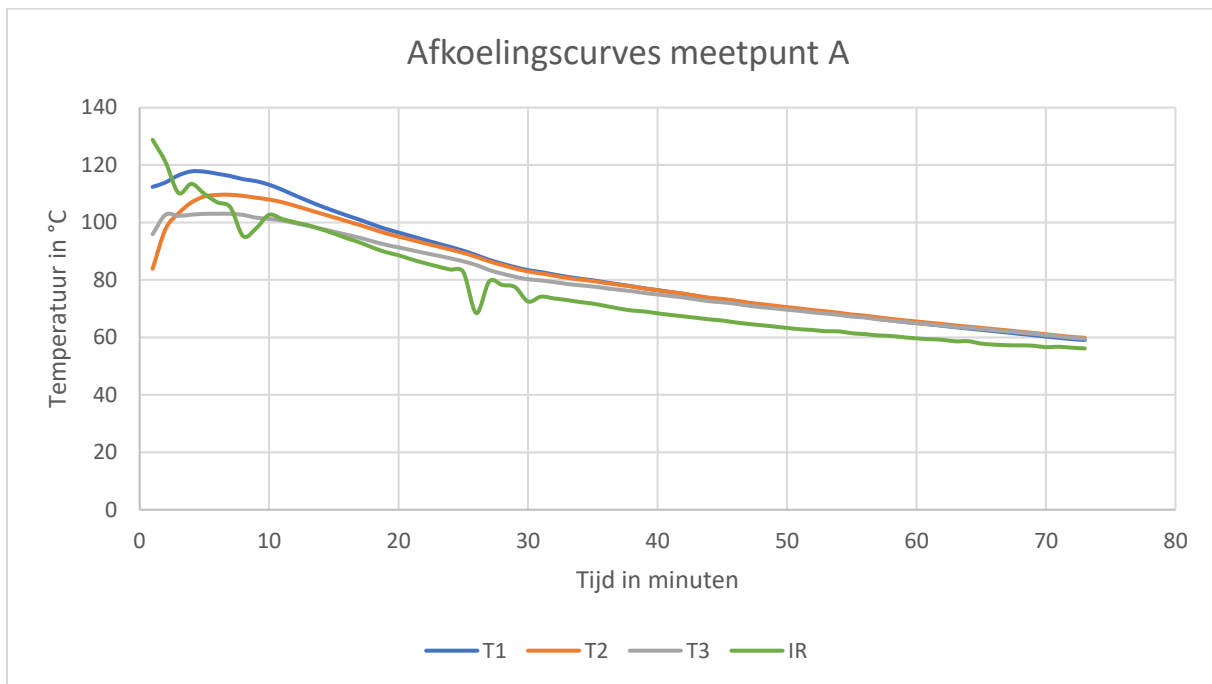
Opmerkingen materialen:

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- | | |
|--|----------------------------|
| - Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: | 1 bandenwals |
| - Hoofdverdichting: | 1 bandenwals, 1 grote wals |
| - Afwerking: | 1 grote wals |

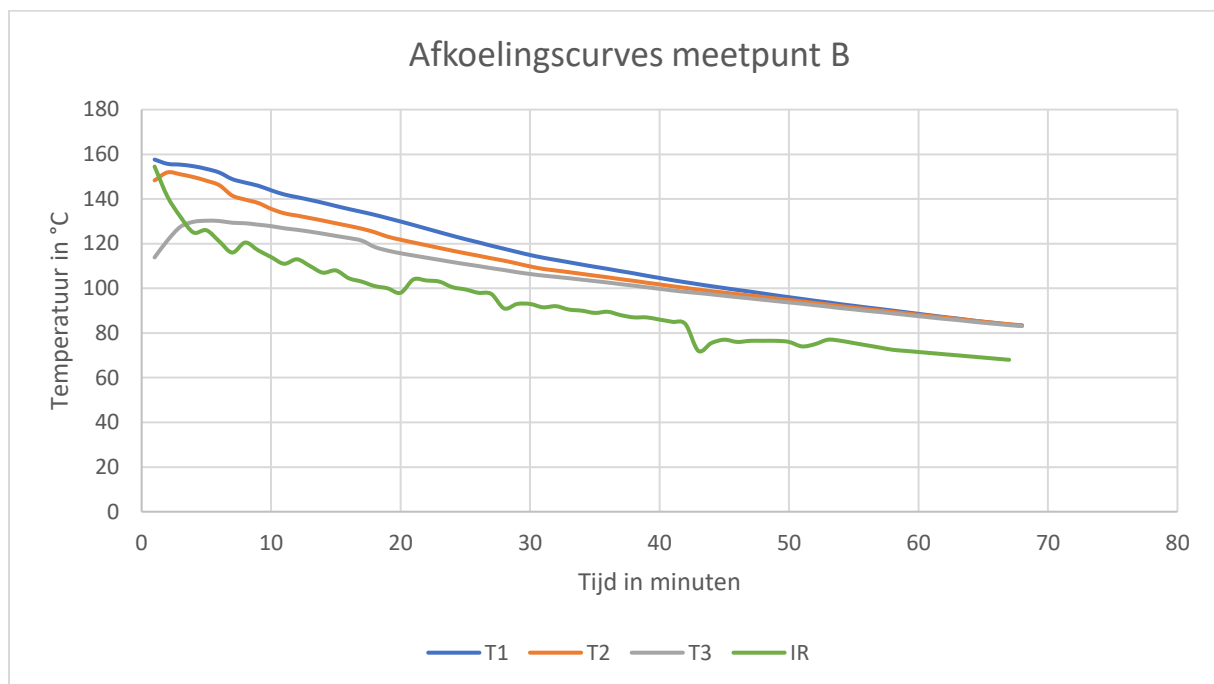
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	130 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	36 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A

- Op sommige punten in de grafiek van de oppervlaktetemperatuur zijn sterke dalingen (negatieve hellingen) te zien. Een mogelijke oorzaak daarvan zijn walsovergangen waarbij water van de wals op het meetpunt terechtkomt. Dit water loopt weg of verdampt binnen een paar minuten, maar zorgt wel voor lagere temperaturen in de gemeten data.

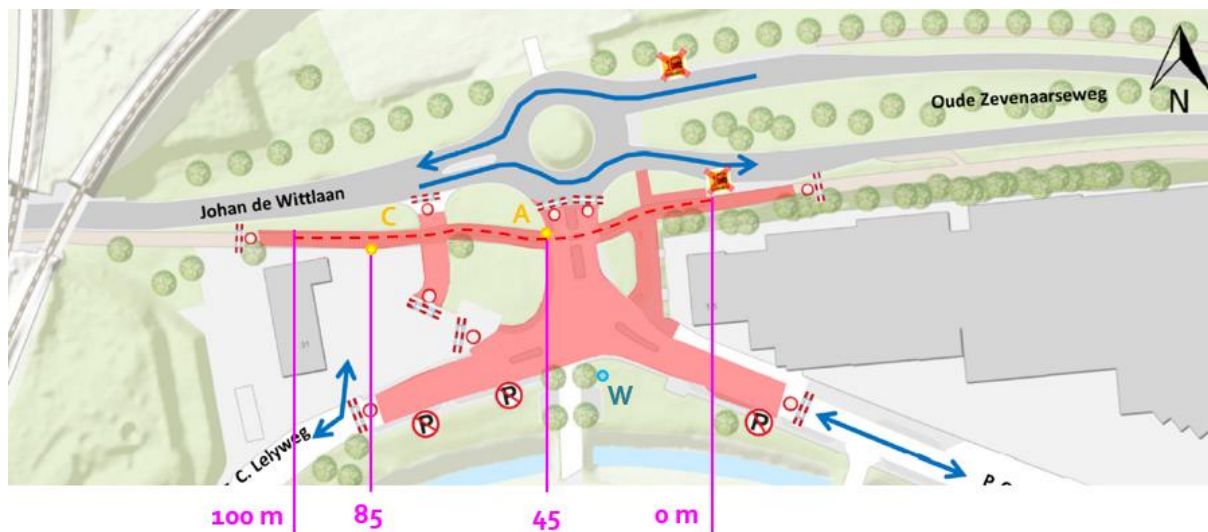


Starttemperatuur asfalt	160 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	30 °C

Meetverslag 8-3 (Tussenlaag)

Datum: 17 december 2019
 Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem

Situatieschets:

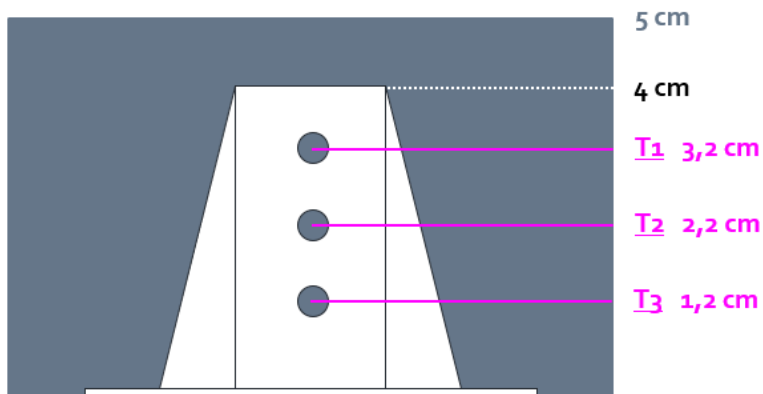


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Fietspad
Geschatte lengte traject:	100 m
Geschatte breedte traject:	4 m
Mengsel:	AC 16 Lynpave
Laag:	Tussenlaag
Laagdikte:	5 cm
Oppervlakte asfalt:	260 m ²
Hoeveelheid asfalt:	33 ton
Bijzonderheden:	Aanleggen van de tussenlaag voor gehele werkgebied opgesplitst in twee delen. Tussenlaag fietspad op 17-12, de rest van de kruising op 19-12 (meetverslag 9-1).

Materialen:

- 1 infraroodcamera (meetpunt A en deel van meting meetpunt C)
- 1 handmatige infraroodscanner (deel van meting meetpunt C)
- 2 thermokoppelhouders (4 cm) met ieder 3 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

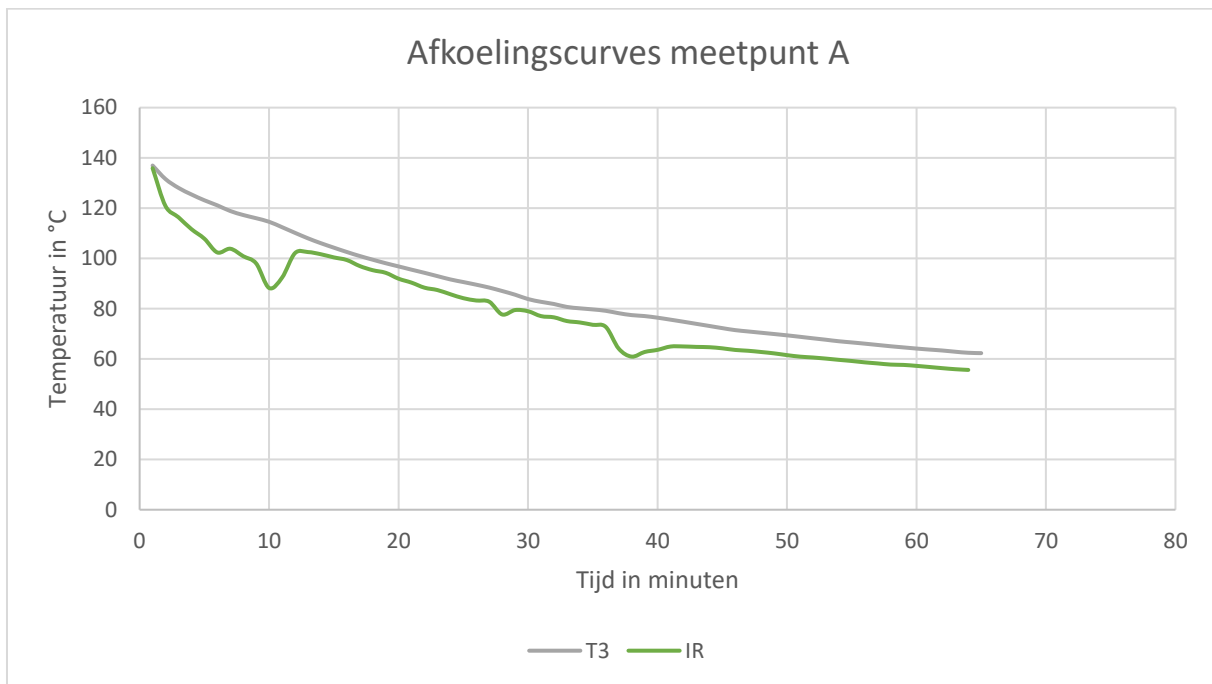
- Zowel bij meetpunt A als bij meetpunt C is niet op alle hierboven aangegeven hoogtes de kerntemperatuur gemeten. Dit heeft te maken met de kwetsbaarheid van de gebruikte thermokoppels. Sommige thermokoppels functioneerden tijdens de meting niet of niet goed en gaven daardoor niet-representatieve data. In de onderstaande grafieken zijn de niet (goed) werkende thermokoppels niet of deels weergegeven.
- Tijdens de meting van meetpunt C is er voor het meten van de oppervlaktetemperatuur gewisseld van de handmatige infraroodscanner naar de infraroodcamera.

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: 1 bandenwals
- Hoofdverdichting: 1 bandenwals, 1 grote wals
- Afwerking: 1 grote wals

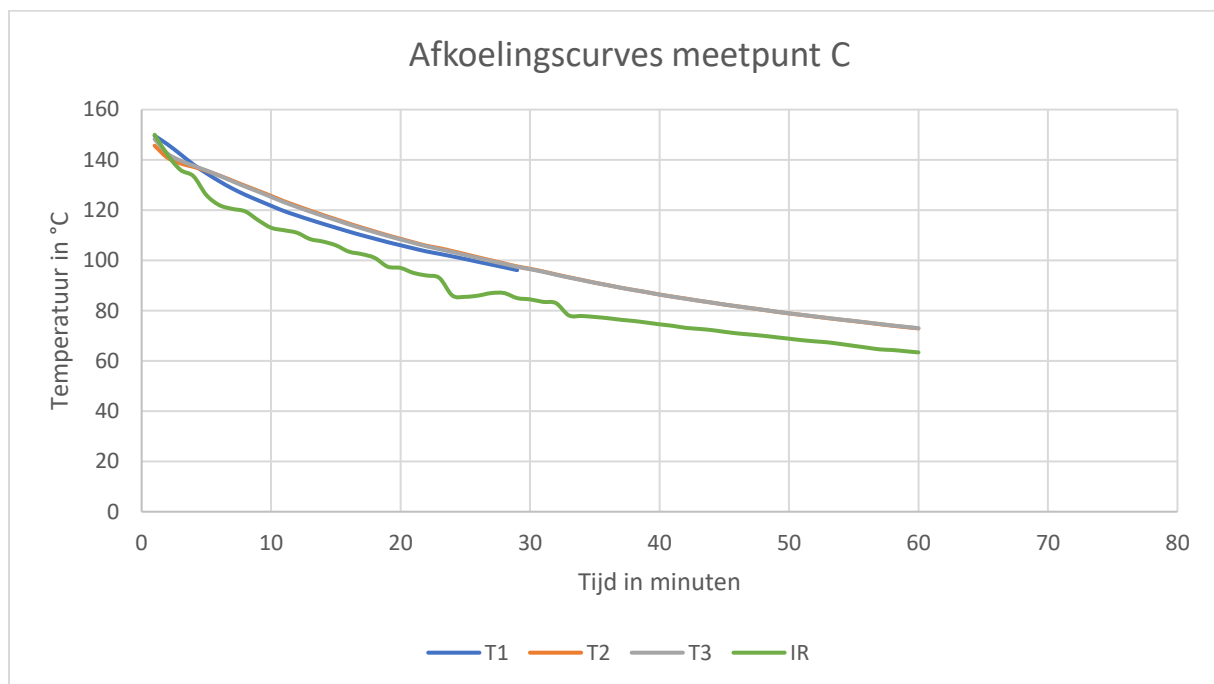
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	140 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	34 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A

- Tijdens de meting functioneerden de thermokoppels T1 en T2 niet, waardoor deze beide zijn komen te vervallen.
- Op sommige punten in de grafiek van de oppervlaktetemperatuur zijn sterke dalingen (negatieve hellingen) te zien. Een mogelijke oorzaak daarvan zijn walsovergangen waarbij water van de wals op het meetpunt terechtkomt. Dit water loopt weg of verdampt binnen een paar minuten, maar zorgt wel voor lagere temperaturen in de gemeten data.

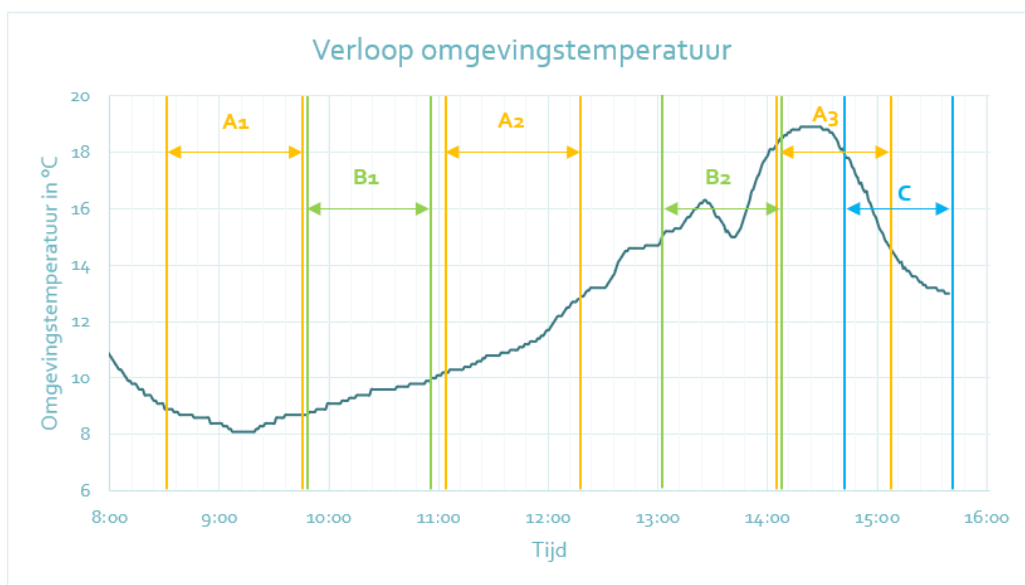


Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	28 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt C

- Na $t=28$ stopte thermokoppel T1 door de kracht van de walsen niet te functioneren. Daardoor is alle data na $t=28$ komen te vervallen.
- Vanaf $t=33$ is overgeschakeld van de handmatige handscanner naar de infraroodcamera. Daardoor is de oppervlaktetemperatuur vóór $t=33$ per minuut gemeten en vanaf $t=33$ per seconde.

Weersgegevens (voor metingen 8-1, 8-2 en 8-3)



Meetpunt:	A1	B1
Gemiddelde omgevingstemperatuur	8,5 °C	9,4 °C
Geschatte windsnelheid	4 km/h	4 km/h
Regen	Nee	Nee
Bewolkingsgraad	25 %	25 %
Luchtvochtigheid	63 %	66 %

Meetpunt:	A2	B2
Gemiddelde omgevingstemperatuur	11,1 °C	16 °C
Geschatte windsnelheid	4 km/h	4 km/h
Regen	Nee	Nee
Bewolkingsgraad	25 %	25 %
Luchtvochtigheid	67 %	64 %

Meetpunt:	A3	C
Gemiddelde omgevingstemperatuur	16 °C*	14,8 °C
Geschatte windsnelheid	30 km/h	30 km/h
Regen	Nee	Nee
Bewolkingsgraad	0 %	75 %
Luchtvochtigheid	59 %	64 %

*De gemeten temperatuur is niet helemaal representatief doordat het weerstation vrijwel continu in de zon stond tussen 14:00 en 15:00, waardoor de gemeten temperaturen hoger uitvallen dan de daadwerkelijke temperaturen op dat moment. Daarom is voor deze meting de gemiddelde temperatuur vastgesteld op 16 °C.

Gemeten weergegevens door KNMI (station Deelen):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	13,2 °C
Gemiddelde windsnelheid	20 km/h
Hoeveelheid neerslag	0 mm
Bewolkingsgraad	0 %
Globale zonnestraling	3 W/m ²
Relatieve vochtigheid	71 %

Meetverslag 9-1 (Onderlaag 1)

Datum: 17 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem

Situatieschets:

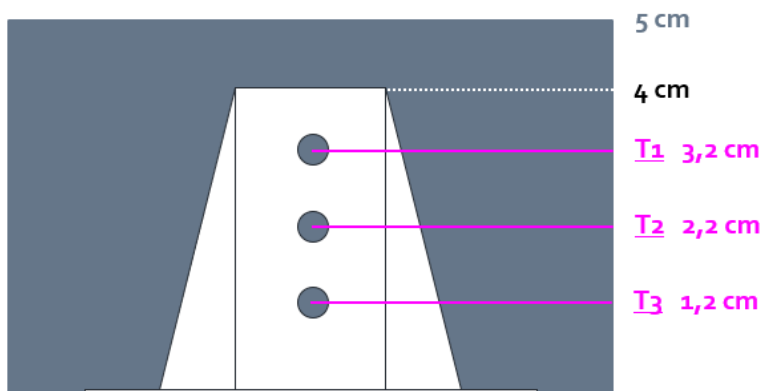


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Industrieweg
Geschatte lengte traject:	n.v.t.
Geschatte breedte traject:	Variërend
Mengsel:	AC 16 Lynpave
Laag:	Tussenlaag
Laagdikte:	5 cm
Oppervlakte asfalt:	770 m ²
Hoeveelheid asfalt:	97 ton
Bijzonderheden:	Deze meting is een deel van de meting die op 17-12 is uitgevoerd op dezelfde tussenlaag. Deze metingen zijn te vinden in meetverslag 8-3.

Materialen:

- 1 infraroodcamera
- 1 thermokoppelhouder (4 cm) met 3 thermokoppels

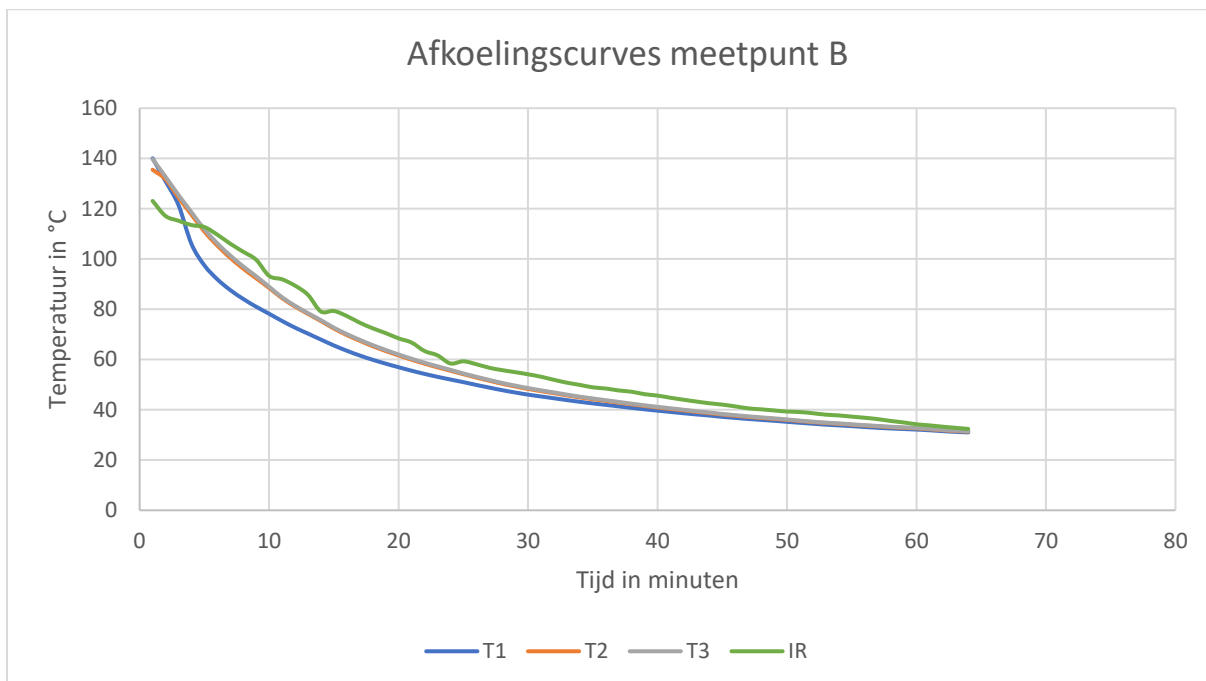


Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: 1 kleine wals
- Hoofdverdichting: 1 kleine wals, 1 grote wals
- Afwerking: 1 grote wals

Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	140 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	9 °C

Meetverslag 9-2 (Deklaag)

Datum: 19 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem

Situatieschets:

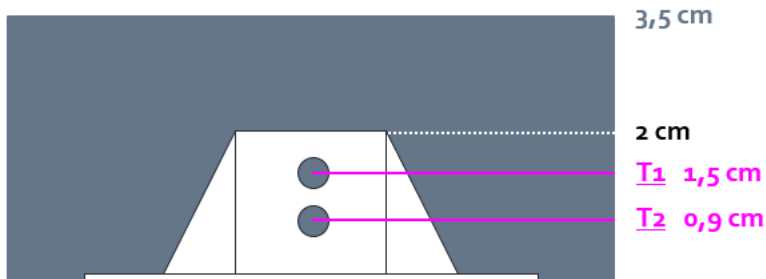


Situatiebeschrijving:

Type weg:	Industrieweg
Geschatte lengte traject:	n.v.t.
Geschatte breedte traject:	Variërend
Mengsel:	SMA-NL 11B
Laag:	Deklaag
Laagdikte:	3,5 cm
Oppervlakte asfalt:	850 m ²
Hoeveelheid asfalt:	75 ton
Bijzonderheden:	Geen

Materialen:

- 1 infraroodcamera
- 2 thermokoppelhouders (2 cm) met ieder 2 thermokoppels



Opmerkingen materialen:

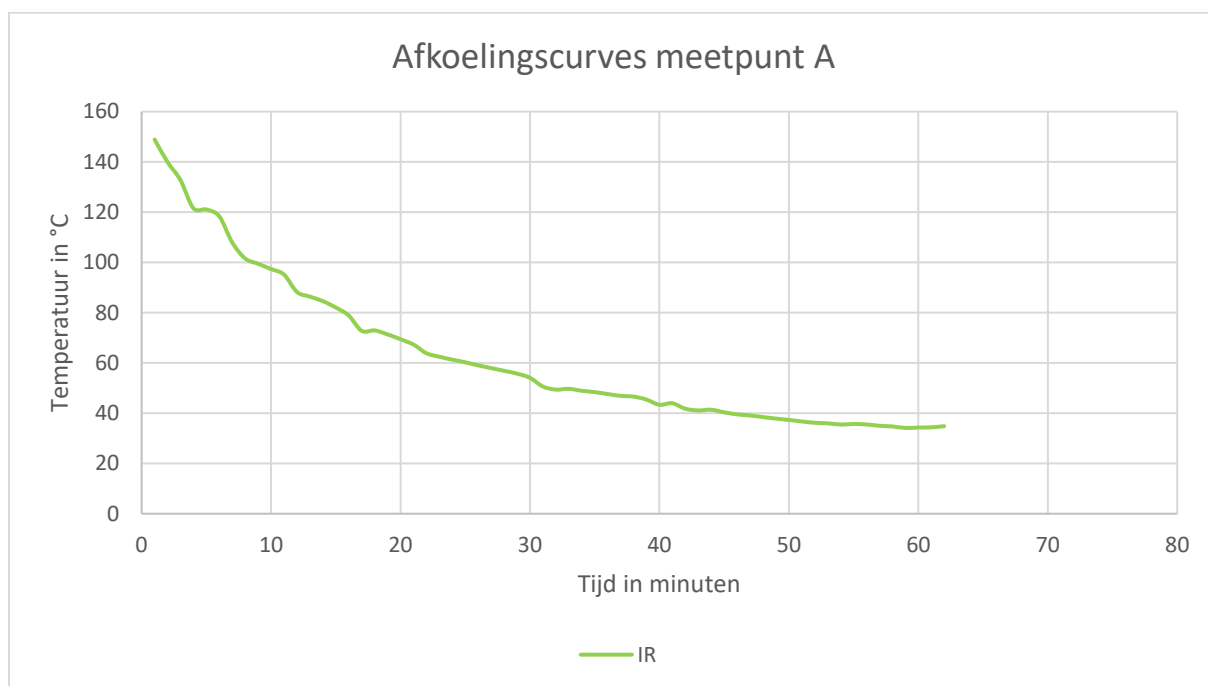
- Op meetpunt A was het niet mogelijk de kerntemperatuur te meten. Dit heeft te maken met de kwetsbaarheid van de gebruikte thermokoppels. Deze thermokoppels functioneerden tijdens de meting niet en gaven daardoor niet-representatieve data. In de grafiek van meetpunt A is de kerntemperatuur daarom niet weergegeven.

Informatie walsen

Op basis van waarnemingen is het volgende bekend over de gebruikte walsen en de walsstrategie:

- | | |
|--|----------------|
| - Egalisatiefase, asfaltmengsel vlak walsen: | 2 grote walsen |
| - Hoofdverdichting: | 2 grote walsen |
| - Afwerking: | 1 grote wals |

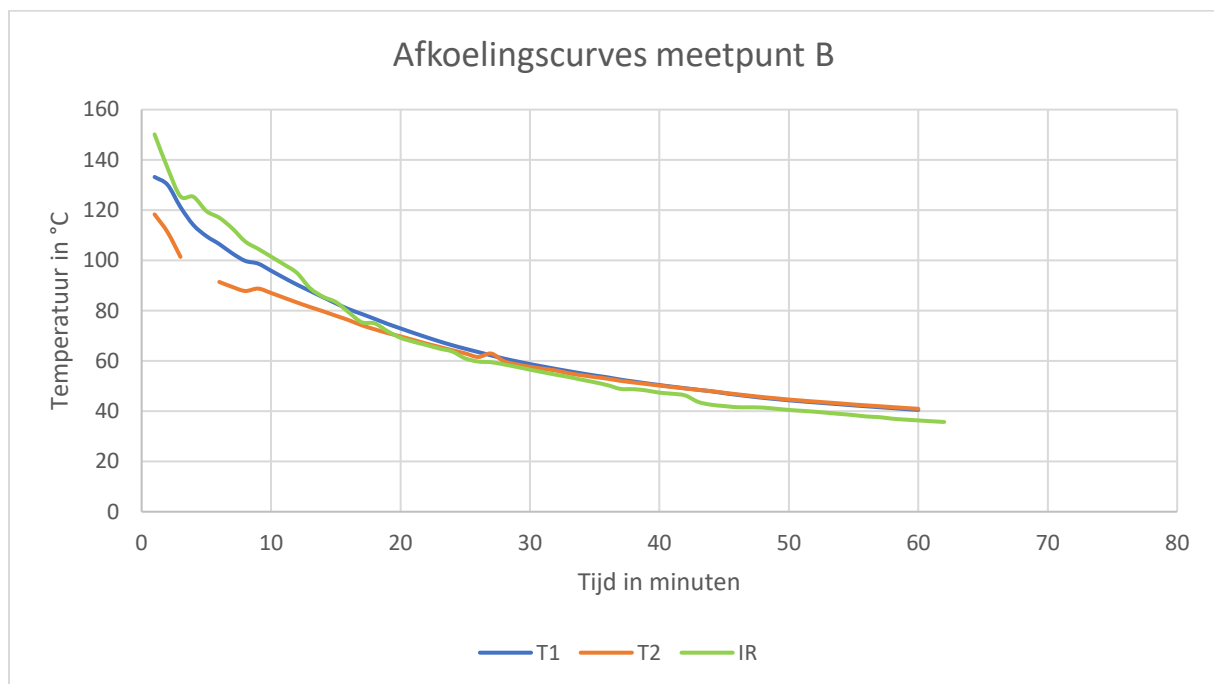
Afkoelingscurves per meetpunt



Starttemperatuur asfalt	150 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	10 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt A

- Tijdens de meting functioneerden zowel thermokoppel T1 als T2 niet. Daardoor zijn deze beide komen te vervallen. Op dit meetpunt is dus alleen de oppervlaktetemperatuur gemeten.

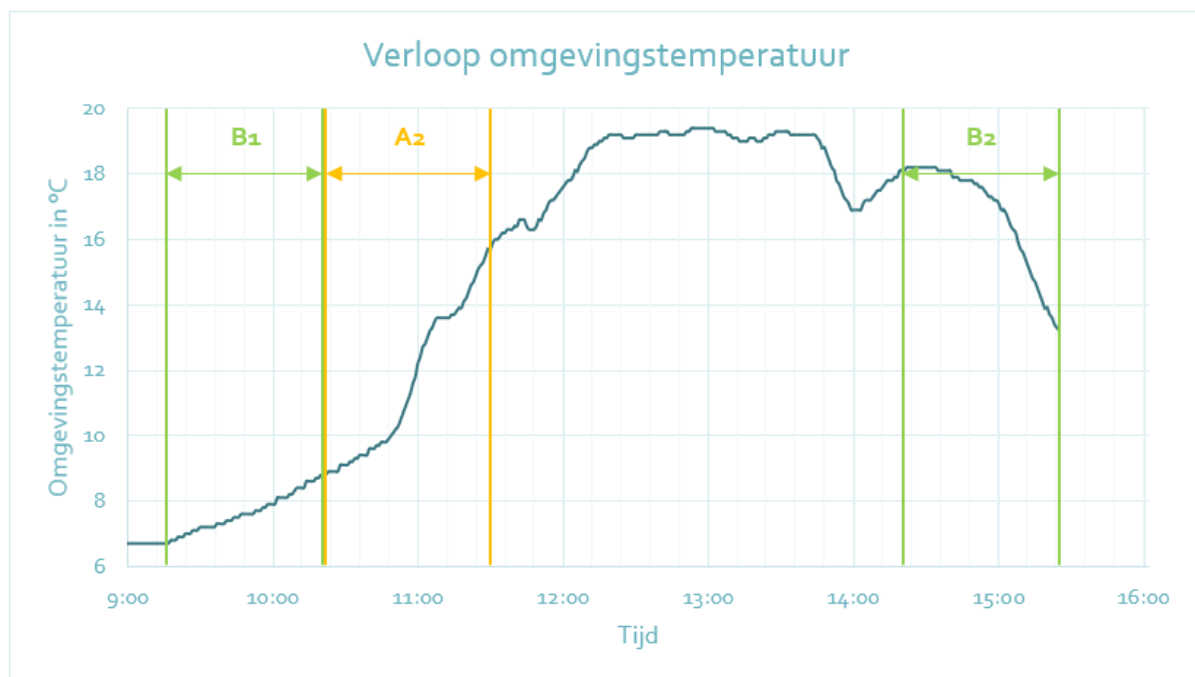


Starttemperatuur asfalt	160 °C
Type onderlaag	Asfalt
Oppervlaktetemperatuur onderliggende laag	15 °C

Opmerkingen en waarnemingen meetpunt B

- Aan de curve van thermokoppel T2 valt op dat op de punten $t=4$ en $t=5$ de gegevens ontbreken. Dit komt doordat hier extreme waarden werden aangegeven als gevolg van de kwetsbaarheid van de thermokoppel. Deze extreme waarden zijn voor het plotten van de afkoelingscurve eruit gefilterd.

Weersgegevens (voor metingen 9-1 en 9-2)



Meetpunt:	B1	A2	B2
Gemiddelde omgevingstemperatuur	7,7 °C	11,6 °C	16,8 °C
Geschatte windsnelheid	10 km/h	10 km/h	10 km/h
Regen	Nee	Nee	Nee
Bewolkingsgraad	0 %	0 %	0 %
Luchtvochtigheid	73 %	70 %	61 %

Gemeten weergegevens door KNMI (station Deelen):

Gemiddelde omgevingstemperatuur	12,1 °C
Gemiddelde windsnelheid	20 km/h
Hoeveelheid neerslag	0 mm
Bewolkingsgraad	0 %
Globale zonnestraling	5 W/m ²
Relatieve vochtigheid	75 %

Bijlage C: Voorspellings- en vergelijkingsverslagen

C.1. Introductie

In deze bijlage zijn voor ieder meetverslag de voorspellings- en vergelijkingsverslagen te vinden. Net als bij de meetverslagen zijn bovenaan ieder verslag de datum en de locatie te vinden. Ook het betreffende meetpunt waar de voorspellingen voor zijn uitgevoerd is aangegeven. Verder zijn de volgende onderdelen te vinden:

Verantwoording meetpunt

Voor ieder meetverslag is gekozen om één meetpunt per meetverslag te voorspellen. In dit onderdeel wordt uitgelegd waarom voor het betreffende meetpunt is gekozen. In de meeste gevallen heeft dit te maken met hoe de meting verliep en hoeveel data er beschikbaar is. Bij voorkeur zijn meetpunten gekozen waar zo min mogelijk afwijkingen in de data zijn te vinden.

Input

In dit onderdeel is voor zowel PaveCool als ASPARiCool de inputwaarden te vinden. De tabellen zijn ingedeeld in drie kolommen: de grootte van iedere input parameter, de eenheid per parameter en de ingevulde waarde. De inputtabellen zijn vooral bedoeld om aan te tonen hoe de voorspellingen tot stand zijn gekomen en om het mogelijk te maken om de voorspellingen later opnieuw te kunnen genereren onder dezelfde omstandigheden.

Output

In dit onderdeel worden de voorspelde afkoelcurves, afkomstig van beide modellen, getoond. In de grafiektitels is aangegeven van welk model de voorspelling afkomstig is. Naast de voorspelde curves is ook de gemeten data weergegeven, zodat meteen het verschil in waarden en verloop van beide curves kan worden waargenomen.

Van ASPARiCool zijn de kern- en oppervlaktetemperatuur apart voorspeld. De beide soorten temperaturen zijn dan ook apart weergegeven in twee verschillende grafieken.

Vergelijking

In dit laatste onderdeel zijn de uitkomsten van de vergelijkingsmethoden (correlatiecoëfficiënt en RMSE) voor iedere voorspelling te vinden. Deze zijn berekend met behulp van Excel.

C.2. Aannames en opmerkingen

Voor de voorspellingen zijn een aantal belangrijke aannames en opmerkingen te vermelden:

- Omdat het in ASPARiCool niet mogelijk is om de voorspelde data te exporteren (naar bijvoorbeeld Excel) en er dus geen numerieke gegevens beschikbaar zijn, zijn alle grafieken die zijn gegenereerd door ASPARiCool afgelezen en afgerond tot $\frac{1}{4}$ van een geheel getal.
- Voor het berekenen van de correlatiecoëfficiënt is een standaard functie van Excel gebruikt (functie: 'CORRELATIE(...)'). Voor het berekenen van de RMSE is geen standaard functie gebruikt, maar is deze 'handmatig' berekend door de formule in meerdere stappen te berekenen.

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 1

Datum: 13 november 2019
Locatie: Burgemeester Matsersingel, Arnhem
Meetpunt: C (ASPARiCool) en D (PaveCool)

Verantwoording meetpunten

In dit geval is de keuze gevallen op twee meetpunten. Meetpunt D ligt niet naast een overgang van bestaand naar nieuw asfalt, dus is in dit geval een 'algemene' situatie, die niet wordt beïnvloed door extra factoren. Echter is op meetpunt D niet de oppervlaktetemperatuur gemeten. Omdat ASPARiCool voorspellingen doet van de oppervlaktetemperatuur, is ervoor gekozen om de gemeten oppervlaktetemperatuur van meetpunt C te beschouwen voor de voorspelling met ASPARiCool. Daarbij is aangenomen dat het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen meetpunten C en D nagenoeg klein is dat deze met elkaar kunnen worden vergeleken.

Input

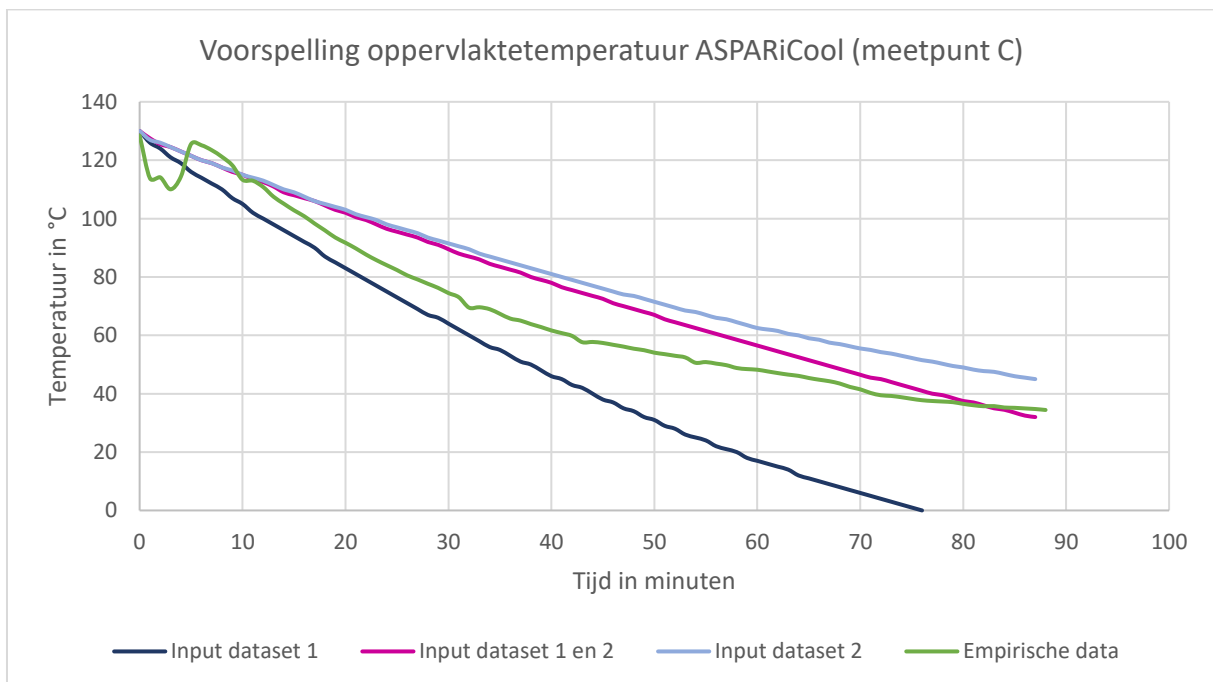
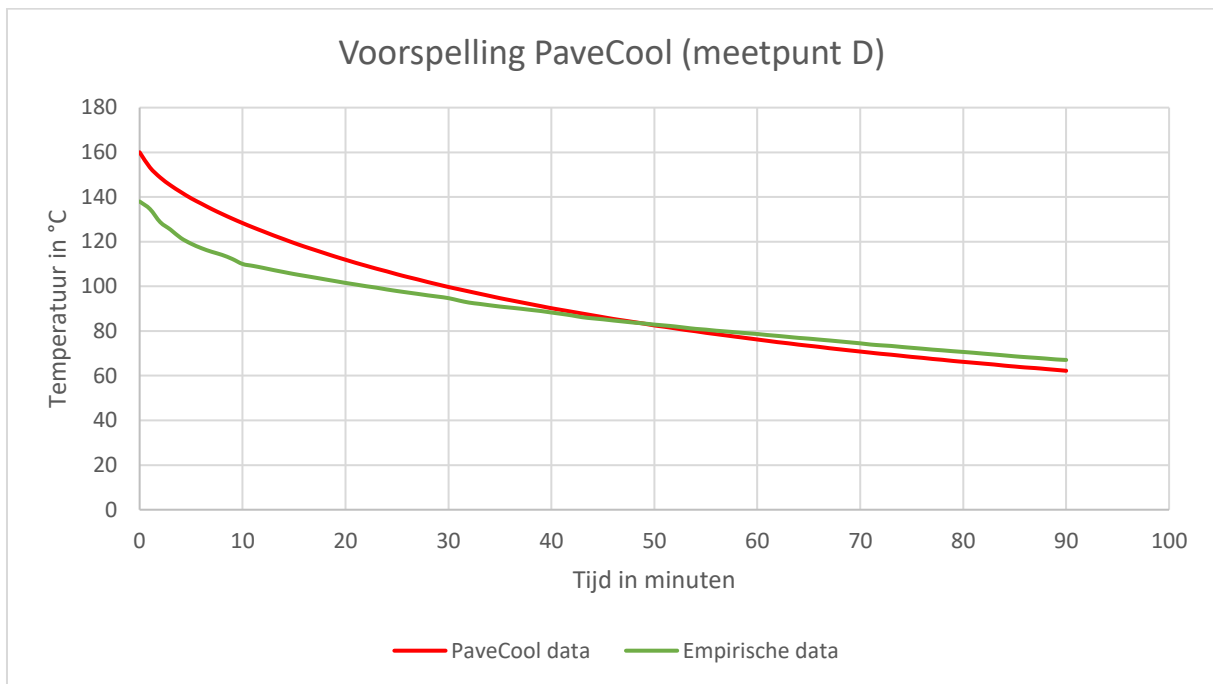
PaveCool

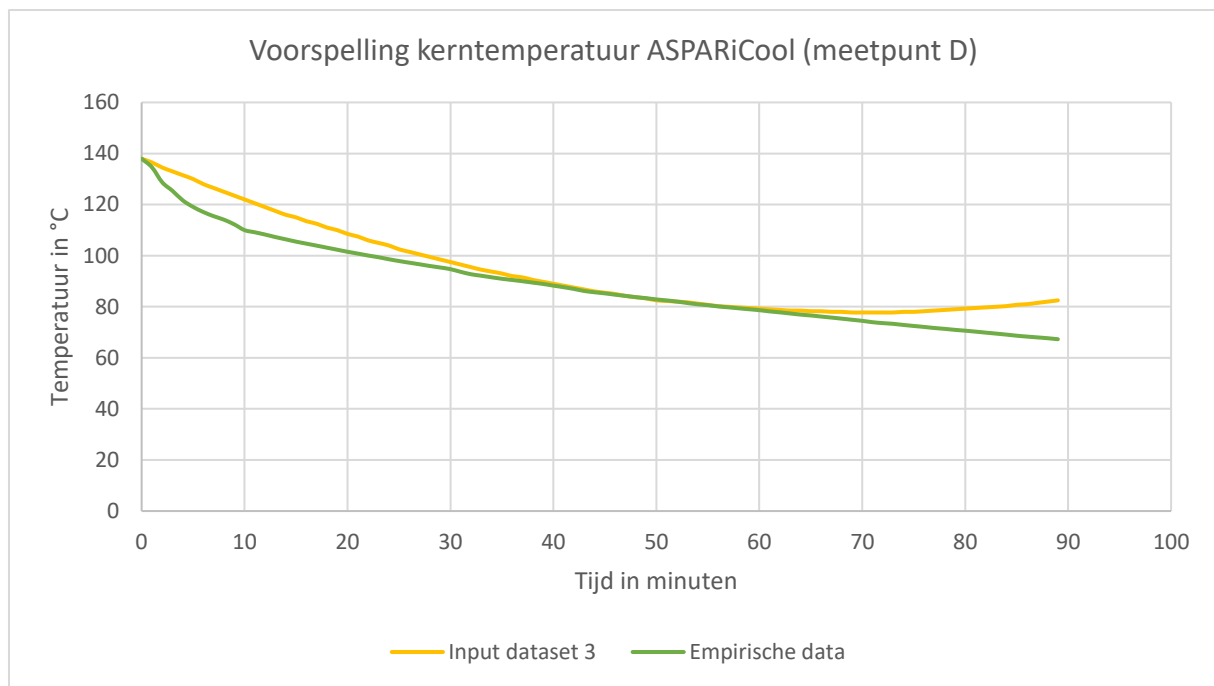
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	11/13/2019
Tijd	(mm:ss)	11:20
Omgevingstemperatuur	°C	10
Windsnelheid	km/h	17
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	75% bewolking
Breedtegraad	°	52
Type asfaltmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	80
Starttemperatuur	°C	160
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Zand/gravel
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	6

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 22
Laagdikte	mm	80
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Zand
Temperatuur onderlaag	°C	6
Windsnelheid	km/h	17
Omgevingstemperatuur	°C	10
Weer/zonnestraling	W/m ²	5
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,998	8,98
ASPARiCool (input dataset 1)	0,986	23,82
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,976	10,30
ASPARiCool (input dataset 2)	0,983	14,17
ASPARiCool (input dataset 3)	0,971	6,53

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 2

Datum: 14 november 2019
Locatie: Burgemeester Matsersingel, Arnhem
Meetpunt: C

Verantwoording meetpunt

De reden dat meetpunt C is gekozen voor de voorspellingen is omdat de data weinig tot geen bijzondere of extreme waarden weergeeft. Ook de gemeten omgevingstemperatuur schommelde niet veel tijdens deze meting.

Input

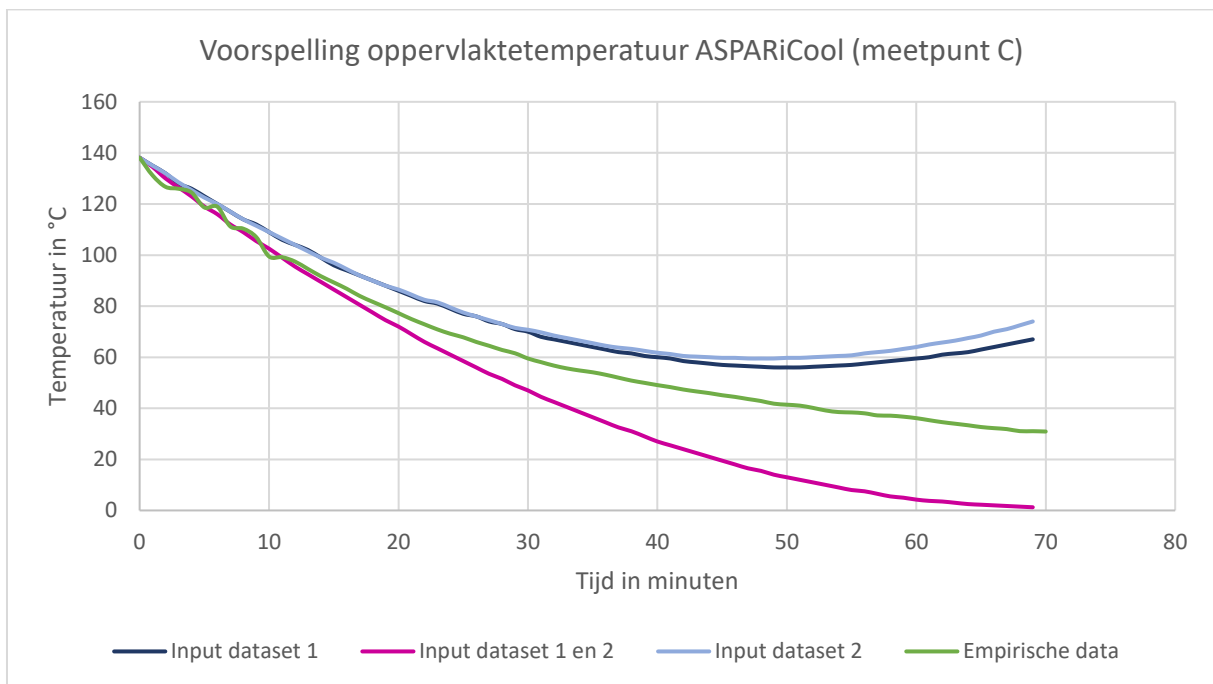
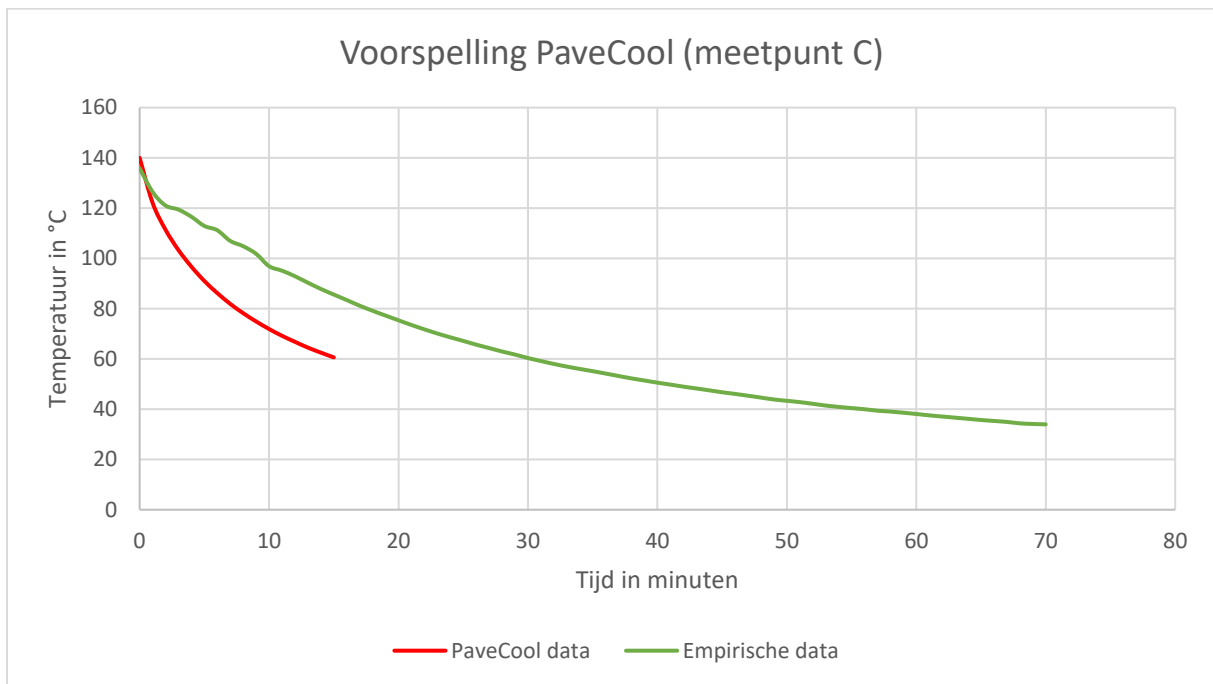
PaveCool

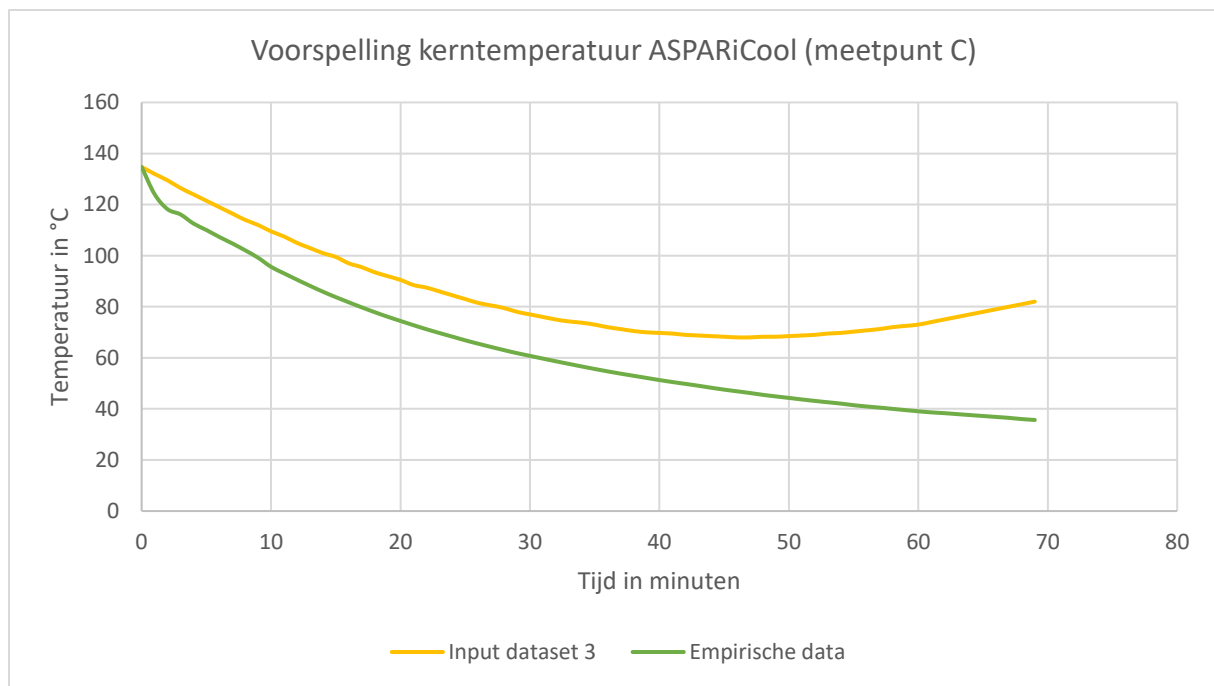
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	11/14/2019
Tijd	(mm:ss)	12:48
Omgevingstemperatuur	°C	10
Windsnelheid	km/h	17
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	75% bewolking
Breedtegraad	°	52
Type asfalmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	30
Starttemperatuur	°C	140
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	7

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfalmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 8
Laagdikte	mm	30
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	7
Windsnelheid	km/h	17
Omgevingstemperatuur	°C	10
Weer/zonnestraling	W/m ²	6
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,977	22,17
ASPARiCool (input dataset 1)	0,976	15,38
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,994	20,24
ASPARiCool (input dataset 2)	0,962	18,11
ASPARiCool (input dataset 3)	0,949	23,18

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 3

Datum: 15 november 2019
Locatie: Runderweg 6, Lelystad
Meetpunt: A

Verantwoording meetpunt

De resultaten op meetpunt A vertonen vrijwel geen bijzondere of extreme waarden of veranderingen in de grafiek. Op meetpunt B is de oppervlaktetemperatuur niet opgenomen in het meetverslag en de grafiek van meetpunt C vertoont in de eerste vijf minuten van de meting afwijkende waarden. Daarom worden de voorspellingen gedaan voor meetpunt A.

Input

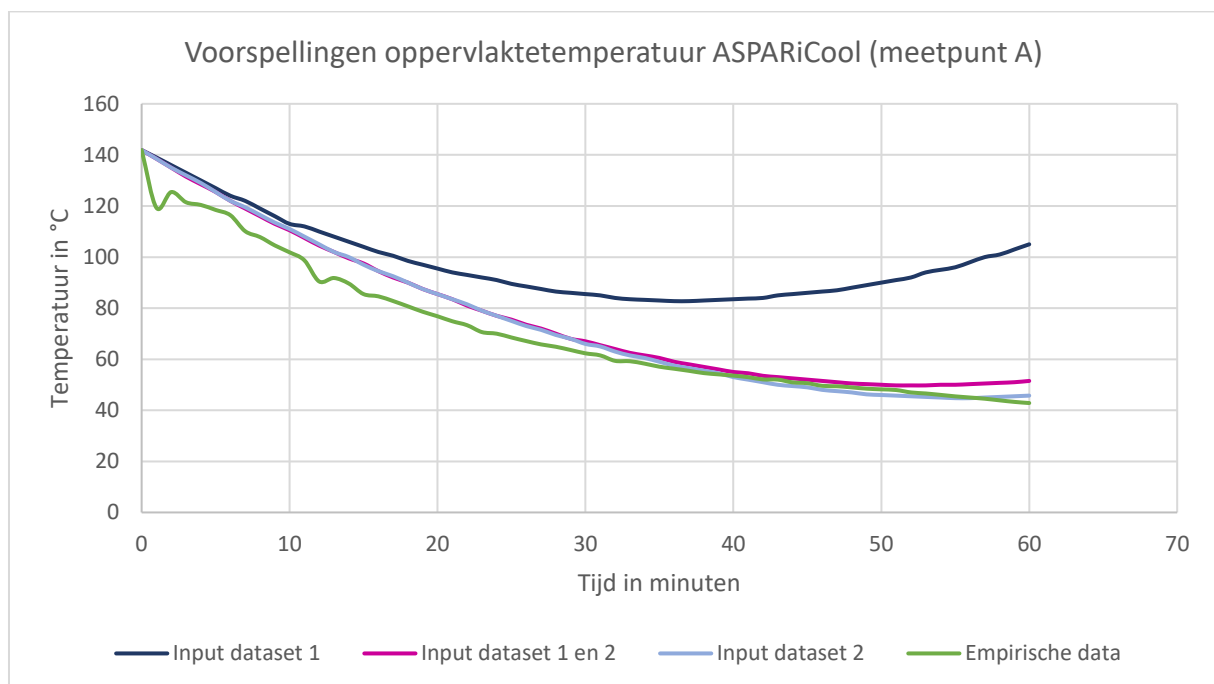
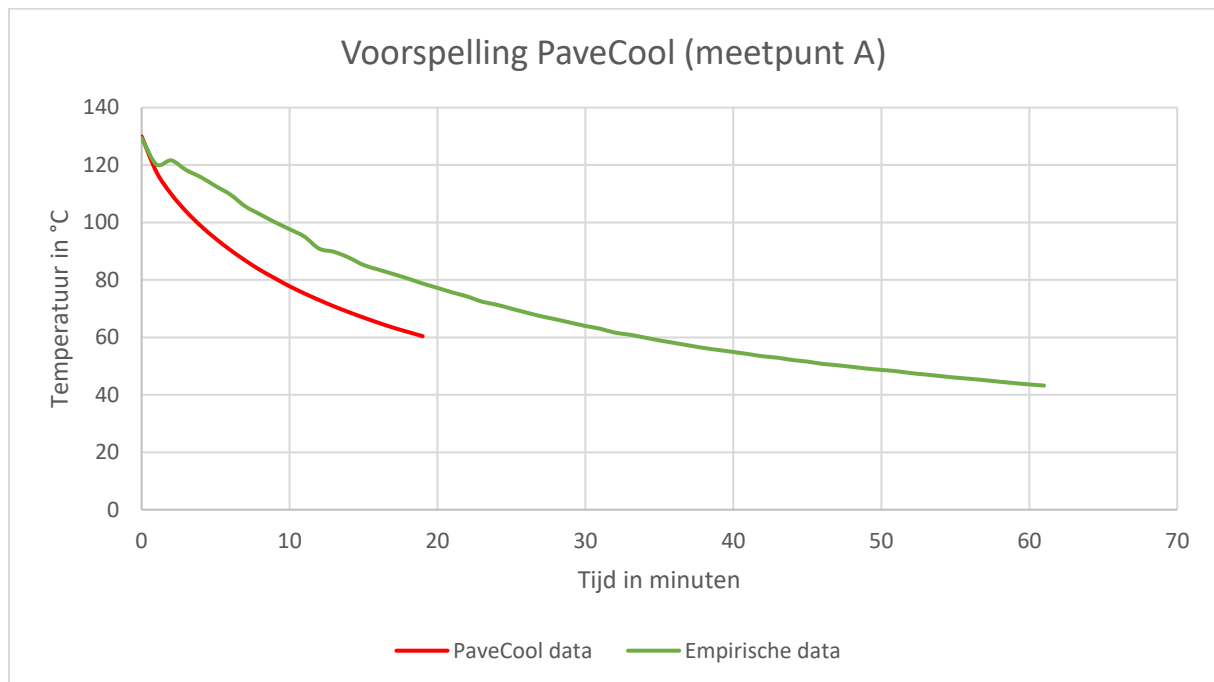
PaveCool

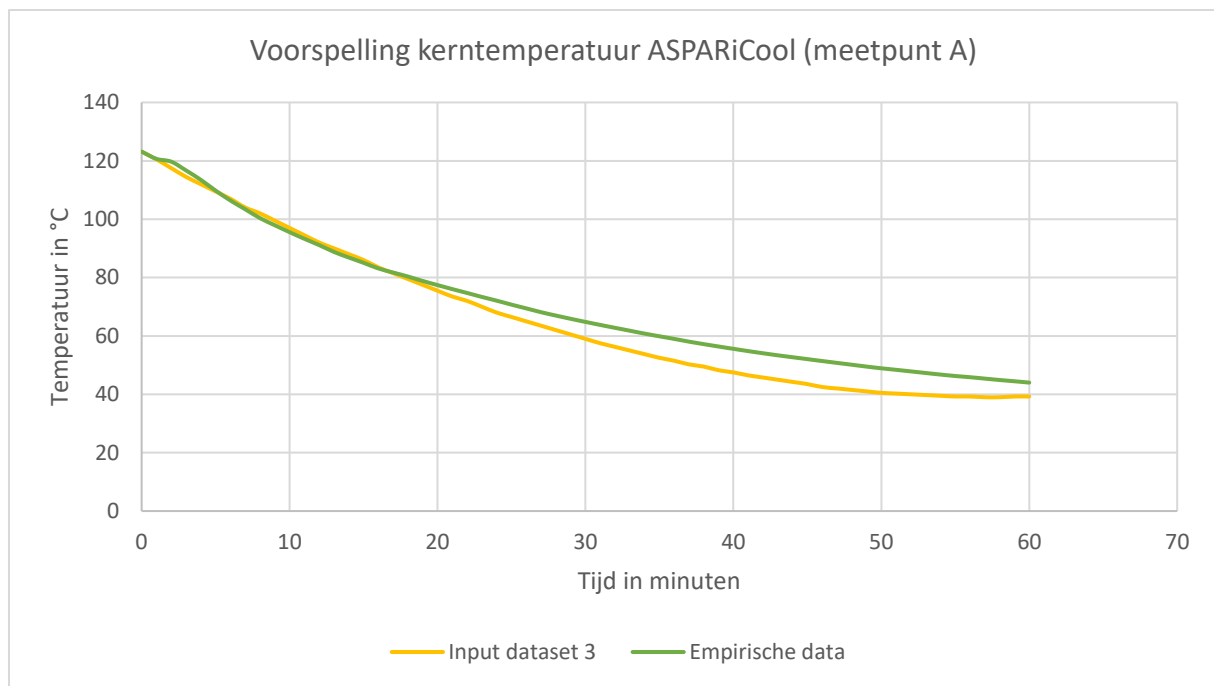
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	11/15/2019
Tijd	(mm:ss)	12:12
Omgevingstemperatuur	°C	6
Windsnelheid	km/h	21
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Volledig bewolkt
Breedtegraad	°	53
Type asfaltmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	40
Starttemperatuur	°C	130
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	7

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 16
Laagdikte	mm	40
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	7
Windsnelheid	km/h	21
Omgevingstemperatuur	°C	6
Weer/zonnestraling	W/m ²	0
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,977	17,31
ASPARiCool (input dataset 1)	0,871	30,52
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,994	6,91
ASPARiCool (input dataset 2)	0,993	6,59
ASPARiCool (input dataset 3)	0,997	5,64

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 5

Datum: 26 november 2019
Locatie: Kroezenhoek-West, Den Ham
Meetpunt: A

Verantwoording meetpunt

De keuze voor deze voorspelling was vooral tussen meetpunten A en D. Voor meetpunten B en C ontbreekt een groot deel van de data, dus is er in die gevallen minder vergelijkingsmateriaal en een kleinere nauwkeurigheid, omdat er minder data beschikbaar is. Omdat meetpunt D korter is gemeten en er daarnaast een handmatige infraroodscanner is gebruikt voor de oppervlaktetemperatuur in plaats van de camera, is gekozen voor meetpunt A als basis voor de voorspellingen.

Input

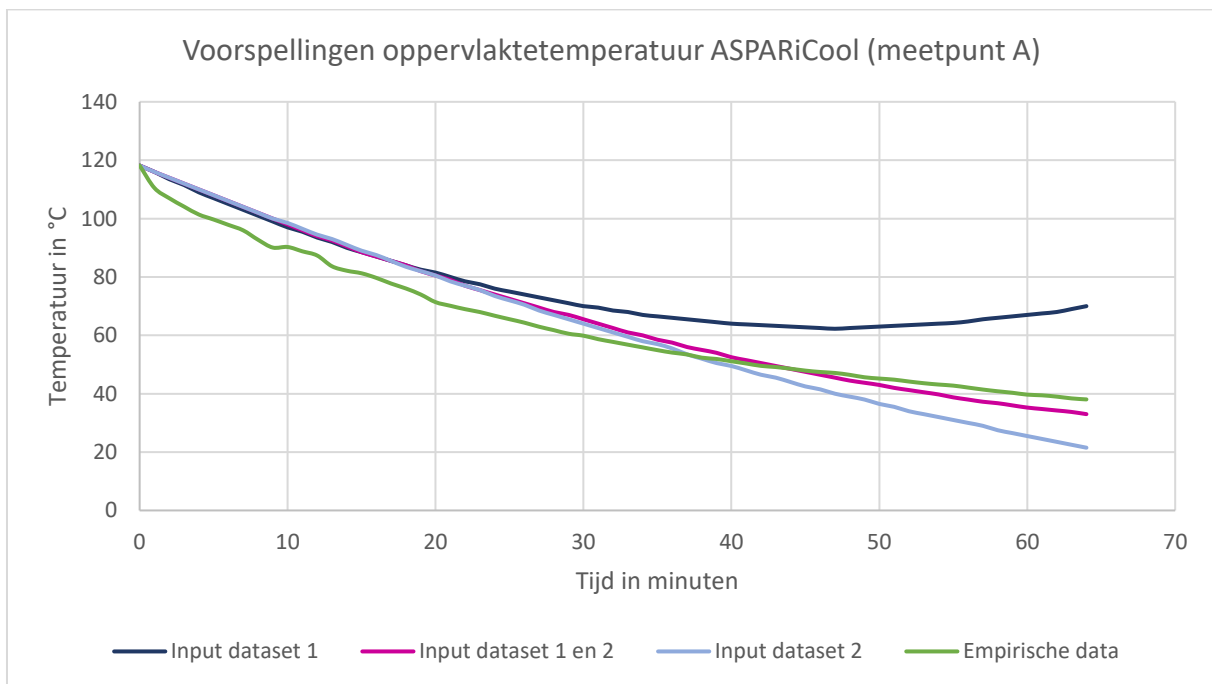
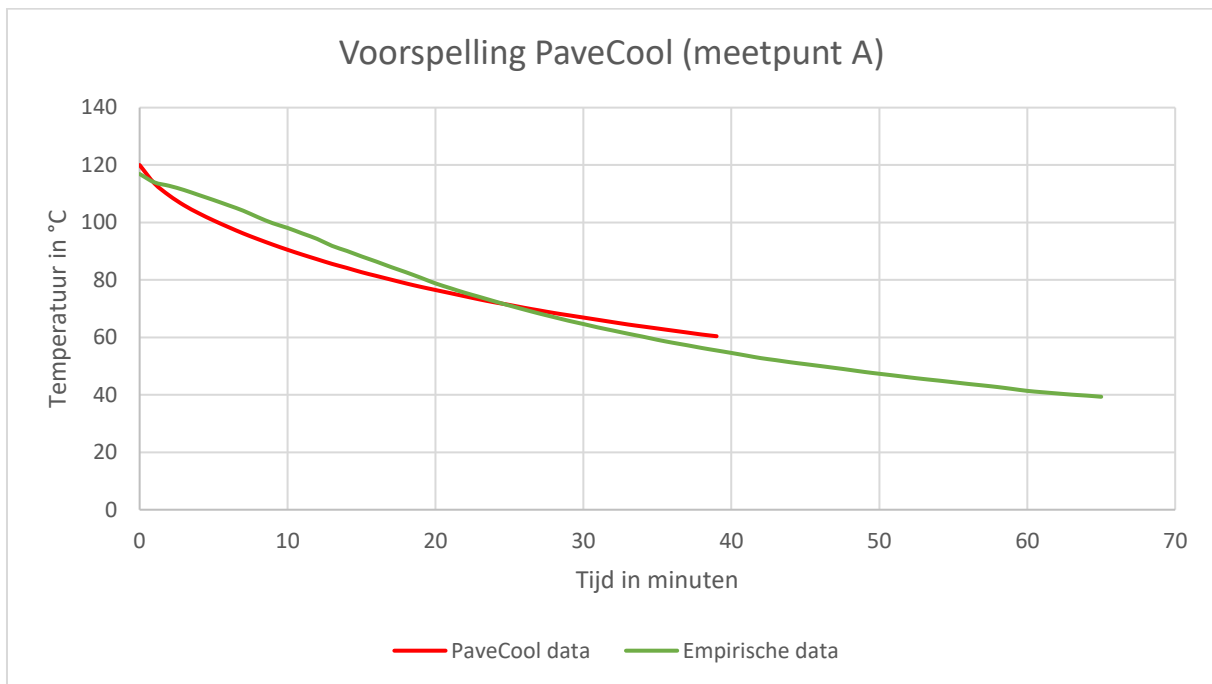
PaveCool

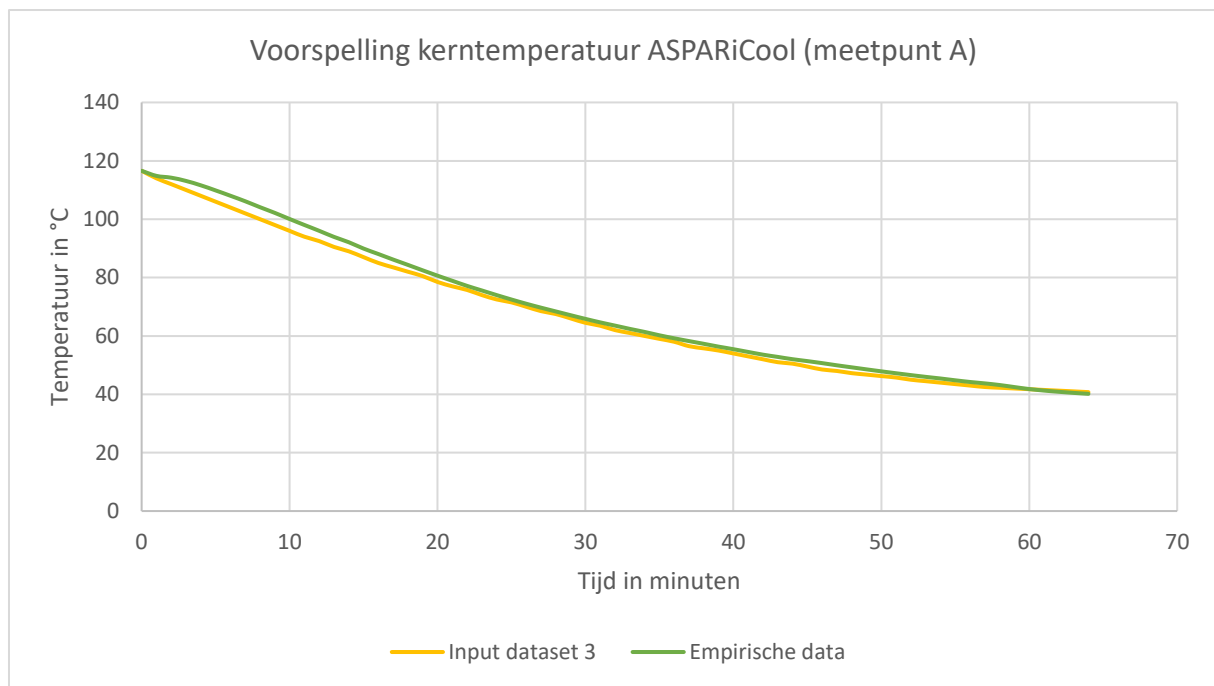
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	11/26/2019
Tijd	(mm:ss)	08:23
Omgevingstemperatuur	°C	9
Windsnelheid	km/h	11
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Volledig bewolkt
Breedtegraad	°	53
Type asfaltmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	60
Starttemperatuur	°C	120
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Zand/gravel
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	8

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 22
Laagdikte	mm	60
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Zand
Temperatuur onderlaag	°C	8
Windsnelheid	km/h	11
Omgevingstemperatuur	°C	9
Weer/zonnestraling	W/m ²	0
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,985	4,67
ASPARiCool (input dataset 1)	0,968	14,98
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,992	5,77
ASPARiCool (input dataset 2)	0,984	8,39
ASPARiCool (input dataset 3)	0,999	2,15

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 6-1

Datum: 28 november 2019
Locatie: Amsterdamseweg, Arnhem
Meetpunt: B

Verantwoording meetpunt

Ondanks dat er voor een paar minuten data ontbreekt op meetpunt B, toont dit meetpunt vergeleken met C en D toch de meeste data. Voor meetpunt C is de oppervlaktetemperatuur niet gemeten en voor meetpunt D ontbreekt een groot deel van de data. Daarom wordt meetpunt B als basis genomen voor de voorspellingen.

Input

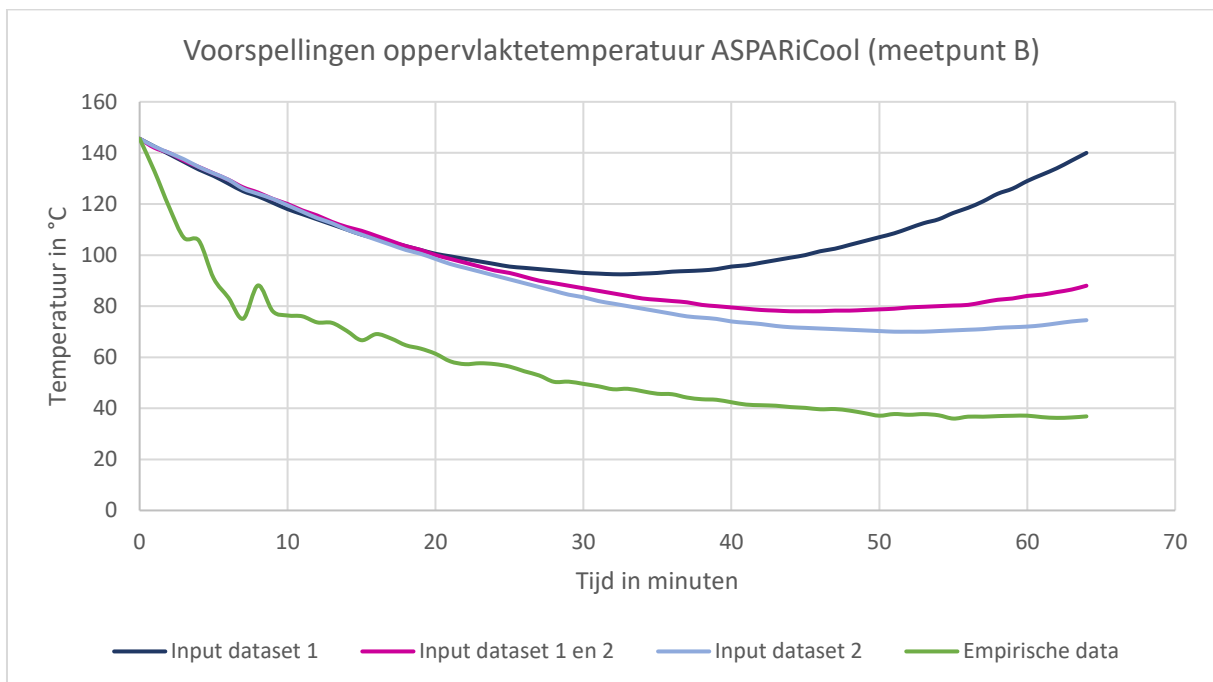
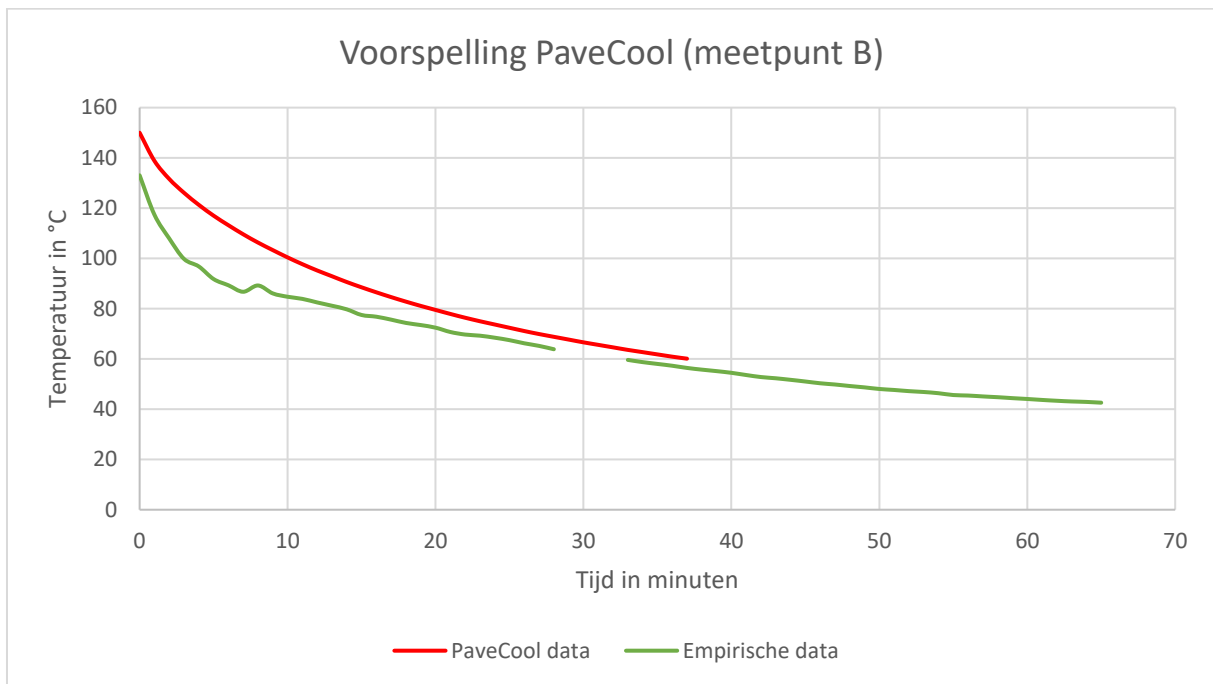
PaveCool

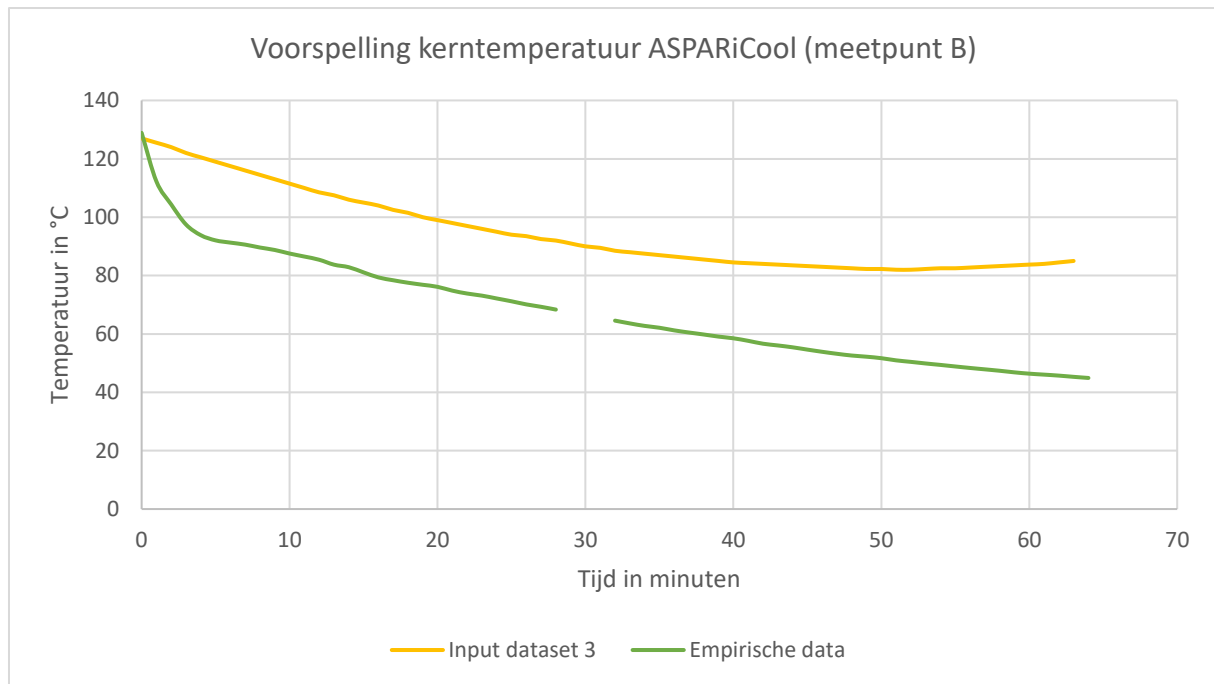
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	11/28/2019
Tijd	(mm:ss)	09:26
Omgevingstemperatuur	°C	9
Windsnelheid	km/h	23
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Volledig bewolkt
Breedtegraad	°	52
Type asfaltmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	50
Starttemperatuur	°C	150
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Nat Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	11

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 22
Laagdikte	mm	50
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	11
Windsnelheid	km/h	23
Omgevingstemperatuur	°C	9
Weer/zonnestraling	W/m ²	0
Regen	mm	0,5

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,984	13,90
ASPARiCool (input dataset 1)	0,501	57,06
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,957	39,59
ASPARiCool (input dataset 2)	0,959	34,80
ASPARiCool (input dataset 3)	0,968	28,18

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 6-2

Datum: 28 november 2019
Locatie: Amsterdamseweg, Arnhem
Meetpunt: D

Verantwoording meetpunt

Als basis voor de voorspellingen is gekozen voor meetpunt D, omdat daarvoor de meest betrouwbare data beschikbaar is. De metingen op punten B en C gingen mis en meetpunt A ligt in een tunnel. Echter is niet bekend in hoeverre de omstandigheden in de tunnel verschillen met die erbuiten, waardoor sommige parameters niet bekend zijn.

Input

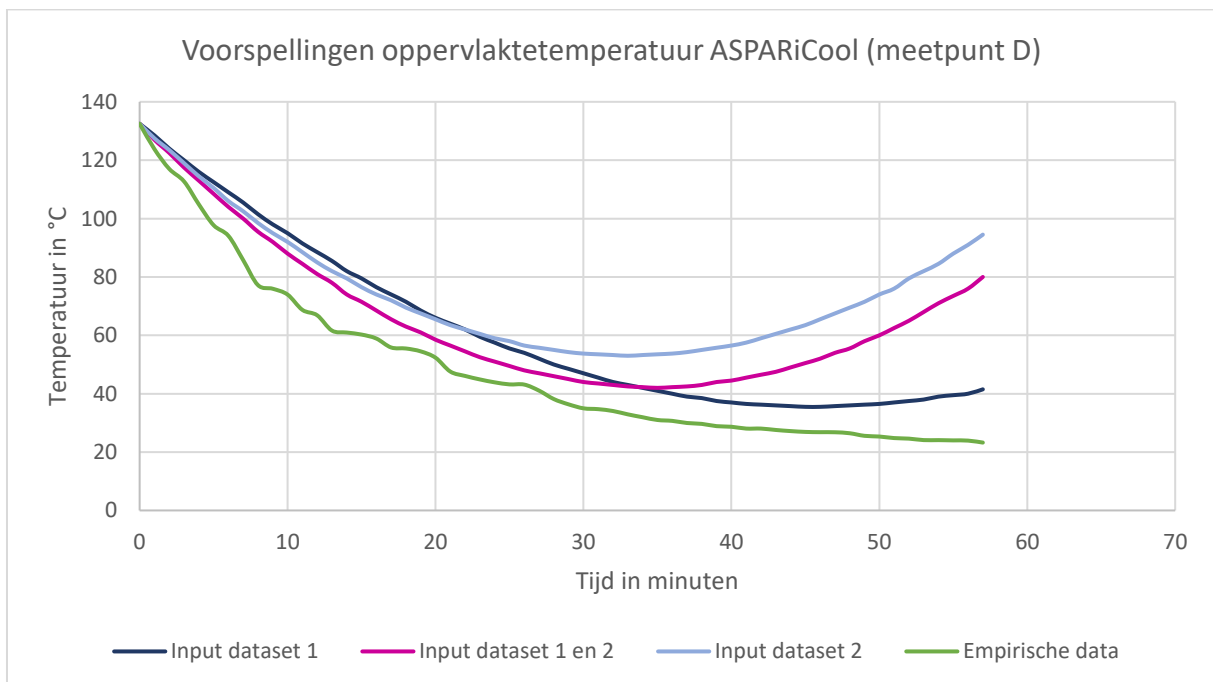
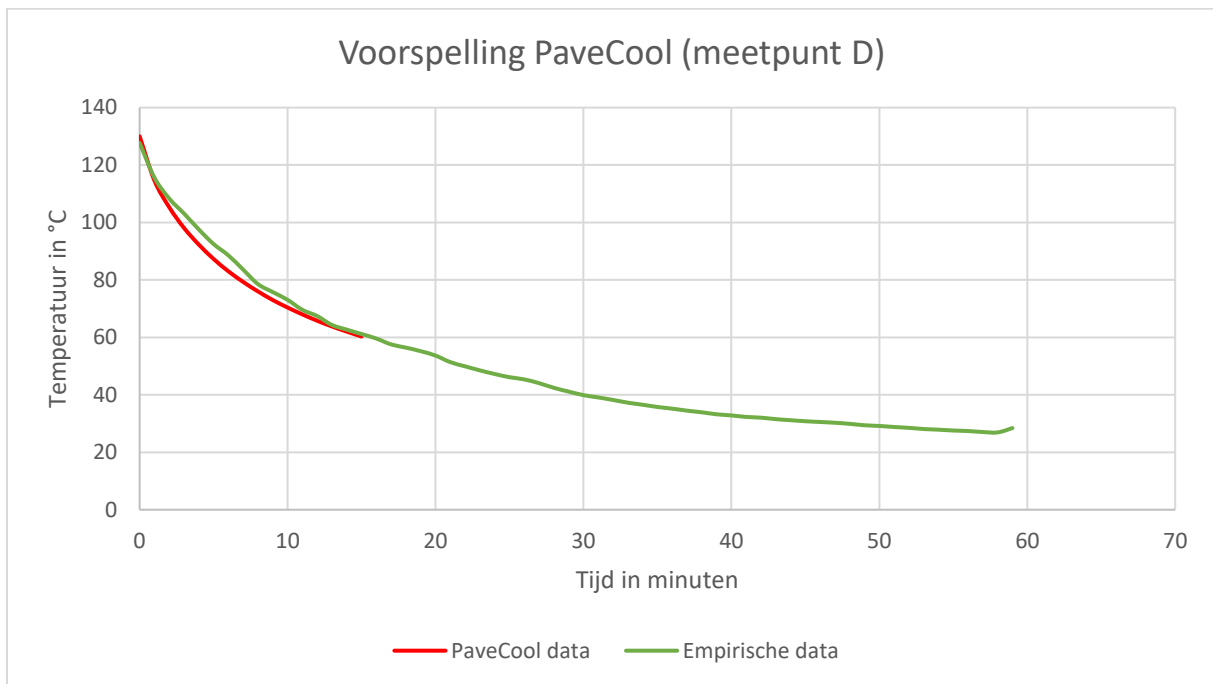
PaveCool

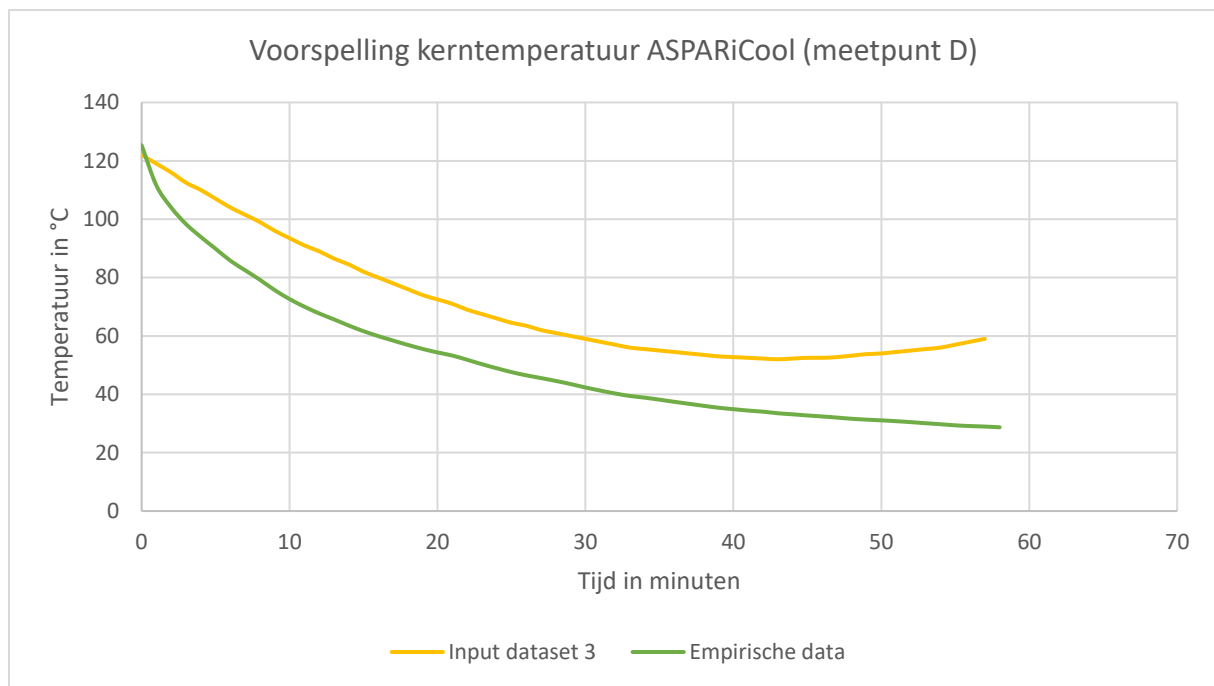
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	11/28/2019
Tijd	(mm:ss)	14:44
Omgevingstemperatuur	°C	10
Windsnelheid	km/h	23
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Volledig bewolkt
Breedtegraad	°	52
Type asfaltmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	30
Starttemperatuur	°C	130
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Nat Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	19

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 8
Laagdikte	mm	30
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	19
Windsnelheid	km/h	23
Omgevingstemperatuur	°C	10
Weer/zonnestraling	W/m ²	0
Regen	mm	0,5

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,994	3,28
ASPARiCool (input dataset 1)	0,985	13,96
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,886	21,48
ASPARiCool (input dataset 2)	0,818	30,46
ASPARiCool (input dataset 3)	0,984	20,56

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 7-1

Datum: 6 december 2019
Locatie: IPC Groene Ruimte, Arnhem
Meetpunt: A

Verantwoording meetpunt

Voor meetpunt A is meer data beschikbaar dan voor meetpunt B. Daarbij zijn de omstandigheden voor beide meetpunten vrijwel hetzelfde, omdat ze bijna volledig tegelijkertijd zijn gemeten. Daarom wordt voor deze voorspellings meetpunt A als basis genomen.

Input

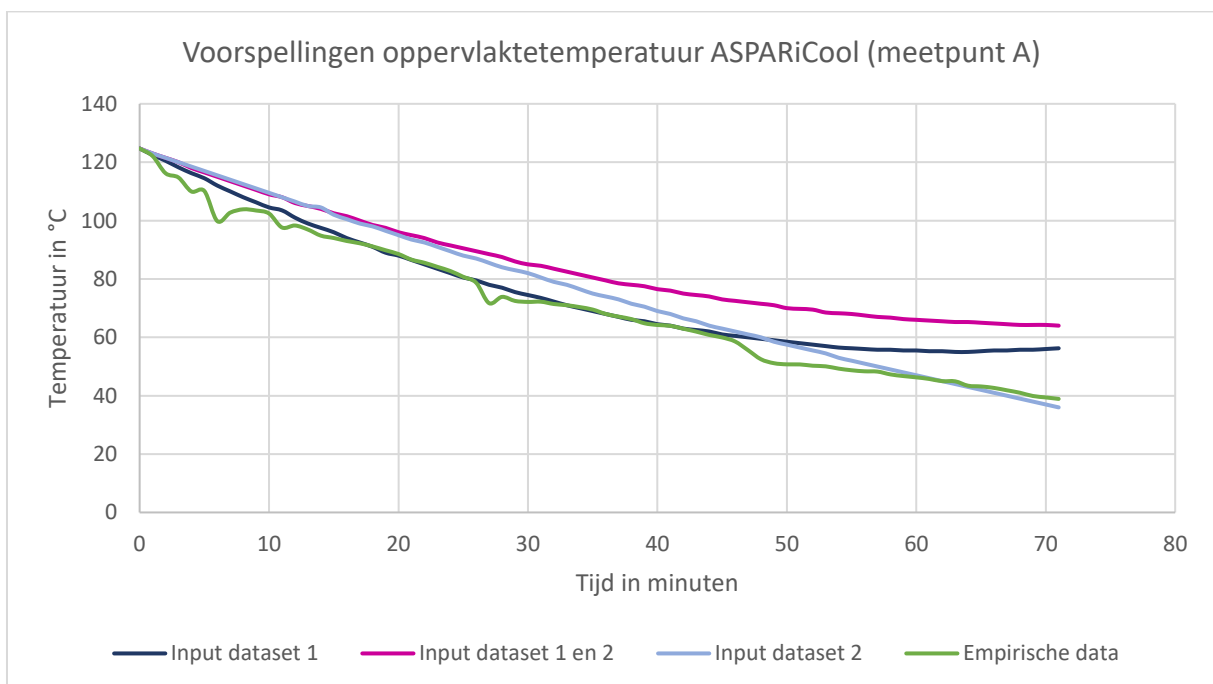
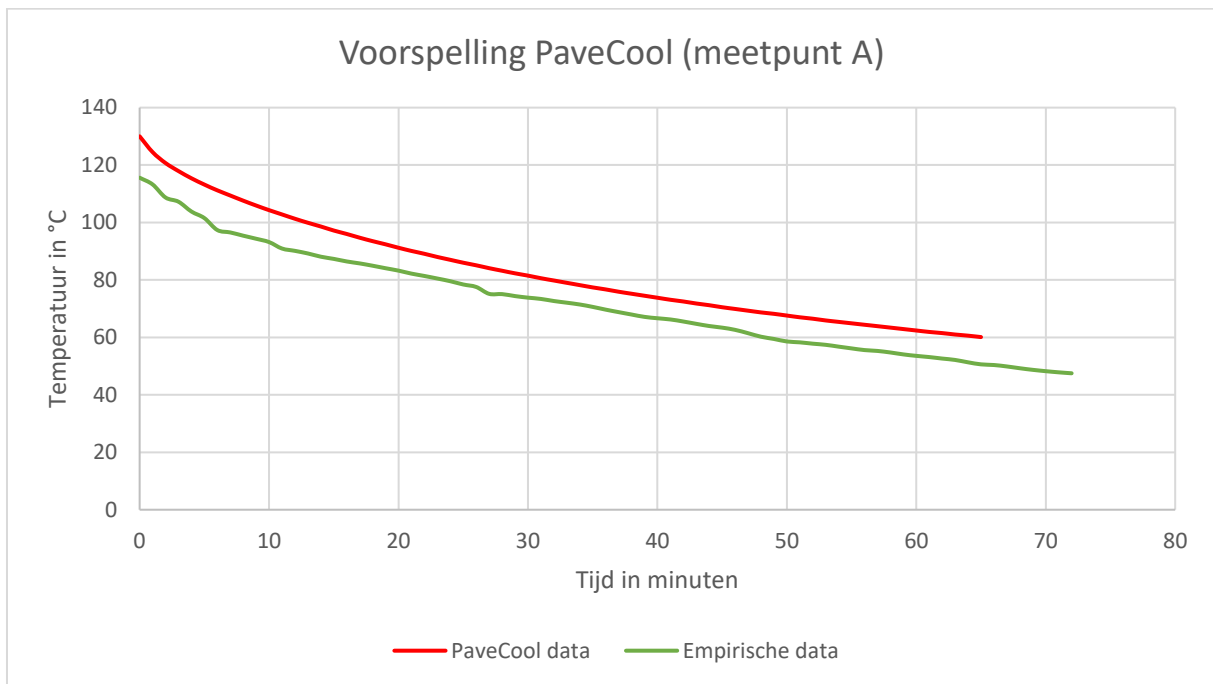
PaveCool

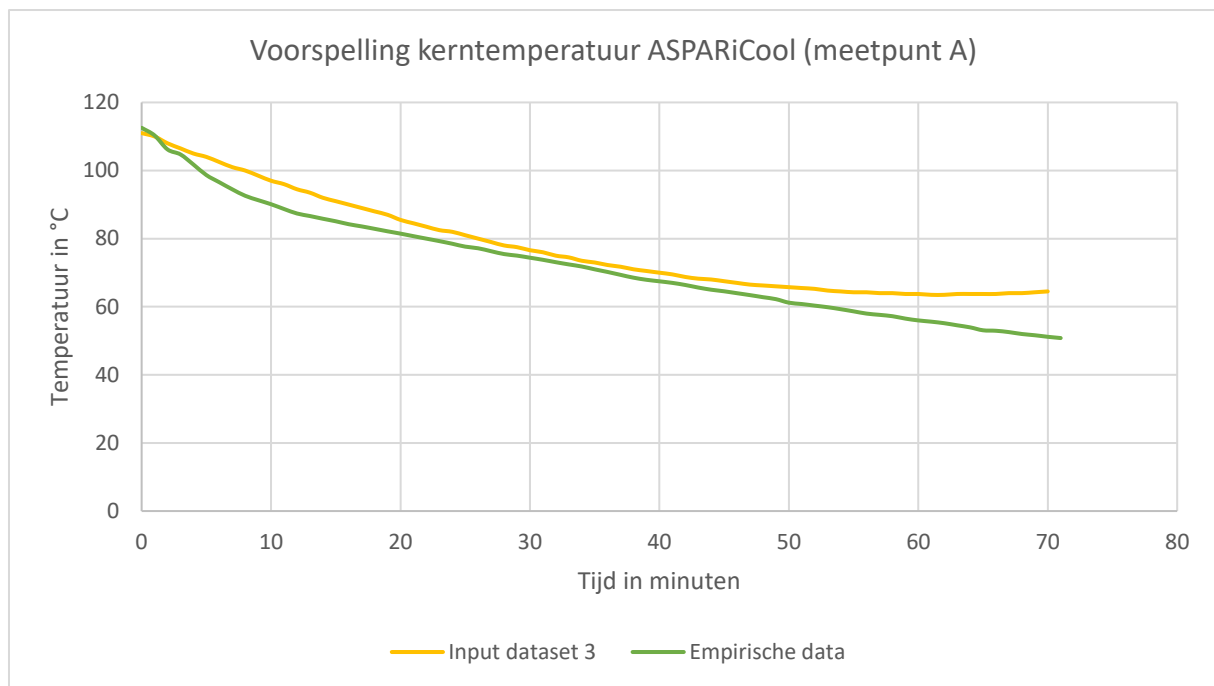
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	12/06/2019
Tijd	(mm:ss)	09:18
Omgevingstemperatuur	°C	5
Windsnelheid	km/h	8
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Volledig bewolkt
Breedtegraad	°	52
Type asfalmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	80
Starttemperatuur	°C	130
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Zand/gravel
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Nat Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	5

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfalmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 22
Laagdikte	mm	80
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Zand
Temperatuur onderlaag	°C	5
Windsnelheid	km/h	8
Omgevingstemperatuur	°C	5
Weer/zonnestraling	W/m ²	0
Regen	mm	1,1

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,997	9,10
ASPARiCool (input dataset 1)	0,982	6,69
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,992	14,75
ASPARiCool (input dataset 2)	0,992	6,43
ASPARiCool (input dataset 3)	0,983	6,46

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 7-2

Datum: 6 december 2019
Locatie: IPC Groene Ruimte, Arnhem
Meetpunt: A

Verantwoording meetpunt

Voor meetpunt A is meer data beschikbaar dan voor meetpunt B. Daarbij zijn de omstandigheden voor beide meetpunten vrijwel hetzelfde, omdat ze bijna volledig tegelijkertijd zijn gemeten. Daarom wordt voor deze voorspellings meetpunt A als basis genomen.

Input

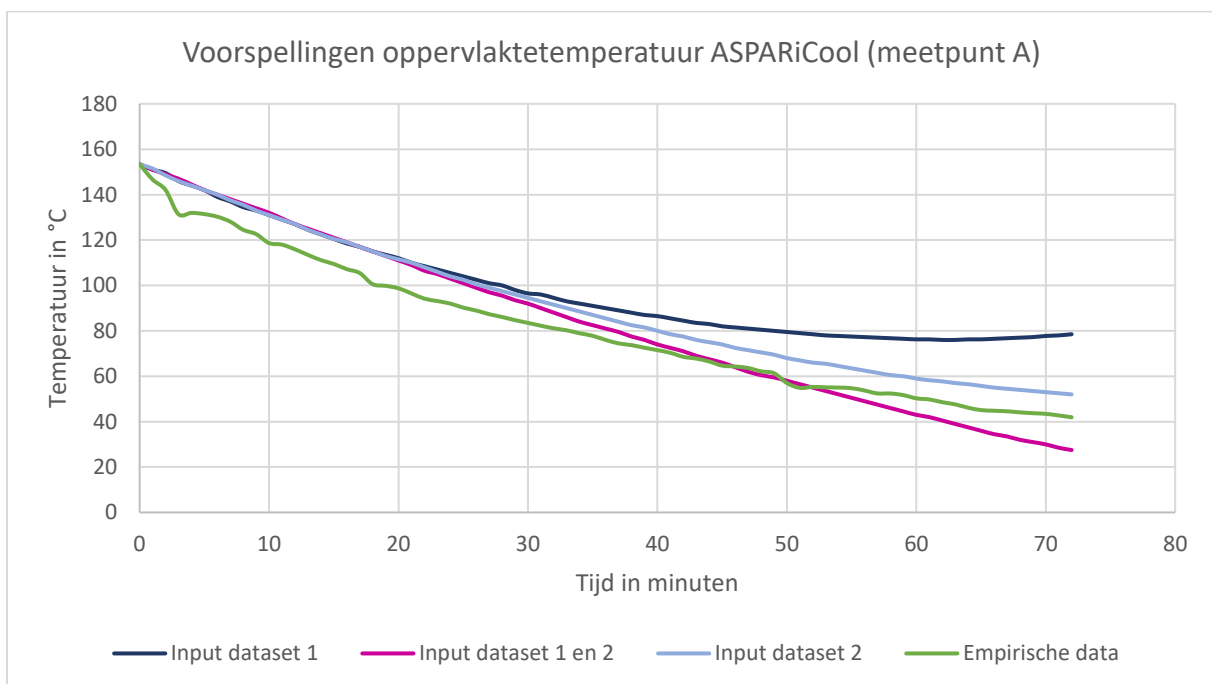
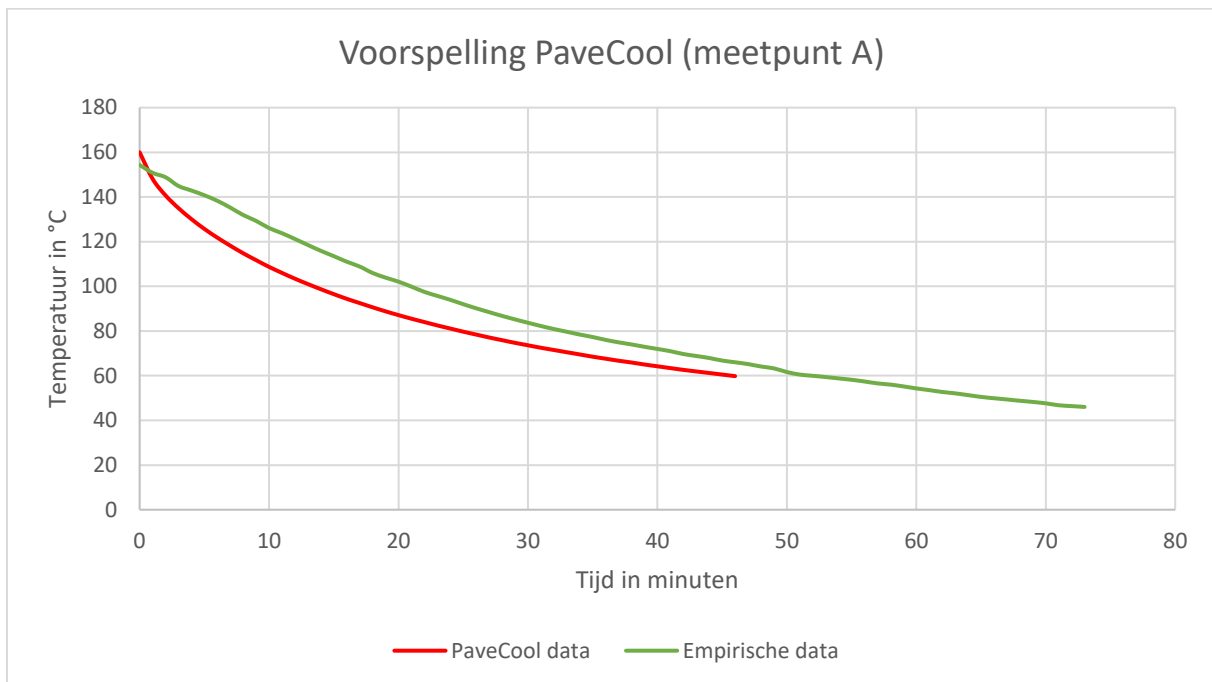
PaveCool

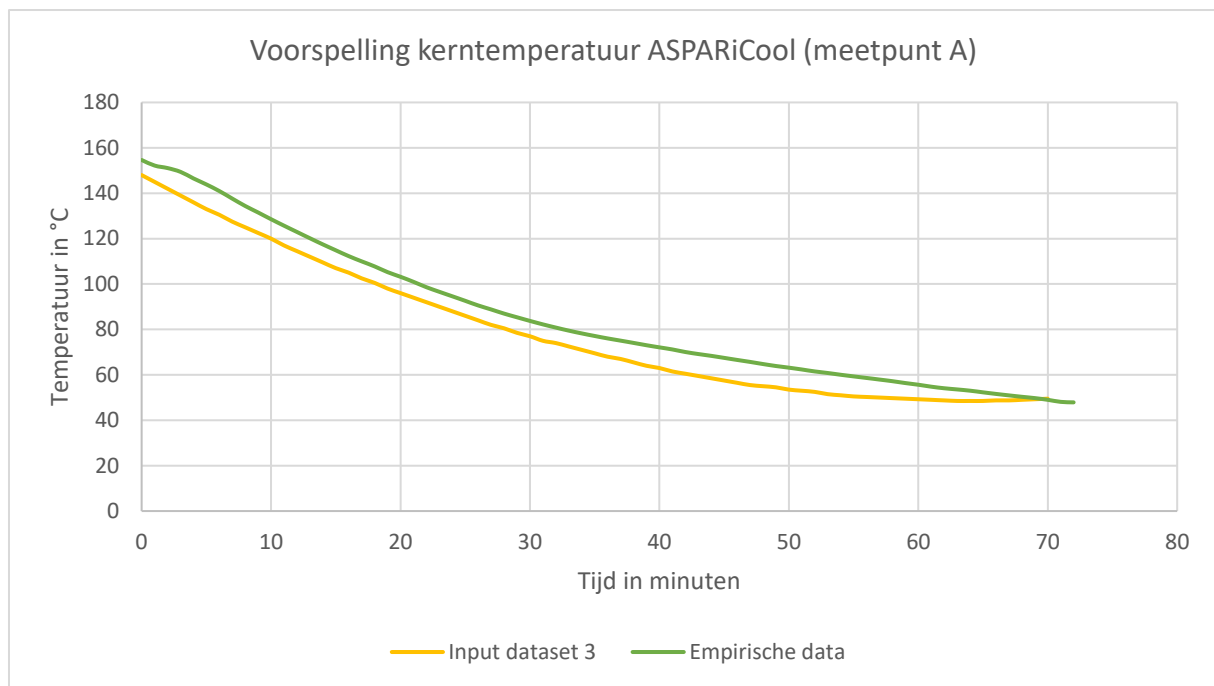
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	12/06/2019
Tijd	(mm:ss)	11:49
Omgevingstemperatuur	°C	6
Windsnelheid	km/h	8
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Volledig bewolkt
Breedtegraad	°	52
Type asfalmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	50
Starttemperatuur	°C	160
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Nat Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	6

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 16
Laagdikte	mm	50
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	6
Windsnelheid	km/h	8
Omgevingstemperatuur	°C	6
Weer/zonnestraling	W/m ²	0
Regen	mm	1,1

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,984	12,48
ASPARiCool (input dataset 1)	0,986	19,32
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,991	8,92
ASPARiCool (input dataset 2)	0,998	10,29
ASPARiCool (input dataset 3)	0,997	5,08

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 7-3

Datum: 6 december 2019
Locatie: IPC Groene Ruimte, Arnhem
Meetpunt: B

Verantwoording meetpunt

Voor meetpunt B is meer data beschikbaar dan voor meetpunt A. Daarbij zijn de omstandigheden voor beide meetpunten vrijwel hetzelfde, omdat ze bijna volledig tegelijkertijd zijn gemeten. Daarom wordt voor deze voorspellings meetpunt B als basis genomen.

Input

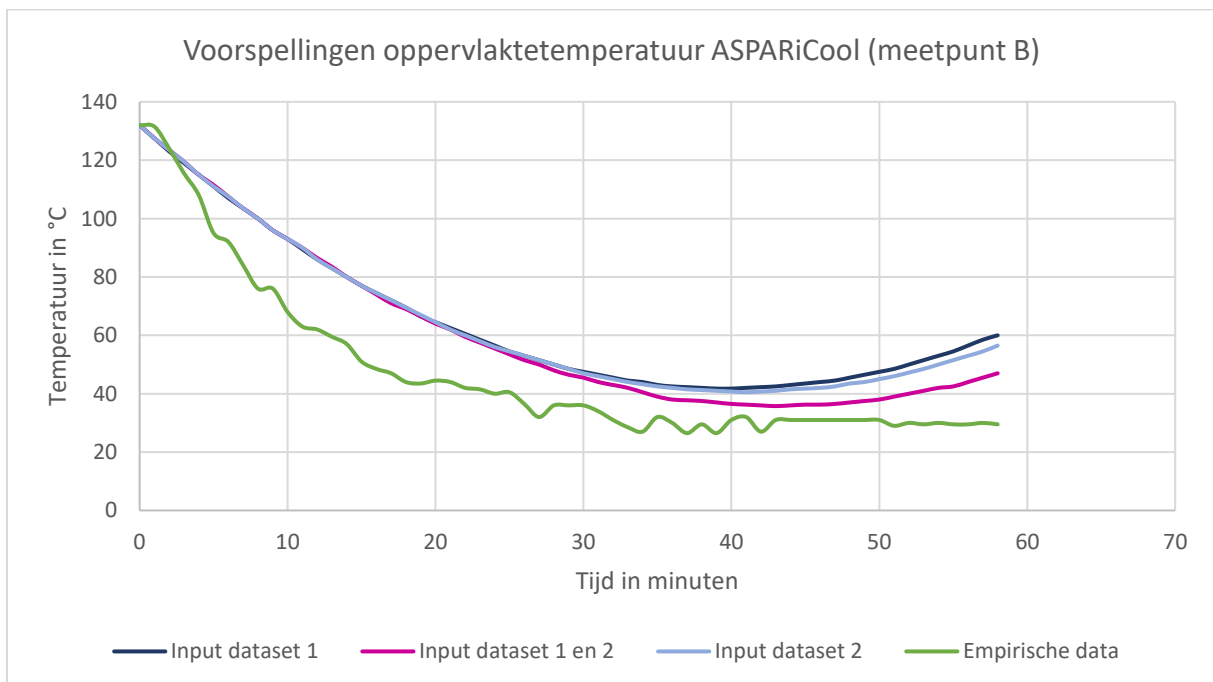
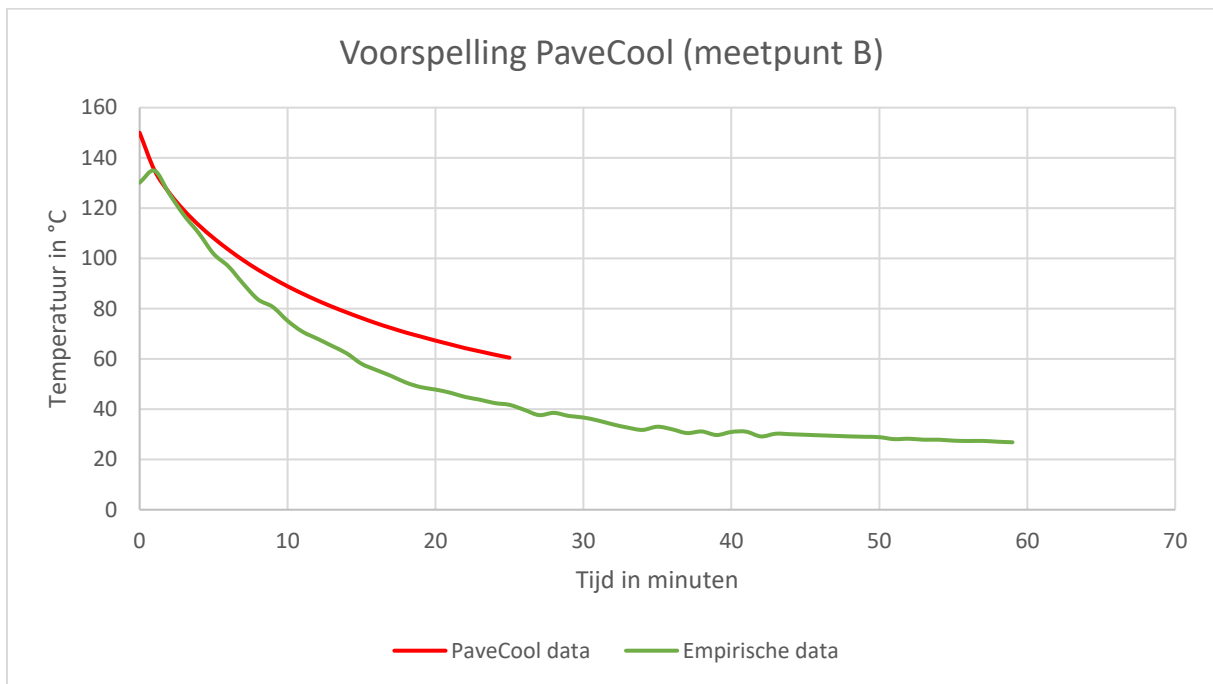
PaveCool

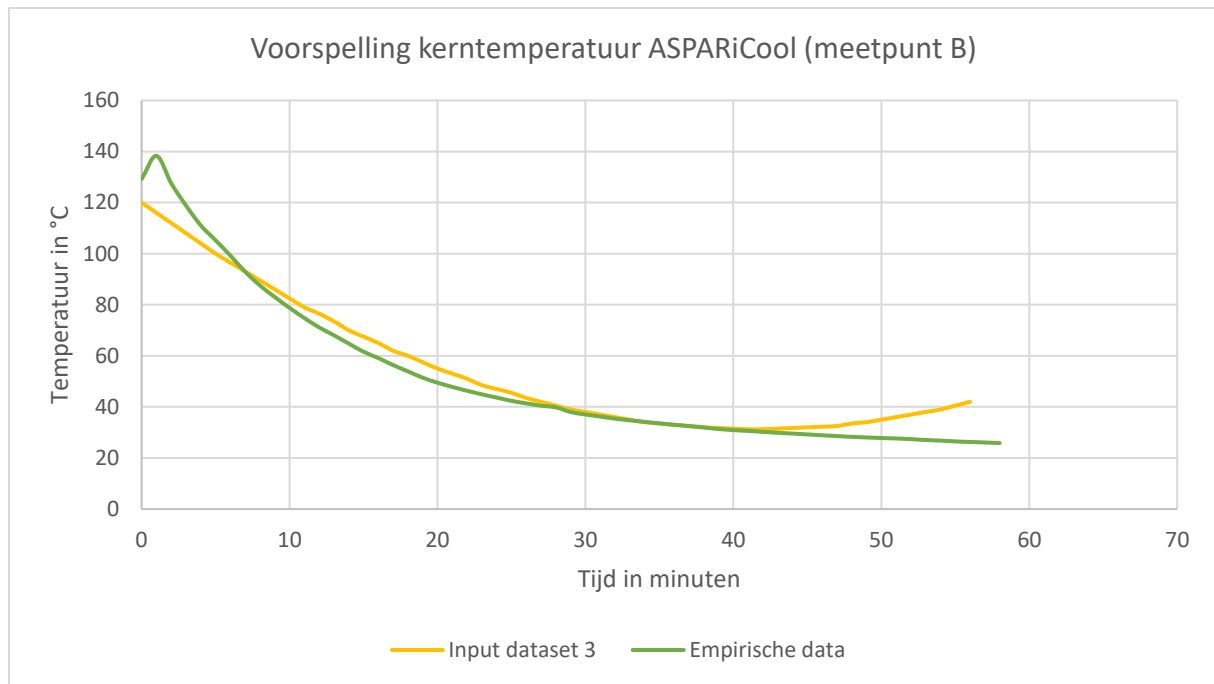
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	12/06/2019
Tijd	(mm:ss)	15:08
Omgevingstemperatuur	°C	7
Windsnelheid	km/h	8
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Volledig bewolkt
Breedtegraad	°	52
Type asfalmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	SMA
Laagdikte	mm	35
Starttemperatuur	°C	150
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Nat Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	7

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfalmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	SMA-NL 11B
Laagdikte	mm	35
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	7
Windsnelheid	km/h	8
Omgevingstemperatuur	°C	7
Weer/zonnestraling	W/m ²	0
Regen	mm	1,1

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,988	15,28
ASPARiCool (input dataset 1)	0,969	18,28
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,965	15,10
ASPARiCool (input dataset 2)	0,970	17,40
ASPARiCool (input dataset 3)	0,984	7,68

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 8-1

Datum: 17 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem
Meetpunt: B

Verantwoording meetpunt

Ondanks dat niet alle thermokoppels goed functioneerde op meetpunt B wordt deze toch als basis genomen voor de voorspellings. Op meetpunt A functioneerden nog meer thermokoppels niet, waardoor voor dat punt nog minder data beschikbaar is dan op meetpunt B.

Input

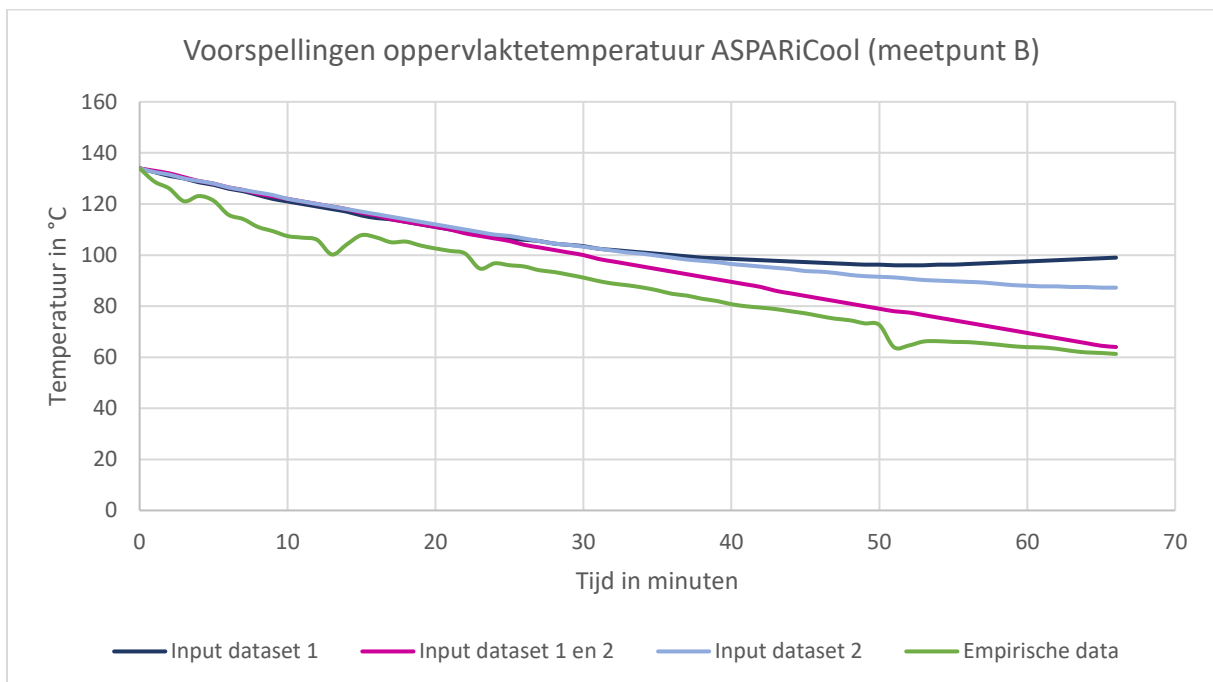
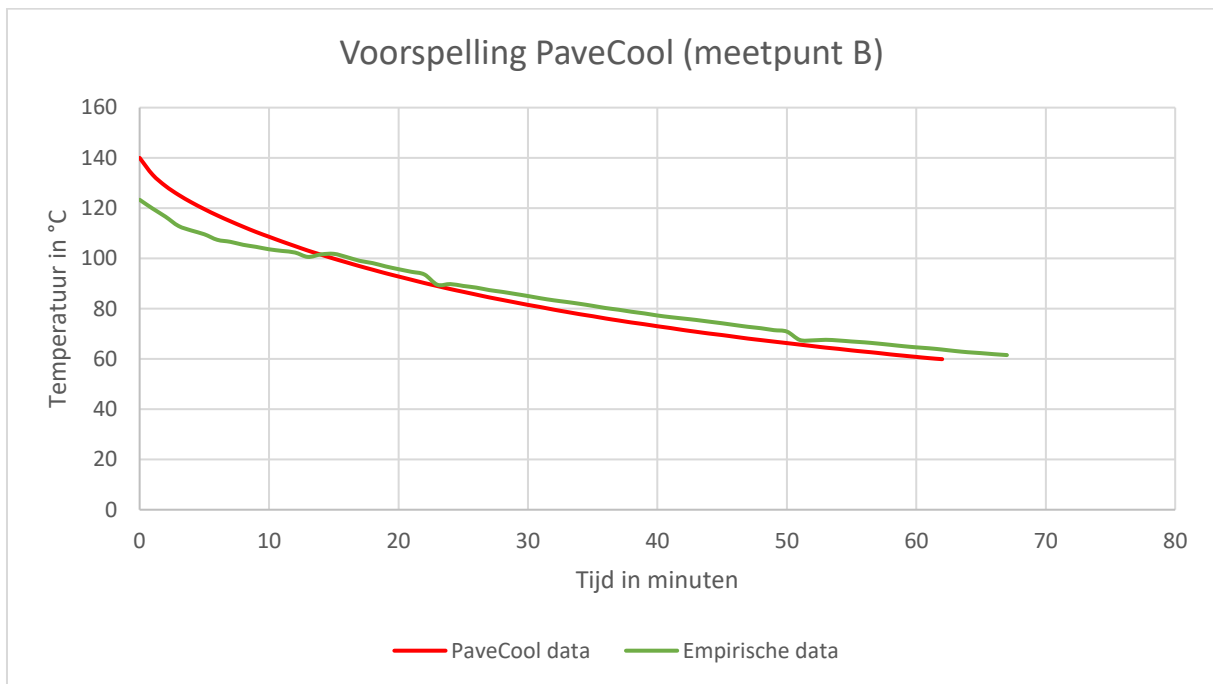
PaveCool

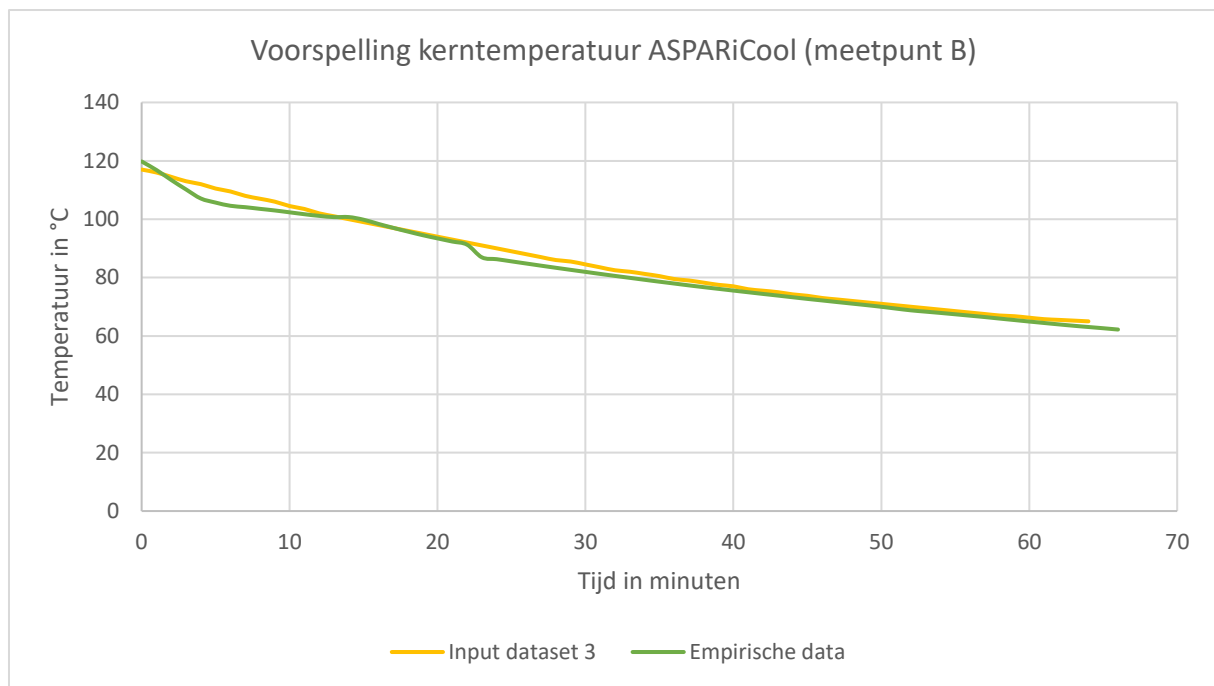
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	12/17/2019
Tijd	(mm:ss)	09:48
Omgevingstemperatuur	°C	9
Windsnelheid	km/h	20
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Nevelig
Breedtegraad	°	52
Type asfalmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	70
Starttemperatuur	°C	140
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Zand/gravel
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	7

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 22
Laagdikte	mm	70
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Zand
Temperatuur onderlaag	°C	7
Windsnelheid	km/h	20
Omgevingstemperatuur	°C	9
Weer/zonnestraling	W/m ²	3
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,989	5,53
ASPARiCool (input dataset 1)	0,937	20,26
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,989	9,00
ASPARiCool (input dataset 2)	0,984	16,60
ASPARiCool (input dataset 3)	0,996	3,59

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 8-3

Datum: 17 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem
Meetpunt: C

Verantwoording meetpunt

Voor deze voorspellings- en vergelijkingsverslagen is meetpunt C als basis genomen, omdat hiervoor de meeste data beschikbaar is. Wel waren de weersomstandigheden tijdens deze meting wat meer veranderlijk ten opzichte van de meting op punt A, maar in dit geval is aangenomen dat dit geen aanzienlijke invloed heeft op de resultaten.

Input

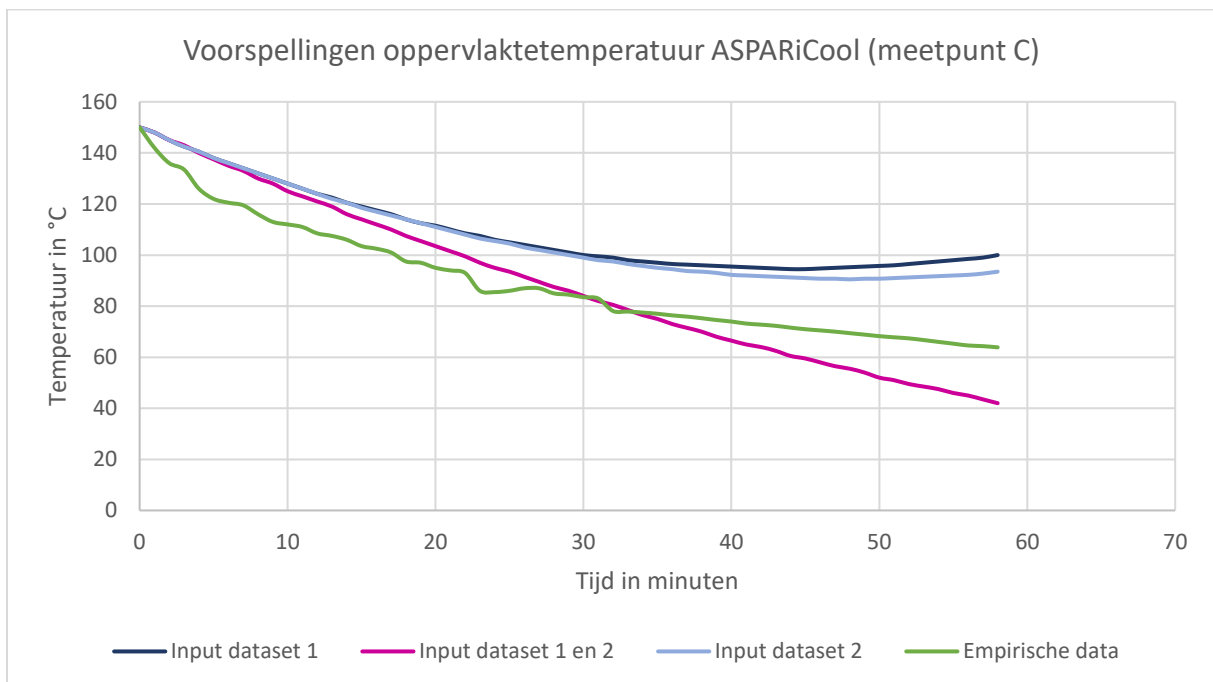
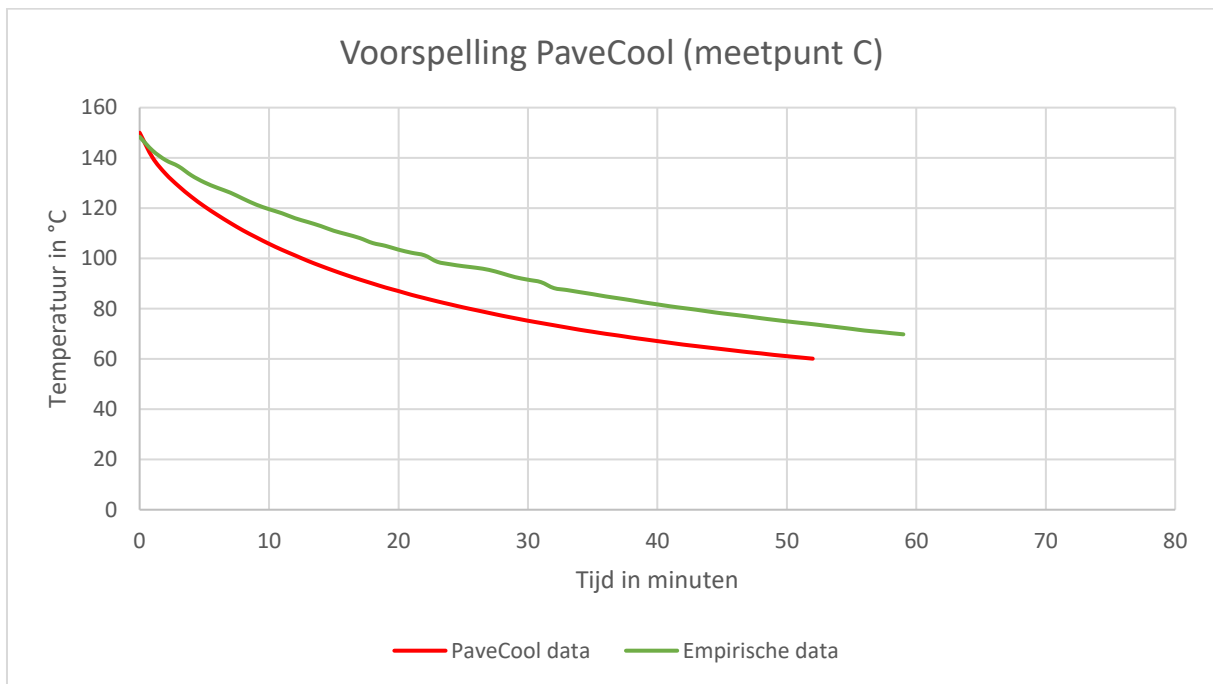
PaveCool

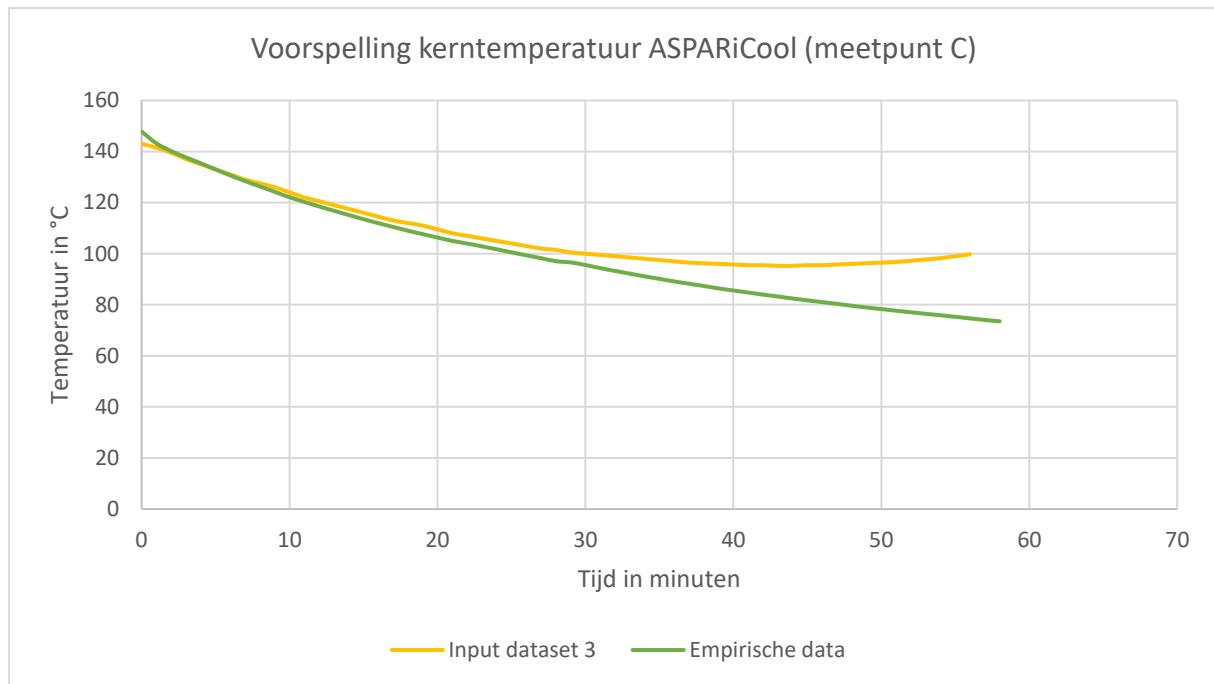
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	12/17/2019
Tijd	(mm:ss)	14:42
Omgevingstemperatuur	°C	15
Windsnelheid	km/h	20
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	75% bewolking
Breedtegraad	°	52
Type asfaltmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	50
Starttemperatuur	°C	150
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	28

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 16
Laagdikte	mm	50
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	28
Windsnelheid	km/h	20
Omgevingstemperatuur	°C	15
Weer/zonnestraling	W/m ²	3
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,993	14,37
ASPARiCool (input dataset 1)	0,978	20,86
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,976	11,43
ASPARiCool (input dataset 2)	0,989	18,41
ASPARiCool (input dataset 3)	0,972	11,31

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 9-1

Datum: 19 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem
Meetpunt: B

Verantwoording meetpunt

Meetpunt B is het enige meetpunt voor deze meting en is uitgevoerd op dezelfde laag als die van verslag 8-3.

Input

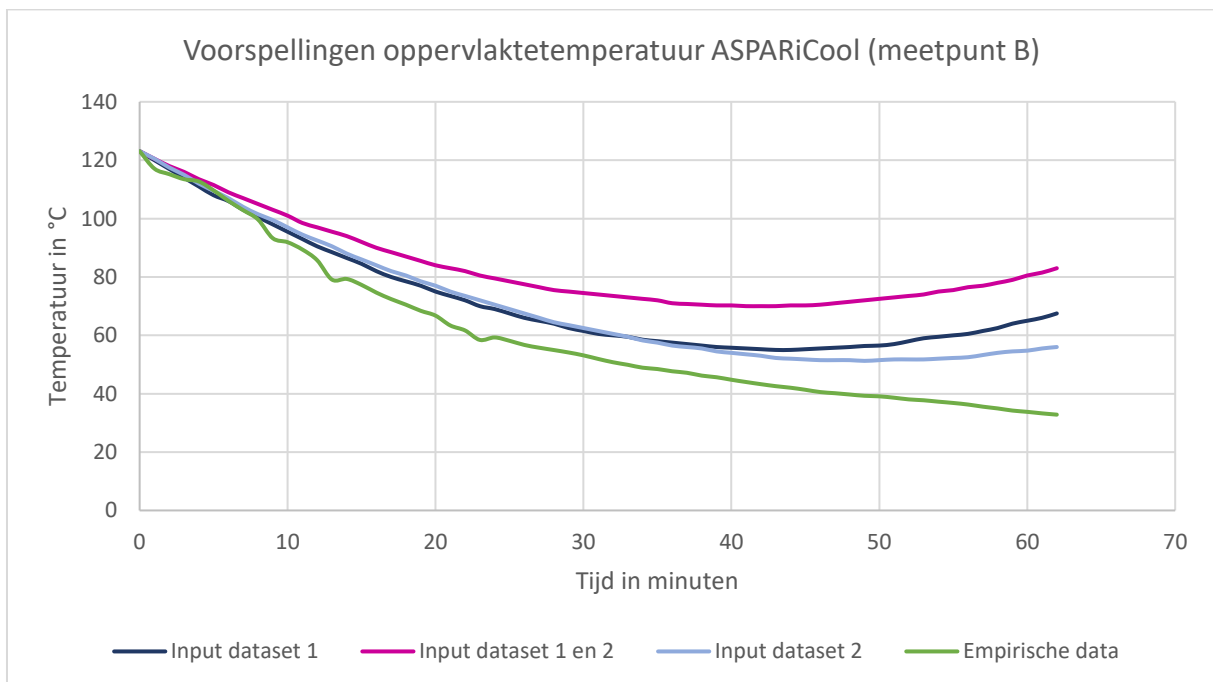
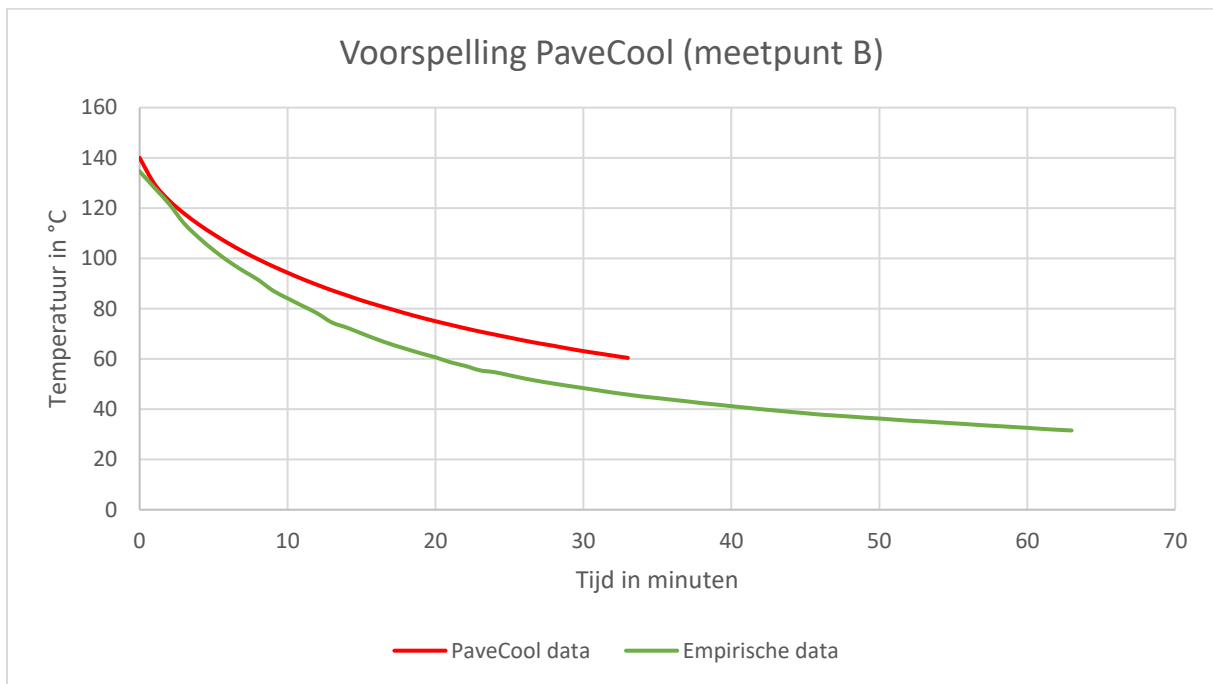
PaveCool

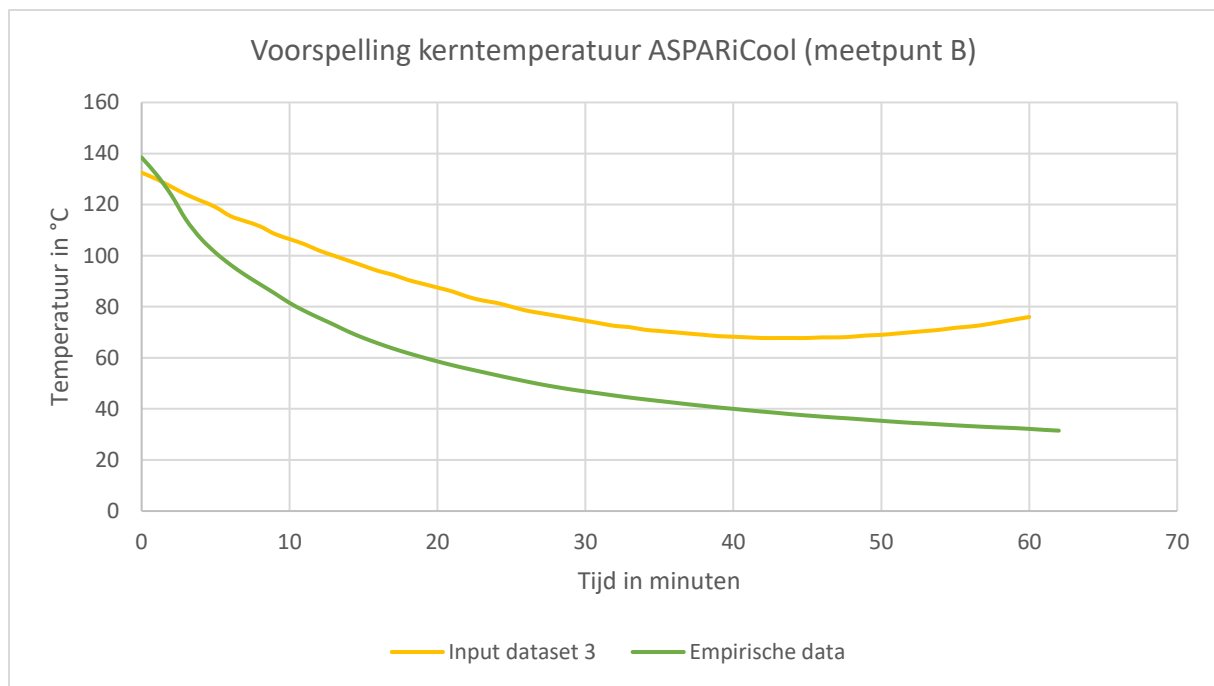
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	12/19/2019
Tijd	(mm:ss)	09:16
Omgevingstemperatuur	°C	8
Windsnelheid	km/h	20
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Helder
Breedtegraad	°	52
Type asfalmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	Dense-graded
Laagdikte	mm	50
Starttemperatuur	°C	140
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	9

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfalmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	AC 16
Laagdikte	mm	50
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	9
Windsnelheid	km/h	20
Omgevingstemperatuur	°C	8
Weer/zonnestraling	W/m ²	5
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,999	12,27
ASPARiCool (input dataset 1)	0,967	14,34
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,947	25,85
ASPARiCool (input dataset 2)	0,991	11,25
ASPARiCool (input dataset 3)	0,979	30,95

Voorspellings- en vergelijkingsverslag 9-2

Datum: 19 december 2019
Locatie: Pieter Calandweg, Arnhem
Meetpunt: B

Verantwoording meetpunt

Op meetpunt A is alleen de oppervlaktetemperatuur gemeten, omdat de thermokoppels tijdens deze meting niet werkte. Op meetpunt B zijn de kerntemperaturen wel gemeten (samen met de oppervlaktetemperatuur), dus op dit punt is wel vrijwel alle data beschikbaar. Daarom is meetpunt B als basis genomen voor de voorspellings- en vergelijkingsverslagen op dit project.

Input

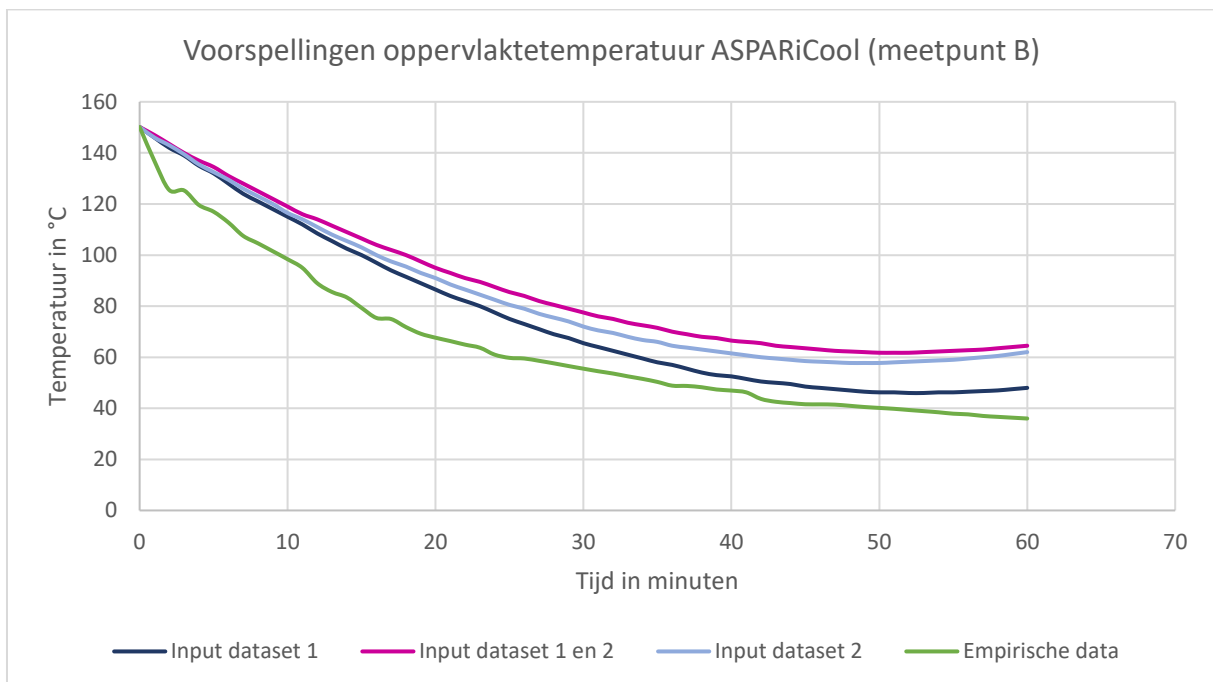
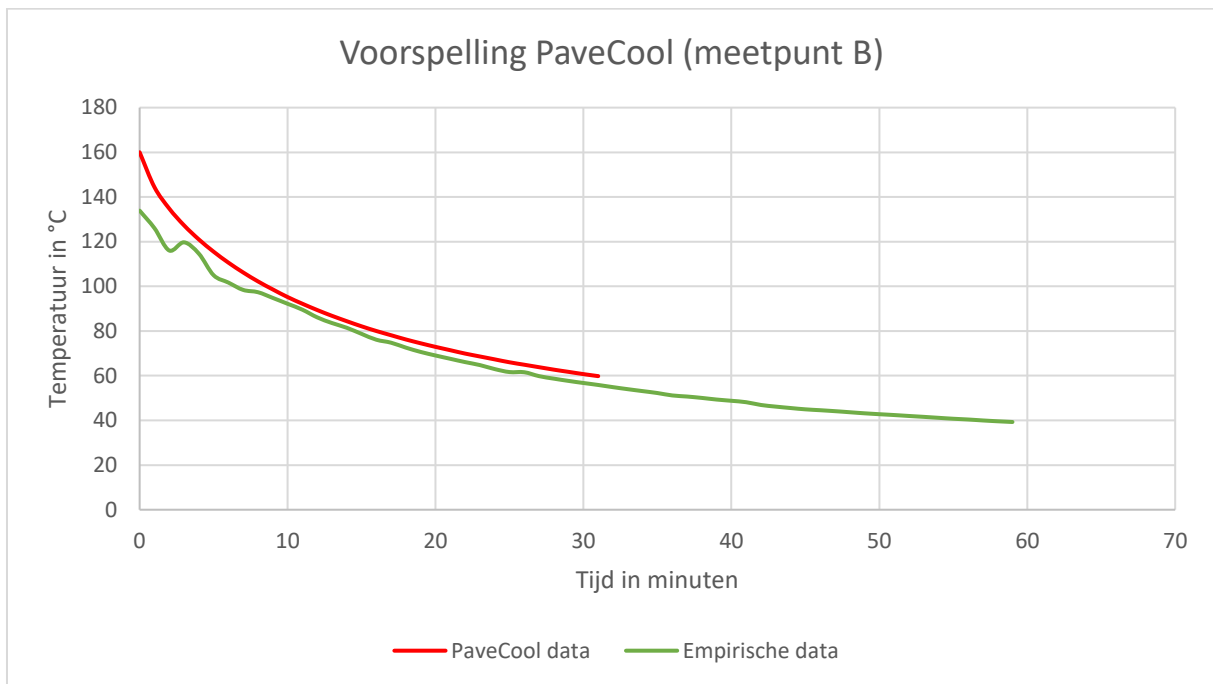
PaveCool

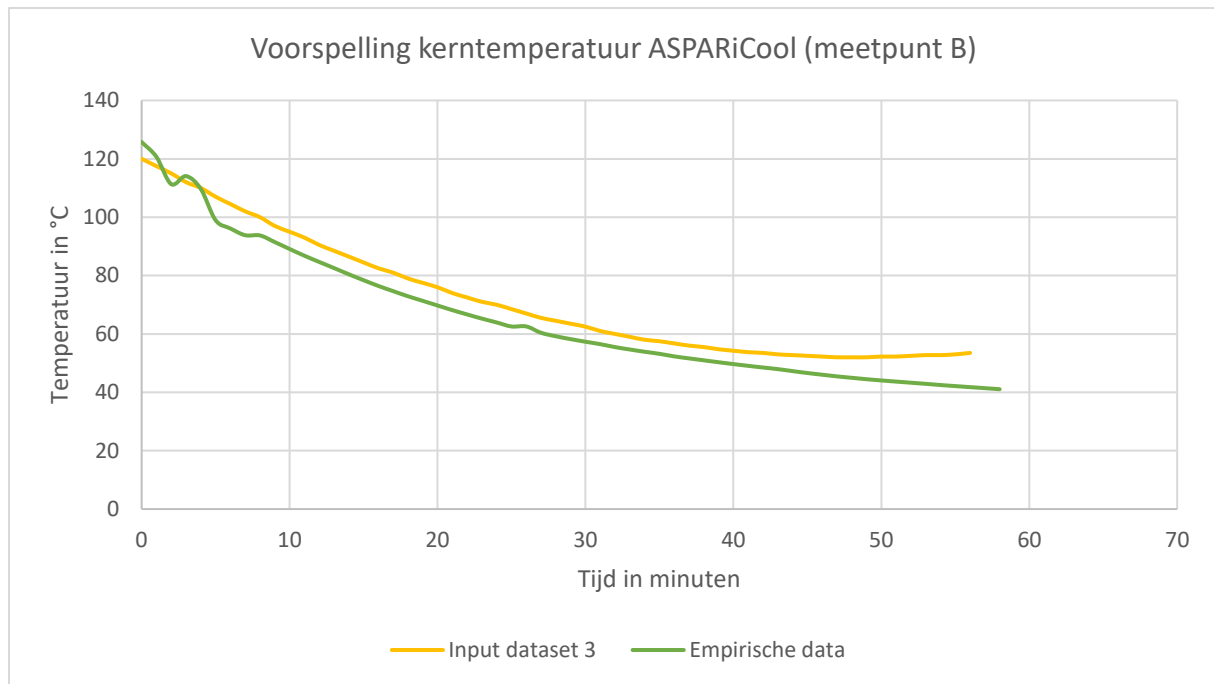
Input parameter	Eenheid	Waarde
Datum	(mm/dd/jjjj)	12/19/2019
Tijd	(mm:ss)	14:21
Omgevingstemperatuur	°C	17
Windsnelheid	km/h	20
Bewolking	Helder, nevelig, 50% bewolking, 75% bewolking of volledig bewolkt	Helder
Breedtegraad	°	52
Type asfaltmix	'Dense-graded'/asfaltbeton of SMA	SMA
Laagdikte	mm	35
Starttemperatuur	°C	160
Type onderlaag	Asfalt, beton, zand/gravel of slib/klei	Asfalt
Staat onderlaag	Droog of nat; bevroren of niet bevroren	Droog Niet-bevroren
Temperatuur onderlaag	°C	15

ASPARiCool

Input parameter	Eenheid	Waarde
Asfaltmengsel	Verschillende varianten asfaltbeton, SMA en ZOAB	SMA-NL 11B
Laagdikte	mm	35
Type onderlaag	Zand, asfalt of steen	Asfalt
Temperatuur onderlaag	°C	15
Windsnelheid	km/h	20
Omgevingstemperatuur	°C	17
Weer/zonnestraling	W/m ²	5
Regen	mm	0

Output





Vergelijking

	Correlatiecoëfficiënt	RMSE
PaveCool	0,991	8,02
ASPARiCool (input dataset 1)	0,989	12,82
ASPARiCool (input dataset 1 en 2)	0,990	22,74
ASPARiCool (input dataset 2)	0,990	18,87
ASPARiCool (input dataset 3)	0,993	8,59

Bijlage D: Vergelijkingswaarden en nauwkeurigheid

D.1. Correlatiecoëfficiënten en RMSE-waarden

Tabel 34: Correlatiecoëfficiënten per voorspelde meting

Meting	Punt	Correlatiecoëfficiënt				
		PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
			1	1 + 2	2	3
1	C/D	0,998	0,986	0,976	0,983	0,971
2	C	0,976	0,976	0,994	0,962	0,949
3	A	0,977	0,871	0,994	0,993	0,997
5	A	0,985	0,968	0,992	0,984	0,999
6-1	B	0,984	0,501	0,957	0,959	0,968
6-2	D	0,994	0,985	0,886	0,818	0,984
7-1	A	0,997	0,982	0,992	0,992	0,983
7-2	A	0,984	0,986	0,991	0,998	0,997
7-3	B	0,988	0,969	0,965	0,970	0,984
8-1	B	0,989	0,937	0,989	0,984	0,996
8-3	C	0,993	0,978	0,976	0,989	0,972
9-1	B	0,999	0,967	0,947	0,991	0,979
9-2	B	0,991	0,989	0,990	0,990	0,993
Gem:		0,989	0,931	0,973	0,970	0,983

Tabel 35: RMSE-waarden per voorspelde meting

Meting	Punt	RMSE				
		PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
			1	1 + 2	2	3
1	C/D	8,98	23,82	10,30	14,17	6,53
2	C	22,17	15,38	20,24	18,11	23,18
3	A	17,31	30,52	6,91	6,59	5,64
5	A	4,67	14,98	5,77	8,39	2,15
6-1	B	13,90	57,06	39,59	34,80	28,18
6-2	D	3,28	13,96	21,48	30,46	20,56
7-1	A	9,10	6,69	14,75	6,43	6,46
7-2	A	12,48	19,31	8,92	10,29	5,08
7-3	B	15,28	18,28	15,10	17,40	7,68
8-1	B	5,53	20,26	9,00	16,60	3,59
8-3	C	14,37	20,86	11,43	18,41	11,31
9-1	B	12,27	14,34	25,85	11,25	30,95
9-2	B	8,02	12,82	22,74	18,87	8,59
Gem:		11,34	20,64	16,31	16,29	12,30

D.2. Nauwkeurigheid per voorspelling

Tabel 36: Nauwkeurigheid verloop per voorspelling

Meting	Punt	Nauwkeurigheid verloop voorspellingen*				
		PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
			1	1 + 2	2	3
1	C/D	I	I	I	I	I
2	C	I	I	I	I	I
3	A	I	II	I	I	I
5	A	I	I	I	I	I
6-1	B	I	III	I	I	I
6-2	D	I	I	II	II	I
7-1	A	I	I	I	I	I
7-2	A	I	I	I	I	I
7-3	B	I	I	I	I	I
8-1	B	I	I	I	I	I
8-3	C	I	I	I	I	I
9-1	B	I	I	I	I	I
9-2	B	I	I	I	I	I
Aantal per categorie nauwkeurigheid						
I		13	11	12	12	13
II		0	1	1	1	0
III		0	1	0	0	0
IV		0	0	0	0	0
V		0	0	0	0	0

*I = Zeer nauwkeurig, II = Nauwkeurig, III = Geringe nauwkeurigheid, IV = Lage nauwkeurigheid, V = Onnauwkeurig

Tabel 37: Nauwkeurigheid temperatuurverschil per voorspelling

Meting	Punt	Nauwkeurigheid temp. verschil voorspellingen*				
		PaveCool	ASPARiCool, dataset:			
			1	1 + 2	2	3
1	C/D	II	IV	III	III	II
2	C	IV	III	IV	III	IV
3	A	III	IV	II	II	II
5	A	I	III	II	II	I
6-1	B	III	IV	IV	IV	IV
6-2	D	I	III	IV	IV	IV
7-1	A	II	II	III	II	II
7-2	A	III	III	II	III	II
7-3	B	III	III	III	III	II
8-1	B	II	IV	II	III	II
8-3	C	III	IV	III	III	III
9-1	B	III	III	IV	III	IV
9-2	B	II	III	IV	III	II
Aantal per categorie nauwkeurigheid						
I		2	0	0	0	1
II		4	1	4	3	7
III		6	7	4	8	1
IV		1	5	5	2	4

*I = Zeer nauwkeurig, II = Nauwkeurig, III = Geringe nauwkeurigheid, IV = Onnauwkeurig

Bijlage E: Voorbeelden en toelichtingen berekeningen

In dit verslag zijn veel getallen en grafieken te vinden die met behulp van Excel zijn berekend en opgesteld. Enkele voorbeelden van deze berekeningen en toelichtingen op grafieken zijn in deze bijlage te vinden.

Berekening hellingen/afkoelsnelheden

Voor de analyse van de gemeten en voorspelde afkoelcurves zijn de gemiddelde hellingen/afkoelsnelheden geraadpleegd. Deze komen voor het eerst voor in **Tabel 2** op pagina 41. Hieronder is deze tabel nogmaals weergegeven:

Meting: (Positie Figuur 18):	8-2A (linksboven)		6-1B (rechtsboven)		9-2B (linksonder)		3C (rechtsonder)	
	kern	opp.	kern	opp.	kern	opp.	kern	opp.
Helling $0 \leq t \leq 10$	-0,59	-2,61	-4,01	-6,76	-3,43	-4,86	-2,13	-4,59
Helling $10 < t \leq 20$	-1,32	-1,41	-1,07	-1,30	-1,78	-2,92	-2,27	-2,52
Helling $20 < t \leq 30$	-1,16	-1,30	-0,78	-1,10	-1,15	-1,11	-1,47	-1,19
$T_{opp} \leq T_{kern,gem}$ vanaf:	t = 6		t = 6		t = 19		t = 8	

De hellingen zijn berekend door het gemiddelde te nemen van de som van de verschillen tussen de temperaturen binnen bepaalde tijdsintervallen. Hierbij dient ook vermeld te worden dat in sommige gevallen de grafiek tijdens de eerste paar minuten nog steeg, mogelijk doordat de thermokoppels nog niet in direct contact stonden met het asfalt. Deze stijgingen zijn echter niet meegenomen in de berekeningen, omdat deze stijgende temperaturen nog niet worden beschouwd als de daadwerkelijke temperatuur van het asfalt op dat moment.

Als voorbeeld worden uit bovenstaande tabel de met groen gemarkeerde hellingen van de kerntemperatuur van meting 8-2A berekend. De gemiddelde kerntemperaturen tussen $t=0$ en $t=30$ zijn in onderstaande tabel te vinden.

t	T	t	T	t	T	t	T	t	T	t	T
1	97,39	6	109,87	11	106,39	16	99,55	21	93,19	26	87,29
2	104,80	7	109,61	12	105,02	17	98,24	22	92,05	27	85,64
3	107,29	8	108,99	13	103,61	18	96,81	23	90,97	28	84,35
4	109,17	9	108,23	14	102,22	19	95,42	24	89,86	29	83,17
5	109,92	10	107,46	15	100,89	20	94,32	25	88,69	30	82,21
										31	81,61

De eerste helling die wordt berekend is die tussen $t=0$ en $t=10$. Echter is in bovenstaande temperatuurgegevens te zien dat de grafiek pas daalt vanaf $t=5$. Daarom wordt de helling in dit geval vanaf $t=5$ berekend:

$$\begin{aligned}
 \text{Helling}_{0 \leq t \leq 10} &= ((T_6 - T_5) + (T_7 - T_6) + (T_8 - T_7) + (T_9 - T_8) + (T_{10} - T_9) + (T_{11} - T_{10})) \div n \\
 &= ((109,87 - 109,92) + (109,61 - 109,87) + (108,99 - 109,61) \\
 &\quad + (108,23 - 108,99) + (107,46 - 108,23) + (106,39 - 107,46)) \div 6 \\
 &= (-0,05 + -0,26 + -0,62 + -0,76 + -0,77 + -1,07) \div 6 = -3,53 \div 6 = -0,59
 \end{aligned}$$

Op dezelfde manier zijn ook de gemiddelde helling tussen $t=10$ en $t=20$ en de gemiddelde helling tussen $t=20$ en $t=30$ berekend:

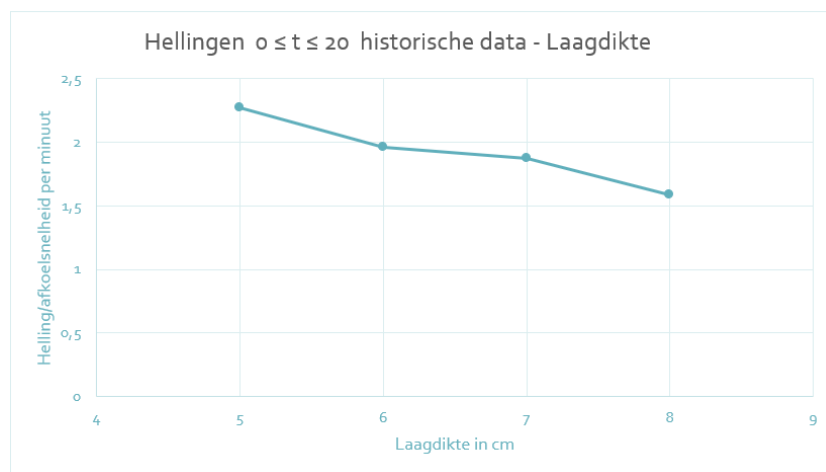
$$\begin{aligned} \text{Helling}_{10 < t \leq 20} &= ((T_{12} - T_{11}) + (T_{13} - T_{12}) + \dots + (T_{21} - T_{20})) \div n \\ &= ((105,02 - 106,09) + (103,61 - 105,02) + \dots + (93,19 - 94,32)) \div 10 \\ &= (-1,37 + -1,41 + -1,39 + -1,33 + -1,34 + -1,31 + -1,43 + -1,39 + -1,10 \\ &\quad + -1,13) \div 10 = -13,2 \div 10 = \mathbf{-1,32} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Helling}_{20 < t \leq 30} &= ((T_{22} - T_{21}) + (T_{23} - T_{22}) + \dots + (T_{31} - T_{30})) \div n \\ &= ((92,05 - 93,19) + (90,97 - 92,05) + \dots + (81,61 - 82,21)) \div 10 \\ &= (-1,14 + -1,08 + -1,11 + -1,17 + -1,40 + -1,65 + -1,29 + -1,18 + -0,94 \\ &\quad + -0,60) \div 10 = -11,56 \div 10 = \mathbf{-1,16} \end{aligned}$$

Alle hellingen/afkoelsnelheden die in het verslag zijn weergegeven zijn op bovenstaande manier berekend.

Toelichting grafieken historische data

In **Figuur 20** op pagina 44 is voor het eerst een grafiek weergegeven van de historische data. In deze figuur zijn de gemiddelde hellingen tussen $t=0$ en $t=20$ per laagdikte weergegeven. Hieronder staat deze grafiek nogmaals weergegeven.

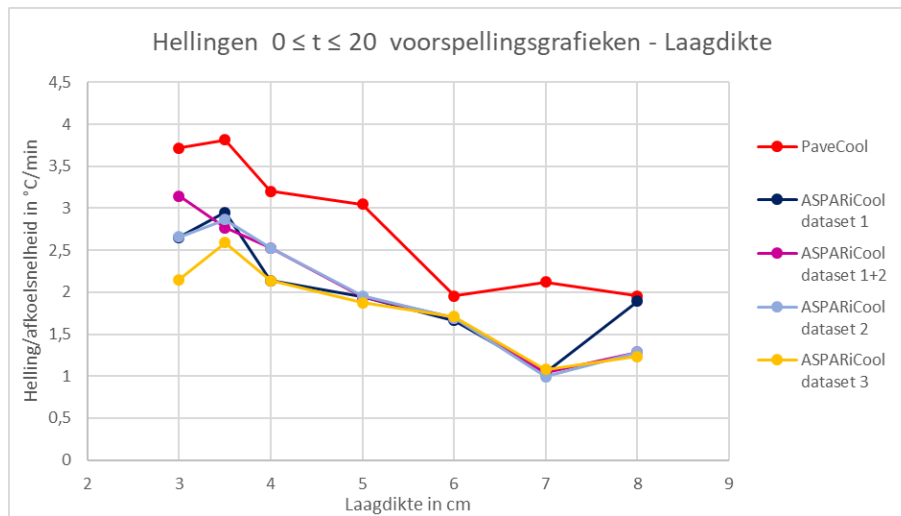


Voor het opstellen van bovenstaande grafiek zijn van in totaal 30 verschillende 'historische' afkoelcurves de gemiddelde helling berekend tussen $t=0$ en $t=20$, op dezelfde manier als in de voorbeeldberekening die eerder in deze bijlage is getoond. Vervolgens zijn deze curves en de bijbehorende gemiddelde hellingen opgedeeld in de vier verschillende laagdiktes die zijn gemeten. Voor de laagdikte 5 cm waren er 9 metingen in de historische dataset, voor 6 cm 7 metingen, voor 7 cm 4 metingen en voor 8 cm waren er 10 metingen. Per laagdikte is van de gemiddelde hellingen weer het gemiddelde genomen en deze zijn uiteindelijk in bovenstaande grafiek weergegeven. Op deze manier is een verband te zien tussen de laagdikte en de afkoelsnelheid van het asfalt.

Voor de grafiek van het verband tussen de omgevingstemperatuur en de afkoelsnelheid van asfalt (**Figuur 21**, pagina 46) is een vergelijkbare aanpak gebruikt. Hierbij zijn de curves opgedeeld in drie temperatuurcategorieën, waarbij voor de categorie 0 tot 10 °C 11 metingen waren in de historische dataset, voor de categorie 11 tot 20 °C 14 metingen en voor de categorie 21 tot 30 °C 5 metingen. Ook hier is per categorie het gemiddelde genomen van de hellingen tussen $t=0$ en $t=20$, waardoor in de grafiek een verband zichtbaar werd tussen de omgevingstemperatuur en de afkoelsnelheid van asfalt.

Toelichting grafieken hellingen voorspellingen vs. factoren

In hoofdstuk 7 worden de gemiddelde hellingen van de voorspellingen geraadpleegd voor het controleren van de validiteit van de voorspellingen. Daarbij is onder meer gebruik gemaakt van onderstaande grafiek:



De totstandkoming van deze grafiek is vergelijkbaar met die van de historische datasets. Eerst is voor alle voorspellingen de gemiddelde helling berekend tussen $t=0$ en $t=20$ (op dezelfde wijze als eerder beschreven in deze bijlage), waarna alle voorspellingen zijn opgedeeld in de verschillende laagdiktes. Tenslotte zijn per laagdikte de gemiddelde hellingen berekend, zodat een verband kan worden weergegeven in bovenstaande figuur. Deze aanpak is ook gebruikt voor de grafiek die de relatie tussen de afkoelsnelheid en de omgevingstemperatuur volgens de voorspellingen weergeeft ([Figuur 31](#), pagina 69).