

40430053-TDC 04-46629A
Energiek Wegdek: het potentieel voor
elektriciteitsopwekking uit asfalt

Arnhem, 17 november 2004
auteurs F.M. Combrink, R.J.F. van Gerwen, B. Taks
KEMA T&D Consulting

In opdracht van
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

auteurs: F.M. Combrink, R.J.F. van Gerwen, B. Taks
B blz. bijl. RvG

beoordeeld:
goedgekeurd:

© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens KEMA Nederland B.V. is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

INHOUD

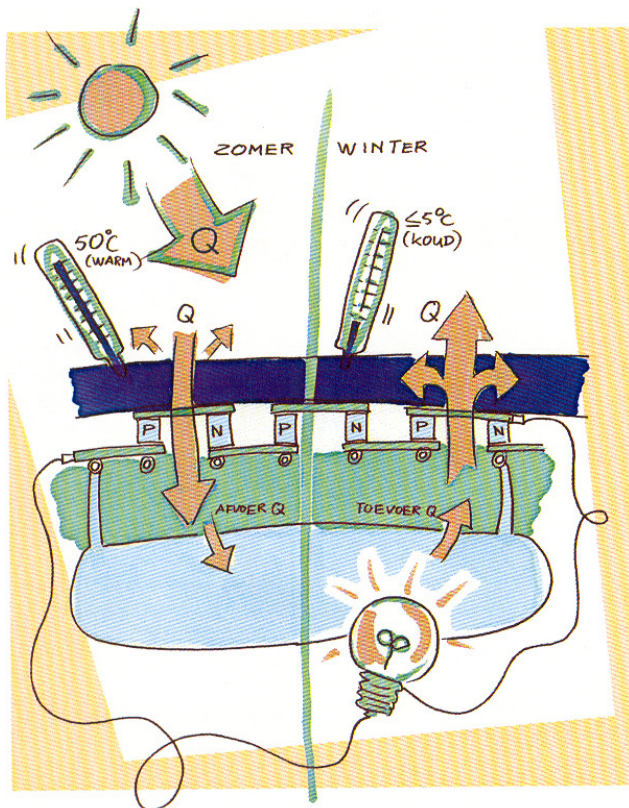
	blz.
SAMENVATTING	5
1 Achtergrond en doelstelling	7
2 Algemene aanpak	10
3 Beschrijving Proeflocatie	12
3.1 Beschrijving proeflocatie algemeen	12
3.2 Beschrijving temperatuurmetingen	13
3.3 Beschrijving registers	14
3.4 Beschrijving Peltierelementen	15
4 Meetresultaten proeflocatie	17
4.1 Meteorologische metingen	17
4.2 Temperatuurmetingen wegdek	19
4.2.1 Inleiding temperatuurmetingen	19
4.2.2 Temperatuurmetingen zonder actieve registers	20
4.2.3 Temperatuurmetingen met actieve registers	21
4.2.4 Verschillen tussen metingen met en zonder register	22
4.2.5 Duurkrommen voor het temperatuurverschil	23
4.3 Opbrengstmetingen aan Peltierelementen	25
4.3.1 Meting elektrisch vermogen	25
4.3.2 Metingen open klemspanning	26
5 Modelling en toekomstperspectief	28
5.1 Inleiding modellering en toekomstperspectief	28
5.2 Statisch thermisch model	28
5.3 Dynamisch thermisch model	31
5.3.1 Beschrijving dynamisch model	31
5.3.2 Validatie thermisch model	33
5.3.3 Opschaling resultaten naar een gemiddeld jaar	34
5.4 Berekening van de Peltierjaaropbrengst	37

6	Conclusies en aanbevelingen	39
6.1	Conclusies	39
6.2	Aanbevelingen	40
7	Doorkijkje naar de toekomst	41
Appendix A	Opbrengstmodel voor Peltierelement	43
Appendix B	Beschrijving dynamisch thermisch model.	46

SAMENVATTING

Het programma "Wegen naar de Toekomst" (WnT) is een innovatieprogramma van Rijkswaterstaat binnen het ministerie van Verkeer en Waterstaat. Binnen dit programma is een demonstratieproject "Energiek Wegdek" opgezet. Dit project, waarvan het idee afkomstig is van BAM, TU-Delft en Shell, wil de mogelijkheden demonstreren van elektriciteitsopwekking uit temperatuurverschillen in asfalt. Deze temperatuurverschillen ontstaan doordat de bodem langzamer afkoelt en opwarmt dan de het asfaltoppervlak.

Om een temperatuurverschil om te zetten in elektriciteit wordt gebruik gemaakt van zogenaamde Peltierelementen. In figuur S.1 wordt dit principe van Energiek Wegdek schematisch weergegeven. De Peltierelementen staan hier weergegeven als "P" en "N". De opbrengst van deze elementen kan actief worden beïnvloed door een leidingenregister dat direct onder de elementen wordt aangebracht en waarmee het temperatuurverschil over de Peltierelementen kan worden vergroot. Dit leidingenregister kan bijvoorbeeld gevoed worden met grondwater met een vrij constante temperatuur van circa 12 °C.



Figuur S.1 Schematische weergave Energiek Wegdek principe (bron: Rijkswaterstaat)

Om het principe van elektriciteit uit warmte daadwerkelijk aan te tonen is een proef gestart waarbij in een bestaande weg een aantal Peltierelementen met bijbehorende meetapparatuur zijn aangebracht met als doel het aantonen van de technische werking van het principe en het bepalen van de potentiële jaaropbrengst.

Uit metingen blijkt dat het technische principe van elektriciteit uit asfalt werkt. De toename van de elektriciteitsopbrengst bij een toenemend temperatuurverschil over de Peltierelementen is conform de verwachtingen. De gemeten elektriciteitsopbrengst ligt echter veel lager dan op grond van de eigenschappen van de Peltierelementen verwacht mocht worden. De oorzaak hiervan is niet achterhaald.

Door een slimme combinatie van meten en modelleren van de temperatuurverschillen in het asfalt afhankelijk van de weersomstandigheden, is het toch mogelijk gebleken voor een "gemiddeld" jaar de potentiële Peltieropbrengst te bepalen. Deze ligt voor de huidige constructie bij goed functionerende Peltierelementen op 25 kWh per m² element per jaar. Indien alle hoofdwegen in Nederland "bedekt" zouden worden met Peltierelementen kan zo gemiddeld in de gehele elektriciteitsbehoefte van Nederland worden voorzien. Het gebruik van een register om met behulp van bijvoorbeeld grondwater een voldoende groot temperatuurverschil te bewerkstelligen is echter noodzakelijk.

Uit het onderzoek volgen nog een aantal verbetermogelijkheden:

- Een beter gebruik van het beschikbaar temperatuurverschil kan onder andere gerealiseerd worden door het gebruik van thermisch hooggeleidend asfalt. Hierdoor neemt de elektriciteitsopbrengst per Peltierelement toe (naar schatting tot boven de 100 kWh per m² element).
- Om een maximale opbrengst te realiseren verdient het aanbeveling het Peltierelement te optimaliseren voor deze toepassing.
- Indien mogelijk moet het gebruik van een register vermeden worden. Dit vraagt extra investeringen en extra pompenergie.

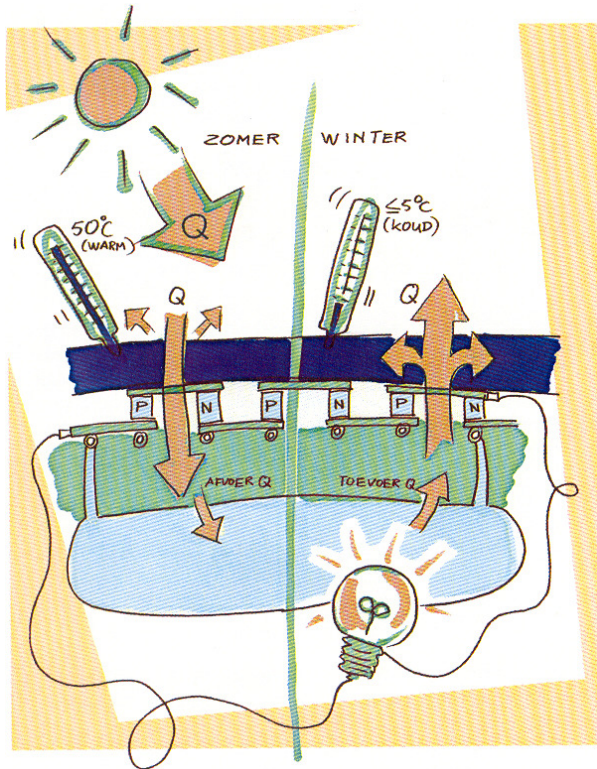
Een eerste economische scan laat zien dat voor het grootschalig toepassen van Peltierelementen in het wegdek de elektriciteitsprijs een grote rol speelt. Als elektriciteit uit het net beschikbaar is zullen Peltierelementen vooralsnog niet kunnen concurreren. Interessant zijn nichemarkten, bijvoorbeeld afgelegen locaties waar het leggen van een elektriciteitskabel duur is.

1 ACHTERGROND EN DOELSTELLING

Het programma "Wegen naar de Toekomst" (WnT) is een innovatieprogramma van Rijkswaterstaat binnen het ministerie van Verkeer en Waterstaat. Dit programma richt zich vooral op het zoeken naar slimme oplossingen voor mobiliteit en infrastructuur. WnT ontwikkelt lange-termijn perspectieven en concrete proefprojecten en demonstraties, waarbij denken op lange termijn wordt gekoppeld aan doen op korte termijn.

In het kader van het programma "Wegen naar de toekomst" is de pilot Energiek Wegdek opgezet. Deze pilot, waarvan het idee afkomstig is van BAM, TU-Delft en Shell, wil een impuls geven aan de ontwikkeling van technieken en toepassingen die het mogelijk maken om het winnen van duurzame energie te combineren met infrastructuur. Dit project gaat uit van het gebruik van zogenaamde Peltierelementen om temperatuurverschillen in het asfalt om te zetten in elektriciteit. Op deze manier wordt het temperatuurverschil tussen de boven- en onderkant van de wegconstructie benut. In de zomer is de bovenkant redelijk warm en de onderzijde relatief koud. In de winter is de situatie precies omgekeerd. De Peltierelementen die worden verwerkt in de wegconstructie leveren door dit temperatuurverschil elektriciteit.

In Figuur 1.1 wordt het principe van Energiek Wegdek schematisch weergegeven. De Peltierelementen staan hier weergegeven als "P" en "N". De opbrengst van deze elementen kan actief worden beïnvloed door een leidingenregister dat direct onder de elementen wordt aangebracht en waarmee het temperatuurverschil over de Peltierelementen kan worden vergroot. Dit leidingenregister kan bijvoorbeeld gevoed worden met grondwater met een vrij constante temperatuur van circa 12 °C.



Figuur 1.1 Schematische weergave principe Energiek Wegdek

De eerste stap op weg naar het toekomstbeeld is het daadwerkelijk beproeven en demonstreren van dit principe (elektriciteit uit warmte). Hiertoe is op de A18 in Didam ter hoogte van verzorgingsplaats Geulenkamp een proefvak gerealiseerd. Vervolgens zijn er metingen uitgevoerd en zijn de resultaten van de metingen gemodelleerd en verwerkt.

Doelstelling

De doelstelling van de pilot Energiek Wegdek is het toetsen van het principe van elektriciteitsopwekking door middel van Peltierelementen uit het temperatuurverschil tussen de verschillende asfaltlagen. Dit temperatuurverschil ontstaat door warmtestromen in het asfalt als gevolg van de weersomstandigheden (en eventueel het gebruik van registers) waarbij de zoninstraling de allerbelangrijkste factor is. Aan de hand van de meting van de temperatuurverschillen in het asfalt kan het perspectief voor het stimuleren van de ontwikkeling van een nieuwe generatie Peltierelementen of andere technieken voor het opwekken van duurzame elektrische energie uit zonnewarmte beoordeeld worden.

In deze rapportage worden de volgende vragen beantwoord:

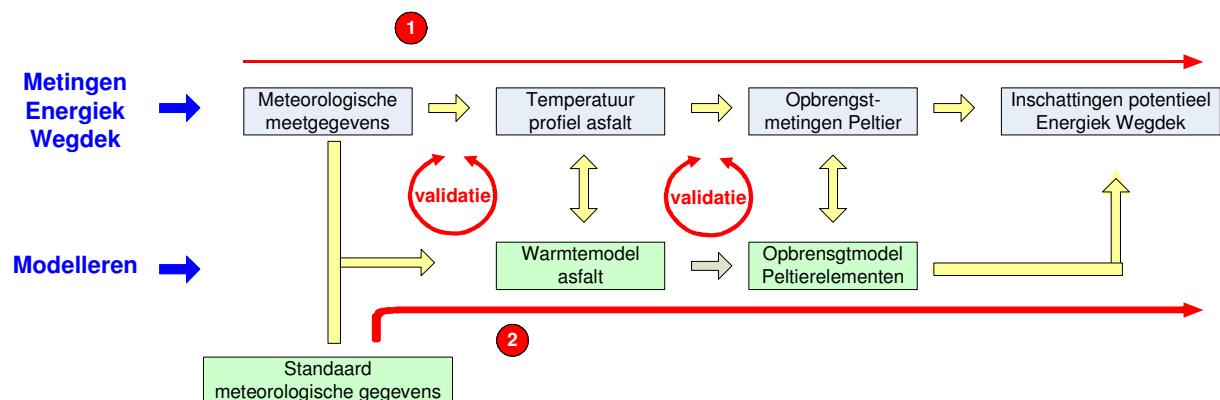
- welke temperatuurverschillen treden op in het asfalt en is dit temperatuurverloop te verklaren dan wel te voorspellen aan de hand van de thermische eigenschappen van het asfalt en de weersomstandigheden?
- welke invloed hebben de registers in het wegdek op het temperatuurverloop in het asfalt en in hoeverre zijn de registers nodig om een voldoende hoog temperatuurverschil te bereiken?
- hoe groot is het door de Peltierelementen opgewekte vermogen in relatie tot het temperatuurverschil over de Peltierelementen en klopt dit met de verwachtingen?
- wat mag op basis van de metingen worden verwacht aan jaaropbrengst per m² wegdek voor een gemiddeld jaar voor de huidige type Peltierelementen en
- welke verbeteringen aan het ontwerp van Energiek Wegdek volgen er uit de experimenten?

2 ALGEMENE AANPAK

De algemene aanpak bestaat uit het gecombineerd meten aan een proefopstelling met Peltierelementen in asfalt en het modelleren van de warmtestromen in het asfalt en van de opbrengst van Peltierelementen. Tijdens de metingen worden onder de gegeven weersomstandigheden gedurende enige tijd temperaturen en elektrische opbrengsten gemeten. Om hier representatieve resultaten voor een heel jaar uit te destilleren, wordt gebruik gemaakt van modellen (zie Figuur 2.1).

Het gebruik van modellen naast de metingen heeft een tweetal voordelen:

- 1 Bij metingen worden de werkelijke weersomstandigheden vastgelegd. Dit betekent dat er gedurende een jaar gemeten dient te worden om een realistisch beeld te krijgen van de weersomstandigheden van een geheel jaar. Door modellering toe te passen kunnen de resultaten (opbrengsten) vertaald worden naar andere weerscondities die bijvoorbeeld representatief zijn voor een gemiddeld Nederlands jaar.
- 1 Door metingen te combineren met modellering, wordt inzicht verkregen in mogelijke verbeteringen in de Peltierelementconstructie, de wegdekopbouw en de daarmee te behalen (mogelijke) opbrengstverbetering. Dit levert een betrouwbaardere inschatting van het toekomstig potentieel voor elektriciteitsopwekking uit asfalt.



Figuur 2.1 Twee aanvullende routes: meten en modelleren

Route 1 In Figuur 2.1 geeft de stappen weer die doorlopen worden bij het maken van een schatting van het potentieel van Energiek wegdek op basis van metingen. Daarnaast wordt route 2 doorlopen: het modelleren van het temperatuurverloop in het asfalt en de opbrengst van de Peltierelementen/thermokoppels. Dit leidt tot een betrouwbaardere, representatievere opbrengstberekening.

Methodiek

Om gebruik te kunnen maken van de modellen, zijn verschillende metingen verricht: temperatuurmetingen in het asfalt en de leidingregisters en opbrengstmetingen voor de Peltierelementen. De ruwe meetdata zijn vervolgens omgezet in grafieken. Een belangrijke grafische representatie is bijvoorbeeld een durkromme voor het gemeten temperatuurverschil over het Peltierelement. Een durkromme geeft aan gedurende welke tijdsduur het temperatuurverschil groter is dan een bepaalde waarde. Hierop wordt nog teruggekomen in het vervolg. Vervolgens is een thermisch model van het asfalt opgesteld en gevalideerd. Hierbij is een eenvoudig en praktisch ééndimensionaal thermisch model van het asfalt met de Peltierelementen opgesteld, gebruikmakend van fysische kennis en reeds ontwikkelde modellen. Dit model is, aan de hand van meetdata op representatieve dagen, gevalideerd en waar nodig bijgesteld.

Na het opstellen van het thermisch model is een eenvoudig en praktisch model voor de Peltierelementen opgesteld. Hierbij is gebruik gemaakt van de reeds eerder uitgevoerde laboratoriummetingen. Dit model is gevalideerd aan de hand van meetdata, de door de fabrikant opgegeven karakteristieken voor de Peltierelementen en de gemeten opbrengst van het Energiek Wegdek.

Eventuele aanknopingspunten voor systeemverbeteringen komen aan het licht tijdens de analyse van de meetresultaten. Tenslotte is met behulp van de gevalideerde modellen de opbrengst onder standaard weersomstandigheden ("verkort referentiejaar voor buitencondities" NEN 5060) bepaald.

3 BESCHRIJVING PROEFLOCATIE

3.1 Beschrijving proeflocatie algemeen

Op de snelweg A18 in Didam ter hoogte van verzorgingsplaats Geulenkamp is een proefwegdek gerealiseerd. Het gaat hierbij om de noordbaan. In Figuur 3.1 tot en met Figuur 3.4 worden de meetopstelling en de aanleg van het proefwegdek weergegeven.



Figuur 3.1 Aanleg proefwegdek



Figuur 3.2 Meetopstelling



Figuur 3.3 Aanleg meetopstelling



Figuur 3.4 Aanzicht proefwegdek

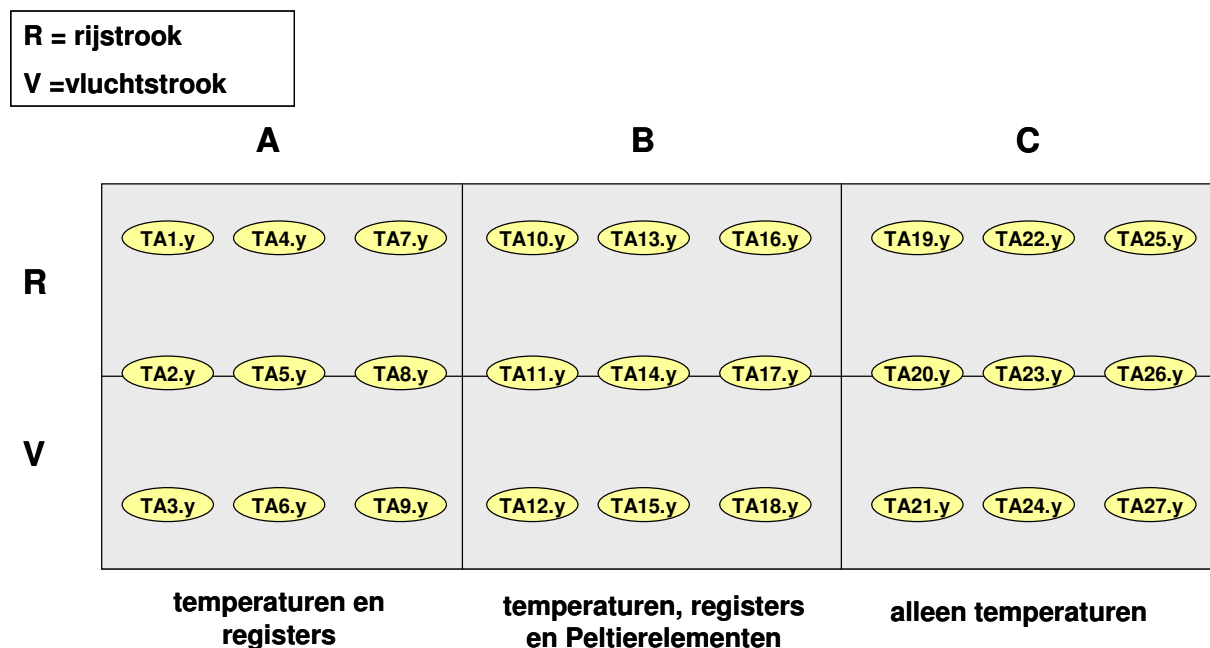
Het proefwegdek is 75 meter lang en omvat de rechterraijstrook en de vluchtstrook. Het proefwegdek is onderverdeeld in vakken waarin temperatuur- en opbrengstmetingen zijn verricht. Het proefvak is onderverdeeld in drie proefvakken:

- A. Een vak met temperatuursensoren en registers (5 m)
- A. Een vak met temperatuursensoren, Peltierelementen en registers (15 m)
- B. Een vak met alleen temperatuursensoren (25 m)

De Peltierelementen (elementen van circa 4x4 cm² met een dikte van 6 mm) zijn aangebracht op een U-vormig aluminium profiel dat tevens als register dienst doet. Deze profielen zijn als geheel in het wegdek aangebracht (zie Figuur 3.1 en Figuur 3.4). De Peltierelementen zijn in groepen van circa 30 stuks in serie geschakeld en deze zijn buiten het proefvak apart te bemeten.

3.2 Beschrijving temperatuurmetingen

In de drie proefvakken zijn in totaal 90 temperatuurssensoren geplaatst, 27 in proefvak A en C en 36 in proefvak B. In vak A en C zijn deze verdeeld over drie lagen, in vak B over vier lagen (zie Figuur 3.5). Deze redundantie is met opzet aangebracht omdat te kunnen compenseren voor defecten in temperatuursensoren die tijdens de aanleg kunnen ontstaan.



Figuur 3.5 Schematische weergave proefvak

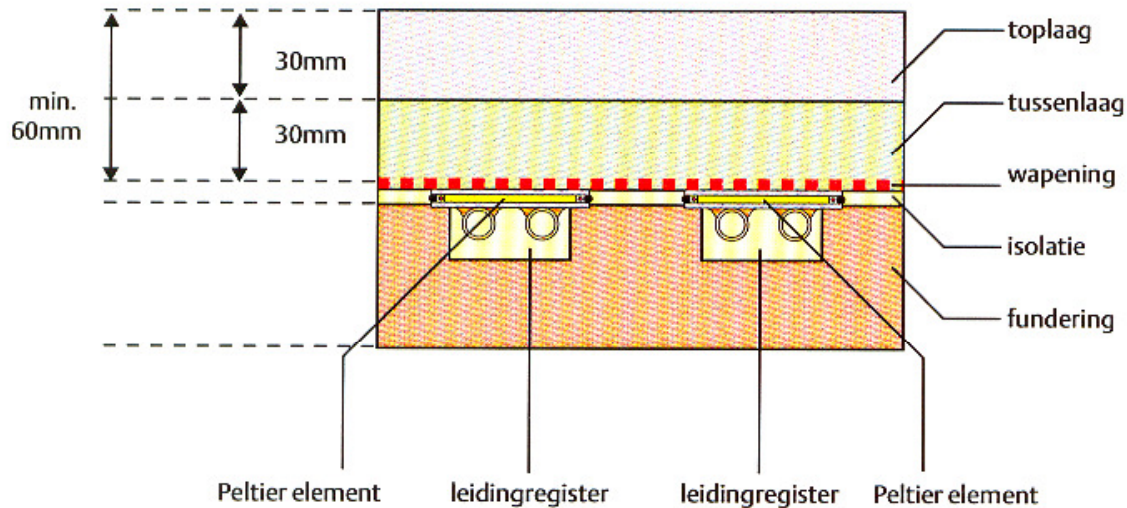
In theorie zijn de gemeten temperaturen in een proefvak zonder registers per laag gelijk. Op basis van deze theorie vindt de controle van de temperatuursensoren plaats. De grote hoeveelheid sensoren die zijn aangebracht biedt namelijk de mogelijkheid tot een onderlinge consistentiecontrole. Na een vergelijking van de gemeten temperaturen per laag blijkt dat de waarden van een aantal temperatuursensoren positief of negatief afwijken van de overige temperatuursensoren in dezelfde laag. Deze zijn kennelijk defect geraakt.

In het onderzoek worden alleen de temperatuursensoren gebruikt die op verschillende meetdagen niet aanzienlijk afwijken van andere sensoren in dezelfde laag. De grens daarvoor is op basis van een praktijkinschatting vastgesteld. Na de vergelijking van de resultaten van de temperatuurmetingen is besloten om de meetresultaten van 26 sensoren niet mee te nemen in het onderzoek. Ondanks het feit dat bijna 30% van de sensoren uiteindelijk niet meegenomen zijn in het onderzoek, zijn er nog ruim voldoende meet-sensoren voorhanden om de representativiteit van de temperatuurmetingen te waarborgen.

3.3 Beschrijving registers

De doelstelling van het experiment Energiek Wegdek is het verkrijgen van een beeld over de optredende temperatuurverschillen in het asfalt gedurende de seizoenen. Het temperatuurverschil in het asfalt is de drijvende kracht achter de elektriciteitsopwekking. Om deze temperatuurverschillen te vergroten is gebruik gemaakt van registers die doorstroomd kunnen worden met een koude of warme vloeistof. In Figuur 3.6 wordt schematisch een dwarsdoorsnede van de asfaltlagen met register weergegeven.

De koeling of opwarming via de registers gebeurt met behulp van een elektrische warmtepomp. In de praktijk kost dit vele malen meer energie dan de opbrengst van de Peltierelementen maar dat is in deze proefsituatie geoorloofd. De nadruk ligt op de technische haalbaarheid van het principe en de noodzaak van de toepassing van een register. Dit is wel een aandachtspunt voor de toekomst: in hoeverre wordt de elektriciteitsopbrengst van de Peltierelementen opgesoupeerd door pompen voor een eventueel noodzakelijk register?



Figuur 3.6 dwarsdoorsnede asfalt

3.4 Beschrijving Peltierelementen

Over het algemeen worden Peltierelementen gebruikt als koelelementen (bijvoorbeeld in koelboxen of voor koeling van computerprocessoren). De elektriciteit die in het Peltierelement wordt gestopt, veroorzaakt een temperatuurverschil en daarmee een warmtestroom door het element waarmee gekoeld kan worden. Het omgekeerde effect (omzetting van een temperatuurverschil naar elektriciteit) is echter ook mogelijk. Dit effect wordt bijvoorbeeld gebruikt in thermokoppels (om temperaturen te meten) maar ook in thermo-elektrische generatoren. Deze worden vanwege hun robuustheid op afgelegen locaties gebruikt voor elektriciteitsopwekking. Het temperatuurverschil voor elektriciteitsopwekking ligt bij deze toepassing ligt in de regel boven de 600 C.

Voor de huidige toepassing (elektriciteitsopwekking bij een relatief laag temperatuurverschil) waren praktische gezien alleen Peltierelementen geschikt. Voor deze toepassing zijn Peltierelementen technisch gezien niet optimaal (ze zijn gemaakt voor grote warmtestromen en er is dus ook een grote warmtestroom nodig om een bruikbaar temperatuurverschil over het element te creëren) maar voor het aantonen van de technische werking van het principe ruim voldoende.

Het gebruikte Peltierelement bestaat uit twee plaatjes keramisch materiaal van 4 bij 4 cm² waartussen verschillende blokjes halfgeleidend materiaal zijn aangebracht. De functie van het keramische materiaal is mechanische sterkte en thermische geleiding. De dikte van een element is circa 6 mm. Wanneer hier een spanning over gezet wordt, en er dus een stroom gaat lopen door het element, zal het element warmte van de ene kant naar de andere kant verplaatsen.

Voor de bescherming van de thermokoppels en de bedrading tegen mechanische invloeden, en het handzaam verwerken van de Peltierelementen in de weg, zijn de elementen vervat in grotere prefab elementen en als zodanig in het asfalt verwerkt. De elementen zijn afgedekt met een koperen plaat voor een betere geleiding van de warmtestromen. In totaal zijn per prefab element 120 Peltierelementen verwerkt die elektrisch in serie zijn geschakeld. In totaal zijn 30 prefab elementen in het wegdek verwerkt.

Peltierelementen in de weg leveren door het temperatuurverschil tussen de bovenkant en de onderkant van het wegdek elektrische energie. Dit temperatuurverschil kan worden beïnvloed door een verwarmd c.q. gekoeld medium in een leidingenregister onder de Peltierelementen te laten doorstromen. Door het instellen van deze registers op een vaste temperatuur blijft de onderste laag van het proefvak op een nagenoeg constante temperatuur. Door het gebruik van registers nemen de temperatuurverschillen in het asfalt toe. Bij extreem hoge luchttemperaturen kan het gebruik van (koelende) registers mogelijk bijdragen aan een verlenging van de levensduur van het asfalt, maar dit is geen onderwerp van deze studie.

Het spanningsverschil over één (onbelast) Peltierelement is recht evenredig met het temperatuurverschil over het element. Wordt het temperatuurverschil twee maal zo hoog, dan zal ook de spanning twee maal zo hoog worden. De spanning over het Peltierelement zonder elektrische belasting wordt de "open klemspanning" genoemd.

Wordt het Peltierelement belast met een elektrische weerstand (bijvoorbeeld een lamp) dan blijkt de spanning echter af te nemen. Het Peltierelement heeft een inwendige elektrische weerstand die er voor zorgt dat de spanning daalt als er stroom gaat lopen. In de praktijk blijkt dat een Peltierelement de maximale opbrengst levert als de belastingsweerstand gelijk is aan de inwendige weerstand. In de meetopstelling is er naar gestreefd de Peltierelementen zodanig aan te sluiten dat zij het maximale vermogen kunnen leveren. Het maximale vermogen dat één Peltierelement in theorie kan opwekken bij een representatief temperatuurverschil van 10°C is circa 21 mW. Bij een totaal van 3600 Peltierelementen (30 prefab element met ieder 120 Peltierelementen) zou dit uitkomen op een opbrengst van

75 W. De open klemspanning voor één element bij een temperatuurverschil van 10°C is ongeveer 0,12 V. Bijlage A gaat verder in op de werking van de Peltierelementen.

4 MEETRESULTATEN PROEFLOCATIE

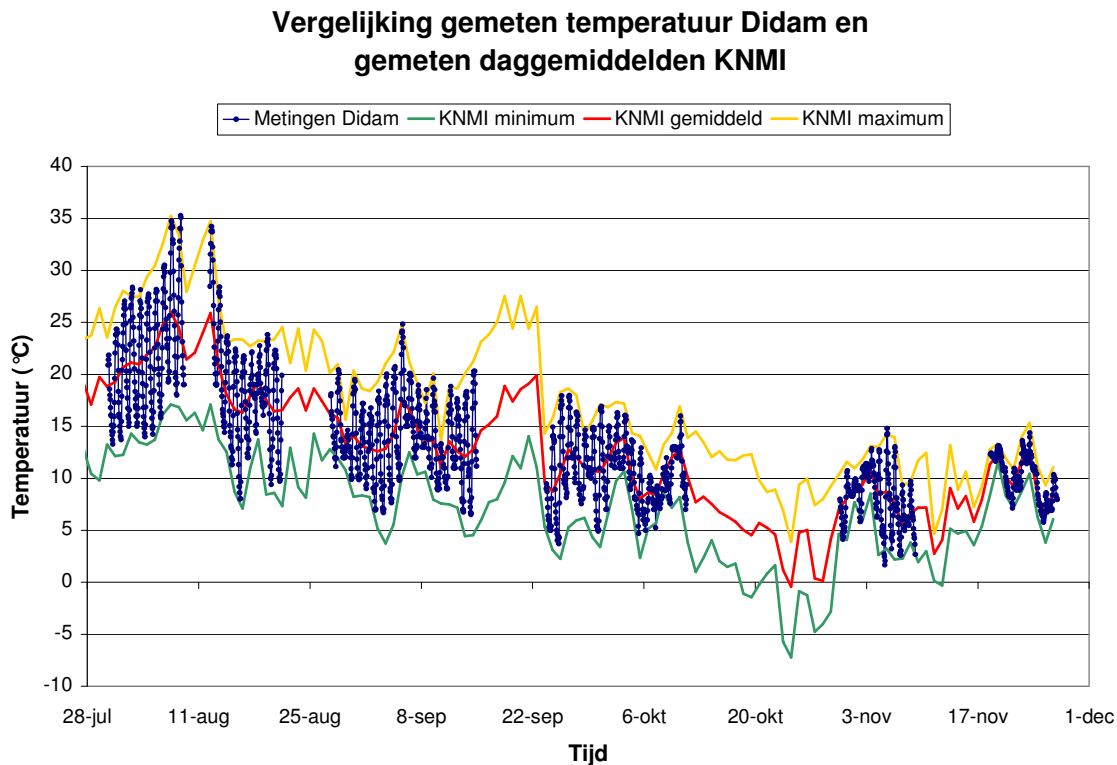
4.1 Meteorologische metingen

In de meetopstelling zijn een aantal sensoren voor meteorologische gegevens aangebracht (weerstation): luchttemperatuur, zoninstraling, windsnelheid, windrichting en neerslag (regen). Doordat een aantal sensoren onvoldoende of niet functioneerden, zijn alleen de meetgegevens van de temperatuur en de windrichting volledig bruikbaar. Van de zoninstraling zijn gedeeltelijke gegevens aanwezig. De sensor die de zoninstraling meet, gaf op onverwachte momenten onrealistische hoge waarden. De windrichting en de neerslagmeting hebben ook niet voldoende gefunctioneerd. Echter, voor de validatie van het thermisch model en voor de opbrengstmetingen bleek meer dan voldoende meteorologische data voorhanden. Het effect van neerslag is echter niet gemeten en ook niet in de modellering meegenomen. Zo is ook het effect van de auto's op het wegdek (warmteontwikkeling door de banden en afscherming van het wegdek voor in- en uitstraling van warmte) niet meegenomen.

Als voorbeeld worden hier de temperatuurmetingen en de windsnelheidsmetingen voor een representatief tijdvak besproken en vergeleken met KNMI-data.

Luchttemperatuur

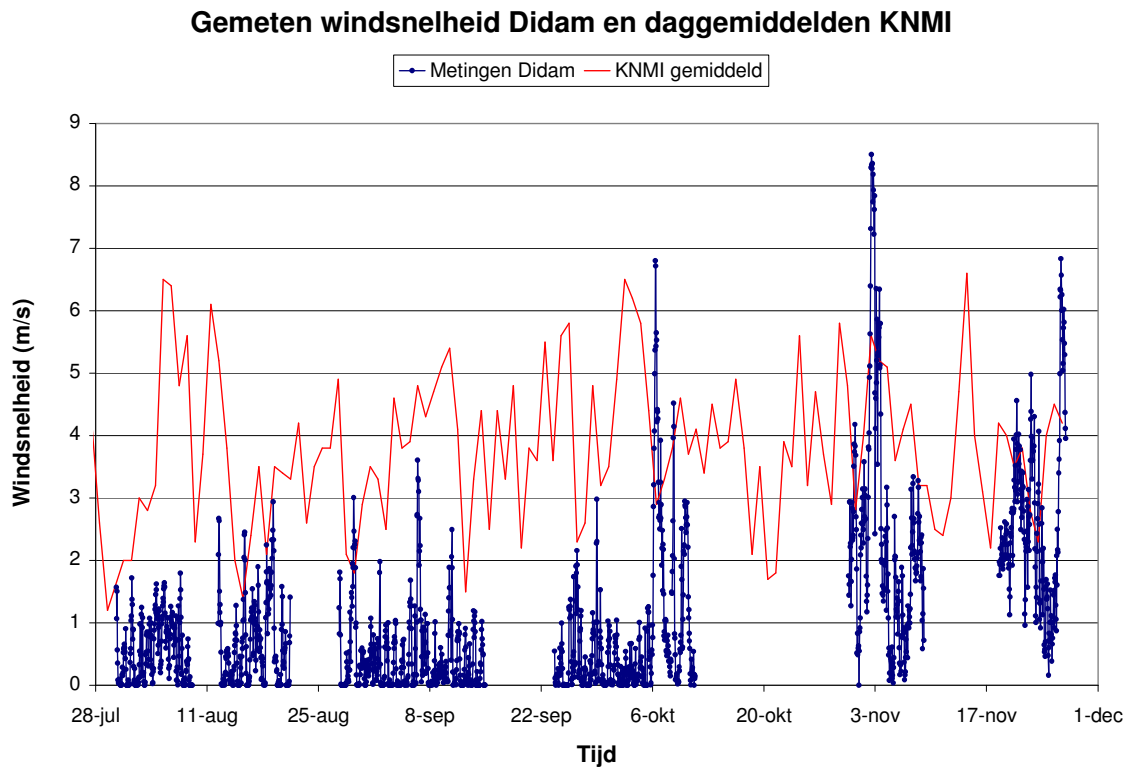
In Figuur 4.1 wordt een voorbeeld gegeven van de resultaten van de temperatuurmetingen gedurende het onderzoek. In deze figuur zijn zowel de gegevens van het KNMI als de meetgegevens weergegeven. Het KNMI levert via haar website de gemiddelde etmaaltemperatuur en de minimale en maximale waarde voor dat etmaal aan. Hierbij wordt een gemiddelde bepaald tussen de KNMI-weerstations De Bilt en Twente. Het weerstation bij het proefvak geeft het uurgemiddelde weer. In de figuur wordt het uurgemiddelde van de gemeten luchttemperatuur en de daggemiddelden, het minimum en het maximum van het KNMIIT weergegeven. De gemeten temperaturen op de proeflocatie volgen een zelfde curve als de daggemiddelden van het KNMI en vallen binnen de minimale en maximale KNMI-waarden. De gemeten temperaturen op locatie Didam lijken hiermee betrouwbaar.



Figuur 4.1 Gemeten luchttemperatuur Didam en meetwaarden KNMI

Windsnelheid

De windsnelheid zoals die gemeten is op de locatie Didam (uurgemiddeld) en gemeten door het KNMI in De Bilt is weergegeven in Figuur 4.2. Er zijn aanzienlijke verschillen tussen de gemeten windsnelheid en de gegevens van het KNMI. Dit kan worden verklaard door de meethoogte. De meethoogte in Didam is circa vier meter, de meethoogte in De Bilt is twintig meter. Op een hoogte van twintig meter wordt aanzienlijk minder hinder ondervonden van de terreinruwheid. Daarnaast is de windsnelheid op deze hoogte in de regel hoger dan op een lager gelegen meetpunt. De sporadisch voorkomende overstijging van het KNMI-gemiddelde, welke blijkt uit Figuur 4.2, kan worden verklaard door stuwing of door middeling. Door stuwing rond de keet met de windmeter kan lokaal een hogere windsnelheid ontstaan. Daarnaast worden in Didam uurgemiddelden gemeten en weergegeven, in tegenstelling tot het KNMI dat daggemiddelden weergeeft. Door de middeling kunnen de gemeten waarden boven de gemiddelde waarden van het KNMI liggen.



Figuur 4.2 Gemeten windsnelheid op locatie Didam en volgens het KNMI

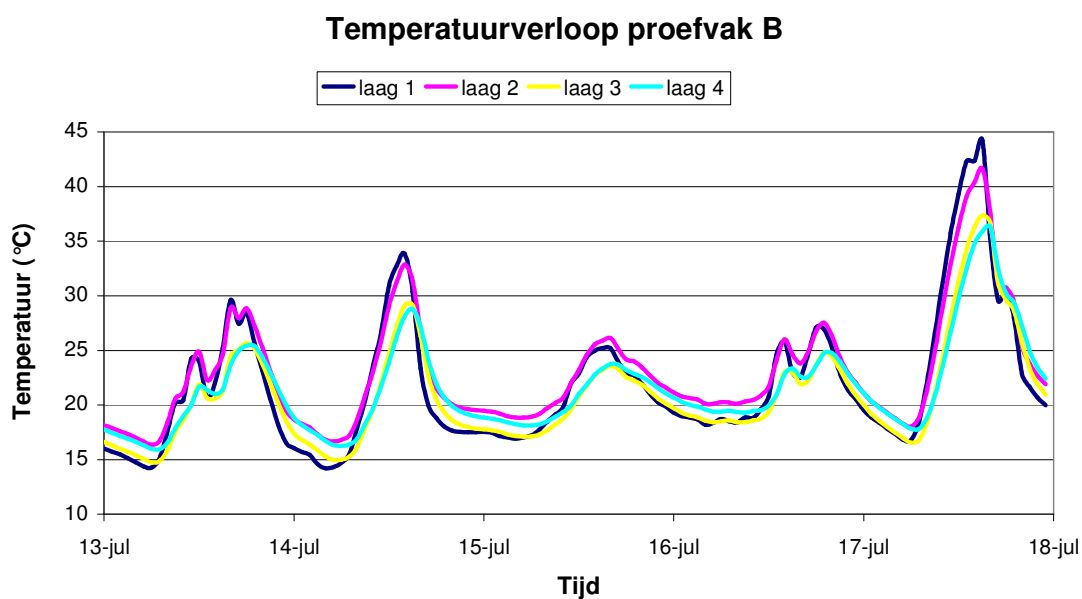
4.2 Temperatuurmetingen wegdek

4.2.1 Inleiding temperatuurmetingen

Op de proeflocatie in Didam zijn gedurende een groot aantal maanden temperatuurmetingen in het wegdek verricht. Bij deze temperatuurmetingen is de temperatuur van het wegdek op vier verschillende dieptes bepaald (zie Figuur 3.5 en Figuur 3.6). Het weergegeven van al deze meetresultaten is niet zinvol. Om te begrijpen hoe het temperatuurverloop in het asfalt zich gedraagt is het voldoende een aantal representatieve metingen met en zonder register in werking weer te geven.

4.2.2 Temperatuurmetingen zonder actieve registers

In Figuur 4.3 is het temperatuurverloop in de verschillende lagen van het wegdek gedurende vijf dagen te zien. De resultaten van deze meting zijn een representatief voorbeeld voor de rest van de meetperiode.



Figuur 4.3 Temperatuurverloop in vier lagen van proefvak B zonder actieve registers

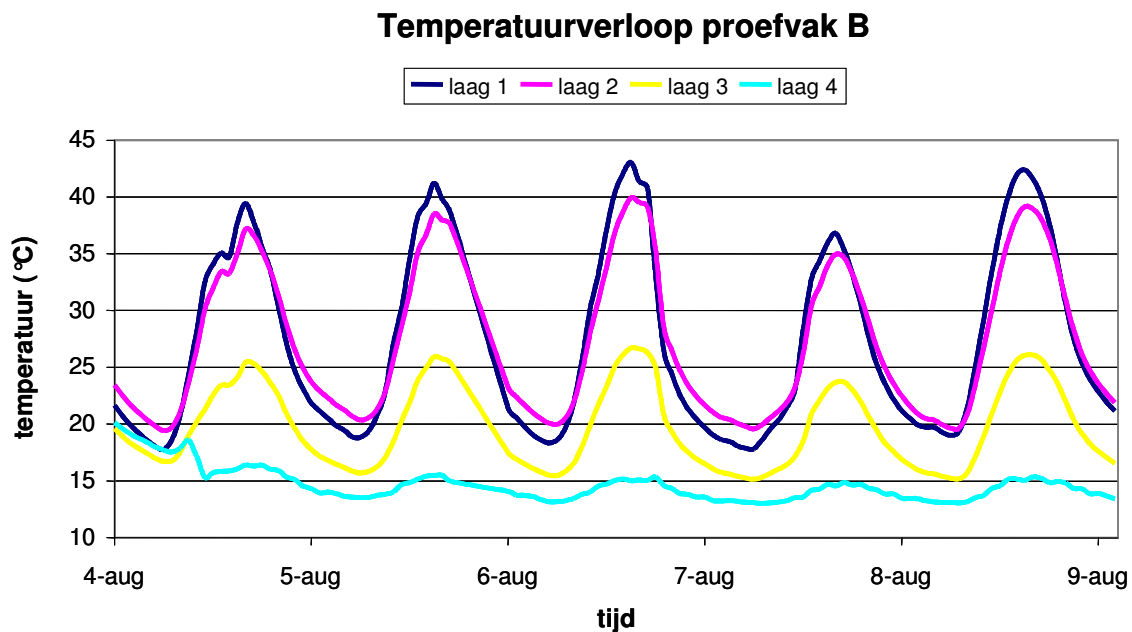
Uit bovenstaande grafiek blijkt dat er weinig verschil is tussen de temperaturen in de verschillende lagen. Er is echter wel een kleine tijdvertraging te constateren. Het temperatuurverloop in de onderste lagen (laag 3 en 4) volgt een zelfde trend als de bovenste twee lagen. De maximumtemperaturen van de onderste twee lagen worden echter op een later tijdstip bereikt.

In de nacht komt de minimumtemperatuur van de bovenste laag onder de minimumtemperaturen van de andere lagen uit. Dit is te verklaren doordat de onderste lagen een isolerende werking hebben en minder warmte af kunnen staan aan de buitenlucht.

Uit deze figuur blijkt duidelijk dat temperatuurveranderingen relatief snel door het asfalt heen dringen. De rol van de warmtecapaciteit van het asfalt is wel zichtbaar meer redelijk beperkt.

4.2.3 Temperatuurmetingen met actieve registers

Gedurende de zomermaanden zijn er verschillende metingen verricht waarbij de registers zijn geactiveerd. Er is gemeten bij diverse registertemperaturen. Figuur 4.4 geeft een meting weer waarbij door de registers water stroomt met een temperatuur van 10°C.



Figuur 4.4 Temperatuurverloop in vier lagen van proefvak B met actieve registers (10°C).

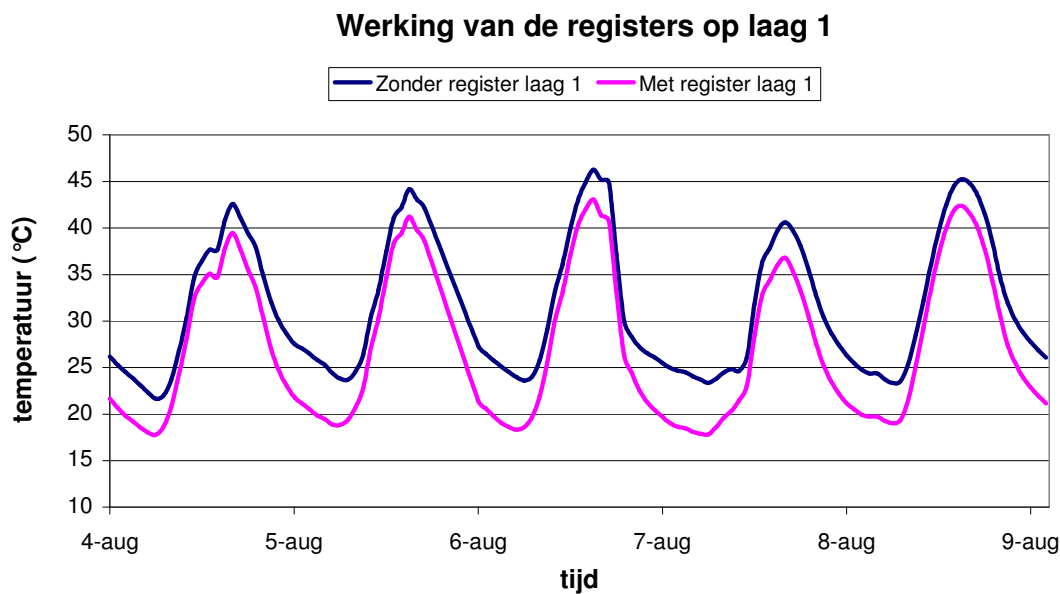
De uitgaande temperatuur van de registers lag tussen de 11,2 en de 12,4°C. Een deel van de warmte in de onderste lagen wordt dus (zoals te verwachten is) opgenomen door het koude water in de registers. Uit Figuur 4.4 is af te lezen dat de onderste laag (laag 4) op een redelijk constante temperatuur van 15°C blijft.

Opmerkelijk is dat laag 4 een temperatuur heeft die nog een stuk boven de register-temperatuur ligt. Ook vertoont laag 4 nog enige temperatuurschommelingen. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door een thermische weerstand tussen de registers en de Peltierelementen of door de positie van de meetsensoren.

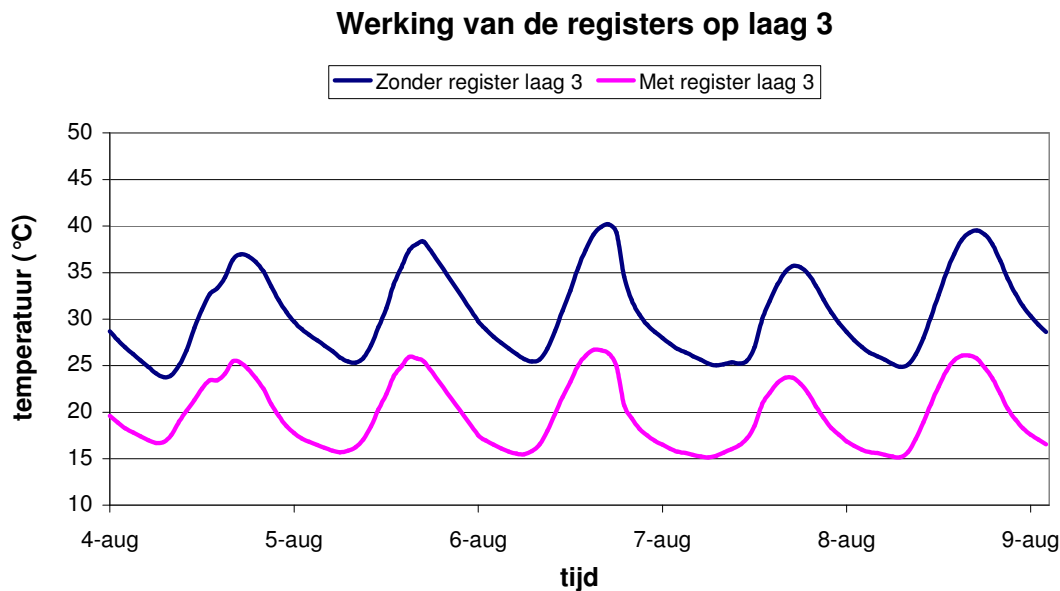
4.2.4 Verschillen tussen metingen met en zonder register

Bij een vergelijking tussen Figuur 4.3 en Figuur 4.4 valt op dat het temperatuurverloop in de vier lagen eenzelfde trend volgen. Door het plaatsen van registers tussen laag drie en vier is het temperatuurverschil tussen de onderste twee lagen en de lagen een en twee echter aanzienlijk toegenomen. In dit opzicht zijn de registers dus effectief.

De metingen die in de vorige twee paragrafen besproken zijn, hebben betrekking op verschillende meetperiodes. De meetlocatie in Didam bevat echter drie proefvakken, waarvan er twee een registersysteem bevatten. Deze kunnen onafhankelijk van elkaar aan- en uitgezet worden. Hierdoor kan tijdens één en dezelfde meetperiode (onder dezelfde weersomstandigheden) het effect van wel of geen register in werking per laag worden vergeleken. Ter illustratie zijn de temperaturen in de verschillende proefvakken weergegeven voor laag 1 (Figuur 4.5) en laag 3 (Figuur 4.6).



Figuur 4.5 Temperatuurverloop in laag 3 voor een proefvak met en zonder register



Figuur 4.6 Temperatuurverloop in laag 3 voor een proefvak met en zonder register.

Uit de figuren blijkt dat de registers meer invloed hebben op laag 3 dan op laag 1. De temperatuur van laag 3 in het proefvak met registers is aanzienlijk lager dan de temperatuur van laag 3 in het proefvak zonder registers. Deze verschillen komen in laag 1 minder duidelijk naar voren. Dit is te verklaren door de positie van het register tussen laag 3 en laag 4. De warmteweerstand van de tussenliggende lagen moet immers overbrugd worden. Het temperatuurverschil tussen laag 1 met register en laag 1 zonder register is gemiddeld ongeveer 4°C, voor laag 3 is dit verschil opgelopen naar ongeveer 10°C.

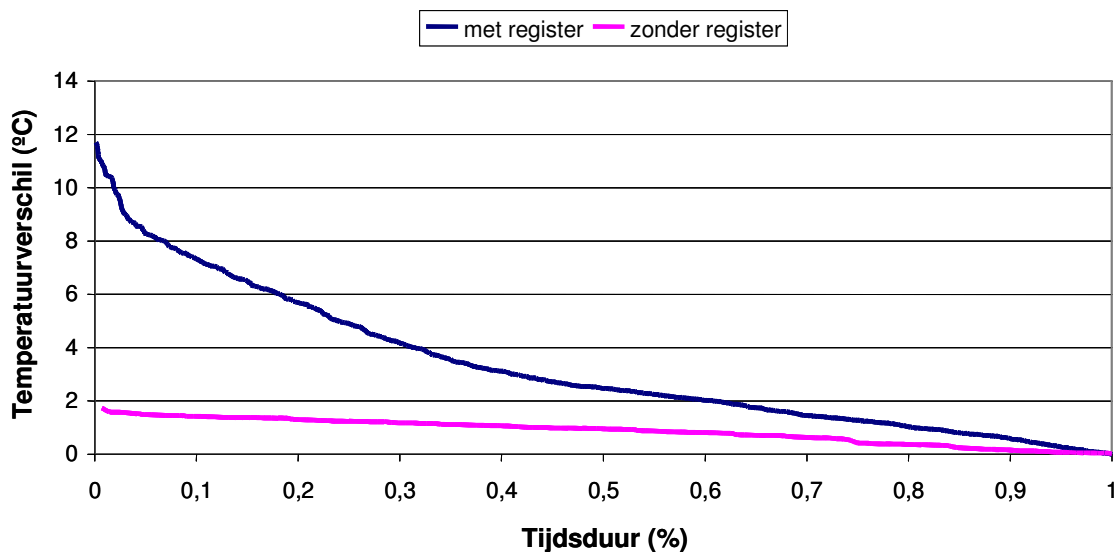
Geconcludeerd kan worden dat het gebruik van registers het temperatuurverschil in alle lagen beïnvloedt. Het feit dat het temperatuurverschil in laag 3 groter is dan in laag 1 is te verklaren door de warmteweerstand van de tussenliggende lagen. Om diezelfde reden heeft de buitentemperatuur minder invloed op de dieper gelegen lagen dan op de oppervlaktelaag.

4.2.5 Duurkrommen voor het temperatuurverschil

Van belang voor de opbrengst van de Peltierelementen is het belangrijk te weten over welke tijd er welk temperatuurverschil over de elementen optreedt. Vooralsnog is het voor het berekenen van de totale opbrengst niet van belang om wanneer dit temperatuurverschil optreedt. Daarom wordt het optredende temperatuurverschil weergegeven in de vorm van

een zogenaamde *duurkromme*. Een *duurkromme* geeft aan gedurende welke tijdsduur het temperatuurverschil groter is van een bepaalde waarde. In feite worden voor een bepaalde meetperiode alle temperatuurwaarden (minuutgemiddeld) voor één laag gesorteerd op aflopende grootte. Een *duurkromme* geeft meer inzicht in het effect van het register. Figuur 4.7 illustreert dit.

Duurkromme van het temperatuurverschil over het Peltierelement

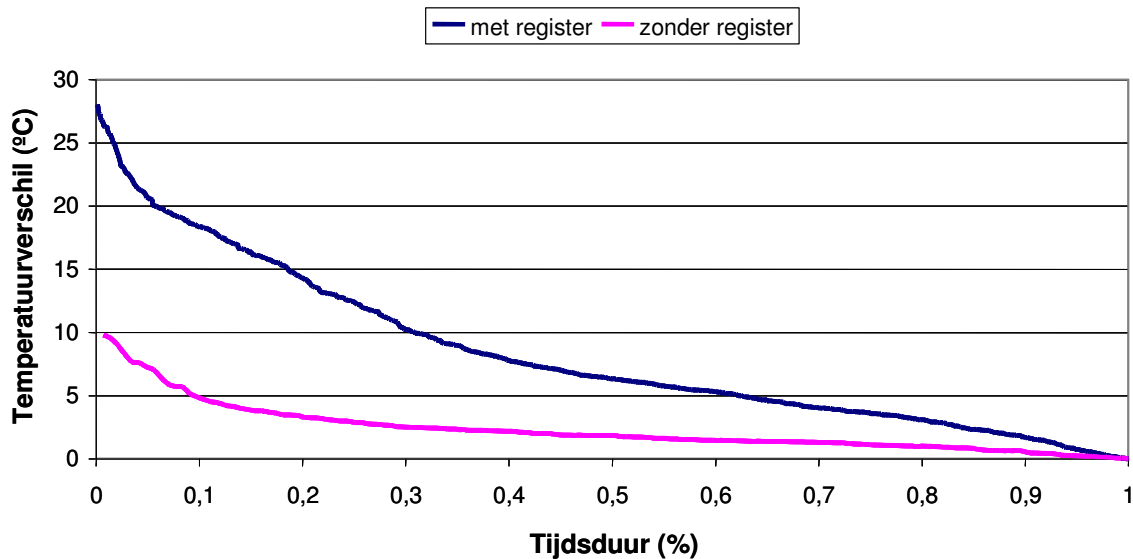


Figuur 4.7 Duurkromme voor het temperatuurverschil over de Peltierelementen

Als de registers niet worden gebruikt, blijkt het temperatuurverschil over de Peltierelementen niet groter te worden dan 2°C. Door wel gebruik te maken van de registers (10°C) kan dit temperatuurverschil vergroot worden tot 12°C. Het oppervlak onder de *duurkromme* is een maat voor het potentieel voor elektriciteitsopwekking. Een conclusie uit Figuur 4.7 is dat het natuurlijk temperatuurverschil over het Peltierelement laag is en dat er zonder registers geen noemenswaardige opbrengst verwacht mag worden..

In Figuur 4.8 is de *duurkromme* van het temperatuurverschil over de gehele asfaltlaag weergegeven. Hier is het maximale temperatuurverschil zonder register 10°C en met register 27°C. Deze temperatuurverschillen geven een inzicht in het potentieel van het wegdek indien het gehele temperatuurverschil kan worden gebruikt om de elektriciteit op te wekken. Dit vraagt echter wel om een andere opbouw van het Peltierelement. Zoals al vermeld worden de huidige Peltierelementen in de proefopstelling normaliter gebruikt voor koeling en hebben daardoor een lage warmteweerstand waardoor ook een hoge warmtestroom nodig is om een bruikbaar temperatuurverschil te genereren.

Duurkromme van het temperatuurverschil over de gehele asfaltlaag



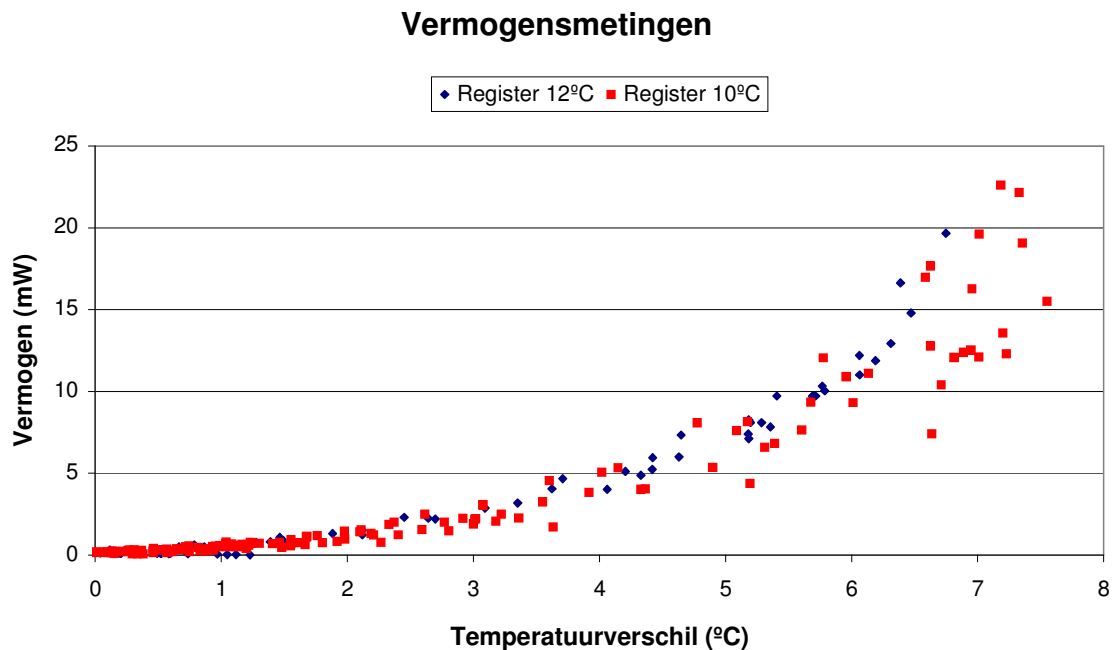
Figuur 4.8 Duurkromme voor het temperatuurverschil over de gehele asfaltlaag

4.3 Opbrengstmetingen aan Peltierelementen

4.3.1 Meting elektrisch vermogen

Naast temperatuurmetingen zijn ook opbrengstmetingen uitgevoerd. Het elektrische vermogen dat door de Peltierelementen wordt opgewekt is gedurende een aantal weken gemeten. Bij een eerste analyse bleek dat veel Peltierelementen geen vermogen afgaven. De oorzaak hiervan is niet achterhaald. Er bleken echter nog voldoende Peltierelementen beschikbaar die wel een meetbaar vermogen afgaven. Deze zijn gebundeld (510 in totaal) en als één groep in serie geschakeld bemeten. Het elektrische vermogen is bepaald door de gemeten stroom en spanning over een externe belastingweerstand met elkaar te vermenigvuldigen. Daarbij is de externe weerstand (op basis van de gemeten inwendige weerstand van de elementen) zodanig ingesteld dat in theorie het maximaal vermogen wordt opgewekt.

Figuur 4.9 geeft het opgewekte vermogen als functie van het temperatuurverschil weer. In deze figuur zijn metingen met actieve registers van 10°C en 12°C weergegeven. De metingen zonder actieve registers gaven zo goed als geen opbrengst (hetgeen op basis van de temperatuurmetingen zonder registers ook al verwacht mocht worden)



Figuur 4.9 Het opgewekte vermogen bij actieve registers (10°C en 12°C)

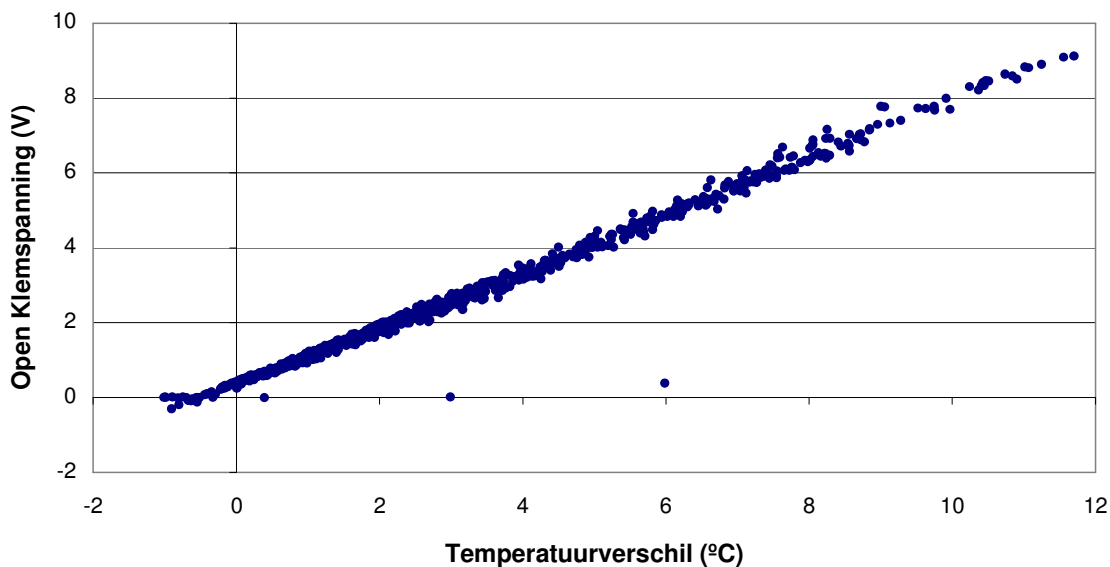
In theorie is het vermogen evenredig met het kwadraat van het temperatuurverschil (afgezien van het effect van de temperatuur op de inwendige elektrische weerstand van het Peltierelement, zie bijlage A). Uit Figuur 4.9 blijkt dat het maximaal opgewekte vermogen bij een temperatuurverschil van 7 °C ongeveer 22 mW bedraagt. Uit bijlage A blijkt dat de opbrengst van één Peltierelement in theorie 20 mW bij 7 °C temperatuurverschil. Van de 510 in serie geschakelde elementen zou dus 5 W vermogen verwacht mogen worden. Het gemeten vermogen blijft daarmee ver achter bij het theoretisch verwachte vermogen.

4.3.2 Metingen open klemspanning

Ondanks het feit dat de principewerking van de Peltierelementen (omzetting van een temperatuurverschil naar elektriciteit) in de vorige paragraaf is aangetoond, blijft de voorspelde elektrische opbrengst ver achter bij de theoretisch verwachte opbrengst. Om een indruk te krijgen van de oorzaak daarvan zijn ook metingen uitgevoerd aan de open

klemspanning van de groep Peltierelementen. Dit is de spanning die gemeten wordt zonder belasting. Hiermee worden effecten van het spanningverval over de inwendige weerstand van de elementen uitgesloten. Er loopt (behalve een te verwaarlozen meetstroom) immers geen stroom door de elementen. Figuur 4.10 geeft de gemeten open klemspanning weer

Open Klemspanning



Figuur 4.10 Gemeten open klemspanning van de bij de meting betrokken Peltierelementen

Figuur 4.10 geeft een keurig netjes lineair verband tussen de open klemspanning en het gemeten temperatuurverschil. Dit is conform de theoretische werking van de Peltierelementen en ondersteunt de uitspraak dat de Peltierelementen in principe werken. Wat opvalt is dat bij een temperatuurverschil van 0 °C nog een spanning wordt gemeten. Dit is zo goed als zeker een gevolg van een afwijking in de temperatuurmetingen. Uit de figuur volgt dat het werkelijke temperatuurverschil circa 0,5 °C hoger moet zijn dan het gemeten verschil.

Bij een temperatuurverschil van 10 °C is de open klemspanning circa 9,5 V. Voor één goed werkend Peltierelement is dit 0,12 V. Dit suggereert dat een equivalent van 79 van 510 elementen zouden werken. Deze zouden dan 1,7 W moeten leveren in plaats van de gemeten 22 mW. Dit laatste wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de inwendige weerstand van de Peltierelementen die niet werken maar wel in de elektrische keten zijn opgenomen en het feit dat de belastingsweerstand niet optimaal is ingesteld op deze hogere inwendige weerstand.

5 MODELLERING EN TOEKOMSPERSPECTIEF

5.1 Inleiding modellering en toekomstperspectief

Modellering van het temperatuurverschil in het asfalt geeft, samen met het model voor de Peltieropbrengst uit bijlage A, inzicht in verbetermogelijkheden voor dit opwekprincipe en inzicht in het potentieel onder andere weersomstandigheden dan gemeten. Daartoe is gebruik gemaakt van een tweetal thermische modellen:

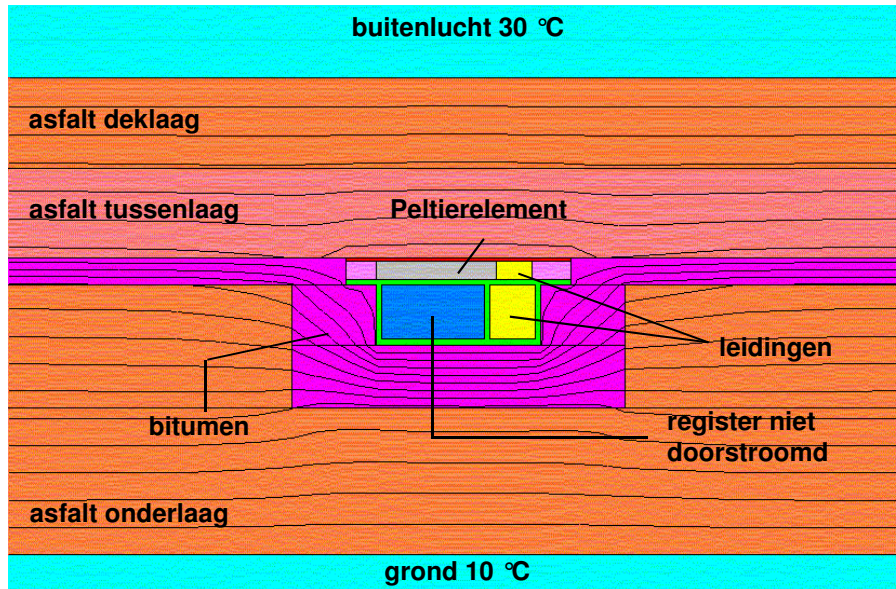
- een statisch, tweedimensionaal warmtestroommodel
- een dynamisch, ééndimensionaal warmtestroommodel

Beide modellen hebben hun specifieke voor- en nadelen. Het statisch model geeft door het gebruik van isothermen inzicht in de temperatuurverschillen in de verschillende asfaltlagen zonder dat de effecten van de warmtecapaciteiten worden meegenomen. Dit model is typisch bruikbaar in een ontwerpfase om warmtestromen zichtbaar te maken. Het dynamisch model neemt het effect van warmtecapaciteiten mee maar berekent slechts warmtestromen in één richting. Het dynamische model is opgesteld om het werkelijke gedrag van het wegdek gedurende de tijd te kunnen simuleren en om de opbrengsten voor een standaard jaar te kunnen berekenen.

5.2 Statisch thermisch model

Het statisch thermisch model dat is gebruikt om de asfaltconstructie met de Peltierelementen thermisch door te rekenen is gebaseerd op een standaard zogenaamd koudebrugmodel dat gebruikt wordt om in gebouwen warmtestromen in constructies door te rekenen. Aan de hand van een dwarsdoorsnede van het asfalt (Figuur 3.6) is een computermodel gemaakt waarin ook de warmtegeleiding van de diverse materialen is opgenomen. Het koudebrugmodel berekent de warmtestromen in de constructie en geeft het temperatuurprofiel in de constructie weer aan de hand van isothermen (lijnen die punten met een gelijke temperatuur verbinden).

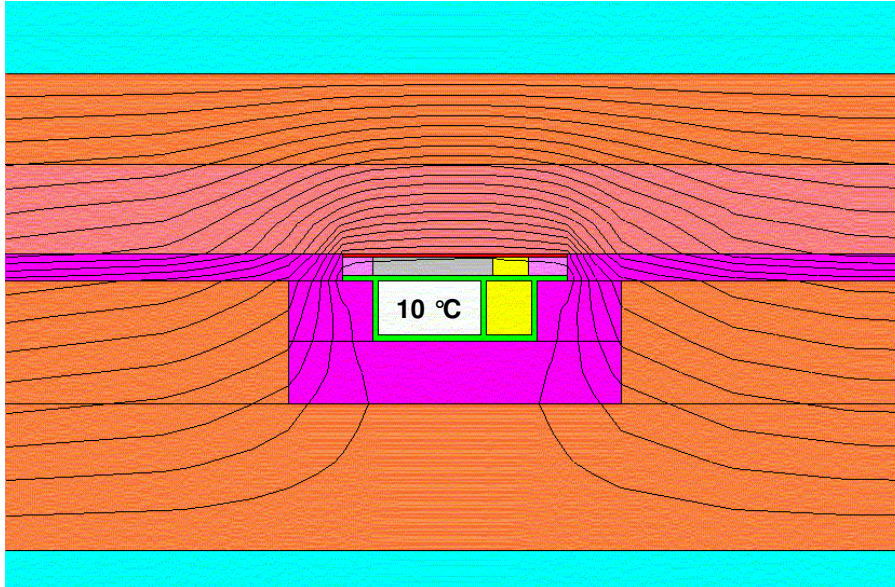
In Figuur 5.1 tot en met Figuur 5.3 worden de doorsneden van het asfalt en de bijbehorende isothermen schematisch weergegeven. In de modellen is de temperatuur van de onderlaag (bodem) constant op 10 °C gesteld en de temperatuur van de bovenlaag (lucht) op 30 °C.



Figuur 5.1 Statisch thermisch model zonder werkend register

In Figuur 5.1 is te zien dat de grootste temperatuurverschillen zich in het isolerende materiaal tussen de deklaag en de tussenlaag en rond het register bevinden. In deze (paarse) bitumenlaag liggen de isothermen dicht bij elkaar. Het temperatuurverschil over het Peltierelement is zeer klein. Dit is zichtbaar doordat er geen isothermen door het element lopen.

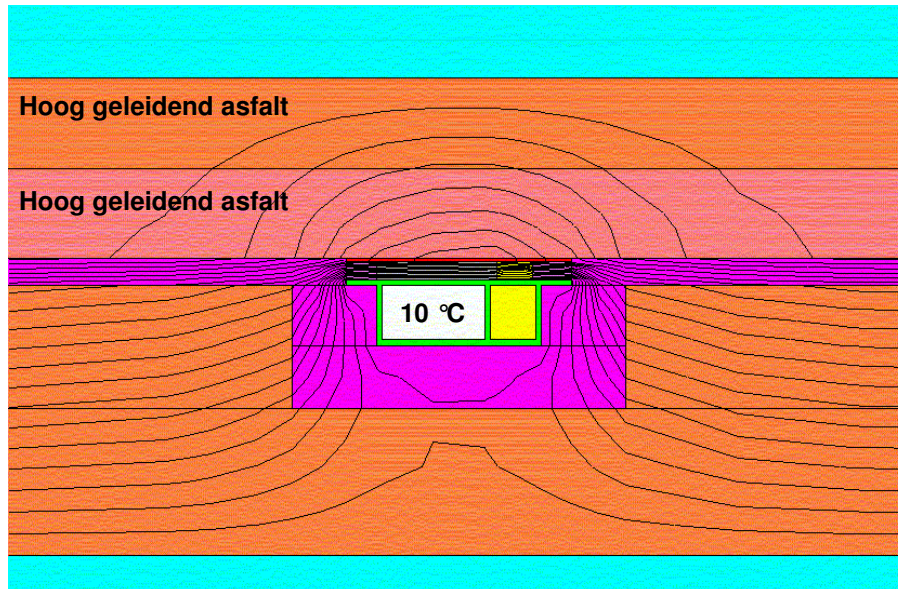
Zodra gebruik wordt gemaakt van een register, treedt er een verandering op in het verloop van de isothermen. In Figuur 5.2 is het verloop van de isothermen te zien als gebruik wordt gemaakt van een register met een temperatuur van 10°C.



Figuur 5.2 Statisch thermisch model met werkend register van 10°C

Bij een vergelijking tussen Figuur 5.1 en Figuur 5.2 valt op dat het temperatuurverloop in de asfaltenlagen bij een werkend register afwijkt van het temperatuurverloop zonder werkend register. Bij het gebruik van een register neemt het temperatuurverschil in de lagen boven het register toe. Dit blijkt uit het toenemend aantal isothermen dat boven het register loopt. Ondanks het gebruik van het register is het berekende temperatuurverschil over het Peltierelement gering. In de praktijk blijkt het gemeten temperatuurverschil over het Peltierelement groter te zijn. Dit kan worden verklaard door het dynamische karakter van de proefopstelling die in dit statisch model niet tot uiting komt.

Het temperatuurverschil over het Peltierelement kan worden vergroot door gebruik te maken van hooggeleidend asfalt. In Figuur 5.3 is zichtbaar dat het gebruik van hooggeleidend asfalt in de bovenste twee lagen leidt tot een groter temperatuurverschil over het Peltierelement. Het temperatuurverschil blijkt uit het groot aantal isothermen dat door het Peltierelement loopt.



Figuur 5.3 Statisch thermisch model met werkend register en hoog geleidend asfalt

De conclusie uit de statische modellering is dat het voor het realiseren van een groot temperatuurverschil over het Peltierelement noodzakelijk is dat het register werkt. Daarnaast helpt het om een zo hoog mogelijke warmtegeleiding van de asfallagen boven het element te realiseren. Dit ligt voor de hand omdat een groot temperatuurverschil over het Peltierelement pas gerealiseerd kan worden met een hoge warmtestroom (en dus een hoge warmtegeleiding van het asfalt).

5.3 Dynamisch thermisch model

5.3.1 Beschrijving dynamisch model

Voor het voorspellen van het temperatuurverloop in het asfalt is een dynamisch model gebruikt. In dit eendimensionale model wordt de warmteweerstand én de warmtecapaciteit van het asfalt en van de Peltierelementen meegenomen.

Het model kent twee type invoerwaarden: tijdafhankelijke invoerwaarden en tijdonafhankelijke invoerwaarden. De tijdafhankelijke invoerwaarden zijn:

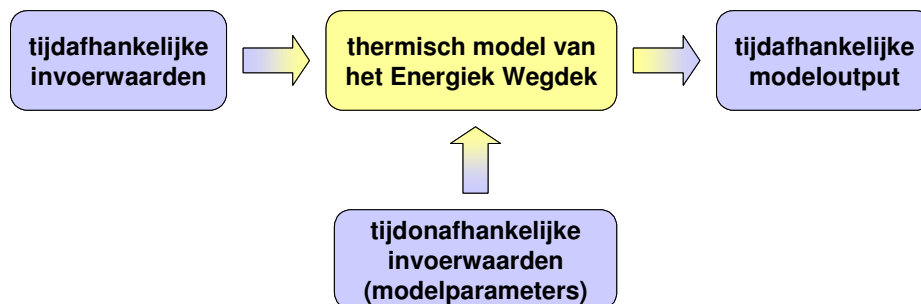
- de zoninstraling op een horizontaal vlak,
- de luchttemperatuur,
- de windsnelheid en

- de hemeltemperatuur.

De effectieve hemeltemperatuur dient te worden bepaald vanwege de warmte-uitstraling van het wegdek naar de hemel. Deze warmte-uitstraling (met name 's nachts) is verantwoordelijk voor bijvoorbeeld vorst aan de grond en bevroren autoruiten, ook al is de luchttemperatuur niet onder nul gekomen. Deze warmtestraling kan berekend worden door aan de hemel een fictieve temperatuur toe te kennen (de hemeltemperatuur). Deze hemeltemperatuur hangt af van de relatieve vochtigheid van de lucht en van de bewolgingsgraad.

De volgende tijdonafhankelijke invoerwaarden (parameters) zijn meegenomen in het thermisch model:

- de dikte van de (asfalt)lagen,
- het warmtegeleidingsvermogen per laag,
- de specifieke warmtecapaciteit per laag,
- de grondtemperatuur (constant verondersteld),
- de absorptie/emissiecoëfficiënt asfalt (warmtestraling) en
- de parameters voor convectieve warmteoverdracht.



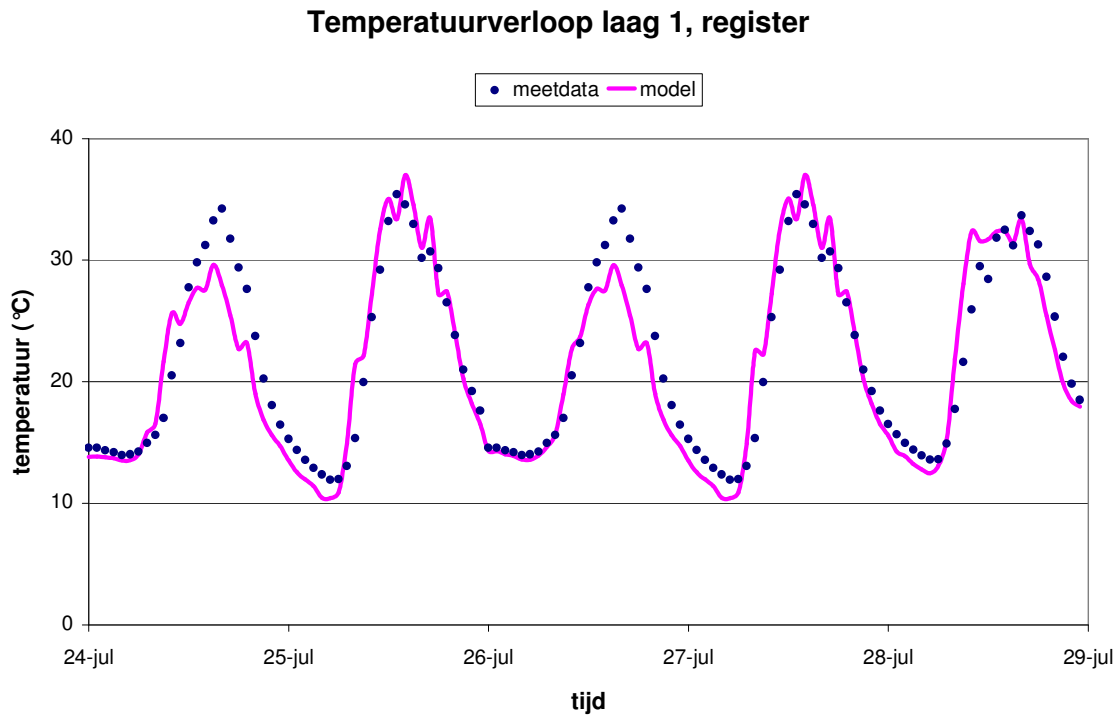
Figuur 5.4 Schematische weergave van het dynamische thermisch model

De tijdonafhankelijke waarden geven onder andere de thermische eigenschappen en dimensies van het asfalt weer, evenals de relatie tussen de windsnelheid en de convectieve warmteoverdracht op het asfalt. Een belangrijke aanname hierbij is dat de thermische eigenschappen van het asfalt niet variëren met de temperatuur. In het beperkte temperatuurbereik van de experimenten is dit gerechtvaardigd.

Het gebruik van het thermische model leidt tot een tijdafhankelijke modeloutput: het temperatuurverloop per laag en de warmtestromen per laag. Bijlage B gaat verder in op de opbouw van het dynamisch thermisch model.

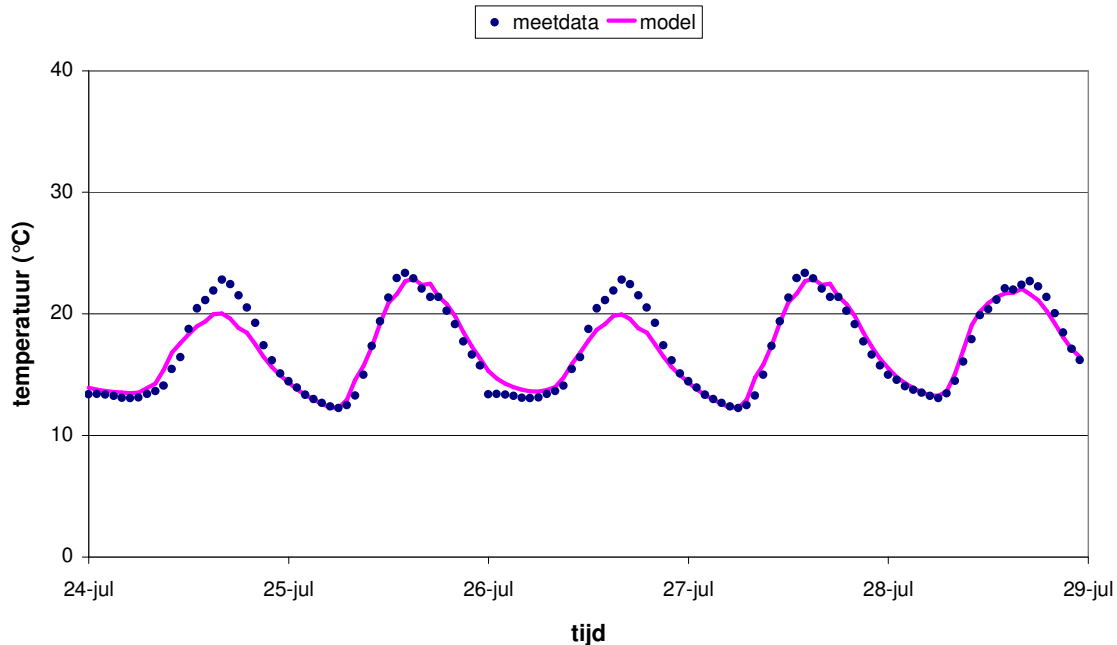
5.3.2 Validatie thermisch model

Nadat het model is opgebouwd en de parameters en constanten, aan de hand van een referentiemeting, zijn geoptimaliseerd, is het model gevalideerd. Bij de validatie worden de gemodelleerde temperaturen per laag vergeleken met de werkelijk gemeten waarden. In Figuur 5.5 en Figuur 5.6 wordt het gemeten en het gemodelleerde temperatuurverloop bij gebruik van een register weergegeven.



Figuur 5.5 Gemeten en gemodelleerd temperatuurverloop in de toplaag van het asfalt

Temperatuurverloop laag 3, register



Figuur 5.6 Gemeten en gemodelleerd temperatuurverloop boven het Peltierelement

Uit bovenstaande figuren blijkt dat de daadwerkelijk gemeten temperatuur een zelfde trend volgt als de gemodelleerde temperatuur volgens het dynamisch model. Dit geldt zowel in de toplaag als in de laag waar het register en het Peltierelement zich bevinden. De vergelijking tussen de metingen en het model toont dus aan dat het model goed overeenkomt met de werkelijk gemeten waarden. De afwijking op de eerste dag heeft te maken met zogenaamde inslingerverschijnselen.

5.3.3 Opschaling resultaten naar een gemiddeld jaar

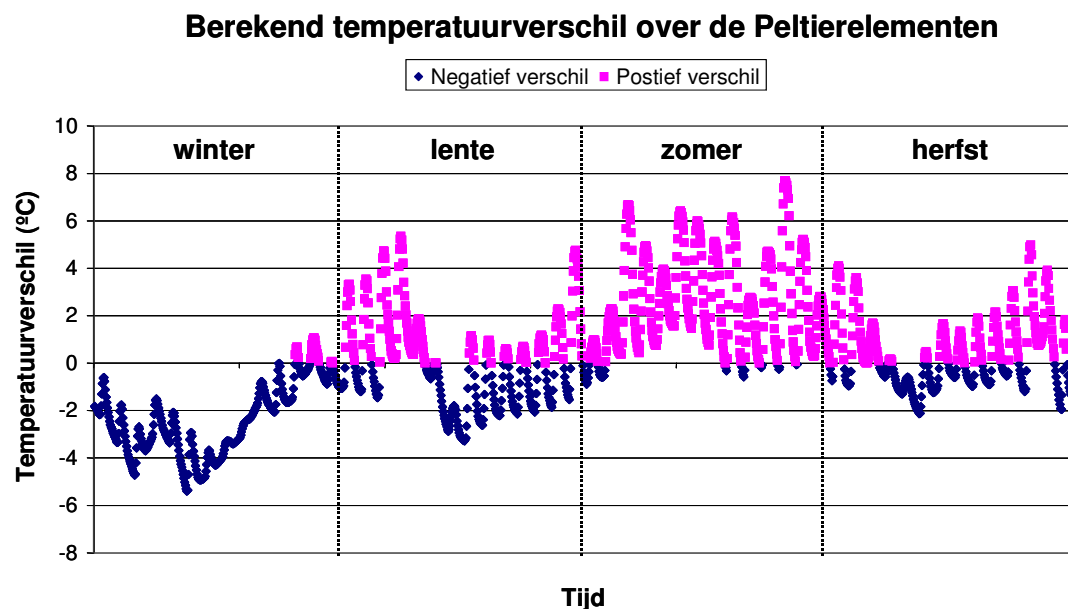
Het resultaat van de validatie is een set parameters (onder andere de warmtegeleiding en de warmtecapaciteiten) die de warmtestromen in het asfalt goed beschrijven. Deze parameterset wordt gebruikt om de warmtestromen en het temperatuurverschil over de Peltierelementen te berekenen voor een standaardjaar. Er wordt gebruik gemaakt van het verkort referentiejaar volgens de norm NEN 5060 'verkort referentiejaar voor buitencondities'. Het doorrekenen van een jaarsituatie aan de hand van het verkort referentiejaar is een

algemeen geaccepteerde methodiek en wordt voor verschillende doeleinden gebruikt, bijvoorbeeld:

- berekening van de jaarlijkse gemiddelde energiebehoefte voor klimatisering van gebouwen,
- berekeningen van temperatuuroverschrijding en
- berekeningen van de jaarlijkse gemiddelde opbrengst van zonne-energiesystemen.

In een verkort referentiejaar worden jaarklimaatgegevens samengevat in acht weken, iedere twee weken vindt een wisseling van het seizoen plaats. Op basis van deze acht weken kunnen de resultaten worden geëxtrapoleerd naar een geheel jaar.

Met de gegeven parameterset uit de validatie is voor het verkort referentiejaar het temperatuurverloop in de verschillende (asfalt)lagen berekend. Daarbij is een constante registertemperatuur van 12 °C aangenomen. Het daaruit volgende temperatuurverschil over de Peltierelementen is weergegeven in Figuur 5.7. Een positieve waarde betekent dat de temperatuur van het asfalt boven het Peltierelement hoger is dan de registertemperatuur en vice versa.



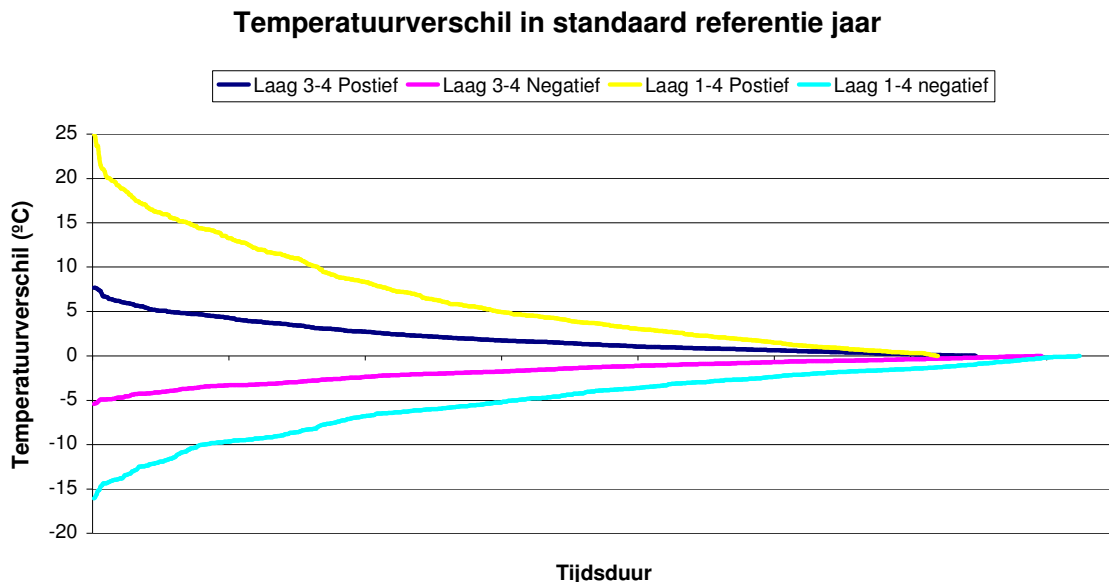
Figuur 5.7 Temperatuurverschil over de Peltierelementen voor een heel jaar

Duidelijk is dat in de winter vrijwel alleen sprake is van een negatief temperatuurverschil en in de zomer vrijwel alleen van een positief temperatuurverschil. In de lente en de herfst is het

temperatuurverschil 's nachts overwegend negatief en overdag overwegend positief. Dit ligt ook in de lijn van de verwachting.

De aanname van een constante registertemperatuur van circa 12 °C is gerechtvaardigd als gebruik wordt gemaakt van grondwater (bijvoorbeeld via een aquifer). Als gebruik wordt gemaakt van oppervlaktewater zal de temperatuur hiervan veranderen met het seizoen en zal de potentiële Peltieropbrengst verminderen (bij een hoge buitentemperatuur in de zomer is ook de watertemperatuur relatief hoog en daarmee het temperatuurverschil over het Peltierelement lager). Wordt in de winter gebruik gemaakt van laagwaardige restwarmte dan kan een hogere opbrengst gerealiseerd worden.

Figuur 5.8 geeft de durkrommen weer voor het temperatuurverschil over het Peltierelement en voor het maximale optredende temperatuurverschil (tussen de toplaag en het register). Daarbij zijn voor een positief en een negatief temperatuurverschil twee verschillende durkrommen getekend. Uit de durkromme van de temperatuurverschillen blijkt dat in een standaard jaar er gedurende een iets langere tijd een negatief temperatuurverschil optreedt dan een positief temperatuurverschil. Absoluut gezien zijn de positieve temperatuurverschillen echter groter.



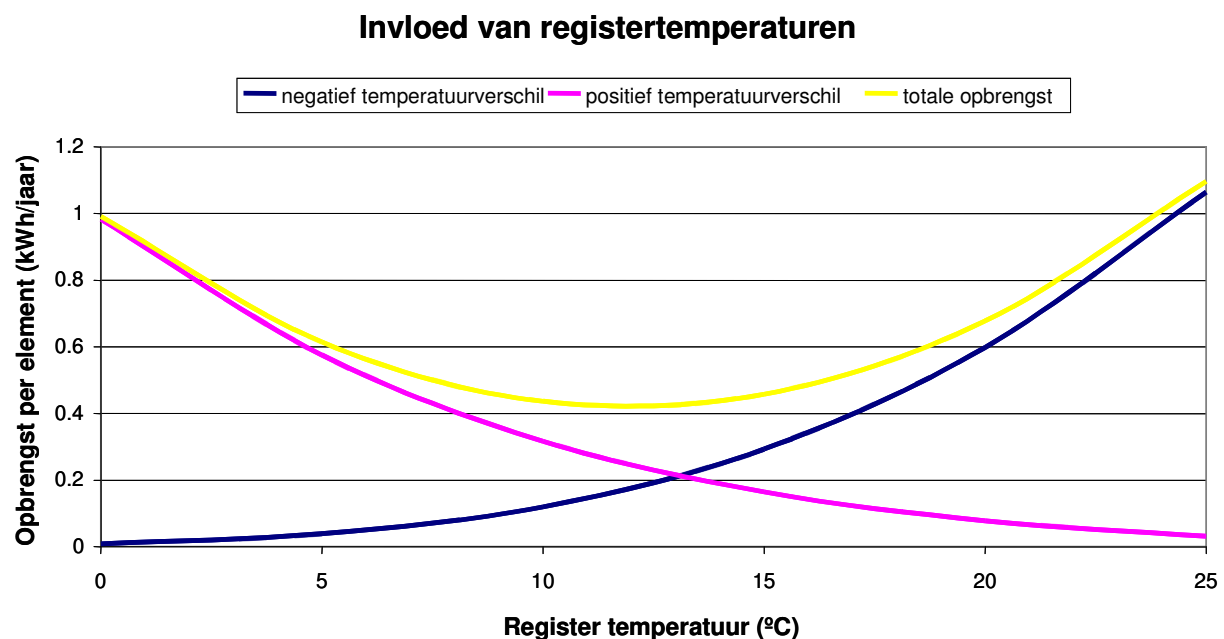
Figuur 5.8 **Durkromme van het berekend temperatuurverschil**

Het maximale temperatuurverschil over de laag waarin de Peltierelementen zich bevinden (laag 3) is ongeveer 8°C. Het maximale negatieve temperatuurverschil is -5°C. Bij een negatief temperatuurverschil werkt een Peltierelement ook en levert hetzelfde vermogen als bij een gelijk positief temperatuurverschil.

5.4 Berekening van de Peltierjaaropbrengst

Uit berekeningen met het standaard referentiejaar kan, met behulp van het Peltiermodel, de gemiddelde jaaropbrengst berekend worden. Een enkel Peltierelement zal, bij een constante registertemperatuur van 12 °C in een gemiddeld jaar circa 0,047 kWh elektrische energie opwekken. Indien gebruik gemaakt kan worden van het temperatuurverschil over de gehele asfaltlaag (bijvoorbeeld door een andere constructie van het Peltierelement in combinatie met hoog geleidend asfalt) bedraagt de jaaropbrengst 0,422 kWh per element. Een toename van het gemiddeld temperatuurverschil van iets meer dan een factor 3 betekent een bijna vertienvoudiging van de potentiële Peltieropbrengst.

De opbrengt kan verder worden vergroot door gebruik te maken van andere registertemperaturen. In Figuur 5.9 is weergegeven hoe de potentiële opbrengst per Peltierelement per jaar afhangt van de registertemperatuur.



Figuur 5.9 De totale Peltieropbrengst als functie van de registertemperatuur

Uit bovenstaande figuur blijkt dat bij een hogere registertemperatuur de opbrengst uit een positief temperatuurverschil zal dalen en uit een negatief temperatuurverschil zal stijgen. Dit ligt ook voor de hand. Andersom daalt de opbrengst uit een negatief temperatuurverschil en stijgt de opbrengst uit positief temperatuurverschil als de registertemperatuur daalt. Het blijkt dat een minimum opbrengst per Peltierelement wordt behaald bij een registertemperatuur tussen de 10 °C-15 °C. Om de opbrengst te verhogen kan dus worden gezocht naar manieren om, op een energetisch gunstige manier, het water in de registers te verwarmen of af te laten koelen.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

Gedurende een aantal maanden zijn metingen verricht aan het proefvak Energiek Wegdek in Didam. Door redundantie in het systeem (extra meetsensoren en Peltierelementen) zijn, ondanks het feit dat een aantal sensoren onbetrouwbaar bleken, representatieve temperatuur- en opbrengstmetingen uitgevoerd.

Uit de temperatuur- en opbrengstmetingen blijkt dat het principe om energie uit temperatuurverschillen in het wegdek op te wekken werkt. Het project is daarmee technisch geslaagd. De hoeveelheid energie die hierbij werd opgewekt was echter veel lager dan verwacht. Dit kan worden verklaard door een aantal inactieve of minder presterende Peltierelementen in het wegdek. De reden van het achterblijven bij de specificaties is echter niet achterhaald.

Om in de huidige proefopstelling een werkbaar temperatuurverschil over het Peltierelement te verkrijgen blijkt het noodzakelijk om een register met vloeistofkoeling toe te passen. Dit vraagt om extra pompenergie die op de Peltieropbrengst in mindering moet worden gebracht.

De statische temperatuurmodellen van de warmtestromen in het asfalt geven een goed inzicht in het temperatuurverloop en zijn geschikt om in een ontwerpfase te gebruiken. Het berekende temperatuurverschil met het statisch model komt echter niet volledig overeen met de metingen. Dit wordt onder andere geweten aan het statische karakter van het model.

De resultaten van het dynamische thermische model komen goed overeen met de gemeten waarden. Met behulp van het dynamische model is de Peltieropbrengst voor een standaard referentie jaar berekend, uitgaande van een correct werkend element. Het opgewekte vermogen bedraagt ongeveer 0,04 kWh per element per jaar.

Indien enkele verbeteringen in het ontwerp kunnen worden aangebracht waardoor het totale temperatuurverschil over de asfaltlaag kan worden gebruikt om elektriciteit op te wekken,

kan het opgewekte vermogen toenemen tot 0,42 kWh per element per jaar. Deze verbeteringen zitten in de constructie van het Peltierelement en de thermische eigenschappen van het asfalt (thermisch hoog geleidend asfalt).

6.2 Aanbevelingen

Uit het onderzoek volgen de volgende aanbevelingen:

- Een beter gebruik van het beschikbaar temperatuurverschil kan onder andere gerealiseerd worden door het gebruik van thermisch hooggeleidend asfalt. Hierdoor neemt de warmtestroom door het Peltierelement toe en daarmee ook de elektriciteitsopbrengst.
- Om een maximale opbrengst te realiseren verdient het aanbeveling het Peltierelement te optimaliseren voor deze toepassing. Hierbij kan gedacht worden aan het verlagen van de warmtegeleiding van het Peltierelement, bijvoorbeeld door het element dikker te maken. Een lagere warmtegeleiding leidt tot een groter temperatuurverschil bij dezelfde warmtestroom en daarmee tot een hogere elektriciteitsproductie. De keerzijde hiervan is dat ook de elektrische weerstand toeneemt en daarmee het interne elektriciteitsverlies. Er zal sprake zijn van een optimale constructie die afhangt van het gemiddeld temperatuurverschil over het Peltierelement.
- Indien mogelijk moet het gebruik van een register vermeden worden. Dit vraagt extra investeringen en extra pompenergie. Aan de hand van het dynamisch thermisch model kan worden nagegaan of met een andere Peltierconstructie de toepassing van registers vermeden kan worden.

7 DOORKIJKJE NAAR DE TOEKOMST

Het technisch principe van elektriciteitsopwekking uit asfalt is afdoende aangetoond (afgezien van het feit dat de opbrengst ver onder de te verwachten opbrengst ligt en hier nog geen verklaring voor gevonden is). Echter, een dergelijke toepassing dient ook aan economische criteria te voldoen. Allereerst wordt gekeken naar het potentieel voor elektriciteitsopwekking.

Volgens het Centraal Bureau voor de Statistiek heeft Nederland ruim duizend km² snelweg. In een gemiddeld jaar valt daar circa 975 kWh per m² zonnestraling op. Stel nu dat dit leidt tot een gemiddeld temperatuurverschil in het asfalt van 10 °C. Dan kan worden afgeleid dat deze zonnestraling met maximaal 3,4% rendement kan worden omgezet in elektriciteit (dit volgt uit het zogenaamde Carnot-rendement voor omzetting van warmte in elektriciteit). Dit komt overeen met een opbrengst van 33 kWh per m² wegdek ofwel een potentieel van 34 miljard kWh elektriciteitsopwekking per jaar. Dit is ruim meer dan het jaarlijks elektriciteitsgebruik in Nederland.

In de huidige opstelling levert een Peltierelement 0.04 kWh per element per jaar. Dit komt (bij een element van 4x4 cm²) overeen met 25 kWh per m². Dit komt aardig overeen met de eerder genoemde 33 kWh per m². Indien gebruik gemaakt kan worden van het totale temperatuurverschil over de asfaltlaag neemt de totale opbrengst in theorie toe tot circa 260 kWh per m². Dit is veel meer dan het genoemde potentieel van 33 kWh per m² onder andere omdat het gemiddeld temperatuurverschil hoger ligt dan de 10 °C in het voorbeeld en omdat niet alleen de directe zoninstraling maar ook de luchttemperatuur een bijdrage levert. Daar staat tegenover dat het nog niet zeker is dat een Peltierelement geconstrueerd kan worden dat van het maximale temperatuurverschil gebruik kan maken en dat deze opbrengstschatting gebaseerd is op een wegdek dat volledig "bedekt" is met Peltierelementen terwijl dat in de proefsituatie niet het geval is.

Uitgaande van een redelijk optimistische reële opbrengstschatting van 100 kWh per m² asfalt, een levensduur van 20 jaar en een onderhoudsvrij systeem mag een Peltiersysteem circa 100 EUR per m² kosten bij een elektriciteitsvergoeding van 0,10 EUR per kWh. Dit is niet overdadig, zeker niet als er ook nog energie verloren gaat aan pompen voor de registers. Daar staat tegenover dat voor afgelegen locaties (waar het leggen van een

elektriciteitskabel erg duur is) of locaties waar onderhoud een belangrijk item is, Peltierelementen in het wegdek mogelijk rendabel kunnen zijn, bijvoorbeeld voor het aansturen van LED-verlichting in het wegdek.

APPENDIX A OPBRENGSTMODEL VOOR PELTIERELEMENT

Inleiding Peltierelementen

Het principe van Peltierelementen berust op het zogenaamde Peltiereffect namelijk dat een stroom van ladingsdragers in een metaal warmte kan transporteren. De hoeveelheid getransporteerde warmte Q (W) is recht evenredig met de elektrische stroom I (A):

$$Q = \Pi \cdot I$$

met Π de Peltiercoëfficiënt (W/A). Het Peltiereffect wordt voornamelijk gebruikt voor het ontwikkelen van koelers (bijvoorbeeld voor computerprocessoren of voor draagbare koelboxen)

Het omgekeerde effect bestaat ook. Door een temperatuurverschil ΔT aan te brengen tussen twee verbindingen van verschillende metalen of halfgeleiders ontstaat een spanningsverschil V . Dit wordt het Seebeckeffect genoemd:

$$V = S \cdot \Delta T$$

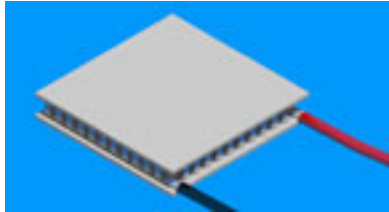
met S de Seebeckcoëfficiënt (V/K). Het Seebeckeffect wordt voornamelijk gebruikt in thermokoppels (temperatuurmetingen) en in thermo-elektrische generatoren.

De relatie tussen deze twee coëfficiënten is:

$$S = \frac{\Pi}{T}$$

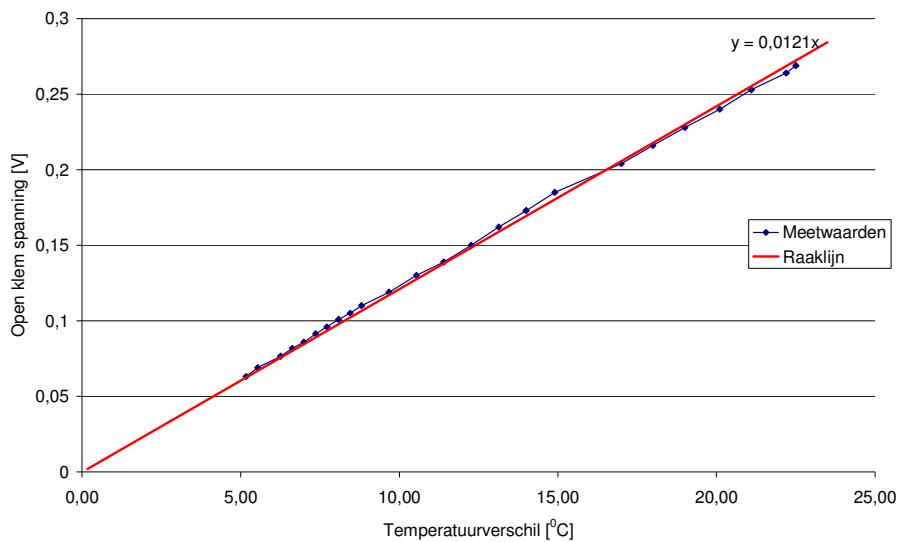
met T de temperatuur. Deze laatste relatie is belangrijk want deze houdt in dat materialen die goed zijn voor Peltierelementen (hoge Peltiercoëfficiënt Π) ook goed zijn voor de opwekking van elektriciteit (hoge Seebeckcoëfficiënt S).

In het energiek Wegdek zijn Peltierelementen gebruikt omdat deze qua uitvoering en verkrijgbaarheid het best aansluiten bij het experiment. Deze Peltierelementen met een afmeting van circa $4 \times 4 \times 0,6 \text{ cm}^2$ (zie figuur A1) zijn ontworpen voor koeling en daarmee voor relatief hoge stromen. De elementen hebben een lage warmtegeleidingscoëfficiënt en dat betekent dat ook een hoge warmtestroom nodig is om een bruikbaar temperatuurverschil over het Peltierelement te krijgen. In dat opzicht is de keuze voor deze Peltierelementen uit ontwerpogpunt zeker niet optimaal. Voor het aantonen van het principe van elektriciteitsopwekking uit temperatuurverschillen in asfalt voldoet deze keuze.



Figuur A1 Voorbeeld van een Peltierelement

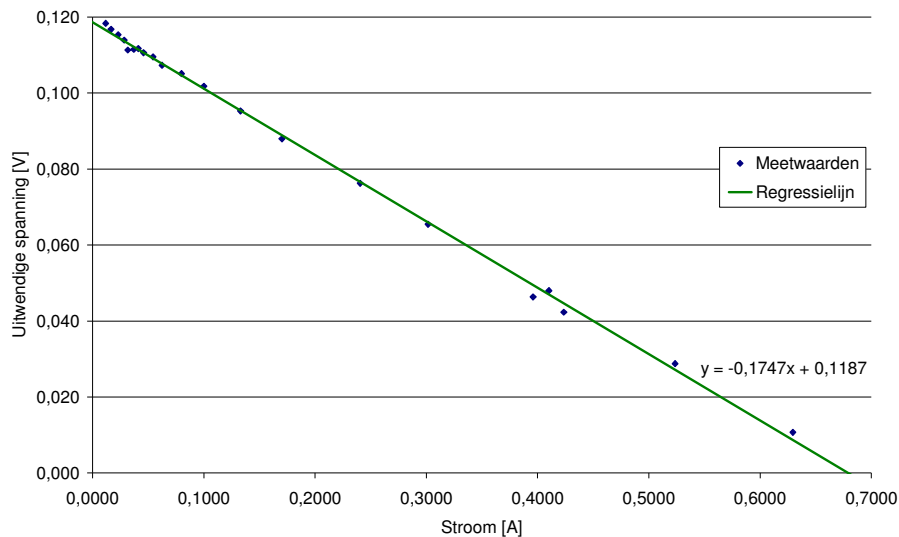
In figuur A2 staat de gemeten relatie tussen het temperatuurverschil over de gebruikte Peltierelementen en de open klemspanning weergegeven. Deze relatie komt goed overeen met wat op basis van het Seebeckeffect verwacht mocht worden (een lineair verband tussen de open klemspanning en het temperatuurverschil). De gemeten Seebeckcoëfficiënt van 0,0121 V/K komt goed overeen met de door de fabrikant opgegeven waarde van 0,0124 V/K. Dit komt bij 20 °C overeen met een Peltiercoëfficiënt van 3,6 W/A wat een reële waarde is.



Figuur A2 Meting van de open klemspanning van een Peltierelement

Er kan pas elektrisch vermogen aan de Peltierelementen onttrokken worden als deze belast worden. Figuur A3 geeft aan hoe Peltierelementen reageren op een elektrische belasting. Uit deze figuur volgt dat het Peltierelement zich gedraagt als een ideale spanningsbron (waarvan de spanning afhangt van het temperatuurverschil) met in serie een inwendige weerstand R_i van circa 0,175 Ω . Deze inwendige weerstand is temperatuurafhankelijk maar

in het beperkte temperatuurgebied waarin de Peltierelementen worden toegepast, wordt deze constant verondersteld.



Figuur A3 Stroom-spanningscurve van een Peltierelement bij 10 °C temperatuurverschil

Het vermogen P dat door een Peltierelement wordt geleverd bij een temperatuurverschil ΔT en een belastingsweerstand R_b is:

$$P = \frac{(S\Delta T)^2}{(R_i + R_b)^2} \cdot R_b$$

Dit vermogen is maximaal als R_b gelijk is aan R_i . Het maximale vermogen P_{\max} bedraagt dan:

$$P_{\max} = \frac{(S\Delta T)^2}{4R_i}$$

Dit komt voor de gebruikte Peltierelementen overeen met een vermogen 21 mW per element bij een temperatuurverschil over het element van 10 °C.

APPENDIX B **BESCHRIJVING DYNAMISCH THERMISCH MODEL.**

Inleiding

Doelstelling van de experimenten is een beeld te krijgen of de optredende temperatuurverschillen in het asfalt over de seizoenen perspectief bieden voor het stimuleren van de ontwikkeling van een nieuwe generatie Peltierelementen of andere technieken voor het opwekken van duurzame elektrische energie uit zonnewarmte. Daarbij komen de volgende vragen naar voren met betrekking tot het temperatuurverloop in het asfalt:

- welke temperatuurverschillen treden op in het asfalt en is dit temperatuurverloop te verklaren dan wel te voorspellen aan de hand van de thermische eigenschappen van het asfalt en de weersomstandigheden?
- welke invloed hebben de registers in het wegdek op het temperatuurverloop in het asfalt en in hoeverre zijn de registers nodig om een voldoende hoog temperatuurverschil te bereiken?

Om het temperatuurverloop in het asfalt te kunnen verklaren en te kunnen voorspellen wordt een thermisch model opgesteld van het asfalt dat in staat moet zijn de optredende temperatuurverschillen in het asfalt en over de Peltier-elementen te verklaren (en te voorspellen) aan de hand van de thermische eigenschappen van het asfalt, de weersomstandigheden en de registertemperaturen.

Modelkeuze

Om het temperatuurverloop in het asfalt te verklaren en te voorspellen is een **dynamisch** model nodig. Dat wil zeggen dat in het model rekening wordt gehouden met tijdeffecten en de warmtecapaciteiten van het asfalt en de Peltierelementen. Verder wordt vooralsnog uitgegaan van een **eendimensionaal** model. Dit wordt gedaan puur uit praktische overwegingen. Een meerdimensionaal model geeft inzicht in de grootte en de richting warmtestromen door het asfalt. Dit is in een ontwerpstadium erg nuttig. Standaardprogramma's voor meerdimensionale warmtestromen (bijvoorbeeld programma's voor het doorrekenen van koudebruggen) zijn echter vaak niet dynamisch. Meerdimensionale, dynamische warmtestroommodellen zijn gecompliceerd en schieten in dit project hun doel voorbij. Eendimensionale, dynamische modellen kunnen met behulp van standaardgereedschappen als Matlab/Simulink of Excel goed en snel doorgerekend worden. Validatie aan praktijkdata zal moeten uitwijzen of een eendimensionaal model voldoet.

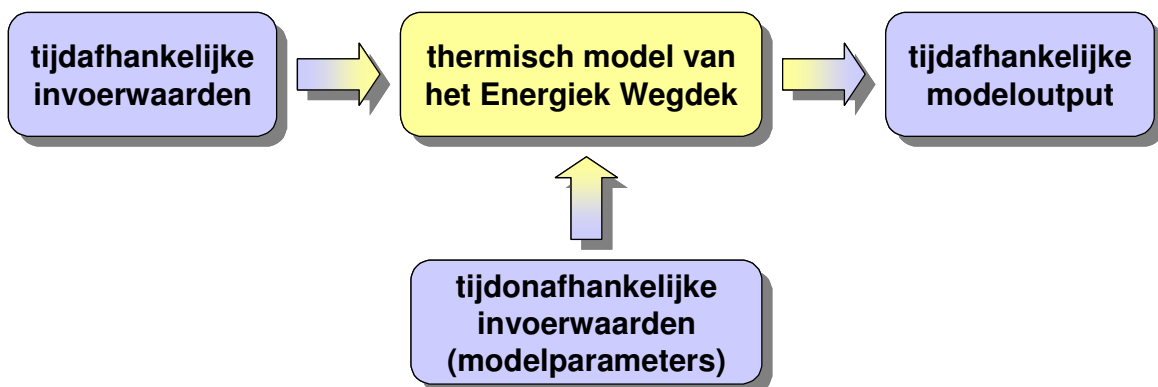
Modelopzet

Uitgangspunt is dus een eendimensionaal, dynamisch model. De algemene opzet van het model is weergegeven in figuur B1. Het model kent twee typen invoerwaarden: tijdafhankelijke invoerwaarden en tijdonafhankelijke invoerwaarden (modelparameters). De tijdafhankelijke waarden zijn:

- de globale zoninstraling op een horizontaal vlak (W/m^2); dit is de som van de directe straling (gecorrigeerd voor de invalshoek) en de diffuse straling.
- de luchttemperatuur ($^{\circ}C$)
- de windsnelheid (m/s)
- de effectieve hemeltemperatuur (in verband met de uitstraling van het wegdek, $^{\circ}C$).

$I_g(t)$: globale zoninstraling
 $T_{lucht}(t)$: luchttemperatuur
 $T_{hemel}(t)$: hemeltemperatuur
 $v_{wind}(t)$: windsnelheid

$T_i(t)$: temperatuurverloop per laag
 $Q_i(t)$: warmtestromen per laag



t_i : dikte per laag
 λ_i : geleidingsvermogen per laag
 $C_{s,i}$: specifieke warmtecapaciteit per laag
 T_{grond} : constante grondtemperatuur
 ϵ_{asfalt} : absorptie/emissiecoëfficiënt asfalt
 $\alpha_{c,0}, \alpha_{c,v}$: parameters voor convectieve warmteoverdracht

Figuur B1 Schematische modelopzet.

De tijdonafhankelijke waarden of modelparameters geven bijvoorbeeld de thermische eigenschappen en dimensies van het asfalt weer maar ook de relatie tussen de windsnelheid en de convectieve warmteoverdracht aan het asfaltoppervlak.

De resultaten van het model zijn:

- het verloop in de tijd van de temperaturen in het asfalt
- het verloop in de tijd van de warmtestromen in het asfalt

Warmte-uitwisseling aan het oppervlak

Het oppervlak van het asfalt wisselt warmte uit met de omgeving. Allereerst is er de globale zoninstraling $I_g(t)$. De absorptiecoëfficiënt ϵ_{asfalt} bepaalt welk deel van de invallende straling wordt geabsorbeerd. Voor asfalt wordt $\epsilon_{\text{asfalt}}=0,2-0,4$ aangehouden.

Daarnaast zal het asfalt warmte verliezen naar de omgeving toe. Dit gebeurt door convectie en door uitstraling. Voor het warmteverlies (of de warmtewinst) door convectie $I_c(t)$ geldt:

$$I_c(t) = \alpha_c \cdot (T_{\text{asfalt}}(t) - T_{\text{lucht}}(t))$$

met T_{asfalt} de oppervlaktetemperatuur van het asfalt en T_{lucht} de luchttemperatuur. De warmtegeleidingcoëfficiënt voor convectie α_c hangt bij benadering lineair af van de luchtsnelheid volgens:

$$\alpha_c(t) = \alpha_{c,0} + \alpha_{c,v} \cdot v_{\text{wind}}(t)$$

waarbij $\alpha_{c,0}$ en $\alpha_{c,v}$ twee constanten (modelparameters) zijn met waarden $5,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ en $4,0 \text{ J/m}^3\text{K}$. De windsnelheid $v_{\text{wind}}(t)$ is een modelinvoerwaarde.

De uitstraling $I_s(t)$ door het asfalt volgt uit de wet van Stefan-Boltzmann:

$$I_s(t) = \epsilon_{\text{asfalt}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{asfalt}}^4(t) - T_{\text{hemel}}^4(t))$$

met σ de constante van Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) en $T_{\text{hemel}}(t)$ de effectieve hemeltemperatuur (modelinvoerwaarde). Deze volgt in goede benadering uit de luchtvochtigheid en de bewolgingsgraad. De emissiecoëfficiënt voor asfalt is gelijk genomen aan de absorptiecoëfficiënt.

Voor de totale warmtestroom $I_t(t)$ van het asfalt naar de omgeving geldt nu:

$$I_t(t) = I_c(t) + I_s(t) - \epsilon_{\text{asfalt}} \cdot I_g(t)$$

Warmtegeleiding door het asfalt

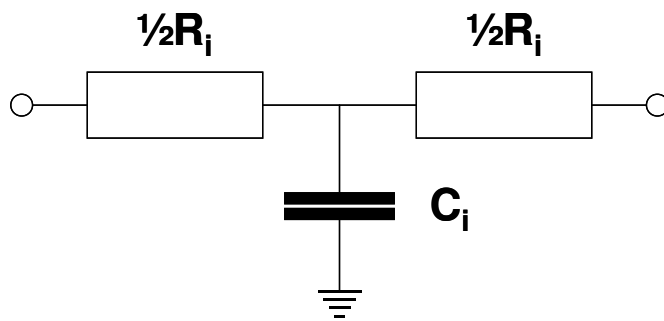
De warmtegeleiding door het asfalt wordt gemodelleerd door voor iedere homogene laag in het asfalt een R/C-netwerk als weergegeven in figuur B2 aan te nemen. De R_i stelt de warmteweerstand voor (in $\text{m}^2\text{K/W}$) van homogene laag i en de C_i de warmtecapaciteit (in $\text{J/m}^2\text{K}$) van die laag. De warmteweerstand volgt uit de warmtegeleidingscoëfficiënt λ_i (m.K/W) van laag i en de dikte t_i (m) van die laag:

$$R_i = \frac{t_i}{\lambda_i}$$

De warmtecapaciteit volgt uit de specifieke warmtecapaciteit $C_{s,i}$ (J/m³K) en de laagdikte:

$$C_i = C_{s,i} \cdot t_i$$

De totale warmteweerstand R wordt per laag opgesplitst in twee afzonderlijke warmteweerstanden met de helft van de totale warmteweerstandswaarde.



Figuur B2 R/C-model voor de warmtestroom door één homogene laag in het asfalt.

Warmtegeleiding naar de grond

Aangenomen wordt dat op een diepte van circa 0,5-1 meter een constante temperatuur T_{grond} heerst die gelijk is aan de gemiddelde grondwatertemperatuur (circa 10-12 °C). De dikte van het grondpakket zal empirisch worden bepaald.