De temperatuursgradiënt in het wegdek bij stalen kokerliggers

Diederik Aerts

Promotoren: prof. dr. ir. Philippe Van Bogaert, dr. ir. Hans De Backer Begeleiders: dr. ir. Hans De Backer, Amelie Outtier

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk bouwkundig ingenieur

Vakgroep Civiele techniek Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck Faculteit Ingenieurswetenschappen Academiejaar 2007-2008



Dankwoord

Ik zou in de eerste plaats mijn dank willen uitbrengen aan mijn promotoren en begeleiders zonder wie ik er niet in zou geslaagd zijn om deze scriptie tot een goed einde te brengen. Mijn dank in het bijzonder aan professor Van Bogaert voor het aanreiken van het scriptieonderwerp en Hans De Backer en Amelie Outtier, die mij gaandeweg hebben geholpen en steeds gezorgd voor de nodige antwoorden op al mijn vragen.

Vervolgens wil ik al de professoren, van wie ik in de loop van mijn opleiding college kreeg, bedanken voor de kritische vorming die ik van hen in de loop van de jaren gekregen heb.

Ook wil ik mijn ouders bedanken. Zij hebben het mij mogelijk gemaakt deze opleiding te volgen. Ze hebben niet alleen financiële steun verleend maar ook morele steun en vertrouwen gegeven. Dankzij dit vertrouwen heb ik de moed gehouden om mijn opleiding te voltooien.

Daarnaast wil ik ook mijn vriendin Inge bedanken voor de vele steun die ze mij heeft gegeven en altijd vertrouwen heeft gegeven aan mijn beslissingen.

Speciale dank gaat ook uit naar mijn drie broers Maarten, Andries en Mattijs die altijd zorgden voor de nodige ontspanning.

Als laatste zou ik mijn vrienden op school niet willen vergeten. Al het harde werk dat we gedurende onze studie en zeker bij de projecten en onze thesis moesten verwerken was zeker nog moeilijker geweest zonder de leuke ontspannende momenten die we samen hebben beleefd.

Toelating tot bruikleen

Ik, Diederik Aerts, geef de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.

Diederik Aerts, juni 2008

Overzicht

De temperatuursgradiënt in het wegdek bij stalen kokerliggers. Diederik Aerts

Promotoren: Prof. Dr. Ir. Philippe Van Bogaert, Dr. Ir. Hans De Backer Begeleiders: Dr. Ir. Hans De Backer, Ir. Amelie Outtier

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk bouwkundig ingenieur

Vakgroep Civiele Techniek Voorzitter: Prof. Dr. Ir. Julien De Rouck Faculteit Ingenieurswetenschappen Academiejaar 2007-2008

Samenvatting

De kokerligger van het viaduct van Vilvoorde ondergaat een effect van opwarming als gevolg van de invallende zonnestraling. Gedurende de dag warmt het wegdek op en wordt deze warmte geleid naar het inwendige van de koker. Hierdoor zal de koker opwarmen. Als de invloed van de zonnestraling 's nachts wegvalt zal de verwarmde koker zijn warmte afgeven naar boven toe, via warmtegeleiding doorheen het wegdek. Hierdoor ontstaat er een grote thermische traagheid, die een zeer nadelige invloed kan uitoefenen op het gedrag en de hechting van de wegverharding aan het brugdek. De bedoeling van deze scriptie is de grootte van de temperatuursgradiënt in te schatten op basis van een thermische eindige elementenanalyse en de invloed van enkele geografische, meteorologische en geometrische parameters te onderzoeken.

In een eerste deel van deze scriptie wordt een rekenmodel opgesteld in combinatie met enkele randvoorwaarden. De karakteristieken van de toegepaste materialen worden onderzocht, een waarde voor de omgevingstemperatuur en de zonneflux wordt bepaald aan de hand van de gegevens van het KMI en de positie van de zon in Vilvoorde, Mbandaka en Hammerfest worden bepaald met het programma *Sunspot*.

Uit de rekenresultaten kan worden afgeleid dat de zon in het zomerklimaat van Vilvoorde, als gevolg van de grote zonnehoogte, aanleiding geeft tot een opwarming van de bovenzijde van het wegdek. Deze warmte wordt dan via warmtegeleiding naar de rest van de constructie overgebracht. Voor het winterklimaat daarentegen geldt, door de lage zonnehoogte, dat de zijkant van de koker opwarmt en dat de warmte van daar naar de rest van de constructie wordt geleid. In Mbandaka is de waarde van de zonneflux veel groter dan in Vilvoorde zodat de opwarming hier ook groter is. Terwijl in Hammerfest de waarde van de zonneflux lager is dan in Vilvoorde, maar de duur van de zonnestraling is groter. Dit geeft ook aanleiding tot een voldoende grote opwarming van de koker. Maar uit het onderling verschil tussen Mbandaka en Hammerfest blijkt dat de invloed van de waarde van de zonneflux groter is dan de invloed van de duur van de straling. De invloed van de dikte van het staal en het asfalt wordt ook onderzocht en daaruit blijkt dat een grotere dikte zorgt voor een grotere weerstand van de warmtegeleiding. Uit de resultaten blijkt wel dat de invloed van de dikte van het staal belangrijker is dan de dikte van het asfalt omdat de warmtegeleidingcoëfficiënt van staal groter is dan deze van asfalt zodat de warmte gemakkelijker geleid wordt door het staal. Een laatste punt dat werd onderzocht is de invloed van enkele opeenvolgende zonnige dagen. Dit kan leiden tot een toename van de gemiddelde dagtemperatuur.

Er kan dus worden afgeleid dat de waarde van de temperatuur in de koker alarmerende waarden kan bereiken en dat een degelijk ontwerp van de constructie hier een belangrijke rol in speelt. Een mogelijke oplossing voor de te grote temperatuur in de huidige koker van het viaduct is de voorziening van een voldoende grote ventilatie die de warme lucht in de koker naar buiten laat afvoeren.

Trefwoorden

Temperatuursgradiënt, stalen kokerbrug, viaduct van Vilvoorde, monitoring van temperaturen, eindige elementenmethode

Temperature gradient in the road of a steel box-girder bridge

Diederik Aerts

Promoters: Prof. Dr. Ir. Philippe Van Bogaert, Dr. Ir. Hans de Backer

Abstract – This article tries to determine the actual value of the temperatures in the box-girder of the viaduct of Vilvoorde by using a finite-elements model based on the data of the viaduct. The influence of the geometry, geography and the meteorology will be investigated.

Keywords – Temperature gradient, steel box-girder bridge, viaduct of Vilvoorde, monitoring of temperatures, finite-elements method

I. INTRODUCTION

Temperature has a fundamental influence on large structures' behaviour. Loads induced by thermal actions could be as important as those due to traffic. These thermal actions are characterized by the deck average temperature and the thermal gradient.

In this context, a finite-elements model of the Viaduct of Vilvoorde is induced and it allows us to calculate the characteristic values of thermal actions. A numerical modelling of thermal exchanges around and inside the box-girder contributes to extend the study to other structures in different places of the world.

II. THERMAL ACTIONS

The three main forms of heat-transfer in structures are conduction, convection and radiation. In addition to these three concepts, the thermal tension in the construction also has an important role. Thermal actions act as the construction would deform as a result of a temperature gradient but it is prevented by the conditions.

III. SIMULATION MODEL

A. The model

The geometry of the model is derived from the data of the original plans of the viaduct. The model is equipped with longitudinal stiffening and apertures. Figure 1 illustrates this model.



Figure 1: Simulation model

B. Parameters for investigation

B.1 Geographic parameters

The position of the sun changes throughout the day. The azimuth and the height of the sun vary in time. This will lead to different sides of the bridge that are being subjected to directly solar radiation, so the warming of the box-girder will change in time. The difference between a low and a high altitude of the sun is important for the warming of the box-girder. Another parameter, linked to the position of the sun, is the influence of the shadow by the cantilevers. When the direct solar radiation is blocked, the thermal effect will be different. The position of the sun is also different for different places in the world. When the sun is nearer to the equator, the days will be shorter. This effect is studied by the calculation for the box-girder bridge in Mbandaka (Democratic Republic of Kongo). But when the sun is nearer to the north of the world, the days will be longer. In Hammerfest (Norway), located within the Arctic Circle, the sun is not covered in the summer between May 16 and July 26.

B.2 Meteorological parameters

The first meteorological parameter being explored is the value of the ambient temperature. The values that are chosen are the average monthly temperatures and are derived from the results of the KMI (= the Royal Meteorological Institute in Belgium). The second, and probably the most important parameter, is the value of the solar flux. When the size of the solar flux increases, the values of the acting temperatures will also increase. First, the solar flux is a function of the radiation from the sun. This radiation varies according to an eleven-year cycle. Second, the solar flux is a function of the position on earth. When the bridge is nearer to the equator the value of the solar flux is larger than in Vilvoorde. The larger value of the solar flux will lead to a larger warming of the box-girder. On the other hand when the bridge is nearer to the north of the world the solar flux will be smaller.

B.3 Geometric parameters

A good assumption of the thickness of the steel and asphalt layers is very important for the thermal effects in the bridge. The impact of a change of this thickness will be investigated. First, the thickness is doubled. Second, the thickness is halved.

IV. THE RESULTS AFTER CALCULATION

All the following results set the temperature in node 132, in the middle on the top of the box-girder seen by the cross-section in figure 2.



Figure 2: Cross section of the box-girder

The first result is the difference between the summer and winter conditions in Vilvoorde. The warming of the box-girder when the sun has a high altitude in the summer will be the result of a conduction of the heat from the top of the structure to the bottom. This is shown in figure 3. But the warming of the box-girder in the winter when the sun has a low altitude is the result of a warming that starts on the side of the boxgirder and will expand to the rest of the box-girder, as shown in figure 4.



Figure 3: Heat flux in the summer in Vilvoorde



Figure 4: Heat flux in the winter in Vilvoorde

Secondly, the geographical parameters are checked. The value of the solar flux in Hammerfest is lower then in Vilvoorde, but the duration of the solar radiation in the summertime is longer. In Mbandaka, however, the day is shorter but the value of the solar flux is larger. These two effects will lead to a higher warming of the box-girder. But when these two effects are being compared with each other it seems that the influence of the value of the solar flux is more important than the duration of the solar radiation. Thirdly, the influence of the thickness of the steel and the asphalt are investigated. When the thickness of the asphalt is increased, the values of the temperatures in the box-girder will decrease. And when the thickness of the asphalt is decreased, the values of the temperatures in the box-girder will increase. This effect is shown in figure 5. The same effect is visible when the thickness of the steel is adjusted. This is visible in figure 6.



Figure 5: Influence of the thickness of the asphalt



Figure 6: Influence of the thickness of the steel

On the end of this study there is mentioned something about the monitoring on the viaduct of Vilvoorde. In the beginning of the year 2008, four temperature gauges were placed on the top and the bottom of the box-girder on the south of the viaduct. The results of the monitoring of the temperature in the box-girder can only be representative after a monitoring over more than twelve months. Because it is necessary to see the influence of day-night and the seasonal behaviour. Therefore this comparison cannot be made for the viaduct right now, but it will be in time.

V. CONCLUSION

The simulation results show that the temperature in the box-girder may reach 80°C. Therefore a good design of the box-girder is of paramount importance for a smooth functioning of the construction. One possible solution against the high temperature increase in the viaduct of Vilvoorde is the facility of ventilation in the box-girder.

Inhoudstafel

Dankwoord	•••••
Overzicht	
Inhoudstafel	•••••
Tabel van afkortingen en symbolen	
Hoofdstuk 1: Inleiding	1 -
1.1 Algemene inleiding	1 -
1.2 Het viaduct van Vilvoorde	2 -
1.3 De gebruikte software	3 -
Hoofdstuk 2: Literatuurstudie	6 -
2.1 Literatuur betreffende kokerbruggen	6 -
2.2 Eurocode	- 13 -
2.3 Achtergrond thermische belastingen	- 21 -
Hoofdstuk 3: Opstellen van het rekenmodel	- 28 -
3.1 Kokerprofiel horizontaal	- 28 -
3.1.1 Kokerdoorsnede	- 28 -
3.1.2 Randvoorwaarden	- 35 -
3.1.3 Materiaaltoekenning	- 37 -
3.1.4 Positie van de zon in functie van de tijd	- 39 -
3.1.4.1 Vilvoorde	- 41 -
3.1.4.2 Mbandaka	- 47 -
3.1.4.3 Hammerfest	- 52 -
3.1.5 Zonneflux	- 54 -
3.1.6 Convectie	- 57 -
3.2 Kokerprofiel geheld	- 57 -
Hoofdstuk 4: Rekenresultaten	- 59 -
4.1 Algemene rekenresultaten	- 59 -
4.1.1 Vilvoorde	- 60 -
4.1.1.1 Zomerklimaat	- 60 -
4.1.1.2 Winterklimaat	- 74 -
4.1.1.3 Vergelijking tussen zomer- en winterklimaat	- 85 -
4.1.2 Mbandaka	- 86 -
4.1.2.1 Zomerklimaat	- 86 -
4.1.2.2 Winterklimaat	- 96 -
4.1.2.3 Vergelijking tussen zomer- en winterklimaat	103 -
4.1.3 Hammerfest	103 -
4.1.4 Vergelijking van de positie van de kokerbrug	117 -
4.2 Bijzondere rekenresultaten	118 -
4.2.1 Invloed van de dikte van het asfalt	119 -
4.2.2 Invloed van de dikte van het staal	123 -
4.2.3 Invloed van de rekenduur	127 -
4.2.3.1 Meetresultaten in het viaduct van Vilvoorde	127 -
4.2.3.2 Meetresultaten uit het model	128 -
4.2.3.3 Vergelijking tussen het model en de werkelijkheid	132 -
Hoofdstuk 5: Conclusie	133 -
Bijlagen	135 -
Bijlage A: Broncode van Samcef	135 -
Referenties	152 -

Tabel van afkortingen en symbolen

- $T = \theta$ = Temperatuur in graden Celsius
- $^{\circ}C = Graden Celsius$
- m = Meter
- W = Watt

K = Kelvin

J = Joule

 $MPa = 10^6 Pascal$

- KU = Krebs Unit
- sfu = Solar flux units

 ΔT = Lineair temperatuursverschil

 ΔT_v = Lineair temperatuursverschil in verticale richting

 ΔT_h = Lineair temperatuursverschil in horizontale richting

 $T_{e,min}$ = Minimale werkelijke brugtemperatuur in °C

 $T_{e,max}$ = Maximale werkelijke brugtemperatuur in °C

 T_{min} = Minimale schaduwluchttemperatuur in °C

 T_{max} = Maximale schaduwluchttemperatuur in °C

 α = Thermische uitzettingscoëfficiënt van een materiaal

- $\alpha_c = Warmteovergangscoëfficiënt van een materiaal$
- $c_a = Specifieke$ warmtecapaciteit van een materiaal

 $\lambda_a = Warmtegeleidingcoëfficiënt van een materiaal$

 $\sigma_{s,max}$ = Grootste optredende positieve eigenspanning

 $\sigma_{s,min}$ = Grootste optredende negatieve eigenspanning

e = Emissiviteit van een oppervlak

r = Reflectiviteit van een oppervlak

A = Azimut / oppervlakte

h = Zonnehoogte

EC = Eurocode

BS = British Standards

AASHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials

NB = Noorderbreedte

OL = Oosterlengte

Hoofdstuk 1:

Inleiding

1.1 Algemene inleiding

Gedurende een cyclus van 24 uur is een gesloten stalen koker onderhevig aan opwarming die vooral veroorzaakt wordt door de stralingswarmte van de zon, welke zowel aan de bovenzijde als aan de langszijde van de koker kan inwerken. Indien de rijwegverharding de stralingswarmte opvangt wordt deze doorgegeven naar de onderliggende staalstructuur, in het andere geval gebeurt de opwarming vanaf de zijkant van de koker naar de rest van de structuur. Door deze warmtegeleiding warmt vervolgens ook de lucht in het inwendige van de kokerligger op. Zodra de uitwendige opwarming van het wegdek en het effect van de stralingswarmte verdwijnen, koelt het wegdek langzaam af. Het inwendige van de kokerligger blijft echter het wegdek nog geruime tijd verder opwarmen, doch nu vanaf de binnenzijde. Hierdoor ontstaat er een grote thermische traagheid, die een zeer nadelige invloed kan uitoefenen op het gedrag en de hechting van de wegverharding aan het brugdek.

De bedoeling van deze scriptie is de grootte van de temperatuursgradiënt in te schatten op basis van een thermische eindige elementenanalyse en de invloed van enkele geografische, meteorologische en geometrische parameters te onderzoeken. Het verloop van de temperatuur in de tijd en de opwarming van de inwendige ruimte van de stalen koker worden beschouwd. Daarbij wordt in de eerste plaats gekeken naar de geografie. De positie van de kokerbrug heeft een invloed op de duur van de zonnestraling, de waarde van de zonneflux en de positie van de zon. Naast de waarde van de zonneflux is de heersende omgevingstemperatuur ook een meteorologische parameter die een invloed heeft op de temperatuursgradiënt. Als laatste wordt nog gekeken naar de geometrie van de koker. Zowel de invloed van de dikte van het staal als de dikte van het asfalt worden onderzocht. Naast de modellering van het eindige elementenmodel wordt ook gekeken naar de plaatsing van enkele meettoestellen voor de monitoring van de temperaturen. De resultaten hiervan worden vergeleken met de resultaten bekomen met het rekenmodel.

1.2 Het viaduct van Vilvoorde

Het viaduct van Vilvoorde maakt deel uit van de Brusselse Ring. In 1973 werd het studiebureau *Greisch* [1] gevraagd de structurele engineering van het bijzonder lange viaduct van Vilvoorde voor zijn rekening te nemen. Voornamelijk de hoogteverschillen en de bochten in de brug baarden zorgen en vooral veel studie, voorbereiding en precisie. De brug werd gebouwd in 1977 en de buitenring werd ingehuldigd op 29 december van datzelfde jaar. De binnenring werd een jaar later geopend. De zwaarste stukken werden in het weekend gebouwd om het verkeer op de weg (Woluwelaan, Schaarbeeklei), het spoor (de belangrijke lijn Brussel-Antwerpen) en het kanaal Brussel-Willebroek niet te veel te storen en de duizenden werknemers die in de industriezone langs het kanaal in Machelen en Vilvoorde werkten niet in gevaar te brengen. De veiligheidsmaatregelen waren zeer streng. Het viaduct van Vilvoorde was het laatste stukje autoweg van de noordelijke helft van de Brusselse Ring dat nog moest afgewerkt worden. Momenteel rijden er 140.000 voertuigen per dag over het viaduct. Het saturatiepunt ligt bij 180.000 voertuigen.

Het viaduct van Vilvoorde [2] overspant een lengte van ongeveer 1700m, is gemiddeld 35m hoog en de breedte van het wegdek is ongeveer 20m per rijrichting. Het viaduct vindt steun op twee landhoofden en 22 rijen pijlers. De grootste tussenoverspanning bedraagt 162m. Het tracé (zie figuur 1) vertoont een cirkelboog met een straal van 700m. De bovenbouw bestaat enerzijds uit aanloopstukken in beton en anderzijds uit een middenstuk van 879 meter in staal. Figuur 2 geeft een algemeen beeld van de kokerbrug gezien vanaf de onderzijde. De meest linkse koker op deze figuur is de koker aan de zuidkant. Het is in deze koker dat de opwarming onder invloed van de rechtstreekse invallende zonnestraling het grootst is.



Figuur 1: Tracé van het viaduct van Vilvoorde



Figuur 2: Overzicht van de kokerbrug

1.3 De gebruikte software

Samcef [3] is een softwarepakket dat gebruikt wordt voor de bouwkundige analyse van structuren. Het werd in 1965 ontwikkeld door de Universiteit van Luik en momenteel wordt het verder ontwikkeld en onderhouden door het bedrijf SAMTECH, gelegen te Luik.

Samcef is een eindige elementenprogramma dat gebruikt wordt voor structurele analyse en voor de analyse van warmteoverdracht. De toepassingsmogelijkheden van dit softwarepakket zijn eindeloos. Het programma werkt met een pre- en een postprocessor. Opstellen van het rekenmodel gebeurt met de preprocessor. Vervolgens bestaan er verschillende mogelijkheden van berekening die kunnen toegepast worden, deze variëren van statisch tot dynamisch en van lineair tot niet-lineair. De resultaten van deze berekening worden dan weggeschreven in de software en kunnen terug worden opgeroepen door de postprocessor.

Om gebruik te maken van deze software dient vooreerst een .dat-bestand aangemaakt te worden. Dit bestand bevat de gedachtegang en de programmeercode die nodig zijn om het programma te laten werken. Dit .dat-bestand wordt dan geopend met *Samcef* en men krijgt het beeld van figuur 3 te zien. Voor de uitvoering van de opeenvolgende stappen wordt gekozen voor de eenvoudigste methode, namelijk deze van de *Run module*. Met behulp van deze module kan stap voor stap gedefinieerd worden wat moet gedaan worden. In figuur 4 zijn de verschillende stappen aangegeven die kunnen gekozen worden in de *Run module*.

SAMCEF	
File Edit Add Module Run Module	Remove
Help	
Cenna	self
Problem Name Thesismodel	
MODULES	
Mode Interactive	
Link Files Discard 🔽	
RUN EXIT	



Figuur 3: Startbeeld van Samcef

Figuur 4: Verschillende stappen in de Run module

In de eerste plaats wordt vertrokken van de preprocessor, namelijk *Bacon*. Als deze stap wordt genomen opent zich het venster dat is weergegeven in figuur 5 . In dit venster kan een code ingegeven worden en het geheel kan dan grafisch voorgesteld worden. Een voorbeeld van deze grafische voorstelling is weergegeven in figuur 6.

🙀 Samcef V11.1-01	- 🗆 X
Program : C:\SamcefU11.1-01\Exec\Sam.exe Arguments:	<u>^</u>
Welcome to SAMCEF V11.1-01	
# filename/SITE = C:\SancefU11.1-01\Exec\samrc.ini # filename/USER = C:\SamWork\samrc.ini SMMCEF: Running module bacon	
Program : C:\SamcefU11.1-01\Exec\Bacon.exe Arguments: NOM=Thesismodel4 prefixe= tmpdir=	
User requested workspace 1590808000 vords (1200 MBytes) Menory Allocation / DB 75000000 / 75000000 words Release : 11.1-01 - Date : 19-0CT-2005 Graphic driver usedt Windows	
Input 1): Input 1): Input 1): Input 1): Input 1): Input 1): Input 1): Spy 1: e Spy C::SaNWork\Thesisnodel4.spy" Input 10: MRCM DEFAULT INITIALISATION FILE Input 10: RACON DEFAULT INITIALISATION FILE Input 10: RABE // is '; spase 1 2 1',	
Input10>.MENU OFF	-

Figuur 5: Werkscherm van de preprocessor

SAMCEF - BA	ats Finals ACION FING '	ња : V 11.	1-1														
SAMUER - BY	TING'	: v 11.	1-1														20.54.44
SOLAR HEAT	ring'													FEI	5 1 5	2008	23:51:41
5	2																
			×	1433	×		×	100	*	2	×		*	12	8	0	
	0	* 05	×	100		1.4	×			100	×	-	×		*	1	
				35								-					
				*		ж		18				*					
				20								128					
						141		361		161							
				*								× .					
× 5	e			*	1	×	2	×	2.0	×	2	×					

Figuur 6: Voorbeeld van een grafische voorstelling

Als de broncode volledig is afgewerkt kan een berekening uitgevoerd worden, zoals bij voorbeeld via *Mecano* of *MecanoThermal*. Als deze berekening voltooid is kunnen de resultaten in de postprocessor oftewel de *Baconpost* visueel worden voorgesteld. Aan de hand van een lijst, namelijk de *liste descriptif*, kan gekeken worden welke resultaten wel en niet ter beschikking zijn en grafisch kunnen voorgesteld worden.

Hoofdstuk 2:

Literatuurstudie

2.1 Literatuur betreffende kokerbruggen

Het probleem van de temperatuursgradiënten in kokerbruggen wordt reeds gedurende enkele jaren ervaren. De tot nog toe uitgevoerde studies over temperatuursgradiënten in bruggen waren vooral toegespitst op betonnen structuren. In de studie "Thermal actions on a steel box-girder bridge" [4] daarentegen wordt gekeken naar een kokerbrug met een stalen structuur, namelijk deze van de "Pont de Normandie" uit Frankrijk. Voldoende kennis over de thermische aspecten is nodig voor een degelijk ontwerp van de brug, opdat daarmee de duurzaamheid en de veiligheid van de structuur verzekerd worden. De bedoeling van deze studie was op zoek te gaan naar de karakteristieke waarden van de thermische belastingen die aanleiding zouden geven tot een overschrijding van de meest ongunstige temperaturen gedurende een referentieperiode van 50 jaar. Het grote probleem bij dit soort studies is de periode van de waarnemingen die voor de meeste studies onvoldoende groot zijn om voldoende representatief te zijn. Daartegenover beschikt men meestal voldoende meteorologische echter wel over gegevens om de schaduwluchttemperatuur over voldoende jaren te kennen.



Figuur 7: Positionering van de meettoestellen

In het brugdek worden zestien meettoestellen geplaatst, maar over het soort toestellen wordt in deze studie verder geen uitleg gegeven. In figuur 7 zijn de toestellen T1 tot en

met T12 zichtbaar. Deze toestellen zijn geplaatst in en op de stalen koker. Daarnaast zijn er nog twee toestellen aangebracht in het beton bovenop de stalen koker. Twee andere metingen die worden uitgevoerd zijn deze van de omgevingstemperatuur en de temperatuur in de koker. Dit levert een totaal van zestien metingen op. Met behulp van al deze meettoestellen wordt de gemiddelde temperatuur in een dwarsdoorsnede, de verticale en de transversale lineaire temperatuursgradiënt gemeten. Uit de metingen blijkt dat de dagelijkse extreme waarden van de temperatuur in de dwarsdoorsnede en de temperatuursgradiënt variëren volgens de seizoenen. Deze twee waarden geven echter niet elk jaar exact dezelfde waarden als gevolg van de atmosferische invloeden van verschillende tijdsduur en intensiteit. Het verloop van de temperatuur wordt aldus opgesplitst in een deterministische en een willekeurige waarde. De distributie van de willekeurige waarden wordt bepaald met de extreme-waardentheorie. Castello et al. ontwikkelde software om de parameters van de drie types extreme distributies te bepalen om zo de best passende curve, horende bij de resultaten, te bekomen. Het voordeel van deze theorie is de schatting van de karakteristieke waarden van de thermische belastingen, uitgaande van een beperkt aantal meetgegevens. De resultaten bekomen met deze theorie worden bevestigd door een numerieke berekening op basis van de Eurocode.

In de studie "Thermal behaviour of composite box-girder bridges" [5] wordt het gedrag van een samengestelde kokerbrug in Seoul, Zuid-Korea, onderzocht onder invloed van de zonnestraling, de luchttemperatuur en de windsnelheid. Deze parameters worden als willekeurig beschouwd en daarom kunnen rationele conclusies met betrekking tot de thermische belastingen enkel genomen worden op basis van een statistische analyse. In een samengestelde kokerbrug is het belangrijk om te kijken naar de uitzetting en het temperatuursverloop in zowel het staal als het beton, omdat de ontwerpnormen hier te weinig informatie over verschaffen. Daarom is een experimenteel onderzoek op een bestaande brug noodzakelijk.

In een dwarsdoorsnede van de brug, zie figuur 8, is zichtbaar dat het betonnen dek steun vindt op vier stalen kokers. Enkel de stalen koker die het meest naar het zuiden is gericht wordt voorzien van 30 meettoestellen. Aangezien de thermische belastingen op bruggen zowel dagelijks als met de seizoenen variëren is het noodzakelijk een meting uit te voeren langer dan één jaar. In deze brug werd een meting om het uur uitgevoerd over een periode van ongeveer 20 maanden.



Figuur 8: Dwarsdoorsnede van de kokerbrug



Figuur 9: Afmetingen van de kokerbrug

Om het verloop van de temperatuur te definiëren worden een aantal parameters gedefinieerd, namelijk:

- De effectieve temperatuur T_e die aanleiding geeft tot een axiale beweging
- Het lineaire temperatuursverschil in verticale en horizontale richting ΔT_v en ΔT_h
- De grootste positieve en negatieve eigenspanningen in de doorsnede $\sigma_{s,max}$ en $\sigma_{s,min}$

Er wordt tevens ondersteld dat de lineaire uitzettingscoëfficiënt α voor staal en beton dezelfde is en dat de aanname van Euler-Bernoulli, namelijk dat een vlakke doorsnede na vervorming vlak blijft, geldig is.

De omgevingsfactoren die de grootste invloed hebben op de effectieve temperatuur zijn de hoeveelheid zonnestraling op het brugdek en de variatie van de schaduwluchttemperatuur. De wind speelt dus in mindere mate een rol. Figuur 10 geeft een overzicht van het verloop van de vijf hierboven gedefinieerde parameters na monitoring over een periode van één jaar.



Figuur 10: Verloop van de parameters gedurende één jaar

Uit de metingen weergegeven in figuur 10 kan worden afgeleid dat de maximale positieve waarden van de effectieve temperatuur optreden tussen 15:00 uur en 17:00 uur in de zomermaanden, net na het optreden van de maximale schaduwluchttemperatuur en de maximale negatieve waarden van de effectieve temperatuur treden op rond de ochtend in de wintermaanden. Het lineaire verticale temperatuursverschil is positief als het bovenvlak warmer is dan het ondervlak. Dit temperatuurverloop kan een dubbele piek vertonen per etmaal na een erg zonnige dag als gevolg van het verschil in de thermische

materiaaleigenschappen tussen staal en beton. Een eerste piek treedt op als gevolg van de opwarming van het wegdek via de rechtstreeks invallende zonnestralen. Van zodra de zon ondergaat begint de koeling en het staal koelt sneller af dan het beton. Dit geeft aanleiding tot een tweede piek in het positieve lineaire verticale temperatuursverschil. Het negatieve lineaire verticale temperatuursverschil daarentegen treedt op bij een lage stand van de zon in de winter omdat de stalen koker dan rechtstreeks onderworpen wordt aan opwarming. De omgevingsvoorwaarden die aanleiding geven tot een verticaal temperatuursverschil veroorzaken ook een horizontaal temperatuursverschil. De piekwaarden voor $\sigma_{s,max}$ treden op tussen 14:00 uur en 16:00 uur in de zomermaanden en allemaal in knoop 21 (zie figuur 8). Dit is te verklaren door het feit dat deze knoop zich net onder het wegdek bevindt en daardoor de grootste invloed ondergaat van de opwarming van het wegdek door de rechtstreeks invallende zonnestraling. De piekwaarden voor $\sigma_{s,min}$ daarentegen treden op tussen 11:00 uur en 15:00 uur in de wintermaanden en in de knopen 6 en 7 (zie figuur 8). Deze resultaten voor $\sigma_{s,min}$ zijn te verklaren door de invloed van het overhangende brugdek. Dit overhangende brugdek geeft aanleiding tot schaduw zodat het grootst bestraalde oppervlak van de koker optreedt in de wintermaanden bij een lagere zonnehoogte. De optredende resultaten zijn het gevolg van de zonnestraling, de schaduwluchttemperatuur, de windsnelheid en het conductieverschijnsel. Waarbij wordt opgemerkt dat het belangrijk is dat de invloed van de schaduw mee in rekening wordt gebracht. Deze invloed is afhankelijk van de oriëntatie en de geometrische details van de brug in kwestie en kan niet veralgemeend worden.

De bekomen resultaten worden vervolgens vergeleken met de ontwerpvoorwaarden voor ontwerpvoorwaarden die thermische belastingen. De worden toegepast zijn achtereenvolgens deze die gebruikt worden in Korea, deze volgens de British Standards Institution (BS 5400) en de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Deze voorwaarden zijn terug te vinden in figuur 11. De ontwerpvoorwaarden zijn echter niet rechtstreeks vergelijkbaar met de resultaten van de gemeten data. Daardoor wordt het oorspronkelijke temperatuursprofiel opgesplitst in drie verschillende profielen, namelijk een axiale component, een lineaire component en een residuele zelfregelende component. Uit deze resultaten blijkt dat de temperatuursverdeling in de afkoelingsfase die wordt voorgesteld in de BS 5400 de thermische spanningsverdeling veel beter benadert dan de overige twee temperatuurprofielen.



Figuur 11: Overzicht van de ontwerpvoorwaarden

In een andere studie, namelijk "Steel box bridge temperatures in Australia and The United Kingdom" [6] worden dezelfde effecten onderzocht maar dan voor specifieke toepassingen in deze twee landen. In deze studie worden de resultaten van de West Gate Bridge in Melbourne, Australië, vergeleken met deze van het Beachley Viaduct in Groot-Brittannië. Omdat de metingen van de West Gate Bridge puntmetingen zijn is het onmogelijk om een exacte vergelijking te maken met de continue metingen van het Beachley Viaduct. Maar toch kan de gelijkheid in thermisch gedrag van beiden vergeleken worden. Een verschil tussen deze en de andere studies is dat sommige oppervlakken van de brugdekplaat wit geverfd zijn en andere grijs. Op zonnige dagen is de invloed van de kleur van het dek op zijn temperatuur duidelijk merkbaar.

Uit de meetresultaten tussen 07:30 uur en 08:30 uur bleek dat het verschil in temperatuur tussen de bodemplaat en de schaduwluchttemperatuur bijna nergens groter was dan 2°C, voor allebei de bruggen. Dit is enigszins verrassend omdat Melbourne dichter bij de evenaar gelegen is en daardoor zullen de dagen korter zijn dan in Engeland. Hierdoor zal de relatie tussen enerzijds de zonnestraling of nachtelijke straling en anderzijds de schaduwluchttemperatuur om 07:00 uur niet noodzakelijk gelijk zijn.

Uit de metingen tussen 07:30 uur en 09:30 uur bleek dat de grijze dekplaat ongeveer 2°C warmer was dan de witte dekplaat waardoor het temperatuursverschil tussen de grijze dekplaat en de bodemplaat ongeveer 2°C groter is dan het temperatuursverschil tussen de witte dekplaat en de bodemplaat. In het Beachley Viaduct zijn er meerdere resultaten waarvoor het temperatuursverschil tussen de donkergroene brugdekplaat en de bodemplaat groter is dan 2°C. Maar omdat de meetresultaten van beide bruggen slechts over een beperkt tijdsinterval werden opgemeten, kunnen er geen geldige conclusies uit afgeleid worden. Uit metingen op zonnige dagen tussen 12:30 uur en 16:00 uur bleek dat het optredende temperatuursverschil in Melbourne groter is dan in Beachley ten gevolge van het verschil in ligging ten opzichte van de evenaar. Ook voor dit tijdsinterval bleek de grijze brugdekplaat op een hogere temperatuur te zijn dan de witte brugdekplaat. Uit deze resultaten volgt duidelijk de invloed van de kleur van het oppervlak op de temperatuur.

De methode om brugdekplaattemperaturen van een stalen kokerbrug te berekenen, die ontwikkeld werd in het Verenigd koninkrijk, blijkt goed met de werkelijkheid overeen te komen. Om deze temperaturen te berekenen moet men beschikken over de kennis inzake:

- Dichtheid, specifieke warmte en dikte van het staal
- Absorptiecoëfficiënt van de brugdekplaat: deze is functie van de kleur
- Warmtegeleidingcoëfficiënt: deze is afhankelijk van de windsnelheid
- Verloop van de schaduwluchttemperatuur
- Begintemperatuur en begintijdstip
- Verandering van de intensiteit van de zonnestraling

Uit de vergelijking tussen de gemeten en de berekende temperatuur van de brugdekplaat blijkt dat de overeenkomst tussen beide als "goed" kan bestempeld worden.

2.2 Eurocode

De Structurele Eurocodes omvatten een groep van normen voor het structurele ontwerp van gebouwen en kunstwerken van de burgerlijke bouwkunde. Hun toepasbaarheid op de uitvoering en de controle van deze werken beperkt zich tot een aanduiding van de kwaliteit van de constructieproducten en van het vakmanschap dat vereist is om aan de vooropgestelde ontwerpspecificaties te voldoen.

Voor de berekening van de thermische belastingen wordt uitgegaan van de ENV 1991-2.5 [7]. Dit deel van de Eurocode verschaft regels en methodes voor de berekening van thermische belastingen op bruggen. Thermische belastingen op een bouwwerk zijn een functie van de maximale temperatuurschommelingen binnen een gegeven tijdsinterval. De schaduwluchttemperatuur is de opgemeten temperatuur in een thermometerhut. Het doel van de thermometerhut bestaat erin om de thermometers af te schermen van de stralingswarmte van de zon en de grond, van de afgifte van stralingswarmte tijdens de nacht en van de neerslag. Thermische belastingen worden beschouwd als vrije veranderlijke belastingen en in dit deel van de Eurocode zijn de karakteristieke belastingen waarden met een herhalingsperiode van 50 jaar.

De temperatuursverdeling binnen een dwarsdoorsnede van een willekeurig bouwdeel leidt tot een vervorming van dit bouwdeel. De opgelegde randvoorwaarden zullen aanleiding geven tot een tegenwerking van deze vervormingen en hierdoor ontstaan spanningen in de constructie. Het zijn deze spanningen die in de ontwerpfase van de constructie moeten worden beschouwd, zodanig dat deze spanningen gedurende de levensduur van de constructie beperkt blijven.

De omvang van de thermische belastingen zal afhangen van de plaatselijke weersomstandigheden, de oriëntatie van het bouwwerk, de globale massa, de afwerking, de gebruikte verwarmings- en verluchtingssystemen en de thermische isolatie. De temperatuursverdeling binnen afzonderlijke elementen van een bouwwerk kan schommelen als gevolg van dagelijkse en seizoensgebonden veranderingen in de schaduwlucht-temperatuur, zonnestraling, indirecte stralingswarmte,.... De temperatuursverdeling binnen

een afzonderlijk bouwelement kan als dusdanig worden opgesplitst in de volgende vier componenten (zie figuur 12):

- a) Een gelijkmatige temperatuurscomponent: ΔT_N
- b) Een lineair variabele temperatuurs component rond de z-z as: ΔT_{MZ}
- c) Een lineair variabele temperatuurs component rond de y-y as: ΔT_{MY}
- d) Een niet-lineaire temperatuursverdeling ΔT_E



Figuur 12: Temperatuursverdeling binnen een afzonderlijk bouwelement

Inzake de temperatuursschommelingen in bruggen wordt uitgegaan van brugdekken die onderhevig zijn aan dagelijkse en seizoensgebonden weersinvloeden. Een brugdek behoort tot één van de hiernavolgende drie groepen bovenbouwstructuren:

- Groep 1: Stalen dek op een kokerligger
- Groep 2: Betonnen dek op een kokerligger
- Groep 3: Betonplaat of betonnen dek op een kokerligger

Alle representatieve waarden van thermische belastingen op bruggen moeten worden bepaald op basis van de gelijkmatige en de lineaire temperatuurscomponent, zoals in onderstaande wordt verduidelijkt.

De gelijkmatige temperatuurscomponent

De gelijkmatige temperatuurscomponent is afhankelijk van de minimale en de maximale werkelijke brugtemperatuur ($T_{e,min}$ en $T_{e,max}$) die een brug binnen een welbepaalde periode zal bereiken. Deze brugtemperaturen moeten worden afgeleid van de isothermen van minimale en maximale schaduwluchttemperaturen (T_{min} en T_{max}). Deze afleiding mag gebeuren aan de hand van figuur 13 in functie van het type bovenbouwstructuur.



Figuur 13: Verband tussen de schaduwluchttemperatuur en de werkelijke brugtemperatuur

De karakteristieke waarden van de minimale en de maximale schaduwluchttemperatuur op de site van het bouwwerk worden bepaald op basis van de isothermenkaarten, zie figuren 14 en 15. De waarden voor deze schaduwluchttemperaturen zijn bruikbaar voor een gemiddeld zeeniveau en in een open landschap, met een retourperiode van 50 jaar. Deze aanname van het zeeniveau is geldig omdat Vilvoorde niet hoger gelegen is dan 100m boven het zeeniveau. Indien gerekend wordt met een andere retourperiode kunnen deze waarden aangepast worden, maar daarvoor wordt verwezen naar de literatuur betreffende de Eurocode [7].



Figuur 14: Isothermen van de minimale schaduwluchttemperatuur [°C]



Figuur 15: Isothermen van de maximale schaduwluchttemperatuur [°C]

De lineaire temperatuurscomponent

De opwarming en afkoeling van de bovenlaag van een brugdek zal over een gegeven periode resulteren in een maximale positieve (d.w.z. warmere bovenlaag) en een maximale negatieve (d.w.z. warmere onderlaag) temperatuursschommeling. Voor de resulterende waarden wordt verwezen naar tabel 1. De waarden uit deze tabel zijn gebaseerd op een deklaagdikte van 50mm. Voor andere deklaagdiktes moeten deze waarden met een correctiefactor k_{sup} worden vermenigvuldigd, zoals aangegeven in tabel 2.

Groepen van	Wegbi	ruggen	Spoorwegbruggen			
bovenbouw- structuren (zie Bijlage B)	ovenbouw- Positieve Negatieve ructuren (zie temperatuur- temperatuu ijlage B) gradiënt gradiënt		Positieve temperatuur- gradiënt	Negatieve temperatuur- gradiënt		
	$\Delta T_{\rm M,pos}(^{\circ}\rm C)$	$\Delta T_{\rm M,neg}(^{\circ}\rm C)$	$\Delta T_{\rm M,pos}(^{\circ}\rm C)$	$\Delta T_{M,neg}(^{\circ}C)$		
Groep 1: stalen dek op stalen koker- liggers, vak- werkliggers of plaatliggers	[18]	[-13]	[18]	[-13]		
Groep 2: betonnen dek op stalen kokerliggers, vakwerkliggers of plaatliggers	[15]	[-18]	[15]	[-18]		
Groep 3: betonnen dek op - betonnen kokerbalk - betonnen T- draagbalk - betonplaat	[10] [15] [15]	[-5] [-8] [-8]	[10] [15] [15]	[-5] [-8] [-8]		

Tabel 1: Karakteristieke waarden van lineaire temperatuursgradiënten

Weg- en spoorwegbruggen									
	be	ton	sta	aal	samengesteld				
Deklaag-	Bovenlaag	Onderlaag	Bovenlaag	Onderlaag	Bovenlaag	Onderlaag			
dikte	warmer dan	warmer dan	warmer dan	warmer dan	warmer dan	warmer dan			
	onderlaag	bovenlaag	onderlaag	bovenlaag	onderlaag	bovenlaag			
(mm)	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}			
0	1,5 1)	1,0	1,6 ¹⁾	0,6	1,1	0,9			
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
100	0,7	1,0	0,7	1,2	1,0	1,0			
150	0,5	1,0	0,7	1,2	1,0	1,0			
funderings-									
materiaal	0,6	1,0	0,6	1,4	0,8	1,2			
(60 cm)									

 Tabel 2: Correctiefactoren voor de verschillende deklaagtypes en -diktes

De omgevingsfactoren die de waarde van de optredende temperatuur van een brug het meest beïnvloeden zijn:

- De schaduwluchttemperatuur
- De stralingswarmte (zowel de totale zoninstraling als de afgifte van stralingswarmte door het brugdek)
- Windsnelheid: deze kan weerspiegeld worden in de warmtetransmissiecoëfficiënt

De waarnemingsperiode van klimaatgegevens moet in elk geval zo lang mogelijk zijn en zou idealiter minstens 25 jaar moeten bestrijken.

De structurele opbouw en de gebruikte materialen zullen een weerslag hebben op de temperatuursinvloeden in bruggen. De belangrijkste parameters zijn:

- De geometrische karakteristieken van de doorsnede van de brug
- Thermische en materiële eigenschappen van het brugdek zoals:
 - a) De absorptiecoëfficiënt
 - b) De emittantiecoëfficiënt
 - c) De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de oppervlaktes
 - d) De warmtegeleiding
 - e) De soortelijke warmte
 - f) De dichtheid

Wanneer er materialen met verschillende lineaire uitzettingscoëfficiënten gezamenlijk worden gebruikt moeten de eigenschappen van elk materiaal afzonderlijk worden beschouwd om van daaruit de overeenkomstige temperatuursverdelingen af te leiden. Voor de formules die hiermee corresponderen wordt wederom verwezen naar de literatuur betreffende de Eurocodes [7].

Indien het noodzakelijk is om zowel de lineaire (ΔT_M) als de gelijkmatige (ΔT_N) temperatuurscomponent in aanmerking te nemen moet de meest nadelige invloed van de volgende waarden gekozen worden:

- $\Delta T_M + \omega_N \cdot \Delta T_N$ Met $\omega_N = 0.35$
- $\omega_{M} \cdot \Delta T_{M} + \Delta T_{N}$ Met $\omega_{M} = 0.75$

Naast het in acht nemen van de voorwaarden van de ENV 1991-2.5 is het ook belangrijk om eens te kijken naar ENV 1993-1.2 [8], betreffende de brandveiligheid bij het ontwerp van stalen draagsystemen. Er dienen nog drie belangrijke thermische eigenschappen van het staal (zie figuren 16, 17 en 18), die in functie van de heersende temperaturen in de tijd kunnen wijzigen, in rekening te worden gebracht:

• De thermische uitzetting van staal $\frac{\Delta l}{l}$, als $20^{\circ}C \le \theta_a \le 750^{\circ}C$, wordt bepaald volgens onderstaande formule waarvan het verloop is weergegeven in figuur 16:

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4}$$

Waarbij $\theta_a = de staaltemperatuur [°C]$ l = de lengte bij 20°C [m] $\Delta l = de temperatuurafhankelijke uitzetting [m]$

Uit deze voorwaarde blijkt dat de rek van het staal toeneemt bij toenemende temperatuur. De thermische uitzettingscoëfficiënt van staal wordt dan bepaald volgens:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta T \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$$

In deze formule stelt ΔT het verschil in temperatuur voor tussen de werkelijke temperatuur in het staal en de begintemperatuur van de omgeving.



Figuur 16: Thermische uitzetting van staal in functie van de temperatuur

 De specifieke warmtecapaciteit van staal c_a, als 20°C ≤ θ_a ≤ 600°C, wordt bepaald volgens:

$$c_{a} = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_{a} - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{a}^{2} + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{a}^{3} \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$$

Het verloop hiervan is weergegeven in onderstaande figuur. Een waarde voor de specifieke warmtecapaciteit, corresponderend met een omgevingstemperatuur van 20°C, bedraagt 439,8 J/kgK.



Figuur 17: Specifieke warmtecapaciteit van staal in functie van de temperatuur

 De warmtegeleidingcoëfficiënt van staal λ_a, als 20°C ≤ θ_a ≤ 800°C, wordt bepaald volgens onderstaande formule waarvan het verloop is weergegeven in figuur 18:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_a \quad \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$$

Een waarde voor de warmtegeleidingcoëfficiënt, corresponderend met een omgevingstemperatuur van 20°C, bedraagt 53,334 W/mK.



Figuur 18: Warmtegeleidingcoëfficiënt van staal in functie van de temperatuur

2.3 Achtergrond thermische belastingen

Voor een goed begrip van de resultaten na berekening worden eerst enkele thermische begrippen die in onderhavige scriptie veelvuldig aan bod zullen komen uitgelegd. De temperatuur van het systeem bepaalt of het systeem in thermisch evenwicht is met een ander systeem. Twee systemen zijn in thermisch evenwicht met elkaar als de temperatuur in de beide systemen aan elkaar gelijk is. In dit geval treedt er geen netto warmtetransport op tussen de systemen. De drie belangrijkste vormen van warmteoverdracht in constructies zijn conductie, convectie en straling. Op deze begrippen [9] wordt in het onderstaande dieper ingegaan. Naast de theoretische uitleg wordt ook de interpretatie van deze parameters in het eindige elementenprogramma *Samcef* uitgelegd.

Warmtegeleiding: dit is het warmtetransport dat optreedt in een materie waarin een temperatuursverschil bestaat. Uit experimentele waarnemingen is gebleken dat de warmtestroomdichtheid door geleiding doorheen een materiaal evenredig is met de temperatuurgradiënt over het materiaal. De warmtegeleidingcoëfficiënt λ drukt uit hoe goed een bepaald materiaal de warmte geleidt. Deze coëfficiënt is afhankelijk van het soort materiaal. Voor de waarde ervan wordt verwezen naar de desbetreffende literatuur. De ééndimensionale stationaire warmtegeleiding doorheen een samengestelde wand wordt beschreven door:

$$q = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{\sum_{n} \frac{d_i}{\lambda_i}}$$

 $\begin{array}{ll} \text{Met} & \theta_{se} = \text{de temperatuur aan het buitenoppervlak [°C]} \\ & \theta_{si} = \text{de temperatuur aan het binnenoppervlak [°C]} \\ & d_i = \text{de dikte van de beschouwde laag [m]} \\ & \lambda_i = \text{de warmtegeleidingcoëfficiënt van het materiaal [W/mK]} \end{array}$

Bij het gebruik van deze formule horen enkele opmerkingen. Allereerst veronderstelt deze vergelijking een in het vlak homogene wand. In werkelijkheid echter is de samenstelling van de constructie heterogeen. Bovendien is het warmtetransport in werkelijkheid meestal niet één-, maar twee- of driedimensionaal. Een derde opmerking is het stationaire gedrag. In werkelijkheid fluctueert zowel het buiten- als het binnenklimaat in de tijd, als gevolg van het verschil tussen zomer-winter, dag-nacht, bewolkt-zonnig,.... Daarom wordt er voor dit soort berekeningen meestal gebruik gemaakt van bepaalde softwarepakketten, voornamelijk software dat gebruik maakt van een eindige elementenberekening.

In *Samcef* wordt de warmtegeleiding doorheen een materiaal voorgesteld door de waarde van de warmtegeleidingcoëfficiënt van dat materiaal. Deze coëfficiënt kan zowel in functie van de tijd als van de temperatuur worden gedefinieerd. Daarvoor is

het nodig een functie te definiëren tussen bepaalde grenzen. Deze grenzen stellen ofwel de tijd ofwel de temperatuur voor. Tijdens de berekening van het model zal deze coëfficiënt automatisch worden aangepast in functie van de vooropgestelde parameter.

• **Convectief warmtetransport:** dit is het warmtetransport ten gevolge van de stroming van fluïda zoals vloeistoffen of gassen. In bouwkundige toepassingen zijn de relevante fluïda voornamelijk lucht en water. Het convectief warmtetransport van een fluïdum naar een materiaaloppervlak wordt beschreven met behulp van een warmteovergangscoëfficiënt α_c , die het verband geeft tussen de warmtestroomdichtheid en het temperatuurverschil fluïdum-oppervlak. Het warmtetransport wordt beschreven door:

$$q_c = \alpha_c \cdot (\theta_s - \theta_f)$$

Met $\alpha_c = de \text{ warmteovergangscoëfficiënt [W/m²K]}$ $\theta_s = de \text{ temperatuur aan het oppervlak [°C]}$ $\theta_f = de \text{ temperatuur van de omgeving [°C]}$

In werkelijkheid is de convectieve warmteovergangscoëfficiënt in elk punt van de bouwconstructie verschillend. Voor praktische warmteverliesberekeningen is het gebruik van oppervlaktegemiddelde overgangscoëfficiënten echter gerechtvaardigd.

De stroming van een fluïdum gaat gepaard met transport van voelbare warmte (enthalpie). Dit is de warmte die capacitief in het fluïdum opgeslagen is en een temperatuurverandering veroorzaakt.

In *Samcef* wordt het convectief warmtetransport voorgesteld door de waarde van de warmteovergangscoëfficiënt. Deze coëfficiënt kan net zoals de warmtegeleidingcoëfficiënt zowel in functie van de tijd als van de temperatuur worden gedefinieerd. Daarnaast bestaan er twee soorten convectie die kunnen geprogrammeerd worden. Enerzijds is er de convectie in een gesloten holte, anderzijds is er de convectie aan een oppervlak. De convectie in een gesloten holte wordt gedefinieerd door een knoop die zich in de holte bevindt en hiermee kan het warmtetransport tussen verschillende delen van de structuur worden gemodelleerd. De convectie aan een oppervlak daarentegen wordt gedefinieerd door een waarde voor de warmteovergangscoëfficiënt van het materiaal van dat oppervlak. Hiermee wordt de invloed van de stroming van de wind aan het oppervlak van de constructie gemodelleerd.

• Warmtestraling: dit is het warmtetransport ten gevolge van elektromagnetische golven die worden uitgestraald door materiaaloppervlakken. In de praktijk is men echter niet zozeer geïnteresseerd in de totaal uitgezonden energie van een oppervlak, als wel in de netto-warmtestroom tussen twee of meer oppervlakken.

De zwarte straler is een oppervlak met ideale stralingseigenschappen. Alle invallende stralingsenergie wordt geabsorbeerd en ze bezit de grootste emittantie (= de uitgestraalde warmteflux) van alle stralers. De totale emittantie van een zwart oppervlak neemt overigens sterk toe met de temperatuur. De emittantie van werkelijke oppervlakken is steeds kleiner dan de emittantie van een zwarte straler met dezelfde temperatuur. De verhouding tussen de werkelijk uitgestraalde energie en de zwarte straler-energie is constant voor alle uitgestraalde golflengtes en wordt de emissiefactor e genoemd. Het werkelijke oppervlak straalt diffuus, d.w.z. dat de stralingsintensiteit in alle richtingen constant is. Een andere parameter, die gedefinieerd wordt door de verhouding tussen de gereflecteerde warmteflux en de irradiantie (= de ontvangen warmteflux), wordt de reflectiefactor r genoemd.

De totale warmtestroom, uitgaande van een grijze straler, is de som van de warmte uitgestraald door het grijze oppervlak en de gereflecteerde invallende warmte van andere grijze oppervlakken. De warmtestroomdichtheid door straling tussen twee grijze stralers in een twee-stralersysteem wordt beschreven door:

$$q_{r,12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{r_1}{e_1} + 1 + \frac{r_2 \cdot A_1}{e_2 \cdot A_2}}$$

Met T_1 = de temperatuur van oppervlak 1 [K] T_2 = de temperatuur van oppervlak 2 [K] $\sigma = 5,67\text{E-8 W/(m^2K^4)}$, de Stefan-Boltzmann constante $r_1 =$ de reflectiefactor van oppervlak 1 $r_2 =$ de reflectiefactor van oppervlak 2 $e_1 =$ de emissiefactor van oppervlak 1 $e_2 =$ de emissiefactor van oppervlak 2 $A_1 =$ de oppervlakte van oppervlak 1 [m²] $A_2 =$ de oppervlakte van oppervlak 2 [m²]

De becijfering van de zonnewinsten van een gebouw is redelijk complex omdat er drie stralingsbronnen aanwezig zijn:

- De zon: gekenmerkt door een kortgolvige irradiantie, rechtstreeks ontvangen door het buitenoppervlak
- De directe omgeving: gekenmerkt door een stralingstemperatuur
- De hemelkoepel: wisselt langgolvige straling uit met het constructieoppervlak

De zonnewinst van een constructie kan berekend worden in functie van drie componenten:

- De waarde van de invallende zonnestraling
- De oriëntatie en de helling van de constructieonderdelen
- De positie van de zon: het azimut A (hoek met het zuiden) en de zonnehoogte h (hoek ten opzichte van de horizon). Figuur 21 [10] geeft meer inzicht in de parameters betreffende de positie van de zon.

Hierbij moet ook aandacht geschonken worden aan een eventuele beschaduwing van het constructieoppervlak dat kan optreden. Aangezien de zonnestand verandert in de loop van het jaar is ook de dagelijks optredende beschaduwing niet constant zodat dit aspect in de berekeningen niet te verwaarlozen valt.



Figuur 19: Positie van de zon

In *Samcef* wordt de straling van de zon als volgt gedefinieerd. Eerst en vooral wordt de waarde van de zonneflux gegeven. Dit is een constante waarde. Daarnaast wordt de positie van de zon gedefinieerd in functie van de tijd. Er is dus nood aan een functie die de coördinaten van de zon weergeeft in functie van de tijd. Een derde parameter die moet gedefinieerd worden is de waarde van de emissiviteit. Deze parameter beïnvloedt de waarde van de zonneflux zodat deze ook in functie van de tijd kan variëren. Naast de straling van de zon wordt nog een stralingseffect in rekening genomen, namelijk de warmtestraling vanuit de onderzijde van de koker, als deze voldoende is opgewarmd, naar boven toe. De waarde van deze straling wordt voorgesteld door een waarde van de emissiviteit.

Naast deze drie voorgaande begrippen speelt de thermische spanning in de constructie ook een belangrijke rol inzake het ontwerp. Thermische spanningen treden op als de constructie wil vervormen ten gevolge van een temperatuursgradiënt maar hierdoor verhinderd wordt door de randvoorwaarden. Deze spanningen kunnen aanleiding geven tot schade aan de constructie en dienen daardoor gecontroleerd te worden. De thermische spanningen worden bepaald door de lineaire uitzettingscoëfficiënt. Bij opwarming zal het materiaal uitzetten en dit zal aanleiding geven tot vervormingen. De vervormingcoëfficiënt van staal bedraagt ongeveer $12x10^{-6/\circ}$ C, maar deze kan veranderen als gevolg van een verandering in de temperatuur zoals reeds werd vermeld in paragraaf 2.2. De vervormingcoëfficiënt van asfalt daarentegen bedraagt $50x10^{-6/\circ}$ C. De coëfficiënt van asfalt is merkelijk groter dan deze van het staal en daardoor zullen de vervormingen in het asfalt ook groter zijn dan in het staal bij eenzelfde temperatuursverandering. Asfalt is eerder een bros materiaal en daarom is het uiterst belangrijk dat de vervormingen van het asfalt beperkt blijven om zo scheurvorming in de asfaltlaag te beperken. De uitzetting van het staal en het asfalt zullen dus zoals eerder vermeld verschillend zijn. Dit kan aanleiding geven tot spanningen in de constructie. De opwarming van de koker dient gecontroleerd te worden en mag nergens de extreme waarde overschrijden gedurende de levensduur van de constructie.

In *Samcef* wordt de lineaire uitzetting van het materiaal bepaald door de waarde van de vervormingcoëfficiënt. Deze coëfficiënt kan ofwel constant zijn ofwel veranderen in functie van de temperatuur van het materiaal. Daarvoor is er wel nood aan een functie die deze parameter definieert in functie van de temperatuur.

Hoofdstuk 3:

Opstellen van het rekenmodel¹

3.1 Kokerprofiel horizontaal

3.1.1 Kokerdoorsnede

Voor het opstellen van het rekenmodel van het viaduct van Vilvoorde wordt gebruik gemaakt van het eindige elementenprogramma *Samcef*, waarover reeds melding werd gemaakt in paragraaf 1.3. In dit hoofdstuk worden de verschillende stappen in de opbouw van het rekenmodel aangehaald en verduidelijkt. De doorsnede van de koker wordt geprogrammeerd zoals in het oorspronkelijke ontwerp van het viaduct van Vilvoorde. Verderop worden de gebruikte afmetingen verduidelijkt.

In de eerste stap van het ontwerp van het rekenmodel worden de knopen van de eerste dwarsdoorsnede van het model opgesteld. Figuur 20 geeft een aanduiding van deze knopen. De afstanden tussen de knopen zijn hier niet op schaal weergegeven. De knopen 1 tot en met 104 zijn de knopen van het stalen profiel, zowel van de stalen koker als van de stalen uitkragingen. De knopen 105 tot en met 137, aan de bovenzijde van het model, stellen de asfaltlaag bovenop de koker voor. De knopen 138 tot en met 143, in het midden van de koker, zijn deze van de diafragma's waarover verderop meer uitleg zal worden gegeven. In deze zelfde figuur is ook de nummering van de knopen aangeduid wat een handig hulpmiddel is bij het opstellen van het rekenmodel en voor de interpretatie van de resultaten na de berekening. Maar daarover wordt in het volgende hoofdstuk meer uitleg gegeven.

¹ Voor de broncode van het rekenmodel wordt verwezen naar bijlage A
🗙 127	🗙 128	🗙 129	🗙 130	😿 131	😿 132	🗙 133	🗙 134	🗙 135	🗙 136	🗙 137	
💥 116	💥 117	🕱 118	💥 119	🕱 120	👿 121	💥 122	💥 123	🕱 124	🕱 125	💥 126	
🗙 105	🗙 106	🗙 107	😠 108	😿 109	😿 110	🗙 111	🗙 112	🗙 113	🕱 114	🗙 ii5	
× 1	<mark>ж</mark> 2	ж З	<mark>⊯ 4</mark>	ж <mark>5</mark>	ж <mark>6</mark>	<mark>⋇</mark> 7	× 8	× 9	j <mark>a 10</mark>	× 11	
<mark>⊯ 12</mark>	💥 1З	¥ 14	<mark>⊯</mark> 15	<mark>⊯ 16</mark>	j <mark>⊯ 17</mark>	<mark>⊯ 18</mark>	<mark>⊯ 1</mark> 9	<mark>⊯</mark> 20	<mark>⊯ 21</mark>	<mark>⊯ 22</mark>	
<mark>⊛</mark> 23	<mark>⊛</mark> 24	× 25	<mark>⊯</mark> 26	j <mark>x</mark> 27	<mark>⊯</mark> 28	<mark>⊛</mark> 29	💥 <mark>30</mark>	× 31	<u>ж</u> 32	💥 <mark>33</mark>	
<u>x</u> 34	¥ 35	<u>ж</u> 36	j <mark>a 3</mark> 7	jaj <mark>38</mark>	<mark>يز 39</mark>	<u>x</u> 40	<u>بر</u> 41	ją 42	ي 43	⊯ 44	
		<mark>≋⁴⁵≋⁴⁶∶</mark>	<mark>≅47</mark> ≋ 48	😠 138	😠 139	😠 140	<mark>≈⁴⁹≈</mark> 50	<mark>≋</mark> 51 <u>≋</u> 52			
		_{≫(} 53 _{)≪} 54)	¥22¥ 26	🐹 141	🐹 142	🗙 143	<mark>⊛</mark> 57 <mark>⊛</mark> 58;	_¥ 59 _¥ 60			
		<u>⊯61 ⊯62</u> ;	<u>≆63</u> ≋ 64	j≝ 65	j <u>⊯</u> 66	≆ 67	<u> </u>	_¥ 70 ¥ 71			
		_∭ 72 _∭ 73	_≪ 74 _≫ 75	j <u>≅</u> 76	j <mark>≋</mark> 77	<mark>⋇</mark> 78	<mark>⊛79</mark> ⊛80	_≆ 81 _≆ 82			
		<u>⊯83</u> ⊚84)	<u>≰85 ≼</u> 86	j≝ 87	j≝ 88	¥ 89	<mark>≊90 ≊91</mark> ;	≝92≝ 93			
		<mark>≋94 ≋</mark> 95;	_≅ 96 _≅ 97	_{ja} 98	<mark>⊯</mark> 99	😠 100	<mark>⊯101</mark> ≂102	_≅ 103 _≅ 104			

Figuur 20: Nummering van de knopen van het rekenmodel

In figuur 21 is de nummering van de elementen in het rekenmodel aangeduid voor eenzelfde dwarsdoorsnede van het model als in figuur 20. Er wordt opgemerkt dat de koker voorzien is van een meerlagige elementenopbouw, dit wil zeggen dat de dikte van de koker en van de asfaltlaag gemodelleerd zijn met behulp van meerdere lagen. Deze opbouw in lagen zorgt voor een grotere nauwkeurigheid voor de bepaling van de temperatuurvariaties doorheen de verschillende lagen. De temperatuur van elke knoop kan namelijk bepaald worden, zodat hiermee het verloop van de warmtegeleiding doorheen het materiaal nauwkeuriger in beeld kan worden gebracht.

In figuur 22 zijn de afmetingen van de kokerdoorsnede gegeven. Er wordt opgemerkt dat de afmetingen van het staal van het dak van de koker verschillen met deze van het staal van de uitkragende gedeelten. Dit verschil in dikte geeft aanleiding tot een verschil in warmtegeleiding.

95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		31 333435 394041					32 363738 424344		
		454647	48	49	50	51	525354		
		1 10101							
		555657	58	59	60	61	626364		

Figuur 21: Nummering van de elementen van het rekenmodel



Figuur 22: Afmetingen van de kokerdoorsnede

In een volgende stap wordt het model verder aangepast om een nog grotere overeenstemming met de werkelijkheid te bekomen. De binnenzijde van de koker wordt voorzien van een aantal verstijvers, zowel langs- als dwarsverstijvers. De positionering van de langsverstijvers is zichtbaar in figuur 23. Het aantal langsverstijvers wordt echter beperkt tot een tweetal aan de zijkanten van de koker en een drietal aan de boven- en de onderzijde van de koker, om de rekentijd van het model niet nodeloos te verhogen.



Figuur 23: Het rekenmodel voorzien van langsverstijvers

In het hiernavolgende wordt iets dieper ingegaan op de nummering en de afmetingen van de langsverstijvers in het rekenmodel. In de figuren 24, 25 en 26 is zowel de nummering van de knopen als deze van de elementen weergegeven voor de verschillende types langsverstijvers. Figuur 24 stelt de halve I-profielen aan de onderzijde van de koker en figuur 25 stelt de halve I-profielen aan de beide zijkanten van de koker voor. Terwijl figuur 26 de kokervormige langsverstijvers aan de bovenkant van de koker voorstelt. In figuur 27 daarentegen worden de afmetingen van al de langsverstijvers weergegeven, uitgedrukt in millimeter. Voor de exacte waarden van deze afmetingen wordt wederom verwezen naar de plans van het oorspronkelijke ontwerp van het viaduct van Vilvoorde waarvan gebruik werd gemaakt.



Figuur 24: Langsverstijvers aan de onderzijde van de koker



Figuur 25: Langsverstijvers aan de zijkanten van de koker



Figuur 26: Langsverstijvers aan de bovenzijde van de koker



Figuur 27: Afmetingen van de verstijvers [mm]

Naast de hierboven gedefinieerde langsverstijvers worden er ook nog enkele diafragma's aangebracht. In werkelijkheid zitten er geen echte diafragma's in de koker, doch eerder een soort van verstevigend vakwerk zoals te zien is in figuur 28. Dit is een foto van de binnenkant van de kokerligger, waarin de gehelde staven die het vakwerk voorstellen duidelijk zichtbaar zijn. In het model worden er in de plaats van een vakwerk diafragma's voorzien voor de eenvoud in de modellering en ook voor de beperking van de rekentijd.



Figuur 28: Het verstevigend vakwerk in de kokerligger

De koker van het rekenmodel wordt voorzien van een zekere lengte, namelijk 20 meter. Deze lengte wordt best niet te groot gekozen omdat hiermee anders de rekentijd van het model verhoogt, maar daarentegen mag deze lengte ook niet te klein worden genomen omdat ze anders onvoldoende representatief is. In het rekenmodel worden drie diafragma's aangebracht. Twee diafragma's worden geplaatst op een afstand van 5 meter van de beide uiteinden van de koker, gezien volgens het lengteprofiel van de koker. Het derde diafragma daarentegen wordt in het midden van de koker geplaatst. Figuur 29 geeft een vooraanzicht van het rekenmodel waarop de aangebrachte langsverstijvers duidelijk zichtbaar zijn en in figuur 30 zijn ook de diafragma's zichtbaar. Een overzichtsfiguur van het rekenmodel is gegeven in figuur 31.



Figuur 29: Vooraanzicht van het model met de langsverstijvers



Figuur 30: Vooraanzicht van het model met de langsverstijvers en de diafragma's



Figuur 31: Overzicht van het model

3.1.2 Randvoorwaarden

De berekeningswijze van het model is opgebouwd uit twee delen. Enerzijds is er een mechanische en anderzijds een thermische berekening. Voor de mechanische berekening wordt de koker voorzien van een aantal verbindingen met de buitenwereld. Ten eerste worden de verplaatsingen van de hoekpunten aan de binnenzijde van de onderkant van de koker (knopen 64 en 68 in figuur 20) ter hoogte van het eerste en het derde diafragma belemmerd, zowel in de X-, de Y- als de Z-richting. Daarnaast wordt de verplaatsing in de Y-richting van de hoeken van de stalen uitkragingen (knopen 1 en 11 in figuur 20) in deze beide diafragma's eveneens verhinderd. Naast deze verbindingen met de buitenwereld kunnen nog uitwendige belastingen op het rekenmodel worden aangebracht. Na berekening kan het gedrag van de koker onder deze belastingen worden bestudeerd.

Voor de thermische berekening moet er eerst en vooral een omgevingstemperatuur worden opgelegd. De waarde van deze temperatuur volgt uit de waargenomen gemiddelde maandgegevens van het Koninklijk Meteorologisch Instituut in België [11]. Zoals verder wordt uitgelegd zullen de maanden juni en december van het jaar 2007 van belang zijn voor de berekeningen. In december van het jaar 2007 was de gemiddelde waargenomen maandtemperatuur gelijk aan 4,1°C. In juni van datzelfde jaar bedroeg de gemiddelde maandtemperatuur 17,5°C.

Een bijzondere eigenschap die kan gecontroleerd worden is de ligging van de kokerbrug. Er kan met andere woorden onderzocht worden of de geografische ligging van de kokerbrug een invloed heeft op de waarde van de opwarming in de koker. Brussel correspondeert met een geografische lengte gelijk aan 4°26'31" OL en een geografische breedte gelijk aan 50°47'30" NB. Enkele andere plaatsen die bijvoorbeeld onderzocht kunnen worden zijn aangegeven in figuur 32. Het betreft twee plaatsen, waarvan één ten noorden en de andere ten zuiden van Brussel gelegen is. Een eerste plaats die onderzocht wordt is Hammerfest, gelegen in het noorden van Noorwegen binnen de noordpoolcirkel, zodat de zon er in de zomer niet ondergaat. Hammerfest bevindt zich op 70°39'NB en 23°30'OL. Op deze positie zal de zon een lage zonnehoogte hebben en in de zomer schijnt de zon gedurende de hele dag, maar daarentegen zal de zonneflux kleiner zijn dan in Vilvoorde. Over het begrip 'zonneflux' wordt verderop meer informatie gegeven. Een andere plaats waarnaar wordt gekeken is de stad Mbandaka, gelegen nabij de evenaar in de Democratische Republiek Kongo. Mbandaka ligt op 0°2'NB en 18°15'OL. Doordat deze stad dicht bij de evenaar gelegen is zal de zonnehoogte veel hoger zijn dan in Vilvoorde, maar het aantal uren dat de zon schijnt per etmaal is lager dan in Vilvoorde.



Figuur 32: Plaatsbepaling van de te onderzoeken gebieden

Naast de geografische ligging van deze twee steden is, zoals reeds eerder werd vermeld, de gemiddelde maandtemperatuur in de zomer en de winter van het jaar 2007 van belang. De aarde wordt verwarmd door zonnestralen. Om de aarde te bereiken moeten deze zonnestralen doorheen de dampkring geraken. Omdat de aarde rond is, vallen de zonnestralen op een bol oppervlak. De zonnestralen die op Europa invallen leggen een langere weg af doorheen de dampkring dan de zonnestralen die ter hoogte van de evenaar invallen. Een bundel zonnestralen op de evenaar verwarmt daardoor een veel kleiner gebied dan een zelfde bundel stralen dat op Europa invalt. Op de evenaar is het dus warmer, omdat de zonne-energie er veel geconcentreerder is. In Mbandaka is de gemiddelde maandtemperatuur in december van 2007 gelijk aan 23,7°C [11], terwijl dit in de maand juni van hetzelfde jaar 23,4°C [11] bedraagt. In Hammerfest is enkel de gemiddelde maandtemperatuur van juni 2007 van belang omdat de zon er in de winter niet opkomt en dus de invloed hiervan niet onderzocht dient te worden. De gemiddelde maandtemperatuur van juni 2007 bedraagt 9,3°C [11].

3.1.3 Materiaaltoekenning

Het model is opgebouwd uit twee soorten materiaal. Enerzijds het staal van de koker en de beide uitkragingen, anderzijds de asfaltlaag aan de bovenzijde die de weg voorstelt. Aangezien beide soorten materiaal verschillende eigenschappen vertonen is het belangrijk de elementen in het rekenmodel apart te groeperen en de eigenschappen toe te kennen aan de specifieke constructiedelen. Tabel 3 geeft een overzicht van de verschillende eigenschappen van deze materialen zoals ze geprogrammeerd worden in het rekenmodel. In wat volgt worden deze eigenschappen meer in detail uitgelegd. Voor de eigenschappen van het asfalt wordt verwezen naar [8] en [12], terwijl voor de eigenschappen van het asfalt wordt verwezen naar [13].

Materiaaleigenschappen	Staal	Asfalt
Conductiviteit [W/mm ^c]	5,53E-02	1,35E-03
Capaciteit [J/kg℃]	439,8	960
Emissiviteit [-]	0,65	0,88
Absorptiviteit [-]	0,65	0,88
Dichtheid [kg/mm ³]	7,82E-06	2,40E-06
Elasticiteitsmodulus [N/mm ²]	210000	884
Coëfficiënt van Poisson [-]	0,3	0,3
Dilatatiecoëfficiënt [/℃]	1,10E-05	5,00E-05

Tabel 3: Eigenschappen van staal en asfalt

Allereerst is het verschil in gedrag tussen de beide materialen belangrijk voor de conductieve eigenschappen van het model. De conductie is een maat voor de geleiding van de warmte doorheen het materiaal. De waarde van de conductie wordt voorgesteld aan de hand van de warmtegeleidingcoëfficiënt. Voor staal varieert deze coëfficiënt in functie van de heersende temperatuur zoals reeds werd aangegeven in paragraaf 2.2. Als gevolg van de opwarming van de koker zal de waarde van deze coëfficiënt veranderen in de tijd. De beginwaarde is afhankelijk van de omgevingstemperatuur en bedraagt ongeveer 53,3 W/m°C bij een omgevingstemperatuur van 20°C. Voor asfalt daarentegen is minder informatie beschikbaar over de karakteristieken en daardoor wordt deze coëfficiënt constant genomen in de tijd. De warmtegeleidingcoëfficiënt van asfalt is kleiner dan deze van staal en bedraagt 1,35 W/m°C.

Een volgende belangrijke eigenschap van het staal en het asfalt is de warmtecapaciteit ervan. De warmtecapaciteit geeft de hoeveelheid energie aan die een materiaal moet opnemen om één graad in temperatuur te stijgen. Voor staal varieert de warmtecapaciteit in functie van de heersende temperatuur, zoals werd vermeld in paragraaf 2.2. Een waarde voor de warmtecapaciteit in het rekenmodel bij een omgevingstemperatuur van 20°C bedraagt 439,8 J/kg°C. Asfalt heeft een hogere warmtecapaciteit dan staal, namelijk 960 J/kg°C en zal dus meer warmte moeten opnemen dan het staal om dezelfde opwarming te ondergaan. De waarde voor het asfalt wordt constant genomen in de tijd wegens het gebrek aan informatie hierover.

De emissiviteit van een materiaal is de verhouding tussen de hoeveelheid energie die door een voorwerp uitgestraald wordt en de hoeveelheid energie die een zwarte straler (= ideale straler) uitzendt bij dezelfde temperatuur. In het model wordt de emissiviteit gelijkgesteld aan de absorptiviteit van een materiaal. De absorptiviteit is de verhouding tussen de stralingsintensiteit die wordt geabsorbeerd en de totale invallende straling. Over de exacte waarden van de emissiviteit/absorptiviteit werden weinig gegevens gevonden. Daarom worden er in deze scriptie een aantal aannames gemaakt hieromtrent. Voor asfalt wordt voor de beide karakteristieken een waarde aangenomen gelijk aan 0,88 omdat de donkere kleur van het asfalt zorgt voor een goede absorptie van de zonnestraling. Het staal daarentegen is voorzien van een anticorrosieverf, namelijk een vinyl ijzerglimmer afschilderverf met een viscositieit bij 23°C van 85-95 KU (*Krebs Units* is de eenheid die wordt gebruikt voor verf) en een dichtheid van ongeveer 1300 kg/m³. Het is ook een verf die nooit volledig uithardt en het ijzerglimmer vormt als het ware een dekschild van 35%. Een aanname voor de emissiviteit en de absorptiviteit bedraagt 0,65.

Een aantal andere belangrijke eigenschappen zijn de dichtheid, de elasticiteitsmodulus, de coëfficiënt van Poisson en de vervormingcoëfficiënt. De dichtheid van staal bedraagt ongeveer 7820 kg/m³ en de dichtheid van asfalt bedraagt ongeveer 2400 kg/m³. De elasticiteitsmodulus van staal wordt gelijkgenomen aan 210000 MPa, voor asfalt bedraagt dit 884 MPa. De coëfficiënt van Poisson is voor beide materialen gelijk aan 0,3. Over de vervormingcoëfficiënt werd reeds melding gemaakt in paragraaf 2.2. Deze coëfficiënt van asfalt wordt constant genomen, namelijk gelijk aan 50x10⁻⁶/°C. Voor staal daarentegen varieert deze coëfficiënt in functie van de heersende temperatuur. Een gemiddelde waarde van de vervormingcoëfficiënt van staal bedraagt 11x10⁻⁶/°C.

3.1.4 Positie van de zon in functie van de tijd

Een belangrijk aspect van het rekenmodel dat in rekening moet worden gebracht is de tijdsafhankelijkheid van de positie van de zon. In figuur 33 is de positie van de zon gegeven, voor de verschillende maanden van het jaar, in functie van de zonnehoogte h en het azimut A. Voor een verduidelijking van deze laatste twee begrippen wordt verwezen naar figuur 19 in paragraaf 2.3. Voor een goed begrip van figuur 33 en de daaropvolgende figuren wordt hierover meer uitleg gegeven. De buitenste cirkel geeft de positie van de zon aan in functie van de vier windrichtingen. Daarmee kan bepaald worden vanwaar de zon zal schijnen in functie van de maand en het tijdstip. De groene lijnen die dezelfde maand links en rechts van de figuur met elkaar verbinden geven de zonnehoogte aan in functie van het tijdstip voor een welbepaalde maand. De waarde van de zonnehoogte wordt bepaald door de rode lijnen. De blauwe lijnen daarentegen stellen het tijdstip voor. Als voorbeeld wordt het punt met het bijschrift A uitgelegd. Als er een rechte lijn wordt getrokken door het punt A en het middelpunt van de buitenste cirkel, volgt daaruit dat deze rechte de buitenste cirkel snijdt in het punt horende bij -40°. Dit wil zeggen dat het azimut van de zon gelijk is aan -40° en dus dat de zon zich in grondplan op 40° ten opzichte van het zuiden bevindt. Diezelfde rechte door het punt A snijdt ook de groene lijn die hoort bij de maanden februari en oktober en deze snijdt ook de rode lijn, corresponderend met een zonnehoogte van 20°. Daarnaast ligt diezelfde rechte ook nog tussen twee blauwe lijnen,

namelijk deze corresponderend met 9u00 en 10u00. Uit deze figuur kan dus worden afgeleid dat de zon om 9u30 in de maanden februari en oktober schijnt vanuit een positie met een zonnehoogte gelijk aan 20° en een azimut gelijk aan -40°. Op deze manier kun bepaald worden op welk tijdstip de zon zich op een bepaalde positie bevindt voor een bepaalde datum. In het hiernavolgende wordt dieper ingegaan op de bepaling van de positie van de zon voor 21 juni en 21 december van het jaar 2007, zowel voor Vilvoorde, Mbandaka als Hammerfest. Een belangrijke opmerking bij figuur 33 is dat deze figuur enkel geldig is om de positie van de zon in Vilvoorde te bepalen.



Figuur 33: Positie van de zon in de tijd

Om de tijdsafhankelijkheid van de zon in rekening te brengen in het rekenmodel wordt eerst de positie van de zon bepaald op een specifieke dag. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het programma "*Sunspot*" [14]. Dit programma geeft het verloop van de zon in functie van de datum, de tijdszone en de geografische lengte en breedte.

3.1.4.1 Vilvoorde

Brussel (Vilvoorde) correspondeert met een geografische lengte gelijk aan 4°26'31" OL en een geografische breedte gelijk aan 50°47'30" NB. In het rekenmodel zullen twee verschillende voorbeelden van de zonnestand worden geïmplementeerd. Als eerste voorbeeld wordt de variatie van de positie van de zon genomen op 21 juni 2007. Dit is ongeveer de langste dag van het jaar zodat de invloed van de zonnestraling maximaal is. In dit geval wordt in het programma "*Sunspot*" met de zomertijd gerekend. Een tweede voorbeeld is de variatie van de stand van de zon op 21 december 2007. In dit geval wordt met de wintertijd gerekend. Deze dag zal in tegenstelling tot 21 juni ongeveer de kortste dag van het jaar zijn, zodat de invloed van de zonnestraling beperkt is. Dit verschil tussen zomer en winter is belangrijk, niet alleen omdat de duur van de zonnestraling erg verschillend is maar ook omdat de zonnehoogte tussen beide erg zal verschillen. Hierdoor kunnen de rekenresultaten van het model, rekening houdend met de beschaduwing van de kokerligger door de uitkragingen, ook erg verschillen. In wat volgt wordt op beide voorbeelden dieper ingegaan.

A. Zomerklimaat

Na berekening levert het programma "*Sunspot*" de positie van de zon op 21 juni 2007 in functie van de tijd, zoals is weergegeven in figuur 34. Op deze figuur zijn zowel de zonnehoogte als het azimut zichtbaar op de gegeven tijdsstippen.



Figuur 34: Zonnestand op 21 juni 2007 in Vilvoorde

Voor het verloop van de zon in functie van de tijd ten opzichte van het kokerprofiel wordt verwezen naar figuur 35. In deze figuur is duidelijk zichtbaar dat de positie van de zon varieert van het noordoosten naar het noordwesten, zoals in aangeduid in figuur 34, in functie van de X- en de Z-coördinaten. De Y-coördinaat stelt de hoogte van de zon voor en is niet zichtbaar in deze figuur. De waarden van deze drie coördinaten zijn weergegeven in tabel 4. Aangezien de afstand van de zon tot de kokerbrug in het model varieert in de tijd en de flux van de zon constant wordt genomen in het model moet er nog een parameter e gedefinieerd worden die de variatie van de zonneflux weergeeft. Er dient opgemerkt te worden dat de afstand van de zon tot de kokerbrug in de praktijk weinig variabel is door de grote afstand tussen beide, maar in het model zal het verschil in deze afstand wel degelijk een invloed hebben op de resultaten en daarom is er nood aan de parameter e. Tabel 4 toont de waarde van deze parameter e in functie van de tijd. Deze waarde is niets anders dan de verhouding van de straal van de omliggende cirkel tot de werkelijke afstand van de zon tot het centrum van de koker.



Tijd [uur]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	e [-]
6	-11496	1283,99	-28557,1	0,911
7	-5312,6	4762,32	-32449,1	0,8167
8	1744	8917,27	-34344,5	0,8167
9	9045,73	13580,6	-34074,6	0,8167
10	15943,2	19839,7	-31663,4	0,8167
11	21822,8	27210	-27325,5	1
12	26161,7	36322,7	-21446,5	1
13	28573,9	44199,2	-14549,5	1
14	28844,9	46077,8	-7247,78	1
15	26950,6	39208,2	-190,88	1
16	23059,5	30255	5993,56	0,8167
17	17517,7	22846,6	10755,5	0,8167
18	10818	16525,5	13671,4	0,8167
19	3556,36	10908,1	14481,8	0,8167
20	-3621,3	6564,76	13114,8	0,8889
21	-10077	2575,05	9691,88	

Figuur 35: Planzicht van het verloop van de zon in de tijd

Tabel 4: Coördinaten van de positie van de zon

Voor de modellering van de zonnestand worden een aantal functies gedefinieerd in het eindige elementenprogramma *Samcef*. Deze functies stellen het verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten voor in functie van de tijd. De tijd is genomen over een etmaal en varieert van 0:00 uur tot 24:00 uur. Figuur 36 stelt deze drie functies voor ten opzichte van de tijd, waarbij wordt opgemerkt dat de tijd is uitgedrukt in seconden, wat nodig is voor een goede werking van het programma. In deze figuur is de hoogte van de zon, de Y-coördinaat, duidelijk zichtbaar in het rood. Er is ook zichtbaar dat de waarden van de functies nul zijn buiten de uren dat de zon schijnt. In figuur 37 is de waarde van de parameter e weergegeven in functie van de tijd.



Figuur 36: Verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten in de tijd



Figuur 37: Variatie van de parameter e van de zonneflux in de tijd

B. Winterklimaat

Voor het verloop van de positie van de zon op 21 december 2007 wordt hetzelfde principe gehanteerd als hierboven. In wat volgt worden enkel de resultaten gegeven. Figuur 38 geeft het verloop van de zon doorheen de dag, bepaald met "*Sunspot*". Figuur 39 stelt het planzicht voor van de positie van de zon. De coördinaten X, Y en Z van de zon en de parameter e zijn aangeduid in tabel 5 in functie van de tijd. De figuren 40 en 41 stellen de in *Samcef* gedefinieerde functies voor, enerzijds voor de X-, Y- en Z-coördinaten, anderzijds voor de parameter e.



Figuur 38: Zonnestand op 21 december 2007 in Vilvoorde



Tijd [uur]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	e [-]
9	20248,3	427,649	-28768,1	0,9074
10	24212,6	3008,22	-24548,6	0,9074
11	27076,2	5207,64	-19516,7	1
12	28679	6564,76	-13953,3	1
13	28931,5	6564,76	-8169,11	1
14	27819,7	5656,27	-2487,2	0,9293
15	25405,6	3880,42	2775,16	0,9293
16	21824,1	1283,99	7324,12	

Tabel 5: Coördinaten van de positie van de zon

Figuur 39: Planzicht van het verloop van de zon in de tijd



Figuur 40: Verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten in de tijd



Figuur 41: Variatie van de parameter e van de zonneflux in de tijd

C. Zomerklimaat – winterklimaat

In de figuren 42 en 43 worden de gedefinieerde functies voor de zomer en de winter samen voorgesteld om zo duidelijk de verschillen tussen beide aan te tonen. Het verschil tussen de zonnehoogte, de Y-coördinaat, is overduidelijk zichtbaar in figuur 42. De zonnehoogte in de zomer is veel groter dan in de winter. In dezelfde figuur is het verschil in duurtijd van de zonnestraling tussen de zomer en de winter ook nadrukkelijk zichtbaar. De lengte van de zomerdagen is bijna dubbel zo groot als deze van de winterdagen. Deze beide aspecten geven aanleiding tot verschillende resultaten inzake de opwarming van de koker. Enerzijds zorgt de lagere positie van de zon in de winter ervoor dat een groter oppervlak van de zijkant van de koker bestraald wordt door de zon, met andere woorden de beschaduwing door de uitkragende gedeelten is kleiner dan in de zomer, zodat er een grotere opwarming van de koker via de zijkant optreedt. In de zomer zal deze opwarming eerder vanaf de bovenkant aangrijpen door de hogere zonnehoogte. Anderzijds zorgt de koker dan in de zomer.



Figuur 42: Verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten in de tijd

In figuur 43 is het verloop van de zonneflux voor de zomer en de winter met elkaar vergeleken. De waarde van de flux varieert niet zo veel, enkel de duur van de flux is sterk verschillend. Maar over de betekenis van de zonneflux wordt in paragraaf 3.1.5 dieper ingegaan.



Figuur 43: Variatie van de parameter e van de zonneflux in de tijd

3.1.4.2 Mbandaka

Zoals reeds eerder vermeld werd, ligt de stad Mbandaka op 0°2'NB en 18°15'OL. Doordat deze stad dichter bij de evenaar gelegen is dan Vilvoorde zal de zonnehoogte veel hoger zijn, maar het aantal uren dat de zon schijnt per dag is beperkter dan in Vilvoorde. In wat volgt wordt het verschil in zonnestand tussen zomer en winter in Mbandaka aangetoond.

A. Zomerklimaat

Na berekening levert het programma "*Sunspot*" de positie van de zon op 21 juni 2007 in functie van de tijd, zoals weergegeven in figuur 44. In deze figuur zijn zowel de zonnehoogte als het azimut zichtbaar op de gegeven tijdsstippen. Er wordt opgemerkt dat de zon beweegt van het noordoosten naar het noordwesten. De rest van de resultaten zijn identiek zoals in de voorgaande paragraaf. Figuur 45 stelt het planzicht voor van de positie van de zon. De coördinaten X, Y en Z van de zon en de parameter e van het rekenmodel zijn aangeduid in tabel 6 in functie van de tijd. Figuur 46 en figuur 47 stellen de in *Samcef* gedefinieerde functies voor, enerzijds voor de X-, Y- en Z-coördinaten, anderzijds voor de parameter e.



Figuur 44: Zonnestand op 21 juli 2007 in Mbandaka



ïjd [uur]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	e [-]
7	-5463,5	3443,25	-32378,5	0,792
8	-5854,1	7025,26	-32204,5	0,792
9	-6622,8	14145,1	-31829,7	0,792
10	-8843,7	22846,6	-30547,4	0,925
11	-12519	33721,4	-27623,8	0,925
12	-17705	48084	-20354,1	1
13	-19817	55027,9	-7014,2	1
14	-15569	42435,2	4052,62	0,897
15	-10584	29198	9306,26	0,897
16	-7750	18462,1	11217,6	0,799
17	-6240,1	10908,1	12020,5	0,799
18	-5854,1	4320,01	12204,5	

Tabel 6: Coördinaten van de positie van de zon

Figuur 45: Planzicht van het verloop van de zon in de tijd



Figuur 46: Verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten in de tijd



Figuur 47: Variatie van de parameter e van de zonneflux in de tijd

B. Winterklimaat

Voor de winter wordt hetzelfde principe toegepast als voor de zomer. Figuur 48 stelt de positie van de zon voor op 21 december 2007, zoals deze werd berekend met het programma "*Sunspot*" rekening houdend met het winteruur. In dit geval verloop de zon terug van het zuidoosten naar het zuidwesten. In figuur 49 is het planzicht van de positie van de zon gegeven. De coördinaten X, Y en Z van de zon en de parameter e zijn aangeduid in tabel 7 in functie van de tijd. In de figuren 50 en 51 zijn de in *Samcef* gedefinieerde functies voorgesteld, enerzijds voor de X-, Y- en Z-coördinaten, anderzijds voor de parameter e.



Figuur 48: Zonnestand op 21 december 2007 in Mbandaka



Tijd [uur]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	e [-]
6	14463,5	3880,4	-32378	0,792
7	14854,1	7490,4	-32205	0,792
8	15622,8	14145	-31830	0,792
9	17843,7	22847	-30547	0,925
10	21519,1	34990	-27624	0,925
11	26704,5	50232	-20354	1
12	28817,4	55028	-7014,2	1
13	24569,2	42435	4052,6	0,897
14	19583,7	28184	9306,3	0,897
15	16750	17800	11218	0,799
16	15240,1	10400	12020	0,799
17	14854,2	4320	12205	

Tabel 7: Coördinaten van de positie van de zon



de tijd



Figuur 50: Verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten in de tijd



Figuur 51: Variatie van de parameter e van de zonneflux in de tijd

C. Zomerklimaat – winterklimaat

In figuur 52 zijn de functies voor de coördinaten van de zon in de zomer en de winter samen voorgesteld. Een eerste verschil is het tijdsverschil. In de zomer begint de dag een uur later en eindigt ook een uur later. Dit is een gevolg van het verschil tussen winter- en zomeruur. Er wordt wel opgemerkt dat de dag en de nacht rond de evenaar vrijwel even lang zijn. Een tweede verschil tussen zomer- en winterklimaat is de positie van de zon. In de zomer varieert de zon van het noordoosten naar het noordwesten. Terwijl de zon in de winter varieert van het zuidoosten naar het zuidwesten. Een opvallende gelijkenis tussen zomer en winter is de zonnehoogte. In de zomer en de winter is de zonnehoogte ongeveer gelijk.



Figuur 52: Verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten in de tijd

Figuur 53 geeft het verloop van de zonneflux in de zomer en de winter. De waarden van de zonneflux zijn bijna identiek aan elkaar. Het enige verschil ligt in het uur tijdsverschil tussen beide. Een opmerking hierbij is dat er rond de evenaar geen echte verschillen tussen de seizoenen bestaan. De gemiddelde maandtemperaturen zijn er quasi constant.



Figuur 53: Variatie van de parameter e van de zonneflux in de tijd

3.1.4.3 Hammerfest

Zoals eerder vermeld bevindt Hammerfest zich op 70°39'NB en 23°30'OL in het noorden van Noorwegen. Op deze positie heeft de zon een lage zonnehoogte. Vanwege de ligging in de noordpoolcirkel gaat de zon in de zomer, ongeveer tussen 16 mei en 26 juli, niet onder en komt de zon in de winter tussen 21 november en 21 januari niet boven de horizon.

A. Zomerklimaat

Na berekening levert het programma "*Sunspot*" de positie van de zon op 21 juni 2007 in functie van de tijd, zoals weergegeven in figuur 54. Op deze figuur zijn zowel de zonnehoogte als het azimut zichtbaar op de gegeven tijdsstippen. De rest van de resultaten zijn wederom identiek zoals in de voorgaande paragrafen. Figuur 55 stelt het planzicht voor van de positie van de zon. De coördinaten X, Y en Z van de zon en de parameter e zijn aangeduid in tabel 8 in functie van de tijd. Figuur 56 en figuur 57 stellen de in *Samcef* gedefinieerde functies voor, enerzijds voor de X-, Y- en Z-coördinaten, anderzijds voor de parameter e.



Figuur 54: Zonnestand op 21 juli 2007 in Hammerfest



Figuur 55: Planzicht van het verloop van de zon in de tijd

ijd [uur]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	e [-]
0	-20000	1713,21	-10000	1
1	-19165	2143,47	-16341,1	1
2	-16718	3008,22	-22250	0,817
3	-12824	4762,32	-27324,1	0,817
4	-7750	6564,76	-31217,6	0,817
5	-1841,1	8436,03	-33665,2	0,817
6	4500	10908,1	-34500	0,817
7	10841,1	13580,6	-33665,2	0,817
8	16750	16525,5	-31217,6	0,817
9	21824,1	19141,5	-27324,1	0,817
10	25717,6	21297,5	-22250	1
11	28165,2	22059,9	-16341,1	1
12	29000	22059,9	-10000	1
13	28165,2	20557,9	-3658,93	1
14	25717,6	18462,1	2250	0,817
15	21824,1	15910,5	7324,12	0,817
16	16750	13580,6	11217,6	0,817
17	10841,1	10908,1	13665,2	0,817
18	4500	10908,1	14500	0,817
19	-1841,1	8436,03	13665,2	0,817
20	-7750	6108,54	11217,6	0,817
21	-12824	4320,01	7324,12	0,817
22	-16718	3008,22	2250	1
23	-19165	2143,47	-3658,93	1
24	-20000	1713,21	-10000	

Tabel 8: Coördinaten van de positie van de zon



Figuur 56: Verloop van de X-, Y- en Z-coördinaten in de tijd



Figuur 57: Variatie van de parameter e van de zonneflux in de tijd

B. Winterklimaat

In de winterperiode komt de zon tussen 21 november en 21 januari niet boven de horizon en zal er geen invloed zijn van zonnestraling op de kokerbrug.

3.1.5 Zonneflux

De zon blijkt radiostraling uit te sturen. De sterkte van deze straling is een maat voor de activiteit van de zon. Deze 'zonneruis' wordt op verschillende golflengten gemeten, maar de meest gehanteerde waarde is deze welke wordt gemeten op een golflengte van 10,7 cm

(2,695 GHz). Dit wordt ook wel de zonneflux genoemd [11]. De zonnestraling die invalt op de aarde varieert volgens de elfjaarlijkse activiteitscyclus van de zon. Deze cyclus is niet erg precies en varieert, volgens waarnemingen gedurende drie eeuwen, tussen de 8 en de 17 jaar. Korte cycli worden gekenmerkt door een relatief grote energieflux, lange cycli daarentegen door een geringe flux. Elfjaarlijkse variaties van de orde van 1W/m² veroorzaken temperatuurvariaties op aarde van de orde van 0,1°C. Figuur 58 [15] geeft een overzicht van het verloop van de zonneflux in de tijd in Brussel. Op de optredende zonneflux in Mbandaka en Hammerfest wordt verderop ingegaan. In de linkerhelft van figuur 58 zijn de waargenomen waarden weergegeven vanaf het jaar 2000 tot en met het heden, terwijl in het rechtergedeelte van de figuur de voorspelde waarden zichtbaar zijn van het heden tot en met het jaar 2016. De Elfjarige cyclus is hierop zichtbaar.

De instralende zonneflux zal niet in zijn geheel het aardoppervlak bereiken. Een deel van de zonneflux wordt gereflecteerd door de bewolking, een deel wordt geabsorbeerd door de atmosfeer, een deel wordt verstrooid door de atmosfeer en een ander deel wordt gereflecteerd door het aardoppervlak. Praktisch blijkt dat er iets minder dan de helft van de zonneflux het aardoppervlak zal bereiken. Dit gebeurt zowel rechtstreeks via de zonnestraling, als onrechtstreeks via diffuse straling, waarvan enerzijds door de wolken en anderzijds doorheen een wolkenloze hemel.

In de praktijk blijkt dat de ionosfeer in staat is golven te weerkaatsen. De ionosfeer ontstaat onder invloed van straling afkomstig van de zon. Fotonen met een hoge energie botsen op de atomen in de atmosfeer en zijn in staat deze te ioniseren (= gedeeltelijk van hun elektronen ontdoen). De zonneflux wordt echter, zoals eerder gezegd, gemeten op een golflengte van 10,7cm en vertegenwoordigt derhalve een geheel ander gedeelte van het spectrum dan de straling die daadwerkelijk verantwoordelijk is voor het vormen van de ionosfeer. Omwille van die reden betekent een hoge zonneflux niet meteen dat er sprake is van een sterke mate van ionisatie van de ionosfeer en dat een aantal andere factoren een veel belangrijkere rol spelen voor de waarde van de zonneflux. Op de eerste plaats is dat de stand van de zon boven het aardoppervlak, waardoor er sprake is van dag-nacht variaties en seizoensinvloeden. Verder spelen verstoringen van het aardmagnetisch veld een belangrijke rol. Een duidelijk verband tussen zonneflux en condities bestaat eigenlijk alleen op wat langere termijn. Het van dag tot dag volgen van de zonneflux is derhalve weinig zinvol.



Figuur 58: Verloop van de zonneflux in de tijd (in Brussel)

Zoals reeds eerder vermeld, geeft figuur 58 een overzicht van het verloop van de zonneflux over enkele jaren in Brussel. Er is duidelijk zichtbaar dat de flux schommelt in waarde waarbij een maximum rond de 200sfu (= solar flux units) voorkomt in het jaar 2002, terwijl in het heden een minimum heerst die slechts rond de 70sfu schommelt. In het model zullen meerdere waarden voor de zonneflux worden toegepast om deze resultaten met elkaar te vergelijken. Enkele mogelijke waarden die uit figuur 58 worden afgeleid zijn bijvoorbeeld 200sfu, 140sfu en 80sfu. Aangezien praktisch kan worden aangetoond dat slechts ongeveer de helft van de zonneflux effectief het aardoppervlak bereikt, wordt de gebruikte zonneflux in het model gelijkgenomen aan 110sfu, 80sfu en 50sfu.

Voor de waarde van de zonneflux in Hammerfest en Mbandaka is minder informatie beschikbaar. Uit [16] blijkt dat de gemiddelde irradiantie van de zon per jaar in Hammersfest ongeveer gelijk is aan 70% van de irradiantie in Brussel. Hierop baserend wordt de waarde van de zonneflux voor Hammersfest gelijkgenomen aan 70% van de zonneflux in Brussel. Dit levert drie waarden voor de zonneflux op, namelijk 77sfu, 56sfu en 35sfu. Voor de waarde van de zonneflux in Mbandaka wordt, baserend op de voorgaande overeenkomst, aangenomen dat de zonneflux in Mbandaka 50% groter is dan deze in Brussel. Dit levert waarden voor de zonneflux gelijk aan 165sfu, 120sfu en 75sfu.

Er wordt nog opgemerkt dat er een extra effect van de straling in rekening wordt gebracht, namelijk op de bodem van de stalen koker. Als gevolg van de opwarming van de koker zal na het verdwijnen van de straling van de zon aan de buitenzijde, met andere woorden tijdens de nacht, de opwarming verder gezet worden maar dan van binnen uit naar buiten toe. De opgewarmde koker geeft dan warmte af naar boven zodat er een temperatuursgradiënt in het wegdek blijft bestaan. Dit effect wordt voorgesteld met een waarde van de emissiviteit gelijk aan 0,14.

3.1.6 Convectie

Een laatste belangrijke parameter die beschouwd wordt is de convectie. In het model is er sprake van twee soorten convectie, namelijk vrije convectie en gedwongen convectie. De natuurlijke of vrije convectie is het gevolg van een temperatuursverschil in de lucht in het inwendige van de koker. Een gangbare convectiecoëfficiënt die in het model gebruikt wordt bedraagt 3W/m²K [9]. De gedwongen convectie daarentegen is het gevolg van een uitwendig opgelegd drukverschil als gevolg van de heersende windstromingen. De waarde van de gebruikte convectiecoëfficiënt ligt hier hoger dan bij de vrije convectie omwille van de aanwezigheid van de stroming van de wind. In het model wordt geopteerd voor een waarde van 50W/m²K [9].

3.2 Kokerprofiel geheld

Een belangrijke opmerking bij de berekening van het model in het voorgaande is de dwarse helling van het viaduct zelf. In de oorspronkelijke plans van het viaduct (figuur 59) is te zien dat het viaduct een helling bevat ten opzichte van het horizontale vlak. Deze helling is nodig voor een goede afwatering. Maar deze helling kan ook leiden tot een grotere opwarming van de kokerligger, namelijk als het beschaduwde oppervlak kleiner wordt dan in het geval zonder helling, zodat de zonnestraling een groter oppervlak bestrijkt. De invloed van deze helling wordt onderzocht door de resultaten van het model met en zonder helling met elkaar te vergelijken.



Figuur 59: Dwarsprofiel van het viaduct

Figuur 59 stelt het dwarsprofiel voor van het viaduct van Vilvoorde en op deze figuur is de helling van het wegdek ten opzichte van het horizontale vlak duidelijk zichtbaar. Deze waarde bedraagt ongeveer 3%. Om hiermee rekening te houden in het model wordt heel het model om een bepaalde hoek, namelijk 3°, geroteerd. Deze rotatie is zichtbaar in figuur 60. Er wordt hier nog bij opgemerkt dat in de werkelijkheid enkel het wegdek geroteerd is en niet de koker, terwijl in het model het geheel wordt geroteerd rond deze hoek. Deze aanname in het model is dus slechts een benadering van de werkelijkheid, maar de invloed hiervan op de resultaten is verwaarloosbaar, zodat deze aanname gerechtvaardigd is.



Figuur 60: Model met helling van 3°

Hoofdstuk 4:

Rekenresultaten

4.1 Algemene rekenresultaten

Na het opstellen van het rekenmodel in het voorgaande hoofdstuk, volgen in dit hoofdstuk de resultaten na de berekening. Er wordt een thermische berekening van het model uitgevoerd, waarbij de positie van de zon zal variëren in functie van de tijd. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen enerzijds de helling van de koker ten opzichte van het horizontale vlak en anderzijds het verschil tussen zomer- en winterklimaat. De bekomen resultaten voor Vilvoorde, Mbandaka en Hammerfest worden expliciet vermeld en met elkaar vergeleken. Voor de eenvoud in begrip van de bekomen resultaten wordt in figuur 61 de nummering van de knopen, waarvan de resultaten worden besproken, herhaald.



Figuur 61: Nummering van de knopen in het model

Om de eventuele randeffecten die kunnen optreden bij de berekening buiten beschouwing te laten worden enkel de knopen ter hoogte van het middelste diafragma, in het midden van de koker, gezien volgens het langsprofiel, en de knopen in het midden van de kokermoot net naast dit diafragma besproken. De twee vlakken van de knopen die hiermee bedoeld worden zijn aangeduid in figuur 62. Doorsnede 1 geeft het midden van de koker aan, terwijl doorsnede 2 het midden van de kokermoot naast dit diafragma aanduidt. De nummering van deze doorsneden blijft van belang voor een goed begrip van de resultaten uit deze paragraaf.



Figuur 62: Aanduiding van de doorsneden in het langsprofiel van de kokerbrug

Bij de rekenresultaten horen nog twee belangrijke opmerkingen in verband met de opgelegde randvoorwaarden. In de eerste plaats worden de begintemperatuur van de koker en de omgeving gelijkgesteld aan de gemiddelde waargenomen maandtemperatuur van de omgeving. Deze waarde is meestal hoger dan de werkelijk optredende begintemperatuur net na het opkomen van de zon. Daarnaast wordt een vaste waarde gekozen voor de zonneflux, terwijl deze waarde afhangt van verschillende factoren en in de praktijk moeilijk te benaderen valt met één getal. Deze twee randvoorwaarden geven aanleiding tot een grotere opwarming in de koker en moeten daarom in beschouwing genomen worden.

4.1.1 Vilvoorde

4.1.1.1 Zomerklimaat

Uit de gegevens betreffende de positie van de zon op 21 juni 2007 te Vilvoorde, zie figuur 34, blijkt dat de zon bijna de hele dag schijnt vanaf een positie met een redelijk grote zonnehoogte. Voor de opwarming van de koker onder deze zonnestraling worden twee aspecten beschouwd. Enerzijds wordt gekeken naar de zijkant van de koker, namelijk de knopen 137 (= de top van de uitkraging), 52 (= zijkant van de koker ter hoogte van de bovenste langsverstijver) en 60 (= de zijkant van de koker ter hoogte van de onderste langsverstijver). Anderzijds wordt gekeken naar het midden van de koker, namelijk de

knopen 132 (= het midden van de bovenzijde van het wegdek), 39 (= het midden van de onderzijde aan de bovenkant van de koker) en 66 (= het midden van de bovenzijde aan de onderkant van de koker). De positionering van deze knopen is, zoals vermeld, aangegeven in het dwarsprofiel van figuur 61.

A. Opwarming van de zijkant van de koker

In eerste instantie wordt gekeken naar de opwarming van de zijkant van de koker, namelijk de kant vanwaar de zonnestraling komt. De opwarming in de knopen 137, 52 en 60 wordt besproken. Figuur 63 geeft het verloop van de temperatuur over een etmaal in de knoop 137. In deze figuur is zowel het temperatuursverloop voor de gehelde als voor de niet-gehelde koker weergegeven voor de doorsneden 1 en 2, waarbij ook nog een onderscheid is gemaakt tussen de verschillende waarden van de zonneflux, namelijk 110sfu, 80sfu en 50sfu. In al de hiernavolgende figuren is de eenheid van de tijd uitgedrukt in uur en de eenheid van de temperatuur in graden Celsius.



Figuur 63: Temperatuursverloop in knoop 137

Uit de bovenstaande figuur kunnen een aantal resultaten worden afgeleid voor de verschillende parameters die gerelateerd zijn aan de opwarming van de zijkant van de

koker ten gevolge van de straling van de zon. Een eerste parameter die duidelijk zichtbaar is, is de waarde van de zonneflux. Voor alledrie de waarden van de zonneflux, is het verloop van de temperatuur quasi-identiek. Er is zichtbaar dat de temperatuur van het asfalt begint toe te nemen van zodra de zon opkomt en vanaf het moment dat de zon ondergaat vermindert de temperatuur van het asfalt. De invloed van de zonnestraling op de opwarming van het asfalt heeft dus een directe invloed in deze knoop. Dit is een rechtstreeks gevolg van de positie van de zon aangezien de zonnestralen in de zomer rechtstreeks op het asfalt invallen. Het enige verschil in het temperatuursverloop voor de verschillende waarden van de zonneflux, is de waarde van de temperatuur. Dit is logisch aangezien voor de berekening in het programma enkel de waarde van de zonneflux verandert, terwijl de rest van de gegevens identiek blijven. Dus bij een vermindering van de zonneflux, verminderen ook de temperaturen. Een andere parameter die beschouwd wordt, is de helling van de koker. Voor alledrie de waarden van de zonneflux is in de figuur een duidelijk temperatuursverschil zichtbaar voor het temperatuursverloop tussen een nietgehelde en een gehelde koker. Uit de figuur volgt dat de invloed van de helling van de koker gunstig werkt op de opwarming van het asfalt. Doordat de koker roteert zal de invallende zonnestraling op het wegdek iets kleiner zijn omdat het stralingsoppervlak vermindert, waardoor de opwarming in de knoop 137 geringer is. De waarde van dit temperatuursverschil bedraagt ongeveer 1,5°C. Een laatste parameter, waarvan de invloed kan afgeleid worden uit de voorgaande figuur, is de doorsnede van de koker waarvan de opwarming beschouwd wordt. Voor elke waarde van de zonneflux geldt dat het verschil in optredende temperatuur van het asfalt voor de doorsneden 1 en 2 verwaarloosbaar klein is. Dit is het gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestraling op de uitkraging. De aanwezigheid van het diafragma heeft dus geen invloed op de opwarming in knoop 137. Zoals later in deze paragraaf wordt aangeduid, gebeurt de opwarming van de koker in het zomerklimaat van bovenuit naar beneden toe, als gevolg van de hoge zonnestand. De bovenkant van het wegdek warmt op door de rechtstreeks invallende zonnestralen en geeft de warmte af naar de rest van de structuur.

Een tweede knoop die van belang is voor het onderzoek naar de opwarming van de zijkant van de koker is knoop 52. Deze knoop bevindt zich aan de zijkant van de koker, aan de kant van de zon, ter hoogte van de bovenste langsverstijver. In figuur 64 is het temperatuursverloop gegeven in deze knoop voor dezelfde parameters als bij knoop 137.



Figuur 64: Temperatuursverloop in knoop 52

Uit deze figuur kan hetzelfde afgeleid worden voor de invloed van de waarde van de zonneflux als bij knoop 137. Bij een hogere zonneflux ontstaan hogere temperaturen, terwijl het verloop van de temperatuur quasi-identiek is. Dit verloop neemt toe van zodra de zon opkomt, maar blijft toenemen, ook als de rechtstreekse invloed van de zonnestraling wegvalt. Er kan wel worden afgeleid dat de mate van de opwarming in deze knoop vermindert als de straling van de zon wegvalt. Dit wordt bepaald door de helling van elk van de krommen in deze figuren. In de figuren 65 en 66 is het temperatuursverloop in doorsnede 1, voor een gehelde en een niet-gehelde koker met een zonneflux gelijk aan 110sfu, weergegeven. Voor beide figuren blijkt duidelijk dat kromme 1 steiler is dan kromme 2. De waarde van deze steilheid is een maat voor de warmteflux. Dit effect van de warmteflux is het gevolg van de hoge zonnehoogte. Doordat de zon zo hoog aan de hemel staat, zal de bovenkant van de brug, namelijk het wegdek, bijna het geheel van de zonnestraling opvangen en daardoor warmt dit wegdek op. Deze warmte wordt doorheen het staal van de koker geleid naar beneden toe, zodat de zijkant van de koker opwarmt van bovenaf, zoals reeds eerder werd vermeld. De koker ondergaat dus enig effect van traagheid inzake de opwarming.



Figuur 65: Knoop 52 ter hoogte van het diafragma, zonder helling met een flux van 110sfu



Figuur 66: Knoop 52 ter hoogte van het diafragma, met helling met een flux van 110sfu

Een ander aspect dat kan worden afgeleid uit figuur 64 is de gunstige invloed van de helling van de koker. Deze gunstige invloed heeft dezelfde oorzaak als bij knoop 137. Aangezien de warmte via geleiding van bovenaf naar beneden toe wordt doorgegeven zal een beperktere opwarming van de bovenkant ook leiden tot een beperktere opwarming in de rest van de zijwand van de koker. Naast dit verschil ten gevolge van de helling van de koker, ontstaat er ook een temperatuursverschil in knoop 52 tussen de doorsneden 1 en 2. Dit temperatuursverschil is beperkt in waarde, maar in tegenstelling tot knoop 137 is er wel degelijk een verschil tussen de beide doorsneden. Dit verschil is het gevolg van de invloed van de aanwezigheid van het diafragma. De waarde van de temperatuur in doorsnede 1 is
iets lager dan deze in doorsnede 2, omdat het diafragma in doorsnede 1 meer warmte naar zich toetrekt dan het inwendige van de koker naast dit diafragma. Daardoor zal de buitenwand van de koker ter hoogte van doorsnede 1 iets lager in temperatuur zijn dan deze in doorsnede 2. Een gedeelte van de warmte van de zijwand wordt als het ware gebruikt om het diafragma op te warmen.

Een laatste knoop die besproken wordt voor het onderzoek naar de opwarming van de zijkant van de koker is knoop 60. Deze knoop bevindt zich aan de zijkant van de koker ter hoogte van de onderste langsverstijver. Figuur 67 geeft het temperatuursverloop in deze knoop.



Figuur 67: Temperatuursverloop in knoop 60

Uit het temperatuursverloop in knoop 60 volgen enkele gelijkaardige resultaten als voor knoop 52. Enerzijds is er de invloed van de waarde van de zonneflux. Bij hogere waarden van de zonneflux is het verloop van de temperatuur identiek, enkel de waarden van de temperatuur variëren. Anderzijds is er het effect van de traagheid. Als gevolg van de opwarming van bovenuit naar beneden toe is het effect van de traagheid hier nog groter dan bij knoop 52. Dit is zichtbaar in de figuren 68 en 69, waar de helling van de kromme 3 nog

steiler is dan de helling van kromme 2 in de figuren 65 en 66. Dit wijst op een grotere opwarming in knoop 60 dan in knoop 52 op hetzelfde tijdstip.



Figuur 68: Knoop 60 ter hoogte van het diafragma, zonder helling met een flux van 110sfu



Figuur 69: Knoop 60 ter hoogte van het diafragma, met helling met een flux van 110sfu

Een ander verschijnsel dat zichtbaar is in figuur 67, en ook in de figuren 68 en 69, is de knik in het temperatuursverloop net na het opkomen van de zon. Deze knik is het gevolg van de lage zonnehoogte, net na het opkomen van de zon, waardoor de knoop 60 rechtstreeks is blootgesteld aan de zonnestraling. Daardoor is er een directe opwarming van deze knoop. Als de zon het volgende uur echter weer hoger staat aan de hemel, verdwijnt

deze rechtstreekse opwarming en begint de opwarming via geleiding in de zijkant van de koker van bovenuit naar beneden toe met de nodige traagheid. Daardoor vermindert eerst even de warmteflux. Maar van zodra de opwarming via geleiding aangrijpt neemt de warmteflux weer toe in waarde. Daarnaast is, net zoals bij knoop 52, het temperatuursverschil tussen de doorsneden 1 en 2 zichtbaar. Dit verschil is in knoop 60 ongeveer even groot als in knoop 52 en is wederom te wijten aan de aanwezigheid van het diafragma dat een groter gedeelte van de warmte naar zich toetrekt dan het inwendige van de koker net naast dit diafragma.

B. Opwarming van het midden van de koker

Naast de opwarming van de zijkant van de koker wordt ook gekeken naar de opwarming in het midden van de koker, gezien in het dwarsprofiel, voor de doorsneden 1 en 2. Zoals reeds vermeld (zie figuur 61) wordt gekeken naar de knopen 132 (= het midden van de bovenzijde van het wegdek), 39 (= het midden van de onderzijde aan de bovenkant van de koker) en 66 (= het midden van de bovenzijde aan de onderkant van de koker). In deze paragraaf worden dezelfde resultaten gegeven voor deze drie knopen als voor de knopen 137, 52 en 60 uit de voorgaande paragraaf. Er wordt wederom een onderscheid gemaakt tussen de helling van de koker en de waarde van de zonneflux. Figuur 70 geeft het temperatuursverloop in knoop 132. Voor al de hiernavolgende figuren betreffende het temperatuursverloop geldt er dat de waarde van de zonneflux enkel aanleiding geeft tot een verschil in waarde van de optredende temperaturen. Daarom wordt deze invloed niet meer vermeld.

Net zoals voor knoop 137 volgt uit het temperatuursverloop van knoop 132 de directe invloed van de invallende zonnestraling op de opwarming van het asfalt, doordat de zonnestralen rechtstreeks invallen op het wegdek. Het asfalt begint op te warmen van zodra de zon opkomt en begint stilaan af te koelen van zodra de zon ondergaat. Daarnaast is de invloed van de helling van de koker gunstig omdat het bestraalde oppervlak kleiner wordt door de rotatie van de koker en daarom vermindert ook de opwarming van het asfalt. Een ander resultaat dat uit deze figuur volgt is het beperkte temperatuursverschil in deze knoop tussen doorsnede 1 en 2. Dit verschil is wel iets groter in deze knoop dan bij knoop 137. Nog een optredend verschil tussen de knopen 132 en 137 is de maximale waarde van de optredende temperatuur. Bij knoop 132 is deze iets lager dan bij knoop 137 en dit is het

gevolg van de invallende zonnestraling die aan de zijkant van de uitkraging iets groter is dan in het midden van het wegdek.



Figuur 70: Temperatuursverloop in knoop 132

Een tweede knoop die van belang is voor het onderzoek naar de opwarming van het midden van de koker is knoop 39. Deze knoop bevindt zich aan de onderzijde van de bovenkant van de koker. Figuur 71 geeft het temperatuursverloop in deze knoop. Het temperatuursverloop in knoop 39 is ongeveer identiek aan het temperatuursverloop in knoop 132. Deze gelijkheid is het gevolg van de geleiding van de warmte doorheen de dunne asfaltlaag en het dunne dak van de stalen koker. Als gevolg van de gelijkheid in resultaten worden deze hier niet verder in detail vermeld, maar wordt verwezen naar de resultaten horende bij figuur 70.



Figuur 71: Temperatuursverloop in knoop 39

Een laatste knoop die belangrijk is voor het onderzoek naar de opwarming van de koker in het zomerklimaat is knoop 66. Deze knoop bevindt zich aan de bovenzijde van de onderkant van de koker. Figuur 72 geeft het temperatuursverloop in deze knoop.

In figuur 72 zijn drie aspecten van de opwarming van de koker zichtbaar. Een eerste aspect is de traagheid van de opwarming aan de onderkant van de koker die het gevolg is van de hoge zonnehoogte waardoor de warmte zich vanaf de bovenkant van de koker naar beneden toe voortplant. De opwarming aan de onderzijde geschiedt dus met een zekere vertraging ten opzichte van de opwarming aan de bovenzijde. Een tweede aspect is de grote afstand tussen de bovenkant en de onderkant van de koker. De warmte aan de bovenkant van de koker moet een "grote" afstand overbruggen vooraleer het de onderkant van de koker bereikt. Deze relatief grote afstand geeft aanleiding tot een beperkte opwarming aan de onderzijde van de koker. Een derde aspect is de kleine piek net na het opkomen van de zon. Doch deze piek is niet duidelijk zichtbaar in de bovenstaande figuur. Figuur 73 geeft het temperatuursverloop in knoop 66, zonder helling van de koker met een waarde van de zonneflux gelijk aan 110sfu. In deze figuur is de piek net na het opkomen van de zon iets duidelijker zichtbaar. Deze piek is, net zoals bij knoop 60, het gevolg van de lage

zonnestand net na het opkomen van de zon. Ten gevolge van deze lage zonnestand gebeurt de opwarming van de koker tijdelijk vanaf de zijkant van de koker en niet vanaf de bovenkant, maar hierover wordt verderop meer uitleg gegeven. Als de zon daarna terug hoger aan de hemel staat, gebeurt de opwarming vanaf de bovenkant van de koker naar beneden toe. Dit geeft dan aanleiding tot een kleine daling in het temperatuursverloop net na het optreden van de piek. Uit het verloop van de temperatuur volgt opnieuw de gunstige invloed van de helling van de koker.



Figuur 72: Temperatuursverloop in knoop 66



Figuur 73: Knoop 66 ter hoogte van het diafragma, zonder helling met een flux van 80sfu

C. Algemene opwarming van de koker

Om een idee te krijgen van het algemene beeld van de opwarming van de koker worden hieronder een aantal figuren gegeven die enerzijds de temperatuur en anderzijds de warmteflux op een bepaald tijdstip in heel de koker weergeven. Er wordt allereerst opgemerkt dat deze figuren corresponderen met een zonneflux van 110sfu en een niet-gehelde koker. De figuren die corresponderen met een lagere zonneflux zijn ongeveer hetzelfde, enkel de waarden van de temperatuur en de waarden van de zonneflux zullen variëren. De eerste twee figuren, namelijk 74 en 75, geven enerzijds de temperatuur en anderzijds de warmteflux op het tijdstip 06u00 weer, wanneer de zon net is opgekomen. In figuur 74 is de waarde van de temperatuur in de koker op dat tijdstip zichtbaar. Aangezien de zon net is opgekomen en de zonnehoogte nog beperkt is in hoogte, is in deze figuur de opwarming aan de zijkant van de koker zichtbaar. Dit effect verklaart ook de waarde van de piek in het temperatuursverloop van de knopen 60 en 66 onderaan de koker, net na het opkomen van de zon, zoals reeds eerder werd vermeld. In figuur 75 daarentegen is de warmteflux gegeven in de koker en aangezien de zon net is opgekomen is het verloop van de zon net is opgekomen is het verloop van deze warmteflux identiek aan het verloop van de temperatuur in de koker.



Figuur 74: Temperatuur in de koker om 06u00



Figuur 75: Warmteflux in de koker om 06u00

In de figuren 76 en 77 zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 13u00 weergegeven. Op dit tijdstip staat de zon in het zuiden, in de figuur is dit aan de rechterzijde van de koker, en op de hoogst mogelijke optredende zonnehoogte. In figuur 77 is duidelijk zichtbaar dat de opwarming van de koker vanaf de bovenzijde aangrijpt, aangezien de warmteflux daar zijn maximale waarden behaalt.



Figuur 76: Temperatuur in de koker om 13u00



Figuur 77: Warmteflux in de koker om 13u00

In de figuren 78 en 79 daarentegen zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 22u00 weergegeven. Op dit tijdstip is de zon reeds volledig ondergegaan en in figuur 79 is zichtbaar dat de bovenzijde van de koker reeds aan het afkoelen is terwijl de zijkant van de koker nog lichtjes aan het opwarmen is als gevolg van de traagheid van de warmtegeleiding.



Figuur 78: Temperatuur in de koker om 22u00



Figuur 79: Warmteflux in de koker om 22u00

4.1.1.2 Winterklimaat

De positie van de zon op 21 december 2007 verschilt in grote mate van deze op 21 juni. In figuur 38 is te zien dat de zonnehoogte in de winter veel lager is dan in de zomer. Deze lage zonnehoogte geeft aanleiding tot een groter bestraald oppervlak aan de zijkant van de koker. Uit de resultaten na de berekening volgt de invloed van deze lage zonnehoogte. Net

zoals in de voorgaande paragraaf wordt enerzijds de zijkant en anderzijds het midden van de koker beschouwd. In het hiernavolgende worden vooral de resultaten gegeven en uitgelegd. De keuze van de knopen werd reeds vermeld in de voorgaande paragraaf.

A. Opwarming van de zijkant van de koker

Net zoals in het zomerklimaat wordt in eerste instantie gekeken naar de zijkant van de koker, namelijk de kant vanwaar de zonnestraling komt. Er wordt gekeken naar de knopen 137, 52 en 60. Figuur 80 geeft het temperatuursverloop in knoop 137 in functie van de helling van de koker, de positie in de koker en de waarde van de zonneflux.



Figuur 80: Temperatuursverloop in knoop 137

Net zoals in het zomerklimaat is in deze figuur de directe invloed van de zonnestraling op de opwarming van het asfalt zichtbaar in het temperatuursverloop. Van zodra de zon ondergaat neemt de temperatuur niet meer toe en begint geleidelijk aan terug af te nemen. Dit is het gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestraling op de uitkraging. Er wordt hier ook opgemerkt dat de mate van temperatuursafname in deze knoop, in vergelijking met de hiernavolgende knopen aan de zijkant van de koker, veel trager is. Dit is het gevolg van de lage zonnestand, waardoor de opwarming in de koker vanaf de zijkant optreedt. Als de zon namelijk onder is, wordt de warmte in de koker naar boven toe afgegeven en wordt de mate van de afkoeling beperkt. Daarnaast is ook zichtbaar dat het verschil in waarde van de temperatuur tussen doorsnede 1 en doorsnede 2 verwaarloosbaar klein is. Dit effect is ook een gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestraling. Een ander effect dat zichtbaar is, is de gunstige werking van de koker doordat het stralingsoppervlak aan de bovenzijde van het wegdek vermindert na rotatie van de koker. Dit temperatuursverschil bedraagt meer dan 1°C.

Naast de bovenkant van de koker wordt ook gekeken naar de zijkant van de koker ter hoogte van de langsverstijvers, namelijk de knopen 52 en 60. Figuur 81 geeft het temperatuursverloop in knoop 60 en figuur 82 geeft het temperatuursverloop in knoop 52.



Figuur 81: Temperatuursverloop in knoop 60

Uit het temperatuursverloop van knoop 60, dit is ter hoogte van de onderste langsverstijver, volgt de rechtstreekse invloed van de zonnestraling op de opwarming van de zijkant van de koker. Ten gevolge van de lage zonnestand in de winter, valt de zon rechtstreeks in op deze koker. Daardoor warmt de koker op als de zon aan de hemel staat en begint de koker reeds af te koelen van zodra de zon onder is gegaan. Dit is net het tegenovergestelde effect als in het zomerklimaat. Een ander effect dat uit deze figuur volgt is de invloed van de helling

van de koker. Deze invloed is verwaarloosbaar voor de opwarming in knoop 60, omdat de rechtstreeks invallende zonnestraling op de zijkant van de koker ter hoogte van deze knoop quasi-onveranderd blijft ten gevolge van de rotatie van de koker. Maar daarnaast volgt uit dit verloop van de temperatuur wel dat de zijkant van de koker ter hoogte van doorsnede 2 warmer wordt dan deze ter hoogte van doorsnede 1. Dit is een gevolg van de aanwezigheid van het diafragma dat een gedeelte van de warmte naar zich toetrekt.



Figuur 82: Temperatuursverloop in knoop 52

Uit het temperatuursverloop van knoop 52, ter hoogte van de bovenste langsverstijver, kunnen een aantal andere aspecten worden afgeleid. Ten eerste moet er rekening worden gehouden met het effect van de beschaduwing dat kan optreden door de aanwezigheid van de uitkraging. Uit het temperatuursverloop in deze knoop kan worden afgeleid dat de temperatuursstijging net na het opkomen van de zon iets groter is dan enkele uren nadat de zon is opgekomen. Figuur 83 geeft het verloop voor de temperatuur in knoop 52 voor een flux van 110sfu en daarin kan dit effect iets duidelijker worden afgeleid. De helling van kromme 1 is iets steiler dan de helling van kromme 2. Dit wijst op een kleinere temperatuursstijging ter hoogte van kromme 2. De uitleg hiervoor is de beschaduwing. Net na het opkomen van de zon schijnt de zon, dankzij de lage zonnehoogte, rechtstreeks op deze knoop en neemt de temperatuur in deze knoop snel toe. Als de zon enkele uren later

een hogere zonnestand heeft ingenomen wordt deze knoop niet meer volledig rechtstreeks bestraald omdat de uitkraging een deel van deze straling onderbreekt. Vanaf dit moment neemt de temperatuur iets minder snel toe omdat de temperatuursstijging in dit geval niet meer via de rechtstreekse zonnestraling optreedt, maar via de geleiding van de warmte doorheen het staal. De beschaduwing heeft naast deze invloed ook nog een andere invloed, namelijk op de helling van de koker. Uit figuur 82 blijkt dat de invloed van de helling van de koker in deze knoop ongunstig is. De temperatuur na rotatie in hetzelfde punt is iets groter in waarde. Deze toename volgt uit de rotatie van de koker waardoor het rechtstreeks bestraalde oppervlak aan de zijkant van de koker iets groter wordt en de temperatuur dus ook iets groter wordt. Naast het temperatuursverschil ten gevolge van de helling, is het verschil in temperatuur tussen de doorsneden 1 en 2 ten gevolge van het diafragma ook duidelijk zichtbaar.



Figuur 83: Knoop 52 ter hoogte van het diafragma, zonder helling met een flux van 110sfu

B. Opwarming van het midden van de koker

In deze paragraaf wordt net zoals voor het zomerklimaat gekeken naar de knopen 132, 39 en 66 in het midden van de koker. Figuur 84 geeft het temperatuursverloop in knoop 132 weer.



Figuur 84: Temperatuursverloop in knoop 132

Uit deze figuur kan worden afgeleid dat het temperatuursverloop is ingedeeld in drie delen. Net na het opkomen van de zon neemt de temperatuur van het asfalt redelijk beperkt toe, aangezien de zon nog laag aan de hemel staat en niet rechtstreeks invalt op het wegdek. Iets later, als de zon hoger aan de hemel staat, neemt de temperatuur sneller toe omdat de zon dan wel rechtstreeks invalt op het wegdek. Op het einde van de dag als de zon ondergaat neemt de warmte in het asfalt nog steeds toe, maar eerder beperkt in waarde. Dit is het gevolg van de lage zonnestand, zodat, zoals reeds eerder vermeld werd, de opwarming van de koker vanaf de zijkant optreedt. Als de zon dan weg is, wordt de zo ontstane warmte in de koker afgegeven naar boven toe in de koker, waardoor het asfalt blijft opwarmen, maar dan van binnenuit. Dit temperatuursverloop is onafhankelijk van de waarde van de zonneflux. Als de waarde van de temperatuur in knoop 132 wordt vergeleken met deze in knoop 137 valt het grote verschil in waarde tussen beide op. Dit komt doordat knoop 137 zich aan de zijkant van het wegdek bevindt, langs de kant vanwaar de zon schijnt, en daardoor ondervindt deze knoop een grotere invloed van de rechtstreeks invallende zonnestraling en warmt deze knoop ook meer op. In figuur 84 is de gunstige invloed van de helling ook zichtbaar. Deze gunstige werking is het gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestraling op het wegdek dat vermindert na rotatie. Een ander zichtbaar aspect is het verschil in temperatuur tussen doorsnede 1 en 2 dat hier eerder beperkt is in waarde.

Een tweede knoop die van belang is voor het onderzoek naar de opwarming van de koker is knoop 39. Figuur 85 geeft het temperatuursverloop in knoop 39 en daaruit volgt dat de verschillen met knoop 132 verwaarloosbaar zijn. Dit is het gevolg van de geleiding van de warmte doorheen het asfalt en het staal van de bovenkant van de koker. Voor de resultaten wordt verwezen naar de resultaten horende bij knoop 132.



Figuur 85: Temperatuursverloop in knoop 39

De laatste knoop die wordt besproken is knoop 66. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in figuur 86.



Figuur 86: Temperatuursverloop in knoop 66

In de voorgaande figuur zijn ook drie aspecten van de opwarming van de koker zichtbaar. Ten eerste begint de opwarming van de koker geleidelijk aan van zodra de zon opkomt. Dit is het gevolg van de geleiding van de warmte doorheen de onderkant van de stalen koker, waarbij de stalen koker opwarmt vanaf de zijkant. Een tweede aspect is het dal in het verloop van de temperatuur net na het ondergaan van de zon. Dit dal is het gevolg van een verlies van de rechtstreekse opwarming aan de onderkant van de koker via de zonnestraling. Aangezien de zon ondergaat zal de onderzijde van de koker aan het uiteinde niet rechtstreeks onderworpen worden aan de zonnestraling en zal deze warmte niet meer kunnen geleid worden doorheen de onderzijde van de stalen koker. Het derde aspect is de sterkere toename van de temperatuur na dit dal. Deze toename is het gevolg van de traagheid van de opwarming van binnenuit als de koker reeds voldoende is opgewarmd. Naast deze aspecten inzake het temperatuursverloop is nog zichtbaar dat de invloed van de helling verwaarloosbaar is in deze knoop en dat het verschil in temperatuur tussen doorsnede 1 en 2 beperkt is.

C. Algemene opwarming van de koker

Om een idee te krijgen van de opwarming van de koker onder de lage zonnestand in de winter worden hieronder, net zoals in het zomerklimaat, een aantal figuren getoond die enerzijds de temperatuur en anderzijds de warmteflux op een bepaald tijdstip weergeven. Net zoals in de figuren horende bij het zomerklimaat corresponderen de hiernavolgende figuren met een zonneflux van 110sfu en een niet-gehelde koker.. De eerste twee figuren die beschouwd worden geven de temperatuur en de warmteflux om 10u00. Ongeveer een uur voor dit tijdstip is de zon opgekomen en in de beide figuren is de opwarming van de zijkant van de koker zichtbaar, als gevolg van de lage zonnehoogte.



Figuur 87: Temperatuur in de koker om 10u00



Figuur 88: Warmteflux in de koker om 10u00

In de figuren 89 en 90 zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 12u00 weergegeven. Op dit tijdstip staat de zon ongeveer in het zuiden, in de figuur is dit aan de rechterzijde van de koker. Dit is zichtbaar in de beide figuren aangezien de opwarming aan die zijde zichtbaar is. In figuur 90 is de waarde van de warmteflux gegeven. In deze figuur is zichtbaar dat de opwarming vooral aan de zijkant van de koker optreedt. Naast deze opwarming aan de zijkant treedt ook een gedeeltelijke opwarming op aan de uitkraging aan de zijde vanwaar de zon schijnt.



Figuur 89: Temperatuur in de koker om 12u00



Figuur 90: Warmteflux in de koker om 12u00

In de figuren 91 en 92 daarentegen zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 18u00 weergegeven. Op dit tijdstip is de zon reeds volledig ondergegaan en begint de koker stilaan af te koelen. In figuur 92 is zichtbaar dat de zijkant van de koker, die in figuur 90 de maximale warmteflux had, nu de minimale warmteflux heeft. Dit wil zeggen dat de zijkant van de koker het snelst afkoelt, wat logisch is aangezien het zich op de hoogste temperatuur bevindt. In sommige delen van de figuur is het effect van de vertraging zichtbaar. Deze delen warmen nog lichtjes op, ondanks de afwezigheid van de zon.



Figuur 91: Temperatuur in de koker om 18u00



Figuur 92: Warmteflux in de koker om 18u00

4.1.1.3 Vergelijking tussen zomer- en winterklimaat

Het grote verschil tussen het zomer- en het winterklimaat in Vilvoorde volgt duidelijk uit de resultaten van de twee voorgaande paragrafen. In de zomer is de zonnehoogte van de zon veel groter dan in de winter waardoor de opwarming van de koker in de zomer van bovenaf gebeurt naar beneden toe, terwijl dit in de winter vanaf de zijkanten van de koker optreedt. De waarden van de optredende temperaturen zijn in de zomer hoger dan in de winter als gevolg van het zachtere klimaat en van de langere periode dat de zon schijnt per dag. Als er naar de lokale verschillen tussen zomer en winter wordt gekeken, kunnen een aantal duidelijke verschillen worden afgeleid. De afkoeling in de winter in knoop 137 is kleiner dan in de zomer als gevolg van de lagere zonnestand. Aangezien de opwarming in de winter vanaf de zijkant geschiedt zal een gedeelte van de warmte via de koker naar boven toe worden geleid en daardoor koelt deze bovenzijde minder snel af. Uit de resultaten van de knopen 52 en 60, aan de zijkant van de koker, volgt dat de temperatuur in deze knopen in de zomer blijft toenemen na het ondergaan van de zon als gevolg van de warmtegeleiding doorheen het staal, terwijl dit in de winter een maximale piek vertoont en daarna begint af te nemen. Indien wordt gekeken naar het midden van de koker, met name de knopen 132 en 39 aan de bovenzijde, kan worden afgeleid dat de temperatuur van het asfalt in de zomer lichtjes begint af te nemen als de zon ondergaat, terwijl dit in de winter zelfs niet afneemt. De reden hiervoor is dezelfde als bij knoop 137. Het verschil in het temperatuursverloop in knoop 66 tussen de winter en de zomer is het dal in de winter dat niet optreedt in de zomer. Dit dal is ook te wijten aan het verschil tussen de zonnehoogte in de winter en de zomer.

Een ander resultaat dat vermeld dient te worden is de invloed van de helling van de koker. In de praktijk zal de positie van de zon variëren in de tijd en de helling van de koker kan in functie van zijn rotatie zowel gunstig als ongunstig werken. Maar de invloed van de helling van de koker is niet groot genoeg om aanleiding te geven tot grote temperatuursverschillen. Er wordt geconcludeerd dat deze helling een invloed heeft op het temperatuursverloop, maar deze invloed is beperkt. Net zoals de invloed van de aanwezigheid van het diafragma eerder beperkt is en in de praktijk geen aanleiding zal geven tot al te grote temperatuursverschillen. Aangezien er in werkelijkheid geen diafragma's zijn in de koker, maar enkel verstevigende vakwerken, wordt de invloed hiervan verwaarloosbaar geacht.

4.1.2 Mbandaka

4.1.2.1 Zomerklimaat

Mbandaka is een stad gelegen rond de evenaar. Uit de positie van de zon in de zomer (zie figuur 44) volgt dat de zon zich aan de tegenovergestelde kant van de koker bevindt in vergelijking met het zomer- en winterklimaat in Vilvoorde. Daarom wordt in deze paragraaf naar een aantal andere knopen gekeken dan in Vilvoorde. Voor het midden van de koker wordt wel nog steeds gekeken naar de knopen 132, 39 en 66. Maar voor de opwarming van de zijkant van de koker wordt gekeken naar de knopen 127 (= de top van de uitkraging), 45 (= zijkant van de koker ter hoogte van de bovenste langsverstijver) en 53 (= zijkant van de koker ter hoogte van de bovenste langsverstijver) en 53 (= zijkant van de koker ter hoogte van de onderste langsverstijver). Voor de positie van deze knopen wordt verwezen naar figuur 61. Een eerste belangrijke opmerking omtrent de resultaten uit deze paragraaf is de waarde van de optredende temperaturen. Aangezien de waarde van de zonneflux groter is rond de evenaar en dus ook zo in het rekenmodel, zullen de optredende temperaturen in de hiernavolgende resultaten hoger zijn dan in Vilvoorde. Dit wordt bij de resultaten niet vermeld, maar deze gedachte moet zeker in het achterhoofd gehouden worden.

A. Opwarming van de zijkant van de koker

Een eerste knoop die bekeken wordt voor de opwarming van de zijkant van de koker is deze aan de bovenkant van het asfalt in de uitkraging, namelijk knoop 127. Figuur 93 geeft het temperatuursverloop in deze knoop weer.



Figuur 93: Temperatuursverloop in knoop 127

Uit deze figuur volgt, net zoals in Vilvoorde, de rechtstreekse invloed van de zonnestraling op het asfalt. Van zodra de zon opkomt begint de temperatuur van het asfalt toe te nemen. Eerst geleidelijk omdat de zonnestand in het begin van de dag beperkt is in hoogte. Maar na enkele uren als de zon hoger staat neemt de temperatuur sneller toe. Doch als de zon op het einde van de dag weer lager aan de hemel staat vermindert de warmteflux weer. Van zodra de zon weg is begint de temperatuur te dalen. Een ander effect dat uit deze figuur volgt is de ongunstige werking van de helling van de koker. Aangezien de zon zich aan de linkerkant van de koker bevindt, in de algemene opstelling van het rekenmodel, zal de rotatie van de koker in dit geval aanleiding geven tot een toename van het stralingsoppervlak aan de bovenzijde van de koker voor de zon zodat de temperatuur van het asfalt na rotatie hoger is dan zonder rotatie. Daarnaast blijkt ook dat het verschil in waarde van de temperatuur in doorsnede 1 en 2 verwaarloosbaar is omdat het diafragma geen invloed heeft op de opwarming van het asfalt.

Een tweede knoop waarnaar gekeken wordt is knoop 45 ter hoogte van de bovenste langsverstijver. Figuur 94 geeft het temperatuursverloop in deze knoop.



Figuur 94: Temperatuursverloop in knoop 45

In deze figuur is de invloed van de positie van de zon ook duidelijk zichtbaar. In figuur 95 is enkel het temperatuursverloop voor een zonneflux van 165sfu gegeven en daar is dit verloop beter in detail zichtbaar. Van zodra de zon opkomt staat deze nog laag aan de hemel en warmt knoop 45 op door de rechtstreeks invallende zonnestralen. Als de zon daarna weer wat hoger aan de hemel staat en de invloed van de beschaduwing groter wordt valt de zon niet meer rechtstreeks in op deze knoop maar op het wegdek. Knoop 45 warmt dan op via warmtegeleiding doorheen de stalen koker. Dit effect is zichtbaar door de eerste kleine piek die optreedt in het temperatuursverloop. Daarnaast is het effect van de traagheid van de opwarming, als gevolg van de geleiding van de warmte doorheen de koker, zichtbaar. De warmte blijft toenemen als de zon reeds onder is, maar deze warmteflux is wel beperkt in waarde. Een ander zichtbaar effect is de ongunstige invloed van de helling. Doordat de koker roteert wordt het stralingsoppervlak aan de bovenzijde van het wegdek groter en worden meer zonnestralen opgevangen zodat de temperatuur ook groter wordt. Een ander aspect dat zichtbaar is, is dat de temperatuur in doorsnede 2 iets groter is dan in doorsnede 1 omdat het diafragma in doorsnede 1 een deel van de warmte naar zich toetrekt, terwijl deze warmte in doorsnede 2 in de koker wordt opgenomen. De warmte die het diafragma opneemt is groter dan de warmte die in de koker wordt opgenomen en daardoor is de zijde ter hoogte van doorsnede 2 op een hogere temperatuur.



Figuur 95: Knoop 45 ter hoogte van het diafragma, zonder helling met een flux van 165sfu

Een laatste knoop die belangrijk is voor de opwarming van de zijkant van de koker is knoop 53, ter hoogte van de onderste langsverstijver. Figuur 96 geeft het temperatuursverloop in deze knoop.



Figuur 96: Temperatuursverloop in knoop 53

In deze knoop is het effect van de positie van de zon nog duidelijker zichtbaar dan in knoop 45. Van zodra de zon opkomt is er een sterke temperatuurstoename ten gevolge van de lage zonnestand en de rechtstreeks invallende zonnestraling. Als de zon daarna hoger aan de hemel staat vermindert de warmteflux als gevolg van de beschaduwing door de uitkraging en de traagheid van de warmtegeleiding. Maar daarna neemt de warmte weer toe als gevolg van de bemel staat, net voor het ondergaan van de zon, neemt de warmteflux weer even sterk toe ten gevolge van de rechtstreeks invallende zonnestralen. Daarna is zichtbaar dat de warmteflux weer kleiner wordt omdat de invloed van de rechtstreekse zonnestraling wegvalt en de traagheid van de warmtegeleiding van de koker is licht ongunstig, maar de waarde van het temperatuursverschil is zodanig klein dat dit verschil verwaarloosbaar is. Het verschil tussen doorsnede 1 en 2 daarentegen is wel zichtbaar, maar ongeveer gelijk in waarde als bij knoop 45.

B. Opwarming van het midden van de koker

Voor de studie van het effect van de opwarming in het midden van de koker wordt naar dezelfde knopen gekeken als in Vilvoorde, namelijk de knopen 132, 39 en 66. Eerst wordt gekeken naar het temperatuursverloop in het midden van het asfalt in knoop 132, dit is weergegeven in figuur 97. In figuur 98 is het temperatuursverloop in knoop 39 gegeven. Dit verloop is identiek met het verloop in knoop 132 ten gevolge van de warmtegeleiding doorheen het asfalt en het staal.

In de beide figuren is de directe invloed van de zonnestraling zichtbaar. De temperatuur neemt toe van zodra de zon opkomt en de temperatuur begint terug af te nemen van zodra de zon ondergaat. Dit is het gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestralen op het asfalt. Vervolgens is zichtbaar dat de invloed van de helling van de koker hier ongunstig is omdat het stralingsoppervlak groter wordt en de temperatuur daardoor hoger oploopt. Ten slotte wordt nog afgeleid dat de temperatuur ter hoogte van het diafragma in doorsnede 1 lager is dan in doorsnede 2.



Figuur 97: Temperatuursverloop in knoop 132



Figuur 98: Temperatuursverloop in knoop 39

Figuur 99 geeft het temperatuursverloop in knoop 66, aan de onderzijde van de koker. In figuur 100 is dit verloop voor knoop 66 onder een flux van 165sfu gegeven omdat in deze

figuur de piek net na het opkomen van de zon beter zichtbaar is. Deze piek is het gevolg van de lage zonnehoogte en de rechtstreekse opwarming via warmtegeleiding doorheen de onderkant van de stalen koker. Als de zon daarna hoger aan de hemel staat gebeurt de opwarming van bovenaf naar beneden toe met de optredende traagheid. Dit effect van de traagheid is ook zichtbaar in het temperatuursverloop net na het ondergaan van de zon. De temperatuur blijft nog toenemen maar in beperkte waarde, aangezien de helling van kromme 1 steiler is dan de helling van kromme 2. In deze knoop is zowel de invloed van de helling als het verschil tussen doorsnede 1 en 2 beperkt.



Figuur 99: Temperatuursverloop in knoop 66



Figuur 100: Knoop 66 ter hoogte van het diafragma, zonder helling met een flux van 165sfu

C. Algemene opwarming van de koker

Voor het algemene beeld van de opwarming van de koker in het zomerklimaat van Mbandaka worden hieronder een aantal figuren gegeven in verband met de temperatuur en de warmteflux op een bepaald tijdstip in de koker. Deze figuren corresponderen met een zonneflux van 165sfu en een niet-gehelde koker. De figuren 101 en 102 geven de waarden van de temperatuur en de warmteflux om 07u00 net na het opkomen van de zon. Als gevolg van de lage zonnestand is de opwarming aan de zijkant van de koker zichtbaar. Dit effect verklaart ook de waarde van de piek in het temperatuursverloop van de knopen 45, 53 en 66, net na het opkomen van de zon, zoals reeds eerder werd vermeld.



Figuur 101: Temperatuur in de koker om 07u00



Figuur 102: Warmteflux in de koker om 07u00

In de figuren 103 en 104 zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 13u00 weergegeven. Op dit tijdstip staat de zon in het noorden, in de figuur is dit aan de linkerzijde van de koker, en op de hoogst mogelijke optredende zonnehoogte. Uit deze beide figuren volgt de invloed van de hoge positie van de zon en de opwarming vanaf de bovenkant, aangezien hier de maximale waarden van de warmteflux optreden.



Figuur 103: Temperatuur in de koker om 13u00



Figuur 104: Warmteflux in de koker om 13u00

In de figuren 105 en 106 daarentegen zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 19u00 weergegeven. Op dit tijdstip is de zon reeds onder gegaan en in figuur 106 is zichtbaar dat de bovenzijde van de koker reeds aan het afkoelen is terwijl de zijkant van de koker nog lichtjes aan het opwarmen is als gevolg van de traagheid van de warmtegeleiding.



Figuur 105: Temperatuur in de koker om 19u00



Figuur 106: Warmteflux in de koker om 19u00

4.1.2.2 Winterklimaat

Voor de positie van de zon op 21 december 2007 in Mbandaka wordt verwezen naar figuur 48. Uit deze figuur volgt dat de positie van de zon in de winter tegenovergesteld is aan de positie van de zon in de zomer. Voor het nazicht van de opwarming van de koker wordt naar dezelfde knopen gekeken als voor Vilvoorde het geval was.

A. Opwarming van de zijkant van de koker

Voor de opwarming van de zijkant van de koker wordt in figuur 107 gekeken naar het temperatuursverloop in knoop 137 aan de bovenkant van de uitkraging.



Figuur 107: Temperatuursverloop in knoop 137

Het temperatuursverloop in deze knoop is ongeveer gelijk aan het verloop hiervan in het zomerklimaat in knoop 127. De directe invloed van de zonnestralen is zichtbaar. De verschillen tussen zomer en winter in Mbandaka zijn beperkt, omdat de positie van de zon tussen beide niet veel verschilt. Enkel de kant van de koker vanwaar de zon schijnt is verschillend. Een belangrijk verschil met het zomerklimaat dat uit het temperatuursverloop wordt afgeleid is de gunstige invloed van de helling van de koker in het winterklimaat. Aangezien de koker in het winterklimaat net een tegenovergestelde rotatie ondergaat, ten opzichte van de zon en zal de waarde van de optredende temperatuur lager zijn.

Het temperatuursverloop in de knopen 52 en 60 aan de zijkant van de koker is weergegeven in de onderstaande figuren. Uit deze beide figuren kan hetzelfde resultaat worden afgeleid. Een eerste piek in het temperatuursverloop treedt op net na het opkomen van de zon. Dit is het gevolg van de lage zonnestand net na het opkomen en de hogere zonnestand iets later, waardoor de opwarming geschiedt via warmtegeleiding. De traagheid van de warmtegeleiding leidt tot de verminderde toename net na de piek. Deze piek is meer uitgesproken in de onderste knoop, namelijk knoop 60, omdat deze knoop minder invloed ondergaat van de beschaduwing door de uitkraging. Een tweede piek treedt op net voor het ondergaan van de zon. Deze piek is wederom het gevolg van het verschil tussen opwarming via geleiding doorheen het staal en de lage zonnestand net voor het ondergaan van de zon. Deze piek is wegens dezelfde reden als de eerste piek, iets meer uitgesproken in de onderste knoop.



Figuur 108: Temperatuursverloop in knoop 52



Figuur 109: Temperatuursverloop in knoop 60

B. Opwarming van het midden van de koker

De resultaten van het temperatuursverloop in het midden van de koker in het winterklimaat zijn ongeveer gelijk aan de resultaten van het zomerklimaat. In de knopen 132 en 39 is de directe invloed van de zonnestraling zichtbaar. Het enige verschil tussen zomer- en winterklimaat is, zoals reeds eerder werd vermeld, de gunstige invloed van de helling van de koker in het winterklimaat. Het temperatuursverloop in knoop 66 is ook ongeveer gelijk aan dit verloop in de zomer en daarom worden in het onderstaande enkel de figuren gegeven van de resultaten zonder hierop meer in detail in te gaan.



Figuur 110: Temperatuursverloop in knoop 132



Figuur 111: Temperatuursverloop in knoop 39



Figuur 112: Temperatuursverloop in knoop 66
C. Algemene opwarming van de koker

De algemene opwarming van de koker in de winter is ongeveer gelijk aan deze in de zomer. Het enige verschil tussen beide is de positie van de zon ten opzichte van de koker. Voor de volledigheid worden hieronder enkel de figuren met de waarden van de temperatuur en de warmteflux in de koker om 07u00, 12u00 en 18u00 gegeven. Voor de uitleg hiervan wordt verwezen naar de resultaten van het zomerklimaat in Mbandaka.



Figuur 113: Temperatuur in de koker om 07u00



Figuur 114: Warmteflux in de koker om 07u00



Figuur 115: Temperatuur in de koker om 12u00



Figuur 116: Warmteflux in de koker om 12u00



Figuur 117: Temperatuur in de koker om 18u00



Figuur 118: Warmteflux in de koker om 18u00

4.1.2.3 Vergelijking tussen zomer- en winterklimaat

Het verschil in de positie van de zon in Mbandaka tussen zomer en winter is beperkt inzake de zonnehoogte. Dit zorgt ervoor dat de opwarming van de koker zowel in de zomer als in de winter gebeurt via warmtegeleiding doorheen het staal vanaf de bovenkant van de koker naar beneden toe. Het enige verschil tussen beide is de richting vanwaar de zon komt. In de zomer straalt de zon van de tegenovergestelde kant als in de winter. Dit zorgt voor een verschil in effect van de helling van de koker. Namelijk een ongunstig effect in de zomer tegenover een gunstig effect in de winter.

4.1.3 Hammerfest

Uit de gegevens betreffende de positie van de zon op 21 juni 2007 te Hammerfest, zie figuur 54, blijkt dat de zon in de zomer gedurende 24 uur per dag schijnt met een beperkte waarde voor de zonnehoogte. Voor de opwarming van de koker wordt gekeken naar dezelfde knopen als in de voorgaande paragrafen. Aangezien de zon 24 uur per dag schijnt en dus zowel aan de noord- als aan de zuidkant optreedt, wordt gekeken naar de beide zijkanten van de koker.

A. Opwarming van de zijkant van de koker

De eerste kant waarnaar gekeken wordt is de noordkant, dit is de kant waar de zon rond middernacht staat. Een eerste knoop die aan deze kant wordt bekeken is knoop 127, aan de bovenzijde van het wegdek aan de uitkraging. Figuur 119 geeft het temperatuursverloop in deze knoop.



Figuur 119: Temperatuursverloop in knoop 127

Uit het temperatuursverloop in knoop 127 kan worden afgeleid dat de temperatuur in deze knoop gedurende de hele dag blijft toenemen. Eerst is deze toename beperkt, dit is het gevolg van de lage zonnestand. De zon is aanwezig, maar staat heel laag aan de horizon. Naar de middag toe wordt de opwarming iets groter, aangezien de zon hoger staat aan de hemel. De invallende zonnestraling op het bovenvlak is dan groter. Maar naarmate het later wordt op de dag, begint de zon weer te dalen en neemt de warmteflux af in waarde. Ondanks de beperkte waarde van de zonneflux kan de temperatuur in deze knoop toch toenemen tot 40°C. Deze toename is vooral te danken aan de duur van de zonnestraling. Hieruit kan dus worden afgeleid dat de duur van de zonnestraling, naast de waarde van de zonneflux, ook belangrijk is bij de opwarming van de koker. Naast dit verloop geldt nog dat het verschil tussen doorsnede 1 en 2 verwaarloosbaar is en dat de invloed van de helling

zowel gunstig als ongunstig kan zijn. Net na middernacht staat de zon in het noorden met een beperkte zonnehoogte. De rotatie zorgt dan voor een toename van het stralingsoppervlak aan de bovenkant van de koker voor de zonnestralen waardoor de temperatuur een hogere waarde krijgt. Rond de middag daarentegen staat de zon in het zuiden en zorgt de rotatie voor een vermindering van de stralingsoppervlakte voor de zon zodat de temperatuur een lagere waarde bereikt met helling dan zonder helling.

Twee andere knopen die van belang zijn voor de opwarming aan de noordkant van de koker zijn deze ter hoogte van de langsverstijvers, namelijk de knopen 45 en 53. De onderstaande figuren geven het temperatuursverloop in deze knopen weer.



Figuur 120: Temperatuursverloop in knoop 45

Uit het temperatuursverloop van knoop 45 volgt duidelijk de invloed van de lage zonnehoogte. Rond middernacht, als de zon in het noorden staat, neemt de temperatuur in deze knoop sterk toe als gevolg van de lage zonnestand. De zon straalt rechtstreeks in op deze knoop. Naarmate de zon hoger aan de hemel komt te staan, vermindert de waarde van de warmteflux. Dit is enerzijds het gevolg van de overgang van de opwarming via rechtstreeks invallende zonnestralen naar de opwarming via warmtegeleiding. Aangezien de zon hoger staat aan de hemel zorgt de uitkraging voor een beschaduwing van deze knoop. De bovenzijde warmt op en geeft deze warmte via geleiding af naar onderen toe. Dit treedt op met een bepaalde traagheid, vandaar het dal na de piek. Anderzijds is deze vermindering van de warmteflux het gevolg van de verplaatsing van de zon naar het oosten, zodat de zon niet meer rechtstreeks straalt op de zijkant aan het noorden. Als de zon 's avonds weer in het noorden staat neemt de warmteflux weer toe als gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestraling door de lage zonnestand. In deze knoop is er wel een beperkt verschil in temperatuur tussen doorsnede 1 en 2 waarneembaar. Doorsnede 2 bevindt zich op een hogere temperatuur dan doorsnede 1. Dit is weer te wijten aan de aanwezigheid van het diafragma dat een groter deel van de warmte naar zich toetrekt. Er geldt ook dat de invloed van de helling gedurende de hele dag gunstig is. De rotatie van de koker zorgt voor een vermindering van de stralingsoppervlakte aan de zijkant van de koker als de zon zich in het noorden bevindt. Als de zon zich in het oosten bevindt is deze invloed verwaarloosbaar omdat de zonnestralen dan invallen op een vlak loodrecht op het rotatievlak. Maar naarmate de zon naar het zuiden opschuift neemt de gunstige invloed weer toe. Dit is net zoals bij knoop 127 het gevolg van een vermindering van de stralingsoppervlakte voor de zon aan de bovenzijde van de koker.



Figuur 121: Temperatuursverloop in knoop 53

Het temperatuursverloop van knoop 53 is ongeveer hetzelfde als het verloop van knoop 45. Het enige verschil tussen beide is de piek net na middernacht die in knoop 53 meer uitgesproken is omdat deze ten gevolge van zijn lagere ligging meer invloed ondervindt van de rechtstreeks invallende zonnestralen.

Naast het temperatuursverloop aan de noordkant van de koker dient ook gekeken te worden naar het verloop van de temperatuur aan de zuidkant. De eerste knoop die wordt bekeken en waarvan het verloop van de temperatuur is weergegeven in figuur 122, is knoop 137.



Figuur 122: Temperatuursverloop in knoop 137

Dit verloop is gelijkaardig met het temperatuursverloop in knoop 127. Enkel de waarden van de warmteflux zijn anders. De warmteflux net na middernacht is in deze knoop kleiner omdat de zon zich aan de andere kant van de koker bevindt. De warmteflux rond de middag, als de zon in het zuiden staat, is groter omdat de zon zich net aan deze zijde van de koker bevindt. Naarmate het middernacht wordt neemt de warmteflux zelfs af. Dit is wederom een gevolg van de positie van de zon in het noorden. Door de lage zonnestand is de invallende zonnestraling in knoop 137 beperkt. Het verschil tussen doorsnede 1 en 2 is verwaarloosbaar en de invloed van de helling is identiek als bij knoop 127. Ongunstig voor de middag en gunstig na de middag.

Daarnaast wordt nog gekeken naar de knopen 52 en 60 aan de zijkant van de koker. De onderstaande figuren geven het temperatuursverloop weer in deze beide knopen.



Figuur 123: Temperatuursverloop in knoop 52

Uit de voorgaande figuur volgt duidelijk de positie van de zon. Als de zon in het noorden staat neemt de temperatuur in deze knoop beperkt toe. Deze toename is zelfs beperkt tot enkele graden Celsius. Maar naarmate de zon opschuift naar het zuiden neemt de warmteflux toe. Eerst beperkt als gevolg van de traagheid van de opwarming door de hoge zonnestand. Dit wordt aangeduid door de helling van kromme 1. Als de zon daarna wat lager staat aan de hemel neemt de warmteflux toe, dit is zichtbaar in de helling van kromme 2. Dit is het gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestraling in combinatie met de traagheid van de opwarming. Als de zon later op de dag opschuift naar het westen vermindert deze zonneflux weer. Dit is te zien in de helling van kromme 3. Naast dit verloop kunnen nog twee aspecten worden afgeleid. Doorsnede 2 bevindt zich op een iets hogere temperatuur dan doorsnede 1 en de invloed van de helling is verwaarloosbaar. De invloed van de helling is licht negatief als de zon in het zuidwesten en wat lager aan de hemel staat, omdat het oppervlak waar de zonnestralen invallen dan groter wordt. Maar voor de rest van de dag heeft de helling van de koker bijna geen invloed op de opwarming.



Figuur 124: Temperatuursverloop in knoop 60

Het temperatuursverloop in knoop 60 is gelijkaardig met het verloop in knoop 52. Een opmerkelijk verschil tussen beide is de optredende piek in het temperatuursverloop net na de middag. Deze piek treedt op als de zon in het zuidwesten staat en is het gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestralen. Als de zon opschuift naar het westen neemt deze rechtstreekse zonnestraling af en zodoende ook de warmteflux. Daarnaast is nog zichtbaar dat de invloed van de helling in deze knoop meer uitgesproken is. Ten gevolge van de rotatie van de koker wordt het stralingsoppervlak voor de rechtstreeks invallende zonnestralen groter en neemt dus ook de temperatuur in deze knoop toe. Doordat deze knoop lager ligt dan knoop 52 is de invallende zonnestraling groter, de beschaduwing is kleiner, en is dit verschil in temperatuur ook groter. Er is ook nog een klein verschil tussen doorsnede 1 en 2 als gevolg van het diafragma in doorsnede 1.

B. Opwarming van het midden van de koker

Voor het nazicht van de opwarming in het midden van de koker wordt gekeken naar het temperatuursverloop in de knopen 132, 39 en 66. Figuur 125 geeft het temperatuursverloop in knoop 132 en figuur 126 geeft dit verloop in knoop 39. Het verschil tussen beide is verwaarloosbaar als gevolg van de warmtegeleiding doorheen het staal en het asfalt.



Figuur 125: Temperatuursverloop in knoop 132



Figuur 126: Temperatuursverloop in knoop 39

In het temperatuursverloop van beide figuren is de invloed van de zonnehoogte wederom zichtbaar. Bij een lage zonnehoogte is de waarde van de warmteflux klein, als de zon daarna hoger aan de hemel staat is de warmteflux groter. Dit is het gevolg van de rechtstreeks invallende zonnestraling op de bovenzijde. Tegen middernacht, bij een lage zonnestand, is de warmteflux weer beperkt en neemt zelfs af tot nul. De zonnestraling heeft overigens een directe invloed in deze knoop. Net zoals in knoop 127 is de invloed van de helling ongunstig tussen middernacht en de middag. Tussen de middag en middernacht daarentegen is deze invloed gunstig. Het verschil tussen doorsnede 1 en 2 is verwaarloosbaar.

Een laatste knoop die van belang is bevindt zich aan de onderzijde van de koker. Figuur 127 geeft het temperatuursverloop in knoop 66.



Figuur 127: Temperatuursverloop in knoop 66

Uit dit temperatuursverloop volgt in de eerste plaats de invloed van de lage zonnestand net na middernacht. De zijkant van de koker warmt op en deze warmte wordt via het staal van de onderkant van de koker geleid. Dit is zichtbaar in de eerste kleine piek in de figuur. Als de zon daarna hoger aan de hemel staat verdwijnt deze invloed en begint de opwarming via geleiding vanaf de bovenkant met de optredende traagheid. Deze traagheid volgt uit het dal net na de piek. Als gevolg van deze traagheid blijft de temperatuur in knoop 66 toenemen. Daarnaast blijkt dat de invloed van de helling verwaarloosbaar is in deze knoop en de invloed van het diafragma is zichtbaar maar ook beperkt in waarde.

C. Algemene opwarming van de koker

In de onderstaande figuren is een algemeen beeld van de optredende temperatuur en warmteflux in de gehele koker weergegeven. Om het verschil hiervan in functie van de tijd aan te tonen zijn deze figuren gemaakt voor de tijdsstippen 01u00, 07u00, 13u00, 18u00 en 23u00. In de eerste twee figuren is het verloop weergegeven om 01u00, dus net na middernacht. Dit correspondeert eigenlijk met het opkomen van de zon omdat de berekening begint bij 00u00. Dit is niet echt realistisch, maar uit figuur 129 kan de warmteflux worden afgeleid en daaruit volgt enerzijds de invloed van de positie van de zon (in het noorden) en anderzijds de invloed van de lage zonnestand.



Figuur 128: Temperatuur in de koker om 01u00



Figuur 129: Warmteflux in de koker om 01u00

In de twee volgende figuren zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 07u00 gegeven. Daaruit volgt dat de grootste warmteflux op dit tijdstip optreedt aan de bovenzijde van de koker aan de oostkant. Daarnaast is ook zichtbaar dat de temperatuur aan de noordkant van de koker geleidelijk terug afneemt. Dit correspondeert met de piek in het temperatuursverloop na middernacht voor de knopen 53 en 45.



Figuur 130: Temperatuur in de koker om 07u00



Figuur 131: Warmteflux in de koker om 07u00

De figuren 132 en 133 geven het verloop van de temperatuur en de warmteflux weer in de koker om 13u00. De zon bevindt zich in het zuiden en de zonnehoogte is zodanig groot dat de opwarming van de koker gebeurt via geleiding van de warmte vanaf de bovenkant naar beneden toe.



Figuur 132: Temperatuur in de koker om 13u00



Figuur 133: Warmteflux in de koker om 13u00

In de volgende figuren zijn de temperatuur en de warmteflux in de koker om 18u00 gegeven. De zon begint te dalen en de maximale opwarming is niet meer aan de bovenzijde van de koker, maar aan de zijkant aan de westkant.



Figuur 134: Temperatuur in de koker om 18u00



Figuur 135: Warmteflux in de koker om 18u00

De volgende figuren zijn gemaakt om 23u00. De zon bevindt zich terug in het noorden op een beperkte zonnehoogte. De figuur van de warmteflux is gelijkaardig met deze om 01u00.



Figuur 136: Temperatuur in de koker om 23u00



Figuur 137: Warmteflux in de koker om 23u00

4.1.4 Vergelijking van de positie van de kokerbrug

Uit de vergelijking tussen de resultaten van Vilvoorde, Mbandaka en Hammerfest kan worden afgeleid dat de positie van de koker wel degelijk een rol speelt bij de opwarming van de koker. Enerzijds volgt uit de berekeningen in Mbandaka dat een grotere waarde van de zonneflux aanleiding geeft tot een grotere opwarming in de koker. Dit is logisch aangezien een sterkere straling van de zon zorgt voor een grotere waarde van de optredende temperatuur. Dus naarmate de brug dichter bij de evenaar staat zal de opwarming ook groter zijn. Anderzijds volgt uit de rekenresultaten in Hammerfest dat de duur van de zonnestraling ook een invloed heeft op de opwarming. Hoe langer de zon schijnt per dag, hoe groter de opwarming. Maar als deze beide resultaten met elkaar vergeleken worden blijkt dat de waarde van de zonneflux een grotere invloed heeft op de opwarming van de koker dan de duur van de straling.

Een ander verschil dat volgt uit de rekenresultaten is de positie van de zon. Dicht bij de evenaar straalt de zon bijna het hele jaar door vanaf een hoge zonnehoogte, enkel bij het opkomen en ondergaan van de zon niet. In het noorden straalt de zon bijna het hele jaar door met een beperkte zonnehoogte. In Vilvoorde daarentegen straalt de zon in de zomer vanaf een grote hoogte en in de winter vanaf een lage hoogte. Dit geeft aanleiding tot een verschil in opwarming. Bij een hoge zonnestand gebeurt de opwarming van de koker via een geleiding van de warmte vanaf de bovenkant van het wegdek naar beneden toe. De zijkant van de koker zal dan met enige traagheid opwarmen. Terwijl bij een lage zonnestand de opwarming van de koker optreedt via de rechtstreeks invallende zonnestralen op de zijkant van de koker.

Uit de resultaten volgt ook dat de helling van de koker zowel gunstig als ongunstig kan zijn. In functie van de richting van de rotatie werkt de helling van de koker gunstig bij een vermindering van de stralingsoppervlakte en ongunstig indien de oppervlakte waarop de zonnestralen invallen groter wordt. Daarnaast is de rol van de uitkraging niet te verwaarlozen, omdat deze de rechtstreeks invallende zonnestralen afschermt en daardoor ook de opwarming in de koker tegenwerkt. Deze uitkraging heeft dus een gunstig effect op de opwarming.

Dus algemeen kan worden bepaald dat de waarde van de temperatuur in de koker alarmerende waarden kan bereiken en dat er in de toekomst nood is aan een oplossing hiervoor. Een mogelijke oplossing is het voorzien van ventilatie in de koker, zodat de convectie in de koker wordt verhoogd en de luchtstroom de warmte in de koker zal wegvoeren naar de buitenomgeving.

4.2 Bijzondere rekenresultaten

In deze paragraaf worden drie aspecten, waarvan twee geometrische en één meteorologische, onderzocht die een invloed kunnen hebben op de opwarming van de koker. Een eerste geometrisch aspect is de invloed van de dikte van het asfalt van het wegdek. Een tweede geometrisch aspect is de invloed van de dikte van het staal. Het meteorologisch aspect dat wordt onderzocht is de invloed van de opwarming na enkele zonnige dagen die achtereenvolgens optreden. Om de rekenresultaten niet te overladen worden enkel de resultaten horende bij een zonneflux van 110sfu in het zomerklimaat te Vilvoorde gegeven en uitgelegd. Voor de andere waarden van de zonneflux geldt hetzelfde principe, enkel de waarden van de optredende temperaturen zullen verschillen.

4.2.1 Invloed van de dikte van het asfalt

Om de invloed van de dikte van het asfalt te onderzoeken wordt deze dikte enerzijds vergroot en anderzijds verkleind. Deze wijzigingen geven een goed inzicht in het effect van een eventuele wijziging van de dikte van het asfalt op de opwarming van de koker. De werkelijke dikte van het asfalt is 5cm. De berekeningen worden aangepast voor een dikte van het asfalt gelijk aan 2,5cm, 10cm en 20cm. In de hiernavolgende figuren wordt het temperatuursverloop in dezelfde knopen bekeken als bij het zomerklimaat van Vilvoorde. De eerste knoop die wordt bekeken is deze aan de bovenzijde van het wegdek aan de uitkraging. Uit het temperatuursverloop voor deze knoop, zie figuur 138, blijkt dat de dikte van het asfalt een redelijk grote invloed heeft op de waarden van de optredende temperaturen. Bij een halvering van de dikte van het asfalt stijgt de maximaal optredende temperatuur met 2 à 3°C. Terwijl bij een verdubbeling van het asfalt deze temperatuur met ongeveer 5°C afneemt. Bij een dikte van het asfalt gelijk aan 20cm blijkt zelfs dat de temperatuur bijna 12°C lager wordt in deze knoop. Een grotere dikte van het asfalt werkt goed weerstandbiedend tegen de geleiding van warmte. Maar deze dikte mag in werkelijkheid niet te groot genomen worden want een overtollige dikte geeft aanleiding tot een hoge kostprijs als gevolg van de materiaalverspilling. Voor de vijf andere knopen worden enkel de resultaten gegeven van het temperatuursverloop aangezien de invloed van de dikte van het asfalt analoog is in al de knopen. Enkel de waarden van de optredende temperaturen verschillen.



Figuur 138: Invloed van de dikte van het asfalt op temperatuursverloop in knoop 137



Figuur 139: Invloed van de dikte van het asfalt op temperatuursverloop in knoop 52



Figuur 140: Invloed van de dikte van het asfalt op temperatuursverloop in knoop 60



Figuur 141: Invloed van de dikte van het asfalt op temperatuursverloop in knoop 132



Figuur 142: Invloed van de dikte van het asfalt op temperatuursverloop in knoop 39



Figuur 143: Invloed van de dikte van het asfalt op temperatuursverloop in knoop 66

4.2.2 Invloed van de dikte van het staal

Om de invloed van de dikte van het staal te onderzoeken worden ongeveer dezelfde berekeningen uitgevoerd als in de voorgaande paragraaf, namelijk voor het zomerklimaat in Vilvoorde. Aangezien uit de rekenresultaten van paragraaf 4.1 kan worden afgeleid dat de opwarming van de koker in het zomerklimaat van Vilvoorde gebeurt via warmtegeleiding vanaf de bovenkant van de koker naar beneden toe, wordt enkel de invloed van de staaldikte aan de bovenzijde gecontroleerd. Deze dikte wordt enerzijds gehalveerd en anderzijds verdubbeld. Deze extreme aanpassingen geven wederom duidelijk de invloed van deze dikte weer. Het temperatuursverloop in knoop 137 is weergegeven in figuur 144. Uit deze figuur volgt duidelijk de invloed van de dikte van het staal. In het rekenmodel is de dikte van het staal 18cm. Als deze dikte wordt gehalveerd naar 9cm volgt dat de temperatuur in deze knoop oploopt tot een maximaal temperatuursverschil van ongeveer 12°C. Als de dikte daarentegen wordt verdubbeld vermindert de temperatuur met een maximale waarde van ongeveer 12°C. Uit deze figuur volgt eenzelfde conclusie als bij de verandering van de dikte van het asfalt. Bij een wijziging van de dikte van het staal van de koker kunnen serieuze wijzigingen optreden in het temperatuursverloop. Deze verschillen in temperatuur zijn echter groter dan bij de diktewijzigingen van het asfalt. Dit is het gevolg van de waarde van de warmtegeleidingcoëfficiënt die voor staal groter is dan voor asfalt. Daardoor geleidt de warmte gemakkelijker in staal en zal de invloed van de dikteverandering groter zijn voor staal dan voor asfalt. Een goede keuze van de dikte van de stalen koker zal meebeslissend zijn bij de effecten van opwarming in de koker. In wat volgt worden voor de volledigheid de resultaten gegeven voor de vijf andere knopen, maar de resultaten zijn identiek als bij knoop 137.



Figuur 144: Invloed van de dikte van het staal op temperatuursverloop in knoop 137



Figuur 145: Invloed van de dikte van het staal op temperatuursverloop in knoop 52



Figuur 146: Invloed van de dikte van het staal op temperatuursverloop in knoop 60



Figuur 147: Invloed van de dikte van het staal op temperatuursverloop in knoop 132



Figuur 148: Invloed van de dikte van het staal op temperatuursverloop in knoop 39



Figuur 149: Invloed van de dikte van het staal op temperatuursverloop in knoop 66

4.2.3 Invloed van de rekenduur

4.2.3.1 Meetresultaten in het viaduct van Vilvoorde

Momenteel zijn er in het viaduct van Vilvoorde vier meettoestellen DS1621 van het bedrijf Maxim Integrated Products geplaatst. De waarden van de temperatuur die met deze toestellen kunnen worden gemeten variëren van -55°C tot 125°C. Voor meer informatie betreffende dit specifiek meettoestel wordt verwezen naar [17]. Drie van deze toestellen zijn geplaatst aan de zuidkant van de meest naar het zuiden gelegen koker, zowel aan de bovenzijde, in het midden als aan de onderzijde. Het vierde meettoestel is in het midden aan de noordkant van dezelfde koker geplaatst. Om een realistisch beeld te krijgen van het temperatuursverloop in de koker is het nodig dat de temperatuur gedurende een periode langer dan twaalf maanden wordt geregistreerd. Dit om de effecten van dag-nacht en van de verschillende seizoenen in rekening te kunnen brengen. Aangezien de meetoestellen pas midden april 2008 werden aangebracht is dit niet het geval en wordt enkel gekeken naar een beperkte meting van de temperaturen. In figuur 150 zijn de resultaten gegeven voor de opwarming in de koker van begin mei 2008 voor één van de vier meettoestellen. De resultaten van de drie andere meettoestellen zijn ongeveer gelijk en worden niet volledig gegeven. Deze dagen waren, voor de tijd van het jaar, erg zonnig. De hoeveelheid zon dat werd gemeten in deze periode lag veel hoger dan normaal. Uit de resultaten van de opwarming volgt duidelijk dat de temperatuur op sommige dagen gedurende de nacht onvoldoende afkoelt en dit geeft aanleiding tot een stijging van de gemiddelde dagtemperatuur in de koker. Het verloop van de temperatuur vanaf het uur 200 uit figuur 150 wordt meer in detail bekeken in figuur 151. In deze detailfiguur is het temperatuursverloop voor alle vier de meettoestellen weergegeven. De optredende temperaturen van de meettoestellen M1, M2 en M3 zijn ongeveer gelijk in waarde. Enkel de waarden van de temperatuur in meettoestel M4 zijn iets hoger dan de rest. Dit meettoestel bevindt zich aan de onderzijde van de koker en de rechtstreeks invallende zonnestraling is hier het grootst. Dit verklaart de hogere waarden van de temperatuur.



Figuur 150: Temperatuursverloop in het meettoestel M1



Figuur 151: Detail van het temperatuursverloop voor de vier meettoestellen

4.2.3.2 Meetresultaten uit het model

Uit de metingen van het viaduct van Vilvoorde uit de voorgaande paragraaf blijkt dus dat sommige delen van de koker geleidelijk aan warmer worden na enkele zonnige dagen. De temperatuur van de koker neemt toe als gevolg van de invallende zonnestralen. Deze temperatuurstoename kan een probleem veroorzaken indien enkele zonnige dagen achter elkaar optreden. Dit probleem doet zich voor als de afkoeling gedurende de hele nacht, dus net voor het opkomen van de zon, kleiner is dan de opwarming gedurende de dag. Daarom is het belangrijk de invloed hiervan te onderzoeken. Deze invloed wordt gecontroleerd door in het model langer te rekenen dan 24 uur. De positie van de zon wordt gedefinieerd voor vijf opeenvolgende dagen en is weergegeven in figuur 152.



Figuur 152: Positie van de zon gedurende vijf dagen

De berekening van het model over deze vijf dagen wordt gedaan voor het zomerklimaat in Vilvoorde voor een niet-gehelde koker met een zonneflux van 110sfu. Om het resultaat voldoende realistisch te maken wordt de waarde van de zonneflux aangepast. De zonneflux vermindert in de loop van de tijd. Het temperatuursverloop in de koker is aangeduid in de vier onderstaande figuren. In figuur 153 is het temperatuursverloop in de zijkant van de koker weergegeven. Hierin is de invloed van enkele opeenvolgende zonnige dagen duidelijk zichtbaar. De waarde van de opwarming is in het model wel groter dan in werkelijkheid, maar daarover wordt verderop meer uitleg gegeven. In figuur 154 is een detail van het temperatuursverloop uit figuur 153 gegeven. In deze figuur is zichtbaar dat de gemiddelde dagtemperatuur geleidelijk aan toeneemt, maar dat de temperatuur in de koker niet eindeloos blijft stijgen. Dit correspondeert met de realiteit.



Figuur 153: Temperatuursverloop in de zijkant van de koker



Figuur 154: Temperatuursverloop in de zijkant van de koker - detail

In de onderstaande figuren is het temperatuursverloop in het midden van de koker gegeven. Hierin is hetzelfde beeld zichtbaar als aan de zijkant van de koker. De gemiddelde dagtemperatuur in de koker neemt geleidelijk aan toe, aangezien de nachtelijke afkoeling onvoldoende is om de opwarming door de dag te compenseren. Dit kan na een erg zonnige periode aanleiding geven tot grote problemen voor het viaduct.



Figuur 155: Temperatuursverloop in het midden van de koker



Figuur 156: Temperatuursverloop in het midden van de koker - detail

4.2.3.3 Vergelijking tussen het model en de werkelijkheid

Uit de voorgaande paragraaf kan worden afgeleid dat het temperatuursverloop in de koker van het rekenmodel redelijk goed overeenstemt met de werkelijk gemeten temperaturen. Er zijn enkele afwijkingen tussen beiden, maar deze zijn het gevolg van enkele aannames in het rekenmodel. Een eerste parameter die een invloed heeft op de opwarming van de koker is, zoals eerder werd vermeld, de waarde van de zonneflux. In werkelijkheid is de zonneflux geen constante, maar deze varieert in de tijd als gevolg van de bewolking en de seizoenen en dergelijke. Dit werd geprobeerd te benaderen in het model door de zonneflux te laten afnemen in de tijd, maar heel realistisch is deze aanname ook niet. Een andere parameter die een invloed heeft op de opwarming in de koker is de straling van de zon. In werkelijkheid zijn er twee kokers naast elkaar zodat de zon niet de hele tijd rechtstreeks invalt op dezelfde koker maar ook op de andere koker kan invallen en daardoor is de opwarming in werkelijkheid anders dan in het rekenmodel. Een derde verschil is de positie van de zon. In het model werd de zon gemodelleerd voor 21 juni 2007, terwijl dit in de metingen werd waargenomen voor de zon in begin mei 2008. De zonnehoogte zal dus lager zijn en de duur van de dag is korter.

Hoofdstuk 5:

Conclusie

In deze scriptie werd geprobeerd de grootte van de temperatuursgradiënt in de kokerligger van het viaduct van Vilvoorde in te schatten op basis van een thermische eindige elementenanalyse en de invloed van enkele geografische, meteorologische en geometrische parameters te onderzoeken.

Uit de rekenresultaten van het rekenmodel kunnen enkele conclusies worden afgeleid. Eerst en vooral werd aangetoond dat het zomerklimaat in Vilvoorde aanleiding geeft tot een grotere opwarming in de koker dan het winterklimaat als gevolg van het zachtere klimaat en de langere duur van de zonnestraling per etmaal. Daarnaast volgt uit de resultaten dat de opwarming in de zomer door de grote zonnehoogte optrad vanaf de bovenkant, als gevolg van de opwarming van het asfalt onder de rechtstreeks invallende zonnestraling. Deze warmte wordt dan vervolgens naar de rest van de constructie overgedragen via de warmtegeleiding. Terwijl de lage zonnehoogte in de winter aanleiding geeft tot een opwarming van de zijkant van de koker en zo wordt de warmte van daar naar de rest van de structuur geleid. Deze warmtegeleiding zorgt ervoor dat bepaalde delen van de constructie met een zekere traagheid opwarmen. Uit de vergelijking van het klimaat in Vilvoorde met het klimaat uit Mbandaka blijkt dat de waarde van de zonneflux veel groter is in Mbandaka en dat hierdoor de waarde van de opwarming in de koker ook groter is dan in Vilvoorde. Uit de vergelijking van het klimaat in Vilvoorde met het klimaat uit Hammerfest daarentegen blijkt dat de duur van de zonnestraling veel hoger is in Hammerfest en dat dit ook aanleiding geeft tot een opwarming van de koker. Maar uit de vergelijking tussen de resultaten van Mbandaka en Hammerfest blijkt dat de invloed van een grotere zonneflux meer bepalend is voor de opwarming in de koker dan een grotere duur van de zonnestraling per etmaal. Een belangrijke geometrische parameter die werd onderzocht is de helling van de koker. Uit de resultaten blijkt dat deze helling zowel gunstig als ongunstig kan zijn in functie van de rotatiezin, maar de waarde van het temperatuursverschil is redelijk beperkt zodat deze invloed verwaarloosbaar wordt geacht. In een laatste paragraaf werden dan ook nog de invloed van de dikte van het staal aan de bovenzijde van de koker en de dikte van

het asfalt van het wegdek onderzocht en daaruit blijkt dat een grotere dikte zorgt voor een grotere weerstand van de warmtegeleiding. Uit de resultaten blijkt wel dat de invloed van de dikte van het staal belangrijker is omdat de warmtegeleidingcoëfficiënt van staal groter is dan deze van asfalt. Daardoor geleidt de warmte gemakkelijker in staal en zal de invloed van de dikteverandering groter zijn voor staal dan voor asfalt. Een laatste punt dat werd onderzocht is de invloed van enkele opeenvolgende zonnige dagen. Dit kan leiden tot een toename van de gemiddelde dagtemperatuur zodat enkele zonnige dagen achter elkaar voor problemen kunnen zorgen voor de constructie.

De opwarming van de koker kan effectief alarmerende waarden bereiken zodat een degelijk ontwerp van de constructie hier een belangrijke rol in speelt. Een mogelijke oplossing voor de te grote temperatuur in de huidige koker van het viaduct is de voorziening van een voldoende grote ventilatie die de warme lucht in de koker naar buiten laat afvoeren.

Bijlagen

Bijlage A: Broncode van Samcef

! THERMO MECHANICAL CALCULATION	I 11 04. 0. Q 1 A 3
OF A CONCRETE TABLE	!
! A) CALCULATION 1 : THERMAL : Bacon >	rappeler 36
input.mt	I 9 01653. 0. Q 1 A 1
(C) CALCULATION 2 : MECHANICAL :	I 8 01644. 0. Q 2 A 1
Bacon > input.me	I 1 5. 0. 0. Q 2 A 3
!	!
.MT &	Rappeler 37
.del.*	I 11 01646. 0. Q 1 A 1
!	I 8 01644. 0. Q 2 A 1
ABRE '/CALCUL' '1'	!
INPUT.CALCUL CURRENT	Rappeler 41
EXIT	I 8 01646. 0. Q 1 A 1
!	I 8 01644. 0. Q 1 A 1
.ME &	I 11 01644. 0. Q 1 A 1
.DEL.*	!
!	I 1 2.5 0. 0. Q 2 A 3
ABRE '/CALCUL' '2'	!
INPUT.CALCUL CURRENT	rappeler 42
EXIT	I 10 01653. 0. Q 1 A 1
!	I 8 01644. 0. Q 1 A 1
.CALCUL &	I 11 01644. 0. O 1 A 1
!	!
.UNIT	rappeler 64
!	I 1 1992.5 0. 0. 0 3 A 1
MM	!
CELSIUS	rappeler 61 A 71
!	I 11 016. 0. Q 3 A 11
.Tit 'Solar heating'	!
!	rappeler 1 A 11 !dikte van het asfalf 2-1-2
.NOE	I 104 0. 2. 0. Q 1 A 11
!	I 11 0. 1. 0. O I A 11
I 1 0. 5000. 0.	I 11 0. 2. 0. Q 1 A 11
I 1 2500. 0. 0. Q 2 A 1	!
I 1 15 0. 0. Q 1 A 1	rappeler 48
I 1 1992.5 0. 0. Q 4 A 1	I 90 1992.5 0. 0. Q 1 A 1
I 1 15 0. 0. Q 1 A 1	I 1 1992.5 0. 0. Q 2 A 1
I 1 2500. 0. 0. Q 2 A 1	!
!	rappeler 56
rappeler 1 A 3 ! dikte staal 4-3-4	I 85 1992.5 0. 0. Q 1 A 1
I 11 04. 0. Q 1 A 3	I 1 1992.5 0. 0. Q 2 A 1
I 11 03. 0. 0 1 A 3	!
I 11 04. 0. 0 1 A 3	rappeler 1 A 143
!	I 143 0. 0500. O 10 A 143
rappeler 4 A 8 ! dikte staal 6-6-6	I 143 0. 023. Q 1 A 143
I11 06. 0. Q 1 A 5	I 143 0. 0553. O 18 A 143
I 11 06. 0. Q 1 A 5	I 143 0. 023. Q 1 A 143
I 11 06. 0. Q 1 A 5	I 143 0. 0500. O 10 A 143
!	1
rappeler 9 A 11 ! dikte staal 4-3-4	VERSTIJVER 1 LINKSBOVEN (6001-6011)
I 11 04. 0. Q 1 A 3	rappeler 48
I 11 03. 0. Q 1 A 3	I 5953 0. 2.6 0. Q 1 A 1

I 1 139.3 0. 0. Q 1 A 1	I 1 -139.3 0. 0. Q 1 A 1
I 1 0. 72.4 0. Q 1 A 1	I 1 0. 72.4 0. Q 1 A 1
I 1 5.35 0. 0. Q 1 A 1	I 1 -5.35 0. 0. Q 1 A 1
I 1 5.35 0. 0. 0 I A 1	I 1 -5.35 0. 0. 0 I A 1
I 1 0150. 0. O 1 A 1	I 1 0150. 0. O 1 A 1
11-5-350-0-0-1 A 1	
11 5.350.0.01 A 1	
11 - 3.55 0.0.01 A 1	110.7240.01A1
110.72.40.QTAT	110.72.40.QTAT
11-139.3 0. 0. Q 1 A 1	1 1 139.3 U. U. Q I A I
1 1 139.3 2.6 0. Q 1 A 1	1 1 -139.3 2.6 0. Q 1 A 1
!	!
I 22 0. 0500. Q 10 A 11	I 22 0. 0500. Q 10 A 11
I 22 0. 023. Q 1 A 11	I 22 0. 023. Q 1 A 11
I 22 0. 0553. Q 18 A 11	I 22 0. 0553. Q 18 A 11
I 22 0. 023. Q 1 A 11	I 22 0. 023. Q 1 A 11
I 22 0. 0500. Q 10 A 11	I 22 0. 0500. Q 10 A 11
!	1
VERSTLIVER 1 LINKSONDER (6012-6022)	VERSTIJVER 3 LINKSONDER (8001-8011)
rappeler 56	rappeler 65
L 5956 0 2 6 0 0 1 A 1	I 7936 -5 1 0 0 0 1 A 1
11072400111	
110.72.40.01A1	
115.550.0.01A1	
11 5.55 U. U. Q I A I	
110150.0.QTAT	
11-5.35 0. 0. Q 1 A 1	1108.0.Q1A1
11-5.35 0. 0. Q 1 A 1	1 I 08. 0. Q I A I
1 1 0. 72.4 0. Q 1 A 1	11-94.9 0. 0. Q 1 A 1
I 1 -139.3 0. 0. Q 1 A 1	I 1 0234. 0. Q 1 A 1
I 1 139.3 2.6 0. Q 1 A 1	I 1 -5.1 234. 0. Q 1 A 1
!	!
I 22 0. 0500. Q 10 A 11	I 33 0. 0500. Q 10 A 11
I 22 0. 023. Q 1 A 11	I 33 0. 023. Q 1 A 11
I 22 0. 0553. O 18 A 11	I 33 0. 0553. O 18 A 11
I 22 0. 023. 0 I A 11	I 33 0. 023. 0 I A 11
I 22 0. 0500. O 10 A 11	I 33 0. 0500. O 10 A 11
!	1
VERSTIIVER 2 RECHTSBOVEN (7001-7011)	· VERSTIIVER 3 MIDDENONDER (8012-8022)
ranneler 49	ranneler 66
16952026001 1 1	17946 510 0 01 1 1
109520.2000.01 A 1	1 10 - 231 0 0 1 0 1
11 - 139.5 0.0.01 A 1	110.254.0.0111
110.7240.01A1	11-94.90.0.QTAT
11-5.55 U. U. Q TA T	
11-5.35 U. U. Q T A T	
1 1 0150. 0. Q 1 A 1	1 1 200. 0. 0. Q 1 A 1
1 1 5.35 0. 0. Q 1 A 1	1108.0.Q1A1
I 1 5.35 0. 0. Q 1 A 1	I 1 08. 0. Q 1 A 1
I 1 0. 72.4 0. Q 1 A 1	I 1 -94.9 0. 0. Q 1 A 1
I 1 139.3 0. 0. Q 1 A 1	I 1 0234. 0. Q 1 A 1
I 1 -139.3 2.6 0. Q 1 A 1	I 1 -5.1 234. 0. Q 1 A 1
!	!
I 22 0.0500. Q 10 A 11	I 33 0. 0500. Q 10 A 11
I 22 0. 023. Q I A 11	I 33 0. 023. Q I A 11
I 22 0. 0553. O 18 A 11	I 33 0. 0553. O 18 A 11
L22 0.023. 0 1 A 11	I 33 0. 023. O 1 A 11
$L_{22} = 0.0 -500 = 0.10 \text{ A} \cdot 11$	I 33 0 0 -500 0 10 A 11
1 VERSTIIVER 2 RECHTSONDER (7012-7022)	I VERSTIIVER 3 RECHTSONDER (8023-8033)
ranneler 57	ranneler 67
160550.260.01.11	17056 5100 01 11
1 0755 U. 2.U U. Q I A I	I A I Y . U. U. U. I A I
I 1 0. 234. 0. Q 1 A 1	! VERSTIJVER 4 RECHTSBOVEN (10025-10036)
---	--
I 1 -94.9 0. 0. Q 1 A 1	Rappeler 40
I 1 0. 8. 0. Q 1 A 1	I 9985 250. 0. 0. Q 1 A 1
I 1 0. 8. 0. Q 1 A 1	I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1
I 1 200. 0. 0. Q 1 A 1	I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1
I 1 08. 0. Q 1 A 1	I 1 -215500. 0. Q 1 A 1
I 1 08. 0. Q 1 A 1	I 1 -70. 0. 0. Q 1 A 1
I 1 -94.9 0. 0. Q 1 A 1	I 1 -215. 500. 0. Q 1 A 1
I 1 0234. 0. Q 1 A 1	I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1
I 1 -5.1 234. 0. Q 1 A 1	I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1
!	I 1 220495. 0. Q 1 A 1
1 33 0. 0500. Q 10 A 11	I 1 60. 0. 0. Q 1 A 1
1 33 0. 023. Q 1 A 11	1 1 2.5 -2.5 0. Q 1 A 1
1 33 0. 0553. Q 18 A 11	1 1 -65. 0. 0. Q 1 A 1
1 33 0. 023. Q 1 A 11	
1 33 0. 0500. Q 10 A 11	1 36 0. 0500. Q 10 A 12
!	1 36 0.023. Q 1 A 12
! VERSTIJVER 4 LINKSBOVEN (10001-10012)	1 36 0. 0553. Q 18 A 12
	1 36 0.023. Q 1 A 12
19963 250. 0. 0. Q I A I	1 36 0. 0500. Q 10 A 12
112.50.0.Q1A1	$\frac{1}{1000}$
11 2.5 0. 0. Q 1 A 1	! DWARSVERSTIJVER (12001-12020)
11-215500.0.QTAT	$\frac{1}{2}$
11 - 70.0.0.0.01 A 1	10247 0 0 5 0 1 1 5
11-213.500.0.01 A 1	192470.0.5, Q1A5
112.50.0.01 A1	1200.0.3.01 A 3
112.50.0.01 A1	192/10, 0, 5, 0, 1, 4, 2
	122410.0.5.01A2
1125-250 01 A 1	rappeler 2773 A 2774
I1-65 0 0 0 1 A 1	19235 0 0 5 0 1 A 2
1	1200 0 5 01 A 2
I 36 0. 0500. O 10 A 12	rappeler 2781 A 2785
I 36 0. 023. 0 1 A 12	19229 0. 0. 5. 0 1 A 5
I 36 0. 0553. O 18 A 12	I 20 0. 0. 5. O 1 A 5
I 36 0. 023. O 1 A 12	rappeler 2855 A 2860
I 36 0. 0500. Q 10 A 12	I 9160 0. 0. 5. Q 1 A 6
!	I 20 0. 0. 5. Q I A 6
! VERSTIJVER 4 MIDDENBOVEN (10013-	!
10024)	.NOE
Rappeler 39	!
I 9974 250. 0. 0. Q 1 A 1	I 1000001 0. 010000.
I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1	I 1000002 1.1.1.
I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1	!
I 1 -215500. 0. Q 1 A 1	.MAI
I 1 -70. 0. 0. Q 1 A 1	!
I 1 -215. 500. 0. Q 1 A 1	I 1 N 1 2 13 12 0 144 145 156 155
I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1	I 1 M 1 Q 9 A 1
I 1 2.5 0. 0. Q 1 A 1	I 10 M 11 Q 2 A 10
I 1 220495. 0. Q 1 A 1	!
I 1 60. 0. 0. Q 1 A 1	I 31 N 36 37 48 45 0 179 180 191 188
I 1 2.5 -2.5 0. Q 1 A 1	I 32 N 41 42 52 49 0 184 185 195 192
I 1 -65. 0. 0. Q 1 A 1	!
!	I 33 N 45 46 54 53 0 188 189 197 196
1 36 0. 0500. Q 10 A 12	11 M 1 Q 2 A 1
1 36 0. 023. Q 1 A 12	
1 36 U. U553. Q 18 A 12	IIMIQ2A1
1 36 0. 023. Q 1 A 12	
1 36 U. U50U. Q 10 A 12	1 39 N 53 54 62 61 0 196 197 205 204
!	IIMIQ2AI

I 42 N 57 58 69 68 0 200 201 212 211	I 10 M 22 Q 39 A 1
I 1 M 1 O 2 A 1	1
	VERSTUVER 2 RECHTSBOVEN
I 45 61 62 73 72 0 204 205 216 215	I 7001 N 7001 7002 7011 49 0 7023 7024 7033
1 13 01 02 73 72 0 20 7203 210 213	192
110M1102A10	172 1 10 N 22 22 22 142 0 22 22 22 142 O 20 A 1
1 10 M 11 Q 2 A 10	I 10 N 22 22 22 143 0 22 22 22 143 Q 33 A 1 I 7002 N 40 7011 7000 7010 0 102 7022 7021
! 1 75 N 105 106 2 1 0 248 240 145 144	1 /002 N 49 /011 /009 /010 0 192 /055 /051
1 /5 N 105 106 2 1 0 248 249 145 144	7052 1 10 N 1 12 02 02 02 0 1 12 02 02 02 0 0 1 1
11 M I Q 9 A I	1 10 N 143 22 22 22 0 143 22 22 22 Q 39 A 1
1 10 N 11 11 104 104 0 11 11 104 104 Q 1 A 10	I 7003 N 7003 7004 7007 7008 0 7025 7026 7029
I 10 M 11 Q 1 A 10	7030
!	I 10 M 22 Q 39 A 1
I 104 M 143 Q 39 A 104	I 7004 N 7004 7005 7006 7007 0 7026 7027 7028
!	7029
I 1000001 N 1467 1468 1568 1478 0 1610 1611	I 10 M 22 Q 39 A 1
1711 1621	!
I 1 N 1 1 1 90 0 1 1 1 90 Q 1 A 1	! VERSTIJVER 2 RECHTSONDER
I1M1 01A1	I 7005 N 7012 7013 7022 57 0 7034 7035 7044
I1N11-911011-911 01A1	200
	I 10 N 22 22 22 143 0 22 22 22 143 O 39 A 1
I 1000005 N 1478 1568 1571 1486 0 1621 1711	I 7006 N 57 7022 7020 7021 0 200 7044 7042
171/ 1629	70/3
111102	I 10 N 1/2 22 22 22 0 1/2 22 22 22 0 20 N 1
11N 101 1 1	I 10 N 145 22 22 22 0 145 22 22 22 Q 55 A 1 I 7007 N 7014 7015 7018 7010 0 7026 7027 7040
$\begin{array}{c} \mathbf{II} \mathbf{M} \mathbf{I} \mathbf{Q} \mathbf{I} \mathbf{A} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \mathbf{N} \mathbf{I} 0 \mathbf{I} 0 \mathbf{I} 0 \mathbf{I} 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 \end{array}$	1 /00/ N /014 /013 /018 /019 0 /050 /05/ /040
I I N I -91 -80 I U I -91 -80 I Q I A I I 1000000 N 1496 1571 1405 1404 0 1620 1714	/041
1 1000009 N 1486 1571 1495 1494 0 1629 1714	1 10 M 22 Q 39 A 1
1638 1637	1 /008 N /015 /016 /01/ /018 0 /03/ /038 /039
11 N 85 1 1 1 0 85 1 1 1 Q 1 A 1	
IIMIQIAI	1 10 M 22 Q 39 A 1
I 1 N 1 -86 I 1 0 1 -86 I 1 Q I A I	
!	! VERSTIJVER 3 LINKSONDER
! (19*143=2717)	I 8001 N 8001 8002 8011 65 0 8034 8035 8044
I 12 M 2717 Q 1 A 12	208
!	I 12 N 33 33 33 143 0 33 33 33 143 Q 39 A 1
! VERSTIJVER 1 LINKSBOVEN	I 8002 N 65 8011 8009 8010 0 208 8044 8042
I 6001 N 6001 6002 6011 48 0 6023 6024 6033	8043
191	I 12 N 143 33 33 33 0 143 33 33 33 Q 39 A 1
I 10 N 22 22 22 143 0 22 22 22 143 Q 39 A 1	I 8003 N 8003 8004 8007 8008 0 8036 8037 8040
I 6002 N 48 6011 6009 6010 0 191 6033 6031	8041
6032	I 12 M 33 O 39 A 1
I 10 N 143 22 22 22 0 143 22 22 22 O 39 A 1	I 8004 N 8004 8005 8006 8007 0 8037 8038 8039
I 6003 N 6003 6004 6007 6008 0 6025 6026 6029	8040
6030	I 12 M 33 O 39 A 1
L 10 M 22 O 39 A 1	
L 6004 N 6004 6005 6006 6007 0 6026 6027 6028	VERSTLIVER 3 MIDDENONDER
6029	I 8005 N 8012 8013 8022 66 0 8045 8046 8055
L 10 M 22 O 39 A 1	209
1	L 12 N 33 33 33 1/3 0 33 33 33 1/3 Ο 39 Δ 1
I VERSTIIVER 1 I INKSONDER	I 8006 N 66 8022 8020 8021 0 200 8055 8053
L 6005 N 6012 6013 6022 56 0 6034 6035 6044	2054
100	L 12 N 1/2 22 22 22 0 1/2 22 22 23 0 20 A 1
177 1 10 N 22 22 22 142 0 22 22 22 142 0 20 A 1	1 12 N 145 55 55 55 0 145 55 55 55 Q 57 A 1 1 2007 N 2014 2015 2012 2010 0 2047 2042 2051
I 10 N 22 22 22 145 0 22 22 22 145 Q 59 A 1	1 8007 IN 8014 8013 8018 8019 0 8047 8048 8031 9052
1 0000 N 30 0022 0020 0021 0 199 0044 0042	0032 1 10 M 22 O 20 A 1
	1 12 IVI 33 Q 39 A 1 1 9000 N 9015 9017 9017 9010 0 9040 9040 9050
1 10 N 143 22 22 22 0 143 22 22 22 Q 39 A 1	1 8008 IN 8015 8016 8017 8018 0 8048 8049 8050
1 000/ N 0014 0015 0018 0019 0 0036 0037 0040	
6041	1 12 M 33 Q 39 A 1
1 10 M 22 Q 39 A 1	!
1 6008 N 6015 6016 6017 6018 0 6037 6038 6039	! VERSTIJVER 3 RECHTSONDER
6040	I 8009 N 8023 8024 8033 67 0 8056 8057 8066

210	10070 10071 10072
I 12 N 33 33 33 143 0 33 33 33 143 Q 39 A 1	I 18 M 36 Q 39 A 1
I 8010 N 67 8033 8031 8032 0 210 8066 8064	I 10016 N 10036 10035 10028 10029 0 10072
8065	10071 10064 10065
I 12 N 143 33 33 33 0 143 33 33 33 O 39 A 1	I 18 M 36 O 39 A 1
I 8011 N 8025 8026 8029 8030 0 8058 8059 8062	I 10017 N 10031 10032 10033 10036 0 10067
8063	10068 10069 10072
L 12 M 33 O 39 A 1	I 18 M 36 O 39 A 1
I 8012 N 8026 8027 8028 8029 0 8059 8060 8061	I 10018 N 10030 10031 10036 10029 0 10066
8062	10067 10072 10065
112 M 22 O 20 A 1	10007 10072 10005 1 1 9 M 26 O 20 A 1
1 12 M 55 Q 59 A 1	1 18 M 30 Q 39 A 1
! VERSTIJVER 4 LINKSBUVEN	! DWARSVERSTIJVER WAND T
1 10001 N 10001 10002 10011 10010 0 10037	1 12001 N 2754 2755 2855 2765 0 12001 12002
10038 1004 / 10046	
1 18 M 36 Q 39 A 1	11N1119001119Q1A1
I 10002 N 10002 10003 10004 10011 0 10038	I 1 M 1 Q 1 A 1
10039 10040 10047	I 1 N 1 1 -91 1 0 1 1 -10 1 Q 1 A 1
I 18 M 36 Q 39 A 1	I 12005 N 2765 2855 2858 2773 0 12006 12015
I 10003 N 10009 10010 10011 10012 0 10045	12018 12008
10046 10047 10048	I 12006 N 2857 2766 2774 2860 0 12017 12007
I 18 M 36 Q 39 A 1	12009 12020
I 10004 N 10012 10011 10004 10005 0 10048	I 12007 N 2773 2858 2782 2781 0 12008 12018
10047 10040 10041	12011 12010
I 18 M 36 Q 39 A 1	I 1 N 85 1 1 1 0 10 1 1 1 Q 1 A 1
I 10005 N 10007 10008 10009 10012 0 10043	IIMIQIAI
10044 10045 10048	I1N1-861101-111101A1
I 18 M 36 O 39 A 1	!
I 10006 N 10006 10007 10012 10005 0 10042	! DWARSVERSTIJVER WAND 2
10043 10048 10041	I 12011 N 12001 12002 12015 12006 0 12021
I 18 M 36 O 39 A 1	12022 12035 12026
1	I1N11190111901A1
I VERSTIIVER 4 MIDDENBOVEN	
I 10007 N 10013 10014 10023 10022 0 10049	$11 \times 12 \times 12$
10050 10059 10014 10025 10022 0 10049	1 12015 N 12006 12015 12018 12008 0 12026
1 18 M 26 O 20 A 1	12013 1 12000 12013 12010 12000 0 12020
I 10 M 50 Q 57 A 1 I 10008 N 10014 10015 10016 10023 0 10050	12035 12036 12026 1 12016 N 12017 12007 12000 12020 0 12037
10051 10052 10050	12017 12017 12007 12009 12020 0 12037
10051 10052 10059	12027 12029 12040 1 12017 N 12008 12018 12011 12010 0 12028
I 10 M 30 Q 39 A I I 10000 N 10021 10022 10022 10024 0 10057	1 12017 N 12008 12018 12011 12010 0 12028
1 10009 N 10021 10022 10023 10024 0 10057	12038 12031 12030
10058 10059 10060	
1 18 M 36 Q 39 A 1	
1 10010 N 10024 10023 10016 10017 0 10060	11N1-111101-1111Q1A1
10059 10052 10053	
1 18 M 36 Q 39 A 1	#IF (/CALCUL EQ I) THEN
I 10011 N 10019 10020 10021 10024 0 10055	.HYP THERMIQUE
10056 10057 10060	#ELSEIF (/CALCUL EQ 2) THEN
I 18 M 36 Q 39 A 1	.HYP VOLUME
I 10012 N 10018 10019 10024 10017 0 10054	#ENDIF
10055 10060 10053	!
I 18 M 36 Q 39 A 1	!VILVOORDE
!	!
! VERSTIJVER 4 RECHTSBOVEN	! Positie van de zon op 21 juni 2007
I 10013 N 10025 10026 10035 10034 0 10061	1
10062 10071 10070	.fct
I 18 M 36 Q 39 A 1	!
I 10014 N 10026 10027 10028 10035 0 10062	cree fonction i 1
10063 10064 10071	cree valeurs y u
I 18 M 36 O 39 A 1	bornes 0. 18000. CON 1.0e-03
L 10015 N 10033 10034 10035 10036 0 10069	bornes 18000, 21600. LIN 1.0e-03 -114964

bornes 21600. 25200. LIN -11496.4 -5312.6	bornes 280800. 284400. LIN -11496.4 -5312.6
bornes 25200. 28800. LIN -5312.6 1744.	bornes 284400. 288000. LIN -5312.6 1744.
bornes 28800. 32400. LIN 1744. 9045.73	bornes 288000. 291600. LIN 1744. 9045.73
bornes 32400. 36000. LIN 9045.73 15943.15	bornes 291600. 295200. LIN 9045.73 15943.15
bornes 36000. 39600. LIN 15943.15 21822.77	bornes 295200. 298800. LIN 15943.15 21822.77
bornes 39600. 43200. LIN 21822.77 26161.66	bornes 298800. 302400. LIN 21822.77 26161.66
bornes 43200. 46800. LIN 26161.66 28573.89	bornes 302400. 306000. LIN 26161.66 28573.89
bornes 46800. 50400. LIN 28573.89 28844.92	bornes 306000. 309600. LIN 28573.89 28844.92
bornes 50400. 54000. LIN 28844.92 26950.64	bornes 309600. 313200. LIN 28844.92 26950.64
bornes 54000. 57600. LIN 26950.64 23059.53	bornes 313200. 316800. LIN 26950.64 23059.53
bornes 57600. 61200. LIN 23059.53 17517.67	bornes 316800. 320400. LIN 23059.53 17517.67
bornes 61200. 64800. LIN 17517.67 10817.99	bornes 320400. 324000. LIN 17517.67 10817.99
bornes 64800. 68400. LIN 10817.99 3556.36	bornes 324000. 327600. LIN 10817.99 3556.36
bornes 68400. 72000. LIN 3556.36 -3621.33	bornes 327600. 331200. LIN 3556.36 -3621.33
bornes 72000. 75600. LIN -3621.33 -10076.7	bornes 331200. 334800. LIN -3621.33 -10076.7
bornes 75600. 79200. LIN -10076.7 1.0e-03	bornes 334800. 338400. LIN -10076.7 1.0e-03
bornes 79200. 86400. CON 1.0e-03	bornes 338400. 345600. CON 1.0e-03
!	!
bornes 86400. 104400. CON 1.0e-03	bornes 345600. 363600. CON 1.0e-03
bornes 104400. 108000. LIN 1.0e-03 -11496.4	bornes 363600. 367200. LIN 1.0e-03 -11496.4
bornes 108000. 111600. LIN -11496.4 -5312.6	bornes 367200. 370800. LIN -11496.4 -5312.6
bornes 111600. 115200. LIN -5312.6 1744.	bornes 370800. 374400. LIN -5312.6 1744.
bornes 115200. 118800. LIN 1744. 9045.73	bornes 374400. 378000. LIN 1744. 9045.73
bornes 118800. 122400. LIN 9045.73 15943.15	bornes 378000. 381600. LIN 9045.73 15943.15
bornes 122400. 126000. LIN 15943.15 21822.77	bornes 381600. 385200. LIN 15943.15 21822.77
bornes 126000. 129600. LIN 21822.77 26161.66	bornes 385200. 388800. LIN 21822.77 26161.66
bornes 129600. 133200. LIN 26161.66 28573.89	bornes 388800. 392400. LIN 26161.66 28573.89
bornes 133200. 136800. LIN 28573.89 28844.92	bornes 392400. 396000. LIN 28573.89 28844.92
bornes 136800. 140400. LIN 28844.92 26950.64	bornes 396000. 399600. LIN 28844.92 26950.64
bornes 140400. 144000. LIN 26950.64 23059.53	bornes 399600. 403200. LIN 26950.64 23059.53
bornes 144000. 147600. LIN 23059.53 17517.67	bornes 403200. 406800. LIN 23059.53 17517.67
bornes 147600. 151200. LIN 17517.67 10817.99	bornes 406800. 410400. LIN 17517.67 10817.99
bornes 151200. 154800. LIN 10817.99 3556.36	bornes 410400. 414000. LIN 10817.99 3556.36
bornes 154800. 158400. LIN 3556.36 -3621.33	bornes 414000. 417600. LIN 3556.36 -3621.33
bornes 158400. 162000. LIN -3621.33 -10076.7	bornes 417600. 421200. LIN -3621.33 -10076.7
bornes 162000. 165600. LIN -10076.7 1.0e-03	bornes 421200. 424800. LIN -10076.7 1.0e-03
bornes 165600. 172800. CON 1.0e-03	bornes 424800. 432000. CON 1.0e-03
!	!
bornes 172800. 190800. CON 1.0e-03	.fct
bornes 190800. 194400. LIN 1.0e-03 -11496.4	!
bornes 194400. 198000. LIN -11496.4 -5312.6	extrait 1 fct 1 discret 144
bornes 198000. 201600. LIN -5312.6 1744.	fusione 1 fct 1
bornes 201600. 205200. LIN 1744. 9045.73	!
bornes 205200. 208800. LIN 9045.73 15943.15	.fct
bornes 208800. 212400. LIN 15943.15 21822.77	!
bornes 212400. 216000. LIN 21822.77 26161.66	cree fonction 1 2
bornes 216000. 219600. LIN 26161.66 28573.89	cree valeurs y u
bornes 219600. 223200. LIN 28573.89 28844.92	bornes 0. 18000. CON 0.
bornes 223200. 226800. LIN 28844.92 26950.64	bornes 18000. 21600. LIN 0. 1283.99
bornes 226800. 230400. LIN 26950.64 23059.53	bornes 21600. 25200. LIN 1283.99 4762.32
bornes 230400. 234000. LIN 23059.55 1/51/.6/	bornes 25200. 28800. LIN 4/02.32 8917.27
bornes 234000. 257000. LIN 17517.07 10817.99 bornes 237600 241200 LIN 10817.00 3556.36	bornes 22400, 32400, LIN 8917.27 15580.0
bornes 241200, 244200, LIN 10817.99 5550.50	bornes 26000, 20600, LIN 10200, 7, 27210, 0
bornes 244200, 244600, LIN 3550.50 -5021.55 bornes 244800, 248400, LIN 2621 22, 10076.7	bornes 20600, 32000. LIN 12639.7 27210.0
bornes 248400, 252000 LIN 10076.7.1.00.02	bornes /3200 /6800 LIN 2/210.0 30522.7
bornes 252000 259200 CON 1 0 03	bornes 46800 50400 I IN 1/100 2 1/6077 8
 	hornes 50400 54000 I IN 46077 8 30208 2
bornes 259200_277200CON 1.0e-03	bornes 54000 57600 LIN 39208 2 30255
bornes 277200, 280800 LIN 1 0e-03 -11496.4	bornes 57600, 61200 LIN 30255 22846.6
551165 E, E00, E00000, E11, 1.00 05 11770.T	SSINGS 57000, 01200, LIN 30233, 22070.0

bornes 61200. 64800. LIN 22846.6 16525.5	bornes 320400. 324000. LIN 22846.6 16525.5
bornes 64800. 68400. LIN 16525.5 10908.1	bornes 324000. 327600. LIN 16525.5 10908.1
bornes 68400. 72000. LIN 10908.1 6564.76	bornes 327600. 331200. LIN 10908.1 6564.76
bornes 72000. 75600. LIN 6564.76 2575.05	bornes 331200. 334800. LIN 6564.76 2575.05
bornes 75600. 79200. LIN 2575.05 0.	bornes 334800. 338400. LIN 2575.05 0.
bornes 79200. 86400. CON 0.	bornes 338400. 345600. CON 0.
!	!
bornes 86400. 104400. CON 0.	bornes 345600. 363600. CON 0.
bornes 104400. 108000. LIN 0. 1283.99	bornes 363600. 367200. LIN 0. 1283.99
bornes 108000. 111600. LIN 1283.99 4762.32	bornes 367200. 370800. LIN 1283.99 4762.32
bornes 111600. 115200. LIN 4762.32 8917.27	bornes 370800. 374400. LIN 4762.32 8917.27
bornes 115200. 118800. LIN 8917.27 13580.6	bornes 374400. 378000. LIN 8917.27 13580.6
bornes 118800. 122400. LIN 13580.6 19839.7	bornes 378000. 381600. LIN 13580.6 19839.7
bornes 122400. 126000. LIN 19839.7 27210.0	bornes 381600. 385200. LIN 19839.7 27210.0
bornes 126000. 129600. LIN 27210.0 36322.7	bornes 385200. 388800. LIN 27210.0 36322.7
bornes 129600. 133200. LIN 36322.7 44199.2	bornes 388800. 392400. LIN 36322.7 44199.2
bornes 133200. 136800. LIN 44199.2 46077.8	bornes 392400. 396000. LIN 44199.2 46077.8
bornes 136800. 140400. LIN 46077.8 39208.2	bornes 396000. 399600. LIN 46077.8 39208.2
bornes 140400. 144000. LIN 39208.2 30255.	bornes 399600. 403200. LIN 39208.2 30255.
bornes 144000. 147600. LIN 30255. 22846.6	bornes 403200. 406800. LIN 30255. 22846.6
bornes 147600. 151200. LIN 22846.6 16525.5	bornes 406800. 410400. LIN 22846.6 16525.5
bornes 151200. 154800. LIN 16525.5 10908.1	bornes 410400. 414000. LIN 16525.5 10908.1
bornes 154800. 158400. LIN 10908.1 6564.76	bornes 414000. 417600. LIN 10908.1 6564.76
bornes 158400. 162000. LIN 6564.76 2575.05	bornes 417600. 421200. LIN 6564.76 2575.05
bornes 162000. 165600. LIN 2575.05 0.	bornes 421200. 424800. LIN 2575.05 0.
bornes 165600. 172800. CON 0.	bornes 424800. 432000. CON 0.
!	!
bornes 172800. 190800. CON 0.	.fct
bornes 190800. 194400. LIN 0. 1283.99	!
bornes 194400. 198000. LIN 1283.99 4762.32	extrait 2 fct 2 discret 144
bornes 198000. 201600. LIN 4762.32 8917.27	fusione 2 fct 2
bornes 201600. 205200. LIN 8917.27 13580.6	!
bornes 205200. 208800. LIN 13580.6 19839.7	.fct
bornes 208800. 212400. LIN 19839.7 27210.0	!
bornes 212400. 216000. LIN 27210.0 36322.7	cree fonction i 3
bornes 216000. 219600. LIN 36322.7 44199.2	cree valeurs y u
bornes 219600. 223200. LIN 44199.2 46077.8	bornes 0. 18000. CON 0.
bornes 223200. 226800. LIN 46077.8 39208.2	bornes 18000. 21600. LIN 028557.1
bornes 226800. 230400. LIN 39208.2 30255.	bornes 21600. 25200. LIN -28557.1 -32449.1
bornes 230400. 234000. LIN 30255. 22846.6	bornes 25200. 28800. LIN -32449.1 -34344.5
bornes 234000. 237600. LIN 22846.6 16525.5	bornes 28800. 32400. LIN -34344.5 -34074.6
bornes 23/600. 241200. LIN 16525.5 10908.1	bornes 32400. 36000. LIN -340/4.6 -31663.4
bornes 241200. 244800. LIN 10908.1 6564.76	bornes 36000. 39600. LIN -31663.4 -2/325.5
bornes 244800. 248400. LIN 0504.70 2575.05	bornes 39000. 45200. LIN -27525.5 -21440.5
bornes 248400. 252000. LIN 2575.05 0.	bornes 45200, 46800, LIN -21440,5 -14549,5
bornes 252000. 259200. CON 0.	bornes 50400, 50400, LIN 7247.78 100.88
: hornes 259200_277200CON 0	bornes 54000 , 57600 , LIN 100.88, 5003.56
bornes 277200, 280800 JIN 0, 1283, 90	bornes 57600, 61200 LIN 5003 56, 10755 40
bornes 280800 284400 LIN 1283.99	bornes 61200, 64800 LIN 10755 49 13671 35
bornes 280400. 28400. LIN 1263.37 4702.32	bornes 6/800 68/00 LIN 13671 35 1//81 82
bornes 288000 291600 LIN 8917 27 13580 6	bornes 68400, 72000 LIN 14481 82 13114 8
bornes 201600, 295200 LIN 13580 6 19839 7	bornes 72000 75600 LIN 13114 8 9691 88
bornes 295200, 298800, LIN 19839 7 27210 0	bornes 75600, 79200. LIN 9691 88 0
bornes 298800, 302400 LIN 27210 0 36322 7	bornes 79200, 86400 CON 0
bornes 302400, 306000, LIN 36322.7 44199.2	
bornes 306000, 309600. LIN 44199.2 46077.8	bornes 86400, 104400. CON 0.
bornes 309600. 313200. LIN 46077.8 39208.2	bornes 104400. 108000. LIN 028557.1
bornes 313200. 316800. LIN 39208.2 30255.	bornes 108000. 111600. LIN -28557.1 -32449.1
bornes 316800. 320400. LIN 30255. 22846.6	bornes 111600. 115200. LIN -32449.1 -34344.5

bornes 115200. 118800.	LIN -34344.5 -34074.6	bornes 374400. 378000. LIN -34344.5 -34074.6
bornes 118800. 122400.	LIN -34074.6 -31663.4	bornes 378000. 381600. LIN -34074.6 -31663.4
bornes 122400. 126000.	LIN -31663.4 -27325.5	bornes 381600. 385200. LIN -31663.4 -27325.5
bornes 126000. 129600.	LIN -27325.5 -21446.5	bornes 385200. 388800. LIN -27325.5 -21446.5
bornes 129600. 133200.	LIN -21446.5 -14549.5	bornes 388800. 392400. LIN -21446.5 -14549.5
bornes 133200. 136800.	LIN -14549.5 -7247.78	bornes 392400. 396000. LIN -14549.5 -7247.78
bornes 136800. 140400.	LIN -7247.78 -190.88	bornes 396000. 399600. LIN -7247.78 -190.88
bornes 140400. 144000.	LIN -190.88 5993.56	bornes 399600. 403200. LIN -190.88 5993.56
bornes 144000. 147600.	LIN 5993.56 10755.49	bornes 403200. 406800. LIN 5993.56 10755.49
bornes 147600. 151200.	LIN 10755.49 13671.35	bornes 406800. 410400. LIN 10755.49 13671.35
bornes 151200, 154800.	LIN 13671.35 14481.82	bornes 410400, 414000. LIN 13671.35 14481.82
bornes 154800, 158400.	LIN 14481.82 13114.8	bornes 414000, 417600, LIN 14481.82 13114.8
bornes 158400, 162000.	LIN 13114.8 9691.88	bornes 417600, 421200, LIN 13114.8 9691.88
bornes 162000, 165600.	LIN 9691.88 0.	bornes 421200, 424800, LIN 9691,880,
bornes 165600 172800	CON 0	bornes 424800 432000 CON 0
1	00110.	1
bornes 172800_190800	CON 0	fct
bornes 190800, 194400	1×0^{-28557}	
bornes 194400, 194400.	LIN -28557 1 -32449 1	extrait 3 fet 3 discret 144
bornes 198000 201600	LIN 32449.1 34344.5	fusione 3 fet 3
bornes 201600, 201000.	LIN 3/3/4 5 3/07/ 6	
bornes 205200, 208200	LIN 34074 6 31663 4	: fct
bornes 208200, 208800.	LIN 31663 / 27325 5	
bornes 212400, 212400.	LIN -51005.4 -27525.5	: oron fonction i 4
bornes 212400, 210000.	LIN -27323.3 -21440.3	cree folicitoli 1 4
bornes 210600, 219000.	LIN -21440.5 -14549.5	hormos 0, 18000 CON 0
bornes 219000. 223200.	LIN -14349.3 -7247.78	bornes 18000. CON 0.
bornes 223200, 220800.	LIN -/24/./8 -190.88	bornes 18000. 21000. LIN 0. 0.911
bornes 226800. 230400.	LIN -190.88 5993.56	bornes 21600. 25200. CON 0.911
bornes 230400. 234000.	LIN 5993.56 10755.49	bornes 25200. 27000. LIN 0.911 0.817
bornes 234000. 237600.	LIN 10/55.49 136/1.35	bornes 27000. 28800. CON 0.817
bornes 237600. 241200.	LIN 136/1.35 14481.82	bornes 28800. 32400. CON 0.817
bornes 241200. 244800.	LIN 14481.82 13114.8	bornes 32400. 36000. CON 0.817
bornes 244800. 248400.	LIN 13114.8 9691.88	bornes 36000. 39600. CON 0.817
bornes 248400. 252000.	LIN 9691.88 0.	bornes 39600. 41400. LIN 0.817 1.
bornes 252000. 259200.	CON 0.	bornes 41400. 43200. CON 1.
!	CONT	bornes 43200. 46800. CON 1.
bornes 259200. 277200.	CON 0.	bornes 46800. 50400. CON 1.
bornes 277200. 280800.	LIN 028557.1	bornes 50400. 54000. CON 1.
bornes 280800. 284400.	LIN -28557.1 -32449.1	bornes 54000. 57600. CON 1.
bornes 284400. 288000.	LIN -32449.1 -34344.5	bornes 57600. 59400. LIN 1. 0.817
bornes 288000. 291600.	LIN -34344.5 -34074.6	bornes 59400. 61200. CON 0.817
bornes 291600. 295200.	LIN -34074.6 -31663.4	bornes 61200. 64800. CON 0.817
bornes 295200. 298800.	LIN -31663.4 -27325.5	bornes 64800. 68400. CON 0.817
bornes 298800. 302400.	LIN -27325.5 -21446.5	bornes 68400. 72000. CON 0.817
bornes 302400. 306000.	LIN -21446.5 -14549.5	bornes 72000. 73800. LIN 0.817 0.889
bornes 306000. 309600.	LIN -14549.5 -7247.78	bornes 73800. 75600. CON 0.889
bornes 309600. 313200.	LIN -7247.78 -190.88	bornes 75600. 79200. LIN 0.889 0.
bornes 313200. 316800.	LIN -190.88 5993.56	bornes 79200. 86400. CON 0.
bornes 316800. 320400.	LIN 5993.56 10755.49	!
bornes 320400. 324000.	LIN 10755.49 13671.35	bornes 0. 104400. CON 0.
bornes 324000. 327600.	LIN 13671.35 14481.82	bornes 104400. 108000. LIN 0. 0.761
bornes 327600. 331200.	LIN 14481.82 13114.8	bornes 108000. 111600. CON 0.761
bornes 331200. 334800.	LIN 13114.8 9691.88	bornes 111600. 113400. LIN 0.761 0.667
bornes 334800. 338400.	LIN 9691.88 0.	bornes 113400. 115200. CON 0.667
bornes 338400. 345600.	CON 0.	bornes 115200. 118800. CON 0.667
!		bornes 118800. 122400. CON 0.667
bornes 345600. 363600.	CON 0.	bornes 122400. 126000. CON 0.667
bornes 363600. 367200.	LIN 028557.1	bornes 126000. 127800. LIN 0.667 0.85
bornes 367200. 370800.	LIN -28557.1 -32449.1	bornes 127800. 129600. CON 0.85
bornes 370800. 374400.	LIN -32449.1 -34344.5	bornes 129600. 133200. CON 0.85

bornes 133200. 136800.	CON 0.85	!
bornes 136800. 140400.	CON 0.85	bornes 0. 345600. CON 0.
bornes 140400. 144000.	CON 0.85	bornes 345600. 367200. LIN 0. 0.311
bornes 144000. 145800.	LIN 0.85 0.667	bornes 367200. 370800. CON 0.311
bornes 145800. 147600.	CON 0.667	bornes 370800. 372600. LIN 0.311 0.217
bornes 147600. 151200.	CON 0.667	bornes 372600. 374400. CON 0.217
bornes 151200, 154800.	CON 0.667	bornes 374400, 378000, CON 0.217
bornes 154800 158400	CON 0.667	bornes 378000 381600 CON 0 217
bornes 158400, 160200	LIN 0 667 0 739	bornes 381600 385200 CON 0.217
bornes 160200, 162000	CON 0.739	bornes 385200 387000 LIN 0.217
bornes 162000, 162000.	LIN 0 739 0	bornes 387000 388800 CON 0.4
bornes 165600, 172800	CON 0	bornes 288800 202400 CON 0.4
bornes 163600. 172800.	CON 0.	bornes 202400, 392400, CON 0.4
1 hammad 0 172800	NI O	bornes 20(100, 200(00, CON 0.4
bornes 0. 172800. CC	$\int \mathbf{N} 0 \cdot 0 = 0$	bornes 390100. 399000. CON 0.4
bornes 1/2800. 194400.	LIN 0. 0.611	bornes 399600. 403200. CON 0.4
bornes 194400. 198000.	CON 0.611	bornes 403200. 405000. LIN 0.4 0.217
bornes 198000. 199800.	LIN 0.611 0.517	bornes 405000. 406800. CON 0.217
bornes 199800. 201600.	CON 0.517	bornes 406800. 410400. CON 0.217
bornes 201600. 205200.	CON 0.517	bornes 410400. 414000. CON 0.217
bornes 205200. 208800.	CON 0.517	bornes 414000. 417600. CON 0.217
bornes 208800. 212400.	CON 0.517	bornes 417600. 419400. LIN 0.217 0.289
bornes 212400. 214200.	LIN 0.517 0.7	bornes 419400. 421200. CON 0.289
bornes 214200. 216000.	CON 0.7	bornes 421200. 424800. LIN 0.289 0.
bornes 216000. 219600.	CON 0.7	bornes 424800. 432000. CON 0.
bornes 219600. 223300.	CON 0.7	!
bornes 223300, 226800.	CON 0.7	.fct
bornes 226800, 230400.	CON 0.7	1
bornes 230400 232200	LIN 0 7 0 517	extrait 4 fct 4 discret 144
bornes 232200 234000	CON 0.517	fusione 4 fct 4
bornes 234000 237600	CON 0.517	
bornes 237600, 241200	CON 0.517	The X-X and 7 direction of the sun vary with
bornes 241200, 244200	CON 0.517	function
bornes 241200. 244800.	LIN 0.517 0.580	1.1. 2 and 3 respectively
bornes 244800. 240000.	CON 0.590	1, 2 and 5 respectively.
bornes 248400, 248400.	LUN 0.589	! The intensity varies with function 4
bornes 248400. 252000.	LIN 0.389 0.	! !
bornes 252000. 259200.	CON 0.	Positie van de zon op 21 december 2007
!		
bornes 0. 259200. CC	DN 0.	.fct
bornes 259200. 280800.	LIN 0. 0.461	!
bornes 280800. 284400.	CON 0.461	cree fonction i 5
bornes 284400. 286200.	LIN 0.461 0.367	cree valeurs y u
bornes 286200. 288000.	CON 0.367	bornes 0. 28800. CON 1.0e-03
bornes 288000. 291600.	CON 0.367	
bornes 291600. 295200.	CON 0.367	bornes 28800. 32400. LIN 1.0e-03 20248.3
bornes 295200. 298800.	CON 0.367	bornes 32400. 36000. LIN 20248.3 24212.65
bornes 298800. 300600.	LIN 0.367 0.55	bornes 36000. 39600. LIN 24212.65 27076.17
bornes 300600. 302400.	CON 0.55	bornes 39600. 43200. LIN 27076.17 28678.95
bornes 302400. 306000.	CON 0.55	bornes 43200. 46800. LIN 28678.95 28931.49
bornes 306000, 309700.	CON 0.55	bornes 46800, 50400, LIN 28931.49 27819.69
bornes 309700 313200	CON 0.55	bornes 50400 54000 LIN 27819 69 25405 63
bornes 313200 316800	CON 0.55	bornes 54000 57600 LIN 25405 63 21824 11
bornes 316800 318600	LIN 0 55 0 367	bornes 57600, 61200 LIN 21824 11 1 θ_{e-03}
hornes 318600 370400	CON 0 367	homes 61200, 86400 CON 1 0 03
bornes 320400. 320400.	CON 0.367	
bornes 224000 227600	CON 0.307	: fot
bornes 324000. 32/600.	CON 0.307	
bornes 32/600. 331200.	CUN 0.367	
bornes 331200. 333000.	LIN 0.367 0.439	extrait 5 fct 5 discret 144
bornes 333000. 334800.	CON 0.439	fusione 5 fct 5
bornes 334800. 338400.	LIN 0.439 0.	!
bornes 338400. 345600.	CON 0.	.fct

1 cree fonction i 6 .fct cree valeurs y u 1 bornes 0. 28800. CON 0. extrait 8 fct 8 discret 144 fusione 8 fct 8 bornes 28800. 32400. LIN 0. 427.649 bornes 32400. 36000. LIN 427.649 3008.22 ! The X, Y and Z direction of the sun vary with bornes 36000. 39600. LIN 3008.22 5207.64 function bornes 39600. 43200. LIN 5207.64 6564.76 ! 5, 6 and 7 respectively. bornes 43200. 46800. LIN 6564.76 6564.76 ! The intensity varies with function 8 bornes 46800. 50400. LIN 6564.76 5656.27 bornes 50400. 54000. LIN 5656.27 3880.42 !---MBANDAKA---bornes 54000. 57600. LIN 3880.42 1283.99 ١ bornes 57600. 61200. LIN 1283.99 0. ! Positie van de zon op 21 juni 2007 bornes 61200. 86400. CON 0. ! .fct 1 .fct ١ cree fonction i 11 1 extrait 6 fct 6 discret 144 fusione 6 fct 6 cree valeurs y u bornes 0. 21600. CON 1.0e-03 .fct bornes 21600. 25200. LIN 1.0e-03 -5463.5 1 bornes 25200. 28800. LIN -5463.5 -5854.1 cree fonction i 7 bornes 28800. 32400. LIN -5854.1 -6622.8 cree valeurs y u bornes 0. 28800. CON 0. bornes 32400. 36000. LIN -6622.8 -8843.7 bornes 36000. 39600. LIN -8843.7 -12519. bornes 28800. 32400. LIN 0. bornes 39600. 43200. LIN -12519. -17705. -28768.1 bornes 32400. 36000. LIN -28768.1 -24548.6 bornes 43200. 46800. LIN -17705. -19817. bornes 36000. 39600. LIN -24548.6 -19516.7 bornes 46800. 50400. LIN -19817. -15569. bornes 39600. 43200. LIN -19516.7 -13953.3 bornes 50400. 54000. LIN -15569. -10584. bornes 43200. 46800. LIN -13953.3 -8169.11 bornes 54000. 57600. LIN -10584. -7750. bornes 46800. 50400. LIN -8169.11 -2487.20 bornes 57600. 61200. LIN -7750. -6240.1 bornes 50400. 54000. LIN -2487.20 2775.16 bornes 61200. 64800. LIN -6240.1 -5854.1 bornes 54000. 57600. LIN 2775.16 7324.12 bornes 64800. 68400. LIN -5854.1 1.0e-03 bornes 57600. 61200. LIN 7324.12 0. bornes 68400. 86400. CON 1.0e-03 bornes 61200. 86400. CON 0. 1 .fct ١ .fct ١ extrait 11 fct 11 discret 144 1 extrait 7 fct 7 discret 144 fusione 11 fct 11 fusione 7 fct 7 1 .fct .fct 1 cree fonction i 12 cree fonction i 8 cree valeurs y u cree valeurs y u bornes 0. 21600. CON 0. bornes 0. 28800. CON 0. bornes 21600. 25200. LIN 0. 3443.25 bornes 28800. 32400. LIN 0. 0.907 bornes 25200. 28800. LIN 3443.25 7025.26 bornes 28800. 32400. LIN 7025.26 14145.1 bornes 32400. 36000. CON 0.907 bornes 36000. 39600. CON 0.907 bornes 32400. 36000. LIN 14145.1 22846.6 bornes 39600. 41400. LIN 0.907 1. bornes 36000. 39600. LIN 22846.6 33721.4 bornes 41400. 43200. CON 1. bornes 39600. 43200. LIN 33721.4 48084.0 bornes 43200. 46800. LIN 48084.0 55027.9 bornes 43200. 46800. CON 1. bornes 46800. 50400. CON 1. bornes 46800. 50400. LIN 55027.9 42435.2 bornes 50400. 52200. LIN 1. 0.929 bornes 50400. 54000. LIN 42435.2 29198.0 bornes 52200. 54000. CON 0.929 bornes 54000. 57600. LIN 29198.0 18462.1 bornes 54000. 57600. CON 0.929 bornes 57600. 61200. LIN 18462.1 10908.1 bornes 57600. 61200. LIN 0.929 0. bornes 61200. 64800. LIN 10908.1 4320.01 bornes 61200. 86400. CON 0. bornes 64800. 68400. LIN 4320.01 0.

bornes 68400. 86400. CON 0.	!
!	! Positie van de zon op 21 december 2007
.fct	!
!	.fct
extrait 12 fct 12 discret 144	!
fusione 12 fct 12	cree fonction i 15
!	cree valeurs y u
.fct	bornes 0. 18000. CON 1.0e-03
!	bornes 18000. 21600. LIN 1.0e-03 14463.5
cree fonction i 13	bornes 21600. 25200. LIN 14463.5 14854.1
cree valeurs y u	bornes 25200. 28800. LIN 14854.1 15622.8
bornes 0. 21600. CON 0.	bornes 28800. 32400. LIN 15622.8 17843.7
bornes 21600. 25200. LIN 032378.5	bornes 32400. 36000. LIN 17843.7 21519.1
bornes 25200. 28800. LIN -32378.5 -32204.5	bornes 36000. 39600. LIN 21519.1 26704.5
bornes 28800. 32400. LIN -32204.5 -31829.7	bornes 39600. 43200. LIN 26704.5 28817.4
bornes 32400. 36000. LIN -31829.7 -30547.4	bornes 43200. 46800. LIN 28817.4 24569.2
bornes 36000. 39600. LIN -30547.4 -27623.8	bornes 46800. 50400. LIN 24569.2 19583.7
bornes 39600. 43200. LIN -27623.8 -20354.1	bornes 50400. 54000. LIN 19583.7 16750.0
bornes 43200. 46800. LIN -20354.1 -7014.2	bornes 54000. 57600. LIN 16750.0 15240.1
bornes 46800. 50400. LIN -7014.2 4052.62	bornes 57600. 61200. LIN 15240.1 14854.2
bornes 50400. 54000. LIN 4052.62 9306.26	bornes 61200. 64800. LIN 14854.2 1.0e-03
bornes 54000. 57600. LIN 9306.26 11217.6	bornes 64800. 86400. CON 1.0e-03
bornes 57600. 61200. LIN 11217.6 12020.5	!
bornes 61200. 64800. LIN 12020.5 12204.5	.fct
bornes 64800. 68400. LIN 12204.5 0.	!
bornes 68400. 86400. CON 0.	extrait 15 fct 15 discret 144
!	fusione 15 fct 15
.fct	!
!	.fct
extrait 13 fct 13 discret 144	!
fusione 13 fct 13	cree fonction i 16
!	cree valeurs y u
.fct	bornes 0. 18000. CON 0.
!	bornes 18000. 21600. LIN 0. 3880.42
cree fonction i 14	bornes 21600. 25200. LIN 3880.42 7490.40
cree valeurs y u	bornes 25200. 28800. LIN 7490.40 14145.1
bornes 0. 21600. CON 0.	bornes 28800. 32400. LIN 14145.1 22846.6
bornes 21600. 25200. LIN 0. 0.792	bornes 32400. 36000. LIN 22846.6 34989.6
bornes 25200. 28800. CON 0.792	bornes 36000. 39600. LIN 34989.6 50232.4
bornes 28800. 32400 CON 0.792	bornes 39600. 43200. LIN 50232.4 55027.9
bornes 32400. 34200. CON 0.792	bornes 43200. 46800. LIN 55027.9 42435.2
bornes 34200. 36000. LIN 0.792 0.925	bornes 46800. 50400. LIN 42435.2 28184.0
bornes 36000. 39600. CON 0.925	bornes 50400. 54000. LIN 28184.0 17800.3
bornes 39600. 41400. CON 0.925	bornes 54000. 57600. LIN 17800.3 10399.6
bornes 41400. 43200. LIN 0.925 1.	bornes 57600. 61200. LIN 10399.6 4320.01
bornes 43200. 46800. CON 1.	bornes 61200. 64800. LIN 4320.01 0.
bornes 46800. 48600. CON 1.	bornes 64800. 86400. CON 0.
bornes 48600. 50400. LIN 1. 0.897	!
bornes 50400. 54000. CON 0.897	.fct
bornes 54000. 55800. CON 0.897	!
bornes 55800. 57600. LIN 0.897 0.799	extrait 16 fct 16 discret 144
bornes 57600. 61200. CON 0.799	fusione 16 fct 16
bornes 61200. 64800. CON 0.799	!
bornes 64800. 68400. LIN 0.799 0	.fct
bornes 68400. 86400. CON 0.	!
!	cree fonction i 17
.fct	cree valeurs y u
!	bornes 0. 18000. CON 0.
extrait 14 fct 14 discret 144	bornes 18000. 21600. LIN 032378.5
tusione 14 fct 14	bornes 21600. 25200. LIN -32378.5 -32204.5

bornes 25200. 28800. LIN -32204.5 -31829.7	bornes 7200. 10800. LIN -1671812824.
bornes 28800. 32400. LIN -31829.7 -30547.4	bornes 10800. 14400. LIN -128247750.
bornes 32400. 36000. LIN -30547.4 -27623.8	bornes 14400. 18000. LIN -77501841.1
bornes 36000. 39600. LIN -27623.8 -20354.1	bornes 18000. 21600. LIN -1841.1 4500.
bornes 39600. 43200. LIN -20354.1 -7014.2	bornes 21600. 25200. LIN 4500. 10841.1
bornes 43200. 46800. LIN -7014.2 4052.62	bornes 25200. 28800. LIN 10841.1 16750.
bornes 46800. 50400. LIN 4052.62 9306.26	bornes 28800. 32400. LIN 16750. 21824.1
bornes 50400. 54000. LIN 9306.26 11217.6	bornes 32400. 36000. LIN 21824.1 25717.6
bornes 54000. 57600. LIN 11217.6 12020.5	bornes 36000. 39600. LIN 25717.6 28165.2
bornes 57600. 61200. LIN 12020.5 12204.5	bornes 39600. 43200. LIN 28165.2 29000.
bornes 61200. 64800. LIN 12204.5 0.	bornes 43200. 46800. LIN 29000. 28165.2
bornes 64800. 86400. CON 0.	bornes 46800. 50400. LIN 28165.2 25717.6
!	bornes 50400. 54000. LIN 25717.6 21824.1
.fct	bornes 54000. 57600. LIN 21824.1 16750.
!	bornes 57600. 61200. LIN 16750. 10841.1
extrait 17 fct 17 discret 144	bornes 61200. 64800. LIN 10841.1 4500.
fusione 17 fct 17	bornes 64800. 68400. LIN 45001841.1
1	bornes 68400. 72000. LIN -1841.1 -7750.
.tct	bornes 72000. 75600. LIN -775012824.
!	bornes 75600. 79200. LIN -1282416718.
cree fonction 1 18	bornes 79200. 82800. LIN -1671819165.
cree valeurs y u	bornes 82800. 86400. LIN -19165. 1.0e-03
bornes 0. 18000. CON 0.	
bornes 18000, 21600, LIN 0, 0, 792	.ict
bornes 21000, 25200, CON 0.792	!
bornes 28200, 28600, CON 0.792	extrait 21 fot 21 discret 144
bornes 28800, 30000, CON 0.792	lusione 21 lct 21
bornes 30000. 32400. LIN 0.792 0.925	! fot
bornes 36000, 37800 CON 0.925	
bornes 37800, 37600, LIN 0.925 1	: cree fonction i 22
bornes 39600, 3200, CON 1	cree valeurs v u
bornes 43200, 45200, CON 1	hornes 0 1800 \downarrow LIN 0 1713 21
bornes 45200. 45000. CON 1.	bornes 1800, 3600 I IN 1713 21, 1713 2
bornes 46800 50400 CON 0 897	bonnes 1000. 5000. Env 1715.21 1715.2
bornes 50400, 52200 CON 0.897	bornes 3600-7200 LIN 1713-21-2143-47
bornes 52200, 52200, CON 0.057	bornes 7200 10800 LIN 2143 47 3008 22
bornes 54000, 57600, CON 0.799	bornes 10800, 14400, LIN 3008.22, 4762.32
bornes 57600, 61200, CON 0.799	bornes 14400, 18000, LIN 4762.32 6564.76
bornes 61200, 64800, LIN 0.799 0	bornes 18000, 21600, LIN 6564.76 8436.03
bornes 64800. 86400. CON 0.	bornes 21600, 25200. LIN 8436.03 10908.1
!	bornes 25200. 28800. LIN 10908.1 13580.6
.fct	bornes 28800. 32400. LIN 13580.6 16525.5
!	bornes 32400. 36000. LIN 16525.5 19141.5
extrait 18 fct 18 discret 144	bornes 36000. 39600. LIN 19141.5 21297.5
fusione 18 fct 18	bornes 39600. 43200. LIN 21297.5 22059.9
!	bornes 43200. 46800. LIN 22059.9 22059.9
!HAMMERFEST	bornes 46800. 50400. LIN 22059.9 20557.9
!	bornes 50400. 54000. LIN 20557.9 18462.1
Positie van de zon op 21 juni 2007	bornes 54000. 57600. LIN 18462.1 15910.5
!	bornes 57600. 61200. LIN 15910.5 13580.6
.fct	bornes 61200. 64800. LIN 13580.6 10908.1
!	bornes 64800. 68400. LIN 10908.1 8436.03
cree fonction i 21	bornes 68400. 72000. LIN 8436.03 6108.54
	bornes 72000. 75600. LIN 6108.54 4320.01
cree valeurs y u	bornes 75600. 79200. LIN 4320.01 3008.22
bornes 0. 1800. LIN 1.0e-03 -20000.	bornes 79200. 82800. LIN 3008.22 2143.47
bornes 1800. 3600. LIN -2000019165.	bornes 82800. 86400. LIN 2143.47 0.
	!
bornes 3600. 7200. LIN -1916516718.	.fct

!	bornes 50400. 54000. CON 0.817
extrait 22 fct 22 discret 144	bornes 54000. 57600. CON 0.817
fusione 22 fct 22	bornes 57600. 61200. CON 0.817
!	bornes 61200. 64800. CON 0.817
.fct	bornes 64800. 68400. CON 0.817
!	bornes 68400. 70200. CON 0.817
cree fonction i 23	bornes 70200, 72000, CON 0.817
cree valeurs v u	bornes 72000 75600 CON 0 817
hornes 0, 1800 \downarrow IN 0 $_{-10000}$	bornes 75600, 77400, CON 0.817
bornes $1800, 3600$ LIN $10000, 163/1, 1$	bornes $77400, 70200, 11N 0, 817, 1$
bornes 2600, 7200 LIN 16241 1, 22250	bornes 70200, 82800, CON 1
bornes 3000. 7200. LIN -10341.1 -22230.	bomes 79200. 82800. CON 1.
bornes /200. 10800. LIN -222502/324.1	bornes 82800. 84600. CON 1.
bornes 10800. 14400. LIN -2/324.1 -31217.6	bornes 84600. 86400. LIN 1. 0.
bornes 14400. 18000. LIN -31217.6 -33665.2	
bornes 18000. 21600. LIN -33665.2 -34500.	.fct
bornes 21600. 25200. LIN -3450033665.2	!
bornes 25200. 28800. LIN -33665.2 -31217.6	extrait 24 fct 24 discret 144
bornes 28800. 32400. LIN -31217.6 -27324.1	fusione 24 fct 24
bornes 32400. 36000. LIN -27324.1 -22250.	!
bornes 36000. 39600. LIN -2225016341.1	! Temperatuursafhankelijkheid van het staal
bornes 39600, 43200, LIN -16341,1 -10000,	1 5
bornes 43200, 46800, LIN -10000, -3658.93	DE CONDUCTIVITEIT
bornes 46800 50400 I IN -3658 93 2250	fct
bornes 50400, 54000, LIN 2250, 7324.12	
bornes 54000, 57600, LIN 7324,12, 11217,6	: cross fonction i 11
bomes 57600. 57600. LIN 1217.6 12665.2	
bornes 57600. 61200. LIN 11217.0 13065.2	cree valeurs y u
bornes 61200. 64800. LIN 13665.2 14500.	bornes 4. 800.
bornes 64800. 68400. LIN 14500. 13665.2	analytique "543.33E-03*\$U"
bornes 68400. 72000. LIN 13665.2 11217.6	!
bornes 72000. 75600. LIN 11217.6 7324.12	.fct
bornes 75600. 79200. LIN 7324.12 2250.	!
bornes 79200. 82800. LIN 22503658.93	extrait 41 fct 41 discret 100
bornes 82800. 86400. LIN -3658.93 0.	fusione 41 fct 41
!	!
.fct	!DE CAPACITEIT
1	fct
extrait 23 fct 23 discret 144	
fusione 23 fct 23	cree fonction i 12
1	
! £-4	here a coo
.Ict	bornes 4. 600.
!	analytique "425.+7.73E-01*\$U-1.69E-
cree fonction 1 24	03*\$U*\$U+2.22E-06*\$U*\$U*\$U"
cree valeurs y u	!
bornes 0. 1800. LIN 0. 1.	.fct
bornes 1800. 3600. CON 1.	!
bornes 3600. 7200. LIN 1. 0.817	extrait 42 fct 42 discret 100
bornes 7200. 10800. CON 0.817	fusione 42 fct 42
bornes 10800. 14400. CON 0.817	!
bornes 14400, 18000, CON 0.817	!DE THERMISCHE UITZETTING
bornes 18000 21600 CON 0.817	fct
bornes 21600, 25200, CON 0.817	
bornes 25200, 27000, CON 0.817	; cross fonction i 13
bornes 23200. 27000. CON 0.817	
Donnes 27000. 32400. CON 0.817	ciee valeurs y u
bornes 32400. 34200. CON 0.817	bornes 4. $/50$.
bornes 34200. 36000. LIN 0.817 1.	analytique "(1.2E-05*\$U+0.4E-08*\$U*\$U-
bornes 36000. 39600. CON 1.	2.416E-04)/(\$U-4.1)"
bornes 39600. 43200. CON 1.	!
bornes 43200. 46800. CON 1	.fct
bornes 46800. 48600. CON 1.	!
bornes 48600. 50400. LIN 1. 0.817	extrait 43 fct 43 discret 100

fusione 43 fct 43 #IF (/CALCUL EQ 1) THEN .MAT I 1 NOM "Steel-thermal" BEHA "thermal" COND 1.e-03 NF 41 TEMP ! 46.e-03 CAPA 1. NF 42 TEMP 1486 EMIS 0.65 ABSO 0.65 M 7820.e-9 I 2 NOM "Asfalt-thermal" BEHA "thermal" COND 1.35e-03 ! 0.75 vind ik in de literatuur CAPA 960. 1960 **EMIS 0.88 ABSO 0.88** M 2400.e-9 #ELSEIF (/CALCUL EQ 2) THEN 1 .MAT I 1 NOM "Steel-elast" YT 210000. NT 0.3 M 7820.e-9 A 1E-03 NF 43 TEMP ! 11e-06 I 2 NOM "Asfalt-elast" YT 884. NT 0.3 M 2400.e-9 A 5E-5 **#ENDIF** .SEL GROUP 1 MAI I 1 J 74 I 104 Q 39 A 74 GROUP 2 MAI I 75 J 104 I 104 Q 39 A 30 GROUP 3 MAI I 1000001 J 1000012 GROUP 4 MAI I 1000013 J 1000024 GROUP 5 NOE I 1494 1498 4211 4215 GROUP 6 NOE I 1431 1441 4148 4158 GROUP 11 MAI I 95 J 104 I 104 Q 39 A 10 **GROUP 12 FACE TRANSFO 11** ORIENTATION 0. 1. 0. GROUP 13 MAI I 21 22 29 30 I 65 J 74 I 104 O 39 A 14 GROUP 14 FACE TRANSFO 13

ORIENTATION 0. -1. 0. GROUP 15 MAI I 1 11 21 31 33 39 45 55 65 75 85 95 I 104 Q 39 A 12 **GROUP 16 FACE TRANSFO 15** ORIENTATION -1.0.0. GROUP 17 MAI I 10 20 30 32 38 44 54 64 74 84 94 104 I 104 Q 39 A 12 **GROUP 18 FACE TRANSFO 17** ORIENTATION 1.0.0. GROUP 12 UNION 14 16 18 1 GROUP 21 MAI I 48 J 51 I 104 Q 9 A 4 **GROUP 22 FACE TRANSFO 21** ORIENTATION 0.1.0. GROUP 23 MAI I 24 J 27 I 104 O 9 A 4 **GROUP 24 FACE TRANSFO 23** ORIENTATION 0. -1. 0. GROUP 25 MAI I 32 36 42 I 104 Q 9 A 3 **GROUP 26 FACE TRANSFO 25** ORIENTATION -1.0.0. GROUP 27 MAI I 31 35 41 I 104 Q 9 A 3 **GROUP 28 FACE TRANSFO 27** ORIENTATION 1.0.0. **GROUP 29 FACE TRANSFO 3 ORIENTATION** 0.0.1. GROUP 22 UNION 24 26 28 29 1 GROUP 31 MAI I 1088 J 1091 I 104 O 19 A 4 GROUP 32 FACE TRANSFO 31 ORIENTATION 0. 1. 0. GROUP 33 MAI I 1064 J 1067 I 104 Q 19 A 4 GROUP 34 FACE TRANSFO 33 ORIENTATION 0. -1. 0. GROUP 35 MAI I 1072 1076 1082 I 104 Q 19 A 3 **GROUP 36 FACE TRANSFO 35** ORIENTATION -1.0.0. GROUP 37 MAI I 1071 1075 1081 I 104 Q 19 A 3 **GROUP 38 FACE TRANSFO 37** ORIENTATION 1.0.0. **GROUP 39 FACE TRANSFO 3 ORIENTATION** 0.0.-1. **GROUP 40 FACE TRANSFO 4 ORIENTATION** 0.0.1. GROUP 32 UNION 34 36 38 39 40 GROUP 41 MAI I 3168 J 3171 I 104 Q 9 A 4 **GROUP 42 FACE TRANSFO 41** ORIENTATION 0. 1. 0. GROUP 43 MAI I 3144 J 3147

I 104 Q 9 A 4	GROUP 12
GROUP 44 FACE TRANSFO 43	SOLEIL 1000002 FLUX 110.0 DSOL 1. 1. 1. NF
ORIENTATION 01. 0.	1 2 3 FLF 4 ! 50, 80 of 110
GROUP 45 MAI I 3152 3156 3162	!H: 77, 56, 35
I 104 O 9 A 3	!Mb: 165, 120, 75
GROUP 46 FACE TRANSFO 45	CALC
ORIENTATION -1, 0, 0,	
GROUP 47 MALI 3151 3155 3161	GROUP 22 EMI 0 14
L 104 0 9 A 3	
GROUP 48 FACE TRANSFO 47	
ORIENTATION 1 0 0	GROUP 32 FML0 14
CPOUP 40 EACE TPANSEO 4 OPIENTATION	
0.0 1	
0. 01.	
GROUP 42 UNION 44 40 48 49	GROUP 42 EMI 0.14
! CDOUD 51 MALL (001 L (009	CALC
GROUP 51 MAI 1 6001 J 6008	
I 10 Q 39 A 8 ! Verstijver I	.GEL TEMP 150.
GROUP 52 MAI I 7001 J 7008	
I 10 Q 39 A 8 ! Verstijver 2	.MCE sup sel tbea
GROUP 53 MAI I 8001 J 8012	.MCE sup sel ray3
I 12 Q 39 A 12 ! Verstijver 3	!
GROUP 54 MAI I 10001 J 10018	.SEL
I 18 Q 39 A 18 ! Verstijver 4	GROUPE 61 NOEUD tous
GROUP 55 MAI I 12001 J 12020 !	!
Dwarsverstijver	.CLT
GROUP 60 MAI TOUT	!
GROUP 61 NOE TRANSFO 60	GROU 61 TIN VAL 17.5 ! 17.5 -> zomer : 4.1 ->
	winter
AEL	Hammerfest 9 3
1	Mhandaka 23.7 in december 23.4 in juni
GROUP 1 MAT 1	CLT
GROUP 2 MAT 2	
CPOUD 3 MAT 1	CPOU 12 CONV VAL 50 0E 06
CROUD 4 MAT 1	CNN VAL 100001
CDOUD 51 MAT 1	CININ VAL 1000001
CDOUD 52 MAT 1	
GROUP 52 MAT 1	
GROUP 53 MAT 1	
GROUP 54 MAT 1	GROU 22 CONV VAL 3.0E-06
GROUP 55 MAT I	CNN VAL 854
!	
! Rotatie van de koker over 3°	.CLT
!	!
.3point	GROU 32 CONV VAL 3.0E-06
!	CNN VAL 2999
I 1 x 20000. y 0. z 0.	!
I 2 x 20000. y 0. z -20000.	.CLT
!	!
.3droite	GROU 42 CONV VAL 3.0E-06
!	CNN VAL 497
I 1 point 1 2	!
1	#ELSEIF (/CALCUL EO 2) THEN
I CMA	
	CI M
Rotation -3.1 1.3 normaal	GROUP 5 FIX COMP 1 2 3
INCOEMENT A EXECUTE 1 NOTION	CDOUD 6 FIX COMD 2
INCREMENT O EAECUTE I INDEUDS	
HE (/CALCULEO 1) THEN	CROUD 2 ACCEL VAL 09810 0.
HIF (/CALCUL EQ I) IHEN	UCROUP 2 ACCEL VAL 09810 0.
! 	GROUP 3 ACCEL VAL 09810 0.
.K3D	'GKOUP 4 ACCEL VAL 09810 0.
1	

#ENDIF	ARCHIVE noe 775 STYPE 9120
!	ARCHIVE noe 772 STYPE 9120
#IF (/CALCUL EQ 1) THEN	ARCHIVE noe 1633 STYPE 9120
1	ARCHIVE noe 1630 STYPE 9120
.SUB	ARCHIVE noe 2205 STYPE 9120
!	ARCHIVE noe 2202 STYPE 9120
I1	ARCHIVE noe 2920 STYPE 9120
MECA 42	ARCHIVE noe 2917 STYPE 9120
CIBL 1	ARCHIVE noe 3492 STYPE 9120
IREF 0	ARCHIVE noe 3489 STYPE 9120
RESO 5	ARCHIVE noe 4207 STYPE 9120
ITMA 99	ARCHIVE noe 4204 STYPE 9120
TIME 0 A 21600 PAS 3600	ARCHIVE noe 5065 STYPE 9120
TIME 21600 A 75600 PAS 1800	ARCHIVE noe 5062 STYPE 9120
TIME 75600 A 86400 PAS 3600	ARCHIVE noe 5780 STYPE 9120
111111 / 5000. 11 00 100. 11 15 5000.	ARCHIVE noe 5777 STYPE 9120
,	
· SALARCHIVE STRUCT STYPE 1802 1804	· ARCHIVE noe 137 STYPE 9120
1805 1806	ARCHIVE noe 44 STYPE 9120
ADCHIVE STRUCT STYDE 2511	ARCHIVE not 852 STVDE 0120
ARCHIVE STRUCT STYDE 1411	ARCHIVE not 352 ST TFE 5120
ARCHIVE STRUCT STITE 1411 ARCHIVE per 20 STVDE 0120	ARCHIVE noc 1710 STYDE 0120
ARCHIVE noe 66 STYDE 0120	ARCHIVE noe $1/10$ ST TFE 9120 A DCHIVE noe 1617 STYDE 0120
ARCHIVE noe 60 ST TPE 9120	ARCHIVE not 1017 ST TPE 9120
ARCHIVE noe 6 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2282 STYPE 9120
ARCHIVE noe 132 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2189 STYPE 9120
ARCHIVE noe 754 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2997 STYPE 9120
ARCHIVE noe 781 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2904 STYPE 9120
ARCHIVE noe 721 STYPE 9120	ARCHIVE noe 3569 STYPE 9120
ARCHIVE noe 847 STYPE 9120	ARCHIVE noe 3476 STYPE 9120
ARCHIVE noe 1612 STYPE 9120	ARCHIVE noe 4284 STYPE 9120
ARCHIVE noe 1639 STYPE 9120	ARCHIVE noe 4191 STYPE 9120
ARCHIVE noe 1579 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5142 STYPE 9120
ARCHIVE noe 1705 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5049 STYPE 9120
ARCHIVE noe 2184 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5857 STYPE 9120
ARCHIVE noe 2211 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5764 STYPE 9120
ARCHIVE noe 2151 STYPE 9120	!
ARCHIVE noe 2277 STYPE 9120	ARCHIVE noe 104 STYPE 9120
ARCHIVE noe 2899 STYPE 9120	ARCHIVE noe 52 STYPE 9120
ARCHIVE noe 2926 STYPE 9120	ARCHIVE noe 99 STYPE 9120
ARCHIVE noe 2866 STYPE 9120	ARCHIVE noe 819 STYPE 9120
ARCHIVE noe 2992 STYPE 9120	ARCHIVE noe 767 STYPE 9120
ARCHIVE noe 3471 STYPE 9120	ARCHIVE noe 814 STYPE 9120
ARCHIVE noe 3498 STYPE 9120	ARCHIVE noe 1677 STYPE 9120
ARCHIVE noe 3438 STYPE 9120	ARCHIVE noe 1625 STYPE 9120
ARCHIVE noe 3564 STYPE 9120	ARCHIVE noe 1672 STYPE 9120
ARCHIVE noe 4186 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2249 STYPE 9120
ARCHIVE noe 4213 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2197 STYPE 9120
ARCHIVE noe 4153 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2244 STYPE 9120
ARCHIVE noe 4279 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2964 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5044 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2912 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5071 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2959 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5011 STYPE 9120	ARCHIVE noe 3536 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5137 STYPE 9120	ARCHIVE noe 3484 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5759 STYPE 9120	ARCHIVE noe 3531 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5786 STYPE 9120	ARCHIVE noe 4251 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5726 STYPE 9120	ARCHIVE noe 4199 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5852 STYPE 9120	ARCHIVE noe 4246 STYPE 9120
!	ARCHIVE noe 5109 STYPE 9120
ARCHIVE noe 60 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5057 STYPE 9120
ARCHIVE noe 57 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5104 STYPE 9120

ARCHIVE noe 5824 STYPE 9120	ARCHIVE noe 2916 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5772 STYPE 9120	ARCHIVE noe 3485 STYPE 9120
ARCHIVE noe 5819 STYPE 9120	ARCHIVE noe 3488 STYPE 9120
!	ARCHIVE noe 4200 STYPE 9120
ARCHIVE noe 94 STYPE 9120	ARCHIVE noe 4203 STYPE 9120
ARCHIVE noe 127 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5058 STYPE 9120
ARCHIVE noe 34 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5061 STYPE 9120
ARCHIVE noe 809 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5773 STYPE 9120
ARCHIVE noe 842 STYPE 9120	ARCHIVE noe 5776 STYPE 9120
$\Delta BCHIVE noe 7/9 STYPE 9120$	
$\Delta RCHIVE noe 1667 STVPE 9120$	SAM non1 2
ADCHIVE noc 1700 STVDE 0120	SAM hop 2
ARCHIVE HOE 1700 STIFE 9120 ADCHIVE noo 1607 STYDE 0120	! #ELSEIE (/CALCULEO 2) THEN
ARCHIVE HOE 1007 ST IFE 9120	#ELSEIF (/CALCUL EQ 2) THEN
ARCHIVE 1100 2259 ST 1 PE 9120	
ARCHIVE noe 2272 STYPE 9120	SAM IUN 39
ARCHIVE noe 2179 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 2954 STYPE 9120	.SUB
ARCHIVE noe 2987 STYPE 9120	!
ARCHIVE noe 2894 STYPE 9120	I 1
ARCHIVE noe 3526 STYPE 9120	MECA 22
ARCHIVE noe 3559 STYPE 9120	CIBL 1
ARCHIVE noe 3466 STYPE 9120	IREF 1
ARCHIVE noe 4241 STYPE 9120	INLY 1
ARCHIVE noe 4274 STYPE 9120	RESO 5
ARCHIVE noe 4181 STYPE 9120	ITMA 99
ARCHIVE noe 5099 STYPE 9120	TIME 0. A 86400. PAS 3600.
ARCHIVE noe 5132 STYPE 9120	!TIME 21600. A 75600. PAS 1800.
ARCHIVE noe 5039 STYPE 9120	!TIME 75600. A 86400. PAS 3600.
ARCHIVE noe 5814 STYPE 9120	!
ARCHIVE noe 5847 STYPE 9120	#ENDIF
ARCHIVE noe 5754 STYPE 9120	!
1	EXIT
ARCHIVE noe 48 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 45 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 763 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 760 STYPE 9120	
$\Delta RCHIVE noe 1621 STYPE 9120$	
ADCHIVE not 1618 STVDE 0120	
ADCHIVE nos 2102 STYDE 0120	
ARCHIVE not 2193 ST TEE 9120 ADCHIVE not 2100 STVDE 0120	
ARCHIVE 100 2190 51 1 PE 9120	
ARCHIVE 100 2908 ST TPE 9120	
AKCHIVE noe 2905 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 3480 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 3477 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 4195 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 4192 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 5053 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 5050 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 5768 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 5765 STYPE 9120	
!	
ARCHIVE noe 53 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 56 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 768 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 771 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 1626 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 1629 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 2198 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 2201 STYPE 9120	
ARCHIVE noe 2913 STYPE 9120	

Referenties

- [1] Studiebureau *Greisch*, vakgebied kunstwerken, viaducten. Online beschikbaar op: <u>http://www.greisch.com/domaine/viaducs-nl.html</u>
- [2] De Vlaamse overheid, het Agentschap Wegen en Verkeer, projecten in Vlaams-Brabant, Viaduct van Vilvoorde. Online beschikbaar op: <u>http://wegen.vlaanderen.be/wegen/projecten/vlaams-brabant/viaduct/</u>
- [3] Samcef user Manual 11.0, Samtech, 2005
- [4] J.M. Lucas, A. Berred, C. Louis, Thermal actions on a steel box-girder bridge,
 Proceedings of the institution of Civil Engineers, Structures & Buildings, May 2003
- [5] S.P. Chang and C.K. Im, Thermal behaviour of composite box-girder bridges, *Proceedings of the institution of Civil Engineers, Structures & Buildings*, 2000
- [6] Marc Emerson Bsc, Steel box bridge temperatures in Australia and the United Kingdom, TRRL, Crowthorne, 1980
- [7] Eurocode 1, Ontwerpbeginselen en belastingen op bouwwerken Deel 2.5: Thermische belastingen, 1997
- [8] Eurocode 3, Ontwerp van stalen draagsystemen Deel 1.2: Algemene regels Brandbeveiligend ontwerp, 1999
- [9] Prof. Dr. Ir. Arch. Arnold Janssens, Bouwfysische aspecten van gebouwen, Universiteit Gent, 2005
- [10] Volkssterrenwacht Urania, waarnemingsinformatie, figuur azimut en zonnehoogte.Online beschikbaar op: <u>www.urania.be/sterrenkunde/images/horizoncoor.png</u>
- [11] Het Koninklijk Meteorologisch Instituut België. Online beschikbaar op: http://www.meteo.be/meteo/view/nl/65239-Home.html?newlanguage=true
- [12] Engineering fundamentals, general properties of steels. Online beschikbaar op: http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/steels_properties.cfm
- T. O. Medani, Asphalt surfacing applied to orthotropic steel bridge decks A literature review, Technical Report 7-01-127-1, Delft University of Technology, March 2001
- [14] Sunspot, software. Online beschikbaar op: <u>http://www.spoorzoeker.nu/software/sunspot/index.html</u>
- [15] Space Weather Highlights, SEC PRF 1687, January 2008. Online beschikbaar op: <u>http://www.swpc.noaa.gov/weekly/pdf/prf1687.pdf</u>

- [16] European Commission, Joint Research Centre, PVGIS Solar Irradiation Data. Online beschikbaar op: <u>http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php?lang=en&map=europe</u>
- [17] Maxim Dallas semiconductor, Digital thermometer and thermostat, DS1621. Online beschikbaar op: <u>www.maxim-ic.com</u>