



Temperatuurverloop in een pas aangebrachte asfaltlaag

Olivier Pilate



Researchverslag

RV 42/06

Temperatuurverloop in een pas aangebrachte asfaltlaag

door

Olivier PILATE

RV 42/06

Uitgegeven door het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW)
Instelling erkend bij toepassing van de besluitwet van 30 januari 1947
Woluwedal 42 – 1200 Brussel

Alle rechten voorbehouden



Dankbetuiging

De auteur dankt C. Van Rooten, directeur-generaal van het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW), en C. Moraux, directeur en hoofd van de OCW-afdeling *Veiligheid en wegbeheer*, omdat zij met dit onderzoek hebben ingestemd.

In het bijzonder wenst hij D. Grillet en Y. Gobert van de industriële hogeschool ECAM te danken voor de modellering van de verschillende soorten van straling, voor de ontwikkeling van de software om het temperatuurverloop volgens het volle eindmodel vooruit te berekenen en voor hun hulp bij de toetsing van het vooruitberekeningsmodel op bouwplaatsen.

Hij is ook dank verschuldigd aan D. Léonard voor zijn waardevolle hulp bij de ontwikkeling van het eerste vooruitberekeningsmodel, aan J. Feremans voor de tijd en het werk die hij aan de in-situmetingen heeft besteed en aan B. Berlémont voor de implementatie van de vooruitberekeningsprogrammatuur EvalTREB LE.

Ten slotte dankt hij zijn collega's van de dienst *Informatie*, M. Van Bogaert en F. Verhoeven, voor de vertaling en de opmaak van dit researchverslag.



Inhoud

Dankbetuiging

| | |
|--|----|
| Woord vooraf | 1 |
| Deel A – Berekeningsmodellen | 3 |
| A.1 Eerste, beperkte model | 5 |
| A.1.1 Temperatuurverloop in een pas aangebrachte asfaltlaag | 5 |
| A.1.1.1 Warmteoverdracht door geleiding | 6 |
| A.1.1.2 Warmteoverdracht door convectie | 6 |
| A.1.1.3 Temperatuurverloop in de wegconstructie | 7 |
| A.1.2 Toepassing van het eerste, beperkte model | 10 |
| A.1.3 Bepaling van de invoerparameters voor het eerste, beperkte model | 10 |
| A.1.3.1 Convectiecoëfficiënt | 10 |
| A.1.3.2 Thermische parameters van wegenbouwmaterialen | 11 |
| A.1.3.3 Aanbrengingstemperatuur van het asfalt | 11 |
| A.1.3.4 Gemiddelde temperatuur van het baanlichaam | 11 |
| A.1.3.5 Temperatuur van de asfaltlaag na afkoeling | 11 |
| A.1.4 Toetsing op bouwplaatsen en beperkingen van het eerste, beperkte model | 14 |
| A.1.4.1 Methodiek | 14 |
| A.1.4.2 Parameters van de bouwplaatsen | 16 |
| A.1.4.3 Vergelijking tussen metingen en berekeningen | 16 |
| A.1.4.3.1 Bouwplaats 3 | 16 |
| A.1.4.3.2 Bouwplaats 4 | 18 |
| A.1.4.4 Beperkingen van het eerste, beperkte model | 19 |
| A.2 Warmteoverdracht door straling | 21 |
| A.2.1 Soorten van zonnestraling | 21 |
| A.2.1.1 Factoren die de intensiteit van de zonnestraling beïnvloeden | 21 |
| A.2.1.1.1 Grootheden van tijd | 21 |
| A.2.1.1.2 Elliptische baan van de aarde om de zon | 23 |
| A.2.1.1.3 Coördinaten van de zon | 23 |
| A.2.1.1.4 Bewolkingsgraad | 25 |
| A.2.1.1.5 Parameters van de plaats | 25 |
| A.2.1.1.6 Extinctie van de zonnestraling | 26 |
| A.2.1.2 Berekening van de directe instraling | 28 |
| A.2.1.2.1 Directe instraling bij een heldere hemel | 28 |
| A.2.1.2.2 Directe instraling bij een bewolkte hemel | 29 |
| A.2.1.2.3 Directe instraling bij een half bewolkte hemel | 29 |
| A.2.1.3 Berekening van de diffuse instraling | 29 |
| A.2.1.3.1 Diffuse instraling bij een heldere hemel | 29 |

| | | |
|---|---|-----------|
| A.2.1.3.2 | Diffuse instraling bij een bewolkte hemel | 30 |
| A.2.1.3.3 | Diffuse instraling bij een half bewolkte hemel | 30 |
| A.2.1.4 | Berekening van de totale instraling | 31 |
| A.2.1.5 | Albedo | 31 |
| A.2.2 | Aardstraling en atmosferische straling | 32 |
| A.3 | Vol eindmodel | 33 |
| A.3.1 | Hypothesen van het volle eindmodel | 33 |
| A.3.2 | Bepaling van de variaties van de luchttemperatuur | 34 |
| A.3.3 | Modellering van het temperatuurverloop in de wegconstructie | 35 |
| A.3.3.1 | Vergelijkingen voor het temperatuurveld | 35 |
| A.3.3.2 | Randvoorwaarden | 35 |
| A.3.3.2.1 | Scheidingsvlak tussen de lucht en de asfaltlaag | 35 |
| A.3.3.2.2 | Scheidingsvlak tussen twee lagen | 36 |
| A.3.3.2.3 | Voorwaarde op een diepte van 1 m | 37 |
| A.3.3.3 | Temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrenging van de nieuwe asfaltlaag | 37 |
| A.3.3.4 | Stelsel van vergelijkingen | 37 |
| A.3.4 | Toepassing van het volle eindmodel | 38 |
| A.3.5 | Toetsing van het volle eindmodel op bouwplaatsen | 38 |
| A.3.5.1 | Methodiek | 38 |
| A.3.5.2 | Parameters van de bouwplaatsen | 38 |
| A.3.5.3 | Vergelijking tussen metingen en berekeningen | 39 |
| A.3.5.3.1 | Bouwplaats 4 | 39 |
| A.3.5.3.2 | Nieuwe bouwplaatsen | 40 |
| A.3.5.4 | Commentaar | 43 |
| A.3.6 | Onderzoek naar de invloed van variërende invoerparameters | 43 |
| A.3.6.1 | Keuze van de parameters | 43 |
| A.3.6.2 | Temperatuurverloop in de wegconstructie | 45 |
| A.3.6.3 | Invloed van de windsnelheid op het afkoelingsproces | 45 |
| A.3.6.4 | Invloed van de luchttemperatuur en van de soorten van straling op het afkoelingsproces | 46 |
| A.3.6.5 | Invloed van de bewolgingsgraad op het afkoelingsproces | 48 |
| A.3.6.6 | Invloed van het aanbrengingstijdstip op het afkoelingsproces | 49 |
| Deel B – Wachtijddiagrammen en vooruitberekeningsprogrammatuur | | 51 |
| B.1 | Gebruik van de wachtijddiagrammen | 53 |
| B.1.1 | Beperkingen | 53 |
| B.1.2 | Gebruik van de wachtijddiagrammen | 54 |
| B.2 | Gebruik van de vooruitberekeningsprogrammatuur | 55 |
| B.3 | Wachtijddiagrammen | 57 |
| Conclusies en vooruitzichten | | 65 |
| Lijst van de figuren | | 67 |
| Lijst van de tabellen | | 69 |
| Lijst van de foto's | | 70 |
| Lijst van de symbolen en afkortingen | | 71 |
| Literatuur | | 73 |

WOORD VOORAF

Als een weg na de aanbrenging van een nieuwe asfaltlaag te spoedig voor het verkeer wordt opengesteld, kan de verharding voortijdig schade oplopen. Die schade kan de vorm aannemen van vroegtijdige spoorvorming (door naverdichting en/of vloeï van het pas aangebrachte asfalt), van onmiddellijke rafeling, enz.

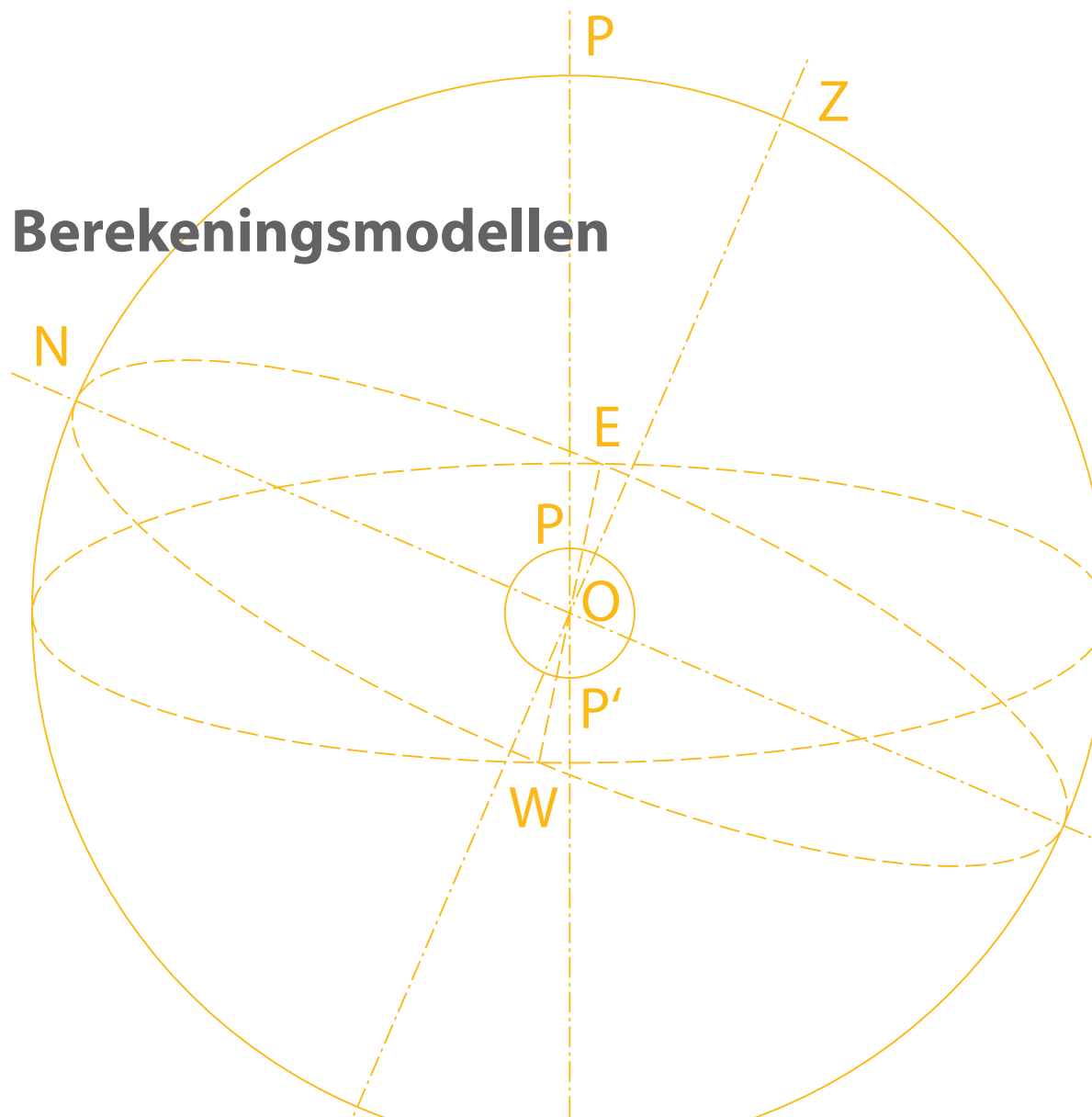
Op verzoek van de wegbeherende overheden en de aannemers heeft het OCW een onderzoeksproject opgezet om na te gaan hoeveel tijd een pas aangebrachte asfaltlaag nodig heeft om af te koelen. De onderliggende bedoeling is de wachttijd tussen de aanbrenging van het asfalt en de wederopenstelling voor het verkeer aan te passen.

Daartoe is een model ontwikkeld om de temperatuur in een nieuwe asfaltlaag vooruit te berekenen. In een eerste benadering is enkel rekening gehouden met warmteoverdracht door geleiding en convectie. Het eerste, beperkte model is getoetst aan metingen in situ. Hoewel de metingen op het werk en de simulaties met het vooruitberekingsmodel meestal goed gecorreleerd waren, is in extreme situaties (veel bezonning) gebleken dat zonnestraling wel degelijk de afkoeling van een pas aangebrachte asfaltlaag beïnvloedt. Bovendien was ervan uitgegaan dat de luchttemperatuur over de volledige periode van afkoeling constant is.

In het model dient dus rekening te worden gehouden met alle factoren die het afkoelingsproces van asfalt beïnvloeden. Daarom is ook de warmteoverdracht door zonnestraling in het model verwerkt en zijn de variaties van de luchttemperatuur bepaald. Het aldus vervolledigde vooruitberekingsmodel is eveneens toegepast en getoetst op werken in uitvoering. Dit gebeurde in het kader van een afstudeerscriptie aan de industriële hogeschool ECAM.

Ten slotte is een stelsel van diagrammen ontwikkeld die, afhankelijk van de luchttemperatuur, de windsnelheid, de zonnestraling en de laagdikte, de minimale wachttijd tussen het einde van de aanbrenging van het asfalt en de wederopenstelling voor het verkeer aangeven voor extreme situaties. Om het tijdstip van de wederopenstelling voor het verkeer in andere gevallen vooruit te kunnen berekenen, is een gebruiksvriendelijke programmatuur aangeleverd.

Deel A



Hoofdstuk A.1

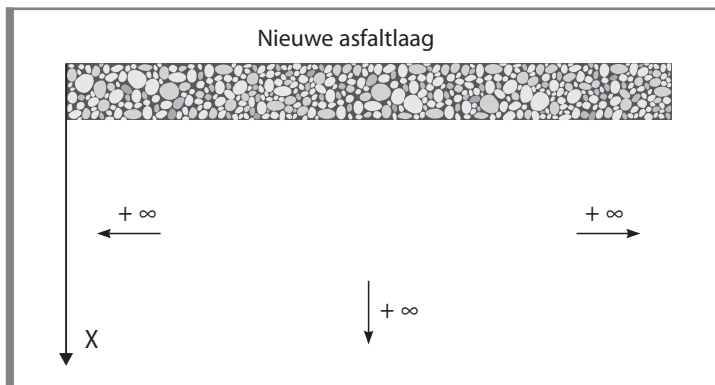
Eerste, beperkte model

In een eerste benadering is een model ontwikkeld om de temperatuur in een nieuwe asfaltlaag vooruit te berekenen, waarbij geen rekening wordt gehouden met de invloed van de zonnestraling. Er is inderdaad van uitgegaan dat die invloed te verwaarlozen is in vergelijking met de warmtegeleiding tussen de asfaltlaag en het baanlichaam, en met de convectie tussen de asfaltlaag en de lucht.

Dit hoofdstuk beschrijft hoe het eerste vooruitberekingsmodel tot stand is gekomen en wat de beperkingen ervan zijn.

A.1.1 Temperatuurverloop in een pas aangebrachte asfaltlaag

In de eerste benadering wordt het verloop van de temperatuur in een nieuwe asfaltlaag bepaald door de wegconstructie als volgt te modelleren:



Figuur A.1.1 Modelling van de wegconstructie

Vlak na de aanbrenging is de temperatuur in de nieuwe asfaltlaag per definitie gelijk aan de aanbrengingstemperatuur (T_{aanbr}). Op dat ogenblik is de op figuur A.1.1 weergegeven wegconstructie thermisch in onevenwicht. Er treden twee soorten van warmteoverdracht op om het evenwicht te herstellen (er wordt geen rekening gehouden met zonnestraling):

- een *geleidingswarmtestroom* in het medium (in de nieuwe asfaltlaag en in het baanlichaam);
- een *convectiestroom* op het scheidingsvlak tussen de lucht en de nieuwe asfaltlaag.

We onderscheiden vier soorten of toestanden van thermisch onevenwicht:

- een *permanent onevenwicht*, waarbij de temperatuur in elk punt van het medium constant blijft en het onevenwicht in stand wordt gehouden door de warmtebronnen;
- een *vast periodiek onevenwicht*, waarbij zich in elk punt van het medium periodieke temperatuurschommelingen voordoen, los van het temperatuurveld in de begintoestand;
- een *tijdelijk onevenwicht*, waarbij een systeem door een wijziging in de warmtebronnen op het begintijdstip van een (permanente of evenwichtige) aanvangstoestand naar een (permanente of

evenwichtige) eindtoestand evolueert. Het temperatuurveld¹ hangt af van het temperatuurveld in de begintoestand, maar die invloed neemt af in de tijd;

- een *veranderlijk onevenwicht*, waarbij de warmtebronnen voortdurend evolueren en het temperatuurveld afhangt van de ogenblikkelijke en voorgaande waarden van de warmtebronnen.

Voor dit onderzoek wordt van een tijdelijk onevenwicht uitgegaan.

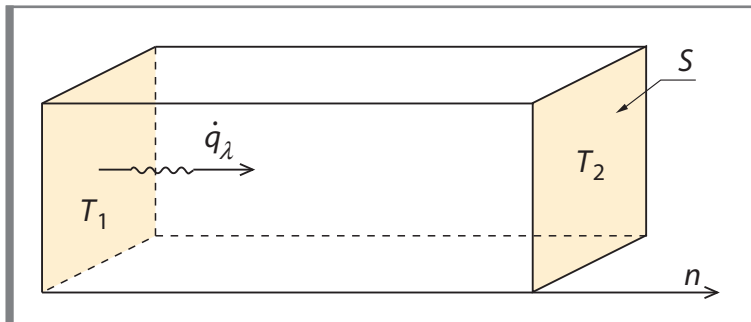
A.1.1.1 Warmteoverdracht door geleiding

Warmtegeleiding wordt beschreven door de fenomenologische wet van Fourier. Voor het specifieke geval van een isotrope constructie gebeurt dat als volgt:

$$\dot{q}_\lambda = -\lambda \frac{\delta T}{\delta n} \quad (1)$$

\dot{q}_λ dichtheid van de warmtegeleidingsstroom (W/m²) in richting n ;
 T temperatuurveld (°C);
 λ warmtegeleidingsvermogen van het medium (W/(m.°C)).

De wet van Fourier beschrijft hoe geleidingswarmtestromen in een medium tot stand komen en evolueren. In figuur A.1.2 is het verloop van de dichtheid van een warmtestroom in een vast medium weergegeven.



Figuur A.1.2 Verloop van de dichtheid van een warmtestroom in een vast medium

A.1.1.2 Warmteoverdracht door convectie

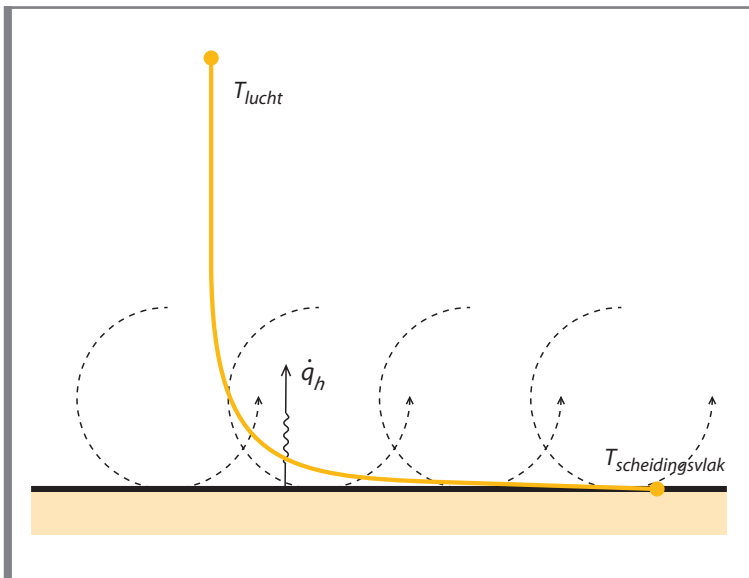
Convectie is een warmtestroom die zich voordoet op het scheidingsvlak tussen een vast en een vloeibaar medium. In dit geval is de lucht het vloeibare medium. De dichtheid van de convectiestroom wordt als volgt bepaald:

$$\dot{q}_h = h (T(M) - T_{lucht}) \quad (2)$$

\dot{q}_h dichtheid van de convectiewarmtestroom (W/m²);
 h convectiecoëfficiënt (W/m².°C);
 $T(M)$ temperatuur in een willekeurig punt M van het scheidingsvlak waar de convectiestroom optreedt (°C);
 T_{lucht} luchttemperatuur (°C), gemeten op een voldoende grote afstand van het scheidingsvlak.

In figuur A.1.3 is het verloop van de temperatuur op het scheidingsvlak van een vast medium weergegeven.

¹ Een temperatuurveld wordt bepaald met de functie $f(n,t)$, bijvoorbeeld $T = f(n,t)$



Figuur A.1.3 Verloop van de temperatuur op het scheidingsvlak van een vast medium

Het oppervlak van de wegconstructie, waarin zich warmtegeleiding voordoet, staat in contact met de lucht. Op het scheidingsvlak tussen lucht en asfaltlaag vindt warmteoverdracht tussen twee media plaats. Voor dit soort van uitwisseling geldt de wet:

$$-\lambda \left[\frac{\delta T}{\delta n} \right]_M = h (T(M) - T_{lucht}) \quad (3)$$

Deze wet wordt ook de «voorwaarde van de derde soort» of «randvoorwaarde van Fourier» genoemd.

A.1.1.3 Temperatuurverloop in de wegconstructie

Het temperatuurverloop in de wegconstructie – van een gegeven begintoestand tot het nieuwe thermische evenwicht is bereikt – wordt gevonden door een stelsel van vergelijkingen op te lossen, waarbij het uitwisselingsoppervlak zich op een diepte $x = 0$ onder het nieuwe wegoppervlak bevindt:

$$\begin{cases} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} - \frac{1}{a} \frac{\delta T_i}{\delta t} = 0 \\ -\lambda \left. \frac{\delta T}{\delta x} \right|_{x=0} + hT \Big|_{x=0} = hT_{lucht} \\ T(x, t=0) = f(x) \end{cases} \quad (4)$$

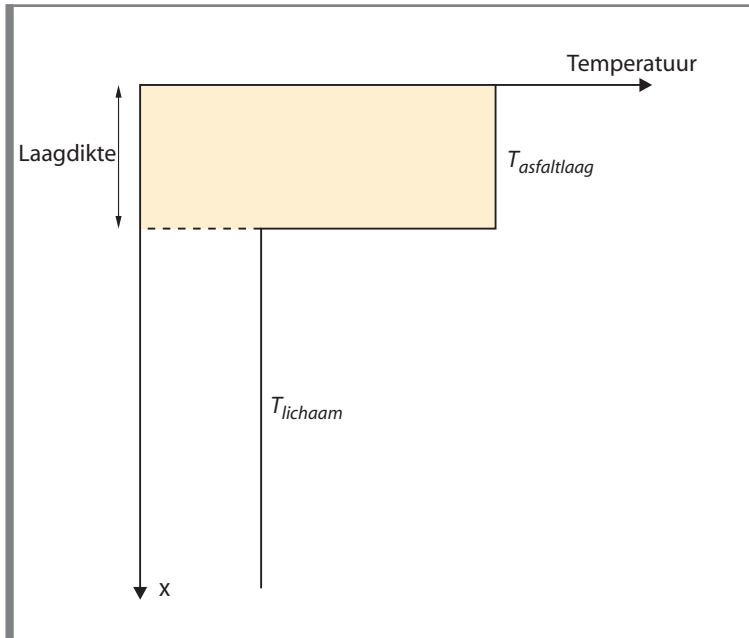
| | |
|------------------------|---|
| $a = \lambda / \rho c$ | thermische diffusiviteit (m^2/s); |
| x | diepte gemeten vanaf het nieuwe wegoppervlak ($x = 0$) (m); |
| $f(x)$ | functie ter bepaling van de temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrenging ($^{\circ}C$); |
| ρ | volumieke massa (kg/m^3); |
| c | soortelijke warmte ($J/kg.^{\circ}C$). |

Om dit stelsel op te lossen, worden de volgende hypothesen aangenomen:

- in de verticale richting is het lichaam halfoneindig (figuur A.1.1);
- in het horizontale vlak is het lichaam oneindig (figuur A.1.1);
- de gehele constructie is isotroop, met één waarde voor de volumieke massa en de geleidingscoëfficiënt;
- de windsnelheid is over de gehele beschouwde periode constant;

- de luchttemperatuur is over de gehele beschouwde periode constant;
- de temperatuur van de lagen onder de nieuwe asfaltlaag is op het begintijdstip gelijk aan het jaargemiddelde;
- er wordt geen rekening gehouden met randeffecten (voor de pas aangebrachte laag).

Op figuur A.1.4 is de met de bovengenoemde functie $f(x)$ berekende temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrenging weergegeven.



Figuur A.1.4 *Temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrenging van een asfaltlaag*

Het temperatuurveld dat door het stelsel van vergelijkingen (4) wordt bepaald, bestaat uit twee componenten:

$$T(x, t) = T_1(x, t) + T_2(x, t) \quad (5)$$

$T_1(x, t)$ is het temperatuurveld dat zich voordoet in de constructie als de convectiestroom = 0 en de temperatuur op het begintijdstip in alle punten van de constructie wordt bepaald door de functie $f(x)$.

$T_1(x, t)$ is dus de oplossing van het stelsel:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0 \\ -\lambda \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0} + hT_1|_{x=0} = hT_{lucht} \\ T_1(x, t=0) = f(x) \end{cases} \quad (6)$$

Om dit stelsel van vergelijkingen op te lossen, zoeken we een oplossing van de volgende soort:

$$T(x, t) = g(x)h(t) \quad (7)$$

Door integratie, waarbij rekening wordt gehouden met de randvoorwaarden in richting x , verkrijgen we:

$$T(x, t; \alpha) = A \sin(\alpha x + B) \exp(-a\alpha^2 t) \quad (8)$$

A, B willekeurige constanten;
 α numerieke parameter.

Ref. 9 geeft de volledige uitwerking. De oplossing wordt verkregen met de relatie:

$$T_1(x, t) = \int_0^{+\infty} \frac{2 \left[\alpha \cos(\alpha x) + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x) \right] \exp(-a\alpha^2 t)}{\pi \left[a^2 + \frac{h^2}{\lambda^2} \right]} \left[\int_0^{\infty} f(x') \left[\alpha \cos(\alpha x') + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x') \right] dx' \right] d\alpha \quad (9)$$

Het temperatuurveld $T_2(x, t)$ is convectief in evenwicht met een luchttemperatuur $= T_{lucht}$. Op het begintijdstip is het temperatuurveld in de gehele constructie $= 0$. Het tweede temperatuurveld wordt door het volgende stelsel van vergelijkingen bepaald:

$$\begin{cases} \frac{\delta^2 T_2}{\delta x^2} - \frac{1}{a} \frac{\delta T_2}{\delta t} = 0 \\ -\lambda \frac{\delta T_2}{\delta x} \Big|_{x=0} + hT_2 \Big|_{x=0} = hT_{lucht} \\ T_2(x, t=0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Hiervoor is ook een oplossing uitgewerkt:

$$T_2(x, t) = T_{lucht} \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{at}} \right] - T_{lucht} \exp \left[\frac{h}{\lambda} x + \frac{h^2}{\lambda^2} at \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h}{\lambda} \sqrt{at} \right] \quad (11)$$

Het temperatuurverloop in de nieuwe asfaltlaag wordt gevonden door de volgende relatie op te lossen:

$$T(x, t) = \int_0^{+\infty} \frac{2 \left[\alpha \cos(\alpha x) + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x) \right] \exp(-a\alpha^2 t)}{\pi \left[a^2 + \frac{h^2}{\lambda^2} \right]} \left[\int_0^{\infty} f(x') \left[\alpha \cos(\alpha x') + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x') \right] dx' \right] d\alpha \quad (12)$$

$$+ T_{lucht} \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{at}} \right] - T_{lucht} \exp \left[\frac{h}{\lambda} x + \frac{h^2}{\lambda^2} at \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h}{\lambda} \sqrt{at} \right]$$

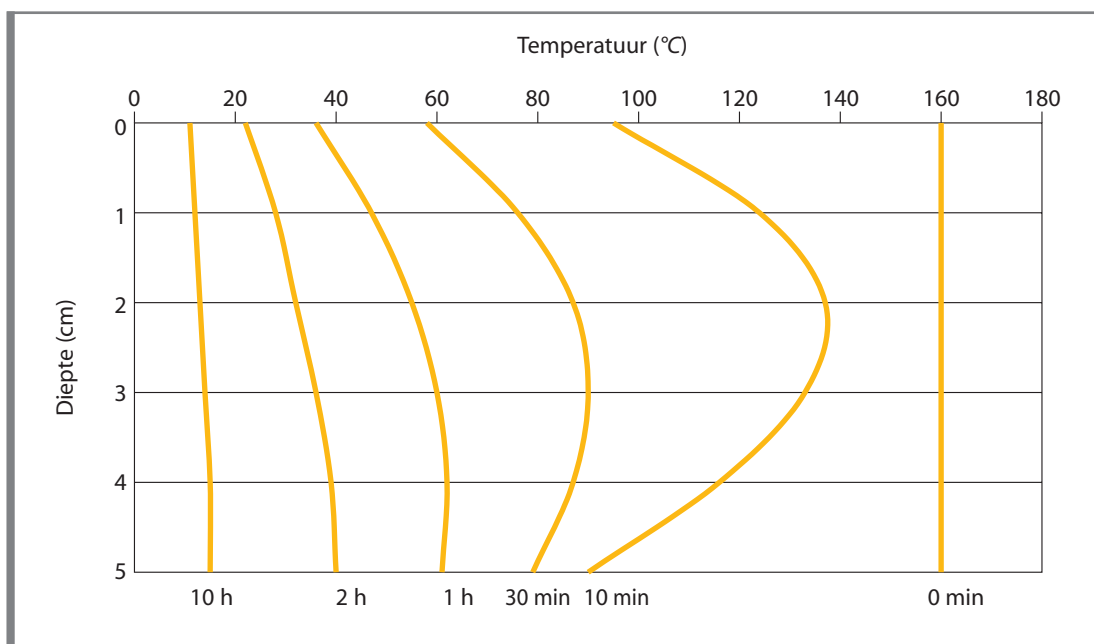
Op die manier kan dus worden nagegaan of de relatie (12) goed correleert met het stelsel van vergelijkingen (4) en of de oplossing correct is.

A.1.2 Toepassing van het eerste, beperkte model

De relatie (12) wordt toegepast in de programmeertaal C++. De integraal in het eerste lid van de som (relatie (9)) benaderen we met de methode van Simpson.

Met dit hulpmiddel kan de temperatuur in asfalt op een gegeven diepte en tijdstip na de aanbrenging worden berekend. Zij hangt af van de aanbrengingstemperatuur van het asfalt, van de luchttemperatuur, van de convectiecoëfficiënt op het scheidingsvlak tussen de lucht en de asfaltlaag, evenals van de thermische parameters van de nieuwe asfaltlaag.

Op figuur A.1.5 zijn de met deze relatie (12) berekende temperaturen in een 5 cm dikke asfaltlaag uitgezet op verschillende tijdstippen na de aanbrenging bij een mengseltemperatuur van 160 °C en een luchttemperatuur van 10 °C. Daarbij is rekening gehouden met een matige windsnelheid ($v_{wind} \approx 6$ m/s) via een convectiecoëfficiënt $h = 30$ W/(m.°C).



Figuur A.1.5 Temperaturen in een 5 cm dikke asfaltlaag, op verschillende tijdstippen na de aanbrenging

A.1.3 Bepaling van de invoerparameters voor het eerste, beperkte model

A.1.3.1 Convectiecoëfficiënt

De convectiestroom hangt hoofdzakelijk af van het verschil tussen de temperatuur van het asfalt en de luchttemperatuur. Om de warmteoverdracht naar het asfaltoppervlak te kunnen bepalen, dient de convectiecoëfficiënt h gekend te zijn. Deze parameter is echter niet zo gemakkelijk te schatten, want hij hangt af van de windsnelheid en in mindere mate ook van de luchttemperatuur en de toestand van het wegoppervlak.

Voor dit onderzoek is de volgende empirische relatie (ref. 19) gekozen:

$$h = \frac{1,163 \cdot (4,84 + 3,36 v_{wind}) \cdot 294,16}{(273,16 + T_{lucht})} \quad (13)$$

v_{wind} windsnelheid (m/s);
 T_{lucht} luchttemperatuur (°C).

Het geldigheidsinterval van deze relatie stemt overeen met een windsnelheid = 0 tot 5 m/s. Uit de metingen in situ is echter gebleken dat het ook voor hogere windsnelheden van toepassing blijft.

A.1.3.2 Thermische parameters van wegebouwmaterialen

De thermische parameters waarmee in dit vooruitberekingsmodel rekening dient te worden gehouden, zijn:

- het *warmtegeleidingsvermogen* λ , of het vermogen van asfalt om warmte te geleiden (W/m.°C);
- de *soortelijke warmte* c , of de capaciteit van asfalt om warmte op te slaan (J/kg.°C).

Om het warmtegeleidingsvermogen, de soortelijke warmte en de volumieke massa van wegebouwmaterialen nader te kunnen bepalen, is een literatuurstudie uitgevoerd. Tabel A.1.1 (blz. 12 en 13) geeft het resultaat van dit onderzoek weer.

Naargelang van de bron kunnen de waarden voor deze parameters sterk verschillen. In de eerste benadering zijn voor asfalt de volgende waarden gekozen:

- warmtegeleidingsvermogen $\lambda = 0,7$ W/m.°C;
- soortelijke warmte $c = 880$ J/kg.°C;
- volumieke massa $\rho = 2\,400$ kg/m³.

A.1.3.3 Aanbrengingstemperatuur van het asfalt

Asfaltmengsels worden bereid bij een temperatuur tussen 150 en 180 °C. Als de bouwplaats niet te ver van de menginstallatie ligt, de opslag in silo's beperkt blijft en het mengsel correct wordt vervoerd (in tegen warmteverlies geïsoleerde vrachtwagens, enz.), mag worden verwacht dat het bij de verwerking nog een temperatuur tussen 130 en 170 °C heeft.

A.1.3.4 Gemiddelde temperatuur van het baanlichaam

Voor de gemiddelde temperatuur van het baanlichaam vóór de aanbrenging van het asfalt is 14 °C gekozen. Dit stemt overeen met het in ref. 2 bepaalde jaargemiddelde.

A.1.3.5 Temperatuur van de asfaltlaag na afkoeling

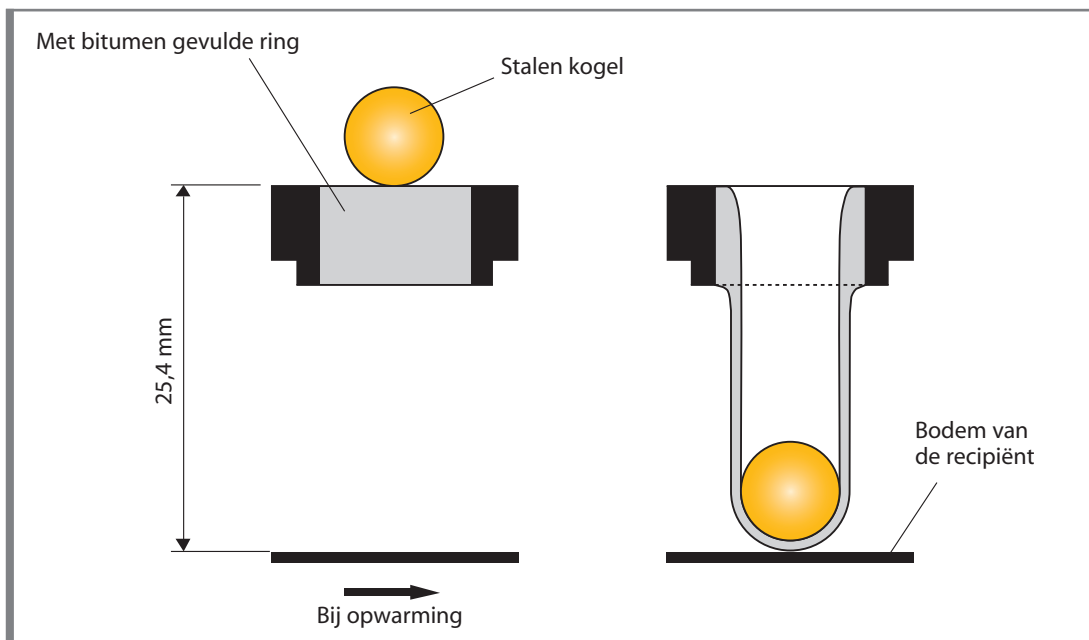
Bitumen maakt een asfaltmengsel tot een visco-elastisch en thermoplastisch materiaal. De (omkeerbare) elastische en (onomkeerbare) viskeuze kenmerken van zo'n materiaal hangen zowel van de temperatuur als van de belastingsfrequentie af.

Bij te hoge temperaturen zal bitumen in een asfaltmengsel een plastisch gedrag vertonen. Met de ring-en-kogelproef (ref. 24) kan de kritische temperatuur hiervoor (het zogenoemde verwekingspunt ring en kogel) worden bepaald. In figuur A.1.6 (blz. 13) is deze beproevingsmethode schematisch weergegeven.

| Materialsoort | Aard | λ (W/m.°C) | c (J/kg.°C) | ρ (kg/m ³) | Ref. |
|---|-------------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|------|
| Algemeen | Wegconstructie | 1,4 tot 2,2 | 870 tot 960 | – | 1 |
| | | 1,28 | 880 | 1 900 | 2 |
| Bitumineuze materialen | Bitumineus mengsel | 1,05 tot 1,98 | 879 | – | 3 |
| | | 1,23 | 921 | 2 230 | 4 |
| | | 0,70 | 921 | 2 100 | 5 |
| | | 1,38 | 1 047 | 2 302 | 6 |
| | | 1,05 tot 2,00 | 921 | 2 000 tot 2 400 | 7 |
| | | 0,74 tot 0,76 | 920 | 1 100 tot 1500 | 8 |
| | | 0,70 | – | 2 120 | 9 |
| | Asfaltbeton | 2,00 | – | 2 350 | 10 |
| | | 2,20 | 869 | – | 1 |
| | Zeer open asfalt | 1,10 | – | 1 960 | 10 |
| | | 1,50 | 995 | – | 1 |
| | Grindzandasfalt | 1,90 | – | 2 250 | 10 |
| | | 1,90 | 869 | – | 1 |
| | Gietasfalt | 0,7 tot 1,15 | – | 2 350 | 11 |
| | Zuiver asfalt voor afdichting | 0,70 | – | 2 100 | 12 |
| Zandasfalt | 1,15 | – | 2 300 | 12 | |
| Beton | Cementbeton | 1,51 | 879 | 2 400 | 5 |
| | | 1,41 | 963 | – | 13 |
| | | 0,9 tot 1,3 | 879 tot 963 | 2 250 tot 2 350 | 7 |
| | | 1,51 | 879 | 2 200 | 17 |
| | | 1,80 | 933 | – | 1 |
| | Portlandcementbeton | 1,75 | 920 | 2 200 tot 2 400 | 8 |
| | Portlandcementbeton | 1,7 | – | 2 300 | 9 |
| | Ander dan portlandcementbeton | 0,8 tot 1,4 | 880 | 1 900 tot 2 300 | 9 |
| | Beschermd gewoon beton | 0,706 | – | 1 600 | 14 |
| | | 0,838 | – | 1 760 | 14 |
| | | 1,056 | – | 1 920 | 14 |
| | | 1,315 | – | 2 080 | 14 |
| | | 1,696 | – | 2 240 | 14 |
| | | 2,267 | – | 2 400 | 14 |
| | Blootgesteld gewoon beton | 0,808 | – | 1 600 | 14 |
| | | 0,952 | – | 1 760 | 14 |
| | | 1,194 | – | 1 920 | 14 |
| | | 1,488 | – | 2 080 | 14 |
| | | 1,904 | – | 2 240 | 14 |
| | | 2,561 | – | 2 400 | 14 |
| Gewapend beton | 1,40 | – | – | 15 | |
| Schraal beton | 0,79 | – | 1 800 | 15 | |
| Gestabiliseerde korrelige materialen | Zandcement | 1,1 | – | 1 900 | 10 |
| | | 3,32 | 1 005 | 2 339 | 6 |
| | Grindzand met slak | 1,1 | – | 2 050 | 10 |
| | | 1,4 | 964 | – | 1 |
| Behandeld vliegas | 0,6 | – | 1 350 | 10 | |

| Materiaal­soort | Aard | λ (W/m °C) | c (J/kg °C) | ρ (kg/m ³) | Ref. |
|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|------|
| Korrelige materialen | Steen­slag | 1,51 tot 2,17 | 754 tot 837 | – | 16 |
| | | 1,31 | 837 | 1 750 | 4 |
| | Grind | 0,52 | 838 | 1 703 | 6 |
| | Droog zand | 0,41 | 800 | 1 500 | 8 |
| | | 0,33 | 879 | 1 520 | 17 |
| Draineerzand | 1,63 | 2 093 | 1 900 | 5 | |
| Grond | Natuurlijke ondergrond | 1,4 | – | 1 610 | 10 |
| | | | 837 | | 16 |
| | Klei | 1,28 | 879 | 1 450 | 17 |
| | Grindhoudende grond | 2,43 | 963 | – | 16 |
| | Samenhangende grond | 1,59 | 1 214 | 2 066 | 6 |
| 0,52 | | 1 842 | 2 040 | 17 | |
| Andere materialen | Kalksteen | 3,50 | – | 2 440 | 14 |
| | | 0,79 tot 1,36 | – | 1 600 tot 1 800 | 15 |
| | | 0,7 tot 0,9 | 840 | 2 600 | 8 |
| | | 1,26 tot 1,33 | 900 | 2 500 | 8 |
| | | 0,52 tot 1,28 | 795 | – | 18 |
| | Zandsteen | 2,9 | – | 2 400 | 14 |
| | | 0,79 tot 1,36 | – | 1 600 tot 1 800 | 15 |
| | | 0,93 tot 1,25 | 710 | 2 160 tot 2 300 | 8 |
| | Porfier | 2,30 | – | 2 400 tot 2 600 | 15 |
| | | 2,90 | – | 1 400 tot 2 600 | 8 |

Tabel A.1.1 Thermische parameters van wegebouwmaterialen



Figuur A.1.6 Bepaling van het verwekingspunt met ring en kogel

De temperatuur van de asfaltlaag na afkoeling is per definitie de maximale temperatuur die het asfaltmengsel in ongeveer het midden van de laagdikte mag hebben om als stabiel te worden beschouwd.

In de praktijk (ref. 25) wordt algemeen aangenomen dat geen dynamische belastingsproef mag worden verricht als de temperatuur in de asfaltlaag meer dan 2/3 bedraagt van de ring-en-kogeltemperatuur van het aanwezige bitumen in die laag. Het lijkt dus aangewezen dit principe ook toe te passen om de temperatuur voor de wederopenstelling van de weg te bepalen:

$$T_{\text{verkeer}} = \frac{2}{3} T_{r\&k} \quad (14)$$

T_{verkeer} temperatuur van het asfalt voor de wederopenstelling van de weg (°C);
 $T_{r\&k}$ ring-en-kogeltemperatuur van bitumen (°C).

Bij wijze van voorbeeld is in tabel A.1.2 voor enkele in de wegenbouw gangbare bitumina de ring-en-kogeltemperatuur en de temperatuur voor de wederopenstelling van de weg weergegeven.

| | Wegenbitumen | | | | Nieuw polymeerbitumen | | |
|--|--------------|---------|---------|---------|-----------------------|------------|-------------|
| Klasse | 20/30 | 35/50 | 50/70 | 70/100 | 50/85 - 50 | 50/85 - 65 | 85/130 - 75 |
| $T_{r\&k}$ | 55 - 63 | 50 - 58 | 46 - 54 | 45 - 31 | 50 | 65 | 75 |
| T_{verkeer} | 39 | 36 | 33 | 31 | 33 | 43 | 50 |

Tabel A.1.2 *Temperatuur voor de wederopenstelling van de weg voor enkele gangbare bitumina*

Noot:

Om de temperatuur voor de wederopenstelling van de weg te bepalen, is voor wegenbitumen van een gemiddelde ring-en-kogeltemperatuur uitgegaan.

A.1.4 Toetsing op bouwplaatsen en beperkingen van het eerste, beperkte model

Het eerste, beperkte vooruitberekeningsmodel is getoetst op werken in uitvoering.

A.1.4.1 Methodiek

Om het temperatuurverloop aan het oppervlak van een pas aangebrachte asfaltlaag te meten, is de volgende methodiek toegepast:

- herhaalde meting van de temperatuur van het asfaltmengsel in de stortbak van de asfaltmachine, met behulp van een gekalibreerde (koper-constantaan)temperatuursonde (foto A.1.1) (minstens driemaal tijdens de duur van de metingen);
- herhaalde meting van de luchttemperatuur op een windluwe plaats, met behulp van de temperatuursonde (minstens driemaal tijdens de duur van de metingen);
- subjectieve beoordeling van de windsnelheid (windluw, matig of strak);
- meting van de temperatuur in het pas gespreide asfalt tijdens en na de verdichting, met tussentijden van 5 tot 10 min en met behulp van een infraroodthermometer (foto A.1.2). Deze metingen vonden plaats op ten minste drie verschillende plaatsen, in het midden van de aangebrachte asfaltstrook (foto A.1.3). Een kartonnen doos schermt het meetpunt tegen de wind af.

Om afleesfouten en andere problemen door het gebruik van de infraroodthermometer te vermijden, zijn in elk meetgebied drie metingen uitgevoerd (foto A.1.4 en figuur A.1.7).

Noot:

Controle van deze infraroodtemperatuurmetingen met een gekalibreerde temperatuursonde wees uit dat een nauwkeurigheid van 2 °C mag worden verwacht.



Foto A.1.1 Koper-constantaantemperatuursonde



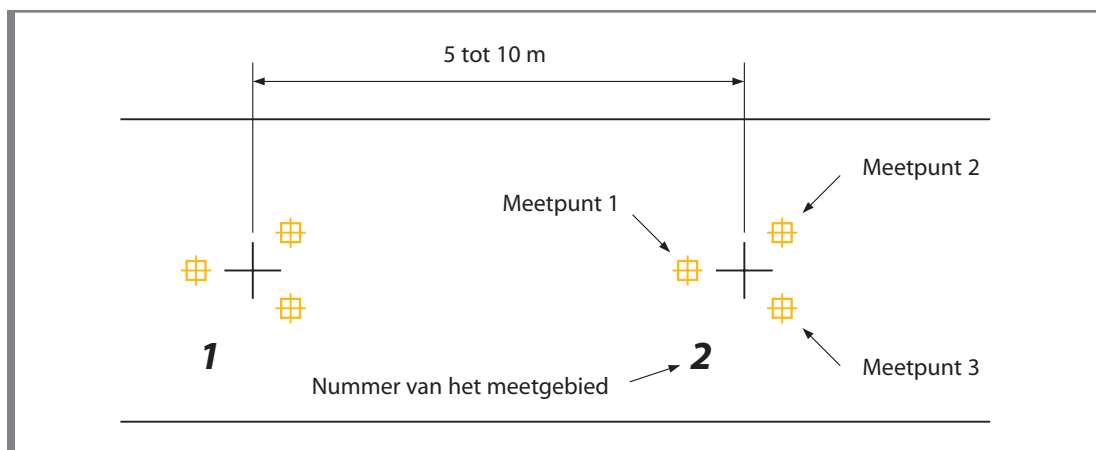
Foto A.1.2 Infraroodthermometer



Foto A.1.3 Temperatuurmeting in het midden van de asfaltstrook



Foto A.1.4 Plaats van de meetpunten in een meetgebied



Figuur A.1.7 Plaats van de meetpunten in een meetgebied

A.1.4.2 Parameters van de bouwplaatsen

De metingen vonden plaats op vier verschillende bouwplaatsen. Daarbij werden de volgende gegevens opgetekend:

| Bouwplaats | Periode | T_{lucht} | Wind | Asfaltsoort | Dikte | T_{aanbr} |
|------------|----------|-------------|-----------------|---------------------|-------|-------------|
| 1 | December | 0 °C | Matig | AB-3A ¹ | 6 cm | 150 °C |
| 2 | Maart | 9 °C | Matig tot strak | AB-1B ² | 5 cm | 160 °C |
| 3 | Juli | 20 °C | Matig | SMA-B6 ³ | 5 cm | 165 °C |
| 4 | Juli | 30 °C | Windluw | SMA-B1 ⁴ | 5 cm | 160 °C |

¹ Asfaltbeton voor onderlagen (korrelmaat 0/20)

² Asfaltbeton voor toplagen (korrelmaat 0/14)

³ Steenmastiekasfalt (korrelmaat 0/14) met nieuw polymeerbitumen

⁴ Steenmastiekasfalt (korrelmaat 0/14) met wegenbitumen

Tabel A.1.3 Parameters van de bouwplaatsen

| Bouwplaats | Duur van de metingen | Aantal metingen |
|------------|----------------------|-----------------|
| 1 | 65 min | 3 x 5 |
| 2 | 85 min | 5 x 1 |
| 3 | 170 min | 5 x 3 |
| 4 | 192 min | 5 x 3 |

Tabel A.1.4 Beschrijving van de metingen

A.1.4.3 Vergelijking tussen metingen en berekeningen

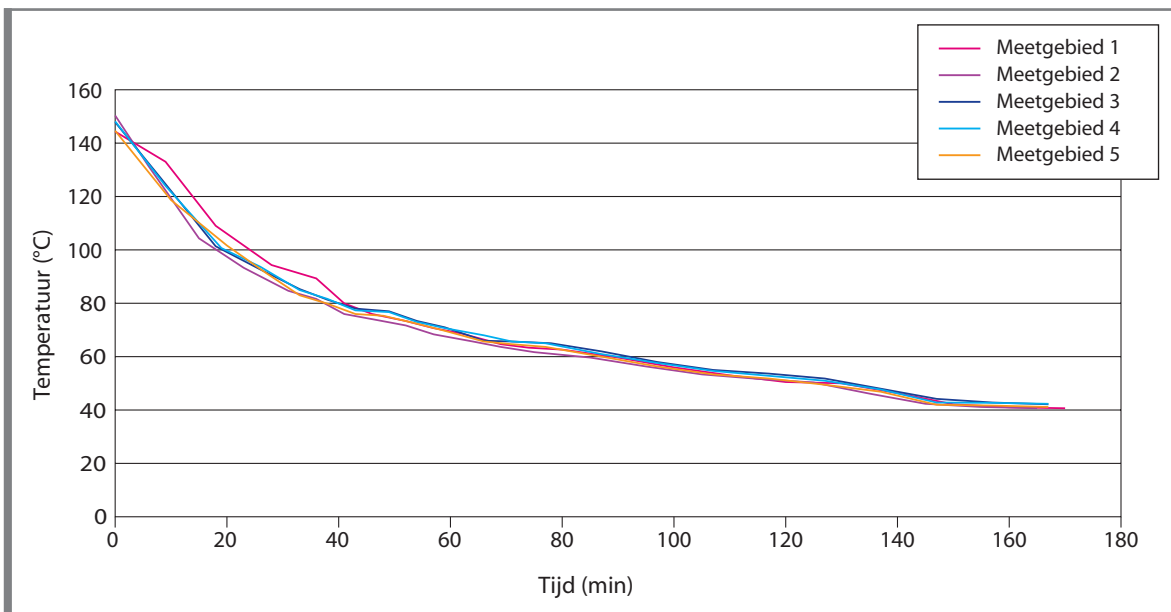
De metingen op bouwplaatsen 1 en 2 hebben de methodiek helpen verfijnen. Zij waren inderdaad nuttig om de meetgebieden (in het midden van de asfaltstrook) en het aantal meetpunten voor elk meetgebied te bepalen. De duur van deze metingen was echter beperkt (tabel A.1.4). Daarom gaan we hierna alleen dieper op de metingen op bouwplaatsen 3 en 4 in.

A.1.4.3.1 *Bouwplaats 3*

Op bouwplaats 3 werd bij droog weer, een matige wind en een bewolkte hemel een laag van SMA-B6 aangebracht. Figuur A.1.8 toont de gemiddelde afkoelingskrommen voor de vijf meetgebieden. Een gemiddelde kromme geeft het gemiddelde van de drie individuele krommen weer.

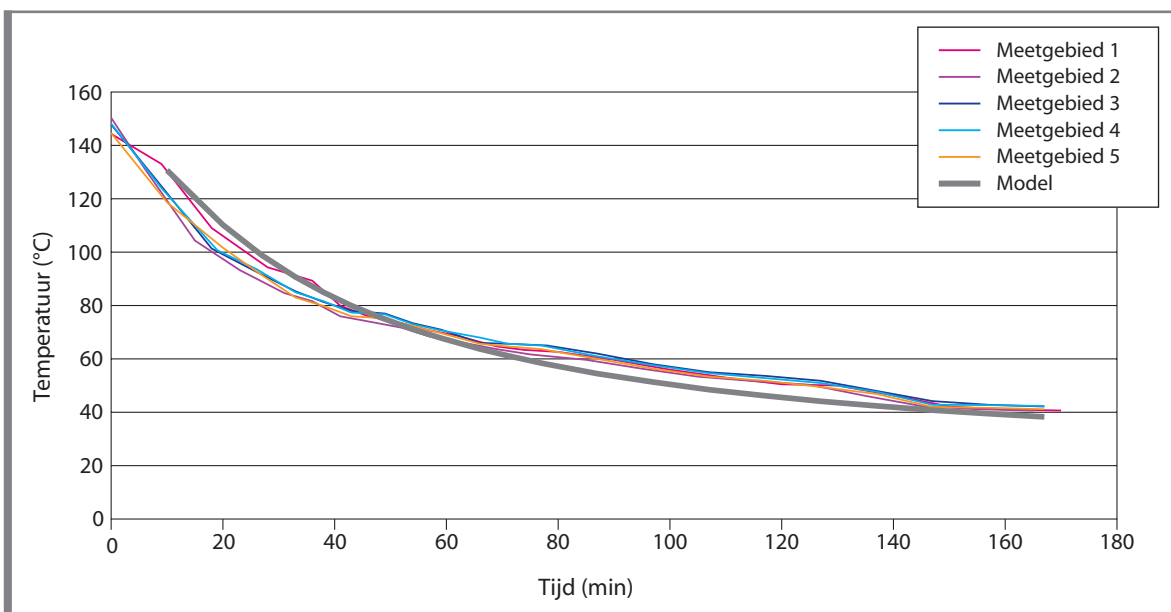
In het vooruitberekeningsmodel zijn de volgende parameters ingevoerd:

- gemiddelde luchttemperatuur = 20 °C;
- aanbrengingstemperatuur = 165 °C;
- temperatuur van het baanlichaam = 14 °C;
- dikte van de asfaltlaag = 5 cm;
- warmtegeleidingsvermogen van het asfalt = 0,7 W/m.°C;
- soortelijke warmte van het asfalt = 880 J/kg.°C;
- volumieke massa van het asfalt = 2 400 kg/m³;
- convectiecoëfficiënt = 15 W/m.°C (matige wind).



Figuur A.1.8 *Bouwplaats 3 - Temperatuurverloop in de nieuwe SMA-B6-laag*

In figuur A.1.9 is naast de gemiddelde krommen die resulteren uit de metingen op het werk ook de kromme getekend die het vooruitberekingsmodel met de invoerparameters van dat werk oplevert.



Figuur A.1.9 *Bouwplaats 3 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen*

Op een lichte afwijking in het tijdsinterval [70 min – 150 min] na blijken de gemeten en berekende krommen zeer goed gecorreleerd te zijn.

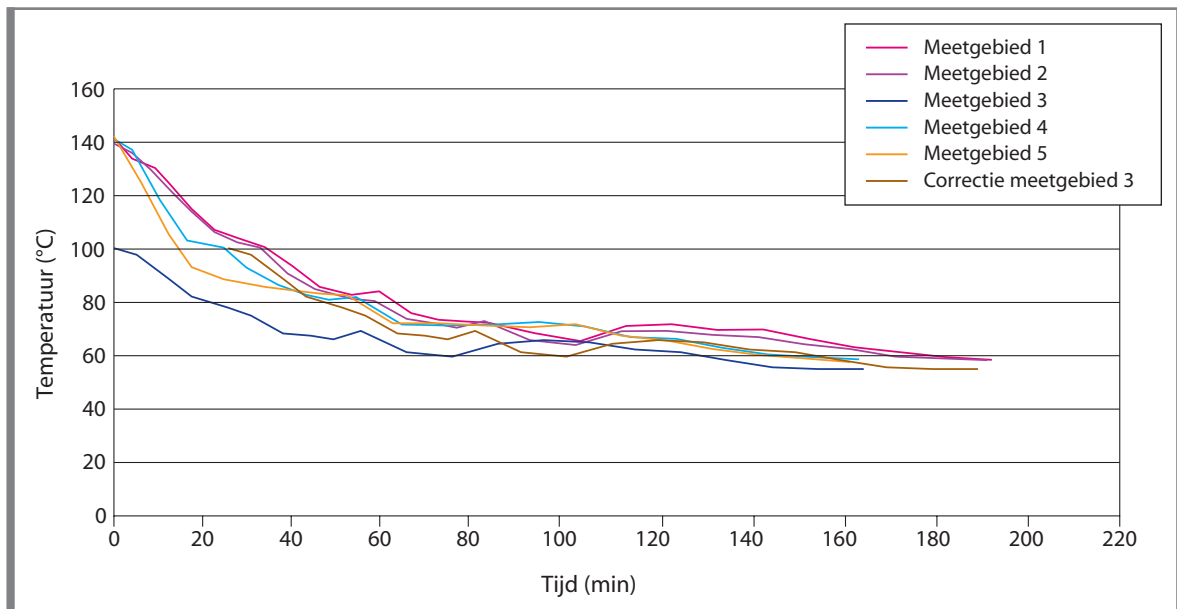
Noot:

Door een numerieke instabiliteit van het vooruitberekingsmodel kunnen voor de eerste tien minuten van het afkoelingsproces geen betrouwbare waarden voor de temperatuur van de asfaltlaag worden verkregen.

A.1.4.3.2 *Bouwplaats 4*

Op bouwplaats 4 werd bij droog, windluw weer en een heldere hemel een laag van SMA-B1 aangebracht. De metingen vonden rond het middaguur (veel bezonning) plaats.

Figuur A.1.10 toont de gemiddelde afkoelingskrommen voor de vijf meetgebieden. De metingen in meetgebied 3 hadden echter vertraging opgelopen. Daarom is naast de oorspronkelijke kromme *Meetgebied 3* ook de getransponeerde, gecorrigeerde kromme *Correctie meetgebied 3* in dit diagram getekend.



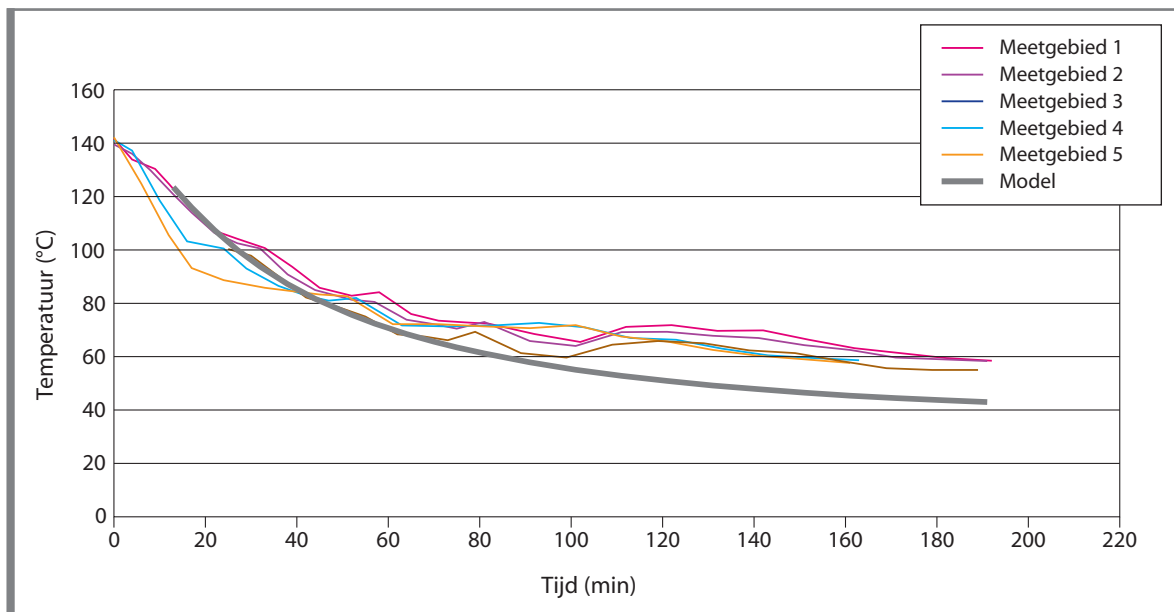
Figuur A.1.10 *Bouwplaats 4 - Temperatuurverloop in de nieuwe SMA-B1-laag*

In het vooruitberekeningsmodel zijn de volgende parameters ingevoerd:

- gemiddelde temperatuur = 30 °C;
- aanbrengingstemperatuur = 160 °C;
- temperatuur van het baanlichaam = 14 °C;
- dikte van de asfaltlaag = 5 cm;
- warmtegeleidingsvermogen van het asfalt = 0,7 W/m.°C;
- soortelijke warmte van het asfalt = 880 J/kg.°C;
- volumieke massa van het asfalt = 2 400 kg/m³;
- convectiecoëfficiënt = 5 W/m.°C (windluw).

In figuur A.1.11 is naast de gemiddelde krommen die resulteren uit de metingen op het werk ook de kromme getekend die het vooruitberekeningsmodel met de invoerparameters van dat werk oplevert.

Na 80 min lopen de gemeten krommen en de berekende kromme bij een temperatuur van ongeveer 70 °C uiteen. Na 190 min bedraagt het temperatuurverschil 20 °C.



Figuur A.1.11 *Bouwplaats 4 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen*

A.1.4.4 Beperkingen van het eerste, beperkte model

Het eerste vooruitberekingsmodel lijkt een goede schatting van de afkoeling van een pas aangebracht asfaltlaag bij een bewolkte hemel te geven. De waarden die voor de verschillende invoerparameters (h , c , λ en ρ) zijn gekozen, lijken met de werkelijkheid overeen te stemmen.

Het model houdt enkel rekening met warmtegeleiding en convectie, niet met warmteoverdracht door zonnestraling. Hoewel de invloed van zonnestraling bij het begin van het afkoelingsproces waarschijnlijk te verwaarlozen is, is in extreme situaties (zie bij bouwplaats 4: zeer warm en windluw) gebleken dat zij de temperatuurdaling wel degelijk beïnvloedt. Deze factor moet dus ook in het model worden verwerkt.

Bij de voorspelling van het afkoelingsgedrag mag niet worden uitgegaan van een constante luchttemperatuur. Er moet rekening worden gehouden met temperatuurschommelingen (zoals het verschil tussen dag en nacht), die soms de wachttijd voor de wederopstelling voor het verkeer kunnen verkorten.



Hoofdstuk A.2

Warmteoverdracht door straling

Onder invloed van verschillende soorten van straling vindt warmte-uitwisseling aan het aardoppervlak plaats. Het betreft de volgende soorten van straling:

- zonnestraling;
- atmosferische straling;
- aardstraling.

▪ Zonnestraling

Een gegeven aardoppervlak ontvangt een bepaalde hoeveelheid zonnestraling, de zogenoemde *totale zonnestraling*. De totale zonnestraling is de som van twee componenten: directe en diffuse zonnestraling.

Directe zonnestraling is de stralingsstroom die door de zonneschijf in een ruimtehoek wordt uitgezonden. Ze verloopt in dezelfde richting als de invallende zonnestraling.

Diffuse zonnestraling is het deel van de zonnestraling dat vanuit de hemelkoepel (zonder de zonneschijf) naar het aardoppervlak wordt uitgezonden. Diffuse of verstrooide straling verloopt niet in een welbepaalde richting.

Een deel van de zonnestraling bereikt het aardoppervlak niet in die vorm. Dat is *geabsorbeerde straling*.

▪ Atmosferische straling

De energie die door de bestanddelen van de atmosfeer wordt geabsorbeerd, wordt grotendeels in langgolvlige stralingsenergie omgezet. Zij zorgt inderdaad voor de opwarming van de moleculen. Volgens de wet van Stephan-Boltzmann is de straling van een lichaam recht evenredig met de vierde macht van zijn temperatuur, zodat de moleculen op hun beurt stralingsenergie uitzenden. Dat is de zogenoemde *atmosferische straling*.

▪ Aardstraling

Volgens dit principe zendt een gegeven oppervlak langgolvlige stralen (infraroodstraling) uit naar de hemelkoepel. Dat is de zogenoemde *aardstraling*.

A.2.1 Soorten van zonnestraling

A.2.1.1 Factoren die de intensiteit van de zonnestraling beïnvloeden

De draaibeweging van de aarde om de zon, de helling van de aardas, de rotatie van de aarde om haar as, het klimaat en de vervuiling op aarde, evenals de plaatselijke omstandigheden zijn factoren die een grote invloed op de zonnestraling uitoefenen. Hierna gaan we nader op deze parameters in.

A.2.1.1.1 Grootheden van tijd

Zonnestraling varieert in de tijd. Het begrip «tijd» kan op verschillende manieren worden gedefinieerd:

- *zonnetijd (ZT)*: de ware tijd, die wordt bepaald door de werkelijke stand van de zon op een gegeven tijdstip en plaats. Als de zon haar hoogste stand heeft bereikt, wordt aangenomen dat $ZT = 12$ h;
- *wettelijke of officiële tijd (WT)*: de zogenoemde lokale tijd;
- *universele of wereldtijd (UT)*: de wettelijke tijd op de nulmeridiaan of de meridiaan van Greenwich (lengteligging = $0,00^\circ$).

Op de meridiaan van Greenwich is de wettelijke tijd gelijk aan de wereldtijd, maar niet aan de zonnetijd. Naargelang van de dag van het jaar passeert de zon in de lokale meridiaan immers soms vóór en dan weer na het zonnemiddaguur. Dit heeft met twee kenmerken van de beweging van de aarde om de zon te maken:

- de aardas staat schuin op het baanvlak van de aarde;
- de aarde draait in een elliptische baan om de zon.

De afwijking in de loop van het jaar tussen de ware en de middelbare zonnetijd wordt de *tijdvereffening* (*TV*) genoemd. Deze afwijking of correctie wordt in minuten uitgedrukt en varieert tussen de uiterste waarden +14 min (begin februari) en -16 min (begin november). De tijdvereffeningskromme heeft een periodiciteit van een jaar. De tijdvereffening wordt met de volgende vereenvoudigde relaties (ref. 26) bepaald:

$$C = 1,914^\circ \sin(M) + 0,02^\circ \sin(2M) \quad (15)$$

$$M = 357^\circ + 0,9856^\circ \cdot j \quad (16)$$

C middelpuntvergelijking, die de invloed van de elliptische baan van de aarde aangeeft (°);
M middelbare anomalie (°);
j dagnummer.

en:

$$R = -2,466^\circ \sin(2L) + 0,053^\circ \sin(4L) \quad (17)$$

$$L = 280^\circ + C + 0,9856^\circ \cdot j \quad (18)$$

R verschuiving van de evenaar, die overeenstemt met de helling van de aardas (°);
L ware lengteligging van de zon (°).

Uiteindelijk verkrijgen we:

$$TV = (C + R) \times 4 \quad (19)$$

Noot:

De coëfficiënten stemmen overeen met de parameters van het baanvlak van de aarde in 2005 en zijn geldig tot 2015.

Voor een lengteligging = 0,00° wordt de zonnetijd berekend met de relatie:

$$ZT = UT - TV \quad (20)$$

Voor een andere lengteligging is de relatie als volgt:

$$ZT = WT - C_{plaats} - TV - \frac{I_{plaats}}{15} \quad (21)$$

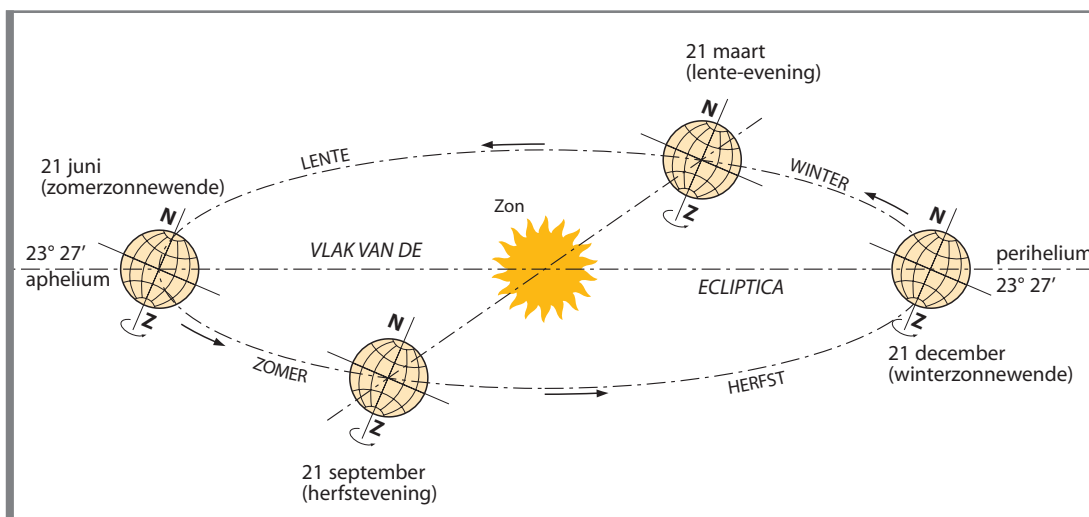
C_{plaats} verschil tussen de wettelijke tijd en de universele tijd (*h*). Deze coëfficiënt verschilt van land tot land en volgens de periode van het jaar. In België loopt de wettelijke tijd in de winter 1 uur en in de zomer 2 uur op de universele tijd voor;
I_{plaats} plaatselijke lengteligging (°).

A.2.1.1.2 Elliptische baan van de aarde om de zon

De zonnearmte die de aarde opvangt, hangt van de afstand tussen de aarde en de zon af. De aarde beschrijft immers een elliptische baan om de zon. Door de lage excentriciteit van die elliptische baan varieert de afstand tussen de aarde en de zon slechts $\pm 1,7\%$ tegenover de middelbare afstand.

Het vlak van de aardebaan, de zogenoemde ecliptica, vormt een zo goed als constante hoek van $23,45^\circ$ ten opzichte van het evenaarsvlak van de aarde.

In figuur A.2.1 is de beweging van de aarde rond de zon schematisch voorgesteld.



Figuur A.2.1 Beweging van de aarde om de zon (ref. 31)

A.2.1.1.3 Coördinaten van de zon

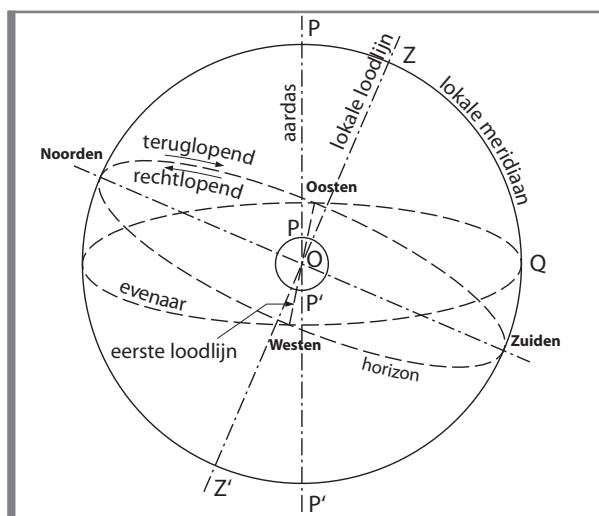
▪ Equatoriale coördinaten

De combinatie van de rotatie van de aarde om haar as en van de aarde om de zon leidt tot schijnbare bewegingen van de zon op een denkbeeldige bol, de zogenoemde hemelbol.

Op een gegeven plaats definiëren we (figuur A.2.2):

- *lokale loodlijn*: lijn die in twee diametraal gelegen punten – het zenit (Z) en het nadir (Z') – door de hemelbol gaat;
- *horizon*: snijvlak dat door het middelpunt van de aarde (O) gaat en loodrecht op de lokale loodlijn staat.

De aarde draait om haar eigen as die door de twee polen loopt, de zogenoemde aardas (PP'). Het snijvlak dat door het middelpunt van de aarde (O) gaat en loodrecht op de aardas staat, noemen we de hemelevenaar.



Figuur A.2.2 Hemelbol (ref. 31)

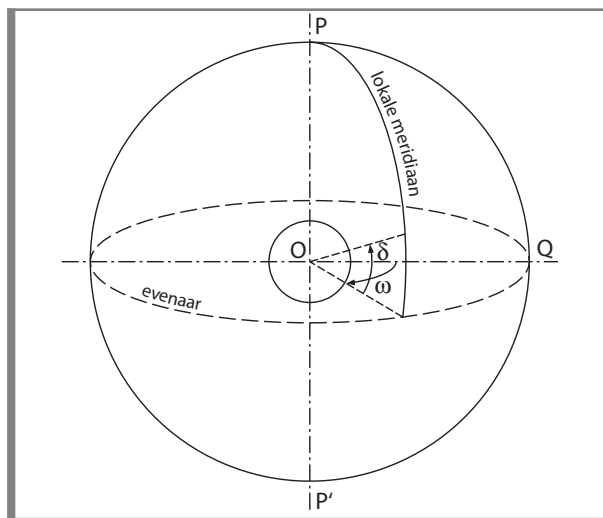
Op de hemelevenaar zijn de equatoriale coördinaten van de zon:

- *zonsdeclinatie* δ : deze coördinaat geeft de helling van zon ten opzichte van de hemelevenaar aan en wordt bepaald met de relatie:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(0,980^\circ (j + 284)) \quad (22)$$

- *uurhoek* ω : deze coördinaat wordt gemeten op de hemelevenaar tussen de uurcirkel van de zon en het vlak van de lokale meridiaan. Hij wordt als functie van de zonnetijd bepaald met de formule:

$$\omega = 15^\circ (ZT - 12) \quad (23)$$



Figuur A.2.3 Equatoriale coördinaten

▪ *Lokale coördinaten*

Voor een waarnemer op een breedteligging ϕ zijn de lokale coördinaten van de zon:

- *zenithoek van de zon* ζ : hoek gevormd door de gegeven lokale loodlijn en de richting van de zon. Deze hoek hangt af van de breedteligging ϕ van de gegeven plaats, de zonsdeclinatie δ en de uurhoek ω . Hij wordt bepaald met de relatie (ref. 23):

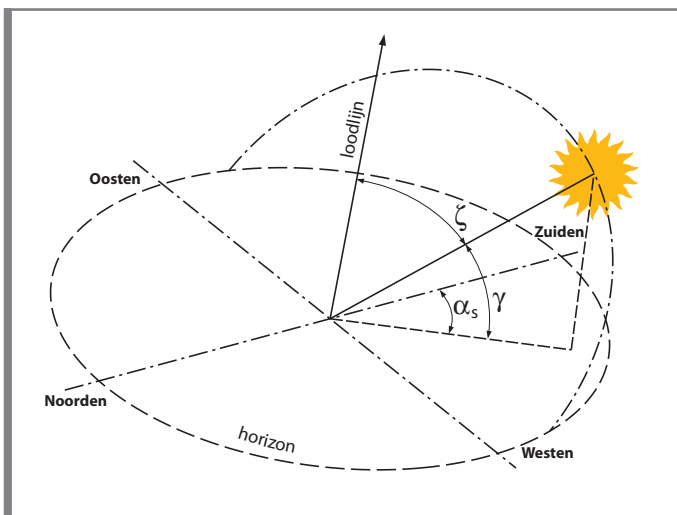
$$\cos \zeta = (\sin \phi \cdot \sin \delta) + (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \quad (24)$$

- *hoogtehoek van de zon* γ : aanvullende hoek aan de zenithoek ($\zeta = \frac{\pi}{2} - \gamma$). Hij wordt als volgt uitgedrukt:

$$\sin \gamma = \cos \zeta \quad (25)$$

- *azimuthoek van de zon* α_s : deze hoek geeft de tweede schijnbare beweging van de zon ten opzichte van een bewegende waarnemer weer. Hij wordt van het zuiden teruglopend berekend (zie bij figuur A.2.2):

$$\sin \alpha_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \gamma} \quad (26)$$



Figuur A.2.4 Lokale coördinaten van de zon

A.2.1.1.4 Bewolkingsgraad

De bewolkingsgraad is per definitie het deel van de hemelkoepel dat op een gegeven plaats en tijdstip volledig of gedeeltelijk door wolken bedekt is. Hij is bepalend voor de hoeveelheid zonnestraling die door de atmosfeer gaat. Hoe meer bewolking, hoe kleiner de directe straling. De bewolkingsgraad heeft bovendien een grote invloed op de diffuse zonnestraling.

Voor dit model onderscheiden we drie bewolkingsgraden:

- *onbewolkte of heldere hemel*: de hemel is niet met wolken bedekt;
- *bewolkte hemel*: de hemel is zo dicht bewolkt dat directe zonnestralen niet tot het aardoppervlak kunnen doordringen;
- *half bewolkte hemel*: een bewolkingsgraad tussen beide voorgaande gradaties in.

A.2.1.1.5 Parameters van de plaats

▪ Lengte- en breedteligging

De hoeveelheid zonnestraling die een bepaald punt op de aarde ontvangt, hangt af van de breedteligging van de beschouwde plaats. De invalshoek van de zonnestraling hangt bijgevolg af van de geografische ligging van die plaats op aarde.

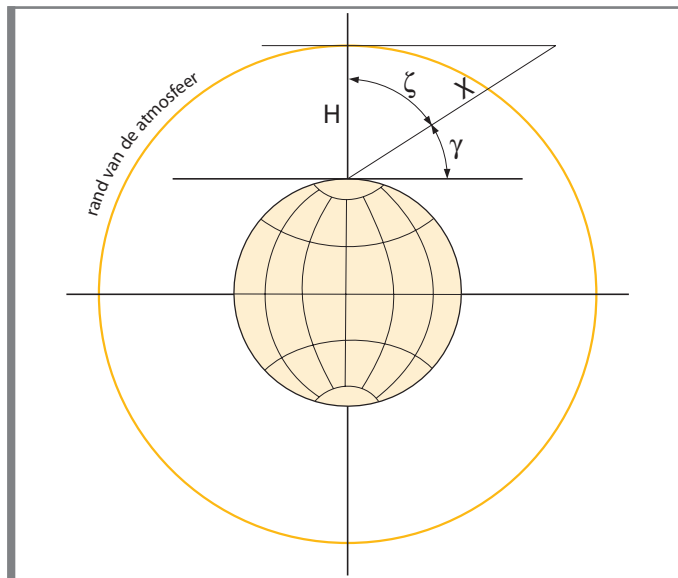
De invloed van de lengteligging is beschreven in A.2.1.1.1 *Grootheden van tijd*.

▪ Hoogte

Over het algemeen stijgt de intensiteit van de zonnestraling met de hoogte. Omwille van de topografische kenmerken van ons land is met de invloed van deze factor in België geen rekening gehouden.

▪ Optische luchtmassa

Naarmate de zon hoger boven het aardoppervlak staat, wordt de atmosfeer optisch dunner. De dichtheid is dus groter als de zon zich aan de horizon bevindt dan wanneer ze in zenit staat. Deze uurvariatie van de luchtdikte wordt door het begrip «optische luchtmassa» weergegeven.



Figuur A.2.5 Afstanden die bepalend zijn voor de optische luchtmassa

De optische luchtmassa m wordt berekend met de relatie:

$$m = \frac{X}{H} \quad (27)$$

X weglengte van het zonlicht in de atmosfeer bij een zenithoek ζ (m);
 H weglengte van het zonlicht in de atmosfeer bij een zenithoek = 0 (m).

Als de hoogtehoek van de zon γ (aanvullende hoek aan de zenithoek ζ) groter dan 10° is, kan de volgende relatie worden toegepast:

$$m = \csc \gamma \quad (28)$$

Als de hoogtehoek van de zon γ kleiner dan 10° is, dient een correctiefactor te worden toegepast. De relatie wordt dan:

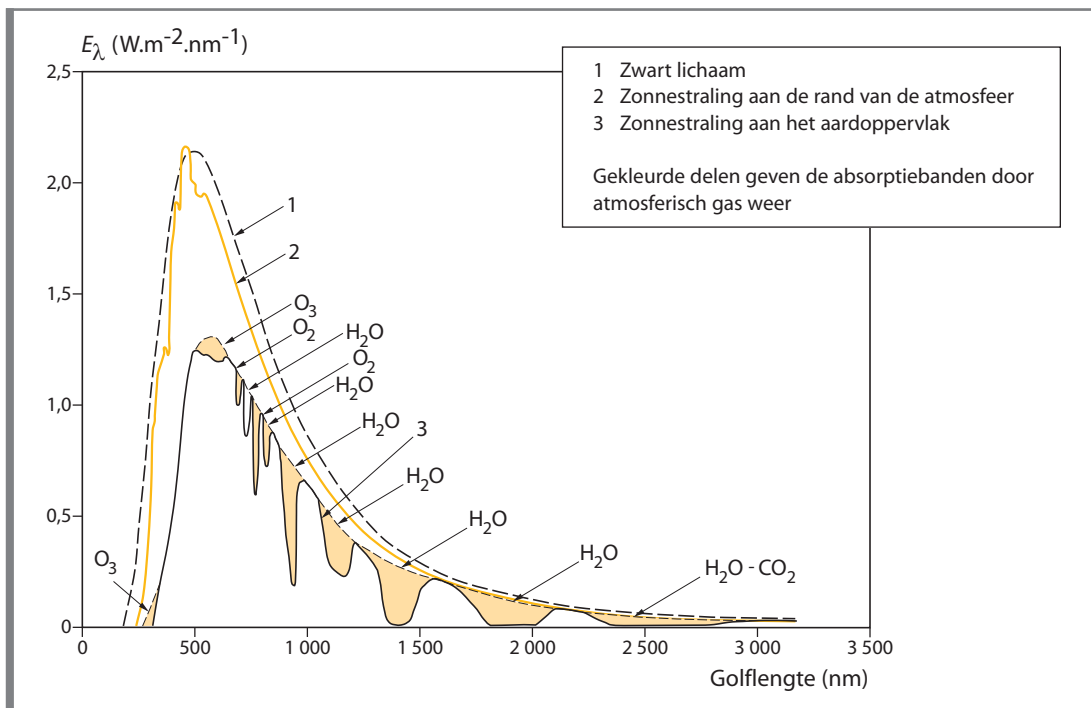
$$m = \frac{1}{\sin \gamma + 0,15 (\gamma + 3,885)^{-1,253}} \quad (29)$$

A.2.1.1.6 Extinctie van de zonnestraling

Door absorptie en verstrooiing wordt de zonnestraling bij de doorgang in de atmosfeer verzwakt.

Absorptie vindt plaats door de volgende elementen die zich in de atmosfeer bevinden:

- koolstofdioxide (CO_2);
- waterdamp (H_2O);
- ozon (O_3);
- aërosolen (in de atmosfeer zwevende vaste en vloeibare deeltjes zoals zandkorrels, stofdeeltjes, organische deeltjes, rook, enz.).



Figuur A.2.6 Zonnespectrum aan het aardoppervlak (ref. 20 en 31)

Verstrooiing van zonnestraling vindt plaats door de verschillende gassen, de waterdamp en de zwevende deeltjes in de atmosfeer. Bij absorptie worden de stralen opnieuw verspreid in de vorm van infraroodstraling. Bij verstrooiing worden ze in dezelfde golflengte in alle richtingen opnieuw verspreid.

De mate waarin de zonnestraling wordt verzwakt, wordt door de hiernavolgende parameters bepaald.

▪ Atmosfeer van Rayleigh

De atmosfeer of optische dikte van Rayleigh is een theoretisch begrip om voor een eenheidsmassa van lucht de mate aan te geven waarin de zonnestraling in een schone en droge atmosfeer wordt verzwakt:

$$\delta_R = \frac{1}{0,9 m + 9,4} \quad (30)$$

δ_R atmosfeer of optische dikte van Rayleigh.

▪ Troebelheid van de atmosfeer

Om met de werkelijke samenstelling van de atmosfeer rekening te houden, dient op de optische dikte van Rayleigh een verminderingsfactor, de zogenaemde troebelheidsfactor, te worden toegepast.

Ref. 29 definieert de troebelheidsfactor als «de verhouding tussen de verzwakking van de zonnestraling in de werkelijke atmosfeer onder een gegeven invalshoek en de verzwakking van de zonnestraling in de referentie-atmosfeer (= schone en droge atmosfeer van Rayleigh) onder dezelfde invalshoek van de zon».

Naast bestanddelen van de atmosfeer die een deel van de straling absorberen, beïnvloeden ook andere factoren zoals vulkanische uitbarstingen, de stoompluim bij de uitstoot van koeltorens, luchtvervuiling, enz. de doorstroming van het zonlicht vooraleer het de aarde bereikt.

Naargelang van hun golflengte filteren al deze elementen het zonlicht in min of meer sterke mate. De hoeveelheid zonlicht die door de atmosfeer gaat, kan worden uitgedrukt in de troebelheidsfactor. Deze factor beïnvloedt de warmtestroom die het aardoppervlak opvangt.

Van alle parameters waarmee bij de bepaling van de zonnestraling rekening dient te worden gehouden, is de totale troebelheidsfactor het moeilijkst in te schatten. Hij hangt immers sterk van plaatselijke omstandigheden zoals stedelijke of industriële vervuiling af.

De belangrijkste invloedsfactoren voor de troebelheid van de atmosfeer zijn:

- de hoogte van de beschouwde plaats z ;
- de druk van de waterdamp aan het aardoppervlak;
- de coëfficiënt van Angström β_A , die de aërosolen in de atmosfeer weergeeft;
- de hoogtehoek van de zon γ ;
- de periode van het jaar, om rekening te houden met de dag- en seizoensvariaties van de troebelheid.

Het is praktisch onmogelijk om deze parameters voor elke gegeven plaats te bepalen. Daarom is een relatie ontwikkeld, die steunt op statistisch onderzoek tussen 1951 en 1980 in Ukkel (ref. 29 en 30). Ze geeft de voorwaarden voor een middelbare troebelheid bij een heldere hemel:

$$T_L = 3,372 + 0,053 \gamma - 0,296 \cos(30 \cdot k) \quad (31)$$

T_L totale troebelheidsfactor van Linke;
 k maandnummer.

We kunnen ook uitgaan van de minimale troebelheidsfactor T_{Lm} , die de gemiddelde waarden van de maandelijks minima van de totale troebelheidsfactor weergeeft:

$$T_{Lm} = 2,730 + 0,027 \gamma - 0,198 \cos(30 \cdot k) \quad (32)$$

Er wordt aangenomen dat deze relaties overal in België van toepassing zijn.

Let wel, de troebelheidsfactor geldt voor een heldere hemel. De invloed van de bewolking wordt later behandeld.

De extinctie van de zonnestraling wordt gelijk genomen aan het product van de optische dikte van Rayleigh δ_R met de totale troebelheidsfactor T_L . Dit levert een verminderingfactor op die rekening houdt met alle bestanddelen van de atmosfeer.

A.2.1.2 Berekening van de directe instraling

Deze paragraaf steunt op ref. 27 en beschrijft de directe zonnestraling die een horizontaal oppervlak bereikt bij verschillende bewolgingsgraden.

A.2.1.2.1 Directe instraling bij een heldere hemel

De directe instraling kunnen we afleiden door op de loodrechte instraling een verminderingfactor toe passen, om rekening te houden met de verzwakking van het zonlicht in de atmosfeer.

Noot:

Loodrechte instraling: de zonnestraling die een oppervlak bereikt dat loodrecht op de richting naar de zon staat en dat zich aan de rand van de aardatmosfeer (of op een hoogte van 80 km) bevindt.

We gebruiken de relatie:

$$I_c = I_{0j} \cdot \exp(-m \cdot \delta_R \cdot T_L) \cdot \sin\gamma \quad (33)$$

I_c directe instraling bij een heldere hemel (W/m^2);
 m optische luchtmassa;
 δ_R optische dikte van Rayleigh voor een eenheidsmassa van lucht;
 T_L totale troebelheidsfactor;
 I_{0j} loodrechte instraling (W/m^2). De loodrechte instraling wordt berekend met de relatie:

$$I_{0j} = I_0 \cdot K_d \quad (34)$$

I_0 zonneconstante. De zonneconstante is een gemiddelde waarde van de zonnestralingstroom = 1353 W/m^2 ;
 K_d correctiefactor voor de zonnestralingstroom om rekening te houden met de invloed van de elliptische baan van de aarde op de afstand tussen de aarde en de zon;

$$K_d = 1 + 0,03344 \cos(0,9856 \cdot j - 2,8^\circ) \quad (35)$$

j dagnummer.

A.2.1.2.2 Directe instraling bij een bewolkte hemel

Bij een bewolkte hemel is de directe instraling per definitie gelijk aan nul:

$$I_b = 0 \quad (36)$$

I_b directe instraling bij een bewolkte hemel (W/m^2).

A.2.1.2.3 Directe instraling bij een half bewolkte hemel

De verschillende theoretische benaderingen om de directe instraling bij een half bewolkte hemel te berekenen, gaan allemaal uit van de directe instraling bij een heldere hemel maar ze passen een andere correctiefunctie toe.

Wij kozen voor de relatie die in ref. 27 wordt voorgesteld en die representatief voor de bezonning in België is.

$$I_\sigma = \bar{\sigma}_d^n \cdot I_c \quad (37)$$

I_σ directe instraling bij een half bewolkte hemel (W/m^2);
 $\bar{\sigma}_d$ gemiddelde dagelijkse bezonning. Dit stemt in feite overeen met de bewolgingsgraad;

$$n = 1 + 0,36 \cdot \bar{\sigma}_d \quad (38)$$

A.2.1.3 Berekening van de diffuse instraling

Deze paragraaf steunt op ref. 30 en beschrijft de diffuse zonnestraling die een horizontaal oppervlak bereikt bij verschillende bewolgingsgraden.

A.2.1.3.1 Diffuse instraling bij een heldere hemel

De methode om de diffuse instraling bij een heldere hemel in te schatten, steunt op talrijke fotometrische metingen van de lichtverdeling².

² Fotometrie is de wetenschap die zich onder meer bezighoudt met de luminantie of helderheid (stralingstroom die per oppervlakte-eenheid en ruimtehoek wordt uitgezonden) van de aardatmosfeer.

Door integratie van de hoeveelheid licht die wordt uitgestraald per infinitesimale eenheid van ruimtehoek van de hemelkoepel verkrijgen we de lichtintensiteit die op een oppervlakte-eenheid instraalt:

$$f_i = \frac{L_c(\gamma_i, \alpha_i)}{L_c(\gamma_i = \pi/2)} = \frac{(0,910 + 10 \exp(-3\varepsilon) + 0,45 \cos^2 \varepsilon) \cdot (1 - \exp(-0,32 \csc \gamma_i))}{0,27385 \cdot (0,910 + 10 \exp(-3\zeta) + 0,45 \sin^2 \gamma)} \quad (39)$$

f_i lichtintensiteit per oppervlakte-eenheid;
 $L_c(\gamma_i, \alpha_i)$ luminantie van het hemelpunt op een hoogte γ_i en azimut α_i (W/m^2);
 $L_c(\gamma_i = \pi/2)$ luminantie van het zenitpunt (W/m^2). Ze is gelijk aan:

$$L_c(\gamma_i = \pi/2) = L'_c(\gamma) + L''_c(T) \quad (40)$$

$$L'_c(\gamma) = 0,8785 \gamma - 0,01322 \gamma^2 + 0,0003434 \gamma^3 \quad (41)$$

$$L''_c(T) = 0,44347 + 0,03644 \cdot T_L \quad (42)$$

ζ zenithoek van de zon ($^\circ$);
 ε hoekafstand tussen de richting van het beschouwde hemelpunt en de richting van de zon ($^\circ$):

$$\varepsilon = \arccos(\sin \gamma_i \cdot \sin \gamma + \cos \gamma_i \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_i)) \quad (43)$$

Door het discretiseren van de hemelkoepel in zones van 5° verkrijgen we een diffuse instraling D_c bij een heldere hemel (W/m^2):

$$D_c = K_d \cdot L_c(\gamma_i = \pi/2) \cdot \left\{ 0,0076154 \cdot \sum_{\gamma_i=2,5^\circ}^{87,5^\circ} \sum_{\alpha_i=2,5^\circ}^{357,5^\circ} f_i \cdot \sin \gamma_i \cdot \cos \gamma_i \right\} \quad (44)$$

A.2.1.3.2 Diffuse instraling bij een bewolkte hemel

De onderstaande relatie levert goede resultaten op voor de zomermaanden wanneer de zonshoogte meer dan 10° bedraagt:

$$D_b = 2,444 \cdot K_d \cdot L_b(\gamma_i = \pi/2) \quad (45)$$

D_b diffuse instraling bij een bewolkte hemel (W/m^2);

$$L_b(\gamma_i = \pi/2) = 81,23 \cdot (1 + 0,36 \times \sin \gamma) \cdot \sin \gamma \quad (46)$$

A.2.1.3.2 Diffuse instraling bij een half bewolkte hemel

Om de diffuse instraling bij een half bewolkte hemel D_σ (W/m^2) te bepalen, gebruiken we de formule:

$$D_\sigma = D_b \cdot (1 - \bar{\sigma}_h) + D_c \cdot (B \cdot \bar{\sigma}_h + (1-B) \cdot \bar{\sigma}_h^2) \quad (47)$$

$$B = 1,37 + 0,71 \sin \gamma \quad (48)$$

$$\bar{\sigma}_h = \zeta \cdot \bar{\sigma}_d \quad (49)$$

$\bar{\sigma}_h$ gemiddelde bezonning per uur.

$$\zeta = 0,5 + 1,023 \cdot (1 - \exp(-0,0956 \times \gamma)) \cdot (1 - \bar{\sigma}_d) \quad (50)$$

A.2.1.4 Berekening van de totale instraling

De som van de directe en de diffuse instraling geeft de totale instraling.

De totale instraling bij een heldere hemel bepalen we met de relatie (W/m^2):

$$G_c = I_c + D_c \quad (51)$$

Als we weten dat de directe instraling bij een bewolkte hemel gelijk aan nul is, is de formule om de totale instraling bij een bewolkte hemel te berekenen als volgt (W/m^2):

$$G_b = D_b(0,0) \quad (52)$$

De totale instraling bij een half bewolkte hemel berekenen we met de relatie (W/m^2):

$$G_\sigma = I_\sigma + D_\sigma \quad (53)$$

A.2.1.5 Albedo

Invallende zonnestraling wordt niet volledig door het aardoppervlak geabsorbeerd. Een deel verdwijnt weer terug naar de atmosfeer. Het deel dat wordt geabsorbeerd, is de absorptiecoëfficiënt. De verhouding tussen de gereflecteerde en de invallende straling is de albedo of het terugkaatsingsvermogen. Het hangt af van:

- de invalshoek van de invallende straling;
- de aard en de vochtigheidsgraad van de grond;
- de vochtigheid van het reflecterende oppervlak;
- de golflengte van de invallende straling.

De albedo van asfalt schommelt tussen 0,10 en 0,20. Voor dit model gaan we van de gemiddelde waarde 0,15 uit.

De totale zonnestraling die werkelijk door asfalt wordt opgevangen (ϕ_{stral}) berekenen we met de relatie (W/m^2):

$$\phi_{stral} = 0,85 \cdot G \quad (54)$$

A.2.2 Aardstraling en atmosferische straling

Elk lichaam zendt van nature straling naar zijn omgeving uit. De stralingsintensiteit hangt af van de aard en de temperatuur van het lichaam en wordt bepaald met de formule van Stephan-Boltzmann. Wij houden hierna enkel rekening met de atmosferische straling en de aardstraling.

De atmosferische straling L_{\downarrow} wordt verkregen met de relatie:

$$L_{\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma (T_{lucht} + 273,16)^4 \quad (55)$$

σ constante van Stephan-Boltzmann. Zij is gelijk aan $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$;
 T_{lucht} luchttemperatuur ($^{\circ}\text{C}$);
 ε_a emissiviteit of emissiecoëfficiënt van de lucht bij een bewolkte hemel. Deze coëfficiënt wordt bepaald met de relatie:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot (1 + 0,12 \cdot N^2) \quad (56)$$

ε_0 emissiviteit van de lucht bij een heldere hemel. Deze emissiecoëfficiënt wordt bepaald met de relatie:

$$\varepsilon_0 = 1 - 0,261 \cdot \exp(0,000777 \cdot T_{lucht}^2) \quad (57)$$

N fractie bewolkte hemel (%). Ze kan worden ingeschat met de relatie:

$$N = 1 - \bar{\sigma}_d \quad (58)$$

De aardstraling L_{\uparrow} wordt bepaald met de relatie:

$$L_{\uparrow} = \varepsilon_s \cdot \sigma (T_s + 273,16)^4 \quad (59)$$

T_s temperatuur van het wegooppervlak ($^{\circ}\text{C}$);
 ε_s emissiviteit van het oppervlak. Voor asfalt schommelt de emissiecoëfficiënt tussen 0,88 en 0,95.

Als de hoeveelheid aardstraling en atmosferische straling gekend is, kunnen we de stralingsbalans (infraroodstraling) L_r bepalen met de relatie (W/m^2):

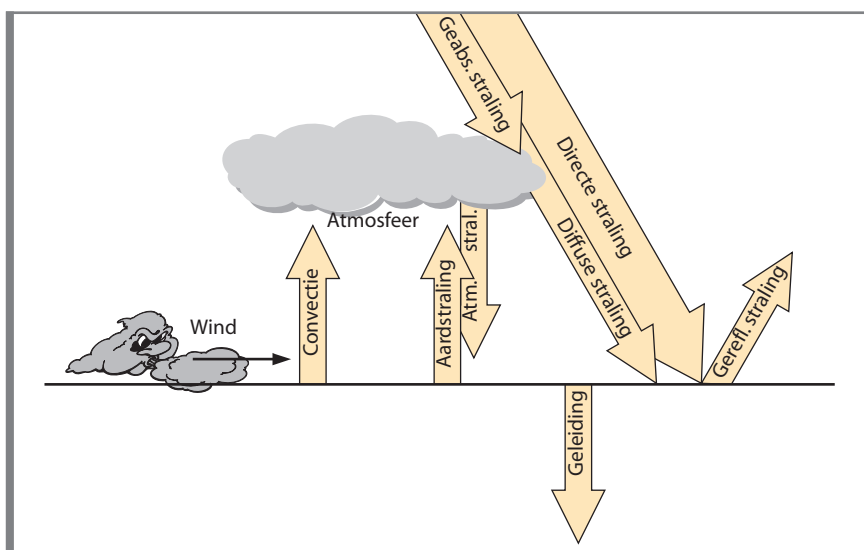
$$L_r = L_{\uparrow} + L_{\downarrow} \quad (60)$$

Hoofdstuk A.3

Vol eindmodel

Dit hoofdstuk beschrijft de ontwikkeling van het volle eindmodel, dat rekening houdt met de uur- en dagvariaties van de luchttemperatuur en met de verschillende soorten van zonnestraling. We behandelen ook de toetsing van dit eindmodel op bouwplaatsen en gaan dieper op de invloed van de verschillende parameters in.

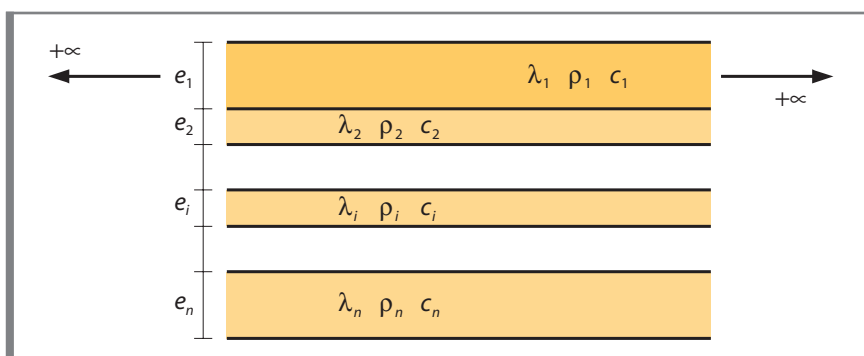
In figuur A.3.1 zijn de verschillende soorten van warmteoverdracht, die tussen een wegoppervlak en de omgeving optreden, schematisch voorgesteld.



Figuur A.3.1 Voornaamste soorten van warmteoverdracht tussen het wegoppervlak en de omgeving

A.3.1 Hypothesen van het volle eindmodel

De samenstellende lagen van een wegconstructie (verharding, fundering, onderfundering en ondergrond) hebben elk hun eigen aard en thermische kenmerken (zie tabel A.1.1). In de eerste benadering is hiermee bij de modellering van de wegconstructie geen rekening gehouden. Het lijkt echter aangewezen dit wel te doen. Figuur A.3.2 geeft deze modellering weer, waarin index i van de pas aangebrachte asfaltlaag gelijk is aan 1 en de index van het baanlichaam gelijk is aan n .



Figuur A.3.2 Modellering van de wegconstructie

In deze benadering is het baanlichaam niet meer halfoneindig in de verticale richting. De temperatuur op 1 m diepte (= maximale beschouwde diepte in dit model) wordt evenwel als constant beschouwd.

De volgende hypothesen worden aangenomen:

- de lagen van de wegconstructie zijn oneindig in de horizontale richting;
- de lagen van de wegconstructie zijn isotroop en homogeen;
- de windsnelheid is constant over de gehele beschouwde periode;
- de temperatuur van de wegconstructie is constant op een diepte van 1 m;
- er wordt geen rekening gehouden met de randeffecten (voor de pas aangebrachte laag);
- er wordt geen rekening gehouden met eventuele wateraanvoer (neerslag) op het wegoppervlak;
- de stralingsstroom is constant in elk punt van het baanlichaam;
- er is alleen warmteoverdracht op het scheidingsvlak tussen de lucht en het wegoppervlak; de zonnestraling vormt geen warmtebron in het baanlichaam.

A.3.2 Bepaling van de variaties van de luchttemperatuur

De bepaling van de uur- en dagvariaties van de luchttemperatuur steunt op ref. 32 en maakt het mogelijk het rekenmodel te verfijnen door rekening te houden met de dagamplitude (= verschil tussen de laagste en de hoogste temperatuur van een dag). Luchttemperatuurschommelingen beïnvloeden de warmteoverdracht door convectie en atmosferische straling.

Met een reeks van Fourier kan de wet van de uurvariatie worden bepaald:

$$T_{lucht} = \frac{A + B \cos \omega t + C \cos 2\omega t + D \sin \omega t + E \sin 2\omega t}{10} \quad (61)$$

T_{lucht} luchttemperatuur (°C);

$$\omega = \frac{2\pi}{24} \quad (62)$$

t universele tijd UT (h);
 A, B, C, D, E parameters die rekening houden met de dagvariaties. Zij worden bepaald met een reeks van Fourier, zoals bijvoorbeeld voor A :

$$A = K + L \cos \omega j + M \cos 2\omega j + N \sin \omega j + P \sin 2\omega j \quad (63)$$

K, L, M, N, P parameters die afhangen van de bezonning;
 j dagnummer.

$$\omega = \frac{2\pi}{366} \quad (64)$$

Tabellen A.3.1, 2 en 3 geven de waarden³ van de parameters K, L, M, N, P weer als functie van de hierna gedefinieerde bezonning:

- dagen met een heldere hemel: $\bar{\sigma}_d \geq 0,8$
- dagen met een bewolkte hemel: $\bar{\sigma}_d \leq 0,2$
- andere dagen: $0,2 < \bar{\sigma}_d < 0,8$

³ Deze waarden zijn voor het weerstation te Ukkel bepaald. Ze worden als geldig voor het volledige Belgische grondgebied beschouwd.

| Dagen met een heldere hemel | | | | | |
|-----------------------------|--------|---------|-------|--------|-------|
| | K | L | M | N | P |
| A | 108,01 | -100,21 | -9,74 | -21,76 | 4,72 |
| B | -35,58 | 18,06 | 4,79 | -0,22 | 0,20 |
| C | 9,28 | 2,92 | -3,32 | -2,17 | 0,55 |
| D | -26,54 | 12,54 | 4,44 | -3,88 | -2,27 |
| E | 1,88 | 5,69 | -0,94 | -0,94 | 1,36 |

Tabel A.3.1 Waarden van de parameters bij een heldere hemel

| Dagen met een bewolkte hemel | | | | | |
|------------------------------|--------|--------|-------|--------|-------|
| | K | L | M | N | P |
| A | 96,86 | -59,82 | -0,62 | -25,20 | 5,36 |
| B | -12,17 | 7,31 | 0,72 | -0,21 | -0,10 |
| C | 2,35 | 0,05 | -0,92 | -0,40 | 0,33 |
| D | -8,43 | 2,23 | 0,51 | -1,03 | -1,04 |
| E | 1,73 | -0,18 | -0,72 | 0,02 | 0,16 |

Tabel A.3.2 Waarden van de parameters bij een bewolkte hemel

| Andere dagen | | | | | |
|--------------|--------|--------|-------|--------|-------|
| | K | L | M | N | P |
| A | 101,81 | -74,52 | -2,64 | -24,24 | 3,95 |
| B | -23,62 | 14,73 | 2,09 | -0,59 | 0,38 |
| C | 6,05 | 1,02 | -2,10 | -1,40 | 0,11 |
| D | -15,13 | 8,37 | 2,01 | -2,62 | -0,79 |
| E | 3,54 | 2,25 | -0,82 | -0,28 | 1,05 |

Tabel A.3.3 Waarden van de parameters op andere dagen

A.3.3 Modelling van het temperatuurverloop in de wegconstructie

A.3.3.1 Vergelijkingen voor het temperatuurveld

De vergelijking voor het temperatuurveld voor elke laag i van de wegconstructie is:

$$\frac{\delta^2 T_i}{\delta x^2} - \frac{1}{a_i} \frac{\delta T_i}{\delta t} = 0 \quad (65)$$

a_i thermische diffusiviteit van een laag i (m^2/s);
 T_i temperatuur van een laag i ($^{\circ}C$).

A.3.3.2 Randvoorwaarden

A.3.3.2.1 Scheidingsvlak tussen de lucht en de asfaltlaag

Het scheidingsvlak tussen de lucht en de pas aangebrachte asfaltlaag (index $i = 1$) ontvangt een stralingsstroom, die gelijk is aan de stralingsbalans (= het resultaat van de hoeveelheid straling die de atmosfeer verlaat en de hoeveelheid straling die de aarde bereikt):

$$r = \phi_{stral} + L\downarrow - L\uparrow \quad (66)$$

In dit scheidingsvlak treden ook geleiding en convectie op. De hypothese van een constante stroom levert de volgende randvoorwaarde op:

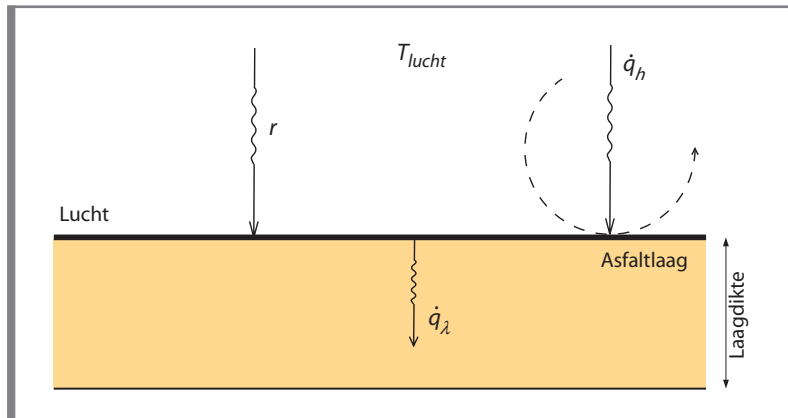
$$\dot{q}_\gamma = \dot{q}_h + r \quad (67)$$

Door elke term te ontwikkelen, verkrijgen we:

$$-\lambda_1 \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=0} = h \cdot (T_{lucht} - T_1(x, t)|_{x=0}) + \phi_{stral} + L\downarrow - L\uparrow \quad (68)$$

of:

$$-\lambda_1 \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=0} = h \cdot T_1(x, t)|_{x=0} + L\uparrow = h \cdot T_{lucht} + \phi_{stral} + L\downarrow \quad (69)$$



Figuur A.3.3 Scheidingsvlak tussen de lucht en de asfaltlaag

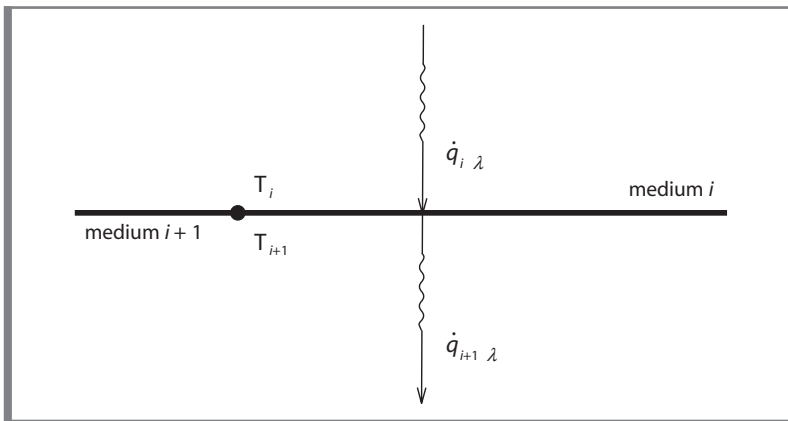
A.3.3.2.2 Scheidingsvlak tussen twee lagen

Voor de lagen met index i en $i + 1$ dient alleen rekening te worden gehouden met de voorwaarde van een constante geleidingsstroom in het scheidingsvlak tussen deze lagen:

$$-\lambda_i \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=(i,i+1)} = -\lambda_{i+1} \frac{\delta T_{i+1}}{\delta x} \Big|_{x=(i,i+1)} \quad (70)$$

en

$$T_i(x, t)|_{x=(i,i+1)} = T_{i+1}(x, t)|_{x=(i,i+1)} \quad (71)$$



Figuur A.3.4 Scheidingsvlak tussen twee lagen van een wegconstructie

A.3.3.2.3 Voorwaarde op een diepte van 1 m

Op een voldoende grote diepte zal de warmteaanvoer van de pas aangebrachte asfaltlaag geen invloed meer hebben op de temperatuur van de wegconstructie. Die diepte wordt hypothetisch gelijk gesteld aan 1 m. We kunnen de volgende relatie afleiden:

$$T_n(x = 1m, t) = Cte \quad (72)$$

Cte constante temperatuur op 1 m diepte ($^{\circ}C$).

A.3.3.3 Temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrenging van de nieuwe asfaltlaag

De temperatuurverdeling in de wegconstructie op het begintijdstip $t = 0$ wordt verkregen met de vergelijking:

$$T_i(x, 0) = f(x) \quad (73)$$

$f(x)$ functie ter bepaling van de temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrenging ($^{\circ}C$).

Figuur A.1.4 geeft deze temperatuurverdeling weer.

A.3.3.4 Stelsel van vergelijkingen

Door het onderstaande stelsel van vergelijkingen op te lossen, verkrijgen we het temperatuurverloop in de wegconstructie van een gegeven begintoestand tot het nieuwe thermische evenwicht is bereikt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta^2 T_i}{\delta x^2} - \frac{1}{a_i} \frac{\delta T_i}{\delta t} = 0 \\ -\lambda_1 \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=0} = h \cdot T_1(x, t) \Big|_{x=0} + L \uparrow = h \cdot T_{lucht} + \phi_{stral} + L \downarrow \\ -\lambda_i \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=(j,i+1)} = -\lambda_{i+1} \frac{\delta T_{i+1}}{\delta x} \Big|_{x=(j,i+1)} \\ T_i(x, t) \Big|_{x=(j,i+1)} = T_{i+1}(x, t) \Big|_{x=(j,i+1)} \\ T_n(x = 1m, t) = Cte \\ T_i(x, 0) = f(x) \end{array} \right. \quad (74)$$

A.3.4 Toepassing van het volle eindmodel

Ref. 23 beschrijft uitvoerig de toepassing van het volle eindmodel door middel van eindige verschillen.

A.3.5 Toetsing van het volle eindmodel op bouwplaatsen

A.3.5.1 Methodiek

Voor de toetsing van het volle eindmodel is dezelfde methodiek toegepast als voor de toetsing van het eerste, beperkte model (zie 1.4. *Toetsing en beperkingen van het eerste, beperkte model*).

Om de meting van de windsnelheid te verbeteren, is hier evenwel een thermo-anemometer gebruikt (foto A.3.1). Met dit toestel kan tijdens de duur van de metingen onder meer de gemiddelde, de maximale en de minimale windsnelheid worden bepaald. Het wordt nabij de pas aangebrachte asfaltlaag op een hoogte van 1 m aangebracht.



Foto A.3.1 Thermo-anemometer

A.3.5.2 Parameters van de bouwplaatsen

Voor de toetsing van het volle eindmodel zijn metingen uitgevoerd op vier verschillende bouwplaatsen. De parameters van deze werken zijn in de tabellen A.3.4 en A.3.5 weergegeven.

| Bouwplaats | Datum | T_{lucht} (°C) | $T_{oppervlak}$ (°C) | $T_{aanbrenging}$ (°C) | v_{wind} (m/s) | Bewolgings- graad (%) |
|------------|------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| 5 | 10/04/2005 | 10,5 | 10 | 171 | 1,24 | 85 |
| 6 | 07/04/2005 | 11,1 | 10 | 153 | 0,80 | 70 tot 80 |
| 7 | 08/04/2005 | 10,1 | 9 | 155 | 1,00 | 100 |
| 8 | 28/09/2004 | 18,2 | 13 | 165 | 1,10 | 100 |

Tabel A.3.4 Parameters van de bouwplaatsen

| Bouwplaats | Begintijdstip | Duur van de metingen (min) | Aantal metingen |
|------------|---------------|----------------------------|-----------------|
| 5 | 9:28 | 115 | 5 x 3 |
| 6 | 11:43 | 115 | 3 x 3 |
| 7 | 11:24 | 82 | 3 x 3 |
| 8 | 10:36 | 150 | 4 x 3 |

Tabel A.3.5 Beschrijving van de metingen

Voor de toepassing van het volle eindmodel dient de opbouw van de wegconstructie gekend te zijn. Tabel A.3.6 geeft de opbouw voor elke bouwplaats weer. In tabel A.3.7 zijn de thermische parameters van de toegepaste materialen weergegeven.

| Bouwplaats | Nieuwe asfaltlaag (mm) | | Onderlaag (mm) | | Fundering (mm) | | Baan-lichaam |
|------------|------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------|------------|--------------|
| | 5 | AB-4C ¹ | 40 | BITV _{frez} ³ | 20 | Bestrating | |
| 6 | SMA-C ² | 40 | AB-3D | 30 | Bestrating | 150 | Zand |
| 7 | AB-4C | 40 | BITV _{frez} | 30 | Bestrating | 160 | Zand |
| 8 | AB-3A | 50 | - | - | Steenslag | 200 | Zand |

¹ Asfaltbeton voor toplagen (korrelmaat 0/10)

² Steenmastiekasfalt (korrelmaat 0/10)

³ Gedeeltelijk afgefreesde bitumineuze verharding

Tabel A.3.6 Opbouw van de wegconstructies

| Material | λ (W/m.°C) | c (J/kg.°C) | ρ (kg/m ³) |
|----------------------|--------------------|---------------|-----------------------------|
| AB-4C | 2,0 | 869 | 2 350 |
| SMA-C | 1,2 | 921 | 2 400 |
| AB-3A | 2,0 | 869 | 2 350 |
| AB-3D | 2,0 | 869 | 2 350 |
| BITV _{frez} | 2,0 | 921 | 2 400 |
| Bestrating | 2,4 | 794 | 2 400 |
| Steenslag | 1,31 | 837 | 1 750 |
| Zand | 0,33 | 879 | 1 520 |

Tabel A.3.7 Thermische parameters van de toegepaste materialen

Noot:

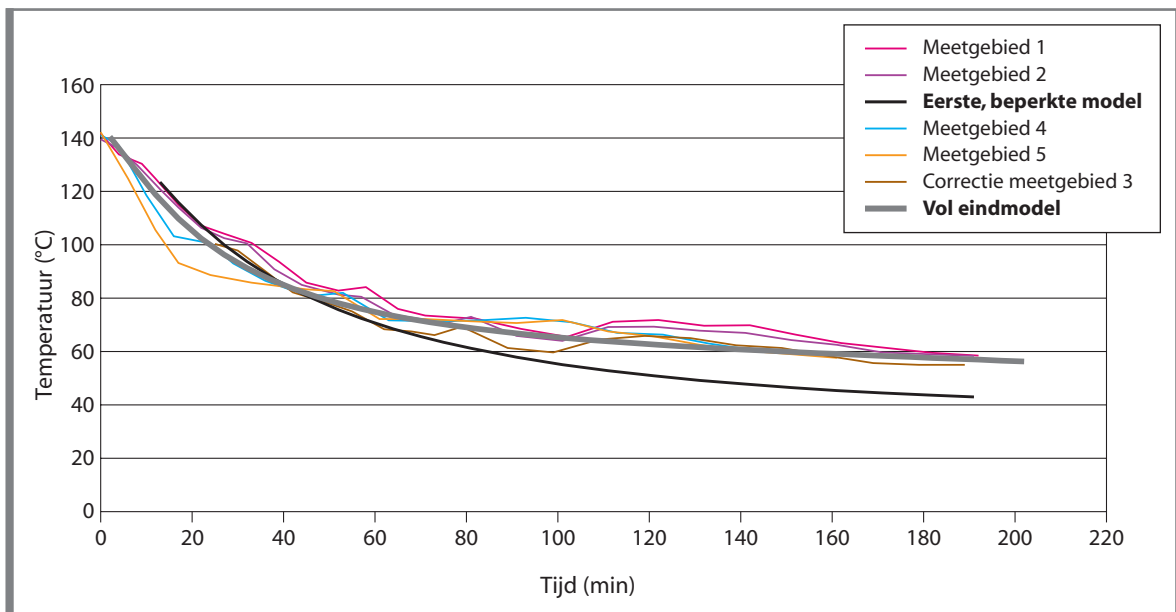
- De keuze van de materialen en de laagdikten steunt niet op onderzoek, maar op informatie van de uitvoerende aannemer. De gegevens zijn dus ter informatie.
- Het baanlichaam is het deel van de wegconstructie dat zich onder de fundering tot 1 m diepte bevindt. Het omvat de eventuele onderfundering. Eenvoudigheidshalve is aangenomen dat het baanlichaam uit zand bestaat.

A.3.5.3 Vergelijking tussen metingen en berekeningen

A.3.5.3.1 Bouwplaats 4

Bij de toetsing van het eerste beperkte model is gebleken (zie A.1.4.3.2) dat het temperatuurverloop van de pas aangebrachte asfaltlaag bij sterke bezonning en windluw weer moeilijk correct kan worden gemodelleerd.

We hebben het afkoelingsproces opnieuw vooruit berekend met het volle eindmodel voor een windsnelheid = 0,5 m/s. In figuur A.3.5 is de aldus verkregen afkoelingskromme getekend, naast de eerder gemeten krommen en de met het eerste, beperkte model berekende kromme.



Figuur A.3.5 *Bouwplaats 4 - Vergelijking tussen de gemeten krommen en de herberekende kromme*

De herberekende kromme en de gemeten krommen blijken vrij goed te correleren.

A.3.5.3.2 *Nieuwe bouwplaatsen*

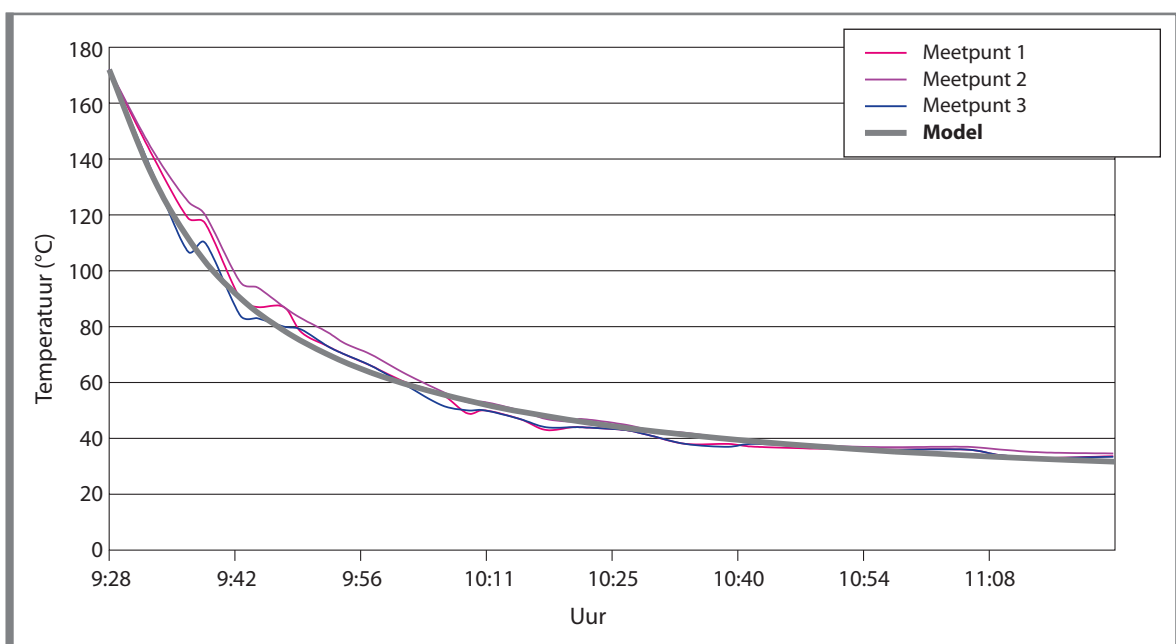
Noot:

Omdat het volle eindmodel rekening houdt met de uurvariatie van de luchttemperatuur:

- is de temperatuur tegenover het uur uitgezet;
- mag de berekende kromme slechts met één enkele gemeten kromme worden vergeleken (behalve wanneer de metingen in de verschillende meetgebieden meteen na elkaar zijn verricht).

▪ *Bouwplaats 5*

In figuur A.3.6 zijn naast de berekende kromme de in het meetgebied 1 gemeten krommen getekend.

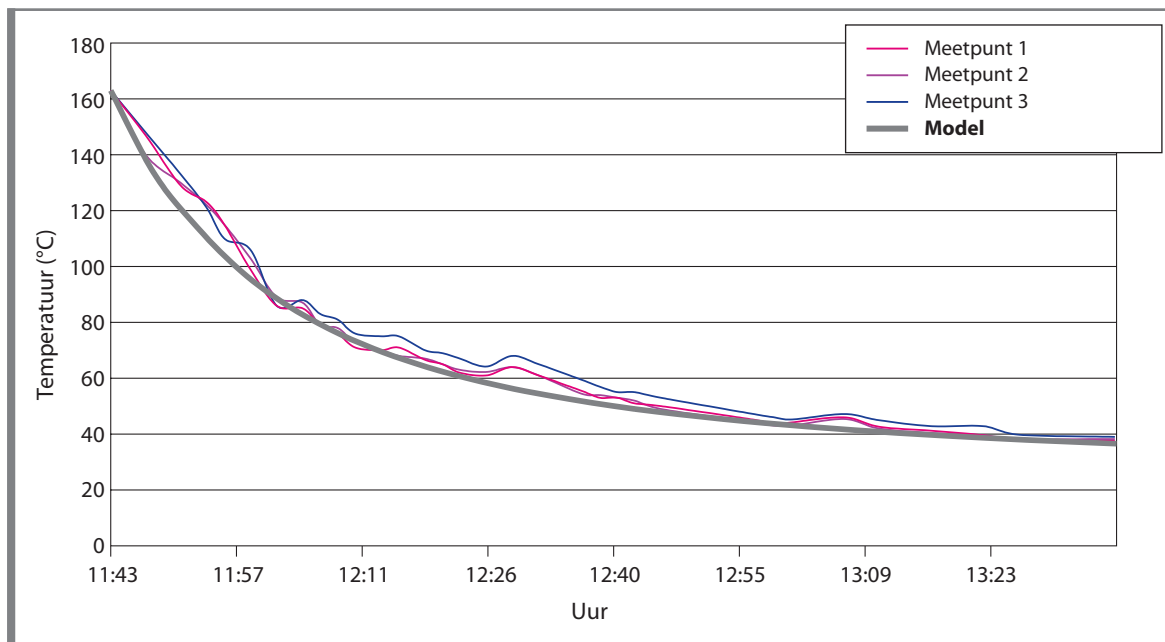


Figuur A.3.6 *Bouwplaats 5 - Meetgebied 1 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen*

De gemeten en berekende krommen blijken goed gecorreleerd te zijn. Dezelfde vaststelling geldt voor de andere meetgebieden.

▪ *Bouwplaats 6*

In figuur A.3.7 zijn naast de berekende kromme de in het meetgebied 3 gemeten krommen getekend.



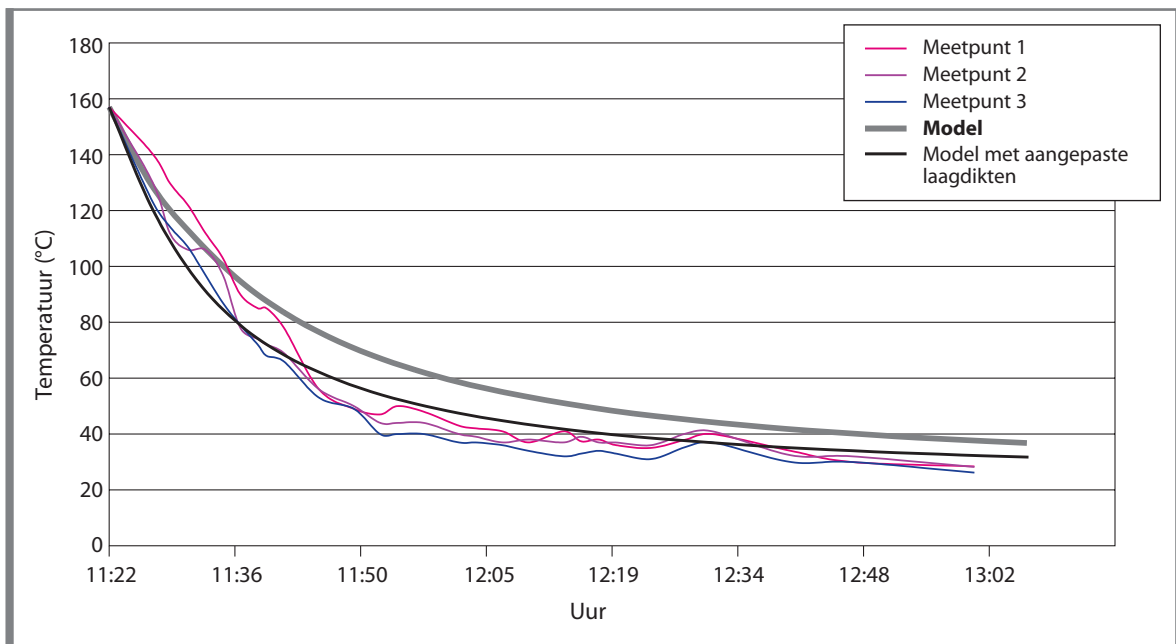
Figuur A.3.7 *Bouwplaats 6 - Meetgebied 3 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen*

De gemeten en berekende krommen voor het meetgebied 3 blijken goed gecorreleerd te zijn. Voor het meetgebied 2 (figuur A.3.8) verloopt de berekende kromme hoger dan de gemeten krommen, mogelijk omdat de werkelijke laagdikten afwijken van de verklaarde (en dus aan het model toegevoerde) laagdikten. In principe is de bestaande asfalttoplaag volledig tot op de (tonronde) bestrating afgereesd. Daarop diende de AB-3D-onderlaag over een veranderlijke dikte te worden aangebracht, om de tonronde weg te werken en de SMA-C-toplaag over een gelijkmatige dikte te kunnen aanbrengen. Omdat de temperatuur in het midden van de asfaltstrook (wat voor deze bouwplaats met het midden van de wegconstructie overeenstemt) wordt gemeten, lijkt het dus waarschijnlijk dat de verklaarde laagdikten op die plaats niet zijn bereikt.

De laagdikten zijn als volgt aangepast:

- SMA-C-laag: 40 mm → 30 mm;
- AB-3D-laag: 30 mm → 20 mm.

In figuur A.3.8 is voor het meetgebied 2 naast de gemeten en de berekende krommen ook de herberekende kromme getekend.

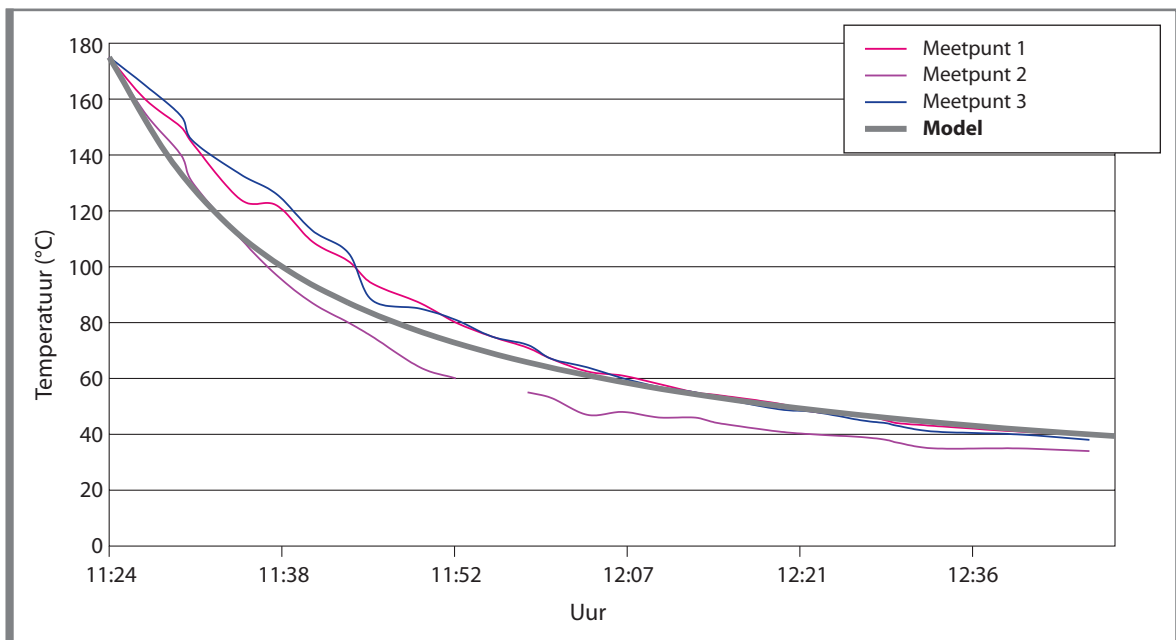


Figuur A.3.8 Bouwplaats 6 - Meetgebied 2 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen

De herberekende kromme (zie *Model met aangepaste laagdikten*) blijkt beter met de gemeten krommen te correleren. Na een afkoelingstijd van 100 min bedraagt het verschil tussen de twee berekende krommen ongeveer 5 °C.

▪ *Bouwplaats 7*

In figuur A.3.9 zijn naast de berekende kromme de in het meetgebied 3 gemeten krommen getekend.

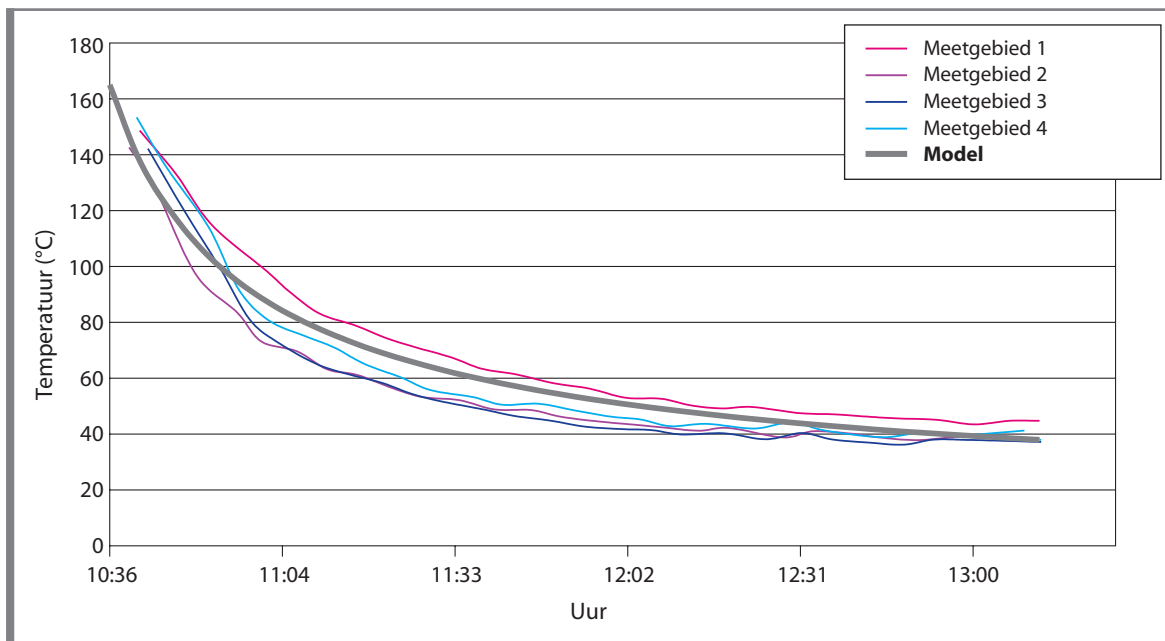


Figuur A.3.9 Bouwplaats 7 - Meetgebied 3 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen

De gemeten en berekende krommen blijken goed gecorreleerd te zijn.

▪ *Bouwplaats 8*

In figuur A.3.10 zijn de berekende kromme en de gemiddelde gemeten krommen voor elk meetgebied getekend. Dit was mogelijk omdat de metingen in de verschillende meetgebieden snel na elkaar zijn uitgevoerd.



Figuur A.3.10 *Bouwplaats 8 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen*

De berekende en gemeten krommen blijken goed gecorreleerd te zijn.

A.3.5.4 Commentaar

Het volle eindmodel is enkel getoetst op bouwplaatsen met gebruikelijke asfaltmengsels (asfaltbeton en SMA). Het was niet mogelijk het model ook op een bouwplaats met zeer open asfalt (ZOA) te toetsen. Door de open structuur van ZOA mag men een snellere afkoeling van de pas aangebrachte asfaltlaag verwachten.

Uit de toetsing is gebleken dat:

- de simulaties en de metingen goed correleren, zelfs bij extreme temperaturen en windsnelheden;
- de laagdikte het afkoelingsproces slechts in geringe mate beïnvloedt.

A.3.6 Onderzoek naar de invloed van variërende invoerparameters

Hierna onderzoeken we de invloed van variërende klimaatparameters op het afkoelingsproces van een pas aangebrachte asfaltlaag. De afkoeling van lagen met een verschillende dikte en samenstelling wordt eveneens onderzocht.

A.3.6.1 Keuze van de parameters

Met uitzondering van de thermische parameters van de toegepaste materialen zijn de invoerparameters dezelfde als voor het eerste, beperkte model. Ze zijn beschreven in A.1.3 *Bepaling van de invoerparameters voor het eerste, beperkte model*.

Naargelang van de bron kunnen de waarden van deze parameters (zie tabel A.1.1) soms sterk verschillen. Ze kunnen worden bijgesteld aan de hand van de waarden voor de toetsing van het volle eindmodel. Hier zij opgemerkt dat de warmtegeleiding, de soortelijke warmte en de volumieke massa van de onderliggende lagen slechts een beperkte invloed op het temperatuurverloop in de pas aangebrachte asfaltlaag hebben. De variatie van de thermische parameters van de asfaltlagen (waaronder de pas aangebrachte laag) heeft gedurende enige tijd een significante invloed op het afkoelingsproces, maar deze invloed vermindert na enkele uren.

In tabel A.3.8 is de beschouwde opbouw weergegeven.

| Materiaal | Laagdikte (mm) | λ (W/m.°C) | c (J/kg.°C) | ρ (kg/m ³) |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|
| AB-1B | 50 | 2,00 | 869 | 2 350 |
| AB-3A | 70 | 2,00 | 869 | 2 350 |
| Steenslag | 200 | 1,31 | 837 | 1 750 |
| Onderfundering van zand | 200 | 1,00 | 879 | 1 520 |
| Samenhangende grond | 480 | 1,59 | 1 214 | 2 066 |

Tabel A.3.8 Thermische parameters van de toegepaste materialen

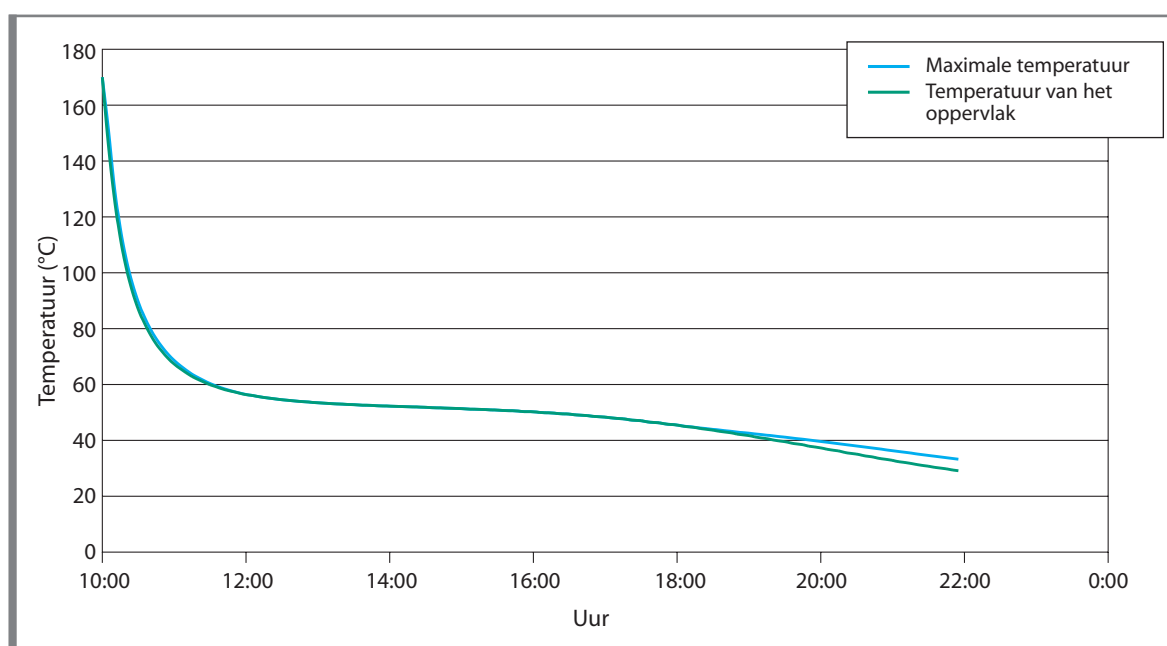
Er is van de volgende parameters uitgegaan:

- aanbrengingstemperatuur = 170 °C;
- temperatuur voor de wederopenstelling voor het verkeer (kort *drempeltemperatuur*) = 33 °C (bitumen 50/70);
- temperatuur van het baanlichaam = 14 °C.

Behalve wanneer de invloed van de beschouwde parameter wordt onderzocht, is voor de afkoelingskrommen uitgegaan van:

- aanbrenging op 15 juli;
- begin van de verdichting om 10.00 uur;
- windsnelheid = 0,5 m/s;
- een heldere hemel.

In deze paragraaf beschouwen we de maximale temperatuur van de pas aangebrachte asfaltlaag. Deze temperatuur stemt overeen met de temperatuur van het oppervlak bij het begin van de afkoeling en op andere tijdstippen onder bepaalde stralingsomstandigheden. Figuur A.3.11 geeft een vergelijking van de maximale temperatuur en de temperatuur van het oppervlak van de laag.



Figuur A.3.11 Afkoeling van pas aangebracht asfalt: krommen van de maximale temperatuur en van de temperatuur van het oppervlak

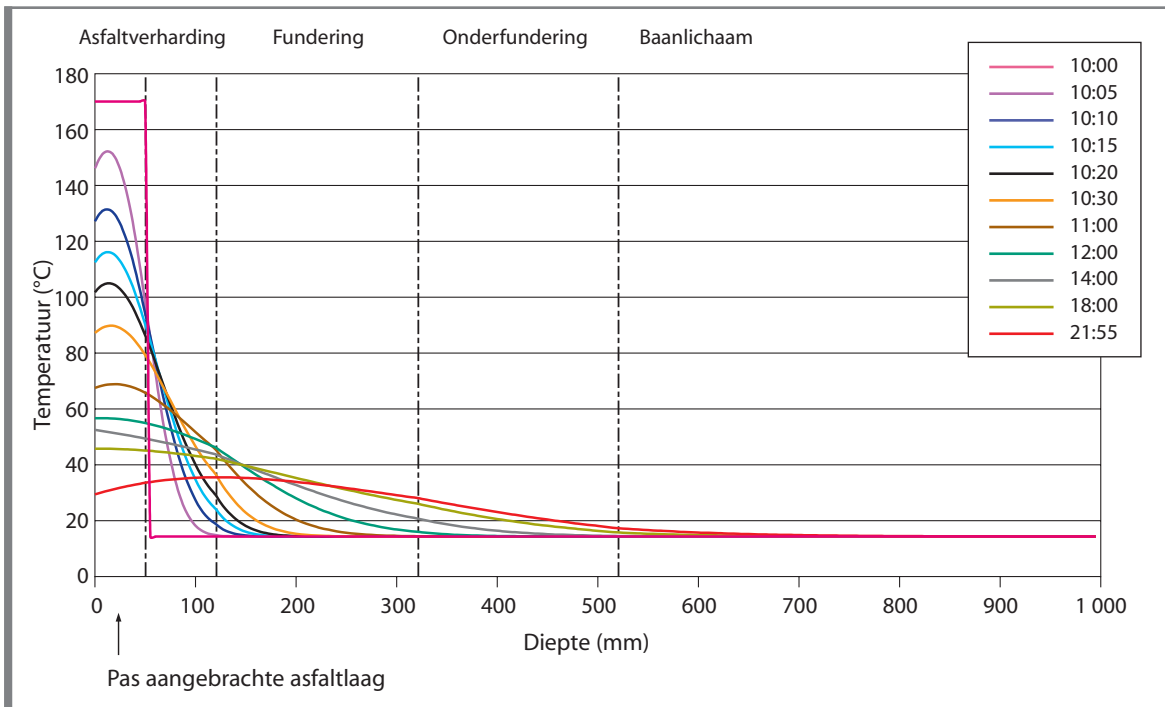
Noot:

De twee krommen vertonen een buiging rond 17:00, onder meer omdat rond dit tijdstip de intensiteit van de zonne- en atmosferische straling afneemt in vergelijking met de aardstraling.

A.3.6.2 Temperatuurverloop in de wegconstructie

Figuur A.3.12 geeft het temperatuurverloop in de wegconstructie weer. Hieruit is duidelijk af te leiden dat:

- de temperatuur in de pas aangebrachte asfaltlaag op het begintijdstip $T = 0$ (10:00) 170 °C bedraagt, tegenover 14 °C in de rest van de wegconstructie;
- de temperatuur constant blijft vanaf een diepte van 800 mm.



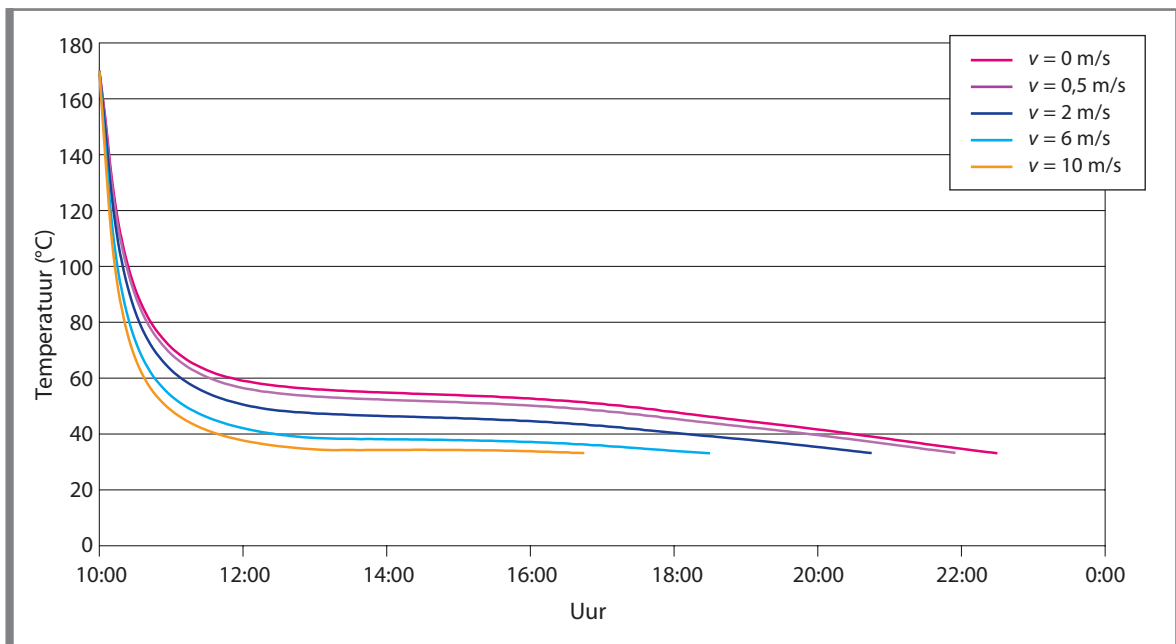
Figuur A.3.12 *Temperatuurverloop in de wegconstructie*

In tegenstelling met figuur A.1.5 die de met het eerste, beperkte model berekende afkoelingskromme van een pas aangebrachte AB-1B-laag weergeeft, stellen we vast dat de maximale temperatuur zich niet steeds in de pas aangebrachte asfaltlaag voordoet:

- om 21:55 tekenen we de maximale temperatuur op in het scheidingsvlak tussen de AB-3A-laag en de steenslag, voornamelijk omdat de lucht 's nachts kouder is dan overdag;
- de maximale temperatuur in de pas aangebrachte asfaltlaag is gemeten om 14:00, als gevolg van de zonne- en atmosferische straling (heldere hemel).

A.3.6.3 Invloed van de windsnelheid op het afkoelingsproces

Convectie maakt dat de windsnelheid een invloed op het afkoelingsproces heeft. Hoe hoger de windsnelheid, hoe sneller immers de afkoeling verloopt. Figuur A.3.13 geeft de afkoelingskrommen voor asfalt bij een windsnelheid van 0 tot 10 m/s weer.

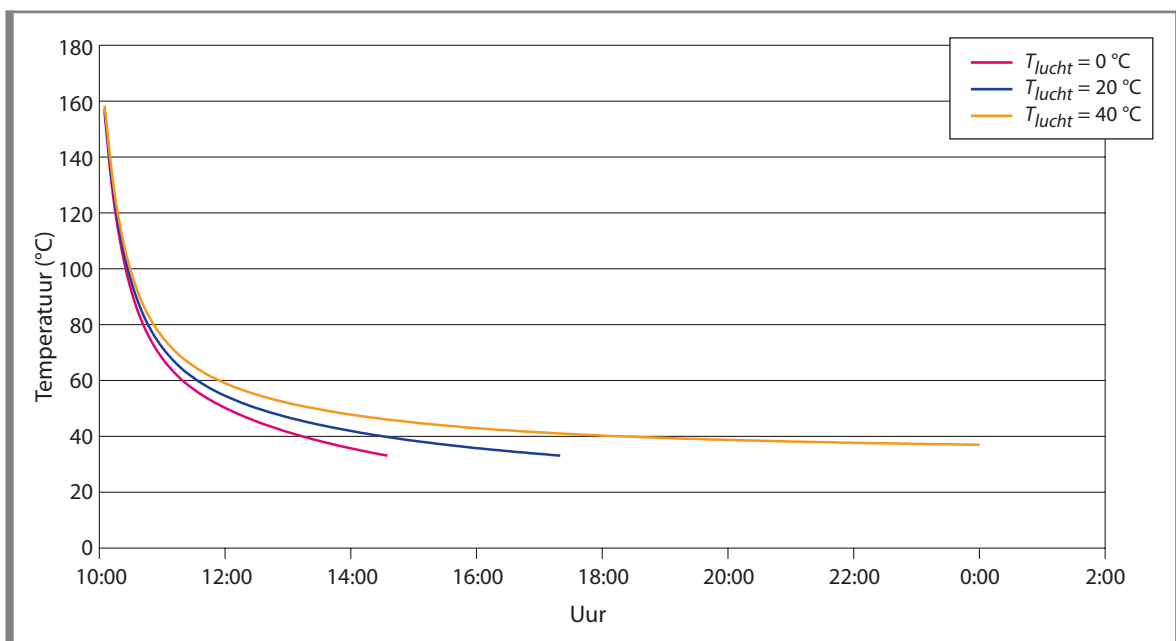


Figuur A.3.13 Invloed van de windsnelheid op het afkoelingsproces

A.3.6.4 Invloed van de luchttemperatuur en van de soorten van straling op het afkoelingsproces

De luchttemperatuur hangt onder meer af van de zonne- en atmosferische straling. Daarom dient naast de invloed van de luchttemperatuur ook die van de zonne- en atmosferische straling in rekening te worden gebracht. Bovendien wordt ook rekening gehouden met de invloed van de aardstraling.

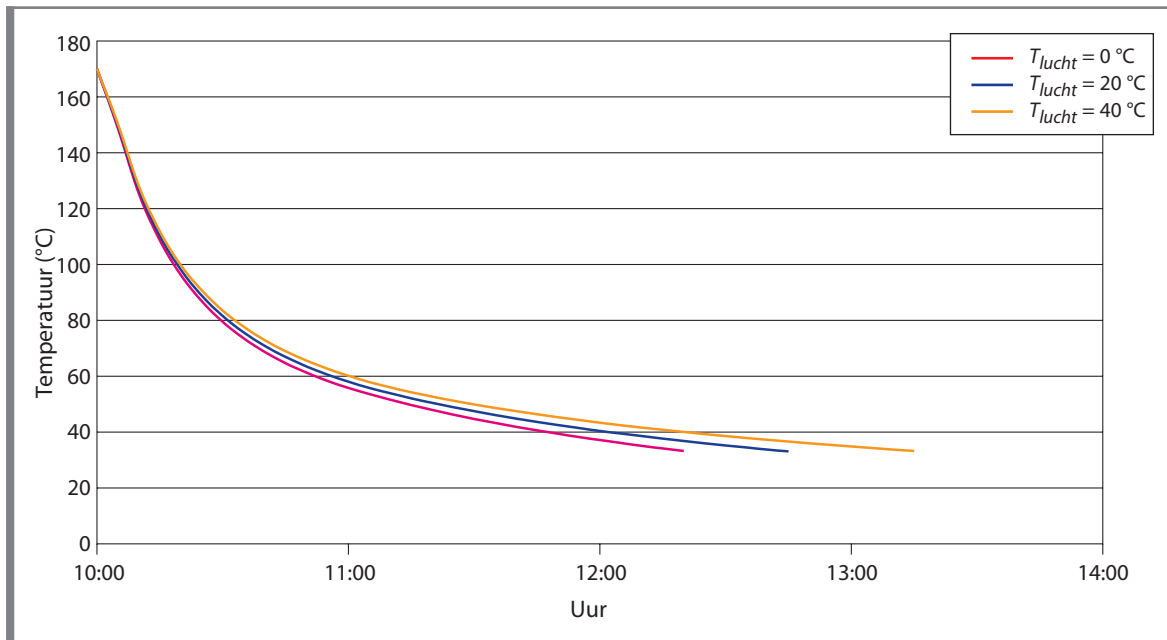
In een eerste benadering houden we net als in het eerste, beperkte model geen rekening met de invloed van de verschillende soorten van straling op het afkoelingsproces. We nemen bovendien aan dat de luchttemperatuur constant blijft tijdens de volledige duur van de afkoeling. Figuur A.3.14 geeft de afkoelingskrommen weer voor een luchttemperatuur van 0 °C, 20 °C en 40 °C.



Figuur A.3.14 Invloed van de luchttemperatuur op het afkoelingsproces (er wordt geen rekening gehouden met de verschillende soorten van straling)

Bij een luchttemperatuur van 40 °C bereikt de temperatuur van de pas aangebrachte asfaltlaag nooit de drempeltemperatuur van 33 °C. Dit bevestigt onze conclusie na de toetsing van het eerste, beperkte model, namelijk dat deze benadering niet met de werkelijkheid strookt.

Figuur A.3.15 geeft het afkoelingsproces voor dezelfde drie luchttemperaturen weer, maar nu is er wel rekening gehouden met de aardstraling. Ook in dit geval is er vanuit gegaan dat de luchttemperatuur constant blijft tijdens de volledige duur van de afkoeling.

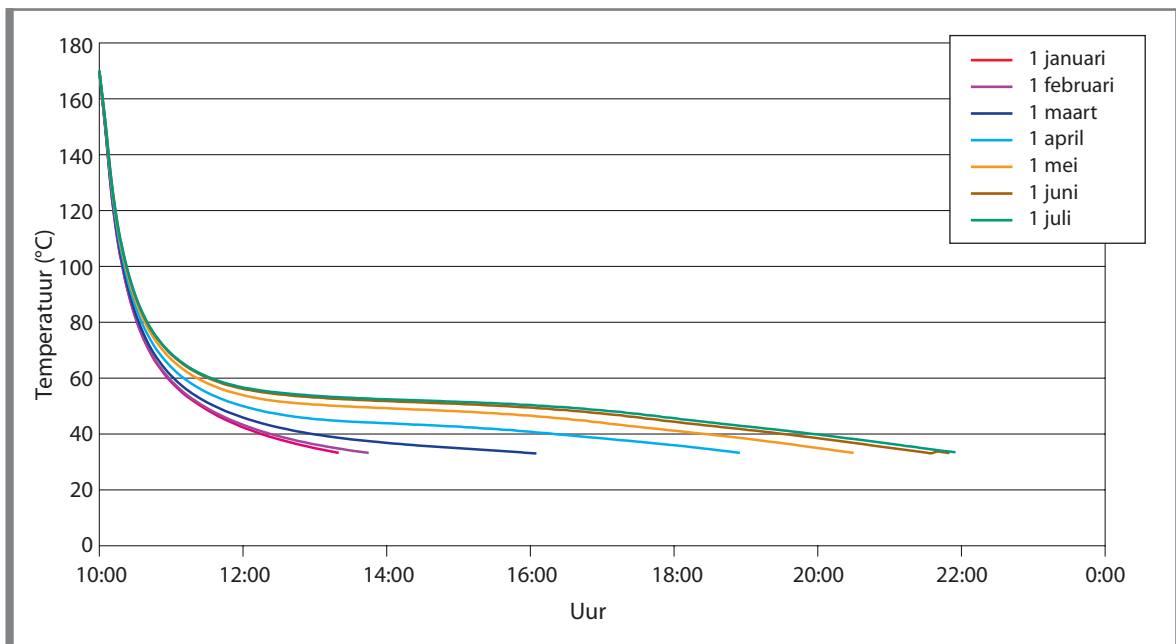


Figuur A.3.15 Invloed van de luchttemperatuur op het afkoelingsproces (er wordt alleen rekening gehouden met de invloed van de aardstraling)

De drempeltemperatuur van 33 °C wordt in alle gevallen bereikt en bovendien veel sneller dan in het voorgaande geval. Dit toont aan dat de warmte-uitwisseling door straling tussen de asfaltlaag en de atmosfeer het afkoelingsproces beïnvloedt. Daarom dient ook de aardstraling in rekening te worden gebracht.

Figuur A.3.16 geeft het verloop van de afkoeling weer voor asfaltlagen die op verschillende dagen – telkens de eerste dag van de beschouwde maand – zijn aangebracht. Bij de berekening is rekening gehouden met:

- de zonnestraling;
- de atmosferische straling;
- de aardstraling;
- de uurvariatie van de luchttemperatuur.



Figuur A.3.16 Invloed van de dag van aanbrenging op het afkoelingsproces

De afkoeling verloopt het snelst op 1 januari en het traagst op 1 juli. De afkoelingstijd voor de maanden augustus tot december stemt ongeveer overeen met de afkoelingstijd voor de maanden juni tot februari.

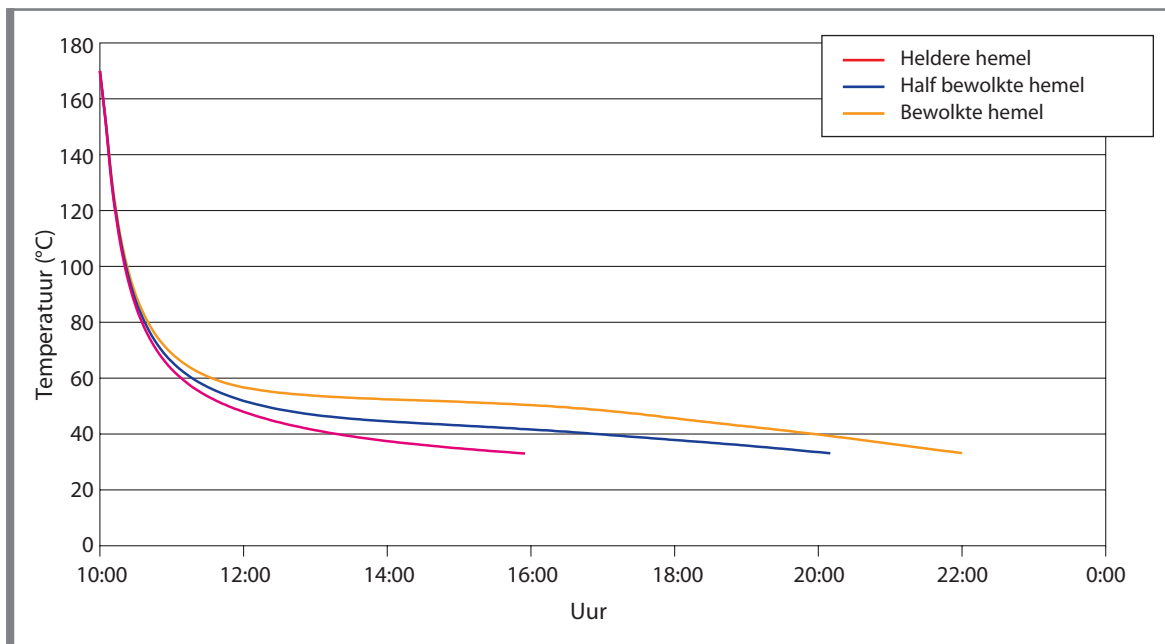
Tabel A.3.9 geeft de afkoelingstijd voor de beschouwde dagen weer.

| Dag van aanbrenging | Afkoelingstijd (min) |
|---------------------|----------------------|
| 1 januari | 219 |
| 1 februari | 253 |
| 1 maart | 363 |
| 1 april | 539 |
| 1 mei | 633 |
| 1 juni | 696 |
| 1 juli | 722 |
| 1 augustus | 702 |
| 1 september | 631 |
| 1 oktober | 516 |
| 1 november | 339 |
| 1 december | 247 |

Tabel A.3.9 Afkoelingstijd volgens de dag van de aanbrenging

A.3.6.5 Invloed van de bewolgingsgraad op het afkoelingsproces

Figuur A.3.17 illustreert de grote invloed van de bewolgingsgraad op de afkoelingstijd. Het wolkendek bepaalt immers mee de hoeveelheid straling die het aardoppervlak bereikt.



Figuur A.3.17 Invloed van de bewolgingsgraad op het afkoelingsproces

Bij een bewolkte hemel kan de afkoeling tot tweemaal sneller verlopen: 359 min, tegenover 719 min bij een heldere hemel.

A.3.6.6 Invloed van het aanbrengingstijdstip op het afkoelingsproces

Het aanbrengingstijdstip of om precies te zijn het uur waarop de verdichting begint, heeft een invloed op de afkoelingstijd. Die invloed hangt af van de stralingsintensiteit op de asfaltlaag tijdens de dag. Als de verdichting later op de dag plaatsvindt, is de geabsorbeerde straling kleiner en zal de afkoeling sneller verlopen.

Tabel A.3.10 geeft de afkoelingstijd weer volgens het aanbrengingstijdstip, weliswaar in extreme omstandigheden:

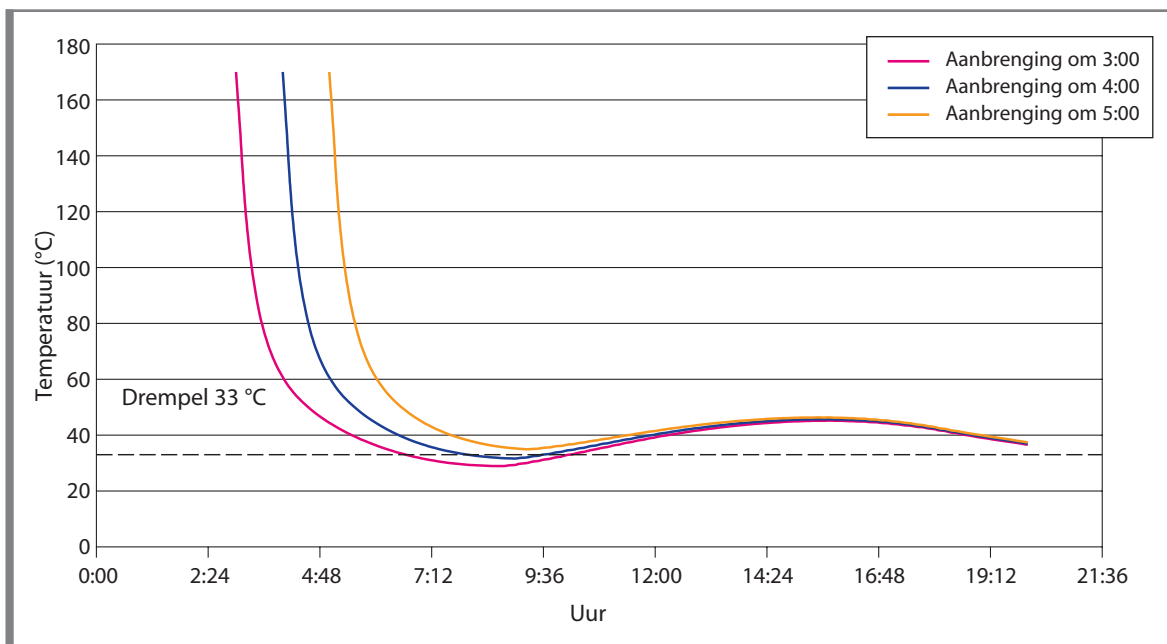
- aanbrengingstijdstip = 15 juli;
- heldere hemel (bewolgingsgraad = 0 %);
- windluw.

| Aanbrengings-tijdstip | Afkoelingstijd (min) | Aanbrengings-tijdstip | Afkoelingstijd (min) |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 0:00 | 222 | 12:00 | 602 |
| 1:00 | 219 | 13:00 | 542 |
| 2:00 | 217 | 14:00 | 483 |
| 3:00 | 218 | 15:00 | 427 |
| 4:00 | 238 | 16:00 | 374 |
| 5:00 | 987 | 17:00 | 327 |
| 6:00 | 935 | 18:00 | 289 |
| 7:00 | 883 | 19:00 | 262 |
| 8:00 | 830 | 20:00 | 244 |
| 9:00 | 775 | 21:00 | 234 |
| 10:00 | 719 | 22:00 | 229 |
| 11:00 | 661 | 23:00 | 226 |

Tabel A.3.10 Afkoelingstijd volgens het aanbrengingstijdstip op 15 juli

Tussen 20:00 en 4:00 bedraagt de afkoelingsijd ongeveer vier uren, omdat de zonne- en atmosferische straling dan erg zwak en de luchttemperatuur nagenoeg constant is.

Om 5:00 stijgt de afkoelingsijd meteen tot ongeveer zestien uren. De drempeltemperatuur van 33 °C wordt dus pas zestien uren na de aanbrenging van de nieuwe asfaltlaag bereikt. Dit valt te verklaren door het feit dat het volle eindmodel de berekeningen stopt, zodra de drempeltemperatuur is bereikt. Er wordt dus geen rekening gehouden met een eventuele verhoging van de temperatuur in de asfaltlaag door de sterke stijging van de luchttemperatuur en van de zonne- en atmosferische straling die zich op dat moment van het jaar voordoet. Bij asfaltlagen die vóór 5:00 worden aangebracht, stijgt de temperatuur dan boven de drempelwaarde uit (zie figuur A.3.18).



Figuur A.3.18 Verhoging van de temperatuur van de pas aangebrachte asfaltlaag

Tabel A.3.11 geeft ter vergelijking de afkoelingsijd weer voor een asfaltlaag die op 15 januari is aangebracht.

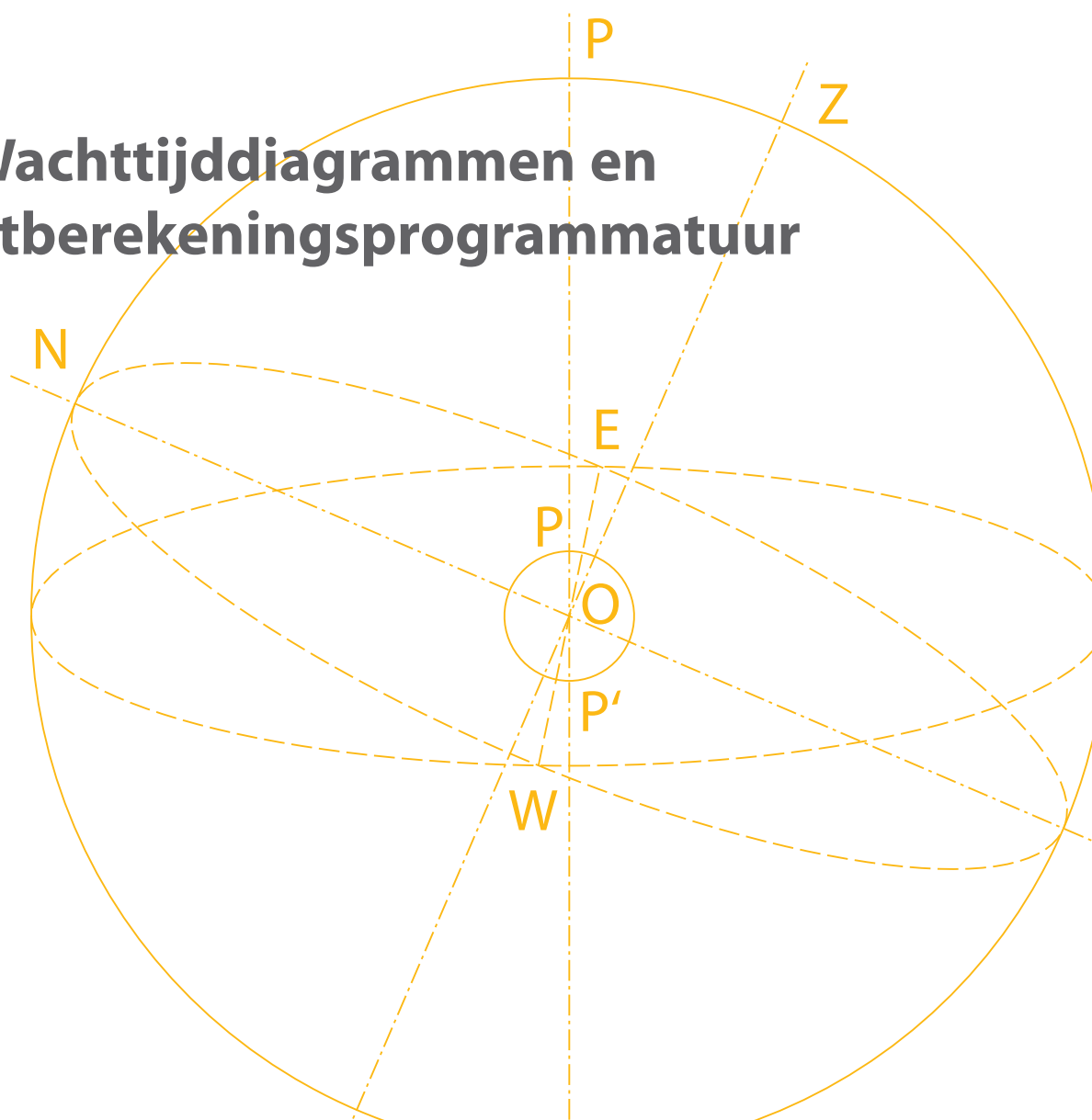
De temperatuur van de pas aangebrachte asfaltlaag stijgt op geen enkel tijdstip nog boven de drempelwaarde van 33 °C uit.

| Aanbrengings-tijdstip | Afkoelingsijd (min) | Aanbrengings-tijdstip | Afkoelingsijd (min) |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| 0:00 | 174 | 12:00 | 232 |
| 1:00 | 174 | 13:00 | 226 |
| 2:00 | 174 | 14:00 | 213 |
| 3:00 | 173 | 15:00 | 199 |
| 4:00 | 172 | 16:00 | 188 |
| 5:00 | 171 | 17:00 | 181 |
| 6:00 | 170 | 18:00 | 178 |
| 7:00 | 170 | 19:00 | 176 |
| 8:00 | 173 | 20:00 | 174 |
| 9:00 | 186 | 21:00 | 174 |
| 10:00 | 207 | 22:00 | 174 |
| 11:00 | 226 | 23:00 | 174 |

Tabel A.3.11 Afkoelingsijd volgens het aanbrengingsijdstip op 15 januari

Deel B

Wachttijddiagrammen en vooruitberekeningsprogrammatuur





Hoofdstuk B.1

Gebruik van de wachttijddiagrammen

B.1.1 Beperkingen

Uit A.3.6 *Onderzoek naar de invloed van variërende invoerparameters* is gebleken dat tal van parameters het afkoelingsproces van een pas aangebrachte asfaltlaag soms sterk kunnen beïnvloeden. In de wachttijddiagrammen dient terdege met dat gegeven rekening te worden gehouden. Om het aantal situaties beperkt te houden, is voor elk van die parameters van enkele significante waarden uitgegaan. Met name:

- laagdikte van de pas aangebrachte asfaltlaag: 2, 3, 4, 5, 6, 7 en 8 cm;
- windsnelheid:
 - windluw (1 m/s);
 - matige wind (7 m/s);
 - strakke wind (15 m/s);
- bewolkingsgraad:
 - heldere hemel (0 %);
 - half bewolkte hemel (50 %);
 - bewolkte hemel (100 %);
- temperatuur vlak na de aanbrenging: 170, 160 en 150 °C;
- temperatuur voor de wederopenstelling: 30, 40 en 50 °C;
- dag van de aanbrenging: de vijftiende dag van de betrokken maand (januari, februari, maart, april, mei, juni en juli) wordt als representatief beschouwd.

De combinatie van die parameters levert vijfhonderd zevenenzestig diagrammen met elk zeven krommen (een voor elke maand) op. Door de verschillende situaties onderling te correleren, zouden we op een lager aantal uitkomen. Zulke correlaties zijn over het algemeen zeer beperkt en leiden tot relaties in de vierde graad. Daarom achten we het verkieslijk een programmatuur mee te leveren waarmee het tijdstip van de wederopenstelling voor het verkeer als functie van de verschillende parameters vooruit kan worden berekend.

Omdat het afkoelingsproces bij extreme temperatuur, windsnelheid en bewolkingsgraad problematisch kan verlopen, hebben we naast de vooruitberekeningsprogrammatuur wachttijddiagrammen voor de volgende omstandigheden ontwikkeld:

- laagdikte: 2, 3, 4, 5, 6, 7 en 8 cm;
- windluw en matige wind;
- heldere hemel;
- temperatuur vlak na de aanbrenging: 170 °C;
- temperatuur voor de wederopenstelling: 30 °C.

In tabel B.1.1 zijn de geometrische en thermische kenmerken van de wegconstructie weergegeven, waarmee in de vooruitberekeningsprogrammatuur en de wachttijddiagrammen rekening wordt gehouden.

| Materiaal | Laagdikte (mm) | λ (W/m.°C) | c (J/kg.°C) | ρ (kg/m ³) |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|
| Pas aangebrachte asfaltlaag | 20 tot 80 | 1,20 | 921 | 2 400 |
| Bestaand asfalt | 100 | 1,20 | 921 | 2 400 |
| Baanlichaam | 900 | 1,31 | 837 | 1 750 |

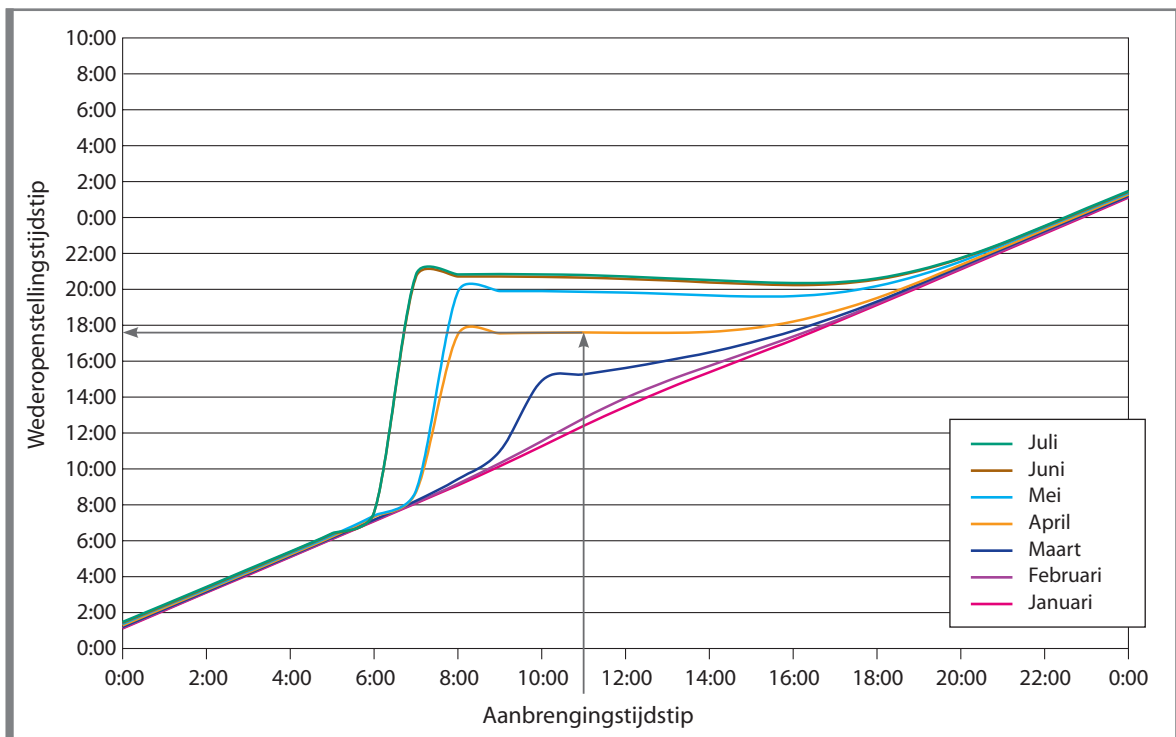
Tabel B.1.1 Geometrische en thermische kenmerken van de wegconstructie

B.1.2 Gebruik van de wachttijddiagrammen

Uitgaande van het aanbrengingstijdstip kan door middel van de wachttijddiagrammen het tijdstip van de wederopenstelling voor het verkeer worden bepaald.

Om het gebruik van die diagrammen toe te lichten, nemen we als voorbeeld een 2 cm dikke asfaltlaag die bij windluw weer om 11.00 uur in de maand april is aangebracht.

- *Stap 1*
Zoek 11:00 op de x-as en trek van daaruit een verticale lijn naar de afkoelingskromme voor de maand april (doorgetrokken oranje lijn).
- *Stap 2*
Trek een horizontale lijn vanuit het snijpunt tussen de afkoelingskromme en de verticale lijn. Lees op de y-as het tijdstip van de wederopenstelling (ongeveer 18:00) af.



Figuur B.1.1 Voorbeeld voor het gebruik van de wachttijddiagrammen

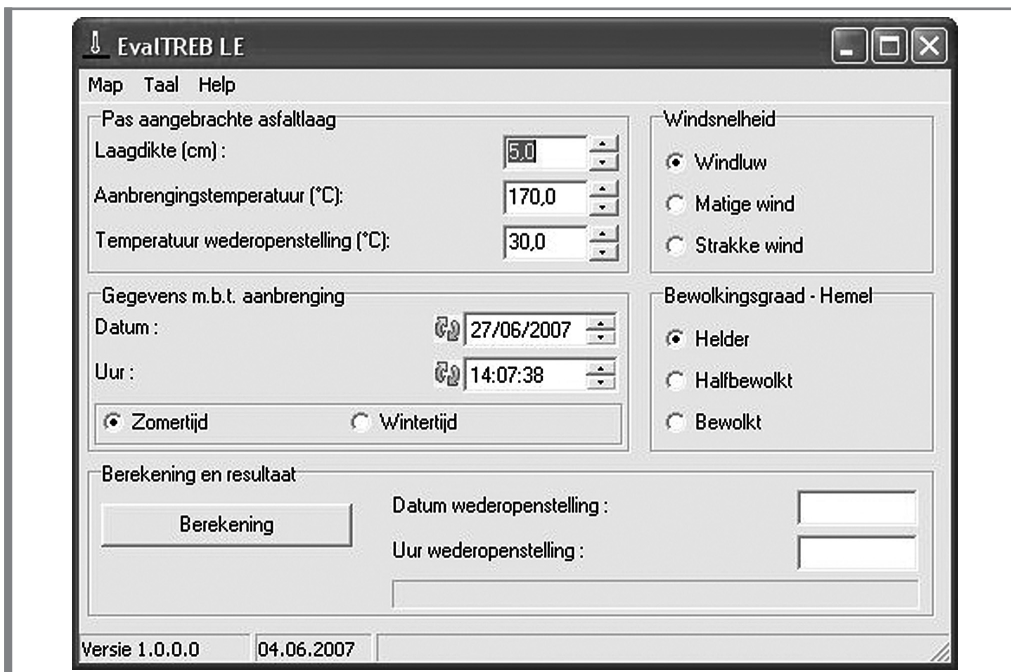
Hoofdstuk B.2

Gebruik van de vooruitberekingsprogrammatuur

Om het tijdstip van de wederopenstelling voor het verkeer met de programmatuur EvalTREB LE te berekenen, voeren we de volgende gegevens toe:

1. dikte van de pas aangebrachte asfaltlaag;
 2. temperatuur van het asfalt vlak na de aanbrenging;
 3. temperatuur voor de wederopenstelling van de weg;
 4. windsnelheid (keuze uit drie mogelijkheden: windluw, matige wind of strakke wind);
 5. bewolgingsgraad (keuze uit drie mogelijkheden: heldere hemel, half bewolkte hemel of bewolkte hemel);
 6. dag en uur van de aanbrenging.
- Ten slotte klikken we op *Berekening* om te bevestigen.

Figuur B.2.1 geeft de gebruikersinterface weer.



Figuur B.2.1 Gebruikersinterface van de vooruitberekingsprogrammatuur



Hoofdstuk B.3

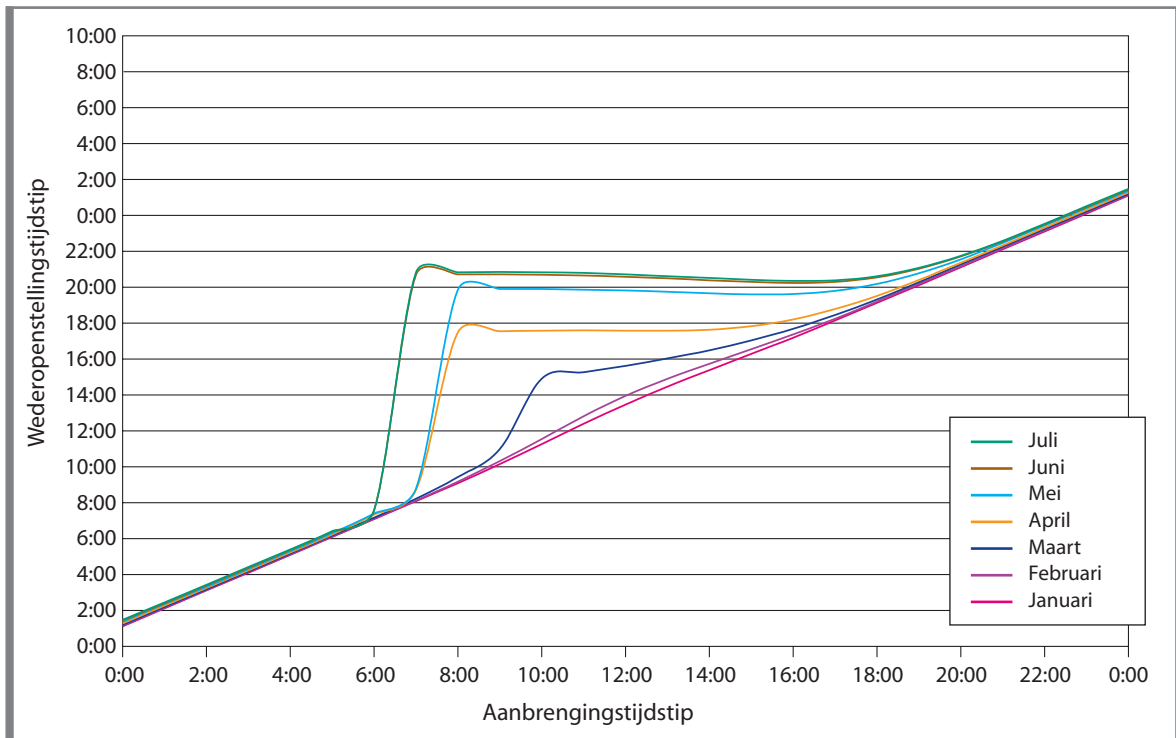
Wachttijddiagrammen

Hierna stellen we veertien wachttijddiagrammen voor. Zij geven voor verschillende laagdikten in extreme weersomstandigheden (temperatuur, bewolgingsgraad en windsnelheid) de wachttijd tussen het einde van de aanbrenging van het asfalt en de wederopenstelling voor het verkeer aan. Daarbij is van de volgende hypothesen uitgegaan:

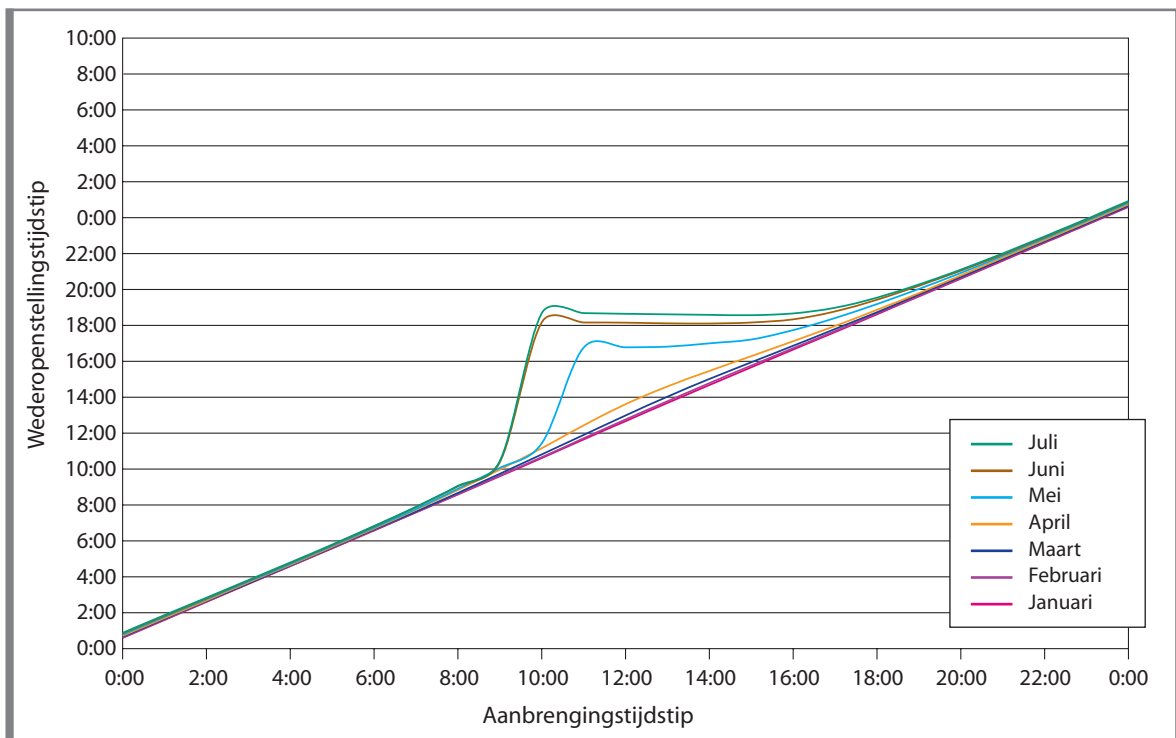
- laagdikte: 2, 3, 4, 5, 6, 7 en 8 cm;
- windsnelheid: 1 m/s (windluw) en 7 m/s (matige wind);
- bewolgingsgraad: 0 % (heldere hemel);
- temperatuur vlak na de aanbrenging: 170 °C;
- temperatuur voor de wederopenstelling: 30 °C.

De geometrische en thermische kenmerken van de wegconstructie waarmee in de wachttijddiagrammen rekening is gehouden, zijn in tabel B.1.1 weergegeven.

Laagdikte = 2 cm

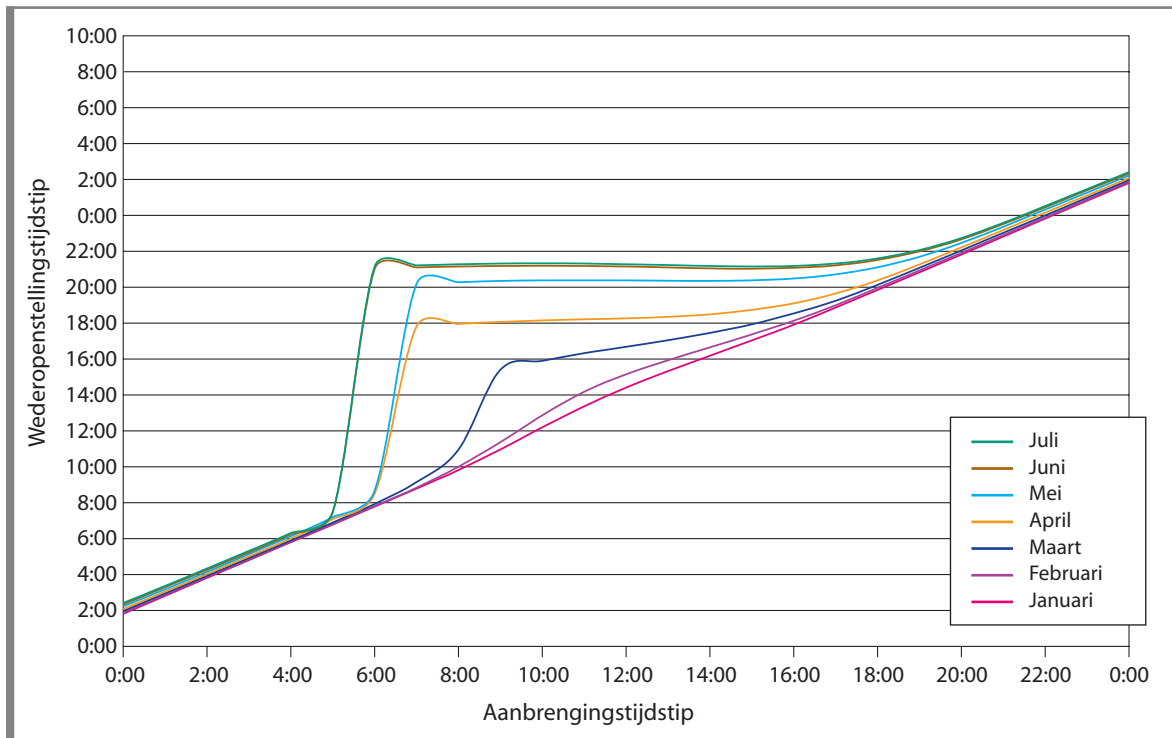


Figuur B.3.1 Diagram 1: laagdikte 2 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %)

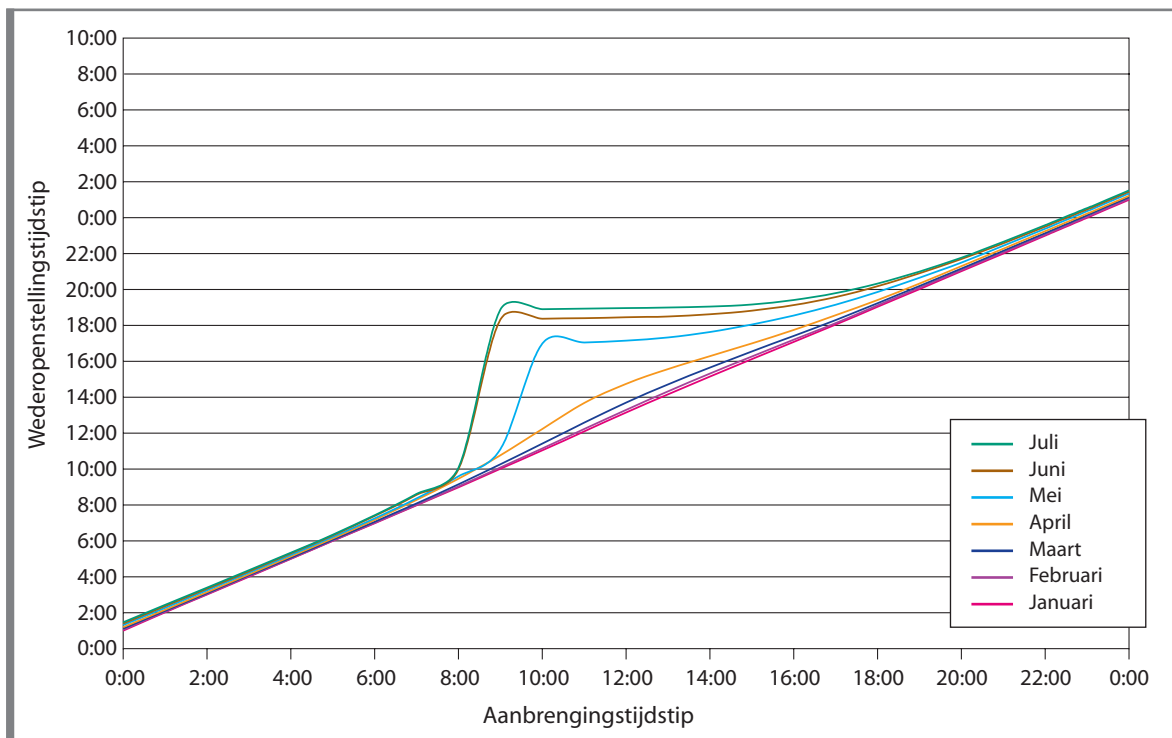


Figuur B.3.2 Diagram 2: laagdikte 2 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %)

Laagdikte = 3 cm

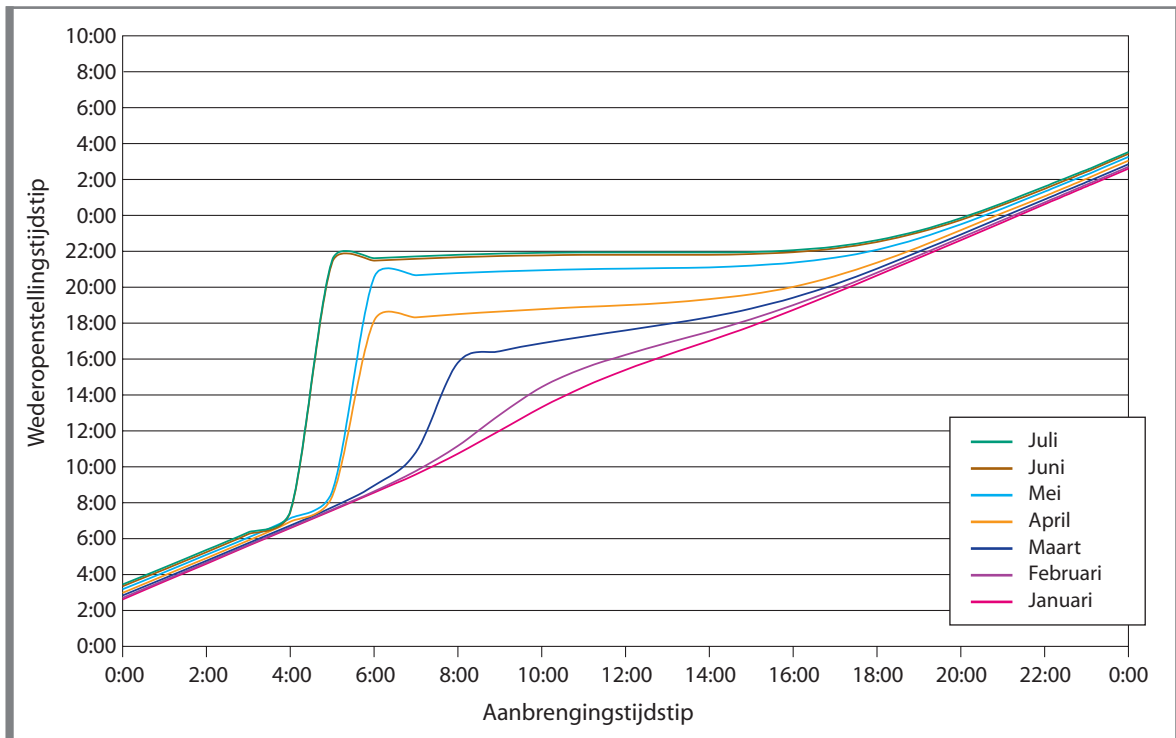


Figuur B.3.3 Diagram 3:
laagdikte 3 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %)

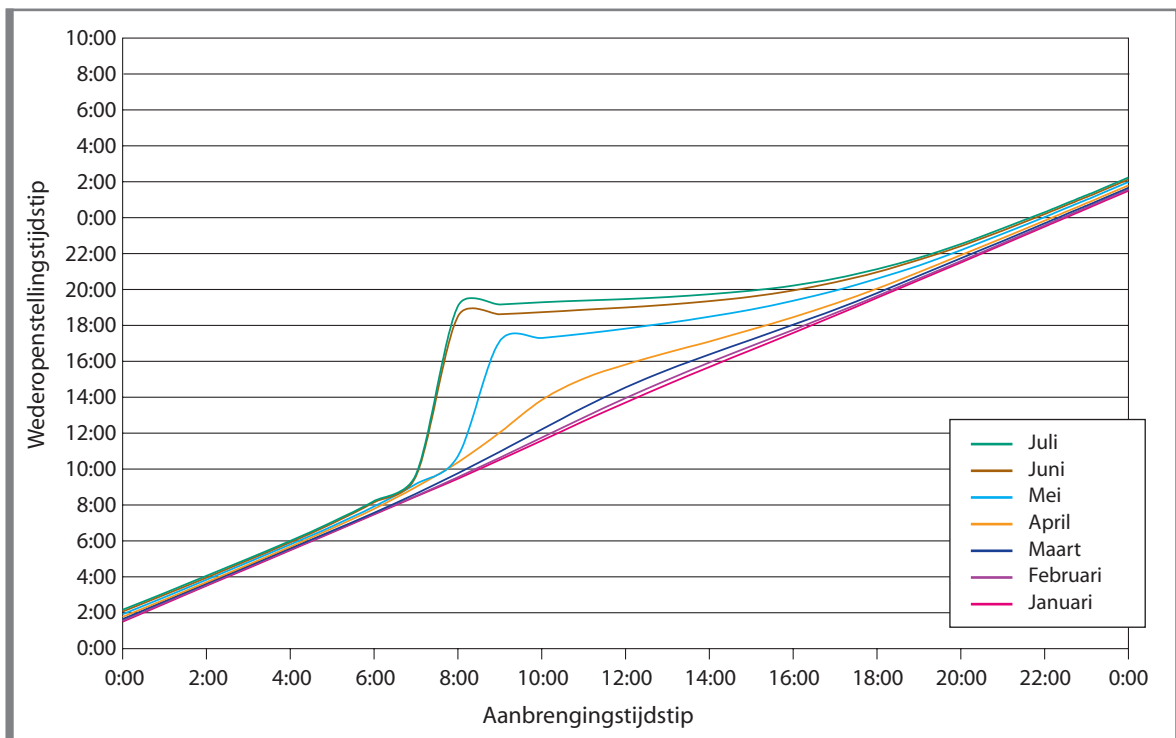


Figuur B.3.4 Diagram 4:
laagdikte 3 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %)

Laagdikte = 4 cm

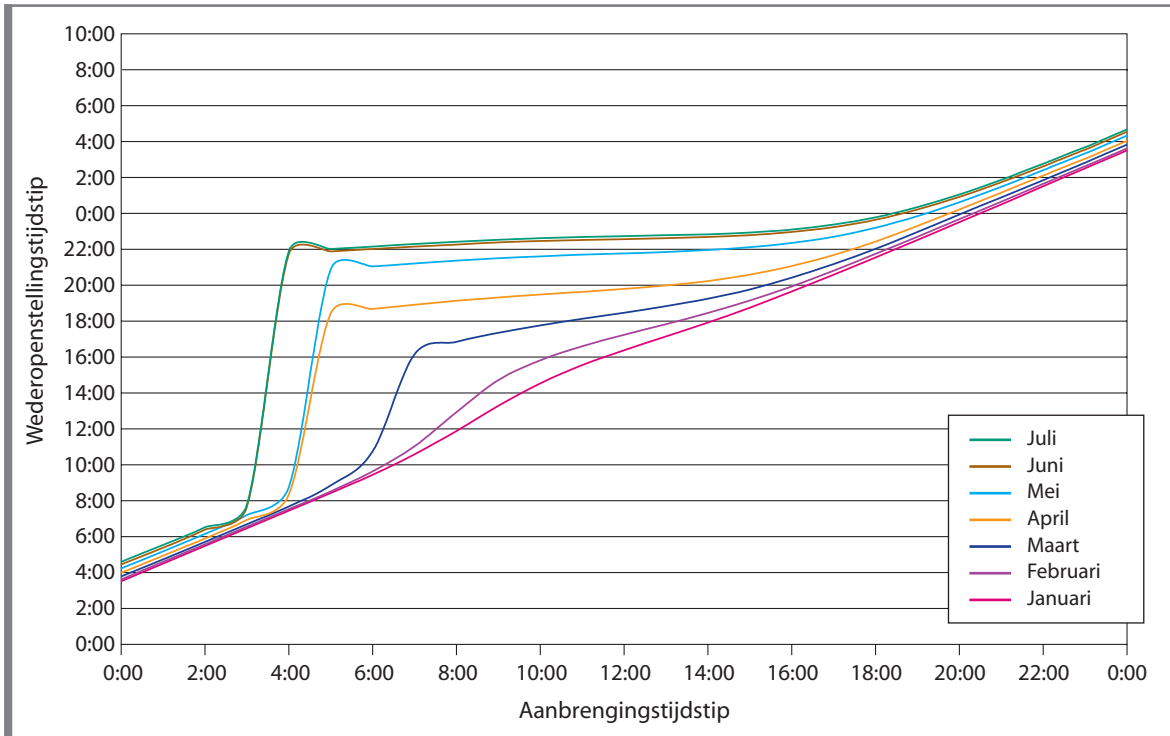


Figuur B.3.5 Diagram 5: laagdikte 4 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %)

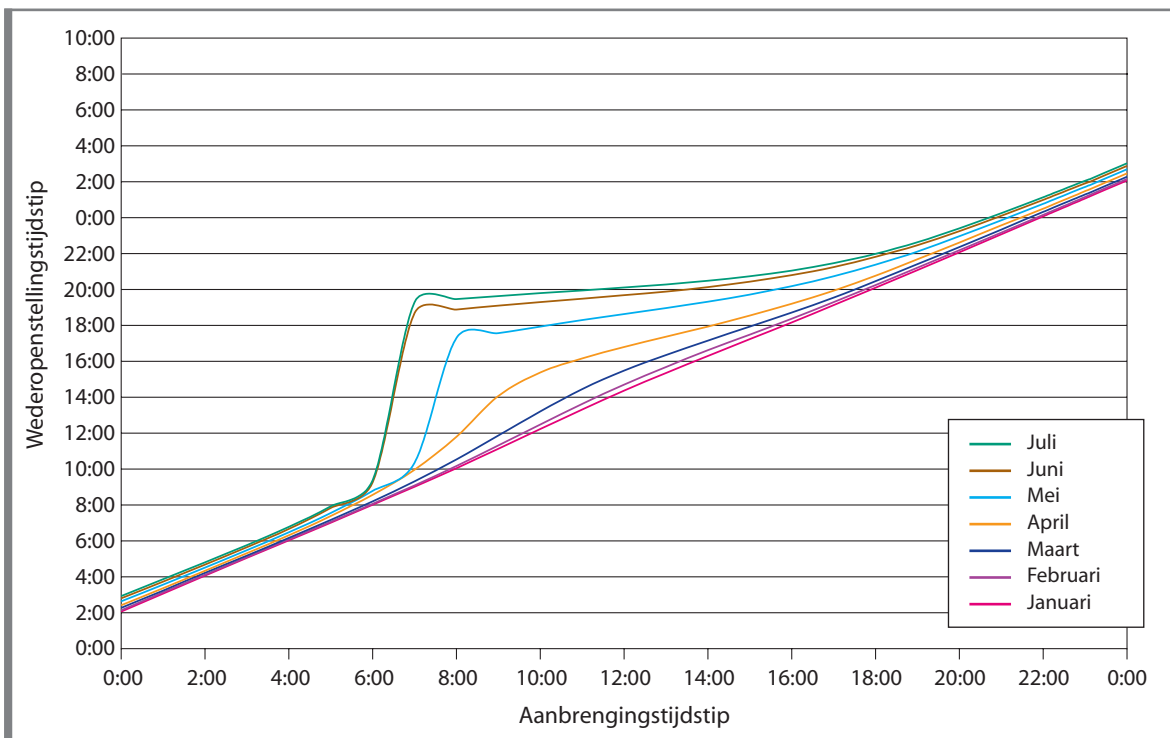


Figuur B.3.6 Diagram 6: laagdikte 4 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %)

Laagdikte = 5 cm

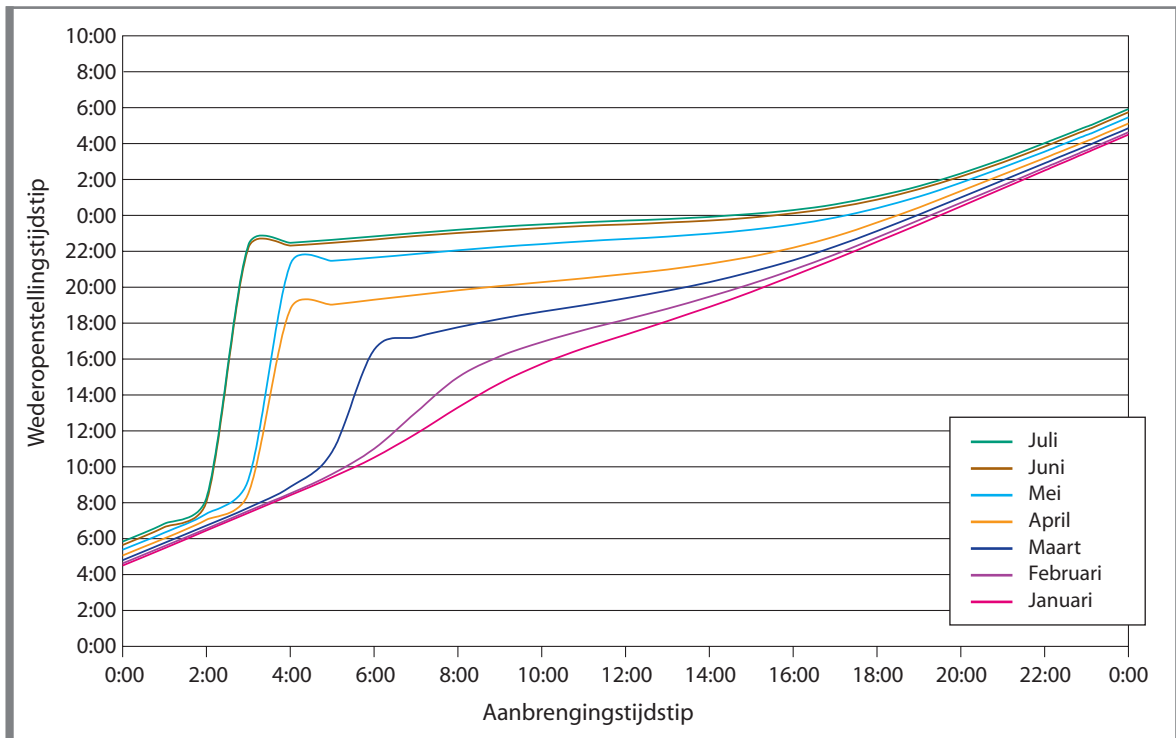


Figuur B.3.7 Diagram 7:
laagdikte 5 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %)

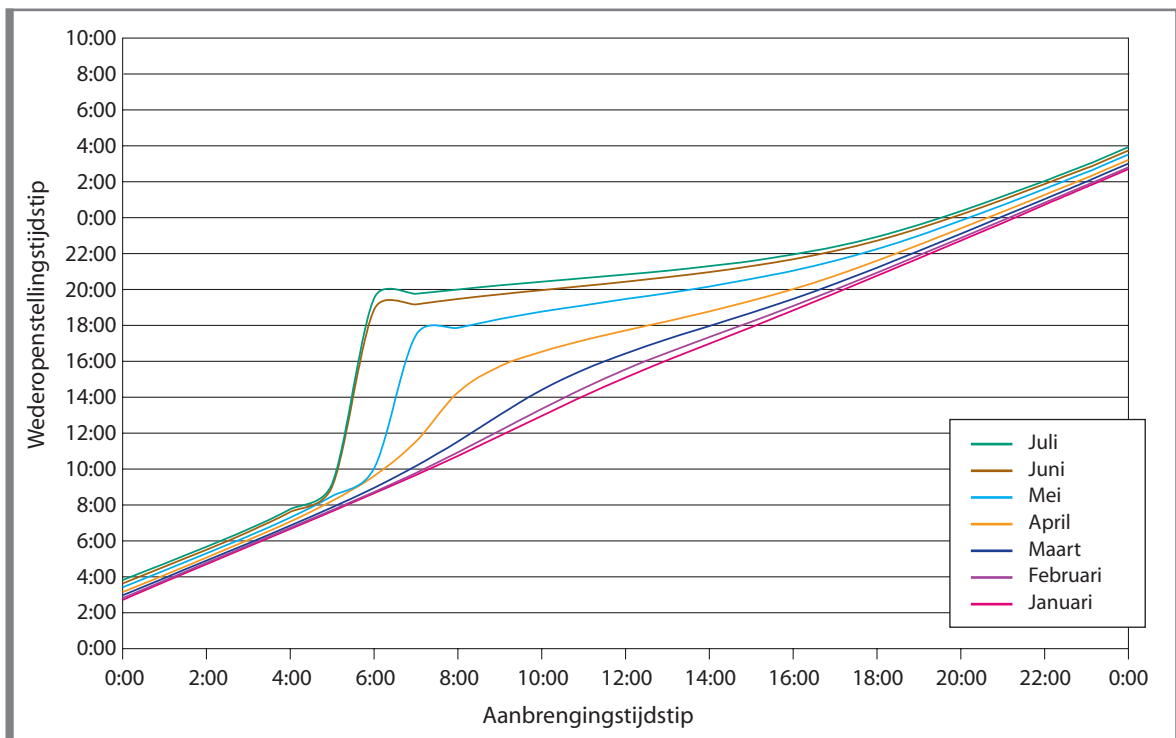


Figuur B.3.8 Diagram 8:
laagdikte 5 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %)

Laagdikte = 6 cm

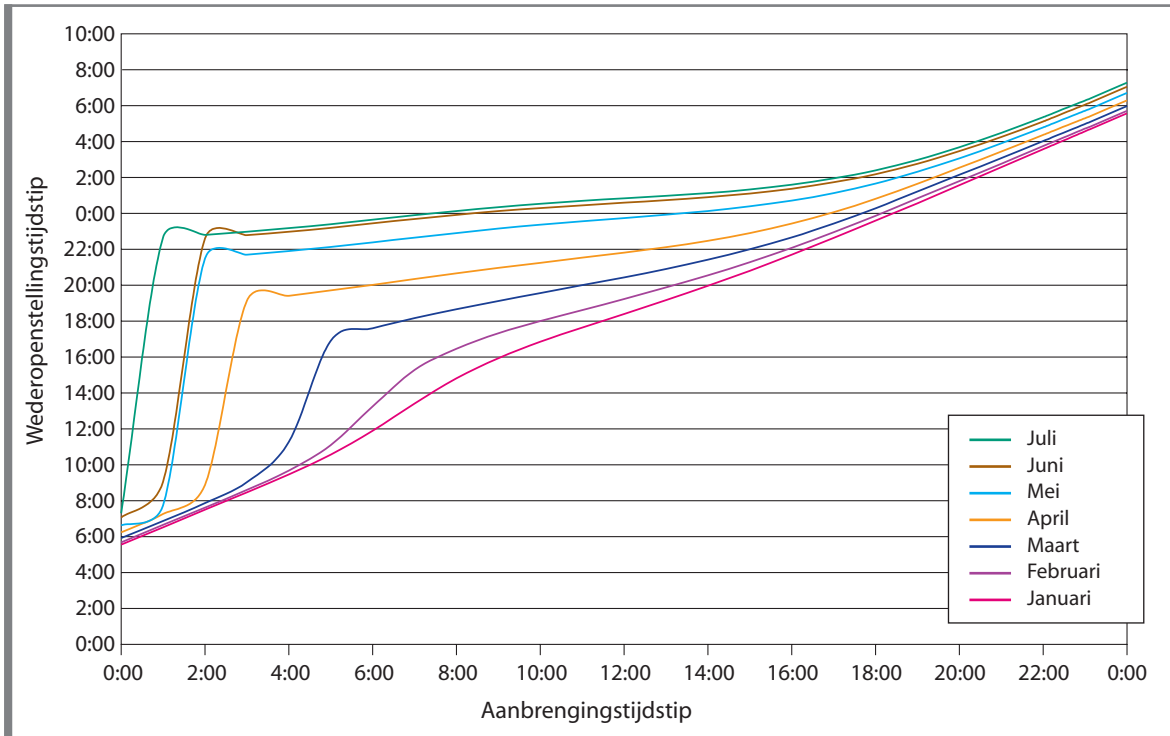


Figuur B.3.9 Diagram 9:
laagdikte 6 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %)

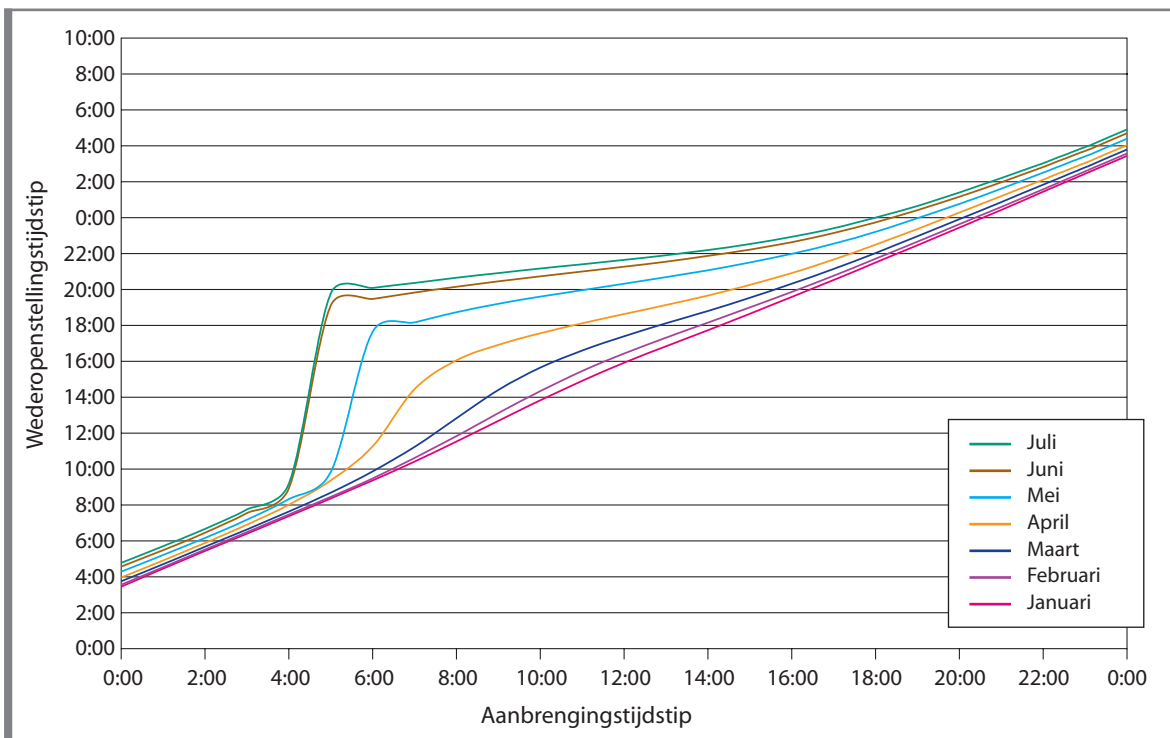


Figuur B.3.10 Diagram 10:
laagdikte 6 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %)

Laagdikte = 7 cm

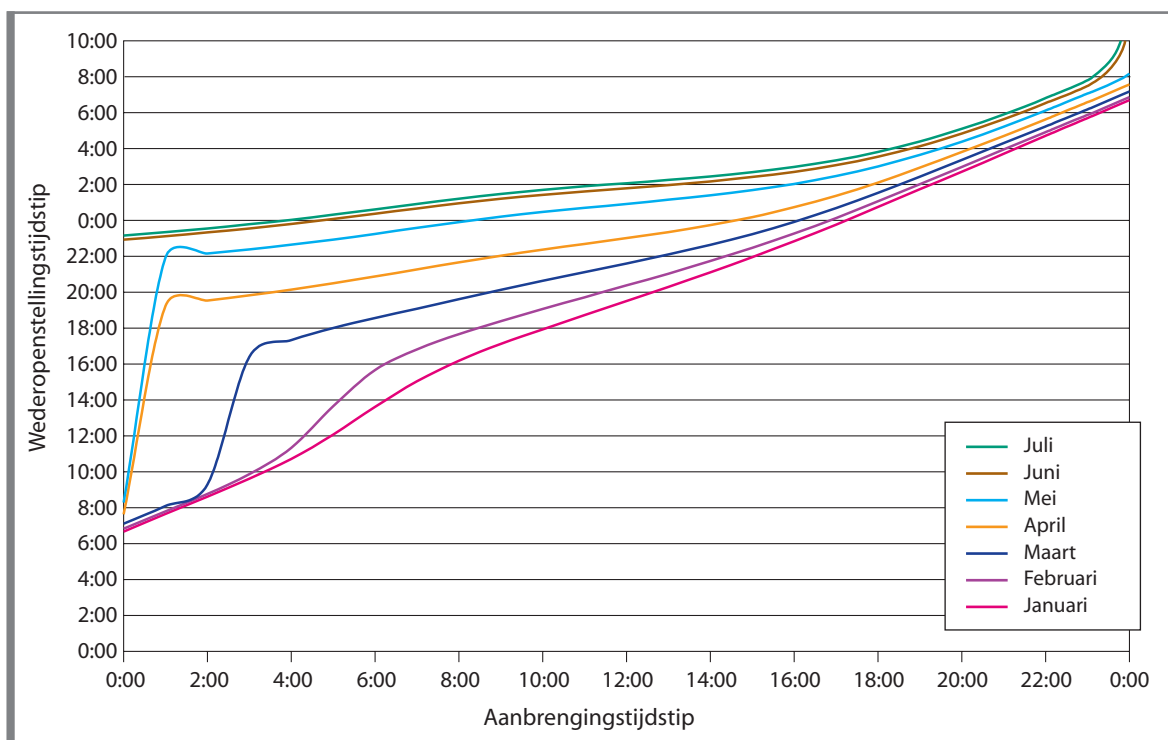


Figuur B.3.11 Diagram 11:
laagdikte 7 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %)

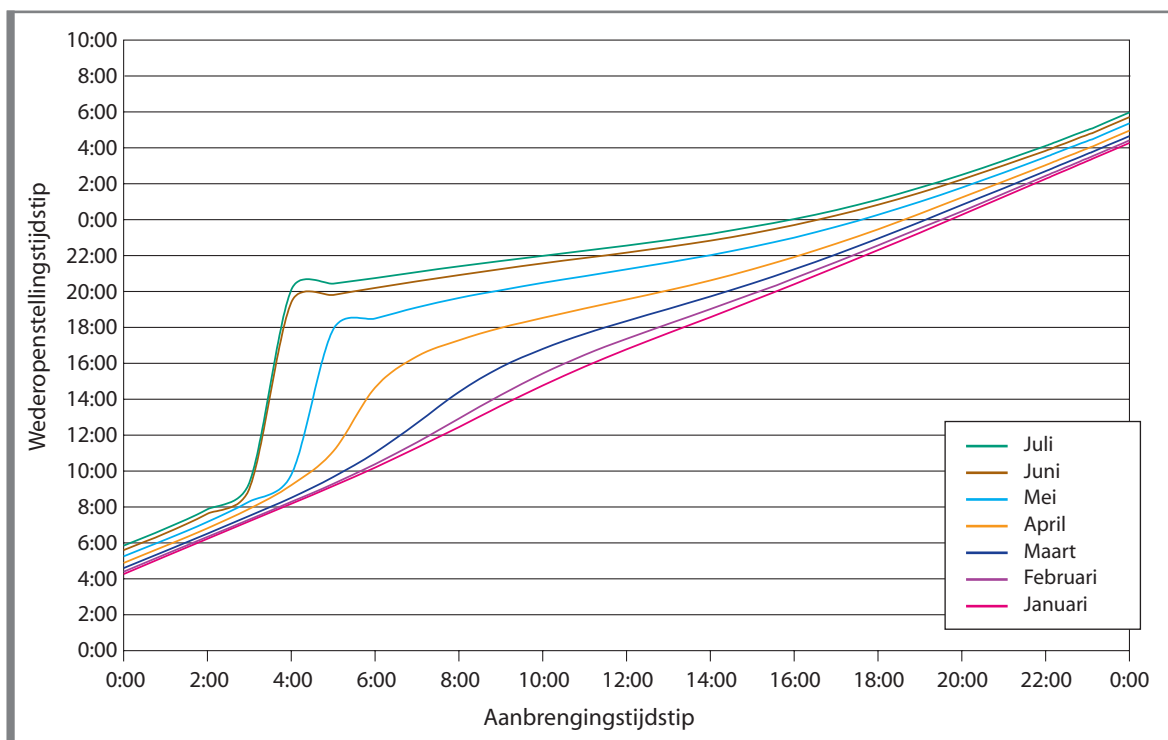


Figuur B.3.12 Diagram 12:
laagdikte 7 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %)

Laagdikte = 8 cm



Figuur B.3.13 Diagram 13:
laagdikte 8 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %)



Figuur B.3.14 Diagram 14:
laagdikte 8 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %)

Conclusies en vooruitzichten

Bij de ontwikkeling van de vooruitberekenningsmodellen voor de afkoeling van een pas aangebrachte asfaltlaag en na de toetsing op bouwplaatsen is onder meer gebleken dat:

- de windsnelheid tijdens het grootste deel van het afkoelingsproces een significant effect heeft. Die invloed neemt echter af vanaf ongeveer 40 °C;
- de straling een grote invloed heeft als de temperatuur tot minder dan 80 °C is gedaald;
- de maximale temperatuur zich niet in het midden van de asfaltlaag voordoet, maar afhankelijk van de variatie van de verschillende soorten van straling tussen het oppervlak en het ondervlak beweegt;
- de laagdikte van de pas aangebrachte asfaltlaag het afkoelingsproces sterk beïnvloedt, terwijl de geometrische en thermische kenmerken van de onderliggende lagen van minder belang zijn.

De toetsing van de modellen op acht bouwplaatsen heeft aangetoond dat de berekeningen goed met de werkelijkheid correleren, ten minste voor zover de juiste geometrische en thermische kenmerken aan het simulatieprogramma zijn toegevoerd. Er dient dus nauwlettend te worden toegezien op de laagdikten die op de bouwplaats worden meegedeeld en op de waarden die uit de literatuur worden overgenomen. Naargelang van de bron kunnen deze waarden immers sterk verschillen en soms zelfs tot driemaal zo hoog zijn.

De ontwikkeling van wachttijddiagrammen is geen eenvoudige opdracht. Er dient immers rekening te worden gehouden met heel wat parameters die het afkoelingsproces beïnvloeden, terwijl tegelijk het aantal waarden voor die parameters beperkt moet worden gehouden. Ten slotte is het niet zo eenvoudig gecorreleerde relaties tussen de verschillende waargenomen situaties te bepalen. Daarom leek het aangewezen enkel wachttijddiagrammen voor extreme situaties uit te werken en aanvullend een vooruitberekenningsprogrammatuur ter beschikking te stellen waarmee uitgaande van de praktische informatie in het researchverslag de wachttijd voor andere gevallen zo nauwkeurig mogelijk kan worden berekend.

Om een weg zo snel mogelijk weer voor het verkeer te kunnen openstellen, wordt de nieuwe asfaltlaag soms 's nachts aangebracht. Uit de analyse van de wachttijddiagrammen is gebleken dat dit voor extreme situaties slechts zin heeft als het vóór 0:00 gebeurt voor een laagdikte van 8 cm en vóór 6:00 voor een laagdikte van 2 cm. Voorbij dit tijdstip doet voornamelijk de invloed van de zonnestraling de beoogde tijdswinst teniet.

Dit rekenmodel zou ook kunnen worden toegepast om simulatieberekeningen van andere thermische verschijnselen in wegconstructies zoals vorst-dooicyclusen te verrichten of om de thermische kenmerken van de toegepaste materialen in wegconstructies te bepalen.



Lijst van de figuren

| | | |
|--------|---|----|
| A.1.1 | Modellering van de wegconstructie | 5 |
| A.1.2 | Verloop van de dichtheid van een warmtestroom in een vast medium | 6 |
| A.1.3 | Verloop van de temperatuur op het scheidingsvlak van een vast medium | 7 |
| A.1.4 | Temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrenging van een asfaltlaag | 8 |
| A.1.5 | Temperaturen in een 5 cm dikke asfaltlaag, op verschillende tijdstippen na de aanbrenging | 10 |
| A.1.6 | Bepaling van het verwekingspunt met ring en kogel | 13 |
| A.1.7 | Plaats van de meetpunten in een meetgebied | 15 |
| A.1.8 | Bouwplaats 3 - Temperatuurverloop in de nieuwe SMA-B6-laag | 17 |
| A.1.9 | Bouwplaats 3 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen | 17 |
| A.1.10 | Bouwplaats 4 - Temperatuurverloop in de nieuwe SMA-B1-laag | 18 |
| A.1.11 | Bouwplaats 4 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen | 19 |
| | | |
| A.2.1 | Beweging van de aarde om de zon (ref. 31) | 23 |
| A.2.2 | Hemelbol (ref. 31) | 23 |
| A.2.3 | Equatoriale coördinaten | 24 |
| A.2.4 | Lokale coördinaten van de zon | 25 |
| A.2.5 | Afstanden die bepalend zijn voor de optische luchtmassa | 26 |
| A.2.6 | Zonnespectrum aan het aardoppervlak (ref. 20 en 31) | 27 |
| | | |
| A.3.1 | Voornaamste soorten van warmteoverdracht tussen het wegoppervlak en de omgeving | 33 |
| A.3.2 | Modellering van de wegconstructie | 33 |
| A.3.3 | Scheidingsvlak tussen de lucht en de asfaltlaag | 36 |
| A.3.4 | Scheidingsvlak tussen twee lagen van een wegconstructie | 37 |
| A.3.5 | Bouwplaats 4 - Vergelijking tussen de gemeten krommen en de herberekende kromme | 40 |
| A.3.6 | Bouwplaats 5 - Meetgebied 1 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen | 40 |
| A.3.7 | Bouwplaats 6 - Meetgebied 3 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen | 41 |
| A.3.8 | Bouwplaats 6 - Meetgebied 2 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen | 42 |
| A.3.9 | Bouwplaats 7 - Meetgebied 3 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen | 42 |
| A.3.10 | Bouwplaats 8 - Vergelijking tussen gemeten en berekende krommen | 43 |
| A.3.11 | Afkoeling van pas aangebracht asfalt: krommen van de maximale temperatuur en van de temperatuur aan het oppervlak | 44 |
| A.3.12 | Temperatuurverloop in de wegconstructie | 45 |
| A.3.13 | Invloed van de windsnelheid op het afkoelingsproces | 46 |
| A.3.14 | Invloed van de luchttemperatuur op het afkoelingsproces (er wordt geen rekening gehouden met de verschillende soorten van straling) | 46 |
| A.3.15 | Invloed van de luchttemperatuur op het afkoelingsproces (er wordt alleen rekening gehouden met de invloed van de aardstraling) | 47 |
| A.3.16 | Invloed van de dag van aanbrenging op het afkoelingsproces | 48 |
| A.3.17 | Invloed van de bewolgingsgraad op het afkoelingsproces | 49 |
| A.3.18 | Verhoging van de temperatuur van de pas aangebrachte asfaltlaag | 50 |

| | | |
|--------|--|----|
| B.1.1 | Voorbeeld voor het gebruik van de wachttijd diagrammen | 54 |
| B.2.1 | Gebruikersinterface van de vooruitberekenningsprogrammatuur | 55 |
| B.3.1 | Diagram 1: laagdikte 2 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %) | 58 |
| B.3.2 | Diagram 2: laagdikte 2 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %) | 58 |
| B.3.3 | Diagram 3: laagdikte 3 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %) | 59 |
| B.3.4 | Diagram 4: laagdikte 3 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %) | 59 |
| B.3.5 | Diagram 5: laagdikte 4 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %) | 60 |
| B.3.6 | Diagram 6: laagdikte 4 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %) | 60 |
| B.3.7 | Diagram 7: laagdikte 5 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %) | 61 |
| B.3.8 | Diagram 8: laagdikte 5 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %) | 61 |
| B.3.9 | Diagram 9: laagdikte 6 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %) | 62 |
| B.3.10 | Diagram 10: laagdikte 6 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %) | 62 |
| B.3.11 | Diagram 11: laagdikte 7 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %) | 63 |
| B.3.12 | Diagram 12: laagdikte 7 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %) | 63 |
| B.3.13 | Diagram 13: laagdikte 8 cm; windluw (1 m/s); heldere hemel (0 %) | 64 |
| B.3.14 | Diagram 14: laagdikte 8 cm; matige wind (7 m/s); heldere hemel (0 %) | 64 |

Lijst van de tabellen

| | | |
|--------|--|----|
| A.1.1 | Thermische parameters van wegebouwmaterialen | 13 |
| A.1.2 | Temperatuur voor de wederopenstelling van de weg voor enkele gangbare bitumina | 14 |
| A.1.3 | Parameters van de bouwplaatsen | 16 |
| A.1.4 | Beschrijving van de metingen | 16 |
| | | |
| A.3.1 | Waarden van de parameters bij een heldere hemel | 35 |
| A.3.2 | Waarden van de parameters bij een bewolkte hemel | 35 |
| A.3.3 | Waarden van de parameters op andere dagen | 35 |
| A.3.4 | Parameters van de bouwplaatsen | 38 |
| A.3.5 | Beschrijving van de metingen | 39 |
| A.3.6 | Opbouw van de wegconstructies | 39 |
| A.3.7 | Thermische parameters van de toegepaste materialen | 39 |
| A.3.8 | Thermische parameters van de toegepaste materialen | 44 |
| A.3.9 | Afkoelingstijd volgens de dag van de aanbrenging | 48 |
| A.3.10 | Afkoelingstijd volgens het aanbrengingstijdstip op 15 juli | 49 |
| A.3.11 | Afkoelingstijd volgens het aanbrengingstijdstip op 15 januari | 50 |
| | | |
| B.1.1 | Geometrische en thermische kenmerken van de wegconstructie | 53 |

Lijst van de foto's

| | | |
|-------|---|----|
| A.1.1 | Koper-constantaantemperatuursonde | 15 |
| A.1.2 | Infraroodthermometer | 15 |
| A.1.3 | Temperatuurmeting in het midden van de asfaltstrook | 15 |
| A.1.4 | Plaats van de meetpunten in een meetgebied | 15 |
| A.3.1 | Thermo-anemometer | 38 |

Lijst van de symbolen en afkortingen

Noot

n.b.: de grootte is niet bepaald.

In alfabetische volgorde

| | | |
|---------------------------|---|--------------------------|
| a | Thermische diffusiviteit | m^2/s |
| a_i | Thermische diffusiviteit van een laag i | m^2/s |
| AB | Asfaltbeton | n.b. |
| $BITV_{frez}$ | Gedeeltelijk afgefreesde bituminieuze verharding | n.b. |
| c | Soortelijke warmte | $J/kg \cdot ^\circ C$ |
| C | Middelpuntvergelijking | $^\circ$ |
| C_{plaats} | Tijdcorrectie (verschil tussen de wettelijke en de universele tijd) | h |
| C_{te} | Constante temperatuur van het baanlichaam op 1 m diepte | $^\circ C$ |
| D_b | Diffuse instraling bij een bewolkte hemel | W/m^2 |
| D_c | Diffuse instraling bij een heldere hemel | W/m^2 |
| D_σ | Diffuse instraling bij een half bewolkte hemel | W/m^2 |
| e | Dikte van de pas aangebrachte asfaltlaag | m |
| f_i | Lichtintensiteit per oppervlakte-eenheid | n.b. |
| F_m | Vloei van het asfalt | N |
| $f(x)$ | Functie ter bepaling van de temperatuurverdeling in de wegconstructie vlak na de aanbrengring | n.b. |
| G_b | Totale instraling bij een bewolkte hemel | W/m^2 |
| G_c | Totale instraling bij een heldere hemel | W/m^2 |
| G_σ | Totale instraling bij een half bewolkte hemel | W/m^2 |
| h | Convectiecoëfficiënt | $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ |
| H | Weglengte van het zonlicht in de atmosfeer bij een zenithhoek = 0 | m |
| I_0 | Zonneconstante | W/m^2 |
| $I_{0,j}$ | Loodrechte instraling | W/m^2 |
| I_b | Directe instraling bij een bewolkte hemel | W/m^2 |
| I_c | Directe instraling bij een heldere hemel | W/m^2 |
| I_σ | Directe instraling bij een half bewolkte hemel | W/m^2 |
| j | Dagnummer, gerekend vanaf 1 januari | n.b. |
| k | Maandnummer | n.b. |
| K_d | Correctiefactor voor de zonnestringsstroom | n.b. |
| l_{plaats} | Lengteligging van de beschouwde plaats | $^\circ$ |
| L | Ware lengteligging van de zon | $^\circ$ |
| $L_c(\gamma_i, \alpha_i)$ | Luminantie van het hemelpunt op een hoogte γ_i en azimut α_i | W/m^2 |
| $L_c(\gamma_i = \pi/2)$ | Luminantie van het zenitpunt | W/m^2 |
| $L \uparrow$ | Aardstraling | W/m^2 |
| $L \downarrow$ | Atmosferische straling | W/m^2 |
| L_r | Stralingsbalans | W/m^2 |
| m | Optische luchtmassa | n.b. |
| M | Middelbare anomalie | $^\circ$ |
| N | Fractie bewolkte hemel | $\%$ |
| O | Middelpunt van de aarde | n.b. |
| PP' | Aardas | n.b. |
| \dot{q}_h | Dichtheid van de convectiewarmtestroom | W/m^2 |
| \dot{q}_λ | Dichtheid van de warmtegeleidingsstroom | W/m^2 |
| r | Stralingsstroom – stralingsbalans | W/m^2 |
| R | Verschuiving van de evenaar | $^\circ$ |

| | | |
|----------------------------|--|------|
| <i>SMA</i> | Steenmastiekasfalt | n.b. |
| <i>t</i> | Universele tijd <i>UT</i> | h |
| <i>T</i> | Temperatuurveld | °C |
| <i>T_{aanbr}</i> | Aanbrengingstemperatuur | °C |
| <i>T_i</i> | Temperatuur van een laag <i>i</i> | °C |
| <i>T_I</i> | Middelbare troebelheidsfactor bij een heldere hemel | n.b. |
| <i>T_L</i> | Totale troebelheidsfactor van Linke | n.b. |
| <i>T_{Lm}</i> | Minimale troebelheidsfactor bij een heldere hemel | n.b. |
| <i>T_{lichaam}</i> | Temperatuur van het baanlichaam | °C |
| <i>T_{lucht}</i> | Luchttemperatuur | °C |
| <i>T(M)</i> | temperatuur in een willekeurig punt <i>M</i> van het scheidingsvlak waar de convectiestroom optreedt | °C |
| <i>T_{r&k}</i> | Ring-en-kogeltemperatuur van bitumen | °C |
| <i>T_s</i> | Temperatuur van het oppervlak | °C |
| <i>T_{verkeer}</i> | Temperatuur van het asfalt voor de openstelling van de weg | °C |
| <i>TV</i> | Tijdvereffening | min |
| <i>UT</i> | Universele of wereldtijd | h |
| <i>WT</i> | Wettelijke, officiële of lokale tijd | h |
| <i>x</i> | Diepte gemeten vanaf het nieuwe wegoppervlak (<i>x</i> = 0) | m |
| <i>X</i> | Weglengte van het zonlicht in de atmosfeer bij een zenithoek ζ | m |
| <i>z</i> | Hoogte van de beschouwde plaats | n.b. |
| <i>Z</i> | Zenit | n.b. |
| <i>Z'</i> | Nadir | n.b. |
| <i>ZOA</i> | Zeer open asfalt | n.b. |
| <i>ZT</i> | Zonnetijd | h |

Gerangschikt volgens het Griekse alfabet

| | | |
|------------------|---|--------------------------------------|
| α_s | Azimuthhoek van de zon | ° |
| β_A | Coëfficiënt van Angström | n.b. |
| γ | Hoogtehoek van de zon | ° |
| δ | Zonsdeclinatie | ° |
| δ_R | Atmosfeer of optische dikte van Rayleigh voor een eenheidsmassa van lucht | n.b. |
| ε | Hoekafstand tussen de richting van het beschouwde hemelpunt en de richting van de zon | ° |
| ε_0 | Emissiviteit van de lucht bij een heldere hemel | n.b. |
| ε_a | Emissiviteit van de lucht bij een bewolkte hemel | n.b. |
| ε_s | Emissiviteit van het oppervlak | n.b. |
| ζ | Zenithoek van de zon | ° |
| v_{wind} | Windsnelheid | m/s |
| λ | Warmtegeleidingsvermogen van het medium | W/(m·°C) |
| ρ | Volumieke massa | kg/m ³ |
| σ | Constante van Stephan-Boltzmann | W/(m ² ·°C ⁴) |
| $\bar{\sigma}_d$ | Gemiddelde dagelijkse bezonning | n.b. |
| $\bar{\sigma}_h$ | Gemiddelde bezonning per uur | n.b. |
| φ | Warmtebron in het medium | W/m ³ |
| ϕ | Breedteligging van de beschouwde plaats | ° |
| ϕ_{stral} | Totale zonnestralingstroom, waarbij rekening is gehouden met de albedo | W/m ² |
| ω | Uurhoek van de zon | ° |

Literatuur

1. **Observatoire National de la Route**
Dictionnaire de l'entretien routier - Thème 4: Viabilité hivernale
Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Metz, Frankrijk, 1998
2. **C. De Backer**
Les températures dans les structures routières – Mesures expérimentales – Méthode prévisionnelle
Rapport de recherche 180, Centre de recherches routières (CRR), Brussel, 1979
3. **J. P. Pfeiffer**
The Properties of Asphaltic Bitumen
Elsevier, New York, USA, 1950
4. **A. L. Straub, H. N. Schenck, F. E. Przybicien**
Bituminous Pavement Temperature related to Climate
HRB Record 256, blz. 53-77, Highway Research Board (HRB), Washington DC, USA, 1968
5. **De Geest**
Thermische isolatie van brugdekken ter voorkoming van ijzel
Revue C Tijdschrift, Volume V n° 5, 1970
6. **J. Mauricio Ruiz**
Concrete Temperature Modeling and Strength Prediction using Maturity Concepts in the FHWA Hiperpav Software
7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando, Florida, USA, 2001
7. **C. De Backer**
Parkeerdekken. Informatiestudie – Synthèse van de huidige kennis en ervaringen
RV 26/85, Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW), Brussel, 1985
8. **J. Taine, J.-P. Petit**
Transferts thermiques – Introduction aux sciences des transferts
[cours, données de base et exercices corrigées]
3e édition, Dunod, Paris, Frankrijk, 2003
9. **C. Saint-Blanquet, B. Fourcher**
Conduction de la chaleur
Syllabus de cours, Université de Nantes, Frankrijk, 2003
10. **M. Frémond, L. Labbé, P. Lerat, R. Lassoued**
Modélisation de la température de surface d'une chaussée à courte échéance par transfert de données météorologiques
XIème Congrès International de la Viabilité hivernale, AIPCR 2002, Sapporo, Japan, 21-28 januari 2002, 8 blz.
11. *Mastic Asphalt - Definitions and some physical attributes*
European Mastic Asphalt Association (EMAA), <http://aea.egv.emaa.online.fr/indexuk.html>, 2006

12. **Office des asphaltes**
Cahier des charges des asphaltes
Office des asphaltes, Antony, Frankrijk, 1978
13. **M. Radoli, R. Green**
Thermal Stresses in Concrete Bridge Superstructures under Summer Conditions
Transportation Research Record 547, blz. 23-36, Transportation Research Board (TRB), Washington DC, USA, 1975
14. **A. Neville**
Propriétés du béton
Eyrolles, Paris, Frankrijk, 2001
15. **R. Cadiergues**
Isolation et protection des bâtiments
Eyrolles, Paris, Frankrijk, 1965
16. **A. Philippe**
Méthodes provisoires d'évaluation des profondeurs atteintes par le gel dans les sols et chaussées
Bulletin de liaison des laboratoires routiers ponts et chaussées, n° 28, blz. 1_15-1_30, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, Frankrijk, 1967
17. **Schwaderer**
Der Strassenbau in physikalisch-messtechnischer Betrachtung
Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 84, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, Duitsland, 1969
18. **F. N. Finn**
Factors involved in the Design of Asphaltic Pavements
HRB Record 39, blz. 1-112, Highway Research Board (HRB), Washington DC, USA, 1967
19. **J. Côté, J.-M. Konrad**
Périodes à risques de givrage différentiel sur le territoire québécois: rapport CREIG-S2
Université de Laval, Faculté des Sciences et de Génie, Département de Génie civil, Laval, Canada, [2001?]
20. **Y. Jannot**
Thermique solaire
Association Libre Cours, Rocquencourt, Frankrijk, 2003, <http://www.librecours.org/documents/13/1393.pdf>, 2006
21. *COST 336 - Falling Weight Deflectometer*
Final Draft, <http://cordis-europe.eu/cost-transport/src/cost-336.htm>
22. **D. Léonard, O. Pilate**
The Development of Temperatures in Newly Laid Asphalt
Congrès Euraspfalt & Eurobitume, Wenen, Oostenrijk, mei 2004

23. **D. Grillet**
Transferts thermiques appliqués aux revêtements routiers
Institut Supérieur Industriel ECAM, Brussel, 2005
24. **Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN)**
Bitumen en bitumineuze bindmiddelen – Bepaling van het verwekingspunt – Ring-en-kogelmethode
NBN EN 1427:2000
25. **O. Pilate**
Evolution des températures dans une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée: prise en compte du rayonnement
XXe Belgisch Wegencongres, Belgische Wegenvereniging (BWV), Brussel, 28-30 september 2005
26. **J.-P. Cornec**
Du temps solaire au temps légal
<http://perso.orange.fr/jean-paul.cornec/equation.htm>, 2006
27. **R. Dogniaux**
Eclairage énergétique par ciel serein des parois orientées et inclinées
Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, Brussel, 1973
28. **R. Dogniaux**
Meteorological Data Measurement Techniques and Solar Components
Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI), Brussel, 1980
29. **R. Dogniaux**
De l'influence de l'estimation du facteur total de trouble atmosphérique sur l'évaluation du rayonnement solaire direct par ciel clair
Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI), Brussel, 1984
30. **R. Dogniaux**
Eclairage énergétique solaire direct, diffus et global des surfaces orientées et inclinées
Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI), Brussel, 1984
31. **R. Dogniaux**
Les rayonnements solaire, atmosphérique et terrestre
Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI), Brussel, 1982
32. **R. Dogniaux**
Paramétrisation des variations horaires et journalières du rayonnement solaire global et de la température de l'air en Belgique
Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI), Brussel, 1983
33. **A. Billet**
Albédo – Comment la Terre est-elle chauffée par le Soleil?
Dossier 6, Collection de l'Atelier d'exploration, Frankrijk, 1996

Temperatuurverloop in een pas aangebrachte asfaltlaag / Pilate, O.

- Brussel : Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, 2007.

- 84 blz. + 1 CD-ROM.

- (Researchverslagen ; 42).

Als een weg voor het verkeer wordt opengesteld vooraleer de pas aangebrachte asfaltlaag voldoende is afgekoeld, kan de verharding voortijdig schade oplopen. Daarom is een model ontwikkeld om de temperatuur in een nieuwe asfaltlaag vooruit te berekenen en de wachttijd tussen de aanbrenging van het asfalt en de wederopenstelling voor het verkeer aan te passen. Het eerste deel van dit researchverslag beschrijft hoe dit model tot stand is gekomen. In een eerste benadering was enkel rekening gehouden met warmteoverdracht door geleiding en convectie. De toetsing van het eerste, beperkte model heeft echter uitgewezen dat zonnestraling in extreme situaties (veel bezonning) wel degelijk het afkoelingsproces beïnvloedt. Bovendien was ervan uitgegaan dat de luchttemperatuur over de volledige periode van afkoeling constant is. Daarom is ook de warmteoverdracht door zonnestraling in het model verwerkt en zijn de variaties van de luchttemperatuur bepaald. Het volle eindmodel is eveneens op bouwplaatsen getoetst. In het tweede deel worden diagrammen voorgesteld, die voor extreme weersomstandigheden (temperatuur, bewolgingsgraad en windsnelheid) de minimale wachttijd tussen het einde van de aanbrenging van het asfalt en de wederopenstelling voor het verkeer aangeven. Om het tijdstip van de wederopenstelling voor het verkeer in andere gevallen vooruit te berekenen, wordt een gebruiksvriendelijke programmatuur meegeleverd. De onderliggende bedoeling is wegbeherende overheden en aannemers een praktisch hulpmiddel ter beschikking te stellen en hen aldus te ondersteunen in hun streven naar kwaliteit in de wegenbouw.

ITRD-classificatie

31 – Bitumineuze bindmiddelen en materialen ; 52 – Aanbrenging van wegconstructies en verhardingen

ITRD-trefwoorden

0122 – PROGNOSE ; 1104 – OPENSTELLEN (VOOR HET VERKEER) ; 2515 – ZON ; 2545 – KLIMAAT ; 2554 – WIND ; 2980 – BOVENLAAG ; 3623 – AANBRENGING (IN TOEPASS) ; 4967 – BITUMINEUS MENGSEL ; 5414 – TIJD (DUUR) ; 6464 – BEREKENING ; 6473 – WISKUNDIG MODEL ; 6711 – AFKOELING (MATER) ; 6722 – TEMPERATUUR ; 6731 – OVERDRACHT ; 6737 – STRALING ; 6743 – WARMTE ; 8645 – PROGRAMMATUUR

Extra termen

Bestellen

Kenm.: RV42/06

Prijs: 16,00 € (excl. 6 % BTW)

Fax: +32 2 766 17 87

E-mail: publication@brrc.be

Wettelijk depot: D/2007/0690/5
ISSN: 1376 - 9367



O p z o e k i n g s c e n t r u m v o o r d e W e g e n b o u w

Instelling erkend bij toepassing van de besluitwet van 30 januari 1947

Woluwedal 42

1200 Brussel

Tel. : 02 775 82 20 - fax : 02 772 33 74

www.ocw.be