

Faseverschuiving bij betonkernactivering

Modelleren van het afkoelen van beton na
uitschakeling van het koelsysteem

Sander Meijering
Universiteit Twente
Civiele Techniek

Van: mei 2008
Tot: augustus 2008

Begeleider Royal Haskoning

Ir. E.J.H. Swinkels Division Building Services

Begeleider Universiteit Twente

Dr. Ir. H.J.H. Brouwers Construction Management & Engineering

Voorwoord

Bij de opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente is het gebruikelijk om de bachelorfase af te sluiten met een bacheloreindopdracht. Na een aantal bezoeken aan de heer Snellink besloot ik mij te richten op betonkernactivering. Via een omweg kwam ik terecht bij Royal Haskoning in Groningen, bij de afdeling Building Services. Tijdens een gesprek met de heer Braam en de heer Swinkels kwamen we tot een opdracht die de heer Swinkels graag nog eens uitgevoerd zag worden: onderzoek naar faseverschuiving van betonkernactivering. Het verslag van deze opdracht heeft u nu in handen.

Ik wil bij deze graag de heer Swinkels bedanken voor zijn grote inbreng in mijn opdracht, zijn goede begeleiding en het geduld wat hij had met iemand met weinig voorkennis over het onderwerp. Wanneer ik niet wist hoe ik verder moest kwam hij met voldoende advies om mij op weg te helpen. Ook wil ik de heer Brouwers bedanken voor zijn inbreng aan de theoretische kant, zijn altijd grote enthousiasme en zijn hulp bij het verslag.

Samenvatting

Dit verslag beschrijft de modellering van het afkoelen van beton na het uitschakelen van het betonkernactiveringssysteem. In het eerste gedeelte van het verslag wordt de theorie achter het model uitgewerkt. De warmtevergelijking wordt afgeleid en de rand- en startvoorwaarden worden beschreven.

Het modelleren gebeurt in het programma FlexPDE. De werking van dit programma wordt beschreven in hoofdstuk 4, evenals de in- en output van het programma.

Hoofdstuk 5 behandelt de validatie van het model aan de hand van een bestaand model van Jeroen Rietkerk van de Universiteit Eindhoven. De waarden van model blijken sterk overeen te komen met de waarden van het model van Jeroen Rietkerk waarmee het model als gevalideerd wordt beschouwd.

Er worden simulaties gedraaid van een viertal betonvloeren:

1. Een normale betonvloer
2. Een airdeckvloer
3. Een slimlinevloer (infraplusvloer)
4. Een kanaalplaatvloer.

De eigenschappen en opbouw van de vloeren zijn terug te vinden in de bijlage.

Als laatste worden de uitkomsten van de simulaties naast elkaar gelegd en besproken. Hierbij blijkt dat vloeren met meer massa langer blijven koelen, maar dat bijvoorbeeld een slimlinevloer al na 3 uur de helft van zijn koelvermogen kwijt is. Dit is te snel om een gebouw goed te koelen.

Inhoud

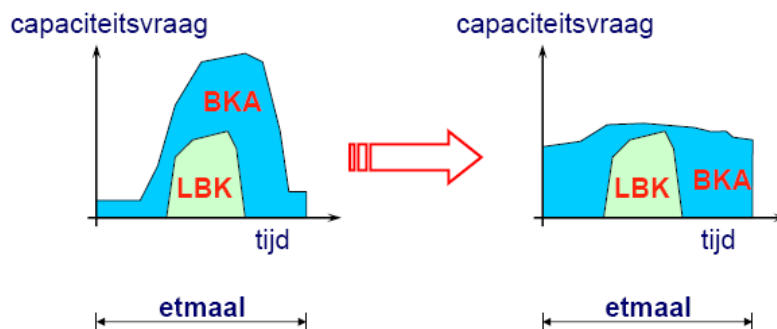
Voorwoord	2
Samenvatting	3
Inhoud	4
1 Inleiding	5
1.1 Opdrachtoomschrijving	5
2 Afleiding differentiaalvergelijking	6
2.1 Warmte balans	6
2.2 Warmtestroom in een punt	6
2.3 Warmtegeleiding vergelijking	7
2.4 Soortelijke warmtecapaciteit	7
3 Start- en randvoorwaarden	9
3.1 Startvoorwaarden	9
3.2 Randvoorwaarden	9
4 Opbouw simulatie	11
4.1 Input FlexPDE	11
4.2 Werkwijze FlexPDE	11
4.3 Output FlexPDE	11
5 Validatie	13
5.1 Beschrijving model TU/e	13
5.2 Vergelijking modellen	13
6 Simuleren van de vloeren	14
6.1 Soorten vloeren	14
6.1.1 Betonvloer	14
6.1.2 Airdeckvloer	14
6.1.3 Slimlinevloer	14
6.1.4 Kanaalplaatvloer	15
6.2 Simulaties en resultaten	15
6.2.1 Normale betonvloer	15
6.2.2 Kanaalplaatvloer	17
6.2.3 Airdeckvloer en slimlinevloer	18
7 Conclusie en aanbevelingen	20
7.1 Conclusie	20
7.2 Aanbevelingen	20
8 Literatuurlijst	21
Websites	21
Boeken	21
9 Bijlage	22
9.1 FlexPDE code	22
9.2 Uitgangswaarden	24
9.3 Resultaten airdeck- en slimlinevloeren	25

1 Inleiding

Tegenwoordig wordt er in steeds meer gebouwen betonkernactivering toegepast. Betonkernactivering is een zuinige manier voor het koelen en verwarmen van een gebouw.

Bij betonkernactivering wordt er koud of warm water, afhankelijk of er gekoeld of verwarmd moet worden, door leidingen in het beton gepompt. Het water in de leidingen hoeft slechts enkele graden kouder of warmer te zijn dan de gewenste temperatuur in de te koelen of te verwarmen ruimte. Betonkernactivering vraagt daardoor relatief weinig energie en is daarom goed te combineren met andere duurzame oplossingen zoals warmtepompen.

Naast koeling en verwarming moet een gebouw ook geventileerd worden met een luchtbehandelingsysteem. Het koelen en ventileren van een gebouw vraagt vooral in de middag veel energie, omdat de vraag naar koeling dan het hoogst is. Het gelijktijdig koelen en ventileren van een gebouw is niet altijd nodig. Doordat het afgekoelde beton behoud ook na uitschakeling van de betonkernactivering nog enige tijd zijn koelend vermogen behoud (faseverschuiving), is het mogelijk om het beton te koelen in periodes dat de vraag naar energie minder is.



Figuur 1.1: Capaciteitsvraag van een systeem met betonkernactivering (BKA) en luchtbehandelingsysteem (LBK) zonder faseverschuiving (links) en met faseverschuiving (rechts)

Op deze manier wordt de maximaal benodigde hoeveelheid energie gereduceerd en kan er bespaard worden op bijvoorbeeld grondpompen en warmtepompen. Door deze besparing kan betonkernactivering aantrekkelijk worden voor kleinschalige projecten.

1.1 Opdrachtomschrijving

Om te kunnen bepalen of het afgekoelde beton genoeg koelend vermogen heeft om na uitschakeling van het systeem de ruimtes op de gewenste temperatuur te houden is het nodig om te kijken hoe snel verschillende typen betonvloeren van variabele diktes reageren op temperatuurverandering. Wanneer hiervoor een model opgesteld wordt kan er in de ontwerpfase bepaald worden of betonkernactivering een optie is.

2 Afleiding differentiaalvergelijking

Voor het rekenen aan betonkernactivering moet een model worden opgesteld. Dit model zal gebruik maken van een differentiaalvergelijking die bekend staat als de warmte vergelijking. In dit hoofdstuk wordt de afleiding van deze vergelijking beschreven aan de hand van een artikel van de Wit (2007).

2.1 Warmte balans

Voor een controle volume en een tijdsinterval geldt: de som van warmte die het volume in gaat plus de warmte die verloren gaat in het volume is gelijk aan de som van de warmte die het volume verlaat plus de opgeslagen hoeveelheid warmte.

In formulevorm wordt dit:

$$\Phi_{in} + \Phi_p = \Phi_{uit} + d/dt * Q_{opsl} \quad (1)$$

Waarbij:

$\Phi_{in}(t)$ = de warmtestroom het volume in als functie van de tijd [W]

$\Phi_p(t)$ = de verloren warmte per tijdseenheid [W]

$\Phi_{uit}(t)$ = de warmtestroom het volume uit als functie van de tijd [W]

Q_{opsl} = de opgeslagen hoeveelheid warmte [J]

2.2 Warmtestroom in een punt

Een warmtestroom heeft een richting. Warmte stroomt bijvoorbeeld van een hogere temperatuur naar een lagere. De warmtestroom is ook afhankelijk van het oppervlakt waar het doorheen stroomt. De dichtheid van de warmtestroom q [W/m²] kan worden gedefinieerd als:

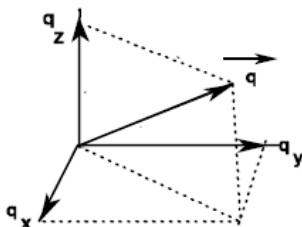
$$q = \Delta\Phi/\Delta A \quad (2)$$

Waarbij:

ΔA = oppervlakte van een oneindig klein deel loodrecht op de warmtestroom [m²]

$\Delta\Phi$ = warmtestroom [W] door A

Net als de warmtestroom heeft de dichtheid van de warmtestroom een richting, het is een vector. Deze vector wordt geschreven als $\vec{q} = (q_x, q_y, q_z)$ met q_x , q_y en q_z als de coördinaten in een rechthoekig (Cartesiaans) coördinatenstelsel.



Figuur 2.1: Cartesiaans coördinatenstelsel

De opgeslagen hoeveelheid warmte hangt ook af van het volume van het materiaal. We krijgen zo een dichtheid e [J/m^3]:

$$\triangleright e = \Delta Q / \Delta V \quad (3)$$

Waarbij:

ΔV = een oneindig klein volume [m^3]

ΔQ = de hoeveelheid warmte [J] opgeslagen in V

Op deze manier kan ook een warmtebron dichtheid [W/m^3] worden gedefinieerd:

$$\triangleright S_e = \Delta \Phi_e / \Delta V \quad (4)$$

Wanneer we vergelijking 1 uitdrukken in de vergelijkingen 2 t/m 4 krijgen we:

$$\triangleright -\frac{\delta q_x}{\delta x} - \frac{\delta q_y}{\delta y} - \frac{\delta q_z}{\delta z} + S_e = -\frac{\delta e}{\delta t} \quad (5)$$

Vergelijking (5) kan worden gebruikt voor elk punt in de ruimte in tegenstelling tot vergelijking (1) die alleen voor een controle volume geldt. Vergelijking (5) kan ook worden geschreven als:

$$\triangleright -\text{div } \vec{q} + S_e = \frac{\delta e}{\delta t} \quad (6)$$

Waarbij div staat voor divergentie. Divergentie is een maat voor de intensiteit van een vectorveld.

2.3 Warmtegeleiding vergelijking

In een materiaal kan de temperatuur op elk moment op elke plaats anders zijn. Dit geeft $T = T(x, y, z, t)$ waarbij x, y en z de coördinaten in een assenstelsel zijn en t de tijd is. In een materiaal zal warmte stromen van een hogere naar een lagere temperatuur. De wet van Fourier stelt dat de warmtestroomdichtheid recht evenredig is met het verschil in temperatuur per lengte eenheid:

$$\triangleright q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

Waarbij:

λ = warmtegeleidingcoëfficiënt [W/mK]

T = temperatuur [K]

Omdat de warmtestroom positief is voor een aflopend temperatuursverschil is λ negatief. Vergelijking (7) kan ook worden geschreven als

$$\triangleright \vec{q} = -\lambda \text{ grad } T \quad (8)$$

waarbij grad staat voor gradiënt (eenvoudig gezegd, de afgeleide in meerdere dimensies).

2.4 Soortelijke warmtecapaciteit

De warmte die nodig is om 1 kg materiaal 1°C te verwarmen wordt de soortelijke warmtecapaciteit c genoemd. Voor 1 m^3 materiaal met dichtheid ρ wordt dat ρc [J]. ρc wordt de volumieke warmtecapaciteit

genoemd. Omdat de verandering in opgeslagen warmte gelijk is aan de verandering in temperatuur volgt de vergelijking:

$$\triangleright \Delta e = \rho c \Delta T \quad (9)$$

Waarbij:

c = soortelijke warmtecapaciteit [J/kgK]

ρ = dichtheid [kg/ m³]

Wanneer de vergelijking (9) gecombineerd wordt met de warmtebalans (6) en de wet van Fourier (7), wordt dat:

$$\triangleright \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

Anders geschreven:

$$\triangleright \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div } \lambda \text{ grad } T \quad (11)$$

Vergelijking (11) staat bekend als de warmte vergelijking.

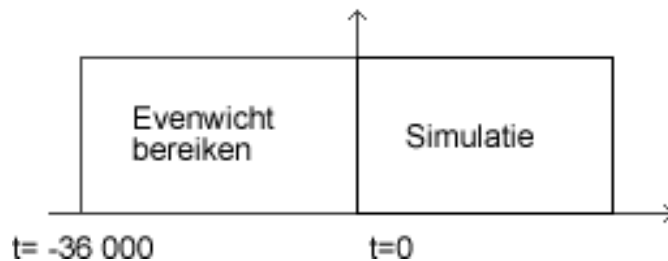
3 Start- en randvoorwaarden

Een differentiaalvergelijking kan alleen opgelost worden door start- en randvoorwaarden te definiëren. In dit hoofdstuk zal hier aandacht aan worden besteed. Allereerst worden de startvoorwaarden bepaald, vervolgens de randvoorwaarden.

3.1 Startvoorwaarden

De startvoorwaarde in deze vergelijking is de temperatuur distributie in het voorwerp aan het begin van de periode (T_0) waarover een berekening zal worden gemaakt. Wanneer er een statische berekening wordt gemaakt is deze beginvoorwaarde overbodig omdat het probleem niet tijdsafhankelijk is. In het geval van een dynamische berekening moet er wel een startvoorwaarde worden opgegeven. Aangezien de startvoorwaarde onbekend is zal deze moeten worden geschat. Daardoor wordt de oplossing pas na enige tijd betrouwbaar.

De startwaarde kan door het programma worden uitgerekend. Het is de bedoeling dat het programma de opwarming van het afgekoelde beton simuleert. De verdeling van de warmte in het afgekoelde beton in een evenwichtssituatie kan worden gezien als de startvoorwaarde. Deze verdeling moet dus bekend zijn. Om deze verdeling uit te rekenen gaat het programma eerst aan de slag om het beton "af te koelen". Het programma werkt toe naar een evenwicht waarin de ruimte temperatuur en de watertemperatuur stabiel zijn. Wanneer dit evenwicht bereikt is wordt de toevoer van koud water 'uitgeschakeld'. Op dit moment begint de daadwerkelijke simulatie. De evenwichtssituatie op $t = 0$ kan worden opgeslagen zodat er niet voor elke simulatie eerst een beginsituatie moet worden berekend. De verdeling van de warmte op $t = 0$ is de startvoorwaarde in dit probleem.

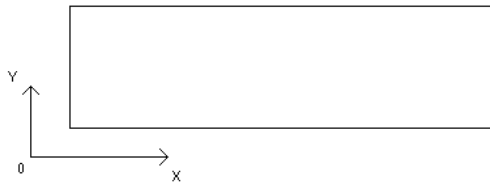


Figuur 3.1: Schematische weergave tijdsverloop simulatie

3.2 Randvoorwaarden

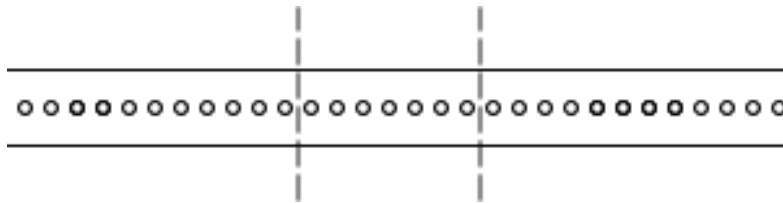
Om de differentiaal vergelijking op te kunnen lossen moeten enkele randvoorwaarden worden gedefinieerd. Het probleem is een 2 dimensionaal probleem met een bepaalde tijdsduur. De vergelijking kent dus drie onbekenden. Er zijn dan ook 3 randvoorwaarden nodig. De eerste voorwaarde is de startvoorwaarde voor de variabele temperatuur (T). Deze wordt hierboven beschreven. Er zijn ook randvoorwaarden nodig voor de variabelen x en y .

De randvoorwaarden zullen niet analytisch worden opgelost, omdat het programma dit zelf doet. Het analytisch oplossen is dus overbodig. Het is wel noodzakelijk FlexPDE te vertellen hoe het om moet gaan met randvoorwaarden. Bij het beschrijven van de randvoorwaarden wordt het volgende assenstelsel aangenomen.



Figuur 3.2: Aangenomen 2-Dimensionale assenstelsel

In dit probleem wordt een klein deel van een betonvloer genomen. Het gesimuleerde deel zit als het ware ingeklemd tussen gelijksoortige delen.



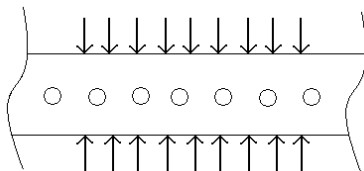
Figuur 3.3: Er wordt slechts een deel van de vloer gemodelleerd

In de x-richting zal er aan de randen dus geen warmte verlies plaats vinden. Dit is de tweede randvoorwaarde.

In de y-richting zal er wel warmte overdracht plaatsvinden, namelijk tussen het beton en de lucht, zowel aan de bovenkant (vloerzijde) als aan de onderkant (plafondzijde). Deze warmte overdracht kan worden beschreven met de formule:

$$\triangleright \Delta Q = \alpha (T_{\text{omgeving}} - T_{\text{oppervlakte}}) \quad (12)$$

met α = warmteoverdrachtscoëfficiënt. Dit is de derde randvoorwaarde.



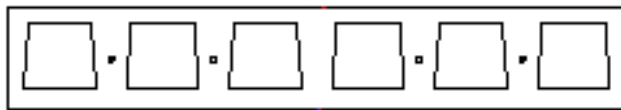
Figuur 3.4: Er vindt alleen warmteoverdracht plaats tussen de vloer- en plafondzijde

4 Opbouw simulatie

In dit hoofdstuk zal worden beschreven hoe de simulatie in het programma FlexPDE werkt. Dit zal worden gedaan door een beschrijving van de input, de werkwijze en de output van FlexPDE.

4.1 Input FlexPDE

Om de simulatie in FlexPDE uit te kunnen voeren moeten er een minimaal aantal gegevens worden ingevoerd. Uiteraard de differentiaal vergelijking en alle parameters die hier een rol spelen, zoals de warmtegeleidingscoëfficiënt en het soortelijk gewicht van water en beton. Ook de tijdstappen en de begin- en eindtijd worden ingevoerd. Vervolgens moet een grafische voorstelling van het probleem worden gemaakt. Dit gebeurt door coördinaten van lijnen in te geven.



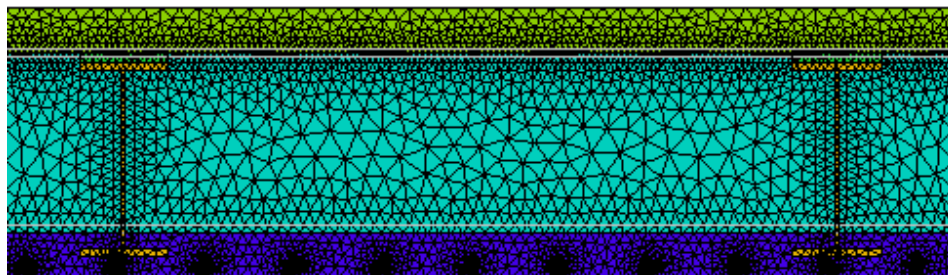
Figuur 4.1: Grafische voorstelling van een bubbledeck vloer in FlexPDE

Wanneer de betonvloer goed is ingevoerd moeten de randvoorwaarden worden opgegeven. Dit gebeurt door bepaalde waarden en vergelijkingen voor verschillende lijnen in te geven. Als laatste moet worden opgegeven welke output de gebruiker graag te zien krijgt.

4.2 Werkwijze FlexPDE

FlexPDE lost de differentiaalvergelijking op aan de hand van de eindige elementen methode (<http://www.pdesolutions.com/userguide/ugindex.html>).

Bij de eindige elementen methode wordt een constructie, in dit geval een betonvloer, in een aantal elementen verdeelt (http://www.mate.tue.nl/~devree/Eem_diktaat.pdf). FlexPDE deelt zelf de ingegeven tekening in in driehoekjes van verschillende grote. Waar het programma grotere veranderingen verwacht, zoals rond de grenzen tussen verschillende materialen, worden de driehoekjes kleiner gemaakt. Wanneer de fout op bepaalde plekken tijdens het rekenen te groot blijkt worden de driehoekjes aangepast.



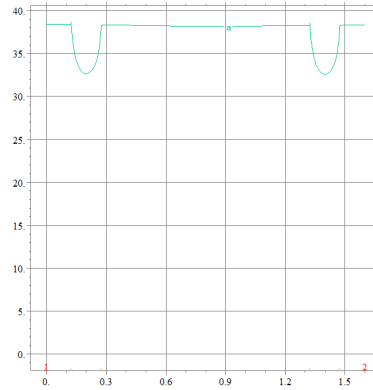
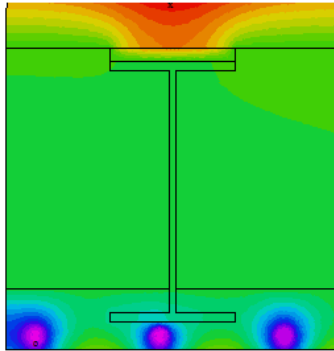
Figuur 4.2: Verdeling in een infrapluus-vloer. De zwarte vlakken zijn zeer kleine driehoekjes

Ook de tijdstappen worden aangepast, bijvoorbeeld aan het eind van de simulatie wanneer er weinig veranderingen optreden.

4.3 Output FlexPDE

FlexPDE kent een aantal manieren om de output weer te geven. Een van de belangrijkste weergaves voor dit probleem is de grafische weergave van de temperatuur. Andere opties zijn tabellen en grafieken.

Het is ook mogelijk data naar een tekstbestand te exporteren om deze in andere programma's als Matlab en Excel te gebruiken.



Figuur 4.3 en 4.4: Voorbeelden grafische output FelxPDE

5 Validatie

Om het model in de praktijk te kunnen gebruiken is het nodig om het model te valideren. Dit kan op een aantal manieren. Een daarvan is natuurlijk het valideren aan de hand van een praktijk situatie. Gezien de omvang van de opdracht is dit geen ideale oplossing. Voor een praktijk validatie zouden er meerdere temperatuur sensors in en rond de betonvloer moeten zitten. Een andere mogelijkheid is het valideren aan de hand van andere modellen waarvan de werking reeds bewezen is.

In dit hoofdstuk zal de validatie van het model aan de hand van een model voor betonkernactivering van een student van de technische universiteit Eindhoven, Jeroen Rietkerk, worden beschreven (http://sts.bwk.tue.nl/bps/onderwijs/software/matlab_femlab_simulink/Betonkernactivering.pdf). Jeroen Rietkerk is tevens werkzaam bij Royal Haskoning.

5.1 Beschrijving model TU/e

Het model gemaakt door Jeroen Rietkerk is gebaseerd op het ISE-model van de TU/e. Het ISE-model is een model wat inzicht moet geven in de warmte- en koude behoefte van een gebouw. Jeroen Rietkerk heeft dit model uitgebreid met een gedeelte voor betonkernactivering. Dit model is geschreven voor Matlab en Simulink en rekent met vervangingsweerstand in het beton. Het model is niet in de praktijk gevalideerd, maar Jeroen Rietkerk heeft de gebruikte differentiaalvergelijking analytisch gecontroleerd.

5.2 Vergelijking modellen

Voor het valideren van het eigen model wordt deze vergeleken met het model van Jeroen Rietkerk. In beide modellen wordt een eenvoudige betonnen vloer in gegeven en alle parameters worden gelijk gesteld. Vervolgens wordt de simulatie gedraaid. Beide modellen moeten eerst een evenwicht bereiken, de startvoorwaarde. Dit evenwicht wordt bereikt op $t = 0$. Vervolgens wordt in beide modellen de aanvoer van koud water afgesloten. De betonvloer warmt nu langzaam op.

Er worden een aantal belangrijke punten van deze simulaties vergeleken. De resultaten zijn te vinden in de onderstaande tabel.

t (uur)		T vloer (°C)	T plafond (°C)	Q vloer (W/m ²)	Q plafond (W/m ²)	Q totaal (W/m ²)
0	eigen model	22,27	22,48	12,13	16,77	28,90
	model Rietkerk	22,28	22,49	12,07	16,63	28,69
12	eigen model	23,16	23,28	5,91	7,89	13,80
	model Rietkerk	23,13	23,28	6,06	7,93	13,98
24	eigen model	23,63	23,69	2,56	3,42	5,98
	model Rietkerk	23,59	23,69	2,59	3,39	5,98

Tabel 5.1: Vergelijking eigen model en het model van Jeroen Rietkerk

Op $t = 0$, $t = 12$ en $t = 24$ blijkt de afwijking voor Q totaal respectievelijk 0.7%, -1.3% en 0.0 %. Naar aanleiding van deze gegevens kan worden aangenomen dat het eigen model realistische waarden als output geeft.

6 Simuleren van de vloeren

Nu het model als betrouwbaar kan worden beschouwd, kan er overgegaan worden tot het uitvoeren van de simulaties van de verschillende vloeren. In dit hoofdstuk wordt beschreven welke vloeren gesimuleerd worden, om vervolgens de uitkomsten van deze simulaties te bespreken.

6.1 Soorten vloeren

Voer de simulaties worden verschillende typen vloeren gebruikt. Het zijn allemaal vloeren die in de bouw veel gebruikt worden. De vloeren die gesimuleerd worden zijn: een normale betonvloer, een airdeckvloer, een slimlinevloer en een kanaalplaatvloer.

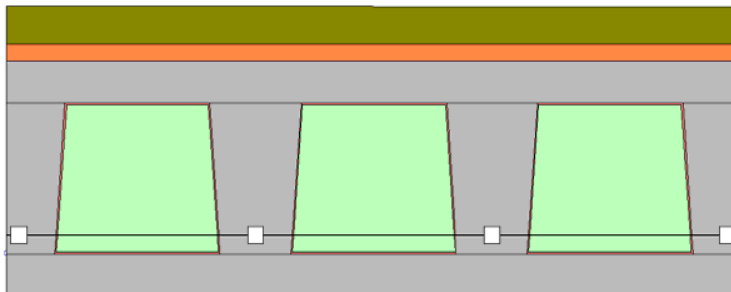
6.1.1 Betonvloer

Als eerste wordt er getest met een normale betonvloer met een dikte van 0.3 m en de leidingen in het midden van de vloer. Deze vloer bevat in tegenstelling tot de andere vloeren geen holle ruimtes en zal naar verwachting langer een koelende werking hebben.

6.1.2 Airdeckvloer

Een airdeckvloer is een betonvloer met daarin holle ruimtes in de vorm van vierhoekige plastieken boxen. Door het toevoegen van deze boxen wordt de vloer lichter en heeft zo minder last van zijn eigen gewicht. Zo kunnen dezelfde overspanningen worden bereikt met een lichtere vloer. Het spreekt voor zich dat de airboxen invloed hebben op het thermische gedrag van de vloer.

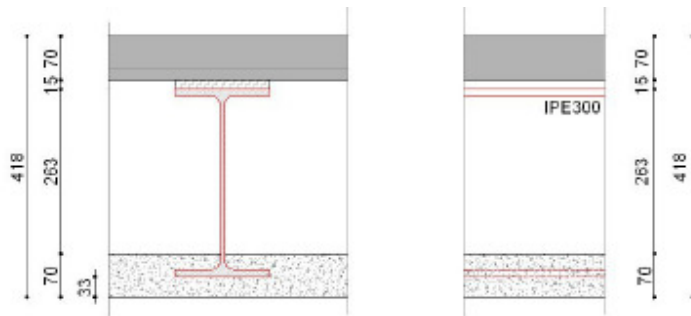
De airdeckvloer is opgebouwd uit een laag beton met daarin de airboxen. Daar bovenop komt een geluidsisolerende laag en een toplaag.



Figuur 6.1: Doorsnede airdeckvloer

6.1.3 Slimlinevloer

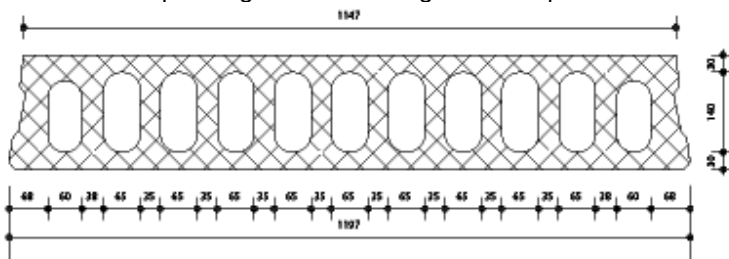
De slimlinevloer stond eerst bekend als de infraplusvloer. Een slimlinevloer is een vloer die bestaat uit een onderschil van 70 mm dik met daarin een stalen IPE profiel. Op dit profiel wordt terplekke een betonnen laag afgegoten. Ook hier ontstaat een grote holle ruimte die het eigen gewicht beperkt.



Figuur 6.2: Dwarsdoorsnede slimlinevloer

6.1.4 Kanaalplaatvloer

De kanaalplaat vloer is in feite hetzelfde als de normale betonvloer, met het verschil dat de kanaalplaat vloer holle uitspanningen over de lengte van de plaat heeft.



Figuur 6.3: Dwarsdoorsnede kanaalplaatvloer

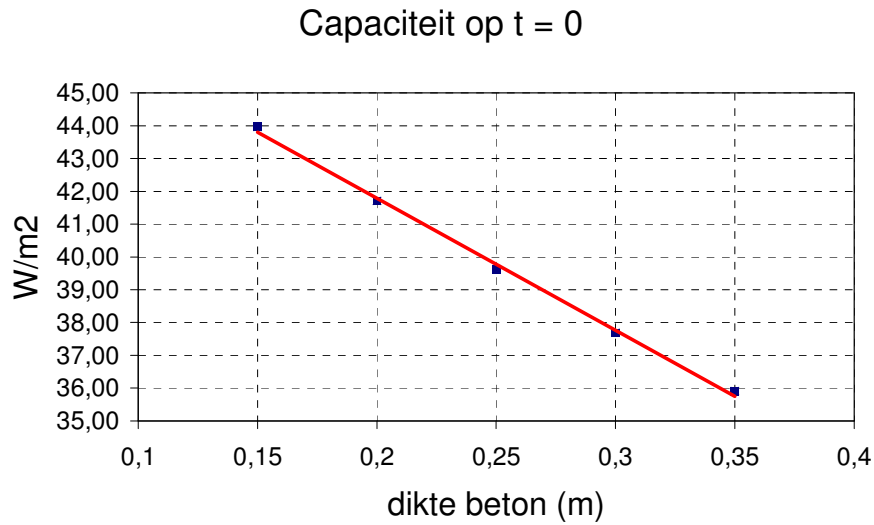
6.2 Simulaties en resultaten

Nadat alle vloeren zijn ingevoerd in het programma, worden er een voor een simulaties gedraaid van verschillende vloeren van verschillende diktes. De uitslagen hiervan zijn te vinden in de onderstaande grafieken.

6.2.1 Normale betonvloer

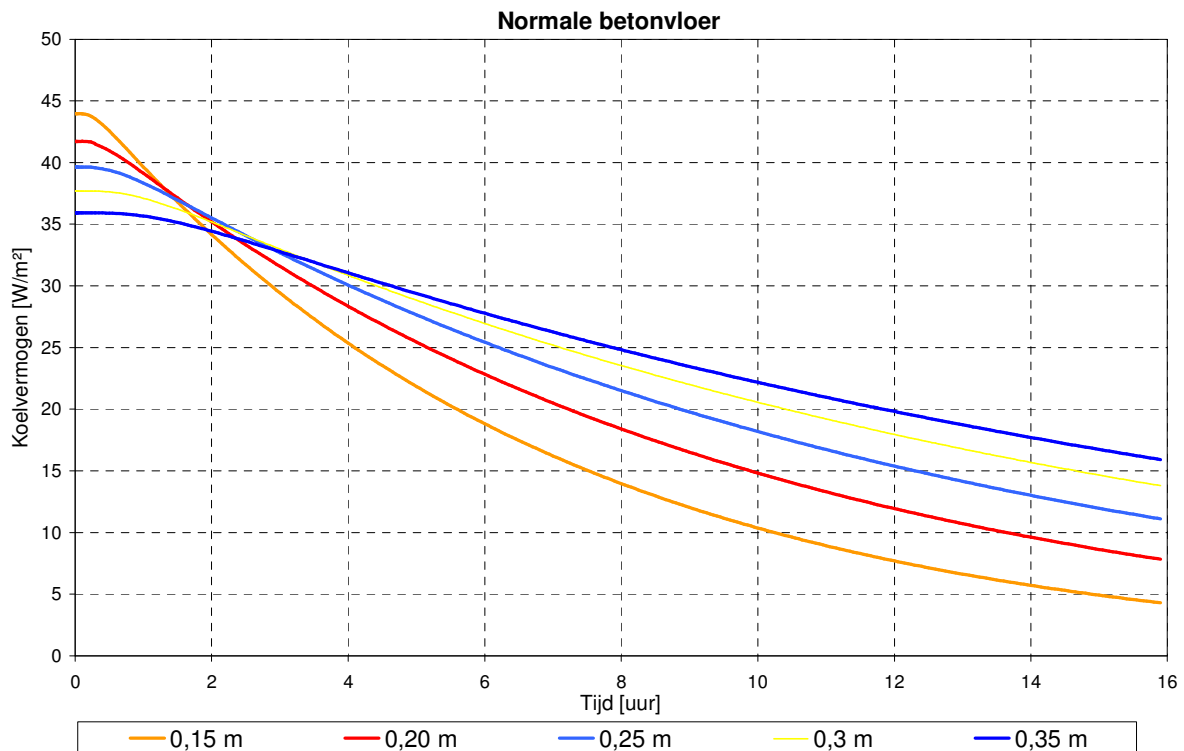
Voor de simulaties van de normale betonvloeren zijn vloeren met een dikte van 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm en 350 mm. nomen. Wanneer de resultaten bekeken worden vallen een aantal zaken op.

De afname van het koelvermogen op $t = 0$ is lineair. Voor elke 50 mm beton neemt het totale koelvermogen ongeveer 2 W/m^2 af.



Figuur 6.1: Afname van de capaciteit op $t=0$

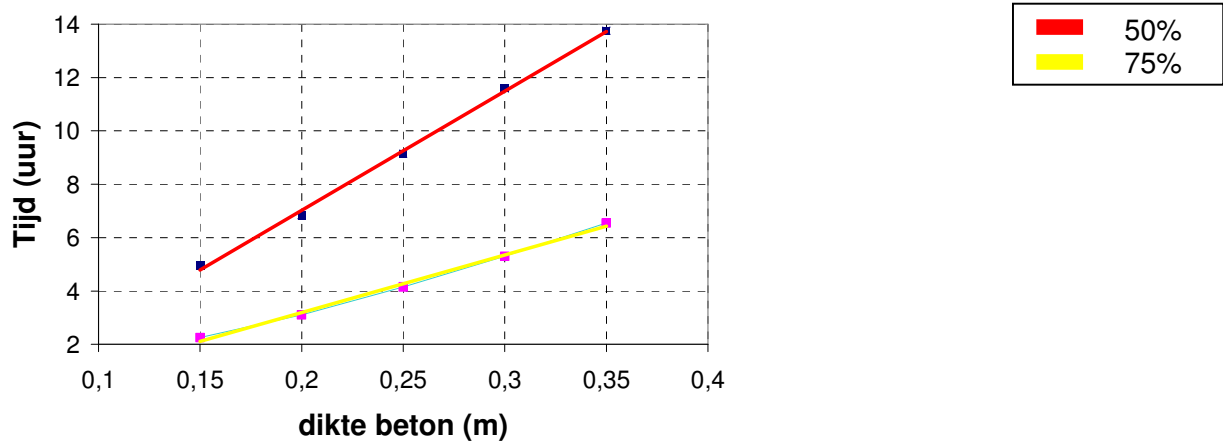
In figuur 6.2 is te zien dat de lijnen in het begin niet dalen. Dit komt door dat de buitenkant van het beton nog niet 'weet' dat het water uitgeschakeld is. Na enige tijd begint de buitenkant op te warmen en neemt het vermogen af. In de grafiek is te zien dat de dunne vloeren sneller beginnen op te warmen dan de dikkere vloeren, wat overeenkomt met wat men zou verwachten.



Figuur 6.2: Afname koelvermogen voor vloeren van verschillende dikte in 16 uur

In figuur 6.3 valt af te lezen dat ook het aantal uren dat het duurt voordat een vloer 50% (rode lijn) of 75% (gele lijn) van zijn vermogen heeft bereikt lineair toeneemt met de dikte van de vloer. Dit biedt de mogelijkheid om heel eenvoudig het vermogen van vloeren van bepaalde dikte te berekenen.

Afname vermogen

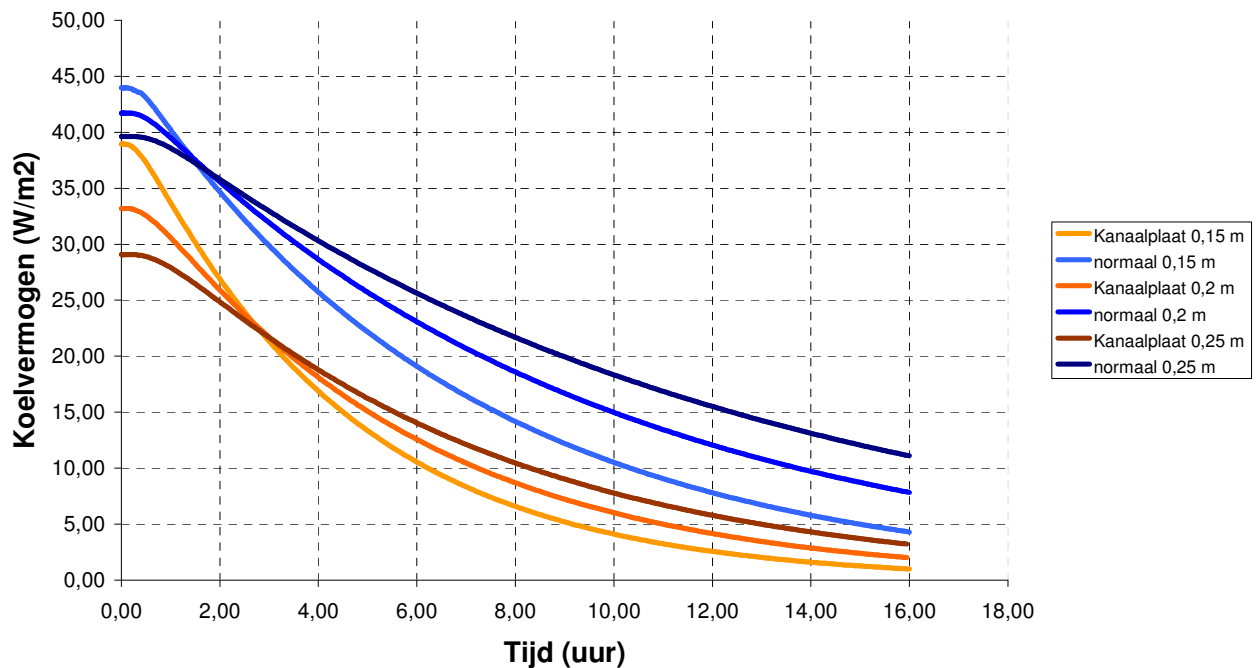


Figuur 6.3: Resterend koelvermogen per vloerdikte

6.2.2 Kanaalplaatvloer

Als volgende worden nu de resultaten van de kanaalplaatvloeren besproken, omdat deze op de ovale gaten in het beton na gelijk is aan de normale betonvloer.

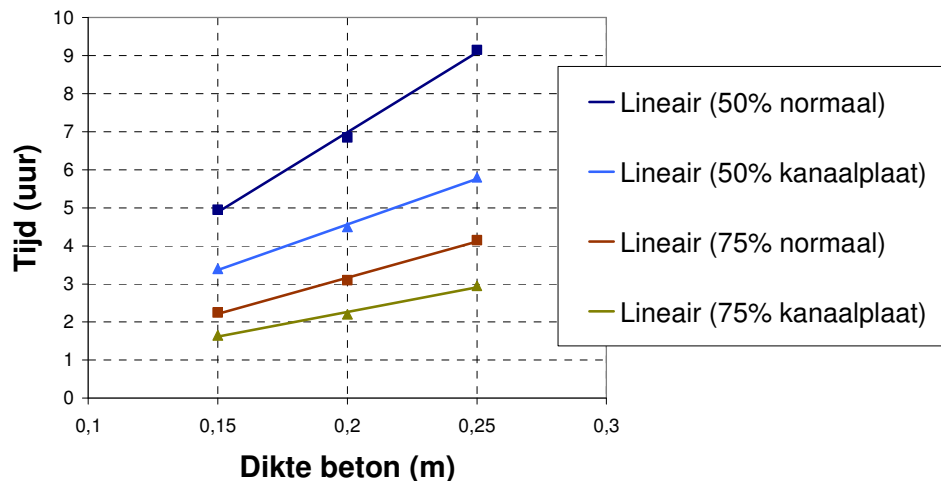
Kanaalplaat en normale betonvloeren



Figuur 6.4: Afname koelvermogen voor kanaalplaat- en normale betonvloeren

Uit de grafiek blijkt dat de kanaalplaatvloeren minder koelvermogen leveren dan normale betonvloeren met gelijke dikte. Ook is te zien dat het opwarmen van het beton eerder begint en sneller gaat. Dit is vrij logisch, aangezien er minder massa op te warmen valt. Als we kijken wanneer de kanaal platen 75% en 50% van hun capaciteit bereiken zien we dat de kanaalplaatvloeren dit eerder doen.

Overgebleven Koelvermogen



Figuur 6.5: Resterend koelvermogenkanaal per vloerdikte

6.2.3 Airdeckvloer en slimlinevloer

De airdeckvloer en de slimlinevloer verschillen er van een normale betonvloer. De positie van de leidingen waar het koelwater door stroomt zit veel dichtter aan de oppervlakte dan bij de andere twee typen vloeren. Bij de slimlinevloer liggen de leidingen onder 1.5 cm beton. Het is dus logischer om de resultaten van de simulaties van de airdeck- en slimlinevloer los te zien en slechts enkele vergelijkingen te maken met een normale betonvloer. In de bijlage zijn de resultaten van de simulaties te vinden in een aantal grafieken en tabellen.

Het eerste wat opvalt is het grote temperatuursverschil van 2.5°C tussen vloerzijde en plafondzijde van de airdeckvloer. Dit zorgt er ook voor dat het plafond een bijna 4 keer zo groot koelvermogen levert. Dit is niet vervelend, aangezien men bij het toepassen van betonkernactivering vaak niet werkt met systeemplafonds maar met verhoogde vloeren.

De airdeckvloer zit na 3.3 uur nog maar op 75% van zijn koelvermogen. Wanneer we naar een normale betonvloer van dezelfde afmetingen kijken dan zien we dat deze vloer er maar liefst 2 keer zo lang over doet, namelijk 6.55 uur. Na 8 uur wordt de 50% bereikt, tegenover 13.75 uur voor de normale betonvloer. Doordat de leidingen vrij dicht aan de onderkant liggen levert de airdeckvloer slechts 14% minder vermogen.

Het verschil tussen vloer en plafondzijde is bij de slimlinevloer niet zo groot als bij de airdeckvloer, hoewel de delen ver uit elkaar liggen en worden gescheiden door een dikke laag lucht. De goede geleiding van de stalen profielen zorgt echter voor een klein verschil, slechts 1°C. Het verschil in koelvermogen tussen vloer en plafond is dan ook niet zo groot, slecht 1.5 maal. Deze voorsprong wordt na uitschakeling al na 1 uur teniet gedaan.

De slimlinevloer verliest van alle gesimuleerde typen wel het snelst zijn koelvermogen. Na slechts 1.65 uur zit de vloer al op 75% en na 4.3 uur is dat nog maar 50%. Dit voor een vloer die maar liefst 0.42 m dik is. Van deze 0.42 m is 0.14 m beton. Vergelijken met een normale vloer met een ongeveer evenveel

Faseverschuiving bij betonkernactivering

beton is dit een slechte prestatie. Ook blijkt dat de voorsprong die het plafond in eerste instantie heeft al na 1 uur teniet is gedaan.

7 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zullen de resultaten kort besproken worden en zal een aantal aanbevelingen worden gedaan omtrent gebruik van het model en vervolgonderzoek.

7.1 Conclusie

Na het opstellen van een model voor betonkernactivering zijn er een aantal simulaties gedraaid met het programma FlexPDE waarbij het betonkernactiveringssysteem uit is gezet. Hierna warmt het beton langzaam op en zal zo steeds minder koelvermogen leveren. Uit de verschillende simulaties komen bruikbare resultaten.

Wanneer de resultaten van de simulaties bekijken kunnen een aantal conclusies worden getrokken die eigenlijk zeer logisch zijn. Meer betonmassa zorgt ervoor dat vloeren langer koel blijven. Sommige vloeren zijn na 3 uur al 50% van hun vermogen kwijt. Wanneer het systeem aan het begin van de middag wordt uitgeschakeld is zeker niet voldoende om de rest van de dag voor een aangenaam klimaat te zorgen. Er kan dus worden gezegd dat een slimlinevloer niet erg geschikt is voor deze taak.

Meer massa zorgt voor een afname van koelvermogen wanneer het systeem nog in werking is. Er moet dus gezocht worden naar goede verhoudingen tussen koelend vermogen met een werkend systeem en een uitgeschakeld systeem.

7.2 Aanbevelingen

Als eerste moet duidelijk vermeldt worden dat het model niet in de praktijk is gevalideerd. Dit zou een mooie vervolg opdracht kunnen zijn, maar heeft als gevolg dat de resultaten kritisch moeten worden behandeld. Aangezien de resultaten wel sterk overeenkomen met een ander model en de uitkomsten liggen binnen dat wat mag worden aangenomen kan wel worden gesteld dat het model als richtlijn kan worden gebruikt, en daar was het ook om te doen.

Het model kan ondersteuning bieden bij het kiezen van een geschikte vloer voor bepaalde situaties waarin en zeker koelvermogen moet worden gerealiseerd.

Aan de hand van dit verslag kunnen wat betreft vervolg onderzoek een aantal aanbevelingen worden gedaan. Praktijk validatie staat voorop, maar men kan ook denken aan het uitbreiden van het model in een 3D omgeving. FlexPDE is hiervoor geschikt, dus dit ligt zeker in lijn met dit model. Ook zou het aantal vloeren kunnen worden uitgebreid.

8 Literatuurlijst

Websites

<http://www.pdesolutions.com/userguide/ugindex.html>
http://nl.wikipedia.org/wiki/Gradi%C3%ABnt_%28wiskunde%29
http://nl.wikipedia.org/wiki/Divergentie_%28vectorveld%29

Jeroen Rietkerk, Faculteit Bouwkunde Capaciteitgroep:
http://sts.bwk.tue.nl/bps/onderwijs/software/matlab_femlab_simulink/Betonkernactivering.pdf

Prof. dr. ir. M.H. the Wit, Faculteit Bouwkunde Capaciteitgroep:
http://sts.bwk.tue.nl/7s533/readers/wveng6_3.pdf

http://www.mate.tue.nl/~devree/Eem_diktaat.pdf

Boeken

R. McMullan (2007), *Environmental Science in Building*
Rijksgebouwendienst (1989), *Temperatuur – simulatieprogramma's een richtlijn voor het gebruik*.

9 Bijlage

9.1 FlexPDE code

TITLE 'Homogen betonvloer'

VARIABLES

temp

DEFINITIONS

temp_water = 273+19.5

t_ruimte = 24+273

K=1.7

breedte = 0.5 {helpt gewenste breedte}

hoogte = 0.15/2 {helpt gewenste hoogte}

rho = 2500

c = 840

r = 0.012

alpha_beton_plafond = 8

alpha_beton_vloer = 6.5

EQUATIONS

div(k*grad(temp)) = 0

BOUNDARIES

REGION 1

rho = 2400

c = 840

START(-(breedte),-(hoogte))

natural(temp)=alpha_beton_plafond*((t_ruimte - temp)) LINE TO (breedte,-(hoogte))

natural(temp)=0 LINE TO (breedte,hoogte)

natural(temp)=alpha_beton_vloer*((t_ruimte - temp)) LINE TO (-(breedte),hoogte)

natural(temp)=0 LINE TO CLOSE

REGION 2

rho = 1000

c = 4200

START(r,0)

VALUE(temp)=temp_water

ARC(CENTER=0,0) ANGLE=360

REGION 3

rho = 1000

c = 4200

START(0.2+r,0)

VALUE(temp)=temp_water

ARC(CENTER=0.2,0) ANGLE=360

```

REGION 4
    rho = 1000
    c = 4200
    START(0.4-r,0)
    VALUE(temp)=temp_water
    ARC(CENTER=0.4,0) ANGLE=360

REGION 5
    rho = 1000
    c = 4200
    START(-0.2+r,0)
    VALUE(temp)=temp_water
    ARC(CENTER=-0.2,0) ANGLE=360

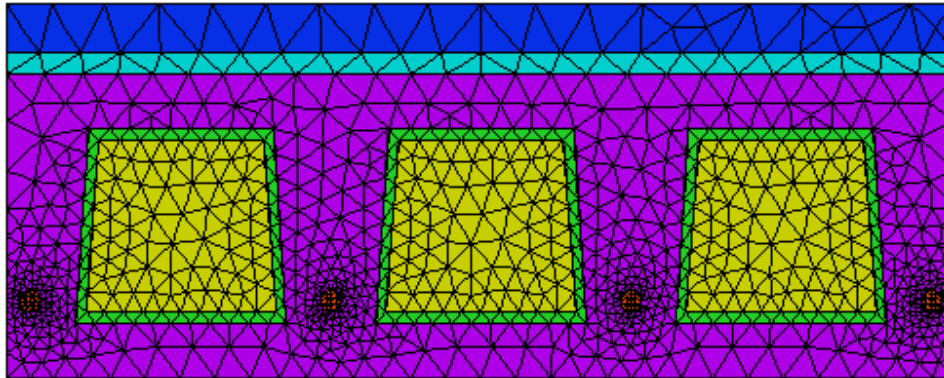
REGION 6
    rho = 1000
    c = 4200
    START(-0.4-r,0)
    VALUE(temp)=temp_water
    ARC(CENTER=-0.4,0) ANGLE=360

PLOTS
    elevation(temp) from(-breedte,-hoogte) to (breedte,-hoogte) range=(292,296)
    elevation(Q) from(-breedte,-hoogte) to (breedte,-hoogte) range=(0,1)
    CONTOUR(temp) painted

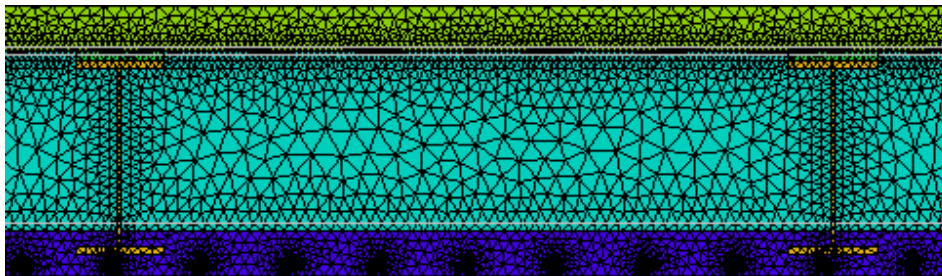
END
    
```

9.2 Uitgangswaarden

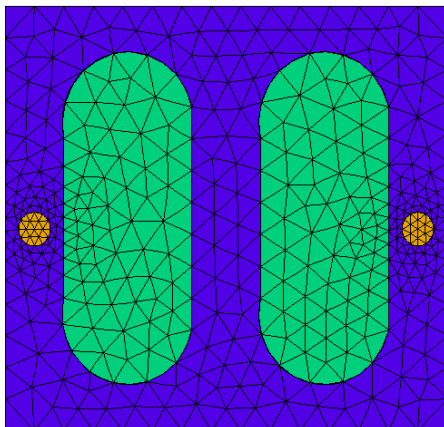
Warmtecapaciteit beton:	840 J/kg K
Dichtheid beton:	2400 kg/m ³
Warmtegeleidingcoëfficiënt beton:	1.4 W/m K
Gemiddelde watertemperatuur leidingen:	20 °C
Gemiddelde ruimte temperatuur:	25 °C
Leiding diameter:	0.02 m



Figuur 9.1: Opbouw airdeckvloer

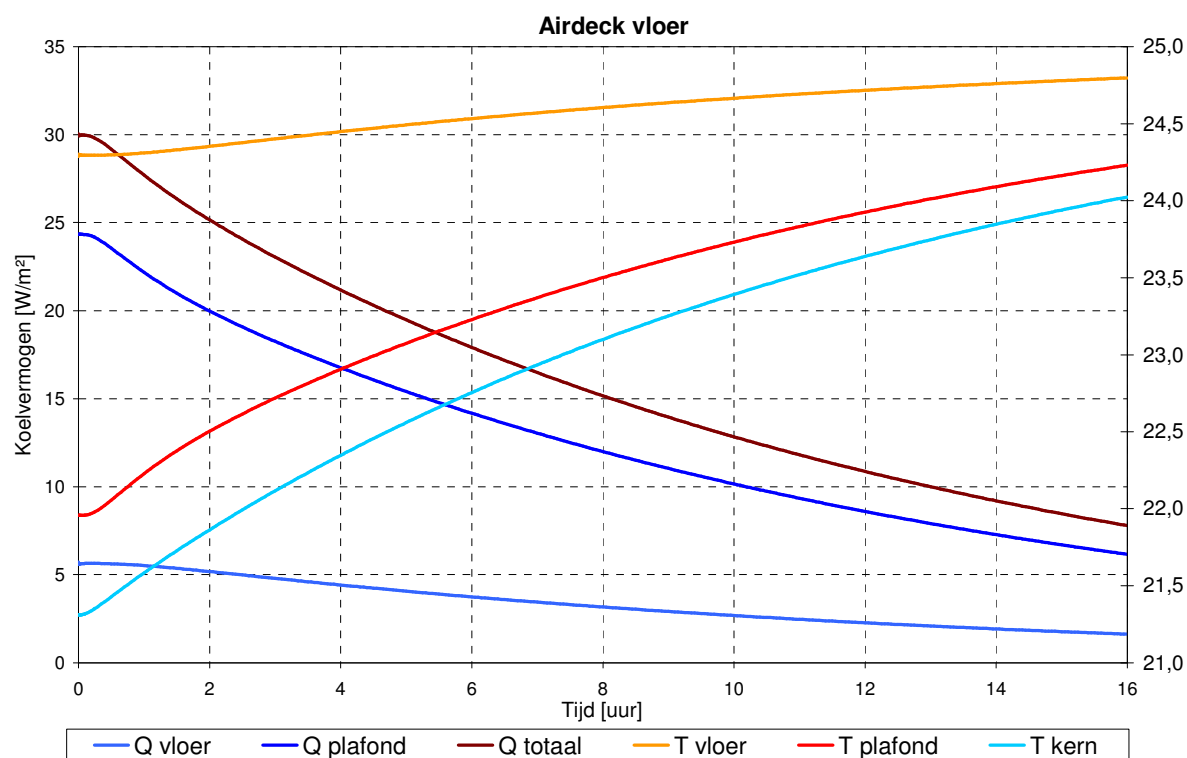


Figuur 9.2: Opbouw slimlinevloer



Figuur 9.3: Opbouw kanaalplaatvloer

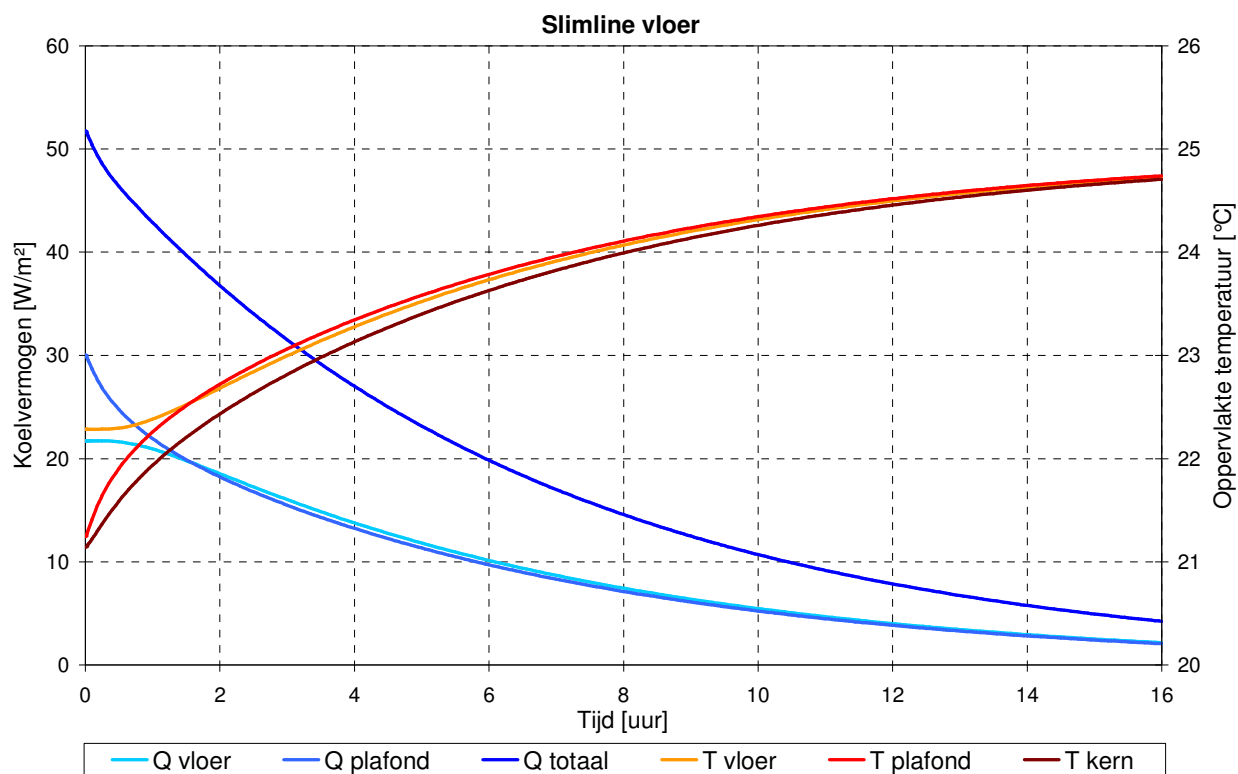
9.3 Resultaten airdeck- en slimlinevloeren



Figuur 9.3: Verloop airdeckvloer

Resterend koelvermogen	Tijd(uur)
75%	3,30
50%	8,00

Tabel 9.1: Resterend koelvermogen airdeckvloer



Figuur 9.4: Verloop slimline vloer

Resterend koelvermogen	Tijd(uur)
75%	1,65
50%	4,3

Tabel 9.1: Resterend koelvermogen slimline vloer