

Afstudeeronderzoek:

Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

Auteur _____

G.A.P. Brouwer

Opdrachtgever _____

Adviesburo Nieman B.V.

Onderwijsinstelling _____

Christelijke Hogeschool Windesheim

Onderzoeksfase

Voor- en hoofdonderzoek

Datum vrijgave

11 maart 2010

Opleiding

Bouwkunde

Studentennummer

s313448

Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

Onderzoeksfase:	Voor- en hoofdonderzoek
Auteur:	dhr. G.A.P. Brouwer
Opdrachtgever:	Adviesburo Nieman B.V. Dr. Van Lookeren Campagneweg 16 8025 BX Zwolle Postbus 40147 8004 DC Zwolle T (038) 467 00 30 F (038) 467 00 40
Onderwijsinstelling:	Christelijke Hogeschool Windesheim School of Built Environment & Transport Campus 2-6 8017 CA Zwolle Tel. 038 - 469 99 11
Begeleiding:	Bedrijfsbegeleiders: dhr. ir. R.A.P. van Herpen, technisch directeur dhr. ir. N.J. Voogd, adviseur Brandveiligheid dhr. ir. J.H. Huls, adviseur Brandveiligheid Schoolbegeleider: dhr. drs. ing. H.M. Nieman, docent Bouwfysica
Datum:	11 maart 2010
Opleiding:	Opleiding: Bouwkunde Afstudeerrichtingen: Bouwfysica Fire Safety Engineering Studentennummer: s313448

Voorwoord

Het voorliggend document is de eindrapportage van mijn afstudeeronderzoek naar de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model. In dit verslag zijn zowel het voor- als hoofdonderzoek samengevoegd tot één geheel.

Dit onderzoek heb ik uitgevoerd ter afronding van mijn opleiding Bouwkunde aan de Christelijke Hogeschool Windesheim. Met dit afstudeeronderzoek studeer ik af op twee afstudeerrichtingen. Dit zijn de afstudeerrichtingen Bouwfysica en Fire Safety Engineering.

Het onderzoek heb ik uitgevoerd in opdracht van Adviesburo Nieman in Zwolle. Inhoudelijk ben ik vanuit Adviesburo Nieman begeleid door Ruud van Herpen, Nico Voogd (vooronderzoek) en Jan Erik Huls (hoofdonderzoek). Vanuit Hogeschool Windesheim ben ik voornamelijk procesmatig begeleid door Harry Nieman. Alle vier wil ik bedanken voor hun ondersteuning tijdens het proces en input voor dit afstudeeronderzoek. In het bijzonder wil ik de begeleiders Harry Nieman en met name Jan Erik Huls bedanken voor de opoffering van hun vrije tijd voor de begeleiding van mijn project.

Naast de begeleiders wil ik Danny Roelofsen en Ben Bloem bedanken voor hun hulp bij de rapportage en samenvattingen. Als laatste, maar niet het minste, wil ik mijn vrouw en zoon bedanken voor de steun en ontspanning tijdens het hele afstudeertraject.

Zwolle, 11 maart 2010,

Gilian Brouwer

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	vii
Summary	ix
1 Inleiding	1
2 Oriëntatie	3
2.1 Aanleiding	3
2.2 Analyse	3
2.3 Probleemstelling	4
2.4 Onderzoeksvragen	4
2.5 Onderzoeksmethode	4
3 Fysica	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Natuurlijke ventilatie	7
3.3 Verschil effectiviteit en efficiëntie van natuurlijke ventilatie	8
3.4 Ventilatie efficiëntie	8
3.5 Effectiviteit van natuurlijke ventilatie in een simulatiemodel	10
3.6 Gebruiksventilatie	10
3.7 Brandventilatie	11
3.7.1 Autobrand	11
3.7.2 Brandventilatie	17
3.8 Conclusie	17
4 Zone modellen	19
4.1 Het principe van zone modellen	19
4.2 Stationaire situatie	20
4.3 Dynamische situatie	23
4.4 Variabelen in zone modellen	26
4.5 Conclusie	26
5 Veld modellen	27
5.1 Het principe van veld modellen	27
5.2 Variabelen in veldmodellen	29
5.3 Conclusie	30
6 Rekenconfiguraties	31
6.1 Inleiding	31
6.2 Bronvermogen	31
6.3 Basis rekenconfiguratie, variant 0	32
6.4 Varianten 1 t/m 8	33
6.5 Variant 9, 10 en 11	35
7 Rekenresultaten	37
7.1 Inleiding	37
7.2 Massastromen	37
7.3 Temperatuur	38
7.4 Ventilatie efficiëntie	40
7.5 Conclusie	40
8 Correctiefactor	41

8.1	Inleiding	41
8.2	Aanpassingen gevelopeningen in de breedte	41
8.3	Aanpassingen gevelopeningen in de hoogte	42
8.4	Conclusie	42
9	Conclusies	43
9.1	Hoe werkt natuurlijke ventilatie ten tijde van gebruiksventilatie en brandventilatie?	43
9.2	Hoe werken zone modellen en veldmodellen?	43
9.3	Op welke variabelen van een zone model kan worden ingespeeld om een betere benadering van de werkelijkheid te realiseren?	43
9.4	Hoeveel wordt de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model overschat?	44
9.5	Hoe kan de overschatting van verticale ventilatieopeningen in een zone model worden gecorrigeerd?	44
10	Aanbevelingen	45
	Symbolenlijst	47
	Begrippenlijst	49
	Literatuurlijst	51

Bijlagen

- Bijlage 1: Massastromen
- Bijlage 2: Temperatuur
- Bijlage 3: Overzicht varianten

Lijst met figuren

Figuur 2.1: Voorbeeld parkeergarage	3
Figuur 2.2: Kortsluiting in gevelzone	4
Figuur 2.3: Gebruikte programma's	5
Figuur 2.4: Stromingsdiagram onderzoeksmethode	6
Figuur 3.1: drukverloop in ruimte en omgeving bij een hogere temperatuur binnen (bron: Van Herpen, 2007b)	7
Figuur 3.2: efficiëntie van natuurlijke ventilatie	8
Figuur 3.3: Mechanische ventilatie betekent extra verdiepingshoogte (bron: Beek, 1996)	10
Figuur 3.4: Brandproef (bron: Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002)	12
Figuur 3.5: Vermogenscurves gemeten in de parkeergarage Fleerde (Amsterdam Zuid-Oost) en ontwerpcurve CCP_RHR Design fire I (bron: Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002)	13
Figuur 3.6: Vergelijking van verschillende brandvermogenscurves van één auto vanuit verschillende literaire bronnen (bron: Feijter, 2007)	14
Figuur 3.7: Brandontwikkeling van 1 auto zonder brandweerinzet (bron: Eggink-Eilander 2003)	14
Figuur 3.8: Brandontwikkeling van 3 auto's zonder brandweerinzet (bron: Eggink-Eilander 2003)	15
Figuur 3.9: Brandontwikkeling van 3 auto's met brandweerinzet na 20 minuten (bron: Adviesburo Nieman)	16
Figuur 3.10: Brandontwikkeling van 3 auto's met brandweerinzet na 20 minuten en een blustijd van 5 minuten volgens ontwerpnorm 6098 (bron: NEN 6098:2007)	16
Figuur 3.11: Mogelijk verloop van de druk op basis van natuurlijke convectie binnen de brandruimte in de hete zone (p_U) en de koude zone (p_L) en buiten de brandruimte (p_∞) bij twee zones, in de beginfase van de brand wanneer $T_L = T_\infty$ (a), en daarna wanneer $T_L > T_\infty$ (b). (bron: Van Herpen, 2007b)	17
Figuur 4.1: Voorbeeld zone model (bron:)	19
Figuur 4.2: Brandruimte in ontwikkelfase met twee zones (bron: Cadorin, 2003)	19
Figuur 4.3: Brandruimte in volledig ontwikkelde fase met één gemengde zone (bron: Cadorin, 2003)	20
Figuur 4.4: Verloop van de druk binnen (p_1) en buiten (p_∞) bij één gemengde zone (bron: Van Herpen, 2007b)	22
Figuur 4.5: Mogelijk verloop van de druk op basis van natuurlijke convectie binnen de brandruimte in de hete zone (p_U) en de koude zone (p_L) en buiten de brandruimte (p_∞) bij twee zones, in de beginfase van de brand wanneer $T_L = T_\infty$ (a), en daarna wanneer $T_L > T_\infty$ (b). (bron: Van Herpen, 2007b)	24
Figuur 4.6: Vier vergelijkingen aangegeven in doorsnede	25
Figuur 5.1: Vereenvoudigde weergave behoudswetten. Samen met het oppervlak van de celwanden bepalen deze parameters de convectieve warmtestroom en de warmtegeleiding in- en uit de cel.	28
Figuur 5.2: Voorbeeld van CFD-model, overzicht en details (bron: Adviesburo Nieman)	29
Figuur 6.1: Reken situaties	31
Figuur 6.2: Rekenvarianten, 3 oriëntaties	34
Figuur 6.3: Rekenvarianten, 3 hoogtes	34

Lijst met tabellen

Tabel 6.1: Overzicht rekenvarianten 0 t/m 8	35
Tabel 7.1: Totale massastromen	37
Tabel 7.2: Temperatuur in de garage	39
Tabel 7.3: Ventilatie efficiëntie	40
Tabel 8.1: Aanpassingen in breedte van gevelopeningen	41
Tabel 8.2: Aanpassingen in hoogte van gevelopeningen	42

Samenvatting

Dit rapport omvat het afstudeeronderzoek naar de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model. Tijdens het vooronderzoek is kennis verzameld over de fysica die komt kijken bij natuurlijke ventilatie ten tijde van zowel de gebruiks- als brandsituatie. Daarnaast is gekeken naar de achtergronden van zone modellen en veldmodellen. In het hoofdonderzoek is met behulp van diverse rekenconfiguraties gezocht naar de overschatting van de effectiviteit van de ventilatie in zone modellen ten opzichte van de werkelijkheid. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Adviesburo Nieman B.V. te Zwolle.

Aanleiding en probleemstelling

Adviesburo Nieman heeft in verschillende projecten ervaren dat de ventilatie in een zone model effectiever is dan in de werkelijkheid het geval is. In projecten waar voor een ventilatieadvies werd gerekend met zone modellen, werd eenvoudiger voldaan aan de eisen dan in vergelijkbare projecten met CFD-modellen. In een zone model blijkt het effect van natuurlijke ventilatie groter dan bij een min of meer zelfde ventilatieberekening met een CFD-model. Dit komt doordat een zone model geen rekening houdt met kortsluitstroming in de gevelzone. Daarom is de volgende probleemstelling opgesteld:

Hoeveel wordt de effectiviteit van ventilatieopeningen in een zone model overschat? En op welke wijze kan deze overschatting in een zone model worden gecorrigeerd zodat een complexe berekening met behulp van een veldmodel overbodig is.

Fysica

Om meer inzicht te krijgen in de fysische achtergrond van het probleem is de eerste onderzoeksvraag opgesteld:

Hoe werkt natuurlijke ventilatie ten tijde van gebruiksventilatie en brandventilatie?

Natuurlijke ventilatie ontstaat in zowel de gebruiks situatie als brand situatie door het drukverschil ten gevolge van temperatuurverschil tussen binnen en buiten. In werkelijkheid heeft de wind invloed op de ventilatie van een ruimte, maar in dit onderzoek wordt hier geen rekening mee gehouden. Windstil weer zal namelijk het worst case scenario zijn voor zowel de gebruiks- als brandsituatie.

Het temperatuurverschil ontstaat in beide situaties door een warmtebron. In de gebruikssituatie is dit het afkoelen van auto's die de garage inkomen en van de warme uitlaatgassen. In de brandsituatie is de warmtebron een autobrand. Door het temperatuurverloop van beide bronnen zijn de ventilatietypen verschillend. Gebruiksventilatie is stationair en een brandventilatie is dynamisch.

Zone en veld modellen

Om de overschatting van zone modellen te kunnen onderzoeken zijn diverse rekenconfiguraties doorgerekend met het op een zone model gebaseerde rekenprogramma CFAST en het op veldmodellen gebaseerde FDS. Om de vergelijking van deze simulatieprogramma's goed uit te kunnen voeren is de tweede onderzoeksvraag opgesteld om meer kennis te vergaren over zone modellen en veldmodellen:

Hoe werken zone modellen en veldmodellen?

In een zone model worden één of twee zones verondersteld waarin de behoudswetten van energie en massa worden opgelost. Hierbij wordt een zone als homogeen gemengd beschouwd. Homogeen gemengd betekent een uniforme temperatuur en dichtheid binnen een zone. In werkelijkheid zijn deze parameters niet constant over de gehele zone (bijv. temperatuur in rooklaag is hoger dichterbij de brandhaard), maar om de macroscopische eigenschappen in de brandruimte gedurende de brandontwikkeling te kunnen beschrijven volstaat deze aanname.

Veld modellen worden uitgewerkt met computerprogramma's gebaseerd op CFD vergelijkingen. Een voorbeeld van een CFD simulatieprogramma is FDS. Dit programma is gebaseerd op de eindige volume methode. Hierin wordt de hele ruimte opgedeeld in kleine volumecellen. Binnen elk van deze cellen worden de vergelijkingen opgelost voor massa, energie en impuls. Door deze volumecellen klein te houden wordt de werkelijkheid zo dicht mogelijk benaderd. Door het grote aantal cellen en tijdstappen waarbinnen elke cel doorgerekend moet worden, kost een berekening met behulp van een CFD-programma veel tijd.

Variabelen in zone en veld modellen

Om tot een oplossing te komen voor het overschattingprobleem in zone modellen is het noodzakelijk te weten op welke variabelen kan worden ingespeeld in een zone model. Daarom is de derde onderzoeksvraag opgesteld:

Op welke variabelen van een zone model kan worden ingespeeld om een betere benadering van de werkelijkheid te realiseren?

Om de werkelijkheid beter te benaderen met een zone model kan er worden ingespeeld op het volgende:

1. *Het drukverschil tussen binnen en buiten.*
2. *De breedte van de gevelopening w_j .*
3. *De hoogte van de opening z .*
4. *De stromingscoëfficiënt C_d .*
5. *Het accumulerend vermogen van de wanden en vloer en/of plafond.*
6. *De geometrie van de ruimte.*

Rekenconfiguraties en resultaten

In dit onderzoek zijn twaalf rekenconfiguraties doorgerekend met CFAST en FDS voor zowel de gebruikssituatie als de brandsituatie. In de twaalf rekenconfiguraties zijn de volgende variabelen opgesteld:

- 3 verschillende oriëntaties van de ventilatieopeningen
- 3 verschillende hoogtes van de ventilatieopeningen
- 1 rekenvariant met een grotere diepte
- 1 rekenvariant met een kleiner rekenraster in het veldmodel
- 1 variant met een kortere tijdsduur van het bronvermogen om de efficiëntie te bepalen.

De grafieken van de resultaten van deze 48 berekeningen zijn terug te vinden in de bijlagen. Uit de gemiddelde temperatuur van de modellen blijkt dat in de brandsituatie het zone model het effect van de ventilatie gemiddeld met 35 procent overschat. Dit percentage moet echter wel gerelativeerd worden, omdat het is afgezet tegen nulpunt van 0°C. Wanneer het de vergelijking wordt uitgezet tegen het absolute nulpunt (0 K) is het percentage veel lager. Met de genoemde kwantificatie van het verschil dient dus voorzichtig omgegaan te worden. Voor een goede uitspraak over de gebruikssituatie is nader onderzoek nodig.

Correctiefactor

De overschatting is alleen gevonden in de brandsituatie van de twaalf opgestelde varianten. Dit verschil kan verholpen worden door de hoogte of breedte aan te passen met ongeveer 50 procent. Voorwaarde hiervan is wel dat het zone model rekent met twee zones en dat de ventilatieberekening gaat over een stationair brandvermogen van 9 MW in een adiabatische omgeving met alleen natuurlijke ventilatie.

Aanbevelingen

De resultaten hebben een beperkt toepassingsgebied door de gebruikte variabelen. Om het toepassingsgebied te vergroten is groter onderzoek nodig waarin meer variabelen nodig zijn. Deze variabelen en varianten zijn hieronder opgesomd:

- Naast horizontale openingen ook verticale openingen
- Rekenen met een dynamische brandsituatie in plaats van een stationaire brand.
- Rekenen met realistische materialen
- Afmetingen garage vergroten en gridgrootte verkleinen

Daarnaast is het aan te bevelen met andere zone modellen te rekenen. Dit zone model moet kunnen rekenen met één zone en overweg kunnen met zowel de gebruikssituatie als brandsituatie. Eventueel kunnen hier ook twee verschillende programma's voor worden gezocht. Voor de controle is het nuttig dat het programma adiabatisch kan rekenen en de massastromen in de output schrijft.

Summary

This report describes the graduation examination of the effectiveness of vertical ventilation openings while using a zone model. During the research, knowledge was gathered on the physics that are involved in natural ventilation in the situations of everyday use as well as a fire situation. Backgrounds of zone- and field models was also examined. There is also looked at the backgrounds of zone models and field models. This research was executed with the help of Adviesburo Nieman B.V. and their Zwolle office.

Purpose and definition of the problem

Adviesburo Nieman has experienced in various projects that the ventilation has proven less effective in reality, than the calculations suggested. In projects where advice was calculated by a ventilation zone models, the requirements were simpler than in similar projects with CFD models. In a zone model the effect of natural ventilation is greater then more or less the same situation calculated with a CFD model. This is because an area model ignores short-circuit currents in the wall zone. Therefore, the following definition of the problem is stated:

In what amount is the effectiveness of ventilation-openings in a zone model overestimated? And how can this overestimation in one zone model be adjusted, making a more complex calculation using a field model unnecessary.

Physics

To further understand the physical background of the first research question is as following:

How effective is natural ventilation at the time of user ventilation and fire ventilation?

Natural ventilation occurs in both the user situation as the fire situation by pressure difference caused by temperature difference between inside and outside the room. In reality, the wind has an effect on the ventilation of a room, but in this study is not taken into account. Calm weather will be the worst case scenario for fire ventilation.

The temperature difference arises in both cases by a heat source. In the user situation the heating of the air is a result of the cooling down of the car engines. In the fire situation the heat source is a car fire. As a result of different heat sources the types of ventilation are different. User ventilation is stationary and fire ventilation is dynamic.

Zone- and field models

Several configurations have been calculated in the zone model CFAST and the field model FDS, to determine the overestimation in each of these models. The following question is defined to compare these programs and to improve knowledge of zone- and field models:

How do zone- and field models work?

In a zone model, one or two zones are assumed, where the conservation- and energy laws are solved. This is regarded as a homogeneous mix. Homogeneously mixed means a uniform temperature and density within a zone. In reality these parameters are not constant over the entire area (eg low temperature smoke is higher nearer the fire), but the macroscopic properties in the fire area during the fire development are sufficient to describe this assumption.

Field models are developed computer programs based on CFD comparisons. An example of a CFD simulation is FDS. This program is based on the finite volume method. The whole area is divided into small volume cells. Within each of these cells, the equations are solved for mass, momentum and energy. By keeping the volume of the cells small, the outcome of the calculations will be close to reality. Because a large number of cells, with time steps, has to be calculated, a CFD-calculation can be very time-consuming, thus very expensive.

Variables in zone and field models

For a solution to the problem area on estimation models it is important to know which variables have an impact on the zone system. Therefore the third research question is:

Which variables of a zone model can be manipulated to achieve a better approximation of reality?

In order to make the calculations with a zone model closer to reality, the following 6 variables should be included in the model:

1. The pressure difference between inside and outside.
2. The width of the facade opening w_j .
3. The height of the opening z .
4. The flow coefficient C_d .
5. The accumulative capacity of the walls and floor and / or ceiling.
6. The geometry of the room.

Calculation results and Configurations

This study covered twelve configurations calculated with CFAST and FDS for both the user situation and the fire situation. In the twelve configurations which are calculated, the following variables are used:

- 3 different heights of the vents
- 3 different orientations of the ventilation openings
- 1 configuration with a greater depth calculation
- 1 configuration with a smaller computing grid computing in the field model
- 1 configuration with a shorter duration of the power source to determine the efficiency.

The graphs of the results of 48 such calculations can be found in the annexes. The average temperature of the models shows that the situation in the fire zone model the impact of ventilation is on average overestimated by 35 percent. With this quantification of the difference should be carefully handled, because it is defined to 0°C. For a good statement about the use situation further investigation is needed.

Correction

The overestimation was found only in the fire situation of the twelve configurations drawn. This difference can be fixed adapting the height or width by about 50 percent. This will only be true if the zone system consists of two zones and provides that the ventilation is calculated on a stationary fire power of 9 MW in an adiabatic environment with natural ventilation only.

Recommendations

The results have a limited scope because of the variables used. To enlarge a larger study with more variables is needed. These variables and variations are listed below:

- Besides horizontal openings also vertical openings
- Calculating with a dynamic fire situation instead of a stationary fire.
- Calculating with realistic materials
- Garage dimensions and grid size decrease increase

It is also recommended to research using other zone models. This zone model should be capable of calculations in one zone, as well as the user situation and the fire situation. It may also cause the need of two different programs. To examine the results it is useful to have a program that can calculate adiabatically, and writes the mass flows in an export file.

1 Inleiding

Parkeergarages

In Nederland neemt het gebruik van de auto nog steeds toe. Volgens het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) waren in 2004 9,3 miljoen motorvoertuigen in Nederland. In januari 2009 is dit cijfer gegroeid tot bijna 10,3 miljoen voertuigen. Uit deze cijfers blijkt dat in 5 jaar tijd het aantal motorvoertuigen in Nederland met bijna 10 procent is gestegen!

Volgens dezelfde cijfers van het CBS blijkt dat bijna 75 procent van deze motorvoertuigen bestaat uit personenauto's. Het is dan ook niet vreemd dat er nog steeds veel parkeergarages worden gebouwd. En waar parkeergarages zijn, bevinden zich ook mensen. Parkeergarages zijn echter door alle uitlaatgassen van auto's niet gezond voor mensen. Bovendien kan een brand in een parkeergarage leiden tot levensbedreigende situaties. Daarom heeft de wetgever kaders opgesteld om het publiek te beschermen tegen ongezonde en gevaarlijke parkeergarages. Deze kaders zijn voor parkeergarages voornamelijk toegespitst op ventilatie.

Ventileren

In het Bouwbesluit wordt een garage aangemerkt als een "overige gebruiksfunctie voor het stallen van motorvoertuigen". Met dit uitgangspunt stelt het Bouwbesluit in artikel 3.48 de prestatie-eis dat de ventilatiecapaciteit voor een verblijfsgebied ten minste 3 dm^3 per m^2 verblijfsgebied dient te bedragen. Voor het bepalen van deze gebruiksventilatie stuurt het Bouwbesluit NEN 1087 aan. Naast deze standaard norm voor het ventileren van ruimten is er voor parkeergarages de NEN 2443 opgesteld. Hoewel deze norm formeel niet vereist is voor een bouwaanvraag geeft de NEN 2443 wel aanvullende eisen en richtlijnen voor parkeergarages.

Om de vele auto's kwijt te kunnen zijn parkeergarages vaak groter dan 1.000m^2 . Voor onder andere brandveiligheid wordt dan gebruik gemaakt van artikel 1.5 van het Bouwbesluit. Met dit artikel voor gelijkwaardige oplossingen kan beroep worden gedaan op de praktijkrichtlijn voor parkeergarages groter dan 1.000 m^2 van het Landelijk Netwerk Brandpreventie (LNB). In deze praktijkrichtlijn zijn eisen opgenomen met betrekking tot rookbeheersing. De LNB richtlijn geeft slechts beperkt aandacht aan brandbeheersing, aangezien de brandomvang bij een autobandscenario niet groter zal zijn dan enkele auto's. In het kader van rookbeheersing stelt de richtlijn dat bij een autobrand in een garage groter dan 1.000 m^2 zo moet worden geventileerd dat er 45 minuten na aanvang van de brand een zichtlengte van ten minste 30 meter wordt gerealiseerd. Daarbij stelt de praktijkrichtlijn dat normale garages tot 5.000 m^2 met een 10-voudige brandventilatie aan deze eis zullen voldoen. Of deze ventilatie plaats vindt door natuurlijke of mechanische ventilatie is voor deze eisen niet relevant. Natuurlijke ventilatie heeft echter het voordeel dat een kostbare installatie wordt vermeden wat bovendien scheelt in de verdiepingshoogte. Dit onderzoek richt zich op de natuurlijke ventilatie.

Simulatiemodellen

Voor zowel de gebruiks- als brandventilatie wordt gebruik gemaakt van geavanceerde computer berekeningen. Deze zijn op te delen in twee typen, namelijk zone modellen en veldmodellen. Zone modellen zijn relatief eenvoudige modellen van de werkelijkheid. In een zone model wordt een ruimte opgedeeld in verschillende zones waarbinnen de behoudswetten voor energie en massa worden opgelost. Hierbij wordt voor zowel de gebruiks- als brandventilatie uitgegaan van een drijvende kracht (energie) vanuit de ruimte. Deze kracht zorgt voor een ventilatiestroom (massa) tussen de ruimte en de omgeving. Veld- of CFD-modellen (CFD = computational fluid dynamics) zijn geavanceerder dan zone modellen. In een veldmodel wordt de ruimte opgesplitst in vele (grootteorde duizenden) kleine volume-elementjes. Voor elk van deze elementjes worden de behoudswetten voor energie, massa en impuls opgelost. Door de vele elementjes is een meer gedetailleerde oplossing mogelijk dan met een zone model. Bovendien kunnen complexere geometrieën worden berekend. Door de gedetailleerdheid van dergelijke berekeningen kost een berekening met een veldmodel echter veel meer rekentijd (grootteorde dagen) dan een berekening met een zone model. Bovendien vereist de gedetailleerde input van veldmodellen

grotere deskundigheid van de gebruiker. Daarom heeft een computerberekening met een zone model in ontwerpsituaties waar dit mogelijk is de voorkeur ten opzichte van een berekening met een veldmodel.

In de praktijk wordt echter een probleem voor toepassing van zone modellen ondervonden. Adviesburo Nieman heeft in verschillende projecten ervaren dat de ventilatie in een zone model effectiever is dan in de werkelijkheid het geval is. In projecten waar voor ventilatie-eisen werd gerekend met zone modellen werd eenvoudiger voldaan aan de eisen dan in vergelijkbare projecten met CFD-modellen. In een zone model blijkt het effect van natuurlijke ventilatie groter dan bij een min of meer zelfde ventilatieberekening met een CFD-model. In dit afstudeeronderzoek is de theoretische oorzaak voor de verschillende resultaten behandeld, onderzocht hoe groot deze overschatting is in een zone model en hoe deze in meer of mindere mate kan worden gecorrigeerd, zodat een complexe berekening met behulp van een veldmodel achterwege kan blijven.

Leeswijzer

Dit document vormt het eindrapport van het afstudeeronderzoek en omvat daarmee zowel het voor- als hoofdonderzoek.

In hoofdstuk 2 is de oriëntatie op het probleem rondom de overschatting van ventilatie stromingen in zone modellen verder uitgekristalliseerd en zijn onderzoeksvragen opgesteld die in dit afstudeeronderzoek worden beantwoord.

In hoofdstuk 3 is de fysische achtergrond van het onderzoek vastgelegd. Dit is voornamelijk de werking van natuurlijke ventilatie bij de gebruiks- en brandsituatie.

In hoofdstuk 4 en 5 worden zone modellen en veldmodellen behandeld waar de gebruikte rekenprogramma's op zijn gebaseerd.

In hoofdstuk 6 zijn diverse rekenconfiguraties omschreven en beargumenteerd. Deze rekenconfiguraties zijn een hulpmiddel om de onderzoeksvragen te beantwoorden. De resultaten hiervan zijn vastgelegd in hoofdstuk 7.

In hoofdstuk 8 is gewerkt aan een correctiefactor met bijbehorende randvoorwaarden.

In hoofdstuk 9 zijn de conclusies van dit afstudeeronderzoek vastgelegd.

In hoofdstuk 10 zijn diverse aanbevelingen opgesteld voor een vervolg onderzoek.

In bijlagen 1 en zijn de rekenresultaten terug te vinden van diverse doorgerekende situaties.

In bijlage 3 is een overzicht opgenomen waarin alle rekenconfiguraties schematisch zijn verbeeld met een vereenvoudigde afbeelding. Tijdens het lezen van het rapport kan dit overzicht uitgeklaapt worden om eenvoudig de verschillen tussen de varianten te relativeren.

2 Oriëntatie

2.1 Aanleiding

Wanneer een parkeergarage groter is dan 1000 m² valt deze buiten de kaders van het Bouwbesluit 2003 en wordt een gelijkwaardige veiligheid gevraagd conform artikel 1.5. Bij het toetsen van diverse grote parkeergarages heeft Adviesburo Nieman ervaren dat de ventilatie berekend met een zone model effectiever is dan in de werkelijkheid het geval is. In projecten waar voor de ventilatieadvies werd gerekend met zone modellen werd eenvoudiger voldaan aan de eisen dan in vergelijkbare projecten met CFD-modellen.

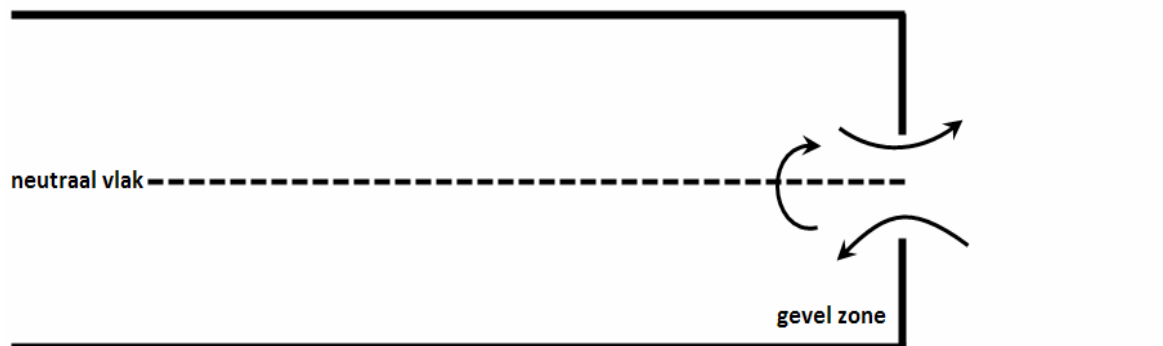


Figuur 2.1: Voorbeeld parkeergarage

In een zone model blijkt het effect van natuurlijke ventilatie groter dan bij een min of meer zelfde ventilatieberekening met een CFD-model. Daarom is onderzoek verricht naar de effectiviteit van verticale ventilatieopening in zone modellen, zodat inzicht is verkregen in de mate van overschatting van ventilatie-effectiviteit in zone modellen en hoe deze overschatting in meer of mindere maten kan worden gecorrigeerd, zodat een complexe berekening met behulp van een veldmodel achterwege kan blijven.

2.2 Analyse

De oorzaak van de overschatting van het effect van natuurlijke ventilatie in zone modellen ligt in het verschil tussen de fysische werkelijkheid van natuurlijke ventilatie en de vereenvoudiging hiervan in zone modellen. Wanneer het drukneutrale vlak in de ruimte ter hoogte van de opening ligt, kan de opening gelijktijdig in toevoer en afvoer voorzien. In de gevelzone zal in werkelijkheid kortsluiting optreden waardoor de binnenkomende lucht deels direct weer wordt afgevoerd zonder opmenging met het ruimtevolumen. Hierdoor kan in het midden van de ruimte een zone ontstaan waar deze natuurlijke ventilatie nauwelijks effect op heeft. In figuur 2.2 is de gevelzone geschematiseerd in een vereenvoudigd weergegeven garage. De luchtstromen laten zien dat de ventilatieopening geen tot weinig invloed hebben op het middengebied van de ruimte.



Figuur 2.2: Kortsluiting in gevelzone

Een zone model houdt geen rekening met deze kortsluiting. In een zone model wordt de toegevoerde lucht namelijk gelijk homogeen opgemengd in de gehele ruimte of zone waardoor het effect van natuurlijke ventilatie overschat wordt. Een veld model zal dit fenomeen echter zelf berekenen door de gedetailleerde rekenmethode. Een gevolg hiervan kan zijn dat een project in een zone model voldoet aan de gestelde eisen, maar het zelfde project doorgerekend met een veldmodel niet voldoet. Om dit te voorkomen is het noodzakelijk dat een zone model meer de werkelijkheid benadert dan dat nu het geval is. Om te weten te komen hoe een zone model de werkelijkheid beter kan benaderen wordt in het hoofdonderzoek eerst onderzocht hoe groot deze overschatting eigenlijk is en waar dit van afhankelijk is. Met antwoorden op de grootte en oorzaak van overschatting ligt de mogelijkheid tot een correctie voorhanden.

2.3 Probleemstelling

In een zone model wordt de ventilatie effectiviteit van verticale openingen overschat. Dit probleem doet zich voor bij natuurlijke ventilatie in zowel gebruik- als brandsituatie. Met behulp van een veldmodel kan hier meer inzicht in worden verkregen. De probleemstelling luidt dan ook:

Hoeveel wordt de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model overschat? En op welke wijze kan deze overschatting in een zone model worden gecorrigeerd zodat een complexe berekening met behulp van een veldmodel overbodig is?

2.4 Onderzoeksvragen

In dit vooronderzoek wordt ingegaan op de volgende onderzoeksvragen:

1. Hoe werkt natuurlijke ventilatie ten tijde van gebruiksventilatie en brandventilatie?
2. Hoe werken zone modellen en veldmodellen?
3. Op welke variabelen van een zone model kan worden ingespeeld om een betere benadering van de werkelijkheid te realiseren?

Met alle vergaarde kennis wordt in het hoofdonderzoek verscheidene modellen doorgerekend. Vragen die daarmee beantwoord worden zijn:

4. Hoeveel wordt de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model overschat?
5. Hoe kan de overschatting van verticale ventilatieopeningen in een zone model worden gecorrigeerd?

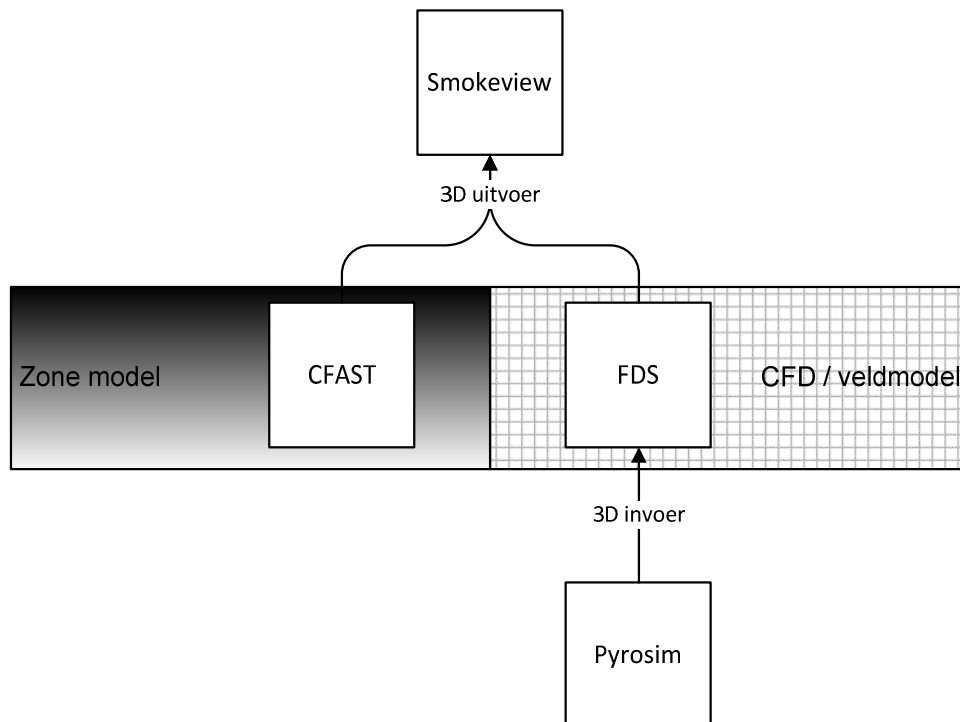
2.5 Onderzoeksmethode

Zoals eerder is gesteld ligt de oorzaak van het probleem in een verschil tussen de fysische werkelijkheid van natuurlijke ventilatie en de vereenvoudiging hiervan in zone modellen. Om meer kennis van deze fysica te krijgen is in een literatuurstudie onderzocht hoe natuurlijke ventilatie in zone modellen en veldmodellen werkt. Daarbij wordt een onderscheid gemaakt in gebruiks- en brandventilatie. De gebruiksventilatie zorgt namelijk voor een stationaire situatie, wat fysisch een groot verschil is met

brandventilatie welke een turbulente situatie oplevert. Met deze literatuurstudie is een antwoord gezocht voor de eerste twee onderzoeksvragen.

Naast de achterliggende fysica van zone modellen, veldmodellen, gebruiks- en brandventilatie, is de werking van deze modellen en ventilatiewijzen in computerprogramma's van belang voor het onderzoek. Met behulp van deze kennis is onderzocht hoe groot de overschatting is van natuurlijke ventilatie in zone modellen. Door de opgedane kennis over de werking van de programma's is een inschatting gemaakt van welke variabelen van een zone model effect hebben op de overschatting.

Voor de verschillende modellen zijn drie computerprogramma's gebruikt van NIST¹ (de twee rekenprogramma's CFAST en FDS en het visualiseringprogramma van de outputgegevens Smokeview) en Pyrosim van Thunderhead Engineering. In figuur 2.3 zijn deze programma's in een overzicht geplaatst waaruit de onderlinge verhouding blijkt.



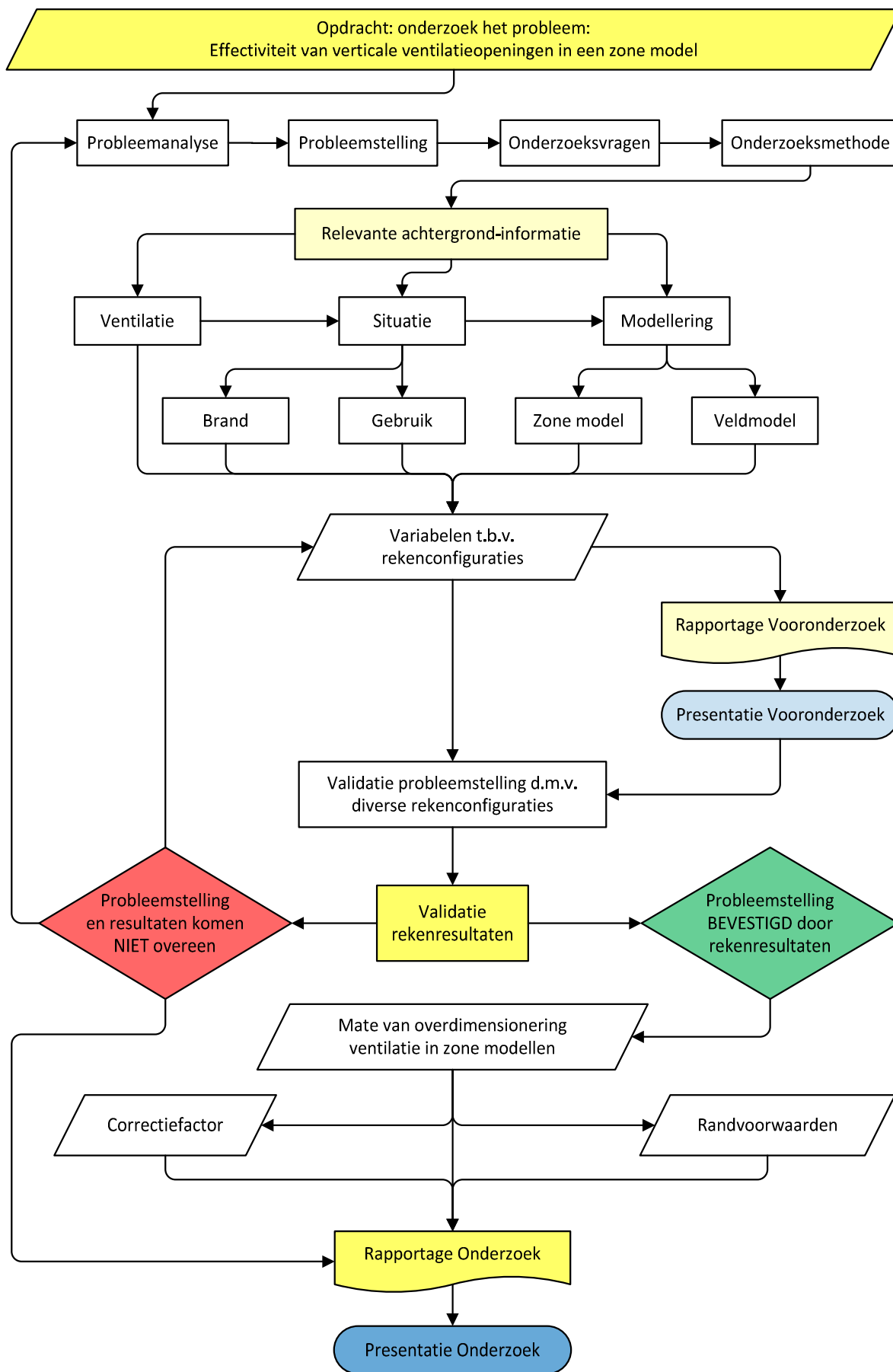
Figuur 2.3: Gebruikte programma's

Met behulp van deze programma's is de probleemstelling gevalideerd. Na deze validatie is het mogelijk geweest de overschatting van ventilatieopeningen in zone modellen te omschrijven een correctiefactor te maken met bijbehorende randvoorwaarden die het toepassingsgebied afbakenen. Hiermee zijn de laatste twee onderzoeksvragen beantwoord.

Wanneer de probleemstelling niet opgelost zou kunnen worden, zouden de berekeningen alsnog waarde hebben voor het onderzoek en daarmee een antwoord geven op de hoofdvraag. Een andere mogelijkheid zou zijn geweest om opnieuw te beginnen met het onderzoek en de analyse aan te passen. Een minder rigoureuze stap zou het aanpassen van de variabelen zijn geweest, zodat een passend antwoord mogelijk blijft.

Bovenstaande werkvolgorde is samengevat in het stromingsdiagram van figuur 2.4.

¹ NIST staat voor "National Institute of Standards and Technology" en is opgericht "ter bevordering van innovatie en het Amerikaanse industriële concurrentievermogen door het bevorderen van de exacte wetenschap, normen en technologie om een impuls te geven aan de economische veiligheid en verbetering van de kwaliteit van leven".



Figuur 2.4: Stromingsdiagram onderzoeksmethode

3 Fysica

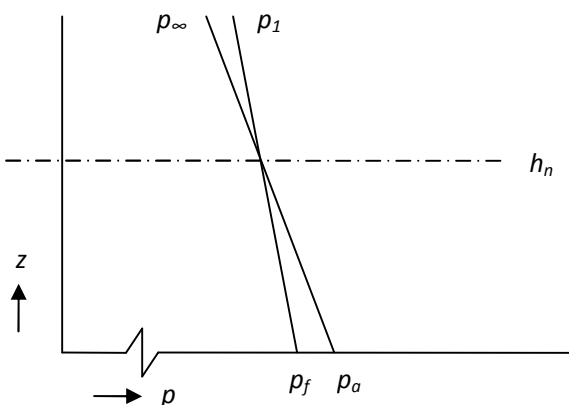
3.1 Inleiding

De effectiviteit van verticale gevel openingen wordt in een zone model beïnvloed doordat zone modellen niet goed omgaan met de fysische invloeden die ontstaan bij natuurlijke ventilatie. In dit hoofdstuk worden de fysische inzichten over natuurlijke ventilatie omschreven en is onderzoeksvraag 1 beantwoordt. Onderzoeksvraag 1 luidt: "Hoe werkt natuurlijke ventilatie ten tijde van gebruiksventilatie en brandventilatie?". In dit hoofdstuk worden zowel natuurlijke ventilatie als brand ventilatie behandeld. Hier wordt omschreven waardoor de ventilatie ontstaat en wat de drijvende krachten zijn die ze veroorzaken. Daarnaast is omschreven hoe effectief en hoe efficiënt ventilatie werkt in een ruimte als een parkeergarage.

3.2 Natuurlijke ventilatie

Natuurlijke ventilatie ontstaat door een drukverschil tussen de binnen- en buitenlucht. Het druk verschil zorgt voor convectie tussen binnen en buiten. Convectie is de stroming van gassen of vloeistoffen. Natuurlijke ventilatie wordt dan ook wel natuurlijke convectie genoemd. Het drukverschil kan ontstaan door wind of een temperatuurverschil. De invloed van wind is een lastig inschatbare factor binnen tijdgebonden modellen. Wind zal in het algemeen een gunstig effect hebben op luchtstromen. Hoe groot dit effect is, is afhankelijk van de geometrie van de ruimte, oriëntatie van het gebouw en gevelopeningen en het jaargetijde. Deze factoren kunnen leiden tot een praktisch oneindig groot aantal scenario's. Bovendien geeft windstil weer een 'worst-case' scenario voor zowel gebruiks- als brandventilatie. Bij windstil weer zal er immers geen afvoer van rook en brandgassen plaats vinden ten gevolge van wind. De afvoer is in die situatie alleen mogelijk door drukverschillen ontstaan door gebruik of brand. Daarom wordt in verband met de projectafbakening in dit onderzoek gerekend met windstil weer en dus alleen convectie door temperatuurverschillen.

In 2002 omschreef Cooper de invloeden van temperatuurverschillen. Het temperatuurverschil tussen binnen en buiten zorgt voor een verschil in dichtheid van de lucht. Door het verschil in dichtheid ontstaat tussen binnen en buiten een drukverschil, dat een functie is van de hoogte boven vloerniveau. In een stationaire situatie zal een neutraal vlak ontstaan. Op dit vlak vindt geen lucht uitwisseling plaats tussen de ruimte en buiten. Indien de temperatuur in de ruimte hoger is dan buiten zal er door openingen boven het neutrale vlak lucht uitstromen en onder het neutrale vlak lucht instromen (zie figuur 3.1).



Figuur 3.1: drukverloop in ruimte en omgeving bij een hogere temperatuur binnen (bron: Van Herpen, 2007b)

In formulevorm wordt het drukverschil op een hoogte z gegeven door de vergelijking (V.1):

$$\Delta p(z) = (\rho_{\infty} - \rho_1)g(z - h_n) \quad (\text{V.1})$$

waarin: $\Delta p(z)$ = drukverschil op hoogte z [Pa]
 ρ = dichtheid van de lucht [kg/m^3]
 g = gravitatieconstante $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$
 z = hoogte boven vloerniveau [m]
 h_n = hoogte neutraal vlak [m]
 ρ_1 = dichtheid binnen
 ρ_∞ = dichtheid buiten (oneindig groot volume)

De snelheid in een opening ten gevolge van het drukverschil op die hoogte wordt beschreven door de Wet van Bernoulli. Deze wet beschrijft het stromingsgedrag van vloeistoffen en gassen en luidt als volgt:

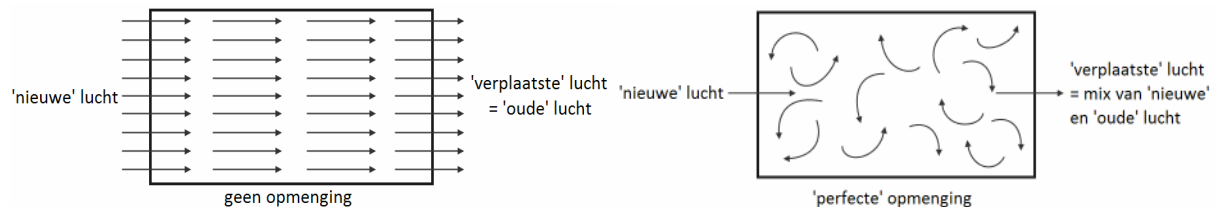
$$V(z) = \left(\frac{2|\Delta p(z)|}{\rho_v} \right)^{1/2} \quad (\text{V.2})$$

waarin: $V(z)$ = snelheid in de opening op hoogte z [m/s]
 ρ_v = $\begin{cases} \text{bij een positief drukverschil van binnen naar buiten: } \rho_1 \\ \text{bij een negatief drukverschil van binnen naar buiten: } \rho_\infty \end{cases}$

Een positief drukverschil van binnen naar buiten zorgt voor een luchtstroming naar buiten; een negatief drukverschil van binnen naar buiten voor een stroming naar binnen.

3.3 Verschil effectiviteit en efficiëntie van natuurlijke ventilatie

Het begrip effectiviteit mag niet verwisseld worden met de efficiëntie van natuurlijke ventilatie in een ruimte. De effectiviteit geeft namelijk het verband weer tussen de prestatie en uitkomst en efficiëntie het verband tussen prestatie en proces. Omdat de woorden efficiëntie en effectiviteit in de praktijk regelmatig per abuis door elkaar worden gebruikt, staan in figuur 3.2 twee verschillende voorbeelden van hoe efficiënt natuurlijke ventilatie kan werken in een ruimte. Beide voorbeelden geven de opmenging van binnenkomende lucht weer. In de eerste situatie vindt geen opmenging plaats, maar wordt het volledige volume verplaatst of verdrongen. In het tweede voorbeeld is een 'perfecte' of volledige opmenging afgebeeld. Beiden kunnen echter wel het zelfde effect hebben: de ventilatielucht voert de hinderlijke en schadelijke stoffen voldoende de ruimte uit. De efficiëntie heeft dus wel effect op de effectiviteit. In dit onderzoek is onderzoek gedaan naar de effectiviteit van natuurlijke ventilatieopeningen in een zone model. Daarnaast is onderzoek gedaan naar de efficiëntie van ventilatie, maar dit heeft een ondergeschikt doel en is alleen mogelijk in veldmodel dat de werkelijkheid nauwkeuriger benadert dan een zone model. Uiteindelijk is het effect van de ventilatie in de ruimte het belangrijkste doel. Het effect in het zone model moet overeenkomen met de werkelijkheid.



Figuur 3.2: efficiëntie van natuurlijke ventilatie

3.4 Ventilatie efficiëntie

Om het begrip efficiëntie van ventilatie rekenkundig correct uit te leggen zijn er enkele stappen nodig. In het afstudeeronderzoek van R. van Esdonk en B. Scholten uit 2006 getiteld "Ventilatie efficiëntie", is uitgebreid onderzoek gedaan naar ventilatie efficiëntie. Om het de ventilatie efficiëntie te bepalen zijn eerst de begrippen ventilatiedebiet, ventilatievoud en nominale tijdsconstante uitgelegd.

Ventilatie-debiet en ventilatievoud

Ventilatie-debiet is een andere benaming voor de mate van luchtverversing. Dit begrip is gebruikt om verwarring te voorkomen dat de lucht in een ruimte helemaal vervangen wordt door de inkomende lucht bij een gegeven lucht-debiet. De inkomende verse lucht in een ruimte wordt weer gemengd met oude lucht. De afgevoerde lucht is dus een menging van oude en verse lucht. Het ventilatievoud is het aantal malen per tijdseenheid dat het ruimtevolume wordt ververst. In formulevorm:

$$n = \frac{Q}{V}$$

Waarin:

- n = ventilatievoud [s^{-1}]
- Q = ventilatie-debiet [m^3/s]
- V = ruimtevolume [m^3]

Nominale tijdsconstante

De nominale tijdsconstante is de tijd in seconden die het kost om het volume van een ruimte aan lucht te verversen. Een lange aanwezigheid van oude lucht geeft een groter risico dat de binnenluchtkwaliteit slecht is. Alle gesloten ruimten hebben een tijdsconstante die de minimum tijd weergeeft waarin binnengekomen lucht in die ruimte blijft. Dit is de nominale tijdsconstante en is dus het omgekeerde van de ventilatievoud. De nominale tijdsconstante is af te leiden van de basiskennis van ventilatievoud en het ruimtevolume. Het is een constante, ongeacht de luchtstromingen of de eigenschappen van de verontreinigende stof. In formule:

$$\tau_n = \frac{V}{Q} = \frac{1}{n}$$

Waarin:

- τ_n = nominale tijdsconstante [s]
- n = ventilatievoud [s^{-1}]

Gemiddelde ouderdom van de lucht

In de praktijk wordt voor het bepalen van de gemiddelde ouderdom van de lucht gebruik gemaakt van een tracergasconcentratie. Dit tracergas wordt voor een bepaalde tijd in de ruimte los gelaten zodat het zich kan ophopen in de ruimte. Wanneer de ventilatie wordt gestart en de toevoeging van tracergas wordt gestaakt kan worden berekend hoe lang het duurt voordat het tracergasgehalte is gehalveerd. In dit onderzoek is echter geen gebruik gemaakt van de tracergasmethode, maar is de gemiddelde ouderdom van de lucht bepaald aan de hand van de gemiddelde temperatuur in de ruimte. In dit onderzoek is dus de tracergasbron vervangen door warmtebron in de ruimte. Deze warmtebron is halverwege de berekening stop gezet zodat door middel van de temperatuurafname de ouderdom bepaald wordt. De gemiddelde ouderdom kan worden bepaald door middel van de formule:

$$\tau_v = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot T_{gem}(t) dt}{\int_0^{\infty} T_{gem}(t) dt}$$

Waarin:

- τ_v = gemiddelde ouderdom [s]
- T_{gem} = gemiddelde temperatuur [$^{\circ}C$]
- t = tijd [s]

Ventilatie efficiëntie

De ventilatie efficiëntie in de ruimte wordt bepaald met behulp van de nominale tijdsconstante en de gemiddelde ouderdom van de lucht. De ventilatie efficiëntie wordt als volgt gedefinieerd:

$$\eta = \tau_n / \tau_{r,v} = \tau_n / 2 \tau_v$$

Waarin:

- η = ventilatie efficiëntie $0 < \eta < 1$
- τ_n = nominale tijdsconstante [s]
- $\tau_{r,v}$ = gemiddelde verblijfstijd [s]
- τ_v = gemiddelde ouderdom [s]

Rekening houdend met een gemiddelde ouderdom van de lucht in een vertrek die gelijk is aan de helft van de gemiddelde verblijfstijd van de lucht in een vertrek, kunnen de volgende grenswaarden geformuleerd worden:

- verdringingsstroming : $\tau_{r,v} = \tau_n$ ($\tau_v = 0,5 \tau_n$) $\eta = 1$
- volledige menging : $\tau_{r,v} = 2 \tau_n$ ($\tau_v = \tau_n$) $\eta = 0,5$
- kortsluitstroming : $\tau_{r,v} > 2 \tau_n$ ($\tau_v > \tau_n$) $\eta = 0$

Om de ventilatie efficiëntie te bepalen is in dit onderzoek geen gebruik gemaakt van de gemiddelde verblijfstijd van de lucht, maar enkel van de gemiddelde ouderdom in de ruimte.

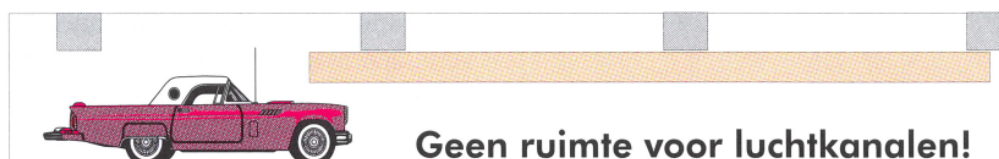
3.5 Effectiviteit van natuurlijke ventilatie in een simulatiemodel

De effectiviteit van natuurlijke ventilatie in een simulatiemodel kan worden uitgedrukt in procenten. Dit geeft de verhouding weer tussen het effect van ventilatie in een ruimte in een model en het effect van natuurlijke ventilatie in een ruimte in de werkelijkheid. Hierbij wordt uitgegaan dat de werkelijkheid 100 procent is en elke afwijking hiervan in het simulatiemodel een waarde van minder of meer dan 100 procent is. In dit onderzoek wordt de effectiviteit bepaald aan de hand van de gemiddelde temperatuur in de ruimte. Wanneer de temperatuur in de werkelijkheid 15°C is en in het simulatiemodel 12°C is de effectiviteit van het simulatiemodel 80 procent.

3.6 Gebruiksventilatie

Gebruiksventilatie is de standaard ventilatie van een ruimte tijdens het alledaagse gebruik. In parkeergarages is de ventilatie noodzakelijk voor het carcinogene karakter van uitlaatgassen. Zonder ventilatie zou een ongezonde tot gevaarlijke omgeving ontstaan voor mensen. Daarom wordt voor het gebruik van parkeergarages geventileerd.

De gebruiksventilatie kan tot stand worden gebracht door zowel natuurlijke als mechanische ventilatie. Natuurlijke ventilatie heeft enkele belangrijke voordelen. Een mechanische ventilatie betekent een extra investering en zorgt bovendien voor een hogere verdiepingshoogte, dus natuurlijke ventilatie betekent in basis een goedkoper concept. Daarentegen is het met behulp van mechanische ventilatie en stuwkrachtventilatie wel mogelijk complexere ontwerpen te realiseren. Hier staat echter wel een hogere prijs tegenover.



Figuur 3.3: Mechanische ventilatie betekent extra verdiepingshoogte (bron: Beek, 1996)

Natuurlijke ventilatie in de gebruikssituatie ontstaat door opwarming van de ruimte. In een parkeergarage zal de binnentemperatuur stijgen door rondrijdende auto's en in mindere mate de aanwezigheid van personen. Wanneer wordt aangenomen dat de gebruiker een temperatuurverschil tussen binnen en buiten veroorzaakt van bijvoorbeeld 2 °C, kan doormiddel van drukverschil de stromingssnelheid bepaald worden. Hoewel door het wisselende gebruik van een garage niet waarschijnlijk is dat er één constante temperatuur blijft, is het voor de abstractie van de vraagstelling wel van belang dat de binnentemperatuur op een constant niveau blijft. Een andere mogelijkheid is om gebruik te maken van een constante warmtebron die één of meerdere auto's voorstelt. Afhankelijk van deze warmtebron en het volume van de parkeergarage zal vanzelf een temperatuurverschil ontstaan. Na een eerste fase waarin het temperatuurverschil stijgt, zal de toename stagneren en het temperatuurverschil stabiliseren. Hierdoor ontstaat een constante vergelijking die overeenkomt met de situatie van gebruiksventilatie. Gebruiksventilatie heeft dus een stationair karakter.

3.7 Brandventilatie

Brandventilatie ontstaat net als gebruiksventilatie door een temperatuurverschil tussen binnen en buiten. De oorzaak van het temperatuurverschil ontstaat echter niet door de gebruiker, maar door de ontwikkeling van een brand. Door de hogere temperaturen en het verloop van de brand verloopt de natuurlijke ventilatie ook anders dan bij gebruiksventilatie. Om brandventilatie goed te kunnen omschrijven is eerst het begrip brand in een parkeergarage verder uitgewerkt in onderstaande subparagraaf. Daarna wordt verder ingegaan worden op brandventilatie.

3.7.1 Autobrand

Een autobrand is vrij klein van omvang, het belangrijkste gevaar is de aanwezige brandstof en de aanwezigheid van airbags, gordelspanners en andere veiligheidsvoorzieningen die gebruik maken van kleine explosieven of drukhouders. De banden van een auto kunnen ontploffen doordat de druk in de band toeneemt door verhitting en tegelijkertijd de sterkte van de band afneemt (bron:²).

Om een beeld te krijgen van de typische ontwikkeling van een autobrand in een ruimte en de factoren die invloed hebben op de ontwikkeling, is het noodzakelijk om de typische ontwikkeling van een autobrand in een ruimte te omschrijven.

In 2002 hebben de Bouwdienst Rijkswaterstaat en Steunpunt Tunnelveiligheid in samenwerking met onder andere TNO Bouw Centrum voor brandveiligheid, Arcadis, Nibra en diverse brandweerkorpsen 28 brandproeven uitgevoerd in de 2^e Beneluxtunnel voor een onderzoek naar tunnelveiligheid. In het vooronderzoek is een literatuurstudie uitgevoerd om vergelijkingen te maken met andere brandproeven zoals die zijn uitgevoerd in onder andere Oostenrijk, Zwitserland, Noorwegen en Japan. Één van de doelen van het Nederlandse onderzoek uit 2002 was het krijgen van een beter begrip van het verloop in de tijd van warmte- en rookverspreiding. Met de resultaten van dit onderzoek worden vandaag de dag nog steeds de brandscenario's bepaald voor CFD-berekeningen van parkeergarages.

² <http://nl.wikipedia.org/wiki/Brandbestrijding#Autobrand>



Figuur 3.4: Brandproef (bron: Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002)

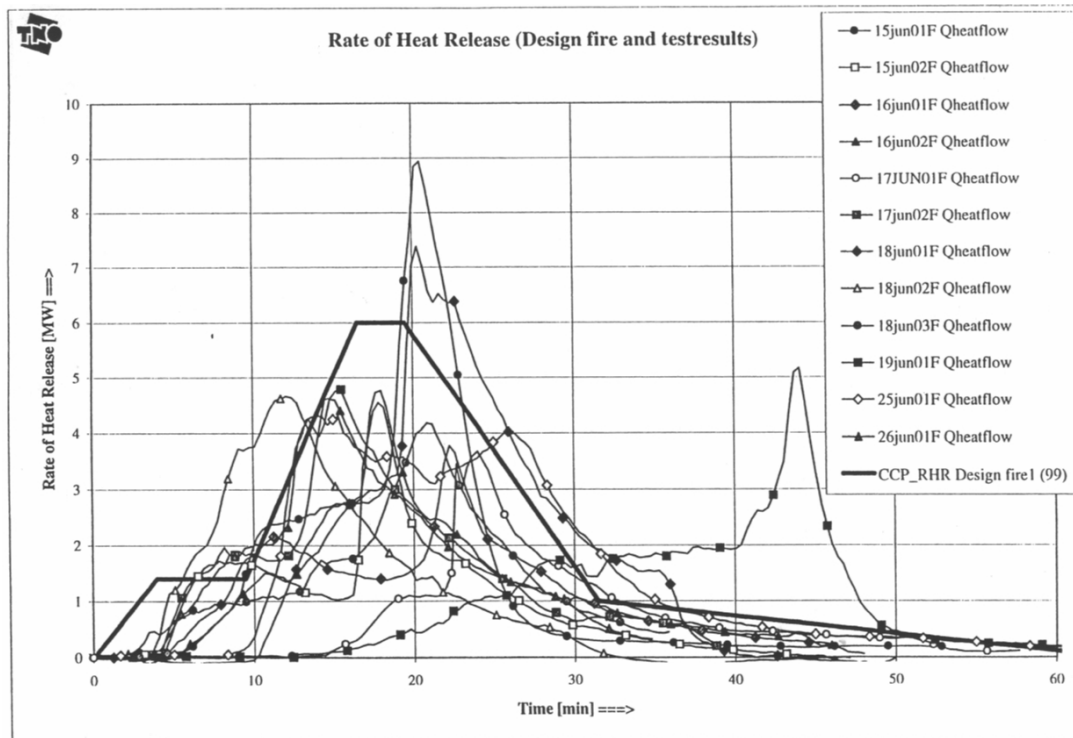
In het literatuuronderzoek van de Bouwdienst Rijkswaterstaat en Steunpunt Tunnelveiligheid is gebruik gemaakt van de resultaten van eerder onderzoek door TNO Centrum voor Brandveiligheid in 1999. TNO heeft in dit onderzoek diverse autobrandproeven uitgevoerd in een gesloten parkeergarage in Fleerde. Uit deze bron heeft de Bouwdienst voor personenautobranden geanalyseerd welke vermogencurves gangbaar zijn. De vermogencurves typeren zich door onderstaande punten. Hierbij is het uitgangspunt gehanteerd dat tijdens proeven gebruik is gemaakt van een kleine ontstekingsbron zoals een aanstekervlam of een brandende lap in een niet verder geprepareerde auto.

De vermogencurves zijn als volgt te typeren.

- De 'opwarmfase' of 'smeulfase', waarin nog weinig vermogen wordt geproduceerd en alleen de directe omgeving van de ontstekingsbron wordt opgewarmd³. Deze fase kan tussen enkele minuten en tientallen minuten duren;
- De 'ontwikkelingsfase' duurt ten minste enkele (3 tot 5) minuten voordat een vermogen van 1 MW wordt bereikt; wordt eenmaal deze omvang bereikt dan kan een autobrand binnen enkele minuten doorgroeien tot enkele MW's;
- Piekvermogens liggen vaak tussen 3 en 5 MW, maar voor modernere auto's ook hoger, tot bijna 10 MW. Deze piekvermogens worden bereikt na ten minste ca.10 minuten;
- De gemiddelde brandduur totdat het vermogen afneemt onder de 1 MW bedraagt circa 30 minuten, afhankelijk van het geproduceerde vermogen (een brand met beperkt vermogen heeft langer brandstof ter beschikking).

De vermogencurves die TNO in 1999 heeft gemeten van autobranden in gesloten parkeergarages tonen een grillig verloop. Bovendien is tussen de verschillende vermogencurves een relatief grote spreiding aanwezig. Vanuit deze gegevens is een ontwerpbrand voorgesteld; CCP_RHR Design fire I. In figuur 3.5 zijn de verschillende brandvermogencurves van het brandonderzoek afgebeeld samen met de ontwerpbrand CCP_RHR Design fire I.

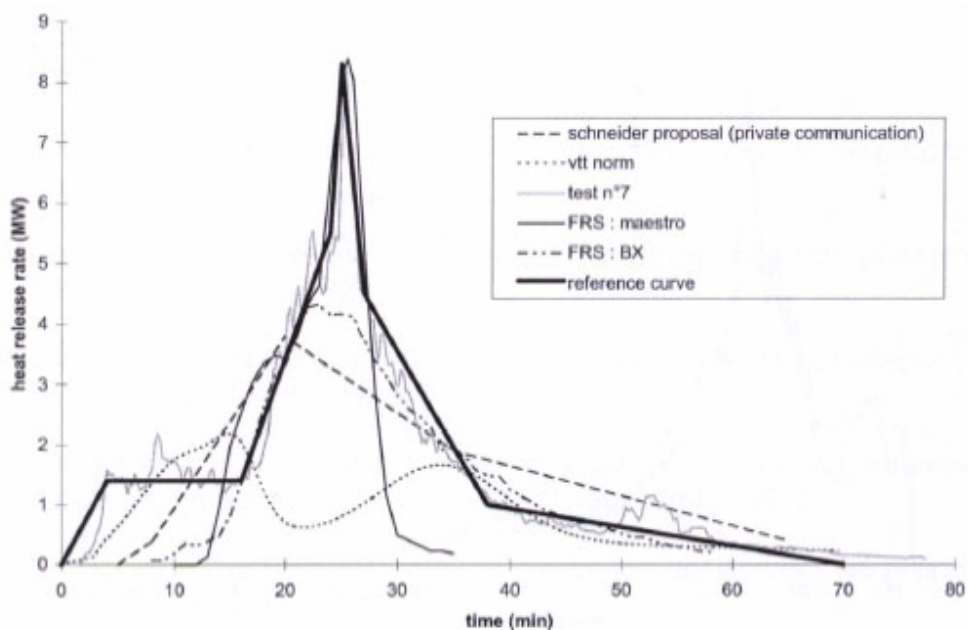
³ Een autobrand zal in deze fase vaak niet ontdekt worden, niet visueel en ook niet door automatische melding



Figuur 3.5: Vermogenscurves gemeten in de parkeergarage Fleerde (Amsterdam Zuid-Oost) en ontwerpcurve CCP_RHR Design fire I (bron: Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002)

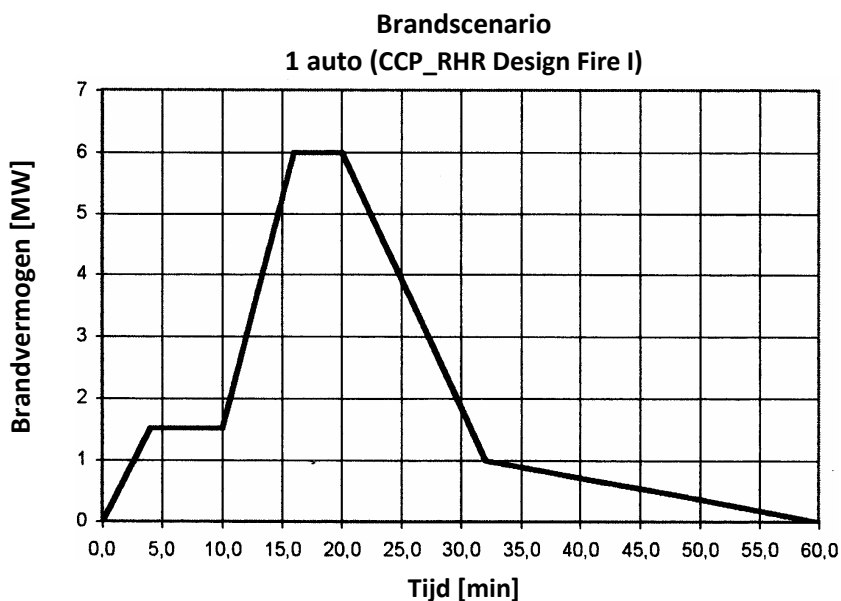
De ontwerpbrand CCP_RHR Design Fire I is in figuur 3.5 de regressielijn van een twaalfstal autobranden. De ontwerpbrand laat een duidelijk verloop zien van de verschillende vastgestelde brandfases, maar wijkt op veel punten substantieel af van gemeten waarden. Daarom moet deze regressielijn gezien worden als richtlijn voor het brandverloop van een autobrand en naar inzicht van de gebruiker worden aangevuld. De curve kenmerkt zich door een maximaal brandvermogen van 6 MW na 16 minuten en een intredende dooffase na 20 minuten. De totale verbrandingswaarde van een auto komt uit op 7 GJ. In figuur 3.7 komt deze verbrandingswaarde overeen met het oppervlak onder de regressielijn. Overigens wordt de verbrandingswaarde van 7 GJ als vrij laag geschat; uit nauwkeurige inventarisaties blijkt dat een verbrandingswaarde van 10 GJ per auto realistischer is (bron: Eggink-Eilander 2003). De oorzaak hiervan is te vinden in het grotere gebruik van kunststoffen in nieuwere auto's dan de geteste auto's in de parkeergarage Fleerde.

Dat er onenigheid bestaat over het exacte verloop, vermogen en verbrandingswaarden blijkt uit verschillende bronnen. Feijter van Efectis Nederland BV gebruikte in 2007 in een onderzoek naar een parkeergaragebrand de vermogenscurve van figuur 3.6. Deze curve geeft een iets trager op gang komend brandvermogen dan de ontwerpcurve CCP_RHR Design Fire I. Bovendien is het maximale brandvermogen van circa 8 MW en een verbrandingswaarde van 8 GJ afwijkend van het geen TNO vanuit een twaalfstal brandproeven heeft gemeten. Daarnaast vertoont de curve een groot piekvermogen wat mogelijk duidt op een snelle vermogenontwikkeling wat past bij een ontploffing. Deze snelle vermogenontwikkeling, gevolgd door een snelle afname is vermoedelijk afkomstig van de ontbranding van de brandstoftank. Wanneer echter meerdere brandproeven worden uitgevoerd is het moment van ontbranding van de brandstoftank afhankelijk van de plaats van ontsteking van de autobrand. Wanneer de autobrand start aan de voorzijde zal de brandstoftank immers veel later ontbranden dan wanneer de ontsteking aan de achterzijde van de auto plaats vindt. Deze snelle stijging gevolgd door snelle afname is daarmee niet een reëel beeld vanuit het statistisch mogelijk verantwoord verloop van een autobrand.



Figuur 3.6: Vergelijking van verschillende brandvermogencurves van één auto vanuit verschillende literaire bronnen (bron: Feijter, 2007)

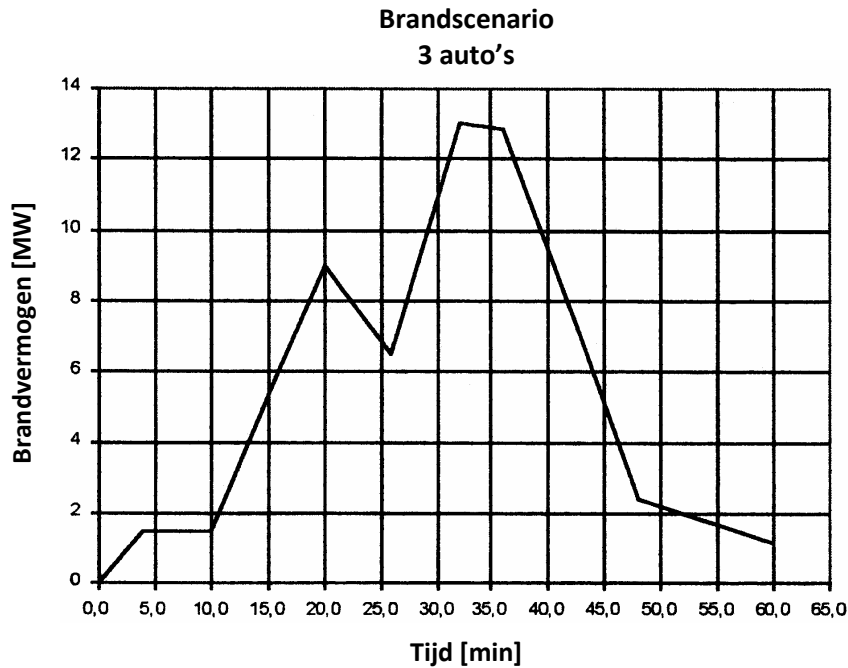
Momenteel wordt bij onder andere Adviesburo Nieman nog gerekend met de ontwerpbrand CCP_RHR Design Fire I. In dit onderzoek wordt dan ook verder gebruik gemaakt van het bijbehorende brandvermogen en verbrandingswaarde. In figuur 3.7 is de brandvermogencurve van de ontwerpbrand nogmaals afgebeeld.



Figuur 3.7: Brandontwikkeling van 1 auto zonder brandweerinzet (bron: Eggink-Eilander 2003)

In de praktijk zal de brand in een parkeergarage zich echter niet beperken tot één enkele auto. Het vermogen van een autobrand is relatief hoog, maar de brandduur is daarentegen kort. In dit brandscenario kan de autobrand wel naar de ernaast geparkeerde auto's overslaan, maar de eerste auto zal zijn gedoofd voordat de brand van hieruit naar de volgende auto overslaat. Met dit scenario kunnen dus maximaal drie auto's gelijktijdig in de brand staan. Dit scenario geeft logischerwijs een ander brandvermogencurve dan een autobrand met maar één auto die in de brand staat. In figuur 3.8 is het brandscenario uitgebreid met twee extra auto's. De vermogenlijn is gecumuleerd en dus niet ontstaan

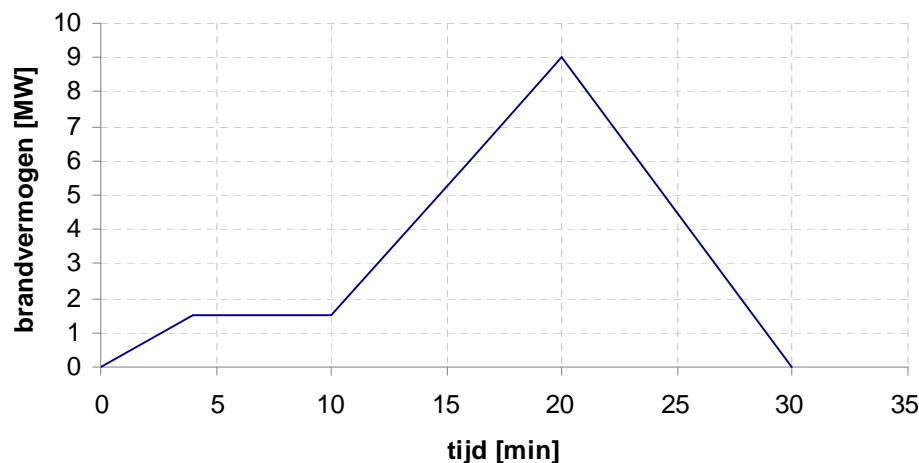
vanuit meetgegevens zoals bij de enkele autobrandcurve wel het geval is. Bij de vermogencurve wordt uitgegaan dat de twee naastgelegen auto's ontbranden op het moment dat de eerste auto het maximale brandvermogen heeft bereikt. Dit is dus na 16 minuten.



Figuur 3.8: Brandontwikkeling van 3 auto's zonder brandweerinzet (bron: Eggink-Eilander 2003)

De vermogencurve van het brandscenario van 3 auto's kenmerkt zich door een maximaal brandvermogen van 13 MW en een verbrandingswaarde van 21 GJ. Daarnaast vertoont de curve een terugval na 20 minuten door het doven van de eerste auto gevolgd door een groei na 26 minuten wanneer de andere twee auto's beginnen aan de hoofd fase.

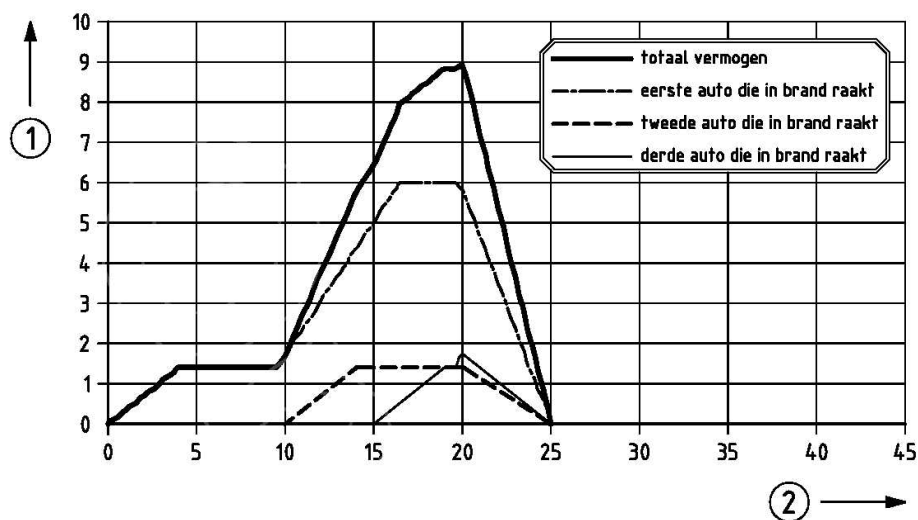
In bovenstaande brandscenario's doven de auto's door het opraken van de brandstof. In de praktijk zal de brandweer binnen 20 à 30 minuten gealarmeerd en aanwezig zijn en kunnen beginnen met bluswerkzaamheden. De brand zal vervolgens in circa 10 minuten geblust zijn. Wanneer er gebruik wordt gemaakt van automatische detectie en doormelding naar de brandweer kan zelfs verantwoord worden dat de brandweer eerder start met blussen. Bij Adviesburo Nieman wordt er in principe van uitgegaan dat de brandweer in 20 minuten start met bluswerkzaamheden. Wanneer projectgebonden in overleg met de brandweer wordt afgesproken dat dit langer of korter is, zal dit invloed hebben op de vermogencurve van het brandscenario. Wanneer wordt uitgegaan van het basisstandpunt ontstaat de vermogencurve zoals afgebeeld in figuur 3.9.



Figuur 3.9: Brandontwikkeling van 3 auto's met brandweerinzet na 20 minuten (bron: Adviesburo Nieman)

De vermogencurve in figuur 3.9 is afgeleid van de gecumuleerde brandvermogencurve van figuur 3.7. Wanneer na 20 minuten de dooffase wordt gestart door de bluswerkzaamheden zal volgende de vermogencurve het maximale brandvermogen beperkt blijven tot 9 MW. De totale verbrandingswaarde blijft door de korte verbrandingstijd beperkt tot 3,3 GJ.

Bovenstaande uitgangspunten worden echter nog betwist door de ontwerpnorm 6098:2007. In deze ontwerpnorm uit 2007 is een brandvermogencurve opgenomen dat uitgaat van de zelfde maximale branduitbreiding van 3 auto's en een brandweerinzet van 20 minuten, maar rekent met een kortere blustijd van 5 in plaats van 10 minuten. Door de zelfde inzettijd van de brandweer blijft het maximale brandvermogen 9 MW. Door de kortere verbrandingstijd is de verbrandingswaarde echter verminderd tot 2,4 GJ. De brandvermogencurve uit de NEN 6098:2007 is weergegeven in figuur 3.10.



Legenda

- 1 vermogen in MW
- 2 tijd in min

Figuur 3.10: Brandontwikkeling van 3 auto's met brandweerinzet na 20 minuten en een blustijd van 5 minuten volgens ontwerpnorm 6098 (bron: NEN 6098:2007)

Uit bovenstaande gegevens blijkt dat men er nog niet in is geslaagd een landelijk akkoord te krijgen over het verloop van een autobrand. Het maximale vermogen van 9 MW lijkt echter een vast uitgangspunt bij

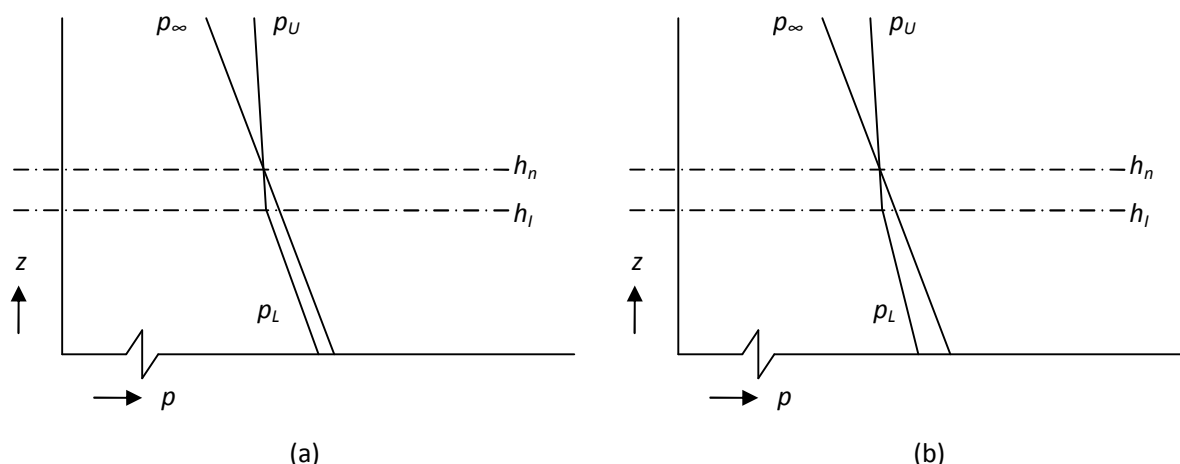
een autobrand met repressieve inzet. In dit onderzoek is dit uitgangspunt tevens gehanteerd. Overige uitgangspunten zijn opgenomen in hoofdstuk 6.

3.7.2 Brandventilatie

Zoals in het begin van paragraaf 3.5 is gesteld heeft het verloop van de brand invloed op het verloop van de natuurlijke ventilatie. De fase van de brand zal de ventilatiecapaciteit en stroom beïnvloeden. Tijdens de smeul- en ontwikkelfase is de brand een brandstof beheerste brand en zal de ventilatie niet de maatgevende factor zijn voor het vermogen van de brand. Tijdens deze fase zal de ventilatie dan ook niet de volledige capaciteit van de gevelopeningen benutten. Tijdens de vervolgfase, de fase van de volledig ontwikkelde autobrand, zal een autobrand geen ventilatie beheerste brand kunnen worden door de brandscenario's als genoemd in bovenstaande paragraaf. Een ventilatie beheerste brand zou namelijk betekenen dat de ventilatie het vermogen van de brand beïnvloedt en dat is bij een autobrand, ongeacht de fase, niet het geval.

In figuur 3.11 wordt het mogelijk verloop van natuurlijke convectie weergegeven binnen een brandruimte tijdens de smeul- en ontwikkelfase van een brand. Tijdens deze fasen kan de situatie ontstaan dat de binnentemperatuur gelijk is aan de buitentemperatuur (figuur 3.11a). Daarna zal de brand verder ontwikkelen en zal de situatie ontstaan dat de temperatuur binnen oploopt, zodat het binnen warmer is dan buiten (figuur 3.11b). Opvallend bij het drukverloop van figuur 3.11 is het verschijnsel dat het neutrale vlak in de warme (bovenste) zone ligt. In de warme zone zal dus zowel een uitgaande als binnenkomende luchtstroom plaats hebben. De koude zone zal alleen worden voorzien van een instroom.

Bij het zien van figuur 3.11 kan de gelijkenis worden gezocht met figuur 3.1. De twee figuren zijn verschillend door de afwijkende vorm van de p_U / p_L -lijn van de brandventilatie. Deze vorm geeft een drukverschil weer tussen de warme boven zone (upper layer) en koude onder zone (lower layer). Hoe het principe van een zone model precies werkt is omschreven in paragraaf 4.1.



Figuur 3.11: Mogelijk verloop van de druk op basis van natuurlijke convectie binnen de brandruimte in de hete zone (p_U) en de koude zone (p_L) en buiten de brandruimte (p_∞) bij twee zones, in de beginfase van de brand wanneer $T_L = T_\infty$ (a), en daarna wanneer $T_L > T_\infty$ (b). (bron: Van Herpen, 2007b)

3.8 Conclusie

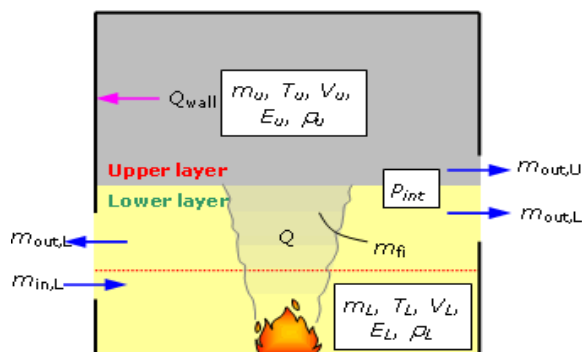
In hoofdstuk 3 is onderzoeksvraag 1 “Hoe werkt natuurlijke ventilatie ten tijde van gebruiksventilatie en brandventilatie?” beantwoord. Natuurlijke ventilatie ontstaat in beide situaties door het drukverschil ten gevolge van temperatuurverschil tussen binnen en buiten. In werkelijkheid heeft de wind invloed op de ventilatie van een ruimte, maar in dit onderzoek wordt hier geen rekening mee gehouden. Windstil weer zal namelijk de worst case scenario zijn voor zowel de gebruiks- als brandsituatie.

Het temperatuurverschil ontstaat in beide situaties door een warmtebron. In de gebruikssituatie is dit het afkoelen van auto's die de garage inkomen en van de warme uitlaatgassen. In de brandsituatie is de warmtebron een autobrand. Door het temperatuurverloop van beide bronnen zijn de ventilatietypen verschillend. Gebruiksventilatie is stationair en een brandventilatie is dynamisch.

4 Zone modellen

4.1 Het principe van zone modellen

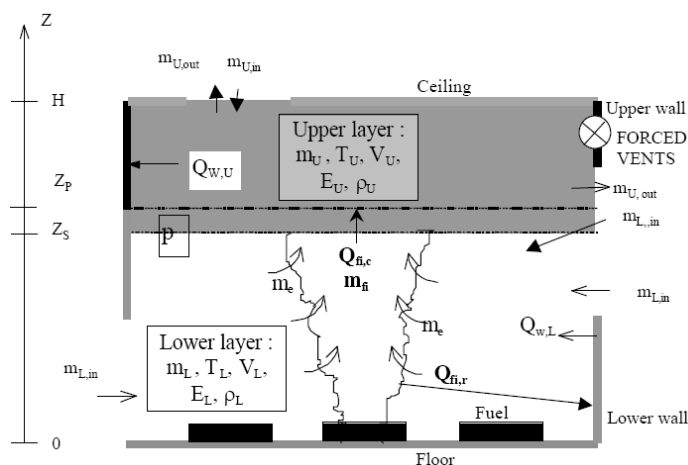
Zoals in de inleiding van dit rapport is uitgelegd worden ventilatie berekeningen uitgevoerd met behulp van computerprogramma's. Programma's gebaseerd op zone modellen sluiten aan op het in voorgaande hoofdstuk omschreven verloop van brand. In figuur 4.1 is een schematisch weergave van de veronderstelde zones in een zone model ten tijde van een brand.



Figuur 4.1: Voorbeeld zone model (bron: ⁴)

Binnen een zone worden de behoudswetten voor energie en massa opgelost. Hierbij wordt een zone als homogeen gemengd verondersteld. Homogeen gemengd betekent een uniforme temperatuur en dichtheid binnen een zone. In werkelijkheid zijn deze parameters niet constant over de gehele zone (bijvoorbeeld: de temperatuur in een rooklaag is hoger dichterbij de brandhaard), maar om de macroscopische eigenschappen in de brandruimte gedurende de brandontwikkeling te kunnen beschrijven volstaat deze aanname (Quintiere, 2002).

Om de werking van een zonemodel te beschrijven wordt het brandscenario gebruikt van een autobrand zoals die is omschreven in 3.4.1. In het begin van de brand, voordat zich een rooklaag ontwikkelt onder het plafond, kan de brandruimte nog als één zone gezien worden. In deze zone heersen nog de initiële omgevingscondities voor temperatuur en dichtheid. Vanaf het moment dat er een rooklaag onder het plafond ontstaat wordt de brandruimte gemodelleerd met twee zones: een koude zone onder in de brandruimte waar de omgevingscondities van kracht zijn, en een hete zone boven in de brandruimte waar een hogere temperatuur en een lagere dichtheid heersen (zie figuur 4.2).

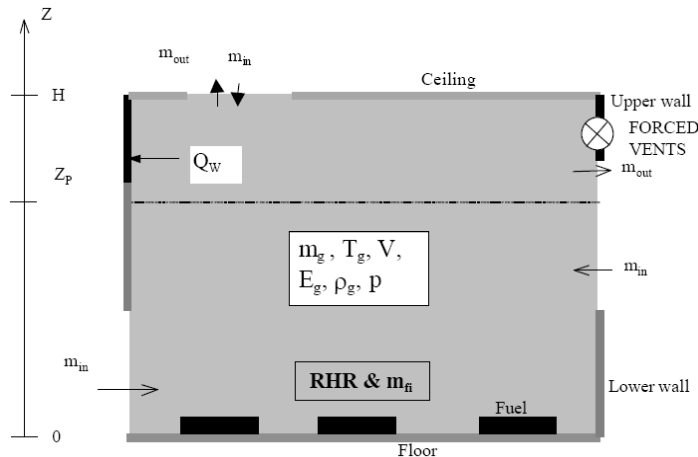


Figuur 4.2: Brandruimte in ontwikkelfase met twee zones (bron: Cadorin, 2003)

⁴ <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/Design/performance/fireModelling/zoneModels/twoZoneModel.htm>

Naarmate de brand zich verder ontwikkelt, wordt de rooklaag steeds dikker. Het volume van de hete zone neemt dus toe en de grens tussen de koude en hete zones (de interface) komt steeds lager te liggen.

Door de uitbreidingsnelheid van een autobrand zal de situatie zich niet voordoen waarin het hele oppervlak van de garage in brand staat. Tevens zal door de beperkte vermogencurve van een autobrand de temperatuur van de rooklaag niet dusdanig oplopen dat deze zoveel straling afgeeft dat andere materialen in de garage vanzelf ontbranden (flashover). Wat echter wel gebeurt bij een autobrand, is het steeds dikker worden van de rooklaag. Deze zal na verloop van tijd zo dik worden dat het niet meer realistisch is om van twee zones te spreken. Op dat moment kan de brandruimte als één gemengde zone gemodelleerd worden (zie figuur 4.3).



Figuur 4.3: Brandruimte in volledig ontwikkelde fase met één gemengde zone (bron: Cadorin, 2003)

Het gebruikte modelleringprogramma CFAST gaat uit van dit zelfde principe. De ontwikkelaars van deze software zijn het echter niet eens met Cadorin wat betreft het overgaan op één zone. Het programma blijft ongeacht de hoogte van de zone rekenen met twee zones. Hierdoor blijven alle massabalansen in stand en wordt het aantal vergelijkingen niet gereduceerd zoals bij de situatie met maar één zone het geval is.

Voor het rekenen met een zone model wordt het model opgesplitst in een hoofdmodel met daaronder submodellen die input geven aan het hoofdmodel. Er kunnen in een brandsituatie submodellen worden opgesteld voor:

- In- en uitstroom van horizontale openingen
- In- en uitstroom van verticale openingen
- In- en uitstroom van mechanische ventilatie
- De pyrolyse
- De rookpluim
- De warme zone
- De koude zone

4.2 Stationaire situatie

Stationaire simulatiemodellen kunnen de ventilatiestromen modelleren van gebruiksventilatie. In de stationaire situatie is de ruimte gevuld met één homogeen gemengde zone. Deze gebruikssituatie komt zone technisch overeen met de situatie waarin de koudezone dusdanig groot is dat het niet meer realistisch is om van twee zones te spreken.

Van Herpen omschreef in 2007 (Herpen, 2007b) en Voogd in 2006 de massastromen in een homogeen gemengd zone model voor het fysisch brandmodel. Het fysisch brandmodel benadert de doelen van de

regelgeving vanuit meer fysisch natuurgetrouwe uitgangspunten. Hierin wordt onder andere een zone model omschreven voor een brandsituatie. Voor de optredende massastromen kan in deze situatie een massabalans voor de zones opgesteld worden. In deze massabalans van bovenstaande bronnen zijn de massastromen omschreven van de pyrolyse (verbranding), de in en uitstroom van verticale en horizontale openingen en mechanische ventilatie. Voor de natuurlijke ventilatie in de gebruikssituatie zijn de massastromen van pyrolyse en de in en uitstroom van mechanische ventilatie niet van toepassing. Bovendien wordt in dit onderzoek alleen gekeken naar de verticale openingen, omdat in het kader van onderzoeksafbakening de ventilatiestromen van horizontale openingen achterwege zijn gelaten. De massabalans voor natuurlijke ventilatie voor de gebruikssituatie in een zone model kan daarmee vereenvoudigd worden tot de vergelijking (V.3) waarin alle termen positief worden gerekend:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{V,in} - \dot{m}_{V,uit} \quad (V.3)$$

waarin: \dot{m}_1 = totale massaverandering van de ruimte (= 0 kg/s in stationaire situatie)
 $\dot{m}_{V,in}$ = totale massastroom de ruimte in door verticale openingen [kg/s]
 $\dot{m}_{V,uit}$ = totale massastroom de ruimte uit door verticale openingen [kg/s]

In vergelijking (V.3) worden de eigenschappen stationaire en dynamische situaties verduidelijkt. In een stationaire situatie zal de ingaande massastroom gelijk zijn aan de uitgaande massastroom. Bij een dynamische situatie zal dit fluctueren; afhankelijk van het moment zal de ingaande massastroom kleiner zijn dan de uitgaande massastroom en andersom. Natuurlijk kan er ook in een dynamische situatie een moment van massabalans aanwezig zijn.

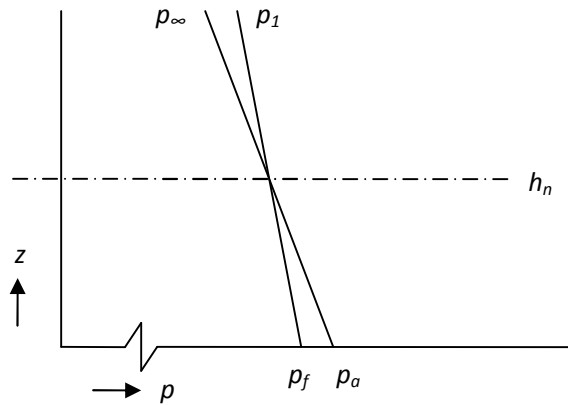
De luchtstroming door verticale openingen is in stationaire situatie het gevolg van natuurlijke convectie. Natuurlijke convectie ontstaat ten gevolge van een drukverschil tussen de ruimte en de buitenlucht. De luchtdruk binnen (p_1) en buiten (p_∞) worden (bij uniforme temperatuur in de ruimte) gegeven door:

$$\text{binnen:} \quad p_1(z) = p_f - \rho_1 g z \quad (V.4)$$

$$\text{buiten} \quad p_\infty(z) = p_a - \rho_\infty g z \quad (V.5)$$

waarin: p_f = luchtdruk ter hoogte van de vloer in de ruimte [Pa]
 p_a = luchtdruk ter hoogte van de vloer buiten de ruimte [Pa]
 ρ = dichtheid van de lucht [kg/m³]
 g = gravitatieconstante $\approx 9,81$ m/s²
 z = hoogte boven vloerniveau [m]
 en subscript 1 en ∞ staan voor binnen respectievelijk buiten de brandruimte.

De tweede term in de vergelijkingen (V.4) en (V.5) is zeer klein in vergelijking tot de eerste term in deze vergelijkingen. Echter, voor de stromingen door de gevelopeningen door natuurlijke convectie zijn juist deze termen van belang. De temperatuur in de ruimte (T_1) is hoger dan de temperatuur van de buitenlucht (T_∞). Aangezien de dichtheid van de lucht omgekeerd evenredig is met de temperatuur, heeft de binnenlucht een kleinere dichtheid ρ_1 dan de buitenlucht ρ_∞ . Dit heeft tot gevolg dat de druk in de ruimte (p_1) minder snel afneemt met de hoogte dan de druk in de buitenlucht (p_∞), waar de dichtheid ρ_∞ groter is. In figuur 4.4 zijn het verloop van de druk p_1 (binnen) en p_∞ (buiten) de ruimte als functie van de hoogte z geschetst.



Figuur 4.4: Verloop van de druk binnen (p_1) en buiten (p_∞) bij één gemengde zone (bron: Van Herpen, 2007b)

In de ruimte zal een neutraal vlak ontstaan (in figuur 4.4 aangeduid met h_n). Boven dit neutrale vlak is de druk in de ruimte hoger dan de druk buiten en zal luchtstroming naar buiten optreden. Onder het neutrale vlak is de druk in de ruimte lager dan de druk buiten en zal luchtstroming naar binnen optreden. Ter hoogte van het neutrale vlak is het drukverschil gelijk aan nul en vindt er geen luchtuitwisseling plaats.

De snelheid van de in- of uitgaande luchtstroom op een bepaalde hoogte is afhankelijk van het drukverschil op die hoogte en wordt gegeven door de Wet van Bernoulli:

$$V(z) = \left(\frac{2|\Delta p(z)|}{\rho_v} \right)^{1/2} \quad (\text{V.2})$$

waarin: $V(z)$ = snelheid in de opening op hoogte z [m/s]
 ρ_v = $\begin{cases} \text{bij een positief drukverschil van binnen naar buiten: } \rho_1 \\ \text{bij een negatief drukverschil van binnen naar buiten: } \rho_\infty \end{cases}$

Een positief drukverschil van binnen naar buiten zorgt voor een luchtstroming naar buiten; een negatief drukverschil van binnen naar buiten voor een stroming naar binnen.

Deze vergelijkingen voor de snelheid kunnen omgerekend worden naar massastromen. Voor de uitgaande massastroom (boven het neutrale vlak dus) op een hoogte z boven de vloer geldt vergelijking (V.6). In deze vergelijking hebben de breedte van de opening en het stromingscoëfficiënt de meeste invloed. Van deze twee factoren heeft alleen de eerste effect omdat het stromingscoëfficiënt een vrijwel vaste waarde is. In mindere mate heeft de hoogte z invloed op de massastroom. Deze factor heeft door de wortel een tot de macht $\frac{1}{2}$ minder invloed.

$$\dot{m}_{v,uit}(z) = w_{v,uit} C_d (2\rho_1 \Delta p(z))^{1/2} dz \quad (\text{V.6})$$

waarin: $w_{v,uit}$ = totale breedte van alle openingen op hoogte z die ten minste gedeeltelijk boven het neutrale vlak liggen [m]
 C_d = stromingscoëfficiënt [-]

De ingaande massastroom (onder het neutrale vlak dus) op een hoogte z boven de vloer wordt gegeven door vergelijking (V.7). Deze vergelijking is gelijk aan de uitgaande stroom met daarbij het verschil dat in de vergelijking van de uitgaande massastroom wordt gerekend met het buitengebied in plaats van de binnenruimte.

$$\dot{m}_{V,in}(z) = w_{V,in} C_d \left(2\rho_\infty |\Delta p(z)| \right)^{1/2} dz \quad (V.7)$$

waarin: $w_{V,in}$ = totale breedte van alle openingen op hoogte z die ten minste gedeeltelijk onder het neutrale vlak liggen [m]

De waarde van de stromingscoëfficiënt C_d is afhankelijk van de verhouding van de afmetingen van de opening tot de afmetingen van de scheidingsconstructie waarin de opening zich bevindt. Indien de opening dezelfde grootte heeft als de totale scheidingsconstructie (bijvoorbeeld volledige glasplui) geldt $C_d = 1,0$ (Cooper, 2002). In het algemeen kan voor verticale openingen de waarde 0,60 aangehouden worden (Emmons, 2002, pp. 2-34).

4.3 Dynamische situatie

Zone modellen zijn sterk vereenvoudigde weergaven van de werkelijkheid. Om te rekenen aan brandventilatie in zone modellen wordt bij Adviesburo Nieman voornamelijk gebruik gemaakt van CFAST en Ozone. Ozone heeft een eenvoudiger invoer, maar laat ten opzichte van CFAST minder specifieke resultaten zien in de uitvoer. CFAST kan in de uitvoer gegevens de massastromen weergeven die benodigd zijn om een vergelijking te kunnen maken met het veldmodel.

Zoals in de uitleg over het principe van zone modellen is omschreven zal een autobrand in een garage eerst leiden tot twee zones. Bovenin de brandruimte bevindt zich een hete zone (hierna aangeduid met het subscript U van "Upper"); onderin de ruimte een relatief koude zone (hierna aangeduid met het subscript L van "Lower"). De onderkant van de hete zone bevindt zich op een hoogte h_i (I van "Interface") boven de vloer van de brandruimte. Binnen beide zones worden de temperatuur T en de dichtheid ρ uniform verondersteld. Macroscopisch gezien heeft de gehele brandruimte dezelfde druk p .

Opnieuw is voor het beschrijven van de massastromen in het twee zone model gebruik gemaakt van de rapportage over het fysisch brandmodel door Van Herpen (2007b) en Voogd (2006). In het kader van de afkadering van de probleemstelling in dit onderzoek is de massabalans vereenvoudigd door het achterwege laten van de massastromen uit horizontale openingen en mechanische ventilatie. Voor de overige massastromen worden de vergelijkingen (V.8) en (V.9) opgesteld:

$$\text{hete zone:} \quad \dot{m}_U = \dot{m}_p + \dot{m}_{fi} - \dot{m}_{U,V,uit} \quad (V.8)$$

$$\text{koude zone:} \quad \dot{m}_L = \dot{m}_{U,V,in} + \dot{m}_{L,V,in} - \dot{m}_{L,V,uit} - \dot{m}_p \quad (V.9)$$

waarin: \dot{m}_U = totale massaverandering van de hete zone (= 0 kg/s in stationaire situatie)

\dot{m}_p = massastroom de hete zone in vanuit de rookpluim [kg/s]

\dot{m}_{fi} = massastroom door pyrolyse [kg/s]

$\dot{m}_{U,V,uit}$ = totale massastroom de hete zone uit door verticale openingen [kg/s]

\dot{m}_L = totale massaverandering van de koude zone (= 0 kg/s in stationaire situatie)

$\dot{m}_{U,V,in}$ = totale massastroom de koude zone in (boven het neutrale vlak) door verticale openingen [kg/s]

$\dot{m}_{L,V,in}$ = totale massastroom de koude zone in door verticale openingen [kg/s]

$\dot{m}_{L,V,uit}$ = totale massastroom de koude zone uit door verticale openingen [kg/s]

\dot{m}_p = massastroom de koude zone uit d.m.v. de rookpluim [kg/s]

De massastroom in de rookpluim ter hoogte van de interface tussen de koude en de hete zone en de massastroom door pyrolyse dienen als input voor dit submodel bekend te zijn. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de massastromen die berekend zijn in respectievelijk het submodel van de rookpluim en het submodel van de verbranding. Op deze submodellen wordt in dit onderzoek niet nader ingegaan. De input van deze submodellen wordt wel geleverd door de omschreven brandscenario's in paragraaf 3.4.1.

Het drukverschil wordt in de twee zone situatie gegeven door vergelijking (V.10):

$$\Delta p(z, t) = \Delta p_{nc}(z) + p_e(t) \quad (\text{V.10})$$

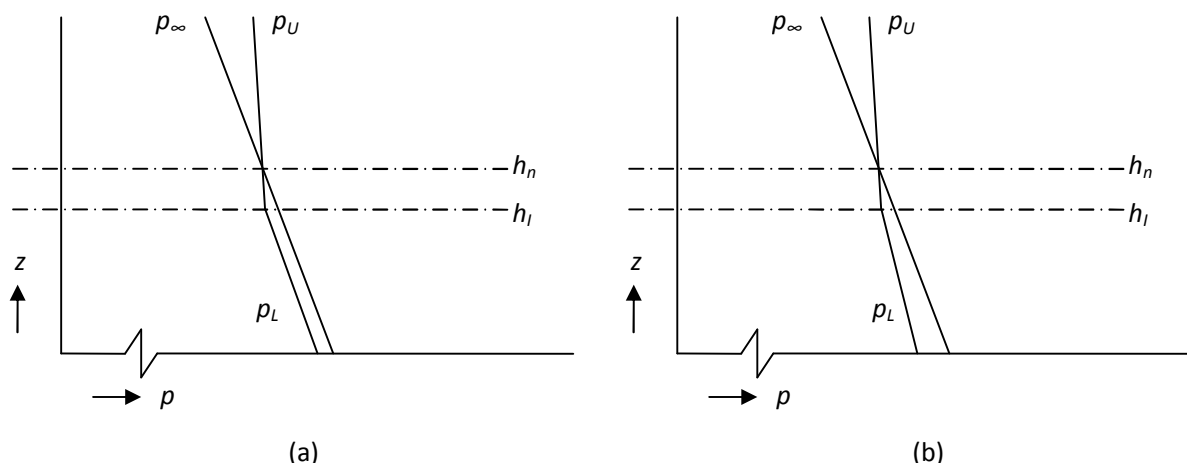
De druk door uitzetting dient weer uit het hoofdmodel bekend te zijn. Daarnaast wijkt de beschrijving van de natuurlijke convectie voor de twee zone situatie af van de één zone situatie.

Kwalitatief kan het verloop van de luchtdrukken binnen en buiten de brandruimte ten gevolge van alleen natuurlijke convectie in de situatie met twee zones als volgt beschreven worden:

Buiten heerst een constante omgevingstemperatuur T_∞ . De luchtdruk p_∞ zal buiten dus lineair afnemen met de hoogte volgens vergelijking (V.5) (zie figuur 4.5).

Binnen in de brandruimte in de hete zone boven het neutrale vlak is de temperatuur hoger dan buiten en zal de druk, p_U , minder snel afnemen met de hoogte dan buiten. Hierdoor zal ter hoogte van de hete zone een positief drukverschil van binnen naar buiten ontstaan en, als gevolg daarvan, een massastroom naar buiten. Het drukverschil tussen de hete zone binnen en de omgeving buiten neemt toe met de hoogte. In de koude zone onder in de brandruimte is de temperatuur (T_L) in de beginfase van de brand gelijk aan de omgevingstemperatuur (T_∞); de luchtdrukken binnen en buiten de brandruimte nemen dan dus evenredig af met de hoogte. Wel moet de druk p_L in de koude zone in de brandruimte iets lager zijn dan de druk buiten; het kan immers niet zo zijn dat in de hete zone wel een massastroom naar buiten bestaat, maar er geen massastroom naar binnen is. Ter hoogte van de interface (onderkant hete zone) gaat de druk p_L over in de druk p_U . Voor de beginfase van de brand verlopen de druk binnen en buiten de brandruimte dus kwalitatief zoals weergegeven in figuur 4.5a (zie ook Thomas, 1995, pp. 305).

Naarmate de brand zich verder ontwikkelt zal de temperatuur van de koude zone door straling vanaf de vlammen en de hete rooklaag hoger worden dan de omgevingstemperatuur. Het drukverschil tussen de koude zone en buiten loopt in dat geval op met de afstand tot de interface. Figuur 4.5b geeft kwalitatief het drukverloop wanneer de temperatuur van de koude zone hoger is dan de omgevingstemperatuur.



Figuur 4.5: Mogelijk verloop van de druk op basis van natuurlijke convectie binnen de brandruimte in de hete zone (p_U) en de koude zone (p_L) en buiten de brandruimte (p_∞) bij twee zones, in de beginfase van de brand wanneer $T_L = T_\infty$ (a), en daarna wanneer $T_L > T_\infty$ (b). (bron: Van Herpen, 2007b)

In figuur 4.5 geeft h_i de hoogte van de interface aan. Uit deze figuur blijkt dat het neutrale vlak h_n (waar het drukverschil tussen binnen en buiten gelijk aan nul is) net boven de hoogte van de interface ligt⁵.

Er kunnen nu vier verschillende massastromen optreden door gevelopeningen:

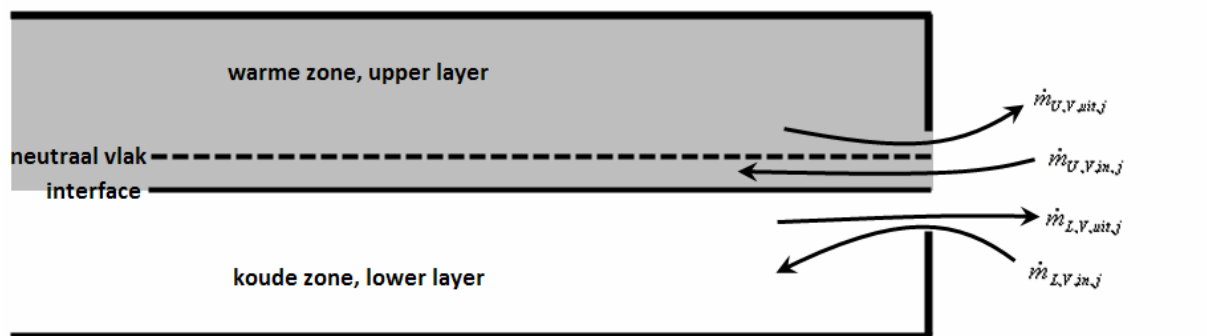
- 1) $\dot{m}_{U,V,uit,j}$; Uitgaande massastroom boven de interface (dus boven het neutrale vlak vanuit de hete zone)
- 2) $\dot{m}_{U,V,in,j}$; Ingaande massastroom boven de interface (dus onder het neutrale vlak; zoals eerder toegelicht stroomt deze massastroom de koude zone in)
- 3) $\dot{m}_{L,V,uit,j}$; Uitgaande massastroom onder de interface (dus onder het neutrale vlak vanuit de koude zone)
- 4) $\dot{m}_{L,V,in,j}$; Ingaande massastroom onder de interface (dus onder het neutrale vlak de koude zone in)

Deze vier verschillende massastromen vormen elk een massabalans. Deze balansen zijn afgeleid uit de vergelijking (V.11):

$$\dot{m}_{V,j}(z,t) = w_j C_{d,j} (2\rho_U |\Delta p(z,t)|)^{1/2} dz \quad (V.11)$$

waarin: $\dot{m}_{V,j}$ = totale massaverandering van verticale opening
 w_j = breedte van opening j [m]
 $C_{d,j}$ = stromingscoëfficiënt [-] (standaardwaarde = 0,60)
 ρ_U = dichtheid "Upper" layer. Voor de massastromen 2 en 4 kan de ρ_U vervangen worden door ρ_∞ (buiten), voor massastroom 3 door ρ_L (Lower layer)
 $\Delta p(z,t)$ = drukverschil, uitgezet in hoogte en tijd
 dz = temperatuurgradiënt in de ruimte door stratificatie [K/m]

Vergelijking (V.11) over de massaverandering van verticale openingen, uitgezet op hoogte en tijd, heeft verschillende componenten met verschillende invloeden. In deze vergelijking hebben de breedte van de opening en het stromingscoëfficiënt de meeste invloed. Van deze twee factoren heeft alleen de eerste effect omdat het stromingscoëfficiënt een vaste waarde is. Daarnaast heeft logischerwijs de druk van de lower en upper layer invloed op de massastroom. Deze zijn een rechtstreeks gevolg van de autobrand. De invloed van de autobrand is echter tot de macht $\frac{1}{2}$ kleiner dan de invloed van de openingsbreedte.



Figuur 4.6: Vier vergelijkingen aangegeven in doorsnede

⁵ Dit verklaart ook de term $\dot{m}_{U,V,in}$. Dit is een massastroom die de brandruimte binnen stroomt in de hete zone (dus boven de interface tussen de koude en hete zone), maar onder het neutrale vlak in de ruimte en daarom aan de koude zone wordt toegekend (zie ook figuur 4.5).

4.4 Variabelen in zone modellen

Om een gedegen vergelijking te kunnen maken tussen een zone model en de werkelijkheid met behulp van een veldmodel, is een overzicht noodzakelijk van de verschillende variabelen van de zone modellen. In het hierna volgende overzicht worden de belangrijkste inputbenodigdheden uitgelegd van de elf omschreven vergelijkingen. Deze worden aangevuld met ondergeschikte invloeden die voortvloeien uit de fysische werkelijkheid welk wordt benaderd door een zone model.

Overzicht variabelen in zone modellen

Uit de vergelijkingen komen de volgende variabelen naar voren:

1. *Het drukverschil tussen binnen en buiten.* De grootte hiervan is afhankelijk van het temperatuurverschil dat ontstaat door een autobrand of het gebruik van de garage. In de vergelijkingen is deze invloed tot de macht $\frac{1}{2}$ kleiner dan de overige variabelen.
2. *De breedte van de gevelopening w_j .* Deze heeft een rechtevenredige invloed op de massastromen in het zone model.
3. *De hoogte van de opening z .* In de vergelijkingen heeft deze door de wortelfunctie tot de macht $\frac{1}{2}$ kleinere invloed dan de overige variabelen.
4. *De stromingscoëfficiënt C_d .* Deze variabele is afhankelijk van de verhouding van de afmetingen van de opening tot de afmetingen van de scheidingsconstructie waarin de opening zich bevindt. In deze factor is dus opnieuw de breedte van de gevelopening verwerkt. Bovendien ligt hier een verband met de voorwaarden van NEN 2443; wanneer aan deze norm wordt voldaan zal de C_d rond de waarde van 0,6 tot 0,8 liggen, omdat voor het voldoen aan deze norm een groot percentage gevelopening nodig is.

In de werkelijkheid hebben naast bovengenoemde factoren ook andere fysische eigenschappen van de werkelijkheid invloed op de massastromen die niet rechtstreeks in de vergelijkingen zijn terug te vinden. Deze zijn bijvoorbeeld:

5. *Het accumulerend vermogen van de wanden en vloer en/of plafond.* Wanneer deze groot is zullen deze vlakken de stijging en daling van de massastroom vertragen. De gebruikte materialen in de ruimte zullen immers als buffer kunnen functioneren die zowel bij opwarming als afkoeling van de ruimte het proces vertragen door warmte op te nemen en af te staan aan de omgeving.
6. *De geometrie van de ruimte.* De afmetingen van vloeren, wanden en openingen hebben invloed op verschillende variabelen uit de vergelijkingen.

4.5 Conclusie

De onderzoeksvragen 2 en 3 zijn in hoofdstuk 4 en 5 opgedeeld in twee delen. In hoofdstuk 4 is het eerste deel van onderzoeksvraag 2 en 3 beantwoord. Het tweede deel van de onderzoeksvragen 2 en 3 wordt in hoofdstuk 5 beantwoord. In de eerste drie paragrafen van hoofdstuk 4 is antwoord gegeven hoe een zone model werkt. In een zone model worden één of twee zones verondersteld waarin de behoudswetten van energie en massa worden opgelost. Hierbij wordt een zone als homogeen gemengd beschouwd.

Homogeen gemengd betekent een uniforme temperatuur en dichtheid binnen een zone. In werkelijkheid zijn deze parameters niet constant over de gehele zone (bijvoorbeeld: de temperatuur in de rooklaag is hoger dichterbij de brandhaard), maar om de macroscopische eigenschappen in de brandruimte gedurende de brandontwikkeling te kunnen beschrijven volstaat deze aanname.

In paragraaf vier zijn diverse variabelen opgesomd om tot een betere benadering te komen. Met behulp van deze variabelen is in verschillende rekenconfiguraties gezocht naar de grootte van overschatting die zone modellen maken bij het berekenen van effectiviteit van verticale ventilatieopeningen ten opzichte van de werkelijkheid.

5 Veld modellen

Om inzicht te krijgen in de effectiviteit van verticale openingen in een zone model zullen voor zowel de gebruiks- als brandsituatie berekeningen worden gemaakt met programma's gebaseerd op het zone model principe. Door deze berekeningen in zone modellen te vergelijken met de zelfde berekeningen in een veld model, kan worden onderzocht hoe groot de overschatting is van ventilatiestromen in zone modellen. Dit is mogelijk omdat een veld model de werkelijkheid dichter benadert dan een zone model. In onderstaande paragrafen wordt eerst het principe uitgelegd van veld modellen, gevolgd met variabelen in veld modellen voor de gebruiks- en brandsituatie.

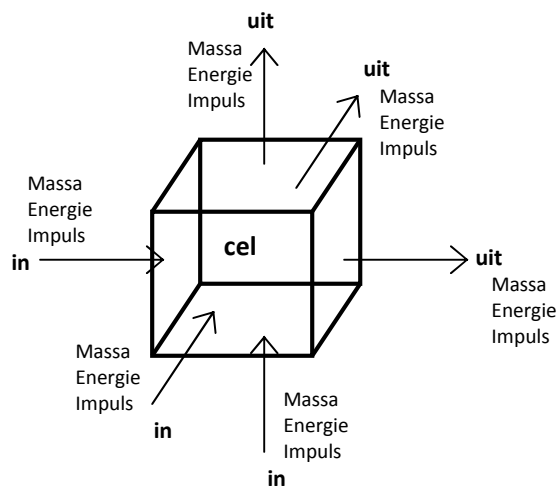
5.1 Het principe van veld modellen

In 2005 omschreef Lemaire het principe van CFD. Veld modellen worden gemaakt met CFD simulatie programma's. CFD staat voor Computational Fluid Dynamics, wat vrij vertaald betekent dat er met behulp van de computer gerekend wordt aan de dynamiek van vloeistof. Een CFD simulatie programma kan dan ook vergelijkingen van gas- en vloeistofstromingen oplossen. Deze stromingsvergelijkingen werden meer dan anderhalve eeuw geleden opgesteld door Navier en daarna Stokes. Als uitgangspunt namen zij de stroming in een theoretisch oneindig klein volumecelletje van de ruimte. Op deze stroming pasten zij de klassieke behoudswetten uit de mechanica en thermodynamica toe, namelijk die van behoud van massa, impuls en energie. Voor een dynamische situatie laat dit zich als volgt vertalen:

- Het verschil tussen de massa vloeistof die in de cel stroomt en er weer uitstroomt is gelijk aan de toename van de massa van de vloeistof in de cel verminderd met de productie van vloeistofmassa in de cel.
- Het verschil tussen de kracht die de vloeistof in de cel ondervindt en die ze weer uitoefent op de vloeistof in naastgelegen cellen is gelijk aan de kracht die nodig is om de vloeistof in de cel te versnellen verminderd met de kracht op de vloeistof in de cel tengevolge van dichtheidsverschillen.
- Het verschil van de energie die in de cel stroomt en de energie die er weer uitstroomt is gelijk aan de toename van de energie in de cel verminderd met de energie die (bijvoorbeeld door verbranding) in de cel vrijkomt.

Navier en Stokes stelden de vergelijkingen op voor de snelheden, de druk en de temperatuur van de stroming in de gehele ruimte. Daarnaast gaven zij aan welke relaties er bestonden tussen enerzijds de dichtheid en viscositeit (stroperigheid) van het gas of de vloeistof en anderzijds de snelheid, druk en temperatuur in de ruimte. Dit leidde tot een set transportvergelijkingen waarmee in principe alle stromingen kunnen worden berekend. Maar in de praktijk bleken de vergelijkingen dermate complex dat ze zonder computer slechts voor een beperkt aantal type stromingen waren op te lossen. Bijvoorbeeld voor een stroming in een buis of langs een wand, waarbij een flink aantal termen in de vergelijkingen verwaarloosd mogen worden.

De meeste CFD software is gebaseerd op de eindige volume methode. Deze methode gaat uit van de behoudswetten uit de mechanica en thermodynamica en past deze toe op de stroming in een klein volumecelletje. Het celletje is echter niet oneindig klein, maar behoudt eindige afmetingen. Onder de aanname dat de stroming- en vloeistofeigenschappen binnen zo'n cel homogeen zijn, kunnen algebraïsche vergelijkingen worden afgeleid voor de snelheidscomponenten, de druk, de temperatuur en eventuele andere eigenschappen van de stroming. De eigenschappen binnen de cel zijn hierbij alleen nog afhankelijk van de eigenschappen in de buiscellen. In figuur 5.1 wordt een vereenvoudigde weergave van zo'n cel weergegeven.



Figuur 5.1: Vereenvoudigde weergave behoudswetten. Samen met het oppervlak van de celwanden bepalen deze parameters de convectieve warmtestroom en de warmtegeleiding in- en uit de cel.

Tijdens een CFD simulatie wordt de gehele ruimte opgedeeld in aan elkaar grenzende volumecellen: het zogenaamde rekenrooster of 'mesh'. De gebruiker bepaalt hierbij de grootte en vorm van de cellen. Vervolgens worden alle algebraïsche vergelijkingen voor alle cellen afgeleid. Het mag daarbij duidelijk zijn dat de realiteit steeds beter zal worden benaderd naarmate steeds kleinere celletjes worden gebruikt. De gebruiker, die verantwoordelijk is voor het rekenrooster, heeft hier dus grote invloed op. In de praktijk worden afhankelijk van de toepassing de rekenroosters opgedeeld in een rastergrootte van 0,1 tot 0,3 meter.

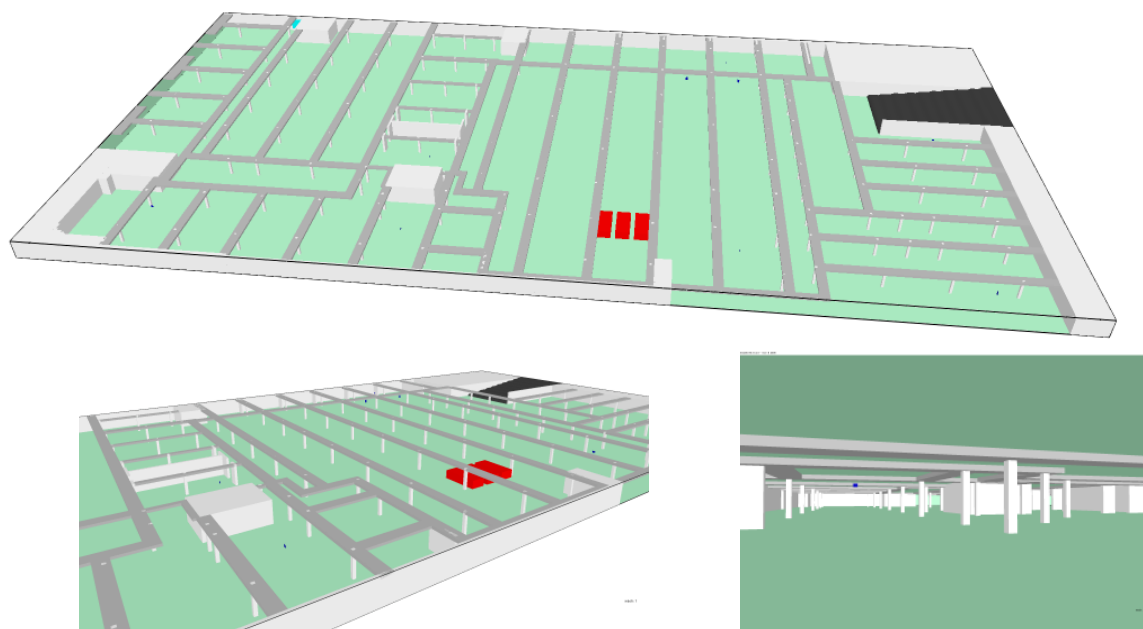
Zo ontstaan er honderdduizenden algebraïsche vergelijkingen voor zes tot acht op te lossen variabelen, waarbij de coëfficiënten van deze vergelijkingen weer afhangen van de waarde van die variabelen. Het oplossen van deze vergelijkingen is dan ook een complex proces. De berekening van een dynamische stroming gebeurt in kleine tijdstappen, waarbij de oplossing van de vorige tijdstap als beginsituatie voor de berekening van de volgende tijdstap wordt gebruikt. Binnen een tijdstap wordt veelal een iteratieve oplosprocedure gevolgd. Vanuit de beginsituatie worden de coëfficiënten van alle vergelijkingen berekend en worden vervolgens alle vergelijkingen opgelost. Na deze stap worden alle coëfficiënten herberekend voor de veranderde situatie en worden de vergelijkingen opnieuw opgelost. De iteraties gaan net zo lang door tot de coëfficiënten en de oplossing bij benadering onveranderd blijven, d.w.z. tot een geconvergeerde oplossing binnen de tijdstap is bereikt.

Een alternatief is de expliciete tijdstap methode. Hierbij wordt verondersteld dat de nieuwe eigenschappen in een cel alleen afhangen van de oude (in de vorige tijdstap berekende) eigenschappen in die cel en zijn buurcellen. Een iteratieve procedure met alle daaraan verbonden nadelen is dan overbodig. De enige beperking is de grootte van de tijdstap, omdat een te grote tijdstap numerieke instabiliteit tot gevolg heeft. In de praktijk kan dit tot onaanvaardbaar lange rekentijden leiden. De methode wordt o.a. toegepast in het CFD programma FDS van NIST.

Turbulentie

Ondanks de huidige snelle computers en efficiënte oplosmethoden, blijkt het veelal onmogelijk om de stromingen die in de praktijk voorkomen direct uit de Navier Stokes vergelijkingen op te lossen. Dit wordt veroorzaakt door het optreden van turbulentie, een fenomeen dat reeds in de 16de eeuw door Leonardo da Vinci bestudeerd werd. In een turbulente stroming fluctueren de stromingseigenschappen zoals snelheid, druk en temperatuur onregelmatig in ruimte en tijd rondom een gemiddelde waarde. En dat terwijl de externe condities toch constant zijn, zoals bijvoorbeeld in een buis- of zogstroming. De oorzaak is de fundamenteel aanwezige interne instabiliteit van de stroming, die bij hogere snelheden niet meer gedempt kan worden door de stroperigheid van de vloeistof. Dit leidt tot zogenaamde turbulente wervels. Om alle fluctuaties in ruimte en tijd te simuleren zouden zeer kleine volumecellen en zeer kleine tijdstappen nodig zijn, wat met de huidige computers tot onaanvaardbaar lange rekentijden zou leiden. Gelukkig is er een andere weg mogelijk, namelijk via de beschrijving van turbulentie in statistische termen, en wel met als belangrijkste termen het tijdsgemiddelde en de standaarddeviatie van de

stromingseigenschappen. Deze statistische grootheden kunnen wel afzonderlijk worden opgelost, zij het met enigszins aangepaste vergelijkingen waarbij het gebruik van experimenteel bepaalde functies en universele turbulentieconstanten niet wordt geschuwd. Hoe dit gebeurt hangt af van het gehanteerde turbulentiemodel, waarvan er in de loop der jaren vele zijn ontwikkeld. Een veel toegepast model voor "engineering" doeleinden is het k- ϵ model. Dit model brengt de extra menging ten gevolge van turbulentie in rekening door een extra "stroperigheid", een zogenaamde "eddy viscosity", aan de vloeistof toe te voegen. Hoe groot die is hangt af van twee turbulentiegrootheden, namelijk k en ϵ die een maat zijn voor respectievelijk de energie van de turbulente fluctuaties en de snelheid waarmee deze fluctuaties gedempt worden. Op hun beurt worden k en ϵ elk weer met een transportvergelijking beschreven. Bij brand is hierbij van belang hoe goed het model de stratificatie van rook kan voorspellen. Bovenstaand beschreven turbulentiemodellering wordt ook wel aangeduid met RANS (= Reynolds Averaged Navier Stokes). Een alternatieve methode die sinds enkele jaren voor de simulatie van branden kan worden gebruikt is LES (=Large Eddy Simulation). Bij deze methode worden de grotere, tragere turbulente wervels ('eddies') direct uit de Navier Stokes vergelijkingen opgelost en worden alleen de kleinere wervels gemodelleerd. LES gebaseerde modellen hebben in principe kleinere volumecellen nodig dan RANS gebaseerde modellen, wat tot langere rekentijden zal leiden. Hier staat tegenover dat de modellen fundamenteeler van aard zijn en daardoor in potentie nauwkeuriger. Het eerder genoemde software pakket FDS maakt gebruik van een LES methode die alleen de allergrootste wervels direct simuleert. Dit maakt FDS geschikt als rekentool voor nauwkeurige benadering van de werkelijkheid.



Figuur 5.2: Voorbeeld van CFD-model, overzicht en details (bron: Adviesburo Nieman)

5.2 Variabelen in veldmodellen

Veldmodellen vormen in dit onderzoek de basis voor vergelijking van zone modellen met de werkelijkheid. Hierdoor gelden voor het veld model dezelfde variabelen als voor het zone model. Vanuit paragraaf 4.4 betekent dit:

1. Het drukverschil tussen binnen en buiten.
2. De breedte van de gevelopening w_j .
3. De hoogte van de opening z .
4. De stromingscoëfficiënt C_d .
5. Het accumulerend vermogen van de wanden en vloer en/of plafond.
6. De geometrie van de ruimte.

In veldmodellen zijn meer variabelen mogelijk dan in zone modellen. Dit heeft te maken met de exactere benadering van de werkelijkheid met daarin ruimte voor lokale verschillen in massa, energie en impuls. In een veldmodel heeft bijvoorbeeld de horizontale positie van een gevelopening rechtstreeks voornamelijk invloed op het lokale verloop van de massastromen in de ruimte. Een veldmodel laat dan ook de gedetailleerde gevolgen zien in de ruimte ter vergelijking met een zone model welk de ruimte benaderd als één of twee homogene zone(s). Op macroscopisch niveau heeft de verticale positie van de gevelopening geen effect. Daarom is deze variabele als constante meegenomen in de berekeningen. Dit wil zeggen dat de breedte van de opening kan variëren, maar dat de positie in de breedte in FDS op één punt is vastgezet. Deze positie is het midden van de gevel om geen onnodige varianten te genereren. Een vergelijking tussen een zone model en de werkelijkheid zal immers zo eenvoudig mogelijk gaan wanneer er zo min mogelijk variabelen invloed kunnen hebben op het verschil.

5.3 Conclusie

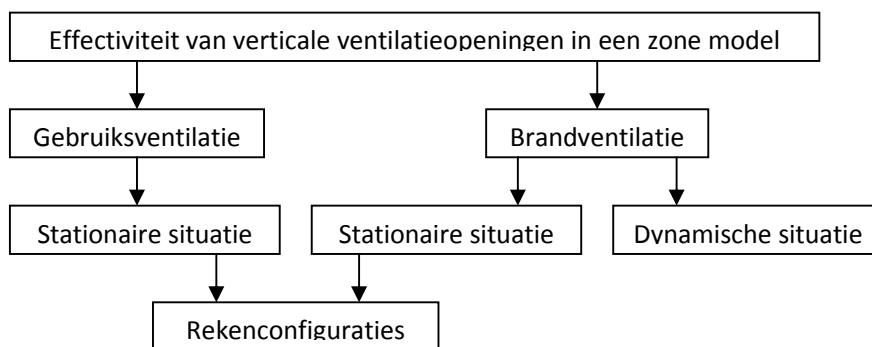
De onderzoeksvragen 2 en 3 zijn in hoofdstuk 4 en 5 opgedeeld in twee delen. In hoofdstuk 5 is het tweede deel van de onderzoeksvragen 2 en 3 beantwoord. In de eerste paragraaf is antwoordt gegeven hoe een zone model werkt. Veld modellen worden uitgewerkt met computerprogramma's gebaseerd op CFD vergelijkingen. Een voorbeeld van een CFD simulatieprogramma is FDS. Dit programma is gebaseerd op de eindige volume methode. Hierin wordt de hele ruimte opgedeeld in kleine volumecellen. Binnen elk van deze cellen worden de vergelijkingen opgelost voor massa, energie en impuls. Door deze volumecellen klein te houden wordt de werkelijkheid zo dicht mogelijk benaderd. Door het grote aantal cellen en tijdstappen waarbinnen elke cel doorgerekend moet worden, kost een berekening met behulp van een CFD-programma veel tijd.

In de tweede paragraaf zijn diverse variabelen opgesomd om tot een beter inzicht te komen hoe veld modellen omgaan met massastromen. Deze komen grotendeels overeen met de variabelen in een zone model. Met behulp van deze variabelen is in verschillende rekenconfiguraties gezocht naar de grootte van overschatting die zone modellen maken bij het berekenen van effectiviteit van verticale ventilatieopeningen ten opzichte van de werkelijkheid.

6 Rekenconfiguraties

6.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 en 5 zijn diverse variabelen benoemd die invloed hebben op zone modellen en veldmodellen. Aan de hand van deze variabelen zijn diverse rekenconfiguraties opgezet in CFAST en FDS/Pyrosim. Het doel van deze rekenconfiguraties is het beantwoorden van onderzoeksvraag 4 en 5. Met behulp van de rekenconfiguraties is gezocht naar hoeveel de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in zone modellen wordt overschat en hoe deze overschatting kan worden gecorrigeerd. Deze rekenconfiguraties zijn opgezet vanuit de twee ventilatiesituaties van dit onderzoek. De gebruikssituatie en brandsituatie zijn ventilatietechnisch op te delen in een stationaire en dynamische situatie. In dit onderzoek wordt echter in verband met de beperkte tijd gerekend met een stationaire brandventilatie. Bovendien vereenvoudigt deze beperking de vergelijking tussen zonemodellen en de werkelijkheid, waardoor een betrouwbaarder resultaat mogelijk is. Daarnaast maakt deze keuze het overbodig om de verschillende brandvermogencurves van diverse literaire bronnen tegen elkaar af te wegen⁶ of als extra variabele mee te nemen in de berekeningen. Deze keuze is schematisch weergegeven in figuur 6.1.



Figuur 6.1: Reken situaties

6.2 Bronvermogen

Voor twee ventilatiesituaties zijn twee verschillende bronnen nodig met een eigen vermogen en thermisch proces. Deze bron zorgt in beide ventilatiesituaties voor het opwarmend vermogen waardoor de natuurlijke ventilatie ontstaat. Zoals in voorgaande paragraaf is omschreven, is in dit onderzoek voor de brandventilatie uitgegaan van een stationaire situatie. Voor de berekeningen betekent deze vereenvoudiging in de brandsituatie een constant vermogen conform het maximale vermogen van ontwerpbrand CCP_RHR Design Fire I (9 MW) en niet met de totale brandvermogencurve (fluctuerend van 0MW tot 9MW). Deze 9 MW wordt continu afgegeven door middel van een Heat Release Rate (HRR) van 340 kW/m². Hierbij wordt dus uitgegaan van ongeveer 26,5m² wat overeenkomt met drie auto's. Deze HRR zorgt naast het opwarmen van de ruimte dat er een bron van rookdeeltjes ontstaat. Hiermee kan in de praktijk voor de brandsituatie de zichtlengte bepaald worden. Deze functie is overigens alleen van toepassing voor FDS. Een zone model zal immers geen lokale verschillen kunnen laten zien in de zichtlengte. In CFAST is gebruik gemaakt van een standaard bron van 9MW.

Voor de gebruiksventilatie is gebruik gemaakt van een bronvermogen van 19,5W/m². Deze bron is verspreid over het hele oppervlak van de garage en simuleert de afgegeven warmte van auto's. Deze schatting van het vermogen is bepaald aan de hand van de volgende aannames:

- Bezetting: per 25 m² staat één auto

⁶ In paragraaf 3.6 worden diverse brandvermogencurves benoemd van diverse brandproeven. Deze zijn door diverse toonaangevende marktpartijen aangenomen als uitgangspunten voor brandsituaties in parkeergarages. Momenteel is er echter geen brandvermogencurve van een autobrand vastgelegd in een definitieve norm of andere vorm van regelgeving.

⁷ In een ruimte van 1440m² is het totale bronvermogen van een autobrand 320 maal zo groot.

- Doorstroming: elke 6 uur worden alle auto's vernieuwd
- De gemiddelde auto heeft de volgende eigenschappen:
 - Het motorblok heeft een massa van 150 kg
 - Het motorblok bevat legeringen van aluminium en staal maar bevat ook rubbers etc. Daarom is de soortelijke warmte (c) van aluminium aangenomen: 880 J/kgK
 - Het motorblok wordt 90°C
- De auto koelt binnen de doorstromingstijd af naar de omgevingstemperatuur van 10°C
- Restwarmte van rondrijden in de garage is verwaarloosbaar ten opzichte van de afgegeven warmte bij stilstand.
- Restwarmte van overige onderdelen van de auto is gecompenseerd met het gewicht van het motorblok.

Dit bronvermogen van 19,5 W/m² wordt in de rekenconfiguraties afgegeven door een "Fixed Heat Flux". Dit wil zeggen dat het vermogen volledig doormiddel van convectie in de ruimte komt. In de bron worden dus geen rookdeeltjes afgegeven. Dit komt dan ook overeen met de gebruikssituatie.

6.3 Basis rekenconfiguratie, variant 0

Om de verschillende variabelen te toetsen op invloed op de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model is een basis rekenconfiguratie vereist. Deze configuratie is variant 0 waar later aanpassingen op zijn gemaakt. Variant 0 valt binnen de kaders van NEN 2443: 2000 "Parkeren en stallen van personenauto's op terreinen en in garages". Hieronder is puntsgewijs de eigenschappen van de basis rekenconfiguratie verantwoord. Een overzicht van deze variant en alle volgende andere varianten is bijgevoegd in bijlage 3.

Afmetingen ruimte

De afmetingen van de ruimte zijn afgeleid van praktijkomstandigheden. Bij ventilatieadviezen van parkeergarages is het gebruiksoppervlak standaard minimaal 1000m² in verband met de kaders van het Bouwbesluit 2003. Om te voldoen aan de randvoorwaarden van NEN 2443 is de afstand tussen de gevels met ventilatieopeningen niet groter dan 54 meter. Bovendien is de hoogte zo realistisch mogelijk aangenomen. De afmetingen van variant 0 zijn als volgt:

- Breedte: 48 meter
- Diepte: 30 meter
- Hoogte: 2,4 meter

Bovengenoemde afmetingen resulteren in een bruto gebruiksoppervlak van 1440m². In de praktijk komen parkeergarages voor die meer dan 10 keer zo groot zijn. Voor dit onderzoek zijn zulke afmetingen niet haalbaar, omdat deze een te lange rekentijd vereisen.

In parkeergarages is voor de hoofddraagconstructie een kolommenstructuur gebruikelijk. In verband met de vereenvoudiging van zone modellen wordt deze structuur niet mee genomen in de modellering van de ruimte. Dit resulteert in een eenvoudige, lege doosvorm.

Afmetingen verticale ventilatieopeningen

Om te voldoen aan NEN 2443 zijn twee tegenover elkaar liggende gevels voorzien van ventilatieopeningen die elk groter is dan 2,5% van het bruto oppervlak. De ventilatieopeningen zijn horizontaal exact in het midden van de gevel geplaatst. De afmetingen van elk van de ventilatieopeningen zijn:

- Hoogte onderkant: 0,9 meter
- Hoogte bovenkant: 2,4 meter
- Breedte: 42 meter

Bovengenoemde afmetingen resulteren per ventilatieopening in een oppervlak van 63m². Door deze toe te passen in twee tegenover elkaar liggende gevels is het totale oppervlak aan verticale ventilatieopeningen in de ruimte 126m².

Accumulerend vermogen

In parkeergarages wordt in veel gevallen gebruik gemaakt van betonnen vloeren, wanden en verdiepingsvloeren. Door het accumulerend vermogen van dergelijke betonnen constructies zou dit invloed hebben op de gehele berekening. Omdat dit een extra variabel zou kunnen zijn die invloed heeft op de verschillen tussen zone modellen en de werkelijkheid, is er adiabatisch gerekend. Dit houdt in dat de wanden, vloer en verdiepingsvloer wel de afmetingen hebben, maar geen massa, energie of impuls kunnen absorberen of doorgeven.

Omgevingsvariabelen

Zoals gesteld in paragraaf 3.2 zijn de berekeningen doorgerekend met windstil weer. Hierdoor ontstaat met name in de brand situatie een worst case scenario. In de praktijk zal een drukverschil van buiten namelijk zorgen voor extra doorspoeling van de ruimte. Zonder wind zal de ventilatie alleen ontstaan door de opwarming van de ruimte.

De omgevingstemperatuur is in zowel de gebruiks als brand situatie vastgesteld op 10°C. Deze temperatuur is redelijk aannemelijk voor het jaarlijks gemiddelde temperatuur in Nederland. Overigens is deze temperatuur vooral van invloed op de gebruiksventilatie en minder van belang voor de brandventilatie. Bij laatst genoemde zal immers een paar graden meer of minder een relatief kleine impact hebben op de ventilatie. Door de hoge temperaturen vallen een paar graden verschil van de omgevingstemperatuur in het niet. In de gebruiks situatie zal een hogere temperatuur leiden tot een sneller evenwicht in de massastromen en dus eerder leiden tot een stationaire situatie.

Nummering berekeningen

In de berekeningen zijn de twee hoofdsituaties aangegeven met een nummer 6 en 7. Nummer 6 staat voor de gebruikssituatie en nummer 7 voor de brandsituatie. Hier aangekoppeld is het varianten nummer, dus 6_0 is bovenstaande variant in de gebruikssituatie en 7_0 voor de zelfde configuratie, maar dan een autobrand als bronvermogen. Berekeningnummers voor nummer 6 zijn tijdens het onderzoek gebruikt voor proefberekeningen en niet geschikt voor resultaten. Tijdens eerdere rekennummers is bijvoorbeeld geëxperimenteerd met de werking van CFAST en FDS en hoe het beste resultaat uit de berekeningen verkregen kon worden.

6.4 Varianten 1 t/m 8

In hoofdstuk 4 en 5 zijn variabelen benoemd die invloed hebben op de massastromen van een zone model. Dat zijn de volgende variabelen:

1. *Het drukverschil tussen binnen en buiten.*
 2. *De breedte van de gevelopening w_j .*
 3. *De hoogte van de opening z .*
 4. *De stromingscoëfficiënt C_d .*
 5. *Het accumulerend vermogen van de wanden en vloer en/of plafond.*
 6. *De geometrie van de ruimte.*
-
1. Het druk verschil tussen binnen en buiten wordt veroorzaakt door de warmtebron in de ruimte. Deze bron is per situatie vastgelegd in de rekennummers 6 en 7. Elke variant is dus doorgerekend voor beide situaties.
 2. De breedte van de gevelopening is zoals gesteld in paragraaf 5.2 vastgesteld op een vaste breedte en positie in de gevel ten opzichte van de breedte van de gevel. Deze breedte is de breedte van de gevel verminderd met 3 meter aan beide zijden van de opening. Hiermee wordt dus niet afgeweken van de basisvariant. De gevel in variant 0 is 48 meter en de ventilatieopening is 42 meter breed.
 3. De hoogte van de opening is gevarieerd in variant 1 t/m 8. Dit is hieronder verantwoord.
 4. Het stromingscoëfficiënt C_d is in CFAST een vaste waarde die niet veranderd kan worden. FDS berekent deze variabele zelf aan de hand van de afmetingen van de gevelopening.

5. Het accumulerend vermogen van de wanden en vloer en/of plafond is uitgeschakeld door adiabatisch te rekenen. Dit heeft als voordeel dat de ventilatie-efficiëntie berekend kan worden aan de hand van de temperatuur.
6. De geometrie van de ruimte is onder te verdelen in twee variabelen. De breedte, diepte en hoogte zijn in variant 1 t/m 8 gelijk gebleven. Daarentegen verandert in deze varianten de oriëntatie van de gevelopeningen wel. Dit is hieronder verantwoord.

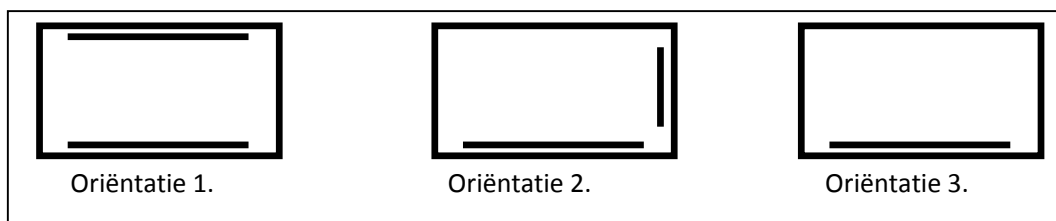
Afmetingen en oriëntatie verticale ventilatieopeningen

Om tot een goed onderzoek naar de variabelen te komen is een gedegen vergelijking van belang. Per variant is één variabele aangepast. Deze variabelen zijn de hoogte van de ventilatieopening en de oriëntatie van de opening. Van beide variabelen zijn 3 varianten onderzocht. Door de kruising van de twee variabelen ontstaan 9 varianten.

De 3 varianten in de oriëntatie van de ventilatieopening zijn:

1. Twee tegenover elkaar liggende gevelopeningen aan de twee langste zijden van de ruimte
2. Twee haaks op elkaar liggende gevelopeningen
3. Één gevelopening aan de langste zijde van de ruimte

De 3 varianten met verschillende oriëntatie van de verticale gevelopeningen zijn schematisch weergegeven in figuur 6.2. Deze weergave is ook gebruikt in bijlage 3.

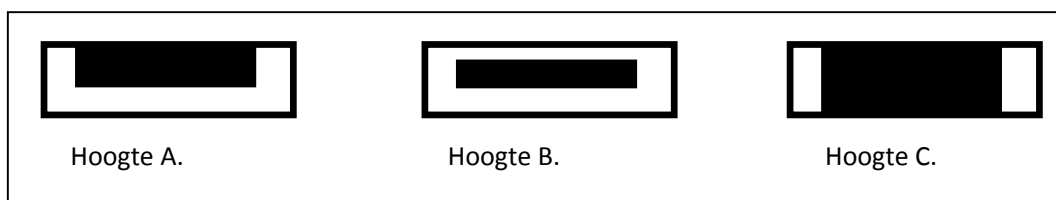


Figuur 6.2: Rekenvarianten, 3 oriëntaties

De 3 varianten in de hoogte van de ventilatieopening zijn:

- A. Hoogte onderkant: 0,9 meter en hoogte bovenkant: 2,4 meter, totale hoogte: 1,5 meter
- B. Hoogte onderkant: 0,9 meter en hoogte bovenkant: 1,8 meter, totale hoogte: 0,9 meter
- C. Hoogte onderkant: 0,0 meter en hoogte bovenkant: 2,4 meter, totale hoogte: 2,4 meter

De 3 varianten met verschillende hoogte van de verticale gevelopeningen zijn schematisch weergegeven in figuur 6.3. Deze weergave is ook gebruikt in bijlage 3.



Figuur 6.3: Rekenvarianten, 3 hoogtes

De 3 oriëntatie van verticale ventilatie openingen en de 3 verschillende hoogtes resulteren in 9 varianten. Een overzicht hiervan is terug te vinden in tabel 6.1. Bovendien is in bijlage 3 een uitklapblad toegevoegd waar deze varianten schematisch zijn weergegeven.

Overzicht rekenvarianten		
Variant	Oriëntatie	Hoogte
0	1.	A.
1	1.	B.
2	1.	C.
3	2.	A.
4	2.	B.
5	2.	C.
6	3.	A.
7	3.	B.
8	3.	C.

Tabel 6.1: Overzicht rekenvarianten 0 t/m 8

6.5 Variant 9, 10 en 11

Diepte van de ruimte

In de varianten 0 t/m 8 zijn bijna alle variabelen vertegenwoordigd die als inputgegeven van een berekening dienen. De laatste variabele (6.) is echter maar deels mee genomen. De geometrie van de ruimte beïnvloedt de ventilatie van een ruimte ook door de afmetingen van vloeren en gevels. Daarom is variant 9 opgezet. In variant 9 is alleen de diepte van variant 0 aangepast tot 45 meter in plaats van 30 meter. Overige eigenschappen van variant 9, zoals oriëntatie en afmetingen van ventilatieopeningen en de hoogte van de ruimte, zijn gelijk gebleven aan variant 0.

Door variant 9 kan in FDS tevens de indringdiepte worden bepaald van de ventilatie ten opzicht van de basisvariant. In het zone model programma CFAST kan dit niet door het feit dat een zone model rekent met twee homogeen opgemengde zones. Het lokale effect kan dus niet worden onderzocht met behulp van CFAST.

Nauwkeurigheid FDS

Bij Adviesburo Nieman worden FDS berekeningen standaard gemaakt met meshes opgebouwd uit cellen van 0,3 x 0,3 x 0,3 meter. Wanneer de situatie daar specifiek om vraagt wordt wel gebruik gemaakt van een kleiner rekenraster, maar dit heeft tot nadeel dat de rekentijden langer worden. Dit wordt gedaan bij zowel mechanisch geventileerde garages als natuurlijk geventileerde garages. Wanneer voor een kleiner rastergrootte wordt gekozen is de nauwkeurigheid van de berekening veel groter, maar zijn de rekentijden vele malen groter. Bovendien nemen de berekeningen dan vele malen meer schijfruimte in beslag. Om deze reden is variant voor maar eenmaal doorgerekend met een kleiner grid. Voor variant 10 is variant 0 als uitgangspunt genomen, maar dan doorgerekend met meshes opgebouwd uit cellen van 0,15 x 0,15 x 0,15 meter. De afmetingen van de cellen zijn dus half zo groot, maar het totale aantal cellen in het model is 8 keer zo groot. Hierdoor is de rekentijd dusdanig lang dat deze celgrote niet voor alle varianten is doorgerekend.

Ventilatie efficiëntie

Om de ventilatie efficiëntie te berekenen is een variant 11 opgesteld. Deze variant komt volledig overeen met de basis variant 0. In deze variant voor zowel de gebruiks- als brandsituatie is de bron echter na 1800 seconden stop gezet. Doormiddel van de tijd die het kost om de gemiddelde temperatuur in de ruimte terug te brengen op de helft van het totale temperatuurverschil is de efficiëntie bepaald. De efficiëntie van andere varianten is niet bepaald in verband met de afstudeerperiode.

7 Rekenresultaten

7.1 Inleiding

In hoofdstuk 6 zijn twaalf varianten (0 t/m 11) beschreven die voor zowel de gebruikssituatie als de brandsituatie zijn doorgerekend. Deze varianten zijn doorgerekend met CFAST en FDS (respectievelijk 6 en 7 genummerd). Uitzondering hierop is variant 10. De CFAST resultaten van variant 10 zijn overgenomen van de basis variant 0.

Met behulp van de resultaten is onderzoeksvraag 4 beantwoordt. De resultaten zijn onderverdeeld in de massastromen, temperatuur en ventilatie-efficiëntie die allemaal bijdragen aan het antwoord op de vraag "Hoeveel wordt de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model overschat?". Voor elk type resultaat is een vergelijking gemaakt tussen de uitkomsten van het zone model en de uitkomsten van het veldmodel. Voor elke type vergelijking is een bijlage opgesteld met grafieken van bijbehorende outputgegevens en simulatiemodel. Hieronder worden alle type vergelijkingen en resultaten beschreven.

7.2 Massastromen

In tabel 7.1 is een overzicht weergegeven van de massastromen die ter plaatse van de gevelopeningen van de verschillende varianten ontstaan. De bijbehorende grafieken zijn opgenomen in bijlage 1.

Deze massastromen zijn een gemiddelde over een rekentijd van 900 seconden tot 3600 seconden. De totale rekentijd van elk variant is namelijk 3600 seconden en het evenwichtsmoment (het moment waar het model stationair gaat rekenen) is bij alle varianten maximaal na 900 seconden. De varianten met uitkomsten die de probleemstelling onderbouwen zijn **rood** gemarkeerd.

Totale massastromen ter plaatse van verticale ventilatieopeningen [kg/s]			
Variant	CFAST (CF _o)	FDS (F _o)	Vershil
6_0	12,96	15,11	-2,15
6_1	7,87	9,50	-1,63
6_2	20,70	19,01	1,69
6_3	11,05	12,58	-1,53
6_4	6,67	7,86	-1,19
6_5	17,66	16,01	1,65
6_6	8,19	9,06	-0,87
6_7	9,72	5,51	4,21
6_8	26,23	11,57	14,66
6_9	11,45	16,96	-5,51
6_10	12,96	12,58	0,38
7_0	37,08	92,79	-55,71
7_1	21,23	58,52	-37,29
7_2	59,90	108,10	-48,20
7_3	31,29	75,36	-44,07
7_4	17,90	46,99	-29,09
7_5	50,63	88,06	-37,43
7_6	45,45	52,49	-7,04
7_7	25,86	34,14	-8,28
7_8	73,88	59,26	14,62
7_9	37,08	94,63	-57,55
7_10	37,08	57,92	-20,84

Tabel 7.1: Totale massastromen

Uit de massastromen in tabel 7.1 lijkt de probleemstelling niet voor alle varianten onderbouwd. Er zou immers verwacht kunnen worden dat wanneer het effect van ventilatieopeningen in een zone model worden overschat, dat de massastromen van een zone model groter zouden zijn dan de massastromen van een veldmodel. Massastromen zijn echter niet het enige effect van ventilatieopeningen. De temperatuur in de ruimte is minstens zo belangrijk, of wellicht zelfs belangrijker. De ventilatie is immers aanwezig om de warmte in de ruimte af te voeren. Daarom wordt in de volgende paragraaf ingegaan op de ontstane gemiddelde temperaturen in de garage.

Uit tabel 7.1 zijn echter wel enkele conclusies te trekken over het effect van de oriëntatie en grootte van de ventilatieopeningen. Deze zijn als volgt:

- Bij een gevelopening ter grootte van de verdiepingshoogte genereert een zone model grotere massastromen ten opzicht van een veldmodel. Dit betekent dat een opening waarvan de bovenzijde hoog ligt een gunstiger resultaat oplevert in een zonemodel dan een veldmodel.
- Wanneer er slechts één ventilatieopening is zal een zone model in verhouding met een veld model grotere massastromen genereren dan wanneer er meerdere ventilatieopeningen aanwezig zijn.
- Wanneer er slechts één ventilatieopening aanwezig is in het model genereert deze in verhouding veel grotere massastromen dan de ventilatieopeningen in varianten met twee ventilatieopeningen.
- Wanneer voor een kleiner grid wordt gekozen in het veldmodel, zijn de verschillen tussen zone en veld modellen kleiner. Dit heeft te maken met het aantal cellen in de ventilatieopening. Wanneer het aantal cellen klein is, kan de contractie van de luchtstromen bij natuurlijk geventileerde garages veel te gunstig worden meegenomen.
- CFAST genereert in de gebruikssituatie bij een grotere garage minder ventilatie dan bij een kleinere garage. Hoewel de warmteproductie dus groter is, is de massastroom niet groter. In FDS levert het verschil in grootte van de garage een naar verhouding minder groot verschil in massastromen, maar levert bij een grotere garage, dus groter bronvermogen, wel grotere massastromen op. Wanneer deze trend wordt uitgezet naar kleinere ruimtes zal CFAST vermoedelijk positievere resultaten geven dan FDS.

7.3 Temperatuur

In tabel 7.2 is een overzicht weergegeven van de gemiddelde temperatuur en maximale temperatuur in de verschillende varianten. De bijbehorende grafieken zijn opgenomen in bijlage 2. De varianten met uitkomsten die de probleemstelling onderbouwen zijn **rood** gemarkeerd. Opnieuw zijn de temperaturen een gemiddelde over een tijd van 900 tot 3600 seconden.

Temperatuur in de garage [°C]					
Variant	CFAST (CF ₋)	FDS (F ₋)		Verschil	
	Gemiddeld	Gemiddeld	Maximaal	Gemiddeld	Maximaal
6_0	13,71	12,18	12,69	-1,53	-1,02
6_1	38,37	13,06	13,43	-25,31	-24,94
6_2	12,78	11,55	11,80	-1,23	-0,98
6_3	14,37	11,64	12,59	-2,73	-1,78
6_4	39,20	12,62	13,32	-26,58	-25,88
6_5	13,27	11,23	12,34	-2,04	-0,93
6_6	15,92	13,08	14,02	-2,84	-1,90
6_7	41,07	14,24	15,11	-26,83	-25,96
6_8	14,44	12,21	13,19	-2,23	-1,25
6_9	12,83	12,67	13,34	-0,16	0,51
6_10	13,71	12,11	12,62	-1,60	-1,09
7_0	57,79	89,71	185,79	31,92	128,00
7_1	184,19	163,06	238,17	-21,13	53,98
7_2	48,12	76,74	176,26	28,62	128,14

Temperatuur in de garage [°C]					
Variant	CFAST (CF ₋)	FDS (F ₋)		Verschil	
	Gemiddeld	Gemiddeld	Maximaal	Gemiddeld	Maximaal
7_3	66,29	100,72	236,63	34,43	170,34
7_4	195,31	173,82	291,99	-21,49	96,68
7_5	54,66	85,47	223,51	30,81	168,85
7_6	87,00	139,18	272,24	52,18	185,24
7_7	222,98	240,47	341,12	17,49	118,14
7_8	70,32	110,52	244,77	40,20	174,45
7_9	57,79	87,92	189,72	30,13	131,93
7_10	57,79	91,28	213,51	33,49	155,72

Tabel 7.2: Temperatuur in de garage

Bij de maximale temperatuur in tabel 7.2 moet wel een opmerking worden geplaatst. De maximale temperatuur is hier de maximale gemiddelde temperatuur. Het gemiddelde is berekend over de volledige breedte van de garage op een verticale lijn zonder dikte. De meetlijn heeft geen dikte omdat het op het rekenraster ligt. De getoonde maximale temperaturen liggen dus lager dan de werkelijke, lokale maximale temperatuur in de ruimte. Wanneer op maximale temperatuur wordt geanticipeerd zou er rekening moeten worden gehouden met hogere temperaturen. In dit onderzoek wordt echter niet gekeken naar het lokale effect, maar naar de hele ruimte en dus is met name de gemiddelde temperatuur van belang. Hierbij dient echter wel in het achterhoofd te worden gehouden dat er lokaal hogere temperaturen zullen optreden.

De gemiddelde temperaturen zijn bij de varianten 1, 4 en 7 in het zone model zijn zo hoog, omdat de dikte van de warme zone daar groot is. De warme zone reikt in alle varianten tot de bovenzijde van de gevelopening. Voor de vergelijking tussen FDS en CFAST zouden de gegevens van alleen de koude zone een positiever resultaat leveren.

Uit tabel 7.2 zijn diverse conclusies te trekken. Hieronder worden ze opgesomd.

- De veronderstelde overschatting van de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model zijn alleen van toepassing in de brandsituatie. In de gebruikssituatie komen de temperaturen in het zone model naar verhouding redelijk overeen met de temperaturen in het veld model. Overigens kan dit verschil ook komen door het toepassingsgebied van het gebruikte simulatieprogramma op basis van een zone model (CFAST). Het is mogelijk dat CFAST niet geschikt is voor het rekenen met een beperkt temperatuurverschil. Het simulatieprogramma is dan ook oorspronkelijk bedoeld om luchtstromen in de brandsituatie te modelleren.
- De gemiddelde temperatuur in een zone model is ongeveer 35% lager dan de gemiddelde temperatuur in een veldmodel. De maximale temperatuur is ongeveer het 4-voudige hiervan. Deze conclusie is alleen van toepassing op de brandsituatie én wanneer de ventilatieopening doorloopt tot de onderkant van het dak. Dit percentage moet echter wel gerelativeerd worden, omdat het is afgezet tegen nulpunt van 0°C. Wanneer het de vergelijking wordt uitgezet tegen het absolute nulpunt (0 K) is het percentage veel lager. Met de genoemde kwantificatie van het verschil dient dus voorzichtig omgegaan te worden.
- Uit bovenstaande conclusie kan mogelijk worden afgeleid dat het gebruikte simulatieprogramma op basis van een zone model (CFAST) niet geschikt is voor de gebruiksventilatie, omdat daarbij slechts kleine temperatuurverschillen optreden. Bovendien blijft het programma rekenen met twee zones, waardoor tegen het plafond een warme zone ontstaat. Hierdoor is het noodzakelijk de ventilatieopening tegen het plafond te plaatsen, anders wordt de effectiviteit van de verticale ventilatieopeningen in het zone model onderschat.
- Wanneer wordt gerekend met een kleiner grid wordt het verschil tussen de gemiddelde temperatuur in het zone model en veldmodel ongeveer 5% groter. Wanneer deze vergelijking wordt gesteld voor de maximale temperatuur is het verschil ongeveer 20% groter. Hierbij dient dus nog rekening te

worden gehouden met het vertekende beeld van de maximale temperatuur. In werkelijkheid zal de maximale temperatuur nog hoger liggen en zal het verschil mogelijk ook nog groter kunnen zijn.

- De gemiddelde temperatuur bij de varianten met één ventilatieopening of twee ventilatieopeningen haaks op elkaar is in het veld model lokaal zeer hoog. In FDS is het verschil tussen de gemiddelde temperatuur en de maximale temperatuur zeker bij de brandsituatie zeer groot. Dit lokale effect zal het zone model niet weergeven.

7.4 Ventilatie efficiëntie

De ventilatie efficiëntie is onderdeel van het effect van verticale ventilatie openingen. In dit onderzoek is variant 11 doorgerekend om de ventilatie efficiëntie te bepalen. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 7.3.

Ventilatie efficiëntie η		
Berekening	CFAST	FDS
6_11_gebruiksventilatie	0,15	0,59
7_11_brandventilatie	0,06	0,10

Tabel 7.3: Ventilatie efficiëntie

Uit tabel 7.3 blijkt dat ventilatie efficiëntie in CFAST zeer laag is. FDS geeft iets hogere ventilatie efficiëntie aan dan CFAST, maar wijkt in de brandsituatie, de situatie die uit de overige meetgegevens de meest betrouwbaarste lijkt te zijn, niet veel af. Overigens dient bij beide waarden rekening te worden gehouden met een klein vertekend beeld door de rekenmethode. In de rekenmethode is de efficiëntie bepaald over 1800 seconden, terwijl de ventilatie efficiëntie eigenlijk bepaald moet worden over een veel langere tijd. Hierdoor is de efficiëntie in de praktijk nog lager. Opvallend is dat ondanks de inmenging van koude lucht, de temperatuur van de koude zone vrijwel niet daalt. Hierdoor ontstaat de ongunstige ventilatie-efficiëntie waarvan verwacht mag worden dat deze in de buurt van 0,5 zou liggen. Bij een volledig opgemengde zone mag je er van worden uitgaan dat deze efficiëntie op 0,5 zit. CFAST kan helaas niet rekenen met één zone.

7.5 Conclusie

In voorgaande paragrafen zijn diverse tussenconclusies verwoord. Dit hoofdstuk heeft echter als hoofddoel om onderzoeksvraag 4 te beantwoorden. Onderzoeksvraag 4 is feitelijk het eerste deel van de hoofdvraag en luidt: "Hoeveel wordt de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model overschat?". Op deze vraag is alleen antwoordt verkregen voor de brandsituatie. Op basis van de gemiddelde temperatuur in de ruimte kan dit worden vastgesteld op gemiddeld 35%. Dit percentage moet echter wel gerelativeerd worden, omdat het is afgezet tegen nulpunt van 0°C. Wanneer het de vergelijking wordt uitgezet tegen het absolute nulpunt (0 K) is het percentage veel lager. Met de genoemde kwantificatie van het verschil dient dus voorzichtig omgegaan te worden. Om antwoordt te krijgen voor de effectiviteit in de gebruikssituatie is een vervolgonderzoek nodig. Dit is nader omschreven in de aanbevelingen.

8 Correctiefactor

8.1 Inleiding

In hoofdstuk 7 is gebleken dat de gemiddelde temperatuur in een zone model lager ligt dan de gemiddelde temperatuur in een veld model. Deze bevingen zijn alleen gedaan in de brandsituatie. Om dit verschil te corrigeren is in dit hoofdstuk onderzocht hoe het zone model aangepast kan worden om tot een gelijke gemiddelde temperatuur te komen. De eenvoudigste manier om het zone model aan te passen is door de afmetingen van de ventilatie openingen aan te passen. In de praktijk is dit ook het eerste wat veranderd zal kunnen worden in ontwerp van een parkeergarage. Hiermee wordt tevens de laatste onderzoeksvraag beantwoordt. De laatste onderzoeksvraag luidt namelijk: Hoe kan de overschatting van verticale ventilatieopeningen in een zone model worden gecorrigeerd?

8.2 Aanpassingen gevelopeningen in de breedte

Wanneer de breedte van de ventilatieopening in het zone model worden verkleind ontstaat een hogere gemiddelde temperatuur. Wanneer de ventilatie openingen echter niet tegen het plafond zijn gelegen is het in CFAST beter om de openingen eerst tegen het plafond aan te modelleren. Dit komt doordat CFAST niet over gaat op één zone. In tabel 8.1 zijn de aangepaste breedtes en eventuele verticale verplaatsing aangegeven die noodzakelijk zijn om de gemiddelde temperatuur in het zone model overeen te stemmen met de gemiddelde temperaturen in het veld model dat de werkelijkheid beter benaderd. De aanpassingen zijn omschreven per gevel. Het eerste getal staat voor opening 1 en het tweede getal staat voor opening 2 zoals aangeduid in bijlage 3.

Aanpassingen gevelopeningen (m)					
Variant	Oorspronkelijke grootte	Nieuwe breedte		Hoogte verplaatsen	
	Breedte	Exact	Percentage	Exact	Percentage
7_0	42, 42	21, 21	50, 50	0	0
7_1	42, 42	21, 21	50, 50	+0,9	38
7_2	42, 42	18, 18	43, 43	0	0
7_3	42, 24	24, 10	57, 42	0	0
7_4	42, 24	32, 12	76, 50	+0,9	38
7_5	42, 24	20, 10	47, 50	0	0
7_6	42, 00	20, 00	47, 00	0	0
7_7	42, 00	34, 00	81, 00	0	0
7_8	42, 00	20, 00	47, 00	0	0
7_9	42, 42	21, 21	50, 50	0	0
7_10	42, 42	21, 21	50, 50	0	0

Tabel 8.1: Aanpassingen in breedte van gevelopeningen

Uit tabel 8.1 blijkt dat de gemiddelde temperatuur in een zone model gelijk komt aan de gemiddelde temperatuur in een veld model, wanneer de ventilatie opening ongeveer 50 procent smaller wordt gemaakt. Voorwaarde hiervan is wel dat het zone model rekent met twee zones en dat de ventilatieberekening gaat over een stationair brandvermogen van 9 MW in een adiabatische omgeving met alleen natuurlijke ventilatie. Deze voorwaarden komen echter in de praktijk niet voor. Om meer raakvlak te krijgen met de praktijk zal dus een vervolg onderzoek nodig zijn. Hier wordt nader op ingegaan in de aanbevelingen. Ondanks deze voorwaarden geven de aanpassingen wel een goed beeld over de werking van een zone model.

8.3 Aanpassingen gevelopeningen in de hoogte

In de praktijk kan de breedte van de ventilatie opening modeltechnisch niet altijd verkleind worden. Daarom is tevens naar een aangepaste hoogte van de ventilatie opening onderzocht. In tabel 8.2 zijn de aangepaste hoogtes aangegeven die noodzakelijk om de gemiddelde temperatuur in het zone model overeen te stemmen met de gemiddelde temperatuur in het veld model. De nieuwe hoogte wordt behaald door de onderkant van de opening naar boven te verplaatsen. De bovenkant van de opening blijft in basis gelijk, tenzij in de laatste kolom staat vermeldt dat ventilatieopening is verplaatst in de hoogte.

Aanpassingen gevelopeningen (m)					
Variant	Oorspronkelijke grootte	Nieuwe hoogte		Verplaatsen in hoogte	
	Hoogte	Exact	Percentage	Exact	Percentage
7_0	1,5	0,75	50	0	0
7_1	0,9	0,40	44	+0,9	38
7_2	2,4	1,5	63	0	0
7_3	1,5	0,75	50	0	0
7_4	0,9	0,40	44	+0,9	38
7_5	2,4	0,95	40	0	0
7_6	1,5	0,95	40	0	0
7_7	0,9	0,75	83	0	0
7_8	2,4	1,05	44	0	0
7_9	1,5	0,75	50	0	0
7_10	1,5	0,75	50	0	0

Tabel 8.2: Aanpassingen in hoogte van gevelopeningen

Uit tabel 8.2 blijkt dat de gemiddelde temperatuur in een zone model gelijk komt aan de gemiddelde temperatuur in een veld model, wanneer de ventilatie opening ongeveer 50 procent minder hoog wordt gemaakt. Voorwaarde hiervan is wel dat het zone model rekent met twee zones en dat de ventilatieberekening gaat over een stationair brandvermogen van 9 MW in een adiabatische omgeving met alleen natuurlijke ventilatie.

8.4 Conclusie

In dit hoofdstuk is antwoord gevonden op de laatste deelvraag "Hoe kan de overschatting van verticale ventilatieopeningen in een zone model worden gecorrigeerd?"

De overschatting is gevonden in de brandsituatie van de twaalf opgestelde varianten. Deze overschatting is te vinden in de gemiddelde temperatuur in het zone model ten opzichte van het veld model. Dit verschil kan verholpen worden door de hoogte of breedte aan te passen met ongeveer 50 procent. Voorwaarde hiervan is wel dat het zone model rekent met twee zones en dat de ventilatieberekening gaat over een stationair brandvermogen van 9 MW in een adiabatische omgeving met alleen natuurlijke ventilatie. Deze voorwaarden komen echter in de praktijk niet voor. Om meer raakvlak te krijgen met de praktijk zal dus een vervolg onderzoek nodig zijn. Ondanks deze voorwaarden geven de aanpassingen wel een goed beeld over de werking van een zone model.

9 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de onderzoeksvragen beantwoord zoals die zijn opgesteld in paragraaf 2.4.

9.1 *Hoe werkt natuurlijke ventilatie ten tijde van gebruiksventilatie en brandventilatie?*

Natuurlijke ventilatie ontstaat in zowel de gebruiks situatie als brand situatie door het drukverschil ten gevolge van temperatuurverschil tussen binnen en buiten. In werkelijkheid heeft de wind invloed op de ventilatie van een ruimte, maar in dit onderzoek wordt hier geen rekening mee gehouden. Windstil weer zal namelijk het worst case scenario zijn voor brand- en gebruiksventilatie.

Het temperatuurverschil ontstaat in beide situaties door een warmtebron. In de gebruikssituatie is dit het afkoelen van auto's die de garage inkomen en van de warme uitlaatgassen. In de brandsituatie is de warmtebron een autobrand. Door het temperatuurverloop van beide bronnen zijn de ventilatietypen verschillend. Gebruiksventilatie is vrijwel stationair en een brandventilatie is dynamisch.

9.2 *Hoe werken zone modellen en veldmodellen?*

In een zone model worden één of twee zones verondersteld waarbinnen de behoudswetten van energie en massa worden opgelost. Hierbij wordt een zone als homogeen gemengd beschouwd. Homogeen gemengd betekent een uniforme temperatuur en dichtheid binnen een zone. In werkelijkheid zijn deze parameters niet constant over de gehele zone (bijv. temperatuur in rooklaag is hoger dichterbij de brandhaard), maar om de macroscopische eigenschappen in de brandruimte gedurende de brandontwikkeling te kunnen beschrijven volstaat deze aanname.

Veld modellen worden uitgewerkt met computerprogramma's gebaseerd op CFD vergelijkingen. Een voorbeeld van een CFD simulatieprogramma is FDS. Dit programma is gebaseerd op de eindige volume methode. Hierin wordt de hele ruimte opgedeeld in kleine volumecellen. Binnen elk van deze cellen worden per tijdstap de vergelijkingen opgelost voor massa, energie en impuls. De uitkomst van elke cel wordt per tijdstap doorgegeven aan naastgelegen cellen waardoor het resultaat van de vergelijking afhankelijk is van de locatie van de cel en het tijdstip in de berekening. Door deze volumecellen klein te houden wordt de werkelijkheid zo dicht mogelijk benaderd. Door het grote aantal cellen en tijdstappen waarbinnen elke cel doorgerekend moet worden, kost een berekening met behulp van een CFD-programma veel tijd.

9.3 *Op welke variabelen van een zone model kan worden ingespeeld om een betere benadering van de werkelijkheid te realiseren?*

Om de werkelijkheid beter te benaderen met een zone model kan er worden ingespeeld op de volgende 6 variabelen:

1. *Het drukverschil tussen binnen en buiten.* De grootte hiervan is afhankelijk van het temperatuurverschil dat ontstaat door een autobrand of het gebruik van de garage. In de vergelijkingen is deze invloed tot de macht $\frac{1}{2}$ kleiner dan de overige variabelen.
2. *De breedte van de gevelopening w_j .* Deze heeft een rechtevenredige invloed op de massastromen in het zone model.
3. *De hoogte van de opening z .* In de vergelijkingen heeft deze door de wortelfunctie tot de macht $\frac{1}{2}$ kleinere invloed dan de overige variabelen.
4. *De stromingscoëfficiënt C_d .* Deze variabele is afhankelijk van de verhouding van de afmetingen van de opening tot de afmetingen van de scheidingsconstructie waarin de opening zich bevindt. In deze factor is dus opnieuw de breedte van de gevelopening verwerkt. Bovendien ligt hier een verband met de voorwaarden van NEN 2443; wanneer aan deze norm wordt voldaan zal de C_d rond de waarde van 0,6 tot 0,8 liggen, omdat voor het voldoen aan deze norm een groot percentage gevelopening nodig is.

5. *Het accumulerend vermogen van de wanden en vloer en/of plafond.* Wanneer deze groot is zullen deze vlakken de stijging en daling van de massastroom vertragen. De gebruikte materialen in de ruimte zullen immers als buffer kunnen functioneren die zowel bij opwarming als afkoeling van de ruimte het proces vertragen door warmte op te nemen en af te staan aan de omgeving.
6. *De geometrie van de ruimte.* De afmetingen van vloeren, wanden en openingen hebben invloed op verschillende variabelen uit de vergelijkingen.

9.4 Hoeveel wordt de effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model overschat?

Op deze vraag is alleen antwoordt verkregen voor de brandsituatie. Op basis van de gemiddelde temperatuur in de ruimte kan dit worden vastgesteld op gemiddeld 35%. Dit percentage moet echter wel gerelativeerd worden, omdat het is afgezet tegen nulpunt van 0°C. Wanneer het de vergelijking wordt uitgezet tegen het absolute nulpunt (0 K) is het percentage veel lager. Met de genoemde kwantificatie van het verschil dient dus voorzichtig omgegaan te worden. Om antwoordt te krijgen voor de effectiviteit in de gebruikssituatie is een vervolgonderzoek nodig. Dit is nader omschreven in de aanbevelingen.

9.5 Hoe kan de overschatting van verticale ventilatieopeningen in een zone model worden gecorrigeerd?

De overschatting is gevonden in de brandsituatie van de twaalf opgestelde varianten. Deze overschatting is te vinden in de gemiddelde temperatuur in het zone model ten opzichte van het veld model. Dit verschil kan verholpen worden door de hoogte of breedte aan te passen met ongeveer 50 procent. Voorwaarde hiervan is wel dat het zone model rekent met twee zones en dat de ventilatieberekening gaat over een stationair brandvermogen van 9 MW in een adiabatische omgeving met alleen natuurlijke ventilatie. Deze voorwaarden komen echter in de praktijk niet voor. Om meer raakvlak te krijgen met de praktijk zal dus een vervolg onderzoek nodig zijn. Ondanks deze voorwaarden geven de aanpassingen wel een goed beeld over de werking van een zone model en een indicatie welke maatregelen getroffen moeten worden om de overschatting van het effect van verticale ventilatie openingen in een zone model te corrigeren.

10 Aanbevelingen

Uit het onderzoek blijkt dat op basis van de gemiddelde temperatuur in de ruimte van een zone model, het effect van verticale ventilatieopeningen in een zone model wordt overschat met gemiddeld 35%. De overschatting is alleen gevonden in de brandsituatie van de twaalf opgestelde varianten. Dit verschil kan verholpen worden door de hoogte of breedte aan te passen met ongeveer 50 procent. Voorwaarde hiervan is wel dat het zone model rekent met twee zones en dat de ventilatieberekening gaat over een stationair brandvermogen van 9 MW in een adiabatiscche omgeving met alleen natuurlijke ventilatie.

De resultaten leiden tot de volgende aanbevelingen:

- De resultaten hebben een beperkt toepassingsgebied door de gebruikte variabelen. Om het toepassingsgebied te vergroten is groter onderzoek nodig waarin meer variabelen nodig zijn. Deze variabelen en varianten zijn hieronder nader omschreven.
- Uit de rekenresultaten lijkt dat CFAST niet goed overweg kan met gebruiksventilatie. Voor de gebruikssituatie zal een ander simulatieprogramma op basis van één zone gezocht moeten worden. Dit programma moet echter wel net als CFAST adiabatiscch kunnen rekenen en de massastromen in de output kunnen schrijven. De massastromen zijn nodig om een goed beeld te krijgen wat er in het model gebeurt en om een correcte vergelijking te krijgen tussen het zone model en veldmodel.
- CFAST blijft rekenen met twee zones. Hierdoor is het voor parkeergarages eigenlijk niet geschikt. Door de dikte van de zones in zowel de gebruikssituatie als de brandsituatie zijn onafscheidelijke zones niet realistisch. Met dit gegeven is het logisch dat elk meerzone model niet voldoet aan de realistische situatie in een parkeergarage. Voor het vervolg onderzoek zal voor de brandsituatie een ander simulatiemodel gezocht moeten worden dat rekent met één zone. Dit programma moet echter wel net als CFAST adiabatiscch kunnen rekenen en de massastromen in de output kunnen schrijven. De massastromen zijn nodig om een goed beeld te krijgen wat er in het model gebeurt en om een correcte vergelijking te krijgen tussen het zone model en veldmodel.

In het onderzoek zijn meerdere onderzoeksafbakeningen gedaan die alsnog onderzocht kunnen worden. In een vervolgonderzoek zouden de volgende zaken aan bod kunnen komen.

Horizontale openingen

In het onderzoek is alleen gekeken naar verticale ventilatieopeningen. In principe is de hele vraagstelling ook van toepassing voor horizontale ventilatieopeningen of een combinatie van verticale en horizontale ventilatieopeningen. In de praktijk komen deze situaties immers ook voor.

Dynamische brandsituatie

In het onderzoek zijn alleen de stationaire situaties van de gebruiks- en brandventilatie behandeld. Zoals uitgelegd in paragraaf 3.7 wordt er in de praktijk gebruik gemaakt van het werkelijk verloop van een autobrand. Wanneer de stationaire situatie volledig is behandeld in een vervolg onderzoek kunnen de gevolgen van ventilatie openingen bij een dynamische situatie onderzocht worden. Hierbij ontstaat echter het risico dat de gegevens moeilijk tot niet vergelijkbaar worden. Het is een betere optie om stationair te blijven rekenen, maar dan de verschillende vermogens van de autobrand als uitgangspunt te hanteren. Wanneer wordt gerekend met de vermogencurve van de autobrand van 3 auto's en een repressieve inzet van de brandweer na 20 minuten, zouden deze brandvermogens bijvoorbeeld 1½, 6 en 9 MW zijn.

Adiabatiscch rekenen

In het onderzoek is alleen adiabatiscch gerekend zodat de efficiëntie van de ventilatie bepaald kon worden aan de hand van de gemiddelde temperatuur. Om een meer realistische berekening te maken is het aan te bevelen met materialen te rekenen die in de praktijk het meest gebruikt worden. Voor parkeergarages zal dit veelal beton zijn. Voor de gebruikssituatie heeft dit tot gevolg dat de berekening langer zal moeten

rekenen om het vermogen om warmte te bufferen op te heffen. Dit kan leiden tot langere rekentijden in het veldmodel.

Om de ventilatie efficiëntie te berekenen kan na het toepassen van bijvoorbeeld beton, niet meer gebruik worden gemaakt van de methode van de gemiddelde temperatuur. In plaats daarvan kan gebruik worden gemaakt van tracerdeeltjes.

Afmetingen garage en gridgrootte

In verband met de maximale onderzoeksduur van dit afstudeerproject is de standaard grootte van de ruimte gesteld op 30 x 48 meter. Daarbij is één variant opgesteld met een grotere diepte van 45 meter. In de praktijk is echter een veel groter scala aan afmetingen mogelijk. Zeker binnen de kaders van NEN 2443 is ruimte voor een diepere garage, namelijk tot 52 meter. Wanneer dergelijke berekeningen worden gestart met het veldmodel moet rekening worden gehouden met veel langere rekentijd dan in dit onderzoek gebruikelijk was.

Symbolenlijst

Symbool	Eenheid	Naam
A	m^2	oppervlakte
A_f	m^2	oppervlakte van de brand
A_{eff}	m^2	effectieve oppervlakte
C_d	-	stromingscoëfficiënt (standaardwaarde = 0,60)
H	m	verticale afstand tussen brandstof en plafond
\dot{Q}	kW	brandvermogen
\dot{Q}_c	kW	convectief afgegeven deel van het brandvermogen
$\dot{Q}_{c,min}$	kW	minimaal convectief gedeelte van het brandvermogen voor opstijgen van de rook tot hoogte H in ruimte met stratificatie
$d\dot{Q}/dt$	kW/s	verandering van het brandvermogen in de tijd
T	K	temperatuur
$T_{\infty 1}$	K	omgevingstemperatuur ter hoogte van het brandoppervlak
ΔT_0	K	temperatuurverschil tussen de centrale as van de rookpluim en de omgeving
ΔT_c	K	temperatuurverschil tussen de centrale as van de rookpluim en de omgeving ter hoogte van het plafond
$\Delta T_{\infty H}$	K	temperatuurstijging in de ruimte door stratificatie vanaf de hoogte van het brandoppervlak tot de hoogte H
$\Delta T_{\infty z}$	K	temperatuurstijging in de ruimte door stratificatie vanaf de hoogte van het brandoppervlak tot de hoogte z_m
dT_{∞}/dz	K/m	temperatuurgradiënt in de ruimte door stratificatie
V	m/s	snelheid (door openingen in scheidingsconstructies)
\dot{V}	m^3/s	volumedebiet
c_p	kJ/kgK	soortelijke warmte van lucht
g	m/s^2	gravitatieconstante (standaardwaarde = $9,81 m/s^2$)
h	kW/m^2K	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt
h_c	m	hoogte van het dak boven de vloer
h_l	m	hoogte van de interface boven de vloer
h_n	m	hoogte van het neutrale vlak boven de vloer
h_s	m	hulpfactor
k	kW/mK	thermische geleiding binnen een object
m	kg	massa
\dot{m}	kg/s	massastroom
\dot{m}_{ent}	kg/s	massastroom aan ingezogen omgevingslucht door de doorsnede van de pluim (op hoogte z)
\dot{m}_{fi}	kg/s	massastroom door pyrolyse
\dot{m}_p	kg/s	massastroom in de rookpluim ter hoogte van de interface
p_a	Pa	luchtdruk ter hoogte van de vloer buiten de brandruimte
p_e	Pa	luchtdruk ten gevolge van uitzetting
p_f	Pa	luchtdruk ter hoogte van de vloer in de brandruimte
Δp	Pa	drukverschil tussen de brandruimte en de omgeving (van <i>binnen</i> naar <i>buiten</i>)
Δp_{nc}	Pa	drukverschil ten gevolge van natuurlijke convectie
t	s	tijd
t_{int}	s	tijdsduur van één interval
u	m/s	snelheid (in de brandruimte)
w_i	m	breedte van opening i

Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

Symbool	Eenheid	Naam
z	m	hoogte boven de brandstof (hoogte boven vloerniveau)
α	kW/s^2	tijdconstante voor brandontwikkeling
ρ	kg/m^3	dichtheid van de lucht
ρ_{fl}	kg/m^3	gemiddelde dichtheid in de vlammen
$\rho_{\infty 1}$	kg/m^3	dichtheid van de omgevingslucht ter hoogte van het brandoppervlak
<i>Subscripts</i>		
1		in de (brand)ruimte
∞		in de omgeving
L		in de koude zone
U		in de hete zone
V		(door) verticale opening
in		de brandruimte in
tot		totaal
uit		de brandruimte uit

Begrippenlijst

Begrip	Betekenis
Brandscenario	Kwalitatieve beschrijving van het brandverloop waarin de tijdstippen van kenmerkende gebeurtenissen, die de brand onderscheidt van andere branden worden vastgelegd. Het definieert de ontsteking en de brandgroei, het volledig ontwikkelde stadium en doofstadium, samen met de gebouwomgeving en systemen of installaties die het brandverloop beïnvloeden.
Brandruimte	Ruimte waarin de brand woedt.
Brandvermogen	Vermogen dat vrijkomt bij verbranding als functie van tijd.
CFD	CFD staat voor Computational Fluid Dynamics
Carcinogeen	Kankerverwekkend, dodelijk
Effectiviteit	Doeltreffendheid, relatie tussen prestatie en uitkomst (De ventilatie-effectiviteit van een systeem geeft aan in hoeverre de ventilatielucht nuttig wordt gebruikt voor de afvoer van hinderlijke en schadelijke stoffen uit een ruimte, bron: ⁸)
Efficiëntie	Doelmatigheid, relatie tussen prestatie en proces
Flash-over	Gelijktijdige ontsteking van de totale vuurlast in een compartiment.
Iteratie	Een methode waarbij iteratief een aanvangswaarde naar een exacte oplossing toe groeit
Iteratief	Kwalificatie van een proces dat bij herhaling een aantal bewerkingen uitvoert totdat aan een gestelde voorwaarde wordt voldaan
Kortsluitstroom	Een type ventilatie die optreedt wanneer de toevoerlucht direct vanaf de toevoer naar de afvoer stroomt, zonder dat het zich mengt met de binnenlucht
NIST	NIST staat voor "National Institute of Standards and Technology" en is opgericht "ter bevordering van innovatie en het Amerikaanse industriële concurrentievermogen door het bevorderen van de exacte wetenschap, normen en technologie om een impuls te geven aan de economische veiligheid en verbetering van de kwaliteit van leven".
Simulatie	Nabootsing van de werkelijkheid
Stratificatie	Situatie waarbij boven in een ruimte een hogere temperatuur heerst dan op lagere niveaus in de ruimte (reeds voor enige invloed van een brand).
Temperatuurgradiënt	Een gradiënt die beschrijft in welke richting en hoe sterk de temperatuur op één bepaalde plek het snelst verandert
Parkeergarage	Een gebouw of onderdeel daarvan, in één of meerdere bouwlagen met het doel daarin auto's te parkeren door overwegend niet regelmatige gebruikers van de voorziening en daartoe bestaande uit een samenstel van verkeersruimten voor voetgangers en personenauto's voor horizontaal en verticaal transport, parkeervakken en de noodzakelijke nevenruimten.
Pyrolyse ⁹	Ontleding van een stof door verhitting. Toelichting: Pyrolyse treedt vooral op bij organische stoffen met een gecompliceerde molecuulstructuur, zoals hout, textiel, zware olie en vele kunststoffen. Bij verhitting van deze stoffen treedt

8

http://www.vibavereniging.nl/detail_page.phtml?&username=vibav_guest&password=9999&groups=VIBA&workgroup=&page=installatie_ben_bronsema_ventileren

⁹ <http://www.brandweer.nl/cms/show/id=156031>

Begrip	Betekenis
	eerst pyrolyse op, waarna de ontledingsproducten voor de eigenlijke verbranding zorgen.
Veld model	Een veld model of CFD simulatiemodel lost in kleien volumecellen de vergelijkingen op van massa, energie en impuls.
Viscositeit	De stroperigheid van een vloeistof of gas
Volledig ontwikkelde brand	Alle brandbare oppervlakken binnen een specifieke ruimte nemen volledig deel aan de brand.
Zone model	Een zone model veronderstelt één of twee zones in een ruimte. Elke zone wordt hierbij als homogeen gemengd beschouwd. Homogeen gemengd betekent een uniforme temperatuur en dichtheid binnen een zone.

Literatuurlijst

- 1) Beek, R.A.G. van (1996), *Het ventileren van parkeergarages met behulp van stuwkrachtventilatie*, Overdruk uit Verwarming en Ventilatie, nr.3, p 1-8
- 2) Bouwdienst Rijkswaterstaat, Steunpunt Tunnelveiligheid (2002), *Project 'Safety Proef', Rapportage Brandproeven*, Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat
- 3) Cooper, L.Y. (2002), *Smoke and Heat Venting*, in: DiNunno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 3-222 – 3-225
- 4) Eggink-Eilander, S, R.A.P. van Herpen (2003), *De praktijkrichtlijn parkeergarages van het LNB/NVBR; Hoe hiermee om te gaan*, Bouwfysica, vol.16, no. 2 en 3, p 16-23
- 5) Emmons, H.W. (2002), *Vent Flows*, in: DiNunno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 2-33 – 2-34
- 6) Esdonk, R. van, B. Scholten (2006), *Afstudeerproject: Ventilatie efficiëntie*, Zwolle: Adviesburo Nieman B.V.
- 7) Feijter, M.P. de, A.J. Breunese (2007), *Onderzoek brand parkeergarage Lloydstraat, Rotterdam* (documentnr. 2007-Efectis-R0894), Rijswijk, Efectis Nederland BV
- 8) Herpen, R.A.P. van (1999), *Ventilatie van Parkeergarages*, Bouwfysica, vol.10, no. 4, p 16-21
- 9) Herpen, R.A.P. van (2005a), *B-2; Fire Safety Engineering; Het verschijnsel rook*, Delft: Kennisbank Bouwfysica
- 10) Herpen, R.A.P. van (2005b), *B-14; Fire Safety Engineering; Fysisch brandmodel*, Delft: Kennisbank Bouwfysica
- 11) Herpen, R.A.P. van, N.J. Voogd (2007a), *Fysisch brandmodel, Basismodel* (documentnr. Wu040430aaA1.rhe), Zwolle: Adviesburo Nieman B.V.
- 12) Herpen, R.A.P. van, N.J. Voogd (2007b), *Fysisch brandmodel, Submodellen* (documentnr. Wu040430aaA2.rhe), Zwolle: Adviesburo Nieman B.V.
- 13) Lemaire, A.D. (2005), *CFD Het ultieme gereedschap?*, Brandveilige gebouwen 10 maart 2005, Efectis Nederland BV en TU Delft, faculteit Bouwkunde, Leerstoel Installaties
- 14) NEN 1087: 2001 *Ventilatie van gebouwen – Bepalingsmethode voor nieuwbouw*, Delft: Nederlands Normalisatie-instituut
- 15) NEN 1087: 2006 (ontwerpnorm) *Ventilatie van gebouwen – Bepalingsmethode voor nieuwbouw*, Delft: Nederlands Normalisatie-instituut
- 16) NEN 2443: 2000, inclusief wijzigingsblad A1, *Parkeren en stallen van personenauto's op terreinen en in garages*, Delft: Nederlands Normalisatie-instituut
- 17) NEN 6098:2007 (ontwerpnorm), *Rookbeheersingssystemen voor mechanisch geventileerde parkeergarages*, Delft: Nederlands Normalisatie-instituut

- 18) NVBR/LNB (2002), *Praktijkrichtlijn (aanvullende) Brandveiligheidseisen op het bouwbesluit voor Mechanisch geventileerde parkeergarages met een gebruiksoppervlakte groter dan 1000 m²*, Arnhem: Nederlands Vereniging voor Brandweer en Rampenbestrijding (NVBR) en Landelijk Netwerk Brandpreventie (LNB)
- 19) Voogd, N.J. (2006), *Afstudeerproject: Fysisch brandmodel: Op weg naar een meer realistische beoordeling van brandveiligheid*, Zwolle: Adviesburo Nieman B.V.
- 20) Voogd, N.J. (2009), *Luchtstroommodel voor ventilatiecapaciteit t.g.v. natuurlijke convectie*, Zwolle: Adviesburo Nieman B.V.
- 21) Vorenkamp, J., P.H.H. Leijendeckers (2005), *B-1; Fire Safety Engineering; Het verschijnsel brand*, Delft: Kennisbank Bouwfysica

Websites

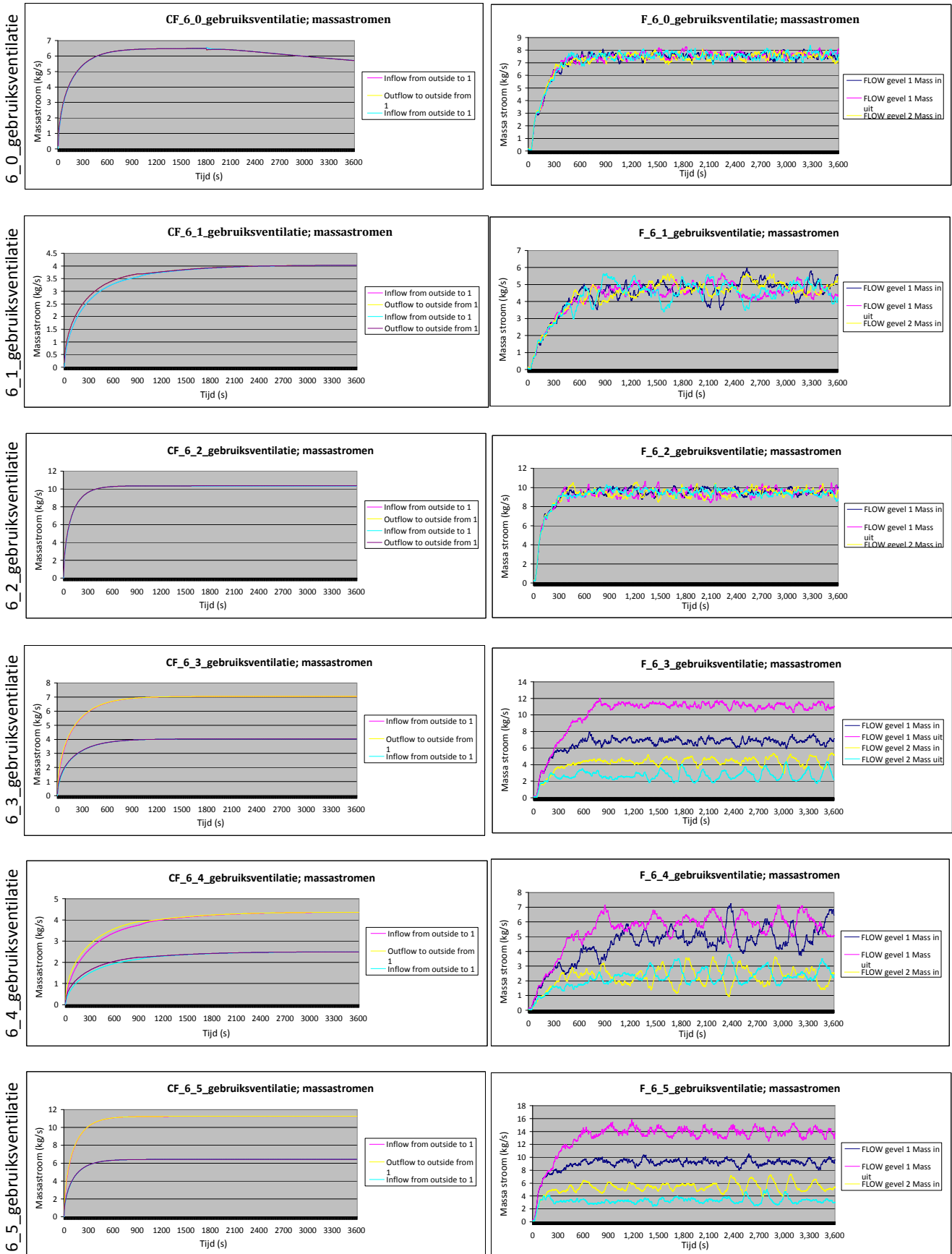
- 22) <http://statline.cbs.nl/statweb/>
- 23) <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/Design/performance/fireModelling/zoneModels/twoZoneModel.htm>
- 24) <http://www.brandweer.nl/cms/show/id=156031>
- 25) <http://groups.google.com/group/cfast/topics>
- 26) <http://groups.google.com/group/fds-smv/topics>
- 27) <http://www.brandveilig.com/artikelen/artikel17.htm>
- 28) <http://www.nvbv.org>

Bijlage 1: Massastromen

Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

CFAST Massastromen [kg/s]

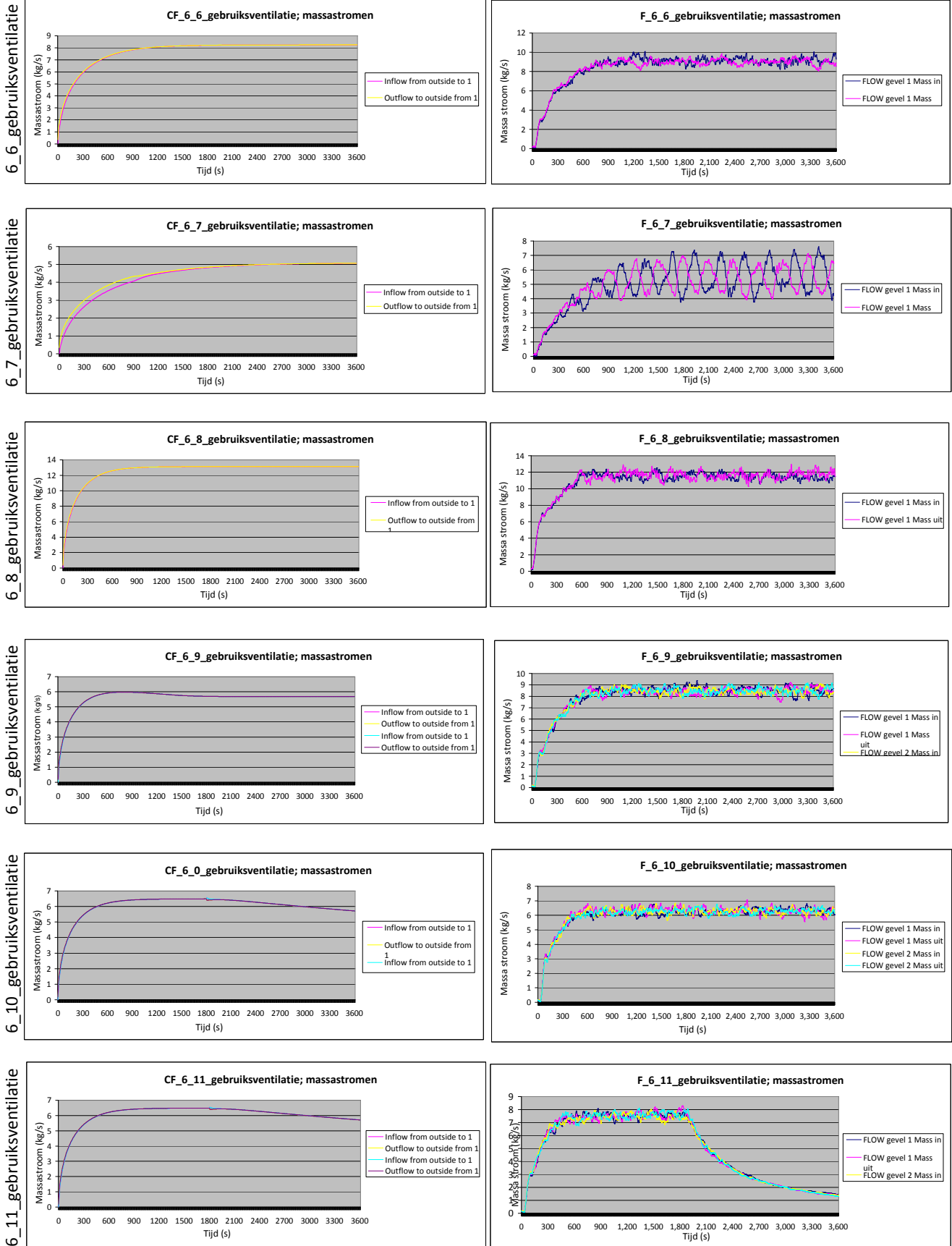
FDS Massastromen [kg/s]



Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

CFAST Massastromen [kg/s]

FDS Massastromen [kg/s]

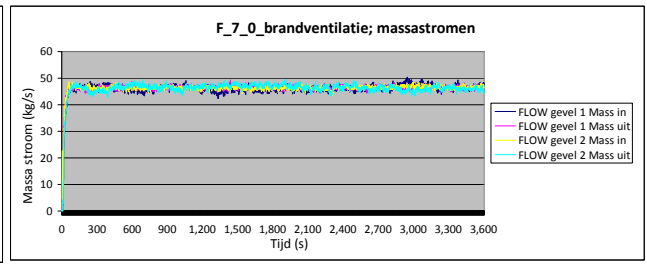
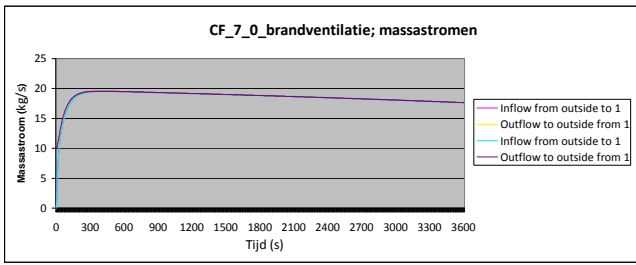


Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

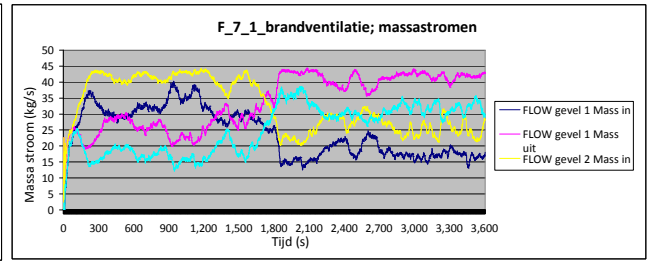
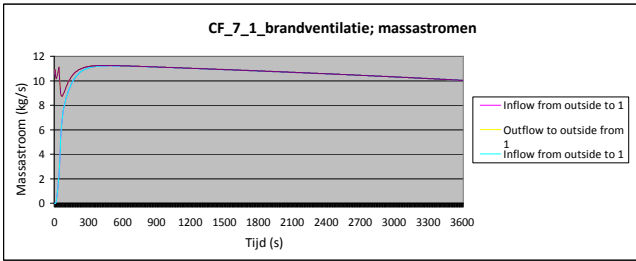
CFAST Massastromen [kg/s]

FDS Massastromen [kg/s]

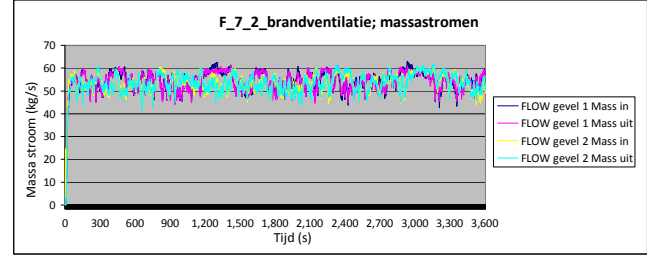
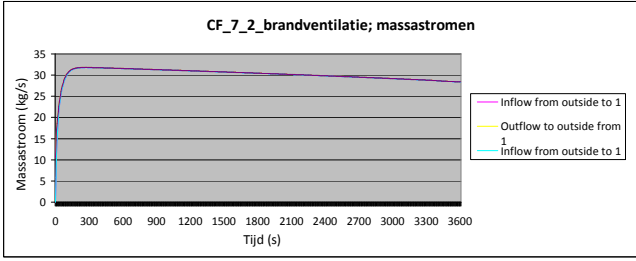
7_0_brandsventilatie



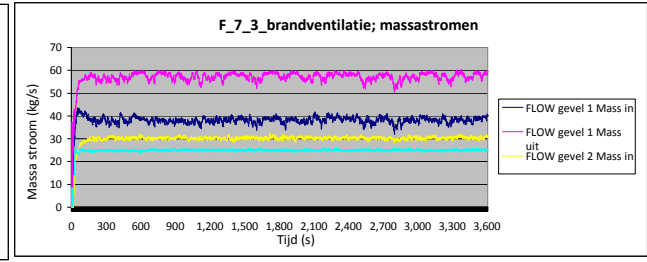
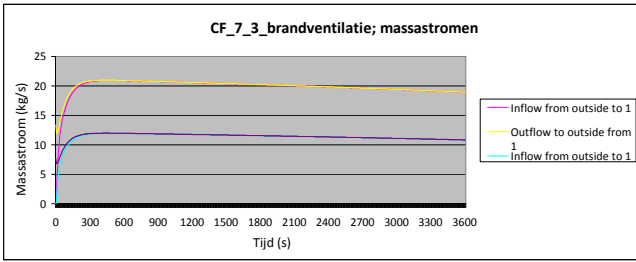
7_1_brandsventilatie



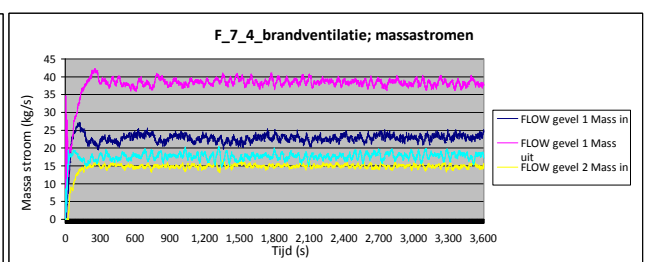
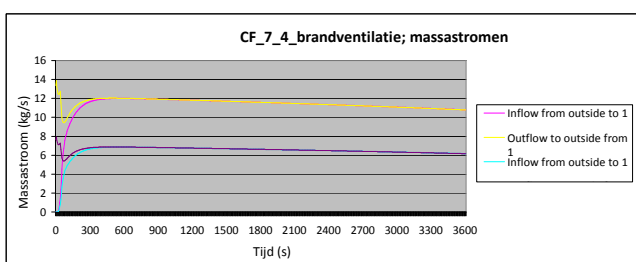
7_2_brandsventilatie



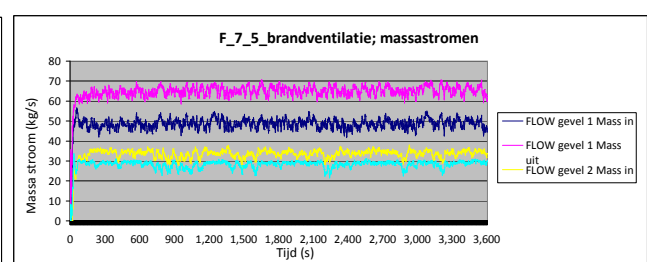
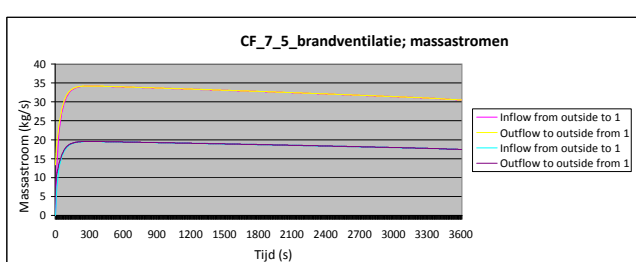
7_3_brandsventilatie



7_4_brandsventilatie



7_5_brandsventilatie

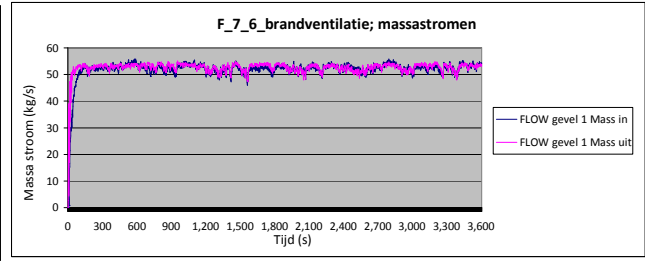
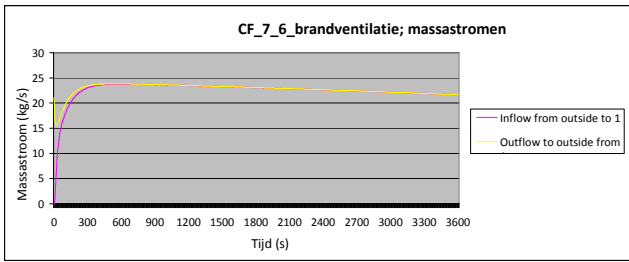


Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

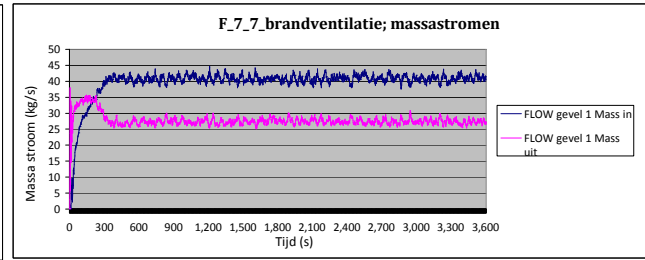
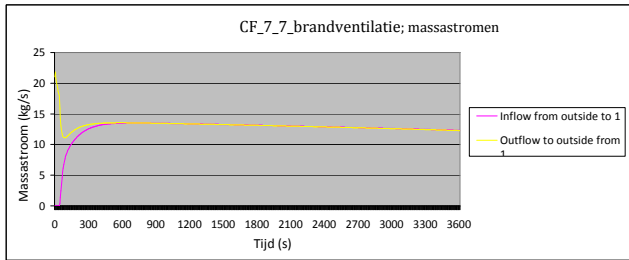
CFAST Massastromen [kg/s]

FDS Massastromen [kg/s]

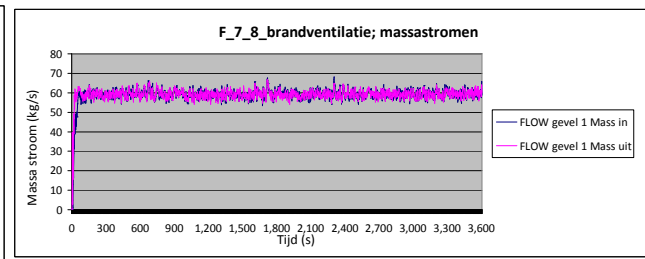
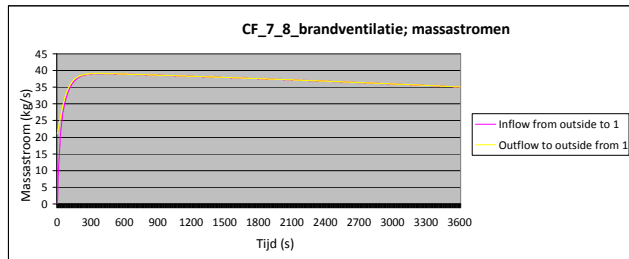
7_6_brandsventilatie



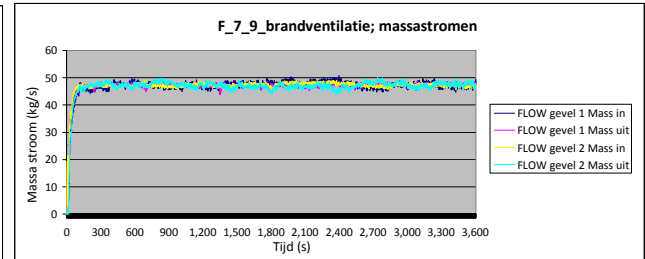
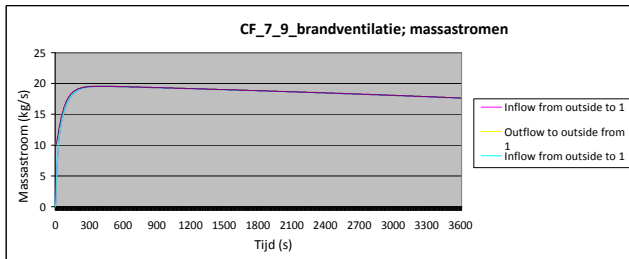
7_7_brandsventilatie



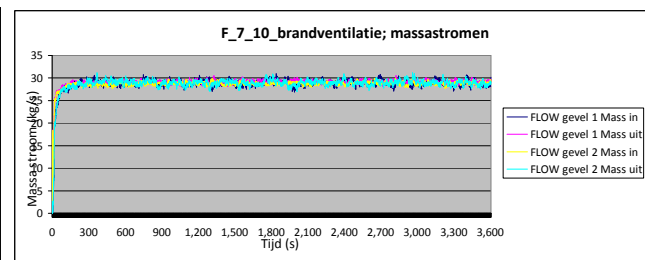
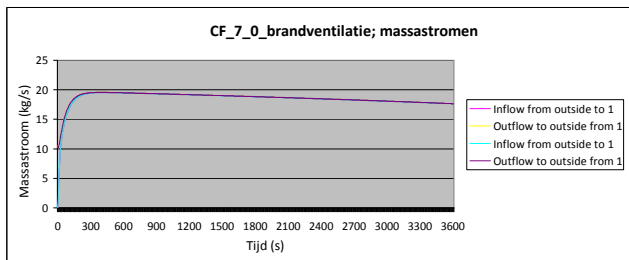
7_8_brandsventilatie



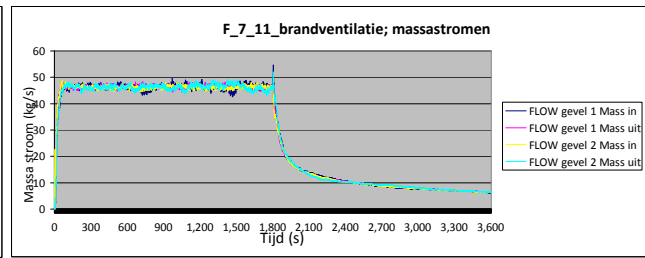
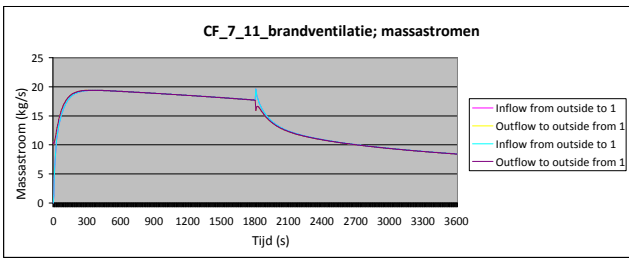
7_9_brandsventilatie



7_10_brandsventilatie

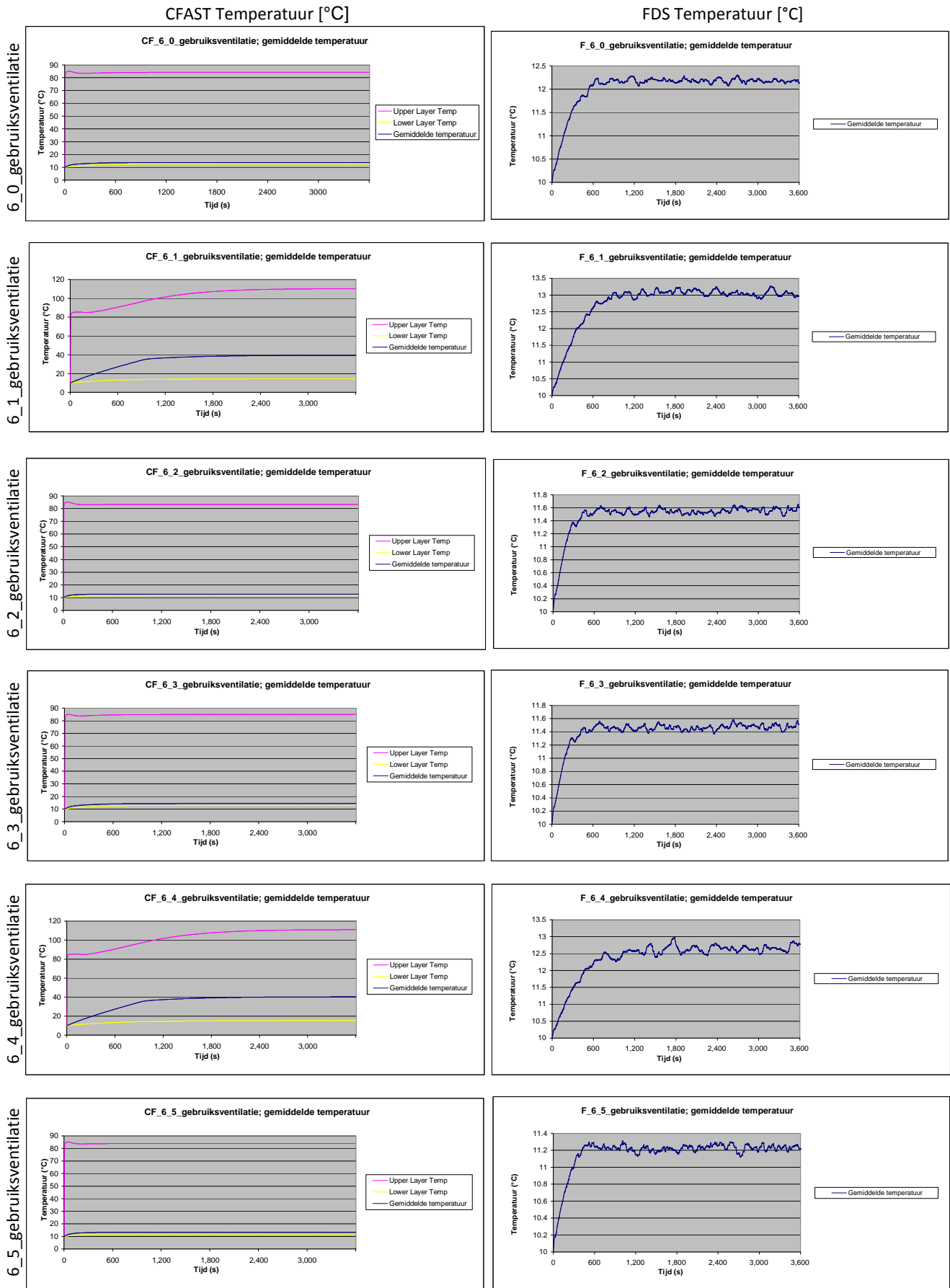


7_11_brandsventilatie



Bijlage 2: Temperatuur

Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

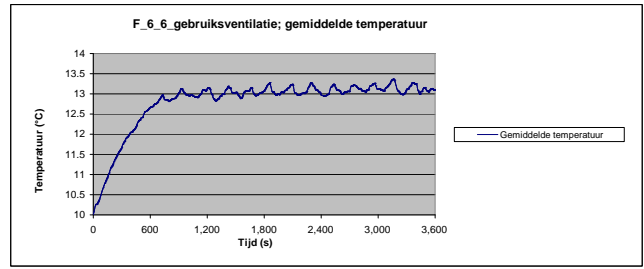
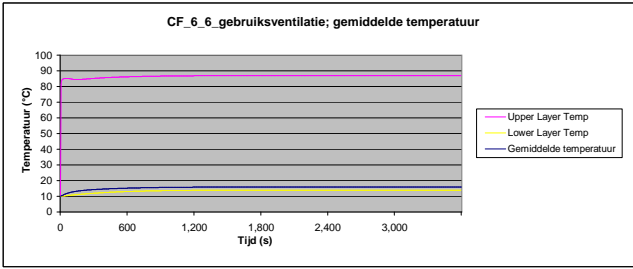


Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

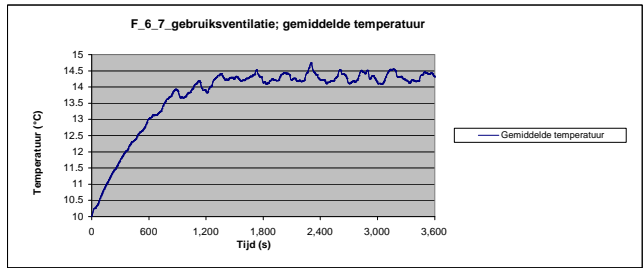
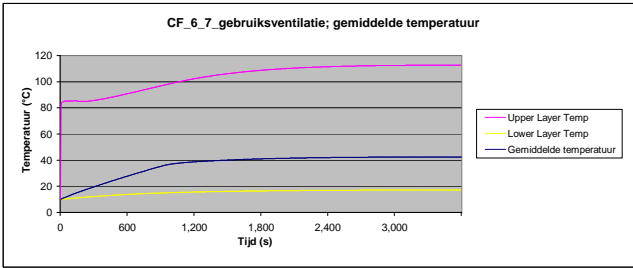
CFAST Temperatuur [°C]

FDS Temperatuur [°C]

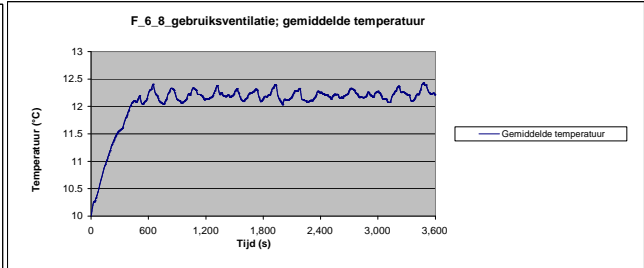
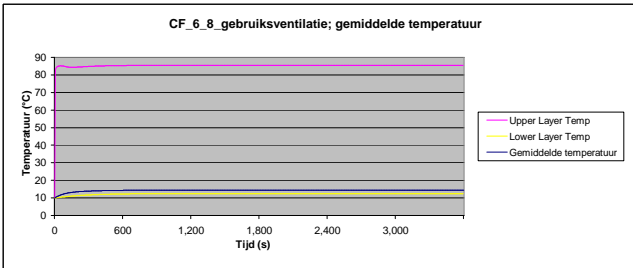
6_6_gebruiksventilatie



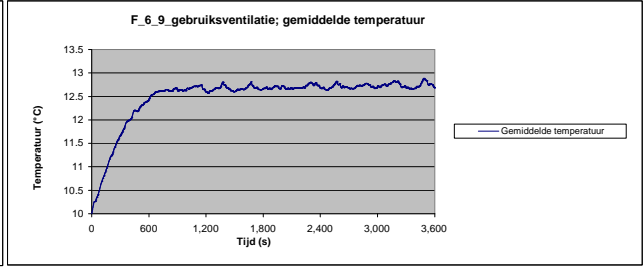
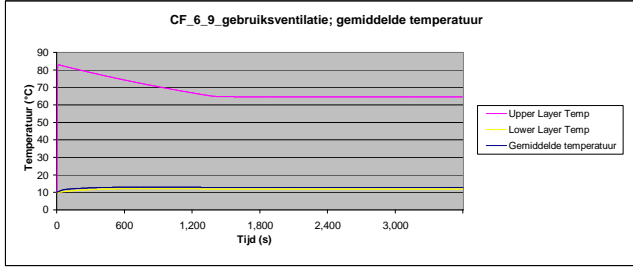
6_7_gebruiksventilatie



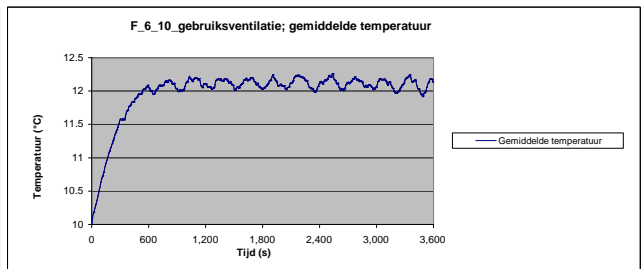
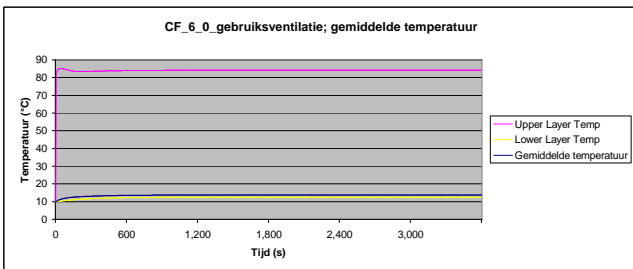
6_8_gebruiksventilatie



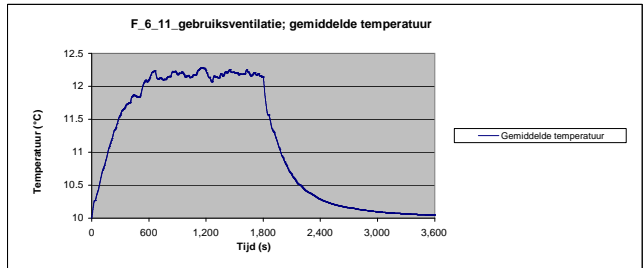
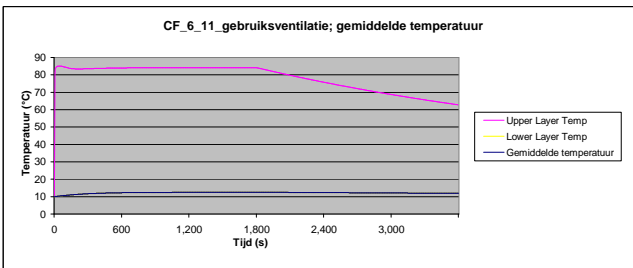
6_9_gebruiksventilatie



6_10_gebruiksventilatie



6_11_gebruiksventilatie

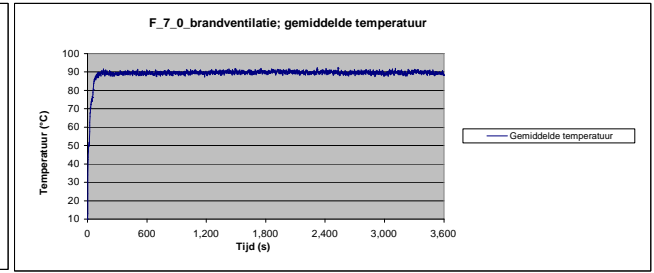
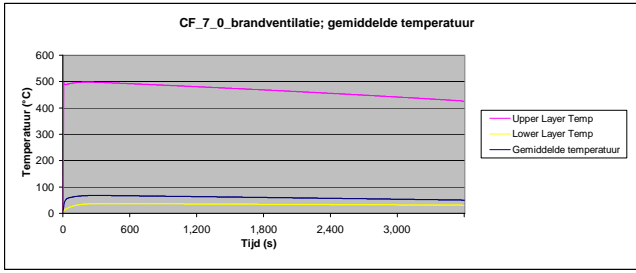


Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model

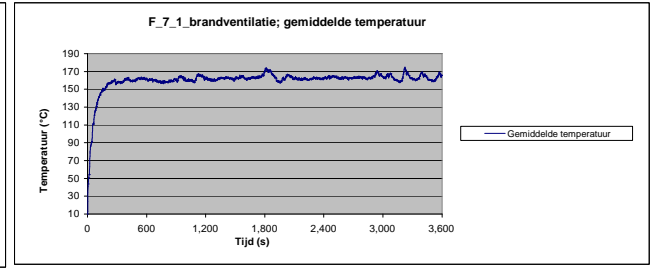
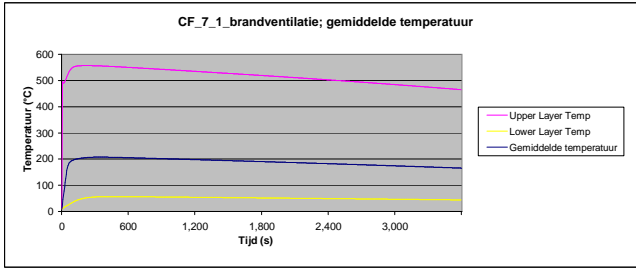
CFAST Temperatuur [°C]

FDS Temperatuur [°C]

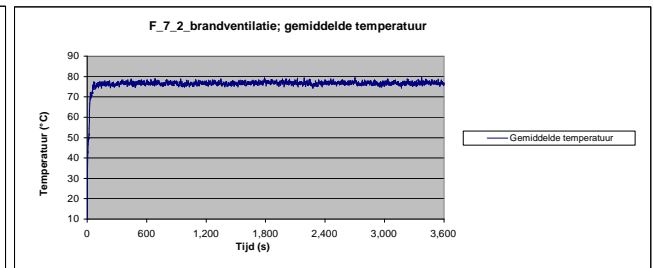
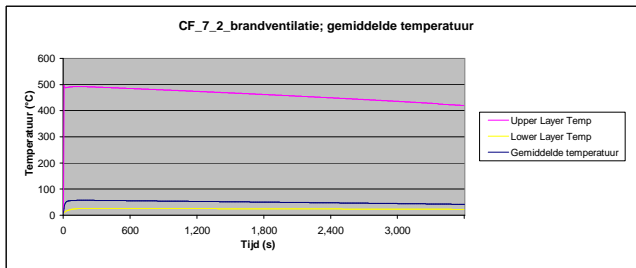
7_0_brandsventilatie



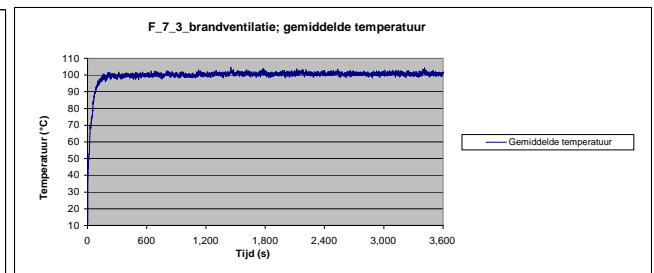
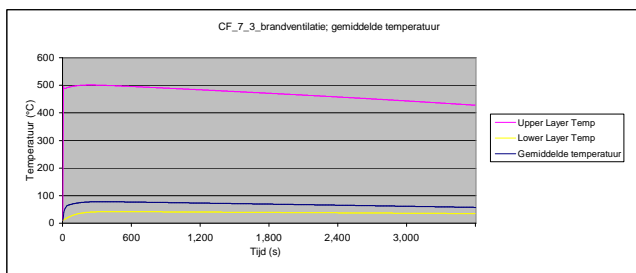
7_1_brandsventilatie



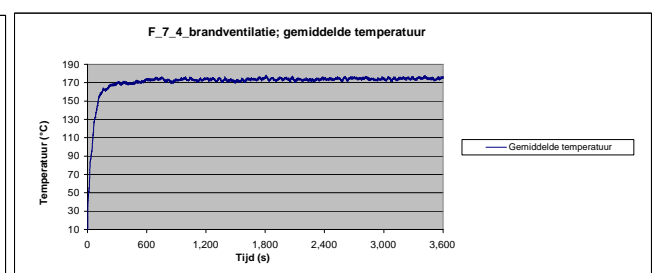
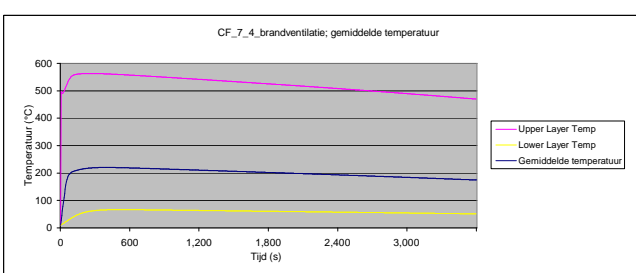
7_2_brandsventilatie



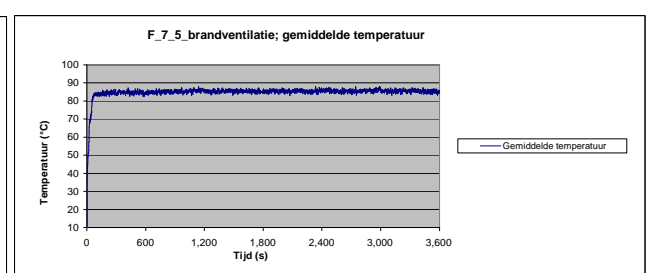
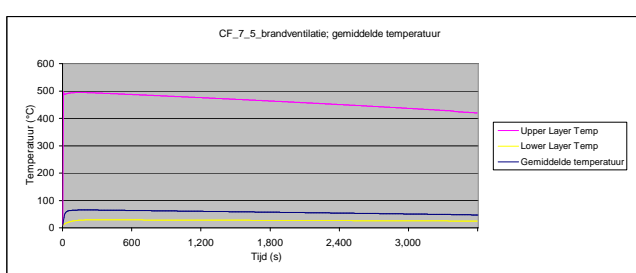
7_3_brandsventilatie



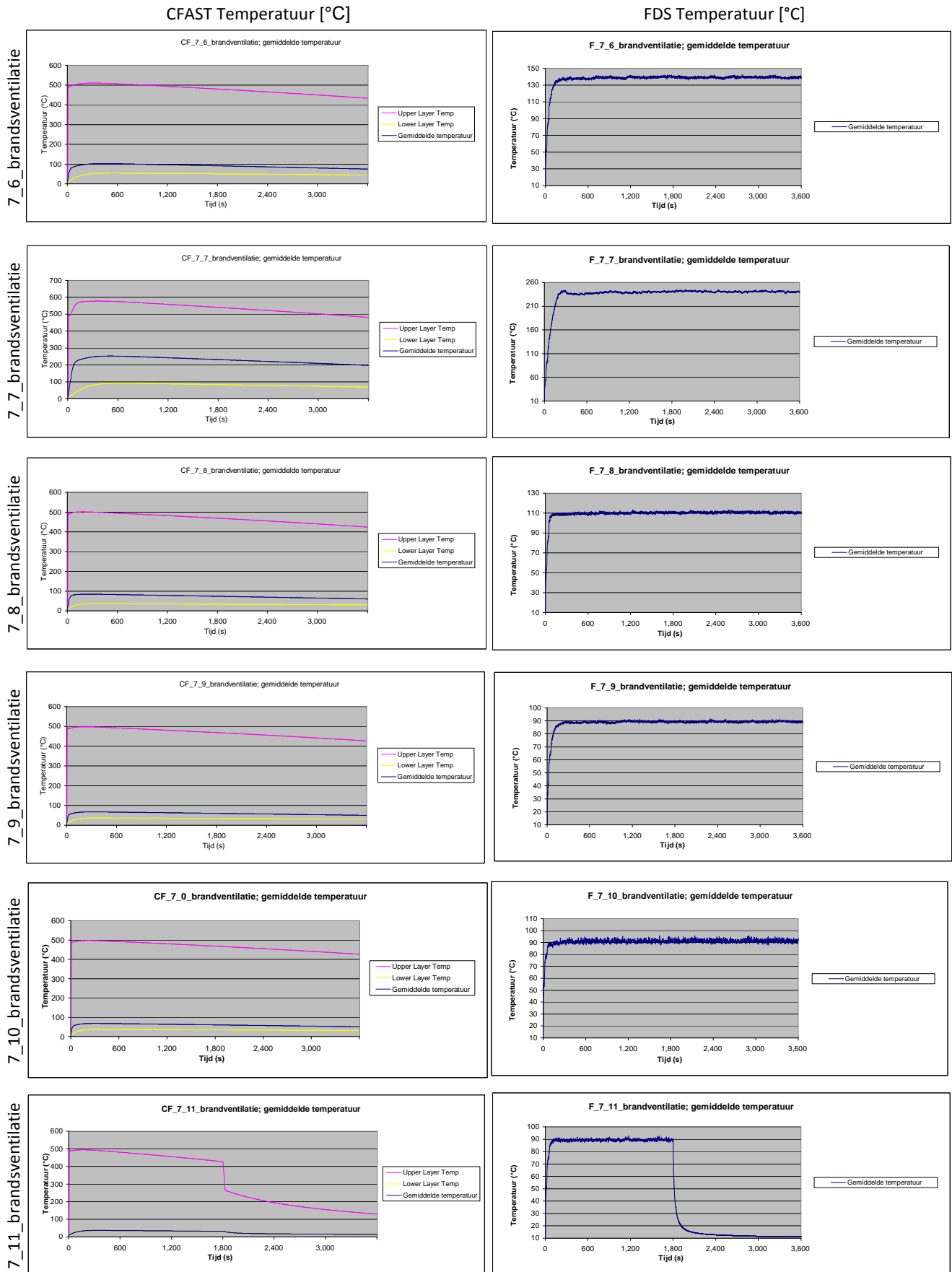
7_4_brandsventilatie



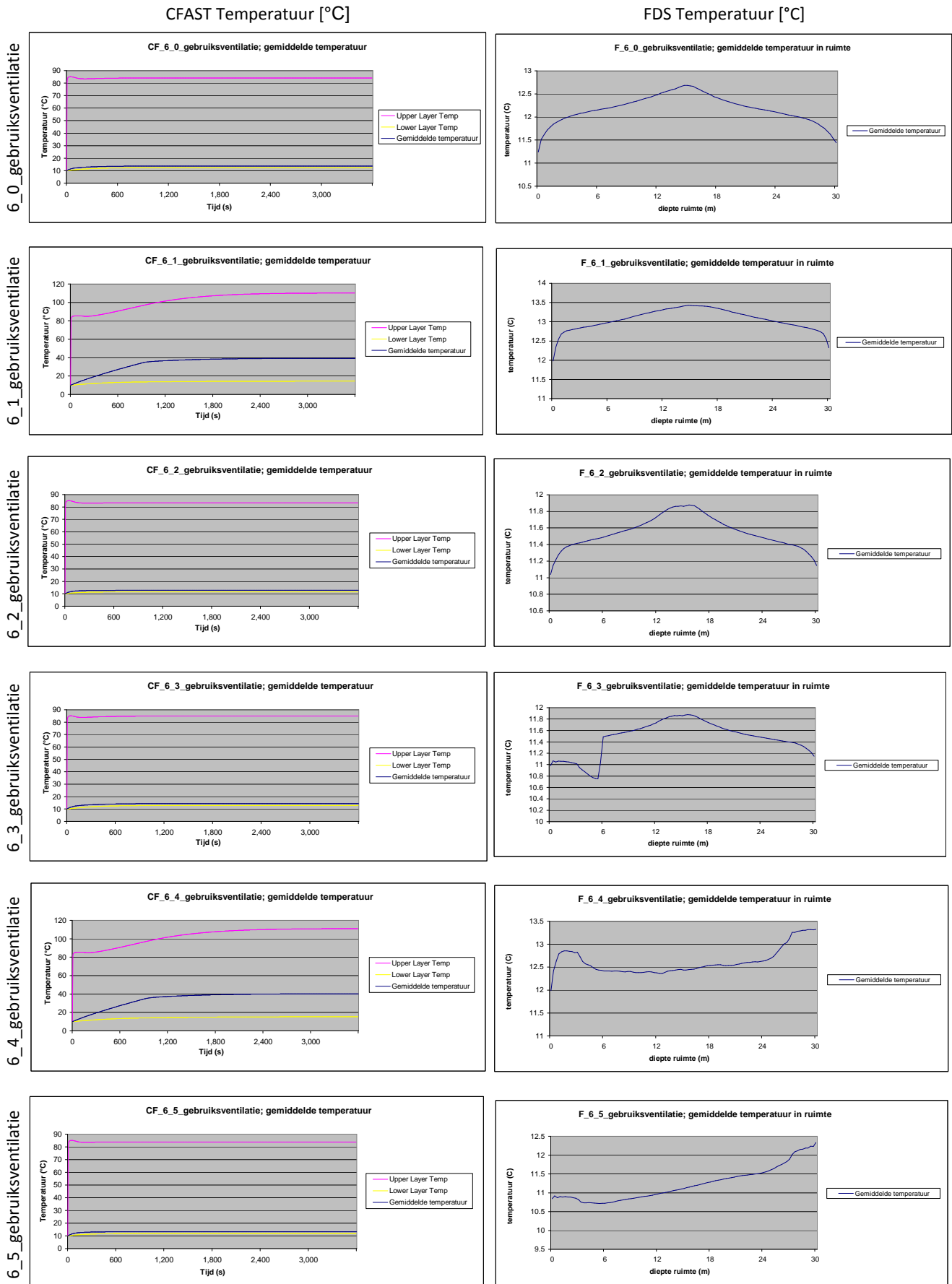
7_5_brandsventilatie



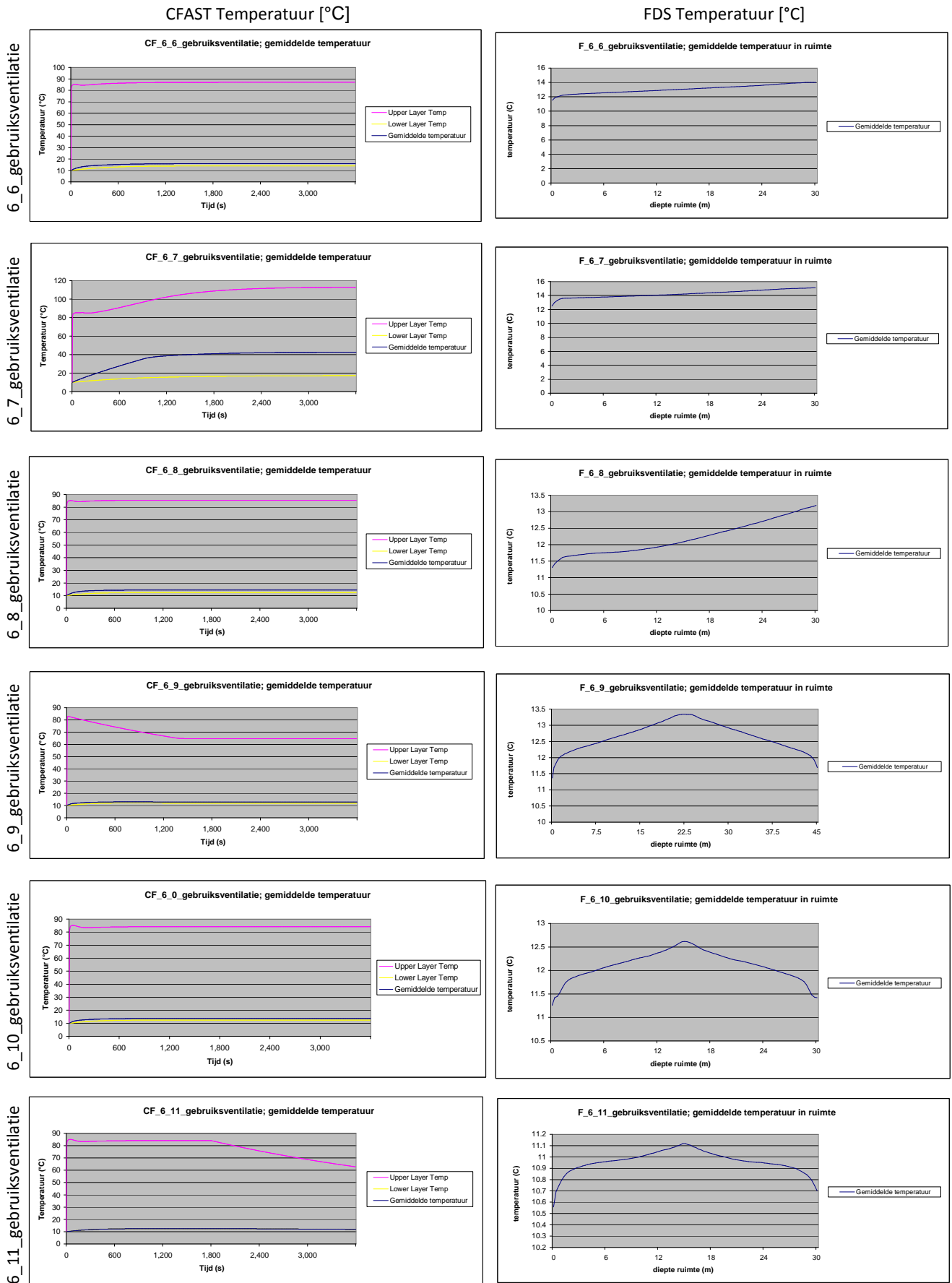
Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model



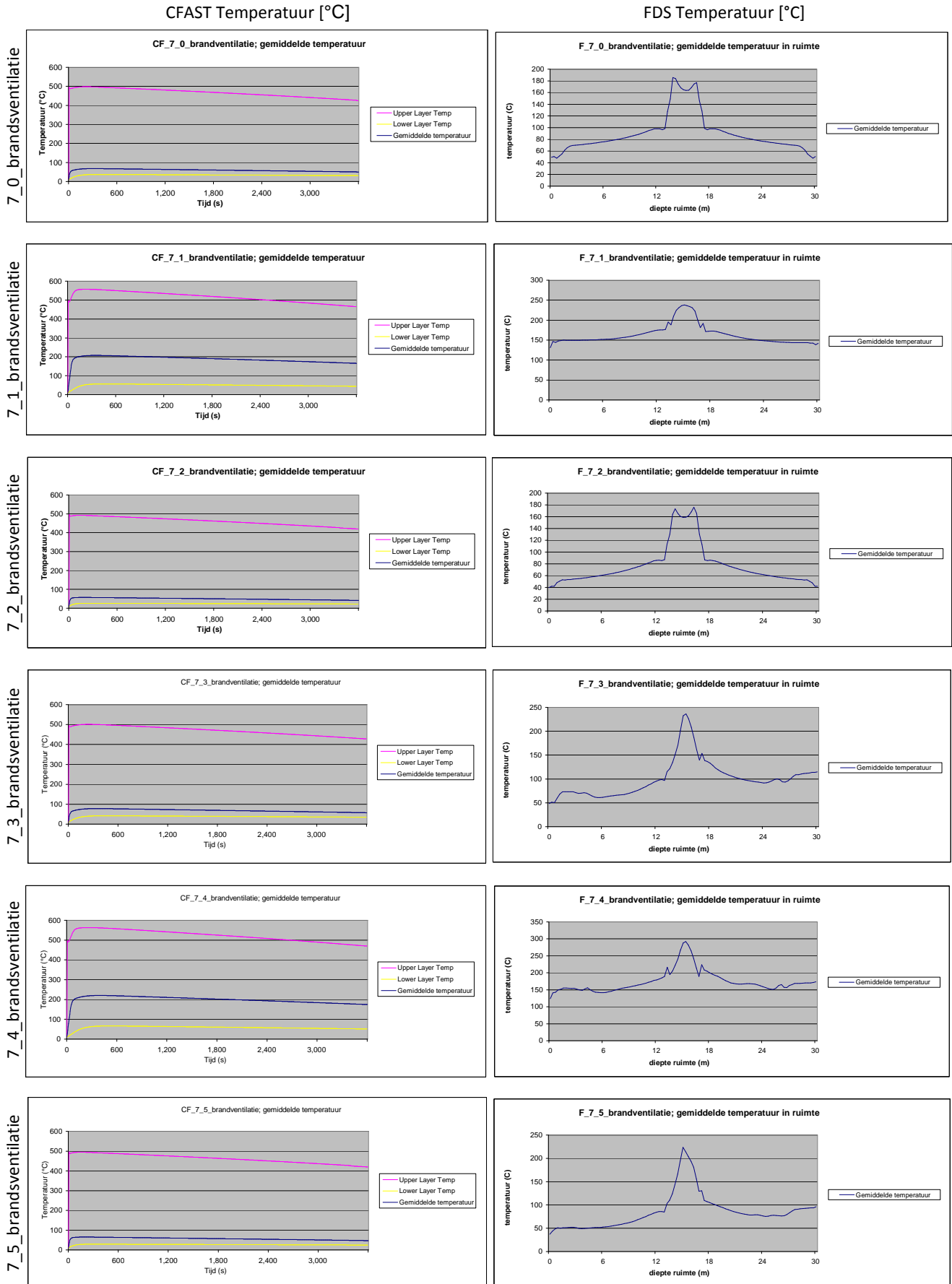
Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model



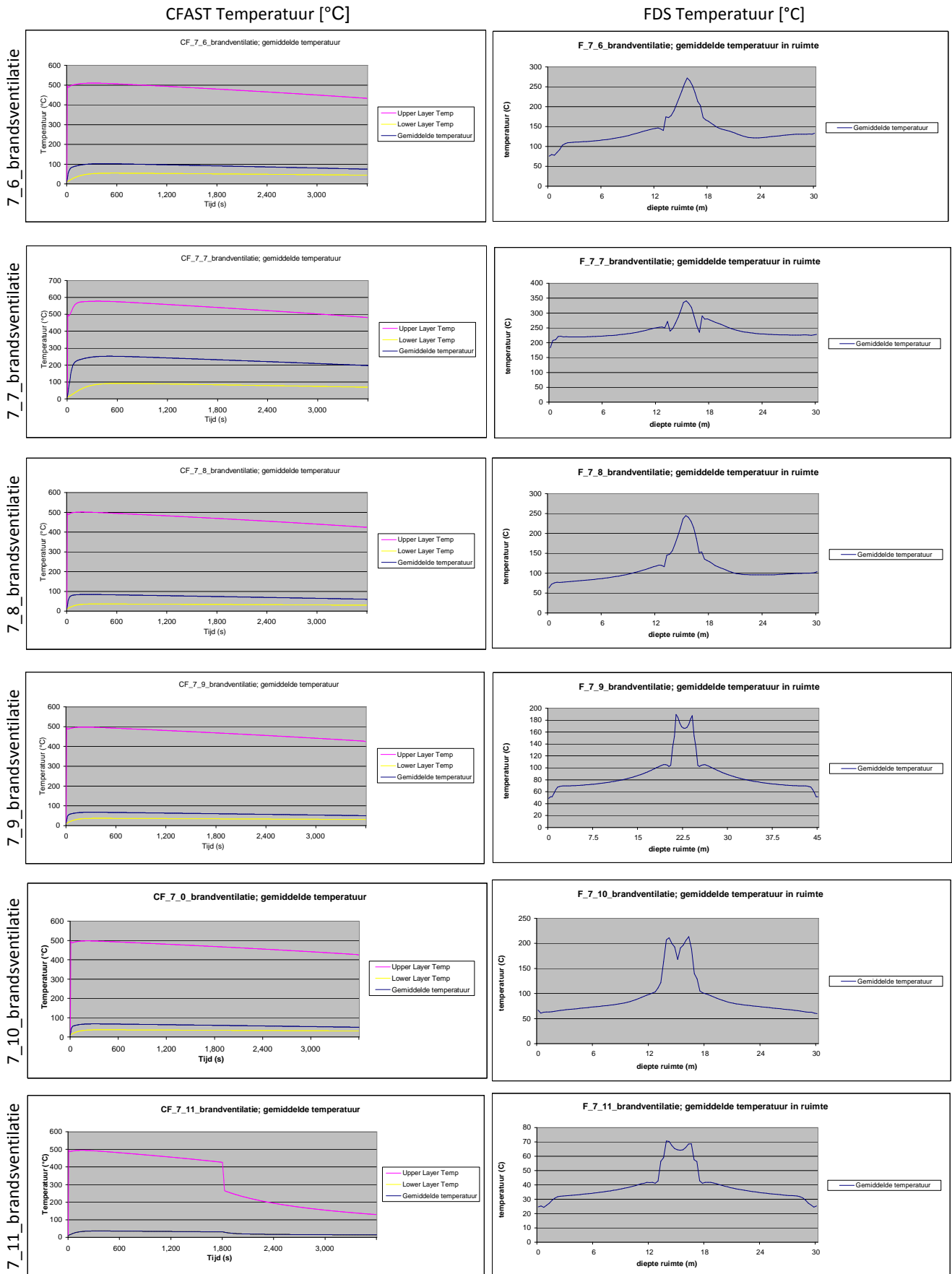
Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model



Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model



Effectiviteit van verticale ventilatieopeningen in een zone model



Bijlage 3: Overzicht varianten

Variant	Oriëntatie	Opening 1	Opening 2
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10		Oriëntatie, grootte en positie van openingen komen overeen met variant 0. In variant 10 is in FDS gerekend met een 8 maal zoveel cellen; het rekenraster is nauwkeuriger.	
11		Oriëntatie, grootte en positie van openingen komen overeen met variant 0. In variant 11 is de bron stop gezet na 1800 seconden om de efficiëntie te bepaling.	