

Computational Fluid Dynamics voor Fire Safety Engineering

Brandbeveiliging in het nieuw station van Mechelen



Figuur 1: 3D-beeld omgeving

In dit artikel gaan we dieper in op een praktische toepassing van CFD als ondersteuning bij het ontwerp van brandventilatie in de ondergrondse constructies van een nieuw te bouwen stationscomplex.

In het kader van het ruimtelijk structuurplan Mechelen werd ten behoeve van de omgeving, de mobiliteit en de bereikbaarheid gekozen voor de aanleg van een tunnel voor het doorgaande verkeer én het bestemmingsverkeer, een *Kiss en Ride* zone, een ondergrondse parking en bijhorende circulatiezones die al deze gebieden met elkaar verbinden.

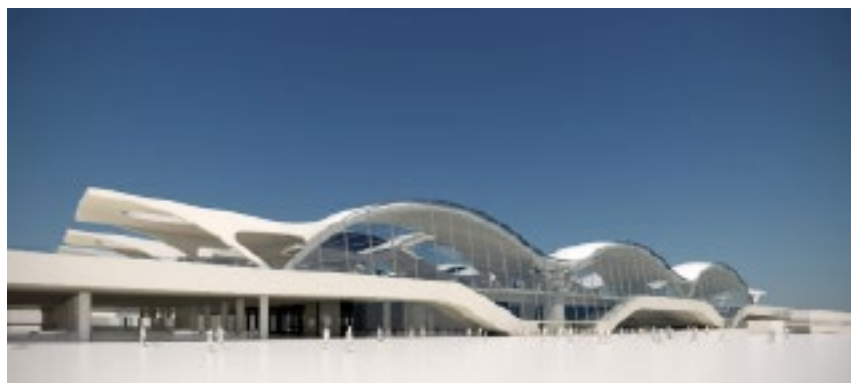
aangeduid, met een stippellijn voor het ondergrondse traject.

De rode lijn geeft de bovengrondse bedding aan die geschikt is voor treinen met een snelheid tot 160km/h.

De meanders van de Dijle rechts en de rechte waterloop van de Vaart links, zijn overbrugd ten behoeve van

de sporen. De rijweg loopt via een tunnel, genaamd Tangent, onder de Vaart door, te herkennen aan de horizontale gele stippellijn. De verticale stippellijn geeft het traject van een verbinding weer, die mogelijks in een latere fase wordt aangelegd.

Figuur 2: principale ingang station



Algemeen beeld

In Figuur 2 ziet u bovenaan de principale ingang van het station, en in Figuur 1 een 3D beeld van de omgeving waar het golvende dak boven de perrons duidelijk is te herkennen.

Op Figuur 3 ziet u in vogelperspectief de wijde omgeving van het station. De doorgaande rijwegen zijn in geel



Figuur 3: vogelperspectief omgeving

Ondergrondse constructie

Op de constructie as in Figuur 4 is het verloop van de hoogte van het wegdek te zien, gerefereerd aan de hoogte van het wegdek op het laagste

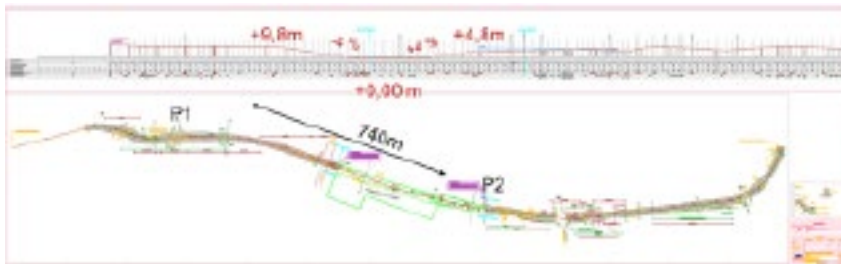
deel van het traject, onder het stationsgebouw. Het bovengronds kruispunt aan de linkerzijde, noemt men P1.

Na ongeveer 200m duikt het wegdek in de tunnel, wat vervolgens daalt

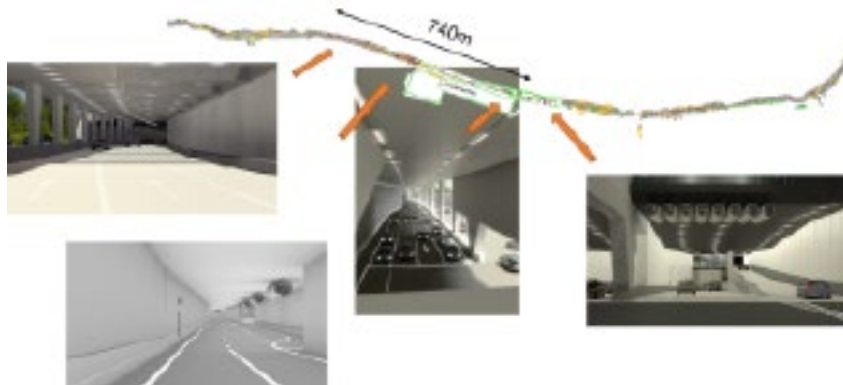
over een afstand van 340m met een hellingsgraad van -4%, waarna een vlak stuk volgt van 280m, om vervolgens weer te stijgen met +4% over een afstand van 140m. Op deze locatie verdwijnt het plafond van de koker en komt men op een kruispunt terecht in half open gebied, genaamd P2. Vanaf dit punt wordt de rijbaan grotendeels overdekt door de bedding van de spoorweg, die zich op een hoogte van ongeveer 10m boven het wegdek bevindt.

Het eerste gebied van het complex dat wordt berekend is de tunnel. In Figuur 5 zijn beelden te zien met, van links naar rechts, respectievelijk de ingang van de tunnel vanuit P1 richting P2, de uitrit naar het hellingencomplex, de half open situatie onder de spoorbedding aan P2, en de ingang van de koker aan P2 in de andere rijrichting. De studie van de tunnel beperkt zich tot de 740m die aangeduid is de tekening.

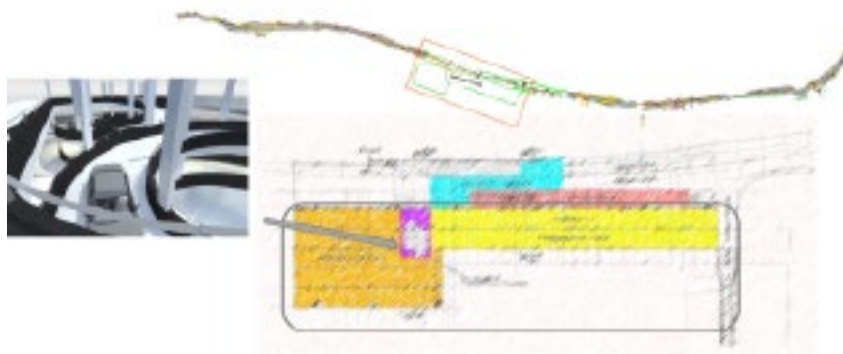
Figuur 4: constructie as



Figuur 5: constructie tunnel, tunnelportalen en uitrit naar hellingencomplex



Figuur 6: constructie parkeergebouw



Het tweede gebied van onderzoek omvat het parkeergebouw, ingedeeld in 3 zones per bouwlaag. In totaal zijn er 3 bouwlagen van elk 17000m² met telkens een capaciteit van ongeveer 700 personenwagens. De bouwlagen van het parkeergebouw staan in directe communicatie via twee niet afgesloten helicoïdale hellingen waarlangs de voertuigen kunnen circuleren tussen de verschillende niveaus. Op de bovenste bouwlaag is het plafond gesloten. Op de andere bouwlagen is de kern van de hellingen open.

Het derde gebied van onderzoek omvat het hellingen complex en aansluitende K&R zone. De K&R zone bevindt zich op hetzelfde niveau bevindt als de bovenste parkeerlaag. Via een trap naast een vide, die zich in de omgeving van de helicoïdale hellingen (paarse zone) bevindt, hebben reizigers via de K&R zone een directe toegang tot de parking. Op Figuur 7 linksboven ziet u de K&R zone met

de toegangshelling vanuit het hellingcomplex waar achteraan de poort van de tunnel te zien is. Op het beeld linksonder kijkt men in de andere richting, met zicht op de drie parallelle rijbanen die verder aansluiten met de tunnel en het parkeergebouw.

Ontwerp brandventilatie tunnel

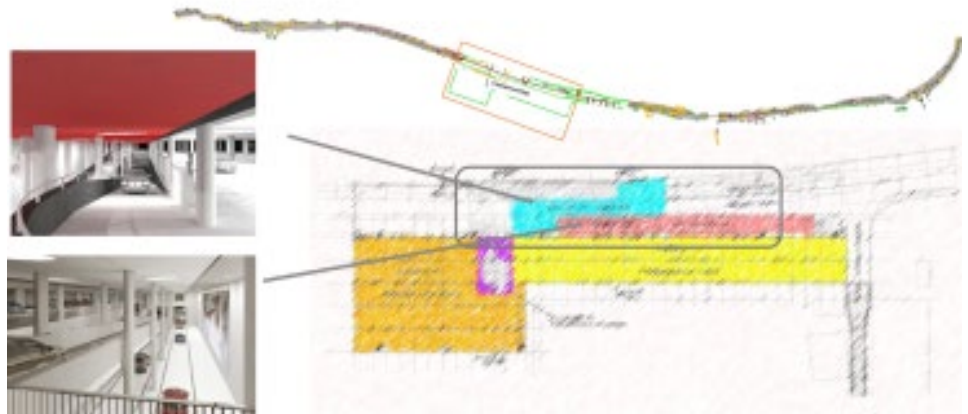
Uitgangspunten

Het globaal ontwerp van een veiligheidssysteem zoals een brandventilatie omvat vele deelaspecten. De mogelijkheid tot benadering van een brandhaard door de brandweer zal maatgevend zijn voor de dimensionering van het systeem, maar er spelen nog andere factoren. De mogelijke omvang van dit artikel is te kort om hierop in te gaan, dus we belichten enkel het maatgevend aspect.

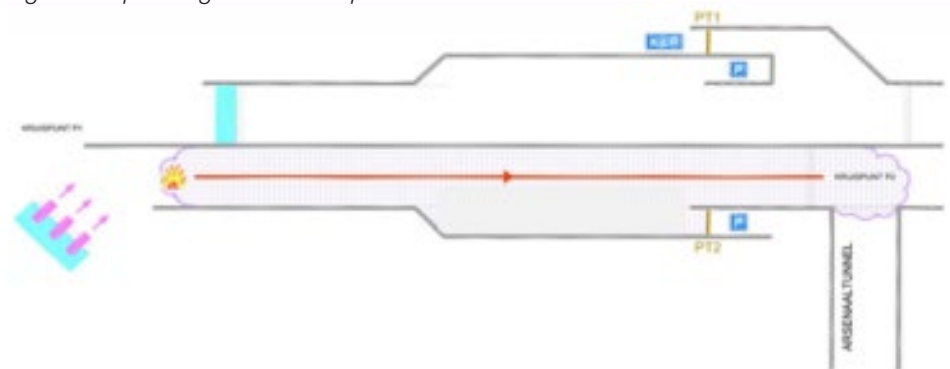
Bij aanvang van het project werd een uitgangspunten document (UPD) opgesteld met de maatgevende factoren en de aannames. In overleg met de stakeholders, namelijk brandweer, Eurostation, en Agentschap Wegen en Verkeer werd het volgende vooropgesteld:

- Maximum vermogen waar het systeem op wordt berekend is 30MW. Dit stemt overeen met een bus of een lichte vrachtwagen zonder lading koolwaterstoffen.
- De vermogendensiteit van de brand bedraagt $1\text{MW}/\text{m}^3$. Deze waarde is een belangrijke parameter bij het gebruik van CFD modellen omdat de impuls van de terugstromende gassen in de hete rookgaslaag tegen het plafond, ofte *ceiling jet*, er afhankelijk van is.
- De warmte die door stralingsverliezen ter hoogte van de brandhaard niet in de convectieve stroming komt bedraagt $1/3$ van het totale vermogen.

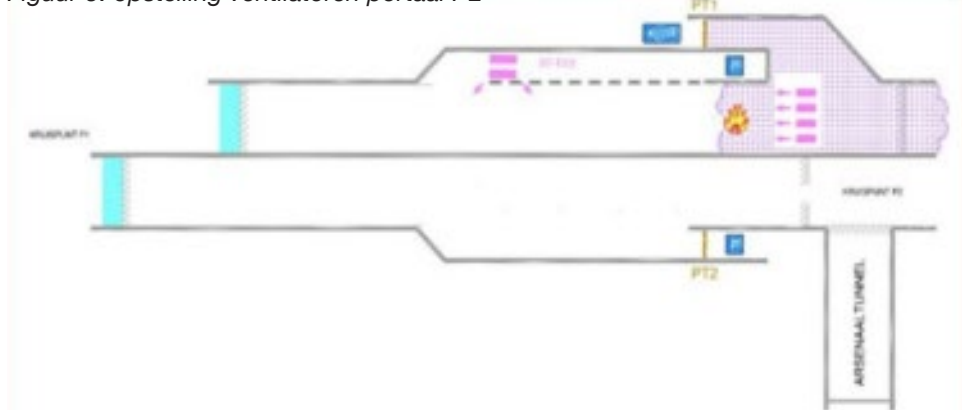
Figuur 7: constructie hellingcomplex



Figuur 8: opstelling ventilatoren portaal P1



Figuur 9: opstelling ventilatoren portaal P2



- Verschillende 'kritieke' locaties van de brandhaard worden bepaald vanuit een conservatieve benadering, daar waar de lokale helling of de hoogte van het plafond aanleiding geven tot de hoogste aanstroomsnelheden van de ventilatie om terugstroming van rookgassen tegen te gaan.
- De curve van het brandverloop

(ontwikkeling in de tijd) is niet direct relevant voor de dimensionering van het systeem maar wel voor andere factoren zoals vluchtveiligheid.

- De brandhaard moet te zien zijn op 15m afstand.
- De verdraagbare temperatuur bij inzet bedraagt 200°C voor de bovenliggende hete rookgaslaag en 100°C voor gemengde situaties.

Eerste benadering: bepaling stuwkracht om 3m/s te halen bij 30MW



$$dH_f = \lambda \cdot \frac{\rho W^2}{2} \cdot \frac{dL}{D_H} = \lambda \cdot \frac{\rho c W_0^2}{2} \cdot \frac{dL}{D_H} \cdot \frac{T}{T_0}$$

$$dH_f = \gamma (\rho_0 - \rho) g dL$$

$$\Delta H_{exp} = 9 \times 10^{-2} \times \frac{\dot{Q}_0}{W_0^2 D_H^2}$$

$$k_{exp} = \frac{\dot{Q}_0 + \dot{Q}_1}{T - T_0}$$

$$T = T_0 + (T_{max} - T_0) \cdot e^{-x/L} \quad \text{et} \quad x = \frac{C_f \rho c W_0}{4k_{exp}} \cdot D_H$$

Drukverlies = 74 Pa
Stuwkracht @3m/s = 3800N

type de tunnel	puissance de l'incendie de dimensionnement	vitesse du courant d'air
gabarit < 2 m	6 MW	2 m/s
2 m < gabarit < 3,5 m	15 MW	2,5 m/s
gabarit > 3,5 m		
• sans TMD	30 MW	3 m/s
• avec TMD	200 MW	4 m/s

TAB. 2.6 – Prescriptions pour la ventilation longitudinale.

vitesse de courant d'air	15 min	60 min	120 min
3 m/s	10 W/m².K	7 W/m².K	6 W/m².K
4 m/s	14 W/m².K	10 W/m².K	7 W/m².K

TAB. 5.7 – Valeurs de coefficient d'échange apparent h_{exp} selon la vitesse de l'air et l'autant considéré après le délai de l'incendie.

Eerste benadering – bepaling grootte ordes

De locatie van de ventilatoren is heel belangrijk. De voorkeur ging uit naar **een zijdelingse opstelling aan het begin van de tunnel** (Figuur 8). In het begin van de tunnel omdat het massadebiet hoger is bij lage temperatuur, een zijdelingse opstelling om redenen van onderhoud en beheer. Ter hoogte van kruispunt P2 was een zijdelingse opstelling echter bouwkundig niet mogelijk. Hier werd voor

een traditionele cluster stuwkracht ventilatoren gekozen, ondersteund door een tweede cluster verderop (Figuur 9).

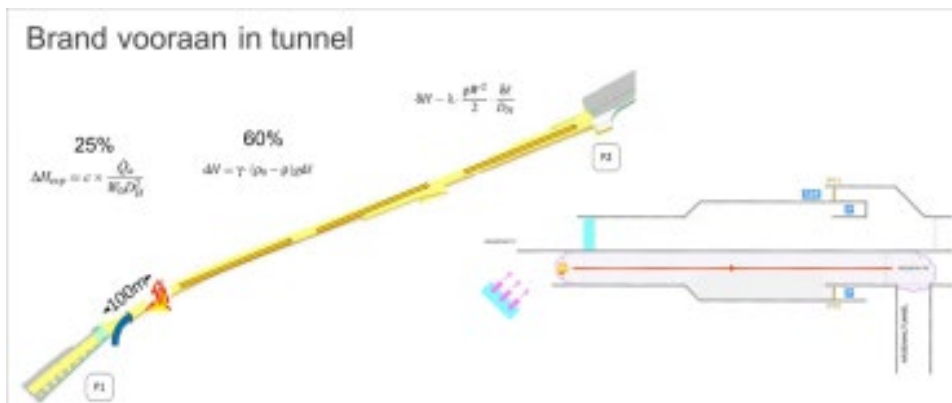
Waar de windbelasting een negatieve impact kan hebben op het systeem, wordt een winddruk van 10Pa en 20Pa aangenomen ter hoogte van respectievelijk het portaal aan P2 en P1. Deze keuze werd onderbouwd door een beoordeling van de invloed van het omgevende landschap op de wind.

We bekijken eerst het te installeren vermogen voor het traject P1 naar P2, dus te leveren door de zijdelingse opstelling (Figuur 8). In een eerste benadering gebruiken we de ontwerp regels van het Centre d'Etude des Tunnels (CETU).

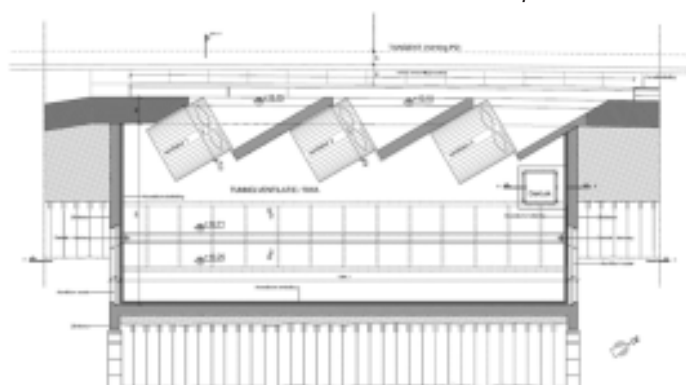
De brandhaard wordt gekozen vooraan in de tunnel aan het begin van het dalende traject. De hete rook zal immers willen stijgen door het dichtheidsverschil met de omgeving, het zogenaamde 'schouweffect'.

Op basis van een opgelegde ventilatie snelheid van 3m/s voor een brandhaard van 30MW, berekenen we een drukverlies in de "leiding" van 74Pa, wat omgerekend naar de sectie van de tunnel een stuwkracht oplevert van 3800N, bij een snelheid van 3m/s. Uit de berekening blijkt dat 25% van de weerstand door de lokale brandhaard wordt veroorzaakt, terwijl het naar beneden duwen van de hete rookgassen 60% van de weerstand vertegenwoordigt!

Figuur 11: rekenmethode volgens CETU, brand vooraan in de tunnel



Figuur 12: horizontale doorsnede lokaal met ventilatoren portaal P1



Figuur 13: verticale doorsnede lokaal met ventilatoren portaal P1



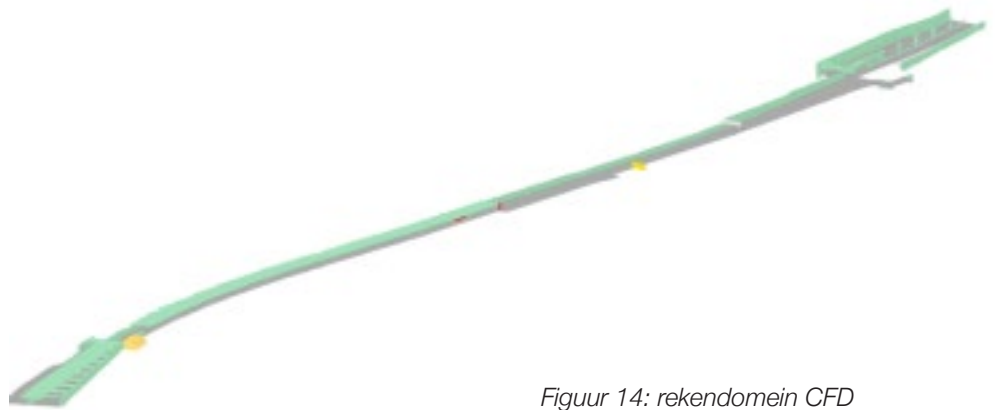
De gebruikte formulering is zeer nuttig maar ze biedt minder houvast voor de bepaling van het rendement van de zijdelings opstelling, en geeft ook geen informatie over lokale stromingsvelden bij plotse veranderingen in de tunneldoorsnede. Plotse variaties in de geometrie, met name verbredingen, geven immers aanleiding tot een drukval met lokale gebieden van terugstroming tot gevolg.

Modellering met CFD – detail berekeningen

Het volledige domein van de tunnel werd uitgetekend in een vierkant rekenraster ten behoeve van een CFD¹ code.

De gebruikte code was Fire Dynamics Simulator v5 van NIST². Deze CFD code gebruikt het LES³ model voor het oplossen van de *Navier-Stokes* vergelijkingen voor elke cel in het rekenraster. Wervels die kleiner zijn dan de lengte schaal van het rekenraster worden dus niet geresolveerd en dienen bijgevolg benaderd te worden door een turbulentie model (standaard Smagorinsky). De oplossing is tijdsafhankelijk. Binnen één rekenraster wordt de tijdsstap bepaald door een combinatie van de cel afmeting en de hoogste lokale snelheid zodat binnen één tijdstap niet meer dan 1 cel wordt 'doorkruist' door het fluïdum. De grootte van de cellen werd bepaald door vuistregels, gevolgd door een sensitiviteit studie.

Het scenario, waar de brandhaard zich vooraan in de tunnel bevindt, was maatgevend volgens de handberekening (§4.2). Ongeveer 60% van de weerstand kon toegeschreven worden aan het dichtheidsverschil op de helling. We berekenen deze opstelling met CFD.

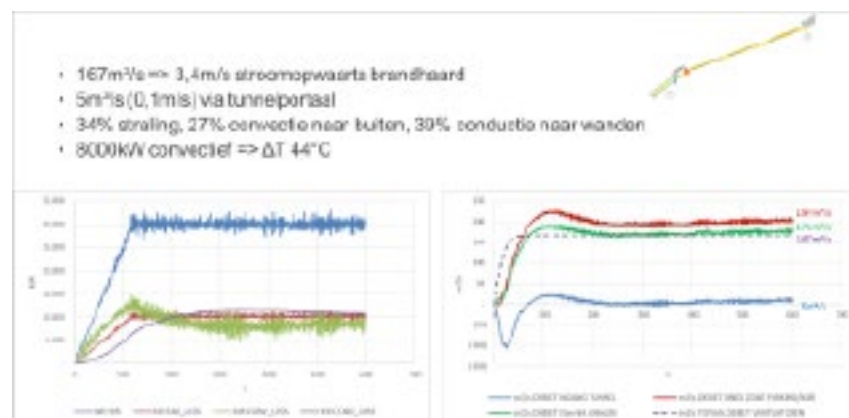


Figuur 14: rekendomein CFD

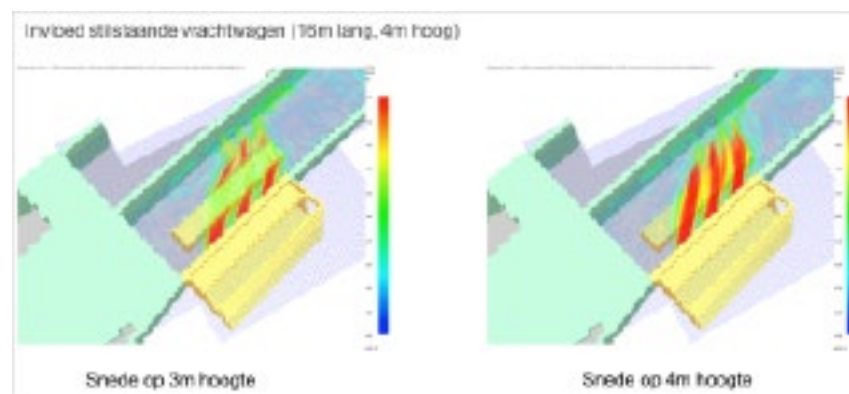
Uit de CFD berekeningen volgt dat een gemiddelde aanstroomsnelheid nodig is van 3.4m/s om terugstroming van rookgassen tegen te gaan. De waarde voor deze 'kritische snelheid' is in overeenstemming met empirische formules uit de literatuur van Wu&Bakar en Atkinson [1]. De zijdelings opgestelde ventilatoren creëren bij een gezamenlijk volumedebiet van 167m³/s voldoende impuls volgens

de lengte as van de tunnel. Dit zien we aan de richting van de geïnduceerde stroming aan het tunnelportaal in regime toestand (Figuur 16). Van het totale vermogen van 30MW aan het begin van de tunnel wordt er 8MW afgevoerd met de rooklucht naar buiten op het einde van de tunnel. Bijna 40% van het totale vermogen verdwijnt dus door convectieve warmte afgifte aan de wanden.

Figuur 15: resultaten uit CFD berekening



Figuur 16: invloed stilstaande vrachtwagen thv ventilatoren



¹ CFD: Computational Fluid Dynamics

² NIST: National Institute for Standardisation (US)

³ LES: Large Eddy Simulations

Het is de impuls van de ventilatoren die de lucht in beweging houdt. Deze grootte volgt uit het product van het massadebiet en de snelheid:

$$F = \dot{m} \cdot v = \rho \cdot \dot{V} \cdot v = \rho \cdot V^2 / A \quad \text{met } \rho = 353 / T$$

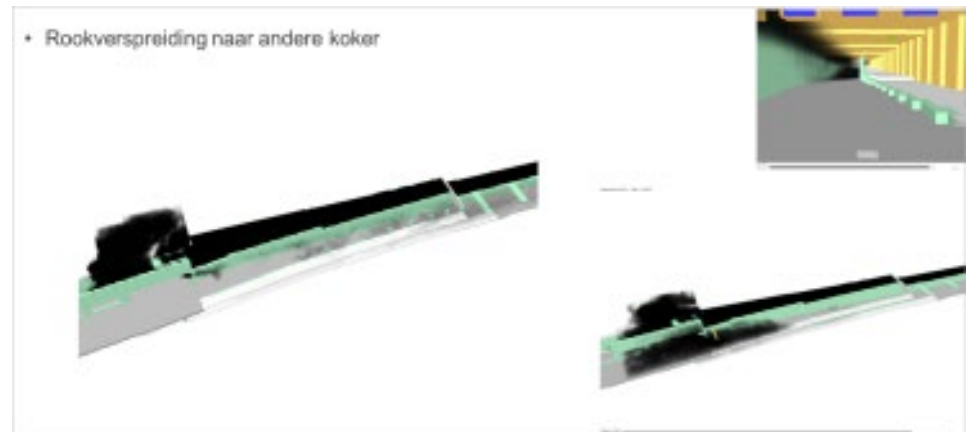
Bij de keuze van een ventilator moet het berekende debiet uit het model correct omgezet worden naar impuls. In bovenstaand geval resulteert dit in 5000N te installeren stuwkracht.

De kans bestaat dat een vrachtwagen ter hoogte van de ventilatoren tot stilstand komt (Figuur 16). Berekeningen hebben aangetoond dat deze situatie geen negatief effect heeft op de werking van het systeem. Dit kan verklaard worden door de vrij hoge opstelling van de ventilatoren en het feit dat de heetste rookgassen zich tegen het plafond bevinden.

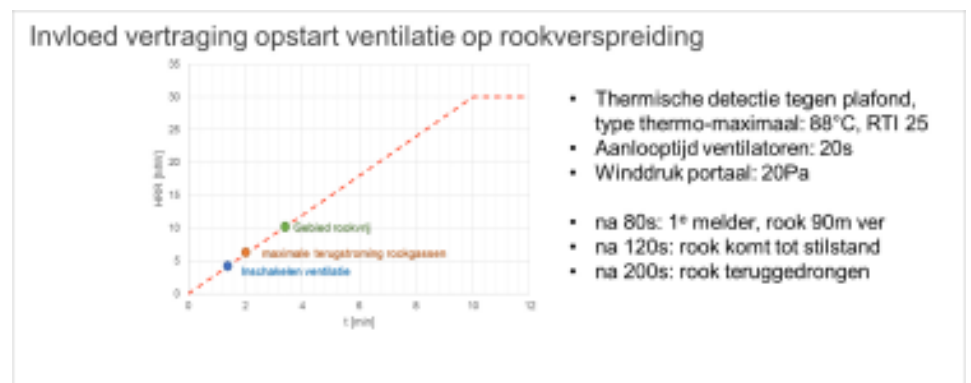
Zoals eerder vermeld zijn er nog andere effecten die spelen bij het ontwerp. In Figuur 17 is te zien dat er rookverspreiding naar de andere koker kan optreden onder invloed van windbelasting op het uitgangsportaal (thv P2). Indien rookdetectie wordt toegepast kan deze verspreiding een ongewenst ventilatie scenario in de andere koker opstarten.

In Figuur 17, rechtsonder, is de cluster aan de ingang van de andere koker reversibel ingeschakeld om rookverspreiding tegen te gaan. Door de lokale onderdruk aan de inlaat van de cluster wordt er nog meer rook aangezogen in het portaal maar de rest van de koker blijft wel gevrijwaard. Er werd ook nagegaan hoe snel het ventilatie systeem (automatisch) reageert op de ontwikkeling van de brandhaard. In deze simulatie werd de brandhaard gepositioneerd op het einde van de dalende helling. De installatie wordt geactiveerd door thermische melders. Ongeveer 200s na het ontstaan van de brand is de rook volledig teruggedrongen. De brand

Figuur 17: rookverspreiding aan de uitgang naar de ingang van de andere koker



Figuur 18: respons ventilatie systeem



heeft dan al een vermogen van 10MW bereikt.

Ontwerp brandventilatie parkeergebouw en circulatiegebieden

De parking en het hellingencomplex worden bediend door 2 ventilatieschachten (RWA1 en RWA2) voor zowel extractie als pulsie, gecombineerd met een natuurlijke toevoer via openingen in de dakplaten van de K&R zone en een vide naast een trap met open borstweringen. Verschillende brandhaard locaties werden onderzocht. De opdrachtgever wenst een ontwerp met minimale rookscheidingsen.

Het volledige domein werd gerasterd ten behoeve van de CFD code (Figuur

20). Op de beelden zijn de helicoidale hellingen te zien en de groene trap aan de vide waarlangs de lucht wordt aangezogen. Het totale vermogen van de brandhaard bedraagt 8MW, waarvan 1/3 stralingsenergie niet naar de convectieve warmtestroom gaat.

Parking 1

Voor het linker deel van de parking (oranje gebied) zijn bij een extractie debiet van 200m³/s via RWA1 geen grote rookscheidingsen nodig voor brandhaarden gelegen boven as Pf, aangegeven door de groene stippellijn (Figuur 21). Een korte scheiding tegen de muur is echter nodig om terugstroming tegen de wand tegen te gaan. Voor brandhaarden gelegen onder de groene lijn is wel een rookscheiding nodig.



Figuur 19: ontwerp brandventilatie parking

In Figuur 22 is het verschil in rookverspreiding te zien voor 2 locaties van de brand die relatief dicht bij elkaar liggen. Ook de invloed van de balken tegen het plafond is duidelijk zichtbaar.

Een brandhaard gepositioneerd in een hoek zal door de nabijheid van de wanden een sterkere *ceiling jet* opleveren dan een vrijstaande brand bij eenzelfde plafondhoogte (Figuur 23). Enkel voor deze locaties volstaat het opgelegde extractie debiet niet.

Hier worden bijkomende stuwkracht ventilatoren opgesteld. De stuwkracht ventilatoren zijn zo opgesteld dat ze ook efficiënt zijn voor de CO ventilatie in de parking.

Zonder stuwers treedt er meer dan 30m terugstroming van rook op. Met stuwers wordt de situatie verbeterd (Figuur 24). De terugstroming van rook is zeer gevoelig aan de locatie van de stuwers. Door de hoge uittrede snelheden, in de grootte orde van 25 à 30m/s, ontstaan gebieden van onder-

druk tussen de stuwers. Een exacte locatie volgens het ontwerp is dus heel belangrijk. Met name de stuwers langs de wand zijn belangrijk om terugstroming te vermijden.

Gezien het relatief hoge extractie debiet van 200m³/s of 720.000 m³/h en de relatief kleine luchttoevoer openingen wordt de onderdruk in de parking geëvalueerd. Een onderdruk van maximaal 60Pa is toegelaten om vluchtdeuren nog te kunnen openen.

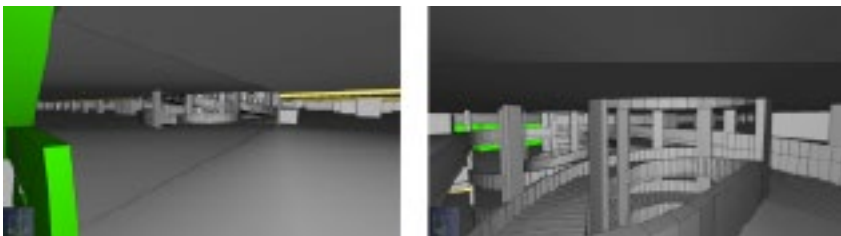
Parking 2

Het rechter deel van de parking heeft een lange smalle vorm (Figuur 25). Hier zijn niet veel problemen te verwachten, uitgenomen de invloed van de longitudinale balken tegen het plafond. Voor een brandhaard in het midden van het gebied hebben de balken het meeste invloed wat resulteert in minimaal 130m³/s extractiedebiet via schacht RWA2 om de terugstroming te beperken tot 15m.

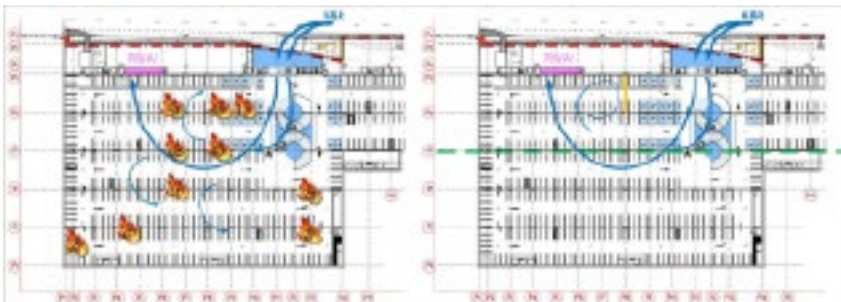
De terugstroming van rook wordt beoordeeld op basis van de rookdichtheid, uitgedrukt in kg roetagglomeraat per m³ lucht. Deze waarde staat in een lineaire relatie tot de zichtlengte in rook via de formulering in Figuur 26. De aangenomen waarde voor 'rookvrij' bedraagt 20mg/m³, wat in realiteit neerkomt op ongeveer 45m zicht. Op het beeld is echter te zien dat de interface tussen geen rook en veel rook zeer dun is. Enkele meters na het overschrijden van de grenslaag zal het zicht herleid zijn tot 0.

Bij alle CFD berekeningen werd de afkoeling van de rookgassen door de

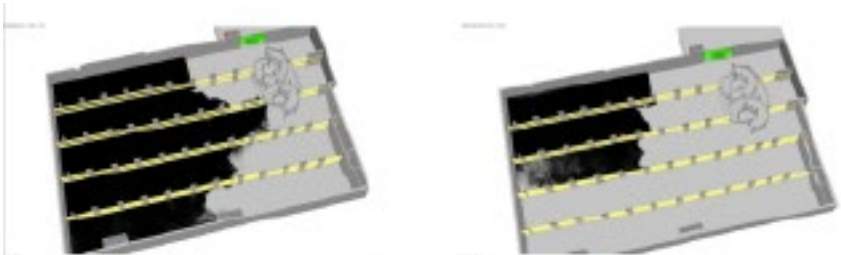
Figuur 20: CFD geometrie



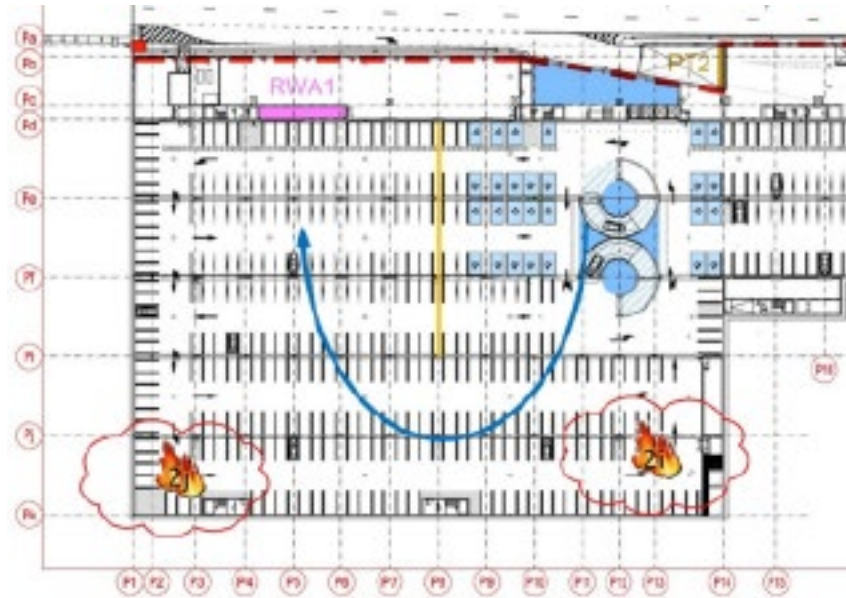
Figuur 21: locatie brandhaarden en rookscheidings in linker deel van de parking



Figuur 22: invloed locatie brandhaard en balken

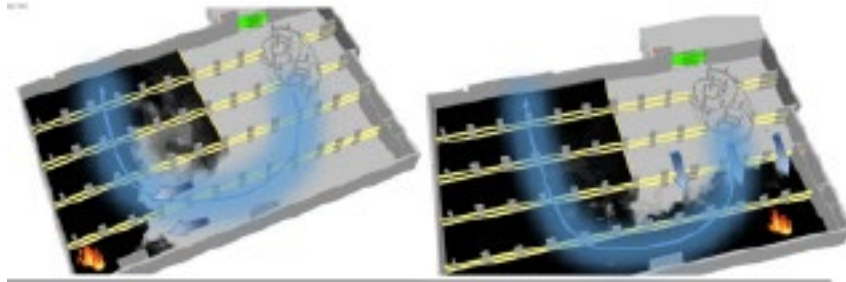


Figuur 23: opstelling brandhaard in de hoeken



betonnen wanden in rekening gebracht. Voor dit scenario gaat er 1/3 van het vermogen naar de wanden. Om de invloed van de afkoeling na te gaan werden ook een aantal vergelijkende adiabate berekeningen uitgevoerd, waarbij het volledige vermogen, uitgenomen de straling, in de rookgassen aanwezig blijft. Door de hogere temperatuur ter hoogte van de extractoren zal minder massadebiet worden afgevoerd, wat resulteert in een lager aanstroombdebiet. Dit heeft echter geen significante invloed voor deze situatie.

Figuur 24: invloed stuwkracht ventilatoren



De rook van een brand nabij of op de helicoïdale hellingen zal zich verspreiden over de 3 bouwlagen. Het is niet te voorspellen welke rookdetector het eerst zal activeren. Daarom wordt bij een detectie in dit gebied de totale capaciteit verdeeld over alle bouwlagen. Hoewel de terugstroming de 15m overschrijdt, blijft de brand lokaliseerbaar.

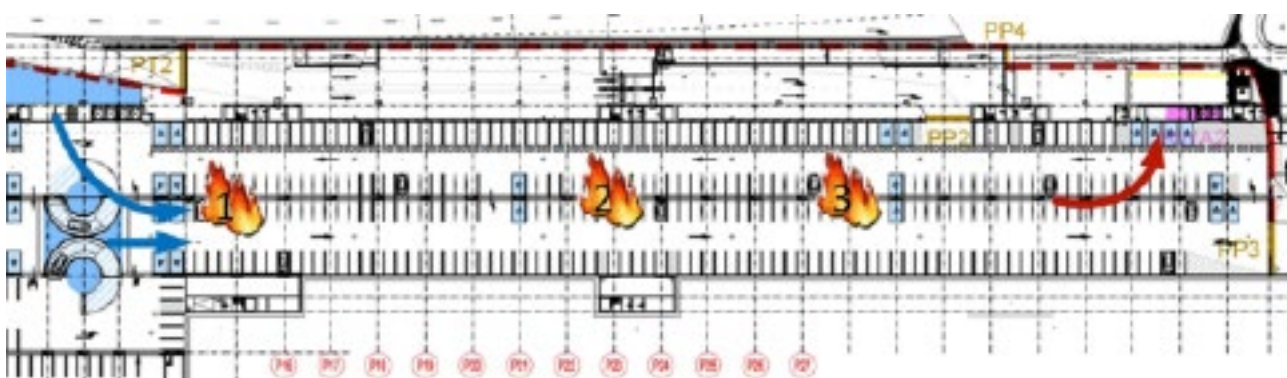
Hellingen complex

Eenmaal de brand is gelokaliseerd, wordt het volle debiet naar de geteisterde bouwlaag gestuurd. Hierdoor wordt de brandhaard benaderbaar. Figuur 28 toont het snelheidsveld met rood voor snelheden groter dan of gelijk aan 3m/s. De invloed van de **ceiling jet** op de luchtstroming is duidelijk te zien nabij de brandhaard.

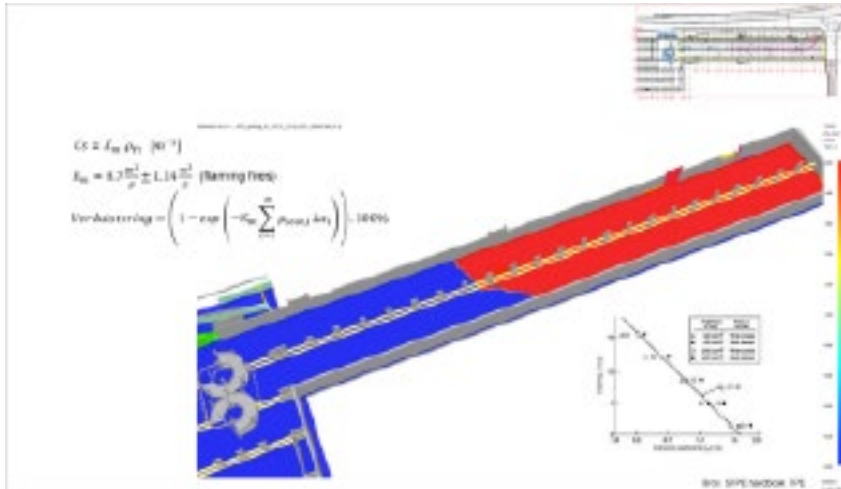
Het gedrag van de rook in het hellingen complex verschilt drastisch van de situatie in de parking. Door de grote hoogte zal een veel grotere rookmassa ontstaan met lagere temperatuur. In deze situatie wordt gekozen om de rooklucht bovenaan af te zuigen via een register in de schacht van RWA2 die uitgeeft op het hellingencomplex (Figuur 29).

Een deel van de rook zal zich ook verspreiden naar de K&R zone. Door de openingen in de dakplaat hier wordt de rook grotendeels op natuurlijke weg afgevoerd. Om de stijging van de rook te bevorderen wordt de toevoer van lucht naar de brand gemaximaliseerd door alle poorten op de laagste bouwlaag open te laten. Hiermee wordt ook voorkomen dat lucht via de openingen in de dakplaat

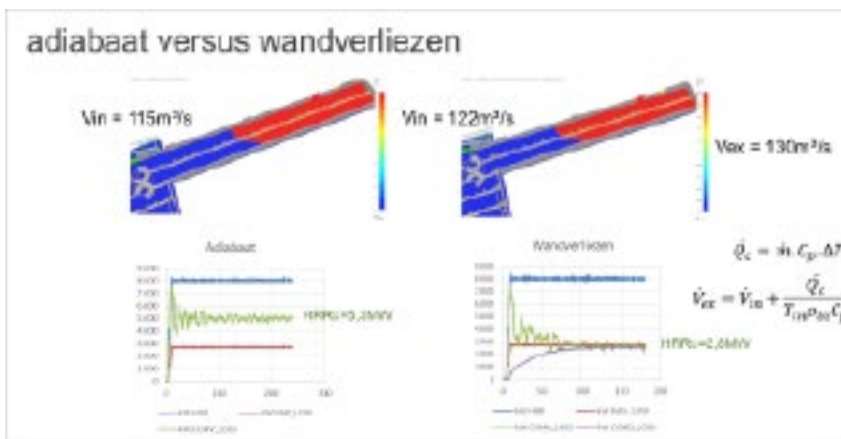
Figuur 25: locatie brandhaarden in rechter deel parking



Figuur 26: rookdichtheid en relatie tot zichtlengte



Figuur 27: relatie tussen extractie debiet en inlaat debiet, zonder en met warmteverlies naar de wand



wordt aangezogen, waarvan de stroming nog meer rookmassa produceert. Via de open poorten op -3 kan de brandweer de brand ook aanvalen.

K&R zone

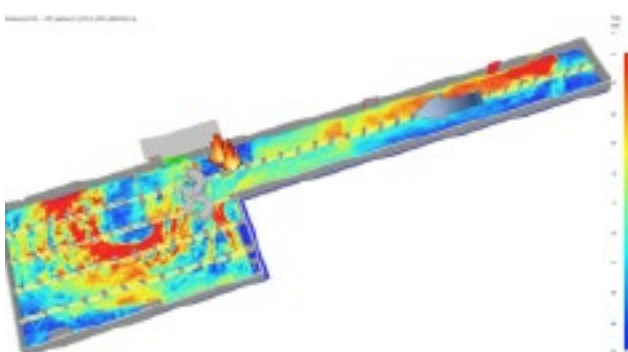
Als laatste belichten we de K&R zone. Hier is natuurlijke ventilatie aangewezen gezien de grote openingen in het dak. Ook hier worden op de laagste bouwlaag alle poorten open gehouden om voldoende luchttoevoer te voorzien (Figuur 30). Om rookverspreiding naar de parking tegen te gaan via de vide, wordt deze in overdruk gebracht door RWA1 in pulsatie te zetten.

Dit creëert enige verstoring van de rook maar de situatie blijft aanvaardbaar.

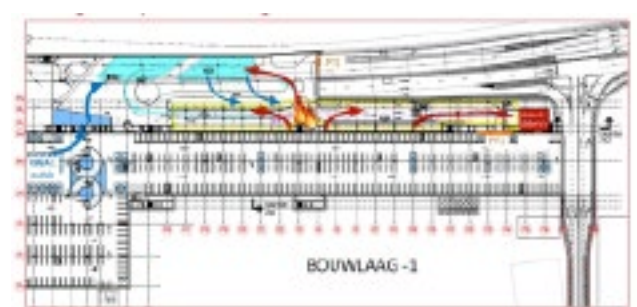
Tot slot wil ik vermelden dat koude CFD berekeningen aan de basis zullen liggen voor de aanvaarding van het systeem bij oplevering. ■

Les Baert

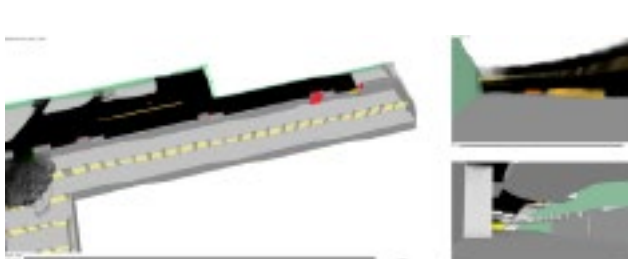
Figuur 28: brand nabij helicoidale hellingen, snelheidsveld



Figuur 29: brand in hellingen complex, luchtstromen



Figuur 30: brand in K&R zone, natuurlijke ventilatie



Figuur 31: brand in K&R zone, parking in overdruk via pulsatie schacht RWA 1

