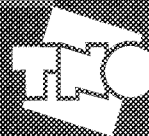


TNO-rapport / TNO report

2002-CVB-R05559

Safety Proef: CFD berekeningen Beneluxtunnel
Deel 1: Integrale rapportage



Nederlandse Organisatie
voor toegepast-
natuurwetenschappelijk
onderzoek / Netherlands
Organisation for Applied
Scientific Research



Centrum voor Brandveiligheid
Lange Kleiweg 5, Rijswijk
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T 015 284 20 00

F 015 284 39 55

TNO-rapport

2002-CVB-R05559

Safety Proef: CFD berekeningen Beneluxtunnel

Deel 1: Integrale rapportage

Datum	28 mei 2002
Auteur(s)	Ir. A.D. Lemaire
Aantal pagina's	18
Aantal bijlagen	A t/m C
Opdrachtgever	Ministerie van Verkeer en Waterstaat Dir.Gen. RWS/Bouwdienst RWS Postbus 20000 3502 LA UTRECHT
Projectnaam	CFD Beneluxtunnel
Projectnummer	006.10258/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2002 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding — 4
1.1	Achtergrond en vraagstelling — 4
1.2	Uitgangspunten — 4
1.3	Werkwijze — 4
1.4	Uitvoering en rapportage — 5
2	Modellering en uitvoering — 6
2.1	Inleiding — 6
2.2	Configuratie — 6
2.3	Materiaaleigenschappen — 11
2.4	Randvoorwaarden — 11
2.5	Fysische modellering en rekenmethode — 13
3	Resultaten — 15
3.1	Overzicht — 15
3.2	Presentatie — 15
3.3	Bespreking resultaten — 16
4	Conclusies — 17
5	Literatuur — 18
	Bijlage(n)
	A Het computerprogramma VESTA
	B Omrekening tussen rookgrootheden
	C Figuren behorende bij deel 1

Samenvatting

Als onderdeel van het project Safety Proef, een studie naar optimalisatie van tunnelveiligheid in Nederland, zal de Bouwdienst Rijkswaterstaat full-scale brandproeven uit laten voeren in de tweede Beneluxtunnel. In het kader hiervan heeft het Centrum voor Brandveiligheid van TNO een zestal Computational Fluid Dynamics berekeningen uitgevoerd voorafgaand aan de brandproeven. Deze CFD predicties dienden enerzijds om de benodigde beschermingsmaatregelen in de tunnel te kunnen bepalen en anderzijds om het gebruik van CFD als ontwerpgereedschap en als hulpmiddel bij veiligheidsstudies te evalueren.

De CFD berekeningen zijn uitgevoerd met het binnen TNO Bouw ontwikkelde programma VESTA en worden in onderhavige rapportage op een zodanige wijze gepresenteerd dat een vergelijking met de resultaten van de brandproeven eenvoudig mogelijk is.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en vraagstelling

Als onderdeel van het project Safety Proef, een studie naar optimalisatie van tunnelveiligheid in Nederland, zal de Bouwdienst Rijkswaterstaat full-scale brandproeven uit laten voeren in de tweede Beneluxtunnel. (Zie [1]). Voorafgaand aan deze proeven worden CFD-(= Computational Fluid Dynamics) berekeningen uitgevoerd, teneinde inzicht te verkrijgen in de ruimtelijke en tijdsafhankelijke temperatuur- en rookverdeling in de tunnel tijdens de proeven. Dit inclusief verschijnselen als stratificatie en backlayering, en niet zo zeer voor de omstandigheden direct boven de brandhaard, maar veeleer voor de situatie vanaf circa 15 m van de brandhaard.

De CFD predicties dienen enerzijds om de benodigde beschermingsmaatregelen in de tunnel te kunnen bepalen en anderzijds om het gebruik van CFD als ontwerpgereedschap en als hulpmiddel bij veiligheidsstudies te evalueren.

In het kader van bovenstaande vraagstelling heeft het Centrum voor Brandveiligheid van TNO Bouw in opdracht van de Bouwdienst RWS een zestal CFD berekeningen uitgevoerd.

1.2 Uitgangspunten

In overleg met de opdrachtgever werd besloten om de berekeningen uit te voeren op basis van de volgende uitgangspunten.

1. De gesimuleerde geometrie komt overeen met de voorgenomen panbrandproeven welke autobranden moeten simuleren. Dit inclusief een voldoende nauwkeurige modellering van:
 - de twee excentrisch geplaatste containers aan weerszijden van de brandpan(nen);
 - de plaats (in dwars- en lengterichting) van de voorgenomen brandproeven, die op circa 200 m van de uitgang van de tunnel zullen plaatsvinden;
 - de helling van de tunnel.
2. De modellering van de brandhaard is zodanig dat de intensiteit en de grootte van het vlamvolume van de panbrand voldoende tot hun recht komen. Dit met name om een goede schatting van de ergste thermische schade (die in de buurt van de brandhaard op zal treden) te kunnen geven.
3. Het verloop van het brandvermogen in de tijd wordt beschouwd als een invoergegeven en wordt dus vooraf gespecificeerd.

1.3 Werkwijze

Gelet op bovenstaande uitgangspunten heeft het Centrum voor Brandveiligheid (CvB) ervoor gekozen om de berekeningen uit te voeren met het zelf ontwikkelde CFD-programma VESTA. Dit programma is recent gevalideerd voor de specifieke toepassing in tunnels (zie [2]) en is door het CvB gebruikt bij de berekeningen ten behoeve van de geboorde HSL Zuid tunnel door het 'Groene Hart' (zie [3]).

Het CFD programma VESTA is gebaseerd op de eindige volume methode en berekent met behulp van het k- ϵ turbulentiemodel en een verbrandingsmodel het tijdsafhankelijke verloop van de locale snelheden, temperaturen en rookconcentraties in een tunnel. Dit rekening houdend met de stralingswarmteoverdracht in de rook en naar de wanden en met de warmtegeleiding in de wanden.

1.4 Uitvoering en rapportage

De berekeningen zijn in twee fasen uitgevoerd.

De eerste fase omvatte één berekening die specifiek bedoeld was om de maximale schade aan de tunnel te kunnen bepalen. Daarom werd uitgegaan van het maximaal beoogde brandvermogen (20 MW) en een zo laag mogelijke ventilatiesnelheid.

In de tweede fase werden de overige 5 gevallen berekend, waarbij het vermogen en de ventilatiesnelheden werden gevarieerd. Deze gevallen zijn met name uitgevoerd om na afloop van de brandproeven te kunnen beoordelen in hoeverre de voorspelde temperatuur- en rookdichtheids-verdelingen overeenstemmen met de gemeten waarden en wat dit voor gevolgen heeft voor de bruikbaarheid van CFD-berekeningen als ontwerpgereedschap en hulpmiddel bij veiligheidsstudies.

De rapportage van alle berekeningen is vastgelegd in twee delen.

Deel 1 behandelt de uitgangspunten, modellering, en rekenmethode en toont de belangrijkste resultaten.

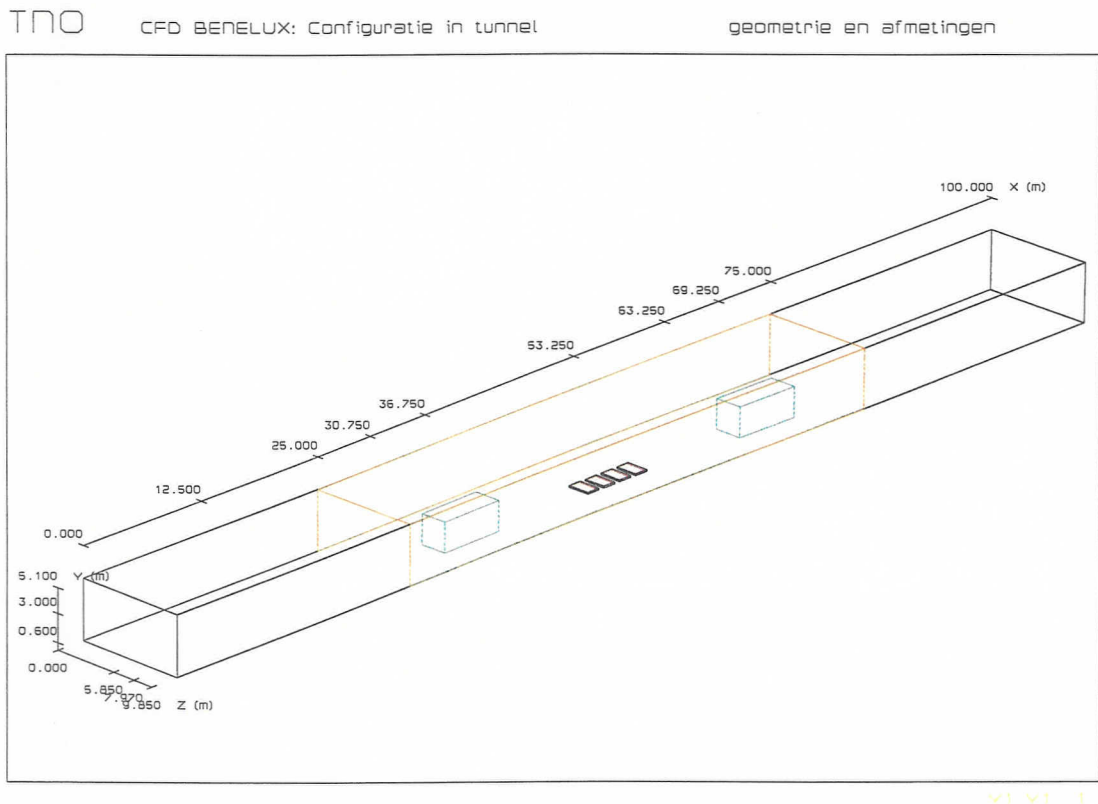
Deel 2 toont alle resultaten in grafische vorm op een wijze die directe vergelijking met de resultaten van de feitelijke brandproeven mogelijk maakt. Zie [4].

Onderhavig rapport is deel 1 van de rapportage.

De brandhaard bevindt zich op circa 200 m van uitgang Noord op de rechterrijstrook (de strook voor het langzame verkeer). Van bovenaf gezien ligt deze rijstrook aan de kortste (binnen) zijde van de tunnelbuis. Op dezelfde rijstrook bevinden zich ook twee containers, en wel één container 10 m stroomafwaarts van de brand en één container 10 m stroomopwaarts van de brand. De brandhaard bestaat uit 4 brandstofbakken. De wanden en het plafond van de tunnel worden over een strook van 50 m rondom de brandhaard beschermd met brandwerende bekleding.

Gemodelleerde configuratie

Figuur 2.2 toont een deel van de gemodelleerde configuratie over een afstand van 100 m rondom de brandhaard. De gehele configuratie omvat de totale lengte van de tunnelbuis. De tunnelbuis is als een rechthoekige doos gemodelleerd, 840 m lang, 9,85 m breed en 5,10 m hoog. De kromming van de buis in zowel horizontale als verticale richting is dus in geometrisch zin verwaarloosd, evenals de lichte kromming van het dak in de breedte van de buis.



Figuur 2.2a De gemodelleerde tunnelconfiguratie rondom de brandhaard (richting x-as van Zuid naar Noord, d.w.z. in rijrichting): 3D aanzicht

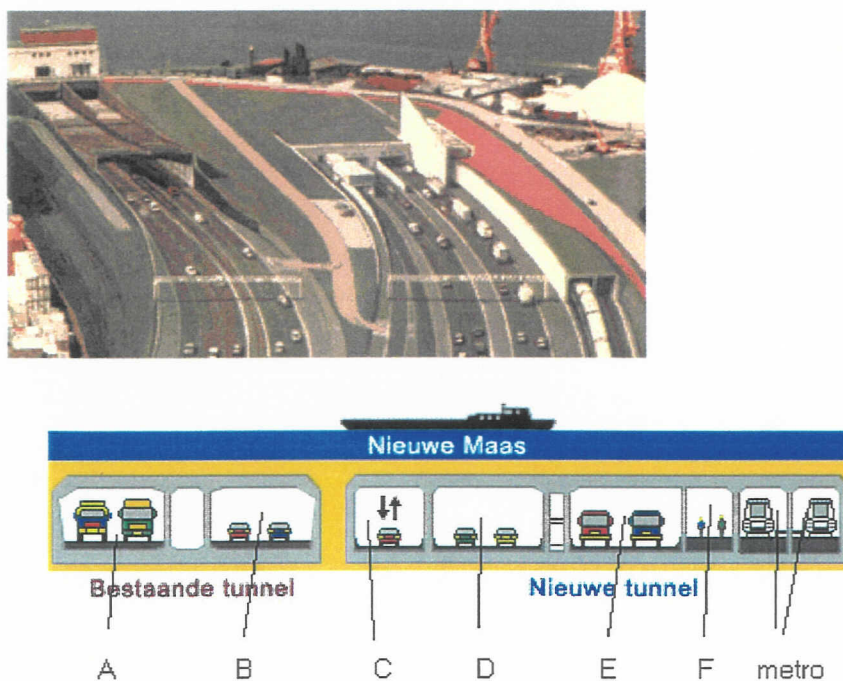
2 Modelling en uitvoering

2.1 Inleiding

Onder modellering wordt hier verstaan:

1. De vereenvoudiging van de werkelijke situatie naar een situatie die als invoer voor het rekenprogramma kan dienen, met name voor wat betreft:
 - de geometrie van de tunnel, obstakels en brandhaard, en eventueel de omgeving;
 - de helling van de tunnel;
 - de ruwheid van de wanden;
 - de begin- en randvoorwaarden van de berekeningen.
2. De modellering van de fysisch-chemische verschijnselen te weten:
 - de stroming, inclusief convectie;
 - de verbranding;
 - de warmtestraling;
 - de warmtegeleiding in de wanden.
3. De numerieke oplosmethode.

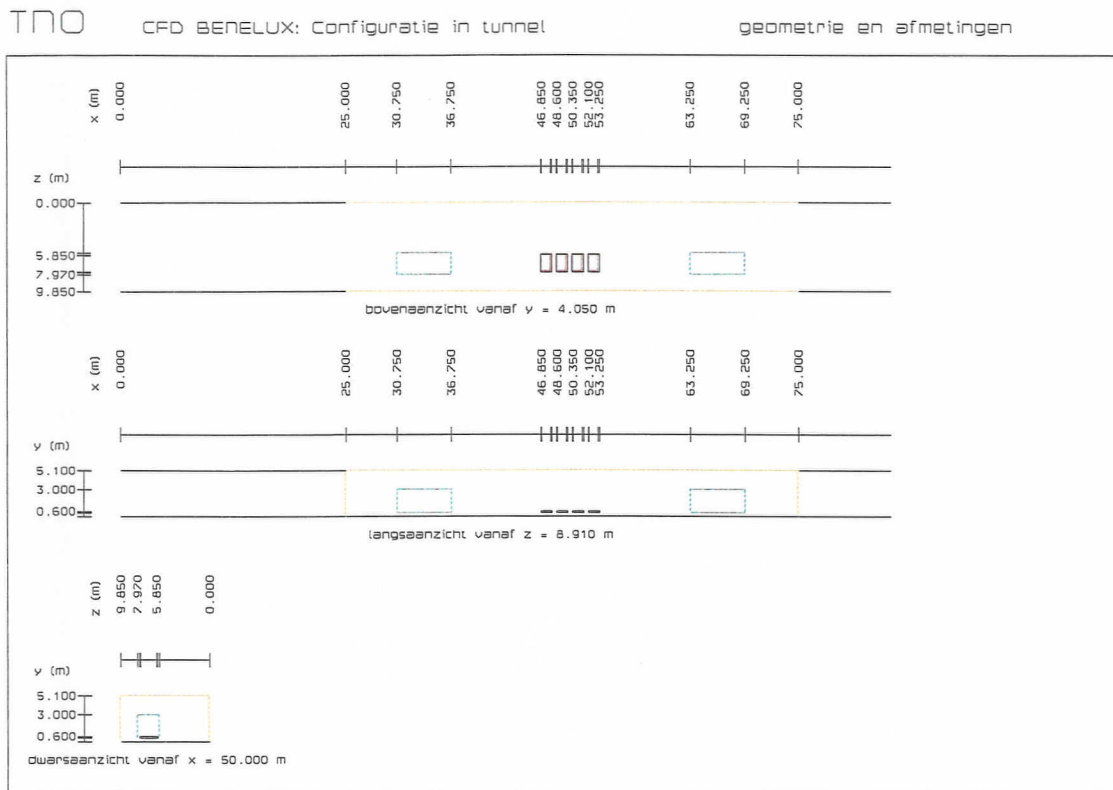
2.2 Configuratie



Figuur 2.1- De zuidelijke toerit van de bestaande (links) en nieuwe (rechts) Beneluxtunnel en de aanduiding van de tunnelbuizen.

Uitgangssituatie

Figuur 2.1 geeft een overzicht van de tweede Beneluxtunnel. De brandproeven worden uitgevoerd in buis D met de verkeersstroom en ventilatierichting van Zuid naar Noord.



Verklaring figuur 2.2

Afmetingen:

tunnelbuis: $L \times H \times B = 840 \times 5,10 \times 9,85$ m

containers (groen) (op 0,4 m van de vloer): $l \times h \times b = 6,0 \times 2,6 \times 2,44$ m

brandstofbakken (rood) totaal: $l \times b = 6,5 \times 2,0$ m

extra isolatie (bruin): $l = 50$ m

Posities uitgaande van in figuren getoond (arbitrair) coördinatenstelsel:

ingang tunnelbuis op $x = -590$ m en uitgang op $x = 250$ m.

rechterrijstrook: $z = 5,00 - 8,50$ m.

midden brandhaard op $x = 50$ m en $z = 6,75$ m.

uiteinden totale brandhaard: $x = 36,75 - 53,25$ m en $z = 5,75 - 7,75$ m

midden containers op $z = 6,75$ m

container 1: $x = 30,75 - 36,75$ m en $z = 5,53 - 7,97$ m

container 2: $x = 63,25 - 69,25$ m en $z = 5,53 - 7,97$ m

extra isolatie tegen dak en wanden: $x = 25,0 - 75,0$ m

Figuur 2.2b De gemodelleerde tunnelconfiguratie rondom de brandhaard (richting x-as van Zuid naar Noord, d.w.z. in rijrichting): boven- en zij aanzicht en verklaring

De invloed van de verticale kromming op de grootte en richting van de zwaartekrachtvector t.o.v. het wegdek is wel meegenomen. Dit resulteert in een component van de zwaartekracht evenwijdig aan het wegdek die ongelijk nul is en in een component van de zwaartekracht loodrecht op het wegdek die kleiner is dan de maximale waarde. Beide componenten variëren in de lengterichting van de tunnel. (De x-as in figuur 2.2)

Gelet op de relatief geringe kromming is de verwachting dat het op bovenstaande wijze 'recht trekken' van de tunnel geen significante invloed op de resultaten zal hebben.

Verder is bij de feitelijke berekeningen de oorsprong van het getoonde coördinaten stelsel in figuur 2.2 verschoven naar de instroomopening, zodat het midden van de brandhaard dan op $x = 640$ m ligt en de uitstroomopening op $x = 840$ m.

Brandhaard en brandstof

De brandhaard bestaat uit vier naast elkaar geplaatste brandstofbakken (onderlinge afstand 0,50 m) waarnaar brandstof wordt verpompt via een leidingensysteem. Elke brandstofbak bestaat uit een buitenbak en een binnenbak. De buitenbak is gevuld met koelwater en de binnenbak met de brandstof. De bodem van de binnenbak staat scheef, zodat de grootte van het brandstofoppervlak (en dus het vermogen) kan worden geregeld.

Bij de berekeningen is echter van een vast brandstofoppervlak per bak uitgegaan, namelijk het maximale oppervlak en is het vermogen per bak gevarieerd door de verbrandingssnelheid per bak te variëren. Hierbij is per brandstofbak slechts één bak gemodelleerd met de afmetingen van de buitenbak. Bovendien is bij de berekeningen met een vermogenscurve tot 5 MW slechts één brandstofbak gemodelleerd die zich in het midden van de brandhaard bevindt. Figuur 2.3 toont de brandhaard in detail.

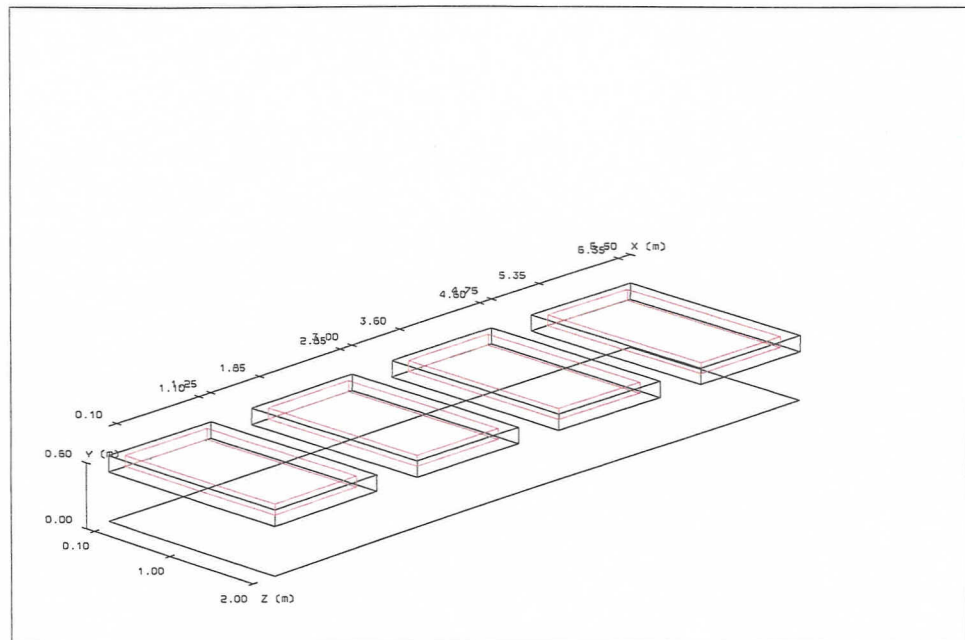
De brandstofbakken hebben een maximaal brandstofoppervlak van 1,0 m x 1,8 m en kunnen elk maximaal 5 MW vermogen leveren, uitgaande van een geschatte verbrandingssnelheid van circa 5 mm/min.

Bij de CFD berekeningen is ervan uitgegaan dat de brandstof uit 95 % zuiver n-heptaan bestaat. Terwijl de CFD berekeningen al gaande waren, werd echter besloten om de feitelijke brandproeven met een mengsel van 60 % n-heptaan en 40 % toluen uit te voeren, teneinde meer rook te produceren. Deze wijziging is niet meegenomen in onderhavige rapportage

TNO

CFD BENELUX: Brandstofbakken

geometrie en afmetingen

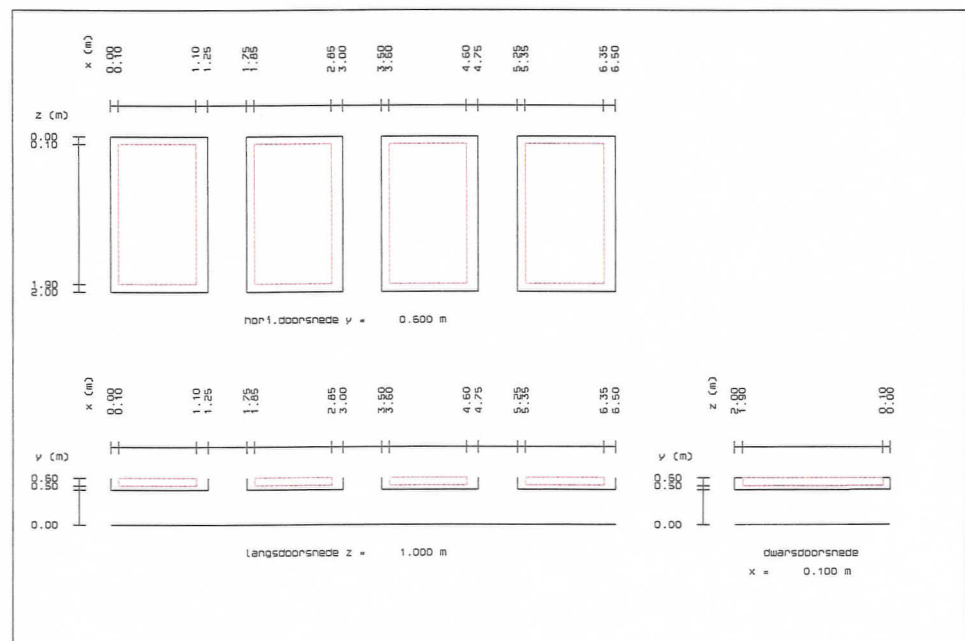


22 222 1

TNO

CFD BENELUX: Brandstofbakken

geometrie en afmetingen



23 223 1

Figuur 2.3 De brandstofbakken

2.3 Materiaaleigenschappen

Tunnel

De tunnelwanden, vloer en plafond zijn van beton, met eigenschappen conform Eurocode 4, namelijk: warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda = 2,0 \text{ W/mK}$ en warmtecapaciteit $\rho C_p = 2,6 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. Verondersteld is dat de wanden, vloer en plafond zo dik zijn dat er nog geen warmteverlies naar buiten optreedt gedurende de onderzochte periode van 20 minuten. De invloed van de betegeling van de wanden tot 3,5 m hoogte is verwaarloosd.

Isolatie

De strook van 50 m extra isolatie bestaat uit 25 mm dik Promacalad-900, met warmtecapaciteit $\rho C_p = 308 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ en warmtegeleidingscoëfficiënt λ respectievelijk 0,14, 0,14, 0,16, 0,19 en 0,24 W/mK bij temperatuur T respectievelijk 20, 200, 400, 600 en 800 °C. Uit verkennende 1-dimensionale warmteberekeningen blijkt dat voor wat betreft de invloed van het warmtetransport door de wanden op de lucht/rook temperaturen, ervan uit mag worden gegaan dat het beton achter de isolatie niet wordt opgewarmd.

Straling

Aangenomen is dat alle oppervlakken een emissiecoëfficiënt 0,9 hebben.

Wandruwheid

Verondersteld is een gemiddelde tunnelweerstandsfactor van 0,021. Dit is gemodelleerd met behulp van een aangepaste wandfunctie in het k-ε turbulentiemodel van VESTA. Het betreft hier een wandfunctie voor een turbulente grenslaagstroming over een ruw oppervlak. De 'oppervlakteruwheid' is zodanig gekozen dat het drukverlies in de tunnel ten gevolge van een turbulente pijpstrooming overeenkomt met het drukverlies behorende bij een tunnelweerstandsfactor van 0,021. De warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt met dezelfde aangepaste wandfunctie bepaald.

2.4 Randvoorwaarden

Ventilatie fase 1

In fase 1 wordt geen ventilatie opgelegd en wordt ook geen invloed van de wind verondersteld. Daarom is aan beide openingen van de tunnel een druk van 0 Pa opgelegd. Er is wel verondersteld dat er intree- en uittreeverliezen optreden. Deze zijn gesteld op:

- drukverlies van $0,5 \rho v^2 \text{ Pa}$ bij instroom met $\rho = \text{dichtheid lucht (kg/m}^3\text{)}$ en $v = \text{gemiddelde snelheid in de tunnelbuis (m/s)}$
- geen drukverlies bij uitstroom.

Verondersteld is een gemiddelde luchtsnelheid in de tunnel van 0 m/s bij aanvang met een turbulentiegraad van 0,10 m/s. De beginwaarden ten behoeve van het turbulentiemodel zijn gekozen op basis van eerdere berekeningen en gesteld op: $k = 0,015 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en $\varepsilon = 0,014 \text{ m}^2/\text{s}^3$.

Ventilatie fase 2

In fase 2 is wel een opgelegde ventilatiesnelheid verondersteld. Deze is aan de instroomzijde van de tunnel als een uniform profiel opgelegd. De bijbehorende turbulentie-intensiteit is op 10 % gesteld, zoals gebruikelijk. Voor aanvang van de feitelijke berekeningen is eerst met VESTA het isotherme snelheidsprofiel in de tunnel

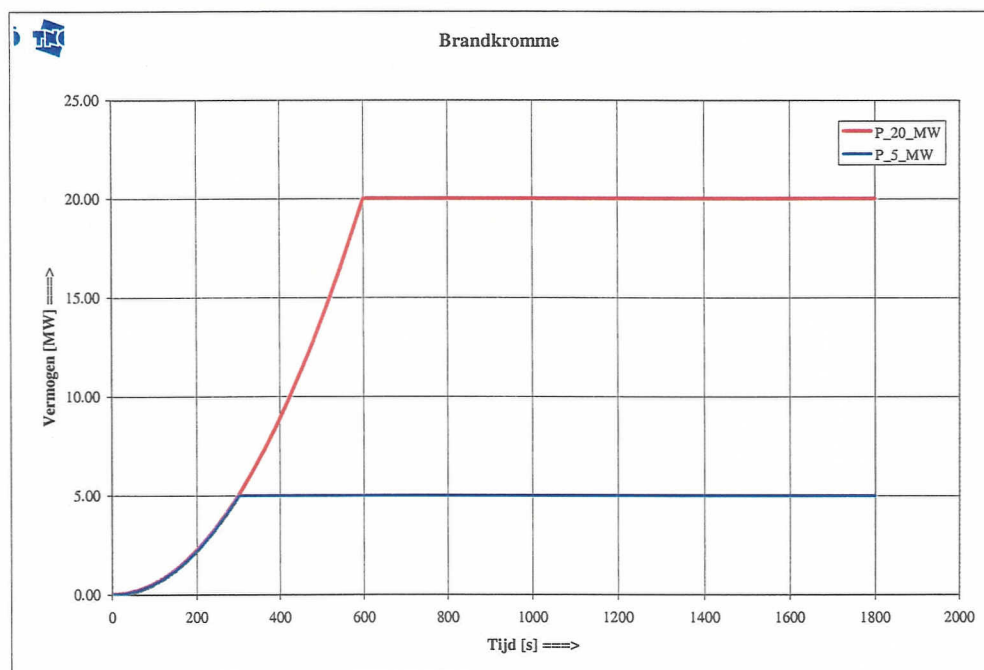
berekend met de bijbehorende turbulentie-eigenschappen. Deze resultaten zijn vervolgens als beginwaarden gebruikt voor de feitelijke berekeningen.

Temperaturen

De temperatuur in de openingen van de tunnel is 10 °C verondersteld, evenals alle temperaturen bij aanvang. Er is geen warmtestroom door de wanden van de containers.

Brandvermogen

Bij de berekeningen zijn twee vermogenscurves gehanteerd, en wel een curve tot 20 MW en een curve tot 5 MW. Dit wordt getoond in figuur 2.4.



Figuur 2.4 De vermogenscurves tot 20 MW (4 bakken) en tot 5 MW (één bak)

De vermogenscurve tot 20 MW representeert een kleine vrachtwagen brand. Het vermogen loopt van $t = 0$ s tot 600 s kwadratisch op van 0 MW naar 20 MW en blijft vervolgens tot $t = 1200$ s constant op 20 MW. De curve wordt gerealiseerd door eerst één bak tot het maximale vermogen van 5 MW te regelen, vervolgens een tweede bak aan te steken en tot het maximale vermogen te regelen (dus 10 MW totaal), vervolgens een derde bak tot het maximale vermogen te regelen en tenslotte de vierde bak.

De vermogenscurve tot 5 MW representeert een snelle autobrand. Het vermogen loopt van $t = 0$ s tot 300 s kwadratisch op van 0 MW tot 5 MW en blijft vervolgens tot $t = 1200$ s constant op 5 MW. Het verloop van $t = 0$ s tot 300 s is dus gelijk aan het verloop van de 20 MW curve. De vermogenscurve wordt gerealiseerd met één bak in het midden van de brandhaard (op $x = 640$ m).

Zoals reeds in § 2.2 gesteld is bij de berekeningen het brandstofoppervlak per bak constant gehouden en is de vermogenscurve gerealiseerd door de verbrandingssnelheid te variëren. Dit in tegenstelling tot bij de geplande experimenten waar het brandstofoppervlak wel wordt gevarieerd en van een vrijwel constante

verbrandingsnelheid wordt uitgegaan. Naar verwachting zal dit verschil tussen model en werkelijkheid echter geen significante invloed hebben op de beoogde resultaten op 15 m vanaf de brandhaard en op de schatting van de maximaal mogelijke schade.

Uitgaande van een nummering van de bakken van 1 tot 4 beginnende bij de bak het meest stroomopwaarts, zijn achtereenvolgens de volgende bakken aangestoken: nummer 3, nummer 2, nummer 4 en nummer 1. Merk op dat door deze wijze van verbranden de brandhaard bij aanvang (bak 3) zich niet precies in het midden tussen de twee containers bevindt, maar iets verschoven stroomafwaarts (naar uitgang Noord).

2.5 Fysische modellering en rekenmethode

CFD methode

De berekeningen zijn uitgevoerd met het programma VESTA. Voor een algemene beschrijving van dit programma en de gehanteerde rekenmethoden met literatuurverwijzing wordt verwezen naar bijlage A. De specifiek bij deze berekeningen gebruikte modellen worden onderstaand behandeld.

Alle gevallen zijn berekend met een niet-equidistant rekenrooster van $119 \times 14 \times 22 = 36.552$ rekencellen, waarbij de kleinste rekencellen zich daar bevinden waar de grootste snelheids- en/of temperatuurgradienten optreden. De keuze van het rooster is gebaseerd op ervaringen met eerdere berekeningen in tunnels. Zie [2] en [3].

De gecombineerde stromings-,stralingsberekening is uitgevoerd met een tijdstap van 12 seconden, waarbij binnen elke tijdstap 90 iteraties werden uitgevoerd. De berekening werd op een SUN Sparc werkstation (300 MHz processor) uitgevoerd onder het UNIX operating system en duurde circa 4 etmalen voor een simulatieperiode van 1200 s. De keuze van tijdstapgrootte en aantal iteraties per tijdstap was gebaseerd op de ervaringen met de eerdere berekeningen in tunnels. Er is gekozen voor een 'brute force' benadering, d.w.z. dat niet is gepoogd de rekentijd te optimaliseren door bijvoorbeeld de tijdstap aan te passen aan de veranderingen van het stromingsbeeld. (Kleine tijdstap d.w.z lange rekentijd bij grote veranderingen versus grotere tijdstap, d.w.z kortere rekentijd bij kleinere veranderingen.).

Verbranding

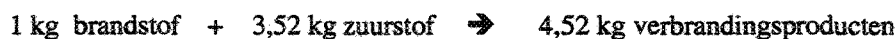
De verbranding is gemodelleerd door middel van de één stappen reactie:



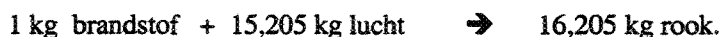
oftewel:



wat resulteert in:



of ook (bij volledig zuurstofverbruik):



Het model neemt aan dat de verbranding instantaan plaatsvindt daar waar brandstof en zuurstof gelijktijdig aanwezig zijn, waarbij dus alle aanwezige zuurstof wordt verbrand of alle aanwezige brandstof. De verbrandingssnelheid is dus onafhankelijk gesteld van de chemische reactiesnelheid en van de turbulente menging van de brandstof met de zuurstof. Deze manier van verbrandingsmodellering wordt het 'mixed is burnt' principe genoemd en biedt de mogelijkheid om rekening te houden met de invloed van de stroming op de grootte en oriëntatie van het berekende vlamvolume. Het is het meeste eenvoudige verbrandingsmodel.

Rookeigenschappen

De stralingseigenschappen van de rook zijn berekend met het Weighted Sum of Grey gases model. Hierbij is gebruik gemaakt van waarden die door Smith et. al. [5] zijn bepaald voor een gas-roet mengsel bestaande uit gelijke volumina kooldioxide en waterdamp uitgaande van een roetproduktie van 0,012 kg/kg verbrande brandstof.

De optische rookdichtheid is berekend op basis van een rookpotentieel van 100 (Bel/m) m³/kg verbrande brandstof. De waarde is gebaseerd op een meting bij CvB volgens NEN 6066. [6]. Voor een uitleg van het begrip rookpotentieel wordt verwezen naar bijlage B van dit rapport.

Warmtestraling

De modellering van de warmteoverdracht door straling is gebaseerd op de Discrete Transfer Methode. Hiervoor zijn 16 stralingsrichtingen gebruikt. Zie verder bijlage B.

3 Resultaten

3.1 Overzicht

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de berekende gevallen.

Geval A is in fase 1 uitgerekend en beoogt de maximale schade te berekenen. De snelheid 0 m/s houdt in dat er geen mechanische ventilatie is en geen invloed van de wind.

Geval B t/m F zijn in fase 2 uitgerekend en gaan allen uit van een opgelegde instroomsnelheid. Geval F bevat een negatieve instroomsnelheid, d.w.z. de snelheid is aan de Noordzijde opgelegd en is van Noord naar Zuid is gericht.

Tabel 3.1 Overzicht berekende gevallen.

Geval	Vermogen (MW)	Snelheid (m/s)	Fase
A	20	0	1
B	5	+ 1	2
C	5	+ 6	2
D	20	+ 6	2
E	20	+ 3	2
F	20	- 6	2

3.2 Presentatie

Alle resultaten worden in deel 2 van de rapportage gegeven. Daarom worden in onderhavige rapportage slechts representatieve waarden gepresenteerd die een indruk moeten geven van de verschillen tussen de diverse berekende gevallen.

Achtereenvolgens worden voor alle gevallen gepresenteerd.

Ruimtelijke verdelingen op de verticale langsdoorsnede precies in het midden van de rechthoekstrook (en dus de brandhaard) per geval op twee representatieve tijdstippen. Dit over een lengte van 250 m vanaf uitgang Noord, namelijk voor $x = 590$ m tot 840 m, waarbij het midden van de brandhaard zich op $x = 640$ m bevindt. De hoogte is hierbij een factor 4 groter weergegeven dan de lengte. Per geval en tijdstip worden van boven naar onder getoond:

- het snelheidsprofiel in de lengterichting in m/s
- de drukverdeling in Pa
- de temperatuurverdeling in °C
- de rookdichtheid per meter in 1/m
- de turbulentiegraad in m/s

In de legenda's wordt aangegeven welke waarde bij welke kleur contourlijn hoort.

Daarnaast worden per aangegeven interval nog vier contourlijnen getoond voor waarden die evenredig verdeeld zijn tussen het aangegeven interval. Dus bijvoorbeeld tussen het interval van 50 °C en 100 °C worden isothermen getoond van 60, 70, 80 en 90 °C.

Temperaturen als functie van de longitudinale afstand tot de brand op zichthoogte, op 0,6 m onder het plafond en op 0,10 m onder het plafond na 20. De temperaturen worden getoond voor de volgende posities:

- Z_L, Z_M, Z_R: op 1, 5 m hoogte resp. boven de linkerijstrook, in het midden en boven de rechterijstrook
- F_M: op 4,5 m hoogte (0,6 m onder het plafond) in het midden
- P_L, P_M, P_R: op 5,0 m hoogte (0,1 m onder het plafond) resp. boven de linkerijstrook, in het midden en boven de rechterijstrook.

Het tijdstip waarop het rookfront passeert als functie van de afstand tot de brand, waarbij de grens van het rookfront wordt bepaald door de zichtlengte (ZL) op 0,6 m onder het plafond van de ene wand naar de andere wand. Dit voor de grenswaarden $ZL = 100, 25, 10, 2.5$ en 1 m.

Stralingsflux en stralingstemperatuur op ooghoogte (1,5 m) als functie van de tijd op de beoogde meetposities.

De posities (xc,z) zijn: pos 1 (-10, 6.75), pos 2 (0, 3.10), pos 3 (10,6.75), pos 4 (20,3.10), pos 5 (10,6.75). Positie 1 t/m 4 zijn gericht naar het centrum van de brand (xc,y,z) = (0,1.5,6.75). Positie 5 is horizontaal omhoog gericht naar het plafond.

3.3 Bespreking resultaten

Een bespreking van de resultaten valt buiten het kader van onderhavige rapportage. De Bouwdienst RWS zal de berekeningsresultaten bespreken als onderdeel van de beoogde evaluatie en in haar rapportage hierover meenemen.

4 Conclusies

Het is mogelijk gebleken alle vooraf vastgelegde CFD berekeningen binnen redelijke termijn uit te voeren.

De resultaten zijn op een zodanige wijze gepresenteerd dat een vergelijking met de resultaten van de brandproeven eenvoudig mogelijk is.

Mede door de ervaringen met soortgelijke berekeningen in tunnels zijn geen numerieke moeilijkheden ondervonden bij het verkrijgen van een oplossing.

De benodigde rekentijd per geval (circa 4 etmalen) is lang en kan een praktische toepassing van CFD als ontwerpgereedschap in de weg staan.



Ir. A.D. Lemaire

5 Literatuur

1. Huijben J.W.
Werkbeschrijving Proeven Brandproef 2001, Safety Proef
Steunpunt Tunnelveiligheid, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-
Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, 18 juli 2001
2. Centre d'Etudes des Tunnels (CETU)
Evaluation of Memorial Tunnel CFD Simulations
Report for the Ministry of Transport and Public Works, The Netherlands , January
1999
3. Lemaire A.D., N.J. van Oerle en P.H.E. van der Leur
CFD-simulaties brand in de boortunnels van de HSL-Zuid
TNO Rapport, nr. 2000-CvB-R00675, april 2001
4. Lemaire A.D.
Safety Proef: CFD berekeningen Beneluxtunnel, Deel2: Gedetailleerde presentatie
resultaten
TNO rapport, nr. 2001-CvB-R , mei 2002
5. Smith T.F., Z.F. Shen and J.N. Friedman
Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model
Journal of Heat Transfer, vol. 104, no. 4, pp 602-608, 1982.
6. Paap F,
Samenstelling van brandstof met verhoogde rookontwikkeling
TNO rapport (concept), 12 oktober 2001.

A Het computerprogramma VESTA

Inleiding

Binnen TNO is het CFD-model VESTA ontwikkeld voor het simuleren van brand en rookverspreiding in de 'Gebouwde Omgeving'.

Met de ontwikkeling van VESTA werd in 1986 begonnen in samenwerking met de Technische Universiteit Delft. Het beoogde eindproduct diende primair binnen TNO voor advieswerkzaamheden aan derden. Het programma diende hiertoe de specifieke voordelen van 'academische' software (eigen beheer computercode) te combineren met die van commerciële pakketten (vriendelijk voor de gebruiker, bedrijfszeker). Nieuwe, experimentele modellen en methoden werden vermeden.

Door het in eigen beheer ontwikkelen en onderhouden van een CFD-model kon de computercode worden gewijzigd ten behoeve van specifieke studies en konden verbeterde en aanverwante modellen (bijv. straling) eenvoudig worden toegevoegd.

Kenmerken

Het computerprogramma VESTA berekent de verdeling van luchtsnelheden, drukken, temperaturen en rookconcentraties in verblijfsruimten voor zowel stationaire als tijdsafhankelijke omstandigheden. Hiertoe worden de vergelijkingen opgelost die de 3-dimensionale, (turbulente) stroming en het transport van warmte en stof beschrijven, alsmede de vergelijkingen voor warmtestraling. Bovendien bevat het programma een eenvoudig verbrandingsmodel.

Berekeningen met VESTA zijn uitgevoerd op o.a. Silicon Graphics, Sun en Hewlett Packard werkstations. Alle werkend onder het UNIX besturingssysteem.

Zoals vrijwel alle CFD-modellen bestaat VESTA uit afzonderlijke modules voor invoer (pre-processing), berekeningen en presentatie (post-processing). De modules zijn geschreven in standaard FORTRAN 77.

De invoer-module

Met behulp van de invoer-module geeft de gebruiker de geometrie, randvoorwaarden en materiaal-eigenschappen op, genereert het rekenrooster en stelt de parameters in voor de sturing van het rekenproces. De gegevens worden ingevoerd door het invullen van invoerfiles, die door de invoer-module worden gegenereerd en getest.

Het programma accepteert rechthoekige geometrische vormen en ook schuine of eenvoudig gekromde vlakken.

De reken-module

De reken-module omvat de modellen voor de berekening van de stroming, de warmtestraling, de warmtegeleiding en eventueel de verbranding.

Stroming

Het stromingsmodel lost de vergelijkingen op waarmee de stroming en het warmte- en stoftransport van een onsamendrukbaar medium worden beschreven. Turbulentie wordt hierbij gemodelleerd met het bekende k- ϵ model en stoftransport is gebaseerd op meevoering door het medium (lucht) en turbulente menging. De stroming in de nabijheid van vaste wanden wordt benaderd met zogenaamde standaard wandfuncties, inclusief de mogelijkheid om wandruwheden op te leggen [1].

Het stelsel gekoppelde vergelijkingen wordt gediscretiseerd en iteratief opgelost volgens de bekende eindige volume methode [2]. Hierbij wordt de ruimte opgedeeld in roostercellen, waarover de vergelijkingen worden geïntegreerd en opgelost. Dit houdt in dat voor elke roostercel de behoudswetten voor massa, impuls en energie worden toegepast, waarbij wordt verondersteld dat het transport door de wanden van een roostercel slechts wordt bepaald door de waarde van de grootheden in de eigen roostercel en in de aangrenzende roostercellen. De oplossing van de drukverdeling gebeurt met het zogenaamde SIMPLE algoritme.

Tijdsafhankelijke berekeningen worden uitgevoerd met behulp van een volledig impliciete Euler tijddiscretisatie waarbij binnen een tijdstap het volledige stelsel vergelijkingen iteratief wordt opgelost.

Straling

Het stralingsmodel is gebaseerd op de Discrete Transfer Methode [3]. Het model simuleert het warmte transport ten gevolge van straling tussen 'grijze', diffuus reflecterende vlakken door een 'grijs' gas. Hiertoe berekent het model voor elke zijde van een roostercel die samenvalt met een stralend vlak, de hoeveelheid warmtestraling die uit de omgeving wordt ontvangen. De ruimte boven het vlak wordt hiervoor onderverdeeld in een van te voren vastgelegd aantal richtingen (ruimtehoeken). Daarna berekent het model de temperatuur van het vlak uit de balans tussen de ontvangen en uitgezonden warmtestraling, de warmteafgifte aan de lucht en eventuele warmtegeleiding door het vlak.

Warmte-indringing

Het warmtegeleidingsmodel berekent het ééndimensionale warmtetransport in de wanden op basis van een één dimensionaal

De presentatie-module

De presentatie-module verzorgt de grafische weergave van de berekende grootheden op de bij CFD-modellen gebruikelijke wijze. De weergave kan zowel in 3D perspectief als in 2D projectie op een doorsnede van de ruimte. De stroming wordt weergegeven door middel van gekleurde pijltjes die richting en grootte van de snelheid aangeven. Bij een 2D projectie vertegenwoordigen grootte en richting van de pijltjes de geprojecteerde snelheid op de doorsnede, maar duidt de kleur de absolute snelheid aan. De andere berekende grootheden, zoals druk, turbulentie-intensiteit, temperatuur, concentratie en comfortparameters worden door middel van gekleurde contourlijnen weergegeven.

De grafische weergave is vector georiënteerd en in HPGL-formaat. Andere grafische formaten zijn op vrij eenvoudige wijze te realiseren, omdat gebruik wordt gemaakt van een in-huis ontwikkelde grafische bibliotheek.

Referenties

1. Launder B.E., 1976, Heat and mass transport in turbulence. Topics in applied Physics. (ed. Bradshaw P.), Springer, Berlin Germany
2. Patankar S.V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, Washington D.C., USA
3. Lockwood F.C., and Shah N.G., 1981, A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures, *18th Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 1405-1414.

B Omrekening tussen rookgrootheden

Homogene rook

Volgens de wet van Beer en Lambert geldt dat de intensiteit I_0 van een lichtstraal die door een homogene rooklaag gaat in een bepaalde richting over een afstand z verzwakt tot een intensiteit I_z , volgens:

$$I_z / I_0 = 10^{-z k C} \quad (1)$$

met: z = afstand (m)
 k = extinctiecoëfficiënt per rookconcentratie $((1/m)/(kg/m^3) = m^2/kg)$
 C = rookconcentratie (kg/m^3)

Hierbij wordt k constant verondersteld.

Vanwege het feit dat de optische rookdichtheid RD (bel) in een bepaalde richting over een bepaalde afstand z gedefinieerd is als:

$$RD = \log_{10} (I_0 / I_z) = -\log_{10} (I_z / I_0) \quad (2a)$$

dus ook:

$$I_z / I_0 = 10^{-RD} \quad (2b)$$

volgt uit (2b) en (1) de relatie:

$$RD = z k C \quad (3)$$

Bovenstaande relatie (en dus de wet van Beer en Lambert) maakt het mogelijk om een optische rookdichtheid RD_1 per lengte eenheid (1/m) te definiëren, waarvoor geldt:

$$RD_1 = k C \quad (4)$$

Zoals eerder gesteld is de zichtlengte ZL in een bepaalde richting omgekeerd evenredig met de optische rookdichtheid over 1 meter RD_1 in die richting. Een veel gehanteerde vuistregel gebaseerd op onderzoek is hierbij:

$$ZL = 1 / RD_1 \text{ voor lichtreflecterende voorwerpen} \quad (5a)$$

$$ZL = 2,5 / RD_1 \text{ voor lichtgevende voorwerpen.} \quad (5b)$$

Met bovenstaande formules is eenvoudig vast te stellen dat (5a) en (5b) feitelijk betekenen dat de zichtlengte gelijk is aan die afstand waarbij de intensiteit tot 10 % respectievelijk 0,32 % van de oorspronkelijke intensiteit is verzwakt.

Indien we nu aannemen dat de rookproductie W (kg/s) evenredig is aan de hoeveelheid brandstof die per tijdseenheid wordt verbrand WB (kg/s), dan zal de rookconcentratie C (kg/m³) ook evenredig zijn met de concentratie verbrande brandstof CB (kg/m³). We kunnen nu stellen:

$$C / CB = W / WB = \gamma \quad (6)$$

en dit substitueren in (1). Dit geeft:

$$I_z / I_0 = 10^{-z k \gamma CB} \quad (7)$$

Het product $k \gamma$ wordt gedefinieerd als het rook potentieel RP met eenheid (1/m) per concentratie (kg/m^3) verbrande brandstof. Dus:

$$RP = k \gamma \quad (8)$$

en dus ook:

$$I_z / I_0 = 10^{-z RP CB} \quad (9)$$

Vanwege (1) en (3) volgt ook uit (9) dat geldt:

$$RD = z RP CB \quad (10)$$

Uit (9) volgt dat het rookpotentieel RP experimenteel kan worden bepaald door meting van de intensiteitsverzwakking van een lichtstraal door een homogeen rookmengsel in een vast volume. De concentratie CB is hierbij eenvoudig te bepalen door meting van de gewichtsafname van de brandstof en het bekende volume waarbinnen de rook wordt opgemengd.

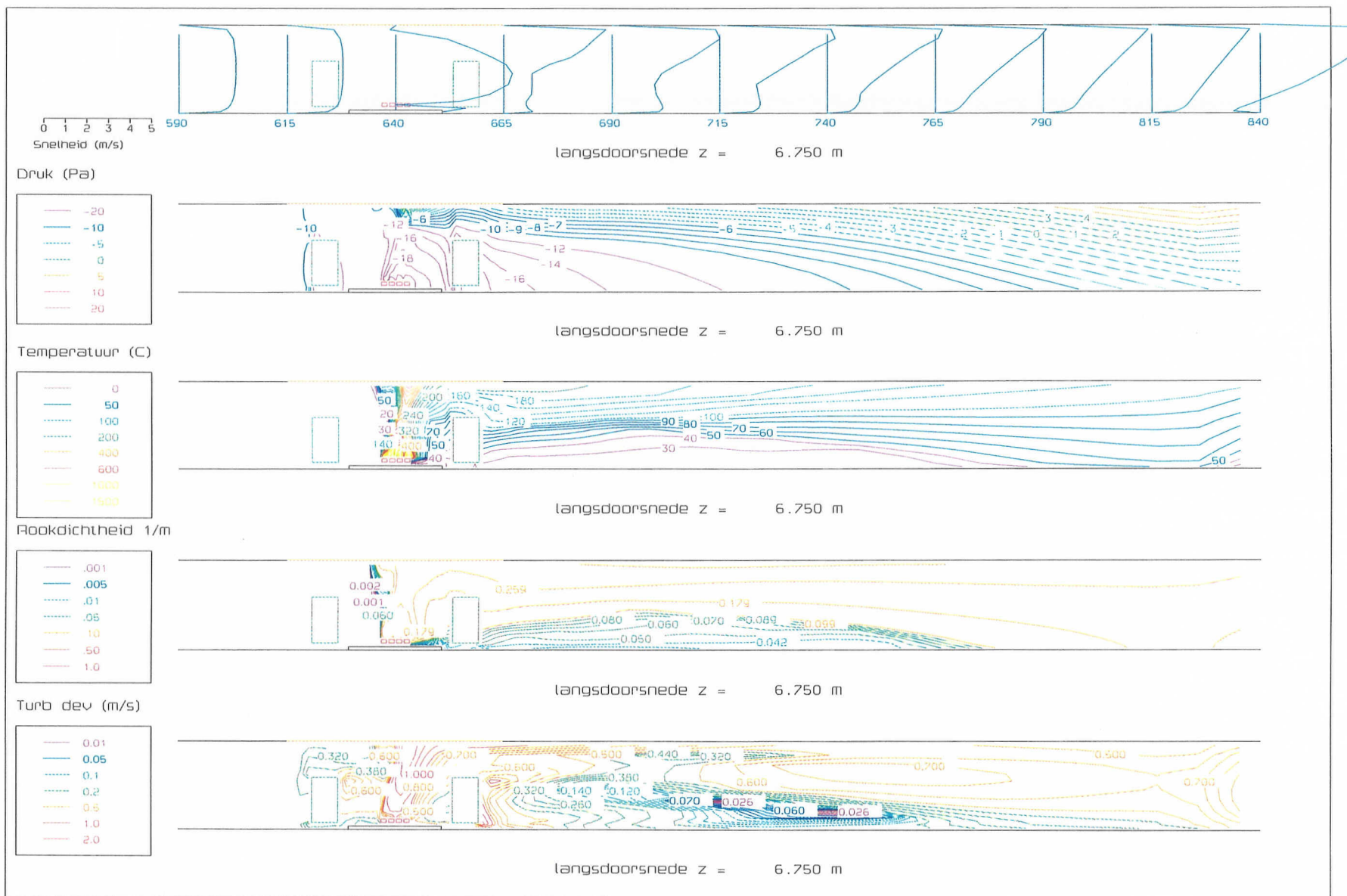
Met (6) en (10) volgt ook:

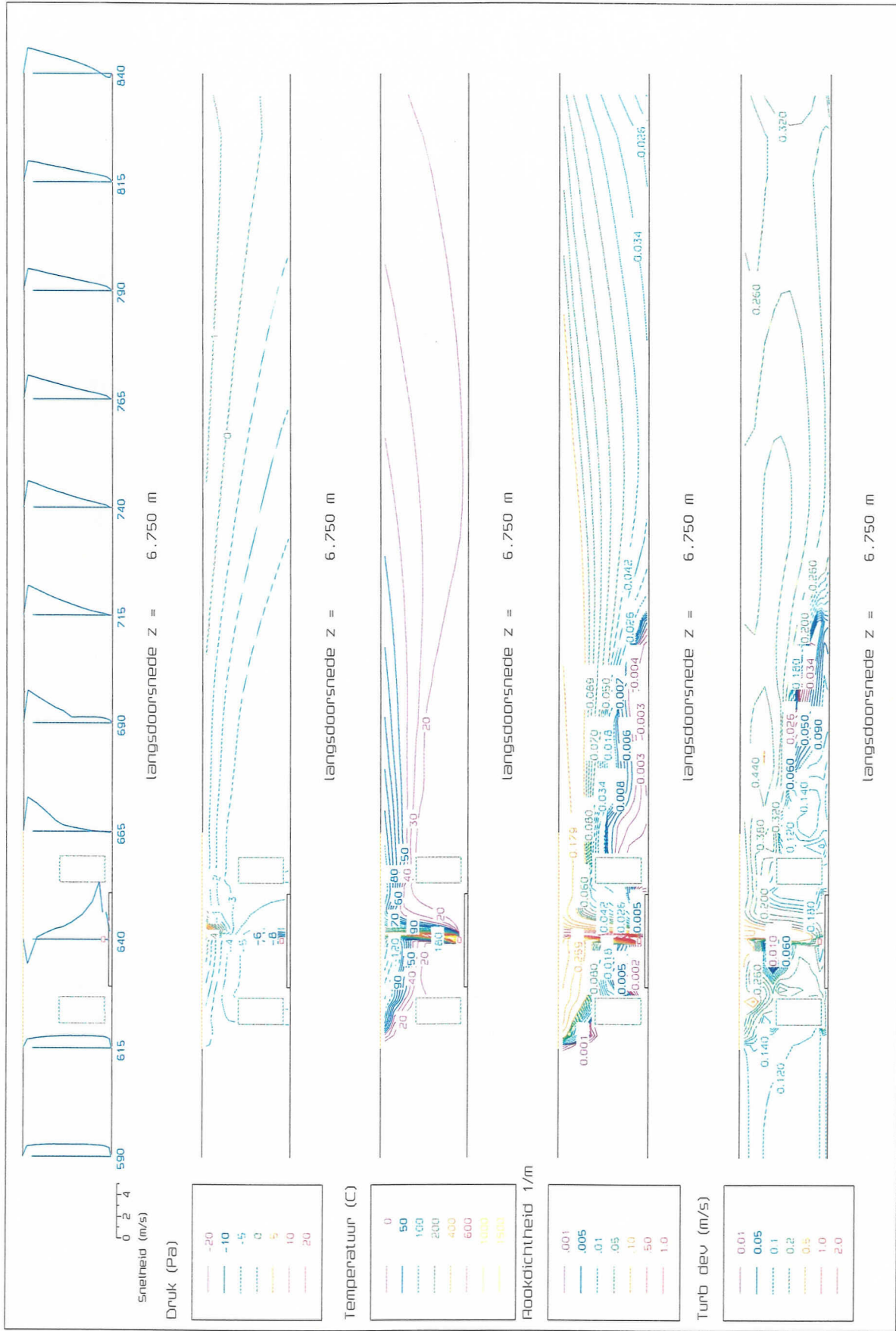
$$RD = z RP C / \gamma \quad (11)$$

Indien de verbrandingswaarde (J/kg) van de brandstof constant wordt genomen, kan het rookpotentieel ook worden uitgedrukt in (m^2) per (J) geproduceerde warmte.

Merk op dat de experimentele bepaling van het rookpotentieel dus het product oplevert van de extinctiecoëfficiënt k per rookconcentratie en de verhouding γ van de rookproductie / productie verbrande brandstoffen. Uit het rookpotentieel is dus niet te bepalen hoeveel massa rook wordt geproduceerd! Dit kan alleen als op een andere wijze de extinctiecoëfficiënt k per rookconcentratie kan worden bepaald, of als daar op theoretische gronden een waarde voor kan worden aangenomen.

C Figuren behorende bij deel 1

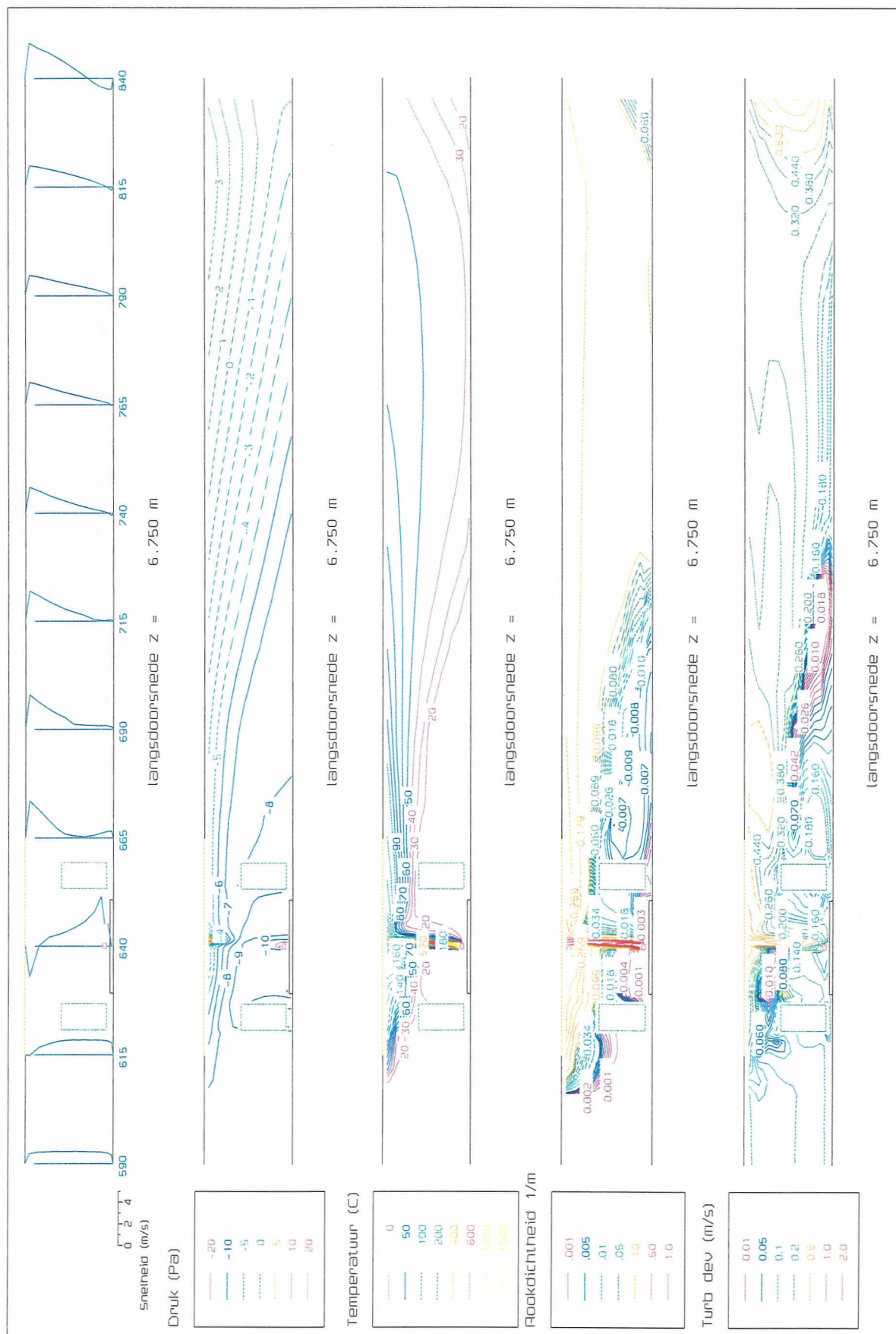


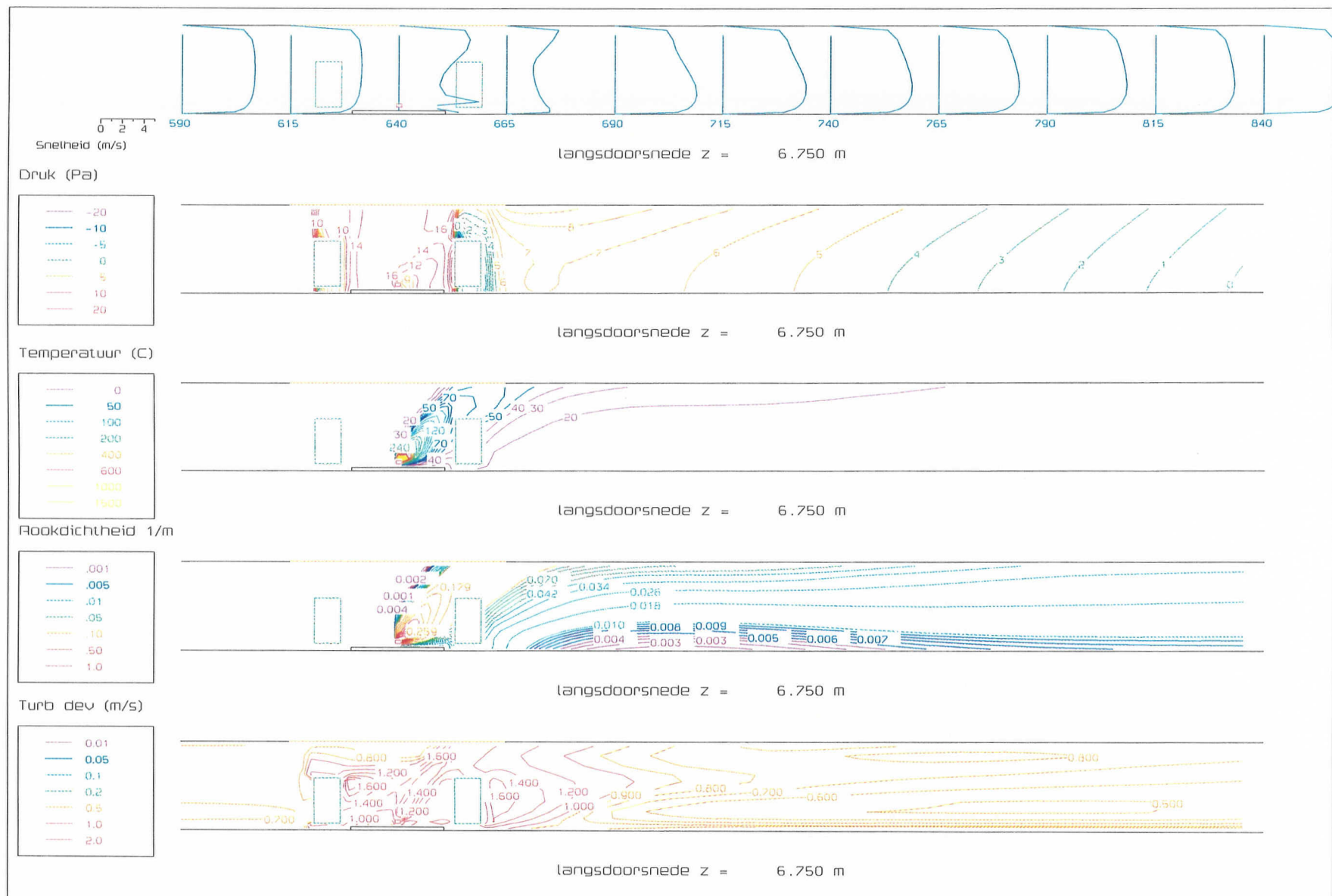


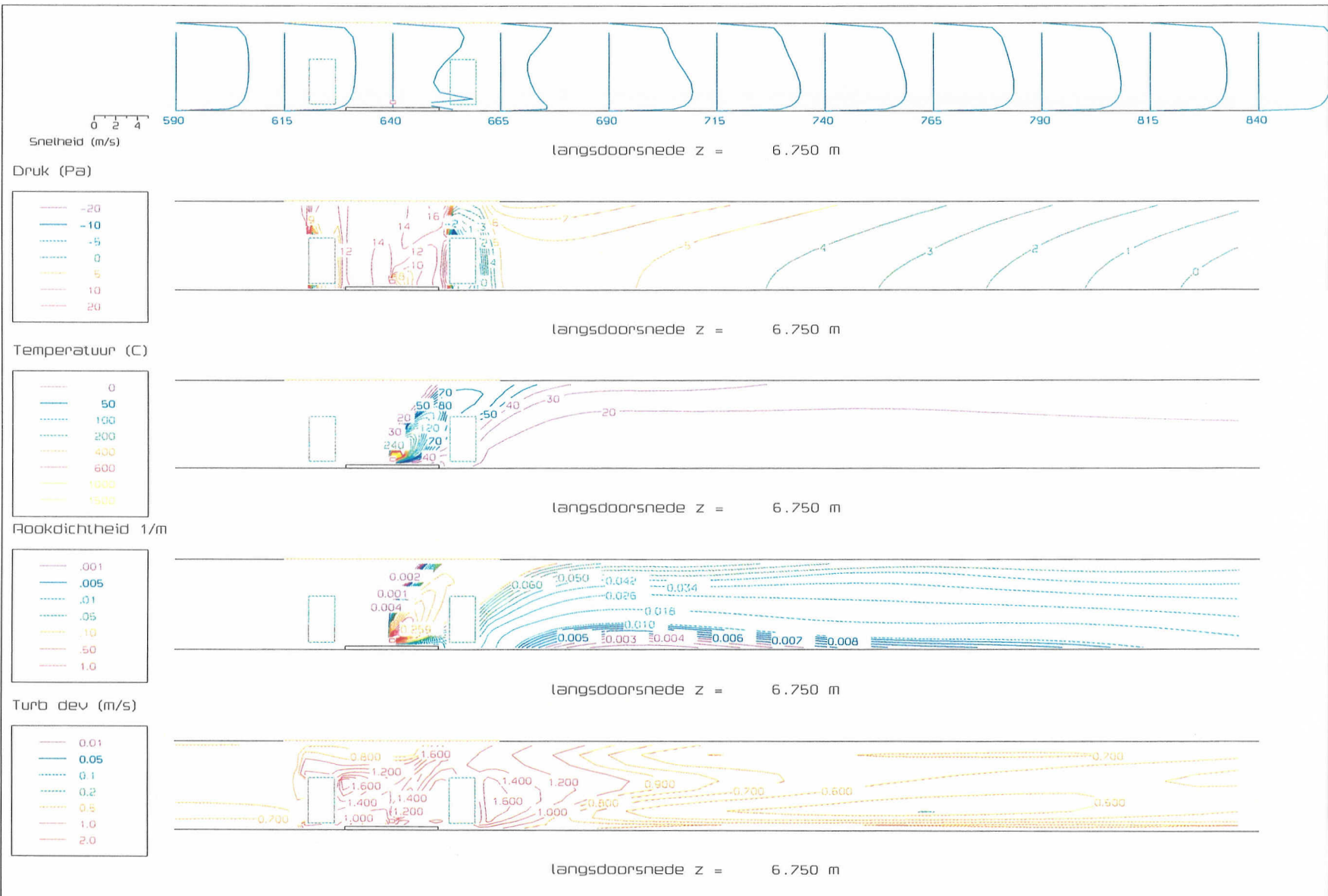
TNO

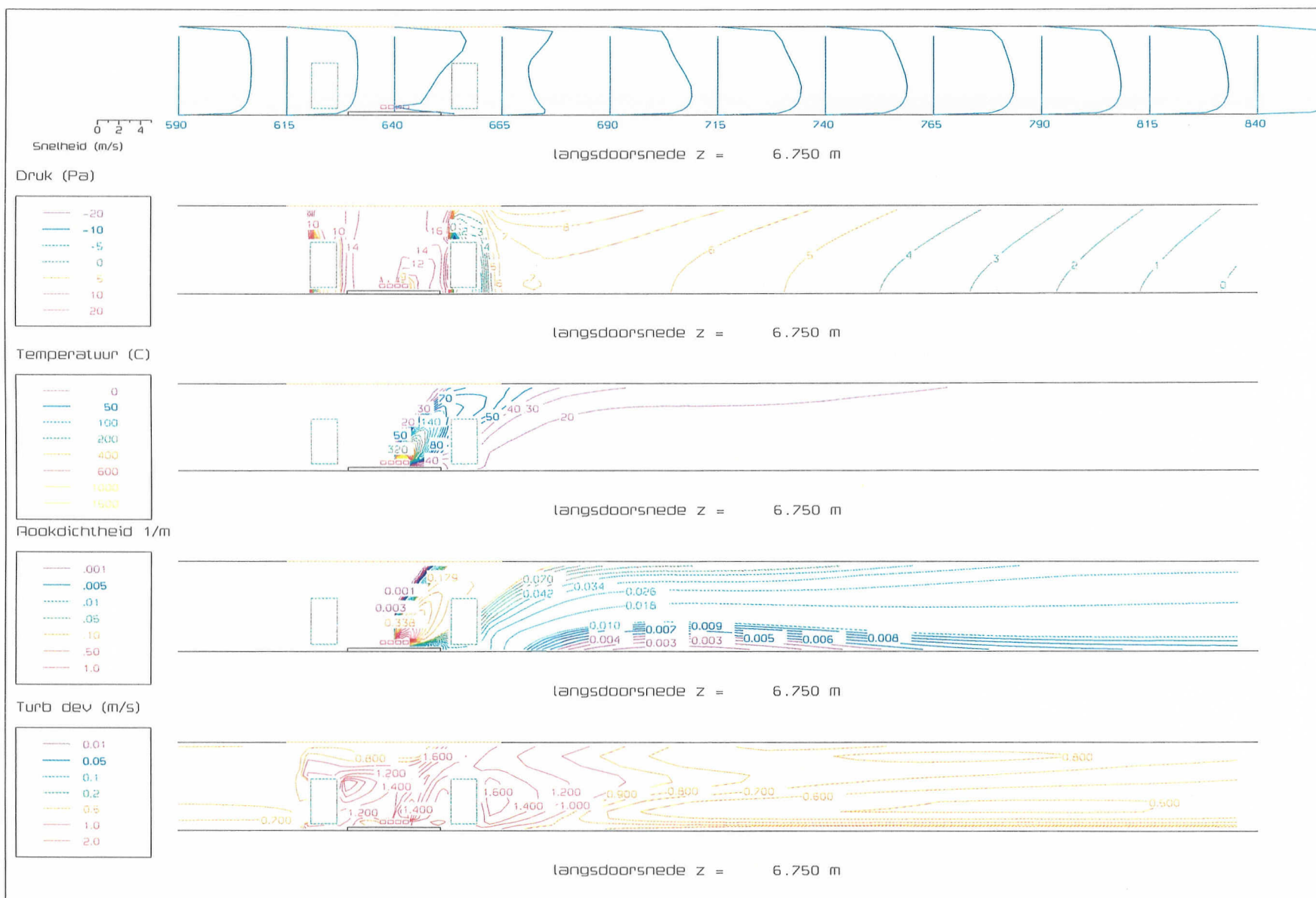
CFD BENELUX: GEVAL B

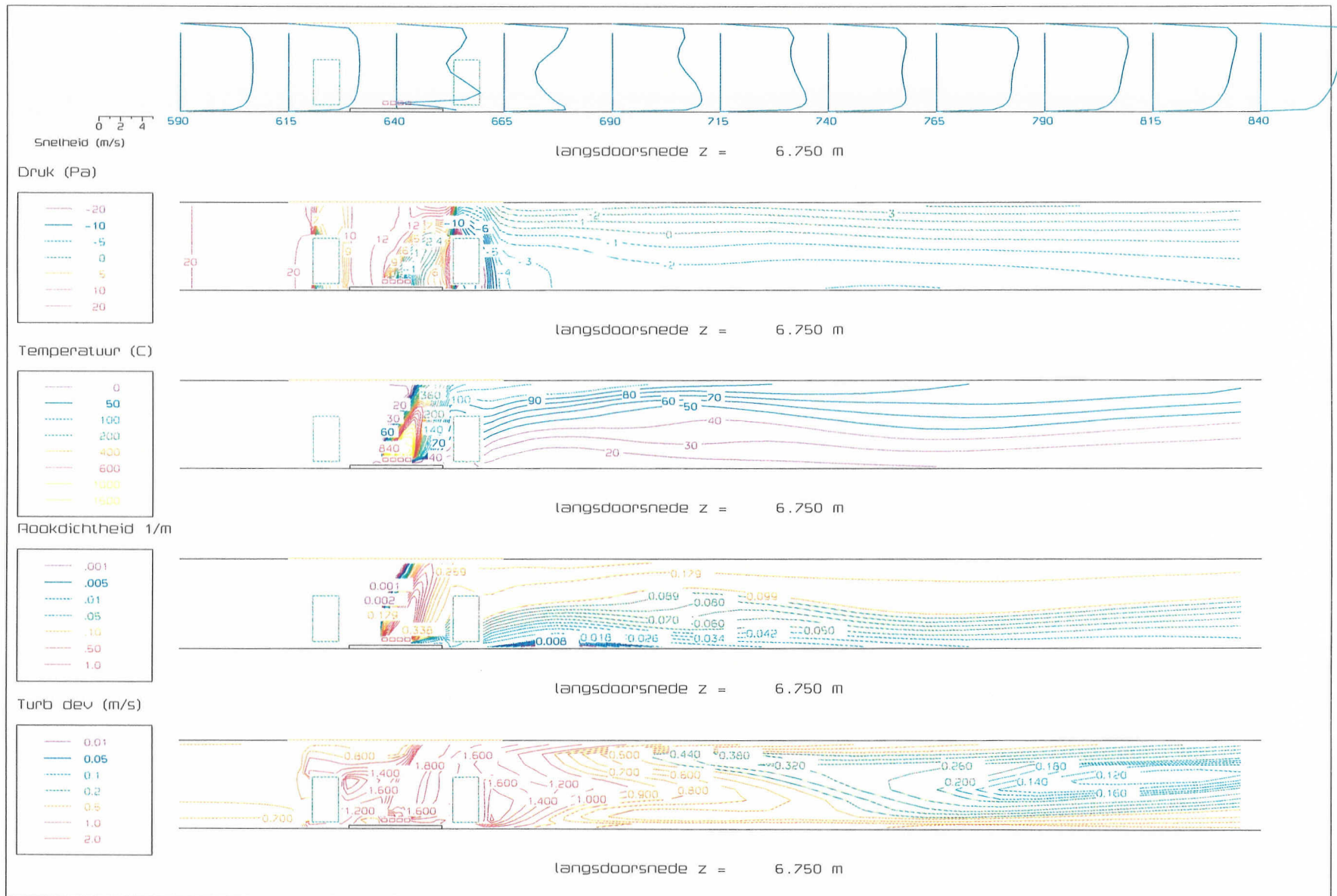
TIME = 1200 s = 20 min







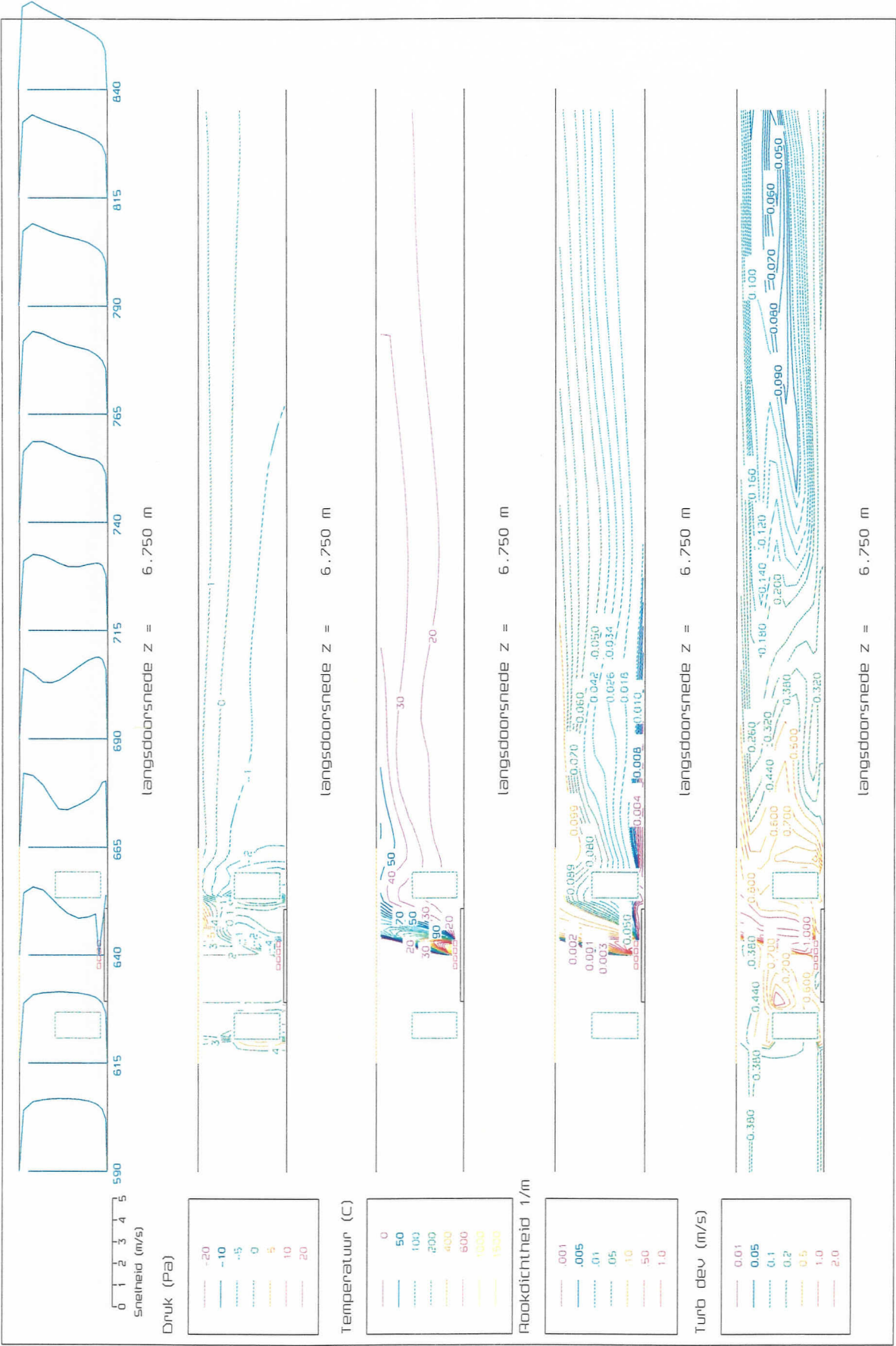


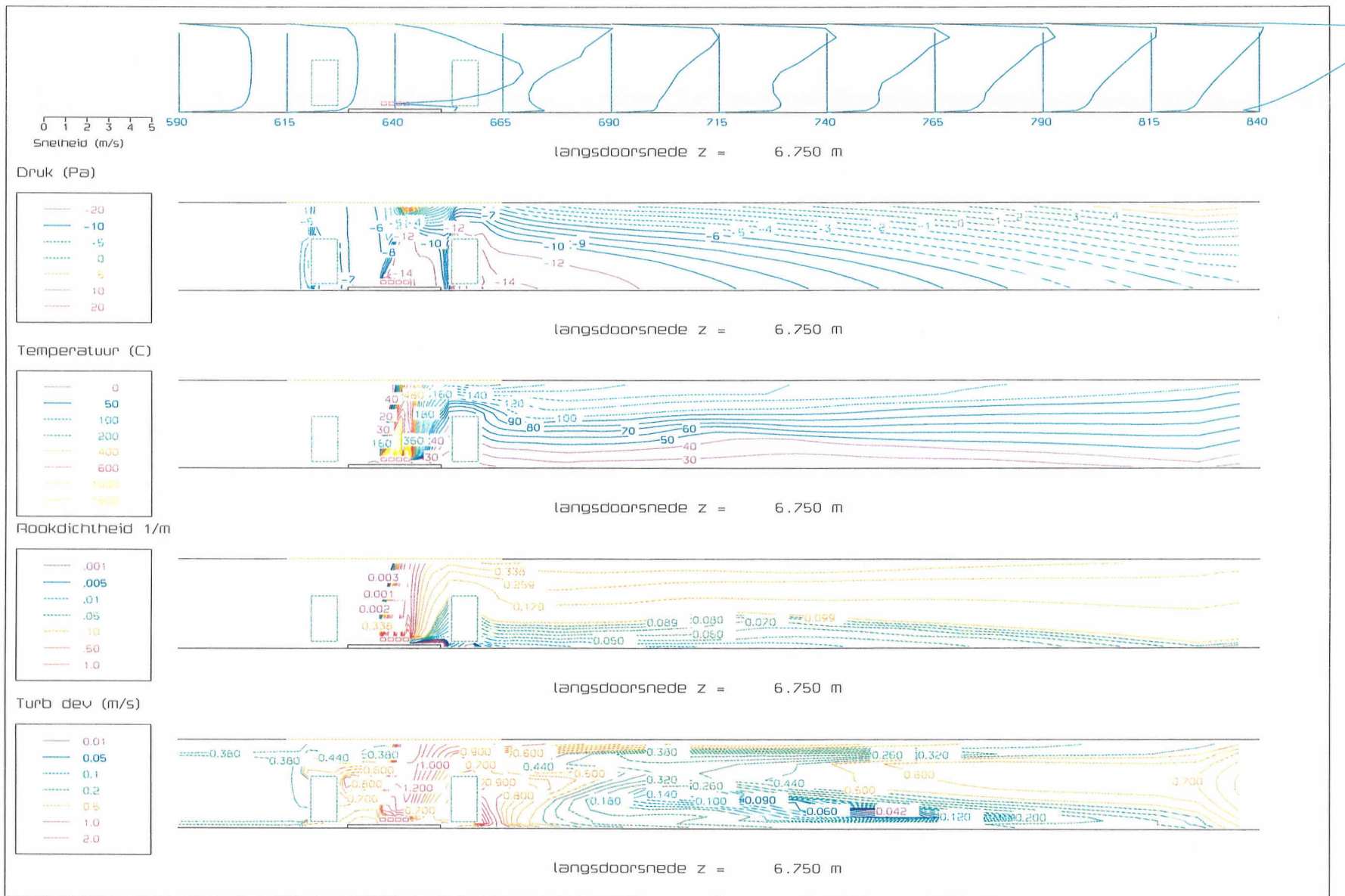


TNO

CFD BENELUX: GEVAL E

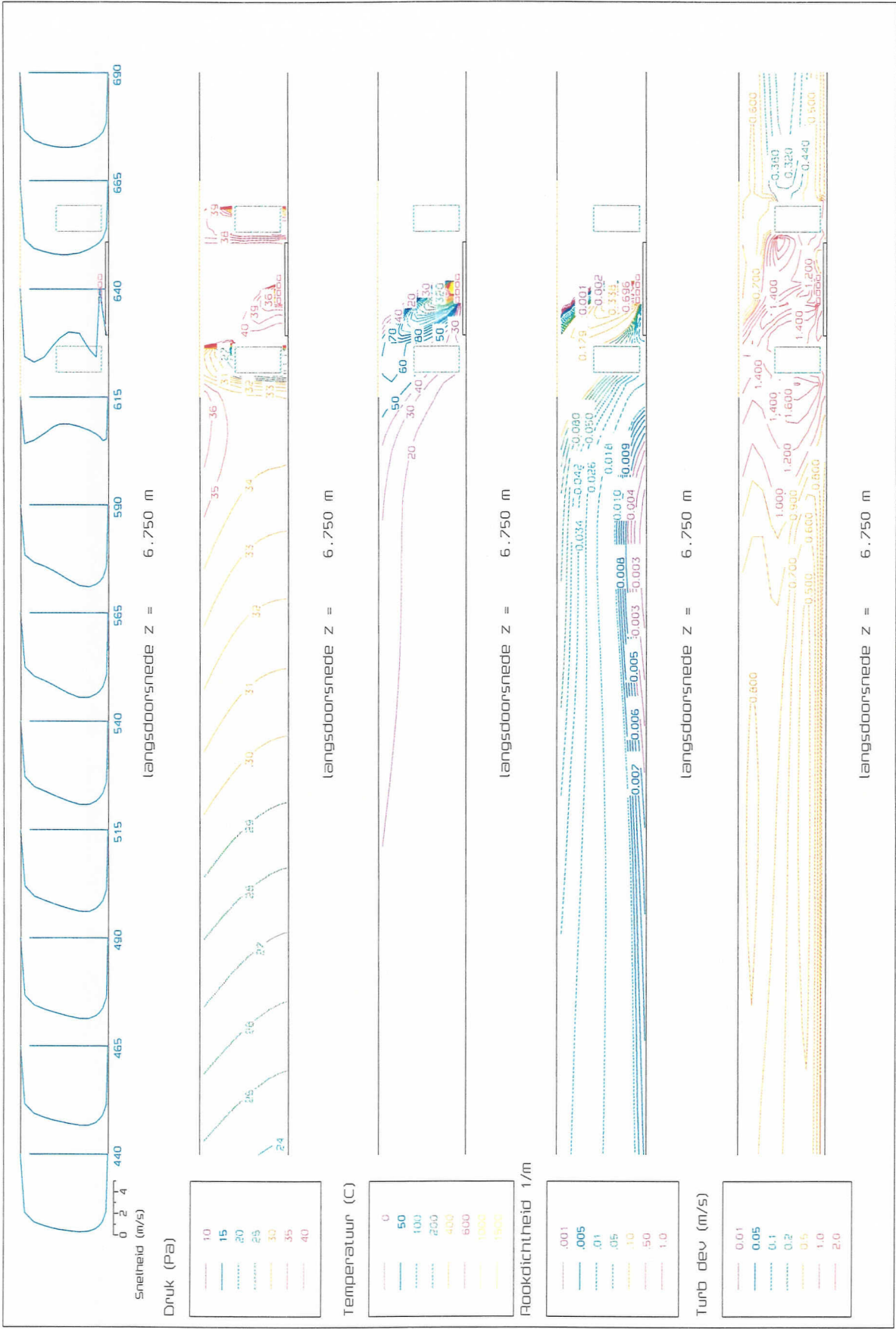
TIME = 300 s = 5 min





TNO CFD BENELUX: GEVAL F

TIME = 300 s = 5 min



TNO CFD BENELUX: GEVAL F TIME = 1200 s = 20 min

