

TNO-report
96-BBI-R0498

**VALIDATIE VAN HET CFD MODEL WISH3D VOOR TOE-
PASSING IN OPERATIE KAMERS DOOR METINGEN IN DE
CLEANROOM TEST FACILITEIT**

TNO Building and
Construction Research

Lange Kleiweg 5, Rijswijk
P.O. Box 49
2600 AA Delft
The Netherlands

Phone +31 15 284 20 00
Fax +31 15 284 39 90
Télex 38270

Date februari 1996

Author(s) ir. A.D. Lemaire

Opdrachtgever : Stichting Integrale Contamination Control
Delft

Projectnummer : 526.4.5451

Projectleider : ir. A.D. Lemaire

M.m.v. : ing. Ph.J. Ham

All rights reserved.
No part of this publication may be
reproduced and/or published by print,
photoprint, microfilm or any other
means without the previous written
consent of TNO.

In case this report was drafted on
instructions, the rights and obligations
of contracting parties are subject to
either the 'Standard Conditions for
Research Instructions given to TNO',
or the relevant agreement concluded
between the contracting parties.
Submitting the report for inspection to
parties who have a direct interest is
permitted.

Aantal pagina's : 46 (excl. bijlage)
Aantal bijlagen : 4

© TNO



SAMENVATTING

In het kader van het project "Integrale Contamination Control Gezondheidszorg", werd het gebruik van Computational Fluid Dynamics technieken voor de voorspelling van de luchtstromingen, temperaturen en concentraties in operatiekamers gevalideerd.

Hiertoe werden in de Clean Room Testfaciliteit van TNO Bouw metingen uitgevoerd aan één in de praktijk veel voorkomende situatie (laminair downflow systeem met lamp) en één geïdealiseerde situatie (laminair downflow systeem zonder lamp). Hierbij werden het operatieteam en de patiënt vervangen door verwarmde etalage-poppen. Met het binnen TNO ontwikkelde CFD-programma WISH3D werden dezelfde situaties doorgerekend.

De validatie toont aan dat Computational Fluid Dynamics een geschikte methode is om de belangrijkste kenmerken van de luchtstromingen die in operatiekamers optreden te voorspellen. De absolute waarden van de luchtsnelheden kunnen tot op 10 a 20 % nauwkeurig worden voorspeld.

Tevens werd een methode ontwikkeld om het infectiegevaar ten gevolge van potentieel bacterie-dragend deeltjes afkomstig van het operatieteam kwantitatief af te schatten. Dit door middel van concentratie metingen van tracergas dat bij de poppen onder de kleding wordt ingebracht. Deze metingen tonen aan dat de gemiddelde concentratie boven de patiënt tot op 10 % nauwkeurig kan worden berekend.

Aanbevolen wordt om de validatie in het vervolg meer te richten op de concentratie-metingen en de plaats van het operatieteam t.o.v. de patiënt.

INHOUD	pagina
1. INLEIDING	4
2. PROBLEEMSTELLING EN UITGANGSPUNTEN	5
2.1 Probleemstelling	5
2.2 Uitgangspunten	5
3. CONFIGURATIES, RANDVOORWAARDEN EN WERKWIJZE	7
3.1 Configuraties	7
3.2 Randvoorwaarden	8
3.3 Meetmethode	9
3.4 Rekenmethode	11
4. RESULTATEN EN DISCUSSIE	19
4.1 Overzicht en presentatie	19
4.2 Bespreking resultaten met warme lamp	41
4.3 Bespreking resultaten zonder lamp	42
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK	44
LITERATUUR	46
BIJLAGE A : Het CFD- programma WISH3D	
BIJLAGE B: Improvement capabilities of operating theatres, with the help of computer flow modelling	
BIJLAGE C: Technische gegevens toegepaste operatie lamp	
BIJLAGE D: Nauwkeurigheid van de meetmethode.	

1. INLEIDING

Tegenwoordig zijn de meeste operatiekamers in Nederland op min of meer dezelfde wijze gebouwd om een goede luchtstromingsbeheersing te garanderen en daarmee de kans op infecties via de lucht laag te houden. De vraag is echter of deze kans laag genoeg is. Een juist antwoord kan alleen worden gevonden door ook naar andere bronnen van infectie te kijken en het effect van preventieve maatregelen zoals verbeterde procedures, kleding, training e.d. Zo'n integrale aanpak vindt plaats in het project "Integrale Contamination Control Gezondheidszorg".

Het hier gepresenteerde onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van het project en richtte zich specifiek op de beheersing van de luchtstroming in de operatiekamer.

Om dit aspect kosten-effectief te kunnen onderzoeken is de beschikbaarheid van zowel experimentele als numerieke methoden essentieel. Dit betekent zowel meten in een testkamer (de Clean Room Test Faciliteit) als rekenen met geavanceerde software. Een veelbelovend hulpmiddel bij het ontwerp van operatiekamers is software gebaseerd op Computational Fluid Dynamics (CFD) technieken. Hiermee worden de elementaire stromingsvergelijkingen opgelost. Vanwege deze fundamentele aanpak is CFD geschikt voor vele situaties. De nauwkeurigheid van CFD hangt echter af van het specifieke toepassingsgebied. Voor de gewenste toepassing is hier betrekkelijk weinig over bekend, behalve een eerste schatting op basis van ervaringen in andere toepassingsgebieden.

Het in dit rapport beschreven onderzoek beoogde dan ook om de bestaande CFD-technieken te valideren voor toepassing in bestaande operatiekamers, zodat bij verder onderzoek van SICC een kosten effectieve keuze gemaakt kan worden tussen meten en simuleren voor specifieke te onderzoeken situaties.

2. PROBLEEMSTELLING EN UITGANGSPUNTEN

2.1 Probleemstelling

Om de bestaande CFD technieken te valideren, dienen we de resultaten van metingen in operatiekamers te vergelijken met de resultaten van berekeningen met een CFD-programma. Hierbij moet de nadruk liggen op de luchtsnelheden, temperaturen en deeltjesconcentraties in de omgeving van de patiënt, omdat deze bepalend zijn voor de kans op infectie. Het programma moet in staat zijn om deze grootheden voldoende nauwkeurig te voorspellen voor verschillende configuraties van de operatiekamer zoals: stand van de operatielampen, laminaire of turbulente luchttoevoer, afzuiging via de vloer, enz.

2.2 Uitgangspunten

Vanwege de grote hoeveelheid benodigde meetgegevens is ervoor gekozen de meeste metingen in de Clean Room Test Faciliteit uit te voeren. Het OK personeel en de patiënt werden hierbij vervangen door verwarmde poppen. De metingen in bestaande operatiekamers bestonden voornamelijk uit tracergas metingen. Hierover zal separaat worden gerapporteerd.

Binnen TNO wordt gerekend met het in eigen beheer ontwikkelde CFD-programma WISH3D, dat in bijlage A nader wordt beschreven. Het lag voor de hand om dit programma te kiezen voor de validatie. Doordat het programma zelf wordt beheerd, kan het in de toekomst waar nodig worden uitgebreid.

Uitgangspunt voor de validaties is een reeds eerder uitgevoerde rekenstudie met WISH3D, gepubliceerd in [1] en [2]. Voor de volledigheid is het artikel [2] als bijlage B toegevoegd. De studie omvatte 4 gevallen. Uitgangspunt was de situatie met één grote lamp in het midden van de kamer boven de operatie-tafel, vier personen rondom de tafel en een laminair downflow systeem. Om potentiële verbeteringen te onderzoeken werd hierna achtereenvolgens de warmteproductie van de lamp uitgeschakeld (koude lamp), de lamp als geheel weggelaten (geen lamp) en vloerafzuiging toegepast. Bij de 'koude lamp' en 'geen

lamp' situaties werd de verstoring van de stroming door de thermische en fysieke aanwezigheid van de lamp opgeheven. De situatie met vloerafzuiging werd onderzocht om te laten zien hoe maatregelen gebaseerd op kennis uit de industriële cleanroom omgevingen, ook tot verbeteringen in de operatiekamer kunnen leiden.

Aanvankelijk was het plan om alle vier gevallen te meten en geen berekeningen meer uit te voeren. De metingen bleken echter zeer arbeidsintensief. Ook was het onmogelijk om in de Clean Room dezelfde omstandigheden te creëren als aangenomen bij de eerdere berekeningen. Het toevoer plenum diende te worden verlaagd en er kon geen uniforme warmtebron in de OK worden toegepast. Daarom waren herberekeningen noodzakelijk.

Dit heeft uiteindelijk geresulteerd in de uitgebreide validatie van twee gevallen, namelijk de situatie met warme lamp en de situatie zonder lamp.

Er is gekozen voor gebruik van binnen TNO Bouw beschikbare meetapparatuur. Dit betekende dat de luchtsnelheden en -temperaturen met behulp van thermo-anemometers en thermokoppels werden gemeten en dat de stromingsrichting met behulp van rook werd bepaald. Ter vervanging van de meting van deeltjesconcentraties werden tracergasconcentraties gemeten. Het hiervoor benodigde gas werd toegevoerd via het boven- en onderlichaam van de poppen om de afgifte van kiem vormende deeltjes van het menselijk lichaam na te bootsen. Met de tracergas methode kan het transport van bacterie-dragende deeltjes in de ruimte voldoende betrouwbaar worden gesimuleerd [3]. Door meting van de tracergasconcentratie bij de als patiënt fungerende pop, kan kwantitatief worden bepaald of deeltjes-transport van het operatieteam tot in het wondgebied mogelijk is.

Uit symmetrie overwegingen behoeft slechts een kwart deel van de operatiekamer bemeten en doorgerekend te worden. Hierbij is aangenomen dat de luchtstromingen en temperatuur- en concentratieverdelingen symmetrisch zijn t.o.v. van de twee verticale vlakken in het midden van de kamer.

3. CONFIGURATIES, RANDVOORWAARDEN EN METHODEN

3.1 Configuraties

Er worden twee configuraties onderscheiden, namelijk met een warme lamp en zonder lamp. Figuur 3.1 geeft een overzicht van de situatie met de lamp. De configuratie zonder lamp ontstaat door de lamp en de lamparm weg te nemen.

De metingen werden uitgevoerd in de Clean Room Test Faciliteit van TNO Bouw. In deze moderne, computer-gecontroleerde klimaatkamer kunnen de omstandigheden in een operatiekamer worden gesimuleerd zonder risico's voor de patiënt.

De kamer meet 6 x 6 x 3 m (breedte x diepte x hoogte). Via het filter plafond kan een laminaire, geklimatiseerde luchtstroom worden toegevoerd, die via 8 openingen in twee tegenoverliggende wanden wordt afgevoerd.

Ten behoeve van de validatie is centraal in de kamer een verlaagd toevoer plenum geïnstalleerd (2,3 x 1,3 m) met in het midden een blinde plaat (0,5 x 0,5 m) voor de bevestiging van de operatielamp. De lamp, een Hanaulux Melbourne (diameter 1,0 m en hoogte circa 0,35 m) werd op een afstand van 0,35 m onder het plenum bevestigd. De operatietafel met een liggende pop als vervanging van de patiënt, bevond zich recht onder het plenum en de lamp. Om de tafel stonden vier etalagepoppen ter vervanging van het OK personeel. Op de vloer, rondom de tafel, op circa 0.9 m vanaf de wanden, bevond zich een rij van in totaal 12 lampen waarmee de warmte productie van omringende apparatuur werd nagebootst.

Elke pop werd verwarmd middels elektrische verwarmingselementen in boven- en onderlichaam. Hierdoor vertonen de poppen dezelfde convectieve warmteafgifte onder de operatiekleding als de mens (60 W). Ook de etalagepop op de operatietafel werd verwarmd.

De vier staande poppen rondom de tafel waren bovendien voorzien van een slangenstelsel onder operatiekleding waardoor, gelijkmatig langs het lichaam verdeeld, een mengsel van lucht en tracergas (SF₆) kon worden geïnjecteerd.

In de figuren 3.2 t/m 3.5 worden de situaties getoond, zoals gemodelleerd voor de CFD-berekeningen. Zoals reeds in paragraaf 2.2 gesteld, is gerekend en gemeten in een kwart deel van de kamer, waarbij symmetrie t.o.v. de verticale vlakken $x = 0$ m en $z = 0$ m is verondersteld. De figuren tonen daarom slechts één staande persoon en een kwart deel van de lamp, van de tafel en van de patiënt (het voeteneind). Ter vereenvoudiging van de berekeningen zijn alle vormen opgebouwd uit rechthoekige blokken. De rij lampen is gesimuleerd door een lijnbron van 0,2 m breed en 0,2 m hoog op de vloer op een afstand van 0,9 m van de wanden.

3.2 Randvoorwaarden

Onderstaand volgen de belangrijkste randvoorwaarden tijdens de metingen en berekeningen, geldend voor de gehele kamer (dus niet de kwart ruimte).

Ventilatie:

Toevoer via plenum:

volumestroom: 0,78 m³/s

snelheid: 0,284 m/s

turbulentie intensiteit :1 %

Afvoer per opening:

volumestroom: 0,097 m³/s

snelheid: 0,78 m/s

Temperaturen en convectieve warmte-ontwikkeling:

Toevoer lucht temperatuur : 20,0 C

Afvoer lucht temperatuur: 21,5 C

Totale warmteproductie: 1350 W

Warmteafgifte operatie lamp: 210 W

bovenzijde: 150 W

zijkanten: 30 W

onderzijde: 30 W

Warmteafgifte personen: 240 W
per persoon: 60 W
Warmteafgifte gesimuleerde apparatuur: 900 W
per lamp: 75 W

Het toevoerdebiet en de luchtsnelheidsverdeling uit het luchtinblaasplenum werden voorafgaande aan de validatie gecontroleerd door meting van de luchtsnelheid op een horizontaal raster van 12 bij 12 punten. Hierbij werd een afwijking van maximaal 5% t.o.v. de gemiddelde snelheid geconstateerd.

De totale warmteafgifte van de operatielamp aan de lucht en de verdeling daarvan over het lampoppervlak werd zo goed mogelijk geschat op basis van de beschikbare documentatie (Heraeus Hanaulux Melbourne). Zie ook bijlage C.

3.3 Meetmethode

De luchtsnelheden en temperaturen werden met behulp van thermo-anemometers (fabrikaat TNO-Bouw) en thermokoppels (fabrikaat Honeywell) bepaald en de stromingsrichting met behulp van rook (afkomstig van Dräger buisjes). Voor de nauwkeurigheden van de gebruikte meetmethoden wordt verwezen naar bijlage D. De door de thermokoppels en thermo-anemometers afgegeven elektrische signalen werden automatisch verwerkt met behulp van een geprogrammeerd data-acquisitiesysteem (fabrikaat Hewlett Packard). Met dit systeem werden de meetsignalen in hoog tempo (ca. 12 meetpunten per seconde) na elkaar uitgelezen en volgens een opgegeven ijklijn omgerekend in de werkelijke luchtsnelheden en temperaturen. Op deze wijze werd in elk meetpunt een gemiddelde waarde bepaald, waarbij als middelingstijd 5 minuten per meetpunt is aangehouden. Alle meetresultaten werden vastgelegd op magneetschijf.

Voor zowel de 'warme lamp' als 'geen lamp' situatie zijn in totaal $12 \times 12 \times 11 = 1584$ punten in de ruimte bemeten. Figuur 3.6 toont de plaats van deze punten (snijpunten van de rode lijnen). Het gehele meetvolume omvatte een ruimte van 1,6 m x 1,6 m x 2,6 m hoogte rondom de tafel.

Figuur 3.7 toont de kamer met de meetopstelling. In totaal 12 anemometers werden op een statief geplaatst dat evenwijdig aan het yz-vlak werd gepositioneerd, zodanig dat elke anemometer op één van de 12 punten op een constante x-lijn kon meten. Hierna werd het statief in de x-richting verplaatst en werd de volgende rij punten gemeten. Nadat op deze wijze een horizontaal vlak van $12 \times 12 = 144$ punten was behandeld, werd de hoogte van het statief veranderd en in het volgende horizontale vlak gemeten. Dit, totdat alle 11 voorgeschreven hoogten waren behandeld.

Per situatie duurde de totale luchtsnelheid- en temperatuurmeting drie tot vier dagen.

Hierna werd in één dag de stromingsrichting bepaald m.b.v. rook. Hierbij werden in totaal 8 richtingen onderscheiden, kijkend vanuit de oorsprong (het midden van de kamer) in de positieve x-richting (het voeteneinde). Dit leverde de snelheidsrichting geprojecteerd op het yz-vlak. De waargenomen richtingen werden met de gemeten snelheden gecombineerd tot vectorplots.

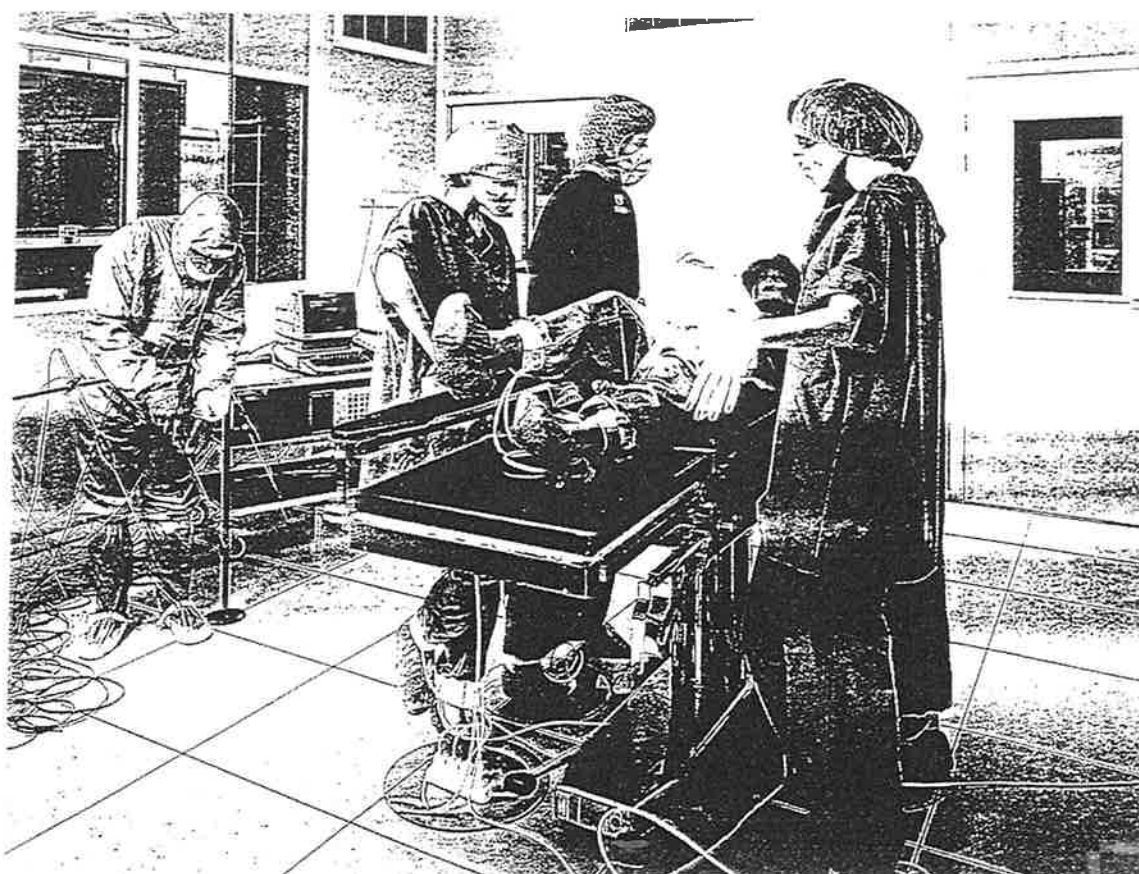
Tenslotte werd de tracergas meting uitgevoerd. Hiertoe werd eerst bij het onderlichaam van elke staande pop en daarna het bovenlichaam, een mengsel van lucht (25 l/min) en SF₆ gas (130 ml/min) toegevoerd. De geïnjecteerde concentratie bedroeg 5200 ppm. De concentraties in de ruimte werden gemeten op 10 cm, 30 cm en 50 cm hoogte boven de patiënt, waarbij op elke hoogte 10 punten werden bemonsterd in een vlak van 0.2 x 0.8 m. Ook gemeten, werden de concentratie in de kamer op punt (x,y,z) = (2.8, 1.3, 0.0) m en de concentratie in de afvoeropeningen. Deze laatste bedroeg 2,6 ppm (parts per million), zoals reeds uit de geïnjecteerde concentratie en het toevoerdebiet kon worden bepaald.

De concentraties werden gemeten met een infrarood gas analyser (fabrikaat Miran) waarvan het meetprincipe berust op dispersieve infrarood absorptie spectrometrie.

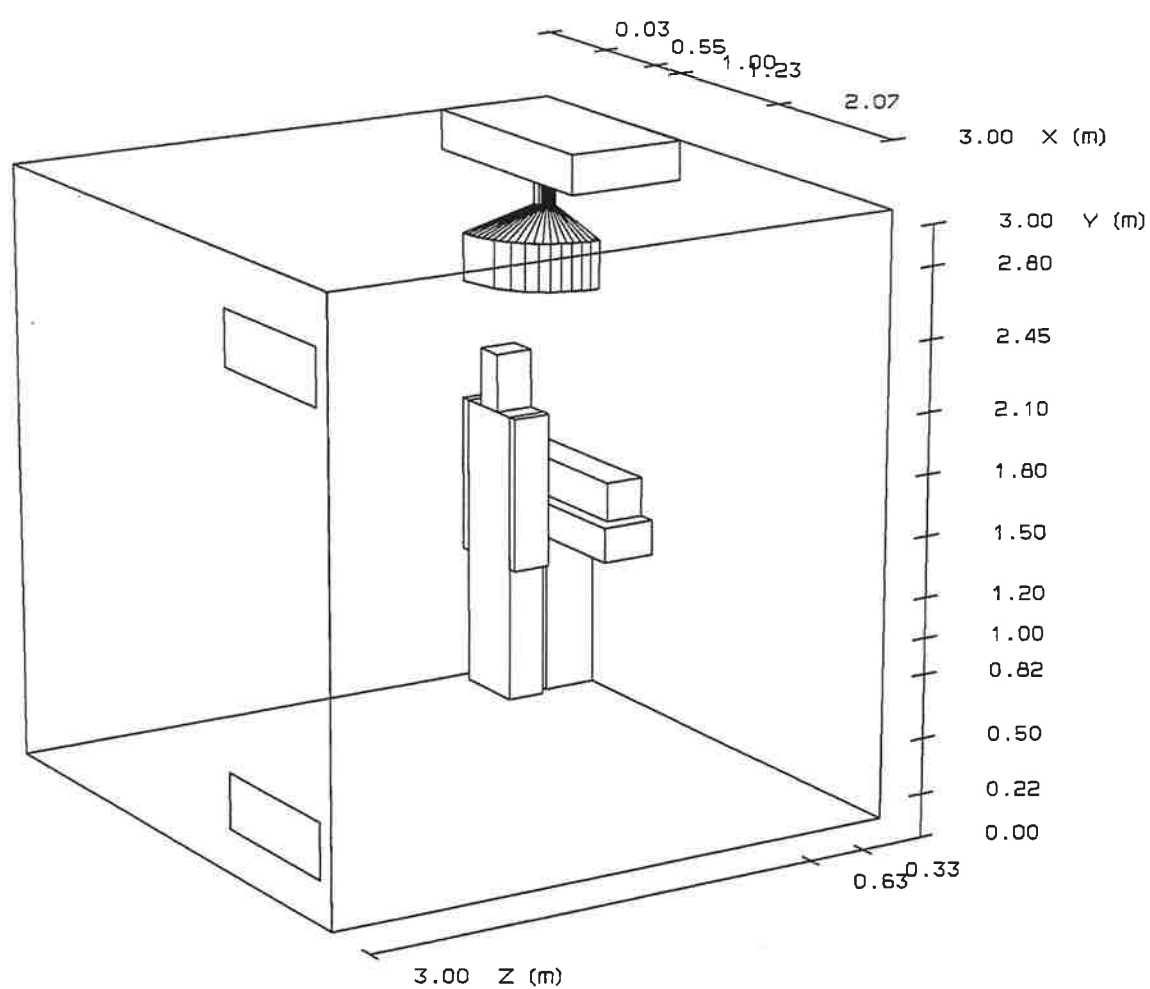
Gedurende alle metingen werden continue de toevoerluchttemperatuur in het plenum en de luchttemperatuur in twee afvoeropeningen (één boven en één onder) geregistreerd.

3.4 Berekeningsmethode

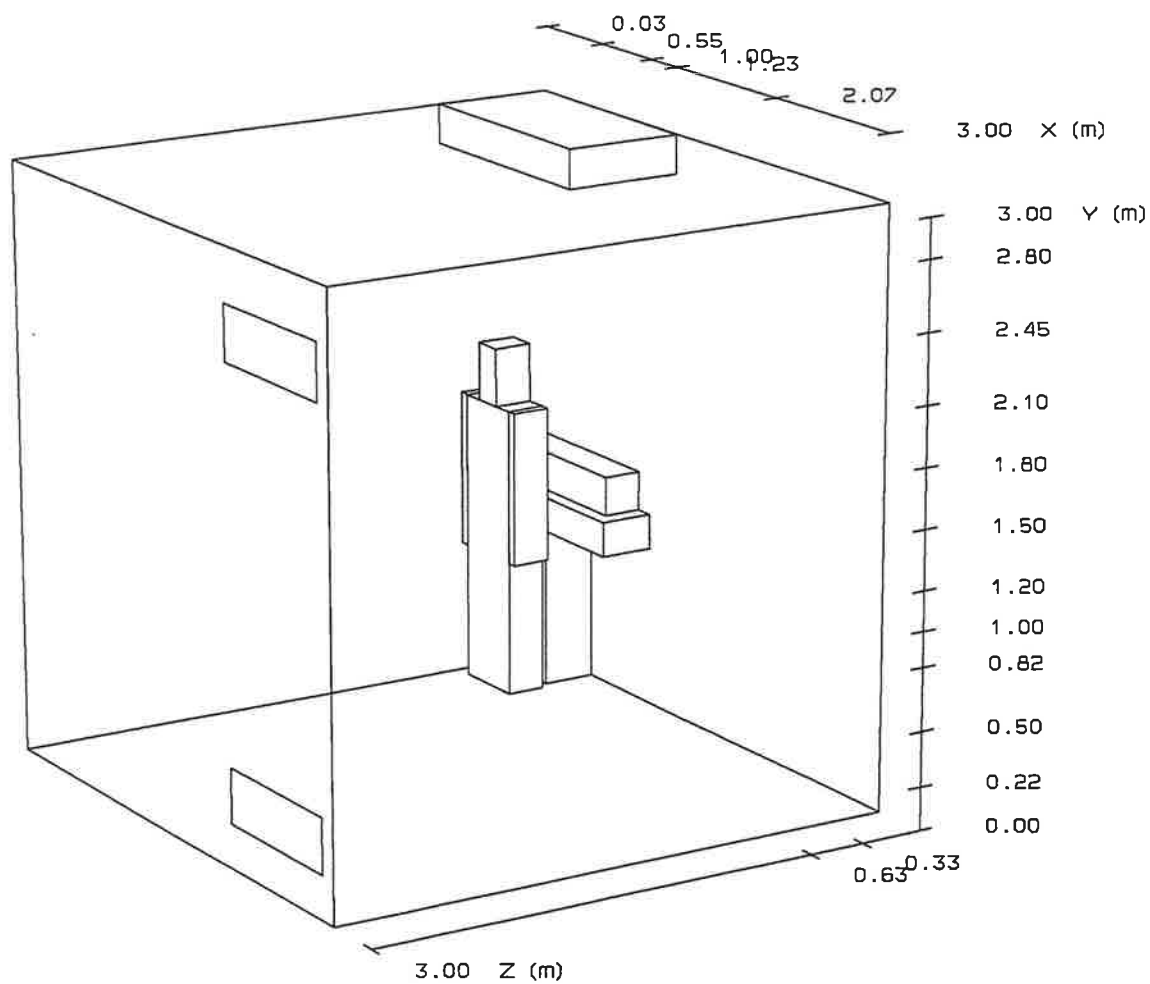
De berekeningen werden uitgevoerd met het CFD-programma WISH3D (zie bijlage A). Hierbij werd een rekenrooster van $46 \times 37 \times 37 = 62.974$ volumecellen gebruikt. Per situatie werden circa 4000 iteraties uitgevoerd om tot een stabiele, geconvergeerde oplossing te komen. Dit kostte per geval circa 2 dagen rekentijd op een SGI Iris 4D2 werkstation.



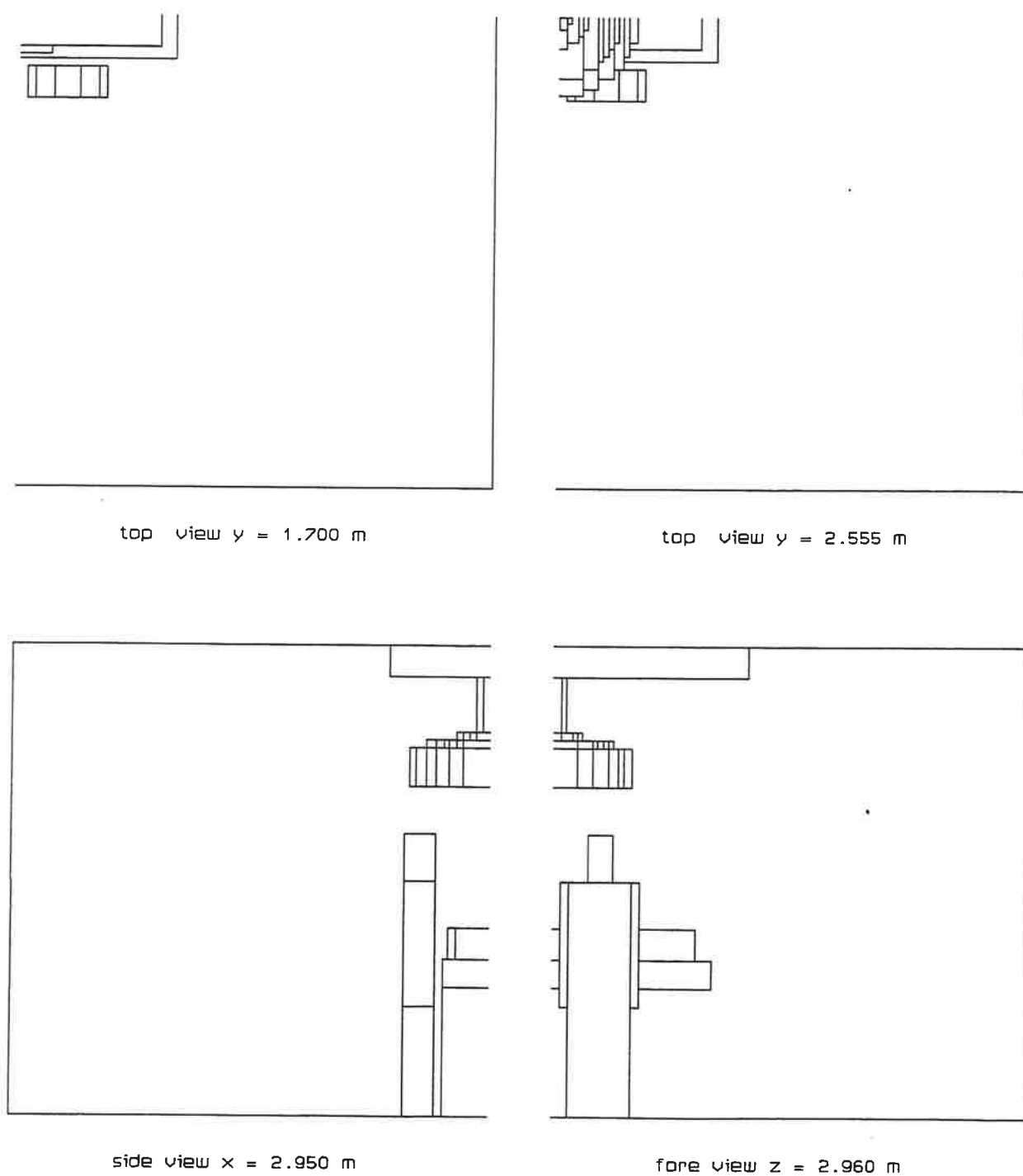
Figuur 3.1 Overzicht van de gemeten situatie in de Clean Room.



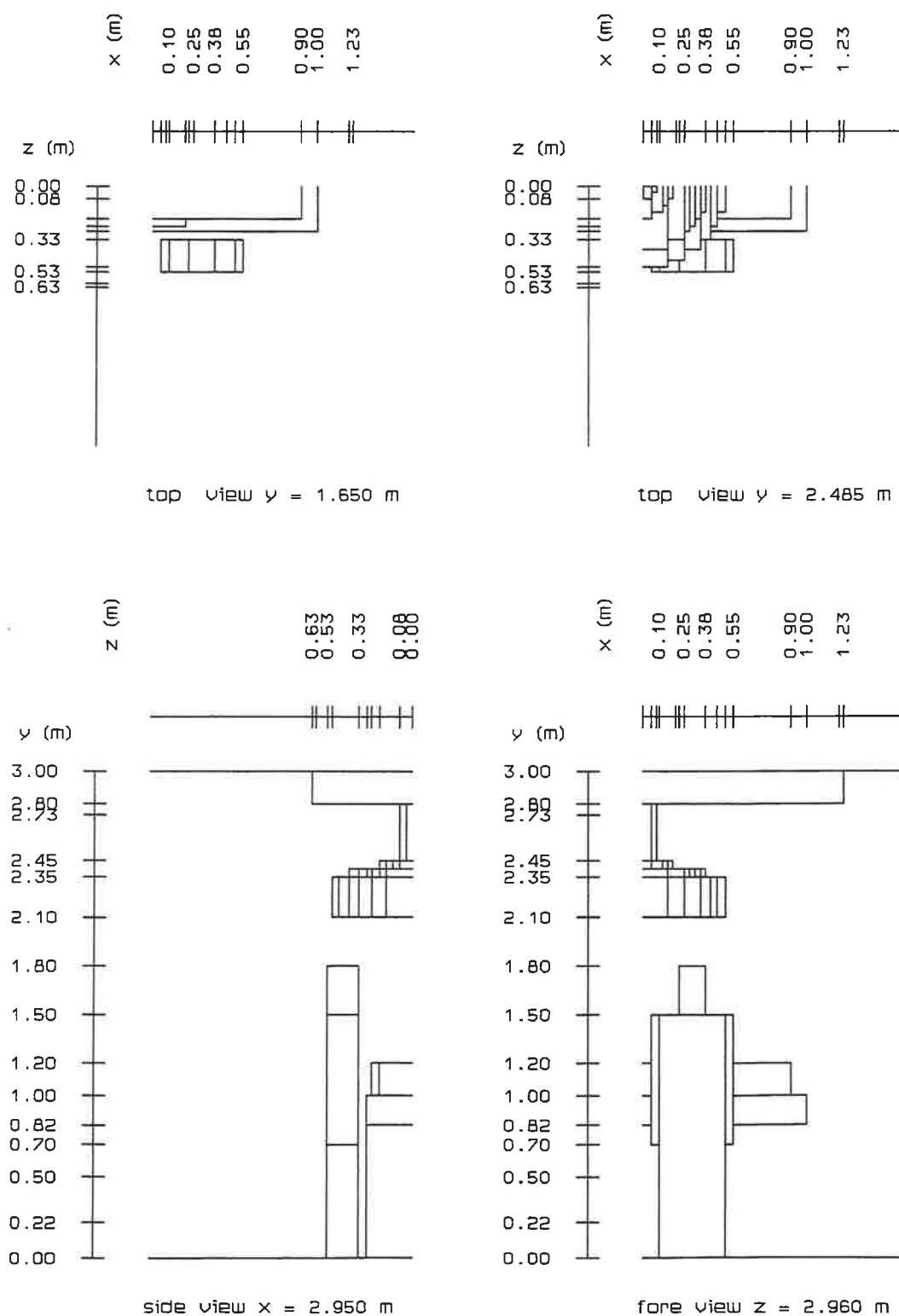
Figuur 3.2 Situatie 'warme lamp': 3D zicht en afmetingen kwart OK.



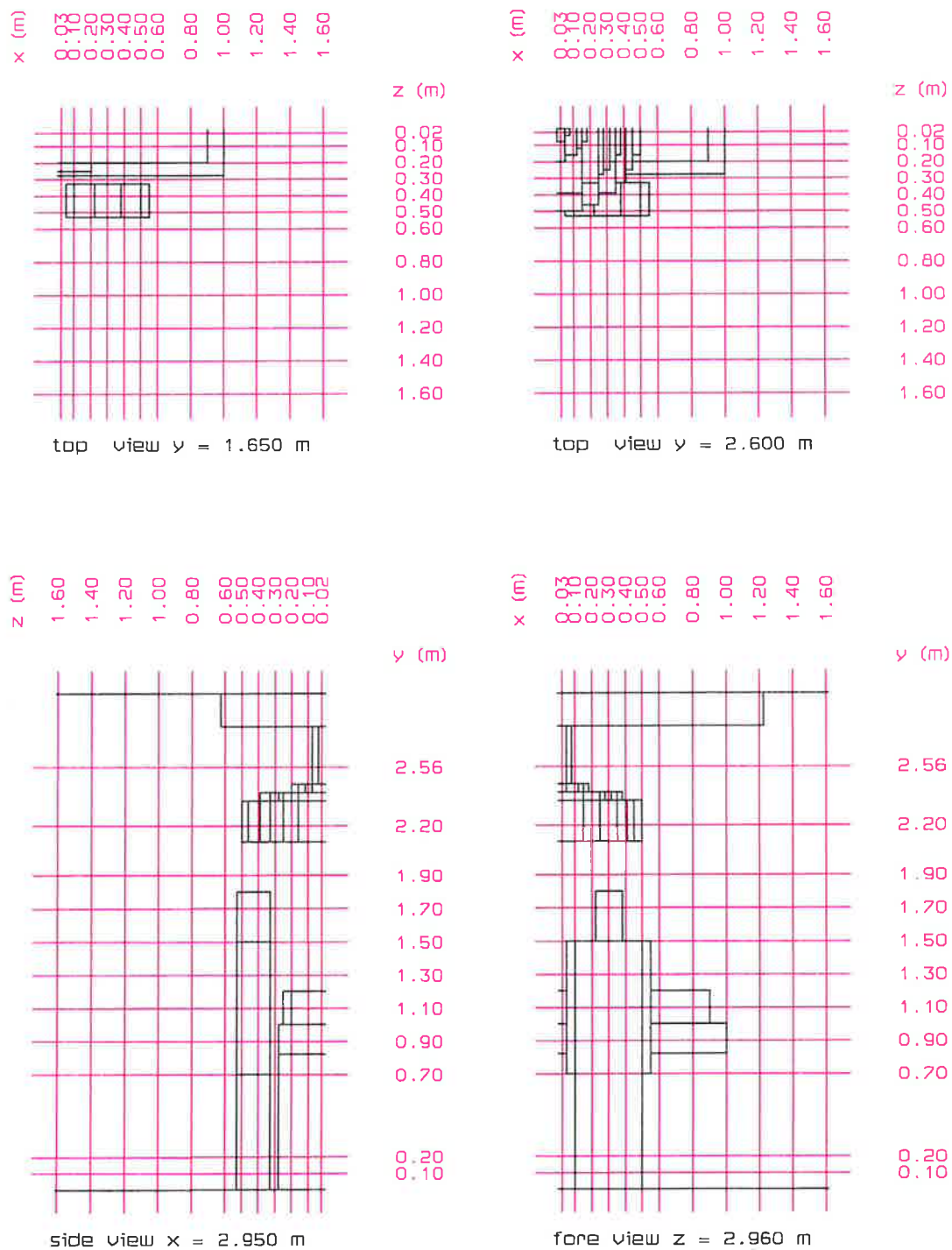
Figuur 3.3 Situatie 'geen lamp': 3D zicht en afmetingen kwart OK.



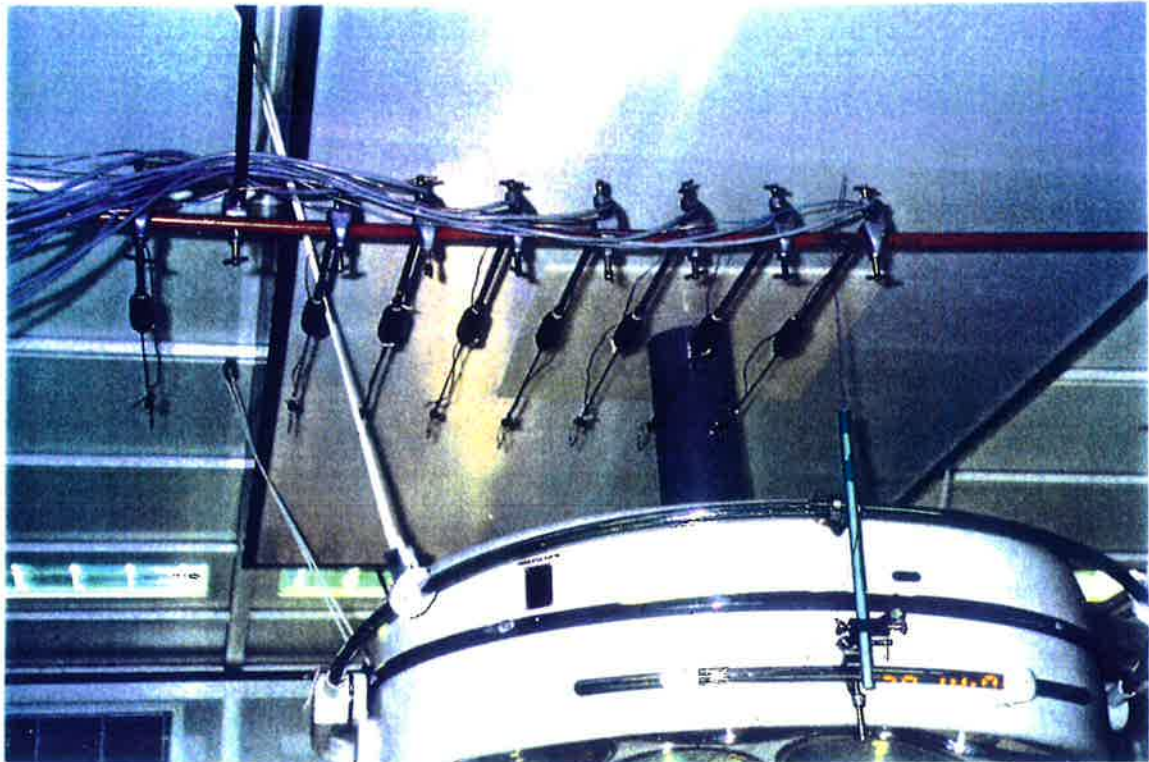
Figuur 3.4 Situatie 'warme lamp': 2D doorsneden kwart OK.



Figuur 3.5 Situatie 'warme lamp': 2D doorsneden en afmetingen doorgemeten ruimte.



Figuur 3.6 Plaats van meetpunten (snijpunten rode lijnen) in de ruimte.



Figuur 3.7 De meetopstelling met anemometers

4. RESULTATEN

4.1 Overzicht en presentatie

Er zijn in totaal 4 gevallen onderzocht, namelijk:

- geval A: meting situatie met warme lamp
- geval B: meting situatie zonder lamp
- geval C: berekening situatie met warme lamp
- geval D: berekening situatie zonder lamp.

De resultaten worden gepresenteerd door middel van snelheidsvectoren (pijltjes) en contouren plots in horizontale en verticale doorsneden van de ruimte.

De pijltjes geven de grootte en richting van de snelheid geprojecteerd op de betreffende doorsnede. Pijltjes met een 'driehoek' kop vertegenwoordigen een richting naar de lezer toe en pijltjes met een 'v-vormige' kop een richting van de lezer af. De kleur is een maat voor de absolute snelheid.

De contouren plots tonen de ruimtelijke verdeling van snelheid, temperatuur, turbulentie-intensiteit en concentratie. Dit door middel van gekleurde lijnen die aangeven waar de betreffende grootte een constante waarde heeft. Per kleur kunnen dit nog 5 of 10 verschillende oplopende waarden zijn, waarbij de legenda de beginwaarde voor elke kleur aanduidt. De concentraties worden weergegeven in dimensieloze vorm. Alle concentraties zijn hiertoe genormeerd op de gemiddelde concentratie in de afvoeropeningen, deze heeft dus de waarde 1,0.

Een zeer uitgebreide presentatie van de onderzochte gevallen A t/m B wordt gegeven in een separate bijlage van het rapport. Het onderhavige rapport bevat hier een selectie uit, welke dient ter ondersteuning van de bespreking van de resultaten en conclusies.

Een overzicht van de doorsneden waarop de resultaten worden gepresenteerd, staat in figuur 4.1.

De luchtstromingen in de gehele onderzochte ruimte (kwart operatiekamer) berekend met en zonder warme lamp worden in figuur 4.2 en 4.3 getoond.

De metingen en berekeningen met de warme lamp (geval A en C) worden met elkaar vergeleken in figuur 4.4 t/m 4.9. Dit voor de snelheden, temperaturen en concentraties.

Hetzelfde wordt gedaan voor de situatie zonder lamp in figuur 4.10 t/m 4.15.

Tabel 4.1 vermeldt de relatie tussen de figuurnummers en de weergegeven resultaten.

Tabel 4.1 Relatie tussen figuurnummers en weergegeven resultaten.

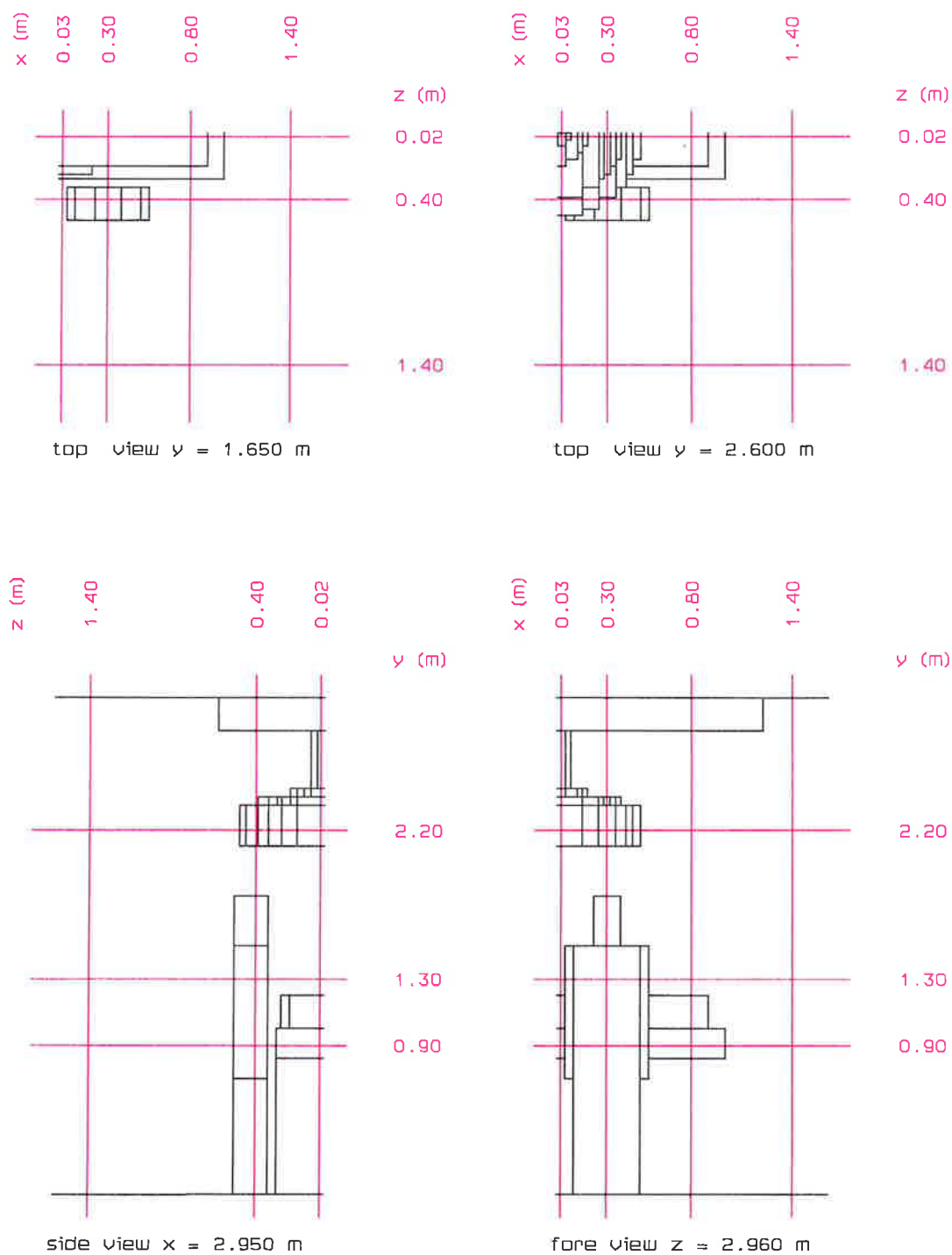
Weergave	Warme lamp		Geen lamp	
	meting	berekening	meting	berekening
Stromingspatroon-hele ruimte		fig. 4.2		fig. 4.3
Stromings patroon	fig. 4.4	fig. 4.4	fig. 4.10	fig. 4.10
Snelheden	fig. 4.5	fig. 4.6	fig. 4.11	fig. 4.12
Temperaturen	fig. 4.7	fig. 4.8	fig. 4.13	fig. 4.14
Concentraties		fig. 4.9		fig. 4.15

In figuur 4.4 en 4.10 kan de lengte van de pijltjes te groot zijn, omdat is aangenomen dat de snelheidscomponenten loodrecht op de doorsnede nul zijn, terwijl deze in werkelijkheid onbekend zijn.

De gemeten en berekende concentraties boven de patiënt worden in tabel 4.2 en 4.3 met elkaar vergeleken voor de situatie met de warme lamp en het bovenlichaam respectievelijk onderlichaam als bron. De tabellen vermelden ook de gemiddelde concentraties in de x-, en z- richting voor elke hoogte waar gemeten is. Tabel 4.4 geeft de gemiddelden per hoogte en over het gehele meetvolume van 0,8 x 0,2 x 0,4 m hoog.

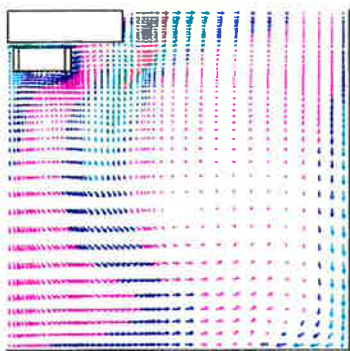
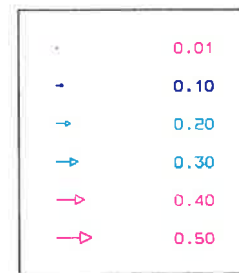
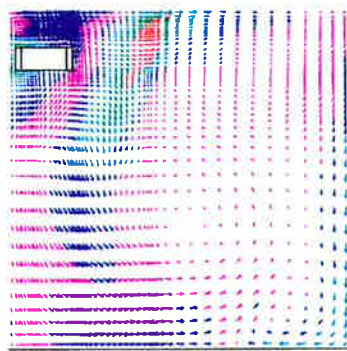
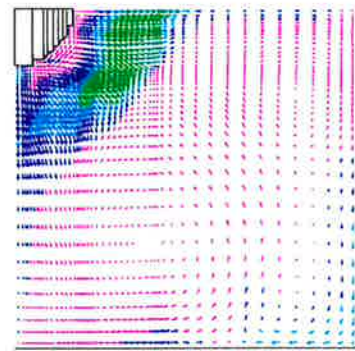
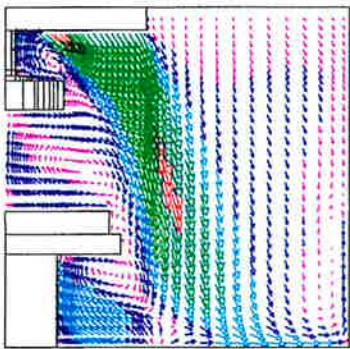
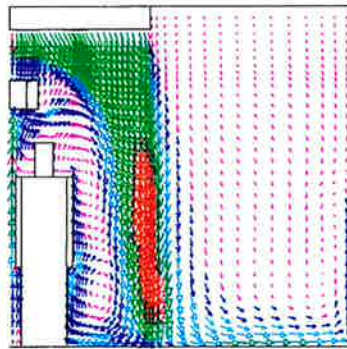
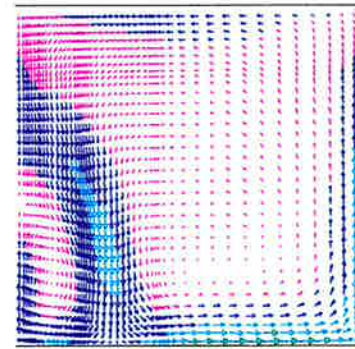
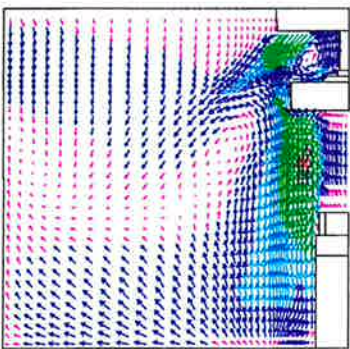
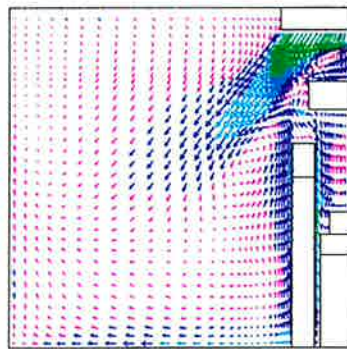
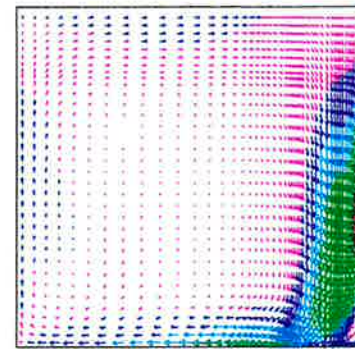
In de situatie zonder lamp met het bovenlichaam als bron zijn boven de patiënt genormeerde concentraties berekend die circa 0,001 of lager bedragen. (Zie tabel 4.5). De meting gaf waarden tussen 0 en 0,1 echter met een nauwkeurigheid van 0,1.

Zonder lamp en met bron onder, zijn de berekende waarden lager dan 0,0001 en valt de gemeten waarde ook weer buiten de gevoeligheid van de opnemer.

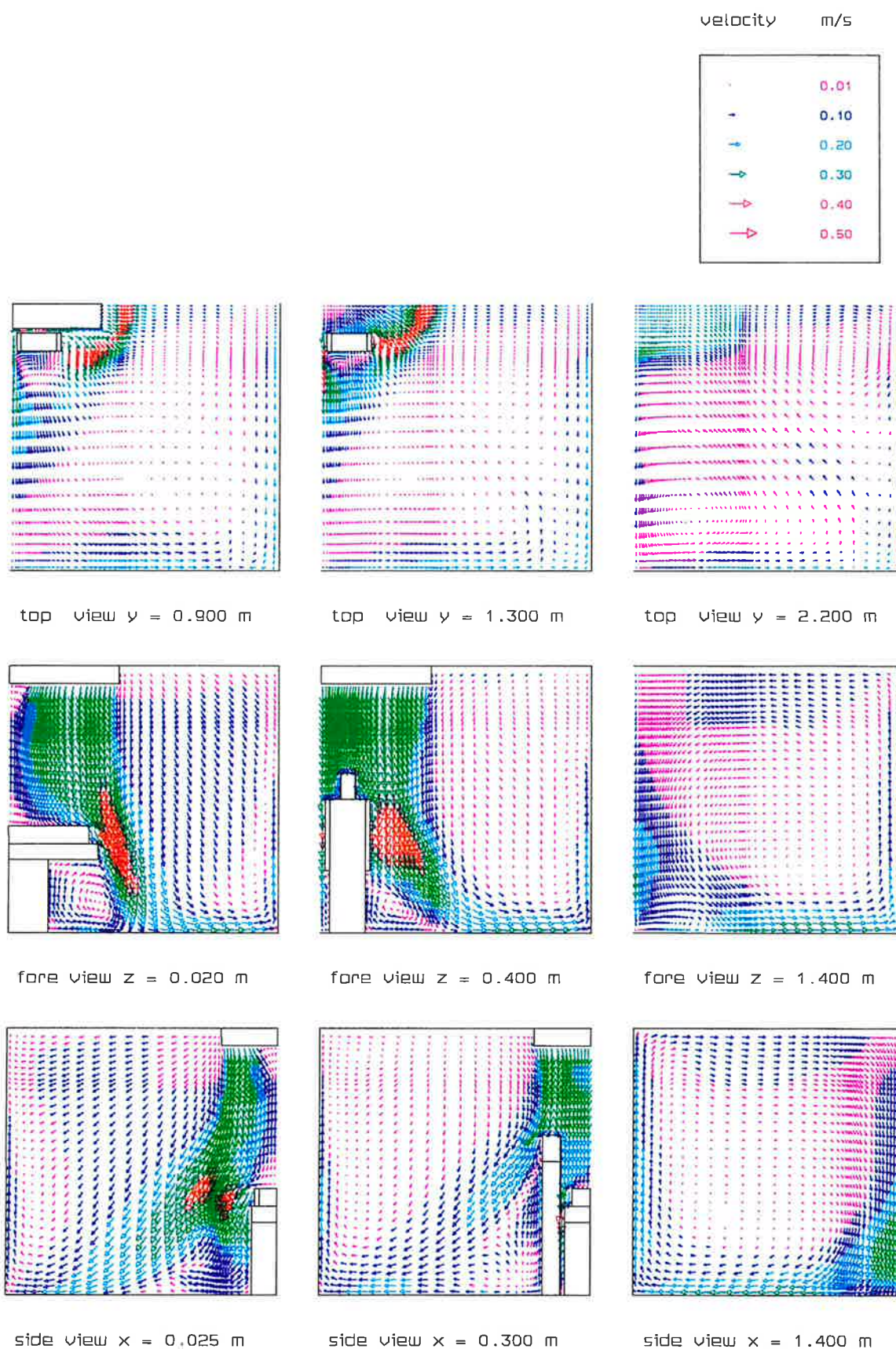


Figuur 4.1 2D aanzichten situatie 'warme lamp'
Doorsneden waarop resultaten worden gepresenteerd

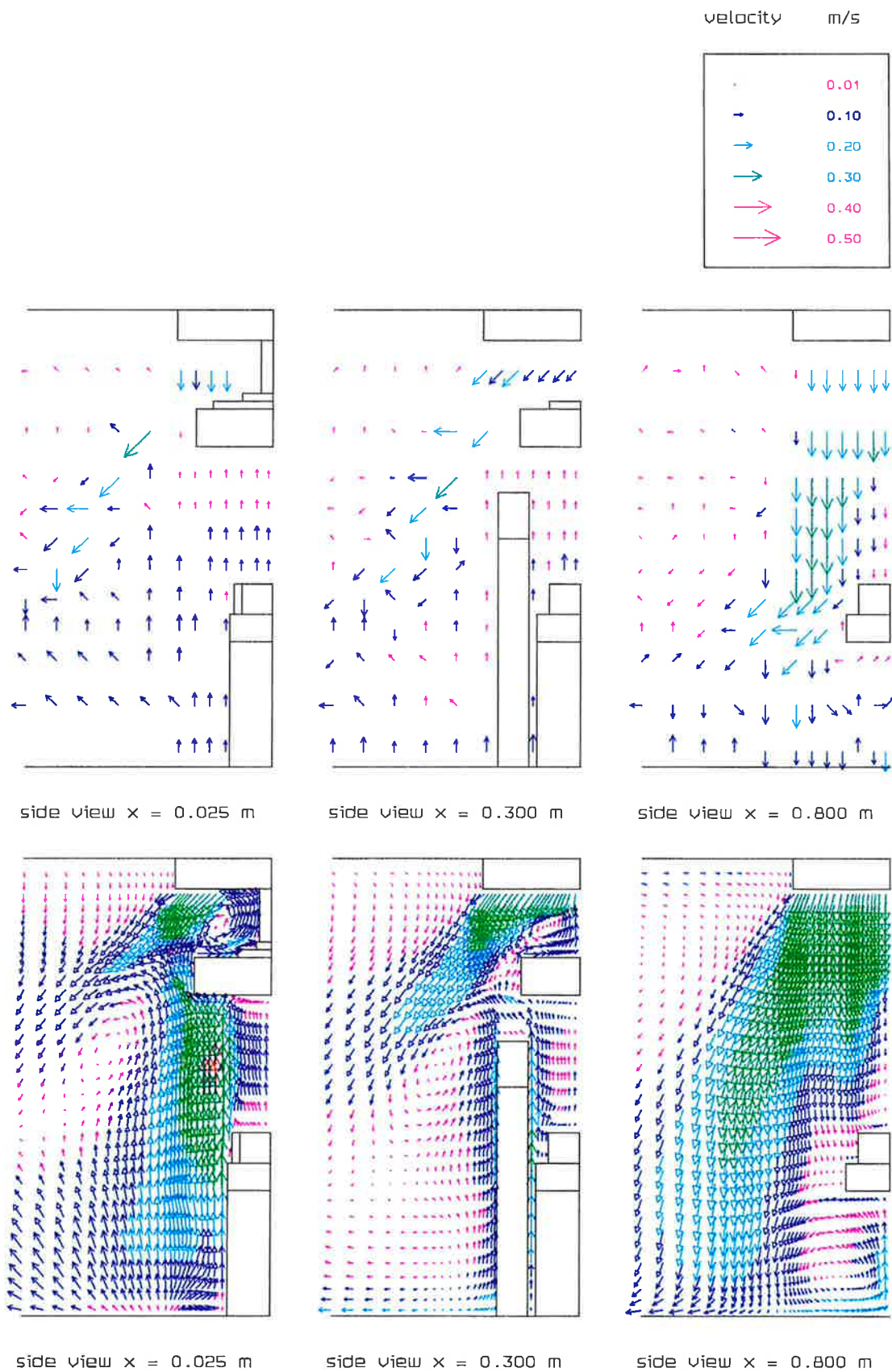
velocity m/s

top view $y = 0.900$ mtop view $y = 1.300$ mtop view $y = 2.200$ mfore view $z = 0.025$ mfore view $z = 0.400$ mfore view $z = 1.400$ mside view $x = 0.025$ mside view $x = 0.300$ mside view $x = 1.400$ m

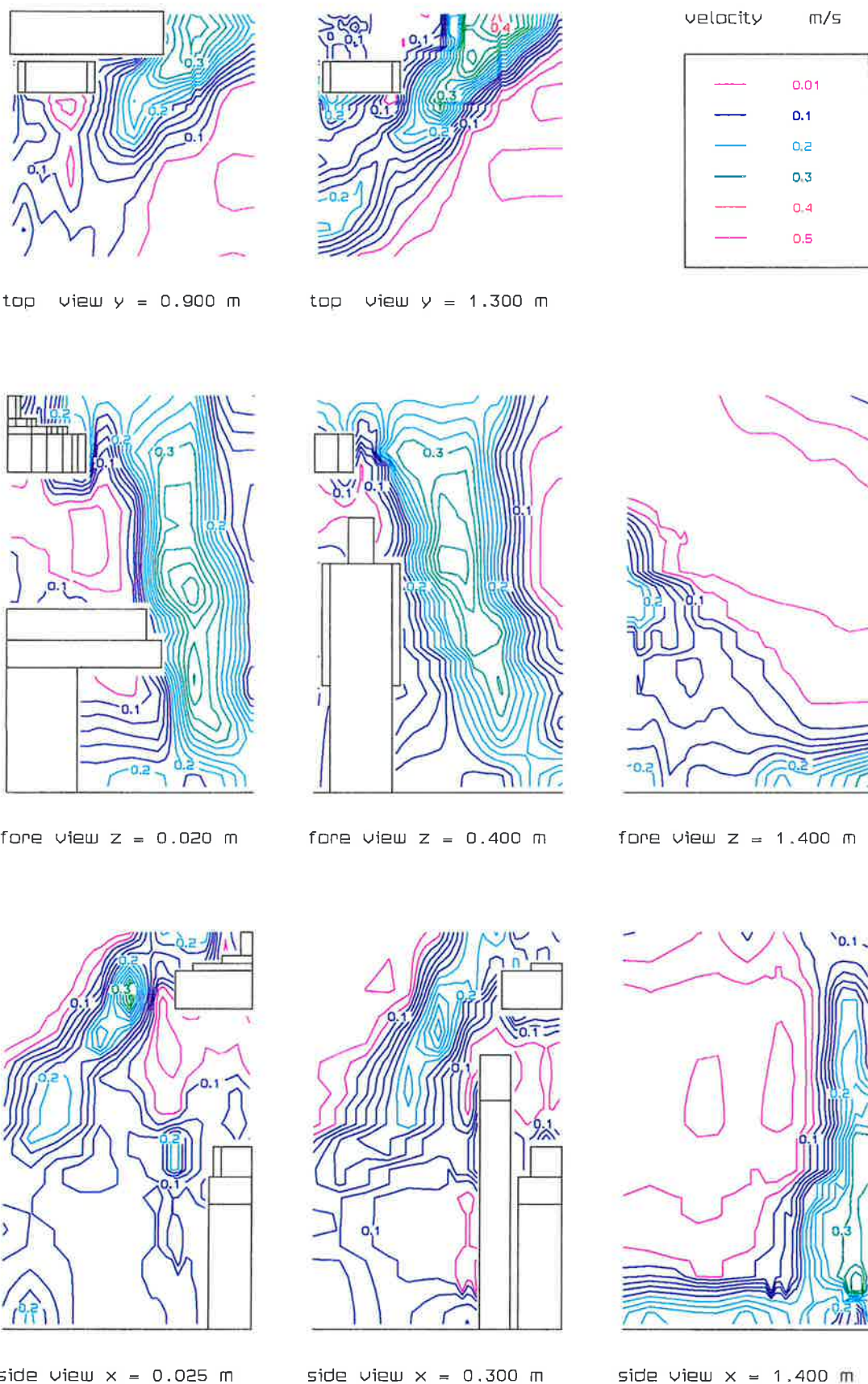
Figuur 4.2 Geval C: berekening 'warme lamp'
Snelheidsvectoren



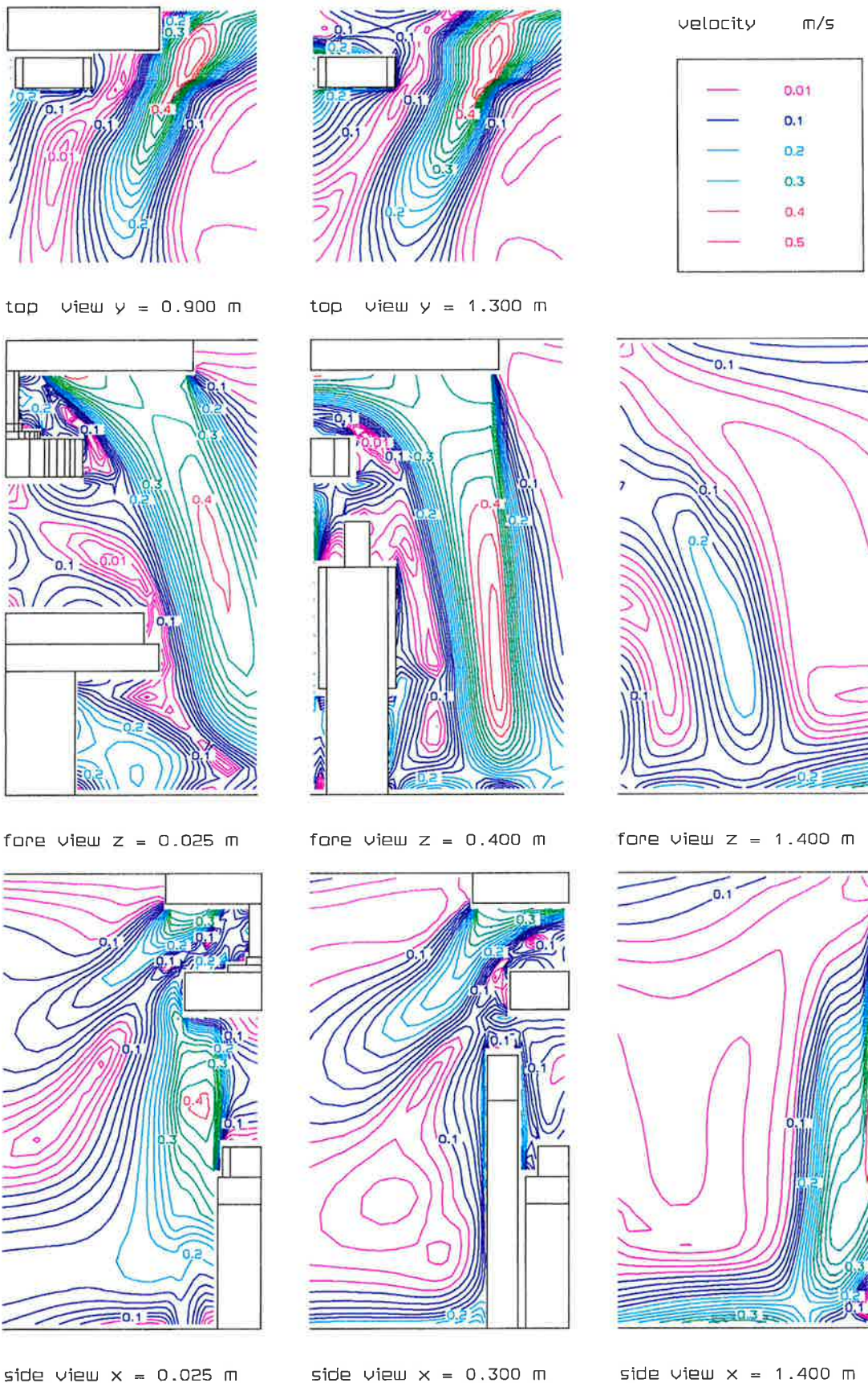
Figuur 4.3 Geval D: berekening 'geen Lamp'
Snelheidsvectoren



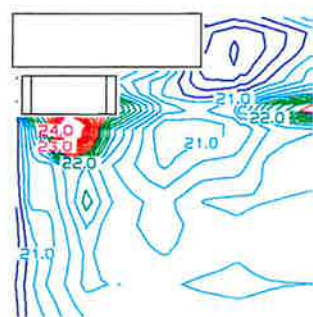
Figuur 4.4 Warme lamp: meting (boven) en berekening (onder)
Snelheidsvectoren



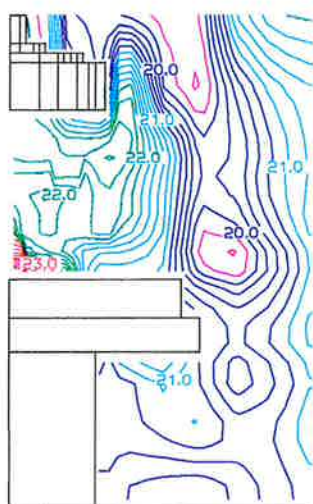
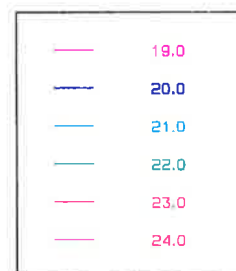
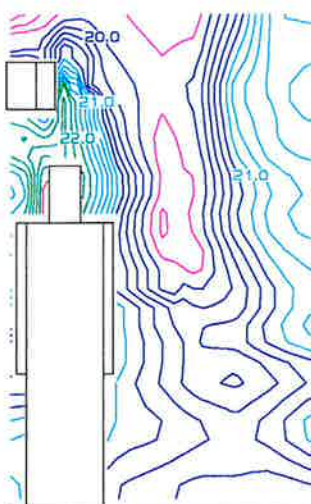
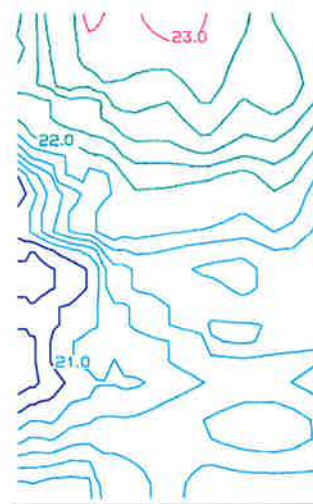
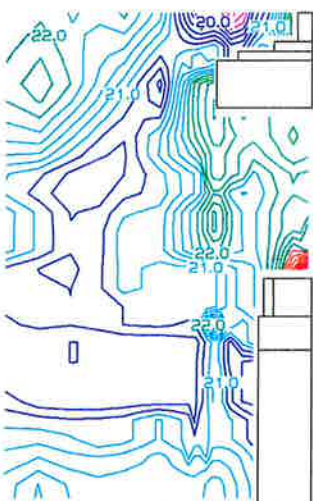
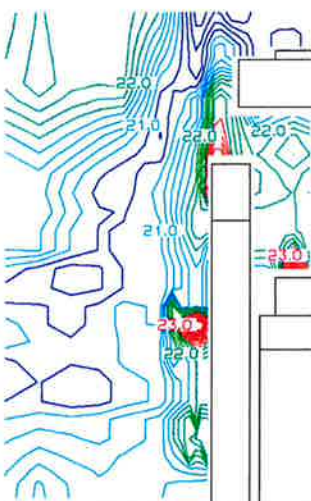
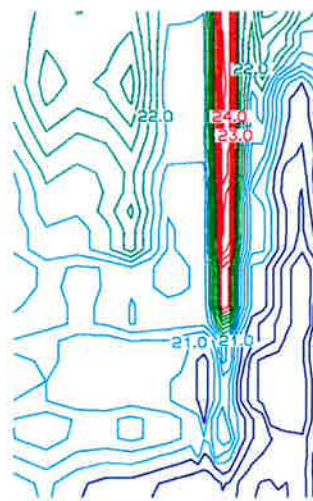
Figuur 4.5 Geval A: meting 'warme lamp'
Iso-vellen (oplopend met 0.02 m/s)



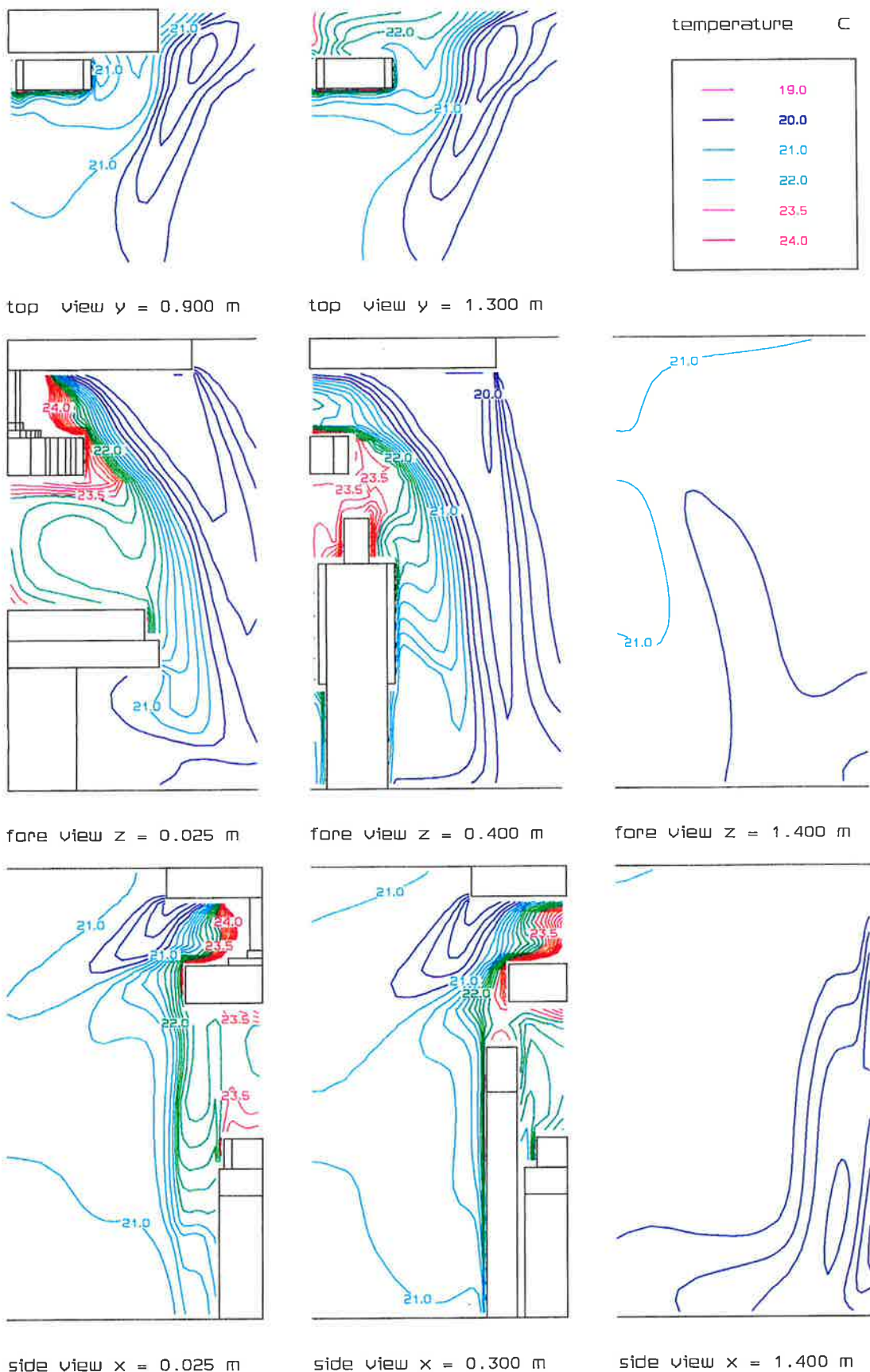
Figuur 4.6 Geval C: berekening 'warme lamp'
Iso-vellen (oplopend met 0.02 m/s)

top view $y = 0.900$ mtop view $y = 1.300$ m

temperature °C

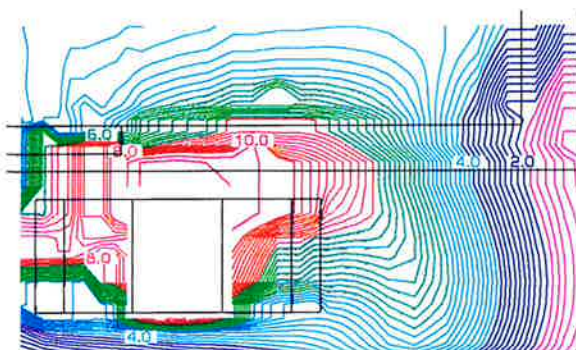
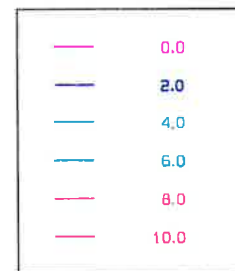
fore view $z = 0.020$ mfore view $z = 0.400$ mfore view $z = 1.400$ mside view $x = 0.025$ mside view $x = 0.300$ mside view $x = 1.400$ m

Figuur 4.7 Geval A: meting 'warme lamp'
Isothermen (oplopend met 0.2 °C)

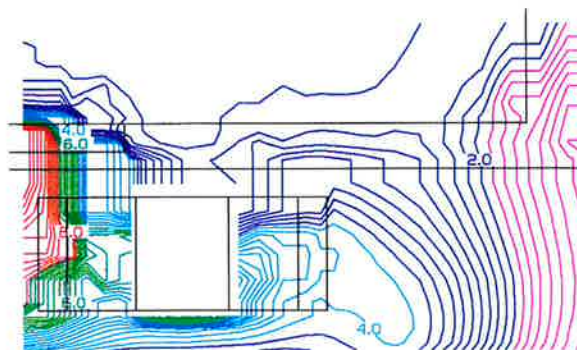


Figuur 4.8 Geval C: berekening 'warme lamp'
Isothermen (oplopend met 0.2°C)

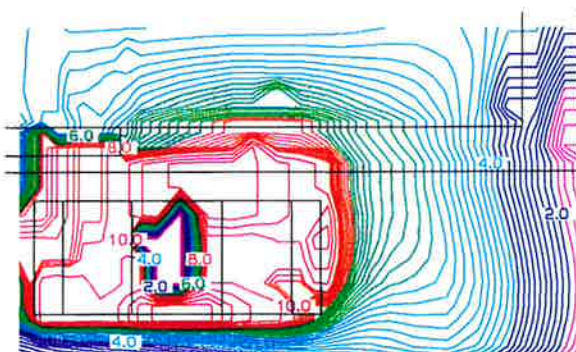
Norm. Concentratie



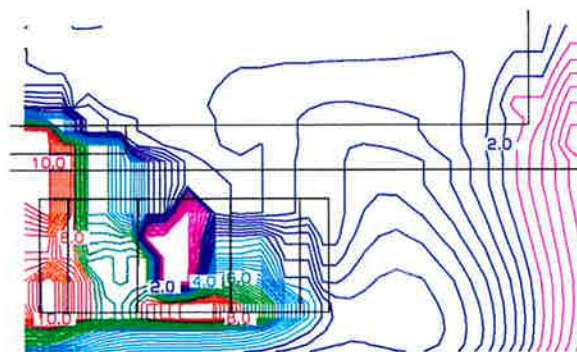
HIGH top view y = 1.700 m



LOW top view y = 1.700 m



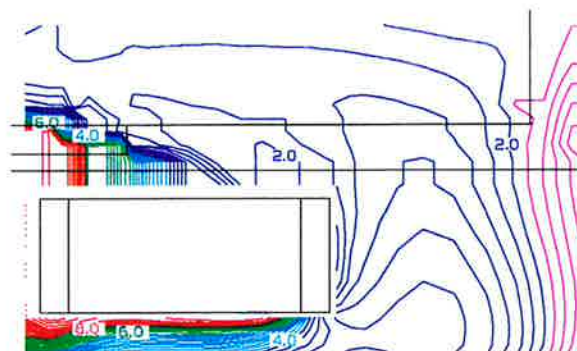
HIGH top view y = 1.500 m



LOW top view y = 1.500 m

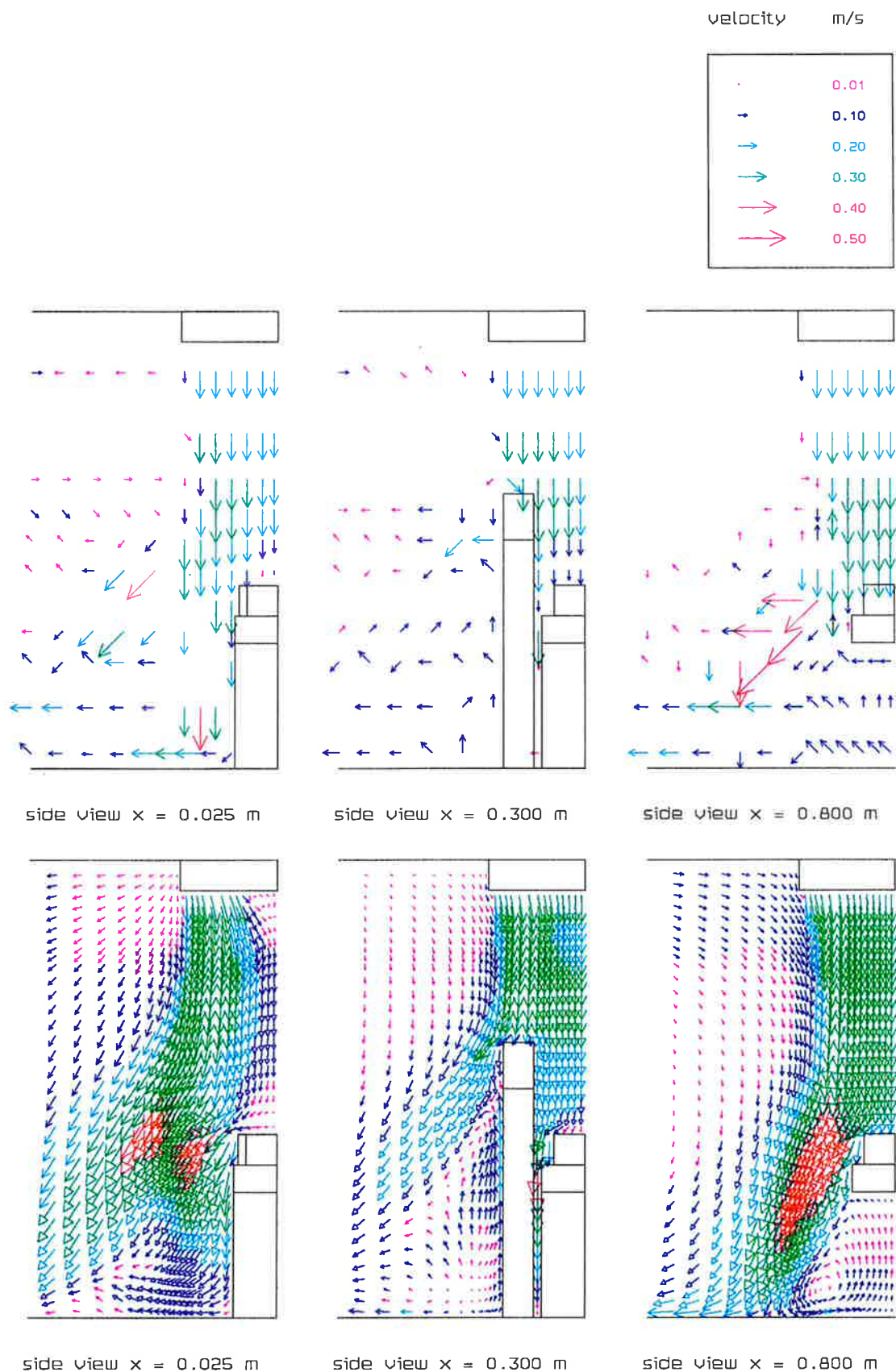


HIGH top view y = 1.300 m

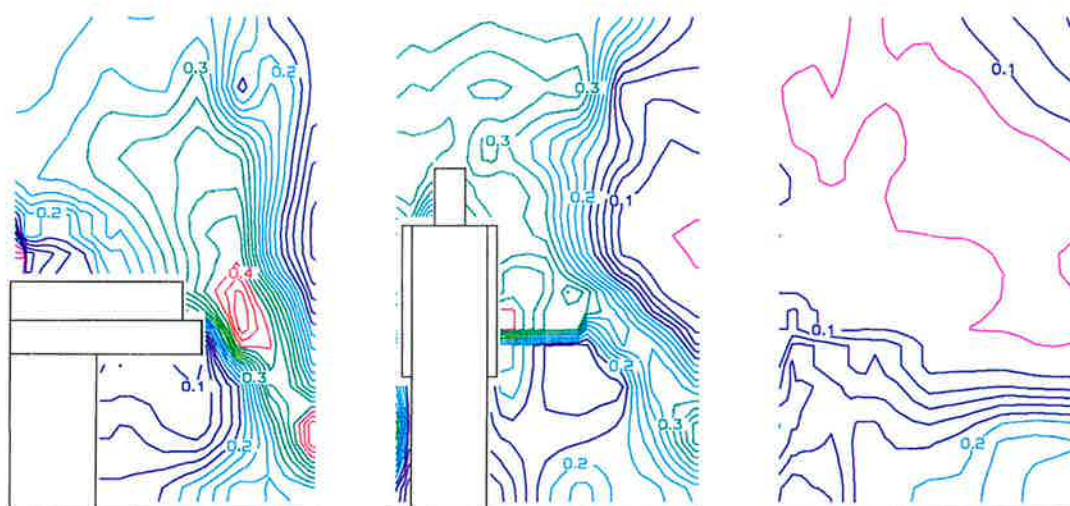
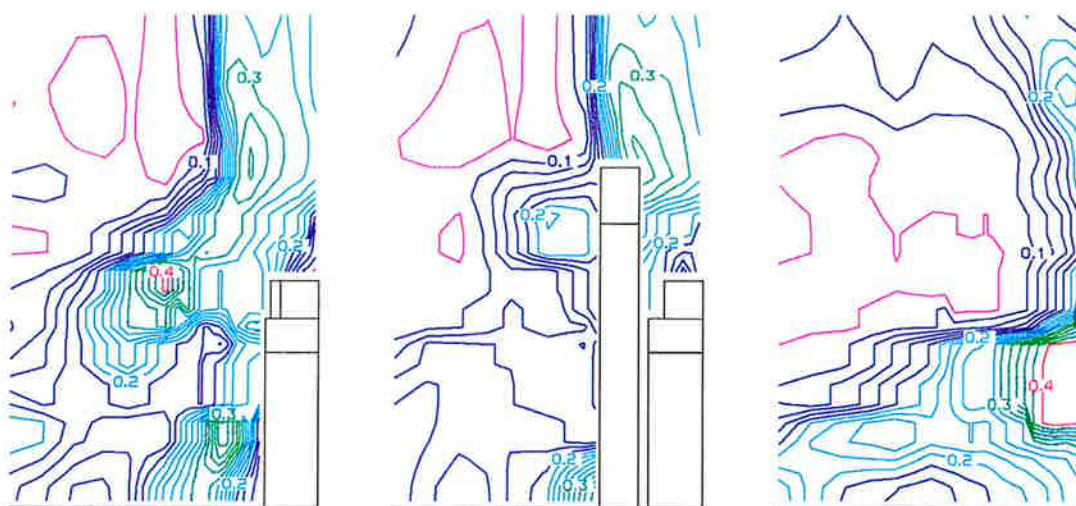


LOW top view y = 1.300 m

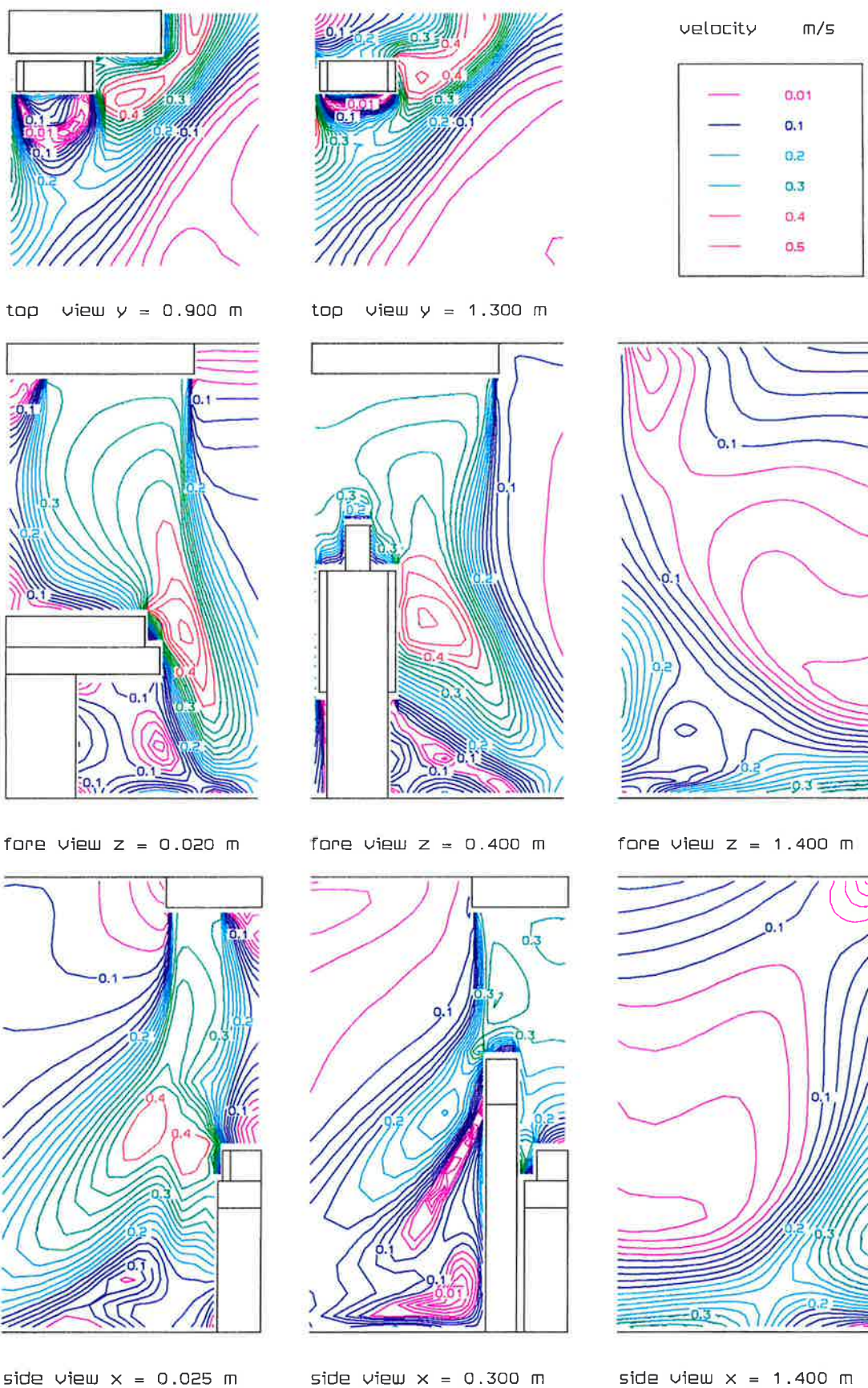
Figuur 4.9 Geval C met bron boven (HIGH) en onder (LOW)
Genorm. concentratie (oplopend met 0.02)



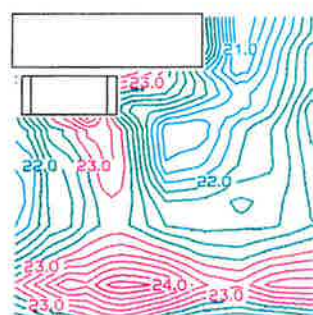
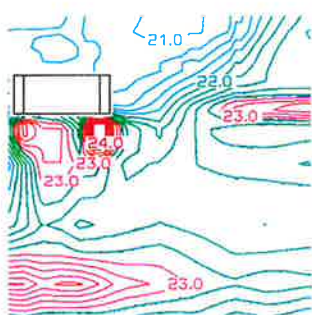
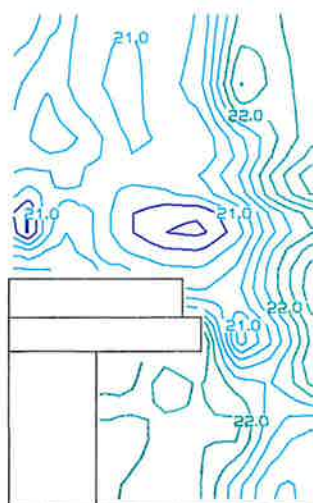
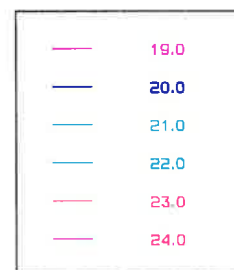
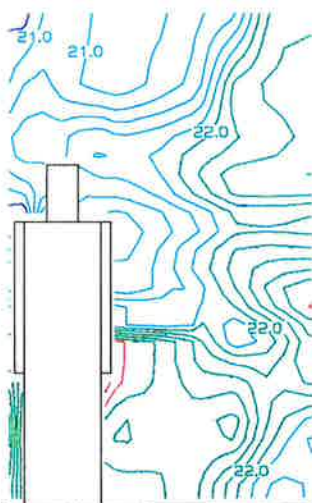
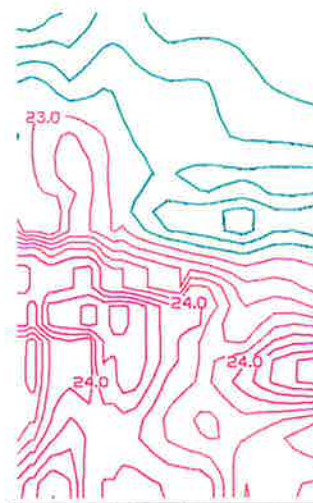
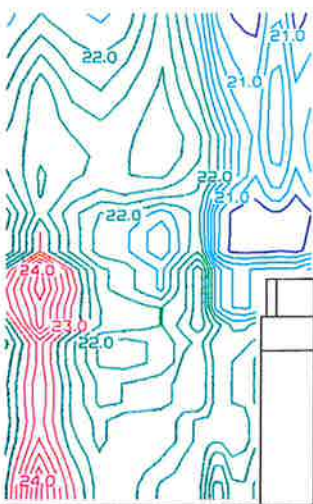
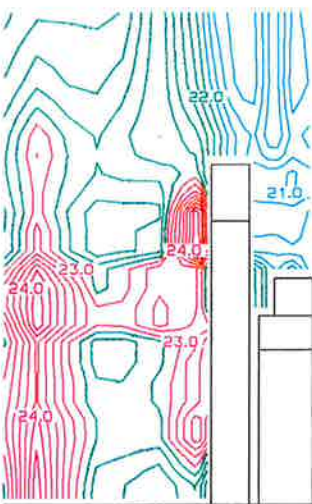
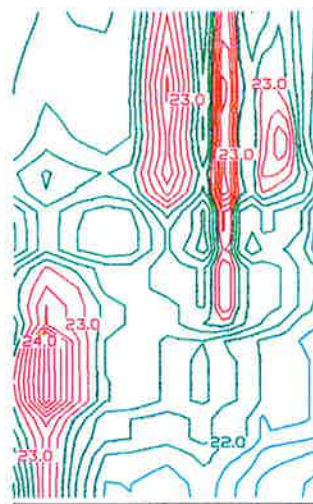
Figuur 4.10 Geen Lamp: meting (boven) en berekening (onder)
Snelheidsvectoren

top view $y = 0.900$ mtop view $y = 1.300$ mfore view $z = 0.020$ mfore view $z = 0.400$ mfore view $z = 1.400$ mside view $x = 0.025$ mside view $x = 0.300$ mside view $x = 1.400$ m

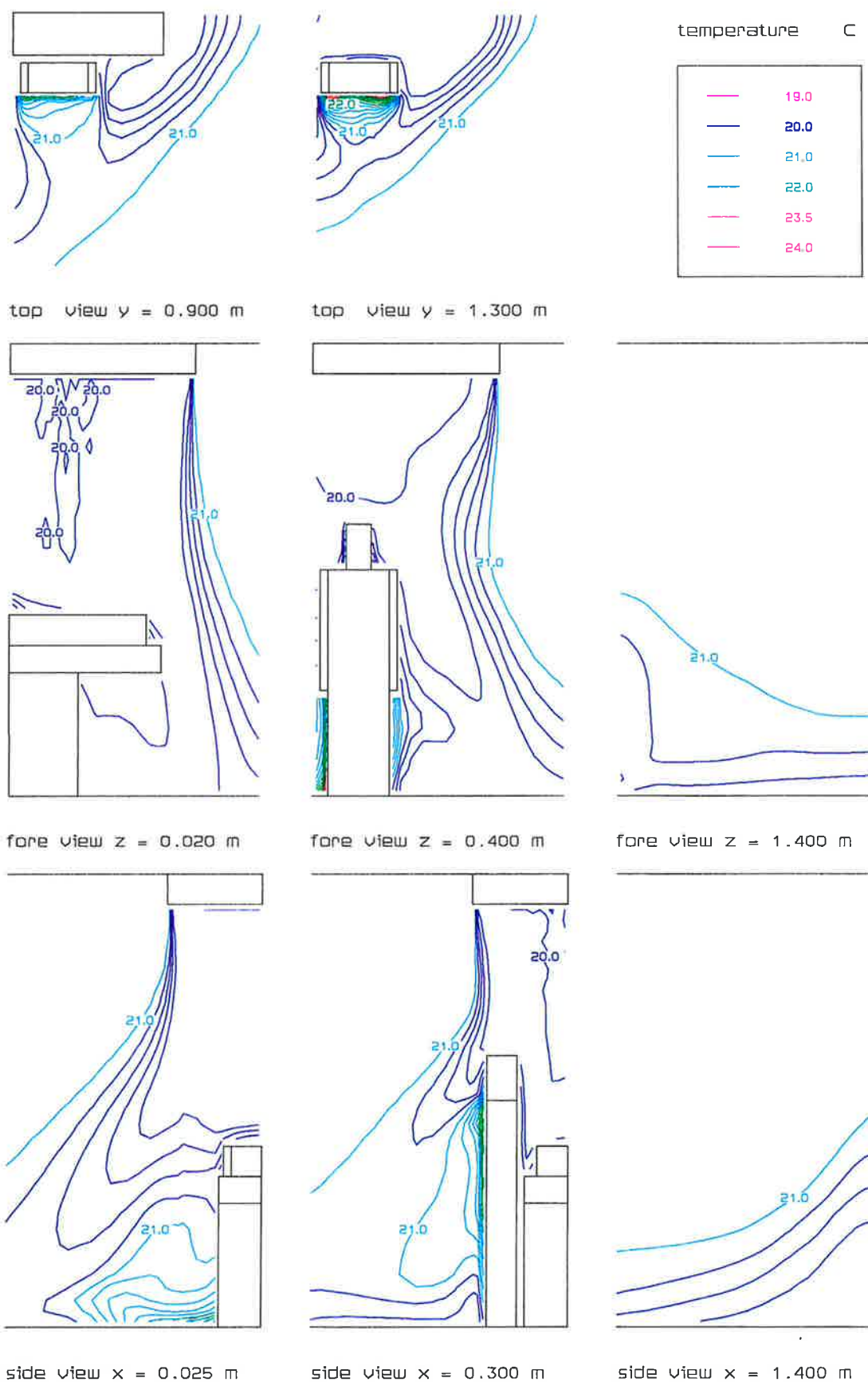
Figuur 4.11 Geval B: meting 'geen lamp'
 Iso-vellen (oplopend met 0.02 m/s)



Figuur 4.12 Geval D: berekening 'geen lamp'
Iso-vellen (oplopend met 0.02 m/s)

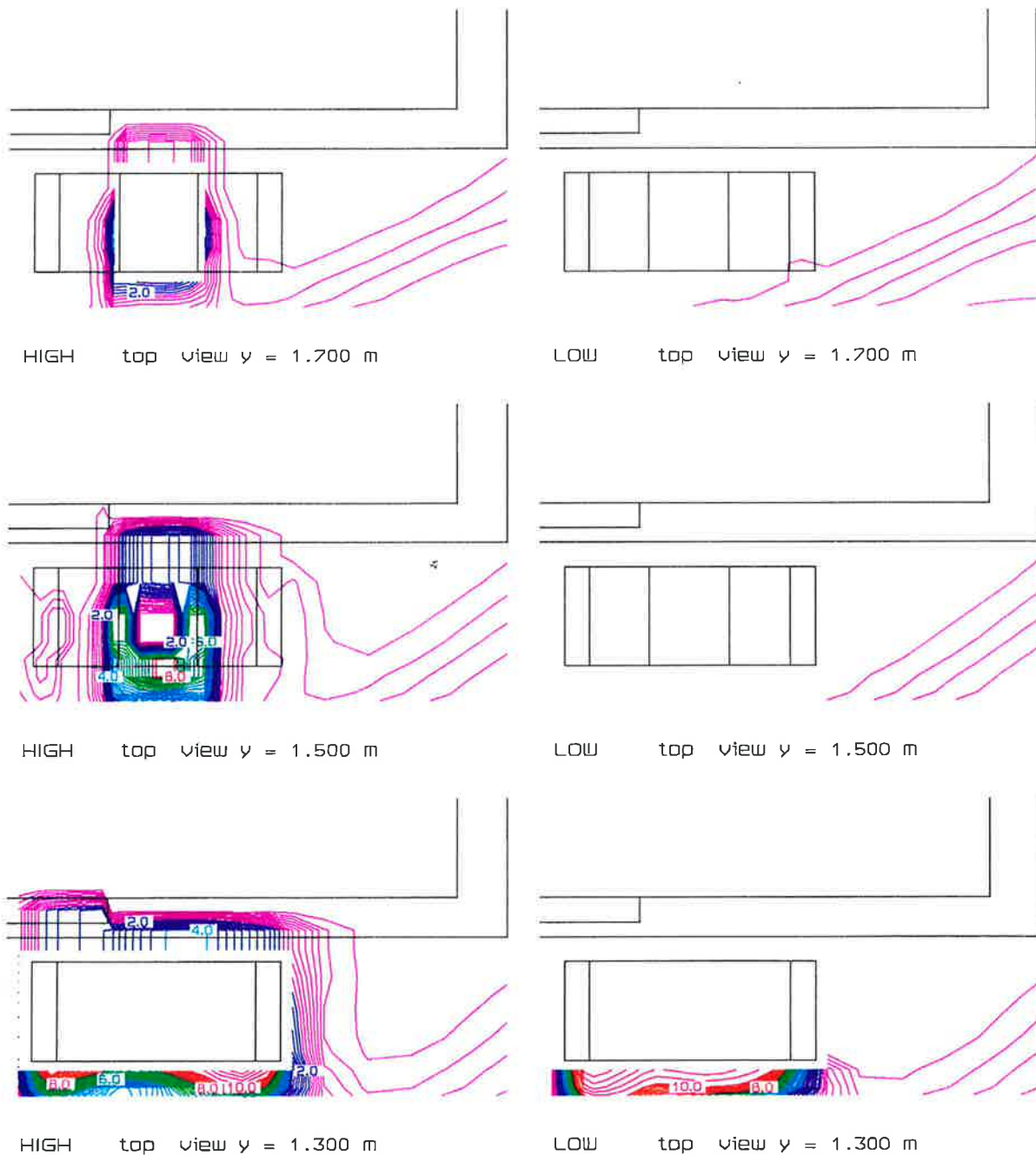
top view $y = 0.900$ mtop view $y = 1.300$ mtemperature $^{\circ}\text{C}$ fore view $z = 0.020$ mfore view $z = 0.400$ mfore view $z = 1.400$ mside view $x = 0.025$ mside view $x = 0.300$ mside view $x = 1.400$ m

Figuur 4.13 Geval B: meting 'geen lamp'
Isothermen (oplopend met 0.2°C)



Figuur 4.14 Geval D: berekening 'geen Lamp'
Isothermen (oplopend met 0.2°C)

Norm. Concentratie



Figuur 4.15 Geval D met bron boven (HIGH) en onder (LOW)
 Genorm. concentratie (oplopend met 0.02)

Tabel 4.2 Bron boven: concentraties (genormeerd) voor de warme lamp, gemeten (geval A) en berekend (geval C) op $y = 1,7\text{ m}$, $1,5\text{ m}$ en $1,3\text{ m}$.

Geval A: meting warme lamp, bron boven, $y = 1,7\text{ m}$						
positie	$x = 0.0\text{ m}$	$x = 0.2\text{ m}$	$x = 0.4\text{ m}$	$x = 0.6\text{ m}$	$x = 0.8\text{ m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{ m}$	4,88	6,04	6,88	4,15	0,38	4,36
$z = 0.2\text{ m}$	6,88	9,73	7,81	5,04	0,58	5,79
gemiddeld	5,88	7,89	7,35	4,60	0,48	5,08

Geval C: berekening warme lamp, bron boven, $y = 1,7\text{ m}$						
positie	$x = 0.0\text{ m}$	$x = 0.2\text{ m}$	$x = 0.4\text{ m}$	$x = 0.6\text{ m}$	$x = 0.8\text{ m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{ m}$	4,32	4,50	4,71	4,95	4,64	4,70
$z = 0.2\text{ m}$	4,20	5,57	7,24	7,01	3,72	5,89
gemiddeld	4,26	5,04	5,98	5,98	4,18	5,30

Geval A: meting warme lamp, bron boven, $y = 1,5\text{ m}$						
positie	$x = 0.0\text{ m}$	$x = 0.2\text{ m}$	$x = 0.4\text{ m}$	$x = 0.6\text{ m}$	$x = 0.8\text{ m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{ m}$	3,96	5,23	6,04	7,81	0,85	4,98
$z = 0.2\text{ m}$	6,88	7,81	6,88	4,88	1,27	5,21
gemiddeld	5,42	6,52	6,46	6,35	1,06	5,10

Geval C: berekening warme lamp, bron boven, $y = 1,5\text{ m}$						
positie	$x = 0.0\text{ m}$	$x = 0.2\text{ m}$	$x = 0.4\text{ m}$	$x = 0.6\text{ m}$	$x = 0.8\text{ m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{ m}$	4,27	4,36	4,39	4,42	4,41	4,40
$z = 0.2\text{ m}$	4,09	5,52	7,26	6,66	4,53	5,99
gemiddeld	4,18	4,94	5,83	5,54	4,47	5,20

Geval A: meting warme lamp, bron boven, $y = 1,3$ m						
positie	$x = 0.0\text{m}$	$x = 0.2\text{m}$	$x = 0.4\text{m}$	$x = 0.6\text{m}$	$x = 0.8\text{m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{m}$	2,31	4,31	5,12	6,04	1,12	4,15
$z = 0.2\text{m}$	4,54	6,04	4,88	3,73	2,12	4,19
gemiddeld	3,43	5,18	5,00	4,89	1,62	4,17

Geval C: berekening warme lamp, bron boven, $y = 1,3$ m						
positie	$x = 0.0\text{m}$	$x = 0.2\text{m}$	$x = 0.4\text{m}$	$x = 0.6\text{m}$	$x = 0.8\text{m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{m}$	4,20	4,13	3,95	3,66	3,35	3,77
$z = 0.2\text{m}$	4,07	4,51	5,14	4,86	4,29	4,70
gemiddeld	4,14	4,32	4,55	4,26	3,82	4,24

Tabel 4.3 Bron onder: concentraties (genormeerd) voor de warme lamp, gemeten (geval A) en berekend (geval C) op $y = 1,7\text{m}$, $1,5\text{m}$ en $1,3$ m.

Geval A: meting warme lamp, bron onder, $y = 1,7$ m						
positie	$x = 0.0\text{m}$	$x = 0.2\text{m}$	$x = 0.4\text{m}$	$x = 0.6\text{m}$	$x = 0.8\text{m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{m}$	2,69	2,04	2,81	1,12	0,19	1,54
$z = 0.2\text{m}$	5,23	6,04	4,50	2,54	0,42	3,38
gemiddeld	3,96	4,04	3,66	1,83	0,31	2,46

Geval C: berekening warme lamp, bron onder, $y = 1,7$ m						
positie	$x = 0.0\text{m}$	$x = 0.2\text{m}$	$x = 0.4\text{m}$	$x = 0.6\text{m}$	$x = 0.8\text{m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{m}$	2,40	2,41	2,45	2,53	2,72	2,53
$z = 0.2\text{m}$	5,44	2,88	2,62	2,83	2,27	2,65
gemiddeld	3,92	2,65	2,54	2,68	2,50	2,59

Geval A: meting warme lamp, bron onder, $y = 1,5$ m						
positie	x = 0.0m	x = 0.2m	x = 0.4m	x = 0,6m	x = 0.8m	gemiddeld
z = 0.0m	2,50	2,92	3,50	3,19	0,27	2,47
z = 0.2m	5,15	3,50	4,15	2,65	0,27	2,64
gemiddeld	3,83	3,21	3,83	2,92	0,27	2,56

Geval C: berekening warme lamp, bron onder, $y = 1,5$ m						
positie	x = 0.0m	x = 0.2m	x = 0.4m	x = 0,6m	x = 0.8m	gemiddeld
z = 0.0m	2,37	2,38	2,41	2,44	2,54	2,44
z = 0.2m	5,99	2,63	2,57	2,89	2,49	2,65
gemiddeld	4,18	2,51	2,49	2,67	2,52	2,55

Geval A: meting warme lamp, bron onder, $y = 1,3$ m						
positie	x = 0.0m	x = 0.2m	x = 0.4m	x = 0,6m	x = 0.8m	gemiddeld
z = 0.0m	2,77	2,88	3,50	3,42	0,46	2,57
z = 0.2m	3,81	2,38	2,88	2,27	0,69	2,06
gemiddeld	3,29	2,63	3,19	2,85	0,58	2,32

Geval C: berekening warme lamp, bron onder, $y = 1,3$ m						
positie	x = 0.0m	x = 0.2m	x = 0.4m	x = 0,6m	x = 0.8m	gemiddeld
z = 0.0m	2,35	2,33	2,30	2,21	2,11	2,24
z = 0.2m	5,20	2,46	2,30	2,60	2,41	2,44
gemiddeld	3,78	2,40	2,30	2,41	2,26	2,34

Tabel 4.4 Gemiddelde concentraties per hoogte en in het meetvolume voor de warme lamp, gemeten (geval A) en berekend (geval C)

hoogte	Bron boven		Bron onder	
	Geval A meting	Geval C berekening	Geval A meting	Geval C berekening
y = 1,7m	5,08	5,30	2,46	2,59
y = 1,5m	5,10	5,20	2,56	2,55
y = 1,3m	4,17	4,24	2,32	2,34
gemiddeld	4,78	4,91	2,45	2,49

Tabel 4.5 Bron boven: concentraties (1000xgenormeerd) zonder lamp berekend (geval D) op $y = 1,7\text{m}$, $1,5\text{m}$ en $1,3\text{ m}$. Let op: waarden in tabel door 1000 delen om werkelijke genormeerde waarde te verkrijgen.

Geval D: berekening zonder lamp, bron boven, $y = 1,7\text{ m}$						
positie	$x = 0.0\text{m}$	$x = 0.2\text{m}$	$x = 0.4\text{m}$	$x = 0,6\text{m}$	$x = 0.8\text{m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{m}$	0,01	0,00	0,00	0,01	0,36	0,09
$z = 0.2\text{m}$	0,06	0,57	0,62	0,09	1,35	0,66
gemiddeld	0,04	0,29	0,31	0,05	0,86	0,38

Geval D: berekening zonder lamp, bron boven, $y = 1,5\text{ m}$						
positie	$x = 0.0\text{m}$	$x = 0.2\text{m}$	$x = 0.4\text{m}$	$x = 0,6\text{m}$	$x = 0.8\text{m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{m}$	0,01	0,00	0,00	0,00	0,25	0,06
$z = 0.2\text{m}$	0,29	3,85	4,97	0,31	0,73	2,47
gemiddeld	0,15	1,93	2,49	0,16	0,49	1,27

Geval D: berekening zonder lamp, bron boven, $y = 1,3\text{ m}$						
positie	$x = 0.0\text{m}$	$x = 0.2\text{m}$	$x = 0.4\text{m}$	$x = 0,6\text{m}$	$x = 0.8\text{m}$	gemiddeld
$z = 0.0\text{m}$	0,03	0,02	0,00	0,00	0,11	0,03
$z = 0.2\text{m}$	2,06	8,29	9,34	1,09	0,26	4,75
gemiddeld	1,05	4,16	4,67	0,55	0,19	2,39

4.2 Bespreking resultaten met warme lamp

Luchtstromingen

De hoofdstroming wordt bepaald door de toegevoerde schone lucht uit het plenum. Deze lucht wordt door de (grote) lamp afgebogen en stroomt langs de tafel achter de staande personen naar beneden en langs de vloer naar de wanden. Boven de lamp ontstaat een wervel, veroorzaakt door de warmteontwikkeling van de lamp. Onder de lamp ontstaat een zogebied, vanwege de blokkerende werking van de lamp. (Zie fig. 4.2). Nabij de operatie-tafel wordt het stromingsbeeld gekenmerkt door:

- omhoogkruipende stromingen langs de staande personen naar de tafel;
- een onbeheerste stroming boven de tafel;
- recirculatiestromen (wervels) onder en naast de tafel.

Alle bovengenoemde kenmerken die reeds in [2] en door de herberekeningen waren voorspeld, werden ook tijdens de metingen waargenomen (zie figuur 4.4).

De gemeten snelheden zijn in het algemeen goed in overeenstemming met de berekende waarden. De belangrijkste verschillen treden op in de koude luchtstroom die langs de kopse kant van de tafel naar beneden stroomt. (Vergelijk doorsneden $z = 0.025$ m en $z = 0.40$ m in fig. 4.5 en fig 4.6). De berekende snelheden zijn volgens deze figuren zo'n 20 % hoger dan de gemeten waarden (0,44 m/s t.o.v. 0.36 m/s). De presentatie in iso-vellen ver-sluiert echter eventuele snelheidspieken, vanwege het relatief grove meetraster. Zorgvuldige analyse van de individueel gemeten meetpunten toont een maximaal gemeten snelheid van 0,40 m/s in de luchtstroom. Dit betekent een verschil van slechts 10 %.

Temperaturen

De gemeten temperaturen zijn veel lastiger te vergelijken met de berekende waarden. (Zie fig. 4.7 en 4.8) De koude en warme gebieden stemmen wel overeen, maar de temperatuurwaarden verschillen. Dit wordt hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door het feit, dat een meet sessie meerdere dagen duurde. De temperaturen in de hal waarin de cleanroom is opgesteld variëren dagelijks en hiermee ook de warmtestromen door de wanden van de cleanroom en de wandtemperaturen. Voor de validatie is dit echter niet zo relevant, omdat de temperatuurverschillen, die bepalend zijn voor de stroming, wel gelijk blijven.

Concentraties

Een indruk van de concentratie-verdeling wordt gegeven in fig 4.9. Nabij de bron (de staande persoon), neemt de concentratie sterk toe. Dit betekent dat de plaats van de persoon, t.o.v. de patiënt heel belangrijk is voor de te verwachten concentraties in het wond gebied.

De metingen (tabel 4.3 en 4.4) tonen de hoogste concentraties in de buurt van $x=0.2$ m, terwijl de berekeningen het maximum in de buurt van $x=0.4$ m voorspellen. Ook daalt de gemeten concentratie vanuit de plaats van het maximum sneller dan voorspeld. Tevens zijn de gemeten maximale waarden zo'n 10% to 30% hoger dan de berekende waarden.

De over het meetvolume gemiddelde concentraties (zie tabel 4.4) stemmen echter binnen 3% met elkaar overeen !

Verontreinigingen afkomstig van het bovenlichaam veroorzaken een circa 2 maal hogere concentratie bij de patiënt dan verontreinigingen afkomstig van het onderlichaam.

4.3 Bespreking resultaten zonder lamp

Luchtstromingen

De hoofdstroming wordt bepaald door de toegevoerde schone lucht uit het plenum. De blokkerende werking van de lamp is verdwenen en het grootste deel van de lucht stroomt naar de patiënt op de tafel. (Zie fig. 4.3)

Nabij de operatietafel wordt het stromingsbeeld gekenmerkt door:

- omlaaggerichte stromingen langs de staande personen naar de tafel;
- een laminaire, rustige omlaaggerichte stroming boven de tafel;
- recirculatiestromen (wervels) onder en naast de tafel.

Alle bovengenoemde verbeteringen die reeds in [2] en door de herberekeningen waren voorspeld, werden ook tijdens de metingen waargenomen (zie figuur 4.4).

De gemeten snelheden zijn in het algemeen goed in overeenstemming met de berekende waarden. Ook hier treden de belangrijkste verschillen op in de koude luchtstroom die langs de zijkanten van tafel naar beneden stroomt. (Vergelijk fig. 4.11 met fig 4.12) en zijn de berekende snelheden zo'n 20 % hoger dan de gemeten waarden. Ook hier geldt echter, dat de presentatie in iso-vellen eventuele snelheidspieken versluiert, vanwege het relatief grove meetraster. Analyse van de individueel gemeten meetpunten toont verschillen in maxima van ca 12 %.

Temperaturen

Ten aanzien van de gemeten temperaturen geldt hetzelfde als reeds in par. 4.2 vermeld.

Concentraties

De berekende en gemeten concentraties zijn zeer laag (zie tabel 4.5) en tonen de uitstekende werking van het laminair downflow systeem bij afwezigheid van de storende werking van de lamp. Door de lage concentraties, die beneden de ondergrens van de meetapparatuur lagen, was validatie niet mogelijk, doch echter ook niet relevant, omdat de gewenste luchtzuiverheid toch wel wordt behaald.

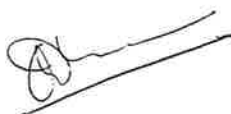
5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Het uitgevoerde onderzoek leidt tot de volgende conclusies.

1. Computational Fluid Dynamics is een geschikte methode om de belangrijkste kenmerken van de luchtstromingen die in operatiekamers optreden te voorspellen.
2. De methode is in staat om de grootte van de belangrijkste luchtsnelheden tot op 10% tot 20 % nauwkeurig te voorspellen.
3. De methode is in staat om de gemiddelde concentraties verontreiniging boven de patiënt afkomstig van het opererend personeel tot op 5% tot 10 % nauwkeurig te voorspellen. De lokale concentraties worden echter minder goed voorspelt, hierbij moet rekening worden gehouden met verschillen van 0,2 m tot 0,3 m in de plaats - van het concentratie maximum en verschillen tot 30 % in de lokale concentratiewaarden.
4. Er werd een methode ontwikkeld om het infectiegevaar ten gevolge van bacteriedragend deeltjes afkomstig van het operatieteam kwantitatief af te schatten met behulp van concentratie metingen van tracergas, dat bij de poppen onder de kleding werd ingebracht.

Het onderzoek leidt ook tot de volgende aanbevelingen voor verdere validaties.

1. Gelet op het tijdrovende karakter van gedetailleerde luchtsnelheidsmetingen, verdient het aanbeveling om bij eventueel benodigde verdere validatie de aandacht te richten op visualisatie van de stroming d.m.v. rook en bijvoorbeeld video-opnamen.
2. Gelet op de sterke afhankelijkheid van de concentraties boven de patiënt van de positie van het operatieteam t.o.v. van de patiënt, verdient het aanbeveling deze posities in het vervolgonderzoek, vaker te variëren.



ir A.D. Lemaire
projectleider



ir W. Plokker
sectiehoofd Installatie Software

Delft, februari 1996

LEAB0498.SIC (bnl)

LITERATUUR

- [1] Luscuere, P.G.; Luchtstromingsbeheersing in operatiekamers, Symposium 'Luchtstromingsbeheersing in operatiekamers, onderdeel van infectiepreventie, Den Haag 13 november 1992, VCCN-syllabus, pag 21-26.
- [2] Luscuere, P.G., T. Lemaire, P.J. Ham; Improvement capabilities with the help of computerflow modelling, Proceedings of Indoor Air '93, vol 2, pag 575-580.
- [3] Wiegersma, N. en P. Maaskant; Deeltjesconcentraties in operatiekamers; De correlatie tussen tracergas- en kiemconcentraties; IG-TNO-rapport F 1478-VI, okt. 1977.

BIJLAGE A

HET COMPUTERPROGRAMMA WISH3D

Inleiding

Het computerprogramma WISH3D berekent de verdeling van luchtsnelheden, drukken, temperaturen en stofconcentraties 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. Tevens kan de verdeling van de comfortparameters: PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) en DR (Draught Risk) worden berekend.

Het programma WISH3D is ontwikkeld door TNO in samenwerking met de TU-Delft, op basis van beproefde rekenmethoden. Het bestaat uit een invoer-module, een rekenmodel en een presentatie-module.

Het programma is in internationaal verband (IEA Annex 20) gevalideerd voor bovengenoemd toepassingsgebied.

De invoer-module

De invoer-module verzorgt de invoer van de geometrie en de randvoorwaarden (snelheden, temperaturen etc.) van het probleem, alsmede de benodigde materie-eigenschappen en stuurparameters voor de rekenmethode. Tevens wordt m.b.v. de invoer-module het benodigde rekenrooster gegenereerd. Vooralsnog wordt hier een rechthoekig rooster voor gebruikt en dit houdt in dat ook de ruimte en eventuele voorwerpen in de ruimte als rechthoekige vormen worden gemodelleerd.

Het rekenmodel

Het rekenmodel omvat het stromingsmodel (inclusief de numerieke methode), het stralingsmodel en het comfortmodel.

Het stromingsmodel gaat uit van de tijdsgemiddelde transportvergelijkingen voor behoud van massa, impuls en energie. Hierbij wordt verondersteld dat de lucht onsamendrukbaar is en zich als een ideaal gas gedraagt. De turbulentie in de ruimte wordt gemodelleerd met het bekende k- ϵ turbulentiemodel. Dit model voegt aan de dynamische viscositeit van de

lucht een 'eddy-viscosity' toe die afhangt van twee extra grootheden, namelijk: k , de kinetische energie voor de fluctuerende snelheid, en ϵ , de dissipatie van de turbulente kinetische energie per tijdseenheid. Deze grootheden worden met behulp van twee extra transport vergelijkingen beschreven. Het stoftransport wordt gebaseerd op meevoering door lucht en turbulente menging. De stroming in de nabijheid van vaste wanden wordt gemodelleerd m.b.v. standaard wandfuncties.

Het gehele stelsel transportvergelijkingen wordt iteratief opgelost m.b.v. de eindige volume methode. Hiertoe wordt de ruimte opgedeeld in roosterzellen, 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 roosterzellen. De oplossing van de drukverdeling gebeurt met het zogenaamde SIMPLE algoritme.

Het stralingsmodel veronderstelt 'grijze', diffuus reflecterende vlakken en is gebaseerd op de Discrete Transfer Methode. Hiertoe wordt voor elke wand van een roostercel die samenvalt met een stralingsvlak, berekend hoeveel warmtestraling uit de omgeving wordt ontvangen. Hierbij wordt de ruimte boven het vlak in een van te voren vastgelegd aantal richtingen (ruimtehoeken) onderverdeeld. Daarna wordt de temperatuur van het stralingsvlak berekend door de balans op te lossen tussen de ontvangen en uitgezonden warmtestraling, de warmteafgifte aan de lucht en het warmteverlies naar buiten.

Tussen het stromings- en stralingsmodel bestaat een wisselwerking, omdat de wandtemperaturen afhankelijk zijn van zowel de stroming als de straling. Daarom worden per iteratiestap de stromings- en de stralingvergelijkingen opgelost.

Het comfortmodel berekent de verdeling van de comfortparameters: PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) en DR (Draught Risk) op basis van de in ISO 7730 voorgeschreven vergelijkingen. De PPD wordt berekend uit de luchtsnelheden en luchttemperaturen die eerst vanaf de vloer tot een hoogte van 1,80 m worden gemiddeld en uit de stralingstemperatuur op 1,10 m hoogte. De DR wordt direct berekend uit de plaatselijke snelheid en turbulentie-intensiteit.

De presentatie-module

De presentatie-module verzorgt de grafische weergave van de berekende grootheden. 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.

BIJLAGE B

IMPROVEMENT CAPABILITIES OF OPERATING THEATRES, WITH THE HELP OF COMPUTER FLOW MODELLING

IMPROVEMENT CAPABILITIES OF OPERATING THEATRES, WITH THE HELP OF COMPUTER FLOW MODELLING

Peter G. Luscuere, Tony D. Lemaire, Philip J. Ham

TNO Building and Construction Research, Delft, The Netherlands

ABSTRACT

The capabilities to improve the performance of operating theatres have been studied with the help of a Computational Fluid Dynamics model. Flow patterns, temperature profiles and spread of contaminants were computed for four cases. The first case, a conventional operating-theatre, shows relatively high contamination levels on the operating table, due to several well known problems with the room air distribution. The three other cases show increasing performance if the heat dissipation of the lamp is subsequently 'turned off', the physical obstruction of the lamp is removed and an active floor exhaust is applied.

INTRODUCTION

Nowadays, most operating theatres in The Netherlands have a certain standard configuration with regard to dimensions, air flow rate, etc. The contribution of this infra structure to infections during operations is considerably low. Is it however, low enough? This question can only be answered in correlation with other sources of infection and with measures to avoid these, such as improvement of procedures, clothing, training etc. Cost and effect of each measure should be known, before decisions can be made, leading to the highest overall improvement. The study presented here, deals with one aspect of this decision process only: improvement of the performance characteristics of operating theatres.

To evaluate the performance correctly, airflow patterns, temperature profiles and spread of contaminants in the room, should be known. Flow visualization with smoke, steam or other small particles can be used. In clean rooms, such as operating theatres, the method has an unwanted contaminating effect and can only be applied after the room has been built, meaning high modification costs. Predictions with computer models, based on Computational Fluid Dynamics, overcome these disadvantages and are nowadays widely used as a research tool as is done in this study.

METHOD

Configurations and main boundary conditions

The computer simulations are all based on operating-theatre circumstances. As reference case, a conventional operating theatre is simulated with a central filter unit, size 2.3m x 2.3m, in the ceiling right above the operating table. Figure 1 shows the configuration and the main dimensions. The table and the lamp (diameter 0.90m) are placed in the centre of the room. Clean air is supplied downwards with approximately 0.3 m/s. Return air is exhausted through grills in the sidewalls. Four persons are standing around the table, representing the medical staff. All geometries are modelled as rectangular blocks, for modelling ease.

In addition to the reference case, three other cases are simulated. Each case investigating the effect of a certain additional measure.

The four studied cases are:

- reference: conventional operating-room
- cold lamp: as 'reference' case, but without heat dissipation of the lamp
- no lamp: as 'cold lamp' case, but without lamp and base on the ceiling
- floor exhaust: as 'no lamp' case, but with exhaust through the floor, instead of sidewall grills.

The 'cold lamp' and 'no lamp' cases serve to study the importance of the thermal and physical influence of the presence of the lamp, mostly right between the clean airflow and the critical operation area. The 'floor exhaust' case is meant to introduce feasible improvements, based on practical experience and knowledge from industrial cleanroom environments. These cases do not represent direct applicable practical solutions, but are meant to quantify the ranges of influence.

A survey of the different configurations associated with the cases is shown in figure 1.

Main boundary conditions are based on measuring results in operating theatres (1,2) and shown in table 1. The total heat dissipation by other apparatus in the room is modelled with a volumetric convective heat source, size 6.0m x 6.0m x 1.2m (excluding the space below the table) and placed on the floor in the centre of the room. The medical staff are considered the only (uniform) source of contaminants.

Table 1. Main boundary conditions for all cases.

CASE	PARAMETER	Value	Unit
All	Total air flow rate	0.778	m ³ /s
	Turbulence intensity at supply	0.01	
	Supply air temperature	20.0	°C
	Heat dissipation persons to air	240	W
	Volumetric heat source	900	W
Reference	Supply velocity	0.284	m/s
Cold lamp	Supply velocity	0.260	m/s
No lamp	Supply velocity	0.260	m/s
Reference	Heat dissipation lamp to air:		
	• upwards	150	W
	• sidewards	30	W
	• downwards	30	W
Cold lamp	Heat dissipation lamp to air	0	W
Reference	Exhaust velocity	0.778	m/s
Cold lamp	Exhaust velocity	0.778	m/s
No lamp	Exhaust velocity	0.778	m/s
Floor exhaust	Exhaust velocity	0.284	m/s

Computer model

All computer simulations were performed with the computer programme WISH3D. The programme was developed at TNO to predict flow patterns, temperatures and contaminant concentrations in a space with a certain ventilation system (3,4). This is achieved by solving the time-averaged equations of momentum, heat and mass transfer, using the finite volume method with pressure relaxation (5). Turbulence is modelled with the standard k-ε

model, leading to extra equations for k, the kinetic energy of turbulent fluctuations and ε, the dissipation rate of turbulent kinetic energy. The dynamic viscosity of the air is replaced by an 'effective' viscosity computed from k and ε. Turbulent mixing of contaminants is modelled in a similar way using an effective Schmidt number of one (6).

The configuration is symmetrical with respect to the two vertical planes in the middle of the room. Thus, by simulating only one quarter of the room, the computational time was reduced proportionally. Even so, computation of each case, lasted about 20 CPU-hours on the powerful workstation, used. This, due to the large number of finite volume cells (49062), needed to achieve accurate solutions.

RESULTS

Figure 2 gives an impression of the flow field of the 'reference' case, using velocity vectors in three different sections. Figure 3 and 4 compare the flow fields of all cases, by presenting projected velocity vectors on four vertical slices. Figure 5, 6 and 7 indicate the distributions of temperatures, contaminant concentrations and turbulence intensities, by showing iso-contours on two vertical slices, for each case. Concentrations are normalised with the concentration in the exhaust grills.

Turbulence intensities are interesting, because they result in uncontrolled contaminant transport. The importance of contaminant concentrations is obvious, though only transport of relatively small particles, due to turbulent mixing and convection is considered. There is no one to one relation between potential bacteria-carrying particles, but the concentration profiles are indicative.

Some striking results of the 'reference' case, which are not-wanted, but also observed in practice are:

- upward flows along the persons to the table
- uncontrolled flow above the table
- recirculation flows below and beside the table
- high turbulence and contamination levels above the table.

Compared to the 'reference' case, the 'cold lamp' case shows a small improvement with regard to the flow field as a whole and a clear decrease of the upward flows. The temperature profiles are also adapted. The 'no lamp' case shows a strongly improved situation with regard to the flow fields and, in particular, the effect of upward flows. The situation with regard to the turbulence-intensities and contaminant concentrations on the table is also improved.

The floor exhaust case shows an almost completely controlled displacement flow with a minimum of turbulence and contamination above the operating-table.

DISCUSSION

The results of the study should be seen as a theoretical framework indicating the influence of an operating lamp as physical and thermal disturbance in the desired flow field. This theoretical framework can then be regarded as the improvement capability that can be attained by improving flow resistance and heat dissipation properties of operating-lamps.

The floor exhaust case shows the capability of even further improvements. Here the quality of the flow is guaranteed, by using concepts developed and applied in industry. In practice, also a solution must be found to maintain safety and hygienic circumstances in the operating theatre.

The improvement capabilities of individual measures with regard to the infra structure of operating theatres have been shown. The results can be used to support the overall decision process, aimed at lowering infection rates during operations.

REFERENCES

1. Ham Ph.J. Airconditioning in Operating Theatres (in Dutch). VCCN-Syllabus II. Noordervliet B.V., Utrecht, The Netherlands, 1991
2. Ham Ph.J. Air control in the new OT-department of the medical centre at Breda (in Dutch). Techniek in de Gezondheid, 1989;7:26-31
3. Lemaire A.D., Luscuere P.G. Computer Flow Modelling. Microcontamination 91, San Jose, California, 1991. Cleanroom Technology Forum, 1991:23-30
4. Lemaire A.D., Luscuere P.G. Investigating Computer Modelling of Cleanroom Airflow Patterns. Microcontamination, 1991;8:19-26
5. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Mc Graw-Hill, New York, 1980.
6. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. Computer methods in applied mechanics and energy, 1974:269-289.

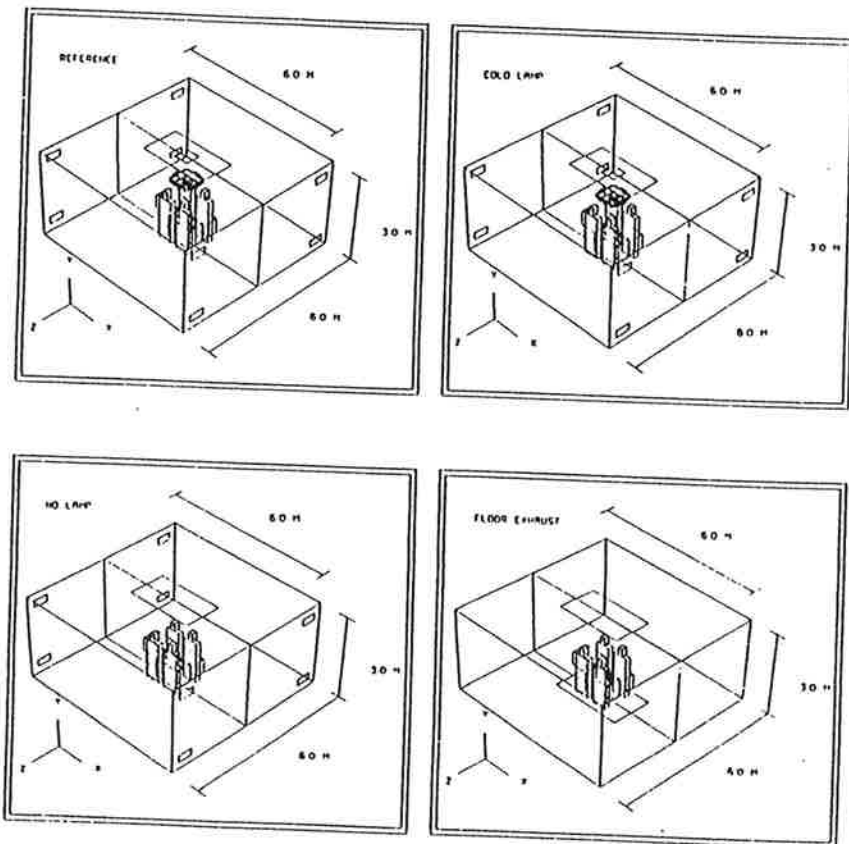
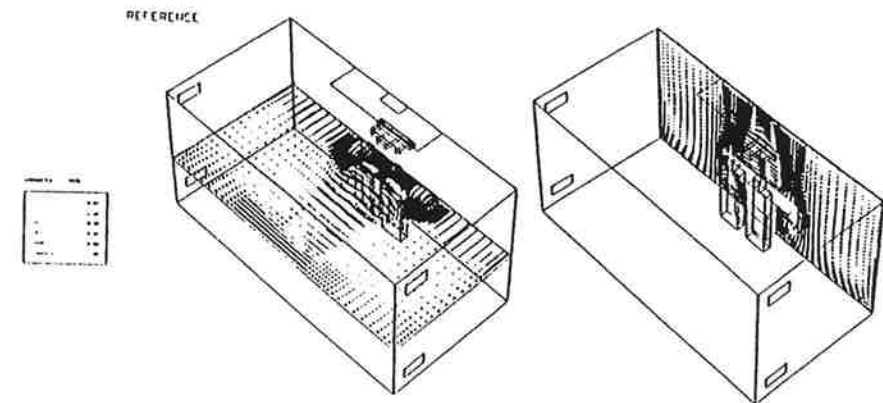
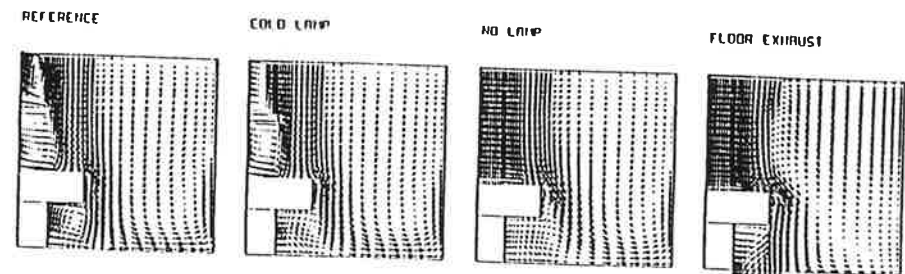
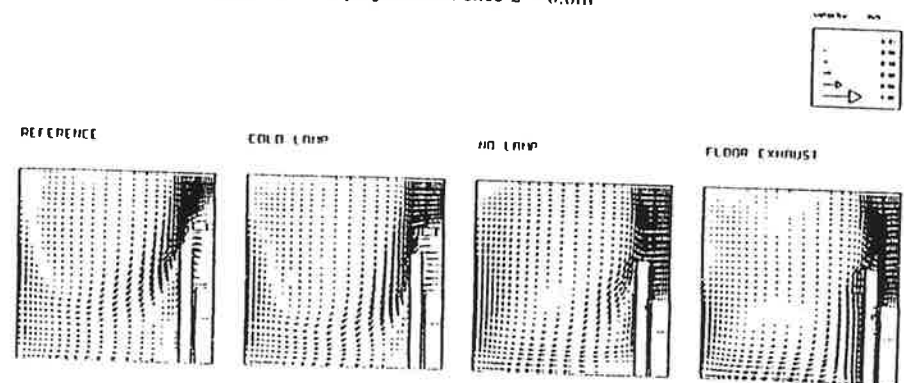


Fig. 1. All cases: geometry and dimensions

Fig. 2. Reference case: velocity vectors on slices $y = 1.65\text{m}$ and $z = 0.0\text{m}$ Fig. 3. All cases: velocity vectors projected on slice $z = 0.0\text{m}$ Fig. 4. All cases: velocity vectors projected on slice $x = 0.31\text{m}$

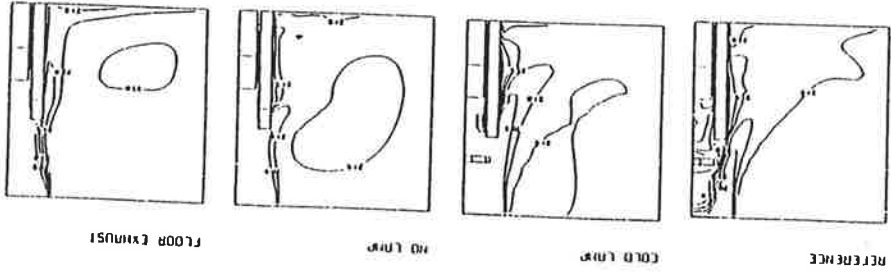


Fig. 5. All cases: temperature distribution on slice $x = 0.31\text{m}$

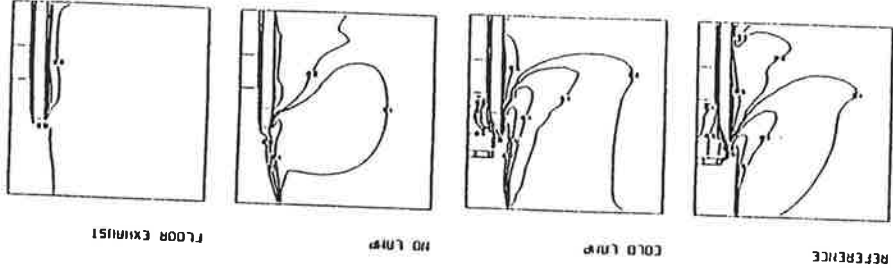


Fig. 6. All cases: contaminant distribution on slice $x = 0.31\text{m}$

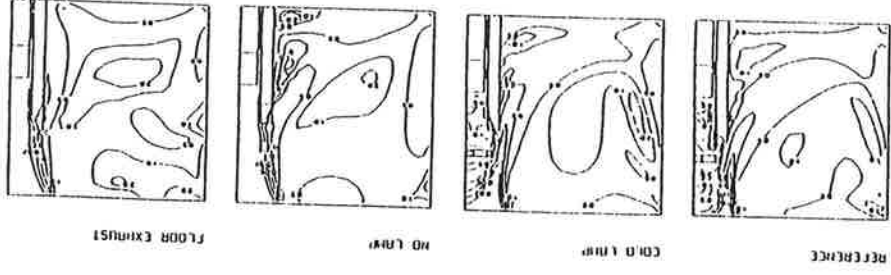


Fig. 7. All cases: turbulence intensity distribution on slice $x = 0.31\text{m}$

BIJLAGE C

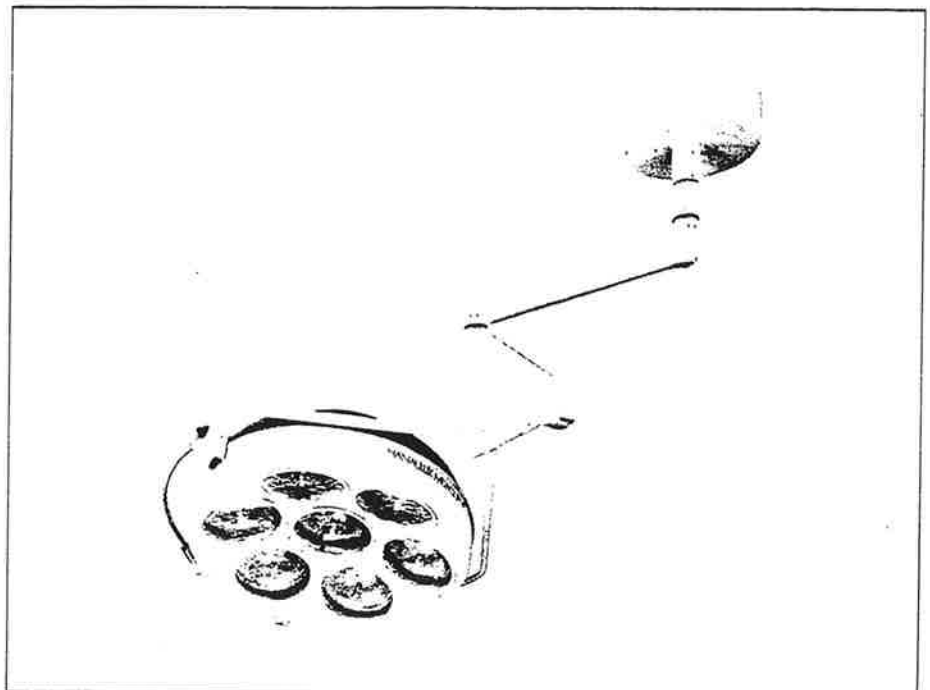
TECHNISCHE GEGEVENS TOEGEPASTE OPERATIELAMP

HANAULUX® Operationsleuchte MELBOURNE

Die Operationsleuchte MELBOURNE wird grundsätzlich mit 2fach-Schleifringsatz geliefert und bietet deshalb die Möglichkeit, jederzeit zusätzlich eine SATELLIT®-Leuchte anzubringen. Die hervorragende Lichtqualität und der weite Aktionsbereich machen das Modell MELBOURNE zur universellen Leuchte für alle chirurgischen Disziplinen.

HANAULUX® MELBOURNE operating light

The MELBOURNE operating light is supplied with two sets of contact rings to make the fitting of a further SATELLIT® light possible at any time. The outstanding quality of the emitted light and the extensive range of action makes the MELBOURNE model a universal light for all fields of surgery.



Technische Daten MELBOURNE:

Mindestraumhöhe ¹⁾	301 cm
Aktionsradius	140 cm
Höhenverstellung	60 cm
Durchmesser des Leuchtenkörpers	100 cm
Gewicht (ohne Flanschrohr)	≈ 80 kg
Max. Drehmoment	3.500 Nm
Leistungsaufnahme	280 W
Leuchtenbestückung	Halogen 7 x 40 W
Mittlere Lebensdauer der Halogenlampen	1.000 h
Farbtemperatur	4.300 K
Beleuchtungsstärke in 1 m Abstand	105.000 Lux
Leuchtfeldgröße in 1 m Abstand	24 cm
Leuchtfeldgröße stufenlos verstellbar	24-37 cm
Anschlußspannung	24 V ≈

Netzanspannung über Transformator

¹⁾ In Sonderausführung ab 271 cm.

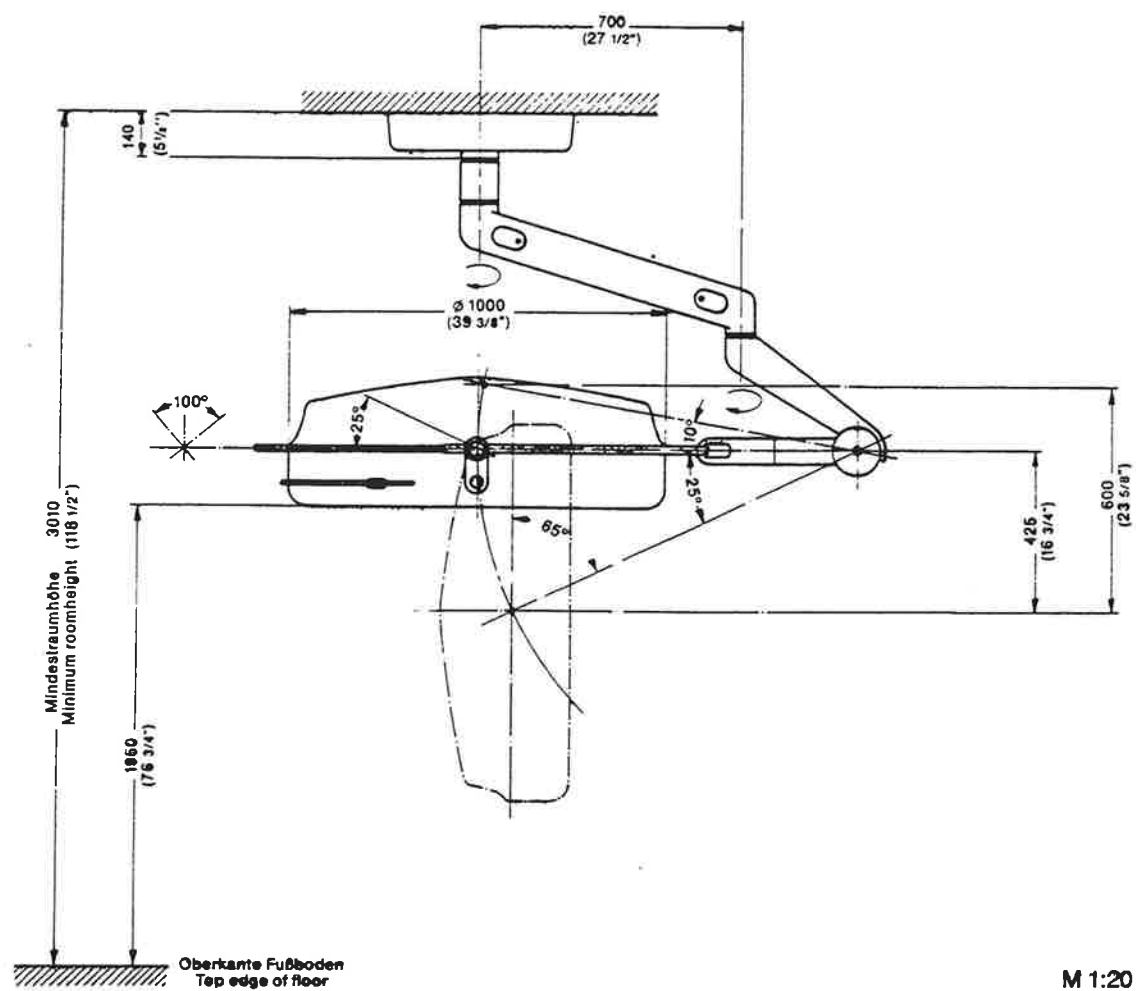
Technical data for MELBOURNE:

Minimum room height ¹⁾	301 cm
Action radius	140 cm
Height adjustment	60 cm
Diameter of light head	100 cm
Weight (without flange tube)	approx. 80 kg
Maximum torque	3500 Nm
Rating	280 W
Number of bulbs	halogen 7 x 40 W
Average life of halogen bulbs	1000 hours
Colour temperature	4300 K
Light intensity at a distance of 1 m	105.000 Lux
Size of illuminated field at a distance of 1 m	24 cm
Illuminated field, infinitely variable from	24-37 cm
Connecting voltage	24 V a.c./d.c.

Mains connection via transformer

¹⁾ Special model for room heights from 271 cm to order.

Figuur C.1 Technische gegevens van de toegepaste operatielamp Hereaus Hanalux Melbourne.



Figuur C.2 *Afmetingen van de Hanalux Melbourne*

BIJLAGE D

NAUWKEURIGHEID MEETMETHODE

Temperatuur

Bij de temperatuurmetingen is gebruik gemaakt van koper-constantaan thermokoppels van het fabrikaat Honeywell. De hiermee opgewekte thermo-emk's werden gemeten m.b.v. een Data Acquisitie systeem, type 3497A van het merk Hewlett-Packard en m.b.v. een polynoomfunctie omgezet in °C. De meetopstelling werd gecalibreerd met behulp van een glazenhulstthermometer. Hierbij werd een positieve afwijking van de via het data-acquisitiesysteem verkregen meetwaarde van maximaal +0.1 K geconstateerd. Het werd niet nodig geacht deze afwijking in de verkregen meetresultaten te corrigeren.

Luchtsnelheid

De luchtsnelheden in de ruimte worden bepaald m.b.v. richting-ongevoelige thermoelektrische anemometers (ontwerp TNO Bouw) welke werden geijkt in een windtunnel voor lage luchtsnelheden. De luchtsnelheid in het midden van deze tunnel kan tot op 2% nauwkeurig worden bepaald. De anemometers werden gecalibreerd op een luchtsnelheid van 0,4 m/s. De fabricage van de anemometers is zodanig dat de nauwkeurigheid bij de laagste luchtsnelheid van 0,06 m/s maximaal 10% en bij de hoogste snelheid van 1,80 m/s maximaal 5% bedraagt. Binnen deze toleranties wordt gewerkt met één zelfde ijkgrafiek voor alle anemometers. De totale nauwkeurigheid van de anemometers bedraagt zodoende, rekening houdend met de nauwkeurigheid van de ijktunnel zelf, maximaal 12 % voor lage (0,06 m/s) en 7 % voor hoge (1,80 m/s) waarbij de nauwkeurigheid toeneemt wanneer de meetwaarde dichterbij 0,4 m/s ligt.