VÄRMEFORSK

NO_x-emissioner vid förbränning av biomassa i svävbäddspannor

En modelleringsstudie

Sture Boström, Anders Brink,
Pia Kilpinen och Mikko Hupa

DELPROGRAM
TILLÄMPAD FÖRBRÄNNINGSTEKNIK 723

NO_x-emissioner vid förbränning av biomassa i svävbäddspannor

En modelleringsstudie

NO_x emissions from biomass combustion in fluidised bed boilers

A modelling study

Sture Boström, Anders Brink, Pia Kilpinen och Mikko Hupa
Åbo Akademi

B9-903

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Februari 2001
ISSN 0282-3772

Förord

Detta är slutrapport för projektet "Reduktion av NO_x-emissioner vid förbränning av biomassor i fluidiserade bäddpannor – en modelleringsstudie om optimala freeboard förhållanden" inom Värmeforsks delprogram för Tillämpad förbränningsteknik 1999–2000.

Arbetet har utförts under åren 1999–2000 inom Åbo Akademi Process Chemistry Group, där professor Mikko Hupa har varit ansvarig ledare och Docent Pia Kilpinen har verkat som projekledare. DI Sture Boström har stått för modelleringsberäkningarna och TkD Anders Brink har burit huvudansvaret för utvecklingen av den nya modellen för bränslekvävets oxidering. Modellutvecklingen har skett inom projektet "Models for simulation of combustion and pollutants" som ingår i det finska teknologiprogrammet för förbränningsmodellering, CODE, som initierats av Teknologiska utvecklingscentralen, Tekes.

Vi vill tacka Per Ljung och Jan Eriksson på Vattenfall för den information de givit om den modellerade pannan samt för givande diskussioner. Vi vill också tacka våra kollegor Dr.-Ing. Christian Mueller och diplomarbetare Staffan Nickull för deras värdefulla insats vid skapadet av CFD-modellens geometri och beräkningsnät.

Åbo januari 2001

Sture Boström

Anders Brink

Pia Kilpinen

Mikko Hupa

Abstract

En ny förenklad modell för bränslekvävets oxidation, speciellt utvecklad med tanke på CFD-simulering av förbränning av biomassa i svävbäddspannor, har testats. Modellen visade sig kunna prediktera trovärdiga NO_x-emissionsnivåer, som motsvarar dem som uppmätts i pannan. Modellen utnyttjades i en modelleringsstudie med syfte att finna en optimal luftfördelning i en svävbäbbspannas freeboard för att minimera NO_x-utsläppet. Resultaten tyder på att arrangemang som endast berör luftinmatningen i freeboardens översta del, under nu gjorda antaganden om bl.a. jämn gasström från bädden, inte nämnvärt påverkar NO_x-utsläppet.

Sammanfattning

Projekts målsättning var att testa en ny förenklad kvävekemimodell, anpassad speciellt för simulering av biomassaförbränning i svävbäddspannor. En sådan modell, utvecklad vid Åbo Akademi, skulle implementeras i ett kommersiellt CFD-program, och testas genom att simulera en existerande svävbäddspanna med varierande randvillkor för beräkningarna. Dessutom var avsikten att utnyttja modellen i en modelleringsstudie med målet att optimera luftinmatningen i pannans freeboard för att nå en möjligast låg NO_x-emission.

Den testade modellen består av två reaktioner där den första representerar bränslekvävets oxidation till kväveoxid (NO), och den andra kväveoxidens reduktion med ammoniak (NH_3) till molekylärt kväve (N_2).

Sammanlagt tio olika beräkningsfall har simulerats. I de olika fallen har beräkningarnas randvillkor eller de använda kvävekemimodellerna varierats. Resultaten har använts dels för att studera den nya modellen vid olika förhållanden, dels för att studera tre olika luftfördelningarnas inverkan på förbränningsskeendet i pannan.

Den nya modellen för bränslekvävets oxidation verkar att fungera tillfredsställande. Den verkar, i motsats till tidigare existerande modeller, ge relativt trovärdiga resultat gällande NO_x-emissionen från förbränning av biomassa i svävbäddspannor.

Simuleringsresultaten visar att NH_3 från bädden reagerar mycket snabbt till NO och N_2 då primärgasen blandas med sekundärluften i freeboarden. NH_3-koncentrationen sjunker från sitt maximivärde till noll inom ett mycket snävt område där all kvävekemi sker.

Det är uppenbarligen av stor betydelse hur bränslets beteende nära och i bädden modelleras. Randvillkoren för bränsleinmatningen visade sig påverka hela beräkningens resultat.

I största delen av reaktionsområdet begränsas enligt simuleringarna både NO-bildningens och -reduktionens hastighet av omblandningens intensitet, snarare än av den kemiska kinetiken, och simuleringsresultatet beror därmed i avgörande grad på de modellers tillförlitlighet, som beskriver turbulensen och dess koppling till kemin..

De tre alternativ för luftinmatningen, som testades i detta arbete, visade sig inte ha någon nämnvärd inverkan på NO_x-emisionen. Uppenbarligen bör de åtgärder som görs för att sänka NO_x-emissionen i denna panna inrikta sig på att påverka förhållandena längst nere i pannans freeboard. Kvävekemin verkar i sin helhet ske inom ett mycket snävt område nere i pannan. Genom att förändra luftinmatningen på ett sätt som endast påverkar förhållandena högre upp i pannan, kan NO_x-kemin uppenbarligen inte styras.

Nyckelord: förbränning, biomassa, svävbäddspanna, CFD, kväveoxider

Summary

The objective of this project was to test a new simplified model for the oxidation of fuel nitrogen especially developed for simulating biomass combustion in fluidised bed boilers. The model, developed at the Åbo Akademi University, was to be implemented in an commercial CFD-program and tested by simulating an existing fluidised bed boiler using various boundary conditions for the calculations. An additional objective was to use the model in a modelling study aiming at optimising the secondary air feed to the boiler freeboard in order to minimise the NO_x-emission.

The model tested consists of two reactions. The first one represents the oxidation of fuel nitrogen to NO and the second one the reduction of NO by ammonia (NH_3) to molecular nitrogen (N_2).

Ten different cases were simulated. In the various cases the boundary conditions or the nitrogen chemistry models were changed. The results were used to study the performance of the new model in various conditions and also to study the influence of three different air feeding strategies on the combustion process in the boiler.

The new model for fuel nitrogen oxidation seems to work to satisfaction. I contrast to earlier models, it appears to predict reliable NO_x emissions from biomass combustion in fluidised bed boilers.

The results indicate that NH_3 leaving the bed reacts very rapidly to form NO and N_2 as soon as it is mixed with secondary air in the freeboard. The concentration of NH_3 decreases from its maximum value to zero within a very narrow area where all the nitrogen chemistry takes place.

Obviously it is important how the fuel behaviour close to and in the bed is modelled. The boundary conditions set for the fuel feed were found to significantly influence the results of the calculations.

According to the simulations, both the NO formation and destruction is limited by the mixing rather than the chemical kinetics in most of the reaction area. The accuracy of the simulations thus depend on the reliability of the models describing the turbulence and its interaction with the chemistry.

The three alternative air feeding strategies tested in this work did not significantly influence the NO_x emission from the boiler. Obviously NO_x abatement measures in this boiler should aim at influencing the conditions down in the freeboard close to the bed. The nitrogen chemistry seems to take place in a very narrow area in the lower part of the boiler. Changing the air feed in a way that only affects the conditions in the upper parts of the boiler does not seem to have any effect on the NO_x-emission.

Keywords: combustion, biomass, fluidised bed combustion, CFD, NO_x

Innehållsförteckning

1 PROJEKTETS BAKGRUND OCH MÅLSÄTTNING 1

1.1 BAKGRUND 1
1.2 MÅLSÄTTNING 2

2 PROJEKTGENOMFÖRANDET 3

2.1 EN NY MODELL FÖR BESKRIVNING AV BRÄNSLEKVÄVETS OXIDATION 3
2.2 CFD-SIMULERING AV EN SVÄVBÄDDSPANNA 4
2.2.1 Den simulerade pannan 4
2.2.2 Beräkningsfall 6

3 RESULTATREDOVISNING 12

3.1 HUVUDKEMIN 12
3.2 NOX-KEMIMODELLENS FUNKTION 13
3.3 LUFTFÖRDELNINGENS INVERKAN PÅ NO_x-EMISSIONEN 15

4 RESULTATANALYS 17

5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER 19

6 FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE 20

7 LITTERATURREFERENSER 21

Bilagor

A STRÖMNINGSFÄLT, TEMPERATURFÄLT OCH HUVUDKOMPONENTERNAS KONCENTRATIONSFÄLT I DE OLIKA BERÄKNINGSFALLEN

B NO- OCH NH_3-KONCENTRATIONSFÄLT I DE OLIKA BERÄKNINGSFALLEN

1 Projektets bakgrund och målsättning

1.1 Bakgrund

Flerdimensionell flödessimulering på dator (Computational Fluid Dynamics, CFD) har under senaste år blivit ett allt vanligare sätt att studera förbränningsprocesser, och mycket arbete läggs ned på att utveckla de metoder och modeller som används.

Metoden innebär att anläggningens, t.ex. pannans eller brännarens, geometri först definieras med ett ritprogram av CAD-typ. Därefter delas beräkningsområdet, dvs. volymen som skall simuleras, upp i ett stort antal balansområden eller beräkningsceller, som tillsammans bildar ett sammanhängande beräkningsgitter. Geometrin och beräkningsgittret läses in i ett CFD-program, som iterativt löser ekvationerna för flödet, de kemiska reaktionerna och värmeöverföring för varje cell i beräkningsgittret. Som resultat fås strömnings- och temperaturfältet i pannan, information om turbulensen, och koncentrationerna av de olika kemiska komponenterna. Modeller för beräkning av t.ex. turbulens, strålning och kemiska reaktioner har skrivits in i programmet antingen av programtillverkaren eller av användaren.

De modeller, som används i dagens CFD-beräkningar är i de flesta fall av tillräcklig hög kvalitet för att tillfredsställande kunna simulera flödesmönstret, temperaturen och förbränningens kemiska huvudförlopp, dvs. kolvätekemin. Ett aktuellt område där tillfredsställande allmängiltiga kemiska modeller däremot ännu inte finns, är kvävekemin och predikteringen av NO_x-emissioner från förbränningsanläggningar.

En detaljerad beskrivning av kemin bakom kväveoxidemissioner består typiskt av hundratals reaktioner [1]. Det är normalt inte praktiskt möjligt att beakta ett så stort antal reaktioner i CFD-modellering, framförallt inte då industriella pannor modelleras. Därför har det funnits behov av att utveckla förenklade uttryck, som trots förenklingarna med tillräcklig precision beskriver de viktigaste reaktionerna som styr kväveoxiduppkomsten. Vid framtagandet av förenklade uttryck är man vanligtvis tvingad att begränsa giltighetsområdet för uttrycket.

Användning av biomassa som bränsle har ökat som en följd av strävan att minska förbrukningen av fossilt bränsle. Svävbäddspannor av bubblande typ (BFBC) är populära bl.a. för att bränna olika typers träavfall och annan biomassa. Trots att dessa pannor redan nu uppvisar relativt låga NO_x-emissioner, finns det en strävan att ytterligare sänka dem. Det finns därför en efterfrågan på modeller, som lämpar sig för CFD-simulering av kvävekemin vid i förhållanden, som är typiska för förbränning av biomassa i svävbäddspannor.

Till de mest kända förenklade beskrivningarna av kvävekemin i förbränning hör det uttryck som presenterats av de Soete [2], och det som presenterats av Mitchell och Tarbell [3]. De Soetes uttryck är bäst lämpade för oxidering av kvävehaltiga komponenter vid mycket hög temperatur. Mitchells och Tarbells uttryck är framtagna med tanke på modellering av förbränning av pulvriserat kol. Dessa uttryck dock inte helt lämpade för modellering av

förbränning av biomassa, eftersom förbränningen då sker vid avsevärt lägre temperatur än vid kolförbränning.

Det finns även ett antal förenklade uttryck för beskrivning av SNCR-processen, dvs. icke-katalytisk NO_x-reduktion med ammoniak eller urea [4]. Temperaturen i SNCR processen avviker inte avsevärt från den man finner vid förbränning av biomassa. Däremot sker SNCR-processen i rökgasmiljö, där kolväte- och kolmonoxidhalten är mycket lägre än i förbränningszonen, vilket ledet till helt andra koncentrationer av de fria radikaler som spelar en avgörande roll i kvävets kemiska reaktioner.

De ovannämnda förenklade beskrivningarna av kvävekemin har även utvärderats i ett antal studier [5–7]. På basen av dessa kan man konstatera att de förhållanden som råder vid förbränning av biomassa avviker så pass mycket från förhållandena vid förbränning av konventionella bränslen, att det finns ett behov att utveckla förenklade uttryck för kvävekemin speciellt avsedda för att användas då man modellerar förbränning av biomassa. Vid Åbo Akademi har under år 2000 fortgått ett projekt med syfte att utveckla sådana modeller för beskrivning av kvävekemin vid förbränning av biomassa.

1.2 Målsättning

Målsättningen med detta projekt var att i praktiken testa en ny förenklad kvävekemimodell, anpassad speciellt för simulering av biomassaförbränning i svävbäddspannor. En sådan modell, utvecklad inom det tidigare nämnda projektet vid Åbo Akademi, skulle implementeras i ett kommersiellt CFD-program, Fluent version 5.4, och testas genom att simulera en existerande svävbäddspanna med varierande randvillkor för beräkningarna.

Dessutom var avsikten att utnyttja modellen i en modelleringsstudie med målet att optimera luftinmatningen i pannans freeboard för att nå en möjligast låg NO_x-emission.

2 Projektgenomförandet

2.1 En ny modell för beskrivning av bränslekvävets oxidation

En förenklad modell för kvävekemin speciellt avsedd att användas då man modellerar förbränning av biomassa har nyligen utvecklats inom ett projekt vid Åbo Akademi. Projektet "Models for simulaton of combustion and pollutants" är en del av det finska forsknings-programmet CODE för modellering av förbränningsprocesser.

Modellen består av två reaktioner

$$NH_3 + O_2 = NO + H_2O + ½H_2 \qquad (1)$$

$$NH_3 + NO = N_2 + H_2O + ½H_2 \qquad (2)$$

där den första representerar bränslekvävets oxidation till kväveoxid (NO), och den andra kväveoxidens reduktion med ammoniak (NH_3) till molekylärt kväve (N_2). Ingendera reaktionen existerar som sådan i verkligheten, utan båda är förenklade beskrivningar av komplexa kemiska förlopp.

Reaktionerna (1) och (2) är identiska med dem man finner i uttrycken av t.ex. Michell och Tarbell eller Brouwer et al. Det nya i modellen består i de uttryck som utvecklats för de båda reaktionernas hastigheter:

$$r_{1,NH3} = -1.8 \cdot 10^4 e^{-8000/T} \left(X_{NH_3} X_{O_2}^{0.5} X_{H_2}^{O.5} \right)$$

$$r_{2,NH3} = -1.3 \cdot 10^{14} T^{-3} e^{-8000/T} \left(X_{NH_3} X_{NO} \right).$$

Temperaturen ges i K och koncentrationerna i mol/cm3. Reaktionshastigheten fås i mol/cm^3 s.

Härledningen av modellen har beskrivits tidigare av Brink och Kilpinen [8], och summeras här endast i korthet.

I utvecklingsarbetet användes en detaljerad beskrivning av förbränningens kemi, bestående av över hundra reaktioner, för att under olika förhållanden simulera ammoniakens reaktioner till NO och N_2. Reaktionerna simulerades i temperatur ntervallet 900–1900 K och med syrehalter mellan 1% och 10%; förhållanden som kan anses relevanta vid förbränning av biomassa.

Vilka koncentrationstermer som bör inkluderas i hastighetsuttrycken, bestämde man genom att analysera vilka elementärreaktioner som under dessa förhållanden dominerar kvävekemin. Man fann att hastigheten $r_{1,\ NH3}$ för reaktion 1 lämpligen uttrycks som en funktion av koncentrationerna av de båda reaktanterna ammoniak X_{NH3} och syre X_{O2} samt dessutom väte X_{H2}. I hastighetsuttrycket $r_{2,\ NH3}$ för reaktion 2 behövs endast koncentrationerna för

reaktanterna ammoniak X_{NH3} och kväveoxid X_{NO}. Det bör observeras att modellen endast fungerar tillförlitligt då förbränningen av pyrolysgaserna beskrivs med en reaktionsmekanism som även innehåller H_2.

Konstanterna i de båda hastighetsuttrycken bestämdes slutligen med regressionsanalys av sambandet mellan temperatur, koncentrationer och de beräknade reaktionshastigheterna.

I figur 1 visas ett exempel på en jämförelse mellan detaljerad kemi, Mitchell och Tarbells modell och den nya modellen. I beräkningarna har en typisk pyrolysgas från biomassa oxiderats vid två olika luftöverskottstal, λ=0.7 och λ=1.3. Pyrolysgas-luftblandningen har antagits innehålla 1000 ppm_v NH_3. Beräkningen har gjorts under antagande av ideala återblandningsreaktorförhållanden som en funktion av reaktorns uppehållstid. Av figuren framgår, att den nya förenklade modellen under de antagna förhållandena ger NH_3- och NO-koncentrationer som väl motsvarar dem som beräknats med den detaljerade modellen, medan Michells och Tarbells modell ger kvalitativt annorlunda resultat.

2.2 CFD-simulering av en svävbäddspanna

2.2.1 Den simulerade pannan

Anläggningen som simulerats är en bubblande svävbäddspanna, med en produktionskapacitet på 70 MW fjärrvärme och 35 MW elektricitet. Som bränsle används oftast träflis, men också olja, gas och kol har använts.

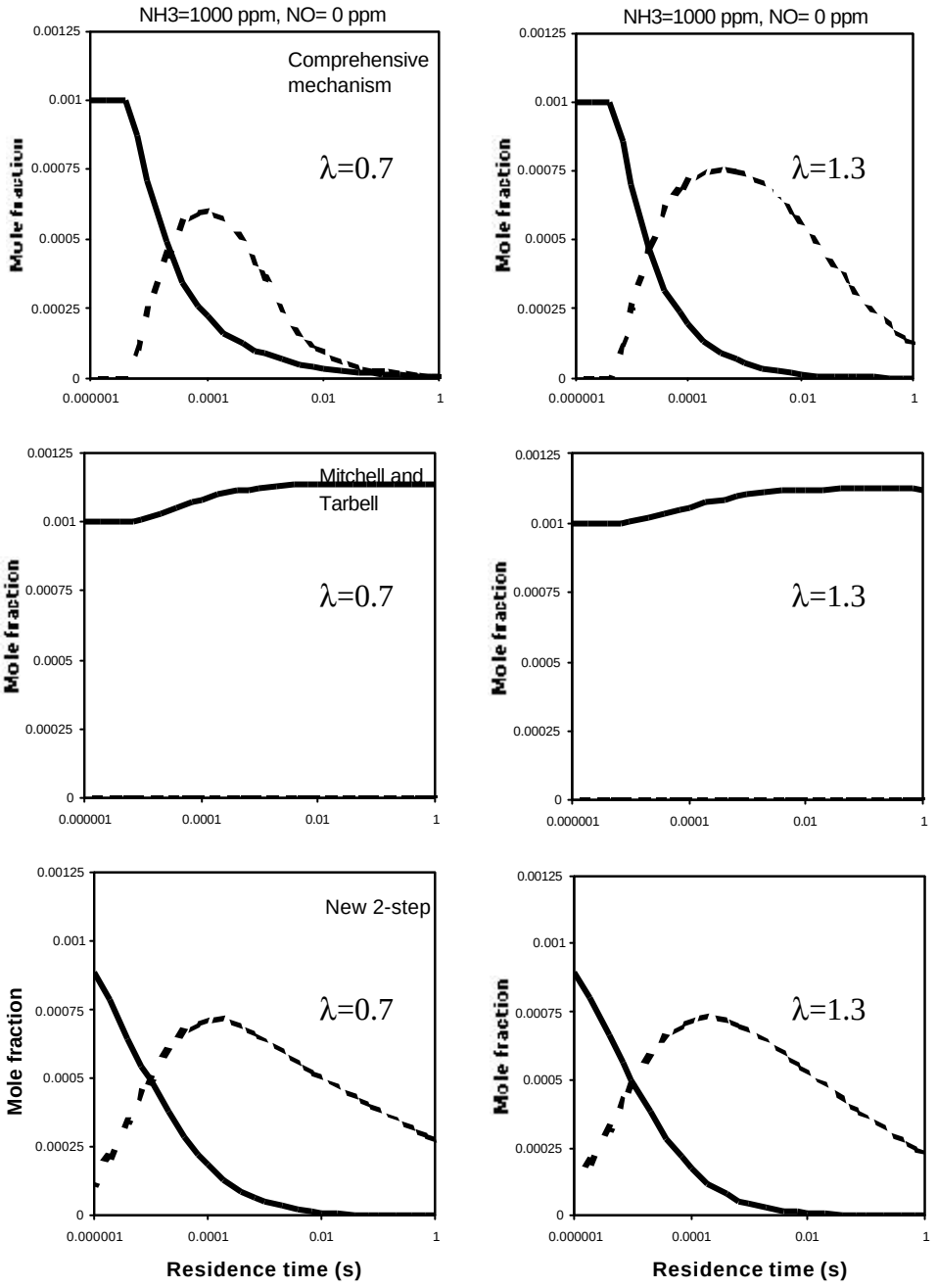
Pannas geometri framgår ur figur 2. Endast halva pannan har modellerats — modellen begränsas åt ett håll av ett vertikalt symmetriplan genom pannans mittlinje. Det modellerade området har följande dimensioner:

Höjd (y):	15.83 m
Bredd (z) (halva pannan):	4.76 m
Djup (x):	11.03 m

Primärluften matas in under bädden, och sekundärluften på fyra nivåer: 1 m, 2.3 m, 4.5 m och 8.7 m över bädden. I alla de beräknade fallen har portarna på nivå 1 (1 m) hållits stängda, och syns ej heller i figur 2.

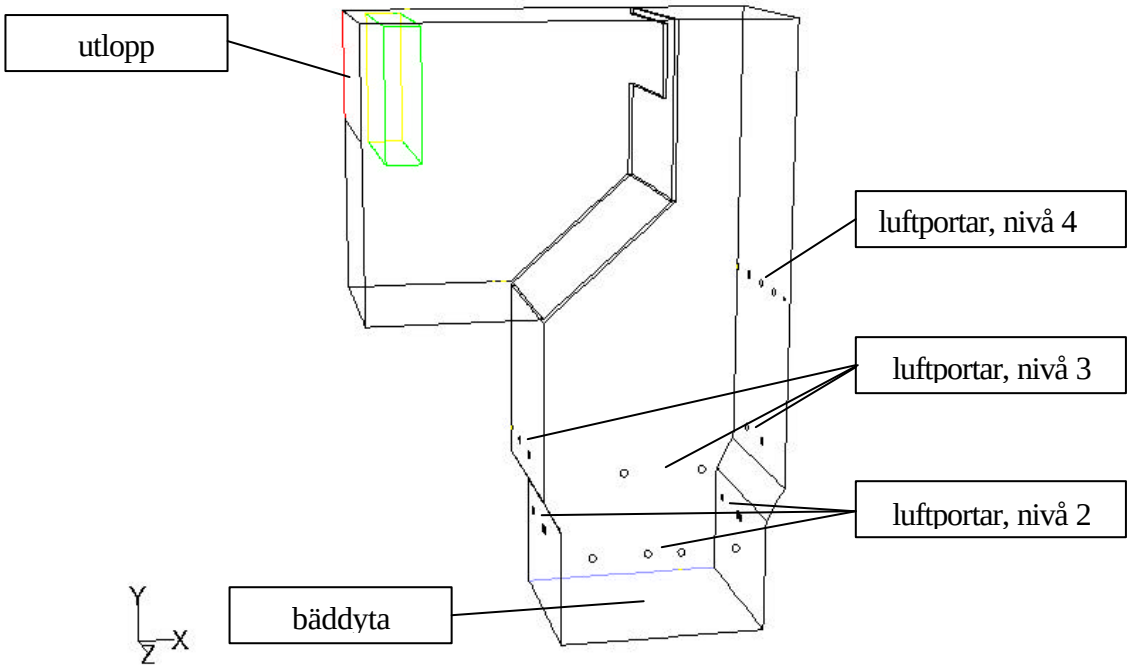
Bäddytan och luftportarna har i modellen definierats som inlopp, där gas av en viss sammansättning och temperatur strömmar in med en bestämd hastighet. Väggarna har givits konstant temperatur och emissivitet.

Beräkningsområdet har delats in i ett ostrukturerat tredimensionellt beräkningsnät bestående av ca. 260 000 tetraedriska celler, vars medelvolym är drygt 3 dm^3.



Figur 1. Jämförelse mellan resultat erhållna med detaljerad kemi (Comprehensive mechanism), Mitchells och Tarbells modell och den nya modellen (New 2-step). Molfraktion av NH3 (—) och NO (- - -) som funktion av uppehållstiden i en ideal återblandningsreaktor vid två olika luftöverskottstal l=0.7 och den högra för l=1.3

Figure 1. Comparison of results obtained with the comprehensive mechanism, the model by Mitchell and Tarbell and the new simplified 2-step model. Mole fraction of NH3 (—) and NO (- - -) as a function of the residence time in an ideal perfectly stirred reactor at two air factors l=0.7 and l=1.3.



Figur 2. Pannans geometri. (Endast halva panna visas)

Figure 2. The boiler geometry (Only half of the boiler is shown)

2.2.2 Beräkningsfall

Sammanlagt tio olika beräkningsfall har simulerats. I de olika fallen har beräkningarnas randvillkor eller de använda kvävekemimodellerna varierats. De olika beräkningsfallen sammanfattas i tabell 1. Beräkningarnas randvillkor och använda modeller specificeras noggrannare nedan.

Resultaten från de fem första simuleringsfallen (1.1–1.4 i tabell 1) har använts för att studera den nya kvävekemimodellen vid olika förhållanden. Det första fallet tillsammans med de fyra sista (1.1 och 2.1–3.2 i tabell 1) har använts för att studera de olika luftfördelningarnas inverkan på förbränningsskeendet i pannan.

I samtliga beräkningsfall hölls följande utgångsvärden oförändrade

Pannans termiska effekt:	71 MW
Pannverkningsgrad:	85 %
Luftfaktor λ i freeboarden:	1.5
Bäddtemperatur:	850 °C
Sekundärluftens temperatur:	200 °C
Pannväggarnas temperatur:	350 °C
Pannväggarnas emissivitet:	0.8

Tabell 1. Sammanfattning av räknade simuleringsfall.

Table 1. Summary of calculated cases.

Nr	Luft-fördelning (se tabell 5)	Kokskväve frigörs som	Primärgas-sammansättning (se tabell 3)	Kvävekemimodell
1.1	1	N_2	1	Brink & Kilpinen
1.1b	1	N_2	1	Brink & Kilpinen, påtvingat kinetiskt begränsad kvävekemi
1.2	1	NO	1	Brink & Kilpinen
1.3	1	N_2	2	Brink & Kilpinen
1.4	1	N_2	1	Brouwer & al.
1.4b	1	N_2	1	Brouwer & al., påtvingat kinetiskt begränsad kvävekemi
2.1	2	N_2	1	Brink & Kilpinen
2.2	2	NO	1	Brink & Kilpinen
3.1	3	N_2	1	Brink & Kilpinen
3.2	3	NO	1	Brink & Kilpinen

I alla beräkningsfall simulerades pannan i två steg. Först simulerades endast huvudkemin, dvs. förbränningen av de brännbara gaserna. Detta gav som resultat strömnings- och temperaturfältet i pannan samt koncentrationsfördelningen av gasblandningens huvudkomponenter (CO, H_2, CH_4, O_2, CO_2, H_2O och N_2). Därefter simulerades som ett andra steg kvävekemin, medan alla resultat från det första steget hölls konstanta. Resultatet av detta andra steg var koncentrationsfördelningen av NH_3 och NO. Det antogs alltså att ammoniakens och kvävemonoxidens reaktioner inte i praktiken inverkar på den övriga kemin, eftersom halterna av NH_3 och NO är mycket låga i jämförelse med de andra gaserna.

Huvudkemin beskrevs i samtliga beräkningsfall med en modell som presenterats av Jones och Lindstedt [9]. Modellen består av fyra reaktioner varav den sista är reversibel:

$$CH_4 + \tfrac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2$$

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

$$H_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$$

Som modell för att beskriva kopplingen mellan turbulens och kemi användes Magnussens och Hjertagers ”Eddy Disspation Combustion Model” {10].

2.2.2.1 Primärgasens huvudkomponenter

Från bäddytan strömmar primärgas, som är en blandning av primärluft och delvis förbränd pyrolysgas, in i pannans freeboard.

I samtliga beräkningsfall utom 1.3 antogs samma sammansättning på primärgasen. Sammansättningen på denna ”Primärgas 1” beräknades enligt följande: Bränslet är skogsavfall, som består av hälften trä och hälften bark. Dess elementarsammansättning och fukthalt har beräknats som ett medeltal av typvärden för trä och bark (Tabell 2).

Tabell 2. Typisk sammansättning (vikt-% i torrsubstans) och fukthalt för trä och bark, samt beräknade värden för skogsavfall bestående av 50% trä och 50% bark.

Table 2. Typical composition (wt-% of dry matter) and moisture of wood and bark. Calculatet values for wood residue (50% wood and 50% bark).

	Trä	Bark	Skogsavfall
C	50.4%	54.5%	52.5%
H	6.2%	5.9%	6.1%
S	0.0%	0.0%	0.0%
O	42.5%	37.7%	40.1%
N	0.5%	0.3%	0.4%
Aska	0.4%	1.7%	0.9%
	100.0%	100.1%	100.0%
Fukthalt	55.0%	60.0%	58.0%

Det finfördelade bränslet tänks falla ner på bäddytan där det torkar och dess fuktinnehåll avgår som vattenånga. Det torra bränslet sjunker ned i bädden, pyrolyseras och oxideras delvis av primärluftens syre vid en temperatur av 850 °C. Luftfaktorn i bädden är λ=0.7. Gasblandningen antas uppnå kemisk jämvikt innan den strömmar från bädden till freeboarden. Den sålunda beräknade gassammansättningen visas i tabell 3.

För att testa hur primärgasens sammansättning påverkar kvävekemimodellens resultat, användes i beräkningsfall 1.3 en alternativ sammansättning på primärgasen (”Primärgas 2” i tabell 3). Denna sammansättning har beräknats på ett liknande sätt som "Primärgas 1", men med en påtvingad låg halt av metan (CH_4) och inget H_2.

Tabell 3. Antagna sammansättningar för primärgasen, som strömmar från bädd till freeboard (vol-%).

Table 3. Assumed compositions of the primary gas flowing from the bed to the freeboard (vol-%).

	Primärgas 1	Primärgas 2
CO	6.2 %	14.5 %
H_2	4.0 %	–
CH_4	–	0.02 %
CO_2	9.9 %	6.6 %
H_2O	35.2 %	21 %
N_2 (rest)	44.8 %	57.8 %

2.2.2.2 Bränslekvävet i primärgasen

Bränslet antas innehålla 0.4 vikt-% kväve (tabell 2). Då bränslet pyrolyseras antas 80 % av bränslekvävet frigöras med pyrolysgasen, hälften som ammoniak (NH_3) och hälften som molekylärt kväve (N_2). De återstående 20 % antas förbli bundna vid koksresten och frigörs då koksen förbränns i bädden. Två alternativa antaganden har gjorts gällande i vilken form detta kokskväve återfinns i primärgasen (Tabell 4). I det ena fallet (Bränslekväve 1) antas koksens kväve frigöras som N_2 och i det andra fallet (Bränslekväve 2) oxiderat till NO.

Tabell 4. Bränslekvävets förekomst i primärgasen enligt två alternativa antaganden.

Table 4. Two alternative assumptions regarding the chemical form of fuel nitrogen in the primary gas.

	Bränslekväve 1	Bränslekväve 2
Pyrolysgasens kväve	419 ppm NH3	419 ppm NH3
Koksrestens kväve	N2	209 ppm NO

2.2.2.3 Kinetiskt vs. blandningsbegränsad reaktionshastighet för kvävekemin

Med den modell som använts vid simuleringarna, begränsas de kemiska reaktionernas hastighet antingen av reaktionernas kinetik eller av den turbulenta omblandningen i reaktionsområdet. Vid de temperaturer som råder vid förbränning, är de kemiska reaktionerna i allmänhet så snabba, att den verkliga reaktionshastigheten bestäms av hur snabbt reaktanterna blandas med varandra. Reaktionshastigheten sägs då vara blandningsbegränsad.

I beräkningsfallen 1.1b och 1.4b har NO_x-kemins hastighet beräknats helt på basen av den kemiska kinetiken. Blandningshastighetens eventuella begränsande inverkan har inte tillåtits påverka reaktionshastigheten.

2.2.2.4 En alternativ modell för kvävekemin

I beräkningsfall 1.4 och 1.4b har en alternativ modell för kvävekemin använts. Det är en modifikation av modellen som utvecklats av Brouwer m.fl. (4). Modellen är utvecklad för simulering av icke-katalytisk NO-reduktion i rökgaser, och i den ingår två reaktioner för ammoniak:

$$NH_3 + NO \rightarrow N_2 + H_2O + H \qquad (1)$$

$$NH_3 + O_2 \rightarrow NO + H_2O + H \qquad (2)$$

De två reaktionernas hastigheter bestäms av:

$$k_1 = [NO][NH_3]\left(4.24\times10^{8}\,\text{cm mol s K}\right)[T + S(CO)]^{5.3}\exp\left\{-\frac{83600\,\text{cal/mol}}{[T + S(CO)]}\right\}$$

$$k_2 = [NO][O_2]\left(3.50\times10^{5}\,\text{cm mol s K}\right)[T + S(CO)]^{7.65}\exp\left\{-\frac{125300\,\text{cal/mol}}{[T + S(CO)]}\right\}$$

S(CO) iuttrycken ovan är en temperaturkorrektionsterm som skall representera CO:s inverkan på radikalkemin och därigenom på reaktionshastigheten. S(CO) ges av:

$$S(CO) = 17.5\times\ln([CO]) - 68.0$$

där [CO] är CO-koncentrationen uttryckt i ppm.

Denna temperaturkorrektion kan, i den nuvarande versionen av CFD-programmet som användes, inte definieras utan att man skriver separata funktioner i C-språket till programmet. Inom ramen för detta projekt var sådant programmeringsarbete dock inte möjligt, och modellen användes utan temperaturkorrektionsterm, i förhoppning att NO-bildningen och –destruktionen skulle påverkas lika mycket av denna förenkling. Denna förhoppning visade sig dock vara falsk, vilket kommenteras senare i avsnittet Resultatanalys.

2.2.2.5 Sekundärluftens inmatning

Tre olika luftfördelningar har beräknats. Den totala luftmängden, primärgasströmmen från bädden och luftinmatningen från nivå 2 är vid alla tre fördelningar lika. Den inmatade luftmängderna vid de tre fördelningarna framgår ur tabell 5. Vid luftfördelning 3 har luftportarna på nivå tre riktats 20° nedåt.

Tabell 5. Inmatning av sekundärluft vid olika luftfördelningar (m^3n/s).

Table 5. Secondary air feed at three different air distributions (m^3n/s)..

	Luftfördelning 1	Luftfördelning 2	Luftfördelning 3
Nivå 2	6.49	6.49	6.49
Nivå 3	11.48	6.96	6.96
Nivå 4	6.96	11.48	11.48 riktad 20° neråt
Summa	24.92	24.92	24.92

3 Resultatredovisning

Samtliga beräkningsfall baserar sig på en av fyra simuleringar av huvudkemin med olika randvillkor:

Luftfördelning 1 och primärgas 1

Luftfördelning 2 och primärgas 1

Luftfördelning 3 och primärgas 1

Luftfördelning 1 och primärgas 2

Övriga skillnader mellan fallen hänför sig till olikheter i NO_x-modelleringen och -beräkningen. Nedan redovisas först resultaten från beräkningen av huvudkemin och sedan resultaten från NO_x-beräkningarna uppdelade i två avsnitt: ett där själva NO_x-kemimodellen studeras och ett annat som behandlar luftfördelningens inverkan på NO_x-emissionen .

3.1 Huvudkemin

Temperaturen och halterna av rökgasens huvudkomponenter i pannans utlopp visas i tabell 6. Strömningsfältet i freeboarden samt temperatur- och koncentrationsfälten för de olika beräkningsfallen presenteras i bilaga 1.

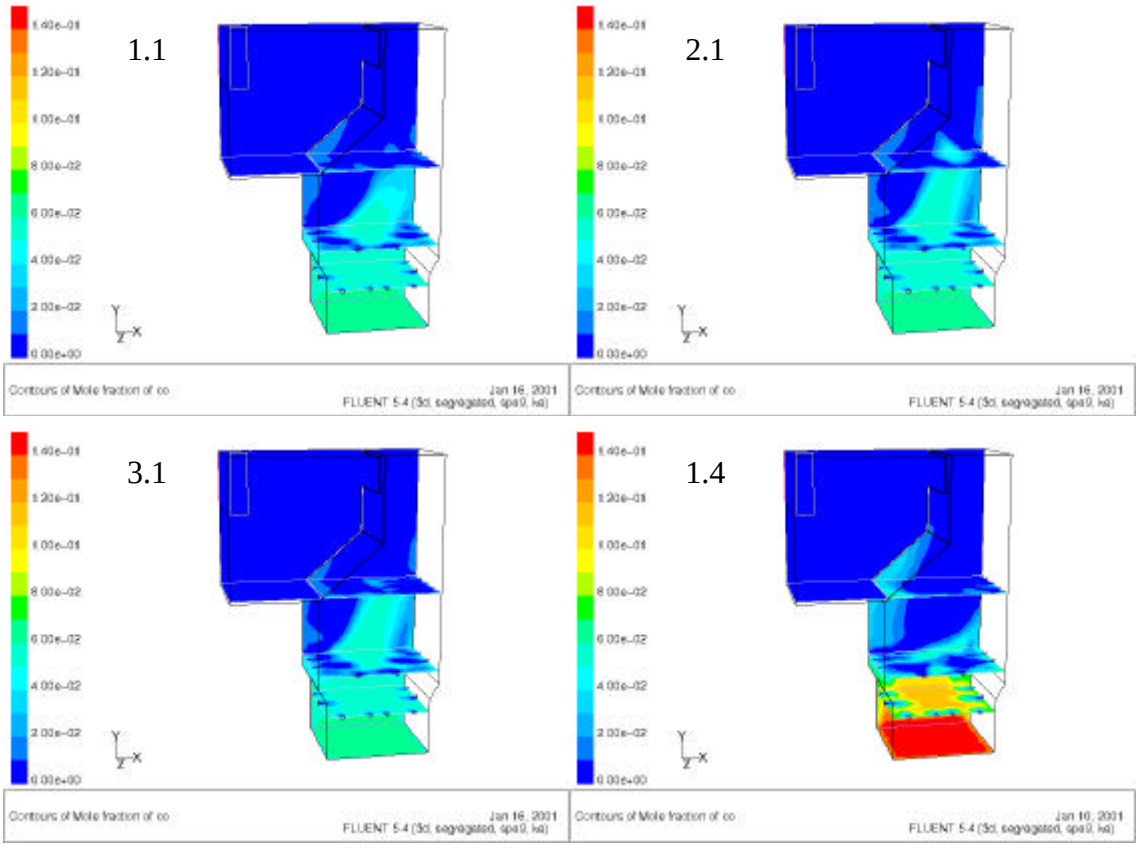
Tabell 6. Temperatur och gaskoncentrationer i beräkningsområdets utlopp.

Table 6. Temperature and species concentrations in the boiler outlet.

	1.1 Luftfördelning 1 primärgas 1	2.1 Luftfördelning 2 primärgas 1	3.1 Luftfördelning 3 primärgas 1	1.4 Luftfördelning 1 primärgas 2
Temperatur (C)	799	801	797	756
H_2O (vol-%)	29.9 %	29.9%	29.9%	14.0%
O_2 (vol-%, torr gas)	2.7 %	2.7%	2.7%	3.6%
CO_2 (vol-%)	12.2 %	12.2%	12.2%	14.3%
CO (ppm)	1	1	1	1
CH_4 (ppm)	0	0	0	0
H_2 (ppm)	1	1	0	0

De tre fall, där primärgasens sammansättning är lika, uppvisar praktiskt taget samma värden i utloppet, trots skillnaderna i luftinmatningen. I fall 1.4 där luftfördelning 1 räknats med primärgassammansättning 2 är rökgastemperaturen något lägre och O_2-halten något högre än i de övriga fallen. I samtliga fall är halten oförbrända gaser i utloppet praktiskt taget noll.

CO-koncentrationsprofilerna (figur 3) ger en bild av skillnaderna i förbränningsförloppet i de olika beräkningsfallen. De tre första fallen med samma primärgas uppvisar endast små inbördes skillnader. I fallet med alternativ primärgas ser bilden annorlunda ut: trots den högre halten CO i primärgasen sjunker CO-halten under 1% något tidigare än i de övriga fallen.



Figur 3. CO-koncentrationsprofilerna i freeboarden i beräkningsfallen 1.1, 2.1, 3.1 och 1.4. (molfraktion i fuktig rökgas)

Figure 3. CO concentration profiles in the freeboard in cases 1.1, 2.1, 3.1, and 1.4. (mole fraction in wet flue gas)

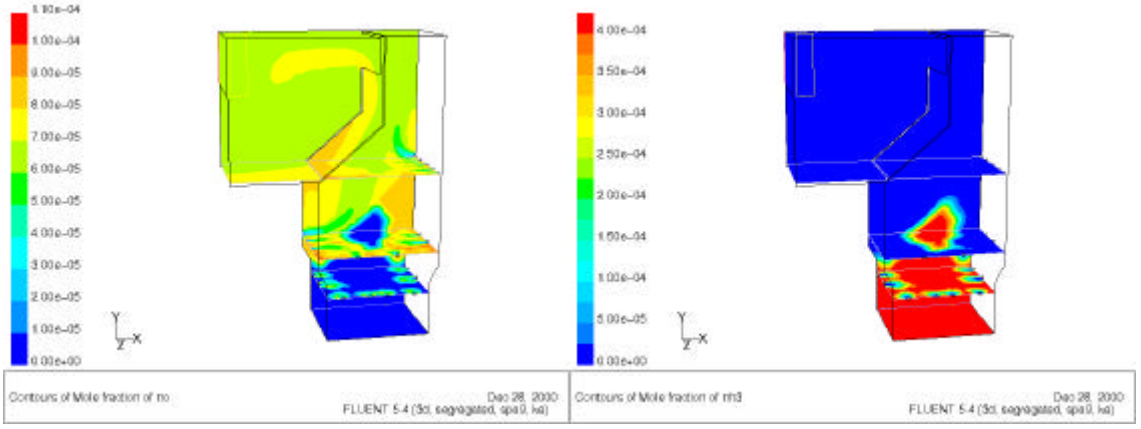
3.2 NOx-kemimodellens funktion

NO-halten i pannans utlopp visas i tabell 7. NO- och NH_3-koncentrationsfälten för de olika beräkningsfallen presenteras i bilaga 2. Figur 4 illustrerar freeboardens kvävekemi i beräkningsfall 1.1.

Tabell 7. Rökgasens NO-halt i pannans utlopp (ppm i fuktig rökgas).

Table 7. NO concentration in the boiler outlet (ppm , wet gases).

Beräkningsfall		NO i utloppet [ppm]
1.1	Luftfördelning 1, kokskväve som N_2, primärgas 1, Brink & Kilpinen	69
1.1b	Luftfördelning 1, kokskväve som N_2, primärgas 1, kinetiskt begränsad Brink & Kilpinen	18
1.2	Luftfördelning 1, kokskväve som NO, primärgas 1, Brink & Kilpinen	89
1.3	Luftfördelning 1, kokskväve som N_2, primärgas 2, Brink & Kilpinen	57
1.4	Luftfördelning 1, kokskväve som N_2, primärgas 1, Brouwer & al.	18
1.4b	Luftfördelning 1, kokskväve som N_2, primärgas 1, kinetiskt begränsad Brouwer & al.	16



Figur 4. NO- (t.v) och NH_3-koncentrationsprofilen i fall 1.1 (molfraktion).

Figure 4. NO (left) and NH_3 concentration profikes in case 1.1 (mole fraction).

Av figuren framgår att NH_3 från bädden reagerar mycket snabbt till NO och N_2 då primärgasen blandas med förbränningsluften från nivå 2. NH_3-koncentrationen sjunker från sitt maximivärde till noll inom ett mycket smalt område där all kvävekemi sker.

Av NH_3 från bädden reagerar i beräkningsfall 1.1 61 % till NO och 39 % förbrukas vid NO-reduktionsreaktionen.

I största delen av reaktionsområdet begränsas både NO-bildningens och -reduktionens hastighet av omblandningens intensitet. Endast i luftportarnas omedelbara närhet är reaktionerna kinetiskt begränsade. I fall 1.1b, där kvävereaktionerna påtvingats kinetiskt bestämda reaktionshastigheter medan fallet i övrigt är identiskt med 1.1, ser resultatet helt olika ut (se bilaga 2). Reaktionerna sker lägre ner i pannan och en avsevärt lägre NO-halt i pannutloppet erhålls.

I fall 1.2 har antagits att det bränslekväve, som under pyrolysen blivit i koksresten, frigörs som NO då koksen förbränns. Primärgasen innehåller i detta fall 209 ppm NO. NH_3-halten i primärgasen är densamma som i fall 1.1.

I motsats till fall 1.1 förbrukas en del av NH_3 i NO-reduktionsreaktionen i freeboardens nedersta del, redan innan luften matas in från nivå 2 (se bilaga 2). En större del av ammoniaken (61 %) förbrukas i detta fall vid NO reduktionen än i fall 1.1. Endast 39 % bildar NO. Trots det är NO-koncentrationen i utloppet 89 ppm, dvs. klart högre än i fall 1.1, beroende på att primärgasen innehåller så mycket mera reaktivt kväve än i fall 1.1.

I fall 1.3 där primärgassammansättning 2 använts för att beräkna huvudkemin sker kvävereaktionerna lägre ner i freeboarden än i basfallet 1.1 (se bilaga 2). Också här sker reaktionerna inom ett mycket snävt område ovanför luftnivå 2. NO-halten i pannans utlopp är 17 % lägre i detta fall än i fall 1.1.

Då kvävekemin i fall 1.4 räknats med den modifierade Brouwer & al –modellen skiljer sig resultatet avsevärt från de tidigare fallen. NO-halten i utloppet är bara 18 ppm och reaktionsområdet är mycket mera utbrett än i fall 1.1 (se bilaga 2). I denna modell är reaktionerna klart långsammare, och kemin är också kinetiskt begränsad i nästan hela reaktionsområdet. En påtvingad kinetisk bestämning av reaktionshastigheten (fall 1.4b) ändrar inte nämnvärt på vare sig utloppets NO-koncentration eller NO-profilen i freeboarden.

3.3 Luftfördelningens inverkan på NO_x-emissionen

NO-halten i pannans utlopp visas i tabell 8. NO- och NH_3-koncentrationsfälten för de olika beräkningsfallen presenteras i bilaga 2.

Alla tre luftfördelningar gav praktiskt taget samma NO-halt i pannans utlopp, både då primärgasens bränslekväve antogs förekomma som enbart NH_3 (kokskväve frigörs som N_2) och som NH_3 och NO (kokskväve frigors som NO). Även NO och NH_3-koncentrations-profilerna i freeboarden (se bilaga 2) är praktiskt taget lika, oberoende av luftinmatning.

Detta är inte överraskande, eftersom temperaturfältet och koncentrationerna av rökgasens huvudkomponenter inte skilde sig väsentligt från varandra vid olika luftinmatningar. De små skillnader som kan skönjas är dessutom belägna högre upp i pannan, där all NH_3 redan reagerat och alla kvävereaktioner därmed upphört.

Tabell 8. NO-halten i pannans utlopp vid olika luftfördelningar då bränslekvävet i primärgasen antagits förekomma som endast NH_3 resp. NH_3 och NO. (ppm i fuktig rökgas)

Table 8. NO concentration in the boiler outlet for the different air distributions. Fuel nitrogen in the primary gas was assumed to be either NH_3 or NH_3 and NO. (ppm, wet gases)

	NO i utloppet [ppm]	
	NH_3	NH_3 + NO
Luftfördelning 1 (fall 1.1 och 1.2)	69	89
Luftfördelning 2 (fall 2.1 och 2.2)	69	90
Luftfördelning 3 (fall 3.1 och 3.2)	68	90

4 Resultatanalys

I tabell 9 visas en jämförelse mellan resultat från beräkningsfall 1.1 och från rökgasmätningar i den existerande panna som simulerats i detta arbete. Både de beräknade och de uppmätta värdena gäller för pannans utlopp. Under mätningarna brändes skogsavfall i pannan. Övriga uppgifter om förhållandena under mätningarna saknas, varför man inte bör dra alltför långtgående slutsatser från jämförelsen. Både mätnetingelserna och randvillkoren får beräkningsfall 1.1 torde å andra sidan vara typiska för pannans förhållanden.

Den uppmätta fukthalten i rökgasen är klart lägre och syrehalten högre än motsvarande beräknade värden, vilket tyder på att bränslet varit torrare och förbränningens luftöverskott större under mätningarna än i simuleringarnas utgångsantaganden.

I övrigt motsvarar de beräknade värdena väl de värden som uppmätts. Både vid mätningarna och simuleringen har man fått mycket låga halter av oförbrända gaser i pannutloppet och en NO-halt på ca. 70 ppm i fuktig gas.

Tabell 9. Jämförelse mellan resultat från beräkningsfall 1.1 och från rökgasmätningar i den existerande pannan.

Table 9. Calculated results from case 1.1 compared to measurement data frpm the existing boiler.

	Beräknat (fall 1.1)	Uppmätt	
		Medelvärde	Standard-avvikelse
H_2O [%]	29.9	19.6	0.5
O_2 [%, torr gas]	2.7	4.9	0.3
CO_2 [%]	12.2	12.4	0.2
CO [ppm]	1	2	24
Metan [ppm]	-	17	3
H_2 (ppm)	1	-	-
NO [ppm]	69	73	5

Antagandena gällande primärgasens sammansättning är uppenbarligen av stor betydelse för simuleringens resultat, vilket framgår av en jämförelse mellan resultaten från beräkningsfallen 1.1, 1.2 och 1.3. Skillnaderna i både huvudkomponenternas antagna inbördes proportioner och det kokskvävets förekomstform gav olika reaktionsmönster och, som en följd därav, olika NO-emissioner.

Med de modeller som i detta arbete använts för turbulens och kemi och deras samverkan bestäms kvävekemin i avgörande grad av omblandning snarare än av kemisk kinetik. För att få

bra simuleringsresultat är det alltså av avgörande betydelse att modellerna som beskriver turbulensen och dess samverkan med kemin är lämpliga för ändamålet.

Den modifierade varianten av Brouwers m.fl. kvävekemimodell gav klart lägre NO-emissioner än vad som uppmätts. Det är uppenbart att temperaturkorrektionstermen i hastighetsuttrycken inte bör lämnas bort. Termen påverkar NO-bildnings- och destruktionshastigheten olika, och vid de höga temperaturer, som råder vid förbränning, är korrektionstermen nödvändig för att modellen skall fungera. Det innebär att Brouwers m.fl. modell inte kan användas i den existerande versionen av det använda CFD-programmet utan att kvävekemin i sin helhet implementeras genom programmering.

Förbränningskemin och NO-emissionen påverkades inte nämnvärt av de förändringar i luftinmatningen, som testades. De förändringar som gjordes påverkar förhållandena högt uppe i freeboarden, medan kvävereaktionerna sker nere nära bädden. Uppenbarligen kan NO_x-emissionen huvudsakligen påverkas genom att reglera de förhållanden som råder i freeboardens nedersta del.

Detta tyder på att det även är viktigt att ha information om och korrekt modellera hur bränslet uppför sig under de första sekunderna i pannan. Medan bränslet faller det ned från inmatningsöppningen mot bädden och sprider sig på och i den, sker flera processer, som är av avgörande betydelse för förbränningskemin. Bränslet torkar och pyrolyseras och oxidationsreaktionerna påbörjas. I vilken mån detta sker redan i de heta gaserna ovanför bädden, på bäddytan eller inne i bädden borde vara känt för att korrekta randvillkor skall kunna sättas för simuleringarna.

5 Slutsatser och rekommendationer

Erfarenheten från detta arbete visar att CFD-simulering är ett värdefullt verktyg, med vilket man kan skapa en bild av de fysikaliska och kemiska företeelserna i en förbränningsanläggning. Även om förenklade modeller används vid simuleringen kan den information som erhålls om strömning, temperaturer och kemiska föreningars koncentrationer, användas då man studerar pannans egenskaper och bedömer konsekvenserna av eventuella modifikationer i körsättet eller konstruktionen.

Den nya modellen för bränslekvävets oxidation verkar att fungera tillfredsställande. Tillsammans med den använda modellen för huvudkemin verkar den, i motsats till tidigare existerande modeller, ge relativt trovärdiga resultat gällande NO_x-emissionen från förbränning av biomassa i svävbäddspannor. Tack vare att modellen är kompakt och enkel, gick beräkningarna snabbt och utan konvergensproblem. Modellen kan enkelt och utan programmering implementeras i det kommersiella CFD-program, Fluent 5.4, som användes i detta arbete, vilket är en klar förbättring ur användarens synvinkel.

Där av stor betydelse hur bränslets beteende modelleras. Randvillkoren för bränsleinmatningen påverkar hela beräkningens resultat. I synnerhet påverkas förhållandena längst ner i freeboarden, vilket är det område där NO_x-kemin i huvudsak sker enligt den nu använda modellen. I detta arbete har antagits att bränslet torkar och pyrolyseras till jämviktssammansättning homogent fördelat över hela bäddarean. I verkligheten sker en del av torkningen och pyrolysen i vissa fall redan i freeboarden ovanför bädden och bränslet sprider sig inte heller jämt över bäddytan. Hur detta modelleras kan ha en stor betydelse för NO_x-prediktionens pålitlighet.

Modellerna som beskriver turbulensen och dess koppling till kemin är av stor betydelse. Kvävekemin är till stor del blandningsbegränsad, och simuleringsresultatet beror till avgörande grad av hur korrekt turbulens-kemi –kopplingen beskrivits.

De tre alternativ för luftinmatningen, som testades i detta arbete, visade sig inte ha någon nämnvärd inverkan på NO_x-emisionen. Uppenbarligen bör de åtgärder som görs för att sänka NO_x-emissionen i denna panna inrikta sig på att påverka förhållandena längst nere i pannans freeboard. Kvävekemin verkar i sin helhet ske inom ett mycket snävt område mellan luftinmatningsnivåerna 2 och 3. Genom att förändra luftinmatningen på ett sätt som endast påverkar förhållandena högre upp i pannan, kan NO_x-kemin uppenbarligen inte styras.

6 Förslag till fortsatt forskningsarbete

På basen av erfarenheten från detta arbete kan följande förslag till fortsatt forskning framföras.

Bränslets beteende i freeboardens nedersta del genast efter inmatningen borde utredas. Det vore av stor betydelse om man kunde bestämma i vilken utsträckning torkningen och pyrolysen sker på vägen ner mot bädden respektive i själva bädden. En beskrivning av vilka faktorer som påverkar detta, samt en metod för att i praktiken avgöra hur detta skall beskrivas i varje enskilt fall vore till stor nytta då randvillkoren för en CDF-simulering av en svävbäddspanna bestäms.

Bränslekvävets beteende under pyrolys och koksförbränning är ännu inte helt klarlagt, och borde utredas ytterligare. NO_x-kemin påverkas av i vilken kemisk form det reaktiva kvävet förekommer i primärgasen, och för tillfället är man hänvisad till rätt grova antaganden då man fastställer randvillkoren för CFD-beräkningarna.

Ett studium av hur olika modeller för turbulens-kemi –kopplingen påverkar NO_x-predikteringen vore intressant, eftersom kvävekemins förlopp vi detta arbete visade sig vara i hög grad beroende av turbulensen.

En närmare undersökning av luftfördelningsstrategier som syftar att påverka förhållandena i freeboardens nedersta del vore en motiverad fortsättning på detta arbete. De nu testade strategierna visade att förändringar i freeboardens övre del inte hade åsyftad verkan. Det verkar som om åtgärder för att påverka kvävekemin bör sättas in redan i freeboardens nedersta del. Då sådana åtgärder bedöms är det av stor betydelse att korrekta antaganden kan göras gällande hurudan gasströmmen från bädden är.

7 Litteraturreferenser

[1] Kilpinen P; ”Kinetic Modeling of Gas Phase Nitrogen Reactions in Advanced Combustion Processes”, Doktorsavhandling, Åbo Akademi, 1992.

[2] De Soete G G; ”Overall Reaction Rates of NO and N_2 Formation from Fuel Nitrogen”, 15th Symposium (Int.) on Combustion 1974.

[3] Mitchell J W and Tarbell J M; ”A Kinetic Model of Nitric Oxide Formation during Pulverized Coal Combustion”, AIChE Journal Vol. 28, No 2., pp. 302-311, 1982.

[4] Brouwer J, Heap M P, Pershing D W and Smith P J; ”A Model for Predicting Selective Noncatalytic Reduction of Nitrogen Oxides by Ammonia, Urea, and Cyanuric Acid with Mixing Limitations in the Presence of CO”, 26th Symposium (Int.) on Combustion, 1996.

[5] Vakkilainen E, Kjäldman L, Taivassalo V, Kilpinen P and Norström T; ”High Solids Firing in a Operating Recovery Boiler — Comparisons of CFD Predictions to Practical Observations in the Furnace”, Int. Chem. Recovery Conference, Tampa, Florida, June 1-4, 1998.

[6] Kjäldman L; ”Application of Different Chemical NO-Mechanisms to Numerical Flow Simulations of Pulverized Peat Combustion”, 4th Int. Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisbon, Portugal, 1997.

[7] Norström T, Kilpinen P, Brink A, Vakkilainen E, and Hupa M; ”Comparisons of the Validity of Different Simplified NH_3-Oxidation Mechanisms for Combustion of Biomass”, Energy & Fuels, Vol. 14, Np. 5, pp. 947-952, 2000.

[8] Brink A, and Kilpinen P; ”A simplified kinetic rate expression for describing the oxidation of fuel-N in biomass combustion”, Åbo Akademi University, Process Chemistry Group. Report 00-10, 2000.

[9] Jones W P and Lindstedt R P; ”Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion. Combustion and Flame”, Vol. 73, pp. 233–249, 1988.

[10] Magnussen B F and Hjertager B H; “On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion”, 16th Symposium (Int.) on Combustion 1976

Bilagor

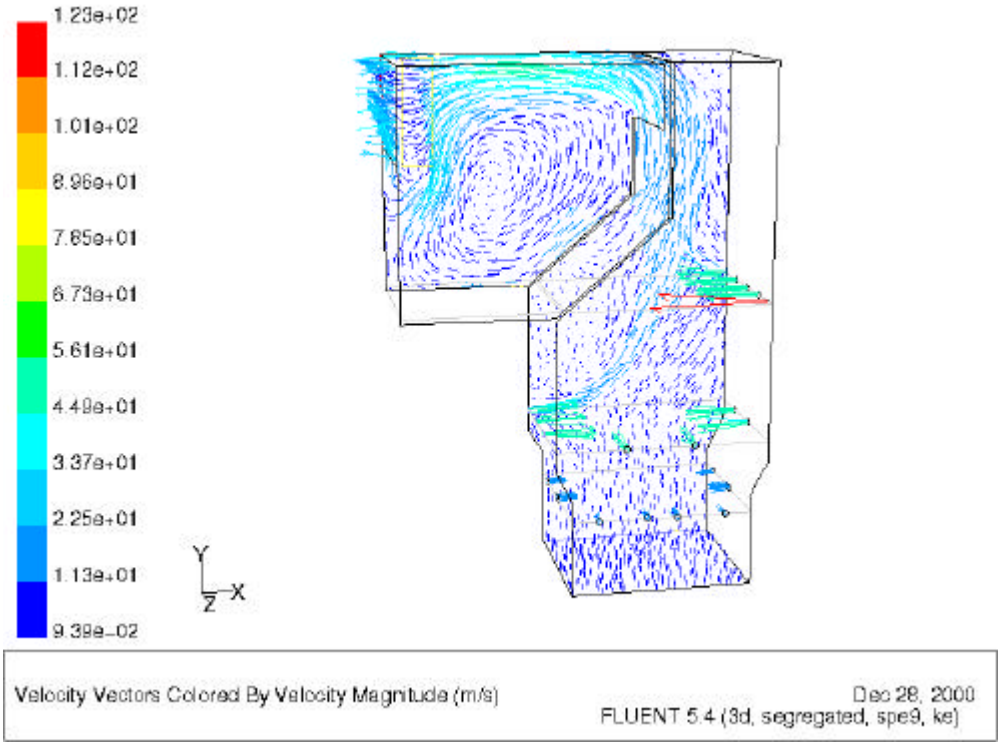
A Strömningsfält, temperaturfält och huvudkomponenternas koncentrationsfält i de olika beräkningsfallen

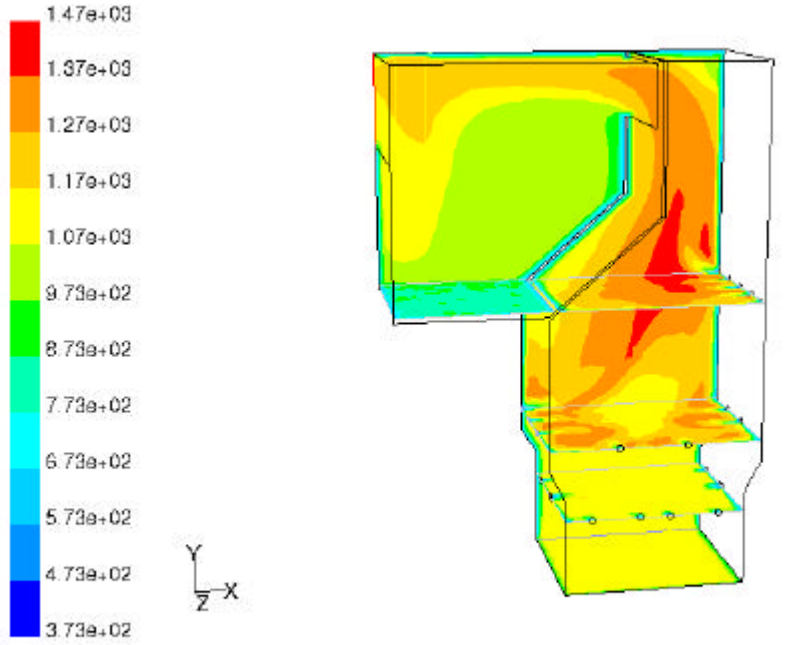
B NO- och NH_3-koncentrationsfält i de olika beräkningsfallen

A Strömningsfält, temperaturfält och huvudkomponenternas koncentrationsfält i de olika beräkningsfallen

Beräkningsfall 1.1, 1.1b, 1.2, 1.4 och 1.4b

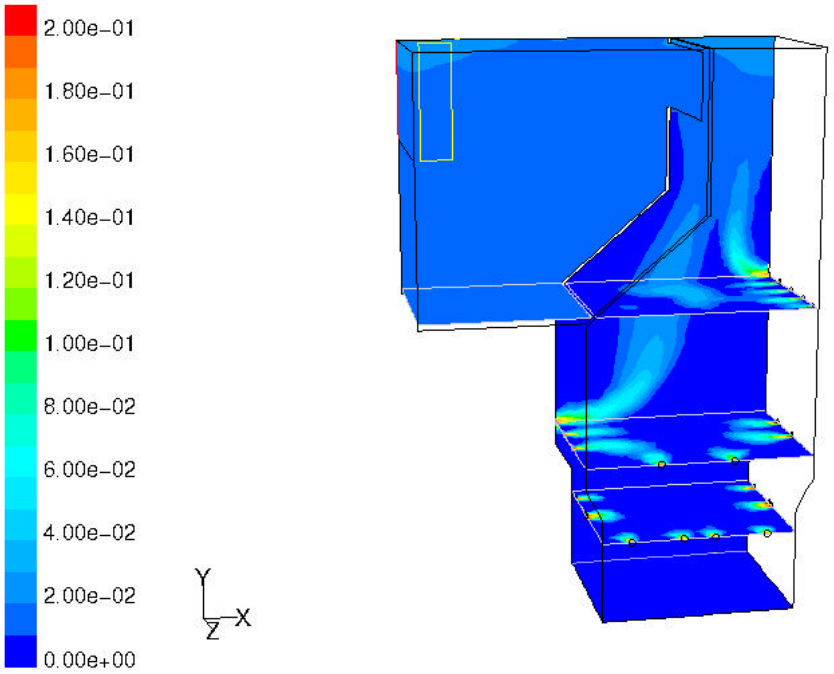
Luftfördelning 1, primärgas 1





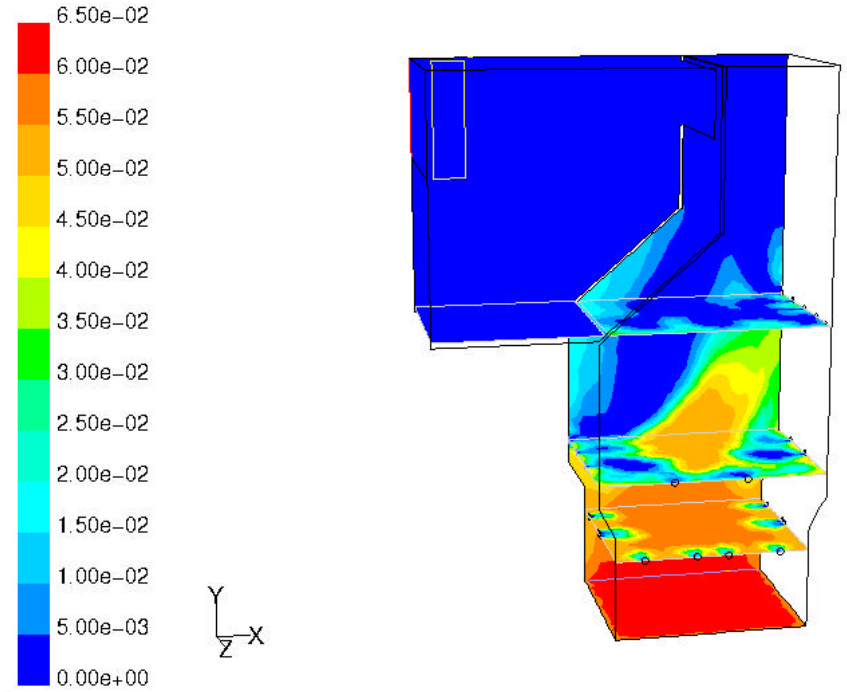
Contours of Static Temperature (k)

Dec 19, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



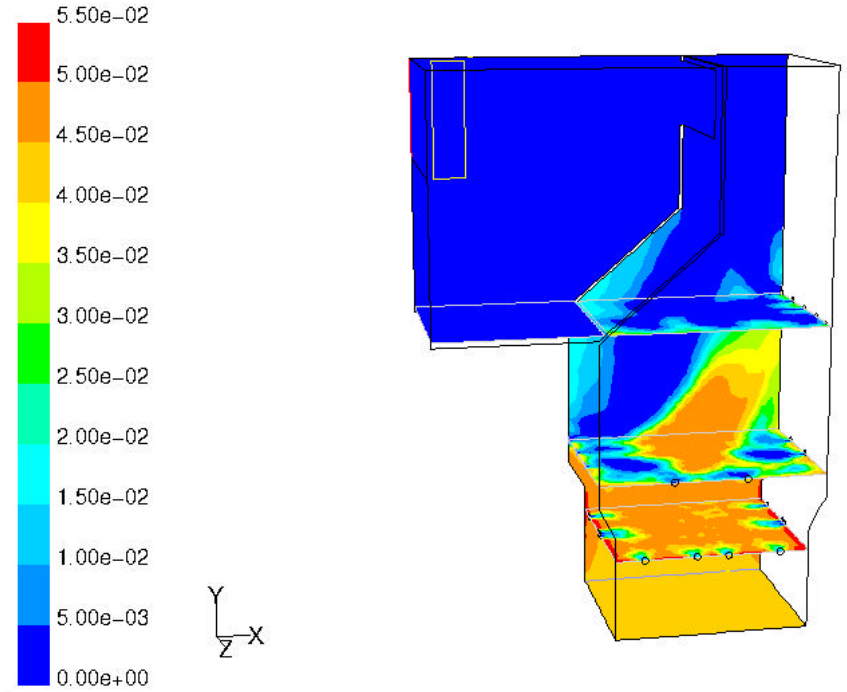
Contours of Mole fraction of o2

Dec 19, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



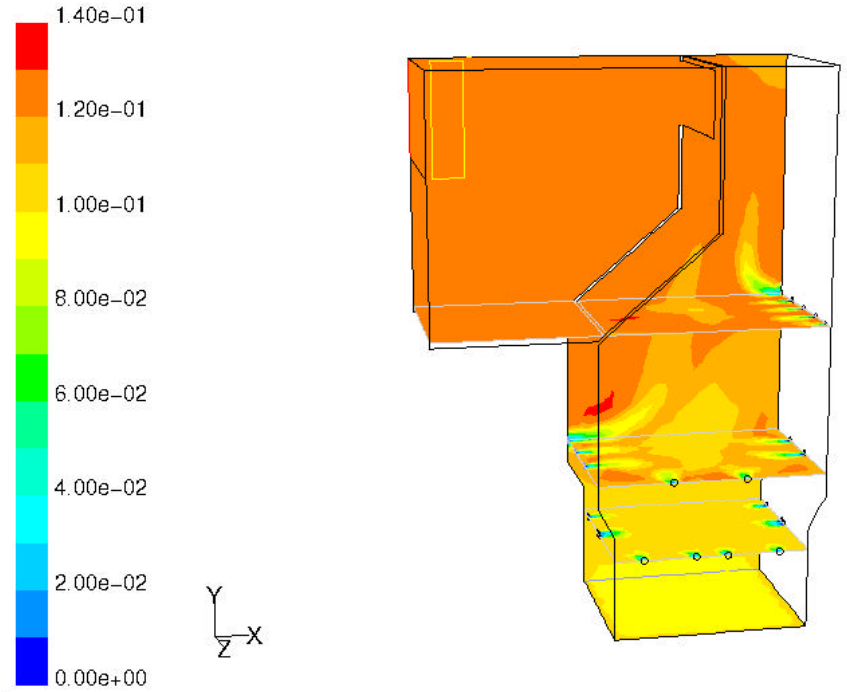
Contours of Mole fraction of co

Dec 28, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



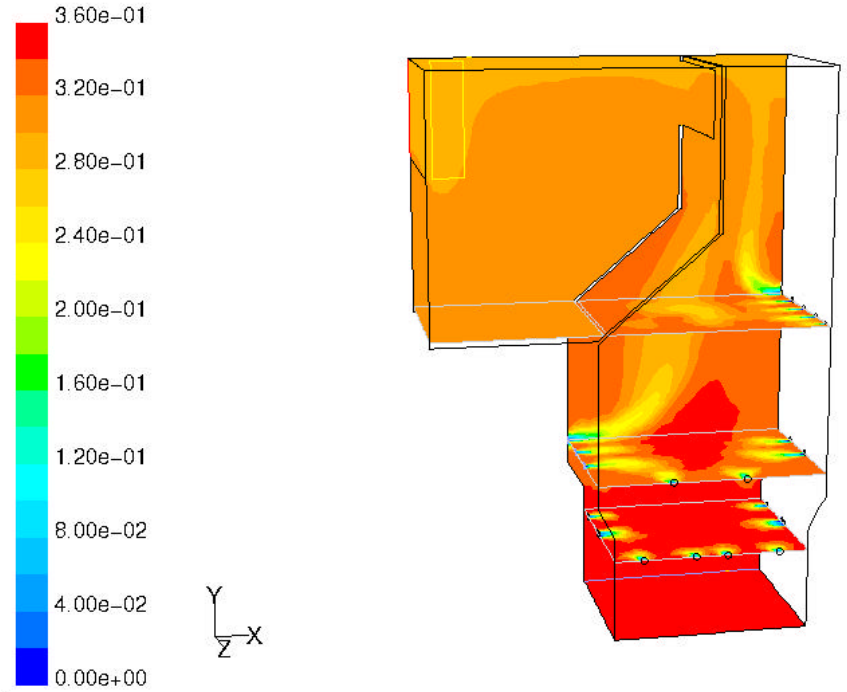
Contours of Mole fraction of h2

Dec 28, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



Contours of Mole fraction of co2

Dec 28, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

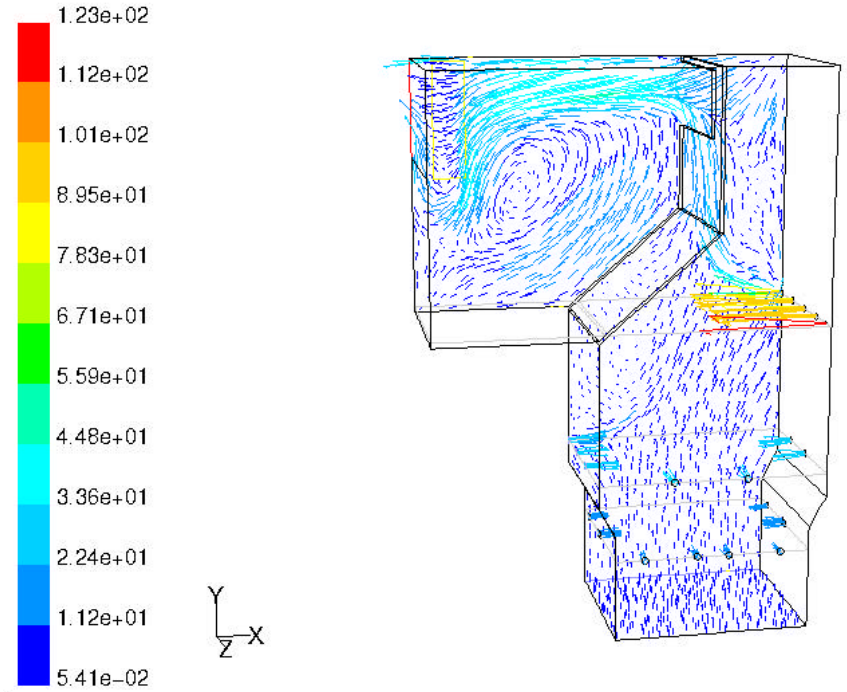


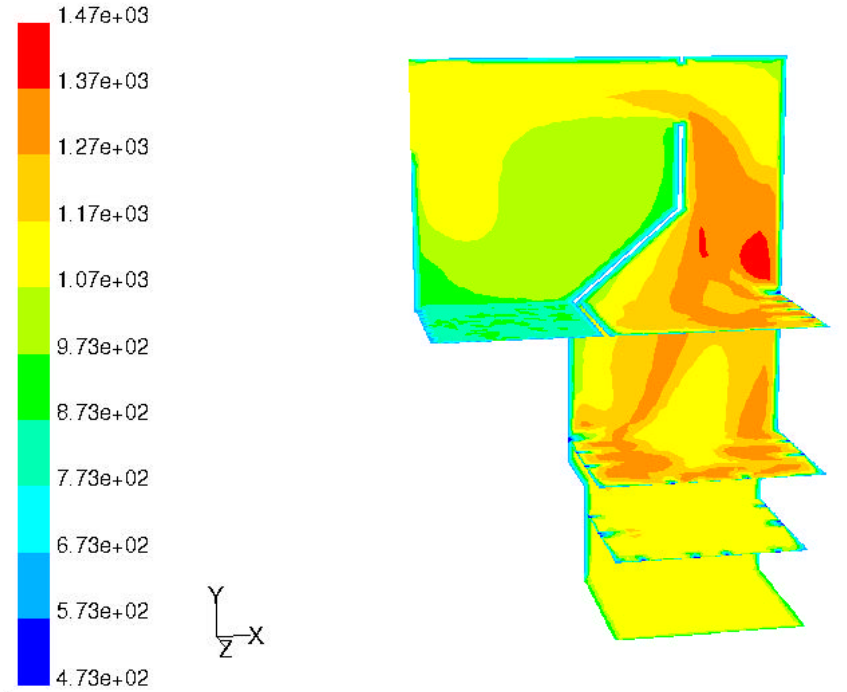
Contours of Mole fraction of h2o

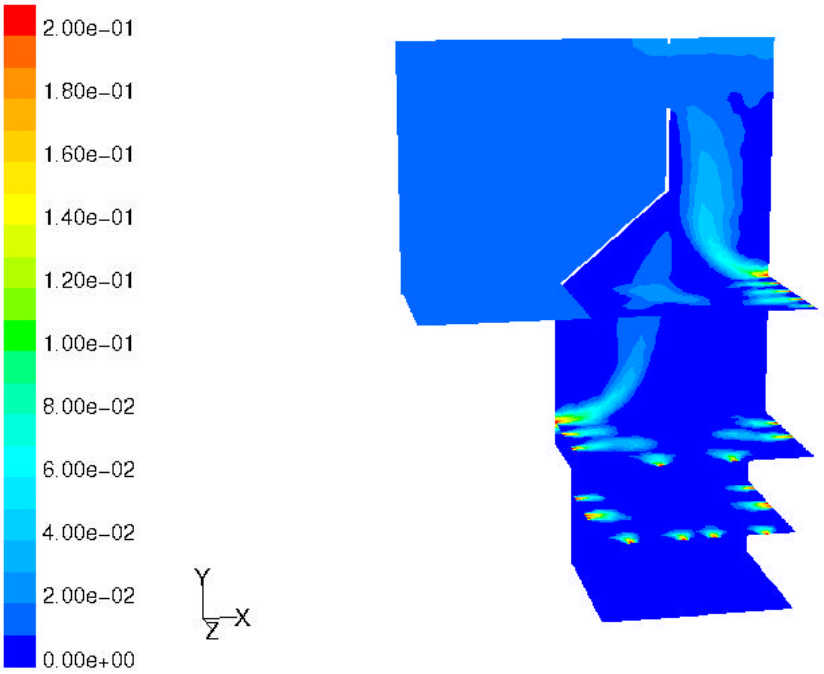
Dec 28, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

Beräkningsfall 2.1 och 2.2

Luftfördelning 2, primärgas 1

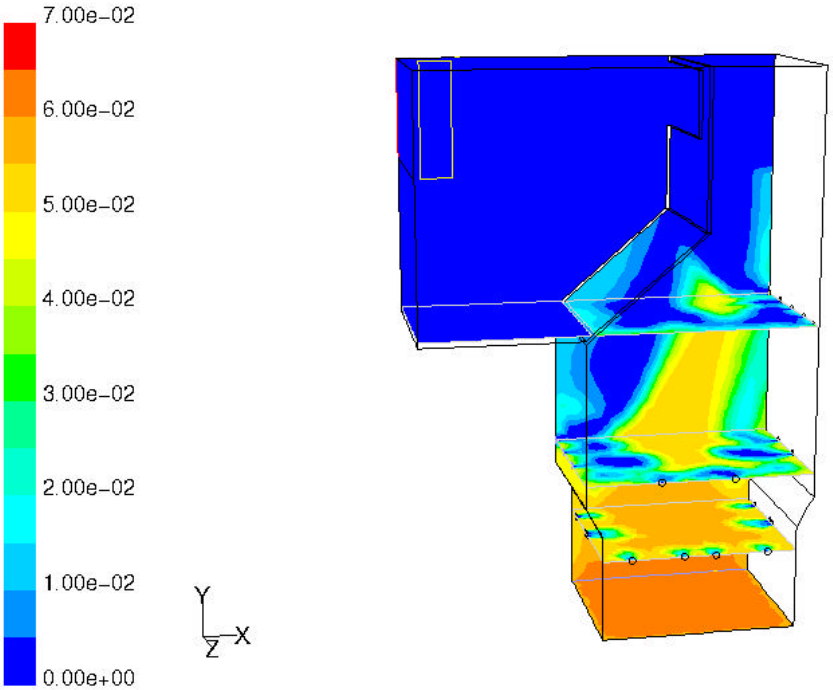






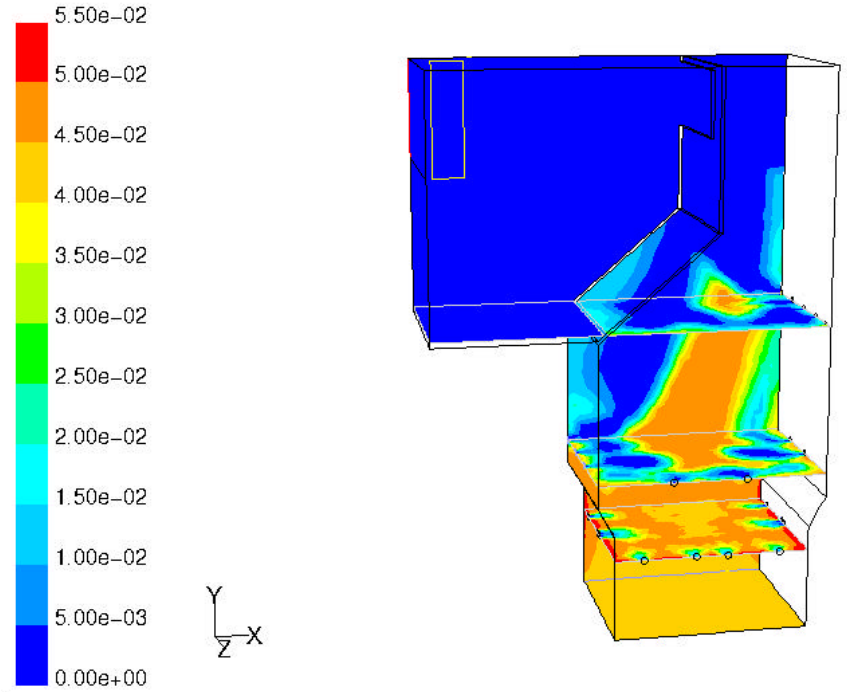
Contours of Mole fraction of o2

Dec 19, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



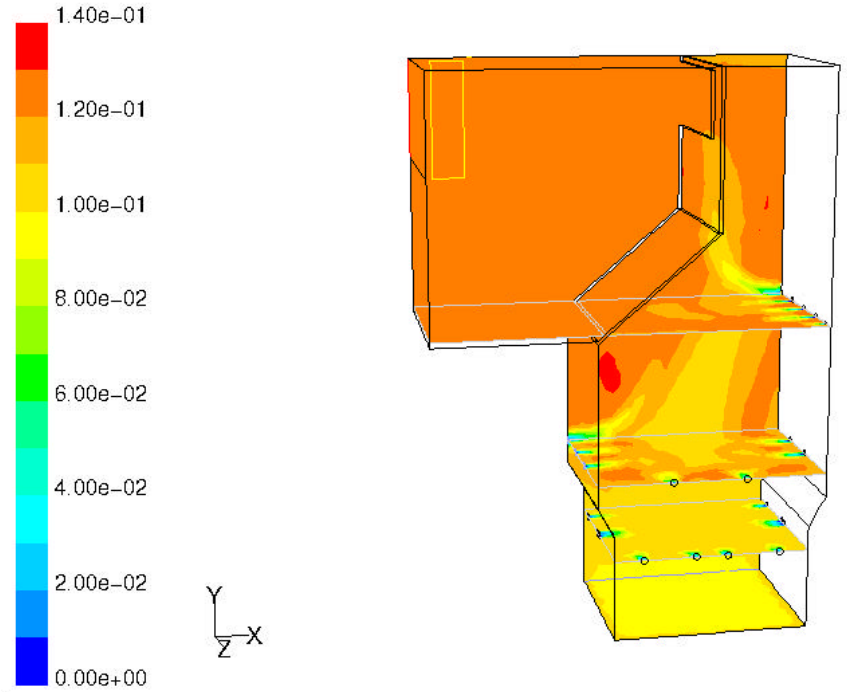
Contours of Mole fraction of co

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



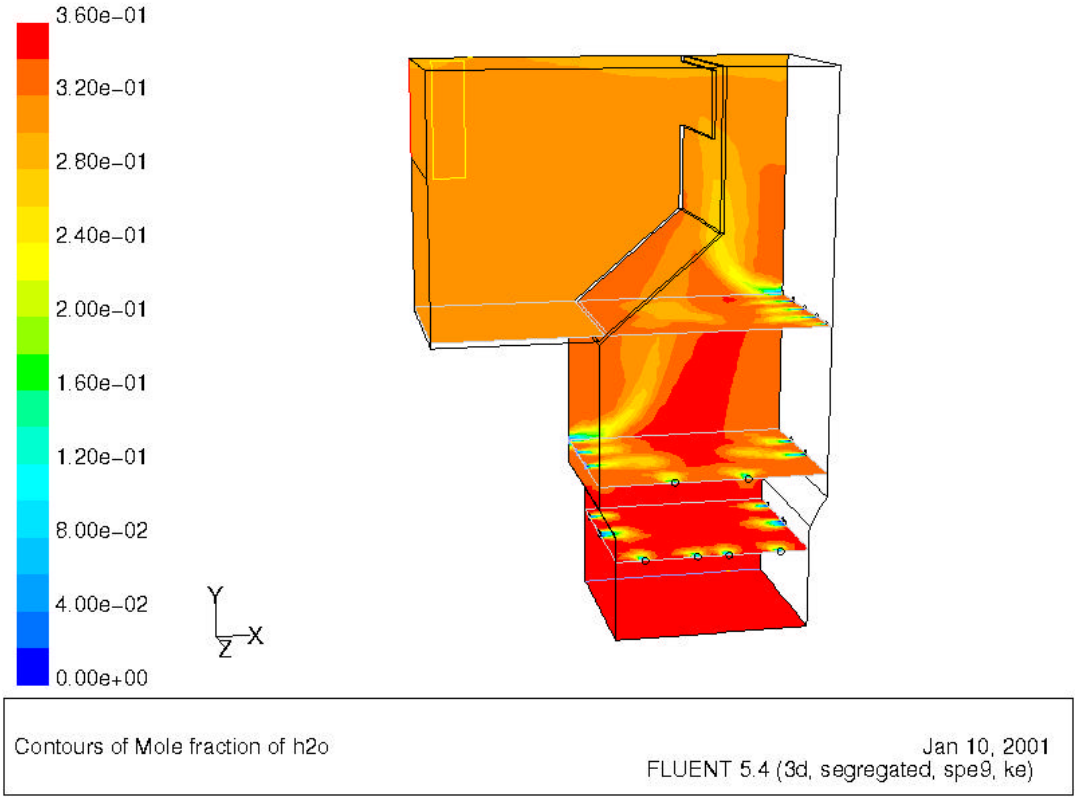
Contours of Mole fraction of h2

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



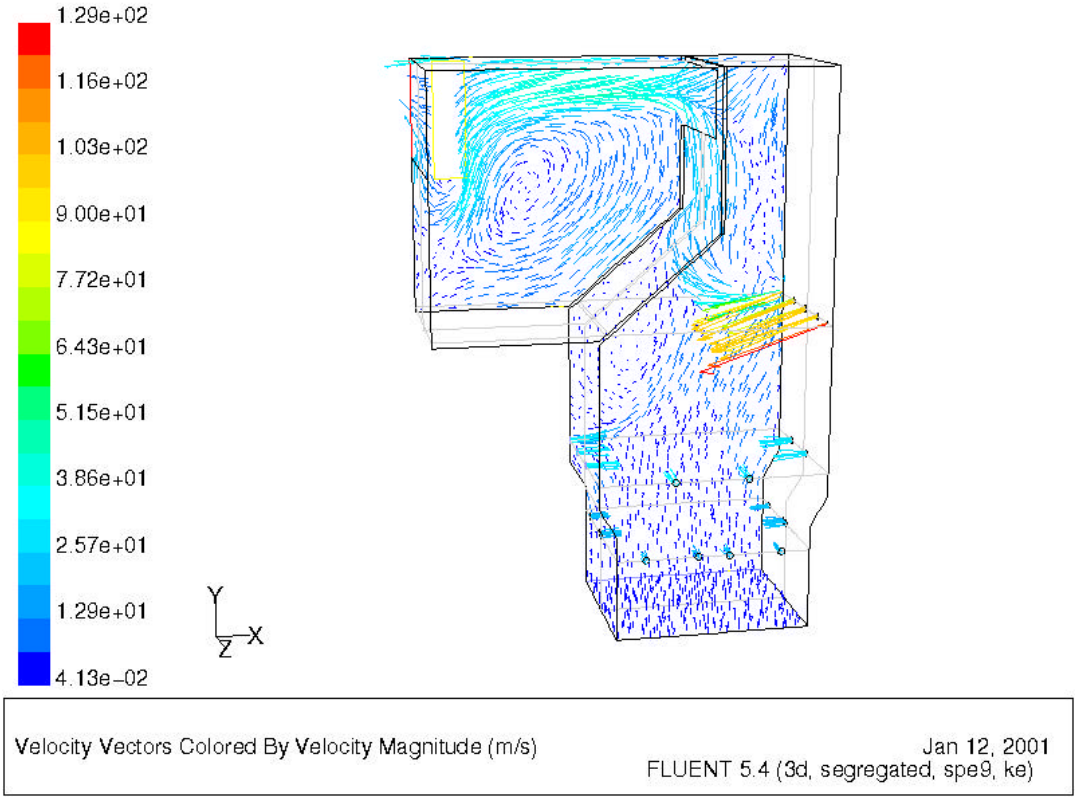
Contours of Mole fraction of co2

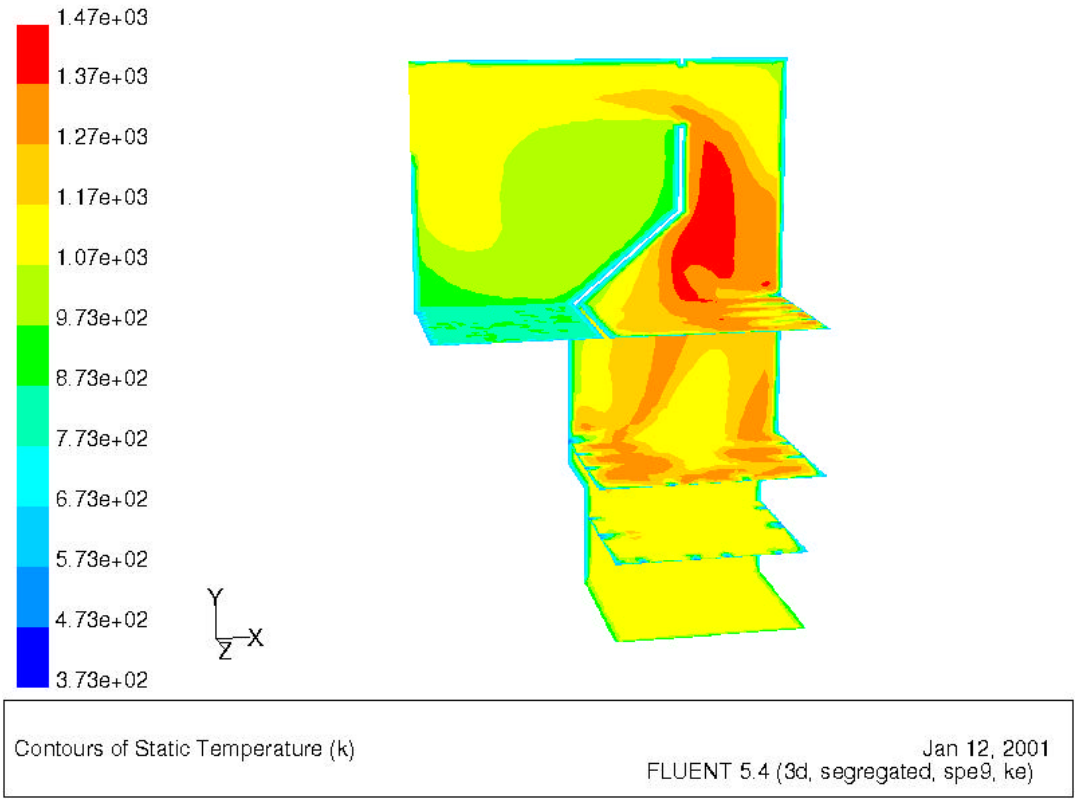
Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

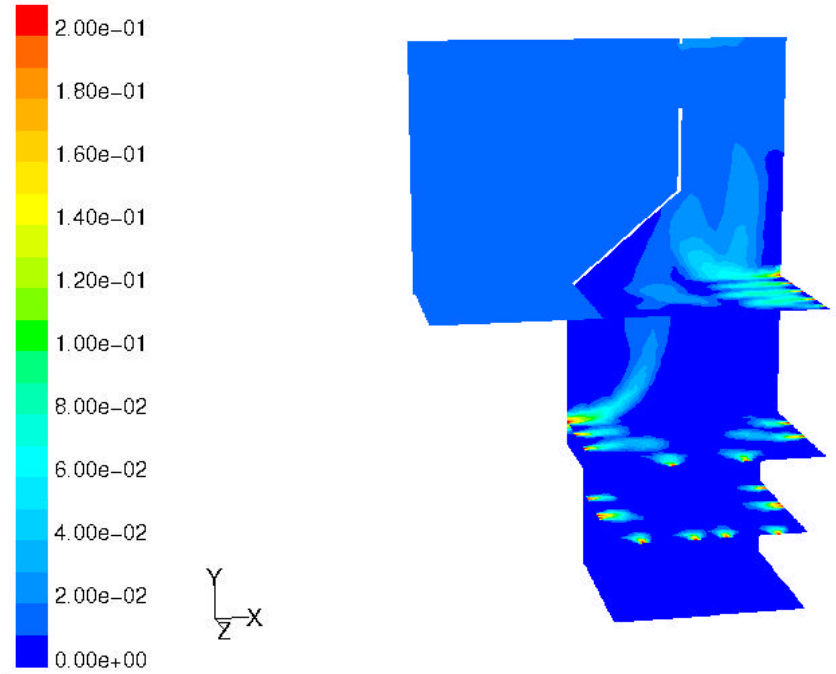

3.60e-01
3.20e-01
2.80e-01
2.40e-01
2.00e-01
1.60e-01
1.20e-01
8.00e-02
4.00e-02
0.00e+00
Y
X
Z
Contours of Mole fraction of h2o
Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

Beräkningsfall 3.1 och 3.2

Luftfördelning 3, primärgas 1

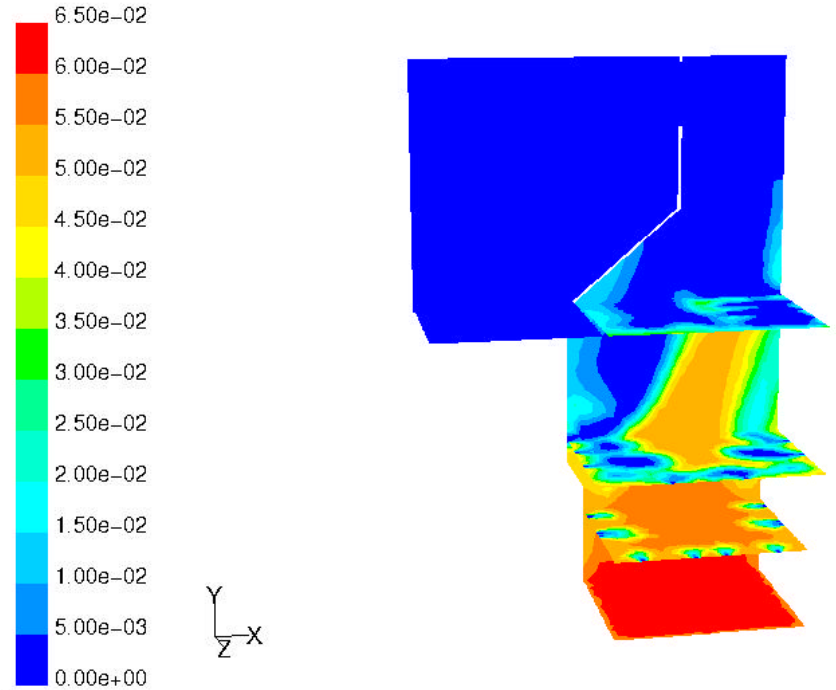






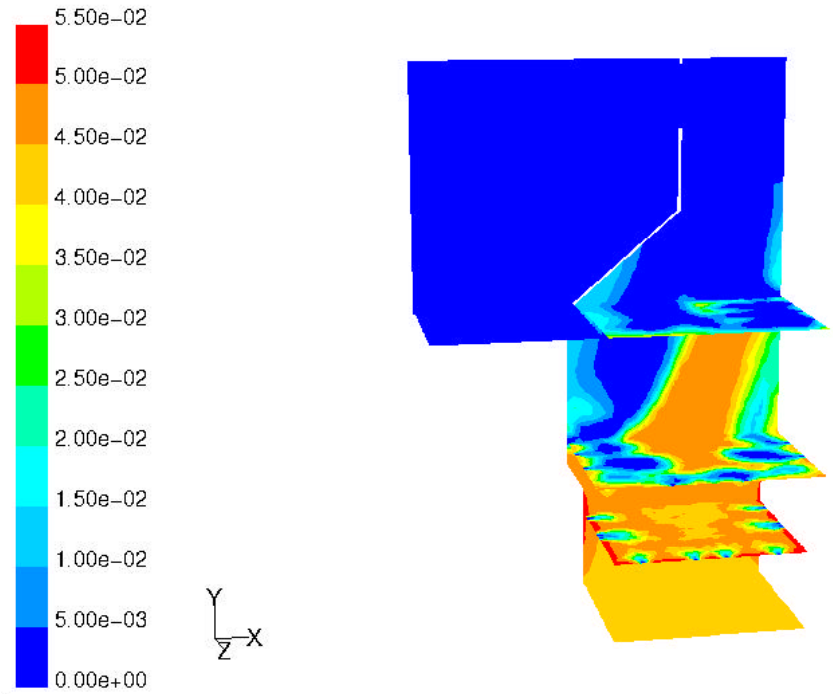
Contours of Mole fraction of o2

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



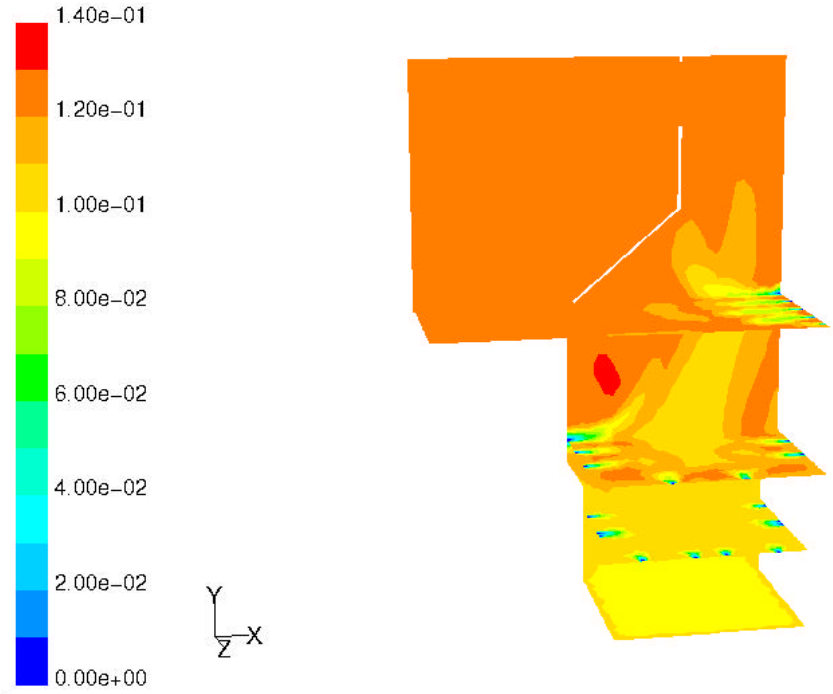
Contours of Mole fraction of co

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



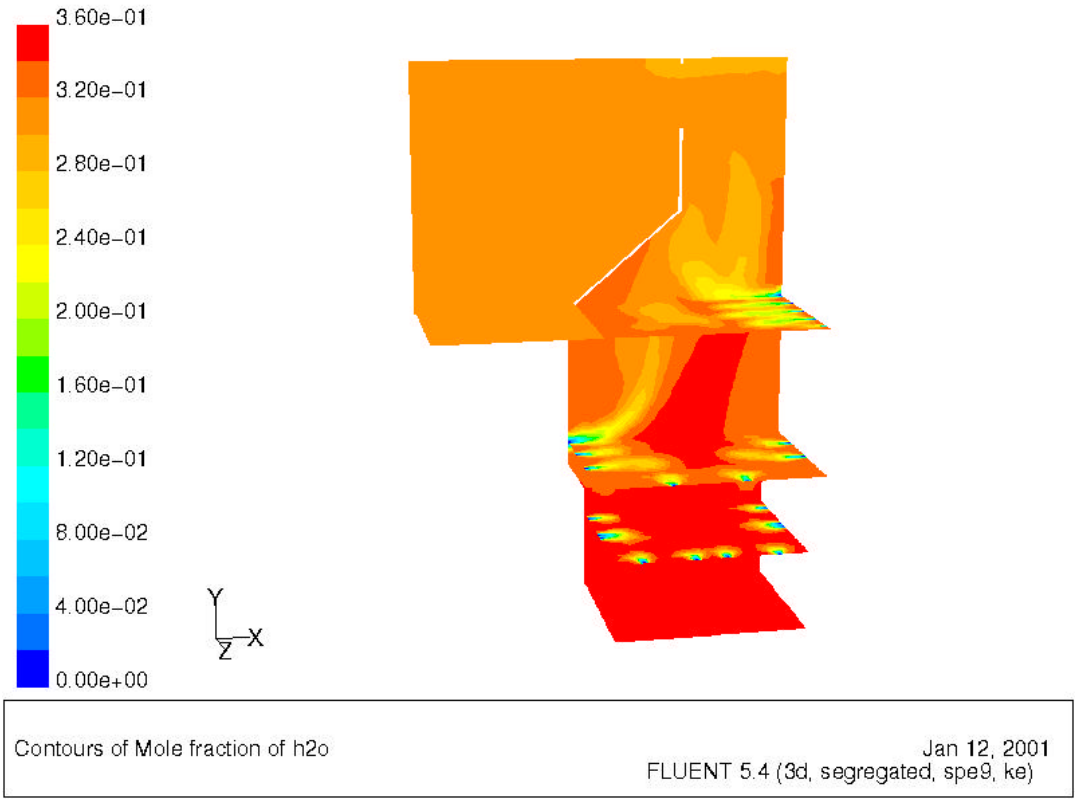
Contours of Mole fraction of h2

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



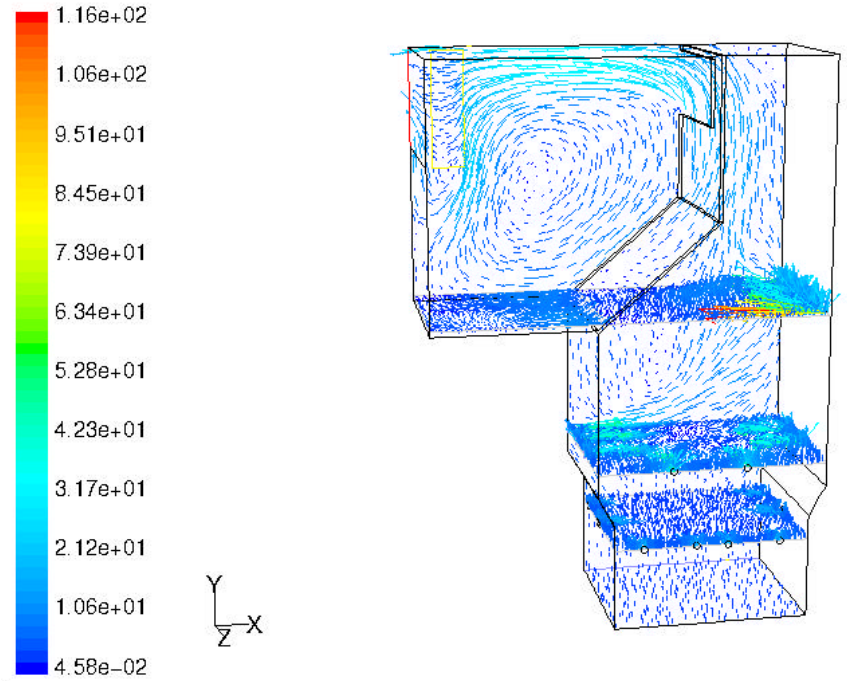
Contours of Mole fraction of co2

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)


3.60e-01
3.20e-01
2.80e-01
2.40e-01
2.00e-01
1.60e-01
1.20e-01
8.00e-02
4.00e-02
0.00e+00
Y
X
Z
Contours of Mole fraction of h2o
Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

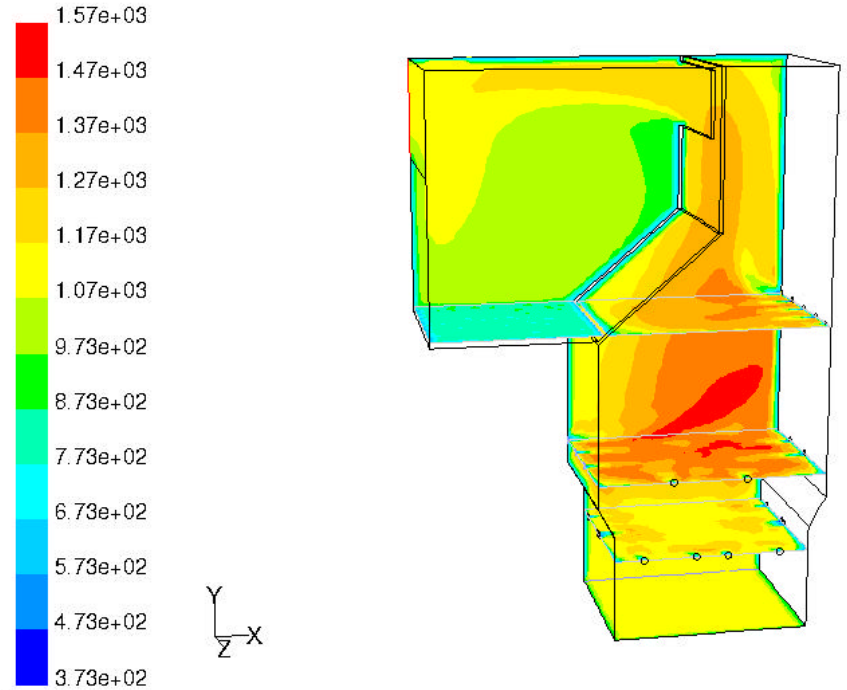
Beräkningsfall 1.3

Luftfördelning 1, primärgas 2



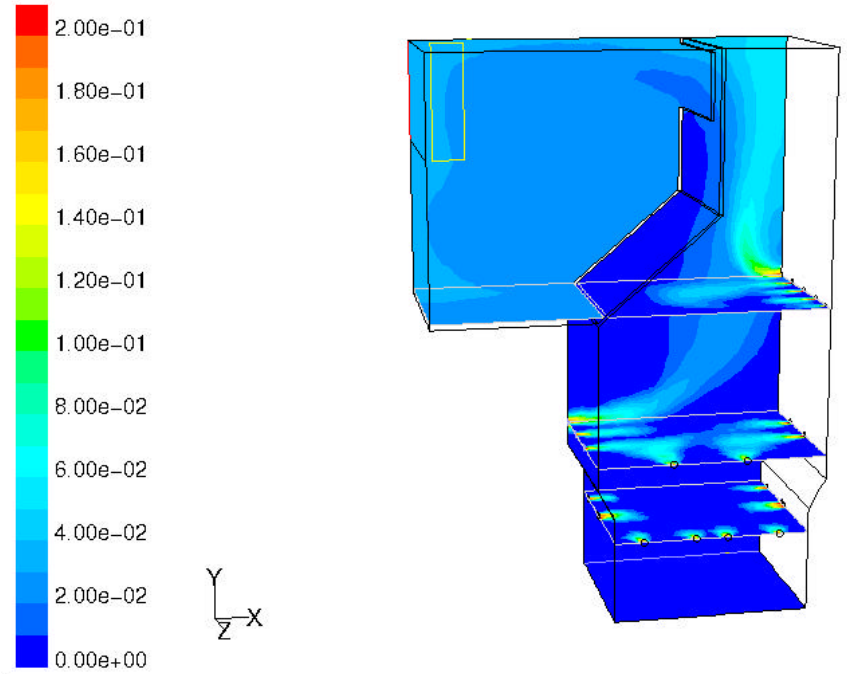
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Nov 14, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



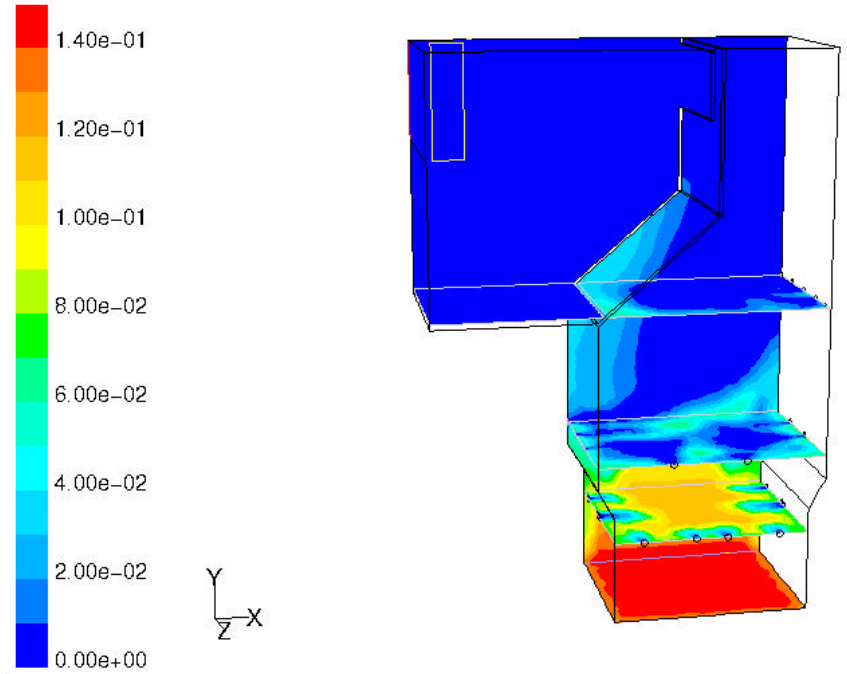
Contours of Static Temperature (k)

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



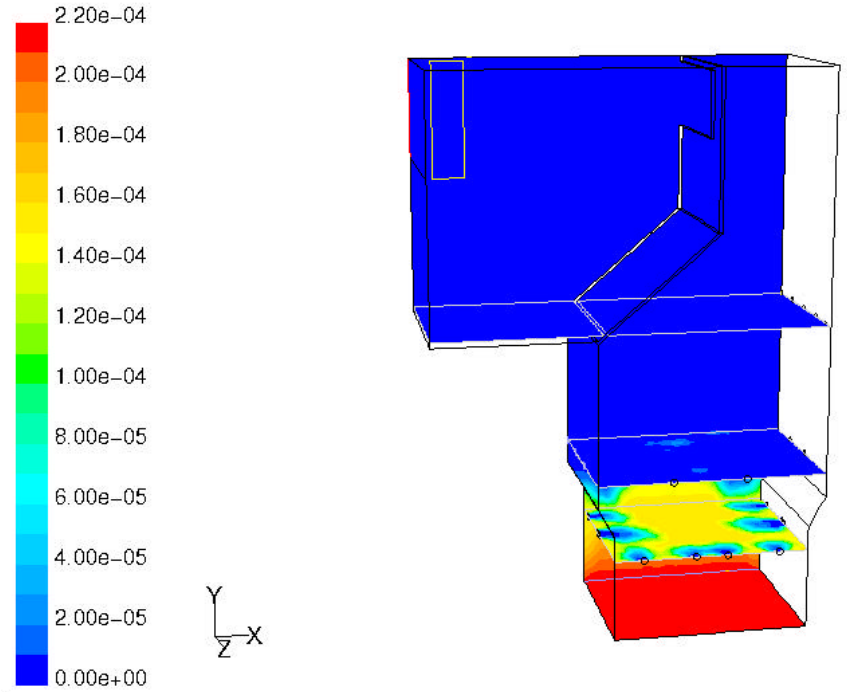
Contours of Mole fraction of o2

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



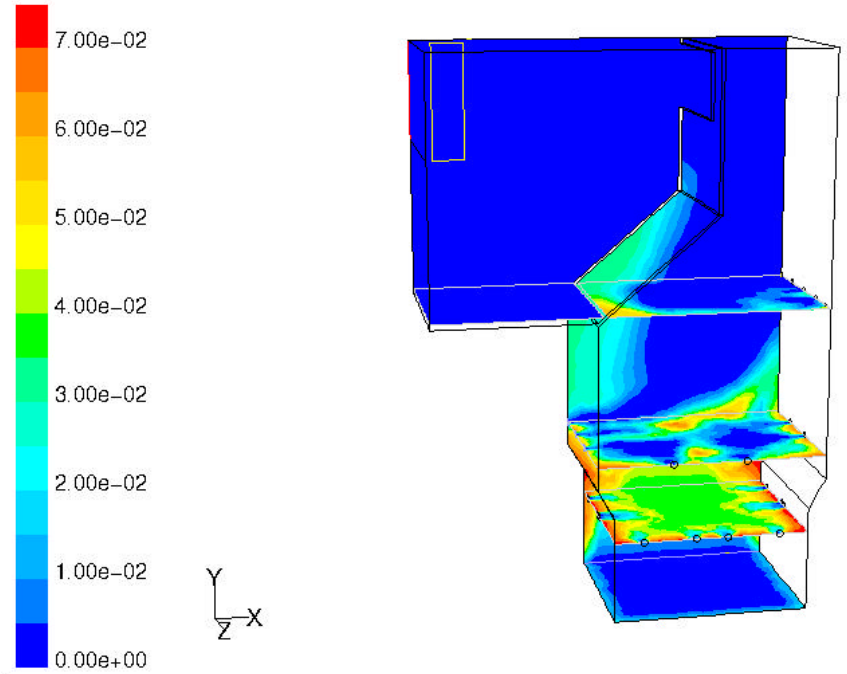
Contours of Mole fraction of co

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



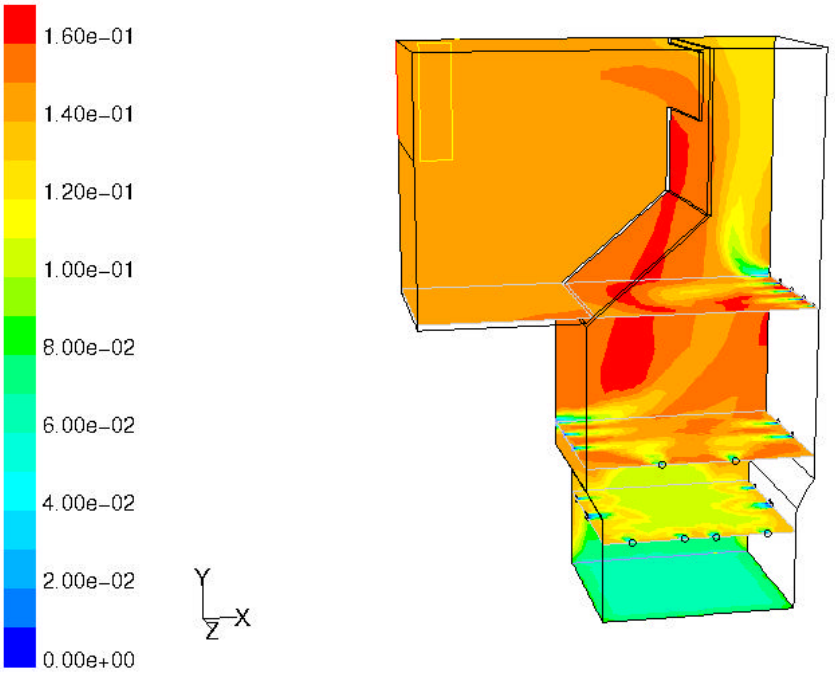
Contours of Mole fraction of ch4

Nov 14, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



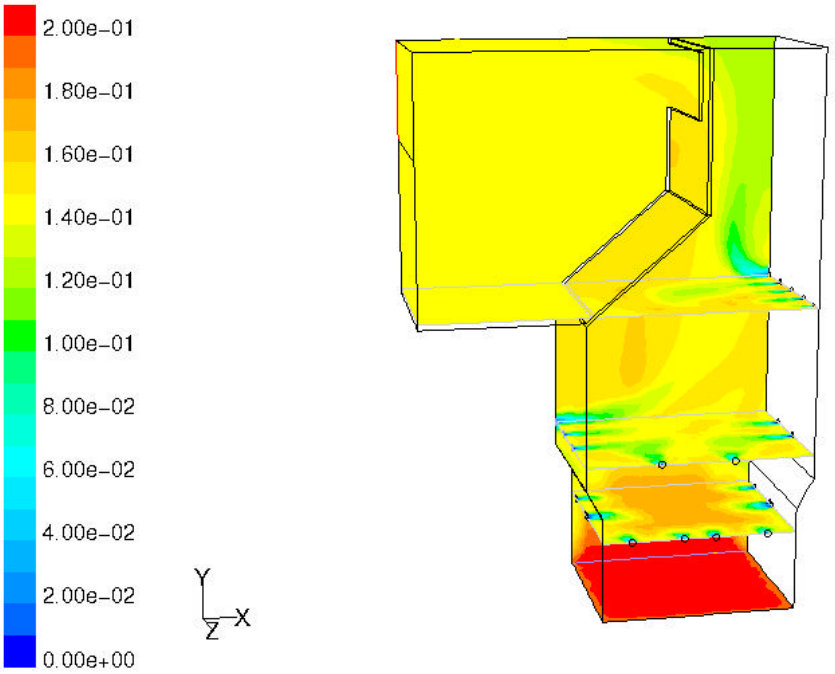
Contours of Mole fraction of h2

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



Contours of Mole fraction of co2

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



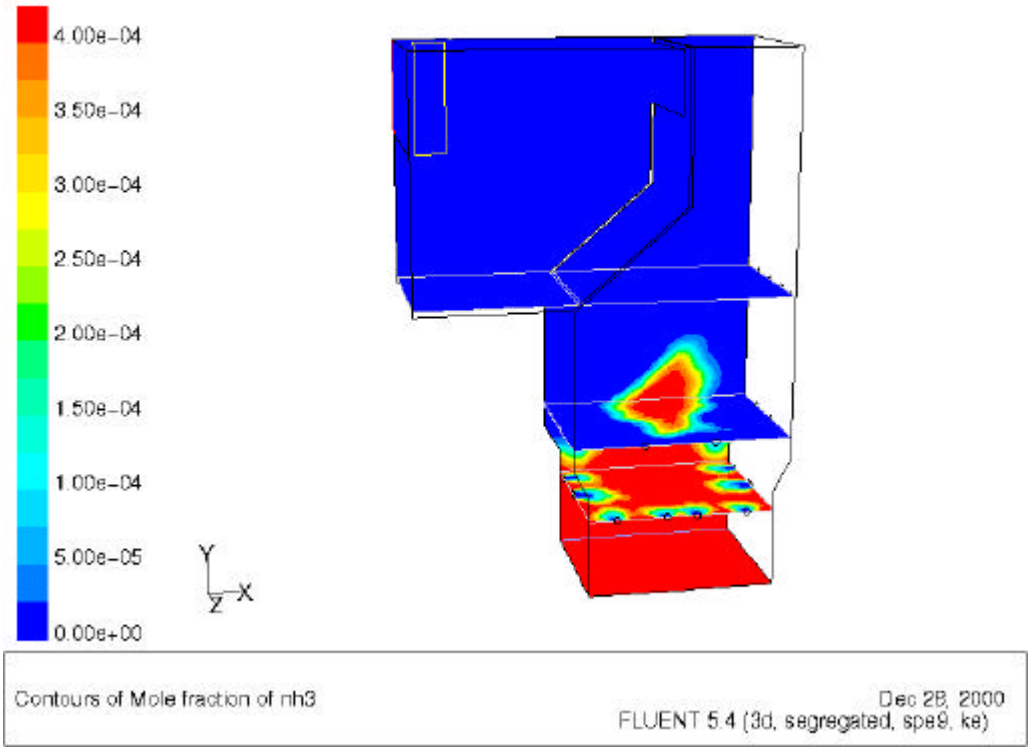
Contours of Mole fraction of h2o

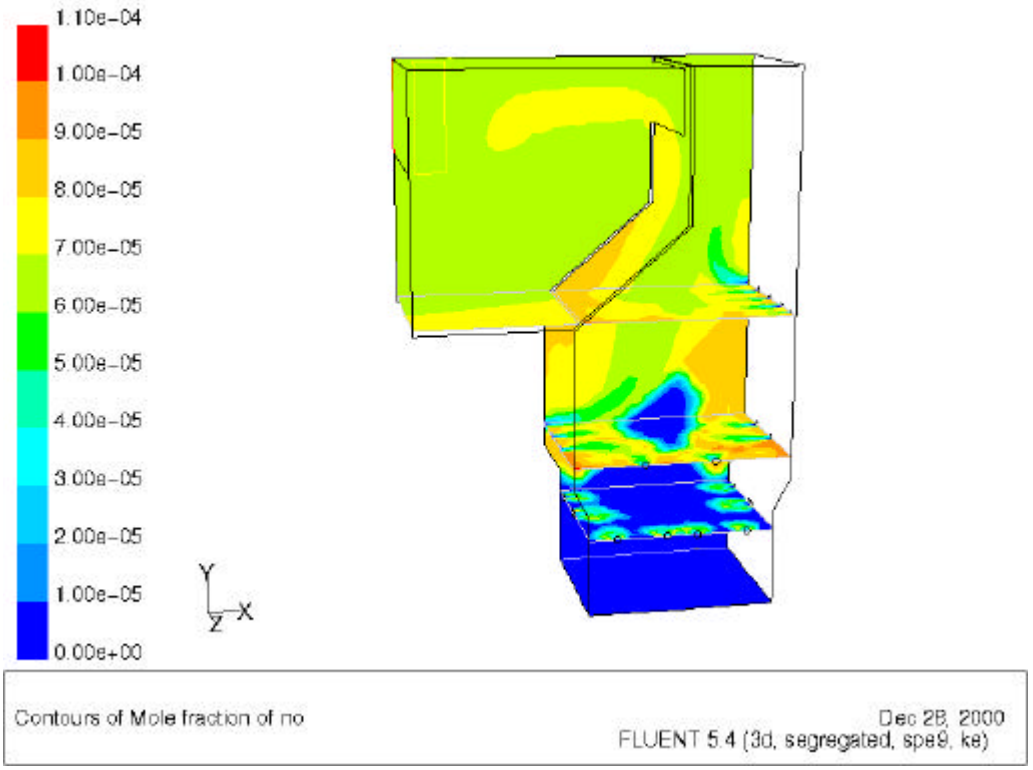
Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

B NO- och NH_3-koncentrationsfält i de olika beräkningsfallen

Beräkningsfall 1.1

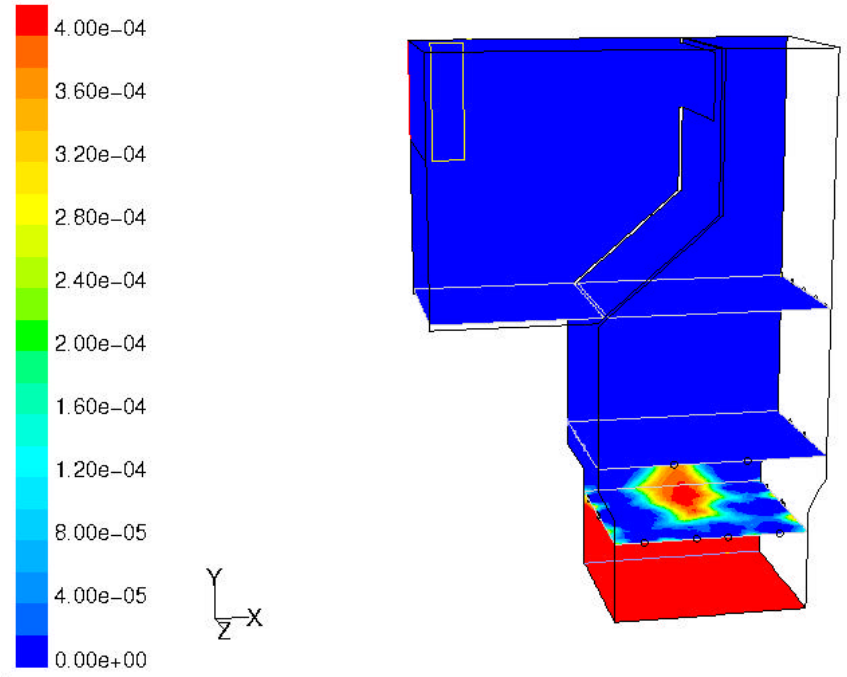
Luftfördelning 1, primärgas 1, kokskväve som N_2, Brink & Kilpinen





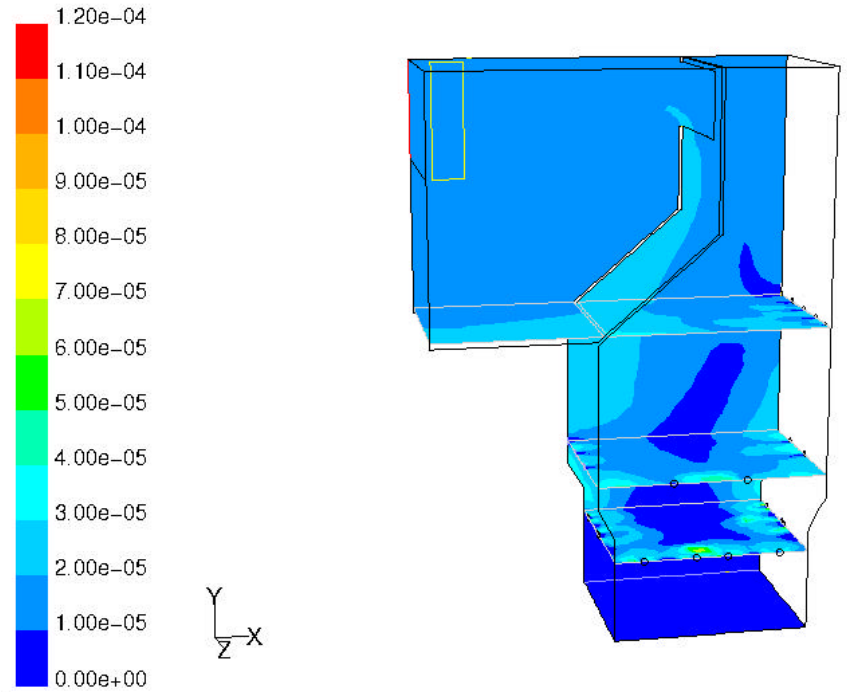
Beräkningsfall 1.1b

Luftfördelning 1, primärgas 1, kokskväve som N_2, kinetiskt begränsad Brink & Kilpinen



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

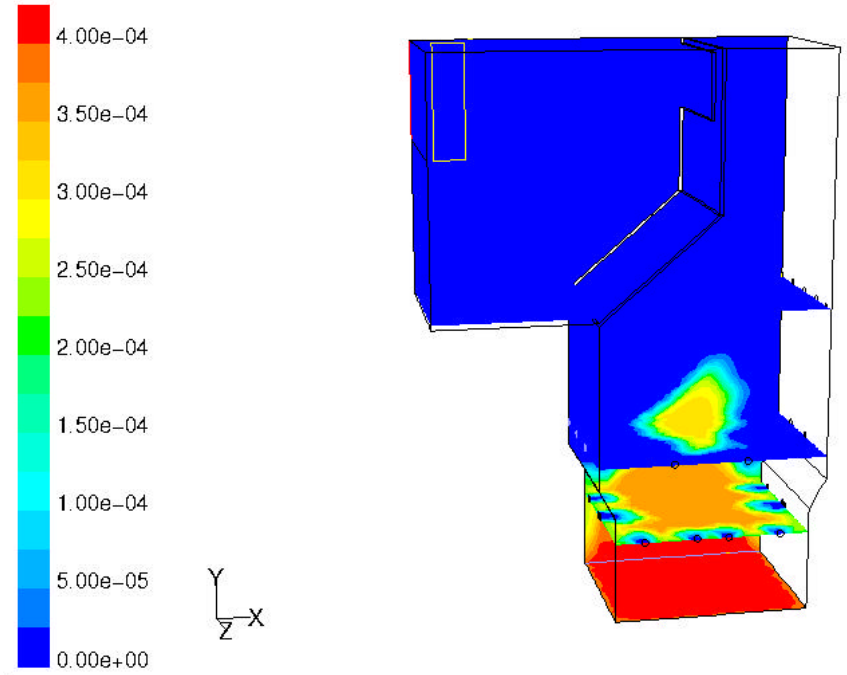


Contours of Mole fraction of no

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

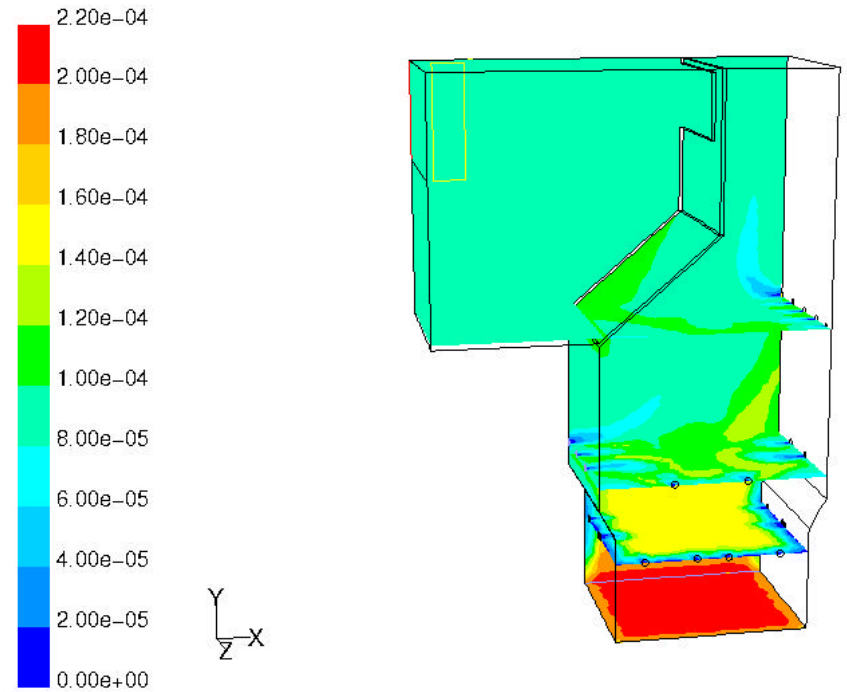
Beräkningsfall 1.2

Luftfördelning 1, primärgas 1, kokskväve som NO, Brink & Kilpinen



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 06, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

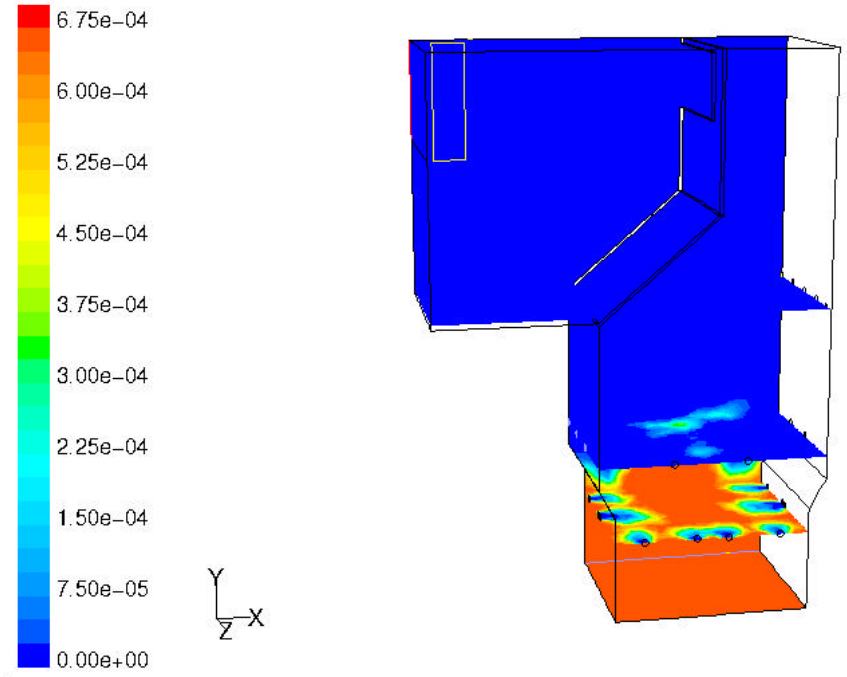


Contours of Mole fraction of no

Jan 06, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

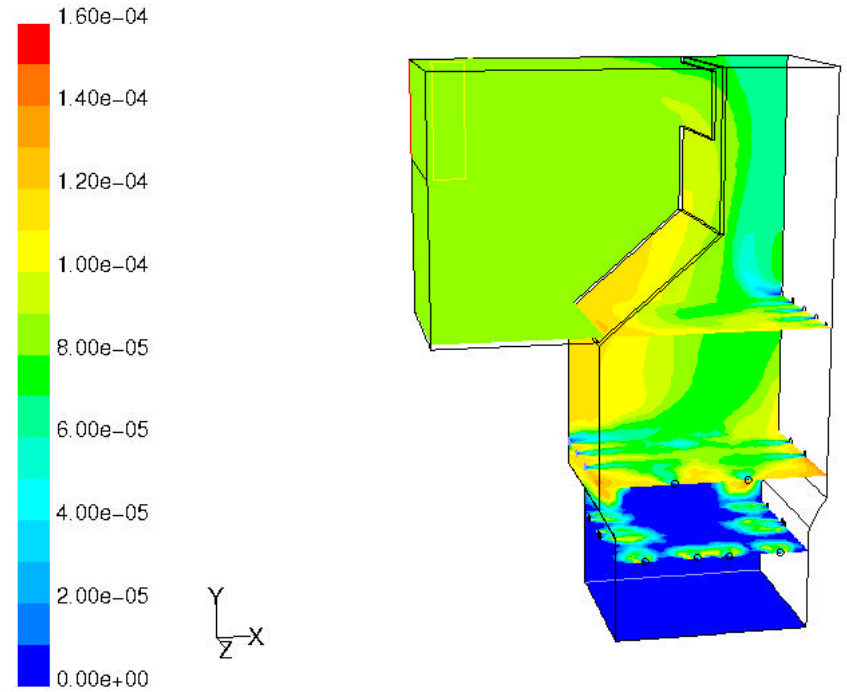
Beräkningsfall 1.3

Luftfördelning 1, primärgas 2, kokskväve som N_2, Brink & Kilpinen



Contours of Mole fraction of nh3

Nov 13, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

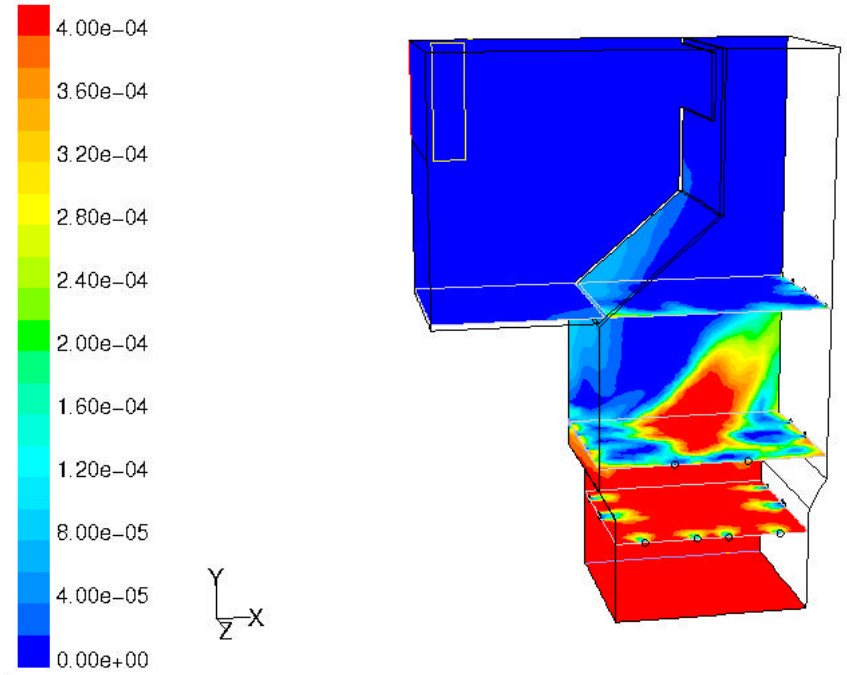


Contours of Mole fraction of no

Nov 13, 2000
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

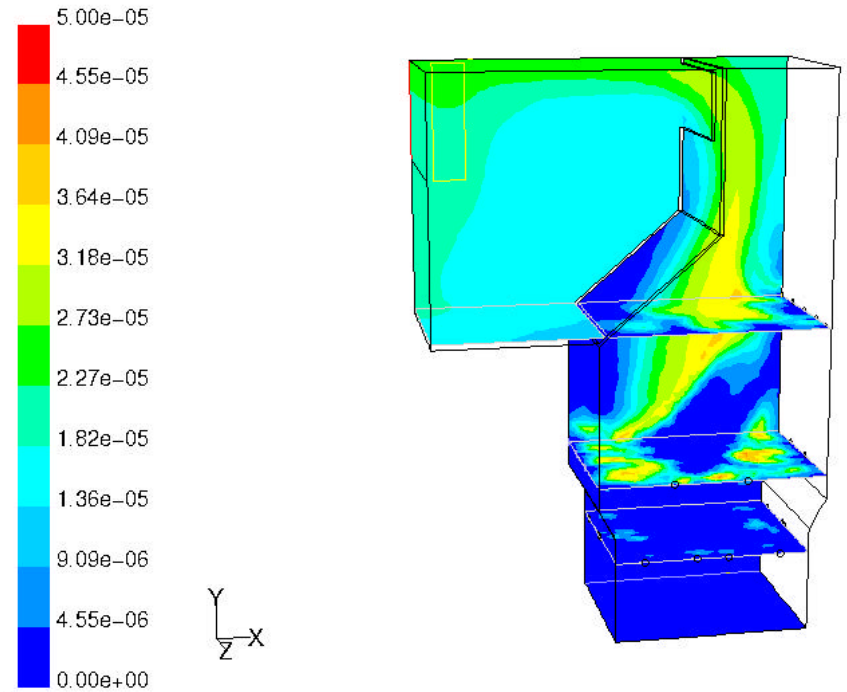
Beräkningsfall 1.4

Luftfördelning 1, primärgas 1, kokskväve som N_2, Brouwer & al.



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 15, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

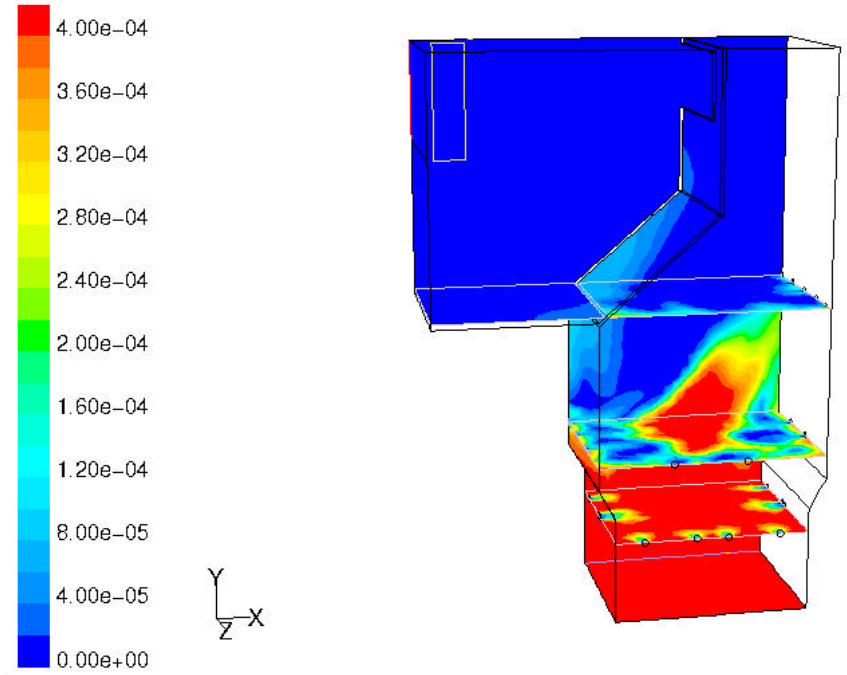


Contours of Mole fraction of no

Jan 15, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

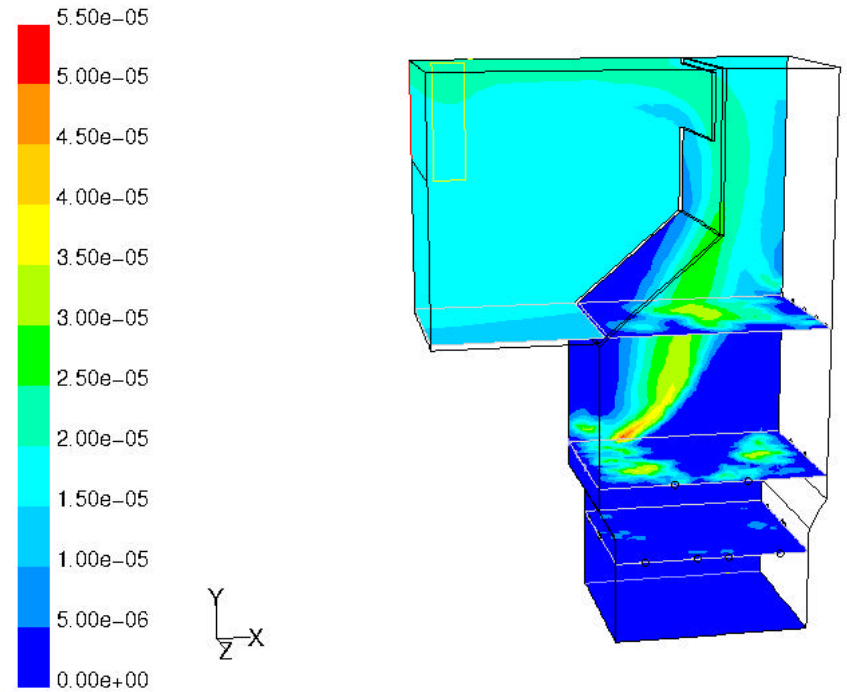
Beräkningsfall 1.4b

Luftfördelning 1, primärgas 1, kokskväve som N_2, kinetiskt begränsad Brouwer & al.



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 16, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

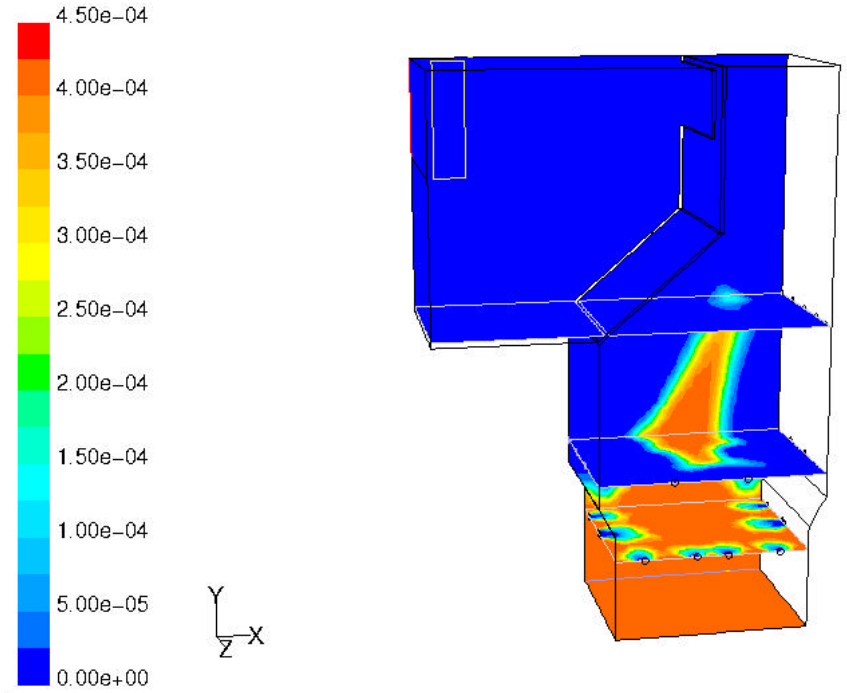


Contours of Mole fraction of no

Jan 16, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

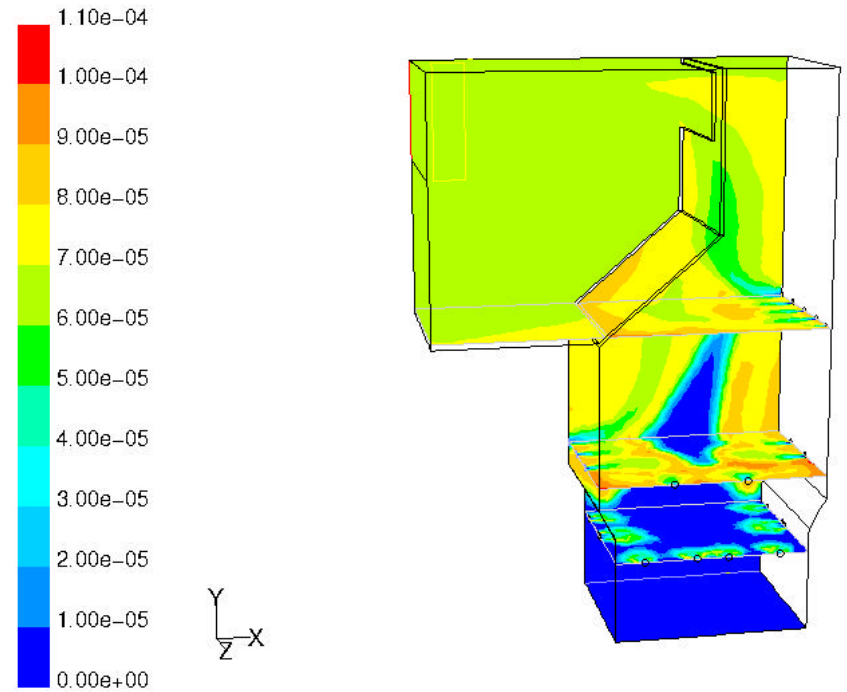
Beräkningsfall 2.1

Luftfördelning 2, primärgas 1, kokskväve som N_2, Brink & Kilpinen



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

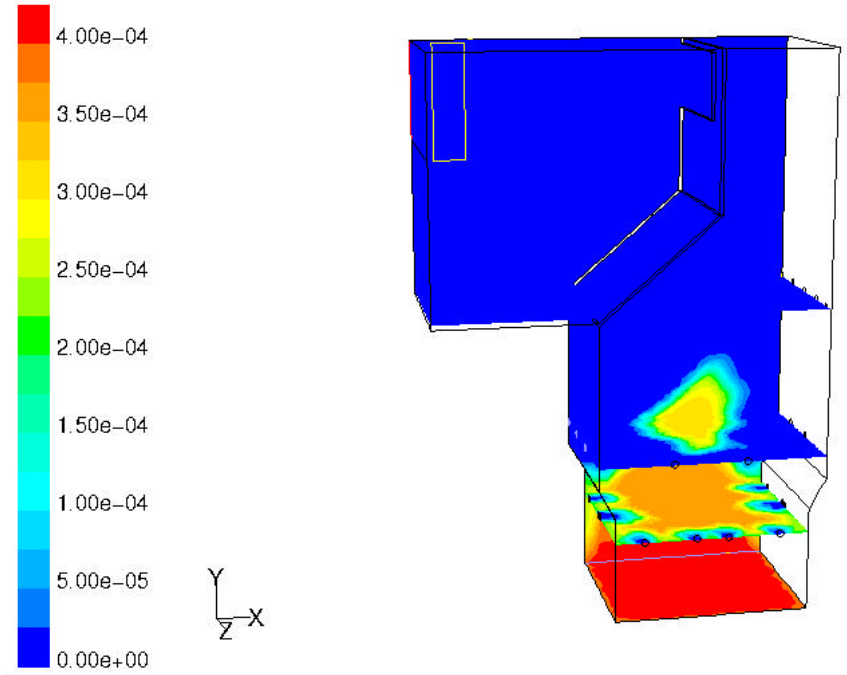


Contours of Mole fraction of no

Jan 10, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

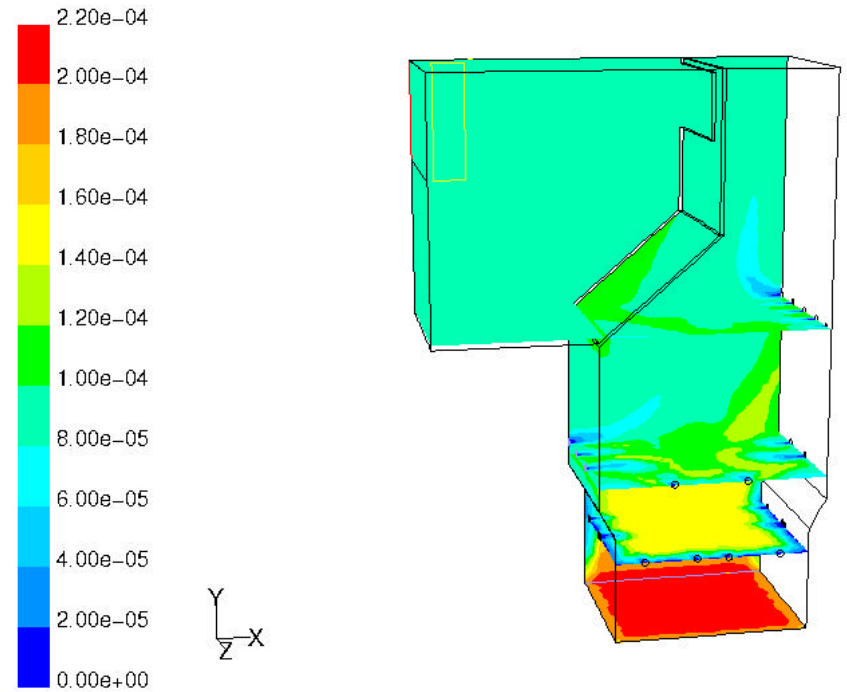
Beräkningsfall 2.2

Luftfördelning 2, primärgas 1, kokskväve som NO, Brink & Kilpinen



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 06, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

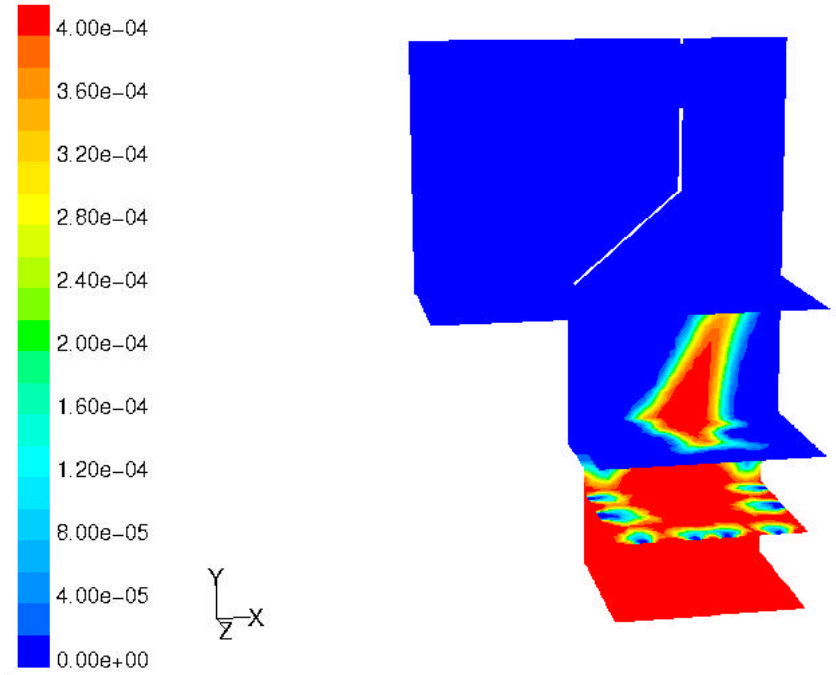


Contours of Mole fraction of no

Jan 06, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

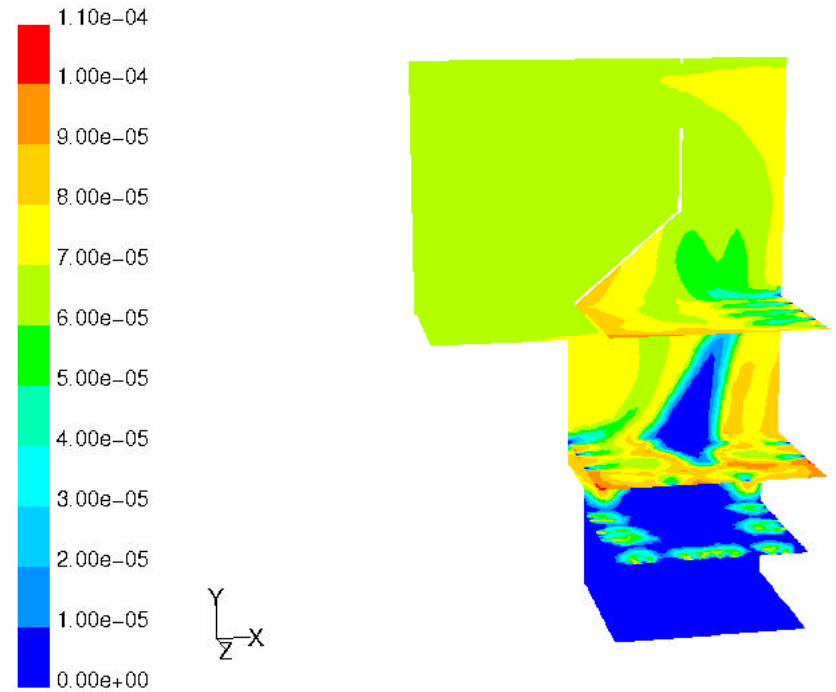
Beräkningsfall 3.1

Luftfördelning 3, primärgas 1, kokskväve som N_2, Brink & Kilpinen



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

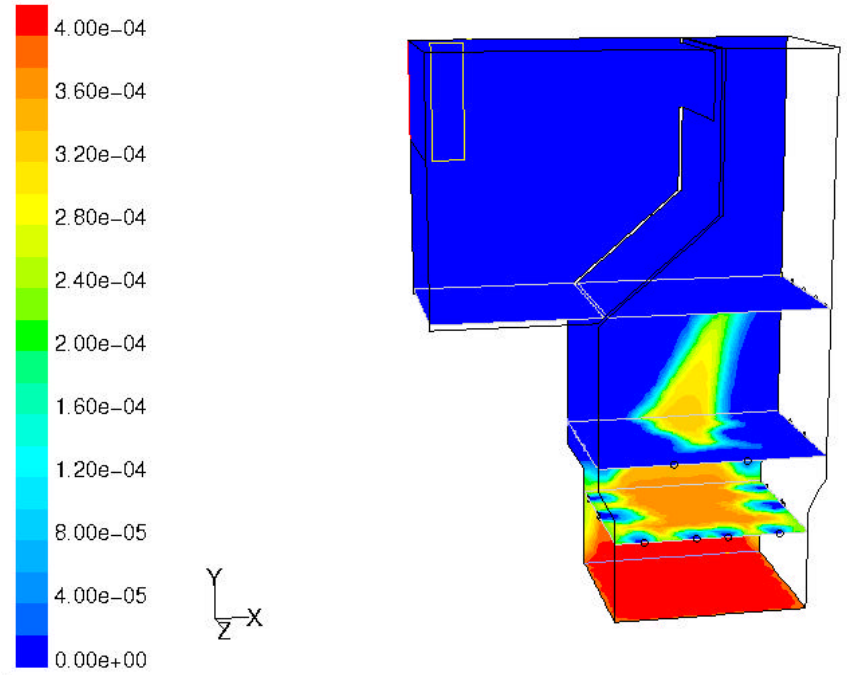


Contours of Mole fraction of no

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

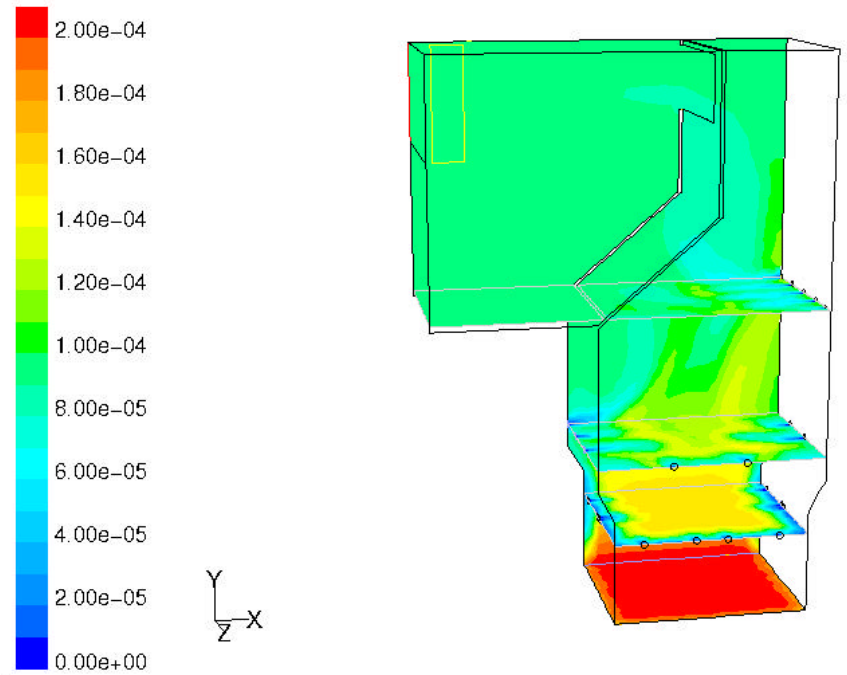
Beräkningsfall 3.2

Luftfördelning 3, primärgas 1, kokskväve som NO, Brink & Kilpinen



Contours of Mole fraction of nh3

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)



Contours of Mole fraction of no

Jan 12, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, spe9, ke)

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrierna
- Övrig Industri

Värmeforsk samarbetar med Statens Energimyndighet.

VÄRMEFORSK Service AB

101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80 ? Fax 08-677 25 35
http://www.varmeforsk.se