LUND UNIVERSITY

Renblåsning och termofores

Jensen, Lars

2011

Link to publication

Citation for published version (APA):
Jensen, L. (2011). *Renblåsning och termofores*. (TVIT; Vol. TVIT-7071). Avd Installationsteknik, LTH, Lunds universitet.

Total number of authors:
1

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Renblåsning och termofores

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2011
Rapport TVIT--11/7071

Lunds Universitet

Lunds Universitet, med nio fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 100 400 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 000 anställda och 41 000 studerande som deltar i ett 90-tal utbildningsprogram och ca 1000 fristående kurser erbjudna av 88 institutioner.

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.
Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmda hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspridning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Renblåsning och termofores

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2011
ISRN LUTVDG/TVIT--11/7071--SE(35)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 LUND

Innehållsförteckning

1	Inledning och syfte	5
2	Termofores	7
	Termoforeshastighet	7
	Uppskattning av termofores	8
	Uppskattning av temperaturgradient	9
	Jämförelse med diffusion	10
	Jämförelse med termofores och diffusion utan strömning	11
3	Beräkningsresultat för fem fall	19
4	Avslutning och slutsatser	31
	Referenser	35

1 Inledning och syfte

Regenerativ värmeväxling med rotor har ett varvtalsberoende överföringsflöde med frånluft till tilluft, vilket elimineras med ett renblåsningsflöde. Det är inte självklart att en rotor blir renblåst även om renblåsningsvolymen för en rotorkanal är större än rotorkanalens volym.

Renblåsning har undersökts på ett flertal sätt och arbetet finns dokumenterat i följande arbetsrapporter i 7000-serien, vilka kommenteras kortfattat:

7063 Termisk mätning av rotorläckage

> Rapporten redovisar en metod att med temperaturmätningar kring en stillastående rotor bestämma rotorläckage mellan uteluft/tilluftsida och frånluft/avluftsida. Renblåsningsflödet medräknas i detta läckage. Svårigheten är att mäta temperaturer efter rotor på uteluft/tilluftsida och frånluft/avluftsida.

7065 Regenerativ värmeväxling och renblåsning

> Renblåsningens funktion beräknas för en ideal laminär strömningsprofil utan hänsyn till diffusion. Överföringen blir omvänt proportionell mot renblåsningstiden för tider större än halva den nominella renblåsningstiden. Slutsatsen är att det går inte att renblåsa en rotor under de givna förutsättningarna.

7066 Regenerativ värmeväxling utan renblåsning

> Utan en renblåsningssektor kan överföringsflödet tolkas som återluft, vilket kan kompenseras med ett variabelt tilluftsflöde lika med det nominella uteluftsflödet utökat med överföringsflödet. Denna lösning ger en mindre energibesparing jämfört med ett fall med konstant renblåsningsflöde alltid större än det varvtalsberoende överföringsflödet.
>
> En delstudie visar att det kan vara ekonomiskt att minska högsta varvtal och därmed också högsta temperaturverkningsgrad, eftersom elkostnaden för fläktdrift minskar mer är värmekostnaden för tillsatsvärme ökar.

7069 Renblåsning med diffusion

> Renblåsningens funktion beräknas för en ideal laminär strömningsprofil med hänsyn till diffusion. Diffusionskonstanten är beroende av partikelstorleken. Resultatet är att överföringen blir försumbar för partikeldiametrar < 0.01 μm och därmed också alla gaser samt att överföringen kvarstår för partikelstorlekar > 0.1 μm.

7070 Renblåsning och rotorkanalform

En rotorkanal är inte cylindrisk utan snarare något triangulär. Detta påverkar det laminära strömningsfältet och därmed renblåsningens funktion. Fyra rotorkanaltvärsnitt undersöks. Renblåsningen försämras något jämfört med det cylindriska fallet.

Syftet med denna arbetsrapport är undersöka hur termofores påverkar renblåsningen och att därmed komplettera andra arbetsrapporter om renblåsning enligt ovan. Termofores transporterar partiklar från varmt mot kallt, vilket är tillämpligt i en rotorkanal både i uteluftssektorn och i frånluftssektorn. Detta kan kanske förbättra renblåsningens funktion.

Undersökningen begränsas och förenklas till en rotorkanal med en ideal laminär strömningsprofil för hela rotorkanalens längd utan någon övergångszon i början och utan diffusion. Beräkningar avser alltid ett rotordjup 0.2 m, en medelhastighet om 2 m/s och en nominell renblåsningstid om 0.1 s. Reynolds tal är 200 för medellufthastighet 2 m/s, diameter 0.0015 m och kinematisk viskositet 0.000015 m^2/s för luft vid 20 °C.

Den laminära ideala strömningen medför att renblåsningen blir ofullständig utan hänsyn till partiklars diffusion. Diffusionskonstanten ökar med avtagande partikelstorleken och har beräknats enligt Brown (1993). En genomräkning av den laminära renblåsningen utökad med diffusion visar att effekten är försumbar för partikelstorlekarna 1 och 0.1 µm samt märkbar för partikelstorlek 0.01 µm samt ytterst påtaglig för partikelstorlek 0.001 µm.

Tabell 1.1 Föroreningsnivå i rotor efter renblåsningstid *t*, partikelstorlek och diameter *d* mm.

d mm	*t* s	laminär	1 µm	0.1 µm	0.01 µm	0.001 µm
2	0.05	0.500	0.500	0.500	0.501	0.501
2	0.10	0.250	0.250	0.250	0.247	0.110
2	0.20	0.125	0.123	0.123	0.104	0.000
2	0.30	0.083	0.082	0.081	0.042	0.000

Slutsatsen är att diffusion förbättrar renblåsningen för mindre partiklar och gaser, men inte större partiklar. Termofores kan något förenklat anses vara oberoende av partikelstorlek och kan därför vara en möjlighet att förbättra renblåsningen för större partiklar.

2 Termofores

Termofores innebär att partiklar i luft rör sig från varmt mot kallt. Gaserna molekylrörelser har högre rörelseenergi på den varma sidan än på den kalla sidan, vilket medför att en partikel förs mot den kalla sidan på grund av den tryckskillnad som finns mellan partikelns sida som vetter mot den varma sidan och den sida som vetter mot den kalla sidan.

Denna tryckpåverkan bestäms lokalt till ett närområde, som begränsas av gasmolekylernas medelväglängd. Detta innebär att temperaturgradienten *dT/dr* skall beräknas lokalt och inte globalt om inte linjära förhållanden råder.

Exempel på termofores kan ses som olika former av nersmutsning av ytor kallare än omgivningen, där nersmutsningen är anhopningar av partiklar. Vanliga exempel är innerytor till ytterväggar och särskilt hörn mellan två ytterväggar och eventuellt ett yttertak. Lokala köldbryggor som spik och skruv i en yttervägg eller i ett yttertak blir också nersmutsade på grund av termofores. Andra exempel kan vara vägg- eller takytor över en värmekälla av något slag såsom en radiator eller en väggmonterad belysningsarmatur. Sotbeläggning i pannor är ett annat exempel.

Termofores innebär att renblåsning av en rotor underlättas, eftersom rotorkanalen och frånluften i rotorkanalen är varmare än uteluften när renblåsningen påbörjas. Frånluftens partiklar rör sig mot rotorkanalens mittlinje som är bättre genomventilerat med kallare uteluft

Det finns även termofores när frånluften genomblåser en rotorkanal, vilket innebär en motsatt effekt nämligen att det sker en ökning av föroreningsnivå i rotorkanalens ytterområde med den kallare rotorkanalytan. Detta innebär att partikelnivån blir högre nära rotorytan efter en halvperiod med frånluft än i själva frånluften. Utgångsläget för renblåsningen försämras på detta sätt.

Resultatet kan därför sammantaget bli plus minus noll eller rent av sämre. Termoforesen kan därför försämra renblåsningens funktion.

Termoforeshastighet

Termoforesens storlek eller hastighet v_T i koordinaten r är direkt proportionell mot temperaturgradienten dT/dr K/m i koordinat r och en konstant a m^2/Ks, vilket kan skrivas som:

$$v_T = - a \, dT/dr \qquad \text{(m/s)} \qquad (2.1)$$

Ett värde på parametern *a* hämtat från Vincent (1995) sidan 87 Figur 4.9 är högst $2 \cdot 10^{-8}$ m^2/Ks, vilket kan tyckas vara försumbart. Temperaturgradienten kan dock vara hög till exempel 1 K på 1 mm ger $dT/dr = 1000$ K/m. Referensen ovan visar att parameter *a* avtar med ökande partikelstorlek > 0.1 µm och kan uppskattas till minst 10^{-8} för partikelstorlek 1 µm. Partikelmaterialets densitet påverkar parametern *a* något.

Uppskattning av termofores

Hastigheten för en partikel *v* m/s med diameter *d* m och utsatt för en temperaturgradient *dT/dr* K/m skall uppskattas. Luftens temperatur tolkas som tryck och en temperaturskillnad som en tryckskillnad för en givet avstånd. Den drivande tryckskillnaden Δp kan nu skrivas som:

$$\Delta p / p = \Delta T / T \qquad (-) \qquad (2.2)$$

Avståndet sätts lika med medelväglängden *s* m för luftens gasmolekyler som för normal atmosfär är omkring 60 nm. Sambandet (2.2) kan under förutsättning att temperaturgradienten är konstant i det aktuella området skrivas om till:

$$\Delta p / p = s\, dT/dr / \mathrm{T} \qquad (-) \qquad (2.3)$$

Insättning av absoluttryck 10^5 Pa, dito temperatur 300 K och medelavstånd 60 nm i (2.3) ger efter förenkling sambandet:

$$\Delta p = 2 \cdot 10^{-5}\, dT/dr \qquad (-) \qquad (2.4)$$

Drivkraften på partiklen och friktionskraften för laminär strömning förbi partiklen, vilka balanserar varandra, kan i sin tur skrivas som:

$$F = \pi d^2 \Delta p / 4 \qquad (\mathrm{N}) \qquad (2.5)$$

$$F = 3 \pi d \eta v \qquad (\mathrm{N}) \qquad (2.6)$$

där η är luftens dynamiska viskositet $18 \cdot 10^{-6}$ kg/ms. Kravet för laminär strömning är att Reynolds tal < 1, vilket är uppfyllt om $d\, v < 15 \cdot 10^{-6}$ och för partikelstorleken 1 µm blir hastighetskravet v < 15 m/s. Den sökta hastigheten kan nu lösas ut på formen:

$$v_T = d \Delta p / 12 \qquad (\mathrm{m/s}) \qquad (2.7)$$

Uttrycket visar att hastigheten *v* ökar med partikelstorleken *d* dock med förutsättningen att partikeln skall inte var mycket större än gasmolekylernas medelväglängd *s*. Eliminering av tryckskillnaden Δp med (2.4) gör att (2.7) kan skrivas som följer:

$$v_T = 0.1\, d\, dT/dr \qquad (\mathrm{m/s}) \qquad (2.8)$$

Uttrycken (2.1) och (2.8) visar att parametern *a* beror på partikelstorleken och siffermässigt blir resultatet för storlekarna 1, 0.1 och 0.01 µm 10^{-7}, 10^{-8} respektive 10^{-9}, vilket är samma storleksordning för parametern a som nämnts tidigare och i Vincent (1995).

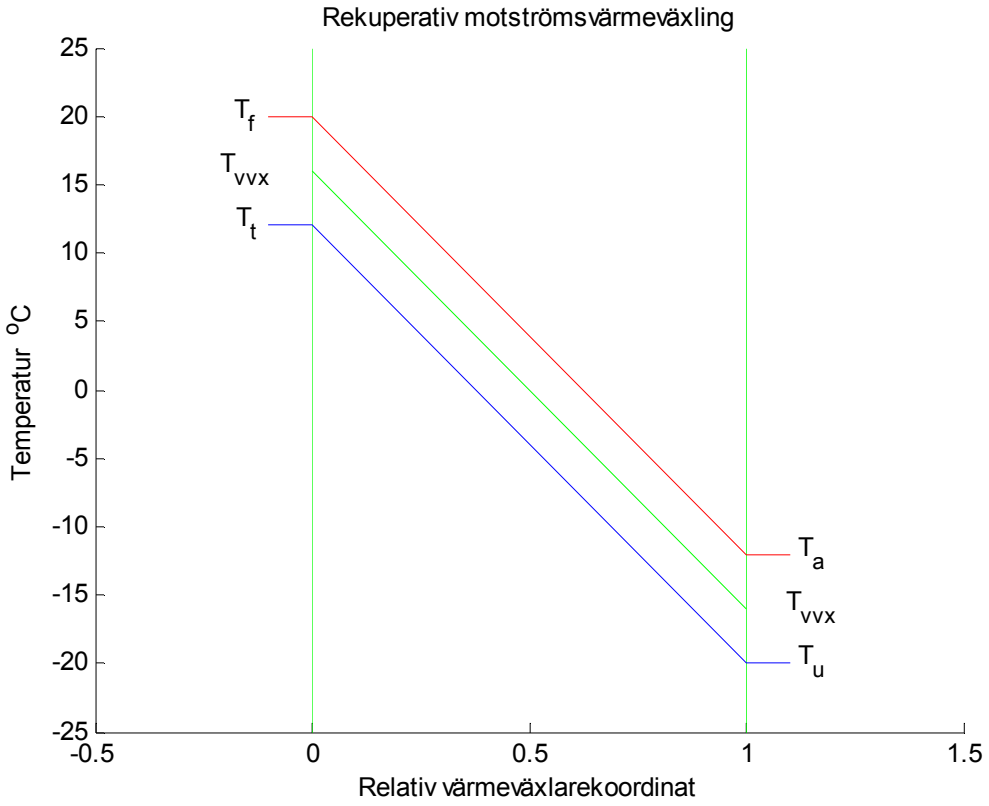
Termoforeshastigheten är oftast låg och det kräver en lång uppehållstid för att partikeln skall föras en mindre sträcka. Ett sifferexempel enligt (2.8) med temperaturgradienten 10^4 K/m ger hastigheten $2 \cdot 10^{-4}$ m/s eller 0.2 mm/s. Denna hastighet kan vara tillräcklig om avståndet är kort och uppehållstiden är tillräckligt lång.

Skattning av temperaturgradienten

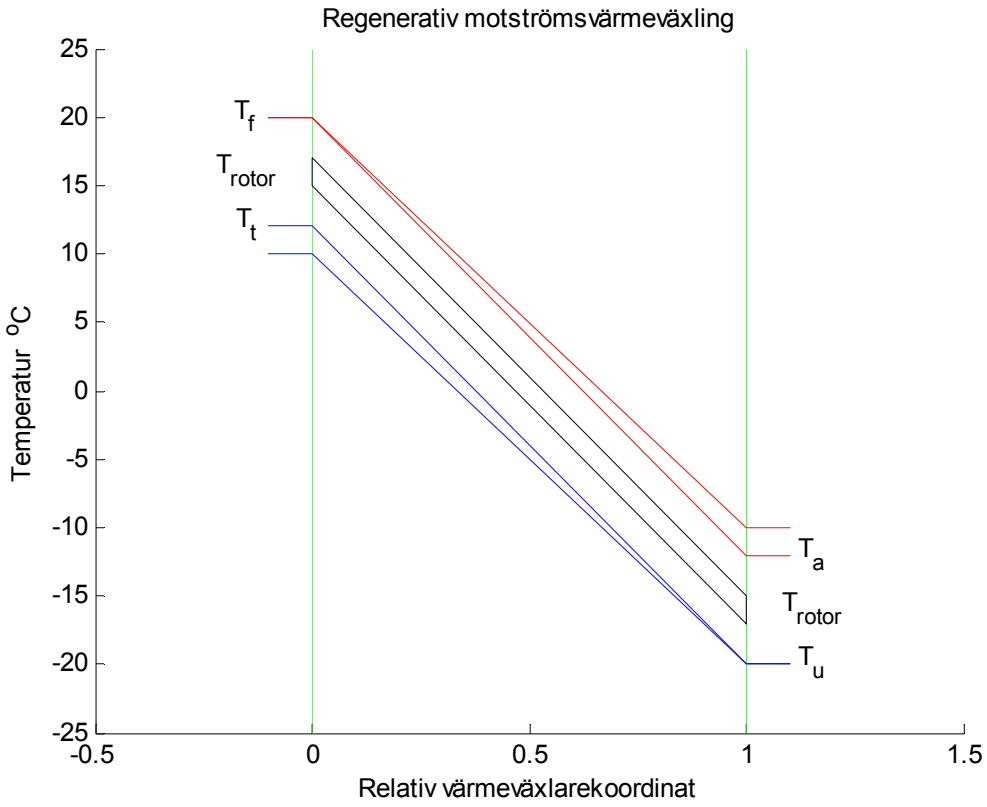
Den temperaturgradienten inom rotorluften kan skattas med temperaturskillnaden mellan rotor och rotorluften i medeltal för ett givet axiellt läge dividerat med rotorkanalens radie. Den relativa temperaturskillnaden mellan uteluft/tilluft och frånluft/avluft för en rekuperativ värmeväxlare med lika flöden kan anges som $1 - \eta_T$ och den sökta skillnaden mellan rotor och rotorluft blir därför $(1 - \eta_T) / 2$, vilket framgår av olika temperaturkurvorna i Figur 2.1. Den drivande temperaturskillnaden i en rotorkanal blir långt mindre än temperaturskillnaden mellan frånluft och uteluft samt kan beräknas enligt (2.9) nedan.

$$\Delta T = (T_f - T_u) (1 - \eta_T) / 2 \qquad \text{(K)} \qquad (2.9)$$

Temperaturförhållanden i en regenerativ värmeväxlare med högt varvtal är ganska lika de för en rekuperativ värmeväxlare. Skillnaden är att temperaturerna för uteluft/tilluft, frånluft/avluft och rotormaterial ändras något med tiden, vilket visas förenklat i Figur 2.2.



Figur 2.1 Temperaturprofil vid rekuperativ motströmsvärmeväxling med lika flöden.



Figur 2.2 Temperaturvariation vid regenerativ motströmsvärmeväxling för lika flöden.

Jämförelse med diffusion

En jämförelse med diffusion över avståndet *dr* m och diffusionskonstanten *D* m^2/s omräknad till en motsvarande hastighet v_D fås med:

$$v_D = D / dr \qquad \text{(m/s)} \qquad (2.10)$$

Diffusionshastigheten v_D kan beräknas till följande för avståndet 1 mm och för de tre partikelstorlekarna 1, 0.1 och 0.01 µm till $0.27 \cdot 10^{-7}$, $0.69 \cdot 10^{-6}$ respektive $0.53 \cdot 10^{-4}$ m/s. Diffusionskonstanten för en partikel har beräknats med referensen Brown (1993).

Virus har en diameter från 0.001 till 0.1 µm och kan för den under gränsen jämställas gaser omkring 10^{-5} m^2/s. Bakterier har en diameter från 0.1 till 10 µm och kan därför inte jämställas med gaser.

Siffrorna visar att de två hastigheterna för termofores och diffusion kan mycket väl vara lika stora. En viktig anmärkning är att termofores är beroende av en temperaturgradient, medan diffusion är beroende av en föroreningsskillnad.

Jämförelse med termofores och diffusion utan strömning

Partikelnivån för ett endimensionellt fall med längden 1 mm och en temperaturskillnad om 10 K skall undersökas för enbart termofores, enbart diffusion och sammantaget termofores och diffusion. Ingen strömning sker.

Termofores antas vara oberoende av partikelstorleken och parametern a i (2.1) är $2 \cdot 10^{-8}$ m^2/Ks. Resultat redovisas på samma sätt i Figur 2.3-2.12 med tidskurvor för partikelnivån efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s samt för olika starttillstånd nämligen konstant partikelnivå med det relativa värdet 1.0 och en stegformad partikelnivå till hälften 0 respektive 2. De minsta valda tiderna motsvarar tiden för renblåsning och den längre om 3 s en halvperiod för ett varvtal om 10 varv/min.

Enbart termofores redovisas i Figur 2.3 och 2.4 för de två startfallen, konstant nivå och stegformad nivå. Termoforeshastigheten v_T med indata och (2.1) kan beräknas till $2 \cdot 10^{-4}$ m/s eller 0.2 mm/s.

Tidskurvorna i Figur 2.3 visar att partikelnivån är 0.5 för lägena $v_T\, t$ lika med 0.02, 0.04, 0.06 0.6 mm. De rundade tidskurvorna beror på modellens utjämnande och något bristande egenskaper. Antag att för ett tidsteg dt att $v_T\, dt$ är hälften av elementlängden dx. Detta halverar partikelnivån för varje tidsteg, om partikelnivån är noll uppströms termiskt sett.. Förklaringen till denna ofullkomlighet är att partikelnivå antas vara konstant inom ett beräkningselement (fullständig omblandning råder). Det går inte att beskriva partikelnivån rätt med värdet från uppströmselementet för halva beräkningselementet och det egna värdet för den andra halvan.

Tidskurvorna i Figur 2.4 visar samma längdförskjutning som för fallen i Figur 2.3. Notera att partikelnivån axeln är begränsad till värdet 2, medan den verkliga partikelnivån är betydligt högre längst till höger.

Diffusionen har genomräknats för fyra partikelstorlekar 1000, 100, 10 och 1 nm för ett stegformat starttillstånd och resultatet redovisas i Figur 2.5-2.8 motsvarande diffusionskonstant är $0.27 \cdot 10^{-10}$, $0.69 \cdot 10^{-9}$, $0.53 \cdot 10^{-7}$ respektive $0.51 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Tidskurvorna i Figur 2.5-8 visar att utjämningen av det stegformade starttillståndet ökar med avtagande partikelstorlek eller med ökande diffusionskonstant, vilket är som förväntat. Utjämningen är betydande för 10 nm och i stort sett fullständig för 1 nm, vilket motsvarar gaser.

Sammansättning av både termofores och diffustion redovisas i Figur 2.9-12 för fallet med konstant starttillstånd. Kurvorna visar att termofores bestämmer partikelnivån för partikelstorlekarna 1000 och 100 nm samt att diffusion bestämmer partikelnivån för partikelstorleken 1 nm. Fallet 10 nm visar att termofores och diffusion har båda betydelse för partikelnivån. Detta gäller särskilt för tidskurvan för 3 s som är snarlik med en exponentiell kurva. En förklaring är diffusionshastighet och termoforeshastighet är av samma storleksordning 0.05 mm/s respektive 0.2 mm/s.

Partikelnivån *c(z)* för både diffusion med konstanten *D* och termofores med hastigheten *v* kan skrivas med följande samband på formen nedan där *da/db* skall tolkas som en derivata av *a* med avseende på *b* samt att *x* är undersökningsområdets utsträckning.

$$dc/dt = D\, d^2c/dz^2 - v\, dc/dz \qquad (-/s) \qquad (2.11)$$

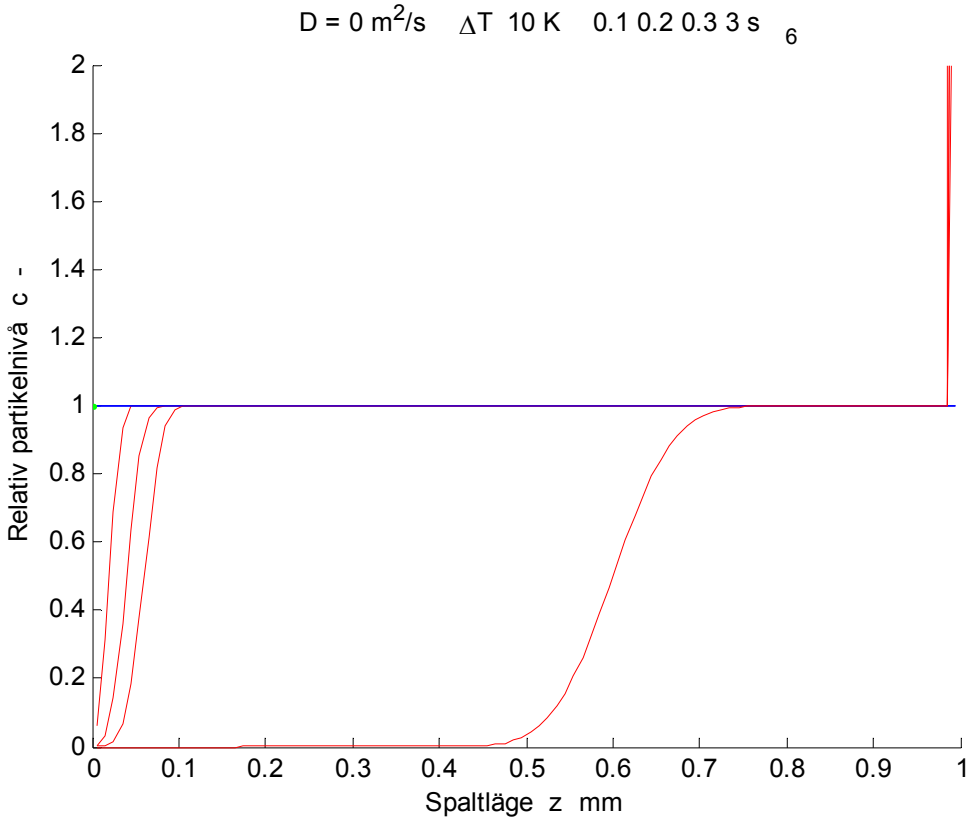
Hastigheten *v* definieras positivt i koordinatriktningen *z*.

Det går att beräkna den statiska partikelnivån för (2.11) som:

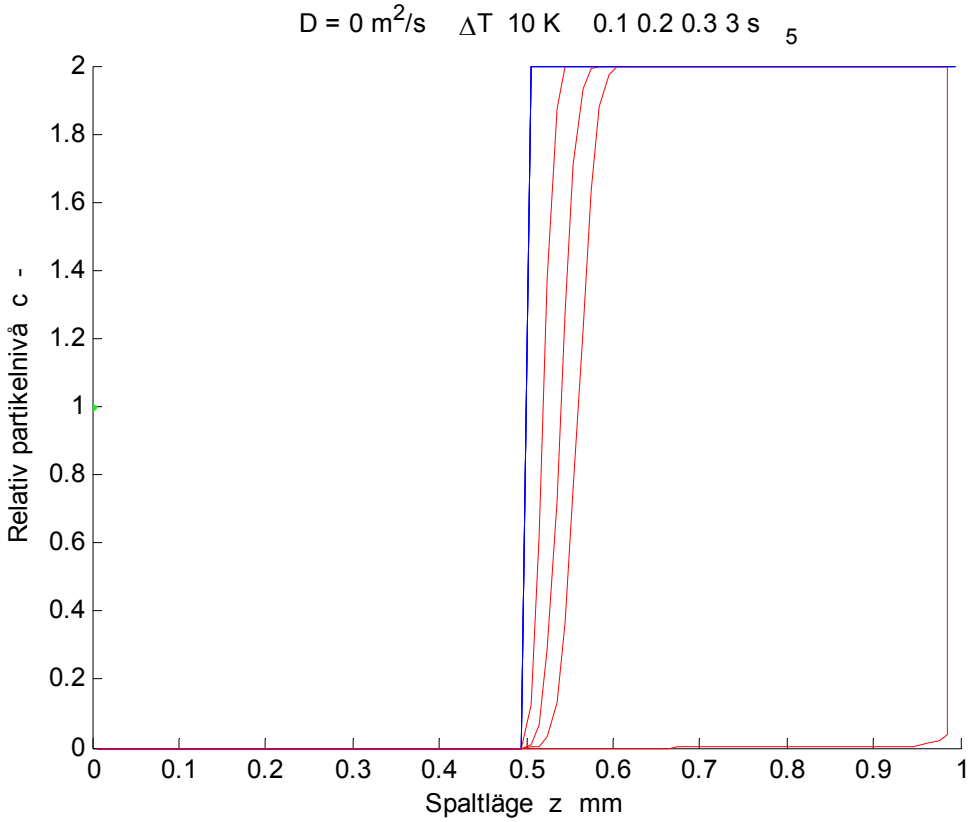
$$c(z) = (vx/D)\, e^{vz/D}/(\, e^{vx/D} - 1\,) \qquad (-) \qquad (2.12)$$

Sambandet (2.12) visar att partikelnivån påverkas av en sammansatt storhet *vx/D*. Den statiska partikelnivån redovisas i Figur 2.13 för *vx/D* = 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 och 10. Kurvorna i Figur 2.13 visar att det kan uppstå statiskt stora skillnaden i partikelnivå för olika diffusionskonstanter. Termoforeshastigheten beror betydligt mindre på partikelstorleken.

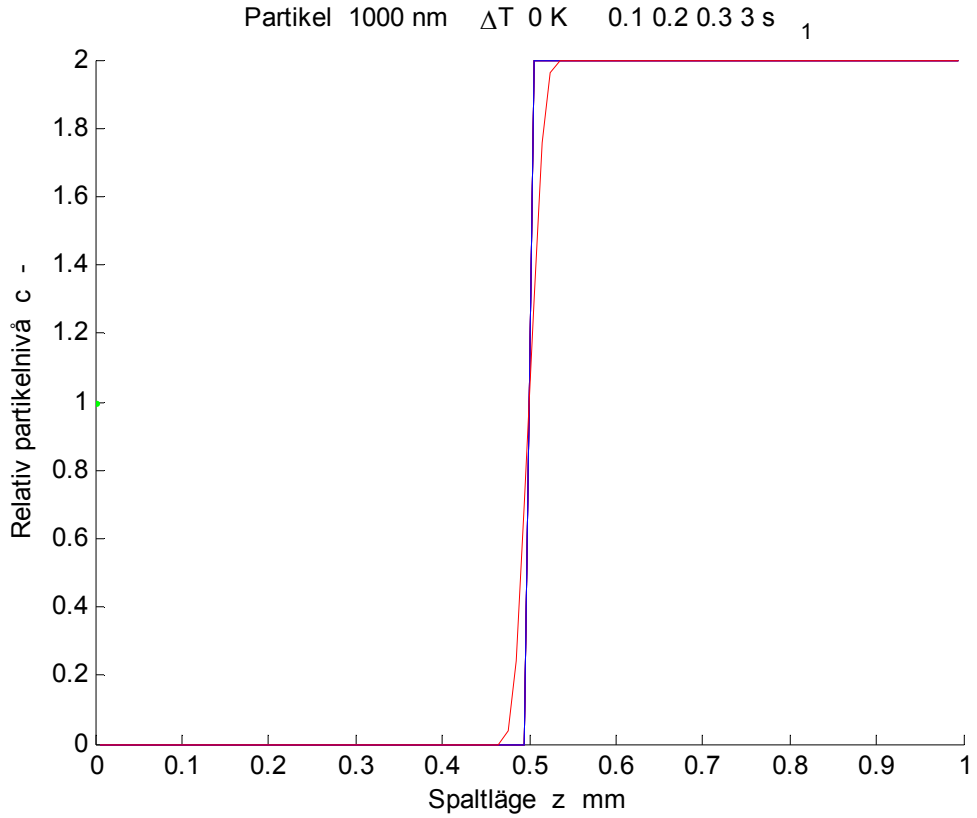
Hur snabbt partikelnivån i Figur 2.11 skall undersökas med andra tidskurvor för varje sekund och ett periodiskt förlopp där termoforeshastigheten byter riktning efter 3 s. Resultatet redovisas i Figur 2.14 för tidpunkterna 1, 2, 3, 4, 5 och 6 s efter att det periodiska förloppet uppnåtts efter start från en konstant partikelnivå. De statiska lösningarna redovisas också i Figur 2.14 och dessa visar att det periodiska förloppet ligger nära de statiska lösningarna.



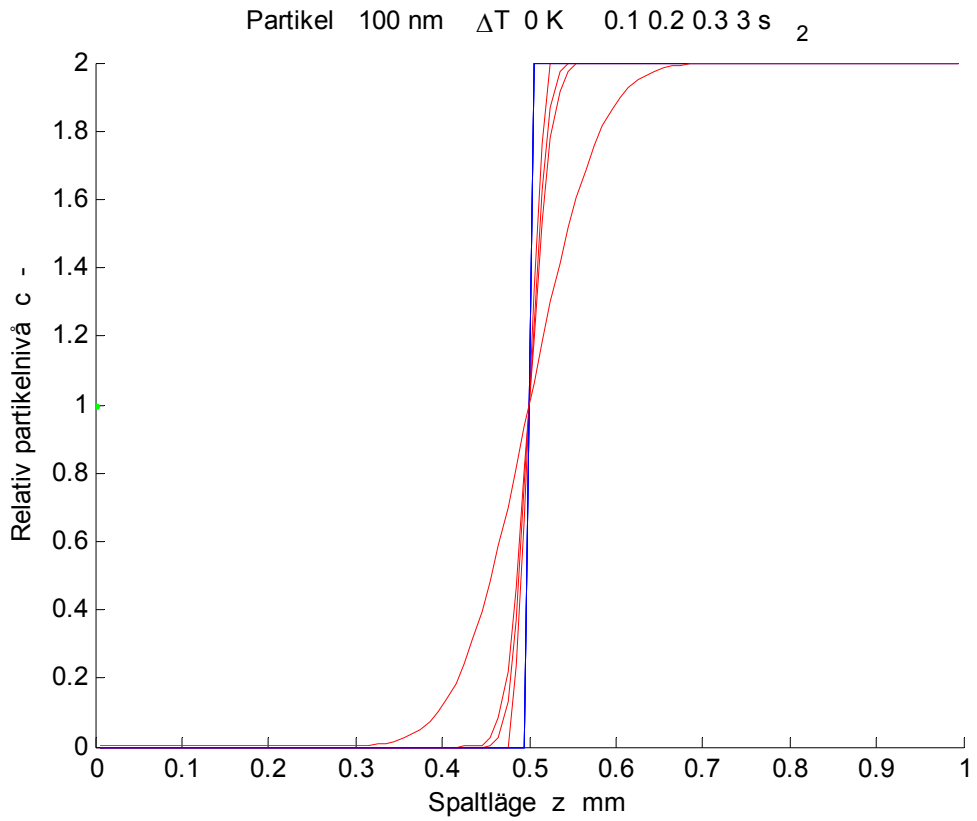
Figur 2.3 Partikelnivå utan diffusion för ΔT 10 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



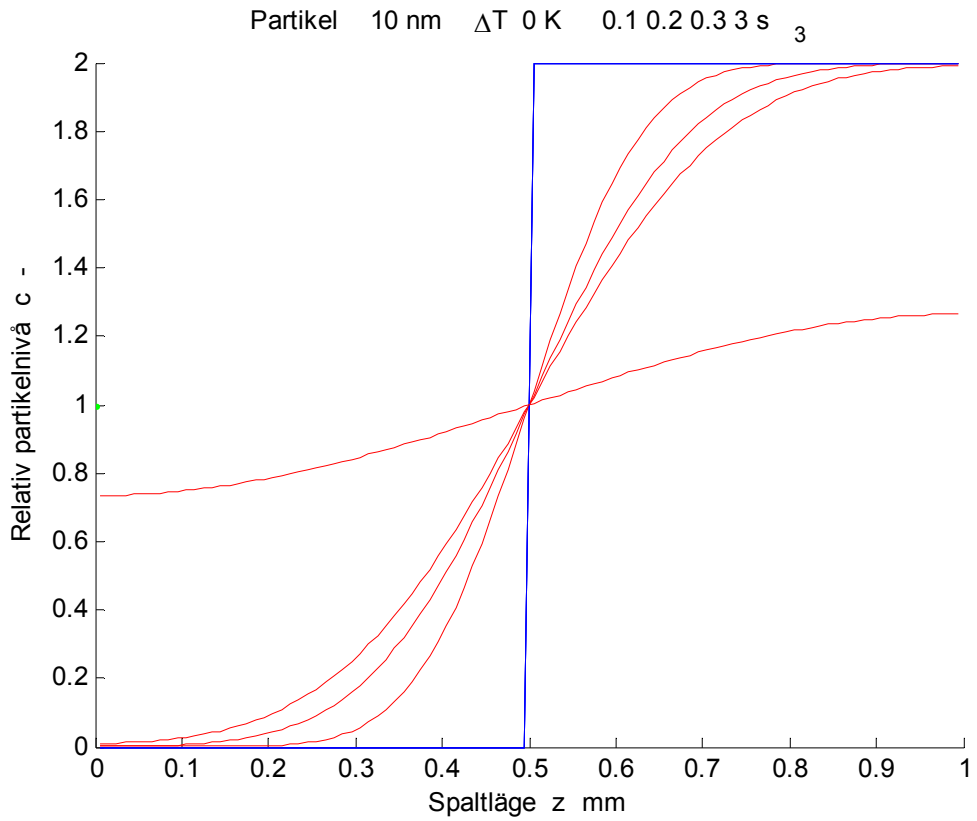
Figur 2.4 Partikelnivå utan diffusion för ΔT 10 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



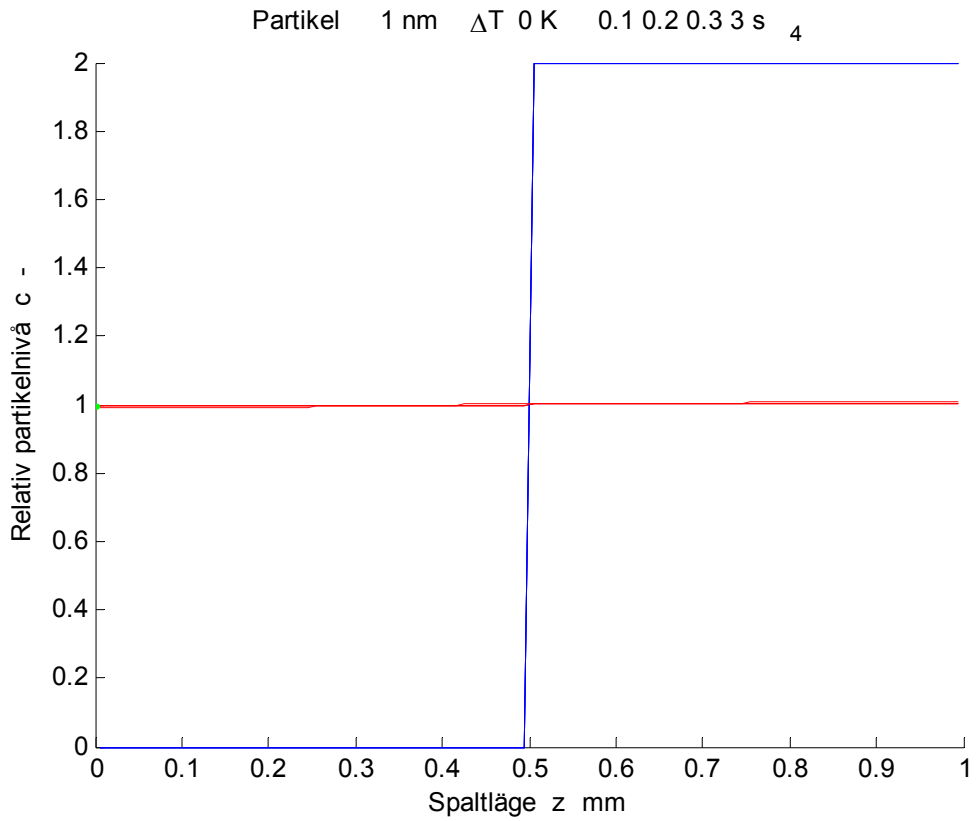
Figur 2.5 Partikelnivå för d 1000 nm och ΔT 0 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



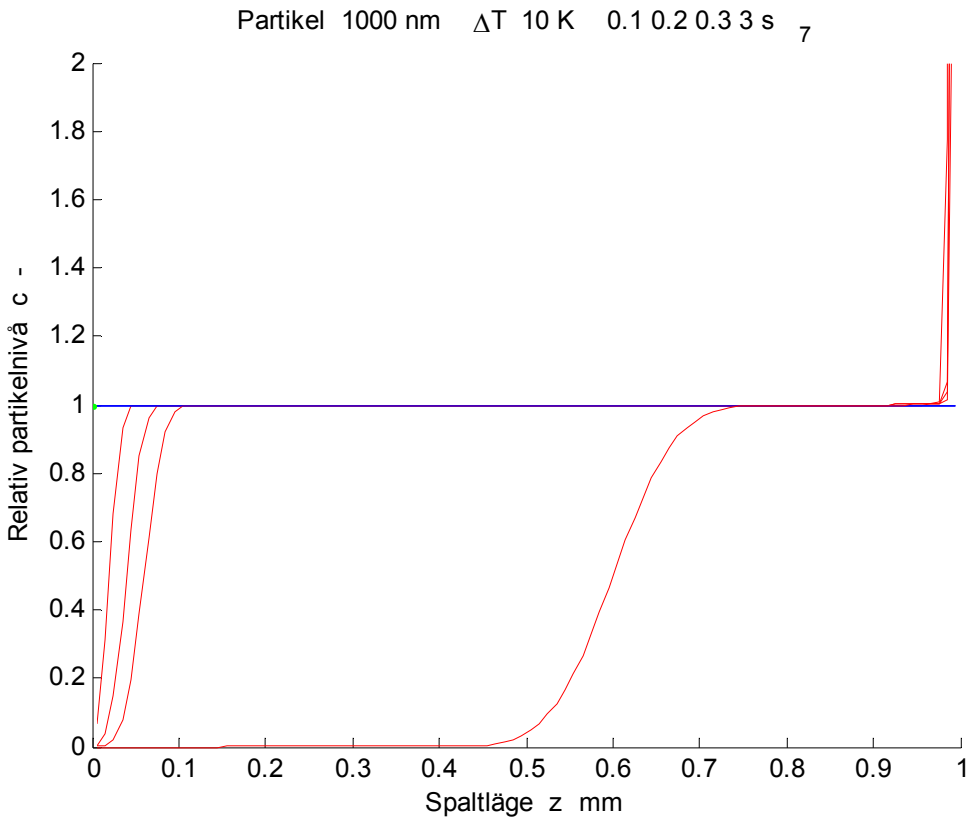
Figur 2.6 Partikelnivå för d 100 nm och ΔT 0 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



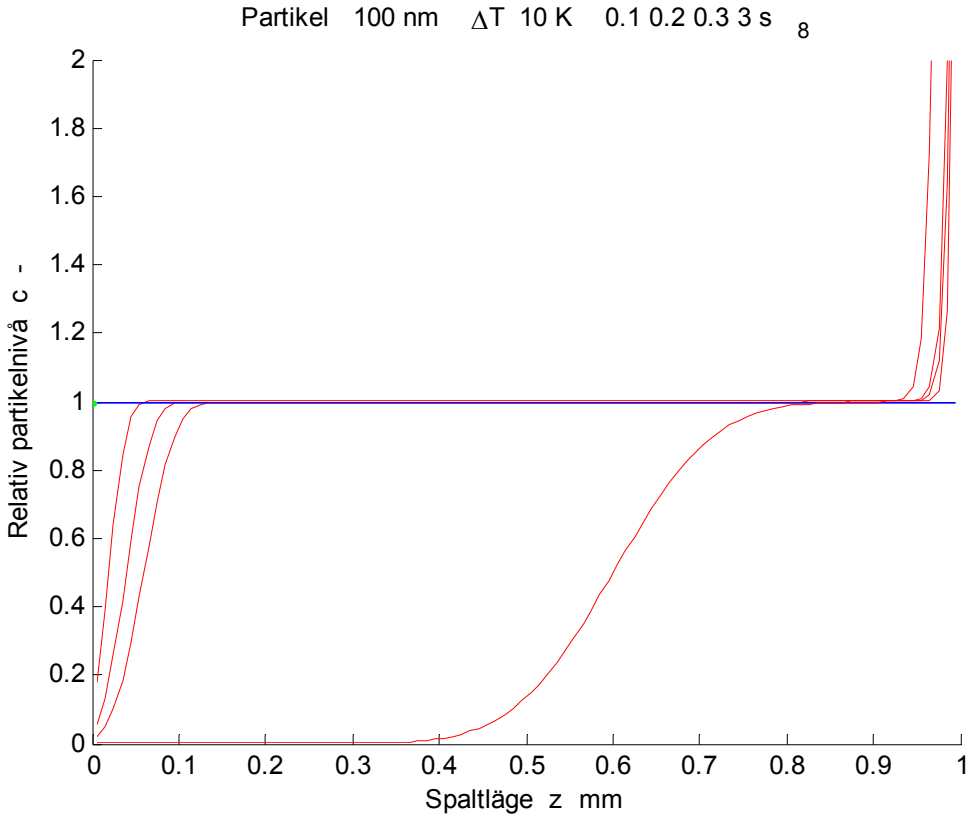
Figur 2.7 Partikelnivå för *d* 10 nm och ΔT 0 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



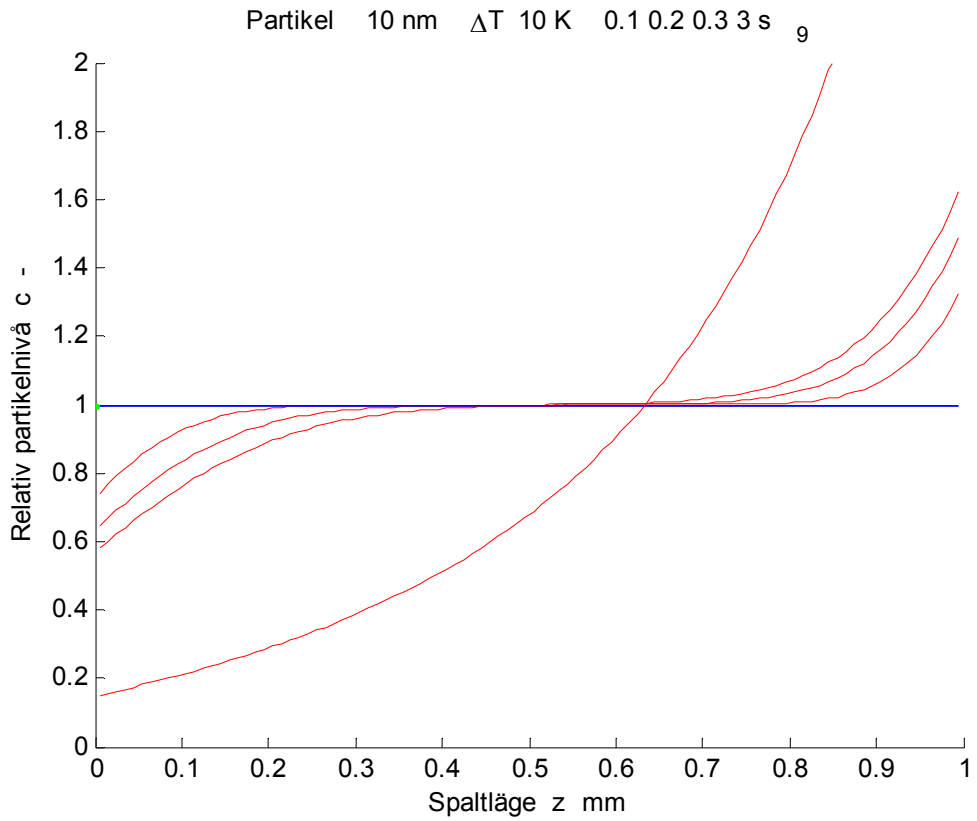
Figur 2.8 Partikelnivå för *d* 1 nm och ΔT 0 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



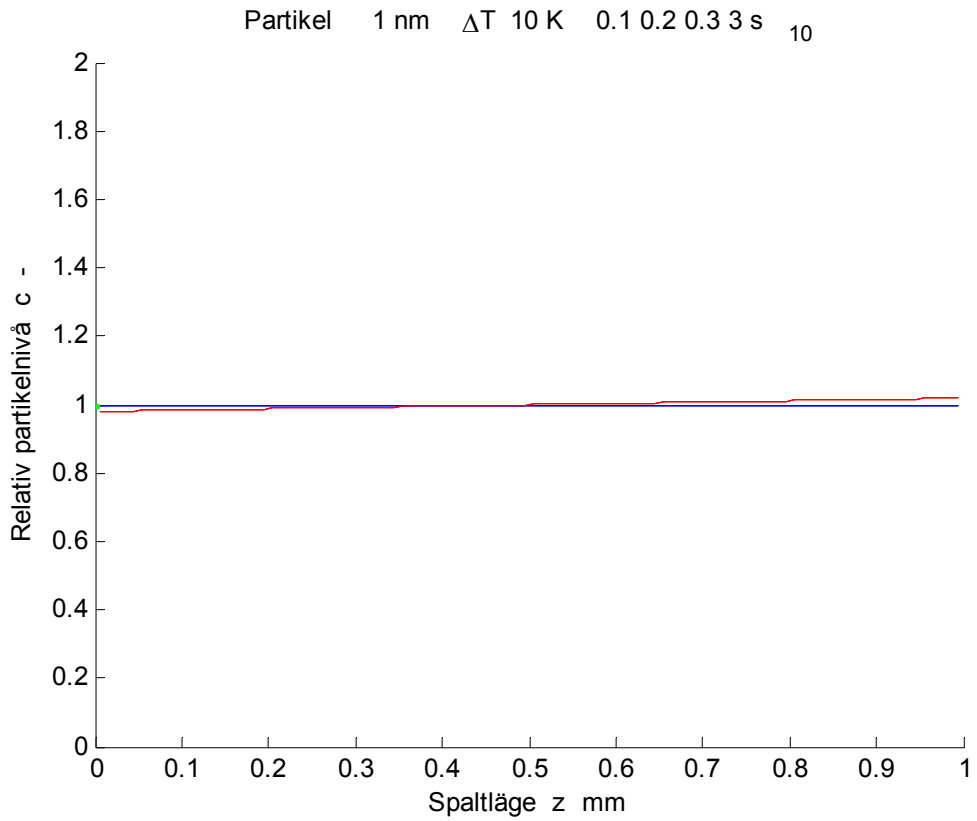
Figur 2.9 Partikelnivå för *d* 1000 nm och ΔT 10 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



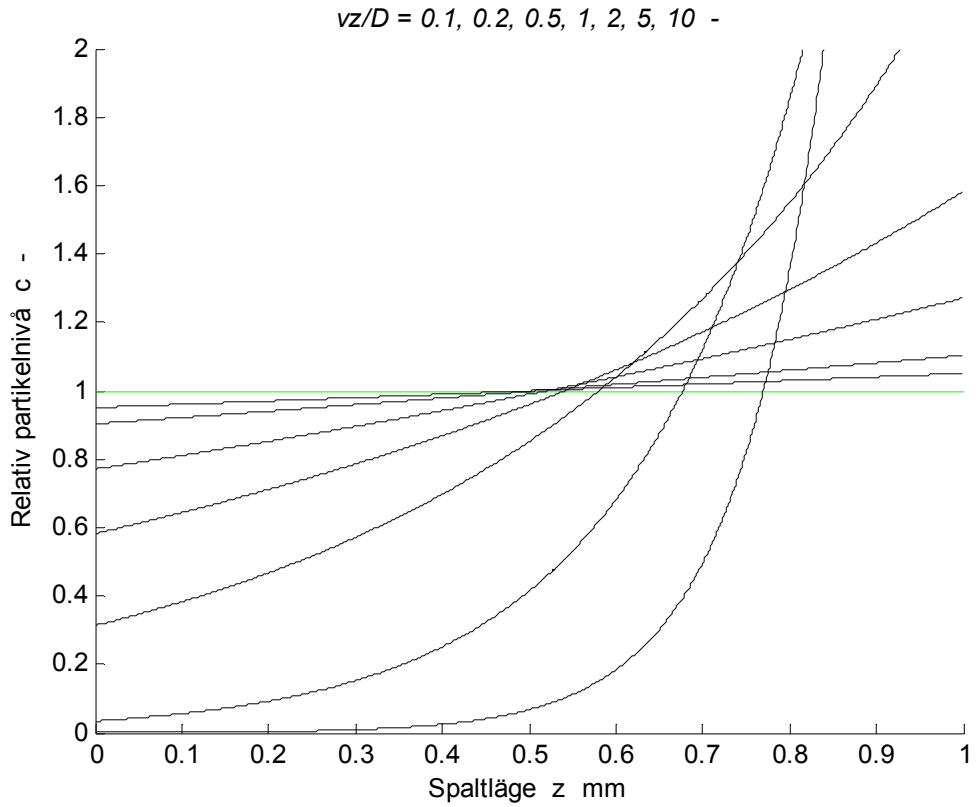
Figur 2.10 Partikelnivå för *d* 100 nm och ΔT 10 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



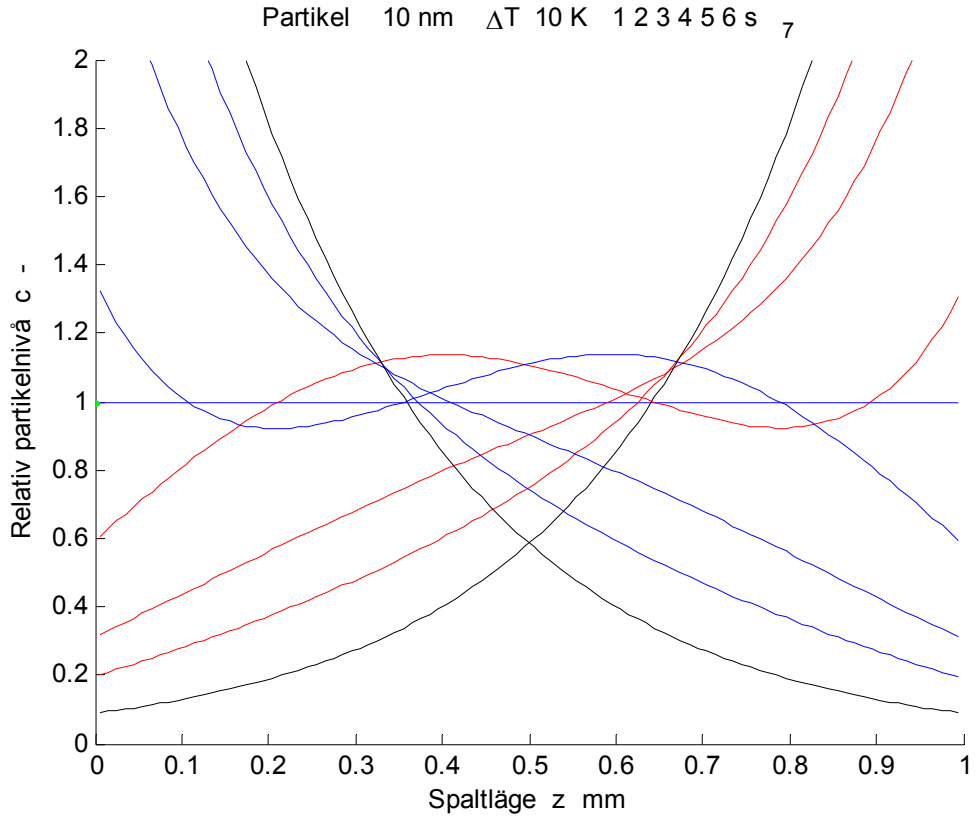
Figur 2.11 Partikelnivå för *d* 10 nm och ΔT 10 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



Figur 2.12 Partikelnivå för *d* 1 nm och ΔT 10 K efter 0.1, 0.2, 0.3 och 3 s.



Figur 2.13 Statisk partikelnivå enligt (2.12) för *vz/D* = 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 och 10.



Figur 2.14 Partikelnivå för *d* 10 nm och Δ*T* 10 K efter 1, 2, 3, 4, 5 och 6 s för periodiskt växlande termofores och även jämviktskurvor för statiska fallet enligt (2.12)

3 Beräkningsresultat för fem fall

Beräkningar av termofores har skett för fem fall enligt Tabell 3.1 nedan. Fall 1, 2 och 3 har olika drivande temperaturskillnad med värden 0, 2 respektive 4 K samt samma rotorkanaldiameter 2 mm. Fall 4, 2 och 5 har olika diameter nämligen 1, 2 respektive 3 mm. Fall 1 är ett fall utan termofores.

Beräkningar sker för en rotorkanal med längden 200 mm och medelhastigheten 2 m/s samt diameter enligt Tabell 2.1. Strömningen följer en ideal laminär strömningsprofil. Diffusion ingår inte utan endast termofores med en konstant hastighet beräknad enligt (2.1) med konstant a $2 \cdot 10^{-8}$ m^2/Ks med olika riktning beroende på vilken sektor som avses. Detta är en stor förenkling, eftersom temperaturfältet för rotorkanalluften bestämmer termoforesen. En beräkning av temperaturfältet och en därmed beroende termofores innebär att beräkningarna blir ytterst tidskrävande, eftersom beräkningsmodellen blir olinjär. Den använda beräkningsmodellen har en linjär modell för strömning och konstant termofores för uteluftssektorn och en snarlik för frånluftssektorn.

Den radiella geometrin behandlas som plan utan hänsyn till beräkningselementens kräkning och rörform. Antalet beräkningselement är 100 i axiell led och 50 i radiell led. Fall med andra antal beräkningselement behandlas i avsnitt 4. Beräkningarna omfattar två hela varv och resultatet för det andra varvet redovisas. Beräkningen startar med renblåsning av en rotorkanal med den relativa partikelnivån ett lika med frånluftens partikelnivå.

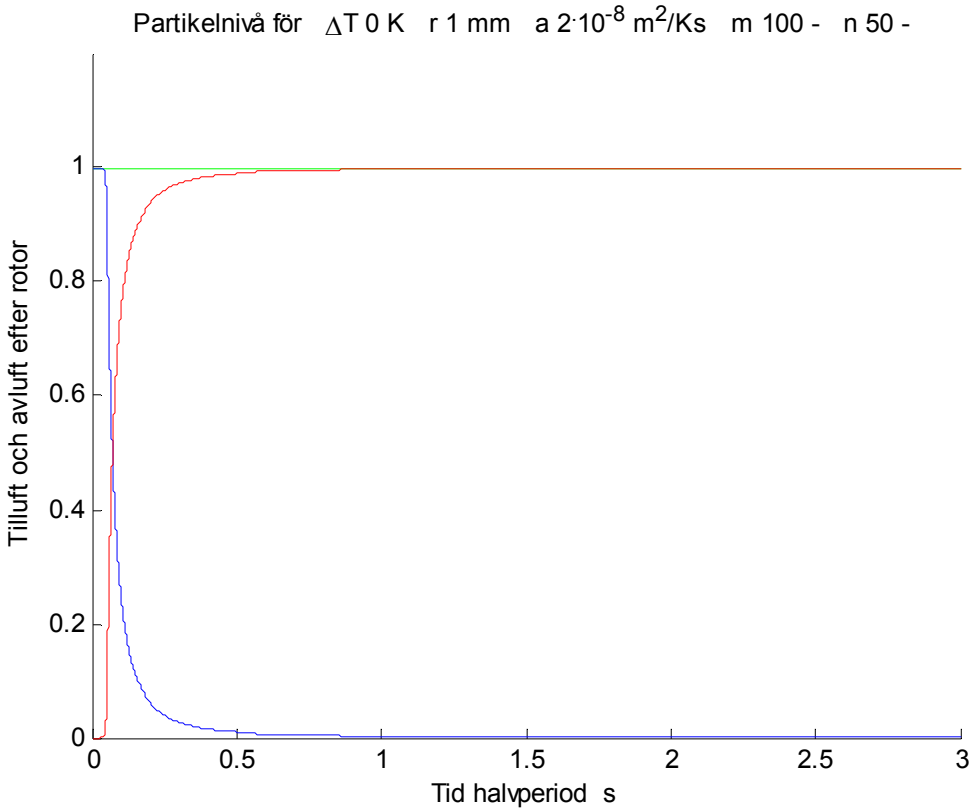
Beräkningar görs med en normerad partikelnivå som är ett för frånluften och noll för uteluften. Resultatet för de fem fallen redovisas med fyra figurer i samma uppslag med:

- partikelnivån för tilluft och avluft efter rotorn under en halvperiod
- partikelnivå för uteluft och frånluft i rotorn under en halvperiod
- dito i axiell led för tidpunkterna 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s
- dito i radiell led för tidpunkterna 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s

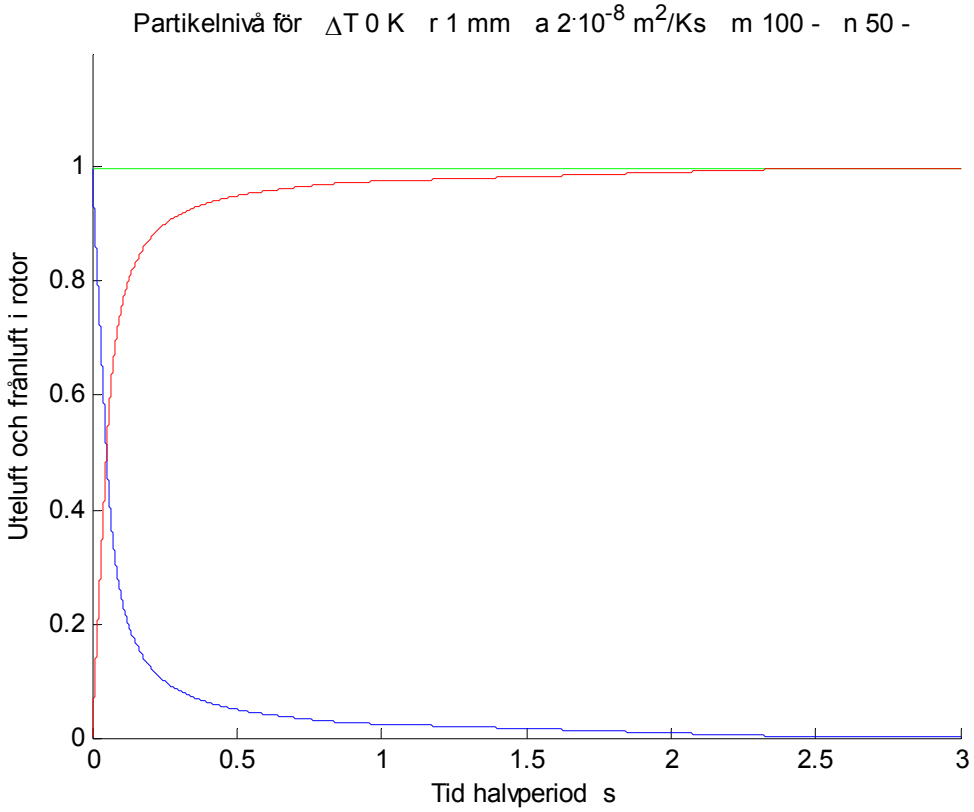
Tidslinjerna för den relativa partikelnivån i axiell eller radiell led samt för uteluftssektor och frånluftssektor ligger närmast varandra efter 0.1 s och längst från varandra efter 3 s med partikelnivåer nära noll och ett.

Tabell 2.1 Indata för beräkningsfall, termoforeshastighet och figurreferenser

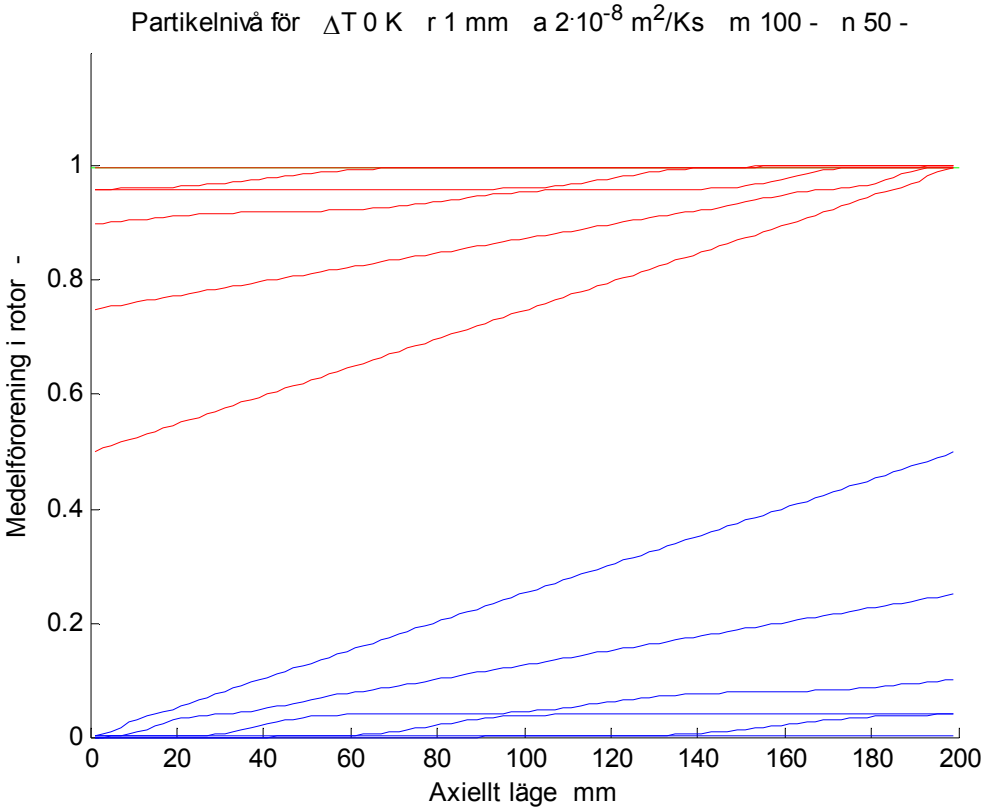
fall	ΔT K	d mm	v_T mm/s	Figur
1	0	2	0.000	3.1-4
2	2	2	0.040	3.5-8
3	4	2	0.080	3.9-12
4	2	1	0.080	3.13-16
5	2	3	0.027	3.17-20



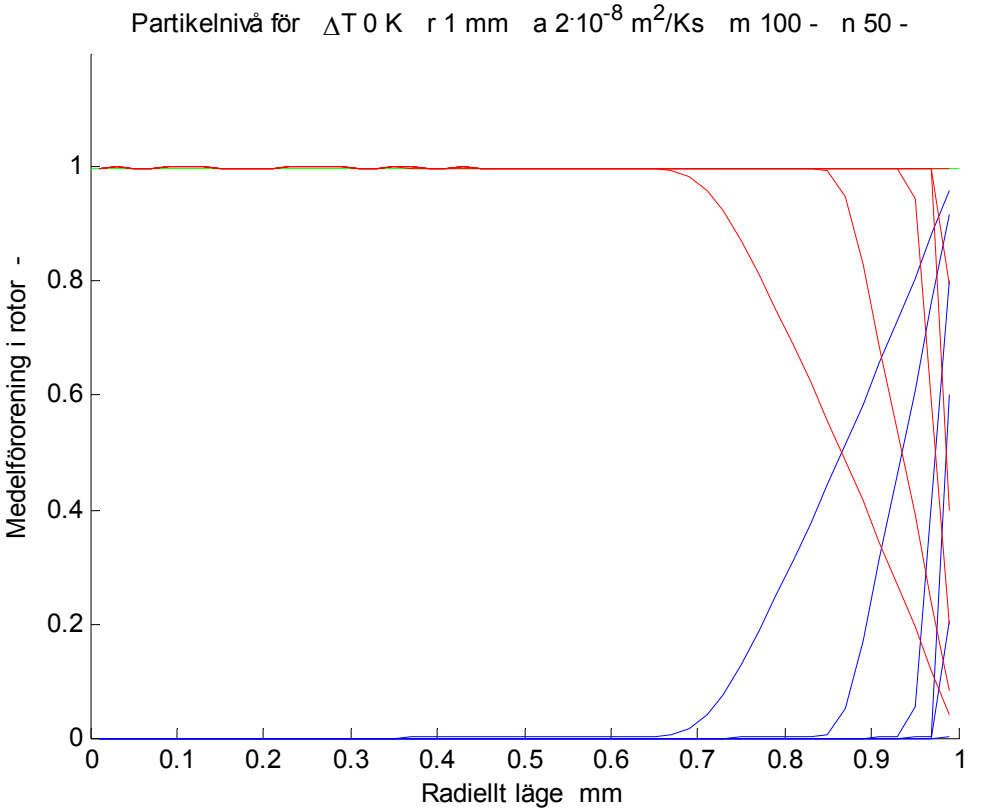
Figur 3.1 Partikelnivå för tilluft och avluft efter rotor under en halvperiod för fall 1.



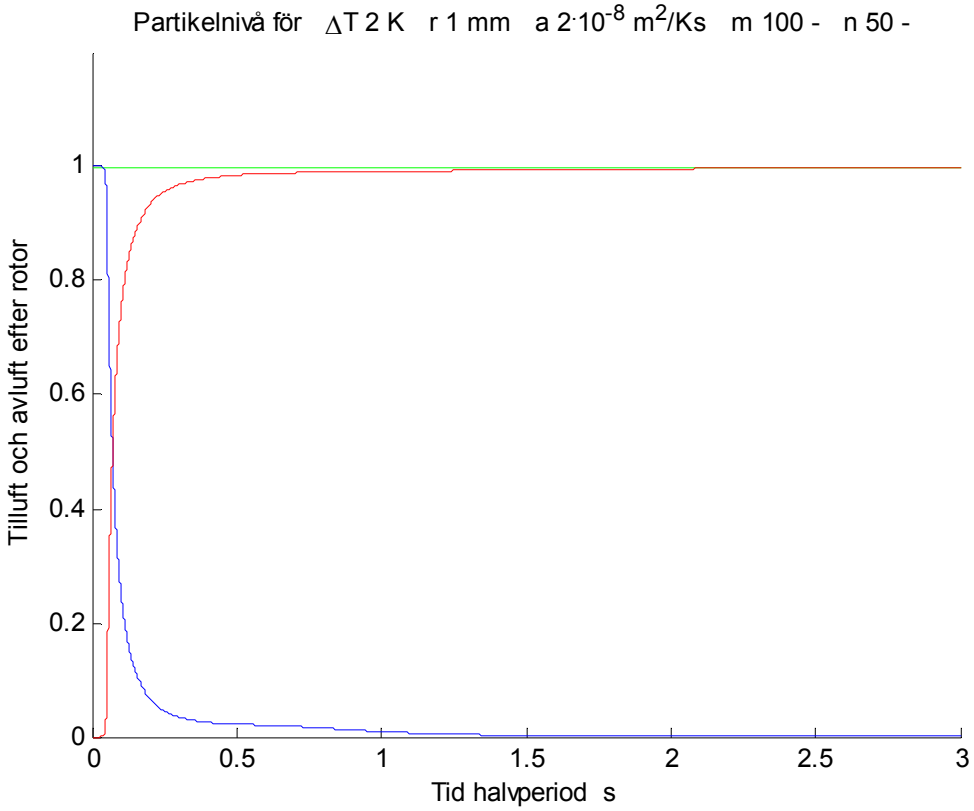
Figur 3.2 Partikelnivå för uteluft och frånluft i rotor under en halvperiod för fall 1.



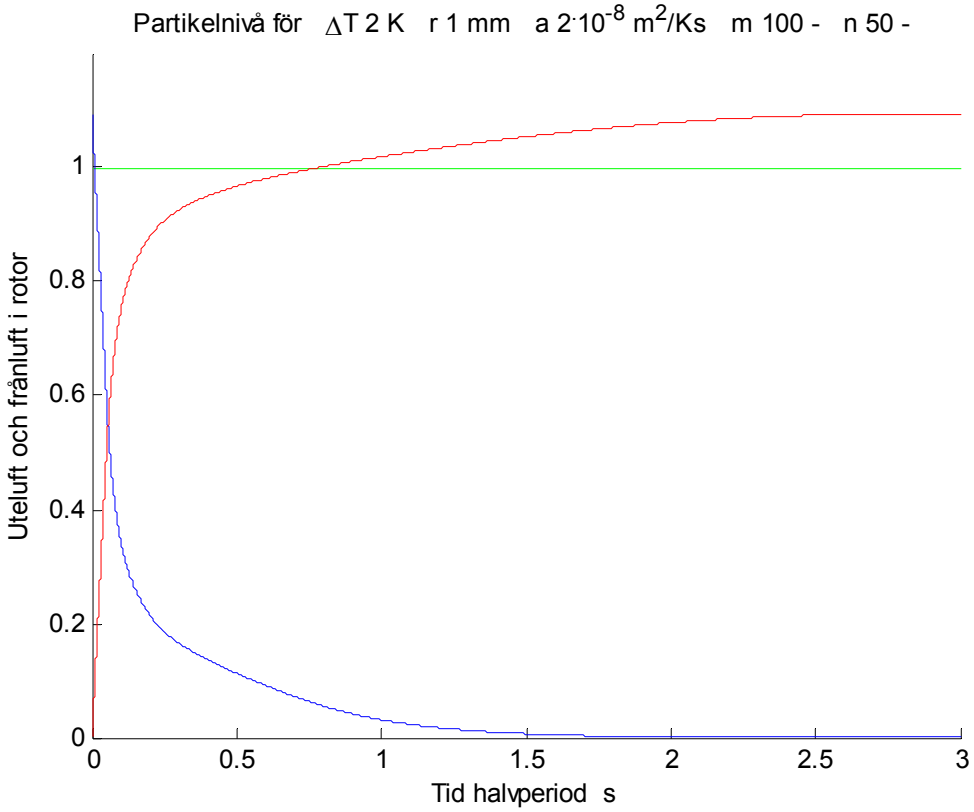
Figur 3.3 Partikelnivå för uteluft och frånluft axiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 1.



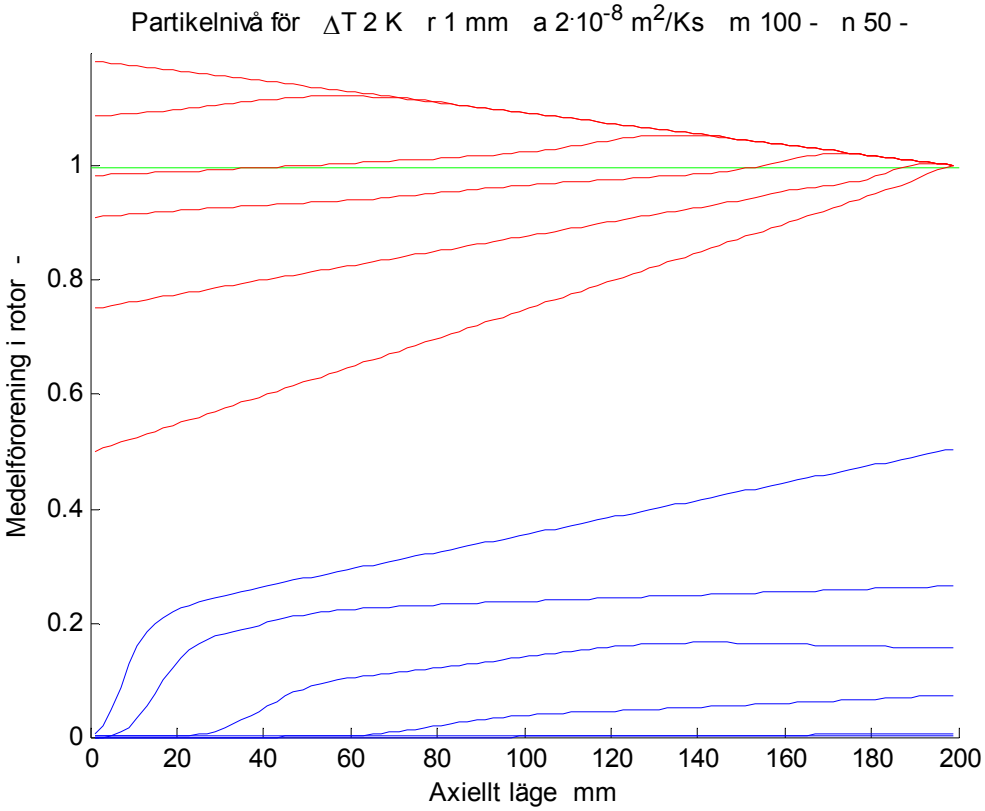
Figur 3.4 Partikelnivå för uteluft och frånluft radiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 1.



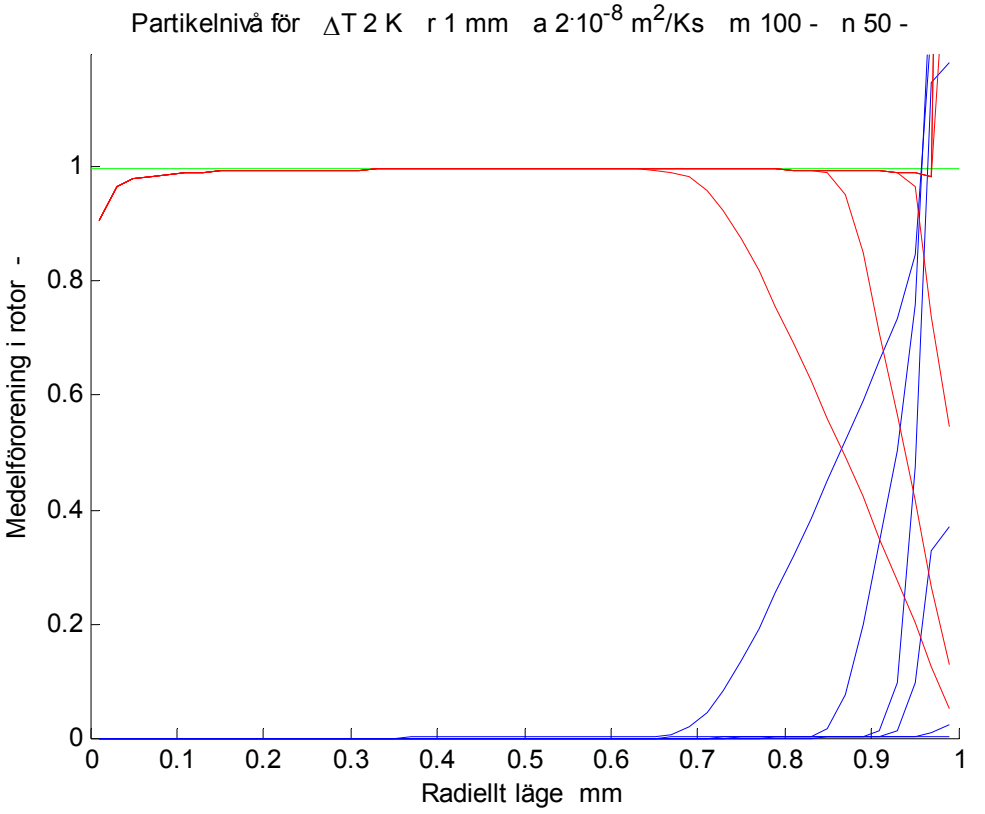
Figur 3.5 Partikelnivå för tilluft och avluft efter rotor under en halvperiod för fall 2.



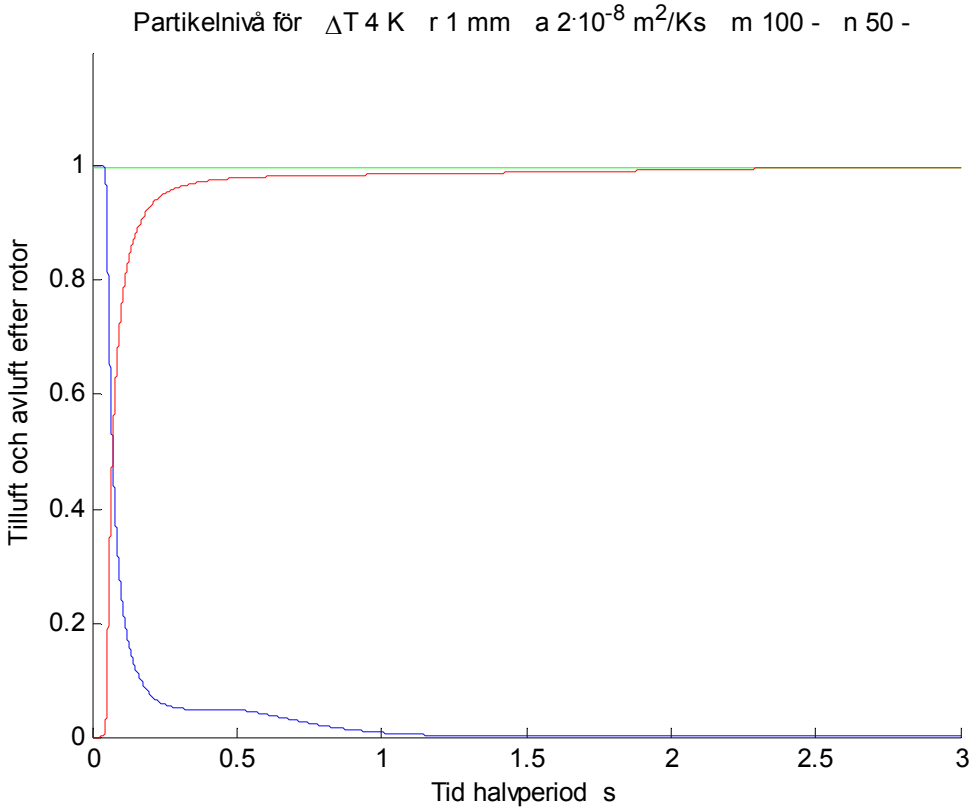
Figur 3.6 Partikelnivå för uteluft och frånluft i rotor under en halvperiod för fall 2.



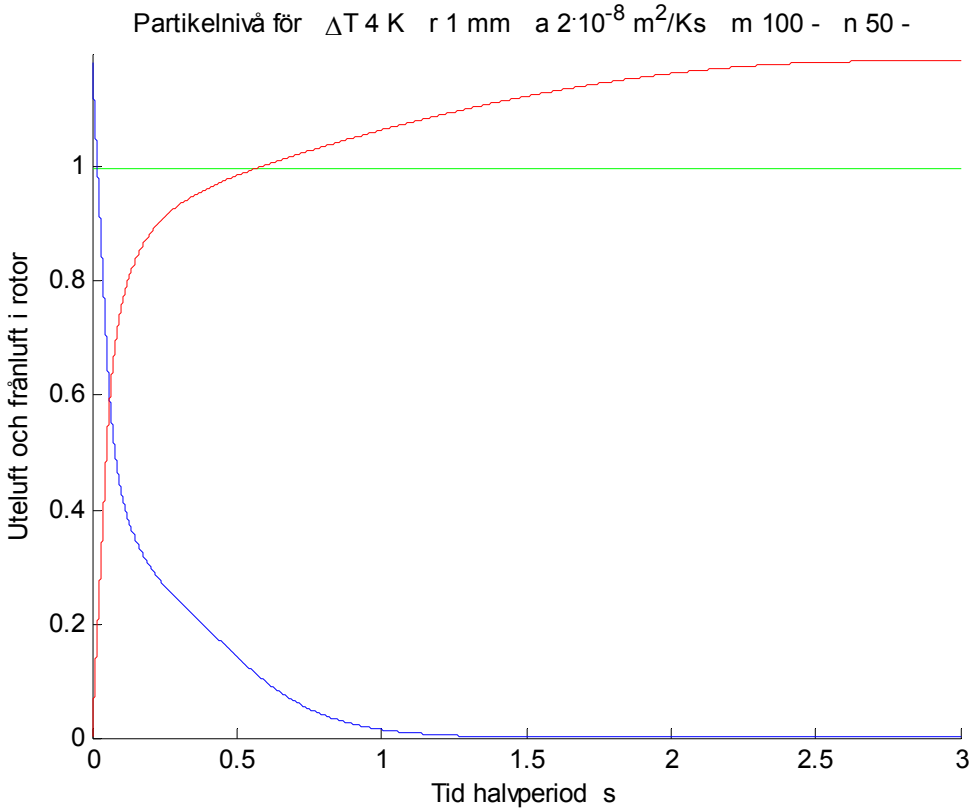
Figur 3.7 Partikelnivå för uteluft och frånluft axiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 2.



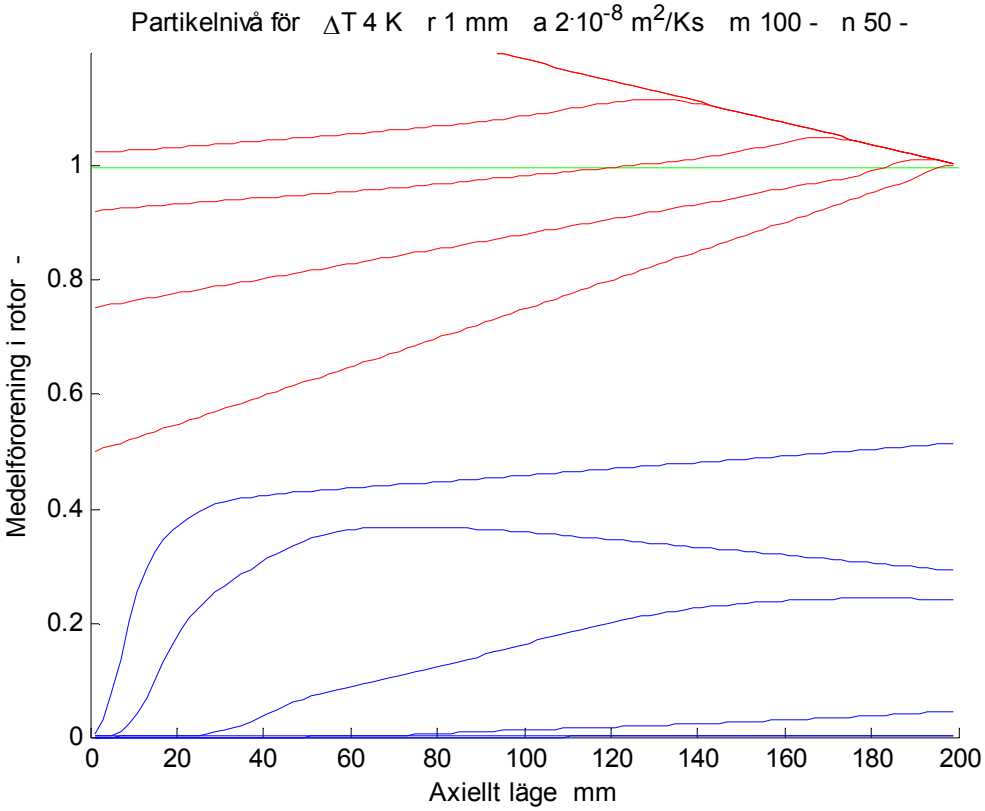
Figur 3.8 Partikelnivå för uteluft och frånluft radiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 2.



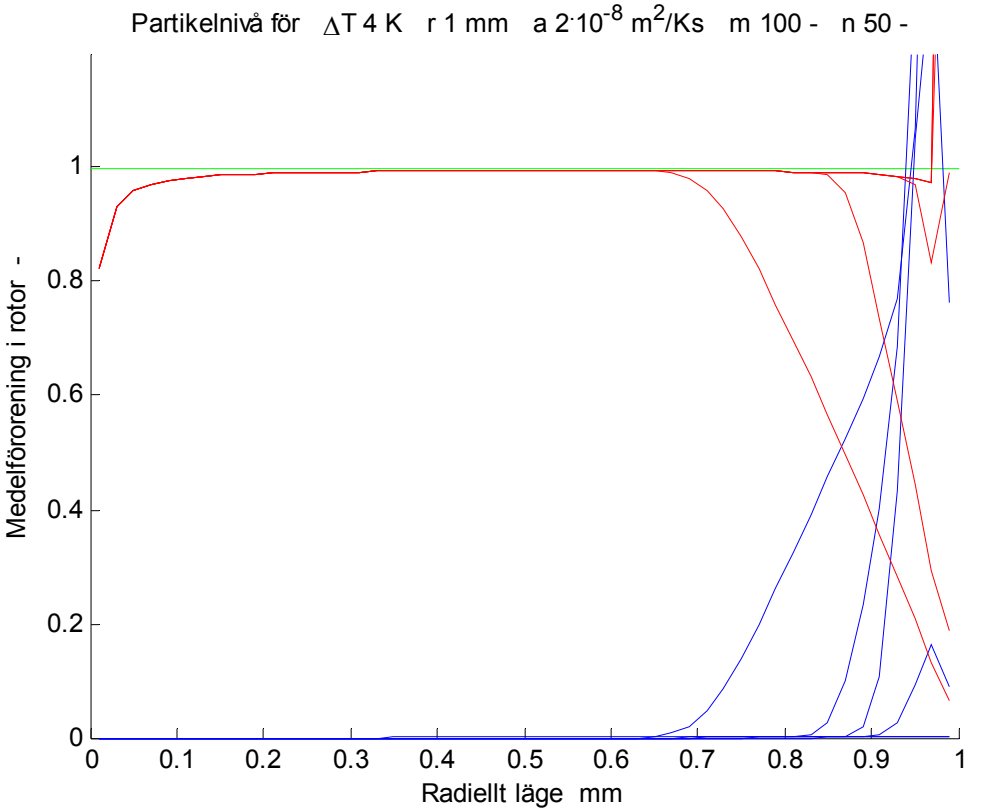
Figur 3.9 Partikelnivå för tilluft och avluft efter rotor under en halvperiod för fall 3.



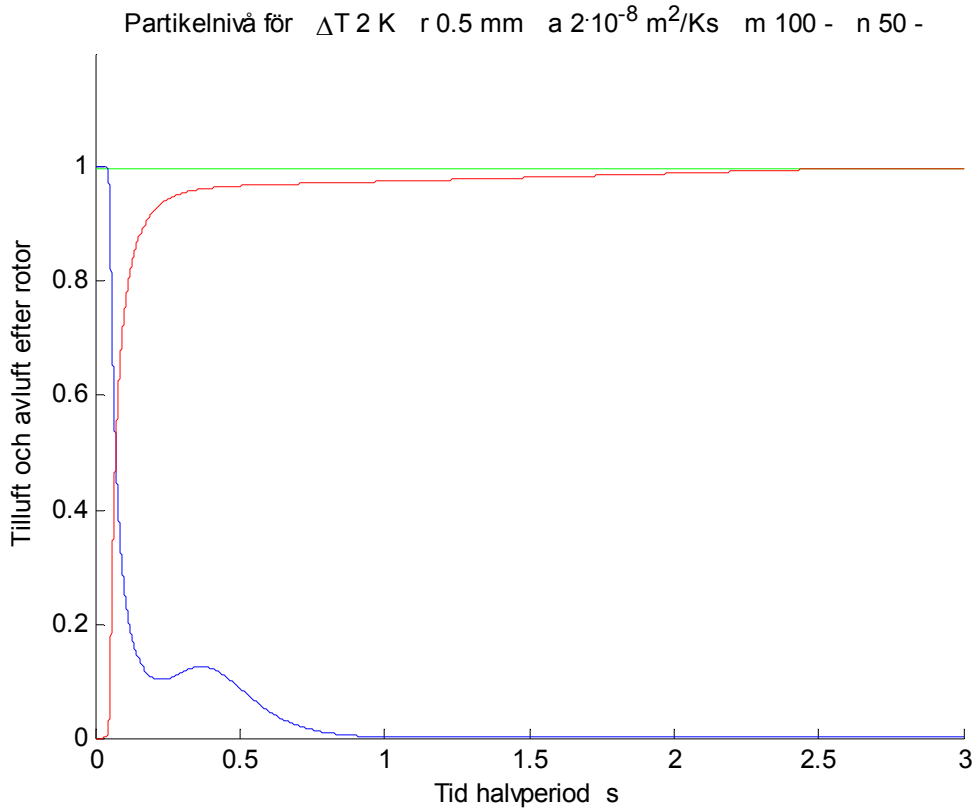
Figur 3.10 Partikelnivå för uteluft och frånluft i rotor under en halvperiod för fall 3.



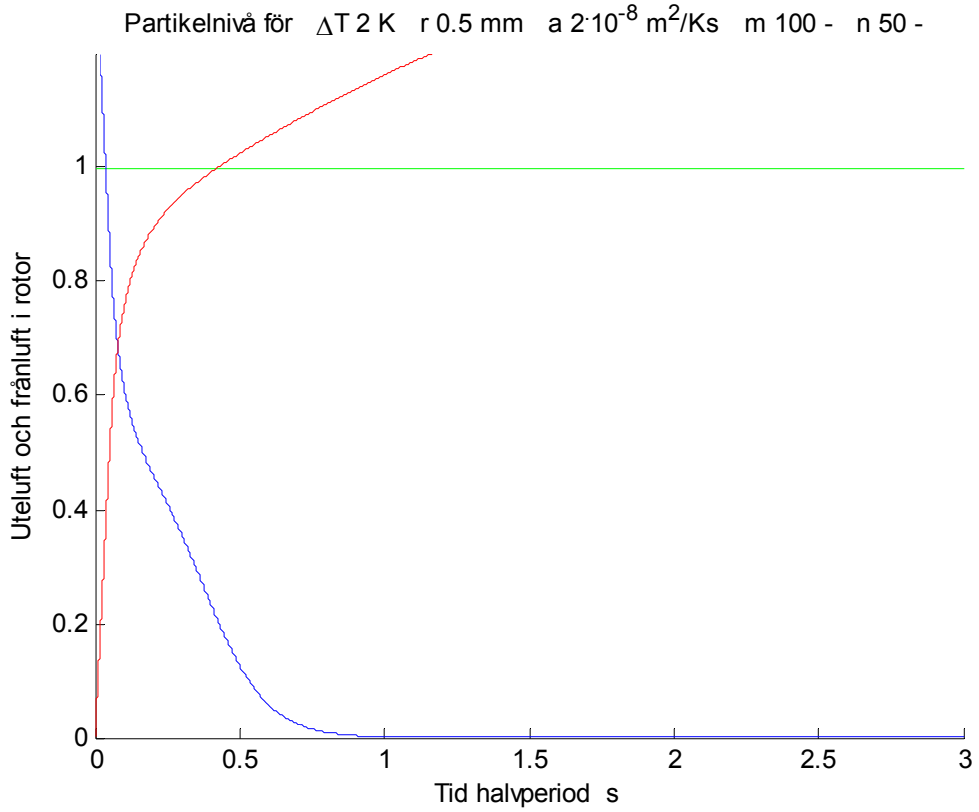
Figur 3.11 Partikelnivå för uteluft och frånluft axiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 3.



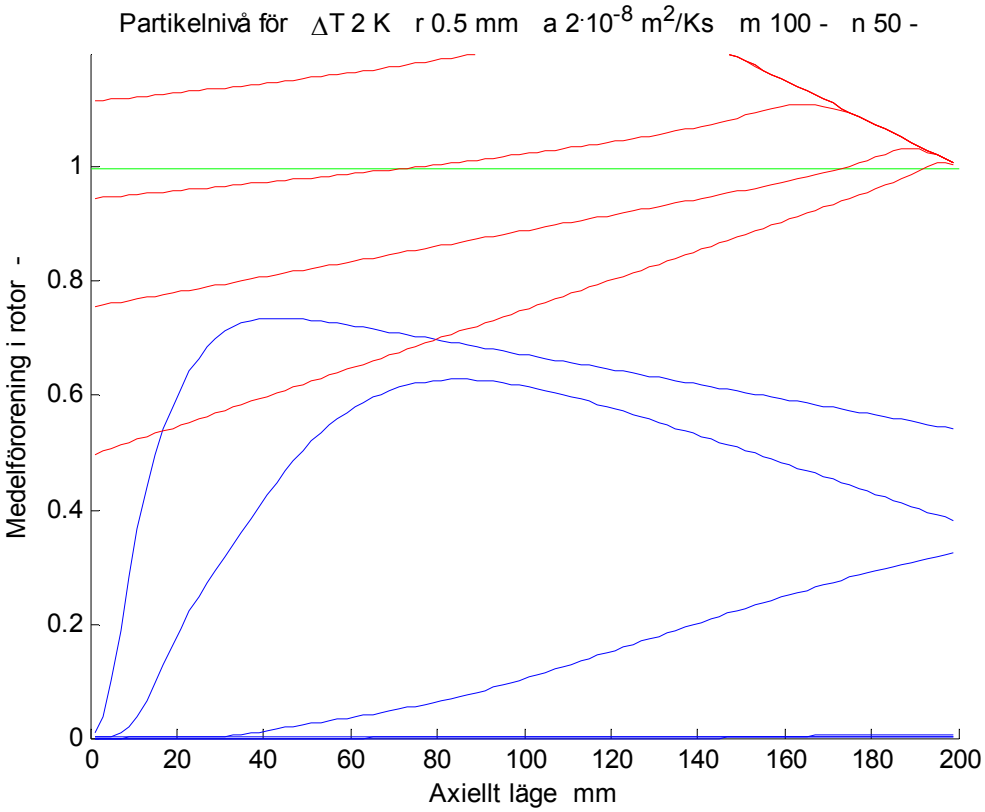
Figur 3.12 Partikelnivå för uteluft och frånluft radiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 3.



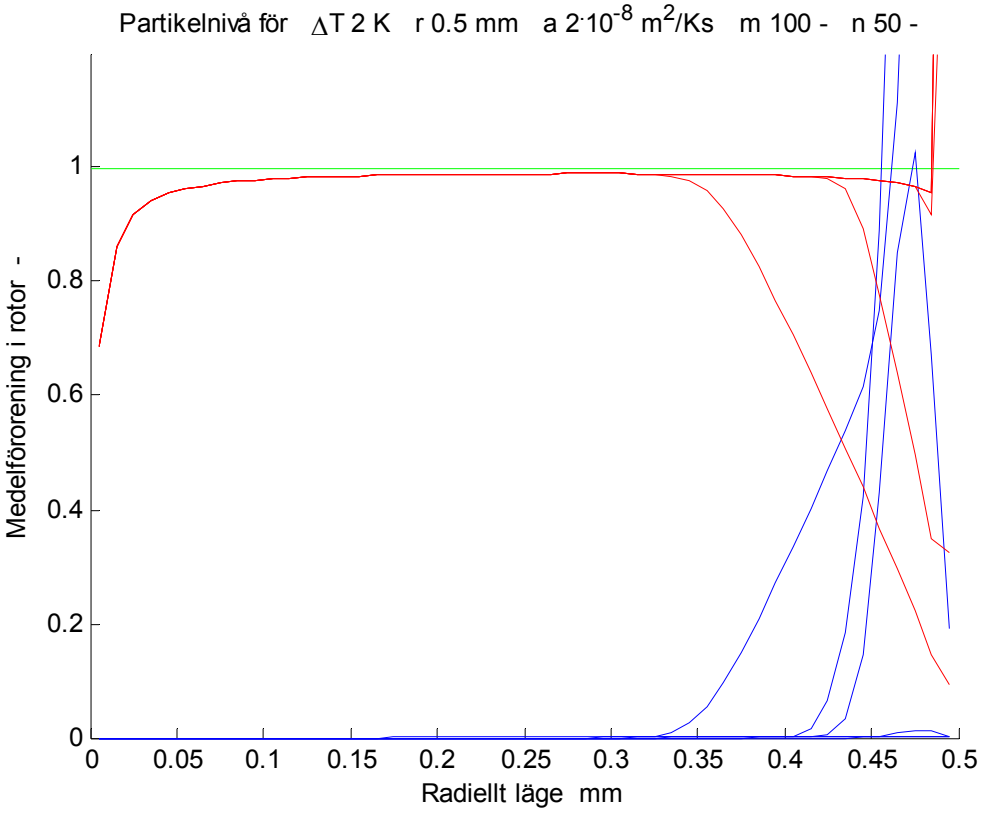
Figur 3.13 Partikelnivå för tilluft och avluft efter rotor under en halvperiod för fall 4.



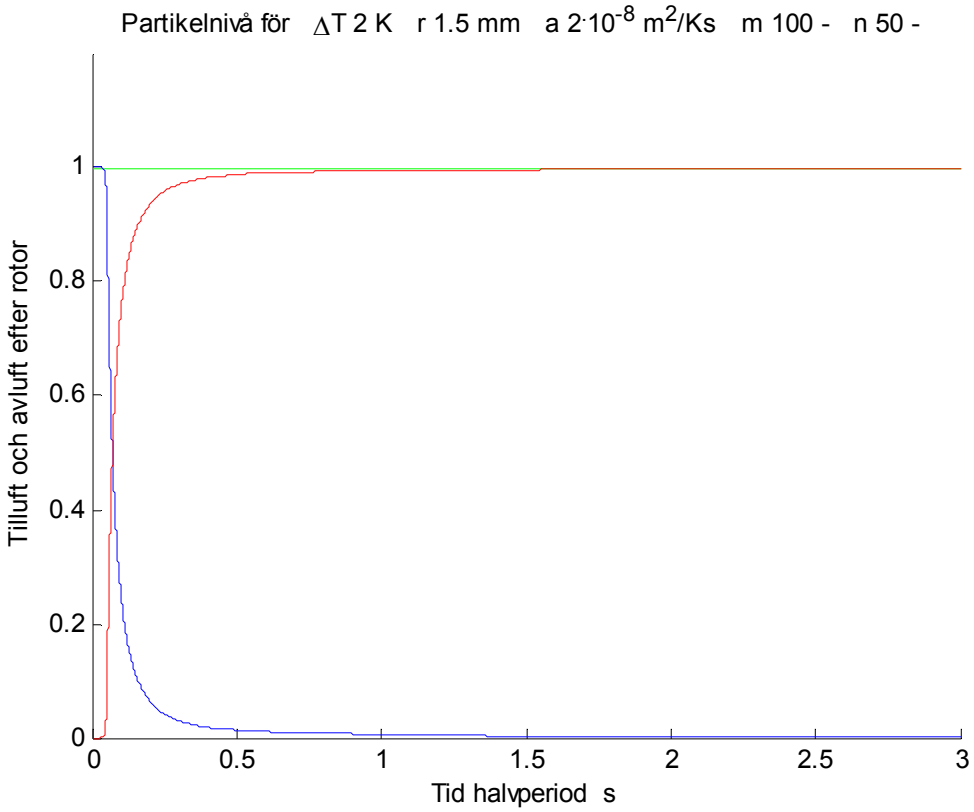
Figur 3.14 Partikelnivå för uteluft och frånluft i rotor under en halvperiod för fall 4.



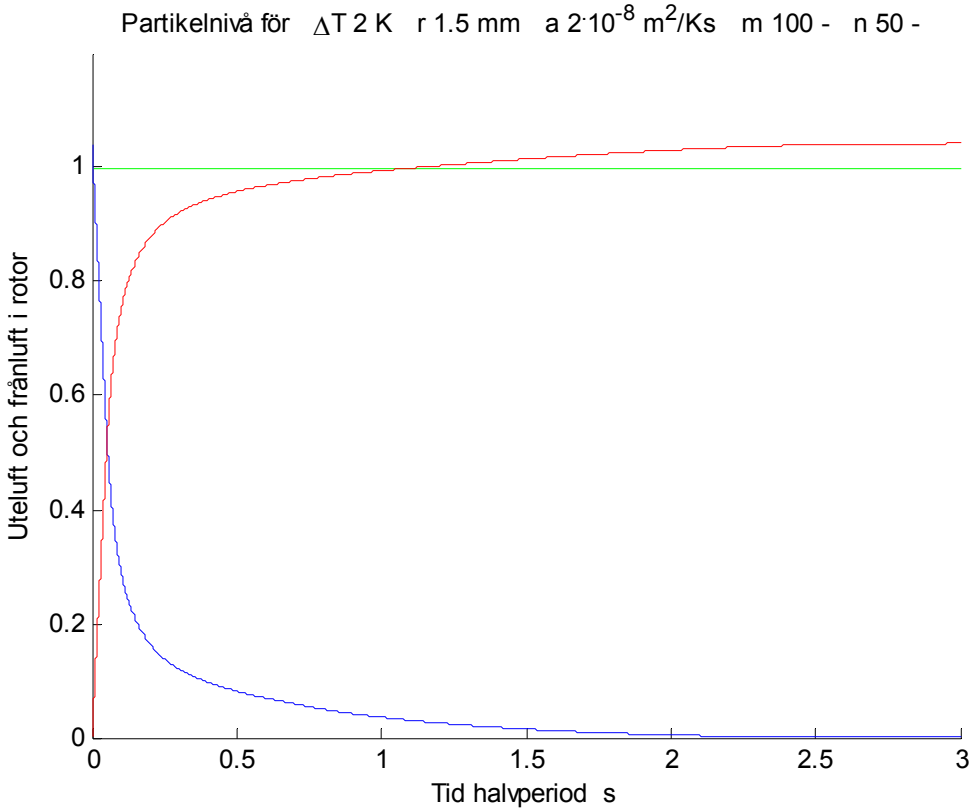
Figur 3.15 Partikelnivå för uteluft och frånluft axiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 4.



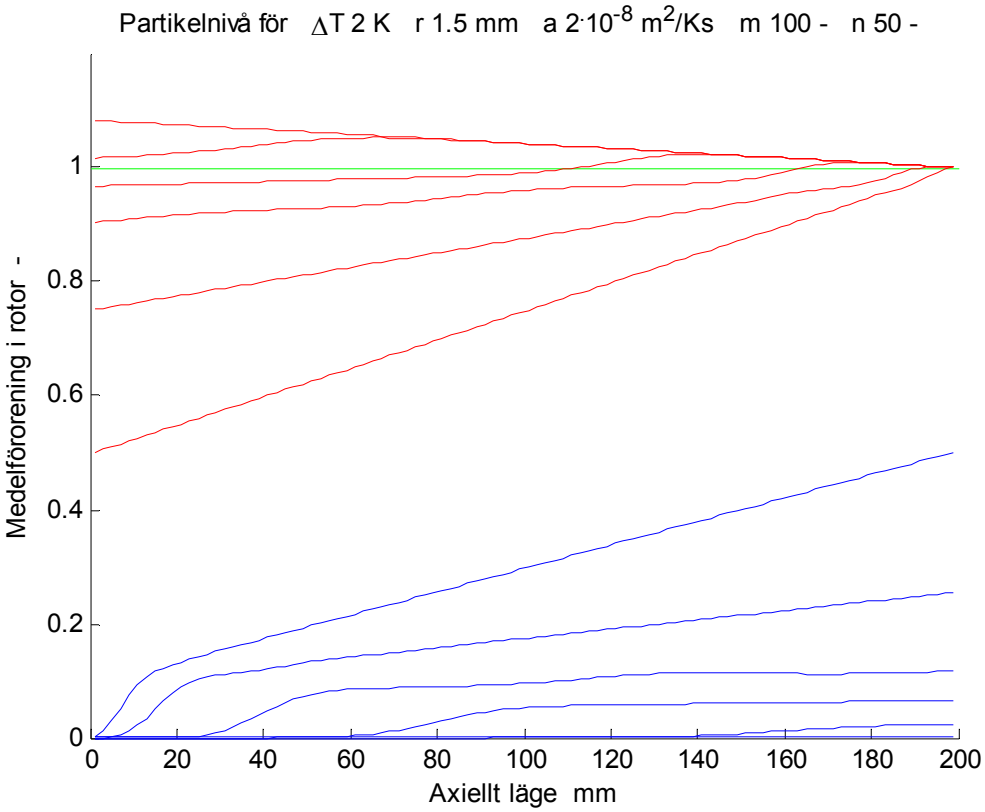
Figur 3.16 Partikelnivå för uteluft och frånluft radiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 4.



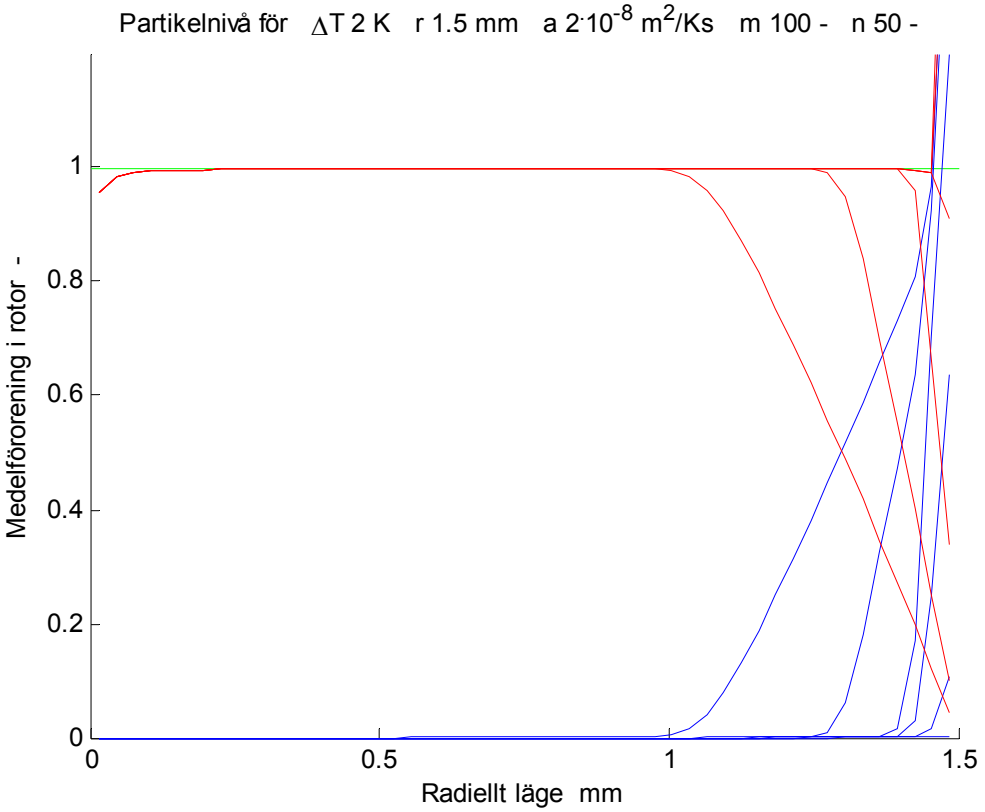
Figur 3.17 Partikelnivå för tilluft och avluft efter rotor under en halvperiod för fall 5.



Figur 3.18 Partikelnivå för uteluft och frånluft i rotor under en halvperiod för fall 5.



Figur 3.19 Partikelnivå för uteluft och frånluft axiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 5.



Figur 3.20 Partikelnivå för uteluft och frånluft radiellt för 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 och 3 s för fall 5.

4 Avslutning och slutsatser

De genomräknade fem fallen med termofores i avsnitt 3 visar att partikelnivån i rotorn inte är försumbar efter en renblåsning med 0.1 och 0.2 s. Denna kvarvarande partikelnivå kan räknas om till en överföring genom att fördela partikelnivå över tilluften för resten av halvperioden om 3 s.

Resultatet visas för de fem beräkningsfallen i avsnitt 3 i Figur 4.1-2 för olika uppdelning av beräkningsområdet med 100 axiell element och 50 radiella element respektive omvänt i Figur 4.2. Kurvorna som funktion av renblåsningstid visar att den relativa överföringen blir liten, men inte helt försumbar för en renblåsningstid om 0.2 s. Den nominella renblåsningstiden är 0.1 s för att flödet skall motsvara en rotorkanalvolym.

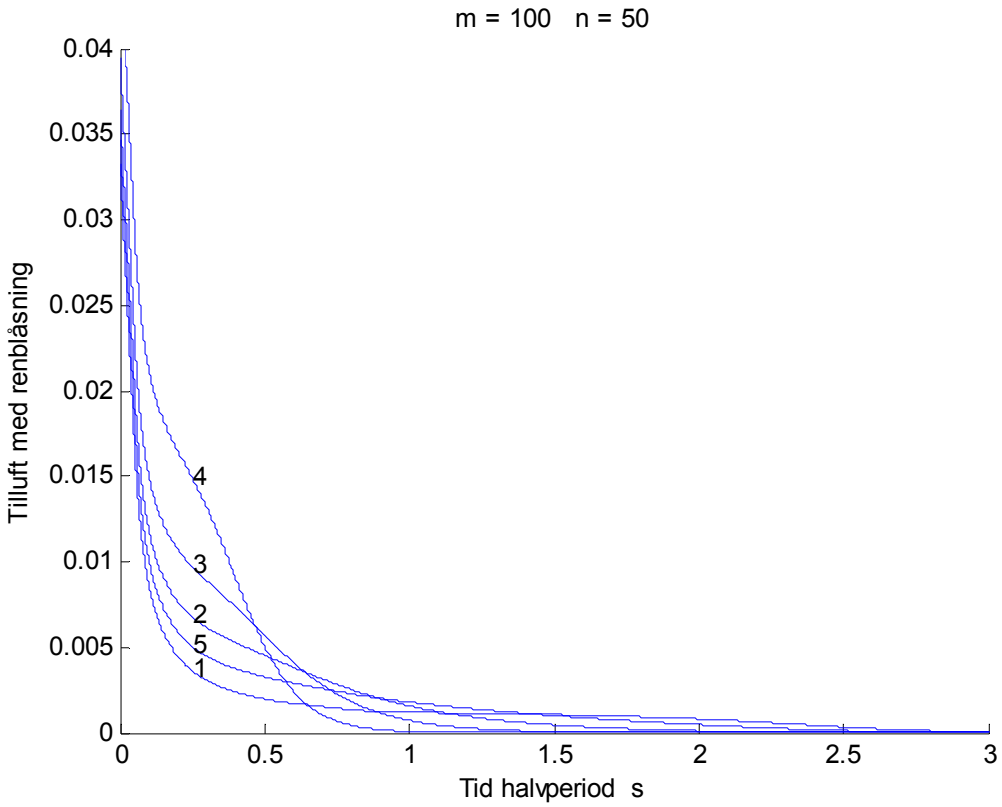
En slutsats är att kurvorna i Figur 4.1 och 4.2 skiljer sig något åt. Orsaken har inte retts ut, men i Figur 4.3 och 4.4 genomräknas fall 2 med olika antal axiella och radiella element. Kurvorna i Figur 4.3 visar att antalet axiella element inte påverkar resultatet, medan kurvorna i Figur 4.4 visar på motsatsen för olika antal radiella element. Fallsiffrorna 6, 2, 7 och 8 i Figur 4.4 står för 20, 50, 100 respektive 200 radiella element. Slutsatsen är rätt antal radiella element borde vara minst 100.

Slutsatsen är att de redovisade resultaten i avsnitt 3 med 100 axiella element och 50 radiella element underskattar överföringen något.

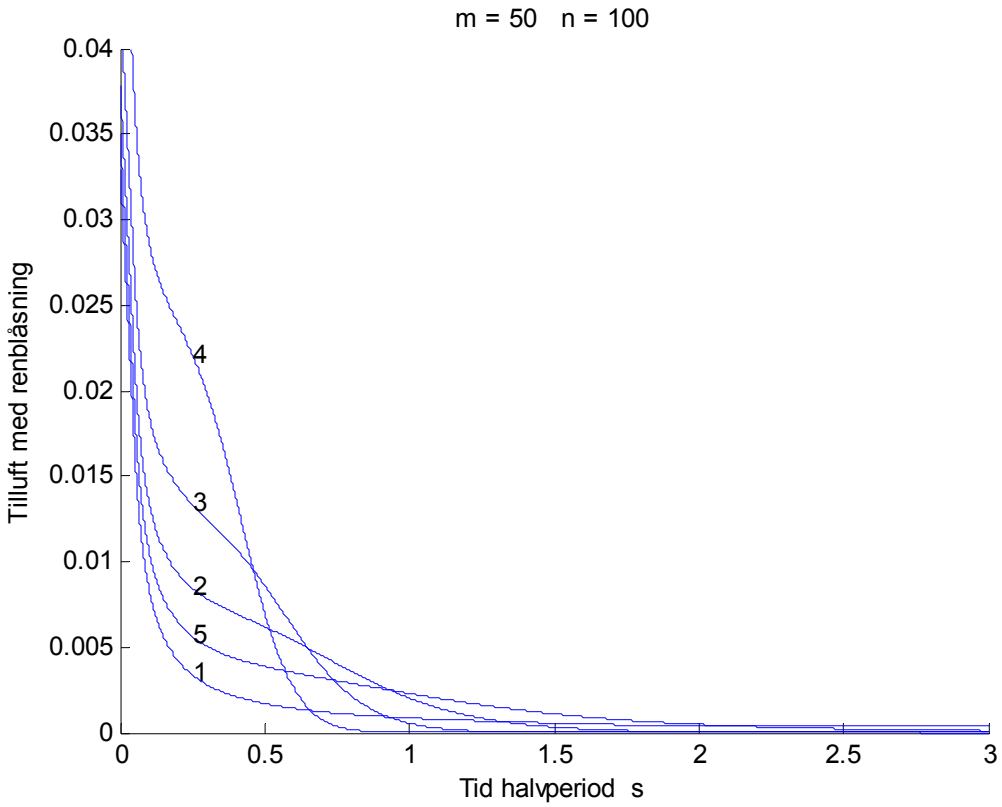
Ordningsföljden visar vidare att fall 1 utan termofores har lägst överföring för renblåsningstider mindre än 0.5 s. Fall 1, 2 och 3 med drivande temperaturskillnad 0, 2 och 4 K visar att ökande termoforeshastighet ökar överföringen. Fall 3 och 4 med samma termoforeshastighet och olika diametrar visar att överföringen blir högre för fall 4 den mindre diametern, vilket beror på att partikelnivå är mycket hög i rotorn och även nära rotorytan när renblåsningen skall ske. Termoforesen under själva renblåsningen räcker inte till att eliminera denna partikelnivå som byggts upp under nästan en halvperiod om 3 s.

Huvudslutsatsen är därför sammanfattningsvis att termoforesen inte förbättrar renblåsningen utan försämrar renblåsningen för de aktuella förutsättningarna med en laminär strömningsprofil för en cylindrisk rotorkanal, ingen diffusion, och en konstant termoforeshastighet i radiell led som växlar riktning för varje halvperiod samt en något bristande indelning av beräkningsfältet med 100 axiella element och 50 radiella element.

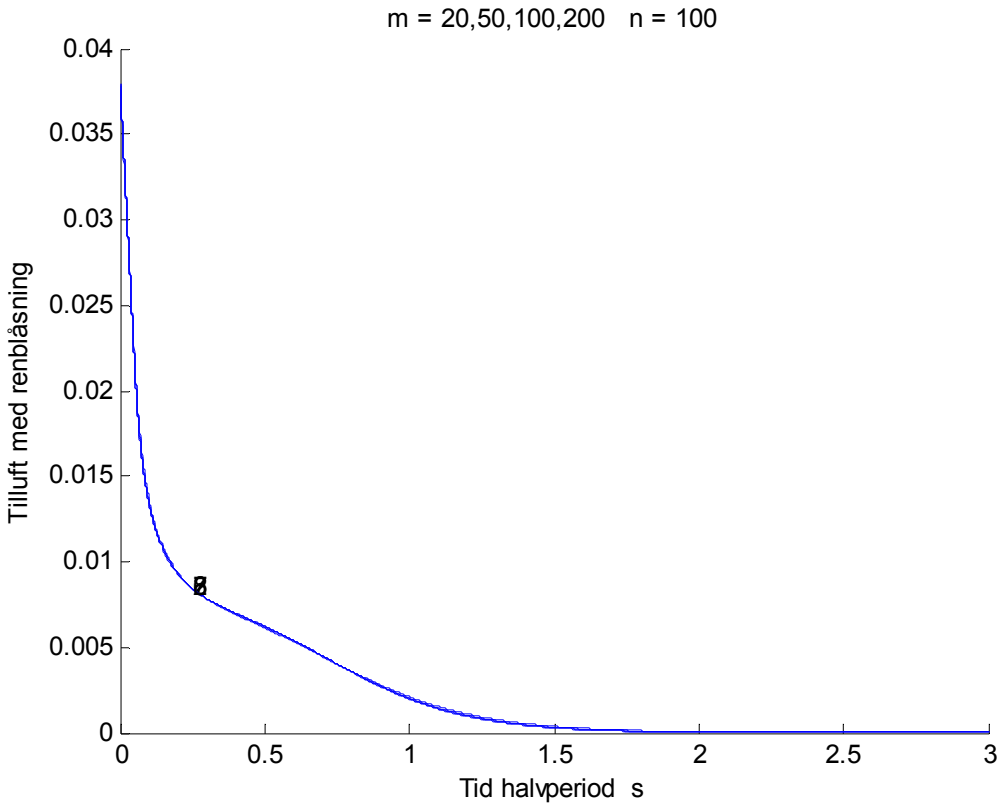
En anmärkning är att en fullständig beräkning med termoforesen inte har genomförts. Detta kräver att hela temperaturfältet beräknas samtidigt för att kunna beräkna temperaturgradientfältet och därmed termoforeshastighetsfältet samt att beräkningen genomförs för en given partikelstorlek för att ta med inverkan diffusion. Hur den cylindriska geometrin påverkar olika ekvationssamband bör kontrolleras.



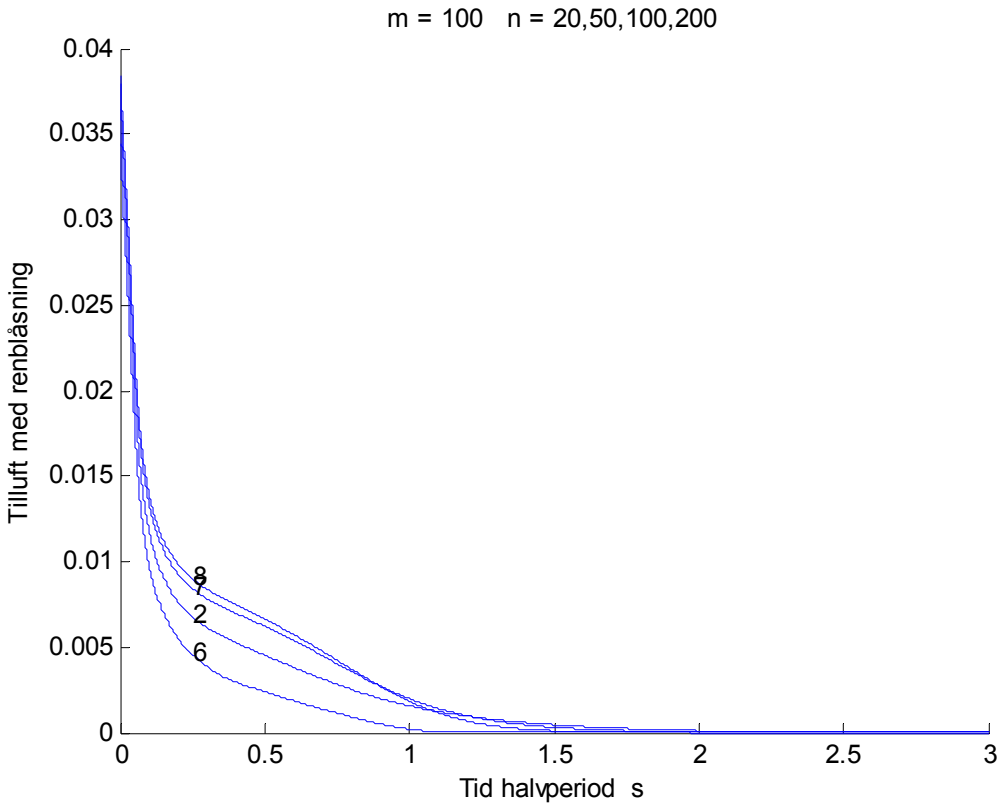
Figur 4.1 Medelpartikelnivå för tilluft som funktion av renblåsningstid för fem fall.



Figur 4.2 Medelpartikelnivå för tilluft som funktion av renblåsningstid för fem fall.



Figur 4.3 Medelpartikelnivå för tilluft för fall 2 för renblåsningstid för fall 2 och olika *m*.



Figur 4.4 Medelpartikelnivå för tilluft för fall 2 för renblåsningstid för fall 2 och olika *n*.

Referenser

Brown, R. C. (1993) Air Filtration, Pergamon Press.

Jensen, Lars (2011) Termisk mätning av rotorläckage, TVIT—11/7063.

Jensen, Lars (2011) Regenerativ värmeväxling och renblåsning, TVIT—11/7065.

Jensen, Lars (2011) Regenerativ värmeväxling utan renblåsning, TVIT—11/7066.

Jensen, Lars (2011) Renblåsning med diffusion, TVIT—11/7069.

Jensen, Lars (2011) Renblåsning och rotorkanalform, TVIT—11/7070.

Vincent, James H. (1995) Aerosol science for industrial hygienists. Pergamon press.