

# RE: SOURCE

Slutrapport för projekt

---

## Industriellt relevant optimerings och simuleringsverktyg för återvinningsprocesser med höga partikelinnehåll

---

Projektperiod: July 2017 och till juni 2019  
Projektnummer: 44266-1

Med stöd från

**VINNOVA**  
Sveriges innovationsmyndighet

 **Energimyndigheten**

**FORMAS** 

**Strategiska  
innovations-  
program**

Titel på projektet – svenska Industriellt relevant optimerings och simuleringsverktyg för återvinningsprocesser med höga partikelinnehåll	
Titel på projektet – engelska Industry relevant simulation and optimization tool for recycle processes with high particle content	
Universitet/högskola/företag Tetra Pak Processing Systems AB	Avdelning/institution Research & Technology
Adress Ruben Rausing gata 22186 Lund	
Namn på projektledare Fredrik Innings/Charlotte Stierna/Ola Ekström	
Namn på ev övriga projektdeltagare Johan Revstedt, Fredrik Lundell, Luca Brandt	
Nyckelord: 5-7 st Flöde, Partiklar, CFD, Simulering, Tryckfall	

## Förord

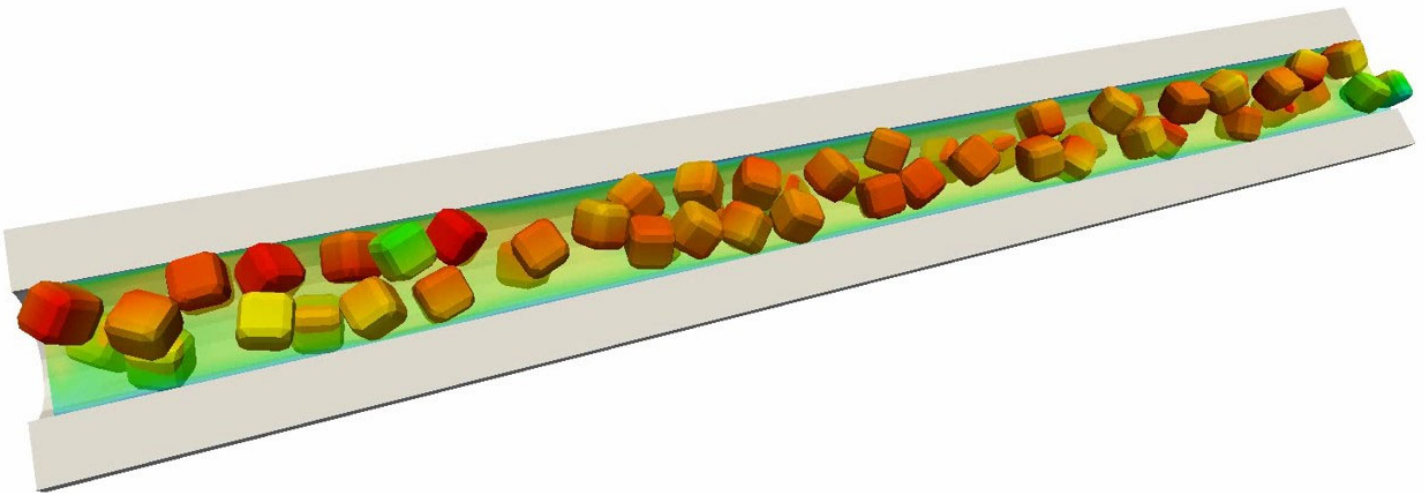
Projektet är en del av det strategiskt innovationsprogrammet RE:Source och är förutom stödet från Energimyndigheten finansierat av de deltagande industrierna: Tetra Pak Processing Systems AB, Valmet AB, FS Dynamics Sweden, och Xylem Water Solutions Global Services. De akademiska partnerna var KTH, Institutionen för Mekanik samt LTH, Avdelningen för energisystem

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	2
Summary .....	3
Inledning och bakgrund .....	4
Genomförande .....	4
Resultat och diskussion.....	6
Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg .....	16
Publikationslista.....	17
Projektkommunikation.....	18
Referenser .....	18
Bilagor .....	18

## Sammanfattning

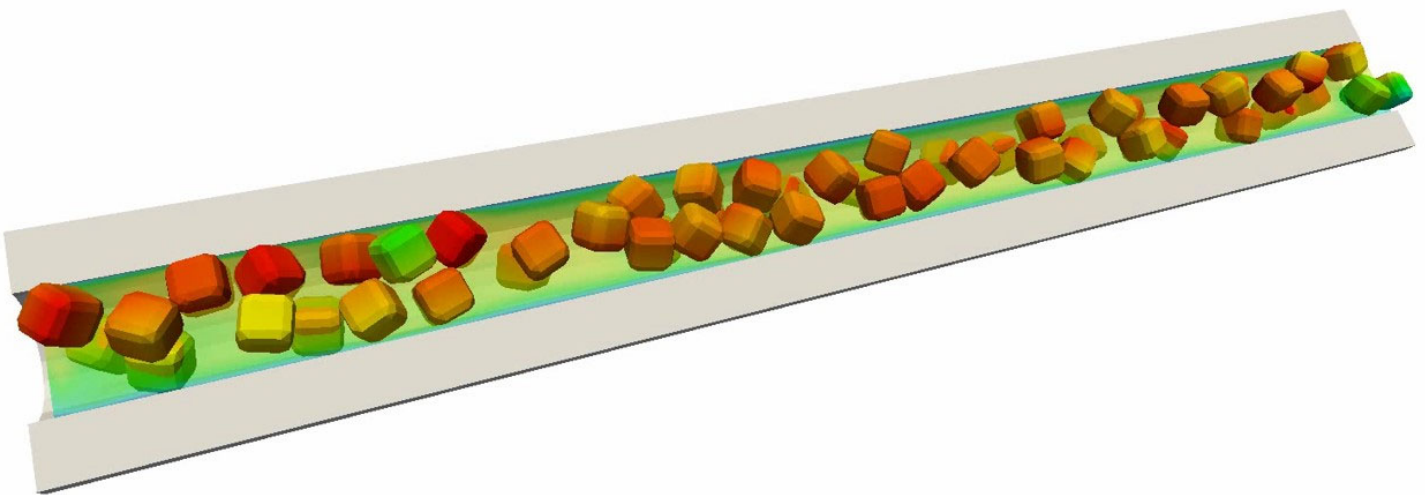
Projektet har lyckats med sin huvudsakliga målsättning; Att ta fram ett industriellt användbart redskap för att simulera flöden som är en blandning av vätska och partiklar. Projektet har modifierat, anpassat och optimerat det befintliga simuleringsprogrammet IBUFlow, utvecklat på FC Fraunhofer Chalmers i Göteborg. Programmet kan nu simulera partikelflöden med höga halter av mycket stora partiklar och är validerat för låga Reynoldstal. För flöden med små partiklar rekommenderar projektet i stället det med standardiserade strömningsberäkningsprogrammet Star CCM+ där flöden med alla Reynoldstal kan simuleras. Projektets vetenskapliga målsättning; att öka kunskapen av vätskeflöden med stora partiklar har nåtts med råge. Genom noggrant utförda experiment både på typpartiklar och riktiga processflöden har vi byggt upp en unik kunskap som redan nu används av de deltagande industrierna och har öppnat upp ett helt nytt forskningsfält för de akademiska partnerna. Vi har nu full förståelse för hur olika partikelhalter påverkar flödet vid Reynoldstal från 100 till 10 000. Genom dessa två byggstenar kan nu vår konsultpartner fsDynamics leverera tjänsten att simulera och optimera riktiga industriella återvinningsprocesser vilket var projektets slutgiltiga mål. Vi har då kommit ett steg närmare vår vision att det ska vara lika lätt att använda virtuella metoder för att utveckla processer med mycket partiklar som det i dag är att använda enfas strömningssimuleringar (CFD) och det ska vara en naturlig del av utvecklandet av nya processlösningar inom återvinningsområdet, och att det i fortsättningen ska användas av stora och små utrustningsleverantörer för återvinningsprocesser såsom avgiftning, energiåtervinning, biologiska processer m.m.



Simulering av partikelflöde av 20 volymsprocent partiklar i rörflöde, eller mer exakt, en tubvärmeväxlare

## Summary

The project has succeeded with the main goal: To develop an industrial relevant tool to simulate flows with a high content of large particles. The project has modified, adjusted and optimized the commercial simulation software IBUFlow developed at Fraunhofer Chalmers in Gothenburg. The software can simulate flows with a very high content of very large particles at low Reynolds numbers. For flows with small particles the project recommends the software Cstar-CCM+ from Siemens that can handle all Reynolds numbers. The scientific goal of the project; to increase the understanding of particulate flows, has surpassed expectations. Through carefully developed and executed experiments both on artificial and real processing flows we have built up an unique knowledge that right now is being used by the participating industries and has opened up a new scientific field for the academic partners. We have now a full understanding on how particles affect the flow at Reynolds numbers from 100 to 10 000. By combining the developed tools with the scientific understanding of the flows our consultant partner can now offer the service of simulation and optimizing real industrial recycling processes, that was the final goal of the project. We have then come one step closer to our vision that it should be as easy to use virtual methods when developing processes with large particles as it is today to use CFD in one-phase flows, and that it will be a normal part of the development of new recycling processes, and that it will be used by both small and large equipment manufacturers of recycling processes whatever recycling processes it is.



Simulation of a particle flow of 20% cubic particles in a tubular heat exchanger.

## Inledning och bakgrund

De allra flesta återvinningskedjor innehåller en stor del klassisk processteknik. Det kan vara att krossa, separera och tvätta återvunnet glas eller fiberförpackningar, eller sortera, mala och värma livsmedelsavfall för biogasproduktion. En försvarlig del av lönsamheten och därmed den ekonomiska möjligheten för dessa återvinningskedjor ligger i effektiviteten i dessa processer. Den moderna och effektivaste metoden att förbättra industriella processer är virtuell optimering, men eftersom de flesta återvinningsprocesser innehåller höga partikelhalter kan inte de nuvarande kommersiella virtuella verktygen (CFD) användas. Det finns åtskilliga exempel på hur förbättrad simuleringsförmåga leder till step change vad gäller effektivitet och innovation. Några exempel är kombinationen av datorstödd konstruktion och hållfasthetstekniska beräkningar för tekniska konstruktioner, eller simuleringar av material- och produktflöden i produktionsprocesser. I båda dessa fall har avancerade beräkningar med väl valda verifieringsexperiment varit starkt bidragande till tex. säkrare bilar. Det här projektet skapades för att åstadkomma motsvarande metodsprång inom processer för återvinning. När det gäller virtuella metoder för partikelsystem så existerar dessa, men bara på universiteten utan att vara tillgängliga för de mindre och innovativa företag som ofta utvecklar dessa processer. Genom att använda mogna industrier som språngbräda har vi överfört de virtuella metoder som nu bara finns på några få universitet till effektiva och enkelt användbara verktyg som beräkningskonsulter lätt kan applicera på alla typer av återvinningsprocesser. Detta har uppnåtts genom ett samarbete där vi kombinerat världsunik kunskap från akademien med processkunnande från livsmedels och pappersindustrin där vi utvecklat ett robust verktyg som kan användas i alla återvinningsprocesser såsom avgiftning, energiåtervinning, biologiska processer m.m.

Projektet var till 59% finansierat av industripartnerna och till 41% av Energimyndigheten

Projektid: Q3 2017--Q3 2019

## Genomförande

Projektet har varit uppdelat i följande åtta arbetspaket

- 1. Projektledning.** De tekniska delarna av projektet har letts av Fredrik Innings på Tetra Pak. Den administrativa sidan har letts av projektledare från Tetra Pak. De första 20 månaderna av Charlotte Stierna och de sista månaderna av Ola Ekström då Charlotte bytt tjänst internt.
- 2. Behovsanalys och inventering av lämpliga kommersiella koder.** Behoven inom återvinningsbranschen har undersökts och en kravspecifikation har tagits fram. De två koderna IBIFlow samt Star CCM+ valdes ut efter att en rad tester utförts.

**3. Framtagning av lokal valideringsdata.** I vattentunneln på Odkvistlaboratoriet på KTH har vi gjort en stor mängd valideringsmätningar i lokal skala och mätt tryckfall, hastighetsfält och partikelrörelser med olika partikeltyper

**4. Framtagning av global valideringsdata.** Enligt reviderad ansökan Dnr 2017-001985 anlitas RISE i Göteborg för att ta fram denna data. En tidigare använd pilotutrustning från Tetra Pak byggdes om och skickades till pilothallen på RISE. En mätkampanj med riktiga livsmedelspartiklar i olika bärarfaser genomfördes lyckosamt.

**5. Utveckling och validering av akademiska koder.** De koder som finns på universiteten har utvecklats och förfinats så vi nu ypperlig överensstämmelse med experimenten.

**6. Överföring till, modifiering och validering av kommersiell kod.** Koderna har testats och optimerats mot experimentdata och mot de akademiska koderna. Viss ny funktionalitet har implementerats.

**7. Utveckling av tjänsten.** Här har vi kombinerat våra kunskaper om partikelflöden med den kommersiella kodens simuleringsmöjligheter till en tjänst som vår konsultpartner fsDynamics kan använda för att simulera och optimera riktiga industriella återvinningsprocesser

**8. Analys av potential och framtid samt kommunikation.** Vi har försökt undersöka verktyget och tjänstens potential samt utvärderat deras helhetsperspektiv genom en hållbarhetsanalys. Vi har tagit fram en kommunikationsplan där vi identifierat och ska informera fler presumtiva användare om verktygets och tjänstens fördelar och möjligheter.

## Deltagare

**Tetra Pak:** Leder projektet och är aktiva inom återvinning av kartongförpackningar men utvecklar även utrustning för livsmedelsindustrin.

**Xylem:** Utvecklar system för rening, återvinning och komplexa strömmande materialflöden.

**Valmet:** Utvecklar utrustning för pappers, bioprocess och energisystem. Bidrar med kunskaper från den högst optimerade processindustrin.

**fsDynamics:** Beräkningskonsult aktiv över hela Sverige. Har utvecklat avancerade virtuella metoder för att hjälpa små och stora företag genom avancerade virtuella metoder

**KTH Institutionen för Mekanik:** Har modern mätutrustning (PIV, MRV, OCT, UVP) för validering samt har utvecklat avancerade simuleringsmetoder för turbulenta partikelströmmar

**LTH Avdelningen för energisystem:** Har utvecklat nyskapande simuleringsmetoder för partikelströmmar i icke Newtonska vätskor.

## Resultat och diskussion

Här redovisas de detaljerade vetenskapliga resultaten. De har huvudsakligen framtagits inom arbetspaket 3-6 och redovisas under dem

**Arbetspaket 3. Framtagning av lokal valideringsdata.** I vattentunneln på Odkvistslaboratoriet på KTH har vi gjort en stor mängd valideringsmätningar i lokal skala och mätt tryckfall, hastighetsfält och partikelrörelser med olika partikeltyper. Experiment har gjorts med stora och små sfärer, 40 resp 20% av rördiametern, i halter på upp till 30% (fig 2).

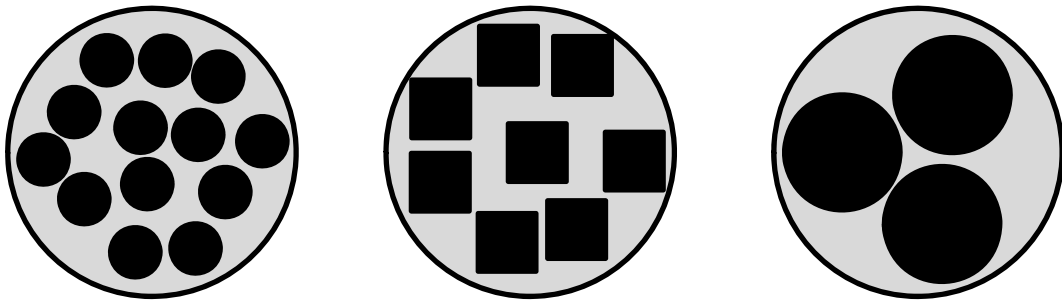


Fig 1. De tre testade partiklarna i relation till rördiametern. Små sfärer, små kuber samt stora sfärer.

Mycket tid har lagts på att få experimenten med kuber att fungera och nu kan vi köra riggen med de små kuberna. De stora kuberna visade sig omöjliga att köra då de fastnar även i ett rakt rör (fig 2).

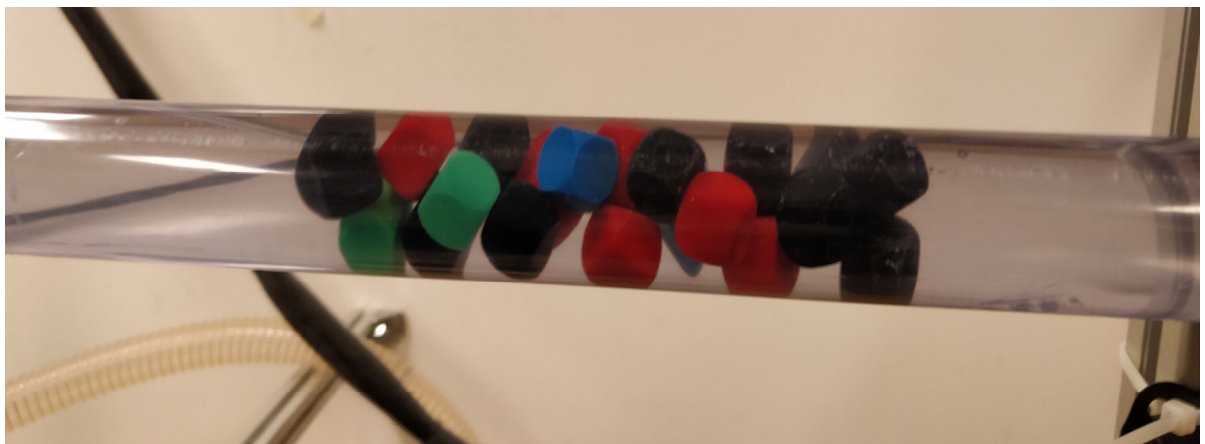


Fig 2 De stora partiklarna har fastnat i ett rakt rör.



Vår huvudsakliga valideringsparameter är tryckfallet och där ser vi mycket intressanta effekter. Effekten av partiklarna är moderata vid låga Re medan effekten är mycket stor i transitionsområdet för att vid höga Re sjunka till ca 10%.

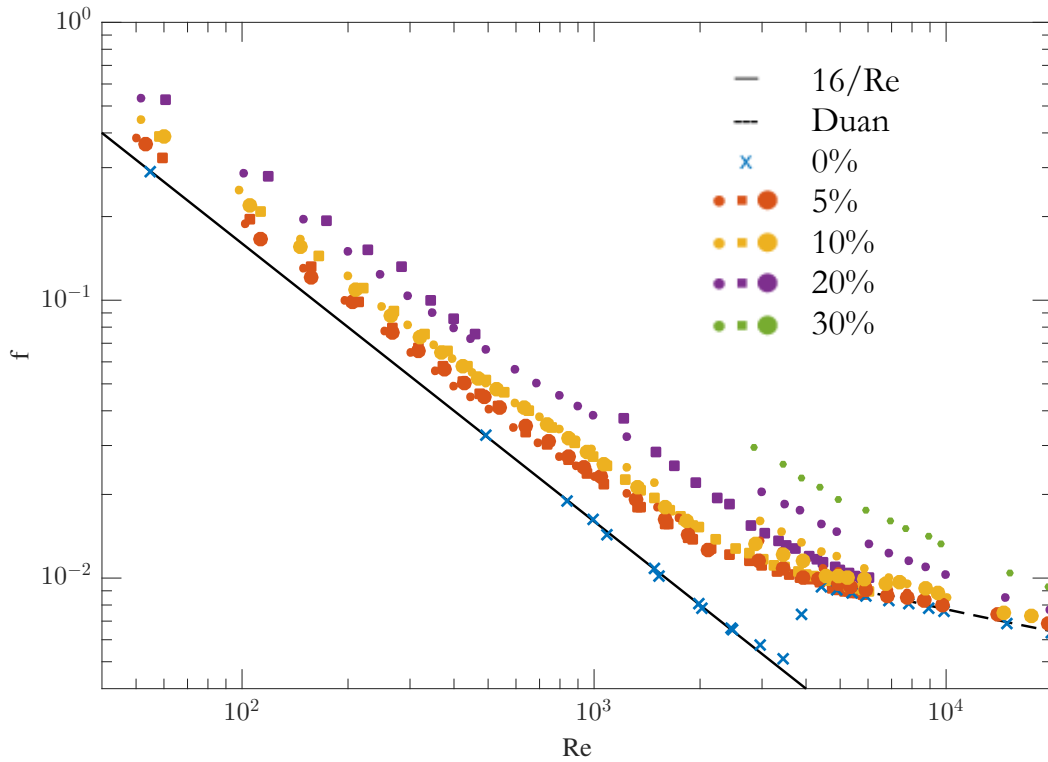


Fig 3 Valideringsdata tryckfall för partiklar med olika former, storlekar och koncentrationer.



Vår detaljerade lokala valideringsvariabel är hastighetsprofilen i röret och hur den påverkas av partiklarna vid olika Re.

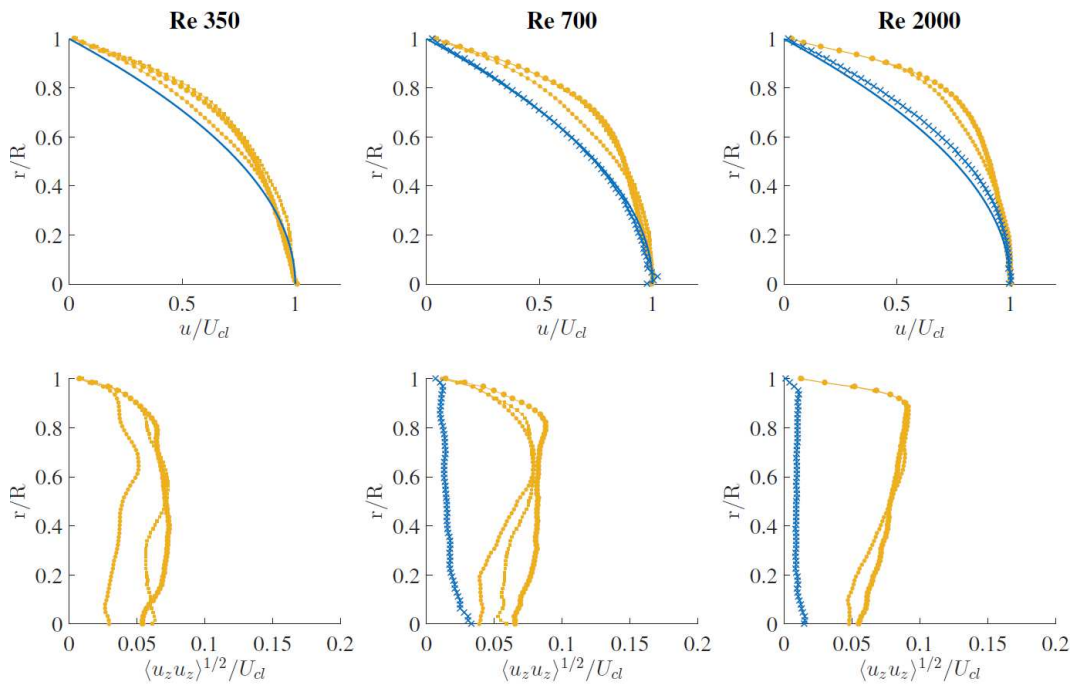


Fig 4 Hastighetsprofiler och turbulensintensitetsprofiler vid olika Re för 10% partiklar. Blå- utan partiklar, gul med partiklar

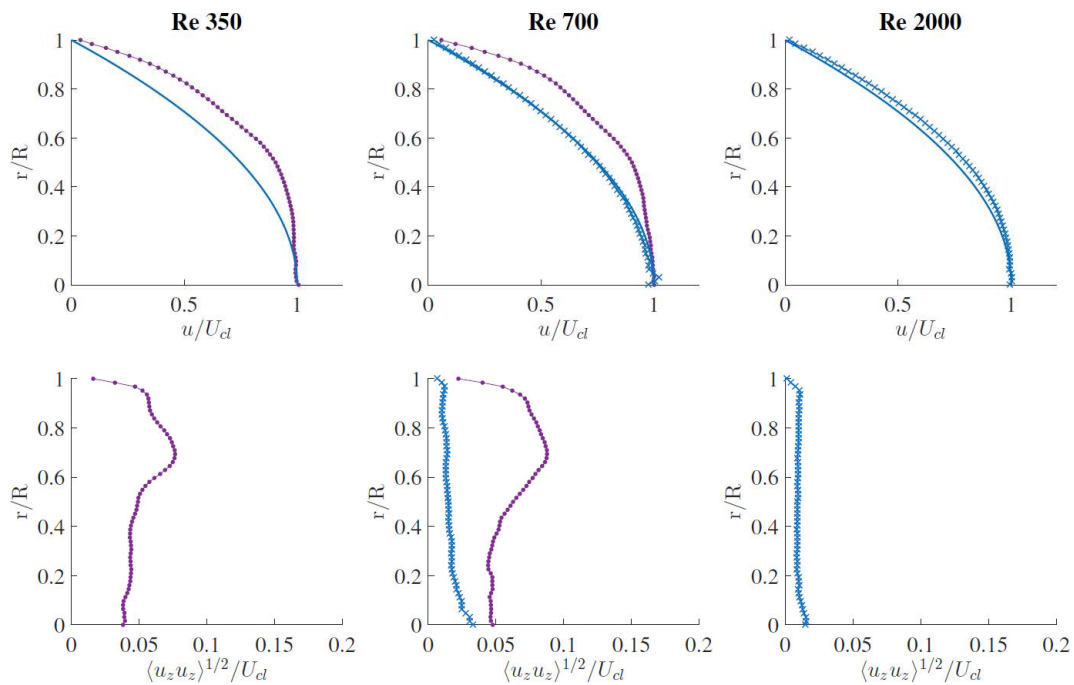


Fig 5 Hastighetsprofiler och turbulensintensitetsprofiler vid olika Re för 10% partiklar. Blå- utan partiklar, lila med partiklar

**Arbetspaket 4. Framtagning av global valideringsdata.** Enligt reviderad ansökan Dnr 2017-001985 anlätades RISE i Göteborg för att ta fram denna data. En tidigare använd pilotutrustning från Tetra Pak byggdes om och skickades till pilothallen på RISE. En mätkampanj med riktiga livsmedelspartiklar i olika bärarfaser genomfördes lyckosamt. Även här är tryckfallet i ett rör den huvudsakliga valideringsparametern. De stora volymer av produkt som processades och svårigheter med att hålla en exakt partikelvolymfraktion gav som väntat betydligt högre brusnivåer än labbexperimenten med plastpartiklar på KTH men experimenten verifierar på alla sätt slutsatserna från KTH. Partiklarna ger en mycket stor påverkan på flödet i det transienta området. Vi har därmed verifierat att mekanismerna vi påvisat i de lokala mätningarna även gäller för verkliga system.

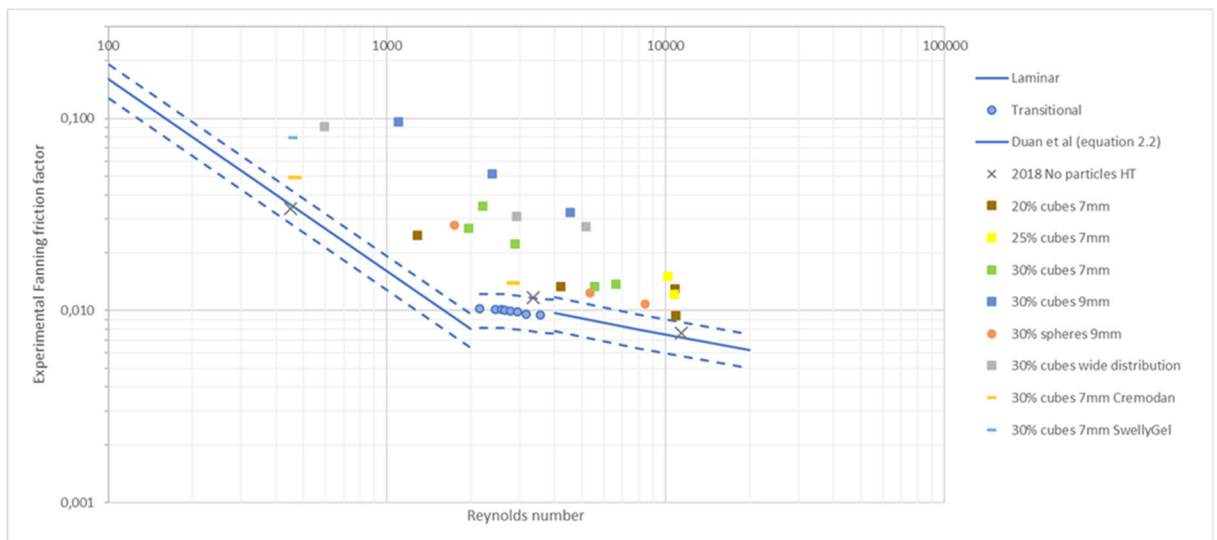


Fig 6 Tryckfall av riktigt testprodukt (livsmedel)

**Arbetspaket 5. Utveckling och validering av akademiska koder.** Här har de två universiteten arbetat med två olika typer av strömningskoder. LTH kör en laminär kod som fungerar i det laminära området och in i det transienta,  $Re < 2000$ . KTH kör en så kallad DNS-kod (Direct Numerical Simulation) som även fungerar vid låga turbulenta  $Re$ . Figur 7 visar överstämmelsen mellan simuleringarna från LTH vid olika partikelkoncentrationer och de lokal valideringsexperimenten från KTH. Som synes är överensstämmelsen mycket bra upp till ett  $Re$  på ca 2000

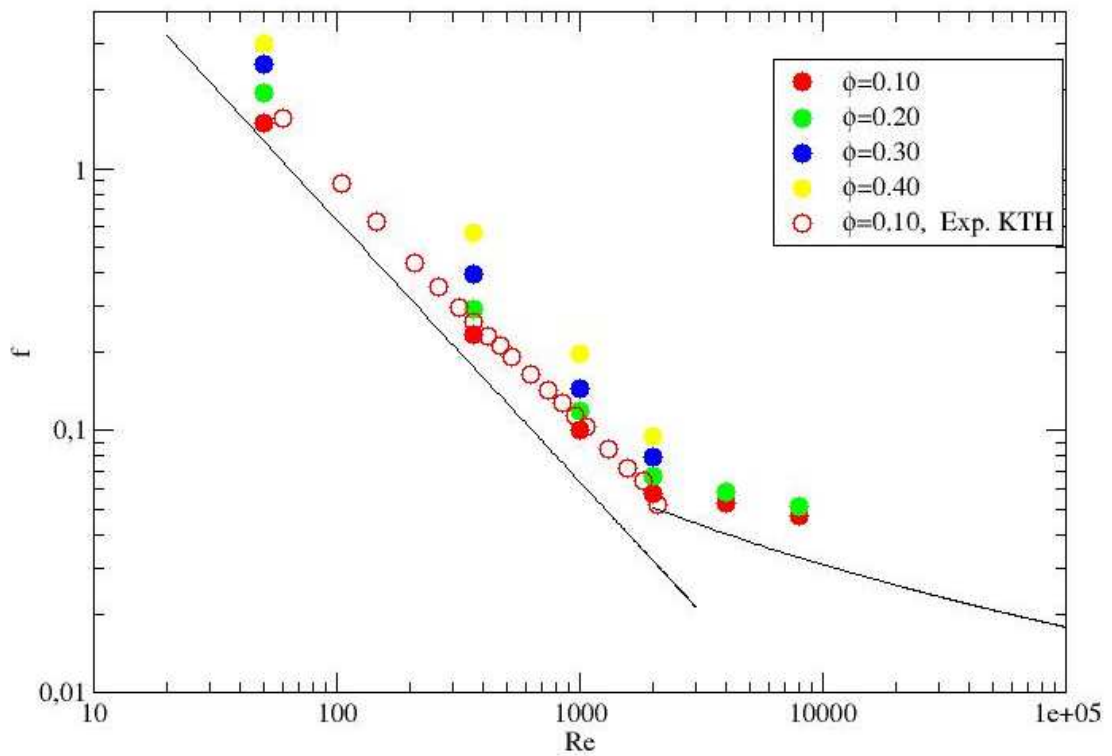


Fig 7 Jämförelse mellan LTHkoden och lokal valideringsdata

Figur 8 visar överstämmelsen mellan simuleringarna från KTH vid olika partikelkoncentrationer och de lokal valideringsexperimenten från KTH. Överensstämmelsen är mycket bra upp till ett Re på ca 10 000.

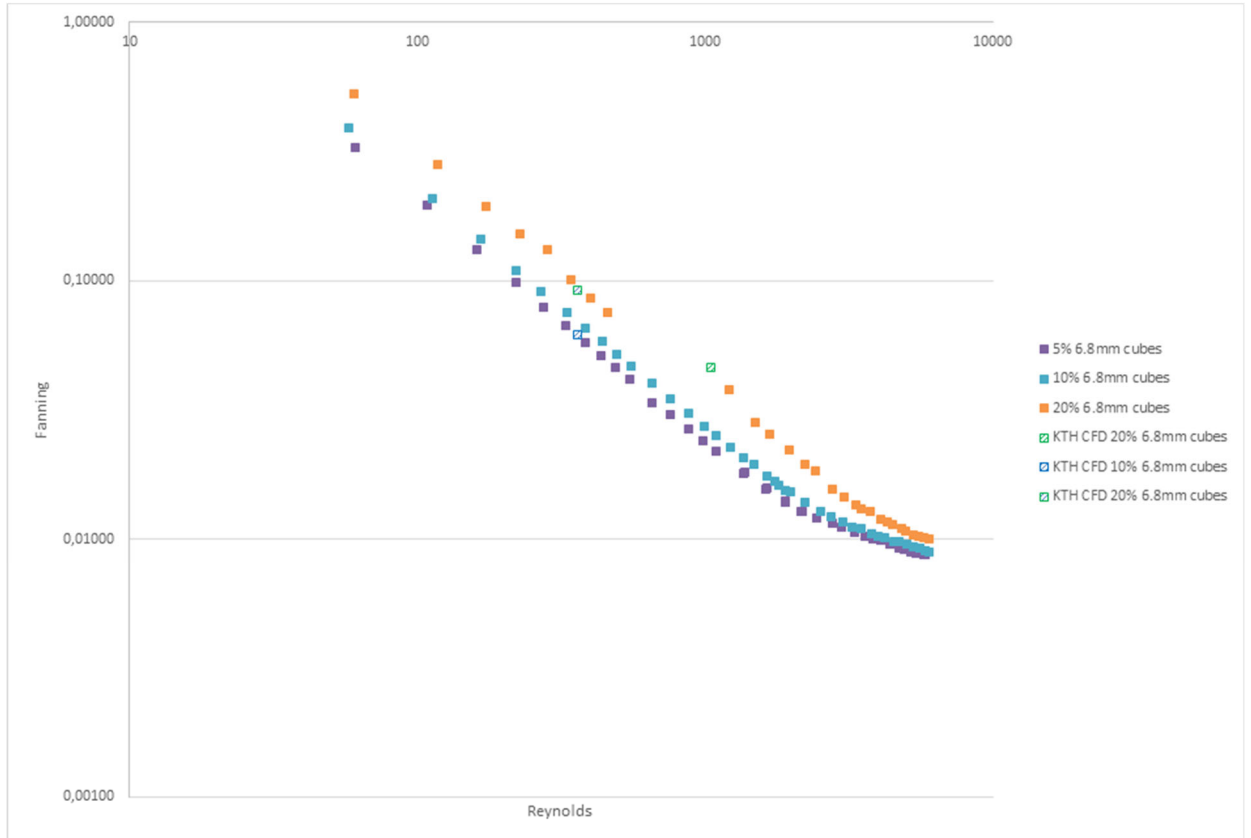


Fig 8 Jämförelse mellan KTHkoden och lokal valideringsdata

**Arbetspaket 6. Överföring till, modifiering och validering av kommersiell kod.**  
 De två koderna IBOFlow samt Star CCM+ valdes ut i arbetspaket 2. IBOFlow är en så kallad Immersed Boundary kod framtagen av Fraunhofer Chalmers och Star CCM+ är en generell CFDkod från Siemens

### Immersed Boundary Octree Flow Solver

- **State-of-the-art solver for multi-phase flows**
  - Unique immersed boundary techniques
    - *Greatly simplified pre-processing – "no bodyfitted meshing"*
    - *Moving geometries handled very efficiently*
  - Very fast implementation – GPU computing
  - Volume of Fluids module
  - Particle and sprays module
  - Multiple cavities
- **Multi-physics applications**
  - Electrostatic module
  - Heat transfer module
  - Structural dynamics module
  - DEM module
- Efficient pre- and post-processing and user-friendly GUI tailored for customer needs
- Physic engine for IPS applications
- Used by Chalmers in some research projects

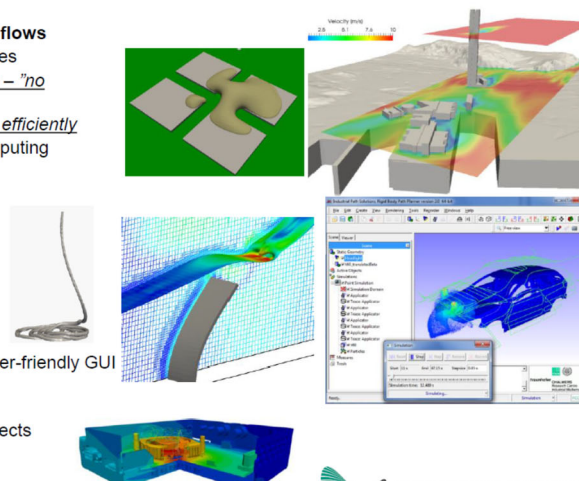


Fig 9 Bild ur marknadsföringsmaterialet framtaget i projektet som beskriver IBOFlow

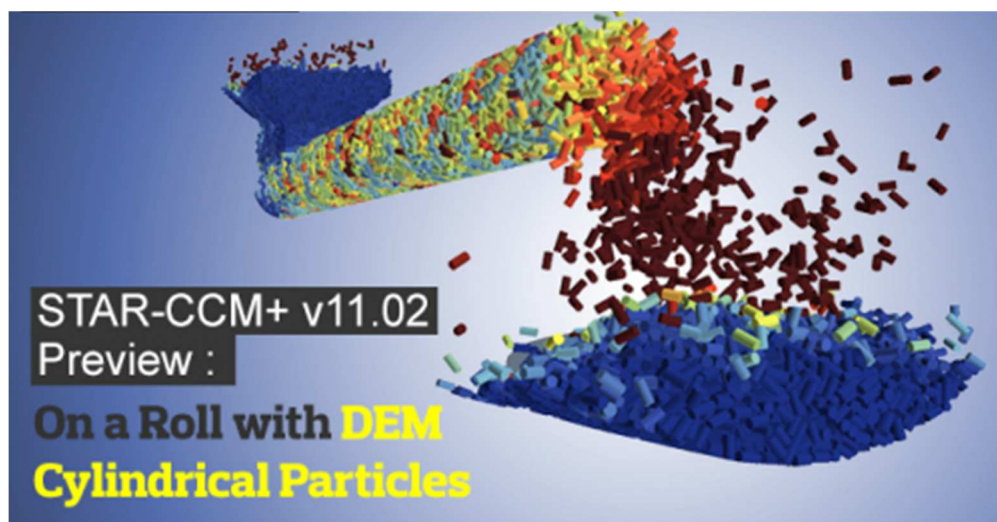


Fig 10 Bild ur marknadsföringsmaterial från Siemens beskriver Star CCM+ med DEM

Projektet har lagt mer mycket tid och möda på att undersöka inom de olika koderna fungerar och var i begränsningar ligger. Vi arbetar med parameterrymden:

- Relativ partikelstorlek, definierad som Partikelstorlek normerad med geometrin, här rördiametern.
- Reynolds tal

I figur 11 ser vi var inom denna partikelrymd de olika mjukvarorna fungerar. IBOFlow klarar av mycket stora partiklar men blir partiklarna för små blir de också för många och då blir koden mycket långsam. Det finns en begränsning strax över  $Re$  1000. DEM i Star-CCM+ har turbulensmodeller så den koden fungerar vid alla  $Re$  men klarar bara av små partiklar. Det finns i dag ingen industriellt användbar mjukvara som klarar av kombinationen mycket stora partiklar och höga  $Re$ .

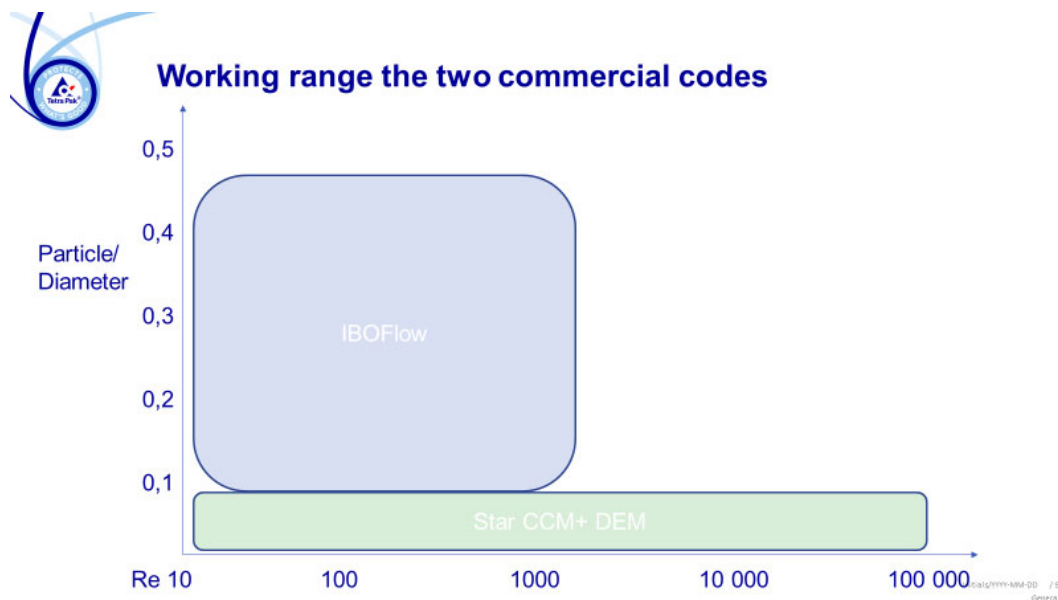


Fig 11 Parameterrymden för de olika mjukvarorna

Figur 12 och 13 visar den slutgiltiga valideringsdatan för stora sfärer resp. små kuber. Som synes så är överensstämmelsen mycket bra för alla  $Re$  upp till ca 1000

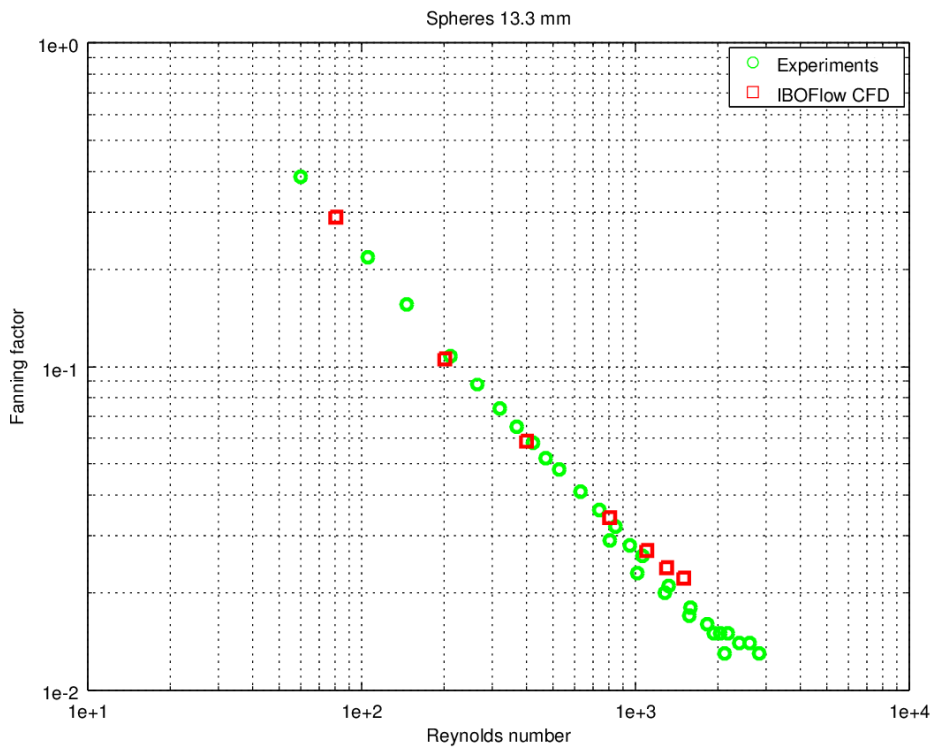


Fig 12 Överensstämmelse mellan IBOFLOW och experiment för stora sfärer

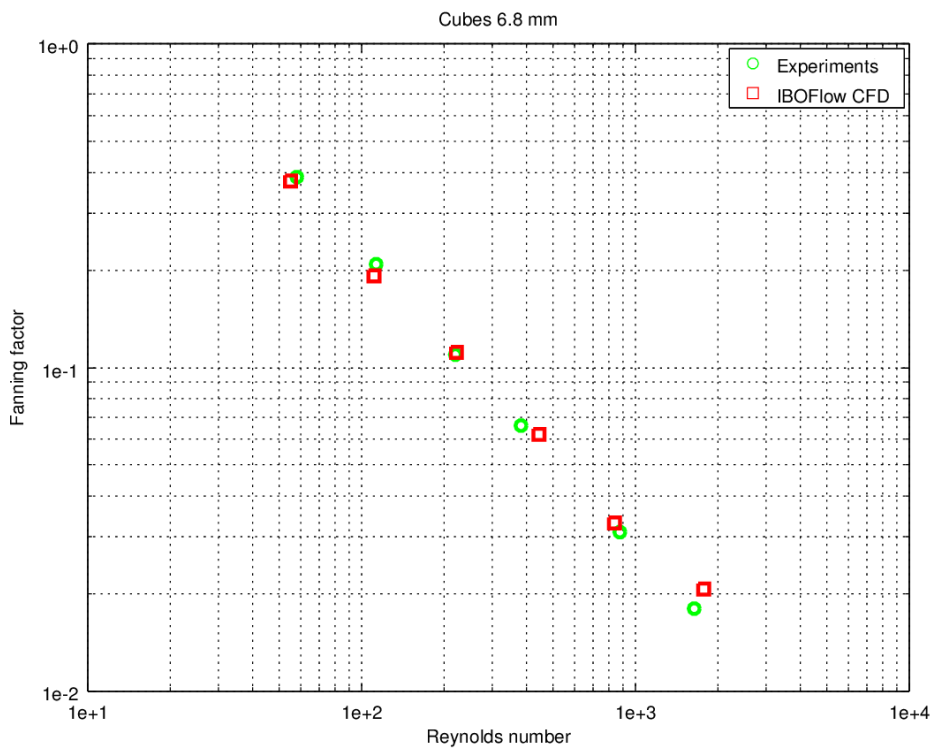


Fig 13 Överensstämmelse mellan IBOFLOW och experiment för små kuber



Projektet har haft som mål att de industriella koderna ska avvika med max 20% när vi validerar med mätdata. Som kan ses i figur 14 så överpredicerar STAR-CCM+ tryckfallet en smula men vi ligger väl under kravet på 20%. (fig 14)

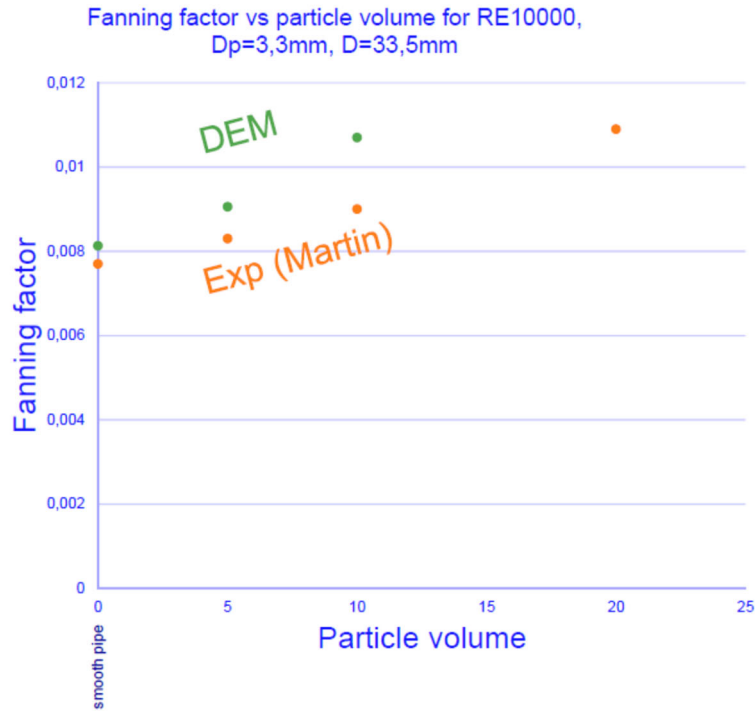


Fig 14 Överensstämmelse mellan Star-CCM+ och experiment för små partiklar

För CTAR-CCM+ har vi även undersökt partikelfördelning i en bifurkation med god överensstämmelse mellan simulering och den analytiska lösningen, fig 15

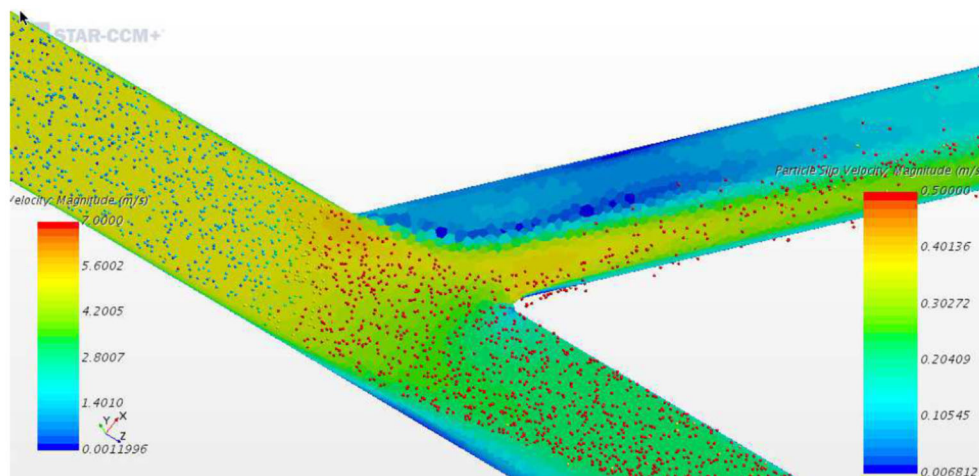


Fig 15. Partikelfördelningen i en bifurkation

## Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

Projektet har lyckats med sin huvudsakliga målsättning; Att ta fram ett industriellt användbart redskap för att simulera flöden som är en blandning av vätska och partiklar. Projektet har modifierat, anpassat och optimerat de befintliga simuleringsprogrammen IBUFlow och Star-CCM+. Programmens användbarhetsområde visas i fig 11. IBOFlow klarar av mycket stora partiklar men blir partiklarna för små blir de också för många och då blir koden mycket långsam. Det finns en begränsning strax över  $Re$  1000. DEM i Star-CCM+ har turbulensmodeller så den koden fungerar vid alla  $Re$  men klarar bara av små partiklar. Tyvärr så finns det i dag ingen industriellt användbar mjukvara som täcker den över högra kvadranten, en av kombinationen mycket stora partiklar och höga  $Re$ . Det finns akademisk mjukvara som genom att använda tusentals datorer i de stora nationella dataklustren klarar att skjuta gränsen lite till höger men det är inget som är industriellt användbart. Detta är en klar begränsning som minskar verktygslådan för den som vill utveckla och optimera en återvinningsprocess. När vi startade det här projektet var vi övertygade om att det var stora partiklar som var den största utmaningen och också det största användningsområdet. Att det var den största utmaningen visade sig vara rätt men vi har under projektets gång mer och mer börjat luta åt att partiklarna inte alltid är så stora och att en mjukvara som bara kan hantera små partiklar också är användbar. Det är därför vi under projektets sista månader vi har lagt mer tid på DEM och validerat det noggrannare än vad som förut var tänkt.

Vi känner därför att även om det finns en begränsning i vad som är möjligt idag så har vår kunskap om vad koderna klarar av tillsammans med vår nya förståelse för hur olika partikelhalter påverkar flödet vid Reynoldstal kan nu vår konsultpartner fsDynamics nu leverera tjänsten att simulera och optimera riktiga industriella återvinningsprocesser vilket var projektets slutgiltiga mål.

## Publikationslista

### Published

#### **Buoyant finite-size particles in turbulent duct flow**

S. Zade, W. Fornari, F. Lundell and L. Brandt, *Phys. Rev. Fluids*, **4**, 024303, 2019. [pdf](#)

#### **Turbulence modulation by finite-size spherical particles in Newtonian and viscoelastic fluids**

S. Zade, F. Lundell and L. Brandt, *International Journal of Multiphase Flow*, **112**, 116-129, 2019. [pdf](#)

#### **Turbulence modulation in channel flow of finite-size spheroidal particles**

M. Niazi Ardekani and L. Brandt, *J. Fluid Mech.*, **859**, 887-901, 2019. [pdf](#)

#### **Experimental investigation of turbulent suspensions of spherical particles in a square duct**

S. Zade, P. Costa, W. Fornari, F. Lundell and L. Brandt, *J. Fluid Mech.*, **857**, 748-783, 2018. [pdf](#)

#### **Numerical study of heat transfer in laminar and turbulent pipe flow with finite-size spherical particles**

M. Niazi Ardekani, L. Al Asmar, F. Picano and L. Brandt, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **71**, 189-199, 2018. [pdf](#)

#### **Numerical study of heat transfer in laminar and turbulent pipe flow with finite-size spherical particles**

M. Niazi Ardekani, L. Al Asmar, F. Picano and L. Brandt, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **71**, 189-199, 2018. [pdf](#)

### Manuscript/In press

#### **Transition in pipe flow with large spherical particles**

M. Leskovec, F. Lundell, F. Innings

#### **Magnetic resonance velocimetry on transitional pipe flow with large spheres and cubes**

M. Leskovec, F. Innings, F. Lundell

## Projektkommunikation

Under projektet har den huvudsakliga projektkommunikationen varit till den akademiska världen och inom de samarbetsorganisationer vi har inom området för att sprida kunskap mellan akademien och industri. På de workshops som Swedish Industrial Association of Multi phase Flow (SIAMUF) anordnar har både hela och olika delar av projektet presenterats fyra gånger under projekttiden och vid det nu förestående höstmötet kommer olika delar av projektet att presenteras av fem olika presentatörer både från industrin och akademien. Under de av Kungliga Vetenskapsakademien/Nationalkommittén för Mekanik organiserade Mekanikdagarna har projektet presenterats både 2017 och 2019

För de mer utåtriktade delen av kommunikationen ansvarar vår konsultpartner FSDynamics vilket presenteras i bifogad marknadsföringsplan och av bifogat marknadsföringsmaterial

## Referenser

### Bilagor

- Administrativ bilaga
- Hållbarhetsanalys
- Marknadsföringsplan
- Marknadsföringsmaterial