

Technical University of Denmark



## Trykfald over en bed af fliskoks

Hindsgaul, Claus; Henriksen, Ulrik Birk

*Publication date:*  
1999

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Hindsgaul, C., & Henriksen, U. B. (1999). Trykfald over en bed af fliskoks. DTU Institut for Energiteknik.

## DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

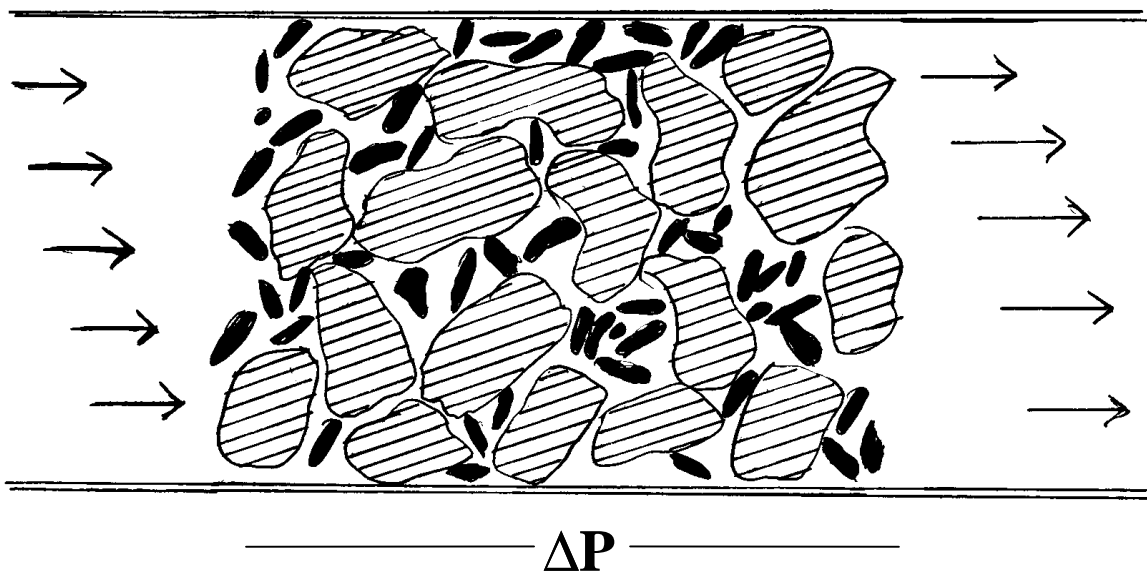
### General rights

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

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.

## Trykfald over en bed af fliskoks



**Abstract**

En (atmosfærisk) luftstrøm ledtes gennem en fast bed af delvist forgasset fliskoks med en binær partikelstørrelsesfordeling (8 og 16 mm). Under variation af størrelsesfordeling og strømningshastighed registreredes det resulterende trykfald gennem bedden. Eksisterende estimationsformler for trykfaldet blev valideret for de givne kokspartikler.

**Note**

Dette er en bearbejdning af rapporten "Trykfald over en Bed af Fliskoks" ved Donovan og Hindsgaul 1997 [1]. I nogle tilfælde er brugen af symboler ændret i forhold til rapporten for at opnå bedre konsistens ligesom fundne fejl er rettet. Både den teoretiske baggrund, forsøgsbeskrivelse og resultater vil blive præsenteret, hvorfor dette skrift kan læses alene. For en grundig beskrivelse af det eksperimentelle arbejde henvises til forsøgsrapporten [1].

*Claus Hindsgaul og Ulrik Henriksen, April 1999*

## Indhold

1. Indledning.....	4
2. Teori og litteratur.....	4
2.1 Reynoldstal og flowdomæner.....	4
2.2 Porøsitet.....	4
2.3 Formler for tryktab .....	5
2.3.1 Ergun's formel.....	5
2.3.2 Standish's formel.....	5
2.3.3 Standish's formel med viskøst led .....	7
2.3.4 Sammenligning af udtryk .....	7
3. Forsøg med fliskoks .....	7
3.1 Partiklerne .....	8
3.2 Forsøgsbeskrivelse .....	8
3.3 Resultater .....	10
3.4 Evaluering af tryktabsformler.....	11
4. Konklusion .....	14
Symbolliste .....	15
Referencer .....	16
Bilag 1 - Måledata .....	17

## 1. Indledning

I forbindelse med optimering af biomasseforgassere er viden om gasstrømning gennem koksbedden i forgasningskammeret interessant. Under dette arbejde blev det forsøgt at klarlægge hvilke parametre, der er bestemmende for trykfaldet af gasstrømme ved forceret strømning gennem homogene koksbeds. Dette blev gjort dels ved litteraturstudie, dels ved en opstilling hvor atmosfærisk luft blev blæst gennem en cylinder fyldt med 40 liter koks.

## 2. Teori og litteratur

### 2.1 Reynoldstal og flowdomæner

Strømninger gennem partikelsamlinger tilhører forskellige domæner afhængigt af reynoldstallet, defineret således (for partikler af homogen størrelse) [3]:

$$Re \approx \frac{\rho U_t}{\mu S_v} \approx \frac{\rho U_t d}{\mu \varepsilon}$$

Hvor  $Re$  er reynoldstallet,  $U_t$  er strømningshastigheden uden tilstedeværelse af partikler,  $d$  er partikeldiameteren (denne er ikke præcist defineret for ikke-sfæriske partikler),  $\rho$  er fluidens densitet,  $S_v$  er overfladeareal pr. volumenenhed,  $\mu$  er fluidens viskositet,  $\varepsilon$  er partikelsamlingens porøsitet.

Re	Strømningsdomæne
<1	Krybende (viskos) strømning
1-10	Inerti strømning
10-150	Stigende kernestrømninger udenfor grænselag
150-300	Uens laminar strømning
>300	Ikke statisk/kaotisk strømning

Tabel 1: Strømningsdomæner for strømninger gennem partikelsamlinger.

### 2.2 Porøsitet

Porøsiteten  $\varepsilon$  af en partikelsamling (volumenandelen af "luft" mellem partiklerne) er en vigtig parameter for størrelsen af trykfaldet gennem partikelsamlinger. Den afhænger af partikelgeometrierne og hvilken struktur de danner i bedden, men ikke af deres absolutte størrelse. F.eks. kan kugleformede partikler stables velordnet så  $\varepsilon=0,26$  (uanset størrelse, når randeffekter ignoreres). En "løs, tilfældig pakning" af homogene kugler har en porøsitet på ca. 0,37-0,44. Hvis en sådan pakning rystes godt, opnås en "Kompakt tilfældig pakning" med en porøsitet på ca. 0,33-0,39 [3].

Blandes partikler af forskellig størrelse vil porøsiteten alt andet lige falde, da de mindre partikler kan udfylde hulrummene mellem de større. Ved meget store spredninger i størrelserne kan man med kugleformede partikler teoretisk nå ned på en porøsitet omkring 0,04-0,18.

En partikelsamlings porøsitet har stor indflydelse på det tryktab, en gennemstrømmende fluid påføres.

### 2.3 Formler for tryktab

For krybende strømninger gennem partikelsamlinger kan beregninger for tryktab baseres på Darcy's klassiske friktionsfaktor. Ved højere  $Re$  får partikelgeometrier og -størrelser en stigende betydning og der er udviklet adskillige approksimationer. Empiri spiller en stor rolle. Forcheimer påviste følgende sammenhæng mellem tryk og volumenstrøm, der med succes er valideret for  $1 < Re < 200$  [3]:

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot \left( \frac{\bar{P}}{P_2} \right) = AU_t + BU_t^2$$

hvor  $\Delta P$  er tryktabet,  $\bar{P}$  er middeltrykket i partikelsamlingen,  $P_2$  er trykket efter partikelsamlingen.  $L$  er højden af bedden mens  $U_t$  er fluidens hastighed baseret på tværsnitsareal uden partikler.  $A$  og  $B$  er semi-empiriske konstanter, der er relaterede til et givent strømningsdomæne og partiklernes størrelser, overfladeareal, ruhed, geometri og opblanding.  $A$ -leddet beskriver de viskose kræfter mens  $B$ -leddet beskriver de kinematiske. Ofte er tryktabet gennem bedden lille i forhold til det absolutte tryk således at leddet  $\left( \frac{\bar{P}}{P_2} \right)$  kan udelades:

$$\boxed{\frac{\Delta P}{L} = AU_t + BU_t^2}$$

Der er foreslået snesevis af udtryk til beregning af  $A$  og  $B$  for givne partikelsamlinger og reynoldstal [3].

#### 2.3.1 Ergun's formel

I 1952 foreslog Ergun en generel formel for trykfald gennem partikelsamlinger:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left( \frac{150\mu}{d^2} \right) \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} U_t + \left( \frac{1,75\rho}{d} \right) \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} U_t^2$$

hvor  $\mu$  og  $\rho$  er fluidens viskositet og densitet.  $d$  er partikeldiameteren. Erguns udtryk svarer til Forchheimers med:

$$A_{Ergun} = \left( \frac{150\mu}{d^2} \right) \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad \text{og} \quad B_{Ergun} = \left( \frac{1,75\rho}{d} \right) \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}$$

#### 2.3.2 Standish's formel

Et udtryk svarende til følgende værdier for  $A$  og  $B$  blev udledt af Standish i 1980 [5] i forbindelse med forsøg med tertiært størrelsesfordelt stålværkskoks med partikeldiameter mellem 5 og 28mm for  $300 < Re < 800$ :

$$A_{Standish} = 0 \quad \text{og} \quad B_{Standish} = \left( \frac{f\rho}{\phi\psi d} \right) \frac{1-\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}^3}$$

hvor  $f$  er Erguns kinematiske friktionsfaktor  $f_k=1.75$ ,  $\bar{\varepsilon}$  er middelporøsiteten af partikelsamlingen,  $\bar{d}$  er middeldiameteren af partiklerne og  $\bar{\psi}$  er middel-sfærisiteten.

Standish indførte geometrifaktoren  $\phi$ , der er 1 ved homogen opblanding af partikler og  $0 < \phi < 1$  ved inhomogen opblanding med membran-dannelser.

Det er uklart, hvordan man beregner middelfærisiteten af blandinger, så Standish interpolerede  $\bar{\psi}$  og  $\bar{d}$  samlet med følgende formel [4]:

$$\bar{\psi d} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i \cdot \psi_i}}$$

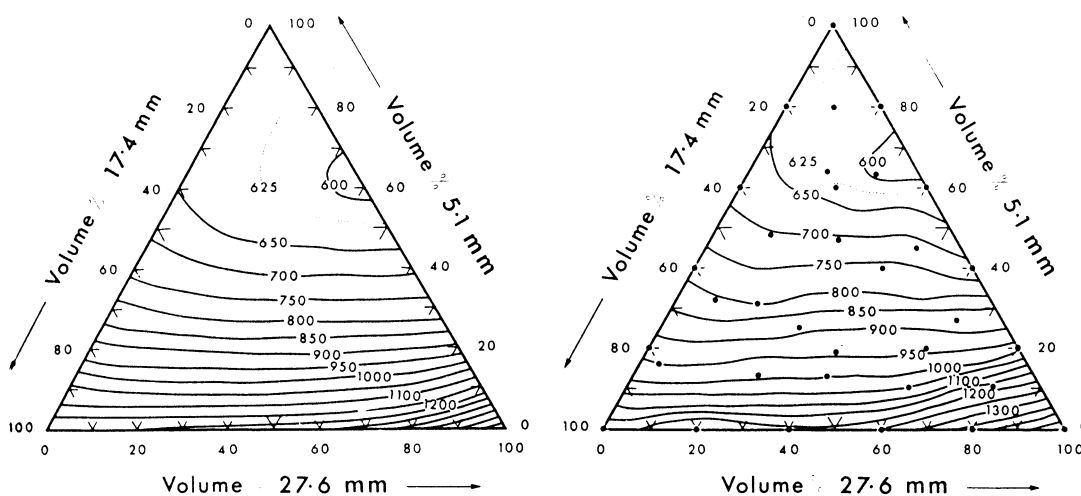
hvor index  $i$  markerer en partikelfraktion med samme størrelse og geometri.

Standish's udtryk kan dermed skrives således:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left( \frac{\rho f_k \sum \frac{x_i}{d_i \cdot \psi_i} \cdot (1 - \varepsilon)}{\phi \cdot \varepsilon^3} \right) \cdot U_i^2$$

hvor  $U$  er fluidens hastighed gennem bedden baseret på beddens samlede tværsnitsareal.

Standish validerede dette udtryk for stålværkskoks og flow med  $300 < Re < 800$  ved at lede atmosfærisk luft gennem en koksbed med tre partikelstørrelser med diametrene 5.1/17.4/27.6 mm blandet i 34 forskellige forhold. Sfærishiteten vurderede han til at være 0.80 for de store koks og 0.67 for de to små størrelser. Estimer med ovenstående formel gav yderst præcise forudsigelser af permeabiliteten gennem bedden, som det ses i figur 1. Trekkanterne viser grafisk værdier af permeabiliteten<sup>1</sup> som "isopermer" (linier med samme permeabilitet). Som det ses af figur 1, er de beregnede og målte permeabiliteter næsten sammenfaldende.



Figur 1. Beregnede (venstre) og målte (højre) permeabiliteter for koksblandinger med tre partikelstørrelser med diametrene 5.1/17.4/27.6 mm [4]

<sup>1</sup> Permeabiliteten definerede Standish som det resulterende flow ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) af atmosfærisk luft ved standard-tryk og -temperatur gennem en 1 meter dyb koksbed med et areal på  $1 \text{ m}^2$  og et trykfald på 1 kPa.

### 2.3.3 Standish's formel med viskøst led

Erguns friktionsfaktor er givet som:

$$f = 150 \frac{(1 - \varepsilon)}{\text{Re}} + 1,75$$

$$= \left( \frac{150 \mu \varepsilon}{\rho U_i d} \right) \frac{(1 - \varepsilon)}{1} + 1,75$$

Standish ignorerede det hastighedsafhængige, viskøse bidrag til friktionsfaktoren og benyttede den konstante værdi  $f=1,75$  i sine beregninger dermed fik han en tryktafsafhængighed, der var proportional med kvadratet på gashastigheden (og ikke lineært med hastigheden). Dette kan forsvares ved "høje" hastigheder.

Skriver man det fulde udtryk for  $f$  ind i Standish's formel for at medtage de viskøse bidrag, bliver  $A$  og  $B$ :

$$A_{\text{Stand+v}} = \left( \frac{150 \mu \sum \frac{x_i}{d_i \psi_i}}{\phi d} \right) \frac{(1 - \bar{\varepsilon})^2}{\bar{\varepsilon}^2} \quad \text{og} \quad B_{\text{Stand+v}} = \left( \frac{1,75 \rho \sum \frac{x_i}{d_i \psi_i}}{\phi} \right) \frac{1 - \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}^3}$$

Det tilføjede viskøse bidrag må forventes at få betydning når:

- viskositeten af gassen er stor
- partikeldiametrene er små
- gashastigheden er lille
- densiteten af gassen er lille

### 2.3.4 Sammenligning af udtryk

Formel-navn	A (viskøst led)	B (inerti-led)
<b>Ergun</b>	$\left( \frac{150 \mu}{d^2} \right) \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$	$\left( \frac{1,75 \rho}{d} \right) \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}$
<b>Standish</b> (uden viskøst led)	0	$\left( \frac{1,75 \rho \sum \frac{x_i}{d_i \psi_i}}{\phi} \right) \frac{1 - \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}^3}$
<b>Standish+v</b> (med viskøst led)	$\left( \frac{150 \mu \bar{\varepsilon} \sum \frac{x_i}{d_i \psi_i}}{\phi d} \right) \frac{(1 - \bar{\varepsilon})^2}{\bar{\varepsilon}^3}$	$\left( \frac{1,75 \rho \sum \frac{x_i}{d_i \psi_i}}{\phi} \right) \frac{1 - \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}^3}$

Tabel 2: Formler for konstanterne i Forchheimers udtryk for tryktab.

## 3. Forsøg med fliskoks

I dette afsnit beskrives de forsøg, der blev udført på fliskoks udtaget fra tottrinsforgasserens bed efter et forgasningsforsøgs afslutning.



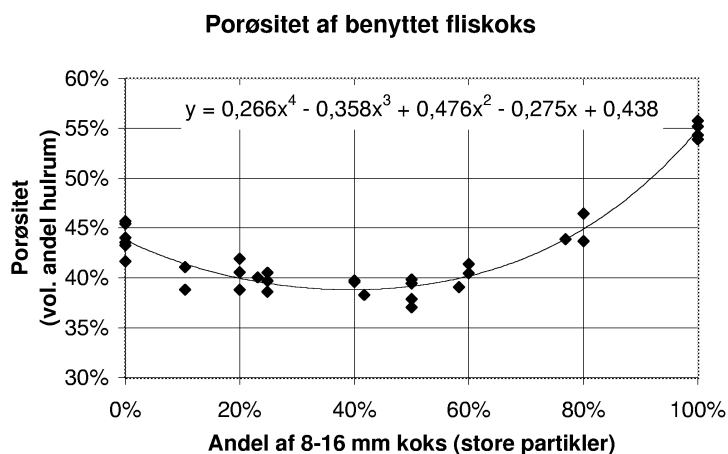
### 3.1 Partiklerne

Det undersøgte partikelmateriale er koks af løvtræs-flis, der tidligere var udtaget fra en forgasningsreaktor efter nedlukning. Ved forgasningsforsøgets afslutning standsedes forgasningsprocessen ved indblæsning af nitrogen i reaktoren.

Ved sining af koksprøven gennem standardsier blev to størrelsesfraktioner udskilt fra dette baseret på maskestørrelsen af de passerede sier:

- Store partikler 8-16mm (middeldiameter ca. 11,3 mm)
- Små partikler 0,7-2,0mm (middeldiameter ca. 1,3 mm)

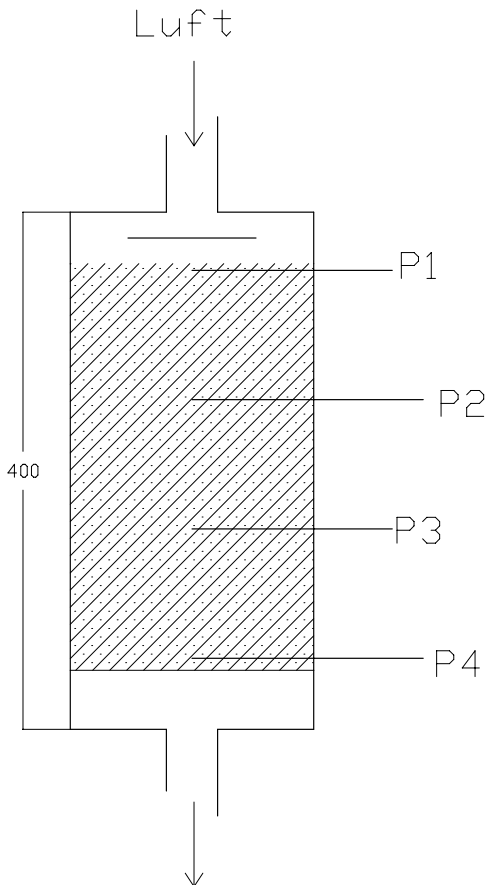
Densiteten af koksen blev bestemt ved en metode, beskrevet i [4]: En koksprøve, vejes i tørret tilstand, holdes neddykket i vand i 24 timer. Volumen af koksen kunne herefter registreres som den vandmængde, den gennemblødte koks fortrængte, når det - efter let afdrypning - blev nedsænket i vand i et måleglas. Densiteten af den benyttede koks (tørret ved 104°C) blev på denne måde bestemt til  $\rho=0,31\text{g/cm}^3$ . Porøsiteten af blandinger af "store" og "små" partikler kunne herefter bestemmes med litermål og vægt (figur 2).



Figur 2. Porøsiteten ved løs tilfældig pakning af forskellige vægtandele af "store" partikler i en 11.3/1.3 binær partikelblanding.

### 3.2 Forsøgsbeskrivelse

Partiklerne blev hældt i en cylinderformet beholder (radius 20 cm, højde 40 cm). Fire tynde metalrør rør var ført ind i centrum af beholderen 10 cm over hinanden således at man kunne måle trykforskellene over tre lag i bedden.



Figur 3. Den cylindriske beholder, hvori koksblendingen gennemblæstes med luft gennem indløbet i toppen. En skive var placeret nær indløbet for at sprede strømmingen.

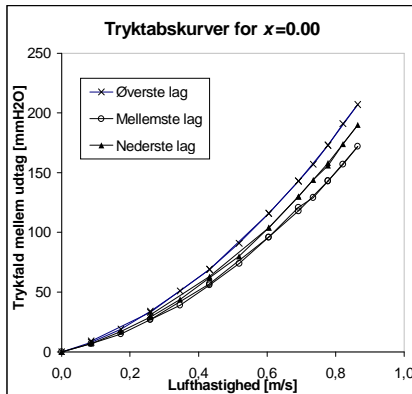
Idet atmosfærisk luft ved ca. 20°C og atmosfæretryk blev ledt gennem bedden med  $0 < U_i < 0.8$  m/s registreredes tryktabskurver for de tre lag i bedden. Dette blev gentaget for blandinger med forskellige andele af "store" og "små" partikler (se tabel 3). Reynoldstallet lå mellem  $17 < Re < 1200$ . Til brug ved databehandlingen konstrueredes en ekstra kurve som summen af de to nederste lag, da det forventedes at luftflowet var mere stabilt i disse lag. Denne "fjerde målekurve" blev medtaget i datagrundlaget for de efterfølgende beregninger.

Andel store partikler:	$x=0.00$	$x=0.15$	$x=0.25$	$x=0.50$	$x=1.00$
Antal forsøg:	3	2	2	2	2

Tabel 3. Forsøgsoversigt. De binære partikelblandinger blev blandet med fem forskellige  $x$  (volumenandel af store partikler). Til hvert af de 11 forsøg fyldtes forsøgsbeholderen med en ny blanding koks. Hvert forsøg resulterede i en målekurve for hvert af de tre lag (i alt 33 målekurver).

### 3.3 Resultater

Figur 4 viser en graf af de typiske 3 målekurver for en enkelt blanding.



Figur 4. Typisk målekurve for gennemblæsning af koksbed med målinger for de tre 10 cm tykke kokslag (her med 100% “små” partikler).

Herefter blev parametriske datafit udført på de producerede tryktabskurver med mindste kvadraters metode. Formålet var i første omgang at forsøge at repræsentere hver enkelt målekurve med en eller to empiriske konstanter. De resulterende varianser, der kan ses i tabel 4, indikerer at de foreslåede udtryk giver en god beskrivelse af målekurverne. Især den første, som i øvrigt svarer til Forcheimers formel.

## Datafit, kurve-specifikke konstanter

Formel	Varians [kPa <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Kommentar
$\frac{\Delta P}{L} = A'_{LS} \cdot U_t + B'_{LS} \cdot U_t^2$	0,10 <sup>2</sup>	Reynolds udtryk med empiriske konstanter $A'_{LS}$ og $B'_{LS}$ for hver enkelt målekurve.
$\frac{\Delta P}{L} = C'_{LS} \cdot U_t^{D'_{LS}}$	0,17 <sup>2</sup>	Potensudtryk (uden teoretisk baggrund) med empiriske konstanter $C'_{LS}$ og $D'_{LS}$ for hver enkelt målekurve.
$\frac{\Delta P}{L} = \tilde{C}'_{LS} \cdot U_t^{1,60}$	0,19 <sup>2</sup>	Potensudtryk med empiriske konstanter $\tilde{C}'_{LS}$ for hver enkelt målekurve med den potens, der gav det bedste samlede fit, ( $D=1,60$ ).

Tabel 4. Parametriske LS-estimer med separate konstanter for hver enkelt af de 43 målekurver.

Nye estimer blev fundet med den ændrede antagelse at alle tryktabskurver med samme partikelblanding,  $x$ , havde samme konstantværdier.

Varianserne fra disse estimer (tabel 5) var næsten en størrelsesorden større end dem i tabel 4.

Dette antyder, at der er flere parametre end den bevidst ændrede (forholdet mellem “store” og “små” partikler) som var bestemmende for trykfaldet. I Standish’s formel ses to parametre, der er svære at styre og reproducere præcist, og sandsynligvis kan forklare mange afvigelse:

- $\varepsilon$  (porøsiteten) af den løse, tilfældig pakning afhænger af hvorledes partiklerne er hældt i beholderen samt hvor meget de blev udsat for rystelser herefter.
- $\phi$  (geometrifaktoren) afhænger af hvor god en blanding af partiklerne, der er opnået. Partikelprøverne blev blandet i små portioner, der hældtes i kammeret efter hinanden for at maksimere opblandingen.

## Datafit, blandingspecifikke konstanter

Formel	Varians [kPa <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Kommentar
$\frac{\Delta P}{L} = \tilde{C}_{LS} \cdot U_t^{1,60}$	1,3 <sup>2</sup>	Potensudtryk med LS-konstanter $\tilde{C}_{LS}$ , for hver blanding, $x$ .
$\frac{\Delta P}{L} = E_{LS} \cdot U_t^2$	1,5 <sup>2</sup>	Andengradsligning med LS-konstanter $E_{LS}$ for hver blanding, $x$ .

Tabel 5. LS-estimer af udtryk med konstanter, der fastholdtes for samme partikelblandingsforhold,  $x$ .

Idet andengradspolynomiet (øverst tabel 4) svarer til Forcheimers udtryk - og tillige beskrev de enkelte målekurver bedst - dannede dette udtryk grundlaget for de efterfølgende evalueringer af Erguns og Standish's udtryk for bestemmelse af tryktab.

### 3.4 Evaluering af tryktabformler

For at evaluere Erguns og Standish's tryktabformler, blev de forventede tryktab udregnet og sammenlignet med de i afsnit 3 fundne udtryk for .

I første omgang fokuseredes på  $E$ -værdien (tryktabets afhængighed af kvadratet på lufthastigheden).

Standish's formel var:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho f}{\phi \psi d} \right) \cdot U_t^2$$

Til estimationen benyttes følgende værdier:

- $\varepsilon$ , partikelblandingernes porøsitet blev eksperimentelt estimeret (se figur 1) for blandinger af "store" og "små" partikler:  $\varepsilon(x) = 0,266x^4 - 0,358x^3 + 0,476x^2 - 0,275x + 0,498$
- $\rho$ , luftens densitet - værdien 1,2 kg/m<sup>3</sup> blev benyttet.
- $\mu$ , luftens viskositet - værdien  $185 \cdot 10^{-7}$  N\*s/m<sup>2</sup>.

- $f$ , friktionsfaktoren blev i første omgang sat til erguns kinematiske friktionsfaktor  $f=f_k=1.75$  ligesom Standish gjorde det [4]. Herefter blev et udtryk for Erguns friktionsfaktor beregnet med luft-hastigheden<sup>2</sup> sat til  $U_t=0.4$  m/s og  $\varepsilon(x)$  som ovenfor:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon(x))}{\text{Re}} + 1.75 \\ &= \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon(x)) \cdot \mu \cdot \varepsilon(x)}{\rho \cdot U_t \cdot \bar{d}} + 1.75 \\ &= \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon(x)) \cdot 185 \cdot 10^{-7} \cdot \varepsilon(x)}{1,2 \cdot 0,4 \cdot (0,0013 + (0,011 - 0,0013)x)} + 1.75 \end{aligned}$$

Ved at indsætte dette udtryk for  $f$  i Standish's formel, opnåedes et pseudo-udtryk for  $E$ , der kunne bruges ved simpel sammeligning med  $E$ -værdier uden viskose led.

- $\phi$ , geometrifaktoren blev sat til 1 (optimal opblanding af partikler).
- $\bar{\psi d}$ . Sfærisiteterne for "store" og "små" partikler blev ved inspektion vurderet til henholdsvis 0,83 og 0,73 mens middeldiametrene var 11mm og 1.3mm. Det gav følgende udtryk:

$$\bar{\psi d} = \frac{1}{\frac{x}{0,011m \cdot 0,83} + \frac{1-x}{0,0013m \cdot 0,73}} = \frac{1}{-944,2x + 1053,7} [m]$$

Med alle værdier indsat ser Standish's formel således ud med  $f=1,75$ :

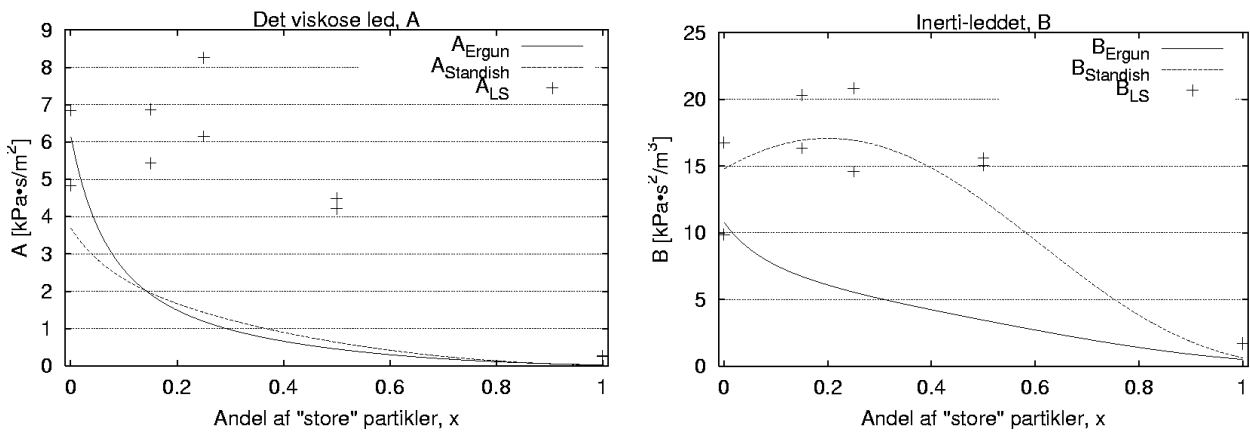
$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{L} &= \frac{1 - (0,363x^2 - 0,270x + 0,498)}{(0,363x^2 - 0,270x + 0,498)^3} \cdot 1,20 \cdot 1,75 \cdot (-944,2x + 1053,7) \cdot U_t^2 \left[ \frac{Pa}{m} \right] \\ &= E(x) \cdot U_t^2 \end{aligned}$$

Hvert målepunkt bygger på målekurver på 2-3 designede koksbeds med samme blandingsforhold. "Samlet datafit" er opnået ved at minimere summen af alle kvadratresidualerne fra både mellemlag, bundlag og summen af disse.

Figur 5 viser kurver for konstanterne for det viskose led  $A$  og inerti-leddet  $B$ . Måledataene er repræsenteret ved mindste kvadraters estimater af de to konstanter baseret på målekurverne for den samlede bed under forsøgene.

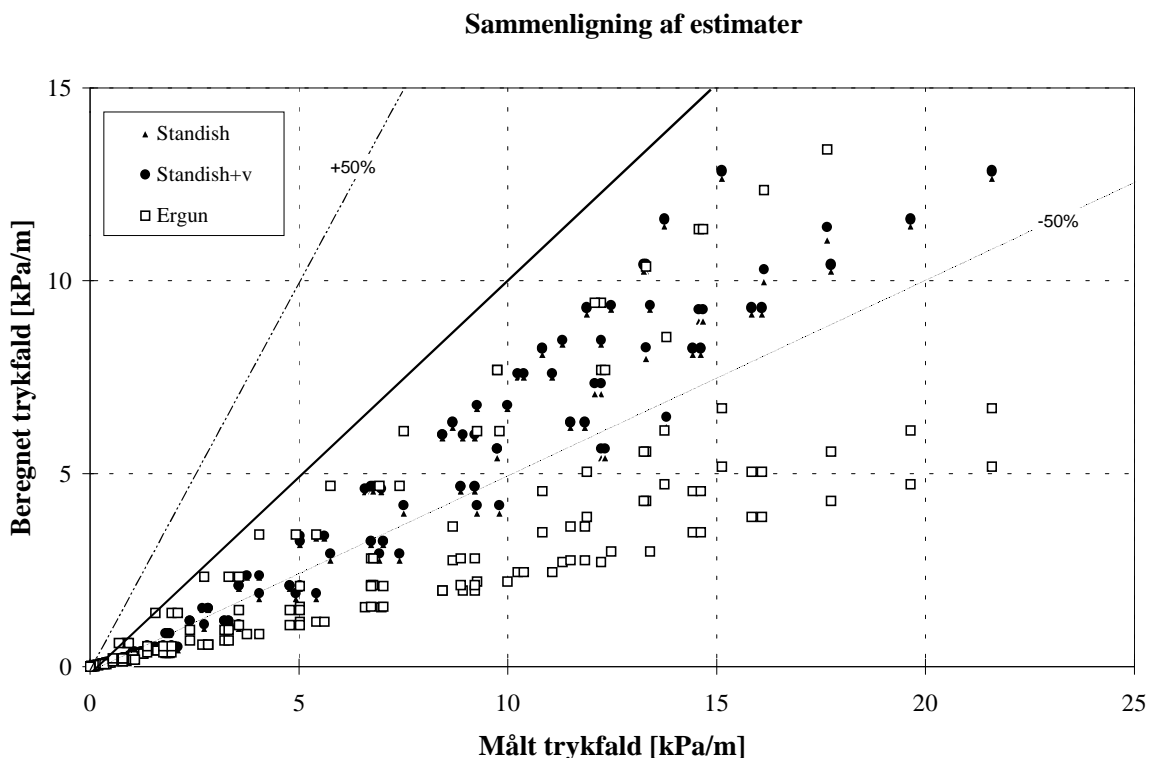
Det er tydeligt at Standish's formel passer bedre til dataene for inerti-leddet end Ergun's. Til gengæld passer de viskose led, for begge formler dårligt til datafittene fra måleserierne.

<sup>2</sup> Under vore forsøg lå  $U_t$  mellem 0 og 0.8 m/s



Figur 5. Konstanterne  $A$  og  $B$  i Reynolds tryktabsformel. Kurverne er beregnet med Ergun's og Standish's formler ud fra ovenstående forudsætninger. Krydsene markerer datafit til målekurverne over den samlede bed i forsøgsreaktoren.

I figur 6 sammenlignes beregnede trykfald pr. meter med de målte trykfald pr. meter. Samtlige målinger udviser større tryktab en beregnet. Som tidligere nævnt, kunne dette forventes - bl.a. fordi forudsætningen om en perfekt opblandet partikelbed (geometrifaktor 1) ikke holder. Ses der bort fra Ergun's beregnede værdier, ligger værdierne dog hovedsageligt indenfor -30 til -60% unøjagtighed.



Figur 6. Sammenligning af estimater for trykfald gennem binært størrelsesfordelt bed af 11.3/1.3mm koks. De tre undersøgte formler er alle plottet mod de aktuelt målte værdier.

#### 4. Konklusion

To eksisterende udtryk for beregning af trykfaldet ved gasflow gennem en bed af partikler blev evalueret med udførte måleserier på beds af binært størrelsesfordelt fliskoks ved flowhastigheder med  $U_1 < 0.8$  m/s.

Måleserierne viste en ganske stor spredning i de målte trykfald for koksbeds og forsøgsforhold, der var tilstræbt at være ens. Sandsynlige forklaringer på dette (graden af partiklernes opblanding og beddens porøsitet) blev påpeget.

Det viste sig at Standish's formel gav den bedste forudsigelse. Ved at fjerne hans antagelse om en ren inertistrømning, blev et nyt udtryk udledt, som inkluderede viskose effekter i strømmingen. Denne formel forbedrede Standish's formel marginalt, hvilket resulterede i den bedste overensstemmelse med de målte tryktab.

Tryktab beregnet med de evaluerede udtryk var konsekvent underestimerede - ca. mellem 30-60% under de målte tryktab (figur 6). Af parametre, der indgår i udtrykkene er geometrifaktoren  $\phi$  og sfærisiteten  $\psi$  vurderede størrelser ligesom  $d$  er upræcist defineret. En bedre bestemmelse af disse vil muligvis give et ændret resultat.

Det vurderes at man for lignende partikelbeds kan opnå forudsigelser på trykfaldet med en præcision omkring 50%.

De evaluerede formler kan umiddelbart udvides til kontinuerte partikelfordelinger. Standish evaluerede således med held selv sin formel med forsøg med tertiært størrelsesfordelte koks (figur 1). Evaluering af sådanne fordelinger er ikke foretaget, men forventes ikke at afvige grundlæggende i tryktabskaraktistik.

## Symbolliste

$A$	Konstant i Reynolds tryktabsformel, $\frac{\Delta P}{h} = A \cdot U_t + B \cdot U_t^2$
$A_{LS}$	Mindste kvadraters estimat af $A$ baseret på flere målekurver med samme $x$ .
$A'_{LS}$	Mindste kvadraters estimat af $A$ baseret på en enkelt målekurve.
$A_{Ergun}$	Konstanten $A$ beregnet med Ergun's formel.
$A_{Standish}$	Konstanten $A$ beregnet med Standish's formel.
$A_{Stand+v}$	Konstanten $A$ beregnet med Ergun's formel plus viskost led.
$A_t$	Samlet tværsnitsareal af bedden (inklusive partikler).
$B$	Konstant i Reynolds tryktabsformel $\frac{\Delta P}{h} = A \cdot U_t + B \cdot U_t^2$ . Der benyttes samme indices som for $A$ .
$C$	Lineær konstant i potens-datafit (tabel 2). Der benyttes samme indices som for $A$ .
$\tilde{C}$	Lineær konstant i potens-datafit med fastholdt potens $D=1,60$ (tabel 2). Der benyttes samme indices som for $A$ .
$d$	Partikeldiameter
$\bar{d}$	Volumenbaseret middelpartikeldiameter
$D$	Potens i potens-datafit (tabel 2). Der benyttes samme indices som for $A$ .
$E$	Konstant i tryktabsformlen: $\frac{\Delta P}{h} = E \cdot U_t^2$
$f$	Erguns friktionsfaktor
$f_k$	Erguns kinematiske friktionsfaktor
$L$	Bedhøjde
$\mu$	Viskositet af fluid
$P$	Tryk
$\bar{P}$	Middeltryk
$\Delta P$	Tryktab over bed ( $P_1 - P_2$ )
$Re$	Reynoldstal
$S_v$	Overfladeareal pr. volumenenhed for partikler ( $S_v = \frac{6}{\rho D}$ [3])
$U_t$	Fluidhastighed gennem bed baseret på beddens samlede tværsnitsareal $A_t$
$x$	Vægtandel af "store" partikler i binær blanding af "store" og "små" partikler.
$x_i$	Vægtandel af partikelfraktion
$\varepsilon$	Porøsitet af bed. Volumenandel af "luft" mellem (uporøse) partikler
$\rho$	Densitet
$\phi$	Geometrifaktoren ( $\phi=1$ for helt homogen bed)
$\psi$	Sfærisitet
$\bar{\psi}$	Volumenbaseret middelfærisitet



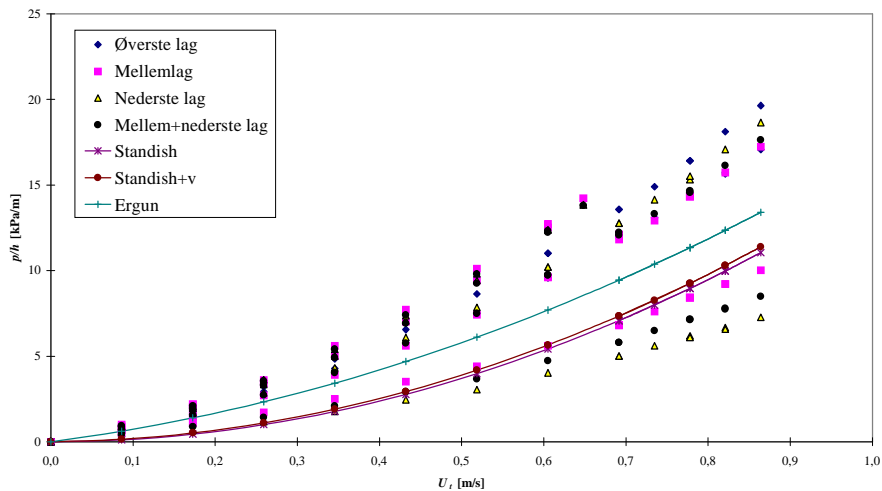
**Referencer**

- [1] M. Donovan og C. Hindsgaul 1997: "*Tryktab over en Bed af Fliskoks*". Institut for Energiteknik, DTU. Juni 1997.
- [2] S. Ergun, "Fluid Flow Through Packed Columns", Chemical Engineering Progress, 1952, vol. 48, pp. 89-94
- [3] R. M. German "Particle Packing Characteristics", Metal Powder Industries 1989 (ISBN 0-918404-83-5)
- [4] N. Standish and D. E. Borger: "*The porosity of Particulate Mixtures*". Powder Technology, 22 (1979), s. 121-125.
- [5] N. Standish and D. G. Mellor: "*The Permeability of Ternary Coke Mixtures*". Powder Technology, 27 (1980), s. 61-68.

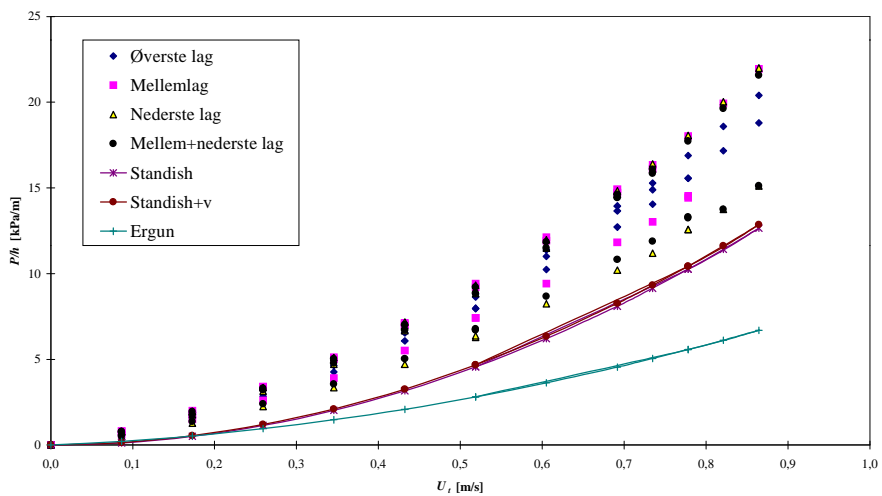
## Bilag 1 - Måledata

I dette bilag er måledataene for luftflow gennem fliskoks fra Donovan og Hindsgaul [1] afbilledet.

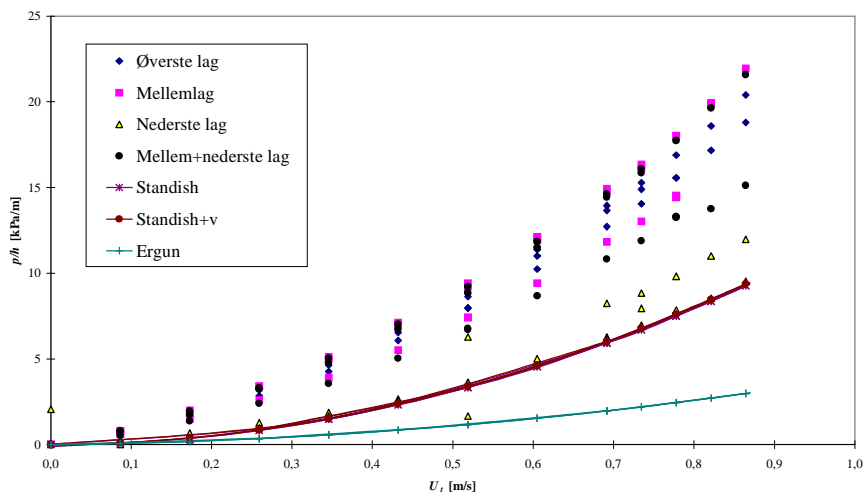
Tryktab,  $x=0.00$



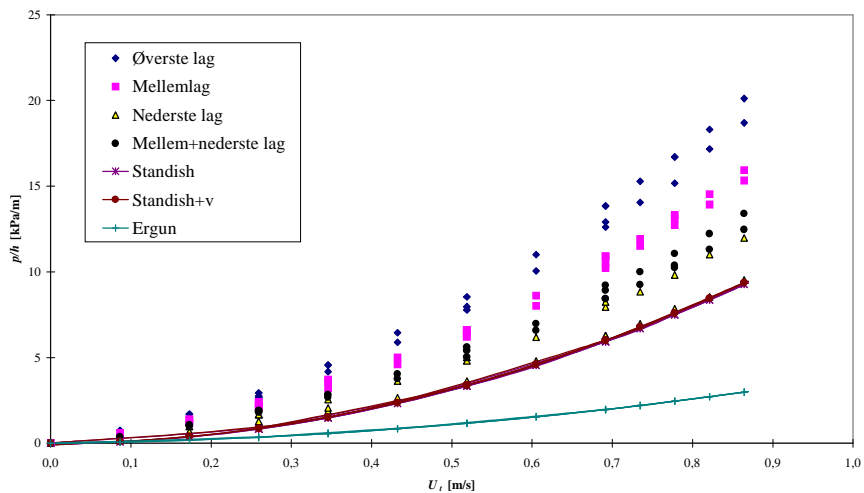
Trykfald,  $x=0.15$



Trykfald,  $x=0.25$



Trykfald,  $x=0.50$



Trykfald,  $x=1.00$

