Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Luftoptimeret Brændeovn
Slutrapport

Miljøprojekt nr. 2081

Maj 2019

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Anne Mette Frey

ISBN: 978-87-7038-065-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	**Sammenfatning**	**5**
2.	**Konklusion**	**7**
3.	**Litteraturstudie**	**8**
3.1	Indledning til litteraturstudiet	8
3.2	Luft til rådighed	8
3.2.1	Forhold mellem brændsel og lufttilførsel	8
3.3	Computational Fluid Dymanics (CFD) som modelleringsteknik	11
3.3.1	Brændselsindflydelse ved forskellige lambdaværdier	12
3.4	Forbrugerfejl under forbrænding	14
3.5	Sammenfatning af litteraturstudiet	16
4.	**Erfaring fra Teknologisk Instituts testarbejde**	**17**
4.1	Analyse af luftbehov og eksisterende flaskehalse på eksisterende ovne	17
4.2	Data fra ovne	19
4.3	Konklusion	22
5.	**Grundlæggende forbrændingsteori**	**23**
5.1	Teoretisk nødvendig mængde luft	23
5.2	Transiente forbrændingsforhold	24
5.3	Indikatorer på luftunderskud	25
6.	**Model-l til vurdering af luftbehov**	**27**
6.1	Indledning	27
6.2	Målekampagne på 4 brændeovne med forskellig betjening	27
6.3	Vurdering af CO og lambda løbende under forbrændingsproces	29
6.4	Påvirkning af brændemængde og lufttilsætning	31
6.5	Dannelse af egentligt luftunderskud	33
6.6	Test af hypotese 'lambda >1.25' sikre god forbrænding	33
7.	**Guidelines til at forhindre luftunderskud i en brændeovn**	**42**
7.1	Simple tommelfingerregler for luftmængder, der skal kunne komme gennem en brændeovn	42
7.2	Forslag til simpel analyse af hvad ovnen kan håndtere af brænde	43
8.	**Luftvejene i brændeovnen**	**44**
8.1	Indledning til kapitlet	44
8.2	Hvor meget luft kommer der gennem ovn	44
8.3	Teoretiske vurderinger af påvirkning af størrelse / facon på luftveje	50
8.4	Måleapparater til luftflowmålinger i brændeovne	52
8.5	Eksperimentelle målinger på tryktab gennem model af rørsystem i brændeovn	54
8.6	Flowstudie af luften på indgang og udgang af ovn under forbrændingstest	63
9.	**Skorstenstræk**	**68**

10. Guidelines til udvikling af luftsystemer i brændeovne 70
10.1 Udvikling af interaktivt værktøj 70
10.2 Sammenfatning 75

11. Nyudviklet ovn 77
11.1 Udvikling af ovn 77
11.2 Sammenfatning 87

1. Sammenfatning

Den publicerede litteratur om luftbehov og styring til mindre ovne og kedler er i dag yderst begrænset. Tilsvarende bærer litteraturen præg af, at der tydeligvis er plads til optimering og forbedringer i de praktiske applikationer. Undersøgelser af brugeradfærd viser ligeledes, at det vil kunne reducere emissioner fra f.eks. brændeovne ved at sørge for at brugeren er mere velinformeret og saglig i sin tilgang til brændslet. Derudover ses at brændeovne optimeres og forbedres i fremtiden, således at de ved at være mere automatiske i optimeringen af forbrændingsprocessen f.eks. i form af kontrol af lufttilførslen er mere brugervenlige og samtidig mere miljøvenlige. Da brugeradfærd i praksis kan være vanskeligt at ændre og kræver et stort stykke arbejde, må det være gavnligt sideløbende at finde bedre tekniske løsninger i fremtiden. Tekniske løsninger kan være at brændeovnen bliver 'intelligent' i styring og lufttilførslen optimeret. Indeværende projekt har som hovedformål at sikre at lufttilførslen bliver optimeret.

At sikre rette mængde luft i en brændeovn gennem hele forbrændingsprocessen er en kompliceret affære. Der er derfor udarbejdet flere værktøjer, som kan benyttes til at vurdere lufttilførslen. Den første en simpel mode, hvor det tilstræbes at teste om de udarbejdede ovne er designet, således at luftoverskuddet (lambda) holdes større end 1,5 gennem hele forbrændingsprocessen - hvilket er med til at sikre lav CO (<0.3%) under forbrændingen og dermed en god forbrænding. Dette er gjort baseret på en mængde målinger og data på mange forskelligartede ovne for at sikre en vis universalitet for ovne og holdbarhed af modellen. Det har vist sig, at testmetoden ikke kan gennemløbes for gamle ovne med høje emissioner. Det kan tages som et udtryk for at forbrændingen med stor sandsynlighed har for høje emissioner. Kan testen derimod gennemføres, er det muligt at få en ide om, hvor meget brænde det er muligt af afbrænde rent; dvs. komme med anbefalinger til kunder om den maximale mængde træ, der bør indfyres i brændeovnen

Efterfølgende blev et mere sofistikeret interaktivt Excelbaseret beregningsværktøj udviklet, til at vurdere om en nyudviklet ovn kan få luft nok til at brænde rent ved den ønskede ydelse, udelukkende baseret på målinger med et lækagemåleapparat og input til specifikke dimensioner angående luftsystemerne i prototypen.

- Hvis ovnens luftsystemer er korrekt dimensionerede bekræftes dette ved metoden, og i givet fald angives en maximal ydelse ovnen kan levere og samtidig stadig brænde rent. Dette beregnet teoretisk ud fra luftmængden der er til stede. Dog forudsat at luften tilsættes de rigtige steder og at brændkammeret er dimensioneret korrekt. Ydelserne kan omsættes til en information til forbrugeren om den maximale mængde træ, der bør benyttes i ovnen pr indfyring for at undgå for høje emissioner.
- Hvis ovnens luftsystem ikke er dimensioneret korrekt, og der er begrænsninger, gives en vurdering af på hvilken af luftvejene begrænsningen ligger, og hvad åbningsarealet burde være i forhold til, hvad det reelt er. Således vil producenten have en ide om hvad der skal ændres, og hvor meget, for at øge mulighederne for at udvikle en god rent brændende ovn.

Yderligere er der blevet bygget fysiske modulsystemer til simulering af indbyggede luftkanaler, for hvilke ændringer i volumenstrøm pr m lige rør og over et antal chikaner er demonstreret at kunne vurderes med simpelt måleudstyr, ligesom tryktab er beregnet og vurderet. Her er det vist at;

- Man skal passe på at tværsnitarealet af ens rør ikke bliver for lille, jo mindre rør des større tryktab
- Længden af luftvejen bør minimeres, jo længere luftvej des større tryktab
- Antallet af chikaner f.eks. knæk skal være så få som muligt og med fordel så 'bløde' som muligt. Skarpe knæk betyder meget for overfladen (med fordel er røret indvendigt altså så glat og med så få, bløde bøjninger som muligt og det bør overvejes hvordan eventuelle sammensvejsninger laves for at undgå kanter, hak og ujævnheder.

Oftest håndteres og vurderes luftbegrænsninger baseret på tryktab. Da dette imidlertid er tidskrævende og kompliceret (bl.a. i forhold til ukendte friktionskoefficienter) og ikke nødvendigvis en kapacitet der kan forventes at være hos en mindre brændeovnsproducent, har det vist sig at det at måle og se på ændringer i volumenstrøm over chikaner/ens rørsystem eller en model af dette giver et kvalitativt fint billede til at beskrive tryktab. Dette kan gøres fornuftigt med lækagemåleudstyr.

Ved studier af to ældre ovne og en moderne HWAM ovn, er det fundet at de to ældre ovne er begrænset på luftsystemerne i henhold til det udviklede værktøj. Dette bekræftes af forbrændingstests, der viser, at de generelt ikke brænder særligt rent, og at de slet ikke kan brænde ved de lave spjældindstillinger som beskrevet i forbindelse med test af den simple model.

I projektet blev en ny ovn udviklet. Dette blev gjort med udgangspunkt i en ældre ovn, som der har været udfordringer med at få til at brænde rent ude hos forbrugeren. Derfor var der en formodning om at luftunderskud kunne opstå, hvis ikke skorstenstræk var højt nok, som f.eks. under en typetest. Alle andre parametre på ovnen, end luftsystemet blev fastholdt, for at se, om det var tilstrækkeligt at optimere på luftsystemet. Efterfølgende blev den nyudviklede ovn testet forbrændingsmæssigt i en række tests og sammenholdt med den oprindelige ovn. At den nye ovn ikke er bedre i alle situationer, tilskrives at en optimering af luftsystemet ikke er tilstrækkeligt i sig selv – her er det vigtigt at brændkammeret også er optimeret, og er optimeret til luftsystemet. Således anbefales, til brug ved ny produktion/udvikling af danske brændeovne, at producenter er sig bevist om de 17 guidelines for brændkammeropbygning (Low Carbon brændkammer) og kombinerer viden herfra med retningslinjer til at undgå luftmodstand og luftunderskud herunder det interaktive værktøj til vurdering af luften der er til rådighed udviklet i dette projekt.

Den overordnede konklusion på projektet er således, at det er vigtigt at designe sit luftsystem rigtigt og uden begrænsninger. Det er nødvendigt, at dette er på plads, og her kan det, i projektet udviklede værktøj, være en stor hjælp for producenter. Simuleringsværktøjet kan være med til at identificere og undgå begrænsninger i ovnen i udviklingsprocessen, så der ikke kommer ovne på markedet med oplagte problemer. Det er imidlertid ikke tilstrækkeligt at luftsystemet er optimeret – skorsten (træk) og brændkammerdimensioner mm. skal også være optimeret.

2. Konklusion

I projektet blev en ny ovn udviklet. Dette blev gjort med udgangspunkt i en ældre ovn, som der har været udfordringer med at få til at brænde rent ude hos forbrugerne i alle tilfælde. Alle andre parametre på ovnen, end luftsystemet blev fastholdt, for at se, om det var tilstrækkeligt at optimere på luftsystemet. Efterfølgende blev den nyudviklede ovn testet forbrændingsmæssigt i en række tests og sammenholdt med den oprindelige ovn. At den nye ovn ikke er bedre i alle situationer, tilskrives at en optimering af luftsystemet ikke er tilstrækkeligt i sig selv – her er det vigtigt at brændkammeret også er optimeret, og er optimeret til luftsystemet. Således anbefales, til brug ved ny produktion/udvikling af danske brændeovne, at producenter er sig bevist om de 17 guidelines for brændkammer opbygning (Low Carbon brændkammer) og kombinerer viden herfra med retningslinjer til at undgå luftmodstand og luftunderskud herunder det interaktive værktøj til vurdering af luften der er til rådighed udviklet i dette projekt.

Den overordnede konklusion på projektet er således, at det er vigtigt at designe sit luftsystem rigtigt og uden begrænsninger. Det er en forudsætning for at kunne sikre en god og ren forbrænding, og her kan det, i projektet udviklede værktøj, være en stor hjælp for producenter. Simuleringsværktøjet kan være med til at identificere og undgå begrænsninger i ovnen i udviklingsprocessen. Det er imidlertid ikke tilstrækkeligt at luftsystemet er optimeret – skorsten (træk) og brændkammerdimensioner m.m., skal også være optimeret.

3. Litteraturstudie

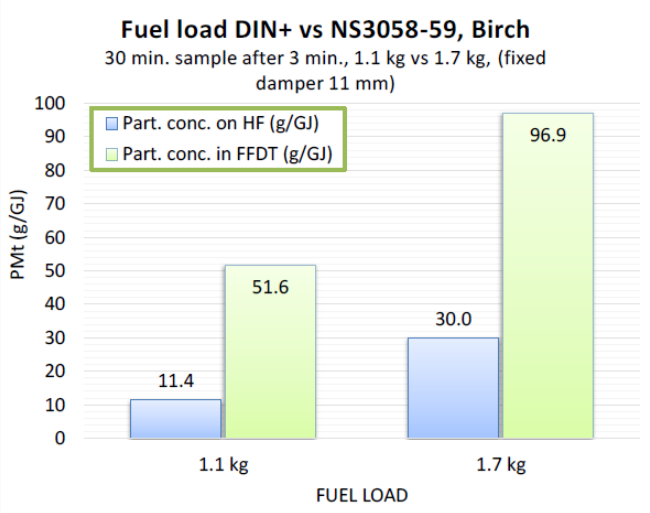
3.1 Indledning til litteraturstudiet

For at en brændeovn kan fungere optimalt, er det nødvendigt, at der er den rette mængde ilt til stede. Hvis der tilføres for lidt ilt, hvis opholdstiden af ilten i ovnen er for kort eller hvis ilten på grund af uønskede flowmønstre ikke kommer til bålet og blandes med røggasserne, er det umuligt at opnå en fuldstændig forbrænding. Fuldstændig forbrænding er til enhver tid det ønskede, i det de eneste produkter derfra er vand og CO_2 (kuldioxid). Da CO_2 fra træ er optaget af planten kort tid inden det frigives ved forbrænding, er systemet overordnet set CO_2-neutralt, hvorfor frigivelsen af CO_2 og vand altså kan regnes som neutrale, harmløse produkter. Det eneste restprodukt, der vil være tilstede ved en sådan fuldstændig forbrænding, vil være uforbrændt aske, der indeholder mineraler fra træet. Hvis ikke der tilføres nok ilt til forbrændingen, sker der altså en ufuldstændig forbrænding. Herved dannes der giftig, gasformig CO, og emissioner af sod, partikler og uforbrændte organiske gasser. Emission af NO_x er ligeledes blandt andet afhængig af forholdene under forbrændingen og kan derfor også udvikle sig i uheldig retning, hvis forbrændingen ikke kontrolleres.
Optimering af luften i brændeovne og andre mindre biomasseenheder, som eksempelvis kedler, er et relativt ubeskrevet blad i den videnskabelige litteratur. Blot få artikler af større eller mindre interesse findes, hvilket aktualiserer nødvendigheden af et eksperimentelt studie og nøje afrapportering af data som i dette projekt.
Indledningsvist vil eksempler fra den fundne litteratur, der skønnes af relevans blive skitseret.

3.2 Luft til rådighed

3.2.1 Forhold mellem brændsel og lufttilførsel

I en rapport fra SINTEF[1] undersøges emissionerne fra henholdsvis birk og gran. Indfyringsmængderne øges, når man går fra lav til fuld indfyring mens lufttilførslen holdes konstant. Partiklerne måles med to forskellige principper, der gør brug af to typer filtre, HF (heated filter), og FFDT (full flow dilution tunnel), hvilket bemærkes at være af afgørende betydning for resultaterne, da de to filtre opfanger forskellige mængder som det ses for birk i figur 1.

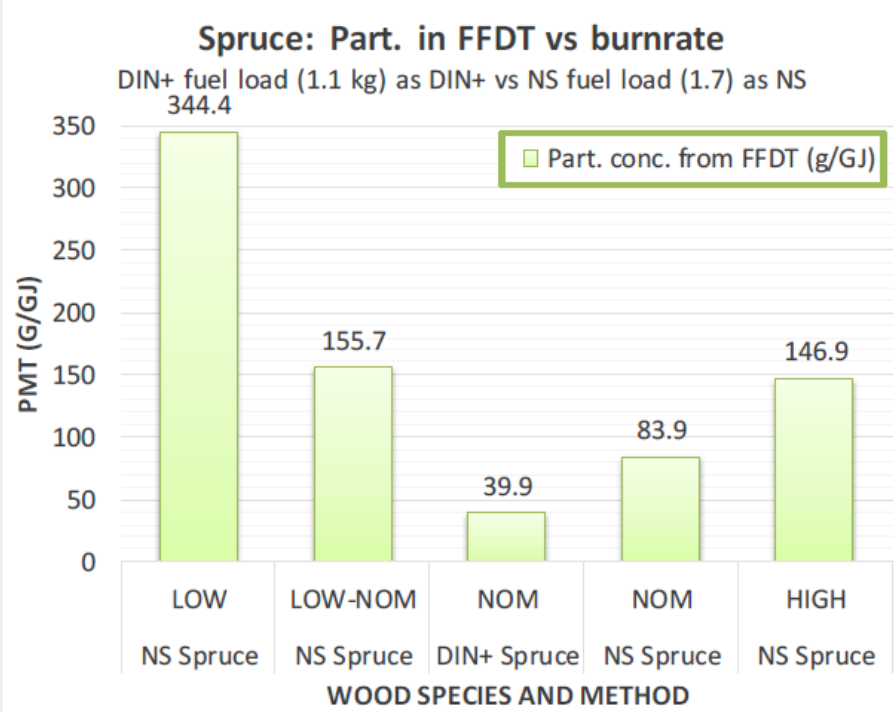


Figur 1. Partikler opsamlet på de to typer filtre HF og FFDT ved forskellig brændselsload

Mængden af partikler målt er højest med FFDT samplingsmetoden, hvilket sandsynligvis skyldes, at en del af de kondenserbare stoffer kan fanges på dette filter i modsætning til filteret ved HF metoden, hvor disse stoffer ikke afsættes og

[1] M. Seljeskog et al. SINTEF, Report: Factors affecting emission measurements from residential wood combustion, 2016

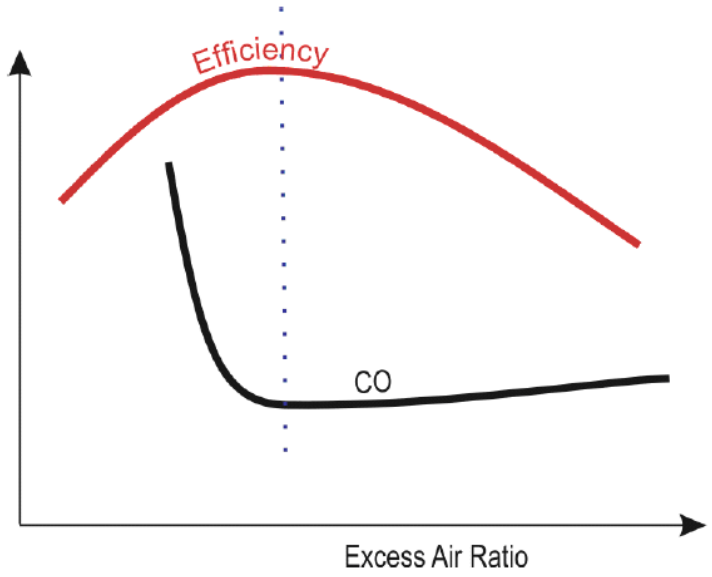
dermed heller ikke tælles med. Dette illustrerer, at det er helt centralt, at overveje sine målemetoder omhyggeligt, således at det giver korrekte billeder af emissionerne. Samtidig skal man være påpasselig med at sammenligne eventuelle data fra forskellige studier, hvor forskellige eksperimentelle udførsler af målinger, kan ligge til grund for forskelle, der derfor ikke nødvendigvis viser en videnskabelig signifikant tendens.
Det er fundet i SINTEF-studiet, at partikelemissionerne øges med henholdsvis en faktor 4 og 6 for de to typer brændsler, birk og gran, når forbrændingsraterne øges fra nominel (nom) til høj (high). Endnu mere udtalt er de høje emissioner i tilfælde af luftunderskud (low). Dette viser således tydeligt vigtigheden af regulering af ilttilførslen og er illustreret for grantræ i figur 2, hvor data på baggrund af analyse af relevansen af passende filtervalg (figur 1) er sammenlignet og vist for eksperimenter udført efter FFDT-filtermetoden.



Figur 2. Partikelemission ved forskellige forbrændingsrater

Fra figur 2 er det tydeligt at emissionerne stiger ved høj ydelse. Emissionerne er signifikant højere når forbrændingsraterne øges over nominel. Resultaterne fra SINTEF rapporten muliggør dog ikke, at der opstilles generelle anbefalinger. Det eneste, der slås fast i konklusionen af rapporten, er at det er kendt, at ethvert brændkammer i har optimale betingelse for forbrændingsreaktionen. Hvis man befinder sig uden for det optimale vindue, der definerer de optimale betingelser, sker det ofte på bekostning af højere emissioner. Generelt gælder det således for de fleste ovne, at partikelemissionen stiger eksponentielt ved ydelse lavere end de nominelle. Typisk falder de yderligere ved forhold der er over de nominelle ydelser, ind til de er meget tæt på ovnens maksimale forbrændingsoutput, hvor de vil stige voldsomt. Der vil derfor være en fin balance, mellem den luft der bør tilføres og hvor rent ovnen brænder.
I et andet studie[2] drøftes optimering af forbrændingen med henblik på to aspekter – henholdsvis forbrændingseffektivitet og sammensætningen af røggassen. Begge disse forhold er påvirket af såvel primær som sekundær lufttilførsel. Når luften optimeres skal der tages højde for kvaliteten af træet og fugtigheden. I figur 3 ses typiske forløb for henholdsvis forbrændingseffektivitet og CO-emissionen, som kurver plottet afhængigt af luftoverskuddet.

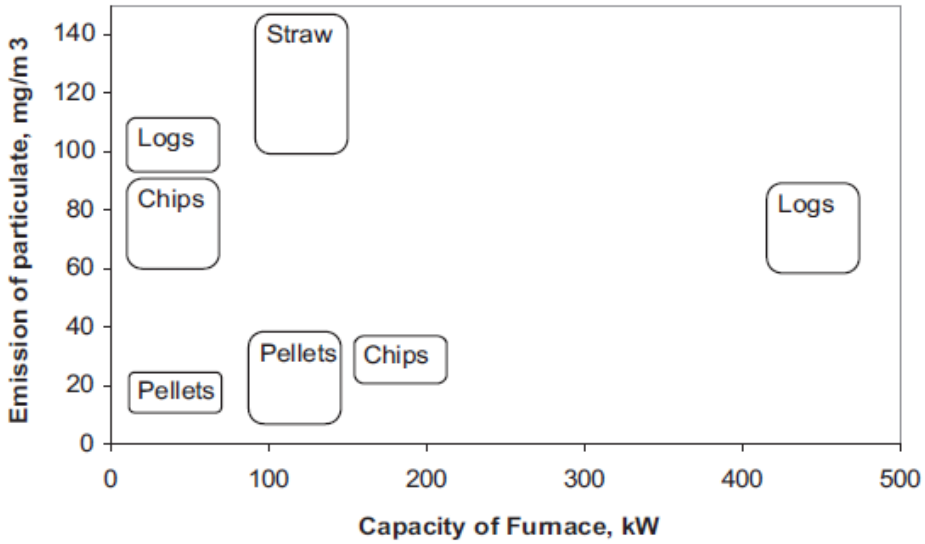
[2] C. Oswald et al, Transfer Issues of Control Optimizing Combustion from Small-scale to Medium-scale Biomass-fired Boilers



Figur 3. Effektivitet of CO afhængighed af overskudsluftforhold.

Som det ses i figur 3, vil maksimum i effektivitet og minimum i CO-emission være at finde ved omtrentlig samme overskudsluftforhold. Dette gør det muligt, at optimere disse to størrelser samtidig. Der nævnes slutteligt, at den optimale luftoverskudstal (lambdaværdi) er afhængig af brændsel, lufttilførslen men også af en række vanskeligt målbare og håndterbare parametre, der ændres gennem forbrændingen. Emission af partikler og NO_x drøftes ikke i dette studie.

Partikelemission er i en enkelt kilde[3] rapporteret til i en vis grad at afhænge af størrelsen af enheden (dog i et kedelstudie, og ikke direkte undersøgt for brændeovne), hvor en tendens, der nævnes er, at små enheder ofte forurener mest på grund af korte kontakttider og dårlig blanding mellem luft og brændsel. Dette er illustreret i figur 4.



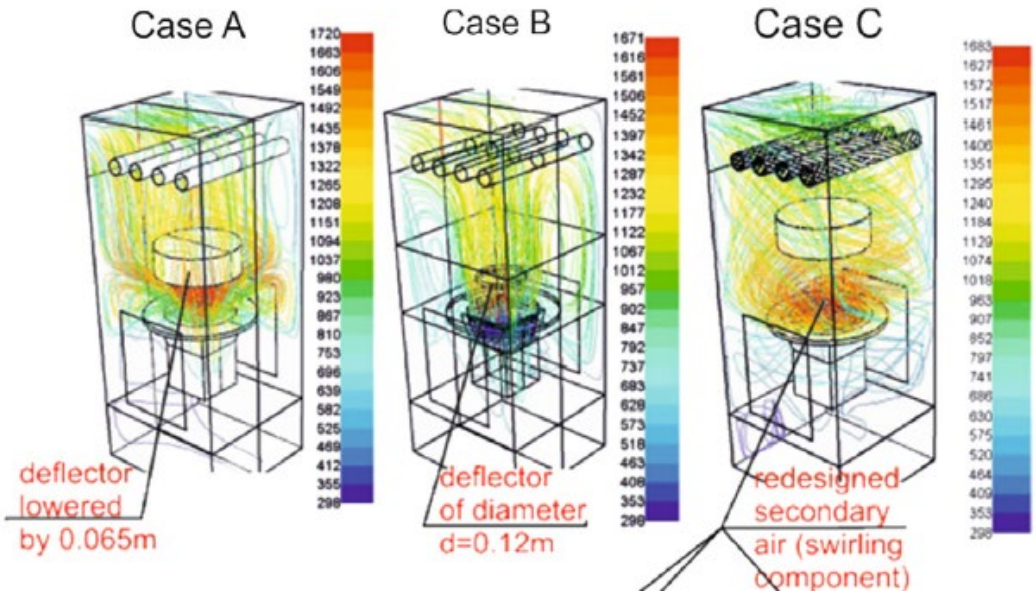
Figur 4. Emissioner af forskellige brændsler afhængig af ovnkapaciteten

Fra figur 4 kan det ses at større enheder har lavest partikelemission ved afbrænding af træbaseret biomasse. Den tentative forklaring på dette er den længere kontakttid mellem ilt og brændsel i større enheder gør det muligt at opnå en mere fuldkommen forbrænding. Der er ikke drøftet muligheder for forbedringer af henholdsvis små og store enheder i form af regulering af mængde og placering af lufttilledningen i studiet.

[3] A. Williams et al, Progress in Energy and Combustion Science 38 (2012) 113-137

3.3 Computational Fluid Dymanics (CFD) som modelleringsteknik

Computational Fluid Dymanics (CFD) er en teknik i fremmarch inden for anvendelse af vurdering af luftbehov for afbrænding af biomasse i små enheder som f.eks. brændeovne eller biomassekedler[4]. Ved denne metode kan en simulering af forbrændingsreaktionen foretages. Ud fra denne modellering er det beregnet og efterfølgende testet eksperimentelt at air staging er en mulig måde at reducere såvel NO_x som partikelemission. Air staging, eller tofaseforbrænding som det også kaldes, er en teknik, hvor der ikke blot ledes ilt til bålet men også over bålet til at fremme forbrænding af gasserne. På grund af kompleksiteten angående NO_x dannelsesmekanismerne er det imidlertid nødvendigt at arbejde videre på disse modeller og optimere dem yderligere i fremtiden for at kunne bruge dem som endegyldige retningslinjer for, hvordan forbrændingsreaktionen kan optimeres for denne størrelse forbrændingskedel. Andre CFD studier fokuserer på udformningen af forbrændingskammer f.eks. i en lille husstandstræpillekedel[5]. Det er for eksempel forsøgt simuleret hvilken indflydelse placering af sekundær lufttilførsel har, herunder størrelser af huller og placering. Dette ses i figur 5 hvor situation C viser en optimering af disse parametre.

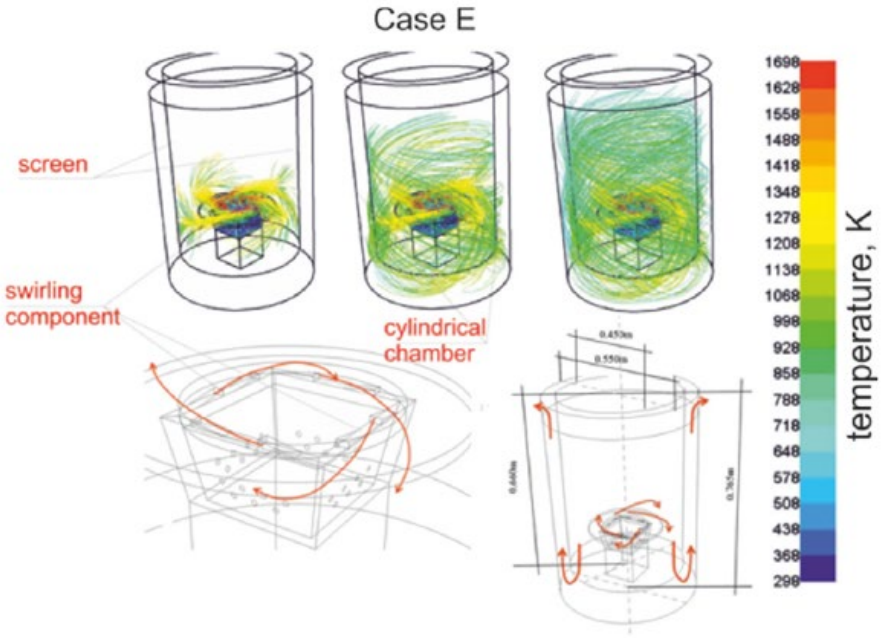


Figur 5. Vigtigheden af placering og størrelse af lufttilførslen ud fra CFD beregninger

Ligeledes er de geometriske former af forbrændingskammeret søgt optimeret ved modellering, og baseret på disse foreløbige beregninger er der grund til at antage at et cylindrisk forbrændingskammer er at foretrække frem for et firkantet, se figur 6.

[4] M. Buchmayr et al, Energy conversion and management 115 (2016) 32

[5] R. Buczynski, Journal of Energy Institute 88 (2015) 53



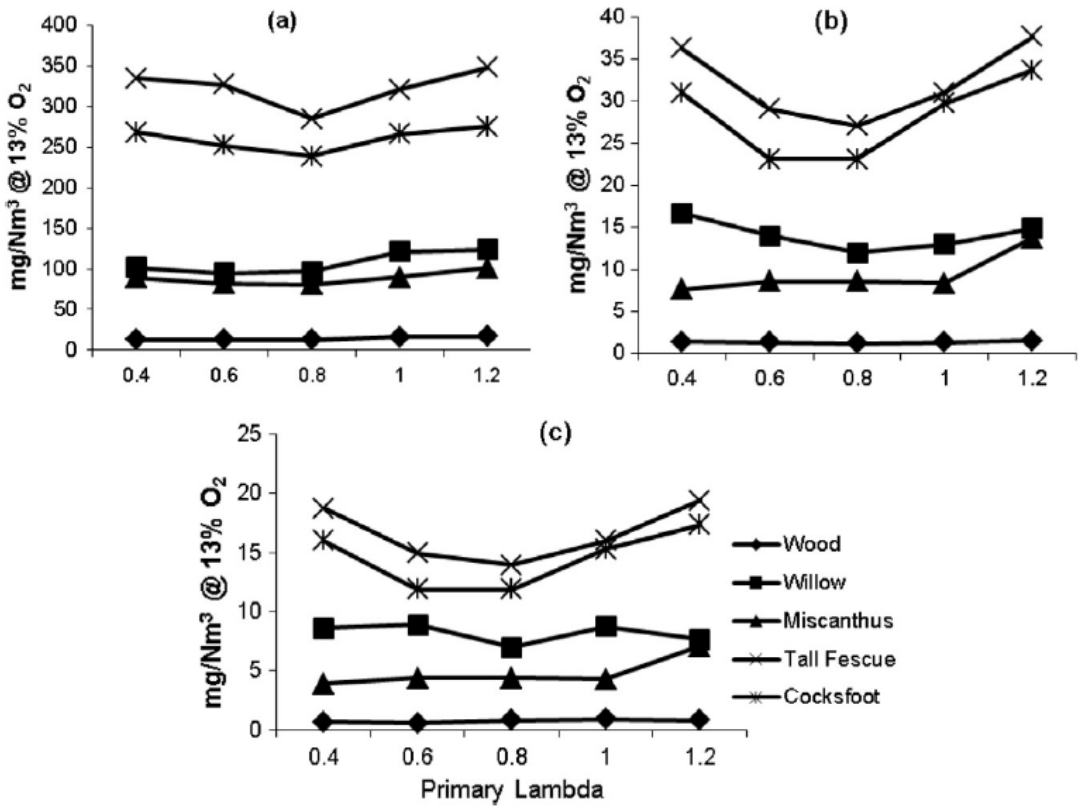
Figur 6. Optimering af brændkammer fra kubiske til cylindrisk beregnet ved CFD

Ved et luftoverskudstal (lambda) på 2 viser beregninger, at det er muligt at reducere CO emission med 90%, mens det med et lambda på 1,5 er muligt at reducere CO emissioner med 80% og partikler med mere end 80%. Yderligere arbejde og eksperimentelle test vil sandsynligvis i fremtiden muliggør optimering af lufttilførsel og luftmængder og forbrændings-kammer.

3.3.1 Brændselsindflydelse ved forskellige lambdaværdier

I studier af air staging ved afbrænding af forskellig typer træ[6] i biomassekedler (ETA Hack35 ETA Heiztechnik GmbH tilting grate biomass boiler), blev det fundet at partikelemissioner er lavest ved luftoverskudstal (lambda) på 0.8 som det ses i figur 7. Dette gælder for alle partikler, uanset størrelsen inden for de undersøgte størrelsesintervaller. Det bør bemærkes, at det er en meget lav lambdaværdi i forhold til hvad man normalt ser for brændeovne og enheder. Lignende resultater er ikke fundet rapporteret andre steder end i dette studie.

[6] J.P. Carroll et al, Fuel 155 (2015) 37



Figur 7 Effekt af lambda for emissioner af partikler med forskellige størrelser a) PM1 b) PM 1-10 c) PM> 10

På samme måde var NO_x fundet optimeret ved samme lambda værdi som vist i Tabel 1.

Tabel 1. NO_x og partikelemissioner ved forskellige lambdaværdier

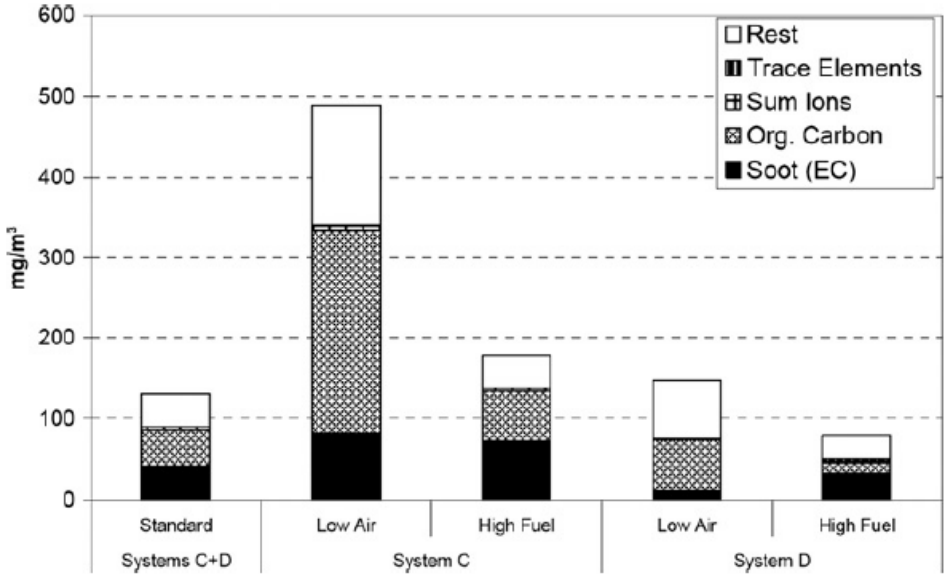
Effect of primary combustion zone temperature (degree Celsius) on NO_x and PM_1 emissions (values in mg/Nm³ @ 13% O_2).

		Wood		Willow		Miscanthus	
		NO_x	PM_1	NO_x	PM_1	NO_x	PM_1
0.4	900°	168	20	342	108	152	84
	1000°	166	16	343	103	173	99
	1100°	163	21	361	112	216	131
0.8	900°	157	19	348	98	148	79
	1000°	162	15	351	94	149	92
	1100°	151	20	355	105	201	118
1.2	900°	162	18	396	103	196	91
	1000°	179	15	452	99	211	101
	1100°	159	20	459	107	255	129

Temperaturen for forbrændingen blev i dette studie fundet ikke at spille nogen rolle for partikelemissioner eller NO_x emissioner. Konklusionen af studiet er at air stagging og lange opholdstider i brændkammer er en metode til at reducere emissioner. Dette viser hvor stor en rolle mængden af luft, der er til rådighed, spiller for forbrændingsreaktionen.

3.4 Forbrugerfejl under forbrænding

Manuelt fyrede ovne udviser tit meget variable emissioner afhængig af indfyring[7]. Forbrændingsteknikken såvel som forbrændingsparametre, herunder væsentligst mængde af brændsel, brændselstype, lufttilførsel, er afgørende for typen og størrelsen af emissionerne. I figur 8 nedenfor er emissioner vist ved en forbrænding, der foregår under standard betingelser for to ovne (benævnt C og D), hvor forbrændingen bliver forringet af henholdsvis lav ilttilførsel og stor indfyring med brændsel (3 x normal brændemængde). Dette er typiske situationer, der kan opstå hos en bruger, der fyrer forkert i sin brændeovn. Ovn C er en ovn, hvor der kun tilføres forbrændingsluft fra et hul nederst i ovnen, mens ovn D er en ovn, der har både primær og sekundær lufttilførsel.



Figur 8. Sammenligning af emissioner ved standard test i forhold til emissioner fra ovn C (kun en lufttilførsel) og ovn D (både primær og sekundær luft) under forskellige typiske forbrugerfejloperationer nemlig for lille luft tilførsel og var stor mængde brænde indfyring

Det ses, at emissionerne afhænger af flere faktorer. Dels er emissionerne afhængig af ovnen. Emissionerne er langt større for C end D under samme omstændigheder. Det vil sige at tilstedeværelsen af såvel primær som sekundær luft er gavnlig i bestræbelserne på at opnå en god forbrænding. Det ses også at iltunderskud skaber større emissioner end en for stor mængde brænde der er anbragt i ovnen. Den totale mængde partikelemission, der er observeret i eksperimenterne, påvirkes med en faktor 6 mellem laveste og højeste værdier, så det er tydeligt at kontrol af forbrændingen er helt central for styring af emissioner af partikler, der dannes i stor stil ved ufuldstændig forbrænding. Den kemiske sammensætning af partiklerne er i studiet fundet ikke at afhænge så meget af ovnen, som af brændetypen og kvaliteten af træet.

Sammensætningen af partikelemissionen fra træopvarmning består af både uorganiske og organiske forbindelser. Blandt andet er 90 organiske forbindelser inkluderende stoffer som furaner, methoxyphenoler, substituerede aromatiske forbindelser, PAH'er, maltol og sukre blevet identificeret[8]. Angående sukrene kan det nævnes, at levoglucossan gennemsnitlig udgør 5% af PM10 udledningen i de eksperimenter, der er udført i dette studie. Forholdet mellem levoglucosan og mamosan rapporteres til at være ca. 3 for nåletræ og 15 for løvtræ. Disse observationer stemmer overens med tidligere publicerede studier i litteraturen. For langt de fleste af disse forbindelser gælder, at mængden øges ved mindre ilttilførsel, men der er undtagelser. For eksempel kan det nævnes, at indholdet af PAH'er og sukker synes at aftage med lavere ilttilførsel.

Brugeradfærd er blevet undersøgt i spørgeskemaundersøgelser, med det formål at få mere viden om virkelige forbrændingssituationer ude i hjemmene, og eventuelt på baggrund af dette finde ud af, om der er mulighed for bedre instruktioner

[7] C. Schmidl et al, Atmospheric Enviroment 45 (2011) 7443-7454

[8] T.B. Jordan, Environ. Sci. Technol., 2005, 39 (10) 3601

af brugerne og eller mulighed for at kompensere for fejl ved bedre/mere kontrollerede ovne og derved mindske manuelle muligheder for fejl[9, 10]. Optændingsprocessen er et forhold, der spørges ind til, og det viser sig at blot 10% af østrigske brugere og mellem 6 og 17% (afhængig af ovntype) blandt alle europæiske adspurgte forbrugere generelt, benytter den anbefalede metode med at tænde bålet op ovenfra og ned[11]. Tilsvarende er der meget der tyder på, at forbrugeren ikke altid har nødvendig viden til at sikre at genindfyring sker på det mest optimale tidspunkt. Adfærd angående dette ses at være utrolig varierende blandt deltagerne i spørgeskemaundersøgelsen (se tabel 2). Indstillinger for luft under forbrænding er noget, der af mere end 50% af de adspurgte, enten aldrig gøres eller blot en enkelt gang i hele processen, trods denne parameter er ualmindelig vigtig for at sikre ordentlig forbrændingsreaktion (se tabel 3). Valg af brændsel er naturligvis også en vigtig parameter, i særdeleshed at undgå afbrænding af affald og at sikre at ovnen er egnet til den type, mængde og størrelse, der fyres ind med (for detaljerede informationer om brugeradfærd på dette område, se tabel 4). Skorstenstræk, er ligeledes en parameter, der vurderes oftest ikke at være optimeret ude hos brugeren. Omkring en tredjedel af de adspurgte udtrykker, at de ikke har læst instruktionsmanualen for ovnen, hvilket viser, at man måske skal tænke i nye baner for instruktion, for således bedre at nå forbrugeren.

Tabel 2 Forkortelserne i tabellen står for følgende: *FWS: firewood stoves, TIS: tiled stoves, COK: cookers, oFH: other firewood operated heaters.* Tabellen viser adfærd i forbindelse med genindfyring.

Fuel refilling behavior.

	FWS (%)	TIS (%)	COK (%)	oFH (%)
Refilling when fuel is still strongly burning	8	5	10	8
Refilling when only small flames are visible	37	20	41	46
Refilling when all brightly visible flames are gone	41	23	30	23
Refilling after certain time interval	5	13	12	8
Refilling after a signal from the stove	2	3	0	2
None of the described	7	36	7	11

Tabel 3 Forkortelserne i tabellen står for følgende: *FWS: firewood stoves, TIS: tiled stoves, COK: cookers, oFH: other firewood operated heaters.* Tabellen viser adfærd i forhold til luftregulering

Combustion air adjustment behavior during heating operation.

	FWS (%)	TIS (%)	COK (%)	oFH (%)
Never, fixed setting is used	19	36	16	22
Once	34	38	32	28
Twice	16	11	14	11
More than twice	8	6	13	4
Variable	23	9	25	35

[9] M. Wöhler, Applied Energy 169 (2016) 240

[10] G. Reichert, Renewable Energy 93 (2016) 245

[11] Et interessant perspektiv, der er værd at nævne, er at oplysningskampagner i Danmark foretaget af Miljøstyrelsen har ført til at 30-40% af danske brændeovnsbrugere benytter den anbefalede metode i henhold til en analyse fra MST desangående. Oplysningsarbejde virker altså positivt.

Tabel 4. Illustration af fordeling af type brændsel brugt gennemsnitligt bland forbrugerne i en række europæiske lande.
Used fuel types of one-fuel type users.

Type of fuel	All countries (%)	Italy (%)	Germany (%)	Sweden (%)	Austria (%)
Firewood from hardwood (HW)	90	88	89	97	90
Firewood from softwood (SW)	5	5	7	2	4
Wood briquette (WB)	2	0	2	0	4
Wood pellets (WP)	1	0	0	2	1
Waste wood (WW)	1	1	1	0	1
Other biomass (OB)	2	5	0	0	0

3.5 Sammenfatning af litteraturstudiet

Den publicerede litteratur om luftbehov og styring af mindre ovne og kedler er i dag yderst begrænset. Tilsvarende bærer litteraturen præg af, at der tydeligvis er plads til optimering og forbedringer i de praktiske applikationer. Undersøgelser af brugeradfærd viser ligeledes, at det vil kunne reducere emissioner fra f.eks. brændeovne ved at sørge for at brugeren er mere velinformeret og saglig i sin tilgang til brændslet. Derudover ses at brændeovne optimeres og forbedres i fremtiden således at de ved at være mere automatiske i optimering af forbrændingsprocessen f.eks. i form af kontrol af lufttilførslen er mere brugervenlig og samtidig mere miljøvenlig. Da brugeradfærd i praksis kan være vanskelig at ændre, og kræver et stort stykke arbejde, må det være gavnligt sideløbende at finde bedre tekniske løsninger i fremtiden, hvor brændeovnen bliver intelligent og lufttilførslen optimeret.

4. Erfaring fra Teknologisk Instituts testarbejde

4.1 Analyse af luftbehov og eksisterende flaskehalse på eksisterende ovne

For at en forbrænding fungerer optimalt i en brændeovn, er tilsætning af forbrændingsluft samt design og dimensionering af brændkammeret vigtigt. Uden optimering er det umuligt at opnå en god forbrænding. Systemet og samspillet mellem de enkelte dele og deres indflydelse på de kemiske og fysiske processer er meget komplekst. Det er således ikke umiddelbart muligt at opstille en simpel model, der beskriver og tager højde for hele teorien. CFD beregninger er et interessant – men tungt - værktøj f.eks. i forbindelse med design af brændkammeret. Her kan strømningsforhold og temperaturforhold til en vis grad modelleres.

Af krav til dimensionering af brændkammeret kan nævnes en række vigtige parametre:

- Størrelse af brændkammer
- Tykkelse af isolering
- Placering af lufttilførsler
- Bestemmelse af nødvendig opholdstid
- Ønskelig temperatur i brændkammeret
- Størrelse glasruden kan have uden at temperaturen i brændkammeret bliver for lav

Betydningen af disse parametre er kort skitseret i tabel 5.

Mange brændeovnsproducenter dimensionerer nye ovne ud fra tommelfingerregler, baseret på hvad der erfaringsmæssigt virker. Ofte er den erfaringsbaserede fornemmelse så god, at producenter kan prædiktere virkningsgrad og emissioner inden for en 5% nøjagtighed i forhold til typetest.

Af parametrene nævnt ovenfor, er det ikke alle der spiller en lige stor rolle i forhold til at undgå luftunderskud, og det er dermed ikke alle parametre, der er lige vigtige i dette projekt. For at sikre tilstrækkeligt lokalt luftoverskud er det nødvendigt at sikre at brændkammeret har volumen og facon der gør at opholdstiden er tilstrækkelig. Typisk er volumenet 3,2-5,8 L pr kW, der indfyres i ovnen (hvor volumenet ikke er korrigeret for det volumen brændet optager). Volumenet for olie og gaskedler er typisk en faktor 3-5 mindre, hvilket skyldes det høje tryk i disse, der skaber en kort flamme og dermed en anden forbrændingssituation. I brændeovne er trækket udelukkende baseret på skorstenstræk og dermed langt lavere, hvorfor der er nødvendigt med et højere volumen for at sikre god opblanding. En anden udfordring ved brændeovne i forhold til kedler er, at de fyres diskontinuert med voldsom gasudvikling kort tid efter påfyringen, hvilket kræver at et større volumen luft er tilstede i denne del af forbrændingsreaktionen for at forhindre luftunderskud. Opholdstiden i en brændeovn er defineret som brændkammerets volumen i forhold til røggasvolumenstrømmen. I sagens natur er opholdstiden et gennemsnit for hele brændkammeret og kan således ikke bruges som mål for, at opholdstiden nødvendigvis er stort nok et specifikt sted derinde. Erfaringer fra typetest af brændeovne viser, at opholdstider ved 300 °C ligger på ca. 2.0-4.6 sekunder og ved 800 °C på ca. 1.2-2.5 sekunder.

Lufttilførslen i de fleste danske brændeovne sker typisk som

- Primær luft (gennem rist, eller små huller)
- Sekundær luft (skylleluft langs glaslågen)
- Tertiær luft (lufthuller/spalte strategisk anbragt, nogle gange uden spjældindregulerings muligheder, andre gange styret via spjæld til sekundær luft)
- Pilotluft (Ekstra mindre lufttilførsel, som tilfører konstant luft til bålet. Typisk placeret i bunden for at kunne antænde bålet i opstartsfasen ved genfyring)

I en del ovne opvarmes forbrændingsluften inden den ledes ind i brændkammeret. Fordelen ved dette er, at man undgår en uønsket nedkøling i brændkammeret. Ulempen er, at det kræver et lidt mere kompliceret trækkrævende luftsystem, end man ellers ville have haft, hvilket igen øger kravene til skorstenen og til luftkanaler med minimal modstand.

Typisk benyttes primær luft i starten af forbrændingen, mens den sekundære luft bliver vigtigst senere i forløbet. Uden tertiær luft er der en stor risiko for at skylleluften kommer til at virke som primær luft for det brænde der ligger forrest i ovnen, således at dette afgasser. Løsningen er ikke blot at tilsætte mindre luft, da den mængde luft der er påkrævet til

forbrændingen støkiometrisk ikke kan reduceres. Det er vigtigt at notere sig, at lufthastigheden i en given afstand fra lufttilsætningen ikke afhænger af indløbshastigheden men af impulsen (bevægelsesmængdestrøm). Impulsen er givet ved produktet af lufthastigheden og luftmængden. Derfor er det impulsen, der skal reguleres for at få tilpasset iltmængden, der kommer til bålet. En typisk måde at regulere lufthastigheden ved selve bålet på, er ved at fastholde luftmængden og ændre luftspaltens størrelse, da dette vil ændre impulsen og derved lufthastigheden ved selve bålet.

Tabel 5. Parametre der er vigtige ved god dimensionering af et brændkammer.

Parameter	Betydning
Størrelse af brændkammerets volumen	Et stort brændkammervolumen giver større opholdstid for gasserne og bedre mulighed for fuldstændig forbrænding. Et stort volumen giver større varmetab med en fastholdt ydelse og dermed lavere temperatur. Jo lavere temperatur, jo dårligere mulighed for fuldstændig forbrænding.
Størrelse af glasareal	Stort glasareal giver høj varmeafgivelse fra brændkammeret og sænker temperaturen. Stort glasareal kan kompenseres ved større eller tykkere udmuring.
Opholdstid	Opholdstiden defineres som volumen af brændkammer i forhold til røggasvolumenstrøm. Opholdstiden er den *gennemsnitlige* tid, som røggasserne opholder sig i brændkammeret. Høj opholdstid giver bedre mulighed for fuldstændig forbrænding.
Udmuring/isolering af brændkammer	Udmuringen har betydning for temperaturen i brændkammeret. Høj udmuring giver mindre varmeafgivelse fra brændkammeret og dermed højere temperatur og bedre mulighed for fuldstændig forbrænding.
Ydelse for brændkammer	En lav ydelse for brændkammeret (lille glasareal, kraftig udmuring m.v.) betyder, at der stilles højere krav til røggaskonvektionen. Dette kan betyde højere tryktab og problemer i forhold til visuelt design og geometri.
Temperatur i brændkammer	Tilstrækkelige høj temperatur er betingelsen for, at gasforbrændingen effektivt kan finde sted og forhindrer, at uforbrændte gasser ikke sendes ud i skorstenen. En for høj temperatur bevirker, at forgasningen af træet i brændkammeret bliver for kraftig. Herved bliver lufttilførslen utilstrækkelig, og gasser sendes uforbrændte ud af brændkammeret.

Afgørende for mulige begrænsninger af luft til brændeovn er en række faktorer, relateret til tryktab af interesse, nemlig:

- Volumenstrøm
- Tværsnitsareal
- Luftvejens forløb - bøjninger (afhængig af vinkler og antal) og indsnævringer
- Længden af luftvejen
- Ruhed (Beskaffenheden af overfladen i lufttilledningsrørsystemet)

Disse parametre giver nemlig anledning til et tryktab gennem systemet, som her specificeres lidt nærmere. Volumenstrømsflowet påvirker tryktabet kvadratisk. Det vil sige, at hvis man fordobler flowet, firedobles tryktabet – en særdeles signifikant effekt. Hvis man ændrer på volumenstrømmen grundet temperatur er virkningen mindre og en fordobling af volumenstrøm leder i dette tilfælde til omtrentligt en fordobling af tryktabet. Tværsnitsarealet er ligeledes en væsentlig parameter. Her viser det sig at en halvering af arealet på et rør fører til en 6- eller 7-dobling af tryktabet. Tryktabet i et system er proportional med selve længden af luftvejen. Knæk og indsnævringer giver modstand afhængigt af antal og vinkler mm., ligesom man skal passe på ikke at montere en snæver udgang ved skorstenstilslutningen. Ruhed af røret spiller også en rolle. Det kan eksempelvis nævnes at et stålrør rundt regnet giver halvt så meget modstand som en muret

kanal. Det er vigtigt i sit design at undgå at tryktabet bliver alt for stort. Et vist tryktab gennem brændeovnssystemet vil i sagens natur aldrig kunne undgås.

4.2 Data fra ovne

En række data fra ovne fra hhv. HWAM og TI er blevet indsamlet og vil blive præsenteret her, i overvejelser omkring luftoverskud og behovet og kravene der stilles til dette. Disse ses i tabel 6 og 7.

Af data på eksisterende ovne, ser man, at luftoverskudstallet under nominelle prøver varier betragtelig afhængig af ovnen. For HWAM ovnene er værdierne mellem 1,8 og 3,0 mens de for forskellige ovntyper testet på Teknologisk Institut er fundet til mellem 1,8 og 2,8. De to intervaller er så tæt på hinanden, at det må konkluderes at forskelle på design af ovne og type af ovne er det samme blandt en fabrikant som blandt ovne af forskellige danske fabrikanter.

Ved sikkerhedstest (stor brændemængde) er iltbehovet fundet at være cirka dobbelt så stort, som ved de nominelle test (lille brændemængde). Dette betyder, at der er en sammenhæng mellem hvor meget brænde en forbruger fyrer ind, og den mængde luft, der skal bruges. I udvikling af lufttilledning og design af ovn i dette studie, vil der blive set nærmere på, hvor meget det er muligt at tage højde for eventuel forkert brugeradfærd i form af for stor indfyringsmængde, og hvornår eventuelle justeringer af dette når en grænse for, hvad der er realiserbart at kompensere for, uden at det er på stor bekostning af funktionalitet under normale driftsforhold eller pris.

Brændeovn	Testrapport	Dato testrapport	Røggasmassestrøm (g/s)	CO2 (%)	CO (%)	CO (mg/m$^{x)}$	CO ved 13% O_2 (%)	CO ved 13% O2 (mg/m3)	Træmængde pr charge (kg)	Træ/time (kg/h)	Træ i alt (3 charges)	Testtid (3 charges) (h)	Gennemsnitlig brændtid pr charge	Træ brændværdi Hu (kJ/kg)	F (%
HWAM 2600 serie - BIM	RRF 40 12 3091	20.08.2012	3,72	11,3	0,16	2000	0,10	1250	0,86	1,21	2,58	2,12	0,71	17925	
HWAM 2600 serie - IHS	RRF 40 12 3091	20.08.2012	3,55	11,7	0,13	1625	0,08	1000	0,88	1,20	2,63	2,20	0,73	17925	
HWAM 3100 serie - BIM	RRF 40 12 3051	17.10.2012	5,10	8,1	0,08	1000	0,07	875	1,30	1,19	3,90	2,75	0,92	15939	
HWAM 3100 serie - IHS	RRF 40 12 3051	17.10.2012	3,66	11,2	0,12	1500	0,08	1000	0,89	1,19	2,66	2,24	0,75	15939	
HWAM 3600 serie - BIM	RRF 40 12 3050	05.12.2012	6,00	9,1	0,11	1375	0,09	1125	1,33	1,76	4,00	2,25	0,75	16838	
HWAM 3600 serie - IHS	RRF 40 12 3050	05.12.2012	5,04	10,9	0,14	1750	0,10	1250	1,18	1,60	3,55	2,21	0,74	16838	
HWAM 4500 serie - BIM	RRF 40 16 4220	13.06.2016	4,10	11,2	0,13	1625	0,08	1000	1,15	1,56	3,46	2,22	0,74	15045	
HWAM 4500 serie - IHS	RRF 40 16 4221	13.06.2016	4,00	11,1	0,10	1250	0,06	750	1,12	1,50	3,36	2,24	0,75	15045	
HWAM 4600 serie - BIM	RRF 40 15 3931	17.09.2015	5,90	9,8	0,10	1250	0,08	1000	1,67	1,95	5,00	2,57	0,86	15505	
HWAM 4600 serie - IHS	RRF 40 15 3932	21.09.2015	6,60	11,3	0,09	1125	0,06	750	1,83	2,53	5,48	2,17	0,72	15505	
HWAM 7100 serie - BIM	RRF 40 12 3198	11.01.2013	4,04	10,3	0,08	1000	0,06	750	0,86	1,21	2,58	2,14	0,71	17925	
HWAM 7100 serie - IHS	RRF 40 12 3198	11.01.2013	4,27	9,7	0,09	1125	0,07	875	0,87	1,21	2,60	2,15	0,72	17925	
WIKING Miro	RRF 40 13 3281	13.05.2013	4,49	10,2	0,12	1500	0,09	1125	0,92	1,33	2,06	2,75	0,92	17565	
WIKING Luma	300-ELAB-2145	11.06.2015	5,30	11,4	0,16	2000	0,10	1188	1,58	2,07	4,74	2,28	0,69	15600	
HWAM Classic 4	RRF 40 07 1414	07.01.2008	9,90	7,1	0,09	1125	0,10	1250		2,52	7,27	2,89		15040	
HWAM Classic 7	RRF 40 07 1415	07.01.2008	13,20	7,0	0,08	1000	0,09	1125		3,64	8,98	2,47		15040	
HWAM Othello	300-ELAB-0810	28.09.2004	7,49	7,7	0,18	2250	0,16	2000	1,93	1,98	5,79	2,92		15891	
HWAM Monet	RRF 40 07 1418	07.01.2008	6,50	8,7	0,12	1500	0,10	1250		1,98	5,98	3,02		15040	
HWAM Monet	300-ELAB-1038	14.12.2005	6,20	7,7	0,24	3000	0,23	2875	1,80	1,69	5,44	3,22		15350	
HWAM 3300	300-ELAB-1013	08.11.2005	3,90	9,6	0,25	3125	0,19	2375	1,70	1,31	5,14	3,93		15420	
HWAM Figaro	RRF 40 07 1416	12.06.2007	6,70	8,7	0,13	1625	0,11	1375		1,94	4,71	2,22		15040	

Tabel 6. Data fra HWAM ovne

Brændeovn	Luft forbrug (m3/kg)	Luft forbrug (L/s)	CO2 frigivet (g/m3)	CO2 (%)	Træmængde (kg)	Træ/time (kg/h)	Fugtprocent (%)	Lamda	Virkningsgrad korrigerte træ (%)	Røggastemperatur (C)
A	8,5	2,8	196	9,6	1	1,13	15,3	2,05	84,14	217,81
B	10,1	8,2	168	8,3	2,156	2,93	14,2	2,36	75,65	287,9
C	8,9	6,4	183	9,0	2,101	2,59	16,5	2,15	74,51	322,5
C	9,0	5,2	185	9,1	1,608	2,09	16,2	2,17	78,55	279,4
E	7,6	5,3	227	11,2	2,1	2,48	13	1,76	79	312
F	8	3,1	210	10,3	1,06	1,39	16	1,91	81,42	268
G	11,9	5,6	142	7,0	2,1	1,73	14	2,76	79	205
H	8,2	3,4	203	10,0	1,13	1,51	16	1,97	83,98	231
I	7,8	4,6	221	10,9	1,57	2,12	13,5	1,8	80,54	289
J	9,7	5	180	8,9	1,6	1,87	14	2,14	78,56	263
K	7,7	4,6	222	10,9	1,67	2,16	14,4	1,8	80,79	291
L	9,3	4,8	184	9,1	1,62	1,85	14,8	2,17	78,89	272
M	7,9	4,1	220	10,8	1,63	1,88	14,6	1,82	83	253
N	9,9	7,1	174	8,6	1,9	2,56	13,1	2,29	74,51	312,1
O	10,6	7,1	160	7,9	1,8	2,41	16,3	2,5	75,25	284
P	9,4	5,2	183	9,0	1,61	2	14,9	2,18	78,84	274
Q	11	8,7	154	7,6	2,17	2,83	14,2	2,58	74,5	280
R	8,7	3,5	197	9,7	1,11	1,44	13,6	2,03	82,15	244
S	8,6	6,6	203	10,0	2,37	2,74	13,5	1,98	72,14	321
T	8,4	5,7	207	10,2	1,96	2,47	13	1,91	77,71	313

Tabel 7. Data med nyere ovne (2015-2016) af forskellige mærker, testet på Teknologisk Institut (nominelle forhold)

4.3 Konklusion

Det er illustreret, at der er stor forskel på behovet for luftoverskud i de forskellige ovne. Før dette adresseres videre, for at opstille modeller for hvor meget luft der skal tilføres og hvorledes i en specifik ovn, vil det blive vurderet hvilken mængde oxygen, der teoretisk er nødvendigt. I det følgende afsnit vil grundlæggende forbrændingsteori blevet gennemgået, med beregninger af minimalt mængde nødvendigt lufttilførsel der skal til, for at sikre fuldstændig forbrænding.

5. Grundlæggende forbrændingsteori

5.1 Teoretisk nødvendig mængde luft

Ved afbrænding af træ i en brændeovn kan den krævede luftmængde beregnes ud fra summen af de to hovedtyper af forbrænding; kulstofforbrænding og brintafbrænding. Der ses her bort for svovlafbrænding, da svovlindholdet i brænde, modsat fast mineralsk brændsel, er så lavt, typisk 0,01%, at det ingen praktisk betydning har for luftbehovet. Ligeledes er nitrogenindholdet så lavt, at oxidation af nitrogen også kan udelades af betragtningerne.
Beregning af luftbehov er baseret på mol vægte, idet; 1 mol C og 1 mol O_2 danner 1 mol CO_2, mens ½ mol H_2 og 1 mol O_2 danner 1 mol H_2O.
I beregningen tages der således hensyn til de forskellige stoffers molvægte sammenholdt med indholdsandele fra brændselsanalyse (tør askefri form).

Indholdet af C i træ er typisk 50% og indholdet af H er typisk 6% og af ilt 44%.

Den molare masse af C er 12,0112 g/mol, mens den af H_2 er 2,0158 g/mol og for O_2 er 31,9988 g/mol

1 kg tørt træ[12] kræver således
500 g/12,0112 g/mol = 41,6 mol ilt til kulstofafbrændingen og
½*60 g/2,0158 g/mol = 14,9 mol ilt til brintafbrændingen.

Idet brændet også indeholder ilt, er det ikke al den nødvendige ilt, der behøver at blive tilført som luft over spjældsystemet.
Den bundne iltmængde i 1 kg brænde udgør
444 g/31,9988 g/mol = 13,9 mol.

Den mængde ilt der skal tilføres via luftsystemet er således:

O_{2min} = 41,6 + 14,9 – 13,9 = 42,6 mol/$kg_{træ}$

Idet luften indeholder ca 21 % ilt skal der tilføres et volumen på ca. 5 gange så meget luft som det nødvendige iltvolumen og idet 1 kmol ilt fylder 24 Nm^3 ved 25 °C, beregnes det minimale luftbehov (støkiometrisk forbrænding) som
l_{min} = 24 L/mol *42,6 mol*(100/21) = 4,86 Nm^3/kg tørt træ

Idet forbrændingen i brændeovne ikke evner at udnytte al den tilført ilt, kræves der yderligere er overskud af luft der er bestemt af ovnens luftoverskudstal – lambda (λ), som vi så i data præsenteret i afsnit 2.
$L_{aktuel} = l_{min} \times \lambda$
Det aktuelle luftbehov i kubikmeter ved typiske lambdaværdier udgør således som illustreret i tabel 8.

Tabel 8: sammenhørende værdier af lambda og det aktuelle luftbehov

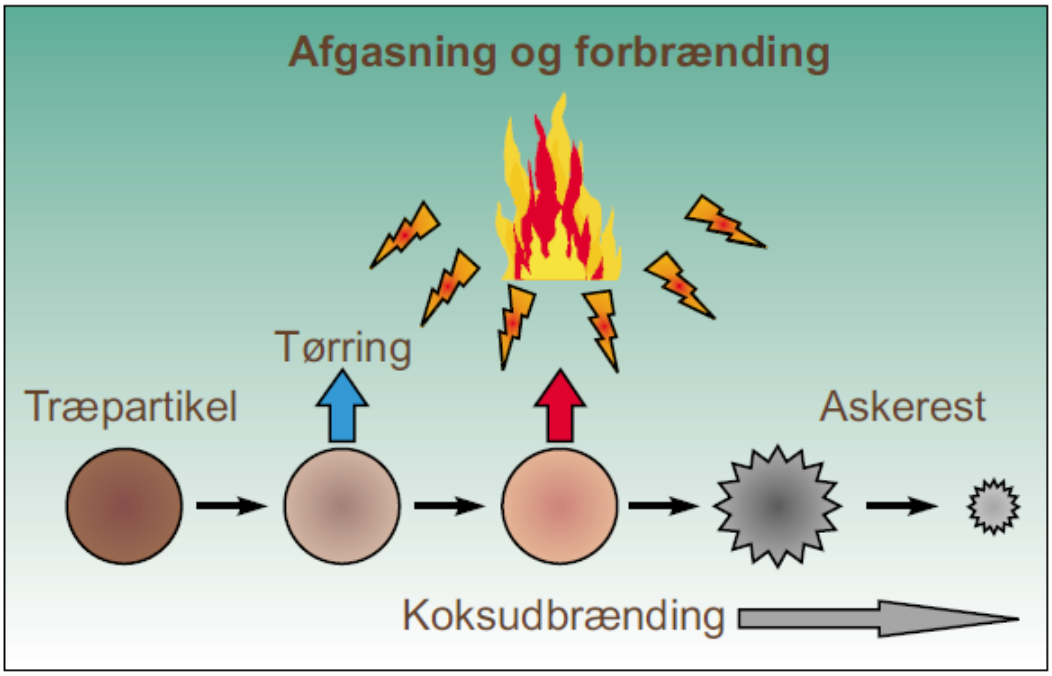
λ	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
L_{aktuel} ($Nm^3/kg_{træ}$)	7,29	7,78	8,26	8,75	9,23	9,72	10,21	10,69	11,18	11,66	12,15

[12] Er træet fugtigt, vil der skulle bruges mindre luft til forbrændingen, og således beregnes maximum behovet ud fra en antagelse af at brændet er tørt

Ud fra denne tabel er det således muligt, at få en første indikation af, hvor meget luft der skal kunne komme til forbrændingen af 1 kg træ gennem hele forbrændingscyklussen.

5.2 Transiente forbrændingsforhold

Brændeovne er en portionsfyret teknologi (intermitterende forbrænding) modsat pilleovne og pillefyr, hvor brændslet tilføres kontinuet, lidt ad gangen.
Brændeovnes luftforsyning sker over et spjæld, der i de fleste tilfælde er manuelt betjent. Det indebærer, at luften tilføres gennem en åbning af uændret tværsnitsareal, og mængden derfor tilnærmelsesvis er konstant hen over en forbrændingscyklus. Der findes undtagelser, idet der ses ovne med automatisk spjældregulering, og ind imellem er der også interesserede brugere af brændeovne, der stiller på spjældene undervejs i forbrændingen for at optimere denne. Men det mest almindelige er at spjældet er manuelt betjent og ofte står i den samme stilling gennem hele forbrændingsprocessen, til trods for at iltbehovet undervejs i processerne er yderst variable. Det, der primært giver varmen i en brændeovn er gasafbrændingen.
Forbrændingen inddeles normalt i 3 faser; udtørring, afgasning og forbrænding og kuludbrænding. Processen er ofte illustreret som vist i figur 9.



Figur 9. Forbrændingens faser (kilde: Videnscenter for Halm og flisfyring; "Træfyringens teori")

Som allerede konstateret under litteraturstudiet (kap 3) er det yderst begrænset hvad der er skrevet om brændeovnes variable luftbehov.
Derimod er der en righoldig litteratur om forgasning af biomasse. Det følgende stammer fra rapporten 'Forgasning af biomasse', udgivet af Dansk Gasteknisk Center i 1995.
DGC inddeler i rapporten forgasning af biomasse i de 3 faser:

Tørrefasen – Pyrolysefasen – Forgasningsfasen. Man ser at der er sammenfald med de første faser af forbrændingsprocessen i en brændeovn. DGC rapporten oplyser at pyrolyse processen går i gang ved ca. 200 °C, når al vandet er fordampet.
Forskellen på forbrænding og pyrolyse er, om der er tilstrækkeligt ilt tilstede. Hvis der ikke er ilt tilstede kan pyrolysefasen fortsætte helt op til en temperatur på 800 °C. I pyrolysefasen begynder brændet at afgive sine flygtige bestanddele i form af blandingsgas bestående af H_2, CH_4, CO, CO_2 samt tjære og oliestoffer.
I forgasningsfasen, efter at temperaturen har passeret 800 °C, og forudsat der tilsættes et forgasningsmiddel som eksempelvis ilt og vand, vil kulstoffet i trækullet omdannes til gas bestående af H_2, CO og CO_2. Herefter vil der være en askerest tilbage der indeholder de mineraler som findes i træ, foruden en uorganisk kulrest.
Frigivelsen af brændbare gasser og variationen i disses sammensætning sker som funktion af tiden og er kraftig i begyndelsen for så at aftage gradvist mod slutningen af pyrolyse og forgasningsfasen.
For så vidt der var tale om rene gasser, er det kendt, at de forskellige gasformige hydrocarboner stiller bestemte krav til både temperatur og blandingsforhold, for at de kan afbrændes. Brint er eksempelvis ret let af få afbrændt, hvorimod metan er mere krævende. Brint kan afbrændes ved koncentrationer på 5-75 %, hvorimod metan kun kan afbrændes hvis koncentrationen er 5-15%. Begge gasser kan antændes ved temperaturer under selvantændelsestemperaturen på omkring 500 °C, så i relation til brændeovne, udgør antændelsestemperaturen ingen begrænsning og gasserne brændes af. Når man sammenholder brændeovnes tilnærmelsesvis konstante luftforsyning, træs variable afgasning og det forhold at gassen ikke optræder som rene gasser, men som en blandingsgas, er det ikke overraskende at betingelser for luftunderskud er tilstede, kortvarende eller længerevarende.

5.3 Indikatorer på luftunderskud

Traditionelt har man brugt dannelse af CO som indikator for forbrændingskvaliteten. Det gælder universelt, også for oliefyr og bilmotorer.
Den ideelle forbrænding efterlader kun kuldioxid og vand som restprodukter. Brænde indeholder kulstof, hvoraf noget afbrændes i gasform f.eks. som metan og noget som trækul.
Forbrændingsreaktionen mellem metan og ilt er:

$$CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

I tilfælde af luftunderskud, f.eks. hvis brugeren har påfyldt for meget brænde, er der for lidt oxygen tilstede, og forbrændingsreaktionen kan ikke føres helt til ende. Det betyder at reaktionen til CO_2 bremses og der dannes CO i stedet for. Derfor er CO en brugbar indikator på ufuldstændig forbrænding, der hyppigst skyldes luftunderskud, selvom årsagen også kunne være for lav brændkammertemperatur, f.eks. hvis det benyttes vådt brænde. Typisk dannes der ikke udelukkende CO, men en blanding CO_2 og CO (eventuelt tillige med sod, C). Forholdet mellem CO og CO_2 vil variere alt efter, hvor godt eller skidt forbrændingen forløber både mht. temperatur og mht. hvor meget ilt der er til stede i forhold til det, der behøves for en fuldstændig forbrænding, hvorfor denne reaktionsligning ikke kan afstemmes med entydigt givne koefficienter:

$$x\ CH_4 + y\ O_2 \rightarrow 2(y\text{-}z)\ CO + z\ CO_2 + 2x\ H_2O$$

Tidligere havde Danmark en grænseværdi for CO emission fra brændeovne på 0,3 % ved referencetilstand 13% ilt. Svanemærket opererer med en grænseværdi på 0,1%. Standarden til typeprøvning af brændeovne, EN13240 tillader op til 1,0% CO. Man kan således groft karakterisere forbrændingskvaliteten ud fra målte værdier af CO, og inddele forbrændingen i 4 kategorier:

- Den rene forbrænding, hvor CO er under 0,1 %
- Den acceptable forbrænding, hvor CO er 0,1-0,3%
- Den dårlige forbrænding, hvor CO er 0,3-1,0%
- Den uacceptable forbrænding, hvor CO er > 1%

I og med danske brændeovne siden begyndelsen af 1990'erne har skullet leve op til krav om maksimalt 0,3% CO har det ingen relevans at undersøge sammenhænge hvor CO er væsentlig over 0,3-0-5%, men skalaen er alligevel anvendelig til at sætte en ramme om hvilke størrelsesordener af CO emissioner man kan forvente i typeprøve sammenhæng. I de nye Ecodesign regler sænkes grænsen yderligere til 0,12%.

6. Model-I til vurdering af luftbehov

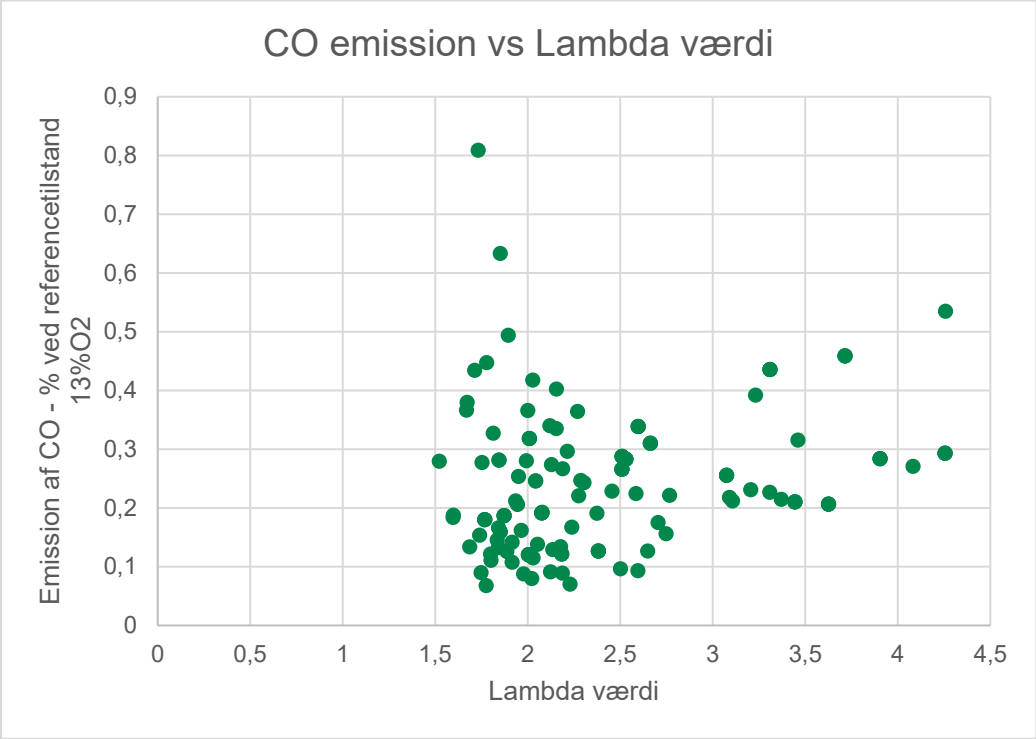
6.1 Indledning

Som indikeret under de forrige afsnit om litteraturstudiet og afsnittet om forbrændingsteori, er luftoverskudstallet (lambda, λ), den simpleste parameter til at vurdere om der kommer luft nok til forbrændingen. Den simpleste model er, at definere at lambda i gennemsnit over en forbrænding skal antage en given størrelse for at forbrændingen er god. I nedenstående vil det blive vist, at denne model er for simpel, og modifikationer vil blive foretaget ud fra målinger på moderne ovne. Dette vil blive brugt som optakt til at opstille retningslinjer til at forhindre luftunderskud i en brændeovn.

6.2 Målekampagne på 4 brændeovne med forskellig betjening

Teknologisk Institut har for nylig gennemført en større målekampagne, hvor der ikke er forsøgt at fyre optimalt, men sådan som en gennemsnitsforbruger kunne gøre det. Der blev benyttet 4 forskellige brændeovne, der alle var nyere ovne. Til fyringerne blev der primært benyttet birkebrænde med naturlig andel af bark. Men der blev også simuleret forskellige former for *'misuse conditions'*, inklusiv brug af vådt brændsel, fyring natten over (både med træ og briketter), overfyldning af ovnen (både brænde og træbriketter) og endelig der hvor brugeren har glemt at skrue ned for spjældet efter genpåfyldning af brænde.

Målekampagnen gav 130 datasæt (enkeltmålinger/påfyringer) indeholdende både CO emission og emission af CO_2. Der benyttes dataformatet procentuel udledning ved referencetilstand 13% ilt for CO og Lambda som et forhold, værdierne er set som et gennemsnit over målingen. Da CO som førnævnt (afsnit 3) er mål for kvaliteten af forbrændingen undersøges sammenhæng mellem CO og lambda som vist i figur 10.

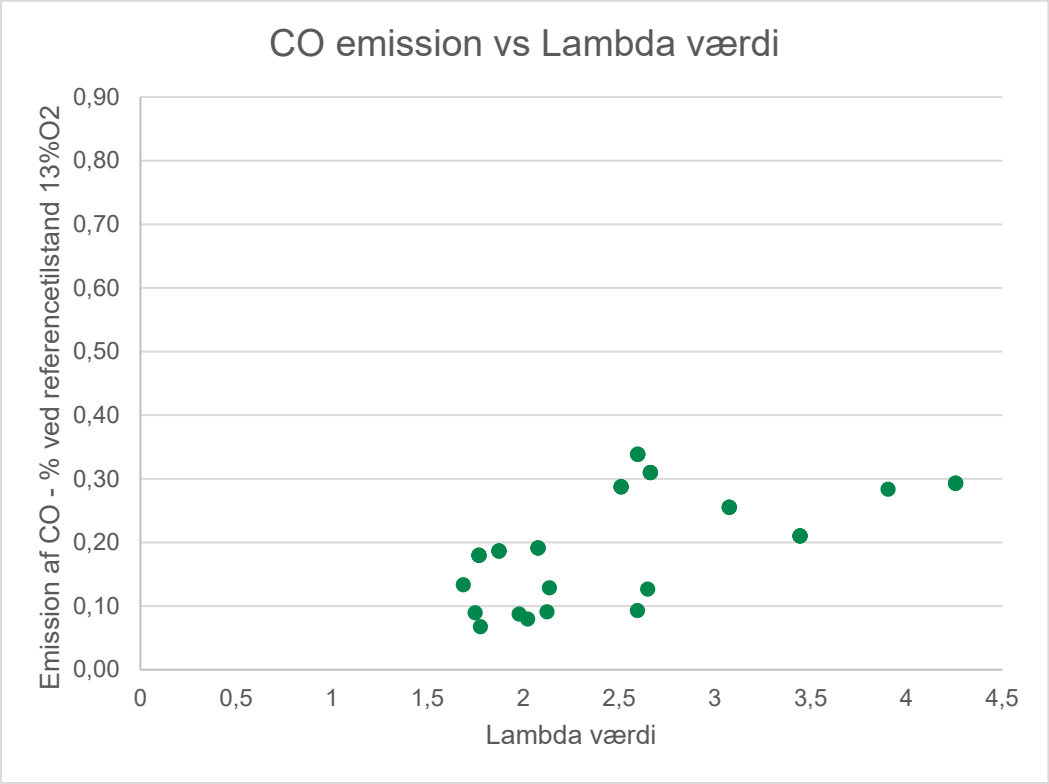


Figur 10 Gennemsnit af hhv. CO og lambda værdier i fyring af en række ovne under vidt forskellige omstændigheder (e.g. regulering af flow, type træ og tørhed, mængde træ)

Datasættet her er set som gennemsnittet af emissionen over hele chargen/påfyringen og viser at det ikke ud fra gennemsnitslambda alene er muligt at vurdere om en ovn er i luftunderskud. For nogle ovne er CO emissionen

lavere, ved en lav lambdaværdi end ved en høj. De 130 datasæt består, som beskrevet af en række forskellige forbrændingsmodus, hvor nogle er kørt med mere luft andre med mindre og nogle med vådt træ mens andre har brugt tørt træ. Dette betyder, at der er mange parametre der kan være med til at præge dette 'uklare' billede.

Hvis der kun fokuseres på de tilfælde, hvor ovnene har brændt som en brændeovn bør fyres (tørt, rent træ i passende mængde) fås følgende graf af CO vs. lambda.



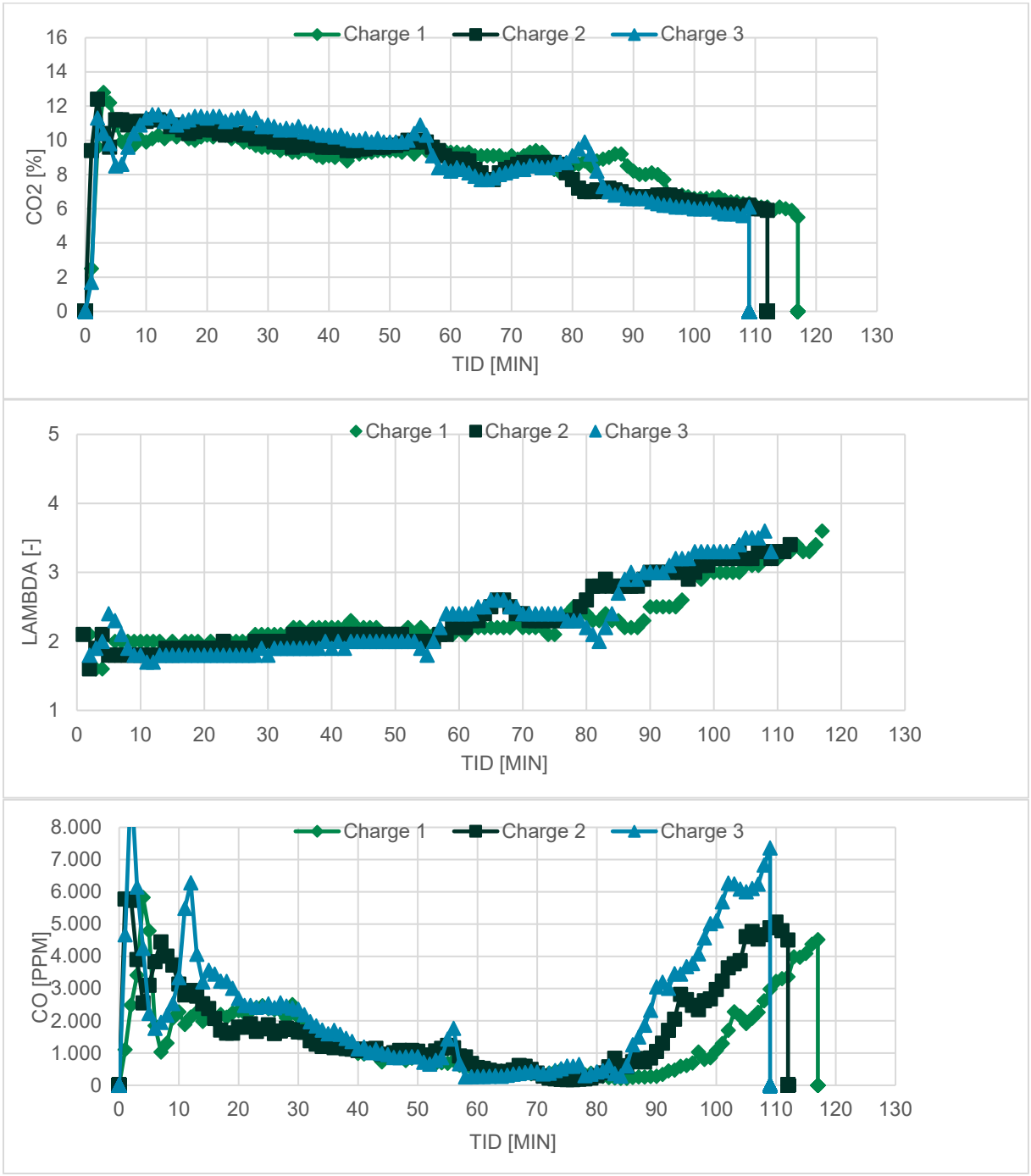
Figur 11 Gennemsnit af hhv. CO og lambdaværdier i fyring af en række ovne under korrekte omstændigheder (dvs. passende regulering af luft, passende mængde af tørt træ)

Af figur 11 ses det at CO og lambdaværdien set over et gennemsnit for ovne, der er håndteret fornuftigt, i gennemsnit over hele fyringsprocessen i så godt som alle tilfælde er gode eller acceptable forbrændinger i henhold til definitionen af forbrændingskvalitet ud fra CO niveau i afsnit 3.3 (<0,3%). Ud fra figuren er det ikke muligt at slutte noget om et optimum for forbrændingen, hvilket foreslår, at der også er andre faktorer, der kan have en indvirkning på CO værdien end kun luftoverskuddet(Lambda). Ligeledes kan det ikke ud fra disse data bekræftes om forbrændingen har været god under hele forløbet, og denne første model om at definere at lambda i gennemsnit over en forbrænding skal antage en give størrelse for at forbrændingen er god, er muligvis for simpel.

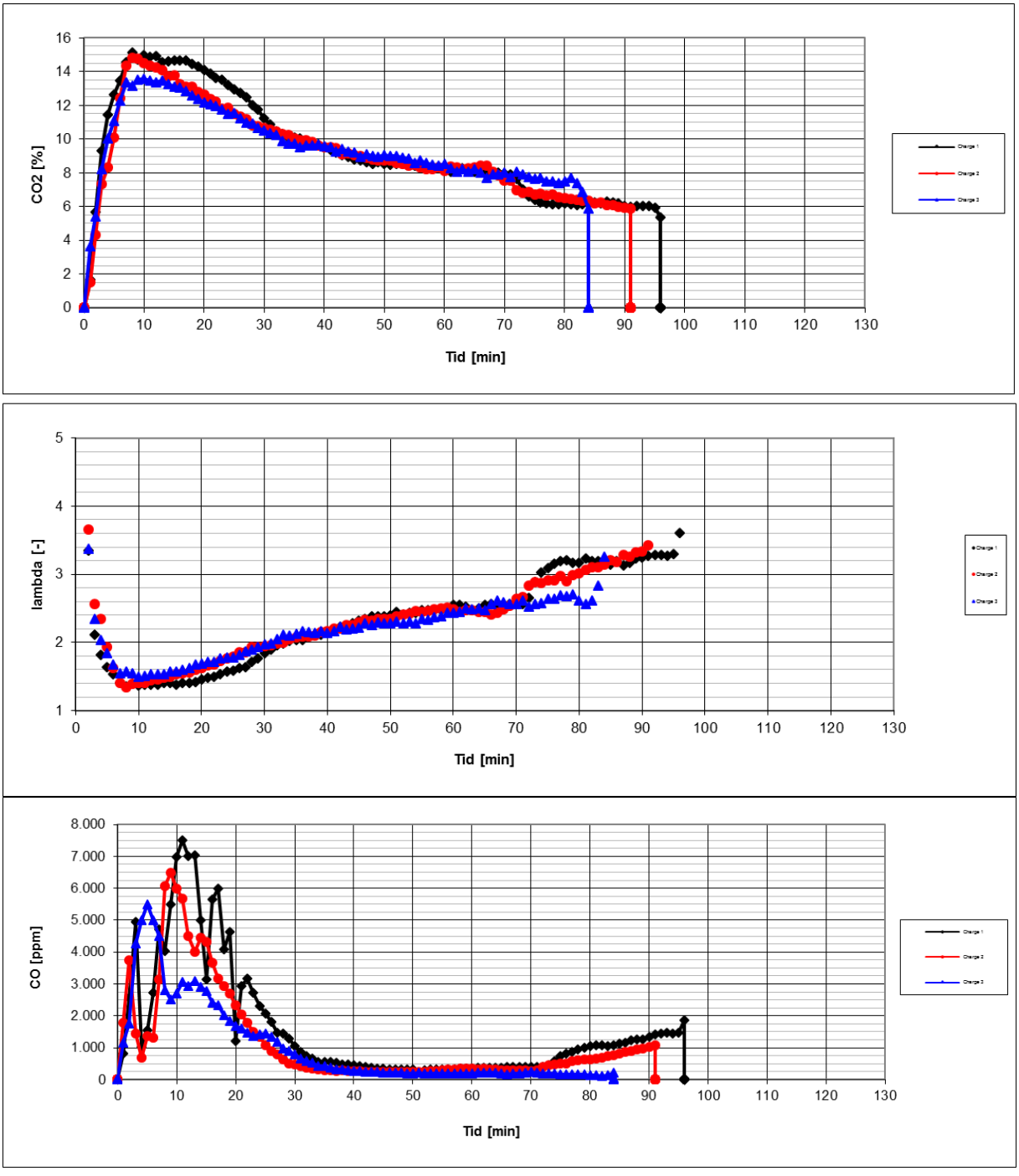
Derfor fokuseres der i næste afsnit på effekten af at følge luftoverskuddet undervejs i forbrændingen og dermed vurdere forbrændingen ud fra denne ved tilsvarende løbende CO værdier.

6.3 Vurdering af CO og lambda løbende under forbrændingsproces

Efter at have vurderet at det er relevant at følge CO og lambda under hele forbrændingen, for at se om dette giver bedre informationer om hvorvidt den rette mængde luft er tilstede, er data indsamlet gennem 3 påfyringer for to forskellige ovne, ovn 1 og ovn 2 med samme brændemængde (1.8 kg).



Figur 12. Ovn 1 - Tre indfyringer med 1,8 kg tørt træ. Data for CO_2, CO og lambda som funktion af tiden



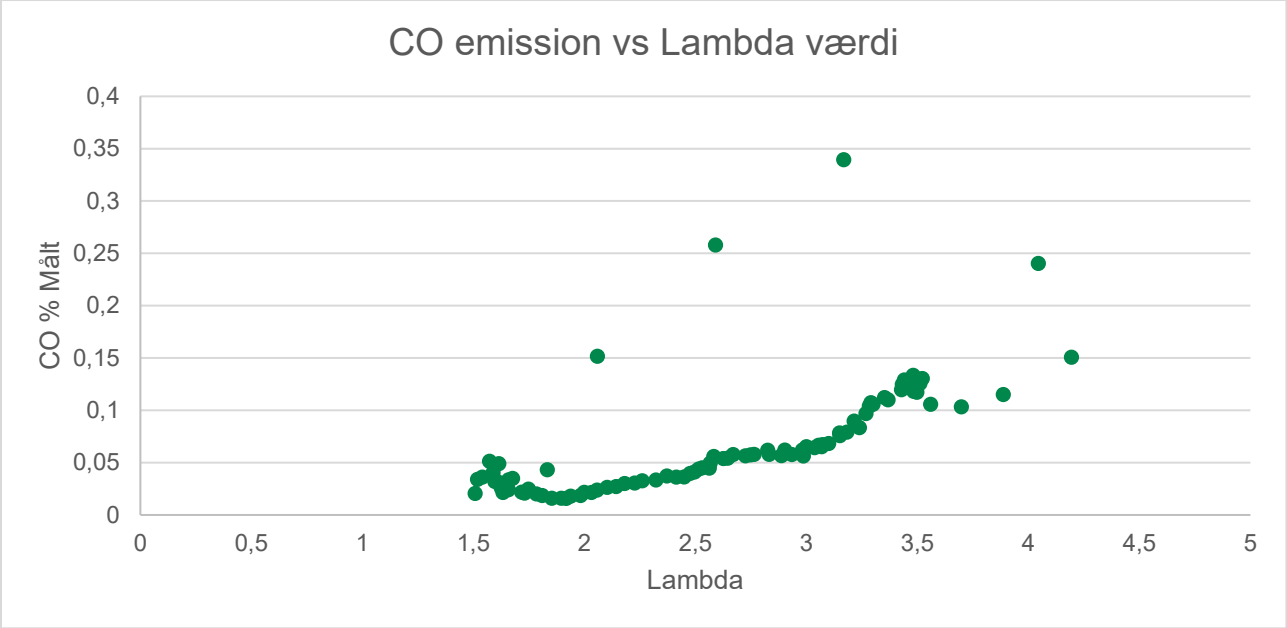
Figur 13. Ovn 2 - Tre indfyringer med 1,8 kg tørt træ. Data for CO_2, CO og lambda som funktion af tiden.

Det ses af figur 12 og 13 at data for de tre indfyringer er reproducerbare for de respektive ovne. Det ses endvidere, at de to ovne opfører sig forskelligt. For ovn 1 er lambda stødt voksende gennem forbrændingen, mens lambda for ovn 2 er ganske høj i starten af forbrændingen, men aftager ganske betragteligt, for så at vokse igen. I begge

tilfælde er CO niveauerne højest i henholdsvis slutningen og afslutningen af forbrændingsprocessen, men kvantitativt set er mængden af CO emission meget forskellig for de to ovne. Det er altså tydeligt, at forbrændingskvaliteten af forskellige ovne er betragtelig forskellig ved afbrænding af samme (passende) mængde træ.

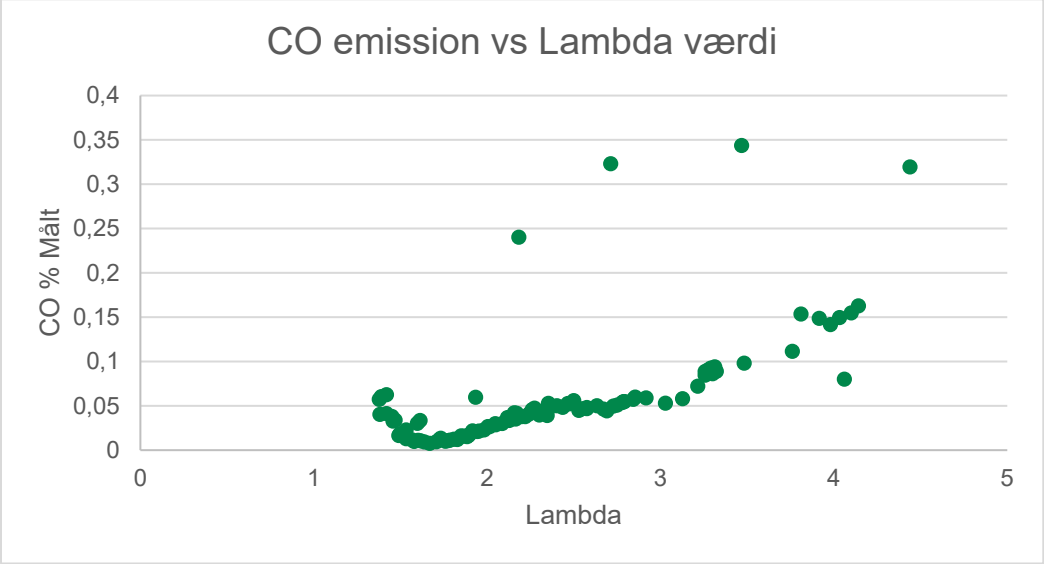
6.4 Påvirkning af brændemængde og lufttilsætning

I det følgende vil det systematisk blive undersøgt hvad mængden af træ og lufttilførsel, i en specifik ovn, ovn 3, gør ved CO og lambdaværdierne, i testlaboratorierne ved Teknologisk Institut.
I første måling, figur 14, er der afbrændt 1,4 kg træ og det ses at CO emissionen ikke er "høj" på grund af luftunderskud, men at det er andre faktorer, der har indflydelse. Dette ses på baggrund af at lambdaværdien er 1,5 og at emissionerne i dette område samtidig er lave. Altså har ovnen tilstrækkelig luft til at brænde gasserne af, men eksempelvis kan mangel på temperatur gøre at CO emissionen er høj på trods af et tilstrækkeligt luftoverskud.



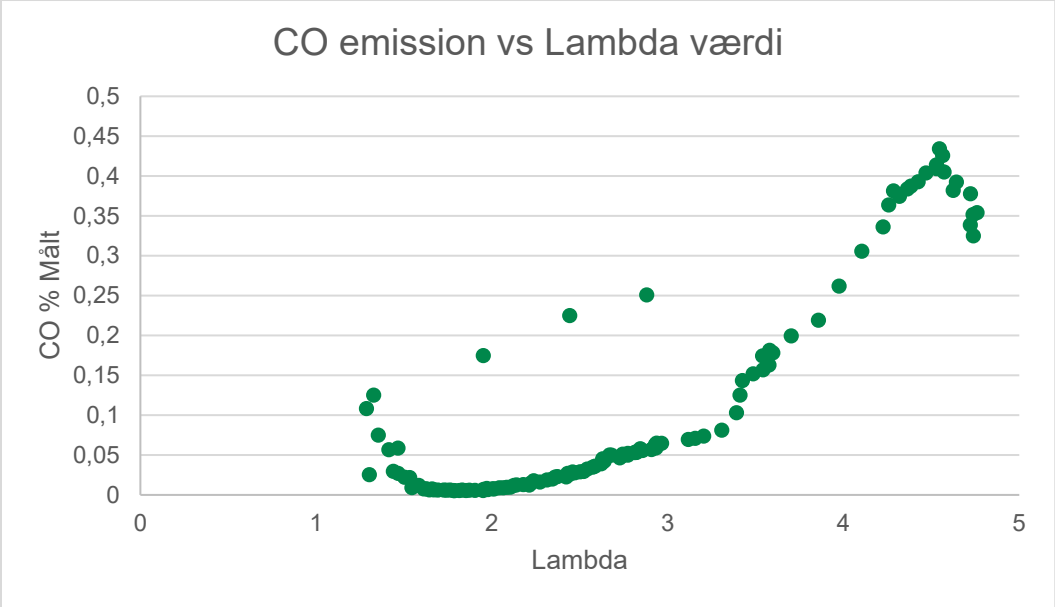
Figur 14 – Der er afbrændt 1,4 kg og luftspjæld har været på 50 % (altså ca. halvt lukket). Det ses at der ikke har været luftunderskud under forbrændingen. Grafen viser målinger foretaget over en charge/påfyring, og er således det faktiske billede og ikke et gennemsnit.

Ved at øge mængden af brænde forventes det at luftoverskuddet falder. Mængden af brændsel øges til 2,1 kg altså ca. 50 % mere brændsel og spjældets position omkring 50 % fastholdes.



Figur 15. Der er afbrændt 2,1 kg og luftspjæld har været på 50 % (altså ca. halvt lukket). Det ses at der ikke har været luftunderskud under forbrændingen. Dog er luftoverskudstallet reduceret til ca. 1,4 i de laveste tilfælde.

Det ses på figur 15 at luftoverskuddet falder, men at det stadig er tilstrækkeligt til at sikre at CO kan afbrændes. For at undersøge effekten af at øge spjældindstillingen til 100 % måles der med samme mængde træ (2,1 kg) men spjældet åbnes fuldt op. Resultatet ses på figur 16.

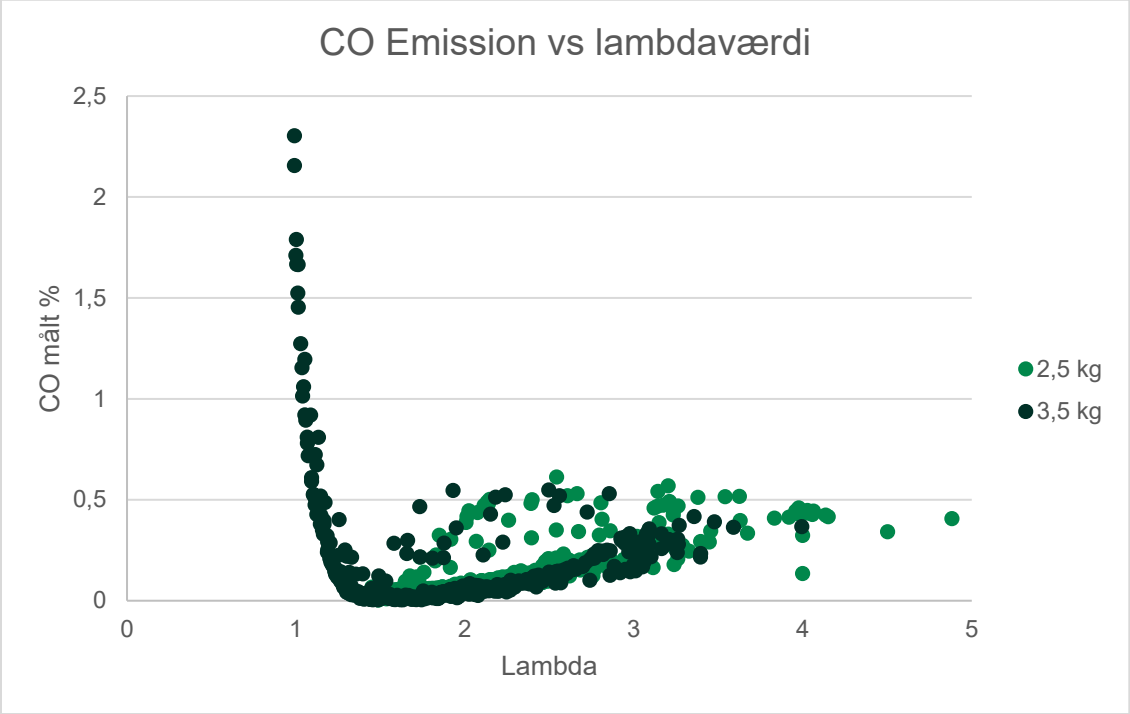


Figur 16 - Der er afbrændt 2,1 kg og luftspjæld har været på 100 % (altså helt åben). Det ses at der ikke har været luftunderskud under forbrændingen.

På figuren ses, at selv om der er 100 % åbent og altså burde være muligt at sikre et meget bedre luftoverskud end ved 50 % åbent spjæld, så opstår faktisk det laveste luftoverskud målt. En forklaring på dette er, at der ved 100 % luft opstår en voldsommere forbrænding og dermed en kraftigere afgasning hvilket øger behovet for luft, for at kunne afbrænde gasserne, dermed falder lambda. Dog er der stadig tilstrækkelig luft til at sikre forbrændingen er acceptabel, gennem hele processen.

6.5 Dannelse af egentligt luftunderskud

For at undersøge hvornår en ovn går i luftunderskud blev der dedikeret en målekampagne med en ny ovn, ovn 4, der er købt på markedet i 2015. Ovnen har kun sekundær og tertiær luft, det vil sige at der ikke kommer luft op i bunden af brændkammeret men kun fra ruden og fra bagvæggen. Ved forbrændingen med 2,5 kg træ var spjældindstillingen på ca. 66 % og med 3.5 kg var der 100 % luft.
På figur 17 ses det at ved 2,5 kg er den mindste observerede lambda på 1,45 hvorimod lambda ved 3,5 kg er 0,99, altså et reelt luftunderskud. På figuren ses det også at der på et meget kort interval ca. lambda 1,2 til lambda 0,99 er en voldsom stigning i den målte CO emission med en max målt CO på ca. 2,3 %. Ovnen er altså kommet i luftunderskud i denne ekstreme situation med meget brænde, men ligesom de øvrige ovne der er målt på, kan ovn 4 sikre tilstrækkelig forbrænding så længe lambda værdien er over 1,2-1,25. Kommer lambdaværdien under dette, ses en voldsomme stigning i CO.

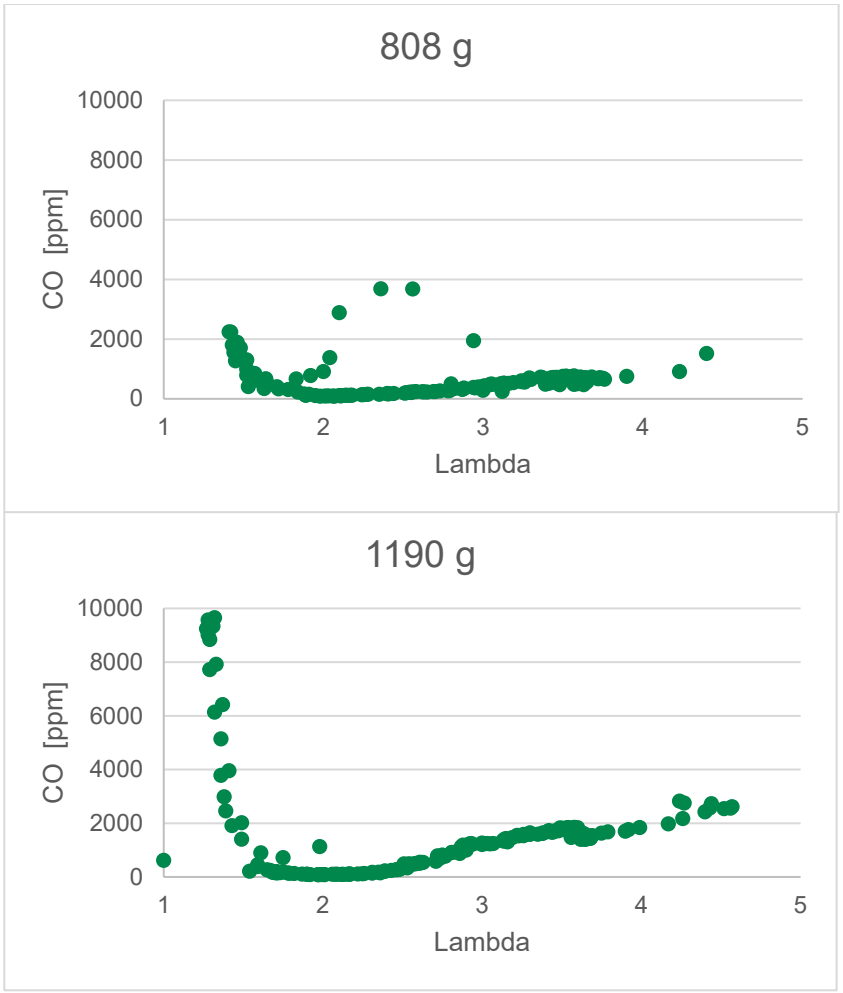


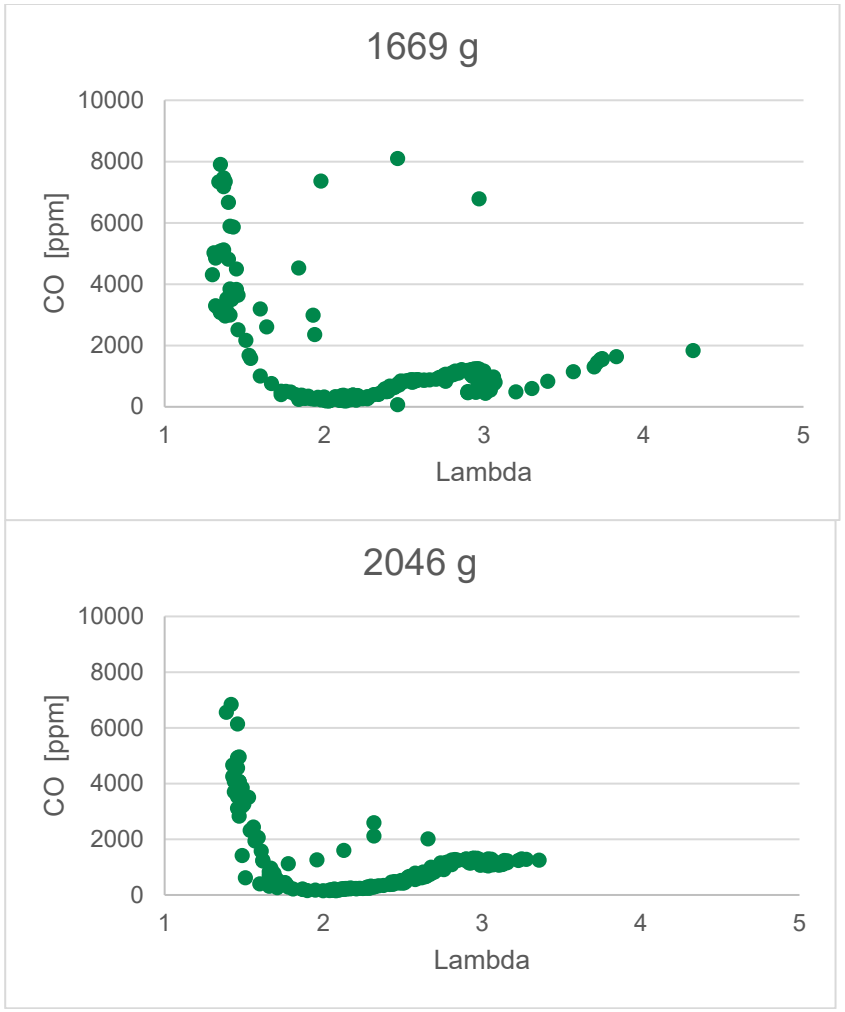
Figur 17 - Der er afbrændt 2,5 kg og 3,5 kg luftspjæld har været på henholdsvis 66 % og 100 % (altså helt åben). Det ses at der ikke har været luftunderskud under forbrændingen ved fyring med 2,5 kg, men ved 3,5 kg er ovnen gået i luftunderskud.

6.6 Test af hypotese 'lambda >1.25' sikre god forbrænding

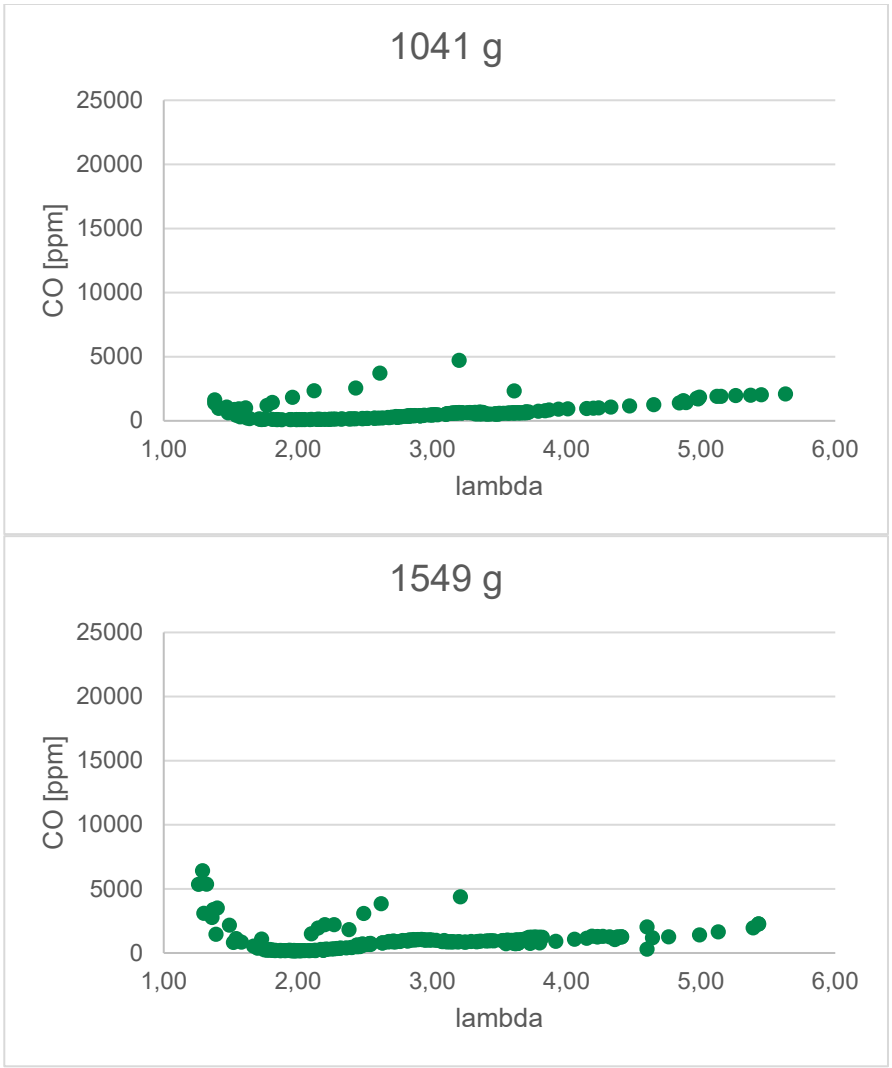
For at undersøge om en lambdaværdi større end 1.25 gennem hele forbrændingen sikrer god forbrænding blev en eksperimentel serie udført ved HWAM, hvor data præsenteres på de følgende sider.
To ovne, alfa og beta, blev udvalgt.
Alfa ovnen har regulering på primærluften. Den er testet ved 100%, figur 18, og 50%, figur 19, af luftreguleringen og så med nogle forskellige chargestørrelser. På figurerne er CO versus lambda vist for de to spjældindstillinger.
Beta ovnen har regulering på alle tre spjæld ved bimetalfjeder. Bimetalsreguleringen kan ikke regulere så hurtigt, at man undgår luftoverskud/underskuds-problematikken igennem forbrændingen. Målingerne er udført ved 50%,

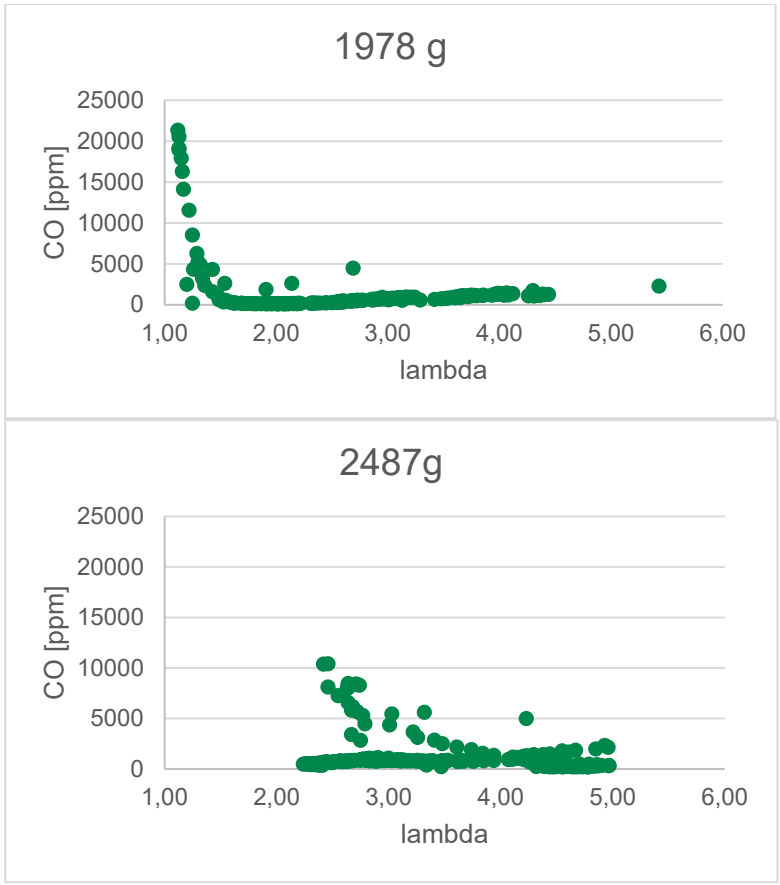
figur 20, og 100%, figur 21, af luftindtaget og med forskellige chargestørrelser. På figurerne er CO versus lambda vist.
Luftflow som funktion af forbrændingsprocessen er ligeledes målt for begge ovne med henholdsvis 50 og 100% åbne luftspjæld og illustreret i figur 22 for chargestørrelser på 2 kg i alle fire tilfælde, således at disse direkte kan sammenlignes.
Indledningsvist ses for data for de to alfa ovns forbrændingstests i figur 18 og 19.





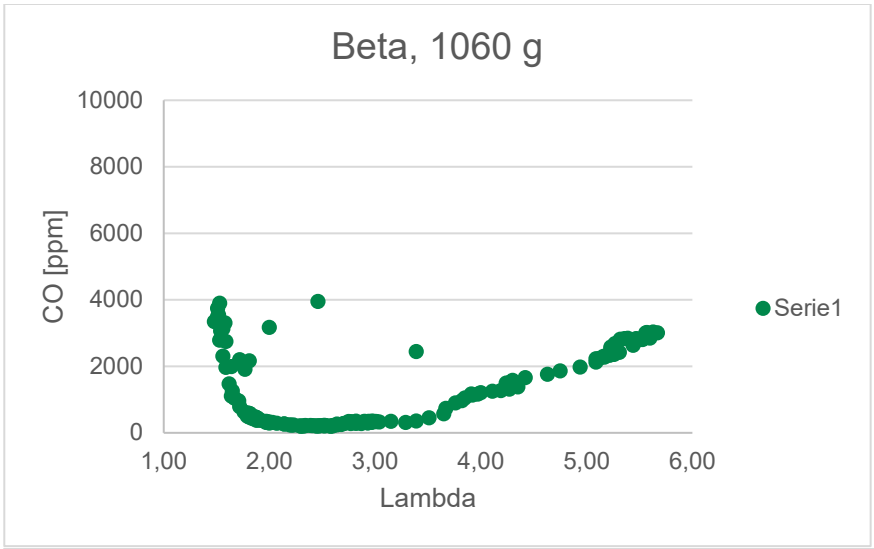
Figur 18. CO versus lambda ved forskellig mængde brænde i alfa ovnen. I alle tilfælde er spjæld således at 50 % mulig luft kommer igennem.

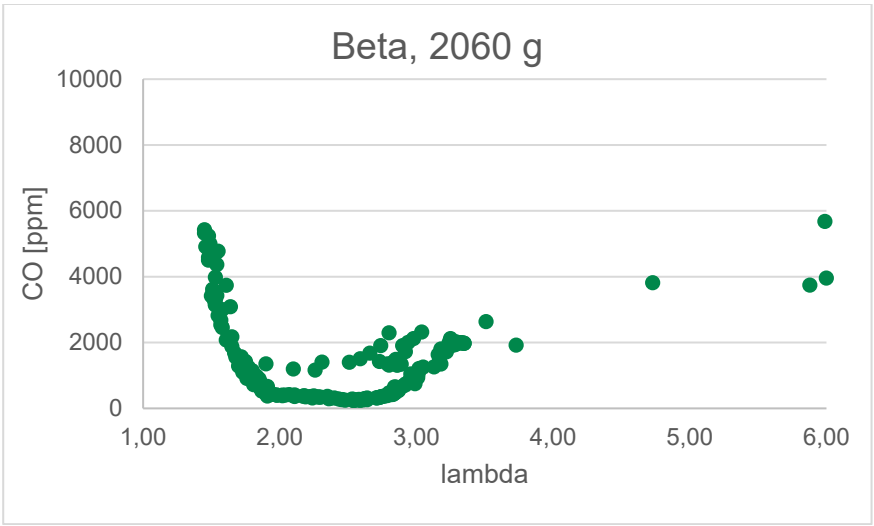


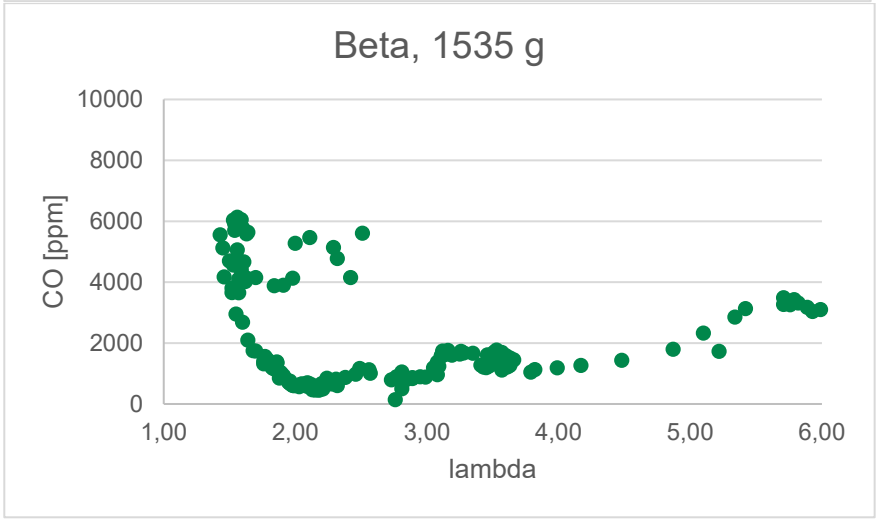


Figur 19. CO versus lambda ved forskellig mængde brænde i alfa ovnen. I alle tilfælde er spjæld således at 100 % mulig luft kommer igennem.

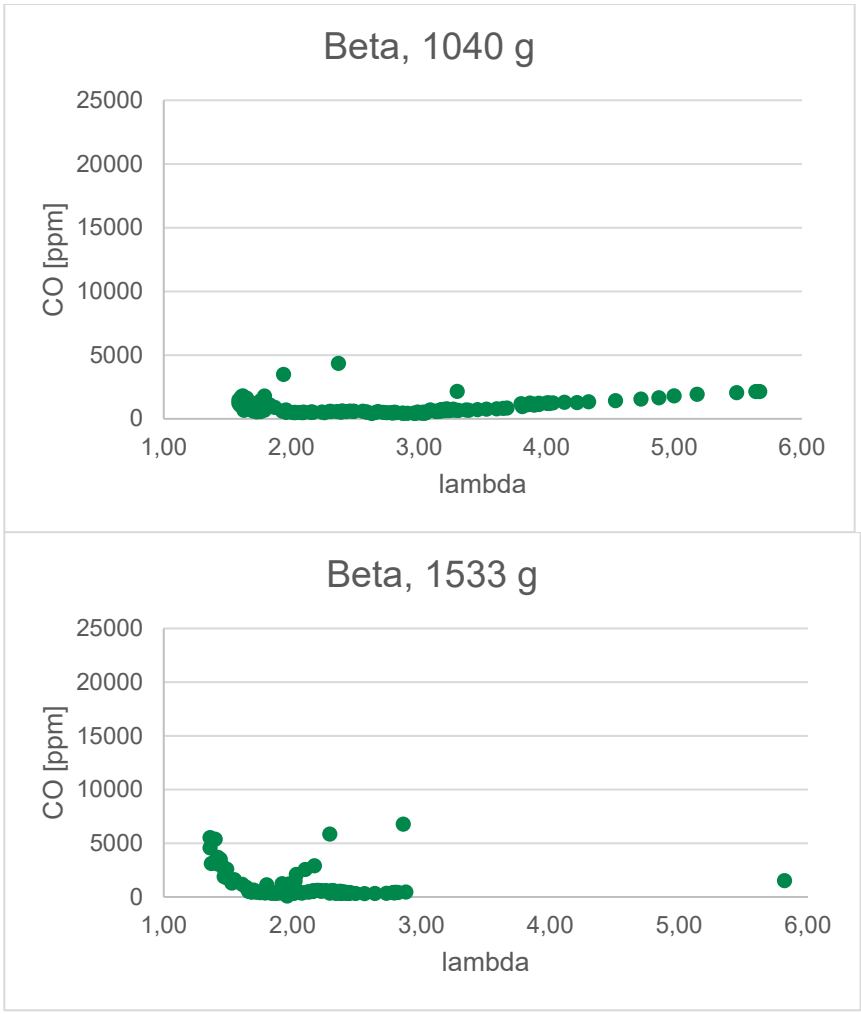
For alfa ovnen ses det ved 50% åbne spjæld (figur 18), at lambda på 1.25 er for lavt sat, hvis CO værdier højere end 3000 ppm skal undgås, og en værdi af lambda på 1.5 synes mere passende at tilstræbe og kunne være et brugbart mål for hvornår forbrændingen er god, da der kun er enkelte isolerede punkter af for høj CO når lambda er større end 1,5. Overordnet ses, at mængden af datapunkter med høje lambdaværdier er faldende jo større mængden af brænde er og tilsvarende vokser mængde af målepunkter med høje CO værdier jo mere brænde der er i ovnen. Ved den største mængde brænde, 2 kg, er de højeste CO værdier observeret dog lidt lavere end ved de mindre mængder brænde.
Ved 100% åbent spjæld ses (figur 19) generelt som ventet højere lambdaværdier end ved 50%. Generelt synes der at være omvendt proportionalitet mellem CO og lambda, men ved en brændemængde så høj som 2,5 kg er dette billede sløret af årsager, der ikke umiddelbart kan fastslås.

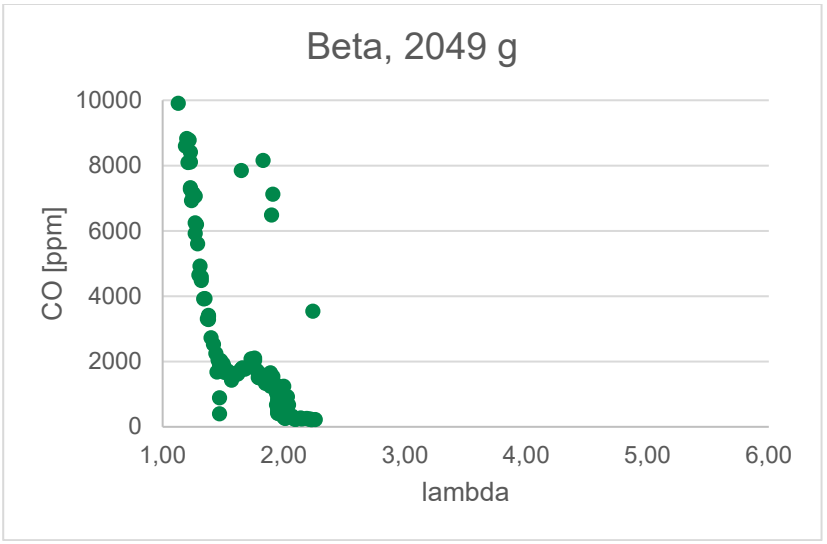






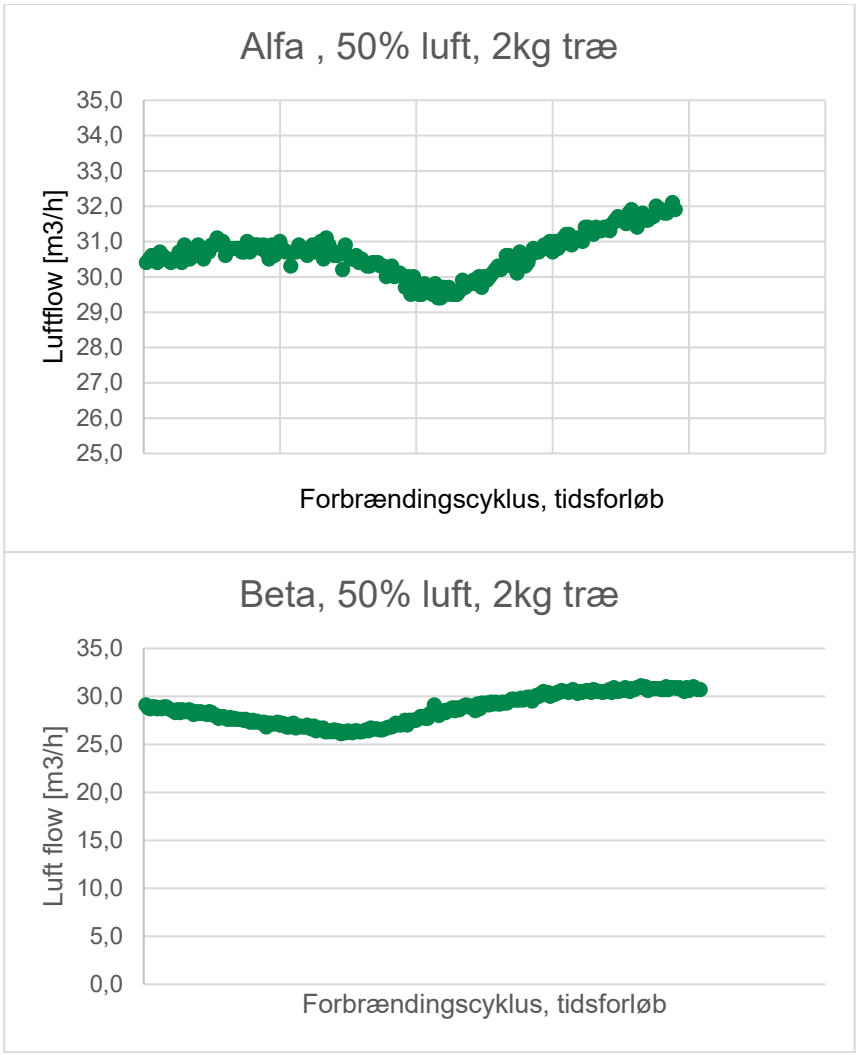
Figur 20. CO versus lambda ved forskellig brændemænger i beta ovnen. I alle tilfælde er spjæld således at 50 % mulig luft kommer igennem.

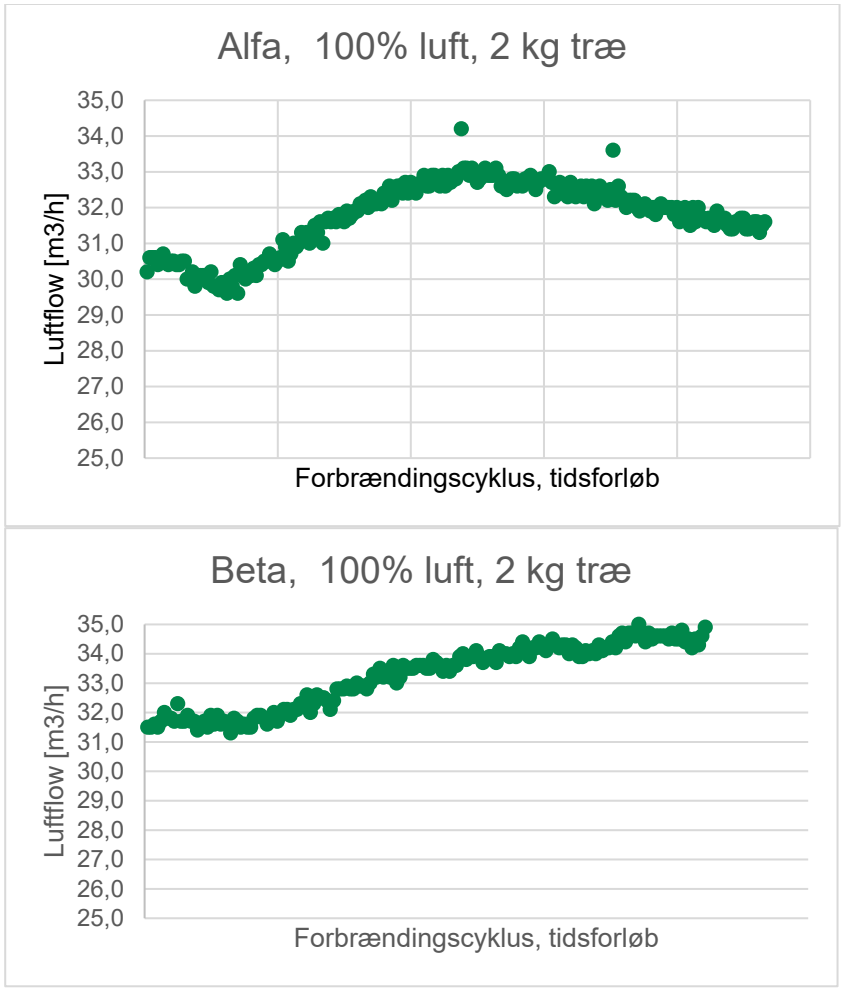




Figur 21. CO versus lambda ved forskellige mængder brænde i beta ovnen. I alle tilfælde er spjæld således at 100 % mulig luft kommer igennem.

For beta ovnen er billedet ved 50% sammenlignelig med alfa ovnen, og atter ser det ud til at en lambda værdi på 1.5 vil være tilrådelig at stræbe efter, for at undgå de situationer hvor CO koncentrationen ellers bliver høj. Ved 100% luft ses en signifikant forskel i forhold til alfa. For beta ovnen ved charge størrelser på 1,5 og 2 kg er lambdaværdierne mindre end hhv. 3 og 2.5 og således lavere end lambda-værdierne i tilfældet hvor spjældene blot er 50% åbne. Tydeligt er for denne ovn, at forbrændingen er bedst, ved lav brændemængde (1 kg) og høj luftmængde (100%) og alle andre situationer er mindre optimale.





Figur 22. Luft flow som funktion af tidsforløbet af forbrændingen i de to ovne, ved forskellige luftindtag (50 og 100%) og for 2kg brænde

Hvis luftflowet gennem systemet betragtes, figur 22, er niveauet det samme ca. 30 ±5 m^3/h i alle fire tilfælde og relativt stabilt gennem hele forbrændingsprocessen. Niveauerne er lidt højere ved 100% end 50%, men forskellene er ikke så store, som man måske kunne have forestillet sig. I tilfældene hvor spjældene står på 50%, ses interessant nok et minimum cirka halvvejs gennem forbrændingen, mens et sådant lokalt minimum synes at være langt mindre og langt tidligere i forbrændingen i tilfældene hvor spjældindstillingerne er 100% åbne. Yderligere studie vil være påkrævet for at forklare de observerede fænomener nærmere, men findes ikke af relevans for dette studie, hvor det blot er interessant at se niveauerne for luftflowet.

7. Guidelines til at forhindre luftunderskud i en brændeovn

7.1 Simple tommelfingerregler for luftmængder, der skal kunne komme gennem en brændeovn

For at sikre, at ovnene ikke kommer i luftunderskud ved den mængde træ, som producenterne ønsker forbrugeren skal kunne benytte i deres ovn, opsættes en række simple kriterier til modellering af luftbehovet til ovnen.
Det laveste luftbehov opnås i forbindelse med typeprøvningen, her har producenten behov for at kunne skrue luften ned, så den kan levere den ønskede effekt og virkningsgrad, med den benyttede mængde træ.
Det højeste luftbehov opstår hos forbrugeren, når de benytter den mængde træ som producenten specificerer som det maksimale der må brændes i ovnen.
Luftbehovet skal kunne opfyldes ved et træk svarende til det træk som er tilgængeligt under typeprøvningen. Her er værdien jf. standarden 12 ±2 pa.
For at gøre modellen tilstrækkelig robust lægges der en sikkerhedsmargin ind i forhold til de udførte målinger ovenfor. Målingerne indikerede, at der ikke var tilstrækkeligt luft i ovnen når lambdaværdien kom under 1,2. Derfor regnes herefter på at ovnen som minimum skal kunne levere et luftoverskud på 1,5 med den ønskede mængde brænde ved 12 Pa.
Af tabel 8 ses det at den tilførte luftmængde derfor skal udgøre mindst 7,29 kubikmeter pr kg tørt brænde tilført.
Ovenstående betragtning fokuserer på hvad der må betegnes som en typisk optimal lambdaværdi under en fornuftig mængde brændeforbrug. Imidlertid ses ofte forkert brugeradfærd, enten i form af for lidt lufttilførsel eller an brænde mængde, der er væsentligt større, end ovnen kan håndtere. Derfor ønskes en model, der kan identificere luftbehovet i en given brændeovn ved forskellige indfyrede mængder træ. Træmængderne skal vurderes i et interval, fra en 'lille' indfyring, til normalt og anbefalelsesværdigt og videre op til en maximal mængde, der ikke bør overskrides.
Nedenfor er illustreret et eksempel på luftmængden, der således skal kunne komme til forbrændingen for at den teoretiske nødvendige mængde luft overordnet set er tilstede.

Minimal charge	750 g	5,5 m^3/charge
Normal charge	1,3 kg træ	9,5 m^3/charge
Maximal charge	4 kg træ	29 m^3/charge

Ud fra dette ses altså at der er følgende krav til en brændeovns lufttilførsel

1) Der skal kunne skrues ned for spjæld, således at en meget lille mængde luft tilføres, som f.eks. ved en typetest ved relativ begrænset brændemængde
2) Spjæld skal kunne reguleres så en luftmængde svarende til en normal charge kan tilføres gennem chargen
3) Der skal skulle kunne skrues op for spjæld, så der kan komme ilt nok til den maksimale charge brændeovnsproducenten vurderer ovnen skal kunne håndtere at brænde rent.

I praksis betyder det, at spjæld og dimensionering (inklusiv forhindring af et problematisk tryktab) skal laves således at der kan komme ca. 30 m^3 luft gennem ovnen pr charge, hvor luftbehovet er variabelt gennem chargen.

Længden af en charge vil variere ganske betragteligt fra ovn til ovn, og afhængigt af træmængde i chargen og luftindstillingerne. Det er altså atter nødvendigt at opstille nogle antagelser. Ud fra erfaring tager en charge mindst 45 minutter hvis træmængden er større end eller svarer til en normal charge. Forbruget af luft er ikke lineært under forbrændingen men må formodes at være størst i gennem den første del. Som antagelse kan man sige at 2/3 af luften skal tilføres i løbet af de første 20 minutter. Dvs. 20 m^3 skal kunne tilføres på 20 min. Det svare til, i værste fald, at ovnen skal kunne trække 1 m^3 igennem pr minut eller 60 m^3/h i visse dele af forbrændingen.

7.2 Forslag til simpel analyse af hvad ovnen kan håndtere af brænde

Til hjælp til brændeovnsproducenter til at teste hvad ovnen kan håndtere af brænde, foreslås følgende procedure:

Trin 1	1,5 kg tørt brænde afbrændes ved ca. 33 % luft
Trin 2	2,5 kg tørt brænde afbrændes ved ca. 66 % luft
Trin 3	3,5 kg tørt brænde afbrændes ved ca. 100 % luft
Trin 4	ca. 4 kg tørt brænde afbrændes ved 100 % luft
Trin 5	ca. 4,5 kg tørt brænde afbrændes ved 100 % luft
Trin 6	ca. 5 kg tørt brænde afbrændes ved 100 % luft

Prøven stoppes, når forbrændingen ikke længere kan gennemføres med lambda værdier større eller lig 1,5. Den største mængde brændeovnen kan håndtere, er således den, der er indfyret med på sidste trin hvor forbrændingen stadig forløber tilfredsstillende. I tilfælde hvor en fabrikant har udviklet en relativt stor ovn, kan man vælge at springe trin 1 over, og starte direkte på trin 2.

For at sikre en standardiseret, ensartet procedure, foreslås at:

- Almindelige stykker birk med bark benyttes
- Trinene følger efter hinanden (Trin 1-6 defineret ovenfor)
- At mindst to charge af hvert trin foretages (for at sikre reproduktion)
- Der må fyres med ny charge, når flammerne går ud
- Ingen lambda værdi mindre end 1,5 er acceptabelt
- Spjæld må justeres optil senest 10 minutter efter påfyring

Der vil kunne udarbejdes en skabelon for dette, som kan sættes ind i manualen. Processen og fordele og ulemper ved denne simple metode studeres nærmere i næste kapitel, hvor det vil tydeliggøres at dette ikke nødvendigvis er tilstrækkeligt.

8. Luftvejene i brændeovnen

8.1 Indledning til kapitlet

For at sikre tilstrækkelig luft til at opnå ren forbrænding i en brændeovn, er det nødvendigt at forhold omkring ovn/spjæld, rørføring og skorstenstræk alle er i orden og afstemt. Disse forhold, og eventuelle begrænsninger, gennemgås her. Der vil blive anvendt tre udvalgte ovne i dette kapitel, til at illustrerer forhold, og til at foretage luftmålinger på. Af disse ovne, er to ældre ovne og en ny og moderne ovn, for at inkludere ovne i studiet, der forventes at have forskellige udfordringer i forhold til luftsystemer, spjæld mm. Ud fra dette vil guidelines blive givet til

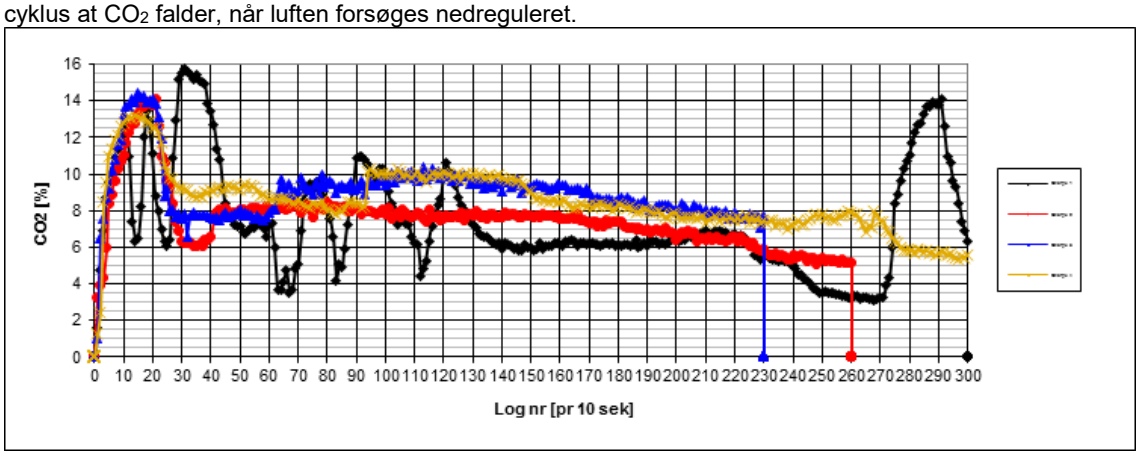
- At hjælpe producenter med at sikre at nyudviklede ovnes begrænsninger i luftsystemet minimeres.
- At hjælpe producenten med, ud fra målinger på nyudviklede ovne, at rådgive kunder med hensyn til hvor meget træ der maximalt må brændes af, for at styrke muligheden for ren forbrænding fra danske brændeovne under virkelige driftsbetingelser.

Som hjælpemidler til dette, vil forskelligt måleudstyr (heriblandt det minimalt nødvendige, nemlig lækagemåler) blive beskrevet. En procedure (inkl. Interaktivt værktøj i form af Excelark til beregninger) til at vurdere luftforholdene i en ny prototype og påpege mulige svage punkter, der kan forbedres i den endelige ovn, vil blive præsenteret.

8.2 Hvor meget luft kommer der gennem ovn

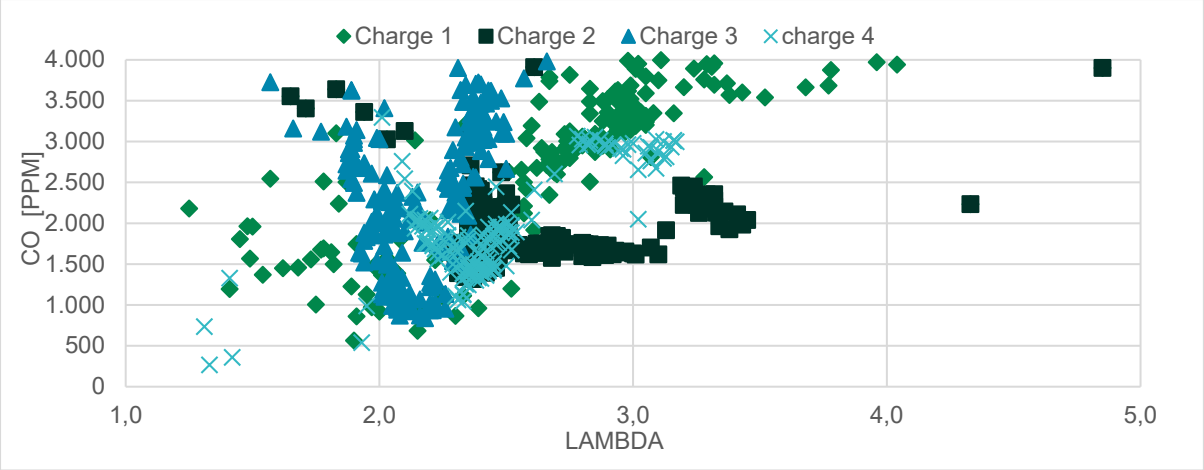
Modellen i kapitel 7 til vurdering af luftbehov, blev udviklet til moderne ovne. Imidlertid har det vist sig, hvis man ser på ældre ovne med begrænsninger i luftsystemerne, at modellen sætter for høje krav, og det således ikke reelt er muligt at benytte proceduren til at fyre efter. Problematikken er her illustreret for to ældre ovne.

For den ene ældre ovn æ1 er dette illustreret i figur 23, hvor der er blevet anvendt primær luft, således at der er 33% åbne spjæld på både primær og sekundærspjældene med ca. 1500 g træ i hver cyklus. Det kan ses på 1. cyklus at CO_2 falder, når luften forsøges nedreguleret.



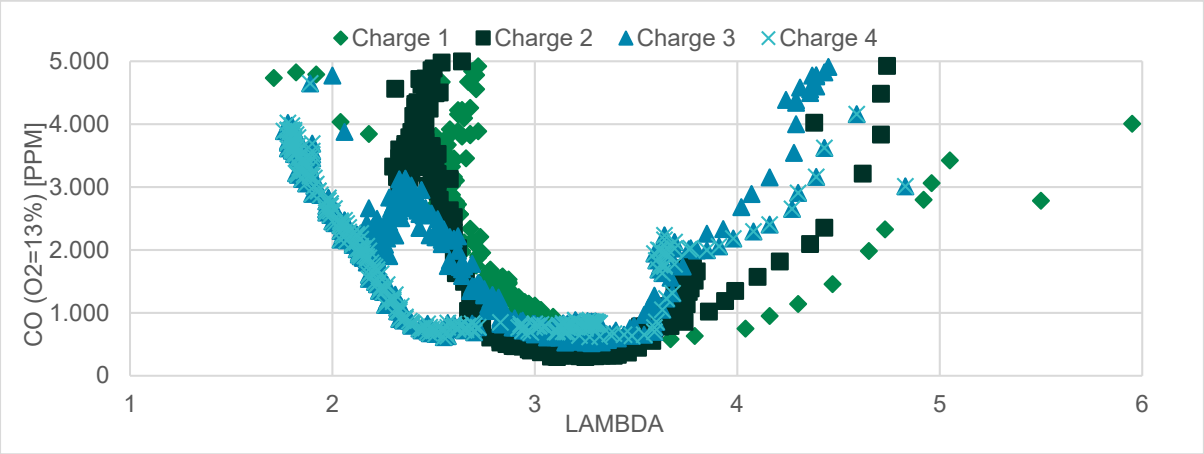
Figur 23 CO_2 gennem forbrændingscyklusser for ældre ovn æ1 med 33% åbne spjæld

Betragtes CO niveauerne ved forbrændingen, ses disse at være meget høje; væsentligt højere end de tilladte gennemsnitlige 1000 ppm, figur 24, uagtet hvad lambdaværdien er.



Figur 24 CO gennem forbrændingscyklus af ældreovn æ1 med 33% åbne spjæld

Forbrændingen er således generelt ringe under testbetingelserne fra protokollen, hvilket kan skyldes, at der ikke kommer nok luft gennem ovnen eller at luften der kommer gennem luftsystemerne ikke havner der i bålet, hvor den gavner mest.
For at evaluere nærmere på forhold for lufttilførsel i ældre ovne, blev en anden ældre ovn, æ2, også inddraget i studiet og cyklus på henholdsvis 778 g, 1010 g, 1282 g og 1539 g blev afbrændt som illustreret i figur 25 ved 100% sekundært spjæld, hvor ydelsen har ligget mellem 3,9 til 5,2 kW. Det har været nødvendigt at åbne spjældene så meget for overhovedet at opnå en fornuftig forbrændingssituation. I henhold til typetesten er ovnen tidligere fundet at have virkningsgrad 84,5% (ydelse 4,0 kW).



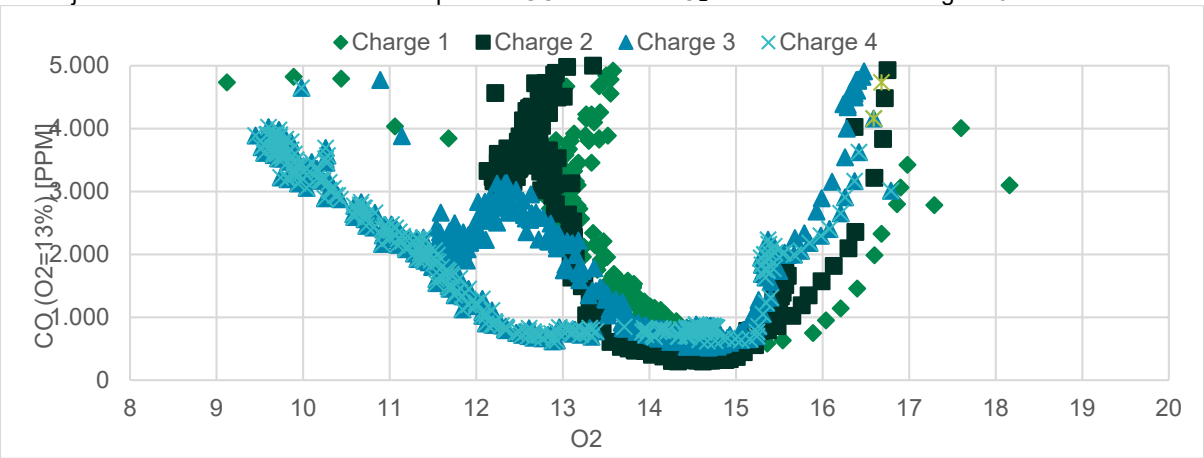
Figur 25 CO som funktion af lambda for ældre ovn æ2 med 100% åbne spjæld for forskellige brændemængder

Hvis kriteriet ud fra den oprindelige model er, at luftunderskud ikke må være under 1,5, så burde ovnen, ud fra lambdaværdien at dømme, brænde perfekt[13]. Dette er dog ikke tilfældet, som det ses på emissionerne. Det er værd at bemærke, at der ikke er sat noget maximal luftoverskudstal på den simple model, hvilket leder til en udfordring. Hvis luftoverskudstallet bliver for højt, så har ovnen ikke længere en fornuftig virkningsgrad og den vil samtidig også have stigende emissioner. Dette er et fokuspunkt, men bør være opmærksom på også for nyere ovne. Når man snakker om luftoptimeret brændeovne, bør man derfor også forholde sig til en maksimal lambdaværdi. Derfor, er det tilrådeligt at brændeovnsproducenter fremadrettet kan orientere kunder om, at der er et øvre loft for

[13] Det faktum at spjældene er nødt til at stå langt mere åbent end beskrevet i modellen i kapitel 2 indikerer at ovnen har et problem, og at det derfor ikke nødvendigvis er fair at slutte at modellen ikke virker, men snarere at modellen ved at fejle påpeger at der er en grundlæggende udfordring med ovnen.

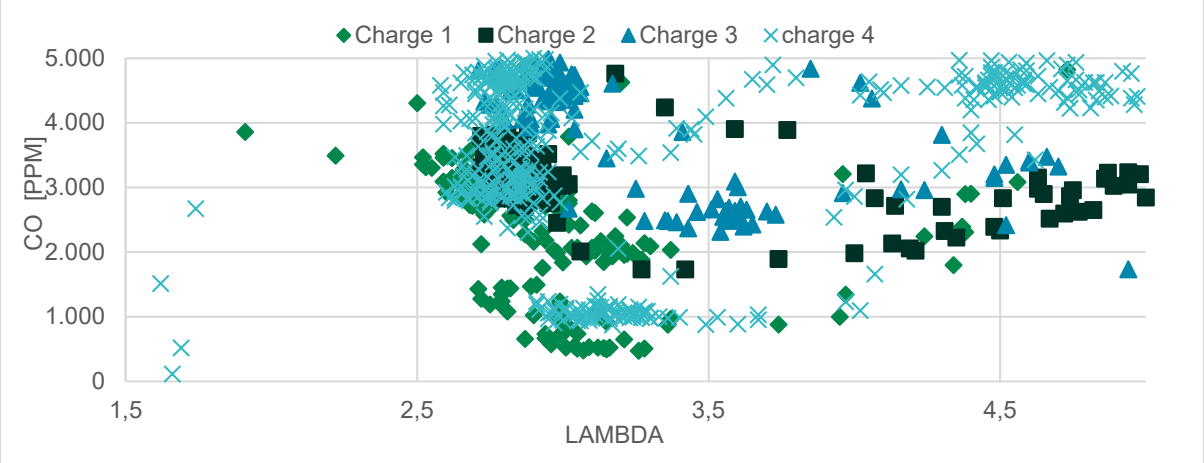
hvor meget der kan afbrændes på miljømæssig forsvarlig vis ad gangen, hvilket der vil blive set nærmere på senere i kapitlet.

For at forsimple billedet, er der forsøgt lavet et tilsvarende plot med CO som funktion af iltindhold fremfor lambda, da lambda som værende et forholdstal kan være mere uoverskueligt for ikke-fagfolk, og dermed måske relevant at overveje en mere direkte måde at se det på som CO i forhold til O_2. Dette er illustreret i figur 26.



Figur 26 CO som funktion af iltindhold for ældre ovn æ2 med 100% åbne spjæld for forskellige brændemængder

Billedet i figur 25 og figur 26 er i sagens natur det samme, og er blot en tanke, til en måde fremadrettet at simplificere illustrationen af luftsituationen i brændeovne til noget der er mere intuitivt klart end en lambdaværdi for ikke fagfolk. Ved afbrænding af tilsvarende størrelse cyklus med 50% spjæld ses følgende CO værdier ved forskellige lambdaværdier for 4 forskellige cyklus størrelser (Cyklus 775g, 764 g, 995 g, 1260 g og 1518 g) i figur 27.



Figur 27 CO som funktion af lambda for ældre ovn æ2 med 50% åbne spjæld for forskellige brændemængder

I modsætning til ved 100% åbne spjæld, ses ved 50% åbne spjæld ikke et klart billede i form af et minimum i CO i et givet interval af lambdaværdier. Dette vanskeliggør yderligere situationen med at definere ønskværdige mængder træ, der kan brændes af, da dette også skal ses i perspektiv af hvordan brugeren så indstiller spjældene på sin ovn i forhold til brændemængde.

Ovenstående viser, at en simpel model - som at se på en lambdaværdi - blot er indikativ, og virker bedst på moderne, velgennemtænkt designede ovne. For at kunne forholde sig mere kvantitativt og måleteknisk til om man få en passende mængde luft gennem en given brændeovn, vil projektet derfor gå videre med luftmålinger på systemet, i første instans de to ældre ovne netop undersøgt forbrændingsmæssigt. I det følgende vil luftflowet, der kan komme gennem de ældre brændeovne således blive vurderet, for at se om dette giver umiddelbare forklaringer på den ringe forbrænding.

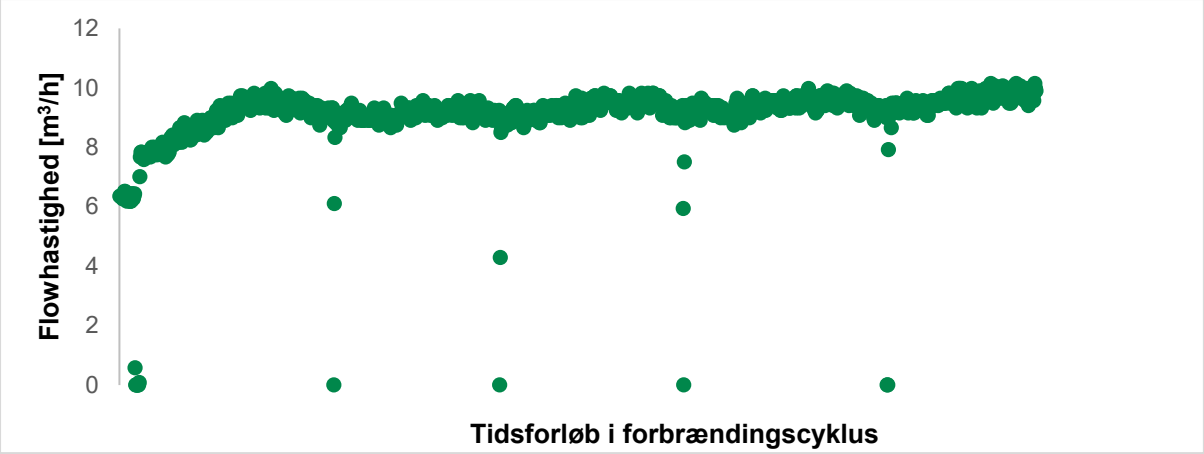
Ved simpelt lækagemåler apparat blev følgende målt på ovnen æ1 ved forskellige tryk, og spjæld henholdsvis lukket, 50% åbne og 100% åbne.

	Alt lukket	50% sek
Tryk [pa]	Flow [m³/h]	Flow [m³/h]
12	0,8	4,1
18	1,1	5,0
24	1,4	6,0
	100% sek	-
Tryk [pa]	Flow [m³/h]	
12	8,1	
18	9,8	
24	11,3	

Figur 28 Lækagemålinger på ældre ovn æ1 ved 0, 50 og 100% åbne sekundære spjæld

Ifølge målingen af kold ovn, skulle der altså, som der ses af tabellen, ved 12 Pa (som er minimumskrav for brændeovne der er stillet op i danske hjem) trækkes 8,1 m^3/h igennem ved 100% åbne spjæld.
Ifølge luftoverskudsberegninger i kapitel 5, skulle det være tilstrækkeligt med luft til afbrænding af ca. 1 kg træ på en time med et luftoverskudstal på ca. 1,6.

I realiteten ses af figur 24 at der reelt er brug for et luftoverskudstal på ca. 2.5 for æ1 for at få CO værdier under 1000 ppm. Dette illustrerer at det ikke er tilstrækkeligt (om end nødvendigt) at en given mængde luft kommer gennem en brændeovn. Dette viser med al ønskelig tydelighed at det ikke er tilstrækkeligt at der kan komme luft nok gennem brændkammeret, størrelsen af brændkammeret er også vigtig, ligesom opblanding og opholdstid er centrale parametre.
I de videre undersøgelser blev det undersøgt. hvordan flowet var i varm ovn. Ved opvarmning af luft sker der en ændring af densitet og dermed volumenstrøm (se Bilag 1 for detaljer).
Denne udvidelseseffekt ses illustreret i figur 29 hvor den ældre ovns, æ1, flow er målt i m3/h som funktion af tiden i sekunder i en cyklus.



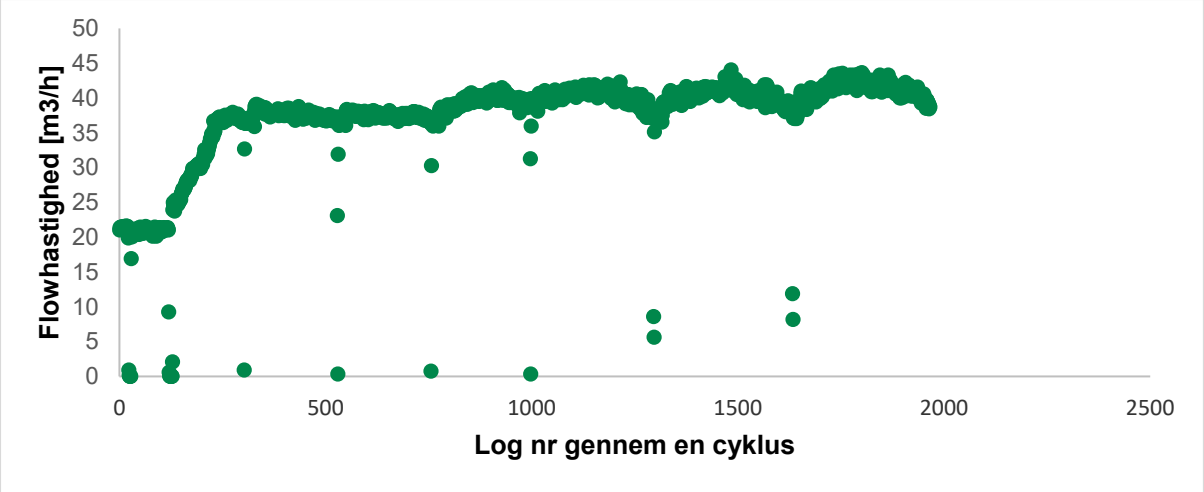
Figur 29 Flowhastighed gennem en cyklus ved afbrænding i æ1

Det ses at flowet initialt stiger betragteligt og fortsætter med at være stigende de første 5 minutter hvorefter det ligger relativt stabilt gennem resten af forbrændingscyklussen. Det stabile niveau ligger på knap 10 m^3/h og er således højere end de 4,8 m^3/h ved 18 Pa. I forbindelse med opvarmning af røggastemperaturen er der en forventelig luftudvidelse. Densiteten af luft falder fra 1,2 kg/m^3 ved 20 °C til 0,62 ved 300 °C, der må antages at kunne sættes som øvre loft for røggastemperaturen i en brændeovn. Således er der en ændring på næsten en fordobling mellem kold og varm luft, hvilket til fulde vil kunne forklare den observerede forskel mellem målingerne i den kolde og den varme ovn.

	Alt lukket	50 % sek
Tryk [pa]	Flow [m³/h]	Flow [m³/h]
12	1,2	4,5
18	1,5	5,5
24	1,8	6,7
	100% sek	-
Tryk [pa]	Flow [m³/h]	
12	8,8	
18	10,8	
24	12,4	

Figur 30 Lækagemålinger på ældre ovn æ2 ved 0, 50 og 100 % åbne spjæld

Det samme blev udført for en anden type ovn, æ2, hvor den tilsvarende graf er vist i figur 31.



Figur 31 Flowhastighed gennem en cyklus ved afbrænding i æ2

I dette tilfældes ses også et langt større flow gennem den varme ovn, end gennem den kolde, igen svarende til en faktor 2 mellem kold og varm ovn (ca. 20 vs. 40 m^3/h). Forskellen på kold ovn på ca. 18 m^3/h mod de ca. 5 m^3/h på kold ovn målt med lækagemåleren, skyldes at ovnen ikke kunne brænde uden åbning af såvel primære som sekundære spjæld, hvilket, da rosetterne er lige store på de to spjæld, giver en ekstra lufttilførsel på en faktor 2. Den yderligere forskel er der ingen umiddelbar forklaring på.

8.3 Teoretiske vurderinger af påvirkning af størrelse / facon på luftveje

Tryktabet igennem luftvejene afhænger primært, som nævnt i kapitel 4, af følgende forhold:

- Volumenstrøm (flow)
  Volumenstrømmen har stor betydning for tryktabet. Hvis flowet fordobles, firdobles tryktabet. Hvis ændringen i volumenstrøm skyldes temperaturen er betydningen knap så stor. Hvis volumenstrømmen fordobles på grund af temperaturstigning vil tryktabet ca. blive fordoblet.
- Tværsnitsareal
  Jo mindre tværsnitsareal, jo større tryktab. På bøjninger betyder en halvering af tværsnitsarealet en firdobling af modstanden på rør betyder det næsten seks gange så stor modstand.
- Transportlængde
  Tryktabet i et lige rør er proportionalt med længden. Fordobles længden fordobles modstanden.
- Ruhed
  Rørets indvendige ruhed har betydning for modstanden.
- Forløb.
  Alle bøjninger, forsnævringer og forgreninger giver ekstra modstand.
  Det er vigtigt at fremføre luftvejene så lige som muligt og hvis bøjninger er nødvendigt udføres så afrundet som muligt.
  Blot ved at udføre en 90° bøjning med afrundede kanter frem for skarpe kan tryktabet reduceres til en tredjedel ifølge teorien.

Beregning af tryktab

Tryktabet igennem en brændeovn er bidraget fra lige rør plus bidraget fra alle enkeltmodstande som bøjninger, størrelsesændringer på kanal osv.

Bidraget fra rør kan beregnes ved

$$\Delta pf = \lambda * \frac{L}{d} * \frac{1}{2} * \delta * c^2$$

hvor
L er længden af røret [m]
d er diameteren af røret [m]
c er middelhastighed [m/s]
δ er massefylde [kg/m^3]
λ er friktionskoefficienten

Bidraget fra enkeltmodstande kan beregnes ved

$$\Delta pf = \zeta * \frac{1}{2} * \delta * c^2$$

hvor
ζ er modstandskoefficienten
δ er massefylde [kg/m^3]
c er middelhastighed [m/s]

Faktorernes betydning
I det følgende vil vi skitsere, nogle af de centrale faktorers betydning

Længden "L"
Hvis længden af røret fordobles vil tryktabet igennem røret fordobles. Tryktabet er proportional med længden.

Hastigheden "c"
Hastigheden er i anden. Det betyder at hvis hastigheden i røret eller enkeltmodstand fordobles, så vil modstanden igennem røret eller enkeltmodstanden firdobles.

Diameter "d"
Hvis diameteren øges betyder det, at hastigheden igennem røret eller enkeltmodstand bliver lavere, hvilket igen betyder at modstanden igennem rør eller enkeltmodstand bliver lavere.
Hvis vi fordobler arealet af rør eller enkeltmodstand, så vil vi halvere hastigheden igennem rør eller bøjning.
A=300 mm^2, volumenflow 20 m^3/h
Hastighed=20/(0,0003x3600)=18,5185 m/s
A=600 mm^2, volumenflow 20 m^3/h
Hastighed=20/(0,0006x3600)=9,2593 m/s.

Hastigheden indgår i anden potens i formlen for enkeltmodstande, så det betyder at en fordobling af arealet giver fire gange så lav modstand igennem enkeltmodstanden f.eks. bøjningen.

For rør indgår også diameter i formlen for trykfald foruden hastigheden i anden potens.
Så her har man forholdet c^2/d. Ved gennemregning ses at trykfaldet bliver 5,6 gange lavere, når diameteren på et rør fordobles.

Massefylde "δ"
Massefylde ved 20°C 1,205 kg/m^3
Massefylde ved 300°C 0,616 kg/m^3

Fra 20° til 300°C er massefylden således halveret. Det betyder, at volumen fordobles fra 20° til 300°C.
Volumen ved 20°C 0,8299 m^3/kg
Volumen ved 300°C 1,6218 m^3/kg

Masseflowet (kg/h) er det samme hele vejen igennem ovnen.
Så volumenflowet stiger, når temperaturen stiger. Det betyder igen at hastigheden bliver større, når temperaturen stiger.

Flow
Hvis flowet igennem røret fordobles, så vil hastigheden igennem røret fordobles, hvilket betyder at modstanden igennem røret firdobles.

Friktionskoefficienten "λ"
Ved små hastigheder opnås laminar strømning dvs. parallelle strømlinjer. Ved store hastigheder bliver strømningen turbulent dvs. uregelmæssig, fyldt med strømhvirvler. Overgangen mellem de to strømningsformer sker ved det kritiske Reynoldstal.

$$Re_{krit} = \frac{c * d}{v} = ca. 2300$$

hvor
c er middelhastigheden [m/s]
d er rørdiameteren [m]
v er den kinematiske viskositet [m^2/s]

Ved laminar strømning kan λ beregnes ved

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

Ved turbulent strømning i glatte rør kan λ findes ved formlen

$$\lambda = 0{,}32 * \mathrm{Re}^{-0{,}25} \ (3000 < Re > 10^5)$$

For ru rør med overfladen K_s gælder

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1{,}74 - 0{,}87 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot k_s}{\mathrm{d}} + \frac{18{,}7}{Re\sqrt{\lambda}}\right)$$

λ findes vanskeligt af ovenstående formel. Alternativt kan bruges diagrammer (se Bilag 2).

Modstandskoefficienten "ζ"
Modstansdkoefficienter kan findes i en række kilder. I de følgende afsnit i dette kapitel, hvor der regnes på tryktab over brændeovnsmodelsystemer vil værdier fra Ventilations Ståbi blive anvendt.

8.4 Måleapparater til luftflowmålinger i brændeovne

Ønsket har været at finde måleapparater/metodik der nemt, hurtigt og til en økonomisk realistisk pris kan benyttes af brændeovnsproducenter til at vurderer om luftmængden, der kommer gennem en nyudviklet brændeovn er tilstrækkelig og hvis ikke at se hvad der skal til for at forbedre systemet. De fleste brændeovnsproducenter har et lækageapparat og derfor ville dette – evt. i kombination af dette med andre måleapparater være en foretrukken metode.

Lækageapparatet brugt ved HWAM i dette projekt er illustreret i figur 32.



Figur 32 Lækagemåleapp Wöhler DP23

Måling med lækagemåleapp Wöhler DP23 foregår ved at målerøret med indbygget sonde placeres oven på ovn. Det ønskede overtryk indstilles på Wöhler lækagemåleapp. Måling gennemføres. Resultat for opretholdelse af overtrykket i m3/h leveres på display.

Ved HWAM haves endvidere et andet flow system, der kan måle på indgangen mens ovnen er i drift, nemlig Testo 480 som vist i figur 33.



Figur 33 Flowmåling med Testo 480

Måling i kold røggas med Testo 480 samt hot ball probe foregår ved at hot ball proben placeres midt i rør. Rørstykket skal være min 150 mm langt for roligt flow. Testo 454 tilkobles PC, så der kan køres online måling. Måler m/s omregnes til m3/h ved arealet af røret.

Hidtil har målinger af flow ved udgangen af en brændeovn været ukendt territorie, da dels varmen, dels det lave flow udgør et problem for traditionelle sensorer. For at få overblik over dette område, blev der i projektet anskaffet en ny FA flow sensor til at kunne måle på udgangsgas flowet som vist i figur 34 og en målemetodik blev udviklet til brug i brændeovne.

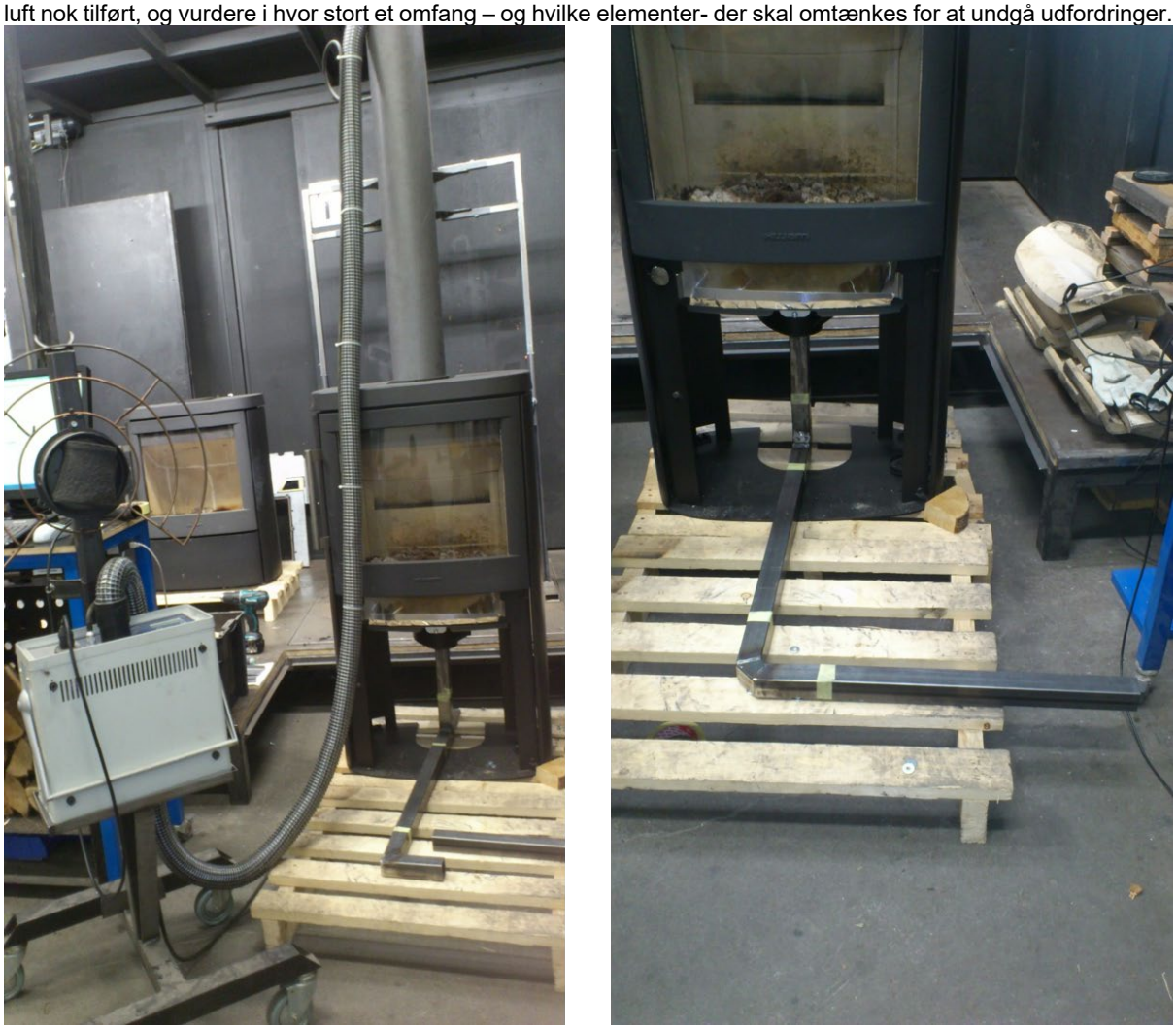


Figur 34 Flowmåling i varm gas med FA flow sensor

Måling i varm røggas med Höntzsch vane wheel flow sensor ZS25, måleområde 0,4 til 120 m/s, sker ved at sonden placeres midt i røgrøret. Af hensyn til måleområdet er der valgt et ø80 mm røgrør frem for standard ø150 mm. Der skal være min ø15 efter reduktion inden måling. Data logges ved Labview-program. Apparatet måler m/s omregnes til m^3/h ved arealet af røret.

8.5 Eksperimentelle målinger på tryktab gennem model af rørsystem i brændeovn

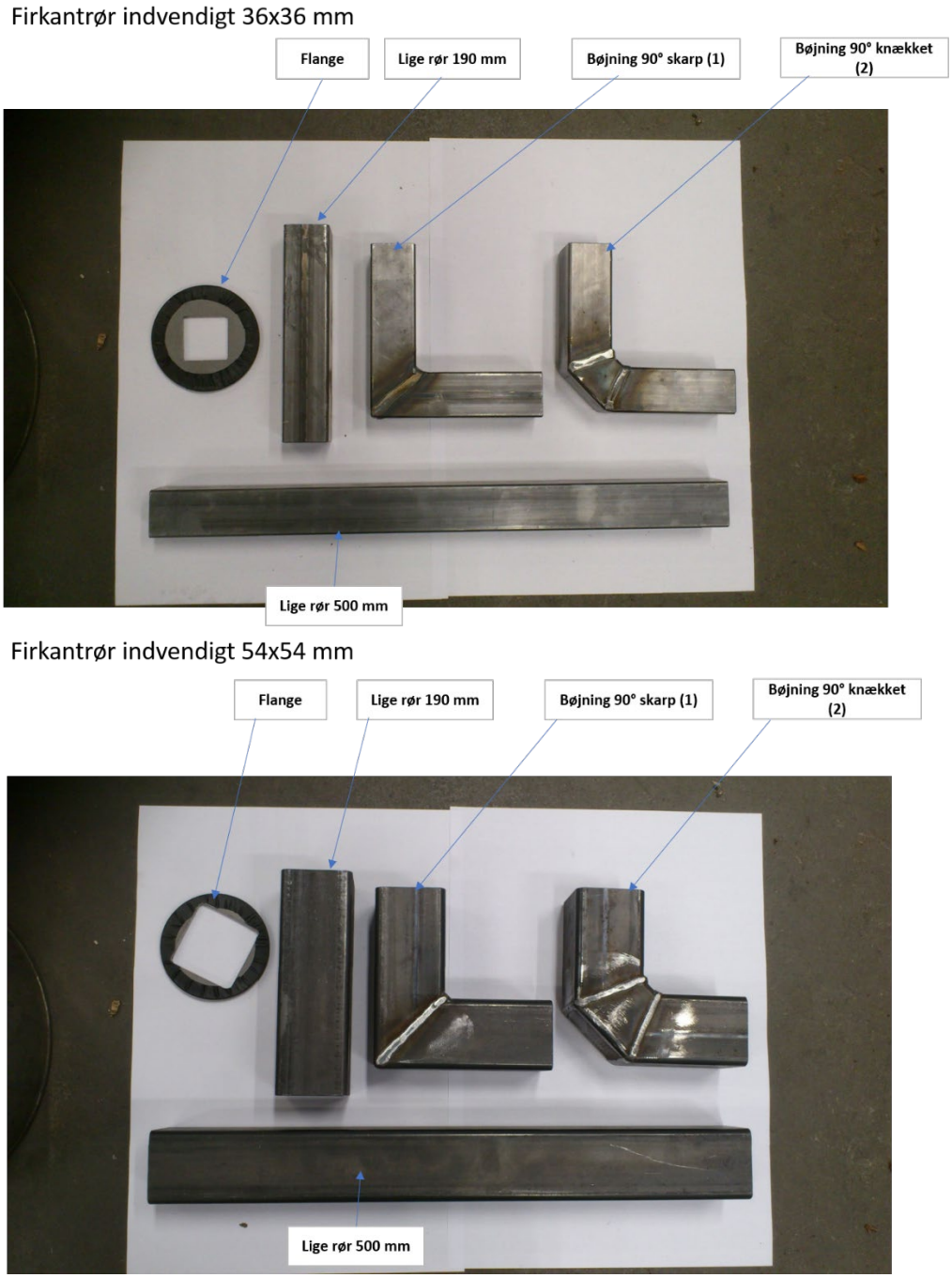
For at kunne måle på tryktab, hvor rørsystemet samtidig er synlig, blev et rørsystem bygget uden for en ovn, som illustreret i figur 35. Formålet med målingerne var, at se i hvilken grad det forskellige måleudstyr var følsomt nok til at registrere og kvantificere især små tryktab som følge af mindre ændringer i systemet. At kunne måle dette, er nemlig afgørende for at brændeovnsproducenter kan bruge udstyret til at vurdere om en nyudviklet prototype får luft nok tilført, og vurdere i hvor stort et omfang – og hvilke elementer- der skal omtænkes for at undgå udfordringer.



Figur 35 Måling af tryktab på rørsystemsmodel

Der blev lavet rørsystemer af firkantede rør, indledningsvist i to dimensioner, nemlig 36 x 36, og 54 x 54 mm som illustreret i figur 36 og der blev målt flow hastighedsændringerne på forskellige systemer, et med skarpe 90 grader knæk (serie a) og et med bløde knæk (serie b) efterhånden som der blev føjet en komponent ad gangen ved udbygningen af 'kanalmodelsystemet'. Serien blev opbygget således, at der blev målt hastighedsændring efter der var sat en flange på ovnen, efterfulgt af ændringen ved montering af 190 mm lige rør, efterfulgt af bøjning, efterfulgt af 500 mm lige rør, efterfulgt af bøjning efterfulgt af 500 mm lige.
Senere blev et mindre rørsystem af dimensioner 21 x 21 valgt og målt på for serie A. For HWAMs ovne skønnes kanalsystemer af størrelsen 36 x 36 at være repræsentative, men fra andre brændeovnsproducenter vides det at

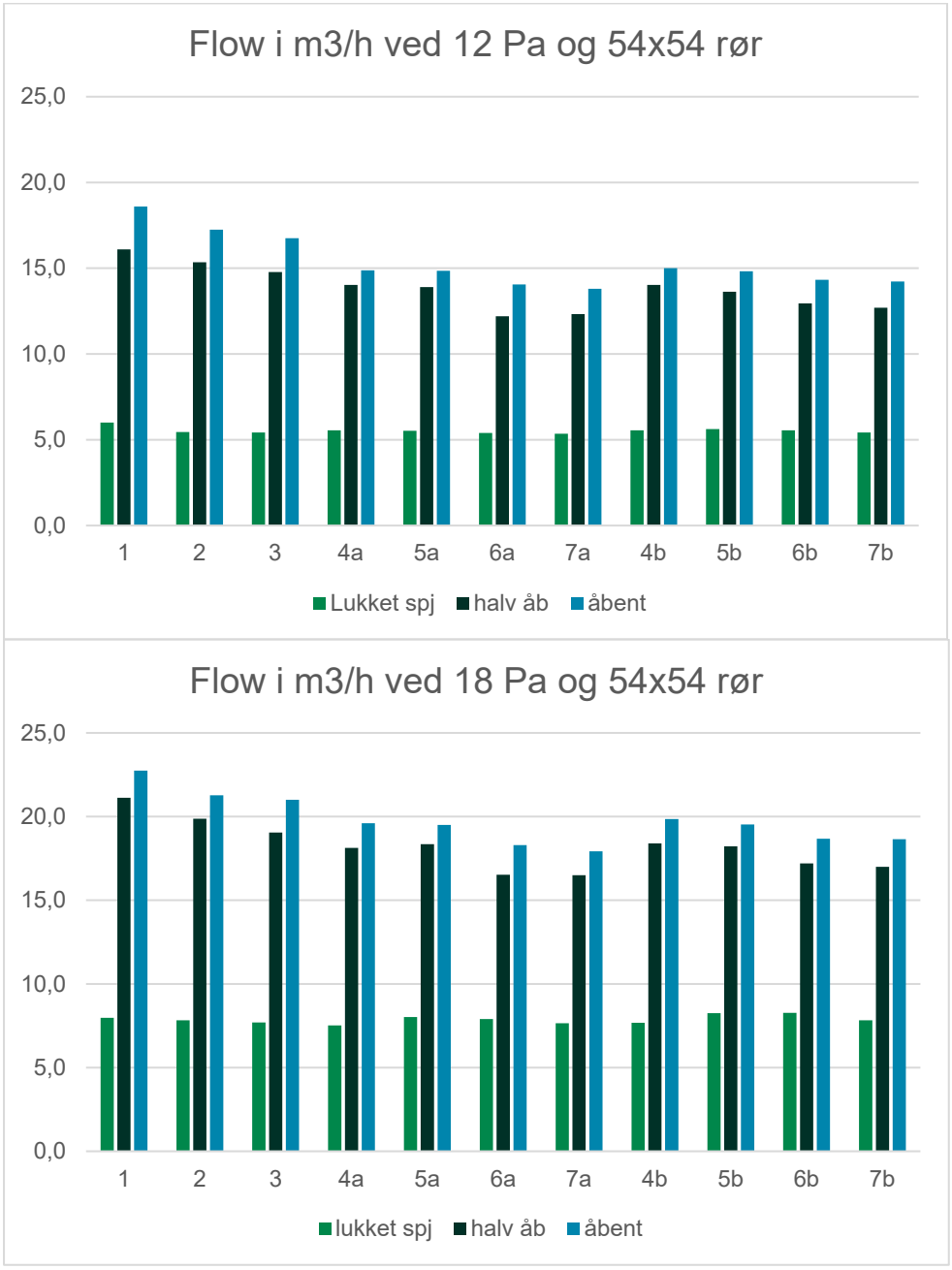
kanaler med så små dimensioner som 20-25 x 20-25 mm anvendes. Det skal nævnes, at der ikke nødvendigvis anvendes kvadratiske luftsystemer som hos HWAM ved alle producenter, disse kan også være runde eller rektangulære hos forskellige producenter, men for simpliciteten og overblikkets skyld, er de kvadratiske benyttede til den eksperimentelle serie. Ud fra en specifik måleserie på kvadratiske rør, må det forventes, at være muligt at se, om måleudstyret er godt nok til at kunne kvantificere tryktab af de enkelte delkomponenter – og virker det i dette tilfælde, må det formodes også at virke for andre rørudformninger, hvor tryktabet godt nok er anderledes, men stadig inden for samme størrelsesorden. Beregninger af formens betydning kan teoretisk bestemmes og betydningen kan derved fastsættes størrelsesordensmæssigt for praktiske anvendelser.



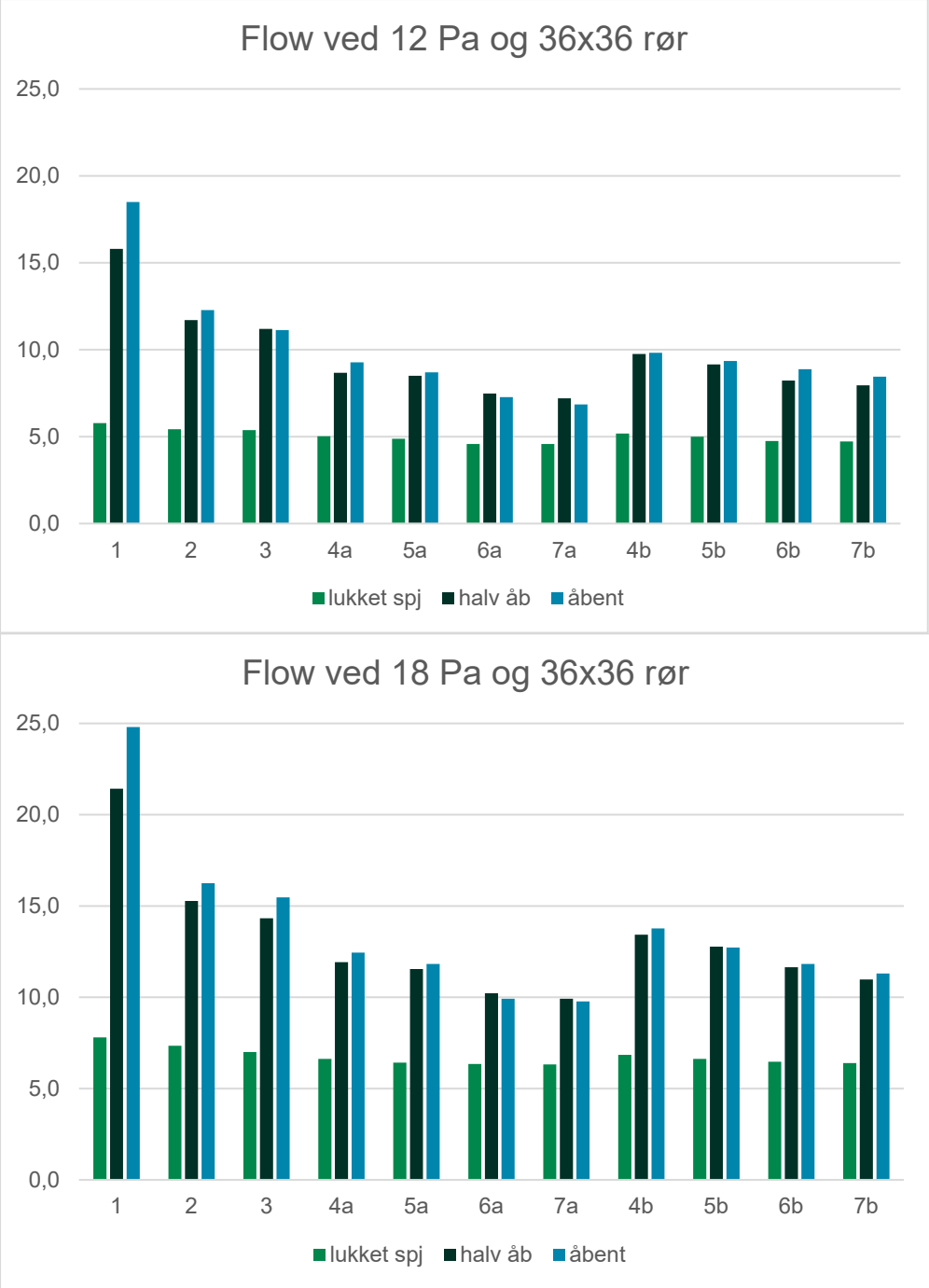
Figur 36 Firkantede rørsystem 36 x 36 mm øverst og 54 x 54 mm -flanke, lige rør, skarpe bøjninger og bløde bøjninger

Der blev målt på forskellige tilføjelser på rørsystemet bygget til ovnen (se Bilag 3) og beskrevet detaljeret ovenfor, hvor der gradvist bygges mere på systemet – i a serien benyttes skarpe 90 grader bøjninger, mens b serien indeholder runde bøjninger.

De forskellige luftflow er sammenlignet i figur 37 for rør med dimension 36 x 36 mm og i figur 38 for rør med dimensionen 54 x 54 mm.



Figur 37 Flow gennem rørbygningsserierne a og b i 54 x 54 rør ved lukket, halvt åbent og åbent spjæld ved henholdsvis 12 og 18 Pa



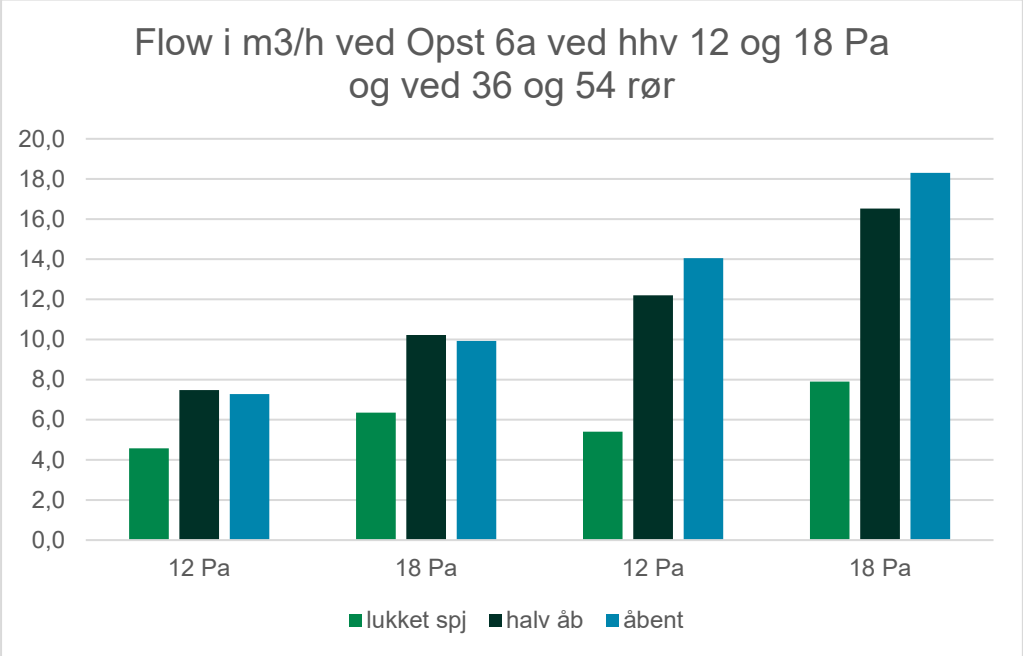
Figur 38 Flow gennem rørbygningsserierne a og b i 36 x 36 rør ved lukket, halvt åbent og åbent spjæld ved henholdsvis 12 og 18 Pa

Fra figurerne ses, at det er muligt med det brugte måleudstyr at identificere tryktab og størrelsesordenen af denne for en række modifikationer af rørsystemet. Følgende, teoretisk ventede, sammenhænge kan uddrages af målingerne:

- Jo længere rørsystem man bygger, des lavere flow kommer der igennem dvs. jo større er hastighedstabet. Dette gør sig gælden for begge dimensioner rør og uanset effektreguleringen, for såvel serie a som b.
- Flowet gennem systemet er lavere i a serien end i b serien, dvs. hastighedsfaldet er observeret at være større for skarpe bøjninger en for knækkede bøjninger
- Jo mindre sug, des højere flow (dvs. jo mindre hastighedsfald) for en given længde/udformning rør
- Jo større dimension rør, des større volumen (dvs. jo mindre hastighedsfald) for en given længde/udformning rør

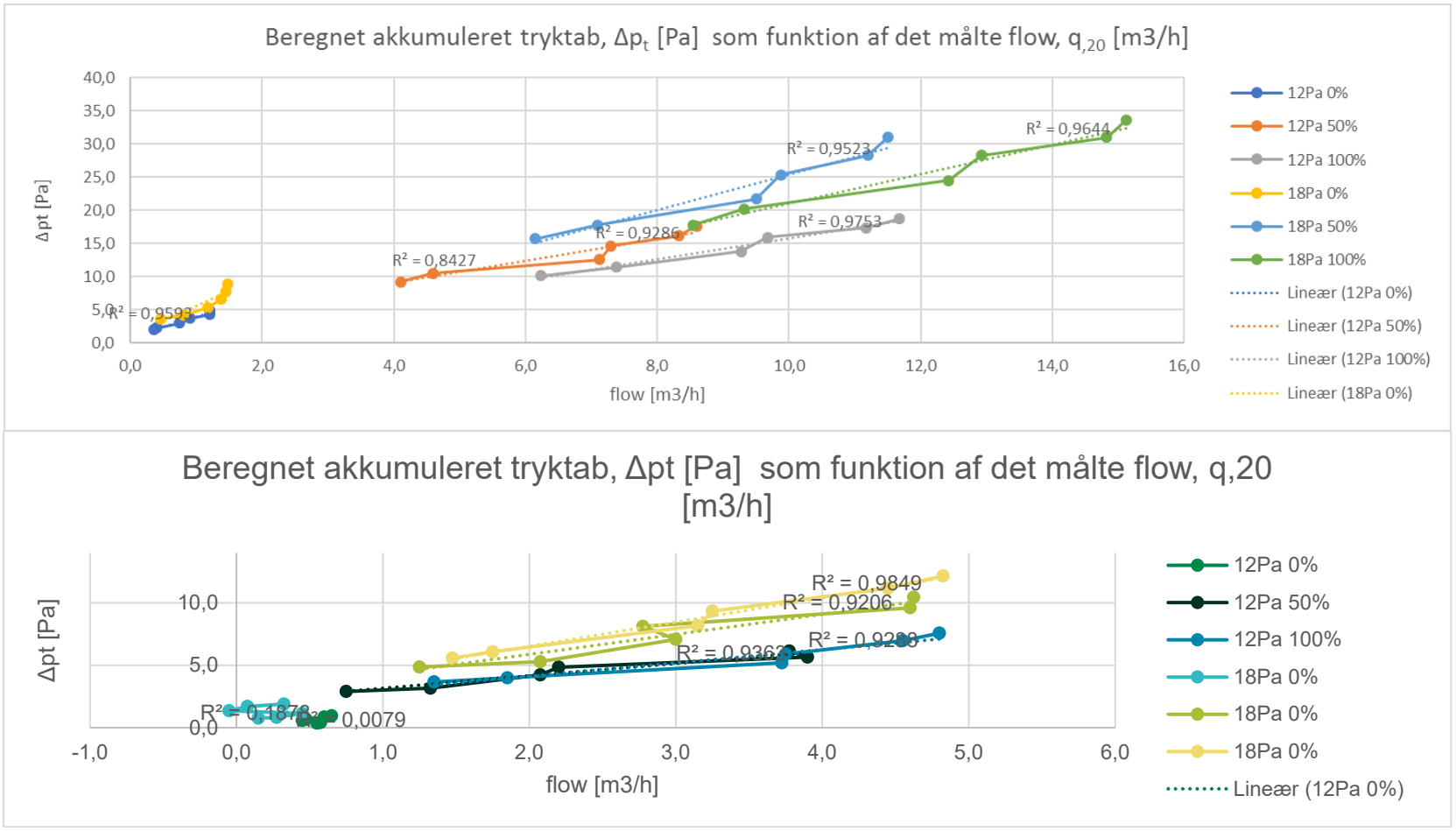
- Forskellen mellem halvt og helt åbent spjæld har meget lille betydning for hastighedsfaldet (dvs. effektiv lufttilførsel) for en given længde/udformning rør – især i situationen med den mindste dimension rør er der nærmest ingen forskel i hastighed ved de to indstillinger, hvilket antyder at der i den givne ovn er meget lidt dynamikområde i spjældet.

Sammenfattende er nøgle parametre relateret til ' for en given længde/udformning rør' illustreret side om side i figur 39 for en udvalgt rørsituation, 6a, og således et lille 'uddrag' af figurerne 37 og 38.



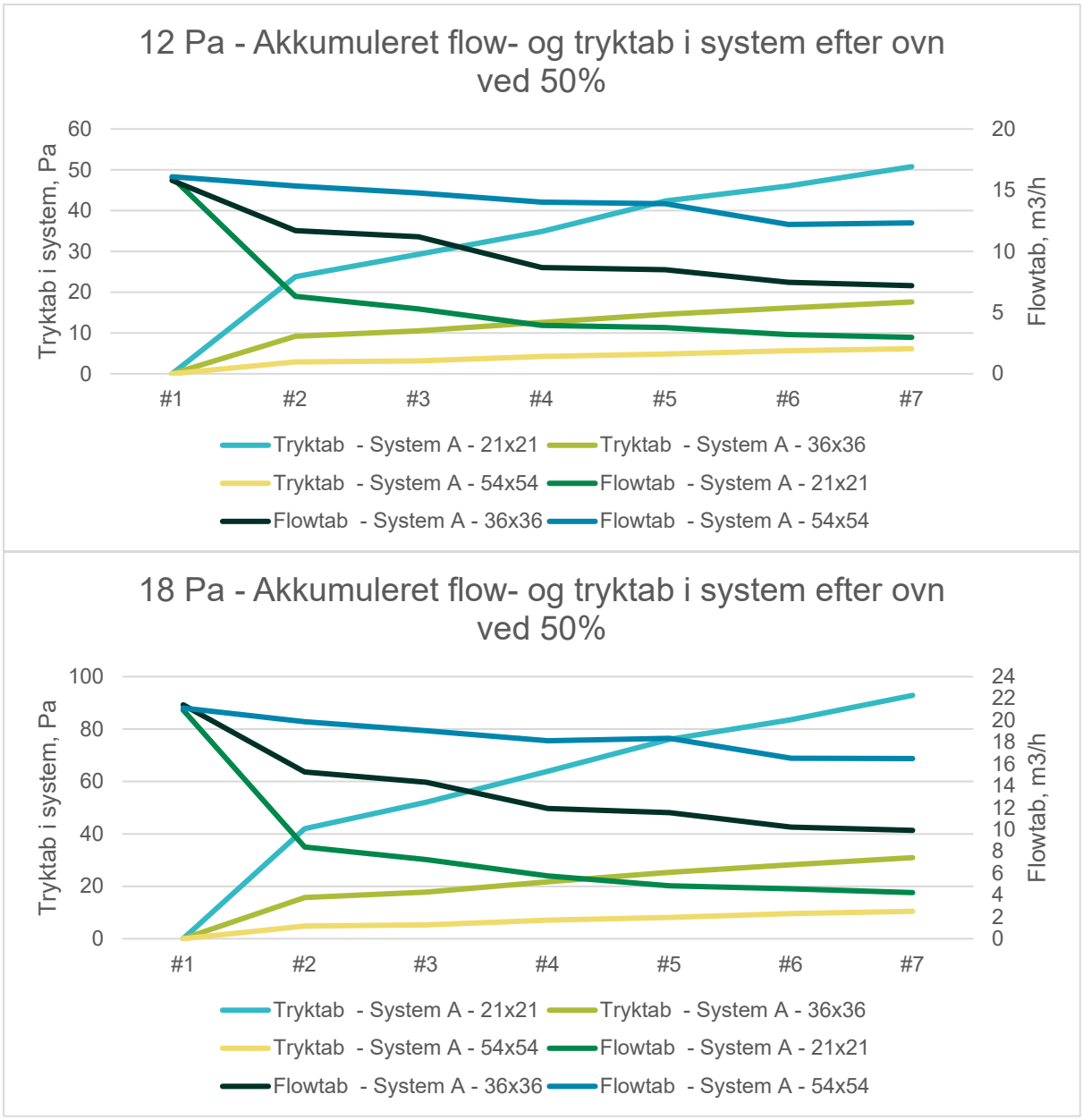
Figur 39 Udvalgt eksempel (6a) på afhængighed af træk, spjældindstilling og rørdiameter

Volumenflow er det, der umiddelbart kan måles, men som illustreret i teoriafsnittet ser man oftest på tryktab. For at kunne sammenholde disse data med teorien, har det derfor været nødvendigt at omregne til tryktab. Dette gøres vha. nødvendige konstanter og formler fra Ventilations Ståbi (se detaljeret tabel i Bilag 1)
Omregnes disse to systemer til akkumuleret tryktab for system A, inklusive målinger for dette system på et endnu smallere rør, nemlig 21 x 21 fås data som sammenfattet i Bilag 1.
Sammenlignes ændringen i tryktab med ændringen i volumenstrøm for system A fås følgende billede som vist i figur 40.



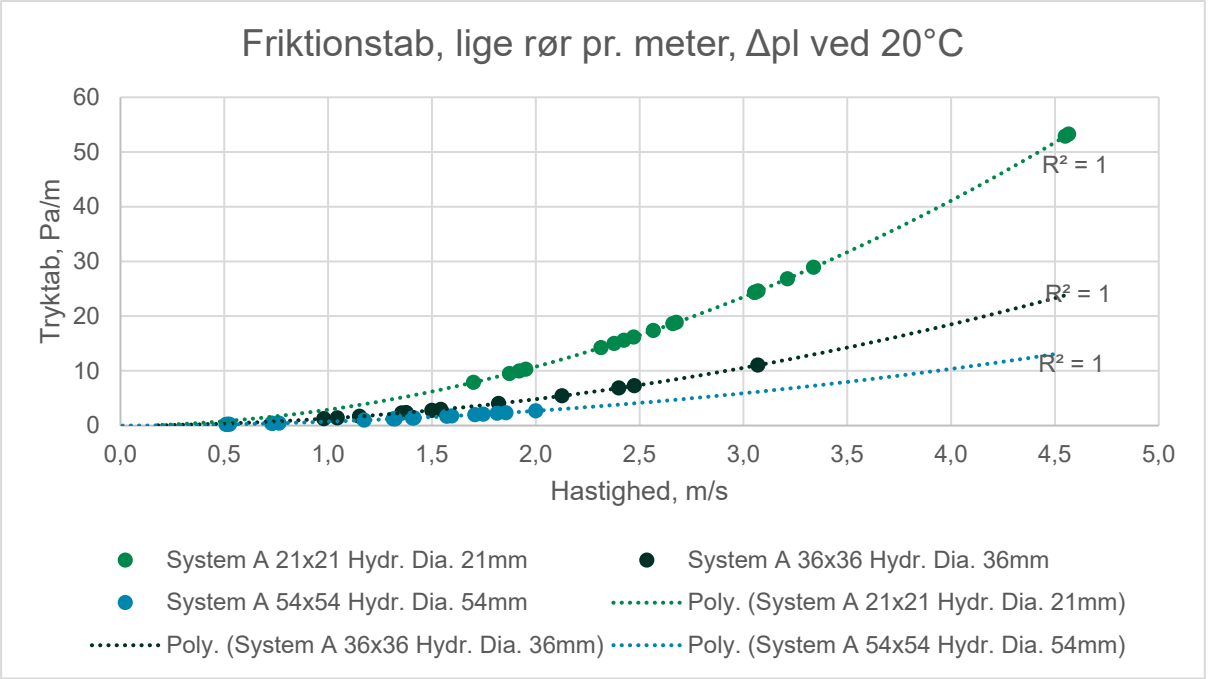
Figur 40 Sammenhæng mellem det beregnede tryktab og flowhastigheden. Øverst er 36 x 36 mm rør, nederst er 54 x 54 mm rør afbildet

Det ses af figur 40 at der er et tryktab af forskellig størrelse forbundet med hver af de ekstra tilføjelser i systemet (komponenter), samtidig med en hastighedsforøgelse og at disse er målbare og kvantificerbare med måleudstyret udvalgt i dette projekt. De to størrelser følges dog ikke lineært ad. Dog kan det af figur 40 (se detaljer i Bilag 3), at de samme ting angående hastighedstab (der direkte kan måles af en brændeovnsproducent) og opridset på punktform ovenfor kvalitativt også gælder for tryktab.
I figur 41 sammenlignes det akkumulerede tryk og flowtab gennem serie A ved henholdsvis 12 og 18 Pa ved spjældåbning på 50% for de forskellige diametre rørsystemet (figurer der viser det tilsvarende ved andre spjældindstillinger er at finde i Bilag 1). Det ses således tydeligt at tryktabet er størst når trækket er størst. Ved et fast træk, er tryktabet størst jo mindre kanalerne er.



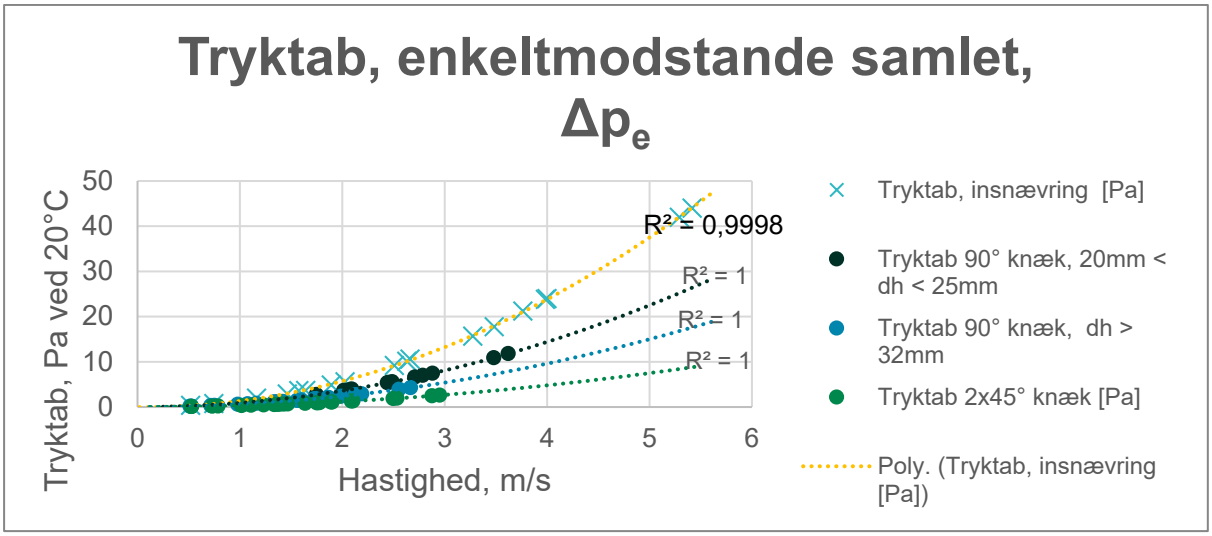
Figur 41 Akkumuleret flow og tryktab for forskellige rørdiametre for system a ved 50% spjæld og henholdsvis 12 og 18 Pa træk

I figur 42 er det illustreret hvordan friktionstabet er pr meter i lige rør, for rørsystemet A med de tre forskellige størrelser rørdiameter.



Figur 42 Tryktab i lige rør pr m som funktion af flowhastigheden

Det ses at tryktabet pr meter i lige rør afhænger kvadratisk af hastigheden, hvor R-værdierne for en sådan sammenhæng er angivet på grafen.
I figur 43 er tryktabet over de i studiet relevante enkeltmodstande angivet ved de givne hastigheder



Figur 43 Tryktab i diverse enkeltmodstande som funktion af flowhastigheden

Det ses tydeligt at tryktabet er størst ved indsnævringen (ved flangen). Når man ser på de forskellige knæk, er tryktabet over det skarpe 90 grader knæk (sort) større end det bløde fra serie B (grøn). Sammenlignes samme knæk, 90 grader skarp, med to diametre, ses som også ventet ud fra teorien at trykfaldet er større i det lille rør over sådan en enkeltmodstand (sort) end et større (blå).

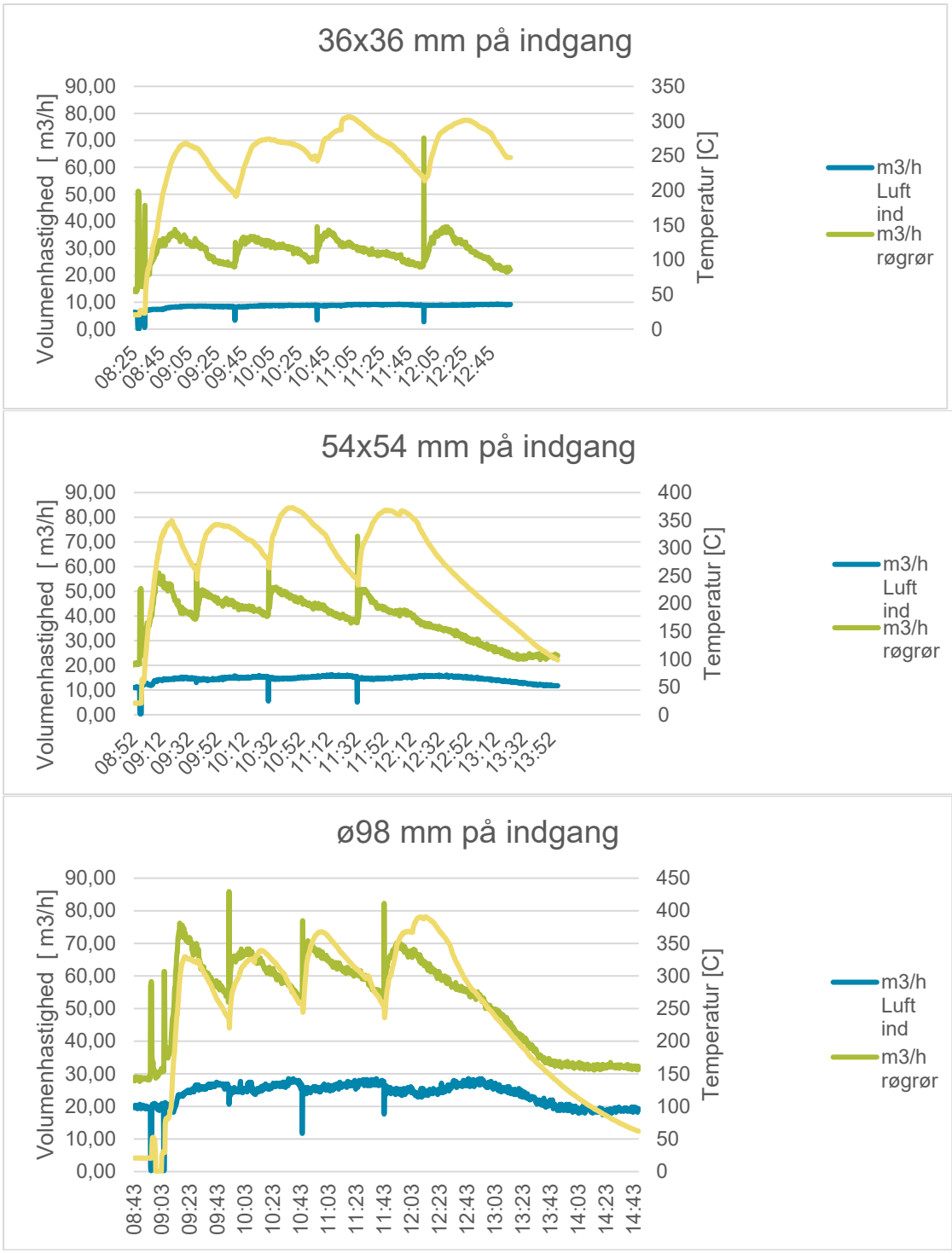
8.6 Flowstudie af luften på indgang og udgang af ovn under forbrændingstest

For samme HWAM-ovn, der var involveret i rørkanalsystemsforsøgene, blev forbrændingsegenskaberne undersøgt med tre forskellige indgangsrørsstørrelser, nemlig 36x 36 mm, 54 x 54 mm og Ø98. Disse tre indgangsrør svarer til arealer på 1296 mm^2, 2916 mm^2 og 7542 mm^2.

I alle tre tilfælde blev flow målt på indgangssiden med Testo 480 og i den varme udgangsluft med Höntzsch vanewheel flowsensor ZS25.

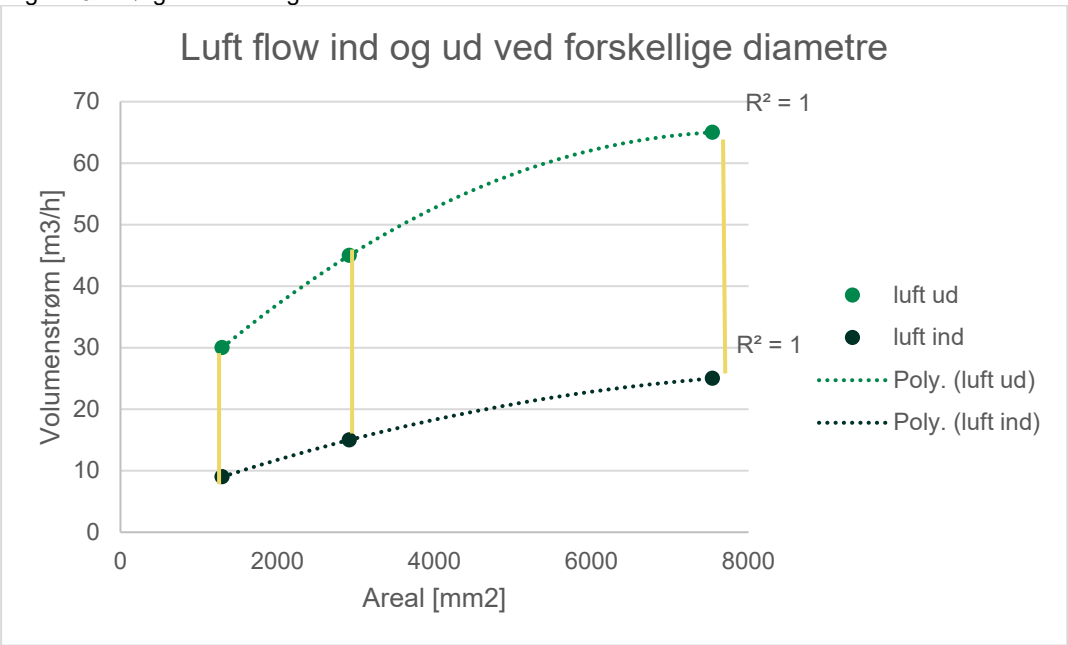
I alle 3 forsøg, er der foretaget 4 fyringer – den første er en optænding, den næste er en indfyring med ca. 2000 g træ. Disse to cyklusser er for at få ovnen i gang og godt varm. De to næste indfyringer er dem, der bruges til databehandling og til sammenligninger. Disse er indfyringer med henholdsvis ca. 2000 g træ og 2800 g træ.

I figur 44 ses røgrørstemperaturen, flowet afrøgrøret (dvs varm luft ud fra ovn) og flow, der ledes ind til ovnen.



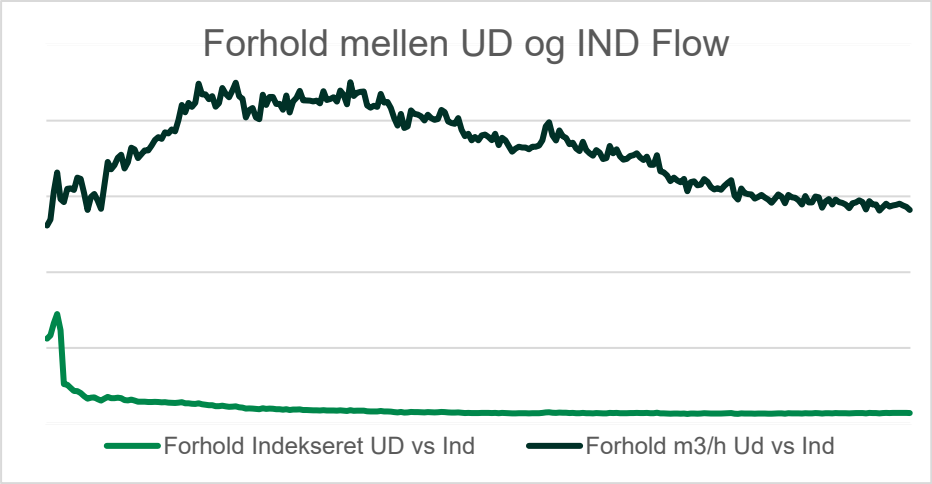
Figur 44 Flow ved indgang og udgang af luft i brændeovn tillige med røggastemperaturen ved tre forskellige størrelser indgangsrør til luften, nemlig 36 x 36 mm, 54 x 54 mm og Ø98. I alle tre tilfælde er der afbrændt 4 cyklusser (der kan identificeres ud fra at en cyklus svarer til en bølgetop i den grønne kurve). De to sidste cyklussers er på hhv. 2 kg og 2,8 kg

Ud fra figur 44 ses umiddelbart kvalitativt at såvel volumenstrøm ved luftindtaget som i røgrøret tillige med røggastemperaturen øges i takt med at arealet på indgangsrøret stiger gennem serien. Hvis man sammenligner kvantitative gennemsnitsflowværdier estimeret over de sidste to indfyringer som funktion af arealet på indgangen ses at flowet øges med stigende tværsnitsareal i figur 45 at følge en andengradsfunktion.



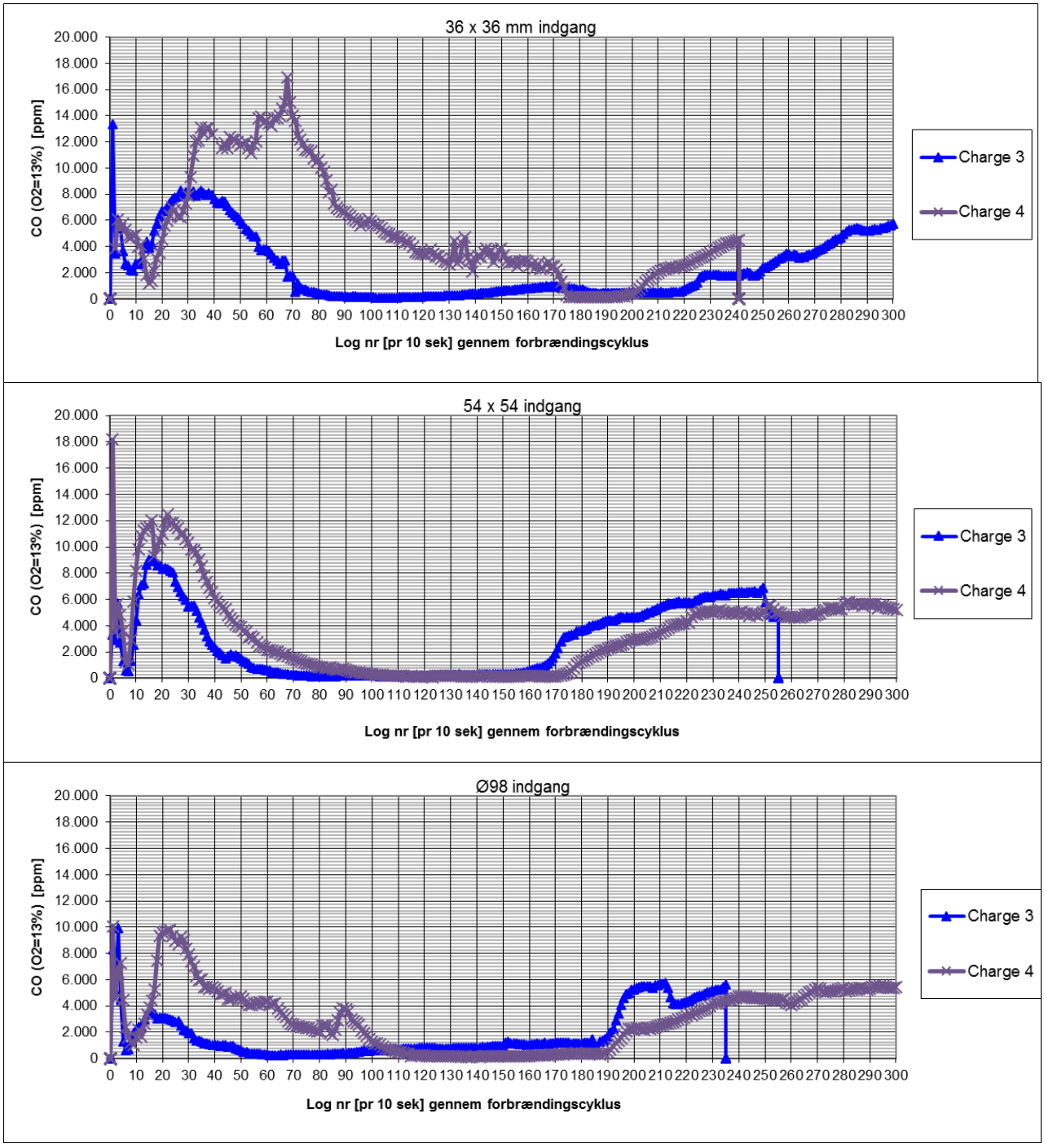
Figur 45 Sammenligning af luftflow ind og ud ved forskellige arealer (størrelser) af indgangsrøret

Den øgede stigning i røggastemperaturen med stigende indgangsrørsareal, figur 45, indikerer at den tilførte øgede luftmængde bidrager (i hvert fald delvist) til forbrændingen – hvis luften ikke havde en positiv påvirkning, ville den ekstra luft nemlig blot lede til en fortynding af røggassen (og dermed en forøgelse af luftoverskudstallet lambda) og dermed en afkøling af røggastemperaturen. Den øgede forskel mellem luft ud og luft ind illustreret ved de grønne lodrette linjer i figur 48, bliver større i takt med at indgangsarealet øges, men samtidig øges som før nævnt forbrændingstemperaturen. Det må formodes at det er sidstnævnte der spiller den største rolle for dette – da forbrændingscyklusserne tager omtrentlig lige lang tid for en given mængde brænde, og størstedelen af træet omsættes til CO_2 og vand bør forholdet mellem stofmængden af O_2 forbrugt og stofmængderne af CO_2 og H_2O dannet være den samme, vurderet samlet over en given forbrændingscyklus. Derved bør volumenforholdet tilsvarende være næsten ens under antagelse af at gasserne er idealgasser. Volumenhastighedens påvirkning af temperaturen, kan også illustreres ved at se på forholdet mellem luft ud og luft ind i en fyringscyklus plottet henholdsvis direkte og normaliseret i forhold til røggastemperaturen som illustreret for en repræsentativ cyklus i figur 46.



Figur 46 Forhold mellem luft ud og ind af brændeovn med og uden normalisering i forhold til røggastemperaturen

Fra figur 46 ses at det temperaturindekserede forhold med luft ud og luft ind er så godt som konstant, hvilket betyder at volumenstrømmen ind og ud af ovnen reelt er sammenlignelig hvis der tages højde for temperaturforskellen. Den umiddelbare forskel mellem forholdene skyldes blot densitetsforskelle grundet temperaturændringerne.
For cyklus 3, 2000 g, og cyklus 4, 2800 g er CO niveauet gennem forbrændingen illustreret for de tre situationer med forskellig diameter indgangsrør, som vist i figur 47.



Figur 47 CO niveau ved afbrænding gennem forbrændingscyklussen af cyklus 3 (2000 g træ) og cyklus 4 (2800 g træ) ved forskellige størrelser indgangsrørsdiametre

Det ses af figur 47 at CO niveauet generelt er højere, og det i længere tid, for den store mængde brænde (cyklus 4) end for den lille mængde brænde (cyklus 3) i alle tre situationer. Yderligere ses at jo mindre rør, des større CO mængde og derved dårligere forbrænding. En brændemængde på væsentligt mere end 2000 g ser således ikke ud til at være muligt at afbrænde rent i den givne ovn. Med Ø98 vil 2000 g derimod kunne afbrændes med en CO værdi, der i gennemsnit er lavere end 1000 ppm gennem forbrændingscyklussen som krævet i typetest.

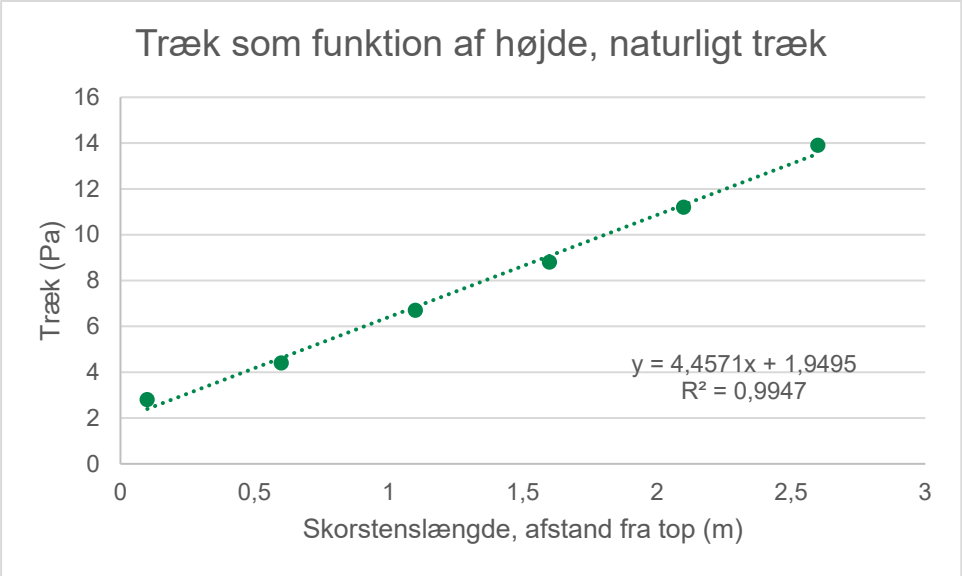
9. Skorstenstræk

For at sikre et ordentligt luftflow gennem en brændeovn, er det vigtigt at skorstenen fungerer ordentligt. I praksis er der store forskelle på hvor meget træk der er i forskellige skorstene. Ved typeprøver holdes skorstenstrækket på 12 Pa, der ses som en slags acceptabel minimumsværdi. Derfor er det ventet at dette tal, kan være væsentligt højere i praksis, og et skorstenstræk på 50% højere, dvs. 18 Pa er ikke utopisk. Samtidig, skal man holde sig for øje, at der desværre sandsynligvis er et vist antal husstande der har væsentligt lavere end 12Pa træk.
Ved test måles skorstenstrækket ca. 1,40 m over ovnen. Til tider gøres dette ikke systematisk hos producenter. For at demonstrere hvad dette betyder, og hvor stor forskel der er i skorstenstræk forskellige steder i en skorsten blev dette eksperimentelt klarlagt ved et simpelt forsøg. I en 3,35 m lang skorsten, isoleret med 255 mm rockwool blev der boret 6 huller med 50 cm afstand, det første 10 cm fra toppen af skorsten, hvor såvel træk som temperatur kan måles. Skorstenen blev anbragt på en ovn, som illustreret i figur 48.



Figur 48 Opstilling til test af træk og temperatur som funktion af højden i en skorsten

Indledningsvist blev der målt træk som funktion af højde ved naturligt træk på en ovn, hvor der er optændt med 1,5 kg træ, og løbende påfyres med ca. 300 g træ, for at holde forbrænding og dermed temperatur i brændkammer så kontinuerlig som mulig (spjæld på ovn 50% åbent gennem hele forløbet). Dette er illustreret i figur 49.

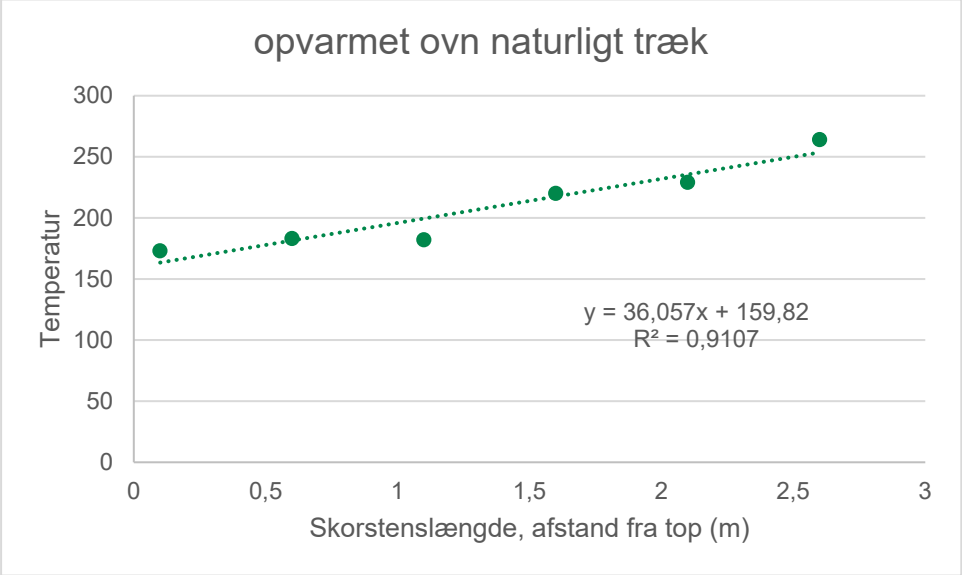


Figur 49 Træk som funktion af skorstenslængden ved naturligt træk

Det ses, som ventet, at sammenhængen mellem træk og højden i en skorsten er lineær. Det ses endvidere at forskellen på de 2,5 m der er mellem de to yderpunkter er næsten 12 Pa. Det vil altså sige, at det er afgørende for sammenligninger i forhold til hvor meget luft, der kommer gennem en brændeovn, at man hos en given producent er omhyggelig med

1) At måle træk i samme højde hver gang
2) Er opmærksom på at denne højde er 'fornuftig' hvis man ønsker at sammenligne med andre producenter/andres test (f.eks. at man vælger at måle tæt på standardpunktet som ved typegodkendelser)

Temperaturen som funktion af højden er vist i figur 50



Figur 50 Træk som funktion af skorstenslængden ved naturligt træk

Temperaturen er således lineært afhængig af højden, og som ventet højest tættest på ovnen og lavest tættest på skorstensudgangen. Sammenhænge ved fast træk på 12 Pa ses i Bilag 4.

10. Guidelines til udvikling af luftsystemer i brændeovne

10.1 Udvikling af interaktivt værktøj

Et interaktivt regneark er blevet udviklet til værktøj til at udvikle luftsystemer i brændeovne så luftunderskud kan undgås på baggrund af erfaringer og observationer med de tidligere forsøg beskrevet i dette kapitel. Regnearket kan bruges til at teste hvordan en nyudviklet prototype ovn er mht. lufttilførsel og om der er begrænsning på systemet, og få en ide om, hvor meget der eventuelt skal ændres for at kunne få nok luft ledt til forbrændingen. Forudsætningerne for beregningerne er baseret på

- Virkningsgrad
- Brandtid
- Fugtindhold i træet
- CO_2 og CO niveau
- Røgtemperatur og forbrændingsluft

Processen for en brændeovnsproducent, der ønsker at benytte værktøjet er følgende

1) Med et lækagemålerapparat måles luft flowet ved 0, 25, 50, 75 og 100% åbent spjæld ved 12 og 18 Pa ved røgstudsen (dvs. svarende til 6 og 12 Pa i omstændigheder svarende til typetest). Dette svarer således til dårligt aftræk (12Pa) og til normalt aftræk ved test (18Pa).
2) De målte værdier indtastes i regnearket under 'tilgængelig luft ved lækagemåling' (figur 51).

Fastsatte gennemsnitlige værdier

Virkningsgrad (η)	78	%
Brændtid (t_b)	45	min
% vand i træ EN	16	%
CO2, %	9,5	%
CO, målt %	0,12	%
Røgtemp ved 20gr.	270	°C
Forbrændingsluft:	37	°C
Ønsket ydelse (P_n)	6	kW
	1,39	kg
	1,86	kg/h
	4,7	l/s
	17,0	m3/h

Tilgængelig luft ved lækagemåling

Lækagemåling:

		0%	25%	50%	75%	100%	
Flow v/20°C	12Pa	5,775	9,68	15,8	17,23	18,5	m³/h
Flow v/20°C	18Pa	7,8	13,08	21,425	22,70	24,8	m³/h

Omregnet nødvendigt flow ved øget forbrændingstemperatur

		0%	25%	50%	75%	100%	
Teoretisk luftbehov	12Pa	6,1	10,2	16,7	18,2	19,6	m³/h
Teoretisk luftbehov	18Pa	8,2	13,8	22,6	24,0	26,2	m³/h

Luft nok luftsystem til ønsket ydelse?	Forbug i kg/h mellem
12Pa	
JA	1,9
	-
	2,2

Luft nok luftsystem til ønsket ydelse?	Forbug i kg/h mellem
18Pa	
JA	1,9
	-
	2,8

Kanaldimensioner og luftindtag

	Indgang, brændkammer, tværsnit, $A_{forb.}$	Målt/ forventet forvarmet luft temperatur - lige inden brændkammer, $T_{forb.}$	Forbrænd-ings-luftens densitet, $\rho_{forb.}$	Faktisk max-luftindtag indtag	Faktor, enkeltmodstand indgang brændkammer, ζ_{ind}	Faktor, enkeltmodstande i kanal, ζ_{enkelt}	Faktor, tab i kanaler, ζ_{kanal}	Kanaltværsnit for ren udvidelse, $A_{udv.}$	Kanaldimension inkl. Udvidelse og modstande	Mindst mulige indgangs-tværsnit, $A_{min.forb.}$	Luftindgang til brændkammer	Luftindtag /kanaldimension
	[mm²]	[°C]	[kg/m3]	[mm²]	-	-	-	[mm²]	[mm²]	[mm²]		
Primærluft	800	20	1,20	1960	1,1	1,1	1,1	800,0	1065	800	OK	OK
Sekundærluft	2640	50	1,09	1960	1,1	1,2	1,1	2910,3	4226	1960	For lille	For lille
tertiærluft	750	20	1,20	1960	1,3	1,2	1,1	750,0	1287	750	OK	OK
pilotluft	0	20	-	0	1	1	1	-	-	0	#I/T	#I/T
Total:	4190	Temp. Min 20		5880	Disse tre: minimum faktor 1,0			4460	6578	3510		
Vægtet forbrændingsluft	37	°C										
Vægtet densitet	1,14	kg/m3										

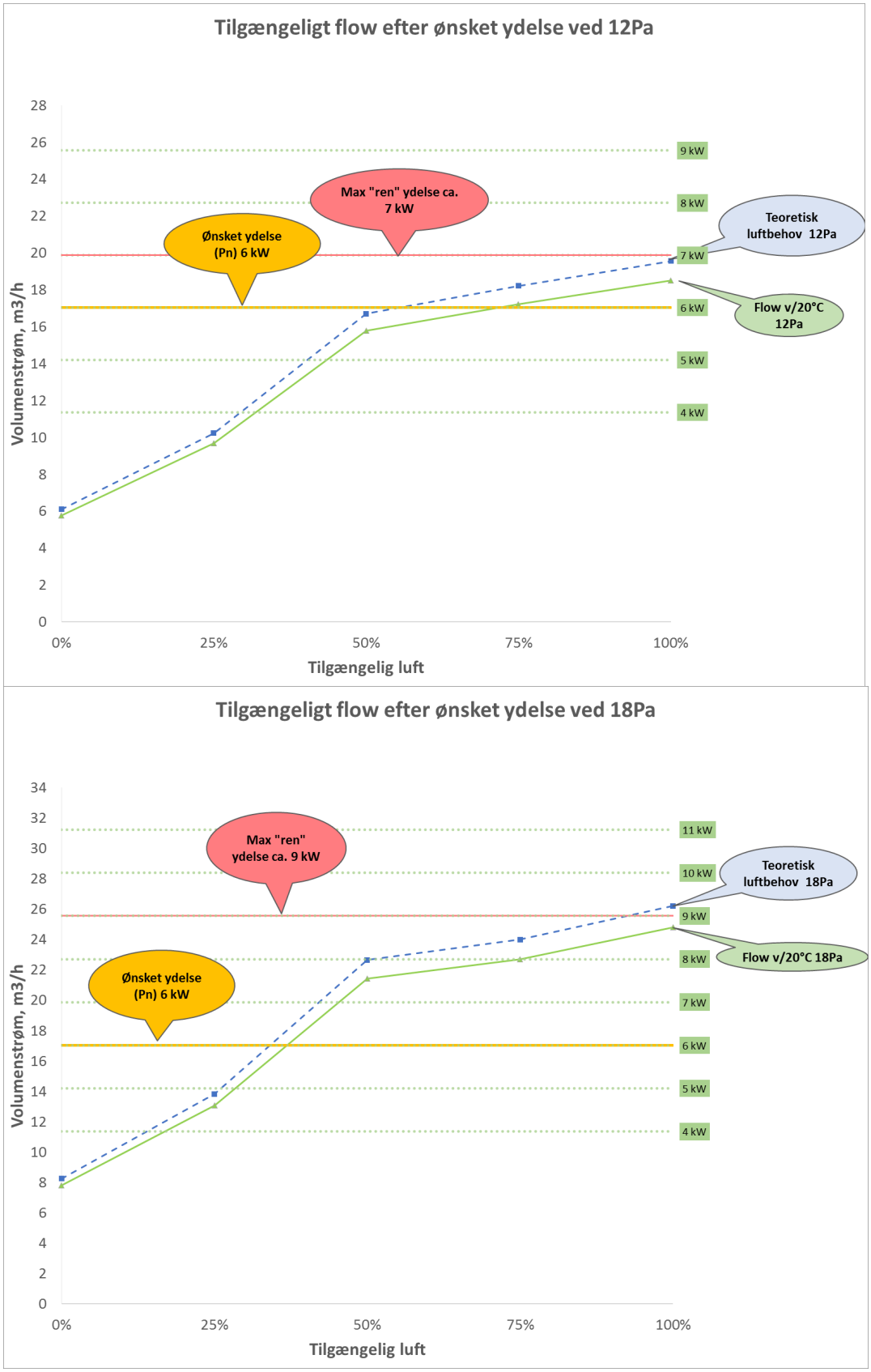
Figur 51 Illustration af regnearkets input og output felter

3) Indtast den ydelse ovnen ønskes at kunne levere
4) Indtast arealet af indgangene ved primær, sekundær, tertiær og pilotluften
5) Hvis temperaturen ved indgangen af de forskellige luftveje kendes eller er estimeret, indtastes disse. Kendes de ikke, fastholdes standardværdier på 20 °C, men man bør være opmærksom på at dette øger usikkerheden i modellen og vurderingen af om der kan komme nok luft gennem kanalerne til at sikre en ren forbrænding.
6) Betragt output af beregningerne i regnearket – i tabel såvel som plots (se f.eks. figur 36)

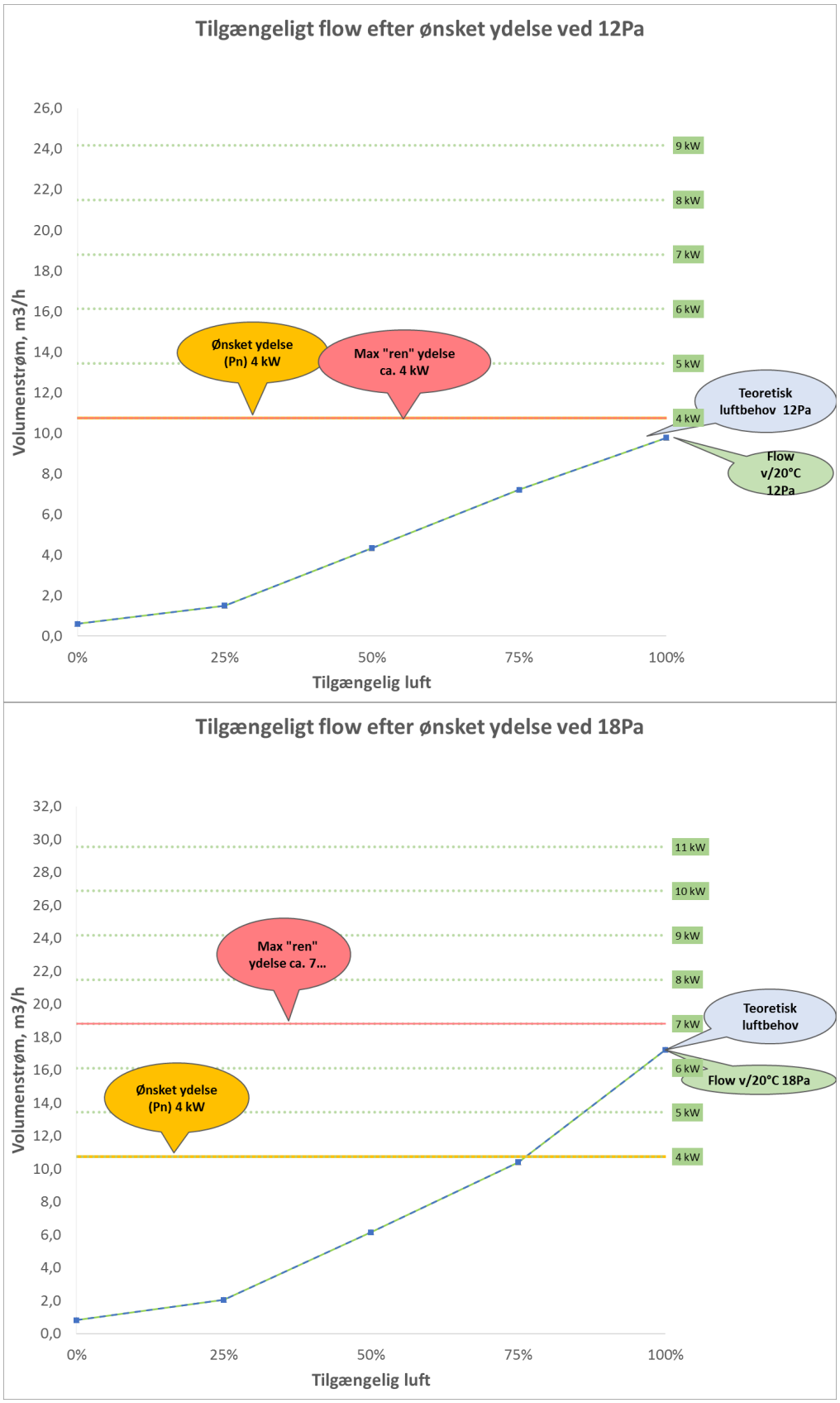
Fra værktøjet kan følgende ting afledes:

- Om ovnen kan levere den ønskede ydelse med den luftmængde der er tilgængelig
- Det kan identificeres på hvilke spjæld, der er luftbegrænsninger (og hvor meget for små disse eventuelt er)
- Ovnens maximale ydelse kan beregnes ud fra hvor meget luft der højest kan komme gennem ovnen.
- Hvor meget brænde forbrugeren maximalt kan afbrænde rent ud fra fastsatte tekniske egenskaber for henholdsvis en god og en dårlig skorsten

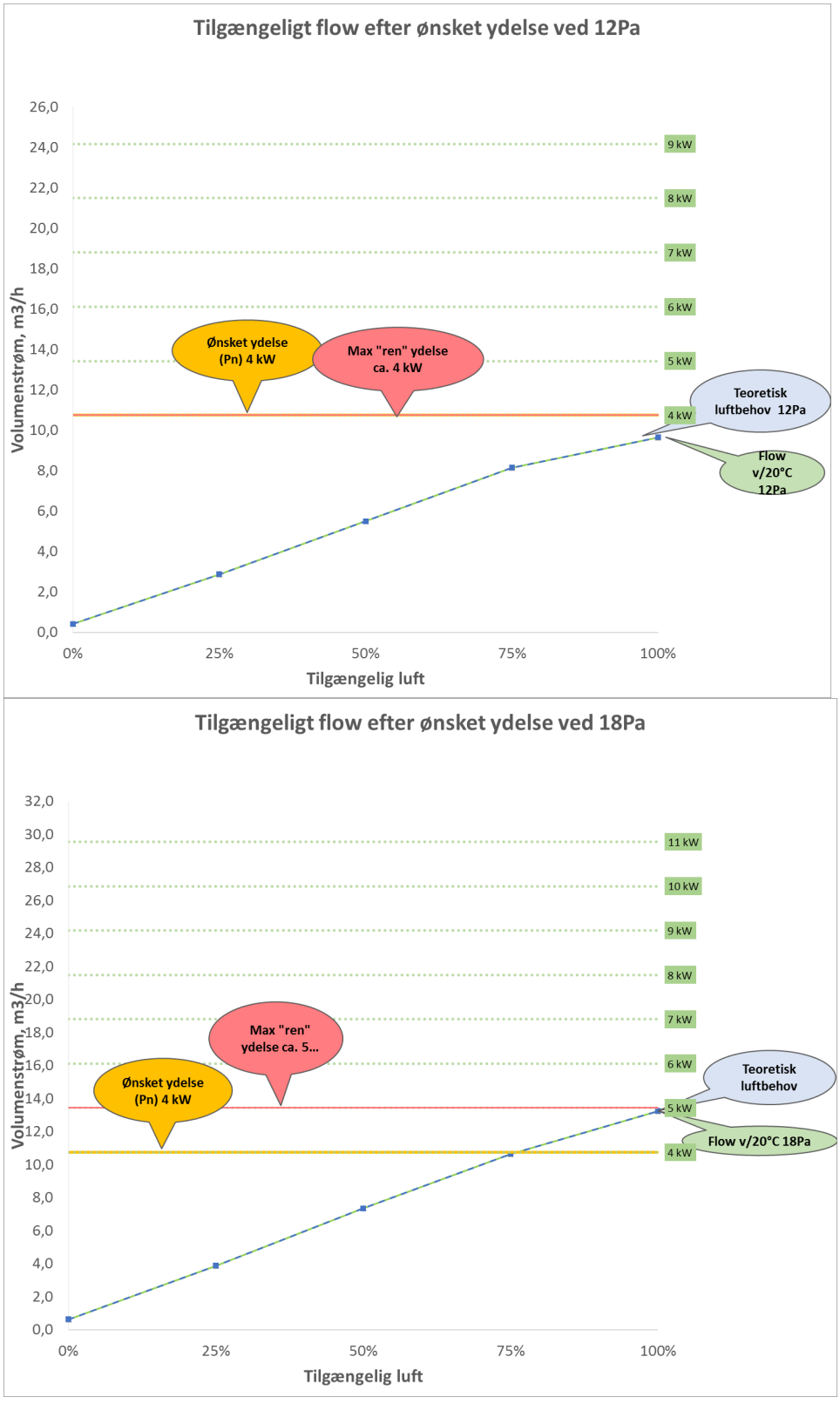
Princippet i regnearket er afprøvet på de tre ovne studeret i dette kapitel, nemlig de to ældre ovne æ1 og æ2 samt den moderne HWAM ovn. Graferne fra regnearket i de tre tilfælde ses i figur 52-54.



Figur 52 Output fra værktøjet på HWAM ovnen ved hhv. 12 og 18 Pa træk



Figur 53 Output fra værktøjet på den ældre ovn æ1 ved hhv. 12 og 18 Pa træk



Figur 54 Output fra værktøjet på den ældre ovn æ2 ved hhv. 12 og 18 Pa træk

For at illustrere princippet om, hvad der kan sluttes ud fra værktøjet i et konkret tilfældes, ses på HWAM ovnen i figur 52. Princippet beskrives ved 12 Pa (situationen ved 18 Pa er analog).

Den blå kurve viser direkte lækagemålingerne (i trin 1, indtastet i trin 2) i den kolde ovn, og viser hvor meget luft der er tilgængelig til forbrænding. Den gule vandrette linje viser den ønskede ydelse (trin 3). Ud fra skæring mellem den gule og den blå kurve ses således, at der ved 50% åbent spjæld burde kunne tilføres den nødvendige mængde luft til den ønskede ydelse, under antagelse af, at luften er kold. Imidlertid udvider luften sig når den opvarmes til den temperatur de er ved de givne indgange (arealer indtastet i trin 4) og ud fra de indtastede temperaturer (i trin 5) hvilket betyder, at det volumen der skal tilføres pr time reelt er højere, illustreret ved den grønne kurve. Sammenlignes således nu hvor den grønne kurve skærer den gule, ses at spjældet skal åbnes mere, ca. 75% for at få den ønskede mængde luft til den ydelse ovnen skal kunne levere. Den maximale mængde luft der kan komme igennem (dvs. grøn kurve, 100% spjæld) giver en maximal ydelse på 6,6 kW. Den røde rette linje viser den maximale ydelse i hele kW dvs. 7 kW. Det kan altså ud fra værktøjet konkluderes at HWAM ovnen kan levere den ydelse den er bygget til at kunne 6 kW, med mulighed for at opnå en smule højere ydelse, 7 kW og stadig have en ren forbrænding. Ved et højere skorstenstræk på 18 Pa, kan ovnen tilsvarende sagtens yde de 6 kW, tilmed med lavere spjældindstillinger, ca. 33% spjæld og en mulighed for maximalt at levere ca. 9 kW og stadig brænde rent. De ydelsesintervaller ovnen således teoretisk (i forhold til luftmængder tilgængelige) kan brænde rent 6-7 kW ved 12 Pa og 6-9 kW ved 18 Pa, kan omregnes til en mængde træ, der maximalt kan afbrændes i timen. Ved et træk på 12 Pa kan der således afbrændes 1,9-2,2 kg træ i timen og ved 18 Pa kan der afbrændes 1,9-2,8 kg i timen, som det ses i output i tabellen. Denne oplysning vil producenten kunne forsyne forbrugeren om, således at forbrugeren har en ide om dels at der er et maksimum for hvor meget brænde der kan brændes rent af per indfyring, og dels hvad dette omtrentligt er. Det bemærkes i øvrigt, at disse tal harmonerer med betragtningen under forbrændingstest i HWAM ovnen, hvor der med 18 Pa træk kunne brændes rent med en brændemængde på 2 kg, hvorimod 2,8 kg gav høje CO emissioner.

I figur 53 og 54 hvor situationen for de to ældre ovne ses, bemærkes at begge ovne har vanskeligt ved at opnå tilstrækkelig luft til den ydelse de har, 4 kW, selv ved 100% åbne spjæld ved 12 Pa. Ovnene har altså udfordringer med luftsystemet. Er trækket 18 Pa er det muligt ved næsten helt åbne spjæld at opnå at få luft nok gennem systemet til en teoretisk ren forbrænding. Således kan æ1 ved 18 Pa brænde rent mellem 4-5 kW og æ2 ved 4-7 kW. Problematikken for disse ovne, harmonerer med forbrændingstestene (figur 25 og 26 i kapitel 8), hvor det ses at forbrændingerne er ringe og CO værdierne er høje for disse gamle ovne der, da de blev godkendt, skulle leve op til mindre strenge krav end nutidens grænseværdier og krav til forbrændingskvalitet.

10.2 Sammenfatning

Et beregningsværktøj er blevet udviklet til at vurdere om en nyudviklet ovn kan få luft nok, til at brænde rent ved den ønskede ydelse, udelukkende baseret på målinger med et lækageapparat og input til specifikke dimensioner angående luftsystemerne i prototypen.

- Hvis ovnens luftsystemer er korrekt dimensionerede bekræftes dette ved metoden, og i givet fald angives en maximal ydelse ovnen kan levere og samtidig stadig brænde rent. Dette beregnet teoretisk ud fra luftmængden der er til stede- dog forudsat at luften tilsættes de rigtige steder og at brændkammeret er dimensioneret korrekt. Ydelserne kan omsættes til en information til forbrugeren om den maximale mængder træ, der bør benyttes i ovnen pr indfyring for at undgå for høje emissioner.
- Hvis ovnens luftsystem ikke er dimensioneret korrekt og der er begrænsninger, gives en vurdering af på hvilken af luftvejene begrænsningen ligger, og hvad åbningsarealet burde være, der kan ses i forhold til, hvad det reelt er. Således vil producenten have en ide om hvad der skal ændres, og hvor meget, for at øge mulighederne for at udvikle en god rent brændende ovn.

Yderligere er der blevet bygget modulsystemer til simulering af indbyggede luftkanaler, for hvilke ændringer i volumenstrøm pr m lige rør og over et antal chikaner er vurderet, ligesom tryktab er beregnet og vurderet. Her er det vist at målinger baseret på lækagemåler er nøjagtigt nok til, at følgende problematikker kan identificeres og adresseres;

- Man skal passe på at tværsnitarealet af ens rør ikke bliver for lille, jo mindre rør des større tryktab
- Længden af luftvejen skal holdes så lille så muligt, jo længere luftvej des større tryktab
- Antallet af chikaner f.eks. knæk skal være så få som muligt og med fordel så 'bløde' som muligt. Skarpe knæk betyder meget for overfladen (med fordel er røret indvendigt altså så glat og med så få, bløde bøjninger som muligt og det bør overvejes hvordan eventuelle sammensvejsninger laves for at undgå kanter, hak og ujævnheder.

Vigtigt at fremhæve er, at den mest korrekte måde at vurdere luftbegrænsninger og forhold gennem et system er ved at se på og beregne tryktab. Da dette imidlertid er tidskrævende og kompliceret og ikke nødvendigvis en kapacitet der kan forventes at være hos en mindre brændeovnsproducent, har det vist sig at det at måle og se på ændringer i volumenstrøm over chikaner/ens rørsystem eller en model af dette giver et kvalitativt fint billede til at beskrive tryktab og en ide om størrelsesordenen systemet og ændringer i systemet påvirker tryktabet. I absolutte tal passer dette ikke grundet sammenhængen mellem tryktab og volumenstrøm er en anden gradsfunktion, samtidig med at konstanterne der bruges til tryktabsberegningerne er forskellige for de forskellige chikaner.
Ved studier af to ældre ovne og en moderne HWAM ovn, er det fundet at de to ældre ovne er begrænset på luftsystemerne i henhold til det udviklede værktøj. Dette bekræftes af forbrændingstests, der viser at de generelt ikke brænder særligt rent, og at de slet ikke kan brænde ved de lave spjældindstillinger som beskrevet i modellen i kapitel 6. Dette viser at proceduren til eksperimentel analyse af hvor meget træ en ovn kan afbrænde rent i kapitel 6 kun virker på moderne ovne – på gamle ovne, vil den fejle. Omvendt kan det, at proceduren ikke kan benyttes bruges som indikation af, at ovnen sandsynligvis lider af et generelt problem med luftsystemerne, og ikke lever op til det en moderne ovn skal kunne i dag. Forbrændingstest med HWAM ovnen bekræfter beregningsværktøjets estimat om at ca. 2 kg er den maximale træmængde der kan afbrændes rent. Samtidig kan ovnen brænde rent efter proceduren i kapitel 6 op til den maximalt tilladelige brændemængde.

Dette beregningsværktøj formodes at kunne have stor værdi for brændeovnsproducenter i Danmark. Hvis anvendelsen er for teknisk/svær, vil Teknologisk Institut kunne assistere eller kunne undervise i brugen.

11. Nyudviklet ovn

11.1 Udvikling af ovn

I projektet blev en ny ovn udviklet, for at undersøge effekten af optimering af luftsystemet. Dette blev gjort ved brug af de retningslinjer og værktøjer til måling og bestemmelse af luftflow gennem ovnen, der er udviklet tidligere i projektet. For at presse de i projektet udviklede modeller og værktøjer mest muligt, og kunne fastslå hvor meget et luftoptimeret system betyder i forhold til andre parametre knyttet til brændeovne, blev en udfordrende opgave valgt. En kommercielt tilgængelig ovn, kaldet Model, der under real life omstændigheder til tider giver forbrændingsmæssige udfordringer, blev valgt som udgangspunkt for at søge at udvikle en andengenerationsovn, der kan fungere uden problemer. Standard Model ovnen, er typegodkendt i henhold til standarderne, og kan således brænde fint, men har givet en række problematikker hos brugere i 'den virkelig verden', hvilket er blevet tilskrevet begrænsninger i luftsystemet, der i særdeleshed kan tænkes at give anledning til udfordringer, hvis brugeren enten har en mindre god skorsten eller bruger for meget træ, i forhold til hvad ovnen kan håndtere.

For at undersøge dette, blev værktøjet til at evaluere luftsystemerne i en brændeovn (Kapitel 10) benyttet for henholdsvis en dårlig skorsten med et træk på 6 Pa og en normal skorsten med et træk på 12 Pa som ved typeprøvning. Resultaterne af dette er vist i figur 55.

Den grønne kurve viser flowet gennem ovnen, som målt ved kold luft med lækagemåleapparat ved forskellige procentvise åbninger af spjældet. Den blå kurve viser luftmængden af opvarmet luft, der beregnet kommer gennem ovnen. Den gule linje viser den nødvendige mængde luft der er behov for, for at ovnen som minimum teoretisk set kan brænde rent, ved den ydelse den er bygget til. Da den blå kurve, dvs. mængden af luft der er til stede), ved alle spjældindstillinger ligger under den gule linje, er det altså ikke muligt for ovnen at brænde rent uanset om spjældet står 100% åbent, da der stadig ikke kommer nok luft til forbrændingen. Ved den gode skorsten, ses at den blå kurve ligger over den gule linje ved ca. 2/3 åbent spjæld, hvilket viser at ovnen teoretisk kan få luft nok til at brænde rent, som da også observeret eksperimentelt ved typeprøvning ved den givne ydelse. Disse indledningsvise målinger viser dog med al ønskelig tydelighed at luftkapaciteten er begrænset og at en dårlig skorsten vil gøre ren forbrænding umulig. Samtidig kan forbrugeren selv ved 12 Pa aldrig opnå en ydelse på mere end 6 kW, hvilket svarer til 1,5 kg afbrændt træ i timen. Indfyrer en forbruger mere end dette (der ikke er en særlig store mængde træ) i sin ovn, er det selvsagt heller ikke mærkeligt at der kan opstå problemer.

Da værktøjet illustrerede at luftsystemet gav anledninger til begrænsninger, der kunne forklare problematikker hos kunder ved f.eks. en dårlig skorsten, eller ved indfyring med for meget træ, blev det besluttet at se om en forbedring af dette, kunne løse problemet. Således er parametre omkring brændkammeret holdt konstant, mens luftsystemet er det, der er optimeret i projektet. Ovnene ser således visuelt 'ens' ud, men Model ny, blev tegnet og udviklet fra starten mht. alle luftindtag og luftsystemer som illustreret i tegningerne i figur 56.

I udviklingen blev der taget højde for følgende forhold til forbedringer af primær, sekundær og tertiær luftindtag:

- Primær luft (bundluft):

  Det er ikke sket de kæmpestore ændringer på primærluft. Primærluft gives kun i start fra kold ovn og ved genindfyring ellers skal den ikke anvendes.

  Det går i begge tilfælde fra fælles indgangskanel, hvor den løber ind i kanal i siden, hvorfra den kommer ind i brændkammeret i gennem risten. På den nye ovn er kanalen i siden gjort større. Og der er lavet mere plads hvor luften løber fra fælles kanal til primær kanal.

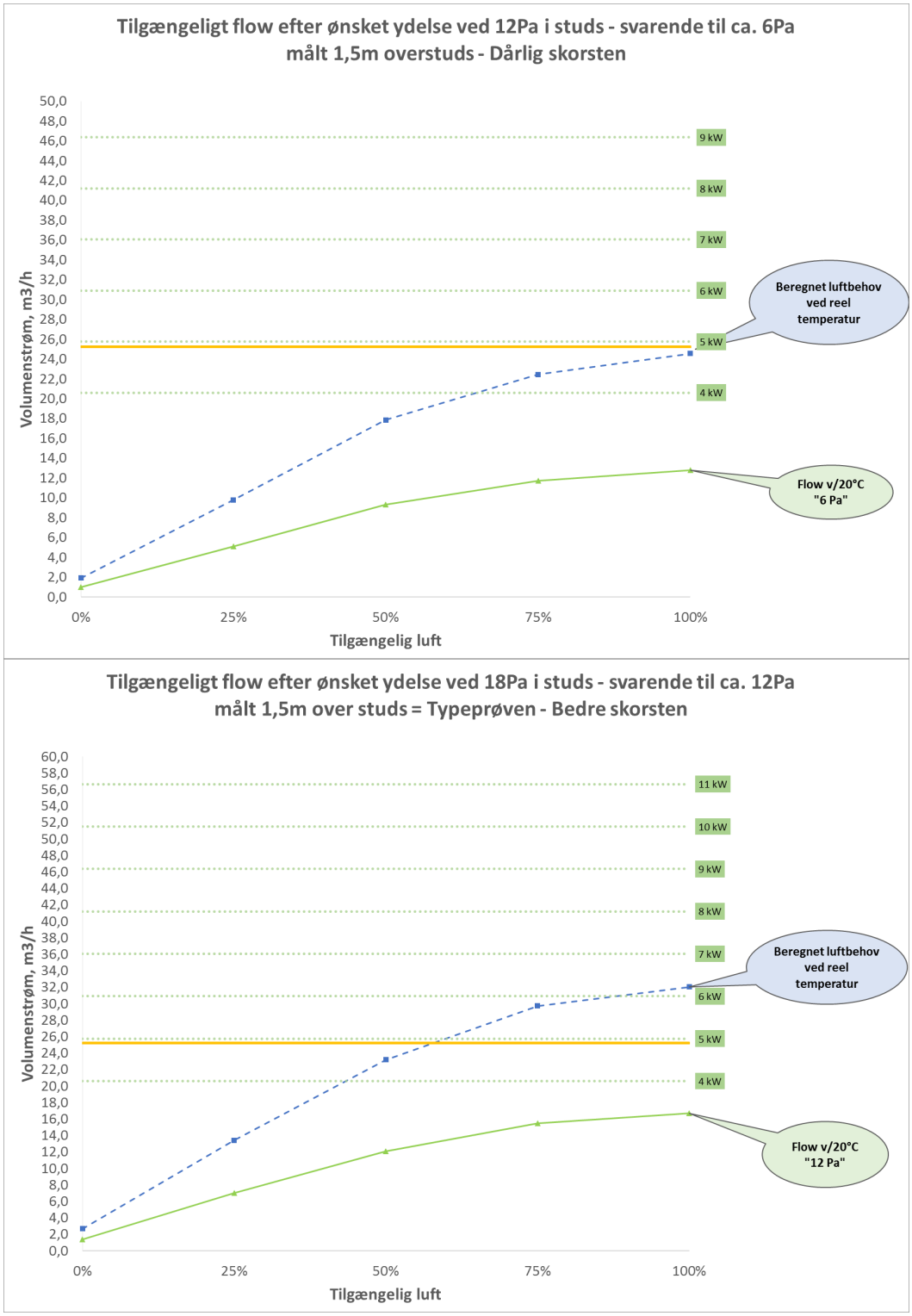
- Sekundær luft (rudeskyl):

Gammel ovn: Fra fælles kanal ledes den ud i de to bagerste hjørner af brændkammeret, hvor der løber en kanal i hver side op i til toppen af ovnen, hvor det så drejes hen langs med toppen af ovnen (stadigt i hver side) til en fordelingskanal i front. Her skal luften så fordeles ud over hele længden af glasset.

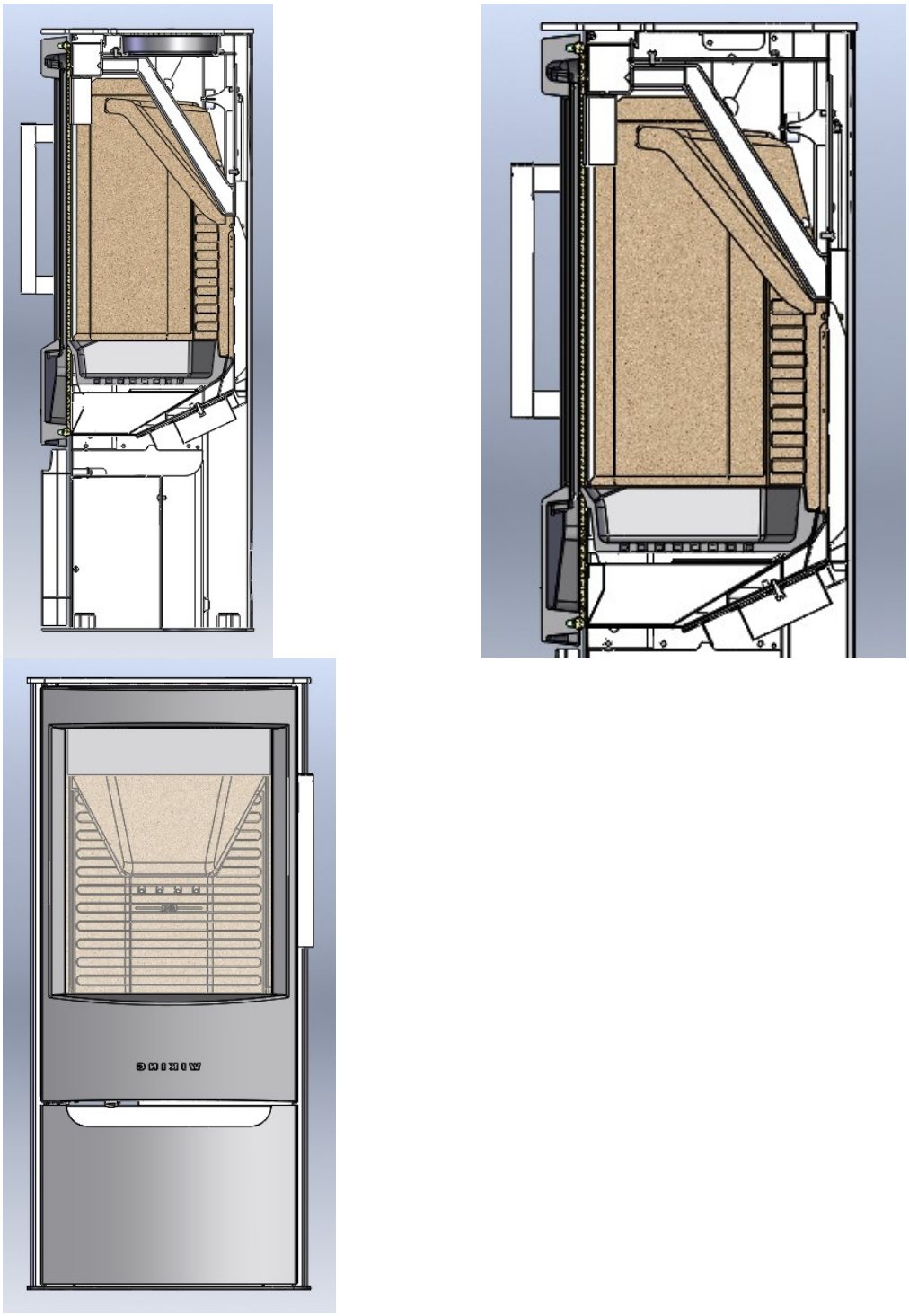
Ny ovn: går fra fælles kanal ind kanal som går op ad ryggen på ovnen og derfra ind i kanal, som leder luften via skrå kanal igennem det sekundære brændkammer og over til fordelingskanal i hele ovnen, hvor den ledes mere hensigtsmæssigt ind i kanalen. Dvs. der er er fjernet en del 90° bøjninger, som giver meget modstand gennem ovn.

- Tertiær luft (rygluft):

Princippet for tertiær luft er den samme for de to ovne. Men kanalen er gjort 3 gange så stor.



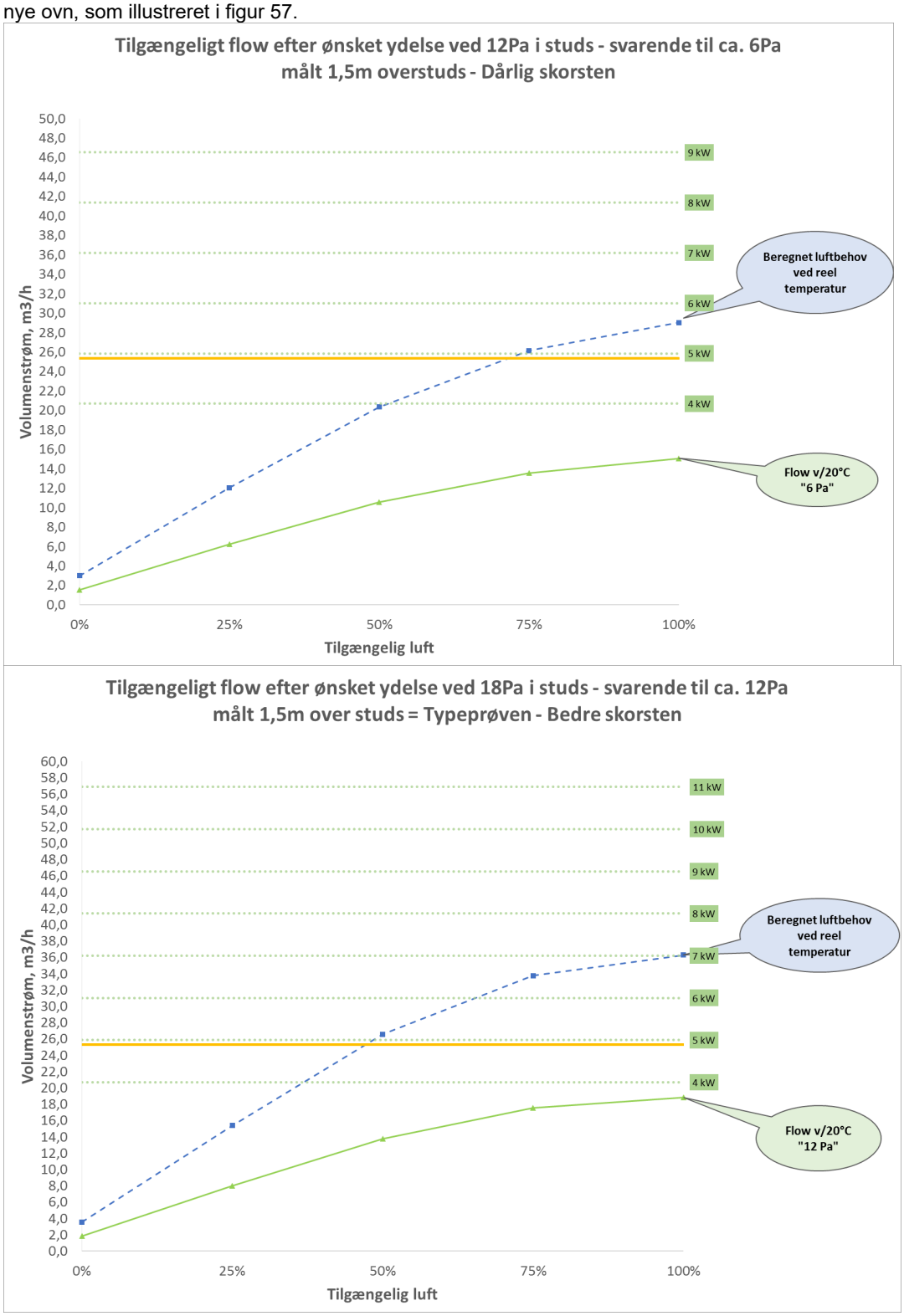
Figur 55 Luftværktøjet er benyttet til at vurdere mængden af luft tilgængelig til forbrændingen i Model Standard



Figur 56 Tegninger af den nyudviklede ovn

Opsummeret er luftkanalerne er altså overordnet set konstrueret så længderne er kortest mulige, der er færrest mulige knæk og med glattest mulig overflade i selve rørene. Og de nødvendige knæk er holdt 'bløde', så der undgås f.eks. 90 graders vinkler. Disse forholdsregler begrænser luftmodstand mest muligt som set i tidligere arbejdspakker. En række andre tegninger inklusive tegninger af standard Model er vist i Bilag 5.

Redskabet til bestemmelse af luftmængden til rådighed blev atter benyttet, denne gang på den nye ovn, som illustreret i figur 57.



Figur 57 Luftværktøjet er benyttet til at vurdere mængden af luft tilstede for forbrænding ved henholdsvis dårlig skorsten og ny skorsten for den i projektet udviklede brændeovn Model Ny

Ved analoge analyser som for standardovnen, bemærkes at forbedringerne har bevirket at den nyudviklede ovn burde kunne brænde rent ved en dårligere skorsten (dog med relativt åbne spjæld, >75%) med træ svarende til den ydelse ovnen er designet til. Samtidig er mængden af

træ, der maximalt kan brændes rent ved en god skorsten, væsentligt større end for Model Standard, nemlig 2,2 kg/h. De to ovne, Model Standard og Model ny, er vist i figur 58.



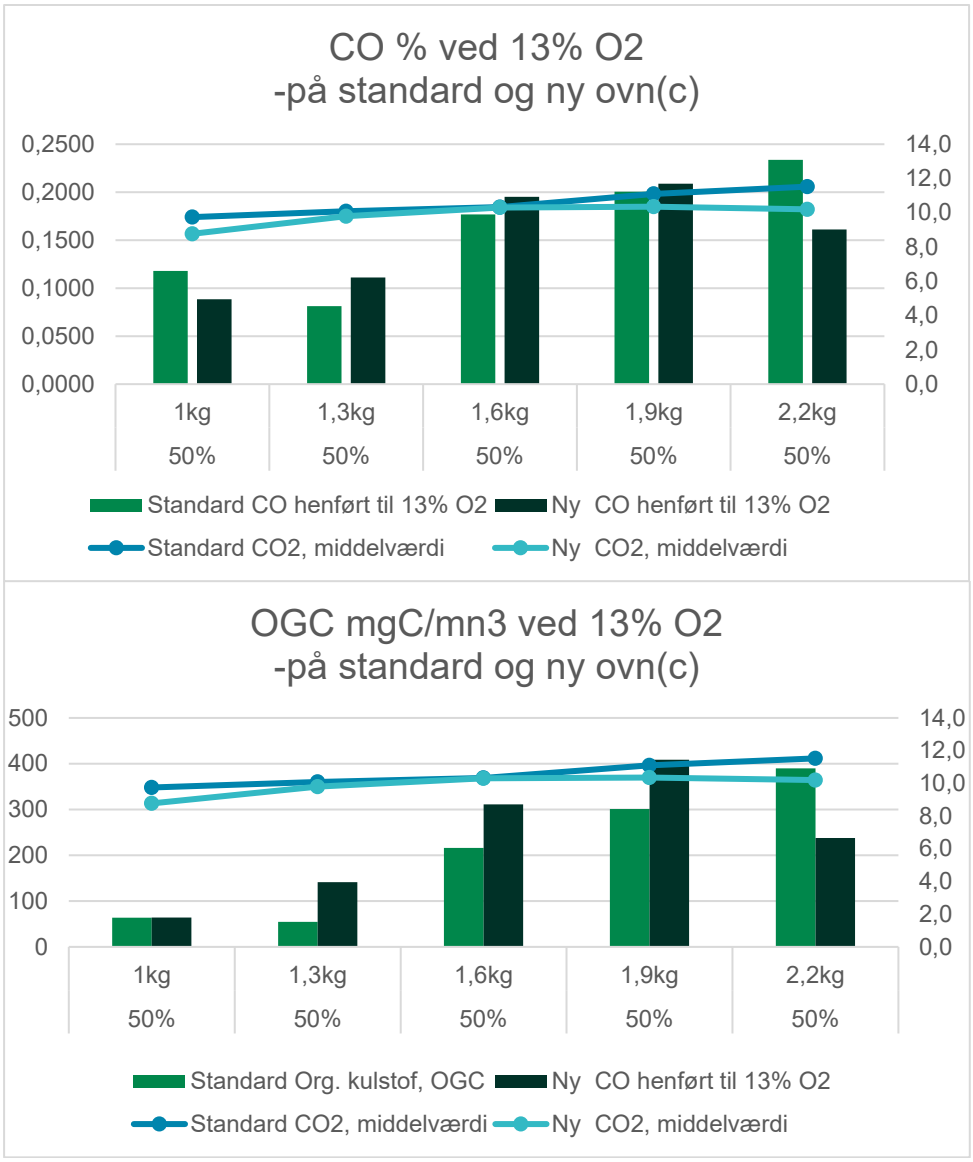
Figur 58 Billeder af de to forskellige generationer brændeovne - luftsystemet er inde i ovnen, så på overfladen ser de ens ud, skønt det er to meget forskellige enheder

Måleudstyr til at måle emissioner på ovnene ved egentlige brændeovnstests blev monteret som illustreret i figur 59.



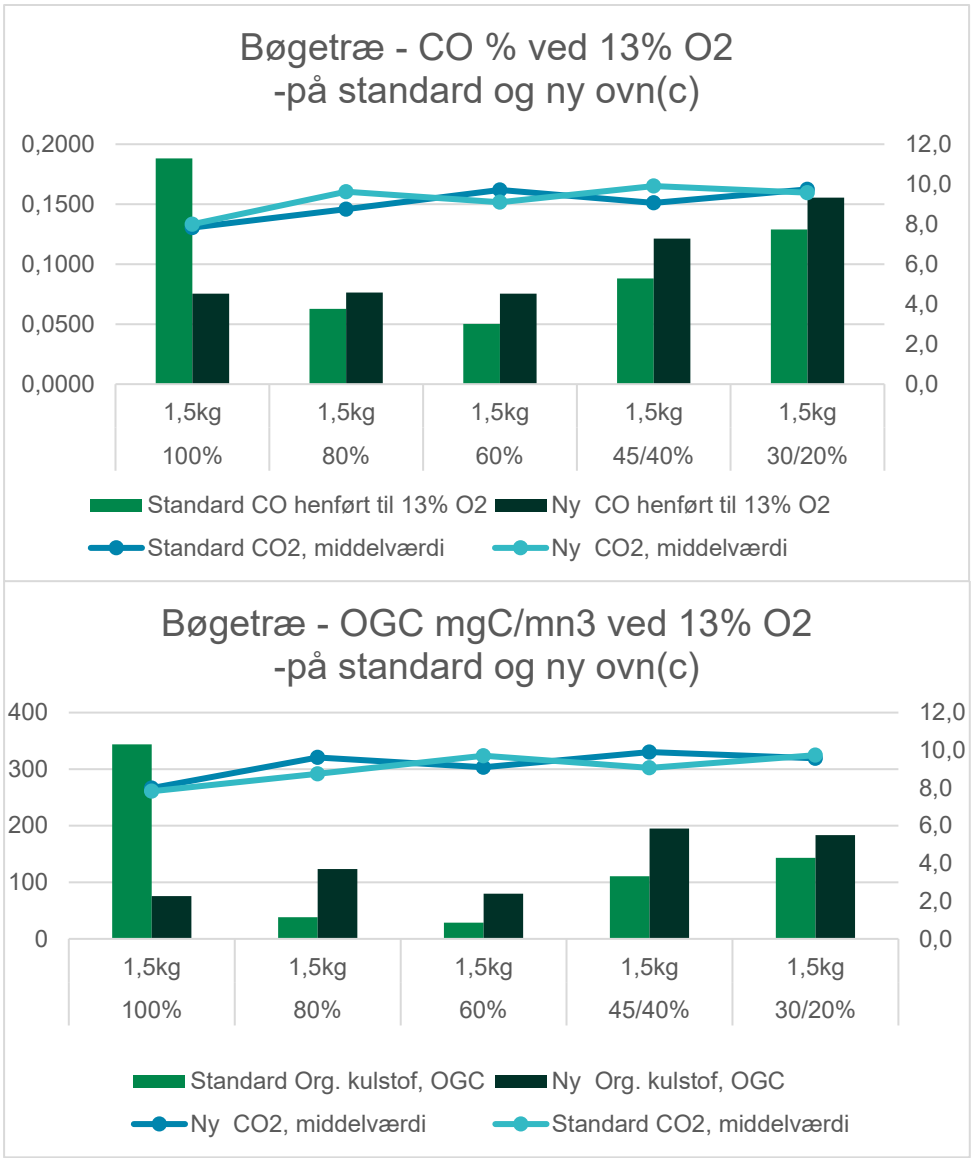
Figur 59 Måleopstilling, til evaluering af emissioner fra brændeovnene

Der blev udført to måleserier på den nye ovn, og emissionerne ved disse test blev sammenlignet med brændeovnstest der blev udført på analog måde, med den oprindelige Model Standard ovn. I den ene måleserie blev træmængden øget, mens luftmængden blev holdt konstant. I den anden måleserie blev brændemængden holdt konstant, mens spjældindstillingerne blev varieret. De to serier blev kørt med to forskellige typer brændsel, nemlig henholdsvis birketræ og bøgetræ. I figur 60 er emissioner af CO og OGC sammenlignet for Model Standard (grøn) og Model Ny (sort). Testene er udført ved 12 Pa træk.



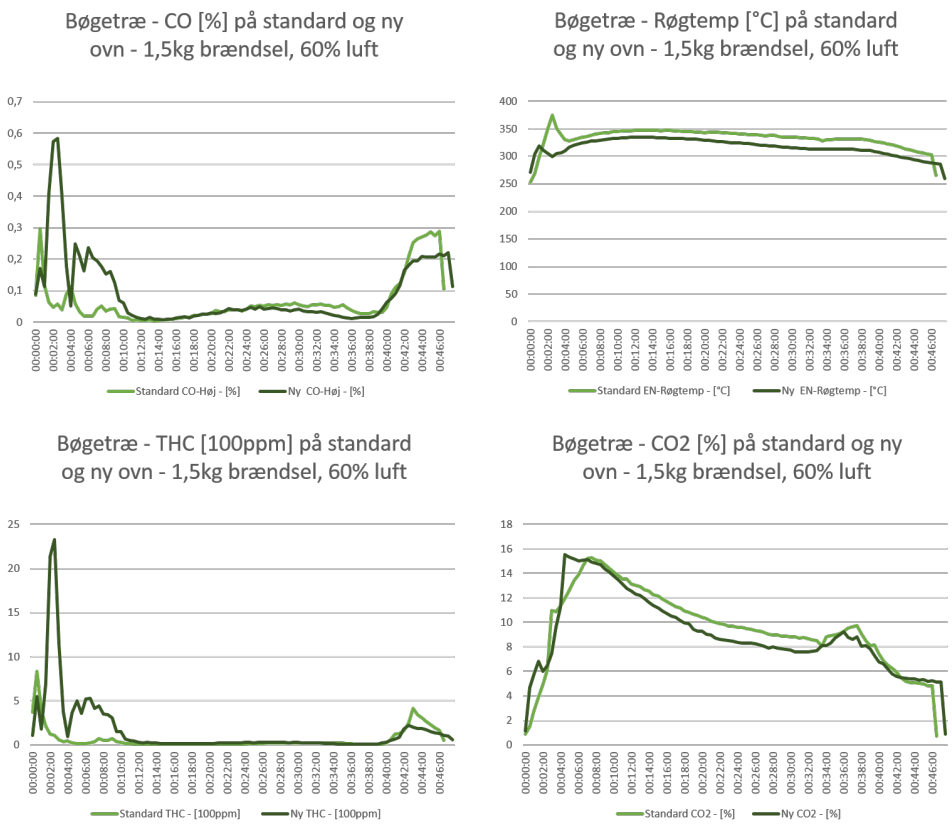
Figur 60 Sammenligning af CO og OGC emissioner fra indfyringer med forskellige brændemængder i henholdsvis Model Standard og Model Ny

Fra figur 60 ses det, at emissionerne er en smule lavere for de små træmængder, hvorimod billedet vender ved stor træmængde. Dette bekræfter lækagemåler undersøgelse om, at der ikke er tilstrækkeligt med luft til at brænde rent ved 12Pa for store træmængder i Model Standard. At Model ny er højere i emissioner ved lav træmængde viser, at luftsystemet alene ikke er tilstrækkeligt for at opnå bedst mulig forbrænding. Brændkammer, blanding og placering af luftindtag skal alt sammen spille optimalt sammen for at opnå de lavest mulige emissioner.
I figur 61 ses sammenligningen af emissionerne ved afbrænding af samme træmængde ved forskellige spjældindstillinger.

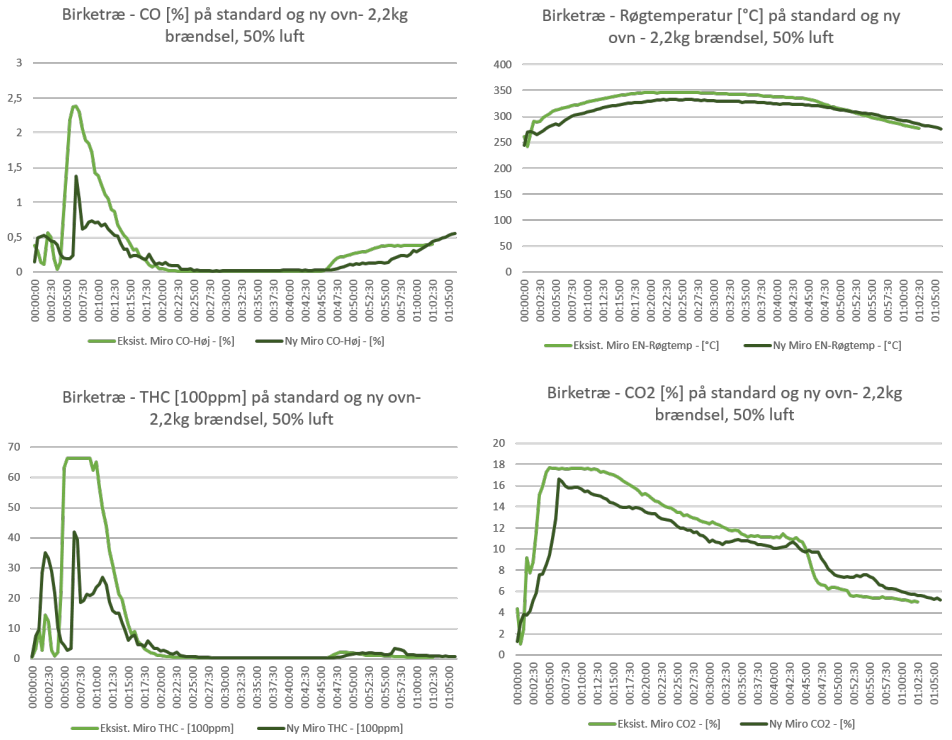


Figur 61 Sammenligning af CO og OGC emissioner ved forskellige spjældindstillinger fra Model Standard og Model ny

Ved sammenligning af lille mængde træ med forskellige spjældindstillinger ses at emissionerne for 100% åbent spjæld er ekstremt høje for Model Standard. Dette resultat er umiddelbart noget overraskende, men kan skyldes afkøling med overskudsluft, der giver høje emissioner. Omvendt udviser den nye ovn, ikke samme tendens, trods luftkapaciteten er højere i denne. Dette viser at lufthullernes placering, blanding mm også er centrale aspekter.
To situationer er udvalgt, en hvor Model Standard har lavere emissioner (bøgetræ, 1,5 kg træ, 60% spjæld) og en hvor den har højere emissioner (birketræ 2,2 kg træ, 50% luft). Emissionerne er vist gennem fyringscyklussen for at vise på hvilke tidspunkter af forbrændingen af emissionerne er hhv. høje og lave. Dette ses illustreret i figur 62 og 63.



Figur 62 Emissionsforløb for situation hvor Model Standard har lavere emissioner end Model ny



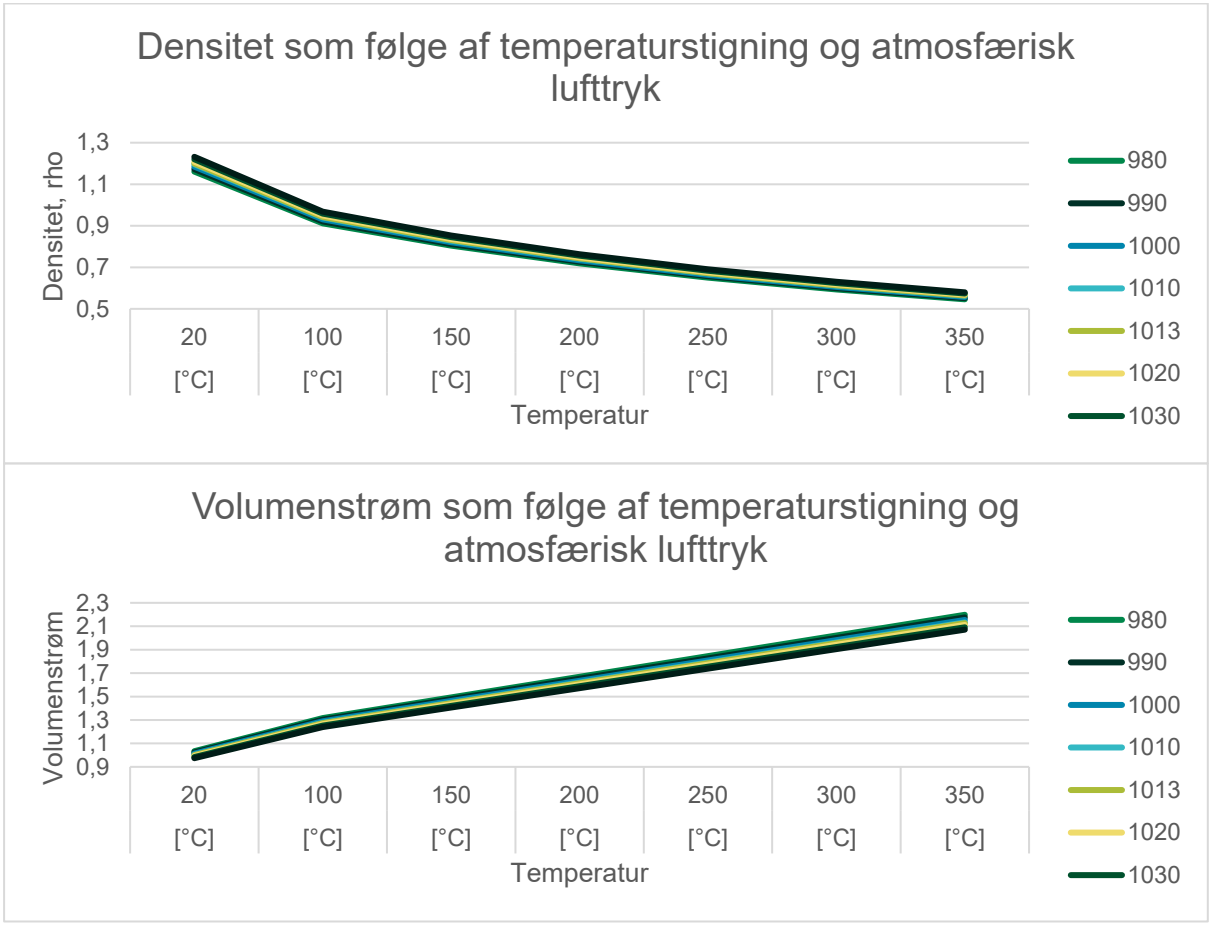
Figur 63 Emissionsforløb for indfyring hvor Model Ny er bedre end Model Standard

Ved at sammenligne emissionsforløbene i Figur 62 og Figur 63 ses at det i begge tilfælde er i opstartsfasen at emissionerne er høje. Det ud til, at tidsrummene hvor Model Ny har høje emissioner er væsentligt kortere end for situationen hvor Model Standard har høje emissioner. Dette er umiddelbart en positiv egenskab ved den nye ovn.

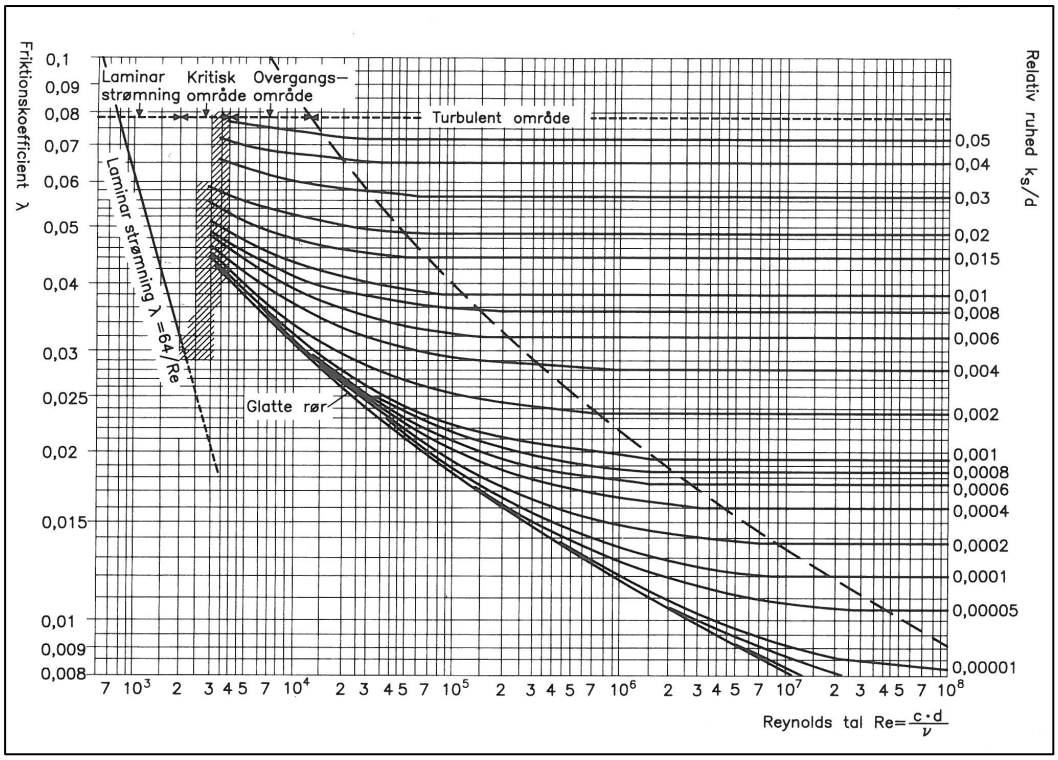
11.2 Sammenfatning

For at konkludere studiet, kan det siges at den nye Model ikke udviser bedre forbrænding med lave emissioner i alle situationer, men at den umiddelbart virker mere robust og kan brænde pænere i et bredere range af spjældindstillinger, i et større område af indfyret brændemængde og der kan komme mere ilt til forbrændingen ved lavere skorstenstræk i en dårlig skorsten. Således er den nye ovn forventelig gennemsnitligt set bedre i virkelig anvendelser og hos forbrugere der ikke nødvendigvis har ideelle betingelser for at opnå den bedst mulige typetestforbrændingssituation. At ovnen ikke er bedre i alle situationer, tilskrives at en optimering af luftsystemet ikke er tilstrækkeligt i sig selv – her er det vigtigt at brændkammeret også er optimeret, og er optimeret til luftsystemet. Således anbefales, til brug ved ny produktion/udvikling af danske brændeovne, at producenter er sig bevist om de 17 guidelines for brændkammer opbygning (Low Carbon brændkammer) og kombinerer viden herfra med retningslinjer til at undgå luftmodstand og luftunderskud herunder det interaktive værktøj til vurdering af luften der er til rådighed udviklet i dette projekt.

Bilag 1 Densitet og volumenstrøm af 1 m^3 luft som funktion af temperatur ved forskellige tryk



Bilag 2 Friktionskoefficienter



Friktionskoefficientbestemmlse ud fra grafisk datamateriale, kilde Varmeståbi

Overflade	k_s [mm]
Aluminium, glas, messing	0 -0,002
Plastrør	0,01-0,05
Trukne stålrør	0,01-0,05
Svejste stålrør, nye	0,03-0,15
Svejste stålrør, med afsætninger	0,15-3,0
Betonrør, centrifugalstøbte	0,1 -0,3
Betonrør, normale	0,3 -1,5

Overfladeruheder fra udvalgte materialer, kilde Varmeståbi

Bilag 3 Flow og tryktab

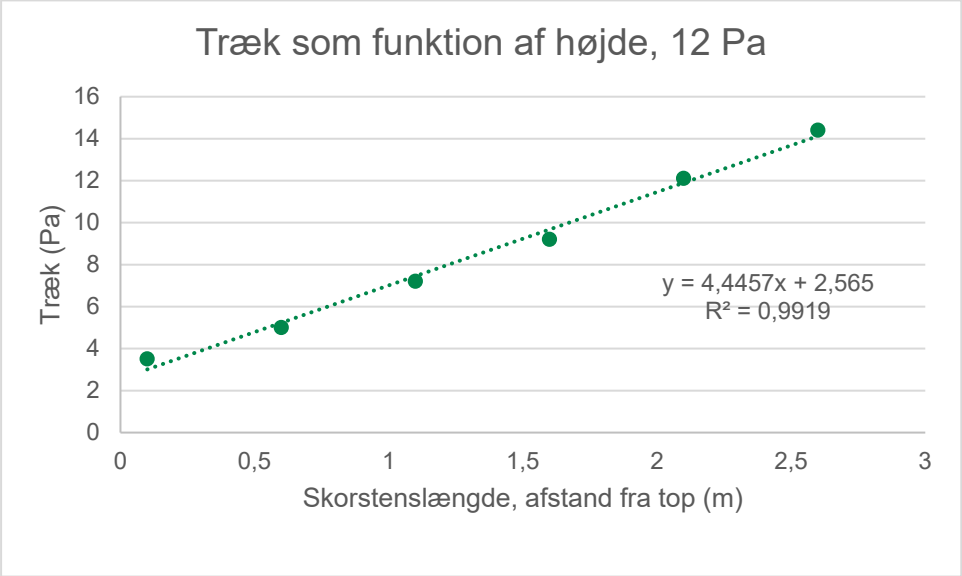
Oversigt over flow i m^3/h gennem forskellige rørkanaler koblet til en ovn ved to rør dimensioner og to effektreguleringer

	Dimension rør	36 x 36 mm2						54 x 54 mm2					
		Lukket spj	halv åb	åbent	lukket spj	halv åb	åbent	lukket spj	halv åb	åbent	lukket spj	halv åb	åbent
1	Ovn	6,0	16,1	18,6	8,0	21,1	22,8	5,8	15,8	18,5	7,8	21,4	24,8
2	Ovn + flange	5,5	15,4	17,3	7,8	19,9	21,3	5,4	11,7	12,3	7,4	15,3	16,3
3	Ovn+flange+lige rør 190 mm (rør går 100 mm over flange)	5,4	14,8	16,8	7,7	19,1	21,0	5,4	11,2	11,1	7,0	14,3	15,5
4a	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° skarp	5,6	14,0	14,9	7,5	18,1	19,6	5,0	8,7	9,3	6,6	11,9	12,5
5a	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° skarp+lige rør 500 mm	5,5	13,9	14,9	8,0	18,4	19,5	4,9	8,5	8,7	6,4	11,6	11,8
6a	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° skarp+lige rør 500 mm+bøjning skarp	5,4	12,2	14,1	7,9	16,5	18,3	4,6	7,5	7,3	6,4	10,2	9,9
7a	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° skarp+lige rør 500 mm+bøjning skarp+lige rør 500 mm	5,4	12,3	13,8	7,7	16,5	17,9	4,6	7,2	6,9	6,3	9,9	9,8
4b	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° knækket	5,6	14,0	15,0	7,7	18,4	19,9	5,2	9,8	9,8	6,9	13,4	13,8
5b	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° knækket+lige rør 500 mm	5,6	13,6	14,8	8,3	18,2	19,5	5,0	9,2	9,4	6,6	12,8	12,7
6b	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° knækket+lige rør 500 mm+bøjning knækket	5,6	13,0	14,3	8,3	17,2	18,7	4,8	8,2	8,9	6,5	11,7	11,8
7b	Ovn+flange+lige rør 190 mm+ bøjning 90° knækket+lige rør 500 mm+bøjning knækket+lige rør 500 mm	5,4	12,7	14,2	7,8	17,0	18,7	4,7	8,0	8,5	6,4	11,0	11,3

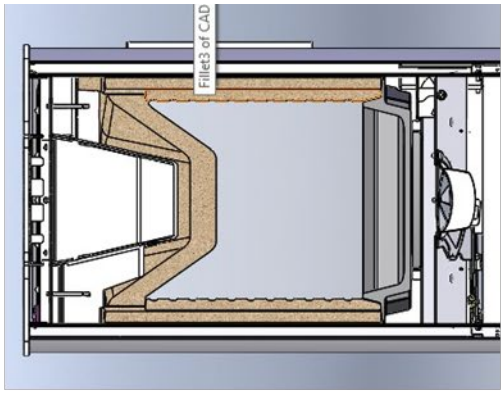
Beregnede tryktab for serie a med tre forskellige rørdimensioner

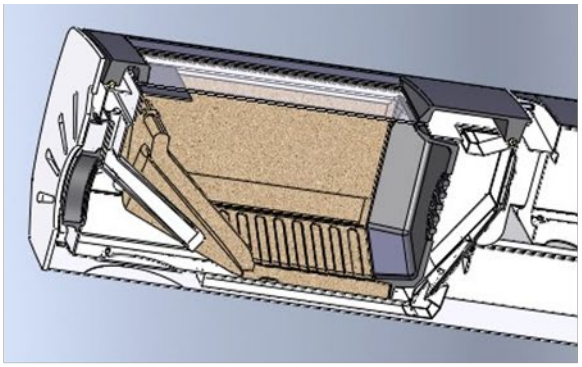
								0%		50%		100%	
	Strækning	Fast tryk	Længde	Tværsnit, a	Tværsnit, b	Hydraulisk diameter, d_h	Tværsnit, A	Akkumuleret flow i system efter ovn	Akkumuleret tryktab i system efter ovn	Akkumuleret flow i system efter ovn	Akkumuleret tryktab i system efter ovn	Akkumuleret flow i system efter ovn	Akkumuleret tryktab i system efter ovn
	#	[Pa]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m^2]	[m^3/h]	[Pa]	[m^3/h]	[Pa]	[m^3/h]	[Pa]
System A - 21x21	#1	12	-	0,098	-	0,098	0,008		0,0		0,0		0,0
	#2		-	0,021	0,021	0,021	0,0004	1,3	10,6	9,7	23,8	12,7	24,0
	#3		0,19					1,6	13,7	10,8	29,3	13,9	29,1
	#4		-					2,2	17,6	12,1	34,9	15,1	34,5
	#5		0,5					2,4	22,8	12,3	42,4	15,3	41,6
	#6		-					2,7	25,5	12,9	46,0	15,7	45,5
	#7		0,5					2,8	29,5	13,1	50,8	16,0	50,4
	#1	18	-	0,098	-	0,098	0,008		0,0		0,0		0,0
	#2		-	0,021	0,021	0,021	0,0004	1,5	21,2	12,6	42,0	14,9	44,0
	#3		0,19					2,6	25,9	13,7	52,1	16,3	54,1
	#4		-					3,2	32,5	15,2	63,9	18,0	65,0
	#5		0,5					3,4	41,2	16,1	76,1	18,7	77,1
	#6		-					3,6	46,6	16,4	83,6	19,1	84,1
	#7		0,5					3,6	54,4	16,7	92,9	19,3	93,5
System A - 36x36	#1	12	-	0,098	-	0,098	0,008		0,0		0,0		0,0
	#2		-	0,036	0,036	0,036	0,0013	0,4	2,0	4,1	9,2	6,2	10,1
	#3		0,19					0,4	2,3	4,6	10,5	7,4	11,4
	#4		-					0,7	3,0	7,1	12,6	9,3	13,8
	#5		0,5					0,9	3,7	7,3	14,6	9,7	15,9
	#6		-					1,2	4,3	8,3	16,1	11,2	17,4
	#7		0,5					1,2	4,9	8,6	17,6	11,7	18,7
	#1	18	-	0,098	-	0,098	0,008		0,0		0,0		0,0
	#2		-	0,036	0,036	0,036	0,0013	0,4	3,6	6,2	15,7	8,6	17,8
	#3		0,19					0,4	4,2	7,1	17,8	9,3	20,2
	#4		-					0,7	5,4	9,5	21,7	12,4	24,5
	#5		0,5					0,9	6,6	9,9	25,3	12,9	28,3
	#6		-					1,2	7,7	11,2	28,2	14,8	31,0
	#7		0,5					1,2	8,8	11,5	30,9	15,1	33,6
System A - 54x54	#1	12	-	0,098	-	0,098	0,008		0,0		0,0		0,0
	#2		-	0,054	0,054	0,054	0,0029	0,5	0,4	0,8	2,9	1,4	3,7
	#3		0,19					0,6	0,4	1,3	3,2	1,9	4,0
	#4		-					0,5	0,6	2,1	4,2	3,7	5,2
	#5		0,5					0,5	0,7	2,2	4,8	3,8	5,9
	#6		-					0,6	0,8	3,9	5,7	4,6	7,0
	#7		0,5					0,7	0,9	3,8	6,1	4,8	7,6
	#1	18	-	0,098	-	0,098	0,008		0,0		0,0		0,0
	#2		-	0,054	0,054	0,054	0,0029	0,2	0,8	1,3	4,9	1,5	5,6
	#3		0,19					0,3	0,8	2,1	5,3	1,8	6,1
	#4		-					0,5	1,1	3,0	7,1	3,2	8,2
	#5		0,5					0,0	1,4	2,8	8,1	3,3	9,3
	#6		-					0,1	1,7	4,6	9,6	4,5	11,2
	#7		0,5					0,3	1,9	4,6	10,4	4,8	12,2

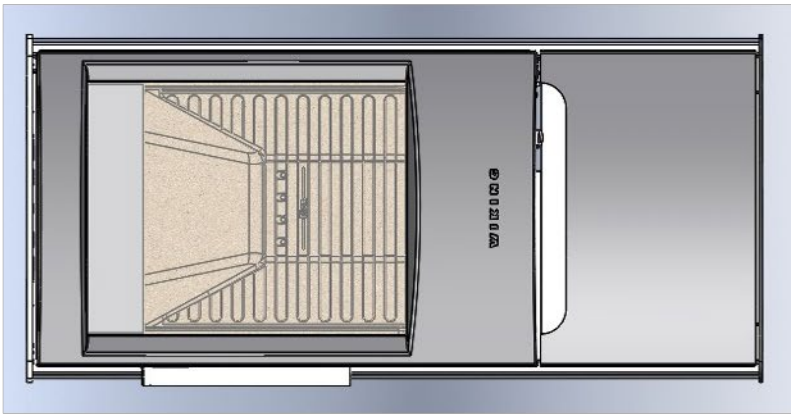
Bilag 4 Træk som funktion af skorstenslængden ved 12 Pa

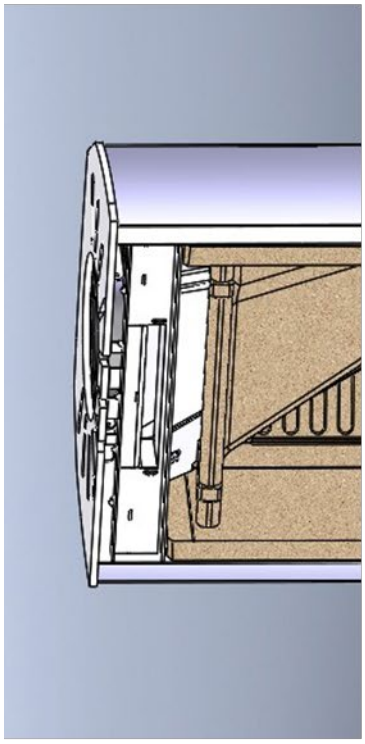


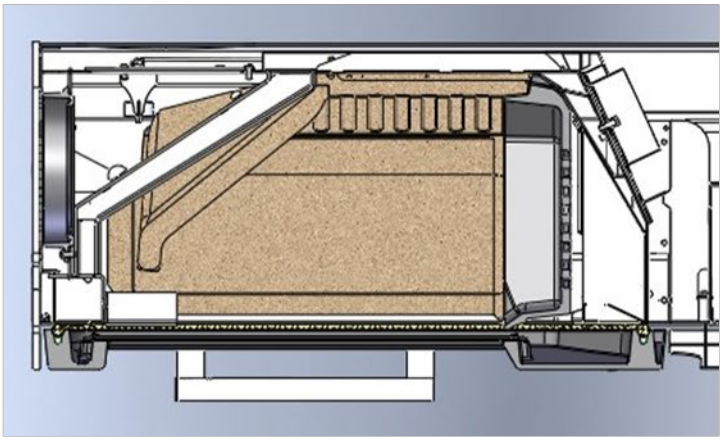
Bilag 5 Tegninger af ovne

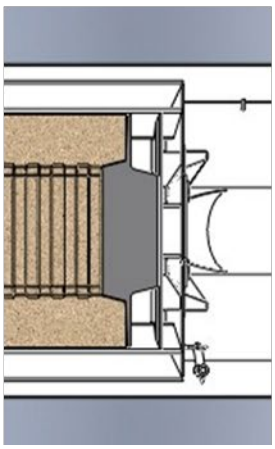


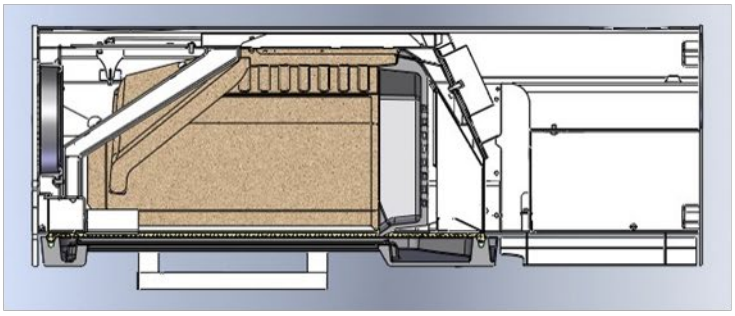




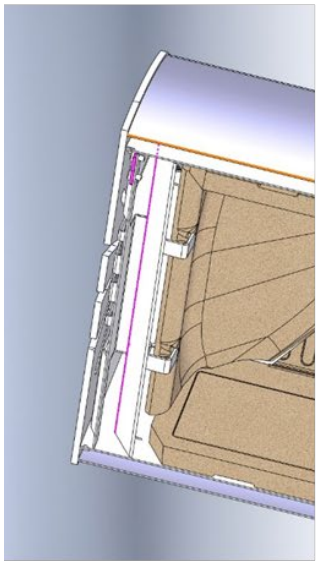


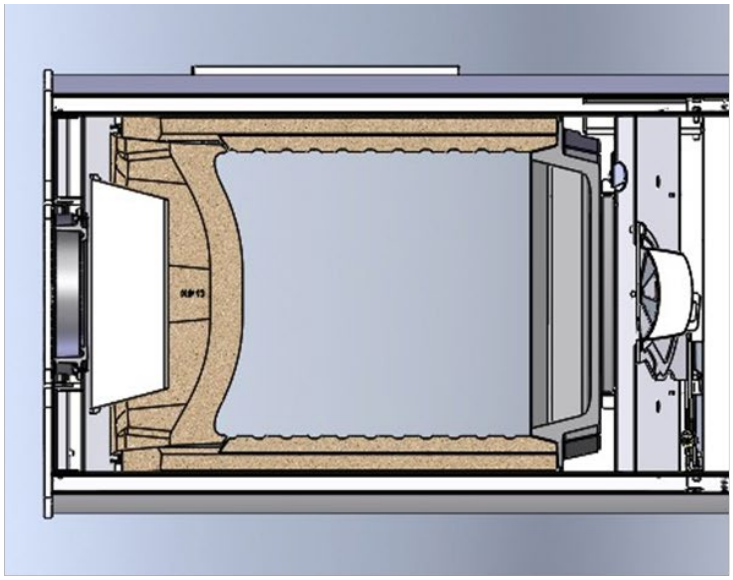


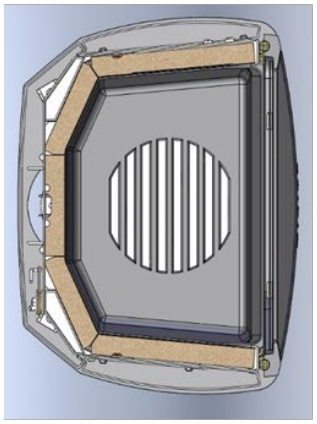


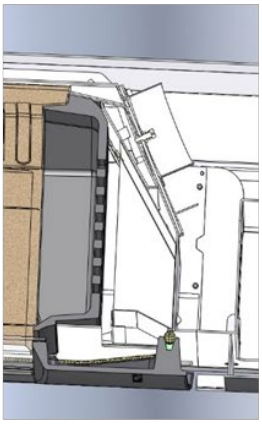


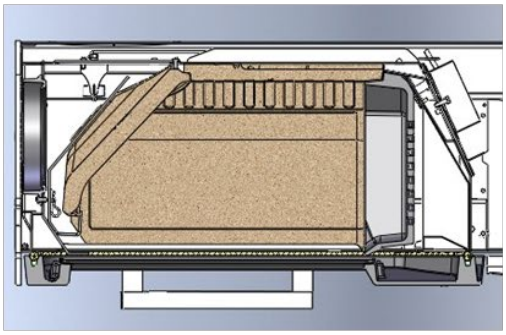
Tegninger af ny ovn

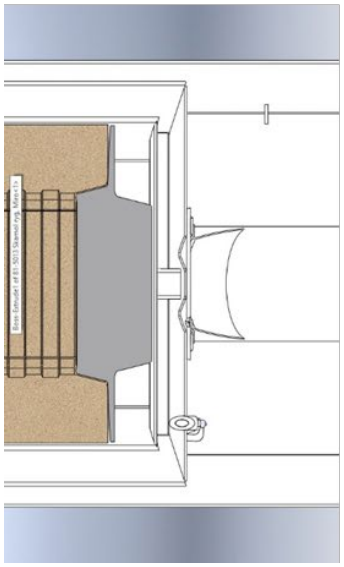


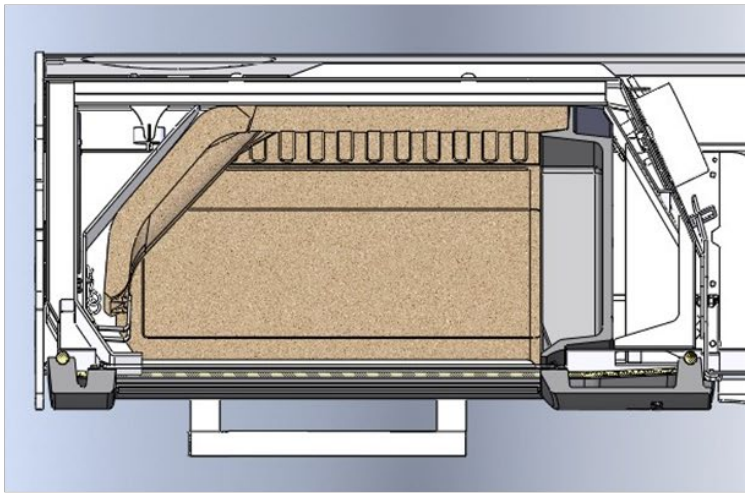












Tegninger af gammel ovn før ændringer

Luftoptimeret brændeovn

Projektet havde som hovedformål at optimere lufttilførslen i brændeovne for at sikre en ren forbrænding. Der er udviklet måle- og beregningsværktøjer til at vurdere brændeovnes dimensionering af luftsystemer, med henblik på at foreslå designændringer. Yderligere er der målt på fysiske modulsystemer til simulering af indbyggede luftkanaler. Ved studier af to ældre ovne og en moderne ovn, er det fundet at de to ældre ovne er begrænset på luftsystemerne i henhold til det udviklede værktøj. Dette bekræftes af forbrændingstests. Luftsystemet i en ny ovn blev udviklet, med udgangspunkt i en ældre brændeovn. Efterfølgende tests viste, at en optimering af luftsystemet ikke er tilstrækkeligt i sig selv, men at også brændkammeret skal optimeres.

Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk