

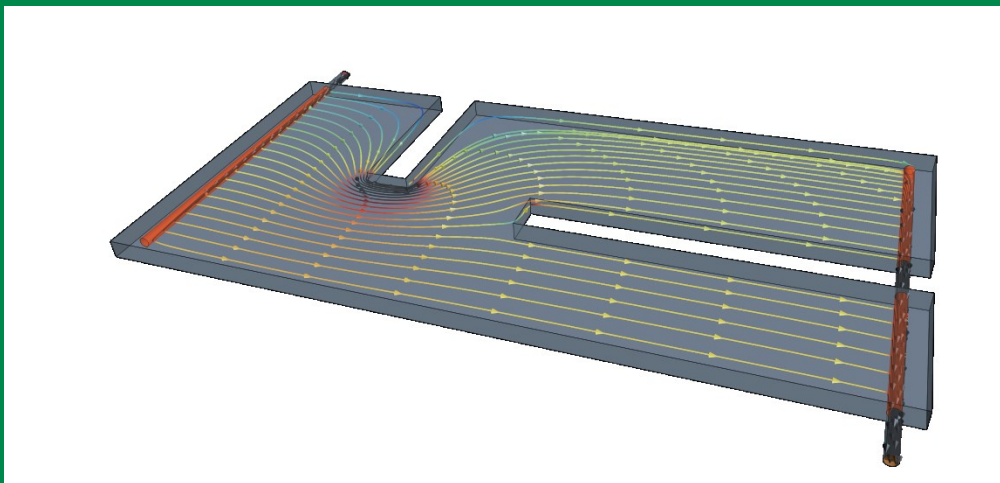


Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

CFD-modellering af balanceret ventilation i kapillarbrydende lag

Miljøprojekt nr. 2028

Juli 2018



Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Hans Bengtsson, Jakob Skovsgaard
og Daniel Plesner (Rambøll)

ISBN: 978-87-93710-51-1

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.	Indledning	4
1.1	Baggrund	4
1.2	Formål	4
2.	Valg af software	5
3.	Modelleringscases og parametre	7
4.	Resultater	9
4.1	Indledende bemærkninger	9
4.1.1	Drænkonfiguration - orientering og placering af dræn	9
4.1.2	Kvadratiske interne fundamenter	12
4.1.3	Trapez- og parallelogramformede fundamenter	15
4.1.4	L-formede fundamenter	17
4.1.5	Delvist gennemgående interne fundamenter	20
4.1.6	Variierende permeabilitet i det kapillarbrydende lag	24
5.	Vurdering og anbefalinger	27
5.1	Anbefalinger	28
6.	Referencer	30

1. Indledning

1.1 Baggrund

Balanceret ventilation i kapillarbrydende lag under gulve etableres i dag på mange forurenede lokaliteter for at sikre indeklimaet i bygninger mod påvirkning fra underliggende flygtig forurening. Ventilationsløsningerne kan både være aktive (dvs. f.eks. mekanisk drevet af ventilatorer) eller passive (drevet ved den relative trykforskel, der genereres af vindpåvirkningen på selve bygningen). Ved anvendelse af et gaspermeabelt medie (ventilationslag af singels/leca m.m.) og dræn opnås der mulighed for at styre luftstrømmen under gulv. Ved korrekt dimensionering er det muligt at opnå et passende luftskifte under gulv, og ligeledes bør det sikres, at selv hjørner og kroge af det kapillarbrydende lag dækkes. Luftens bevægelse under gulv i mere komplekse bygningsgeometrier lader sig dog vanskeligt bestemme i praksis.

Der er de senere år opstået en stigende interesse for at udvikle bedre metoder til projektering og dokumentation af ventilationsløsninger til sikring af indeklimaet i bygninger på forurenede grunde. Modellering af ventilationseffekten i det kapillarbrydende lag ved forskellige ventilationsløsninger vurderes at kunne bidrage med vigtig viden, som ikke kan opnås på anden vis. I den forbindelse har Region Hovedstaden udført et indledende studie /1/ til undersøgelse af potentialet for anvendelse af forskellige modelleringsværktøjer ved dimensionering af ventilationsløsninger under gulve. Projektet blev gennemført ved finansiering fra både Region Hovedstaden og Rambølls Videns & Innovationspulje. Dette studie havde til formål at levere "proof of concept" og omfattede alene test af en simpel geometri i en rektangulær flowcelle. Studiet viste:

- at både CFD-modellering (Computational Fluid Dynamics) og modellering med Air3D freeware kan levere en grafisk præsentation af data for tryktab, flow og luftskifte i et kapillarbrydende lag, og at begge programmer kan bidrage med en detaljeret beskrivelse af effekten af balancerede ventilationssystemer under gulv, som ikke kan opnås på anden vis
- at CFD-modelleringen kan præsentere resultaterne med en større detaljegråd end Air3D, og at CFD udgør et mere avanceret og fleksibelt analyseværktøj
- at udviklingen af et modelbaseret dimensioneringskoncept i væsentlig grad vil kunne sikre bedre anlæg i fremtiden og kan bidrage til at reducere antallet af fejl dimensionerede anlæg

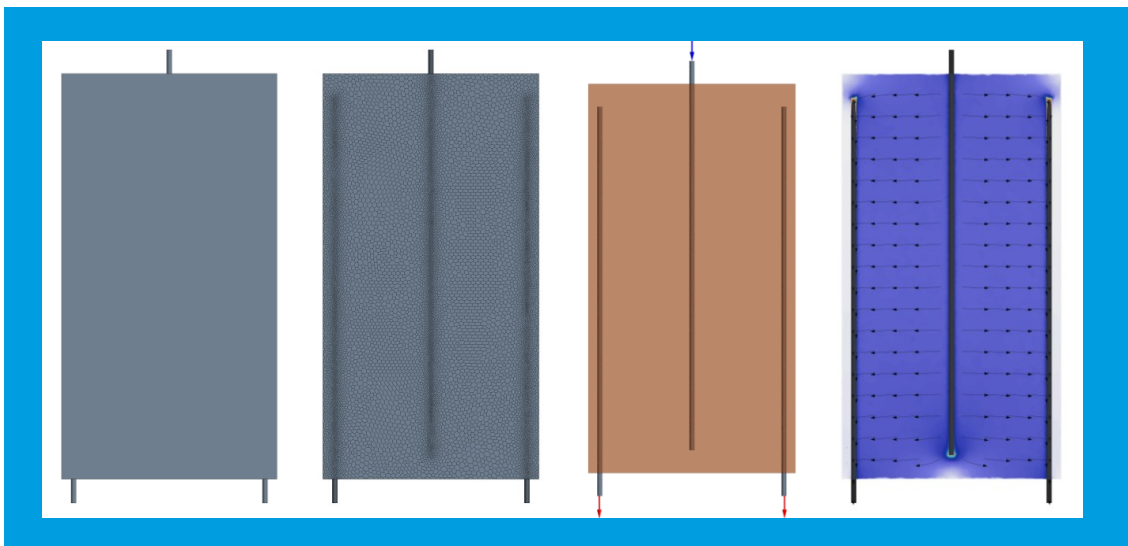
1.2 Formål

Formålet med nærværende projekt er, at bygge videre på det indledende studie /1/, og at identificere og beskrive kritiske parametre ved design af ventilationssystemer under gulve i bygninger med mere komplekse geometrier og sektionsinddelinger. Det er desuden formålet at identificere og beskrive generelle principper og retningslinjer for design og etablering af effektive ventilationssystemer i forskellige mere komplekse geometrier.

2. Valg af software

CFD-modelleringen har i de indledende studier vist sig velegnet til at præsentere resultater af modelleringsforsøg for ventilation i kapillarbrydende lag med en stor detaljegrad. CFD-modellering er derfor valgt til at udføre forsøg med mere komplekse geometrier.

Computational Fluid Dynamics (CFD) er en simuleringsmetode, hvorved ligningerne, der beskriver fluidstrømninger, løses numerisk i et beregningsnet. Til dette projekt er programmet Star-CCM+ v. 12.04 valgt. Programmet er udviklet til generel brug og kan bruges til en lang række både simple og komplekse flowmæssige problemstillinger herunder luft- og vandstrømning, forbrænding, flerfase strømninger m.m. Det er op til operatøren at vælge den relevante fysik, som skal modelleres, og derved skabe modellen, der beskriver den ønskede problemstilling med en given kompleksitet. Opsætning af beregningsmodellerne består typisk af fem trin: geometrisk definering, netgenerering, valg af fysik og randbetingelser, samt beregning, efterbehandling og visualisering af data. En grafisk visning af denne proces er illustreret i figur 1, der viser processen fra en 3D CAD-geometri til en visualisering af simuleringsresultatet.



FIGUR 1. Grafisk visning af geometri, beregningsnet, randbetingelser og resultat

Til modellering af ventilationen i kapillarbrydende lag, bruges en simpel inkompressibel laminar flowmodel. Tryktabet i det kapillarbrydende lag modelleres som et porøst medie påtrykt modstandskoefficienterne ved:

$$\frac{\Delta P}{L} = (P_i |v| + P_v) v$$

hvor $\Delta P/L$ er tryktabet pr. længdeenhed, v er luftens hastighed uden det porøse medie, og P_i og P_v er koefficienter, der beskriver tryktabet som funktion af hastigheden. Disse koefficienter kan frembringes ud fra målinger eller eksisterende empiriske formler. I dette tilfælde er Darcy's lov anvendt, som modellerer tryktabet lineært med hastigheden ved:

$$Q = \frac{\kappa A \Delta P}{\mu L} \Leftrightarrow \frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa} v \quad \Rightarrow \quad P_i = 0, \quad P_v = \frac{\mu}{\kappa}$$

hvor κ er mediets permeabilitet, μ er luftens dynamiske viskositet, A er flowarealet og Q er volumenstrømmen. Idet strømmingen er laminar, er brugen af en lineær model for tryktab tilstrækkelig.

Til visualisering og vurdering af ventilationen vises tre relevante størrelser for ventilationen; hastigheden, luftskiftet samt det statiske tryk. Lufthastigheden giver informationer om fordelingen af luften i mediet samt retningen på flowet. Det forventes, at områder med en relativ lav hastighed vil have en større koncentration af forureningskilden (forudsat at forureningsfluxen lodret op i ventilationslaget er ensartet/homogen). Luftskiftet beregnes ud fra den inverse af opholdstiden for luften. Denne giver et billede af forventede relative koncentration af forurening i mediet, givet en jævn fordelt forureningskilde. Trykket giver information om modstanden i det porøse lag, og hvor stor en trykdifferens, der er påkrævet for at opnå det ønskede flow.

3. Modelleringscases og parametre

I forbindelse med det indledende studie /1/ er der identificeret en række parametre, som vurderes at kunne have betydning for luftens strømning i det kapillarbrydende lag. Det primære fokus i nærværende studie er at undersøge parameteren "Geometri og forhindringer", dvs. betydningen af flowcellens form, samt tilstedeværelsen af eksempelvis skorstensfundamenter/elevatorskakte m.m. Der er foretaget CFD-modellering af luftstrømning i flere forskellige former af flowceller, som alle repræsenterer mere komplekse geometriske former på bygninger og fundamentsinddelinger så som tværfundamenter, fundamenter til trappe- eller elevatorskakte, skorsten mv. De forskellige modelleringsforsøg er beskrevet i en række cases som fremgår af oversigten i tabel 1.

TABEL 1. Oversigt over undersøgte parametre og modelleringsforsøg

Parameter	Beskrivelse	Modellerings-case
Drænkonfiguration	Drænenes orientering og indbyrdes placering i flowcellen	1.1 – 1.4
Geometri	Rektangulært fundament med et kvadratisk, internt fundament	2.1 – 2.5
Geometri	Trapez- og parallelogramformede fundament uden interne fundamenter	3.1 – 3.3
Geometri	L-formet fundament uden interne fundamenter	4.1 – 4.3
Geometri	Rektangulært fundament med 2 delvist gennemgående interne fundamenter	5.1 – 5.5
Geometri og permeabilitet	Rektangulært fundament med et kvadratisk, internt fundament, varierende permeabilitet i kapillarbrydende lag	2.2*

*: Case 2.2 med varierende permeabilitet i det kapillarbrydende lag

Indledningsvis er der foretaget modellering med en rektangulær geometri for at illustrere nogle grundlæggende principper. Derefter er der foretaget modellering med mere komplekse geometrier med forskellige drænkonfigurationer, dvs. det mønster drænene lægges med i flowcellerne. Der er desuden udført modelleringsforsøg med varierende permeabilitet i det kapillarbrydende lag i kombination med interne fundamenter i flowcellen. Dette er gjort for at afdække betydningen af den varierende modstand i det porøse medie i forhold til ønsket om at opnå forbedret strømning.

Drivtryk i passive ventilationssystemer baseret på vind ligger erfaringsmæssigt på 0 – 5 Pa. I forhold til dimensionering af passive ventilationssystemer, så anbefales det at anvende et luftskifte, der giver anledning til en samlet modstand i mellem luftindtag og luftafkast på mellem 1 og 2 Pa /2/. De anvendte værdier og dimensioner i modelforsøgene er valgt således, at modstanden i det porøse medie som udgangspunkt er ca. 3 Pa. Modstanden i mediet varierer dog fra case til case alt efter de testbetingelser der arbejdes ud fra. Der er i de opstillede modelleringsseksempler set bort fra tryktab i rør og dræn.

Modelleringscasen består, som udgangspunkt, af et rektangulært fundament med en længde på 8,5 m og en bredde på 4,5 m. I beregningerne er den samlede flowmængde fastholdt til 11 m³/t, med mindre andet er angivet.

Flowcellerne i de anvendte modelleringscases beskriver ventilationssystemer under gulv, som er opbygget efter principperne for balanceret ventilation, dvs. med både luftindtag og luftudtag.

En flowcelle er her defineret som en sektion af det kapillarbrydende lag, hvor der sker strømning af luft mellem to dræn. Består ventilationssystemet af mere end to dræn (dvs. et indløbsdræn og et udløbsdræn) vil der således være tale om mere end én flowcelle. I en række af de undersøgte cases består ventilationssystemet f.eks. af to sammenhængende flowceller med udløbsdræn i siderne og et fælles indløbsdræn i midten.

Hver flowcelle er, som udgangspunkt, opbygget med parallelle dræn. Drænkonfigurationerne er dog tilpasset iht. kompleksiteten af de forskellige geometrier. Drænrørene er forbundet med luftindtag og udsugning/afkast på ydersiden af bygningen. Der ventileres med en ydelse (flow) på $11 \text{ m}^3/\text{t}$. I flowceller med to luftindtag er luften fordelt med $5,5 \text{ m}^3/\text{t}$ i hvert dræn.

Som standard er hver flowcelle, som udgangspunkt, defineret ved følgende:

- Flowmængde = $11 \text{ m}^3/\text{t}$
- Længde og bredde = $8,5 \times 4,5 \text{ meter} = 38,25 \text{ m}^2$ (indvendige mål)
- Højde = $0,2 \text{ meter}$
- Schmidt tal = $0,7$
- Permeabilitet = $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ (svarende til permeabiliteten for LECA)
- Længde af dræn = 8 m
- Afstand mellem dræn = 4 m

Idet beregningen af opholdstiden i det porøse lag indeholder diffusion, er diffusionskoefficienten beregnet ud fra et givent Schmidt tal. Schmidt tallet er et dimensionsløst tal der beskriver forholdet mellem momentum diffusivitet og molekylær diffusivitet. Schmidt tallet er defineret som:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

hvor μ er dynamiske viskositet, ρ er densiteten og D diffusionskoefficienten. Eventuelle afvigelser fra standardopbygningen af flowcellerne fremgår af de enkelte cases. For Trapezformede og nogle af de L-formede geometrier afviger længden af flowcellen fra standardopbygningen. Ligeledes afviger permeabiliteten fra standardværdien $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ i de modelleringsforsøg, hvor betydningen af variation i permeabiliteten er undersøgt.

4. Resultater

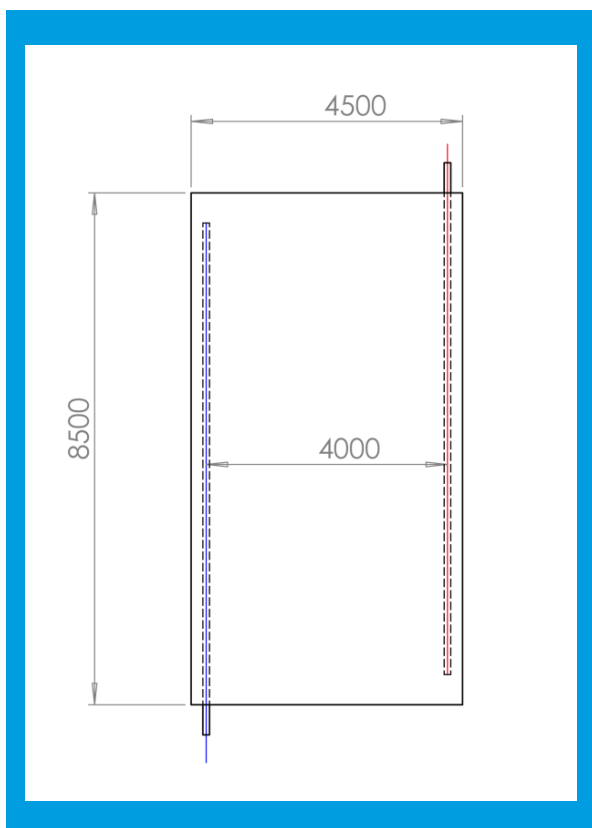
4.1 Indledende bemærkninger

I det følgende præsenteres resultaterne af modelkørsler for CFD-modellering for de enkelte modelcases. Det er i projektet tilstræbt, at input i størst muligt omfang er ens for de forskellige cases for at give det bedst mulige sammenligningsgrundlag.

Resultaterne fremgår af figurerne i dette kapitel vist med tre relevante størrelser for ventilationen; lufthastigheden, luftskiftet samt udbredelsen af det statiske tryk i cellen. Lufthastigheden giver informationer om fordelingen af luften i mediet samt retningen på flowet. Luftskiftet (Air Change Per Hour) angiver luftens "alder" i cellen. Blå nuancer viser den luft, der har været kortest tid i cellen mens røde nuancer angiver luft, der har været længst tid i cellen. I en forureningssammenhæng vil dette svare til, at blå repræsenterer den reneste luft (dvs. typisk atmosfærisk luft, som trækkes in via luftindtagsdræn), medens rød repræsenterer den luft, der indeholder mest forurening (forudsat, at der er en ensartet flux ind i cellen). Trykket giver information om modstanden i det porøse lag, og hvor stor en trykdifferens, der kræves for at drive det ønskede flow.

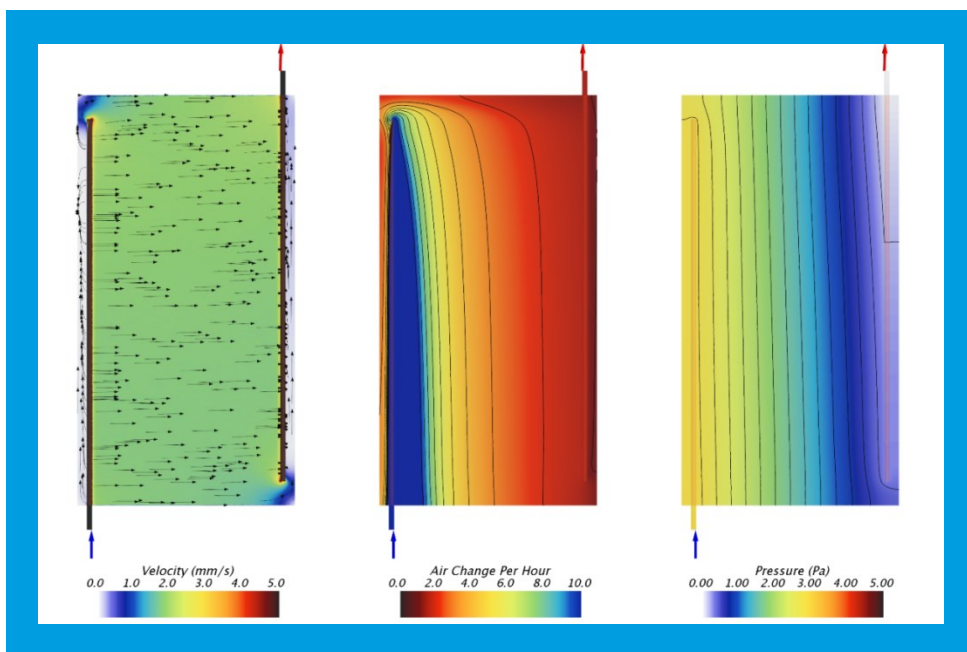
4.1.1 Drænkonfiguration - orientering og placering af dræn

Indledningsvis er det undersøgt, hvorvidt drænenes orientering har betydning for ventilation og flowfordeling. Der er foretaget modelleringsforsøg med en simpel rektangulær flowcelle som vist i figur 2.

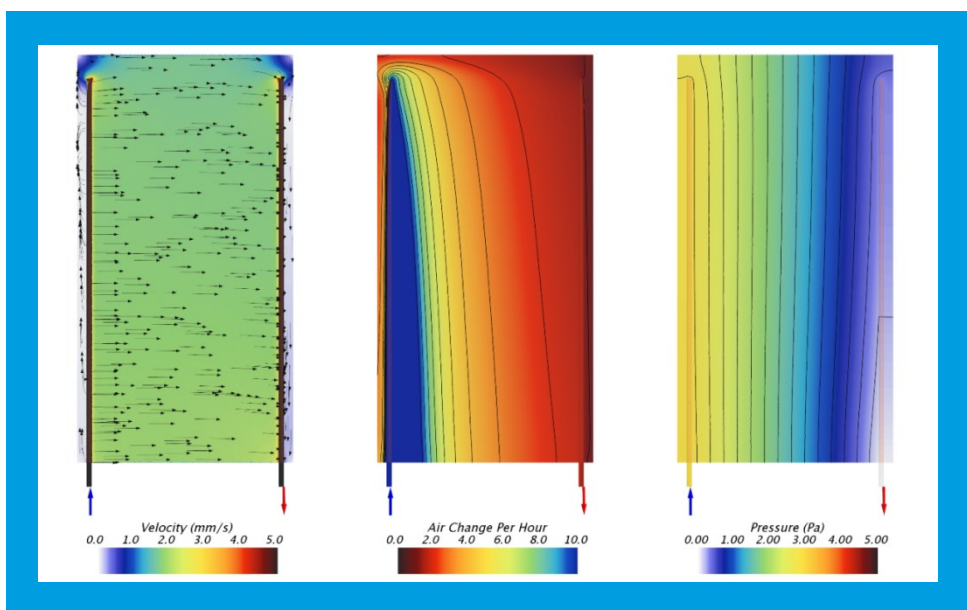


FIGUR 2. Principskitse for opbygning af rektangulær flowcelle

Resultaterne af modelleringsforsøgene fremgår af figur 3 – 4. Resultaterne viser, at der ingen nævneværdig forskel er på fordelingen af lufthastighed, luftskifte og tryk i flowceller, hvor dræ-
nene udgår hhv. fra modsatte side (case 1.1) og fra samme side af fundamentet (case 1.2).
Det ses, at der i begge tilfælde opnås en jævnt fordelt lufthastighed (Velocity) i hele flowcellen.
Luftskiftet (Air Change Per Hour) viser, at der opnås næsten samme fordeling på tværs af
flowcellen i hele cellens længde. Ligeledes ses det, at trykfordelingen (Pressure) har næsten
samme fordeling på tværs af flowcellen i hele cellens længde. I beregningerne påtrykkes en
statisk trykforskel på ca. 2 Pa, for at opnå det valgte flow på 11 m³/t. Trykket på ca. 2 Pa sva-
rer til den størrelsesorden af drivtryk, der kan forventes ved passiv ventilation baseret på vind,
og de forskellige modelleringscases viser således et realistisk billede, af hvad der kan opnås
for passive ventilationssystemer.

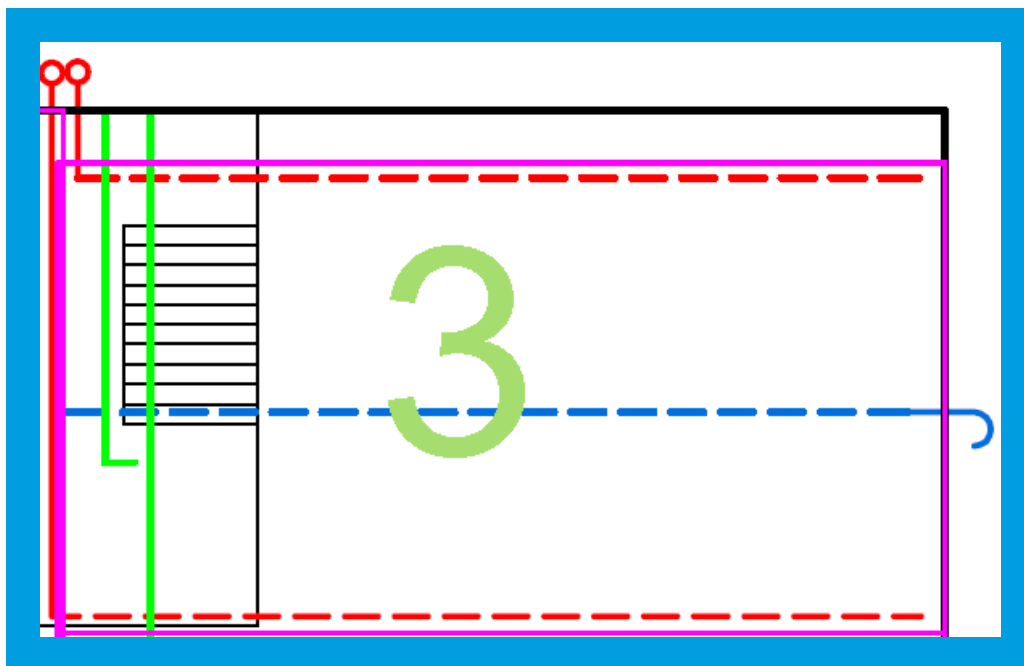


FIGUR 3. Case 1.1



FIGUR 4. Case 1.2

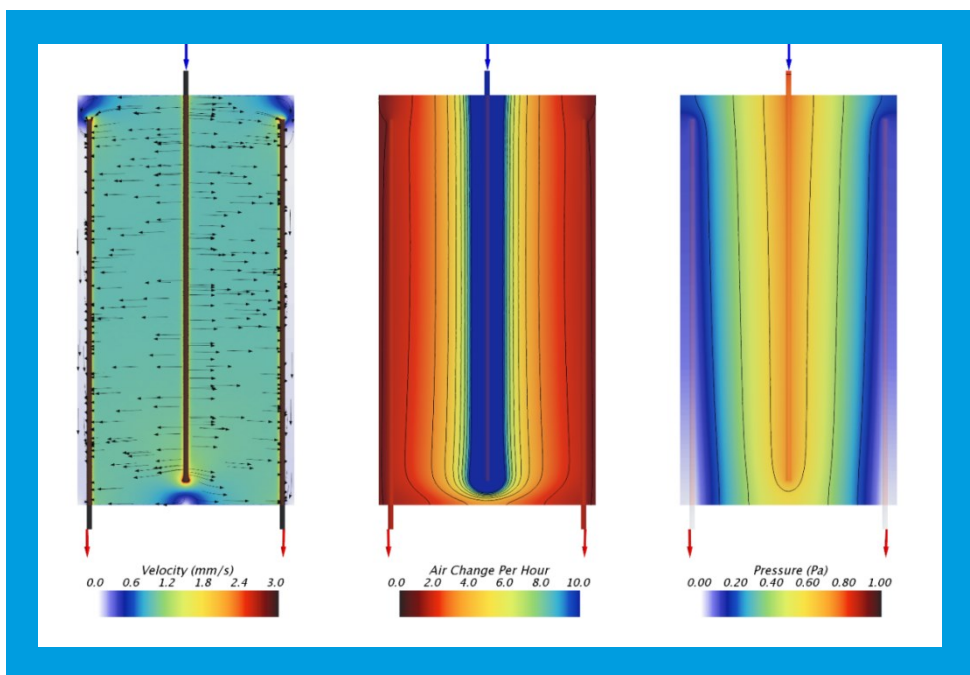
Case 1.3 viser resultatet for et ventilationssystem, hvor tilførslen af luft til flowcellen sker med et dræn placeret ned midt i cellen, og hvor luften ledes ud gennem dræn i hver side af cellen. Princippet for flowcellen er vist i figur 5.



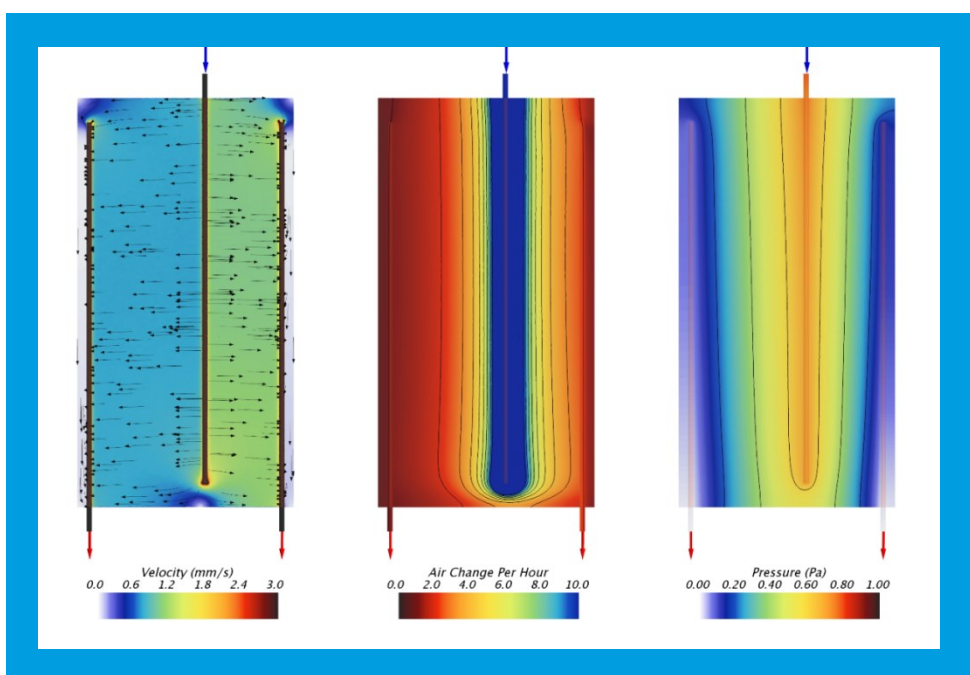
FIGUR 5. Case 1.3. Lufttilførslen sker gennem drænet placeret ned midt i cellen (stiplet blå) og luften ledes ud gennem dræn i hver side af cellen (stiplet rød). Afgrænsningen af flowcellen er vist med pink linje. Prøvetagnings slanger er vist med grønne linjer

I case 1.4 er det undersøgt, hvorledes flowet ændres ved en parallelforskydning af indløbsdrænet. Drænet er forskudt 20 % til højre (0,4 m). Sammenlignet med case 1.3 medfører forskydningen af drænet en skævdeling af luftens fordeling i cellen. Således opnås en højere hastighed og et bedre luftskifte i højre side af cellen, hvor afstanden mellem drænene er mindst.

Studiet af drænkonfigurationernes orientering og placering (case 1.1 – 1.4) viser, at luthastigheden afhænger af afstanden mellem drænene, mens lufthastigheden ikke i væsentlig grad afhænger af orienteringen af drænenes ind- og udløb.



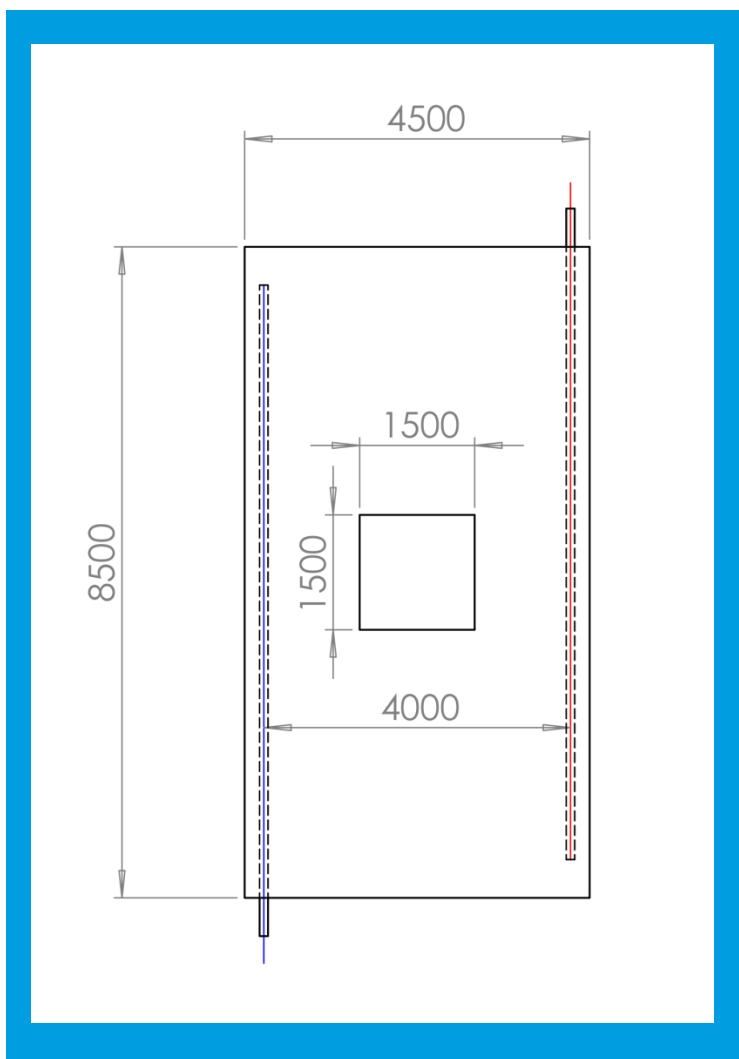
FIGUR 6. Case 1.3



FIGUR 7. Case 1.4. Flowcelle med indløbsdrænet forskudt 20% mod højre

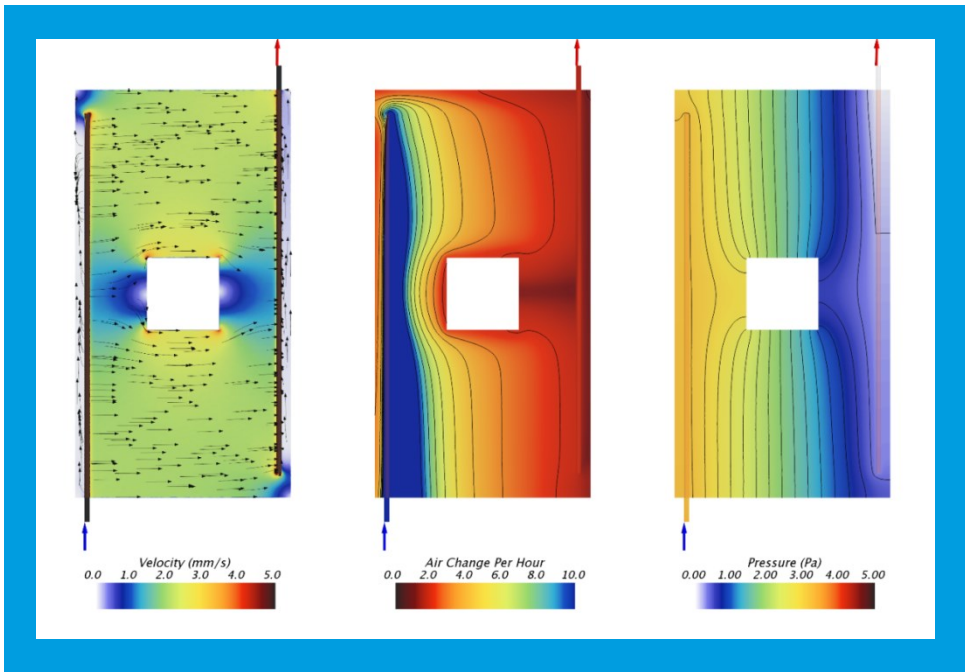
4.1.2 Kvadratiske interne fundament

I case 2.1 – 2.5 er det undersøgt, hvorledes kvadratiske fundament i en rektangulær flowcelle påvirker flowmønstret. Der er foretaget undersøgelser med et rektangulært internt fundament på 1,5x1,5 m (1/3 af fundamentbredden) med forskellige placeringer i cellen. Princippet for opbygning af flowcellen er vist i figur 8.



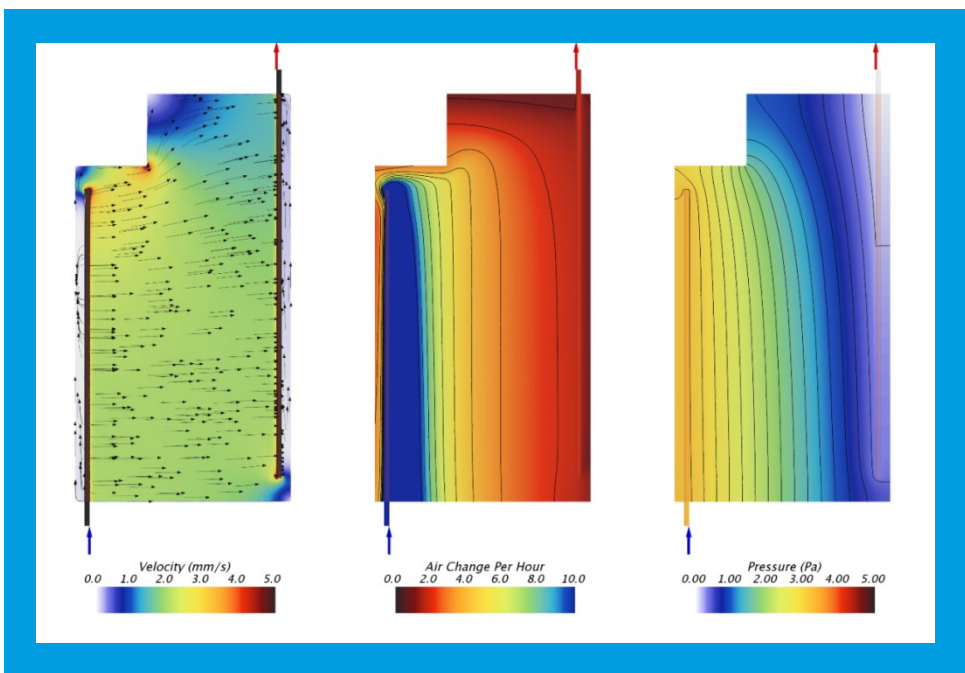
FIGUR 8. Principskitse for opbygning af rektangulær flowcelle med internt kvadratisk fundament

Resultaterne fremgår af figur 9 – 11. Resultaterne for case 2.1, hvor fundamentet er placeret centralt i cellen viser, at lufthastigheden både på forsiden og bagsiden af fundamentet er lavere end i den øvrige del af cellen. Hastighedsplottet viser, at luften står næsten stille både foran og bagved fundamentet. Luftskiftet (Air Change Per Hour) ses dog at være væsentligt højere på forsiden end på bagsiden. Dette skyldes, at luften på forsiden har en forholdsvis lav "alder" i modsætning til luften bag på fundamentet. Således bidrager det interne fundament primært til et forringet luftskifte på bagsiden af fundamentet og i et smalt bælte rundt om hele fundamentet.



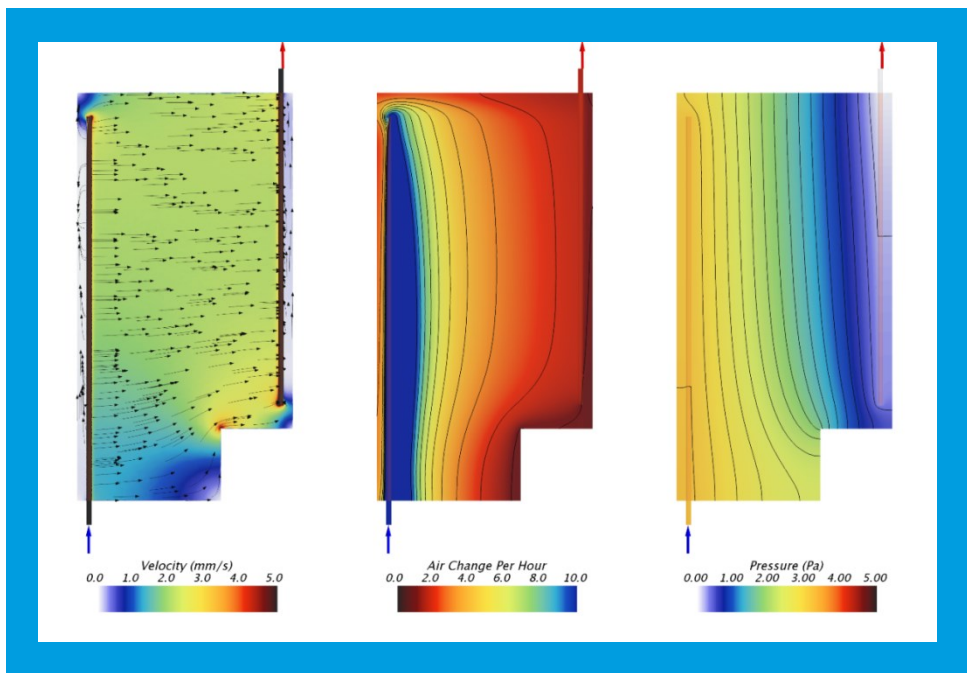
FIGUR 9. Case 2.1

I case 2.2 er fundamentet placeret i hjørnet ved indløbsdrænet. Her opstår der et område med lavere lufthastighed i hjørnet på bagsiden af fundamentet og herfra langs væggen hen til udløbsdrænet. I disse områder ses også luftskiftet at være lavt. Luftskiftet er her på samme niveau som ved udløbsdrænet.



FIGUR 10. Case 2.2

Placeres fundamentet i hjørnet ved udløbsdrænet, som vist i case 2.3, opstår der et område mellem indløbsdrænet og fundamentet med væsentligt lavere lufthastighed og luftskifte end i resten af cellen.



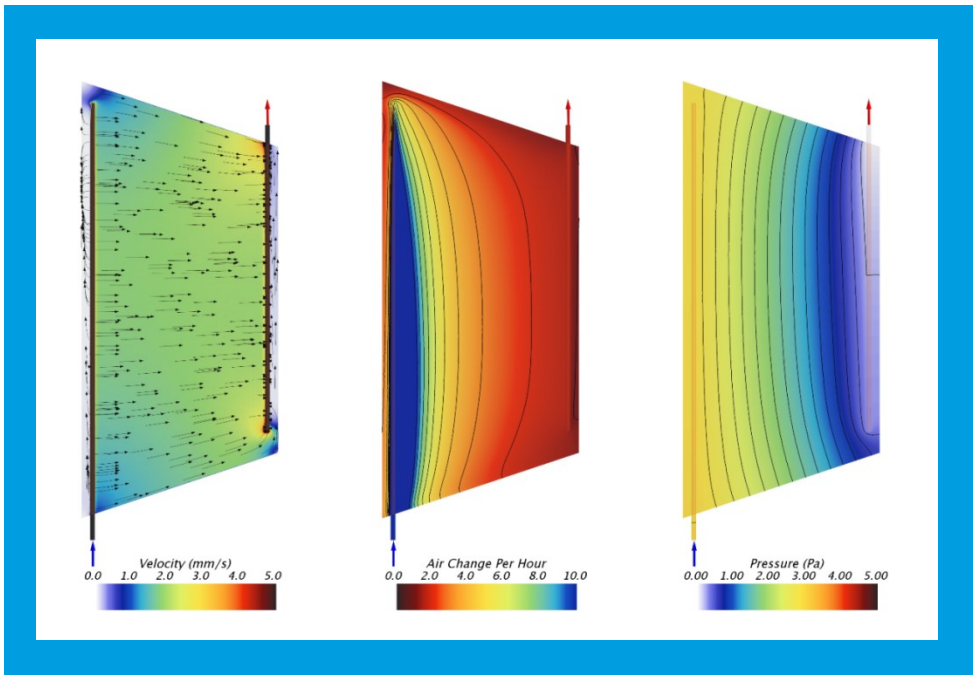
FIGUR 11. Case 2.3

Studiet af de interne, kvadratiske fundamenter (case 2.1 – 2.3) viser, at disse fundamenter har en væsentlig indflydelse på fordelingen af lufthastigheden og luftskiftet i flowcellen, og at fundamentets placering i cellen har betydning for, i hvilket omfang og i hvilke områder påvirkningen af flowmønstret sker.

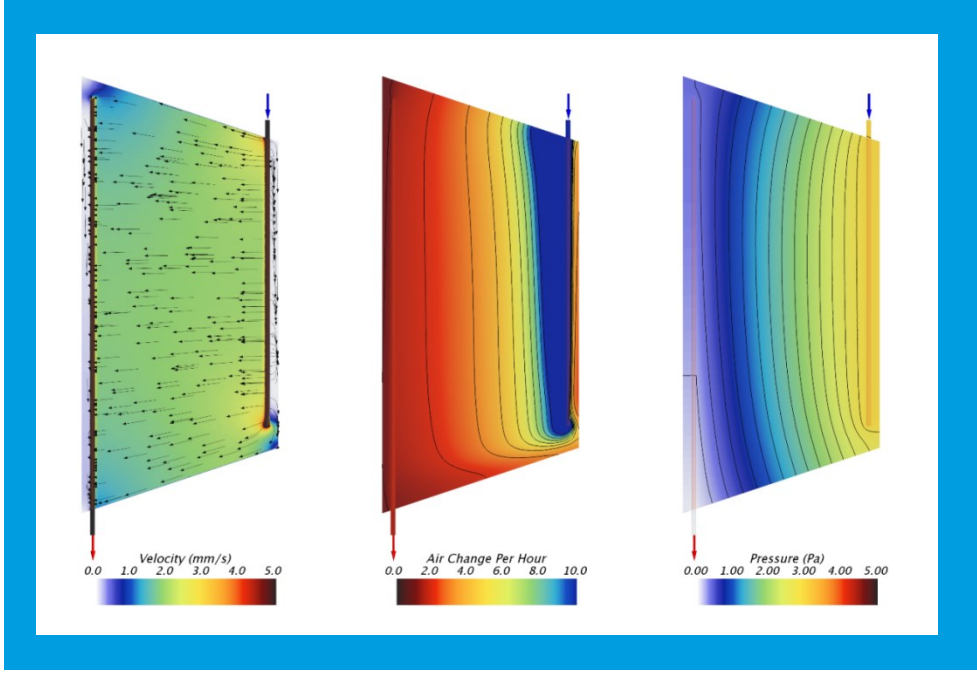
4.1.3 Trapez- og parallelogramformede fundamenter

To alternative fundamentsgeometrier er undersøgt i form af en trapezform og parallelogram. Det trapezformede fundament er genereret således, at det samlede areal er bevaret ift. standardflowcellen. Flowet er dernæst indført i hver sin retning (case 3.1). Resultaterne af modeleringsforsøgene fremgår af figur 12 - 14. Resultaterne viser, at luften har større tendens til at bevæge sig i midten af cellen, hvor afstanden mellem drænene er kortest. Tilfældet med modsatrettet flow (case 3.2) viser et lignende resultat.

De højeste hastigheder observeres i enderne af det korte dræn. I case 3.1 ses dog samme sted de største områder med det laveste luftskifte. Det lave luftskifte ses at brede sig ned langs væggene ved enderne af drænene. Samme tendens ses i case 3.2.



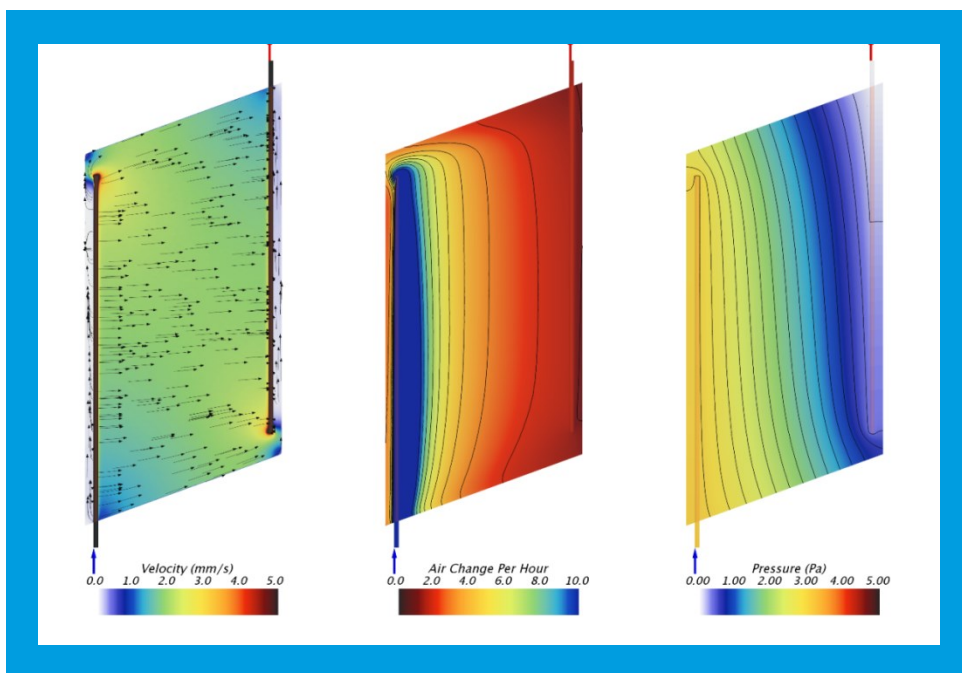
FIGUR 12. Case 3.1



FIGUR 13. Case 3.2

For parallelogrammet vist i case 3.3 ses på samme måde som for trapezet, at luften bevæger sig vandret gennem midten af cellen, hvor afstanden mellem drænene er kortest. Som i trapezet ses det laveste luftskifte at brede sig langs væggene ved enderne af drænene.

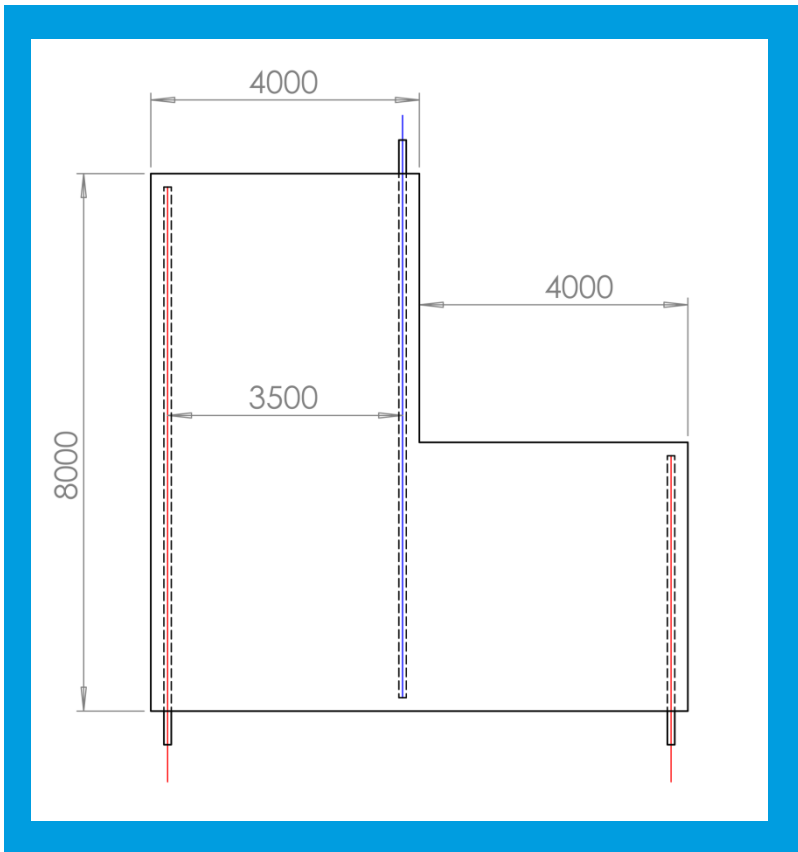
Studiet af trapez- og parallelogramformede flowceller (case 3.2 – 3.3) viser, at skæve vinkler som i trapez- og parallelogramformede flowceller har en væsentlig indflydelse på fordelingen af luft hastigheden og luftskiftet i flowcellen.



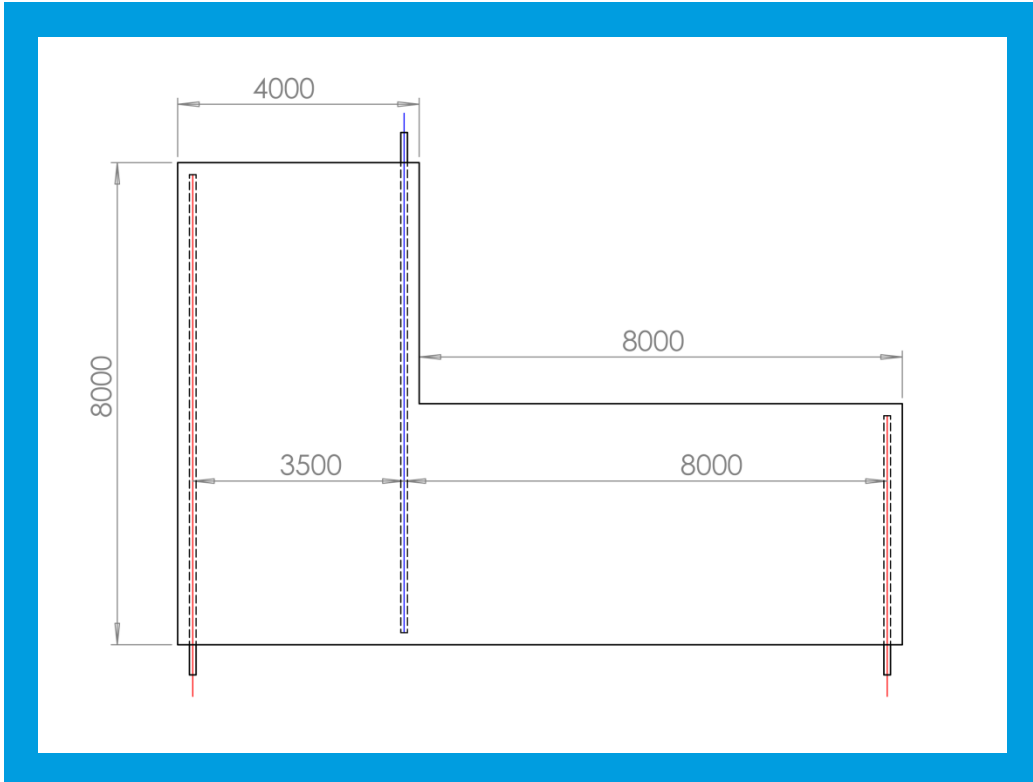
FIGUR 14. Case 3.3

4.1.4 L-formede fundamenter

To forskellige L-formede fundamenter, som begge tager udgangspunkt i opbygningen af standardflowcellen (figur 2), er blevet undersøgt. L-formen i case 4.1 er dannet ved, at tilføjet en ekstra flowcelle med den halve størrelse. I case 4.2 er bredden af det tilstødende fundament ændret til det dobbelte i forhold til case 4.1. Princippet for opbygning af flowcellerne er vist i figur 15 og 16.

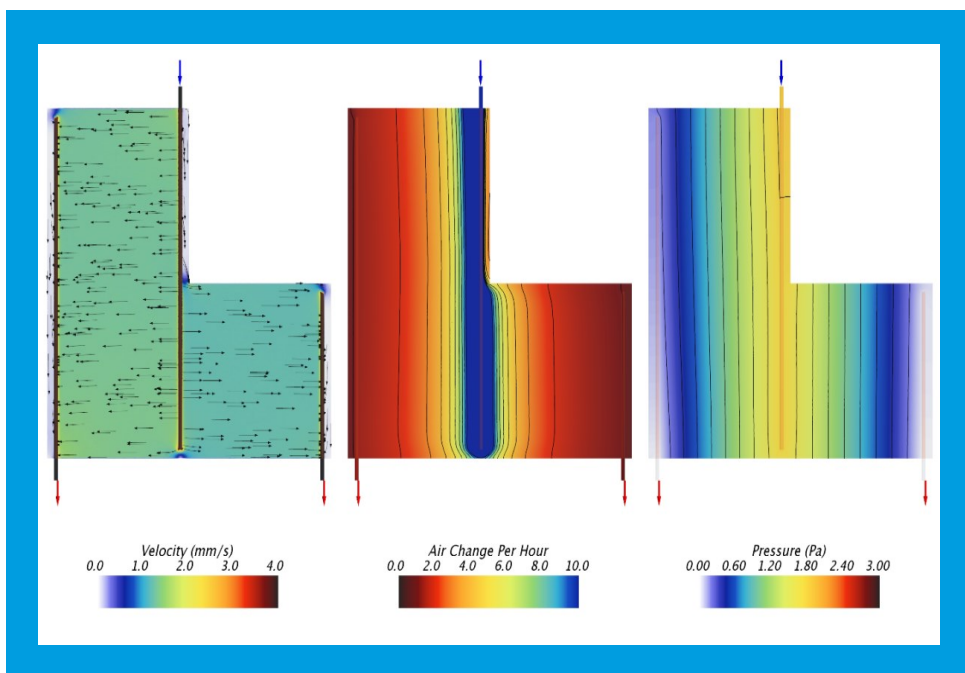


FIGUR 15. Principskitse for opbygning af L-formet flowcelle for case 4.1

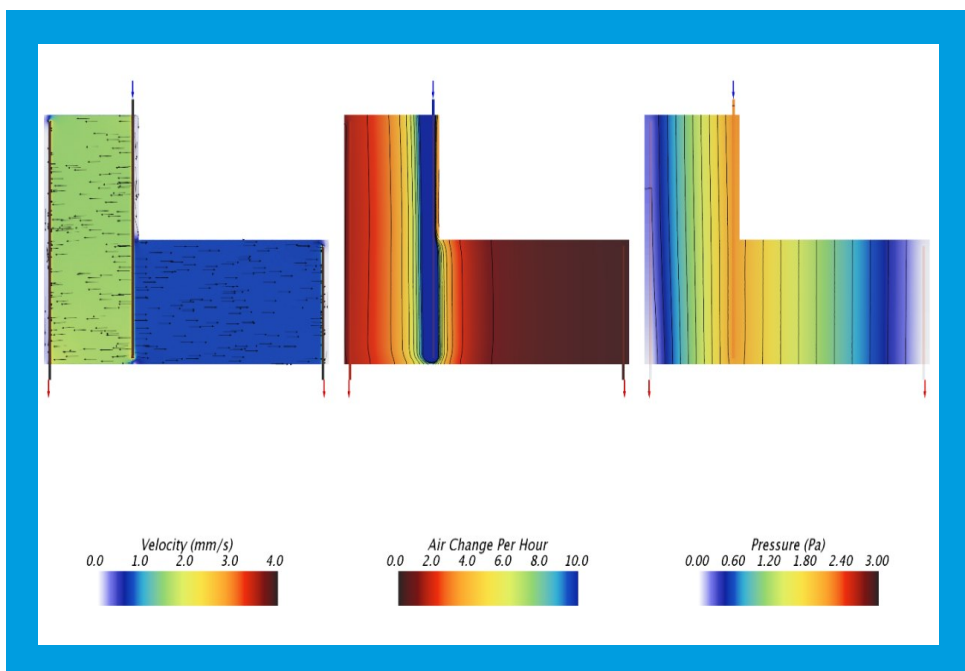


FIGUR 16. Principskitse for opbygning af L-formet flowcelle for case 4.2

Resultaterne fremgår af figur 17-19. Resultaterne for case 4.1 viser en jævn fordeling af luft-hastigheden i L-formen og en ensartet fordeling af luftskiftet. Dette skyldes, at afstanden mellem de tro dræn er ens, hvilket giver en identisk trykmodstand hen gennem cellerne. Forlænges det tilstødende fundament som i case 4.2, falder hastigheden i denne celle, og der opnås et forringet luftskifte.



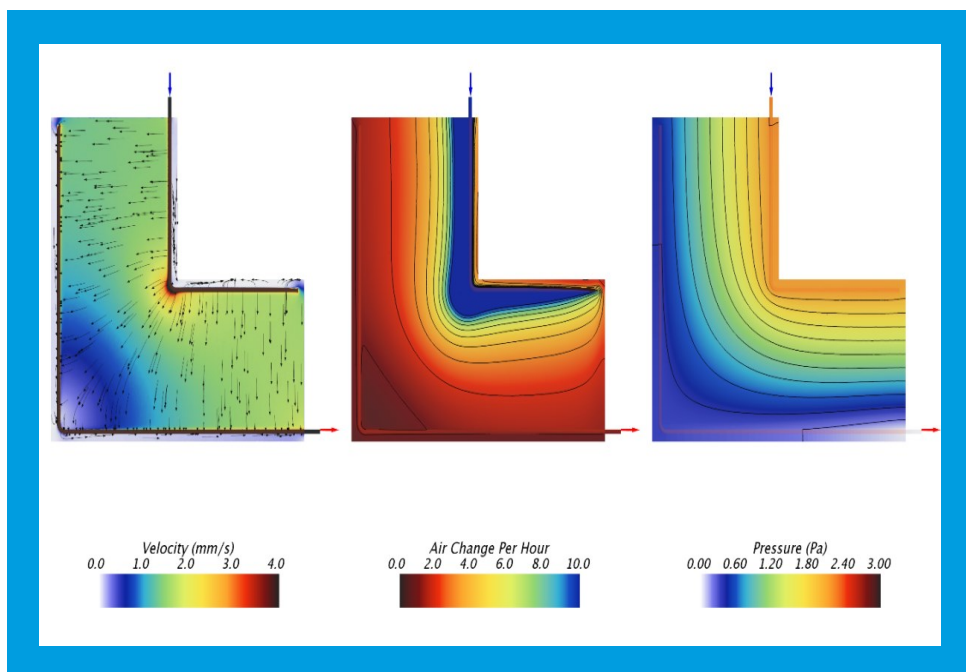
FIGUR 17. Case 4.1



FIGUR 18. Case 4.2

Resultatet ved anvendelse af en alternativ drænløsning er vist i case 4.3 (figur 14). Her følger både ind- og udløbsdrænet L-formen. Med denne drænløsning opstår der en zone med lav ventilation og lavt luftskifte i det nedre venstre hjørne, idet afstanden til indløbsdrænet her er størst.

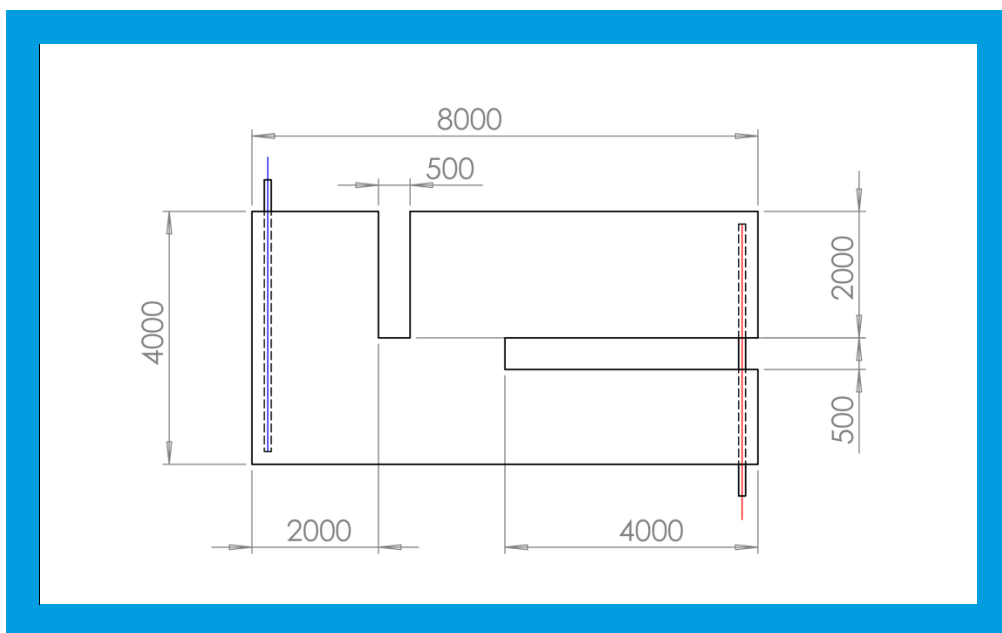
Studierne af L-formede fundamenter (case 4.1 – 4.3) viser, at rette vinkler, som i de L-formede flowceller, ikke i sig selv har indflydelse på fordelingen af lufthastigheden og luftskiftet i flowcellerne, men at afstanden mellem drænene er afgørende for strømningsmønsteret i flowcellerne. Drænkonfigurationen synes mere hensigtsmæssig i case 4.1 og 4.2 end i case 4.3, hvis områder med ingen strømning skal undgås, dog med forbehold for at afstanden (case 4.2) mellem drænene kan blive problematisk.



FIGUR 19. Case 4.3

4.1.5 Delvist gennemgående interne fundamenter

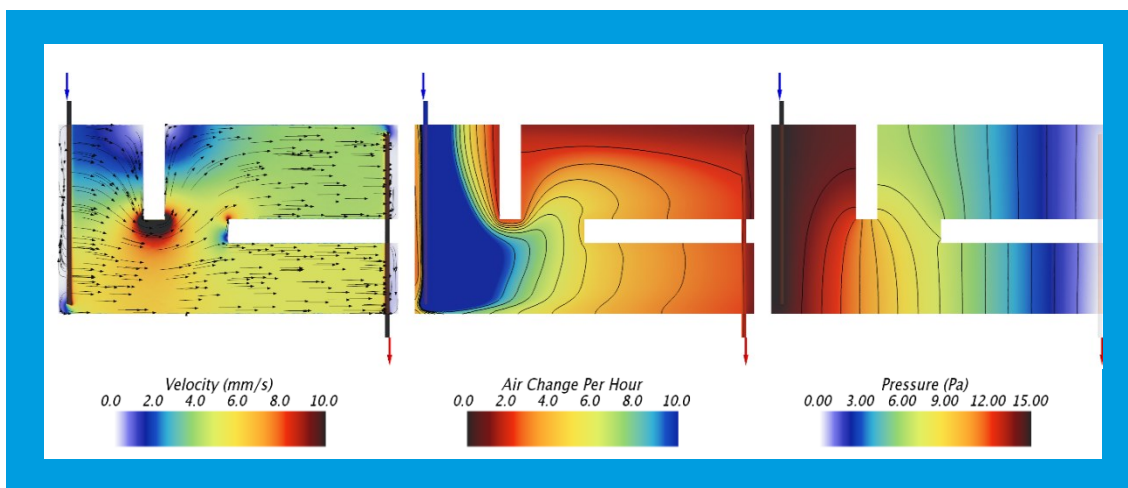
Et rektangulært fundament med to delvist gennemgående interne fundamenter er undersøgt, med varierende drænkonfigurationer. Fundamentet har samme bredde/længde som standard-flowcellen (figur 2), men drænene er lagt ind på tværs af fundamentet. Derudover er der lagt obstruktioner fra delvist gennemgående interne fundamenter ind. Princippet for opbygning af flowcellen er vist i figur 20.



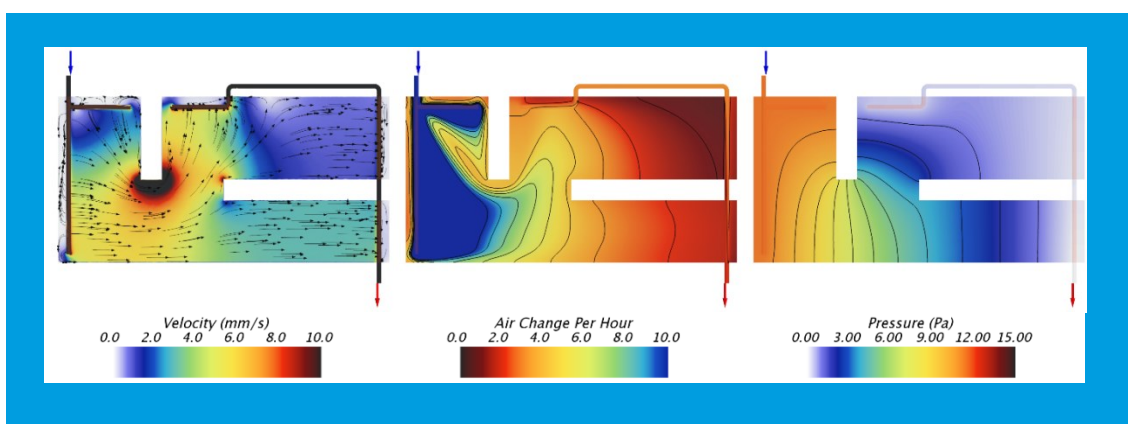
FIGUR 20. Principskitse for opbygning af rektangulær flowcelle med delvist gennemgående interne fundamenter

Resultaterne af modelleringsforsøgene er vist i figur 21-25. Først er konfigurationen undersøgt, hvor drænene er lagt ind i hver ende af flowcellen (case 5.1, figur 21). Det ses af figur 21, at der opstår en væsentlig trykforøgelse ved indløbet sammenlignet med de foregående cases, grundet det mindskede tværsnitsareal i flowretningen. Fordelingen af lufthastigheden i cellen påvirkes også væsentligt af det tværgående fundament, mens det langsgående fundament kun har en mindre betydning for lufthastigheden. Det ses også, at modstanden i obstruktionen medfører, at hastigheden i den nederste del af cellen er højere. Luftsiftet ses ligeledes at påvirkes, idet der opstår et inhomogent luftsifte i cellen med laveste luftsifte i sektionen nedstrøms de to fundamenter (sektionen øverst til højre i flowcellen). Obstruktionen på tværs af flowretningen ses at medføre en opbremsning af luften på både forsiden og bagsiden, som også er observeret tidligere (case 2.2).

En alternativ ventilationsløsning (case 5.2), hvor indløbsdrænet forgrener sig i to dræn inde i fundamentet, og hvor et stykke af udløbsdrænet er lagt op ved siden af det tværgående fundament, er vist i figur 22. Det ses, at udfletningen af indløbsdrænet bidrager til et øget luftsifte i de ellers døde områder omkring det tværgående interne fundament. Det ekstra udløbsdræn på bagsiden af fundamentet bidrager til en lokal øget ventilation, men dette sker dog på bekostning af luftsiftet længere nedstrøms.



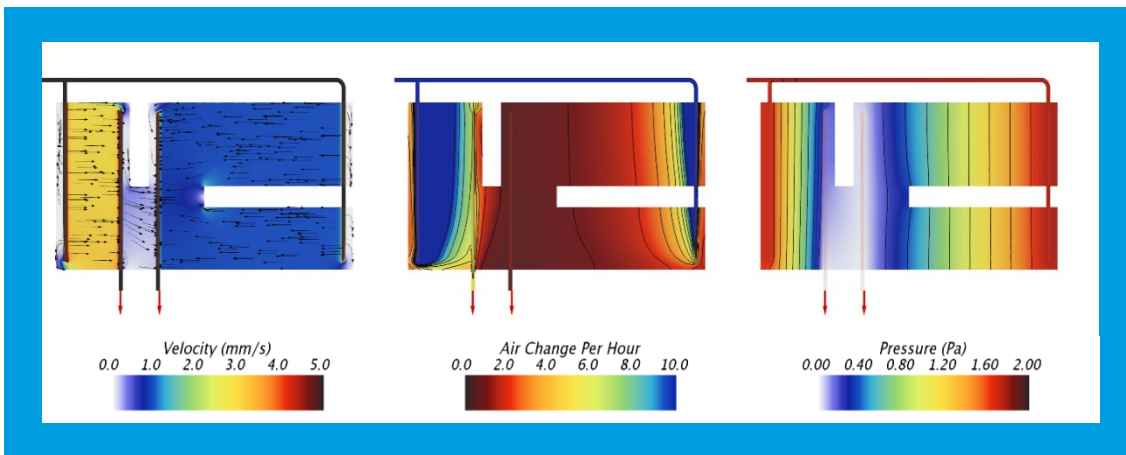
FIGUR 21. Case 5.1



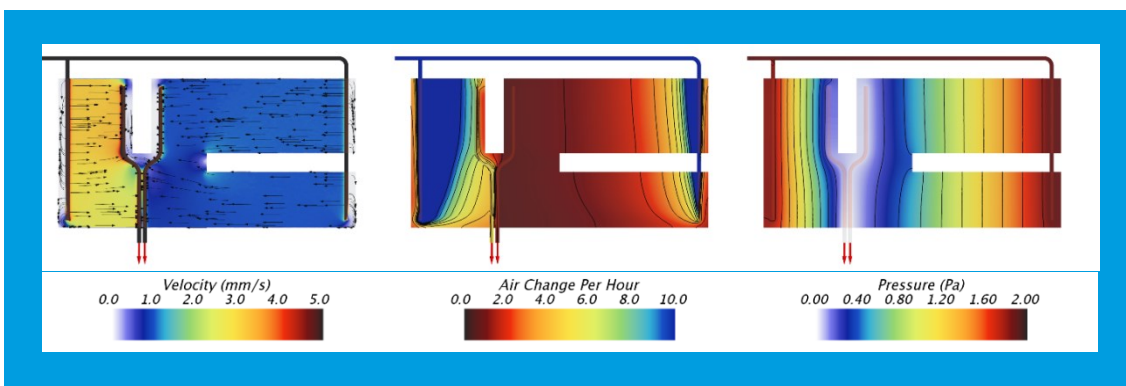
FIGUR 22. Case 5.2

I case 5.3 er der tilføjet yderligere et indløbs- og et udløbsdræn i forhold til case 5.1. Udløbsdræne er lagt i lige linjer på hver side af det tværgående fundament. De to indløb forgrenes i en manifold, således at fordelingen af luft mellem de to dræn er styret af trykmodstanden i mediet. I dette tilfælde ses hastighedsfordelingen i flowcellen til højre og flowcellen til venstre at have en jævnt fordelt hastighed i hele cellen. På grund af den kortere afstand mellem dræne til venstre, er lufthastigheden her større end i den til højre. Ydermere ses det, at der opstår en stagnationszone mellem de to udløbsdræn med meget lav lufthastighed. Et lavt luftskifte ses at præge store dele af flowcellen til højre samt stagnationszonen mellem de to udløbsdræn.

I case 5.4 er det to udløbsdræn lagt sammen tæt op ad hinanden. Derved fjernes stagnationszonen mellem udløbsdræne. For den resterende del af ventilationssystemet er resultaterne de samme som i case 5.3.

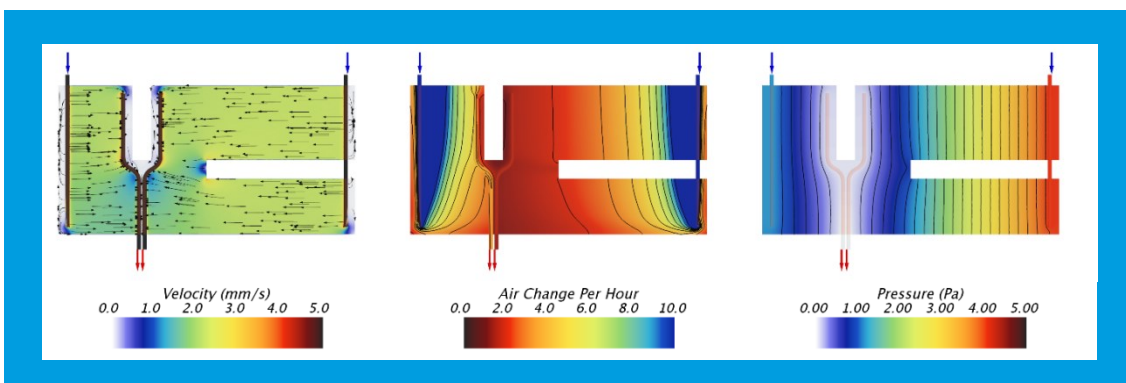


FIGUR 23. Case 5.3



FIGUR 24. Case 5.4

Som alternativ til, at indløbsdrænene har en fælles manifold, er der i case 5.5 foretaget en opdeling af de to dræn, og den samlede luftmængde er fordelt mellem den højre og den venstre flowcelle, således at lufthastigheden bliver ens i de to flowceller. Da flowcellen til højre er længere end flowcellen til venstre, ses det ensartede flow i cellerne at blive genereret ud fra forskellige tryk i indløbsdrænene. Luftsiftet ses at være lavere til højre end til venstre. Et ensartet luftsifte i de to flowceller kan fås ved at vægte luftmængderne med de indbyrdes afstande mellem ind- og udløbsdræn (ikke vist).



FIGUR 25. Case 5.5

Studierne af flowceller med delvist gennemgående fundamenter (case 5.1 – 5.5) viser, at det kan være yderst kompliceret at opnå effektiv ventilation med en ensartet luftstrømning/et ensartet luftsifte i flowceller med interne fundamenter. Modellering af forskellige drænkonfigurati-

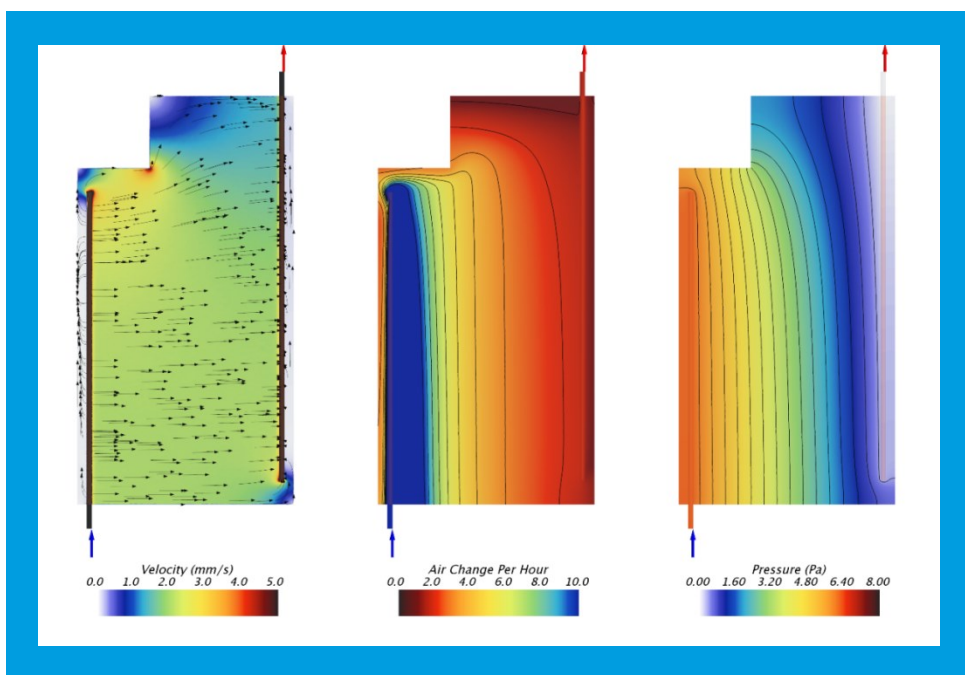
oner vurderes i sådanne tilfælde at kunne bidrage med væsentlige analyser til hjælp for design og optimering af ventilationssystemerne.

4.1.6 Varierende permeabilitet i det kapillarbrydende lag

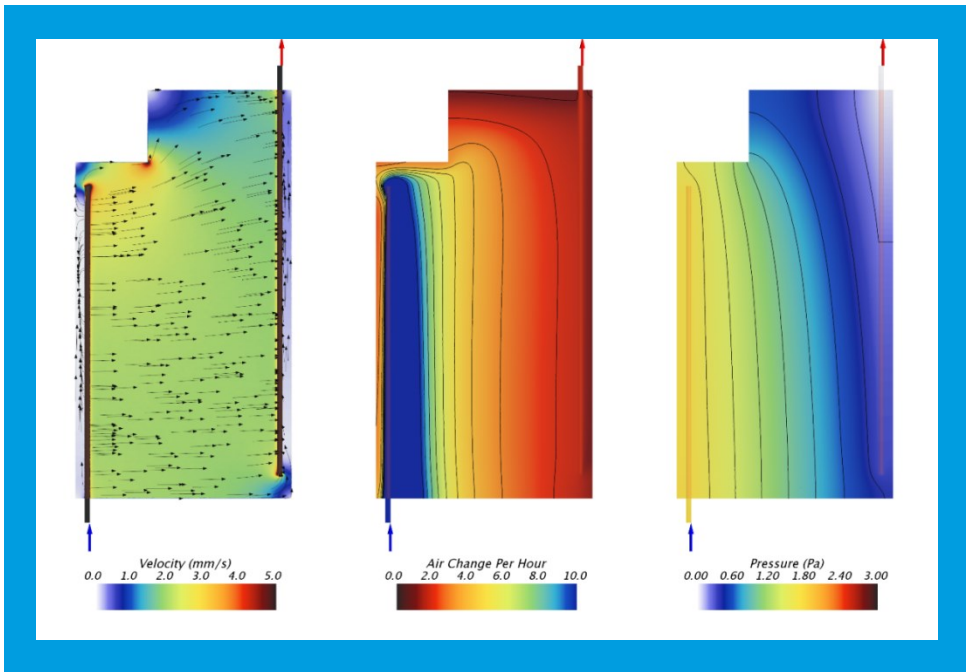
I det følgende vises resultater fra forsøg, hvor permeabilitetens indflydelse på flowfordeling er undersøgt ved at gentage beregningerne for case 2.2 med varierende permeabilitet i det kapillarbrydende lag. Permeabiliteten er således ændret fra $5e-8 \text{ m}^2$ til hhv. $2,5e-8 \text{ m}^2$, $10e-8 \text{ m}^2$, $20e-8 \text{ m}^2$ og $500e-8 \text{ m}^2$. Dette er hhv. en halvering, fordobling, firedobling og hundrededobling af permeabiliteten.

Resultaterne viser, at flowmønstret og luftskiftet kun i mindre grad afhænger af størrelsen af permeabiliteten, så længe variationerne kun er beskedne (firedobling og der under). Den visuelle forskel på hastigheden og luftskiftet for permeabilitet fra $2,5e-8 \text{ m}^2$ til $20e-8 \text{ m}^2$ ses i disse tilfælde kun at være meget lille. Der kan for drænmateriale generelt forekomme ret store variationer i permeabilitet, navnlig hvis der er tale om stor uensartethed af kornstørrelser, hvorfor denne faktor kan være meget afgørende. Lav permeabilitet kan give udfordringer i forhold til store tryktab.

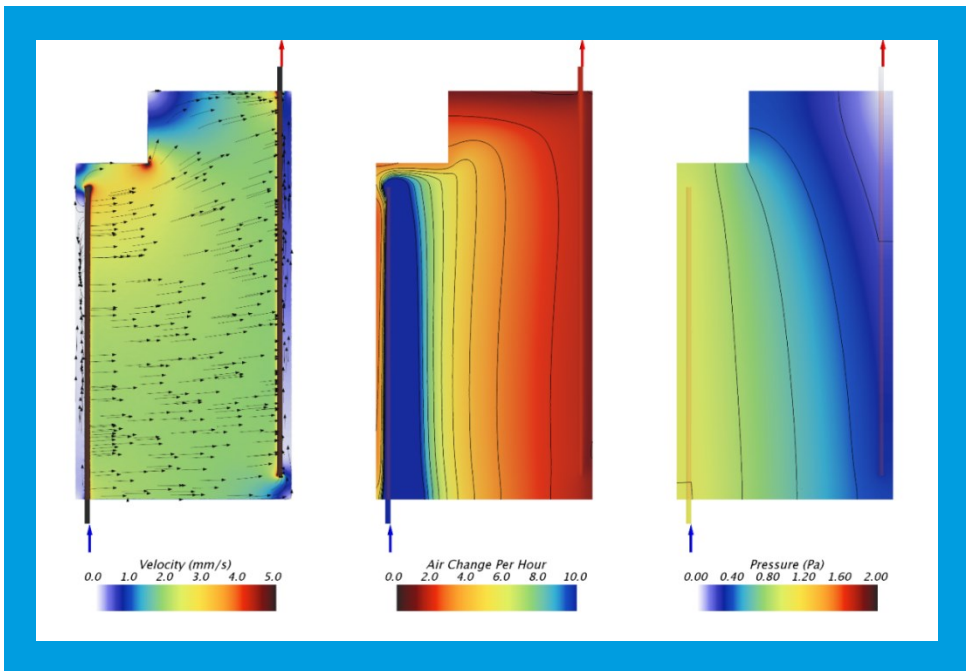
Men udfordringerne er også tilstede såfremt permeabiliteten bliver høj. Ved højere permeabilitet (eksempelvis på $500e-8 \text{ m}^2$, figur 29) ses, at området med meget lavt luftskifte på bagsiden af det interne fundament mindskes. Samtidig ses luften dog også at følge en mere direkte vej fra indløb mod udløbet, resulterende i en meget høj hastighed omkring udløbet. Dette resultat indikerer, at der med tiltagende permeabilitet i flowcellen fås en gradvist ringere fordeling af luften i flowcellen. Hvis dette er tilfældet, viser resultaterne, at det har væsentlig betydning for fordeling af luften i flowcellen, at der anvendes et passende porøst medium i flowcellen, og at flowsystemer helt uden porøse medier (kompartimentventilation) risikerer at få kortslutning af ventilationssystemerne mellem ind- og udløb.



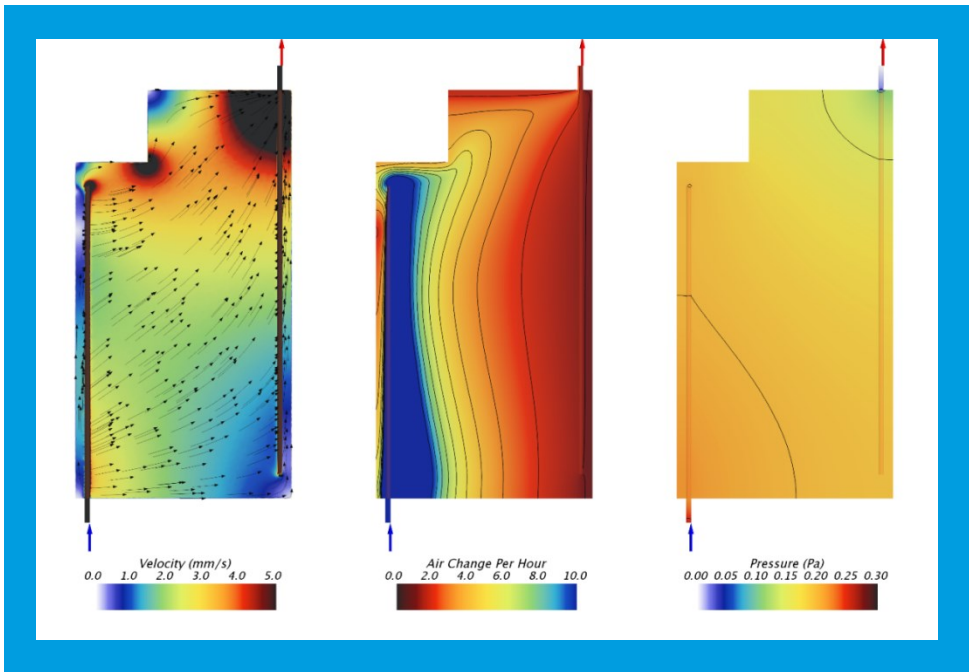
FIGUR 26. Case 2.2 $\kappa = 2,5e-8 \text{ m}^2$



FIGUR 27. Case 2.2 $\kappa = 10e^{-8} \text{ m}^2$



FIGUR 28. Case 2.2 $\kappa = 20e^{-8} \text{ m}^2$



FIGUR 29. Case 2.2 $\kappa = 500e^{-8} \text{ m}^2$

5. Vurdering og anbefalinger

De gennemførte modelleringsforsøg omfatter resultater for en række cases, som repræsenterer både helt simple ventilationssystemer og mere detaljerede systemer i komplekse bygningsgeometrier. Det vurderes, at der med de gennemførte forsøg iht. formålet foreligger grundlag for:

- At beskrive kritiske parametre ved design af ventilationssystemer under gulv i bygninger med mere komplekse geometrier og sektioninddelinger
- At identificere og beskrive generelle principper og retningslinjer for design og etablering af effektive ventilationssystemer i forskellige mere komplekse geometrier

Resultaterne af de indledende modelleringsforsøg viser, at lufthastigheden i flowcellen i væsentlig grad afhænger af afstanden mellem drænene (case 1.1). Dette følger naturligt af, at hastigheden afhænger af trykgradienten i cellen. Jo større afstand, jo lavere bliver gradienten og dermed hastigheden.

Resultaterne viser også (case 1.2), at hastighedsfordelingen ikke afhænger (i nævneværdig grad) af orienteringen af drænenes ind- og udløb. Under forudsætning af, at der ikke er tryktab af betydning i drænstrækningerne, vurderes der således at kunne ses bort fra orienteringen af drænene ved etablering af nye ventilationssystemer under gulve. For sådanne ventilationssystemer vil en effektiv fordeling af luften i cellen i væsentlig grad afhænge af, hvorvidt der kan etableres drænkonfigurationer med parallelle dræn i hele flowcellen.

Det vurderes på baggrund af modelforsøgene, at det for de mere komplekse geometrier er vanskeligt at etablere drænkonfigurationer, der sikrer ensartede lufthastigheder i hele flowcellen, og det må forventes, at der opstår et eller flere stagnationsområder ("døde områder") dvs. områder med meget lav lufthastighed. Studiet af de forskellige geometrier har vist, hvordan det ved hjælp af CFD-modellering er muligt at opnå et detaljeret indblik i, hvor disse stagnationsområder kan opstå.

I case 5.2 er der præsenteret et eksempel på en kompleks geometri, hvor det er forsøgt at opnå en forbedret fordeling af luften i flowcellen ved at ændre strategisk på opdelingen af ind- og udløbsdræn. Af eksemplet fremgår det, at det er muligt at opnå nogle forbedringer ved analyse af indledende modelleringsresultater (case 5.1). Eksemplet viser dog, at det er vanskeligt at opnå helt ensartet strømning i cellen. Men principielt kan strømningsforholdene forbedres.

Optræder der irregulære geometrier i bygningsfundamentet i form af spidse vinkler eller interne fundament, vurderes det på basis af de gennemførte modelleringsforsøg, at være nødvendigt med supplerende tiltag. Dette kunne være at etablere afspærring af fundamentssektioner (underopdeling i mindre flowceller) for at opnå mere regulære (rektangulære) sektioner, som herefter kan ventileres som selvstændige flowceller. Ulemperne ved denne fremgangsmåde er, ud over omkostningerne til de nødvendige byggetekniske tiltag, at der skal anvendes flere ind- og udløbsdræn i det samlede ventilationssystem. Dette kan medføre både pladsproblemer i afkast/teknikskakte og have betydning for det visuelle udtryk på en bygning. Fremgangsmåden vil primært være anvendelig i nybyggeri.

Luftskiftet er i modelleringsforsøgene angivet som "Air Change Per Hour", som viser den inverse værdi af luftens opholdstid i flowcellen. Denne værdi angiver således, hvor ny/frisk luften er. Dette tal er med andre ord et mål for lav eller høj forureningskoncentration, forudsat at der

er tale om ensartet fluks op i flowcellen, og at indtaget repræsenterer ren luft. Modellering af luftskiftet viser, at det ikke kun er i områder med lav hastighed, at der er risiko for større forureningskoncentrationer i luften, men at en væsentlig del af flowcellen med lavt luftskifte (Air Change Per Hour) også opstår i områder med højere strømningshastighed. Resultaterne kan anvendes til, i samarbejde med miljømyndigheder, at udpege de områder i flowcellen, som er mest relevante i forhold til dokumentation af ventilationssystemets effektivitet.

Luftskiftet er væsentligt, i forhold til en vurdering af hvor effektivt de forskellige områder i flowcellen ventileres. Således ses den "reneste" luft omkring indløbsdrænet og den mest "forurenede luft" omkring udløbsdrænet. I de komplekse geometrier ses det lave luftskifte at brede sig ud i områder med lav hastighed (stagnationsområder). I case 2.1 – 2.3 ses det, hvordan interne, kvadratiske fundamenter har en væsentlig indflydelse på fordelingen af lufthastigheden og luftskiftet i flowcellen, og at fundamentets placering i cellen har betydning for, i hvilket omfang og i hvilke områder påvirkningen af flowmønstret sker. Case 3.2 – 3.3 viser, at skæve vinkler som i trapez- og parallelogramformede flowceller har en væsentlig indflydelse på fordelingen af lufthastigheden og luftskiftet i flowcellen. Case 4.1 – 4.3 viser, at rette vinkler som i de L-formede flowceller, ikke nødvendigvis i sig selv har indflydelse på fordelingen af lufthastigheden og luftskiftet i flowcellen, men at længderne mellem drænene er afgørende for strømningsmønstret i flowcellerne.

Som udgangspunkt er der i modelleringsforsøgene anvendt en permeabilitet på $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$, som svarer til permeabiliteten for LECA. Dette er et produkt, der ofte anvendes ved etablering af kapillarbrydende lag, da sorteringsgraden og permeabiliteten er velkendt og da selve produktet kan leveres med en vis forsyningsikkerhed. Resultaterne af modelleringsforsøgene med varierende permeabilitet viser, at flowmønstret og luftskiftet kun i mindre grad påvirkes af permeabiliteten, når der er tale om små ændringer (ved firedobling og der under). Når permeabiliteten øges væsentligt (100 gange) ses en begyndende tendens til, at der sker en kortslutning mellem ind- og udløbet i flowcellen. Disse resultater viser, at der med tiltagende permeabilitet i flowcellen fås en gradvist ringere fordeling af luften i flowcellen. Det er således af væsentlig betydning for fordeling af luften i flowcellen, at der anvendes et passende porøst medium i flowcellen, og at flowsystemer uden porøse medier (åbne rum som f.eks. krybekældre) risikerer at medføre kortslutning af ventilationssystemerne mellem ind- og udløb. I åbne rum vil der dog ofte kunne opstå turbulent strømning, som kan bidrage til en vis fordeling af luften i flowcellen. Denne turbulens er dog afhængig af flowmængde og er ligeledes svær at styre/forudsige.

Resultaterne af case 5.1 – 5.5 viser, at det er yderst kompliceret at opnå effektiv ventilation med et ensartet luftskifte i flowceller med interne fundamenter. Modellering af forskellige drænkonfigurationer vil i sådanne tilfælde kunne bidrage med væsentlige analyser til hjælp for design og optimering af ventilationssystemer under gulv. I mange tilfælde vil en underopdeling af celler (interne barrierer) kunne blive nødvendig.

5.1 anbefalinger

De foreløbige studier af balanceret ventilation i kapillarbrydende lag er baseret på nogle forudsatte værdier for dimensioner og designparametre, på forudsætninger om homogenitet i det porøse medie (ventilationslaget), homogen fordeling af forureningsflux ind i flowcellen, samt at der ikke er tryktab i drænrør.

Det anbefales, at der, med udgangspunkt i de opnåede resultater med CFD-modellering, foretages supplerende studier, der kan belyse vigtige aspekter ved etablering af ventilationssystemer, som endnu ikke er belyst. Særligt vurderes aspekter vedrørende inhomogenitet i det porøse medie og sprækker (mellem selvbærende gulve og det porøse medie) at have væsentlig betydning for fordelingen af ventilationsluften i flowceller. Desuden vurderes der at være behov for at belyse strømningsmønstre for ventilationssystemer baseret på meget korte (ind-

skudte) drænstrækninger (punktsug), som ofte anvendes til afværge af indeklimarisiko i eksisterende byggeri.

Det anbefales således, at der gennemføres følgende studier:

- Undersøgelse af betydningen af sprækker med fri passage for luft i det ventilerede lag
- Undersøgelse af den resulterende koncentrationsfordeling i ventilationsluften under gulv ved inhomogen flux af forurening til det ventilerede lag
- Undersøgelse af strømningsmønstre ved punktsug i kapillarbrydende lag
- Betydningen af inhomogenitet i det porøse materiale, som anvendes i det kapillarbrydende lag
- Undersøge hvilke permeabiliteter i det porøse lag, der giver mest optimale forhold for laminar strømning og lavt tryktab i det porøse medie

6. Referencer

- /1/ Region Hovedstaden. Modelling af luftstrømning i kapillarbrydende lag ved balanceret ventilation, Notat, Rambøll. Januar 2017
- /2/ Region Hovedstaden. Indeklimasikring i nybyggeri, vejledning i forbindelse med sagsbehandling af § 8-sager. December 2016 – version 2.1.3

Der er udført computersimulering af ventilation af kapillarbrydende lag under huse ved forskellige fundamentopbygninger til brug for design af afværgeforanstaltninger mod indtrængning af flygtige forureningskomponenter fra forurenede jord. Der er på denne baggrund beskrevet kritiske parametre ved design af disse ventilationssystemer, og der er identificeret og beskrevet generelle principper og retningslinjer for designet.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk