



# NOTECH

Fuldskala afprøvning og dokumentation af NOTECH-systemet i en skoleklasse, og i Klimalab på TI



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

**”** En indeklimaløsning  
med naturen i centrum

# NOTECH

Fuldskala afprøvning og dokumentation af NOTECH- systemet i en skoleklasse, og i Lab på TI



**Udarbejdet af:**

Teknologisk Institut  
Projektleder Bodil Engberg Pallesen  
Agro Food Park 15  
8200 Aarhus N  
Fødevarer og Produktion

**Udarbejdet sammen med:**

Mathias Andersen, Carlo Volf Arkitekter, WindowMaster International A/S, Outrup Vinduer, IKM og Build, AAU

**Foto:**

Bodil Engberg Pallesen og Erik H. Hansen (DTI), Carlo Volf, WindowMaster, Outrup Vinduer m.fl.

Januar 2024



TEKNOLOGISK  
INSTITUT



Carlo Volf



INSTITUT FOR BYGGER  
MILJØ

aau.dk

## Forord

Ideen med at udvikle NOTECH-konceptet og anvende ålegræs til filtrering af indblæsningsluften opstod som et spin off på et projekt omhandlende udvikling af isoleringsmåtter af opskyllet ålegræs som bud på et bæredygtigt isoleringsmateriale (Projekt "Bæredygtige Tangisoleringsmåtter fra ålegræs", 2015-2017). Her blev samarbejdet mellem Teknologisk Institut og arkitekt Carlo Volf etableret. Det første NOTECH-filter blev opbygget i mock-up, og siden blev NOTECH-konceptet testet i en skoleklasse på Skovbrynets skole i Søborg med støtte fra Elforsk. Her blev WindowMaster International koblet på styringssiden. Siden blev etableret kontakt med Henning Larsen Arkitekter, og i forbindelse med nybygning af en skoletilbygning på Feldballe Friskole med HLA, som arkitekter blev NOTECH valgt som indeklimaløsning sammen med andre bæredygtige byggematerialer i to skoleklasser. Det var derfor oplagt at gennemføre et fuldskala-afprøvning af NOTECH-systemet på Feldballe Friskole, og til dette blev ansøgt og siden bevilget støtte til afprøvningen hos Realdania.

Konsortiet i projektet blev udvidet til foruden Teknologisk Institut og arkitekt Carlo Volf, og WindowMaster også at omfatte IKM, der bidrog med varmepumpe-system, Outrup-Vinduer samt Per Kvols Heislerberg fra AAU, Institut for Byggeri, By og Miljø. Fuldskalaafprøvningen blev gennemført under ledelse af Mathias Andersen. I projektet er også gennemført en mock-up test ved Teknologisk Institut, afdeling for Klima og Energi.

Projektgruppen vil hermed sige tak for den værdifulde støtte fra Realdania med en bevilling på 2.352.000 DKK.

Ligeledes også en tak til Feldballe Friskole, bestyrelse, ledelse og lærere, for at tro på NOTECH-løsningen, og vælge den til deres nye tilbygning. Samt elever for at have taget så positivt imod systemet.

*Projektleder Bodil Engberg Pallesen, Teknologisk Institut*

Januar 2024

1.	Resume .....	6
2.	Indledning .....	7
3.	Formål .....	8
3.1.	Målgruppe.....	9
4.	Baggrund.....	10
4.1.	Udfordringer med indeklima på skoler .....	12
4.2.	Ændring i Bygningsreglementet BR18 relevant for naturlig ventilation .....	12
4.3.	Udfordringer vedr. træk-gener .....	13
4.4.	Lydniveau i klassen kan reduceres .....	15
5.	Fuldskalatest af NOTECH på Feldballe Friskole .....	15
5.1.	Beskrivelse af NOTECH-systemet.....	15
5.1.1.	Ålegræs-råvaren .....	22
5.2.	Metode og forsøgsopsætning vedr. fuldskalatesten .....	23
5.2.1.	Indeklimamålinger .....	23
5.2.2.	Målinger af energiforbrug .....	24
5.2.3.	Placering af sensorer .....	25
5.2.4.	Måling af akustiske effekter .....	27
5.2.5.	Måling af temperaturgradient fra luftindtaget .....	28
5.3.	Resultater fra fuldskalamålinger på Feldballe friskole .....	29
5.3.1.	CO <sub>2</sub> -koncentration .....	29
5.3.2.	Temperatur og RH .....	33
5.3.3.	Partikler PM2.5/PM10 .....	36
5.3.4.	VOC – on site.....	38
5.3.5.	Dagslysmålinger .....	39
5.3.6.	Lydniveau .....	40
5.3.7.	Efterklang .....	41
5.3.8.	Temperaturgradient.....	42
5.3.9.	Performance-rapportering – drift og vedligehold .....	46
5.3.10.	Energiforbrug og -produktion .....	46
6.	Mock-up forsøg i indeklimalab på TI .....	48
6.1.	Overordnet testplan: Måling af tryktab og træk.....	48
6.2.	Opbygning af NOTECH mock-up - opstillet til trykmåling i klimakammer .....	49

6.3.	Styring af NOTECH-systemet.....	52
6.4.	Dimensionering af NOTECH filter.....	52
6.5.	Resultater af måling af luftydelse/tryktab - Mock-up i Indeklima-lab på TI.....	54
6.5.1.	Konklusioner vedr. tryktabsmålinger.....	56
6.6.	Forsøgsplan – termiske målinger af trækrate.....	57
6.7.	Resultater af forsøg med trækrate-målinger - Mock-up i Indeklima-lab på TI.....	58
6.7.1.	Konklusioner af målinger af trækrate.....	62
7.	Luftkvalitet: VOCs afgangsmåling på element-niveau .....	62
8.	LCA-analyse/-screening.....	63
9.	Feedback fra brugere (lærere, elever).....	64
10.	Konklusion, diskussion og perspektivering.....	65
11.	Formidling.....	67
11.1.	Artikler, linkedin, facebook mv. ....	68
11.2.	Udstillinger.....	69
11.3.	Møder og Workshops.....	71
12.	Bilag.....	72
12.1.	Bilag: LCA-screening.....	72
12.2.	Bilag Luftkvalitet: VOCs afgangsmåling på element-niveau .....	96
12.3.	VOC-Metode.....	96
12.4.	VOC-resultater og konklusioner vedr. VOC-afgangsmåling på element-niveau .....	97

## 1. Resume

NOTECH, et nyt koncept for behovstyret naturligventilation integreret i facaden. Systemet er testet og dokumenteret i en nybygget skolebygning samt i klimalaboratorium. NOTECH ventilationssystemet er udviklet i samarbejde med Carlo Volf Arkitekter, Teknologisk Institut og WindowMaster International.

Formålet med projektet er at dokumentere funktionaliteten af NOTECH indeklimaløsning, i en skoleklasse i forhold til kravene i bygningsreglementet. Projektet er støttet af Realdania.

*Resultater fra on-site-målinger på Feldballe Friskole:*

**CO<sub>2</sub>:** Overordnet har systemet vist sig driftsstabil og effektivt til at holde CO<sub>2</sub> under grænseværdien. Online målinger over vinter, forår og sommer har vist, at det er muligt at holde CO<sub>2</sub>-koncentrationen under 1000 ppm i ca. 95% af brugstiden. I vinterperioden, med en gennemsnits udetemperatur på 3,4°C, var det muligt at holde CO<sub>2</sub>-koncentrationen under 1000 ppm i 95% af tiden, mens CO<sub>2</sub>-koncentrationen om sommeren har været under 1000 ppm i 99% af brugstiden. Samlet set fra marts til og med august målte vi CO<sub>2</sub>-koncentrationer over 1000 ppm i 3 % af brugstiden.

**Øvrig performance:** Eleverne har adspurgte ikke oplevet træk i en afstand på 1 meter fra luftindtaget hvilket passer godt overens med vores målinger. Målinger af temperaturgradienten og flow, om vinteren ved 100 % åbningsgrad, viste at temperaturen 1 meter fra luftindtaget, 5 cm over gulvet minimum var 19,5 °C, kun godt én grad under rumtemperaturen. Opvarmningen af luften gennem vægen blev målt til 10°C. Med en indetemperatur på 20,5 °C var der en temperaturredifference mellem indblæsningsluft og rumtemperatur på 7°C. Målinger i klimalab ved temperaturredifference mellem indblæsning og rumtemperatur på ca. 9 grader og dimensioneret flow viste, at trækgrænsen i laboratorie-setup ligger på ca. 2 meter fra luftindtaget. Ved ikke at placere eleverne direkte langs vægge og luftindtag kan systemet i praksis bruges uden yderligere forvarmning af luften. I nogle bygningstyper vil det dog være påkrævet at indblæsningsluften opvarmes i de koldeste perioder af året evt. vha. en radiator under luftindtaget.

**Energiforbruget** for fyringssæsonen 2022-2023 var 32,7 kWh/m<sup>2</sup>, hvilket inkluderer energiforbrug til varmepumpe der leverer gulvarme og varmt vand, tilskudsvarmepumpe og radiator inklusive energi til varemålerens ventilator og elpatron. Det estimerede årlige energiforbrug til opvarmning, ventilation, varmt vand og belysning ligger lige under 33 kWh/m<sup>2</sup>, hvilket er energirammen for den frivillige lavenergiklasse.

**Lydniveauet** blev kontinuerlig målt både inde i klassen og på facaden ude mod vejen. I gennemsnit blev der fundet en reduktion på 31 % i lydniveauet mellem yderside og inderside af facade målt over 3 måneder i tidsrummet 15-17 på hverdage, hvor NOTECH systemet var åbent, mens klassen overvejende er tom for elever. Målinger af efterklang viste at systemet dæmper efterklangen med 6 %, hvilket er nok til at klasseværelset overholder kravet på 0,6 sek. i forhold til BR.

**VOC:** Målinger af afdampning af udvalgte VOC viste, at der ikke var afdampning af nogle problematiske stoffer fra filteret.

*Resultater fra mock-up målinger i indeklima-lab på Teknologisk Institut:*

**Tryktab:** Der skal være min. 50 mm frirum mellem yderste facade og første yderbeklædning for at undgå yderligere tryktab over NOTECH-element. Netmaterialet bag lamelfronten skal være så porøst som muligt for at sikre at dette ikke bliver en flaskehals for flow af luft. Dette opnås ved minimum 50% åbningsgrad, fx med et insektnet med relativ store huller. Ved 350 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal (1.200 m<sup>3</sup>/h Feldballe, 41 m<sup>3</sup>/h/elev) blev der målt et tryktab på 4 Pa. over elementet inkl. insektnet og lameller. Et vindtryk på 2,9 m/s mod facaden svarer til et dynamisk middelvindtryk på 5 Pa. Et tryktab på 4 Pa vil i de fleste tilfælde være tilstrækkeligt. Dette betyder, at der vil kunne opnås tilstrækkelig ventilation udelukkende ved krydsventilation.

**Trærate:** Data fra mockup-forsøget viste, at trækrategrænsen på 20 %, hvilket vurderes som ubehageligt om vinteren, kunne begrænses til en halvcirkel med en afstand af 2,2 meter fra centrum af luftindtaget i en afstand af 10 cm over gulvet. Dette blev målt i en simuleret driftssituation med 50 l/s flow (346 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal), gulvarme og en delta T på ca. 11 grader, som temperaturdifferencen mellem ude og inde.

I en simuleret efterår/forårs situationer (19°C inde 8°C ude) skal ventilationen begrænses ca. 41 m<sup>3</sup>/h per elev for at overholde kravet på maks. 1000 ppm for CO<sub>2</sub> samt undgå unødigt træk og øget energiforbrug (50l/s). Møblering af klassen skal undgås i en afstand af 2,2 meter fra ydervæg, medmindre der er etableret supplerende varme under luftindtag.

*LCA\_beregning:* Der er gennemført en LCA-screening (EN15804) af NOTECH standardelementet, som er rapporteret i afsnit 8 samt med særskilt rapport, som er bilag til nærværende slutrapport, se bilag 12.1). Resultaterne i denne screening indikerer, at den nyudviklede NOTECH indeklimaløsning (standard-element) forventes at medføre et lavt klimaaftryk (0,279 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH element/år inklusiv D- modul og 1,173 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH element/år eksklusiv D- modul for et luftskifte på 250 m<sup>3</sup>/time). Eksempelvis for et klasselokale med et samlet gulvareal på 96 m<sup>2</sup> er de totale klimapåvirkninger 0,052 CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> gulvareal/år (eksklusiv D-fasen) når der skal opnås et samlet luftskifte på 1080 m<sup>3</sup>/time hvorved der skal bruges 4,25 m<sup>2</sup> NOTECH filterløsning. D-fasen er hvor der indregnet genbrugs-, genanvendelses- og nyttiggørelsespotentiale (erstatning af råstoffer på markedet).

## 2. Indledning

Nærværende er den færdige slutrapport for NOTECH-projektet, støttet af Realdania. Målet er at dokumentere hvordan et nyt ventilationskoncept performer mht. indeklimaet, energiforbrug og CO<sub>2</sub>-aftryk i en nybygget skoleklasse.

Ved dokumentation af en simpel ventilationsløsning håber projektpartnerne at fremme udbredelsen af styret naturlig ventilation på skoler generelt og derigennem højne kvaliteten af indeklimaet. Sigtet er en at tilvejebringe uvildig dokumentation for funktionaliteten og performance af NOTECH, i en skoleklasse i forhold til kravene i bygningsreglementet. Dette er gjort ved gennemførelse af fuldsalamålinger på Feldballe-friskole suppleret med målinger på mock-up i klimalaboratoriet på Teknologisk Institut.

Partnere i projektet er Carlo Volf Arkitekter, Teknologisk Institut, WindowMaster International A/S, Outrup Vinduer, IKM. og Per Kvols Heiselberg fra AAU, Institut for Byggeri, By og Miljø som ekstern rådgiver samt konsulent Mathias Andersen, som underleverandør.

Fuldskalatest er gennemført med målinger on site på nybygget tilbygning på Feldballe friskole mht. CO<sub>2</sub>, temperatur, relativ fugtighed, partikler (PM<sub>2,5</sub> og PM<sub>10</sub>), VOC, dagslysmålinger, lydniveau, efterklang, temperaturgradient, evaluering af performance drift og vedligehold, energiforbrug samt den reale varmeproduktion fra varmepumper.

Mock-up-afprøvning er gennemført mht. måling af luftydelse/tryktab samt målinger af trækrate for at kunne vurdere trækrelaterede risici. Dernæst er der gennemført VOC-afgasningsmålinger. Alle mock-up målinger er gennemført i indeklimalab på Teknologisk Institut.

Der er gennemført en LCA-analyse af NOTECH systemet med det formål at kunne levere data til LCA-byg samt at kunne sammenligne CO<sub>2</sub>-aftrykket med mekanisk ventilation.

Der har gennem hele projektperioden været afholdt en række projektmøder med partnere, og løbende evalueret og tilpasset styringen af indeklimaet med NOTECH-systemet.

### 3. Formål

Projektet "Fuldskala afprøvning og dokumentation af NOTECH- systemet i en skoleklasse, og i Lab på TI" har til formål at dokumentere funktionaliteten af det nye NOTECH koncept for naturlig styret ventilation, i en skoleklasse i forhold til kravene i bygningsreglementet. I projektet vil vi dels demonstrere og dokumentere at systemet kan leve op til kravene i BR18 mht. max. CO<sub>2</sub> koncentration på 1000 ppm under forskellige belastninger og årstider samt at systemet er driftsstabilitet under længere tids drift. Projektet har også til formål at dokumentere hvordan systemet performer i forhold til bygningsreglementets regler mht. Træk. Desuden ønskes dokumentation for at energiforbruget i nybygningen med NOTECH ventilation ikke overskrider energirammen for byggeriet.

Det andet formål er at gennemføre en LCA-analyse mhp. at få NOTECH-konceptet med i LCA-byg.

Testen er såvel gennemført som fuldskalatest samt ved laboratorie-test i en mock-up test i klimalaboratoriet på TI.

Målet med mock-up-testen var at måle tryktabet over filtret ved forskellige flow samt typer af akustisk filtmateriale, som indgår i NOTECH-filtret, for at finde den optimale type, med mindst muligt tryktab. Et andet formål for mock-up-testen var at undersøge minimumsåbningsarealet gennem facaden mhp. fremtidige dimensioneringer af NOTECH. Sidst men ikke mindst var målet for mock-up-testen at måle trækraten i indeklimalaboratoriet ved forskellige indgangstemperaturer og luftflow. NOTECH-filteret blev både testet med og uden gulvarme og radiator. Der blev desuden gennemført



afgasningsmålinger af VOC fra filtermaterialet fra mock-up, for at kunne dokumentere at der ikke afgives uønskede gasser gennem luftindtaget.

Fuldskalatesten er gennemført med online målinger i et nybygget klasselokale på Feldballe Friskole, hvor en bæredygtig tilbygning er opført med NOTECH ventilationsløsningen, integreret i vægfacaden. Et arkitektonisk mål med NOTECH har været at opnå et godt indeklima uden brug af mekanisk ventilation med store synlige rør eller nedsænkede lofter. Nybygningen er tegnet af Henning Larsen Arkitekter (HLA), men selve NOTECH-integreringen på skolen er tegnet af Carlo Volf Arkitekter. NOTECH-systemet er synligt fra klasseværelses via. 4 store lamelfronter der installeret i direkte forlængelse af vinduespartierne. Arkitektonisk er NOTECH derfor også en vigtig del af byggeriet. Gennem lamelfronterne kan man skimte ålegræsfilteret der ud over at fordele luften også fungerer som et akustisk element der reducerer lyd udefra og absorbere og dæmper lyd fra klassen. Ved en grundig dokumentation af NOTECH på en nybygget skole er målet, at det i fremtiden vil blive nemmere at udnytte denne teknologi i nybyggeri eller til renoveringsprojekter. En skoleklasse anses for at være den mest udfordrende applikation for ventilation generelt.

I fuldskalatesten på Feldballe Friskole er der løbende blevet målt energiforbrug til varmen og ventilation samt effekten af varmepumpen. Foruden CO<sub>2</sub>, er der online måling af temperatur, relativ luftfugtighed (RH), lydniveau, PM2.5, PM10, VOC og dagslys. Målt af efterklang og temperaturgradientmålinger er gennemført på udvalgte tidspunkter. Performance mht. drift og vedligehold er løbende blevet registreret.

### 3.1. Målgruppe

Afprøvning af NOTECH systemet har til hensigt at danne et beslutningsgrundlag for bygherrer og rådgivere når der skal træffes beslutning om valg af ventilationssystem til et skolebyggeri.

Desuden skal dokumentationen kunne bruges til at vurdere NOTECH systemet i forhold til BR18 og den kommende bæredygtighedsklasse (BK) samt myndighedsbehandling. Testen henvender sig derfor både til bygherrer, skoler og kommuner, som har behov for dokumentation af NOTECH som en alternativ ventilationsløsning.

Vi har i dette projekt fokuseret på nybyggeri på en skole, men forventningen er at erfaringerne vil kunne bruges i forbindelse med renovering af skoler, plejehjem, almene boliger mm. Dokumentationen vil kunne bruges af alle aktører involveret i projektering af ventilationsløsninger i skole som f.eks. rådgivere, ingeniører, arkitekter og entreprenører.

Målgruppen omfatter bl.a.:

- Bygherrer
  - Kommunale tekniske forvaltninger
  - Private skoler

- Øvrige undervisningsinstitutioner
- Skoler
  - Skoleledere
  - Driftspersonale mm
- Politiske aktører
  - Byråd
  - Skolebestyrelser
  - Andre
- Projekterende rådgivere og udførende Arkitekter
  - Ingeniører
  - Entreprenører

Skoler forventes at opnå fordele mht. indeklima, støjreduktion, besparelse af materialer, forbedret CO<sub>2</sub>-aftryk mm.

#### 4. Baggrund

NOTECH er i udgangspunktet simpel ventilationsløsning der bygger på naturlig styret ventilation. Systemet er integreret i facaden og kan ikke ses udefra men fremstår indadtil som en arkitektonisk og akustikdæmpende indeklimaløsning opbygget træ og ålegræs. NOTECH ventilationssystemet baserer sig på naturlig behovstyret ventilation, og kan enten integreres i vægfacaden eller i vindueselement. Systemet er skabt for at fremme et godt indeklima både mht. luftkvalitet, reducerer efterklang samt reducere CO<sub>2</sub>-aftrykket for både installation og drift sammenlignet med mekanisk ventilation

Målet er at fremme indeklimaet særlig på skoler, hvor godt indeklima er fundamentet for sunde og motiverede børn. Formålet med projektet er at dokumentere funktionaliteten af NOTECH, i en skoleklasse i forhold til kravene i bygningsreglementet.

Igennem de seneste årtier har energikrav og arkitektur forandret den måde, vi planlægger skoler og deres indeklima på. Specifikke krav til lufttilførsel i kombination med krav til energirammer i Bygningsreglementet fra 1995 [BR95] har ført til at næsten alle nyopførte skoler efter 1995 er opført som "lufttætte" bygninger med mekanisk ventilation og varmegenvinding. I forhold til BR18 skal ventilationsanlægget i undervisningsrum være dimensioneret til normale driftsforhold i bygningen og skal ved normalt aktivitetsniveau kunne holde et CO<sub>2</sub>-niveauet under 1000 ppm, under de dimensionerende forhold, med tilladte kortvarige overskridelser.

Et CO<sub>2</sub> niveau på under 1000 kan forholdsvis nemt løses med mekanisk ventilation og CO<sub>2</sub> styring, men her kan til gengæld være udfordringer med at få plads til ventilationskanaler, mekanisk støj, øget energiforbrug, store serviceomkostninger, tør luft og en begrænset ventilationskapacitet, f.eks. i sommerhalvåret, sammenlignet med naturlig ventilation.

De højsolerede og relativt lufttætte nybyggede skoler med mekanisk ventilationssystem er ofte kun dimensioneret i forhold til antal elever, og lige nøjagtig til at overholde CO<sub>2</sub>-kravene. Dette kan i sommerperioden føre til overophedning, hvis ikke naturlig ventilation er tænkt ind som et integreret element. Ældre skoler lider også af dårligt indeklima med for højt indhold af CO<sub>2</sub>, og underdimensionerede eller forældede ventilationsanlæg. Her benyttes ofte manuel åbning af vinduer som kan give problemer med træk og varmestyringen, og kan i vintersituationer opregulere uhensigtsmæssigt. Lagring af kulde og varme i bygningen er heller ikke tænkt ind i BR, hvilket er et princip, der potentielt vil kunne øge komforten i klassen og sænke energibehovet.

Med baggrund i disse udfordringer blev NOTECH konceptet med ålegræs-filter udviklet tilbage i 2019 i et samarbejde mellem Arkitekt Carlo Volf og Teknologisk Institut ved Bodil Engberg Pallesen og Mathias Andersen. Det nuværende NOTECH-system på Feldballe Friskole er videreudviklet i samarbejde med Carlo Volf Arkitekter, Teknologisk Institut og WindowMaster.

Det første NOTECH filter blev installeret i en roterbar 1:1 mock-up sengestue ved Ny Psykiatri Bispebjerg, og dannede baggrund for Elforsk projektet<sup>1</sup>, hvor NOTECH-facade-løsning blev etableret i en skoleklasse på Skovbrynets skole i Søborg. I dette projekt indledte projektgruppe samarbejde med WindowMaster mht. styring af facadeelementet. I december 2021 vandt konceptet NOTECH Danish Design Awards<sup>2</sup> med de tre partnere Volf Design (Carlo Volf Arkitekter), Teknologisk Institut samt WindowMaster i kategorien "Better Learning". I løbet af 2020-2021 blev konceptet videreudviklet med integration af udsugningsvarmepumpe med mulighed for udnyttelse af hybridventilation og varmegenvinding. NOTECH systemet blev installeret som naturlig behovstyret ventilationsløsning i en nybygget skolebygning ved Feldballe Friskole. Projektgruppen søgte herefter om støtte til fuldskalatest ved Realdania (2022-2023), som blev bevilget februar 2022.

I forbindelse med udarbejdelse af ansøgning til Realdania til gennemførelse af en fuldskalatest af NOTECH på Feldballe Friskole blev yderligere to partnere koblet på projekt-teamet, nemlig Outrup Vinduer, som leverer ramme og åbenbart fyldningsparti til NOTECH-filtret med mulighed for integrering i vindueselementet. Derudover blev IKM (indeklima og miljø) inddraget med leverance af udsugningsvarmepumpe og styring af varmekilde samt udsugning fra punktudsug. Projektet " Fuldskala afprøvelse af NOTECH-systemet i en skoleklasse<sup>3</sup>" blev bevilget i februar 2022.

---

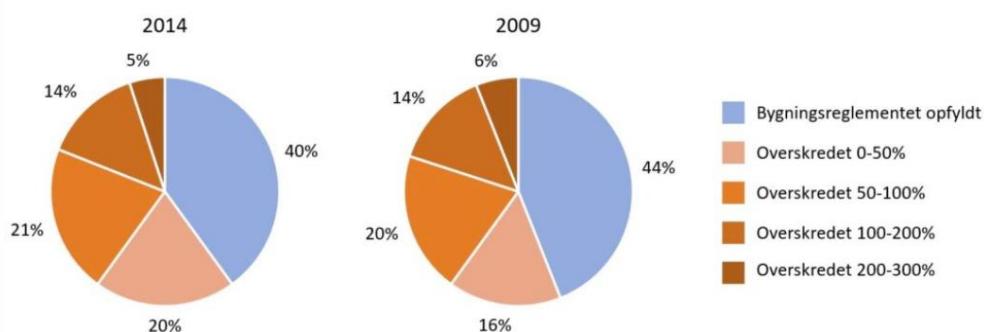
<sup>1</sup> [https://elforsk.dk/sites/elforsk.dk/files/media/dokumenter/2021-04/350\\_048\\_slutrapport.pdf](https://elforsk.dk/sites/elforsk.dk/files/media/dokumenter/2021-04/350_048_slutrapport.pdf)

<sup>2</sup> <https://intra.teknologisk.dk/agrotech-er-med-til-at-vinde-danish-design-award-2022/43694?cms.query=NOTECH>

<sup>3</sup> <https://www.teknologisk.dk/projekter/fuldskala-afproevning-af-notech-systemet-i-en-skoleklasse/44026?cms.query=fuldskala+afpr%F8vning+note>

## 4.1. Udfordringer med indeklima på skoler

I de seneste årtier er der dokumenteret store udfordringer med indeklimaet i danske skole og institutioner. Bl.a. viste Maseeksperimentet 2021 på danske skoler<sup>4</sup> gennemført af DTU og Realdania, at CO<sub>2</sub>-niveauet i klasselokalerne ikke har ændret sig væsentligt siden en tilsvarende, landsdækkende måling i 2009 og 2014. Undersøgelsen viser samtidig for første gang i meget stor skala, at den dårlige luftkvalitet påvirker både elevernes trivsel og koncentrationsevne. Luftkvaliteten i danske klasselokalerne er generelt for dårlig og den er ikke blevet bedre siden den første gang blev målt for nu 14 år siden. Dengang som nu blev grænseværdien for CO<sub>2</sub> overskredet i over halvdelen af lokalerne. Samtidig påvises det nu for første gang i storskala på tværs af mange skoler, at frisk luft forbedrer elevernes trivsel.



Figur 3.1. Indeklimaet (CO<sub>2</sub>) for et stort udsnit af alle landets skoler er i 2009 og 2014. Kun omkring 40-44% af klasselokalerne opfylder kravene i Bygningsreglementet til luftkvalitet (blå), alle øvrige klasselokaler overskrider kravene i varierende grad. Fra DTUs Maseeksperiment 2009 og 2014).

I Realdania og DTUs undersøgelse i 2017 blev det f.eks. dokumenteret, at bygningsreglementets grænse for CO<sub>2</sub>-indhold i luften blev overskredet i 91 % af 245 undersøgte klasseværelser på et eller andet tidspunkt i løbet af skoledagen. Samlet var grænsen overskredet i 47% af skoletiden i fyringssæsonen og 12 % uden for fyringssæsonen.

NOTECH konceptet er et bud på hvordan styret naturlig ventilation kan imødegå disse udfordringer og sikre god luftkvalitet, som nærværende projekt har til formål at dokumentere. I projektet er der tale om nybyggeri, men NOTECH er også relevant i renoveringsprojekter af fx skoler.

## 4.2. Ændring i Bygningsreglementet BR18 relevant for naturlig ventilation

Den 1. januar 2021 blev en række ventilationsbestemmelser i bygningsreglement 2018 (BR18) ændret, med det formål at videreføre eksisterende kravniveau til indeklima, med et øget fokus på

<sup>4</sup> <https://maseeksperiment.dk/tidligere-eksperimenter/indeklima-iii/> støttet af Realdania.

teknologineutralitet. Med ændringen følger større fleksibilitet i forhold til overholdelse af kravene samt øget mulighed for anvendelse af nye og innovative ventilationsløsninger i byggeriet.

Konkret er der blevet ændret i kravene til de ventilationssystemer, der anvendes til at ventilere boliger. Med de nye regler er det således ikke længere kun mekaniske ventilationsanlæg med varmegenvinding samt forvarmning af indblæsningsluften, der kan anvendes i denne type byggerier.

Herudover bliver kravene til de ventilationssystemer, der anvendes til at ventilere daginstitutioner og skoler, også gjort teknologineutrale. Det betyder, at det fremover vil være muligt at anvende styret naturlig ventilation, hybridventilation mv.

Med de nye regler kan man fremover benytte alternative løsninger til mekaniske ventilationsanlæg. Det er dog en forudsætning, at det alternativ, man vælger, overholder bygningsreglementets bestemmelser, og at løsningen ikke medfører et højere energiforbrug, end et mekanisk ventilationsanlæg ellers ville have gjort.<sup>56</sup>

### 4.3. Udfordringer vedr. træk-gener

Træk er en hyppig årsag til ubehag og komfortproblemer, der kan medføre koncentrationsbesvær, spændinger og nedsat arbejds effektivitet. Trækgener opleves som en kombination af luftens temperatur, lufthastigheden og turbulensintensitet. Ifølge arbejdstilsynet skal lufthastigheden i rum, hvor der er personer, bør holdes under 0,15 m/sek. Kravet gælder ikke ved udluftning gennem vinduerne i en kølesituation. I Branchevejledning for indeklima i skoler fremgår det at trækrisiko/draught rate i % ikke må overstige 20 % som standard<sup>7</sup>. Ligeledes står der i BR18 § 425: "*Ved tilførsel og fjernelse af luft skal det i rum, hvor personer opholder sig i længere tid, sikres, at der ikke opstår træk i opholdszonen. For lokaler med stillesiddende aktivitet er eftervisning af, at trækrisikoen (draught rate) ikke overstiger 20 pct., én måde at dokumentere, at der ikke opstår træk i opholdszonen*". Trækrisikoen er et udtryk for den teoretiske andel af brugerne, som vil opleve trækgener. Draught rate defineres som i DS/EN ISO 7730 Ergonomi inden for termisk miljø - Analytisk bestemmes termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termiske komfortkriterier. Trækrisikoen afhænger af aktivitetsniveau, lufttemperatur og luftens turbulensintensitet.

Tabel 3.1. fra BR18 der viser sammenhæng mellem lufthastighed, temperatur og draught rate. Med draught rate på 20% fås følgende, maksimale middellufthastigheder ved normal turbulens (Turbulensintensitet på 40 pct):

Lufttemperatur	°C	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Lufthastighed	m/s	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,31

<sup>5</sup> [Ventilation i beboelsesbygninger, BR § 443-446](#)

<sup>6</sup> [Ventilation af daginstitutioner og undervisningsrum, BR, §447.](#)

<sup>7</sup> <https://realdania.dk/publikationer/faglige-publikationer/branchevejledning-for-indeklima-i-skoler>121

BR18 specificere ligeledes at ved åbne vinduer, eller ved brug af loft- eller bordventilatorer, som er under personlig kontrol, kan trækraten være højere end 20%.

Det skal pointeres at de data der har dannet baggrund for fastsættelsen af trækrategrænsen er baseret på træk fra mekanisk ventilation hvor friskluft strømmer ned oppefra og derved fortrinsvis påvirkede forsøgspersonernes oplevelse af træk langs nakken<sup>8</sup>

Nyere amerikanske undersøgelser tyder på at træk langs gulvet giver mindre trækgener, Her beskrives en ny metode til at beregne trækgenen ved anklerne<sup>9</sup>. I et nyt dansk studie har man fundet, at man ved at tage højde for den lavere følsomhed ved fødderne end for armene kan fordoble temperaturdifferencen mellem ude og inde uden at overstige trækgrænsen. Det betyder at man i princippet vil kunne benytte naturligventilation uden forvarmning af luften i en langt større del af året end lovgivningen på nuværende tidspunkt foreskriver<sup>10</sup>.

Samtidig med trækrategrænsen på maksimum 20 %, er det i forhold til DS447 Annex A specificeret, at det vil være acceptabelt at afvige fra denne trækrategrænse i f.eks. 10 % af brugstiden per uge. I en skoleklasse med timer fra 8-15 vil det betyde at trækrategrænsen må overskrides i 3,5 timer per uge eller ca. 4 x 10 min. om dagen. Så der f.eks. kan ventileres kraftigere i frikvarterende.

**Tabel 3.2. Anbefalede værdier for acceptable afvigelser med hensyn til træk.**

Afvigelser	Uge	Måned	Årlig
%	10	8	6
h	4	14	126

Da vi mennesker har forskellige tolerancegrænser for træk og komforttemperatur har man i fra myndighedernes side fundet det acceptabelt at en femtedel af eleverne i perioder kan opleve træk. Temperaturen skal samtidig holdt holdes over 21 °C.

Trækgener forekommer særligt når kroppen er kold. Omvendt kan forhøjede lufthastigheder føles behageligt og kølende hvis krops- og lufttemperaturen er høj. Udsatte områder for træk er specielt nakkeområder der oftest er bart og man derfor taber meget varme. Derfor er kølig luft, der kommer oppe fra specielt problematisk. Anklerne er også et udsat sted, da man her oftest har tyndere beklædning sammen med det faktum at kold luft er tungere end varm og derfor bevæger sig hen langs gulvet. Anklerne er dog langt mindre følsomme end nakkereionen.

Trækgener er en udfordring for rumventilation generelt, men særligt for naturlig ventilation har det traditionelt være en udfordring at ventilere tilstrækkeligt om vinteren i rum med høj belastning og stort ventilationsbehov uden samtidig at skabe trækproblemer. NOTECH er designmæssigt optimeret for at undgå træk. I en NOTECH løsning bevæger luften sig langsomt gennem et relativt stort åbningsareal i facaden og bliver delvist opvarmet ved passage gennem ydervæggen. Den kølige luft der falder ned

<sup>8</sup> Fanger PO, Melikov AK, Hanzawa H et al (1988) Air turbulence and sensation of draught. Energy and Buildings, 12, 21-39.

<sup>9</sup> ASHRAE. 2020b ANSI/ASHRAE Standard 55-2020. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE

<sup>10</sup> Jannick Roth, Per Heiselberg, Chen Zhang. Thermal comfort and risk of draught with natural ventilation - assessment methods, experiences and Solutions. 43rd AIVC - 11th TightVent & 9th Venticool Conference 2023 : Ventilation, IEQ and health in sustainable buildings - Aalborg University, Copenhagen, Danmark. 2023

ved indtaget efter filteret, bliver efterfølgende opvarmet af enten en radiator eller gulvarme. I frikvarter og pauser er der mulighed for at ventilere ekstra kraftigt uden gene for eleverne.

#### 4.4. Lydniveau i klassen kan reduceres

Lyd fra ventilationsanlæg er hyppigt bidrag til lydniveauet i skoleklasser med mekanisk ventilation, eller udefrakommende støj ved åbne vinduer. Trafik støj eller støj fra legeplads kan oftest være årsag til vinduer i klasseværelser ikke bliver åbnet tilstrækkeligt, da dette vil give støjgener der kan påvirke undervisningen negativt.

Ålegræsset, der indgår i NOTECH-filteret, er et blødt materiale med en stor overflade og relativ høj massefylde. Erfaringer har tidligere vist at NOTECH kan reducere udefrakommende støj ved at absorbere lyd, der trænger ind gennem facadeåbningen. Der kan således udluftes i klassen uden at udefrakommende støj påvirker lydniveauet inde i klassen i væsentlig grad.

### 5. Fuldskalatest af NOTECH på Feldballe Friskole

For at dokumentere effekten på indeklimaet og energiforbruget, har projektgruppen valgt at teste NOTECH-systemet i en 8-9 klasse i en nybygget skolebygning på Feldballe Friskole over et skoleår.

Nybygningen på Feldballe Friskole blev designet som et bæredygtigt byggeri og opført med naturlige materialer herunder også ventilationsløsning fra NOTECH, som blev integreret i facadeløsning. Målet for bygherren var at opnå et godt indeklima uden brug af mekanisk ventilation med synlige rør eller nedsænkede lofter. Nybygningen består af 8-9 klasseværelse, fysiklokale samt toilet og mellemgang på i alt ca. 230 m<sup>2</sup> opvarmet areal. Den nye skolebygning blev færdig til skoleåret 2021/2022, og officielt indviet maj 2022<sup>11</sup>.

NOTECH-Konceptet er karakteriseret ved behovstyret naturlig ventilation med et facadeintegreret filter af ålegræs. Til forskel for klassisk naturlig ventilation med styrede vinduesåbninger, har NOTECH systemet den fordel at være effektivt til at reducere lyd udefra i forhold til åbne vinduer (afsnit 5.3.6) og dæmpe efterklang (afsnit 5.3.7) indenfor og er desuden tyverisikret da det er integreret i væggen.

#### 5.1. Beskrivelse af NOTECH-systemet

NOTECH-systemet er behovstyret naturlig ventilation integreret i facaden og kan kombineres med en udsugningsvarmepumpe, der kan udnytte varm luft i udsuget fra bygningen til opvarmning af brugsvand og gulvarme. Systemet kan opdeles i 4 delelementer:

---

<sup>11</sup> [officiel indvielse af Feldballe Friskoles nybygning med NOTECH-systemet](#)

1. Luftindtag med regulerbart spjæld, ålegræsfilter der fungerer som isolering i lukket tilstand og som luftfilter og lydæmpende i åben tilstand samt akustikdæmpende lamelfront i træ.
2. Regulerbare kipvinduer der i åben tilstand, grundet opadstigende varm luft og vindens påvirkning, genererer et undertryk i bygningen, der driver ventilationen.
3. Styreenhed, der regulerer temperatur og CO<sub>2</sub> via spjæld, kipvinduer og varmepumpe ud fra målinger af temperatur og CO<sub>2</sub>-koncentrationen i bygningen. Desuden muliggør styringen lagring af varme og kølighed i bygningen.
4. Udsugningsvarmepumpe, der er forsynet med en ventilator, der udnytter rumvarmen i udsugningsluften til at opvarme varmt vand, der kan bruges i gulvvarmesystemet.

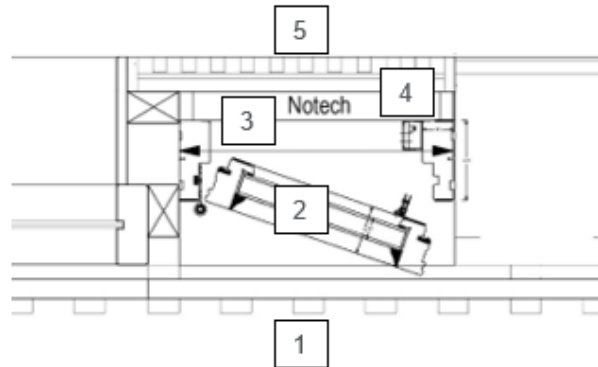


Figur 5.1. principtegning, inderside. Ålefilter ses i øvre side, indbygget stilbar klap for regulering af luftflow ses på luftindtagssiden. Th. 2 Principtegning set fra udvendig side. I øvre del ses en lodret hængslet klap foran ålegræsfilteret.

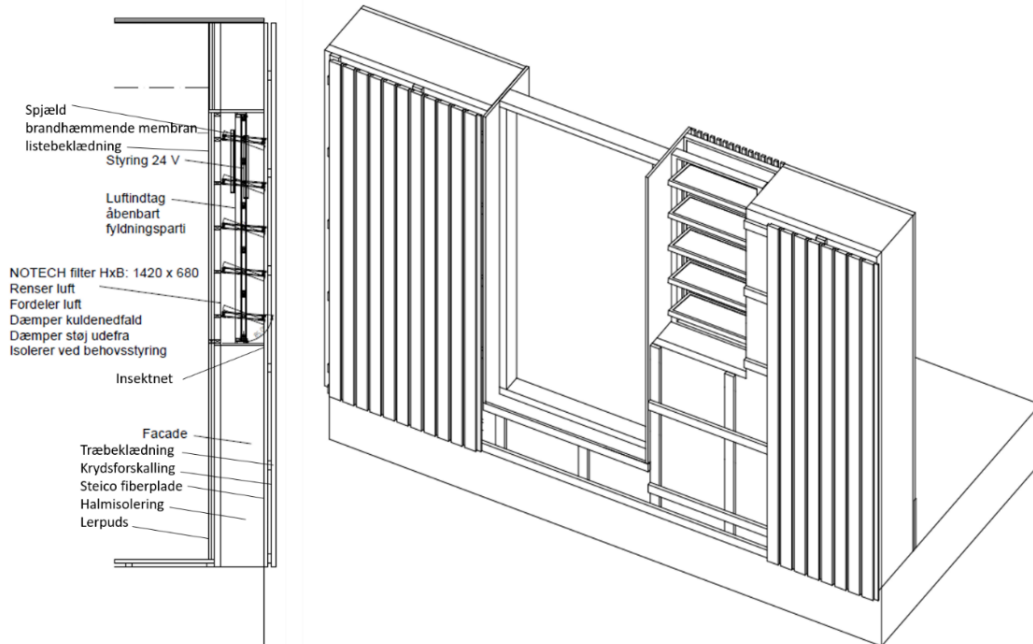


**Opbygning af Notech elementet**

1. Facadebeklædning
2. Automatisk styret åbning
3. Insektnet
4. Ålegræsfilter
5. Trælamelpanel



Figur 5.2. Skitsering af NOTECH-løsningen på Feldballe Friskole, som er tegnet af Carlo Volf-Arkitekter.



Figur 5.3. Tv snittegning af NOTECH-vægelement. Th 3D model af NOTECH vægelement fra Feldballe-Friskole,



Figur 5.4. NOTECH-filter installeret på Feldballe Friskole. Carlo Volf og Mathias Andersen.



Figur 5.5. Spjældelement etableret på Feldballe Friskole samt lamelfront.



Figur 5.6. Klasselokale indvendig og udvendig til 8-9 klasse med NOTECH, Feldballe Friskole.



Figur 5.7. Kipvinduer indefra tv. fra fysiklokalet, samt th fra klasselokalet.



Figur 5.8. Facadeløsning med NOTECH udefra på Feldballe Friskole med oven-vindue, kipvindue med styringssystem fra WindowMaster.



Figur 5.9. NV Komfort styreenhed fra WindowMaster hvor fra systemet kan betjenes. WindowMaster's styresystem består desuden af motorcontroller, vinduesmotorer, rumsensorer og en vejrstation.

### 5.1.1. Ålegræs-råvaren

I NOTECH-filtret anvender vi ren ålegræs, som indbygges i et element med træramme, så ventilationsluft frit kan passere igennem ålegræsset uden væsentlig trykmodstand. Ventilationen drives af opdriftventilation eller krydsventilation, begge dele defineres som naturlig ventilation.



Figur 5.10. Ålegræsset i NOTECH-elementet består af relativt lange blade og stængler, som kan være mere end 50 cm lange.

Råvaren ålegræs (*Zostera marina*) er en enkimbladet vandplante, i klasse med græsser. Ålegræs skyller op på kysterne sammen med en række tangplanter (macroalger) ved danske kyster i store mængder hele året. Når ålegræs optræder i renbestand, kan den opsamles, men skal først udvandes af nedbør på en græseng, inden den kan presses i baller til opbevaring. Vandprocenten i ålegræsset skal være ca. 20 % eller derunder, og råvaren skal være rensat fri for sand.

Ålegræssets kvalitet som isoleringsmateriale blev dokumenteret i form af en Cradle to Cradle Guld-certificeret<sup>12</sup> i forbindelse med et projekt, der omhandlede udnyttelse af ålegræs til isoleringsmaterialer, som ved endt levetid kan genanvendes til nye materialer.

---

<sup>12</sup> Pallesen B. E. 2018; Bæredygtige Tangisoleringsmåtter fra ålegræs. Miljøstyrelsen. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2018/06/978-87-93710-35-1.pdf> s. 41.

## 5.2. Metode og forsøgsopsætning vedr. fuldskalatesten

Projektet har monitoreret indeklimaet igennem halvandet års forløb på Feldballe Friskole. Undervejs er der gennemført en række tilpasninger mht. styring af varmesystem, monitoring med sensorer og indretning af lokale.

Der er gennemført såvel sommer- som vintermålinger, da disse repræsenterer forskellige udfordringer for styret naturlig ventilation. I forhold til indeklima er der online blevet målt temperatur, RH, CO<sub>2</sub>, støj, lysintensitet, partikelsensorer (PM2.5 og PM10), VOC samt tryk. Ud over indeklimaparametre er energiforbruget til opvarmningen af tilbygningen (dvs. fysik og 8/9-klases lokaler) blevet målt. Dette inkluderer også energiproduktionen fra varmepumpen.

Sideløbende er der gennemført en lab-test med mock-up af NOTECH facadeelement, efter samme model som der er anvendt i fuldskala-on-site-testen på Feldballe friskole, se afsnit 6.

Det primære formål med fuldskalatestene er at dokumentere, at NOTECH systemet kan leve op til kravene i BR18 mht. max. CO<sub>2</sub> koncentration på 1000 ppm under forskellige belastninger og årstider. Derfor måles det primære performanceparameter CO<sub>2</sub> online gennem en helt skoleår. Samtidig måles sekundære parametre som temperatur og fugt mv. for at dokumentere at systemet også på andre indeklimaparametre bidrager til god indeklimakomfort. Fuldskalatesten inkluderer også måling af energiforbrug, da dette er et væsentligt driftsparameter i forhold til totaløkonomi, men også fordi det er energikrav der skal overholdes i forhold til BR18.

### 5.2.1. Indeklimamålinger

Indeklimamålinger kan opdeles i online målinger, der ses i tabel 5.1., samt spotmålinger af akustik og træk, se afsnit 5.2.4. og afsnit 5.2.5.

Temperatur, CO<sub>2</sub> og RH måles i 5 forskellige steder i klasseværelset og ét sted i fysiklokalet for at kunne vurdere variationen af disse vigtige parametre. Lysintensitet, partikler (PM2.5, PM10), VOC (volatilt organisk stof), støj og lufttryk måles ude og inde. Måleudstyret målte over et helt skoleår, således at der ville være data nok til at kunne dokumentere systemets performance under både vinter og sommerforhold og på tidspunkter, hvor NOTECH systemet har været fuldt optimeret.

Tabel 5.1. over de online indeklimaparametre de måles på.

Parametre	Enheder	Måleforhold	Placering	Målemetode
Temperatur	°C	Online målinger sommer og vinter	1 x Fysik	Leepcraft AirBird
			5 x 8.-9. klasse	
			1 x Ude	
Relativ fugtighed	RH%	Online målinger sommer og vinter	1 x Fysik	Leepcraft AirBird
			5 x 8.-9. klasse	
			1 x Ude	
CO2	ppm	Online målinger sommer og vinter	1 x Fysik	Leepcraft AirBird
			5 x 8.-9. klasse	
			1 x Ude	
Lyssensor	LUX	Online målinger sommer og vinter	1 x 8.-9. klasse	Leepcraft, Ambinote
			1 x Ude	
Støj	dB	Online målinger sommer og vinter	1 x 8.-9. klasse	Leepcraft, Ambinote
			1 x Ude	
Luftryk	mbar	Online målinger sommer og vinter	1 x 8.-9. klasse	Leepcraft, Ambinote
			1 x Ude	
PM2.5	µg/m3	Online målinger sommer og vinter	1 x 8.-9. klasse	Leepcraft, Ambinote
			1 x Ude	
PM10	µg/m3	Online målinger sommer og vinter	1 x 8.-9. klasse	Leepcraft, Ambinote
			1 x Ude	
VOC	ppb	Online målinger sommer og vinter	1 x 8.-9. klasse	Leepcraft, Ambinote
			1 x Ude	

## 5.2.2. Målinger af energiforbrug

Energiforbrug og energiproduktion blev målt for dels at kunne dokumentere, at NOTECH systemet integreret i denne specifikke skoletilbygning kan leve op til energikravene i forhold til BR18, og dels for at hvis det kunne vurdere varmepumpens effektivitet under praksisnære forhold.

Tilbygningen på Feldballe friskole opvarmes primært af en udsugningsvarmepumpe, der leverer gulvvarme i hele bygningen. Udsugningsvarmepumpen er leveret af IKM. Den fungerer på den måde, at varm luft fra bygningen, under brug, kan suges gennem fordamperen og bidrage til opvarmningen af cirkulationsvandet og på den måde genvinde en del af den varme luft, der suges ud af bygningen. IKM varmepumpen kan desuden gøre brug af en elvarmepatron, hvis forbrug er målt særskilt. Det viste sig



under forsøget, at IKM's varmepumpe på 5,5 KW ikke var nok i spidsbelastningsperioder, hvorfor der midlertidigt blev installeret el radiatorer i klassen samt en permanent luft til vand varmepumpe på 9 KW som suppleringsvarme. Energiforbruget fra disse varmekilder er også blevet logget i forsøget.

Den direkte varmeproduktion til gulvarmen blev målt via en Kampstrup energimåler. Temperaturreguleringen var indstillet ens i hele tilbygningen, hvorfor energiforbruget til den enkelte klasse kan estimeres lineært ud fra klassens arealandel.

Der måles varmeflow i luften via måling af luftflow samt temperaturforskelle mellem ind- og udsug til varmepumpen. Dette gøres for at kunne estimere varmegenvindingen gennem varmepumpen.

Tabel 5.2. viser de forskellige energi-parametre, der blev målt

Parametre	Enheder	Måleforhold	Placering	Målemetode
Energiproduktion	kWh	Online måling over et år	Temp. Indløb og return	PT100 temperaturføler Kampstrup 403
			Flow indløb	
Temperatur ventilationssystem	°C	Online måling over et år	Temp. Indløb og return	PT100 temperaturføler
Flow ventilationssystem	m <sup>3</sup> /h	Online måling over et år	Indløb	Lindab Ultralink
Energiforbrug	kWh	Online måling over et år	VP	C11 110-101 MID
			Ventilator	C11 110-101 MID
			Radiator	C11 110-101 MID
			El patron	C13 110-101 MID

### 5.2.3. Placering af sensorer

Der er placeret 5 sensorer i 8/9 klasse ud over de sensorer, som WindowMaster benytter til styring af systemet. Derudover er der placeret en sensor i fysiklokale og en sensor uden for ud mod vejen. Sensorerne i klasseværelset er placeret i 1 meters højde for bedst at måle indeklimaet i det område, hvor eleverne har deres hoveder, når de sidder ned. Den CO<sub>2</sub>-koncentration de indånder, vil derfor i størst omfang svare til den koncentration, der måles. Der måles i 5 forskellige punkter for at få den mest repræsentative måling af hele rummet, hvilket muliggør beregning af et gennemsnit af koncentrationen i

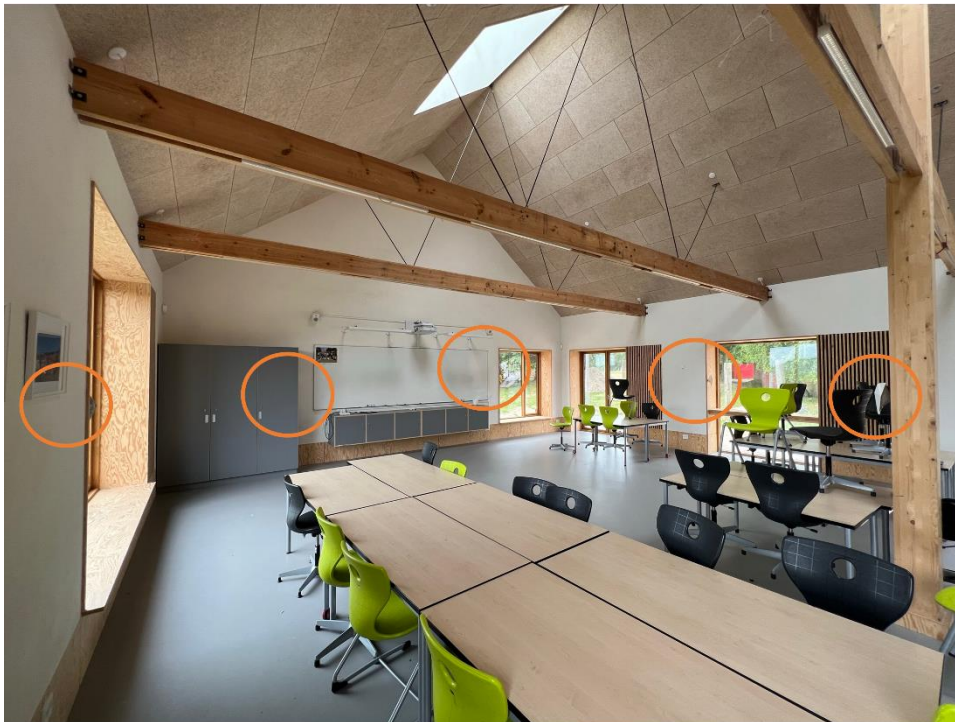
klassen. Koncentrationen i det enkelte målepunkt afhænger meget af luft-flowet i klassen, der igen afhænger af klimaet uden for.



Figur 5.11. På billedet ses et screenshot af Leapcrafts webplatform, hvor man får et overblik over sensorernes placering og de data der logges.



Figur 5.12. Sensorens placering i fysiklokalet, hvor der står en AirBird oven på skabet.



Figur 5.13. Placering af sensorer i 8/9 klasse illustreret ved de orange ringe.

I 8/9 klasse er der placeret 5 stk. LeapCraft sensorer fordelt over hele klassen. En i hvert verdenshjørne og en i midten. Der er desuden placeret en WindowMaster sensor mod nord, som ikke kan ses på billedet, figur 5.13.

#### 5.2.4. Måling af akustiske effekter

Støj er det et stort indeklimaproblem i danske skoler både for eleverne eller lærere. Dårlig akustik giver problemer med at hører konsonanter, og derfor generelt ordgenkendelse, med dårlig læring til følge. Akustikken i et rum bestemmes af, hvor meget af lyden i et rum der bliver kastet tilbage. Den måles i efterklangstid. Jo kortere efterklangstid, jo mere behagelige vil rummene ofte være at opholde sig i. Efterklang måles i det antal sekunder, det tager lyden at dø ud. Efterklang at må højest være 0,6 sekunder i skoleklasser i forhold til kravet i BR18. Måling af akustik og hvad rummet skal leve op til, er beskrevet meget præcist i bygningsreglementet<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> [https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/17/Vejledninger/Generel\\_vejledning?Layout=ShowAll](https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/17/Vejledninger/Generel_vejledning?Layout=ShowAll)

I denne undersøgelse er efterklangen målt på en udvalgt dag med lav baggrundsstøj. Efterklangen blev målt med og uden tildækkede (med gipsvæg-materiale) filterlameller samt lukket og åbent filter. Herigennem findes den absorberende effekt af filteret i den pågældende klasse.

Akustikken i klasserummet med 8/9 klasse blev målt i henhold til EN ISO 3382-2, hvor der måles over 1/3 oktav bånd fra 125 Hz til 4000. Til målinger i 1/3 oktavbånd, skal signalets båndbredde være større end eller lig med 1/3 oktav og med relativt fladt signal. Alternativt kan bredbåndsstøjspektret være formet som et pink spektrum i "steady-state" til måling af efterklangslid i rummet.

Frekvensområdet dækker således en tredjedel-oktavbånd fra 125 Hz til 4 kHz. APM Sweep blev benyttet til formålet, der dækker spektret fra 125-8000 Hz. B&K 2250 lydmåler blev brugt til at regulere lydstyrken.

Målingerne blev udført med en ekstern højttaler midt i rummet og mikrofon og analyseenhed placeret 7 forskellige steder i rummet, hvorefter et gennemsnit blev fundet. Hele forsøget blev gentaget i med og uden plader for filtrene i hele frekvensområdet. Der blev benyttet 13 mm gipsplader 90 x 240 til at dække de 4 lamelindtag til filtrene.

### 5.2.5. Måling af temperaturgradient fra luftindtaget

Det blev udført målinger af temperaturgradient ud fra luftindtag for at måle påvirkningen af temperaturgradienten fra filteret under forskellige åbningsgrader.

Måling af temperaturgradient fra luftindtag blev udført en vinterdag i februar 2023 under normal klasseundervisning, hvor åbningsgraden af NOTECH filteret gradvist blev åbnet fra 0-90 %, samtidig med at temperaturen i gulvhøjde blev målt for hver 20 cm 20-100 cm ud fra luftindtaget. I 50 og 100 cm over gulvet blev målt for hver 10 cm, 0-30 cm ud fra luftindtaget. Flowet af luft blev udregnet ud fra elevernes CO<sub>2</sub> produktion og den målte CO<sub>2</sub>-koncentration i rummet. Hver måling blev udført efter steady state havde indfundet sig efter min 15 min. Udetemperaturen var mellem 2-4° C og inde temperaturen omkring 21° C. Temperaturen blev målt med Testo 174H temperaturloggers. Der blev udført måling ud fra 2 forskellige luftindtag i hver side af klasseværelset.

### 5.3. Resultater fra fuldskalamålinger på Feldballe friskole

Fra skoleårets start i august 2022 blev der sat online logningsudstyr op til at monitorere indeklima og energiforbrug jf. metodebeskrivelse i afsnit 5.2. Foråret 2022 var forinden blevet brugt til at tilpasse WindowMaster-styringen til NOTECH-systemet og optimere driften. Det primære formål var at dokumentere CO<sub>2</sub>-koncentrationen i forhold til eksisterende krav i BR18, men også indeklimaet generelt i forhold til temperatur, RH, dagslys, støj, VOC mv.

Det var fra starten projektets ambition at dokumentere indeklimaet over et helt skoleår med et fungerende og optimeret anlæg. Vi løb dog ind i nogle problemer med varmepumpen, der betød at vi ikke fik optimalt styr på varmen før marts 2023.

Hen over vinteren 2022 oplevede vi forskellige problemer med styringen, der i første omgang hang sammen med for lidt varmeproduktion fra udsugningsvarmepumpen. Dette resulterede i at temperaturen faldt til under 19 °C i klasselokalet, hvilket var til gene for elever, og betød at vi var nødsaget til at ventilere mindre end nødvendigt for at holde os under grænseværdien på 1000 ppm CO<sub>2</sub>. Lavere temperaturer i klassen gjorde det ligeledes sværere at opnå den ønskede ventilation, da ventilationskapaciteten er afhængig af temperaturforskellen ude og inde. Problemet blev i første omgang løst med installation af nogle el-radiatorer, og senere rettede vi en fejl i varmepumpens software. Da varmepumpen kom op og kørte igen, viste det sig, at den ikke havde nok kapacitet til at holde den ønskede temperatur (over 20 °C) i klassen under dage med dagsfrost udenfor. Vi var derfor nødt til at etablere en supplerende varmepumpe, hvilket var et stort og tidskrævende arbejde.

Efter installation af supplerende varmepumpe var der energi nok til at holde den ønskede temperatur i klassen også under tilstrækkelig ventilation. Men forsinkelsen betød desværre, at vi først kunne begynde at dokumentere NOTECH systemet med et fungerende varmesystem fra primo marts 2023. Heldigvis var det en kold måned, der gav mulighed for at teste systemet under vinterforhold.

Systemet har stadig nogle udfordringer under heldagsregnvej, hvor kipvinduer lukker for at undgå, at det regner ind. I denne situation er systemet overladt til krydsventilation, som sker ved ventilation tværs gennem klassen fra det ene NOTECH-facade-element til de modsatte elementer. Hvilket er mindre effektivt end opdriftsventilation. Dette stiller krav til øget ventilation samt hurtigere indregulering. WindowMasters styring er traditionelt designet til pulsventilation, hvor man typisk regulerer hver halve eller hele time, f.eks. i frikvartererne. For at optimere ventilationen yderligere, har WindowMaster besluttet at opdatere styringssystemet på Feldballe til en nyere styringsmodel, der har bedre mulighed for hurtig indregulering.

#### 5.3.1. CO<sub>2</sub>-koncentration

De største udfordringer med at holde CO<sub>2</sub>-koncentration under 1000 ppm er om vinteren, hvor ventilationen ønskes begrænset pga. risiko for træk og unødvendigt energiforbrug. Om sommeren er

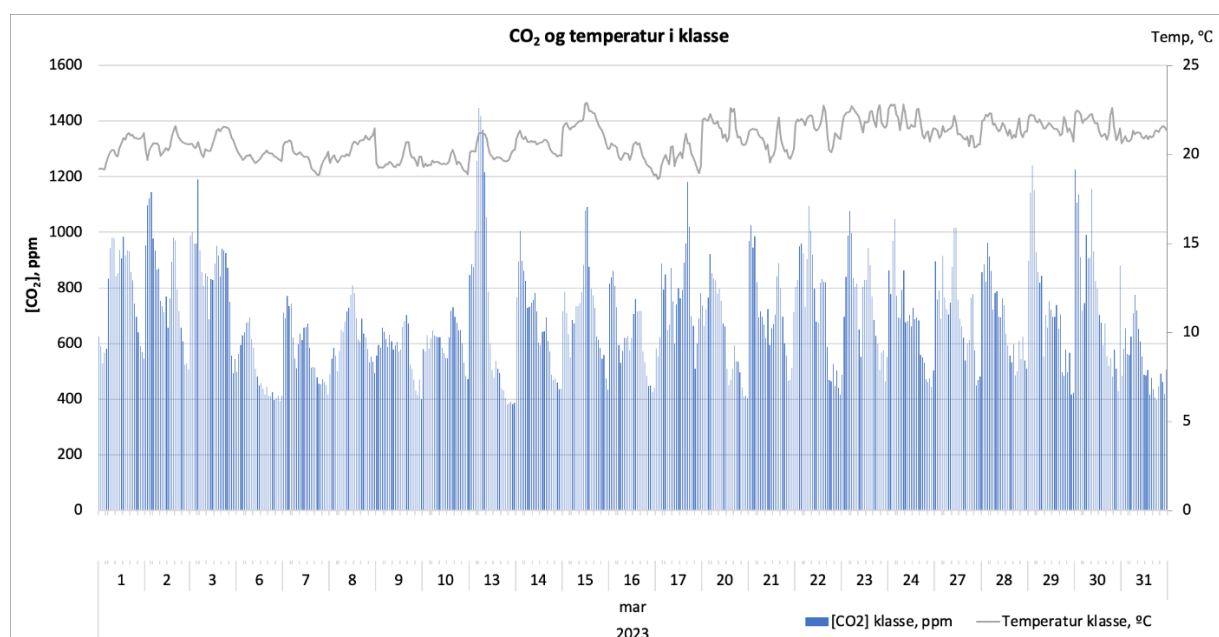
udfordringen mere at holde temperaturen nede. I dette afsnit ses eksempler på CO<sub>2</sub>-koncentrationer målt vinter, forår og sommer.

Studier har vist en klar sammenhæng mellem CO<sub>2</sub>-koncentrationer og skoleelevers præsentation, forstået ved den hastighed og nøjagtighed, med hvilken elever løste skoleopgaver. Ligeledes har man fundet en sammenhæng mellem CO<sub>2</sub>-koncentration og fravær for eleverne. For CO<sub>2</sub>-koncentrationer højere end 1.750 ppm falder elevernes præstation til 85% og deres fravær stiger til 5%. tilstedeværelse<sup>14</sup>.

Data er logget hvert 15 min. og er et gennemsnit af 5 målepunkter. Data er udelukkende vist og analyseret i brugstiden, dvs. hverdage fra klokken 8-15.

## Vinter

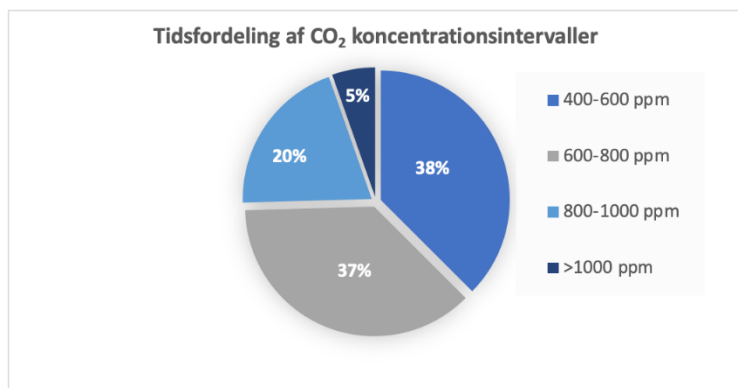
Marts betragtes som vinterklima og var den koldeste måned i 2023 med en gennemsnits døgntemperatur på 3,2 °C.



Figur 5.14. Målinger af CO<sub>2</sub> og temperatur i marts 2023 i 8/9-klasselokalet på Feldballe Friskole.

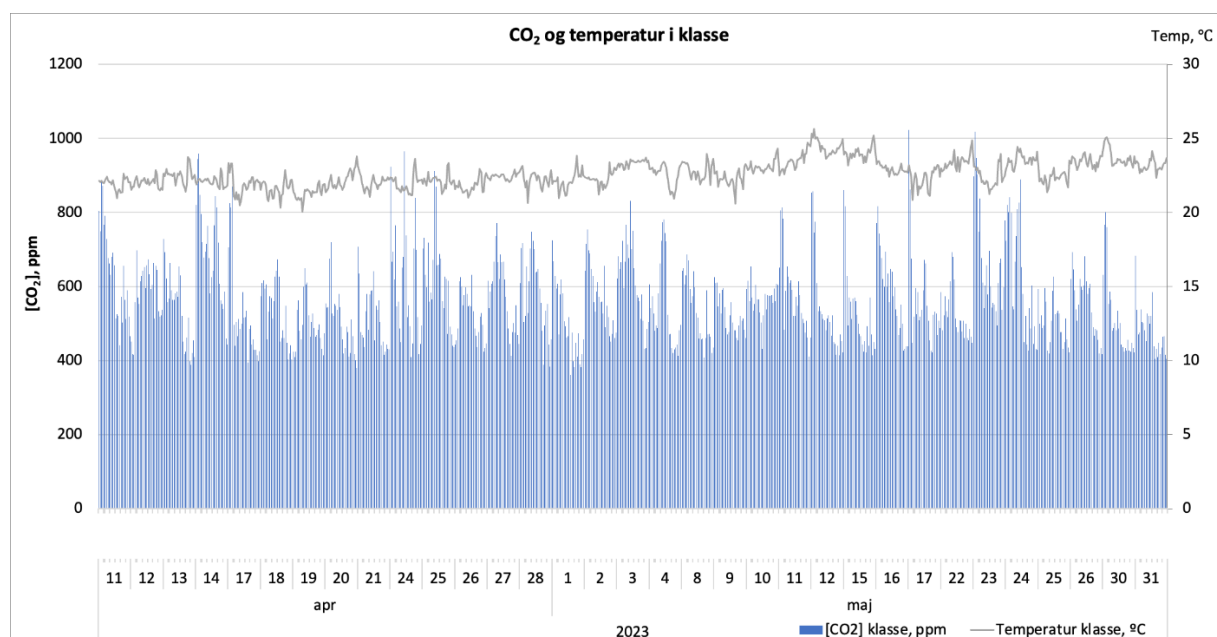
<sup>14</sup> Maria Madsen (Incentive), Daniel Sloth Hauberg (Incentive), Kristian Kolstrup (Incentive) og Jørn Toftum. 2019. Samfundsøkonomiske gevinster ved forbedret indeklimate. Realdania. <https://www.folkeskolen.dk/files/2022/11/28/Incentive%20og%20DTU%20Samfunds%C3%B8konomiske%20gevinster%20ved%20forbedret%20indeklimate%2030kt2019%20v9.pdf>

I marts måned blev CO<sub>2</sub> grænseværdien på 1000 ppm kun overskredet i 5,4% af brugstiden. Det var især en dag som fx den 13. marts, der trækker procenten på. Dette skyldes sandsynligvis heldagsregn. Generelt er overskridelserne kortvarige og kommer maksimalt op på 1400 ppm.



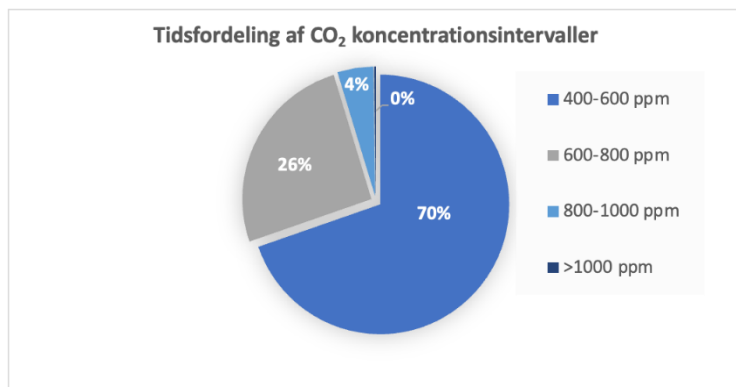
Figur 5.15. Tidsfordeling af CO<sub>2</sub> koncentrationsintervaller, vinter (marts måned).

## Forår



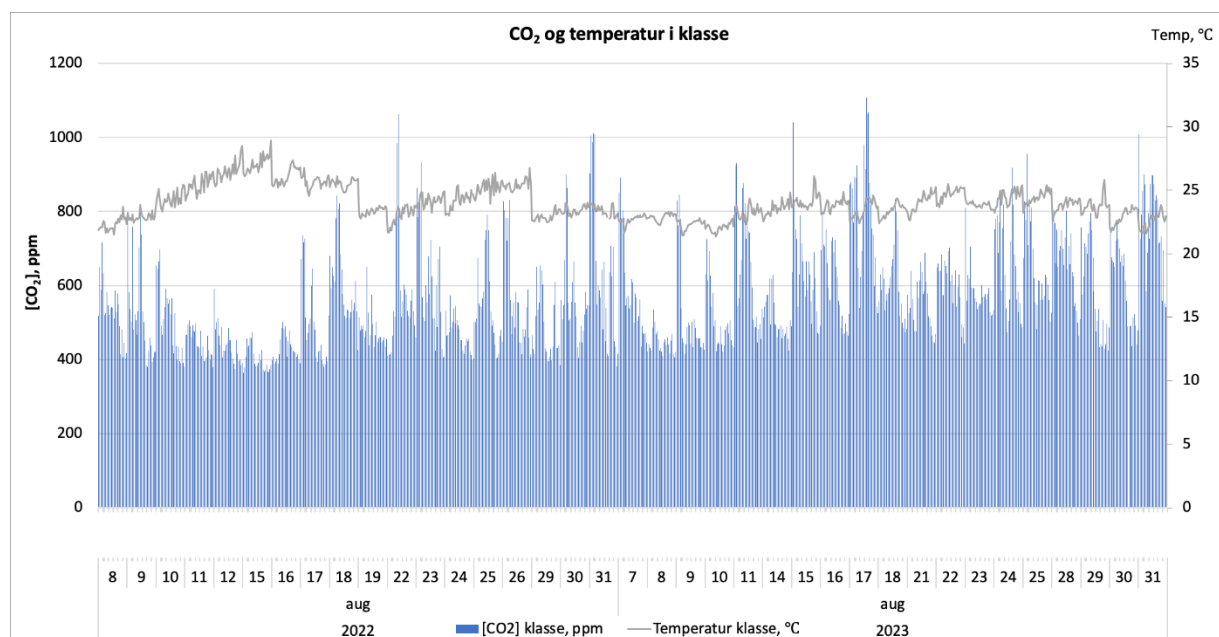
Figur 5.16. Målinger af CO<sub>2</sub> og temperatur i april og maj 2023 i 8/9-klasselokalet på Feldballe Friskole.

I april og maj måned var der kun 2 dage, hvor koncentrationen af CO<sub>2</sub> var oppe over 1000 ppm. I gennemsnit vare der en overskridelse i 0,4% af tiden set over disse 33 forårsdage. En del dage er udtaget grundet ferie.



Figur 5.17. Tidsfordeling af CO<sub>2</sub> koncentrationsintervaller, forår.

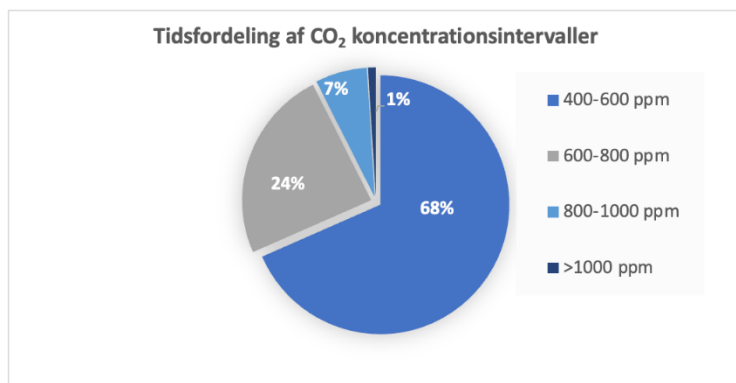
## Sommer



Figur 5.18. Målinger af CO<sub>2</sub> og temperatur i august 2022 og 2023 i 8/9-klasselokalet på Feldballe Friskole, august 2022 og 2023.

Om sommeren kom CO<sub>2</sub> koncentrationen sjældent over 1000 ppm. I gennemsnit blev CO<sub>2</sub> koncentrationen kun målt over 1000 ppm i 1% af brugstiden i august 2022. Hertil kommer at overskridelse var under 10 %, kun 5 dage ud af 38 var koncentrationen af CO<sub>2</sub> kortvarigt over 1000 ppm.





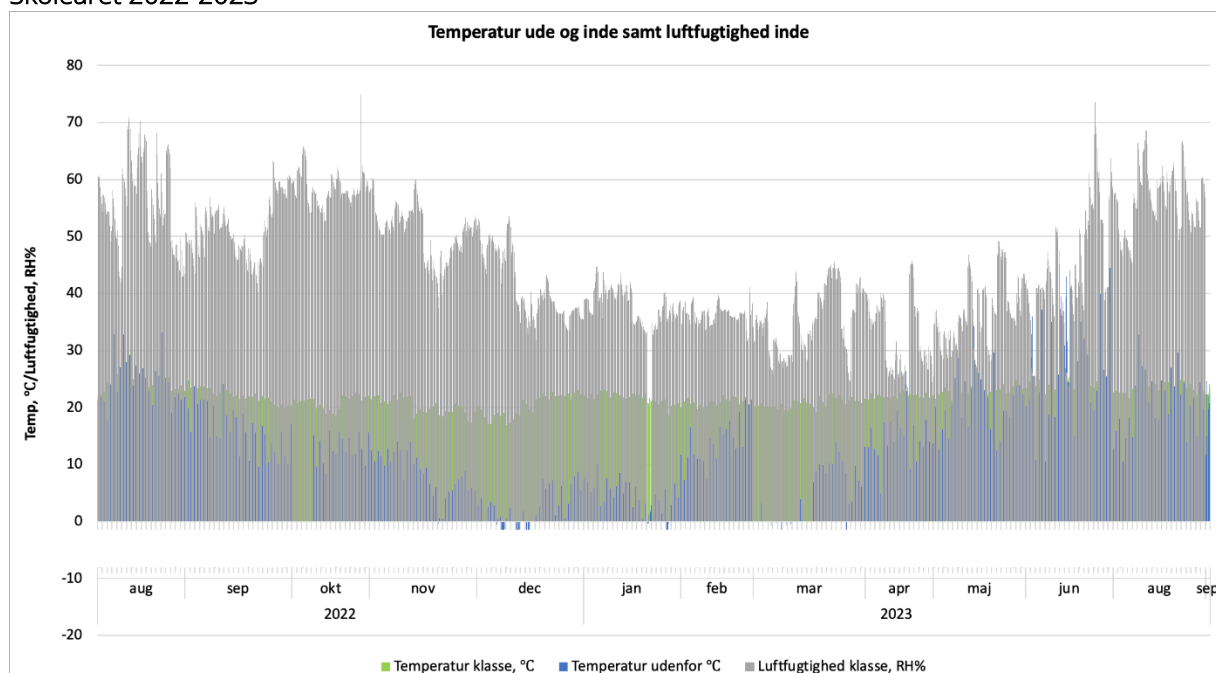
Figur 5.19. Tidsfordeling af CO<sub>2</sub> koncentrationsintervaller, sommer

I juni måned ligger CO<sub>2</sub>-koncentrationen endnu lavere med 96% af brugstiden under 800 ppm. Ud over den varmere udendørstemperatur skyldes det også, at eleverne opholder sig mindre i klassen op til eksaminerne. Samlet set fra marts til og med august målte vi CO<sub>2</sub>-koncentrationer over 1000 ppm i 3 % af brugstiden.

### 5.3.2. Temperatur og RH

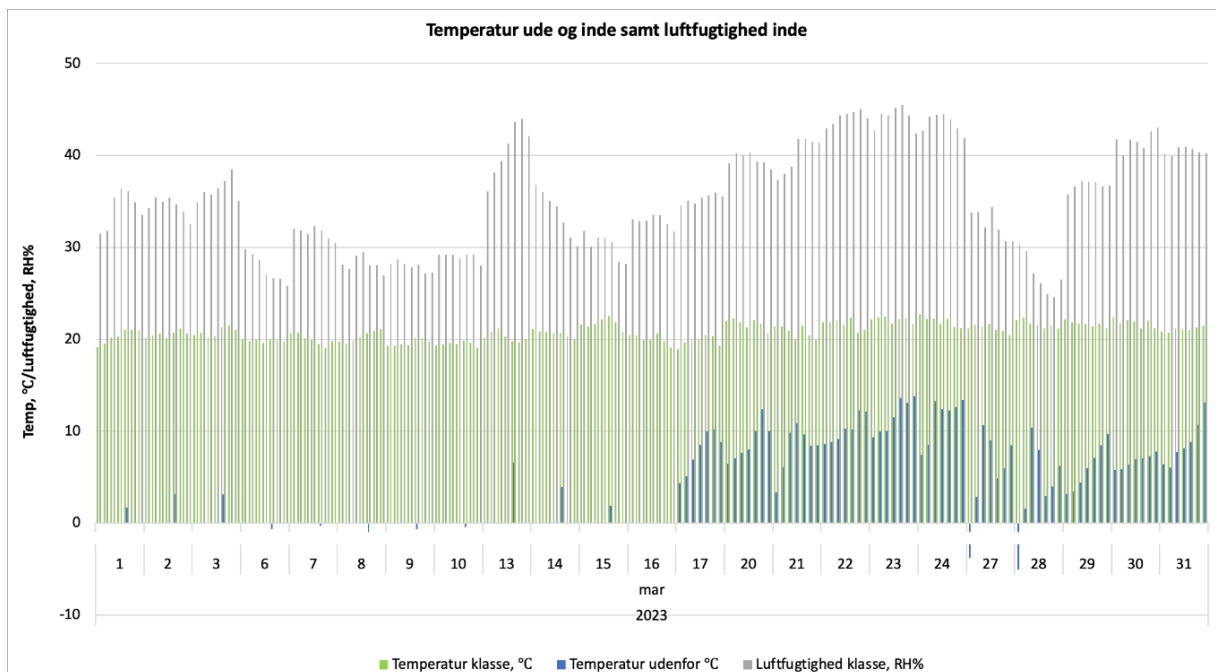
Temperaturen og luftfugtighed for hele skoleåret ses herunder, hvor gennemsnittet for brugstiden fra kl. 8-14 på skoledage er målt.

#### Skoleåret 2022-2023



Figur 5.20. Måling af temperatur ude og inde samt luftfugtighed inde i klasselokalet for 8/9 klasse, fra august 2022 – august 2023. Målingerne er et gennemsnit over en time i brugstiden fra 8-15.

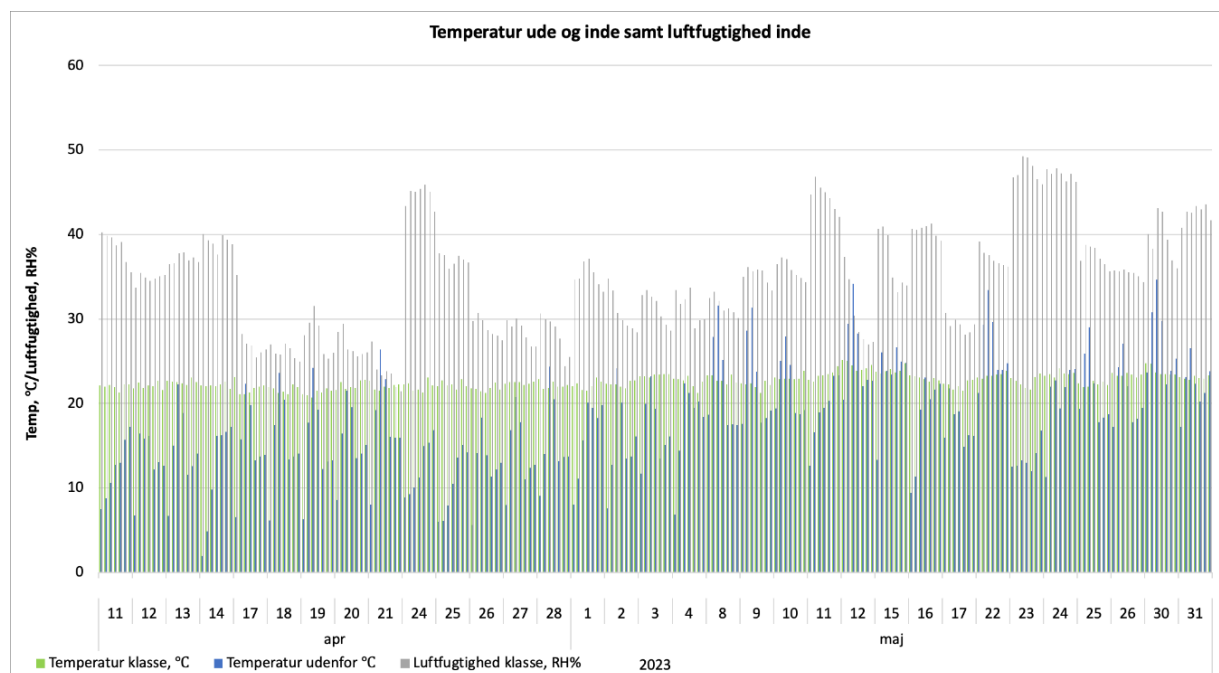
## Vinter



Figur 5.21. Måling af temperatur ude og inde samt luftfugtighed inde i klasselokalet for 8/9 klasse, marts 2023. Målingerne er et gennemsnit over en time i brugstiden fra 8-15.

Marts måned var den koldeste måned i 2023 med et gennemsnit på 3,4 °C. Specielt den første halvdel af marts var kold med flere dage med dagsfrost. Temperaturen var dog ikke under -5 °C i dagtimerne. Inde temperaturen i klassen kunne under behovsstyret ventilation stadig holdes over 20 °C. Luftfugtigheden ligger i perioden lavt mellem 25-45 %, hvilket skyldes det generelt tørre frostvejr udenfor. Ude-temperaturen er et gennemsnit i brugstiden (kl. 8 – 15) i første halvdel af marts grundet sensorudfald.

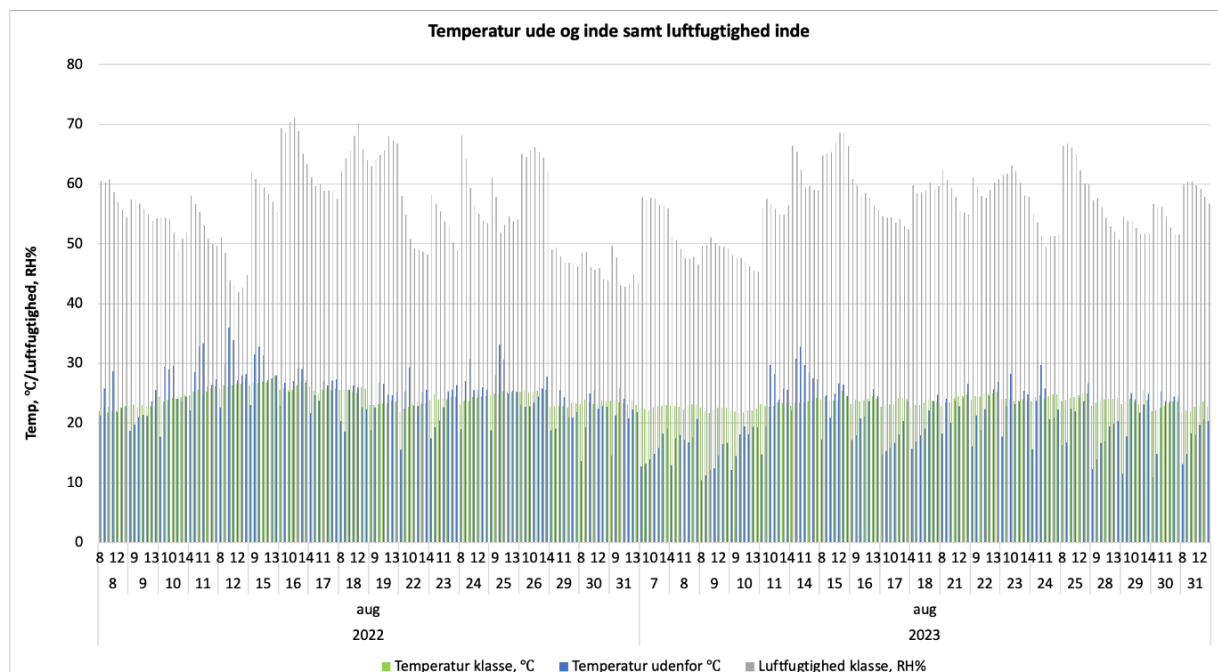
## Forår



Figur 5.22. Måling af temperatur ude og inde samt luftfugtighed inde i klasselokalet for 8/9 april og maj 2023. Målingerne er et gennemsnit over en time i brugstiden fra 8-15.

April og maj var karakteristisk for, at udetemperaturen ændrer sig kraftigt fra temperaturer lige over frysepunktet til over 30 °C. Alene dagstemperaturene kan fra om morgen til eftermiddag svinge med 20 °C, hvilket stiller store krav til varmestyring. Inde temperaturen ligger i perioden temmelig stabilt på omkring 21 °C. Luftfugtigheden svinger mellem 25-50% RH. Alle målinger er angivet som et gennemsnit over 1 time.

## Sommer



Figur 5.23. Måling af temperatur ude og inde samt luftfugtighed inde i klasselokalet for 8/9 klasse, august 2022 og august 2023. Målingerne er et gennemsnit over en time i brugstiden fra 8-15.

August 2022 var et rekord varmt år, og dette afspejler sig også i temperaturmålingerne fra Feldballe, hvor udetemperaturen kom godt over 30 °C. Nogle af de høje udsving skyldes dog sandsynligvis direkte solpåvirkning af sensoren. Inde temperaturen i samme periode er noget lavere, og kommer ikke over 28 °C. I august 23 var temperaturerne mere normale og inde temperaturen kom kun op på 23-24 °C. Luftfugtigheden ligger i hele perioden mellem 40-70% RH, hvilket afspejler luftfugtigheden udenfor. 40-60 % RH betragtes som ideelt. Alle målinger er angivet som gennemsnit over 1 time. Det kan bemærkes, at temperaturen i klassen gennem flere dage faktisk kan holdes køligere end udetemperaturen. Det skyldes bl.a. at NOTECH udnytter ventilation om natten, og at bygningen har en stor masse, der kan holde temperaturen nede.

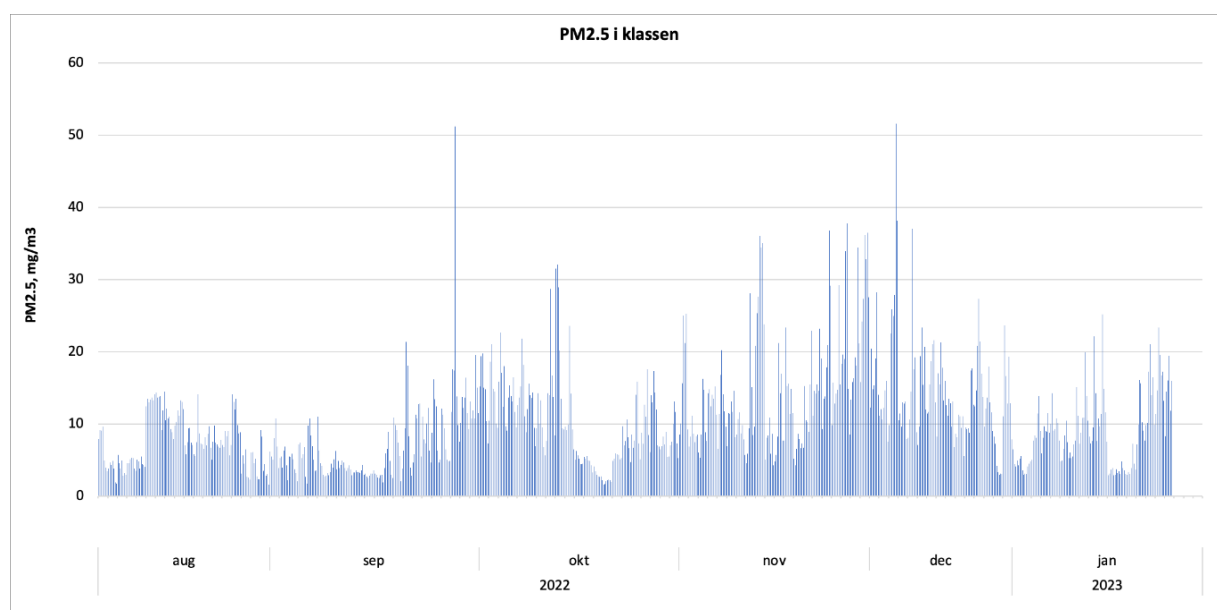
### 5.3.3. Partikler PM2.5/PM10

Partikler deles op i størrelser som anses for skadelige f.eks. PM2.5 og PM10 der henholdsvis er 2.5 og 10 mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) eller mindre i diameter. Begge er respirable, dvs. indåndes, men PM2.5 kan trænge dybere ned i lungerne og sætte sig i alveolerne og endda trænge ind i blodbanen og påvirke organerne. Disse partikler anses derfor for at være særdeles skadelige.

Eksponering for PM2.5 kan forårsage sygdomme både i vores hjertekar- og åndedrætssystem for eksempel slagtilfælde, lungekræft og kronisk obstruktiv lungesygdom (KOL).

Ny forskning har også ifølge WHO vist en sammenhæng mellem prænatal eksponering for høje niveauer af luftforurening og udviklingsforsinkelse i en alder af tre år, såvel som psykologiske og adfærdsmæssige problemer senere, herunder symptomer på opmærksomhedsunderskud hyperaktivitetsforstyrrelse (ADHD), angst og depression<sup>15</sup>.

Forhøjede niveauer af PM2.5 i en periode på 24-timer kan forårsage problemer for personer med eksisterende vejtrækningsproblemer såsom astma. Støvet og forurenede luft kan på længere sigt føre til luftvejsproblemer hos børn som astma, bronkitis og lungebetændelse. EU-grænseværdien for årgennemsnittet af luftens indhold af fine partikler (PM2.5) er i 2021 blevet skærpet til 10 µg/m<sup>3</sup>. De større partikler (PM10) må ikke overskride 15 µg/m<sup>3</sup> som årligt gennemsnit, og en døgnmiddelværdi på 45 µg/m<sup>3</sup> må ikke overskrides mere end 35 gange om året. WHO's grænse er noget lavere. For PM2.5 er grænseværdien 5 µg/m<sup>3</sup> for gennemsnit over et år og 15 µg/m<sup>3</sup> for gennemsnit over 24 timer. For PM10 er grænseværdien 15 µg/m<sup>3</sup> over et år og 45 over 24 timer.



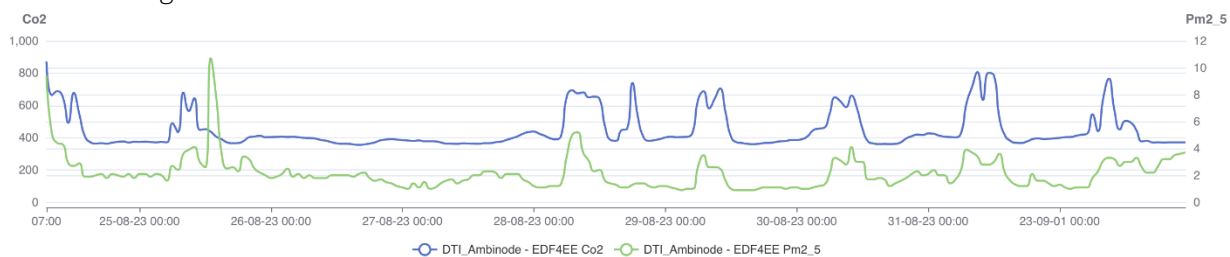
Figur 5.24. Målinger af PM2,5 i 8/9 klasse, fra august 2022 – januar 2023.10.23.

Gennemsnittet for PM2.5, i brugstiden fra august til og med januar, er 10 µg/m<sup>3</sup>. Niveauet er specielt højt fra midt november til december, hvilket kan skyldes mindre ventilation og partikler fra stearinlys.

Generelt for de 6 måneders målinger er niveauet ret højt, når man sammenligner det med WHO's retningslinjer på 5 µg/m<sup>3</sup> som årligt gennemsnit. Det skal nævnes, at ventilationen har været for lav (CO<sub>2</sub>-koncentrationen over 1000) i perioden grundet omtalte problemer med varmepumpen, hvilket har resulteret i højere koncentrationer af partikler. I marts måned hvor systemet fungerede optimalt var den

<sup>15</sup> Ya-Chu Chang et al. 2022. PM2.5 exposure and incident attention-deficit/hyperactivity disorder during the prenatal and postnatal periods: A birth cohort study. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35777438/>

gennemsnitlige PM2.5 koncentration 4,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Da Feldballe-friskole ligger i et landområde uden intensiv landbrugsproduktion eller trafik, er baggrundskoncentrationen udenfor nærmest nul, målt som ikke detekterbar. Til sammenligning var årgennemsnitte af baggrundskoncentrationen på gadeniveau i Aarhus omkring 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  og i København på H.C. Andersens Boulevard omkring 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  i 2020<sup>16</sup>. Ved høj ventilation, der kendetegner styret naturlig ventilation i sommerhalvåret, ligger partikkelkoncentrationen meget lavere.



Figur 5.25. CO<sub>2</sub>-koncentration (Blå) og PM2.5 (grøn) i klasselokalet de 10 sidste dage i august. Gennemsnit over 1 time.

I august 2023 var gennemsnittet af PM2.5 f.eks. kun 3,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Det ses på figur 5.25, at PM2.5 koncentrationen følger CO<sub>2</sub>-koncentrationen, hvilket betyder at PM2.5 er koblet til aktivitet i klassen. Dette kan f.eks. være støv der hvirvles op, aerosoler fra udånding og nys, partikler fra elektronisk udstyr, deodorant, døde hudceller og tøjfibre. Om natten og i weekenderne, hvor der ikke er aktivitet i klassen, kommer PM2.5 koncentrationen ned på 1,5-2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 5.3.4. VOC – on site

VOC betyder “Volatile Organic compounds” eller flygtige organiske forbindelser. Flygtige organiske forbindelser er organiske kemikalier, der bliver til en gas ved stuetemperatur. Der er tusindvis af VOC'er, hvoraf nogle få er skadelige. Langt de fleste er dog harmløse.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA)<sup>17</sup> opfordrer til, at tVOC-niveauer holdes så lave som muligt, typisk under 500 ppb for god indendørs luftkvalitet. Verdenssundhedsorganisationen (WHO) anbefaler en vejledende værdi på 300 ppb tVOC i indeluft. Der er ingen grænseværdi for VOC i Danmark, men ifølge masseeksperimentet er anbefalede niveauer for den maksimale mængde af TVOC ofte 750 ppb. I dette studie fandt man at 10 % af klasserne oplevede TVOC-koncentrationer over anbefalede grænseværdier i mere end halvdelen af tiden<sup>18</sup>.

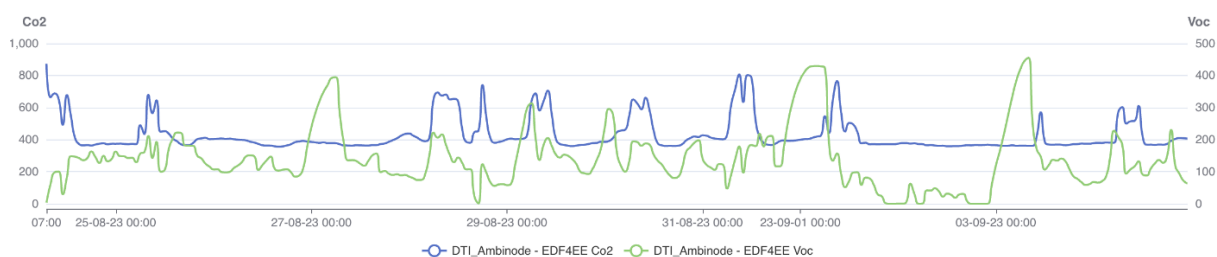
<sup>16</sup> Thomas Ellermann, Claus Nordstrøm og Martin Ole Bjært Sørensen. 2021. Corona- nedlukningens indflydelse på luftkvaliteten i Danmark i 2020. Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. [https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater\\_2021/N2021\\_07.pdf](https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2021/N2021_07.pdf)

<sup>17</sup> [U.S. Environmental Protection Agency \(EPA\)](https://www.epa.gov/)

<sup>18</sup> Masseeksperimentet <https://bce.au.dk/aktuelt/nyheder/nyhed/artikel/kemiske-stoffer-paavirker-indeklimaet-i-danske-klasselokaler>

VOC'er er en stor gruppe kemikalier, der findes i mange produkter, og byggematerialer. Når disse kemikalier er i vores hjem, frigives de eller "afgasser" til luften vi indånder.

Af almindelige eksempler på VOC'er, kan nævnes: benzen, ethylenglycol, formaldehyd, methylenchlorid, tetrachlorethylen, toluen, xylene og 1,3-butadien. Formaldehyd findes bl.a. i de krydsfinerplader som endevæggene i klasseværelset er opbygget af.



Figur 5.26. CO<sub>2</sub>-koncentration i ppm samt VOC-koncentration i ppb fra 24 august til 4 september.

Udledning af VOC'er er ligesom partikler korreleret med aktivitet i klassen, men afdampning fra materialer og rengøringsmidler spiller også en stor rolle her. Det ses f.eks. tydeligt at der er lørdagsrengøring i klassen den 26. august og den 2. september, da koncentrationen af VOC herefter stiger kraftigt og først falder, når der kommer ventilation på om mandagen. Der har sandsynligvis også været noget rengøring af overflader den 3. september.

Generelt er koncentrationen af VOC ikke over 200 ppb i skoletiden, men nogle dage, typisk mandag efter der er blevet gjort rent i weekenden, ligger koncentrationen af VOC stadig over 300 ppb, når eleverne møder ind. Herefter falder koncentrationen dog hurtigt igen som resultat af ventilation. Se også afsnit 7. vedr. VOC-målinger af mock-up.

### 5.3.5. Dagslysmålinger

Dagslysmængden skal være min. 300 lux i 50% af det relevante areal i halvdelen af dagslystimerne. Vi har gennemført målinger kontinuert i forsøgsperioden.

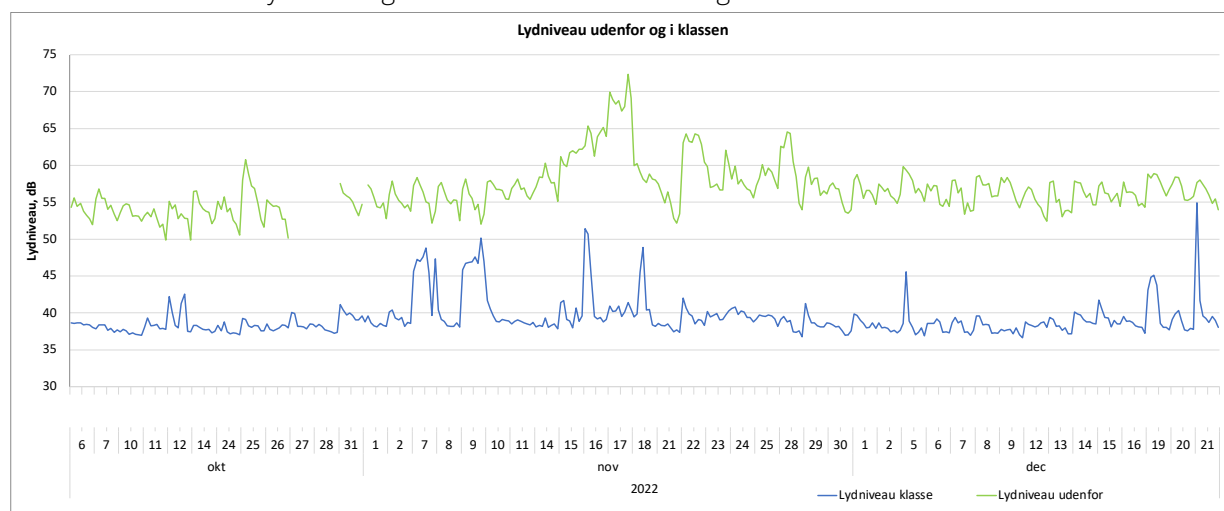


Figur 5.27. Eksempel på dagslysmåling i 8/9 klasse, hvor der er målt fra den 1-11 september 2023. Dagslys er angivet i Luminans (LUX) der er midlet over en time.

Det ses på figur 5.27. at dagslyssintensiteten i en tilfældig periode i september 2023 kommer over 300 LUX i 6 ud af 11 dage. Det skal bemærkes, at lysmåleren peger mod nordvest og derfor altid sidder i skygge i undervisningstimerne. Klassen har et vinduesareal på 32 m<sup>2</sup>, hvilket udgør ca. 33 % af gulvarealet. Hertil kommer at vinduerne i facaden er lavet af 2-lags ruder med jernfattigt glas med en lys-transmittens på 0,84, hvilket i princippet giver en endnu større lystransmission. Da summen af glasarealet ifølge BR18 skal udgøre mindst 10 % af det samlede gulvareal for et rum, lever klasseværelset op til kravene fra BR.

### 5.3.6. Lydniveau

Lydniveauet er målt kontinuerligt gennem hele forsøgsperioden, både i klasselokale for 8/9 klasse samt udenfor, ud mod Ebeltoftvej. På figur 5.28. ses en graf over lydniveauet uden på facaden, ud mod vejen og inde i klassen i udvalgt periode. Målingerne er fra oktober 2022 til januar 2023 og i tidsrummet hverdage mellem klokken 15-17, hvor eleverne er taget hjem. CO<sub>2</sub> koncentrationen er stadig høj (over 600 ppm), hvilket betyder at filtrene er åbne. Samtidig er der mest trafikstøj i myldretiden. Her ved kan reduktion af lydniveau gennem det åbne filter beregnes.

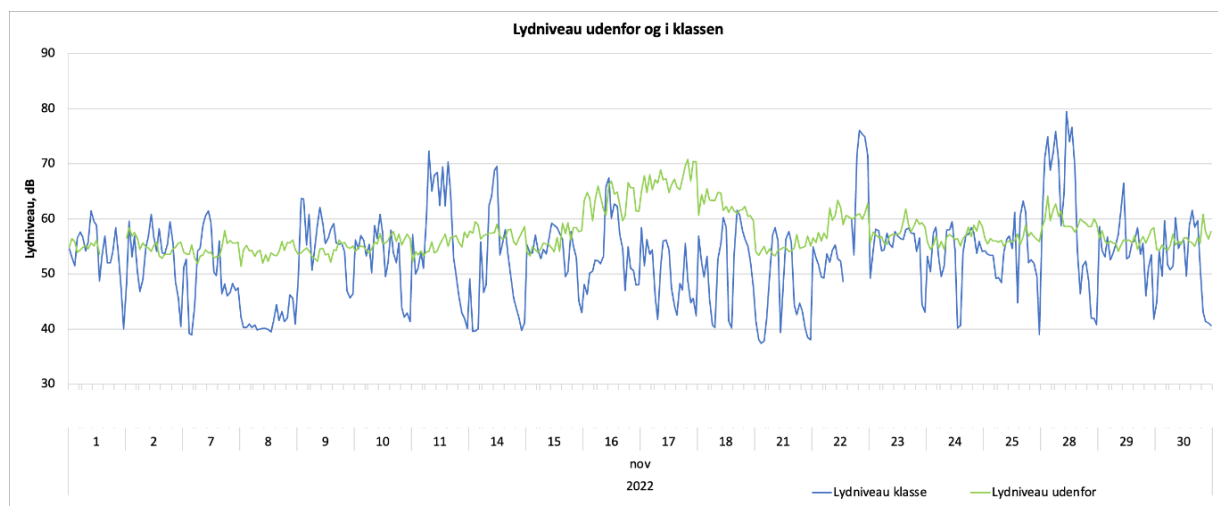


Figur 5.28. Lydniveau, dB fra oktober til december 2022, i 8/9-klasselokale. Op ad y-aksen har vi dB og ud ad x-aksen tidspunktet. Målingerne er gennemsnit over 15 min fra kl. 15-17.

I gennemsnit ses en reduktion fra 57 til 39 dB mellem lyden fra ydersiden af facaden ud mod vejen og på den anden side inde i klassen. Målingerne er foretaget over 3 måneder lige efter brugstiden, hvor filtrene har været åbne. Dette giver en lydreduktion over facaden på 31%. Da lydniveauet i dB er logaritmisk, betyder reduktionen reelt at man i klassen hører meget lidt støj udefra. Reduktionen skal ses i forhold til ventilation via et åbent vindue, hvor man lige inden for vinduet ikke vil opleve nogen reduktion af lydniveauet.



Lydniveauet i klassen er afgørende for trivsel og et godt læringsmiljø. Støj nedsætter elevernes evne til at indlære og gør det svært for udsatte børn at blive inkluderet. I figur 5.29. ses et eksempel på lydniveauet i november i skoletiden fra 8-14.



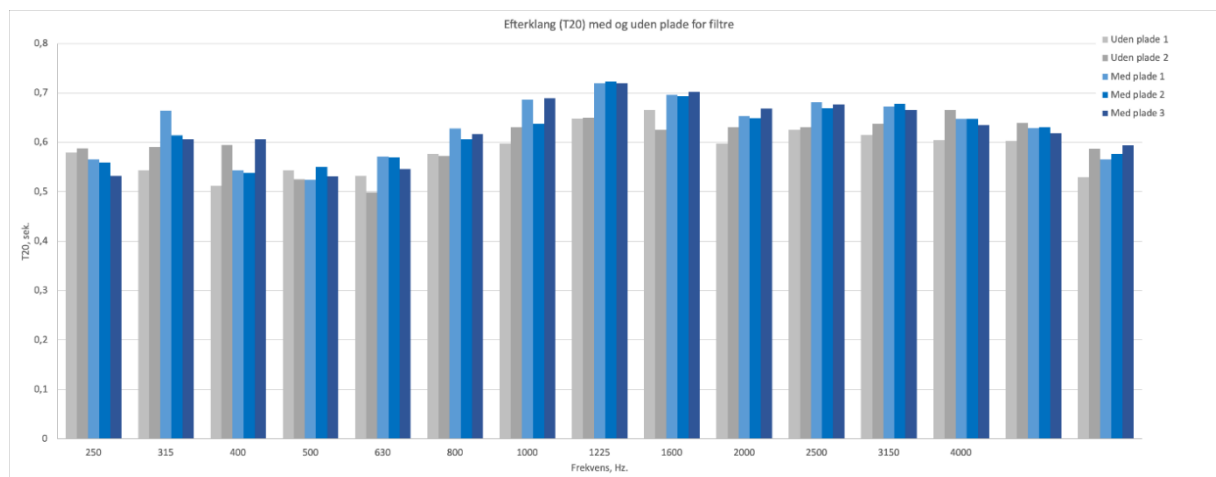
Figur 5.29. Lydniveau, dB fra oktober til november 2022, i 8/9-klasselokale samt udenfor. Målingerne er gennemsnit over 15 min fra kl. 8-15.

Lydniveauet varierer typisk mellem 40 og 60 dB i løbet af en klassesstime, men kan i nogle tilfælde ramme 70-80 dB. Lydniveauet er meget sjældent over 65 dB, som er grænsen for hvad der betragtes som støjende. Gennemsnittet for lydniveauet i brugstiden i november mellem kl. 8-14 er 53 dB, hvilket er meget lavt for en skoleklasse. Fra oktober 2022 til januar 2023 lå lydniveauet i brugstiden på gennemsnitlig 51 dB. I en undersøgelse af 35 klasser fra 2012 fandt man, at det gennemsnitlige lydniveau var 72 dB i en undervisningstime<sup>19</sup>, hvilket svarer til støjen fra en støvsuger på et par meters afstand. Så højt et lydniveau blev kun målt et par gange i november måned i 8/9 klasse på Feldballe friskole.

### 5.3.7. Efterklang

Vi har målt efterklang i klassen, der efter reglerne ikke må ligge over 0,6 sek. for undervisningslokaler i BR. Efterklang er defineret som den tid det tager for lydtrykniveauet at falde 60 dB, efter at lydkilden er stoppet angivet i sekunder (s). Grænseværdier er relateret til målinger i henhold til DS/EN ISO 3382-2. I praksis bruger man ikke 60 dB mere, da det er for svært at overholde. I stedet bruges T20 henfaldstiden for en impulsrespons mellem 5 til 25 dB. Vi har målt i oktavniveauet mellem 250 og 4000 Hz. Vi har målt 2 forskellige steder i klassen uden gipsplader foran filterne, og 3 forskellige steder med plader for filterne. Hver måling består af et gennemsnit af 7 forskellige sweep hen over frekvenserne. På figur 5.30. er målinger med plade illustreret med blå søjler, og målinger uden plade med grå søjler. Gennemsnittet for målingerne uden plade er 0,595 sek, og gennemsnittet af målingerne med plade er 0,630 sek. Så filterne er herved årsag til, at klasserummet på Feldballe overholder kravene i BR. Uden filterne ville klasselokalet 8/9 ikke leve op til kravet til BR.

<sup>19</sup> <https://nfa.dk/da/nyt/nyheder/2014/stoer-i-klassen-giver-laerere-gener---ikke-hoereskader>



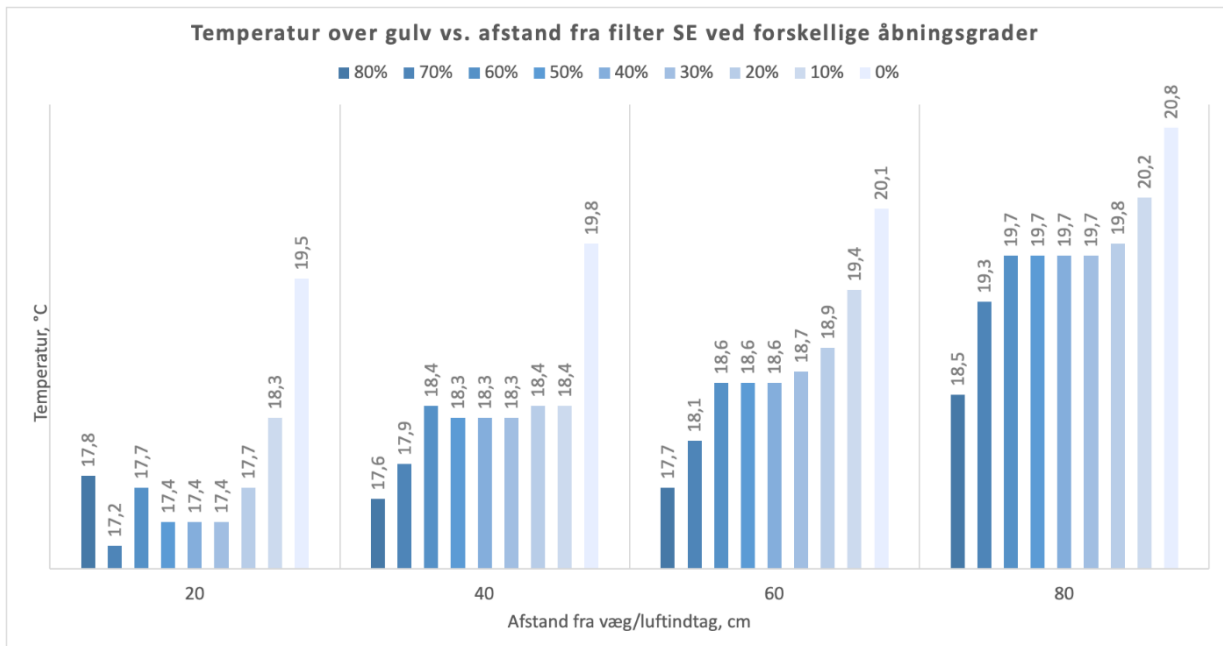
Figur 5.30. Efterklang målt i 8/9 klasselokale på Feldballe Friskole.

Det er interessant at se, at filtrene absorberer mindre ved lave frekvenser som 250-400 Hz. Dette skyldes sandsynligvis, at filteret er relativt tyndt og opsat oven på et relativt hårdt underlag (alu spjæld). Da lave toner har en højere bølgelængde og har mere energi, absorberes de i mindre grad af filteret, men reflekteres i stedet af det hårde alu-spjældet bagved.

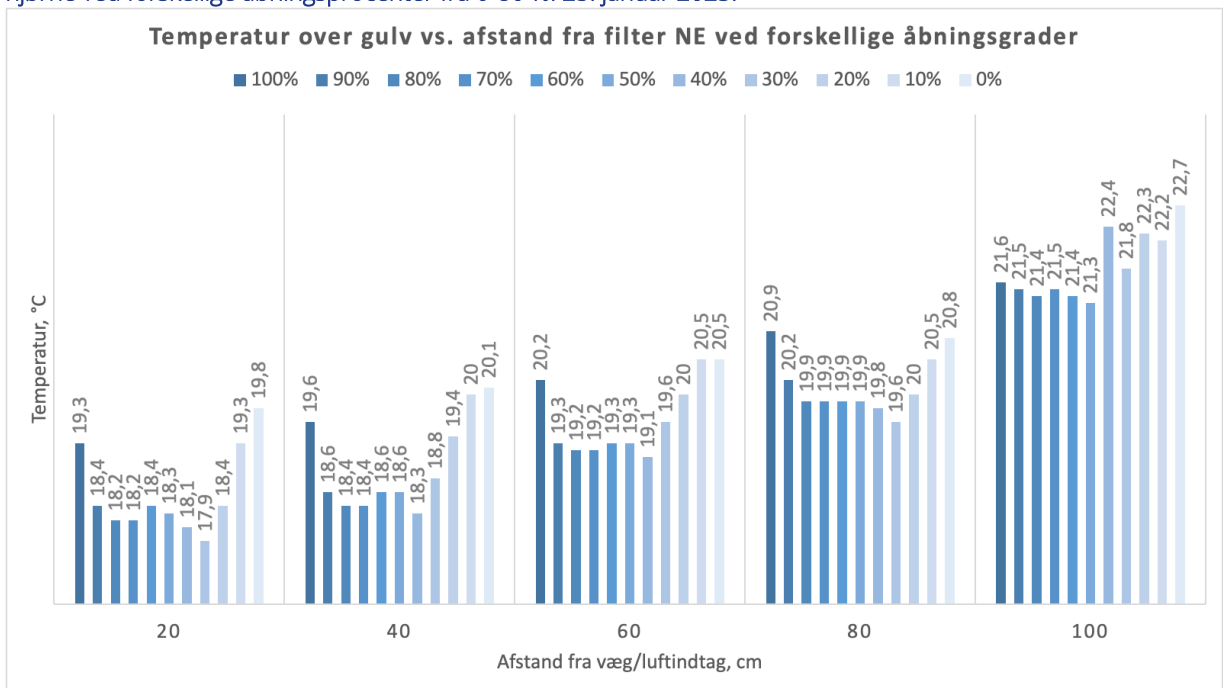
### 5.3.8. Temperaturgradient

En af de væsentligste parametre for træk er temperatur og lufthastighed. På Feldballe Friskole er målt temperaturgradienten foran filtrene, hvor luften kommer ind for at kunne vurdere risikoen for trækgener under praktiske forhold. I afsnit 6.6. er gennemført egentlige trækratemålinger i klimalaboratorium med NOTECH mock-up.

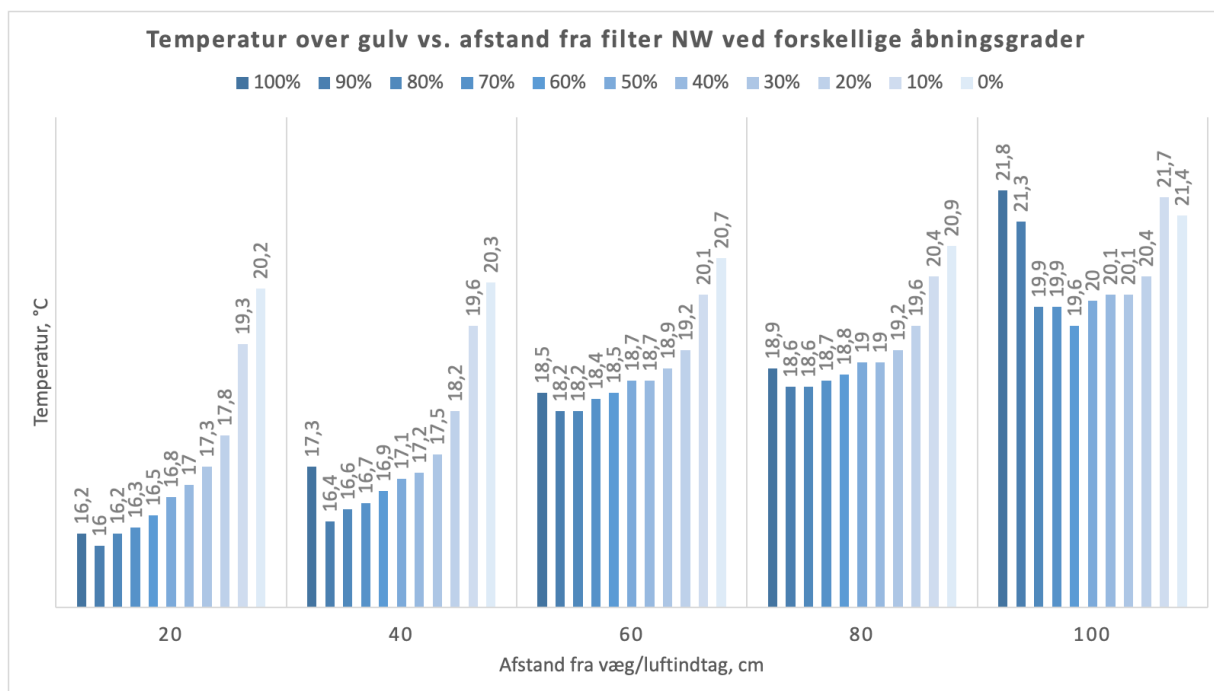
Den 25. og 26. januar 2023 blev der på Feldballe-friskole gennemført detaljerede målinger af temperatur i forskellige afstande fra luftindtaget og højder over gulvet samt ved forskellige flow/åbningsgrader. Målingerne på de sydlige filtre blev gennemført den 25. januar på en overskyet dag med vind fra SV 3-5 m/s. Udetemperatur på 3-5 °C.



Figur 5.31. viser temperatur 5 cm over gulvet som funktion af afstand fra væg/luftindtag ved filter i det sydøstlige hjørne ved forskellige åbningsprocenter fra 0-80 %. 25. januar 2023.



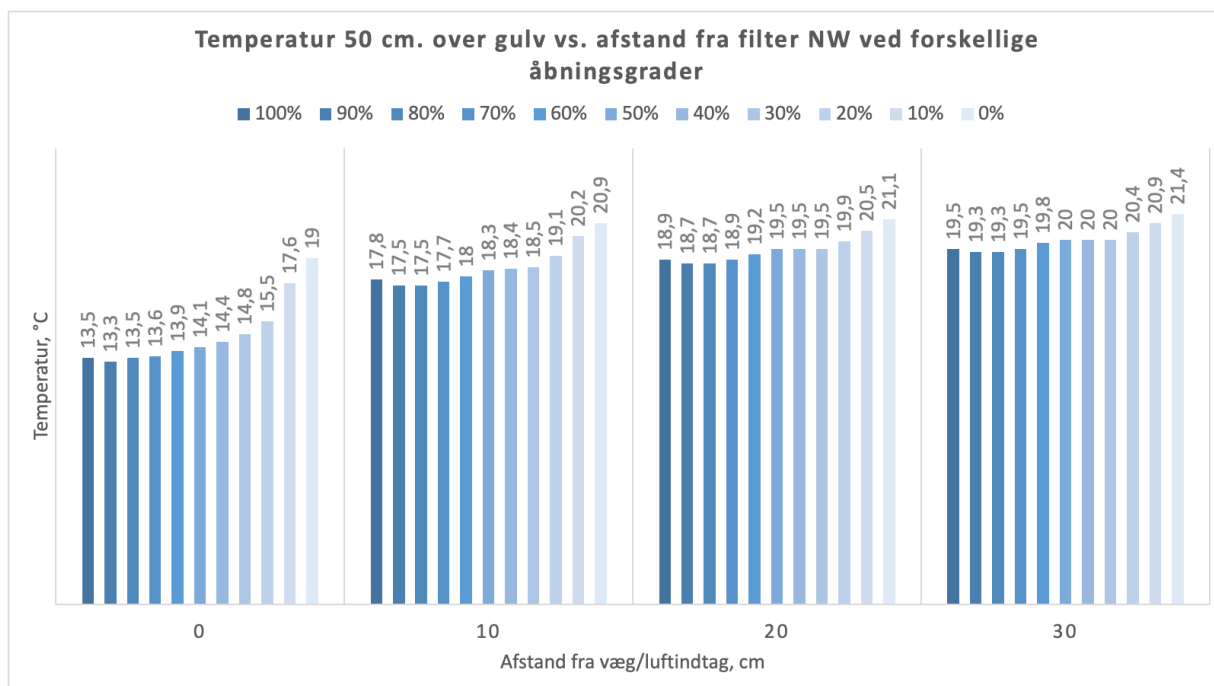
Figur 5.32. viser temperatur 5 cm over gulvet som funktion af afstand fra væg/luftindtag ved filter i det nordøstlige hjørne ved forskellige åbningsprocenter fra 0-100 %. 26. januar 2023.



Figur 5.33. viser temperatur 5 cm over gulvet som funktion af afstand fra væg/luftindtag ved filter i det nordvestlige hjørne ved forskellige åbningsprocenter fra 0-100 %. 26. januar 2023.

Det ses i figurerne 5.31 -5.33, at temperaturen generelt stiger med øget afstand fra væggen, og at temperaturen i generelt en er lavest 20 cm fra væggen, hvor den køligere luft fra indtaget falder ned og rammer gulvet. Der er dog for de to nordlige filtre ikke stor forskel på temperaturen i 20 og 40 cm afstand, da det ca. er her luften rammer gulvet. Temperaturen er målt 5 cm over gulvet, hvor lufthastigheden er størst og derved bidrager mest til træk. Temperaturen var, målt 20 cm fra ydervæggen under filteret, minimum mellem 16-18 °C og én meter fra væggen 18,2-21,3 °C. Der er også en tendens til, at temperaturen falder ved øget åbningsgrad. Ved 90-100% åbningsgrad ses, at temperaturen er højere end gennemsnittet og specielt længst væk fra væggen. Dette kan skyldes øget turbulens ved de højere lufthastigheder, der suger varmere luft fra omgivelserne. Der blev målt en lufthastighed ud fra filteret ved 80 % åbningsgrad til at være 0,15 m/s, hvilket er under grænsen for laminar flow. For ISO 14644 specificeres det, at luftstrømhastighedsgrænser i laminare flow-systemer er 0,45 m/s  $\pm$  20 %.

Temperaturen blev også målt i 50 og 100 cm højde. Der var dog stort set ikke forskel på temperaturgradienten i disse to højder, derfor er kun temperaturen i 50 cm højde vist. På figur 5.34 ses, at temperaturen er 13,5 °C ved fuld ventilation lige ved luftindtaget, hvilket er ca. 10 °C varmere end udeluften. Da den kolde luft hurtigt falder ned mod gulvet, stiger temperaturen hurtigt ind i rummet, i 50 cm højde, og når 19,3 °C 30 cm fra indtaget.



Figur 5.34. viser temperatur 50 cm over gulvet som funktion af afstand fra væg/luftindtag ved filter i det nordvestlige hjørne ved forskellige åbningsprocenter fra 0-100 %. 26. januar 2023.

I betragtning af at vi tager luften ind ved 3-4 °C, sker der en betydelig opvarmning af luften gennem facaden. Dette er en sandsynligvis årsagen til, at der ikke opleves trækgener på Feldballe-friskole. Desuden er bordene placeret, så der ikke sidder nogen direkte foran indblæsningen.

En teoretisk udregning af trækrate ved gulvet indikerer, at vi skal 1,4 meter fra væggen ved et luftskifte på 1000 m<sup>3</sup>/h og en temperatur på 19 grader, for at holde os under 20 % trækrate. Dette luftskifte er ca., hvad der kræves for at holde CO<sub>2</sub> koncentrationen under 1000 ppm ved 30 elever i klassen. Vi målte lufthastigheden ud fra filteret ved 80 % åbningsgrad til at være 0,15 m/s, der svarer til et luftflow på 930 m<sup>3</sup>/h samlet for klassen. Dette er tæt på det beregnede flow ud fra CO<sub>2</sub>-ballancen på 968 m<sup>3</sup>/h. I beregningen af trækgrænsen er det antaget, at luften falder lodret ned foran filterne og udbreder sig i en halvcirkel væk fra væggen i en bølge på 10 cm højde, hvilket er en forsimpning af det billede vi har set fra målingerne i klimalaboratoriet, afsnit 6.6. I en radius på 1,4 meter fra væggen 10 cm. over gulvet, midt under luftindtaget, vil lufthastigheden være reduceret til 0,16 m/s, hvilket svarer til 20 % trækrate. I mock-up forsøget i klimalab så vi at trækgrænsen lå på ca. 3,5 meter fra luftindtaget det en ΔT på 16 °C, figur 6.9-11. Forskellen skyldes sandsynligvis, at luften i klimalab kun blev opvarmet med et par grader gennem den noget tyndere facade. Vinter ventilation på Feldballe-friskole kan bedre sammenlignes med forsøg i klimalab med ΔT på 11 °C, hvor vi så en trækgrænse på lige over 2 meter fra væggen. Med en 10 graders opvarmning gennem facaden vil det svare til en real temperaturforskel ude og ind på ca. 20 °C, eller en udetemperatur på 0 °C.

### 5.3.9. Performance-rapportering – drift og vedligehold

NOTECH-filtret er konstrueret således, at man vil kunne udskifte delkomponenter, fx filterelement med ålegræs, hvis det viser sig at være nødvendigt. Vi har hvert år siden installation af NOTECH-filtret siden 2021, fjernet lamel-fronten, og vurderet om filtret er intakt.

Formålet har været at vurdere om ålegræs-materialet stadig var intakt, og ikke var faldet sammen og havde dannet kanaler/kuldebroer i elementet. Det har ikke været tilfældet i monitoringsperioden og driftsperioden indtil efterår 2023. Der har endnu ikke været behov for at udskifte materiale. En vigtig parameter har også været om der har været målt stigende tryktab, hvilket der ikke har været tilfældet.

Det forventes, at filtret på Feldballe Friskole vil kunne holde en årrække uden at der kan registreres ændringer, minimum 5 år. Over tid kan der potentielt være en lille risiko for at tryktabet over filtret stiger, hvis der sker en ophobning af partikler i filtret. Som nævnt har det indtil nu ikke været tilfældet.

Filterperformance kan løbende vurderes ved at estimere et maximalt luftskifte vha. måling af CO<sub>2</sub>-indholdet i klassen ved fuld belastning, dvs. hvor alle eleverne er til stede. Hvis koncentrationen på 1000 ppm kan overholdes tilsvarende måleperioden 2022-2023, anses det som udtryk for at tilstrækkelig luft kan passere gennem filtret, og dermed er velfungerende. Forudsætning er, at hele styre- og varmesystemet fungerer optimalt.

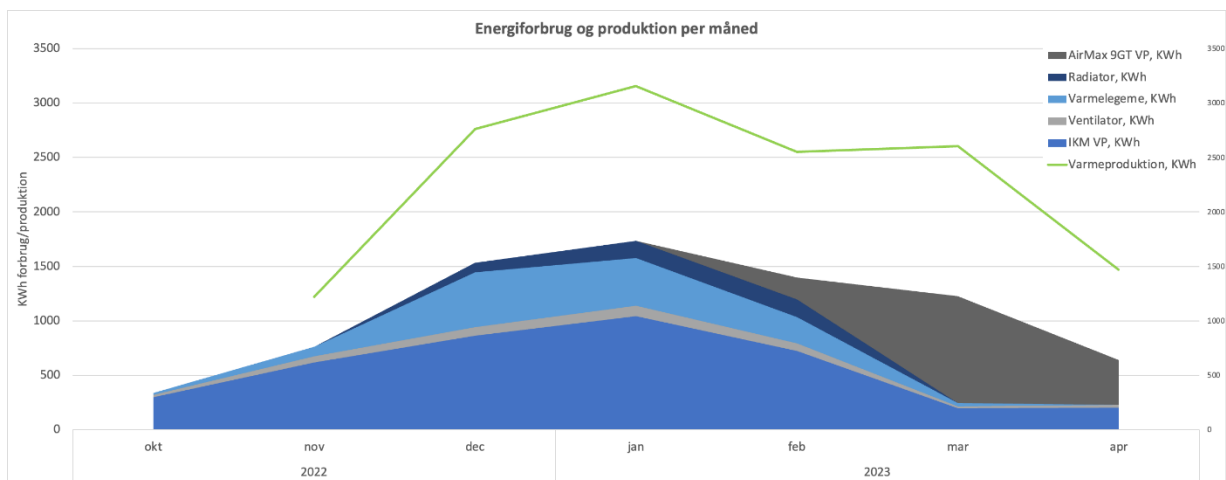
I nærværende projekt er der anvendt mange timer på tilpasning af systemet, da WindowMaster-styringen har skulle udvikles færdigt til systemet, og tilpasset en konkret skoleklasse. Samtidig har der været anvendt ekstra tid mht. gennemførelse af monitoring ved fuldskalaafprøvningen af NOTECH.

I fremtiden forventer projektgruppen at tilpasning af systemet kan ske på få timer, samtidig med indkøring af styringssystemet på lokationen.

Projektgruppen har vurderet, at der max vil være brug for 1 time per år per skoleklasse til at gennemføre serviceeftersyn af NOTECH, bestående af et tjek om ålegræs-filtret er intakt. Desuden må der påregnes tid til servicering af indblæsningsvarmepumpe samt styringssystem fra WindowMaster.

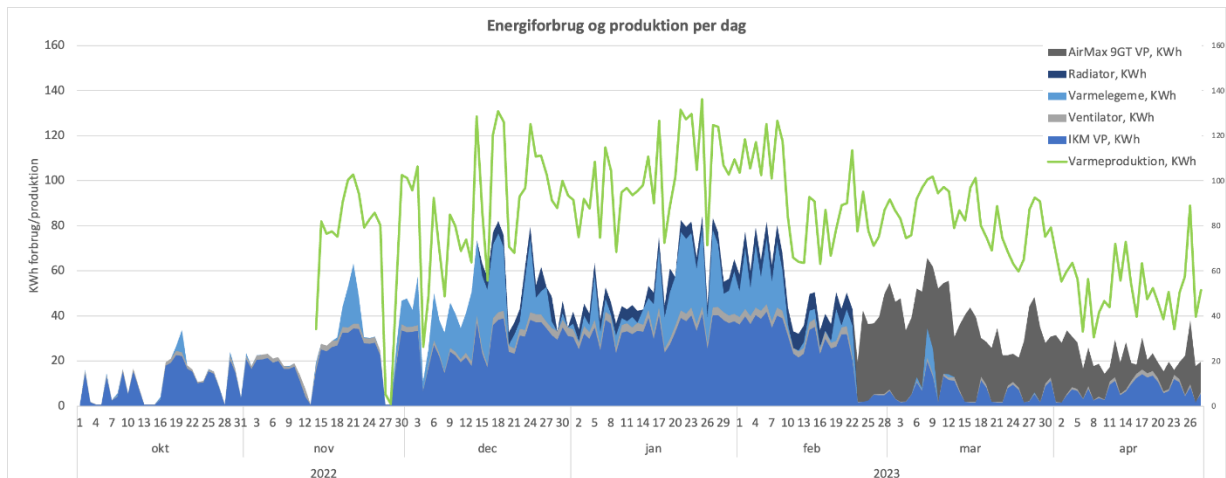
### 5.3.10. Energiforbrug og -produktion

Elforbrug til varme samt varmeproduktion for varmepumper for fyringssæsonen 1. okt. 2022 til 1 maj 2023 er monitoreret.



Figur 5 35. viser forbruget til varme for forskellige varmekilder og varmeforbruget for varmepumperne og tilbygningen på Feldballe-friskole.

På figur 5.35 kan man se hvordan den nye varmepumpe har overtaget forbruget i fra sidst i februar, hvor den blev installeret. Årsforbruget er 7634 kWh, inkl. radiatorer, hvilket divideret med det 233 m<sup>2</sup> tilbygning er ca. 32,7 kWh/m<sup>2</sup>/år. Dette betyder at bygningen lige akkurat lever op til BR18 lavenergiklassen krav på 33 kWh/m<sup>2</sup> pr. år



Figur 5 36. viser forbruget til varme for forskellige varmekilder og varmeforbruget for varmepumperne og tilbygningen på Feldballe-friskole.

Det ses på figur 5.36. at den nye varmepumpe (AirMax 9GT) blev installeret omkring den 23. februar 2023. Herefter var der ikke behov for el-radiatorer, og varmepumpen fra IKM kørte meget mindre og stort set uden brug af varmepatron. Logning af varmeproduktion blev opsat midt i november som det kan ses på figur 5.36 illustreret med den grønne graf.

SCOP'en er i gennemsnit for fyringssæsonen nov.-maj liggende på 2,04, hvilket er noget lavere end forventet. Dette har sandsynligvis noget at gøre med, at varmepumpen ikke har fungeret optimalt i størstedelen af vinteren. Udsugningsvarmepumpen har i hele forsøget kørt på udedrift, hvilket betyder at

varmepumpen ikke har udnyttet varmen i udsugningsluften, hvilket varmepumpen ellers har potenti-ale for. Dette skyldes udfordringer med teknikken.

Energirammen i Bygningsreglementet viser, hvor meget energi en nyopført bygning højst må bruge til opvarmning, ventilation, køling, varmt vand og belysning. Energirammen for kontorer, skoler, institutio-ner o.l. er ifølge BR18  $41 \text{ kWh/m}^2 + 1000 \text{ kWh}$  år/opvarmet areal.

Det betyder, at det samlede energibehov for tilbygningen på Feldballe-friskole på  $230 \text{ m}^2$  højst må være  $10.430 \text{ kWh}$  pr. år.

Lavenergiklassen krav på  $33 \text{ kWh/m}^2$  pr. år er frivillig. For at leve op til lavenergiklassen i BR18 må det samlede energibehov for en offentlig bygning på  $230 \text{ m}^2$  højst må være  $7.590 \text{ kWh}$  pr. år.

Vinterhalvårsforbruget blev målt til  $7226 \text{ kWh}$ . Hertil skal lægges strøm til lys. Der er i alt  $16+8$  led-skin-ner i klasseværelse + fysiklokale på hver  $30\text{W}$ . Hvis vi antager, at lyset er tændt i brugstiden  $8-15$  på hverdage i hele vinterhalvåret 1. oktober til 1. april, er det  $114$  dage  $\times$   $7$  timer =  $798$  timer. Det bliver til ca.  $34 \text{ kWh}$ . Der vil ligeledes være et lille varmebehov til varmtvand i på badeværelset i sommerhalv-året. Hvis  $30$  elever hver bruger  $12$  liter  $30^\circ\text{C}$  varmt vand om dagen i  $86$  skoledage, vil det kræve  $30,96 \text{ m}^3$  vand. Det skal bruges  $1,16 \text{ kWh}$  for at opvarme  $1000$  liter vand  $1^\circ\text{C}$ , og hvis vi regner med at van-det skal opvarmes  $18^\circ$  bliver det samlet  $646 \text{ kWh}$ . Da det er varmepumpen, der varmer vandet op, kan vi nøjes med  $317 \text{ kWh}$ . Det passer meget godt med, hvad vi ser første uge i oktober 2022, hvor varme-pumpen cirka har brugt  $4 \text{ kWh}$  om dagen. Det samlede beregnede årlige energiforbrug til rumop-varmning, varmt brugsvand, lys og ventilation er således:  $7.577 \text{ kWh}$ . Dette vurderes derfor at tilbyg-ningen kan overholde kravene til lavenergiklassen på  $33 \text{ kWh/m}^2$  pr. år.

Når NOTECH-systemet er lukket uden for skoletid har systemet en samlet U-værdi på ca.  $0,22$  sva-rende til et moderne vindue eller  $30 \text{ cm}$  halmvæg.

## 6. Mock-up forsøg i indeklimalab på TI

Mock-up forsøgene er gennemført i klimakammer på DTI, Tåstrup, afdeling for Energi og Miljø, under ledelse af Merete Lyngbye i samarbejde med Erik Hvirgel Hansen m.fl. samt koordineret i tæt samar-bejde med hele projektgruppen.

### 6.1. Overordnet testplan: Måling af tryktab og træk

Afprøvningerne i klimakammer har omhandlet måling af tryktab gennem NOTECH element afhængigt af filtertype inklusiv den ydre beklædning foran og rundt om NOTECH elementet. Målet har været at do-kumentere tryktabet, som ønskes mindst muligt for at kunne udnytte de naturlige drivkræfter, vind og opdrift til at bevæge luften. Den naturlige opdrift er størst om vinteren, og systemet ønskes endvidere



at kunne bidrage mest muligt som gratis køleeffekt på sommerdage, hvor udetemperaturen er under inde temperaturen, og hvor loftvinduet er åbent.

Derudover er undersøgt, hvordan trækraten performer i nærheden af NOTECH-elementets (DR=drafra-ten = trækraten) og overholder den maksimale værdi på 20 %, som krævet i bygningsreglementet. Dette gælder under hensyntagen til temperaturdifferens inde- ude og luftstrømsmæssigt. Målingerne fremstilles i kurveform i et lodret midtsnit (normal-snit) i det målte område fra ca. 5-170 cm over gulv og 10 cm over gulv i et mindst 4 m bredt felt og tværs over gulvet.

## 6.2. Opbygning af NOTECH mock-up - opstillet til trykmåling i klimakammer

Mock-up forsøgene i Tåstrup startede med planlægning og opbygning af mock-upen i efteråret 2022 og gennemførelse af afprøvningen i vinter/forår 2023. Formålet var at teste NOTECH filterets performance mht. tryktab og træk under standardiserede forhold. Projektgruppen har brugt meget tid på at forberede og koordinere forsøgene, så det tættest muligt afspejlede virkeligheden på skolen (case Feldballe friskole) og samtidig fulgte standarder for sammenlignelig teknologi.

I forbindelse med forberedelserne til forsøgene blev der tegnet en 3D model af facademodulet fra Feldballe-friskole for at der efterfølgende kunne bygges en replica i TI's klimalab. Modellen inkluderede hele vægelementet inkl. facade, forskalling, Insekt-net, NOTECH filter akustisk filt og lamelfront, da alt dette bidrager til tryktab over systemet.

Ud fra tegninger og flere møder blev der opbygget en replika af vægelementet i 1:1, dog noget forsimplet i forhold til størrelse og luftens passage gennem facaden. Dette gav os mulighed for at regulere åbningsgraden via sprækken på figur 6.3., og herudfra måle tryktabet og vurdere optimal åbningsgrad til brug for fremtidig dimensionering og anbefalinger til bygherre.

Carlo Volf har leveret hovedkomponenterne, og medvirket med opbygning af mock-up sammen med Erik Hvirvel Hansen, TI. Dimensionen på mock-uppen har været HxBxD.: 2320 mm x 600x580 mm inkl. krydsforskalling på 2 x 25 mm og beklædning med 25 mm thermowood beklædning fra Moelven samt lerpuds/træ på indvendig side. Den udvendige Kryds-forskalling skal sikre, at luft strømmer ind uden nævneværdigt tryktab. Krydsforskallingen og indvendig væg er af praktiske grunde erstattet af en spånplade 50 mm fra væggen.

Trykmålinger gennemføres isotermt, hvor trykdifferensen over ventilelementet måles ved forskellige spjældstillinger og forskellige luftstrømme.



Figur 6.1. luftindtagssiden udefra, klap sektion med en lodret monteret hængslet drejeklap 50x90 cm her helt oppe.

NOTECH-Elementet er indbygget i en sortmalet træramme, der skal monteres i ydervæggen. Væggens tykkelse tillader, at den hængslede lukkeplade (spjæld), kan åbne ud i hulrummet for udeluft uden for rammen, så der opnås en luftspalte på mindst 10 cm mellem pladens bagkant og den nærmeste del af rammen. NOTECH-elementet fylder med lukket ventil kun ca. halvdelen af ydervæggens tykkelse. NOTECH-elementet med ålegræs er monteret således, at udeluft kan trænge ind til elementet med ubetydelig luftmodstand. Træbeklædningen er monteret i afstand af vindtæt pap mv. ved hjælp af lægter, så luft kan trænge ind i NOTECH elementet fra dennes omrids.

Indvendigt er NOTECH elementet dækket af ca. 25x25 mm træfinerlameller, se figur6.2. som er monteret i plan med den indvendige vægbeklædning. Lamellernes bagside er beklædt med en sort grov filt, hvorigennem den friske udeluft tilføres mellem lamellerne. Filteret giver subjektivt vurderet et tiltalende udseende og hindrer at småting som blyanter etc. stikkes ind i væggen (aktuelt i en skole)

Den hængslede plade – spjæld-elementet - for regulering af luftindstrømningen vil i den endelige udformning kunne bevæges trinløs fra lukket til åben, ved hjælp af en aktuator fra projektdeltager Windowmaster. Aktuatorens indgik ikke i forsøgene, da lukkepladen var fastholdt i åben stilling ved hjælp af et beslag.



Figur 6.2. Indvendig side af lameller ses her i åben trykmåleopstilling. Lameller er på indvendig side beklædt med forskellige filttyper. Th: Indvendige lameller set gennem flowmålehul til trykmåleopstilling.



Figur 6.3. Tv: Overgang mellem ålegræsfilter og fast sektion. I midten ses lufttagsspalte rundt om ålegræsfilret. Th: Frontplade med inspektionsluge.



Figur 6.4. Mockup TI indeklimalab. Til venstre ses lamelfront efter fulgt af filter hvorfra luften kommer ind i klassen. I midten det regulerbare spjæld/blædparti, der sidder midt i vægelementet. Til højre ses den sprække der simulerer hvordan luften komme ind gennem facaden via. en 50 mm sprække omkring ventilationshullet.

### 6.3. Styring af NOTECH-systemet

Styringen af luftindtaget bestemmes af  $\text{CO}_2$  -koncentrationen og temperaturen i rummet og ude-temperaturen. På de koldeste dage om året reduceres luftindtaget på bekostning af en forøget  $\text{CO}_2$  -koncentration, specielt når der er mange personer i lokalet.

NOTECH-elementet skal i størst muligt omfang kunne anvendes uden brug af hjælpeenergi, og indeholder ingen ventilator, dvs. det virker primært ved hjælp af naturlig opdrift, og pulsationer i vindtrykket omkring bygningen. Det er derfor vigtigt, at NOTECH-elementet har lavt tryktab til at sikre tilstrækkelig ventilation i lokalet.

I mock-up opsætningen er monteret en klap til styring af luftindtaget, Styringen kan varieres trinløst mellem helt lukket og helt åbent, men under forsøgene anvendtes kun åben stilling af klap.

Luftstrømmen blev bestemt og målt ved hjælp af TI`s måleudstyr i henholdsvis trykmåleopstilling og i indeklimalaboratoriet, hvor temperaturer og DR (draughtrate = trækrate) blev målt.

### 6.4. Dimensionering af NOTECH filter

Nærværende afprøvning har til formål at vurdere det nødvendige areal af NOTECH elementerne til dimensionering af fx en skoleklasse.

Der er regnet med dimensionering svarende til fire NOTECH-elementer anvendt per klasse med 30 store elever svarende dimensionering på Feldballe Friskole., hvor der er anvendt i alt  $4,104 \text{ m}^2$  filterareal fra 4 NOTECH-filtre (2 størrelsestyper er brugt). Bygningen de fire filtre er installeret i, i 8/9-klasse har et

areal på 96 m<sup>2</sup> Klasselokale med loftshøjde: 6,8-7 m ved kip og, 3,2 m ved væg. Svarende til 1 m<sup>2</sup> filterareal pr. ca. 250 m<sup>3</sup> klasselokale, se beregninger i bilag 12.1. LCA-screening.

**Ønsket luft flow** tager udgangspunkt i 30 elever a 36 m<sup>3</sup>/h svarende til 1080 m<sup>3</sup>/h af hensyn til luftkvaliteten (under 1000 ppm) dvs. 270 m<sup>3</sup>/h per element. Der er taget udgangspunkt i denne dimensionering ved design af mock-up, og de flow, der er anvendt til afprøvningen.

**Varmebelastnings-bestemt ønsket luftflow**, beregnet ud fra en forenklet metode:

- o Eksempel: luftflow på varme dage: På meget varme dage og dobbelt luftstrøm dvs. 30 elever a 72 m<sup>3</sup>/h= 2160 m<sup>3</sup>/h og helt åbne spjæld fås 540 m<sup>3</sup>/h per element af hensyn til temperaturen.
- o Eksempel: 2160 m<sup>3</sup>/h fjerner følgende varmeeffekt ved en temperaturdifferens mellem udetemperatur på 25 °C og loft-temperatur på 30 °C:  $P = 2160 \cdot 0,34 \cdot (30 - 25) = 3670 \text{ W}$ .
- o På meget kolde dage 30 elever a 24 m<sup>3</sup>/h= 720 m<sup>3</sup>/h, dvs. 180 m<sup>3</sup>/h per element af hensyn til temperatur og trækrisiko.

**Lufflow-målinger, ikke isotherm:** Der gennemføres målinger ved lavt flow, 50 m<sup>3</sup>/h per element svarende til reduceret relevant. Luftstrømmene bestemmes under alle forsøg med en ekstern flow-regulator og, hvor den interne reguleringsklap er fastholdt. i åben stilling med et beslag.

Opstillingen føres ind i Teknologisk Instituts indeklimalaboratorium, og kold luft tilføres til kasse på udesiden ved forskellige åbningsgrader, ved fuldt åben spjældklap (dvs. 10 cm åben). Luftstrømmen tilføres på ydersiden af spjældklappen gennem to ø 200 mm kanaler. Luftstrømmen måles og reguleres med en køle-isoleret Lindab Ultralink enhed med dreje-spjæld. Enhedens flow (tilført luftstrøm) kan vælges med en app installeret med en smartphone.

På gulv tilføres så megen varme, at der er mellem 20 og 30°C indendørs, og rummets varmetab til omgivelserne dækkes.

Luftstrømnings-mønsteret måles i et lodret normalplan ud fra indblæsningsarmaturer, så vidt muligt i standardiserede højder 0,05, 0,1, 0,7, 1,1, 1,7 og 2 m mht. temperatur, lufthastighed og draught-rate (trækrate= DR) med forskellige flow.

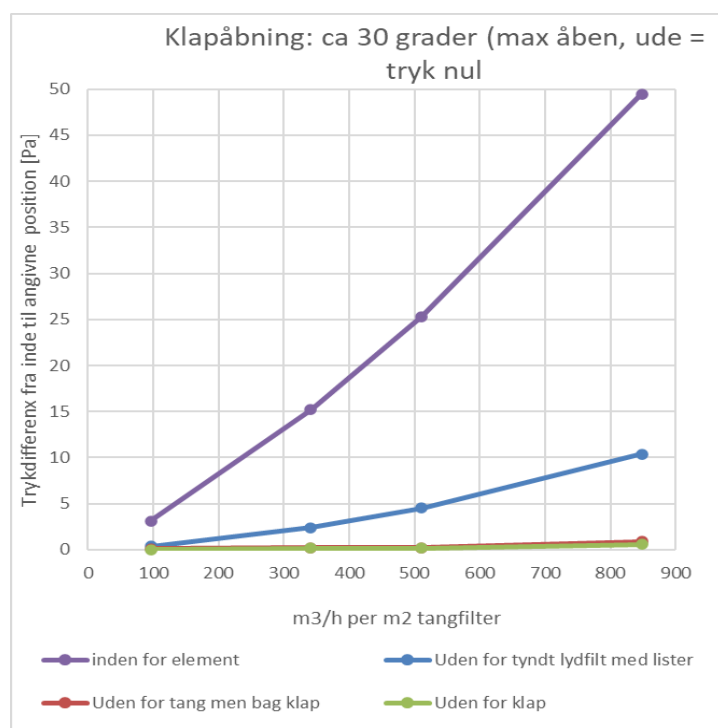
Mockuppen er mindre end filterelementerne på Feldballe Friskole (ca. 66 % større i Fysik og ca. 52,5 % større i klasserum), da denne standard størrelse (HxB= 600 x 1120 mm) passer bedre til fremtidige byggerier. Hvor der således er 4 filterelementer til en klasse på 30 i Feldballe, vil der skulle 6 mock-up-elementer til at give samme åbningsareal. Normal belastning i en skoleklasse er 30 elever, der efter BR18 dimensioneres med 36 m<sup>3</sup> luft i timen per elev svarende til 1080 m<sup>3</sup>/h totalt. Denne ventilationskapacitet tilstræbes for at opretholde god luftkvalitet og holde CO<sub>2</sub> under kravet på 1000 ppm. 1080 m<sup>3</sup>/h for klasse på 30 elever giver 270 m<sup>3</sup>/h per element ved 4 elementer. NOTECH filteret i Feldballe har ydermål der svarer til et areal på omkring 1 m<sup>2</sup>, hvorfor flowet også vil være ca. 270 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal under den dimensionerede belastning. Vi har dog også testet filteret ved 750 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup>

filterareal, hvilket er næsten 3 gange mere end den dimensionerede belastning. Dette høje flow kan dog være relevant om sommeren, hvor varme ønskes ventileret ud af bygningen.

## 6.5. Resultater af måling af luftydelse/tryktab - Mock-up i Indeklima-lab på TI

Der blev dels målt på tryktab over hele NOTECH elementet og udvalgte enkeltdele med henblik på optimering af tryktab inden forsøg for at kortlægge træk under simulerede forhold sommer og vinter. Der er også testet effekten af forskellige typer af filternet, som viste sig at have indflydelse på tryktabet.

Resultater fra første mock-upforsøg i klimalab viste tryktabet for de forskellige elementer. Indledningsvis afprøvede vi forskellige typer af filt og net, der havde til hensigt at skjule filteret bag lamelfronten og sammenlignede med ålegræsfilteret uden filt. Resultatet viste, at de akustiske filt bidrog med et relativt højt tryktab.



Figur 6.5 viser tryktabet over NOTECH elementet. 1. målepunkt er uden for klappen der åbner blændpartiet og måler derved kun tryktabet over spalten på 50 mm, der simulerer facaden. 2. målepunkt er inden for klappen, og måler tryktab på klap og spalte. 3. målepunkter efter filteret og medtager tryktab for spalte, klap og filter. 4. målepunkt er efter lydfilt/net og inkluderer spalte, klap, filter og lydfilt/net.

Det blev fundet, at der minimum skal være 50 mm fri passage omkring indsugningshullet for at undgå, at dette bliver en flaskehals mht. tryktab og derved maksimal ventilationskapacitet. Virksomheden Outrup har designet og leveret det regulerbare blændparti til mockuppen, og WindowMaster har leveret

viden omkring styringen og luft flow gennem filteret. Der er blevet afholdt flere møder med henblik for korrekt design af mock-up og gennemførelse af forsøgene.

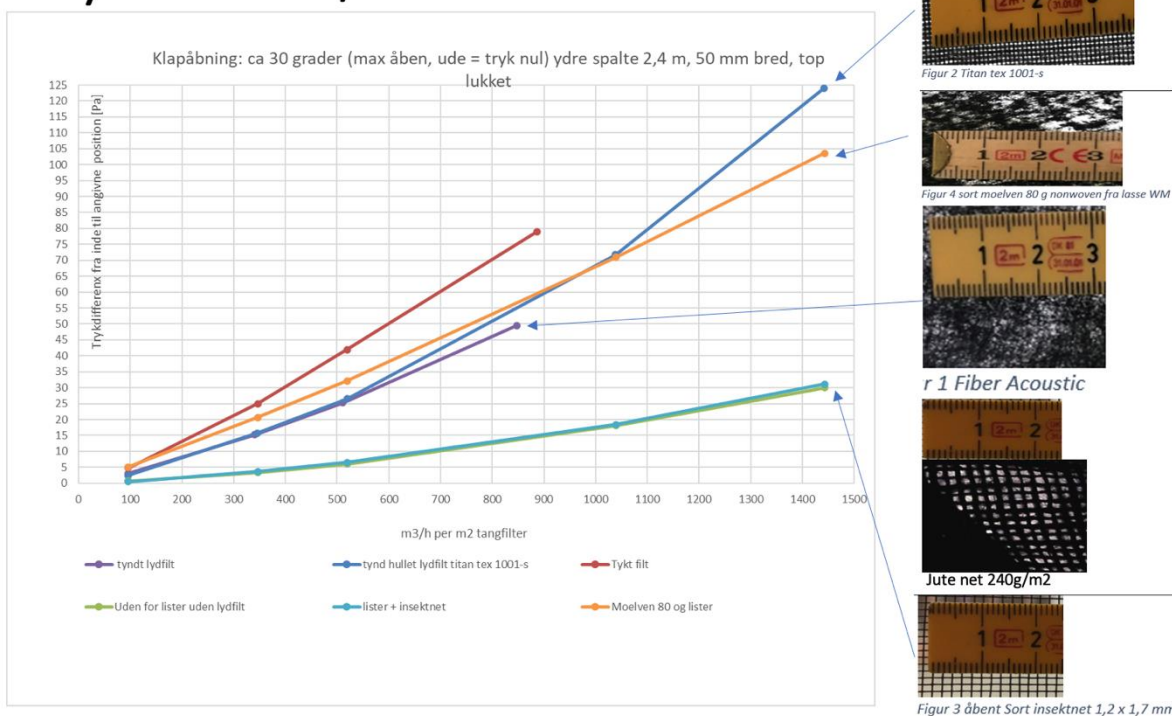


Figur 6.6. Tryktab målt over delelement i NOTECH-elementet. Måling på meget tæt filternet (akustisk filt) tv samt meget åbent insektnet, th. Det tætte filternet var uegnet pga. det reducerede tryktabet. Dvs. placeret indenfor lamellerne.

På figur 6.6. ses det at lydfilt/akustiskfilt af samme fabrikat, som der oprindeligt blev benyttet på Feldballe Friskole. Under simuleret sommerventilation fandt vi et tryktab på 34 Pascal og under vinterventilation (36 m<sup>3</sup>/h/elev) ca. 10 Pascal.

Ålegræsfilteret alene uden akustisk filternet har et tryktab på henholdsvis 8 og 2 Pascal for sommer og vinter. Det vurderes at klasseværelset i Feldballe normalt vil kunne genere mellem 10-15 Pascal under tryk, højde- og temperaturforskel taget i betragtning. Vi var derfor nødt til at afprøve forskellige andre filt- og netmaterialer som erstatning for det originale akustiske filt for at få tryktabet ned.

# Tryktab filt/net



Figur 6.7. viser tryktab for ålegræsfilter og lister, Insektnet og 4 forskellige typer filt. Firkanten viser området fra det dimensionerede flow til 3 x dette.

Ud fra figur 6.7. kan man se at alle de afprøvede filtmaterialer ligger over 40 Pa ved sommerventilation og kun den originale lydfilt og Titan tex ligger under 15 Pa om ved den dimensionerede grænse. Dette forsøg er gennemført med en spalte på 2,4 m<sup>2</sup>, der svarer til at luften kan komme ind gennem facaden fra tre sider, da der er lukket langs vinduet, som filteret sidder op ad.

Forsøget gav anledning til at vi udskiftede det akustiske filt på Feldballe Friskole for alle NOTECH-filtre til et mere luftgennemtrængeligt insektnet af organisk oprindelse (jute net 240g/m<sup>2</sup>) med lavere tryktab.

## 6.5.1. Konklusioner vedr. tryktabsmålinger

Konklusionerne fra forsøgene med måling af tryktab kan opsummeres som følger:

Der skal være min. 50 mm frirum mellem yderste facade og første yderbeklædning for at undgå yderligere tryktab over NOTECH-element.

Netmaterialet bag lamelfronten skal være så porøst som muligt for at sikre at dette ikke bliver en flaskehals for flow af luft. Fluenet eller tilsvarende porøsitet er at foretrække. Dette opnås ved minimum 50% åbningsgrad, fx med et insektnet med relativt store huller, se også figur 6.7.



Ved 350 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal (1.200 m<sup>3</sup>/h Feldballe, 41 m<sup>3</sup>/h/elev) blev der målt et tryktab på 4 Pa. over elementet inkl. insektnet og lameller. Et vindtryk på 2,9 m/s mod facaden svarer til et dynamisk middelvindtryk på 5 Pa. Et tryktab på 4 Pa vil i de fleste tilfælde være tilstrækkeligt. Dette betyder, at der vil kunne opnås tilstrækkelig ventilation udelukkende ved krydsventilation.

## 6.6. Forsøgsplan – termiske målinger af trækrate

Der blev gennemført en række forsøg med termiske målinger af trækrate, og evalueret disse i projektgruppen. På baggrund af disse evalueringer blev gennemført flere forsøg, for at belyse træk-raten under så mange relevante forhold som muligt. Forsøgsplan tog udgangspunkt i følgende forhold:

1. Træk illustreres ved ISO-kurver for Draught Rate (DR) hvoraf 20 % kurven skal fremgå ved forskellige placering i rummet og forskellige højder i rummet. Øvrige relevante kurver beregnes og vises også.
2. Loftshøjde 3,1 m
3. Træk max 0.15 m/s ved 18 C i følge BR18. Lufthastigheder illustreres i Isovel diagrammer.
4. 20 – 30 cm afstand imellem vandrette målingspunkter.
5. Vinter scenarie testes først med/uden gulvarme.

Første målinger blev gennemført med borde 140x170cm og 8 personsimulatorer med 100 W varmelegemer per styk. Afstand til fra filter til simuleret elev, ca. 50 cm.

Efter projektgruppens evaluering af første måleresultater, blev alle efterfølgende målinger udført i rum uden borde og personsimulatorer, men i et umøbleret rum for at opnå et sikkert sammenligningsgrundlag. Tillige blev målingerne derved lettere at gennemføre, da der så kunne anvendes kørestativer til at holde proberne.

Varmetilførsel med radiator indgik i nogle af forsøgene: På grund af ret høje draught-rates i nærzonen, blev der til sidst tilført varme med en radiator på gulvet inden for NOTECH elementet, hvilket reducerede draught-raten til et minimum. En radiator med termostat eller relevant styring kan anbefales anvendt ved lave udetemperaturer.

Første del af testen i klimalab udføres uden filt men med fluenet, herefter køres en testkørsel med det mest porøse indvendige filter. Loftshøjden blev valgt til 3,1 meter. Indblæsningsfelt kommer fra 1,7 til 2,85 m over gulv. Over og under elementet er tomsektioner på henh. ca. 0,15 og 0,4 m.



I figur 6.8a. ses eksempler på forsøgsopstillingerne.



Figur 6.8b. Tv. Eksempel på målinger i normalplan ud for NOTECH-element, der blev udført med og uden hjælperadiator. Mf. Eksempel på måling lavt over gulv, her i lang afstand fra NOTECH element. Th. Flytbar måleopstilling for måling lavt over gulv.

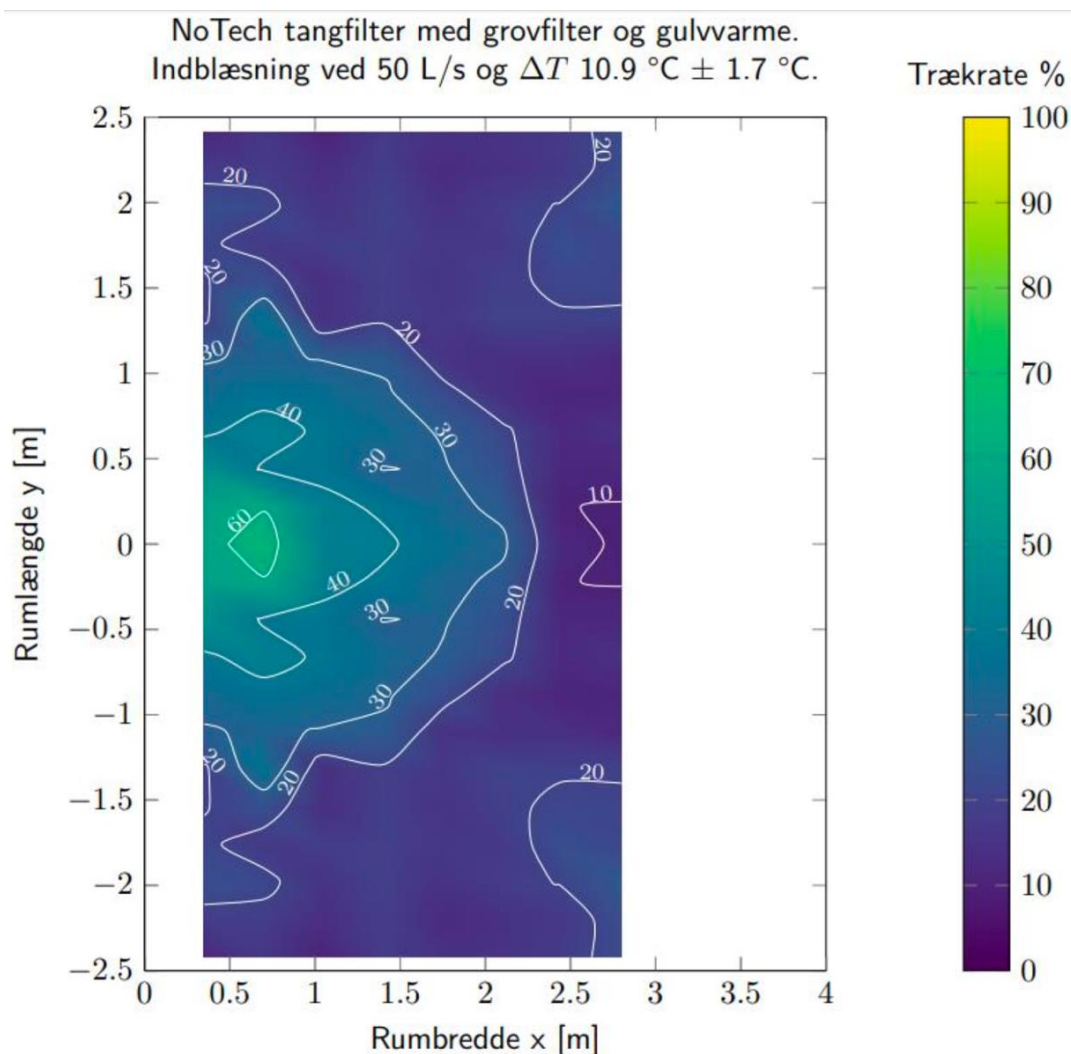
## 6.7. Resultater af forsøg med trækrate-målinger - Mock-up i Indeklima-lab på TI

Målinger af Draft-rate – træk-rate havde til formål at vise om trækrategrænsen kunne holdes under 2,2 meter også under ekstreme situationer i vinterperioder. Projektgruppen deltog i diskussioner om forsøgsopstillingen, så NOTECH-filtrets performance kunne kortlægges mht. træk.

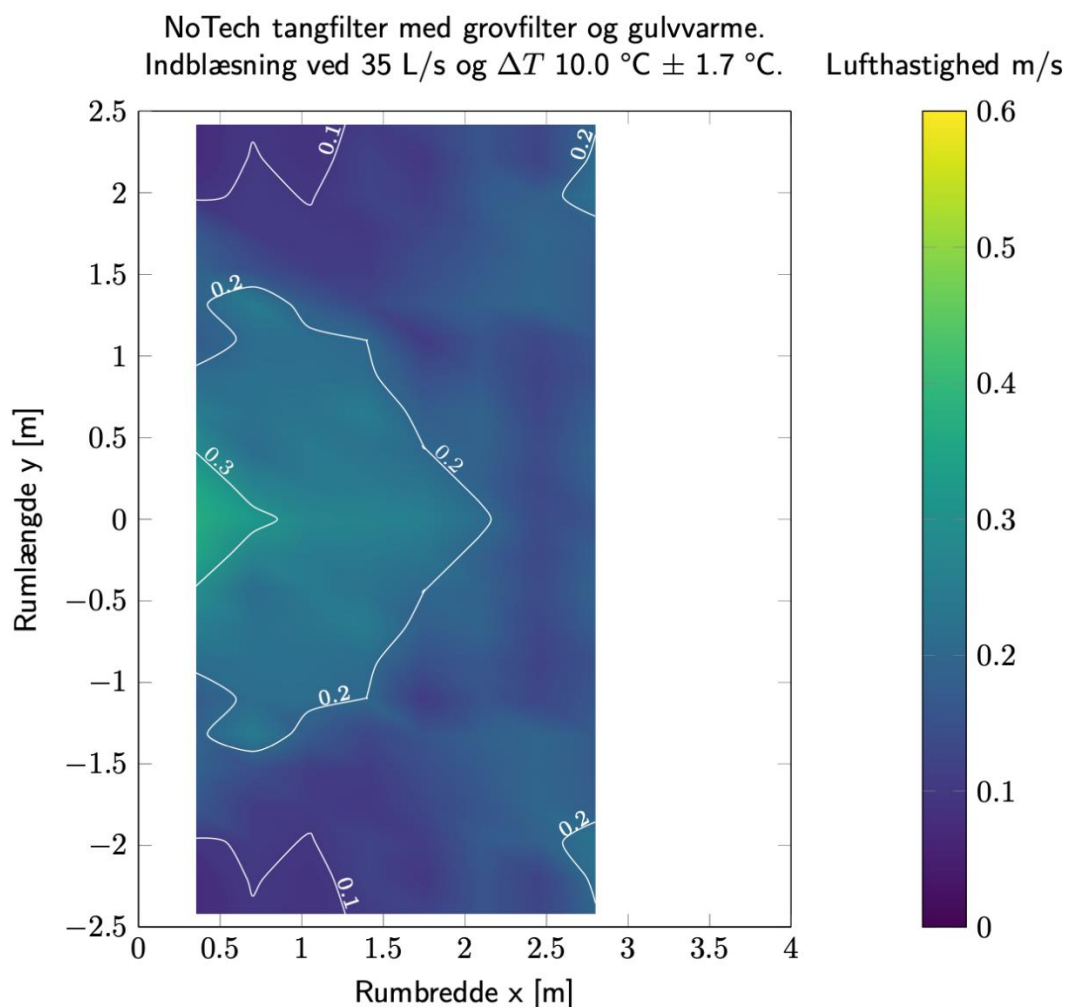
Data fra mockup-forsøget viste at trækrategrænsen på 20 %, hvilket vurderes som ubehageligt om vinteren, kunne begrænses til en halvcirkel med en afstand af 2,2 meter fra centrum af luftindtaget i en afstand af 10 cm over gulvet. Dette blev målt i en simuleret driftssituation med 50 l/s flow (346 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal), gulvvarme og en delta T på ca. 11 grader.

I en simuleret efterår/forårs situationer (19° inde 8° ude) skal ventilationen begrænses ca. 41 m<sup>3</sup>/h per elev for at overholde kravet på maks. 1000 ppm for CO<sub>2</sub> samt undgå unødigt træk og øget energiforbrug (50l/s). Møblering af klassen skal undgås i en afstand af 2,2 meter fra ydervæg, medmindre der er etableret supplerende varme under luftindtag.

Hvis flowet reduceres til 29 m<sup>3</sup>/h per elev (35 l/s per enhed??). Reduceres udbredelsen af trækrategrænsen langs vægen til 1,5 meter fra centrum af indtaget, mens luften stadig kommer 2,2 meter ind i rummet, se figur 6.9.



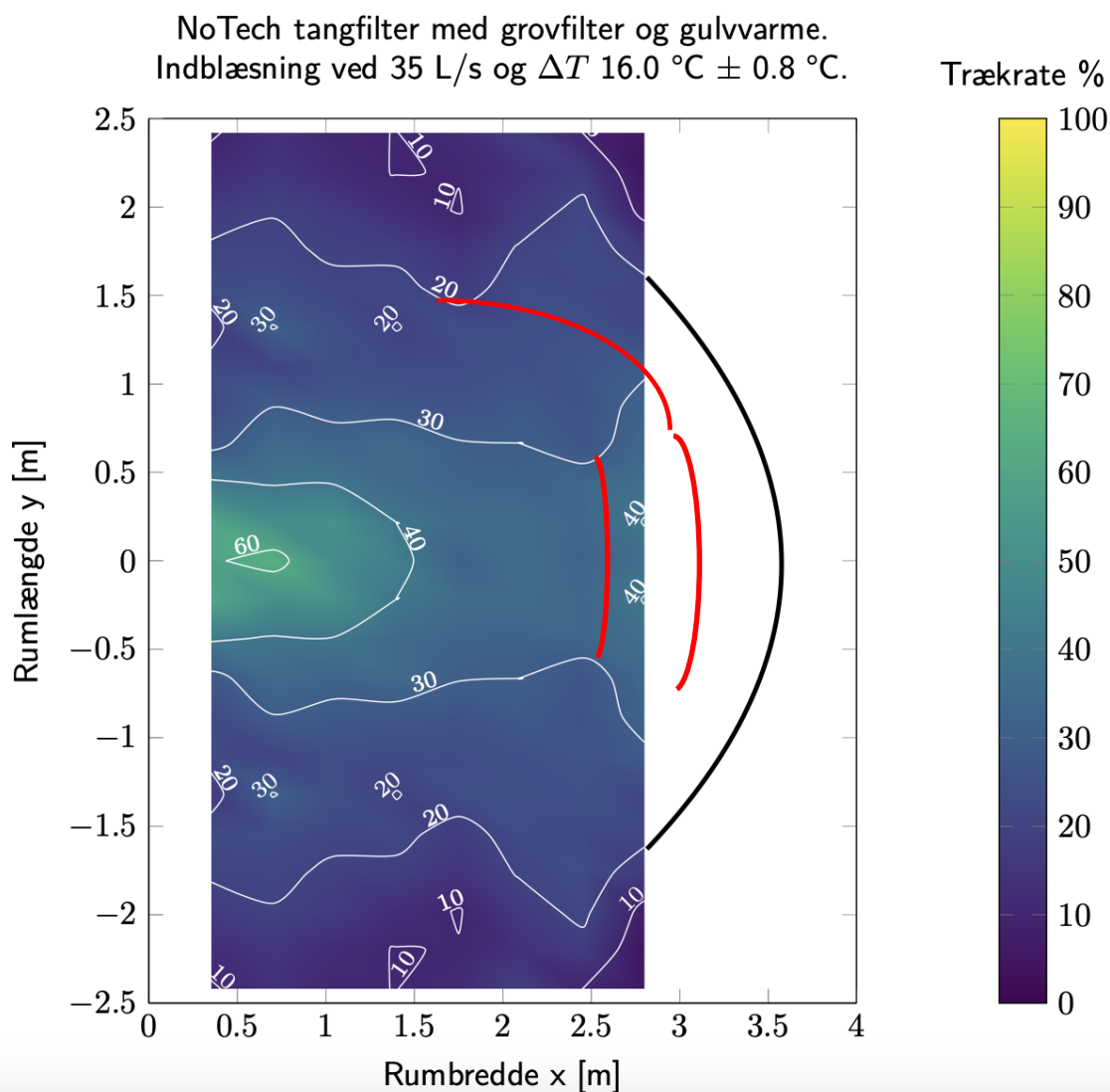
Figur 6.9. NOTECH ålgræsfilter med grovfilter og gulvvarme. Indblæsning ved 50 L/s, og  $\Delta T$  10.9 °C ± 1.7 °C



Figur 6.10. NOTECH ålegræsfilter med grovfilter og gulvvarme. Indblæsning ved 35 L/s, og  $\Delta T$ - 10.9 °C  $\mp$  1.7 °C

Data fra mockup-forsøget viste, at trækrategrænsen på 20 % strækker sig i en tunge ca. 3,5 meter ind i rummet fra centrum af luftindtaget og 2 meter til hver side. Dette blev målt i en simuleret driftssituation med 36 l/s flow (250 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal), gulvvarme og en delta T på ca. 16 grader. Kurven er ekstrapoleret.

I en simuleret vintersituation (19°C inde 3°C ude) skal ventilationen begrænses til at overholde kravet på maks. 1000 ppm for CO<sub>2</sub>, ca. 30 m<sup>3</sup>/h per elev for at undgå unødigt træk og forøget energiforbrug (36 l/s). Møblering af klassen skal undgås i en afstand af 3,5 meter fra ydervæg midt for filteret medmindre, der er etableret supplerende varme under luftindtag.



Figur 6.11. NOTECH ålgræsfilter med grovfilter og gulvvarme. Indblæsning ved 35 L/s, og  $\Delta T$  16 °C  $\pm$  0,8 °C

36 l/s flow eller 250 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal vil svare til ca. 880 m<sup>3</sup>/h i Feldballe. Beregningsmæssigt skal der ca. 1000 m<sup>3</sup>/h til at holde CO<sub>2</sub> koncentrationen under 1000 ppm. Det kan derfor blive være nødvendigt at ventilere lidt kraftigere i frikvartererne for at undgå CO<sub>2</sub> koncentrationer over 1000 ppm.

I forhold til møblering er det fordel at placere filtre i hjørnerne af klassen, hvilket efterlader størst muligt frirum til placering af møbler midt i klassen.

Ved installation af varmekilde under luftindtag (1300W) reduceres trækrategrænsen på 20 % til ca. 0,7 meter fra indtaget. Varmekilde kan med fordel indbygges under filter og indstilles til at regulere lufttemperaturen ved luftindtags-temperatur under f.eks. 3-8 °C. Forsøget gennemførtes med 35 L/s og  $\Delta T$  18.1°C. Det er sandsynligvis begrænset energi der skal til, da det kun er få dage om året og kun i skoletiden.

### 6.7.1. Konklusioner af målinger af trækrate

Data fra mockup-forsøget viste, at trækrategrænsen på 20 %, hvilket vurderes som ubehageligt om vinteren, kunne begrænses til en halvcirkel med en afstand af 2,2 meter fra centrum af luftindtaget i en afstand af 10 cm over gulvet. Dette blev målt i en simuleret driftssituation med 50 l/s flow (346 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> filterareal), gulvvarme og en delta T på ca. 11 grader, som temperaturforskellen mellem ude og inde.

I en simuleret efterår/forårs situationer (19°C inde 8°C ude) skal ventilationen begrænses ca. 41 m<sup>3</sup>/h per elev for at overholde kravet på maks. 1000 ppm for CO<sub>2</sub> samt undgå unødigt træk og øget energiforbrug (50l/s). Møblering af klassen skal undgås i en afstand af 2,2 meter fra ydervæg, medmindre der er etableret supplerende varme under luftindtag.

## 7. Luftkvalitet: VOCs afgangsmåling på element-niveau

Luftkvalitet via VOC-målinger er udført på DTI, Tåstrup, afd. for Byggeri og Anlæg af konsulent Helene Bendstrup Klinke.

Den frivillige bæredygtighedsklasse stiller krav til indeklimamålinger i det færdige byggeri, herunder flygtige stoffer fra afdampning af materialerne i bygningen. Da det er biomaterialer [bl.a. ålegræs] vi arbejder med, vil vi forvente at der vil være en afdampning af flygtige stoffer [VOC], hvorfor vi gerne vil dokumentere at denne afdampning ikke giver en negativ påvirkning af indeklimaet i form af uacceptabel lugt eller problematiske sundhedsskadelige stoffer. Dette foreslås gjort på produktniveau af det færdige element ved standardbetingelser for temperatur og fugt på hhv. 23 °C og 50 % RH samt en stresstest ved forhøjet relativ luftfugtighed på ca. 80 % RH.

Dette er gjort ved målinger af afdampning af VOC'er fra filtret som før og eftermåling.

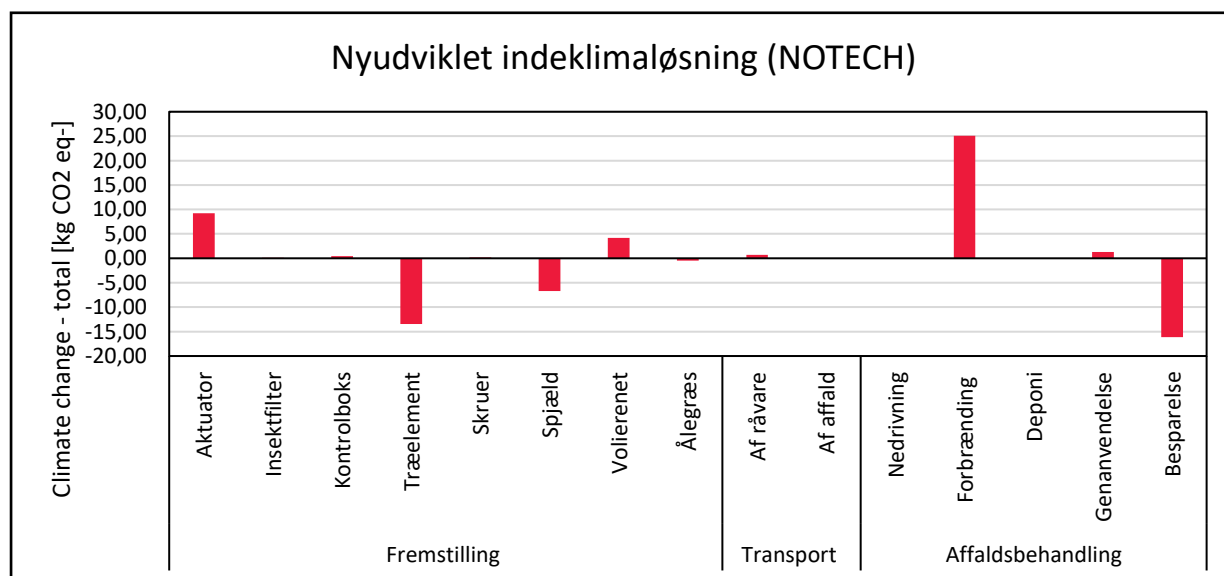
Analyserne af hhv. aldehyder (ISO 16000-3, rapport 196361) og VOC (ISO 16000-6, rapport MAIC-2023-1185). Resultaterne fra luftprøveanalyserne er angivet i tabellerne 12.2.1. og 12.2.2. i Bilag 12.2. Ingen af de identificerede stoffer overskrider EU-LCI-grænseværdierne i indeklimaet.

## 8. LCA-analyse/-screening

Der er gennemført LCA-screeninger af standard-elementet NOTECH, som er udført af Maria Preilev Hansen, afd. for Livscyklusvurderinger, Teknologisk Institut, og udarbejdet rapport, som er vedlagt i fuld længde i bilag 12.1.

Det overordnede formål med LCA-rapporten er at foretage en screening af de potentielle klimapåvirkninger (CO<sub>2</sub>-ækv.) ved fremstilling af den nyudviklet arkitektonisk indeklimaløsning, NOTECH, der søger at drage nytte af naturlig ventilation og naturlige materialer. Indeklimaløsningen bruges til at fremme indeklimaet på skoler og har en antaget levetid på 25 år. Selve ålegræsfiltermaterialet formodes at skulle udskiftes hvert 5 år, hvilket er konservativt sat, i mange tilfælde vurderer vi, at der går betydelig længere tid.

Resultaterne kan bruges til at indikere, hvor i produktets livscyklus de største CO<sub>2</sub>-emissioner finder sted, samt til at give en overordnet indikation af de samlede miljøpåvirkninger fra de omfattede livscyklusstadier. Der er foretaget beregninger på et standardelement af NOTECH-filtret uden vindue. Vi har ikke haft mulighed for at lave en sammenligning med miljøpåvirkningerne fra en konventionel indeklimaløsning på skoler, baseret på EDP-oplysninger, da vi kun kigger på et enkelt element (mock-up) og ikke fuld løsning til fx en skoleklasse. Indikation af hvorvidt NOTECH systemet kan forventes at have et lavere klimamæssigt aftryk end den konventionelle indeklimaløsning vil derfor forudsætte et fuldstændigt sammenligneligt set-up. Det bør bemærkes, at beregningerne beror på en række antagelser og simplificeringer, samt at flere processer er udeladt af beregningerne. De opnåede resultater kan udelukkende bruges til at give en indikation af hvorledes NOTECH systemet klimaaftryk er.



Figur 8.1. Samlede resultater for den nyudviklede indeklimaløsning (NOTECH).

**Konklusion:** Overordnet indikerer resultaterne i denne screening, at den nyudviklede NOTECH indeklimaløsning (standard-element) forventes at medføre et lavt klimaaftryk (0,279 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH

element/år inklusiv D- modul og 1,173 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH element/år eksklusiv D- modul for et luftskifte på 250 m<sup>3</sup>/time). Eksempelvis for et klasselokale med et samlet gulvareal på 96 m<sup>2</sup> er de totale klimapåvirkninger 0,052 CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> gulvareal/år (eksklusiv D-fasen) når der skal opnås et samlet luftskifte på 1080 m<sup>3</sup>/time hvorved der skal bruges 4,25 m<sup>2</sup> NOTECH filterløsning. D-fasen er hvor der indregnes genbrugs-, genanvendelses- og nyttiggørelsespotentiale (erstatning af råstoffer på markedet).

Det bør dog understreges, at resultaterne og konklusionerne anses som hæftet med stor usikkerhed. Bemærk at denne screening tager udgangspunkt i et meget konkrete scenarie for blandt andet opsætning, installation, affaldsbehandling og brug af genanvendte materialer i produktionen, og det bør bemærkes at resultaterne vurderes at være følsomme overfor ændringer af netop disse parametre.

Fremstillingen af materialer/komponenter er modelleret med generiske datasæt, og der er desuden en række processer der ikke er medtaget i beregningerne, herunder energiforbrug til samling af NOTECH løsningen samt vedligehold i brugsfasen. Det er ukendt hvilken betydning disse antagelser og udelukkede processer kan have for de samlede resultater. De anses dog for ubetydelige.

En sammenligning med den traditionelle mekaniske indeklimaløsning er ikke udført grundet de tidligere nævnte rammer for analysen. Det anbefales fremadrettet at gennemføre en sammenligning under sammenlignelige forhold, herunder at indhente data på fremstillingen af produkterne (herunder materialer og komponenter), samt at medregne alle livscyklusstadier.

## 9. Feedback fra brugere (lærere, elever)

Der har ikke været gennemført en egentlig systematisk brugerundersøgelse, da det ikke har været en del af projektet. Til gengæld har der været megen kommunikation med lærere og elever i forbindelse med besøg samt vores on-site-målinger, både sommer og vinter. Generelt har der både blandt lærere og elever været stor tilfredshed med indeklimaet som opleves som det bedste i nybygningen, hvor NOTECH er etableret, i forhold til alle skolens øvrige lokaler. Luften opfattes frisk og der er opleves ingen lugtgener, som mange skoleklasser er kendt for. Det samme har været oplevelse fra projektgruppen, herunder især de personer, der tit er kommet på skolen i forbindelse med projektet.

Trine Wad Andersen, skoleleder for Feldballe Friskole & Børnehus udtaler: "Vi har nu i to år haft glæden af vores nye fantastiske bygning. Bygningen rummer skolens bedste lokaler og giver vores elever de mest optimale forhold for læring, da der altid er frisk luft og en behagelig temperatur."

Særlig i fysik-lokalet er dårlig lugt meget udbredt normalt, men i det nye fysiklokale på Feldballe Friskole med NOTECH er der ingen ubehagelige lugte af kemi og lignende. Hvilket fysiklærer Ida Bertelsen også udtaler: "NOTECH-indeklima-system har givet et utrolig godt indeklima i vores fysiklokale på Feldballe Friskole, og burde implementeres til andre skoler. Min tidligere erfaring med fysiklokaler er, at indeklimaet er rigtig træls. Det er en fornøjelse at køre undervisning i fysik i Feldballes Friskoles nybygning".



I sommerperioden har elever og lærere ikke oplevet problemer med overtemperaturer, bl.a. under hede­bølgen i juni 2022 med en uges varighed i op til 31 °C udenfor, hvor temperaturen i skolelokalet ikke oversteg 26 °C, se også afsnit 5.3.2.

## 10. Konklusion, diskussion og perspektivering

Et godt indeklima vedrører luft, temperatur og fugtighed, lyd- og lysforhold, hvor ikke mindst den valgte indeklimaløsning har stor indflydelse på især de første 4 områder. Særlig i skoleklasser er der fokus på:

- CO<sub>2</sub>-niveauet er tilstrækkelig lavt og adgang til frisk luft
- Temperaturen i rummet er behagelig
- Luftfugtigheden er behagelig
- Der ikke er ubehagelige trækgener
- Der ikke er afdampning af uønskede stoffer
- Der ikke er uønskede støjgener udefra eller fra installationer eller uønsket efterklang i lokalet

Det har været vigtigt at kunne eftervise at NOTECH-løsningen kan leve op til BR18 mht. CO<sub>2</sub>, træk og regulering af temperaturen. Projektet har vist at NOTECH-løsningen lever op til BR18 til disse parametre.

Derudover spiller CO<sub>2</sub>-aftrykket en vigtig rolle for at kunne matche de stigende krav til at reducere CO<sub>2</sub>-aftrykket ved nybyggeri. Her spiller energiforbruget ved drift under brug også en vigtig rolle.

**CO<sub>2</sub>-niveauet i rummet er på et lavt niveau:** CO<sub>2</sub>-niveauet har kunne holde sig under de 1000 ppm i størstedelen af tiden, og dermed overholde BR18 -kravene for en skoleklasse. NOTECH-systemet leverer frisk luft, når der er behov, og ikke kun i frikvartererne. Derfor har den subjektive oplevelse af indeklimaet i nybygningen blandt elever og lærere også været at det opleves som der altid er frisk luft, og ikke en sur lugt, efter undervisningen.

**Temperatur, luftfugtighed og trækgener:** Generelt holdes temperatur og relativ luftfugtighed på i balance. I ekstreme situationer, hvor ude-temperaturen er meget lav (fx -10 °C) har der været problemer med at holde temperaturen oppe samt træk-problemer. Løsning på disse udfordringer blev for Feldballe-sites vedkommende var at udskifte varmepumpen, som løste problemet. Ændring på bordopstilling har også været testet mhp. at reducere trækgener under mere ekstreme forhold (testet i mock-up). NOTECH-løsningen har også vist, at temperaturen holdes nede under hede­bølger pga. mulighed for at ventilere om natten, hvilket ellers er stort problem i mange bygninger.

**Afdampning af uønskede stoffer:** NOTECH-elementet har ikke afgivet nogen former for uønskede stoffer, hvorfor NOTECH-systemet har kunne leve op til VOC-krav. Endvidere har brugen af systemet på Feldballe sitet vist, at luftgener fra elever, madpakker mm er fjernet indeklima-systemet, som har sikret tilgang af frisk luft kontinueret.

**Lydmålinger af NOTECH-elementet** er gennemført Feldballe-sitet og har vist, at man i klassen hører meget lidt støj udefra, når spjældet er helt eller delvis åbent. Reduktionen skal ses i forhold til

ventilation via. et åbent vindue, hvor man lige inden for vinduet ikke vil opleve nogen reduktion af lyd-niveauet. Der er dog konstateret en gene ved lyd fra åbning af kip-vindue, hvilket bør være en faktor som kan reduceres ved tilpasning af åbnings-mekanismen. Måling af efterklang on-site viste at NOTECH-filtrene er årsag til, at klasserummet på Feldballe overholder kravene i BR. Uden filtrene ville klasselokalet ikke leve op kravet til BR.

**I projektet er energiforbruget monitoreret på Feldballe Friskole.** Det samlede beregnede årlige energiforbrug til rumopvarmning, varmt brugsvand, lys og ventilation er således: 7.577 kWh. Dette vurderes således at tilbygningen kan overholde kravene til lavenergiklassen på 33 kWh/m<sup>2</sup> pr. år. Selve NOTECH-systemet bruger meget lidt energi mht. drift, nemlig når spjæld åbnes og lukkes, samt på Feldballe, når kip-vinduet åbnes og lukkes. Performance af NOTECH viste i forsøgsperiode (ca. 2 år) at selve filtret med ålegræs ikke har haft behov for at skifte ålegræsset, og vi vurderer at der ikke vil være behov for at skifte ålegræsset ud hver 5 eller 10` år. I LCA-analysen er dog indlagt skift af ålegræs efter 5 år. Det anbefales at man fremadrettet tegner et serviceabonnement mht. tjek af filter og styringssystem, hvis fx der er behov for tilpasning af Windowmaster-styringssystemet, samt tjek af filter fortsat er intakt. Samlet vurderer projektgruppen at omkostninger til vedligehold er meget lave set over en 20 - 25-årig periode.

**Økonomi:** I projektet er der ikke regnet detail-økonomi på fremstilling af NOTECH-løsningen, da en industriel produktion af NOTECH først forventes at gå i gang i 2024. Design af de individuelle løsninger med integrering af NOTECH sammen med vindueselementer og styringssystemer fra WM vil påvirke økonomien i de enkelte projekter. Selve standard-elementet derimod vil kun udgøre en mindre udgift også set i forhold til fx investering i mekaniske anlæg, med mange metalrør, motor og nedsænkede lofter, og heraf følgende øget materialeforbrug/klima-belastning/merhøjde.

**Konklusion:** Resultaterne i projektet viser, at NOTECH udgør et reelt alternativ til forbedring af indeklimaet både i skoler og andre institutioner, som fuldskaltesten på Feldballe Friskole samt i mock-up-afprøvningen viste. NOTECH skaber et godt indeklima i nybyggeri (Feldballe) og kan overholde kravene i BR. Projektgruppen vurderer også at NOTECH-indeklimaløsningen har stort potentiale fx til renovering af skoler og daginstitutioner, plejehjem, kontormiljøer mm, som en facadebaseret indeklimaløsning. De store udfordringer med dårligt indeklima, som bl.a. Realdania-rapporten "Masseeksperimentet"<sup>20</sup> dokumenterer er meget udbredte, kalder på at der skal ske noget. Der er behov for at designe renoverings-løsninger, som er enkle og lette at implementere, og som ikke kræver stort vedligeholdelse, foruden at de skal være økonomisk overkommelige. På mange skoler har man kun naturlig ventilation i form af at åbne vinduerne i frikvarteret. Hvor man står overfor at skulle udskifte vindues-partier, er det oplagt at kombinere det med NOTECH-indeklimaløsning/facadebaseret indeklimaløsning, og projektgruppen vurderer at det kunne være en effektiv og prisbillig metode til at opnå godt indeklima.

**LCA screening:** I projektet er beregnet NOTECH-standard-elementet CO<sub>2</sub>aftryk, som værende et lavt CO<sub>2</sub>-aftryk (0,279 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH element/år inklusive D- modul og 1,173 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH element/år eksklusiv D- modul for et luftskifte på 250 m<sup>3</sup>/time), og hvor vi har anlagt en konservativ tilgang mht. levetider af elementet og dets delkomponenter. I LCA-en er taget udgangspunkt i at NOTECH holder i 25 år, men at ålegræsset kan skiftes hver 5 år, dette vil i mange tilfælde formentlig være

---

<sup>20</sup> <https://masseeksperiment.dk/tidligere-eksperimenter/indeklima-iii/> støttet af Realdania.

over et længere tidsspand, som fx 10 år. NOTECHs konstruktion/facade-partier under facaden forventer vi også kan holde væsentligt længere end de 20-25 år facade-partier er udsat for vind og vejr. Et filterskift af ålegræs for NOTECH vurderes at være både færre og billigere og dermed mindre miljøbelastende end for mekanisk ventilation. Det er trods alt fordelene ved NOTECH som et mere robust system uden partikel-følsomme rør/motorer. Der er i LCA-resultaterne ikke medtaget klimapåvirkninger fra vinduer eller om der vil opstå yderligere besparelser i forbindelse med udskiftningen af vægelementet til NOTECH systemet. NOTECH er helt uafhængigt af vinduer og døre og, at systemet, hvilket muliggør anvendelse af høj-transmittante 2-lagsruder, som igen bidrager til lavere klimapåvirkning.

Projektgruppen ser potentielt store muligheder for også at integrere NOTECH-elementet i skoler og andre institutioner, kontormiljøer mm, men også i private boliger. Pt. indgår NOTECH-løsningen i ALFABO-almennyttige boliger i Kolding, hvor bl.a. NOTECH-elementet er installeret som naturlig ventilation både med og uden på behovsstyring, og sammenlignet med mekanisk ventilation både med og uden på behovsstyring. Her arbejder vi på at gennemføre en sammenlignende test af performance af de forskellige systemer, som er implementeret i ALFABO.

#### Opsummering af indeklimamæssige fordele ved NOTECH

- Reducerer trækgener ved styret naturlig ventilation
- Renser udeluft
- Laminar air flow (LAF)
- Reducerer støj udefra ved styret naturlig ventilation
- Ingen driftsstøj
- Gode akustiske egenskaber
- God dagslys-kvalitet, 2-lags vinduer med høj lystransmittans
- Energibesparelser til opvarmning i vinterperioden

#### Øvrige fordele

- Behovsstyring (24 V)
- Ingen synlige rør, ingen tekniske installationer
- Isolerer klimaskærmen når der ikke er behov for ventilation
- Mere indlejret CO<sub>2</sub>, mindre CO<sub>2</sub> aftryk
- Robust, arkitektonisk løsning
- Mindre vedligeholdelse NOTECH -filter skal ikke skiftes
- Mulighed for integreret, intelligent indeklimastyring med varmepumpe

## 11. Formidling

NOTECH-løsningen implementeret i nybygningen på Feldballe Friskole har givet megen omtale, ikke mindst fordi det er integreret i en nybygning opført med bæredygtige byggematerialer som halm og træ og har et meget lavt CO<sub>2</sub>-aftryk, ca. 2,5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Mange byggerier ligger omkring 12 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> eller derover, kun ca. 10% ligger under denne grænse. Nye krav er trådt i kraft pr. 1. januar 2023, og skal efter indfasning i 2029 ligge under 7,5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> <sup>21</sup>. Derfor er motivationen for at anvende bæredygtige

---

<sup>21</sup> <https://byggeriogklima.dk/klimakrav/kort-om-kravene/>

biologiske materialer stigende, herunder også en indeklimaløsning, baseret på ålegræs til erstatning af metalrør.



Figur 11.1. Indvielse af Feldballe Friskoles nye lokaler, med NOTECH-løsningen, d. 24. maj 2022.

### 11.1. Artikler, linkedin, facebook mv.

Projektet med NOTECH har været omtalt på de sociale medier i form af linkedin og facebook, samt hjemmesider ved partnerne.

Der er afholdt officiel indvielse af Feldballe Friskoles nybygning med NOTECH-systemet som indeklima-løsning 24. maj 2022<sup>22</sup>, med stor deltagelse af alle involverede i byggeriet, bygherrer og rådgivende par-ter, samt skolens ledelse, lærere, bestyrelse, Syddjurs kommune m.fl. Byggeriet og ikke mindst indekli-maet, som har kørt siden august 2021 (ved skolestart) fik meget rosende ord fra alle brugere af lokalet.

Der har været en stribe grupper, virksomheder mv., som jævnligt besøger Feldballe Friskole for at høre om det bæredygtige byggeri samt NOTECH-indeklimaløsning. Fx besøgte 240 medarbejdere fra

<sup>22</sup><https://www.facebook.com/EcoCoconDK/posts/pfbid02orG38Rnt4HRFgkiDtN1RKRARq5gRAMyELum5jRHa1ywgD-Wam6As3TWPYxRCYwrjml>

arkitektfirmaet Henning Larsen besøgte Feldballe Friskole i august 2022, for at opleve skolen nye undervisningsbygning som firmaet var partnere på. Lars Keller viste rundt og fortalte om ideen og processen<sup>23</sup>. Der har også været afholdt mundtlig snak sammen elever (8 – 9 klasse) omkring oplevelsen af indeklimaet.

NOTECH-projektet med Realdania er beskrevet på TI`s hjemmeside<sup>24</sup>, på Build<sup>25</sup>. Partnerne WindowMaster har skrevet om NOTECH på deres hjemmeside<sup>26</sup>, Outrup omtaler NOTECH på deres hjemmeside<sup>27</sup>

På linkedin er projektet omtalt også på partnernes profiler.

NOTECH konceptet er også omtalt fx på Fagbladet Boligens hjemmeside<sup>28</sup>  
Indvielse af Feldballe Friskoles nybygning med NOTECH indeklimaløsning

I 2023 er blevet antaget en international artikel om NOTECH ved F1000Research, omhandlende resultater fra de først indeklimamålinger ved projekt om NOTECH støttet af Elforsk<sup>29</sup>.

Artikel i ingeniøren: Ventilationsløsning med ålegræsfilter skal testes i almen renovering<sup>30</sup>, hvor NOTECH projektet på Feldballe Friskole også omtales.

## 11.2. Udstillinger

NOTECH systemet har været præsenteret ved Building Green i juni 2022 og 2023 i Århus.

---

<sup>23</sup><https://www.facebook.com/feldballefriskole2010.dk/posts/pfbid0mvT1CMLt2R2Ug2zs9y1MfzZbjjqGFgj5yqfUE-uUqLxBH8yQ8eHqvUE4wcKw1Rztxl>

<sup>24</sup> <https://www.teknologisk.dk/fuldskala-afproevning-af-notech-systemet-i-en-skoleklasse/44026?cms.query=notech>

<sup>25</sup> <https://vbn.aau.dk/da/projects/notech-fuldskala-afpr%C3%B8vning-og-dokumentation-af-notech-systemet-i>

<sup>26</sup> <https://www.windowmaster.dk/ekspertise/nyheder-og-trends/notech/>

<sup>27</sup> <https://www.outrup.dk/nyheder/forskningsprojekt/>

<sup>28</sup> <https://fagbladetboligen.dk/alle-nyheder/2023/september/alegraes-i-vinduerne-beboere-far-baeredygtig-isolering/>

<sup>29</sup> Volf C, Martiny K, Andersen M and Engberg Pallesen B; 2023; " Indoor environmental quality in schools: NOTECH solution vs. standard solution"; <https://f1000research.com/articles/12-560/v2>

<sup>30</sup> <https://pro.ing.dk/buildingtech/artikel/ventilationsloesning-med-aalegraesfilter-skal-testes-i-almen-renovering>



Figur 11.2. Deltagelse med Mock-up af NOTECH på Building Green København, november 2022, sammen med bl.a. Windowmaster og ECOCOCON, standen hed "Stronger together". I juni måned deltog vi med NOTECH på Building Green i Århus.

WindowMaster har deltaget i byggeudstillinger og konferencer omkring bæredygtighed og ventilation og præsenteret naturlige ventilationsløsninger.



Figur 11.3. På Building Green, Århus, juni 2023 havde WindowMaster og Carlo Volf en stand med fremvisning af en mock-up af NOTECH-elementet.

### 11.3. Møder og Workshops

Bodil E. Pallesen har deltaget i to fyraftensmøder omkring Bæredygtigt Byggeri i Syddjurs kommune, arrangeret af Business Djursland, efteråret 2022. Bodil bl.a. fortalt om NOTECH-projektet og medvirket i paneldebatterne.

Carlo Volf har deltaget i en række møder og fortalt om NOTECH-projektet, og deltager på workshop med "Naturens løsninger", og Biofilt design 10. marts 2023, samt seminarer "Current Topics in Sleep & Circadian Health" 17. april 2023.

Projektet NOTECH medvirkede ved Forskningen Døgn afholdt på TI d. 31. maj 2022, præsenteret af Carlo Volf.

## 12. Bilag

### 12.1. Bilag: LCA-screening



# Miljøscreeningsrapport:

NOTECH - Fuldskala afprøvning og dokumentation af  
NOTECH-systemet i en skoleklasse, og i Lab på Teknologisk Institut

## REKVIRENT:

Teknologisk Institut

## DATO:

December 2023



# Indhold

<b>INDHOLD</b> .....	<b>2</b>
<b>1 GENERELT</b> .....	<b>3</b>
1.1 Rekvirent.....	3
1.2 LCA udvikler .....	3
1.3 Dato .....	3
1.4 Ordliste .....	4
<b>2 DISCLAIMER</b> .....	<b>5</b>
<b>3 FORMÅL</b> .....	<b>6</b>
<b>4 BESKRIVELSE AF NOTECH SYSTEMET</b> .....	<b>7</b>
4.1 Systemafgrænsning og antagelser .....	10
4.1.1 Udeladelse af livscyklusfaser, processer og data .....	10
4.1.2 Antagelser.....	11
<b>5 LIVSCYKLUSKORTLÆGNING (LCI)</b> .....	<b>12</b>
5.1 Transport af produktsystem .....	12
5.2 Materialeinputs til fremstilling af NOTECH indeklimaløsning .....	12
5.3 LCA for experts model .....	16
5.4 Enhedsprocesser og Kilder til generiske data .....	17
5.4.1 Vurdering af datakvalitet .....	17
<b>6 VURDERING AF POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER (LCIA)</b> .....	<b>19</b>
6.1 LCIA og LCI resultater.....	19
6.1.1 Resultater for nyudviklet indeklimaløsning (NOTECH) .....	19
6.2 Konklusion .....	22
<b>7 REFERENCER</b> .....	<b>22</b>

# 1 Generelt

Denne rapport dokumenterer en miljøscreening og opfylder derfor ikke kravene til en LCA, som er beskrevet i ISO 14040 og ISO 14044 standarderne.

Ved miljøscreening forstås en afgrænset og simplificeret livscyklusvurdering, baseret på let tilgængelige produktionsdata, og som i vid udstrækning modelleres med generiske datasæt fra baggrundsdata-baser.

## 1.1 REKVIRENT

---

Projektet: "NOTECH - Fuldskala afprøvning og dokumentation af NOTECH-systemet i en skoleklasse, og i Lab på Teknologisk Institut"  
Agro Food Park 15,  
8200 Aarhus N  
Denmark

Støttet af Realdania.

Kontaktperson:  
Projektleder Bodil Engberg Pallesen, Teknologisk Institut  
Tlf: +45 72203281  
Mail: [bdp@teknologisk.dk](mailto:bdp@teknologisk.dk)

## 1.2 LCA UDVIKLER

---



### **Teknologisk Institut**

Gregersensvej  
2630 Taastrup

Konsulent: Maria Preilev Hansen  
Intern KS/Review: Daniel Matthaeus Krisa

## 1.3 DATO

---

Denne rapport er udarbejdet i perioden september-december 2023. Data er indsamlet for samme periode.

## 1.4 Ordliste

---

### **Residual-mix:**

"El-mix som tager højde for at strøm fra vedvarende kilder (grøn strøm) sælges via. certifikater (GO'er). Residual-mixet er den strøm, der er tilbage, når al certificeret grøn strøm er trukket ud, det vil typisk sige den "sorte" strøm, baseret på f.eks. kul og naturgas samt den vedvarende energi der ikke er bundet op på de grønne certifikater."<sup>A</sup>

### **GWP / Klimabelastning / Climate Change**

Global Warming potential er et udtryk for klimabelastningen/drivhusgasudledningen, og angives i enheden CO<sub>2</sub>-ækv. Drivhusgasser er forskellige i forhold til hvor stor en effekt de har på global opvarmning. For at kunne sammenligne effekten af forskellige drivhusgasser, omregnes deres klimapåvirkning derfor til såkaldte CO<sub>2</sub>-ækvivalenter (CO<sub>2</sub>-ækv.). Det betyder, at effekten fra alle drivhusgasser omregnes til en fælles referenceenhed, som beskriver hvor meget udledningen af en given drivhusgas svarer til i CO<sub>2</sub>. Alle udledninger i denne rapport angives derfor i CO<sub>2</sub>-ækvivalenter (CO<sub>2</sub>-ækv.). Da denne rapport udelukkende fokuserer på de potentielle klimapåvirkninger (GWP – kg CO<sub>2</sub>-ækv.), bør det bemærkes at resultaterne ikke kan bruges til at vise noget om andre miljøpåvirkningskategorier.

### **Livscyklusmoduler (opdeling af resultater)**

Resultaterne i denne analyse omfatter produktionen af alle delkomponenter i NOTECH indeklimaløsningen. Produktet livscyklus er opdelt i en række "moduler" for at overskueliggøre hvor miljøpåvirkningen finder sted. Resultaterne for klimapåvirkning (CO<sub>2</sub>-ækv.) er derfor opdelt i en række livscyklusmoduler, ift. hvor de finder sted. Opdelingen i livscyklusmoduler er baseret på strukturen i EN15804+A2 (selvom denne analyse ikke følger standarden EN15804+A2). Nedenfor er en gennemgang af de enkelte livscyklusmoduler:

**A1:** Udvinning af råstoffer, råmaterialer og komponenter (Sand, kalk, cement, ler mm.)

**A2:** Transport af råmaterialer til produktionsstedet.

**A3:** Fremstilling af materialer (Energiforbrug mm. til fremstilling af mursten, tagsten og mørtel)

**A4:** Transport af materialer til byggeplads

**A5:** Installation af produkterne

**B1-B7:** Brugsfaser, herunder vedligehold, reparation, energiforbrug mm. (disse er ikke medtaget i denne analyse, eftersom de ikke anses som relevante).

**C1:** Nedrivning af bygning

**C2:** Transport til affaldsbehandling

**C3:** Affaldsbehandling (nedknusning, sortering mm).

**C4:** Deponering (ikke relevant i denne analyse).

**D:** Genbrugs-, genanvendelses- og nyttiggørelsespotentiale (erstatning af råstoffer på markedet).

---

<sup>A</sup> EPD Danmarks konsulentkit 2023.1

## 2 Disclaimer

Denne rapport er en miljøscreening af et produkt i forbindelse med REALDANIA for projektet "Fuldskala afprøvning og dokumentation af NOTECH-systemet i en skoleklasse, og i Lab på Teknologisk Institut". Den opfylder dermed ikke kravene til en fuld LCA, som står beskrevet i ISO 14040 og ISO 14044 standarderne. Resultaterne fra denne undersøgelse er derfor udelukkende til internt brug hos Teknologisk Institut og REALDANIA. Resultaterne fra denne screening kan ikke bruges som basis for sammenligning med andre produkter, eller til at underbygge udsagn om produktets samlede miljømæssige påvirkning, men giver en god indikation af løsningens bidrag til GWP.

Resultaterne er kun gyldige under de i afsnit 4 beskrevne antagelser og forudsætninger. Denne undersøgelse har desuden ikke taget stilling til, om nogen af de kemikalier der er brugt i produktet findes på REACH "Kandidatliste over stoffer, som anses for at være særlig problematiske for menneskers sundhed eller miljøet". (<http://echa.europa.eu/candidate-list-table>)<sup>C</sup>. Det forudsættes at lovgivningen er overholdt.

---

<sup>B</sup> <https://mst.dk/erhverv/sikker-kemi/kemikalier/reach-og-clp/faa-overblik-over-reach/eus-kandidatliste-over-saerligt-problematisk-stoffer>

<sup>C</sup> <https://mst.dk/erhverv/sikker-kemi/kemikalier/reach-og-clp/faa-overblik-over-reach/eus-kandidatliste-over-saerligt-problematisk-stoffer>

### 3 Formål

Det overordnede formål med denne rapport er at foretage en screening af de potentielle klimapåvirkninger (CO<sub>2</sub>-ækv.) ved fremstilling af en nyudviklet arkitektonisk indeklimaløsning, NOTECH, der søger at drage nytte af naturlig ventilation og naturlige materialer.

Resultaterne kan bruges til at indikere, hvor i produktets livscyklus de største CO<sub>2</sub>-emissioner finder sted, samt til at give en overordnet indikation af de samlede klimapåvirkninger fra de omfattede livscyklusstadier.

## 4 Beskrivelse af NOTECH systemet

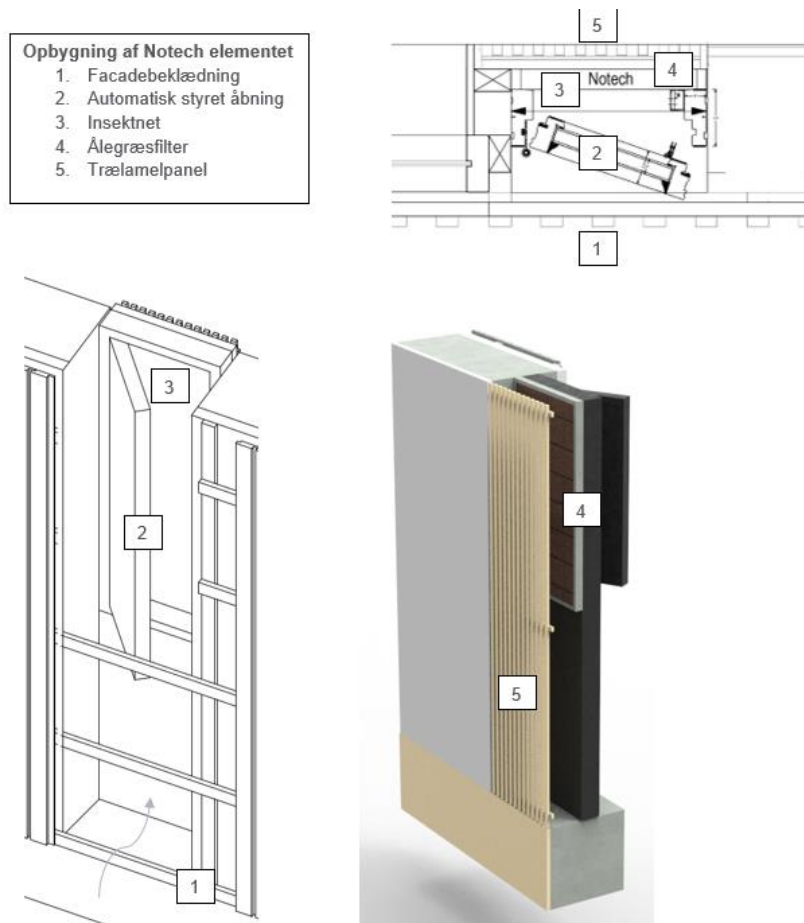
Indeklimaløsningen bruges til at fremme indeklimaet på skoler og har en antaget levetid på 25 år, som angivet af projektleder Bodil E. Pallesen ved Teknologisk Institut.

NOTECH-elementet består af følgende dele:

- Filter-element med ålegræs, se EPD<sup>D</sup>, indbygget i træramme med voliere-net på for- og bagside samt et insektfilter på forsiden.
- Et spjæld-element leveret af Outrup, uden EPD.
- Lameller af træ, som er placeret synligt i væggen ved siden af vindue, uden EPD.
- Dertil styringselement, der består af aktuator<sup>E</sup> og temperatur, CO<sub>2</sub>- og fugtighedssensor med komforttryk og WSK-Link kontrolsensor<sup>F</sup>.

Den overordnede idé er et facadeelement, som kan indbygges i ydervæggen eller tilføjes som tilbygning på yderfacaden. Dette element består af et ydre og indre facadeelement, en styret åbning for naturlig ventilation og et ålegræsfilter. Det ydre og indre facadeelement samt selve åbningen kan variere afhængig af designet, og derfor er kun de væsentlige dele medtaget i LCA screeningen her.

**Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** viser et tværsnit af det samlede NOTECH indeklimasystem, samt systemet



Figur 1 Skitse af NOTECH systemet vist som tværsnit med numre der angiver hvilken komponent der indgår hvor i systemet.

set oppefra.

<sup>D</sup> [https://www.epddanmark.dk/media/4occu5i1/md-21034-en\\_rev1.pdf](https://www.epddanmark.dk/media/4occu5i1/md-21034-en_rev1.pdf)

<sup>E</sup> <https://www.epddanmark.dk/media/jvlhyd11/md-23160-en.pdf>

<sup>F</sup> <https://www.epddanmark.dk/media/b54koadp/md-23161-en.pdf>

NOTECH indeklimaløsning består af et filter-element med ålegræs med dertilhørende insektfilter indbygget i træramme med voliere-net på for og bag. Se Figur 4 og Figur 5 for billede af det indbyggede ålegræs element holdt fast med volierenet.

Filterelementet er gemt bag Lameller af træ, som er placeret synligt i væggen, se Figur 6 og Figur 7, ved siden af vindue (vindue er ikke medtaget i LCA screeningen, da det vil variere fra bygning til byggeprojekt). Til NOTECH systemet hører desuden et spjæld-element og et styringselement, se **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** og Figur 8. Hele systemet er indbygget i et facadeelement, som kan indbygges i ydervæggen eller tilføjes som tilbygning på yderfacaden. Idet det ydre og indre facadeelement samt selve åbningen kan variere afhængig af designet, dette er heller ikke medtaget i LCA screeningen her.



**Figur 2** – Billede af ålegræselementet indbygget i træramme



**Figur 3** – Billede af ålegræsfilter holdt på plads af volierenet





**Figur 4** – Billede af ålegræselementet indbygget i facadeelement



**Figur 5** – Billede af lamelvæg der dækker ålegræsfilteret/ spjældelement



**Figur 6** – Billede af spjældelementet



**Figur 7** – Billede af aktuator til vindue (øverst) og kontrolpanel (nederst)

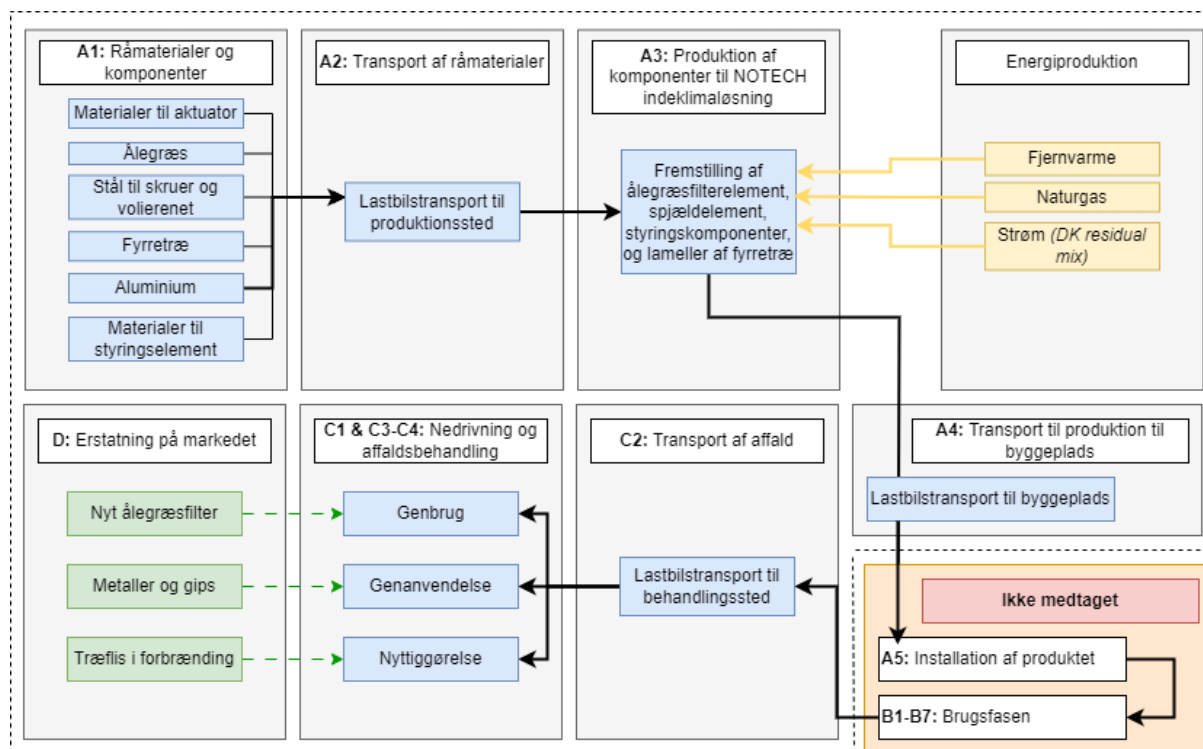
Indeklimaløsningen samles hvor den indbygges. Der er ikke medregnet miljøpåvirkninger fra indbygningsfasen.

Ifølge producenten, antages det at NOTECH indeklimaløsningen har en levetid på 25 år. Der allokeres derfor 1/25 af NOTECH indeklimaløsningens klimapåvirkning til den samlede påvirkning per år. Derudover, er det antaget at ålegræsfilteret skal skiftes hvert 5. år (konservativt), og derfor er produktionen af ålegræsfilteret yderligere medtaget 5 gange.

Ved endt levetid antages produktet at blive transporteret 30 km til nærmeste behandlingsanlæg hvor det afbrændes. Elektronikdelene antages af blive genanvendt ved nærmeste genanvendelsesanlæg.

#### 4.1 SYSTEMAFGRÆNSNING OG ANTAGELSER

LCA-screeningsberegningerne tager udgangspunkt i standardmodellen, som er bygget op i Feldballe, og som er testet hos Teknologisk Institut, Energi og Klima.



Figur 8 Flowdiagram der viser systemgrænserne for denne analyse, samt de primære processer og råmaterialer for NOTECH indeklimaløsningen.

Screeningen består af modulerne A1-A4 og C2-C4 og D i henhold til EN 15804:

- **A1:** Udvinning af råmaterialer (ålegræs, træ, aluminium)
- **A2:** Transport af råmaterialer til produktionsstederne
- **A3:** Fremstilling af komponenter
- **A4:** Transport af råmaterialer og komponenter til produktionsstedet
- **A5:** Installation og samling af indeklimaløsning (**ikke medtaget**)
- **B1-B7:** Brugsfasen, herunder vedligehold, reparation og energiforbrug (**ikke medtaget**)
- **C1:** Nedrivning af indeklimaløsning
- **C2:** Transport af affald fra byggeplads til affaldsbehandler
- **C3:** Affaldsbehandling (sortering, nedknusning, genbrug mm.)
- **C4:** Deponi (ikke relevant i denne analyse)
- **D:** Genbrugs-, genanvendelses- og nyttiggørelsespotentiale (erstatning af råstoffer på markedet).

##### 4.1.1 Udeladelse af livscyklusfaser, processer og data

Nærværende analyse omfatter udelukkende de potentielle klimapåvirkninger (GWP – kg CO<sub>2</sub>-ækv.) og dækker ikke andre miljøpåvirkningskategorier. Resultaterne kan dermed ikke bruges til at konkludere noget generelt om de samlede miljøpåvirkninger i produktionen. Det bør desuden understreges at denne rapport ikke lever op til kravene i ISO 14040 og ISO 14044 vedrørende rammerne, indholdet og dokumentationen for et LCA-studie om opsætning af model, udvælgelse af LCI og af processer samt LCA-værktøj følger dog ISO standarderne. Denne rapport har desuden ikke gennemgået 3. parts verificering eller kritisk Review.

Følgende processer/data er ikke medtaget i beregningerne, da det ikke har været muligt at få specifikke data på disse:

- Energiforbrug til samling af NOTECH systemet.
- Emballage af produkter i systemet som ikke har en tilhørende EPD.
- Fremstilling af produktionsudstyr, transportmidler, kontorudstyr og produktionsanlæg (Capital Goods).
- Emissioner der forekommer i brugsfasen; i praksis forventes det ikke at der forekommer store emissioner i brugsfasen, eftersom NOTECH indeklimaløsningen under normale omstændigheder udelukkende forbruger energi ved automatiske styret åbning og lukning af spjæld. Da energiforbruget er så lille, udelades den af modelleringen.
- Miljøpåvirkninger fra nedrivning af bygninger i C1; da de antages at denne del udføres manuelt.

NOTECH elementet er i forsøgsopstillingen ved Feldballe friskole indbygget i facaden, og indgår som en del af bygningen der består af et sandwichelement. Det har været besluttet udelukkende at beregne miljøpåvirkningerne fra NOTECH-elementet, da vinduer og facade element vil variere fra bygning og byggeprojekt.

NOTECH systemet kan derudover også variere i udseende i forhold til valg af trælameller og anvendt vinduestype. Dette system har medtaget trælamelpanelet, som er på forsiden indvendig i lokalet og et spjæld med automatisk styret åbning på bagsiden.

Der er udformet en EPD på et akustik-element lavet af ålegræs, som benyttes i stedet for specifikke data på produktionen af filter-elementet i NOTECH systemet. Dette skyldes, at ålegræs er et relativt nyt byggemateriale, hvortil der foreløbigt ikke forefindes miljøbaseret baggrundsdata. Selvom ålegræs-filteret har en stor volumenmæssig størrelse på NOTECH-systemet, så udgør ålegræsset kun 5,7% af den samlede vægt for elementet.

Det er ukendt hvilken betydning disse antagelser og udelukkede processer kan have for de samlede resultater.

#### 4.1.2 Antagelser

- Der er for produktet anvendt en transportafstand på 30 km fra produktionsstedet til affaldsmottager.
- Strømforsbrug i produktionen modelleres med det danske residualmix.

## 5 Livscykluskortlægning (LCI)

Nedenfor ses en oversigt over alle LCI-data der er anvendt i dette projekt. I afsnit 5.1 ses en oversigt over de anvendte datasæt til modellering af alle baggrundsdatasæt. Alle generiske baggrundsdata er baseret på LCA for experts version 10.7.1.28, samt enkelte datasæt fra Ecoinvent 3.8.

### 5.1 TRANSPORT AF PRODUKTSYSTEM

Lastbilen anvendt i beregningerne er udvalgt som den mest generisk type i Danmark af typen EURO 6, i størrelsen 20-26t. Andelen af biodiesel i brændstoffet er ændret til 6,59%, i henhold til det anvendte dataset brugt til modellering af brændstof. Alle andre parametre i datasættet er uændrede:

- Udnyttelsesgraden på 61% er uændret.
- Fordelingen mellem kørsel i landdistrikter (23%), byområder (7%) og motorveje (70%) er uændret.
- Nyttelast på 17,3t er uændret.

Skibet anvendt i beregningerne er af typen Bulk carrier, coastal, med 500-25.000 tons (dwt) nyttelastkapacitet. Der er ingen andel af biodiesel i brændstoffet. Alle andre parametre: Udnyttelsesgraden på 58% og kapacitet er uændret.

NOTECH-systemet transporteres som delkomponenter fra forskellige produktionssteder til Feldballe Friskole, der har adresse på Ebeltoftvej 56, DK 8410 Rønde.

Tabel 1 – Anvendte transportafstande

Materiale/komponent	Leverandør	Rute	Afstand (km)	Køretøj/skib
Ålegræsfilter	Søuld Håndværkervej 3, 7700 Thisted	Ukendt**	174	Lastbil, Euro6
Spjæld-element	Outrup vinduer Outrupstræde 31, 7900 Nykøbing Mors	Ukendt**	160	Lastbil, Euro6
Insektfilter	-	Ukendt*	20	Lastbil, Euro6
Lameller af træ	-	Ukendt*	623 100	Lastbil, Euro6 Skibstransport
Søm	-	Ukendt*	1020	Lastbil, Euro6
Volierenet	-	Ukendt*	1020	Lastbil, Euro6
Styringselement og aktuator	Windowmaster Skelstedet 13, Vedbæk	Ukendt**	355	Lastbil, Euro6

\*Estimeret transportafstand.

\*\* Ruten er ukendt, men afstanden er oplyst af leverandøren.

Bemærk at både træ, skruer og volierenet er købt i det lokale byggemarked. Der antages derfor en distance på 20 km. Derudover forventes det ikke at hverken søm eller volierenet består af metaller udvundet og produceret i Danmark, og derfor tilføjes en generisk distance på 1000 km da det antages at produktionen er indenfor Europa. Træelementerne af fyrretræ, estimeres at blive transporteret 623 km med lastbil og 100 km skibstransport<sup>G</sup>, med en estimeret gennemsnitsbetragtning for de 4 mest anvendte træfabrikanter i Sverige.

### 5.2 MATERIALEINPUTS TIL FREMSTILLING AF NOTECH INDEKLIMALØSNING

Nedenfor i **Tabel 2** ses materialesammensætning for den nyudviklede NOTECH indeklimaløsning, hvor der regnes med forskellige procenter af spild på alle materialer under fremstilling (I henhold til producentens estimat).

<sup>G</sup> <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/1998/87-7909-186-5/html/kap06.htm>. Her er valgt en transport lastbilsdistance på 623 km og en skibsdistance på 100 km. Dette er baseret på de fire mest brugte træfabrikanter i Sverige med en lastbilsdistance til Feldballe skolen på hhv. 412, 654, 688 og 737 km og en skibstransportdistance på hhv. 91,8, 91,8, 91,8 og 123 km fra Gruvön, Kopparfors, Linghed og Ala i Sverige. Her er antaget af træfabrikanterne har et ligeligt vægtet transportgennemsnit.

**Table 2** – Materialeinputs til fremstilling af den nyudviklede NOTECH indeklimaløsning

Komponent	Materiale	Modelleret som følgende materiale i	Mængde per produkt (kg)	Mængde inkl. spild (kg)
Ålegræsfilter	-	EPD-data fra producent	0,67	Inkluderet i EPD og genbruges til nyt produkt
Insektfilter*	PP-film	Polypropylene granulate (PP) mix	0,05	-
Spjæld-element	Træ	Timber pine (12% moisture; 10.7% H2O content)	5,9	-
	Aluminiumsliste	Aluminium frame profile, powder coated	0,1	-
	PUR skum	PUR sealing compound	0,2	-
Lameller af træ	Fyrretræ	Timber pine (12% moisture; 10.7% H2O content)	9,14	-
Søm	Galvaniseret stål	Fixing material screws galvanized	0,05	-
Volierenet	Varmforzinket stål tråd	Steel hot dip galvanized zinc coating, coils	0,74	-
Aktuator	Lille aktuator	EPD-data for aktuator fra producent	1,00 <sup>H</sup>	Inkluderet i EPD
Kontrolboks	-	EPD-data for kontrolboks fra producent	0,11 <sup>I</sup>	Inkluderet i EPD

\*Vægten på insektfilteret er anslået, idet det ikke har været muligt at veje nøjagtigt på en køkkenvægt.

Miljøpåvirkningerne fra ålegræsfilteret er taget fra en EPD af Søuld for ålegræsisoleringsmåtter. Isoleringsmåtterne er ikke benyttet i NOTECH systemet, men de består af samme materiale. Forskellen på mængden af ålegræs i de to elementer relateres til tætheden af produktet, hvor isoleringsmåtterne er meget mere tæt pakket end ålegræsfilteret i NOTECH systemet for at luften kan sive igennem og blive filtreret. Massefylden for ålegræsisoleringsmåtten er 137 kg/m<sup>3</sup> mens den for ålegræsfilteret er tættere på 30 kg/m<sup>2</sup>, hvilket er specifikt afmålt. Det skal bemærkes at ålegræsmåtten fra Søuld indeholder en mindre mængde bindefibre (max 10% PP/PE-fibre), men omregnet til den lavere vægtfylde vurderer vi, at det kun har en mindre indflydelse på beregningen, med udgangspunkt i en konservativ betragtning.

I EPD'en for ålegræsisoleringsmåtterne, er det vurderet at produktionen, som beskrevet nedenfor, inkluderer en højere miljøbelastning end ålegræsfilteret i sig selv. Det er fordi ålegræsset anvendt i filteret udelukkende høstes, tørres og rulles til ålegræsballer inden det leveres som filter til NOTECH indeklimaløsningen. Det vil sige at produktionen inklusiv impregnation, hot press, and cutting ikke er inkluderet i produktionen af ålegræsfilteret i NOTECH systemet. Til gengæld vurderes den samme mængde spild i produktionen på de to materialer, da spildet er baseret på renheden af ålegræsset.

*"The product stage includes the extraction and processing of raw materials for input to the product system. This includes eelgrass (including stand/stone/impurities), spider-net packaging made of polypropylene (PP) for the eelgrass bales, flame retardant, IBC pallet tank as packaging material for the flame retardant, water, adhesive and plastic pallet + wrap + strips as packaging material for the adhesive. The transportation of the raw materials to the manufacturing is also included in the product stage. [...] The production of Søuld Acoustic Mats includes shredding of eelgrass, impregnation, mixing the products in a nonwoven plant, a hot press of the product and cutting it into panels while running on a transport system. 5.87% eelgrass waste takes place in the shredding process and consists of 50% sand / stone /impurities from the eelgrass bales and 50% clean eelgrass. [...]"*

*The raw materials included in the product system originate from different suppliers with manufacturing processes in Poland, Ireland and Denmark, which are all transported by truck and ship to the manufacturing site in Thisted, Denmark. The manufacturing of Søuld Acoustic Mats includes electricity and natural gas for the production processes as well as electricity for the factory. The production of eelgrass bales includes the harvesting of eelgrass. The eelgrass is harvested directly from the beach with the use of a tractor. After the harvesting from the beach, the eelgrass is laid out to dry on a field after which it is rolled into eelgrass bales and packaged with a spider-net*

<sup>H</sup> <https://download.windowmaster.com/perfion/file.aspx?id=2AC03F30-CA0D-4A1E-8154-5343BD3C03CE>

<sup>I</sup> <https://download.windowmaster.com/perfion/file.aspx?id=E392E7E6-8CEB-4E88-9766-619889680469>

ready to be transported to the manufacturing site Convert A/S in Thisted. The diesel and motor oil for the tractor is included in the LCA model.”

Miljøpåvirkningerne fra ålegræsisoleringsmåtterne inkluderer også miljøpåvirkningerne fra insektfilteret. Der vil i udgangspunkt være mere insektfilter per mængde ålegræs i filterløsningen i forhold til isoleringsmåtteløsningen. Da insektfilteret er en del af ”adhesive” materialet og miljøpåvirkninger af dette typisk er højere end ålegræsset, vurderes det dog at miljøpåvirkningen fra ålegræsisoleringsmåtte EPD’en stadig er et worst case scenarie, brugt i manglen på LCA for experts processer for ålegræs.

Bemærk at alt træ i forsøgsopstillingen er udformet af fyrretræ, som også er træformen brugt i modelleringen. Træsarten kan variere, med forskellige forsøgsopstillinger.

Vægten af insektfilteret er anslået efter at være blevet vejet på en unøjagtig køkkenvægt til særligt lette mængder. Den anslået vægt er konservativ. Insektfilteret er desuden lavet af polypropylenen plastik film.

Volierenettet er et svejst net af varmforzinket tråd belagt med min. 220 gram zink pr. m<sup>2</sup>.<sup>J</sup> I zinkoverfladebehandlingen fra LCA for experts, findes kun processer med enheden per m<sup>2</sup>. Der er omregnet fra kg til m<sup>2</sup> ved følgende beregning<sup>K</sup>:

Det totale areal af volierenettet i NOTECH opstillingen er:

$$Længde \cdot Bredde = Areal \quad \leftrightarrow \quad 1,1 \text{ m} \cdot 0,59 \text{ m} = 0,649 \text{ m}^2$$

Den totale vægt af volierenettet er: 0,739 kg, baseret på en densitet af 1,138 kg/m<sup>2</sup>. Denne densitet er for et kraftigere og dyrt volierenet, som er afmålt til denne densitet. Ifølge NSH Nordic (HORTUS), så er tråden belagt med zink i omfanget 0,22 kg/m<sup>2</sup>.

Zink belægning per kg stål, hvoraf 0,05 kg af stålet er spild:

$$\frac{\text{Per kg stål} + 0,05 \text{ kg stål spild}}{\text{densitet af volierenettet}} \quad \leftrightarrow \quad \frac{1,05 \text{ kg stål}}{1,138 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} = 0,92 \text{ m}^2$$

Dette er mængden indsat i LCA for experts modellen.

Det vil sige at zinkbelægningen per NOTECH element vil være:

$$\begin{aligned} \text{Zinkbelægning per kg stål:} & \quad 0,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 0,92 \text{ m}^2 = 0,2 \text{ kg} \\ \text{Zinkbelægning per m}^2 \text{ NOTECH volierenet:} & \quad 0,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 0,649 \text{ m}^2 = 0,14 \text{ kg} \end{aligned}$$

Sidst men ikke mindst er spjældet udformet som indvendige jalousi skodder til et vindue. Det udvendige vindue er ikke medtaget i beregningerne som beskrevet tidligere. I NOTECH systemet på Feldballekolen er skodden udelukkende bestående af aluminium, men i fremtidige projekter og allerede implementeret på Alfabo projektet<sup>L</sup>, er skodden bestående af primært træ, som nævnt i **Tablet 2**. Dette er gjort for at få massen af CO<sub>2</sub>-tunge materialer ud af

<sup>J</sup> <https://www.nshnordic.com/dansk/produkter/volierenet-maske-6-x-6-mm-100-cm-x-10-m-galvaniseret>

<sup>K</sup> <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/4415881738770-How-Do-I-Model-Zinc-Coating-of-Steel->

<sup>L</sup> <https://fagbladetboligen.dk/alle-nyheder/2023/september/alegraes-i-vinduerne-beboere-far-baeredygtig-isolering/>

den mere naturlige indeklimaløsning. Der er derfor valgt udelukkende at se på, hvordan spjæld-elementet af primært træ påvirker systemet, se Figur 9 nedenfor.



Figur 9 Spjældelement af træ.

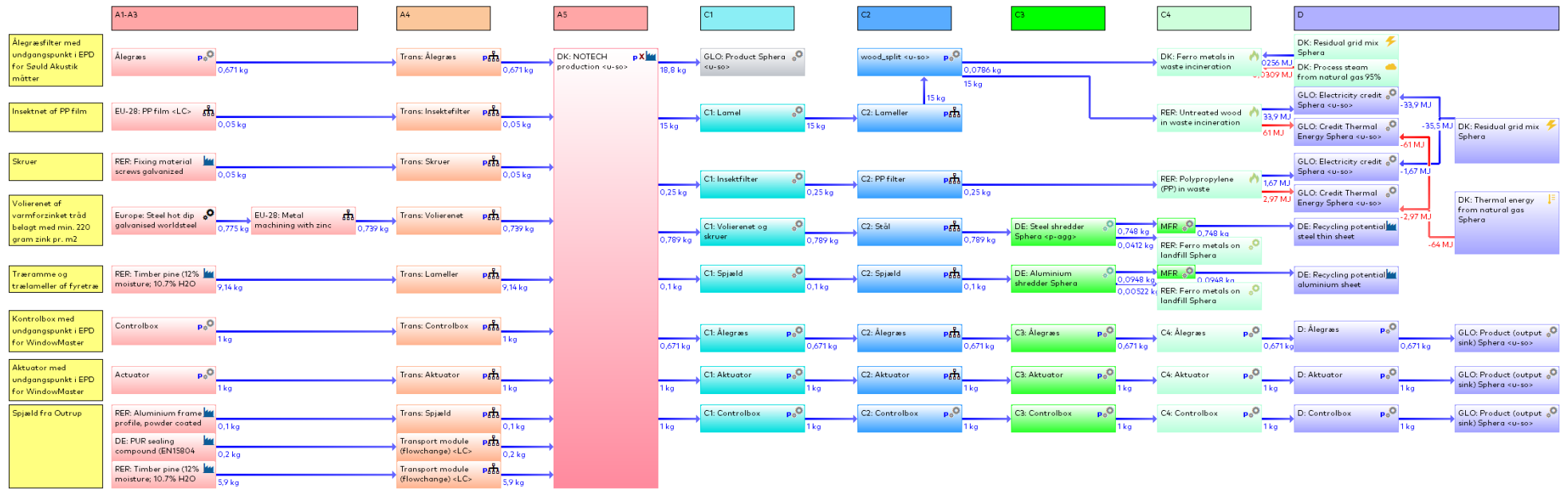
Det har ikke været muligt at få primære data for indbygning og derfor er der ikke medregnet energiforbrug til samling af de enkelte komponenter/materialer (herunder påføring af insektfilter på ålegræsset) på NOTECH systemet. Dette forventes også at variere per bygning og per byggeprojekt. Det er ukendt hvilken betydning disse udelukkede processer kan have for de samlede resultater.

For yderligere forklaring af begreber og enheder, kan følgende guide anvendes (Guiden er målrettet forståelsen af EPD'er, men kan muligvis anvendes til at give en generel forståelse for LCA-resultater og fremgangsmåde):

[epddanm https://www.epddanmark.dk/media/nxvppn4v/epddanmark\\_guide4.pdf](https://www.epddanmark.dk/media/nxvppn4v/epddanmark_guide4.pdf)

### 5.3 LCA FOR EXPERTS MODEL

NOTECH  
Process plan Reference quantities





## 5.4 ENHEDSPROCESSER OG KILDER TIL GENERISKE DATA

Generiske baggrundsdata er baseret på LCA for Experts version 10.7, og Ecoinvent version 3.8. Kvaliteten af de anvendte dataset er vurderet i henhold til følgende skala: "Meget god", "God", "Retfærdig", "Dårlig" og "Meget dårlig" som beskrevet i EN15804+A2: 2019 Bilag E.

### 5.4.1 Vurdering af datakvalitet

Datakvaliteten for de anvendte dataset er i de fleste tilfælde vurderet som værende god til meget god, med enkelte datasæt der er vurderet som "Retfærdig".

**Tabel 3** – Kilder til materiale/procesinputs

Proces/Materiale	Geo	Proces	Ref år	Link	Geo	Ti	Te
Ålegræsfilter	DK	EPD-datasæt fra Søuld	2022	<a href="https://www.epddanmark.dk/media/40ccu5i1/md-21034-en_rev1.pdf">https://www.epddanmark.dk/media/40ccu5i1/md-21034-en_rev1.pdf</a>	MG	MG	G
Aktuator	DK	EPD-datasæt fra WindowMaster	2023	<a href="https://www.epddanmark.dk/media/jvlhyd11/md-23160-en.pdf">https://www.epddanmark.dk/media/jvlhyd11/md-23160-en.pdf</a>	MG	MG	MG
Kontrolboks	DK	EPD-datasæt fra WindowMaster	2023	<a href="https://www.epddanmark.dk/media/b54koalp/md-23161-en.pdf">https://www.epddanmark.dk/media/b54koalp/md-23161-en.pdf</a>	MG	MG	MG
Insektfilter	DE	Polypropylene granulate (PP) mix	2022	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/c8e9efd5-fd8f-4da2-89ed-5a78e7ba6e42.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/c8e9efd5-fd8f-4da2-89ed-5a78e7ba6e42.xml</a>	R	MG	G
	GLO	Plastic Film (PE, PP, PVC)	2022	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/7094f46a-2202-44e5-a1cc-8e939be9ff6b.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/7094f46a-2202-44e5-a1cc-8e939be9ff6b.xml</a>	MG	MG	G
	RER	Lubricants at refinery	2017	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/bdfac21c-7415-46af-acbc-8916cb95b9b8.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/bdfac21c-7415-46af-acbc-8916cb95b9b8.xml</a>	G	G	MG
	RER	Residual grid mix	2021	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/4f75cdf1-7615-44ef-b703-585c8348b7a8.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/4f75cdf1-7615-44ef-b703-585c8348b7a8.xml</a>	G	MG	MG
	RER	Thermal energy from natural gas	2019	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/cfe8972e-6b51-4a17-b499-d78477fa4294.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/cfe8972e-6b51-4a17-b499-d78477fa4294.xml</a>	G	MG	MG
Volierenet	EU	Steel hot dip galvanised	2020	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/cb27c596-c1cf-4cb3-ba99-ed208f446ff.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/cb27c596-c1cf-4cb3-ba99-ed208f446ff.xml</a>	G	MG	G
	GLO	Steel sheet stamping and bending (5% loss)	2020	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/35dac06b-ef43-4c33-8c5b-42d422be0ed1.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/35dac06b-ef43-4c33-8c5b-42d422be0ed1.xml</a>	G	MG	R
	GLO	Compressed air 7 bar (medium power consumption)	2017	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/591678ea-db78-427a-8b62-f0c2a329c5bb.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/591678ea-db78-427a-8b62-f0c2a329c5bb.xml</a>	G	MG	MG
	RER	Lubricants at refinery	2017	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/bdfac21c-7415-46af-acbc-8916cb95b9b8.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/bdfac21c-7415-46af-acbc-8916cb95b9b8.xml</a>	G	G	MG
	RER	Residual grid mix	2021	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/4f75cdf1-7615-44ef-b703-585c8348b7a8.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/4f75cdf1-7615-44ef-b703-585c8348b7a8.xml</a>	G	MG	MG
	RER	zinc coating, coils	2023	Ecoinvent data	G	MG	R
Skrue	DE	Fixing material screws galvanized (EN15804 A1-A3)	2020	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/ab2f074d-58b9-4ceb-af64-32847f3c9b3a.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/ab2f074d-58b9-4ceb-af64-32847f3c9b3a.xml</a>	R	MG	MG
Spjæld	RER	Aluminium frame profile, powder coated (EN15804 A1-A3)	2022	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/76a28c07-f7d7-40f9-8fcd-1f23237daf2e.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/76a28c07-f7d7-40f9-8fcd-1f23237daf2e.xml</a>	G	MG	R
	DE	PUR sealing compound (EN15804 A1-A3)	2022	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/2fe6d8e8-dede-4e65-8f70-2f08444ad047.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/2fe6d8e8-dede-4e65-8f70-2f08444ad047.xml</a>	R	MG	G
	RER	Timber pine (12% moisture; 10.7% H2O content) (EN15804 A1-A3) 1kg	2022	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/c77ec3f3-ca22-4bae-a9a6-289936b739da.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/c77ec3f3-ca22-4bae-a9a6-289936b739da.xml</a>	G	MG	G
Træramme + lamel	RER	Timber pine (12% moisture; 10.7% H2O content) (EN15804 A1-A3) 1kg	2022	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/c77ec3f3-ca22-4bae-a9a6-289936b739da.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/c77ec3f3-ca22-4bae-a9a6-289936b739da.xml</a>	G	MG	MG
Strøm	DK	Residual grid mix	2017	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/470b8025-0616-4847-a111-a9ab50712fcc.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/470b8025-0616-4847-a111-a9ab50712fcc.xml</a>	MG	G	MG
Naturgas	DK	Thermal energy from natural gas	2019	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/87fade97-c24d-4688-8942-d5c43a5b8f15.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/87fade97-c24d-4688-8942-d5c43a5b8f15.xml</a>	MG	G	G
Vand	RER	Tap water from groundwater	2020	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/db009013-338f-11dd-bd11-0800200c9a66.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/db009013-338f-11dd-bd11-0800200c9a66.xml</a>	G	MG	MG
Stål og aluminium shredder	DE	Car shredder	2022	<a href="https://sphera.com/2023/xml-data/processes/9913bb52-74bc-47ae-b794-d80ee214705c.xml">https://sphera.com/2023/xml-data/processes/9913bb52-74bc-47ae-b794-d80ee214705c.xml</a>	R	MG	G

Forbrænding af træ	RER	Untreated wood in waste incineration plant	2022	<a href="https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/57026b03-269c-4ef9-bd07-55ef46292783.xml">https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/57026b03-269c-4ef9-bd07-55ef46292783.xml</a>	G	MG	MG
Forbrænding af plastik	RER	Polypropylene (PP) in waste incineration plant	2022	<a href="https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/f39b6710-30b8-4672-9a73-cc06607e652d.xml">https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/f39b6710-30b8-4672-9a73-cc06607e652d.xml</a>	G	MG	MG
Deponi af fluff	RER	Ferro metals on landfill	2022	<a href="https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/64197301-3307-11dd-bd11-0800200c9a66.xml">https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/64197301-3307-11dd-bd11-0800200c9a66.xml</a>	G	MG	MG
Genanvendelse af aluminium	DE	Recycling potential aluminium sheet	2022	<a href="https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/3b2a3841-e3eb-42ce-9ac3-87178d413700.xml">https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/3b2a3841-e3eb-42ce-9ac3-87178d413700.xml</a>	R	MG	G
Genanvendelse af stål	DE	Recycling potential steel thin sheet (EN15804 D)	2022	<a href="https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/bcac2d2d-a1f0-4cb7-9354-fe519759d419.xml">https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/bcac2d2d-a1f0-4cb7-9354-fe519759d419.xml</a>	R	MG	G
lastbil	GLO	Truck, Euro 6, 28 - 32t gross weight / 22t payload capacity	2020	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/659fe88d-fbd9-4139-9820-73c9b07dfeeb.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/659fe88d-fbd9-4139-9820-73c9b07dfeeb.xml</a>	G	MG	MG
Diesel	RER	Diesel mix at filling station	2017	<a href="http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/99248ee9-3a59-47e4-b1f1-bb79067249ba.xml">http://gabi-documentation-2021.gabi-software.com/xml-data/processes/99248ee9-3a59-47e4-b1f1-bb79067249ba.xml</a>	G	G	MG
Skib	GLO	Oil tanker, 500 to 20.000 dwt payload capacity, coastal	2022	<a href="https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/6bc855dd-6afa-46d5-b2f5-a8b62b7c284c.xml">https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/6bc855dd-6afa-46d5-b2f5-a8b62b7c284c.xml</a>	G	MG	G
Braendstof	RER	Light fuel oil at refinery	2021	<a href="https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/909c9a65-3b16-4923-9c91-fe585ca9d194.xml">https://sphaera.com/2023/xml-data/processes/909c9a65-3b16-4923-9c91-fe585ca9d194.xml</a>	G	MG	MG

Der er anvendt specifikke data for produktion/bearbejdning på enkelte elementer i NOTECH systemet som ikke i forvejen havde en EPD. Disse er baseret på data fra producenten for det specifikke projekt.

Jf. EN 15804:2012+A2:2019 afsnit 6.3.7 er det anvendt generiske LCA-data for opstrøms-processer i modul A1-A3, samt nedstrøms-processer for affaldsbehandling af produktionsspild/-affald i de inkluderede EPD'er. Da der ikke har været samme datatilgængelighed for inkluderet materialer uden EPD, er de valgte generiske processer markeret med en dårligere datarepræsentativitet. Der er også anvendt generiske LCA-data for enkelte nedstrøms-processer for moduler ud over modulerne A1-A3 (fabrikporten).

Alle datasæt med tilhørende EPD'er vurderes som værende meget god på tværs af den tidsmæssige (Ti), den geografiske (Geo) og den tekniske (Te) repræsentativitet. Af de generiske datasæt vurderes de udvalgte processer især indenfor den teknologiske repræsentativitet ofte som retfærdig, fremfor god eller meget god, fordi datavalidering fra producenten har været mindre omfangsrig og detaljeret end det er forventet i EPD'er. Dermed forventes datakvaliteten og begrundelsen for de udvalgte processer at være af dårligere repræsentativitet end de fundne EPD'er til de andre input materialer. Disse datasæt anses dog alligevel som valide og repræsentative, og medfører derfor ikke væsentlig usikkerhed for de samlede resultater.

## 6 Vurdering af potentielle miljøpåvirkninger (LCIA)

Til beregning af LCIA-resultater er karakteriseringsmodellen EN 15804:2012+A2:2019 anvendt sammen med modelleringssøftvare LCA for Experts (GaBi). Alle resultater er angivet med miljøpåvirkningskategorien *Climate Change - total* [kg CO<sub>2</sub>-ækv.].

### 6.1 LCIA OG LCI RESULTATER

Nedenfor i **Tabel 3** ses en oversigt over de samlede potentielle klimapåvirkninger (CO<sub>2</sub>-ækv.) for NOTECH indeklimaløsningen. Det bør bemærkes at der i LCA-sammenhæng ikke medregnes potentielle besparelser ved genanvendelse/nyttiggørelse af affald fra egenproduktion i A3 (i henhold til EN 15804+A2). De samlede emissioner er opdelt i en række kategorier (kategorierne indeholder både fremstilling af de enkelte materialer/komponenter, samt forskellige livscyklusstadier), er vist grafisk for NOTECH i **Figur 10**.

#### 6.1.1 Resultater for nyudviklet indeklimaløsning (NOTECH)

**Tabel 3** – Oversigt over resultaterne for den nyudviklede indeklimaløsning NOTECH. Resultaterne er vist både med deres faktiske påvirkning og som % af de samlede CO<sub>2</sub>-emissioner. Resultaterne er opdelt mellem faktiske emissioner og potentielle besparelser fra energiproduktion ved forbrænding (negative værdier).

Samlede resultater – Nyudviklet indeklimaløsning (NOTECH)				
Kategori	Proces	Climate Change - total [kg CO <sub>2</sub> -ækv.]	Andel af samlede emissioner (%)	Andel af absolute samlede emissioner (%)
Fremstilling af råvare og produktion af komponenter	Aktuator	9,21E+00	44,66%	14,90%
	Insektfilter	9,57E-02	0,46%	0,15%
	Kontrolboks	4,44E-01	2,15%	0,72%
	Ramme + Trælammeller	-1,34E+01	-65,07%	21,71%
	Skruer	1,61E-01	0,78%	0,26%
	Spjæld	-6,67E+00	-32,34%	10,79%
	Volierenet	4,20E+00	20,36%	6,80%
	Ålegræs	-5,01E-01	-2,43%	0,81%
Transport	Af råvare	6,99E-01	3,39%	1,13%
	Af affald	4,52E-02	0,22%	0,07%
Affaldsbehandling	Nedrivning	0,00E+00	0,00%	0,00%
	Affaldsforbrænding	2,51E+01	121,62%	40,58%
	Deponi	4,06E-03	0,02%	0,01%
	Genanvendelse	1,27E+00	6,17%	2,06%
<b>Total</b>	-	2,06E+01	<b>100%</b>	<b>100%</b>
Besparelser*	Energi fra forbrænding	-9,41E+00	58%	58%
	Genanvendelse	-6,70E+00	42%	42%
<b>Total</b>	-	<b>-1,61E+01</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
*medregnes ikke i EPD-sammenhæng				

Bemærk her at affaldsforbrændingen udgør mere end 100% (ca. 121%) af de samlede emissioner fra NOTECH systemet. Dette skyldes at optaget af biogent karbon i træ bidrager med en negativ andel til de samlede emissioner (et CO<sub>2</sub> optag), hvorfor den absolute sum er over 100% (i alt 300%). I absolute værdier udgør affaldsforbrændingen op til 40%, mens produktionen af diverse elementer med trækomponenter tilsammen udgør 32%.

Produktionen af spjældet har i løbet af projektet været under udvikling og er gået fra at være udelukkende af aluminium til primært af bestå af træ. Derfor er den proces vurderet til at have den største usikkerhed i beregningen af miljøpåvirkningen fra NOTECH systemet. I fremtidige studier bør vægten af spjældet samt dets nøjagtige materiale kendes. Derudover vil en EPD for spjældløsningen være fordelagtigt til undersøgelsen af klimapåvirkningerne fra NOTECH systemet, idet det vil sikre højere datarepræsentativitet, og så vil materialespild ved produktion være inkluderet i miljøpåvirkningerne.

NOTECH systemet kan derudover også variere i udseende i forhold til valg af trælameller og vindues typer. Dette system har medtaget trælamelpanelet af fyrretræ, som er på forsiden indvendig i lokalet. Et skift i træsorten for lamellerne forventes ikke at have en stor betydning for resultatet.

Derudover er klimapåvirkningsresultatet for NOTECH indeklimaløsningen usikker idet der er brugt data fra en EPD på et akustik-element lavet af ålegræs fremfor på ålegræs i sig selv. Det blev valgt at benytte det konservative input fordi, ålegræs er et relativt nyt byggemateriale, hvortil der foreløbigt ikke forefindes miljøbaseret baggrundsdata. Der er her taget udgangspunkt i modellen *Spøld akustik måtte ikke-brandhæmmende*, som vurderes stadig at være en mere konservativt input-proces end det faktiske ålegræs idet akustik panelet også indeholder andre komponenter (klæbemidler og brandhæmmende middel) end det bioorganiske materiale ålegræs. Selvom ålegræsfilteret har en relativt stor volumenmæssig størrelse på NOTECH-systemet, så udgør ålegræsset kun 5,7% af den samlede vægt for elementet. Derudover udgør ålegræsset kun -2,8% af den samlede klimapåvirkning fra NOTECH systemet, trods det konservative valg.

Den samlede størrelse på NOTECH standardelement er 0,85 m<sup>2</sup>. Resultatet overfor angiver således miljøpåvirkningerne fra produktionen af standard størrelsen (mock-up systemet) - altså et NOTECH element i nøjagtig denne størrelse. For lettere at kunne skalere resultatet til andre størrelser samt relatere det til andre luftskiftemængder, er der udformet en eksempel-kalkulation for hvordan NOTECH systemet kan fungere i praksis.

Der er taget udgangspunkt i at der skal bruges 5 standard filtre der i alt fylder 4,25 m<sup>2</sup> til at opnå et 1080 m<sup>3</sup>/h i lokalet på de 96 m<sup>2</sup> på Feldballe-friskole, svarende til 30 personer af 36 m<sup>3</sup>/h. Dette giver omregnet til at 1 m<sup>2</sup> NOTECH filterløsning, et dimensioneret luftskifte på ca. 250 m<sup>3</sup>/h. Resultatet overfor er derfor multipliceret med en faktor 1,18 for at resultaterne skal repræsentere en NOTECH løsning på 1 m<sup>2</sup> fremfor 0,85 m<sup>2</sup>.

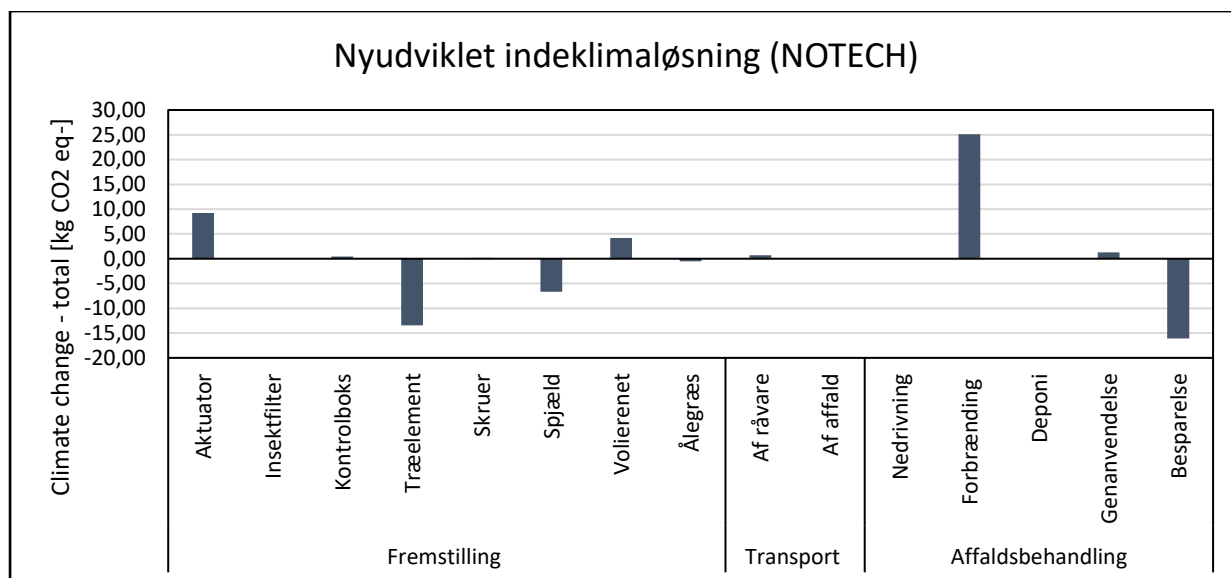
Ifølge producenten, antages det at NOTECH indeklimaløsningen har en levetid på 25 år. Der allokeres derfor 1/25 af NOTECH indeklimaløsningens klimapåvirkning til den samlede påvirkning per år. Derudover, er det antaget at ålegræsfilteret skal skiftes hvert 5. år (konservativt), og derfor er produktionen af ålegræsfilteret yderligere medtaget 5 gange. Dermed er den samlede udledning for 1 m<sup>2</sup> af NOTECH indeklimaløsningen der kan yde et luftskifte på 1071 m<sup>3</sup> per time:

Klimapåvirkninger fra A1-A3:	$-5,76 \cdot 10^0 \text{ kg } CO_2 \text{ eq}$
Klimapåvirkninger fra B4 og B6:	$9,57 \cdot 10^{-2} \text{ kg } CO_2 \text{ eq} \cdot 5 = 4,79 \cdot 10^{-1} \text{ kg } CO_2 \text{ eq}$
Klimapåvirkninger fra C3-C4:	$2,64 \cdot 10^1 \text{ kg } CO_2 \text{ eq}$
Klimapåvirkninger fra D:	$-1,61 \cdot 10^1 \text{ kg } CO_2 \text{ eq}$
Totale klimapåvirkninger inkl. besparelse per 1 m <sup>2</sup> NOTECH:	$\frac{(-5,76 + 4,79 \cdot 10^{-1} + 2,64 \cdot 10^1 - 1,61 \cdot 10^1) \text{ kg } CO_2 \text{ eq}}{25 \text{ år}} \cdot \frac{1,18}{0,85 \text{ m}^2} = 0,279 \frac{\text{kg } CO_2 \text{ eq}}{\text{m}^2 \cdot \text{år}}$
Totale klimapåvirkninger ekskl. besparelse per 1 m <sup>2</sup> NOTECH:	$\frac{(-5,76 + 4,79 \cdot 10^{-1} + 2,64 \cdot 10^1) \text{ kg } CO_2 \text{ eq}}{25 \text{ år}} \cdot \frac{1,18}{0,85 \text{ m}^2} = 1,173 \frac{\text{kg } CO_2 \text{ eq}}{\text{m}^2 \cdot \text{år}}$
Totale klimapåvirkninger på Feldballe-friskole ekskl. besparelse:	$\frac{(-5,76 + 4,79 \cdot 10^{-1} + 2,64 \cdot 10^1) \text{ kg } CO_2 \text{ eq}}{25 \text{ år}} \cdot \frac{1,18}{0,85 \text{ m}^2} \cdot \frac{4,25 \text{ m}^2 \text{ (størrelse på filter)}}{96 \text{ m}^2 \text{ (størrelse på klasseværelse)}}$ $= 0,052 \frac{\text{kg } CO_2 \text{ eq}}{\text{m}^2 \cdot \text{år}}$

Det giver en samlet udledning på henholdsvis 0,279 eller 1,173 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>/år for et NOTECH indeklimaløsning

med et luftskifte på ca. 250 m<sup>3</sup>/time, med og uden besparelserne i modul D. For et klasselokale med et samlet areal på 96 m<sup>2</sup> er de totale klimapåvirkninger 0,052 CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>/år (eksklusiv D-fasen) når der skal opnås et samlet luftskifte på 1080 m<sup>3</sup>/time.

Der er valgt at se på den samlede miljøpåvirkning uden besparelser i diskussionsafsnittet nedenfor. I **Figur 10** ses et grafisk overblik over resultaterne fra **Tabel 3**, hvor de samlede resultater er opdelt i en række underkategorier.



**Figur 10** – Samlede resultater for den nyudviklede indeklimaløsning (NOTECH).

Overordnet viser resultaterne at de største klimapåvirkninger kommer fra fremstillingen af elektroniske dele i form af aktuatorer samt volierenettet af zinkbehandlet stål. Dette skyldes ikke at produkterne udgør den største vægtmæssige andel af produktet, men fordi de består af metaller der kan være vanskelige og især klimabelastende at udvinde som råstoffer. Derudover påvirker træformen og lamellerne en negativ klimabelastning i produktionsfasen idet træprodukterne optager CO<sub>2</sub> i dens levetid indtil forbrænding ved endt levetid. Træelementerne der er med i NOTECH systemet går i nul over produktets levetid. Det bør bemærkes at optag/emissioner fra indholdet af biogent karbon i træ ikke er medregnet (dvs. at træ i denne analyse anses som værende CO<sub>2</sub>-neutralt). De øvrige komponenter såsom insektfilter, ålegræs, skruer og spjæld udgør tilsammen kun en mindre andel af de samlede klimapåvirkninger.

Der opnås desuden en betydelig "besparelse" fra energifremstilling ved afbrænding af træelementerne i produktet efter endt levetid. Derudover opnås en relativt god besparelse ved genanvendelse af de brugte metaller i produktet, fordi der for metaller generelt findes en velfungerende genanvendelsesordning.

Resultaterne i 10 viser, at under forudsætningerne i de konkrete scenarier i denne analyse, har den nyudviklede NOTECH indeklimaløsning en relativ lav klimapåvirkning. Dette ses især i fremstillingen af produkterne, hvortil resten af livscyklusmodulerne har værdier, der tilsvarende produktionsudledningen relativt.

Det har ikke været muligt at sammenligne med et traditionelt mekanisk ventilationsanlæg, idet EPD-er for dette typisk også inkluderer en række andre komponenter såsom varmegenvinding der er et krav i BR for mekanisk ventilation. Dette er dog ikke et krav for naturlig ventilation. Det anbefales at der ved sammenlignelige byggerier – fx identiske skoleklasser fremadrettet gennemføres en sammenligning mellem NOTECH og traditionel mekanisk ventilation, hvor der medtages alle komponenter, herunder også brugsfasen og vedligehold. Det forventes at NOTECH systemet har større vedligeholdelsesstandarder end den mekaniske indeklimaløsning, hvor det største vedligehold er udskiftningen af filter. Derudover forventes der et øget strømforbrug i brugsfasen for den mekaniske indeklimaløsning til ventilationsaggregatet kontra til håndteringen af spjældåbningssystemet i NOTECH indeklimaløsningen. Begge moduler for brugsfasen i livscyklussen kan have indvirkning på de samlede miljøpåvirkninger fra

NOTECH systemet, men fordi en sammenligning ikke er medtaget i rapporten her, er det ikke muligt at komme med en konklusion på dette.

## 6.2 KONKLUSION

---

Overordnet indikerer resultaterne i denne screening, at den nyudviklede NOTECH indeklimaløsning (standard-element) forventes at medføre et lavt klimaaftryk (0,279 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH element/år inklusiv D- modul og 1,173 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> NOTECH element/år eksklusiv D- modul for et luftskifte på 250 m<sup>3</sup>/time). Eksempelvis for et klasse-lokale med et samlet gulvareal på 96 m<sup>2</sup> er de totale klimapåvirkninger 0,052 CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> gulvareal/år (eksklusiv D-fasen) når der skal opnås et samlet luftskifte på 1080 m<sup>3</sup>/time hvorved der skal bruges 4,25 m<sup>2</sup> NOTECH filterløsning. Det bør dog understreges at resultaterne og konklusionerne anses som hæftet med stor usikkerhed. Bemærk at denne screening tager udgangspunkt i et meget konkrete scenarie for blandt andet opsætning, installation, affaldsbehandling og brug af genanvendte materialer i produktionen, og det bør bemærkes at resultaterne vurderes at være følsomme overfor ændringer af netop disse parametre.

Fremstillingen af materialer/komponenter er modelleret med generiske datasæt, og der er desuden en række processer der ikke er medtaget i beregningerne, herunder energiforbrug til samling af NOTECH løsningen samt vedligehold i brugsfasen. Det er ukendt hvilken betydning disse antagelser og udelukkede processer kan have for de samlede resultater. De anses dog for ubetydelige.

En sammenligning med den traditionelle mekaniske indeklimaløsning er ikke udført grundet de tidligere nævnte rammer for analysen. Det anbefales fremadrettet at gennemføre en sammenligning under sammenlignelige forhold, herunder at indhente data på fremstillingen af produkterne (herunder materialer og komponenter), samt at medregne alle livscyklusstadier.

## 7 Referencer

### Standarder

- ISO 14040  
DS/EN ISO 14040:2008 – "Miljøledelse – Livscyklusvurdering – Principper og struktur"
- ISO 14044  
DS/EN ISO 14044:2008 – "Miljøledelse – Livscyklusvurdering – Krav og vejledning"

### Databaser

- LCA for experts version 10.7.1.28 (2023) Professional Database: [Professional \(sphera.com\)](https://gabi.sphera.com/databases/gabi-databases/professional/ra.com)

### EPD

- Søuld ApS: EPD for akustikmåtter af ålegræs:  
[https://www.epddanmark.dk/media/4occu5i1/md-21034-en\\_rev1.pdf](https://www.epddanmark.dk/media/4occu5i1/md-21034-en_rev1.pdf)
- WindowMaster: EPD for aktuator:  
<https://www.epddanmark.dk/media/jvlhyd11/md-23160-en.pdf>
- WindowMaster: EPD for kontrolboks med CO<sub>2</sub> måling:  
<https://www.epddanmark.dk/media/b54koadp/md-23161-en.pdf>

### Generelt

- EPD Danmark Konsulentkit 2023.1

- Miljøstyrelsen  
REACH: EU's kandidatliste over særligt problematiske stoffer: <https://mst.dk/erhverv/sikker-kemi/kemikalier/reach-og-clp/faa-overblik-over-reach/eus-kandidatliste-over-saerligt-problematiske-stoffer>
  
- Miljøstyrelsen  
Reduktion af miljøbelastning ved flytning af godstransport fra land til sø: <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/1998/87-7909-186-5/html/kap06.htm>
  
- WindowMaster  
Specifikationer for kædemoter (aktuator): <https://download.windowmaster.com/perfion/file.aspx?id=2AC03F30-CA0D-4A1E-8154-5343BD3C03CE>
  
- WindowMaster  
Specifikationer for sensor med Temperatur-, CO2- og fugtighedssensor med komforttryk og WSK-Link: <https://download.windowmaster.com/perfion/file.aspx?id=E392E7E6-8CEB-4E88-9766-619889680469>
  
- NSH Nordic  
Specifikationer på Hortus volierenet maske 6x6 mm - 100 cm x 10 m, galvaniseret: <https://www.nsh-nordic.com/dansk/produkter/volierenet-maske-6-x-6-mm-100-cm-x-10-m-galvaniseret>
  
- One Click LCA  
How do I model zinc coating of steel: <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/4415881738770-How-Do-I-Model-Zinc-Coating-of-Steel->
  
- Boligen  
Ålegræs i vinduerne: Beboere får bæredygtig isolering: <https://fagbladetboligen.dk/alle-nyheder/2023/september/alegraes-i-vinduerne-beboere-far-baeredygtig-isolering/>
  
- Miljøstyrelsen  
Bæredygtige Tangisoleringsmåtter fra ålegræs; Bodil Engberg Pallesen; <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2018/06/978-87-93710-35-1.pdf>

## 12.2. Bilag Luftkvalitet: VOCs afgangsmåling på element-niveau

Luftkvalitet via VOC-målinger er udført på DTI, Tåstrup, afd. for Byggeri og Anlæg af konsulent Helene Bendstrup Klinke.

Den frivillige bæredygtighedsklasse stiller krav til indeklimamålinger i det færdige byggeri, herunder flygtige stoffer fra afdampning af materialerne i bygningen. Da det er biomaterialer [bl.a. ålegræs] vi arbejder med, vil vi forvente at der vil være en afdampning af flygtige stoffer [VOC], hvorfor vi gerne vil dokumentere at denne afdampning ikke giver en negativ påvirkning af indeklimaet i form af uacceptabel lugt eller problematiske sundhedsskadelige stoffer. Dette foreslås gjort på produktniveau af det færdige element ved standardbetingelser for temperatur og fugt på hhv. 23 °C og 50 % RH samt en stresstest ved forhøjet relativ luftfugtighed på ca. 80 % RH.

Dette er gjort ved målinger af afdampning af VOC-er fra filtret som før og eftermåling.

## 12.3. VOC-Metode



Figur 7.1. Ålegræs til forsøg anvendt til NOTECH filterelementer på Feldballe Friskole.

Emissions-test er udført i klimakammer ved 23°C og 50 % RH (11,5 gram) ved luftskifte på 30 L/h. Luftprøvetagninger af indblæsningsluft til filterelement (IN) hhv. Udblæsningsluft (OUT) fra filterelement til indeluften i rummet (RUM).

Luftprøvetagninger med blå GilAir pumper med hhv. DNPH-rør til aldehydanalyser og Tenax-rør til VOC-analyser – 3 målepunkter, se nedenstående figur.





Figur 7.2. NOTECH filterelement. Mockup Indeklimalaboratoriet. Tv: Udeluft-Indblæsning (IN) (10,4°C) Mf: Udblæsning filterelement NOTECH til rum (10,4°C) + rumluft (på stol) (27,4°C). Th: Hele opstillingen (mock-up) med luftprøvetagninger før og efter NOTECH filterelement

### Analysemetode

Prøverne er analyseret efter Teknologisk Instituts metode: OA-750.

### Referencemetoder:

Ref. 1: ISO16000-3, Indoor Air – Part 3. Determination of Formaldehyde and other carbonyl compounds – Active sampling method.

Ref. 2: Supelco Lp-DNPH cartridges, Certificate of Analysis (metode til eluering af DNPH-rør).

Ref. 3: OT020 Analysemetode DNPH-rør ver.03 26.01.2012.NB

### Vilkår:

Prøvningen er udført akkrediteret i henhold til internationale krav (ISO/IEC 17025:2017) og i henhold til Teknologisk Instituts almindelige vilkår. Prøveresultaterne gælder udelukkende for de(t) prøvede emne(r) eller de(n) til analyse udtagne delprøve(r). Analyserapporten må kun gengives i uddrag, hvis Teknologisk Institut skriftligt har godkendt uddraget.

## 12.4. VOC-resultater og konklusioner vedr. VOC-afgasningsmåling på element-niveau

Analyserne af hhv. aldehyder (ISO 16000-3, rapport 196361) og VOC (ISO 16000-6, rapport MAIC-2023-1185). Resultaterne fra luftprøveanalyserne er angivet i nedenstående tabel 12.2.1. og 12.2.2. Ingen af de identificerede stoffer overskrider EU-LCI-grænseværdierne i indeklimaet.

Tabel 12.2.1. Analyseresultater VOC-målinger af emissioner.

<b>Analyseresultater</b>												
<b>Prøvemærke</b>		<b>Luft</b>	<b>Formaldehyd</b>		<b>Acetaldehyd</b>		<b>Propanal</b>		<b>Butanal</b>		<b>Acrolein</b>	
<b>Laboratoriet</b>	<b>Rekvirent</b>	liter	µg/rør	µg/m <sup>3</sup>	µg/rør	µg/m <sup>3</sup>	µg/rør	µg/m <sup>3</sup>	µg/rør	µg/m <sup>3</sup>	µg/rør	µg/m <sup>3</sup>
196361-1	122949-1 rum	42,7	0,66	16	0,12	2,8	-	-	0,06	1,5	-	-
196361-2	186876-2-0	37,8	-	-	0,30	8,0	-	-	-	-	-	-
196361-3	122949-2 indblæsning	49	0,10	2,0	0,04	0,75	-	-	-	-	-	-
196361-4	122949-3 Ud-filter	60	0,13	2,2	0,06	1,1	-	-	-	-	-	-
196361-5	122949-5 Ålegræs	47,3	0,07	1,5	0,05	0,97	0,06	1,2	0,03	0,72	-	-
196361-blind	Transport	/	-	/	-	/	-	/	-	/	-	/
<b>Detektionsgrænse**</b>			0,03		0,03		0,05		0,03		0,2	
<b>Ekspanderet usikkerhed</b>			15%*									

\*- Betyder mindre end detektionsgrænsen.

/' Betyder ikke relevant.

\*Ved resultater < 0,05 µg/rør er usikkerheden ± 0,01 µg/rør

\*\*Detektionsgrænsen for acrolein er sat til 0,2 µg/rør pga. eventuel interferens med furfural

Frivillige mærkningsordninger for miljø og bæredygtighed (f.eks. EU-blomsten, Svanen, LEED, Indeklima-mærket, M1) har godkendelseskriterier for emission af flygtige stoffer til indeklimaet.

Den harmoniserede EU-LCI-liste med > 200 stoffer har defineret vejledende grænseværdier i luft i et referencerum på 30 m<sup>3</sup> med et luftskifte på 0,5 gang i timen. EU-LCI lowest concentration of interest (LCI): [https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values_en)

Test af råmateriale Ålegræs samt NOTECH filterelement ved mockup i Indeklimalaboratoriet viste, at der ikke afgassede farlige stoffer eller stoffer på EU-LCI-listen i koncentrationer langt under LCI-grænseværdierne for problematisk indeklima.

**Konklusion:** Afgasningerne vurderes at være uproblematisk for indeklimaet.

Tabel 12.2.1. Emissioner fra Ålegræs vs. NOTECH filterelement (=UD) i forhold til indblæsningsluft (IND) og rumluft.

CAS no.	Stofnavn	Ålegræs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	IND ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	UD ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RUM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	EU-LCI# ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
50-00-0	Formaldehyd	2	2	2	16	100
75-07-0	Acetaldehyd	1	1	1	3	1200
123-38-6	Propanal	1	< 1	< 1	< 1	650
123-72-8	Butanal	1	< 1	< 1	2	650
64-19-7	Eddikesyre	130	< 1	< 1	9	1200
79-09-4	Propansyre	8	< 1	< 1	< 1	1500
108-88-3	Toluen	2	< 1	< 1	5	3100
80-56-8	alpha-Pinen	2	< 1	< 1	7	2500
100-52-7	Benzaldehyd	< 1	2	2	3	-
142-62-1	Hexasyre	< 1	< 1	< 1	2	2100
108-95-2	Phenol	< 1	1	1	2	70
0556-67-2	Octamethylcyclotetrasiloxan(D4)	< 1	< 1	< 1	1	1200
127-91-3	beta-Pinen	< 1	< 1	< 1	3	1400
104-76-7	2-Ethyl-1-hexanol	< 1	< 1	< 1	2	300
098-86-2	Acetophenon	< 1	2	2	1	490
124-19-6	n-Nonanal	3	3	2	9	900
65-85-0	Benzosyre	< 1	12	11	4	-
112-31-2	n-Decanal	1	2	1	3	900
	Carboxylsyreester	7	< 1	< 1	< 1	-
	Ukendte	5	< 1	< 1	< 1	-
	Sum VOC (< C6):		2	3	5	-
	Sum VOC (C6-C16):		31	31	66	-
	Sum SVOC (> C16):		< 1	< 1	< 1	-
	TVOC Toluene (ISO 16000-6):		110	90	233	-

< 1 Koncentration er under  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , # EU-LCI lowest concentration of interest (LCI) values: [https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values_en)

"

*Vi har nu i to år haft glæden af vores nye fantastiske bygning.*

*Bygningen rummer skolens bedste lokaler og giver vores elever de mest optimale forhold for læring, da der altid er frisk luft og en behagelig temperatur."*

*Trine Wad Andersen*

*Skoleleder*

*Feldballe Friskole & Børnehus*

