



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Eksperimentell validering av modeller for luftinfiltrasjon i bygninger

Experimental validation of air infiltration models in
buildings

Milosz Waszczuk
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på et femåring masterprogram innen Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven er utarbeidet ved Fakultet for realfag og teknologi våren 2017.

Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder professor Thomas Kringlebotn Thiis for god rådgivning, konstruktive tilbakemeldinger og inspirasjon. Jeg ønsker også å takke Stergiani Charisi for hjelp i forbindelse med gjennomføring av målinger og simuleringer, og mange gode samtaler som bidro til utformingen av denne oppgaven.

Jeg vil takke Dimitrios Kraniotis for veiledning og hans ekspertise innen luftinfiltrasjon i bygninger. Det rettes en takk til professor Tormod Aurlen for gode råd og lån av måleinstrumenter. Takk til Signe Kroken for muligheten til å gjennomføre målinger på målestasjonen på Søråsjordet.

En stor takk rettes til mine foreldre for motivasjon og støtte i løpet av studietiden. Avslutningsvis vil jeg takke min kjæreste Marte for korrekturlesing og moralsk støtte gjennom hele masterperioden, og for at du lyser opp hverdagen min.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, mai 2017

Milosz Waszczuk

Sammendrag

Luftinfiltrasjon er en viktig faktor ved beregning av energitap i bygninger. I dette studiet ble tre beregningsmodeller for luftinfiltrasjon vurdert og sammenlignet med målte verdier. Én av disse modellene er hentet fra Norsk Standard (NS 3031) og to fra energisimuleringsprogrammet DesignBuilder (DB). Målingene av luftinfiltrasjon ble gjennomført i et testhus ved bruk av sporgassmetoden "Concentration Decay". Testhuset var utsatt for to typer vindskjermingsforhold; eksponert og moderat skjerming fra nord. Resultatene fra feltmålingene indikerer at de målte infiltrasjonsratene var avhengige av varierende vindforhold, og av endringer i vindskjermingen.

Modellene fra NS 3031 og DB beregnet konstant infiltrasjonsrate uavhengig av vindforholdene. NS 3031 overestimerte de målte verdiene med 50 – 90% når testhuset var eksponert, og underestimerte de med kun 20% når testhuset var moderat skjermet fra nord. Den vinduavhengige metoden i DB viste samme trend, men med større avvik. Den siste modellen beregnet infiltrasjonsraten basert på vindtrykkoeffisienter (VTK). I tillegg til standard-VTK fra en database, ble VTK fra CFD-simuleringer som gjenspeilet de varierende skjermingsforholdene benyttet. Infiltrasjonsraten beregnet med VTK fra CFD-simuleringer ga det laveste avviket i sju av ni forsøk, imidlertid var de to øvrige verdiene vesentlig overestimert. Estimaten fra alle modellene varierte med forskjellige vindretninger og -styrker sammenlignet med de målte verdiene, og trenger dermed ytterligere undersøkelser for å verifiseres.

Avslutningsvis ble også ett års simuleringer utført for beregning av energitapet skapt av luftlekkasjer, der de aktuelle infiltrasjonsmodellene ble benyttet. Resultatene varierte med opptil 60% avhengig av den valgte infiltrasjonsmodellen.

Abstract

Air infiltration is a crucial factor when calculating energy loss in buildings. In this study, three models for calculating air infiltration are assessed and compared to measured values. One of the models is obtained from Norwegian national standard (NS 3031) whereas the latter from building energy simulation program DesignBuilder (DB). The measurements were conducted in a test building, by using tracer gas method Concentration Decay. The test building was examined in two cases of exposed and partially sheltered conditions. The results from the measurements indicated that infiltration rates were dependent on varying wind speeds and directions, as well as changes in wind exposure.

The models from NS 3031 and DB calculating constant infiltration rate, ignore the effect of wind speeds and directions. In exposed conditions, the measured values were overestimated by 50 – 90 % when calculated by NS 3031. In partially sheltered conditions, the measured values were underestimated by merely 20%. A similar trend was found in the wind independent model in DB, however with a higher deviation. The remaining model in DB calculated infiltration rate based on wind pressure coefficients (WPC). In addition to standard WPC from a database, several CFD-simulations were conducted to calculate WPC that reflected the change in shelter conditions. In seven out of nine experiments, the infiltration rate calculated by WPC from the CFD-simulations showed the lowest deviation when compared to the measured values. The remaining two values, however, were highly overestimated. The difference between estimated values and measured results from all models varied depending on wind speeds and directions. Consequently, further investigations are needed to verify these models.

Lastly, an annual simulation of energy loss caused by air infiltration was executed with all infiltration models. Depending on the selected infiltration model, the results varied up to 60%.

Innhold

1	Innledning.....	1
1.1	Problemstilling.....	1
1.2	Bakgrunn.....	1
1.3	Avgrensninger.....	2
2	Teori.....	3
2.1	Ventilasjon i bygninger	3
2.1.1	Kontrollert ventilasjon.....	3
2.1.2	Ukontrollert ventilasjon	4
2.2	Vindteori	5
2.2.1	Trykk og atmosfærisk trykk	5
2.2.2	Vind.....	6
2.2.3	Vind og mikroklima i urbane områder	7
2.3	Vindtrykkoeffisienter	10
2.4	Trykkforskjeller i bygninger	12
2.4.1	Vindtrykk	12
2.4.2	Skorsteineffekt	12
2.4.3	Ventilasjon.....	13
2.5	Konsekvenser av luftlekkasjer	13
2.6	Måling av luftlekkasjer.....	15
2.6.1	Infiltrasjonsrate	15
2.6.2	Lekkasjetall n_{50}	20
2.7	Simulering og beregning av luftlekkasjer	21
2.7.1	NS 3031 og SIMIEN	21
2.7.2	DesignBuilder og EnergyPlus.....	22
2.8	Computational Fluid Dynamics.....	26
2.8.1	Generelt om CFD-simulering.....	26
2.8.2	CFD-modul i DesignBuilder.....	27
3	Metoder.....	31
3.1	Testhuset og Søråsjordet.....	32
3.2	Beskrivelse av casene	37

3.3	Feltmåling av luftlekkasjer	39
3.3.1	Måleinstrumenter og utstyr	40
3.3.2	Fremgangsmåten.....	42
3.4	Simulering og beregning av luftlekkasjer	44
3.4.1	NS 3031	44
3.4.2	DesignBuilder	44
3.4.3	CFD-simulering	46
3.5	Ett års simulering.....	49
4	Resultater	51
4.1	Resultater fra målinger	51
4.1.1	Case 1 – eksponert	51
4.1.2	Case 2 – moderat skjerming.....	53
4.1.3	Målt vær	55
4.2	Resultater fra beregninger og simuleringer av luftlekkasjer.....	56
4.2.1	NS 3031	56
4.2.2	DesignBuilder Scheduled.....	57
4.2.3	DesignBuilder Calculated	58
4.2.4	Vindtrykkoeffisienter fra CFD-simuleringer	60
4.3	Resultater fra ett års simulering.....	62
5	Diskusjon	63
5.1	Diskusjon av resultater fra målinger.....	63
5.1.1	CO ₂ -målingenes pålitelighet.....	63
5.1.2	Vurdering av resultatene med hensyn til været	64
5.1.3	Vindskjerming i Case 1 og Case 2	66
5.2	Diskusjon av resultater fra beregninger og simuleringer	67
5.2.1	NS 3031	67
5.2.2	DesignBuilder Scheduled.....	68
5.2.3	DesignBuilder Calculated	69
5.2.4	Vindtrykkoeffisienter og CFD-simuleringer	71
5.3	Sammenstilling av resultatene	78
5.4	Diskusjon av energitapet grunnet infiltrasjon	80
6	Konklusjon	81

7	Forslag til videre arbeid	83
8	Referanser	85
	Vedlegg A: Koeffisienter fra DesignBuilder	i
	Vedlegg B: Værdata målt på Søråsjordet	iii

1 Innledning

1.1 Problemstilling

I denne oppgaven vurderes det om verdien for luftinfiltrasjonsraten beregnet i henhold til standarden NS 3031 gir realistiske resultater, og om denne beregningsmetoden kan forbedres. Dette oppnås ved å studere formelen fra NS 3031, samt to andre infiltrasjonsmodeller, og sammenligne disse modellene med målte verdier.

I tillegg har studiet som delmål å undersøke hvilken effekt vindskjerming har på luftinfiltrasjon i bygninger. Dette utføres ved hjelp av målinger og simuleringer på et testhus både i eksponerte omgivelser og moderat skjermede omgivelser. Det vurderes også om vindtrykkoeffisienter beregnet med numeriske simuleringer gir bedre resultater ved beregning av infiltrasjonsrater enn generelle vindtrykkoeffisienter fra databaser.

Avslutningsvis studeres energitapet beregnet ved hjelp av de nevnte infiltrasjonsmodellene på én tenkt bygning plassert i forskjellige klimaer.

1.2 Bakgrunn

Bygningsmassen står for omtrent 40 prosent av energiforbruket i Norge. Store deler av denne energien kan frigjøres ved å energieffektivisere nye og eksisterende bygg (Dokka et al. 2009). Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK) stiller stadig strengere krav til energiforbruket i bygninger. Disse kravene dekker blant annet netto energibehov per år, bygningselementenes isoleringsevne, lufttetthet og effektiviteten til ventilasjonsanlegg (Direktoratet for Byggkvalitet 2016). Kravet om lufttetthet har i 2017 økt med 76% sammenlignet med kravet fra 2010 og med 85% i forhold til 1997 (Standard Norge 2007). I tillegg til reduksjonen av energibehovet har lufttetthet påvirkning på inneklimatekvalitet (Liddament 1996), risiko for fuktskader og overføring av lukt, forurensning og støy inn i bygninger (Holøs & Aurlien 2014).

I følge Byggeteknisk forskrift, TEK10 §14-2-(4) må "Beregninger av bygningers energibehov og varmetapstall utføres i samsvar med Norsk Standard NS 3031", som omfatter både stasjonære og dynamiske beregningsalternativer. I dag har de fleste energisimuleringsmodeller gått over fra enkle stasjonære formler, som kan benyttes til håndkalkulasjoner, til mer avanserte og dynamiske modeller som tar hensyn til værforhold rundt bygninger. Denne klimaavhengigheten skaper en mer realistisk tilnærming til virkeligheten. Selv om energisimuleringsprogrammer blir stadig forbedret er det fortsatt en viss usikkerhet knyttet til de beregnede verdiene i forhold til reelle målinger (Karlsson et al. 2007).

Luftinfiltrasjon defineres som ukontrollert strømming av luft gjennom utettheter og sprekker i bygningskallet og er sterkt avhengig av vindtrykk på fasaden og temperaturforskjeller mellom inn- og utsiden av en bygning (Liddament 1996). Modellen for beregning av luftinfiltrasjon i NS 3031 bruker en stasjonær formel basert på lekkasjetallet ved 50 Pascal trykkforskjell, utformingen av terrenget rundt bygningen, antall fasader utsatt for vind og effektiviteten av eventuelle ventilasjonsanlegg (Standard Norge 2007). Dette innebærer at en bygning plassert midt i Oslo og i Bergen vil være utsatt for samme infiltrasjon selv om værforholdene er forskjellige. Derfor er det viktig å vurdere om denne standardiserte metoden er tilfredsstillende, eller om den kan forbedres til å gi mer realistiske resultater.

1.3 Avgrensninger

Infiltrasjon beregnet i henhold til NS 3031 kan kalkuleres på to måter; enten ved å bruke den stasjonære formelen beskrevet i standarden, eller ved å følge dens henvisning til NS-EN 15242, der en vindavhengig og dynamisk modell er beskrevet. I denne oppgaven skal kun den stasjonære metoden beskrevet i NS 3031 vurderes, da denne metoden er mest anvendt. Det finnes mange forskjellige metoder for beregning av infiltrasjon. Dette studiet skal imidlertid begrenses til metoder inkludert i energisimuleringsprogrammet DesignBuilder. I tillegg til ekstern infiltrasjon er bygninger utsatt for interne luftlekkasjer mellom forskjellige soner. Interne lekkasjer kan ha påvirkning på infiltrasjonsraten, og flere energiberegningsprogrammer tar hensyn til dette ved å anvende modeller med "air flow network". Denne oppgaven begrenses til vurdering av infiltrasjon i én sone.

2 Teori

2.1 Ventilasjon i bygninger

Ventilasjon defineres som en prosess der luft i et oppholdsrom blir fornyet. Hovedmålet med ventilasjon er å sikre tilfredsstillende luftkvalitet ved å fjerne forurenset inneluft og tilføye ren uteluft, samt regulere innelufttemperatur (Liddament 1996). Ventilasjon i bygninger kan deles i to typer; kontrollert og ukontrollert ventilasjon.

2.1.1 Kontrollert ventilasjon

For å sikre et godt inneklima i oppholdsrområder må bygninger prosjekteres med ventilasjonssystem dimensjonert for å kunne tilføre en tilfredsstillende mengde uteluft og fjerne forurenset inneluft. Mengden av luften som skal transporteres inn og ut av bygningen er avhengig av formålet og størrelsen av bygningen, samt driftstiden og personbelastningen. De tre vanligste ventilasjonsmetodene i dagens bygninger er naturlig, balansert og mekanisk ventilasjon (Liddament 1996; Mysen & Segtnan 2015).

I naturlig ventilasjon kommer luften inn og ut av bygningen gjennom åpninger, vinduer, dører, klaff- og spaltventiler. Denne typen ventilasjon er mest utbredt i eldre bygninger. For å opprettholde gode inneklimaforhold må man regulere lufttilførselen manuelt, ved åpning av vinduer, dører og ventiler. Mengden av luft som slippes inn gjennom åpninger i bygningskroppen er sterkt avhengig av vindstyrke og -retning, noe som gjør naturlig ventilasjon vanskelig å kontrollere. I tillegg vil bygningen få økt varmetap i kuldeperioder, da varmen fra fjernet inneluft ikke kan gjenvinnes. Dermed er naturlig ventilasjon mest egnet for bygninger i områder med et mildere klima. Selv om naturlig ventilasjon har sine ulemper er det fortsatt vidt utbredt over hele verden grunnet sin enkelhet og lave vedlikeholdsbehov (Liddament 1996; NFBIB 2004).

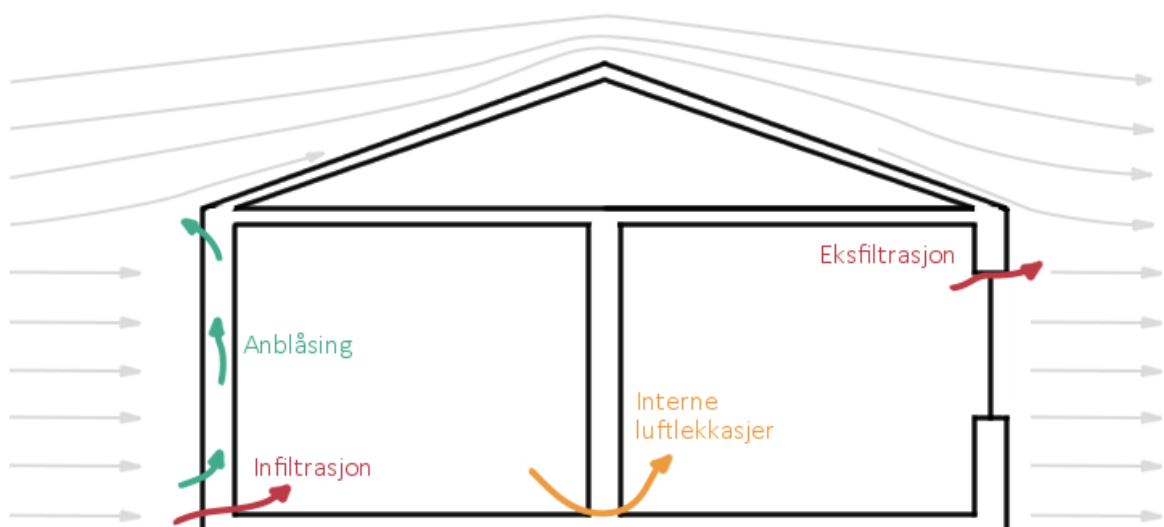
Balansert ventilasjon er en mer avansert metode å kontrollere luftomsetninger i en bygning. Lufttilførsel og -avtrekk reguleres av vifter montert i kanalsystemer plassert i ulike deler av huset. Noen systemer styres manuelt etter behov, mens andre er utstyrt med CO₂-målere som konstant måler luftkvaliteten basert på CO₂-konsentrasjonene og tilpasser lufttilførselen

respektivt. I tillegg til viftene har man fortsatt mulighet til å åpne vinduer og dører for ekstra lufttilførsel. Mange balanserte ventilasjonssystemer er utstyrt med et varmegjenvinningsystem som reduserer varmetap ved å resirkulere varmen mellom luften som fjernes og luften som tilføres i bygningen, uten overføring av forurensninger. Denne ventilasjonsmåten kan sørge for bedre inn klima og lavere varmetap, men krever også mer vedlikehold (Liddament 1996; Mysen & Segtnan 2015).

I mekanisk ventilasjon blir lufta tilført gjennom åpninger, vinduer, klaff- og spaltventiler, som i naturlig ventilasjon. I tillegg er systemet utstyrt med mekaniske avtrekksvifter som sørger for en mer effektiv fjerning av forurensninger (Mysen & Segtnan 2015).

2.1.2 Ukontrollert ventilasjon

I tillegg til kontrollert ventilasjon kan luften i en bygning fornyes ved en ukontrollert inn- og utstrømning gjennom utettheter og sprekker i klimaskjermen. En dårlig utført klimaskjerm kan også forårsake luftgjennomstrømning langs bygningskroppen og dermed svekke effektiviteten til isolasjonslaget (Hole & Aurlien 2013). Avhengig av porøsiteten til klimaskjermen, vær og klima, kan luftlekkasjer utgjøre en stor andel av bygnings varmetap og føre til økt årlig energiforbruk (Edvardsen & Ramstad 2010). Konsekvenser av en ikke sammenhengende eller porøs klimaskjerm kan deles i tre typer (Figur 1); luftlekkasjer (infiltrasjon og eksfiltrasjon), anblåsing og interne luftlekkasjer:



Figur 1: Konsekvenser av utettheter i klimaskjermen. Basert på Holøs og Aurlien (2014).

I bygninger med en usammenhengende eller porøs klimaskjerm oppstår ukontrollerte luftutvekslinger når lufttrykket er forskjellig inne og ute. Denne utvekslingen kalles infiltrasjon når lufta strømmer inn, og eksfiltrasjon når den strømmer ut. Lufta blir transportert gjennom utettheter og sprekker i klimaskjermen i forskjellige deler av bygningen. Typiske utettheter kan lokaliseres blant annet i sammenføyninger mellom forskjellige bygningselementer, rundt vinduer og dører og overganger mellom ytter- og innervegger og taket. Infiltrasjon påvirker energibehovet i bygninger i form av økt oppvarmingsbehov når varm inneluft transporteres ut i kalde perioder, eller økt kjølingsbehov når kald inneluft transporteres ut i varme perioder.

Utettheter i vindskjermen kan også føre til at luft strømmer gjennom vindspærren og inn i isolasjonslaget ett sted og strømmer ut et annet sted. Dette kalles anblåsing og er forårsaket av varierende vindtrykk på den vindustatte fasaden (Edvardsen & Ramstad 2010). Når kald luft strømmer inn i vegg og gjennom isolasjonslaget skapes det bevegelse i den ellers stillestående lufta i isolasjonen. Dette fører til reduksjon i veggens isoleringsevne og økt varmetap i form av termisk konduksjon (Holøs & Aurlien 2014).

Infiltrasjon og eksfiltrasjon av luft i forskjellige deler av bygninger kan skape trykkforskjeller mellom soner internt i bygningen. Dette fører til luftlekkasjer mellom forskjellige rom og enheter dersom det finnes utettheter i skillekonstruksjonen (Holøs & Aurlien 2014).

2.2 Vindteori

2.2.1 Trykk og atmosfærisk trykk

Trykk er et fundamentalt mål som beskriver forholdet mellom kraft og areal av flaten den virker på. En gass består av molekyler i kaotisk bevegelse. Når gassen befinner seg i en beholder vil dets molekyler kolliderer med hverandre og veggene til beholderen, og på denne måten skape gasstrykk. SI-målenheten for trykk er Pascal (Pa).

Atmosfæren rundt jorda består av enorme mengder av gassmolekyler. Disse molekylerne blir trukket til jordoverflaten grunnet gravitasjonskraften og skaper krefter på overflatene de er i kontakt med. Forholdet mellom tyngden til en luftspøyle og et bestemt område den virker på

kalles atmosfærisk trykk. Denne luftsøylen kan også defineres som massen til atmosfæren over et spesifikt område. Når man beveger seg opp i høyden vil tykkelsen av søylen avta. Færre partikler betyr lavere tyngde og dermed lavere lufttrykk. Det høyeste lufttrykket oppstår derfor på bakkenivå og avtar eksponentielt med høyden. Den ikke-lineære oppførselen kommer av luftens kompressibilitet, som vil si at luften er mer komprimert i lavere lag (Aguado & Burt 2001).

Massetettheten til luft (1) kan beregnes ved å bruke den ideelle gassloven og er avhengig av det atmosfæriske trykket og temperaturen:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad 1$$

Der: P – Atmosfærisk trykk [N/m²]

T – Temperatur [K]

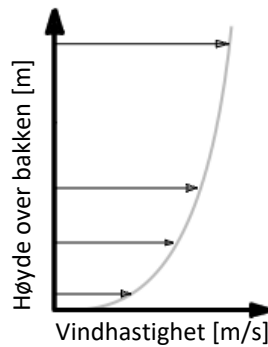
R – Den spesifikke gasskonstanten ($R_{\text{luft}} = 286.9 \text{ J/kg K}$)

2.2.2 Vind

Det atmosfæriske trykket er ujevnt fordelt over hele jordoverflaten. Dette skyldes hovedsakelig høydeforskjellene i jordas form og den respektive variasjonen i tykkelsen av atmosfæren. Disse trykkforskjellene skaper en horisontal trykkgradient som fører til at lufta beveger seg fra høy- til lavtryksområder med et mål om å jevne ut trykket og skape likevekt (Aguado & Burt 2001). I tillegg til det horisontale trykket vil bevegelsen av luft være påvirket av to andre krefter; Corioliseffekten og friksjon. Corioliseffekten kan endre vindens mønster, mens friksjonseffekten påvirker vindhastigheten. I denne oppgaven tas det hovedsakelig hensyn til friksjonseffekten, og dermed vil kun dette fenomenet beskrives nærmere.

Vinden som beveger seg nærmest jordoverflaten og er i kontakt med bakken vil være utsatt for friksjonskrefter. Disse kreftene fører til retardasjon av vindhastigheten. Vindlaget direkte over vil også bli påvirket av friksjonskrefter skapt av det retarderte vindlaget nærmest jordoverflaten. Denne effekten fortsetter å virke oppover i hele grenselaget av atmosfæren (eng.: boundary layer), helt opp til 1,5 km over bakkenivå. I lufta over grenselaget kan friksjonseffektene neglisjeres (Aguado & Burt 2001). Begrepet vindprofil brukes ofte for å beskrive lufthastigheten på forskjellige høyder over bakken. Grunnet friksjonskrefter vil

vindhastigheten i et vanlig profil for et lite skjermet område avta når avstanden til bakken eller et mellomlag minker. Fordelingen av vindhastighet kan beskrives ved hjelp av flere fysiske modeller, der de to vanligste metodene er logarithmic law (logaritmisk vindprofil) og power law (E. J. Plate et al. 2004).

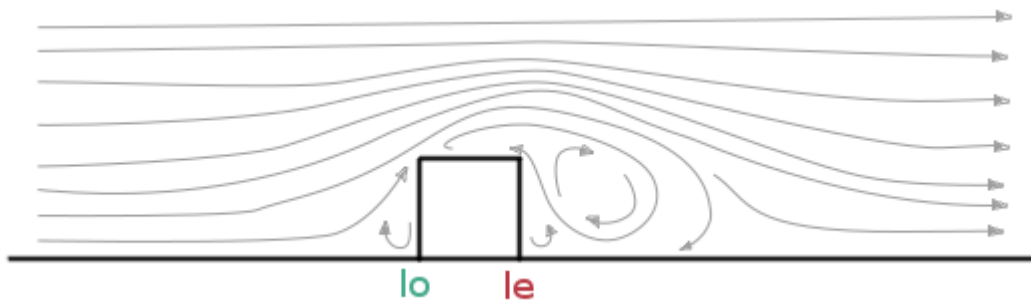


Figur 2: Eksempel på et vindprofil på et åpent felt.

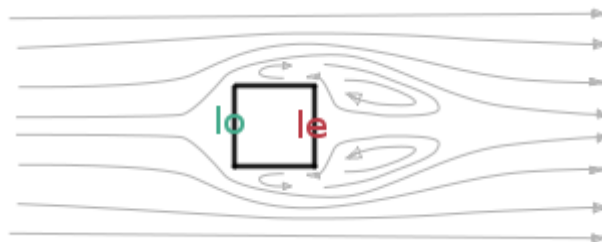
2.2.3 Vind og mikroklima i urbane områder

Når menneskelig aktivitet fører til forandringer i det naturlige økosystemet vil det også oppstå endringer i lokalklima. Endringer i økosystemet kan påvirke den hydrologiske syklusen som videre fører komplekse konsekvenser for blant annet vannbalansen, temperatur, luftfuktighet og vindforhold (Oke 1987). Menneskelig aktivitet i naturen beskriver et bredt spekter av forandringer som for eksempel jordbruk, skogbruk, brannskader eller utbygging av urbane områder. Denne oppgaven begrenses til endringer i vindforhold grunnet skjermingsforholdene skapt av nærliggende bygninger.

Flere vindtunellstudier har blitt utført for å karakterisere vindoppførselen nær bygningsoverflater. Figur 3 og Figur 4 viser strømningsmønstret langs et firkantet bygg med skarpe kanter. Når vinden kolliderer med fasaden på losiden vil det oppstå vindtrykk på overflaten, og luften vil strømme enten opp, ned eller til sidene av fasaden. Luften som akselererer over kantene av losiden blir separert fra fasadeoverflaten og skaper dermed et vindsug langs sideveggene, det flate taket og lesiden. Området på lesiden vil ha lavere trykk, og følgelig vil vindstrømmen separert fra bygningen bevege seg ned mot lavtrykket og skape turbulens. Dette kalles et separasjonsområde (Oke 1987).



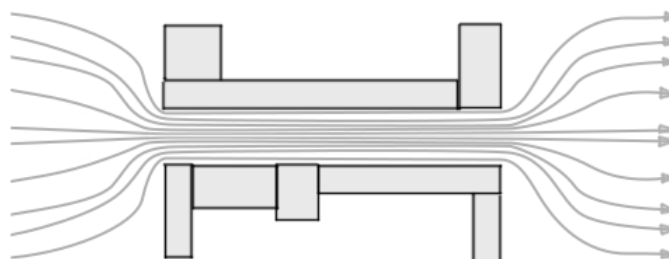
Figur 3: Vindstrømning langs en firkantet bygning sett fra siden. Basert på Oke (1987).



Figur 4: Vindstrømning langs en firkantet bygning sett ovenfra. Basert på Oke (1987).

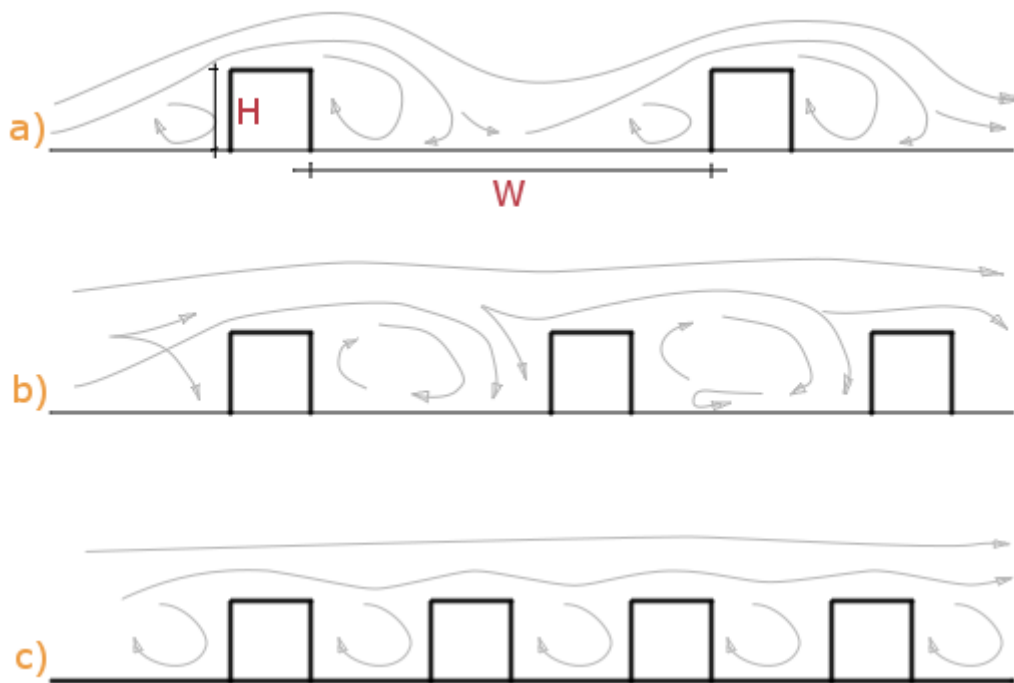
Det ovennevnte mønsteret vil forandre seg avhengig av formen og orienteringen til bygningskroppen, omgivelsene og landskapet – men mange av de samme prinsippene vil også gjelde de mer komplekse bygningsformene. Strømningsmønsteret ved bygninger som er en del av et urbant område vil være sterkt avhengig av vindstyrken og -retningen, gjennomsnittshøyden av bygningene (H), og avstanden mellom bygninger langs vindretningen (W) (Figur 6).

Når vindretningen er parallell med lengdeaksen til en vei vil skjermingseffekten fra bygningene være redusert. Luftstrømmen tvinges mellom bygningene (Figur 5), og som en konsekvens av dette vil vindhastigheten øke (Oke 1987).



Figur 5: Vindstrøm tvinges mellom bygninger, sett ovenfra.

Når vindretningen kommer ortogonalt på lengdeaksen av veien vil strømningsmønsteret være sterkt avhengig av tettheten mellom bygningene. Oke (1987) deler dette mønsteret i tre typer (Figur 6) avhengig av forholdet mellom høyden H og avstanden mellom bygningene W . I områder der bygningene er plassert med stor avstand, $H/W < 0.4$, vil strømningsmønsteret være nesten upåvirket av omgivelsene (Figur 6a). I urbane strøk med tett bebyggelse, $H/W < 0.7$, vil vindmønsteret være avhengig av omgivelsene og de andre hindringene, og dermed skape komplekse mønstre (Figur 6b). Når bygningene står svært tett, $H/W > 0.7$, vil vinden strømme over takhøyden og skape turbulente virvler mellom bygningene (Figur 6c).



Figur 6: Vindmønsteret er avhengig av forholdet mellom høyden og avstanden mellom bygningene. Basert på Oke (1987).

Når vindretningen er skrått på lengdeaksen vil vindmønsteret være en kombinasjon av de to ovennevnte situasjonene.

2.3 Vindtrykkoeffisienter

Vindtrykkfordelingen på bygningsfasader er en viktig parameter for flere fagområder tilknyttet bygninger. For eksempel må det ved beregning av vertikale laster på en konstruksjon tas hensyn til kreftene skapt av vindtrykk (Standard Norge 2005).

Trykkforskjeller skapt av vind har også en påvirkning på naturlig ventilasjon og infiltrasjon i bygninger og er en viktig faktor i flere simuleringsmodeller brukt til blant annet energi- og hygroteermiske analyser (Liddament 1996).

Som beskrevet i kapittel 2.2.3 er mønsteret til vindstrømmen rundt bygningskropper avhengig av terrengets utforming, tettheten mellom bygningene, vindstyrke og vindhastighet. Alle disse variablene gjør at vindtrykk på fasaden er en svært vanskelig parameter å beregne analytisk. Derfor bruker mange simuleringsverktøy en forenkling og beregner vindtrykk nærmest fasaden ved å bruke en dimensjonsløs vindtrykkoeffisient C_p , også kalt formfaktor. Ved å bruke denne koeffisienten kan man beregne statisk vindtrykk på et punkt på fasaden basert på vindretningen og vindhastigheten i den uforstyrrede luftstrømmen i bygningshøyden (2) (Cóstola & Alucci 2007):

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} = \frac{2P_x}{\rho V_{ref}^2} \quad 2$$

Der: P_x – Statisk vindtrykk på et punkt på fasaden [Pa]

P_d – Dynamisk vindtrykk i den uforstyrrede luftstrømmen [Pa]

ρ – Massetettheten til luft [kg/m³]

V_{ref} – Vindhastigheten i den uforstyrrede luftstrømmen i bygningshøyde [m/s]

Vindtrykkoeffisienten (VTK) kan defineres som statisk vindtrykk på fasaden av en bygning normalisert med dynamisk vindtrykk ortogonalt på vindretningen i den frie luftstrømmen i bygningshøyden. Dette betyr at VTK er uavhengig av vindhastigheten, forutsatt at vindstrømmen rundt bygningen ikke er påvirket av termiske prosesser og er uavhengig av Reynoldstallet (Cóstola et al. 2009).

Verdien av vindtrykkoeffisienter er avhengig av vindretning. I standarder, databaser og simuleringprogrammer angis det verdier av VTK for hver fasade, for vindretninger mellom 0° og 360° med faste intervaller. Disse intervallene kan være for eksempel på 15°, 30° eller 45° grader. VTK vil også være påvirket av plasseringen på fasaden og geometrien til bygningen. Dette medfører at fasader med komplekse former og utkrager vil være utsatt for stor variasjon i vindtrykkoeffisienter (Montazeri & Blocken 2013). Høye fasader vil også ha stor vertikal variasjon i VTK. I følge Liddament (1996) kan trykkoeffisienter i bygninger med opptil tre etasjer uttrykkes som gjennomsnittlig verdi for hele veggen.

Når man kjenner verdiene til VTK til en fasade og har tilgang til værdata med vindretninger og vindhastigheter, kan formel 3 benyttes til beregning av vindtrykk i et gitt punkt på fasaden (DesignBuilder 2017):

$$P_x = 0,5 * C_p * \rho * V_{ref}^2 \quad 3$$

Vindtrykkoeffisienter kan ofte være vanskelige å utlede og variasjonen vil være stor for forskjellige bygningsformer. Ifølge Cóstola og Alucci (2007) mener Hensen at *"accurate evaluation of this parameter is one of the most difficult aspects of air infiltration modeling and, as yet, is not possible by theoretical means alone"*. Dette betyr at dagens metoder for analytisk beregning av VTK er preget av en viss grad av usikkerhet. Cóstola et al. (2009) deler vindtrykkoeffisienter i to hovedgrupper; primære og sekundære kilder. Primære kilder består av målinger fra fullskalaforsøk, målinger fra vindtunnelforsøk og CFD-analyser. Disse kildene tar hensyn til alle de viktigste faktorene som påvirker vindtrykkoeffisienter og kan anvendes på spesifikke bygninger og spesifikke omgivelser. Dette gir mest nøyaktige resultater for vindtrykkoeffisienter, men denne typen forsøk og analyser kan ofte være dyre å gjennomføre og krever høy grad av ekspertise. Kapittel 2.8 beskriver mer utdypende hvordan CFD-analyser kan brukes til beregning av vindtrykkoeffisienter. Sekundære kilder defineres som databaser, empiriske formler og andre verktøy som utleder vindtrykkoeffisienter basert på tidligere resultater fra primære kilder. Flere simuleringprogrammer inneholder databaser av vindtrykkoeffisienter for de mest vanlige bygningsformene. Sekundære kilder kan ofte føre til unøyaktige resultater, men er billigere og enklere å anvende.

2.4 Trykkforskjeller i bygninger

Luftlekkasjer er sterkt avhengige av trykkforskjellen mellom inn- og utsiden av bygninger. De tre viktigste faktorene som skaper trykkforskjell mellom inn- og utsiden av bygninger er vind, temperaturforskjeller (skorsteineffekt) og ventilasjon (Edvardsen & Ramstad 2010). For å finne ut hvilken faktor som påvirker luftlekkasjer mest, kan man benytte en forenklet tommelfingerregel basert på forskningsresultatene til Shaw (1981) – når vindhastigheten er høyere enn 3,5 m/s er vind hoveddrivkraften for infiltrasjon, mens når temperaturforskjellen mellom inn- og utsiden av en bygning er større enn 20°K er skorsteineffekten den dominerende drivkraften. Når begge verdiene er oversteget blir infiltrasjonen drevet av en kombinasjon av disse faktorene.

2.4.1 Vindtrykk

Teori bak vindtrykk på bygninger har blitt dekket grundig i kapittel 2.2 og 2.3. Når en bygning utsettes for vind vil det oppstå utvendig overtrykk på losiden og undertrykk på lesiden, som vist i Figur 1. Vindtrykk er avhengig av flere variabler som bygningens form, høyde og skjerming av omgivelsene, men en forenklet formel 4 kan benyttes til å beskrive trykkforskjellen mellom le- og losiden av bygningen (Holøs & Aurlien 2014):

$$\Delta p = \frac{\rho * v^2}{2} \quad 4$$

Der: ρ – Massetettheten til luft [kg/m³]

v – Vindhastighet [m/s]

2.4.2 Skorsteineffekt

Atmosfærisk trykk beskriver luftens trykk på et gitt punkt på jorden. Det kan defineres som tyngden av en luftsøyle opp til lufttom høyde per horisontale flateenhet. Vekten til luft avtar når høyden øker, siden tykkelsen til luftlaget minker. Sammen med vekten vil også lufttrykket avta når høyden øker. Vekten til lufta er også avhengig av temperatur. Varm luft veier mindre enn kald, og dermed vil trykket avta mindre med høyden i varm inneluft enn i kald uteluft. Dette kan skape trykkforskjell over hele høyden av bygningskroppen og føre til at det oppstår innvendig undertrykk nederst i bygningen og overtrykk øverst i bygningen. Nivået hvor trykket inne og ute er likt kalles nøytralsonen. I nedre delen av bygningen, under

nøytralsonen, vil lufta lekke inn i bygningen, mens den over nøytralsonen vil lekke ut. Nøytralsonens nivå er avhengig av fordelingen av utetthetene i klimaskjermen, men kan også bli påvirket av åpning av vinduer, dører eller spalter (Edvardsen & Ramstad 2010). Formel 5 kan benyttes til å regne trykkforskjellen skapt av temperaturforskjeller (Holøs & Aurlien 2014):

$$\Delta p = \rho * g * z * \frac{\theta_i - \theta_u}{273 - \theta_m} \quad 5$$

Der: ρ – Massetettheten til luft [kg/m^3]

g – Tyngdeakselerasjonen [m/s^2]

z – Høyde [m]

θ_i – Lufttemperatur inne [$^{\circ}\text{C}$]

θ_u – Lufttemperatur ute [$^{\circ}\text{C}$]

θ_m – Middelttemperaturen av ute og inne [$^{\circ}\text{C}$]

2.4.3 Ventilasjon

Ventilasjonsanlegg kan også påvirke trykkforskjellen mellom inn- og utsiden av en bygning. Balansert ventilasjon vil ikke påvirke trykket, så lenge mengden av til- og fralufta er tilnærmet lik. Hus utstyrt med mekanisk ventilasjon er imidlertid utsatt for trykkforskjeller. De mekaniske viftene vil suge luft ut fra bygningen og skape innvendig undertrykk over klimaskjermen dersom lufta ikke rekompenseres med mer tilluft.

2.5 Konsekvenser av luftlekkasjer

I artikkelen om luftlekkasjemåling av bygninger beskriver Holøs og Aurlien (2014) de viktigste konsekvensene av eksterne og interne luftlekkasjer. Først og fremst vil luftlekkasjer øke energibehovet i en bygning. I kalde perioder vil varm inneluft lekke ut gjennom klimaskjermen, uten mulighet for varmegjenvinning, og dermed øke oppvarmingsbehovet. I varme perioder kan varm luft strømme inn i bygningen og følgelig øke behovet for kjøling. Denne ukontrollerte ventilasjonen er avhengig av værforhold og kan avgjøre en stor andel av årlig energibehov avhengig av klima. Interne luftlekkasjer påvirker også energibehovet. I en innvendig tett konstruksjon vil eksterne luftlekkasjer være dempet, og luften vil ikke bevege seg mellom soner med ulik temperatur.

Luftlekkasjer kan også forårsake fuktskader. Når varm og fuktig inneluft lekker gjennom en vegg og kommer i kontakt med en kald overflate kan det oppstå kondens. Bygningsdeler som har vært fuktige i lange perioder er utsatt for fuktskader som muggsoppvekst. Et eksempel på dette kan være kaldloft over et våtrom.

En annen konsekvens av luftinfiltrasjon er redusert bokomfort. Uteluft transportert inn i en bygning ved infiltrasjon vil ofte ha høyere hastighet enn innelufta. Dette skaper innvendige luftstrømmer, trekk, og reduserer inneklimatekvaliteten. Uteluften kan også inneholde forurensninger og lukt. Når denne luften transporteres inn i en bygning vil det føre til økt forurensningsbelastning og redusert kvalitet av inneluften. Dette kan også være et problem ved interne lekkasjer når forurenset luft transporteres mellom forskjellige soner. En annen faktor som påvirker bokomforten er støynivå. For at lydbølger skal kunne spre seg må de ha et medium å bevege seg i, som luft. Infiltrasjon kan føre til transport av lyd fra eksterne støykilder og inn i bygningen, mens interne luftlekkasjer transporterer støy internt mellom soner.

I tillegg kan luftlekkasjer også ha store helseskadelige konsekvenser. Radon er luktfri og usynlig gass som kan være helseskadelig for mennesker. Gassen strømmer opp gjennom utettheter i byggegrunnen, og blander seg med innelufta i huset. I bygninger med høy smittefare, som for eksempel sykehus eller laboratorier er det nødvendig å ha god kontroll på luftlekkasjene. Virus, bakterier og smittestoffer kan transporteres i lufta både innvendig i bygningen mellom soner og til utelufta. Ved tilfelle av brann vil eksterne luftlekkasjer øke oksygentilførelsen i bygningen og dermed øke hastigheten til brannspredning. Interne luftlekkasjer vil føre til raskere spredning av røyk mellom ulike soner og derfor øke risikoen for røykforgiftning.

2.6 Måling av luftlekkasjer

Luftomsetninger defineres som volumet av luften som strømmer inn i eller ut av en sone delt på volumet av sonen (6) (Laussmann & Helm 2011; Liddament 1996). Målenheten for luftomsetninger er (m³/h)/m³ eller ac/h (airchanges/hour – luftomsetninger/time).

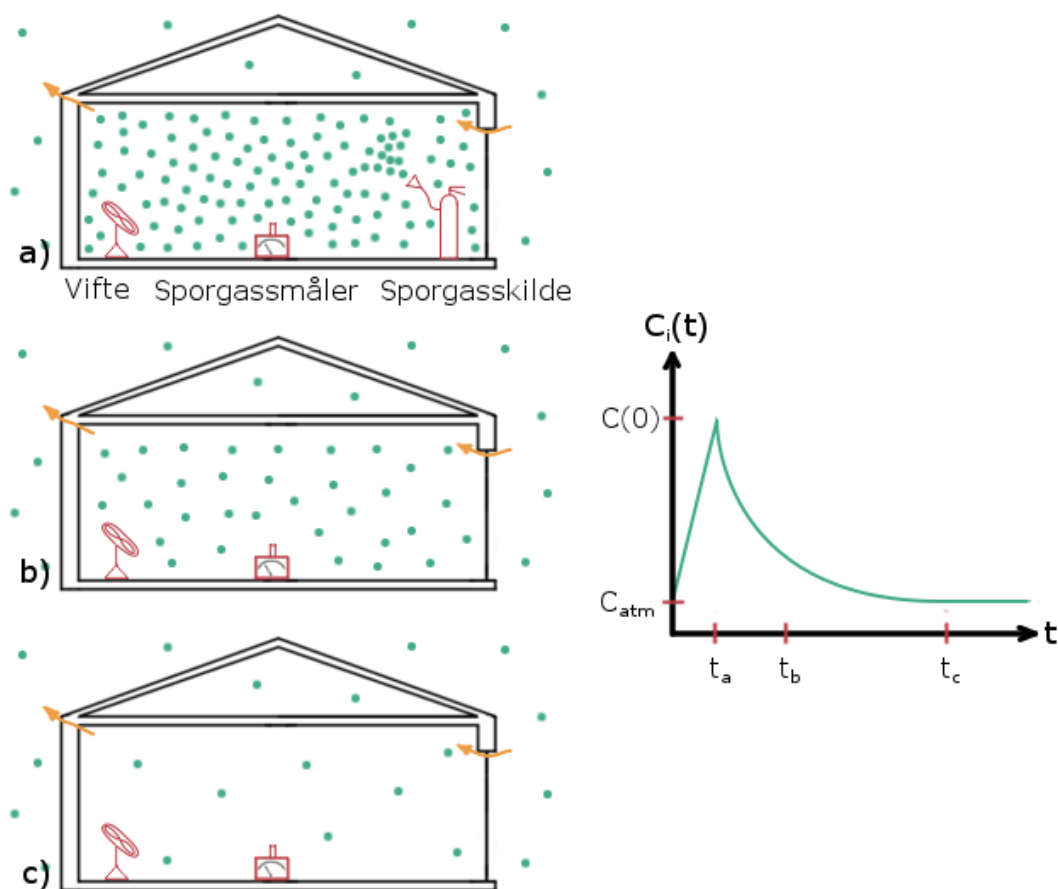
$$\lambda(t) = \frac{Q(t)}{V_{Rom}} \quad 6$$

Kravet om lufttetthet i bygninger blir stadig strengere. I dagens Byggteknisk forskrift stiller Direktoratet for Byggkvalitet (2016) krav om maksimum luftlekkasjetall per time ved 50 Pa trykkforskjell på 0,6 luftomsetninger i timen for både småhus og boligblokker, § 14-2 (2). Dette betyr at nye konstruksjoner må gjennomgå én eller flere luftlekkasjemålinger under byggeprosessen for å sikre tilfredsstillende utførelse og kvalitet i henhold til forskriftene. I dette kapitlet beskrives to typer luftlekkasjemålinger. Den første metoden benyttes til å finne karakteristiske luftomsetninger grunnet infiltrasjon drevet av værskapte trykkforskjeller i en bygning på et gitt tidspunkt, mens den andre metoden går ut på å skape konstant trykkforskjell og måle resulterende luftomsetninger.

2.6.1 Infiltrasjonsrate

Luftomsetninger skapt av infiltrasjon, også kalt infiltrasjonsrate, varierer med tiden avhengig av vind- og temperaturforhold. Store trykkforskjeller over klimaskjermen vil føre til sterkere infiltrasjon og dermed økte luftomsetninger (Holøs & Aurlien 2014). Den internasjonale standarden ASTM International (2009) E 741 beskriver tre metoder for måling av luftomsetninger ved bruk av sporgass. En sporgass forekommer i svært små mengder i utelufta, eller forekommer ikke naturlig. Eksempler på sporgass kan være karbondioksid, dinitrogenoksid, feron eller helium. De tre metodene beskrevet i standarden er "Concentration Decay", "Constant Injection" og "Constant Concentration". Disse metodene kan brukes for å måle alle typer luftomsetninger, uansett om de er skapt av infiltrasjon eller ventilasjonsanlegg, men hver av de krever forskjellige gasstilsetting- og målingsstrategier. I denne oppgaven benyttes Concentration Decay-metoden grunnet anvendelsen og tilgjengeligheten av måleinstrumenter, og dermed vil kun denne metoden beskrives videre.

Det første steget ved Concentration Decay-metoden er å injisere en bestemt mengde sporgass inn den sonen der luftomsetninger skal måles (Figur 7a). Sonen må holdes lukket under hele målingen. Sporgassen distribueres uniformt over hele sonen, og holdes godt blandet med innelufta med hjelp av en vifte. Etter at gassen er injisert vil den innvendige konsentrasjonen gradvis avta grunnet infiltrasjonen av uteluft med lavere innhold av sporgassen (Figur 7b). Raten den innvendige sporgasskonsentrasjonen endrer seg vil være avhengig av tettheten av konstruksjonen, trykkforskjellen under målingen og sporgassinnholdet i utelufta. Til slutt vil sporgasskonsentrasjonen inne og ute være lik (Figur 7c). Konsentrasjonen av sporgassen inni sonen måles minst fem ganger med jevne mellomrom under hele måleprosessen (ASTM International 2009). Ut ifra de målte verdiene kan man beregne raten med hvilken sporgass ble uttynnet og dermed finne luftomsetninger i sonen. Grafen i Figur 7 representerer endring i konsentrasjonen av sporgassen under målingen, hvor tiden (t_a) representerer startkonsentrasjonen, (t_b) konsentrasjonen underveis, mens (t_c) er konsentrasjonen da det ble oppnådd likevekt mellom inn og utsiden.



Figur 7: Endring i sporgasskonsentrasjonen ved bruk av Concentration Decay-metoden.

For å kunne beskrive uttynningen (decay) av en sporgass i en lukket sone har Heidt og Werner (1986) utledet en fysisk modell (7 og 8), og for at denne modellen skal være gyldig må følgende forutsetninger være tilfredsstillende (Laussmann & Helm 2011):

- "Sporgassen er kjemisk stabil og det finnes ingen kjemiske reaksjoner som kan forandre konsentrasjonen av gassen i rommet under målingen.
- Det vil ikke oppstå en adsorpsjonsprosess på vegger, himling eller møbler i rommet som kan senke konsentrasjonen av sporgassen.
- Luften i rommet er fullstendig og uniformt blandet under målingen.
- Utskiftningen av sporgassen med frisk luft vil forekomme kun i områder som er i kontakt med uteluften.
- Luftinnstrømningen og volumet av rommet er konstant under målingen."

Modellen (7 og 8) utledet av Heidt og Werner (1986) beskriver balansert endring av mengde av en sporgass i et lukket, ventilert rom:

$$\frac{\text{Endring i masse}}{\text{sekund}} = \frac{\text{Masse inn}}{\text{sekund}} - \frac{\text{Masse ut}}{\text{sekund}} + \frac{\text{Masse produsert internt}}{\text{sekund}} \quad 7$$

$$V_{Rom} * \frac{dC_i(t)}{dt} = C_{atm} * Q - C_i(t) * Q + E \quad 8$$

Der: V_{Rom} – Volum av rommet [m^3]
 $C_i(t)$ – Sporgasskonsentrasjon inne [g/m^3]
 C_{atm} – Sporgasskonsentrasjon i utelufta [g/m^3]
 Q – Luftstrømning inn og ut av rommet [m^3/s]
 E – Sporgass produsert i rommet [g/s]
 t – Tid [s]

Ved å sette formel 6 som definerer luftomsetninger, inn i formel 8 kan man definere en ny lineær differensiallikning (9). Her er det viktig å huske at luftomsetningene anses som konstante:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -(C_i(t) - C_{atm}) * \lambda + \frac{E}{V_{Rom}} \quad 9$$

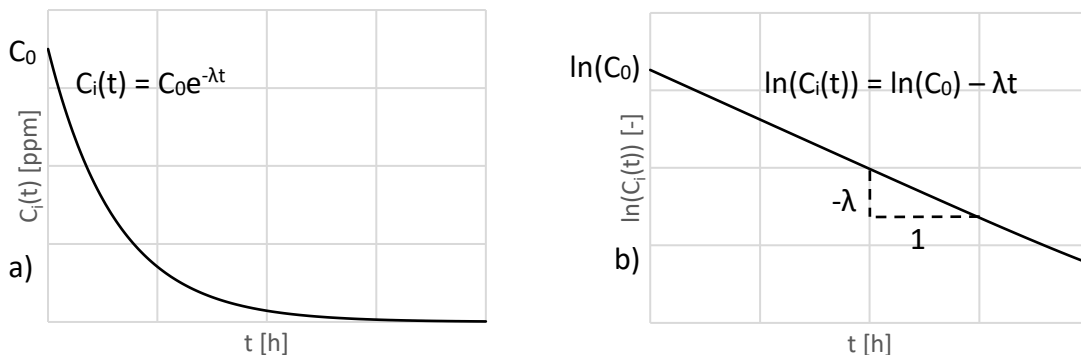
Denne ligningen (9) kan videre løses analytisk. Ved å sette inn startverdien $C(t=0) = C_0$, får man en spesifikk løsning (10) som er et viktig verktøy ved beregning av endringsraten av sporgasser:

$$C_i(t) = (C_0 - C_{atm})e^{-\lambda t} + C_{atm} + \frac{E}{\lambda * V_{Rom}} [1 - e^{-\lambda t}] \quad 10$$

I tilfeller hvor det ikke finnes noe sporgasskonsentrasjon i uteluften ($C_{atm} = 0$) og det ikke foregår noe produksjon av sporgassen i rommet ($E = 0$) vil den nye spesifikke løsningen være (11):

$$C_i(t) = C_0 e^{-\lambda t} \quad 11$$

Figur 8a) presenterer en grafisk fremstilling av formel 11, der sporgasskonsentrasjonen $C_i(t)$ ble plottet mot tiden (t). Ved å finne logaritmen av denne formelen, får man en førstegradslikning (Figur 8b) der stigningstallet beskriver luftomsetningene λ og konstantleddet $\ln(C_0)$ beskriver logaritmisk verdi av startkonsentrasjonen.



Figur 8: a) Sporgasskonsentrasjon $C_i(t)$ og b) logaritmisk sporgasskonsentrasjon $\ln(C_i(t))$ plottet mot tiden.

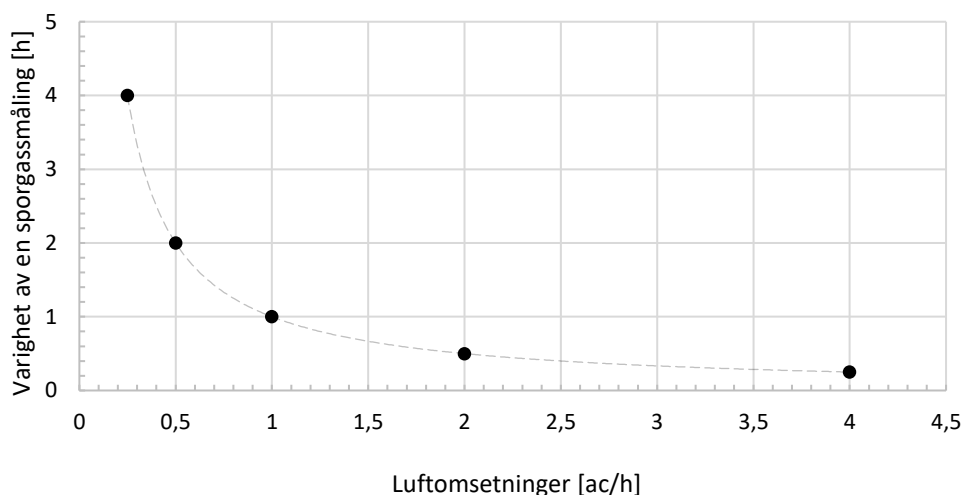
$C_i(t)$ beskriver idealisert nedbrytning av en gass, men en tilsvarende metode kan brukes på feltmålinger av gasskonsentrasjonen i en bygning. Logaritmen av målte gasskonsentrasjonsverdier, $\ln(C_i(t))$, plottes da mot tiden t . Ved å bruke lineær regresjon med skjæringspunkt i $\ln(C_0)$, får man en førstegradslikning der stigningstallet tilsvarer luftomsetningene λ (ASTM International 2009).

Hvis målingene har blitt utført ved hjelp av sporgass som forekommer naturlig i utelufta og har en konstant verdi, som for eksempel CO₂, må man ta hensyn til bakgrunnsnivåene i atmosfæren. En normalisert verdi for konsentrasjonen i rommet, C_N(t), kan finnes ved å bruke formel 12, som tar hensyn til både startkonsentrasjonen C₀ og konsentrasjonen i utelufta C_{atm} (Claude-Alain & Foradini 2002). Verdiene av konsentrasjonen blir transformert til et intervall mellom 0 og 1, og metoden beskrevet ovenfor (11) kan brukes til å finne luftomsetningene.

$$C_N(t) = \frac{C_i(t) - C_{atm}}{C_0 - C_{atm}} \quad 12$$

Standarden ASTM International (2009) E741 definerer også minimal varighet av en målingsperiode ved bruk av Concentracion Decay-metoden. Denne lengden er avhengig av luftomsetningene og er presentert i Figur 9, hvor Y-aksen gir minimal varighet av sporgassmålingen i timer, mens X-aksen representerer verdi for luftomsetninger i ac/h. Når luftomsetningene er lave, vil konsentrasjonen av sporgassen endre seg med lavere hastighet og dermed kreve lengre målingsperiode.

Varighet av en sporgassmåling



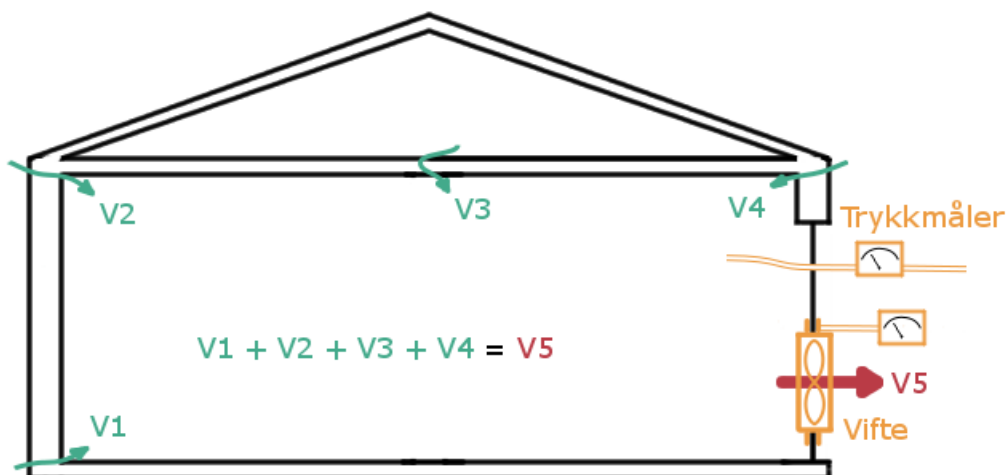
Figur 9: Nødvendig varighet av en sporgassmåling.

2.6.2 Lekkasjetall n_{50}

Som tidligere nevnt stiller dagens byggeregler krav til tetthet for nye bygninger. Dette krever at hele byggebransjen opererer med et felles mål som kan brukes til å sammenligne forskjellige bygninger med ulik form og størrelse. Denne enheten kalles for lekkasjetall (13) og defineres som "...samlet lekkasje i luftvekslinger per time ved 50 Pa trykkforskjell mellom ute og inne..." (Edwardsen & Ramstad 2010).

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad 13$$

For mest nøyaktige resultater ved måling av lekkasjetallet bør man bruke en standardisert trykksettingsmetode beskrevet i NS-EN 13829. Hovedprinsippet er illustrert i Figur 10, og går ut på å skape en kunstig trykkforskjell mellom inn- og utsiden av en bygning og måle resulterende luftomsetninger. Det første steget er å erstatte en inngangsdør med en viftedør. Når vifta slås på oppstår det en trykkforskjell mellom inn- og utsiden av bygningen grunnet luftutstrømning eller -innstrømningen. Hastigheten på vifta justeres slik at en trykkforskjell på 50 Pa opprettholdes. Trykkforskjellen skal holdes konstant under målingen og trykknivåene kontrolleres ved hjelp av en trykkmåler. Man registrer luftmengden som passer gjennom vifta, \dot{V}_{50} , og den samme luftmengden vil lekke inn eller ut i bygningen gjennom utettheter. Lekkasjetallet beregnes ved hjelp av formel 13, der den målte luftmengden \dot{V}_{50} deles på volumet til sonen (Holøs & Aurlien 2014).



Figur 10: Trykksetting av en bygning med én sone.

I tillegg til å være et felles mål for lufttetthet av bygninger, brukes lekkasjetallet også som utgangsverdi for beregning av infiltrasjonsrate i flere energisimuleringsprogrammer.

2.7 Simulering og beregning av luftlekkasjer

2.7.1 NS 3031 og SIMIEN

NS 3031 – "Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data" er en standard utarbeidet av Standard Norges komité SN/K 34 "Energi i bygninger". Denne standarden beskriver metoder for beregning av bygningers energibehov og varmetapstall, og den omfatter både stasjonære og dynamiske beregningsalternativer, til henholdsvis månedsberegning og forenklet timeberegning. Grunnet kompleksiteten av beregningsmetodene egner denne standarden seg best for et databasert beregningsverktøy, regneark og lignende. SIMIEN er et simuleringsprogram brukt til beregning av energiytelsen i bygninger utviklet av det norske firmaet ProgramByggerne ANS. Programmet tar utgangspunkt i NS 3031, og den internasjonale standarden EN 15265 – "Bygningers energiytelse - Beregning av bygningers energibehov til oppvarming og kjøling ved bruk av dynamiske metoder - Generelle kriterier og valideringsprosedyrer". Ved å bruke formelverket og metodene beskrevet i begge standarder kan programmet lage en dynamisk simulering for blant annet beregning av netto energiforbruk eller validering av inneklime i en bygning. Bygninger kan også valideres mot dagens krav i norske byggeforskrifter og passivhuskriterier i NS 3700, eller energimerkes ut ifra beregnet levert energi (ProgramByggerne). Ved beregning av energibehovet i en bygning tar SIMIEN hensyn til varmetap grunnet infiltrasjon. En stasjonær modell (14), hentet fra NS 3031, brukes til beregning av konstant infiltrasjonsrate:

$$n_{inf} = \frac{n_{50} e}{1 + \frac{f}{e} \left(\frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{V n_{50}} \right)^2} \quad 14$$

Der: n_{50} – Lekkasetall ved 50Pa [h^{-1}]

e, f – Terrengskjermingskoeffisienter

\dot{V}_1 – Tilluftsmengde i det mekaniske ventilasjonsanlegget [m^3/h]

\dot{V}_2 – Avtrekksluftmengde i det mekaniske ventilasjonsanlegget [m^3/h]

V – Oppvarmet luftvolum [m^3]

Denne formelen tar utgangspunkt i lekkasjetallet n_{50} ved 50 Pa trykkforskjell og tar hensyn til terrengutformingen og luftmengden passerende ventilasjonssystemet (Standard Norge 2007). Dette er en forholdsvis enkel formel som kan brukes til håndkalkulasjoner. Verdien for n_{50} kan enten måles, eller hentes fra en database eller tabell med anbefalte verdier i standarden NS 3031. Den nye n_{inf} -verdien benyttes til beregning av varmetransportkoeffisienten (15), der 0,33 beskriver den spesifikke varmekapasiteten til lufta. Varmetransportkoeffisienten brukes videre til beregning av energi som trengs for å varme opp luften tapt ved infiltrasjon basert på utetemperatur fra værdata.

$$H_{inf} = 0,33 * n_{inf}V \quad 15$$

2.7.2 DesignBuilder og EnergyPlus

DesignBuilder (DB) er et brukergrensesnitt basert på simuleringsmotoren EnergyPlus (EP) utviklet av et britisk firma DesignBuilder Software Ltd. Programmet brukes til dynamisk beregning av energiforbruk, utslipp av klimagasser (hovedsakelig CO₂), inneklimavurdering og dagslysanalyse i bygninger. Det kan også brukes til validering av bygningsprosjekter mot flere nasjonale byggeforskrifter og standarder, og er et ledende verktøy for dette formålet i Storbritannia, Frankrike, Irland og Portugal. Utviklere har som formål å skape et verktøy til simulering og vurdering av energiytelsen i bygninger som er enkelt å bruke, lett tilgjengelig og har en rimelig pris. EnergyPlus er et simuleringsprogram til beregning av energiytelsen i bygninger utviklet først i USA i 1996 (Crawley et al. 2001). Programmet er basert på to simuleringsprogrammer DOE-2 og BLAST som har vært brukt til varme- og energianalyser i bygninger siden 1960-tallet. EnergyPlus har ivaretatt de viktigste funksjonene og modulene til dets forgjengere, men ble omskrevet på en mer oversiktlig måte som forenkler videre modifiseringer. Det nye programmet var i utgangspunktet en kodebasert simuleringsmotor, men etter hvert kom det flere brukervennlige brukergrensesnitt som DesignBuilder og gjorde programmet mer tilgjengelig til kommersiell bruk.

Ved utføring av en energisimulering i DesignBuilder må man skape en tredimensjonal CAD-modell (Computer-Aided Design) av bygningen som skal analyseres. Denne CAD-modellen inkluderer alle bygningselementer som inngår i bygningen, samt deres oppbygning.

Bygningen deles inn i soner avhengig av deres funksjon, geometri og plassering i forhold til

hverandre. For hver sone defineres blant annet ventilasjonsanlegg, minimum inneklimakrav, oppvarmings- og kjølingssystem, belysning, varmtvannforbruk, personbelastning, driftstider, varmetilskudd fra datamaskiner og elektriske installasjoner, samt infiltrasjon. I simuleringer utført i DesignBuilder kan to beregningsmetoder for infiltrasjon velges; Scheduled og Calculated Infiltration. Man kan også velge å neglisjere infiltrasjon fra simuleringen. Valget av infiltrasjonsmodell vil ha påvirkning på resultatene av energisimuleringen. I tillegg er simuleringstiden avhengig av kompleksiteten til infiltrasjonsmodellen.

Infiltrasjonsmodellen satt på "Scheduled" karakteriseres ved at "*... Natural ventilation change rate is explicitly defined for each zone in terms of a maximum ACH value and a schedule and infiltration air change rate is defined by a constant ACH value ...*"

(DesignBuilder 2017). Dette betyr at ved å sette infiltrasjonen på "Scheduled" vil infiltrasjonsraten være konstant under simuleringen. For å få pålitelige resultater må en realistisk verdi for infiltrasjonen suppleres inn i programmet. Verdien for infiltrasjonsraten bør finnes ved hjelp av en måling av det virkelige bygget, eller fra en veiledende database hvis målingen ikke er gjennomførbar. Luftomsetninger skapt av naturlig ventilasjon er avhengig av forhåndsbestemte verdier definert av brukeren. Programmet må suppleres med driftstider, aktivitetsmønster, minimum mengde av uteluft som må transporteres inn i sonen, samt laveste og høyeste tillatte temperatur. Naturlig ventilasjon kan også deaktiveres i modellen.

Verdien av infiltrasjonen kan oppgis i programmet som ac/h, m³/(m²h) ved 50 Pa trykkforskjell, m³/(m²h) ved 4 Pa trykkforskjell eller (n₅₀) ac/h ved 50 Pa trykkforskjell. Avhengig av valgt enhet konverterer DesignBuilder den gitte verdien til gjennomsnittlige luftomsetninger ac/h, og benytter denne videre i simuleringen. For å omskrive luftomsetningen m³/(m²h) ved 50 og 4 Pa til ac/h, regner programmet om verdiene til n₅₀ og bruker deretter formel 16 til å finne gjennomsnittsluftomsetninger ac/h. Denne formelen kommer fra standarden NS-EN 12831: "Varmesystemer i bygninger - Metode for beregning av dimensjonerende effektbehov". Verdiene for terrengkategori-koeffisienten *e_i*, og bygningshøyde-koeffisienten *ε* følger som Vedlegg A - Tabell 10 og Tabell 11.

$$\text{Infiltration rate } \left[\frac{ac}{h} \right] = 2 * n_{50} \left[\frac{ac}{h} \right] * e_i * \epsilon$$

16

Selv om infiltrasjonsraten defineres som konstant vil de resulterende omsetningene skapt av infiltrasjon variere med noen få prosent. Dette er grunnet følgende prosess, der DB omregner verdien for infiltrasjon når luften blir transportert mellom ut- og innsiden av bygningen:

1. Programmet suppleres med en kjent verdi for infiltrasjonsraten og omskrives til [ac/h].
2. Infiltrasjonsraten [ac/h] blir konvertert til luftstrøm [m³/s] ved å multiplisere infiltrasjonsraten med volumet av oppvarmet luft [m³] (17):

$$\frac{m^3}{s} = \frac{\frac{ac}{h}_{input} * \text{volumet av oppvarmet luft } m^3}{3600 \frac{s}{h}} \quad 17$$

3. Massegjennomstrømming [kg/s] beregnes ved å multiplisere tettheten [kg/m³] av uteluft med luftstrømmen (18):

$$\frac{kg}{s} = \frac{m^3}{s} * \rho_{uteluft} \frac{kg}{m^3} \quad 18$$

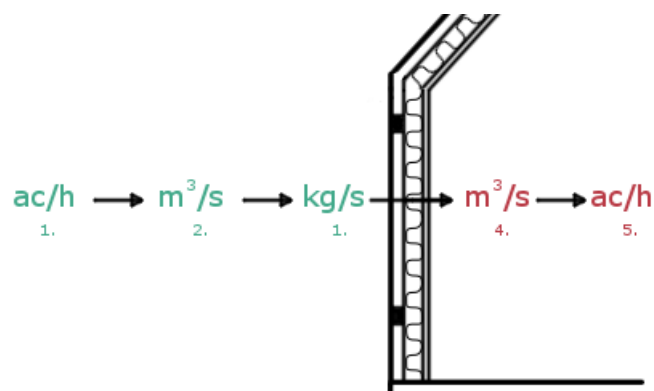
4. Massegjennomstrømmingen introduseres inn i bygningen og en ny luftstrømverdi beregnes ved å bruke tettheten av innelufta (19):

$$\frac{m^3}{s} = \frac{\frac{kg}{s}}{\rho_{inneluft} \frac{kg}{m^3}} \quad 19$$

5. Til slutt blir luftgjennomstrømmingen omskrevet tilbake til infiltrasjonsraten (20):

$$\frac{ac}{h}_{output} = \frac{\frac{m^3}{s} * 3600 \frac{s}{h}}{\text{volumet av oppvarmet luft } m^3} \quad 20$$

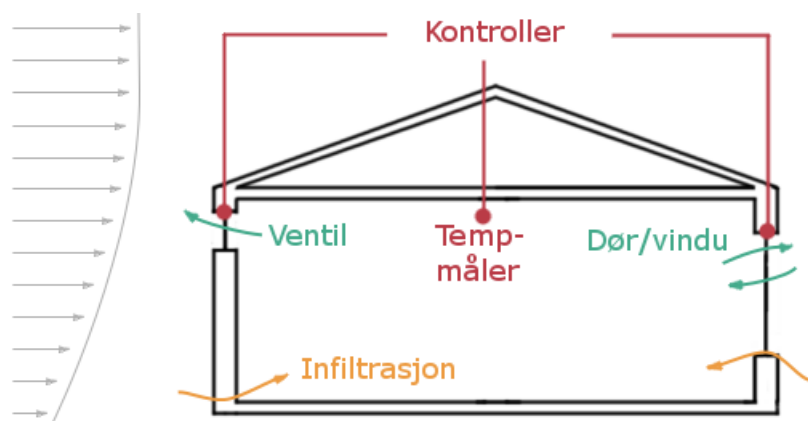
Hele prosessen er illustrert i Figur 11:



Figur 11: Beregningsprosessen av Natural Ventilation and Infiltration Scheduled.

Denne prosessen innebærer at outputverdien fra simuleringen vil differere med opptil $\pm 10\%$ fra inputverdien, med mindre luftmasse tettheten er identisk inne og ute. Når temperaturen er lav ute og høy inne vil outputverdien være høyere enn input, og motsatt.

Infiltrasjonsmodellen satt på "Calculated" karakteriseres ved at "(...) *Natural ventilation and infiltration are calculated based on window openings, cracks, buoyancy and wind driven pressure differences crack dimensions etc. (...)*" (DesignBuilder 2017). Denne metoden tar utgangspunkt i porøsiteten til materialene og sprekker i konstruksjonen, åpningen av vinduer, ventiler og dører, samt trykkforskjellene skapt av temperatur og vind, og regner samlede infiltrasjonsrate og naturlig ventilasjon ut ifra disse faktorene. Ventiler og vinduer kontrolleres under simuleringen av forhåndsbestemte innstillinger og av lufttemperaturen i sonen (Figur 12). Før simuleringen startes må man velge når sonen er i bruk og definere ønsket innetemperatur. Når sonen er i drift og lufttemperaturen overstiger ønsket innetemperatur åpnes vinduene og ventilene, slik at man får luftinnstrømning. Når temperaturen faller under ønsket innetemperatur lukkes vinduene og ventilene igjen.



Figur 12: Calculated Natural Ventilation and Infiltration. Basert på en figur i brukerstøtte til DesignBuilder (2017).

For å beregne massestrømning $[(\text{kg/s})/\text{m}^2]$ gjennom sprekker og utettheter i de forskjellige bygningselementene benytter programmet formel 21:

$$q = C * \Delta P^n \quad 21$$

Der: C – Strømningskoeffisient $[(\text{kg}/(\text{s m}^2 \text{ Pa}^n))]$

ΔP – Trykkforskjell over elementet $[\text{Pa}]$

n – StrømningsekspONENT $[-]$

For hvert bygningselement som vinduer, dører, ventiler, vegger, gulv og tak defineres spesifikke strømningskoeffisienter og strømningssekspONENTER. Strømningskoeffisienten beskriver luftmassestrømningen per sekund per kvadratmeter av elementet, mens strømningssekspONENTEN forteller i hvor stor grad strømningsen er turbulent (0,5) eller laminær (1,0). Her kan man sette inn egendefinerte verdier eller bruke forhåndsbestemte innstillinger i DesignBuilder for forskjellige bygningskvaliteter (Vedlegg A - Tabell 13). For å beregne trykkforskjell over et element benytter programmet formel 3 for beregning av vindtrykk på fasaden. Dette betyr at den kalkulererte infiltrasjonen vil være avhengig av vindtrykkoeffisienter, vindstyrken, vindretning og massetettheten til lufta. De tre sistnevnte verdiene kan eksporteres under simuleringen fra værdata. DesignBuilder inneholder forhåndsbestemte vindtrykkoeffisienter beregnet for en bygning med firkantet fasader, og med opptil tre etasjer. Disse verdiene kan hentes fra databasen til Air Infiltration and Ventilation Center (AIVC) eller læreboken til Liddament (1996) (Vedlegg A - Tabell 12). For mer nøyaktige resultater kan de forhåndsbestemte vindtrykkoeffisienter erstattes med mer spesifikke verdier fra primære kilder, som numeriske simuleringer eller vindtunnel-tester.

2.8 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) eller numerisk fluiddynamikk er en fellesbetegnelse for numeriske metoder brukt til analyse av væske- og gasstransport. Ved hjelp av disse metodene kan man simulere og beregne hastighet, trykk, temperatur og flere egenskaper til væsker og gasser i et avgrenset 2- eller 3-dimensjonalt område (Versteeg & Malalasekera 2007).

2.8.1 Generelt om CFD-simulering

Hovedprinsippet i numerisk fluiddynamikk går ut på å løse Navier-Stokes ligninger – et sett av partielle ikke-lineære andregradslikninger som beskriver bevegelsen av væsker og gasser. Disse ligningene har ingen analytisk løsning og må derfor løses numerisk. Dette krever høy beregningskapasitet og utføres ved hjelp av CFD-programmer. Før en CFD-simulering settes i gang må programmet suppleres med informasjon om geometrien og fysiske startverdier knyttet til problemstillingen. Geometrien kan definere for eksempel formen til en bygning i et avgrenset domene (simuleringsområde) eller et lukket rom. De andre startverdiene kan

beskrive for eksempel inn- og utløp, vindhastighet, vindretning, varmekilder eller overflatetemperaturer. I tillegg til Navier-Stokes ligningene som beskriver bevegelse av væsker og gasser bruker programmet en modell som beskriver turbulensfenomenet. Dette tilfører flere ukjente variabler i regnestykket men også flere ligninger som kan brukes til å finne løsningen. Det finnes flere turbulensmodeller med ulike antall ligninger og formål. Deretter løser programmet differensialligning-settet som nå består av Navier-Stokes-ligninger med en turbulensmodell, og som tar hensyn til alle forhåndsdefinerte inputverdier. Disse ligningene er ikke-lineære og kan ikke løses analytisk, men det finnes numeriske metoder som gir god tilnærming til en løsning. For at disse metodene skal kunne anvendes må domenet (simuleringsområdet) deles opp i diskrete elementer. En av de mest anvendte diskretiseringsmetodene i dagens CFD-programmer er Finite Volum-metoden, der domenet deles opp i et grid (rutenett) med små volumelementer. Deretter brukes differensialligningene til å beskrive egenskapene til væsken/gassen i sentret av hvert element og hvordan disse forholdene overføres til nabovolumelementene. Differensialligningene blir omformulert til sett av lineære algebraiske ligninger, i hvert element, og løses ved hjelp av en iterativ prosess. Dette betyr at programmet prøver å løse det lineære ligningssettet flere ganger, og for hver ny iterasjon (beregning) bruker programmet verdiene fra forrige beregning som input. Til slutt vil forskjellen mellom hver ny iterasjon være svært liten, som vil si at løsningen har konvergert (DesignBuilder 2009; Versteeg & Malalasekera 2007). Den konvergente løsningen brukes til å beskrive væskeforhold i hvert volumelement i domenet. De fleste programmene kan fremstille resultatene ved hjelp av figurer bestående av vektorer og fargekart, og kan eksportere resultatverdiene til Excel til videre bearbeiding. Utføring av CFD-simuleringer er en kompleks prosess der brukeren selv må bestemme inputverdier, turbulensmodell, diskretiseringsmetode og når den iterative prosessen skal stoppes. Dette fører til at resultatene kan være preget av en usikkerhet avhengig av valgte simuleringsinnstillinger.

2.8.2 CFD-modul i DesignBuilder

DesignBuilder er utstyrt med en egen CFD-modul, som kan benyttes ved prosjektering og vurdering av løsninger i bygninger. Her blir det utført en stasjonær CFD-analyse der man ser på kun ett øyeblikksbilde i tida for hver simulering. CFD-modulen i DesignBuilder har mange

forhåndsdefinerte innstillinger som kan modifiseres ved hjelp av et oversiktlig brukersnitt, noe som gjør utførelsen av simuleringer enklere. Det finnes to typer analyser i DB; intern- og eksternanalyse. I internanalysen avgrenses simuleringsdomenet av yttervegger til en sone. Luften tilføres inn i sonen via en ventilasjonskanal, en ventil eller en åpning, og programmet beregner verdier for lufthastighet, trykk og temperatur i rommet. Resultatene kan brukes for eksempel til dimensjonering av HVAC-anlegg og vurdering av inneklimakvalitet.

Eksternanalysen lager et domene utenfor bygningen med dimensjoner definerte av brukeren. Man oppgir vindretning og vindhastighet og programmet skaper et vindprofil og beregner resulterende vindhastighet og trykk rundt bygningen innenfor domenet. Disse resultatene kan brukes til prosjektering av HVAC-anlegg, beregning av vindtrykkkoeffisienter langs fasaden og vurdering av strømningsforholdene på fotgjengernivå (DesignBuilder 2009). I denne oppgaven brukes CFD-analysen til beregning av vindtrykk-koeffisienter, dermed vil kun eksternanalysen beskrives videre.

Navier-Stokes- og turbulensligningene i DesignBuilder fremstilles på en generell form vist i formel 22 (Webb 2013). Som tidligere nevnt må disse ligningene løses numerisk, og diskretiseringsmetode må anvendes for å finne en løsning. Ved valg av turbulensmodell kan man enten benytte "k-ε" som består av to ligninger som beskriver kinetisk energi i turbulensen og dissipasjonsraten av turbulent kinetisk energi, eller "konstant effektiv viskositet" som er en enklere og mindre nøyaktig modell.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi \quad 22$$

Der: φ – Transportfaktor (hastighet, temperatur eller trykk)

ρ – Massetetthet

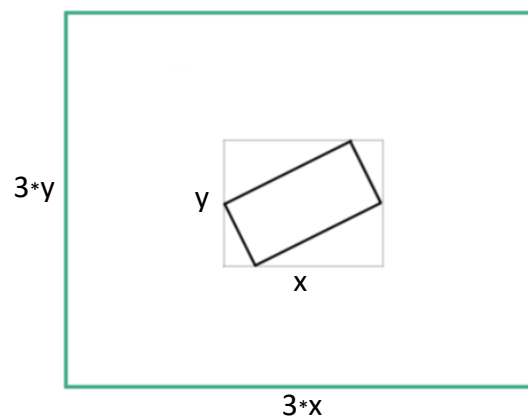
x_j – Forskyvning i j-retningen

u_j – Hastighet i j-retningen

Γ_φ – Diffusjonskoeffisient

S_φ – Kilde

For å beskrive geometrien brukt i analysen må det lages en tredimensjonal CAD-modell av bygningen. Her er det viktig at modellen tegnes med korrekt orientering i forhold til nord-retningen. CAD-modellen tegnes i energisimuleringsmodulen til DesignBulder og blir deretter eksportert automatisk til CFD-modulen. Deretter må verdier for vindretning og vindhastighet målt i 10-meters høyde oppgis. Ut ifra og ut ifra denne verdien skaper programmet et vindprofil. Vindretningen angis som en vinkel i forhold til nord-retningen som er oppgitt i CAD-modellen. Den oppgitte vindretningen vil bestemme hovedaksene til domenet, samt gridet, og CAD-modellen av bygningen blir rotert respektivt. Størrelsen til domenet vil være avhengig av størrelsen til bygningen. Brukeren definerer en multiplikasjonsfaktor for bredde, lengde og høyde av domenet. Deretter måler programmet avstanden mellom de to ytterste punktene av bygningen parallelt med bredden, lengden og høyden av domenet. Ved å multiplisere disse avstandene med deres respektive multiplikasjonsfaktorer regner programmet ut de endelige dimensjonene av domenet. Standard multiplikasjonsfaktorer i DesignBuilder er 3 for bredde og lengde, og 2 for høyde. Et eksempel på dette er illustrert i Figur 13 der den blå linjen markerer domenet, mens den grå linjen markerer avstanden mellom de to ytterste punktene av en skråplassert bygning.



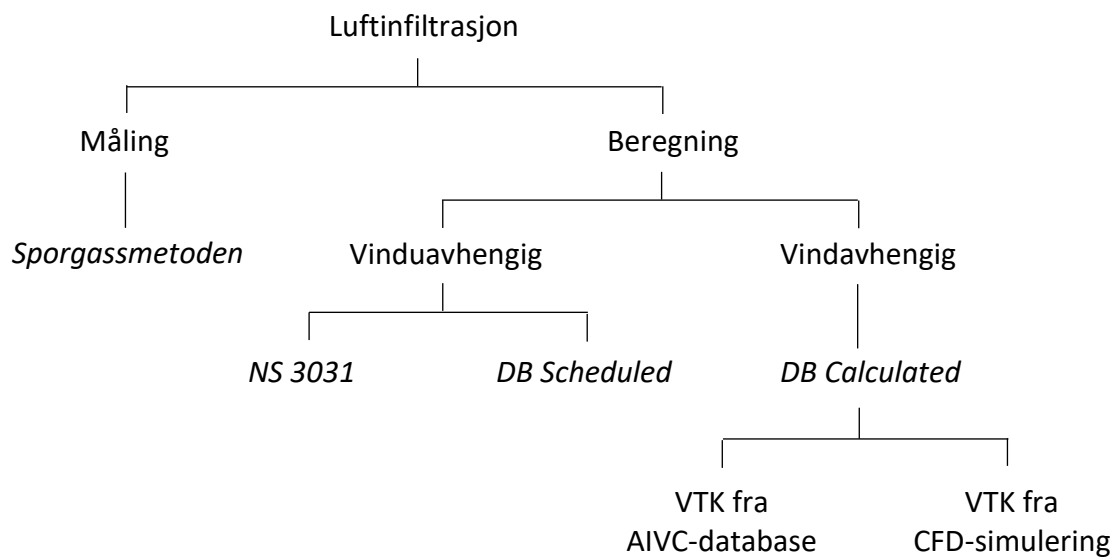
Figur 13: Domenestørrelse (blå linje) i forhold til en bygning (svart linje) sett ovenfra.

Diskretiseringsmetoden anvendt i DesignBuilder er Finite Volume-metoden. Denne oppdelingen bruker et Kartesisk grid der alle gridlinjer er parallelle i forhold til hovedaksene til domenet (Webb 2013). Dette medfører at volumelementer, samt domenet er begrenset til form av rettvinklet prismer. DesignBuilder genererer gridet automatisk innenfor domenet ved å ta utgangspunkt i bygningens geometri. Brukeren kan bestemme største og minste størrelse mellom volumelementene. Når avstanden mellom to elementer blir for liten kan det føre til ustabile resultater, derfor slås elementer med for lite mellomrom sammen. Brukeren kan også velge å modifisere deler av gridet, ved å bruke finere eller grovere oppdeling i enkelte områder. Før den numeriske beregningen settes i gang må det velges et volumelement som fungerer som en "Cell Monitor". Under iterasjonsprosessen vil programmet sjekke beregnet verdi i dette volumelementet og sammenligne det med verdien fra forrige iterasjon. Når differansen har blitt så lav som $10^{-5}\%$ melder programmet ifra at løsningen har konverget. Antall iterasjoner for at løsningen skal konvergere er avhengig av kompleksiteten til simuleringen. Dette inkluderer geometrien, størrelsen til domenet og gridet, og turbulensmodellen. Når løsningen har konverget kan resultatene presenteres grafisk i form av et plan som snitter domenet og CAD-modellen. Disse snittene presenterer beregnet vindretning, -styrke og trykk i form av vektorer eller en fargeskala. Snittene kan også eksporteres som en tekstfil som inneholder grid-koordinater, vindhastighet og -trykk, og kan brukes til videre bearbeiding.

3 Metoder

I denne oppgaven skal forskjellige beregningsmetoder for måling av infiltrasjon vurderes i forhold til verdier fra feltmålinger. Til sammen skal én metode benyttes for måling av den faktiske luftinfiltrasjonen, og fire metoder der infiltrasjonen beregnes og simuleres ved hjelp av matematiske og fysiske modeller. Figur 14 viser en oppsummering av de aktuelle metodene for måling og beregning av luftinfiltrasjon.

Videre i teksten vil simuleringer utført i DesignBuilder med infiltrasjonsmodellen satt på "Scheduled" omtales som DB Scheduled. Når infiltrasjonsmodellen settes på "Calculated" og infiltrasjonsraten beregnes med standardvindtrykkoeffisienter fra AIVC-database, omtales simuleringene som DB Calculated AIVC. Og når vindtrykkoeffisientene beregnet ved hjelp av CFD-simuleringer benyttes, vil simuleringene kalles DB Calculated CFD.



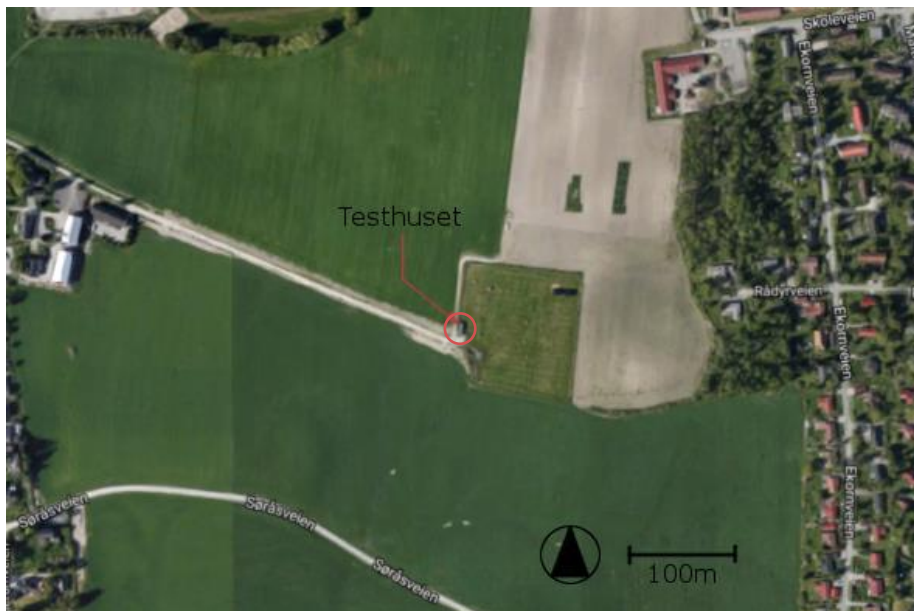
Figur 14: Metoder for måling og beregning av luftinfiltrasjon benyttet i denne oppgaven.

3.1 Testhuset og Søråsjordet

Alle simuleringene og målingene har blitt utført på et trehus (Figur 15) plassert på et åpent felt ved den meteorologiske stasjonen FAGKLIM på Søråsjordet i Ås (59°30'37"N, 10°46'53"E). Bygningen er plassert i det nordvestlige hjørnet av målestasjonen med kontordelen rettet mot nord med en vinkel på 6,5°. Figur 16 viser nøyaktig lokalisering av bygningen.

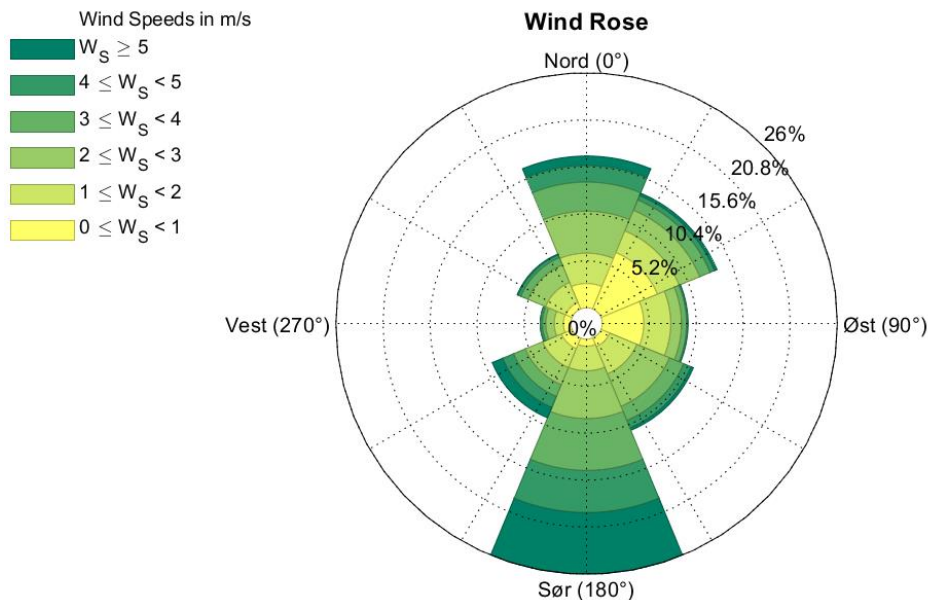


Figur 15: Testhuset.



Figur 16: Plassering av testhuset (Google Maps 2017).

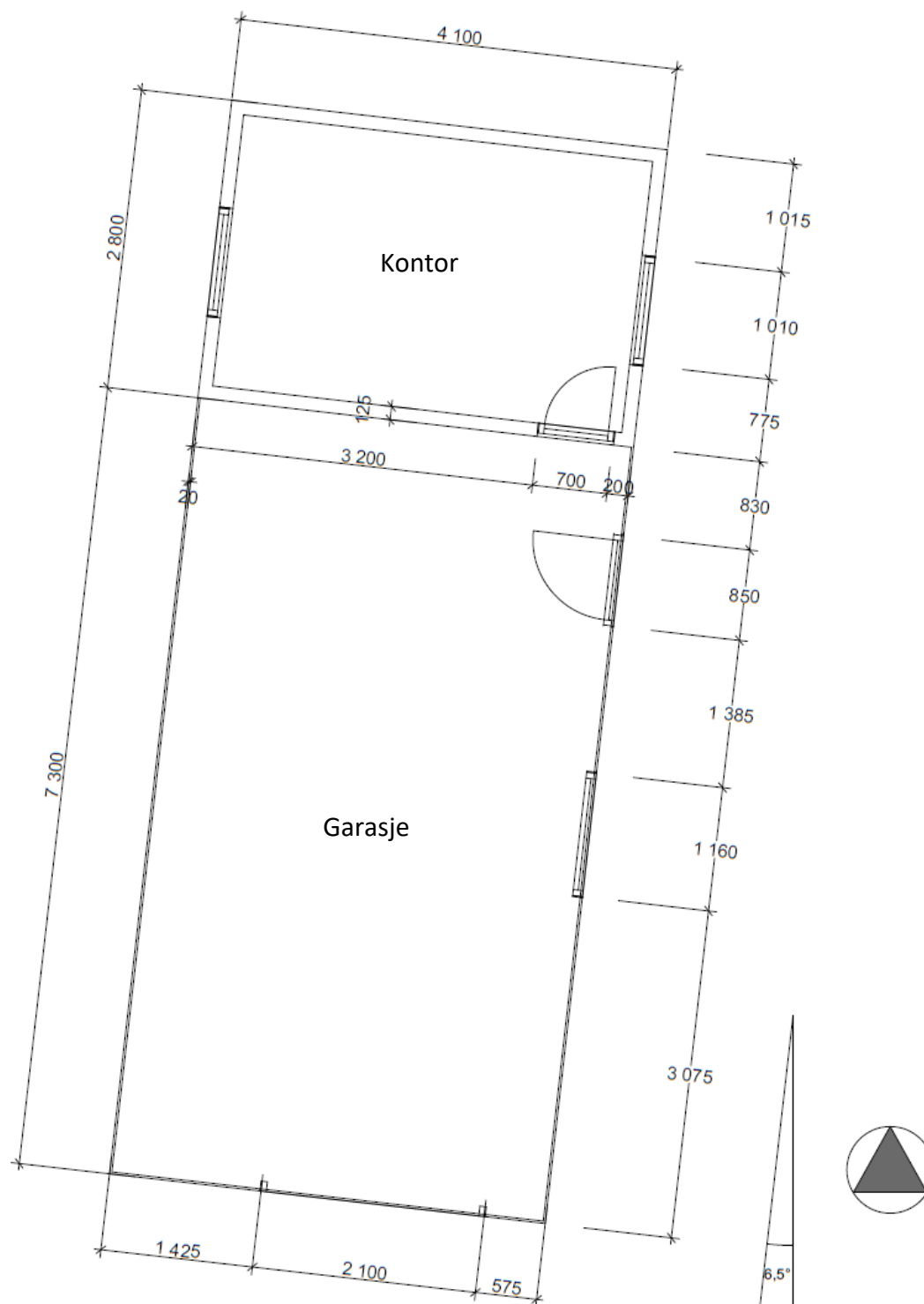
Testhuset er plassert på et åpent felt og det finnes ingen bygninger i nærheten som kan ha stor påvirkning på vindforholdene. En vindrose for Søråsjordet (Figur 17) med vindstyrke og vindretning målt i ti meters høyde for perioden januar – august 2016 viser at testhuset hovedsakelig er utsatt for vind fra sør, nord og nordøst.



Figur 17: Vindforhold på Søråsjordet, januar - august 2016. Laget med matlabkode basert på Pereira (2015).

Trehuset har en omkrets på 36,6m og består av to deler; en enkel garasje og et kontor. Figur 18 viser plantegningen av bygningen med de viktigste dimensjonene både inn- og utvendig, mens Figur 19 presenterer en CAD-modell av testhuset. De enkelte bygningselementene er beskrevet i Tabell 1 og Tabell 2. Plantegningen ble tegnet ut ifra målte dimensjoner, og figurer i artikkelen til Kraniotis et al. (2014).

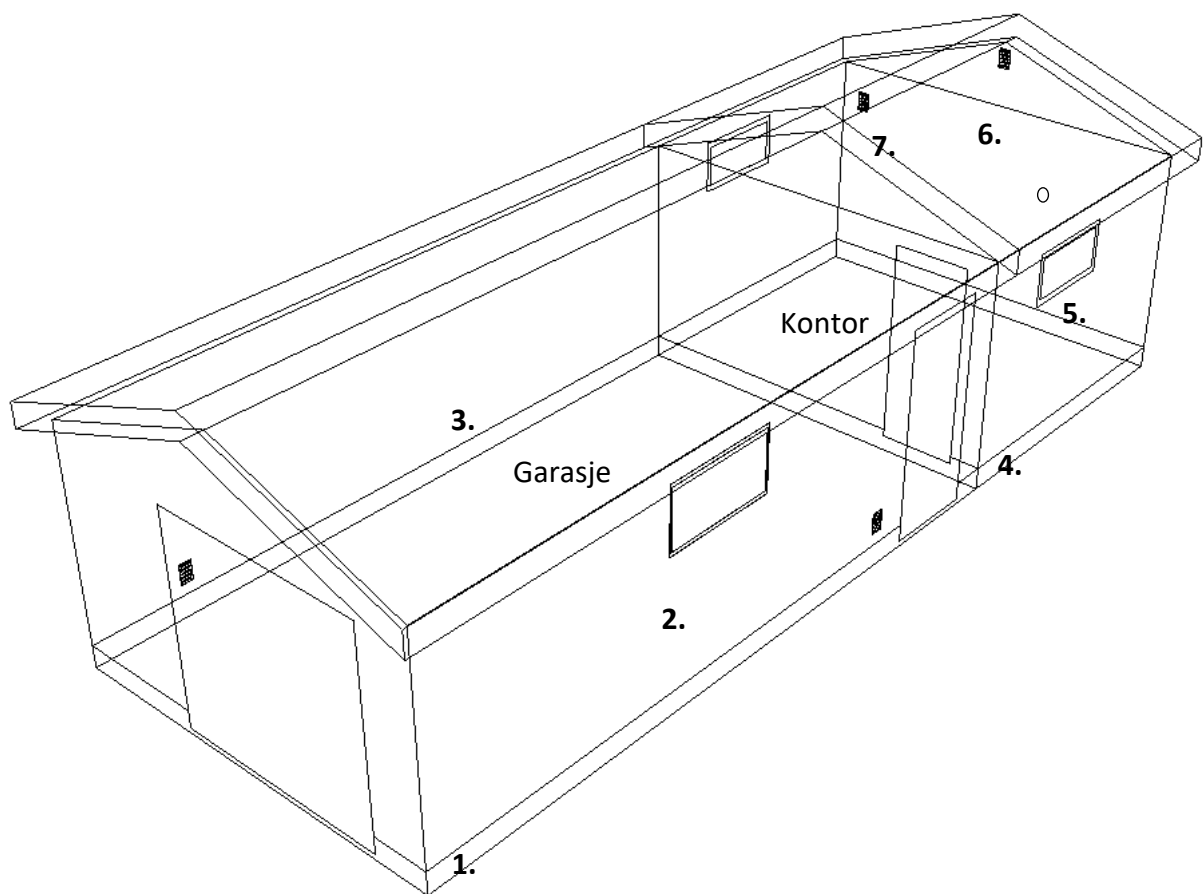
Kontoret er separert fra garasjen med en isolert vegg med en dør. På kontoret finnes det to vinduer, mens det i garasjen er ett vindu, en dør og en garasjeport. Hele bygningen står på et fundament av lecablokker. Den bærende konstruksjonen består av trestendere og bjelker som til sammen danner en skjelettkonstruksjon. Alle disse elementene fremstilles i Figur 19.



Figur 18: Plantegning av testhuset.

Garasjen er verken oppvarmet eller isolert. Den fungerer som et verksted, lagerplass og gjennomgang til kontoret. Ytterveggkonstruksjonen består av stående trekledning malt på utsiden, festet til utlekting til stendere med skruer. Konstruksjonen er beskrevet grundig i Tabell 1. I denne delen av bygningen finnes det ingen himling, kun et uisolert tak.

Kontordelen består av et isolert rom med kaldloft. Her finnes alt elektrisk utstyr og datamaskiner som kontroller og samler data fra værstasjonen. Kontoret blir brukt på hverdager i omtrent 30 minutter mellom klokken 8:30 og 9:00 for loggføring av værdata. Dette rommet er utstyrt med vannbåren varme i gulvet som holder temperaturen på omtrent 20°C. I tillegg må alt det elektriske utstyret være påslått til enhver tid for å logge data fra værstasjonen, noe som kan gi varmetilskudd inne. Ytterveggene og resten av konstruksjonen er beskrevet i Tabell 2.



Figur 19: Wireframe av testhuset. De nummererte bygningselementene er beskrevet i Tabell 1 og Tabell 2.

Tabell 1: Konstruksjon av testhuset, uoppvarmet sone.

Bygningsdel	Lag	Tykkelse	DesignBuilder-lag
1. Gulv	Pukk	-	-
	Isolasjon	0,05m	XPS Extruded Polystyrene – CO2 Blowing
	Støpt betong	0,15m	Cast Concrete
2. Vegg	Utvendig trekledning	0,02m	Painted Oak
	Trestedere	-	-
3. Tak	Takkledning	0,025m	Clay Tile (roofing)
	Lekter	0,1016m	4in Wood 2x4 at R-1,25/in

Tabell 2: Konstruksjon av testhuset, oppvarmet sone.

Bygningsdel	Lag	Tykkelse	DesignBuilder-lag
4. Gulv	Pukk	-	-
	Isolasjon	0,10m	XPS Extruded Polystyrene – CO2 Blowing
	Støpt betong	0,15m	Cast Concrete
	Dampsperre	0,002m	Vapor: seal, 2 layers of mopped 0,73 kg/m2 felt
	Vinylgulv	0,02m	PVC/Rubber floor covering
5. Vegg	Utvendig trekledning	0,015m	Painted Oak
	Vindsperre	0,002m	Bitumen, felt/sheet
	Isolasjon	0,1m	MW Stone Wool (rolls)
	Trestendere	-	-
	Dampsperre	0,002m	Vapor: seal, 2 layers of mopped 0,73 kg/m2 felt
	Innvendig kledning	0,01m	Woods – oak, radial
6. Tak	Takkledning	0,025m	Clay Tile (roofing)
	Lekter	0,1016m	4in Wood 2x4 at R-1,25/in
7. Himling	Isolasjon	0,1m	MW Stone Wool (rolls)
	Dampsperre	0,002m	Vapor: seal, 2 layers of mopped 0,73 kg/m2 felt
	Himlingsplater	0,01m	Woods – oak, radial

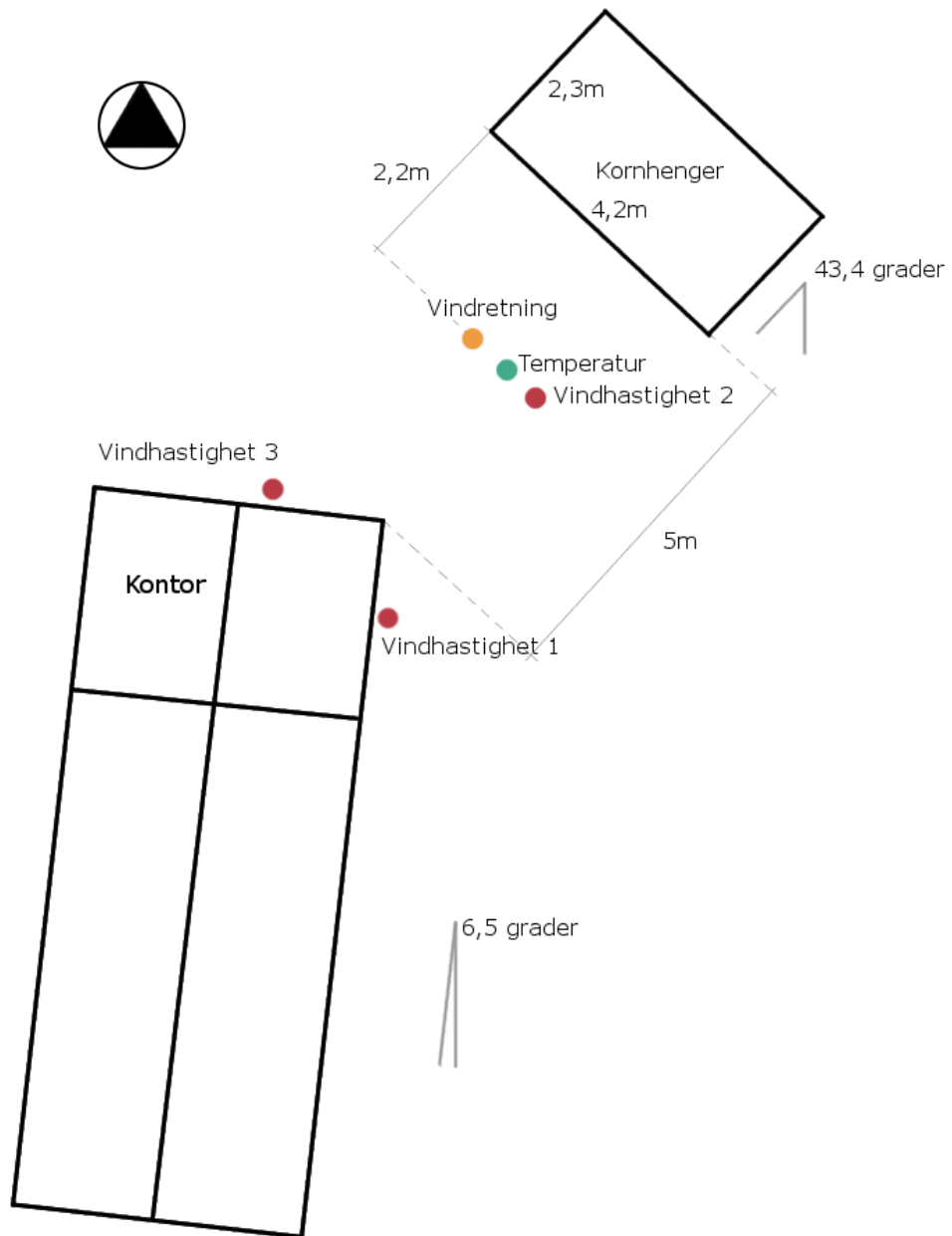
3.2 Beskrivelse av casene

En av problemstillingene tar for seg er påvirkningen av vindskjerming på luftinfiltrasjon i bygninger. For å forandre omgivelsene rundt kontoret ble det valgt å gjennomføre målinger og simuleringer for to caser med forskjellige skjermingsforhold. I Case 1 skulle bygningen være fullstendig eksponert for vær og vind, mens den i Case 2 skulle ha moderat skjerming.

Da bygningen er plassert på et åpent område på Søråsjordet kan omgivelsene defineres som eksponert, og følgelig er kravet for Case 1 tilfredsstillt. For å skape mer skjermede forhold i Case 2 ble det plassert en kornhenger ved siden av testhuset som skulle imitere en liten garasje. Basert på vindmålinger fra 2016 (Figur 17) ble kornhengeren satt fem meter nordøst for kontoret, som er en av de mest vindutsatte retningene (Figur 21). Kornhengeren hadde lengde og bredde på 4,2 m og 2,3 m, og en høyde på 3,4 m. For å få hengeren mer kompakt og vindtett ble den fullstendig dekket med PE-folie (Figur 20).



Figur 20: Kornhenger dekket med vindtett PE-folie brukt til skjerming i Case 2.



Figur 21: Case 2 - med skjerming.

3.3 Feltnmåling av luftlekkasjer

Feltnmåling av luftomsetninger skapt av infiltrasjon ble gjennomført i perioden februar til mars 2017. Tabell 3 viser navn, nøyaktige målingsperioder og skjermingsoppsett på de ulike dagene, der forsøk 1.1 – 1.4 ble gjennomført med Case 1, mens 2.1 – 2.5 tilhører Case 2. Infiltrasjonsraten ble målt ved bruk av sporgassmetoden – Concentration Decay, forklart i 2.6.1. Forsøksprosedyren, samt beskrivelse av måleinstrumenter og utstyr er beskrevet videre i dette kapittelet.

Tabell 3: Målingsperioder på de forskjellige dagene.

	Forsøksnummer	Målingsperiode	Skjerming
Case 1	1.1	09.02 16:00 – 10.02 10:30	nei
	1.2	22.02 22:00 – 23.02 21:00	nei
	1.3	07.03 09:30 – 07.03 22:10	nei
	1.4	07.03 22:15 – 08.03 10:00	nei
Case 2	2.1	04.03 19:35 – 05.03 09:30	ja
	2.2	05.03 09:50 – 05.03 19:35	ja
	2.3	05.03 19:50 – 06.03 10:15	ja
	2.4	06.03 10:00 – 06.03 19:20	ja
	2.5	06.03 19:35 – 07.03 09:00	ja

3.3.1 Måleinstrumenter og utstyr

Instrumentene og utstyret benyttet under feltmålingene bestod av: CO₂-måler ROTRONIC CP11, brannslukningsapparat fylt med CO₂, værstasjon på Søråsjordet og mobil værstasjon NRG Symphonie.



Figur 22: ROTRONIC CP11 CO₂-måler.

ROTRONIC CP11 er et lite håndholdt instrument som kan brukes til måling av relativ luftfuktighet, temperatur og CO₂. Måleren begynner å måle verdier når den blir slått på og oppdateres hvert sekund. Måleområde og feilmargin til de målte verdiene vises i Tabell 4.

Tabell 4: Måleområde og feilmargin til ROTRONIC CP11.

Målt verdi	Måleområde	Feilmargin
Relativ luftfuktighet	0,1% – 99,9%	±3% for fuktighet på 10-95% ved 25°C, ellers ±5%
Temperatur	-20°C – 60°C	±0,3°C ved temperatur 5 – 40°C
CO ₂	0 ppm – 9 999 ppm	±30 ppm + 5% målt verdi ved 0 – 5 000 ppm

Instrumentet er utstyrt med en innebygd logger som kan lagre opptil 18 000 verdier. Siden CP11 måler alle de tre parameterne samtidig har loggeren kapasitet av 6 000 målinger. Intervaller mellom hver måling kan justeres til en verdi mellom 1 sekund og 5 timer.

Resultatene inneholdende målte verdier kan eksporteres fra måleinstrumentet til en datamaskin via et eget program utviklet av ROTRONIC. De målte verdiene blir lagret som en tekstfil (CSV), som kan brukes til videre bearbeiding av data.

For å injisere sporgassen inn i testhuset brukes et brannslukningsapparat fylt med CO₂. Dette er en rimelig og enkel måte å frakte og distribuere sporgassen på. Apparatet viser ikke hvor mye CO₂ som blir sluppet ut, men ved å bruke en CO₂-måler kan man kontrollere sporgasskonsentrasjonen under injiseringen.

Værstasjonen FAGKLIM på Søråsjordet er et feltlaboratorium der meteorologiske observasjoner blir kontinuerlig registrert. Stasjonen er utstyrt med omfattende måleinstrumenter (Figur 23) og produserer resultater med gjennomsnittsverdier med ti minutters intervaller. Vindretning og vindhastighet måles ved ti meters høyde over bakkenivået, mens temperatur, relativ fuktighet, lokalt vindtrykk og andre parametere måles ved to meters høyde.



Figur 23: Måleinstrumentene knyttet til værstasjonen på Søråsjordet

I tillegg til FAGKLIM ble en mobil værstasjon med en NRG Symphonie-logger benyttet (Figur 24), som bestod av tre anemometere, én vindretningsmåler og én temperaturmåler. Måleinstrumentene ble festet på aluminiumsstenger 1,5 meter over bakkenivå. To av anemometerne ble plassert ved nord- og østfasaden av testhuset, mens resten av måleinstrumentene ble plassert midt mellom testhuset og kornhengeren. Figur 21 viser nøyaktig plassering av værinstrumentene. Loggøren registrerte været kontinuerlig og produserte resultater med gjennomsnittsverdier med ti minutters intervaller. NRG Symphonie-logger ble benyttet bare for Case 2 for å kontrollere værforhold nærmest kornhengeren.



Figur 24: Anemometer, temperaturmåler, vindretningsmåler og NRG Symphonie-logger.

3.3.2 Fremgangsmåten

Alle målingene av infiltrasjonsratene har blitt gjennomført i samsvar med retningslinjer i standarden ASTM International (2009) E741. Standarden definerer minimal varighet av en Concentration Decay-sporgassmåling basert på luftomsetninger (Figur 9). Fra tidligere målinger av Kraniotis et al. (2014) utført på samme testhus kommer det fram at de faktiske luftomsetningene i kontoret skapt av infiltrasjon kan variere mellom 0,32 ac/h og 0,75 ac/h. Dette medfører at sporgassmålingen må vare i minst tre og en halv time. I og med at ROTRONIC CP11 er begrenset til 18 000 målinger, må det korteste intervallet mellom hver måling være 2,1 sekunder (23), eller med avrundning opp – 3 sekunder.

$$t_{logger} = \frac{3,5timer * \frac{3600sekunder}{1time}}{6000målinger} = 2,1 \frac{sekunder}{måling} \quad 23$$

Det endelige intervallet for loggingsfrekvensen ble innstilt på 15 sekunder. Den resulterende loggingsperioden kunne vare opptil 25 timer (24). Dette gir nok målinger til å kunne beregne luftomsetninger samt fleksibilitet til å velge den mest egnede perioden, der målingene er mest stabile.

$$T_{\text{logger}} = 6000\text{målinger} * \frac{15\text{sekunder}}{\text{måling}} * \frac{1\text{time}}{3600\text{sekunder}} = 25\text{timer} \quad 24$$

For hver gjennomførte feltmåling ble to like CO₂-loggere benyttet. En vanlig forsøksprosedyre starter med innstilling av begge CO₂-loggere til 15 sekunders intervaller mellom hver måling og sletting av gammel data lagret på enheten. Etter at loggingen startes plasseres begge loggere ute for å logge bakgrunnsnivå av CO₂ i utelufta i omtrent tre minutter. I mellomtiden kan NRG-værstasjonen aktiveres avhengig om målingen foretas med eller uten skjerming. Alle instrumenter knyttet til NRG-værstasjonen må kontrolleres ved å sjekke at loggeren viser riktige verdier for hvert instrument.

Deretter kan CO₂-loggerne plasseres 1,5 meter over gulvet i midten av kontoret. Alle vinduer og dører på kontoret lukkes og en vifte som sørger for god blanding av innelufta ved starttiden slås på. Deretter benyttes et brannslukkingsapparat fylt med CO₂ til å injisere sporgassen i kontoret, fram til begge målere viser CO₂-konsentrasjon på over 5 000 ppm. Til slutt slås vifta av og døra til kontoret lukkes igjen. Under hele målingen må alle vinduer og dører tilknyttet kontoret være lukket, slik at sporgassuttyningen ikke blir forstyrret. Etter tre og en halv time kan CO₂-loggerne hentes og igjen plasseres ute for å måle bakgrunnsnivå av CO₂ i utelufta i omtrent tre minutter. Til slutt eksporteres de registrerte dataene til en datamaskin i form av en CSV-fil, og et nytt forsøk kan igangsettes.

Resultatene fra CO₂-målingene analyseres ved hjelp av Excel. Da det under hvert forsøk benyttet to måleinstrumenter må man finne gjennomsnittet av hver målt verdi (C(t)) for videre beregning. CO₂-bakgrunnsnivå (C_{atm}) finnes ved å regne ut gjennomsnittsverdien av alle målinger av utelufta registret ved start og slutt av hver logging. De målte CO₂-verdiene plottes mot tiden (t). Ved hjelp av den nye grafen finner man det tidspunktet da CO₂-gassen ble sluppet inn i testsonen. Siden de første målingene kan variere mye på grunn av ujevn blanding av innelufta med sporgassen, må starttiden (t₀) defineres som tidspunktet hvor

endringen i sporgasskonsentrasjonen har blitt stabil. Alle målinger etter starttiden omskrives til normaliserte verdier ved hjelp av formel 12, der startkonsentrasjonen er definert som $C(t_0)$, og plottes deretter mot tiden. Til slutt brukes lineær regresjon til å finne en trendlinje med et skjæringspunkt i origo på en tretimers periode fra starttiden. Den nye førstegradsligningen brukes til å finne luftomsetninger, som beskrevet i kapittel 2.6.1.

3.4 Simulering og beregning av luftlekkasjer

3.4.1 NS 3031

For å beregne infiltrasjon i testhuset i henhold til Norske Standard 3031 benyttes formel 14. Siden kontoret ikke var utstyrt med noen form for balansert eller mekanisk ventilasjon kunne formelen forenkles til (25):

$$n_{inf} = n_{50} * e \quad 25$$

Tidligere målinger utført av Kraniotis et al. (2014) viste at det faktiske lekkasjetallet ved 50 Pa for kontoret er 8,17 ac/h. Bygningen har mer enn én utsatt fasade, som gjør at terrengskjermingskoeffisienten vil være 0,10 for Case 1 (Forsøk 1.1-1.4) uten skjerming, og 0,07 for Case 2 (Forsøk 2.1-2.5) med moderat skjerming (Standard Norge 2007).

3.4.2 DesignBuilder

For å utføre en energisimulering i DesignBuilder ble det tegnet en tredimensjonal CAD-modell av testhuset i henhold til planløsningen i Figur 18. Modellen inkluderer vinduer, dører og ventiler som vist i Figur 19. Det ble også tegnet et hull i nordveggen med areal på 4 cm². Oppbyggingen av alle bygningselementer er beskrevet i Tabell 1 og Tabell 2, der kolonne fire beskriver de valgte lagene fra DesignBuilders database. I realiteten er testhuset orientert med en vinkel på 6,5° i forhold til nord, men her har det blitt gjort en forenkling ved å neglisjere dette og plassere nordveggen rettet direkte mot nord.

Den ferdige CAD-modellen ble brukt til simulering av infiltrasjon med både Scheduled og Calculated-metoden. For å skape skjerming i Case 2 ble det også tegnet en rettvisklet kloss med samme dimensjoner som kornhengeren. Klossen ble plassert fem meter fra det nordøstlige hjørnet av kontoret som vist i Figur 21.

Testhuset ble delt inn i to soner; én for oppvarmet kontor og én for uoppvarmet garasje. I tillegg ble det tegnet tak over begge sonene som også ble delt i to nye soner. Til sammen bestod konstruksjonen av fire soner. Garasje- og taksonene ble definert som "Semi-exterior unconditioned" – et rom ikke beregnet til opphold som blir ekskludert fra energiberegningen. Kontorsonen ble definert som en "Standard" og ble inkludert i energiberegningen. For å kunne lese av verdien for infiltrasjon ble mekanisk og naturlig ventilasjon deaktivert fra modellen. Den laveste tillatte temperaturen ble satt 20°C. Oppholdsperioder der én person bruker kontoret ble satt til kl 08:30 til 09:00, mandag til fredag. De andre innstillingene hadde ingen påvirkning på infiltrasjon og ble dermed satt til forhåndsdefinerte verdier. Værdata for simuleringene ble hentet fra værstasjonen på Søråsjordet i tekstformat (CSV). For å konvertere datafilene til EPW-format, som kan brukes i DesignBuilder, ble programmet "EnergyPlus - Weather Statistics and Conversions" benyttet.

For å aktivere den vinduavhengige modellen i DesignBuilder ble "Natural Ventilation and Infiltration Modelling" satt til "Scheduled" i programinnstillingene. I samme fane ble enhet for infiltrasjon valgt til å være lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (n_{50}). Inputverdien for infiltrasjon ble hentet fra tidligere målinger fra Kraniotis et al. (2014) og ble oppgitt som $n_{50} = 8,17$ ac/h. Deretter ble simuleringen satt i gang for periode 09.02 til 08.03 med værdata for Søråsjordet. Resultatene kunne hentes i form av en tabell med timeintervaller for hele perioden. For å kunne sammenligne de beregnede og målte luftomsetningene ble det tatt ut verdier fra simuleringen for tilsvarende tidsintervaller da målingene foregikk.

For å aktivere den vinduavhengige modellen i DesignBuilder ble "Natural Ventilation and Infiltration Modelling" ble satt til "Calculated" i programinnstillingene. Strømningskoeffisienter og -eksponenter ble valgt fra en standard database inkludert i DB for forskjellige bygningskvaliteter (Tabell 13). Alle bygningsselementer tilhørende kontoret ble definert som "Poor", mens resten av bygningen ble satt til "Very Poor". Her ble to infiltrasjonssimuleringer gjennomført. Først ble det brukt standardvindtrykkoeffisienter inkludert i DB (Vedlegg A - Tabell 12), og deretter ble det brukt vindtrykkoeffisienter beregnet ved hjelp av en CFD-simulering beskrevet i neste kapittel. Her ble to sett med vindtrykkoeffisienter benyttet; ett for Case 1 (1.1-1.4) og ett for Case 2 (2.1-2.5). Videre ble det brukt samme metode som i "Scheduled" for å sette i gang simulering og hente resultater.

3.4.3 CFD-simulering

CAD-modellen brukt til eneregisimuleringene ble automatisk eksportert til CFD-modulen. Her ble det brukt en modell uten kornhenger for Case 1 og en modell med kornhenger for Case 2. For å få like store domener og samme utforming av gridet i begge Casene, ble kornhengeren erstattet med en uendelig tynn kloss i Case 1. Dette tvang programmet til å skape likt grid og like stort domene i begge Casene.

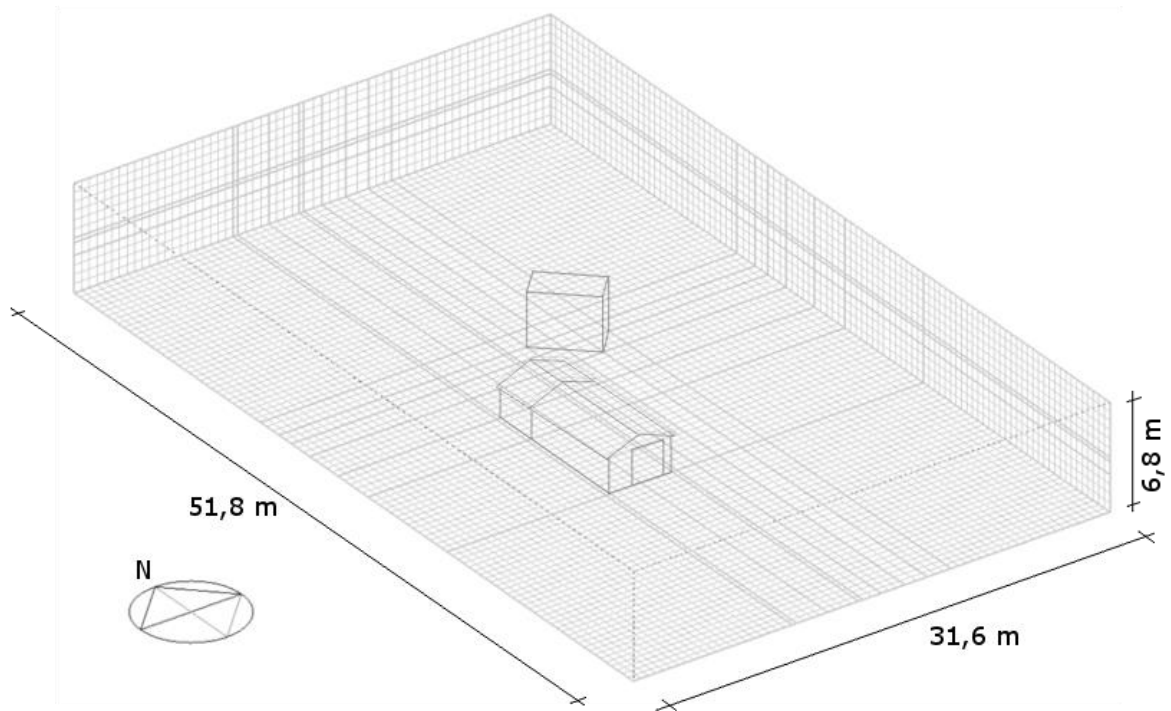
Vindhastigheten i den fire luftstrømmen ble satt til 5 m/s med eksponering "Open country". Til sammen ble det utført 8 simuleringer for hver Case, der vindretningen ble satt til 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° og 315°.

For å velge riktig gridstørrelse ble det først utført en forenklet "grid independence"-test der tre gridstørrelser (Tabell 5) ble benyttet for CFD-simuleringer på samme CAD-modell. Resultatene ble brukt til beregning av vindtrykkverdier på fasader for hver vegg. Til slutt ble disse verdiene sammenlignet med hverandre. Det ble derfor besluttet å bruke medium gridoppdeling for videre simuleringer.

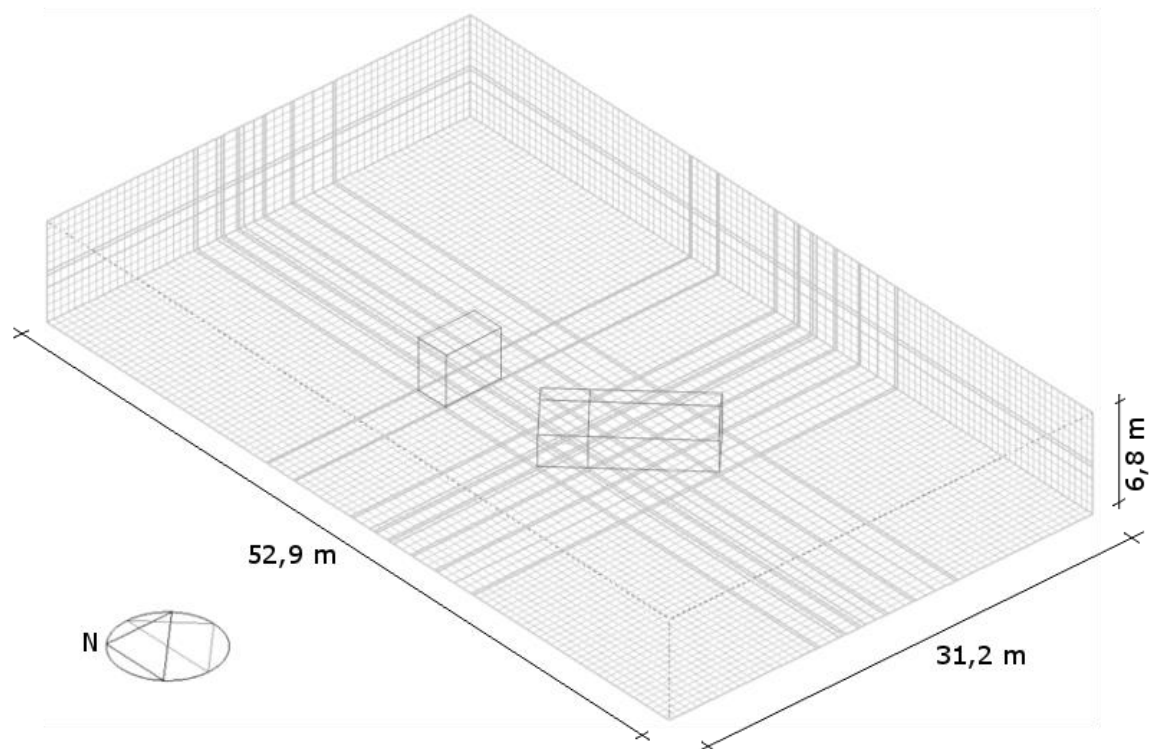
Tabell 5: Grid independence test.

Gridoppdeling	Størst avstand mellom gridlinjer [m]	Minst avstand mellom gridlinjer [m]
Grov	1	0,20
Medium	0,5	0,10
Fin	0,25	0,05

Multiplikasjonsfaktor for domenestørrelsen ble satt til 3 for lengde og bredde, og 2 for høyde. Den endelige størrelsen av domenet vises i Figur 25 og Figur 26. Turbulensmodellen benyttet i simuleringen var $k-\epsilon$. "Cell Monitor" ble plassert i et volumelement i midten av domenet over testhuset, og størst antall iterasjoner ble valgt til 20 000.



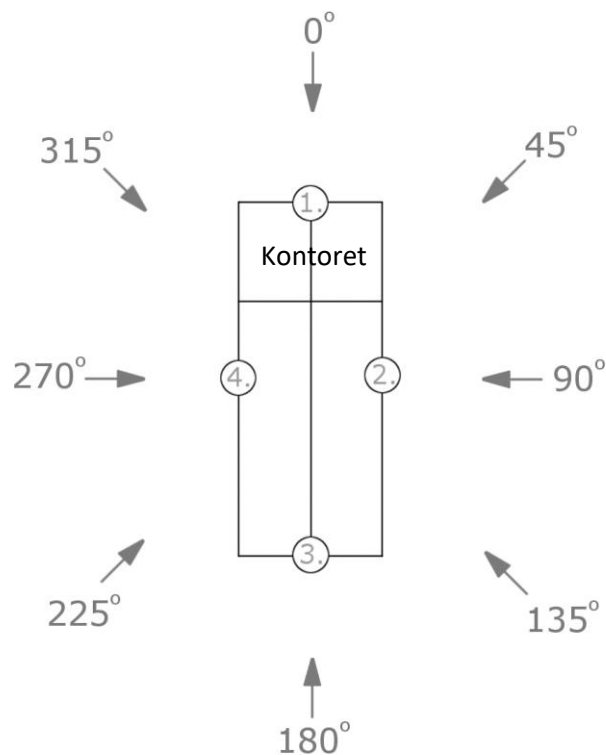
Figur 25: Domene og grid i Case 2 for vindretning 0° , 90° , 180° , 270° .



Figur 26: Domene og grid i Case 2 for vindretning 45° , 135° , 225° , 315° .

Etter at resultatene konvergente ble de beregnede verdiene eksportert som tekstfil (CSV) og analysert i Excel. For hver fasade ble vindtrykkverdier nærmest fasaden undersøkt. Deretter ble formel 2 benyttet for å finne vindtrykkoeffisienter for hvert punkt på fasaden. Massetettheten til lufta ble beregnet ved hjelp av formel 1 og vindhastigheten ble lest av i bygningshøyden i den uforstyrrede vindstrømmen. Til slutt ble gjennomsnittlig vindtrykkoeffisient for hver vegg beregnet.

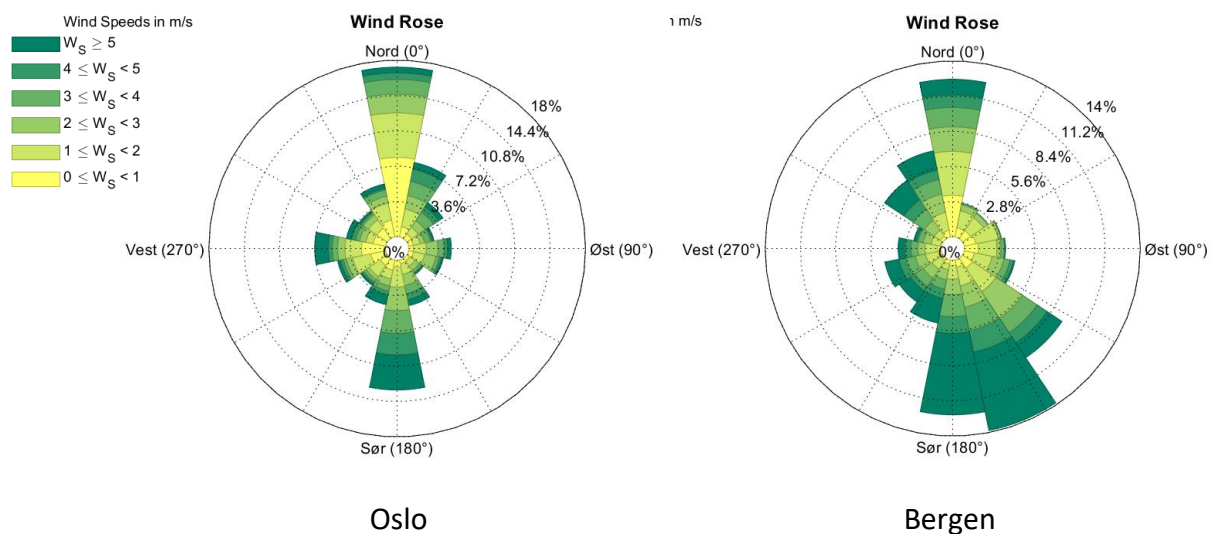
For hver Case ble det utført åtte simuleringer med vindretninger presentert i Figur 27. For hver vindretning ble det beregnet fire vindtrykkoeffisienter, én for hver fasade:



Figur 27: Vindretninger i CFD-analysen i forhold til testhuset.

3.5 Ett års simulering

For å kunne se konsekvensene av de forskjellige beregningsmodeller i et større perspektiv, ble det til slutt beregnet hvor mye energi som trengs for å rekompensere for varmetap grunnet infiltrasjon i løpet av et typisk år. Her ble det benyttet klimadata for Oslo og Bergen hentet fra DesignBuilder. Gjennomsnittlig temperatur og vindhastighet basert på klimadata i Oslo var henholdsvis 6,7°C og 2,3 m/s, mens den for Bergen var 7,1°C og 3,3 m/s. Figur 28 viser en framstilling vindroser for begge byene for et helt år.



Figur 28: Vindrose for et typisk år i Oslo og Bergen, basert på klimadata fra DB.

I DesignBuilder ble simuleringene utført for perioden 01.01 til 31.12. Først ble simuleringen utført med infiltrasjonsmodellen satt til Scheduled, og deretter til Calculated med vindtrykkoeffisienter beregnet med CFD-simuleringer for Case 1, og deretter for Case 2. Hver simulering ble gjennomført en gang for hver av de to byene.

For å beregne energitapet i henhold til NS 3031 ble formel 15 benyttet. Temperaturen på kontoret ble antatt å være konstant på 20°C, mens utetemperaturen ble beregnet fra klimadata for Oslo og Bergen.

4 Resultater

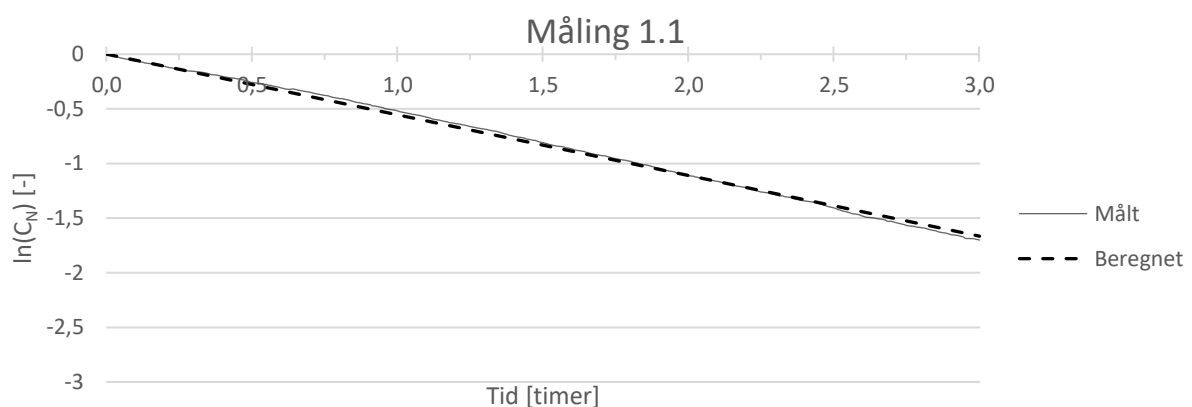
4.1 Resultater fra målinger

Figur 29 til Figur 32 viser målinger av infiltrasjonsrate for Case 1, mens Figur 33 til Figur 37 viser resultater fra Case 2. Fra hvert forsøk ble det tatt ut målinger fra en periode på tre timer, der Y-aksen representerer logaritmen av normalisert CO₂ konsentrasjon i lufta mens X-aksen er tiden målt i timer. Den sammenhengende kurven viser målte verdier, mens den stiplede linjen representerer verdier beregnet ved hjelp av lineær regresjon. Under hver figur oppgis gjennomsnittsverdi og tidsintervall for infiltrasjonsrate, samt R² for lineær regresjon (coefficient of determination). Resultatene fra dette kapitlet brukes videre i oppgaven til vurdering av beregnings- og simuleringsmodeller for infiltrasjon.

Fra resultatene ser vi at luftinfiltrasjon varierte fra 0,427 ac/h i måling 1.2 til 0,998 ac/h i måling 1.3. I tillegg er resultatene fra Case 1 mer varierte enn de fra Case 2.

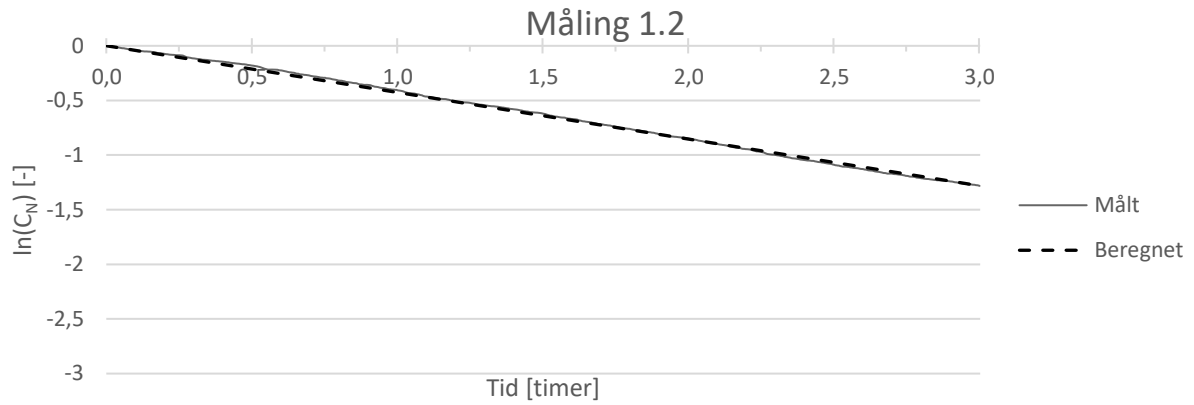
R² for lineær regresjon er generelt høy for alle målinger og har lavest verdi på 0,992 i måling 2.3.

4.1.1 Case 1 – eksponert



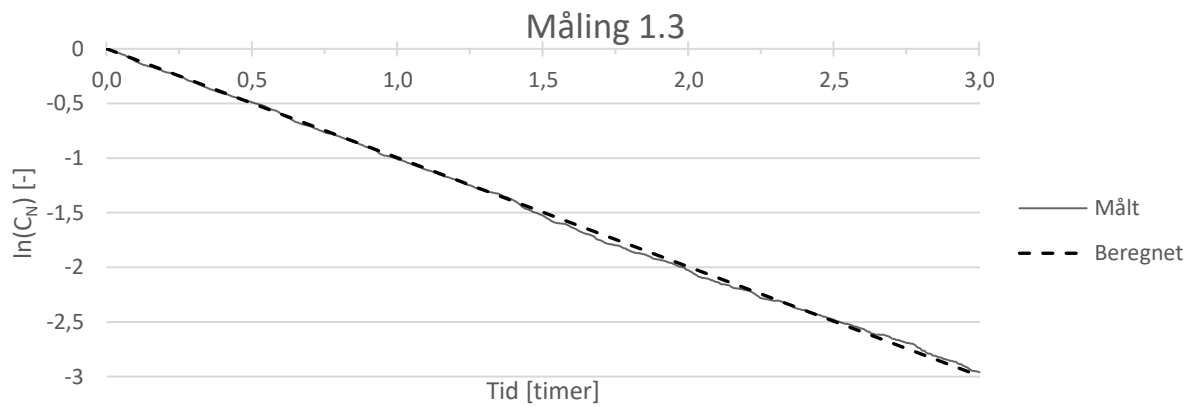
Figur 29: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 1.1 plottet mot tiden.

$$\lambda = 0,555 \text{ ac/h; } 09.02 \text{ 16:30} - 09.02 \text{ 19:30; } R^2 = 0,999$$



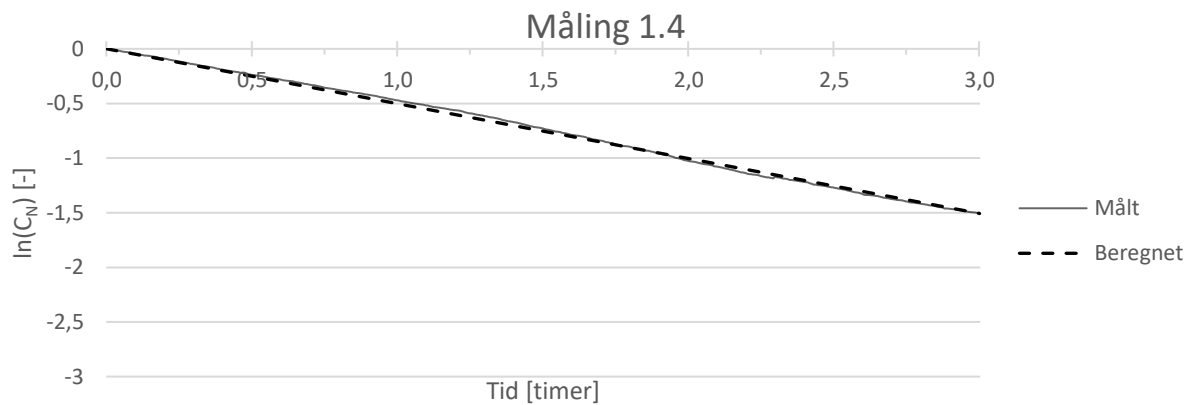
Figur 30: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 1.2 plottet mot tiden.

$$\lambda = 0,427 \text{ ac/h; } 22.02 \text{ 22:15} - 23.02 \text{ 01:15; } R^2 = 0,998$$



Figur 31: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 1.3 plottet mot tiden.

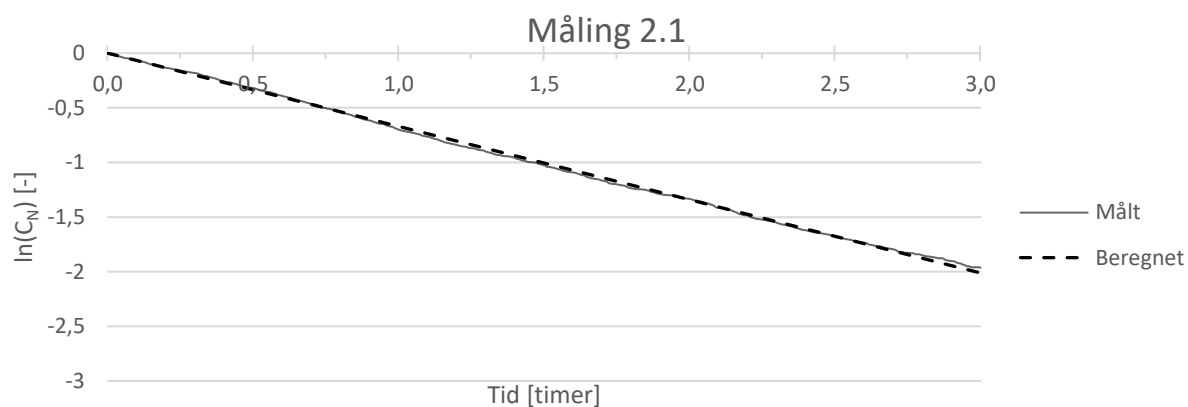
$$\lambda = 0,998 \text{ ac/h; } 07.03 \text{ 10:00} - 07.03 \text{ 13:00; } R^2 = 0,999$$



Figur 32: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 1.4 plottet mot tiden.

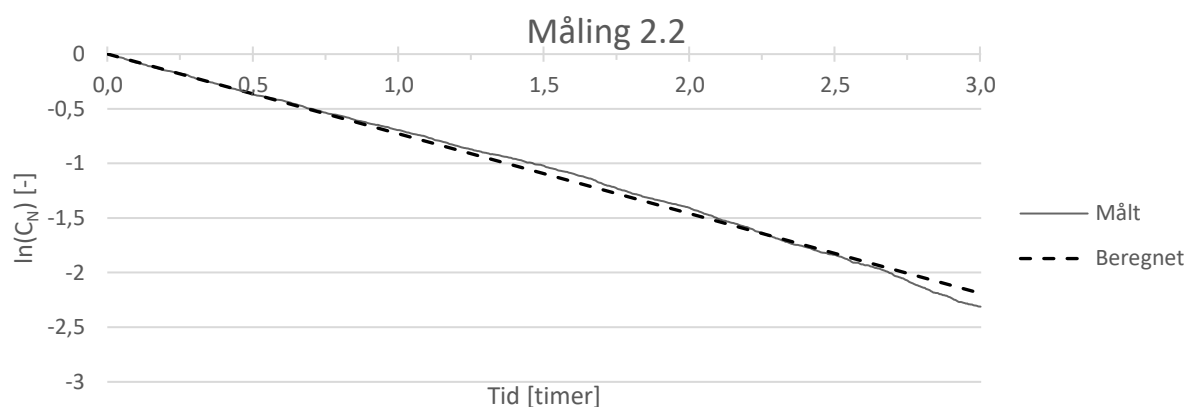
$$\lambda = 0,502 \text{ ac/h; } 08.03 \text{ 00:00} - 08.03 \text{ 03:00; } R^2 = 0,997$$

4.1.2 Case 2 – moderat skjerming



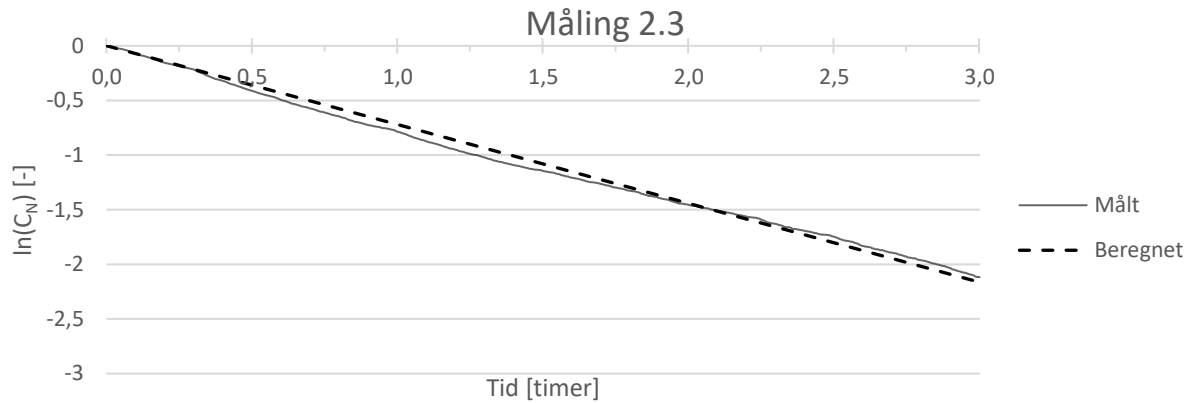
Figur 33: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 2.1 plottet mot tiden.

$$\lambda = 0,671 \text{ ac/h; } 04.03 \text{ 21:00} - 05.03 \text{ 00:00; } R^2 = 0,998$$



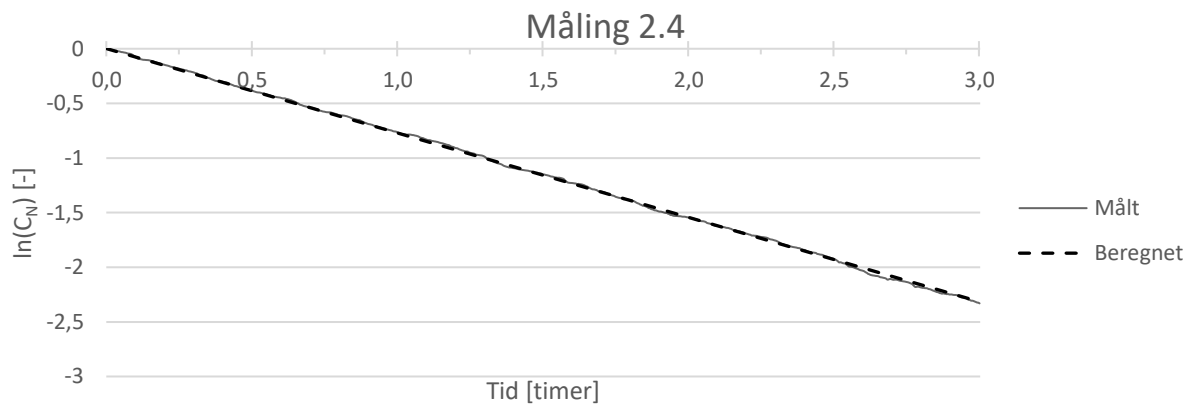
Figur 34: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 2.2 plottet mot tiden.

$$\lambda = 0,730 \text{ ac/h; } 05.03 \text{ 11:30} - 05.03 \text{ 14:30; } R^2 = 0,995$$



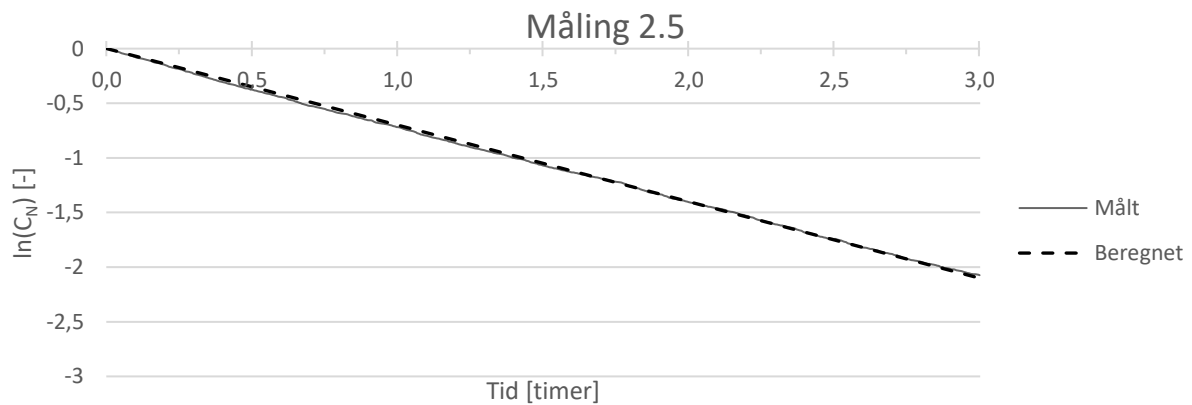
Figur 35: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 2.3 plottet mot tiden.

$$\lambda = 0,721 \text{ ac/h; } 05.03 \text{ 21:00} - 06.03 \text{ 00:00; } R^2 = 0,992$$



Figur 36: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 2.4 plottet mot tiden.

$$\lambda = 0,772 \text{ ac/h; } 06.03 \text{ 12:00} - 06.03 \text{ 15:00; } R^2 = 0,999$$



Figur 37: Logaritmiske verdier av normaliserte CO₂-konsentrasjoner fra måling 2.5 plottet mot tiden.

$$\lambda = 0,700 \text{ ac/h; } 06.03 \text{ 20:25} - 06.03 \text{ 23:25; } R^2 = 0,999$$

4.1.3 Målt vær

Tabell 6 viser værdata målt under hvert forsøk. Kolonne 3 viser tidsperioder for målingene som ble brukt til beregning av infiltrasjonsraten. Kolonne 4 til 6 fremstiller vindhastighet og vindretning målt i 10 meters høyde, samt utetemperatur. Grafisk fremstilling av det målte været følger med i Vedlegg B.

Tabell 6: Været målt under hvert forsøk.

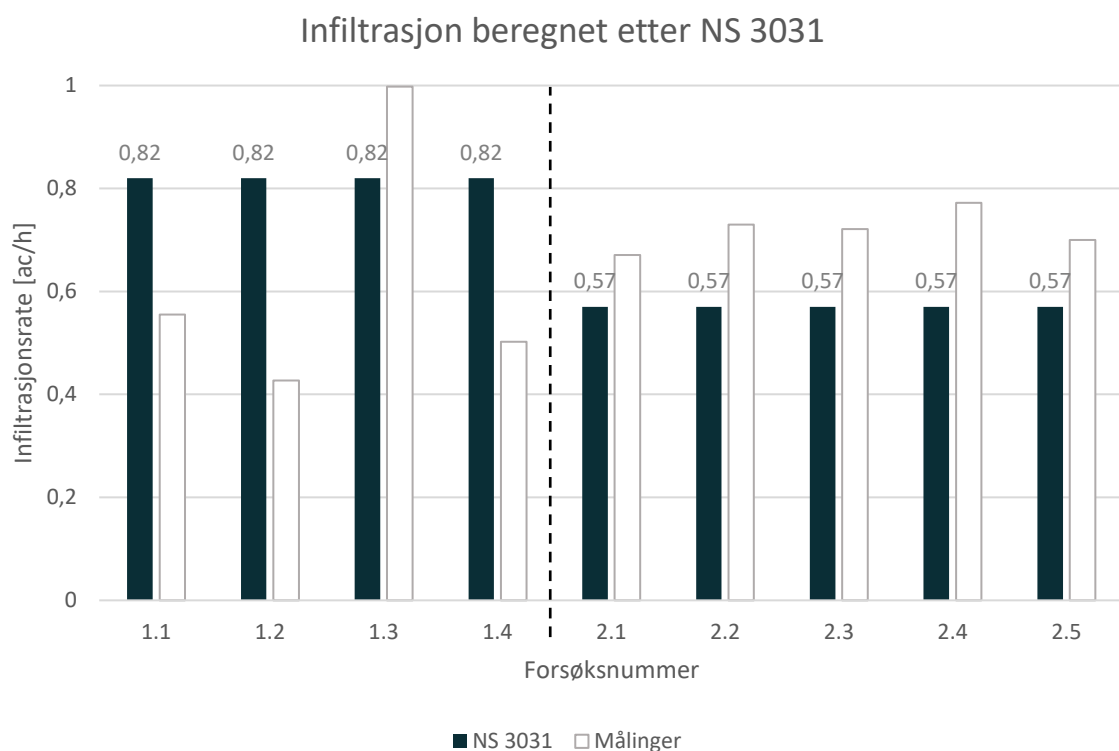
Forsøk	Periode	Vindhastighet målt i 10 meters høyde	Vindretning	Utetemperatur	
Case 1	1.1	09.02 16:30 – 09.02 19:30	2,5 m/s	N	-5,6 °C
	1.2	22.02 22:15 – 23.02 01:15	2,1 m/s	NV	-0,1 °C
	1.3	07.03 10:00 – 07.03 13:00	5,8 m/s	N	-3,0 °C
	1.4	08.03 00:00 – 08.03 03:00	2,5 m/s	N	-3,9 °C
Case 2	2.1	04.03 21:00 – 05.03 00:00	3,7 m/s	NØ	-0,1 °C
	2.2	05.03 11:30 – 05.03 14:30	4,6 m/s	NØ	-1,0 °C
	2.3	05.03 21:00 – 06.03 00:00	4,2 m/s	NØ	-1,8 °C
	2.4	06.03 12:00 – 06.03 15:00	5,1 m/s	NØ	-0,7 °C
	2.5	06.03 20:25 – 06.03 23:25	4,1 m/s	N	-3,7 °C

Den høyeste vindhastigheten, på 5,8 m/s ble målt under forsøk 1.3, mens den laveste på 2,1 m/s, under forsøk 1.2. Vindhastigheten har generelt variert mest under forsøkene knyttet til Case 1, mens i Case var vindforholdene nokså stabile. Vinden har kommet hovedsakelig fra nord og nordøst og temperaturen har holdt seg stabilt mellom -0,1°C og -5,6°C.

4.2 Resultater fra beregninger og simuleringer av luftlekkasjer

4.2.1 NS 3031

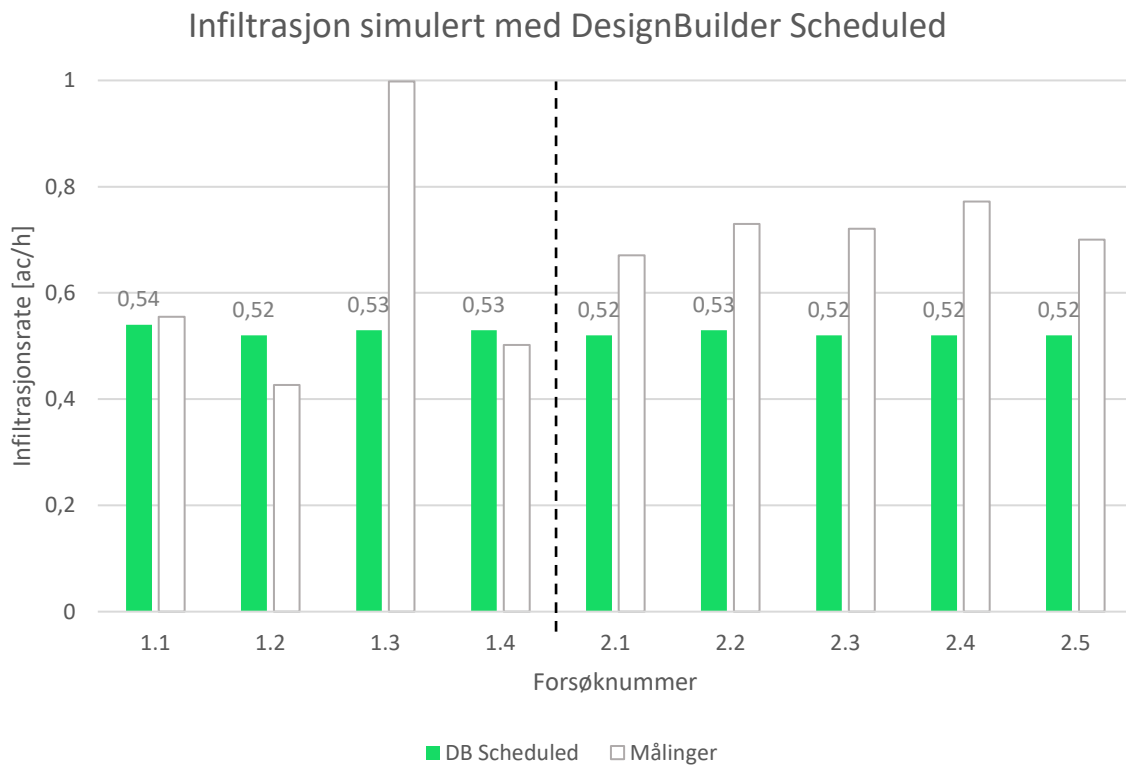
Figur 38 viser luftomsetninger skapt av infiltrasjon beregnet i henhold til NS 3031, samt de målte infiltrasjonsratene. Hvert søylepar representerer et forsøk, der forsøksnummer 1.1 til 1.4 tilhører Case 1, mens 2.1 til 2.5 tilhører Case 2. Her ser man at den beregnede verdien for infiltrasjon er lik for alle forsøkene innenfor hver Case. I tillegg er den beregnede infiltrasjonen for Case 1 omtrent 45% høyere enn for Case 2.



Figur 38: Infiltrasjon beregnet i henhold til NS 3031, samt målte infiltrasjonsrater.

4.2.2 DesignBuilder Scheduled

Figur 39 viser luftomsetninger skapt av infiltrasjon simulert i DesignBuilder med infiltrasjonsmodellen satt til Scheduled, samt de målte infiltrasjonsratene. Den beregnede verdien for infiltrasjon for hvert forsøk holder seg rundt 0,53 ac/h og varierer med $\pm 2\%$ både for Case 1 og 2.

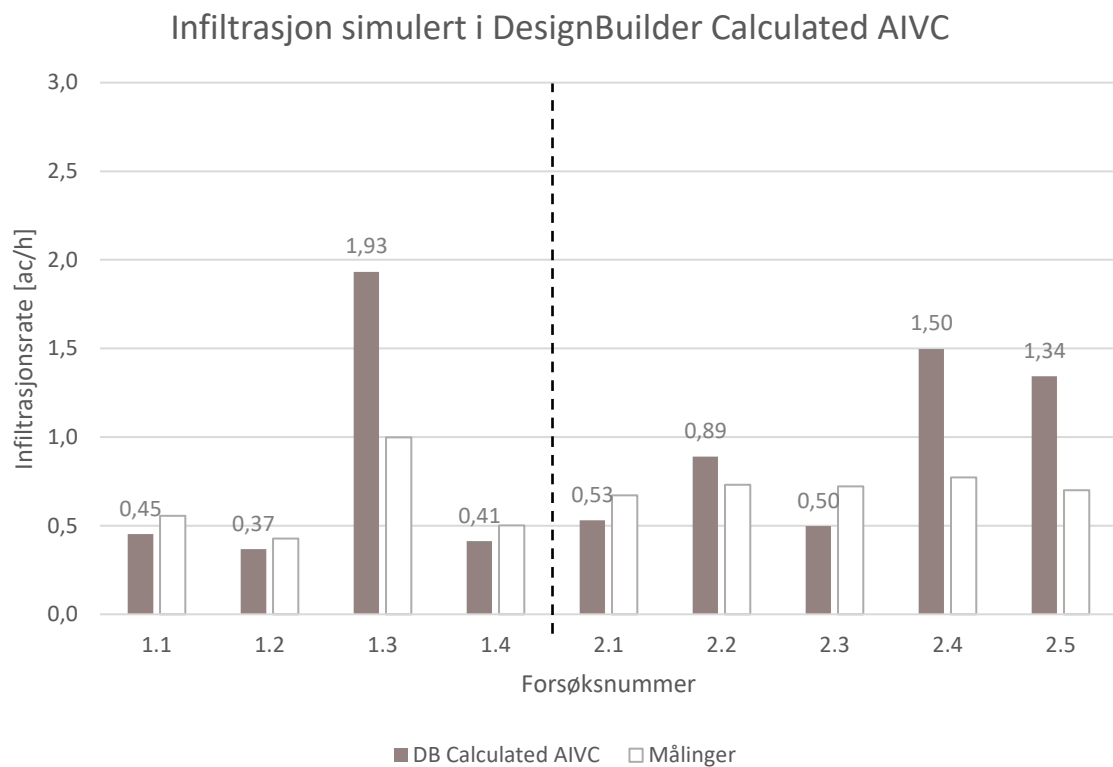


Figur 39: Infiltrasjon simulert i DesignBuilder med infiltrasjonsmodell satt til Scheduled, samt målte infiltrasjonsrater.

4.2.3 DesignBuilder Calculated

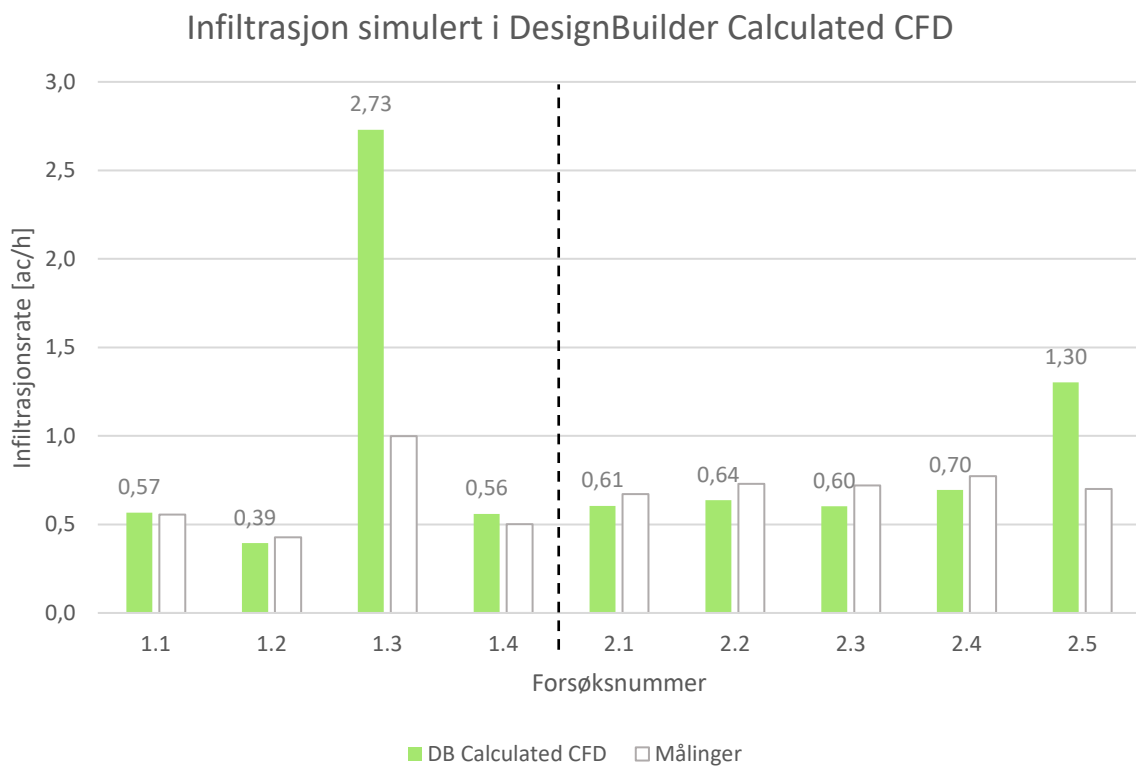
Figur 40 presenterer luftomsetninger skapt av infiltrasjon simulert i DesignBuilder med infiltrasjonsmodell satt til Calculated, samt de målte infiltrasjonsratene. Her ble det benyttet standardverdier for vindtrykkoeffisienter fra AIVC database (Vedlegg A – Tabell 12).

Resultatene fra denne simuleringen varierer mye mer for hvert forsøk. De høyeste beregnede verdiene er 1,93 ac/h i forsøk 1.3, 1,50 ac/h i forsøk 2.4 og 1,34 ac/h i forsøk 2.5. Disse verdiene er betydelig høyere i forhold til de andre forsøkene.



Figur 40: Infiltrasjon simulert i DB med infiltrasjonsmodell satt til Calculated med standardvindtrykkoeffisienter. De målte infiltrasjonsratene er også framstilt.

For resultatene i Figur 41 vindtrykkoeffisienter beregnet ved hjelp av CFD-modul i DesignBuilder benyttet. Verdiene for vindtrykkoeffisientene benyttet i forsøk 1.1 – 1.4 vises i Tabell 7, mens for forsøk 2.1 – 2.5 i Tabell 8. Her ser man også at resultatene varierer mye for hvert forsøk. Verdiene for Case 1 er høyere når vindtrykkoeffisienter fra CFD-simuleringene benyttes enn når standardvindtrykkoeffisienter fra DB benyttes. For Case 2 er verdiene derimot generelt lavere når egendefinerte vindtrykkoeffisienter benyttes. To av forsøkene har betydelig høyere verdier for infiltrasjon, dette gjelder forsøk 1.3 og forsøk 2.5.



Figur 41: Infiltrasjon simulert i DesignBuilder med infiltrasjonsmodell satt til Calculated med VTK fra CFD-simuleringer. De målte infiltrasjonsratene er også framstilt.

4.2.4 Vindtrykkoeffisienter fra CFD-simuleringer

Tabell 7 og Tabell 8 viser vindtrykkoeffisienter beregnet ved hjelp av vindtrykkverdier fra CFD-simuleringene utført i DesignBuilder CFD-modul. Vegg 1 er plassert nordvendt, Vegg 2 er østvendt, Vegg 3 er sørvendt og Vegg 4 er vestvendt. En grafisk fremstilling av vindretninger i forhold til veggplasseringer er illustrert i Figur 27. De fleste vindtrykkoeffisienter er 5% til 15% høyere for Case 2 – med moderat skjerming enn for Case 1 – eksponert. Når vindstrømmen kommer fra nordøst (45°) er det motsatt og vindtrykkoeffisientene blir betydelig lavere for Case 2 enn for Case 1. For de fleste veggene er vindtrykkoeffisientene positive for vindretning ortogonalt og delvis ortogonalt på veggene, mens for andre vindretninger er de negative. Det eneste unntaket oppstår for Case 2 på vegg 1 når vinden kommer fra nordøst (45°).

Tabell 7 Vindtrykkoeffisienter C_p for testhuset i Case 1 – ingen skjerming.

Vindretning	Vegg 1	Vegg 2	Vegg 3	Vegg 4
0° (fra nord)	0,67	-0,16	-0,13	-0,16
45°	0,37	0,49	-0,38	-0,51
90°	-0,76	0,76	-0,76	-0,55
135°	-0,32	0,54	0,47	-0,48
180°	-0,11	-0,15	0,70	-0,15
225°	-0,32	-0,46	0,43	0,52
270°	-0,66	-0,40	-0,66	0,92
315°	0,46	-0,45	-0,30	0,60

Tabell 8 Vindtrykkoeffisienter C_p for testhuset i Case 2 – moderat skjerming.

Vindretning	Vegg 1	Vegg 2	Vegg 3	Vegg 4
0° (fra nord)	0,74	-0,21	-0,13	-0,19
45°	-0,16	0,51	-0,28	-0,32
90°	-0,89	0,83	-0,83	-0,57
135°	-0,39	0,60	0,50	-0,53
180°	-0,17	-0,08	0,77	-0,18
225°	-0,26	-0,37	0,52	0,59
270°	-0,57	-0,43	-0,67	1,02
315°	0,58	-0,49	-0,35	0,62

4.3 Resultater fra ett års simulering

I tillegg til å beregne og simulere luftinfiltrasjon på de dagene målingene ble gjennomført, ble det utført flere energisimuleringer med ett års varighet. Ut ifra disse simuleringene kunne det hentes verdier for energien som må brukes til å rekompensere for varmetap grunnet infiltrasjon. Resultatene fra simuleringer i Oslo og Bergen, gitt i kWh/m²/år, presenteres i Tabell 9:

Tabell 9 Energibehov til å rekompensere varmetap grunnet infiltrasjon gitt i kWh/m²/år.

Beregningsmetode	Oslo	Bergen
NS 3031	48,4	46,7
DB Scheduled	57,2	50,4
DB Calculated – Case 1	62,6	69,3
DB Calculated – Case 2	58,6	75,0

Ut ifra tabellen ser man at ved å bruke de vinduavhengige metodene, NS 3031 og DB Scheduled, blir energitapet høyere i Oslo enn i Bergen. NS 3031 beregner generelt det laveste energitapet ut ifra alle de aktuelle metodene.

Når man benytter den vindavhengige metoden DB Calculated blir energitapet høyere i Bergen enn i Oslo. Forskjellen mellom de to byene blir mindre når man benytter vindtrykkoeffisienter beregnet for Case 1 – eksponert.

5 Diskusjon

5.1 Diskusjon av resultater fra målinger

Under arbeidet med denne oppgaven ble flere målinger foretatt, men for å sikre uniforme og sammenlignbare resultater ble kun målingene der vindretningen var fra nord eller delvis fra nord benyttet. Denne vindretningen ble valgt på grunn av nordøstplasseringen av skjermingen i Case 2.

Under feltmålingene av luftlekkasjene i Case 2 ble det satt opp en mobil værstasjon, NRG Symphonie, mellom kontoret og kornhengeren. Det målte været kunne ha gitt et godt innblikk i værforholdene mellom de to konstruksjonene, samt nord- og østfasaden av kontoret. Disse resultatene kunne også blitt sammenlignet med været målt på FAGKLIM værstasjonen. Imidlertid førte kombinasjonen av regn, fuktig luft og kuldegrader til sporadisk isdannelse på måleinstrumentene, og dette gjorde resultatene ubrukelige.

5.1.1 CO₂-målingenes pålitelighet

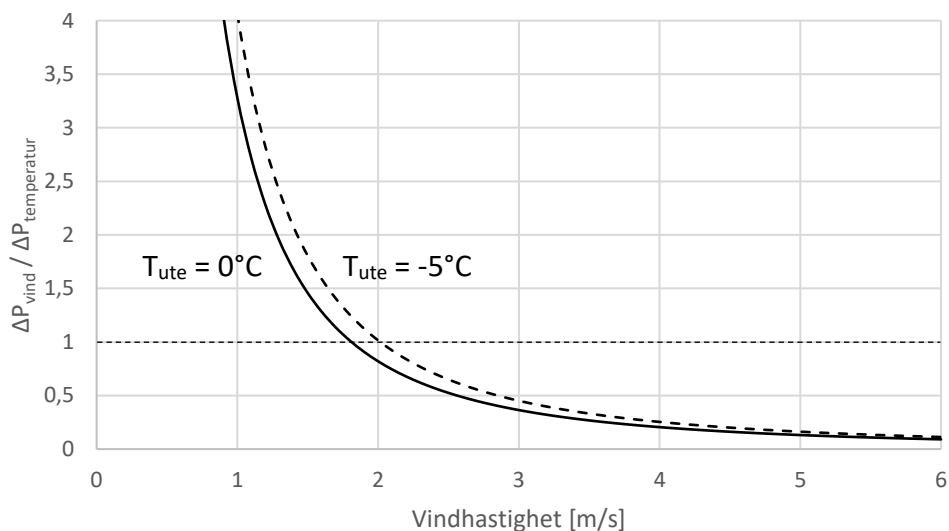
Fra hver måling ble en periode på tre timer valgt ut. I og med at værforholdene, samt infiltrasjonsraten varierer med tiden har lengden av målingene påvirkning på den endelige kalkulerte infiltrasjonene. Den relativt korte perioden gjenspeiler godt den målte infiltrasjonsraten. Under målingen av CO₂-konsentrasjonsendringer ble det benyttet to CO₂-målere. Infiltrasjonsraten kan variere internt i sonen med noen få prosent avhengig av fordelingen av utettheter og sprekker i klimaskjermen. Ved å bruke to målere skapes det en bedre tilnærming for den generelle luftinfiltrasjonen på kontoret. Begge CO₂-målere benyttet i denne oppgaven var relativt nye. For å kontrollere om de var riktig kalibrert ble det foretatt en forenklet kontroll. Først ble CO₂-konsentrasjonen i uteluften målt og sammenlignet med de veiledende verdiene i ASTM E741. I tillegg ble begge målere validert i henhold til hverandre i forskjellige CO₂-konsentrasjoner. I begge testene var de målte verdiene innenfor feilmarginen for ROTRONIC CP11 vist i Tabell 4. Dette tyder på at målingene gjennomført med CO₂-målere ga et godt grunnlag for videre beregning av infiltrasjonsraten.

Ved beregning av luftomsetninger skapt av infiltrasjon ut ifra de målte verdiene, ble det valgt at kurven funnet ved lineær regresjon skulle gå gjennom origo, da dette har en fysisk betydning. Lineær regresjon ble anvendt på logaritmiske verdier av de normaliserte resultatene. Når man normaliserer de målte konsentrasjonene av CO₂ vil alle resultatene transformeres til verdier mellom 1 og 0, der 1 tilsvarer den høyeste målte konsentrasjonen og 0 tilsvarer atmosfærisk konsentrasjon. I tidsperioden brukt til lineær regresjon hadde startverdien den høyeste konsentrasjon og dette innebærer at $C_N(t=0) = 1,0$ og $\ln(C_N(t=0)) = 0,0$. Dette betyr at ved å føre kurven, funnet ved lineær regresjon, gjennom origo vil den beregnede startkonsentrasjonen samsvare med den målte verdien. Dette valget hadde en vesentlig påvirkning på verdien av den målte infiltrasjonsraten. Alle kurver funnet ved lineær regresjon hadde en høy verdi for R², noe som betyr at den beregnede endringen i sporgasskonsentrasjonen beskriver de målte verdiene med veldig lav grad av usikkerhet. Dette kan også være knyttet til loggingsintervallene benyttet under målingen. CP11 registrerte CO₂-nivåene hvert sekund, og logget gjennomsnittsverdien av 15 sekunders intervaller, noe som kan føre til utjevning av målingene.

5.1.2 Vurdering av resultatene med hensyn til været

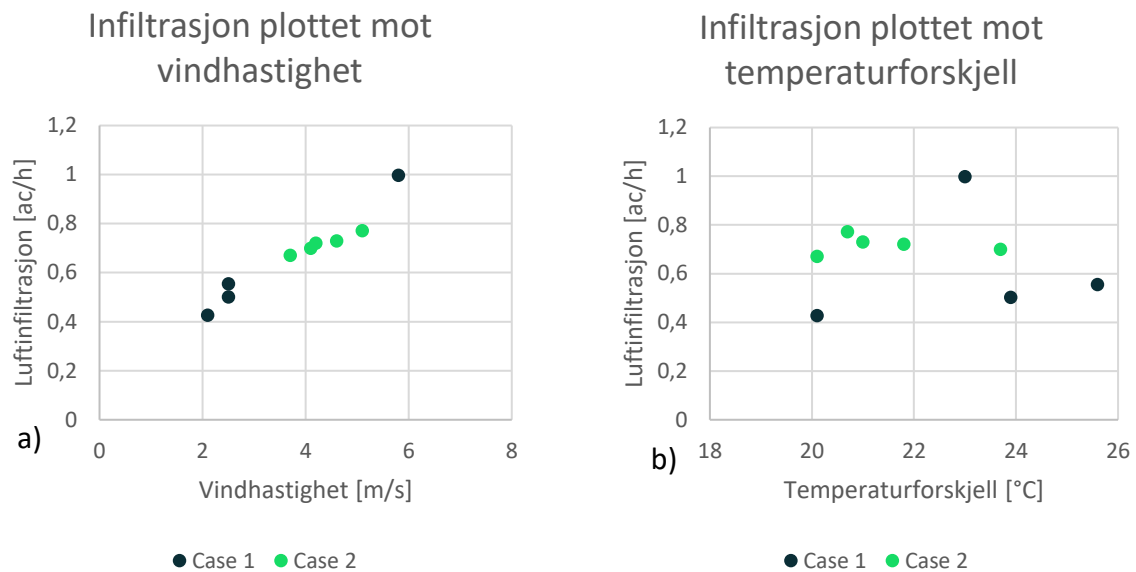
Testhuset er ikke utstyrt med noen form for mekanisk ventilasjon og det er dermed vindtrykk og temperaturforskjeller som spilte størst rolle på styrken av luftinfiltrasjon. Vindstyrken under målingene har variert mellom 2,1 m/s og 5,8 m/s. Utetemperaturen har holdt seg mellom -0,1°C og -5,6°C, mens innetemperaturen lå stabilt på 20°C. Generelt kan man si at variasjonen i vindstyrken var relativt høy, mens temperaturforskjellen mellom inn- og utsiden av bygningen har holdt seg relativt stabil. Shaw (1981) beskriver en tommelfingerregel - når vindhastigheten er høyere enn 3,5 m/s er vind den dominerende drivkraften for infiltrasjon, mens når temperaturforskjellen er større enn 20°C er skorsteineffekten den dominerende drivkraften. Dette kan være en indikator på at både vind- og temperaturforholdene hadde betydelig påvirkning på luftinfiltrasjon under målingene.

Ved å ta utgangspunkt i formel 4 og 5 for trykkforskjeller skapt av vind og temperatur, kan man også sammenligne hvilken av faktorene som skaper høyest trykkforskjell. Figur 42 presenterer trykkforskjell over klimaskjermen i testhuset skapt av vind delt på trykkforskjell skapt av skorsteineffekt plottet mot varierende vindhastighet. Figuren viser at når vindhastigheten er over 2 m/s vil vindtrykket være den dominerende drivkraften for infiltrasjonen.



Figur 42: Sammenligning av trykkforskjeller skapt av vind og temperaturforskjeller.

For å bekrefte denne teorien ble de målte infiltrasjonsratene plottet mot deres respektive vind- og temperaturforhold. Resultatene vises i Figur 43, der Y-aksen representerer luftskifte skapt av infiltrasjon, mens X-aksen oppgir vindhastigheten i den første grafen, og temperaturforskjellen mellom inn- og utsiden av bygningen i den andre. Et punkt tilsvarende en måling, der de svarte punktene tilhører Case 1 og grønne Case 2.

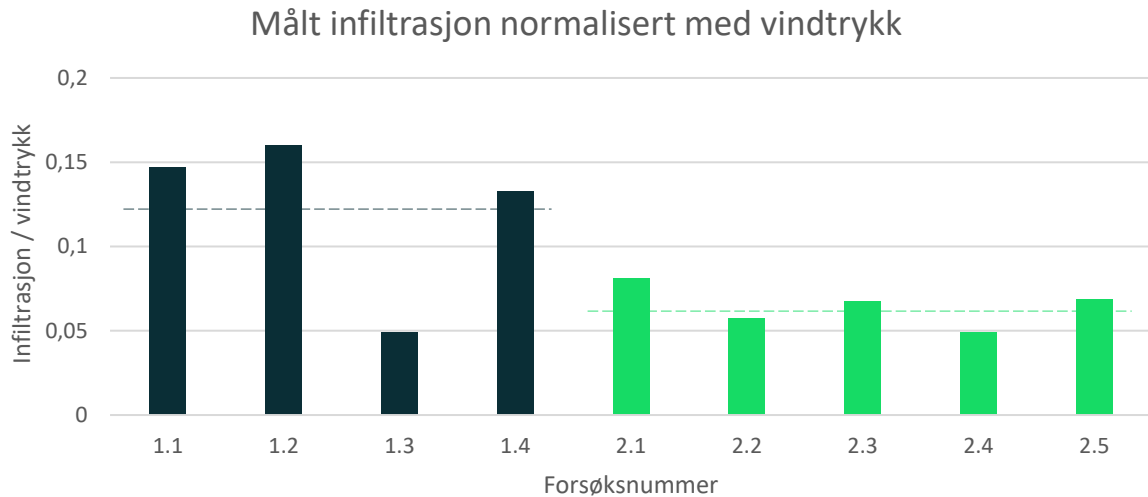


Figur 43: Målt infiltrasjon plottet mot a) vindhastighet målt ved 10 meters høyde, og b) temperaturforskjell.

I graf a) ser man at de målte verdiene for luftinfiltrasjonene har et tilnærmet positivt lineært forhold med vindhastigheten. Infiltrasjonen plottet mot utetemperatur b) viser derimot intet klart mønster. I og med at temperaturforskjellen har holdt seg på over 20°C vil skorsteineffekten ha stor påvirkning på infiltrasjonen, men den lave variasjonen i temperaturen fører til at trykkforskjellen holder seg på et stabilt nivå. Figur 43 kan indikere at infiltrasjonen på kontoret var mest påvirket av variasjonen i vindforholdene.

5.1.3 Vindskjerming i Case 1 og Case 2

Vindhastigheter oppgitt i Tabell 6 ble målt i ti meters høyde. Grunnet friksjonseffekten vil både vindhastigheten og vindtrykket ved høyden til testhuset være vesentlig lavere. I tillegg vil skjermingen i Case 2 ha påvirkning på vindtrykket på fasaden når vindstrømmen treffer kornhengeren før den når testhuset. I og med den målte vindretningen for alle forsøk kommer fra nord og nordøst vil vindtrykket på fasaden være påvirket av skjermingen i alle forsøk i Case 2. Figur 44 presenterer målt infiltrasjonsrate normalisert med vindtrykk beregnet ved hjelp av formel 4. Dette gjør at infiltrasjonsraten blir uavhengig av vindtrykk. Her ser man at de beregnede verdiene for infiltrasjon i Case 1 er betydelig høyere enn i Case 2. Unntaket er måling 1.3, som er lavere enn de andre målingene i Case 1. En av grunnene for dette kan være vindhastigheten, som var vesentlig høyere på den dagen enn under de andre forsøkene fra Case 1.



Figur 44: Infiltrasjon for de forskjellige forsøkene normalisert med respektiv vindtrykk.

En fysisk tolkning av Figur 44 kan tyde på at infiltrasjon på kontoret i Case 1 uten skjerming er generelt høyere enn i Case 2 med moderat skjerming uavhengig av vindtrykket. Dette er et tegn på at endringer i skjermingsforholdene hadde en påvirkning på luftinfiltrasjonen i testhuset da vindretningen var fra nord og nord-øst.

5.2 Diskusjon av resultater fra beregninger og simuleringer

5.2.1 NS 3031

Resultatene for infiltrasjon beregnet i henhold til NS 3031 er verken avhengig av varierende vindforhold eller skorsteineffekt. Dette betyr at selv om været har variert for de forskjellige forsøksdagene blir infiltrasjonen lik innenfor hver case. Siden skjermingsforholdene var forskjellige for Case 1 og 2, måtte skjermingskoeffisienten endres, noe som førte til to forskjellige verdier for infiltrasjon.

I denne oppgaven ble det benyttet lekkasjetall n_{50} basert på resultater fra en tidligere trykksettingsmåling. I mange tilfeller kan det imidlertid være vanskelig å foreta slike målinger. I NS 3031 finnes det noen få anbefalte verdier basert på byggetekniske krav fra tidligere år, men det finnes ingen andre databaser som kan brukes for beregning av infiltrasjon av eldre bygninger. En statistisk analyse av infiltrasjon i flere bygninger kunne ha blitt brukt til å skape en slik database.

5.2.2 DesignBuilder Scheduled

Som i forrige metode, beregner DesignBuilder luftinfiltrasjon uavhengig av vindforholdene ved testhuset. Resultatene for de forskjellige forsøksdagene varierer med $\pm 2\%$. Dette skyldes måten DesignBuilder prosesserer inputverdien til outputverdi i forhold til den varierende utetemperaturen hentet fra værdata for Søråsjordet. Siden inputverdi for infiltrasjon ble oppgitt som lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell benyttet programmet formel 16 for å omskrive verdien til konstant infiltrasjonsrate. De beregnede verdiene for Case 1 og 2 er nokså like, og dette skyldes at programmet ikke klarte å tolke endringen i skjermingsforholdene i CAD-modellen. Terrengekoeffisienten for begge Casene ble satt til 0,03 – "*Medium sheltered site & Heated zone with multiple facades exposed*". Mens den korrekte koeffisienten for Case 1 burde være 0,05 - "*Open site & Heated zone with multiple facades exposed*" (Vedlegg A - Tabell 11). Den nye verdien kan lett kalkuleres for hånd uten DesignBuilder ved å bruke formel 16, 20, og 1 for beregning av luftmassetettheten (26 og 27):

$$inf_{input} = 2 * n_{50} * \varepsilon * ei = 2 * 8,17 \frac{ac}{h} * 1 * 0,05 = 0,82 \frac{ac}{h} \quad 26$$

$$inf_{output} = inf_{input} * \frac{\rho_{uteluft}}{\rho_{inneeluft}} = 0,82 * \frac{1,30}{1,21} = 0,88 \frac{ac}{h} \quad 27$$

Dermed burde luftomsetningene skapt av infiltrasjon være 0,88 ac/h for Case 1 uten skjerming, og 0,52-0,54 ac/h for Case 2 med skjerming. Disse verdiene brukes videre i diskusjonen.

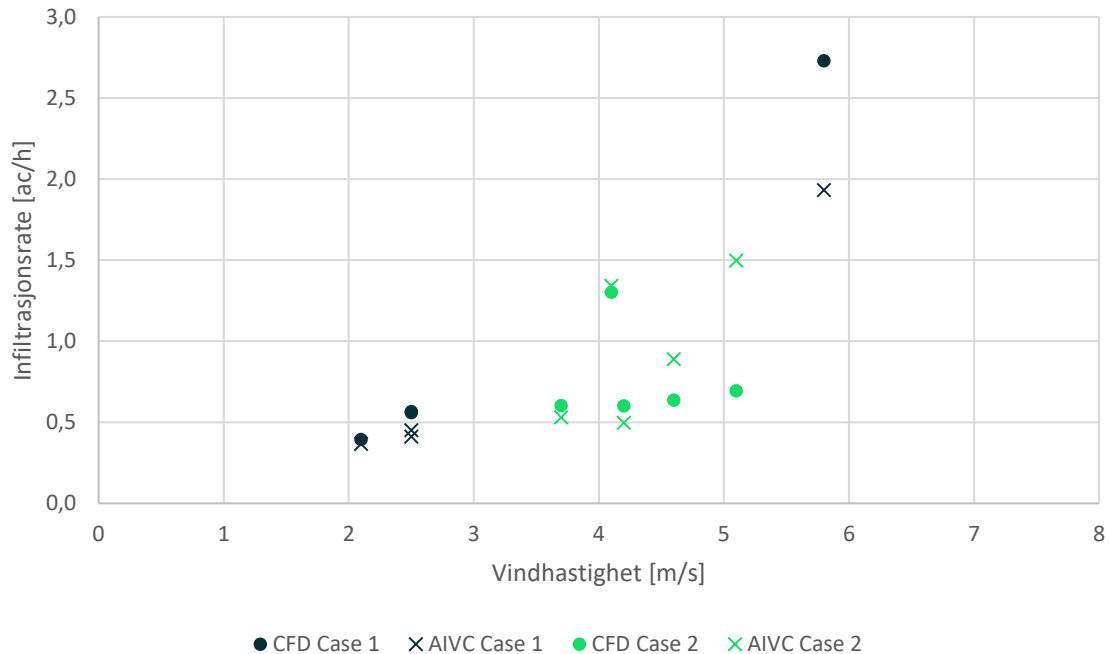
5.2.3 DesignBuilder Calculated

Ved simulering av luftinfiltrasjon i DesignBuilder Calculated ble værdata fra Søråsjordet benyttet. Dette gjorde det mulig å utføre simuleringene ved samme værforhold som var tilstede under målingene. De beregnede verdiene for infiltrasjonsraten varierer mye for de forskjellige forsøksdagene, både for DB Calculated med vindtrykkoeffisienter fra AIVC databaser og CFD-simuleringer. Dette kan forklares ved måten programmet beregner luftmassestrømning gjennom bygningselementer basert på vindtrykkoeffisienter samt strømningskoeffisienter og -eksponenter. Avhengig av vindforholdene under simuleringen vil luftmassestrømningen, samt infiltrasjonsraten variere.

For verdier kalkulert med vindtrykkoeffisienter fra CFD-simuleringer er det to forsøksdager som skiller seg ut; forsøk 1.3 og 2.5. Begge dagene har betydelig høyere verdier for luftomsetninger skapt av infiltrasjon sammenlignet med de resterende forsøkene. Under begge dagene var vindretningen konsentrert fra nord, og dette betyr at programmet måtte bruke vindtrykkoeffisienter for 0° ved beregning av luftmassestrømning gjennom bygningselementene. Nordfasaden har to ganger større areal enn øst- og vestfasaden for kontoret, i tillegg til at vindtrykkoeffisienten for 0° for nordveggen er høyere enn for 45° og 315° (Tabell 7 og Tabell 8). Dette i kombinasjon med høy vindhastighet kan være en mulig forklaring på de høye luftomsetningene på kontoret. Her er det også sannsynlig at det har oppstått en simuleringsfeil i selve programmet.

Figur 45 viser luftskifte skapt av infiltrasjon beregnet ved hjelp av DesignBuilder Calculated-metoden plottet mot respektive vindtrykk målt ved 10 meters høyde. Kryss representerer resultater kalkulert med standardvindtrykkoeffisienter i DB, mens prikker benytter vindtrykkoeffisienter beregnet ved hjelp av CFD-simuleringer. Resultatene presentert i grafen viser en klar trend, der luftomsetninger øker med vindhastigheten. Dette mønstret gjenspeiler også hvordan de målte verdiene plottet vindhastighet oppførte seg (Figur 43).

Resultater fra DB Calculated plottet mot vindhastighet



Figur 45: Simulert infiltrasjon plottet mot vindtrykk målt i 10 meters høyde.

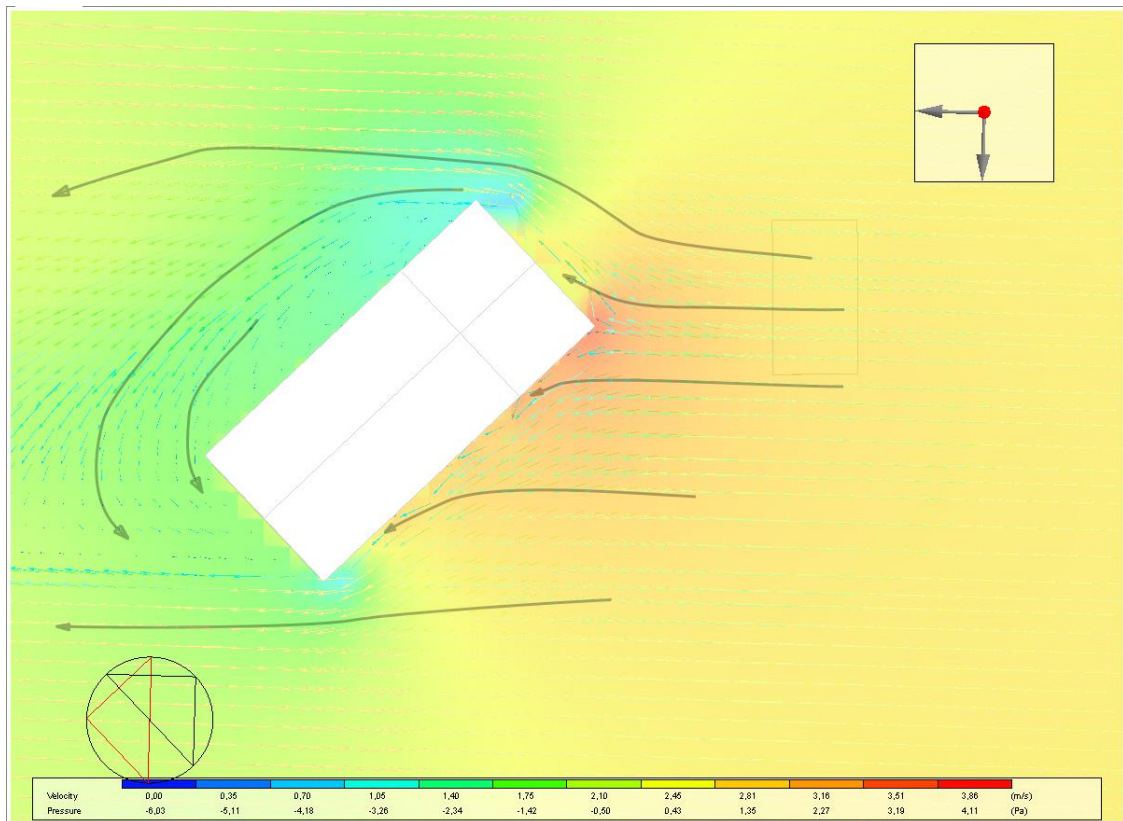
I tillegg viser Figur 45 at verdiene for infiltrasjonsraten beregnet med standardvindtrykkoeffisienter fra AIVC databaser gir lavere resultater for Case 1 og høyere for Case 2 i forhold til de beregnet med vindtrykkoeffisienter fra CFD-simuleringer. I motsetning til vindtrykkoeffisientene fra AIVC, reflekterer vindtrykkoeffisientene fra CFD-simuleringer endringen i skjermingsforholdene mellom Case 1 og 2. Dette betyr at for Case 1 er testhuset eksponert for begge vindtrykkoeffisienter, og siden koeffisientene fra CFD-simuleringene er høyere, blir infiltrasjonen følgelig høyere. For Case 2 reflekterer vindtrykkoeffisienter fra CFD-simuleringene skjermingsforholdene, dermed blir infiltrasjonen lavere.

5.2.4 Vindtrykkoeffisienter og CFD-simuleringer

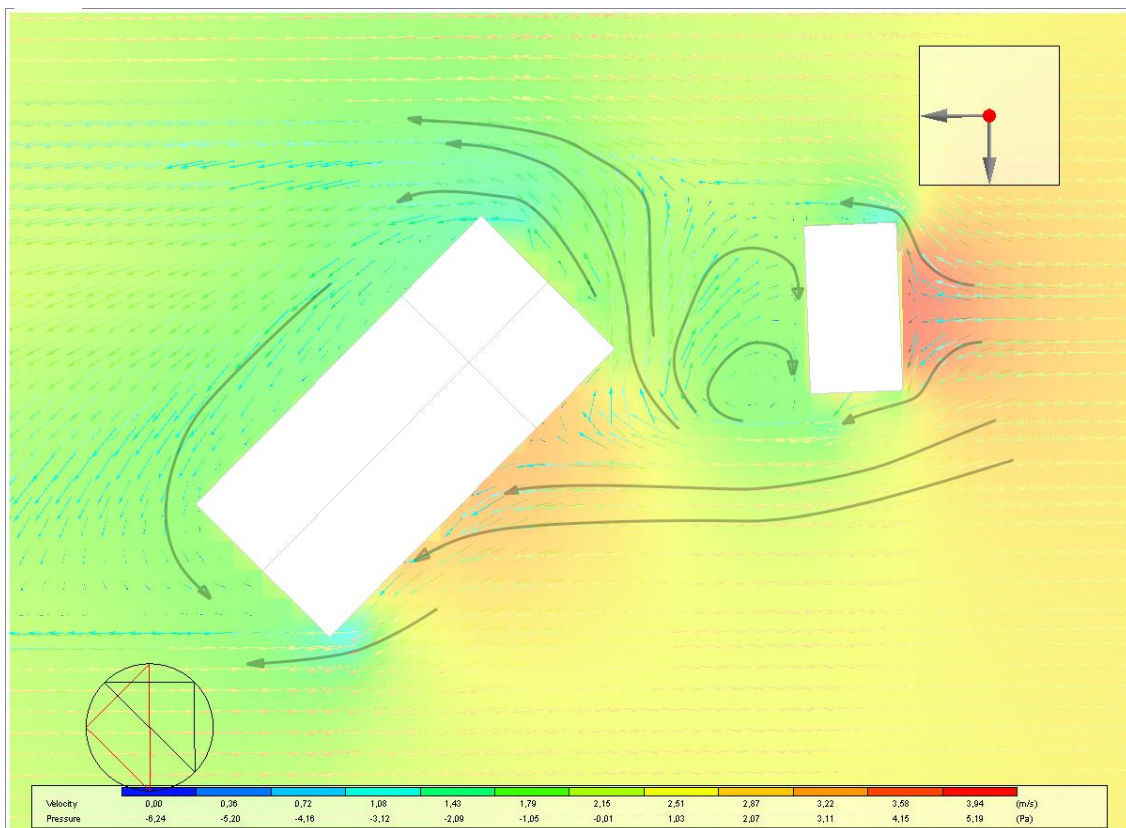
Vindtrykkoeffisientene beregnet for Case 1 (Tabell 7) er lavere enn for Case 2 (Tabell 8), og forskjellen holder seg mellom 5% til 15%. I utgangspunktet burde vindtrykkoeffisientene i begge casene for vindretninger upåvirket av skjermingen være nokså like.

Vindtrykkoeffisienter brukt i eurokoden for beregning av vindlaster NS-EN 1991-1-4 (Standard Norge 2005) viser en trend der fasader med et stort høyde/bredde-forhold har høyere verdi for vindtrykkoeffisienter på både lo- og lesiden. Hvis man gjør en forenkling og antar at testhuset sammen med kornhengeren (Case 2) skaper en bredere overflate enn testhuset alene (Case 1), burde vindtrykkoeffisientene være lavere i Case 2 enn i Case 1. I og med at det er et mellomrom mellom de to konstruksjonene vil imidlertid fordelingen av vindtrykket være avhengig av flere variabler. Et scenario kan være at vindstrømmen blir presset gjennom mellomrommet med økt hastighet, samtidig som man får mer turbulent vindstrøm. Dette kan føre til svært kompliserte vindmønstre. Det er vanskelig å si noe sikkert om vindtrykkoeffisientene i Case 1 burde være høyere eller ikke, sammenlignet med Case 2. Den lille forskjellen som har oppstått i resultatene kan skyldes simuleringsfeil.

For vindtrykkoeffisienter gitt med intervaller på 45° , for en fasade i en rettvinklet bygning, vil trykket ha den største positive verdien når vindstrømmen kommer ortogonalt på fasaden. Vindtrykk skal også være positivt for vindretninger med en vinkel på 45° eller 315° i forhold til normalen til fasaden. Alle andre vindretninger vil resultere i negative vindtrykkoeffisienter. Dette stemmer godt overens med de beregnede vindtrykkoeffisientene både for Case 1 (Tabell 7) og Case 2 (Tabell 8). Det eneste unntaket oppstår for Case 2 når vindstrømmen kommer fra nordøst med vinkel på 45° . Figur 46 og Figur 47 viser et utsnitt fra CFD-simuleringen, der testhuset vises ovenfra. De gule og røde områdene representerer positivt trykk, mens blå og grønne områder er sug. Den svarte pilen viser nord mens den røde pilen angir vindretning.



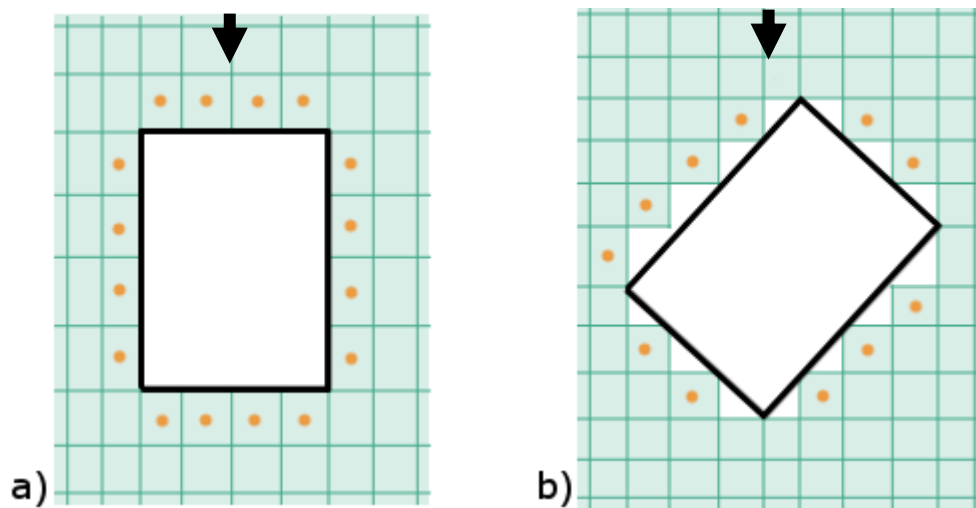
Figur 46: Utsnitt fra resultatene fra CFD-simuleringen for Case 1 med vind fra nordøst.



Figur 47: Utsnitt fra resultatene fra CFD-simuleringen for Case 2 med vind fra nordøst.

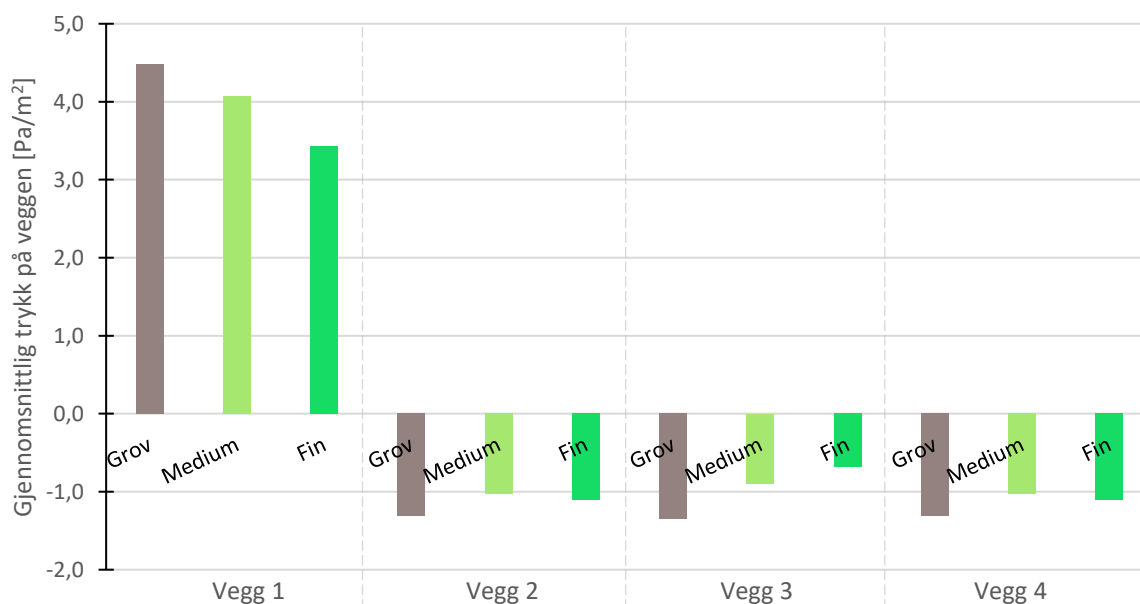
Uten skjerming skaper vindstrømmen trykk på den nord- og østvendte veggen, og sug på den sør- og vestvendte veggen (Figur 46). Når vindstrømmen treffer testhuset på losiden oppstår det trykk. Deretter blir vindstrømmen separert fra veggene ved kantene og det oppstår et separasjonsområde som fører til sug nærmest fasaden på losiden. Når skjermingen plasseres nordøst for kontoret kolliderer vindstrømmen med kornhengen før den treffer testhuset (Figur 47). Dette fører til at vinden blir bremsset opp, separert fra veggene av kornhengeren og det oppstår et turbulensområde mellom kontoret og kornhengeren. Det oppstår fortsatt trykk på den østvendte veggen og sug på den sør- og vestvendte veggen av testhuset, men det nye vindmønsteret skaper nå et sug på nordveggen i stedet for trykk.

Utføring av CFD-simuleringene krever en høy grad av ekspertise innen både fluiddynamikk og numeriske beregningsmetoder. Kompleksiteten av simuleringprosessen fører til at resultatene lett blir påvirket av gridstørrelsen og -utformingen, domenestørrelsen eller valg av turbulensmodell. Under beregningen av vindtrykket på fasaden var det flere momenter der det kunne ha oppstått potensielle feilkilder. Ved beregning av vindtrykkoeffisienter ble det utført åtte simuleringer med forskjellige vindretninger for hver Case. Som tidligere nevnt er det i DesignBuilder vindretningen som bestemmer hovedaksene til gridet, mens CAD-modellen blir rotert respektivt. Et av problemene med FVM i DesignBuilder er at volumelementer er begrenset til form av rettvinklede prizmer. Dette medfører at ved simulering av vindretning fra NØ, SØ, SV og NV blir veggene til testhuset vinklet med 45° i forhold til hovedaksene til gridet og volumelementene. Konsekvensen av dette er at senteret av volumelementene, der vindtrykket blir beregnet, blir plassert lengre unna fasaden og at det blir større avstand mellom disse elementene. Figur 48a) viser utformingen av gridet i forhold til bygningen for vindretning fra N, Ø, S og V, mens Figur 48b) for vindretningen fra NØ, SØ, SV og NV der mellomrommet oppstår. Celler med prikker representerer aktuelle verdier brukt til beregning av vindtrykkoeffisienter.



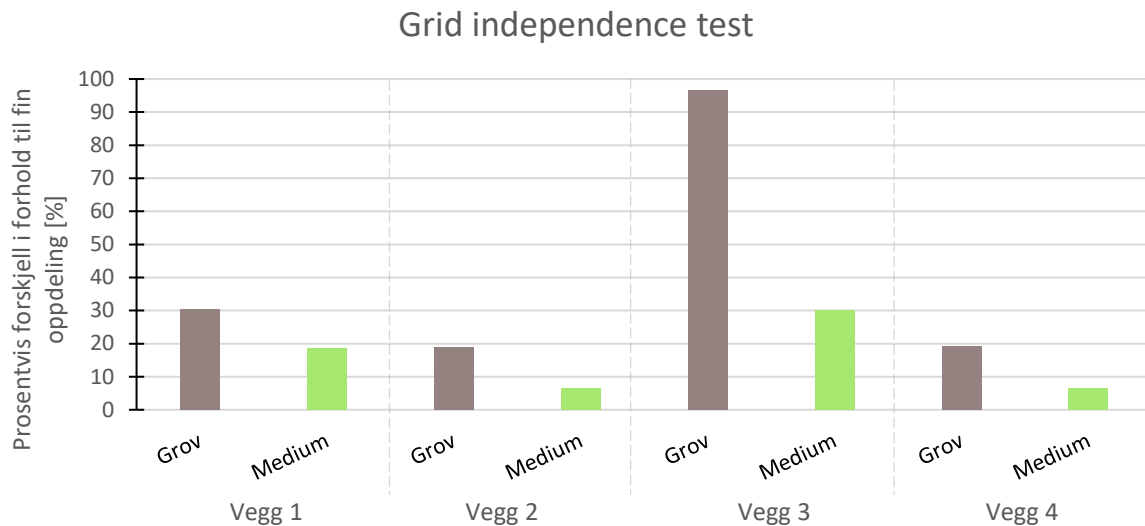
Figur 48: Utforming av griddet avhengig av orienteringen til objektene.

Størrelsen til griddet og volumelementene kan også ha påvirkning på resultatene fra CFD-simuleringer. Derfor ble det gjennomført en forenklet "grid independence test", der tre typer gridoppdelinger ble sammenlignet. Figur 49 viser vindtrykk på fasaden beregnet ved hjelp av de forskjellige gridoppdelinger, for alle veggene av testhuset.



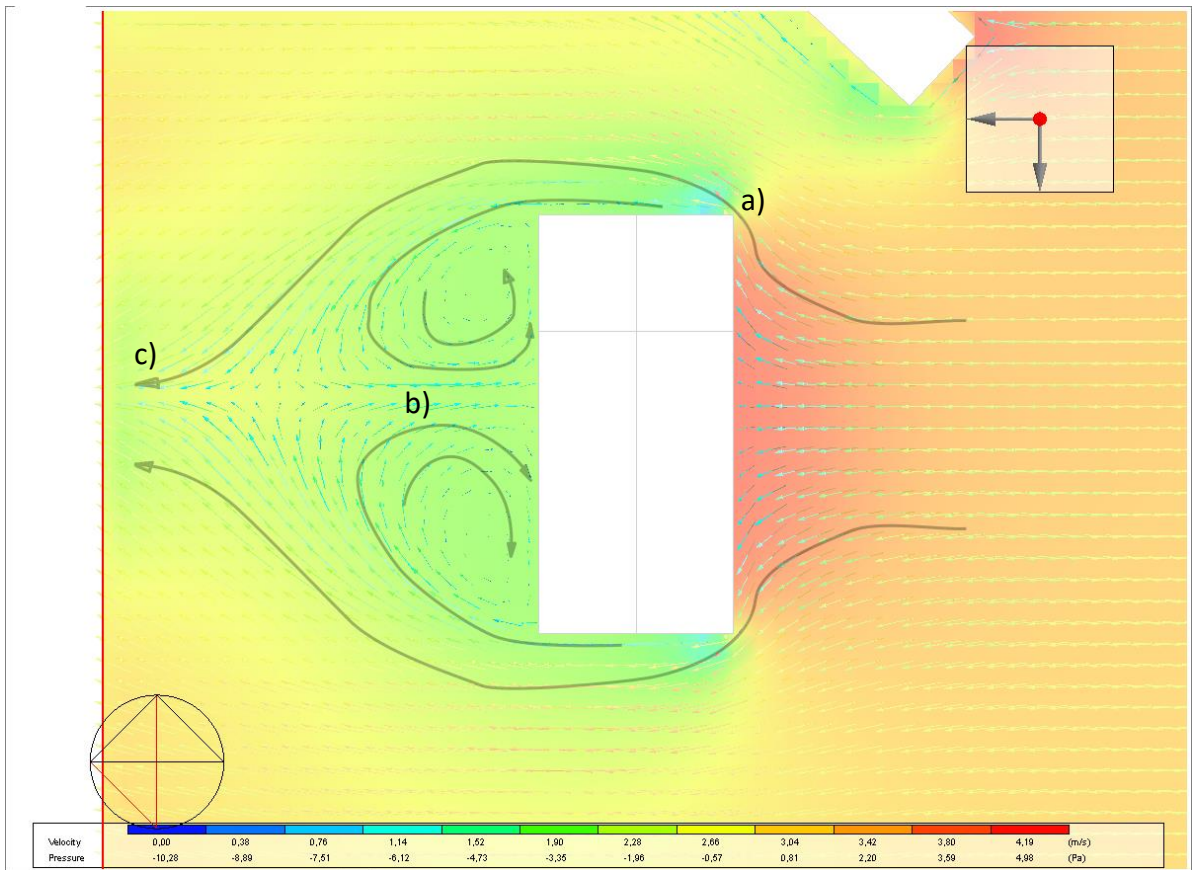
Figur 49: Grid independence test.

Ved å beregne prosentvis forskjell mellom grov og medium oppdeling i forhold til den fine oppdelingen (Figur 50), ser man at resultatene for beregnet trykkverdi kan variere med opptil 95%. Differansen mellom medium og fin oppdeling viser lav variasjon. Imidlertid var simuleringstiden for medium oppdeling vesentlig lavere. Det ble derfor besluttet å benytte medium oppdeling for de endelige simuleringene.



Figur 50: Grid independence test, prosentvis forskjell

En annen faktor som kunne påvirke CFD-simuleringene er størrelsen til domenet i forhold til det simulerte resirkulasjonsområdet på lesiden av bygningen (Figur 51b). For at resultatene skal være pålitelige må det være tilstrekkelig avstand mellom der vinden blir separert fra bygningen (Figur 51a) til det stedet hvor vindstrømmen fortsetter som i det uforstyrrede området (Figur 51c). For kort avstand kan føre til urealistisk oppførsel av vindstrømmen og dermed skape feil trykkverdier ved fasaden på lesiden. Ved utføring av CFD-simuleringer var det vindretning fra øst (90°) som var mest utsatt for dette problemet. Figur 51 viser et utsnitt fra denne simuleringen sett ovenfra, der den røde linja på venstre side markerer slutten av domenet. Her ser man at vindstrømmen får tilstrekkelig stort område for å gi realistisk avbildning av virkeligheten.



Figur 51: Resirkulasjonsområde fra CFD-simuleringen for Case 2, vindretning 90°.

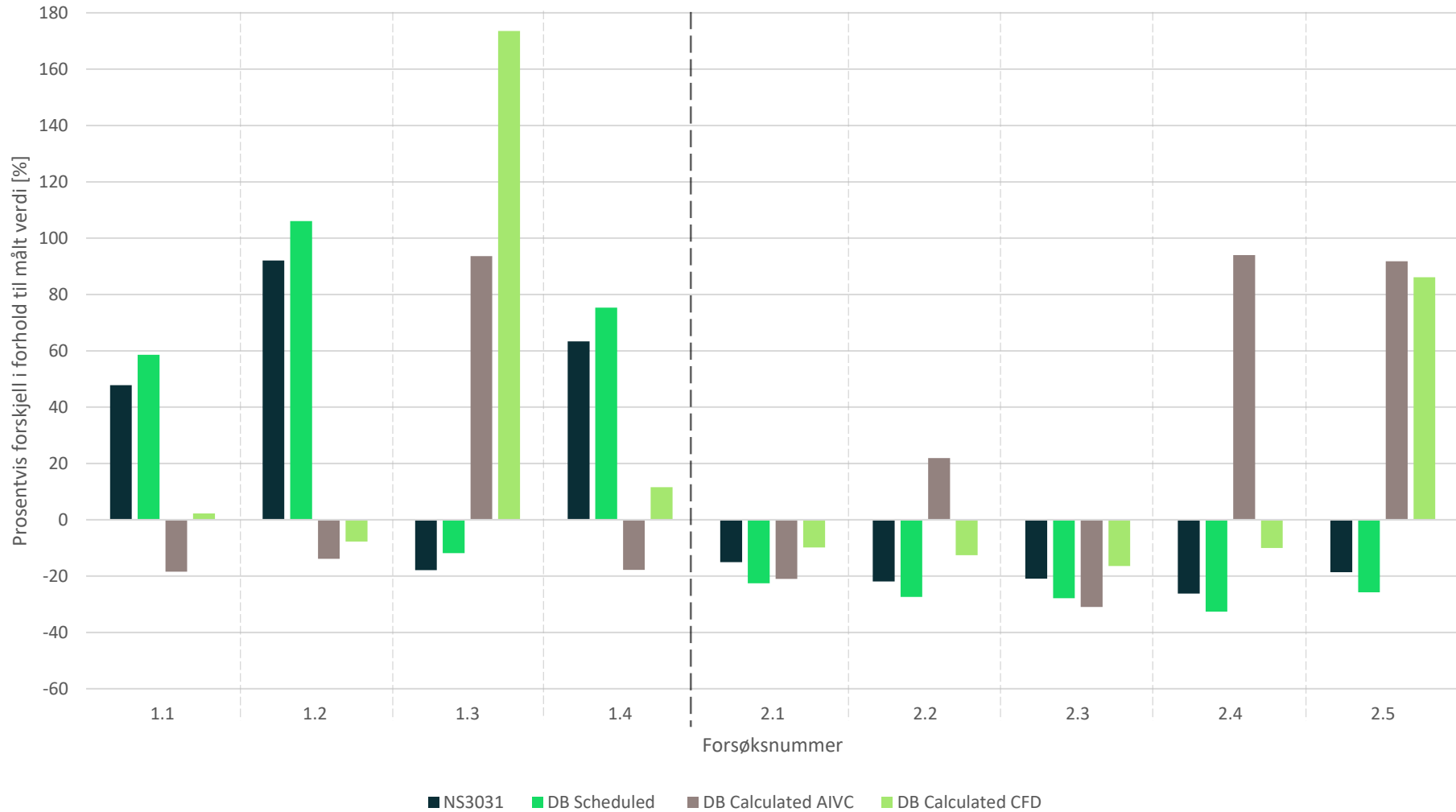
5.3 Sammenstilling av resultatene

Figur 52 presenterer resultater for luftinfiltrasjonsrater beregnet i henhold til NS 3031, og simulert ved hjelp av DB Scheduled-metoden og DB Calculated-metoden med vindtrykkoeffisienter både fra AIVC databaser og beregnet med CFD-simuleringer. Hver av resultatene presenteres som prosentvis forskjell til de målte verdiene. Metoden fra NS 3031 overvurderer luftomsetninger skapt av infiltrasjon i Case 1 med 50 – 90%, med unntak av forsøk 1.3. For Case 2 er infiltrasjonsraten nærmere den målte verdien, og resultatene undervurderer luftomsetninger med omtrent 20%. Verdiene beregnet i DB Scheduled viser samme trend som NS 3031. Verdiene for Case 1 er i Figur 52 endret til de korrekte luftomsetningene kalkulert i kapittel 5.2.2. For Case 1 ble infiltrasjonsraten overvurdert med omtrent 60-105%, mens den for Case 2 ble undervurdert med 25-35%.

Resultatene beregnet med infiltrasjonsmodellen satt på Calculated gir de beste estimatene for sju av ni forsøk. Verdiene beregnet med vindtrykkoeffisienter fra CFD-simuleringer estimerer infiltrasjonsratene med kun 2-16% feilmargin. Resultater for infiltrasjonsrater med standardvindtrykkoeffisienter fra AIVC-databaser er noen prosent dårligere enn de fra CFD-simuleringer, men gir fortsatt en god tilnærming med omtrent 20% avvik for seks av ni forsøk. De to tilfellene hvor NS 3031 og DB Scheduled gir et bedre estimat enn DB Calculated CFD er forsøk 1.3 og 2.5. Her blir infiltrasjonsraten vesentlig overestimert av Calculated-metoden, mens NS 3031 og DB Calculated gir et estimat med bare 20% avvik fra målingene. Begge dagene var utsatt for svært høye vindhastigheter, konsentrert fra nord.

Da antall forsøk er for få til å vise en statistisk trend, er det vanskelig å trekke en konklusjon som omfatter alle de benyttede modellene. De beregnede estimatene varierer med forskjellige vindretninger og -styrker og trenger ytterligere undersøkelser for å verifiseres.

Sammenstilling av resultater fra beregning og simulering av luftinfiltrasjon



Figur 52: Sammenligning av resultater fra beregning og simulering av luftinfiltrasjon.

5.4 Diskusjon av energitapet grunnet infiltrasjon

Resultatene fra energisimuleringer for et helt år viser forskjellen mellom de vindavhengige og -uavhengige infiltrasjonsmodellene. Her ble værdata for Oslo og Bergen benyttet siden Oslo har kaldere gjennomsnittstemperatur, mens Bergen er utsatt for høyere vindhastigheter.

Ved beregning av energitap grunnet infiltrasjon i henhold til NS 3031 var den konstante infiltrasjonsraten identisk for begge byene. For øvrig beregnes energitapet basert på hvor mye energi som skal til for å rekompensere for varmetapet i luften transportert med infiltrasjon. Med hensyn til at Oslo har et kaldere klima blir testhuset utsatt for et høyere energitap. Samme forklaring kan brukes for DB Scheduled som også beregner infiltrasjon uavhengig av vindforholdene.

For den vindavhengige metoden (DB Calculated) for beregning av infiltrasjonsrate var energitapet i Bergen høyere enn i Oslo. Dette kan tyde på at det var vindforhold, og ikke temperatur, som var den dominerende drivkraften for energitapet i denne modellen. I følge klimadataene benyttet for Oslo, er byen hovedsakelig utsatt for vind fra nord, som innebærer at skjermingen i Case 2 har vesentlig effekt på infiltrasjonen og gir lavere energitap. Bergen er derimot mest utsatt for vind fra sør, noe som gjør at skjermingen i Case 2 har mindre betydelig effekt. I tillegg er vindtrykkoeffisientene i Case 2 høyere enn i Case 1, og følgelig blir infiltrasjonsraten samt energitapet høyere.

6 Konklusjon

Metoden for beregning av infiltrasjon fra NS 3031 tar verken hensyn til vindforholdene eller skorsteineeffekten. Sammenlignet med resultatene fra feltmålingene overestimerte den stasjonære modellen infiltrasjonsratene med 50 – 90% når testhuset var eksponert, og undervurderte infiltrasjonen med omtrent 20% når testhuset var moderat skjermet fra nord. Metoden i DB Scheduled beregnet også konstant infiltrasjonsrate, men gav et dårligere estimat enn NS 3031. Infiltrasjonsraten beregnet med de øvrige metodene varierte med vindforholdene. Luftinfiltrasjon kalkulert med DB Calculated med vindtrykkoeffisienter hentet fra CFD-simuleringer ga de beste estimatene, med kun 2-16% avvik for sju av ni forsøk, mens de to resterende forsøkene ble sterkt overestimert. Alle disse estimatene varierer med forskjellige vindretninger og -styrker og trenger ytterligere undersøkelser for å verifiseres.

En vurdering av den målte infiltrasjonsraten i kombinasjon med værdata indikerer at luftlekkasjene på testhuset var mest påvirket av varierende vindforhold. Endringen i skjermingen i Case 1 og 2 påvirket vindforholdene ved testhuset, som videre resulterte i en endring av infiltrasjonsraten under målingene.

Utføring av CFD-simuleringer krever en høy grad av ekspertise, samt mye tid og ressurser. CFD-modulen i DesignBuilder har mange forhåndsbestemte innstillinger, noe som gjør det lettere å gjennomføre simuleringer. Imidlertid mister man fleksibiliteten andre CFD-programmer tilbyr. Beregning av vindtrykkoeffisienter i DesignBuilder er en relativt enkel prosess som har potensiale til å gi en forbedring av resultatene ved beregning av infiltrasjonsrater.

Avhengig av hvilken beregningsmetode for infiltrasjon som benyttes, kan energitapet endre seg betydelig. Energitapet skapt av infiltrasjon beregnet i henhold til NS 3031 ble 20 – 60% lavere i forhold til verdiene beregnet med DB Calculated. Dette er en konsekvens av at NS 3031 ignorerte vindforholdene i de forskjellige byene.

7 Forslag til videre arbeid

Concentration Decay er en relativt billig og rask metode for måling av luftinfiltrasjonsrater. I forbindelse med dette studiet ble det gjennomført ni målinger. For å kunne trekke mer konkrete og sikre konklusjoner om infiltrasjonsmodellene bør man basere seg på et større datasett, som gir mulighet til å anvende statistiske analyser. Derfor anbefales det å gjennomføre flere målinger og skape et større datasett med variasjon av vindhastigheter og -retninger, og temperaturforhold.

I tillegg burde flere modeller for luftinfiltrasjon vurderes, blant annet den dynamiske formelen fra NS-EN 15242 som NS 3031 henviser til.

En av utfordringene ved studiet av effektene av skjermingsforhold på luftinfiltrasjon var plasseringen av testhuset på Søråsjordet. Instrumentene knyttet til værstasjonen på Søråsjordet logger været kontinuerlig og bør ikke forstyrres av hindringer over lengre perioder. En mulig løsning på dette er å bruke et mobilt testhus som kan flyttes til forskjellige lokasjoner med varierende klimaforhold. Dette i kombinasjon med en mobil værstasjon, som for eksempel NRG Symphonie benyttet i denne oppgaven, kan gi et bedre innblikk i infiltrasjonsrater i forskjellige skjermingsforhold.

I tillegg til effekten av skjermingsforholdene bør også påvirkning av andre mikroklimatiske effekter på luftinfiltrasjon undersøkes.

8 Referanser

- Aguado, E. & Burt, J. E. (2001). *Understanding weather and climate*. 2nd ed. utg. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- ASTM International. (2009). *E741 - 00, Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution*: ASTM Internation. 17 s.
- Claude-Alain, R. & Foradini, F. (2002). Simple and Cheap Air Change Rate Measurement Using CO2 Concentration Decays,. *International Journal of Ventilation*, 1 (1): 39-44.
- Cóstola, D. & Alucci, M. (2007). Pressure coefficient simulated by CFD for wind-driven ventilation analysis. I: *IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association 2007*, s. 999-1006.
- Cóstola, D., Blocken B. & Hensen J. L. M. (2009). Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment*: 18.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., et al. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33 (4): 319-331.
- DesignBuilder. (2009). Simulation and CFD Training Guide.
- DesignBuilder. (2017). *Natural Ventilation Modelling*. Tilgjengelig fra: https://designbuilder.co.uk/helpv5.0/#_Natural_ventilation_modelling.htm (lest 15.02.2017).
- Direktoratet for Byggkvalitet. (2016). *Byggteknisk forskrift (TEK 10) § 14-2. Krav til energieffektivitet*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggeregler/tek/3/14/14-2/> (lest 13.02.17).
- Dokka, T. H., Hauge, G., Thyholt, M., Klinski, M. & Kirkhus, A. (2009). Prosjektrapport 40: Energieffektivisering i bygninger – mye miljø for pengene! *Prosjektrapport*: SINTEF Byggforsk.
- E. J. Plate, H. Kiefer & J. Wacker. (2004). WIND AND URBAN CLIMATES. *Special Session in Honor of Dr. E. Plate*, Session 7: 13.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. (2010). *Håndbok 53 Trehus*. 9 utg.: SINTEF Byggforsk. 333 s.

- Google Maps. (2017). 02.02.2017: Google.
- Heidt, F. D. & Werner, H. (1986). Microcomputer-aided Measurement of Air Change Rates. *Energy and Buildings*, 9: 313-320.
- Hole, I. & Aurlien, T. (2013). 520.401 Lufttetting av bygninger Framgangsmåte for å oppnå lavt lekkasjetall. *Byggforskserien*: 10.
- Holøs, S. & Aurlien, T. (2014). 474.624 Luftlekkasjemåling av bygninger. Hensikt og vurdering. *Byggforskserien*: 8.
- Karlsson, F., Rohdin, P. & Persson, M.-L. (2007). Measured and predicted energy demand of a low energy building: important aspects when using Building Energy Simulation. *Building Services Engineering Research and Technology*, 28 (3): 223-235.
- Kraniotis, D., Aurlien, T. & Thiis, T. (2014). Investigating Instantaneous Wind Driven Infiltration Rates using the CO2 Concentration Decay Method. *International Journal of Ventilation*, 13 (2): 14.
- Laussmann, D. & Helm, D. (2011). *Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of air change for indoor air quality*. Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality.
- Liddament, M. W. (1996). *A Guide to Energy Efficient Ventilation: Air Infiltration and Ventilation Centre*.
- Montazeri, H. & Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60: 137-149.
- Mysen, M. & Segtnan, I. L. (2015). 552.301 Ventilasjon av boliger: Prinsipper. *Byggforskserien*: 7.
- NFBIB. (2004). *Frisk luft hjemme, Frisk luft i bolig, leilighet*. Tilgjengelig fra: <http://arkiv.innemiljo.net/index.asp?id=6200&P=2794&G=2476> (lest 02.02.17).
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates (Second Edition)*. Taylor & Francis e-Library: Methuen.
- Pereira, D. (2015). *Wind Rose*. Tilgjengelig fra: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47248-wind-rose> (lest 30.04.17).
- ProgramByggerne. *Bruksanvisning for Simien*. Tilgjengelig fra: <http://www.programbyggerne.no/> (lest 20.03.17).

Shaw, C. Y. (1981). A Correlation between Air Infiltration and Air Tightness for Houses in a Developed Residential Area. *ASHRAE Transactions*, Vol. 87 (Pt. 2).

Standard Norge. (2005). *NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner*. Del 1-4: Allmenne laster Vindlaster: Standard Norge. 188 s.

Standard Norge. (2007). *NS 3031:2007, Beregning av bygningers energiytelse: Metode og data*. 69 s.

Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method*. 2nd ed. utg. Harlow: Pearson/Prentice Hall.

Webb, M. (2013). BUILDING ENERGY AND CFD SIMULATION TO VERIFY THERMAL COMFORT IN UNDER FLOOR AIR DISTRIBUTION (UFAD) DESIGN *13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France: 1886-1893*.

Vedlegg A: Koeffisienter fra DesignBuilder

Koeffisienter fra EN 12831 for formel 16 (DesignBuilder 2017).

Tabell 10: bygningshøyde-koeffisienten ϵ .

Building height	ϵ Building height class
0-10m	1
10-30m	1,2
30m<	1,5

Tabell 11: terrengkategori-koeffisienten e_i .

Exposure description	Heated zone no facade exposed to outside	Heated zone with single facade exposed	Heated zone with multiple facades exposed
Open site (sea shores, open country)	0,01	0,03	0,05
Medium sheltered site (towns, city periphery)	0,01	0,02	0,03
Well shelters site (city centre)	0,01	0,01	0,02

Vindtrykkoeffisienter fra DesignBuilder og fra AIVC (Liddament 1996).

Tabell 12: Vindtrykkoeffisienter for en bygning med firkantet fasader, og med opptil tre etasjer. Hentet fra AIVC.

Vindretning (Normalt i forhold til veggen)	C_p
0°	0,40
45°	0,10
90°	-0,30
135°	-0,35
180°	-0,20
225°	-0,35
270°	-0,30
315°	0,10

Strømningskoeffisienter og strømningseksponenter fra DesignBuilder

I hver celle oppgis først strømningskoeffisient $[(\text{kg/s})/\text{m}^2/\text{Pa}^n]$ og så strømningseksponent [-] for forskjellige bygningselementer og forskjellig bygningskvaliteter.

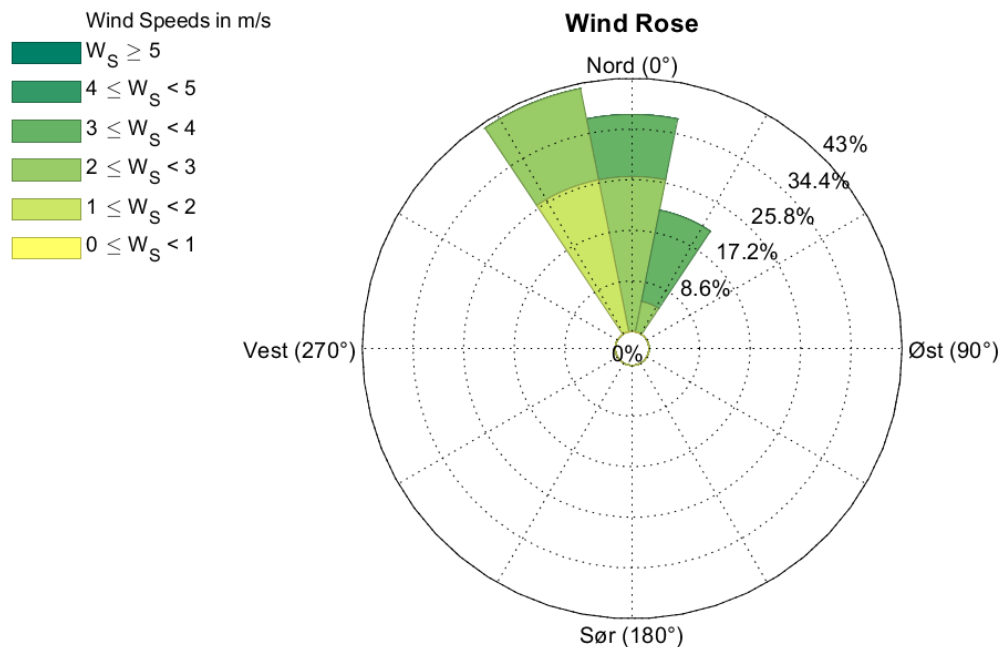
Tabell 13: Strømningskoeffisienter og strømningseksponenter i DesignBuilder

		Very poor	Poor	Medium	Good	Excelent
Windows	External	0,00300 0,60	0,00100 0,60	0,00014 0,65	0,00006 0,70	0,00001 0,70
	Internal	0,00300 0,60	0,00180 0,60	0,00140 0,65	0,00060 0,70	0,00020 0,70
Doors	External	0,00300 0,66	0,00180 0,66	0,00140 0,65	0,00060 0,70	0,00020 0,70
	Internal	0,02000 0,60	0,02000 0,60	0,02000 0,60	0,02000 0,70	0,02000 0,70
Vents	External	0,04000 0,66	0,01000 0,66	0,00800 0,66	0,00400 0,66	0,00100 0,66
	Internal	0,02000 0,60	0,00900 0,60	0,00700 0,60	0,00300 0,60	0,00100 0,60
Walls	External	0,00040 0,70	0,00020 0,70	0,00010 0,70	0,00004 0,70	0,00001 0,70
	Internal	0,01900 0,75	0,00500 0,75	0,00300 0,75	0,00200 0,75	0,00100 0,75
Floor	External	0,00200 1,00	0,00100 1,00	0,00070 1,00	0,00030 1,00	0,00010 0,70
	Internal	0,00300 0,70	0,00200 0,70	0,00090 0,70	0,00003 0,70	0,00001 0,70
Roof	-	0,00020 0,70	0,00015 0,70	0,0001 0,70	0,00003 0,70	0,00001 0,70

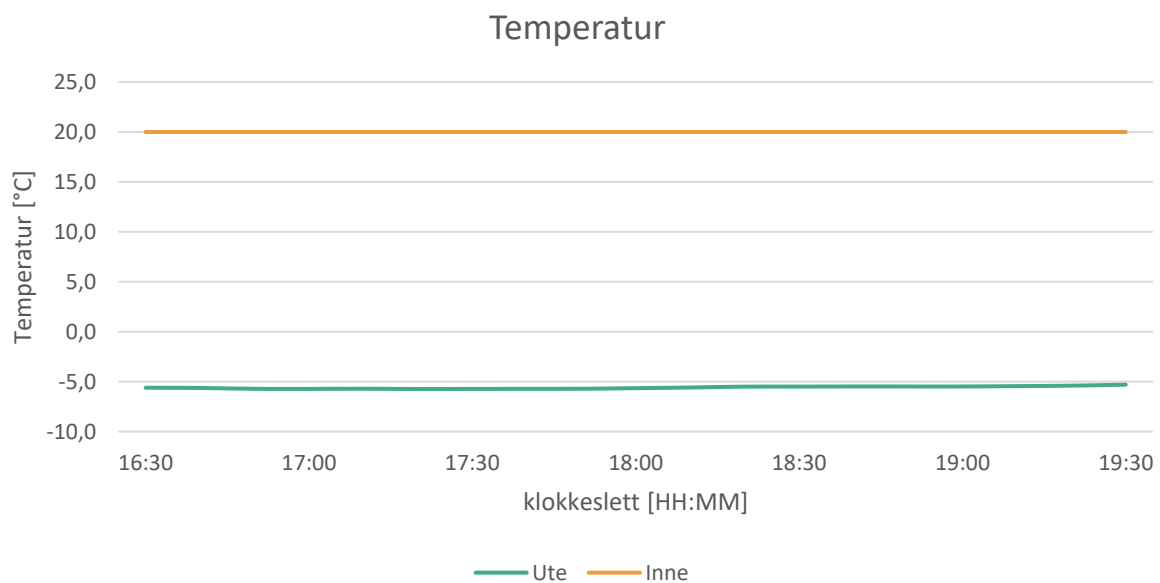
Vedlegg B: Værdata målt på Søråsjordet

Matlabkoden for fremstilling av vindroser ble basert på en kode skrevet av Pereira (2015).

Forsøk 1.1

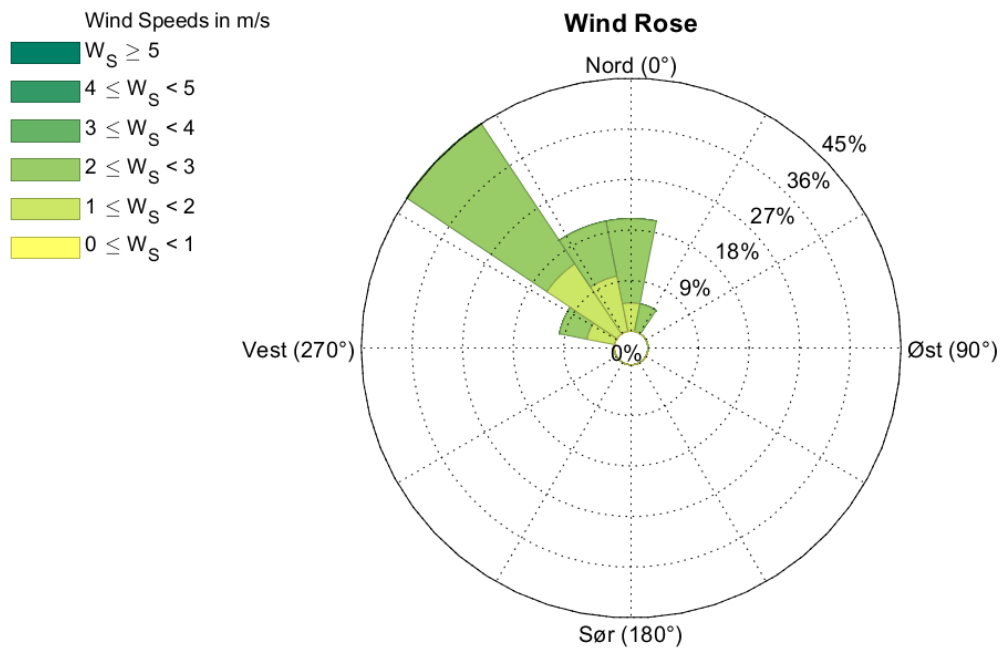


Figur 53 Vindrose for måling 1.1, 09.02 16:30 – 09.02 19:30

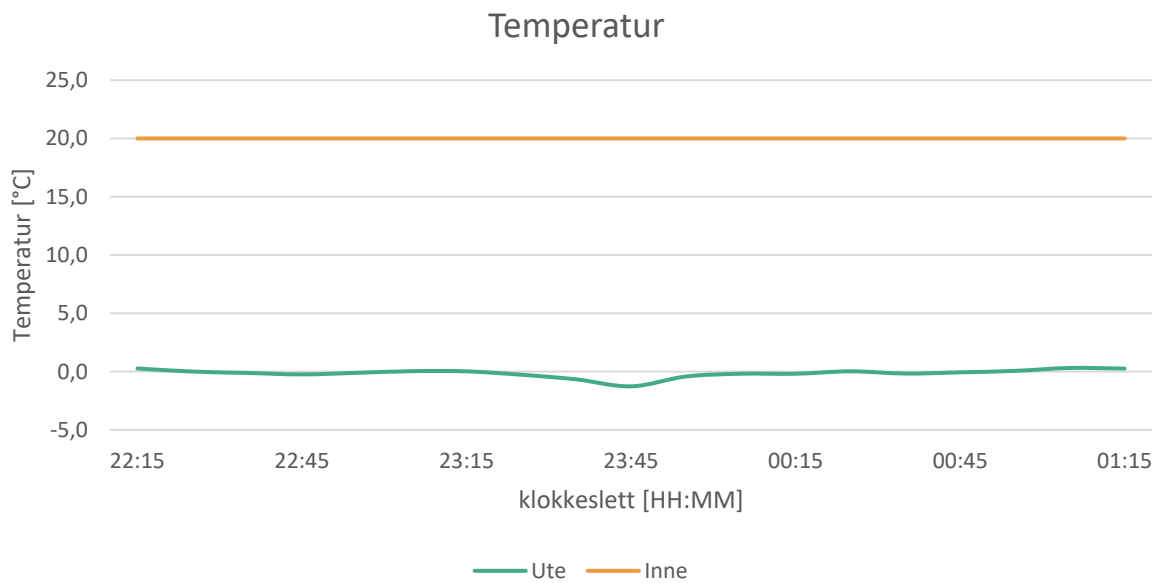


Figur 54 Inne- og utetemperatur for måling 1.1

Forsøk 1.2

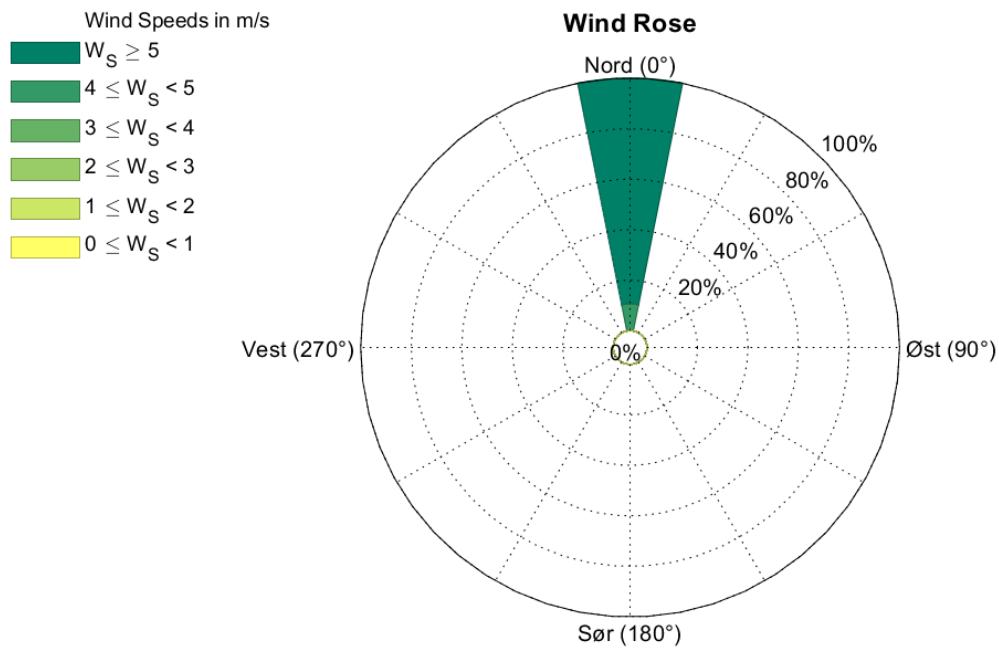


Figur 55 Vindrose for måling 1.2, 22.02 22:15 – 23.02 01:15

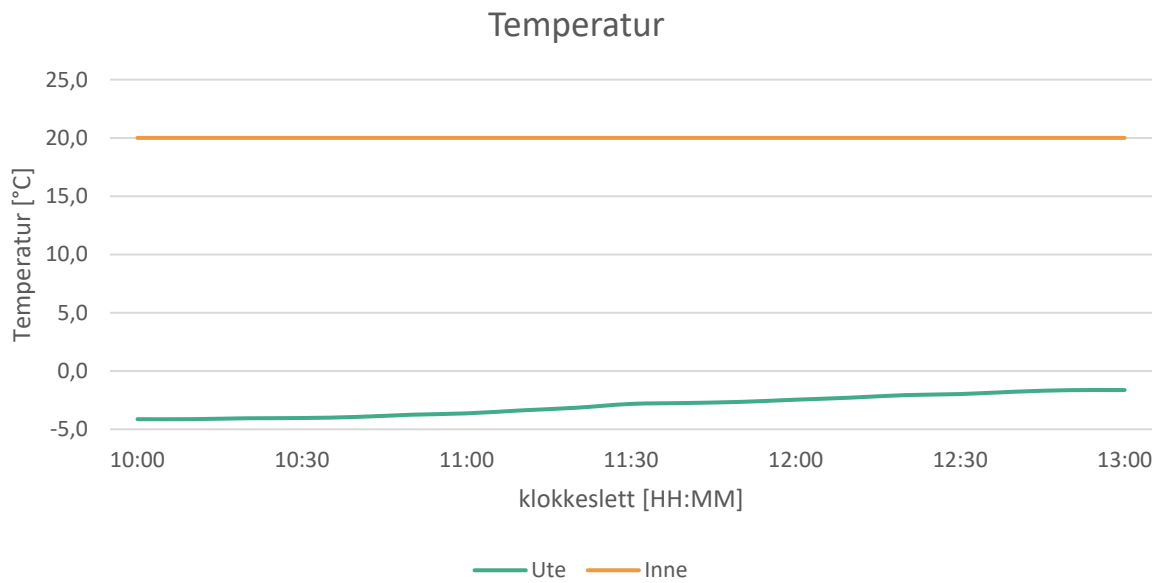


Figur 56 Inne- og utetemperatur for måling 1.2

Forsøk 1.3

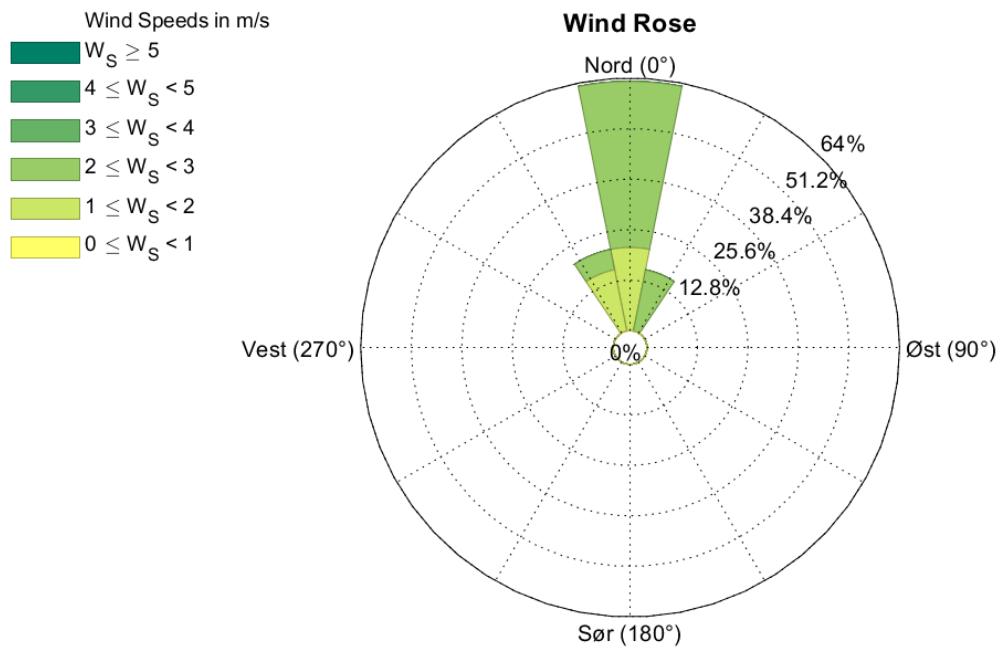


Figur 57 Vindrose for måling 1.3, 07.03 10:00 – 07.03 13:00

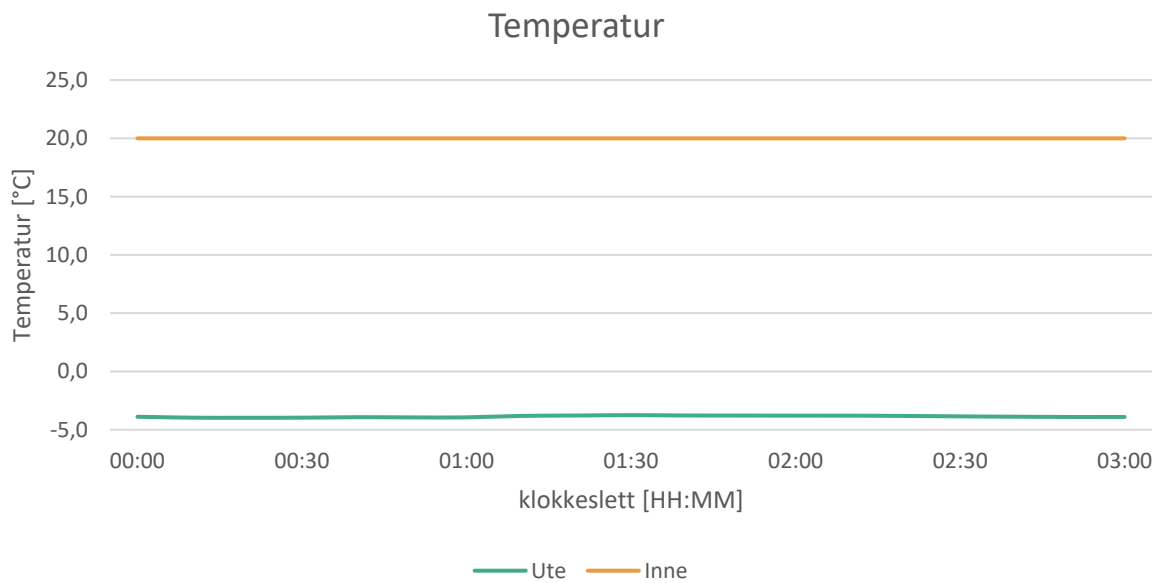


Figur 58 Inne- og utetemperatur for måling 1.3

Forsøk 1.4

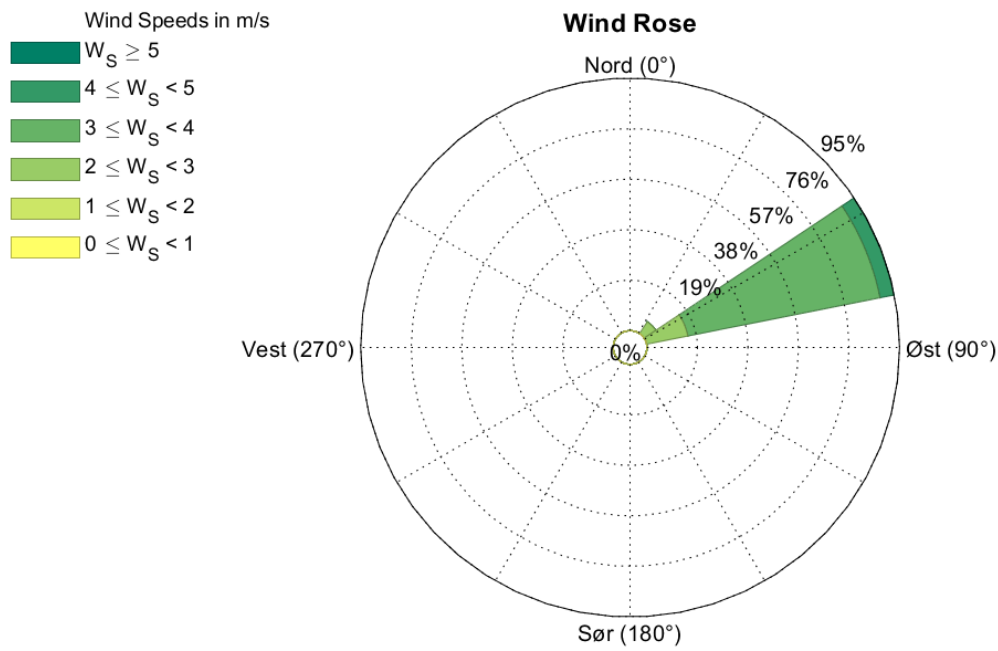


Figur 59 Vindrose for måling 1.4, 08.03 00:00 – 08.03 03:00

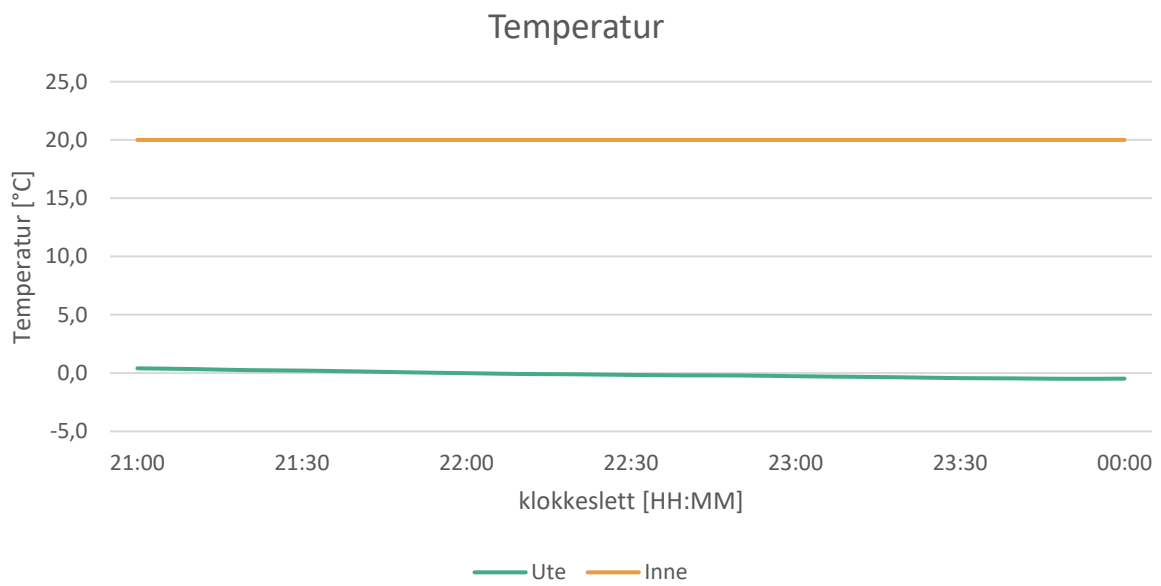


Figur 60 Inne- og utetemperatur for måling 1.4

Forsøk 2.1

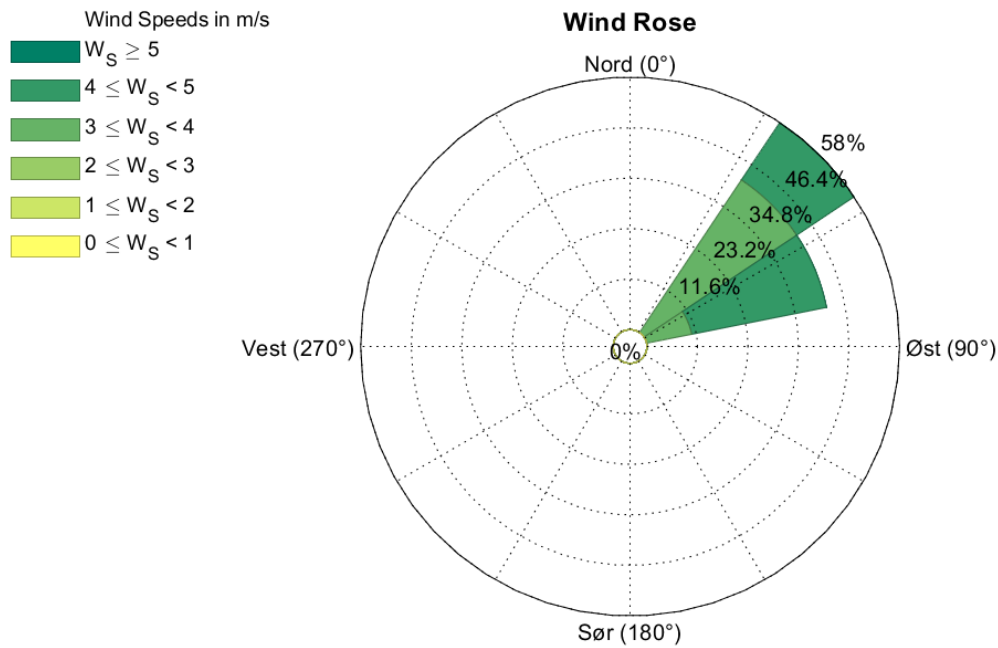


Figur 61 Vindrose for måling 2.1, 04.03 21:00 – 05.03 00:00

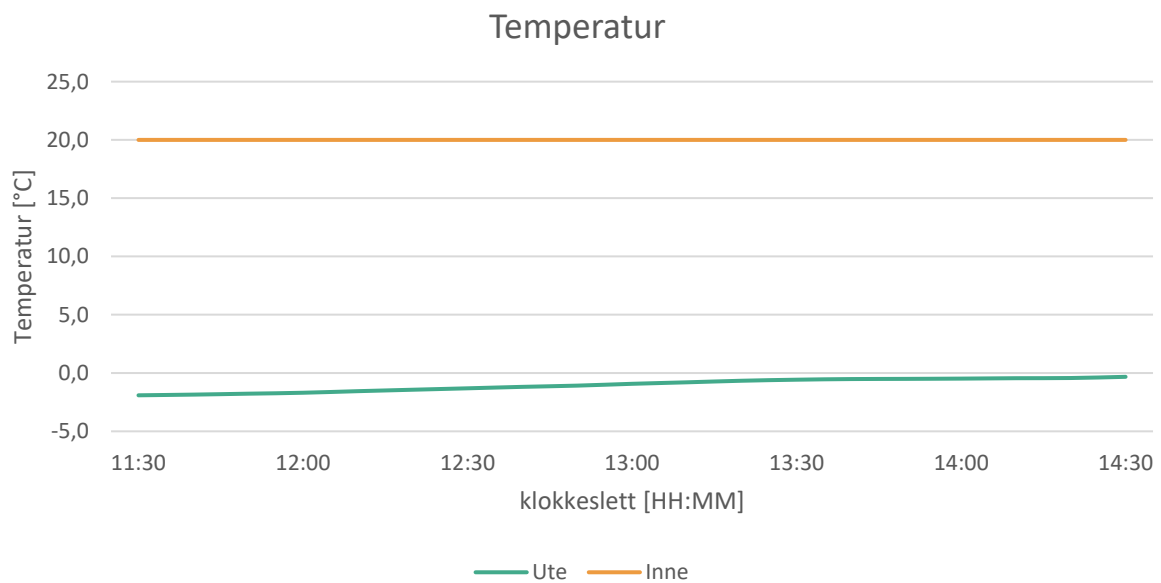


Figur 62 Inne- og utetemperatur fra måling 2.1

Forsøk 2.2

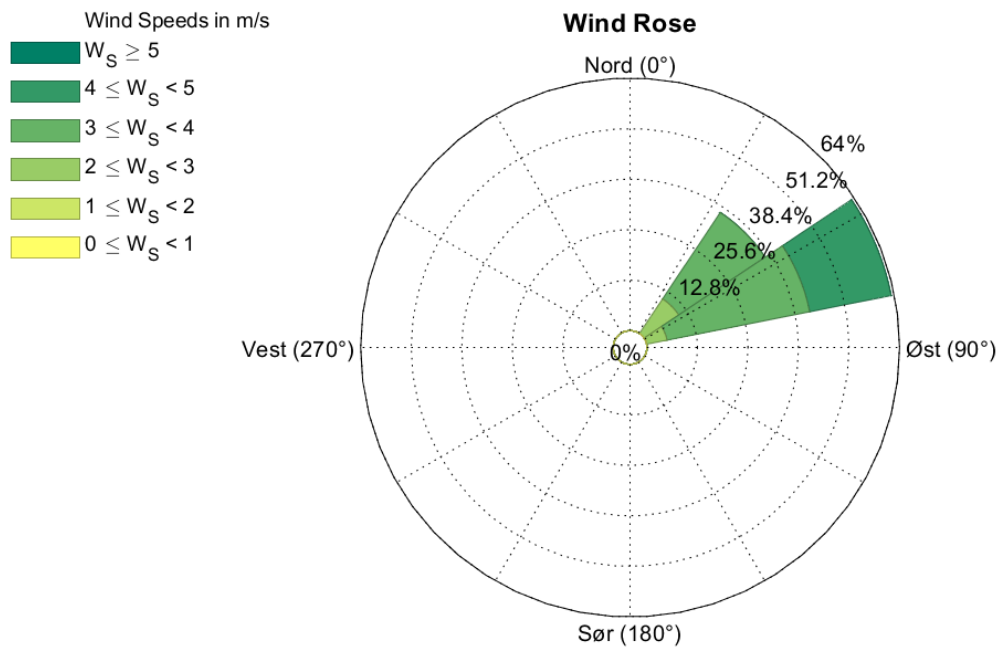


Figur 63 Vindrose for måling 2.2, 05.03 11:30 – 05.03 14:30

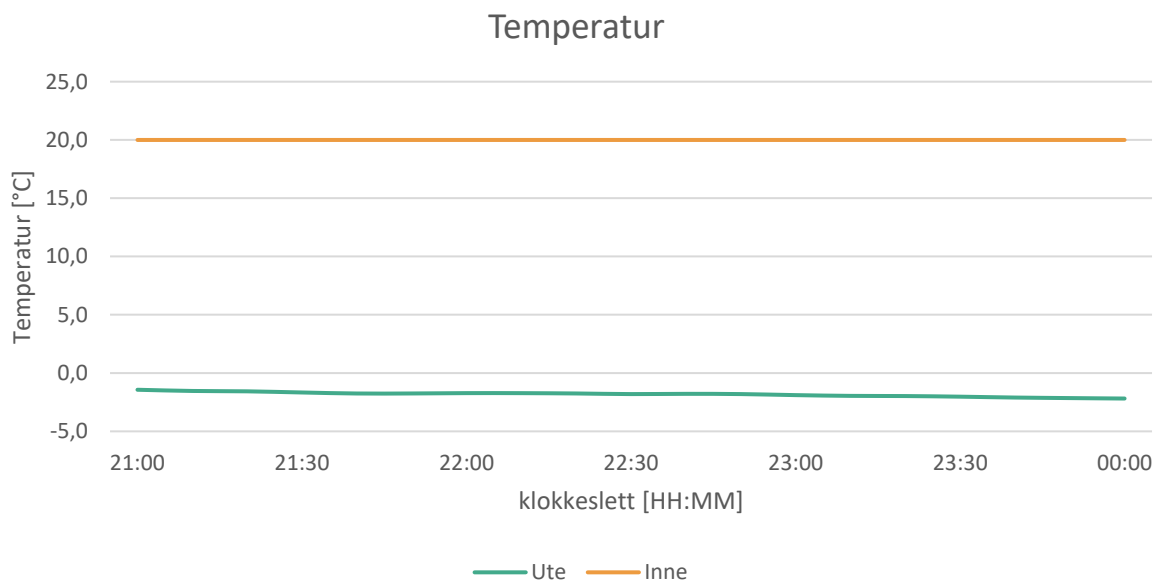


Figur 64 Inne- og utetemperatur for måling 2.2

Forsøk 2.3

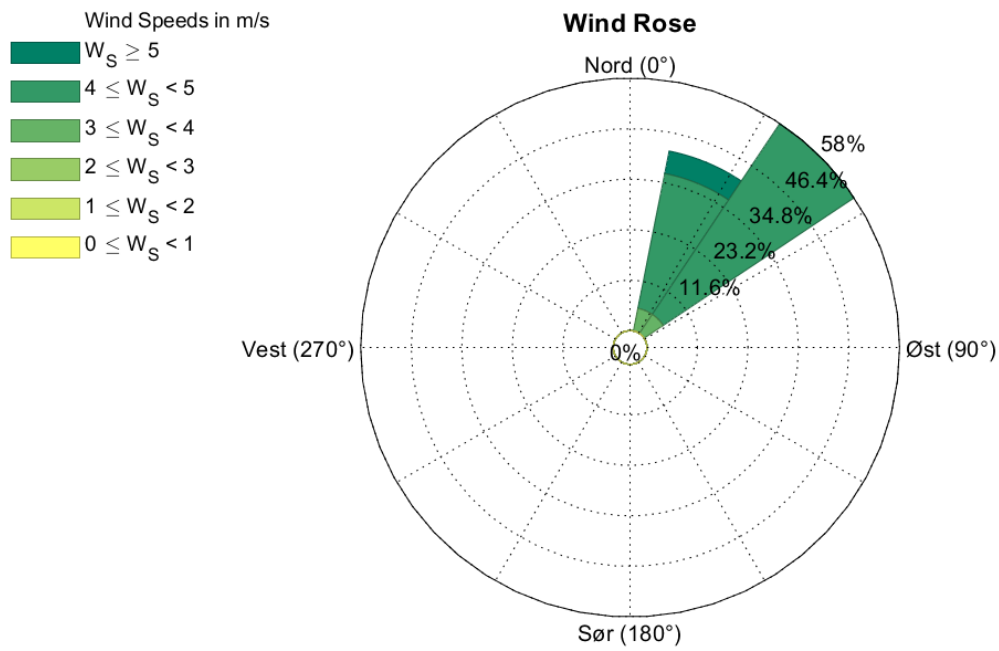


Figur 65 Vindrose for måling 2.3, 05.03 21:00 – 06.03 00:00

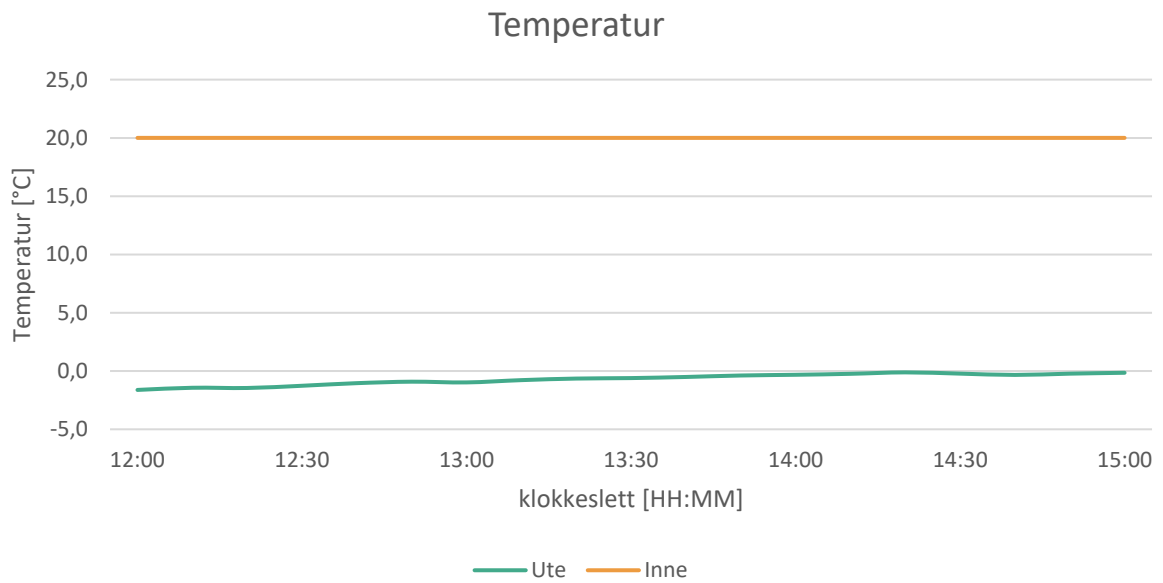


Figur 66 Inne- og utetemperatur for måling 2.3

Forsøk 2.4

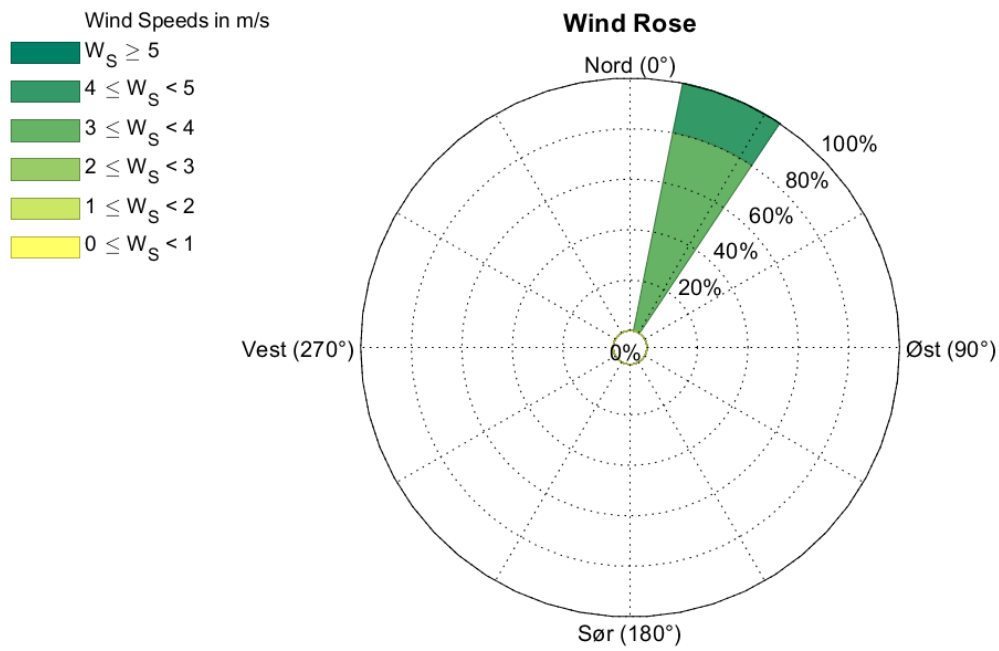


Figur 67 Vindrose for måling 2.4, 06.03 12:00 – 06.03 15:00

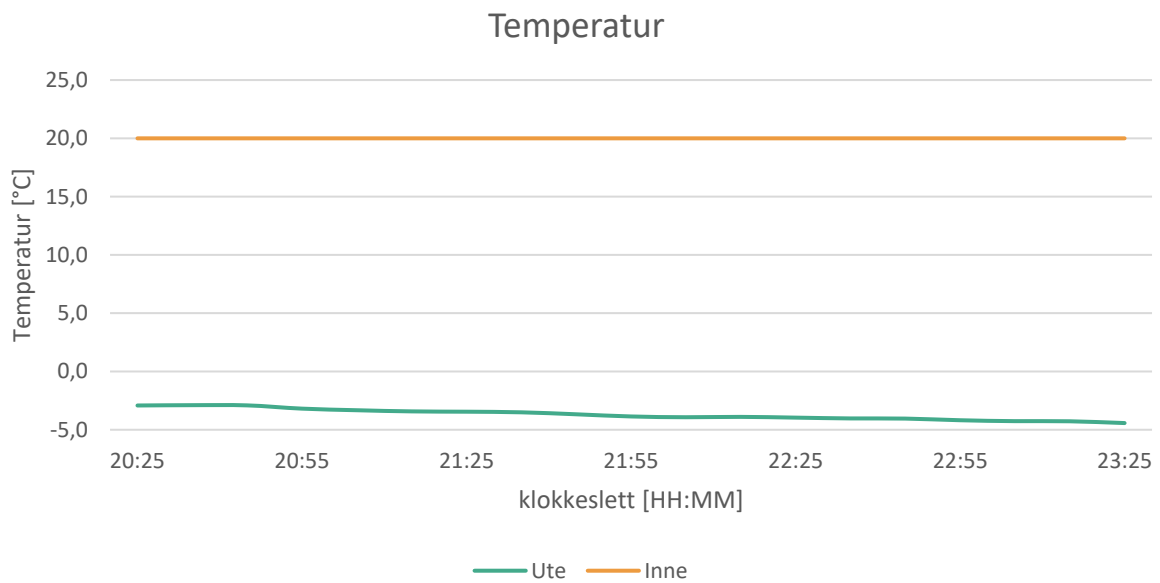


Figur 68 Inne- og utetemperatur for måling 2.4

Forsøk 2.5



Figur 69 Vindrose for måling 2.5, 06.03 20:25 – 06.03 23:25



Figur 70 Inne- og utetemperatur for måling 2.5



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway