

Tonje Margrethe Omli-Moe

Undersøkelse av ventilasjonsprinsipper for museer

En case-studie: Vikingtidsmuseet i Oslo

Masteroppgave i Produktutvikling og produksjon

Veileder: Hans Martin Mathisen

Juni 2019



"Naust". Brukt med tillatelse fra AART Architects/Statsbygg

Tonje Margrethe Omli-Moe

Undersøkelse av ventilasjonsprinsipper for museer

En case-studie: Vikingtidsmuseet i Oslo

Masteroppgave i Produktutvikling og produksjon
Veileder: Hans Martin Mathisen
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosessteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet for Instituttet for energi- og prosesseteknikk ved Fakultetet for ingeniørvitenskap på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Oppgaven omhandler undersøkelser av ulike ventilasjonsprinsipper for museer.

Jeg vil takke veilederen min Hans Martin Mathisen for støtte og god hjelp gjennom oppgaveskrivingen. Han har kommet med faglige innspill og hans interesse for oppgaven har motivert meg. Jeg vil også takke medveileder Mohamed Hamdy for faglig innspill og for videreføring av tidligere arbeid utført på samme case-studie.

Til slutt vil jeg takke familie for støtte og motivasjon gjennom studiet. Og en stor takk til alle de gode vennene jeg har fått og som har delt både oppturer og nedturer med meg. Dere har gjort disse fem årene i Trondheim helt fantastiske.

Nomenklatur og definisjoner

Dette avsnittet beskriver noen ord og uttrykk som blir brukt senere i oppgaven.

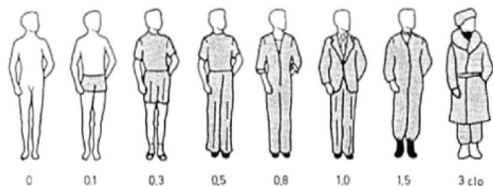
ADPI Air diffusion performance index. Definert som prosentandel av okkupert sone hvor lufthastighet og temperatur er innenfor akseptable grenser (Liu and Novose-lac, 2015).

ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

CAV Konstant volum (constant air volume). Systemer med konstante luftmengder.

CFD Computational fluid dynamics.

clo Isolasjonsverdien i bekledningen er den termiske motstanden mellom den utven-dige overflaten til bekledningen og hudens overflate. 1 clo er definert som 0.155 m²K/W (NTNU and SINTEF, 2007).



Figur 1: Isolasjonsverdier for ulike beklædninger. Brukt med tillatelse (Mathisen, 2018)

EP Energy Performance Index.

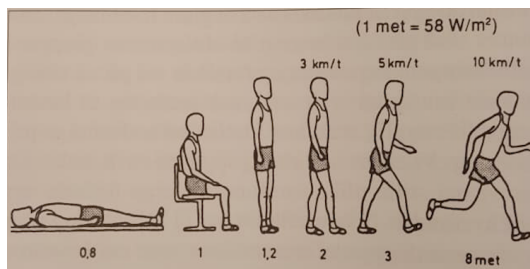
HVAC Heating, ventilation and air-conditioning.

IMQ Indoor Microclimate Quality.

IoT Internet of things.

LCC Livssyklus kostnader inkluderer investeringskostnader, kostnader til forvaltning, drift og vedlikehold (FDV), samt avhending gjennom hele livsløpet.

met Betegnelse for metabolisme. Metabolisme er oksidasjonsprosessen i menneskekroppen, også kalt stoffskiftet. Gjennomsnittlig kroppsarealet for en voksen person er 1.75 m^2 (Ingebrigtsen, 2016). Varmeproduksjonen for en stillesittende, avslappet person er 58 W/m^2 , som tilsvarer 1 met. Met-verdien øker med økende aktivitet.



Figur 2: Endring i met-verdier ved ulike aktiviteter. Brukt med tillatelse (Mathisen, 2018)

PPD Forventet prosentandel misfornøyde (Predicted Percentage Dissatisfied).

RF Relativ luftfuktighet er et mål på luftens vanninnhold i forhold til tørr luft. Jo varmere luften er, desto mer vanddamp kan den holde på. Den relative fuktigheten er definert som vanddampens partialtrykk, p , delt på vanddampens metningstrykk, p_s , som vist i ligning 1:

$$\phi = \frac{p}{p_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

Relativ fuktighet oppgis gjerne i prosent og den maksimale relative luftfuktigheten er på 100%. Det kan også skrives som et tall mellom 0 og 1.

SD Sentral driftskontroll er styring og overvåkning av automatikkanlegg.

SFP Spesifikk vifteeffekt (specific fan power) er et forholdstall mellom summen av alle vifteeffekter i et system og summen av maksimal sirkulert luftmengde for tilluft og avtrekk.

VAV Variabelt volum (variable air volume). Systemer med variable luftmengder.

Sammendrag

Museer er institusjoner som skal ta vare på samlinger av gjenstander med historisk eller vitenskapelig verdi, samt kunstverk. Denne kunnskapen skal videreføres gjennom utstillinger tilgjengelig for offentligheten, og sikre fremtidige generasjoner informasjon om den kulturelle arven. For å kunne bevare disse gjenstandene på best mulig måte må de konserveres. Det vil blant annet si å sørge for et riktig inneklime, noe som ofte innebærer at krav til temperatur og relativ fuktighet må ligge innenfor definerte grenseverdier.

Målet med masteroppgaven har vært å undersøke ulike ventilasjonsprinsipper som sørger for riktig inneklime for skjøre museumsgjenstander av tre eksponert for romluft og samtidig minimere energiforbruket. En mikroklimatisk analyse i simuleringsprogrammet IDA ICE har blitt utført på de ulike prinsippene. Oppgaven har hatt spesielt fokus på hvordan klimatisering av vikingskipene kan holde relativ fuktighet og temperatur stabilt. Kostnader knyttet til implementering av disse systemene og bygging av klimaanlegget er ikke beregnet.

Et litteraturstudie om ventilering av museer og basis teori er brukt for å komme frem til ulike ventilasjonsprinsipper for klimatisering av museumsgjenstander eksponert for romluft. Fem ulike scenarier har blitt undersøkt: fortrengning, omrøring, luftgardin, perforert plate og tekstilkanal. Beregninger av luftmengder og lufthastigheter for disse scenariene har blitt utført.

En case-studie av det planlagte Vikingtidsmuseet i Oslo er gjennomført. Settpunkter for relativ fuktighet og temperatur for inneklime til vikingskipene var et resultat av en ekskursjon til det eksisterende Vikingskipshuset. Disse settpunktene ble brukt i energisimuleringer utført i IDA ICE av scenariene som ble undersøkt, en vinter- og en sommersimulering. Ut fra resultatene ble scenariet med luftgardin ansett som det beste systemet og en robusthetsvurdering av dette systemet ble utført ved å øke de interne lastene.

Simuleringsresultatene viser at både temperatur og relativ fuktighet holder seg stabilt, samtidig som energibruket til museet kan reduseres med nesten 30% ved å implementere et mikroklima rundt vikingskipene. Vurderingen av scenariet med luftgardin for ventilering av et mikroklima viste seg å være robust ved økte interne laster, og kan være et godt alternativ til den planlagte løsningen for Vikingtidsmuseet.

Summary

Museums are institutions that take care of collections of artifacts with historical or scientific value and art work. This knowledge should be carried on through exhibitions available to the public, and secure future generations information about the cultural heritage. In order to preserve these exhibits in the best way possible a proper indoor climate must be provided. This often implies that requirements for temperature and relative humidity must be within defined limits.

The objective of this master thesis has been to investigate different ventilation principles that ensure the correct indoor climate for museum artifacts exposed to room air while also minimizing the energy consumption. A microclimate analysis in the simulation program IDA ICE has been carried out for the different principles. The thesis has focused on how climatization of the Viking ships can keep temperature and relative humidity stable. Costs associated with the implementation of these principles and the construction of the HVAC system are not estimated.

A literature study on ventilation of museums and basic theory has been used to describe various ventilation principles for climatization of artifacts exposed to room air. Five different scenarios have been investigated: displacement, mixing, air curtain, perforated plate and fabric air duct. Air flow and velocity calculations were performed for these scenarios.

A case study of the planned new Viking Age Museum in Oslo has been completed. Setpoints for relative humidity and temperature for the indoor climate for the Viking ships were a result of an excursion to the existing Viking Ship House. These setpoints were used in energy simulations performed in IDA ICE of the scenarios investigated for a winter and a summer simulation. Based on the results, the air curtain scenario was considered the best system and a robustness assessment of this system was carried out by increasing the internal loads.

The simulation results show that both temperature and relative humidity remain stable while the energy consumption of the museum can be reduced by almost 30% by implementing a microclimate around the Viking ships. The assessment of the scenario with an air curtain for ventilating a microclimate showed good robustness when increasing the internal loads and can be a good alternative to the planned solution for the Viking Age Museum.

Innhold

Forord	i
Nomenklatur og definisjoner	ii
Sammendrag	iv
Summary	v
Innholdsfortegnelse	viii
Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Hensikt og mål	2
1.3 Avgrensninger og omfang	2
1.4 Metodikk	3
1.5 Oppbygning	3
2 State of the art	5
3 Teori	9
3.1 Inneklima	9
3.1.1 Termisk miljø	10
3.1.2 Atmosfærisk miljø	10

3.1.3	Aktinisk miljø	10
3.1.4	Estetisk miljø	10
3.2	Design av klimaanlegg for museer	11
3.2.1	Temperatur og relativ fuktighet	12
3.2.2	Anbefalte verdier	13
3.3	Kontroll av relativ luftfuktighet	14
3.3.1	Avfuktning	16
3.3.2	Befuktning	19
3.4	Luftfordelingsprinsipper	22
3.4.1	Omrøringsventilasjon	23
3.4.2	Fortrengningsventilasjon	24
3.4.3	Luftgardin	25
3.4.4	Stempelstrøm	26
3.4.5	Perforert plate	26
3.4.6	Tekstilkanal	27
4	Case-studie: Vikingtidsmuseet i Oslo	29
4.1	Krav og belastninger på inneklima	30
5	Metode	33
5.1	Beregning av luftmengder og lufthastigheter	33
5.1.1	Løsning med fortrengning	34
5.1.2	Løsning med omrøring	35
5.1.3	Løsning med luftgardin fra gulvet	36
5.1.4	Løsning med perforert plate under skipene	40
5.1.5	Løsning med tekstilkanal montert over skipene	41
5.2	Simulering av Vikingtidsmuseet i IDA ICE	44
5.2.1	Simuleringsmodell	44
5.2.2	Forenklinger	48
5.2.3	Inputdata	49
5.2.4	Implementering av et mikroklima i IDA ICE	53
5.3	Simuleringsscenarier	54
5.3.1	Referansemodell	54
5.3.2	Simuleringsscenario med omrøring	55
5.3.3	Simuleringsscenario med luftgardin	55
5.3.4	Simuleringsscenario med tekstilkanal	56
5.3.5	Analyse av simuleringsresultater	56

5.4	Robusthetsvurdering	57
6	Resultater	58
6.1	Vintersimulering	58
6.1.1	Temperatur	58
6.1.2	Relativ fuktighet	60
6.1.3	PPD	61
6.1.4	Energibehovet til klimaanlegget	61
6.1.5	Energibruk	62
6.2	Sommersimulering	63
6.2.1	Temperatur	63
6.2.2	Relativ fuktighet	65
6.2.3	PPD	66
6.2.4	Energibehovet til klimaanlegget	66
6.2.5	Energibruk	67
6.3	Robusthetsvurdering	68
6.3.1	Vintersimulering	68
6.3.2	Sommersimulering	71
7	Diskusjon	74
7.1	Simuleringsmodellen	74
7.1.1	Forenklinger i simuleringsmodellen	75
7.1.2	Inputdata	75
7.1.3	Implementering av et mikroklima	76
7.2	Simuleringsresultater	76
7.2.1	Vintersimulering	76
7.2.2	Sommersimulering	79
7.3	Robusthetsvurdering	81
8	Konklusjon	82
9	Videre arbeid	84
	Referanser	85
	Vedlegg	92
A	Digitalt vedlegg: simuleringsmodell av Vikingtidsmuseet	92

Figurer

1	Isolasjonsverdier for ulike bekledninger. Brukt med tillatelse (Mathisen, 2018)	ii
2	Endring i met-verdier ved ulike aktiviteter. Brukt med tillatelse (Mathisen, 2018)	iii
3.1	Muggvekst på ulike materialer påvirket av RF og temperatur	13
3.2	Mollierdiagram med markerte verdier for ønsket inneklime i kontorbygg (gul) og museer (blå)	15
3.3	Blanding av to luftmengder a og b	16
3.4	Ideell prosess gjennom en adsorpsjonsavfukter fra punkt A til B	17
3.5	Ideell prosess gjennom en kondensavfukter fra punkt A til B	18
3.6	Ideell prosess ved befuktning av luft med vann fra punkt A til B	20
3.7	Ideell prosess ved befuktning av luft med damp fra punkt A til B	21
3.8	Definisjon av oppholdssonen. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	22
3.9	Prinsipp for omrøringsventilasjon. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	23
3.10	Prinsipp for fortreningsventilasjon. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	24
3.11	Prinsippet med en luftgardin. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	25
3.12	Prinsippet ved stempelstrøm. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	26
3.13	Ventilering ved bruk av en perforert plate. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	27
3.14	Ventilering ved bruk av en tekstilkanal i takhøyde. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	28
5.1	Luftfordeling ved fortreningsventilasjon i hele sonen. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	35

5.2	Luftfordeling ved omrøringsventilasjon i hele sonen. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	36
5.3	Luftfordeling ved bruk av luftgardin fra gulvet. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	37
5.4	Hvordan lufthastigheten avtar ved ulike strålehøyder og spaltebredder ved bruk av en luftgardin	39
5.5	Luftfordeling gjennom en perforert plate. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe .	40
5.6	Luftfordeling ved luftgardin fra kanalsystem montert over skipet. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe	42
5.7	Hvordan lufthastigheten avtar ved ulike stråleavstander og lufthastigheter ved bruk av en tekstilkanal	43
5.8	Bilde av Vikingtidsmueet i Autodesk Revit. (Brukt med tillatelse)	46
5.9	Bilde av Vikingtidsmuseet i IDA ICE. (Brukt med tillatelse)	47
5.10	Utklipp fra IDA ICE viser sonefordelingen i underetasjen. (Brukt med tillatelse)	47
5.11	Utklipp fra IDA ICE viser sonefordelingen i første etasje. (Brukt med tillatelse)	48
5.12	Illustrasjon av utstillingsrommet til Osebergskipet. Brukt med tillatelse fra AART Architects/Statsbygg	49
5.13	Prosentvis besøksbelastning gjennom åpningstiden. (Brukt med tillatelse)	51
5.14	Ventilasjonsaggregat for Gokstad- og Osebergsonen hentet fra IDA ICE .	53
5.15	Mikroklimasonen implementert i IDA ICE	54
6.1	Gjennomsnittlig lufttemperatur i Gokstadsonen for en uke i januar	59
6.2	Gjennomsnittlig RF i Gokstadsonen for en uke i januar	60
6.3	Energibehovet til klimaanlegget for de ulike scenariene for en uke i januar	62
6.4	Det totale energibruket til Vikingtidsmuseet for en uke i januar	63
6.5	Gjennomsnittlig lufttemperatur i Gosktadsonen for en uke i juli	64
6.6	Gjennomsnittlig RF i Gokstadsonen for en uke i juli	65
6.7	Energibehovet til klimaanlegget for de ulike scenariene for en uke i juli .	67
6.8	Det totale energibruket til Vikingtidsmuseet for en uke i juli	68
6.9	Gjennomsnittlig lufttemperatur i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene	69
6.10	Gjennomsnittlig RF i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene	70
6.11	Gjennomsnittlig lufttemperatur i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene	71

6.12 Gjennomsnittlig RF i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene	72
---	----

Tabeller

3.1	Anbefalte verdier for svingninger i temperatur og RF for klasse A	14
4.1	Settpunkter for RF og temperatur til inneklime for vikingskipene fastsatt av konservator ved Vikingskipshuset	31
5.1	Variabler til utregninger av friskluftmengder definert i ligning 4.1	34
5.2	Sentralstrålehastigheten og luftmengden for ulike verdier av lufthastighet ved inntak, spaltebredde og strålehøyde ved bruk av en luftgardin	38
5.3	Luftmengden for ulike verdier av tilluftshastigheter gjennom en perforert plate	41
5.4	Luftmengde som må til ved ulike lufthastigheter og kanaldiametere ved bruk av en tekstilkanal	43
5.5	Værdata for Oslo, Gardermoen fra ASHRAE IWEC2 lastet inn i IDA ICE, justert etter posisjonen til museet på Bygdøy	45
5.6	Noen krav til passivhus for kulturbygg fra NS 3701 (Standard Norge, 2012)	46
5.7	Areal og volum for de ulike sonene hentet fra IDA ICE	50
5.8	Innsatte verdier for bekledning og aktivitetsnivå i IDA ICE	51
5.9	Fuktproduksjon ved ulike aktivitetsnivåer	52
5.10	System som brukes, luftmengde og lufthastighet for referansemodellen . .	54
5.11	Simuleringsscenario med omrøring: system som brukes, luftmengde og lufthastighet	55
5.12	Simuleringsscenario med luftgardin: systemfordeling med tilsvarende luftmengder og lufthastigheter	55

5.13 Simuleringsscenario med tekstilkanal: systemfordeling med tilsvarende luftmengder og lufthastigheter	56
6.1 Resultat fra stabilitetsanalysen for vintertemperatur, TS, i Gokstadsonen .	59
6.2 Resultat fra stabilitetsanalysen for relativ fuktighet, RFS, i Gokstadsonen	61
6.3 Resultat fra stabilitetsanalysen for sommertemperatur, TS, i Gokstadsonen	64
6.4 Resultat fra stabilitetsanalysen for relativ fuktighet, RFS, i Gokstadsonen	66
6.5 Resultat fra stabilitetsanalysen for relativ fuktighet, RFS, for de tre systemene for uken i januar	70
6.6 Resultat fra stabilitetsanalysen for temperatur, TS, for de tre systemene for uken i juli	72
6.7 Resultat fra stabilitetsanalyse for relativ fuktighet, RFS, for de tre systemene for uken i juli	73

Innledning

1.1 Bakgrunn

Museer, arkiver, gallerier og biblioteker er bygget for å ta vare på og dokumentere kultur og historie for våre etterkommere. Dette kan være alt fra bøker, dokumenter og kunst, til fossiler og vikingskip. Disse historiske gjenstandene symboliserer den kulturelle identiteten og gir et bilde på hvordan verden tidligere var, eller ble oppfattet som. For å kunne videreføre denne kulturarven til fremtidige generasjoner er det viktig å konservere disse gjenstandene korrekt, slik at de ikke ødelegges. Dette arbeidet utføres vanligvis i et museum.

Bevaring av slike kulturhistoriske samlinger er en kontinuerlig og kompleks prosess som krever forebyggende tiltak. Målet med konservering av historiske gjenstander er å bevare gjenstanden i sin ”originale” tilstand så godt det lar seg gjøre, forhindre nye skader og forsinke eller forebygge nedbryting av materialer.

Disse samlingene utsettes hele tiden for ulike påvirkninger, og de fleste av disse kan unngås ved kontrollering av mikroklimatiske forhold. Dette kan gjøres ved hjelp av et riktig utformet klimaanlegg (HVAC-system). Klimaanlegget i museer med skjøre gjenstander som må beskyttes er som regel i drift døgnet rundt, alle dager i året, for å opprettholde de fastsatte kravene til inneklimate, med spesielt fokus på riktig temperaturnivå og relativ fuktighetsnivå (RF).

Vikingskipshuset på Bygdøy ble designet av arkitekten Arnstein Arneberg, og den første

delen som huser Osebergskipet ble åpnet i 1926. Delene av bygget som huser Gokstad- og Tuneskipet ble ferdigstilt i 1957 (Næss, 2019). Per i dag huser Vikingskipshuset tre vikingskip, som er blant verdens best bevarte vikingskip, og en rekke andre gjenstander fra vikingtiden. Vikingskipene er laget av tre, som er et hygroskopisk materiale som kan absorbere og frigjøre fuktighet. Når det hygroskopiske materialet absorberer eller frigjør fuktighet, endres formen til materialet ved utvidelse eller krymping. Et riktig og stabilt inneklime er derfor viktig for å kunne bevare skipene på best mulig måte.

Vikingskipshuset ble bygget for 50 000 besøkende i året, men i 2016 ble det registrert over 500 000 besøkende (Kulturhistorisk museum, 2016). Det nye Vikingtidsmuseet skal kunne huse over en million besøkende i året. Siden det gamle museet ikke har noen form for kontrollert ventilasjon gir en overbelastning i rommene store svingninger i inneklimeforholdene, noe som fremskynder aldringsprosessen til vikingskipene. Det er derfor planlagt at Vikingskipshuset skal utvides med et påbygg.

1.2 Hensikt og mål

Den norske regjeringen har bestemt at Vikingskipshuset skal utvides og bli til Vikingtidsmuseet. Museet skal ta vare på utstillingsobjekter fra vikingtiden, og det settes strenge krav til maksimalt ønskede svingninger i innetemperatur og relativ fuktighet. Et godt designet ventilasjonssystem kan kontrollere temperatur og RF for å oppnå kravene til inneklime. Et slikt system er gjerne plass- og energikrevende, samt at store kanaler er estetisk uønsket i et museumsmiljø.

Målet med masteroppgaven er å undersøke ulike ventilasjonsprinsipper som sørger for riktig inneklime for skjøre museumsgjenstander av tre eksponert for romluft, og samtidig minimere energiforbruket. Prinsippene skal evalueres ved å utføre en mikroklimatisk analyse ved hjelp av en dynamisk bygningssimulering i IDA ICE (EQUA Simulation AB, 2019).

1.3 Avgrensninger og omfang

Fokuset i denne masteroppgaven er hvordan bruk av ulike ventilasjonsprinsipper kan klimatisere vikingskipene og samtidig redusere energiforbruket til klimaanlegget. Simuleringer er utført på de ulike ventilasjonsprinsippene som er vurdert.

Oppbygningen av ventilasjonsaggregatet som ventilerer for sonene med vikingskip er ikke en del av fokuset til oppgaven, selv om det er inneforstått at oppbygningen til dette systemet har en innvirkning på det totale energibruket til bygget og til klimaanlegget. Å implementere komponenter, som avfuktere og befuktere, med høyere energieffektivitet gjør det mulig å redusere effektbehovet og energibruket til klimaanlegget.

Kostander blir i stor grad vektlagt i beslutningsprosessen når valg av ventilasjonssystemer til et prosjekt skal gjøres. Kostnadene ved å implementere de ulike prinsippene som er vurdert i denne oppgaven er vanskelig å forutsi, så kostnader knyttet til systemene og bygging av klimaanlegget er ikke beregnet.

1.4 Metodikk

Denne masteroppgaven har samlet informasjon og teori om ventilering av museer og hva som er nytt innenfor dette tema gjennom et litteraturstudie. Ventilasjonsprinsippene som blir omtalt i teorien vurderes og det utføres manuelle beregninger av disse. Ut i fra disse løsningene velges det noen scenarier hvor det skal utføres en energisimulering i IDA ICE. For å få simuleringen til å fungere og ved implementering av et mikroklima er det brukt prøve- og feilemetoden.

1.5 Oppbygning

Første del av oppgaven er et "State of the art" litteraturstudie som beskriver hvordan og hvilke prinsipper som brukes innen ventilering av museer i dag, og hva det kan forskes på videre. Deretter kommer en teoridel som beskriver designparametere for et klimaanlegg i museer, samt at ulike ventilasjonsprinsipper blir beskrevet og forklart med enkle skisser.

Andre del av oppgaven tar for seg en case-studie av det nye Vikingtidsmuseet i Oslo basert på Statsbygg sitt skisseprosjekt (STATSBYGG, 2017a). Simuleringsdata som skal brukes i IDA ICE er basert på dette dokumentet. Metodekapittelet inneholder en vurdering av de ulike ventilasjonsprinsippene og beregninger på disse, samt beskrivelse av simuleringsdata, simuleringsscenarioer og en robusthetsvurdering.

Resultatene blir presentert i siste del av oppgaven. Disse resultatene blir så evaluert og diskutert med tanke på oppgavens hensikt og mål, og det utføres en robusthetsvurdering av

det beste systemet. En konklusjon fattes på grunnlag av resultatene og denne robusthetsvurderingen. Til slutt blir noen forslag til videre arbeid basert på denne masteroppgaven presentert.

State of the art

Opp gjennom årene har det blitt forsket på konservering av museums bygninger og hvordan man kan bevare disse på best mulig måte, samt gjenstandene de huser. På 1900-tallet var kravet til inneklime mye strengere enn det er i dag, og noen museer hadde nulltoleranse for avvik fra settpunkter. Først på starten av 2000-tallet ble det økt interesse for å klimatisere med mer realistiske settpunkter og større svingninger ble tillat (Kramer et al., 2016). Daglige svingninger øker, mens de timesvise svingningene reduseres ved å slakke av på klimaspesifikasjonene.

Det finnes tre former for konservering: preventiv konservering, korrigerende konservering og restaurering. Gjennom forskning og studier er det vist at preventiv konservering er den mest kostnadseffektive og bærekraftige løsningen for å redusere operative kostnader og energibehovet uten at det går ut over konserveringen og menneskelig komfort (Lucchi, 2018).

Kunsthauz Bergenz, Kolumba Art Museum i Cologne og Emil-Schumacher-Museum i Hagen har alle fokusert på preventiv konservering. Disse museene har vist en reduksjon i energikostnader ved å bruke fornybar energi og ulike driftsverktøy for å gjøre museet mer energieffektivt (Mueller, 2013). God klimakontroll av overflate temperaturer, ventilasjon og luftlåser gjør at driften av disse bygningene drives med høyere ytelse og mer effektivt enn før.

Tidligere har det blitt fokusert på preventiv konservering, design av museums bygning og driftsverktøy for kontroll og forebygging av skader. Nyere forskning, fra 2006-

2016, fokuserer på energieffektivitet og bærekraftighet (Lucchi, 2018). Ny teknologi og måter å forske på har gitt mer kunnskap om aspekter som klimaendringer, reduksjon av drivhusgasser og energibesparing, noe som har endret tankegangen blant forskere når det gjelder konservering av museer og gjenstander. Hovedfeltene det forskes på i dag er arkitektur og design av utstillingene, miljø- og energisimuleringer, skade forebygging og miljøforvaltning, samt overvåkning, registrering og kontrollering av miljøvernmidler.

Energieffektivitet blir brukt som et verktøy for å kunne redusere energibruket når det kommer til design av ventilasjonssystemer for museer. Noen retningslinjer for energieffektivt design er beskrevet i "Venice Charter for Conservation and Restoration" og er som følger: gjøre minst mulig inngrep, kompatibilitet, holdbarhet, reversibilitet, identifiserbarhet, autentitet og respekt for det opprinnelige materialet (de Santoli, 2015). Disse retningslinjene foreslår at begrepet forbedringer blir byttet ut med begrepet tilpasninger i gjeldende krav og standarder med hensyn til sikkerhet og komfort.

Slike retningslinjer gjør det mulig å utføre energianalyser av bygget. En slik energianalyse burde utføres minst to ganger; først for å definere den faktiske tilstanden til bygningen, for så å evaluere resultatene etter at forbedringen er implementert. Energianalyser utføres gjerne gjennom energisimuleringer, noe som gjør det mulig å sammenligne energibruket og se hvilken innvirkning forbedringen har hatt på energieffektiviteten. Å skille mellom resultatene for energibruket til oppvarming, kjøling, ventilasjonssystemet og selve anlegget til bygget er viktig i en slik simulering. Dette gjør det lettere å evaluere mulige ineffektiviteter i energitransformasjonsoperasjoner (de Santoli, 2015). Målet med en slik energianalyse er å evaluere gjennomførbarheten til ulike forbedringer som kan gjøres med tanke på energieffektiviteten og vurdere energiytelsen til bygget. Vurderingen av energiytelse er basert på energiytelsesindeksen, EP, som er årlig energiforbruk. Denne indeksen er gjerne oppgitt i kWh/m² per år.

Kramer et. al. utførte en case-studie ved museet Hermitage Amsterdam hvor de sammenlignet ASHRAE klassifisering AA og A mot en referansemodell hvor ingen svingninger var tillatt (Kramer et al., 2016). Forskjellen på disse scenariene var hvor store svingninger fra settpunkter som var tillatt. Klasse A tillater størst svingninger. En energisimulering med kravene til klasse AA viste en reduksjon i det relative energiforbruket på 49% sammenlignet med referansemodellen, mens en energisimulering med kravene til klasse A viste en reduksjon på hele 63%. Energiforbruket for klasse A var på 385 kWh/m² per år, sammenlignet med 1053 kWh/m² per år for referansemodellen. Denne case-studien viser at

det å implementere større variasjoner i settpunkter og tillatte svingninger gjør det mulig å redusere energiforbruket betraktelig.

Selv om det er stort fokus på å gjøre driften av museer så energieffektiv som mulig, er det også viktig å ta hensyn til de mikroklimatiske forholdene i et museum. Før i tiden ble settpunkter for relativ fuktighet og temperatur bestemt med tanke på menneskelig komfort og ikke med tanke på gjenstandene (Ascione et al., 2009). I dag er det motsatt. Mikroklimatiske forhold bestemmes ut fra hvilke verdier for RF og temperatur som er optimale for konservering av gjenstander. Hygrotermiske svingninger innenfor et området avgrenset av en sikkerhetsgrense og null kalles for det mikroklimatiske sikkerhetsområdet (Litti et al., 2017). En ”indoor microclimate quality”(IMQ) analyse gjør at inneklimateforholdene i museet og rundt gjenstandene kan bestemmes og gjør det mulig å definere settpunkter for et mikroklima. Mikroklimatiske settpunkter inkluderer relativ fuktighet, temperatur og forurensninger, som CO₂.

Carla Balocco et. al. utførte i 2015 en case-studie ved Palatina biblioteket i Italia (Balocco et al., 2016). Denne case-studien viser en mikroklimatisk analyse av to forskjellige scenarier i arkivrommet De Rossi. Første scenariet er av den nåværende tilstanden hvor naturlig ventilasjon brukes, og det andre er ved bruk av et CAV ventilasjonssystem foreslått av forskerne. Begrensninger på antall besøkende i rommet, leser tilgang og aktiviteter som kunne påvirke konsentrasjonen av forurensninger i rommet ble satt. ”Air diffusion performance index”(ADPI) ble også beregnet. Denne indeksen gir informasjon om luftdistribusjon i sonene knyttet til ventilasjonseffektivitet, kondensasjon og kontroll av muggvekst. CFD-simuleringer viste at scenariet med ventilasjonssystemet var det mest effektive med tanke på de mikroklimatiske forholdene. Den relative fuktigheten viste seg å være mer stabil gjennom døgnet, både på vinteren og sommeren, mens temperaturen varierte litt, men ikke betydelig.

Mange av de mikroklimatiske forholdene blir i dag kontrollert av ulike sensorer for temperatur, RF og forurensninger i rommet. Mange av disse krever mye avansert utstyr og er vanskelige å håndtere og vedlikeholde. Gaudenzi Asinelli et. al. har utviklet en prototype for utstyr til overvåking og kontroll av inneklimate rundt kulturminner (Gaudenzi Asinelli et al., 2018). Prototypen baserer seg på ”open hardware” og gir mulighet for å måle relativ fuktighet, temperatur og duggpunkttemperaturen i rommet som overvåkes. Data blir sendt til en IoT-plattform slik at sanntidsvisualisering, nedlastinger og analyser er mulig. Prototypen ble prøvd ut ved Casa de Convalescencia i Vic, Spania, og viste gode resulta-

ter. Temperatur og RF holdt seg mer stabile enn ved bruk av allerede eksisterende utstyr. Prototypen skiller seg ut ved å basere seg på WiFi og IoT. Dette gjør denne prototypen billigere enn dagens utstyr, lettere å håndtere, mindre vedlikehold og den gir muligheter for å skreddersy utstyret slik at spesifikke behov kan dekkes. Når det kommer til energieffektivisering av museer og konservering av gjenstander er dette er en ny, pålitelig teknologi som er på vei inn i markedet.

I dag forskes det allerede på innovative mikroklimasensorer som skal sikre interoperabilitet, reversibilitet, brukervennlighet og sanntidsinnsamling, som prototypen til Gaudenzi Asinelli. De Santoli påpeker at forholdet mellom installasjoner og restaurering er kritisk for konservering og energieffektivisering, og er noe som må bli mer utforsket. Andre interessante forskningspunkter for fremtiden er sanntids og forenklede energimodeller som kalibreres etter reelle data, enkle og brukervennlige verktøy til miljøsimuleringer og overvåkning av gjenstander til bruk av konservator og ansatte, og kriterier og teknologier for integrering av klimaanlegget i historiske bygninger. Forbedringspotensialet er der og forskningspunktene er mange.

Kapittel 3

Teori

Et museum er en institusjon som skal bevare og tolke håndfaste beviser på miljøet og menneskeheten (Britannica, 2018). Museer er offentlige eller private institusjoner som huser en systematisk samling av gjenstander tilknyttet kulturarven som er tilgjengelig for offentligheten (Opstad and Hjemdahl, 2018). Formålet med museer er å sikre opplysninger knyttet til kunstverk eller gjenstander, å sikre disse mot ødeleggelser og gi historiske opplysninger og opplevelser til folket. Deler av teorien er hentet fra prosjektoppgaven skrevet høsten 2018.

3.1 Inneklima

Klimaanlegget for et museum har som regel spesielle krav til inneklima som må innfris. Å ivareta inneklimakravene til utstillingsobjektene, som for eksempel temperatur og relativ fuktighet, er viktig. Andre krav kan være sikkerhet, komfort, helse og driftsøkonomi m.v. som oppført i ASHRAE *Standards* 55 og 62.1 (ASHRAE, 2015).

Et inneklima består i hovedsak av fem hovedparametere: termisk, atmosfærisk, akustisk, aktinisk og mekanisk miljø. Inneklima påvirkes også av det estetiske og psykososiale miljøet (Ingebrigtsen, 2016). Parameterene det legges størst vekt på ved design av et klimaanlegg for museer er det termiske, atmosfæriske, aktiniske og estetiske miljøet.

3.1.1 Termisk miljø

Det termiske miljøet består av luftfuktighet, strålingstemperatur, lufttemperatur og lufthastighet (Ingebrigtsen, 2016). Bekledning, oppholdstid og aktivitetsnivå er med på å bestemme vår oppfatning av det termiske miljøet. For å kunne preservere objekter eksponert for romluft på best mulig måte, men også ha et godt inneklima for besøkende, er det viktig at de termiske forholdene er så stabile som mulig. Forskjellige parametere som påvirker de termiske forholdene i et rom er blant annet varmeavgivelse fra menneskekroppen, overflater og utstillingsobjekter, samt fra bygningsmaterialer og stråling.

3.1.2 Atmosfærisk miljø

Luftkvaliteten, som vil si gasser, partikler, lukter og kjemiske stoffer i luft, er med på å påvirke det atmosfæriske miljøet. Bygningen kan bli mer energieffektiv ved å ta hensyn til bygningsgeometrien, orientering og solstyring av vinduer, termisk isolasjon og den termiske kapasiteten på romflater. Et dårlig atmosfærisk miljø kan føre til blant annet helseplager, konsentrasjonsvansker og muggvekst. Filtre i ventilasjonsanlegget brukes til å rense luften for forurensninger og forbedrer luftkvaliteten.

3.1.3 Aktinisk miljø

Belysningsnivået i rommet, radiobølger, dagslysnivå og lyskildens fargeegenskaper påvirker det aktiniske miljøet. For utstillingsobjekter er belysning den største trusselen, da de blir eksponert for dette store deler av døgnet. Belysningskontrollering består i hovedsak av tre oppgaver: belysning av rom, synliggjøring av utstillingsobjekter og bevaring av gjenstander (Mueller, 2013). Tiden en gjenstand blir påvirket av belysning er med på å fremskynde aldringsprosessen, og god belysningskontroll er viktig. Noen tiltak for å redusere strålingen på gjenstandene er å redusere den infrarøde strålingen, eliminere ultrafiolett stråling, begrense total belysningsvarighet og begrense strålingsintensiteten fra lysene (ASHRAE, 2015). Dette kan blant annet gjøres ved å ha ekstra lysdiffusjon eller solskjerming på vinduer, eller ha takvinduer.

3.1.4 Estetisk miljø

Menneskets egne holdninger og oppfatninger påvirker det estetiske miljøet. Et godt estetisk miljø innebærer trivelige og pene omgivelser, og det oppfattes som behagelig for øyne, nese, ører og smak (NTNU and SINTEF, 2007). Hvordan besøkende oppfatter utstillingene og stemningen i et museum er avhengig av det estetisk miljø. Å integrere eller

”usynliggjøre” de mekaniske installasjonene til ventilasjonssystemet, som rør og kanaler, gjør det estetiske miljøet bedre.

3.2 Design av klimaanlegg for museer

Nøkkelen til å designe et bra klimaanlegg for museer er å ha et godt samarbeid mellom de ulike bidragsyterne i prosjektet. Vanlige bidragsytere er eieren av prosjektet, tekniske rådgivere, arkitekter og konservatorer. Begrensninger, forventninger og krav må bli definert tidlig i designfasen slik at problemer kan bli løst. Boken 2015 ASHRAE Handbook - HVAC Applications (SI) ramser opp ni typer trusler som kan skade utstillingsobjektene (ASHRAE, 2015). Et godt designet ventilasjonssystem skal kunne ta hensyn til disse truslene. Truslene er som følger:

1. **Belysning:** en av de største truslene, men det er relativt lett å redusere og kontrollere hvis problemet blir adressert i designfasen.
2. **Relativ luftfuktighet:** tre er et hygroskopisk materiale som har et visst fuktinnhold ved likevekt. I denne tilstanden er materialet i biologisk, kjemisk og fysisk stabilitet. Store variasjoner i RF kan være kritisk for trematerialer, men også for andre biologiske materialer.
3. **Temperatur:** temperatursvingninger påvirker RF i materialer.
4. **Luftforurensing:** gass- og partikkelforurensninger fra luften ute som trenger inn i bygningen påvirker luften inne, som igjen påvirker eksponerte utstillingsobjekter. Bruk av high-end filtre i ventilasjonssystemet kan kontrollere disse innslippene.
5. **Skadedyrangrep:** insekter, sopp, bakterier og mugg kvalifiserer som skadedyr og ødelegger gjenstander ved å brødfø seg av materialet. Å ha riktig temperatur, RF og bruk av filtre kan redusere denne typen ødeleggelser.
6. **Vibrasjoner og støt:** vibrasjoner gjennom kanalene i ventilasjonssystemet er en stor bekymring spesielt når det kommer til bilder og objekter som er festet på veggene. Med gode opphengsmetoder er det enkelt å redusere denne påvirkningen.
7. **Naturkatastrofer:** brann, flom og jordskjelv er sjeldne, men de kan oppstå. En sikkerhets- og evakueringsplan er viktig å ha i tilfelle slike situasjoner skulle forekomme.

-
8. **Mekaniske utformings- og konstruksjonsfeil:** kan i stor grad unngås ved gode og gjennomarbeidede løsninger. Hvis noe skulle gå galt er det viktig å ha et backup-system som kan holde ønsket inneklimate konstant.
 9. **Tyveri og hærverk:** begrenset adgang til museet og de tekniske rommene må tas i betraktning for å forbedre sikkerheten og hindre ødeleggelser av ventilasjonssystemet.

3.2.1 Temperatur og relativ fuktighet

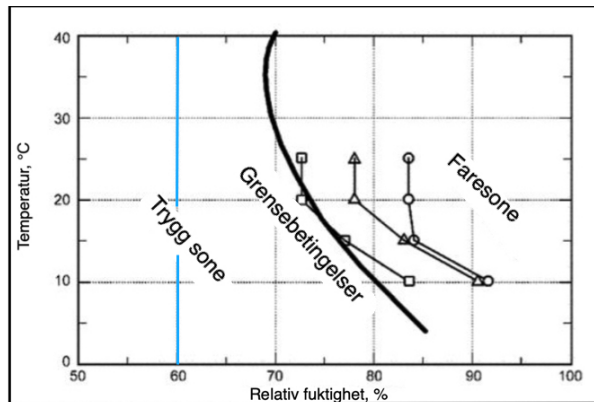
Temperatur og relativ fuktighet er de viktigste parameterene å ta hensyn til ved design av klimaanlegg til museer. Disse to parameterne er avhengig av hverandre; når temperaturen endres, endres også den relative fuktigheten. Klimaanlegget blir designet til å håndtere innendørs luftkvalitet, luftfuktighet og temperatur i utstillingsrommene. Med en liten justering av disse parameterene kan livstiden til en gjenstand øke betraktelig. Temperatur, RF, innendørsluftkvalitet og stråling påvirker nedbrytingen av materialer, noe som resulterer i kjemiske, mekaniske og biologiske skader (D'agostino et al., 2015).

Kjemiske skader er et resultat av kjemiske reaksjoner i materialer. Kjemisk nedbrytning påvirkes av høye temperaturer og moderate mengder med relativ fuktighet. Den kjemiske reaksjonshastigheten øker betraktelig med økende RF, økende temperatur og aktiveringsenergien til materialet (Mecklenburg and Tumosa, 1999).

Mekaniske skader kommer av svingninger eller lave verdier av temperatur og RF, noe som øker stivheten til organiske materialer og gjør de mer utsatt for brudd. Den største årsaken er sammentrekninger og utvidelser i materialer kombinert med eksterne og interne begrensninger (ASHRAE, 2015). Ekspansjonskoeffisienten til tre minimeres ved moderate RF nivåer, så veldig lave eller høye RF verdier utgjør en stor risiko for mekaniske skader. Fukt- og varmeproduksjon fra besøkende danner svingninger i RF og temperatur. Da antallet besøkende er vanskelig å forutse, blir det vanskelig å ta hensyn til disse svingning når klimaanlegget skal designes. Forurensende partikler menneskene tar med seg fra uteluften kan bidra til mekaniske skader på eksponerte utstillingsobjekter.

Biologiske skader oppstår pga. høye RF nivåer, noe som akselererer forekomsten av mugg og bakterier. Mugg oppstår først og fremst på utstillingsobjekter med overflater forurenset av sukker, støv, oljer, stivelse osv., men kan også oppstå på objekter laget av bein, skinn og gress. Muggvekst er avhengig av RF, temperatur og tid, noe som er vist i figur 3.1.

Grensen for muggvekst er satt til 60% RF, og som vist i figur 3.1 vil RF nivåer under dette forhindre biologiske skader (ASHRAE, 2015). På figuren vises dannelsen av muggvekst på skinn som firkanter, på stivnet bomull som trekkanter og på gammelt pergament som rundinger. Den blå streken viser maksimalt tillatt RF i museer satt av ASHRAE. Figuren er basert på opplysninger fra ASHRAE og modifisert til denne oppgaven.



Figur 3.1: Muggvekst på ulike materialer påvirket av RF og temperatur

3.2.2 Anbefalte verdier

Et optimalt klimaanlegg opprettholder ønskede verdier for temperatur og relativ fuktighet, samt unngår store variasjoner i settpunktene som er satt. Ideelle settpunkter er et kompromiss mellom passende minsteverdier for temperatur og RF for objektene, og komfortbehovet til besøkende og ansatte ved museet. Siden alle museer er forskjellige finnes det ingen universale settpunkter for temperatur og RF, men ASHRAE har foreslått alternativer til slike settpunkter. Alternativene for variasjoner i temperatur og RF er klassifisert i kategori AA, A, B, C og D. Settpunktene som er anbefalt er basert på kunnskap fra forskning, tilgjengelig data og konservatorenes evalueringer (ASHRAE, 2015). Klasse A er anbefalt for museer, og anbefalte verdier og settpunkter for temperatur og RF for denne klassen er gitt i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Anbefalte verdier for svingninger i temperatur og RF for klasse A

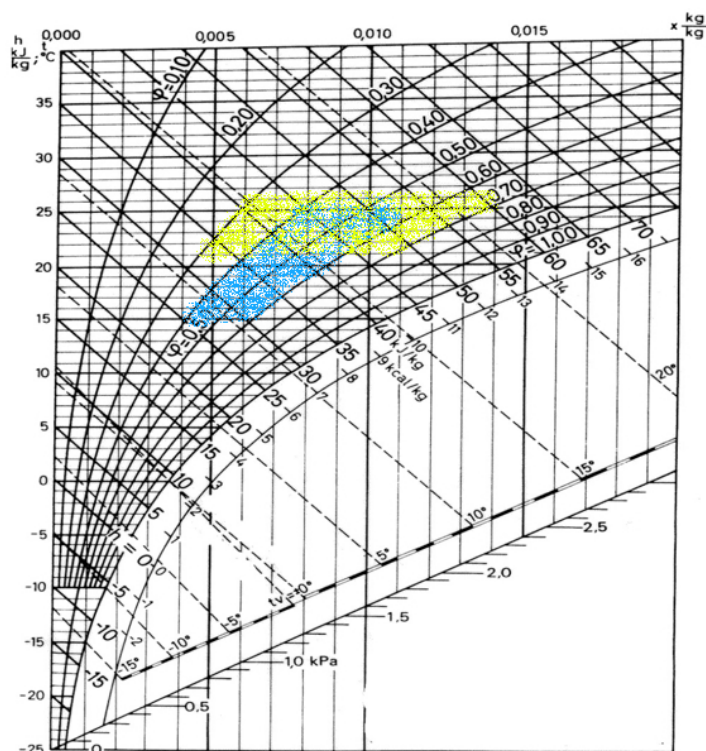
Settpunkt		Kortsiktige variasjoner	Sesongbaserte justeringer
Temperatur	15-25 °C	± 2 K	Opp 5 K, ned 10 K
Relativ fuktighet	50% RF	± 10% RF	Opp 10% RF, ned 10% RF

Kategori A er anbefalt fordi den er mindre energikrevende enn kategori AA. Kategori A krever presisjonskontroll og tar hensyn til sesongbaserte variasjoner i temperatur og RF, i tillegg til tilbakefall ved systemfeil. Fordelen ved å bruke denne kategorien er at risikoen for mekaniske skader på eksponerte gjenstander er liten. Ulempen er at gjenstander som er kjemisk ustabile blir ubrukelige innen noen tiår som følge av større variasjoner i temperatur og RF.

3.3 Kontroll av relativ luftfuktighet

Luft består av nitrogen, oksygen, argon og karbondioksid. Fuktig luft dannes ved at vandamp tilsettes luften, og er en blanding av vannpartikler, tørr luft og mettet vanddamp (Aaslund, 2015). Ved konstante temperaturer og varierende relativ fuktighet, er det små variasjoner i luftens vekt. Varmeinnholdet i luften, også kalt entalpi, er et mål på hvor mye energi som tilføres luften. Luften blir varmere og entalpien øker ved tilførsel av energi. Prosessen er det motsatte ved kjøling. Vanninnholdet i luft avhenger av relativ fuktighet, temperatur, partialtrykket og entalpi. Disse sammenhengene er gjerne presentert i et Mollierdiagram som er vist i figur 3.2.

Mollierdiagrammet i figuren viser to markerte områder. Gult område indikerer ønsket innneklima i et kontorbygg, hvor temperaturen er mellom 21 og 26 °C, mens RF er mellom 30 og 70%. Blått område indikerer ønsket innneklima i et museum etter krav fastsatt av ASHRAE, hvor temperaturen er 15-25 °C, mens RF er 40-60%. Figuren er modifisert til denne oppgaven.



Figur 3.2: Mollierdigram med markerte verdier for ønsket inneklime i kontorbygg (gul) og museer (blå)

For å kunne kontrollere luftfuktigheten brukes gjerne fuktsensorer som er taktisk plassert rundt i sonen som skal ventileres. Disse sensorene måler luftfuktigheten i sonen og sender den målte verdien tilbake til en regulator i ventilasjonsaggregatet. Denne regulatoren sammenligner den mottatte verdien opp mot settpunktet for RF i sonen. Hvis denne verdien avviker fra settpunktet bestemmer regulatoren om systemet skal avfukke eller befukte tiluften til sonen, også kalt prosessluften.

Det finnes ulike metoder for avfuktning og befuktning av luft, og de vanligste forklares i etterfølgende tekst. Prosessene som er vist i figurene nedenfor er alle ideelle prosesser. Fukt- og varmeproduksjon fra mennesker og gjenstander i sonen må tas hensyn til i virkeligheten, og den reelle prosessen vil se litt annerledes ut enn den ideelle prosessen.

3.3.1 Avfuktning

Avfuktning skjer ved at luften tørkes og vanninnholdet minker. Avfuktingsbehovet gir et tall på hvor mye vann som må felles ut fra prosessluften per time og er gitt i kg/h. Avfuktingsbehovet er avhengig av ønsket luftfuktighet, og er gitt i ligning 3.1.

$$AF = q \cdot \rho \cdot (x_1 - x_2) \quad (3.1)$$

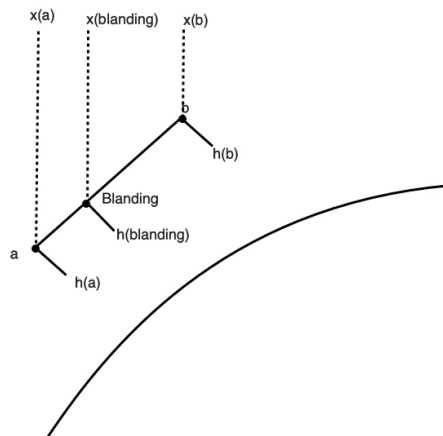
I ligningen for avfuktingsbehovet er:

q - luftmengde [m^3/h]

x - vanninnhold per kg tørr luft [g/kg]

ρ - tettheten til luft [kg/m^3]

Adsorpsjonsavfuktning og kondensavfuktning er de vanligste formene for avfuktning av uteluften som tilføres et rom. Mekanisk ventilasjon med ren uteluft kan også brukes, og er den enkleste og billigste formen for avfuktning. Til gjengjeld gir den ikke like god kontroll på RF-nivået som de andre avfuktingsmetodene. Denne metoden baserer seg på utskifting av en del av romluften med tørr uteluft. Det vil si at uteluften må ha et lavere fuktighetsnivå enn ønsket fuktighetsnivå i rommet. Blandingen av disse luftmengdene vil bidra til å redusere RF-nivået i rommet som vist i figur 3.3.

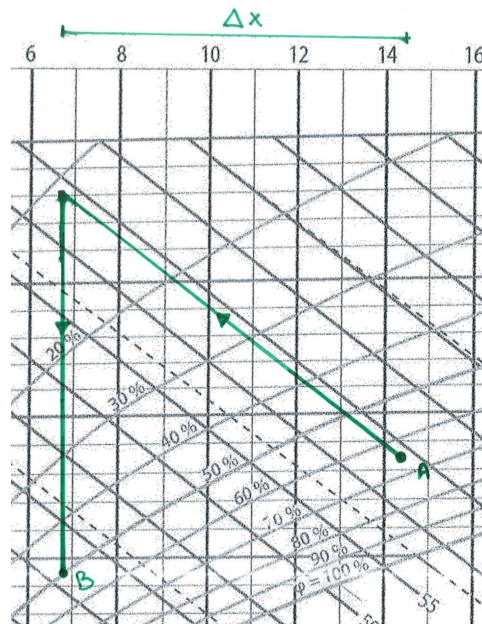


Figur 3.3: Blanding av to luftmengder a og b

Adsorpsjonsavfuktning er en prosess hvor de kjemiske og fysiske egenskapene til et hygroskopisk materiale ikke endres gjennom avfuktingsprosessen. Et materiale som er mye brukt i adsorpsjonsavfuktere er silicagel, som er et materiale som fungerer som en ”svamp”

og har god evne til å oppta fuktighet fra luften (Mazzei et al., 2005). En hygroskopisk varmegjenvinner benytter ofte silicagel som et overflatebelegg på rotoren. Forskjellene i partialtrykket til damp mellom prosessluften og silicagelen gjør at adsorpsjonen skjer, og dampen fra luften trekkes ut og ”festes” på silicagelen. Luften etter avfuktning har høy temperatur, og må derfor kjøles ned med et kjølebatteri før den tilføres sonen.

Luften om sommeren i Norge har gjerne et høyt vanninnhold og relativt høy temperatur og må gjerne avfuktes før den slippes inn i rommet. En varm sommerdag kan det være temperaturer på over 30 °C og høy luftfuktighet. For å illustrere avfuktningssprosessene i et Mollierdigram er en utelufttilstand på 27 °C og en RF på 65% (A) brukt som eksempel. Ønsket innetemperatur kan være på 19 °C og 50% RF (B).



Figur 3.4: Ideell prosess gjennom en adsorpsjonsavfukter fra punkt A til B

Figur 3.4 viser den ideelle avfuktningssprosess ved adsorpsjon på en varm sommerdag. Vanninnholdet i punkt A er ca. 14,6 g/kg og ved punkt B er det ca. 6,8 g/kg. Det vil si at det må felles ut 7,8 g/kg vann. Fra punkt A økes temperaturen og vann ”fordamper” slik at vanninnholdet i prosessluften minker. Når ønsket vannmengde i prosessluften blir nådd er temperaturen veldig høy, rundt 46 °C. Prosessluften kjøles derfor ned til ønsket temperatur gjennom et kjølebatteri, og punkt B oppnås.

den stiplede linjen på figuren, da noe av luften vil passere kjølebatteriet uten å nå duggpunktstemperaturen. Avfuktningsbehovet er det samme som ved adsorpsjonsavfukning: 7,8 g/kg vann. Når ønsket vannmengde er felt ut, er temperaturen sunket til 8 °C. For å oppnå riktig temperatur på prosessluften varmes den opp gjennom et varmebatteri til ønsket temperatur i punkt B.

3.3.2 Befuktning

Befuktning av luft kan skje gjennom tilsetning av vanddamp eller vann. Befuktningsbehovet per time vil si hvor mye vann/damp som må tilføres prosessluften i kg/h for å oppnå den ønskede luftfuktigheten. Befuktningsbehovet er gitt i ligning 3.2 (Skarland Press, 2018).

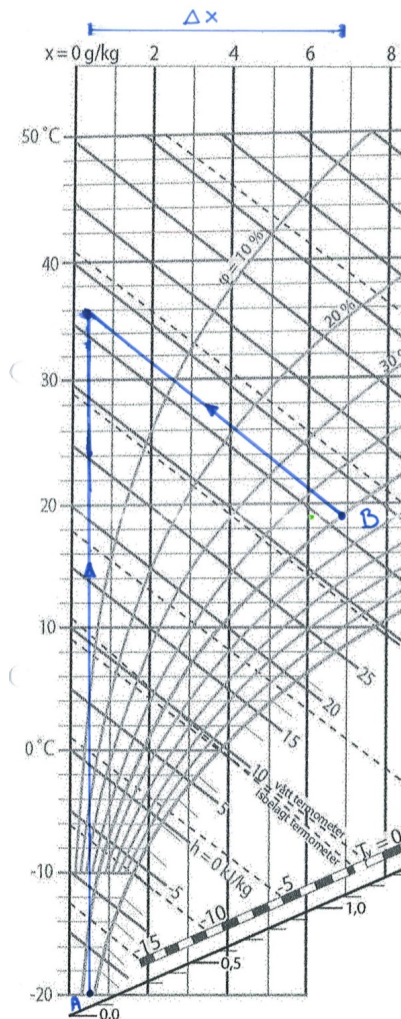
$$F = q \cdot \rho \cdot (x_2 - x_1) \quad (3.2)$$

Får å få til en befuktning av luften kreves det en viss effekt. Dette effektbehovet er gitt ved ligning 3.3 og har enheten kW (Ingebrigtsen, 2016).

$$P = (h_2 - h_1) \cdot q \cdot \rho / 3600 \quad (3.3)$$

Befuktning med vann kalles adiabatisk kjøling, og prosessluften kjøles ned til ønsket temperatur. Prosessluften tilføres vann med en viss entalpi, h , og når vannet tilføres reduseres temperaturen. Mengden vann som må tilføres bestemmes av befuktningsbehovet.

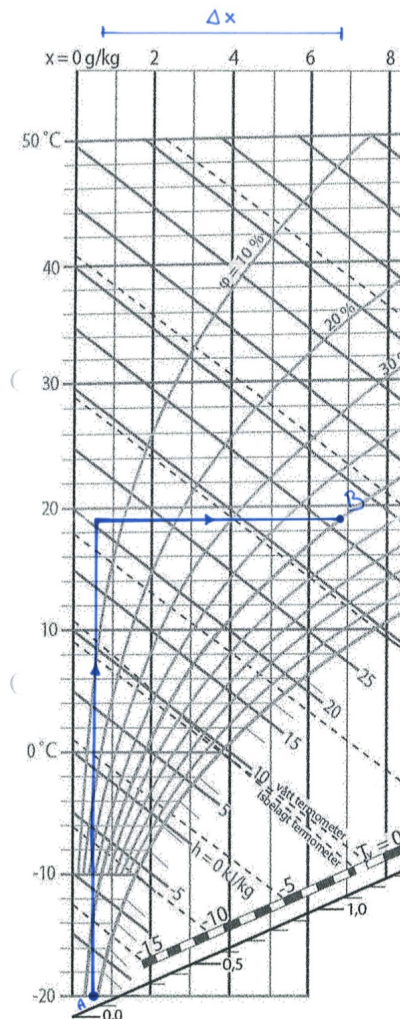
Uteluften om vinteren i Norge er gjerne veldig tørr og må i mange tilfeller befuktes for å ligge innenfor de grenseverdiene som er ønsket. En kald vinterdag kan det være mer enn -20 °C og høy relativ fuktighet. For å illustrere befuktningsprosessen i et Mollierdiagram er en utelufttilstand med -20 °C og en RF på 80% (A) brukt som et eksempel. Ønsket innetemperatur kan være 19 °C og 50% RF (B).



Figur 3.6: Ideell prosess ved befuktning av luft med vann fra punkt A til B

Figur 3.6 viser prosessen med befuktning av luft med vann i et Mollierdiagram. For å komme fra punkt A til punkt B varmes luften opp gjennom et varmebatteri til ca. 34 °C. Vanninnholdet i luften ved denne temperaturen er ca. 0,5 g/kg. Vanninnholdet er ca. 6,8 g/kg ved ønsket temperatur og RF, som vil si at det må tilføres 6,3 g/kg vann til hver kg prosessluft. Prosessluft på 34 °C går gjennom befukteren og vanninnholdet økes, samtidig som temperaturen minker. Entalpilinen følges ned til punkt B, og ønsket temperatur og vanninnhold er oppnådd.

Befuktning med damp kalles isothermisk befuktning, da temperaturøkningen på luften er såpass liten at den er neglisjerbar. Denne formen for befuktning skjer ved at luft kjøles ned eller varmes opp til ønsket temperatur. Når denne temperaturen er nådd tilsettes det damp til prosessluften. En dampbefukter krever et relativt stort effektbehov, da vann skal kokes for å danne damp. I tillegg er det en del varmetap gjennom prosessen, blant annet i kjelen, rør osv. Effekten ved tilførsel av damp på 100 °C tilsvarer 2675 kJ/kg ved normalt atmosfæretrykk (Ingebrigtsen, 2016).



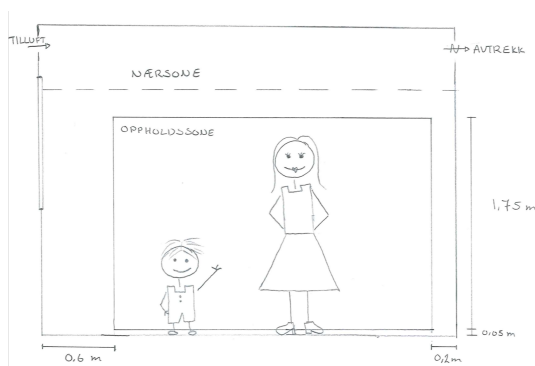
Figur 3.7: Ideell prosess ved befuktning av luft med damp fra punkt A til B

Basert på den kalde vinterdagen, viser figur 3.7 prosessen med befuktning av luft ved tilførsel av damp i et Mollierdiagram. Befuktningens behovet er det samme som ved befuktning av vann: 6,3 g/kg tørr luft. Fra punkt A varmes prosessluften opp til ønsket temperatur gjennom et varmebatteri. Deretter går det gjennom dampbefukteren (kjelen) hvor det tilsettes damp til ønsket vanninnhold i punkt B er nådd.

3.4 Luftfordelingsprinsipper

Hensikten med et ventilasjonssystem er å fjerne forurensninger i luften som varme, partikler, gasser og vanddamp, samt oppnå et godt inneklime. Hvilket luftfordelingsprinsipp som burde velges avhenger av rommets form og høyde, romflatens temperatur, lufttemperaturen, lufthastigheter i rommet fra andre forhold, forurensningskilder og -plassering, samt varme- og kjøleelementers plassering og effekt (Ingebrigtsen, 2016). Basert på disse forholdene finnes det flere forskjellige luftfordelingsprinsipper å velge mellom. Hovedprinsippene som brukes mest i dagens museer er omrøringsventilasjon og fortrengningsventilasjon.

Oppholdssonen er et begrep som blir mye brukt i forbindelse med ventilering, og er definert som det området hvor personer normalt oppholder seg. Oppholdssonen begrenses av et horisontalt plan 0,05 m over gulvet og et på 1,8 m over gulvet, samt et vertikalt plan 0,6 m fra yttervegg og et 0,2 m fra innervegg. Definisjonen på en oppholdssone er vist i figur 3.8. Krav til lufthastigheter, temperatur, temperaturgradienter osv. settes i oppholdssonen, noe som gjør at områder utenfor oppholdssonen noen ganger ikke tilfredsstillende disse kravene.



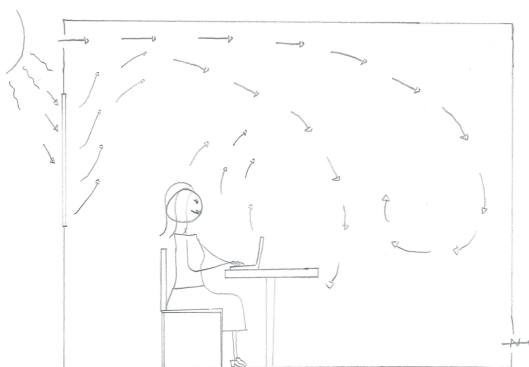
Figur 3.8: Definisjon av oppholdssonen. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

Nærsone er et annet begrep som blir brukt og er området over oppholdssonen hvor til-

luftventilene gjerne blir plassert. Nærsonen defineres som området rundt tilluftsventilen hvor lufthastigheten er høyere enn det som tillates i oppholdssonen (SINTEF Byggforsk, 1996). Temperaturen i nærsonen er gitt med en undertemperatur på 3 K, målt mellom tilluftstemperaturen og rommets temperatur. Nærsonen er vist i figur 3.8.

3.4.1 Omrøringsventilasjon

Omrøringsventilasjon, også kalt stråleventilasjon, fortynningsventilasjon og implusventilasjon, er den mest brukte formen for lufttilførsel i norske bygg (Ingebrigtsen, 2016). Med dette ventilasjonsprinsippet blir luft tilført med stor undertemperatur og store kjøleeffekter til rommet. Luft tilføres rommet via en tilluftsventil med høy impuls slik at den eksisterende luften settes i bevegelse. For å forhindre trekk i oppholdssonen foregår denne tilførselen utenfor oppholdssonen, i det som kalles nærsonen. Luften som tilføres rommet fra ventilen kalles primærluft, og den allerede eksisterende romluften kalles sekundærluft. Primærluften blandes med sekundærluften via induksjon og senker hastigheten i luftstrålen før den kommer ned til oppholdssonen. Hvis luften blir fullstendig blandet blir ventilasjonseffektiviteten 1,0, men som regel er ikke dette tilfelle. Ventilasjonseffektiviteten er avhengig av hvor tilluft- og avtrekksventilene er plassert i rommet. Et bilde på hvordan luften fordeler seg ved omrøringsventilasjon er vist i figur 3.9.



Figur 3.9: Prinsipp for omrøringsventilasjon. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

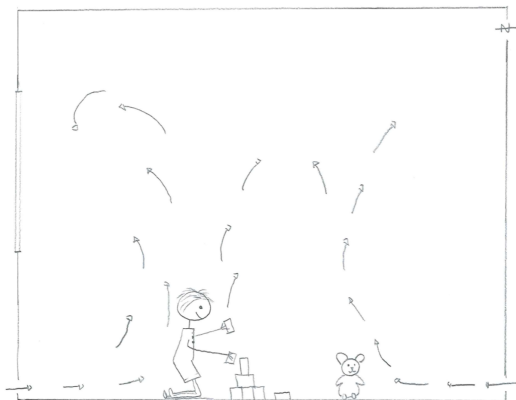
Fordelene ved omrøringsventilasjon er at det er enkelt å plassere tilluft- og avtrekksventiler, det oppstår et stabilt strømningsmønster og det kan benyttes til både oppvarming og kjøling. Luftkvaliteten og temperaturen i rommet blir den samme som for primærluften og stor induksjon gir muligheter for store kjølekapasiteter med tilluft. Da dette systemet kan brukes til kjøling trengs det et stort effektbehov, noe som kan øke energiforbruket. Store

kjøleeffekter gir også en risiko for trekk.

3.4.2 Fortrengningsventilasjon

Fortrengningsventilasjon, også kalt diffus ventilasjon, foregår ved at luft tilføres med lav impuls rett inn i oppholdssonen. Oppdriftskrefter er drivkraften bak denne ventilasjonsformen, og målet er å fjerne overflødig varme og forurensninger fra rommet (Etheridge, 1996). Fortrengningsventilasjon egner seg for lokaler med stor takhøyde hvor forurensninger tilføres sammen med varme.

Tilluften tilføres gjerne med en liten undertemperatur slik at den tilførte luften siger bortover gulvet og dekker hele gulvarealet. Rundt objekter som avgir varme dannes det konveksjonsstrømmer som beveger seg oppover. Disse strømmene tar med seg overskuddsvarme og forurensninger opp til takhøyde hvor avtrekksventiler er plassert. Rommet blir da delt inn i to soner: en nedre sone med ensrettet strømning og ren luft, og en resirkuleringsone med høyere temperatur og mer forurensninger. Et bilde på hvordan luften fordeler seg ved fortrengningsventilasjon er vist i figur 3.10.



Figur 3.10: Prinsipp for fortrengningsventilasjon. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

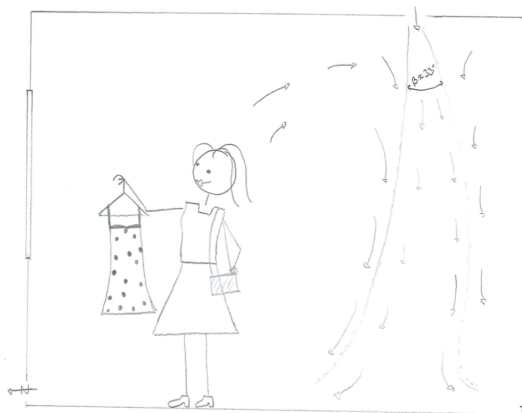
Når det kommer til fortrengningsventilasjon er det viktig at ventilene for tilluft har tilstrekkelig avstand fra hverandre, slik at strømmingene ikke påvirker hverandre, og at fortrengningsventilens nærsone ikke er blokkert av møbler og lignende. Hvis avstanden er for liten kan nærsonen øke, noe som er uønsket da trekk kan oppstå.

Fortrengningsventilasjon gir et system med høy ventilasjonseffektivitet, lave lufthastigheter og muligheter for god luftkvalitet i oppholdssonen. Systemet er også godt egnet til

kjøling av lokaler med stor takhøyde. Bruk av varmekilder som gulvvarme og radiatorer kan være tilstrekkelig i tilfeller hvor oppvarming er nødvendig.

3.4.3 Luftgardin

Luftgardiner er en form for lokal ventilasjon og skal redusere lekkasje av luftstrømmer, og brukes gjerne ved inngangspartier, ytterdører og porter der de er plassert for å redusere mengden kald luft som strømmer inn i lokalene når inngangen er i bruk. En luftgardin kan separere et luftvolum fra omgivelsene rundt. Dette gjør at sonen på den ene siden av ”skjoldet” kan holde andre temperaturer og nivåer for RF enn sonen på den andre siden. Prinsippet baserer seg på dempningsfaktoren tilluftsstrålene har (Goodfellow, 2001), og det finnes flere forskjellige typer luftgardiner. Den mest brukte er en kombinert luftgardin med inneluft, og er vist i figur 3.11.

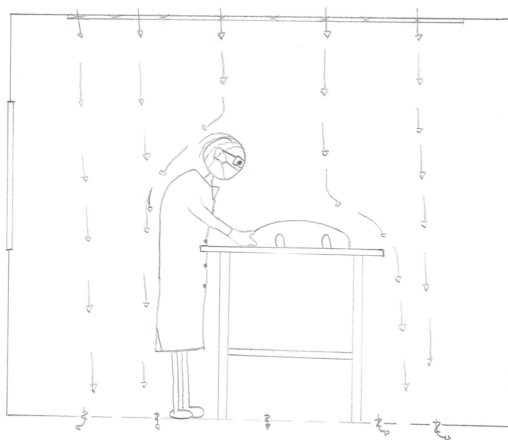


Figur 3.11: Prinsippet med en luftgardin. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

Høye lufthastigheter blir brukt for å danne et ”skjold” rundt luftvolumet som skal separeres. Dette skjoldet motstår trykk- og temperaturforskjeller, samt opprettholder vindhastigheter. Luftstrålene som tilføres kan være både to- og tredimensjonale. Utbredelsesvinkelen til en plan stråle som brukes i mange luftgardiner er tilnærmet 33° , og strålen vil etterhvert blande seg med omluften. Dette gjør at det ikke er mulig å få til en fullstendig separasjon av luftvolumene. Fordelene med en luftgardin er at det er mulig å opprettholde et annet inn klima inni luftvolumet enn for omgivelsene rundt, samt at energibruket til klimaanlegget kan reduseres, da luftmengder kan begrenses.

3.4.4 Stempelstrøm

Stempelstrøm, også kalt ideell fortregning, går ut på at luft tilføres sonen med lav hastighet gjennom høyeffektive luftfiltre og luftdiffusorer. Forskning viser at lufthastigheter på 0,25 m/s og oppover er vanlig for slike stempelstrømmer (Skaret and Norges byggforskning sinstitutt., 2000). Luftstrømmene kan enten være horisontale, diagonale eller vertikale. Bruk av diffusorer i taket er den vanligste formen og er mest brukt i renrom. Luften tilføres med en lavere temperatur en romluften, noe som gjør at den strømmer nedover. På vei ned tar stempelstrømmen med seg forurensninger i luften, før den avkastes gjennom avtrekk i gulvet (Goodfellow, 2001).

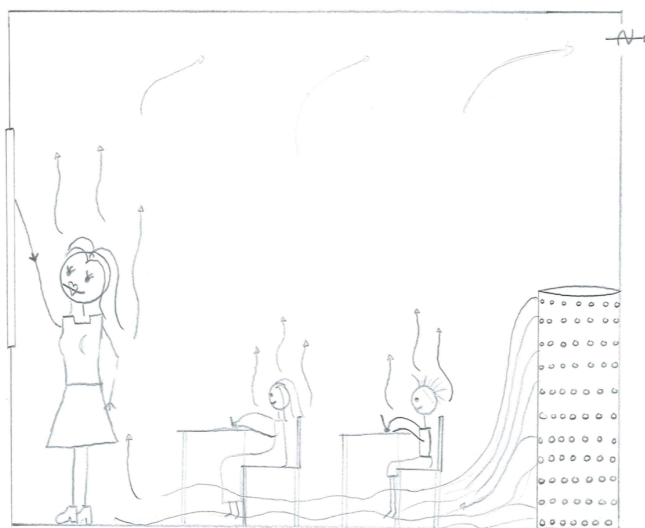


Figur 3.12: Prinsippet ved stempelstrøm. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

Figur 3.12 viser luftfordelingsprinsippet ved bruk av ensrettet laminær luftstrømning. En ulempe ved bruk av dette prinsippet er at det krever store luftmengder, men tilgjengelig minimeres spredningen av forurensninger i sonen (Whyte, 2010). Luftvekslingstallet avgjør hvor mange ganger luften skal skiftes ut per time, og luftvekslingseffektiviteten er 1,0. Teoretisk sett skal det ikke være noen forurensninger i romluften.

3.4.5 Perforert plate

Denne formen for ventilering tilfører luft jevnt over store arealer og blander seg godt med romluften. Luften som tilføres kan derfor ha en stor undertemperatur uten at trekkproblemer oppstår (Uv, 2005). Et eksempel på bruk av en perforert plate som et ventilasjonsgitter, er fronten på en fortregningsventil i et klasserom, som illustrert i figur 3.13.



Figur 3.13: Ventilering ved bruk av en perforert plate. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

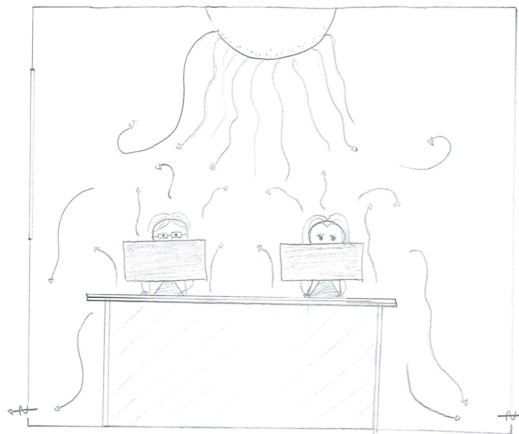
En viktig faktor for å bestemme luftkvaliteten og luftstrømmen til ventilering er de åpne arealene av en perforert plate. Perforeringsgraden sier noe om hvor stort arealet av hele platen som inneholder lysåpninger og angis i prosent. Perforeringsgraden er vanligvis mellom 30 og 50% (Hengda Perforated Metal Factory, 2019). Luftmengdene som trengs er avhengig av lufthastigheten gjennom platen, kontraksjonskoeffisienten til lysåpningene og hvilken diameter hullene har.

En fordel med perforerte plater er at de kan spesialdesignes slik at de tilpasses eventuelle krumninger på vegger eller tak. Disse platene kan lages i ulike materialer, som plast og glassfiber, men det mest brukte i dag er metall. Perforerte plater brukes til mye annet enn bare ventilering. For eksempel som solskjerming av bygg, akustiske paneler og på fasader.

3.4.6 Tekstilkanal

Prinsippet med en tekstilkanal er at luft siver ut av et materiale, enten gjennom åpninger laget i materialet eller ved å benytte materialets permeabilitet, som vist i figur 3.14. Spaltekanal, lavimpulskanal og dysekanal er tre ulike innblåsningsmetoder som kan benyttes. Slike tekstilkkanaler spesialdesignes og kommer derfor i mange forskjellige størrelser, farger, oppheng, antall deler og materialer, alt avhengig av formålet til kanalen. Disse kanalene kan også vaskes i vaskemaskinen i følge Niels Thorsen, president i FabricAir (Turpin,

2001).



Figur 3.14: Ventilering ved bruk av en tekstilkanal i takhøyde. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

Kanalsystemer hengende fra taket kommer nærmere oppholdssonen og er derfor ikke like utsatt for høyerer varmelaster og ytteligere kjøling i motsetning til kanalsystemer montert i takhøyde. Opphengte kanalsystemer kan virke komplisert å montere, men Beaver Manufacturing fant ut at dette ikke var tilfellet. Bedriften installerte tekstilkanaler i fabrikk og installasjonskostnadene ble redusert med mer enn 20%, og det tok bare tre dager å installere, i motsetning til metallkanaler som ville tatt mer enn to uker (Frantz, 2007). Dette viser at kanalsystemer av tekstil kan være mer kostnadseffektive på installasjonsfronten enn vanlige metallkanaler.

Kapittel 4

Case-studie: Vikingtidsmuseet i Oslo

Vikingtidsmuseet i Oslo som skal bygges er case-studien denne masteroppgaven skal ta for seg. Ulike løsninger for ventilering av et mikroklima rundt vikingskipene ble presentert i prosjektoppgaven. Disse løsningene kan vise seg å være mer energibesparende og -effektive enn den allerede planlagte løsningen i skisseprosjektet (STATSBYGG, 2017a). Luftmengder og lufthastigheter beregnes for de ulike løsningene og verdiene blir brukt videre i en energisimulering sammen med en rekke andre inputdata. Resultatet fra energisimuleringen er med på å avgjøre om løsningen er et alternativ til den planlagte løsningen eller ikke. Hvis dette er tilfellet er det et system som burde vurderes videre i prosjekteringsprosessen. Noen deler er hentet fra prosjektoppgaven skrevet høsten 2018.

Vikingskipshuset dekker per i dag ikke museets arealbehov og trenger en oppgradering og utvidelse. I 2013 bestemte Regjeringen at et nytt Vikingtidsmuseum skal bli bygget på Bygdøy, og har utnevnt Multiconsult som teknisk rådgiver (STATSBYGG, 2017b). Et nytt museum skal bidra til bedre arbeidsforhold for de ansatte, økt sikkerhet for utstillingsobjektene og gi den fremtidige generasjonen kunnskap om Vikingtiden.

Plan- og designkonkurransen til det nye museet startet i 2015 og det kom inn 111 bidrag. Vinneren ble kåret i april 2016 og var AART Architects med bidraget "Naust", avbildet med tillatelse på forsiden av oppgaven. I 2024-2025 vil den gamle og den nye delen til sammen utgjøre det nye Vikingtidsmuseet.

Målet med dette prosjektet er et energi- og kostnadseffektivt bygg som skiller seg fra normale kulturbygg, og som bevarer utstillingsgjenstander og skip ved å være teknisk fleksibelt. Dette vil si at tekniske installasjoner skal tilpasses ulike driftssituasjoner, samt gi optimalt inneklima for utstillingene. Alle de tekniske installasjonene skal ha et så lavt trykkfall som mulig, være kostnadsoptimale og baseres på vurderinger av livssyklus-kostnader (LCC).

Case-studien fokuserer på den nye delen som skal bygges og ulike parametere som trengs til energisimuleringer i IDA ICE blir definert. Deler av teksten er hentet fra prosjektoppgaven skrevet høsten 2018.

4.1 Krav og belastninger på inneklima

Når nybygg skal oppføres settes det ulike krav til inneklima avhengig av formålet til bygget. I Norge følges Byggtekniske forskrifter, da spesielt TEK17. Denne forskriften stiller krav til temperatur, fuktighet, ventilasjon, U-verdier osv. Et museum er bygget for publikum og huser gjenstander som utstilles. Disse gjenstandene skal bevares på best mulig måte og det er derfor strengere krav til inneklima i et museum sammenlignet med en vanlig bolig.

En ekskursjon til Vikingskipshuset på Bygdøy ble utført og et møte med konservator Guro Hjulstad fant sted. Fra møtet kom det frem at de holder på å utføre en IMQ analyse av skipene for å sjekke hvilken tilstand de er i og hva som skjer med materialet over tid. Hvordan de skal få flyttet og oppbevart skipene og andre utstillingsobjekter trygt i forbindelse med byggingen av det nye museet er noe det også jobbes med. Gjennom flere analyser og tester har de kommet frem til ideelle settpunkter for RF og temperatur med tanke på bevaring av vikingskipene og andre gjenstander eksponert for romluft. Disse verdiene er avhengig av årstid og er vist i tabell 4.1. Som tabellen viser kan temperaturen variere ganske mye, men en temperatur på 19 °C brukes som settpunkt året rundt.

Tabell 4.1: Settpunkter for RF og temperatur til inneklima for vikingskipene fastsatt av konservator ved Vikingskipshuset

Årstid	Relativ fuktighet	Temperatur
Vinter/vår	45% ±5	16-25 °C
Sommer/høst	55% ±5	16-25 °C

Selve Vikingskipshuset er bygget i betong med siporex på utsiden, og gavlveggen i Gokstad- og Tuneøyen har hult mur av tegl. Veggene til bygget er godt bevart og har vært lite utsatt for fukt, men de er dårlig isolert og U-verdien på veggene varierer fra 1 til 3,6 W/m²K (Eian and Kjeldsen, 2010). Disse høye U-verdiene har ført til infiltrasjon gjennom veggene og det har oppstått variasjoner i temperatur og RF, men i følge konservator Hjulstad har den relative luftfuktigheten ikke hatt like mye å si for nedbrytningen av skipene som den mekaniske påvirkningen.

Hjulstad påpekte at et av de største problemene vikingskipene utsettes for i dag er forurensninger, som blant annet støv- og fuktpartikler. Partiklene legger seg som et lag oppå vikingskipene, noe som er med på å akselerere nedbrytingsprosessen. Vikingskipshuset har ingen form for mekanisk ventilasjon, så det må brukes støvsuger og andre apparater for å fjerne slike forurensninger fra skipene. Disse apparatene sliter på trematerialet og er med på å øke den mekaniske nedbrytningen til skipene. Et ventilasjonssystem kan brukes til å fjerne disse partiklene på en effektiv måte, samtidig som nedbrytingsprosessen sinkes. Vikingtidsmuseet skal bruke mekanisk ventilasjon, og klimaanlegget blir dimensjonert etter kravene i TEK17. Fra TEK17 er kravene om luftmengder i arbeids- og publikumsbygninger følgende (SINTEF Byggforsk, 2017):

- (A) Gitt at personene i bygningen har et aktivitetsnivå som tilsvarer ”lett aktivitet”, kreves det en frisklufttilførsel på 26 m³/h per person.
- (B) Hvis bygningen eller rommet er i bruk skal gjennomsnittlig frisklufttilførsel være minst 2,5 m³/h per m² gulvareal, og minst 0,7 m³/h per m² gulvareal hvis det ikke er i bruk.

Luftmengden av friskluft som må tilføres for å opprettholde kravet i TEK17 regnes ut ved hjelp av ligning 4.1.

$$V_{luft} = q_p \cdot n + q_b \cdot A_g \quad (4.1)$$

De ulike variablene i denne ligningen er gitt ved:

V_{luft} - friskluftmengde [m³/h]

q_p - personbelastning [m^3/h per person]

n - antall personer

q_b - materialbelastning [m^3/h per m^2 gulvareal]

A_g - netto gulvareal [m^2]

Kapittel 5

Metode

Dette kapittelet forklarer fremgangsmåten og simuleringsprosessen, samt hvilke beslutninger som er tatt i forbindelse med simuleringene. Manuelle beregninger av luftmengder og lufthastigheter blir utført, simuleringsmodellen og inputdata blir beskrevet, og til slutt blir simuleringsscenariene og robusthetsvurderingen presentert. Fem alternative ventilasjons-/klimatiseringsmetoder for vikingskipene blir vurdert: fortregning, omrøring, luftgardin, perforert plate og tekstilkanal. Deler av dette kapittelet er hentet fra prosjektoppgaven skrevet høsten 2018.

5.1 Beregning av luftmengder og lufthastigheter

Fem ulike løsninger ble presentert i prosjektoppgaven, hvorav tre er for ventilering av et eget mikroklima rundt vikingskipene. Minimum og maksimum friskluftmengde tilført sonen er viktig å definere for å kunne beregne luftmengder og lufthastigheter. Beregninger blir utført for Gokstadsonen.

Ventilasjonsaggregatene som brukes skal benytte uteluft når det er maksimal belastning i rommet. Et mindre aggregat ventilerer for vikingskipene og et større aggregat ventilerer for den resterende delen av Gokstadsonen. Hvis det ikke er krav om 100% friskluftmengde kan det lille aggregatet kjøres med omluft for å spare energi. Videre kan det store aggregatet styres ned ved hjelp av VAV-regulering. Det minste aggregatet kjører med omluft om natten, mens det største aggregatet kjører med minstekrav til luftmengde.

Gokstadsonen er en stor sone med et stort volum og stor takhøyde. Systemet dimensjoneres

for en maksimum personbelastning på 650 personer. Verdier for areal og volum er oppgitt i tabell 5.7. Den minste luftmengden oppnås når rommet ikke er i bruk og antall personer er null. Friskluftmengden som trengs for å opprettholde kravene til inneklime i sonen kan regnes ut ved hjelp av ligning 4.1 og verdier fra tabell 5.1. For hele Gokstadsonen ble det beregnet en minimum friskluftmengde på 904,4 m³/h, som tilsvarer 0,057 h⁻¹ luftskifter i timen.

Tabell 5.1: Variabler til utregninger av friskluftmengder definert i ligning 4.1

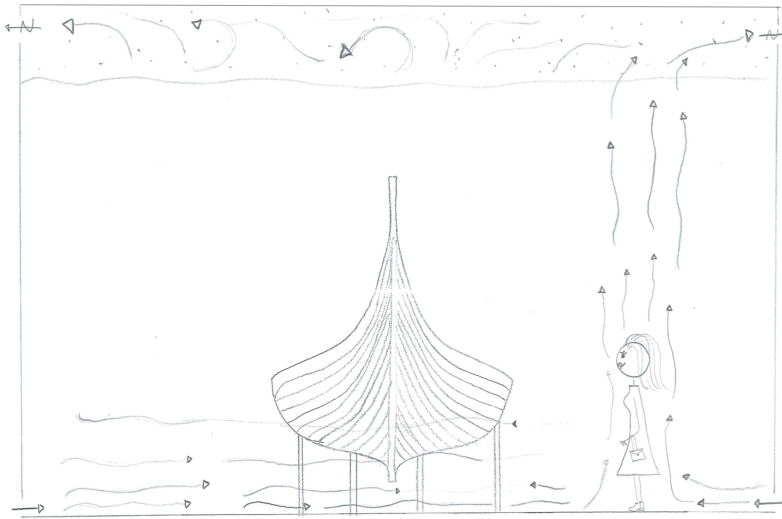
	q_p	n	q_b
I bruk	26 m ³ /h per person	650 personer	2,5 m ³ /h per m ²
Ikke i bruk	0 m ³ /h per person	0 personer	0,7 m ³ /h per m ²

Den største friskluftmengden oppnås når rommet er i bruk og det er maksimalt antall besøkende. Beregnet maksimal luftmengde til sonen blir 20130 m³/h, som tilsvarer 1,275 h⁻¹ luftskifter i timen.

Fokuset på denne oppgaven er bevaring av vikingskipene og inneklimakravene er litt annerledes enn kravene for termisk komfort, noe som er beskrevet i delkapittel 4.1. Løsningene er presentert nedenfor og utregnede verdier for optimale luftmengder og lufthastigheter har blitt beregnet. Vanligvis legges det til en sikkerhetsfaktor for at systemene skal tåle høyere laster enn det er designet for, men dette er ikke gjort for løsningene under.

5.1.1 Løsning med fortregning

Luftfordelingsprinsippet med fortregning er det som er tiltenkt systemet beskrevet i skisseprosjektet (STATSBYGG, 2017a), og er et av de mest brukte ventileringsprinsippene i dag. For dette systemet er allerede dimensjonerende luftmengder satt, og disse brukes i referansemodellen. Luftmengden i Gokstadsonen er satt til 15 m³/h per m², noe som gir en luftmengde på 19380 m³/h. Kravet til maksimal friskluftmengde på 20130 m³/h blir ikke nådd med denne luftmengden, noe som skyldes at arealet og volumet fra simuleringsmodellen avviker litt fra den skisserte modellen. For å redusere energikostnader skal systemet ha VAV-regulering som styres av temperatur- og CO₂-sensorer som skal regulere varme og luftmengde til sonen.



Figur 5.1: Luftfordeling ved fortrenningsventilasjon i hele sonen. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

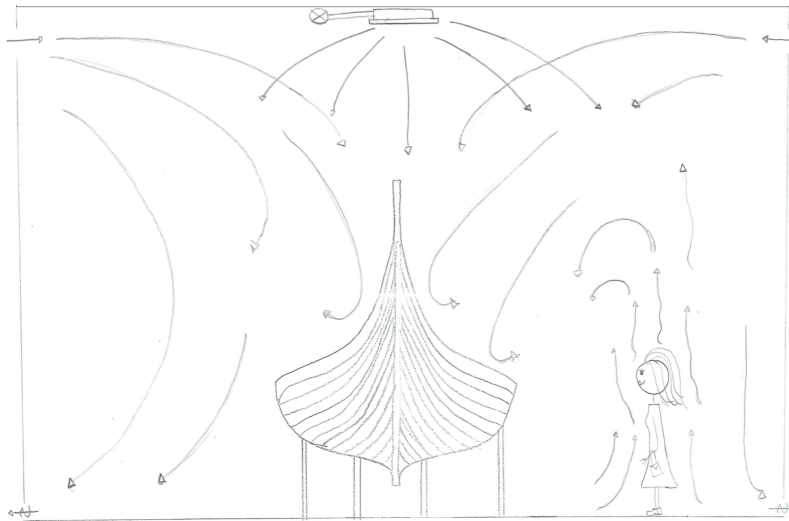
Figur 5.1 viser en forenklet skisse av luftfordelingen ved bruk av fortrenning. Konvek-sjonsstrømmene tar med seg forurensninger fra luften og danner et øvre sjikt med dårlig luft som vist i figuren. Derfor plasseres avtrekkene oppe i takhøyde, og tilluftsventilene ved gulvnivå. Da nærsonen til tilluftsventilene er nærmere oppholdssonen er det viktig å ikke ha høye lufthastigheter. I følge tabell 2.13 i Ventilasjonsteknikk del 1 viser det seg at færre opplever ubehag ved lavere lufthastigheter (Ingebrigtsen, 2016). En lufthastighet på 0,2 m/s i nærsonen velges derfor for denne løsningen.

5.1.2 Løsning med omrøring

Denne løsningen innebærer at hele Gokstadsonen skal ventileres med omrøring etter kra-vene som stilles til bevaring av vikingskipene. Vikingskipene er eksponerte for romluften og er ikke separert fra oppholdssonen, slik at fukt- og varmeproduksjonen fra menneske- ne må tas hensyn til ved beregning av effektbehovet til ventilasjonssystemet. Behovet for mengde friskluft definert i TEK17 må også være oppfylt. Den dimensjonerende luftmeng- den som trengs for dette systemet er den samme som maksimal friskluftmengde beregnet ved ligning 4.1, på 20130 m³/h. Å opprettholde den dimensjonerende luftmengden hele døgnet, spesielt når tilluften skal befuktes/avfuktes, er energikrevende.

Utstillingsrommene som huser vikingskipene har veldig store volumer og det er høyt under taket. For å få så store luftmengder i bevegelse kreves det store lufthastigheter, og det settes

en lufthastighet på 3 m/s i nærsonen. Tilluftsventiler plasseres i takhøyde og avtrekk ved gulvet. En forenklet skisse av luftfordelingen ved omrøringsventilasjon i Gokstadsjonen er vist i figur 5.2.



Figur 5.2: Luftfordeling ved omrøringsventilasjon i hele sonen. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

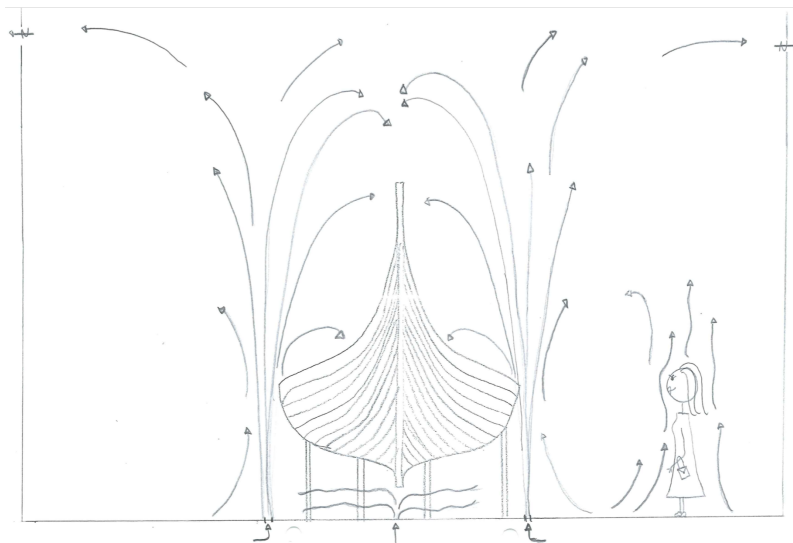
Full omrøring i rommet vil si at primærluften er fullstendig blandet med sekundærluften og ventilasjonseffektiviteten er 1,0. Gjennom ulike vitenskapelige studier viser det seg at det er vanskelig å oppnå en ventilasjonseffektiviteten på 1,0 ved bruk av omrøring. Teoretisk sett vil denne løsningen ha en lavere energieffektivitet enn løsningen med fortrenningsventilasjon. En simulering vil kunne bekrefte/avkrefte dette.

5.1.3 Løsning med luftgardin fra gulvet

Luftgardiner brukes gjerne i industribygg, kjøpesenteret og i rom med store åpninger til uteluften. Bruk av luftgardiner til ventilering av skjøre gjenstander som skal konserveres er lite omtalt i vitenskapelige artikler. Generelle artikler om luftgardiner viser at lufthastighetene som brukes varierer veldig, og kommer helt an på bruksområdet og hvilken type luftgardin som blir valgt. Siden luftgardiner separerer to luftmengder fra hverandre ble det bestemt at en luftgardin skulle prøves ut for ventilering av et mikroklima rundt vikingskipene.

En vertikal luftstrøm fra gulvnivå og oppover rundt hele vikingskipet vil kunne separere skipet fra oppholdssonen som vist i figur 5.3. Slik kan to luftvolumer med forskjellige

klimakrav dannes, og sonen med vikingskipet vil kunne tilfredsstille kravene satt av konservator. Avtrekk plasseres ved vegg i takhøyde. Avtrekk plassert i taket rett over skipet vil kanskje ikke være så lurt, og en CFD-simulering vil kunne avdekke den beste plasseringen.



Figur 5.3: Luftfordeling ved bruk av luftgardin fra gulvet. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

Luftstrømmene som utgjør luftgardinen må ha høy hastighet for å kunne isolere skipet fra resten av sonen og kan kreve noe høyere drivtrykk. Hvordan konveksjonsstrømmene som dannes i rommet blander seg med luftgardinen og hvilken påvirkningen det har for klima rundt skipene er vanskelig å forutse. Bevegelsene til strømmingene rundt skipet kan analyseres ved å utføre en CFD-simulering.

Luftstrålene som tilføres gjennom spalten er plane todimensjonale stråler, og etterhvert som de beveger seg bort fra spalten blandes strålene med romluften. Luftstrålene rundt vikingskipet vil bli påvirket av luftstrømmer fra sonen rundt skipet, samt av selve skipets form. Luftstrålene vil utvides og tildels endre retning og "klappe" sammen etter en viss avstand fra gulvet. Teorien er at luften fra spaltene vil omhulle vikingskipet og bevare mikroklima rundt skipet uten altfor stor innvirkning fra luften rundt. For å gjøre beregningene enklere antas det tilnærmet isoterme luftstråler, samt at trykkreftene virker vinkelrett på strålens akse (Skaret and Norges byggforskningsinstitutt., 2000). En annen antagelse er at strømningsforholdene er like i ulike deler av tversnittet. Senterstrålehastigheten til en plan fristråle med spalteformet åpning i kanal kan beregnes ved bruk av formel 5.1. K_p antas å være 3,5 fra tabell 8.15 i Ventilasjonsteknikk del 1 (Ingebrigtsen, 2016).

$$v_y = v_0 \cdot \frac{K_p}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h_0}{y}} \quad (5.1)$$

De ulike variablene i ligningen er gitt ved:

v_y - senterstrålehastigheten [m/s]

v_0 - lufthastighet i kontrahert areal [m/s]

K_p - konstant [-]

h_0 - kontrahert høyde (spaltebredde) [m]

y - strålehøyde [m]

Lufthastigheten ved kontrahert areal er lufthastigheten ved inntaket, v , delt på kontraksjonskoeffisienten, C_a , og gitt ved ligning 5.2.

$$v_0 = \frac{v}{C_a} \quad (5.2)$$

Fra tabell 8.12 i boken Ventilasjonsteknikk del 1 antas verdien til C_a lik 0,85. Luftmengden som trengs kan beregnes ved å variere lufthastigheten gjennom spalteåpningen, spaltebredden og strålehøyden. Ligning 5.3 brukes for å regne ut luftmengden, q . Lengden, l , på luftgardinen er satt til 65 m.

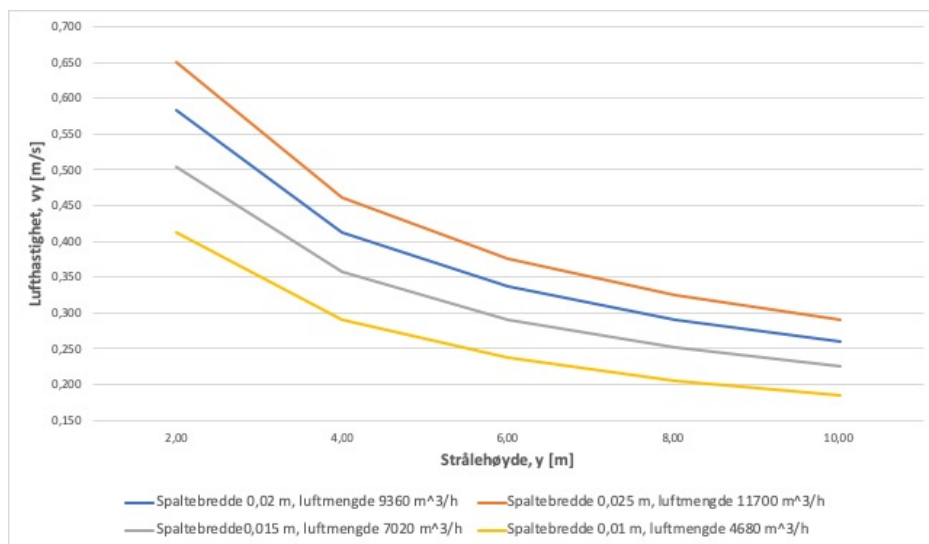
$$q = h_0 \cdot l \cdot v \quad (5.3)$$

Tabell 5.2: Sentralstrålehastigheten og luftmengden for ulike verdier av lufthastighet ved inntak, spaltebredde og strålehøyde ved bruk av en luftgardin

C_a [-]	v [m/s]	v_0 [m/s]	K_p [-]	h_0 [m]	v_y [m/s]	y [m]	Luftmengde [m ³ /h]
0,85	2,00	2,35	3,50	0,01	0,24	6,00	4680,00
0,85	2,00	2,35	3,50	0,01	0,22	7,00	4680,00
0,85	2,00	2,35	3,50	0,02	0,34	6,00	9360,00
0,85	2,00	2,35	3,50	0,02	0,31	7,00	9360,00
0,85	2,50	2,94	3,50	0,02	0,42	6,00	11700,00
0,85	1,50	1,76	3,50	0,02	0,25	6,00	7020,00
0,85	3,00	3,53	3,50	0,02	0,50	6,00	14040,00
0,85	1,00	1,18	3,50	0,02	0,17	6,00	4680,00

Fra tabell 5.2 vises det at luftmengden er den samme med en starthastighet på 2 m/s og en spaltebredde på 0,01 m, som med en starthastighet på 1 m/s og en spaltebredde på 0,02 m. Som forklart tidligere trengs det høye lufthastigheter for å kunne isolere vikingskipet fra oppholdssonen. En hastighet på 2 m/s i nærsjonen velges derfor for denne løsningen. Å variere spaltebredden og strålehøyden gjør det mulig å se hvordan lufthastigheten avtar

for ulike strålehøyder. Figur 5.4 viser dette for fire ulike spaltebredder.



Figur 5.4: Hvordan lufthastigheten avtar ved ulike strålehøyder og spaltebredder ved bruk av en luftgardin

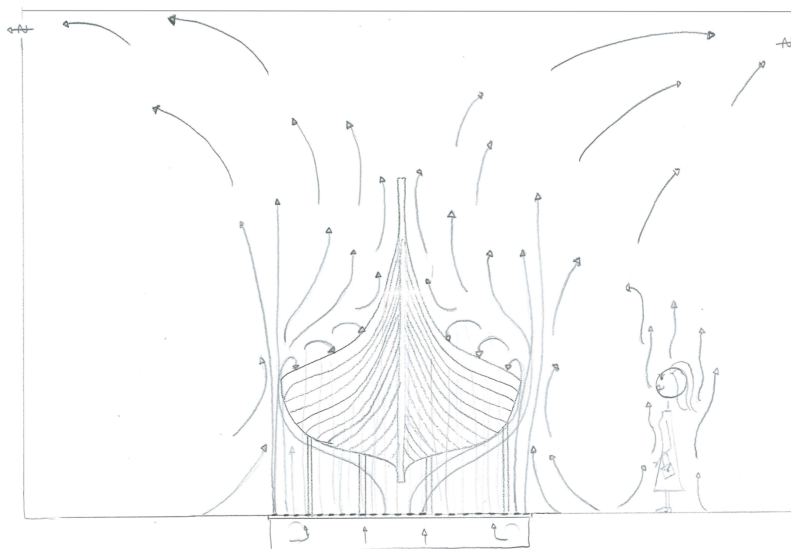
Fra figuren velges det en luftmengde på 7020 m³/h, som tilsvarer en spaltebredde på 0,015 m. Den valgte luftmengden er for liten til å kunne tilfredsstille kravet til friskluftmengder satt av TEK17 ved full belastning i rommet. Et ventilasjonsaggregat i tillegg til det som brukes til mikroklima rundt skipet må installeres. Dette aggregatet baseres på fortrengningsventilasjon. Forutsatt at begge aggregatene tilfører friskluft når det er maksimal belastning i rommet, må det andre aggregatet håndtere den resterende luftmengden som trengs for at inneklimakravet skal tilfredsstilles. Det maksimale friskluftmengdekravet er på 20130 m³/h, som vil si at tilleggsaggregatet må håndtere en luftmengde på 13110 m³/h. Dette systemet ventilerer for termisk komfort og det stilles ingen spesifikke krav foruten om at det skal holde en innetemperatur på 16-25 °C. Systemet skal behovsstyres etter temperatur- og CO₂-konsentrasjonen i rommet ved hjelp av VAV-regulering.

Det andre aggregatet følger kravene fra TEK17 (SINTEF Byggforsk, 2017), og er bare på under åpningstidene. Aggregatet som ventilerer for mikroklima skal være på døgnnet rundt, og det er viktig å ikke ha store avvik i RF og temperatur i denne sonen.

5.1.4 Løsning med perforert plate under skipene

Studier har vist at bruk av stempelstrøm er en effektiv måte å fjerne forurensende partikler på, og brukes mye i renrom og sykehus. Partikler med forurensning på skipene er et stort problem og vil bli fjernet så fort som mulig. Da studier viser at stempelstrøm gjør dette effektivt ble det bestemt at en perforert plate med stempelstrøm skulle vurderes som en mulig løsning. Platen skal formes etter skipet og dekke gulvarealet under skipet. Den perforerte gulvplaten under skipet er full av hull og luftstråler strømmer opp gjennom hullene fra et trykkammer under platen. Dette er vist i en forenklet skisse i figur 5.5.

Stempelstrømmen må overvinne strømningsenergi generert av aktiviteter i rommet og fra forurensningskilder slik at mikroklimasonen separeres fullstendig fra oppholdssonen. Den oppadgående stempelstrømmen fjerner forurensende partikler, som støv, samtidig som overskuddsvarme og fuktighet fra menneskelig aktivitet holdes borte fra skipene. Luftstrålene stiger og tar med seg disse forurensningene mot taket og det er derfor gunstig å plassere avtrekk i takhøyde, som for løsningen med luftgardin.



Figur 5.5: Luftfordeling gjennom en perforert plate. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

Luftstrålene som tilføres gjennom hvert enkelt hull i platen blir sett på som frie runde stråler. Etter en viss avstand fra gulvet har disse strålene blandet seg og blitt til en stor homogen stråle. Strålene gjennom den perforerte platen antas som en stempelstrøm for å gjøre beregningene enklere. Luftmengden til en stempelstrøm regnes ut ved bruk av

ligning 5.4.

$$q = v \cdot F \quad (5.4)$$

I denne ligningen er:

q - luftmengde [m³/h]

F - tverrsnittet til platen [m²]

v - lufthastighet [m/s]

Arealet av platen som trengs under skipet er vanskelig å definere, og det antas en plate med et areal på 175 m². Perforeringsgraden er satt til 50%, som vil si at antall m² til lysåpningene er 87,5. Luftmengden som trengs kan finnes ved å prøve ut ulike tilluftshastigheter. Luftmengdene ved ulike tilluftshastigheter er vist i tabell 5.3.

Tabell 5.3: Luftmengden for ulike verdier av tilluftshastigheter gjennom en perforert plate

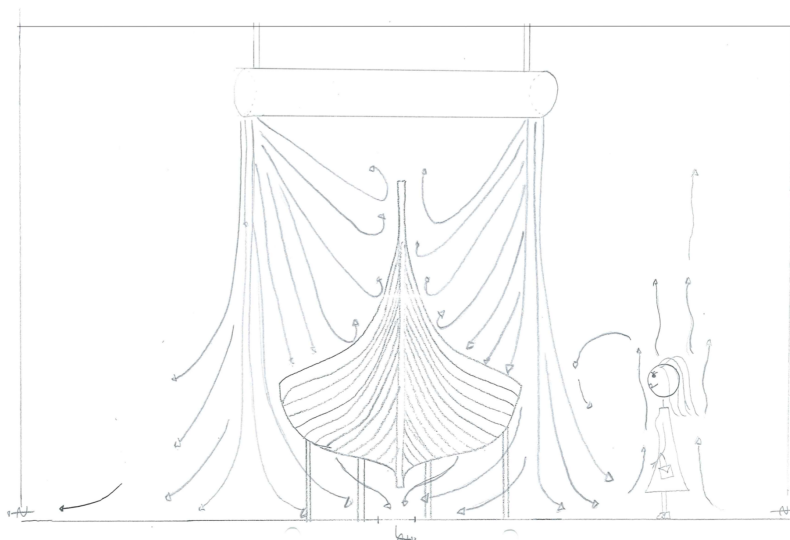
F [m ²]	v [m/s]	Perforeringsgrad [%]	Luftmengde [m ³ /h]
175,00	0,25	0,50	78750,00
175,00	0,20	0,50	63000,00
175,00	0,15	0,50	47250,00
175,00	0,10	0,50	31500,00
175,00	0,05	0,50	15750,00

Som tabell 5.3 viser trengs det veldig store luftmengder for denne løsningen. Stort areal på strålehullene er utslagsgivende for denne luftmengden. Dette vil gi et stort energiforbruk, noe som strider mot oppgavens formål om å redusere energiforbruket. Denne løsningen er urealistisk og det vil derfor ikke bli gjort flere beregninger, og heller ikke utført energisimuleringer.

5.1.5 Løsning med tekstilkanal montert over skipene

Tekstilkanaler kom først på markedet for litt over 30 år siden og har i dag begynt å ta over for mange av de tradisjonelle metallkanalene. Studier viser at materialet tekstilkanalene er laget av er fleksibelt og kan variere i form og størrelse, samtidig som det er enkelt å vedlikeholde. Estetikken i museet setter standarden for opplevelsen. En tekstilkanal hengende fra taket kan derfor ødelegge inntrykket og opplevelsen i rommet, men med dagens teknologi er det mulig å implementere denne kanalen til en del av utstillingen. En tekstilkanal ble derfor valgt som en løsning for ventilering av et mikroklima rundt vikingskipet.

Et kanalsystem montert over skipet kan produsere en ”luftboble” som skipet omkranses av. Kanalsystemet vil være en tekstilkanal formet etter skipet med små hull som danner en vertikal nedadrettet luftgardin. Kanalen har i tillegg skråstilte åpninger for innblåsning mot senter av båten klokken 4, 5 og 6, noe som er illustrert i en forenklet skisse i figur 5.6. Dette forhindrer fukt og støv fra å treffe objektene i denne luftboblen (Frantz, 2007). I motsetning til de to andre løsningene med et mikroklima, vil avtrekket befinne seg i gulvkonstruksjonen under skipet, samt langs vegger. Montering av en kanal hengende ned fra taket kan være problematisk med tanke på høyden i rommet og estetikken til museet. For denne løsningen kan også vanlige metallkanaler brukes.



Figur 5.6: Luftfordeling ved luftgardin fra kanalsystem montert over skipet. Illustrasjon: Tonje Omli-Moe

Forskningsartikler og studier som er utført, som studien til Wang og Li (Wang and Li, 2015), gir numeriske data som gjør det mulig å beregne luftmengdene og lufthastighetene som trengs i en tekstilkanal. Strømningen gjennom tekstilkanalen over skipet antas å være todimensjonal. For å kunne beregne lufthastighetene i ulike avstander fra tekstilkanalen, v_y , brukes ligning 5.5. Denne ligningen er basert på numerisk data fra studien til Wang og Li.

$$v_y = v_0 \cdot 0,19 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^{-0,18} \quad (5.5)$$

I denne ligningen er:

v_0 - tilluftshastighet [m/s]

y - avstand fra kanalsystem [m]

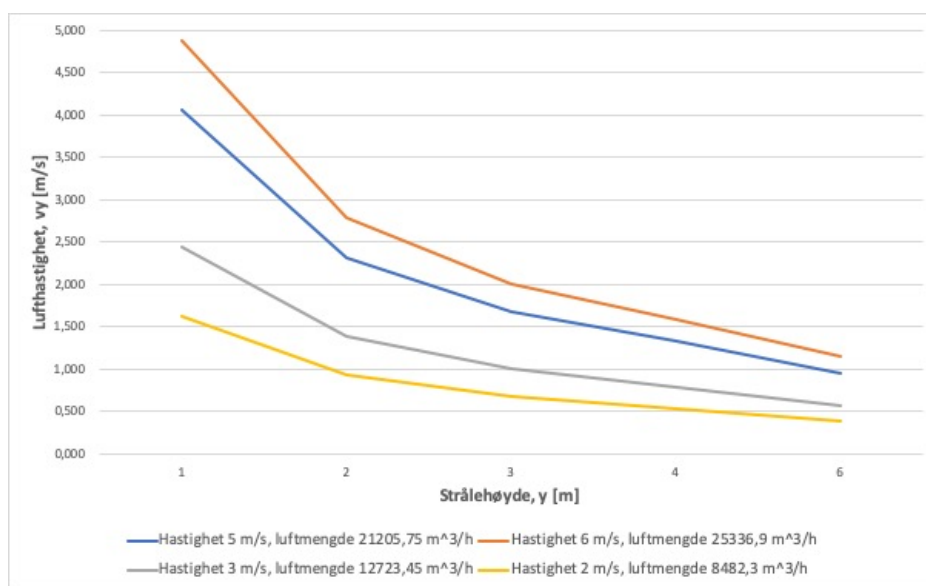
h - avstand fra kanalsystem til gulv [m]

Det antas at kanalsystemet henger 6 m over gulvet. Luftmengden som trengs kan finnes ved å variere lufthastigheten og diameteren på innløpet til kanalen. Tabell 5.4 viser hvordan disse luftmengdene varierer. En kanaldiameter på 0,75 m velges basert på verdier i denne tabellen.

Tabell 5.4: Luftmengde som må til ved ulike lufthastigheter og kanaldiameterer ved bruk av en tekstilkanal

v_0 [m/s]	h [m]	y [m]	v_y [m/s]	Diameter [m]	Luftmengde [m ³ /h]
2	6	3	0,666	0,80	9047,787
2	6	6	0,380	0,75	8482,300
5	6	6	0,950	0,75	21205,750
6	6	3	1,999	0,75	25446,900
6	6	6	1,140	0,80	27143,361
7	6	3	2,332	0,85	33646,457
10	6	3	3,331	0,85	48066,368

Figur 5.7 viser hvordan lufthastigheten avtar ved ulike stråleavstander fra tekstilkanalen.



Figur 5.7: Hvordan lufthastigheten avtar ved ulike stråleavstander og lufthastigheter ved bruk av en tekstilkanal

I følge standarden NS-EN ISO 7730 "Ergonomi i termisk miljø" er kravet at lufthastigheter ikke skal overstige 0,15 m/s i oppholdssonen (Norge, 2005). Et unntak kan gjøres hvis folk er i stadig bevegelse og en lufthastighet på opptil 0,45 m/s kan aksepteres, men da vil 20% oppleve trekk. Etter som luften fra tekstilkanalen brer seg utover gulvet som vist i figur 3.14, er det viktig å velge en lufthastighet som oppfyller dette kravet. Figur 5.7 viser at en tilluftshastighet på 2 m/s gir en akseptabel lufthastighet ved gulvnivå på 0,38 m/s. Med høyere lufthastigheter øker også luftmengden betraktelig. En tilluftshastighet på 2 m/s i nærsonen og en luftmengde på 8480 m³/h velges derfor for denne løsningen.

Luftmengden som trengs for denne løsningen er for liten til å kunne tilfredsstillere kravet til friskluftmengder satt i TEK17 ved full belastning i rommet. Et annet ventilasjonsaggregat må installeres på lik linje som for løsningen med luftgardin. Forutsatt at begge aggregatene tilfører friskluft når det er maksimal belastning i rommet må dette aggregatet håndtere en belastning på 11650 m³/h. Systemet baseres på fortregning og skal behovsstyres etter temperatur- og CO₂-konsentrasjonen i sonen ved hjelp av VAV-regulering. Temperaturen skal holdes mellom 16 og 25 °C.

5.2 Simulering av Vikingtidsmuseet i IDA ICE

IDA ICE baserer seg på inputdata og antagelser som er gjort for å kunne utføre nøyaktige og detaljerte simuleringer. Inputdata og antagelser blir beskrevet i dette delkapittelet. Et digitalt vedlegg av simuleringsmodellen i IDA ICE er lagt ved i vedlegg som tillegg A.

5.2.1 Simuleringsmodell

Simuleringsmodellen som er brukt i denne masteroppgaven er hentet med tillatelse fra Skramdal sin masteroppgave (Skramdal, 2018). Modellen har blitt modifisert i denne masteroppgaven. Energimodellen i IDA ICE baserer seg på klima, bygningsgeometri og soneinndeling. Disse inputverdiene blir videre forklart.

Klima

Den viktigste inputparameteren er hvilke værddata som blir valgt. Værddataene består av temperatur, relativ fuktighet, varmetilskudd fra direkte og diffus stråling, samt vindhastighet. Værfilen som blir brukt i IDA ICE hentes fra ASHRAE (EQUA Simulation AB, 2019). Tabell 5.5 viser værddataene for Oslo, Gardermoen, justert etter posisjonen til museet. Vikingtidsmuseet har en posisjon med en lengdegrad på 10.68 E, en breddegrad på 59.90 N og en høyde over havet på 16.50 m (Kartverket, 2018).

Tabell 5.5: Værdata for Oslo, Gardermoen fra ASHRAE IWEC2 lastet inn i IDA ICE, justert etter posisjonen til museet på Bygdøy

	Variables						
	Dry-bulb temperature, Deg-C	Rel humidity of air, %	Direct normal rad, W/m2	Diffuse rad on hor surf, W/m2	Wind speed, x-component, m/s	Wind speed, y-component, m/s	Cloudness, %
January	-7.2	85.3	59.0	9.0	0.1	-0.4	56.3
February	-4.9	81.0	103.7	24.2	0.5	-0.3	57.6
March	-1.8	77.1	154.3	51.1	0.1	1.2	55.2
April	2.8	73.6	133.3	87.8	-0.5	-0.3	63.1
May	10.7	56.9	201.1	115.2	0.1	-0.8	59.1
June	13.2	65.0	183.2	133.6	0.2	0.6	64.5
July	15.6	67.6	185.5	125.4	0.2	-1.0	60.8
August	14.8	74.4	152.8	100.7	-0.6	-0.6	64.7
September	9.8	77.0	121.1	65.3	-0.2	0.5	62.7
October	4.9	85.8	101.2	32.8	-0.4	0.9	59.0
November	0.7	87.7	63.2	13.4	-0.3	1.4	63.1
December	-3.2	93.5	37.4	6.3	0.0	0.3	60.5
mean	4.7	77.1	124.8	63.9	-0.1	0.1	60.5
mean*8760.0 h	40988.4	674985.5	1093392.0	560120.0	-693.7	1047.9	530300.0
min	-7.2	56.9	37.4	6.3	-0.6	-1.0	55.2
max	15.6	93.5	201.1	133.6	0.5	1.4	64.7

Bygdøy utsettes for det som kalles et nordisk klima. Som tabell 5.5 viser, er det store svingninger i temperatur og RF gjennom året. Utendørstemperaturen svinger fra gjennomsnittlig minimumstemperatur på $-7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ i januar til gjennomsnittlig maksimumstemperatur på $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ i juli. Å skille mellom vinter- og sommersimuleringer er derfor viktig.

Bygningsgeometri

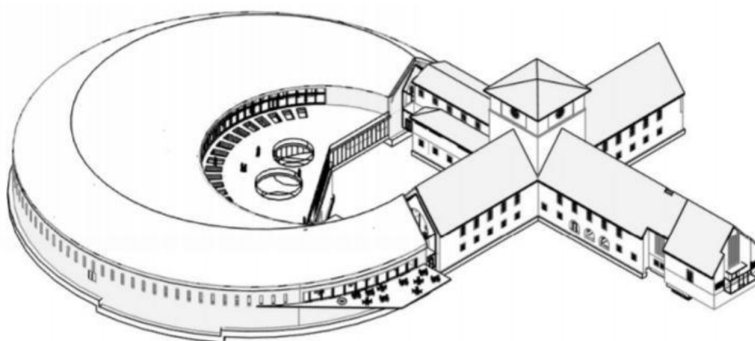
Bygningsgeometri og bygningsmaterialer, som tykkelse på isolasjonen, tettheten og varmeledningsevnen til materialer, kuldebroer osv. har mye å si for det totale energibruket til bygget. Tilbygget skal ha høy energieffektivitet, og bygningsdelene skal ha passivhuskvalitet, samt ha en energibesparelse i drift på 25,1% sammenlignet med et TEK10-bygg og oppnå energikarakteren A (STATSBYGG, 2017a). Noen av kravene til passivhus er gitt i standarden NS 3701 (Standard Norge, 2012), og vist i tabell 5.6.

Kravene til passivhus er avhengig av oppvarmingsbehovet til bygget som måles per m^2 oppvarmet gulvareal. Statsbygg tror at det nye tilbygget ikke kommer til å oppfylle disse kravene i og med at romvolumene er veldig store i forhold til oppvarmet gulvareal.

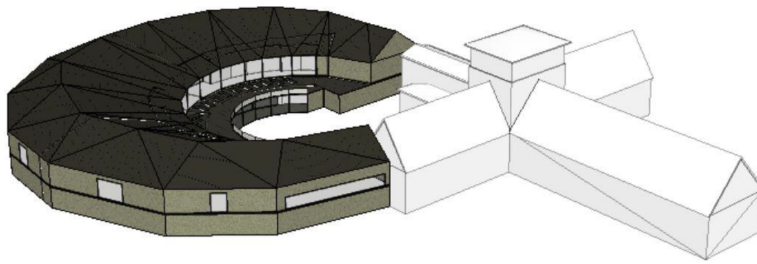
Tabell 5.6: Noen krav til passivhus for kulturbygg fra NS 3701 (Standard Norge, 2012)

Parameter	Krav
Varmetapstall for bygninger med et areal $\geq 1000 \text{ m}^2$	0,4 W/(m ² K)
Maks energibehov til oppvarming for bygninger med $\Theta_{\text{ym}} \leq 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$	30,6 kWh/(m ² år)
Maks energibehov til kjøling	0 kWh/(m ² år) (Temperaturen overskrider ikke 20 °C i mer enn 50 t/år)
Maks energibehov til belysning	17,2 kWh/(m ² år)
SFP-faktor	$\leq 1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner	$\geq 80\%$
Gjennomsnittlig luftmengde i driftstid	6,0 m ³ /(m ² h)
Varmetilskudd fra utstyr	1,0 W/m ²
Varmetilskudd fra personer	3,2 W/m ²

Figur 5.8 og 5.9 er brukt med tillatelse og viser henholdsvis bygningsmodellen i Revit og IDA ICE. Den nye delen er designet som et tilbygg til det gamle museet som vist i figurene.



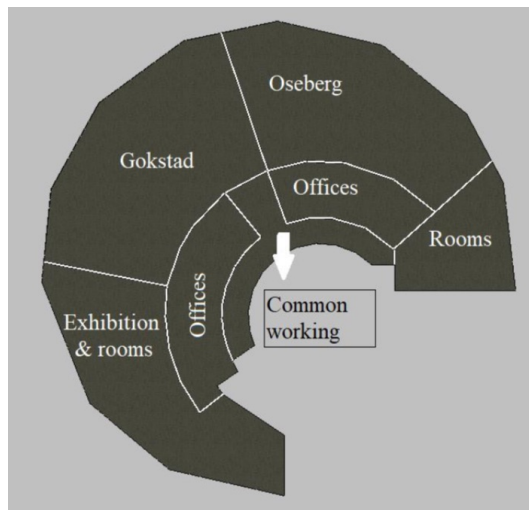
Figur 5.8: Bilde av Vikingtidsmuseet i Autodesk Revit. (Brukt med tillatelse)



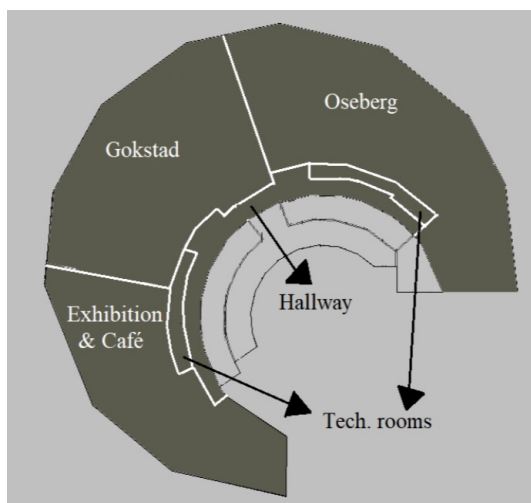
Figur 5.9: Bilde av Vikingtidsmuseet i IDA ICE. (Brukt med tillatelse)

Soner

Den nye bygningen består av rom med forskjellige formål. Bygget deles inn i flere termiske soner for å korte ned simuleringstiden i IDA ICE. En termisk sone er et område med samme krav til innneklima. Settpunkter for temperatur og RF er de samme i en termisk sone, det er like mye stråling og sonen styres av samme klimaanlegg (Brown, 2016). Nybygget er delt inn i 13 soner fordelt på to etasjer; 7 soner i underetasjen og 6 i overetasjen. Gokstadsonen går over to plan og er en stor sone. Figur 5.10 og 5.11 viser henholdsvis sonene i underetasjen og overetasjen på nybygget. Utklippene er hentet fra Skramdal sin master og brukt med tillatelse.



Figur 5.10: Utklipp fra IDA ICE viser sonefordelingen i underetasjen. (Brukt med tillatelse)



Figur 5.11: Utklipp fra IDA ICE viser sonefordelingen i første etasje. (Brukt med tillatelse)

5.2.2 Forenklinger

Som figur 5.9 viser er det gjort en del forenklinger fra museets design i Revit (figur 5.8). Færre og større vinduer ble laget av Lundqvist i hennes masteroppgave for å kutte ned på simuleringstiden (Lundqvist, 2018). Denne metoden kalles "fit for purpose" og er en måte å forenkle og korte ned simuleringstiden på. Geometrien til bygget ble også endret da IDA ICE har problemer med runde konstruksjoner.

Simuleringene i denne masteroppgaven fokuserer på Gokstadsonen. For å gjøre simuleringene mer realistiske ble Gokstadsone U1 og 1 slått sammen til en stor sone som går over to plan, slik den er designet i skisseprosjektet. Antall soner ble redusert fra 13 til 12, og simuleringstiden ble kortere. Det var også ønskelig å slå sammen Osebergsonene til en stor sone, men dette var ikke mulig i IDA ICE. Åpningene i gulvet mellom Oseberg U1 og Oseberg 1 sonene ble gjort større for at strømningsbildet i rommet skulle bli mer realistisk ved simulering.

Energibruket kan reduseres ved bruk av VAV, men for å gjøre simuleringene enklere brukes det CAV for ventilasjonssystemene (system 2) i Gokstad og Osebergsonene. Bruk av CAV-regulering på alle løsningene i simuleringen gjør det mulig å se om forbedringer kan gjøres på det planlagte systemet.

Et komplisert varme- og energiforsyningsanlegg er planlagt i skisseprosjektet. Dette sys-

temet er ikke implementert i modellen ettersom ventilering av vikingskipene er fokuset på oppgaven. Som en ”erstatning” til dette anlegget er det satt inn radiatorer med vannbåren varme i alle rom med personbelastning, inneforstått at dette ikke gir helt nøyaktige verdier på det totale energibruket til museet.

Gokstad- og Osebergsonen huser de største vikingskipene, og figur 5.12 viser utstillingsrommet til Osebergskipet slik det er designet av arkitekten. Utstillingsrommet til Gokstadskipet vil være tilsvarende det for Osebergskipet.



Figur 5.12: Illustrasjon av utstillingsrommet til Osebergskipet. Brukt med tillatelse fra AART Architects/Statsbygg

5.2.3 Inputdata

Outputdata er avhengig av inputdata, og faktorer som påvirker inneklime rundt vikingskipene blir presentert.

Areal og volum

Beregninger av luftmengder, samt simulering av ventileringsbehov og energibruk er avhengig av arealet og volumet til sonene. Tabell 5.7 viser disse verdiene.

Tabell 5.7: Areal og volum for de ulike sonene hentet fra IDA ICE

Level	Sone	Areal [m ²]	Volum [m ³]
U1	Rom	387	1626
	Gokstad	1292	15787
	Oseberg	1094	4596
	Kontor 1	407	1709
	Kontor 2	305	1280
	Utstillingsrom	932	3914
	Fellesareal	313	1315
1	Gang	310	1640
	Oseberg	1406	10922
	Utstillingsrom og kafé	959	7319
	Teknisk rom 1	61	380
	Teknisk rom 2	77	475

Åpningstider

Antallet besøkende og interne laster varierer med åpningstidene til museet. Åpningstidene til Vikingskipshuset avhenger av årstid, og er stengt 1. januar, 6. februar og 13. februar (Kulturhistorisk museum, 2018). Det antas at Vikingtidsmuseet skal ha de samme åpningstidene. Åpningstidene for de to sesongene er:

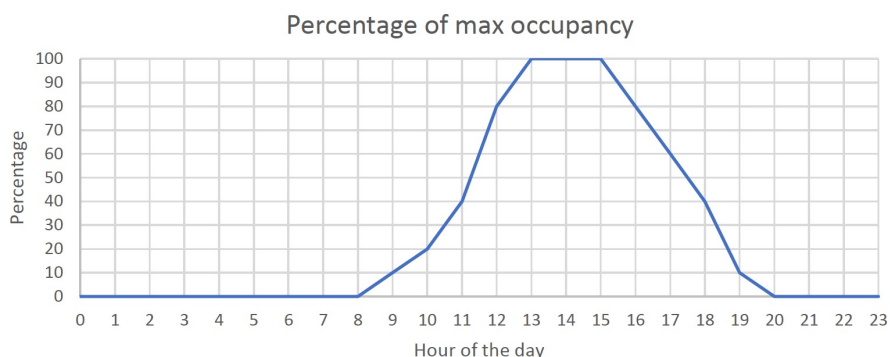
Vintersesong: 1. oktober - 30. april, kl. 10.00-16.00

Sommersesong: 1. mai - 30. september, kl. 09.00-18.00

Åpningstider og feriedager legges inn i IDA ICE. Interne laster og luftmengder styres etter denne planen.

Besøkende

Antallet besøkende påvirker inneklimate i museet ettersom mennesker avgir varme, fukt, CO₂ osv., og er derfor viktig å ta med i simuleringene. Maksimalt antall besøkende til museet er estimert til 1759 personer. I ordet besøkende inngår også de ansatte ved museet. Antallet besøkende i løpet av en dag og når på dagen de kommer er uvisst. En prosentvis personbelastning gjennom åpningstiden har blitt estimert, og denne besøksprofilen er vist i figur 5.13.



Figur 5.13: Prosentvis besøksbelastning gjennom åpningstiden. (Brukt med tillatelse)

Gokstad og Oseberg er de to største sonene og har en beregnet total belastningskapasitet på 1300 personer, 650 personer per sone. Maksimalt antall besøkende er lagt inn i IDA ICE for alle soner.

Varmebelastning fra personer

Varmeproduksjonen til et menneske er avhengig av aktivitetsnivå, metabolisme og bekledding. Vikingtidsmuseet skal være et interaktivt museum, og det vil være mye bevegelse blant de besøkende. Bekleddingen varierer fra måned til måned og et estimat må gjøres. Case-studien ”Hermitage Amsterdam” til R. Kramer m.fl. (Kramer et al., 2017) bruker en met-verdi på 1,5 met, noe som tilsvarer en blanding av stående og sittende aktivitet. Met-verdien for denne case-studien antas å være den samme. Antatte verdier for aktivitetsnivå og bekledding er gitt i tabell 5.8.

Tabell 5.8: Innsatte verdier for bekledding og aktivitetsnivå i IDA ICE

Bekledding	0,85 ± 0,25 clo
Aktivitetsnivå	1,5 met

Verdiene for bekledding justeres automatisk i IDA ICE etter komfortnivå. Bekleddingen på vinteren blir derfor 1,1 clo og 0,6 på sommeren.

Fuktbelastning fra personer

Fuktproduksjonen til et menneske er avhengig av latent varmetap og aktivitetsnivået. Latent varmetap fra menneskekroppen skjer gjennom svetting, åndedrett og ved diffusjon gjennom huden (NTNU and SINTEF, 2007). Fuktproduksjonen avhenger av aktivitetsnivået som vist i tabell 5.9 (Jokl, 2002). For denne case-studien antas det en fuktbelastning

på 180 g/h per person. Fuktproduksjonen fra besøkende er viktig for å kunne definere riktig befuktning-/avfuktningbehov til ventilering.

Tabell 5.9: Fuktproduksjon ved ulike aktivitetsnivåer

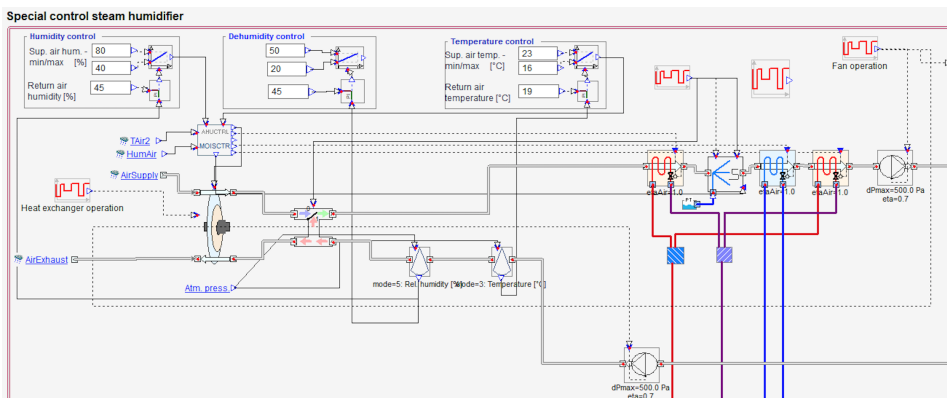
Lav aktivitet	30 - 60 g/h
Middels aktivitet	120 - 200 g/h
Høy aktivitet	200 - 300 g/h

Ventilasjonsaggregat

Skisseprosjektet indikerer at museet skal ha en energisentral som benytter seg av varmepumper og energibrønner til å forsyne bygget med energi (STATSBYGG, 2017a). Alle sonene skal ha hvert sitt ventilasjonsaggregat ettersom det er ulike krav til inneklime. Ventilasjonssystemet skal basere seg på prinsippet om fortregning. Lufthastigheten er satt til 0,2 m/s i nærsone. Alle systemene skal være mengderegulerte og behovsstyrte, noe som gir et energieffektivt system. Dimensjonerende SFP-verdi er 1,5 kW/(m³/s) ved normal drift.

For å gjøre simuleringene litt enklere er det brukt to ulike ventilasjonsaggregater. Ventilasjonsaggregatet som ventilerer for alle andre soner enn utstillingsrommene, Gokstad og Oseberg, har et standard ventilasjonsaggregat (system 1). Dette aggregatet består av en varmeveksler, et kjølebatteri, et varmbatteri og en tilluftsvifte. Luftmengden er på 10 m³/h som tilsvarer verdier gitt i skisseprosjektet (STATSBYGG, 2017a).

For Gokstad- og Osebergsonene benyttes et ventilasjonsaggregat som tar hensyn til befuktning og avfuktning (system 2). Aggregatet består av en hygroskopisk roterende varme-gjenvinner, omluftsdel, varmbatteri, befukter, kjølebatteri, varmbatteri og tilluft- og avtrekksvifte. Figur 5.14 viser dette ventilasjonsaggregatet. Luftmengden på dette aggregatet er satt til 15 m³/h per m², som definert i skisseprosjektet. Verdier for luftmengder vil endres i de ulike simuleringene for hver løsning basert på utregnede verdier i delkapittel 5.1, samt varierende settpunkter for RF etter årstid.



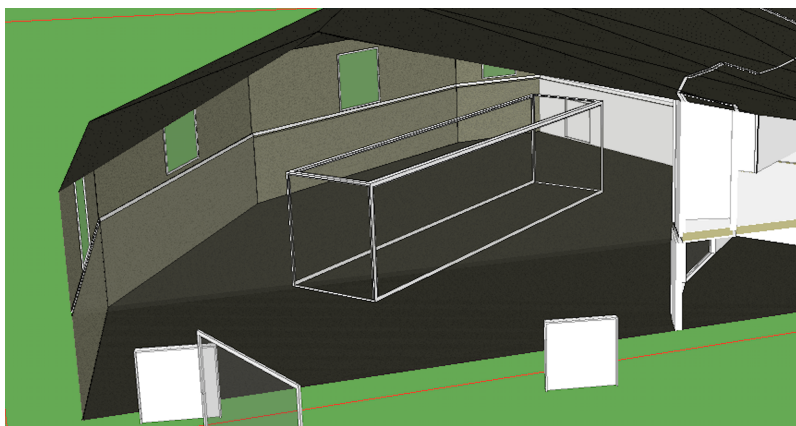
Figur 5.14: Ventilasjonsaggregat for Gokstad- og Osebergsonen hentet fra IDA ICE

Kanalene til systemet skal dimensjoneres med lavt energibruk, moderate lufthastigheter og lavt trykktap. Luftinntak, sjakter, hovedføringer og aggregater skal dimensjoneres etter maksimalt beregnet ventilasjonsbehov, inkludert en samtidighetsvurdering. Tilluftskanalen skal være så "usynlige" som mulig for å opprettholde det estetiske miljøet til museet.

5.2.4 Implementering av et mikroklima i IDA ICE

For scenariene hvor et mikroklima rundt vikingskipet skal ventileres må dette legges inn i IDA ICE. Mikroklima skiller et lite luftvolum fra resten av sonen. EQUA ble kontaktet i forbindelse med dette scenariet, men det er foreløpig ikke mulig å skille mellom to luftrom i en sone i IDA ICE (EQUA Simulation AB, 2019).

Løsningen ble å lage en ny sone i den allerede eksisterende Gokstadsonen. Geometrien til vikingskipene er vanskelig å få til i IDA ICE, så det ble brukt et rektangulært areal på 123,76 m² som base for sonen. Høyden på sonen ble satt til 6 m og det ble lagt inn åpninger som dekker alle veggene og taket i sonen. Luften i mikroklimasonen påvirkes av luften i sonen rundt ved å ha disse åpningene og strømningsbildet i simuleringene blir mer realistisk. Da volumet til denne sonen ikke blir trukket fra den eksisterende Gokstadsonen ventilerer system 1 fortsatt for hele dette volumet, mens system 2 bare ventilerer for mikroklimasonen. Energibruket blir derfor noe unøyaktig. Den implementerte mikroklimasonen i IDA ICE er vist i figur 5.15.



Figur 5.15: Mikroklimasonen implementert i IDA ICE

5.3 Simuleringsscenarier

Gjennom beregningene utført i delkapittel 5.1 ble ulike scenarier som skal simuleres bestemt. Simuleringsscenariene skal sammenlignes med en referansemodell som er basert på ventilasjonssystemet fra skisseprosjektet. På denne måten kan de ulike løsningene måles, kvantifiseres og sammenlignes med referansemodellen.

5.3.1 Referansemodell

Når simuleringer skal utføres er det viktig å ha en referansemodell. Da kan innvirkningen de ulike scenariene har sammenlignes med denne modellen. Referansemodellen som er valgt baserer seg på verdier beskrevet i delkapittel 5.1.1, og bruker fortregning som luftfordelingsprinsipp. Verdiene for RF varierer med årstidene og bestemmes etter verdiene i tabell 4.1. Inputparameterne for referansemodellen er vist i tabell 5.10.

Tabell 5.10: System som brukes, luftmengde og lufthastighet for referansemodellen

Parameter	Soneventilering
Ventilasjonssystem	System 2
Luftmengde	19380 m ³ /h
Lufthastighet i nærsone	0,2 m/s

Det utføres to simuleringsperioder for hvert scenario. En uke for vintersesongen, fra 15.

januar til 21. januar, og en uke for sommersesongen, fra 15. juli til 21. juli.

5.3.2 Simuleringsscenario med omrøring

Inputdata for dette scenariet er basert på beregninger utført i delkapittel 5.1.2. Luftmengden skal holde kravet satt i TEK17 og samtidig opprettholde settpunktene for RF og temperatur satt av konservator. Ventilasjonssystemet som brukes, luftmengde og lufthastighet for dette scenariet er vist i tabell 5.11.

Tabell 5.11: Simuleringsscenario med omrøring: system som brukes, luftmengde og lufthastighet

Parameter	Soneventilering
Ventilasjonssystem	System 2
Luftmengde	20130 m ³ /h
Lufthastighet i nærsone	3 m/s

Dette scenariet vil mest sannsynlig kreve mye energi da det er storeluftmengder i omløp, stort volum som skal ventileres og systemet må befukte/avfukte store luftmengder.

5.3.3 Simuleringsscenario med luftgardin

En luftgardin skal kunne klare å separere et luftvolum fra et annet luftvolum med andre temperaturer og verdier for relativ fuktighet. Inputverdiene for dette scenariet ble bestemt ut i fra beregninger gjort i delkapittel 5.1.3. Inputverdiene for dette simuleringsscenariet er vist i tabell 5.12.

Tabell 5.12: Simuleringsscenario med luftgardin: systemfordeling med tilsvarende luftmengder og lufthastigheter

Parameter	Mikroklimaventilering	Resterende soneventilering
Ventilasjonssystem	System 2	System 1
Luftmengde	7020 m ³ /h	13110 m ³ /h
Lufthastighet i nærsone	2 m/s	0,2 m/s

Dette scenariet tar i bruk mikroklima som ble implementert i IDA ICE, og det er to systemer som brukes til ventilering av Gokstadsoneen.

5.3.4 Simuleringsscenario med tekstilkanal

Litteratur og teori viser at den mekaniske slitasjen kan reduseres ved å implementere et mikroklima som ventileres av en tekstilkanal. Gjennom sitt eksperiment kom Wang og Li frem til at luftstrålene fra sideåpningene i en tekstilkanal etterhvert ble integrert i den vertikale strålen, noe som viste seg å forbedre ventilasjonseffektiviteten (Wang and Li, 2015). Denne studien viser at energibruket kan reduseres ved å implementere et mikroklima med en tekstilkanal.

Tabell 5.13: Simuleringsscenario med tekstilkanal: systemfordeling med tilsvarende luftmengder og lufthastigheter

Parameter	Mikroklimaventilering	Resterende soneventilering
Ventilasjonsystem	System 2	System 1
Luftmengde	8480 m ³ /h	11650 m ³ /h
Lufthastighet i nærsone	2 m/s	0,2 m/s

Verdiene i tabell 5.13 har blitt beregnet i delkapittel 5.1.5 og er basert på numeriske ligninger som ulike vitenskapelige studier har kommet frem til.

5.3.5 Analyse av simuleringsresultater

Kravene som er satt til inneklimate i museet setter basen for resultatanalysen. Resultatene skal analyseres for to ulike perioder; en vinter/vår-periode og en sommer/høst-periode. I vinter/vår-perioden skal RF-nivået være mellom 40 og 50 % og perioden varer fra 1. desember til 31. mai. I sommer/høst-perioden skal RF-nivået være mellom 50 og 60 %, og denne perioden varer fra 1. juni til 31. november. Temperaturen kan variere fra 16 til 25 °C i løpet av året.

Ventilasjonsaggregat 2 er et komplekst system som er designet for å kunne opprettholde en ønsket RF-verdi, se figur 5.14. Dette systemet brukes i Gokstad- og Osebergsonene. Selv om fokuset er på Gokstadsonen er alle de andre sonene også implementert i modellen da de har en påvirkning på inneklimate i sonen. Påvirkningen skjer blant annet ved at luftstrømmer beveger seg fra rom med lavere temperatur til rom med høyere temperatur, samt at solinnstråling vil varme opp rommet. Da oppgaven går ut på å lage et ventilasjons-system som kan holde stabil RF og temperatur, samt ha et så lavt energibruk som mulig, tas det utgangspunkt i referansemodellen når resultater skal sammenlignes for de ulike

scenariene.

En stabilitetsanalyse for relativ fuktighet og temperatur vil bli brukt for å vurdere stabiliteten til scenariene. Gjennomsnittlig RF blir beregnet for hvert scenario. Stabilitetsindeksen for relativ fuktighet, RFS, er summen av absoluttverdien til differansen mellom gjennomsnittlig RF for scenariet og gjennomsnittlig times RF (Ferreira et al., 2015). Dette er vist i ligning 5.6.

$$RFS = \sum_i | \overline{RF} - RF_i | \quad (5.6)$$

$$TS = \sum_i | \overline{T} - T_i | \quad (5.7)$$

Stabilitetsindeksen for temperatur, TS, er beregnet på tilsvarende måte som RFS, og er vist i ligning 5.7. Stabilitetsindeksene gir et bilde på hvor mye hvert scenario avviker fra gjennomsnittlig RF og temperatur i perioden. Jo lavere verdien er, desto mindre er avviket.

5.4 Robusthetsvurdering

Basert på resultatene skal det systemet som anses å være best gjennomgå en robusthetsvurdering. Systemene vurderes etter hvor godt de holder den relative fuktigheten og temperaturen stabil og innenfor kravene som er satt, samtidig som systemet skal ha et så lavt energibruk som mulig. Robusthetsvurderingen skal undersøke hvor godt systemet fungerer ved høyere interne laster.

Den største usikkerheten når det kommer til det nye museet er hvor store de interne lastene vil være. Menneskenes aktivitetsnivå og antallet besøkende i museet er med på å påvirke de interne lastene. Besøksprofilen som er estimert brukes til å beregne antall besøkende gjennom dagen og de interne lastene vil variere etter denne. Flere besøkende og økt aktivitet vil øke de interne lastene, og det er noe ventilasjonssystemene må være rustet til å tåle.

Robustheten til det systemet som anses å være best skal testes ved å øke antallet besøkende med 25% i Gokstad- og Osebergsonene, samt øke aktivitetsnivået fra 1,5 til 2,5 met.

Kapittel 6

Resultater

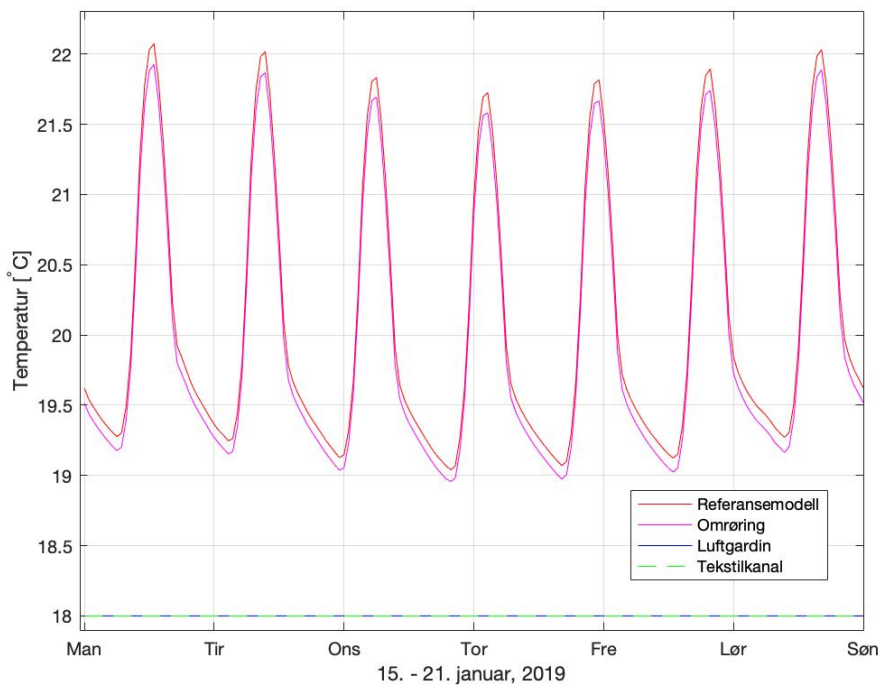
Dette kapittelet er todelt. Først blir resultatene for vintersimuleringene presentert, deretter resultatene for sommersimuleringene. I hver del presenteres de individuelle resultatene for hvert scenario med tanke på temperatur, RF, PPD, energibehovet til klimaanlegget og energibruket til museet.

6.1 Vintersimulering

Her blir vintersimuleringen presentert. Simuleringsperioden er fra 15.-21. januar. Resultatet for hvert scenario er presentert i de ulike figurene.

6.1.1 Temperatur

Temperaturresultatene for Gokstadsonen er presentert for hvert scenario i figur 6.1. Denne figuren viser temperatursvingningene gitt av simuleringen i IDA ICE for en uke i januar. Den røde grafen viser temperatursvingningene for referansemodellen, den lilla for scenariet med omrøring, den blå viser for scenariet med luftgardin og den grønne stiplede grafen for scenariet med tekstilkanal. Som grafen viser holder temperaturen seg mer stabil med et regulert mikroklima.



Figur 6.1: Gjennomsnittlig lufttemperatur i Gokstadsone for en uke i januar

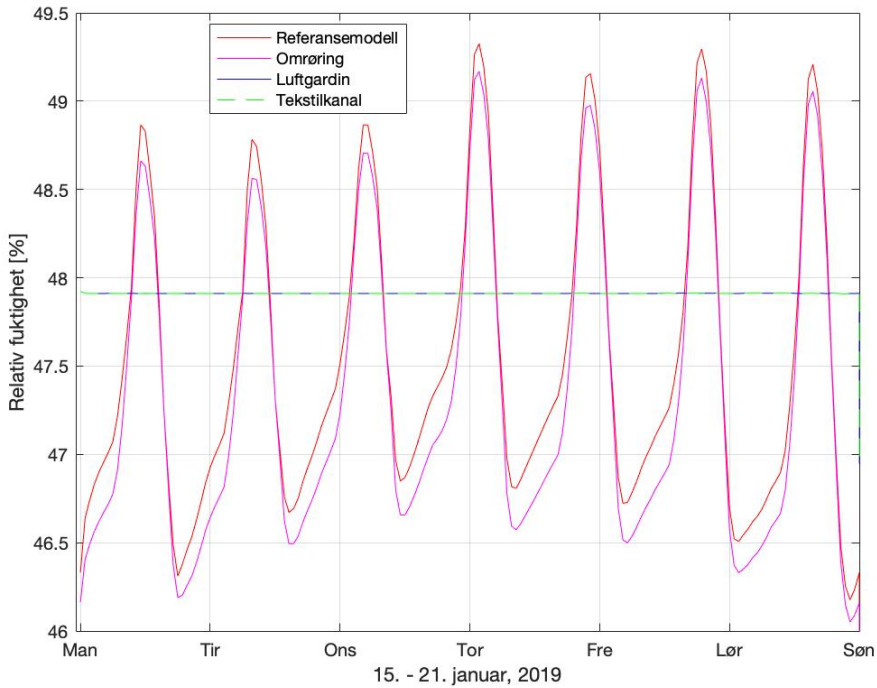
Tabell 6.1 viser minimum, maksimum, gjennomsnittlig og standardavvik for temperaturen i Gokstadsone for de ulike scenariene, samt stabilitetsindeksen for temperaturen, TS. Minimum og maksimum temperatur som er satt for museet gjennom året er henholdsvis 16 og 25 °C. Som tabellen viser holder alle disse scenariene seg innenfor temperaturgrensene. Å implementere et mikroklima reduserer standardavviket og TS-verdien betraktelig.

Tabell 6.1: Resultat fra stabilitetsanalysen for vintertemperatur, TS, i Gokstadsone

	Referansemodell	Omrøring	Luftgardin	Tekstilkanal
Min	19,04	18,95	18	18
Maks	22,09	21,93	18	18
Gjennomsnitt	20,081	19,969	18,000	18,000
Standardavvik	0,950	0,9322	0,0002	0,0002
TS	139,046	136,274	0,004	0,004

6.1.2 Relativ fuktighet

Den relative fuktighetsfordelingen i Gokstadsonen i den simulerte perioden er vist i figur 6.2. Den røde grafen viser resultatene for referansemodellen, den lilla for scenariet med omrøring, den blå for scenariet med luftgardin og den grønne stiplede grafen for scenariet med tekstilkanal. Grafen viser stabil RF fordeling med et regulert mikroklima.



Figur 6.2: Gjennomsnittlig RF i Gokstadsonen for en uke i januar

Minimum, maksimum, gjennomsnittlig, standardavvik og stabilitetsindeksen for relativ fuktighet for de ulike scenariene er vist i tabell 6.2. Verdiene i tabellen viser at RF-nivået er innenfor ønskede verdier på 40-50%. Resultatene viser også at en implementering av et mikroklima rundt vikingskipet reduserer stabilitetsindeksen for RF og standardavviket.

Tabell 6.2: Resultat fra stabilitetsanalysen for relativ fuktighet, RFS, i Gokstadsonen

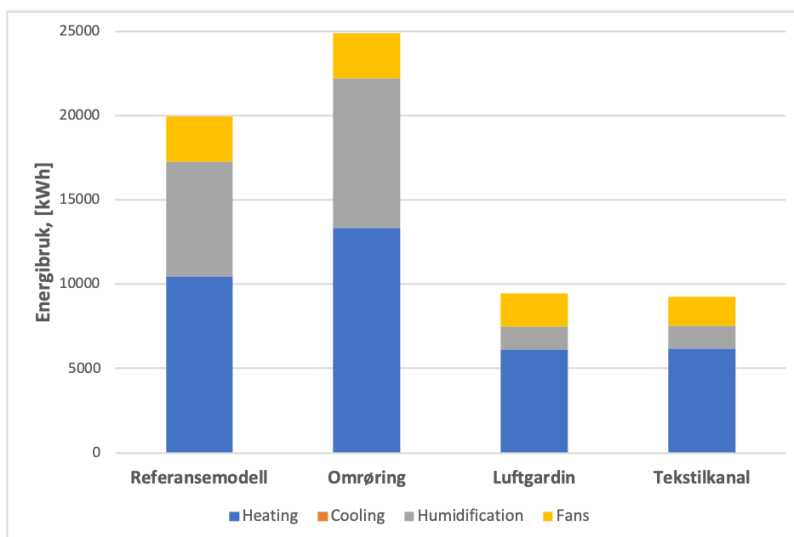
	Referansemodell	Omrøring	Luftgardin	Tekstilkanal
Min	46,18	46,05	47,91	47,91
Maks	49,33	49,17	47,91	47,91
Gjennomsnitt	47,514	47,323	47,911	47,911
Standardavvik	0,8336	0,8645	0,0010	0,0010
RFS	118,077	125,170	0,086	0,088

6.1.3 PPD

Antall personer som føler misnøye med inneklimateforholdene i et rom er gitt i prosent ved PPD-indeksen. For to scenarier ble maks PPD beregnet gjennom simuleringen i IDA ICE. Referansemodellen viste størst prosentandel som var misfornøyd og hadde en maks PPD-verdi på 6,936%, mens scenariet med omrøring hadde en PPD-verdi på 6,687%. For scenariene med et mikroklima er PPD-indeksen ikke-eksisterende, da det ikke er noen personer som oppholder seg i sonen.

6.1.4 Energibehovet til klimaanlegget

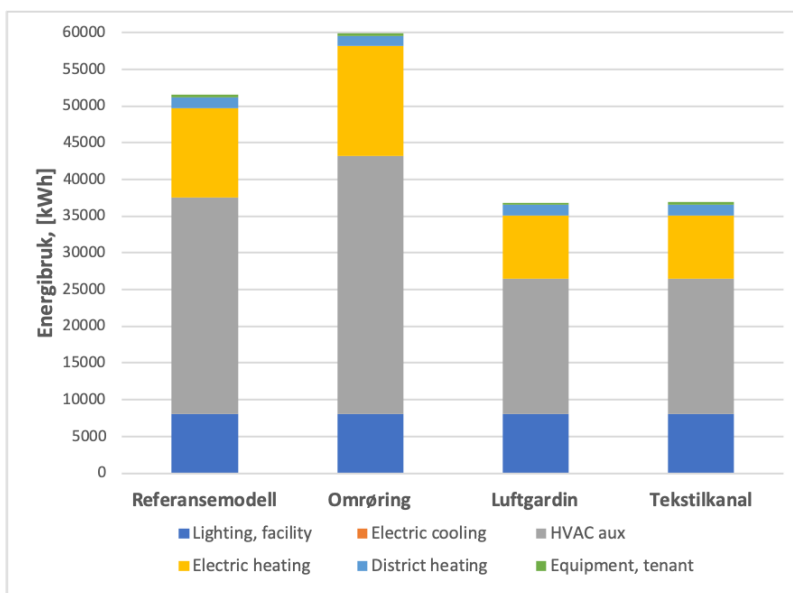
Figur 6.3 viser energibehovet til klimaanlegget som ventilerer Gokstadsonen for de ulike scenariene. Dette systemet, også beskrevet som system 2 i delkapittel 5.2.3, bruker mest effekt på oppvarming av tilluften. Det totale energibehovet til klimaanleggene som ventilerer for Gokstadsonen er: 19948 kWh for referansemodellen, 24903 kWh for scenariet med omrøring, 9457 kWh for scenariet med luftgardin og 9246 kWh for scenariet med tekstilkanal. For scenariene med et mikroklima er ventileringen med system 1 også tatt med i figuren.



Figur 6.3: Energibehovet til klimaanlegget for de ulike scenariene for en uke i januar

6.1.5 Energibruk

Totale energibruk for hele Vikingtidsmuseet for uken i vintersimuleringen er vist i figur 6.4. Som figuren viser er det klimaanleggene som krever mest energi for alle scenariene. Energibruket til lys og fasiliteter, samt til utstyr og brukere er det samme for alle scenariene. Det totale energibruket til referansemodellen er på 51522 kWh og for scenariet med omrøring er det på 59930 kWh. For scenariet med luftgardin er energibruket 36855 kWh og for scenariet med tekstilkanal er det 36866 kWh.



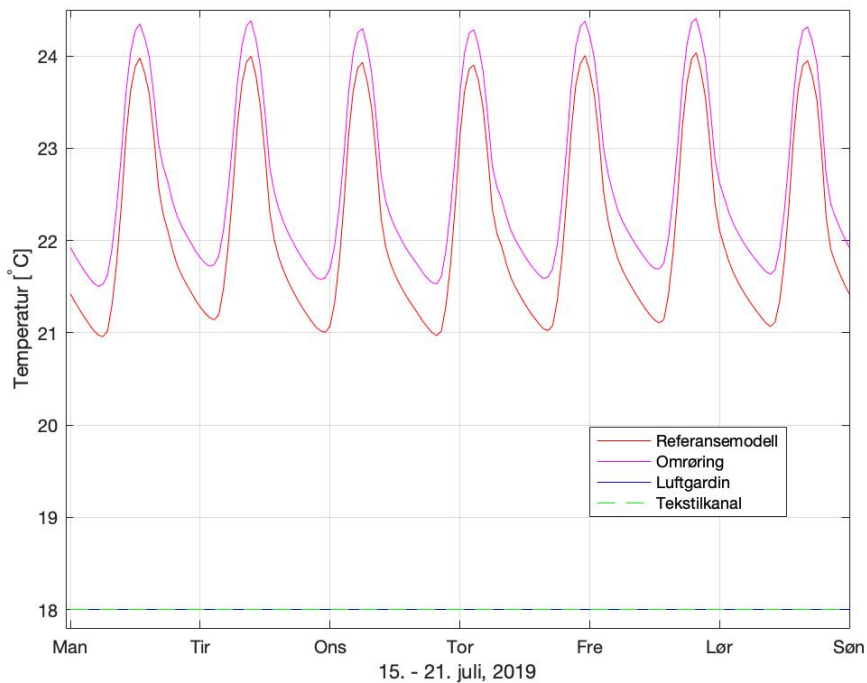
Figur 6.4: Det totale energibruket til Vikingtidsmuseet for en uke i januar

6.2 Sommersimulering

Her blir sommersimuleringen presentert. Simuleringsperioden er fra 15.-21. juli. Resultatet for hvert scenario er presentert i de ulike figurene.

6.2.1 Temperatur

Figur 6.5 viser temperaturresultatene for Gokstadsone for hvert scenario. Figuren viser temperatursvingningene gitt av simuleringen i IDA ICE for en uke i juli. Den røde grafen viser temperatursvingningene for referansemodellen, den lilla for scenariet med omrøring, den blå viser for scenariet med luftgardin og den grønne stiplede grafen viser for scenariet med tekstilkanal. Å implementere et mikroklima gjør det mulig å holde en stabil temperatur.



Figur 6.5: Gjennomsnittlig lufttemperatur i Gosktadsønen for en uke i juli

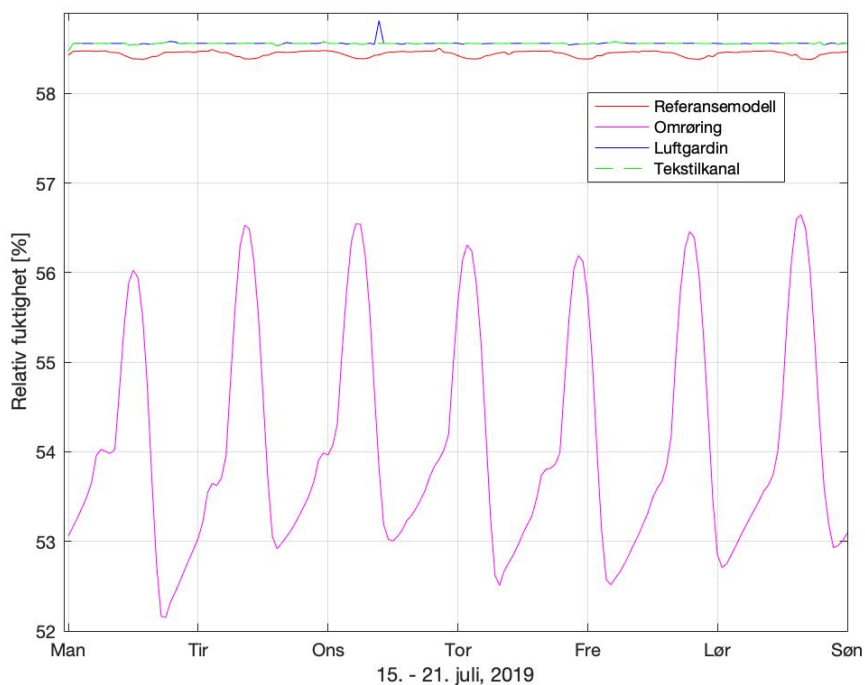
Minimum, maksimum, gjennomsnittlig og standardavvik for temperaturen i Gokstadsønen for de ulike scenariene, samt stabilitetsindeksen for temperaturen, TS, er vist i tabell 6.3. Som tabellen viser holder de ulike scenariene seg innenfor temperaturgrensene satt av konservator. Standardavviket og TS-verdien har blitt redusert ved å implementere et mikroklima.

Tabell 6.3: Resultat fra stabilitetsanalysen for sommertemperatur, TS, i Gokstadsønen

	Referansemodell	Omrøring	Luftgardin	Tekstilkanal
Min	20,96	21,5	18	18
Maks	24,04	24,42	18	18
Gjennomsnitt	22,134	22,635	18,000	18,000
Standardavvik	1,0109	0,9494	0,0002	0,0005
TS	148,966	139,942	0,006	0,018

6.2.2 Relativ fuktighet

Figur 6.6 viser den relative fuktighetsfordelingen i Gokstadsønen for den simulerte perioden i juli. Resultatene for referansemodellen tilsvarer den røde grafen, den lilla viser for scenariet med omrøring, den blå for scenariet med luftgardin og den grønne stiplede grafen for scenariet med tekstilkanal. Grafen viser at den relative fuktigheten kan holdes stabil ved å ha et regulert mikroklima.



Figur 6.6: Gjennomsnittlig RF i Gokstadsønen for en uke i juli

Tabell 6.4 viser minimum, maksimum, gjennomsnittlig, standardavvik og stabilitetsindeksen for relativ fuktighet for de ulike scenariene. Tabellen viser at RF-nivået er innenfor ønskede verdier på 50-60%. Stabilitetsindeksen og standardavviket for RF reduseres ved å implementere et mikroklima rundt vikingskipet.

Tabell 6.4: Resultat fra stabilitetsanalysen for relativ fuktighet, RFS, i Gokstadsonen

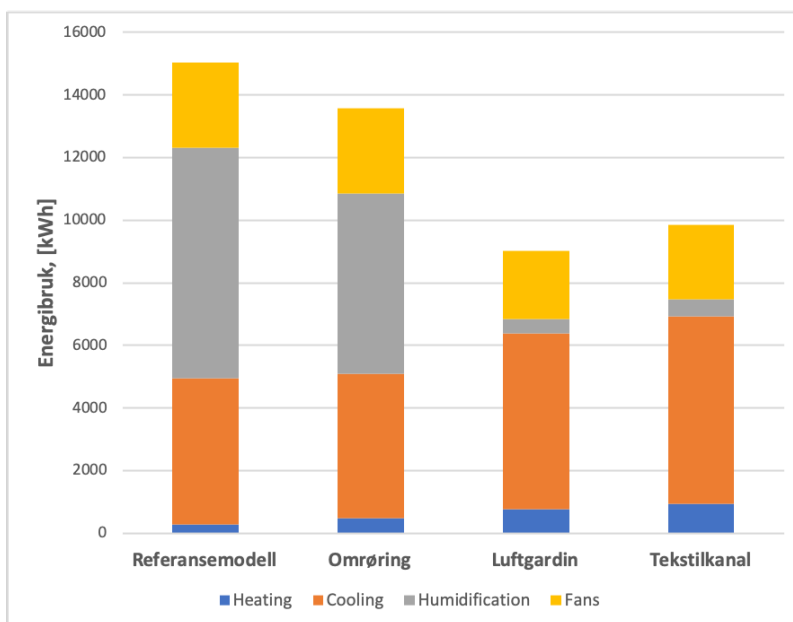
	Referansemodell	Omrøring	Luftgardin	Tekstilkanal
Min	58,35	52,13	58,44	58,44
Maks	58,5	56,65	58,72	58,72
Gjennomsnitt	58,444	54,079	58,559	58,558
Standardavvik	0,0312	1,2437	0,0216	0,0090
RFS	4,520	176,404	0,970	0,737

6.2.3 PPD

Resultatene fra simuleringen viser at scenariet med omrøring har en PPD-indeks på 17,12%, mens referansemodellen har en noe lavere PPD-indeks på 14,71%. For scenariene med et mikroklima er PPD-indeksen ikke-eksisterende, da ingen personer oppholder seg i denne sonen.

6.2.4 Energibehovet til klimaanlegget

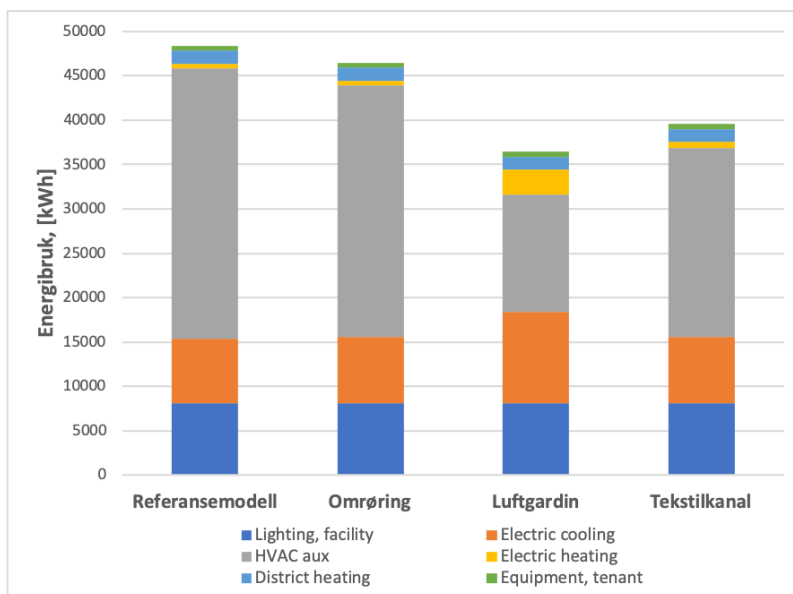
Energibehovet til klimaanleggene som ventilerer Gokstadsonen er vist i figur 6.7 for de ulike scenariene. Det totale energibehovet til klimaanleggene som ventilerer fot Gokstadsonen er: 15049 kWh for referansemodellen, 13570 kWh for scenariet med omrøring, 9009 kWh for scenariet med luftgardin og 9859 kWh for scenariet med tekstilkanal. For scenariene med et mikroklima er ventileringen med system 1 også tatt med i figuren.



Figur 6.7: Energiebehovet til klimaanlegget for de ulike scenariene for en uke i juli

6.2.5 Energibruk

Figur 6.8 viser det totale energibruket til hele Vikingtidsmuseet for simuleringsuken i juli. Klimaanleggene krever mest energi for alle scenariene, og energibruket til lys og fasiliteter, samt til utstyr og brukere er så å si det samme for alle scenariene. Det totale energibruket til referansemodellen 34371 kWh og noe lavere for scenariet med omrøring på 46432 kWh. For scenariet med luftgardin er energibruket 36424 kWh og for scenariet med tekstilkanal er det 39559 kWh.



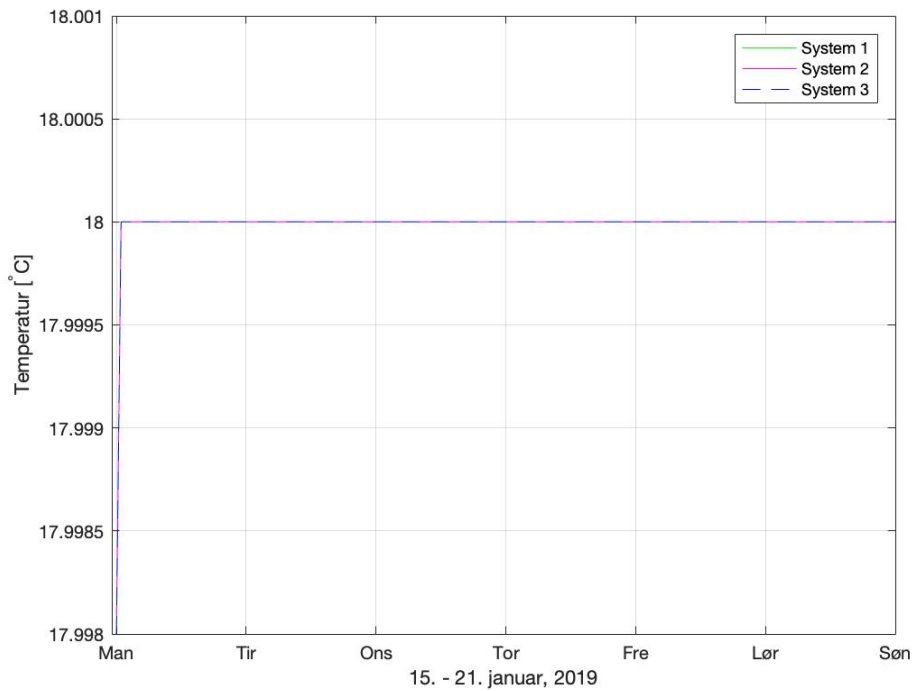
Figur 6.8: Det totale energibruket til Vikingtidsmuseet for en uke i juli

6.3 Robusthetsvurdering

Resultatene viser at scenariet med luftgardin anses som den beste løsningen. Med tanke på RF og temperatur holder dette systemet verdiene innenfor kravene som er satt av konservator i tillegg til å ha det laveste energibruket for begge simuleringsperiodene. Det velges derfor å utføre en robusthetsvurdering av dette systemet. System 1 er det opprinnelige scenariet med luftgardin som har 650 personer og 1,5 met. System 2 har en økning på 25% antall besøkende og system 3 har en økning på 1 met, fra 1,5 til 2,5 met.

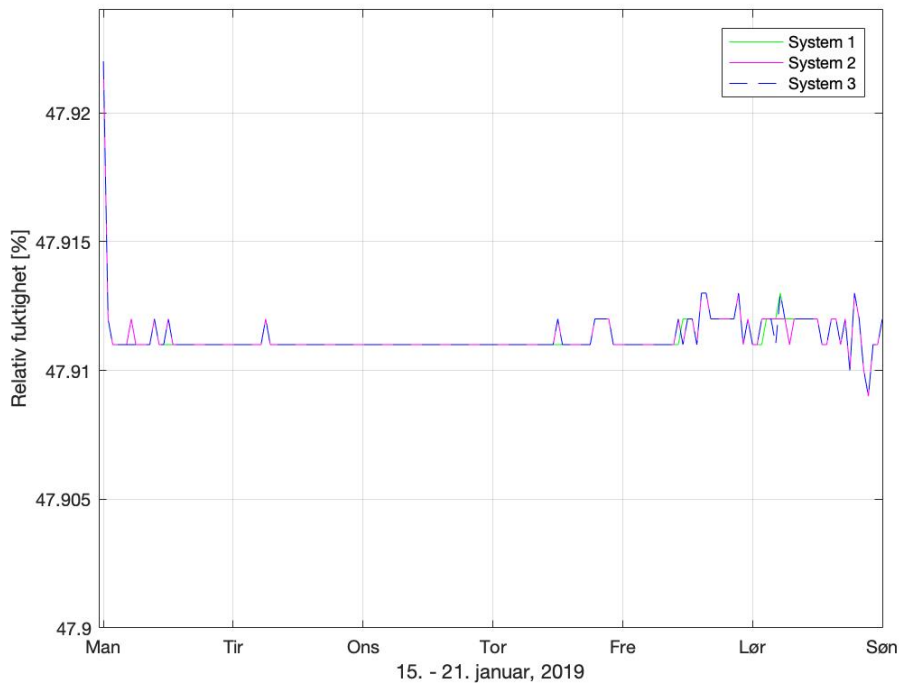
6.3.1 Vintersimulering

Figur 6.9 viser den gjennomsnittlige temperaturen i mikroklime for de tre systemene. Den grønne grafen viser temperaturen for system 1, den lilla for system 2 og den stiplede blå viser for system 3. Figuren viser at temperaturen er stabil og den samme for alle systemene. Stabilitetsindeksen for temperatur, TS, blir det samme som for originalen på 0,004, også vist i tabell 6.1.



Figur 6.9: Gjennomsnittlig lufttemperatur i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene

Selv om temperaturen er stabil for de tre systemene, viser figur 6.10 at det er forskjeller i fordelingen av RF. Den grønne grafen viser for RF-fordelingen til system 1, den lilla for system 2 og den stiplede blå for system 3.



Figur 6.10: Gjennomsnittlig RF i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene

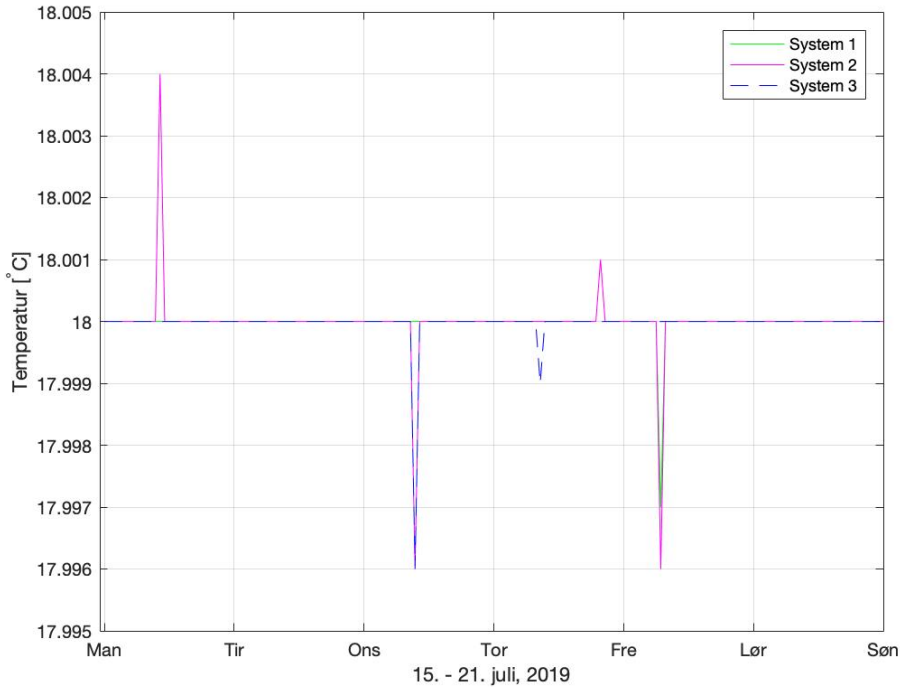
Som tabell 6.5 viser er minimum- og maksimumsverdien, samt gjennomsnittet og standardavviket for de tre systemene det samme. RFS-verdien varierer og resultatet er vist i tabellen. System 2 og 3 viser en noe høyere RFS-verdi enn system 1.

Tabell 6.5: Resultat fra stabilitetsanalysen for relativ fuktighet, RFS, for de tre systemene for uken i januar

	System 1	System 2	System 3
Min	47,9090	47,9090	47,9090
Maks	47,9220	47,9220	47,9220
Gjennomsnitt	47,9113	47,9113	47,9113
Standardavvik	0,0010	0,0010	0,0010
RFS	0,0859	0,0862	0,0868

6.3.2 Sommersimulering

Gjennomsnittlig temperatur for de tre systemene for sommersimuleringen er vist i figur 6.11. Den grønne grafen viser temperaturfordelingen for system 1, den lilla for system 2 og den blå stiplede grafen for system 3. Som figuren viser holder temperaturen seg ganske stabil.



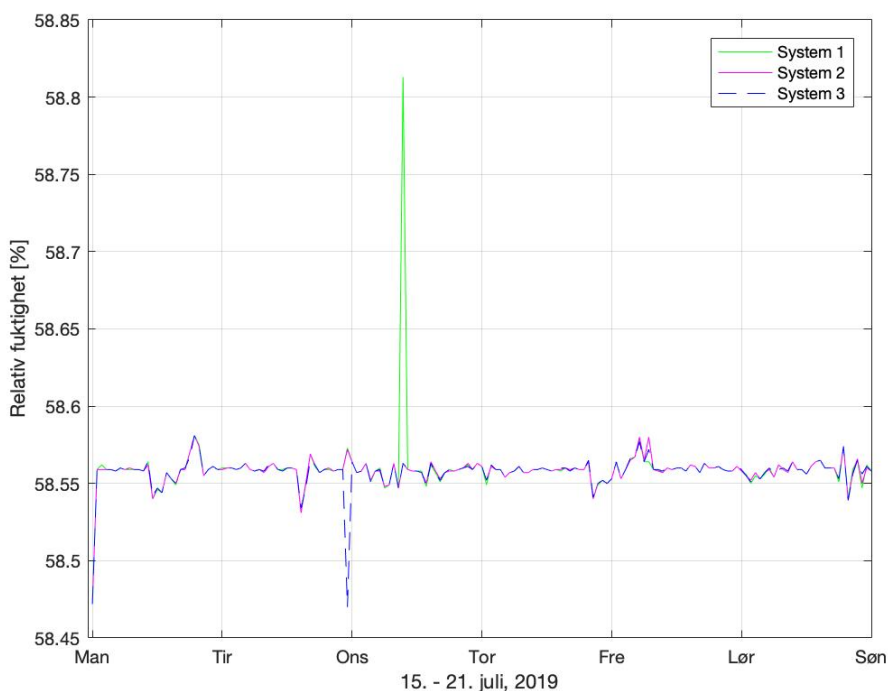
Figur 6.11: Gjennomsnittlig lufttemperatur i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene

Tabell 6.6 viser minimum, maksimum, gjennomsnittlig temperatur, standardavvik og TS for de tre systemene. Økt antall besøkende og økt aktivitetsnivå gir større svingninger i systemene, og stabiliseringsindeksen for temperatur øker.

Tabell 6.6: Resultat fra stabilitetsanalysen for temperatur, TS, for de tre systemene for uken i juli

	System 1	System 2	System 3
Min	17,9970	17,9960	17,9960
Maks	18,0010	18,0040	18,0000
Gjennomsnitt	18,0000	18,0000	18,0000
Standardavvik	0,0002	0,0005	0,0003
TS	0,0060	0,0159	0,0099

Den relative fuktighetsfordelingen til de tre systemene er vist i figur 6.12. Grafene viser at det er relativt små variasjoner for de tre systemene.



Figur 6.12: Gjennomsnittlig RF i mikroklimasonen rundt vikingskipet for de tre systemene

Tross små variasjoner i RF blir stabilitetsindeksen, RFS, påvirket, noe som er vist i tabell 6.7. Tabellen viser at system 1 har den høyeste RFS-verdien, mens de to andre er lavere.

Tabell 6.7: Resultat fra stabilitetsanalyse for relativ fuktighet, RFS, for de tre systemene for uken i juli

	System 1	System 2	System 3
Min	58,4740	58,4720	58,4700
Maks	58,8130	58,5810	58,5810
Gjennomsnitt	58,5595	58,5581	58,5575
Standardavvik	0,0216	0,0091	0,0111
RFS	0,9697	0,7279	0,8277

Diskusjon

Simuleringsmodellen og inputverdiene blir diskutert i dette kapittelet. De ulike løsningene og simuleringsresultatene blir forklart og sammenlignet med teori og litteratur. Til slutt blir robustheten til det beste scenariet diskutert.

Forskning rettet mot museer fokuserer i dag på måter å gjøre museer mer energieffektive på, blant annet gjennom energisimuleringer. Energianalyser kan gi resultater for energieffektiviteten, samt energibruket til et bygg, og brukes som et verktøy for å designe klimaanleggene i museer. I følge de Santoli er det noen retningslinjer som må følges for at energianalysen skal bli så presis og troverdig som mulig (de Santoli, 2015). Det viktigste er at energianalysen utføres minst to ganger slik at det blir lettere å sammenligne resultater og se hvilke forbedringer som gir best energieffektivitet. Energianalysen utføres gjerne gjennom energisimuleringer som resulterer i en energiytelsesindeks, EP, som brukes til å evaluere energieffektiviteten til bygget. I denne masteroppgaven ble det derfor valgt å utføre energisimuleringer for to ulike simuleringsperioder, og for flere scenarier som har blitt definert og vurdert.

7.1 Simuleringsmodellen

Simuleringsmodellen i IDA ICE har blitt hentet med tillatelse fra Skramdal sin masteroppgave (Skramdal, 2018), og har blitt modifisert til å passe denne masteroppgaven. For å få modellen til å fungere som ønsket ble det brukt prøve- og feilemetoden.

7.1.1 Forenklinger i simuleringsmodellen

Metoden "fit for purpose" har blitt brukt for å korte ned simuleringstiden ved å forenkle geometrien til museet. Den største modifiseringen som har blitt gjort er å slå sammen Gokstadsonene til en stor sone. I følge Brown er det bedre å ha færre termiske soner slik at sonene kan styres av samme klimaanlegg og energibruket kan bli redusert (Brown, 2016). I skisseprosjektet er det designet et lite podium hvor besøkende kan stå å se ned på skipene. Totalt gulvareal i Gokstadsonen vil derfor være større i virkeligheten enn det som er brukt i modellen. Da dette ekstra gulvarealet ikke har noe å si for ventilering av sonen er det derfor valgt å se bort i fra dette podiet.

Klimaanlegget har også blitt forenklet og det er satt inn en hygroskopisk roterende varmegjenvinner, samt en dampbefukter. Fokuset er å opprettholde riktig klima for vikingskipene hele døgnet. For at kravene til RF og temperatur skal holdes konstant krever det et klimaanlegg som er i drift hele døgnet, året rundt. Det ble derfor bestemt at CAV skal brukes i klimaanleggene til Gokstad- og Osebergsonene, til tross for at litteratur og studier viser at et VAV-system gir større energibesparelser enn et CAV-system. For denne case-studien viser resultatene at en kombinasjon av CAV- og VAV-regulering kan redusere energibruket til både klimaanlegget og hele museet. CAV-reguleringen brukes til å styre mikroklima, og VAV-regulering brukes til resten av sonen og er bare på under åpningstid.

7.1.2 Inputdata

Inputdataen er basert på informasjon og verdier gitt i skisseprosjektet, samt opplysninger fra Multiconsult. Den mest usikre inputverdien er antall besøkende. Dette varierer fra dag til dag og det er vanskelig å fastslå hvor mange som kommer til å være i museet til en hver tid. For simuleringsmodellen antas det like mange besøkende og samme besøksprofil hver dag. Befuktning-/avfuktningsbehovet til ventilasjonssystemene som ventilerer for hele Gokstadsonen er avhengig av fukt- og varmeproduksjonen fra de besøkende, og med en usikker besøksbelastning vil resultatene fra simuleringen også bli påvirket.

Skisseprosjektet viser til at en energisentral, hvor varmepumper og energibrønner for lagring av energi, skal utgjøre energiforsyningen til museet, samt 800 m² med solceller. Dette energianlegget er ikke tatt med i simuleringsmodellen da fokuset på oppgaven er å se effekten av de ulike løsningene for ventilasjonssystemet. Hvis dette energieffektive energianlegget hadde blitt implementert i simuleringsmodellen, kunne resultatene blitt noe annerledes.

7.1.3 Implementering av et mikroklima

Litteratur og studier viser at en IMQ-analyse gjør det mulig å fastsette settpunkter for et mikroklima. Dette har blitt gjort i Vikingskipshuset og settpunktene fastsatt av konservator er derfor pålitelige. Gjennom Balocco et. al. sin studie ble de vist at RF og temperatur holder seg relativt konstant innenfor et mikroklima (Balocco et al., 2016). Det ble derfor valgt å utforske ventilering av et mikroklima rundt vikingskipene med settpunkter fra IMQ-analysen utført i Vikingskipshuset. Denne løsningen gjør det mulig å holde innklima rundt vikingskipene konstant, noe som er ønsket.

For å kunne simulere scenariene med luftgardin og tekstilkanal i IDA ICE trengs det en mikroklimasone. I følge EQUA er det ikke mulig å skille to luftrom fra hverandre i samme sone i IDA ICE. Løsningen som ble valgt var å legge en ny mindre sone i Gokstadsønen kalt mikroklimasonen som er rundt selve skipet. Gulvarealet til de resterende delene av Gokstadsønen blir feil i IDA ICE, da gulvarealet til mikroklimasonen ikke blir trukket fra denne sonen. Det vil si at ventileringsbehovet til resten av sonen vil bli noe høyere enn den ville blitt i virkeligheten.

Geometrien til mikroklimasonen skal følge formen på vikingskipene, men i IDA ICE er buede linjer som tidligere skrevet ikke mulig. For å gjøre simuleringen så enkel og realistisk som mulig ble det derfor bestemt at geometrien skulle være rektangulær, med bredden og lengden til vikingskipene, samt en høyde som dekker masten. Simuleringen av ventileringsbehovet til mikroklimasonen vil avvike noe fra de virkelige verdiene, men ikke betraktelig. En CFD-analyse av scenariene med et mikroklima gjør det mulig å se luftstrømningene rundt skipene. Basert på å prøve og feile med CFD-simuleringer vil luftmengder og lufthastigheter kunne bli definert, samt at kanaler kan dimensjoneres.

7.2 Simuleringsresultater

Resultatene som ble presentert i forrige kapittel skal her bli diskutert og satt opp mot problemstillingen til oppgaven.

7.2.1 Vintersimulering

Vintersimuleringen for 15.-21. januar hadde settpunkter på 16-25 °C og 40-50% RF.

Temperatur

Som figur 6.1 viser holder den gjennomsnittlige temperaturen seg stabil på 18 °C for begge scenariene hvor et mikroklima har blitt innført i sonen. For referansemodellen varierer den fra 19,04 til 22,09 °C. Dette gir en variasjon i temperatur på 3,05 °C. Scenariet med omrøring har en gjennomsnittlig temperatur som varierer fra 18,95 til 21,93 °C, med en variasjon på 2,98 °C. I teorien om anbefalte verdier for museer fastsatt av ASHRAE kan de kortsiktige variasjonene være på ± 2 K. Simuleringsresultatene viser at temperaturen er utenfor denne terskelen for de to scenariene, selv om den er innenfor settpunktene satt av konservator til vikingskipene. Å være utenfor denne terskelen er ikke nødvendigvis et problem, men å være innenfor viser at systemet er robust nok til å holde settpunktene. Å tillate større svingninger i temperatur enn det som er fastsatt av ASHRAE kan potensielt redusere energiforbruket.

Grunnen til at det er så stor variasjon i temperatur mellom de fire scenariene er at ventilasjonssystemet ventilerer med CAV-regulering for hele Gokstadsone for referansemodellen og scenariet med omrøring, mens det for de to andre scenariene bare ventileres med CAV for vikingskipet, i mikroklimasonen, og VAV for resten av sonen. Ventilering av hele sonen må ta hensyn til varme- og fuktproduksjon fra menneskene, noe som ikke eksisterer i mikroklimasonen. Antallet mennesker i rommet varierer fra 0 til 650, og kan være en utslagsgivende faktor for de store svingningene i gjennomsnittstemperaturen.

Relativ fuktighet

Fra teorien gir settpunkter gitt av ASHRAE en mulighet for kortsiktige variasjoner på $\pm 10\%$ RF. Figur 6.2 viser at det er relativt små svingninger i gjennomsnittlig RF. Referansemodellen svinger mellom 46,18% og 49,3% RF, scenariet med omrøring svinger mellom 46,05 og 49,17 %, og de to andre scenariene har en stabil RF på 47,91%. Alle scenariene er innenfor terskelen satt av både ASHRAE og konservator. I følge Kramer et. al. er det mulig å redusere energibruket betraktelig ved å implementere muligheter for større variasjoner i settpunkter og tillate svingninger (Kramer et al., 2016). Resultatene viser relativt små svingninger i RF, og muligheten for å øke disse er stor. Anbefalingene til Kramer et. al. gjør det mulig å redusere energibruket til museet.

PPD

For å sikre et godt inneklime for menneskene er det viktig å ta hensyn til PPD-indeksen. Resultatene viser PPD-indeksen for referansemodellen og for scenariet med omrøring. Dette er fordi systemet til disse scenariene ventilerer for hele Gokstadsone og det må tas hensyn til menneskene i rommet. I følge NS-EN ISO 7730 burde PPD-indeksen væ-

re mindre enn 10% i et nybygg (Standard Norge, 2006). Som resultatene viser er PPD-indeksen for referansemodellen på 6,936% og på 6,687% for scenariet med omrøring, noe som er godt innenfor denne grensen. Denne PPD-verdien indikerer at henholdsvis 93,064% og 93,313% er fornøyde med inneklimate og de termiske forholdene i rommet. Området som dekker mikroklimasonen omkranser skipet, og det er ingen mennesker som skal oppholde seg i denne sonen. PPD-indeksen for scenariene med et mikroklima er derfor ikke eksisterende.

Energibehovet til klimaanlegget

Ventilasjonssystemet i referansemodellen og scenariet med omrøring ventilerer for hele Gokstadsone, og energibehovet til disse scenariene blir derfor større i forhold til de to andre scenariene, noe som er vist i figur 6.3. Det totale energibehovet til referansemodellen er på 19948 kWh, for scenariet med omrøring er det 24903 kWh, for scenariet med luftgardin er det 9457 kWh og for scenariet med tekstilkanal er det 9246 kWh. Resultatene indikerer at energibehovet til klimaanlegget kan reduseres med henholdsvis 52,6% og 62,9% ved å implementere et mikroklima.

Som ligning 3.2 viser er befuktningens behov avhengig av luftmengden. Desto større luftmengder, desto større befuktningens behov. Ettersom uteluften er kald på vinteren må den varmes opp før den befuktes, og som figuren viser går det meste av energien til oppvarming og befuktning av uteluften. Standard befukter i IDA ICE baserer seg på befuktning med damp ved 100 °C. Energibehovet kan potensielt bli redusert ved å benytte adiabatisk kjøling, men siden Vikingtidsmuseet skal benytte energibrønner som kan dra nytte av å få tilbakeført ”varmt” vann, er bruk av adiabatisk kjøling nødvendigvis ikke en fordel her.

Energibruk

Som figur 6.4 er det ikke så store forskjeller i energibruk mellom de ulike scenariene. Det totale energibruket for Vikingtidsmuseet i vinteruken er 51522 kWh for referansemodellen, 59929 kWh for scenariet med omrøring, 36855 kWh for scenariet med luftgardin og 36866 kWh for scenariet med tekstilkanal. Dette indikerer at energibruket til referansemodellen kan reduseres med henholdsvis 28,5% og 28,4% for scenariene med et mikroklima.

Som figuren viser går det meste av det totale energibruket til klimaanlegget. Litteratur og nyere forskning, som blant annet studien utført av Balocco et. al. (Balocco et al., 2016), viser at et mikroklima som styres ved hjelp av CAV kan holde stabil RF og temperatur. En reduksjon i energibruk henger sammen med størrelsen på luftmengder. Små luftmengder

gir lavt energiforbruk, noe som resultatene i figuren viser. Energibruket til klimaanlegget ble redusert ved å implementere et mikroklima med lavere tilførsel av luftmengder.

7.2.2 Sommersimulering

Sommersimuleringen for 15.-21. juli hadde settpunkter på 16-25 °C og 50-60% RF.

Temperatur

Som figur 6.5 viser varierer den gjennomsnittlige temperaturen fra 20,96 til 24,04 °C for referansemodellen, noe som gir en variasjon i temperatur på 3,08 °C. For scenariet med omrøring er det en variasjon i temperatur på 2,92 °C, og variasjonene er mellom 21,5 og 24,42 °C. For scenariene med et mikroklima holder temperaturen seg stabil på 18 °C. De kortsiktige variasjonene kan være på ± 2 K i følge ASHRAE, og resultatene viser at temperaturvariasjonene i referansemodellen og scenariet med omrøring er utenfor dette området. På den annen side er temperaturen innenfor settpunktene satt av konservator til vikingskipene. Som for vintersimuleringen er det ikke nødvendigvis dårlig å være utenfor denne terskelen, men å være innenfor viser robusthet i systemet. Energibruket kan også reduseres for denne simuleringsperioden ved å tillate større svingninger i temperatur enn det som er fastsatt av ASHRAE. Å heve gjennomsnittstemperaturen i sonen til for eksempel 23 grader kan være et annet tiltak for å redusere energibruket, da behovet for kjøling blir mindre.

Denne figuren viser også at det er variasjoner i temperatur mellom de fire scenariene. Grunnen til dette er den samme som for vintersimuleringen: klimaanleggene ventilerer med CAV for hele Gokstadsone for referansemodellen og scenariet med omrøring, og bare med CAV for mikroklimasonen for de to andre scenariene.

Relativ fuktighet

Figur 6.6 viser den relative fuktigheten for de ulike scenariene for uken i juli. Teorien viser til settpunkter gitt av ASHRAE med en mulighet for kortsiktige variasjoner på $\pm 10\%$ RF. Som figuren viser er det relativt små svingninger i RF for tre av de fire scenariene. Referansemodellen svinger mellom 58,35% og 58,5% RF, scenariet med omrøring svinger mellom 52,13 og 56,65 %, mens de to andre scenariene svinger mellom 58,44% og 58,72%. Alle scenariene er innenfor terskelen satt av både ASHRAE og konservator. Som for vintersimuleringen er det mulig å redusere energibruket til museet ved å tillate større svingninger i RF etter anbefalinger fra Kramer et. al (Kramer et al., 2016).

PPD

Som resultatene viser er PPD-indeksen for referansemodellen på 14,71%, mens den er noe høyere for scenariet med omrøring på hele 17,12%. I følge NS-EN ISO 7730 er disse verdiene utenfor anbefalt område, noe som indikerer at en større andel av de besøkende er misfornøyde med inn klima og de termiske forholdene i rommet. Som for vintersimuleringen er bare resultatene for referansemodellen og scenariet med omrøring tatt med ettersom det ikke er noen mennesker i mikroklimasonen.

Energibehovet til klimaanlegget

Som figur 6.7 viser er det ikke så store forskjeller i energibehovet til klimaanlegget for de ulike scenariene. Energibehovet til referansemodellen er på 15049 kWh, 13570 kWh for scenariet med omrøring, scenariet med luftgardin har et energibehov på 9009 kWh og for scenariet med tekstilkanal er det på 9859 kWh. Resultatene indikerer at energibehovet til klimaanlegget kan reduseres med henholdsvis 40,1% og 34,5% for scenariene med et mikroklima.

For scenariene hvor klimaanlegget ventilerer for hele Gokstadsone kreves det mest energi til avfuktning ettersom luftmengden er stor og fuktproduksjonen fra de besøkende påvirker vanninnholdet i luften. For scenariene med et mikroklima kreves det mest energi til kjøling. Avfuktningsbehovet er vist i ligning 3.1 og er avhengig av luftmengden og vanninnholdet i luften. Kjølebatteriet brukes til å kjøle ned og avfukte luften.

Energibruk

Sommersimuleringen viser ikke så store forskjeller i det totale energibruket til Vikingtidsmuseet. Figur 6.8 viser at det totale energibruket for referansemodellen er på 48371 kWh, og noe lavere for scenariet med omrøring på 46432 kWh. For scenariet med luftgardin er energibruket 36424 kWh og for scenariet med tekstilkanal er det 39559 kWh. Det vil si at det totale energibruket til referansemodellen kan reduseres med henholdsvis 24,7% og 18,2% for scenariene med et mikroklima.

Klimaanlegget er det som krever mest energi. Som tidligere diskutert er det mulig å redusere energibruket til dette systemet ved å implementere et mikroklima. Som litteratur og forskning viser, er det en sammenheng mellom størrelsen på luftmengder og energibruk, noe som resultatene er med på å bekrefte.

7.3 Robusthetsvurdering

Scenariet med luftgardin ble ansett som det beste systemet og det ble utført en robusthetsvurdering av systemet. Resultatene viser at systemet holder temperaturen i mikroklima konstant gjennom simuleringsperiodene og har den laveste TS-indeksen. Systemet klarte også å holde den relative fuktigheten relativt konstant, og hadde den laveste RFS-indeksen for vintersimuleringen. Sammenlagt energibruk for begge periodene var det minste av alle scenariene.

Teori og litteratur viser at inn klima påvirkes av menneskelig aktivitet, da mennesker produserer fukt og varme. Hvor store de interne lastene vil være varierer og er veldig usikkert. Klimaanleggene må derfor være rustet til å tåle høyere interne laster enn først antatt. Å øke antallet besøkende med 25%, samt øke aktivitetsnivået til de besøkende viser hvor godt systemet for scenariet med luftgardin takler høyere interne laster.

Resultatene viser at temperaturen i mikroklima ikke påvirkes av økte interne laster for vintersimuleringen, og stabilitetsindeksen, TS, er konstant på 0,004. For sommersimuleringen er det derimot litt større variasjoner, og stabilitetsindeksen øker med 165% ved en økning på 25% besøkende og 65% ved en økning i aktivitetsnivå til 2,5 met som vist i tabell 6.6. Gjennomsnittlig temperatur er den samme for begge simuleringsperiodene, og standardavviket er lite, noe som indikerer at temperaturen holdes innenfor kravene satt av ASHRAE og konservator. Selv om TS øker er den fortsatt veldig liten og det er små svingninger i systemet.

Som figur 6.10 og 6.12 viser er det noen variasjoner i RF-fordelingen i mikroklima, men den holder seg relativt stabil for begge simuleringsperiodene. For vintersimuleringen øker RFS-indeksen med økt antall besøkende og økt aktivitetsnivå, med henholdsvis 0,35% og 1,05%. For sommersimuleringen minker den med henholdsvis 24,94% og 14,64%. Tross svingningene, viser gjennomsnittlig RF og lave standardavvik at den relative fuktigheten holder seg innenfor kravene satt av både ASHRAE og konservator.

Lave TS- og RFS-verdiene indikerer at det er små svingninger i temperatur og relativ fuktighet, og resultatene viser at både temperatur og RF holder seg innenfor kravene satt av ASHRAE og konservator for vikingskipene. Robusthetsvurderingen gjort av scenariet med luftgardin viser at systemet er veldig robust og klarer å takle høyere interne laster.

Konklusjon

Denne masteroppgaven har undersøkt ulike ventilasjonsprinsipper for ventilering av museumsgjenstander eksponert for romluft. Gjennom et litteraturstudie og ved hjelp av teori har ulike strategier for ventilering av et stabilt inneklime blitt implementert og evaluert. En case-studie av Vikingtidsmuseet har blitt gjennomført. To scenarier med et mikroklima rundt vikingskipene som ventileres ved hjelp av en luftgardin og en tekstilkanal har blitt evaluert opp mot systemer som ventilerer for hele Gokstadsonen med fortregning og omrøring. Referansemodellen baserer seg på fortregning og verdier fastsatt i skisseprosjektet, mens de andre modellene baserer seg på beregninger i henhold til krav fra TEK17. Inneklime i Gokstadsonen har blitt analysert.

Simuleringsresultatene viser at implementering av et mikroklima gjør det mulig å holde temperatur og RF relativt stabilt og innenfor kravene satt av både ASHRAE og konservator for vikingskipene. Av de to scenariene med et mikroklima viste det seg at systemet med en luftgardin hadde et lavere energibruk enn systemet med en tekstilkanal.

Robusthetsvurderingen gikk ut på å sjekke hvor godt det valgte systemet takler økte interne laster. Robustheten til systemet ble testet ved å øke antallet besøkende med 25% og øke aktivitetsnivået fra 1,5 til 2,5 met. Scenariet med luftgardin ble ansett som det beste systemet og en robusthetsvurdering ble utført på dette systemet. Resultatene viser at TS- og RFS-verdiene er relativt lave ved høyere interne laster for begge simuleringsperiodene. Lave verdier av TS og RFS indikerer små svingninger i systemet, noe som viser at systemet er robust og kan takle høyere interne laster.

Arbeidet i denne masteroppgaven viser at implementering av et mikroklima reduserer energibruket, som igjen gjør at de fysiske størrelsene til klimaanlegget kan reduseres. Sammenlignet med referansemodellen kan energibruket reduseres med nesten 30%. Resultatene indikerer at implementering av et mikroklima med luftgardin rundt vikingskipet er et godt alternativ til det skisserte systemet.

Videre arbeid

Denne masteroppgaven har vurdert ulike ventilasjonsprinsipper som skal sørge for riktig inneklimate for museumsgjenstander eksponert for romluft, samt minimere energiforbruket. Ulike scenarier har blitt vurdert og analysert ved hjelp av energisimuleringer i IDA ICE. Noen av scenariene inkluderte et mikroklima rundt de eksponerte gjenstandene. Per i dag er det ikke mulig å skille mellom to luftvolumer i samme sone i IDA ICE. Å kunne skille disse luftvolumene kan gi mer nøyaktige resultater med tanke på energiforbruket, og er noe som burde undersøkes videre.

Energisimuleringene i IDA ICE tar ikke hensyn til hvor i sonen luftmengder og varme tilføres. Luftstrømmene i sonen vil forandres etter ulike belastninger i sonen. En CFD-analyse av de ulike scenariene gjør det mulig å se hvordan strømningsbildet rundt vikingskipene og andre eksponerte gjenstander blir, og er noe som burde utføres. Mer nøyaktige luftmengder og lufthastigheter kan fastsettes fra denne analysen, og kanalene til systemet kan dimensjoneres.

Kostnadene ved å implementere de ulike systemene som er vurdert er ikke tatt hensyn til i denne masteroppgaven. Investerings- og FDV-kostnader spiller en stor rolle når det skal bestemmes hvilket system som skal benyttes til et prosjekt. En kostnads- og økonomianalyse (LCC) kan være nyttig å utføre for å se hvilket system som er mest lønnsomt.

Global oppvarming påvirker klima, og det er forventet at det norske klima blir varmere og våtere i fremtiden. Klimafilene som brukes i mange simuleringsprogrammer er i dag basert på værdata fra tidligere år. Etersom klimafilene er en av de viktigste grensebetingelse

i bygningssimuleringer, vil det fremtidige klima påvirke simuleringene og er noe som burde utforskes videre. Bygningen, inkludert alle systemene, må designes for fremtiden og kunne opprettholde et godt inn klima for eksponerte museumsgjenstander som følge av klimaendringer.

Bibliografi

Aaslund, P. A., 2015. Luftavfuktning. Ventøk.

URL http://www.kompetansebiblioteket.no/Ventok/Luftbehandlingsutstyr/4_13_Luftavfuktning.aspx?searchStr=mollier

Ascione, F., Bellia, L., Capozzoli, A., Minichiello, F., 3 2009. Energy saving strategies in air-conditioning for museums. *Applied Thermal Engineering* 29 (4), 676–686.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108001737>

ASHRAE, 2015. Museums, Galleries, Archives, and Libraries. In: 2015 ASHRAE Handbook - HVAC Applications (SI). ASHRAE, Ch. 23.

Balocco, C., Petrone, G., Maggi, O., Pasquariello, G., Albertini, R., Pasquarella, C., 11 2016. Indoor microclimatic study for Cultural Heritage protection and preventive conservation in the Palatina Library. *Journal of Cultural Heritage* 22, 956–967.

URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207416300929?dgcid=raven_sd_recommender_email

Britannica, E., 2018. "MuseumBritannica Academic.

URL <https://academic.eb.com/?target=%2Flevels%2Fcollegiate%2Farticle%2Fmuseum%2F117302>

Brown, E. G., 2016. 2016 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Non-residential Buildings. In: 2016 Building Energy Efficiency Standards Reference Ace Tool. California Energy Commission.

D'agostino, V., D'ambrosio Alfano, F. R., Palella, B. I., Riccio, G., 2015. The museum environment: A protocol for evaluation of microclimatic conditions. *Energy & Buildings* 95, 124–129.

de Santoli, L., 1 2015. Guidelines on energy efficiency of cultural heritage. *Energy and Buildings* 86, 534–540.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814008950>

Eian, P. K., Kjeldsen, G., 2010. Kulturhistorisk museum på Bygdøy Vurdering av byggets tåleevne ved klimatisering - PDF.

URL <https://docplayer.me/16679425-Kulturhistorisk-museum-pa-bygdoy-vurdering-av-byggets-taleevne-ved-klimatisering-PDF.html>

EQUA Simulation AB, 2019. IDA ICE - Simulation Software — EQUA.

URL <https://www.equa.se/en/ida-ice>

Etheridge, D., 1996. *Building ventilation : theory and measurement*.

Ferreira, C., de Freitas, V., Ramos, N., 11 2015. Influence of Hygroscopic Materials in the Stabilization of Relative Humidity Inside Museum Display Cases. *Energy Procedia* 78, 1275–1280.

URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215020238>

Frantz, J., 2007. *Fabric Ducts Help Meet HVAC Challenge* - ProQuest.

URL https://search.proquest.com/docview/236995338?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo

Gaudenzi Asinelli, M., Serra Serra, M., Molera Marimòn, J., Serra Espauella, J., 10 2018. The smARTS_Museum_V1: An open hardware device for remote monitoring of Cultural Heritage indoor environments. *HardwareX* 4, e00028.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067217300834?via%3Dihub>

Goodfellow, H. D., 2001. *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Elsevier Science.

Hengda Perforated Metal Factory, 2019. *Perforated Vent Grille – Perforated Metal Products - For Air Ventilation*.

URL <https://www.perforated-metal.net/perforatedmetal/perforated-vent-grille.html>

Ingebrigtsen, S., 2016. Ventilasjonsteknikk : Del 1.

Jokl, M. V., 2002. Thermal Comfort and Optimum Humidity Part 1. *Acta Polytechnica* 42 (1).

URL <https://doaj.org/article/136f3f02e4a44c248ac94b8a31c1e05a>

Kartverket, 2018. Norgeskart.

URL <https://www.norgeskart.no/#!?project=seeiendom&layers=1002,1015&zoom=14.26408586204052&lat=6648647.31&lon=258671.72>

Kramer, R., Schellen, H., van Schijndel, A., 10 2016. Impact of ASHRAE's museum climate classes on energy consumption and indoor climate fluctuations: Full-scale measurements in museum Hermitage Amsterdam. *Energy and Buildings* 130, 286–294.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816306946>

Kramer, R., Schellen, L., Schellen, H., Kingma, B., 2017. Improving rational thermal comfort prediction by using subpopulation characteristics: A case study at Hermitage Amsterdam. *Temperature* 4 (2), 187–197.

Kulturhistorisk museum, 2018. Velkommen til Vikingskipshuset - Kulturhistorisk museum.

URL <https://www.khm.uio.no/besok-oss/vikingskipshuset/>

Kulturhistorisk museum, U., 2016. 500 000 besøkende på Vikingskipshuset! - Kulturhistorisk museum.

URL <https://www.khm.uio.no/om/aktuelt/aktuelle-saker/2016/500-000-besokende-pa-vsh.html>

Litti, G., Audenaert, A., Fabbri, K., 11 2017. Indoor Microclimate Quality (IMQ) certification in heritage and museum buildings: The case study of Vleeshuis museum in Antwerp. *Building and Environment* 124, 478–491.

URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317303591?dgcid=raven_sd_recommender_email

Liu, S., Novoselac, A., 5 2015. Air Diffusion Performance Index (ADPI) of diffusers for heating mode. *Building and Environment* 87, 215–223.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000323>

Lucchi, E., 1 2018. Review of preventive conservation in museum buildings. *Journal of Cultural Heritage* 29, 180–193.

URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207416302217?dgcid=raven_sd_recommender_email

Lundqvist, R. C., 2018. Investigation of stabilizing the indoor environment using building technologies. A case study: Viking Age Museum in Norway. Ph.D. thesis, NTNU.

Mathisen, H. M., 2018. Indoor Environment.

Mazzei, P., Minichiello, F., Palma, D., 4 2005. HVAC dehumidification systems for thermal comfort: a critical review. *Applied Thermal Engineering* 25 (5-6), 677–707.

URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431104002078>

Mecklenburg, M., Tumosa, C., 1999. Temperature and relative humidity effects on the mechanical and chemical stability of collections. *ASHRAE Journal* 41 (4).

URL <http://search.proquest.com/docview/220518413/>

Mueller, H. F., 1 2013. Energy efficient museum buildings. *Renewable Energy* 49, 232–236.

URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112000365?dgcid=raven_sd_recommender_email

Næss, E. M., 2019. Om Vikingskipshuset - Kulturhistorisk museum.

URL <https://www.khm.uio.no/om/tall-og-fakta/om-bygningene/vikingskipshuset.html>

Norge, S., 2005. Ergonomi i termisk miljø Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV-og PPD-indeks og lokal termisk komfort (ISO 7730:2005). Tech. rep.

URL www.standard.no

NTNU, SINTEF, 2007. ENØK i bygninger : effektiv energibruk.

Opstad, L., Hjemdahl, A.-S., 2018. museum – Store norske leksikon.

URL <https://snl.no/museum>

SINTEF Byggforsk, 1996. 552.351 Fordeling av ventilasjonsluft i rom - Byggforskserien.

URL https://www.byggforsk.no/dokument/539/fordeling_av_ventilasjonsluft_i_rom

SINTEF Byggforsk, 2017. 421.503 Luftmengder i ventilasjonsanlegg. Krav og anbefalinger - Byggforskserien.

URL https://www.byggforsk.no/dokument/2753/luftmengder_i_ventilasjonsanlegg_krav_og_anbefalinger#i17

Skaret, E., Norges byggforskningsinstitutt., 2000. Ventilasjonsteknisk handbok. Norges byggforskningsinstitutt.

URL <https://www.nb.no/nbsok/nb/a6f76335379a384fbbd6a86f72fe7a43?lang=no#183>

Skarland Press, 2018. Ventøk - Skarland Press. Skarland Press.

URL <http://www.kompetansebiblioteket.no/Ventok.aspx>

Skramdal, T. A., 2018. Investigation of strategies to dimension the HVAC system in museums. A case study: Viking Ae Museum in Norway. Ph.D. thesis, NTNU.

Standard Norge, 2006. NS-EN ISO 7730:2005.

URL <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=158329>

Standard Norge, 2012. Kriterier for passivhus og lavenergibygninger : yrkesbygninger = Criteria for passive houses and low energy buildings : non-residential buildings.

STATSBYGG, 2017a. VIKINGTIDSMUSEET. Tech. rep.

URL <https://www.statsbygg.no/files/prosjekter/vikingtidssamlingen/vikingtidsSkisseprosjektLesehefte.pdf>

STATSBYGG, 2017b. Vikingtidsmuseet, utvidelse og nybygg.

URL <https://www.statsbygg.no/vikingtidsmuseet/>

Turpin, J. R., 2001. Fabric duct is easy on the eyes and budget - ProQuest.

URL https://search.proquest.com/docview/196460636?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo

Uv, O. A., 2005. Dysekanaler - tilluftsenhet. Ventøk.

URL http://kompetansebiblioteket.no/Ventok/Luftfordelingsutstyr/6_11_Dysekanaler_tilluftsenhet.aspx?searchStr=perforeringsgrad

Wang, X., Li, A., 2015. Indoor and Built Environment Airflow characteristics generated by fabric air dispersion ventilation.

URL <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1420326X15584424>

Whyte, W., 2010. Cleanroom technology: fundamentals of design, testing and operation. John Wiley & Sons.

Tillegg **A**

Digitalt vedlegg: simuleringsmodell av Vikingtidsmuseet

Simuleringsmodellen av Vikingtidsmuseet i IDA ICE er vedlagt som en digital fil. Modellen kan skaffes gjennom medveileder, Mohamed Hamdy, ved Instituttet for bygg- og miljøteknikk på NTNU.

