

Naturlig klimatiserte kontorbygg

ANALYSE AV ET "NULLKONSEPT" I NORSK KLIMA



SINTEF Notat

Michael Gruner, Kristian Stenerud Skeie og Inger Andresen

Naturlig klimatiserte kontorbygg

Analyse av et "nullkonsept" i norsk klima

SINTEF akademisk forlag

SINTEF Notat 22

Michael Gruner, Kristian Stenerud Skeie og Inger Andresen

Naturlig klimatiserte kontorbygg

Analyse av et "nullkonsept" i norsk klima

Emneord:

nullkonsept, kontorbygg, naturlig klimatisering, bygningsintegrert ventilasjon, multi-sone bygningssimulering, luftstrømningsnettverk

Prosjektnummer: 102010001

ISSN 1894-2466

ISBN 978-82-536-1542-4 (pdf)

Foto, omslag: Kontorbygget 2226, archphoto, inc © baumschlagler eberle

© Copyright SINTEF akademisk forlag 2017

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med SINTEF akademisk forlag er enhver eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bære tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.

Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

SINTEF akademisk forlag

SINTEF Byggforsk

Forskningsveien 3 B

Postboks 124 Blindern

0314 OSLO

Tlf.: 73 59 30 00

www.sintef.no/byggforsk

www.sintefbok.no

Forord

Denne rapporten er en del av prosjektet «Naturlig klimatisering av fremtidens energieffektive bygninger», finansiert av Norges forskningsråd og ledet av Skanska Teknikk. Prosjektets omfatter utvikling av kunnskap, konsepter, teknologier og strategier for naturlig klimatisering av bygninger. I delprosjekt 2.1 skal vi teste ut hvor langt man kan gå mot et fullt naturlig klimatisert bygg uten bruk av aktive tekniske installasjoner, og dermed null energibruk til klimatisering, her kalt et "null"-konsept.

Trondheim, Desember 2017



Judith Thomsen
Forskningsleder
SINTEF Byggforsk



Tor Helge Dokka, Skanska
Prosjektleder
Skanska Teknikk

Sammendrag

Et alternativ til "aktive" avanserte tekniske systemer kan være naturlig klimatisering der det brukes "passive" løsninger som utnytter fysiske prinsipper og naturlige drivkrefter for å klimatisere bygningen. Et fullt naturlig klimatisert bygg er her kalt et "Nullkonsept". Konseptet er implementert i det østerrikske kontorbygget "2226". I denne rapporten har vi analysert konseptet gjennom beskrivelse av utforming og inneklimasimuleringer både i østerriksk beliggenhet og i norsk klima. Vi har også sett på rammebetingelser mht. norske forskrifter og brukerkrav.

Analysen viser at 2226-konseptet er basert på til dels veldig omfattende kunnskap om bygningsfysiske og termodynamiske sammenhenger. Bygget har spesielle rammebetingelser mht. bruk, klima og forskriftskrav som muliggjør konseptet i Østerrike, men er ikke direkte overførbart til norske forhold. Inneklimasimuleringene viser at innnetemperaturen om vinteren blir uakseptabel lav for Oslo-klima. Det er også betydelig fare for trekk og lokalt termisk ubehag. "2226" er først og fremst et konseptuelt bygg som er ment til å utfordre byggebransjen, også i den kalkulererte risikoen for at bygget ikke vil tilfredsstille inneklimatestandarder.

Innhold

FORORD	3
SAMMENDRAG	4
INTRODUKSJON	6
KONTORBYGGET "2226"	7
ANALYSE	7
<i>Generelt</i>	7
<i>Beliggenhet</i>	7
<i>Bygningsvolum og planløsning</i>	8
<i>Konstruksjon/materialbruk</i>	10
<i>Klimatisering</i>	11
<i>Energi</i>	12
<i>Kostnader</i>	12
INNEKLIMASIMULERINGER	13
<i>Utgangspunkt</i>	13
<i>Forutsetninger</i>	13
<i>Resultater</i>	15
<i>Diskusjon</i>	21
<i>Konklusjoner</i>	22
OPPSUMMERING	23
RAMMEBETINGELSER / KRAV FOR NORSKE FORHOLD	27
FORSKJELLIGE FORUTSETNINGER	27
RELEVANTE KRAV	27
<i>Byggeteknisk forskrift / Veiledning til TEK</i>	27
<i>Arbeidsplassforskriften / Veiledning 444</i>	29
<i>NS 15251:2007+NA:2014</i>	29
OPPSUMMERING	31
KONKLUSJONER	34
OPPSUMMERING	36
REFERANSER	37

Introduksjon

I de fleste kontorbygg med høye energiambisjoner benyttes det i stort omfang komplekse tekniske installasjoner i form av mekanisk ventilasjon med avansert behovsstyring, ofte mekanisk kjøling med kompressorkjøling og varmepumpeløsninger basert på energibrønner. Disse installasjoner er ofte styrt med avanserte styringssystemer.

Et alternativ til slike avanserte tekniske installasjoner kan være en bevisst utnyttelse av fysiske sammenhenger knyttet til utforming av bygningskroppen og utnyttelse av naturlige klimatiseringsløsninger i forhold til brukeratferd og -behov. Dette vil kunne minimere behovet for aktive klimainstallasjoner og dermed redusere både investerings- og driftskostnader, samt gjøre systemene mer brukervennlige og robuste. Naturlig klimatisering vil da kunne føre til betydelig reduksjon av energibruk, lavere kostnader, høy arkitektonisk kvalitet og godt innemiljø.

Med naturlig klimatisering menes løsninger der behov for oppvarming, kjøling og ventilasjon kan forsynes uten bruk av "aktive" teknologier som krever energi tilført til bygget. I stedet brukes smarte "passive" tiltak basert på naturlige drivkrefter og termodynamiske prosesser samt optimal utforming av bygget og materialbruk for å klimatisere bygget. Ved slike bygningsintegreerte løsninger overtar bygningselementer flere funksjoner utover det opprinnelige formålet. Alle disse hensyn må samkjøres med de andre kravene som stilles til et byggverk som brukskvalitet, fleksibilitet, estetikk, innemiljø, brann osv. Konsekvensen er at arkitekturen blir del av klimakonseptet og vice versa.

I sin reneste form omfatter konseptet å tilfredsstillere alle krav til inneklimate, dvs. klimatisering ift. termisk komfort og luftkvalitet, kun med naturlig ventilasjon og gjennom bruk av bygget. En annen mulig definisjon og mål med naturlig klimatisering kan omfatte at bygget har null (eller nesten null) behov levert energi til oppvarming, kjøling og ventilasjon, dvs. at det kan tillates installasjon av små, supplerende systemer, særlig for oppvarming, men energibehovet for disse installasjoner skal utelukkende dekkes med fornybar energi på tomten, f.eks. bygningsintegreert solenergi.

Kontorbygget "2226"

Nullkonseptet er implementert i det østerrikske kontorbygget "2226" som ble tatt i bruk 2013. Bygget har ikke installert dedikerte aktive systemer for oppvarming, kjøling eller ventilasjon.

I dette kapitlet vil vi beskrive byggets utforming og rammebetingelser, samt resultater fra inneklimasimuleringer for bygget plassert først i Lustenau og deretter i Oslo. Analyse og simuleringer oppsummeres og det vurderes overførbarhet av bygningskonseptet til norske forhold.

Analyse

Generelt

Arkitektkontoret Baumschlager Eberle har vært både byggherre, arkitekt og prosjekterende for klima- og energikonsept. Mottoet til bygget er "atmosfære i stedet for maskin" [1]. Konseptuelt er bygget beskrevet som et "bygget manifest" mot økende avhengighet av tekniske installasjoner, særlig mot passivhus-konseptet, og det skal vise at det er mulig å oppnå god komfort uten aktive systemer for oppvarming, kjøling og ventilasjon. På denne måten henvender man seg til mange arkitekter som ønsker seg enklere bygg, og bygget har blitt et identifikasjons- og valfartsobjekt for arkitekter fra flere land. I stedet for ventilasjons- og oppvarmingsanlegg brukes bevisst tradisjonelle konsepter som murte vegger, stor romhøyde, og høykvalitets overflater som skal danne et formodentlig enkelt bygg. [2]

En viktig arkitektonisk referanse er lokal middelalderbebyggelse med murte, tykke vegger, et uregelmessig bygningsvolum og en utforming med «hullfasade» med smale vinduer, dype smyg og skodder [3]. Dessuten er konseptet basert på kvaliteter som finnes i bygg fra det 19. århundre, noe som ifølge arkitekten ble forlatt i det 20. århundre som følge av økonomisk optimalisering og imøtekommelse av økte komfortkrav med mer tekniske systemer [2]. I stedet relaterer konseptet seg til grunnleggende (arkitektoniske) verdier som proporsjon, materialitet og rimelighet/hensiktsmessighet. Dette danner et bygg med gode romproporsjoner og stor takhøyde, massivitet og tregnet i konstruksjon, fornuftig vindusareal samt et mindre antall materialer, med andre ord *enkelthet*, en verdi som det hevdes at mange lengter etter i dag [4]. I tråd med konseptets fokus på det varige er levetiden til bygget angitt til 200 år [2].

Beliggenhet

Bygget befinner seg i Lustenau (47,7 N, 9,7 Ø) i den østerrikske delstaten Vorarlberg. Klimaet er relativt mildt og preget av nærheten til Bodensjøen. Temperaturen til den forholdsvis store vannmassen i Bodensjøen varierer veldig lite ift. de årstidsmessige svingninger i lufttemperaturen. Innsjøen fungerer som et varmelager om vinteren og forhindrer lave temperaturekstremere [5] I Bregenz, som er nærmeste sted med tilgjengelige klimadata, er den laveste gjennomsnittlige månedstemperaturen på ca. 0 °C i januar, med ca. 65 frostdager i løpet av hele året. Om sommeren kjøler Bodensjøen den omgivende luften og modererer temperaturen. Pga. beliggenheten ved foten av Alpene, er klimaet påvirket av fönvindfenomenet der vind som strømmer sørfra over fjellene gir varm og tørr vind på nordsiden av Alpene. Gjennomsnittlig vindhastighet er 1,5 m/s i alle måneder over hele året, med dominerende vindretning fra nordvest (Bodensjøen) og sørøst (Alpene). Det er lite forekomst av sterk vind, med 17 dager over 11 m/s (6Bft) hhv. 2 dager over 17 m/s (8Bft) akkumulert over året. [6]



Figur 1 Kontorbygget "2226" (Foto: Jakob Schoof)

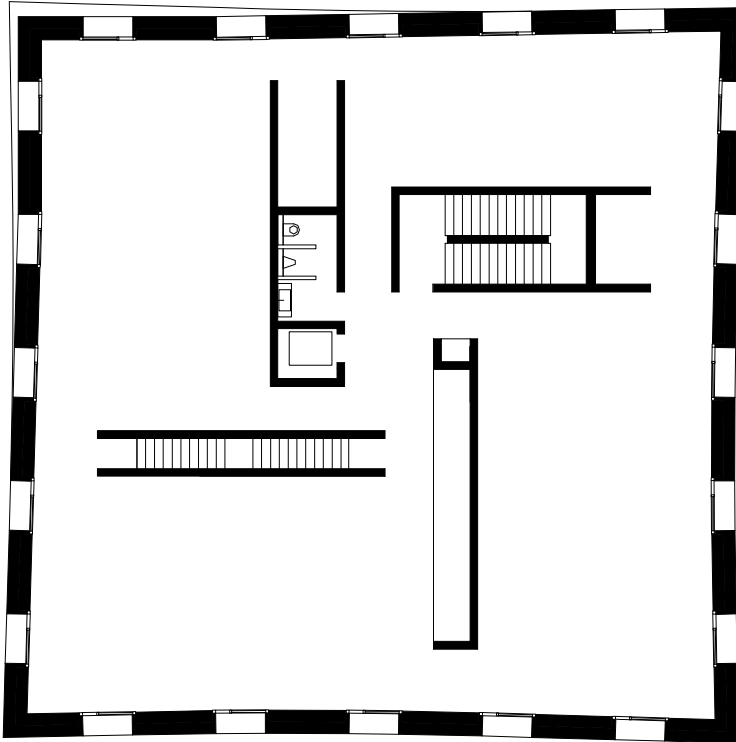
Bygningsvolum og planløsning

Bygget ligger i et industriområde i ytterkant av byen i et landlig miljø med god avstand til nabobebyggelse. Mht. arkitektoniske muligheter tilsvarer dette et "tabula rasa", noe som var et ønske fra arkitektene. Bygget ble med hensikt plassert utenfor bysentrum men med nærhet til motorveien fordi man ikke var opptatt av tilknytning til et lokalmiljø men heller ønsket en mer rasjonell plassering i forhold til raske og effektive reisetider til prosjekter rundt om i verden [2]

Bygget er en kubus med utvendige dimensjoner på ca. 24 x 24 x 24 meter på en tomt på 4027 m². Byggets bruttoareal er på 3201 m² og nettoareal på 2421 m² [7]. Bruksareal etter norsk beregning er på ca. 2900 m². Fasadene har samme vindusutforming og -areal i alle himmelretninger. Vindusarealet er forholdsvis lite (ca. 30 % av fasadearealet) og minimert for å redusere varmetap og varmetilskudd. Vinduene er høye og relativt smale og er ført så høyt opp mot taket som konstruktivt mulig for å slippe inn dagslys.

I 1. etasje er en felles kantine og en filial til et galleri, i 2. til 4. etasje er det kontorer til Baumschlager Eberle og 3 leietakere (rådgivere som jobber tett sammen med Baumschlager Eberle). 5. og 6. etasje er for tiden tomme og skal huse boliger. Etasjehøyden er på ca. 4,6 m i 1. etasje og 3,75 m i de øverste etasjer, noe som tilsvarer en typisk etasjehøyde i norske kontorbygg. Med en dekkhøyde på 375 mm (240 mm betongdekke + 135 mm gulvoppbygging) blir romhøydene ca. 4215 mm og 3375 mm.

Figur 2 viser planløsningen for 2. til 6. etasje.



Figur 2 Plan normaletasje M 1:400 (Kilde: Bamschlagel Eberle Architekten)

Bygget viser en kontorløsning med kontorer for mindre gruppestørrelser, en vanlig løsning i Sentral-Europa. Den kvadratiske planen på ca. 22 x 22 meter er nesten rotasjonssymmetrisk ("vindmølle") med 3 gruppekontorer på 100 m² for 8 arbeidsplasser i sørøst-, sørvest- og nordvestre hjørne og et møterom i det nordøstre hjørnet. Sekundærarealet (trappehus, heis, wc, osv.) er samlet i 4 tykke murte innervegger som er trukket inn fra fasadene.

En særegenhet av planløsningen er at alle primære rom har tilgang til to fasader som muliggjør kryssventilasjon i rommet mellom disse. I tillegg tilsvare forholdet mellom romdybde og –høyde i disse rommene anbefalte forhold på 1:2 [8] hhv. 1:2,5 [9] som muliggjør ensidig ventilasjon. Dessuten er rommene knyttet til hverandre gjennom dels permanente åpninger som tillater kryssventilasjon gjennom hele bygget. Byggets planløsning muliggjør dermed ensidig ventilasjon og kryssventilasjon over 2 fasader pr rom og muligens kryssventilasjon gjennom hele bygget. Hovedprinsippet for ventilasjon er kryssventilasjon i rom over to fasader, men hvis det er lite vind kan ensidig ventilasjon benyttes.

Interiøret består av sparsom møblering og det er ingen møblering langs veggene for å eksponere mest mulig veggoverflate. Arbeidsbordene er trukket inn fra fasaden slik at de er frittstående i rommet; dette for å legge til rette for prinsippet med klimatisering med vinduslufting [10]. Følgelig sitter det ingen personer nærmere enn ca. 2 meter fra vindu. Med større avstand fra vegg får man redusert lufthastighet og økt tilluftstemperatur ved åpning av vinduer. I tillegg kan man få en effekt av at forbigående personer kan skape turbulens, noe som kan forstyrre/reducere luftstrømmen/kaldraset fra vinduer.

Den faste belysningen omfatter kun en generell belysning langs innervegger med lysrør. Installert effekt anslås til ca. 6 W/m² i kontorrommene. I tillegg brukes arbeidsplassbelysning for individuelle behov. Føringer av elektriske kabler og IKT er bygningsintegrert i gulvet uten synlige føringskanaler. Hovedkanalen er tilgjengelig i en senket installasjonskanal langs innerveggen. I motsetning til standardløsningen med lett datagulv og gulvbokser brukes en tung gulvoppbygning med tilfarere og påstøp på ca. 60 mm. Brukerne kan drille hull etter behov for å legge kabler i hulrommet [2].

Konstruksjon/materialbruk

Det statiske systemet baserer seg på bærende yttervegger med elementer på 2x380 mm og innervegger av murt hulltegl, en vanlig og kostnadseffektiv byggemetode for boliger i Sentral-Europa, men uvanlig i større kontorbygg. Forskalingselementer med plasstøpt betong spenner over dekkene med spennvidde på ca. 7,6 meter. Dette er en forholdsvis stor spennvidde for sentral-europeiske kontorbygg som vanligvis har plane betongdekker på søyler med maks 7 meter rasteravstand. Avstivning oppnås med massive indre veggskiver og heissjakten.

Figur 3 viser et kontorrom ute møblering. Det benyttes eksponerte mineralske materialer for konstruksjon og innvendige overflater (tegl, betong, kalkpuss, anhydrittpåstøp) for å oppnå mest mulig termisk masse for varmelagring og minst mulig emisjoner fra byggematerialer. Utforming av bygningselementer og detaljer tilsvarer stort sett typiske passivhusløsninger for å eliminere kuldebroer [2]. På denne måten får man høyere overflatetemperaturer som forbedrer opplevelsen av termisk komfort.



Figur 3: Typisk gruppekonto uten møblering (Foto: Jakob Schoof)

Oppbygningen av ytterveggene er nokså uvanlig med en tykkelse på totalt 81 cm. Den store veggtykkelsen er begrunnet med statiske hensyn og for å oppnå tilstrekkelig dypt smyg for passiv solskjerming. Det har vært fokus å bygge med den tradisjonelle sentral-europeiske byggemetoden med murverk og puss, men uten utvendig isolasjon [11]. Derfor består veggen av et innvendig sjikt av "Poroton 38 N+F" med bedre bæreevne og lavere varmemotstand og et utvendig sjikt av "Poroton 38 H.i N+F" med mindre bæreevne og høyere varmemotstand [7]. De valgte tegltypene kan sammenlignes med trevirke/massivtre både mht. varmeledningsmotstand og varmekapasitet. Total U-verdi av yttervegg er beregnet til 0,14 W/(m²K). Det er anslått at veggene bidrar bare 22 % til varmelagring. Mesteparten av termisk masse er plassert i dekker og gulv [11]. Teglveggene er pusset inn- og utvendig. Kalkpussen ute skal bli hardere over levetiden, og dermed skal man unngå råte og soppvekst.

Figur 4 viser vinduer der arkitektur og klimakonsept integreres på en elegant måte.



Figur 4 Vindu med åpen lufteluke i en normaletasje [2] (Foto: Jacob Schoof)

Vinduene er todelte med isolerte karmen av tre – ca. 2/3 er fastkarmvinduer, ca. 1/3 er tettfelt med lufteluke. Basert på den lavere U-verdien til fastkarm sammenlignet med åpningsfløy og bruk av vakuumisolasjonspaneler (VIP) i tettfeltet, anslås U-verdien til vinduet til kun 0,70-0,75 W/(m²K). I alt har "2226" et glassareal tilsvarende ca. 12 % BRA. Pga. luftelukene er det imidlertid en stor andel «karm» og det totale vindusarealet er på ca. 22 % BRA.

Det er ikke installert et aktivt solskjermingssystem og det brukes bare passive arkitektoniske tiltak i form av dype utvendige vindussmyg og varierende posisjon til tettfeltet på fasadene ift. rommets solbelastning over døgnet.

Utformingen av vinduer er tilpasset klimatiseringskonseptet med vindusventilasjon for å regulere friskluftmengden. I tråd med kunnskap om vindusventilasjon ligger vinduene i flukt med den innvendige veggoverflaten slik at innvendige smyg ikke har negativ påvirkning på den innstrømmende luften [12]. De vertikale sidehengslede lufteåpningene gir maksimalt luftskifte pr tidsenhet ved ensidig vindusventilasjon ('worst case' uten vind som drivkraft) sammenlignet med bunnhengslede vinduer. Dette kan være hensiktsmessig ved lave utetemperaturer der man ønsker å unngå hyppig åpningsfrekvens.

Klimatisering

Det er ikke installert noe oppvarmingssystem i bygget. Tilfredsstillende temperaturer skal oppnås kun med varmetilskuddet fra interne laster (lys og utstyr). For kjøling brukes kun vindusventilasjon. Det finnes dessuten ikke noe felles anlegg for varmtvann, i stedet brukes lokale varmtvannsberedere (el-kassetter).

Kontroll av termisk inneklime og luftkvalitet i kontorrom er basert utelukkende på vindusventilasjon. I våtrom brukes det mekanisk avtrekksventilasjon og i kantinekjøkkenet brukes det kullfilter [13]. Kontorrommene styres enkeltvis på CO₂, innetemperatur samt solbelastning på fasader. Romhøyden er bevisst økt for å tillate stratifisering av temperatur og CO₂ [11]. På denne måten reduseres kritiske nivå for forurensninger i oppholds-/pustesonen der også sensorene for luftkvalitet er plassert. Om vinteren brukes CO₂-styrt pulsventilasjon der vinduene åpnes ca. 10 cm i 10 minutter [14]. Om sommeren ventileres det basert på temperaturstyring og det brukes nattkjøling med aktivering av den termiske massen. Brukerne kan overstyre og aktivere luftelukan etter eget behov, men lukene lukkes igjen etter 10 min [13]. Dette er en velkjent ventilasjonsstrategi for naturlig klimatiserte bygg (ref. f.eks. [8]). Også strategien med pulsventilasjon bygger på vanlig praksis i Sentral-Europa der det finnes etablerte strategier for lufting i arbeidsplassforskriftene [9] og fra forskning [12] som ligger til grunn. Det er etablert kunnskap at pulsventilasjon med sidehengslete vinduer gir bedre termisk komfort og muligens mindre oppvarmingsbehov enn kontinuerlig lufting med bunnhengslete vinduer som senker overflatetemperaturen med påfølgende negativ innvirkning på termisk miljø og fare for muggvekst [15-17]. Det jobbes fortsatt med innkjøring av styringssystemet i "2226", men rapporterte erfaringer viser at brukerne er fornøyde med termisk komfort, selv om det har vært noen utfordringer med overtemperaturer om sommeren [10]. Det rapporteres imidlertid at det er noen utfordringer med uønsket varmetilskudd fra server og kjøkken. I vinterhalvåret slår man på belysningen i kalde perioder eller i perioder med lite internlast for å sikre romtemperaturer på et tilstrekkelig nivå [13]. Inneluftkvaliteten er vurdert av brukerne som generelt veldig god [10], imidlertid er ventilasjonen i kjøkkenet ikke tilstrekkelig [13]. Ut fra brukersitatet om at «bygget reagerer på slurv» [2], kan det tolkes at inneklimate er svært avhengig av styringen. Det finnes dessverre ikke uavhengige evalueringer og målinger av inneklime og brukertilfredshet. Med tanke på at det er de prosjekterende som selv eier og bruker bygget, kan man ikke betrakte deres egne publikasjoner som nøytrale.

Energi

Hovedformålet med prosjektet har vært å vise at det kan oppnås tilfredsstillende inneklime uten tekniske systemer. Energifbesparelse har ikke vært i fokus.

Målt energibruk er likevel lavt, i det første driftsåret målte man et forbruk på 38 kWh/m²år inkludert alt utstyr og kjøkkendrift. Det må imidlertid tas hensyn til at bare 4 av 6 etasjer er belagt. Basert på erfaringer fra Powerhouse Kjørbo har vi anslått at bygget har et energibehov til belysning på 10 kWh/m²år, samt 25 kWh/m²år til utstyr og 3 kWh/m²år til varmtvann. Tilført energi til bygget består bare av elektrisitet fra nettet. Det er planlagt å installere et solcelle-anlegg på taket for å oppnå et netto nullenergi-nivå. [13]

Kostnader

Kostnader for bygget er angitt til 950 €/m² eks. mva., tomt og interiør, noe som anses som lavt for sentral-europeiske forhold [2]. Byggemetoden med hulltegl er rasjonell og økonomisk, særlig fordi bygget er basert på den østerrikske teglmodulen mht. antall teglsjikt, bredde og vindusavstand. Vinduene er avanserte bygningsdeler med avanserte materialer som VIP og motorstyring for vindusåpning, men dette er imidlertid likt på alle fasader. I hele bygget brukes bare et fåtall velkjente detaljløsninger med et mindre antall byggematerialer. Økte kostnader til tekniske komponenter oppveies av reduserte kostnader til klimatiseringsløsninger. På den annen side har bygget krevd økt prosjekteringsinnsats samt kostnader knyttet til utvikling og innkjøring av styringssystemet.

Inneklimasimuleringer

Utgangspunkt

Det ble utført simuleringer av en normaletasje (kontor) i «2226» for Lustenau og Oslo for å vurdere forholdene mht. termisk miljø og ventilasjonsprinsipper både i den reelle beliggenheten og under norske forhold. Hensikten er å undersøke om klimatiseringskonseptet kan opprettholde tilstrekkelig termisk komfort mht. operativ temperatur og inneluftkvalitet mht. CO₂-konsentrasjon. For norske forhold analyseres dessuten ventilasjonsprinsippene og det teoretiske oppvarmingsbehovet i bygget.

Beregninger er utført med det dynamiske simuleringsprogrammet "ESP-r 12.2" [18] for et helt år og for utvalgte dager. Infiltrasjon dvs. ventilasjon med utendørs luft er representert med et integrert luftnettverk ("airflow network"). Luftnettverket tar hensyn til luftstrømning pga. vind og oppdrift mellom knutepunkter ("nodes") som forbindes med tilknytninger ("connections" eller "links") via definerte komponenter ("components"). Det må bemerkes at strømmingen er indusert og bare følger de definerte veiene. Det anslås full omrøring i hvert knutepunkt dvs. sone eller rom. Luftnettverk har dermed begrenset mulighet til å gi en nøyaktig modell av luftstrømningen i sonen (trekk, lufthastighet, stratifisering, osv.). Simuleringer er utført med 5 min tidsintervall som tilsvarer den minste åpningstiden for lufteluker og responstiden for styring av inneklimateparametere.

Lokale komfortkriterier er ikke vurdert, selv om disse anses som mest kritiske for bruk av naturlig ventilasjon i kaldt klima. Dette kan best vurderes ut fra målinger og brukerundersøkelser i felt. Det finnes målinger av lokal termisk komfort av naturlig ventilerte bygg i norske forhold, f.eks. [19, 20], men disse er gjort på bygg med lavere energistandard eller ifbm. rehabilitering, og har begrenset nytteverdi for superisolerte bygg.

Forutsetninger

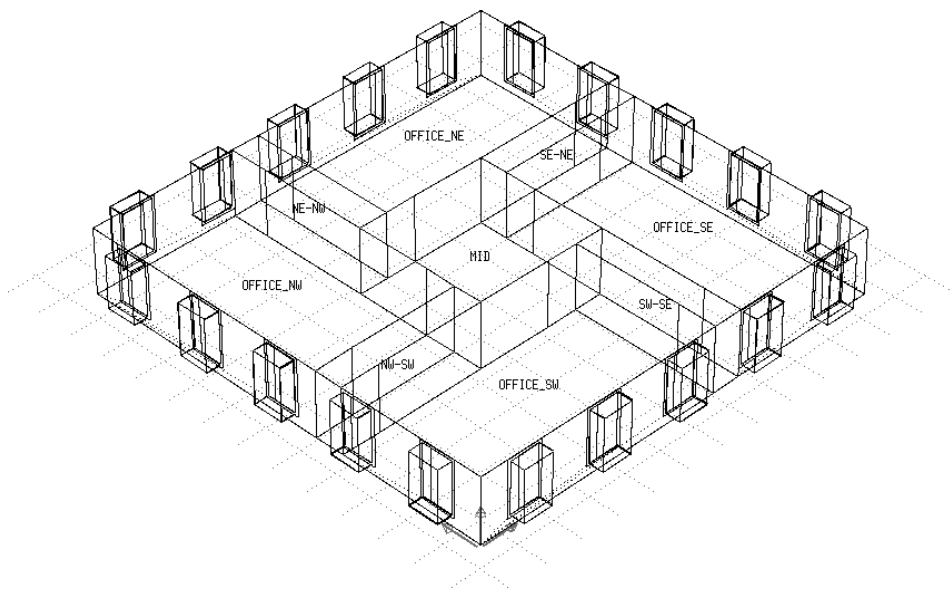
Klima

For Lustenau (47.4 N, 9.7 Ø) brukes klimadata fra Meteonorm for Bregenz som nærmeste sted med lignende klima. For vurderingen av norske forhold brukes det mest oppdaterte klimadatasettet for Oslo (59.9 N, 10.7 Ø), utviklet av SINTEF Byggforsk [21]. Sammenlignet med standard klimadata i NS 3031 som er basert på målinger fra 1968 til 1978, er gjennomsnittlig årstemperatur i den nye filen 0,5 grader varmere og har færre ekstremværsituasjoner dvs. mindre kalde perioder om vinteren og færre varme dager om sommeren. For Oslo undersøkes i tillegg en kald vinterdag og en varm sommerdag. Som vinterdag ble det valgt 23. mars pga. at det kan oppnås en romtemperatur på nesten 20 °C i driftstid med CO₂-styring uten oppvarming denne dagen samtidig som det er en lav gjennomsnittlig utetemperatur på -7 °C ute. Vinden blåser jevnt med ca. 2,5 m/s fra nord om morgnen og skifter retning til sør etter kl 9. Utvalgt sommerdag er 27. august med isoterme temperaturforhold, det vil si like temperaturer inne og ute. Denne solrike sommerdagen (ca. 20 W/m² soltilskudd i driftstid) har moderat vind på ca. 3 m/s fra sør i driftstiden.

Utforming

Figur 5 viser modellen i ESP-r. I det virkelige bygget er den kvadratiske planen på ca. 496 m² preget av de 4 primære rommene i hvert hjørne og støttestrukturer i 'tykke' innervegger mellom kontorsonene. For simuleringer er geometrien forenklet og møterommet i det nordøstlige hjørnet er byttet til et kontorrom. Støttestrukturer samt internlast er samlet i en midtsone. Det er modellert 4 soner mellom kontorene slik at modellen har det samme fasadearealet som det virkelige bygget. Kontorrommene med gulvareal på 100 m² har samme gulv- og fasadeareal som i virkeligheten. Fasadene er orientert 0, 90, 180, 270 grader fra nord. Oppbygninger er valgt iht. tilgjengelig litteratur om bygningen [14] og med bygningsfysiske materialegenskaper hentet fra produktokumentasjon. Lineære kuldebroer er modellert i THERM 7.3 [22] og lagt inn i modellen.

Driftstiden er satt til kl 8 – 18 på ukedager. I kontorrom er det anslått at 6 av 8 mulige arbeidsplasser er opptatt i driftstiden (75 W sensibel varme pr person). Persontetthet med tilstedeværelse på 75 % i hele etasjen er på ca. 20 m²/person. Internlaster fra belysning er på 4 W/m² i gjennomsnitt for hele året og fra utstyr på 10 W/m². Midtsonen med sekundære rom har internlaste fra personer på 0,5 W/m² pr time (tilsvarende 37,5 W pr person), belysning på 2 W/m² og utstyr på 5 W/m² i driftstiden. Tilførsel av CO₂ er knyttet til internlaste fra personer.



Figur 5 ESP-r modell

Luftnettverk

Luftnettverket i studien omfatter alle soner i den termiske modellen og tillater kryssventilasjon både i rom og gjennom bygget, samt ensidig ventilasjon i kontorrommene (se nedenfor). Vindtrykkoeffisienter dvs. C_p -verdier for alle fasader følger databasen i ESP-r for en delvis utsatt vegg med bredde/høyde-proporsjon på 1:1. Ifølge tegninger er størrelsen til en lufteluke på $0,30 \times 2,50 = 0,75$ m². Åpninger med samme orientering i rom er slått sammen til ett åpningsareal. For å ta hensyn til ensidig ventilasjon er arealet delt i en nedre og en øvre halvdel. Når lufteluken er åpen er det anslått en spaltbredde på ca. 15 cm som gir et effektivt åpningsareal på 0,225 m² per vindu. C_d -verdien dvs. kontraksjonskoeffisienten til åpningen er anslått til 0,65. Infiltrasjon n_{50} på 0,5 1/h er modellert dynamisk med "cracks" som en del av luftnettverket slik at årlig gjennomsnittlig infiltrasjonsrate ' n_1 ' er på 0,035 1/h som tilsvarende beregnet infiltrasjon etter NS 3031. Interne åpninger fra kontorer til midtsonen og fra midtsonen til mellomsonen er modellert som toveisåpninger ("bi-directional large openings") som tillater samtidig luftstrømming i begge retninger i store åpninger. C_d -verdien for toveisåpninger dvs. dører er satt til 0,4 iht. [23]. Luftskifte mellom kontorer gjennom dører langs fasaden er ikke inkludert (dørene som går direkte mellom kontorrommene er forutsatt å være lukket).

Inneklima og ventilasjon styres kun med lufting gjennom luftelukene og rommene er styrt uavhengig av hverandre. Den veletablerte styringsstrategien for naturlig ventilasjon er benyttet: dvs. basert på CO₂ for den kalde sesongen og på innetemperatur for den varme sesongen. For CO₂-styring er det stipulert at luftelukene åpnes i driftstid hvis CO₂-konsentrasjonsdifferansen inne – ute overstiger 600 ppm; et kompromiss mellom krav til innneklima på arbeidsplasser [24] (ut fra kravet til CO₂-konsentrasjon inne på 1000 ppm og muligens 450 ppm [25] ute kan differansen være på 550 ppm) og standard NS-EN 15251 [26] (konsentrasjonsdifferanse fastlagt på 650 ppm). I følge [26] tillater østerriksk

byggeforskrifter andre CO₂-konsentrasjoner i naturlig ventilerte bygg. Alternativt vurderes derfor også 1 000 ppm konsentrasjonsforskjell som kan tilsvare en maks inneluftkonsentrasjon på ca. 1400 ppm. Det tas ikke hensyn til ventilasjonsbehovet pga. forurensinger som skyldes bygningen (byggematerialer og interiør). Ved temperaturstyring åpnes lukene i driftstiden hvis lufttemperaturen i rommet overstiger 23 °C. Utenfor driftstiden styres luftelukene for å holde innelufttemperaturen under 20 °C. Det skiftes fra CO₂-styring til temperaturstyring når temperaturstyring kan sikre CO₂-nivået.

Oppvarming

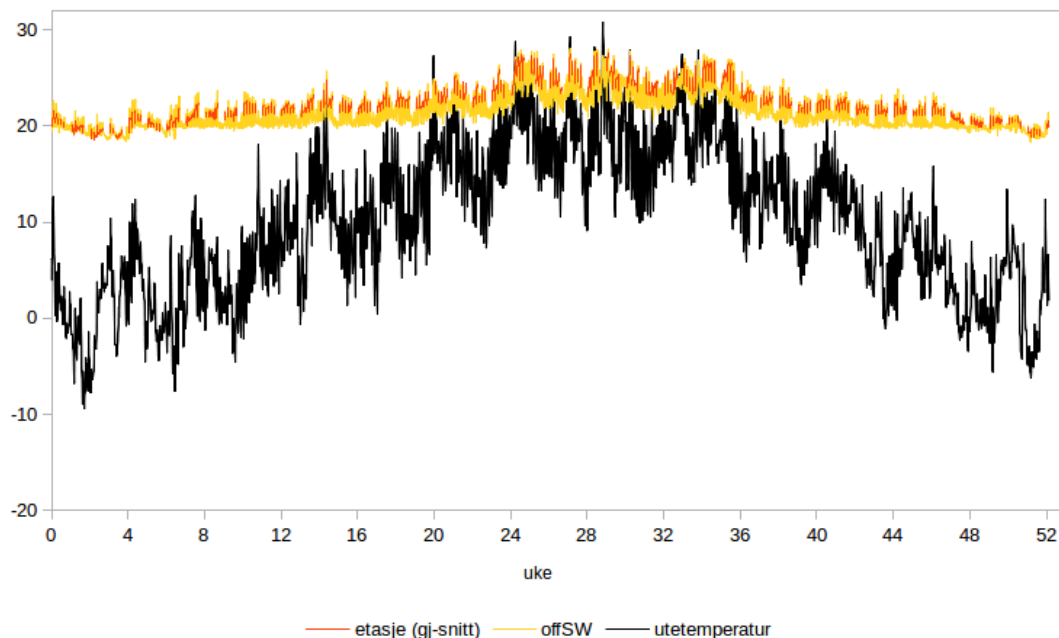
For vurdering av teoretisk oppvarmingsbehov i Oslo er det lagt inn et ideelt oppvarmingssystem med ubegrenset kapasitet i hvert rom. Settpunkttemperatur (lufttemperatur) for oppvarming er 21 °C i driftstiden og 18 °C utenfor driftstiden for å oppnå operativ temperatur på ca. 20 °C i driftstiden. Beregningsresultatene som er basert på en ideell styringsstrategi har en viss usikkerhet da et reelt oppvarmingssystem ikke vil reagere så fort, særlig mht. umiddelbart oppvarmingsbehov etter pulslufting. Dessuten er ikke justering av settpunkttemperaturer ift. nattkjøling inkludert. Merk også at beregningen er gjort for en mellometasje uten varmetap opp- og nedover.

Resultater

Lustenau – Termisk inneklima

Med styring på 600 ppm CO₂-gradient varer oppvarmingssesongen i Lustenau i 19 uker og den temperaturstyrte kjølesesongen i 33 uker (fra medio mars t.o.m. slutten av oktober). Med styring på 1000 ppm CO₂-gradient varer oppvarmingssesongen i 13 uker og den temperaturstyrte kjølingssesongen i 39 uker (begynnelsen av mars t.o.m. slutten av november).

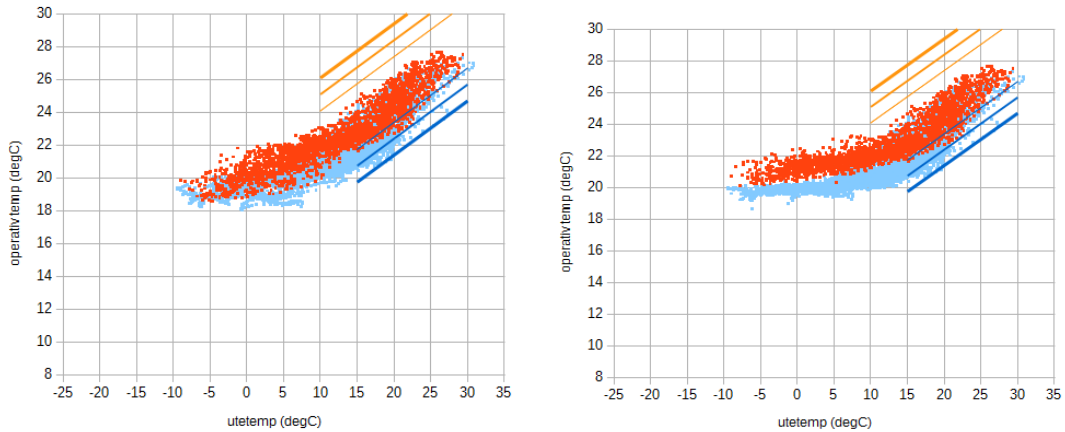
Figur 6 viser årlig gjennomsnittlig operativ temperatur i driftstiden og operativ temperatur i det varmeste kontoret i sørvest-hjørnet med CO₂-styring på 600 ppm forskjell inne-ute. Figur 7 viser romtemperaturer ift. klasser iht. modellen for adaptiv termisk komfort.



Figur 6 Årlig operativ temperatur i etasjen og kontorrommet beregnet for klimasted Lustenau med styring på CO₂ (600 ppm gradient) og temperatur

Temperaturer i oppvarmingssesongen ligger tett sammen for begge CO₂-styringer. Ved styring på 600 ppm konsentrasjonsdifferanse er innetemperaturen over året på <20 °C i 9 %

av driftstiden, mellom 20-23 °C i 57 %, 23-26 °C i 28 %, >26 °C i 6 %. Operativ temperatur på 20 °C kan oppnås for utetemperaturer ned til -5 °C hhv. -9 °C. Ved styring på 1000 ppm gradient er innetemperaturen aldri lavere enn 20 °C, mellom 20-23 °C i 65 %, 23-26 °C i 29 %, >26 °C i 6 % av driftstiden. Temperaturene i kjølesesongen ligger alltid innenfor klasse II.

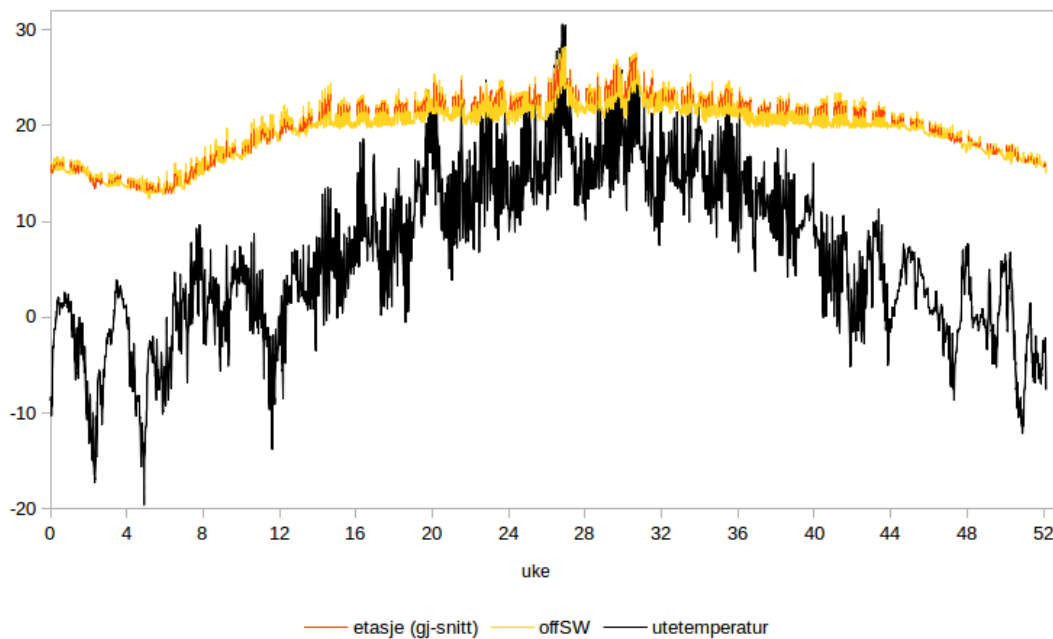


Figur 7 Operativ temperatur i driftstid (rød) og utenfor driftstid (blå) med CO₂-styring på 600 ppm gradient (venstre) og på 1 000 ppm gradient (høyre)

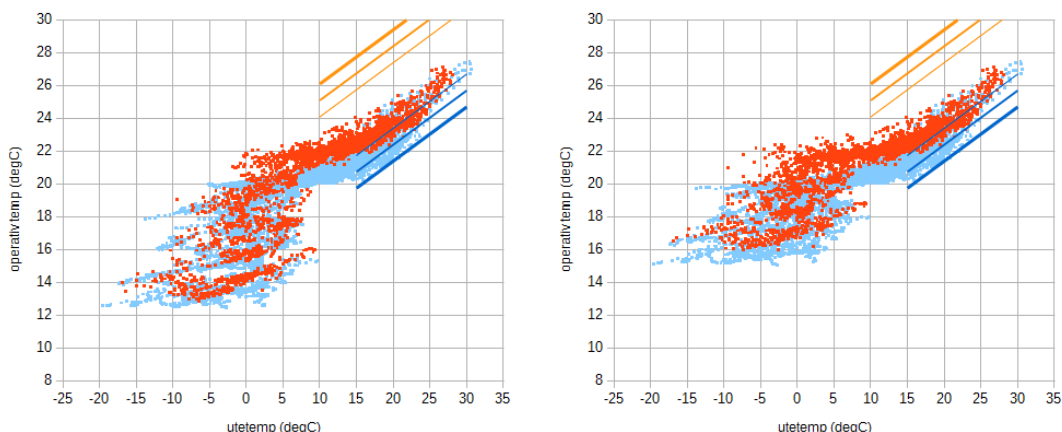
Oslo – Termisk inneklima

I Oslo varer oppvarmingssesongen i 26 uker og den temperaturstyrte kjølingssesongen i 26 uker (fra medio april t.o.m. begynnelsen av oktober) med styring på 600 ppm CO₂-gradient. Med CO₂-styring på 1 000 ppm konsentrasjonsforskjell inne-ute varer oppvarmingssesongen i 22 uker og den temperaturstyrte kjølingssesongen i 30 uker (fra begynnelsen av april t.o.m. medio oktober).

Figur 8 viser årlige gjennomsnittlige operativ temperaturer i driftstiden og operativ temperatur i det varmeste kontoret i sørvest-hjørnet med CO₂-styring på 600 ppm gradient. Figur 9 viser operative temperaturer iht. modellen for adaptiv termisk komfort.



Figur 8 Årlig operativ temperatur for Oslo-klima med styring på CO₂ (600 ppm gradient) og temperatur

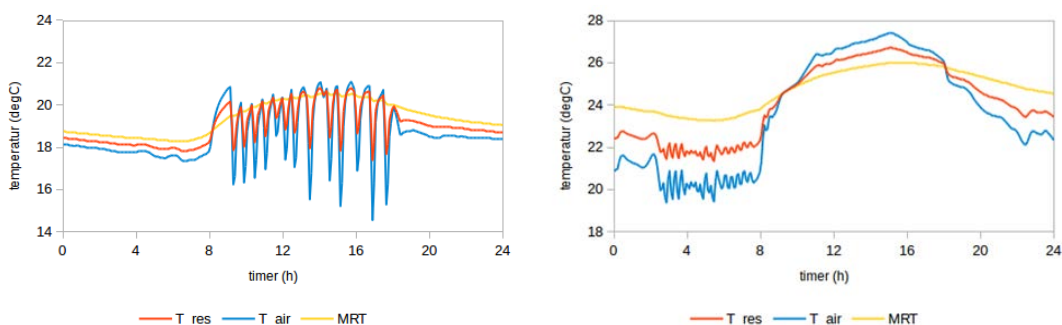


Figur 9 Operativ temperatur i driftstid (rød) og utenfor driftstid (blå) med CO₂-styring på 600 ppm gradient (venstre) og på 1000 ppm gradient (høyre)

Ved styring på 600 ppm gradient er innetemperaturen på <20 °C i 37 % av driftstiden, mellom 20-23 °C i 44 %, 23-26 °C i 18 %, >26 °C i 1 %. Ved styring på 1000 ppm gradient er innetemperaturen på <20 °C i 25 % av driftstiden, mellom 20-23 °C i 56 %, 23-26 °C i 18 %, >26 °C i 1 %. Temperaturene viser stor spredning av verdier for lave utetemperaturer (oppvarmingsssesong) for begge CO₂-styringstyper. Dessuten finnes en stor andel av timer med mindre lave utetemperaturer der ønsket innetemperaturer ikke kan tilfredsstilles. I kjølesesongen ligger romtemperaturer innenfor klasse II.

Vi har utført simuleringer med ideell oppvarming for å beregne oppvarmingsbehov for CO₂-styring på 600 ppm gradient. Ved styring på lufttemperatur ligger dette på 21 kWh/(m²·a) for etasjen. Simuleringer styrt på operativ temperatur gir et oppvarmingsbehov på 10 kWh/(m²·a).

Figur 10 viser detaljerte resultater for et utvalg rom (kontorrom i sørøst). Figuren viser lufttemperaturen "T_{air}", arealvektet midlere strålingstemperatur "MRT", og operativ temperatur "T_{res}" (beregnet som middelverdi av MRT og lufttemperatur) for en vinterdag og sommerdag.



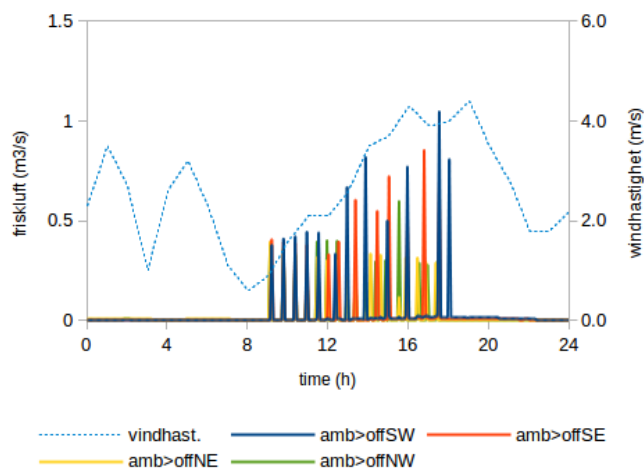
Figur 10 Lufttemperatur, MRT og resulterende operativ temperatur for en utvalgt vinterdag (venstre) og en sommerdag (høyre)

Lufttemperaturen på vinterdagen varierer mye pga. lufting når kald luft strømmer inn i rommet. På sommerdagen før kl 8 vises det et oscillerende mønster som er et resultat av luftnettverksstyring der luftlukene åpnes og lukkes med annethvert tidsintervall pga. styring etter lufttemperatur på 20 °C. MRT varierer imidlertid lite, med en amplitude mindre enn 2 K. På vinterdagen er MRT høyere enn lufttemperaturen, på sommerdagen lavere i driftstid og høyere utenfor.

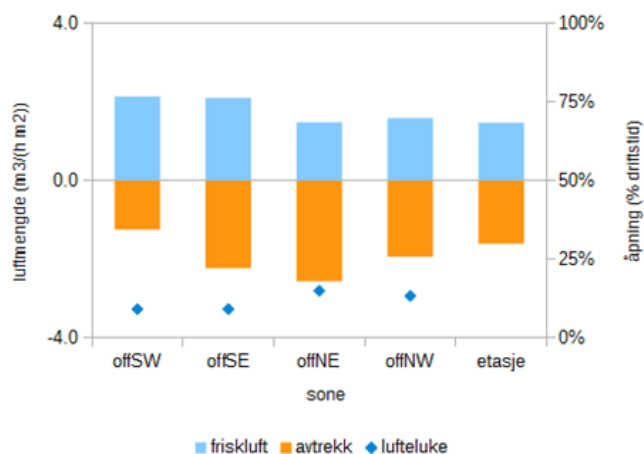
Oslo – luftstrømning

Det vurderes og sammenlignes først strømningsforhold i de 4 kontorrom for vinterdagen.

Figur 11 viser friskluftmengder som strømmer inn i rommene gjennom luftelukene i fasadene og gjennomsnittlige timesverdier av friskluft og avtrekk i rom samt antall åpninger av lufteluker. Rommene viser lik åpningsadferd med overlappende grafer i begynnelsen av driftstiden med regelmessige åpninger hvert 35. minutt. Dette kan begrunnes i lave vindhastigheter. I det videre forløpet fra ca. kl 12 varierer luftmengder og åpningsfrekvens. Mens uteluftmengden øker i sørvendte rom, synker friskluftmengder og antall åpninger øker i nordvendte rom.

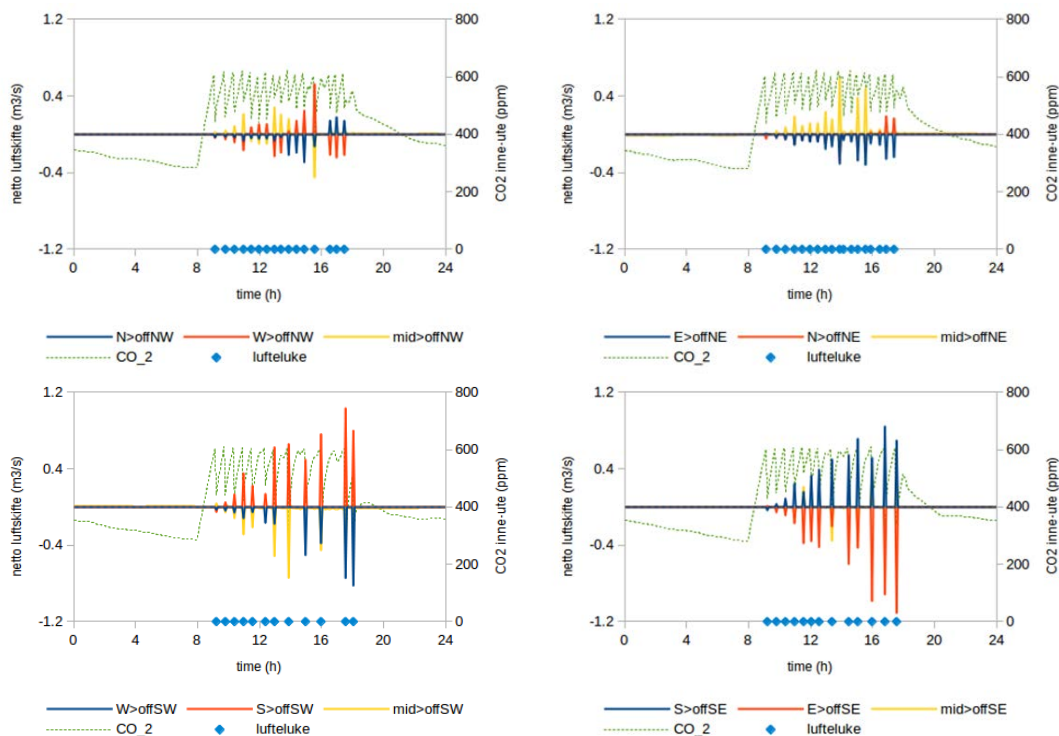


Figur 11 Vinterdag 23. mars – friskluftmengde som strømmer utenfra og inn i kontorene hvor "offSW" er kontorsonen mot sør-vest, "offSE" er kontorsonen mot sør-øst, "offNE" er kontorsonen mot nord-øst og "offNW" er kontorsonen mot nord-vest



Figur 12 Vinterdag 23. mars – mengde friskluft og avtrekk samt åpningsfrekvens (lufteluke) i de 4 kontorrommene og i hele etasjen.

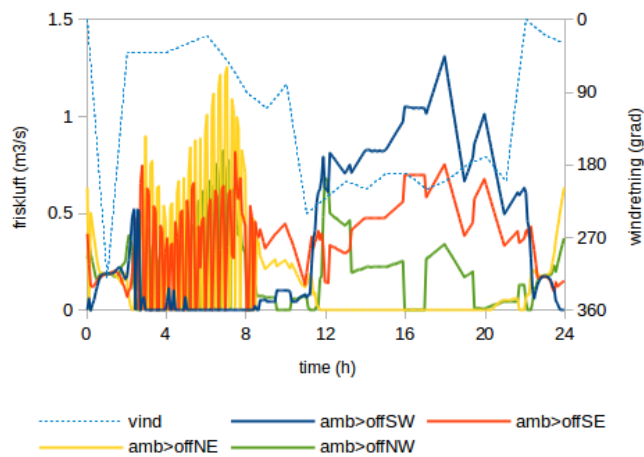
Rommene viser ikke enhetlig fordeling av frisk- og avtrekksluftmengder. På lo-siden (sørsiden) strømmer det inn mer luft enn det som strømmer ut grunnet framherskende vindretning sørfra. På le-siden (nord) er situasjonen omvendt til tross for at luftelukene åpnes hyppigere. Dette tyder på at rom mot nord virker som avtrekk for sørvendte rom. Luftelukene mot sør står åpne i 9 % av driftstiden, men lukene mot nord åpnes i ca. 14 % av driftstiden. Gjennomsnittlig tilluftmengde for hele etasjen på 496 m² er på 1,5 m³/(h·m²) i driftstid.



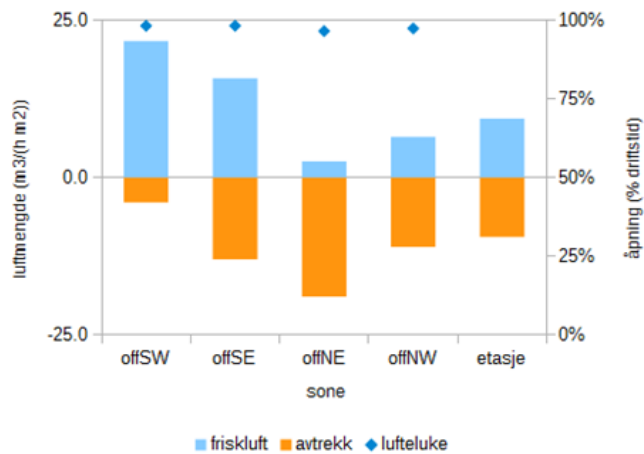
Figur 13 Vinterdag 23. mars – luftstrømningsbalanser gjennom fasader og fra midtsonen i nordvest-kontor (øverst venstre), nordøst-kontor (øverst høyre), sørvest-kontor (nederst venstre) og sørøst-kontor (nederst høyre).

Figur 13 viser nettoluftmengder (innstrømmende luft minus utstrømmende luft) gjennom fasadene og fra midtsonen, samt CO₂-konsentrasjon og tidspunktene når luftelukene er åpne. Resultatene viser ulike strømningsmønstre. I det enkleste tilfellet oppstår kryssventilasjon mellom fasadene (der røde og blå 'peaks' er motsatt og like store). Der vi ser en reduksjon av CO₂-konsentrasjonen, og der balansen er null eller liten, kan det antas at en har ensidig ventilasjon gjennom fasadene der den samme luftmengden strømmer inn i den nederste delen og ut i den øverste delen av luftelukene. Resultatene for kontorene i sørvest- og nordøst viser hyppig bruk av midtsonen for kryssventilasjon gjennom bygget. Resultatene for nordøstkantoret viser at et rom kan fungere som avtrekk for andre rom over lengre tid. I stedet for å tilføre ny friskluft til rommet trekkes det ut brukluft fra andre rom hvis luftelukene åpnes. Dette fører til hyppigere åpninger og større varmetap. Særlig kontorene i sørvest- og nordvest-hjørnet viser skiftende strømningsmønstre gjennom dagen. Det kan ikke identifiseres ett dominerende ventilasjonsprinsipp i bygget.

Figur 14 viser luftmengder frisk luft som strømmer inn i rommene gjennom luftelukene i fasader. Figur 15 viser gjennomsnittlige timesverdier av friskluft og avtrekk i rom samt antall åpninger av lufteluker på den undersøkte sommerdagen. NB!: Diagrammene viser 2 utfordringer med simuleringene: a) problemer med interpolasjon av timesverdier for vindretning, b) et oscillerende on/off mønster grunnet en forenklet temperaturstyring.



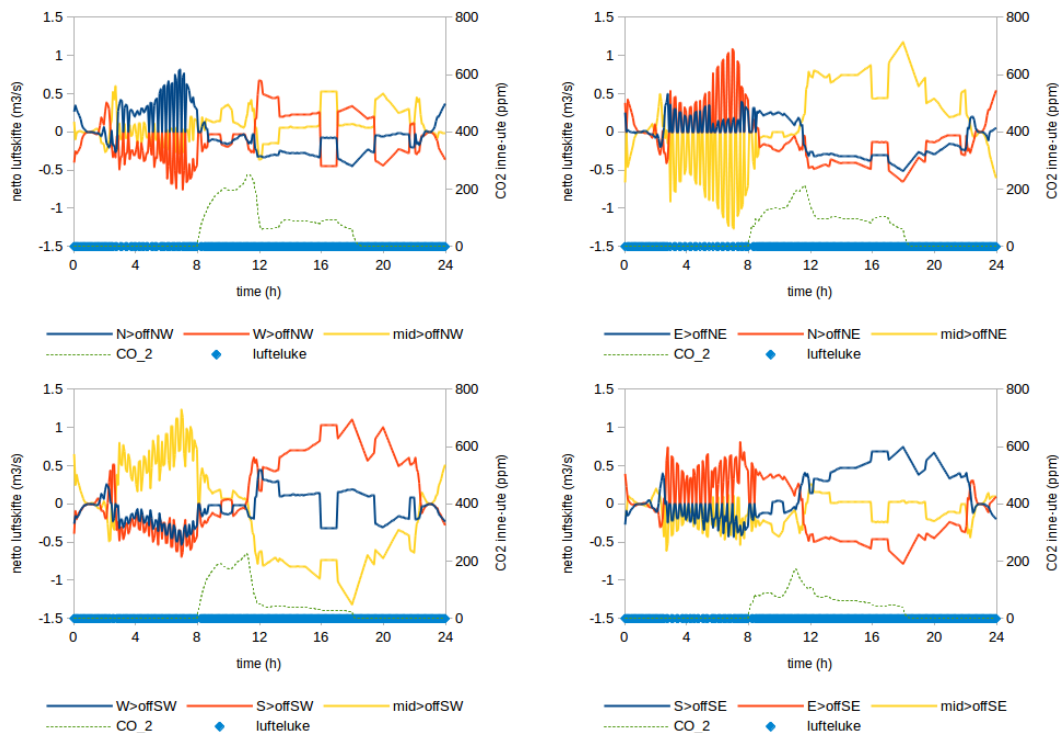
Figur 14 Sommerdag 27. juli – friskluftmengde som strømmer utenfra og inn i kontorene "offSW", "offSE", "offNE", "offNW"



Figur 15 Sommerdag 27. juli – mengde friskluft og avtrekk samt åpningsfrekvens i de 4 kontorrommene og i hele etasjen

Luftelukene er nesten alltid åpne i og utenfor driftstid. Mens rom mot sør er forsynt med friskluft pga. vind fra sør, får kontoret i nordøst-hjørnet ikke friskluft mellom kl 12 og kl 20. Rommene viser igjen ikke enhetlig fordeling av frisk- og avtrekksluftmengder. Mer luft strømmer inn på lo-siden enn det som strømmer ut. På lesiden er det nesten bare avtrekk. Luftelukene i alle rom står åpne i nesten 100 % av dagen. Gjennomsnittlig tilluftsmengde for hele etasjen er på $9,4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ i driftstid og $8,6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ over hele dagen.

Figur 16 viser nettolutftmengder (innstrømmende luft minus utstrømmende luft) gjennom fasadene og fra midtsonen, CO_2 -konsentrasjon og tidspunktene når luftelukene er åpne. Pga. kontinuerlig lufting er CO_2 -konsentrasjonen aldri i nærheten av grenseverdien, men øker mellom kl. 8 og kl. 11 der vindhastigheten faller under 1 m/s og isoterme forhold ikke tillater ensidig vindusventilasjon basert på oppdrift. Med økende vindhastighet (vinden endrer også retningen fra øst til sør) oppstår kryssventilasjon gjennom hele bygget bortsett fra kontoret i sørøst-hjørnet. Kontoret i nordøst-hjørnet fungerer som avtrekk for andre rom mellom kl. 12 og kl. 22 og får ikke friskluft utenfra.



Figur 16 Sommerdag 27. juli – luftstrømningsbalanser gjennom fasader og fra midtsonen i nordvest-kontor (øverst venstre), nordøst-kontor (øverst høyre), sørvest-kontor (nederst venstre) og sørøst-kontor (nederst høyre)

Diskusjon

Termisk inneklime

Resultatene viser betydelige forskjeller mellom Lustenau og Oslo. Oppvarmingsperioden i Lustenau er kortere og det kan oppnås høyere inne-temperaturer om vinteren. Dette er på grunn av det mildere klimaet med høyere utetemperaturer og mer solinnstråling om vinteren. Styring på CO₂-konsentrasjonsdifferanse mellom inne og ute på 1 000 ppm vil gi til høyere inne-temperaturer i oppvarmingsperioden slik at "2226" for østerrikske forhold kan tilfredsstille krav til termisk inneklime om vinteren etter NS-EN 15251. I Norge vil ikke heller en CO₂-konsentrasjonsgradient på 1 000 ppm gi tilfredsstillende inne-temperaturer om vinteren. Den valgte styringen i kjølesesongen på innelufttemperatur både om dagen og om natten (nattkjøling) kan sikre at man unngår overtemperaturer bortsett fra på dager med isoterme forhold. Luftlukene er imidlertid aktivert nesten 24 timer pr døgn, noe som er en risiko både mht. trekk og sikkerhet.

Riktig valg av styringsalgoritme i mellomperioden er kritisk. Ved temperaturstyring er uteluften kald nok til å kjøle rommet med få/små åpninger, men dette reduserer ikke CO₂-konsentrasjonen tilstrekkelig. På den andre siden gir styring kun på CO₂ for høye inne-temperaturer. I vår- og høstperioden trengs det derfor en styringsalgoritme som kan ta hensyn til både CO₂ og temperatur. Nattkjøling med uteluft er en effektiv måte for å få kontroll på høye temperatur i driftstiden, særlig i Norge med lave nattetemperaturer nesten hele året. Man må imidlertid passe på at bygget ikke kjøles for mye, slik at temperaturen om morgenen blir for lav.

Rom mot sør viser ca. 2 K høyere operative temperaturer i driftstid enn for nordvendte rom samt midtsonen, imidlertid utjevnes temperaturforskjellen etter arbeidstidens slutt slik at temperaturene i rommene er like neste morgen. Dette er på grunn av den åpne planløsningen som muliggjør store luftutvekslinger mellom sonene.

Passiv solvarme er en vesentlig kilde til oppvarming i konseptet, og simuleringer viser at det er forskjell mellom dager med og uten direkte sollys ved ellers like forhold. På den andre siden er reduksjon av vindusarealet vesentlig for reduksjon av varmetapet. Balansen mellom tilstrekkelig glassareal og begrensning av varmetap er avgjørende og krever bevisst arkitektonisk utforming av bygningsform og fasader.

Bruk av tunge byggematerialer fører til mer jevne overflatetemperaturer (MRT) som kan moderere svingningene i lufttemperaturen. Om vinteren gir høyere overflatetemperaturer økt operativ temperatur i driftstid. Om sommeren er overflatene kaldere enn romluften i driftstid, særlig taket viser nesten konstante overflatetemperaturer.

Luftstrømning

Ulike hovedstrømningsmønstre kan identifiseres, de tre hovedmønstrene er: a) ensidig ventilasjon, b) kryssventilasjon mellom fasadene i rommet, c) kryssventilasjon gjennom bygget. Dessuten finnes det blandinger av disse strømningsmønstrene og forskjellige prinsipper kan oppstå samtidig. Kryssventilasjon gjennom bygget kan føre til at rom ikke får friskluft utenfra, men kun avkast fra andre rom, som fører til ekstra åpninger av lufteluker. Sammenknytning mellom soner fremstår som viktig del av luftstrømningen gjennom bygget. Dette tillater kryssventilasjon gjennom hele bygget og er avgjørende for å utjevne temperaturforskjeller og CO₂-nivå mellom sonene i bygget.

CO₂-nivået varierer mellom rommene pga. ulike vindforhold og ventilasjonsmønstre som følge av styring iht. CO₂-nivåer i rommene. Dette gir komplekse og vanskelig forutsigbare strømningsforhold i bygget, der strømningsmønstret i et rom avhenger av luftingen i andre rom. Avhengigheten kan føre til at frisklufttilførselen reduseres eller at rommet blir avtrekk for et annet rom som luftes. CO₂-styrt tilluftsmengde om vinteren er på 1,5 m³/(h·m²) med persontetthet på ca. 20 m² pr person i etasjen. For å tilfredsstille norske forskriftskrav må det ventileres nesten tredobbelt så mye: 1,5 m³/(h·m²) med CO₂-styring pluss 2,5 m³/(h·m²) for å ta hensyn til materialforurensninger som gir 4,0 m³/(h·m²) total luftmengde.

Konklusjoner

Termisk Inneklima

Med CO₂-styring på 600 ppm CO₂-differanse er det ikke mulig å oppnå tilstrekkelig innnetemperaturer hverken i Lustenau (minste operativ temperatur i driftstiden er på 18 °C) eller i Oslo (minste operativ temperatur i driftstiden er på 13 °C). Med styring på 1000 ppm kan målet oppnås for Lustenau (minste operativ temperatur i driftstiden på 20 °C), men ikke for Oslo (minste operativ temperatur i driftstiden på 16 °C). Operativ temperatur varierer mellom rom avhengig av orientering; opptil 2 Kelvin i driftstiden. Det oppstår høye innnetemperaturer på over 26 °C om sommeren som ikke kan avhjelpest med vinduslufting eller bruk av nattkjøling. Det er ikke lagt inn solskjerming i "2226", noe som bidrar betydelig til dette. Ved bruk av den adaptive komfort-modellen ligger temperaturene likevel innenfor klasse II iht. NS-EN 15251 for bygget i Lustenau.

Beregnet oppvarmingsbehov for Oslo er på 21 kWh/m² med settpunkt på 600ppm. Selv om resultatene må anses som usikre, viser resultatene at det trengs et oppvarmingssystem som kan reagere raskt for å gjenopprette tilfredsstillende romtemperaturer etter en ventilasjonspuls, til tross for den termiske massen i bygget.

Ventilasjon

Med 75 % tilstedeværelse og en persontetthet på 20 m²/pers i hele etasjen åpnes luftelukene i 5 minutter ca. 15 ganger pr døgn (ca. 10-15 % av driftstiden) for bygget i Oslo i oppvarmingsseasonen. Grenseverdien for CO₂-konsentrasjon overskrides ikke. Høyere persontetthet vil føre til hyppigere åpninger og dermed større varmetap.

Luftstrømning i rom (dvs. hvor luft går inn i/ut fra rommet) varierer over døgnet for de ulike prinsipper for naturlig ventilasjon. Pga. romvis styring av luftlukene og avhengighet av luftingen i andre rom, oppstår svært uforutsigbare strømningsforhold i bygget.

Luftstrømningen kan avvike fra et forventet konsept hvis luftveiene er utilstrekkelig tatt hensyn til og modellert dvs. hvis ikke alle mulige luftveier er inkludert i beregningsmodellen. I simuleringene ble det brukt en relativt enkel modell med 4 rom med 2 fasader som er tilknyttet en felles midtsone. Uansett er strømningsforholdet i modellen svært varierende pga. den alternative tredje luftveien fra kontorene til midtsonen. Detaljerte studier av luftbevegelser og -hastigheter i rommet er nødvendig for en mer fullstendig vurdering av komfort i oppholdssonen.

Oppsummering

Konsept

Bygget er først og fremst et konseptuelt bygg og er ment som et «statement» mot for mye teknologi i moderne bygg. Med dette utfordres VVS-bransjen og andre teknisk orienterte i byggebransjen som, etter arkitektens mening, gjør dagens arkitektur for komplisert [2]. Utfordringen viser seg ikke bare i fraværet av tekniske installasjoner, men også i den kalkulerte risikoen for at bygget sannsynlig ikke kommer til å tilfredsstillende alle krav ift. tradisjonelle inneklimatestander til enhver tid. Konseptet fremhever imidlertid "atmosfære" som en verdi stedet for å ha rent fokus på kvantifiserbare inneklimatefaktorer iht. standarder. Dermed utfordres også måten/indikatorerne for å måle komfort i innemiljøet.

Det er viktig å bemerke at bygningskonseptet er basert på til dels veldig avansert kunnskap om simuleringer og fysiske egenskaper til materialer. Selv om konseptet tilbyr et alternativ til passivhuskonseptet, brukes mange av de samme strategier og løsninger som også kan finnes i passivhus eller lignende 'høyteknologiske' konsepter. Bygget kan forså vidt også tolkes som et passivhus etter det opprinnelige passivhuskonseptet, dvs. et hus som tilbyr komfort basert på rene passive prinsipper. Bygget er altså ikke nødvendigvis en antitese. Konseptet er også kritisk mht. plassering fra et byplanleggingsperspektiv, da det er en forutsetning at omgivelsene ikke har for høy støy- og luftforurensing. Å bygge med hensikt i ytterkant av byen kan sies å være utfordrende mht. dagens ønsker om fortetting og urbanisering.

Rammebetingelser

Bygget har i utgangspunktet spesielle rammebetingelser som muliggjør konseptet for lokale forhold i Østerrike. Mange tiltak og løsninger er tilpasset akkurat byggets beliggenhet og sine brukere. Beliggenheten er valgt i forhold til konseptet, og ikke tvert om som for vanlige for byggeprosjekter. Det må dermed settes spørsmålsteget ved om konseptet kan fungere overalt og kan overføres uten forbehold til andre steder, særlig i beliggenheter der vinduslufting ikke er egnet pga. for store interne og ytre belastninger, ugunstige vindforhold, omkringliggende bebyggelse, støy / trafikk og sikkerhetsmessige forhold [9]. I tette byområder der hver kvadratmeter er kostbar, er de tykke murveggene og to meter avstand fra innvendig fasade og nærmeste arbeidsplass, hvis dette anses som en sentral del av konseptet, ikke særlig godt egnet.

Klimaet spiller også en viktig rolle. I motsetning til norsk klima har Lustenau milde vintre pga. sitt spesielle lokalklima knyttet til Bodensjøen. Lokaliseringen i Sentral-Europa med mer solinnstråling gir også et større potensial for utnyttelse av passiv solvarme til oppvarming om vinteren, samt høyere dagslysnivå. I norske forhold med lav sol om vinteren og overveiende overskyede forhold er dagslystilgangen begrenset. Dype smyg som solskjermingselement gir større effekt i Sentral-Europa med større solhøyde om sommeren, mens i norsk klima vil en slik løsning begrense dagslystilgangen betraktelig (til sammenligning: høyeste solhøyde i Oslo er ca. 53°, mens i Lustenau 66°). Simuleringene viser at konseptet ikke gir tilfredsstillende termisk komfort om vinteren for Oslo-klima.

I tillegg er forskriftsmessige rammebetingelser er annerledes i Østerrike enn i Norge, i Østerrike brukes det andre krav for naturlig ventilerte bygg enn for mekanisk ventilert bygg [27]. Dette medfører mindre strenge krav, f.eks. høyere CO₂-settpunkter for bygg i Østerrike. Dessuten er det bare krav til ventilasjon pga. personbelastning, dvs. man må ikke tas hensyn til byggrelaterte belastninger fra byggematerialer og møbler, fordi CO₂ anses som tilstrekkelig indikator for alle forurensninger hvis mennesker er hovedkilden.

Et spesielt forhold for prosjektet i Lustenau, er at både byggherre, prosjekterende og brukere er de samme. Dette forholdet tillater at man kan ta større risiko mht. eksperimentelle løsninger, samt tillate seg å sette mindre strenge rammebetingelser mht. inneklimakrav og arbeidsplassforskrift. Det er også viktig å huske at det foreligger et arbeidsgiver-ansattforhold blant eier/prosjekterende og brukere som kan føre til at ansatte muligens stilltiende aksepterer et større ubehag. Dessuten kan det at brukerne selv har tatt del i prosjekteringen og har god kjennskap til byggets konsept, påvirke deres opplevelse av komfort, og gjøre dem bedre i stand til å akseptere større svingninger i inneklimate.

Utforming

Planløsningen for bygget er skreddersydd til klimatiseringskonseptet, og konseptet fungerer som følge av den spesielle romutformingen og det resulterende bygningsvolumet. Det er ikke sannsynlig at alle bygg kan ha en løsning med primærrom som har tilgang til to fasader for å tillatte kryssventilasjon. Det resulterende, kubiske volumet betyr relativt mye ytterveggareal med negative konsekvenser både mht. varmetap og kostnader. Det er fordi U-verdien til yttervegger som inkluderer både opak vegg og vinduer er større enn U-verdier av tak og gulv på grunn.

Kontorløsningen med gruppekontorer for opptil 10 arbeidsplasser som muligjør konseptet er typisk for Sentral-Europa, men ikke vanlig i Norge der det prosjekteres hovedsakelig med cellekontorer for en person eller åpne kontorlandskap med stor persontetthet [28]. "2226" har lite sekundærareal, mens norsk praksis er å legge flere rom uten dagslys krav som møterom, stillerom, adkomst e.l. i det sentrale mørkarealet, noe som reduserer muligheten til å bruke naturlig ventilasjon. For å få til en slik planløsning trengs endringer mht. norske brukerkrav eller det må brukes andre prinsipper enn i "2226" for naturlig ventilasjon, f.eks. med oppdrift gjennom sentrale avtrekksjakt og tilpassete planløsninger. Begge forutsetninger ville gi andre bygningsutforminger enn "2226" og det som er vanlig i Norge i dag.

Med tanke på at det siktes på en levetid på 200 år for bygget, må man forvente at det i løpet av denne tiden skjer store endringer både mht. bruksmønstre og teknologiutvikling. Bortsett fra de konstruktive grensene er en mulig utvidelse og sammenslåing av kontorrom delvis umulig fordi sekundære rom, trapp og heis befinner seg mellom primærrom. En deling av de store rommene i mindre rom ødelegger klimatiseringskonseptet, eller man må forholde seg til fasade- hhv. vindusrytmen som ikke er tilrettelagt for en modul på f.eks. 2,40 meter som er typisk for cellekontorer i Norge.

Konstruksjonssystemet med bærende ytter- og innervegger er valgt mht. ønsket om forenkling og optimalisering av dekkene [4], men dette går på bekostning av fleksibiliteten. Endringer vil innebære inngrep i det statiske systemet og er ikke mulig der det må tas hensyn til bæreakser.

Det kan også settes spørsmålsteget kan til konstruksjonen med hulltegl, særlig for norske forhold med lite tradisjon med murverksbygging. I nordiske land finnes det imidlertid et etablert system med et lett, høyisolerende utfyllende bindingsverk som har blitt utviklet over tid og er godt tilpasset klimaet. En slik blandingskonstruksjon brukes også tiltagende i Sentral-Europa pga. nye energiregler [29]. Veggoppbygging med hulltegl i "2226" er forankret i det arkitektoniske konseptet og er basert på arkitektens ønske om en monolittisk

oppbygging. En betongyttervegg med utvendig påfôret isolasjon ville ha bedre varmelagringskapasitet med lik isolasjonsevne, og mindre tykkelse.

For å utnytte den termiske massen er alle innvendige overflater i "2226" eksponert, noe som har konsekvenser for akustiske forhold i rommene. Akustikken vil sannsynligvis ikke oppfylle konvensjonelle norske normer, men dette er ikke undersøkt nærmere i denne studien.

Dagslysregninger viser at kontorrommene i "2226" ikke oppnår tilstrekkelig dagslysnivå på 2 % gjennomsnittlig dagslysfaktor iht. norsk forskrift TEK med standardrefleksjonsverdier for vegg, tak og gulv som inkluderer eventuell interiør. Bare med hvitmalt vegger uten møblering kan dagslyskravet oppnås, noe som ville begrense fleksibilitet av møblering og bruk av rommene betydelig.

Inneklima

Det finnes dessverre ikke uavhengige publikasjoner mht. målinger av inneklima for "2226"-bygget. Våre inneklimasimuleringer har imidlertid vist at "2226" muligens kan oppnå et godt inneklima i Lustenau ift. østerrikske retningslinjer for inneklima og luftkvalitet. Høye overtemperaturer oppstår, men kan aksepteres hvis den adaptive komfortmodellen forutsettes. Imidlertid er det tvilsomt om innnetemperaturen kan holdes innenfor grensene 22-26°C som navnet til bygget tilsier.

I norsk klima kan man ikke oppnå tilfredsstillende innnetemperaturer i oppvarmingsperioden. En vurdering av lokal termisk komfort mht. lokal lufthastighet, trekk, strålingstemperaturer er ikke utført, men her kan man også forvente utfordringer for kalde vinterdager. Til og med i et mildere klima som i Lustenau er det valgt plassering av arbeidsplasser med god avstand fra luftelukene for å unngå trekk. En slik løsning fører til en begrensning av brukbart areal og lite fleksibilitet i forhold til bruk av rommene, noe som kan være en økonomisk utfordring for utleier og leietaker med mindre disse tåler begrensninger i komfort.

I "2226" bestemmes behovet for vinduslufting utelukkende ut fra belastninger knyttet til brukere (luftkvalitet og romtemperatur), mens belastninger fra bygget (byggematerialer) neglisjeres. Grunnventilasjon pga. materialbelastning er forankret i byggeforskriften i Norge. Det er vanskelig å sørge for en konstant, jevn lufttilførsel med naturlig ventilasjon på en forsvarlig måte uten å unngå for stort varmetap. En annen utfordring er de norske kravene til filtrering av tilluft, som er en utfordring i alle naturlige ventilerte bygg.

Avslutningsvis kan det bemerkes at det finnes bygg i Norge som kan sammenlignes med "2226" mht. bygningsvolum, størrelse og isolasjon, og eksponert termisk masse. F.eks. har blokkene i Powerhouse Kjørbo et nesten likt fotavtrykk som "2226" [30]. Imidlertid har byggene på Kjørbo et oppvarmingssystem og et mekanisk/hybrid ventilasjonsanlegg.

Kompetanse

Kunnskapen og teknologiene som er benyttet i '2226' er ikke nye, men er basert på eksisterende faglitteratur og forskning. Det som utmerker prosjektet er at alle enkeltaspekter og problemstillinger er adressert samtidig og søkt løst på en meget integrert måte. Den arkitektoniske utformingen av bygget er et tydelig resultat av det klart definerte inneklimakonseptet som ligger til grunn for prosjekteringen. Likevel er det arkitektoniske konseptet ikke underordnet klimatiseringskonseptet. I stedet er de tekniske krav mht. arkitektoniske elementer grundig innarbeidet fra kyndige arkitekter. Prosjektet fremstår derfor som meget gjennomtenkt, helhetlig og 'helstøpt', med et kompromissløst og ryddig arkitekturspråk.

Fordi bygget virker så enkelt, er det en risiko for at man velger ut kun enkeltelementer av konseptet, dvs. elementer tatt ut av sin sammenheng, f.eks. vindusløsninger med vertikale

luftluker. Konseptet fungerer imidlertid bare som et samspill av alle valgte løsninger og under gitte rammebetingelser. For å få til dette kreves både forståelse av helhet og dybdekunnskap på enkeltområder. Forutsetningen for at et slikt konsept skal ha suksess hviler ikke bare på samspillet mellom involverte partnere, men også på kunnskap om bygningsfysikk, luftstrømming, termodynamikk og styringssystemer. Arkitektene må ha innsikt i fysiske og tekniske sammenhenger. Helhetlige konsepter som er særlig tilpasset til sine rammebetingelser (klima, forskrifter, osv.) fordrer også at rådgivere og entreprenøren må levere høy kvalitet på prosjektering og utførelse, dvs. helhetlig interdisiplinær tenkning og 'estetisk' forståelse av bygningsintegrasjon. Det vil også være nødvendig å bevege seg utenfor etablerte bransjestandarder og preaksepterte løsninger. Løsninger må tilpasses til hvert enkelt prosjekt med sine særegne rammebetingelser.

For utførelsen er det avgjørende med tilgjengelighet av høykvalitets-komponenter til en økonomisk forsvarlig pris. Følgelig kreves et bredt marked med flere konkurrerende aktører som forserer utviklingen av nye produkter.

Selv om bygget viser frem et image av "null-teknologi" og "selvfølgelighet" [11] kreves det også et høyt kunnskapsnivå om styring ved innkjøring, etterjustering og vedlikehold i driftsfasen. Både utleier, driftspersonell og leietaker må være kjent med byggets adferd og styring samt tilhørende begrensninger.

Rammebetingelser / krav for norske forhold

Forskjellige forutsetninger

Norske forutsetninger er forskjellige fra forutsetningene i Østerrike, særlig mht. klima, forskriftskrav, byggeskikk og typiske kontorløsninger. I dette kapitlet belyser vi krav til inneklime i kontorbygg som finnes i norske forskrifter, veiledninger og gjeldende norske utgaver av internasjonale standarder og vurderer om disse fremmer eller strider mot konsepter basert på naturlig klimatisering. Konsekvenser mht. andre krav knyttet til akustikk, brann og røykspredning, sikkerhet, energi, fukt, osv. inngår ikke i analysen. Det vises også til undersøkelser av barrierer og begrensninger som er fremkommet i tidligere forskningsprosjekter som Natvent [31] og Hvbvent [32].

Relevante norske krav for kontorbygg er angitt i "Forskrift om tekniske krav til byggverk" (TEK10) [33] og "Forskrift om utforming og innretning av arbeidsplasser og arbeidlokaler" (Arbeidsplassforskriften) [34] der det vises til Veiledning nr. 444 "Veiledning om Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen" [24]. Veiledningen til Byggteknisk forskrift viser også til NS-EN 15251:2007 [26] og denne legges også til grunn for vurderinger iht. Veiledning 444. Veiledning til TEK og 444 refererer ikke spesifikt til standardens Nasjonale tillegg NA fra 2014.

Relevante krav

Byggteknisk forskrift / Veiledning til TEK

Minimumskrav / preaksepterte ytelser

Byggteknisk forskrift formulerer minimumskrav som er forpliktende. Veiledningen til Byggteknisk forskrift fortolker forskriften og gir orienteringer for omsetning i praksis ved å oppgi anbefalinger og preaksepterte ytelser. Disse er ikke bindende.

Hvis det er gitt forskriftskrav med konkrete tallverdier (ytelseskrav), er disse absolutte krav og må oppfylles. Er kravene formulert som krav til funksjoner (funksjonskrav), verifiseres disse enten med samsvar med preaksepterte løsninger gitt i veiledningsteksten eller ved analyse som viser at funksjonskravet er oppfylt. Foreligger fravik fra ytelseskrav må det søkes dispensasjon. Brukes analyse for verifisering av funksjonskrav må det dokumenteres skriftlig at analysemetoden er egnet og forutsetninger i analysen må beskrives og begrunnes. Det må kartlegges ytelsesnivåer som følger av funksjonskravet, og avvik fra preaksepterte ytelser gitt i veiledningen må begrunnes, samt at man må vurdere behov for kompensierende tiltak. Oppfyllelse av ytelser verifiseres med metoder i tråd med relevante norske standarder. Krav til inneklime er formulert i forskriftens kapittel 13 "Miljø og helse". Her gjelder § 13-1 og 13-3 for luftkvalitet og § 13-4 for termisk inneklime.

§ 13-1 Generelle krav til ventilasjon

Forskriften omfatter funksjonskrav til ventilasjon for å sikre luftkvaliteten i rommet. Det skal tas hensyn til forurensningskilder, til luftkvalitet og luftføring i bygget.

Forurensningsbelastning bestemmes fra materialer, prosesser, personer og husdyr. Kravet oppfylles hvis fastsatte luftmengder spesifisert i § 13-3 brukes. Dimensjonerende personbelastninger konkretiseres i veiledningsteksten basert på menneskets CO₂-produksjon med anbefaling om at CO₂-nivå ikke bør ligge mer enn 500 ppm over utendørs nivå på typisk 400-450 ppm. Dessuten viser veiledningen til relevante standarder NS-EN 15251 tabell B.4 og NS-EN 13779. Iht. forskriften skal materialer brukt i innemiljøet være lavemitterende, og veiledningen krever at det bare benyttes produkter med tilfredsstillende dokumentasjon.

Tilluftskvaliteten skal sikres ved riktig plassering og utforming av bygg og ventilasjonsanlegg, og det spesifiseres at luftinntak og -avkast skal plasseres slik at avkastluft ikke blandes med friskluft. Etter forskriften skal tilluften renses hvis uteluften ikke har tilfredsstillende luftkvalitet og kan føre til risiko for helse og installasjoner. Grunnlaget for vurderingen av dette er ikke beskrevet. Det kan tas utgangspunkt i grenseverdier i Forskrift om begrenning av forurensning (forurensningsforskriften) eller Folkehelseinstituttets anbefalte normer [35]. Miljøverndepartementets Retningslinje T 1520 [36] omhandler hvordan luftkvalitet skal tas hensyn til ved planlegging av bebyggelse. Her skal kommuner utarbeide luftsonekart med luftkvalitetssoner ut fra NO₂ og svevestoffkonsentrasjoner. Veiledningen konkretiserer tiltakene om plassering og utforming av inntak med minst forurenset luft og skjermet fra forurensinger. Videre spesifiseres det at uteluften alltid bør filtreres og at det bør ikke benyttes dårligere filter enn F7.

For å forhindre overføring av forurensinger mellom rom krever forskriften at det sørges for luftstrømming fra rom med høyere luftkvalitet til rom med lavere krav til luftkvalitet, innkapsling av forurensende aktiviteter og at det ikke benyttes omluft. Ifølge veiledningen skal dette sikres gjennom kontrollerte trykkforhold i bygningen, særlig undertrykk eller eget punktavsug i rom med forurensninger. Hvis det benyttes omluft må det dokumenteres at forurensninger ikke overføres, alternativt må omluften filtreres.

§ 13-3 Ventilasjon i byggverk for publikum og arbeidsbygning

Forskriften fastsetter ytelseskrav til friskluftmengder for å ta hensyn til forurensninger fra personer og materialer. Angitte luftmengder er gjennomsnittlige.

I driftstiden er det påkrevd en frisklufttilførsel på minst 26 m³/h pr person med lett aktivitet og på minst 2,5 m³/h pr m² mht. forurensninger fra materialer. Personbelastning er basert på CO₂-produksjon, der verdien på 26 m³/h pr person er den luftmengden som skal til for å holde rommets CO₂-nivå under 1000 ppm ved lett aktivitet. Ved høyere aktivitet skal friskluftmengden økes ift. aktivitetsnivå og tilhørende CO₂-produksjon. Ifølge veiledningen forutsetter materialbelastningen på 2,5 m³/h pr m² at man har veldokumenterte lavemitterende materialer.

Hvis bygning eller rom ikke er i bruk, kan luftmengden reduseres til 0,7 m³/h pr m². På grunn av at kravet til luftmengde er gjennomsnittlig, kan luftmengden utenfor driftstid også tilfredsstilles med intermittert drift [37].

§ 13-4 Termisk inneklima

Forskriften inneholder funksjonskrav til temperaturforhold og lokal komfort. I tillegg stilles det krav om minst ett åpeningsbart vindu i rom for varig opphold.

Kravet spesifiseres i veiledningsteksten med anbefalinger til operativ temperatur mellom 19 og 26 grader for rom med lett arbeid. I oppvaringssesong anbefales det at den laveste grensen alltid overholdes, samtidig anbefales det at operativtemperaturen er lavere enn 22 °C. Den står videre at operativtemperaturen kan være høyere enn 26 °C i perioder med utelufttemperatur over n₅₀-maksimaltemperaturen (temperaturen som overskrides med 50 timer i et normalår). Det er ikke angitt hvor ofte operativtemperaturen på 26 °C kan overskrides. Mht. lokal komfort oppgis at lufttemperaturforskjell mellom føtter og hode ikke bør overskride 3-4 °C og at periodisk temperaturvariasjon utover ca. 4 °C ikke er akseptabelt.

Kravet til åpeningsbart vindu gjelder ikke for arbeids- og publikumsbygg dersom bruken eller driften av rommet forutsetter at vinduer ikke skal kunne åpnes. Veiledningen spesifiserer vinduet som sikkerhet hvis mekanisk klimatisering svikter. Kravet til vinduet anses som hjemlet i § 13-13 dvs. i sammenheng med utsyn.

Arbeidsplassforskriften / Veiledning 444

§ 2-14 i Arbeidsplassforskriften regulerer inneklime i arbeidslokaler. § 1-3 setter krav til arbeidsgiver, men også til utleier og byggherre, til å planlegge, kartlegge og iverksette tiltak for å sikre at krav overholdes. Ifølge arbeidsmiljøloven § 18-9 er det plikt til å innhente samtykke fra Arbeidstilsynet ved søknadspliktige byggesaker. Arbeidstilsynet vil gi samtykke hvis det foreligger tilstrekkelig dokumentasjon at ytelseskrav er oppfylt, f.eks. ved å vise samsvar ved sjekklister, men er ikke pålagt å vurdere løsninger. Hvis det gis samtykke med vilkår, ansees vilkårene som innfridd, f.eks. med tilstrekkelig dokumentasjon av kravspesifikasjoner. Arbeidstilsynet kan også gi pålegg om tiltak eller nekte samtykke hvis løsningen etter Arbeidstilsynets oppfatning gir et dårlig inneklime. Verdien gitt i Veiledning 444 beskriver når det er krav til tiltak, dvs. et minstekrav.

Det tas i utgangspunkt i et mekanisk ventilasjonsanlegg. Vinduer til å åpne anses som en mulighet for lufting i tillegg til det egentlige (mekaniske) ventilasjonsanlegget. Uteluft som trekkes inn i bygget skal være renest mulig og luftinntaket skal plasseres beskyttet fra støy, trafikk, regn, snø og andre organiske forurensninger. Luftfiltrering anses alltid som nødvendig, der luftfilter bør være klasse EU7. Med tanke på et balansert ventilasjonsanlegg antas det at lufttilførsel og -avtrekk skjer i de enkelte lokaler, men det aksepteres overstrømning til rom uten faste arbeidsplasser eller hvis det unngås spredning av forurensninger. Det forutsettes at tilførsel og avtrekk utføres slik at hele oppholdssonen ventileres uten kortslutning eller at det oppstår trekk. Ventilasjon med luftspalter i yttervegg og avtrekksventilasjon aksepteres ikke pga. dårlige erfaringer med trekk. Ved bruk av naturlig ventilasjon må det dokumenteres at termisk inneklime og luftkvalitet er tilfredsstillende. Likevel bør arbeidslokaler ha vinduer til å åpne for å tilby lufting i tillegg til mekanisk ventilasjon.

Grenseverdien for forurensninger i arbeidsatmosfæren skal ikke overskrides. Grenseverdi for CO₂ som den mest relevante indikatoren er eksempelvis på 5000 ppm [38]. Mht. normert luftkvalitet vises det til Nasjonalt Folkehelseinstitutt "Anbefalte faglige normer for inneklime" [35] der det settes maksimalverdi for innendørs CO₂-nivå på 1800 mg/m³ tilsv. 1000 ppm. Ventilasjonen skal fjerne eller tynne forurensningene. Luftmengden skal vurderes ut fra summen av a) belastning fra personer og aktivitetsnivå, b) belastninger fra bygningen selv dvs. byggematerialer og interiør (Veiledning 444 har stor fokus på byggematerialer), c) evt. belastninger fra prosesser og arbeid. Laveste aksepterte luftmengder i driftstid er summen av 7,0 l/s pr person og 0,7 l/s pr m² gulvareal med dokumenterte, lavemitterende materialer. Sistnevnte må også opprettholdes ved behovsstyrt ventilasjon hvis rommet ikke er i bruk i byggets driftstid. Utenfor driftstid må det tilføres minst 0,2 l/s pr m² gulvareal.

Operativ temperatur ved lett arbeid skal ligge mellom 19 og 26 °C, der det anbefales at temperaturen er mindre enn 22 °C i oppvarmingssesong. Overskridelsen av den høyeste grensen på 26 °C skal være mindre enn 50 timer pr år. I tillegg skal N-EN 15251 bli lagt til grunn for kontorer. Det vises til pågående utarbeidelse av "adaptive standarder" uten å gå inn på konsekvenser. Her er det behov for oppdatering av Veiledning 444 siden adaptiv komfort ble tilføyd NS-EN 15251 i 2007. Det vises i tillegg til lokale komfort-kriterier som påvirker temperaturopplevelsen, som temperatur av omgivende overflater (ikke spesifisert), temperaturforskjell mellom føtter og hode på 3-4 °C og daglige eller periodiske temperaturvariasjoner over 4 °C. Lufthastighet skal ikke overstige 0,15 m/s i oppvarmingssesongen og rom med faste arbeidsplasser skal ha en egen trekkfri frisklufttilførsel.

NS 15251:2007+NA:2014

Både TEK10 og Veiledning 444 viser til NS-EN 15251 som skal legges til grunn. NS-EN 15251 identifiserer inneklimeparametere for dimensjonering av bygningens tekniske systemer, beregninger av byggets energiytelse og evaluering samt overvåking av

inneklimate i oppførte bygninger. Kriterier gis for termisk miljø, inneluftkvalitet, fuktighet, belysning, akustikk. Standarden angir dessuten kriterier for akseptable avvik og definisjoner for lavt og svært lavt forurensende materialer. Basert på kriterier for PPD-PMV i NS-EN ISO 7730 fastsettes kategorier for termisk innemiljø, inneluftkvalitet og fuktighet for bygninger både med og uten mekanisk kjøling. For disse kan det som alternativ til PPD/PMV-modellen brukes en adaptiv komfortmodell som beskrives i tillegg A.2. Bygg uten mekanisk kjøling er definert som bygninger som benytter vinduer, solavskjerming, bygningens masse, naturlig ventilasjon, nattventilasjon, osv. for å redusere høye innetemperaturer. I tillegg faller også mekanisk ventilasjon med ukondisjonert luft i denne kategorien, men vindusventilasjon skal da være den viktigste måten for styring av termiske forhold. Også ved andre muligheter for personlig kontroll, f.eks. ved små vifter, kan den adaptive komfortmodellen brukes.

Nasjonalt tillegg NA ble fastsatt i juni 2014 og omfatter tilpasninger til nasjonale behov mht. klima, byggeskikk og etablerte preferanser. NS-EN 15251 bruker "kategorier" for inneklimate med kategori II tilsvarende et normalt forventningsnivå som er anbefalt for bruk i nye og rehabiliterte bygg. Nasjonalt tillegg NA bruker "klasser" hvor krav i klasse III er søkt harmonisert med offentlige forskrifter. Klassene avviker delvis fra kategoriene i NS-EN 15251. Klasse II og III har samme kriterier som tilsvarer PPD- og PMV-kriteriene i kategori II med $PPD < 10\%$ og $-0,5 < PMV < +0,5$. Kategori II og klasse III er derfor sammenlignbare. Kravet kan overskrides i maksimalt 50 timer i året.

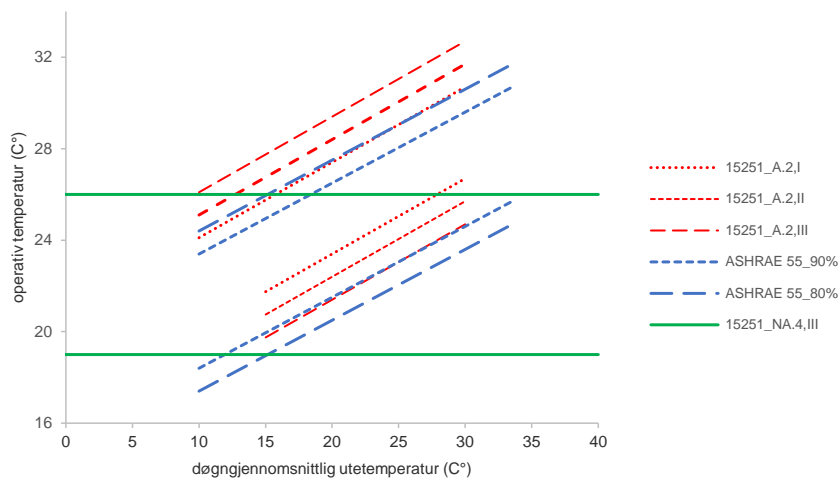
Tiltak for behandling og filtrering av friskluft er ikke påkrevd, men skal vurderes iht. retningslinje T-1520 [36] ut fra luftkvalitetssonen i kommunes luftsonekart. Luftkvalitetssonen klassifiseres i gul eller rød sone ut fra konsentrasjoner av svevestøv og NO_2 . Basert på klassifiseringen og Folkehelseinstituttets anbefalte normer skal det så velges hensiktsmessige tiltak.

Nødvendige luftmengder beregnes som summen av luftmengder pga. forurensninger fra personer og fra bygget (byggematerialer, interiør og klimaanlegg). For personbelastning kreves i klasse II og III en luftmengde på minst 7,0 l/s pr person i driftstiden. Selv om det defineres lavt og svært lavt forurensende bygninger med utgangspunkt i klassifisering av bygningsmaterialer, er minste luftmengdene lik 0,7 l/s pr m^2 gulvareal for alle klasser og bygningsskinner. Utenfor driftstiden skal det enten ventileres med 2 luftvolumer hhv. luftskifte på $2\ h^{-1}$ i en time før bygget tas i bruk eller ventileres kontinuerlig minst 0,2 l/s pr m^2 gulvareal. Mht. CO_2 -nivå som indikator for luftkvalitet og styring viser NS-EN 15251, tabell B.4 bare til forskjellen mellom utendørs og innendørs konsentrasjon. Iht. Tabell NA.9 kan CO_2 -konsentrasjon inne være 460 ppm høyere enn ute for klasse I, 650 ppm for klasse II & III, >650 ppm for klasse IV.

Iht. termisk inneklimate angir tabell NA.4 i Nasjonalt tillegg NA i relevant klasse III for nye og rehabiliterte kontorbygg operative temperaturer mellom 19,0 og 24,0 °C i oppvarmingsperioden med bekleddning på 1,0 clo og mellom 23,0 og 26,0 °C utenfor oppvarmingsperioden med bekleddning på 0,5 clo. For dimensjonering av nødvendig kapasitet til klimasystemer skal imidlertid brukes temperaturområdet mellom 20 og 26 °C. I motsetning til NS-EN vises det også til kriterier for lokalt termisk ubehag dvs. maksimal prosent misfornøyde pga. vertikal temperaturgradient på maks 5 %, pga. varmt eller kaldt gulv på maks 10 %, pga. strålingssymmetri på maks 5 % og en trekkrate på 20 %. Korresponderende verdier finnes i NS-EN ISO 7730.

Modellen for adaptiv komfort i tillegg A.2 tar hensyn til menneskes termiske respons som avhenger av uteklimate og viser akseptable operative temperaturer i forhold til utetemperatur. Det forutsettes stillesittende aktiviteter (1..1,3 met) slik at brukere fritt kan tilpasse bekleddningen og at vinduer enkelt skal kunne åpnes og reguleres. Den adaptive komfortmodellen kan ikke brukes i alle situasjoner og det pekes på at kontorlandskap kun

har begrenset adgang til vinduer og dermed liten kontrollmulighet. Figur 17 viser akseptable temperaturer for de 3 kategoriene i NS-EN 15251 sammenlignet med tillatte temperaturgrenser etter Nasjonalt tillegg NA. For sammenligning vises den tilsvarende adaptive modellen i ASHRAE Standard 55:2013 for 80 og 90 % misfornøyde.



Figur 17 Adaptive modeller i NS-EN 15251 (rød) og ASHRAE Standard 55 (blå) sammenlignet med kriterier i Nasjonalt tillegg NA for mekanisk klimatiserte bygg (grønn)

I motsetning til ASHRAE standard 55, gjelder den adaptive modellen i NS-EN 15251 kun for utetemperaturer ned til 15 °C dvs. kun for kjølingssesongen. Den nedre grensen for den adaptive modellen ligger over den minste tillatte operative temperaturen for bygg med mekanisk ventilasjon på 19 °C for kategori II / klasse III. Den øverste grensen ligger på maks 30 °C utetemperatur der det tillates innetemperaturen opp til ca. 32 °C i kategori II / klasse III

I modellen for adaptiv termisk komfort kan man tillate høyere innetemperaturen enn 25 °C ved å øke lufthastigheten i rommet. Temperaturkorreksjonen er avhengig av lufthastigheten etter tabellen gitt i NS-EN ISO 7730. Det er imidlertid forutsatt at man har mulighet til å øke lufthastigheten på arbeidsplassen manuelt styrt med lokale vifter e.l.

Oppsummering

Krav & avvik

Forutsetningene for inn klima gitt i ulike norske forskrifter, veiledninger og standarder er ikke helt konsistente. Veiledningene til TEK og Arbeidsplassforskriften samt reglene i standard NS-EN 15251 henviser til hverandre, men bruker forskjellige grenseverdier og metoder. Reglene for naturlig klimatisering benytter seg av alternative metoder som den adaptive komfortmodellen, og indikatorer for innluftkvalitet i stedet for luftmengder. Spesielt normene knyttet til disse er ulike i de forskjellige standardene/veiledningene og gjør det vanskelig for prosjekterende og kontrollerende å fastsette et omforent ytelsesnivå.

I byggeteknisk forskrift er det hovedsakelig gitt funksjonskrav, bortsett fra de påkrevde minimums-luftmengder. Det kan vises samsvar ved bruk av preaksepterte ytelser gitt i veiledningstekst til TEK. Hvis det ikke brukes preaksepterte løsninger kan det vises samsvar ved godt dokumentert analyse der det utarbeides et ytelsesnivå og tiltak som tilfredsstiller funksjonskravet. Veiledning 444, på den andre siden, benytter ytelseskrav lignende de preaksepterte løsningene i veiledning til TEK som utgangspunkt for behov for tiltak. Ytelseskravene gir dermed grunnlag for Arbeidstilsynets samtykke. Avvik fra ytelseskrav i 444 eller bruk av alternative eller kompensierende tiltak er følgelig ikke mulig, eller vil være avhengig av Arbeidstilsynets vurdering.

Bruk av naturlig ventilasjon vil ikke gi et konstant termisk innemiljø og faste luftmengder. Dermed kan man vanskelig oppfylle smale grenseverdier gitt i forskrifter og standarder, særlig hvis det regnes med korte tidsperioder. Naturlig ventilasjon er avhengig av et visst spillerom/fleksibilitet, f.eks. døgngjennomsnittlige verdier, som tillater amplituder og overskridelse av nedre og øvre grenseverdier i korte perioder, f.eks. ved vindusåpning i noen minutter. Bare med dynamisk adferd over døgnet kan fordelene med naturlig ventilasjon, f.eks. nattkjøling, utnyttes.

Tilluft & luftføring

TEK sikter på å sikre god tilluftskvalitet med riktig utforming og plassering av bygning og ventilasjonsanlegg og god luftføring i bygget for å forebygge risiko for helse eller installasjoner. Mens forskriften angir behov for filtrering av friskluft avhengig av uteluftkvalitet, forutsetter Veiledning til TEK og Veiledning 444 at det alltid bør filtreres med filter av klasse F7. Veiledning 444 har et eksplisitt krav til balansert ventilasjon med fortrinnsvis lokal tilførsel og avtrekk i rommet. Dermed gis det i utgangspunktet ikke mulighet for f.eks. avtrekksventilasjon med overstrømning til andre rom.

Krav til sikker tilluftskvalitet er i praksis en utfordring for naturlig ventilasjon. Inntaket går direkte til rommet og kan ofte ikke plasseres optimalt ift. best mulig luftkvalitet samt lyd- og støykilder. Filtrering er ikke påkrevd i forskriften, men skal vurderes ut fra uteluftkvalitet mht. risiko for helse og installasjoner. Tas det utgangspunkt i gul sone iht. retningslinje T-1520 bør det i de fleste byområdene kreves filtrering av tilluft. Veiledningene forutsetter i utgangspunktet filtrering med filterklasse på minst EU7. Slik filtrering av tilluft er utfordrende for naturlig ventilasjon fordi drivkreftene er så små at trykktapet grunnet filtrering vil bety vesentlig redusert effektivitet og tilluftsmengder.

Forskriften krever at luftinntakets utforming skal sikre minst mulig forurenset friskluft og at avkast ikke tilbakeføres. Komponenter for naturlig ventilasjon er enten generelle bygningselementer uten særlig tilpasset utforming, f.eks. åpningsbare vinduer, eller spesielle komponenter, f.eks. ventiler. Disse er ofte optimalisert mht. maks kapasitet ift. luftmengde og naturlige drivkrefter, dvs. i mindre grad med tanke på skjerming fra påkjenninger som reduserer god gjennomstrømning. Kravene som er spesifisert i veiledningene er derfor vanskelige/umulige å oppfylle.

Luftføringsveier skal være definert og det skal sikres at luften alltid strømmer fra områder med høyere til områder med lavere luftkvalitet. Luftstrømningen ved naturlig ventilasjon er avhengig av ytterlige drivkrefter som vind og trykk-/temperaturdifferanse mellom inne ute. Disse kan variere mye, noe som ofte fører til uforutsigbare strømningsmønstre i bygningen som er vanskelige å styre. Det krever også høy kompetanse for å dokumentere funksjonskravene til luftføring for naturlig ventilerte bygg. Man kan i prinsippet heller ikke ha naturlig ventilerte rom uten direkte tilgang til fasade hvis man må benytte brukt inneluft fra rommene langs fasaden. Sammen med krav til separat ventilasjon i rom med sterkt forurensende funksjoner som toaletter, kopirom, kjøkken, osv. er det derfor svært vanskelig å få til et rent naturlig ventilert bygg uten spesielle, lite effektive eller nokså ubrukbare planløsninger.

Ventilasjon

Både forskrift, veiledninger og standarden tar utgangspunkt i forurensinger fra personer og bygningmaterialer som grunnlag for dimensjonerende minste luftmengder i driftstid. Byggeteknisk forskrift spesifiserer krav til minste luftmengder formulert som ytelseskrav, og både standard og veiledninger er harmonisert mot det. Ventilasjon utenfor driftstiden er påkrevd i alle tilfeller.

Det finnes imidlertid en forskjell mht. tilsiktet inneluftkvalitet og CO₂-konsentrasjon. Veiledning til TEK §13-1 anbefaler at CO₂-konsentrasjonen innendørs ikke skal overstige

utendørs konsentrasjon med mer enn 500 ppm, som er tatt fra den generelle delen i NS-EN 15251 tilsvarende inneklimategri II i tabell B.4. Med gitt utendørs konsentrasjon på 400-450 ppm er den absolutte konsentrasjonen på 900-950 ppm. Veiledning 444 viser til andre nasjonale anbefalinger der nivået innendørs ikke skal overskride 1000 ppm. Nasjonalt tillegg NA påpeker imidlertid at det ikke er den absolutte konsentrasjonen som er indikator for inneluftkvalitet, men differansen mellom konsentrasjonene inne og ute. Med en konsentrasjon inne på 650 ppm og en uteluftkonsentrasjon på opp til 450 ppm, kan dette gir en absolutt konsentrasjon på 1100 ppm, dvs. 10 % over nivået i Veiledning 444 og ca. 20 % over anbefalinger i Veiledning til TEK. I praksis aksepteres denne periodiske overskridelsen.

Naturlig klimatisering kan ikke levere det påkrevde ytelsesnivået i TEK med konstante luftmengder fordi naturlig ventilasjon baserer seg på dynamiske indikatorer som CO₂ eller temperatur. Imidlertid gir de gjennomsnittlige luftmengdene i forskriften rom for døgnmiddelverdier.

Påkrevde minste luftmengder innenfor og utenfor driftstid er det mest kritiske mht. naturlig klimatisert bygning. Naturlig klimatisering som ikke benytter seg av forvarming av tilluft og/eller varmegjenvinning fra avtrekk er da vanskelig å få til hvis man vil minimere varmetapet. Utenfor driftstid, som utgjør over to tredjedel av året, har man i liten grad internvarme fra personer og utstyr og sol som naturlige varmekilder. Hvordan det kan defineres og dokumenteres en alternativ ytelse til minste luftmengder og hvordan dette kan omsettes i praksis, er ikke gitt. Det er derfor sannsynlig at prosjektering av naturlig ventilasjon kunne gi avvik fra krav og dermed kreve at det søkes om dispensasjon med de usikkerheter dette har for prosjekterende og byggherre.

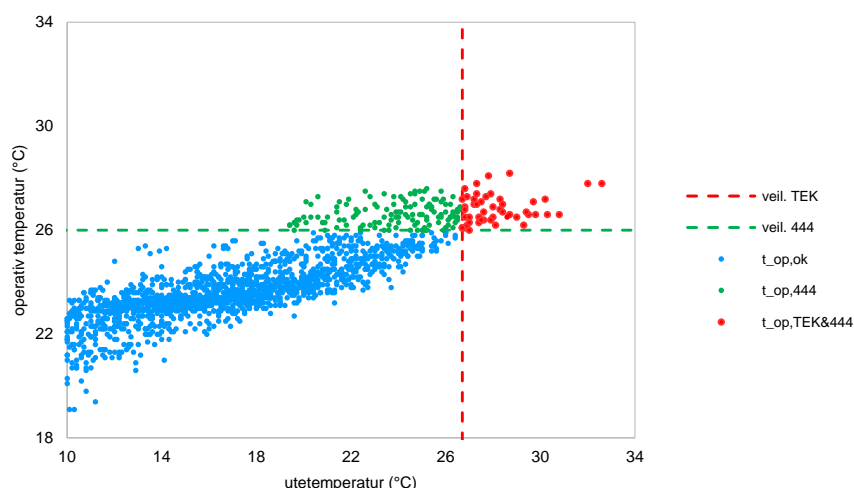
Termisk innemiljø

Funksjonskrav til termisk inneklima i TEK ut fra hensyn til helse og komfort er fortolket i Veiledningen til TEK og Veiledning 444 som tillat operativ temperatur mellom 19 °C og til 22 °C i fyringssesongen for lett arbeid. Nasjonalt tillegg til NS-EN 15251 spesifiserer tydeligere ved å angi desimaler og tillater et større variasjon i fyringssesongen opp til 24,0 °C operativ temperatur.

Den øverste grensen for operativ temperatur er i alle dokumenter satt til 26 °C basert på lett bekledning, men referansen varierer. Veiledning til TEK tillater overtemperaturer i en begrenset periode basert på lokal n₅₀-maksimaltemperatur. Denne maksimumstemperaturen kan imidlertid ligge høyt, t.o.m. over innetemperaturen på 26 °C, som f.eks. for Oslo-klima. Dette betyr at det tillates innetemperaturer over 26 °C også i perioder der utetemperaturen er under 26 °C. På den andre siden har man kravet i Veiledning 444 og NS-EN 15251 som har en konstant grense for innetemperatur uansett utetemperatur og klimasted.

Figur 18 viser en sammenligning av temperaturgrensene for et kontorrom i Oslo. Veiledning til TEK tillater overtemperaturer ved større utetemperaturer enn 26,7 °C, dvs. til høyre for den røde linjen, mens Veiledning 444 (og NS-EN 15251) ikke tillater overtemperaturer over den rosa linjen.

I NS-EN 15251 har man allerede i utgaven fra 2007 innarbeidet en modell for adaptiv termisk komfort, noe naturlig klimatisering ville nyte godt av, men Veiledning til TEK og 444 tar ikke hensyn til dette. Modellen gjelder for bygg uten kjøleanlegg, særlig naturlig klimatiserte bygg og tillater høyere innetemperaturer enn 26 °C, gitt at brukerne har kontroll over bekledning og lufteåpninger og at dette varierer dynamisk i forhold til utetemperatur. En vesentlig forutsetning for den adaptive komfortmodellen er aktive brukere som får mulighet til å har mulighet til å overstyre den automatiske inneklimatekningen. På den annen side legger ikke forskriftene til rette for aktive brukerstyring, og dermed fremme naturlig ventilasjon, da kravet til åpningsbare vinduer mht. termisk inneklima ikke er absolutt. Krav til vinduer er hovedsakelig knyttet til utsyn og ikke til luftemulighet.



Figur 18 Tillatt overtemperaturer iht. Veiledning til TEK og Veiledning 444 for et kontorrom i Oslo klima

Termisk komfort er formulert som funksjonskrav, og er ikke spesifisert videre i TEK. Veiledninger og NS-EN 15251 bruker samme kriterier for lokal komfort basert på NS-EN ISO 7730. Mens Veiledning til TEK fokuserer på begrensning av lokale temperaturforskjeller og temperaturvariasjon over tid, fremhever Veiledning 444 særlig at lufthastigheten ikke skal overstige 0,15 m/s på arbeidsplasser for å unngå trekk.

Men selv om det er funnet på en løsningen å sikre termisk komfort for et naturlig klimatiseringskonsept er dokumentasjon av termisk komfort ift. TEK en utfordring. På den ene siden kreves avanserte beregningsverktøy og god kompetanse på bruk av disse. På den andre siden har undersøkelser [39] vist at komfortopplevelsen i bygg med naturlig klimatisering er annerledes enn i bygg med mekanisk ventilasjon og at PMV/PPD-modellen etter NS-EN ISO 7730 bare kan anvendes i begrenset omfang i naturlig ventilerte bygg. NS-EN 15251, som ville være grunnlag for dokumentasjon av termisk komfort i den alternative analysemetoden, baserer imidlertid også på PMV/PPD-modellen og har ikke alternative spesifikasjoner for lokal termisk komfort for naturlig ventilerte bygg. Modellen for adaptiv komfort i NS-EN 15251 omfatter kun operativ temperatur.

Konklusjoner

Byggteknisk forskrift TEK fastsetter ikke hva slags ventilasjonsprinsipp eller konsept som skal brukes. Forskriften beskriver hovedsakelig krav til funksjoner, noe som gir rom for forskjellige løsninger så lenge funksjonen kan imøtekommes. For prosjekter med uvanlige konsepter kan den alternative analysemetoden benyttes. Denne krever mye kompetanse og bruk av avanserte verktøy ved prosjektering, og utfallet er usikkert fordi man trolig må søke om dispensasjon fra forskriften på noen punkter. Det mest kritiske er knyttet til tilførsel av friskluft, minste luftmengder og komfortproblemer.

Veiledningene inneholder formuleringer av ytelsesnivåer basert på forskriftens funksjonskrav og viser preaksepterte løsninger som kan benyttes for å tilfredsstille kravene. Ytelsesnivåene er utformet med bakgrunn i balanserte ventilasjonsanlegg og anbefalingene er følgelig basert på krav til installasjoner for et slikt system. Foreslåtte ytelser i veiledningene er derfor vanskelig å tilfredsstille med prosjekter som benytter seg av alternative konsepter.

Ytelseskrav og preaksepterte løsninger i Veiledningen til TEK kan ses bort ifra hvis den alternative analysemetoden brukes. Veiledning 444, på den andre siden, er mer utfordrende

for alternative konsepter siden samtykke fra Arbeidstilsynet er avhengig av oppfyllelse av kriteriene i Veiledning 444. Arbeidstilsynet har ikke hjemmel for en alternativ løsning og det er ikke gitt at Arbeidstilsynet vil godta dokumentasjon som viser alternative tilsvarende ytelser. Det er derfor viktig å ta kontakt med Arbeidstilsynet i god tid for å diskutere det aktuelle prosjektet i hvert tilfelle. Dette innebærer mye risiko for byggherre og prosjekterende, noe som kan være en hemsko for nye og innovative løsninger.

Oppsummering

Et alternativ til "aktive" avanserte tekniske systemer kan være naturlig klimatisering der det brukes "passive" løsninger som utnytter fysiske prinsipper og naturlige drivkrefter for å klimatisere bygningen. Et fullt naturlig klimatisert bygg er her kalt et "nullkonsept".

Konseptet er implementert i det østerrikske kontorbygget "2226" I denne rapporten har vi analysert konseptet gjennom beskrivelse av utforming og inneklimasimuleringer både i østerriksk beliggenhet og i norsk klima.

Analysen viser at konseptet er basert på til dels veldig omfattende kunnskap om bygningsfysiske og termodynamiske sammenhenger. Bygget har spesielle rammebetingelser mht. bruk, klima og forskriftskrav som muliggjør konseptet i Østerrike, men er ikke direkte overførbart til norske forhold. Inneklimasimuleringene viser at innetemperaturen om vinteren blir uakseptabel lav for Oslo-klima. Det er også betydelig fare for trekk og lokalt termisk ubehag. "2226" er først og fremst et konseptuelt bygg som er ment til å utfordre byggebransjen, også i den kalkulerede risikoen for at bygget ikke vil tilfredsstille inneklimatestandarder.

Rammebetingelser for å oppnå tilfredsstillende inneklimate i norske bygg er gitt i relevante forskrifter samt tilhørende veileder, og overordnede standarder. Byggeteknisk forskrift TEK tilbyr mulighet for å benytte seg av en alternativ analysemetode for beregning av luftkvalitet, men dette krever høy kompetanse ved prosjektering. Samtidig har vi Veiledning 444 som krever oppfyllelse av faste kriterier som forutsetter mekanisk ventilasjon. Arbeidstilsynet har ikke hjemmel for en alternativ metode som TEK og det er ikke gitt at alternative inneklimatekrav, f.eks. fra andre land, vil godkjennes i Norge.

Referanser

- [1] Baumschlagger Eberle. (2015). 2226. Available: <http://www.baumschlagger-eberle.com/projekte/projektetails/project/buerogebaeude.html>
- [2] J. Schoof. (2014, 02 03). Haus ohne Heizung. *DETAIL*. Available: <http://www.detail.de/artikel/haus-ohne-heizung-buerogebaeude-von-baumschlagger-eberle-in-lustenau-11703/>
- [3] K. T. Thorsen, *Personal Communication*, 21.04.2015
- [4] F. Aicher, "Ich will selbst über das Verhältnis zu meiner Umgebung bestimmen," *Bauwelt*, pp. 5-8, 2012.
- [5] Wikipedia Die freie Enzyklopädie. (2015). *Bodenseeklima*. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bodenseeklima>
- [6] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. (2002). *Klimadata for Bregenz 1971-2000*. Available: http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm
- [7] Wienerberger. (2014, 01 03). Objektrapport. Bürogebäude 2226, Lustenau. Available: <http://wienerberger.at/bauen-mit-ziegel/objektreport-b%C3%BCrogeb%C3%A4ude-lustenau>
- [8] CIBSE, *Natural ventilation in non-domestic buildings. CIBSE AM10*. London: Chartered Institution of Building Service Engineers (CIBSE), 2005.
- [9] BAuA, *Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) A3.6 Lüftung*. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2013.
- [10] L. Junghans, *Personal Communication*, 26.04.2015
- [11] D. Eberle and G. Walden, "Ein selbstbestimmtes Haus," *DETAIL*, vol. 53, pp. 600-604, 2013.
- [12] K. Fitzner and U. Finke, *Lüftungsregeln für freie Lüftung*. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2012.
- [13] T. H. Dokka and N. Lassen, *Notat befarings: (ikke publisert)*, 2014.
- [14] Malmquist, "2226, Lustenau, Østerrike," *Arkitektur N nr. 1 2015*, 2015.
- [15] J. S. W. Richter, R. Gritzki, M. Rösler, *Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht. Abschlussbericht (Kurzbericht)*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003.
- [16] K. Gertis and G. Hauser, *Energieeinsparung durch Stosslüftung?* vol. 5: (ikke publisert), 1979.
- [17] S. Warentest. (2010, 5 12). Energie sparen: Jetzt handeln, Kosten senken. Available: <https://www.test.de/Energie-sparen-Jetzt-handeln-Kosten-senken-1394601-1396813/>
- [18] ESRU, "ESP-r," ed: University of Strathclyde (ESRU), 2015.
- [19] M. Mysen, P. G. Schild, V. Hellstrand, and K. Thunshelle, "Evaluation of simplified ventilation system with direct air supply through the facade in a school in a cold climate," *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 157-166, 2// 2005.
- [20] M. Justo Alonso, H. M. Mathisen, and J. Halvarsson, "Case study of window and ventilation refurbishment – Simulation on indoor environment quality," in *Proceedings of the 13th International Conference Indoor Air 2014*, Hong Kong, 2014.
- [21] S. Byggforsk, "TEK-sjekk Energi," ed: SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, 2014.
- [22] LBNL, "THERM 7.3.2," ed: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), 2014.
- [23] J. van der Maas, Ed., *Air Flow Through Large Openings in Buildings*. Lausanne: EPFL, 1992, p.^pp. Pages.
- [24] Arbeidstilsynet, *Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen*. Trondheim: Direktoratet for arbeidstilsynet (Arbeidstilsynet), 2013.

- [25] DiBK, *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. Oslo: Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), 2015.
- [26] Standard Norge, "NS-EN 15251:2007+NA:2014," Lysaker: Standard Norge, 2014.
- [27] BMLFUW, *Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), 2011.
- [28] K. Arge and K. Landstad, *Prosjektrapport 336. Generalitet, fleksibilitet og elastisitet i bygninger*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt, 2002.
- [29] Holzabsatzfonds, *Holzkonstruktionen in Mischbauweise*. Bonn: Holzabsatzfonds, 2006.
- [30] Snøhetta, "Powerhouse Kjørbo Sluttrapport," unpublished.
- [31] P. Blom, *Barriers to Natural Ventilation Design of Office Buildings. National Report Norway*. Oslo: Norwegian Building Research Institute, 1998.
- [32] A. Delsante and T. A. Vik, Eds., *Hybrid Ventilation. State-Of-the-Art review*. IEA-ECBCS Annex 35 HybVent, 2000, p.^pp. Pages.
- [33] *Byggeteknisk forskrift (TEK)*, Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK), 2016.
- [34] *Arbeidsplassforskriften*, Direktoratet for arbeidstilsynet (Arbeidstilsynet), 2015.
- [35] FHI, *Anbefalte faglige normer for inneklima – Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer*. Oslo: Nasjonalt folkehelseinstitutt (FHI), 2015.
- [36] K.-o. miljøverndepartement, *Retningslinje for behandling av luftkvalitet i arealplanlegging*. Oslo: Klima- og miljøverndepartement, 2012.
- [37] M. Mysen and P. Schild, "Behovsstyrt ventilasjon, DCV – forutsetninger og utforming : Veileder for et energioptimalt og velfungerende anlegg," ed, 2014.
- [38] *Forskrift om tiltaks- og grenseverdier*, Direktoratet for arbeidstilsynet (Arbeidstilsynet), 2016.
- [39] G. S. Brager and R. de Dear, "A Standard for Natural Ventilation," *ASHRAE Journal*, vol. 42, pp. 21-28, 2000.

Naturlig klimatiserte kontorbygg

ANALYSE AV ET "NULLKONSEPT" I NORSK KLIMA

Et alternativ til "aktive" avanserte tekniske systemer kan være naturlig klimatisering. Det innebærer å utnytte fysiske prinsipper og naturlige drivkrefter for å klimatisere bygningen.

Et fullt naturlig klimatisert bygg er her kalt et nullkonsept. Konseptet er implementert i det østerrikske kontorbygget 2226. I denne rapporten har vi analysert konseptet gjennom å beskrive utforming og utføre inneklimasimuleringer både for østerriksk beliggenhet og norsk klima.