



SINTEF Bygg og miljø
Arkitektur og byggteknikk

Postadresse: 7465 Trondheim
Besøksadresse: Alfred Getz vei 3
Telefon: 73 59 26 20
Telefaks: 73 59 82 85

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

Passiv klimatisering

Delrapport: Vurdering av termisk komfort, luftkvalitet, dagslys og energibruk på kontorbygget "Pynten".

FORFATTER(E)

Tor Helge Dokka, Marit Thyholt

OPPDRAAGSGIVER(E)

Avantor ASA

RAPPORTNR.	GRADERING	OPPDRAAGSGIVERS REF.	
STF 22 A 02513	Åpen	Geir Vaagan	
GRADER. DENNE SIDE	ISBN	PROSJEKTNR.	ANTALL SIDER OG BILAG
Åpen	ISBN 82-14-02493-5	22403810	21
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTLÉDER (NAVN, SIGN.)	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.)
I:/pro/22403800_PassKlimTHD/Avantor		Tor Helge Dokka	Inger Andresen
ARKIVKODE	DATO	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.)	
	2002-06-17	Dag Kittang, Forskningsjef	

SAMMENDRAG

Passiv klimatisering er et 4-årig kompetanseprosjekt med brukermedvirkning (kmb) finansiert av NFR, Statsbygg, Selmer-Skanska ASA, Avantor ASA og TAC AS. Prosjektet går ut på å utnytte passive teknikker som naturlig ventilasjon, naturlig stratifisering, dagslys utnyttelse, passiv solvarme og passiv kjøling, med det mål å oppnå et godt inneklima med et minimum av energi. Kontorbygget "Pynten" som skal bygges av Avantor i Nydalen, Oslo, er et pilotbygg i dette prosjektet. Bygget er planlagt med bygningsintegrert ventilasjon som utnytter naturlige drivkrefter, fortrenningsventilasjon, utnyttelse av passiv solvarme i sentralt atrium, passiv kjøling (ingen kjølemaskin) og god dagslys design. Det skal også brukes betongkulvert til forvarming, forkjøling og sedimenteringsfiltrering av ventilasjonsluften. I denne rapporten er det gjort beregninger og simuleringer av termisk komfort, energi- og effektbehov, dagslys og luftkvalitet i "Pynten". Simuleringene viser at termisk komfort blir fullt ut tilfredsstillende i bygget, selv uten mekanisk kjøling. Dette forutsetter en justering av vindusareal i NV-orienterte møterom i 2. og 3. etasje. Simulert luftkvalitet i oppholdssonen i kritiske rom viser at luftkvaliteten med god margin tilfredsstiller kravene satt i byggeforskriftene. Simulert dagslys-nivå i kontorrom i 2. og 3. etasje viser at de ligger godt over kravet i forskriftene, og at det i store deler av året vil være tilstrekkelig belysning med kun dagslys. Simulert total energibruk for hele bygget er på 84 kWh/m², hvorav romoppvarming utgjør 26 kWh/m². Effektbehov til romoppvarming er beregnet til 25 W/m², dvs. ca. 70 kW for hele bygget. Tilsvarende effektbehov (70 kW) har også varmebatteriet i ventilasjonsanlegget. Simuleringer av betongkulverten viser at den har en betydelig kjøleeffekt i kjølesesongen, men at oppvarmingseffekten er mer beskjeden.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Energi	Energy
GRUPPE 2	Inneklima	Indoor climate
EGENVALGTE	Dagslys	Daylight
	Hybrid ventilasjon	Hybrid ventilation
	Passiv kjøling	Passive cooling

INNHALDSFORTEGNELSE

1.0 Bakgrunn	3
2.0 Beregningsforutsetninger	3
2.1 Belysning	4
2.2 Utstyr	4
2.3 Bygningskropp	4
2.4 Vindus- og solskjermingsløsning	6
2.5 Ventilasjons og kjøling	6
2.6 Oppvarming	8
3.0 Simulering av termiske forhold	8
3.1 Temperaturforløp ved sommerforhold	8
3.2 Vurdering av kaldras og strålingsassymetri	13
3.3 Vurdering av temperaturgradienter	14
4.0 Oppvarmingsbehov	15
4.1 Romoppvarming	15
4.2 Varmebatteri	16
5.0 Simulering av luftkvalitet	16
5.1 Cellekontor	16
5.2 Møterom	13
6.0 Simulering av energibruk for hele bygget	17
7.0 Dagslyssimulering	18
8.0 Simulering av kulvert	18
8.1 Kjøleeffekt	19
8.2 Oppvarmingseffekt	20
9.0 Referanser	21

1.0 Bakgrunn

Målsetningen for kontorbygget ”Pynten” har vært å få til et bygg med lavt energiforbruk, med liten miljøbelastning og godt inneklima. For å oppnå denne målsetningen har det blitt satset på: et bygningsintegriert hybrid ventilasjonssystem med kulvertløsning, solide og innemiljøvennlige materialer, passiv kjøling (ingen kjølemaskin), utnyttelse av dagslys, passiv solvarme i atrium samt optimal behovsstyring av ventilasjon, belysning og oppvarming. Det har også blitt satset på løsninger med god brukerstyring, høy robusthet, lite vedlikeholdsbehov og lang levetid.

I dette notatet er det presentert resultater fra simuleringer av: termisk komfort, luftkvalitet, effektbehov, energibruk og dagslys.

2.0 Beregningsforutsetninger

Tabell 1 viser de viktigste forutsetninger og dimensjoneringskriterier for de etterfølgende beregninger. Mange av disse kan og bør diskuteres videre i detaljprosjekterings-fasen, men anses å være rimelig realistiske. Andre beregningsforutsetninger enn de i tabell 1 er beskrevet i de etterfølgende delkapitlene.

Tabell 1 Dimensjoneringskriterier og beregningsforutsetninger.

	Kontorcelle	Teamkontor	Kontorlandskap	Møterom U1	Møterom 3 etg.
Internlast					
Personer	10 m ² /pers	10 m ² /pers	13 m ² /pers	2.8 m ² /pers	1.75 m ² /pers
Belysning	7 W/m ²	7 W/m ²	7 W/m ²	7 W/m ²	7 W/m ²
Utstyr	8 W/m ²	10 W/m ²	7 W/m ²	0 W/m ²	0 W/m ²
Arbeidstid/driftstid	08-16	08-16	08-16	08.30-12, 13-16	08.30-12, 13-16
Bygningskropp					
U-verdi vinduer ⁵	1.4 W/m ² K	1.4 W/m ² K	1.4 W/m ² K	1.4 W/m ² K	1.4 W/m ² K
U-verdi yttervegger ⁶	0.22 W/m ² K	0.22 W/m ² K	0.22 W/m ² K	0.22 W/m ² K	0.22 W/m ² K
U-verdi tak og gulv	0.15 W/m ² K	0.15 W/m ² K	0.15 W/m ² K	0.15 W/m ² K	0.15 W/m ² K
Solfaktor glass ⁷	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Lystransmisjon ⁷	> 50 %	> 50 %	> 50 %	> 50 %	> 50 %
Ventilasjon					
Nominell luftmengde ⁸	4 m ³ /hm ²	5.5 m ³ /hm ²	4 m ³ /hm ²	13 m ³ /hm ²	14 m ³ /hm ²
Min. tilluftstemp.	17 °C	17 °C	17 °C	17 °C	17 °C
Temperaturer					
Maks. operativ temp. ¹	26 °C	26 °C	26 °C	26 °C	26 °C
Min. operativ temp. ²	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C
Dim.sommertemp. ³	20°C ± 6.7 K	20°C ± 6.7 K	20°C ± 6.7 K	20°C ± 6.7 K	20°C ± 6.7 K
Dim. vintertemp. ⁴	-20°C ± 4.8 K	-20°C ± 4.8 K	-20°C ± 4.8 K	-20°C ± 4.8 K	-20°C ± 4.8 K

¹ Maksimal operativ temperatur i oppholdssonen(0-1.3 meter over gulv), i normal arbeidstid. Skal ikke overskrides mer enn maksimalt 25 timer i et normalår med de forutsatte belastninger.

² Minimum operativ temperatur i oppholdssonen (0-1.3 meter over gulv), i normal arbeidstid.

³ Denne temperaturen (maks. 26.7 °C og min. 13.3 °C), forutsettes å være i en 5 døgns varmebølge i midten av Juli, som anses som dimensjonerende sommerforhold.

⁴ Denne temperaturen (maks. -15.2 °C og min. -24.8 °C), er minimum 3 døgns middel for en kald periode i Januar.

⁵ Gjelder for hele vinduskonstruksjonen, inkl. karm og ramme.

⁶ Gjelder for hele ytterveggkonstruksjonen, inkl. eventuelle kuldebroer.

⁷ Gjelder for vinduer med solrik orientering (Øst, Syd og Vest).

⁸ Gjelder ved normale driftsforhold. Vil være høyere ved varme sommerforhold og noe lavere i kalde perioder (under f.eks. - 5 °C).

2.1 Belysning

Det er forutsatt brukt et belysningssystem som er styrt etter tilstedeværelse og dagslys. Det er også antatt en allmennbelysning på kun 300 lux, og at dette kan suppleres med lokal skrivebordsbelysning som brukes ved behov. Med en arbeidstid fra 08.00 til 16.00, er det antatt at gjennomsnittlig varmeavgivelse og energiforbruk for kunstlys på 7 W/m². Dette gjelder både i hvert enkelt kontor (kontor-celle/teamkontor alternativet), men også for hver etasje (kontorlandskap alternativet).

2.2 Utstyr

Varmeavgivelse og energiforbruk til utstyr er alltid et stort usikkerhetsmoment der man ikke har full oversikt over type leietakere. I kontorbygg er det spesielt datautstyr som står for det meste av varmeavgivelsen. Det er imidlertid klare tendenser til at varmeavgivelse/energiforbruk til datautstyr går ned: overgang til LCD-flatskjermer, overgang til bærbar PC også som arbeidsmaskiner på kontorarbeidsplasser og mindre og mer energieffektive servere og arbeidsstasjoner. F.eks. avgir en bærbar PC ca. 1/5 av varmen i forhold til en tilsvarende vanlig stasjonær PC med vanlig skjerm.

Det er forutsatt at printere og kopimaskiner settes i egne rom som settes under undertrykk (kun avtrekk) slik at ikke varme og forurensning (ozon, papirstøv, VOC'er) overføres til andre oppholdsrom. Det er i beregningene antatt at varmeavgivelsen/energiforbruket til utstyr utgjør 8 W/m², og er i drift fra 08.00 til 16.00. Det vil bli utført følsomhetsanalyser for å se på hvordan de termiske forholdene forandrer seg med ulike varmelaster fra teknisk utstyr (5-20 W/m²).

Tabell 2 Effekt, varmeavgivelse og driftstid for belysning og utstyr i kontorer

	Effekt/varmeavgivelse	Styring	Driftstid
Belysning	7 W/m ²	IR/Lyssensor	08-16, 5 d/uke
Utstyr	8 W/m ²	IR ¹	08-16, 5 d/uke

¹ Det er også mulig å styre datautstyr etter tilstedeværelsesensor, eller alternativt etter et adgangskontrollsystem.

2.3 Bygningskropp

Det er ingen falsk himling slik at den termiske massen¹ til himlingen kan utnyttes fullt ut. Videre er det antatt brukt parkett på gulvet, noe som reduserer den termiske massen til betongkonstruksjonen noe. Det skal muligens brukes tynt gulvbelegg istedenfor parkett, noe som vil gi mere termisk masse. Skillevegger (i kontorcelle alternativet) og yttervegger er antatt utført som lette vegger, dvs. bindingsverk med gips, og har derfor liten effekt på den termiske massen. Ytterveggen er beregnet å ha 20 cm isolasjon ($U = 0.20-0.22$ W/m²K). Yttertak og gulv mot kjeller er forutsatt å ha konstruksjoner som holder kravet til U-verdi i forskriftene (0.15 W/m²K). "Svalgangene" rundt bygget er tenkt bygget i lett materiale (metall/tre), og kan dermed dekobles termisk fra betongdekkene og ytterveggen. Det anbefales at ytterveggen utføres slik at det er et felt med minimum 70 mm isolasjon ($\lambda = 0.036$ W/m²K) som bryter kuldebroen i betongdekkene og topp- og bunnsvill, se figur 1a. Dette kan f.eks. gjøres ved å bruke en indre primærvegg med 123 mm bindingsverk (125 mm isolasjon), og en sekundærvegg/utforing med 68 mm bindingsverk (70 mm isolasjon). Eventuelt kan det brukes 70 mm trykkfast isolasjon utvendig. Denne løsningen vil gi en meget liten kuldebrovirkning, anslagsvis en kuldebroverdi på 0.03 – 0.05 W/mK. Den konvensjonelle løsningen med 200 mm bindingsverk, med gjennomgående sviller og ca. 50 mm isolasjon utenpå enden av betongdekket (se figur 1.b), vil gi en

¹ Med den termiske massen menes det innvendige konstruksjoner som kan oppta varme i perioder med varmeoverskudd i rommet (dag) og som avgir varme igjen i perioder med varmeunderskudd (natt). Materialer med stor termisk masse er tunge materialer som tegl og betong. Stor termisk masse reduserer bl.a. kjølebehovet betydelig.

Technical cross-section drawing of a wall assembly. The wall consists of a central concrete slab (Betong) 200 mm thick, flanked by insulation (Varmeisolasjon kl. 36) and a timber frame (Tresvill). The timber frame includes a 70 mm thick rigid insulation layer (Kuldebrobryter) and a 68 mm binding grid (bindingsverk) with 70 mm insulation (isolasjon kl. 36). Dimensions are indicated: 200 mm for the concrete slab and 70 mm for the rigid insulation layer.

Brutto og netto takhøyde for de tre øverste etasjene er satt til hhv. 3.1 m og 2.8 meter. I U1 er brutto- og netto takhøyde satt til hhv. 3.3 m og 3.0 meter.

Bygningsdel	U-verdi
Yttervegg ¹	0.22 W/m ² K
Yttertak	0.15 W/m ² K
Gulv ²	0.15 W/m ² K
Vinduer ³	1.4 W/m ² K

³ U-verdi for hele vinduskonstruksjon inkludert karm/ramme.

2.4 Vindus- og solavskjermingsløsning

Med en modulbredde på ca. 2.4 meter (tilpasset en kontorcelle) er det i beregningen gått utfra en vindusløsning med høyde på 1.7 meter og bredde på 2.0 meter mot syd pluss 0.6 meter mot øst (gjelder den sagtannformede delen av 2. og 3. etasje). Av et innvendig fasadeareal på 8.4 m² utgjør da vindusarealet ca. 53 % (4.42 m²). Det er beregnet at glassprosenten av det totale vindusarealet er ca. 77 % (resterende 23 % er karm/ramme). For å ikke få for stor varmebelastning i kontorer mot øst, syd og vest foreslås det brukt solavskjermende glass sammen med innvendig solavskjerming. Det foreslås brukt Pilkington Suncool HP Brilliant 50, eller en annen rutetype med tilsvarende ytelse. Sammen med innvendige manuelle persiennner med brede lameller og avskjerming fra "svalgangen" vil dette gi tilfredsstillende solavskjerming og blendingskontroll. Den øvre delen av persiennen kan ha lameller av reflekterende materiale, for å reflektere dagslys opp i himlingen (se bilde nedenfor). I kontorer mot nord foreslås det brukt vanlig 2 lags energiglass (lav emisjonsbelegg) med argonfylling. Også mot nord bør det være innvendige persiennner av samme type.



Figur 2 Persiennesystem med todelt funksjon, der den øvre delen reflekterer dagslyset opp i himlingen.

Tabell 4 Data for foreslåtte vindusruter

Vinduer	Glassfaktor	Solfaktor	Lystransmisjon	U-verdi ¹
Øst, syd og vest ²	0.77	0.26	51 %	1.0 W/m ² K
Nord ³	0.77	0.59	75 %	1.1 W/m ² K

¹ Midtrute U-verdi

² F.eks. Pilkington Suncool HP Brilliant 50, 4 Hbm-15-4 (eller tilsvarende rute).

³ F.eks. Pilkington Optitherm S, 4-15-S4 (eller tilsvarende rute).

2.5 Ventilasjon og kjøling

Ventilasjonssystemet er et bygningsintegret lavtrykk tapsanlegg med streng behovsstyring, og forvarming/forkjøling i kulvert. Det brukes fortrengningsventilasjon for å få til høy ventilasjonseffektivitet i lokalene. Alt kjølebehov skal dekkes av ventilasjonsluft som er nedkjølt av kulverten i sommerhalvåret. Det vil si målet er å unngå bruk av kjølemaskin².

² Det er mulig man må ha lokal kjøling i form av fancoils i den nylig planlagte datasalen i U1.

Luftmengder

Ventilasjonsluftmengdene er estimert utfra REN veiledning: 7 l/sperson + 0.7 l/sm² (lavemiterende materialer). For kontorer er det meget konservativt antatt en ventilasjonseffektivitet på 1.25. For møterom er det antatt en ventilasjonseffektivitet på 1.4. For en kontorcelle på 10 m² for en person gir dette en nominell luftmengde på 40 m³/h, eller 4 m³/hm².

Forskning viser at opplevd luftkvalitet er avhengig av temperaturen i et lokale. Den viser at lufta føles mer frisk og behagelig ved lave temperaturer i forhold til ved høye temperaturer. Erfaringer fra naturlig- og hybridventilerte skoler underbygger også dette, dvs. at man kan strupe ventilasjonsluftmengdene i kalde perioder uten at dette går utover opplevd luftkvalitet. Det foreslås derfor en viss årsstyring av luftmengdene, med ca. 5 m³/hm² i sommermånedene, 4 m³/hm² høst og vår, og 3 m³/hm² i vintermånedene (gjelder kontorcelle på 10 m²). I tillegg kjøres det forserte luftmengder ved behov for nattkjøling.

Behovsstyring

Det er planlagt en omfattende behovsstyring av luftmengdene for å bruke behandlet luft der det er behov (les: der det er personer). Dette er tenkt gjort ved styring etter temperatur, tilstedeværelse (Infrarøde sensorer, IR) og/eller CO₂. Tidsstyring er også i enkelte tilfeller aktuelt. Tabell 2 viser aktuell styringsstrategi i ulike rom, med foreslåtte luftmengder.

Tabell 5 *Persontetthet, behovsstyring og luftmengder for ulike rom.*

Type rom:	Kontorcelle	Teamkontor	Kontorlandskap	Møterom
Persontetthet	10 m ² /pers	8 m ² /pers	13 m ² /pers	1.75 m ² /pers
Behovsstyring ¹	IR/Temperatur	IR/Temperatur	CO ₂ /Temperatur	IR/Temp
Luftmengde vår/høst	4.0 m ³ /hm ²	4.5 m ³ /hm ²	3.5 m ³ /hm ²	13 m ³ /hm ²
Luftmengde vinter	4.0 m ³ /hm ²	4.5 m ³ /hm ²	3.5 m ³ /hm ²	13 m ³ /hm ²
Luftmengde sommer	5.0 m ³ /hm ²	5.5 m ³ /hm ²	4.5 m ³ /hm ²	13 m ³ /hm ²
Luftmengde ved nattkjøling	10 m ³ /hm ²	10 m ³ /hm ²	10 m ³ /hm ²	20 m ³ /hm ²
Luftmengde uten personer tilstede	1 m ³ /hm ²	1 m ³ /hm ²	1 m ³ /hm ²	1 m ³ /hm ²

¹ IR står for Infrarød sensor som brukes til tilstedeværelsesstyring.

Tilstedeværelsessensorer sammen med temperaturfølere vil styre VAV³-spjeld i tilluftsåpningene, mens sentral måling av CO₂ og temperatur i overstrømningsåpningen til atrium for hver etasje vil frekvensstyre avtrekks- og tilluftsvifter.

Tilluftstemperatur

Om vinteren, høst og vår, når det er oppvarmingsbehov, vil varme-/gjenvinnerbatteri bli styrt slik at tilluftstemperaturen er i området 17 – 19 °C. Dette er en optimal tilluftstemperatur for å få den ønskede fortrengningseffekten i rommene. I sommermånedene (ca. mai-september) når det ikke er romoppvarmingsbehov kan tilleggsvarmen fra kjel kuttes ut, og kun varmegjenvinner benyttes. Ved utetemperaturer over 13-14 °C, kan også varme fra gjenvinner kuttes ut, og tilluftstemperaturen kan flyte fritt. Tilluftstemperaturen vil pga. av kulverten stabilisere seg mellom 16 – 19 grader. Det er også gunstig for nattkjølingseffekten at man lar tilluftstemperaturen flyte i denne perioden.

Nattkjøling

I varme perioder vil det mest sannsynlig ikke være tilstrekkelig med forkjølingen av ventilasjonsluft i kulverten. Ved å kjøle ned den termiske massen (hovedsakelig betonghimlingen) med kald natteluft kan man redusere dagtemperaturen vesentlig. Målet med nattkjølingen er å

³ VAV står for variable air volume

senke temperaturen i den termiske massen maksimalt uten at dette går nevneverdig utover den termiske komforten i morgentimene. Den nedkjølte himlingen vil da fungere som et kjøletak utover dagen.

Det er også viktig at nattkjølingsstrategien er samkjørt med styringen av oppvarmingen, slik at ikke oppvarmingssystem og nattkjøling kjører mot hverandre (se også nedenfor). En mulig strategi kan være at nattkjøling startes hvis et av disse kriteriene er oppfylt:

- Maksimal temperaturen i arbeidstiden (08-17) har overskredet 25 °C
- Midlere temperatur i arbeidstiden har overskredet 24 °C

Driftstiden for nattkjøling kan f.eks. være fra 21.00 til 06.30. Hvis temperaturen synker under 17 °C i løpet av natten avsluttes nattkjølingen. Nattkjøling må være sentralt styrt og temperaturen det styres etter kan f.eks. være middelet av avtrekkstemperaturen fra de tre øverste etasjene, målt i overstrømningsåpningene ut i atriumet.

2.6 Oppvarming

Oppvarming vil skje med termostatstyrte elektriske panelovner plassert under vinduer. Det skal brukes en type som kan kobles til bussystemet (styringssystemet) slik at oppvarmingen integreres med ventilasjon, kjøling og belysning. Oppvarmingen er da tenkt å styres etter termostat, tilstedeværelse og/eller etter tidsur. Forslag til styring av oppvarmingen er gitt i tabellen nedenfor. Installert oppvarmingseffekt vil være ca. 70-75 kW eller 25 W/m² (snitt for hele bygget). Estimert oppvarmingseffekt for ulike rom er vist i kapittel 4.0.

Tabell 6 Forslag til styring av oppvarming

Modus	Styring	Forslag til settpunkt
Arbeidstid, personer tilstede	Termostat/IR	21 °C
Arbeidstid, personer ikke tilstede	Termostat/IR	19 °C
Utenfor arbeidstid	Termostat/Tidsstyring	17-18 °C
Nattkjølingsmodus	Termostat/Tidsstyring	10 °C

3.0 Simulering av termiske forhold

For å vurdere om de termiske forholdene blir tilfredsstillende er det gjort følgende simuleringer/beregninger:

- Temperaturforløp ved dimensjonerende sommerforhold: klar himmel, 20°C ± 6.7 K (T_{\max} = 26.7 °C), 5 dager i strekk.
- Kaldras og temperaturassymtri pga. av kalde vindusflater ved dimensjonerende vinterforhold
- Temperaturgradienter i rommene pga. av fortrengningsventilasjon.

Det er foreløpig sett på fem ulike romtyper: cellekontor, teamkontor (ca. 40 m²), kontorlandskap (hele 3 etg., ca. 520 m²), lite møterom i 2. og 3 etasje og stort møterom i U1.

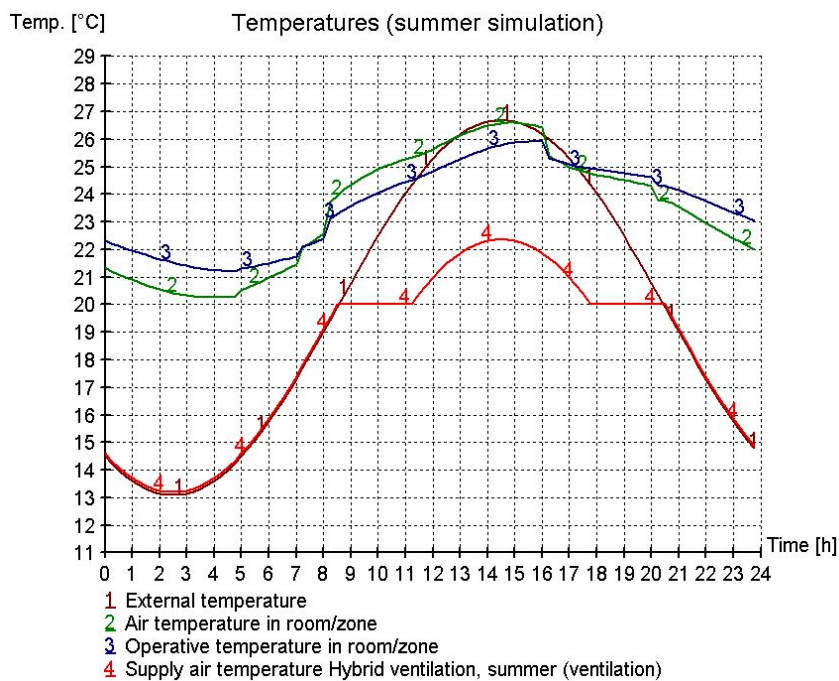
3.1 Temperaturforløp ved sommerforhold

Hvis ikke annet er angitt er simuleringene og beregningene gjort med programmet SCIAQ Pro \1\.

Dette er et dynamisk bygningssimuleringsprogram som beregner temperaturer, effekter og konsentrasjoner med et tidsstepp mellom 5 minutter og en time (settes etter behov).

Cellekontor

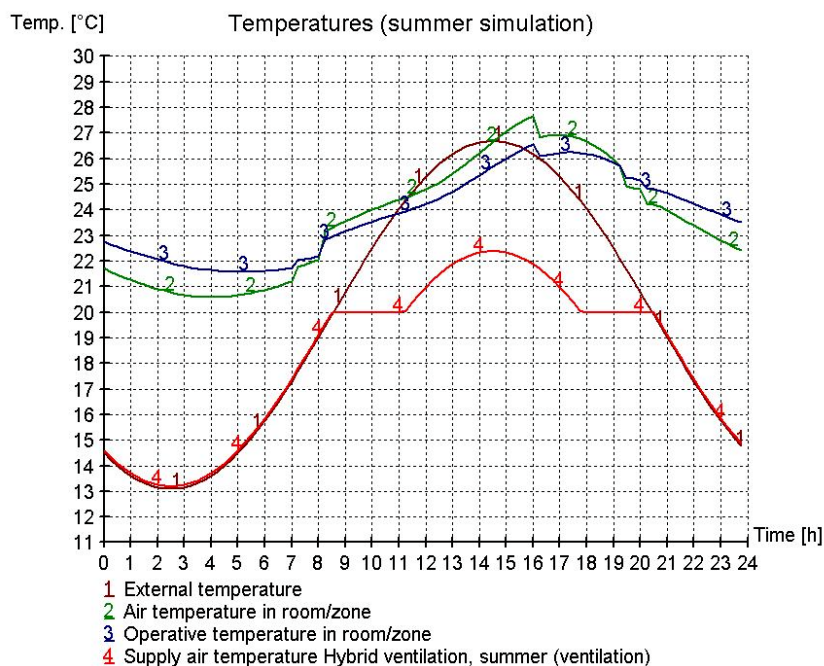
Figur 3 viser temperaturforløp i cellekontorer med sydvent orientering. Tabell 7 viser følsomhetsanalyse av maksimal operativ temperatur i det sydvendte kontoret med ulike internlaster og to ulike gulvløsninger (ulik termisk masse).



Figur 3 Temperaturforløp i et sydvendt kontor på 10 m², dimensjonerende sommerforhold (Juli)

Tabell 7 Makismal operativ temperatur i sydvendt kontor.

Case	Med parkett	Med tynt gulvbelegg
Internlast: 5 W/m ²	25.5 °C	25.2 °C
Internlast: 8 W/m ²	25.9 °C	24.8 °C
Internlast: 14 W/m ²	26.8 °C	25.9 °C
Internlast: 20 W/m ²	27.6 °C	26.7 °C



Figur 4 Temperaturforløp i et vestvendt kontor på 10 m², dimensjonerende sommerforhold (Juli)

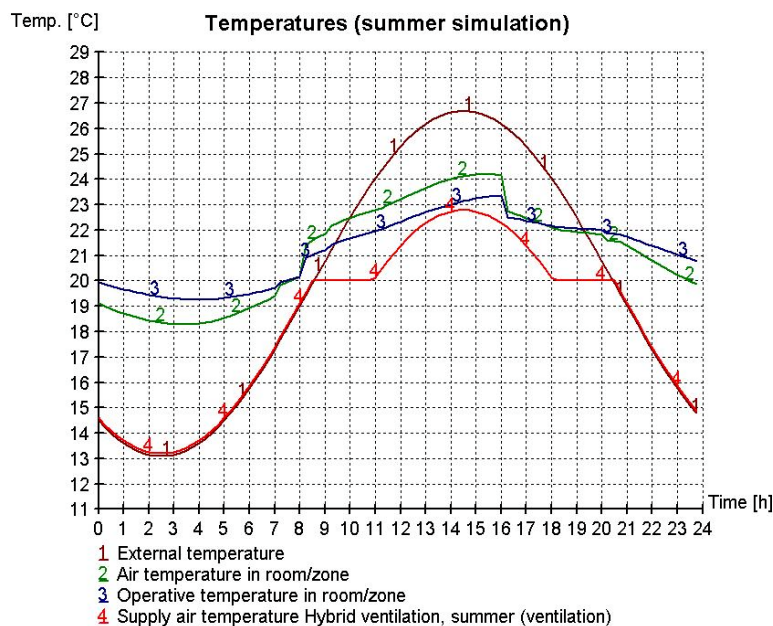
Som vi ser får vi akseptable termiske forhold selv etter en 5 dagers ”varmebølge”. Dette gjelder for både syd og vestvendte kontorer. Vestvendte kontorer er de som får høyest temperatur, men operativ temperatur er kun en kort periode over 26 °C.

Det er også simulert for andre måneder enn Juli, for å se om lavere solhøyde ville føre til mer solinnstråling og dermed høyere romtemperatur. Solinnstrålingen er riktignok noe større i månedene Mai og September, men lavere utetemperatur fører til at romtemperaturen blir noe lavere enn i Juli.

Det er i simuleringene ikke tatt hensyn til at det brukes fortrengningsventilasjon, noe som fører til at temperaturen i oppholdssonen blir lavere enn simulert her. Typisk vil temperaturen i oppholdssonen ligge 1.0-1.5 °C lavere enn de vist i figurene over (2. og 3.), se også beregning av temperaturgradient nedenfor. I figur 3 og 4 er det regnet med parkett på gulv, mens det meget sannsynlig vil være et gulvbelegg med lavere varmemotstand enn parkett. Dette vil føre til at rommet får mer termisk masse, og at temperaturen blir lavere enn vist over (0.5-1.0 °C lavere). Det er heller ikke tatt hensyn til den sagtannformede fasaden i plan 2 og 3, som også vil redusere solinnstrålingen noe, og føre til at romtemperaturen blir ennå noe lavere (0.5 – 1.0 °C). Til sammen tilsier dette at de termiske forholdene i cellekontorer blir fullt ut akseptable, selv i varme perioder, og selv om varmeavgivelsen fra datautstyr skulle være noe høyere enn de antatt i simuleringene.

Teamkontor

Figur 5 viser temperaturforløp i et syd/syd-vest vendt teamkontor på 40 m², med 6 arbeidsplasser.



Figur 5 Temperaturforløp i et sydtvendt teamkontor på 40 m², dimensjonerende sommerforhold (Juli)

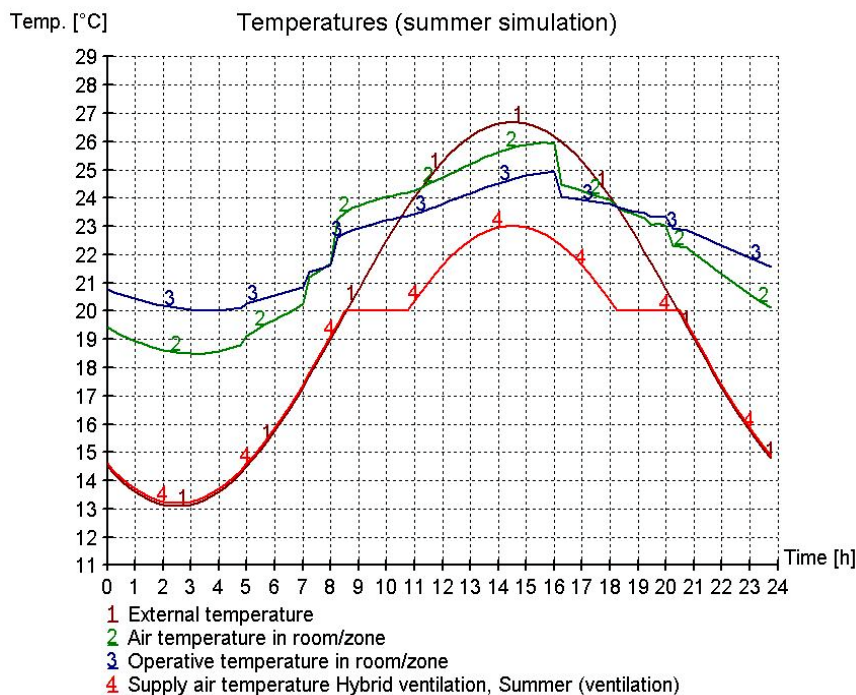
Tabell 8 Makimal operativ temperatur i sydvent teamkontor.

Case	Med parkett	Med tynt gulvbelegg
Internlast: 5 W/m ²	23.7 °C	23.1 °C
Internlast: 8 W/m ²	24.5 °C	23.6 °C
Internlast: 14 W/m ²	25.5 °C	24.5 °C
Internlast: 20 W/m ²	26.5 °C	25.5 °C

Også i dette tilfellet blir temperaturen akseptabel. Det heller ikke her regnet med fortrenningsventilasjon, og sideskjerming pga. av sagtannformen.

Kontorlandskap

Figur 6 viser temperaturforløpet i tilfellet der en hel etasje (totalt 520 m²) er innredet som kontorlandskap. I følge tegninger er det da ca. 40 arbeidsplasser pr. etasje. Totalt fasadeareal for kontorlandskapet er ca. 250 m², der ca. 50 % er transparent areal. Det er regnet med en varmelast fra belysning på 7 W/m², og det samme fra utstyr (ikke medregnet kopi/fax maskiner i egne rom).



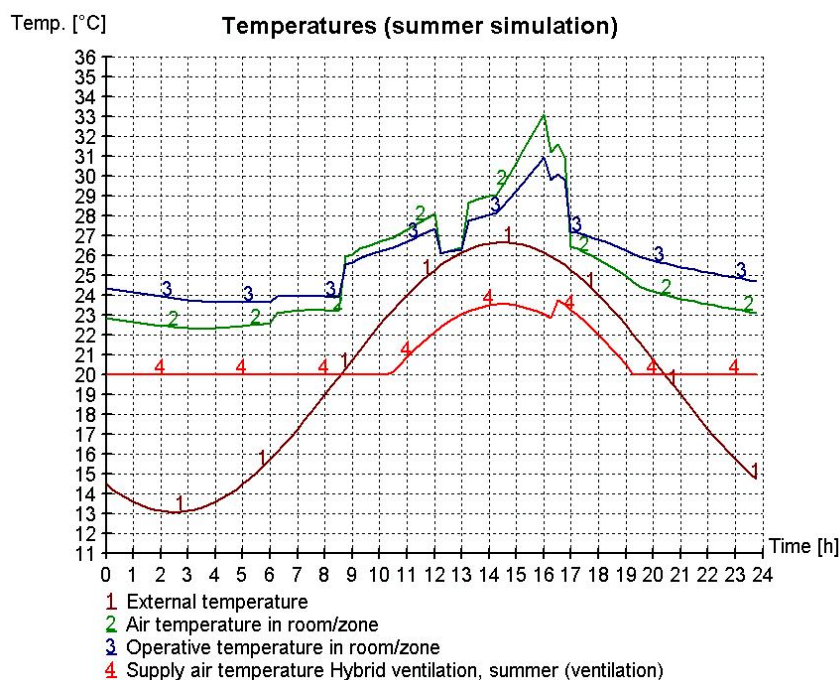
Figur 6 Temperaturforløp hvis hele 3 etasje er et kontorlandskap på 520 m², dimensjonerende sommerforhold (Juli)

Simuleringene viser at operativ temperatur for hele kontorlandskapet er under 25 °C, noe som må sies å være meget bra. Det er ikke regnet med effekten av fortrenningsventilasjon, mer termisk masse (tynt gulvbelegg) og sideskjerming pga. av sagtannformen.

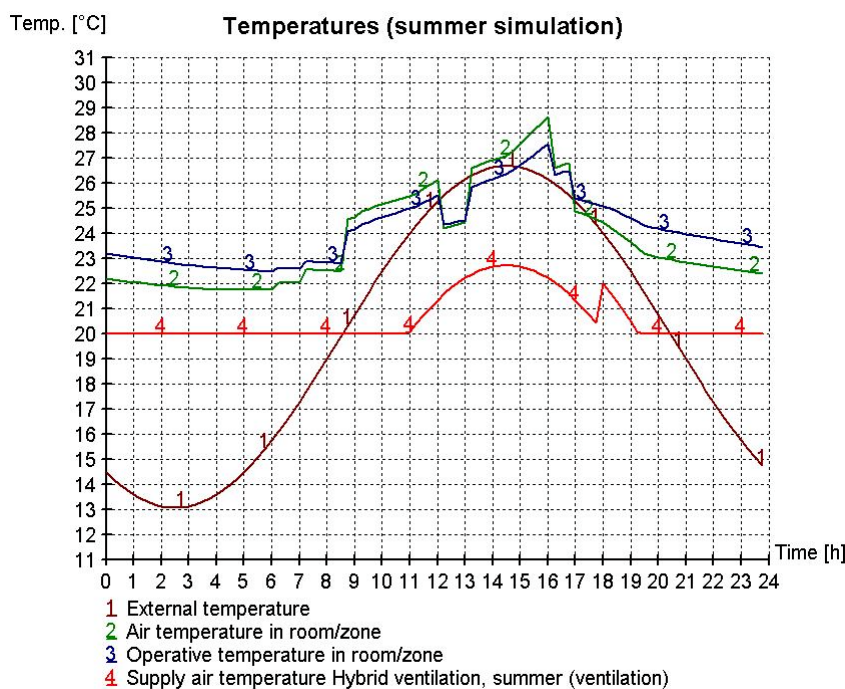
Møterom i 2. og 3. etg.

Figur 7 viser temperaturforløp i det minste møterommet i 3 etg. (14 m²), som vender mot nord-vest (300°) og delvis nord-øst (30°). Det er regnet med at store deler av fasaden er i glass (NV: 4.8. x 2.8 m + NØ: 0.9 x 2.8 m), dvs. glass fra gulv til tak. Personbelastningen er 8 personer (1.8 m²/pers). Fasaden er delvis skygget av motliggende bygninger på andre siden av Maridalsveien. Horisontvinkel fra 3 etg. til motliggende bygninger er anslått til 27 °.

Som vi ser blir temperaturen på slutten av dagen for høy, pga. direkte solstråling på de store glassflatene. Det foreslås derfor at man har samme brystningshøyden som for de andre fasadene, slik at vindushøyden blir redusert til 1.7 meter, samt at bredden for vinduet mot NV reduseres til 3.0 meter. Temperaturen for modifisert fasade er vist i figur 8. Også med redusert vindushøyde er operativ temperatur over 27 °C. Siden det blir en betydelig temperaturgradient i dette rommet ved dim. sommerforhold, vil operativ temperatur i oppholdssonen bli i underkant av 26 °C (se også avsn. 3.3). Perioden med høy temperatur er dessuten begrenset til helt på slutten av dagen, og vil derfor trolig være akseptabel.



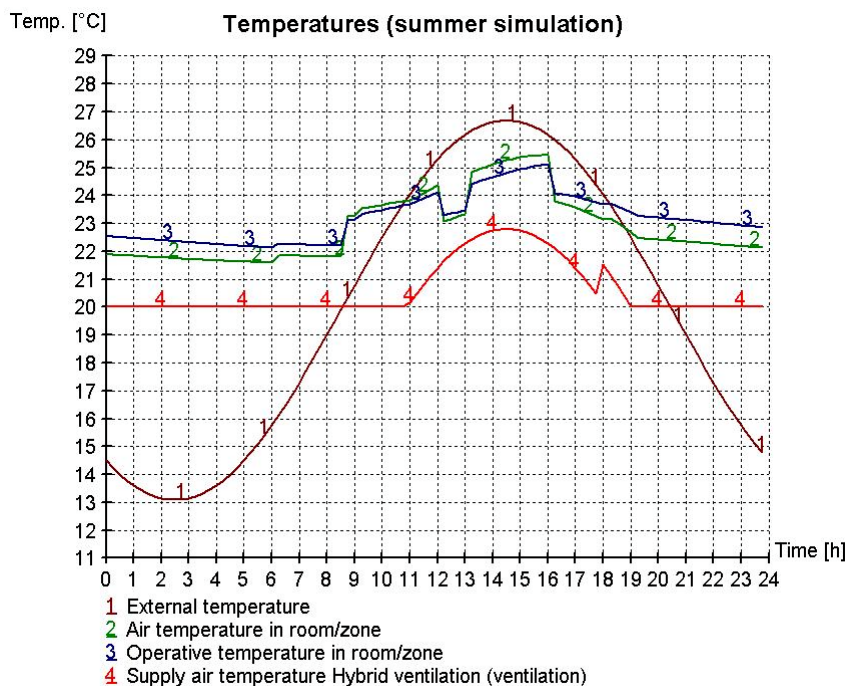
Figur 7 Temperaturforløp i møterom i 3 etg. med nord-vestvendt fasade, og vindushøyde på 2.8 meter, dimensjonerende sommerforhold (Juli)



Figur 8 Temperaturforløp i møterom i 3 etg. med nord-vestvendt fasade, og redusert vindusareal (vindushøyde på 1.7 meter og vindusbredde på 3.0 m), dimensjonerende sommerforhold (Juli)

Møterom i U1

Figur 8 viser temperaturforløp i et møterom på 34 m² i underetasjen (U1). Møterommet har en personbelastning på 12 personer, og et veggareal mot fordelingskulverten på 15 m². Det har ingen vinduer, og derfor kun varmelast fra belysning og personer.



Figur 9 Temperaturforløp i møterom (34 m²) i underetasjen (U1), dimensjonerende sommerforhold (Juli)

Forholdene i møterommet er fullt ut akseptable.

3.2 Vurdering av kaldras og strålingsassymetri

Store vindusarealer kan føre til trekkfølelse og kaldstråling (temperaturassymetri) pga. lave overflatetemperaturer. De mest utsatte vindusfeltene er vinduene mot syd på 1.7 x 2.0 meter (H x B), og vinduene i møterommet (opprinnelig 2.8 x 4.8 meter). Det mest riktige er å bruke midtrute U-verdi for beregning av kaldras og temperaturassymetri. Midtrute U-verdi for den foreslåtte vindusløsningen er 1.0 W/m²K. Både for temperaturassymetri og kaldras beregnes det 0.6 meter fra innerfasaden, som er en vanlig definisjon av oppholdssonen. For kaldras vil det si 0.6 meter ut på et skrivebord (kontor), eller 0.6 meter ut på gulv (møterom).

Overflatetemperaturen på innerruta, regnet utfra en utetemperatur på -20 °C (DUT for Oslo) og en innetemperatur på 20 °C, blir 14.8 °C. Denne temperaturen er brukt både til beregning av kaldras og temperaturassymetri.

Kaldras

Vinduene i kontorene har en høyde på 1.7 meter. Maksimal kaldras-hastighet for vinduer på 1.7 meter, 0.6 meter ut på et skrivebord, er beregnet med empiriske modeller ^{\2\}, til å være 0.25 m/s. For det 2.8 meter høye vinduet i det lille møterommet mot NV, er maksimal lufthastighet 0.6 meter ut på gulvet beregnet til 0.32 m/s.

Beregnet med Fanger's termisk komfort modeller for trekk ^{\3\}, vil antall misfornøyde være 16 % i kontorene (1.7 m høye vinduer) og 20 % i møterommet (2.8 m høye vinduer).

Lokal termisk komfort pga. kaldras kan derfor sies å være akseptabel i kontorene, mens det for møterommet anbefales at man bruker brystning slik som for kontorene, og reduserer vindushøyden til 1.7 meter. Lufthastighet vil da bli lik som for kontorene.

Strålingsassymetri

Maksimal temperaturassymetri, dvs. forskjell i strålingstemperatur på hver side av en liten flate 0.6 meter fra vinduet, er for kontorvinduene (1.7 x 2.0 m) på 4.5 K. For det lille møterommet (14 m²) er temperaturassymetrien på 6.9 K. Så små temperaturforskjeller (assymetrier) er ingen risiko med hensyn på termisk komfort.

3.3 Vurdering av temperaturgradienter

På grunn av valg av fortrenningsventilasjon som ventilasjonsprinsipp vil det oppstå vertikale temperatur- og forurensningsgradienter i rommene. Det er i dette avsnittet estimert temperaturgradienter utfra varmekilder, romhøyde, tilført luftmengde og kaldras pga. av vindusflater, med en teoretisk utledet to-sone modell som er validert mot eksperimentelle data \4\.

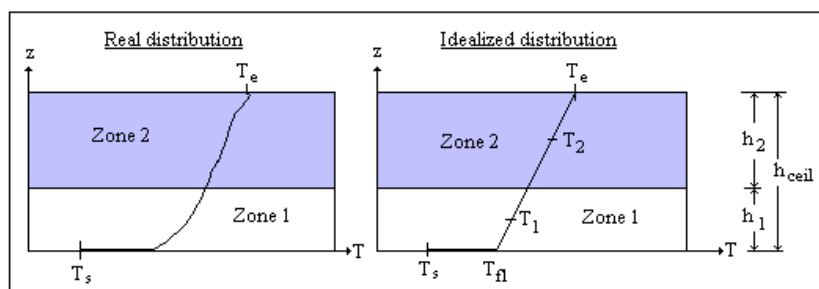
Det er sett på et sydvendt cellekontor, og et 14 m² stort møterom i 3 etg., som er de kritiske rommene

Kontorcelle

For kontorcelle tilfellet er det regnet for det sydvendte kontoret på 10 m², med en utstyrseffekt på 8 W/m², og parkett på gulv. I rom med liten persontetthet, som kontorer, vil temperaturgradienten være tilnærmet lineær (se figur 10). Ved beregning av temperatur i oppholdssonen, er det regnet med gjennomsnittstemperatur for en oppholdssone som er 1.2 meter høy (hovedsakelig sittende aktivitet). For vår og høst simuleringen er det regnet med en overskyet dag i mars og oktober, med utetemperatur på 0 °C.

Tabell 9 Temperaturgradienter, og temperaturer i oppholdssonen og avtrekket ved ulike årstider

	Dimensjonerende sommer ($T_e = 26.7\text{ °C}$)	Vår/høst (Mars/Okt) ($T_e = 0\text{ °C}$)	Vinter ($T_e = -10\text{ °C}$)
Temperaturgradient	1.5 K/m	0.5 K/m	0.2 K/m
Temperatur oppholdssone	24.4 °C	21.5 °C	21.0 °C
Avtrekksstemperatur	25.9 °C	22.0 °C	21.2 °C



Figur 10 Typisk vertikal temperaturfordeling i et fortrenningsventilert kontor.

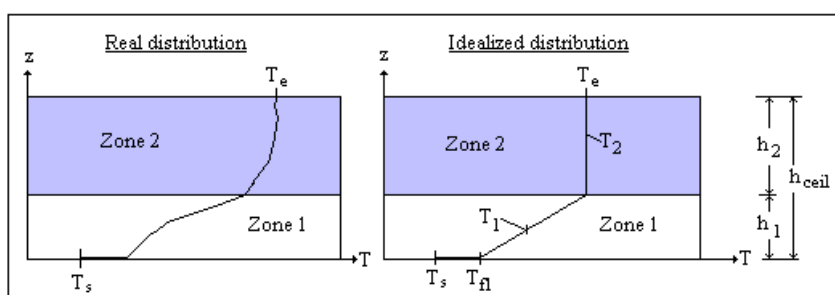
Simuleringene viser at temperaturgradienten er størst i varme perioder, noe som er gunstig både for termisk komfort og energibruk. En temperaturgradient på 1.5 K/m er heller ikke problematisk mhp. lokal termisk komfort (under 2.5 –3 K/m er uproblematisk, \3\).

Møterom

For møterommet på 14 m² med NV-orientering er det regnet med en persontetthet på 1.75 m²/pers, og parkett på gulv. Det er regnet med en vindushøyde på 1.7 meter, jfr. avsnitt 3.1 og 3.2. I rom med stor persontetthet, som dette møterommet, vil temperaturgradienten være ikke-lineær (se figur 10), med stor temperaturgradient i oppholdssonen. Ved beregning av temperatur i oppholdssonen, er det regnet med gjennomsnittstemperatur for en oppholdssone som er 1.2 meter høy (sittende aktivitet). For vår og høst simuleringen er det regnet med en overskyet dag i mars og oktober, med utetemperatur på 0 °C.

Tabell 10 Temperaturgradienter, og temperaturer i oppholdssonen og avtrekket ved ulike årstider

	Dimensjonerende sommer ($T_e = 26.7\text{ °C}$)	Vår/høst (Mars/Okt) ($T_e = 0\text{ °C}$)	Vinter ($T_e = -10\text{ °C}$)
Temperaturgradient	2.5 K/m	1.8 K/m	1.3 K/m
Temperatur oppholdssone	25.1 °C	22.0 °C	21.0 °C
Avtrekkstemperatur	27.6 °C	24.2 °C	22.3 °C



Figur 11 Typisk vertikal temperaturfordeling i et fortrengningsventilert møterom med stor persontetthet.

Simuleringene viser at temperaturgradienten også her er størst i varme perioder, men at også i kalde perioder vil temperaturgradienten være betydelig. En temperaturgradient på 2.5 K/m vil trolig ikke være problematisk mhp. lokal termisk komfort.

4.0 Oppvarmingsbehov

4.1 Romoppvarming

I tabell 11 er det vist beregnet oppvarmingsbehov for ulike rom i bygget. For kontorlandskap må oppvarmingsinstallasjonen monteres i perimetersonen. Det er ikke regnet med varme fra teknisk utstyr og belysning, men personvarme er tatt med. Utetemperaturen er regnet konstant lik - 20 °C i en tredøgns-periode, som er dimensjonerende utetemperatur for Oslo.

Tabell 11 Oppvarmingsbehov i ulike rom

Rom	Oppvarmingsbehov
Kontorcelle, 10 m ²	30 W/m ²
Kontorlandskap, 525 m ²	25 W/m ²
Møterom U1, 34 m ²	30 W/m ²
Møterom 2-3. etg., 14 m ² *	50 W/m ²

* Beregnet med en vindushøyde på 1.7 m, jfr. avsn. 3.1

For hele bygget er effektbehovet til romoppvarming 70-75 kW.

4.2 Varmebatteri

Effektbehov for varmembatteriet er beregnet til 70-75 kW. Dette er beregnet utfra en gjenvinner-virkningsgrad på 55 %, en tilluftstemperatur på 18 °C og en luftmengde på 12 000 m³/h. Det er konservativt ikke regnet med noen forvarming i kulverten, se også kap. 8.

5.0 Simulering av luftkvalitet

Det er i dette avsnittet simulert CO₂ konsentrasjoner og ventilasjonseffektivitet i sydvendt kontorcelle (10 m²) og møterom i 3 etasje (14 m²). Modeller tilsvarende de brukt for temperaturgradienter [4] er brukt for å simulere vertikale konsentrasjonsgradienter.

Perfekt omrøringsventilasjon har en ventilasjonseffektivitet på 1.0, noe som betyr at konsentrasjonen i oppholdssonen er lik konsentrasjonen i avtrekket. En ventilasjonseffektivitet på 2.0 betyr at luftkvaliteten er dobbelt så bra i oppholdssonen som i avtrekket.

5.1 Cellekontor

Det er antatt samme termiske forhold som beskrevet i avsnitt 3.3. Det er videre antatt at CO₂ konsentrasjonen i uteluften, er på 400 ppm.

Tabell 12 CO₂-konsentrasjoner og ventilasjonseffektivitet ved ulike årstider, for kontorcelle

	Dimensjonerende sommer (T _e = 26.7 °C)	Vår/høst (Mars/Okt) (T _e = 0 °C)	Vinter (T _e = -10 °C)
Ventilasjonseffektivitet i oppholdssonen*	2.55	1.50	1.45
CO ₂ -konsentrasjon i oppholdssonene	555 ppm	730 ppm	740 ppm
CO ₂ -konsentrasjon i avtrekket	795 ppm	895 ppm	895 ppm
Luftmengde	5 m ³ /hm ²	4 m ³ /hm ²	4 m ³ /hm ²

* Definert som $\eta = (C_e - C_s) / (C_{occ} - C_s)$, hvor C_e er konsentrasjonen i avtrekket, C_s er konsentrasjonen i tilluften og C_{occ} er midlere konsentrasjon i oppholdssonen.

5.2 Møterom

Det er antatt samme termiske forhold som beskrevet i avsnitt 3.3. Det er videre antatt at CO₂ konsentrasjonen i uteluften, er på 400 ppm.

Tabell 13 CO₂-konsentrasjoner og ventilasjonseffektivitet ved ulike årstider, for møterom

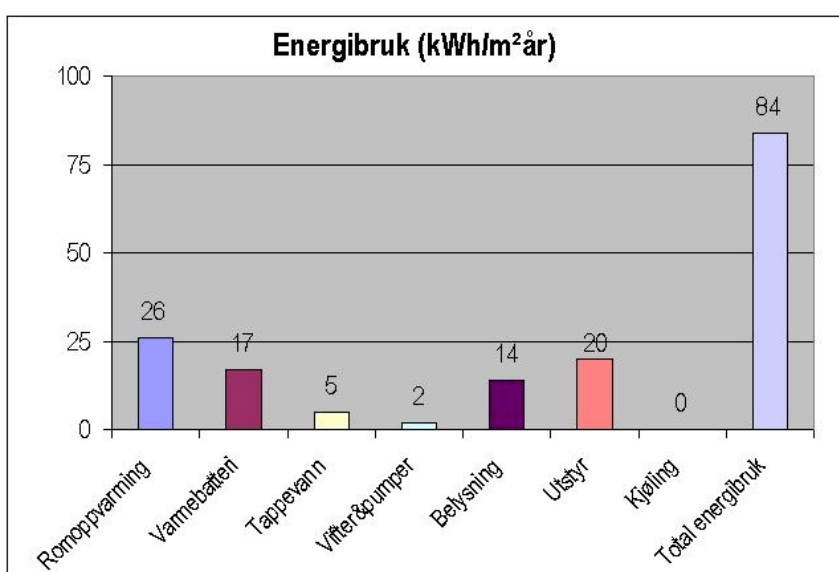
	Dimensjonerende sommer (T _e = 26.7 °C)	Vår/høst (Mars/Okt) (T _e = 0 °C)	Vinter (T _e = -10 °C)
Ventilasjonseffektivitet i oppholdssonen*	1.75	1.80	2.00
CO ₂ -konsentrasjon i oppholdssonene	900 ppm	885 ppm	835 ppm
CO ₂ -konsentrasjon i avtrekket	1270 ppm	1270 ppm	1270 ppm
Luftmengde	13 m ³ /hm ²	13 m ³ /hm ²	13 m ³ /hm ²

* Definert som $\eta = (C_e - C_s) / (C_{occ} - C_s)$, hvor C_e er konsentrasjonen i avtrekket, C_s er konsentrasjonen i tilluften og C_{occ} er midlere konsentrasjon i oppholdssonen.

Et vanlig satt krav, bl.a. i byggeforskriftene, er at CO₂ nivået ikke skal overskride 1000 ppm. Som vi ser av tabell 12 og 13 ligger CO₂ konsentrasjonen i oppholdssonen betydelig under dette også for møterommet med størst persontetthet (1.75 m²/pers).

6.0 Simulering av energibruk for hele bygget

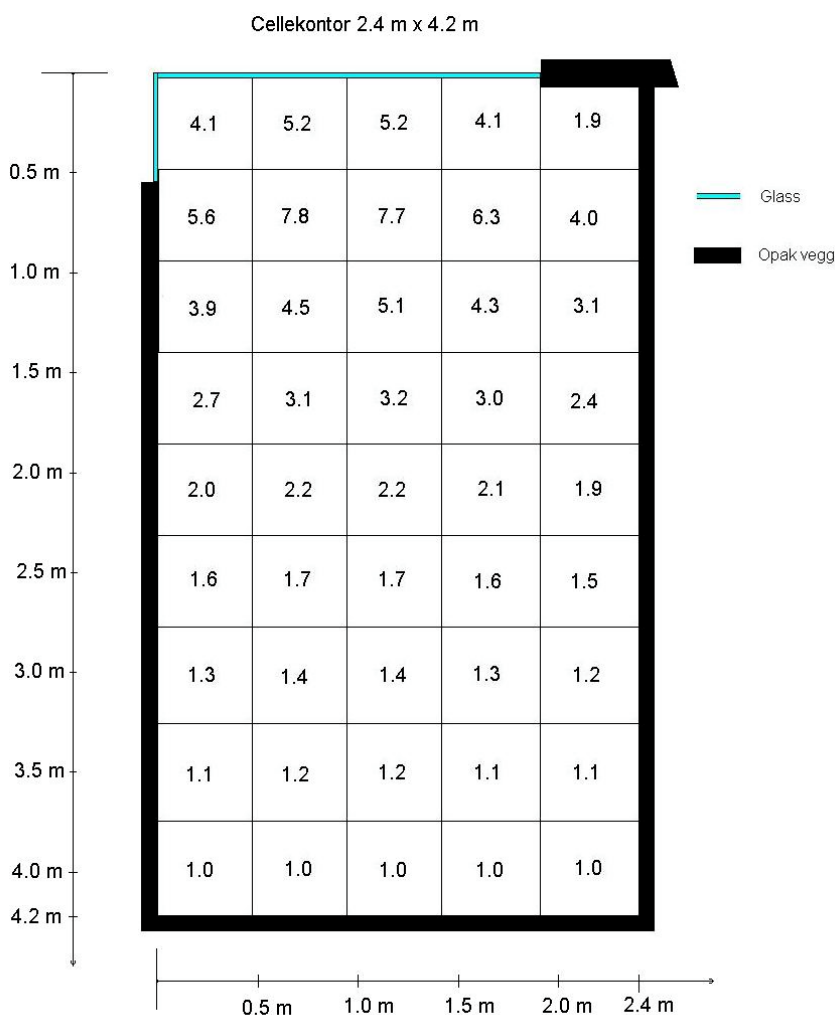
Figur 12 viser simulert energibudsjett for hele bygget, inkludert U1 (kantine, møterom etasjen). Total energibruk på 84 kWh/m² er meget lavt. Snittet for bygningsmassen er på ca. 230-240 kWh/m² \5\ . Energibruken er meget avhengig av at styringssystemene for bygget fungerer, da belysning, ventilasjon, oppvarming og nattekjøling er basert på relativt stram behovsstyring. Det er i simuleringene ikke regnet med perfekt behovsstyring. Bla. er det ikke regnet dagslysstyring av kunstig belysning, relativt beskjeden effekt av tilstedeværelseskontroll av belysning, oppvarming og ventilasjon. Med optimal kontroll av disse forholdene ville energibruken kunne bli ennå lavere enn beregnet her. På den annen side viser erfaringer at byggautomatiseringen sjelden virker fullt ut etter sin intensjon, særlig de første par årene etter at bygget settes i drift. De viste simuleringene anses derfor å være relativt realistiske.



Figur 12: Energibudsjett for hele bygget.

7.0 Dagslyssimuleringer

Dagslyssimuleringer er utført for en kontorcelle på 10 m², i den sagtannformede delen av fasaden (2. og 3 etg. mot syd/syd-vest). Dagslysfaktorer er beregnet med programmet LESODIAL \6\. Dagslysfaktor er definert som dagslysbelysningen fra jevnt overskyet himmel (CIE) i et punkt på en flate innendørs angitt i prosent av den samtidige belysningen på en uskjermet horisontal flate utendørs. Byggeforskriftene setter krav til en dagslysfaktor på minst 1 %, målt i et punkt som ligger halvveis inn i rommet fra vindusfasaden og 1.0 meter fra sidevegg, i en høyde 0.8 meter over gulv. Av figur 13 ser vi at dagslysfaktoren i dette punktet, 0.8 meter over gulv, er på ca. 2.2 %. Dvs. godt over kravet i forskriften. Avhengig av plassering av kontorinnredning (arbeidsplass) vil dagslysfaktoren på arbeidsplanet typisk ligge i området 5-7 %. Krav til belysning på kontorarbeidsplasser er fra 300 til 500 lux. I store deler av arbeidsåret (vanlig arbeidstid 08-16) vil utendørs horisontal belysning være over 10 000 lux. Det betyr at det er tilstrekkelig med kun dagslys for å oppnå tilfredsstillende belysning på arbeidsplassen store deler av året, med tilsvarende potensiale for å spare energi og varmebelastning fra kunstig belysning.



Figur 13 Viser fordeling av dagslysfaktor i kontorcelle, i 0.8 meters høyde over gulv.

I simuleringene vist her er det ikke tatt hensyn til solavskjerming fra innvendige persienner, og heller ikke dagslyssystemet med den reflekterende øverste delen av persiennen. Det er foreløpig ikke gjort dagslyssimuleringer av andre rom.

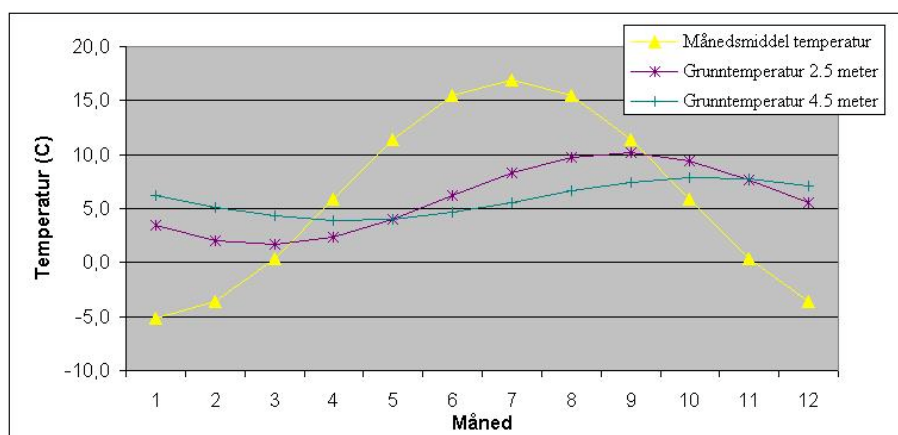
8.0 Simulering av kulvert

Det er planlagt brukt en nedgravd betongkulvert til forvarming, forkjøling og sedimenteringsfiltrering av ventilasjonsluften. I dette avsnittet er det beregnet hvilken kjølings- og oppvarmingseffekt kulverten har på den gjennomstrømmende lufta.

Det er i prosjektet "Passiv klimatisering" utarbeidet modeller for beregning av forkjøling og forvarming av ventilasjonsluft i betongkulverter \7\ . Det er hovedsakelig to termiske effekter man utnytter i en ventilasjonskulvert, den årlige temperatursyklusen i grunnen, og den døgnmessige temperatursyklusen i kulvertveggene av betong.

Figur 13 viser hvordan temperaturen, 2.5 og 4.5 meter ned i grunnen, varierer over året. Den store varmetregheten til grunnen fører til en demping og faseforskyvning av temperaturen, sett i forhold til overflatetemperaturen. Tilstrekkelig langt ned i grunnen (ca. 10 meter) vil grunntemperaturen være tilnærmet lik årsmiddeltemperaturen for stedet, selv midt på sommeren. Som vi ser av figur 14 er temperaturen i Juli, 4.5 meter ned i grunnen, under årsmiddeltemperaturen for Oslo (5.9 °C).

Det betyr at potensialet for å kjøle ned ventilasjonsluften i en nedgravd kulvert er god. Den andre effekten er at den termiske massen i betongveggene i kulverten demper døgnmessige variasjoner i temperaturen. Det betyr at varme fra ventilasjonsluften (uteluft) lagres i betongveggene om dagen, og avgis igjen om natten, slik at tilluftstemperaturen jevnnes ut over døgnet.



Figur 14 Viser temperaturvariasjon i uberørt grunn, 2.5 meter og 4.5 meter ned i grunnen. Det er regnet med løsmasser i grunnen og for Oslo klima.

8.1 Kjøleeffekt

Nedenfor er det beregnet hvilken kjøleeffekt kulverten har på ventilasjonsluften ved dimensjonerende sommerforhold.

Data for kulverten er som følger:

Lengde utvendig kulvert: $L_e = 30$ m

Innvendig høyde kulvert: $H_c = 2$ m

Innvendig bredde kulvert: $B_c = 2.5$ m

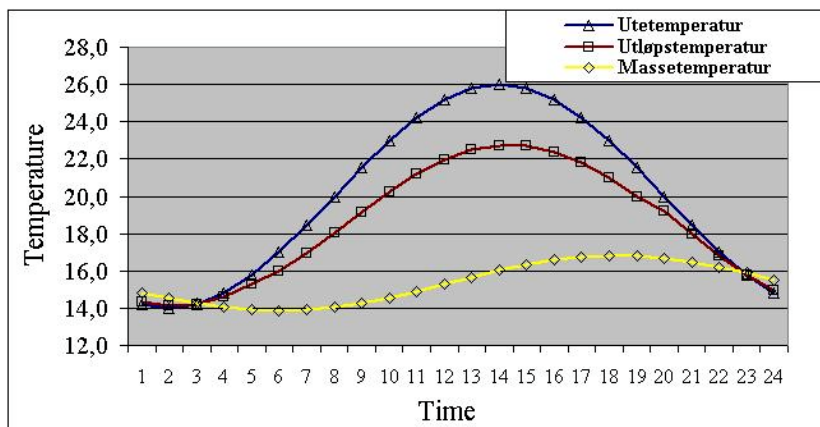
Overdekningshøyde kulvert: $H_o = 1.5$ m

Det er regnet med løsmasser i grunnen (varmeledning 2.0 W/mK, varmediffusivitet: 0.0025 m²/h)

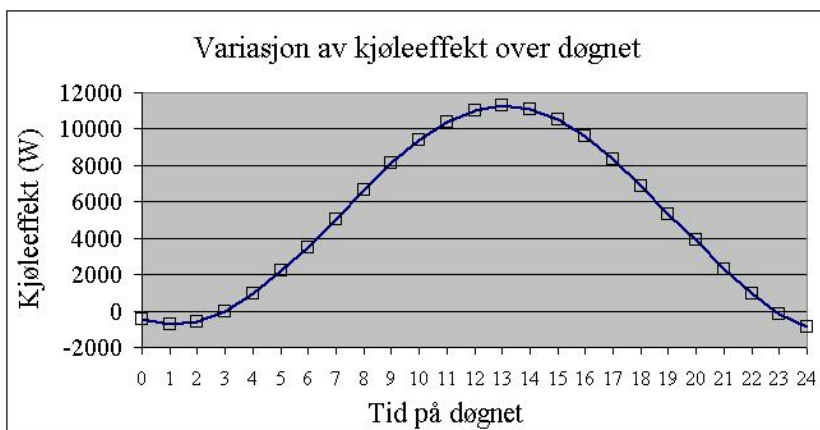
Utetemperatur dim. dag: $T_e = 20$ °C \pm 6 K (svinger mellom 14°C og 26 °C)

Luftmengde dag (06-20), dimensjonerende sommerdag: $V_{on} = 10\,000$ m³/h

Luftmengde natt (20-06), dimensjonerende sommerdag: $V_{off} = 15\,000$ m³/h (nattkjøling)



Figur 15 Utetemperatur, masstemperatur i kulvertvegger og utløpstemperatur fra kulverten på dimensjonerende sommerdag (15 Juli).



Figur 16 Avgitt kjøleeffekt fra kulvertvegger til ventilasjonslufta over døgnet.

Som vi ser av figurene vil maksimal tilluftstemperatur på en dimensjonerende sommerdag være i overkant av 22 °C, og maksimal kjøleeffekt fra kulverten er på 11.3 kW. Som beregningene i kapittel 3 viser vil kjøleeffekten fra kulverten, sammen med andre passive kjøletiltak, være tilstrekkelig til å holde tilfredsstillende termiske forhold om sommeren. Det er her ikke regnet med den termiske massen til den innvendige fordelingskulverten, dvs. det er bare den 30 meter lange utvendige kulverten som er beregnet. Gjennomsnittlig tilluftstemperatur ved sommerforhold vil derfor trolig være noe lavere enn beregnet her.

8.2 Oppvarmingseffekt

Det er også beregnet hvilken oppvarmingseffekt kulverten kan ha ved dimensjonerende vinterforhold, og over året. Ved dim. vinterforhold (DUT = -20 °C), vil kulverten heve temperaturen fra 1.5 til 2.5 K (avhengig av når på døgnet). Varmeeffekten tilført fra kulverten er beregnet til ca. 4 kW. Det vil si at kulverten har relativt begrenset oppvarmingseffekt, med tanke på at dimensjonerende effekt for varmebatteri er på 70 kW.

Energimessig (varme) tilskudd fra kulverten over året er avhengig av styring av luftmengder, men er estimert til å ligge i området 3000 – 6000 kWh. Dvs. at den energimessige gevinsten av kulverten er begrenset, når man ser bort fra kjøling.

9.0 Referanser

- \1\ SCIAQ-PRO 1.0: ”Simuleringsprogram for termisk klima, luftkvalitet, produktivitet, termisk komfort og energi- og effektbehov”. ProgramByggerne ANS, 2001, <http://www.programbyggerne.no/>
- \2\ Heiselberg P., “Draught risk from cold vertical surfaces”, Building and Environment, 29, pp. 297 – 301, 1994
- \3\ Fanger P.O, “Varme- og Klimateknikk Grundbog” (In Danish), Chapter 1 pp. 17 – 40. DANVAK 1992.
- \4\ Dokka T.H., Doctoral thesis: “Modelling of Indoor Air Quality in residential and commercial buildings” , Department of Industrial Economics and Industrial Management, NTNU, Trondheim, August 2000
- \5\ NVEs Byggoperatør, ”Bygningsnettverkets energistatistikk”, Årsrapport 2000.
- \6\ LESO-DIAL: Beregning av dagslysnivå i rom, http://lesowww.epfl.ch/anglais/Leso_a_frame_sof.html
- \7\ Dokka TH, ” Betongkulverter brukt til forvarming og forkjøling av ventilasjonsluft; dimensjonering og beregningsmodeller” (SINTEF rapport under utarbeidelse, publiseres høst 2002).