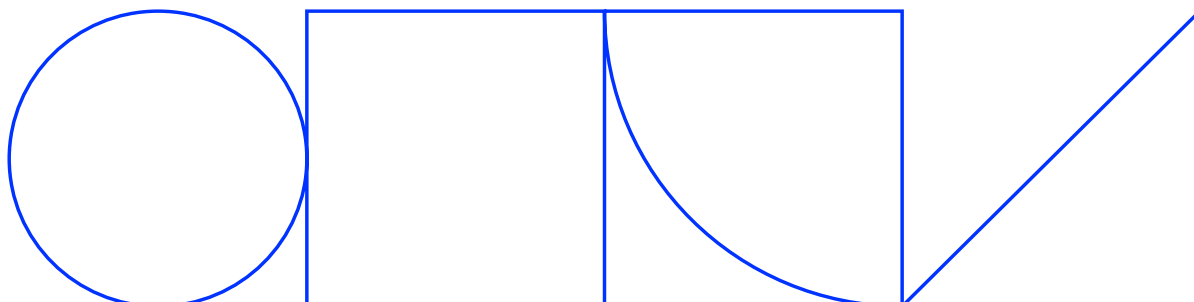
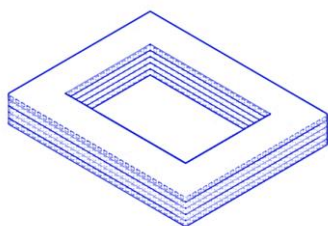
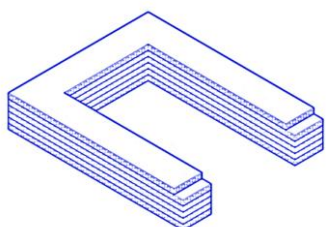
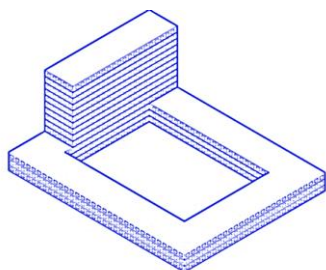


Koppling mellan dagsljus och energiparametrar i täta stadsmiljöer

Effekt av byggnadsdensitet på uppvärmningsbehov och dagsljus i nordiska bostadshus

Emanuele Pepe
Skanska Sverige AB

2024-06-12



Förord

Detta projekt har genomförts i ett nära samarbete mellan akademiska institutioner, särskilt Lunds Tekniska Högskola (LTH), och industrin, vilket har berikat både innehållet och perspektiven.

Jag vill börja med att rikta ett stort tack till mina medförfattare, Marie-Claude Dubois och Niko Gentile. Ett speciellt tack går även till Lisa Flawn Orpana och Charlotte Svensson Tengberg, vars stöd under projektets utveckling har varit avgörande. Deras kunskap och tekniska assistans har spelat en stor roll i formulerandet av våra slutsatser.

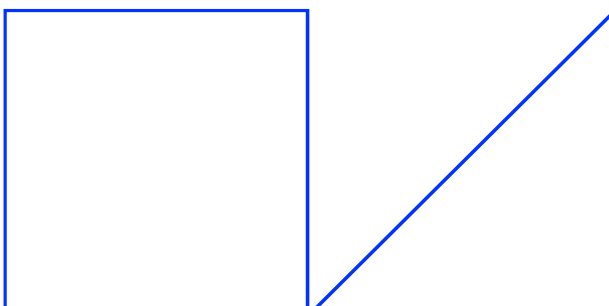
Jag är också mycket tacksam för det stöd och de resurser som har tillhandahållits av Skanska Sverige AB och Lunds Tekniska Högskola (LTH). Detta projekt hade inte kunnat genomföras utan finansiering från SBUF, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, vars stöd har varit avgörande för att vi skulle kunna genomföra studier med den kvalitet och det djup som krävdes. Att SBUF valde att stödja detta projekt är ett erkännande av vikten av forskning för en hållbar utveckling av byggsektorn, något för vilket vi är djupt tacksamma.

Malmö

Emanuele Pepe, Doktorand

Skanska Sverige AB

Division of Energy and Building Design, Department of Building and Environmental Technology, Lund University LTH EBD



Sammanfattning

Denna studie utforskar relationen mellan byggnadsdensitet, dagsljus och uppvärmningsbehov i bostadsbyggnader, specifikt inriktad på de nordiska ländernas klimat och geografiska förutsättningar. Med en global ökning av urbaniseringen står Norden inför nya utmaningar och möjligheter inom stadsplanering och byggnadsform. Rapporten tar upp hur byggnadsdensitet påverkar uppvärmningsbehov och dagsljus, samt identifierar vilka byggnadsformer som är mest fördelaktiga i en tät stadsmiljö.

Hur forskningen genomfördes:

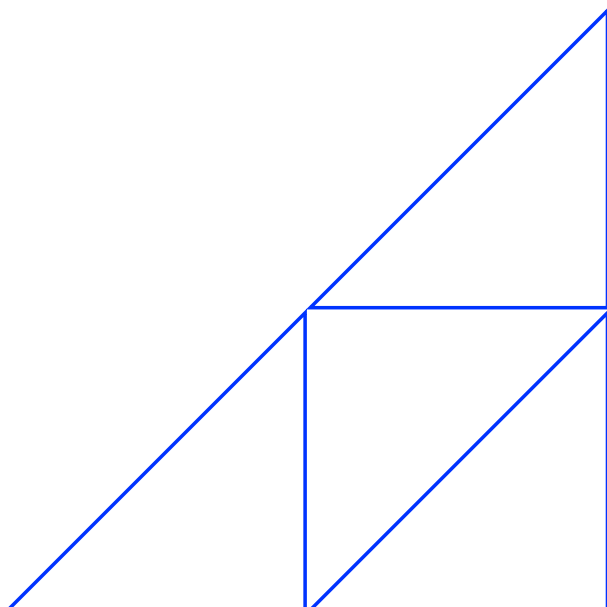
För att tackla dessa frågor genomfördes en studie strukturerad i tre papers. I **Paper I**, "Methodology and parameters to analyse daylighting and energy use in dense cities: A literature review", utvecklades en teoretisk grund genom en systematisk litteraturoversikt. Här identifierades och analyserades tidigare forskning för att skapa en solid bas för vidare empiriska studier. **Paper II**, "Steady-State Calculation versus Dynamic Energy Simulations during the Early Design Phase", utforskade och jämförde stationära och dynamiska simuleringar för att förstå hur olika metoder påverkar uppskattningen av byggnadernas uppvärmningsbehov. **Paper III**, "Effect of urban density on heating demand and daylighting in Nordic residential buildings", använde sig av parametriska 3D-modellerings-simuleringar för att undersöka effekten av byggnadsdensitet på uppvärmningsbehov och dagsljus i olika byggnadsutformningar.

Studierna visade:

Resultaten från dessa studier visar att det finns en tydlig korrelation mellan ökad byggnadsdensitet och minskat uppvärmningsbehov, särskilt när byggnadsdjupet och höjden ökar. Det framkom dock att när byggnadsdensitet ökar över en viss tröskel, specifikt en Floor Area Ratio (FAR) på 3, förbättras inte energieffektiviteten ytterligare, och dagsljusstillgång minskar betydligt. Studierna visade också att byggnadstypologierna U-shape och M-shape är mer fördelaktiga än traditionella gårdstypologier (C-shape, Courtyard) för att balansera uppvärmningsbehov med dagsljus i stadsförtätning.

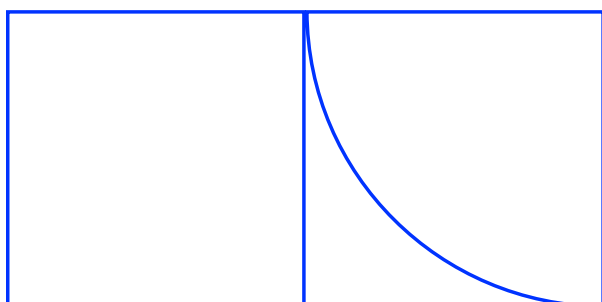
Slutsatser:

Utifrån denna studie dras slutsatsen att, inom forskningsinställningarna, en densitetsnivå (FAR 3) ger en balans mellan lågt uppvärmningsbehov och tillräckligt dagsljus för nordiska bostadsbyggnader. Dessa fynd är av stor vikt för arkitekter, stadsplanerare och utvecklare som arbetar för att skapa energieffektiva och hållbara urbana miljöer i Norden. Studien bidrar med värdefulla insikter som kan användas för att optimera framtida byggnadsprojekt och stadsplanering, med målet att förbättra både energieffektiviteten och boendekvaliteten i takt med den ökande urbaniseringen.



Innehållsförteckning

1. Inledning	5
1.1 Bakgrund	5
1.2 Syfte & mål	6
2. Paper I	7
2.1 Metod	7
2.2 Resultat	7
3. Paper II	9
3.1 Metod	9
3.2 Resultat	11
4. Paper III	12
4.1 Metod	12
4.2 Resultat	17
4. Diskussion	21
5. Slutsatser	22
Litteraturförteckning	23



Ordlista

Stadsplanering - Processen och disciplinen att designa och organisera stadsmiljöer, inklusive byggnader, vägar och offentliga utrymmen.

Byggnadsdensitet - Mått på hur tätt byggnader är placerade i ett område, oftast uttryckt som en kvot mellan byggd yta och totalt tillgänglig markyta.

Byggnadsform - Den fysiska formen och strukturen hos en byggnad som påverkar dess funktionalitet och estetik.

Byggnadstypologi - Klassificering av byggnader baserat på deras design och funktionella egenskaper.

Floor Area Ratio (FAR) - En kvot som beskriver förhållandet mellan den totala byggnadsytan på en tomt jämfört med tomtens storlek.

Window-to-wall ratio (WWR) - Förhållandet mellan ytan av fönster på en fasad jämfört med den totala väggytan, vilket påverkar både energiprestanda och dagsljusinträngning.

Vertical Sky Component (VSC) - Ett mått på mängden synligt himmelsljus som når en punkt vid marken eller byggnadens fasad, viktigt för att bedöma dagsljus i stadsplanering.

Dagsljus - Naturligt ljus från solen som når in i byggnader, vilket är viktigt för energieffektivitet och boendekomfort.

Dagsljustillgång - Tillgängligheten av naturligt ljus i en byggnad, vilket är viktigt för både energieffektivitet och invånarnas välbefinnande.

Spatial Daylight Autonomy (sDA) - Ett mått på hur stor del av ett utrymme som uppfyller vissa kriterier för dagsljus under en viss procent av årets arbetstid.

Solstrålning - Energin från solens strålar som når jorden, vilken kan utnyttjas för att värma upp byggnader passivt.

Uppvärmningsbehov - Mängden energi som krävs för att värma upp en byggnad till en behaglig temperatur under kalla perioder.

Energieffektivitet - Användning av teknik och designprinciper för att minimera energiförbrukningen i byggnader och andra strukturer.

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Under det senaste århundradet har det skett en ökning av urbaniseringen med en betydande förflyttning av människor från landsbygdsområden till stadsområden (UN. Population Division, 2019). Enligt FN (2019) bodde 55% av befolkningen i urbana regioner, och det förväntas stiga till 70% år 2050. Trots att de täcker en liten del av jordens yta (ungefär 3%) bidrar städer med 60% till 80% av den globala energianvändningen och 75% av koldioxidutsläppen från koldioxid (IEA, 2016). Globalt står byggsektorn och byggnader för cirka 36% av energianvändningen och 40% av de energirelaterade koldioxidutsläppen (CO₂) (IEA, 2020). Detta understryker vikten av energieffektivitet i byggnader för att minska resursförbrukningen och föroreningarna.

Kompakt stadsutveckling och förtätning av städer är en del av urban politik över hela världen i linje med FNs mål för hållbar utveckling, specifikt inom Mål 11, Indikator 11.3.1 (OECD, 2012; Laituri et al., 2021). Forskare har belyst fördelarna som att förbättrad social och ekonomisk rörlighet, kollektivtrafik, energieffektivitet och övergripande välbefinnande (Boyko & Cooper 2011). Det är dock en komplex uppgift och högre urban densitet kan ha både positiva och negativa effekter (Larivière & Lafrance, 1999; Pont et al., 2021).

I de nordiska länderna är den totala energiförbrukningens påverkan av förtätning upp till +19% för bostäder och +30% för kontor, vilket visar att stadsdensitet är en nyckelfaktor för byggnadsprestanda (Strømman-Andersen & Sattrup, 2011). Dock är sambandet mellan byggnadsdensitet och energianvändning i byggnader inte helt enkelt. Den täta byggnadskvarter skapar en "canyon effect", där byggnader skuggar varandra, minskar tillgången till dagsljus och passiv solvärme, vilket potentiellt ökar behovet av elektrisk belysning och uppvärmning (Strømman-Andersen & Sattrup, 2011). Det finns ett växande erkännande i forskning och industri om hur förtätning påverkar byggnaders energieffektivitet, men det finns fortfarande luckor i forskningen, speciellt i det nordiska sammanhanget, där studier är sällsynta, särskilt när det gäller kontextspecifika aspekter som dagsljusstillgång jämfört med energifördelar av förtätning (Pepe et al., 2022).

Strømman Andersen och Sattrup (2013) betonar behovet av att tidigt i stadsplaneringen beakta dagsljusstillgång, som är särskilt relevant i nordiska länder på grund av höga latituder och låga solhöjder där stadsförtätning märkbart påverkar dagsljusstillgång och ökar överskuggningen. Städer i norra Europa tenderar att ha en enhetlig stadsutformning med 5 till 6 våningar höga flerbostadshus (vanligtvis gård, semi-öppen gård eller lamelltyp) i stadskärnan och tätt befolkade områden (Sattrup och Strømman-Andersen, 2013; Bournas, 2020). Dessutom upplever dessa områden ofta molniga himlar, vilket ytterligare minskar det naturliga ljuset under vintermånaderna (Strømman Andersen & Sattrup, 2013). Med tanke på dessa förhållanden är det väsentligt att inkludera dagsljus i arkitektoniska utformningar, vilket påverkar inte bara uppvärmningsbehoven utan också invånarnas välbefinnande (Bournas, 2021; Nagare et al., 2021).

1.2 Syfte & mål

Syftet med studien är att undersöka och klargöra de dagsljus- och energiparametrar (uppvärmningsbehov) som påverkar prestandan hos nya byggnader samt att fastställa kunskapsbasen så att aktörer inom byggsektorn och utvecklare inom bostadssektorn kan bygga välplanerade byggnader med avseende på dagsljus och lågt uppvärmningsbehov i den snabba takt som krävs i tätare stadsmiljöer.

Specifikt syftar detta projekt till att ta itu med dessa luckor genom att undersöka hur tätheten i ett byggnadskvarter påverkar uppvärmningsbehov och dagsljus. I denna forskning utvecklades tre papers. Varje Paper bygger på resultaten från den föregående, och förfinar successivt hypoteserna. Frågor som belysts i bakgrundskapitlet avslöjar betydande luckor i den nuvarande förståelsen av förtätning och byggnads formfaktors energidynamik samt fördelningen av dagsljus i tätt befolkade urbana miljöer i Norden. Den observerade bristen på forskning som länkar fördelarna mot de negativa effekterna har lett till utvecklingen av denna forsknings centrala hypotes. Genom att ta itu med dessa luckor är studiens mål att föreslå en förskjutning mot tidiga dynamiska simuleringsmodeller för att bättre reflektera de komplexa sambanden mellan byggnadsdensitet, uppvärmningsbehov och dagsljus.

Initierad av **Paper I** med en litteraturoversikt identifierar studien luckor, skisserar metodiken och de prestandaindikatorer som används för att bedöma byggnadsdensitet, energianvändning och dagsljus i täta urbana miljöer baserat på befintlig litteratur. Dessa resultat ledde till formuleringen av specifika hypoteser som syftar till att testa effektiviteten av olika urbana byggnadsformer och bebyggelsens densitet genom parametriska simuleringsmetoder. De huvudsakliga hypoteserna som utvecklats från de inledande resultaten är:

- Dubbel effekt av densitet: En ökning av byggnadsdensitet i nordiska klimat kommer att leda till minskade uppvärmningsbehov men kan påverka dagsljusstillgång negativt.
- Densitetströskel: Det finns ett område med optimala lösningar för stadsförtätning, som varierar beroende på byggnadskvarterets höjd och djup samt byggnadsdensitet.
- Optimerade byggnadsformer i högdensitetsområden: Dessa kan förbättra tillgängligheten på dagsljus utan att öka uppvärmningsbehovet.

För att bedöma rätt indata och utdata som är relevanta för denna forskning implementerar **Paper II** en jämförande analys mellan statisk och dynamisk simulering. Denna paper testar direkt hypotesen genom att bedöma vilken simuleringsansats som mer effektivt kan modellera den dynamiska urbana miljön och därmed tillhandahålla mer tillförlitliga data för stadsplanering. **Paper III** tillämpar insikterna från Paper I och Paper II, testar forskningshypoteserna och presenterar resultat om hur densitet påverkar uppvärmningsbehov och dagsljus på kvartersnivå i en nordisk miljö, vilket ger slutgiltiga bevis på hur byggnadsdensitet påverkar uppvärmningsbehov och dagsljus.

2. Paper I

Methodology and parameters to analyse daylighting and energy use in dense cities: A literature review

Baserat på en litteraturöversikt presenterar denna studie viktig befintlig vetenskaplig kunskap och utvecklar en hypotes på vilken ytterligare forskning utvecklas. Identifierar de mest relevanta prestandaindikatorerna och föreslår en sammanhängande metodik för att bedöma dagsljus och energianvändning i täta bostadskvarter i nordiska länder. Detta första paper sätter en ram för efterföljande analyser i Paper II och III, vilket ger en tydlig grund för jämförelse av statiska och dynamiska simuleringsverktyg och projektapplikationer.

Forskningsfråga:

Vilken metodik (arbetsflöde, modellering, programvarupaket, analys), parametrar och prestandaindikatorer är mest relevanta att använda vid bedömning av energianvändning (värmebehov) och dagsljus inom ett nordiskt förtätat bostadskvarter?

2.1 Metod

En översyn av den vetenskapliga litteraturen genomfördes genom att kombinera en "systematisk" och en "snöboll" sökansats inom referenslistan för identifierade artiklar. Denna systematiska sökning utfördes över databasen Scopus och genomfördes under juni 2021, med en uppsättning nyckelord kopplade till den Booleska operatoren "AND" och "OR" för synonymer: daylight OR passive solar AND dens* OR urban* AND energy. Alla artiklar granskades därefter, baserat på titel och sammanfattning. Inkluderingskriterier var: analys och design av byggnadskvarter, prestandaindikatorer för dagsljus, prestandaindikatorer för värmebehov för nordiska och tempererade klimat. Exkluderingskriterier var distriktsnivåanalys, skyskrapor, varmt klimat, kylning, solenergi och solceller.

2.2 Resultat

Studien identifierade 582 källor, 79 ansågs relevanta utifrån inkluderingskriterierna, varav endast 15 ansågs relevanta för det nordiska klimatet. Resultaten (Tabell 1) från dessa artiklar skapade en grundläggande förståelse för effektiva metoder och betydande parametrar att implementera i studien, de huvudsakliga resultaten av denna översikt sammanfattas nedan:

- Arbetsflöde och simuleringar: Den utbredda användningen av parametriska och prestandabaserade simuleringar, särskilt med användning av programvaran Grasshopper, visar fördelarna med att integrera avancerade beräkningsverktyg i tidiga skeden.
- Nyckelparametrar: i tidiga skeden visade sig urbana höjd/bredd-förhållanden och grundläggande geometriska begränsningar vara avgörande för att påverka senare skeden av energianvändning och dagsljus. Förenklade prestandaindikatorer såsom Vertical Sky Component (VSC) belystes som effektiva prediktorer för dagsljusprestanda och FAR (floor area ratio) är en bra kontrollvariabel för att beskriva densitet.
- Detaljerade fassparametrar: Daylight Autonomy (DA) och Useful Daylight Illuminance (UDI) var starkt förknippade med den byggnadsdensitet påverkan på värmebehovet. Intressant nog visade solvärmevinster en stark korrelation med DA men varierade inte proportionellt med ökad byggnadsdensitet (FAR).

Utöver resultaten om metodik (arbetsflöde, modellering, programvarupaket, analys), parametrar och prestandaindikatorer, gav informationen från de inkluderade artiklarna andra intressanta resultat som sammanfattas nedan:

- Densitet och kompakthet i en byggnadskvarter minskar energianvändningen i ett byggnadskvarter. Dock, med en byggnads Plot Ratio över 250% minskar dagsljuset och medför inte längre någon ytterligare energifördel (värmebehov).
- Kombination av byggnadstypologier inom samma kvarter kan vara en lösning för att balansera dagsljus och byggnadsdensitet.

- Värmebehov för bostadsbyggnader är den huvudsakliga energi prestandaindikatorer att ta hänsyn till för Norden.
- Urban densitet [m^3/m^2] korrelerar till kriteriet Daylight factor (DF).

Tabell 1. Resultat/fynd

Referens	Resultat/Fynd
Aksamija (2012)	Utvecklingsnivå (Level of Development, LOD) och implementering
Sacks et al. (2018)	Stratifieringar av Utvecklingsnivå (LOD) i BIM
Aksamija (2018)	Rådande mjukvarulösningar: programvara för byggnadsinformationsmodellering (BIM) och icke-BIM-programvara
Ayoub (2019)	Jämförelse av programvarupaket; Grasshopper och metoder för dagsljusprognos
Natanian and Auer (2020)	Grasshopper programvarupaket; användning av parametriska och prestandabaserade designer
Littlefair (2001), Strømman-Andersen and Sattrup (2013)	Grundläggande geometriska begränsningar påverkar den slutliga byggnadsenergin och dagsljusförsörjningen
Strømman-Andersen and Sattrup (2011)	Geometri för urbana canyon (H/W-förhållande) hade en relativ inverkan på total energianvändning och solfördelning
Ko (2013)	Höjd/bredd-förhållande i urbana canyon (H/W) och 'yta-till-volym'-förhållande (S/V) används för att analysera urban densitet och dess inverkan på energianvändning och solpotential
Vartholomaios (2017)	S/V-förhållandet har starkast samband med värmeförbrukning
Bournas and Dubois (2019)	Urban density [m^3/m^2] korrelerar till Daylight Factor (DF) kriterium
Li et al. (2009)	Vertical Daylight Factor (VDF) - dagsljuset minskar betydligt i en kraftigt hindrad tät byggnadskvarter
Mardaljevic and Roy (2016)	Sunlight Beam Index (SBI) - dagsljuset minskar betydligt i en kraftigt hindrad tät byggnadskvarter
Sattrup and Strømman-Andersen (2013), ŠPrah & Košir (2019)	Floor Area Ratio (FAR), och total densitet för tomtratio, används som kontrollvariabler för att reglera maximal densitet
Chatzipoulka et al. (2018), Bournas (2020)	Vertical Sky Component (VSC) kan vara en kraftfull prediktor för dagsljusprestanda
Bournas (2021)	Kombination av byggnadstyper inom samma kvarter kan vara en lösning för att balansera dagsljus och densitet
Sattrup and Strømman-Andersen (2013)	Nordiska länder är dominerade av användning av värmeenergi Densitet över 250%, det finns en minskning av dagsljuset, utan någon större energifördel Daylight autonomy (DA) korrelerar starkt med passiva solvinstnivåer Specifik byggnadstypologi med samma densitetseffekt upp till 48% DA, och upp till 16% av den totala energiprestandan
Bournas (2020)	Usefull daylight illuminance (UDI) visade det starkaste sambandet med urban densitet / associerades signifikant med genomsnittlig byggnadshöjd i omgivningen och värmelast

3. Paper II

Steady-State Calculation versus Dynamic Energy Simulations during the Early Design Phase

Byggs på insikterna från Paper I, som identifierade nyckelmetoder för att analysera energianvändning (värmebehov) och dagsljus i täta urbana miljöer, tar Paper II denna forskning vidare genom att jämföra stationära beräkningar och dynamiska energisimuleringar. Detta paper undersöker specifikt dessa simuleringar i tidiga skeden.

Forskningsfrågor:

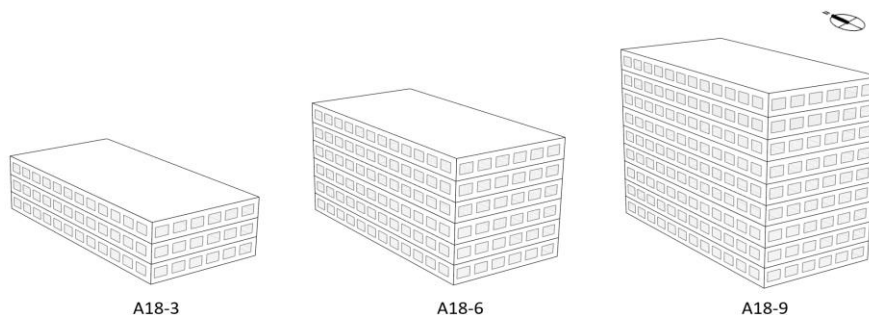
- Hur jämför sig indata och utdata från stationära beräkningar på ett enkelt byggnadskvarter med dynamiska simuleringar?
- Vilka är fördelarna och begränsningarna med stationära beräkningar och dynamiska energisimuleringar?

3.1 Metod

Metoden integrerar både stationära och dynamiska simuleringsmetoder med fokus på ett enskilt bostadsbyggnadskvarter, modell A18, som modifierades för att representera tre variationer av ökande densitet genom att lägga till våningar (Figur 1): tre våningar (A18-3), sex våningar (A18-6), och nio våningar (A18-9). Dessa variationer möjliggör en undersökning över olika potentiella urbana utvecklingsscenarier. I alla modeller var window-to-wall ratio (WWR) konstant på 30%, vilket är ett typiskt värde som finns i bostadsbyggnader.

Med användning av Rhinoceros 7 och Grasshopper-programvara med EnergyPlus-motorn via ClimateStudio-plugin (Grasshopper, 2022), designades simuleringarna för att säkerställa en omfattande analys och integration inom arkitektoniska modelleringsarbetsflöden. Utvecklingsnivån (LOD) 200 användes för att tillhandahålla tillräcklig detalj för exakta uppskattningar av energianvändning samtidigt som enkelheten som krävs för analys i tidiga skeden bibehölls. Två huvudmetoder användes för simulering:

- **Kontrollmetod:** Denna använde modifierade väderdata för att skapa ett baslinjescenario utan solstrålning, med fokus på stationära förhållanden för att möjliggöra en direkt jämförelse med dynamiska modeller under kontrollerade förhållanden.
- **Fullvädersmetod:** Inkorporerade faktiska data för solstrålning och miljöförhållanden för att utvärdera hur varje simuleringsmetod svarar på mer dynamiska och realistiska inställningar.



Figur 1. Byggnadsmodell A18 med 3 våningar (A18-3), 6 våningar (A18-6) och 9 våningar (A18-9).

Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Steady-State Calculation versus Dynamic Energy Simulations during the Early Design Phase"; publicerad av EDP Sciences, 2023, och presenterad vid BuildSim Nordic 2023.

Kontrollmetod: Detaljerad Analys

Kontrollmetoden som användes i Paper II använde en statisk beräkningsmetod för att exakt bestämma de årliga uppvärmningsbehoven för uppvärmning baserat på värmeförlusterna från byggnadens klimatskal. Denna metod inkluderar modifierade väderdata från Köpenhamns EPW-dataset (EnergyPlus Weather

Format) (OneBuilding Climate, 2023), där utan solstrålningen och den externa temperaturen var konstant 0°C, för att etablera en konsekvent baslinje för jämförelse.

Denna uppställning underlättade beräkningen av Uppvärmningsgraddagar (HDD) (ASHRAE, 2021), ett mått som är avgörande för att uppskatta byggnadens termiska behov under stationära förhållanden. HDD beräknades som den kumulativa temperaturskillnaden över ett år mellan referensinomhustemperaturen ($T_{ref} = 21^{\circ}\text{C}$) och den konstanta utomhustemperaturen ($T_{out} = 0^{\circ}\text{C}$). Det beräknade värdet av 7665 HDD, motsvarande 183960 Uppvärmningsgradtimmar (HDH) när det multipliceras med 24, tjänade som grund för efterföljande beräkningar av värmeförluster (Tabell 2). Slutligen erhöles det totala årliga uppvärmningsbehovet för uppvärmning, med hänsyn till värmeåtervinning på ventilationssystemet, genom att kombinera värmeförlusterna från Q_{vent} och Q_{cond} betecknade som Q_{total} . Division av HDH-värdet med den totala byggnadsytan (A_{temp}) gav den årliga energiintensiteten för uppvärmning med värmeåtervinning på ventilationssystemet, uttryckt i kWh/m².

Tabell 2. Ekvationer för att uppskatta värmeförluster:

Equation	
(1)	$Q_{cond} = 1.3(U \cdot A) HDH$
(2)	$Q_{vent} = [\rho \cdot cp \cdot q_{vent} \cdot (1 - \eta) + \rho \cdot cp \cdot q_{leakage}] HDH$

Där:

- T_{ref} : Referenstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{out} : Genomsnittlig årlig utomhustemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- U : Värmegenomgångskoefficient för specifika byggnadskomponenter ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- A : Yta för specifika byggnadskomponenter (m^2)
- HDH: Uppvärmningsgradtimme ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)
- Q_{cond} : Årlig värmeförlust genom ledning ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{år}$)
- Q_{vent} : Årliga värmeförluster på grund av luftläckage och ventilation ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{år}$)
- ρ : Luftdensitet vid rumstemperatur ($1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$)
- cp : Specifik värmekapacitet för luft ($1000 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- q_{vent} : Ventilationshastighet enligt svenska standarder ($\text{L}/\text{s}, \text{m}^2$)
- η : Värmeväxlareffektivitet (0.75)
- $q_{leakage}$: Läckage vid 50 Pa övertryck ($\text{m}^3/\text{m}^2, \text{s}$)

Detta detaljerade statistiska tillvägagångssätt möjliggjorde en direkt jämförelse med dynamiska simuleringar genom att tillhandahålla en tydlig, kontrollerad baslinje mot vilken den dynamiska modellens respons på miljövariabler kunde bedömas. Medan den statistiska metoden visade sig effektiv i en kontrollerad miljö, blev dess begränsningar uppenbara när dynamiska miljöfaktorer som solstrålning återinfördes, vilket utforskades i "Fullvädersmetoden".

Fullvädersmetoden: Detaljerad Analys

Byggande på insikterna från "Kontrollmetoden" introducerar "Fullvädersmetoden" miljödata som är medvetna om platsen för att utvärdera byggnadsprestanda under dynamiska förhållanden. Denna metod använder det omfattande meteorologiska datasetet från Köpenhamns EPW-fil för åren 2007-2021, vilket inkluderar detaljerade uppgifter om solstrålning och temperaturfluktuationer. Denna data ger en realistisk baslinje för att förstå hur byggnader svarar på naturliga miljöförändringar över tid, vilket är avgörande för att utveckla hållbara stadsdelar som kan anpassa sig till varierande klimat.

I denna metod beräknas Uppvärmningsgraddagar (HDD) för temperaturer under 18°C, vilket ger totalt 3132 HDD. Detta översätts till 75168 Uppvärmningsgradtimmar (HDH) när det multipliceras över årets timmar. Denna beräkning är grundläggande för att kvantifiera uppvärmningsbehoven under typiska klimatförhållanden och erbjuder en realistisk bedömning av uppvärmningsbehoven. Dessutom justeras uppvärmningsinställningspunkten i den statistiska modellen till 18°C för att ta hänsyn till passiva solvärmevinster. Denna justering, som bygger på en uppskattning att solvinster minskar uppvärmningskraven med cirka 3°C, låter oss simulera en mer exakt termisk respons av byggnader till solstrålning.

De dynamiska simuleringarna, som genomförs med ClimateStudio-pluginet inom Grasshopper/Rhinoceros 3D-miljön (Solemma, 2022), ger en nivå av precision till analysen. Varje våning i byggnaden modelleras som en separat termisk zon, vilket ger en detaljerad förståelse för hur solvinster och miljöförhållanden påverkar

olika delar av byggnaden. Detta zoneringsansats är särskilt insiktsfullt för att identifiera hur termiska beteenden varierar med byggnadshöjd och orientering, vilket kan påverka den totala energieffektiviteten i strukturen avsevärt.

Till skillnad från Kontrollmetoden, som förenklade miljöförhållanden för att etablera en baslinje för jämförelse, avslöjar Fullvädersmetodens integration av faktiska väderdata komplexa interaktioner mellan byggnaden och dess omgivning. Detta tillvägagångssätt visar inte bara hur miljöfaktorer som solstrålning kan utnyttjas för att förbättra byggnadsprestanda utan också belyser begränsningarna hos statiska modeller som misslyckas med att fånga dessa dynamiker. Till exempel är de avvikelser som observerats mellan de stationära och dynamiska modellerna i denna metod en indikation på den kritiska rollen som dynamiska miljöinteraktioner och termisk massfördröjning av material har.

3.2 Resultat

Den jämförande analysen ger insikter i tillämpningen av båda metoderna inom EDP (Early Design Phase). Medan stationära beräkningar erbjuder ett snabbt bedömningsverktyg, misslyckas de med att fånga komplexa miljödynamiker som är kritiska i energieffektiv bygghuset, särskilt i kallare klimat. Dynamiska simuleringar, även om de är mer resurskrävande, ger detaljerade insikter som är viktiga för att uppnå exakta förutsägelser av energiprestanda. Denna studie understryker behovet av en kombinerad metod i EDP, genom att utnyttja den snabba bedömningsförmågan hos stationära beräkningar tillsammans med den omfattande analysen som tillhandahålls av dynamiska simuleringar. Resultaten från de två huvudmetoderna (Tabell 3 och Tabell 4) är:

- Kontrollmetodens Resultat: Resultaten visade en nära överensstämmelse mellan stationära och dynamiska metoder när solstrålning uteslöts, med avvikelser från 2,2 % till 5,4 %. Detta tyder på att stationära beräkningar kan ge snabba och tillförlitliga uppskattningar för grundläggande bedömningar av termisk prestanda.
- Fullvädersmetodens Resultat: När solstrålning inkluderades observerades betydande avvikelser, med stationära beräkningar som avvek från dynamiska simuleringar med 36,7 % till 39,5 %. Detta belyste begränsningarna hos stationära metoder, särskilt deras oförmåga att ta hänsyn till dynamiska miljöinteraktioner såsom solvinster och termiska massa effekter.

Tabell 3. Resultat för värmekrav med modifierad "kontrollmetod":

Static Model (s)	Dynamic Model (d)	Static (kWh/m ² år)	Dynamic (kWh/m ² år)	Relative difference (%)
A18-3s	A18-3d	92	90	2.2
A18-6s	A18-6d	79	82	3.8
A18-9s	A18-9d	74	78	5.4

Tabell 4. Resultat för värmekrav med "fullvädersmetoden":

Static Model (s)	Dynamic Model (d)	Static (kWh/m ² år)	Dynamic (kWh/m ² år)	Relative difference (%)
A18-3s	A18-3d	38	23	39.5
A18-6s	A18-6d	32	20	37.5
A18-9s	A18-9d	30	19	36.7

Paper II broar inte bara de grundläggande metoderna som etablerades i Paper I med tillämpningarna i Paper III, utan ger också arkitekter och stadsplanerare en detaljerad jämförande analys av simuleringsverktyg. Dessa resultat förbättrar förmågan att bedöma energiprestanda från de tidiga stadierna av ett projekt, vilket informerar mer hållbara strategier för stadsutveckling.

4. Paper III

Effect of urban density on heating demand and daylighting in Nordic residential buildings

Med utgångspunkt i metoderna och resultaten från Paper I och Paper II utforskar Paper III effekterna av byggnadsdensitet och byggnadskvarterets form på värmekrav och dagsljus i flerbostadshus. Denna del av studien granskar variationerna i energianvändning och dagsljusstillgång som resultat av olika urbana densiteter och arkitektoniska typologier (Courtyard, U-shape, och M-shape form).

Forskningsfrågor:

- För ett typiskt nordiskt bostadskvarter, vad är effekten av ökad byggnadsdensitet på uppvärmningsbehov och dagsljus?
- Med fokus på Courtyard byggnadstypologi, hur påverkar ökad densitet (genom att ändra byggnadsdjup och höjd) uppvärmningsbehov och dagsljus?
- Kan implementeringen av en "U-shape" eller "M-shape" (mixed with tower) derivat av Courtyard typen resultera i en mer energieffektiv byggnadskvarter som erbjuder en kompromiss mellan uppvärmningsbehov och dagsljus?

4.1 Metod

Denna forskning bygger på parametriska 3D-modellerings- och analyser. Den fokuserar på att jämföra uppvärmningsbehov och dagsljusprestanda över tolv generiska modeller, vilka representerar den vanliga nordiska Courtyard byggnadstypologin (Rådberg & Friberg, 2001), samt åtta derivatmodeller.

Modellerna undersöks under olika konfigurationer för att bedöma deras prestanda mot ökande grader av densitet, som representeras av variationer i Floor Area Ratio (FAR). FAR jämför byggnadernas brutto golvyta med deras tomtyta (Metropolitan Council, 2021). Till exempel indikerar en FAR på 1.5 att byggnadens totala golvyta är 1.5 gånger tomten den upptar. Att öka antalet våningar och byggnadsdjup höjer följaktligen FAR.

Studien är strukturerad i två huvudsteg:

1. Jämförelse av Courtyard modeller vid olika densiteter:

- Courtyard modeller: Dessa modeller varierar i djup (10m, 13m, 16m) och höjd (antal våningar).
- Simulering och analys av prestandaindikatorer: Vertical sky component (VSC), Spatial daylight autonomy (SDa), Solstrålning och uppvärmningsbehov.

2. Utvärdering av U-Shaped och M-Shaped (mixed with tower) designer:

- U16 och M16 typologier: Dessa modeller analyseras för att bibehålla samma FAR som den högdensitets Courtyard modellen (C16), vilket möjliggör en jämförande utvärdering med den grundläggande Courtyard designen.
- Simulering av prestandaindikatorer: Vertical sky component (VSC), Spatial daylight autonomy (SDa), solstrålning och värmekrav.
- Jämför med Courtyard: jämför prestandaindikatorer för U-Shaped och M-Shaped designer mot Courtyard baslinjen för att avgöra om dessa alternativa typologier erbjuder förbättrade resultat när det gäller energieffektivitet och optimering av dagsljus. Denna jämförelse hjälper till att utforska om ändring av byggnadsformen kan leda till bättre total byggnadsprestanda utan att öka fotavtrycket.

Simuleringsinställningar och modelleringsmetod:

Level of Development (LOD)-systemet användes för att bestämma den nödvändiga detaljnivån för varje simulering, och definierade modeller baserade på branschstandarder inom arkitektur, ingenjörsvetenskap och byggindustrin (Sacks et al., 2018). Denna studie använde LOD 100 för solstrålning och Vertical sky component (VSC), LOD 200 för värmekrav och LOD 300 för simuleringar av Spatial Daylight Autonomy (sDA) (Tabell 5).

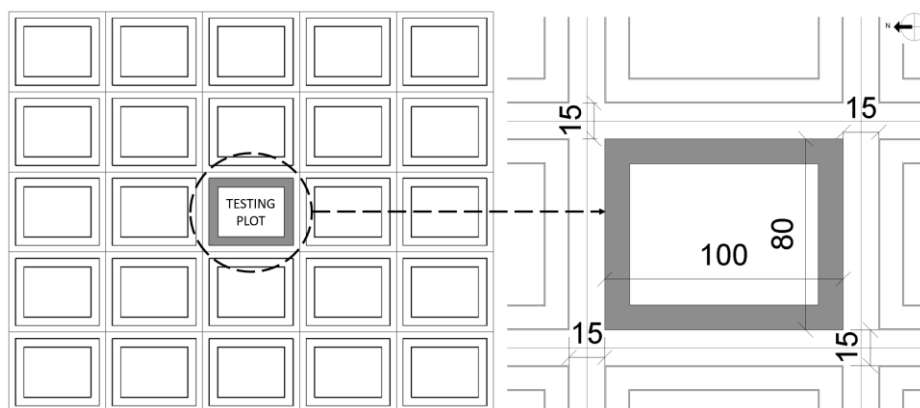
Tabell 5. Lista över prestandaindikatorer som valts för analys.

Namn	Tröskel	LOD	Beräknings- eller simuleringsmetod
Solstrålning	-	100	Kumulativ årlig solstrålning per fasadyta [kWh/m ²]
Vertical sky component (VSC)	27 %	100	Mängden himmelsbelysning på en vertikal yta (fasad) jämfört med horisontell global belysning från en ostörd himmel baserat på CIE:s fördelning för övertäckt himmel [%]
Uppvärmningsbehov	20 kWh/m ²	200	Årligt värmekrav per golvarea [kWh/m ²]
Spatial daylight autonomy (sDA _{300/50%})	50 %	300	Andel golvarea [%] där 300 lux belysning uppnås under 50% av drifttiden

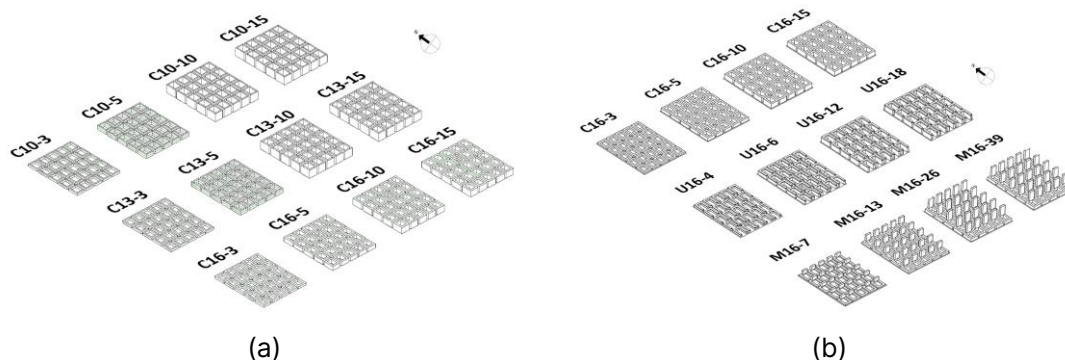
Geometrisk parametrisk modellering genomfördes med Rhinoceros 7 (Robert McNeel & Associates, 2022) och Grasshopper (Grasshopper, 2022). Simuleringarna baserades på Energy+ och Radiance Lighting Simulation System (Larson & Shakespeare, 1998). Plugins inkluderade ClimateStudio för värme, solstrålning och dagsljus (Solemnia, 2022) och Honeybee för VSC (Ladybug Tools, Honeybee, 2022). Väderdata kom från OneBuilding (OB) (OneBuilding Climate, 2023), med användning av Köpenhamns EPW-fil (DNK_HS_Copenhagen-Kastrup.AP.061800_TMYx.2004-2018). Egenskaperna (Tabell 1x) återspeglar vanliga värden i nyare nordiska byggnader (Sveby, 2015).

Geometrisk parametrisk modellering använde ett rutnät med enheter på 5 m x 5 m för ett homogent kvarter i denna studie (Tabell 7), men endast den centrala bostadskvarter analyserades (Figur 2). Den grundläggande bostadskvarter är en rektangel på 100 m x 80 m med 15 m breda gator mätta från byggnadens yttre fasad. Denna gatubredd representerar en typisk kvarterdimension som finns i nordiska stadskärnor. Window to wall ratio (WWR) sattes till 30 %, ett typiskt värde för bostadsbyggnader som säkerställer tillräckligt dagsljus i perifera rum (Dubois & Flodberg, 2013). 3D Modellerna inkluderade inte detaljer om tak, fasad, balkonger, stadsinfrastruktur eller vegetation. Varje våning hade en höjd på 3 m, med ytterväggar som var 0,4 m tjocka och bjälklag 0,3 m tjocka. Studien fokuserade på byggnadsdensitet och EDP från LOD 100 till 300, och exkluderade andra arkitektoniska och kontextuella detaljer.

Gårdstypologin Courtyard (C) analyserades med djup på 10 m (C10), 13 m (C13) och 16 m (C16). Varje modell hade fyra våningsalternativ: 3 våningar (t.ex. C10-3), 5 våningar (t.ex. C10-5), 10 våningar (t.ex. C10-10) och 15 våningar (t.ex. C10-15), totalt 12 modeller (Figur 3). Vardagsrummen var 5 m djupa på gårdsidan. På gatusidan var de 5 m för C10, 6,5 m för C13 och 8 m för C16, det senare som ett värsta scenariot (Figur 4). Nästa steg jämförde det värsta dagsljusscenarioet för C16 med U-shape (U16) och M-shape (M16) typologier, båda 16 m djupa, varierande antal våningar men bibehållande samma FAR (Figur 3). Åtta modeller skapades (Tabell 7), med 5 m djupa vardagsrum på gårdsidan och 8 m på gatusidan (Figur 5).



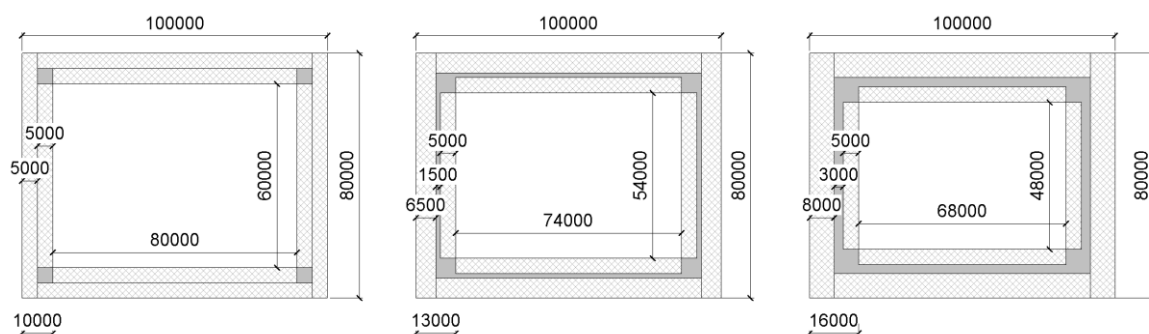
Figur 2. Byggnadskvarter med enhetligt rutnät på 5x5 enheter med analys bostadskvarter på 100m x 80m. Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".



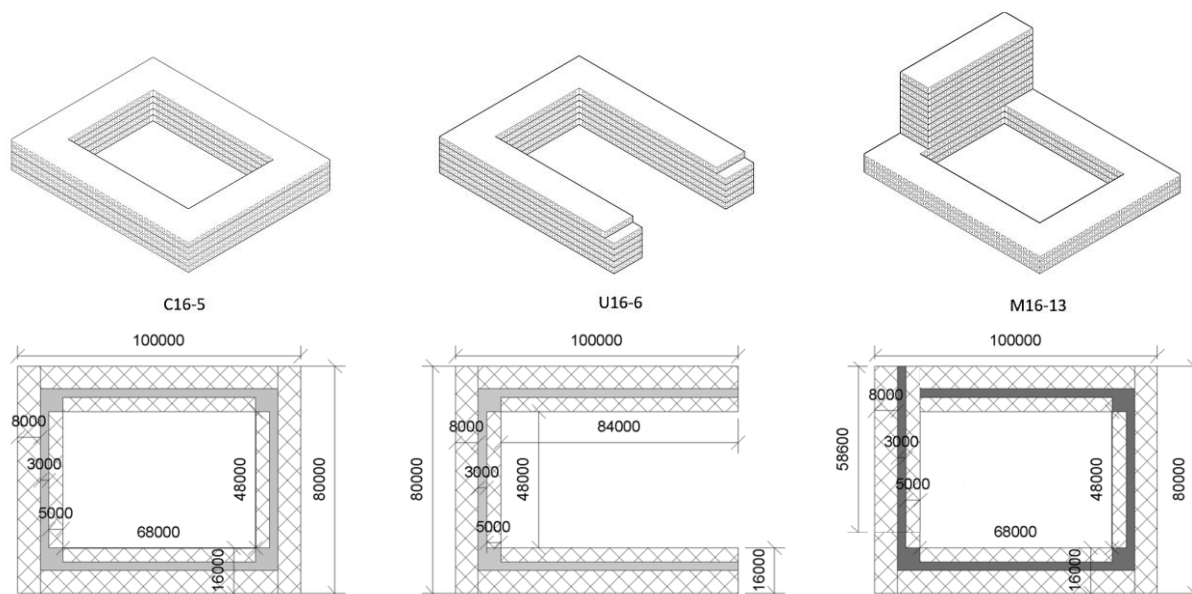
Figur 3. Bostadskvarter för alla simuleringsvariationer. (a) Jämförelse av Courtyard typologier. (b) Jämförelse av Courtyard, U-shape och M-shape. Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".

Tabell 6. Simuleringsparametrar.

Parameter	Värde
Konstruktion	
U-värde för ytterväggar	0.13 W/m ² ·K
U-värde för tak	0.15 W/m ² ·K
U-värde för mark/exponerade golv	0.15 W/m ² ·K
U-värde för innerväggar	0.30 W/m ² ·K
U-värde för innetak/golv	0.30 W/m ² ·K
Termisk bro i klimatskal	30%
U-värde för fönster	1.05 W/m ² ·K
g-värde för fönster	0.50
Synligt ljus normala egenskaper	0.68
Luftutbyten	
Infiltration	0.4 l/m ² /s
Variationsprofil	kontinuerligt på
Mekanisk ventilation	
Minsta flöde	0.35 l/s/m ²
Variationsprofil	kontinuerligt på
Verkningsgrad för värmeåtervinning	75%
Naturlig ventilation	
Ventilationshastighet	0.3 l/s/m ² , t > 26°C
Variationsprofil	kontinuerligt på
Uppvärmning	
Inställningspunkt för uppvärmning, vinter	21°C (kontinuerligt på)
Uppvärmnings-COP	1
Belastningar	
Personer enligt ASHRAE55	
Persondensitet	0.033 P/m ²
Metabol hastighet	1 met
Variationsprofil	100% beläggning: 18:00 – 08:00 40% beläggning: 08:00-18:00
Utrustning	
Variationsprofil	0.35 W/m ² kontinuerligt på
Ytreflektans	
Mark (Albedo)	20%
Omgivning	30%
Yttre vägg	30%
Inre vägg	80%
Inre tak	80%
Fönsterram	80%
Golv	30%



Figur 4. Jämförelse av Courtyard 10 m-djupt (byggnad C10), 13 m-djupt (byggnad C13), och 16 m-djupt (byggnad C16). Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".



Figur 5. Courtyard typologier (C16) med en U-shape (U16) och M-shape (M16).

Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".

Tabell 7. Byggnadstyp och variabler för varje typologi.

Namn	Djup (m)	Antal våningar	Tomtyta (m ²)	Golvyta (m ²)	FAR
C10-3	10	3	8000	9600	1.2
C10-5	10	5	8000	16000	2.0
C10-10	10	10	8000	32000	4.0
C10-15	10	15	8000	48000	6.0
C13-3	13	3	8000	12012	1.5
C13-5	13	5	8000	20020	2.5
C13-10	13	10	8000	40040	5.0
C13-15	13	15	8000	60060	7.5
C16-3	16	3	8000	14164	1.8
C16-5	16	5	8000	23680	3.0
C16-10	16	10	8000	47360	5.9
C16-15	16	15	8000	71040	8.9
M16-7	16	7	8000	14164	1.8
M16-13	16	13	8000	23680	3.0
M16-26	16	26	8000	47360	5.9
M16-39	16	39	8000	71040	8.9
U16-4	16	4	8000	14164	1.8
U16-6	16	6	8000	23680	3.0
U16-12	16	12	8000	47360	5.9
U16-18	16	18	8000	71040	8.9

Analys av parameter

Detta avsnitt beskriver de prestandaindikatorer som används i studien för att utvärdera effekterna av byggnadsdensitet på uppvärmningsbehov och dagsljus i nordiska bostadsbyggnader. Prestandaindikatorerna inkluderar Vertical sky component (VSC), Spatial Daylight Autonomy (sDA_{300/50%}), Solstrålning och Värmekrav. Varje metrik förklaras med avseende på dess relevans, beräkningsmetod och betydelse för att bedöma byggnadsprestanda under olika konfigurationer och densiteter.

Vertical sky component (VSC)

Vertikal Skykomponent (VSC) mäter mängden diffust dagsljus som tas emot vid en punkt, relativt den diffusa belysningen från en CIE övertäckt himmel (Littlefair, 2011). Till skillnad från vertikal dagsljusfaktor (VDF) tar VSC inte hänsyn till reflektioner från marken eller närliggande byggnader, utan beaktar endast den infallande diffusa belysningen från den övertäckta himmelfördelningen utan att faktorer in fönsteregenskaper, byggnadsplanlösning eller materialreflektans (Chatzipoulka et al., 2018). VSC är en effektiv utomhusprediktor för inomhusdagsljus (Czachura et al., 2022a) och har ett linjärt förhållande med inomhus Daylight factor (DF) (Littlefair, 2010), vilket gör det till en nyckelprediktor i BRE:s handbok för dagsljus (BRE Group, 2022). En VSC över 27 % är vanligtvis önskad för bra inomhusdagsljus (Littlefair, 2011). Den maximala VSC för en ostrukturerad vy är cirka 39.6 % (Littlefair, 1998). I denna studie används VSC för att bedöma dagsljuspotentialen genom byggnadsfasaders geometri vid tidiga skede, med ett sensorrutnät på 1m x 1m för analysen.

Spatial daylight autonomy (sDA_{300/50%})

För den mer detaljerade dagsljusbedömningen används Spatial daylight autonomy (sDA). sDA anger procentandelen av en yta som uppfyller dagsljuskravet på 300 lux under 50 % av drifttimmarna (sDA_{300/50%}) (Reinhart et al., 2006). Denna prestandaindikator förbättrar DF genom att beakta alla himmelstyper årligen genom klimatbaserad dagsljusmodellering (CBDM) och är i linje med klimatdata som används i energisimuleringar. Det acceptabla minimiet för denna studie är sDA 50 % för områden som uppnår 300 lux under 50 % av tiden, i linje med europeiska och nordiska standarder (CEN, 2018; Boverket, 2023). Arbetets planförskjutning sattes till 0,8m, med ett rutnät på 1m x 1m inom rummet och ingen väggförskjutning, enligt EN 17037 (CEN, 2018). Drifttimmarna var från 06:00 till 18:00, utan skuggningsanordningar.

Solstrålning

Solstrålning är den årliga värmeenergi från sol som tas emot av alla byggnadsfasader, uttryckt i kWh/m²år. Denna studie använde ett sensorrutnät på 1m x 1m för att bedöma fasadsolstrålningen i stor skala. Data som samlats in från dessa sensorer på fasaden hjälper till att analysera hur olika byggnadskonfigurationer och densiteter påverkar mängden värmeenergi från sol som tas emot under året.

Uppvärmningsbehov

Resultaten för uppvärmningsbehov inkluderar den totala årliga energianvändningen över alla termiska zoner i byggnaden, med varje våning representerad av en enskild zon. Fokus låg på uppvärmningsbehov eftersom skandinaviska hem typiskt saknar kylsystem. Dock beaktades mekanisk ventilation (energin för att värma inkommande luft) eftersom värmeåtervinningsventilation är vanlig i skandinaviska bostäder. Även om tappvarmvatten och fastighetsel är stora energiposter i nordiska hem (Strømman-Andersen & Sattrup, 2013), är de oberoende av byggnadsdensitet och uteslöts från simuleringen.

Det årliga uppvärmningsbehovet uttryckts i kWh/m²Atemp år. För denna studie ansågs en tröskel på 20 kWh/m²år vara låg för nordiska länder, med tanke på energikravet 75 kWh/m²år för bostadsbyggnader (Boverket, 2022). Denna tröskel tar hänsyn till andra energianvändningar som tappvarmvatten (~20 kWh/m²år) och fastighetsel (~10 kWh/m²år) (Sveby, 2015).

4.2 Resultat

Courtyard Typologier

De inledande simuleringsresultaten för uppvärmningsbehov och solstrålning visas i Tabell 8 och Figur 6. Tabell 8 indikerar att både värmebehovet och solstrålningen minskar över alla byggnader när Floor Area Ratio (FAR) ökar. Märkbart visar 16 m-djupa serien (C16) de största minskningarna: värmebehovet sjunker med 54,9 % (från 24,2 till 10,9 kWh/m²/år) och solstrålningen med 50,5 % (från 503 till 249 kWh/m²/år) för C16-5. Dessa resultat tyder på att byggnadstypen C16 är mer energieffektiv jämfört med C10 och C13, särskilt när det gäller uppvärmningsbehov på grund av dess ökade kompakthet, vilket minskar fasadytan per volym. Minskningen av solstrålning är nästan linjär med ökande FAR, medan minskningen av uppvärmningsbehov är exponentiell, med en kraftig nedgång från FAR 1 till 3 och sedan en utplaning för högre FAR-värden (Figur 6).

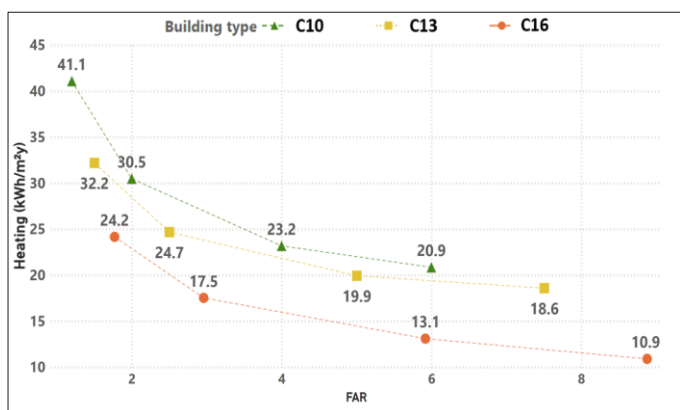
Simuleringsresultaten för VSC och sDA_{300/50%} visas i Tabell 9 och Figur 7. När byggnadsdjupet ökar från 10 m (C10) till 13 m (C13) och 16 m (C16), minskar dagsljuset avsevärt, som visas av fallet i sDA_{300/50%} värden. Figur 7 illustrerar att för alla byggnader upplever C16 de mest signifikanta minskningarna i sDA_{300/50%} och VSC när antalet våningar och FAR ökar, med de största reduktionerna 46,4 % (från 32,6 till 17,5) i VSC och 49 % (från 55,5 till 28,3) i sDA_{300/50%} för C16-15.

Tabell 8. Effekt av Courtyard-typologins densitet på uppvärmningsbehov och solstrålning.

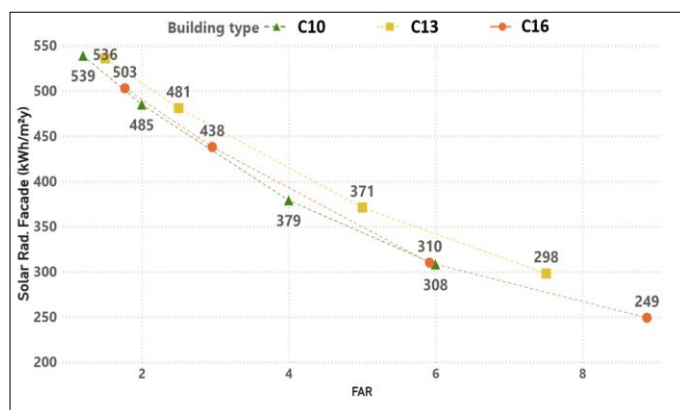
Namn	FAR	Uppvärmningsbehov (kWh/m ² Atem pår)	Uppvärmningsbehov Δ (%)	Solstrålning (kWh/m ² fasad år)	Solstrålning Δ (%)
C10-3	1.2	41.1	Base case	539	Base case
C10-5	2.0	30.5	-25.8	485	-10.0
C10-10	4.0	23.2	-43.6	379	-29.7
C10-15	6.0	20.8	-49.2	308	-42.9
C13-3	1.5	32.2	Base case	536	Base case
C13-5	2.5	24.7	-23.4	481	-10.3
C13-10	5.0	19.9	-38.1	371	-30.8
C13-15	7.5	18.6	-42.3	298	-44.4
C16-3	1.8	24.2	Base case	503	Base case
C16-5	3.0	17.5	-27.4	438	-12.9
C16-10	5.9	13.1	-45.8	310	-38.4
C16-15	8.9	10.9	-54.9	249	-50.5

Tabell 9. Effekt av Courtyard-typologier och densitet på VSC och sDA_{300/50%}.

Namn	FAR	VSC (%)	VSC Δ (%)	sDA _{300/50%} (%)	sDA _{300/50%} Δ (%)
C10-3	1.2	33.0	Base case	82.9	Base case
C10-5	2.0	29.1	-11.8	72.8	-12.2
C10-10	4.0	22.9	-30.6	55.6	-32.9
C10-15	6.0	18,7	-43.4	43.7	-47.3
C13-3	1.5	32.8	Base case	69.7	Base case
C13-5	2.5	28.9	-12.0	61.1	-12.3
C13-10	5.0	22.5	-31.5	46.0	-34.0
C13-15	7.5	18.2	-44.6	35.7	-48.8
C16-3	1.8	32.6	Base case	55.5	Base case
C16-5	3.0	28.7	-11.9	49.1	-11.5
C16-10	5.9	21.9	-32.9	36.9	-33.5
C16-15	8.9	17.5	-46.4	28.3	-49.0

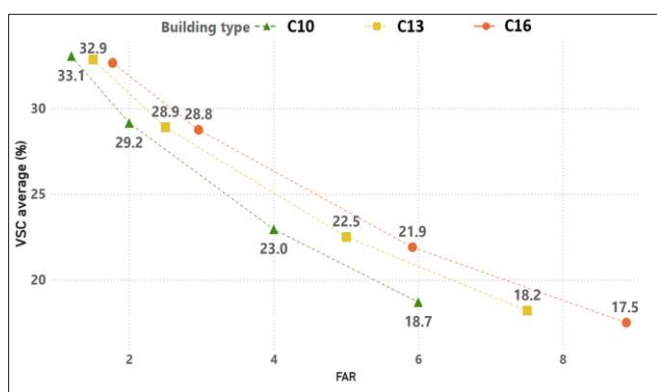


(a)

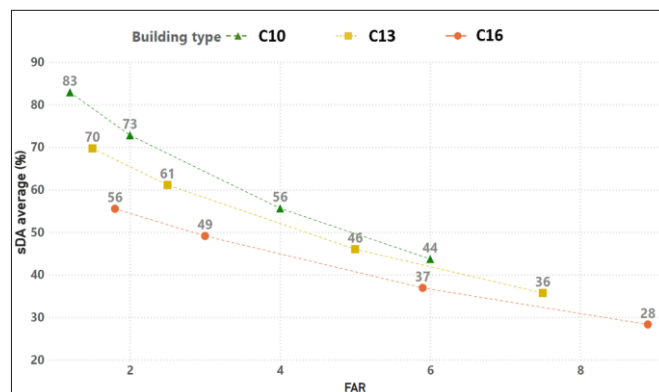


(b)

Figur 6. Courtyard (C10, C13, C16) typologiers densitetseffekt på uppvärmningsbehov (a) och solstrålning (b). Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".



(a)



(b)

Figur 7. Courtyard (C10, C13, C16) typologiers densitetseffekt på VSC (a) och sDA_{300/50%} (b). Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".

Courtyard, U-shape, and M-shape Typologier

Den andra serien av simuleringar för uppvärmningsbehov och solstrålning presenteras i Tabell 10 och Figur 8. Resultaten visar att med samma FAR leder mer kompakta byggnadsformer som "U-shape" typologin till lägre uppvärmningsbehov, vilket minskar med 35,1 % (från 13,1 till 8,5 kWh/m²/år) som visas i Figur 8. Solstrålningsvärdena är liknande över C16, U16 och M16 byggnader, där M16 får mer på grund av tornets exponering. Minskningen av uppvärmningsbehov visar återigen en exponentiell nedgång, som stabiliseras bortom en FAR på 3.

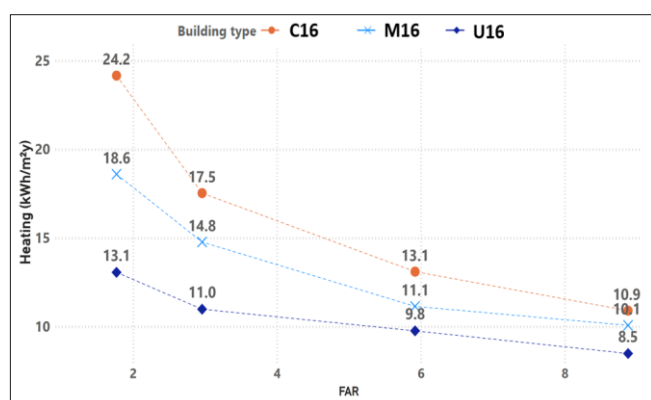
Resultat som jämför C16, M16 och U16 för VSC och sDA_{300/50%} visas i Tabell 11 och Figur 9. Trenderna visar en minskning i sDA_{300/50%} och VSC för alla byggnadstyper när antalet våningar och FAR ökar. M16 och U16 presterar konsekvent bättre än C16, där C16 visar en drastisk minskning på 49,0 % (från 55,5 till 28,3) i sDA_{300/50%} för C16-15 och en minskning på 46,4 % (från 32,7 till 17,5) i VSC för samma konfiguration.

Tabell 10. Courtyard, U-shape och M-shape typologiers densitet, på uppvärmningsbehov och solstrålning.

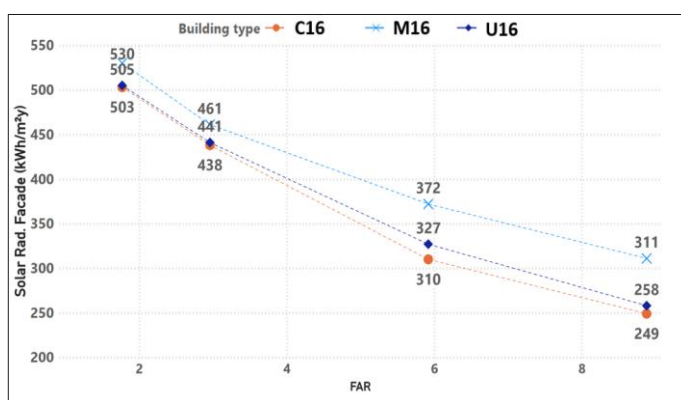
Namn	FAR	Uppvärmningsbehov (kWh/m ² år)	Uppvärmningsbehov Δ (%)	Solstrålning (kWh/m ² år)	Solstrålning Δ (%)
C16-3	1.8	24.2	Base case	503	Base case
C16-5	3.0	17.5	-27.4	438	-12.9
C16-10	5.9	13.1	-45.8	310	-38.4
C16-15	8.9	10.9	-54.9	249	-50.5
M16-7	1.8	18.6	Base case	530	Base case
M16-13	3.0	14.8	-20.6	461	-13.0
M16-26	5.9	11.1	-40.1	372	-29.8
M16-39	8.9	10.1	-45.9	311	-41.3
U16-4	1.8	13.1	Base case	505	Base case
U16-6	3.0	10.9	-15.9	441	-12.7
U16-12	5.9	9.8	-25.3	327	-35.2
U16-18	8.9	8.5	-35.1	258	-48.9

Tabell 11. Courtyard, U-shape och M-shape typologiers densitet, VSC och sDA_{300/50%}.

Namn	FAR	VSC (%)	VSC Δ (%)	sDA _{300/50%} (%)	sDA _{300/50%} Δ (%)
C16-3	1.8	32.7	Base case	55.5	Base case
C16-5	3.0	28.7	-11.9	49.1	-11.5
C16-10	5.9	21.9	-32.9	36.9	-33.5
C16-15	8.9	17.5	-46.4	28.3	-49.0
M16-7	1.8	32.7	Base case	57.3	Base case
M16-13	3.0	30.0	-8.4	53.1	-7.3
M16-26	5.9	24.0	-26.7	39.5	-31.1
M16-39	8.9	20.1	-38.6	31.6	-44.9
U16-4	1.8	32.8	Base case	59.6	Base case
U16-6	3.0	29.3	-10.4	53.1	-10.9
U16-12	5.9	22.6	-30.9	39.4	-33.9
U16-18	8.9	18.4	-43.7	29.6	-50.3

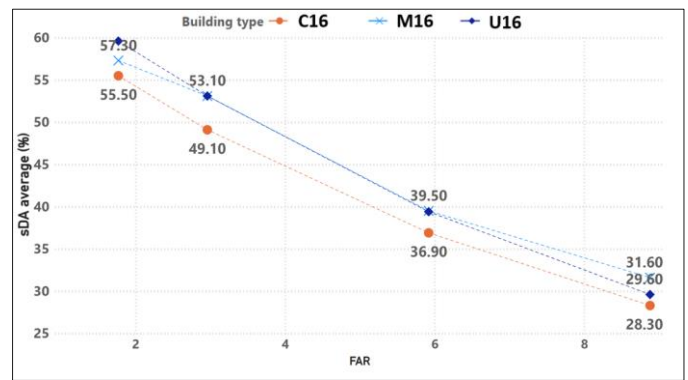
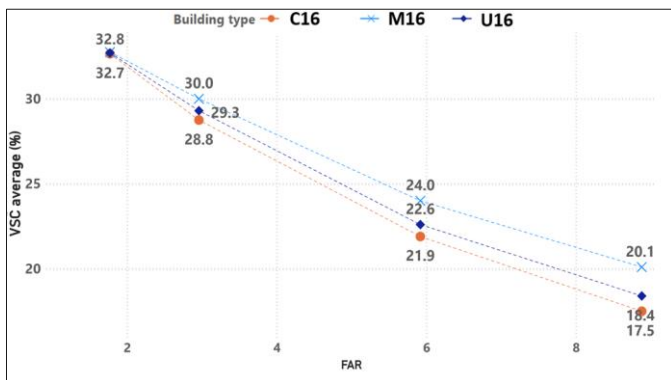


(a)



(b)

Figur 8. Courtyard (C16), U-shape (U16) och M-shape (M16) typologiers form och densitetseffekt på uppvärmningsbehov (a) och solstrålning (b). Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".



(a)

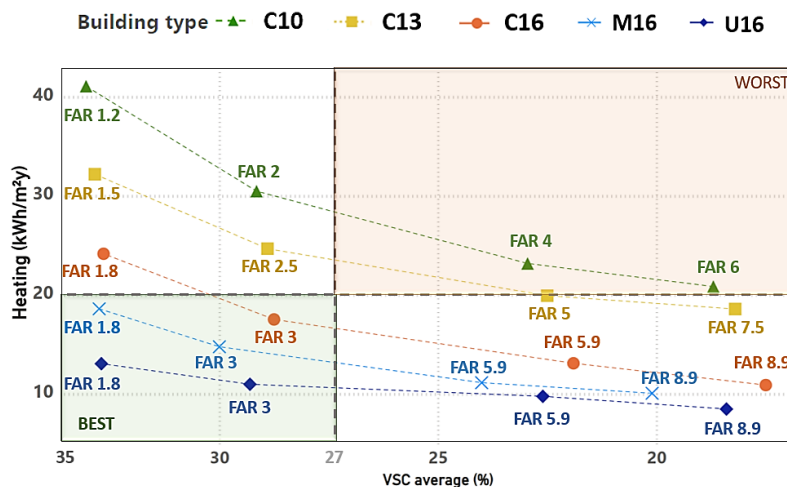
(b)

Figur 9. Courtyard (C16), U-shape (U16) och M-shape (M16) typologiers form och densitetseffekt på VSC (a) och sDA300/50% (b). Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".

Jämförelse Mellan uppvärmningsbehov och VSC

Denna sista del av studieresultaten syftar till att belysa förhållandet mellan uppvärmningsbehov och VSC för att ge en omfattande förståelse för hur byggnadsdensitet påverkar energieffektivitet och dagsljuspotential. VSC, som är en effektiv indikator på dagsljusstillgång i det tidiga skedet med en låg detaljnivå (LOD 100), jämförs här med uppvärmningsbehov för att identifiera optimala byggnadsutformningar som balanserar energieffektivitet med tillräckligt dagsljus.

Figur 10 illustrerar korrelationen mellan uppvärmningsbehov och VSC över olika byggnadsdensiteter, mot praktiska trösklar på 20 kWh/m²/år för uppvärmning och 27% för VSC. Analysen visar att en FAR på 3 markerar en vändpunkt där U-shape typologin uppnår ett lägre uppvärmningsbehov medan god dagsljusstillgång bibehålls, indikerat av högre VSC-värden. Minskning av FAR från 3 till 1,8 visar en signifikant ökning i uppvärmningsbehov, vilket antyder betydande fördelar med en ökning från låga till intermediära värden. Vidare visar resultaten att för FAR värden över 3 uppvägas minskningen i uppvärmningsbehov av en kraftig nedgång i VSC för alla byggnadstypologier, vilket etablerar FAR 3 som den optimala densitetströskeln i denna studie för nordiska förhållanden, balanserande uppvärmningsbehov med dagsljusstillgång. Denna insikt är avgörande för stadsplanerare och arkitekter som strävar efter att designa energieffektiva byggnader utan att kompromissa med dagsljus kvaliteten. Diagrammet kategoriserar prestandan för olika byggnadstypologier i 'bästa' och 'sämsta' zoner baserat på deras prestanda i förhållande till uppvärmningsbehov och VSC-värden.



Figur 10. Förhållande mellan uppvärmningsbehov och VSC för C10, C13, C16, M16 och U16.

Återgivet med tillstånd från Emanuele Pepe, "Effect of Urban Density on Heating Demand and Daylighting in Nordic Residential Buildings".

Viktiga resultat:

- Låg byggnadsdensitet (FAR 1 till 3): Byggnader med lägre FAR-värden uppvisar generellt högre VSC och högre uppvärmningsbehov. Till exempel har C10-byggnader vid FAR 1,2 och C13-byggnader vid FAR 1,5 den högsta VSC men också de högsta uppvärmningsbehov, vilket indikerar att lägre densitet tillåter mer dagsljus men kräver mer energi för uppvärmning.
- Intermediär Densitet (FAR 3): FAR 3-märket representerar en kritisk vändpunkt där balansen mellan uppvärmningsbehov och VSC börjar skifta. Vid FAR 3 visar U16 och M16 typologier förbättrad prestanda med lägre uppvärmningsbehov och rimligt hög VSC, vilket gör dem lämpliga för att optimera både energieffektivitet och dagsljus.
- Hög Densitetskonfigurationer (FAR 5,9 till 8,9): När densiteten ökar bortom FAR 3 minskar uppvärmningsbehov avsevärt, särskilt för C16, M16 och U16 typologier. Dock sjunker även VSC-värdena, vilket indikerar minskad dagsljusstillgång. Till exempel visar C16 vid FAR 8,9 en betydande minskning i uppvärmningsbehov men också en markant minskning i VSC.
- Optimal Typologi: U16 typologin, särskilt vid FAR 3 och bortom, bibehåller en balans mellan lågt uppvärmningsbehov och tillräcklig VSC, vilket gör den till ett fördelaktigt val för täta stadsmiljöer. Den M16 presterar också väl, med lågt uppvärmningsbehov och bibehåller bättre VSC jämfört med C16 Courtyard typologin vid liknande byggnadsdensitet.

4. Diskussion

Studieresultaten från Paper I, II och III belyser tillsammans balansen som krävs för att optimera byggnadsdensitet, uppvärmningsbehov och dagsljus i nordiska bostadsbyggnader. Dessa studier understryker den avgörande rollen av byggnadsform och byggnadsdensitet för att uppnå energieffektivitet och tillräckligt dagsljus, men avslöjar också de inneboende kompromisser som är involverade. Vertical Sky Component (VSC) framträder som en pålitlig indikator på dagsljuspotentialen i den tidiga skede. Denna prestandaindikator effektivitet ligger i dess förmåga att kvantifiera mängden himmelsljus som träffar en punkt, vilket direkt påverkar dagsljusstillgången i en byggnad. När den kopplas till uppvärmningsbehov ger VSC ett kraftfullt verktyg för att identifiera optimala byggnadslösningar som balanserar energieffektivitet med tillräckligt dagsljus.

Ingen av de undersökta designerna uppfyllde VSC 27%-trösklarna och dagsljuskravsnivån (sDA300/50% \geq 50%) för någon konfiguration med FAR större än 3, med en 30% WWR och en gatubredd på 15 meter. Detta antyder en gräns för förtätning för nordiska länder, bortom vilken det blir svårt att uppnå både låga uppvärmningsbehov och tillräckligt dagsljus. Vid FAR 3 uppnår den U-shape typologin ett lägre uppvärmningsbehov samtidigt som god dagsljusstillgång bibehålls, vilket indikeras av högre VSC-värden. Denna slutsats är i linje med tidigare studier som identifierade en tomtkvot på upp till 300% (FAR = 3) i en femvåningsbyggnad med ett djup på 10 meter som en bra kompromiss mellan energianvändning och dagsljus.

Byggnader som M16 eller U16, utformade för att förbättra dagsljusstillgång, visar bättre prestanda när det gäller uppvärmningsbehov och solstrålning jämfört med traditionella Courtyard typologier. U16 typologin visar överlägsen prestanda på grund av sin optimerade design som kombinerar formfaktor med exponering för solljus på gårdssidan. Dessa blandade typologier med väl utformade former kan öka byggnadsdensitet samtidigt som dagsljusstillgång säkerställs, vilket ger betydande förbättringar i uppvärmningsbehov och dagsljus.

Trots detta står byggnadsdensitet optimering ofta i konflikt med dagsljusstillgång. Täta byggnadskvarter med trånga gator skapar skuggade förhållanden för de flesta lägenheter på lägre våningsplan. Detta understryker behovet av koordinerad planering och samdesignprocesser som beaktar utvecklingen av närliggande byggnader. Att säkerställa dagsljusstillgång samtidigt som byggnadsdensitet optimering kräver ett omfattande angreppssätt som integrerar byggnadskvarterform med stadsplaneringsstrategier.

Studien bygger på förenklad byggnadskvarter och typologier, vilket var nödvändigt för kontrollerade jämförelser, men begränsar dess tillämpbarhet till de komplexitet som finns i verkliga urbana miljöer. Trots

dessa begränsningar erbjuder studien insikter som kan informera politiska beslut och standarder, särskilt i utvecklingen av blandade Byggnadsutformningar som prioriterar dagsljustillgång inom nordiska stadsutvecklingar. Genom att förstå och tillämpa dessa insikter kan stadsplanerare och arkitekter bidra till utvecklingen av hållbara, energieffektiva och beboeliga stadsmiljöer. Framtida forskning bör sträva efter att förfinas simuleringsmodeller för att inkludera ytterligare variabler som innovativa byggnadsformer, konstruktionslösningar, termisk komfort och överhettningsoverväganden, energigenereringsmöjligheter och framtida klimatförhållanden.

5. Slutsatser

Resultaten indikerar att byggnadsdensitet kan minska energiförbrukningen för uppvärmning, men det påverkar också negativt dagsljustillgång. Vidare belyser studien potentialen av att variera byggnadsdjup och höjder, bibehålla samma Floor Area Ratio (FAR) och integrera olika typologier med väl utformade former för att uppnå högre densitet samtidigt som tillräcklig dagsljustillgång säkerställs.

De slutsatser av denna studie sammanfattas enligt följande:

- En kvartersdensitet på FAR 3 identifieras i analyser som en kritisk tröskel för att balansera uppvärmningsbehov och dagsljus i nordiska länder. Detta utifrån ett Window-to-wall ratio (WWR) på 30 % och en gatubredd på 15 meter.
- Att i tidiga skeden utvärdera både Vertical Sky Component (VSC) och byggnadens uppvärmningsbehov ger värdefullt beslutsunderlag för att fastställa den optimala byggnadsformen och densitetströskeln.
- Innovativa byggnadsformer och blandade typologier som prioriterar dagsljustillgång kan uppnå motsvarande uppvärmningsbehov samtidigt som de förbättrar dagsljuset jämfört med traditionella Courtyard typologier (gårdkvarter).
- Den U-shape typologin U16 visar bättre prestanda avseende värmebehov, solstrålning, VSC och sDA_{300/50%} jämfört med typologierna C16 (Courtyard) och M16 (M-shape).
- Det finns en koppling mellan byggnadsdensitet och solvärmevinster; dock har formfaktor och byggnadsform en större inverkan på det totala värmebehovet och dagsljustillgång.

Litteraturförteckning

Ahmadian, E., Sodagar, B., Bingham, C., Elnokaly, A., & Mills, G. (2021). Effect of urban built form and density on building energy performance in temperate climates. *Energy and Buildings*, 236, 110762. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110762>

Aksamija, A. (2012). *BIM-Based Building Performance Analysis: Evaluation and Simulation of Design Decisions*. aceee.

Aksamija, A. (2018). Methods for Integrating Parametric Design with Building Performance Analysis. *Proceedings of the EAAE/ARCC International 2018 Conference, Philadelphia, PA, May 16-18*.

ASHRAE. (2021). *ASHRAE handbook: fundamentals*.

Ayoub, M. (2019). 100 Years of daylighting: A chronological review of daylight prediction and calculation methods. *Solar Energy*, 194, 360–390. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.072>

Bournas, I. (2020). Daylight compliance of residential spaces: Comparison of different performance criteria and association with room geometry and urban density. *Building and Environment*, 185, 107276. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107276>

Bournas, I. (2021). Swedish daylight regulation throughout the 20th century and considerations regarding current assessment methods for residential spaces. *Building and Environment*, 191, 107594. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107594>

Bournas, I., & Dubois, M. C. (2019). Daylight regulation compliance of existing multi-family apartment blocks in Sweden. *Building and Environment*, 150, 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.013>

Boverket. (2022). *Boverkets föreskrifter om ändring i Boverkets byggregler (2011:6) - föreskrifter och allmänna råd*. <https://rinfo.boverket.se/BFS2011-6/pdf/BFS2020-4.pdf>

Boverket. (2023). *Remiss om Boverkets förslag till föreskrifter om skydd med hänsyn till hygien, hälsa och miljö samt om hushållning med vatten och avfall*. Boverket. Retrieved April 26, 2023, from <https://www.boverket.se/sv/lag--ratt/boverkets-remisser/remiss-boverkets-forslag-till-foreskrifter-om-hygien-halsa-och-miljo/>

Boyko, C. T., & Cooper, C. L. (2011). Clarifying and re-conceptualising density. *Progress in Planning*, 76(1), 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.07.001>

BRE Group. (2022). *Right to Light Planning: Site Layout Planning for Natural light* | BRE Group. BRE Group | Building a Better World Together. <https://bregroup.com/services/testing-certification-verification/indoor-environment-testing/natural-light/>

CEN. (2018). *BS EN 17037:2018+A1:2021 Daylight in buildings*. <https://www.en-standard.eu>. Retrieved March 3, 2023, from <https://www.en-standard.eu/bs-en-17037-2018-a1-2021-daylight-in-buildings/>

Chatzipoulka, C., Compagnon, R., Kaempf, J., & Nikolopoulou, M. (2018). Sky view factor as predictor of solar availability on building façades. *Solar Energy*, 170, 1026–1038. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.028>

Czachura, A., Gentile, N., Kanters, J., & Wall, M. (2022). Identifying Potential Indicators of Neighbourhood Solar Access in Urban Planning. *Buildings*, 12(10), 1575. <https://doi.org/10.3390/buildings12101575>

Czachura, A., Kanters, J., Gentile, N., & Wall, M. (2022). Solar Performance Metrics in Urban Planning: A Review and Taxonomy. *Buildings*, 12(4), 393. <https://doi.org/10.3390/buildings12040393>

Dubois, M., & Flodberg, K. (2013). Daylight utilisation in perimeter office rooms at high latitudes: Investigation by computer simulation. *Lighting Research & Technology*, 45(1), 52–75. <https://doi.org/10.1177/1477153511428918>

Grasshopper. (2022). Algorithmic Modeling for Rhino. Retrieved October 21, 2023, from <https://www.grasshopper3d.com/>

IEA. (2016). World Energy Outlook. Retrieved December 6, 2023, from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>

IEA. (2020). World Energy Outlook. Retrieved December 6, 2023, from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

Ko, Y. (2013). Urban Form and Residential Energy Use. *Journal of Planning Literature*, 28(4), 327–351. <https://doi.org/10.1177/0885412213491499>

Ladybug Tools / Honeybee. (2022). Retrieved May 1, 2023, from <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>

Laituri, M., Davis, D. T., Sternlieb, F., & Galvin, K. M. (2021). SDG Indicator 11.3.1 and Secondary Cities: An analysis and assessment. *ISPRS International Journal of Geo-information*, *10*(11), 713. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110713>

Larivière, I., & Lafrance, G. (1999). Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban density. *Energy Economics*, *21*(1), 53–66. [https://doi.org/10.1016/s0140-9883\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/s0140-9883(98)00007-3)

Larson, G. W., & Shakespeare, R. (1998). *Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization*. Morgan Kaufmann Publishers.

Li, D. H., Cheung, G. H., Cheung, K., & Lam, J. C. (2009). Simple method for determining daylight illuminance in a heavily obstructed environment. *Building and Environment*, *44*(5), 1074–1080. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.011>

Littlefair, P. (1998). Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *2*(3), 303–326. [https://doi.org/10.1016/s1364-0321\(97\)00009-9](https://doi.org/10.1016/s1364-0321(97)00009-9)

Littlefair, P. (2001). Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment. *Solar Energy*, *70*(3), 177–185. [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(00\)00099-2](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(00)00099-2)

Littlefair, P. (2011). *Site Layout Planning for Daylight and Sunlight: A Guide to Good Practice (BR 209)*. Building Research Establishment: Watford, UK.

Littlefair, P. J. (2010). *Environmental Site Layout Planning: Solar Access, Microclimate and Passive Cooling in Urban Areas*. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BB0777461X>

Mardaljevic, J., & Roy, N. (2016). The sunlight beam index. *Lighting Research & Technology*, *48*(1), 55–69. <https://doi.org/10.1177/1477153515621486>

Metropolitan Council. (2021). *Calculating Floor Area Ratio—Local Planning Handbook*. Metropolitan Council: Saint Paul, MN, USA.

Nagare, R., Woo, M., MacNaughton, P., Plitnick, B., Tinianov, B. D., & Figueiro, M. G. (2021). Access to Daylight at Home Improves Circadian Alignment, Sleep, and Mental Health in Healthy Adults: A Crossover Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(19), 9980. <https://doi.org/10.3390/ijerph18199980>

Natanian, J., & Auer, T. (2020). Beyond nearly zero energy urban design: A holistic microclimatic energy and environmental quality evaluation workflow. *Sustainable Cities and Society*, *56*, 102094. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102094>

OECD. (2012). *OECD Green Growth Studies Compact City Policies A Comparative Assessment: A Comparative Assessment*. OECD Publishing.

OneBuilding Climate. (2023). Retrieved February 2, 2023, from <http://climate.onebuilding.org/default.html>

Pepe, E., Dubois, M., Gentile, N., & Bernardo, R. (2022). Methodology and parameters to analyse daylighting and energy use in dense cities: A literature review. *E3S Web of Conferences*, *362*, 09001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236209001>

Pepe, E., & Dubois, M.-C. (2023). *Steady-State calculation vs. dynamic energy simulations during the early design phase* (19th Advanced Building Skins Conference & Expo 28-29 October 2024, Bern, Switzerland). ABS.GREEN.

Pont, M. B., Haupt, P., Berg, P., Alstäde, V., & Heyman, A. (2021). Systematic review and comparison of densification effects and planning motivations. *Buildings & Cities*, *2*(1), 378. <https://doi.org/10.5334/bc.125>

Rådberg, J., & Friberg, A. (2001). *Svenska stadstyper: Historik exempel klassificering ([ny uppl.])*. Kungliga tekniska högskolan.

ISBN 9171706992

Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*, *3*(1), 7–31. <https://doi.org/10.1582/leukos.2006.03.01.001>

Robert McNeel & Associates. (2022). *Rhinoceros 3D*. www.rhino3d.com. Retrieved May 1, 2023, from <https://www.rhino3d.com/>

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM Handbook. *A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. 3rd Edition, Wiley, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781119287568>

Sattrup, P., & Strømman-Andersen, J. (2013). Building typologies in Northern European cities: Daylight, solar access, and building energy use. *Journal of Architectural and Planning Research*, 30(1), 56–76. <https://www.jstor.org/stable/43030993>

Solemma. (2022). ClimateStudio. Retrieved May 1, 2023, from <https://www.solemma.com/climatestudio>

Šprah, N., & Košir, M. (2019). Daylight Provision Requirements According to EN 17037 as a Restriction for Sustainable Urban Planning of Residential Developments. *Sustainability*, 12(1), 315. <https://doi.org/10.3390/su12010315>

Strømman-Andersen, J., & Sattrup, P. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), 2011–2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.007>

Sveby. (2015). *Sveby / Branchstandard för energi i byggnader*. Retrieved April 25, 2023, from https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/10/Sveby_Brukarindata_bostader_version_1.0.pdf

UN. Population Division. (2019). *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*.

Vartholomaios, A. (2017). A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. *Sustainable Cities and Society*, 28, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>