



Nr B 2291
November
2017

mini-GINERVA

God INnemiljö i enERgieffektiva byggnader

Sarka Langer, Bo Sahlberg, Willem Duis



I samarbete med: AB Stockholmshem och
Miljöförvaltningen, Stockolms stad

Författare: Sarka Langer, Bo Sahlberg, Willem Duis, IVL Svenska Miljöinstitutet
Medel från: AB Stockholmshem; Miljöförvaltningen, Stockholms stad; Stiftelsen IVL
Fotograf: AB Stockholmshem, Sarka Langer
Rapportnummer B 2291
ISBN 978-91-88319-93-7
Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2017
IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // Fax 010-788 65 90 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Detta projekt genomfördes i samarbete med AB Stockholmshem och Kemikaliecentrum, Miljöförvaltningen, Stockholms stad.

Stort tack riktas till Jenny Fäldt, Kemikaliecentrums föreståndare, för finansiering av och för hennes engagemang i projektet, och till Åsa Stenmark och Harry Matero, AB Stockholmshem, för finansiering av projektet och praktisk hjälp vid genomförandet med rekrytering av deltagare till studien och genomförandet av mätning av luftflöden i lägenheterna.

Sist men inte minst vill vi tacka de hyresgäster som deltagit studien.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	5
Summary	6
Inledning.....	7
Innemiljö	7
Källor och hälsoeffekter av luftföroreningar	8
Mål för projektet	10
Metoder och genomförande.....	11
Bostäder	11
Mätningar av luftföroreningar	12
Upplevd luftkvalitet – enkätundersökning	13
Beräkning av index.....	14
Resultat och diskussion	15
Ventilation	15
Inneklimat	16
Lutföroreningar.....	16
Upplevd luftkvalitet	20
Index	21
Statistik	23
Slutsatser.....	24
Referenser	25
Bilagor	28
Bilaga 1 Beräkning av Indoor Environmental Index.....	28
Bilaga 2 Enkätundersökning – formulär.....	30
Bilaga 3 Mätdata.....	31
Bilaga 4 Resultat av enkätundersökningen.....	32

Sammanfattning

En pilotstudie om luftkvalitet i energieffektiva bostäder har genomförts i tio lägenheter i kvarteret Töfsingdalen, Norra Djurgårdstaden i Stockholm. Pilotstudien syftade till att ge underlag till utveckling av ett diagnostiskt verktyg för helhetsbedömning av inomhusmiljö i bostäder. Fastigheten tillhör fastighetsägare AB Stockholms hem. Arbetet genomfördes under tiden 2017-02-23 – 2017-04-03 och innefattade mätningar och en enkätundersökning om upplevelsen av luftkvalitet inomhus.

Undersökningen bestod av mätning av halter av luftföroreningarna kvävedioxid, ozon, totalhalt av flyktiga organiska ämnen (TVOC), formaldehyd och koncentrationer av partiklar PM₁₀ och PM_{2.5} i inomhusluft. De gasformiga luftföroreningarna mättes med diffusiva provtagare och partiklarna med en direktivisande optisk partikelräknare under en vecka. Samtidigt registrerades temperatur, relativ luftfuktighet och halten av koldioxid. Den upplevda luftkvaliteten studerades genom enkäter där både de boende och inspektör som installerade mätutrustningen besvarade frågor om allmän acceptans av luftkvalitet, lukt och upplevelse av fuktighet och termisk komfort.

Temperaturen i alla lägenheterna var mycket stabil och låg kring 22 °C. Relativa luftfuktigheten var låg med medelvärde på 21 %. Luftflöden låg med ett undantag över Boverkets minimikrav på 0,35 Liter/s, m². Halten av koldioxid har inte överskridit det rekommenderade värdet på 1 000 ppm under längre tidsperioder. De uppmätta halterna av luftföroreningar var med några få undantag under de rekommenderade riktvärdena för god luftkvalitet inomhus.

Halterna av de individuella luftföroreningarna och parametrarna för termisk komfort har använts för beräkningen av ett Indoor Environmental Index (IEI) för varje lägenhet. Indexet förenklar tolkningen av de uppmätta parametrarna och möjliggör en ranking av inomhusmiljö mellan bostäder (och byggnader). Värden av IEI hamnade i intervallet 4 – 6 på en skala mellan 0 (bäst) och 10 (sämst). Det fanns ingen skillnad i upplevelse av inomhusmiljö mellan hyresgästerna och inspektören förutom för upplevelsen av luftens fuktighet (Wilcoxon matched-pairs signed-rank test). Boenden uppfattade luften i sina lägenheter som torrare än inspektören. Regressionsberäkningar visade svaga och inte signifikanta korrelationer mellan mätningar och upplevd luftkvalitet.

Resultaten visar att god ventilation och halten av koldioxid som den enda indikator för luftkvalitet inte alltid garanterar att halterna av individuella luftföroreningar är under riktvärdena för god luftkvalitet inomhus. Enkätundersökningar om upplevd inomhusmiljö kan inte ersätta faktiska mätningar.

Bostäderna i denna studie var ganska få och homogena med avseende på energianvändning och byggmaterial. För att kunna analysera samband mellan bostad och luftkvalitet borde man beakta olika byggnadstekniska lösningar, ålder, geografiskt läge, ventilations- och uppvärmningssätt, inredning och de boendes aktivitetsmönster och beteende. Detta kräver dock mätdata från ett betydligt större antal olika bostäder.

Summary

A pilot study on indoor air quality in energy efficient dwellings has been performed in ten apartments in the district Töfsingdalen, Norra Djurgårdstaden in Stockholm. The pilot study was designed to develop a diagnostic tool for overall assessment of indoor environment. The property belongs to property owner AB Stockholmshem. The work was conducted during the period 2017-02-23 - 2017-04-03 through measurements and surveys on the perception of indoor air quality.

The survey consisted of measurements of concentration of the air contaminants nitrogen dioxide, ozone, total volatile organic compounds (TVOC), formaldehyde and concentrations of particles PM₁₀ and PM_{2.5}. The gaseous air pollutants were measured with diffusive samplers and the particles with a direct reading optical particle counter during one week. At the same time, temperatures, relative humidity and concentration of carbon dioxide were registered. The perceived air quality was studied through surveys where both residents and inspectors who installed the measuring equipment answered questions about general acceptance of air quality, odor and the perception of humidity and thermal comfort.

The temperature in all apartments was very stable around 22 °C. Relative humidity was low with average of 21%. Airflows were with one exception above Boverket's minimum requirement of 0.35 Liter / s, m². The CO₂ level did not exceed the recommended value of 1 000 ppm under prolonged periods of time. The measured levels of the air pollutants were, with a few exceptions, below the recommended guideline values for good indoor air quality.

The concentrations of the individual air pollutants and the thermal comfort parameters have been used to calculate an Indoor Environmental Index (IEI) for each apartment. The index simplifies the understanding of the measured parameters and enables a ranking of indoor environment between dwellings (and buildings). The values of IEI were in the range 4 - 6 on a scale between 0 (best) and 10 (worst). There was no difference in the perception of indoor environment between the occupants and the inspector except for the experience of air humidity (Wilcoxon matched-pairs signed-rank test). The occupants perceived the air in their apartments as drier than the inspector. Regression calculations showed weak and statistically not significant correlations between measurements and the perception.

The results show that good ventilation and the carbon dioxide concentration as the only air quality indicator do not always guarantee that the levels of individual air pollutants are below the recommended guideline values. Surveys on perceived indoor environment cannot replace actual measurements.

The dwellings in this study were few and quite homogeneous with regard to energy use and building materials. A more extensive link between residences and air quality should take into account a much larger number of homes with different building engineering solutions, age, geographical location, ventilation and heating modes, interior design and the activity patterns and behavior of the occupants.

Inledning

Innemiljö

Människor tillbringar i genomsnitt 85-95 % av sin tid i olika innemiljöer. Det är bevisat att god luftkvalitet inomhus främjar mentala, kognitiva och kreativa funktioner. Energieffektiva hus byggs mycket lufttäta, varför ventilationssystemet, emission av kemiska ämnen från byggmaterial och mänskliga aktiviteter har en avgörande betydelse för luftkvaliteten inomhus. Det är av största vikt att energieffektivisering av byggnader görs utan att äventyra en god innemiljö eftersom problem kopplade till innemiljön kan leda till ohälsa.

Byggandet av energieffektiva byggnader har tagit fart i Sverige. Detta kan ses som ett led i att senast den 31/12 2020 ska alla nya byggnader inom EU vara nära-nollenergibyggnader (EU directive 2010/31). Energieffektiva byggnader har främst utvärderats med avseende på energibesparingsaspekter och i några fall har även inneklimate (temperatur och relativ luftfuktighet) beaktats. Energieffektiva byggnader/passivhus byggs i allt större utsträckning i Sverige. Fokus ligger på energiaspekter och inneklimate men luftkvalitet kommer i skymundan. (Karlsson och Moshfegh, 2007; Rohdin m.fl., 2014). Energieffektiviseringsåtgärder utan hänsyn till deras inverkan på Indoor Environment Quality (IEQ) kan leda till försämrade luftkvaliteten (Földvåry m.fl., 2017).

Innemiljö karakteriseras av termisk komfort, ljud- och ljusmiljö och luftkvalitet. De tre förstnämnda parametrarna regleras genom nationella och internationella standarder medan luftkvalitet främst styrs genom ventilationskrav. Detta faktum uppmärksammas på EU nivå. De flesta EU länder har introducerat minimikrav på ventilation, mest baserat på kriterier för termisk komfort. Krav relaterade till luftkvalitet inomhus så som acceptabla halter av luftföroreningar är svåra att ställa med tanke på varierande nivåer på gränsvärden och riktvärden (Kephelopoulou m.fl., 2016).

Luftkvalitet i bostäder har studerats i ett antal forskningsprojekt, med fokus främst på kartläggning av utvalda luftföroreningar och eventuella samband med byggnadstekniska parametrarna i svenska och franska bostäder (t.ex. Langer och Bekö, 2013; Langer m.fl. 2016). Luftkvalitet i energieffektiva byggnader har undersökts i några studier. De flesta fokuserar på mätningar av parametrarna för termisk komfort som temperatur och relativ luftfuktighet samt luftomsättning och utvalda gasformiga luftföroreningar och partiklar (Langer m.fl., 2015; Derbez m.fl., 2014 a; 2014b).

I stället för att mäta enskilda föroreningar, är ett annat sätt att bedöma luftkvaliteten inomhus att undersöka hur den upplevs av personer, genom enkätundersökningar. Upplevd inomhusluftkvalitet har i stor utsträckning använts i studier om IAQ i byggnader. Den mest förekommande metoden är en bedömning av luftkvaliteten genom värdering av allmän acceptans och luktintensitet (Wargocki et al., 2009). Termisk komfort bedöms på en sjugradig skala enligt en europeisk standard (EN 15251, 2007).

Den uppmätta och den upplevda luftkvaliteten har tidigare studerats var för sig. Ett exempel på samband mellan halter av utvalda luftföroreningar och ranking av luftkvalitet genom enkätundersökning har nyligen publicerats för franska bostäder (Langer m.fl., 2017). Upplevelse av sämre luftkvalitet uppvisade ett samband med luftföroreningar så som utvalda flyktiga organiska ämnen och partiklar.

Luftkvalitet i inomhusmiljöer såsom bostäder, skolor eller förskolor kan bedömas med avseende på halter av gasformiga luftföroreningar såsom flyktiga organiska ämnen (Volatile Organic Compounds, VOC) och deras totalhalt (TVOC), formaldehyd, kvävedioxid, svaveldioxid och ozon samt partiklar PM₁₀ och PM_{2.5}, parametrar för termisk komfort temperatur, relativluftfuktighet, halten av koldioxid (CO₂) och luftomsättning.

Luftkvalitet karakteriseras av halter av gasformiga och partikulära föroreningar. Utvärdering av inomhusluftens kvalitet är komplicerad eftersom IAQ innefattar ett brett spektrum av ämnen som varierar över tid och i rum. För att förenkla bedömningen av uppmätta halter av flera luftföroreningar, kan halterna räknas om till ett index – Indoor Air Pollution Index. Indexet används för att beskriva, klassificera och förbättra IAQ genom att tillhandahålla en lättbegriplig och sammansatt ranking av IAQ-nivåer i byggnader. Metodiken för beräkning av indexet har utvecklats för kontorsbyggnader med avseende på halter av luftföroreningar (Sofuoglu och Moschandreas, 2003) som Indoor Air Pollution Index (IAPI). Det har senare kompletterats med bedömning av temperatur och relativ luftfuktighet som Indoor Discomfort Index (IDI) och dessa två index har vävts samman till ett Indoor Environment Index (IEI). Indexet möjliggör en ranking av bostäder med avseende på inomhusmiljö.

Källor och hälsoeffekter av luftföroreningar

Epidemiologiska och toxikologiska studier visar på samband mellan exponering för luftföroreningar och hälsoeffekter. För en del av de gasformiga ämnen och partiklar som förekommer i inomhusmiljöer finns internationella eller nationella rekommenderade riktvärden som baseras på forskning. Exempel på luftföroreningar som kan förekomma i bostäder och som har riktvärden för inomhusmiljön är kvävedioxid (NO₂), svaveldioxid (SO₂), ozon (O₃), flyktiga organiska ämnen (VOC), formaldehyd samt partiklar (damm).

Luftföroreningar med ursprung i utomhusluft

Luftföroreningar som bildas utomhus tillförs inomhusmiljön via ventilationen.

Kväveoxider NO och NO₂ bildas i förbränningsprocesser och ingår bland annat i avgaser från bilar och andra motordrivna transportmedel, främst dieseldrivna. Den primära kväveinnehållande förbränningsprodukten är kvävemonoxid (NO) som snabbt omvandlas till kvävedioxid genom reaktion med ozon. Svaveldioxid (SO₂) bildas vid förbränning av svavelhaltigt bränsle. Både NO₂ och SO₂ irriterar ögonen, kan orsaka luftvägsinflammation, nedsatt lungfunktion och nedsatt immunförsvar.

Marknära ozon är en del av s.k. fotokemisk smog. Ozon bildas genom en serie fotokemiska reaktioner (dvs. solljus initierar den kemiska reaktionen) i utomhusluft. Ozon är irriterande för ögon, näsa och hals, orsakar andningsproblem och lungsjukdomar, ger försämrad lungfunktion och kan trigga astma.

Partiklar i olika storlekar förekommer i uteluften. Partiklar bildas genom olika mekanismer, både naturliga processer så som vulkanutbrott, sandstormar, pollenspridning och mänskliga aktiviteter så som mekanisk nötning, slitage och förbränningsprocesser. Beroende på partiklarnas storlek kan de nå mer eller mindre långt ner i luftvägarna och lungorna. Hälsorisen med partiklar beror till stor del på vilka ämnen som ingår i partiklarna och även på partiklarnas storlek. Det finns ett statistiskt samband mellan exponering för förhöjda partikelhalter och ökad sjuklighet och dödlighet. PM står för engelska benämningen "particulate matter". Det används för att klassificera

storleken av PM₁₀ och PM_{2.5} som är koncentration av partiklar, i µg/m³, med aerodynamisk diameter mindre än 10 µm respektive 2.5 µm.

Bensen kan avges från vissa bränslen och är ett av många ämnen som ingår i VOC. Exponering för förhöjda halter av bensen kan orsaka leukemi.

Luftföroreningar med ursprung i inomhusluft

Flyktiga organiska ämnen (VOC) och formaldehyd har sina huvudsakliga källor inomhus. De avges från byggmaterial och inredning. Formaldehyd är en beståndsdel i lim som används i tillverkning av spånskivor och andra träbaserade kompositmaterial. Formaldehyd är irriterande och är klassad som cancerframkallande för människor av IARC (International Agency for Research on Cancer).

En del luftföroreningar inomhus alstras av människor själva. Till exempel har man studerat andel av flyktiga organiska ämnen (VOC) i en lärosal och konstaterat att människor bidrog med 57 % av VOC medan andelen från inredning var 8 % och resterande 35 % kom från tilluften (Tang m.fl. 2016).

Ett annat ämne, som förekommer i utandningsluften och som förekommer inomhus i halter som vida överskridande andra luftföroreningar är koldioxid (CO₂). Dess halt är en praktisk indikator på om ventilationen tillför tillräckligt mycket luft i lokaler där människors utandningsluft är den viktigaste koldioxidkällan. Koldioxidhalten fungerar som ett "proxy" för effektivitet av ventilation.

Partiklar kan även genereras inomhus, exempelvis av matlagning och tillfälligt vid städning. Undermålig eller otillräcklig städning innebär att bakgrundshalten av partiklar ökar.

Guidelines om luftkvalitet inomhus

I lokaler där luftföroreningar huvudsakligen uppkommer genom personbelastning kan koldioxidhalten användas som en indikator på om luftkvaliteten är tillfredsställande. Folkhälsomyndigheten (FoHMFS 2014:18) ger allmänna råd om ventilation i bostäder och lokaler för allmänna ändamål. I sådana lokaler ska en koldioxidhalt under 1000 ppm eftersträvas. Om koldioxidhalten i ett rum vid normal användning regelmässigt överstiger 1 000 parts per million (ppm), bör detta ses som en indikation på att ventilationen inte är tillfredsställande.

Världshälsoorganisationen (WHO, 2005; WHO, 2010) och Umweltbundesamt (UBA) – den tyska motsvarigheten till Naturvårdsverket och Kemikalieinspektionen – har definierat så kallade riktvärden (guideline values) för ett urval relevanta luftföroreningar i inomhusmiljöer: ozon, NO₂, SO₂, partiklar PM₁₀ och PM_{2.5}, flyktiga organiska ämnen och formaldehyd. Dessa rekommenderade riktvärden/guidelines gäller främst för bostäder och andra icke-industriella miljöer.

Halter av VOC i inomhusluft anges ofta som en summa av analyserade ämnen, s.k. TVOC. Det kan finnas upp till 6 000 olika VOC i inomhusluft och sammansättningen varierar mellan olika inomhusmiljöer och under tiden. Eftersom det finns en stor variation i vilka ämnen som ingår i TVOC, går det inte att dra några slutsatser om hälsoeffekter baserat på uppmätta TVOC-halter. TVOC relaterar inte till några enskilda hälsoeffekter och kan därför inte användas som hälsoindikator. Däremot kan storleken på TVOC halten ge en indikation på föroreningsnivå av flyktiga organiska ämnen.

Temperatur (T) och relativ luftfuktighet (RF) är tillsammans parametrar för inneklimat. Temperatur och extremt låg eller hög RF är viktiga för upplevelse av komfort inomhus. De flesta människor upplever god termisk komfort inom temperaturintervallet 20–24 °C (SOFS 2005:15;

FoHMFS 2014:17). Förhöjd temperatur (35-40 °C) leder till fysiska och fysiologiska symptom från obehag, koncentrationssvårigheter, risk för misstag i arbetet och risk för olyckor, störning av metabolism, överbelastning av hjärt-kärlsystem, trötthet och utmattning. Prestationsförmågan påverkas redan vid betydligt lägre temperaturer. Effekterna kan dock uppstå vid betydligt lägre temperatur, redan vid 25 °C (Wyon, 1986). Människans förmåga att objektivt ta ställning till luftens fuktighet är dåligt utvecklad. Hög luftfuktighet kan orsaka fuktproblem och ökad risk för mögelpåväxt. Rekommenderad luftfuktighet är 30–70 % relativ luftfuktighet (RF). Besvär orsakade av torr luft kan uppträda vid nivåer under 20 % RF och orsaka torra ögon, läppar, hud, och slemhinnor i näsan, allergi och andningsproblem, samt näsblod. Torr luft med en RF på 20 procent och något lägre kan förekomma på vintern utan att orsaka besvär för människor (SOFS 2005:15).

Tabell 1. Sammanställning av rekommenderade riktvärden för god luftkvalitet i inomhus. Nästan alla riktvärden anger medelvärden för en viss tidsperiod. I tabellen anges den tid som respektive värde gäller för i kolumnen Medelvärdesperiod.

Parameter	Riktvärde inomhus	Medelvärdesperiod	Referens
CO ₂ koldioxid	1 000 ppm	momentana halter (återkommande)	FoHMFS 2014:18
NO ₂ kvävedioxid	40 µg/m ³	1 år	WHO 2010
SO ₂ svaveldioxid	20 µg/m ³	24 timmar	WHO 2005
O ₃ Ozon	100 µg/m ³	8 timmar	WHO 2005
TVOC	300 µg/m ³	momentana halter	UBA
Bensen	2 µg/m ³	hela livet*	Mandin m.fl. (2009)
Formaldehyd	10 µg/m ³ 100 µg/m ³	hela livet* 30-minuter	Mandin m.fl. (2009) WHO 2010
PM ₁₀	20 µg/m ³ 50 µg/m ³	1 år 24 timmar	WHO 2005 WHO 2005
PM _{2.5}	10 µg/m ³ 25 µg/m ³	1 år 24 timmar	WHO 2005 WHO 2005
T temperatur	20 - 24 °C	momentana halter	FoHMFS 2014:17
RF relativ luftfuktighet	30 – 60 %	momentana halter	ASHRAE 2013

*låg-risk nivå

Mål för projektet

Projektets mål var att utveckla och testa en metodik för en sammanvägd bedömning av den uppmätta och upplevda luftkvaliteten i energieffektiva byggnader samt att undersöka om det finns ett samband mellan den faktiska IEQ uttryckt som Indexet IEI och hur personer som bor eller vistas i de respektive inomhusmiljöerna upplever inomhusmiljön.

Projektet var indelat i flera delmoment:

- mätning av utvalda luftföroreningar och inneklimatparametrar i bostäder
- undersökning av hur inomhusmiljön upplevs med hjälp av enkäter
- framtagning av inomhusmiljöindex (IEI Indoor Environmental Index)
- undersökning av sambandet mellan mätningar och upplevelsen

Metoder och genomförande

Bostäder

Projektet genomfördes i samarbete med AB Stockholmshem, fastighetsägare till kvarteret Töfsingdalen i Norra Djurgårdsstaden i Stockholm. Kvarteret var byggt 2015. Översiktlig bild av kvarteret visas i Figur 1.



Figur 1. Schematisk bild av kvarteret Töfsingdalen i Norra Djurgårdsstaden, Stockholm. Berörda gatorna heter Hårdvallsgatan, Ängbruksgatan, Lövängsgatan och Slättervallsgatan.

Projektmedlemmar rekryterades av fastighetsägaren AB Stockholmshem. Information till boende delades ut till samtliga bostadsinnehavare i kvarteret, totalt cirka 150 hushåll. 10 lägenheter rekryterades till projektet: en på Slättervallsgatan, två på Ängbruksgatan, tre på Lövängsgatan och fyra på Hårdvallsgatan. Fortsättningsvis benämns lägenheterna 1 – 10.

IVLs personal besökte bostäderna i fyra omgångar. Mätningarna genomfördes i veckolånga perioder under tiden 2017-02-23 – 2017-04-03, under uppvärmningssäsongen. Provtagningsutrustning installerades och enkäter delades ut och samlades in. Enkäterna besvarades av en och ibland två vuxna som bodde i respektive lägenhet.

Fastighetsägaren tillhandahöll information om storleken på bostäder (boarea), uppmätta luftflöden i lägenheterna, fastighetens energiförbrukning och typ av invändiga byggmaterial i golv, väggar och tak. Huset var uppförd som en lågenergibyggnad med projekterad fastighetsenergi på 57 kWh/m², år; denna uppgift har inte kontrollerats genom mätningar av reell energiförbrukning.

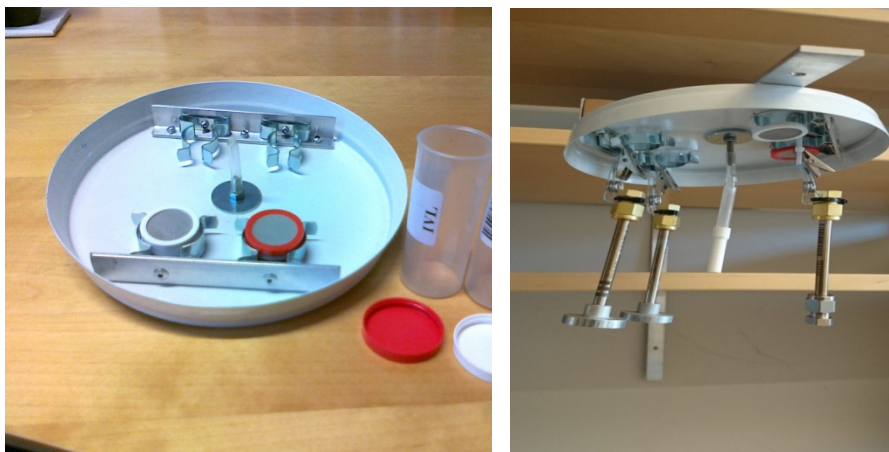
Mätningar av luftföroreningar

Mätmetoder för inneklimatparametrar och gasformiga och partikulära luftföroreningarna

Inneklimatparametrar temperatur och relativ luftfuktighet (RF) samt halterna av koldioxid registrerades kontinuerligt med loggande sensorer (Wöhler CDL 210 CO₂-logger). Temperatur, RF och CO₂ mättes under hela mätperioden som 5-minuters medelvärden. Efter avslutad mätning sammanställdes värden för dessa parametrar för hela mätperioden.

Koncentrationer av gasformiga luftföroreningar ozon, NO₂ och SO₂ mättes med IVLs passiva provtagare. Arbetsprincipen för passiv, eller med andra ord diffusiv, provtagning är molekylär diffusion av gaser vid konstant hastighet. Diffusionsprovtagare behöver därför ingen pump (till skillnad från aktiv provtagning) vilket förenklar provtagningen. Gasmolekylerna diffunderar in i provtagaren där de kvantitativt uppsamlas under provtagningstiden. Efter provtagningen analyserades proverna på IVLs laboratorium med våtkemiska metoder. Resultat av mätningen är koncentrationsvärden integrerade över provtagningstiden. Detaljer om principer för diffusiv provtagning och analysermetoder kan hittas i vetenskaplig litteratur (Ferm, 2001; Ferm and Rodhe, 1997)

För passiv provtagning av flyktiga organiska ämnen (VOC Volatile Organic Compounds) användes rör innehållande Tenax adsorbentmedium (Tenaxrör, model N9307005, Perkin Elmer, Waltham, MA, USA). VOC analyserades med gaskromatografi/masspektrometri (GC/MS; GC 6890, MS 5973N, Agilent, USA) som summa av VOC i provet med masspektrometer. Totalhalter av flyktiga organiska ämnen, TVOC, uttrycks i toluenekvivalenter enligt internationell praxis. Detta innebär att beräkningarna har gjorts som om alla ämnen var enbart toluen. Detta görs för att man ska få en uppfattning om den totala koncentrationen. Bensen har kvantifierats ämnesspecifikt. Formaldehyd provtogs också passivt med DSD-DNPH Aldehyde Diffusive Sampling Device (Supelco, Bellefonte, PA, USA) och analyserades med vätskekromatografi (HPLC) med en UV detektor. Exempel på provtagarna och hur de monterades i bostäderna visas i Figur 2.



Figur 2. IVLs passiva provtagare för ozon, kvävedioxid, flyktiga organiska ämnen samt passiv provtagare för formaldehyd (Supelco).

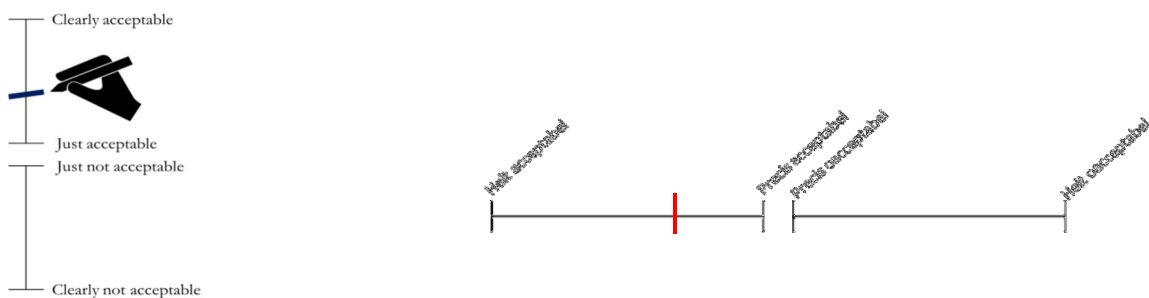
Partiklar i storleksområdet 0.3 – 25 µm fördelat på 15 storleksintervaller mättes kontinuerligt med direktvisande instrument, en optisk partikelräknare av märket Grimm (Portable Dust Monitor, Grimm 11-A, Grimm Aerosol Technik GmbH & Co) med tidsupplösning på 1 minut. Inbyggd mjukvara räknar om antalet partiklar i de relevanta storleksintervallen till masskoncentration av PM₁₀ och PM_{2.5}. Instrumentet innehåller en datalogger, som lagrar mätdata för masshalten (µg/m³).

Kemiska ämnen och partiklar mättes i vardagsrum. Mätaren för temperatur, RF och CO₂ placerades i sovrum.

Upplevd luftkvalitet – enkätundersökning

Upplevd luftkvalitet undersöks genom en enkel enkät. Där svarade respondenter på frågor om luftkvaliteten är acceptabel på en skala mellan -1 till +1, om lukten (ingen lukt till mycket stark lukt), luftens karaktär i några icke-tekniska termer såsom frisk-unken, torr-fuktig, ren-dammig och möjlig-icke möjlig samt den termiska komforten (kall – het).

Utformningen av enkäten framgår av Bilaga 1. Enkätsvaren bygger på att man markerar sitt svar som ett streck på en så kallad visuell analog skala. Denna skala rekommenderas för otränade respondenter som inte är vana att bedöma luftkvaliteten inomhus. Allmän acceptans av luftkvalitet bedöms från Helt acceptabel till Helt oacceptabel; svaren kodas från -1 till +1 med den delade övergången som kodas som 0 (noll) (Wargocki, 2004).



Figur 3. Utseende av enkätfråga om acceptansen på frågeformuläret. Till vänster original från vetenskaplig litteratur; till höger modifierat för projektets ändamål.

Bedömningen av lukten, luftens karaktär i några icke-tekniska termer såsom frisk-unken, torr-fuktig, ren-dammig och icke möjlig- möjlig samt den termiska komforten (kall – het) görs också på de analoga skalorna och kodas från 0 (ingen lukt, frisk, torr, ren icke-möjlig, kall) till 10 (mycket stark lukt, unken, fuktig, dammig, möjlig, het). Bedömningen av upplevelsen av lukt och luftens karaktär i icke tekniska termer görs enligt Wargocli m.fl. (1999). Termisk upplevelse bedöms i originalet, standarden EN 15251, på en sju-gradig skala med givna kategorier. Vi har använt en kontinuerlig skala i likhet med övriga enkätfrågorna (kodning från 0 = kallt till 10 hett), för enhetlig utvärdering.

Enkäten besvarades av en och ibland två personer per lägenhet. För bostäder där enkäten besvarades av två personer beräknades medelvärden av de två enkätsvaren.

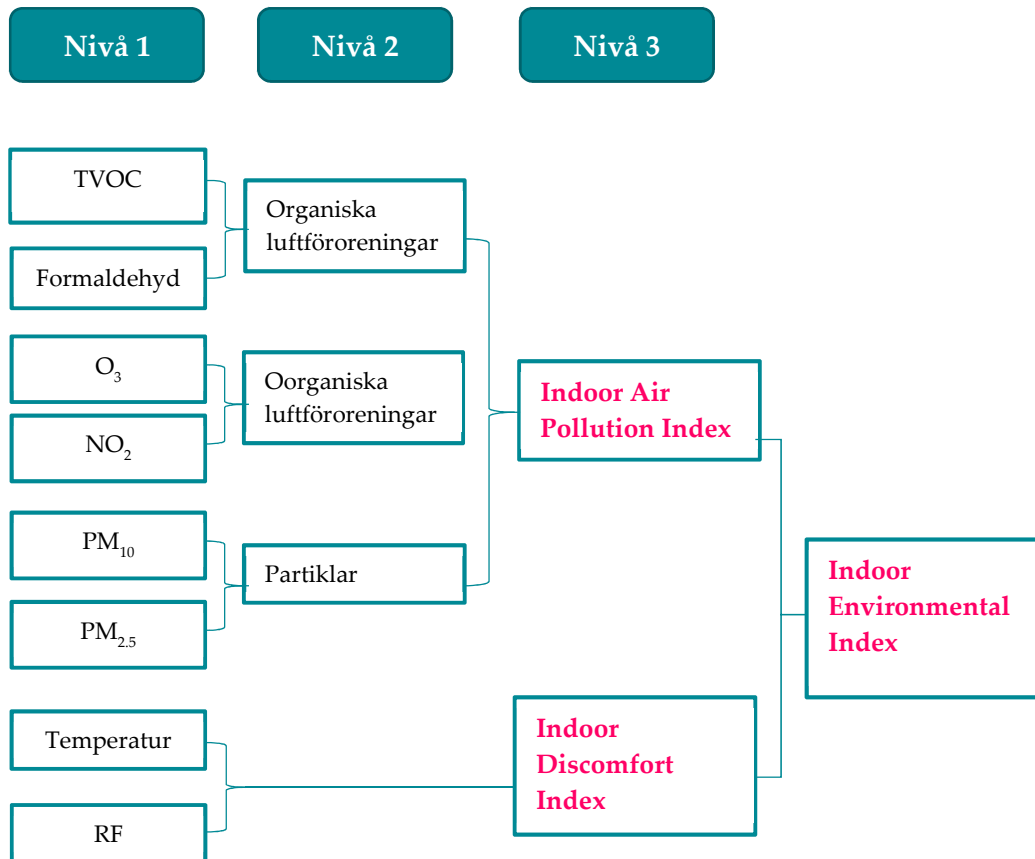
Två personer från IVL som genomförde installation av mätutrustningen i lägenheterna och besvarade samma enkät utgjorde kategori "inspektör". I enlighet med en publicerad studie valdes svaren av den av inspektörerna med sämre upplevelse/poäng (Langer m.fl., 2017).

Beräkning av index

Beräkning av luftföroreningsindex, Indoor Air Pollution Index (IAP), bygger på en procedur som utvecklats för kontorsbyggnader (Sofuoglu och Moschandreas, 2003). Samma forskare (Moschandreas och Sofuoglu, 2004) har vidareutvecklat idén med indexering med att definiera ett nytt index för inneklimat, det vill säga temperatur och relativ luftfuktighet, Indoor Discomfort Index (IDI). Indoor Environmental Index (IEI) är ett aritmetiskt medelvärde av indexen IAPI och IDI.

Vi har valt ut följande luftföroreningar som samtliga har rekommenderade riktvärden för inomhusmiljö: organiska ämnen TVOC, bensen och formaldehyd, oorganiska luftföroreningarna kvävedioxid (NO₂) och ozon (O₃) samt partiklar PM₁₀ och PM_{2.5} samt riktvärden för klimatparametrar temperatur och relativ luftfuktighet. Riktvärden framgår av Tabell 1; för PM används 24-timmars medelvärden.

I Figur 4 visas hur indexet är uppbyggt i en trästruktur.



Figur 4. Trästruktur för beräkning av IEI.

En detaljerad beskrivning av beräkningen av indexet finns i Bilaga 1.

Resultat och diskussion

Ventilation

Information om bostädernas storlek, uppmätta luftflöden och beräknad luftomsättning, baserad på takhöjd på 2,5 m (information från fastighetsägaren) ges i Tabell 2. Projekterad energiförbrukning är 57 kWh/m², år. Energideklarationen är inte utförd än. Detaljerad energiförbrukningen i de individuella bostäderna var inte möjligt att få.

Byggnaden var utrustad med ett FTX-ventilationssystem, som betyder reglering av både frånlufts- och tilluftsflöden med värmeåtervinning. Golv var konstruerade med klinker eller parkett på betongunderlag, väggarna bestod av betong eller gips och var målade eller tapetserade och taken var gjorda av målad betong.

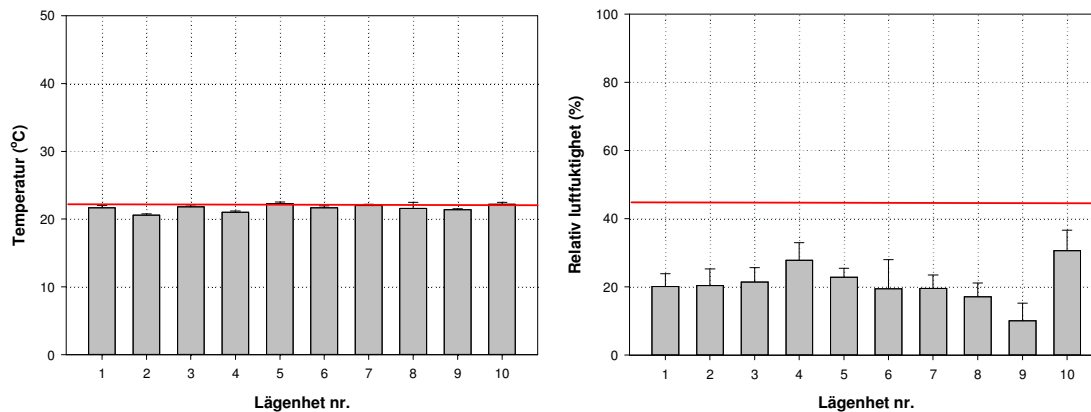
Tabell 2. Boarea, luftflöden och luftomsättningen i lägenheterna.

Lgh. nr.	Boarea m ²	Luftflöde uppmätt Liter/sekund	Luftflöde BBR krav Liter/sekund	Luftomsättning h ⁻¹
1	79	36	28	0.66
2	63	30	22	0.69
3	83	28	29	0.49
4	41	28	14	0.98
5	99	40	35	0.58
6	64	30	22	0.68
7	63	30	22	0.69
8	69	28	24	0.58
9	53	30	19	0.82
10	54	31	19	0.83

Boverkets byggregler (BFS 2011:6 - BBR 18) föreskriver att ventilationssystem ska utformas för ett lägsta uteluftsflöde motsvarande 0,35 l/s per m² golvarea. Detta ger en luftomsättning på 0,50 h⁻¹ vid en normal takhöjd på 2,5 m. Lägenhet nr. 3 är möjligen något underventilerad medan de andra lägenheterna har god eller mycket god ventilation, och betydligt bättre än Boverkets minimikrav.

Inneklimat

Temperatur, relativ luftfuktighet och halterna av koldioxid presenteras i följande figurer. Staplarna representerar medelvärden över mätperioden (en vecka) i respektive lägenhet.



Figur 5. Temperatur (vänster bild) och relativ luftfuktighet (höger bild) i bostäderna. Medelvärden och standardavvikelser under mätperioden (en vecka). Röda linjer visar de optimala värden. Streck över staplarna är standardavvikelser som tillhör medelvärden.

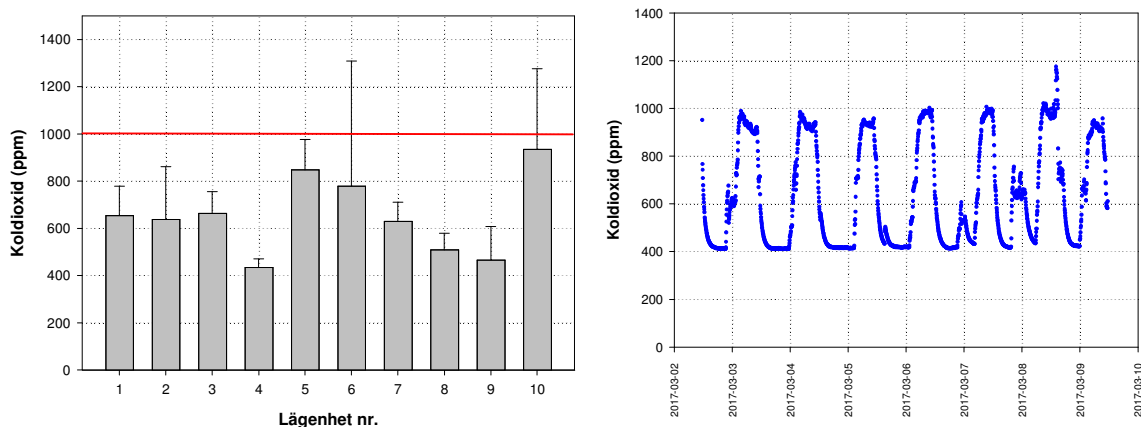
Temperaturen var stabil i alla lägenheterna med ett medelvärde på 21,6 °C och en standardavvikelse på 0,5 °C. Medelvärdet låg nära det optimala värdet på 22 °C. Variationen i temperatur var liten både inom och mellan bostäderna. De uppmätta temperaturerna stämmer väl med Stockholms kommunala bostadsbolags riktlinjer att temperaturen inomhus ska vara 21 ± 1 °C. Den relativa luftfuktigheten var ganska låg med medelvärdet 21 och standardavvikelsen 6 %. Utomhusluftens temperatur var $2,1 \pm 3,2$ °C och den relativa luftfuktigheten 73 ± 18 %. Luften i lägenheterna hade låg relativ fuktighet vilket är vad som kan förväntas under uppvärmningssäsongen/vinter då denna undersökning genomfördes och som också har observerats i andra lägenhetsbyggnader (Langer m.fl., 2015).

Lutföroreningar

Halterna av luftföroreningar redovisas som medelvärden över provtagningsperioden på en vecka.

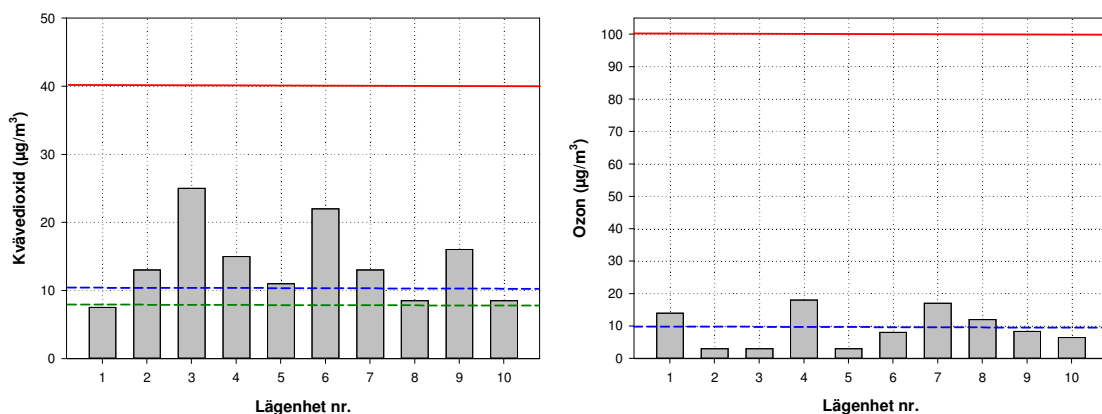
Medelvärden för koldioxidhalten (Figur 6, vänster bild) låg under det rekommenderade riktvärdet på 1 000 ppm i samtliga lägenheter. Halten koldioxid i bostäderna beror på antalet personer som vistas i lägenheten och vistelsetider. Koldioxidhalten var vid enstaka tillfällen högre (upp till 2 800 ppm) under mycket korta tidsperioder.

Den högra bilden i Figur 6 visar ett typiskt tidsförlopp av CO₂-halten i ett sovrum i en bostad. Halten byggs upp efter läggsdags och ligger någorlunda konstant under natten. När man lämnar bostaden går halten ner (CO₂ ventileras bort) och halten ligger kring 400 ppm vilket är samma som koldioxidhalten i utomhusluft.



Figur 6. Halter av koldioxid i bostäderna. Medelvärden och standardavvikelser under mätperioden (en vecka), vänster bild. Typiskt tidsförlopp av koldioxidhalten i en bostad (höger bild). Streck över staplarna är standardavvikelser som tillhör medelvärden.

De uppmätta halterna av svaveldioxid var i alla bostäder $< 0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (under analysmetodens detektionsgräns) och med mycket god marginal under det rekommenderade riktvärdet på $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24-timmars medelvärde).

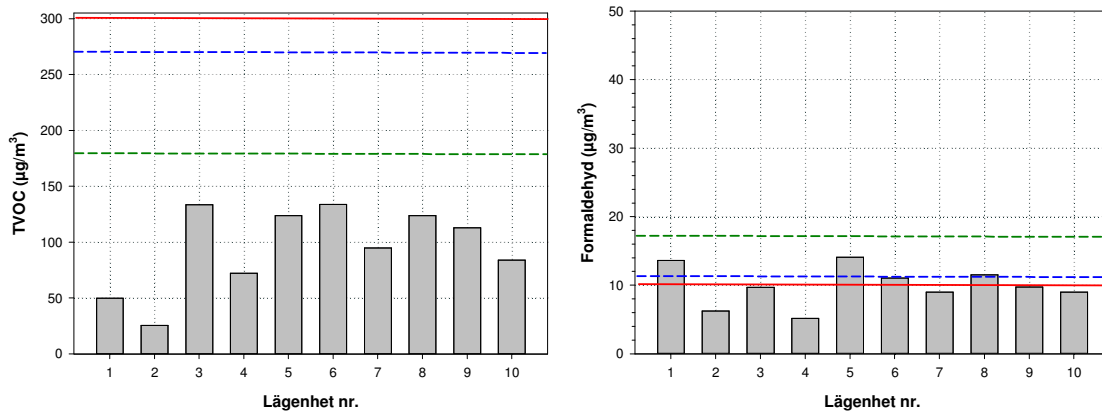


Figur 7. Halter av kvävedioxid (vänster bild) och ozon (höger bild) i bostäderna. Medelvärden under mätperioden (en vecka). Observera olika skalor på y-axlarna. Röd linje: rekommenderat riktvärde; blå linje: andra svenska lågenergibostäder (median); grön linje: svenska bostadsbeståndet (median); bara kvävedioxid.

Halterna av kvävedioxid och ozon i bostäderna låg också under och med mycket god marginal under de rekommenderade riktvärdena för inomhusluft som är indikerade med den röda linjen i Figur 7 (se Tabell 1 för de aktuella värdena). Den blå linjen är medianhalter i 20 utvalda svenska lågenergibyggander undersökta under uppvärmningssäsonger 2012/2013 och 2013/2014 (Langer m.fl., 2015); $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för NO_2 och $9,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för ozon. Den gröna linjen är medianhalt av kvävedioxid ($8,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) i 305 bostäder som anses representativa för det svenska bostadsbeståndet från en undersökning som Boverket genomförde under uppvärmningssäsongen 2007/2008; ozon ingick inte i Boverkets studie.

Medelvärden av kvävedioxid och ozon i utomhusluft för den tiden då studien genomfördes i lägenheterna i kvarteret Töfsingdalen var $\text{NO}_2 = (10 \pm 2) \mu\text{g}/\text{m}^3$ och $\text{O}_3 = (63 \pm 8) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Genom att

jämföra halterna inomhus och utomhus kan man konstatera att ozonet inomhus är betydligt lägre än utomhus medan kvävedioxidhalter inomhus är i samma storleksordning som utomhushalterna; detta stämmer med undersökningar beskrivna i vetenskaplig litteratur (Finlayson-Pitts och Pitts, 2000) Sannolikt beror detta på att ozon är reaktivt och reagerar med andra ämnen vid transport genom ventilationskanaler medan kvävedioxiden transporteras genom ventilationskanalerna opåverkad. Uppgifter om halterna i utomhusluft kommer från Stockholms stad miljöövervakning från mätstationen på Torkel Knutssonsgatan på Södermalm i Stockholm.

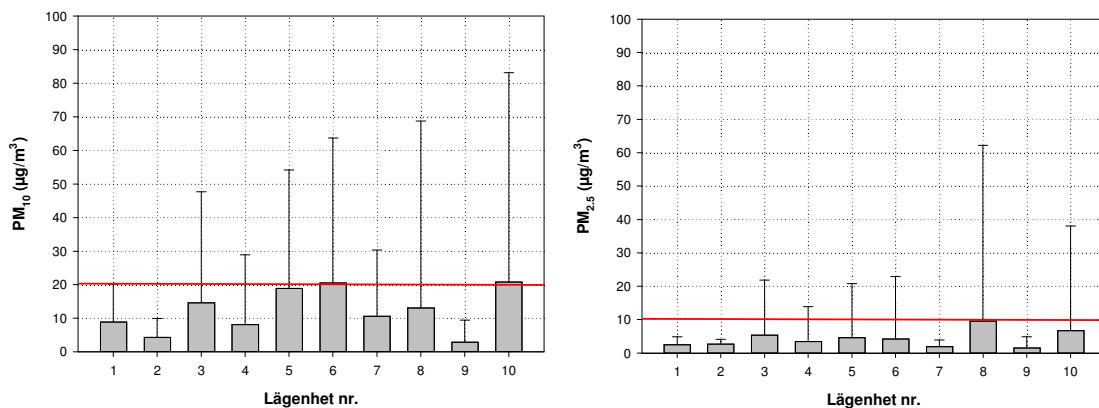


Figur 8. Halter av TVOC (vänster bild) och formaldehyd (höger bild) i bostäderna. Medelvärden under mätperioden (en vecka). Observera olika skalor på y-axlarna. Röd linje: rekommenderat riktvärde; blå linje: andra svenska lågenergibostäder (median); grön linje: svenska bostadsbeståndet (median).

Totalhalterna av VOC låg både under det rekommenderade riktvärdet (se Tabell 1) och de var också lägre än medianhalter i andra (utvalda) svenska lågenergibygnader ($270 \mu\text{g}/\text{m}^3$), blå linje (Langer m.fl., 2015) och i det svenska bostadsbeståndet ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$); grön linje (Langer och Bekö, 2013).

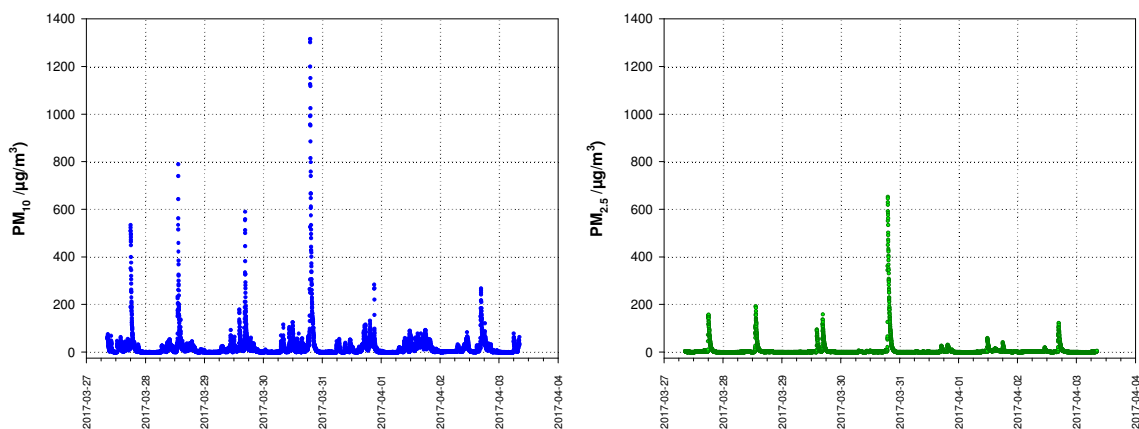
Bensen bedöms för sig på grund av dess hälsoskadliga egenskaper. Halterna i bostäderna låg för det mesta under detektionsgränsen på $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dvs. väl under det rekommenderade riktvärdet för livslång exponering ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Halterna av formaldehyd var nära både det rekommenderade riktvärdet för livslång exponering på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (röd linje) och medianhalten i svenska lågenergibygnader på $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (blå linje; Langer m.fl., 2015). Däremot var medianhalten i det svenska bostadsbeståndet på $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ högre än halterna i alla de undersökta lägenheterna (Langer och Bekö, 2013). Formaldehydhalten mättes under en vecka och kan därför formellt sett inte jämföras med riktvärdet för livslång exponering. Med tanke på att formaldehydhalterna var relativt lika i bostäderna och att man vistas en stor del av dygnet i bostaden, ligger halterna oroväckande nära riktvärdet för livslång exponering. Det är också möjligt att relatera halten av formaldehyd till WHO:s riktvärde på $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ som medelvärde under 30 minuter. En sådan jämförelse blir inte heller rättvisande eftersom detta riktvärde är avsett att skydda mot tillfälliga höga exponeringar, vilket inte är situationen i bostäderna. Formaldehydhalten i bostäderna kan förväntas minska med tiden, eftersom formaldehyd avges i störst omfattning från nya material och produkter, dvs i nybyggda bostäder.



Figur 9. Halter av PM₁₀ (vänster bild) och PM_{2.5} (höger bild) i bostäderna. Medelvärden under mätperioden (en vecka). Observera olika skalor på y-axlarna. Röd linje: rekommenderat riktvärde. Streck över staplarna är standardavvikelser som tillhör medelvärden.

Partiklarna mättes kontinuerligt med direktvisande instrument (optisk partikelräknare) där en inbyggd mjukvara omvandlade antalet partiklar till PM₁₀ och PM_{2.5}. Värderna i diagrammen i Figur 9 är medelvärden över den veckolånga mätperioden. Det framgår av figuren att partikelhalten för det mesta låg under de rekommenderade långtidsriktvärdena (årsmedelvärden; se Tabell 1) men i vissa fall ganska nära riktvärdet. Partiklar i dessa storlekar (PM₁₀ och PM_{2.5}) som tillförs via ventilationen är så stora att de bör fångas upp effektivt med filter i ventilationssystemen (förutsatt att filtret har en god avskiljningsgrad för dessa partiklar och fungerar som avsett). Partiklar kan också bildas inomhus från olika processer/mänskliga aktiviteter så som matlagning och städning. Det är framförallt de större partiklarna dit PM₁₀ och PM_{2.5} tillhör som bildas genom mekaniska processer. Även för partiklarna har vi valt att jämföra de uppmätta halterna med långtidsmedelvärden. Använder man i stället korttidsvärden (24-timmars medelvärden) på 50 µg/m³ för PM₁₀ och 25 µg/m³ för PM_{2.5} så hamnar partikelhalterna väl under de rekommenderade riktvärdena.



Figur 10. Typiskt exempel på tidsförlopp av halter av PM₁₀ (vänster bild) och PM_{2.5} (höger bild) i en av bostäderna.

Det framgår av Figur 10 att partikelhalterna varierade över mätperioden. Förhöjda halter förekom för det mesta vid lunchtid eller middagstid, det vill säga de sammanfaller med tider för matlagning och/eller att personer vistas och rör sig i bostaden. Under övriga tider var halterna låga.

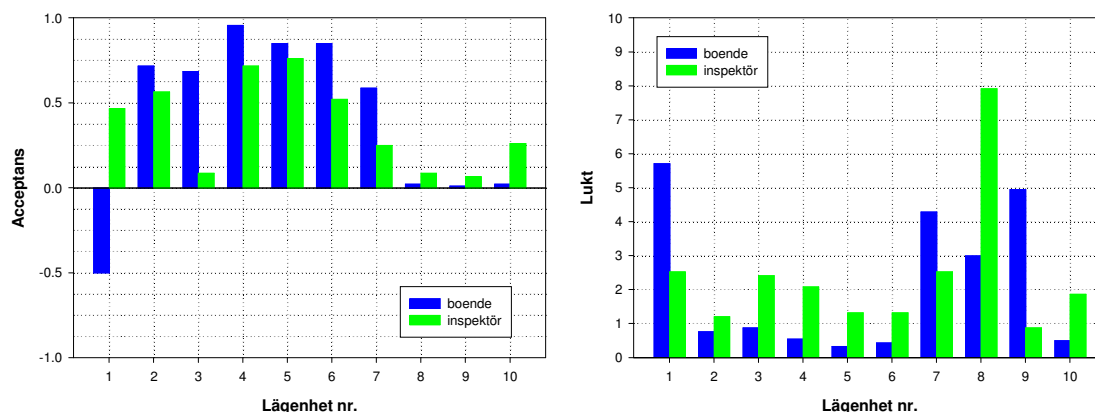
Variationer i tidsförloppet är också orsaken till de stora standardavvikelserna på medelvärden i Figur 9.

Alla resultat från mätningarna av temperatur, RF, koldioxid och luftföroreningar är samlade i Bilaga 3.

Upplevd luftkvalitet

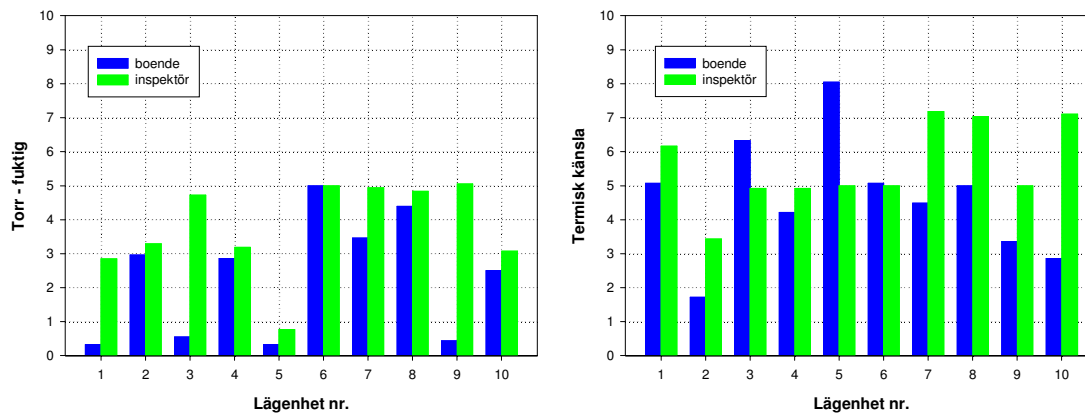
Upplevelsen av luftkvalitet är personlig och ofta spelar andra parametrar in så som svarandes ålder, kön, arbets- och livssituation, hälsoaspekter, social och ekonomisk status osv. Ändå är enkätundersökningar erkända som ett forskningsinstrument. Det behövs ett stort antal enkätsvar för att kunna dra statistiskt signifikanta slutsatser baserat på enkäter. I denna studie ingick enbart 10 bostäder. Resultaten ska därför tolkas med stor försiktighet.

Här redovisas svaren om den allmänna acceptansen av luftkvaliteten, upplevelsen av lukt, luftens torrhet/fuktighet och den termiska komforten. Hur acceptabel luftkvaliteten upplevdes var på den positiva delen av skalan mellan 0 och +1 även om det var stora skillnader mellan olika bostäder och mellan boende och inspektör (Figur 11, vänster bild). Även upplevelse av lukten var för det mesta på den positiva sidan mellan 0 (ingen lukt) och 5 (neutralt) och också den varierade både mellan bostäderna och mellan boende och inspektör (Figur 11, höger bild).



Figur 11. Acceptans av luftkvalitet allmänt (vänster bild) och upplevelse av lukten (höger bild). Blåa staplar: boenden; gröna staplar: inspektör.

Upplevelsen av inneklimat visas i Figur 12. Luften upplevdes mera som torr än fuktig (poäng < 5) och temperaturen upplevdes för det mesta som neutral vilket svaren runt poängen 5 visar.



Figur 12. Upplevelse av fuktighet (vänster bild) och den termiska känslan (höger bild). Blåa staplar: boenden; gröna staplar: inspektör.

Statistiska jämförelser redovisas i avsnittet Statistik. Resultat från enkätundersökningen i numerisk form finns i Bilaga 4. Resultat från svaren på ytterligare frågor om luftens karaktär som fräsch- unken, ren-dammig och icke-möjlig-möjlig återfinns också i Bilaga 4.

Index

Mätdata har använts för beräkningen av Indoor Air Pollution Index, Indoor Discomfort Index och Indoor Environmental Index enligt ekvationerna och schemat beskrivet i kapitel Metoder och genomförande, Beräkning av index, samt Bilaga 1.

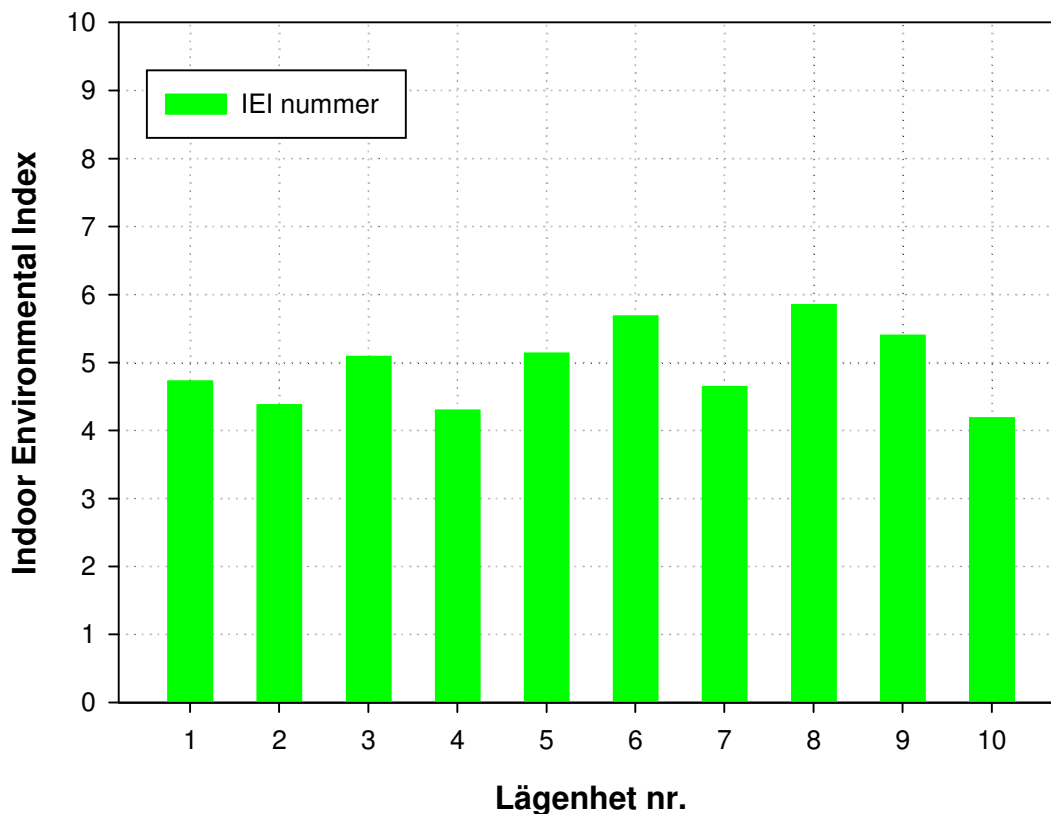
Indoor Air Pollution Index IAPI består av en positioneringsterm och en viktningsterm som multipliceras och resultatet normaliseras mellan 0 – 10. För positionering inom ett visst antal mätningar av samma parameter kan utomstående mätserier användas eller man kan jämföra mätvärdena i den aktuella mätserien. Här valdes att jämföra värden från denna studie med nationella studier av luftkvalitet i ett större antal bostäder, för att ge en bild av statusen på innemiljön ur perspektivet luftkvalitet och inneklimat. Indoor Discomfort Index IDI bedömer temperatur och relativ luftfuktighet. Innemiljöindex IEI (Indoor Environmental Index) är ett medelvärde av IAPI och IDI.

Tabell 3. Data för beräkning av IAPI; alla värden i $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Referensuppgifter för riktvärden finns i Tabell 1.

	Minimum C_{\min}	Maximum C_{\max}	Riktvärde C_{riktv}	Reference för C_{\min} och C_{\max}
NO ₂	0,5	38	40	Langer och Bekö, 2013
Ozon	3,9	36,4	100	Langer m.fl., 2015
TVOC	49	1 424	300	Langer och Bekö, 2013
Formaldehyd	5	141	10	Langer och Bekö, 2013
PM ₁₀	1,6	523	20	Langer m.fl., 2016
PM _{2.5}	1,2	568	10	Langer m.fl., 2016

Tabell 3 presenterar värden som användes för beräkningarna: lägsta och högsta värden i utomstående mätserier av de individuella luftföroreningarna, tillsammans med riktvärden. Data som kommer från studien om 305 bostäder som representerar det svenska bostadsbeståndet (Langer och Bekö, 2013) togs för NO₂, TVOC och formaldehyd. För ozon användes data från den svenska studien om lågenergibyggander (Langer m.fl., 2015) och för partiklar PM₁₀ och PM_{2.5} data från 576 franska bostäder (Langer m.fl., 2016). Övre och nedre gränser och optimala värden för temperatur och relativ luftfuktighet har angivits i texten i Bilaga 1, Beräkning av index, under Ekvation 2.

Index IEI för alla lägenheterna visas i Figur 13. Alla värden faller inom intervallet 4 – 6. I en fransk studie beräknades IEI för 576 bostäder. I den studien byggde indexet på halterna av koloxid och koldioxid istället för NO₂ och ozon som i detta fall och även värden för C_{min}, C_{max} och C_{riktv} var olika. De franska bostäderna jämfördes sinsemellan och indexen hamnade för det mesta, 58 % av bostäder, inom samma intervall, dvs. mellan 4 – 6 (Wei m.fl., 2016). Om man betänker att indexet kan identifiera båda bästa (IEI = 0) och sämsta (IEI = 10) bostäder så var inomhusmiljö i de studerade lägenheterna varken uppseendeväckande bra eller dålig och skillnaderna mellan bostäderna var små (IEI medelvärde 4,9 och standaravvikelse 0,6).



Figur 13. Indoor Environmental Index. Bäst = 0, sämst = 10.

Statistik

För att undersöka sambanden mellan mätresultaten och enkätsvaren har vi gjort statistiska korrelationsberäkningar. Enkäterna besvarades av både av boende och den mätinspektör som besökte bostaden. I en fransk studie har man hittat samband mellan upplevelse av inomhusmiljö och uppmätta halter av specifika luftföroreningar. Boende upplevde luftkvaliteten i sina bostäder som bättre än inspektörer och den skillnaden var statistiskt signifikant (Langer m.fl., 2017).

Vi har använt ett så kallat icke-parametriskt "Wilcoxon matched-pairs signed-rank test" som testar om två olika dataset skiljer baserat på medianvärdet. Värden från Figureerna 11 och 12 för boenden och inspektören användes som ingångsparametrar. Resultaten står i Tabell 4.

Tabell 4. Skillnader i upplevelse för boenden och inspektör. Siffror i tabellen är medianvärden. Statistiskt signifikant skillnad är markerad i fet text.

	Boende	Inspektör	p-värde
Acceptans	0,64	0,36	0,39
Lukt	0,82	1,98	0,75
Fuktighet	2,28	4,01	0,004
Termisk känsla	4,75	5,00	0,19

Ju mindre p-värdet är desto större sannolikhet är det att dataset är olika (Miller och Miller, 1993). Skillnader med p-värdet < 0,05 är signifikanta (dvs. statistiskt säkerställda). Den enda signifikanta skillnad gällde upplevelse av luftens fuktighet. Bostadsinnehavare upplevde luften som torrare än inspektören. Det bör påpekas att inspektören som besvarade enkäterna var alltid en och samma person till skillnad från olika personer i alla undersökta lägenheterna.

För att undersöka samband mellan uppmätta halter av luftföroreningar och de boendes upplevelse, har vi testat mätt temperatur mot termisk känsla, mätt relativ luftfuktighet mot upplevelse av fuktig/torr luft, Indoor Air Pollution Index (bara luftföroreningar) mot upplevelsen av lukt och Indoor Environmental Index (både luftföroreningar och inneklimate) mot hur acceptabel luftkvaliteten är. Linjär regression är inte alltid så enkelt eftersom den antar att X-värdena är utan fel. Därför användes en så kallad Partial Least Squares regression för att kvantifiera sambanden mellan de uppmätta och upplevda parametrarna. På samma sätt har också eventuellt samband mellan IEI och luftomsättning testats. Resultaten presenteras i Tabell 5.

Tabell 5. Samband mellan upplevelsen och mätning för de boenden.

	Koefficient	p-värde
Temperatur: upplevd mot uppmätt	0,61	0,060
Fukt: upplevd mot uppmätt	0,10	0,780
IAPI och lukt	-0,21	0,556
IEI och acceptans	-0,07	0,846

Koefficienten uppger styrka och riktning (positiv eller negativ) för korrelationen och p-värde uppger den statistiska signifikansen. Temperatur och termisk känsla visade starkaste positivt samband och trots att p-värde inte låg < 0,05 var den korrelationen mest signifikant jämfört med de andra. Upplevelsen av luftens fuktighet och den uppmätta relativa luftfuktigheten visade väldigt

svag positiv och inte signifikant korrelation. Samband mellan indexen och upplevelsen av lukt respektive allmänna acceptansen av luftkvalitet visade svag negativ korrelation och var inte heller signifikanta.

Korrelationen mellan Indoor Environmental Index och luftomsättningen (h^{-1}) hade en koefficient på -0,51 och p-värde = 0,132. Lägre värden på IEI som tyder på god inommiljö har koppling till högre värden på luftomsättningar. Sambandet var svagt och statistiskt ej säkerställt (p-värde mycket större än 0,05).

Slutsatser

I denna studie har vi utvecklat och testat en metodik som binder samman mätningar av luftföroreningar i inomhusluft med upplevelsen av inommiljö. Objektet för undersökningen var 10 lägenheter i kvarteret Töfsingdalen, Norra Djurgårdstaden i Stockholm. Vi har samlat uppmätta halter av luftföroreningarna NO_2 , ozon, TVOC, formaldehyd, PM_{10} och $PM_{2.5}$ och inneklimateparametrar temperatur, relativ luftfuktighet och ventilationsflöden samt enkätsvaren om de boendes upplevda luftkvalitet i sina respektive bostäder.

Halterna av de individuella luftföroreningarna jämfördes med sina respektive rekommenderade riktvärden för god inomhusluftskvalitet. Temperatur och relativ luftfuktighet jämfördes med komfortgränser för gott inneklimate. För att underlätta förståelse för luftkvalitet och inneklimate har alla de uppmätta värdena räknats om till ett index, Indoor Environmental Index. Statistiska beräkningar av sambandet mellan mätningarna (index) och boendes upplevelse av inommiljön (enkätsvaren) visade svaga och inte signifikanta korrelationer. Sambandet mellan luftomsättningen och inommiljöindexet IEI visade en antydning om att luftkvalitet kan förbättras genom bättre ventilation.

Mätningen pågick bara under en vecka under uppvärmningssäsongen. En mera omfattande studie över längre tidsperspektiv (t.ex. ett års undersökning) skulle ge mera rättvisande bild av luftkvaliteten i denna byggnad.

Denna studie var ämnad som ett test av metodiken för hur undersökningar av inommiljö borde gå till. För mera omfattande samband mellan bostäder och luftkvalitet borde studier göras i ett större antal bostäder med olika byggnadstekniska lösningar, ålder, geografiskt läge, ventilations- och uppvärmningssätt, energianvändning, inredning och de boendes aktivitetsmönster och beteende.

Referenser

- ASHRAE. Ventilation for acceptable indoor air quality. Standard 62.1. Atlanta, GA. American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; 2013.
- BFS 2011:6 - BBR 18. Boverkets byggregler. Kapitel 6:25 Ventilation.
- Derbez M., Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Pignon C., Riberon J., Kirchner S. (2014a). Indoor air quality and comfort in seven newly built, energy-efficient houses in France. *Building and Environment* 72, 173-187.
- Derbez M., Berthineau B., Cochet V., Pignon C., Riberon J., Kirchner S. (2014b). A 3-year follow-up of indoor air quality and comfort in two energy-efficient houses. *Building and Environment* 82, 288-299.
- EN 15251 (2007) Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. European committee for Standardisation.
- EU directive 2010/31 of the European parliament and of the council of 19 May on the energy performance of buildings. Official J Eur Union 2010; 53:L153.
- Ferm M. and Rodhe H., 1997. Measurements of air concentrations of SO₂, NO₂ and NH₃ at rural and remote sites in Asia. *Journal of Atmospheric Chemistry* 27, 17-29.
- Ferm M., 2001. The theories behind diffusive sampling. Proc. from International Conference Measuring Air Pollutants by Diffusive Sampling, Montpellier, France 26-28 September 2001. p31-40.
- Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Jr. (2000) *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications*. Academic Press.
- FoHMFS 2014:17. Folkhälsomyndighetens allmänna råd om temperatur inomhus. Folkhälsomyndigheten, Stockholm.
- FoHMFS 2014:18. Folkhälsomyndighetens allmänna råd om ventilation. Folkhälsomyndigheten, Stockholm.
- Földváry V., Bekö G., S., Arrhenius K., Petráš D. (2017) Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment* 122, 363-372.
- Karlsson J.F., Moshfegh B. (2007) A comprehensive investigation of a low-energy building in Sweden. *Renewable Energy* 32, 1860-1841.
- Kephalopoulos S., Geiss O., Barrero-Moreno J., D'Agostino D., Paci D. (2016) Promoting healthy and energy efficient buildings in the European Union - National implementation of related requirements of the Energy Performance Buildings Directive (2010/31/EU), EUR 27665 EN, doi: 10.2788/396224.

- Langer S., Bekö G. (2013) Indoor air quality in the Swedish housing stock and its dependence on building characteristics. *Building and Environment* 69, 44-54.
- Langer S., Bekö G., Bloom E., Widheden A., Ekberg L. (2015) Indoor air quality in passive and conventional new houses in Sweden. *Building and Environment* 93, 92-100.
- Langer S., Ramalho O., Derbez M., Ribéron J., Kirchner S., Mandin C. (2016) Indoor environmental quality in French homes and its dependence on building characteristics. *Atmospheric Environment* 128, 82-91.
- Langer S., Ramalho O., Le Ponner E., Derbez M., Kirchner S., Mandin C. (2017) Perceived indoor air quality and its relation to air pollutants in French dwelling. *Indoor Air* 27, 1168-1176.
- Mandin C., Bonvallot N., Kirchner S., Keirsbulck M., Alary R., Cabanes P-A., Dor F., Le Moullec Y., Mullot J-U., Peel A-E., Rousselle C. (2009) Development of French Indoor Air Quality Guidelines. *Clean* 37, 494 – 499.
- Miller J.C., Miller J.N. *Statistics for analytical chemistry*. 1993. Third Edition, Ellis Horwood PTR Prentice Hall, Great Britain.
- MKN Miljö kvalitetsnormer för utomhusluft. Luftkvalitetsförordningen (2010:477).
- Moschandreas DJ., Sofuoglu SC. (2004) The Indoor Environmental Index and its relationship with symptoms of office building occupants. *Journal of Air and Waste Management Association* 54, 1440-1451.
- Rohdin P., Molin A., Moshfegh B. (2014) Experiences from nine passive houses in Sweden - Indoor thermal environment and energy use. *Building and Environment* 71, 176-185.
- SOFS 2005:15. Temperatur inomhus. Socialstyrelsens allmänna råd om temperatur inomhus.
- Sofuoglu SC., Moschandreas DJ. (2003) The link between symptoms of office building occupants and in-office air pollution: the Indoor Air Pollution Index. *Indoor Air* 13, 332-343
- Tang X., Misztal PK., Nazaroff WW., Goldstein AH. (2016) Volatile Organic Compound Emissions from Humans Indoors. *Environmental Science and Technology* 50, 12686–12694.
- UBA. Umweltbundesamt - Federal Environment Agency of Germany. Health and Environmental Hygiene. Guide values for indoor air quality. Available at: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/ad-hoc-arbeitsgruppe-innenraumrichtwerte>
- Wargocki P. (2004) Sensory pollution sources in buildings. *Indoor air* 14, 82-91.
- Wargocki P., Wyon D. P., Baik Y. K., Clausen G., Fanger PO. (1999). Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads. *Indoor Air* 9, 165-179.
- Wei W, Ramalho O, Derbez M, Ribéron J, Kirchner S, Mandin C (2016) Applicability and relevance of six indoor air quality indexes. *Building and Environment* 109, 42-49.



WHO, 2005. Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, ISBN 92 890 2192 6.

WHO, 2010. World Health Organization. Selected pollutants. WHO indoor air quality guidelines. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

Wyon D (1986) VVS & Energi nr 3, 1986.

Bilagor

Bilaga 1 Beräkning av Indoor Environmental Index

Beräkning av luftföroreningsindex, Indoor Air Pollution Index (IAPI), bygger på en procedur som utvecklats för kontorsbyggnader (Sofuoglu och Moschandreas, 2003). Indexet baserades på uppmätta halter av luftföroreningar i 41 kontorsbyggnader. Följande åtta luftföroreningar ingick i formulering av indexet: formaldehyd, summa flyktiga organiska ämnen (TVOC, Total Volatile Organic Compounds), kolmonoxid, radon, PM₁₀, PM_{2.5}, svampar (mögel) och bakterier.

Ytterligare har idén vidareutvecklats för definiera ett nytt index för inneklimat, det vill säga temperatur och relativ luftfuktighet, Indoor Discomfort Index (IDI) (Moschandreas och Sofuoglu, 2004). Ett enkelt aritmetiskt medelvärde av indexen IAPI och IDI ger det slutliga indexet Indoor Environmental Index (IEI).

Det finns ett rekommenderat, hälsobaserat riktvärde för alla luftföroreningar från denna studie som i beräkningen används som avgränsning (riktv i ekvationen nedan). Man har diskuterat olika sätt för beräkning av indexet, s.k. aggregeringsfunktion: linjär summa av delindex, s.k. maximum operator, icke-linjärt medelvärde och aritmetiskt medelvärde; det sistnämnda bedömdes som lämpligaste sätt för beräkning av indexet.

Indexet IEI och delindexen IAPI (för luftföroreningar) och IDI (för temperatur och relativ luftfuktighet) beräknas enligt ekvationer nedan. Enligt trästrukturen är beräkningen uppdelad i tre nivåer enligt vilka man beräknar medelvärdet för luftföroreningarna, temperatur och RF.

På Nivå 1 beräknas index för individuella luftföroreningar och medelvärdernas på Nivå 2 genom "I" till grupper organiska luftföroreningar (TVOC, formaldehyd), oorganiska luftföroreningar (NO₂, ozon) och partiklar (PM₁₀, PM_{2.5}). Medelvärdering av dessa grupper till IAPI sker på Nivå 3 genom "J".

Ekvation 1:

$$IAPI = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I 10 \left(1 - \frac{C_{max} - C_{obs}}{C_{max} - C_{min}} \left(\frac{C_{riktv} - C_{obs}}{C_{riktv}} \right) \right)$$

Betydelse av termerna i ekvationerna är följande: C_{obs} är den uppmätta halten av en luftförorening; C_{riktvc} är det rekommenderade riktvärde; C_{max} och C_{min} är det lägsta och det högsta värde för en given förorening från landsomfattande studier (för bostadsbeståndet).

För TVOC, formaldehyd och NO₂ användes värden från en studie om inomhusmiljö i det svenska bostadsbeståndet från 2007/2008 (Langer och Bekö, 2013). För ozon användes värden från en annan svensk studie och inomhusmiljö i nybyggda passivhus och konventionellt byggda hus (Langer m.fl., 2015) och för partiklarna värden från en fransk studie eftersom inga svenska data finns (Langer m.fl. 2016).

På Nivå 3 och genom index K beräknas också Indoor Discomfort Index enligt Ekvation 2.

Ekvation 2:

$$IDI = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K 10^{\frac{|CA_{opt} - CA_{obs}|}{CA_{ucl} - CA_{lcl}}}$$

CA betyder "comfort agent"; CA_{opt} är optimala värden för temperatur och relativ luftfuktighet $T = 22$ °C och $RF = 45$ %; ucl betyder övre komfortnivå (upper comfort level) $T = 24$ °C och $RH = 60$ %; och lcl (lower comfort level) betyder nedre komfortnivå $T = 20$ °C och $RH = 30$ %.

Komfortgränserna för temperatur är från SOFS 2005:15 - Temperatur inomhus. Socialstyrelsens allmänna råd om temperatur inomhus. Komfortgränserna för relativ luftfuktighet är från den internationella standarden ASHRAE - Ventilation for acceptable indoor air quality. Standard 62.1. Atlanta, GA. American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; 2013.

Ekvation 3:

$$IEI = \frac{IAPV + IDI}{2}$$

Slutligen beräknas inommiljöindex Indoor Environmental Index som medelvärde av de två delindexen.

Bilaga 2 Enkätundersökning – formulär



mini-GINERVA

Med den här enkäten vill vi försöka få fram hur du upplever inomhusklimatet i din lägenhet. Det är helt frivilligt att delta i undersökningen. I resultatsammanställning kommer alla uppgifter att avidentifieras.

Datum: _____ Adress: _____

Lgh. nr.: _____ Ålder/Kön: _____

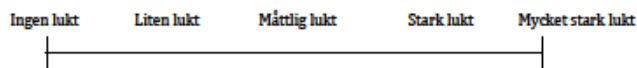
Ta 2-3 andetag när du kommer hem utifrån och markera med ett sträck på skalan:

1. Hur upplever du i allmänhet att luftkvaliteten brukar vara i din lägenhet?



Vg. observera att det är ett "glapp" mellan skalorna för acceptabel och oacceptabel.

2. Hur upplever du att det luktar i din lägenhet?

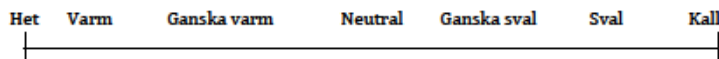


3. Hur bedömer du i allmänhet luften i din lägenhet?

Är luften:

Fräsch	_____	Unken
Torr	_____	Fuktig
Ren	_____	Dammig
Inte möjlig	_____	Möjlig

4. Hur bedömer du i allmänhet temperaturen i din lägenhet?



Bilaga 3 Mätdata

Numeriska värden från mätningarna ges i Tabellerna 3.1 och 3.2.

Tabell 3.1 Medelvärden \pm standardavvikelse för temperatur, relativ luftfuktighet och halten av koldioxid (CO₂) i lägenheterna. Medelvärden för mätperioden på en vecka. Ursprungliga mätdata är 5-minuters värden.

Lgh. nr.	Temperatur °C	Relativ luftfuktighet %	CO ₂ medelvärde ppm	CO ₂ maxvärde ppm
1	21,7 \pm 0,3	20 \pm 4	656 \pm 123	900
2	20,6 \pm 0,2	20 \pm 5	639 \pm 222	1 179
3	21,8 \pm 0,3	21 \pm 4	664 \pm 91	899
4	21,0 \pm 0,2	28 \pm 5	435 \pm 36	808
5	22,3 \pm 0,3	23 \pm 3	848 \pm 128	1 086
6	21,7 \pm 0,2	20 \pm 8	779 \pm 529	2 850
7	22,0 \pm 0,2	20 \pm 4	630 \pm 81	821
8	21,6 \pm 0,9	17 \pm 4	509 \pm 71	650
9	21,4 \pm 0,2	10 \pm 5	466 \pm 142	1 175
10	22,2 \pm 0,3	31 \pm 6	934 \pm 342	1 642

Tabell 3.2 Halter av gasformiga luftföroreningarna och partiklar i inomhusluft; alla i enheten $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Gasformiga luftföroreningarna är ett integrerat medelvärde över mätperioden på en vecka. Medelvärden \pm standardavvikelse för partikelkoncentrationer är beräknade från 1-minuts värden från mätinstrumentet.

Lgh. nr.	SO ₂	NO ₂	Ozon	TVOC	Formaldehyd	PM ₁₀	PM _{2.5}
1	< 0,7	7,5	14	50	14	8,9 \pm 11	2,6 \pm 2,3
2	< 0,7	13	<6	26	6,2	4,3 \pm 5,6	2,7 \pm 1,3
3	< 0,7	25	<6	134	9,7	15 \pm 33	5,4 \pm 16
4	< 0,7	15	18	72	5,2	8,2 \pm 21	3,5 \pm 10
5	< 0,7	11	<6	124	14	19 \pm 35	4,7 \pm 16
6	< 0,7	22	8,1	134	11	21 \pm 43	4,3 \pm 19
7	< 0,7	13	17	95	9,0	11 \pm 20	2,0 \pm 1,9
8	< 0,7	8,5	12	124	12	13 \pm 56	9,7 \pm 53
9	< 0,7	16	8,3	113	9,7	2,9 \pm 6,6	1,6 \pm 3,3
10	< 0,7	8,5	6,5	84	9,0	21 \pm 62	6,8 \pm 31

Bilaga 4 Resultat av enkätundersökningen

Numeriska värden på enkätsvaren som presenteras i testen och som kunde relateras till mätningarna ges i Tabellerna 4.1 och 4.2.

Tabell 4.1 Resultat av enkätundersökningen – svar från boenden i de respektive lägenheterna. Acceptansen graderades på en skala mellan -1 (sämst) och +1 (bäst); lukt, fuktighet och termisk känsla på en skala mellan 0 (ingen lukt, torrt, kallt) och 10 (mycket stark lukt, fuktigt, hett).

Lgh. nr.	Acceptans	Lukt	Fuktighet	Termisk känsla
1	-0,50	5,7	0,3	5,1
2	0,72	0,8	3,0	1,7
3	0,68	0,9	0,5	6,3
4	0,96	0,5	2,9	4,2
5	0,85	0,3	0,3	8,0
6	0,85	0,4	5,0	5,1
7	0,59	4,3	3,5	4,5
8	0,02	3,0	4,4	5,0
9	0,00	4,9	0,4	3,4
10	0,02	0,5	2,5	2,9

Tabell 4.2 Resultat av enkätundersökningen – svar från inspektören i de respektive lägenheterna. Acceptansen graderades på en skala mellan -1 (sämst) och +1 (bäst); lukt, fuktighet och termisk känsla på en skala mellan 0 (ingen lukt, torrt, kallt) och 10 (mycket stark lukt, fuktigt, hett).

Lgh. nr.	Acceptans	Lukt	Fuktighet	Termisk känsla
1	0,47	2,5	2,9	6,2
2	0,57	1,2	3,3	3,4
3	0,09	2,4	4,7	4,9
4	0,72	2,1	3,2	4,9
5	0,76	1,3	0,8	5,0
6	0,52	1,3	5,0	5,0
7	0,25	2,5	4,9	7,2
8	0,09	7,9	4,8	7,0
9	0,07	0,9	5,1	5,0
10	0,26	1,9	3,1	7,1

Ytterligare frågor handlade om luftens karaktär i termer som fräsch – unken, ren – dammig och icke-möglig – möjlig. De poängsattes också på skalan 0 (bäst) – 10 (sämst) Medianvärden för fräsch – unken var 2,6 för boenden och 4,1 för inspektören; för ren – dammig 5,4 för boenden och 4,2 för inspektör och 0,3 för både boenden och inspektören i frågan om möjlig.

