



Nr C 464
December 2019

Luftkvalitet i stadsutvecklingsprocessen

Del två: effekten på luftkvaliteten av olika
utformning av bebyggelse och vegetation

Jenny Lindén, Luca Merelli, Malin Gustafsson, Gabriella Saucedo-Villamor



På uppdrag av Naturvårdsverket

Författare: Jenny Lindén, Luca Merelli, Malin Gustafsson, Gabriella Saucedo-Villamor

Medel från: Naturvårdsverket

Rapportnummer C 464

ISBN 978-91-7883-130-2

Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© **IVL Svenska Miljöinstitutet 2019**

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

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

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	5
1 Bakgrund och syfte	7
1.1 Påverkan på luftkvaliteten av stadsbebyggelse	7
1.2 Vegetationens påverkan på ventilation av stadsluft	8
1.3 Studiens syfte	8
2 Genomförande.....	9
2.1 Spridningsmodell och ingångsdata.....	9
2.1.1 Emissionsdata	9
2.1.2 Meteorologi	10
2.2 Scenarier i spridningsberäkningarna	10
2.2.1 Effekt på luftkvaliteten från olika utformning av förtätad stadsbebyggelse	11
2.2.2 Effekt på luftkvaliteten från olika typer av vegetation i gaturummet	14
2.2.3 Effekt på luftkvaliteten från olika typer av barriärer runt en urban genomfartsled.....	16
3 Resultat.....	18
3.1 Effekt på luftgenomströmning och luftkvalitet av olika bebyggelse	18
3.1.1 Effekt av förtätning och trafikökning	18
3.1.2 Effekt av olika utformning på förtätning.....	20
3.1.3 Jämförelse punkthus av jämn vs ojämn höjd.....	21
3.1.4 Jämförelse av olika vinkel på linjehus	22
3.2 Vegetationens påverkan på luftgenomströmning och luftkvalitet i gaturummet	23
3.3 Effekt på luftkvaliteten av barriärer längs med en större genomfartsled.....	27
4 Slutsats och rekommendationer	31
Referenser.....	33

Sammanfattning

I denna rapport presenterar IVL Svenska Miljöinstitutet, på uppdrag av Naturvårdsverket, en studie av effekten på luftkvalitet vid olika utformning av förtätningsscenarier, stadsvegetation och barriärer. Studiens syfte är att genom modellberäkningar tydliggöra hur utformningen av framtidens täta, gröna städer kan optimeras med avseende på luftkvalitet.

Förtätning och ökad grönska är en stark trend i dagens städer, och de positiva effekterna av detta är många. Förtätning ger, till exempel, effektivare användning av infrastruktur och service samt minskad energiåtgång, och växtlighet kan till exempel öka välbefinnande, minska värmestress och översvänningsrisk. Dock kan både förtätning av bebyggelse och urban växtlighet minska luftgenomströmningen i staden. Det påverkar i sin tur omblandning och utspädning av lokalt genererade luftföroreningar, från till exempel trafik, och kan därmed riskera att leda till försämrad luftkvalitet. Genom noggrann stadsplanering kan dock dessa negativa effekter begränsas eller till och med undvikas helt. Det är därmed av största betydelse att skapa medvetenhet om vikten av och möjligheter till att optimera utformningen av framtidens hållbara och täta städer för en god luftkvalitet.

Sammantaget visar studien att det finns stora möjligheter att förbättra den urbana luftkvaliteten genom att optimera bebyggelse och vegetation för bästa luftgenomströmning. Beräkningarna av olika förtätningsscenarier visade att utformning och placering av bebyggelse kan ge skillnader i årsmedelhaltbidrag från trafik på upp mot 50 %. Lägst haltbidrag gav punkthus där luften tilläts strömma fritt mellan husen, och högst haltbidrag orsakades då byggnader stängde in gaturum och effektivt förhindrade luftgenomströmning i den huvudsakliga vindriktningen.

Vegetation placerad i ett slutet gaturum minskade också luftgenomströmningen generellt, och påverkade därmed luftkvaliteten negativt. Försämringen var störst för stora träd med täckande krona, vilka beräknades ge en ökning på upp till 40 % i haltbidrag i luften vid trottoarerna. Ökningen orsakades av att träden hindrade omblandning och utspädning av föroreningarna med luften ovan, varpå föroreningarna istället spreds ut till trottoarer och ytor bredvid vägen. Även ett vegetationslager längs med husväggen beräknades ge minskade vindhastigheten genom gaturummet och ge ett ökat haltbidrag vid trottoarerna. Dock medför en förenklad beskrivning av vegetation i modellen, samt att den renande depositionseffekten inte kunde inkluderas, ökade osäkerheter i den beräknade effekten från vegetationen, vilket bör beaktas i tolkning av resultaten.

Även barriärer runt en genomfartsled hade stor påverkan på haltbidrag i närområdet. Solida barriärer, så som plank eller mur, gav större minskning i haltbidrag, upp till 40 %, inne vid en öppen yta nära leden, medan effekten av porösa vegetationsbarriärer var lägre, under 20 %. Placering av hög och tät bebyggelse nära genomfartsleden minskade luftgenomströmningen betydligt, vilket gav höga halter nära vägbanan och längs med den närliggande fasaden, men minskat haltbidrag längre in vid den öppna ytan.

Resultaten i denna studie visar tydligt att luftkvalitetsaspekten bör inkluderas i planering av nya områden, speciellt då ett område ska förtätas. Extra fokus bör vara på platser som riskerar att bli trafikutsatta. På dessa platser bör bebyggelse planeras med hänsyn till huvudsakliga vindriktningar, så att luften tilläts strömma genom gaturummen och ventilera ut trafikrelaterade föroreningar.

I gaturum där människor förväntas uppehålla sig på trottoarer, till exempel på uteserveringar, är vegetation ofta önskvärt då det ökar välbefinnande, kan skapa skugga under varma dagar och lä



för vind. Om trafik finns i dessa gaturum bör dock vegetation noga planeras för att tillåta luftgenomströmning i syfte att undvika förhöjda halter där människor förväntas uppehålla sig. Till exempel bör träd med tätt krontäcke undvikas över trafikerade gator, då det kan medföra att föroreningarna sprids ut till trottoarer och ytor bredvid vägen istället för att blandas om och spädas ut med luften ovan.

Eftersom luftgenomströmningen kan påverkas kraftigt av relativt små förändringar bör luftkvalitetsutredningar för trafikutsatta platser inkludera plats-specifika beräkningar för att ge möjlighet till anpassning och optimering av luftkvaliteten på platsen. Om luftkvalitetsutredningen inkluderar gaturum, och platser där vegetation finns eller planeras att introduceras, bör även vegetation beaktas i utredningen.

1 Bakgrund och syfte

Svenska storstäder och storstadsnära orter växer allt snabbare. Det innebär både möjligheter och risker för den hållbara samhällsutveckling som eftersträvas. För att lösa städernas miljö- och trängselproblem och skapa hållbara städer behövs lösningar av grundläggande strukturell karaktär, där boende-, arbetsplats-, miljö-, trafik- och transportfrågor integreras i den långsiktiga stadsplaneringen. Samtidigt som en förtätning av staden kan vara bra för miljön på grund av en ökad energieffektivisering, mer samtransport och ökad kollektiv resursfördelning, kan den också innebära ökade halter av luftföroreningar i gaturummet. När mer människor och aktiviteter ska få plats på mindre yta riskeras en ökning av förorenande utsläpp, och en tätare bebyggelse kan dessutom ge sämre ventilerings av stadens gaturum, vilket i sin tur kan leda till att de utsläpp som genereras lokalt ansamlas i gaturummen med sämre luftkvalitet som följd.

Under våren 2018 genomfördes en förstudie (Lindén et al. 2018) där det konstaterades att även om Sverige ännu är relativt gles befolkat så pågår en kraftig förtätningstrend. För närvarande överskrider de, enligt miljö kvalitetsnormerna, tillåtna halterna av luftföroreningar i många av Sveriges städer, och prognoser indikerar att problem med överskridande av MKN riskerar att kvarstå år 2030 (Holmin-Fridell et al. 2013). Nyligen sänkta bullerkrav har dessutom lett till ökade möjligheter att bebygga, till exempel, trafikutsatta platser där höga halter av luftföroreningar riskeras. Detta, i kombination med en fortsatt kraftig förtätning, ger starka argument för att luftkvalitet bör hanteras som en viktig del i framtidens hållbara stadsutveckling.

1.1 Påverkan på luftkvaliteten av stadsbebyggelse

Utformning av bebyggelse, vegetation och andra objekt i närområdet kan ha stor inverkan på ventilationen av luft i ett område genom att luftflödet styrs runt objekt som står i vägen. I bebyggda områden medför detta generellt minskade vindhastigheter och ökad turbulens. Genom påverkan på genomströmningen av luft i gaturummen påverkas också omblandning och utspädning av de luftföroreningar som släpps ut där. I den önskvärda täta och gröna stad som ofta eftersträvas i förtätningprojekt är risken därmed stor att ökningen av utsläpp kopplade till den högre andelen människor och aktiviteter, tillsammans med den minskade ventilationen i stadsrum, ger kraftigt försämrade luftkvalitet som resultat.

Att kvantifiera effekten av täthet, höjd och utformning av bebyggelse på ventilation av stadsluft har varit fokus i flera studier där vindtunneexperiment eller spridningsmodeller använts (e.g. Amorim et al. 2013; Britter and Hanna 2003; Goricsán et al. 2004; Xie et al. 2007). Dessa studier visar tydligt att risken är stor att en tätare bebyggelsestruktur minskar omblandningen av luften i marknivå och därmed begränsar ventilerings och utspädning av lokalt genererade utsläpp från till exempel trafik, med förhöjda föroreningshalter som resultat. Dock har studier visat att stora möjligheter finns att minimera negativa effekter av förtätad bebyggelse genom optimering av utformning, struktur och placering med avseende på rådande vindriktning (Chan et al. 2001; Kastner-Klein et al. 2004; Moonen et al. 2011; Yuan et al. 2014).

1.2 Vegetationens påverkan på ventilation av stadsluft

Även objekt som till exempel träd och annan vegetation påverkar luftflödet. Eftersom lövverk inte är solida, utan har en varierande täthet blir påverkan på luftflödet annorlunda än det från bebyggelse, men även vegetation orsakar generellt lägre vindhastighet och minskad omblandning av den marknära luften. Studier har visat att stadsvegetation kan ha betydande påverkan på strömningsmönster med risk för minskad omblandning och utspädning av föroreningar som följd (Abhijith et al. 2017; Amorim et al. 2013; Gromke 2011; Gromke et al. 2008; Janhäll 2015; Wania et al. 2012). På samma sätt som bebyggelse kan vegetation dock anpassas för att minimera den negativa effekten på luftströmningen (e.g. Janhäll 2015; Klingberg et al. 2017). Vegetation kan till exempel placeras så att spridning från föroreningskälla till platser där människor vistas förhindras, vilket visas av till exempel Gromke et al (2016). En ytterligare effekt av stadsvegetation är att luftföroreningar kan fastna på vegetationens lövverk, vilket kan ge en direkt renande effekt på luften (Janhäll 2015; Litschke and Kuttler 2008; Pugh et al. 2012). Dock är denna process mycket komplex, och det är svårt att bedöma hur stor den renande effekten är i praktiken. Studier har indikerat att vegetationens påverkan på luftgenomströmningen har betydligt större relevans för föroreningshalter i ett gaturum än depositionseffekten (e.g. Wania et al. 2012; Vos et al. 2013). Komplexiteten i de faktorer som styr deposition på växtlighet medför att depositionseffekt oftast inte är inkluderad i beräkningsmodeller för urban luftkvalitet. I denna studie är depositionseffekten inte inkluderad i modellberäkningarna, men möjlig påverkan av deposition inkluderas i analys av resultaten och i diskussionen.

1.3 Studiens syfte

Det är välkänt att utformning av stadens bebyggelse och vegetation kan påverka luftgenomströmningen i gaturummen och därmed också omblandning och utspädning av de luftföroreningar som släpps ut där. Även om effekten av bebyggelse och vegetation på urban luftkvalitet bedrivits länge så identifierades i förstudien ett behov av en tydlig sammanställning av hur stor effekt som kan förväntas från olika utformning av bebyggelse och vegetation.

Syftet med denna delstudie är att bygga upp och simulera scenarier som beskriver påverkan av olika utformning och placering av förtätad bebyggelse, vegetation i gaturummet, och barriärer runt större trafikleder, på luftgenomströmning och luftkvalitet i ett område. Resultaten har analyserats och sammanfattats med syfte att tydliggöra hur stor effekt som kan förväntas från olika utformning och placering av bebyggelse och vegetation. Tanken är att det ska ge en indikation om hur utformningen av gaturummet kan optimeras för bästa effekt på luftkvaliteten.

2 Genomförande

2.1 Spridningsmodell och ingångsdata

För att öka kunskapen om vilken faktisk effekt på luftkvaliteten som kan förväntas från olika åtgärder avseende utformning av bebyggelse och vegetation har scenarier byggts upp och spridning av lokala trafikutsläpp beräknats i modellen MISKAM SoundPLAN. MISKAM är en CFD-modell (Computational Fluid Dynamics) för beräkning av högupplöst spridning av luftföroreningar i mikroskala (från gaturum till kvarter eller stadsdel). I denna modell simuleras ett tredimensionellt luftströmningsmönster baserat på vindhastighet och riktning, turbulens skapad runt byggnader, vegetation, broar och topografi, trafikinducerad turbulens och marknära strömningsförhållanden. Modellen tar även hänsyn till atmosfärisk stabilitet, horisontell transport (advektion), sedimentation och deposition, och räknar i enlighet med alla större internationella standarder. Den är väl lämpad för beräkningar av luft i en komplex urban miljö och kan också användas för att beräkna vindutsatthet. Även vegetationens påverkan på luftflödet kan beräknas, dock ej deposition av föroreningar på vegetationens löv och barr och grenverk. Detta medför en risk att den negativa effekten på luftkvaliteten från vegetation överskattas, vilket har beaktats i analysen.

2.1.1 Emissionsdata

Trafik är den överlägset största källan som återfinns i de flesta urbana gaturum, och studien har därför fokuserat på spridning av trafikrelaterade utsläpp. I största möjliga mån har trafiksammanställning och flöde från befintliga vägar använts i studien för att säkerställa att resultaten blir realistiska. Emissionsfaktorer avser utsläpp för nutida fordonspark och har hämtats från HBEFA 3.3.

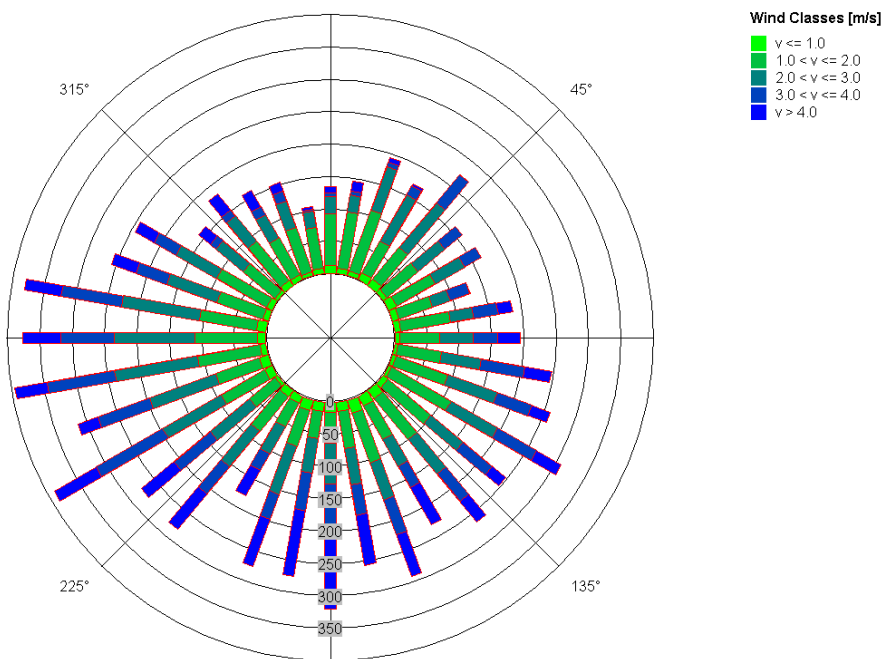
Samtliga jämförelser avser trafikrelaterade NO_x-utsläpp. Vanligtvis är halter av NO₂ eller partiklar av störst intresse i studier av urban luftkvalitet eftersom det är dessa föroreningar av de som är reglerade i miljökvalitetsnormer och miljökvalitetsmål som städerna har störst problem att klara. Dock påverkas NO₂-halter av kemiska reaktioner i atmosfären efter de emitterats. Dessa kemiska reaktioner kan inte inkluderas i beräkningar med MISKAM, vilket ökar osäkerheten i resultaten. Partiklar i gaturummet kommer från direkta avgasemissioner, men främst från resuspension (uppvirvling) av damm och slitagepartiklar från vägbanorna. Emissionerna varierar kraftigt under olika årstider, och är starkt beroende av bland annat renhållning av gator och typ av vägyta samt däck. Partikelemissioner är därmed mer komplexa att fastställa vilket även det ökar osäkerheten i resultaten. För att minimera osäkerheten i grundläggande emissioner har därför NO_x valts ut för att representera spridning och påverkan av bebyggelse och vegetation.

Eftersom fokus i studien är att kvantifiera effekten av olika utformning och placering på spridning av lokala trafikutsläpp, har regionala och långväga transporterande föroreningar (bakgrundshalter), inte inkluderats i kartorna som presenteras. De halter som presenteras motsvarar därmed endast haltbidraget från lokal trafik, och inte faktiska halter i området.

2.1.2 Meteorologi

Vindförhållanden är mycket viktiga för spridning av luftföroreningar. Vindriktning och -hastighet bestämmer hur utsläpp transporteras och hur stor omblandningen med omgivande luft blir. Kraftigare transport och större omblandning innebär att utsläppen späds ut mer vilket ger lägre resulterande halter.

För att ge möjlighet att bedöma effekter på spridning generellt, över en längre tid, har spridning beräknats för ett typår. Ett typår är en sammansättning av statistiskt representativa månader från olika år som tillsammans bildar ett representativt år avseende typiska spridningsförutsättningar baserat på en objektiv väderklassificering (Lambs väderklasser) (Chen 2000). Genom att använda ett typår återspeglas "normala" spridningsförhållanden för området. Det typår som används är framtaget ur data från Göteborg, se vindros i Figur 1. Även om vindmönster kan variera kraftigt lokalt mellan olika platser så drivs Sveriges vindklimat generellt av västvindar (SMHI 2017), vilket gör att de huvudsakligen väst och sydvästliga vindriktningarna, under det typår som används i studien, är representativa även för andra platser i Sverige (utanför fjällvärlden). Även vindhastigheterna under typåret, med 4 % vindhastigheter under 1 m/s, 79 % mellan 1 och 4 m/s och 17 % över 4 m/s, är vanligt förekommande. Vindmönster under typåret anses därmed generellt vara representativt för svenska städer.



Figur 1. Vindros beskrivande ett typår för centrala Göteborg.

2.2 Scenarier i spridningsberäkningarna

För att de testade scenarierna ska bli realistiska har idag existerande platser, utformning och placering av befintlig bebyggelse och vegetation legat som grund för scenarierna i största möjliga mån. I förtätningsscenierna innebär detta att ett befintligt område i Göteborg använts som grund för möjlig vidare utveckling och förtätning av detta område. Även trafikmängder och

sammansättning har hämtats från befintliga exempel i dagens Göteborg. I studien undersöktes också effekten av olika sorters barriärer runt en genomfartsled, som passerar genom stadsbebyggelse, på spridning av luftföroreningar.

Totalt 16 scenarier har byggts upp för att undersöka hur utformning av den urbana miljön påverkar spridning av luftföroreningar i urban miljö. Huvudsakligt fokus har legat på olika utformning och placering av förtätad bebyggelse, olika utformning av vegetation i gaturummet, och effekten från olika typer av barriärer runt en genomfartsled som går genom stadsbebyggelse. Samtliga scenarier beskrivs i följande i sektion 2.2.1 – 2.2.3.

2.2.1 Effekt på luftkvaliteten från olika utformning av förtätad stadsbebyggelse

För att de simulerade förtätningsscenarierna ska bli realistiska valdes ett centrumnära område i Göteborg för att ligga som grund till beräkningarna av förtätningsscenarierna, se Figur 2. Bebyggelsen i området är idag blandad och relativt gles, med inslag av villor, men området är under omvandling och förtätas successivt.



Figur 2. Området runt korsningen Gibraltargatan-Eklandagatan i Göteborg har använts som grund för förtätningsscenarierna. All bebyggelse i Ortofotot har inkluderats i beräkning av vindflödet, medan spridning av föroreningar beräknats för området inom den röda rektangeln. Bilder hämtade från Google maps.

Förtätning av bebyggelsen i området utgick från att befolkningstätheten skulle bli 150 invånare per hektar. Detta är den befolkningstäthet som FN:s boende- och bosättningsorgan rekommenderade för utveckling av hållbara stadsdelar (UN Habitat 2014). En befolkningstäthet på 150 eller mer återfinns ofta i de centrala delarna av svenska städer, medan mer perifera områden generellt har

betydligt lägre befolkningstäthet. Områden som idag har en liknande befolkningstäthet är Vasastaden i Göteborg (ca 160 invånare per hektar¹) och Möllevången i Malmö (ca 210 invånare per hektar²). Även Vasastaden i Stockholm³ har en liknande befolkningstäthet som helhet (ca 213 invånare per hektar), även om delar av stadsdelen har högre befolkningstäthet. En ungefär dubbelt så hög befolkningstäthet återfinns även i till exempel stadsdelen Olivedal i Göteborg. Antagandet att de delar av svenska städer som planeras för förtätning ska uppnå en befolkningstäthet på ca 150 invånare per hektar anses därmed som en rimlig utgångspunkt för beräkningarna i denna studie. Om samtliga byggnader i det aktuella området antas vara bostäder⁴, ger det en ökning i bostadsyta, och därmed befolkningstäthet, på drygt 50 %.

En förtätning av det aktuella området till den önskade befolkningstätheten på 150 invånare/ha kan ske med olika utformning av bebyggelsen. Effekt av bebyggelse på vindgenomströmning och spridning av trafikrelaterade utsläpp har beräknats för totalt sex scenarier enligt beskrivning i Tabell 1. För att ge en indikation på hur stor förändring som kan förväntas från en förtätning av bebyggelsen i området har spridning beräknats för nuvarande bebyggelse. Bebyggelsestrukturen i förtätningsscenarierna har renodlats så att enbart en typ av bebyggelse inkluderas i respektive scenario. Tre vanligt förekommande typer av bebyggelse; linjehus, blockhus och punkthus, har inkluderats. Även effekten av olika vinkling av linjehusen, samt av variation av höjden av punkthusen har inkluderats i scenarierna. För att säkerställa att samtliga scenarier är realistiska har exempel med motsvarande bebyggelse hämtats ifrån verkligheten.

Den totala yta som i förtätningsscenarierna ska upptas av bebyggelse inom området har beräknats baserat på att varje person ges en boyta motsvarande genomsnittet i svenska storstäder, vilket ligger på runt 40 m² (SCB, 2016, <https://www.scb.se/hitta-statistik/artiklar/2016/Minst-bostadsyta-per-person-i-storstader/>), och att varje våningsplan i flervåningshus har höjden 2.5 m. Utrymme för källare och vind har inte inkluderats i beräkningarna. Samtliga bebyggelsescenarier har ungefär samma totala boyta.

Bebyggelse byggdes upp i modellen för ett område på minst 500 x 500 meter (byggnader som sträckte sig utanför detta område inkluderades i helhet i modellen). Ett tredimensionellt luftströmningsmönster beräknades för området baserat på vindhastighet och riktning, turbulens skapad runt byggnader mm. Baserat på detta luftströmningsmönster beräknades spridning av trafikrelaterade utsläpp för en yta på 240 x 300 meter och en gridstorlek på 2 meter centrerad inom detta område. För att renodla effekten från olika typer av bebyggelse inkluderades inte topografi i beräkningarna. Resultaterande haltbidrag som anges för ursprungsscenarioet kan därmed avvika från verkligheten.

För scenariot med nuvarande bebyggelse, har även aktuella trafikmängder och sammansättningar för gator inom området använts för framtagande av emissioner. Emissionsfaktorer för dessa vägar har hämtats från HBEFA. En ökning av befolkningen på 50 % innebär sannolikt även ett ökat trafikflöde genom området. Eftersom ett stort fokus i stadsutveckling idag läggs på alternativa trafiklösningar med satsningar på kollektivtrafik, bilpooler, cykeltrafik etc, antas trafiken inte öka proportionerligt med befolkningsökningen. En ökning av utsläpp på 20 % har istället antagits till vägarna inom området i förtätningsscenarierna.

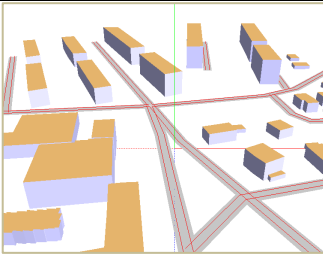

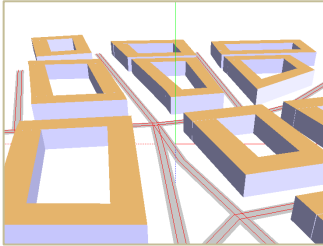
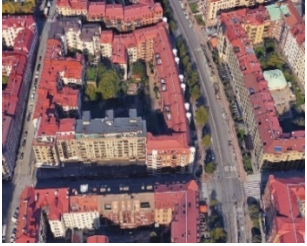
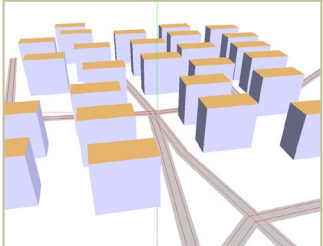

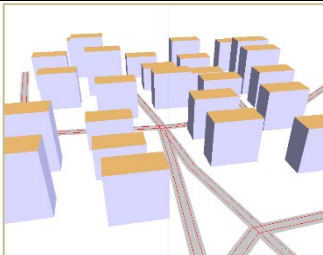

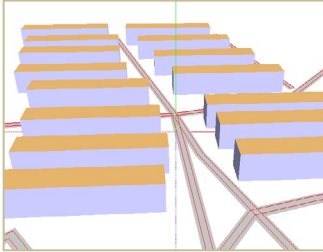
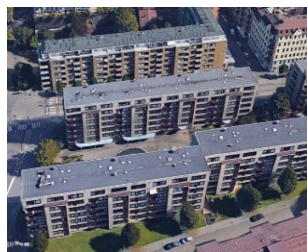
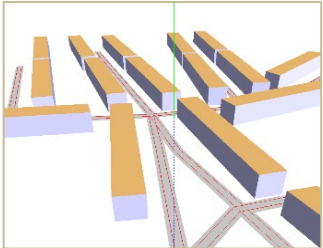

¹ <https://goteborg.se/wps/portal/enhetssida/statistik-och-analys/demografi-och-analys/befolkningsprognoser>

² <https://malmo.se/service/om-malmo-stad/demokrati-beslut-och-paverkan/Fakta-och-statistik/befolkning>

³ <http://statistik.stockholm.se/historisk-statistik/befolkning-historisk>

⁴ Några byggnader används idag som kontor och i undervisningssyfte, men eftersom användning inte påverkar luftströmningsmönster antas dessa byggnader vara bostäder i jämförelsen.

Tabell 1. Beskrivning av förtätningsscenarioer. Bilder hämtade från Google maps.

Scenario	Beskrivning	3D-representation i MISKAM	Exempel på befintlig motsvarighet
S _{F0}	<p>Nu-scenario för bebyggelse</p> <p>Nuvarande bebyggelse och trafik i området runt korsningen Gibraltargatan-Eklandagatan i Göteborg. Höjd på bebyggelse varierar från enplansvillor till 17 m höga linjehus.</p>		
S _{F1}	<p>Förtätningsscenario 1</p> <p>Blockhus, enhetlig höjd 17 m</p> <p>Trafikemissioner: 20 % ökning från nu-scenario</p>		
S _{F2}	<p>Förtätningsscenario 2</p> <p>Punkthus, enhetlig höjd, 33 m</p> <p>Trafikemissioner: 20 % ökning från nu-scenario</p>		
S _{F3}	<p>Förtätningsscenario 3</p> <p>Punkthus, höjd varierande mellan 23 och 43 m.</p> <p>Trafikemissioner: 20 % ökning från nu-scenario</p>		
S _{F4}	<p>Förtätningsscenario 4</p> <p>Linjehus, höjd 17 m, placerade vinkelrätt mot huvudväg, parallellt med huvudsaklig vindriktning.</p> <p>Trafikemissioner: 20 % ökning från nu-scenario</p>		
S _{F5}	<p>Förtätningsscenario 5</p> <p>Linjehus, höjd 17 m, placerade parallellt med huvudväg, vinkelrätt mot huvudsaklig vindriktning.</p> <p>Trafikemissioner: 20 % ökning från nu-scenario</p>		

2.2.2 Effekt på luftkvaliteten från olika typer av vegetation i gaturummet

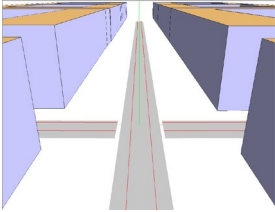

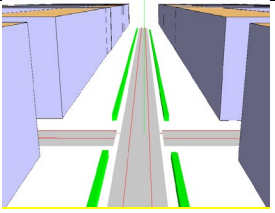

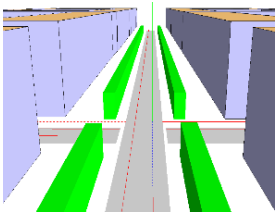
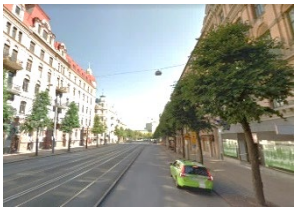
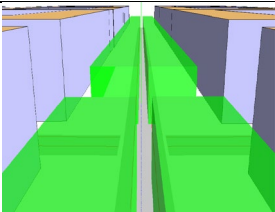
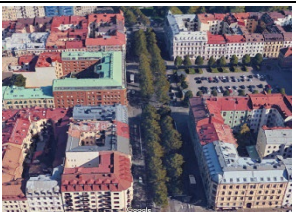
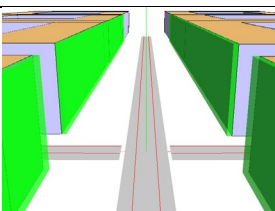
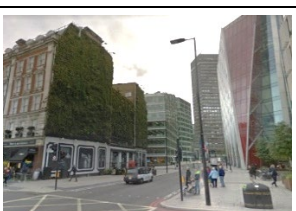
För att undersöka effekten från olika utformning och placering av vegetation i gaturummet byggdes ett enkelt, relativt slutet, gaturum med en korsning omgivet av blockhus av samma karaktär som i förtätningsscenario 1 (SF₁) ovan. Denna typ av urban miljö valdes ut eftersom den är vanligt förekommande i de centrala delarna av svenska städer idag. I gaturummet beräknades spridning av trafikrelaterade föroreningar över en yta av 150 x 200 meter med en gridstorlek på 1 x 1 m. Den högre upplösningen användes eftersom vegetation ofta upptar relativt lite yta i ett gaturum och effekter från vegetation på luftkvaliteten bör därför beräknas på en mer detaljerad nivå för att skillnader ska tydliggöras. Trafikflöde och sammansättning antas vara samma som på de högst trafikerade gatorna i förtätningsscenarierna.

För att representera vegetation som förekommer i gaturum idag byggdes följande fyra vegetationsscenarioer upp; lägre buskar mellan trafik och trottoar, små låga träd med begränsad krona, större träd med täckande krona, samt gröna väggar. För bilder och beskrivning se Tabell 2.

Modellen beräknar endast påverkan från vegetationen på luftgenomströmning i gaturummet. För att beskriva vegetationen i modellen anges de så kallade *Leaf Area Density (LAD)*, och *Surface coverage* för olika lager i varje enskild vegetationsyta. *LAD* anger hur stor lövyta i m² som finns per kubikmeter luft, och *surface coverage* är ett värde mellan noll och ett som anger hur stor del av den inritade ytan som täcks av vegetation i respektive lager. För buskage antas både *LAD* och *surface coverage* vara jämnt fördelat över hela den inritade ytan och höjden. För träd på stam anges värdet 0 för båda dessa parametrar för marknära lager under det att kronan startar. I mitten av kronan antas *LAD* och *surface coverage* vara högst, medan den undre och övre fjärdedelen av kronan ges lägre värden då dessa delar är mindre i omfång och ofta inte lika täta. Värden för *LAD* har hämtats från Balczó et al (2009), där en studie av hur effekten av vegetation kan beräknas med modellen MISKAM (också använd i denna studie) presenteras. I enighet med Balczó et al används en *LAD* på 1.33 för vegetation av låg densitet, som till exempel topp och bas av trädkronan, en *LAD* på 3.33 för medelhög densitet, som mitten på trädkronan, och en *LAD* på 4.17 för vegetation av hög densitet, som buskage och häckar. Snarlika siffror har även presenterats i andra studier (e.g. Czáder et al. 2009; Wania et al. 2012). Avseende vegetationens utbredning, *surface coverage*, anges 0.5 till den undre och övre delen av kronan, medan mitten ges värdet 1, det vill säga att mitten av kronan täcker upp hela den inritade ytan sett uppifrån, medan den övre och undre delen av kronan endast täcker in halva denna ytan.

I denna studie antas träden vara lika utformade längs med hela gaturummen med kronor som nuddar varandra (d.v.s. inga glapp mellan två bredvid varandra stående träd) längs med gatans sträckning. Det är givetvis en grovt förenklad beskrivning av vegetationen. Kronor är sällan uniforma i varken form eller täthet, och beräkningen av vegetationens inverkan på luftflödet innebär därmed en större osäkerhet än flödet runt till exempel ett hus. Det ger dock en indikation på hur stor påverkan som kan förväntas från vegetation i ett gaturum. En ytterligare osäkerhet är att beräkningarna endast avser effekt från vegetation på luftgenomströmning, medan depositionseffekten inte inkluderats då detta i dagsläget inte är möjligt att inkludera i modellberäkningarna.

Tabell 2. Beskrivning av vegetationsscenarierna (V). Se sektion 2.2.2 för beskrivning av parametrar.

Scenario	Beskrivning	3D-representation i MISKAM	Motsvarande befintligt exempel
Sv0	Gaturummet utan vegetation. Omgivande bebyggelse har höjden 17 m. Gaturummets bredd är 32 m.		
Sv1	Låga buskar mellan körbana och trottoar. Höjd 1 m, bredd 1 m. LAD: 4.18, Surface coverage: 1		
Sv2	Små träd med liten krona Höjd: 5 m (stam 2 m), kronans bredd: 3 m LAD krona:1.33-3.33-1.33 Surface coverage, krona: 0.5-1-0.5		
Sv3	Större träd med täckande krona Höjd 10 m (stam 3 m), kronans bredd 10 m. LAD krona:1.33-3.33-1.33 Surface coverage, krona: 0.5-1-0.5		
Sv4	Gröna väggar längs med fasader Bredd: 1m*. LAD: 4.17 Surface coverage: 1		

*Detta är sannolikt en överdriven bredd för gröna väggar, men eftersom modellens upplösning i dessa beräkningar är 1 meter kan mindre objekt inte inkluderas på ett fullgott sätt i beräkningarna.

2.2.3 Effekt på luftkvaliteten från olika typer av barriärer runt en urban genomfartsled

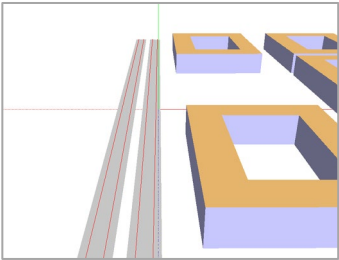

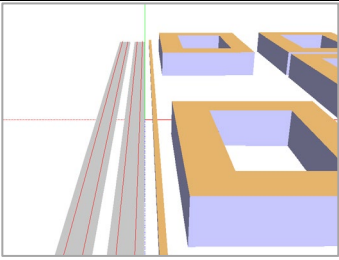

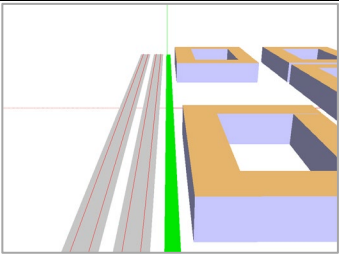
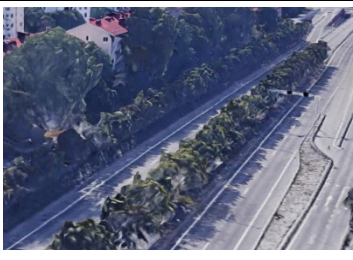
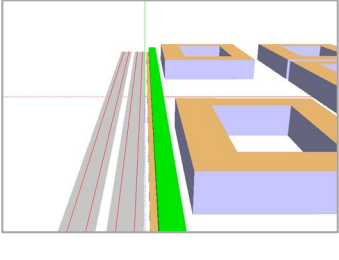

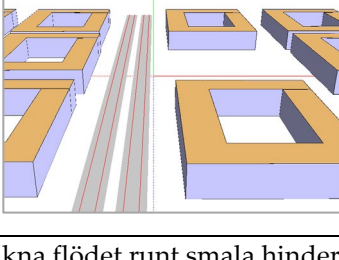

Genomfartsleder med kraftigt trafikflöde återfinns i de flesta större städer. De kan bidra till minskat trafikflöde i de gaturum där människor vistas och kan skärmas av med hjälp av till exempel plank, vegetation eller bebyggelse. Avskärmning sker ofta för att öka säkerhet och minska risken för bullerstörningar från trafiken på leden. Dessa avskärmningar påverkar också luftgenomströmningen och därmed spridning av trafikutsläpp. För att undersöka hur stor effekten av dessa avskärmningar är på spridning av luftföroreningar och resulterande haltbidrag i närområdet har sex olika typer av barriärer byggts upp i modellen och beräknats.

Genomfartsleden har motsvarande trafikflöde och sammansättning på Dag Hammarsköldsleden i Göteborg, (ÅDT 26 000 fordon, varav 6 % tung trafik), som går från Göteborgs västra utkanter in mot stadskärnan. Detta trafikflöde är lägre än på de högst trafikerade genomfartslederna men motsvarande flöde återfinns på leder i de flesta större städer. Dag Hammarsköldsleden, och många liknande leder, går huvudsakligen genom omgivningar där ena eller båda sidorna är mestadels öppna. För att simulera spridning av föroreningar till närliggande bebyggelse har ett grundscenario byggts upp där bebyggelse placeras på läsidan av genomfartsleden i huvudsaklig vindriktning. Fokus ligger på en öppen plats mellan bebyggelsen. Detta på grund av att öppna platser är tänkta som platser där människor ska kunna vistas en längre tid än i ett gaturum. Öppna platser kan till exempel användas till lekplatser, serveringar eller som utegård för förskoleverksamhet.

I grundscenariot saknas bebyggelse och vegetation på lovartsidan och luftgenomströmningen tillåts passera fritt in till bebyggelsen. Ytterligare fyra scenarier har byggts upp för att undersöka effekten av ett bullerplank, en bredare vegetationsbarriär, en kombination av dessa två, samt att relativt tät bebyggelse placeras på båda sidorna av genomfartsleden. I simuleringarna av bebyggelse på båda sidorna har gaturummets bredd angetts till 65 m. Liknande gaturumsbredd återfinns till exempel där den betydligt mer trafikerade E6:an passerar genom bebyggelse i centrala Göteborg. Det är också av liknande bredd (något bredare) som gaturummet längs Nynäsvägen genom Gamla Enskede, samt där Essingeleden passerar genom Stadshagen i Stockholm.

Eftersom de objekt som påverkar flödet i dessa beräkningar är relativt stora har en större yta på 300 x 500 meter beräknats. Det ger möjlighet att undersöka hur långt in mellan husen påverkan från genomfartsleden sker. En gridstorlek på 3 meter har använts i beräkningarna. Eftersom fokus är på hur barriärerna påverkar spridning av utsläpp från genomfartsleden har ingen trafik på sidogator inkluderats i beräkningar och analys.

Tabell 3. Beskrivning av barriärscenarierna (B)

Scenario	Beskrivning	3D-representation i MISKAM	Motsvarande befintligt exempel
S_{B0}	Blockhus med öppen plats placerade på läsidan av genomfartsleden.		
S_{B1}	Bullerplank* placerat mellan genomfartsled och bebyggelse, höjd 4 m		
S_{B2}	Vegetationsbarriär placerad mellan genomfartsled och bebyggelse, höjd 4m bredd 4m, LAD: 4.17		
S_{B3}	Kombination av 4 m högt plank följt av 10 m hög vegetation i form av träd, placerad mellan genomfartsled och bebyggelse, LAD krona: 1.33-3.33-1.33		
S_{B4}	Tät bebyggelse på båda sidorna,		

* Eftersom modellen inte klarar av att beräkna flödet runt smala hinder har bullerplanket representerats av en byggnad med samma bredd som en gridruta.

3 Resultat

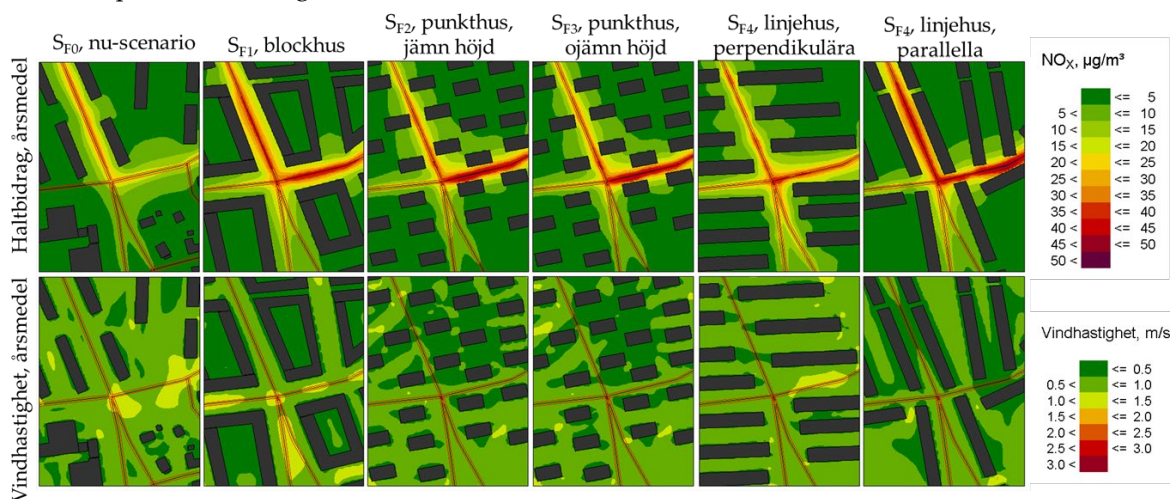
I resultatdelen analyseras effekten av olika förtätningsscenarioer, följt av effekten från vegetation och från olika typer av barriärer. Fokus i analysen ligger på förändring i haltbidrag från trafikutsläpp som orsakas av respektive områdesutformning. För varje grundscenario visas haltbidraget i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ för att visa utsträckning av det område som påverkas av trafikutsläpp. För att förtydliga effekten från områdesutformning presenteras skillnader även som procentuell förändring. Notera att det innebär att i områden där haltbidraget från trafikutsläpp är litet kan den procentuella förändringen bli stor. För att undvika att resultat övertolkas i områden med låga halter markeras gränsen för områden där haltbidraget av NO_x från trafik är $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån med en röd konturlinje. Analys av förändringar avser därför enbart området *innanför* den röda linjen, det vill säga de huvudsakliga gaturummen och så långt in i omgivningarna där trafiken ger ett betydande haltbidrag.

Då faktiska halter eller vindhastigheter visas är färgsättning från grönt (lågt) till rött (høgt). För procentuella skillnader används en färgskala från blått (minskning) till brunt (ökning) som beräknas ske då gaturummets utformning byts från ursprungsscenarioet till det jämförda scenariot.

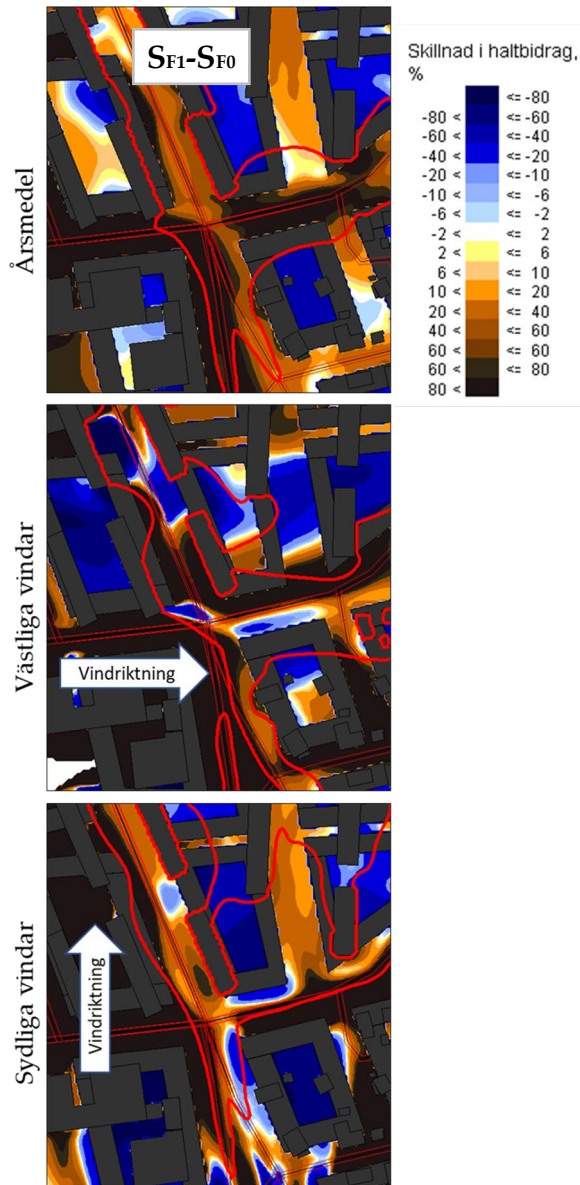
3.1 Effekt på luftgenomströmning och luftkvalitet av olika bebyggelse

3.1.1 Effekt av förtätning och trafikökning

För att ge en realistisk bild av den förändring i haltbidrag från trafikutsläpp som kan förväntas av en befolkningsökning på 50 %, beräknades scenarier där effekten av både en förtätad bebyggelse och en ökning i trafik inkluderades. Resulterande haltbidrag från trafik samt vindhastighet som årsmedel presenteras i Figur 3.



Figur 3. Haltbidrag från trafik (ovan) samt vindhastighet (nedan) som årsmedel, beräknat för nuvarande bebyggelse och trafik (till vänster), samt för förtätningsscenario 1 till 5. I förtätningsscenarioerna beräknades också trafiken öka med 20 %.



Figur 4. Procentuell förändring i haltbidrag från trafik efter förtätning med blockhus i årsmedelvärde (överst), vid västliga vindar och vindhastighet på 2.5 m/s (mitten) och vid sydliga vindar och vindhastighet på 2.5 m/s (nederst). Blå färgtoner indikerar en sänkning av halter efter förtätning, bruna färgtoner en ökning. Områden med haltbidrag över 5 µg/m³ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån, S_{F0}, är markerade med röd konturlinje. Utanför linjen kan små förändringar i haltbidrag generera stora procentuella förändringar. För att undvika övertolkning av resultaten bör områden utanför linjen analyseras med försiktighet. Notera även att skalans intervall är tätare runt nollan och ökar vid större procentuella förändringar. Detta för att förtydliga mönster även vid mindre förändringar.

Det är tydligt att haltbidraget från trafik ökar i gaturummen. Förändringen är störst i anslutning till de större gator som går genom området. För att undersöka om förändringen i huvudsak orsakas av den ökning i utsläpp som det ökade trafikflödet medfört, presenteras procentuella skillnader mellan de två scenarierna i årsmedel, vid västliga, samt vid sydliga vindar i Figur 4.

Haltbidraget i årsmedel visar en ökning på över 20 % i båda de huvudsakliga gaturummen (de två gaturum som utgår från korsningen i mitten av bilden) som beräknats. Ökningen är störst i de områden där gaturummen i förtätningsscenarioet omges av högre och tätare bebyggelse. På flera platser i dessa gaturum överstiger försämringen 80 %, vilket indikerar att det inte enbart är ökningen i trafikflöde och utsläpp som orsakar förändringen. De högre och tätare byggnaderna i förtätningsscenarioet minskar luftgenomströmningen och därmed omblandning och utspädning av de utsläpp som sker i gaturummet, vilket ger högre haltbidrag som följd. Blockhusen ger skyddade innergårdar dit inga föroreningar når, vilket ger en minskning i haltbidrag och indikerar en mycket god luftkvalitet där. Dock är haltbidraget lågt även i ursprungs-scenarioet på de flesta av dessa innergårdar, och den faktiska påverkan av den förtätade bebyggelsen är liten.

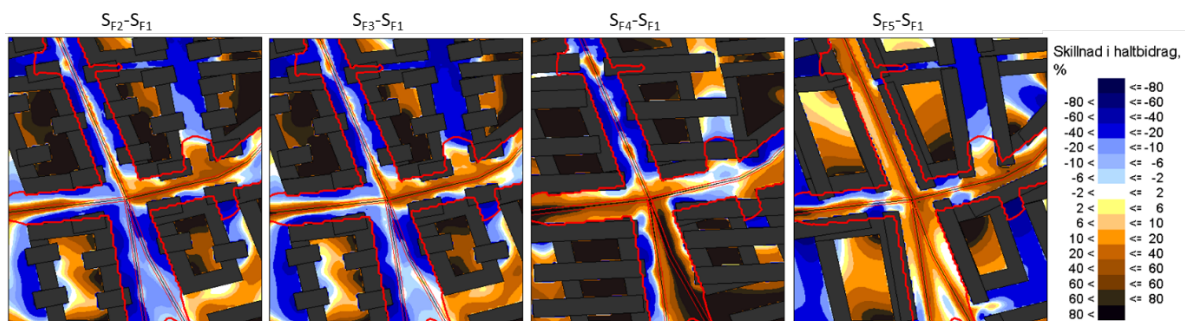
Vid västliga vindar förändras luftgenomströmningen och även om försämringen i de huvudsakliga gaturummen bitvis kvarstår, så sker en förbättring på vissa platser där vinden styrs om så att luftgenomströmningen ökar och haltbidraget blir lägre. Samma typ av förändringar, men med olika mönster i resulterande procentuell förändring, återfinns vid sydliga vindar.

Sammantaget visar detta att både ökningen i trafik och de förändrade luftgenomströmningen som en förtätad bebyggelse ger, generellt orsakar mellan 20 till över 80 % högre föroreningshalter i de huvudsakliga gaturummen, medan stängda

och skyddade innergårdar fick en sänkning i halter. Dock blir effekten olika vid olika vindriktningar vilket visar att det är viktigt att undersöka effekten av den specifika utformningen på området om det finns risk för förhöjda luftföroreningshalter i ett område som planeras för förtätning.

3.1.2 Effekt av olika utformning på förtätning

För att vidare undersöka effekten på luftkvaliteten från de olika utformningarna och placeringarna av den förtätade bebyggelsen som beräknats i förtätningsscenario S_{F1} - S_{F5} , presenteras procentuella skillnader i haltbidrag i Figur 5. Jämförelsen utgår från blockhusscenario eftersom det är vanligt förekommande i tätbebyggda centrala delar av svenska städer idag.



Figur 5. Procentuell förändring i haltbidrag från trafik som årsmedel efter förtätning mellan a) jämnhöga punkthus och blockhus (S_{F2} - S_{F1}), b) punkthus med varierande höjd och blockhus (S_{F3} - S_{F1}), c) linjehus perpendikulärt placerade runt huvudgaturummet och blockhus (S_{F4} - S_{F1}), och d) linjehus parallellt placerade runt huvudgaturummet och blockhus (S_{F5} - S_{F1}). Blå färgtoner indikerar lägre haltbidrag i det jämförda scenariot (inte blockhus), bruna färgtoner en ökning i haltbidrag. Områden med haltbidrag över $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån, S_{F1} , är markerade med röd konturlinje. Utanför linjen kan små förändringar i haltbidrag generera stora procentuella förändringar varför förändringar utanför linjen bör analyseras med försiktighet.

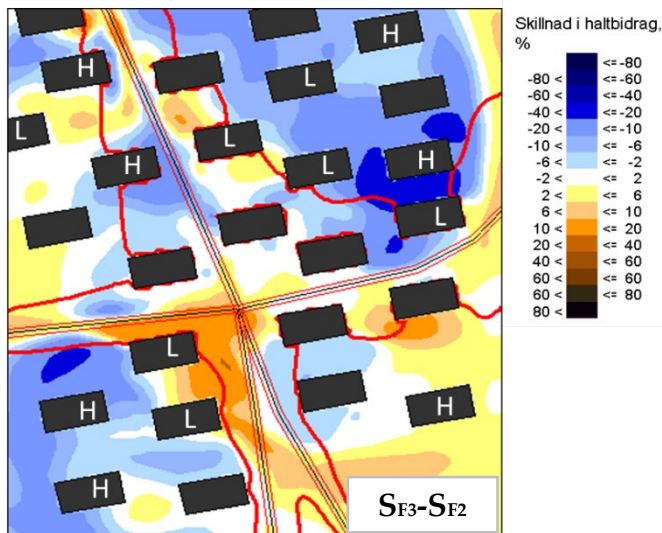
Med avseende på det huvudsakliga gaturummet i nord-sydlig riktning skedde generellt en kraftig sänkning av haltbidraget på 20 till 40 % som årsmedel, i de förtätningsscenarioer som tillät luftflöde i de huvudsakligen väst och sydvästliga vindriktningarna. Haltbidraget var som lägst i scenarierna med punkthus, vilket orsakades av att dessa inte stänger in gaturum och minskar luftgenomströmningen på samma sätt som längre byggnader gör. Punkthusen ökade istället omblandningen av luften och bidrog till ett lägre haltbidrag. Jämförelsen av de olika förtätningsscenarioerna visar att blockhusens innergårdar generellt har ett betydligt lägre haltbidrag än övriga scenarier. All öppning för vindflöde från trafikerade gaturum till dessa platser innebär en försämring av luftkvaliteten. Dock är haltbidraget på dessa innergårdar mycket lågt i ursprungsscenarioet. Den kraftiga procentuella ökningen i föroreningshalter om blockhusen byttes mot punkt eller linjehus innebär därmed en inte nödvändigtvis stor ökning i faktiska halter.

Placering av linjehus längs med gaturummet var det enda förtätningsscenario som genomgående orsakade en höjning av halter på runt 10 till 20 % i det mellanliggande huvudsakliga gaturummet jämfört med blockhusscenarioet. Detta orsakades i huvudsak av att linjehusen styrde om vinden så att en kraftig sänkning av vindhastigheten, och därmed minskad omblandning och utspädning av föroreningar, skedde i gaturummet.

Sammantaget visar detta att bebyggelse som stänger in och skärmar av från vindar i den huvudsakliga vindriktningen (i detta fall väst och sydvästliga vindar) riskerar förhöjda halter jämfört med om luften tillåts strömma fritt mellan byggnader.

3.1.3 Jämförelse punkthus av jämn vs ojäm höjd

Eftersom båda scenarierna med punkthus innebär en klar förbättring av genomströmningen jämfört med blockhus görs en detaljstudie över hur punkthus av olika höjder påverkar luftkvaliteten jämfört med punkthus av samma höjd. Blå färgtoner visar procentuell minskning i haltbidrag i scenariot med olika höjd på punkthusen, bruna färgtoner procentuell ökning i haltbidrag.



Figur 6. Procentuell förändring i haltbidrag från trafik som årsmedel efter förtätning med punkthus av olika höjd jämfört med jämnhöga punkthus (S_{F3}-S_{F2}). H representerar hus som i S_{F3} har höjden 43 m, L representerar hus som i S_{F3} har höjden 23 m. Övriga hus i S_{F3}, samt alla hus i S_{F2} har höjden 33 m. Områden med haltbidrag över 5 µg/m³ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån, S_{F2}, är markerade med röd konturlinje. Utanför linjen kan små förändringar i haltbidrag generera stora procentuella förändringar varför förändringar utanför linjen bör analyseras med försiktighet.

Haltbidraget varierar kraftigt och det är tydligt att höjden på punkthusen påverkar omblandning och spridning av trafikutsläppen, och skillnader upp mot 20 % återfinns i de huvudsakliga gaturummen. Dock är det svårt att tydligt identifiera mönster till följd av hushöjden och därmed avgöra vilken utformning som är att föredra. En djupare detaljstudie skulle krävas för att kartlägga och kvantifiera påverkan av varierande hushöjder för luftgenomströmning och luftkvalitet i området.

För bedömning av påverkan på luftkvalitet i ett område planerat för förtätning med punkthus bör olika scenarier simuleras för att undersöka den specifika effekten på luftkvaliteten i området. Troligtvis kan höjder och placering av punkthus utnyttjas för att öka omblandningen och sänka haltbidraget på platser där risk finns för förhöjda halter eller där det är extra viktigt med låga halter, till exempel på platser där människor förväntas vistas i omfattande grad.

3.1.4 Jämförelse av olika vinkel på linjehus

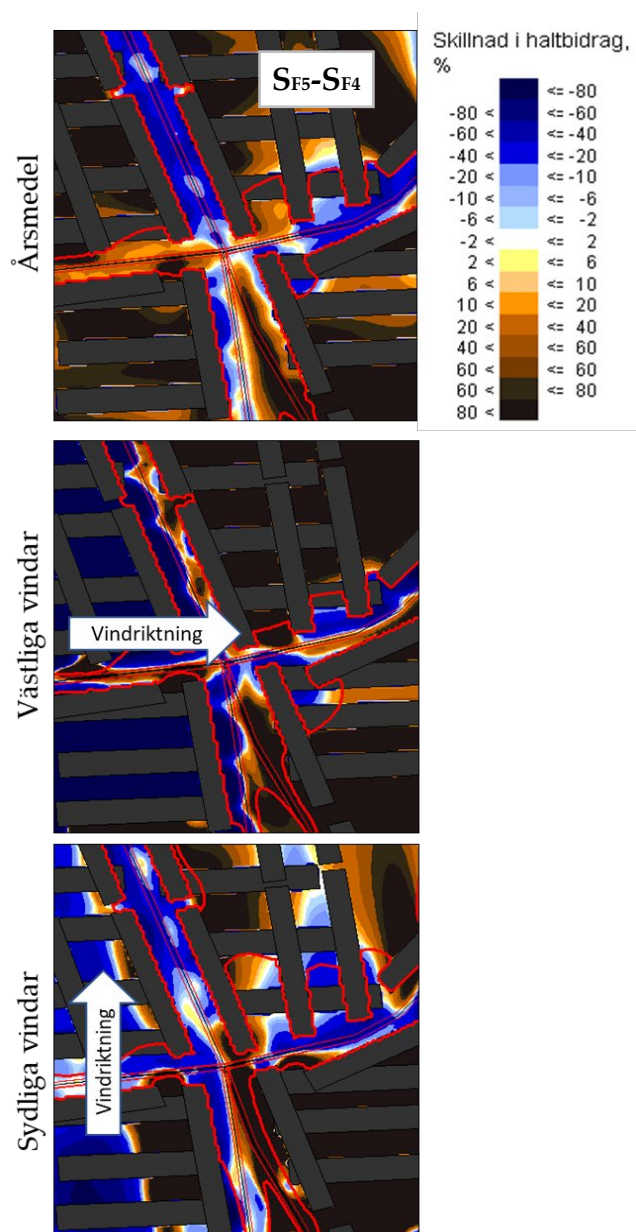
Placering av linjehus längs med en gata har stor inverkan på luftgenomströmningen och därmed utspädning av utsläpp från trafik i gaturummet. Eftersom den huvudsakliga vindriktningen i dessa beräkningar innebär vindar från väst och sydväst, ger en placering av linjehusen i öst-västlig riktning en tydlig förbättring av luftgenomströmningen och därmed en tydlig sänkning av haltbidraget på 40–60 % i de huvudsakliga gaturummen. Undantaget är den nedre delen av gaturummet med ökad gatubredd. Där medför den ökade luftgenomströmningen att föroreningar transporteras mot den östra delen av gaturummet och ger ökade halter där.

Linjehus placerade längs med gaturummet ger en skyddande effekt i områden på andra sidan huset där en bättre luftgenomströmning i gaturummet transporterar föroreningar längre in i omgivningarna och ger en tydlig höjning i haltbidrag istället. Notera dock att haltbidraget i dessa områden är lågt (utanför röda linjen) i båda scenarierna och den stora procentuella skillnaden innebär en liten faktisk skillnad i halt.

Effekten blir extra tydlig då västliga vindar isoleras, vilket gör att haltbidraget i det nord-sydliga gaturummet generellt sänks betydligt om linjehusen placeras i öst-västlig riktning, medan haltbidraget istället ökar inne mellan husen på läsidan av gaturummet.

Vid sydliga vindar skulle en motsatt effekt kunna förväntas, men beräkningarna visar att så inte blir fallet i de beräknade scenarierna. En ökad turbulens orsakas av de öst-västliga belägna husen genom det nord-sydliga gaturummet, vilket ökar omblandningen generellt och sänker haltbidraget.

Sammantaget är det tydligt att placeringen av linjehus är mycket viktig för haltbidraget generellt i gaturum. Placering av linjehus kan därmed utnyttjas för att öka luftgenomströmning i ett gaturum och därmed sänka haltbidraget från trafik på utsatta platser.

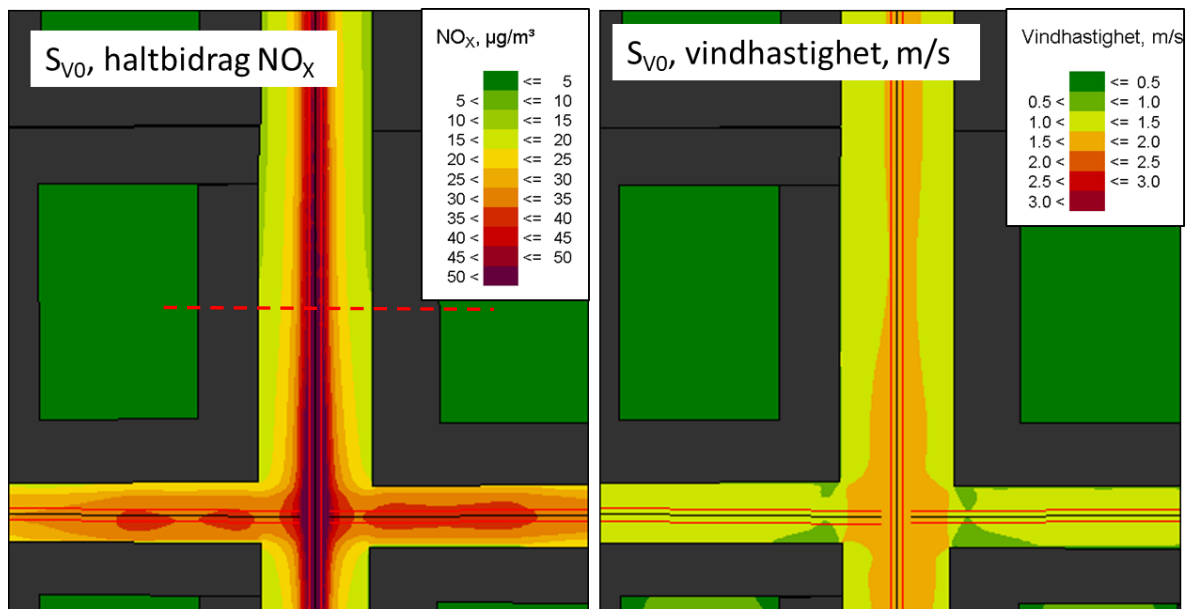


Figur 7. Procentuell förändring i haltbidrag från trafik vid förtätning med linjehus placerade perpendikulärt (S_{F4}) jämfört med linjehus placerade i parallellt (S_{F5}) med huvudsakliga gaturummet som årsmedelvärde (överst), vid västliga vindar och vindhastighet på 2.5 m/s (mitten) och vid sydliga vindar och vindhastighet på 2.5 m/s (nederst). Blå färgtoner indikerar lägre halter vid öst-västliga hus (S_{F4}), bruna färgtoner högre halter. Områden med haltbidrag över 5 µg/m³ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån, S_{F4}, är markerade med röd konturlinje. Utanför linjen kan små förändringar i haltbidrag generera stora procentuella förändringar varför förändringar utanför linjen bör analyseras med försiktighet.

3.2 Vegetationens påverkan på luftgenomströmning och luftkvalitet i gaturummet

För att analysera vegetationens inverkan på luftgenomströmningen i ett gaturum har olika typer av vanligt förekommande vegetation byggts upp i ett slutet gaturum och haltbidraget av NO_x samt vindhastigheten har beräknats. På grund av begränsningar i modellen inkluderas inte deposition av föroreningar på växtligheten, vilket renar luften och sänker föroreningshalterna, i beräkningarna. Studier av depositionseffekten från vegetation i ett gaturum har dock visat sig vara liten i jämförelse med effekten som samma vegetation har på luftgenomströmningen i gaturummet, speciellt avseende träd (e.g. Wania et al. 2012; Vos et al. 2013). I en sammanställning av studier med fokus på deposition på vegetation konstaterade författarna att deposition på vegetation i en normalsituation beräknas bidra till en förbättring i luftkvaliteten med runt 1 % (Litschke and Kuttler 2008). Dock påverkas depositionen av bland annat föroreningshalter i luften, vindflöde, vegetationens placering och täthet, samt bladytans egenskaper, vilket ger stora skillnader i mängden deponerade föroreningar (e.g. Kwak et al. 2019; Sæbø et al. 2012; Shi et al. 2017). Komplexiteten i depositionseffekten gör det svårt att bedöma påverkan i denna studie, men möjliga effekter inkluderas i analys och diskussion så långt det är möjligt. En ytterligare osäkerhet är att vegetation sällan är så uniform som den beskrivs i modellen, och att säsongsvariationer i lövverk inte kan inkluderas i beräkningarna. Resultaten bör därmed ses som indikationer på effekten snarare än absoluta svar.

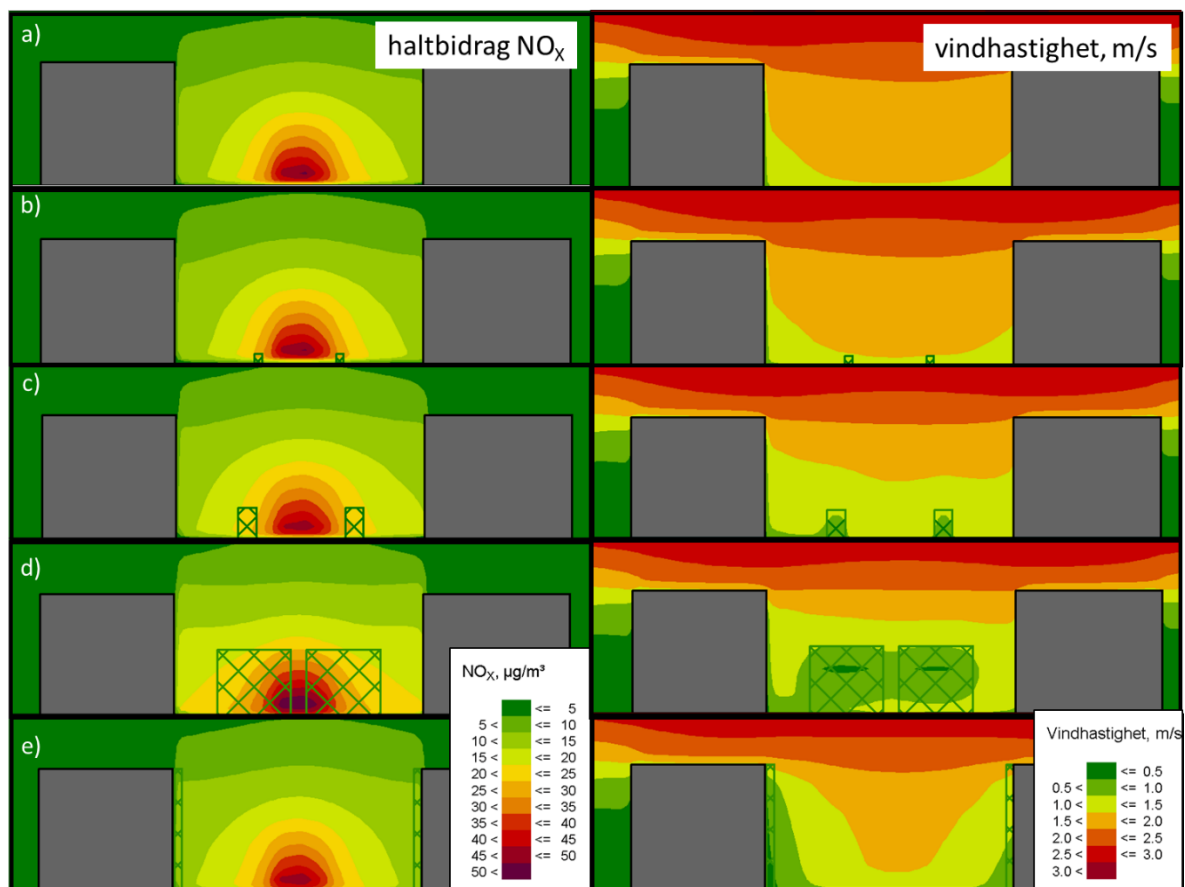
Årligt medelhaltbidrag och vindhastighet i gaturummet presenteras i Figur 8. I kartorna kan ses att spridningen är relativt uniform över det 32 m breda gaturummet omgivet av 17 m höga blockhus med högst halter längs med den tätast trafikerade gatan i nord-sydlig riktning.



Figur 8. Haltbidrag (vänster) och vindhastighet (höger) som årsmedel för S_{V0} (utan vegetation) i det aktuella gaturummet. Röd streckad linje markerar läge för tvärsnitt i Figur 9.

Den jämna fördelningen i årsmedelhalter och vind över gaturummet återfinns även i tvärsnittet i Figur 9 a, med ett högt haltbidrag på vägbanan som avtar gradvis mot väggarna. Eftersom beräkningarna baseras på ett för Sverige typiskt vindmönster är vindarna i huvudsak västliga (från vänster till höger i bilden), vilket gör att vindhastigheterna är något lägre på gaturummets västra sida. Tvärsnitten som visas i Figur 9 b-e illustrerar hur vindgenomströmningen och haltbidraget påverkas av olika utformning och placering av vegetationen inom gaturummet.

Låga häckar nära vägbanan, Figur 9 b, ger mycket begränsad effekt på luftflödet och haltbidraget, medan små träd (5 m höga med 3 m bred krona) placerade mellan vägbanan och trottoar, Figur 9 c, ger lägre vindhastigheter och gör att haltbidraget breder ut sig något mot husväggarna. Större träd med täckande krona (Figur 9 d) har en markerad effekt på vindflödet. Den betydligt lägre vindhastigheten begränsar omblandningen och utspädning av trafikemissionerna i gaturummet. Täta, täckande kronor minskar speciellt omblandningen med luftlagren ovanför, vilket medför högre halter i hela de lägre delarna av gaturummet, främst under trädkronan. Effekten sträcker sig ända från vägbanans mitt ut till husväggen.

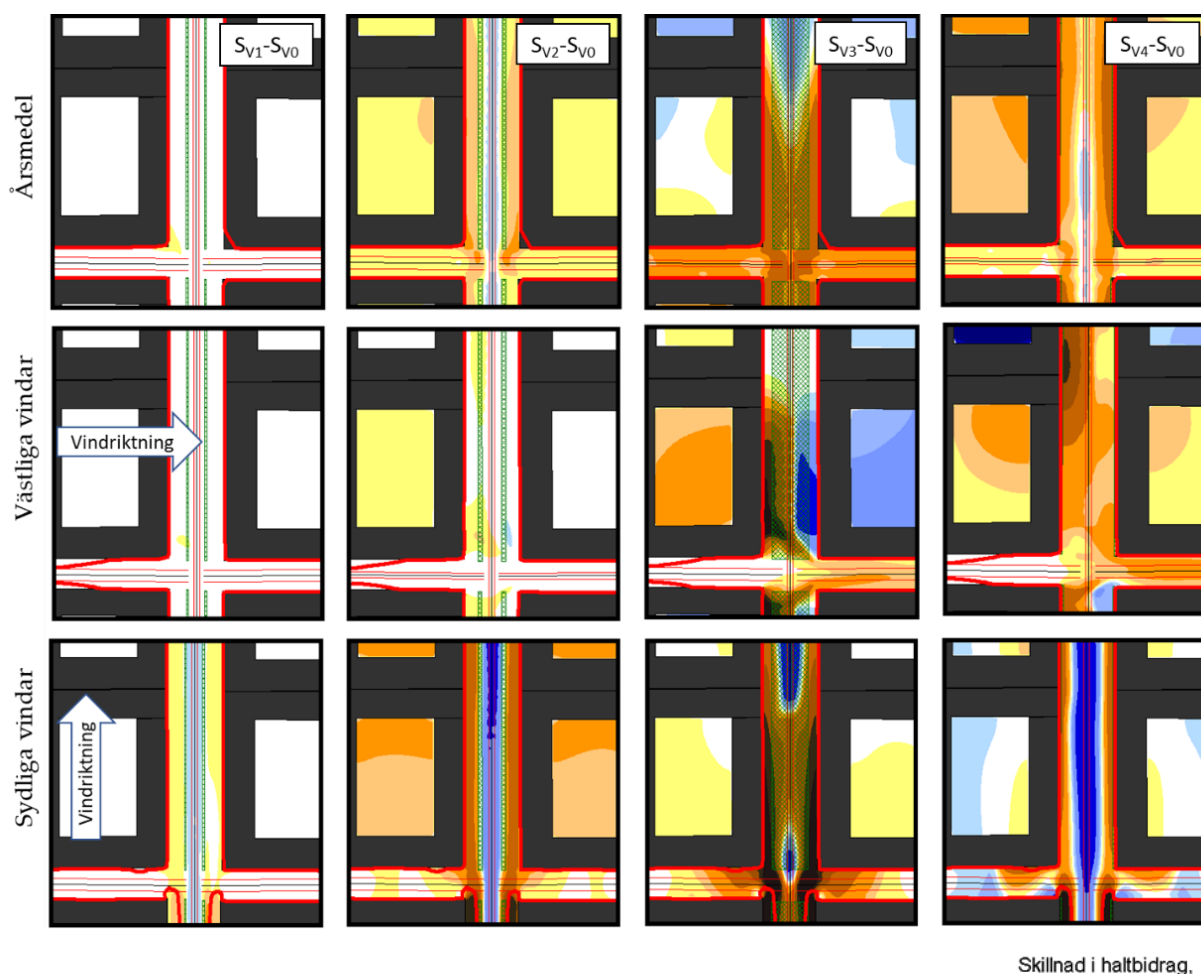


Figur 9. Haltbidrag (vänster) och vindhastighet (höger) i tvärsnitt av det nord-sydliga gaturummet placerat enligt streckad röd linje i Figur 8, för a) gaturum utan vegetation S_{V0} , b) gaturum med 1 m höga häckar nära trafikbanan, S_{V1} , c) 5 m höga träd, S_{V2} , d) 10 m höga och 10 m breda träd, S_{V3} , och e) gröna väggar med en tjocklek av 1 m, S_{V4} . Vegetation representeras av gröna, kryssmarkerade områden i kartorna.

En tydlig sänkning av vindhastigheten orsakas även av gröna väggar så de representerades av 1 m brett vegetationslager längs med husväggarna i modellberäkningarna. Eftersom vinden blir turbulent i ett gaturum studsar den många gånger mot väggarna och effekten av hastighetssänkningen vid varje studs blir därför betydande. Ett vegetationslager längs med väggen

ger en kraftigare vindhastighetssänkning. Dock hindras ingen omblandning med luften ovanför gaturummet och effekten på utspädning av trafikemissioner blir därför begränsad. På grund av tekniska begränsningar i modellen har tjockleken på de gröna väggarna satts till 1 m vilket sannolikt är en överskattning av verklig tjocklek. Det finns därmed en risk att även effekten på luftflödet överskattas vilket beaktas i analysen.

För att undersöka påverkan på luftkvaliteten i gaturummet presenteras de procentuella skillnaderna i Figur 10. Generellt sker en försämring på upp mot 40 % av luften vid trottoarerna och husväggarna medan en förbättring sker i mitten av körbanan. Effekten blir tydligare med högre och mer täckande vegetation (S_{v3}), samt för de vertikala gröna väggarna (S_{v4}). Detta mönster orsakas av att trädkronorna hindrar spridning av föroreningar i vertikal led, medan spridning i horisontell led, alltså från körbanan ut mot trottoarerna, gynnas. Den sänkning i vindhastighet som orsakas av de gröna väggarna medför att omblandning och utspädning av utsläppen begränsas vilket resulterar i högre halter. Effekten är mycket begränsad för de små häckar som placeras nära vägbanan (S_{v1}). Detta beror sannolikt på att dessa små häckar upptar en mycket liten del av gaturummet och därmed endast ger en liten effekt på luftflödet i gaturummet.



Figur 10. Procentuell förändring i haltbidrag från trafik som årsmedelvärde orsakad av, från vänster till höger: införande av 1 m höga buskar, 5 m höga tätt stående träd med begränsad krona, 10 m höga träd tätt stående med stor krona, och gröna väggar, för topp till botten, årsmedel, västliga vindar och sydliga vindar. Blå färgtoner indikerar lägre haltbidrag i vegetationsscenario, bruna färgtoner en ökning i haltbidrag. Områden med haltbidrag över $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån, S_{v0} , är markerade med röd konturlinje. Utanför linjen kan små förändringar i haltbidrag generera stora procentuella förändringar varför förändringar utanför linjen bör analyseras med försiktighet.

Påverkan är generellt störst vid vindar längs med gaturummet, då samtliga vegetationsutformningar orsakar en ökad omblandning nära marknivå. Det ger lägre halter i vägbanans mitt och högre på trottoar och vid husvägg. Påverkan blir mer varierad för vindar vinkelrätt mot gaturummet då turbulens skapad runt bebyggelse i kombination med turbulens runt vegetation ger komplexa luftgenomströmningsmönster och därmed stora skillnader över små avstånd.

Effekten från vegetation i gaturum är jämförbar, men generellt något mindre jämfört med effekten från utformning och placering av bebyggelse. Dock presenteras tydliga indikationer på att vegetationen i ett gaturum kan orsaka en försämrad omblandning och betydande höjning av haltbidraget med avseende på årsmedelvärde på trottoaren från trafik som följd. Resultaten från den här studien stämmer överens med flera andra studier, till exempel visade en omfattande review av Abhijith et al. (2017) att täta trädkronor över en trafikerad väg orsakade förhöjda

föroreningshalter i gaturummet. Studierna angav som huvudsaklig orsak att trädkronorna begränsar omblandningen av luften, samt att ju tätare och mer täckande krona, desto större var generellt den negativa påverkan på luftkvaliteten. Samma mönster återfinns även i den här studien, där små träd gav en ökning i haltbidrag på trottoaren på upp mot 10 %, medan större träd med täckande krona orsakade en försämring på upp mot 40 % i årsmedelhaltbidrag. Vid vindar längs med gaturummet var påverkan ännu större, och även här ökade effekten med utsträckning av vegetationen. Det är alltså viktigt att inkludera luftkvalitetsaspekten när utformning och placering av vegetation i ett gaturum planeras. Om trafik finns i gaturummet bör till exempel träd med täckande krona undvikas för att minimera risken för förhöjda halter på trottoarer och vid fasad.

Den begränsade effekten från de mindre häckar som kunde ses i denna studie stämmer väl överens med beräkningar presenterade av till exempel Vos et al (2013). Vos et al (2013) undersökte även effekten från större häckar eller buskage i gaturummen och fann att en optimerad placering av större häckar i ett gaturum kan ge en signifikant förbättring av luftkvaliteten på exempelvis trottoarer. Liknande resultat återfinns i flertalet studier (Gonzales et al. 2018; Gromke et al. 2016; Tiwary et al. 2008). I samtliga dessa studier konstaterades positiva effekter av en betydligt större häck än den som inkluderats i denna studie. Större häckar återfinns dock sällan i gaturum i Sveriges stadskärnor idag, huvudsakligen på grund av säkerhetsskäl då de begränsar sikten och därför inte tillåts enligt regelverk. Vi har i denna studie därför valt att begränsa höjden på häckarna till en meter eftersom det är av en storleksordning som teoretiskt sett skulle kunna förekomma i gaturum i svenska städer. Dock är även denna höjd på häckar relativt sällan förekommande idag.

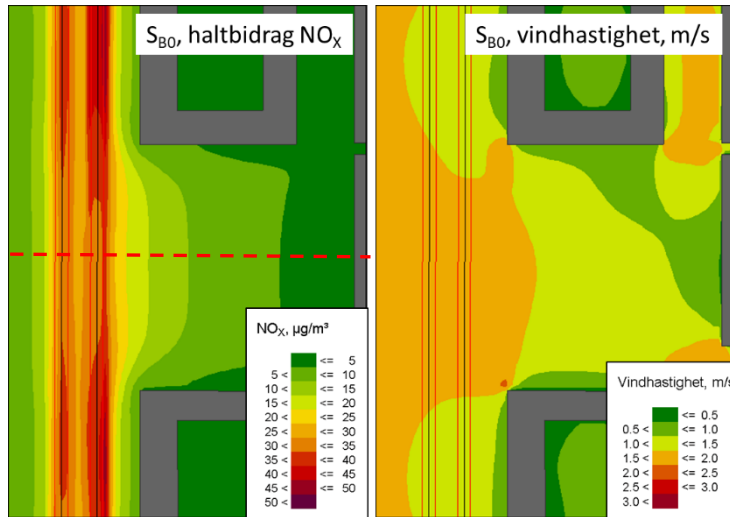
Det är viktigt att notera att denna studie endast inkluderar vegetationens effekt på luftgenomströmningen i gaturummet, och inte tar hänsyn till depositionseffekten, vilket sker då föroreningar fastnar på växternas blad och därmed renar luften. Som beskrivits i inledningen till detta stycke har studier av depositionseffekten från vegetation i ett gaturum visat sig vara liten i jämförelse med effekten som samma vegetation har på luftgenomströmningen i gaturummet, speciellt avseende träd (e.g. Wania et al. 2012; Vos et al. 2013). I en sammanställning av studier med fokus på deposition på vegetation konstaterade författarna att deposition på vegetation i en normalsituation beräknas bidra till en förbättring av luftkvaliteten med runt 1 % (Litschke and Kuttler 2008). Sammantaget medför det att de negativa effekterna som beräknades orsakas av vegetation i denna studie i någon mån skulle kunna kompenseras av depositionseffekten i ett verkligt scenario, men den positiva effekten av deposition är sannolikt liten i sammanhanget.

3.3 Effekt på luftkvaliteten av barriärer längs med en större genomfartsled

För att analysera effekten av de barriärer som är vanligt förekommande runt större genomfartsleder, på spridning av trafikrelaterade utsläpp på lederna in till omgivande områden, har fyra scenarier med olika typer av barriärer samt utformning av gaturummet byggts upp och spridning beräknats. Fokus i analysen har varit på spridningen in till en öppen plats mellan hus eftersom öppna platser kan användas till aktiviteter där människor förväntas vistas under en längre tid, som till exempel förskoleverksamhet eller uteserveringar. Genomfartsleden har

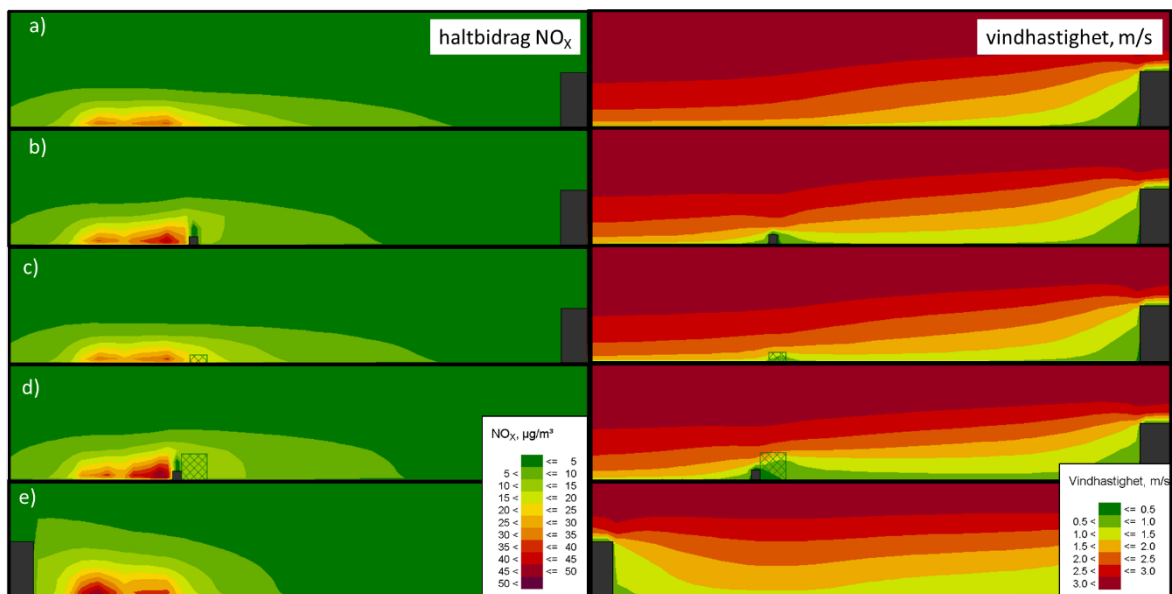
motsvarande trafikflöde och sammansättning som på Dag Hammarsköldsleden i Göteborg, (ÅDT 26 000 fordon, varav 6 % tung trafik), som går från Göteborgs västra utkanter in mot stadskärnan. Detta trafikflöde är lägre än på de högst trafikerade genomfartslederna men motsvarande flöde återfinns på leder i de flesta större städer.

Årligt medelhaltbidrag och vindhastighet på genomfartsleden och närliggande öppna plats presenteras i Figur 11. I kartorna kan ses att spridning orsakad av de i huvudsak västliga och sydvästliga vindarna är relativt uniform över den öppna platsen med avtagande halter från körbanan ut genom bebyggelsen.



Figur 11. Haltbidrag (vänster) och vindhastighet (höger) som årsmedel för S_{B0} (utan barriär) i det aktuella gaturummet. Röd streckad linje markerar läge för tvärsnitt i Figur 12.

Den jämna spridningen i årsmedelhalter och vind från genomfartsleden och in över den öppna platsen återfinns även i tvärsnittet i Figur 12 a, med ett högt haltbidrag på vägbanan som avtar gradvis med ökande avstånd. Eftersom beräkningarna baseras på ett för Sverige typiskt vindmönster är vindarna i huvudsakliga västliga (från vänster till höger över genomfartsleden i bilden), vilket gör att föroreningar transporteras in på den öppna platsen. Tvärsnitten som visas i Figur 12 b-e illustrerar hur vindgenomströmningen och haltbidraget påverkas av olika utformning och placering av barriären, samt effekten av att byggnader placeras på lovartsidan av genomfartsleden med avseende på de huvudsakligen väst och sydvästliga vindriktningarna.



Figur 12. Beräknat haltbidrag (vänster) och vindhastighet (höger) i ett tvärsnitt över genomfartsleden placerat enligt streckad röd linje i Figur 11, för a) genomfartsled utan barriär S_{B0} , b) genomfartsled med 4 m hög solid barriär S_{B1} , c) genomfartsled med 4 m hög vegetationsbarriär S_{B2} , d) genomfartsled med kombination av solid barriär och träd, S_{B3} , och e) genomfartsled med bebyggelse på lovartsidan, S_{B4} . Vegetation representeras av gröna, kryssmarkerade områden i kartorna.

Avsaknad av både barriär och bebyggelse ger störst haltbidrag i marknivå inne på den öppna platsen. Detta orsakas av att öppenheten ger en kraftig transport av trafikutsläppen in över den öppna platsen. De relativt höga vindhastigheterna medför dock att omblandningen vertikalt ökar vilket medför ökad utspädning och därmed relativt lågt haltbidrag trots att trafikflödet i dessa scenarier är mer än dubbelt så högt jämfört med tidigare förtätnings- och vegetationsscenarioer.

En 4 meter hög barriär placerad (S_{B1}) i direkt anslutning till genomfartsleden ger en tydlig påverkan på luftgenomströmningen. Den vertikala spridningen ökar medan den horisontella spridningen minskar. Denna barriär är tänkt att representera ett bullerplank, men på grund av tekniska begränsningar i modellen har den utformats som en 4 meter hög och 3 meter bred byggnad. Barriärens bredd riskerar att öka den vertikala omblandningen något i beräkningarna jämfört med om barriären varit formad som ett plank. Detta har dock troligtvis begränsat inflytande på det generella luftflödet runt barriären och de resulterade haltbidraget på den öppna platsen.

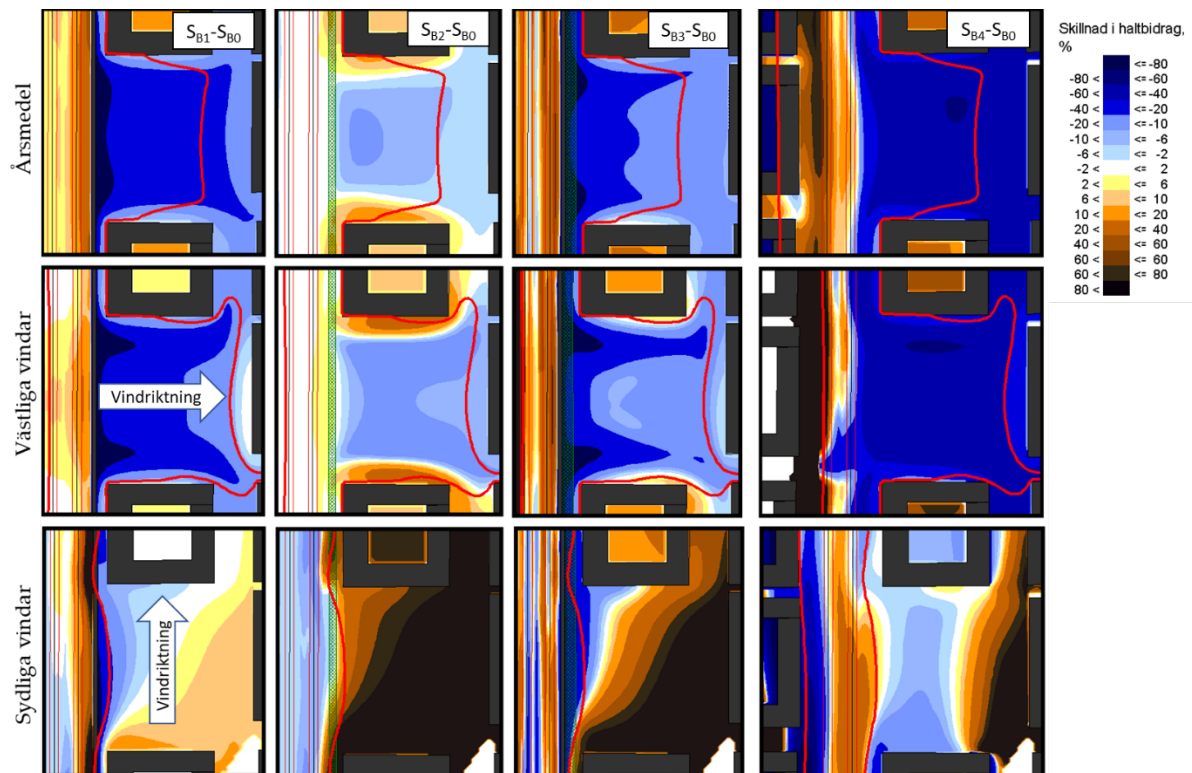
En vegetationsbarriär (buskage, S_{B2}), 4 meter bred och 4 meter hög, medför en begränsad sänkning av vindhastigheten och ger därmed något lägre haltbidrag på den öppna platsen. Dock hindras inte luftflödet från genomfartsleden i någon större utsträckning, vilket ger liknande halter som utan barriär.

Kombination av en solid barriär (till exempel plank) med högre träd (S_{B3}) ger högre vertikal omblandning men även ökad turbulens och lägre vindhastighet, vilket medför förhöjda halter längre in på öppna platsen jämfört med om enbart ett plank används. Återigen är det viktigt att notera att beräkningarna endast inkluderar effekten från vegetation på luftgenomströmningen och bortser från den potentiellt renande depositionseffekten.

Placering av bebyggelse på lovartsidan (S_{B4}) sänker vindhastigheten kraftigt vid vägbanan vilket begränsar spridning av föroreningar in till den öppna platsen och medför lägst haltbidrag av de testade scenarierna. Dock ger detta scenario höga halter på vägbanan och längs med fasaden på byggnaden på lovartsidan.

För att undersöka påverkan på luftkvaliteten på den öppna platsen presenteras även de procentuella skillnaderna i Figur 13. Områden med haltbidrag över $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån, S_{B0} , är markerade med röd konturlinje. Utanför linjen kan små förändringar i haltbidrag generera stora procentuella förändringar varför förändringar utanför linjen bör analyseras med försiktighet. S_{B4} - S_{B0} visas med något bredare karta för att tydliggöra effekten av bebyggelsen på motstående sida av den öppna platsen.

För årsmedelhalter ger samtliga barriärer och bebyggelser en sänkning av haltbidraget på den öppna platsen. Störst förändringen orsakas av att bebyggelse placeras på lovartsidan av genomfartsleden i den huvudsakliga vindriktningen, vilket ger en sänkning i haltbidraget upp mot, och delvis över, 60 % inne på den öppna platsen. Detta scenario medför dock en generell begränsad luftgenomströmning vilket ger kraftigt förhöjda halter på vägbanan och längs med fasaden på den tillkomna byggnaden.



Figur 13. Förändring i haltbidrag från trafik som årsmedel runt en genomfartsled orsakad av, från vänster till höger: införande av 4 m hög barriär (S_{B1}), 4 m höga buskage (S_{B2}), 4 m hög barriär i kombination med 10 m höga träd (S_{B3}), och bebyggelse på motstående sida av leden (S_{B4}), från topp till botten: årsmedel, västliga vindar och sydliga vindar. Blå färgtoner indikerar lägre och bruna färgtoner högre haltbidrag i barriärs scenariot jämfört med scenariot utan barriärer eller byggnader. Områden med haltbidrag över $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i scenariot som jämförelsen utgår ifrån, S_{B0} , är markerade med röd konturlinje. Utanför linjen kan små förändringar i haltbidrag generera stora procentuella förändringar varför förändringar utanför linjen bör analyseras med försiktighet. $S_{B4}-S_{B0}$ visas med något bredare karta för att tydliggöra effekten av bebyggelsen på motstående sida av den öppna platsen.

En tydlig minskning i årsmedelhaltbidrag på mellan 20 till 40 % orsakades också av placering av en solid barriär mellan körbana och den öppna platsen samt en kombination av solid barriär och växtlighet. Även en ensam vegetationsbarriär gav förbättrad luftkvalitet, men den genomströmning av luft som vegetationen möjliggör medförde att effekten var begränsad till en generell sänkning av haltbidraget på den öppna platsen med runt 10 %, bitvis upp mot 20 %.

En liknande effekt återfanns även vid västliga vindar, medan effekten minskade vid sydliga vindar. Vid sydliga vindar är dock området, för vilket analys är relevant, begränsat till genomfartsledens absoluta närhet vilket kraftigt begränsar möjligheter till analys av effekten från de olika barriärerna inne på det öppna området.

4 Slutsats och rekommendationer

Sammantaget visar studien att det finns stora möjligheter att förbättra den urbana luftkvaliteten genom att optimera bebyggelse och vegetation för bästa luftgenomströmning. I den här studien undersöktes totalt 16 olika scenarier med olika utformning av förtätad bebyggelse, av vegetation i gaturummet, samt av barriärer och bebyggelse runt en genomfartsled. Då utformningen av gaturummet gynnade luftgenomströmningen ökade omblandning av utsläpp från trafik i gaturummet, vilket ledde till en utspädning och lägre haltbidrag i marknära luftlager. De övergripande resultaten sammanfattas enligt följande:

- **En förtätad bebyggelse** i ett område med motsvarande en befolkningsökning på 50 % ger **generellt försämrad luftkvalitet**, dels på grund av den ökade trafikmängd som förtätning medför, men också på grund av att den tätare bebyggelsen begränsade luftgenomströmningen. Utformningen av den förtätade bebyggelsen beräknades orsaka skillnader i årsmedelhaltbidrag i gaturummet på 40 % eller mer. **Gaturum där bebyggelsen tillät luftgenomströmning**, som punkthus eller linjehus placerade längs med huvudsakliga vindriktningen, **gav lägst halter** i gaturummet. **Gaturum som stängs in av bebyggelse** i den huvudsakliga vindriktningen, som blockhus eller linjehus placerade vinkelrätt mot huvudsakliga vindriktningen **ger högst halter**.
- **Vegetation** placerad i ett slutet gaturum ger en generell **minskad luftgenomströmning** och därmed **negativ påverkan på luftkvaliteten**. Den negativa effekten ökade med vegetationens storlek där **stora träd med täckande krona indikerade en ökning i årsmedelhaltbidrag på upp mot 40 %** på trottoarerna, medan mindre häckar beräknades ge försumbar effekt. Även ett vegetationslager längs med husväggen beräknades ge minskade vindhastigheten genom gaturummet vilket medförde ett ökat haltbidrag på trottoarerna. Dock medför en förenklad beskrivning av vegetation i modellen, samt att depositionseffekten inte kunde inkluderas, ökade osäkerheter i den beräknade effekten från vegetationen vilket bör beaktas i tolkning av resultaten.
- **Barriärer runt en genomfartsled ger en tydlig sänkning i haltbidrag inne i närområdet** vilket kopplas till att luftflödet styrs om så att transport av föroreningar från leden in mot bebyggelsen hindras. **Solida barriärer gav störst minskning i haltbidrag**, upp mot 40 %, inne på en öppen yta nära leden, medan **effekten av porösa vegetationsbarriärer var lägre**, under 20 %. Placering av **hög och tät bebyggelse** nära genomfartsleden minskade luftgenomströmningen betydligt, vilket gav **höga halter nära vägbanan men minskat haltbidrag längre in i bebyggelsen**.

Resultaten i denna studie visar tydligt att luftkvalitetsaspekten bör inkluderas i planering av nya områden, speciellt då ett område ska förtätas. Extra fokus bör vara på platser som riskerar att bli trafikutsatta. På dessa platser bör bebyggelse planeras med hänsyn till huvudsakliga vindriktningar så att luften tillåts strömma genom gaturummen och ventilera ut trafikrelaterade föroreningar.

I gaturum där människor förväntas uppehålla sig på trottoarer, till exempel på uteserveringar, är vegetation ofta önskvärt då det upplevs som positivt, ökar välbefinnande, och kan skapa skugga under varma dagar samt lä för vind. I gaturum med trafik bör dock vegetation noga planeras för att tillåta luftgenomströmning och därmed undvika förhöjda halter där människor förväntas uppehålla sig. Till exempel bör träd med tätt krontäcke undvikas över trafikerade gator då det kan



medföra att föroreningarna sprids ut till trottoarer och ytor bredvid vägen istället för att blandas om och spädas ut med luften ovan.

Eftersom luftgenomströmningen kan påverkas kraftigt av relativt små förändringar bör luftkvalitetsutredningar för trafikutsatta platser inkludera platsspecifika beräkningar för att ge möjlighet till anpassning och optimering av luftkvaliteten på platsen. Om luftkvalitetsutredningen inkluderar gaturum och platser där vegetation finns eller planerar att introduceras, bör även vegetation beaktas i utredningen.

Referenser

- Abhijith, K., and Coauthors, 2017: Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments—A review. *Atmospheric Environment*, **162**, 71-86.
- Amorim, J., V. Rodrigues, R. Tavares, J. Valente, and C. Borrego, 2013: CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. *Science of the Total Environment*, **461**, 541-551.
- Balczó, M., C. Gromke, and B. Ruck, 2009: Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. *Meteorologische Zeitschrift*, **18**, 197-206.
- Britter, R. E., and S. R. Hanna, 2003: Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **35**, 469-496.
- Chan, A. T., E. S. So, and S. C. Samad, 2001: Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality. *Atmospheric Environment*, **35**, 4089-4098.
- Chen, D., 2000: A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study. *International Journal of Climatology*, **20**, 1067-1076.
- Czáder, K., M. Balczó, and J. Eichhorn, 2009: Modelling of flow and dispersion in a street canyon with vegetation by means of numerical simulation. *Proceedings of the XXIII. MicroCAD International Scientific Conference, Miskolc, Hungary*, 19-20.
- Gonzales, H. B., J. Tatarko, M. E. Casada, R. G. Maghirang, L. J. Hagen, and C. J. Barden, 2018: Dust Reduction Efficiency of a Single Row Vegetative Barrier (*Maclura pomifera*). *Transactions of the ASABE*, **61(6)**.
- Goricsán, I., M. Balczó, T. Réger, and J. Suda, 2004: Comparison of wind tunnel measurement and numerical simulation of dispersion of pollutants in urban environment. *International Conference on UrbanWind Engineering and Building Aerodynamics, von Karman Institute, Rhode-Saint-Genèse, Belgium*.
- Gromke, C., 2011: A vegetation modeling concept for building and environmental aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies. *Environmental pollution*, **159**, 2094-2099.
- Gromke, C., N. Jamarkattel, and B. Ruck, 2016: Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, **139**, 75-86.
- Gromke, C., R. Buccolieri, S. Di Sabatino, and B. Ruck, 2008: Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment*, **42**, 8640-8650.
- Holmin-Fridell, S., J. Jones, C. Bennet, H. Södergren, S. Kindell, S. Andersson, and M. Jakobsson, 2013: *Luftkvaliteten i Sverige år 2030*. SMHI.
- Janhäll, S., 2015: Review on urban vegetation and particle air pollution—Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, **105**, 130-137.
- Kastner-Klein, P., R. Berkowicz, and R. Britter, 2004: The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **87**, 121-131.
- Klingberg, J., M. Broberg, B. Strandberg, P. Thorsson, and H. Pleijel, 2017: Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure—a case study in Gothenburg, Sweden. *Science of the Total Environment*, **599**, 1728-1739.
- Kwak, M. J., and Coauthors, 2019: The Removal Efficiencies of Several Temperate Tree Species at Adsorbing Airborne Particulate Matter in Urban Forests and Roadsides. *Forests*, **10**, 960.
- Lindén, J., M.-O. Larsson, J. Holmqvist, and L. Tang, 2018: Hållbar stadsutveckling - god luftkvalitet i framtidens täta och gröna städer?
- Litschke, T., and W. Kuttler, 2008: On the reduction of urban particle concentration by vegetation—a review. *Meteorologische Zeitschrift*, **17**, 229-240.
- Moonen, P., V. Dorer, and J. Carmeliet, 2011: Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **99**, 414-423.
- Pugh, T. A., A. R. MacKenzie, J. D. Whyatt, and C. N. Hewitt, 2012: Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental science & technology*, **46**, 7692-7699.
- Sæbø, A., R. Popek, B. Nawrot, H. Hanslin, H. Gawronska, and S. Gawronski, 2012: Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, **427**, 347-354.
- Shi, J., G. Zhang, H. An, W. Yin, and X. Xia, 2017: Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, **8**, 836-842.
- SMHI, cited 2019: Vind i Sverige. [Available online at <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/vind-i-sverige-1.31309>.]
- Tiwary, A., A. Reff, and J. J. Colls, 2008: Collection of ambient particulate matter by porous vegetation barriers: Sampling and characterization methods. *Journal of Aerosol Science*, **39**, 40-47.
- UN Habitat, 2014: A new strategy of sustainable neighbourhood planning: Five principles. *Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme*.



- Wania, A., M. Bruse, N. Blond, and C. Weber, 2012: Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of environmental management*, **94**, 91-101.
- Vos, P. E., B. Maiheu, J. Vankerkom, and S. Janssen, 2013: Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environmental Pollution*, **183**, 113-122.
- Xie, X., C.-H. Liu, and D. Y. Leung, 2007: Impact of building facades and ground heating on wind flow and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment*, **41**, 9030-9049.
- Yuan, C., E. Ng, and L. K. Norford, 2014: Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. *Building and Environment*, **71**, 245-258.



