

# Modellering för klimatneutrala stadsdelar

– En studie av stadsdelars klimatpåverkan  
genom modellering av Nyhamnen i Malmö

*Sara Johansson*

---

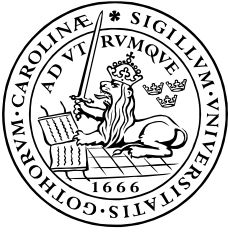
Examensarbete 2021

Miljö- och Energisystem

Institutionen för Teknik och samhälle

Lunds Tekniska Högskola





**LUNDS UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

## **Modellering för klimatneutrala stadsdelar**

En studie av stadsdelars klimatpåverkan genom  
modellering av Nyhamnen i Malmö

Sara Johansson

Examensarbete

April 2021



Dokumentutgivare, Dokumentet kan erhållas från  LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA  vid Lunds universitet  Institutionen för teknik och samhälle  Miljö- och energisystem  Box 118  221 00 Lund  Telefon: 046-222 00 00  Telefax: 046-222 86 44	Dokumentnamn
	Examensarbete
	Utgivningsdatum
	Författare
	Sara Johansson

Dokumenttitel och undertitel

Modellering för klimatneutrala stadsdelar – en studie av stadsdelars klimatpåverkan genom modellering av Nyhamnen i Malmö

Sammandrag

Städer ger upphov till klimatpåverkan både i uppförandet och användningen av bebyggelsen. Studier av svenska kommuner visar att det finns stora utmaningar i att få klimatarbetet att gå från övergripande strategiska mål till implementering och att det saknas handfast vägledning i beslutssituationer.

Syftet med detta examensarbete har varit att undersöka hur modellering kan användas vid planering av nya stadsdelar för att klargöra vilka vägval som har störst effekt på klimatpåverkan över tid. För att besvara dessa frågeställningar har en modellering av stadsdelen Nyhamnen i Malmö gjorts i modelleringsverktyget Stella. Beräkningar har först gjorts baserat på ett standardscenario, varpå skillnad i klimatpåverkan beräknats för olika vägval i stadsbyggnadsprocessen: val av byggmaterial, val av uppvärmningslösning, andel egenproduktion av el med solceller, planering för bilfri stadsdel och satsning på laddinfrastruktur för elfordon. Vidare har en undersökning gjorts för att hitta eventuella återkopplingsmekanismer som inverkar på stadsdelars klimatpåverkan.

Resultaten visar att det för fallet Nyhamnen finns vägval för byggmaterial, uppvärmningslösningar och trafikplanering som alla kan minska klimatpåverkan med 8–15%, sett över 50 år från stadsdelens byggstart. En kombination av dessa lösningar bedöms kunna sänka klimatpåverkan med 38% jämfört med standardscenariot. Samtidigt beräknades att en kombination av de lösningar som beräknats ge lägst klimatpåverkan ger ett totalt elbehov som är 33% högre än standardfallet. Av detta kan slutsatsen dras att beräkning av klimatpåverkan för lokala stadsbyggnadslösningar behöver kompletteras med utredningar av betydelsen av dessa vägval för energisystemet i stort.

Gällande återkopplingsmekanismer har ett fåtal sådana identifierats på transportområdet, främst rörande val av transportmedel och social påverkan som driver på omställningen till mer transporteffektiva färdmedel och elfordon. Förslag på vidare studier är bland annat inkludering av framtidsprognos för elproduktionens emissioner, en högre tidsupplösning i beräkning energianvändning och motsvarande produktion, kvantifiering av återkopplingsmekanismer samt implementering av dessa i modellen.

Nyckelord

Modellering, klimatneutralitet, stadsdelar, klimatpåverkan, stadsbyggnad, återkopplingsmekanismer, stadsplanering

Sidomfång	Språk	ISRN
62	Svenska	ISRN LUTFD2/TFEM--21/5166--SE + (1-62)

<p>Organisation, The document can be obtained through</p> <p>LUND UNIVERSITY</p> <p>Department of Technology and Society</p> <p>Environmental and Energy Systems Studies</p> <p>Box 118</p> <p>SE - 221 00 Lund, Sweden</p> <p>Telephone: int+46 46-222 00 00</p> <p>Telefax: int+46 46-222 86 44</p>	<p>Type of document</p> <p>Master thesis</p>	
	<p>Date of issue</p>	
	<p>Author</p> <p>Sara Johansson</p>	
<p>Title and subtitle</p> <p>Modeling for climate neutral districts – a study of the climate impact of districts through modelling of Nyhamnen in Malmö</p>		
<p>Abstract</p> <p>Cities give rise to climate impacts both in the construction and use of buildings. Studies of Swedish municipalities show that there are major challenges in transforming from overall strategic climate goals to implementation, and that there is a lack of robust guidance in decision-making situations.</p> <p>The purpose of this thesis has been to investigate how modeling can be used when planning new districts to clarify which choices have the greatest effects on climate impact over time. To fulfil this purpose a model of the Nyhamnen district in Malmö has been developed using the modeling tool Stella. Initially, calculations were made based on a base case scenario, after which differences in climate impact were calculated for different decisions in the urban construction process: choice of building materials, choice of heating solution, share of local production of electricity using solar cells, planning for car-free district and investment in charging infrastructure for electric vehicles. Furthermore, a literature study has been carried out to find possible feedback mechanisms which affect a districts' climate impact.</p> <p>It is estimated that for in the case of Nyhamnen, choices concerning building materials, heating solutions and traffic planning, can reduce the climate impact by 8–15%, seen over 50 years from the construction start. A combination of these solutions is estimated to be able to reduce the climate impact by 38%, compared with the base case scenario. It was estimated that a combination of the solutions calculated to have the lowest climate impact could increase electricity demand by 33%, compared with the base case scenario. It can be concluded that calculations of climate impacts from urban development need to be complemented with investigations of energy system impacts.</p> <p>A small number of feedback mechanisms were identified for the transport sector, mainly concerning the choice of means of transport and the social impact which drives the transition towards more transport-efficient means of transport and electric vehicles. Suggestions for further studies include the inclusion of future forecasts for electricity production emissions, a higher time resolution in calculating energy use and corresponding production, quantification of feedback mechanisms and implementation of quantified feedbacks in the model.</p>		
<p>Keywords</p> <p>Modeling, climate neutrality districts, climate impact, urban development, feedback mechanisms, urban planning</p>		
<p>Number of pages</p> <p>62</p>	<p>Language</p> <p>Swedish</p>	<p>ISRN</p> <p>ISRN LUTFD2/TFEM--21/5166--SE + (1-62)</p>

## Förord

Detta examensarbete genomfördes under hösten 2020 och början av våren 2021, en tid som med anledning av covid-19-pandemin lär bli ihågkommen som mycket speciell. Under inledningen av arbetet spenderades många trevliga och inspirerande dagar på IVL Svenska Miljöinstitutets Malmökontor, medan resterande del av arbetet fick genomföras hemifrån på grund av rådande omständigheter.

Jag vill börja med att rikta ett stort tack till alla de kunniga och otroligt hjälpsamma personer på IVL som jag kommit i kontakt med under arbetsprocessen. Arbetets breda inriktning har inneburit nödvändig dialog med experter inom många olika områden, och jag är evigt tacksam för det varma och hjälpsamma bemötande jag fått av er alla. Tusen tack!

Jag vill även tacka familj och vänner som varit ett stort stöd genom hela arbetsprocessen. Ni har bidragit med ovärderlig hjälp, både som sakkunniga bollplank och som medmänniskor.

Jag vill även rikta två extra stora tack till mina handledare. Till Jamil Khan, huvudhandledare från institutionen för miljö- och energisystem på LTH, som bidragit med ett oundgängligt stöd i den akademiska processen och hjälpt mig hålla en röd tråd genom arbetet. Ett stort tack även till Johan Holmqvist, biträdande handledare från IVL Svenska Miljöinstitutet, som gett mig en ovärderlig inblick i dagens forskning och tillämpat arbete inom stadsbyggnad, och som utmanat mig att tänka utanför boxen för att driva arbetet framåt. Ni är guld!

Sara Johansson

Malmö, april 2021

## Innehåll

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte och frågeställningar.....	1
1.2	Några förtydliganden .....	2
1.3	Disposition.....	2
2	Städers klimatpåverkan.....	4
2.1	Klimatpåverkan från nybyggnation av hus.....	4
2.2	Klimatpåverkan från energi till byggnader .....	5
2.3	Transporters klimatpåverkan .....	6
2.4	Sammankoppling av klimatpåverkan från byggmaterial, energi till byggnader och transport8	
2.5	Klimatpåverkan och klimatarbete i Malmö.....	8
3	Modellering som verktyg för bedömning av klimatpåverkan .....	11
3.1	Några olika typer av modellering .....	11
3.2	Verktyg för modellering av stadens klimatpåverkan .....	12
3.3	Andra verktyg för styrning av klimatpåverkan på stadsnivå .....	14
3.4	Scenario-baserad dynamisk modellering i Stella.....	14
4	Metod.....	15
4.1	Modellering i Stella.....	15
4.2	Avgränsningar.....	16
4.3	Grundläggande beräkningar och data.....	19
4.4	Testning av vägval .....	23
4.5	Studie av återkopplingsmekanismer för stadsbyggnad inom system dynamics.....	26
5	Resultat.....	27
5.1	Testning av vägval .....	27
5.2	Återkopplingsmekanismer för stadsdelars klimatpåverkan.....	34
5.3	Osäkerheter och eventuella felkällor .....	34
6	Diskussion.....	36
6.1	Sammanvägd reflektion kring resultat .....	36
6.2	Målkonflikter i stadsplaneringen.....	37
6.3	Stadsdelars klimatpåverkan och energisystemet.....	37
6.4	Tidsaspekter i beräkningarna .....	38
6.5	Livscykelperspektiv på stadsdelar .....	38
6.6	Analys av möjligheter för återkoppling i modelleringsarbetet .....	38
6.7	Utvärdering av Stella som modelleringsverktyg för stadsdelars klimatpåverkan.....	39
6.8	Hantering av brist på säkra data .....	40
6.9	Potentiell användning av modelleringsresultat i planeringsarbetet.....	40



6.10	Förslag på vidare studier .....	40
7	Slutsats .....	42
8	Referenser .....	43
Bilaga 1	.....	49
	Byggmaterial.....	49
	Andel värmepump till värmeförsörjning .....	49
	Djupgeotermi .....	50
	Solceller .....	50
	Bilfri stadsdel.....	51
Bilaga 2	.....	52

# 1 Inledning

Den globala befolkningen har under lång tid följt två trender med stor betydelse för vår påverkan på planeten: urbanisering och ökande växthusgasutsläpp till atmosfären. Således har städer blivit hem för merparten av världens befolkning, samtidigt som de bidrar till stor klimatpåverkan. Städer står idag för mer än 70 % av de växthusgasutsläpp som görs till atmosfären (Europeiska kommissionen 2020), och stadsbyggnaden kan därför ses som en central del av systemomställningen till ett klimatneutralt samhälle.

Städer ger upphov till klimatpåverkan, både i uppförandet av den fysiska miljön och från det senare användandet av bebyggelsen. Planeringen och byggandet av staden lägger grund för de livsmönster som invånarna utvecklar. Vid uppförandet av nya stadsdelar finns viktiga vägval ur klimatsynpunkt, där de beslut som tas bör vara väl underbyggda med kunskap om möjliga utfall för de olika alternativen. Studier av svenska kommuner visar att det finns stora utmaningar i att få klimatarbetet att gå från övergripande strategiska mål till implementering och faktisk systemförändring, att det saknas handfast vägledning i beslutssituationer och att föreslagna åtgärder ofta ratas i beslutssammanhang om det saknas tydlig grund för de klimatförbättrande effekterna (Storbjörk et al. 2017). I skrivelsen *Strategi för Levande städer – politik för en hållbar stadsutveckling* från 2018 framför den svenska regeringen att man ser ett behov av ökat stöd i form av kunskapshöjande insatser och vägledningar för dem som arbetar med samhällsplanering för minskad klimatpåverkan (Regeringen 2018).

Modellering används idag inom många kunskapsområden som verktyg för att testa möjliga åtgärder och utvärdera effekterna utan att behöva implementera dem i den fysiska miljön. Idag finns en rad verktyg för modellering av energisystem på internationell, nationell och lokal nivå. Dessa verktyg har alla utvecklats ur olika behov och problemställningar. Vissa inkluderar endast beräkningar av energibehov, medan andra inkluderar ytterligare funktioner som till exempel beräkning av klimatpåverkan eller optimering av energisystemens utformning ur ett ekonomiskt perspektiv. Verktygen skiljer sig också åt i på vilket sätt de tar hänsyn till olika åtgärders slutliga inverkan på miljön. För vissa modeller, som till exempel inom vetenskapsområdet *system dynamics*, läggs stort fokus på återkopplingsmekanismer som kan ge vidare effekter än åtgärder i sig själva (Sterman 2001). Syftet med en sådan metod är ofta att hitta betydelsefulla åtgärder, så kallade hävstångspunkter, som leder till omvälvande systemförändring genom effekten av återkopplingsmekanismer.

Med den givna situationen har ambitionen uppkommit att vilja undersöka vilka möjligheter som finns till att använda modellering för att beräkna klimatpåverkan och bedöma olika vägvals inverkan på en stadsdels klimatavtryck över tid. Ett sådant verktyg skulle kunna vara ett praktiskt stöd i styrningen mot klimatneutrala städer och ge den handfasta vägledning som saknas i stadsbyggnadsprocessen idag.

## 1.1 Syfte och frågeställningar

Arbetets syfte har varit att öka insikten kring vilka vägval vid upprättandet av en ny stadsdel som har betydande påverkan på det totala klimatavtrycket, samt att undersöka hur modellering av en stadsdels klimatpåverkan kan användas för att öka sådana insikter. Som fördjupning i betydelsen av olika vägval har även en undersökning gjorts för att hitta eventuella återkopplingsmekanismer som inverkar på stadsdelars klimatpåverkan.

Arbetet har utförts med följande frågeställningar:

- Hur kan en ny stadsdels klimatpåverkan modelleras för att öka insikten kring betydelsefulla vägval i stadsbyggnadsprocessen?
- Vilka är de stora källorna till växthusgasutsläpp för en stadsdel, sett till de områden som hanteras i stadsbyggnadsprocessen?
- Vilka vägval i upprättandet av en stadsdel har störst potential att minska klimatavtrycket och vilka är begränsningarna för potentiella minskningar?
- Går det att finna några återkopplingsmekanismer som kan påverka en stadsdels klimatpåverkan?

För att besvara dessa frågeställningar har en modellering av stadsdelen Nyhamnen i Malmö gjorts i modelleringsverktyget Stella. Målet har varit att generera slutsatser som kan appliceras både på det specifika fallet Nyhamnen och på andra fall. Verktöget Stella och tillvägagångssättet för modelleringen beskrivs mer i detalj i metodkapitlet.

## 1.2 Några förtydliganden

Begreppet "stadsbyggnad" kan ofta användas för att beskriva processer som ligger långt utanför byggandet av en fysisk miljö. Det bör därför poängteras att fokus i detta arbete har varit utvärdering av vägval som sker i byggandet av den fysiska miljön i uppbyggnaden av en ny stadsdel.

Detta arbete har syftat till att undersöka den klimatpåverkan som genereras av en stadsdel sett över hela dess "livslängd". Formuleringar som "en stadsdels klimatpåverkan" innefattar därför, om inget annat anges, både utsläpp från uppbyggnadsfasen och utsläpp som genereras genom aktiviteter under tiden som stadsdelen används. Vad detta innebär för modelleringen i detta arbete behandlas vidare i metodkapitlet i avsnittet *Avgränsningar*.

Byggandet av en ny stadsdel är en process som involverar många aktörer, från kommunens planeringsarbete till uppbyggnaden av stadsmiljön som involverar arkitekter, byggherrar, entreprenörer osv. Det primära fokuset i detta arbete har lagts vid skärningspunkten mellan strategiskt arbete och praktisk implementering, och således förväntas arbetet vara av nytta främst för involverade i stads- och detaljplanering, bygglovsprocesser och de tidiga skedena av byggandet.

## 1.3 Disposition

Rapporten har strukturerats med ett inledande kapitel om städers klimatpåverkan, med underkapitel om fokusområdena byggmaterial, energi till byggnader och transporter. I kapitlet presenteras även pågående klimatarbete och befintliga klimat- och energimål för Malmö, samt planerna för området Nyhamnen som använts vid utformningen av modellen. Därefter följer ett kapitel om modellering av städers klimatpåverkan, med en genomgång av olika befintliga metoder och verktyg för modellering samt hur dessa använts i tidigare studier med liknande syften.

Metoden för examensarbetet presenteras sedan med en inledande beskrivning av modelleringsverktyget Stella, följt av en genomgång av valda avgränsningar för arbetet. Därefter presenteras beräkningsmetodik och använda data för det utformade grundscenariot samt för testningen av vägval som utförts för att bedöma potentialen för att minska stadsdelens klimatpåverkan. I resultatkapitlet redovisas bedömningen av klimatpåverkan för grundscenariot, minskningen klimatpåverkan till följd av de alternativa vägval som testats samt en beräkning av skillnaden i elbehov för de olika vägvalen. Därefter presenteras de återkopplingsmekanismer med potential att påverka stadsdelars klimatpåverkan som återfunnits i litteraturen.

I diskussionskapitlet redovisas bedömningar av resultaten och reflektioner kring resultatens innebörd ur ett vidare perspektiv på t.ex. stadsbyggnad och omgivande energisystem. En utvärdering görs även

av Stella som modelleringsverktyg, samt en bedömning av potentialen för liknande modellering i planeringsarbetet och förslag på vidare studier. Till sist presenteras slutsatserna för arbetet som helhet i relation till arbetets syfte och frågeställningar.

## 2 Städers klimatpåverkan

Städer tar idag upp ungefär 3% av jordens landyta, men står för ca 72% av växthusgasutsläppen som görs till atmosfären (Europeiska kommissionen 2020). Städerna fortsätter dessutom att växa, uppskattningen är att 85% av europeiska medborgare kommer leva i städer vid år 2050. I städer finns kunskap och kapital som kan användas för systemomställning, men dessa ytor är också komplicerade att planera eftersom en mängd verksamheter och aktiviteter ska samsas på liten yta.

Den byggda miljön blir ofta styrande för viktiga livsval för lång tid framåt. Begreppet "carbon lock-in" används ofta för att beskriva svårigheterna med att fasa ut fossila bränslen ur dagens samhälle. På systemnivå anses carbon lock-in bland annat leda till svårigheter för klimatsmarta tekniker att ta sig in på marknader trots deras miljömässiga, och ibland även ekonomiska, fördelar (Unruh 2000). På individnivå innebär det till exempel att människor ofta blir tvingade till val som leder till klimatpåverkan om miljön inte främjar (eller ens tillåter) alternativa lösningar (Unruh 2002).

Forskning på carbon lock-in har lyft fram just fysiska urbana miljöer som några av de mest långlivade strukturer som bidrar till lock-in-effekter (Seto et al. 2016). Byggnader och transportinfrastruktur kan skapa energibehov för lång tid framåt baserat på hur de utformas. Samtidigt kan livslängden skilja mycket mellan olika delar av den fysiska strukturen, vilket också kan påverka nivån av inlåsning. Byggnadselement som till exempel isolering och fönster kan ha relativt korta livslängder, medan strukturer som placering av byggnader och utformning av vägnät ofta ger mycket långlivade effekter. En studie från Stockholm Environment Institute har visat en stor mängd kumulativa utsläpp (ca 45 Gt CO<sub>2</sub>) globalt skulle kunna undvikas genom att ny stadsbyggnad sker med progressiva metoder ur klimatsynpunkt, med bland annat energi-effektiva byggnader och tät bebyggelse som minimerar transportbehoven (Erickson & Tempest 2015). Studien visar också att icke-progressiv planering idag skulle kräva kostsamma renoveringslösningar i framtiden, om lokala och globala hållbarhetsmål ska nås, kostnader som delvis kan undvikas med satsningar på hög prestanda ur klimatsynpunkt från start.

Ett klimatsmart samhällsbyggande kräver en hög nivå av kunskap kring vilka vägval i stadsbyggnadsprocessen som leder till stor klimatpåverkan, en komplicerad uppgift vars svar även kan variera utifrån kontext. För svenska kommuner har Boverket på uppdrag av regeringen tagit fram en vägledning för hur kommuner genom översiktsplanering ska kunna styra mot minskad klimatpåverkan (Boverket 2020c). Vägledningens tre första huvudområden är "Transporter", "Bostäder, lokaler och byggande" och "Energi". Bakgrunden är dels att de alla ska beröras av en översiktsplan, dels att dessa står för en stor del av Sveriges totala utsläpp. Enligt Boverket står bygg- och fastighetssektorn för 19% av det svenska samhällets växthusgasutsläpp sett till inhemska utsläpp (Boverket 2021a). Transportsektorn står för 32% av utsläppen (Naturvårdsverket 2020a), av vilka merparten kommer från persontransporter (Klimatpolitiska rådet u.å.).

Med denna bakgrund har klimatpåverkan från byggnation, energi till byggnader och transporter valts ut som fokusområden för modellering och analys för detta arbete. Nedan följer en fördjupning av dessa områden, ett kapitel om klimatpåverkan och klimatarbete i Malmö samt en introduktion till planeringen av stadsdelen Nyhamnen.

### 2.1 Klimatpåverkan från nybyggnation av hus

Byggnader genererar klimatpåverkan både i uppförandefasen, genom framställning av byggmaterial m.m., och genom förbrukning av el och värme när byggnaderna används. Under de senaste åren har intresset för byggnaders hela livscykel, inklusive aspekter som byggmaterial och energiförbrukning i byggfasen, ökat i kontrast till tidigare insatser inom hållbart stadsbyggande som främst fokuserat på att skapa byggnader med låg energianvändning i driftskedet, såsom passivhus (Regeringen 2018).

Uppförandet av nya byggnader leder idag till betydelsefull klimatpåverkan och utsläppen från produktion av material som betong och stål anses vara några av de största utmaningarna för att nå Sveriges mål om nettonollutsläpp år 2045. Naturvårdsverket tillsammans med Boverket uppskattar att bygg- och fastighetssektorn ger upphov till ca 75% av den svenska mineralindustrins växthusgasutsläpp, huvudsakligen från produktion av cement (Naturvårdsverket & Boverket 2019).

I ett samarbete mellan KTH, IVL Svenska Miljöinstitutet och Sveriges Byggindustrier har en studie genomförts för att beräkna klimatpåverkan per BTA<sup>1</sup> i ett livscykelperspektiv för fem olika byggsystem, alltså fem olika konstruktionslösningar för ett och samma referenshus (Erlandsson et al. 2018). De valda byggsystemen uppfyllde alla samma grundläggande funktionskrav enligt Boverkets byggregler (BBR) och skulle sammantaget representera hur majoriteten av de svenska flerbostadshusen byggs idag. De studerade byggsystemen var dels konstruerade med olika typer av material, tre med betongstomme och två med trästomme, dels med olika byggtekniker, då till exempel både prefabricerade och platsgjutna betongstommar fanns med i studien. Skillnaden i klimatpåverkan för de olika systemen visar sig dels bero på vilka mängder av olika material som behövs för respektive system, dels på själva byggtekniken och utsläpp kopplat till denna. En slutsats från projektet var att det finns förhållandevis stor potential att minska klimatpåverkan för samtliga konstruktionslösningar som undersökts, oavsett om huvudmaterialet är betong eller trä.

## 2.2 Klimatpåverkan från energi till byggnader

Användning av byggnader kräver energi för uppvärmning/kylning, varmvatten samt fastighets- och hushållsel. De val som sker i byggprocessen sätter ofta ramarna för vilken energiprestanda ett hus kommer ha vid användning. Krav på energiprestanda finns i Sverige genom energihushållningskraven i BBR (dessa reglerar dock inte hushållsel) (Boverket 2021a).

I Sverige har användning och produktion av fjärrvärme ökat med 50% sedan 1990. Svensk fjärrvärmeproduktion leder till stor klimatpåverkan främst genom förbränning av fossilt avfall, som 2019 stod för 64 % av el- och fjärrvärmesektorns utsläpp (Naturvårdsverket 2020b). En stor mängd fossilfri kraftproduktion från vatten-, kärn- och vindkraft ger låg klimatpåverkan från elproduktion jämfört med många andra länder. Samtidigt bör inte det svenska energisystemet betraktas som isolerat från, eller oberoende av, sin omgivning. Bränslen importeras till el- och värmeproduktion (Naturvårdsverket 2021b), det svenska elsystemet är ihopkopplat med grannländernas och det pågår inom Europa också ett arbete för att integrera de europeiska elmarknaderna ytterligare (Europeiska rådet 2020). Stor osäkerhet finns även för hur dessa produktionssystem kommer se ut i framtiden. En globalt fortsatt ökad energianvändning, en stark elektrifieringstrend nationellt i många sektorer och en ökad andel förnybar intermitterent elproduktion är bara några av de faktorer som lär bli betydelsefulla för utvecklingen (Energikommissionen 2017).

Det klimatavtryck som kan kopplas till bebyggelsens energiförbrukning beror givetvis på vilka lösningar som väljs för el- och värmeförsörjning. Betydelsefulla beslut för hur bebyggelsens energibehov ska mötas sker tidigt i stadsbyggnadsprocessen. Investeringar i infrastruktur för import av energi kan låsa in en stadsdel i klimatpåverkan från processer som ligger långt utanför stadsdelens gränser och påverkansmöjligheter.

Att avgöra vilka lösningar för el- och värmeförsörjning som ger upphov till lägst klimatpåverkan är en komplicerad uppgift, som studier av Gode et al. (2020) visat. I dessa studier har effekten av beslut som påverkar en byggnads energianvändning beräknats med hjälp av konsekvensanalys i verktyget Tidstegen. Ett sådant beslut kan till exempel vara installation av frånluftsvärmepump, solceller eller

---

<sup>1</sup> BTA står för bruttoarea och är den sammanlagda arean av alla våningsplan i en byggnad.

renoveringslösningar som fönsterbyte och tilläggsisolering. Verktöget använder energiförbrukningsdata för byggnaden per timme och matchar dessa med produktionsdata för fjärrvärmeanläggningar. På detta sätt beräknas effekten som beslutet har på produktionsanläggningen och medföljande klimatpåverkan. Även förändrad efterfrågan på el kan analyseras med antaganden om vilka elproduktionsanläggningar som kommer att påverkas till följd av valda åtgärder.

I pilotprojekt av Gode et al. (2020) har man med verktöget Tidstegen konstaterat att fjärrvärmenät med mycket kraftvärme kan ge resultatet att fjärrvärmen klimatmässigt är bättre än värmepump, vilket beror på att en lägre efterfrågan på fjärrvärme också leder till mindre elproduktion från kraftvärmeverken. Eftersom elproduktion från kraftvärmeverk tränger undan annan elproduktion med högre klimatpåverkan, betyder detta att ett sänkt fjärrvärmebehov kan ge en negativ effekt på klimatpåverkan. Detta resultat gäller dock inte för de tidpunkter där elproduktionen i kraftvärmeverken stängs av för att produktionen av värme behöver maximeras. Vilken energilösning som är mest fördelaktig ur klimatsynpunkt beror alltså på tidpunkten, förutsättningarna för den produktionsenhet som berörs av de analyserade besluten och vilken alternativ produktion som ersätts. I studien nämns även att kraftvärmeverk som har mottagningsplikt för avfall är tvingade att fortsätta förbränningen av avfall, även då efterfrågan går ner, vilket betyder att en minskad efterfrågan inte leder till en minskning av klimatpåverkan i praktiken (ibid.).

### 2.2.1 Egenproduktion av el i stadsmiljö

Att etablera elproduktion för lokal självförsörjning av en stadsdel kan ha många syften. Installation av till exempel solcellsanläggningar kan minska behovet av importerad el, samtidigt som frågan om huruvida detta leder till lägre klimatpåverkan kan besvaras på många sätt. Precis som tidigare nämndes angående fjärrvärmesystemet, försvåras sådana utredningar av att svaret beror av vid vilken tidpunkt elen produceras och används. Jämförelsen kan också göras mot olika alternativa lösningar. En pilotstudie av Gode et al. (2020) visar dock att solceller kan anses klimatmässigt fördelaktigt om jämförelsen sker mot el från det nordeuropeiska elsystemet som den förväntas ersätta.

## 2.3 Transporters klimatpåverkan

År 2019 stod den svenska transportsektorn för 32% av de territoriella växthusgasutsläppen, av vilka merparten kommer från persontransporter (Klimatpolitiska rådet u.å.). Utsläppen från transportsektorn har minskat långsamt det senaste decenniet, men för att nå övergripande mål om minskade utsläpp från transportsektorn på både nationell och regional nivå krävs en acceleration av denna trend (Naturvårdsverket 2020c).

Ett transporteffektivt samhälle kan beskrivas som ett samhälle som uppnår hög tillgänglighet på ett effektivt sätt ur energi-, miljö- och ekonomiskt perspektiv (Regeringskansliet 2019). Detta kan uppnås genom att minska transporter med energiintensiva trafikslag som tex. personbil, lastbil och flyg (Energimyndigheten 2018). En sådan omställning kan låta enkel i teorin, samtidigt visar studier att inlåsningseffekter från transportinfrastruktur tidigare har underskattats av planerare på regional och nationell nivå (Driscoll 2014). Utbyggnaden av transportinfrastruktur som kan bana väg för klimatpåverkan under lång tid framöver, speciellt då tekniska, institutionella och beteendemässiga inlåsningseffekter tenderar att förstärka varandra (Seto et al. 2016). En möjlighet att bryta sådana inlåsnings är att utnyttja tillfällena för ny exploatering till att skapa en alternativ ordning.

Styrning mot ett mer transporteffektivt samhälle, och en lägre klimatpåverkan från transporter, kan göras genom en mängd olika typer av åtgärder. För detta arbete har styrning med två typer av syften studerats: styrning för att minska personbilsinnehavet i stadsmiljö och styrning mot användning av fordon med lägre klimatpåverkan, specifikt elfordon. Åtgärder kopplat till dessa två inriktningar har

även inkluderats i modelleringen där effekter av olika vägval beräknas. Med anledning av detta urval presenteras nedan en bakgrund gällande dessa två typer av styrning.

### 2.3.1 Styrning mot minskat bilinnehav

Många svenska kommuner ser idag en möjlighet att utöva styrning mot högre transporteffektivitet genom att begränsa mängden bilparkeringar (Romson et al. 2020). Enligt Boverkets vägledning för översiktsplanering kan ett framgångsrikt sätt att påverka människors resvanor vara att jobba aktivt med parkeringsnormer och parkeringstal vid nyexploatering (Boverket 2020b). En rekommendation är användning av så kallade flexibla parkeringstal, som möjliggör att ett lägre antal parkeringsplatser byggs om byggherrarna ser till att andra mobilitetstjänster tillgängliggörs för de boende och verksamma. Sådana åtgärder kan vara att tillgängliggöra bilpool eller ge rabatt på kollektivtrafikkort (ibid.). Ett problem som identifierats gällande denna typ av styrning är dock att svensk lagstiftning för nybyggnation inte bedöms ge stöd för exploatering som styr mot minskat bilinnehav (Romson et al. 2020). Dessa regler, specifikt PBL kap 8 om krav på nybyggnation, är i stället formulerade så att parkeringsutrymme minst motsvarande det bilbehov som finns måste tillgodoses.

I en studie av Roth et al. (2018) sammanställdes erfarenheter från 12 olika nybyggnadsprojekt som genomförts med låga eller reducerade parkeringstal. I studien konstateras att bilinnehavet i flertalet av de studerade projekten är lägre än i jämförbara områden med högre utbud av parkering, och i flera av projekten är andelen personkilometer som genomförs med bil bevisat betydligt lägre än i en genomsnittlig stadsdel. I studien har även konstaterats att det är en kombination av viktiga förutsättningar som ligger till grund för resultatet lågt bilinnehav. Det bedöms dock vara svårt att avgöra effekten av specifika åtgärder, som till exempel subventionering av mobilitetstjänster som bilpool. Snarare bedöms en kombination av olika faktorer som möjliggör ett vardagsliv utan bil vara just det som leder till ett framgångsrikt projekt för minskat bilinnehav.

### 2.3.2 Styrning mot fordon med lägre klimatpåverkan

En annan möjlig väg för att minska klimatpåverkan kan vara att få till stånd ett skifte mot transportbränslen med lägre klimatpåverkan. Idag finns många prognoser för antalet elbilar i fordonsflottan år 2030 och framåt. En omvärldsanalys där 10 olika studier analyserats visar att prognoserna har en spridning från 2% till 30% elbilar i personbilsflottan år 2030 (Wisell et al. 2020).

Att erbjuda laddplatser för elfordon kan vara en åtgärd för att stödja omställningen till fossilfria transporter. Sedan 2020 finns genom EU-direktiv och svensk lagstiftning krav på förberedelse för eller uppförande av laddutrustning för elfordon vid nybyggnation (Boverket 2021b). I skriften "Ladda för framtiden – laddinfrastruktur för elfordon", som Sveriges Kommuner och Landsting tagit fram för att stödja kommuner i utvecklingen av laddinfrastruktur, poängteras att en stor del av laddbehovet för elbilar är vid hemmet och att kommuner behöver samverka med bostadsbolag, fastighetsägare m.fl. för att speciellt boende i flerbostadshus ska få tillgång till laddning (Sveriges Kommuner och Landsting 2017).

Undersökningar visar också att tillgången till privat laddplats eller annan möjlighet till laddning över natten kan vara en påverkande faktor för människors villighet att köpa en elbil (Patt et al. 2019). Just möjlighet till laddning hemma bedöms också kunna bli en mer avgörande faktor i framtiden då andra faktorer som pris, räckvidd och befintlighet av landningsplatser vid långväga resor bedöms bli mindre begränsande (ibid.).



## 2.4 Sammankoppling av klimatpåverkan från byggmaterial, energi till byggnader och transport

I föregående avsnitt har klimatpåverkan från byggnation, energi till byggnader och bränsleförbrukning för transport hanterats som separata områden. Samtidigt kan vägval inom ett område ha påverkan på andra delar av systemet. Nedan följer ett par exempel:

- Val av byggmaterial kan påverka energiförbrukningen i byggnaden: Studier visar att en viktig avvägning ligger i vilken lösning som ger lägst klimatpåverkan totalt, sett till både klimatpåverkan från framställning av material och energianvändning i byggnadens användningsfas (Wang et al. 2015; Görman & Tham Johansson 2019).
- Val av transportbränsle påverkar energiförbrukningen i byggnader: Med en förväntad elektrifiering av fordonsflottan bedöms det årliga nationella elbehovet för transporter öka med 600% till år 2045 (20–25 TWh år 2045, jämfört med 3 TWh år 2017) (Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA) 2019). En del av detta elbehov kommer behöva mötas vid byggnader, dvs. för elbilsladdning kopplat till bebyggelsen. På så sätt kopplas transportsektorns energibehov ihop alltmer med byggnaderna, vilket kräver en planering som kan möta dessa behov där de kommer att finnas i framtiden.

Denna typ av sammankopplingar visar på att en sänkning av den totala klimatpåverkan kräver ett helhetsperspektiv i stadsbyggnadsprocessen, så att förändringar inom ett område inte leder till ökade utsläpp inom ett annat.

## 2.5 Klimatpåverkan och klimatarbete i Malmö

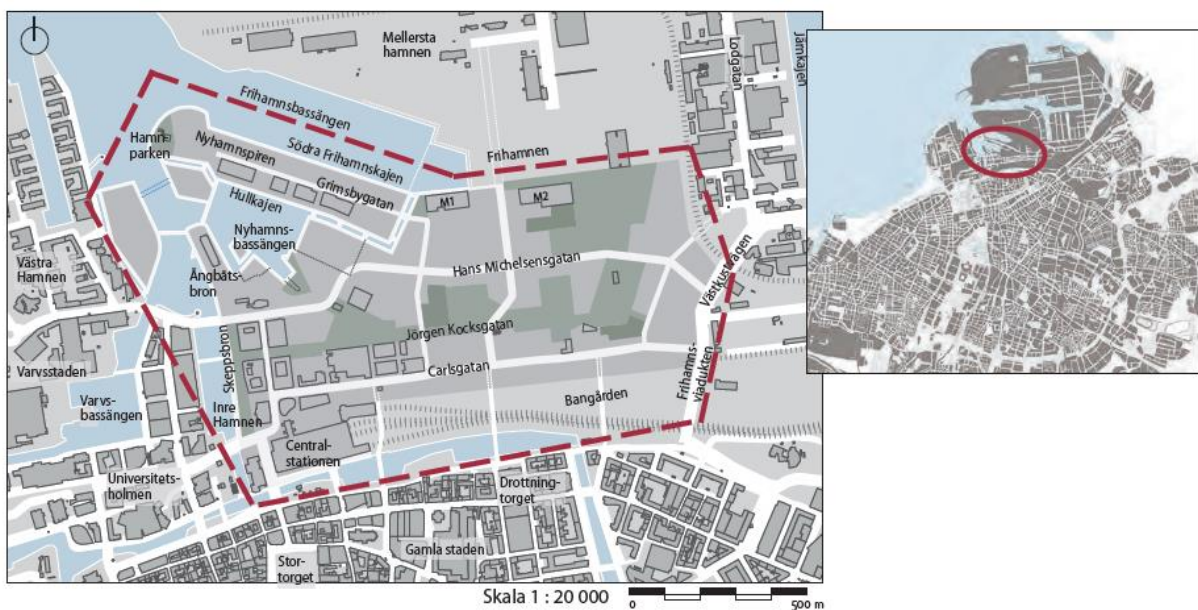
Malmö stads Miljöbarometer, som följer upp utsläppen av växthusgaser inom kommunens gränser, visar att "Industri och Energi" samt "Trafik" står för merparten av de klimatutsläpp som genereras i staden (Malmö stad 2021). Kommunen har ett övergripande mål om ett 100% förnybart energisystem år 2030 (Kommunfullmäktige Malmö stad 2020). Merparten av den el som förbrukas i staden importeras idag och Malmö stad har som mål att bli mer självförsörjande på el. I Malmö stads budget för 2021 konstateras också inom området "Stadsutveckling och klimat" att det för att reducera de klimatpåverkande utsläppen "krävs genomgripande förändringar i planeringen och byggandet av staden" (Kommunfullmäktige Malmö stad 2020, s.16). Staden ska bygga nya cykelstråk, påbörja minst en klimatneutral byggnation och trygga elförsörjningen med utbyggnad av till exempel solceller, för att nämna några av de insatser som planeras. Det finns även ett eget initiativ för klimatneutralt byggande, Lokal Färdplan Malmö (LFM30), där det övergripande målet är att Malmö ska ha en klimatneutral bygg- och anläggningssektor (LFM30 2021). Staden har ett väl utbyggt fjärrvärmenät och lokal värmeförsörjning från Sysavs avfallskraftvärmeverk, som producerar 60 % av stadens fjärrvärme (Sysav 2020). Staden har även planer på att utveckla djupgeotermi som ska kopplas till fjärrvärmenätet, där målsättningen är att bygga fem anläggningar med en effekt på 50MW vardera (E.ON 2021a).

I stadens trafik- och mobilitetsplan finns mål om en förändring av färdmedelsfördelningen, endast 30% av resorna ska genomföras med bil och fler resor ska i stället ske med cykel eller kollektivtrafik (Malmö stad 2016). Under 2020 antogs en ny policy och norm för mobilitet och parkering för Malmö (Malmö stad 2020). Med trafik- och mobilitetsplanens mål som bakgrund har man i den nya parkeringsnormen delat upp staden i olika zoner utifrån förutsättningarna för att bo i staden utan bil. Parkeringstalet är sedan bestämt baserat på zon, och det finns möjlighet att anlägga färre parkeringar om ytterligare mobilitetsåtgärder genomförs.

Malmö stad jobbar även för att stödja omställningen till en fossilfri fordonsflotta inom Region Skånes projekt Elbilslandet Syd, som bland annat hjälper fastighetsbolag och kommuner i Skåne med processer inom utbyggnad av laddinfrastruktur för elfordon (Elbilslandet Syd 2021).

## 2.5.1 Nyhamnen

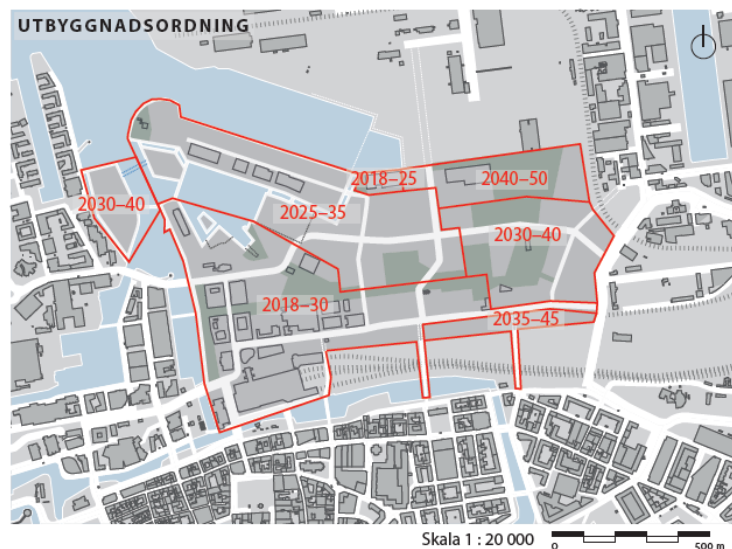
Genom uppbyggnaden av stadsdelen Nyhamnen ser Malmö stad en möjlighet att utvidga stadskärnan och omvandla gamla hamn- och industrimiljöer till en funktionsblandad, hållbar stadsdel. Totalt planeras 7 000 – 9 000 nya bostäder och 12 000 – 16 000 nya arbetsplatser (Malmö stad 2019).



Figur 1 Området som innefattas av översiktsplanen för Nyhamnen, med områdets avgränsning (till vänster) och läge (till höger). (Bild från Översiktsplan för Nyhamnen, med tillåtelse från Malmö stad.)

Översiktsplanen för området godkändes i december 2019. Uppbyggnaden kommer ske etappvis under flera decennier, med den sista etappen planerad 2040–50. Den planerade ordningen för bebyggelse för olika delar av planområdet visas i bilden till höger. Framtagning av detaljplaner pågår för delar av de "tidiga" områdena, dvs. områden som har start från 2018 i bilden till höger.

Områdets stationsnära läge anses ge goda förutsättningar för hållbart resande, och i planeringsriktlinjerna för stadsdelen anges att fotgängare, cyklister och kollektivtrafik ska prioriteras vid gatutformningen. Ett lågt bilinnehav ska möjliggöras för att minska behov av parkeringsplatser. I stadsdelen kommer två delar med något olika struktur skapas: den västra delen med tät innerstadskarakter där bebyggelsen i delar är väsentligt högre än 5–6



Figur 2 Planerad utbyggnadsordning för planområdets olika delar. (Bild från Översiktsplan för Nyhamnen, med tillåtelse från Malmö stad.)

våningar och den östra delen med lugnare kvarter, delvis lägre bebyggelse och flera större grönytor (Malmö 2019).

En viktig förutsättning för utvecklingen i Nyhamnen är att den också bör ske i linje med övergripande mål, planer och strategier för Malmö stad. Detta innebär att tex. målet om 100% förnybart energisystem och trafik- och mobilitetsplanens mål om förändring av färdmedelsfördelningen även är av betydelse i planeringen av denna stadsdel.

## 3 Modellering som verktyg för bedömning av klimatpåverkan

Den inledande bakgrunden har visat på den fysiska planeringens betydelse för städers klimatpåverkan. Det blir också tydligt att det finns en stor mängd valmöjligheter inom varje område, och att besluten inom respektive område påverkar andra områden på betydelsefulla sätt. För att hantera denna komplexitet i stadsbyggnadens beslutsprocess behövs ett genomtänkt sätt att närma sig dessa frågor. Modellering kan användas som verktyg för att simulera olika skeenden utan att åtgärder behöver införas i en fysisk miljö. På så sätt kan kunskap inhämtas om olika möjliga vägval för att stötta beslutsprocesser.

Vilken typ av modell som är bäst lämpad beror delvis på karaktären hos det system som ska modelleras och på vilket syfte man har med själva modelleringen. Inför den modellering som gjorts i detta arbete har efterforskningar gjorts om olika modelleringsmetoder och befintliga modelleringsverktyg som kan användas för att beräkna städers klimatpåverkan.

Nedan följer två avsnitt om modellering, en beskrivning av olika typer av modellering generellt och en genomgång av några idag befintliga modelleringsverktyg som används för modellering av energisystem och klimatpåverkan på stadsnivå. Ett avsnitt har även inkluderats om verktyg som snarare kan beskrivas som visualiserings- eller bokföringsverktyg för styrning på klimatområdet. Dessa har inkluderats trots att de inte är rena modelleringsverktyg eftersom de ansetts vara aktuella inom det område inom vilket arbetet genomförts.

I detta arbete har en dynamisk scenario-baserad modellering gjorts för att undersöka olika vägval i stadsbyggnadsprocessen. Modelleringen har utförts i verktyget Stella. Detta kapitel avslutas med ett kort resonemang om varför just denna metod valts, med bakgrund i den genomgång av modelleringsmetoder som görs nedan.

### 3.1 Några olika typer av modellering

#### 3.1.1 Dynamisk och statisk modellering

En dynamisk modell beskriver förändringen av ett system över tid. Den ger således en möjlighet att se och förstå systemets egenskaper baserat på hur det beter sig under den tidsperiod som modelleras. En statisk modell beskriver i stället ett system utan tidsvariation. Ur en sådan modell kan man få en ögonblicksbild av systemet, och få ut information som till exempel slutvärden, medelvärden osv. En sådan modell saknar dock den dynamiska modellens möjlighet att studera dynamiska beteenden i systemet. Fördelen med statiska modeller är att de oftast kräver enklare beräkningar än dynamiska. Det är möjligt att studera system med dynamiska egenskaper med hjälp av statiska modeller. I en sådan modell framgår dock ingen information om systemets dynamiska beteende i resultaten, utan endast en ögonblicksbild av systemet för den tidpunkt som modelleras. (Gustafsson et al. 1982).

En statisk modell för beräkning av klimatpåverkan från en stadsdel skulle till exempel kunna ge information om total klimatpåverkan vid en vis tidpunkt, och ett medelvärde för hur stora utsläppen är per år, men inte ge information om hur utsläppen ökar/minskar över tid och vilka trender som påverkat dessa utsläppsförändringar (vilket skulle kunna ses vara ett exempel på ett systems dynamiska beteende).

#### 3.1.2 Forecasting, backcasting och scenario-baserad modellering

Modellering av möjliga framtida utvecklingar av ett system kan göras på olika sätt, och med olika syften. Forecasting (på svenska prognostisering) görs med syftet att förutsäga den mest troliga framtiden, och baseras ofta på en förlängning av de beteenden och trender som kan ses i nuläget.

Backcasting (saknar svensk översättning) å andra sidan, utgår ifrån ett fast mål eller en önskad framtid, och utforskar möjliga vägar för att systemet ska nå målet (van Bers et al. 2016).

Scenario-baserad modellering ämnar utforska olika möjliga scenarier för framtida utveckling av ett system. Medan forecasting är begränsad till antaganden för den mest troliga utvecklingen, och backcasting begränsas av ett givet mål, ger den scenario-baserade modelleringen en möjlighet att studera alternativa utvecklingar som även leder fram till olika möjliga framtider. Utforskandet av sådana möjliga utfall kan ge viktig information om hur olika beslut som görs i nutid kan påverka den möjliga utvecklingen (ibid.).

### 3.1.3 Modellering inom System Dynamics

Inom vetenskapsgrenen *System Dynamics*, som tog sin start vid mitten av 1950-talet genom Jay W. Forrester, är ansatsen att hitta ett sätt att förstå beteendet hos system genom att modellera hur olika delar av systemet påverkar varandra över tid (MIT Sloan School of Management 2021). I praktiken genomförs modellering inom system dynamics först genom formulering av en dynamisk hypotes med hjälp av så kallad *causal loop modelling*, en slags konceptuell modellering där målet är att koppla ihop orsakssamband mellan olika delar av ett system. Detta följs av skapandet av en kvantitativ, matematisk modell för simulering (Agnew et al. 2019). Inom denna vetenskapsgren anses sådan modellering kunna ge en korrekt mental bild av skeenden som vi annars lätt misslyckas med att förutsäga, bland annat på grund av vår begränsade förmåga att förstå icke-linjära samband och hur de påverkar varandra över tid (Meadows 2008). Målet är ofta att urskilja så kallade hävstångspunkter (*leverage points*), ställen där en åtgärd påverkar ett system på ett omvälvande sätt tack vare återkopplingsmekanismer (Meadows 1999). Metoden har använts för att tex. hitta styrmedel som kan ha ett högt inflytande på de strukturer vi vill förändra i ett befintligt system (Sterman 2001). Metoden kan bland annat användas för scenariobaserad modellering.

## 3.2 Verktyg för modellering av stadens klimatpåverkan

Nedan presenteras verktyg som idag används för modellering av energisystem och/eller klimatpåverkan på stad-/stadsdelsnivå.

### 3.2.1 TIMES

Modelleringsverktyget TIMES har utvecklats i samarbetet Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) som skett genom Internationella energirådet. TIMES används för energisystemanalys, och kombinerar en teknisk ansats med en ekonomisk för att producera ett optimalt kostnadseffektivt energisystem. Verktyget utgår från scenarioanalys för att testa hur olika styrmedel påverkar vilken utformning av energisystemet som är mest kostnadseffektiv. Först tas ett referensscenario fram, där energisystemet optimeras utan styrmedel. Sedan testas ett scenario med styrmedel inkluderat, och därefter kan åtgärdens påverkan utvärderas (Loulou et al. 2005).

I TIMES utformas ett scenario med antaganden för både användarsidan och tillförselsidan. För användarsidan skapas en efterfråganskurva med antaganden om förväntad tillväxt av befolkning, BNP m.m. med hjälp av redan existerande modeller för detta. På tillförselsidan tas olika utbudskurvor fram, beräknas en förväntad tillgång på en specifik resurs till ett visst pris, vilket är baserat på bedömningar av både kumulativ och årlig maximal tillgång på olika resurser som gas, olja, tillgänglig mark för vindkraft, tillväxt av biobränslen m.m. I scenarioanalysen inkluderas även styrmedel som påverkar systemet, liksom tillgängliga tekniska lösningar som används för att omvandla de primära resurserna till energitjänster (ibid.).

TIMES har använts på global, nationell, regional och lokal nivå. Inom EU-projektet InSmart (Integrated Smart City Planning) har verktyget applicerats på stadsnivå för fyra europeiska städer. I processen

arbetade man nära med städernas beslutsfattare, både i framtagandet av de scenarier man modellerade och i analysen av resultaten. Ambitionen var att förbättra kommunikationen mellan modellerare och beslutsfattare, samt att kombinera kvalitativ och kvantitativ analys av hållbara energisystem (Simoes et al. 2018). Verktöget har även använts inom EU-projektet SureCity för att skapa en plattform som ska assistera planerare på stadsnivå att nå sina hållbarhetsmål, inom vilket den utvecklade stadsnivå-modellen har fått namnet TIMES-City (Pardo-Garcia et al. 2019).

### 3.2.2 LEAP

Verktöget LEAP, Low Emissions Analysis Platform (tidigare Long-range Energy Alternatives Planning system), är ett modelleringsverktyg för energisystemanalys och bedömning av klimatpåverkan. LEAP är utvecklat av Stockholm Environment Institute, och har använts av många länder för att skapa scenarier för de nationellt beslutade klimatåtaganden för att nå målen i Parisavtalet (Heaps 2020). LEAP är scenariobaserat och kan därför användas för att utvärdera hur olika styrmedel påverkar det framtida energibehovet och i förlängningen utsläpp av växthusgaser. Verktöget tar även ett integrerat grepp för att möjliggöra utredning av en kombination av flera styrmedel.

Med verktöget LEAP kan en modell byggas av ett energisystem som baseras på data för efterfrågan inom olika användarkategorier och data för växthusgasutsläpp från olika energislag. Verktöget kombinerar inbyggda data med användarens egna data, för att modellen ska formas till det specifika fall som användaren modellerar. Beräkningar sker för årsvisa tidssteg med en obegränsad tidshorisont, där den vanligaste tidsperioden är mellan 20 och 50 år (ibid.).

LEAP har också använts för modellering av energisystem på regional och lokal nivå, tex. i Madrid (García-Gusano et al. 2019), Sao Paulo (Collaço et al. 2019) och Ningbo (Yang et al. 2017). I Sverige har LEAP använts av Uppsala kommun för utveckling av en modell med syfte att beräkna och simulera kommunens energisystem och klimatpåverkan, samt att assistera beslutsfattande för att minska klimatpåverkan (Byfors & Sundberg 2014). Vid utvecklingen av Uppsalas modell har scenarioanalys använts både för att utvärdera påverkan från politiska beslut på nationell nivå och för att visa hur åtgärder hos aktörer på lokal nivå kan påverka energisystemet. I Uppsala kommuns modell inkluderades energiförbrukning för sju kategorier: hushåll, privat sektor, offentlig sektor, industri, jordbruk, transport och övrigt. Två referensscenarier togs fram, ett baserat på redan fattade beslut på nationell nivå och ett baserat på förslag under beredning när studien gjordes, samt ett aktörsscenario som speglar den förväntade utvecklingen vid införande av ett antal specifika åtgärder av lokala aktörer för att minska kommunens växthusgasutsläpp.

### 3.2.3 Stella

Verktöget Stella är utvecklat av företaget isee systems som skapar programvaror för dynamisk modellering baserad på system dynamics-metodik (isee systems 2021). Verktöget används för dynamisk modellering av system inom många olika discipliner.

I en studie av Feng et al. (2012) användes Stella för att bygga en modell för beräkning av framtida energiförbrukning och CO<sub>2</sub>-utsläpp för Beijing. I modellen inkluderades sektorerna transport, hushåll, service, jordbruk och industri. Befolkningsutveckling och förväntad ekonomisk utveckling inkluderades också i modellen.

Verktöget Stella har använts för modellering i detta arbete, och verktögets struktur och funktioner beskrivs därför vidare i metodkapitlet. I avsnitt 3.4 nedan behandlas valet av metod och hur det relaterar till olika typer av modellering.

### 3.3 Andra verktyg för styrning av klimatpåverkan på stadsnivå

För styrning mot lägre klimatpåverkan från städer och stadsdelar finns även andra icke-modellbaserade metoder. Några av dessa har ansetts vara värda att ta i beaktan för bakgrundsanalys, eftersom de ofta används för att uppfylla samma syfte som detta arbete är centrerat kring, dvs. för att utreda vilka åtgärder och vägval i stadsbyggnadsprocessen som har stor betydelse för städernas framtida klimatpåverkan. Nedan följer en genomgång av några av dessa:

#### 3.3.1 ClimateView

ClimateView är en programvara utvecklad med syftet att hjälpa städer förstå, visualisera och planera hur städer behöver förändras för att nå sina klimatmål. Bakgrunden är utvecklingen av Panorama, ett verktyg som utvecklades för att visualisera den nödvändiga klimatomställningen för Sverige på nationell nivå (Climate View AB 2020). Verktöget används nu av ett 20-tal städer i bland annat Tyskland, Storbritannien och Sverige.

#### 3.3.2 FutureproofedCities

Plattformen FutureproofedCities är ett onlineverktyg som möjliggör skapande och uppföljning av en klimatplan för en stad. Inom verktyget beräknas kostnad och klimatnytta för åtgärder, och man kan se hur detta påverkar stadens utsläpp över tid. Verktöget har ca 140 användarstäder i Europa (Futureproofed 2020).

#### 3.3.3 CityLab

Citylab är ett svenskt certifieringssystem utvecklat av Sweden Green Building Council (SGBC) för skapandet av stadsdelar som lever upp till nationella och globala hållbarhetsmål. Genom Citylab kan certifiering ske både av tidiga utföranden, som hållbarhetsprogram och handlingsplaner för stadsutvecklingsprojekt, och av färdiga stadsdelar i förvaltningsfasen (Sweden Green Building Council 2019).

### 3.4 Scenario-baserad dynamisk modellering i Stella

Valet av modelleringsmetod bör, som tidigare nämnts baseras både på karaktären hos det system som ska modelleras och på vilket syfte man har med själva modelleringen. För detta arbete har syftet varit att beräkna klimatpåverkan för en stadsdel över hela stadsdelens "livscykel". Av denna anledning, dvs. att den klimatpåverkan som beräknas sker kontinuerligt över en lång tidsperiod, gjordes bedömningen att dynamisk modellering på bästa sätt skulle bidra till att uppnå arbetets syfte.

Arbetet har också syftat till att testa olika möjliga vägval i stadsbyggnadsprocessen, för att se hur dessa vägval inverkar på stadsdelens totala klimatpåverkan. En sådan utredning handlar alltså inte om att bedöma vilken framtid som är mest trolig, vilket bedömts som en slags forecasting, eller att utifrån ett fast mål för mängden tillåten klimatpåverkan beräkna hur detta mål kan uppnås, vilket hade varit att arbeta enligt metoden backcasting. Metoden i detta arbete kan snarare definieras som en slags-scenariobaserad modellering, där olika möjliga vägval testas och beräkningarna i modellen görs för att bestämma vad stadsdelens totala klimatpåverkan skulle bli i det fall den väg som testas skulle väljas.

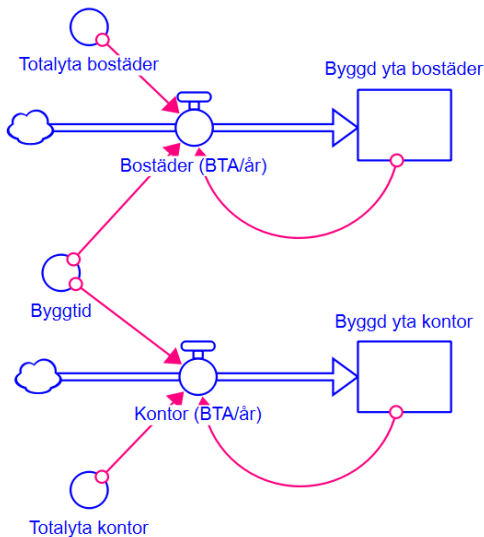
Valet av verktyget Stella gjordes av flera anledningar. Verktöget ansågs lämpligt för just scenario-baserad dynamisk modellering av anledningar som förtydligas i metodkapitlet nedan. Det bedömdes också vara passande för examensarbetets omfattning och detaljnivå.

## 4 Metod

Nedan följer en beskrivning av metoden för den modellering som gjorts i arbetet, samt valda avgränsningar och grundläggande beräkningar. Därefter beskrivs de vägval som undersökts med avseende på potentialen att minska klimatpåverkan. Slutligen beskrivs i korthet den studie som gjorts av befintlig litteratur inom stadsbyggnad och system dynamics.

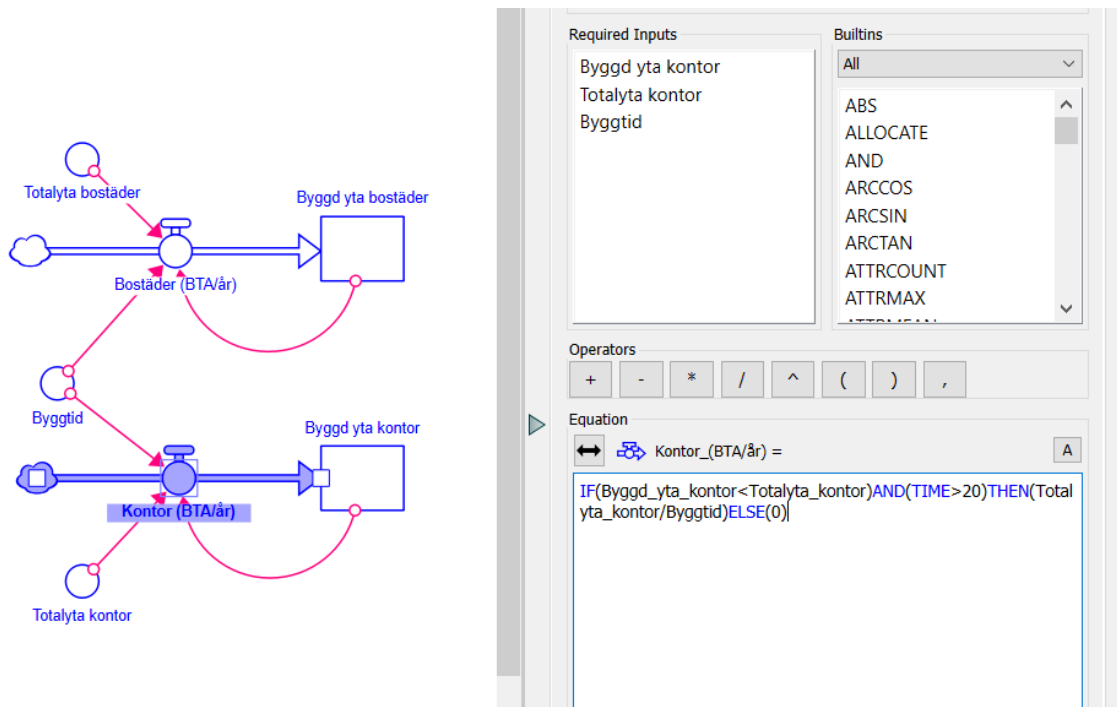
### 4.1 Modellering i Stella

I detta arbete har programmet Stella Architect använts för skapandet av den kvantitativa modellen.



Figur 3 Exempel på beräkning av byggd yta i Stella.

Verktöget är utvecklat av isee systems, ett företag som skapar programvaror för dynamisk modellering baserad på system dynamics-metodik (isee systems 2021). Utgångspunkten i programvaran är att en modell byggs för att simuleras över ett tidsintervall (vilket väljs av användaren). Figur 3 illustrerar ett exempel på hur systemet kan ritas upp i programmet. I programmet visas ett flöde (flow) med en pil med valvsymbol och ett lager (stock) som en rektangel. Cirklarna anger omvandlare (*converters*), som kan vara till exempel konstanter eller ekvationer som behövs för att bilda ett matematiskt samband. En röd pil anger ett samband mellan två punkter, till exempel betyder en röd pil från en omvandlare till ett flöde att ekvationen som beskriver flödet beror av omvandlarens värde. En streckad cirkel eller rektangel anger att parametern hämtats från en annan sektion i modellen där den tidigare definierats.



Figur 4 I programmets ekvations-läge definieras de matematiska sambanden med stöd av den uppritade modellen.



I ekvations-läget (se Figur 4) specificeras de matematiska sambanden baserat på den uppritade modellen. I exemplet i figur 4 definieras mängden byggd kontorsyta per år som den totala mängden som ska byggas, dividerat med byggtiden (vilket alltså ger en linjär ökning av byggd yta över hela byggtiden). Modellen kan köras först när alla uppritade samband har definierats matematiskt.



Figur 5 Omvandlare i två lägen, till vänster med förinställt värde och till höger där värdet har justerats med hjälp av direkt variering under simulering.

Eftersom verktyget har ett dynamiskt upplägg körs modellen då över det tidsintervall som definierats. När simuleringen gjorts finns möjligheten att analysera systemets status i varje tidssteg fram till sluttidpunkten. Programmet har även en funktion som tillåter direkt variering av värden som finns i en omvandlare (se Figur 5), vilket gör att en slags "känslighetsanalys" för dessa värden kan göras enkelt i realtid. Detta skapar en möjlighet att snabbt få en uppfattning om hur systemet ändrar sig med olika input-faktorer.

Verktyget används för modellering inom många olika discipliner, och har därför ett startläge som antingen kräver import av en befintlig modellfil, eller att användaren helt bygger upp samband och beräkningar från grunden. En av fördelarna med detta är att verktyget tillåter ett modellbygge som helt är anpassat efter det system man vill modellera, samt möjligheten att designa om sambanden på egen hand. Eftersom alla samband är visuellt synliga i modelleringsläget, får användaren en överblick över hur systemet hänger samman. Programmet håller även koll på vilka parametrar som förväntas vara inkluderade i en specifik beräkning (baserat på hur de röda pilarna är ritade). Eftersom programmet är uppbyggt för dynamisk modellering över ett tidsintervall lämpar det sig väl för modellering av scenarier där användaren vill se hur olika kvantiteter förändras över tid. Eftersom programmet är utvecklat för användning i system dynamics-metodiken finns även en möjlighet att inkludera återkopplingsmekanismer i beräkningen på ett användarvänligt sätt.

Modellen har byggts från grunden i detta arbete, vilket betyder att en mängd avgränsningar har gjorts, och att data för beräkningar har inhämtats från olika källor. Genom valet av fallet Nyhamnen har delar av beräkningarna baserats på uppgifter om hur stadsdelen planeras, så som mängden bebyggelse för bostäder och kontor, ungefärliga byggnadshöjder m.m. Andra delar är baserade på uppgifter som gäller staden Malmö som helhet, så som invånarnas resvanor och emissionsfaktor för fjärrvärme. Nedan följer en genomgång av viktiga avgränsningar och underlag för beräkningar som används för att utföra modelleringsarbetet.

## 4.2 Avgränsningar

Modelleringsarbetet har inkluderat klimatpåverkan från produktion av byggmaterial, energiförbrukning i byggnader samt bränsleförbrukning från transporter. Valet av avgränsning bygger på den kunskap som redovisats i bakgrundsavsnittet, alltså att områdena (1) står för en stor del av de totala territoriella utsläppen i Sverige (2) ofta prioriteras av kommuner då de anses vara av betydelse i stadsplaneringen som kommunerna själva har rådighet över (3) att betydelsefulla lock-in effekter kan uppstå om dessa prioriteringar inte görs rätt i planering och uppbyggnad av staden.

Syftet med detta arbete har varit att undersöka den klimatpåverkan som genereras över en stadsdels hela "livslängd", och alltså att göra en slags "livscykelanalys" för en stadsdel, för att kunna studera storleken på utsläppen i olika faser och för att se vilken typ av verktyg som bäst passar en sådan beräkning. Eftersom det inte finns någon exakt definition av en stadsdels livslängd hanteras just valet av tidsperiod som en egen del i beräkningarna, vilket beskrivs närmare under rubriken Tidsperiod i avsnitt 4.4. Testning av vägval.

De vägval som ansetts viktiga att undersöka har varit de som genomförs i det tidiga planerings- och byggnadsskedet, medan den klimatpåverkan som vägvalen ger upphov till har beräknats för hela stadsdelens "livslängd". Till exempel: En åtgärd som byggandet av en bilparkering sker vid upprättandet av stadsdelen, men klimatpåverkan från fordon som utnyttjar parkeringen sker under hela stadsdelens livslängd.

Samtliga beräkningar har gjorts på årsbasis, vilket innebär att klimatpåverkan adderas i beräkningarna som de totala utsläpp som sker varje år från respektive område. Detta innebär också att de använda emissionsfaktorerna för till exempel el, värme och transporter är medelvärden över året och inte förändras beroende på när under året eller över ett dygn som energin används. I verkligheten kan emissionsfaktorer för produktion av el och värme variera, vilket innebär att en högre tidsupplösning i beräkningarna möjligen skulle gett andra resultat. I detta arbete har årsbasis för beräkningarna använts för att ge arbetet en rimlig omfattning och tidsåtgång.

#### 4.2.1 Avgränsning för nybyggnation av hus

Utvecklingen av en ny stadsdel, såsom Nyhamnen, kräver givetvis en planering i relation till den omgivande staden. I ett arbete som detta behövs avgränsning för vilka utsläpp som ska räknas till just denna stadsdel. Vad gäller byggmaterial och energiförbrukning i byggnader kan avgränsningen göras relativt enkelt genom att inkludera klimatpåverkan som genereras av de byggnader som planeras inom planområdet. Beräkning av klimatpåverkan från byggnation inkluderar utsläpp från produktskede (råvaruförsörjning, transport och tillverkning), transport till byggplats samt bygg- och installationsprocesser, för de byggmaterial som används vid uppförandet av den planerade nya bebyggelsen i området. Energiförbrukning i användningsfasen beräknas baserat på mängden bebyggelse, vilket alltså innebär att klimatpåverkan från energiförbrukning ökar i takt med att stadsdelen byggs upp och bebyggelsen börjar användas.

#### 4.2.2 Avgränsning för energi till byggnader

De olika vägval som testats är utvalda för att de bedömts ha en potential att påverka stadsdelen totala klimatavtryck på ett betydande sätt. Vilka vägval som utretts presenteras under 4.4 Testning av vägval. En faktor med möjlig inverkan på klimatpåverkan är byggnadernas energiprestanda. Ett vägval som diskuterades i arbetets inledning var byggande för att uppnå till exempel "passivhus"-standard, vilket i Sverige kan beräknas med kravspecifikationer från Forum för Energieffektivt Byggnade (FEBY 2019). Efter genomgång av dessa krav och jämförelse med de genom lagkrav som ställs på nya byggnaders energiprestanda via BBR konstaterades att skillnaden mellan lagkrav och passivhuskrav idag är mycket liten. Efter överläggning med energikunniga på IVL togs därför beslutet att utesluta beräkningar gällande energiprestandakrav till förmån för andra beräkningar inom områden som idag är mindre utforskade och där branschen inte bedömts ha kommit lika långt gällande åtgärder för att minska klimatpåverkan, till exempel val av byggmaterial och planering av transport.

#### 4.2.3 Avgränsning för transporter

Vad gäller transporter blir frågan om avgränsning mer komplex, eftersom transporter som sker i relation till den nya bebyggelsen inte endast sker inom området. I denna modell har klimatpåverkan från transporter beräknats baserat på två grupper av människor, *boende* och *besökare*, där antalet boende är baserat på mängden planerade bostäder och antalet besökare är baserat på mängden planerade kontor. För de boende har samtliga vardagsresor inkluderats medan endast de resor som görs till stadsdelen är inkluderade för besökarna, dvs. arbetspendling till och från kontor. Modellen har utformats så med syftet att inkludera de vägval som är möjliga att påverka i stadsbyggnadsprocessen, där antagandet är att alla dessa resor kan påverkas och därför bör inkluderas. Genomfartstrafik som sker utan annan koppling till stadsdelen har inte inkluderats för beräkning, vilket i korthet kan

motiveras med att det finns en stor begränsning för vad åtgärder på stadsdelsnivå kan göra för att påverka dessa resor, och att detta har ansetts vara något som bör analyseras och beräknas för staden som helhet snarare än för enskilda stadsdelar.

Byggande och drift av transportinfrastruktur står enligt Boverket för 5 till 10 % av transportsektorns totala utsläpp (Boverket 2020c). För detta arbete gjordes valet att inte inkludera utsläpp kopplade till byggande och drift av infrastruktur i modellen. Anledningarna till detta var dels att 5–10% ansågs vara en förhållandevis liten andel av utsläppen, dels att beräkningarna bedömdes bli tidskrävande i relation till hela arbetets omfattning. Värt att nämna är dock att Trafikverket ser klimatpåverkan från infrastruktur som betydande och på nationell nivå driver arbete med att ställa klimatkrav längs hela kedjan för byggande, drift och underhåll av infrastruktur (Trafikverket 2016). Det är därför möjligt att inkludering av klimatpåverkan från transportinfrastruktur, och eventuella vägval för att påverka denna, skulle kunna vara en värdefull vidareutveckling av modellen för framtida studier.

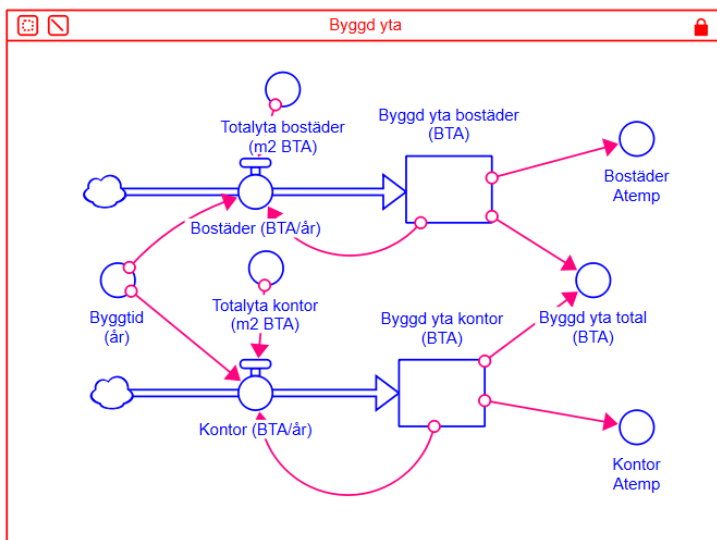
### 4.3 Grundläggande beräkningar och data

Beräkningar av klimatpåverkan har gjorts i enheten koldioxidekvivalenter (kg CO<sub>2</sub>e), vilket är standardenheten för miljöpåverkanskategorin klimatpåverkan enligt internationell standard för livscykelanalys (Larsson et al. 2016). Genom att alla klimatpåverkande gaser räknas om till en mängd koldioxid med motsvarande global uppvärmningspotential (Global Warming Potential, GWP) kan alla klimatpåverkande utsläpp samlas under en enhet.

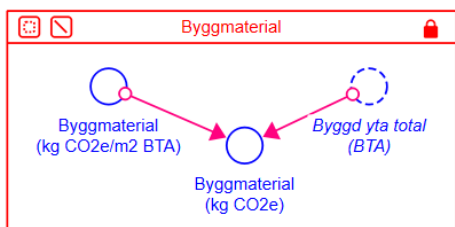
Nedan presenteras grundläggande beräkningsmetodik och de modellsektioner som skapats i den utformade Stella-modellen. Använda parametrar och värden som inte redovisas i texten återfinns i tabell i Bilaga 2.

#### 4.3.1 Grundläggande beräkningar och modellsektioner för byggnation

För uppbyggnaden av staden har klimatpåverkan baserats på mängden planerad bebyggelse och data för klimatpåverkan från byggmaterial. Mängden planerad bebyggelse är baserat på uppgifter i översiktsplanen för Nyhamnen, liksom byggnationstiden som planeras ske etappvis med de sista etapperna planerade år 2040–2050 (Malmö stad 2019). Byggnationstakten har antagits vara konstant över hela byggnationsperioden. I figur 6 presenteras sektionen "Byggd yta" i modellen, som beräknar utbyggnaden av stadsdelens bebyggelse i antal BTA för både bostäder och kontor.



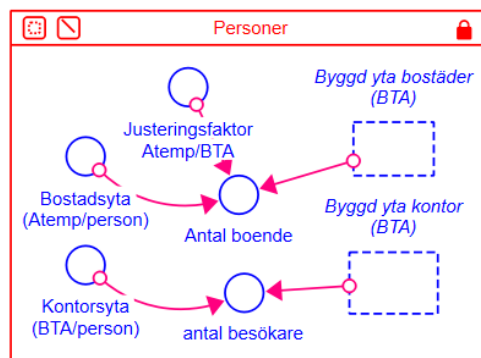
Figur 6 Modellsektion för byggd yta, kontor och bostäder.



Figur 7 Modellsektion för klimatpåverkan från byggmaterial.

Antalet boende i området är baserat på genomsnittlig boarea per person för bostadsrätter och hyresrätter i Sverige (Statistiska centralbyrån 2021b). Antal besökare är baserat på beräknat antal arbetsplatser via översiktsplanen för Nyhamnen (Malmö stad 2019). I figur 8 presenteras sektionen som beräknar antalet personer i området. Antalet boende och besökare används senare för att beräkna transporter kopplat till stadsdelens bebyggelse.

För byggmaterial är klimatpåverkan baserat på livscykelanalysdata för byggmaterial som tillhandahållits av IVL. I figur 7 presenteras sektionen för beräkning av klimatpåverkan från byggmaterial.

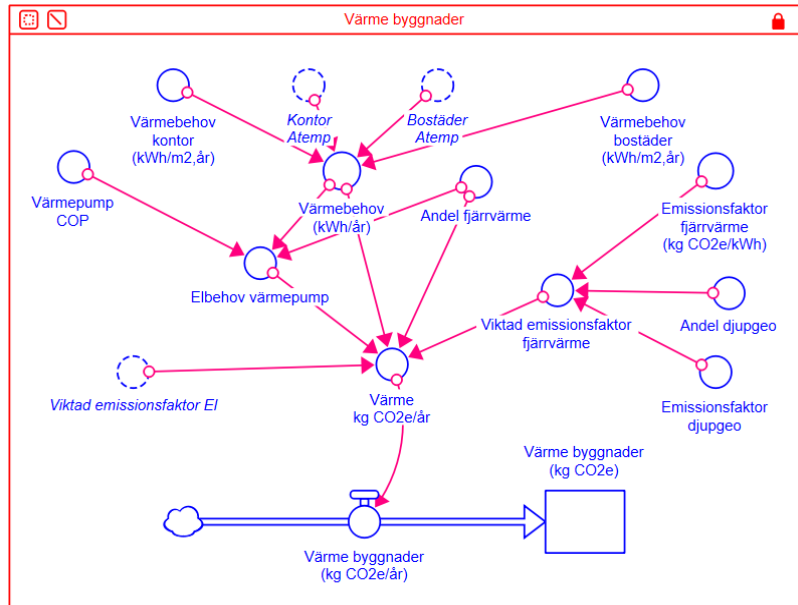


Figur 8 Modellsektion för antal boende och besökare i området.

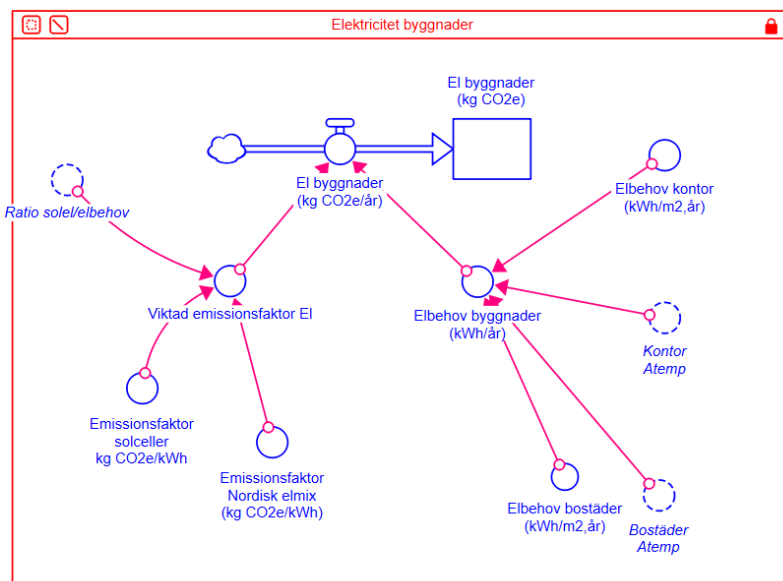
### 4.3.2 Grundläggande beräkningar och modellsektioner för energi till byggnader

Energiförbrukning från byggnader i form av el och värme har beräknats med utgångspunkt i mängden bebyggelse, vilket innebär att energiförbrukningen i stadsdelen ökar successivt i takt med att stadsdelen byggs upp. El- och värmebehoven för byggnaderna (både kontor och bostäder) är ansatta efter överläggning med energikunniga på IVL.

I figur 9 visar sektionen i modellen som beräknar klimatpåverkan från värme till byggnaderna. Värmebehovet är beräknat baserat på mängden byggd yta. I värmesektionen finns möjligheten att variera värmelösningen från fjärrvärme till en viss andel värme genererad med värmepump. Sektionen inkluderar även möjligheten att introducera en andel djupgeotermi i värmeproduktionen till fjärrvärmesystemet.



Figur 9 Modellsektion för värme i byggnader.



Figur 10 Modellsektion för elektricitet till byggnader.

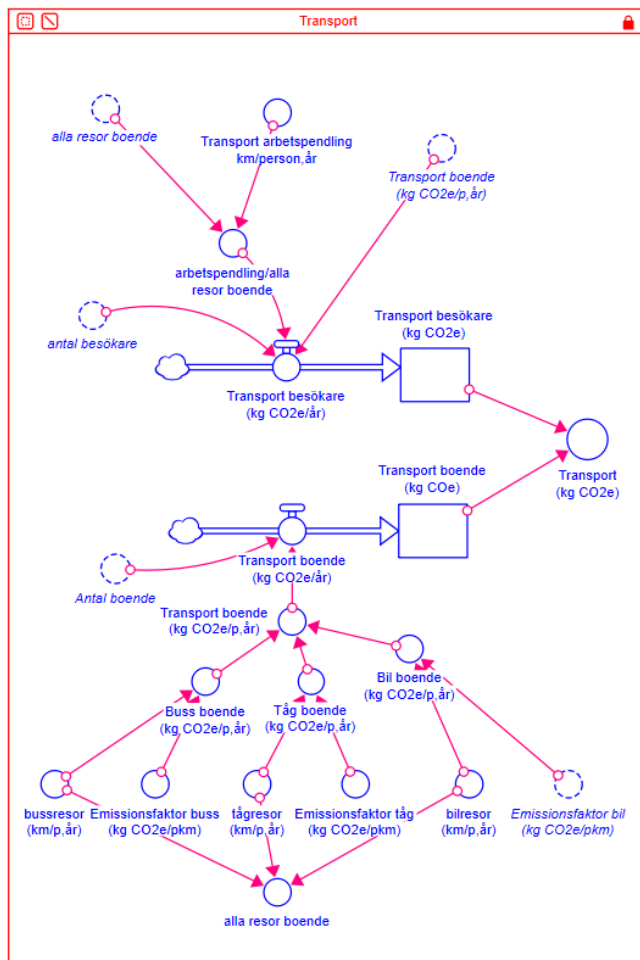
Sektionen i figur 10 beräknar klimatpåverkan från behovet av elektricitet i byggnaderna. Detta inkluderar hushålls- och fastighetsel för bostäder, samt verksamhets- och driftsel för kontor. Emissionsfaktorn för el är viktad baserad på mängden solet som kan produceras lokalt (se sektion för beräkning av solet under 4.4 Testning av vägval). Klimatpåverkan från resterande mängd el är beräknad baserad på emissionsfaktor för nordisk elmix som tillhandahållits av IVL.

Klimatpåverkan från el till transporter har ej inkluderats i

denna sektion, då denna är placerad i sektionen för transporter. Vid beräkning av elektricitet som produceras med solceller har dock elbehovet för laddning av elbilar för boende inkluderats, detta eftersom elektricitet till fordon som laddas i anslutning till en byggnad påverkar byggnadens totala elbehov och därmed även påverkar hur stor andel av det totala elbehovet som kan mötas med lokal solet.

### 4.3.3 Grundläggande beräkningar och modellsektioner för transporter

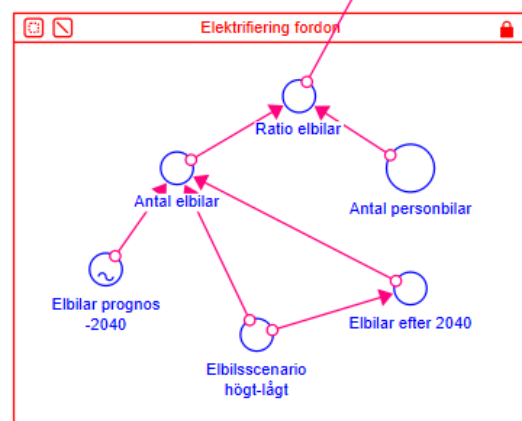
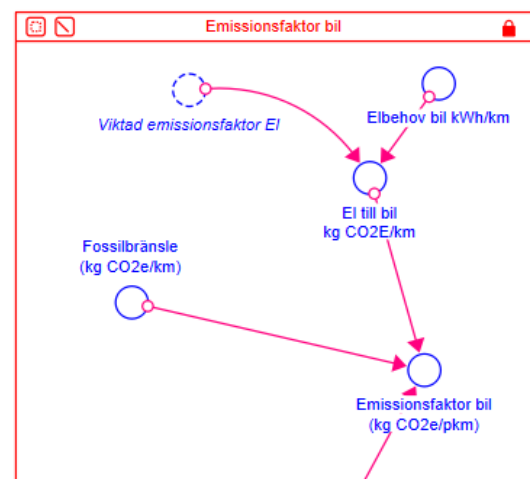
I figur 11 presenteras sektionen som beräknar klimatpåverkan från transporter, inkluderat buss, tåg och biltrafik för både boende och besökare. För besökare inkluderas endast arbetspendling, medan samtliga vardagsresor inkluderas för de boende. Emissionsfaktor för Skånes busstrafik är hämtade från Naturvårdsverkets beräkningsverktyg för transportutsläpp (Naturvårdsverket 2021a). Emissionsfaktor för pendeltåg har tillhandahållits av IVL.



Figur 11 Modellsektion för klimatpåverkan från transport.

För elektrifieringstakten av personbilsflottan har en elbilskvot räknats fram som antalet elbilar genom antalet personbilar totalt. Antalet personbilar totalt har beräknats baserat på den förväntade befolkningsökningen (Statistiska centralbyrån 2018), med antagandet att antalet personbilar per person i Sverige kommer vara konstant över de kommande decennierna. Denna metod för att prognostisera antalet personbilar är baserad på Trafikverkets arbete med verktyget Sampers (Trafikverket 2020).

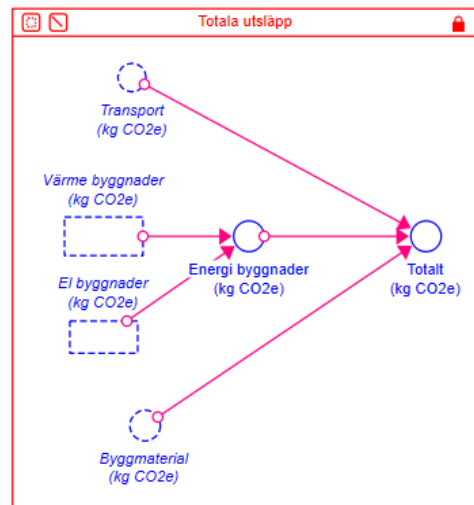
I figur 12 presenteras beräkning av emissioner från biltrafik. Bränsleförbrukningen i personbilsflottan har förenklats till två fordonstyper: fossilbränsle drivena bilar och elbilar. För de fossilbränsle drivena bilarna har ett snittvärde på emissionsfaktor för diesel- och bensinbilar beräknats baserat på siffror från Naturvårdsverkets beräkningsverktyg för transportutsläpp (Naturvårdsverket 2021a), medan utsläpp från elbilar har beräknats utifrån genomsnittlig elförbrukning i kWh per km.



Figur 12 Modellsektion emissionsfaktor för bil och elektrifiering av fordonsflottan.

#### 4.3.4 Beräkning av totala utsläpp

Slutligen beräknas de totala utsläppen (se figur 13) genom en aggregering av de utsläpp som beräknats i sektionerna för transport, värme, elektricitet och byggmaterial.



Figur 13 Modellsektion för total klimatpåverkan

#### 4.3.5 Antaganden för grundscenariot

Till en början har total klimatpåverkan från byggmaterial, energi till byggnader och transport beräknats för ett grundscenariot. Följande antaganden har gjorts för grundscenariot:

- Ett medelvärde för klimatpåverkan för vanligt förekommande betong-byggsystem har använts, vilket bedömts som ett passande business-as-usual-fall för modellen efter överläggning med IVL.
- Hela värmebehovet för stadsdelen försörjs med fjärrvärme. Klimatpåverkan för fjärrvärmerna är beräknad med emissionsfaktorn för residualmixen i Malmös fjärrvärme år 2020 (E.ON 2021b).
- Hela elbehovet för stadsdelen försörjs med el som importeras till stadsdelen. Klimatpåverkan beräknas därför med en emissionsfaktor för nordisk elmix som tillhandahållits av IVL.
- Det genomsnittliga antalet transportkilometer med buss, tåg och bil för boende, samt genomsnittlig reslängd för arbetspendling för besökare, har baserats på resvaneundersökningar som gjorts för Malmö kommun (Region Skåne & Malmö stad 2019).
- Elektrifieringstakten för fordonsflottan har baserats på IVL:s långtidsbedömning av vägfordonsflottan, där ca 17% av bilflottan består av elbilar år 2030 (Wisell et al. 2020).

## 4.4 Testning av vägval

För att besvara frågeställningen om vilka vägval som har störst effekt på klimatavtrycket har en testning av olika vägval genomförts med hjälp av den utformade Stella-modellen. Resultaten för de olika vägvalen har sedan jämförts med resultaten för grundscenariot, vilket ger en bedömning av vilken skillnad i klimatpåverkan som vägvalen kan generera. Nedan beskrivs de testade vägvalen.

### 4.4.1 Byggmaterial

Utvärdering av val av byggmaterial har gjorts genom beräkning med det byggsystem som ger lägst klimatpåverkan enligt KTH, IVL och Sveriges Byggindustriers studie av fem olika byggsystem (Erlandsson et al. 2018). Byggsystemet har en massiv trästomme i korslimmat trä, och är baserat på en konstruktionslösning som kan anses representativ för en träkonstruktion för flerbostadshus i storlek ca 2500 BTA. De olika byggsystemen antagits ha samma energiprestanda, vilket innebär att mängden förbrukad energi för el och uppvärmning inte varierats när ett annat byggsystem testats.

### 4.4.2 Andel värmepump i värmeförbrukningen

I grundscenariot beräknas hela stadsdelens värmebehov försörjas med fjärrvärme. Ett vägval som testats är att i stället låta en del av värmebehovet försörjas med hjälp av lokala bergvärmepumpsanläggningar. För en sådan lösning beräknas klimatpåverkan baserat på värmepumpens elförbrukning för att möta behovet, med emissionsfaktorn för el från nordisk elmix. Värmepumpens elförbrukning har antagits vara värmebehovet per  $m^2 Atemp^2$  för fjärrvärmeuppvärmd yta dividerat med 2,6, i enlighet med Boverkets föreskrifter för viktning vid energiberäkningar (Boverket 2020a).

### 4.4.3 Djupgeotermi

Utvärdering av effekten av djupgeotermiutveckling i Malmö har bedömts baserat på kapaciteten från samtliga planerade anläggningar, totalt 250 MW som kan ge 900 GWh värme per år (motsvarande ca 50% av Malmös värmebehov) (E.ON Energilösningar 2020). Åtgärden har därför beräknats med en viktad emissionsfaktor där 50% av värmen kommer från djupgeotermi och 50% kommer från förbränning av avfall samt spillvärme.

Då ingen emissionsfaktor kunnat anges för Malmös potentiella produktion har en emissionsfaktor för djupgeotermi från en fallstudie i Skottland av McCay et al. (2019) använts. Flera osäkerheter finns kopplat till emissionsfaktorn, något som diskuteras vidare avsnittet Osäkerheter i resultatkapitlet.

---

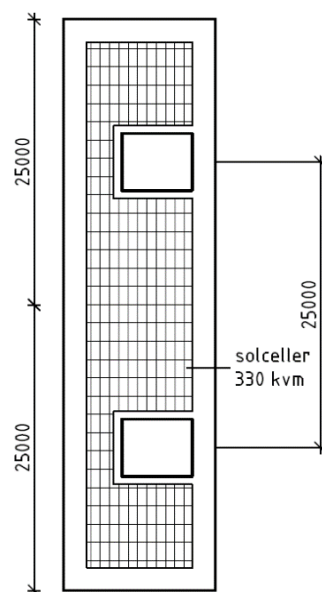
<sup>2</sup> Atemp är den invändiga arean för varje våningsplan som värms upp till mer än 10°C.



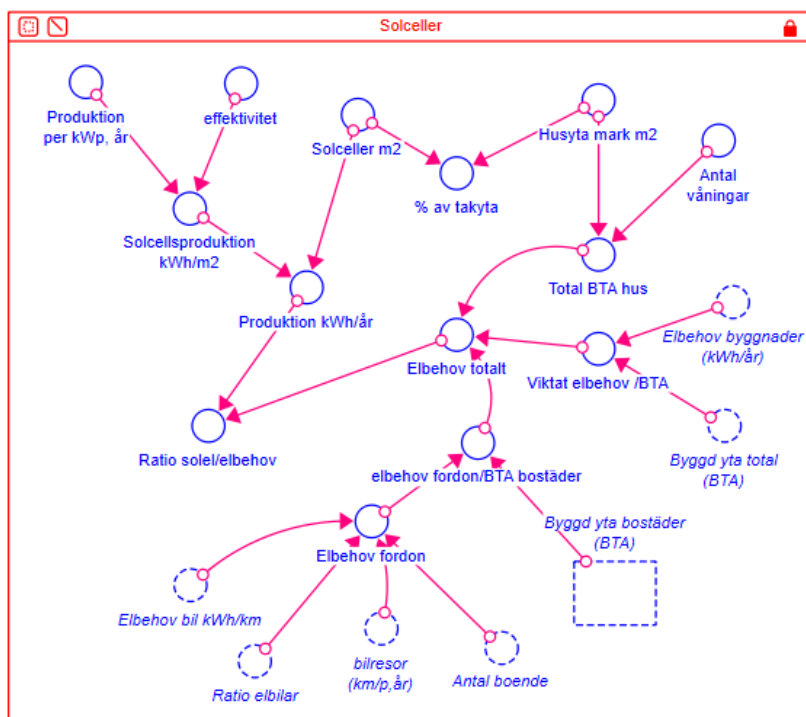
#### 4.4.4 Solceller

Potentialen för lokal elproduktion från solceller har beräknats baserat uppskattning av mängd solceller som kan placeras på ett typhus, framtaget med assistans av arkitekt Katrin Johansson<sup>3</sup>. Typhuset kan ha 51% av takytan täckt av solceller, när hänsyn tagits till säkerhetsavstånd till kanter, hisstoppar m.m. Produktionen för svenska förhållanden antas vara 1000 kWh per kWp<sup>4</sup> och år (Bernardo 2021). Emissionsfaktorn för solceller är baserad på LCA-data från Vattenfall (Vattenfall u.å.).

För anläggning av solceller har en ytterligare variabel testats, nämligen det genomsnittliga antalet våningar i husen. Denna undersökning har gjorts med antagandet att högre hus ger högre antal m<sup>2</sup> Atemp per m<sup>2</sup> takyta, vilket skulle innebära att en lägre andel av byggnadens elbehov kan mötas med el från solceller. Antagandet är dock att den totala mängden byggd BTA i stadsdelen hålls konstant.



Figur 14 Typhus med solceller på taket. (Bild: Katrin Johansson)



Figur 15 Modellsektion för produktion av el från solceller.

Till vänster i figur 15 presenteras sektionen som beräknar mängden solceller som kan anläggas på typhusets tak. I sektionen beräknas produktionen från solcellerna baserat på mängden takyta och elbehovet baserat på antalet BTA. Elbehovet inkluderar i detta fall alltså även el till fordon för boende. Antalet våningar påverkar mängden BTA för typhuset, vilket i förlängningen påverkar elbehovet och således andelen av elbehovet som kan täckas av producerad solet.

#### 4.4.5 Bilfri stadsdel

Som tidigare nämnts finns stora svårigheter med att dra generella slutsatser om hur mobilitetsåtgärder i praktiken påverkar färdmedelsfördelning och i förlängningen klimatpåverkan. Samtidigt finns exempel på områden som planerats som bilfria där andelen personkilometer som genomförs med bil är betydligt lägre än för genomsnittet, och för denna modellering har data baserat på ett sådant fall använts.

<sup>3</sup> Katrin Johansson arkitekt SAR/MSA, anställd på FOJAB arkitekter, via e-post den 17 februari 2021.

<sup>4</sup> kWp står för kilowatt peak och är solcellsanläggningens topp effekt vid standardtestförhållanden.

Fallet Stellwerk 60 är ett bostadskvarter i Köln i Tyskland på 450 lägenheter (ca 1500 invånare) som planerats och marknadsförts som bilfritt från start. Kvarteret har ett p-tal på 0,26 parkeringsplatser/lägenhet, och har (i likhet med Nyhamnen) en väldigt god anknytning till kollektivtrafik med gångavstånd till hållplats för stadståg, spårvagn och buss. Biltrafik är förbjudet på alla kvartersgator och ett parkeringshus har byggts i utkanten av området, där samtliga parkeringsplatser och även bilpoolsplatser finns (Roth et al. 2018). Vid en utvärdering av projektet undersöktes färdmedelsfördelningen i personkilometer, där resultatet visade en betydligt lägre andel bilresor än för stadens genomsnitt. För denna studie har färdmedelsfördelningen för Stellwerk 60 omsatts som Nyhamnens potentiella färdmedelsfördelning vid planering med låga p-tal och marknadsföring som bilfri stadsdel. Färdmedelsfördelningen för Stellwerk 60 beräknar all kollektivtrafik sammanslaget, och för Nyhamnen har omräkning gjorts så att den procentuella andelen kollektivtrafik totalt motsvarar den för Stellwerk 60, samtidigt som fördelningen mellan tåg och buss antas vara den samma som i Malmö idag.

#### 4.4.6 Laddinfrastruktur

Åtgärder kopplat till laddinfrastruktur och dess inverkan på klimatpåverkan ger specifikt svåra förutsättningar för beräkningar. Som tidigare nämnts finns många olika prognoser för elektrifieringen av fordonsflottan. Drivkraften för en stor satsning på utbyggnad av laddinfrastruktur skulle vara att potentiellt snabba på omställningen av fordonsflottan, då studier visar att tillgång till laddplats kan ha en positiv inverkan på dessa beslut (se avsnitt *Styrning mot låg klimatpåverkan från transporter* i bakgrundkapitlet). Samtidigt finns en stor osäkerhet i hur stor denna påverkan är och hur den i så fall bör beräknas.

Laddinfrastrukturens inverkan på andelen elbilar har därför beräknats med ett stort osäkerhetsintervall. Den lägsta effekten beräknas med standardscenariot för elektrifiering från IVL (se beskrivning i *Grundläggande beräkningar och data*), vilket alltså innebär att laddinfrastruktur inte ger någon ökad elektrifiering i just denna stadsdel jämfört med övriga landet och staden. Den högsta effekten ger en andel elbilar motsvarande en prognos från Power Circle, som ser en snabb elektrifiering jämfört med många andra prognoser. Enligt denna prognos är ca 30% av bilarna personbilsflottan elbilar vid år 2030 (Wisell et al. 2020). Denna prognos är i IVL:s omvärldsanalys den mest optimistiska av de 10 som analyserats.

#### 4.4.7 Tidsperiod

En viktig del av studien har också varit att undersöka hur tidsperioden påverkar resultaten. Detta gjordes på två olika sätt:

- En undersökning har gjorts av hur definitionen av byggnaders "livslängd" påverkar resultaten, dvs. hur förhållandet mellan olika klimatpåverkansområden förändras beroende på vilken tidsperiod som beräknas.
- En jämförelse gjordes mellan två delområden inom stadsdelen (motsvarande en detaljplan med bostäder och kontor på totalt 110 000 BTA), där den ena börjar byggas år 2020 och den andra år 2040. I jämförelsen beräknades klimatpåverkan från transportsektorn både för grundscenariot och för om området planeras enligt vägvalet "bilfri stadsdel" som beskrivits ovan. Syftet med undersökningen var att se om vägvalens effekt på klimatpåverkan förändras beroende på när delområdet börjar byggas, till exempel till följd av att fordonsflottan förväntas bestå av en högre andel elbilar längre fram i tiden.

Dessa två undersökningar har båda gjorts baserat på ett mindre delområde, där byggtiden för området har beräknats som 4 år.

## 4.5 Studie av återkopplingsmekanismer för stadsbyggnad inom system dynamics

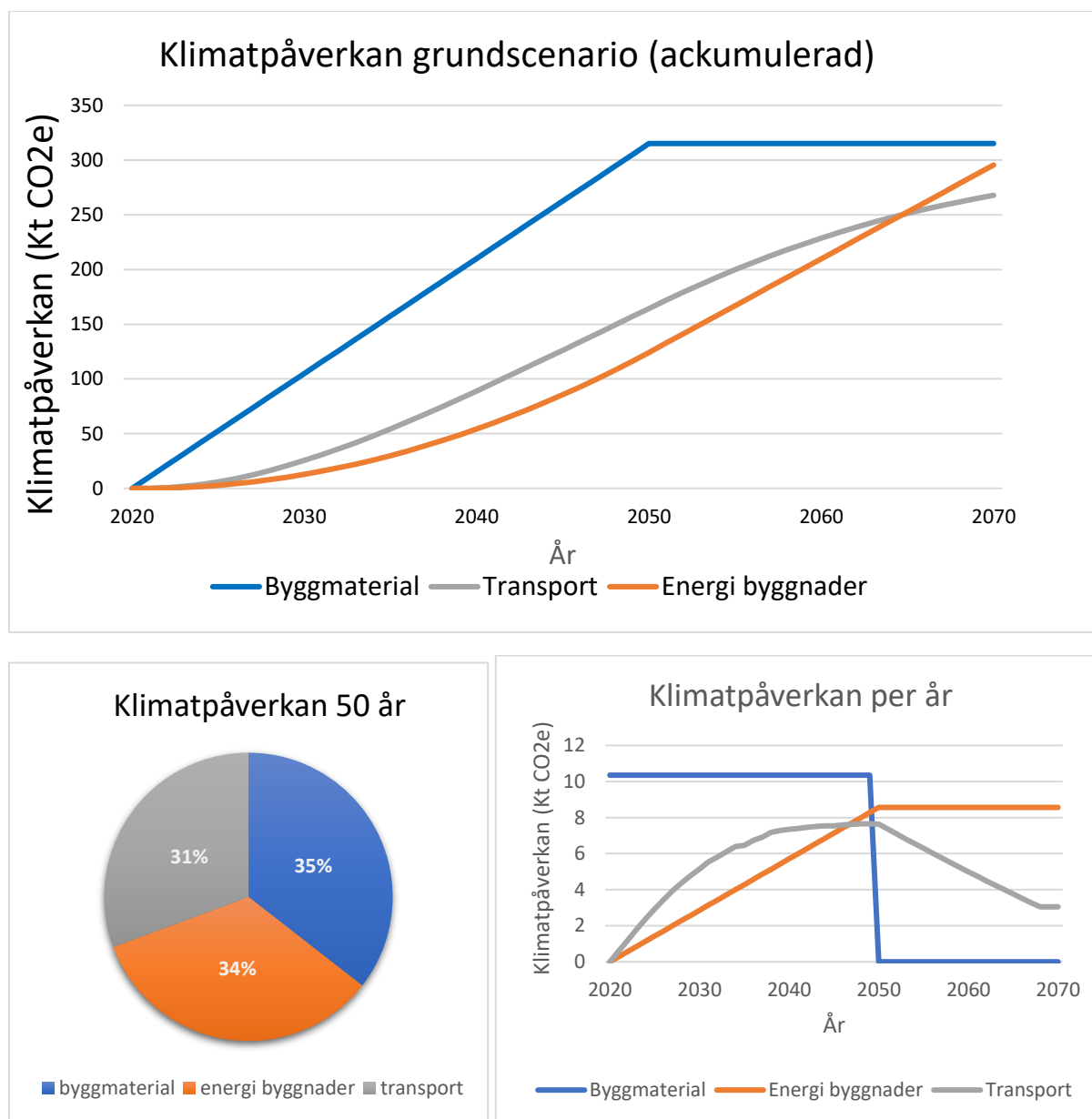
Förutom modelleringen har även en studie gjorts av befintlig litteratur som presenterar modellering inom system dynamics. Dessa studier presenterar återkopplingsmekanismer som är av betydelse för färdmedelsfördelning, genomslag för policys m.m. På grund av svårigheter med att kvantifiera och inkorporera dessa i den övriga modelleringen i detta arbete redovisas resultatet separat som en genomgång av de återkopplingsmekanismer som hittats i litteraturen och som skulle kunna ha en möjlig effekt på resultatet för modellering av klimatpåverkan för en stadsdel.

## 5 Resultat

### 5.1 Testning av vägval

#### 5.1.1 Grundscenariot

Till en början gjordes en simulering av klimatpåverkan för hela stadsdelen för ett grundscenariot, med antaganden och data som presenterats i avsnitt 4.3 Grundläggande beräkningar och data.

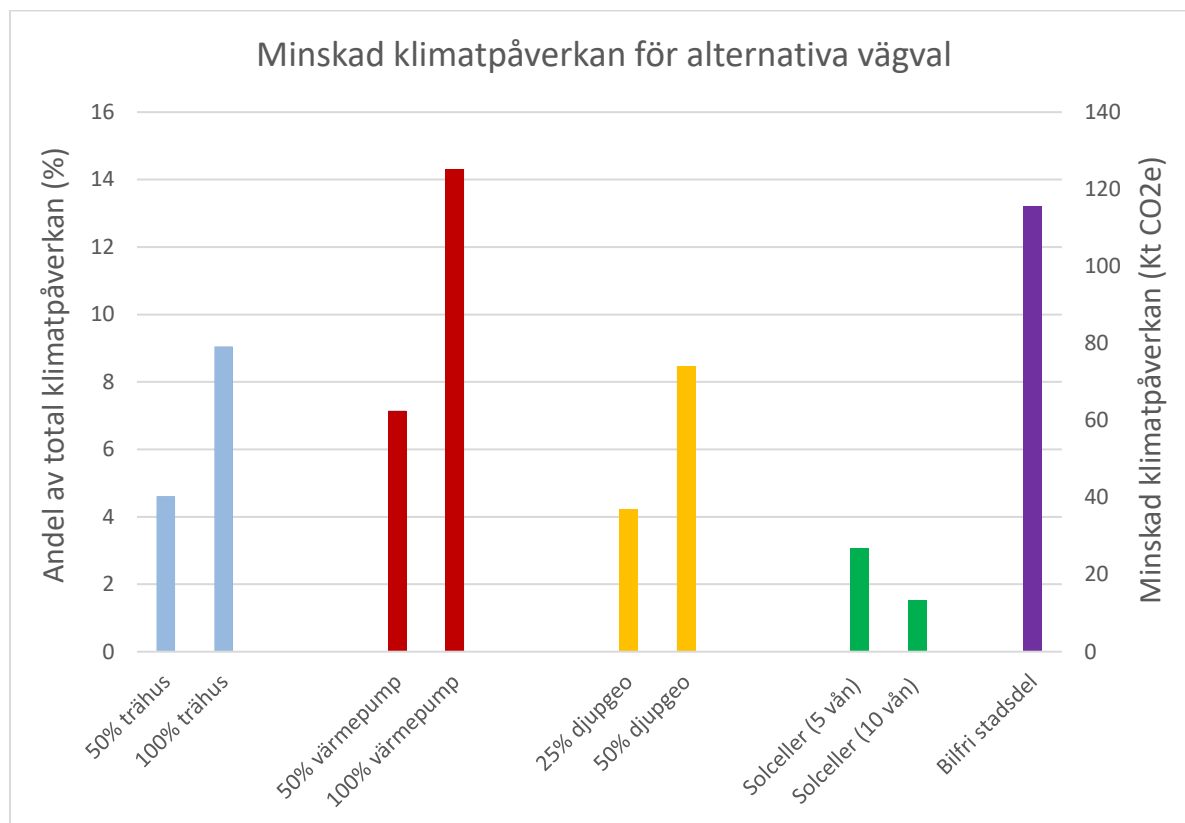


Figur 16 Ovan visas resultaten för standardscenariot för hela stadsdelen som (1) en graf över ackumulerad klimatpåverkan 2020–2070 (2) ett cirkeldiagram över fördelningen för klimatpåverkan över dessa 50 år och (3) den årliga klimatpåverkan som sker över 50 år.

Resultaten visar att byggnader, energi till byggnader och transporter alla står för mellan 30–35% vardera av klimatpåverkan över 50 år. Under stadsdelens uppbyggnadsperiod (2020–2050) står byggmaterialet för en övervägande del av utsläppen, medan transporter och framför allt energi till byggnader överväger för de senare åren.

### 5.1.2 Minskad klimatpåverkan för olika vägval

I figur 17 nedan presenteras den beräknade minskningen av klimatpåverkan som kan åstadkommas med de olika vägval som testats. Minskningen av klimatpåverkan är för alla vägval beräknad som skillnaden i klimatpåverkan jämfört med grundscenariot.



Figur 17 Beräknad minskning av klimatpåverkan för testade vägval, både i mängd i Kt CO2e och i andel av total klimatpåverkan i procent.

För byggmaterial testades minskningen av klimatpåverkan för 50% och 100% trähus (i stället för standardbetongbyggnader), och detsamma gjordes för andelen värmepump (i stället för fjärrvärme) i värmeförseln. För andelen djupgeotermi i fjärrvärmemixen testades 25% och 50%. 50% valdes som den högsta procentsatsen för djupgeotermi eftersom detta är den maximala mängden som beräknats för Malmös fjärrvärmesystem som helhet. Bedömningen av huruvida en högre andel är teoretiskt möjlig ansågs vara utanför omfattningen för detta arbete.

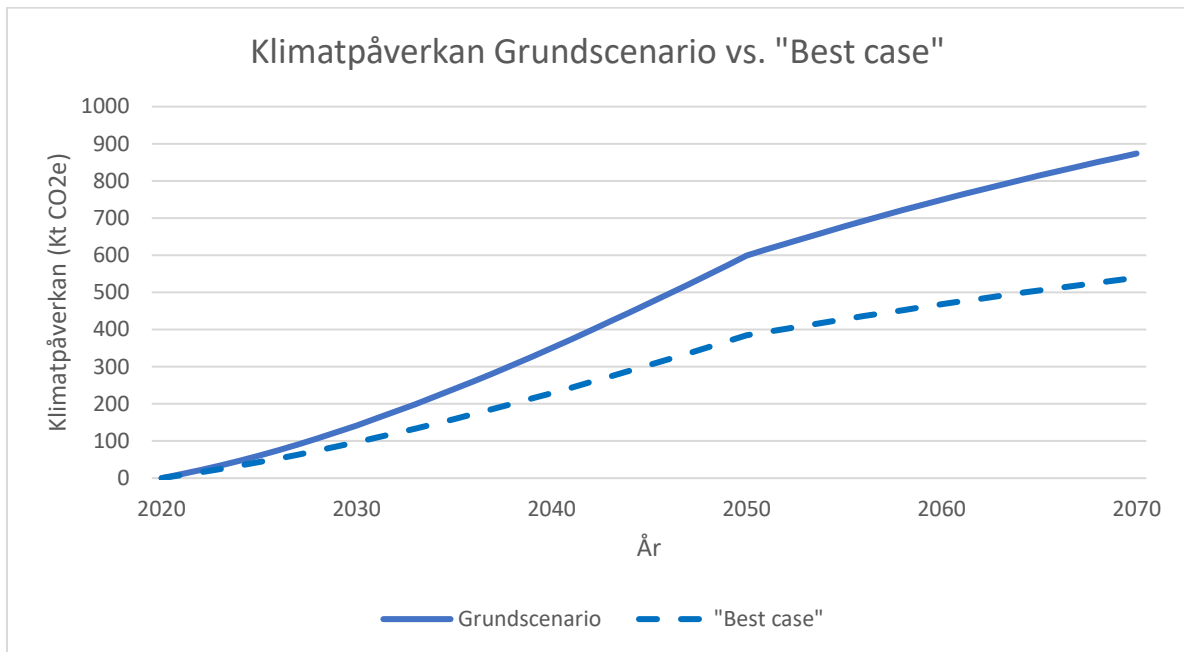
För solceller testades två fall för medelantalet våningar, 5 våningar i det första och 10 våningar i det andra, detta för att undersöka hur stor andel av det totala elbehovet som kunde mötas med sol i de båda fallen. I båda fallen var dock antagandet att samtliga hus i stadsdelen installerar maximal mängd solceller på samtliga tak. För 5 våningar som medelhöjd motsvarande produktionen 25–33% av elbehovet i byggnaderna (inkl. behovet till elbilar), medan 10 våningar som medelhöjd gav 12–17%.

Diagram har även tagits fram för de olika vägvalen separat, där skillnaden i utsläpp presenteras över tid. Dessa diagram återfinns i Bilaga 1.

### 5.1.3 Samtliga vägval – Grundscenario vs. "Best case"

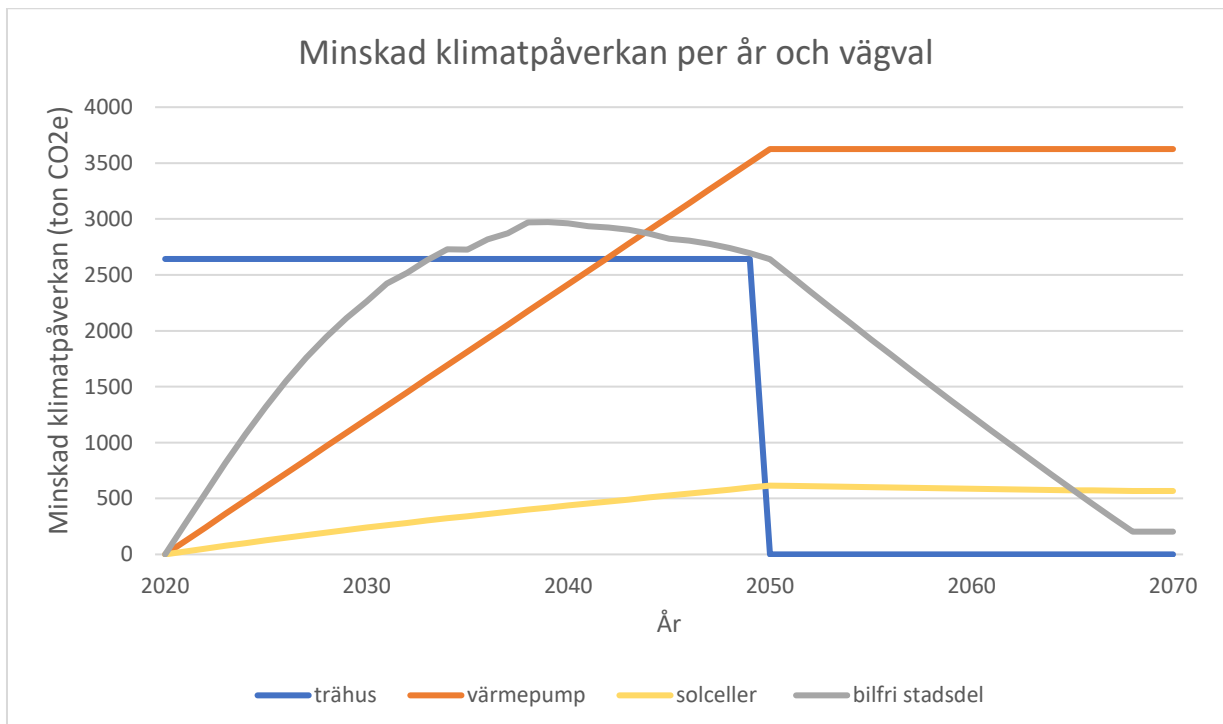
En beräkning gjordes även för den minskning av klimatpåverkan som skulle vara möjlig om samtliga åtgärder genomfördes i stadsdelen. Detta "Best case"-scenario byggs med 100% trähus, 100%

värmepumpsuppvärmda byggnader, solceller och som en "bilfri" stadsdel. Resultatet presenteras i figur 18 nedan.



Figur 18 Total ackumulerad klimatpåverkan över 50 år för grundscenario och "best case" i Kt CO2e.

Denna kombination av vägval som testats "best case"-scenariot ger 38% procent lägre klimatpåverkan än grundscenariot.



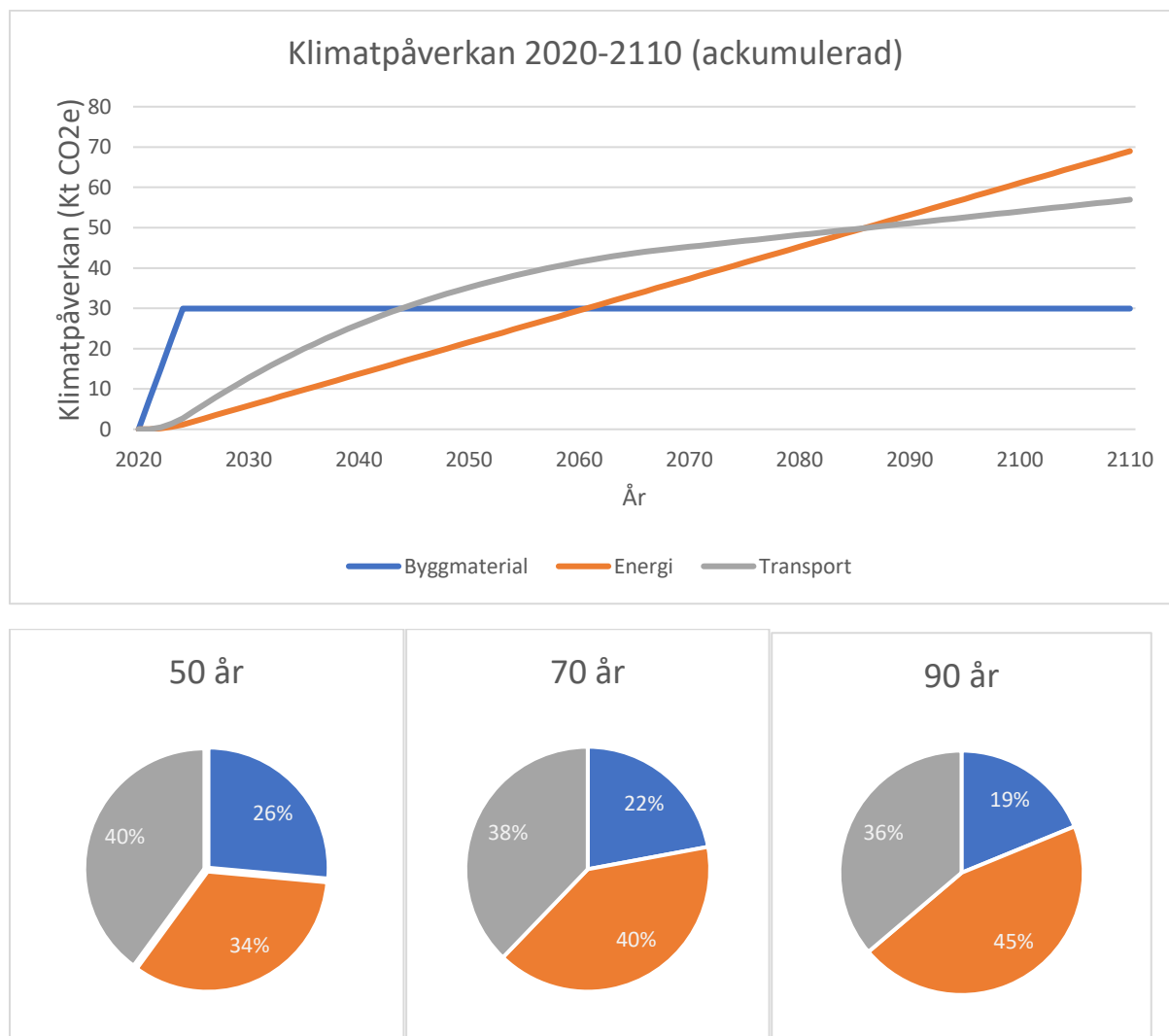
Figur 19 Minskad klimatpåverkan för vägval baserat på när i tiden klimatpåverkan skulle inträffat i grundscenariot.

Figur 19 visar när i tiden klimatpåverkan, som undviks med dessa vägval i ett "best case"-scenario, skulle ha inträffat. Grafen förtydligar det faktum att vägvalens inverkan på klimatutsläppen även har

en tidsdimension, vilket innebär att möjligheten att förhindra utsläppen även ligger på olika platser i tiden. Samtidigt finns, som beskrivits tidigare avsnitt, en tydlig lock-in effekt för klimatpåverkan i stadsmiljö, vilket kan innebära att utsläpp som ligger långt fram i tiden förutbestäms av val som sker i tidiga skeden. Dessa resonemang utvecklas vidare i diskussionskapitlet.

### 5.1.4 Tidsperiod

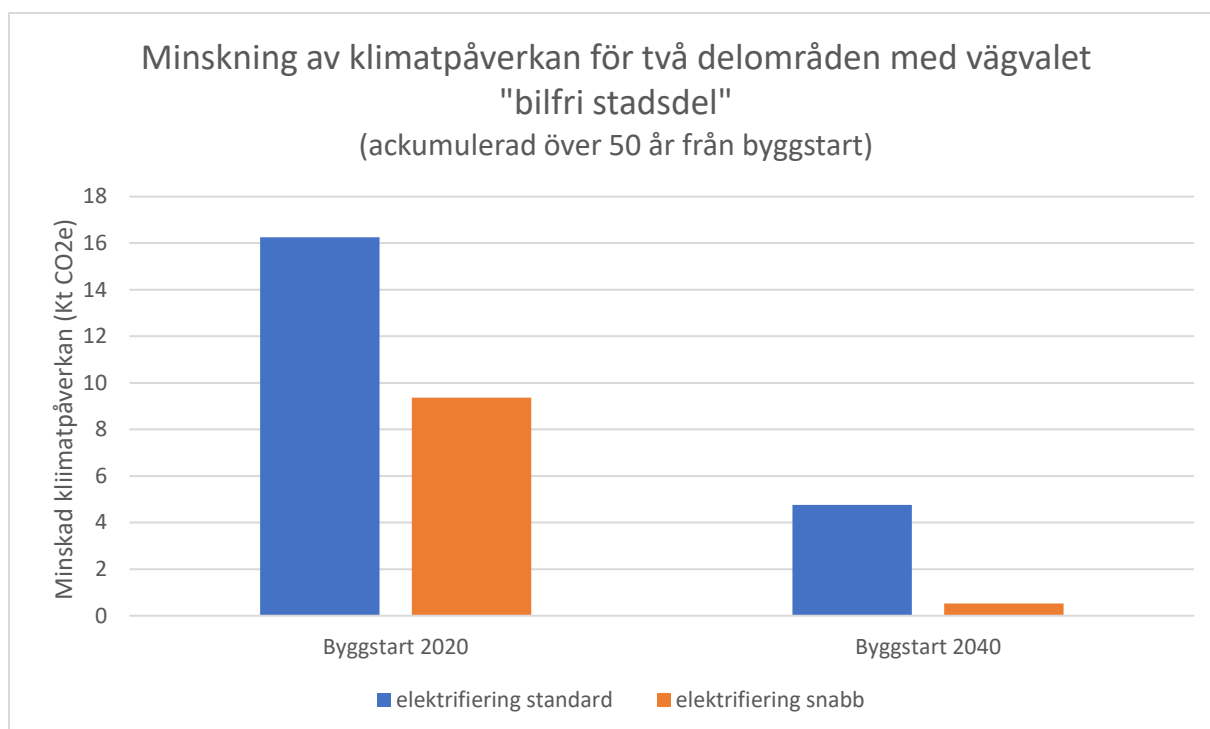
Här presenteras resultaten av de två undersökningarna av hur den beräknade tidsperioden påverkar resultaten.



Figur 20 En ackumulerad klimatpåverkan mellan 2020 och 2110 för byggmaterial, energi till byggnader visas i grafen ovan. I cirkeldiagrammen visas fördelningen av klimatpåverkan mellan de tre områdena, baserat på de tre beräkningsperioderna 50, 70 och 90 år.

För att undersöka betydelsen av valet av tidsperiod för byggnaders "livslängd", gjordes en beräkning över 90 år för standardfallet, där fördelningen av andelen klimatpåverkan för byggmaterial, energi till byggnader och transporter kan ses i figur 20.

En viktig parameter är antagandet om att byggmaterialet inte byts ut under tidsperioden. Detta är ett teoretiskt antagande som använts för att illustrera betydelsen av den planerade livslängden hos byggnader vid uppförandet av dem, något som behandlas vidare i diskussionskapitlet. En annan viktig parameter är att osäkerheten kring emissionsfaktorer för energi ökar med tiden, vilket påverkar tillförlitligheten för resultaten vid de senare årtalen.



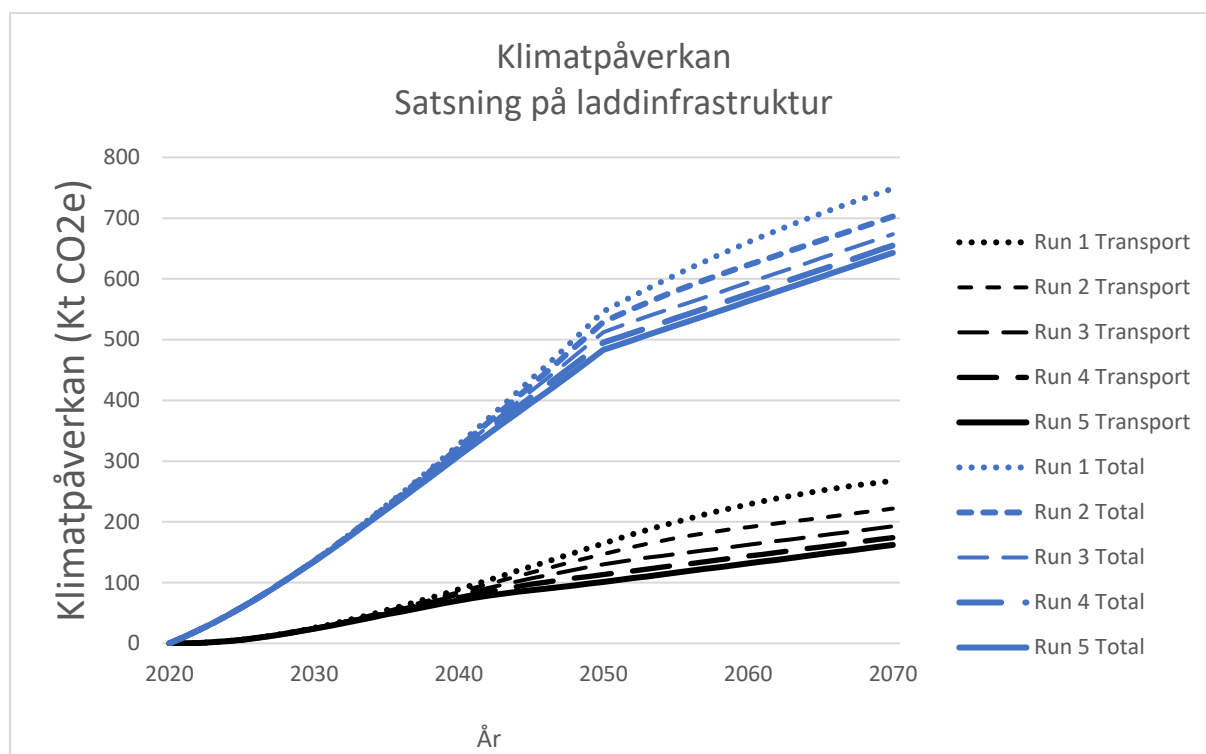
Figur 21 En minskning av klimatpåverkan genom vägvalet "bilfri stadsdel" för två olika delområden, ett med byggstart 2020 och ett 2040.

För att vidare undersöka tidsberoendet av resultaten gjordes en undersökning för två tänkta delområden (i storlek 110 000 BTA), ett med byggstart år 2020 och ett med byggstart 2040. En ackumulerad klimatpåverkan från transporter beräknades för standardscenariot och för scenariot med "bilfri stadsdel". En minskning av klimatpåverkan beräknades baserat på differensen mellan de båda. Som figur 21 visar ger åtgärden "bilfri stadsdel" störst effekt (dvs. den största minskningen av klimatpåverkan) för delområdet med byggstart 2020, vid standardscenariot för elektrifiering av fordon. Lägst blir effekten för delområdet med byggstart 2040 för ett snabbt elektrifieringsscenario. Detta beror på att fordonsflottan i ett sådant scenario till stor del är elektrifierad under hela delområdets "livslängd" (alltså de beräknade 50 åren), vilket leder till en liten effekt på klimatpåverkan för åtgärden "bilfri stadsdel" i det fallet.



### 5.1.5 Laddinfrastruktur

En beräkning gjordes även av möjliga effekter av satsningar på laddinfrastruktur som stödjer elektrifieringen av fordonsflottan. Nedan i figur 22 visas resultaten från beräkningen.

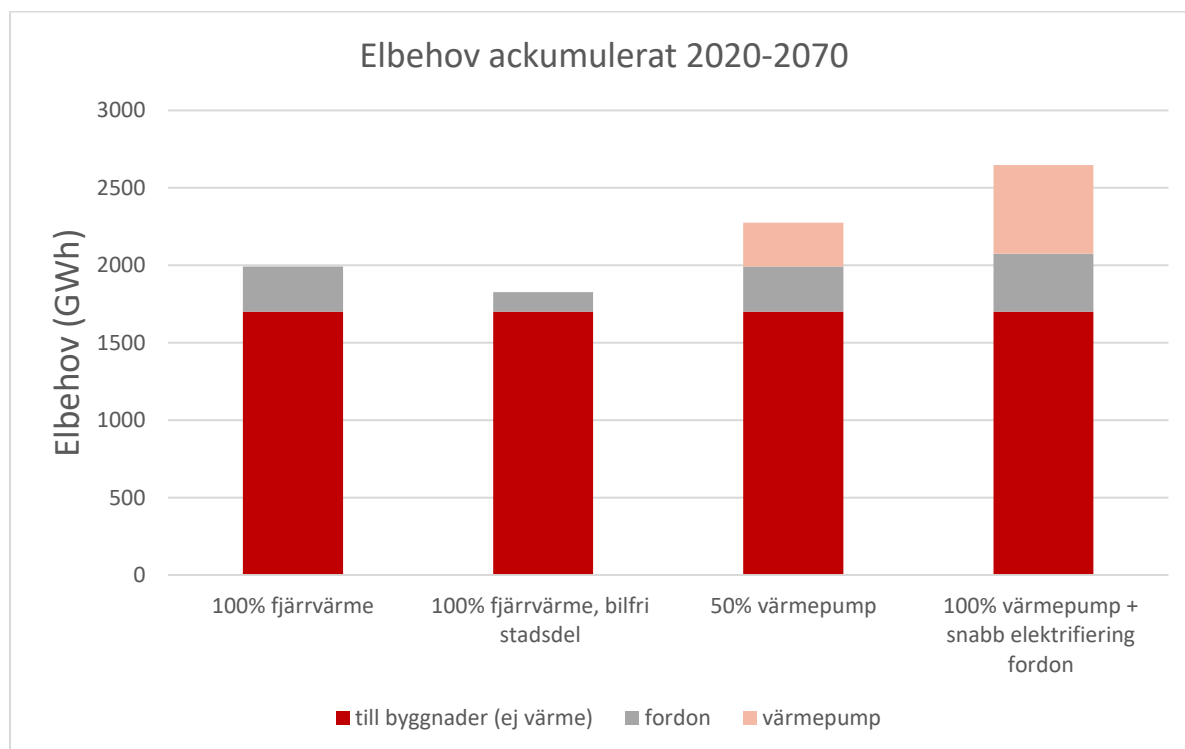


Figur 22 Klimatpåverkan från transporter (och total klimatpåverkan från hela stadsdelen) för 5 nivåer av elektrifiering av fordonsflottan.

Som tidigare beskrivits finns stora svårigheter med att kvantitativt bestämma effekten som införandet av laddinfrastruktur har på elektrifieringen av den lokala fordonsflottan. Därför har beräkningen för denna åtgärd utförts med ett osäkerhetsspann. Lägst effekt (Run 1) beräknas med standardscenariot (vilket alltså innebär att laddinfrastrukturen inte påverkar elektrifieringen alls) medan den starkaste effekten (Run 5) motsvarar en snabb elektrifiering där 30% av bilarna personbilsflottan är elbilar vid år 2030. Beräkningen visar att det allra mest optimistiska scenariot skulle ge en minskning av klimatpåverkan på 106 Kt CO<sub>2</sub>e, motsvarande 14% av de totala utsläppen.

### 5.1.6 Elbehov

Det övergripande fokuset för detta har varit att beräkna klimatpåverkan och effekter på klimatpåverkan för olika vägval i stadsbyggnaden. Som betonats i tidigare kapitel förväntas dock skeenden elektrifieringen av fordonsflottan leda till en ökning av elförbrukningen i byggnader. Detta gäller även för valet av värmepump för att möta byggnaders värmebehov. För att belysa effekten av detta gjordes även en jämförelse mellan de olika alternativen med avseende på det totala elbehovet över tid.



Figur 23 Ackumulerat elbehov för byggnader över 50 år baserat på olika scenarier och beslut i byggprocessen.

Enligt beräkningarna förväntas ett 33% högre elbehov för alternativet med 100% värmepumpslösningar för värmebehovet kombinerat med en snabb elektrifiering där 30% av fordonen är elbilar år 2030, jämfört med standardscenariot med 100% fjärrvärme och en medelsnabb elektrifiering där 17% är elbilar 2030.

## 5.2 Återkopplingsmekanismer för stadsdelars klimatpåverkan

Som tidigare beskrivits har en studie gjorts av befintlig litteratur som presenterar modellering inom system dynamics. Dessa studier presenterar återkopplingsmekanismer som är av betydelse för färdmedelsfördelning, genomslag för policys m.m. Nedan följer en genomgång av de återkopplingsmekanismer som hittats i litteraturen och som skulle kunna ha en möjlig effekt på resultatet för modellering av klimatpåverkan för en stadsdel.

### 5.2.1 Transport och system dynamics

I en studie av Bernardino och van der Hoofd (2013) presenteras en struktur för modellering av urbana trafiksystem för att utvärdera effekten av parkeringspolicys och optimera systemet för optimal service. Några betydelsefulla dynamiska beteenden i systemet har identifierats i studien:

- **Balanserande feedback-loop till följd av trängsel:** Enligt denna logik leder en ökande mängd personbilar till trängsel och en lägre medelhastighet, vilket i förlängningen ger en minskning av personbilar då detta blir ett mindre attraktivt alternativ. Ett lågt antal parkeringsplatser bedöms ha en likartad effekt då tiden för att leta efter parkeringsplats också förlänger restiden.
- **Förstärkande feedback-loop gällande avgångstätheten för kollektivtrafik (Mohring-effekten):** Enligt denna logik leder en ökande efterfrågan på kollektivtrafik till fler avgångar, vilket ökar attraktiviteten hos färdmedlet och därav ökar efterfrågan.

Struben och Sterman (2008) har tagit fram en dynamisk modell för att beskriva möjligheterna för alternativa fordonslag, som till exempel elbilar, att ta sig in på fordonsmarknaden, där följande samband identifierats:

- **Förstärkande feedback-loop till följd av exponering:** Förekomsten av alternativa fordon leder till att människor oftare kommer i kontakt med fordonen. Detta leder till fler villiga köpare, vilket leder till fler fordon osv.
- **Förstärkande feedback-loop till följd av "talk of the town":** En ytterligare förstärkning bedöms komma från dem som inte själva äger en bil, men som genom sin egen köpvilja hjälper till att sprida ordet. Detta bidrar till ytterligare exponering, vilket driver på ökningen av villiga köpare, vilket leder till fler fordon osv.

## 5.3 Osäkerheter och eventuella felkällor

Emissionsfaktorn för beräkning av djupgeometri har som tidigare nämnt hämtats från en fallstudie för en djupgeotermianläggning i Skottland. Detta innebär att det kan finnas betydelsefulla skillnader mellan fallen som till exempel borrhingsdjupet, vilken temperatur som kan genereras i värmebäraren från värmekällan, hur länge värmekällan kan användas osv. En annan osäkerhetsfaktor är att en del av utsläppen från geotermi kopplas elförbrukningen för driften, där emissionsfaktorn för elproduktion varierar beroende på var sajten finns. En rekommenderad vidare studie är därför att uppdatera emissionsfaktorn så fort en faktisk siffra för Malmös system finns tillgänglig.

Som tidigare nämnts finns svårigheter med att beräkna effekten av åtgärder inom mobilitetsområdet. För denna studie beräknades potentiella effekter på den lokala fordonsflottan vid satsningar på laddinfrastruktur. Även om denna koppling konstaterats kvalitativt genom kartläggning av människors köpvilja baserat på tillgång till laddinfrastruktur (se avsnittet *Styrning mot låg klimatpåverkan från transporter*), är det alltså fortfarande okänt hur stor denna effekt är och vad det kommer att innebära för elektrifieringen de kommande decennierna. Det bör därför tydligt understrykas att resultatet från

beräkningar för laddinfrastrukturer av denna anledning bär stora osäkerheter. Ansatsen har varit av utforskande karaktär och resultaten bör inte ses som definitiva slutsatser för klimatpåverkan.

Beräkningar för transportsektorn har i detta arbete inkluderat de boendes egna resor samt arbetspendling för besökare till planerade kontor. För vägvalet "bilfri stadsdel" har färdmedelsfördelningen för dessa förändrats. Förändringen av färdmedelsfördelning till följd av skapandet av en bilfri stadsdel har beräknats ha likvärdig inverkan på arbetspendlare som på boende. Detsamma gäller för satsning på laddinfrastruktur och dess inverkan på elektrifieringstakten. Eftersom arbetspendlingen bara är en av många resor för besökare och deras totala resmönster, är det möjligt vägval i denna stadsdel inte påverkar denna grupp i samma utsträckning som de påverkar de boende vad gäller till exempel val av fordon. Det är därför möjligt att en överskattning gjorts av åtgärdernas inverkan på arbetspendlare, vilket i så fall skulle vara en möjlig felkälla i arbetet.

Ett minskat bilresande kan eventuellt skapa bieffekten att godstrafiken ökar, om tex. användningen av hemleveranstjänster ökar till följd av det minskade bilinnehavet. Sådana effekter har ej inkluderats i detta arbete, vilket kan vara en möjlig felkälla som i så fall ger en överskattning av hur klimatpåverkan förändras med detta vägval.

För vägvalet "bilfri stadsdel" användes färdmedelsfördelningen från en befintlig stadsdel som planerats och marknadsförts som bilfri. Referensområdet som använts är betydligt mindre än planområdet för Nyhamnen, med ca 1 500 invånare medan Nyhamnen förväntas ha ca 20 000 boende när området är färdigbyggt. Det bör därför nämnas att den beräknade minskningen av klimatpåverkan givetvis är beroende av att det finns en målgrupp för en bilfri livsstil som matchar områdets storlek, vilket inte har undersökts i detta arbete. I den använda studien diskuteras också fenomenet att områden som marknadsförs som bilfria i varierande utsträckning drar till sig människor som redan lever bilfritt. Detta skulle betyda att en bilfri stadsdel i praktiken inte minskar stadens klimatpåverkan, något som inte tagits hänsyn till i beräkningarna.

Under rubriken Tidsperiod presenterades beräkningar för hur tidsperioden som används vid beräkning påverkar förhållandet mellan de olika områdena för klimatpåverkan. Det finns såklart en osäkerhet i hur lång de faktiska livslängderna kommer bli för de byggnader som byggs och de material som används i dem. Enligt Erlandsson et al. (2018) är 50 år en livslängd som ofta gäller vid projektering för delar av en byggnad som inte går att byta ut, och att det dessutom är vanligt att byggnader byggs om på ett omfattande sätt efter 50 år. Beräkningar gjordes ändå för andra livslängder för att illustrera den möjliga effekten av att skapa bebyggelse med en längre livslängd.

## 6 Diskussion

### 6.1 Sammanvägd reflektion kring resultat

Baserat på de resultat som modellarbetet och testning av vägval genererat kan konstateras att vägval finns gällande byggmaterial, val av uppvärmningslösning och transportplanering som alla ger en möjlig minskning av klimatpåverkan med 8–15%, vilket kan anses vara betydande skillnader sett över den beräknade tidsperioden. Författaren har inte bedömt att något vägval kan pekas ut som mer viktigt, då dessa vägval alla hamnar inom ett relativt snävt spann och därför bedöms ha ungefär lika stor betydelse.

Gällande fallet Nyhamnen kan konstateras att beräkningarna rörande värmelösningar är lokala på ett annat sätt än beräkningar för byggmaterial och transporter. Bedömningen är att val av byggmaterial och transportplanering (både rörande bilfrihet och laddinfrastruktur) kan anses ha betydande påverkan gällande stadsutvecklingsprojekt även på andra platser. En liknande bedömning kan inte göras för värmelösningar, då dessa resultat baserats på beräkningar med emissionsfaktor för fjärrvärmesystemet i Malmö (eftersom modellens beräkningar utgår från den möjliga fjärrvärmesystemet för fallet Nyhamnen). Resultaten från detta arbete bedöms därför inte kunna ge en generella riktlinjer för val av uppvärmningslösning, något som inte heller är helt oväntat med tanke på tidigare studiers resultat på ämnet (se studie av beslut rörande energianvändning i 2.2 Klimatpåverkan från energi till byggnader) som visar på stor komplexitet i bedömningen av dessa beslut. I de redovisade resultaten kan uppvärmning med bergvärmepump bedömas som ett gynnsamt vägval ur klimatsynpunkt (se figur 6 för minskning av klimatpåverkan för de olika vägvalen). En sådan bedömning bör dock även kompletteras med en problematisering ur energisystemperspektiv. Detta resonemang fördjupas under 6.3 Stadsdelars klimatpåverkan och energisystemet.

En kommentar värd att göra är att man med beräkningar för ett "best case"-scenario, där alla de vägval som beräknats vara klimatomkostligt gynnsamma, endast uppnår en minskning av klimatpåverkan med 38%. En tolkning av detta är verkligt "klimatneutrala" stadsdelar endast kan uppnås med betydligt mer radikala vägval än de som testats i detta arbete. Sådana vägval skulle till exempel kunna vara användning av främst återbrukat material i byggnader, investering i teknik för koldioxidinfångning för värmeproduktionsanläggningar eller totalförbud mot biltransporter.

Effekten av egenproduktion av el från solceller ger en anmärkningsvärt låg effekt på total klimatpåverkan. En logisk förklaring till detta är att emissionsfaktorn som använts för beräkning solceller inte skiljer sig så mycket från emissionsfaktorn för nordisk elmix som förutspåddes vid arbetets inledning. Även detta test kan antas ge ett annat resultat för ett stadsutvecklingsprojekt med andra förutsättningar, där till exempel emissionsfaktorn för nationell elproduktion är högre eller där lägre bebyggelse planeras vilket skulle möjliggöra att en högre andel av det totala elbehovet kan mötas med solceller.

Vägvalet "bilfri stadsdel" hade också förväntats ge ännu lägre klimatpåverkan än resultaten visar. Det är tydligt att den beräknade elektrifieringen av fordonsflottan innebär att val av transportmedel inte ger samma effekt på klimatpåverkan för de kommande decennierna som det bedömts göra tidigare. Som tidigare kommenterats är dock ökningen av elbehovet något som i sig kan påverka den framtida emissionsfaktorn för el, vilket gör det svårt att tolka resultatens tillförlitlighet. För vidare studier rekommenderas därför att elsystemet förväntade utveckling med avseende på klimatpåverkan inkluderas i beräkningarna, något som kommenteras vidare under 6.10 Förslag på vidare studier.

## 6.2 Målkonflikter i stadsplaneringen

I planeringen av nya stadsdelar måste många målkonflikter hanteras. I detta arbete har ett par målkonflikter pekats ut specifikt. Den första är en konflikt mellan byggnaders markanspråk och andelen möjlig egenproduktion av el. Att bygga på höjden är en möjlighet att frigöra yta till andra saker än just boende. Detta kan vara en stor fördel ur stadsplaneringssynpunkt, lokalt kan till exempel större grönytor anläggas och för staden som helhet kan det innebära att man undviker nybyggnation på jordbruksmark. En annan aspekt är att tät, hög bebyggelse i staden kan förkorta reseavstånden, vilket också kan leda till minskad klimatpåverkan. Med högre hus följer dock att lägre andel av byggnadens elbehov kan täckas av solceller. Som visas i resultaten ger el från solceller en minskning av klimatpåverkan, ett vägval som på fastighets- eller stadsdelsnivå får allt mindre effekt ju högre medelantal våningar stadsdelen har. Avvägningen mellan klimatnyttan för lokal elproduktion och förändring i resmönster endast till följd av tät bebyggelse innefattas dock inte i detta arbete, främst eftersom modelleringen gjorts på ett projekt med en redan definierad plats, byggnadsmängd och antal invånare, vilket försvårar en konsekvensanalys av den täta stadsbyggnaden enbart. Detta kommer därför inte diskuteras i högre utsträckning än att det kan konstateras vara en möjlig vidare undersökning för framtida modellering på stadsdelsnivå.

## 6.3 Stadsdelars klimatpåverkan och energisystemet

Som resultaten visar kan beräkningar som endast tar hänsyn till klimatpåverkan för en enskild åtgärd ge en förenklad bild av vad som är klimatmässigt gynnsamt i ett större perspektiv. Vägval som ser ut att ge minskad klimatpåverkan leda till ökad elförbrukning i bebyggelsen. För att möta ett sådant elbehov krävs kapacitet både i momentan överföring och total produktionskapacitet i elsystemet. En kraftig ökning av elbehovet kan, både momentant och sett på lång sikt, leda till att elproduktionsmetoder med högre emissioner krävs för att möta behovet, vilket kan leda till att elektrifieringen inte ger den minskning av klimatpåverkan som förutsetts.

De beräkningar som i detta arbete pekar på att elektrifiering leder till en minskad klimatpåverkan bygger på en emissionsfaktor för nordisk elmix som den ser ut idag. Det kan konstateras att emissionsfaktorn för el påverkar de slutsatser som kan dras från detta arbete, och att resultaten därför bör hanteras med medvetenhet om att så är fallet. En vidare analys av möjligheter och svårigheter för det framtida elsystemet i stort anses dock ligga utanför vad detta arbete kan omfatta.

I det fall det konstateras att produktions- och/eller överföringskapacitet inte möjliggör elektrifiering av flera sektorer är det rimligt att tänka sig att de sektorer som saknar alternativa lösningar bör prioriteras. Fjärrvärme produceras idag på många ställen, däribland Malmö, genom förbränning av avfall av både förnybart och fossilt ursprung. Samtidigt som detta ger upphov till klimatpåverkan som kan anses oönskad, skulle en uteslutning av denna uppvärmningslösning innebära att avfallet behöver hanteras på annat sätt. I Sverige är deponering av brännbart avfall förbjudet enligt förordningen om deponering av avfall (SFS 2001:512), och uppvärmning av byggnader kan därför betraktas som en biprodukt av en ofrånkomlig process för att förhindra deponi av avfall. Detta leder i praktiken till att minskad efterfrågan på fjärrvärme inte nödvändigtvis förhindrar förbränning av avfall, vilket även konstaterats i en studie med verktyget Tidstegen (Gode et al. 2020) som berördes i kapitel 2.

Sammanfattningsvis kan det med ett mer heltäckande energisystemperspektiv konstateras att vägval för enskilda stadsdelar inte endast bör bedömas utifrån de emissioner som beräknas i modeller som den använd i detta arbete. Det kan därför anses eftersträvansvärt att bedömningar av vägval gällande klimatpåverkan även tar hänsyn till effekter på energisystemet lokalt, regionalt och nationellt, så att inte ett problem löses genom skapandet av ett annat.

## 6.4 Tidsaspekter i beräkningarna

Undersökningen av bebyggelsens livslängd (för 50, 70 och 90 år) gjordes som tidigare nämnts för att belysa hur förhållandet mellan de olika områdena för klimatpåverkan förändras baserat på tidsintervallet. Tyvärr har ingen vidare utredning gjorts av huruvida det är praktiskt möjligt att bygga för så långa livslängder som 90 år, men förhoppningen är att resultaten kan motivera en fortsatt strävan mot ett byggande tar hänsyn till byggnadslivslängdens inverkan på det totala klimatavtrycket.

En ytterligare undersökning gjordes på två delområden, för att belysa hur vägvalens inverkan på klimatavtrycket beror av när byggnationen infaller. Genom resultaten blir det tydligt att vilka aktiviteter som ger upphov till klimatpåverkan kommer att förändras över tiden. Det kan även vara en god idé för ett stadsbyggnadsprojekt med en så lång utsträckning i tiden som Nyhamnen, att med jämna mellanrum uppdatera beräkningar som görs för klimatpåverkan för olika vägval, så att bebyggelsen som görs flera decennier fram i tiden inte bygger på gamla antaganden.

## 6.5 Livscykelperspektiv på stadsdelar

På vissa ställen i rapporten har begrepp som "stadens livscykel" eller "en slags 'livscykelanalys' av en stadsdel" använts för att beskriva syftet med detta arbete. Samtidigt har ingen formell LCA-metodik använts vid framtagningen av modellen. För att inte vilseleda läsaren kring detta har typiska LCA-begrepp som systemgränser, funktionell enhet och allokering undvikits som en del av metodiken. Samtidigt har många frågor som uppstått i processen liknat sådant som ofta uppstår i arbetet med LCA-metodik, som till exempel vad som är en rimlig metodik för avgränsning och vilken enhet som bör användas för att bedöma den funktion som stadsdelen utför. Dessa frågor diskuteras nedan.

En funktionell enhet kan vara av vikt för att avgöra vilken påverkan som sker för att leverera en viss funktion. För en stadsdel skulle en sådan enhet kunna innehålla olika typer av service som stadsdelen tillhandahåller, ta hänsyn till vilket antal personer som stadsdelen inhyser eller beräknas per byggd BTA, för att nämna några exempel. Samtidigt ska valet av funktionell enhet spegla arbetets syfte och omfattning.

Det har blivit tydligt under arbetets gång att antalet möjliga funktioner för en stadsdel gör det svårt att definiera en funktionell enhet som fungerar för alla syften. Den valda frågeställningen kring olika vägval och dess effekt på klimatpåverkan bedömdes kunna besvaras enklast genom beräkning av det totala antalet CO<sub>2</sub>-ekvivalenter, och alltså inte i relation till varken mängden personer eller BTA. Om en åtgärd testats som påverkar antalet människor i stadsdelen, som till exempel en förändring av antal BTA per boende, hade valet av enhet för redovisning troligen behövs hanteras annorlunda.

För framtida arbete med klimatpåverkan för stadsdelar kan detta vara en viktig fråga att ta hänsyn till, speciellt om sådana studier förväntas kunna leverera resultat med avsikt att jämföra stadsdelars prestanda med avseende på klimat. Detta gäller även för valet av avgränsning, eftersom en rättvis jämförelse av resultat från olika stadsdelar skulle kräva en likvärdig avgränsning. Som nämndes i avgränsningen har dubbelräkning gjorts för arbetspendling, då dessa resor räknas för både boende och besökare. Detta val är även viktigt att ha i åtanke om beräkningar från en modell som denna skulle användas för aggregering av klimatpåverkan från flera stadsdelar, eftersom detta skulle leda till en överskattning av klimatpåverkan från resor. Eftersom fokus i detta arbete varit vikten av olika vägval i stadsbyggnadsprocessen, har detta prioriterats framför möjligheten att aggregera.

## 6.6 Analys av möjligheter för återkoppling i modelleringsarbetet

Beräkningen för effekten av vägvalet bilfri stadsdel har gjorts baserat på en färdmedelsfördelning som är en ögonblicksbild av det befintliga exemplet Stellwerk 60, Köln. Vad gäller till exempel andelen

kollektivåkning finns en teoretisk möjlighet att den förstärkande effekten av god tillgänglighet kan öka en sådan andel över tid. En sådan möjlig återkoppling har inte inkluderats i den kvantitativa modellen, men skulle kunna vara av värde för vidare studier. Den balanserande effekten av lågt antal p-platser är också svår att kvantifiera för ett fall som detta, men om en sådan effekt finns är den ett möjligt bidrag till den låga andelen bilresor i den studerade bilfria stadsdelen.

De presenterade återkopplingarna för övergång till alternativa fordon skulle kunna ha en påverkan på elektrifieringstakten av fordonsflottan i stadsdelen. Detta skulle tala för att en satsning på laddinfrastruktur kan ge "ringar på vattnet" genom exponering och "talk of the town" gällande elfordon. Storleken på denna effekt är även den väldigt svårt att kvantifiera.

För att skapa ett maximalt transporteffektivt samhälle kan man anta att både snabb elektrifiering av fordonsflottan och minskad biltrafik är behövligt. Ur det perspektivet vore det önskvärt att utnyttja samtliga av dessa återkopplingsmekanismer till fullo. En stadsdel som marknadsförs som bilfri lär dock kunna antas ge lägre förstärkning för köpvilja gällande elfordon, då exponeringen och troligen även "talk of the town" effekten blir lägre. I så fall skulle bilfrihet leda till en långsammare elektrifiering av fordonsflottan, vilket alltså i praktiken skulle innebära att dessa ansatser till viss del jobbar emot varandra. För att kunna göra en mer kvalificerad bedömning av detta bör dock vidare studier göras av hur dessa effekter förhåller sig till varandra i praktiken.

## 6.7 Utvärdering av Stella som modelleringsverktyg för stadsdelars klimatpåverkan

Verktyget Stella har i detta arbete använts för beräkning av klimatpåverkan från en stadsdels uppbyggnad och användning över tid. Målet har bland annat varit att undersöka om denna metod kan vara användbar för att stödja beslut kring olika vägval i stadsbyggnadsprocessen, och således fylla en funktion som praktiskt stöd för styrning mot klimatneutrala städer.

Verktygets utformning möjliggör enkla känslighetsanalyser genom de funktioner som möjliggör förändring av parametrar där resultatet förändras i realtid som parametern ändras. En reflektion är att detta kan vara till stor hjälp för att snabbt och enkelt förstå vilka variationer i parametrarna som har stor betydelse för total klimatpåverkan. Visualiseringen av samband mellan olika parametrar bidrar också till en förståelse av hur modellen är uppbyggd som förenklar introduktionen till modellen nya användare.

Det råder ingen tvekan om att modellering av både energisystem och klimatavtryck kan göras med mer avancerade och detaljerade metoder. Ambitionen med detta arbete har dock inte varit att ta fram ett verktyg som endast kan användas av användare med lång modelleringserfarenhet eller avancerade kunskaper inom energisystem, utan snarare att tillgängliggöra användbara data och samband för aktörer i stadsbyggnadsprocessen för att öka kunskapen om hur olika vägval inverkar på klimatutsläppen. För detta ändamål bedöms verktyget ha stora fördelar, eftersom användningen har en stor visuell och beräkningsmässig transparens i stället för att ge upplevelsen av att beräkningarna sker i en "black box" som levererar kvantitativa resultat men inte bidrar till ökad förståelse av systemet som helhet eller hur stor påverkan osäkerheter för de olika parametrarna har för resultatet. Verktyget har även upplevts som mycket flexibelt på det sätt att parametrar som kan skilja mellan olika stadsutvecklingsprojekt, som till exempel geografiska skillnader i emissioner från energiproduktion eller storleken på projektet, mycket enkelt kan ändras för att passa det valda projektet. Eftersom författaren själv inte har några erfarenheter av beräkning med andra verktyg som kan användas för liknande ändamål (som till exempel TIMES och LEAP, vilka nämns bakgrunden till arbetet) lämnas det okommenterat hur detta verktyg står sig i jämförelse med sådana verktyg.



Verktøget Stella är som tidigare nämnt utvecklat för arbete inom system dynamics-fältet, där beräkningarna ofta centreras kring feedback-mekanismer samt kvantifieringen av dessa. Eftersom beräkningsmodellen inte inkluderar några sådana samband har fördelarna med verktøget inte utnyttjats i den utsträckning som förhoppningen var när arbetet inleddes. Fördelen med det arbete som gjorts är samtidigt att möjligheten finns att inkludera sådana samband i senare studier, i det fall data och samband som anses möjliga att integrera skulle återfinnas.

## 6.8 Hantering av brist på säkra data

Under modelleringsarbetet har brist på data, eller stora osäkerheter för de data som använts, uppkommit som problem i flera sammanhang. Speciellt inom transportområdet kan effekten av åtgärder vara speciellt svår att förutsäga, vilket ger stora osäkerheter i till exempel beräkningar för laddinfrastrukturens inverkan på klimatpåverkan. Givetvis finns möjligheten att vänta tills bättre data finns innan man gör modelleringar av detta slag. Samtidigt finns en stor angelägenhet att ställa om samhället snabbt med avseende på klimatpåverkan, vilket kan tala för att beräkningar med stora osäkerheter ändå kan ge viktiga insikter, så länge en medvetenhet finns om osäkerheterna och hur de kan påverka resultatet. Ambitionen har varit att genomföra beräkningarna med så stor transparens som möjligt där dessa osäkerheter finns, så att läsaren är medveten om vilka antaganden som lett fram till resultaten och själv kan göra en bedömning av tillförlitligheten.

## 6.9 Potentiell användning av modelleringsresultat i planeringsarbetet

Resultaten som presenteras i denna rapport består dels i en modell som kan användas för beräkning av klimatpåverkan, dels i beräknade effekter på klimatpåverkan från olika vägval i stadsbyggnadsprocessen. Delar av beräkningarna är baserade på uppgifter som är specifika för fallet Nyhamnen i Malmö, medan andra delar innehåller antaganden och data som är generaliserbara på nationell, och i vissa fall även internationell, nivå. Det är viktigt att lyfta att de specifika resultaten för olika vägvals inverkan på klimatutsläppen inte bör ses som generaliserbara eftersom de baseras på antaganden för Nyhamnen. Vad gäller beräkningsmodellen kan författaren se en möjlighet att med relativt enkla medel anpassa denna för användning vid andra stadsbyggnadsprojekt, om detta görs med en medvetenhet om vilka data som är platspecifika och därför behöver förändras för ett annat fall.

En viktig aspekt angående vägval i stadsbyggnad är att dessa processer involverar aktörer inom flera branscher, vilka alla har rådighet över olika delar. För att få till stånd en stadsbyggnad som bryter med invanda mönster krävs en enighet och samordning mellan dessa parter om vilka vägval som på bästa sätt bidrar till uppsatta mål på klimatområdet. Förhoppningen är att detta verktyg kan vara användbart för den eller de personer som finner sig i en sådan samordnande roll. Detta kan till exempel vara personer inom kommunal planering, men även exploatörer med ambitionen att förstå de olika vägvalens inverkan på den färdiga byggnationens totala klimatpåverkan.

För fallet Nyhamnen fanns redan en definierad plats och omfattning av bebyggelse (mängd BTA). Vid planering i ännu tidigare skede skulle en beräkning av klimatpåverkan från en stadsdel kunna användas som en del av till exempel miljökonsekvensbeskrivning för fördjupad översiktsplan, där till exempel lokalisering av ny stadsdel kan övervägas med beräknad klimatpåverkan från transporter i åtanke.

## 6.10 Förslag på vidare studier

Beräkningar som görs med syftet att bedöma framtida klimatpåverkan bör för bästa resultat ta hänsyn till framtidsprognoser för emissioner från produktion av fjärrvärme och el. För fjärrvärmens kräver detta en ingående utredning av fjärrvärmebolagens framtidsplaner och förväntade bränslefördelning. Även utvecklingen av teknik för koldioxidinfångning kan ha en möjlig påverkan på framtida emissioner från

fjärrvärme. För elproduktionen behövs en utredning av både nationella planer och planer för omgivande länder då export och import av el över landsgränserna idag är ett frekvent inslag på elmarknaden. En högre tidsupplösning som tar hänsyn till förändringar i emission beroende på när energin används är också en möjlig förbättringspotential för vidare studier.

Som tidigare nämnts finns möjliga kopplingar mellan val av byggmaterial/byggsystem och byggnaders energiförbrukning. I detta arbete har byggnaders energiförbrukning inte varierats för olika byggsystem. En sådan fördjupning skulle därför vara möjlig för vidare studier. I en sådan studie skulle även byggmaterialens livslängd kunna studeras i detalj och tas hänsyn till i beräkningarna.

Osäkerheter för effekter av åtgärder inom transportsektorn har som tidigare nämnts försvårat arbetet. Möjligheten att accelerera elektrifieringen av fordonsflottan, genom till exempel satsningar på laddinfrastruktur, kan anses speciellt svårbedömt eftersom denna pågående process aldrig skett tidigare och bristen på data gällande dessa effekter därför är extra tydlig. Förhoppningen är dock att det under de närmaste åren kommer göras studier på laddinfrastruktur vilka ökar insikten i processen och som sedan kan förbättra antaganden inom arbeten som detta.

## 7 Slutsats

Syftet med detta arbete har varit att öka insikten kring vilka vägval vid upprättandet av en ny stadsdel som har betydande påverkan på det totala klimatavtrycket, samt att undersöka hur modellering av en stadsdels klimatpåverkan kan användas för att öka sådana insikter. För att besvara dessa frågeställningar har en modellering av stadsdelen Nyhamnen i Malmö gjorts i modelleringsverktyget Stella. En undersökning har även gjorts för att hitta eventuella återkopplingsmekanismer som inverkar på stadsdelars klimatpåverkan.

Bakgrundsstudien för arbetet visade att klimatpåverkan från bygg- och fastighetssektorn tillsammans med transportsektorn står för cirka hälften av de nationella växthusgasutsläppen i Sverige, samt att vägval i stadsbyggnadsprocessen inom dessa sektorer kan ge lock-in effekter som leder till klimatpåverkan för lång tid framöver. Beräkning av klimatpåverkan och vägval i stadsbyggnaden rörande dessa sektorer inkluderades därför i modelleringsarbetet.

Resultaten visar att det för fallet Nyhamnen finns vägval för byggmaterial, uppvärmningslösningar och trafikplanering som alla kan minska klimatpåverkan med mellan 8–15%, sett över 50 år från stadsdelens byggstart. En kombination av dessa lösningar bedöms kunna sänka klimatpåverkan med 38% jämfört med standardscenariot. Samtidigt beräknades att en kombination av de lösningar som beräknats ge lägst klimatpåverkan ger ett totalt elbehov som är 33% högre än standardfallet.

Gällande återkopplingsmekanismer med potentiell inverkan på klimatavtrycket har ett fåtal sådana identifierats i litteraturen. Dessa återkopplingsmekanismer har identifierats på transportområdet, främst rörande val av transportmedel och social påverkan som driver på omställningen till mer transporteffektiva färdmedel och elfordon. Återkopplingarna inverkar på klimatavtrycket har inte kvantifierats i detta arbete, något som förhoppningsvis kan implementeras i vidare studier.

Genom arbetet har framgått att scenario-baserad dynamisk modellering liknande den som genomförts i detta arbete kan anses vara en användbar metod för att kvantifiera betydelsen av olika vägval i stadsbyggnadsprocessen ur klimatsynpunkt. Samtidigt är slutsatsen att denna typ av modellering, som endast tar hänsyn till klimatpåverkan för lokala stadsbyggnadslösningar, i beslutsprocesser behöver kompletteras med utredningar från andra perspektiv. Exempel på andra viktiga perspektiv är vägvalens betydelse för energisystemet i stort, gällande ökade elbehov m.m., och målkonflikter rörande t.ex. markanvändning. En rekommendation är därför att modelleringsverktyg för kvantifiering av klimatpåverkan, liknande det som utvecklats i detta arbete, bör användas tillsammans med andra verktyg som hanterar andra aspekter för att nå bästa möjliga beslut för en stadsdel som helhet.

## 8 Referenser

- Agnew, S., Smith, C. & Dargusch, P. (2019). Understanding transformational complexity in centralized electricity supply systems: Modelling residential solar and battery adoption dynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, nr.109437. doi: 10.1016/j.rser.2019.109437
- Bernadino, J.P.R. & van der Hoofd, M. (2013). Parking policy and urban mobility level of service–system dynamics as a modelling tool for decision making. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 13(3), ss. 239-258. doi:10.18757/ejtir.2013.13.3.3001
- Bernardo, R. (2021). *Photovoltaic systems, components, costs, shading and by-pass diodes*. Lund, Sverige, 5 februari 2021.
- Boverket. (2020a). *Konsekvensutredning BFS 2020:4. Boverkets föreskrifter om ändring i verkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, BBR, avsnitt 5 och 9*.
- Boverket (2020b). *Parkering som styrmedel*.  
[https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/oversiktsplan/allmannaintressen/hansyn/miljo\\_klimat/klimatpaverkan/transport/parkering](https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/oversiktsplan/allmannaintressen/hansyn/miljo_klimat/klimatpaverkan/transport/parkering) [2021-03-31]
- Boverket. (2020c). *PBL kunskapsbanken – en handbok om plan- och bygglagen*.  
<https://www.boverket.se/globalassets/vagledning/kunskapsbanken/oversiktsplanering/vagledning>
- Boverket (2021a). *Miljöindikatorer - aktuell status*. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status> [2021-02-22]
- Boverket (2021b). *Regler för laddinfrastruktur*.  
<https://www.boverket.se/sv/byggande/uppdrag/avslutade-uppdrag/regler-for-laddinfrastruktur> [2021-03-09]
- Byfors, S. & Sundberg, C. (2014). *Modellering av Uppsala kommuns energisystem och växthusgasutsläpp i LEAP*. Uppsala: SLU, Institutionen för energi och teknik.  
<https://klimatprotokollet.uppsala.se/globalassets/klimatprotokollet2/dokument/rapport-underlag-till-leap.pdf>
- Climate View AB. (2020). *Om oss*. <https://sv.climateview.global/about> [2021-02-23]
- Collaço, F.M.A., Dias, L.P., Simoes, S.G., Pukšec, T., Seixas, J. & Bermann, C. (2019). What if São Paulo (Brazil) would like to become a renewable and endogenous energy-based megacity? *Renewable energy*, 138, ss.416-433. doi: 10.1016/j.renene.2019.01.073
- Driscoll, P.A. (2014). Breaking Carbon Lock-In: Path Dependencies in Large-Scale Transportation Infrastructure Projects. *Planning Practice and Research*, 29(3), ss. 317-330. doi: 10.1080/02697459.2014.929847
- Elbilslandet Syd. (2021). *Om Elbilslandet Syd*. <https://elbilslandetsyd.se/om/> [2021-03-04]
- Energikommissionen. (2017). *Kraftsamling för framtidens energi*.  
[https://www.regeringen.se/4a024d/contentassets/1996569dcb2844869fc319b35a3ba4f1/sou-2017\\_kraftsamling-for-framtidens-energi.pdf](https://www.regeringen.se/4a024d/contentassets/1996569dcb2844869fc319b35a3ba4f1/sou-2017_kraftsamling-for-framtidens-energi.pdf)

Energimyndigheten. (2018). *Transporteffektivt samhälle*. <http://www.energimyndigheten.se/klimat--miljo/transporter/transporteffektivt-samhalle/>

E.ON. (2021a). *Ett steg närmare utsläppsfri energi i Malmö*. <https://www.eon.se/nyheter/ett-steg-naermare-utslaeppsfri-energi-i-malmoe> [2021-02-23]

E.ON. (2021b). *Fjärrvärme – ett bra miljöval*. <https://www.eon.se/fjarrvarme/miljopaverkan> [2021-02-23]

E.ON Energilösningar. (2020). *DjupGeo – En möjlig "game changer" med pågående testhålsprojekt i Malmö*. Malmö, Sverige 7 april 2020.

Erickson, P. & Tempest, K. (2015). *Keeping cities green: Avoiding carbon lock-in due to urban development*. Seattle, WA: Stockholm Environment Institute. <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/Climate/SEI-WP-2015-10-C40-Cities-carbon-lock-in.pdf>

Erlandsson, M., Malmqvist, T., Francart, N. & Kellner, J. (2018). *Minskad klimatpåverkan från nybyggda flerbostadshus - LCA av fem byggsystem*. u.o: Sveriges Byggindustrier.

Europeiska kommissionen. (2020). *Proposed Mission: 100 Climate-neutral Cities by 2030 – by and for the Citizens*, Luxemburg: Publications Office of the European Union. [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research\\_and\\_innovation/funding/documents/ec\\_rtd\\_mission-board-report-climate-neutral-and-smart-cities.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/funding/documents/ec_rtd_mission-board-report-climate-neutral-and-smart-cities.pdf)

Europeiska rådet. (2020). *Energiunionen*. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/sv/MEMO\\_15\\_4485](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/sv/MEMO_15_4485) [2021-02-22]

FEBY. (2019). *Kravspecifikation för energieffektiva byggnader*. <https://www.feby.se/files/rapporter/2019-12-12-kravspecifikation-feby18.pdf> [2021-03-30]

Feng, Y.Y., Chen, S. Q. & Zhang, L.X. (2012). System dynamics modeling for urban energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling*, 252, ss.44-52. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.09.008

Futureproofed. (2020). *Making your city futureproofed*. <https://www.futureproofed.com/cities> [2021-02-23]

García-Gusano, D., O'Mahony, T., Iribarren, D & Dufour, J. (2019). Lessons for regional energy modelling: enhancing demand-side transport and residential policies in Madrid. *Regional Studies*, 53(6), ss.826-837.

Gode, J., Nilsson, J., Ottosson J. & Sidvall A. (2020). *Klimatbedömning av energilösningar i byggnader -Pilotprojekt för test av verktyget Tidstegen*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://www.ivl.se/publikationer/publikation.html?id=5831>

Gustafsson, L., Lanshammar, H. & Sandblad B. (1982). *System och modell. En introduktion till systemanalysen*. Lund: Studentlitteratur.

Görman, F. and Tham Johansson, M. (2019). *Klimatpåverkansbedömning av energieffektiva lösningar för byggnader-Jämförelse av klimatpåverkan från olika isoleringsmaterial och energisystem*.

Heaps, C.G. (2020). *LEAP: The Low Emissions Analysis Platform*. [Software version: 2020.1.21] Somerville, MA, USA: Stockholm Environment Institute. <https://leap.sei.org/>

isee systems. (2021). *Our Story*. <https://www.iseesystems.com/about.aspx> [2021-02-23]

Klimatpolitiska rådet. (u.å.). *Panorama Sverige*.

<https://app.climateview.global/public/board/ec2d0cdf-e70e-43fb-85cb-ed6b31ee1e09>

Kommunfullmäktige Malmö stad. (2020). *MALMÖ STADS BUDGET 2021. Ett öppet och tryggt Malmö i en ny tid*.

<https://malmo.se/download/18.4f363e7d1766a784af18ed8/1610706348463/Budget%202021%20Malm%C3%B6%20stad.pdf.pdf> [2021-02-23]

Kulin & Andersson. (2019) *Elbilsläget 2018. Prognos elbilsutvecklingen 2019*.

<https://powercircle.org/wp-content/uploads/2019/01/Prognos-och-statistik-elektrifiering-transportsektorn1.pdf>

Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA). (2019). *Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen. En delrapport från IVA-projektet Vägval för klimatet*.

<https://www.iva.se/globalassets/bilder/projekt/vagval-klimat/201909-iva-vagval-for-klimatet-delrapport4-i.pdf>

Larsson, M., Erlandsson, M., Malmqvist, T. & Kellner, J. (2016). *Byggandets klimatpåverkan. Livscykelberäkning av klimatpåverkan för ett nyproducerat flerbostadshus med massiv stomme av trä*. <https://www.ivl.se/download/18.29aef808155c0d7f05063/1467900250997/B2260.pdf>

LFM30. (2021). *Malmö växer hållbart – tillsammans*. <https://lfm30.se/mal-strategier/>

Loulou, R., Goldstein, G., Kanudia, A., Lehtila, A., & Remne, U. (2005). *Documentation for the TIMES Model - PART I*. [https://iea-etsap.org/docs/Documentation for the TIMES Model-Part-I.pdf](https://iea-etsap.org/docs/Documentation%20for%20the%20TIMES%20Model-Part-I.pdf)

Malmö stad. (2016). *Trafik- och mobilitetsplan för ett mer tillgängligt och hållbart Malmö*.

Malmö stad. (2019). *Översiktsplan för Nyhamnen. Fördjupning av Översiktsplan för Malmö*.

<https://malmo.se/download/18.4f363e7d1766a784af162f7/1610101752580/%C3%96versiktsplan%20f%C3%B6r%20Nyhamnen,%20antagen%20december%202021.webb.pdf>

Malmö stad. (2020). *Policy och norm för mobilitet och parkering i Malmö*. [Policy och norm för mobilitet och parkering i Malmö \(malmo.se\)](https://malmo.se/Policy-och-norm-f%C3%B6r-mobilitet-och-parkering-i-Malm%C3%B6)

Malmö stad. (2021). *Koldioxidutsläpp per invånare*.

<http://miljobarometern.malmo.se/klimat/utslapp-av-vaxthusgaser/koldioxidutslapp-per-invanare/> [2021-02-23]

Meadows, D. H. (1999). *Leverage Points: Places to Intervene in a System*. Hartland, VT: Sustainability Institute. [http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Leverage\\_Points.pdf](http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Leverage_Points.pdf)

McCay, A.T., Feliks, M.E.J. and Roberts, J.J. (2019). Life cycle assessment of the carbon intensity of deep geothermal heat systems: A case study from Scotland. *Science of the Total Environment*, 685, ss.208-219. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.311

Meadows, D.H. (2008). *Thinking in systems: A primer*. London: Earthscan.

- MIT Sloan School of Management. (2021). *System Dynamics*.  
<https://mitsloan.mit.edu/faculty/academic-groups/system-dynamics/about-us> [2021-02-23]
- Naturvårdsverket & Boverket. (2019). *Klimatscenarier för bygg- och fastighetssektorn*.  
<http://www.naturvardsverket.se/upload/sa-mar-miljon/klimat-och-luft/klimat/PM-Klimatscenarier-bygg-fastighetssektorn.pdf>
- Naturvårdsverket. (2020a). *Territoriella utsläpp och upptag av växthusgaser*.  
<http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-territoriella-utslapp-och-upptag> [2021-02-22]
- Naturvårdsverket. (2020b). *Utsläpp av växthusgaser från el och fjärrvärme*.  
<https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-el-och-fjarrvarme> [2021-02-22]
- Naturvårdsverket. (2020c). *Utsläpp av växthusgaser från inrikes transporter*.  
<http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/> [2021-02-22]
- Naturvårdsverket. (2021a). *Hur kan jag minska min klimatpåverkan?*  
<https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Klimat/minska-min-klimatpaverkan/> [2021-02-23]
- Naturvårdsverket. (2021b). *Import och export av avfall*. <https://naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Avfall-import-och-export> [2021-02-22]
- Pardo-García, N., Simoes, S.G., Dias, L., Sandgren, A., Suna, D. and Krook-Riekkola, A. (2019). Sustainable and Resource Efficient Cities platform—SureCity holistic simulation and optimization for smart cities. *Journal of cleaner production*, 215, ss.701-711. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.070
- Patt, A., Aplyn D., Weyrich P. & van Vliet, P. (2019). Availability of private charging infrastructure influences readiness to buy electric cars. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 125, ss. 1-7. doi: 10.1016/j.tra.2019.05.004
- Regeringen. (2018). *Strategi för Levande städer – politik för en hållbar stadsutveckling*. Skr. 2017/18:230.  
<https://www.regeringen.se/4971fa/contentassets/b5640fd317d04929990610e1a20a5383/171823000webb.pdf>
- Regeringskansliet. (2019). *Transporteffektivitet*. <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/transportsektorn-staller-om-for-klimatet/transporteffektivitet/>
- Region Skåne & Malmö stad. (2019). *Så reser vi i Malmö kommun. Resvaneundersökning 2018*.  
[https://malmo.se/download/18.38c6709716cae2cad392d582/1578405143257/resvaneundersokning\\_rapport\\_malmo\\_2018.pdf](https://malmo.se/download/18.38c6709716cae2cad392d582/1578405143257/resvaneundersokning_rapport_malmo_2018.pdf)
- Romson, Å., Ivansson M. & Holm, F. (2020). *Att styra mot minskad bilparkering – om Plan- och bygglagen, p-tal och mobilitetsåtgärder*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.  
<https://www.ivl.se/publikationer/publikation.html?id=6117>

- Roth, A., Hult, C., Hult, Å., Vikengren, T. & Koucky, M. (2018). *Sänkt p-tal som drivkraft för attraktiv stadsbyggnad och hållbar mobilitet*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.  
<https://www.ivl.se/publikationer/publikation.html?id=5529>
- Seto, K.C., Davis, S.J., Mitchell, R.B., Stokes, E.C., Unruh, G. & Ürge-Vorsatz, D. (2016). Carbon Lock-in: Types, Causes, and Policy Implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, ss.425-452. doi: 10.1146/annurev-environ-110615-085934
- SFS 2001:512. *Förordning om deponering av avfall*. Stockholm: Miljödepartementet.
- Simoes, S.G., Dias, L., Gouveia, J.P., Seixas, J., De Miglio, R., Chiodi, A., Gargiulo, M., Long, G. & Giannakidis, G. (2019). InSmart—A methodology for combining modelling with stakeholder input towards EU cities decarbonisation. *Journal of cleaner production*, 231, ss.428-445. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.143
- Statistiska centralbyrån. (2018). *Sveriges framtida befolkning 2018–2070*.  
[https://www.scb.se/contentassets/b3973c6465b446a690aec868d8b67473/be0401\\_2018i70\\_br\\_be51br1801.pdf](https://www.scb.se/contentassets/b3973c6465b446a690aec868d8b67473/be0401_2018i70_br_be51br1801.pdf)
- Statistiska centralbyrån. (2021a). *Fordon enligt bilregistret efter fordonsslag och bestånd. Månad 1975M01 – 2021M01*.  
[https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START\\_TK\\_TK1001\\_TK1001A/Fordon/](https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_TK_TK1001_TK1001A/Fordon/)
- Statistiska centralbyrån. (2021b). *Genomsnittlig bostadsarea per person efter region, hushållstyp och boendeform. År 2012 – 2019*.  
[https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START\\_HE\\_HE0111/HushallT23/#](https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_HE_HE0111/HushallT23/#) [2021-02-23]
- Sterman, J. D. (2001). System Dynamics Modeling: Tools for learning in a complex world. *California Management Review*, 43(4), ss. 8–25. doi: 10.2307/41166098
- Storbjörk, S., Isaksson, K., Hjerpe M., Antonson H. & Hrelja R. (2017). *Kommunerna och klimatomställningen: Lärdomar om klimatfrågans integrering i lokal policy och planering. En slutrapport från forskningsprojektet CLIPP*. Linköping: Linköping University Electronic Press.  
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1091408/FULLTEXT01.pdf>
- Struben, J. & Sterman, J.D. (2008). Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(6), ss..1070–1097. doi: 10.1068/b33022t
- Sveriges Kommuner och Landsting. (2017). *Ladda för framtiden – laddinfrastruktur för elfordon*.  
<https://skr.se/tjanster/merfranskr/rapporterochskrifter/publikationer/laddaforframtidenladdinfrastrukturforelfordon.28713.html>
- Sweden Green Building Council. (2019). *Citylab Manual – Manual för certifiering av en stadsdels hållbarhet*. <https://www.sgbc.se/app/uploads/2019/11/CitylabManual-1.0-Webb.pdf>
- Sysav. (2020). *Avfall som bränsle*. <https://www.sysav.se/om-oss/Om-avfall/energiatervinning/Avfall-blir-energi/> [2021-02-23]
- Trafikverket. (2016). *Trafikverkets Miljörapport 2016*. [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/25491/Ineko.Product.RelatedFiles/2017\\_090\\_trafikverkets\\_miljorapport\\_2016.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/25491/Ineko.Product.RelatedFiles/2017_090_trafikverkets_miljorapport_2016.pdf)



Trafikverket. (2020) *Metoder för framtagande av indata och förutsättningar – Sampers Basprognoser 2020-06-15*.

<https://www.trafikverket.se/contentassets/19d85cfc691b4df3bff6c851d4097623/2020/metoder/metoder-for-framtagande-av-indata-och-forutsattningar-sampers-basprognoser-200615.pdf>

Unruh, G.C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy policy*, 28(12), ss.817-830. doi:10.1016/S0301-4215(00)00070-7

Unruh, G.C. (2002). Escaping carbon lock-in. *Energy policy*, 30(4), ss.317-325. doi: 10.1016/S0301-4215(01)00098-2

Vattenfall. (u.å.). *Ursprungsmärkning och miljöpåverkan på vår el*.

<https://www.vattenfall.se/elavtal/energikallor/elens-ursprung/> [2021-03-03]

van Bers, C., Bakkes, J. & Hordijk L. (red.). (2016). *Building Bridges from the Present to Desired Futures: Evaluating Approaches for Visioning and Backcasting*. Osnabrück, Germany: The Integrated Assessment Society. doi: 10.13140/RG.2.2.27914.47048

Wang, Q., Laurenti, R. & Holmberg, S. (2015). A novel hybrid methodology to evaluate sustainable retrofitting in existing Swedish residential buildings. *Sustainable Cities and Society*, 16, ss. 24–38.

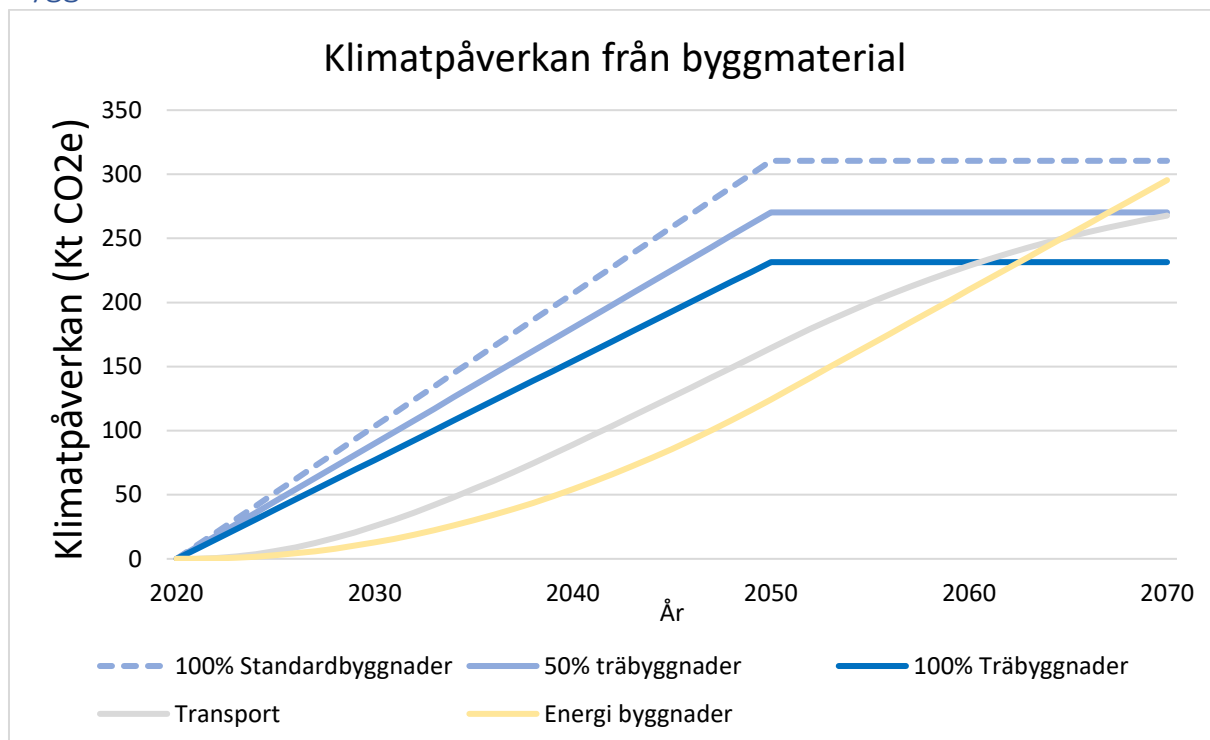
Wisell, T., Hult, C., Larsson, M. O. & Fredricsson, C. (2020). *Omvärldsanalys och långtidsbedömning av den svenska vägfordonsflottans utveckling*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.

<https://www.ivl.se/download/18.7342a03f17582337c283160/1605084260539/C476.pdf>

Yang, D., Liu, B., Ma, W., Guo, Q., Li, F. & Yang, D. (2017). Sectoral energy-carbon nexus and low-carbon policy alternatives: A case study of Ningbo, China. *Journal of Cleaner Production*, 156, ss.480-490. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.068

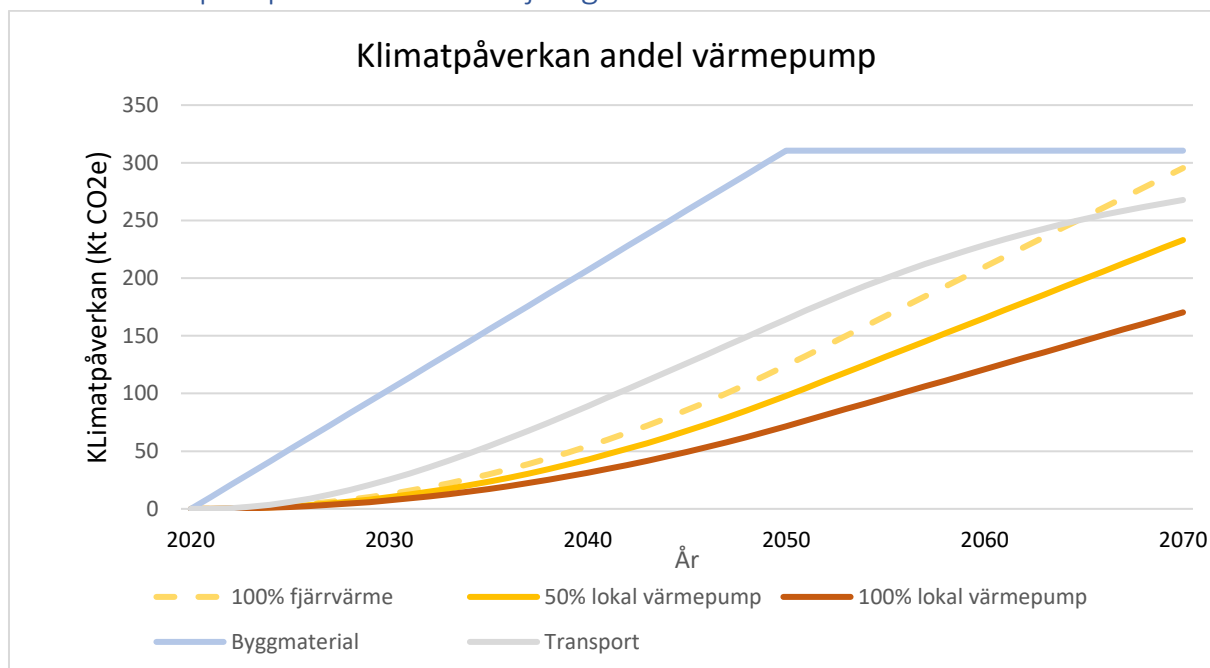
## Bilaga 1

### Byggmaterial



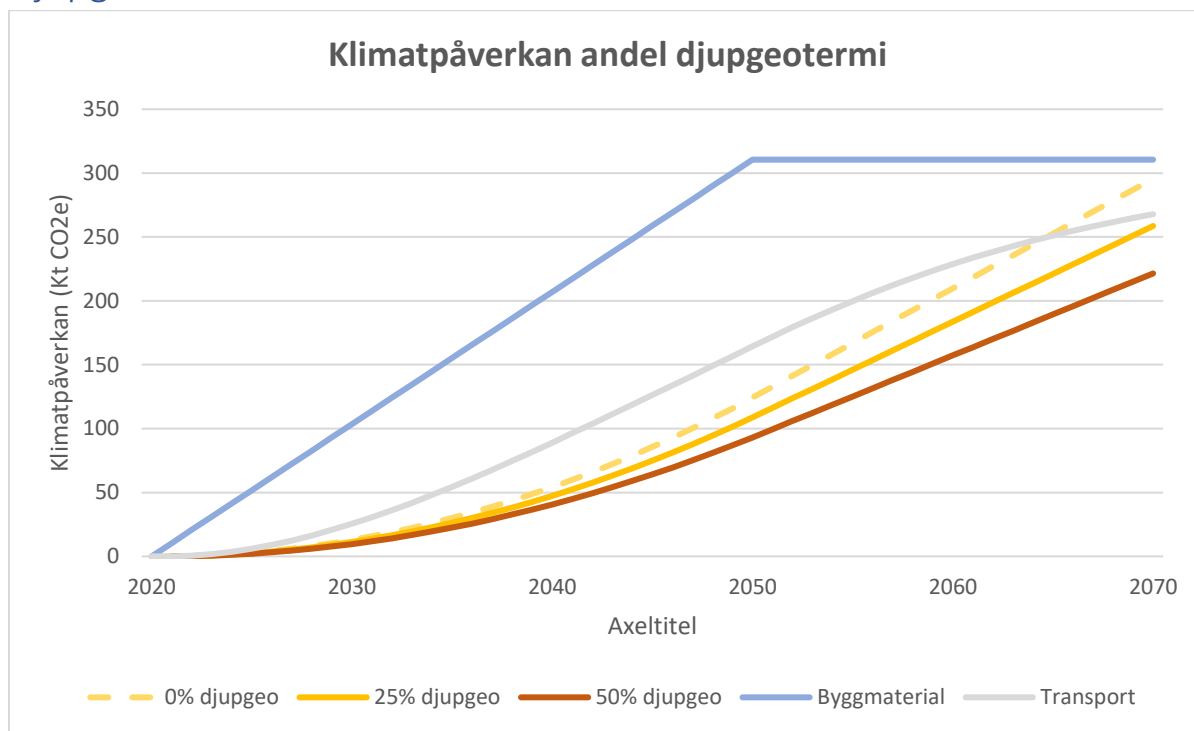
Figur 24 Klimatpåverkan från byggmaterial 100% standardbyggnader 50% standard/50% träbyggnader och 100% träbyggnader. Diagrammet inkluderar även utsläpp från transport och energi till byggnader för grundscenariot för jämförelse.

### Andel värmepump till värmeförsörjning



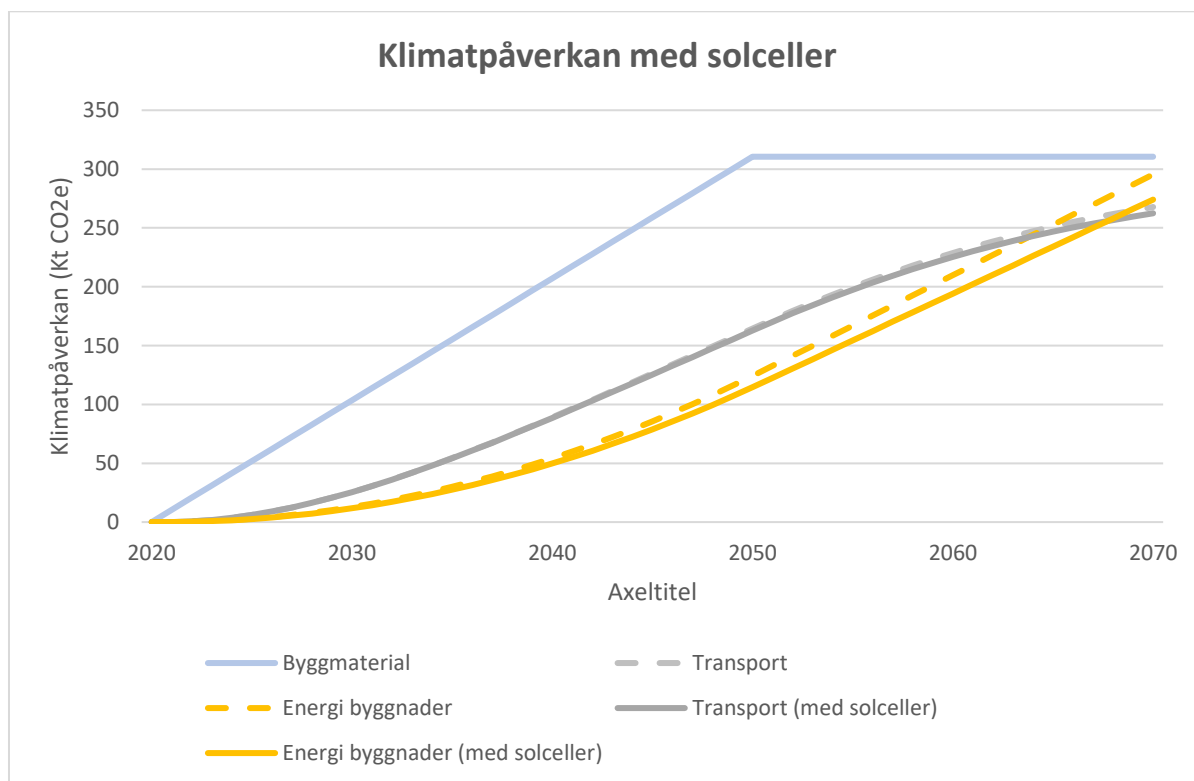
Figur 25 Klimatpåverkan från energi till byggnader för tre olika värmesystem: 100% fjärrvärme, 50% fjärrvärme/50% lokal bergvärmepump och 100% bergvärmepump. Diagrammet inkluderar även utsläpp från byggmaterial och transport för grundscenariot för jämförelse.

## Djupgeotermi



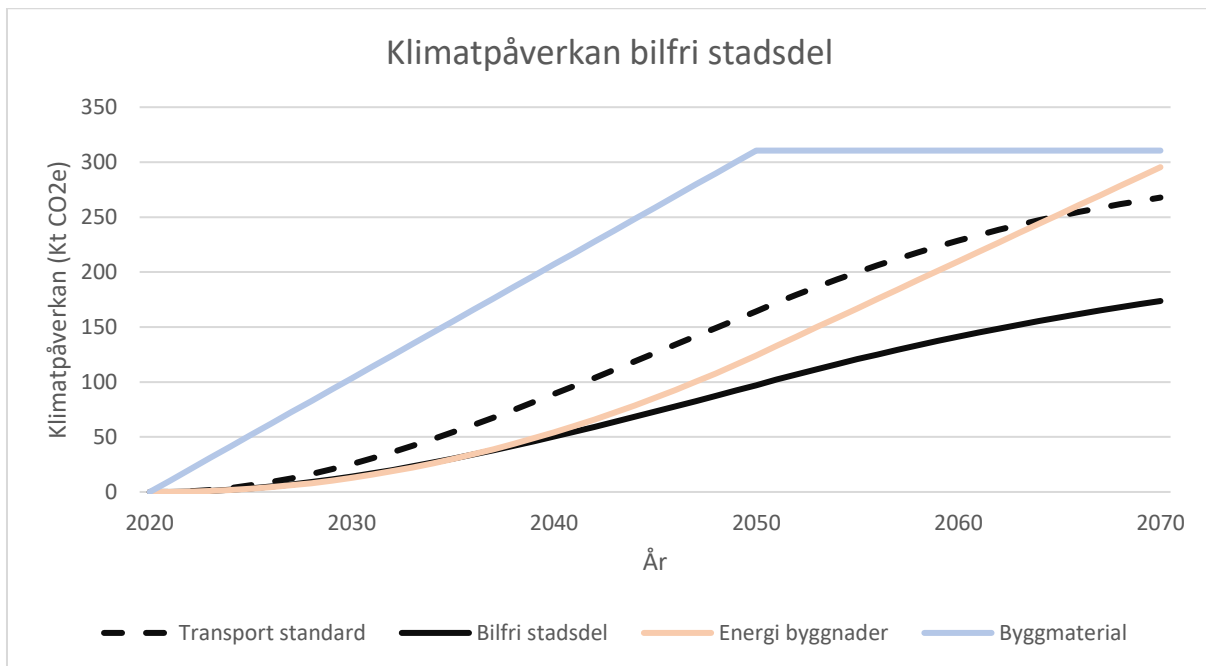
Figur 26 Klimatpåverkan från energi till byggnader för tre olika värmelösningar för fjärrvärme: 0% djupgeotermi, 25% djupgeotermi och 50% djupgeotermi. Diagrammet inkluderar även utsläpp från byggnadsmaterial och transport för grundscenariot för jämförelse.

## Solceller



Figur 27 Klimatpåverkan från energi till byggnader och transport med eller utan solceller. Diagrammet inkluderar även utsläpp från byggnadsmaterial för grundscenariot för jämförelse.

## Bilfri stadsdel



Figur 28 Klimatpåverkan från transport för två olika fall: planering för bilfri stadsdel och färdmedelsfördelning för grundscenariot (transport standard). Diagrammet inkluderar även utsläpp från byggmaterial och energi till byggnader för grundscenariot för jämförelse.

## Bilaga 2

Använda parametrar i modellberäkningar som inte redovisas i texten redovisas i tabellen nedan.

Parameter	Storlek	Enhet	Källa
Total bostadsyta	800 000	BTA	Översiktsplan för Nyhamnen
Total kontorsyta	350 000	BTA	Översiktsplan för Nyhamnen
Byggnationstid	30	År	Översiktsplan för Nyhamnen
Klimatpåverkan byggmaterial	Redovisas ej	kg CO <sub>2</sub> e/BTA	Kontakt med IVL
Emissionsfaktor fjärrvärme Malmö (residualmix)	0,098	kg CO <sub>2</sub> e/kWh	(E.ON 2021b)
Värmebehov kontor (inkl. tappvarmvatten)	32	kWh/m <sup>2</sup> ,år	Kontakt med IVL
Värmebehov bostäder (inkl. tappvarmvatten)	55	kWh/m <sup>2</sup> ,år	Kontakt med IVL
Emissionsfaktor el nordisk elmix	Redovisas ej	kg CO <sub>2</sub> e/kWh	Kontakt med IVL
Emissionsfaktor djupgeotermi	12 (medel för 9,7-14.0)	kg CO <sub>2</sub> e/MWh	(McCay et al. 2019)
Elbehov bostäder (fastighets- och hushållsel)	40	kWh/m <sup>2</sup> ,år	Kontakt med IVL
Elbehov kontor (fastighets- och verksamhetsel)	65	kWh/m <sup>2</sup> ,år	Kontakt med IVL
Produktion (solceller)	1000	kWh/kWp,år	(Bernardo 2021)
Emissionsfaktor solceller	0,028	kg CO <sub>2</sub> e/kWh	(Vattenfall u.å.)
Effektivitet solceller	14	%	(Bernardo 2021)