Examensarbete inom teknik

Grundnivå, 15hp

Digitala Tvillingar i Byggnadsprocessen

En studie om samarbete och funktionalitet

WILLIAM FYLES

MARC HOFBERG

Juli 6, 2024

Handledare: Jonas Anund Vogel & Per Lundqvist
Examinator: Per Lundqvist
MJ148X

Sammanfattning

Bygg- och fastighetssektorn är just nu den sektor med störst utsläpp av växthusgaser och står för ungefär 37% av världens totala utsläpp och är därför i kraftigt behov av förändring och nya klimatsmarta lösningar och innovationer. En metod för att minska bygg- och fastighetssektorns klimatpåverkan som har blivit alltmer populär är att göra en så kallad digital tvilling av byggnaden. Definitionen för en digital tvilling är omtvistad och varierar ofta från aktör till aktör men kan övergripande beskrivas som någon slags virtuell avbildning av något fysiskt, till exempel en byggnad. Med hjälp av bland annat sensorer, ställdon, simuleringsverktyg och IoT kan den digitala tvillingen planera och optimera hur en byggnad ska se ut, övervaka en byggarbetsplats eller kontrollera en byggnad. En digital tvilling kan ha många funktioner och att utveckla den är en komplicerad process som många aktörer är inblandade i. Denna rapport har som syfte att undersöka vilka funktioner som kan finnas i den digitala tvillingen i varje fas samt hur samarbetet ser ut i framtagningen av en digital tvilling och om det är fördelaktigt för aktörer att samarbeta med varandra.

Byggnadens livscykel inleds med design- och planeringsfasen. I denna fas kan man med hjälp av en digital tvilling göra simuleringar för att undersöka vilka material som passar bäst till byggnadens plats och funktion och som gör byggnaden mest klimateffektiv. Under byggnadens andra fas, byggskedet, kan man använda den digitala tvillingen för att undvika felkonstruktioner och onödiga kostnader. Den kan också användas för att öka säkerheten för arbetarna samt som ett samarbetsverktyg för de inblandade aktörerna. Den sista fasen är driftfasen. I denna fas kan den digitala tvillingen optimera energianvändningen, mäta och kontrollera klimatfaktorer och på så sätt även minska driftkostnaderna. Livscykeln avslutas med rivning av byggnaden. I en perfekt värld utvecklas den digitala tvillingen med byggnaden och får fler funktioner i varje fas, men på grund av bland annat ineffektiva samarbeten under och mellan faserna går mycket arbete förlorat. Detta beskriver även de aktörer som har intervjuats under arbetet. Problematiken med samarbetet kan spåras till hur kontrakten ser ut mellan aktörerna men även till tillitsproblem.

För att reda ut situationen gällande samarbete för utveckling av digitala tvillingar gjordes en PESTLE-analys där främjande och hindrande faktorer kategoriserades och sammanställdes. Det är uppenbart att samarbetet kan påverkas av till exempel olika politiska incitament men även ökad teknisk kompetens och samarbetsprojekt kan hjälpa till att stärka förståelsen för digitala tvillingars potentiella fördelar.

Sammanfattningsvis kan digitala tvillingar implementeras i alla stadier under en byggnads livscykel och fortsättningsvis diskuteras det om det är fördelaktigt eller inte att utveckla den digitala tvillingen från början under den inledande design- och planeringsfasen. Samarbetet kring utvecklingen av digitala tvillingar kan visa sig inte vara lönsamt för alla inblandade parter då det till exempel saknas politiska incitament och det finns flera risker och kostnader. På grund av detta måste man noggrant analysera för- och nackdelar för alla intresserade parter innan man utvecklar en och samma digital tvilling genom byggnadens livscykel.

Abstract

The construction and real estate sector is currently the one with the largest greenhouse gas emissions, accounting for approximately 37% of the world's total emissions, and is therefore in dire need of change and new climate-smart solutions and innovations. One method to reduce the climate impact of the construction and real estate sector that has become increasingly popular is to create a so-called digital twin of the building. The definition of a digital twin is debated and often varies from one actor to another but can broadly be described as some kind of virtual representation of something physical, such as a building. With the help of sensors, actuators, simulation tools and IoT, the digital twin can plan and optimize how a building should look, monitor a construction site, or control a building. A digital twin can have many functions, and developing it is a complicated process involving many actors. This report aims to investigate what functions can exist in the digital twin at each stage and how collaboration looks in the development of a digital twin and whether it is beneficial for actors to cooperate with each other.

The building's life cycle begins with the design and planning phase. In this phase, a digital twin can be used to run simulations to determine which materials are best suited for the building's location and function and make the building as climate-efficient as possible. During the building's second phase, the construction stage, the digital twin can be used to avoid construction errors and unnecessary costs. It can also be used to increase worker safety and as a collaboration tool for the involved actors. The final phase is the operational phase. In this phase, the digital twin can optimize energy use, measure and control climate factors, and thereby reduce operating costs. The life cycle ends with the demolition of the building. In a perfect world, the digital twin is developed along with the building and gains more functions at each phase, but due to, among other things, inefficient collaborations during and between the phases, much work is lost. This is also described by the actors who have been interviewed. The problem with collaboration can be traced to how contracts are structured between the actors but also to issues of trust.

To clarify the situation regarding collaboration for the development of digital twins, a PESTLE analysis was conducted where promoting and hindering factors were categorized and compiled. It is evident that collaboration can be influenced by for example various political incentives, but increased technical competence and collaborative projects can also help strengthen the understanding of the potential benefits of digital twins.

In summary, digital twins can be implemented at any stage of a building's life cycle, and it remains a topic of discussion whether it is advantageous or not to develop the digital twin from the beginning during the initial design and planning phase. Collaboration in the development of digital twins may not be profitable for all parties involved, as there may be a lack of political incentives and several risks and costs. Therefore, it is crucial to carefully analyze the pros and cons for all interested parties before developing a single digital twin throughout the building's life cycle.

Innehållsförteckning

Sammanfattning 2

Abstract 3

Figurer 6

Nomenklatur 7

1. Bakgrund 8

1.1 Digitala tvillingar 8

1.1.1 Building Information Model (BIM) 9

1.1.2 Building Performance Simulation (BPS) 9

1.1.3 Internet of Things (IoT) 10

1.1.4 Blockkedjeteknik 11

1.1.5 Olika nivåer av digital tvilling 11

1.2 En byggnads livscykel 12

1.2.1 Design och planering 13

1.2.2 Byggskedet 13

1.2.3 Drift 14

1.2.4 Kontrakt under byggnadens livscykel 14

1.3 Tidigare forskning inom området och Dig-IT Lab 15

2. Syfte och problemformulering 17

3. Metod 18

3.1 Metod för litteraturstudie 18

3.2 Metod för intervjuer 18

3.3 PESTLE-analys 18

3.4 Metoddiskussion 19

3.5 Källdiskussion 20

4. Avgränsningar 21

5. Resultat från litteraturstudie 22

5.1 Digitala tvillingar och dess roll under en byggnads livscykel 22

5.1.1 Digitala tvillingars funktion under design- och planeringsfasen..... 22
5.1.2 Digitala tvillingars funktion under byggskedet..... 23
5.1.3 Digitala tvillingars funktion under driftfasen..... 25
5.1.4 Digitala tvillingen genom faserna..... 27
5.2 Samarbete..... 28
5.2.1 Kontrakt..... 28
5.3 Politiska incitament..... 28
6. Resultat från intervjuer med aktörer..... 30
6.1 Bakgrund till de intervjuade företagen..... 30
6.2 Sammanställning av resultat från intervjuer..... 30
7. PESTLE-analys..... 33
7.1 Politik..... 33
7.2 Ekonomi..... 33
7.3 Social..... 34
7.4 Teknologi..... 34
7.5 Juridik..... 35
7.6 Miljö..... 36
7.7 Sammanfattning av PESTLE-analys..... 36
8. Diskussion..... 38
8.1 En digital tvilling från livscykelns början?..... 38
8.2 Samarbete kring digitala tvillingar..... 38
8.3 Framtida forskning..... 39
8.4 Övrig diskussion..... 40
9. Slutsats..... 42
10. Referenslista..... 43
11. Bilagor..... 51

Figurer

Figur 1. Sammanfattning av en digital tvillings potentiella funktioner i varje fas…….27

Figur 2. En sammanfattning av PESTLE-analysen……36

Nomenklatur

BIM	-	Building Information Model
BPS	-	Building Performance Simulator
IoT	-	Internet of Things
AI	-	Artificiell Intelligens

1. Bakgrund

Bygg- och fastighetssektorn är just nu den sektor med störst utsläpp av växthusgaser och står för ungefär 37% av världens totala utsläpp (UNEP, 2023). I Sverige är denna siffra runt 20% medan sektorn samtidigt står för ungefär 40% av energiförbrukningen (Naturvårdsverket, 2023). Det är med andra ord en sektor som är i kraftigt behov av förändring vilket understryks av FN:s elfte globala mål som handlar om att göra städer mer hållbara (United Nations, u.å.). Samtidigt har den svaga svenska ekonomin i form av inflation och räntor påverkat branschen kraftigt. Till exempel har investeringar i byggnader minskat och låg 2023 på samma nivå som under finanskrisen 2008 (Byggföretagen, 2023). Trots den besvärliga ekonomiska situationen behöver bygg- och fastighetssektorn nya klimatsmarta lösningar och innovationer för att uppnå det globala målet och skapa de hållbara byggnader som krävs för minskade utsläpp. Miljö och hållbarhet är även något som flera stora företag i branschen, exempelvis Vasakronan (Vasakronan, u.å.), Castellum (Castellum, u.å.), SISAB (SISAB, u.å.) och Einar Mattsson (Einar Mattsson, u.å.) ser som en viktig del i deras verksamhet. En metod för att minska bygg- och fastighetssektorns klimatpåverkan som har blivit alltmer populär är att göra en så kallad digital tvilling av byggnaden.

1.1 Digitala tvillingar

Digital tvilling är ett mångtydigt begrepp och varierar i betydelse beroende på vilken bransch och sektor det handlar om. Begreppet skulle dessutom kunna ha olika innebörd bland aktörer inom samma bransch (Wright & Davidson, 2020). Om man analyserar det första ordet, digital, betyder det enligt Svenska Akademiens ordlista något “som avser siffror; som avser datateknik” (Svenska Akademiens Ordböcker, 2015a). Ordet tvilling från samma ordlista har betydelsen “nära relaterad och mycket lik” (Svenska Akademiens Ordböcker, 2015b). Om man ska tolka begreppet från vad orden betyder skulle det kunna definieras som datateknik som är väldigt likt verkligheten. En studie sammanfattade 46 andra olika studier som handlade om definitionen av digitala tvillingar. Den drog slutsatsen att definitionen beror på vad det är för önskat resultat man vill åstadkomma med sin digitala tvilling och att det även är detta som påverkar vad den digitala tvillingen har för egenskaper (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Ofta gäller det för de olika definitionerna att en digital tvilling innebär någon slags virtuell avbildning av något fysiskt. Detta kan bland annat vara en avbildning av en maskin, en stad eller en byggnad (IBM, u.å.a). Inom bygg- och fastighetssektorn är det främst det senare som det utvecklas digitala tvillingar för. Men även inom denna sektor kan begreppet digital tvilling skilja sig åt. Företag som främst är aktiva under byggfasen av en byggnad kan ha sin uppfattning av vad begreppet innebär medan ett företag som förvaltar byggnader kan ha en annan åsikt kring det.

Digital tvilling är inget nytt fenomen inom forskningsvärlden. Redan på 1960-talet gjorde NASA vad man skulle kunna kalla för en digital tvilling (NASA, 2021). Under rymdfärden Apollo 13 år 1970, råkade skeppet ut för en olycka under resan på väg till månen. På jorden

hade NASA ett flertal simulatorer som liknade farkosten i vilka arbetarna replikerade Apollo 13s omständigheter och på så sätt kunde dra slutsatser till hur man skulle lösa problemet och få hem passagerarna säkert. NASA använde sig av datorer och den data som fanns från Apollo 13 i sin digitala tvilling för att göra simuleringarna så framgångsrika som möjligt. Resultaten från simuleringarna kunde sedan användas och förmedlades även till passagerarna på skeppet som efter att ha rundat månen lyckades återvända till jorden vid liv. Framgången med hanteringen av olyckan kan därför i stor grad tillskrivas de digitala tvillingar som byggdes upp. Detta skulle kunna kallas för den första officiella användningen av en digital tvilling (SIEMENS, 2020). Själva konceptet med digitala tvillingar introducerades dock 2002 av Dr. Michael Grieves, medan termen digital tvilling först myntades av John Vickers på NASA år 2002 (IBM, u.å.a).

Inte förrän de senaste åren har teknologin med digitala tvillingar spridit sig i världen. Inom bygg- och fastighetssektorn har det ännu inte blivit en grundpelare i varje projekt men tekniken blir vanligare och vanligare, även om utvecklingen går långsamt. För att förstå hur digitala tvillingar fungerar och används inom bygg- och fastighetssektorn finns ett flertal verktyg som behöver beskrivas som till exempel Building Information Model, Building Performance Simulation och Internet of Things, men även blockkedjeteknik som också kan integreras med en digital tvilling.

1.1.1 Building Information Model (BIM)

Building Information Model (BIM) är en metod för att skapa en 3D-modell, en virtuell representation, av en byggnad och alla dess olika komponenter. Dessa komponenter kan sedan tilldelas och lagra information om en mängd olika saker som till exempel bredd, höjd och annan geometrisk information. Från modellen kan man också få information om andra egenskaper i materialet och det kan även kopplas till leverantörer och priser. Den digitala modellen gör det möjligt att snabbt mäta, tillföra och utvärdera hur byggnaden kommer att svara mot behov och krav (Svensk Byggtjänst, 2021).

BIM kan användas under hela byggnadens livscykel, från design och planering till byggskedet och drift. Att använda sig av BIM bär med sig många fördelar. Det har bland annat visats att användning av BIM minskar kostnader, ökar produktiviteten samt minskar antalet fel som görs under designfasen. Detta leder i sin tur till att felen även reduceras under byggskedet eftersom de potentiella felen och misstagen inte når byggarbetsplatsen. Andra fördelar med BIM är att det kan hjälpa till att minska växthusgasutsläppen. Med BIM finns alltså möjligheter att hjälpa bygg- och fastighetssektorn att nå hållbarhetsmål på flera olika sätt (Nordic BIM Group, u.å.).

1.1.2 Building Performance Simulation (BPS)

Building Performance Simulation (BPS) är ett samlingsbegrepp för digitala modeller som avbildar vissa aspekter av byggnadens prestanda med hjälp av datateknik och matematiska

modeller. Målet med en BPS är att kunna kvantifiera en byggnads prestanda vilket kan påverka dess design, konstruktion, drift och den generella kontrollen över en byggnad (De Wilde 2018). Det finns flera olika faktorer som kan undersökas med BPS men de vanligaste simuleringarna brukar handla om temperatur, ljus, ljud, luftkvalitet och energianvändning. För att kunna utföra simuleringarna krävs det vanligen information om till exempel klimatet runt byggnaden såsom temperatur och vind, byggnadens möjliga utformning och vilket material som är planerat att användas i byggnaden (Clarke & Hensen 2015).

Under det senaste årtiondet har forskning använt känd information för att konstruera BIM och BPS:er för att optimera design, byggskedet och driften av byggnader. Men på grund av brist på input av realtidsinformation i modellerna blir det svårt att reflektera kring de faktiska ändringar som görs i byggnaden över en lång tidsperiod, vilket minskar värdet och användandet av dessa digitala modeller. Detta skulle dock kunna åtgärdas med hjälp av en teknik som kallas Internet of Things (IoT) som har förmågan att göra mätningar i realtid och föra vidare informationen till ett centralsystem (Pan m.fl. 2023). Detta system kan definieras som ett övervakningssystem för byggnader där all information samlas så att den som har tillgång till data kan dra slutsatser på hur byggnaden ska styras. Data skulle också kunna skickas till ett system som styrs av artificiell intelligens (AI) som drar egna slutsatser (Agouzoul m.fl. 2021).

1.1.3 Internet of Things (IoT)

IoT brukar ofta innebära ett nätverk av sensorer och ställdon som delvis kan detektera saker och händelser i omgivningen och även reagera på dem. För att kunna använda den data som samlas in behöver nätverket vara uppkopplat mot internet. Uppbyggnaden av IoT brukar indelas i tre olika lager. I det första lagret, perceptionslagret, sker insamlingen av data med hjälp av bland annat de sensorer som finns kopplade till systemet. I det andra lagret, överföringslagret, tolkas sedan den data som har samlats in och överförs till det tredje lagret, applikationslagret. I detta lager behandlas data ytterligare och kan därefter skicka en uppmaning till ställdon att reagera eller ändra på något (Swaling & Johansson, 2018). Den stora mängd information som tillhandahålls tolkas ofta med hjälp av exempelvis maskininlärning och algoritmer. IoT skapar möjligheter att kunna optimera verksamheter genom effektivitet och lättare upptäckande av avvikelser som skulle kunna göra skada. Genom datadrivna beslut kan man även minska kostnader för exempelvis energianvändning och underhåll men även skapa bättre upplevelser för kunder eller användare av en byggnad (IBM, u.å.c).

Det är också viktigt att tänka på riskerna med tekniken. IoT kan innehålla mycket känslig information om både privatpersoner och företag vilket kan attrahera hackare och falla offer för cyberattacker. Det kan även finnas risker för spionage och avlyssning och stöld av data från IoT-system skulle kunna utnyttjas i bredare attacker eller som användning i manipulationer. Det har påvisats att bland annat bilar som är kopplade till IoT kan utsättas för hackerattacker och bli fjärrstyrda av främmande individer. Det finns därför en oro över att

detta även kan komma att drabba bland annat hus och städer som använder sig av IoT-system (Swaling & Johansson, 2018). Dessutom kan tekniken innebära intrång på människors privatliv och det är därför viktigt att följa de lagar och regler som finns. IoT kan också medföra höga initialkostnader att installera och kräver hög teknisk kompetens bland personalen för att kunna hanteras och underhållas (IBM, u.å.c).

1.1.4 Blockkedjeteknik

Blockkedjeteknik förknippas ofta med kryptovalutor men den kan även appliceras på andra användningsområden. Tekniken kan förklaras som en slags databas av block som är sammankopplade i kedjor. Varje block innehåller en typ av transaktion av en tillgång. Dessa tillgångar kan antingen vara fysiska, till exempel material eller en produkt, eller något immateriellt som en ritning eller information. I blocket kan det finnas information om när transaktionen skedde, vad det var för något, vem eller vilka som gjorde transaktionen och när tillgången skapades. När tillgången ingår i en ny transaktion skapas ett nytt block som kedjas till det tidigare blocket vilket gör att man på ett tillförlitligt sätt kan undersöka en tillgångs historia. Blockens information går sedan inte att ändra på vilket minskar risken för bedrägerier. Blockkedjan delas endast med dem som har fått tillgång till den vilket leder till att man kan lita på att informationen inte hamnar i fel händer. Den ökade säkerheten är alltså den största fördelen med blockkedjeteknik (IBM, u.å.b). Eftersom tekniken är ny kan det ta tid innan aktörer blir benägna att använda den och dessutom kan tekniken innebära höga initiala investeringskostnader. Att integrera tekniken i sin verksamhet kan också vara komplicerat och det är även viktigt att poängtera att trots den ökade säkerheten som blockkedjor kan ge så finns det fortfarande risk för exempelvis cyberattacker (Niranjanamurthy, Nithya & Jagannatha, 2018).

Blockkedjeteknik har potential att även användas inom bygg- och fastighetsbranschen eftersom den ökade säkerheten för transaktioner kan underlätta samarbete mellan olika aktörer. Detta kommer att behandlas vidare i rapportens resultatdel.

1.1.5 Olika nivåer av digital tvilling

På grund av den omtvistade definitionen av en digital tvilling inom bygg- och fastighetssektorn har flera menat att man bör dela in en digital tvilling i olika nivåer beroende på hur komplicerad den är. Företaget Autodesk (Autodesk, u.å.) beskriver till exempel ett sätt att dela in den digitala tvillingen i fem nivåer:

Nivå 1. Deskriptiv tvilling: På denna nivå innebär en digital tvilling en simpel och virtuell 3D-modell av byggnaden som inkluderar viktig data om byggnaden. På denna nivå har även BIM en central roll.

Nivå 2. Informativ tvilling: Denna digitala tvilling är något mer komplicerad och inkluderar även sensorer som gör att man kan övervaka byggnaden i realtid vilket underlättar bland annat drift.

Nivå 3. Prediktiv tvilling: Med hjälp av sensorerna kan den digitala tvillingen på denna nivå även göra analyser och försöka hitta eventuella problem innan de inträffar.

Nivå 4. Förstående tvilling: Förutom tidigare funktioner kan denna typ av digital tvilling också göra avancerade simuleringar för eventuella scenarion vilket gör att den exempelvis kan komma med rekommendationer på hur man bör agera i olika situationer.

Nivå 5. Autonom tvilling: En tvilling på denna nivå har integrerats med AI. Genom AI kan den digitala tvillingen dels lära sig av tidigare händelser och data och den kan även ta beslut baserat på dessa. Dessa beslut kan tas med hjälp av simuleringar som grundar sig i komplicerade algoritmer.

Madni et al. (2019) redogör en liknande indelning för att beskriva digitala tvillingar. Denna klassificering beskriver däremot digitala tvillingar generellt och fokuserar inte på digitala tvillingar för byggnader specifikt. Deras indelning består av fyra olika nivåer där den första nivån innebär en digital tvilling av något som ännu inte finns fysiskt och där den digitala tvillingen används för exempelvis designbeslut och för att identifiera eventuella problem med den kommande fysiska produkten. För varje ytterligare nivå blir den digitala tvillingen mer avancerad och autonom. På den fjärde och sista nivån kallar Madni et al. den digitala tvillingen för intelligent och menar att den kan analysera och reagera på saker som den fysiska tvillingen utsätts för och att den även kan lära sig av tidigare händelser.

1.2 En byggnads livscykel

Enligt vad som har tidigare nämnts i bakgrunden står bygg- och fastighetsbranschen för en stor del av de globala växthusgasutsläppen. För att förstå hur ny teknologi och i synnerhet digitala tvillingar kan utnyttjas för att bidra till minskade utsläpp är det därför viktigt att ha med sig hur en byggnads livscykel ser ut, från idé och ritning till byggande och drift innan den till slut rivs.

En byggnads livscykel kan delas in i flera olika faser och indelningen skiljer sig åt i litteraturen. Khajavi et al. (2023) beskriver exempelvis livscykeln i sex olika faser: design och planering, förberedelse på byggplatsen, byggskedet, drift, renovering och till sist rivning. Opuko et al. (2021) beskriver istället livscykeln i fyra faser: design, byggskedet, drift och avslutningsvis rivning. Adu-Amankwa et al. (2023) delar in den i tre faser: före byggskedet, byggskedet och efter byggskedet. “Före byggskedet” beskrivs som en fas där design och planering sker medan “byggskedet” innebär händelser som sker på byggarbetsplatsen. “Efter byggskedet" formuleras sedan som en driftfas. Aengenvoort & Krämer (2018) väljer också att dela in livscykeln i tre huvudsakliga faser: design, byggskedet och avslutningsvis drift.

Litteraturen visar att det inte finns ett bestämt svar på hur en byggnads livscykel bör delas in och hur många olika faser den ska bestå av. Gemensamt för de beskrivna uppfattningarna är att en byggnads livscykel inleds med design av en byggnad och planering över hur byggprocessen ska se ut. Därefter påbörjas själva byggarbetet på den plats där byggnaden ska stå. När byggnaden är färdigställd inleds sedan driften av fastigheten. Under driften kan även renoveringar ske och i slutet av byggnadens livscykel rivs den. Baserat på de olika beskrivningarna av en byggnads livscykel har det beslutats att för detta arbete kommer livscykeln att delas in i tre olika faser: design och planering, byggskede och drift. Dessa faser kommer att beskrivas ytterligare i kommande avsnitt.

1.2.1 Design och planering

En byggnads livscykel inleds med fasen design och planering. I detta stadie ska inblandade parter, såsom kund och arkitekter, bestämma vilka behov som ska uppfyllas, vad för slags byggnad som ska uppföras och vilka funktioner den ska ha. Det är viktigt att ha tydliga mål med byggnaden tidigt i processen eftersom detta kan påverka både byggnadens hållbarhet och framtida kostnader (Bragança, Viera & Andrade, 2014). Det har bland annat pekats på att man redan under design- och planeringsfasen skulle kunna påverka uppemot 80% av byggnadens miljöpåverkan samt framtida kostnader. Under denna fas är det även lättast att få igenom stora förändringar av byggnaden till en låg kostnad vilket inte är fallet i senare faser då möjligheten till ändringar är mindre och kostsammare (Kovacic & Zoller, 2015). På grund av design- och planeringsfasens påverkan på framtida faser har den en mycket central roll i en byggnads livscykel och det är viktigt för de ansvariga i fasen att kommunicera och samarbeta väl med inblandade aktörer i framtida faser (Arditi & Nawakorawit, 1999).

Planeringen av en byggnad innebär att man måste ta många olika saker i beaktning och det är viktigt att diskutera detta med till exempel byggingenjörer och andra specialister. Man behöver bland annat ta beslut om planlösning, hur värme-, ventilation-, el-, ljus- och kylsystem ska fungera samt hur vattenledningar ska dras. Fasen har därför en central roll i planeringen av den framtida energianvändningen i byggnaden. Fastställande av vilka material som ska användas i byggnaden tas också i detta steg. Detta kan handla om material i väggar, golv, tak, fasad och fönster med mera (Bragança, Viera & Andrade, 2014).

En viktig del under design- och planeringsfasen är att man behöver bli beviljad bygglov för den planerade byggnaden. Bygglov är ett beslut som tas av kommunen om att en viss åtgärd får göras på en plats om det uppfyller Plan- och bygglagen. Bygglov krävs vid exempelvis nybygge och tillbyggnader (Byggfakta, 2022).

1.2.2 Byggskedet

Då design- och planeringsfasen är klar och bygglov har blivit beviljat påbörjas nästa fas i byggnadens livscykel, byggskedet. Denna fas handlar om den fysiska produktionen av den

planerade byggnaden som togs fram under design- och planeringsfasen. Byggskedet inleds med att arbetsplatsen förbereds för byggarbetet (Khajavi et al., 2023). Man behöver även planera för hur byggarbetet ska gå till, vilka strategier man ska ha och i vilken ordning saker och ting ska monteras och byggas. För ett framgångsrikt byggarbete är det flera faktorer som behöver ges hänsyn, men de viktigaste kan anses vara kostnad, tidsplan, kvalitet och säkerhet för arbetarna (Shields, Tucker och Thomas, 2003).

Byggskedet har stor klimatpåverkan. Produktionen av material är det som överlägset bidrar mest till utsläppet av växthusgaser. Därutöver är transport av materialet, energiförbrukning vid användning av verktyg och maskiner samt bortforsling av avfall stora faktorer som bidrar till fasens klimatpåverkan (Hong et al., 2015). Det har lyfts fram att en åtgärd för att kunna minska byggskedets klimatpåverkan är att öka användningen av återvunnet material, främst stål, eftersom detta är ett material vars produktion innebär stora utsläpp av växthusgaser (Yan et al., 2010).

1.2.3 Drift

När byggnaden är färdigställd och redo att användas inleds den sista fasen i livscykeln, driftfasen. Av de tre faserna är det denna fas som pågår längst (Lu et al., 2020a). I denna fas så lämnas byggnaden över till fastighetsägaren och för framgångsrik skötsel är det viktigt att fastighetsägaren får all nödvändig information om hur byggnaden fungerar och hur systemen är uppbyggda. Det är sedan fastighetsägaren som ansvarar för att underhålla och förbättra byggnaden så att den behåller sitt värde och funktion. Detta innebär flera olika uppgifter för fastighetsägaren, till exempel reparationer, renoveringar, byta ut föråldrade system och städning. Andra åtaganden som behöver utföras är att analysera och uppskatta kostnaderna av driften, planera inför kommande renoveringar och upprätthålla historiken över byggnaden, till exempel vilka reparationer som har gjorts och vilka system som har bytts ut (Arditi & Nawakorawit, 1999).

Driftfasen är som tidigare berättat den längsta fasen i byggnadens livscykel. Detta resulterar i att det även är denna fas som har störst klimatpåverkan och energikonsumtion. Modernare och klimatsmartare byggnader har dock börjat vända trenden och istället är det under byggskedet som en stor del av energikonsumtionen sker på grund av den energi som finns lagrad i de använda materialen (Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán & Marrero, 2017).

I sluten av driftfasen, vilket också inebär slutet av byggnadens livscykel, står byggnaden inför rivning. Under rivningsarbetet är det viktigt att klarlägga vad i byggnaden som kan återvinnas och om det finns komponenter som skulle kunna återanvändas i exempelvis en annan byggnad (Thomsen, Schultmann & Kohler, 2011).

1.2.4 Kontrakt under byggnadens livscykel

Ännu en väsentlig del i byggprocessen är kontrakten som görs mellan aktörerna. Ett byggprojekt från början till slut är oftast tidsmässigt en lång process och innefattar flera inblandade aktörer. Vanliga aktörer som ingår i ett byggprojekt är till exempel byggherren, finansiärer, projektledare, konsulter, designer, entreprenörer, underleverantörer och leverantörer (Uher & Davenport 2009). Projekt inom byggnadsprocessen kännetecknas av en mängd individuella kontrakt som görs mellan de olika aktörerna. Kontrakt formas för att se till att det som behöver göras blir klart. Projekt inom byggnadsprocessen kan undvika kontrakt men utan dessa finns det inga garantier på att aktörer kommer att fullgöra det arbete som har utlovats eller kommit överens om sinsemellan.

Tillit mellan aktörerna i ett projekt har identifierats som en av de mest avgörande faktorerna för att minska förhandlingskostnader, minska övervaknigskostnaden och öka möjligheterna att nå ömsesidigt fördelaktiga avtal (Chow, Cheung & Chan 2012). Camén, Gottfridsson och Rundh (2012) antyder att kontrakt är essentiellt när det kommer till att bygga framgångsrika relationer mellan olika företag och på så sätt garantera att arbetet görs.

Uher & Davenport (2009) påpekar att byggprojekt är unika eftersom det finns diskontinuitet mellan aktörernas sammansättning under projektets livscykel. Detta beror på att arbetet i ett byggnadsprojekt delas upp av den stora mängden individuella kontrakt som uppstår genom hela byggprocessen. På grund av det stora antalet kontrakt ökar risken för att ett av dem inte uppfylls vilket allvarligt kan påverka projektets resultat.

1.3 Tidigare forskning inom området och Dig-IT Lab

Digitala tvillingar har varit ett populärt ämne inom forskning de senaste åren och antalet publicerade vetenskapliga rapporter har ökat år för år. Med hjälp av sökorden “digital twin” på hemsidan ScienceDirect ses en tydlig ökning av antalet publicerade artiklar med “digital twin” i titeln. Till exempel publicerades 82 artiklar år 2019 medan det år 2023 publicerades 660 artiklar med dessa ord i rubriken (ScienceDirect, u.å.). Forskningen behandlar framförallt hur digitala tvillingar kan användas i bygg- och fastighetsbranschen (Cespedes-Cubides & Jradi, 2024), (Deng, Menassa, & Kamat, 2021), (Jiang et al., 2023), (Khajavi et al., 2023), Lu et al., 2020), (Madni et al., 2019), (Qian et al., 2024), (Tahmasebinia et al., 2023), (Teizer, Johansen,& Schultz, 2022), (Tzachor et al., 2022), (Wright & Davidson, 2020) (Zhao et al., 2022). Definitionen av en digital tvilling brukar även diskuteras i en inledande diskussion i de flesta rapporterna men diskuteras mer genomgående av till exempel VanDerHorn & Mahadevan (2021).

Ett projekt som har startats kring digitala tvillingar är Dig-IT Lab vid KTH. Projektet grundades under 2023 och har som syfte att minska bygg- och fastighetssektorns samlade klimatutsläpp och påverkan med hjälp av nya tekniska och digitala lösningar där digitala tvillingar kommer att spela en viktig och central roll i utvecklingen. Målet med projektet är också att Sverige ska bli ledande i arbetet med dessa nya digitala lösningar. Dig-IT Lab beskrivs som ett kompetenscentrum där samarbete och forskning är i fokus för att hitta nya

lösningar på hur digitalisering kan göra byggnader mer klimateffektiva under både byggprocessen och driften. Utöver KTH är de inblandade parterna i projektet olika universitet som exempelvis Chalmers Tekniska Högskola, Umeå universitet och Uppsala universitet, forskningsorganisationer såsom RISE samt internationella organisationer. Dessutom är flertalet företag inom bygg- och fastighetssektorn delaktiga i samarbetet. Dessa företag är på olika sätt involverade inom bygg- och fastighetsbranschen. Vissa är som mest engagerade under byggskedet, andra är inriktade på förvaltningen av fastigheter medan andra är konsultfirmor som arbetar med att ta fram digitala tvillingar och lösningar (KTH, 2023). På grund av olika företags inriktningar skiljer sig deras definition och arbetsområde kring digitala tvillingar mellan varandra. Dessa skillnader gör att ett överskridande samarbete kring utvecklandet av en digital tvilling mellan aktörer i byggprocessens olika faser kan hämmas.

Denna rapport kommer att med hjälp av tidigare forskning och intervjuer med aktörer inom bygg- och fastighetsbranschen i Sverige fortsätta arbetet att definiera en digital tvilling och undersöka hur tekniken kan användas i byggprocessen. Rapporten kommer också att analysera hur samarbetet mellan aktörer ser ut kring utvecklandet av digitala tvillingar.

2. Syfte och problemformulering

Syftet med arbetet är dels att undersöka hur digitala tvillingar används under varje fas i en byggnads livscykel för att på så sätt försöka hitta kopplingar mellan dessa funktioner och samarbete mellan inblandade aktörer kring utvecklandet av en digital tvilling. Utifrån detta blir syftet även att analysera om ökat samarbete är fördelaktigt för de inblandade aktörerna och vilka potentiella faktorer som främjar eller hindrar samarbete.

För att kunna uppnå detta syfte har följande frågeställningar formulerats:

Hur kan digitala tvillingar potentiellt integreras i varje fas av en byggnads livscykel?

Är det fördelaktigt för aktörer inom hela byggnadsprocessen att samarbeta kring utvecklingen av en digital tvilling och vad finns det för faktorer som främjar eller hindrar detta?

3. Metod

3.1 Metod för litteraturstudie

Detta arbete har delvis gjorts som en systematisk litteraturstudie (Malmö Universitet, 2024). De typer av litteratur som har använts som underlag för rapporten har varit vetenskapliga rapporter och undersökningar, nyhetsartiklar, intervjuer och vanliga webbsidor. De vetenskapliga rapporter som har studerats har tagits fram från databaserna ScienceDirect och Google Scholar. För att hitta relevanta artiklar kombinerades “digital twin” med andra sökord. Dessa var: “aec”, “buildings”, “design and planning”, “construction”, “maintenance”, “operation”, “energy”, “climate”, “safety”, “collaboration”, “cooperation”, “economy”, “blockchain”, “phases”, “IoT”, “BPS”, ”air quality”, “material”, “affordability”, “cost” , “renovation”, “demolition” och “definition”.

De källor som har använts i arbetet har valts ut på grund av deras tillförlitlighet och relevans för rapportens syfte och frågeställning. Detta diskuteras vidare i kapitel *3.4 Källdiskussion*.

3.2 Metod för intervjuer

För att få en större inblick i hur digitala tvillingar används i branschen och hur aktörer upplever att samarbetet i utvecklingen av digitala tvillingar fungerar genomfördes intervjuer med aktörer delaktiga i projektet Dig-IT Lab. De aktörer som intervjuades var ProptechCore, EQUA, Bengt Dahlgren och Castellum. Ytterligare bakgrund till dessa företag ges i kapitel *6.2 Sammanställning av resultat från intervjuer*. Intervjuerna utformades som semistrukturerade intervjuer vilket innebar att samtliga respondenter fick samma huvudsakliga frågor men att ytterligare frågor kunde ställas beroende på respondenternas svar. De huvudsakliga frågorna som ställdes till respondenterna finns formulerade i *11. Bilagor, Bilaga 1*. Syftet med frågorna var framförallt att få respondenternas egna åsikter och erfarenheter av digitala tvillingar, till exempel vad de ansåg om digitala tvillingars definition, funktioner, fördelar och nackdelar samt hur samarbetet ser mellan aktörer och vad som skulle kunna göras för att eventuellt främja ökat samarbete. Frågornas utformning försökte göras på ett sätt som undvek ledning för att på det viset få respondenternas egna tankar och åsikter om ämnet utan vår påverkan. Intervjuerna varierade i tidsomfång där den kortaste intervjun varade i ungefär 20 minuter medan den längsta intervjun tog 50 minuter. Skillnaderna i tid berodde på respondenternas olika längd på svaren till frågorna som ställdes samt antalet ytterligare frågor som ställdes utöver de huvudsakliga frågorna.

3.3 PESTLE-analys

PESTLE-analys är ett användbart verktyg som framförallt används av företag för att analysera externa faktorer som kan påverka företagets verksamhet. PESTLE står för political, economic, social, technological, legal och environmental. Genom att analysera dessa faktorer kan man dels hitta nya möjligheter att satsa på men man kan också hitta potentiella hot mot verksamheten som man således kan arbeta för att undvika (Kenton, 2024). I denna rapports fall kommer en PESTLE-analys dock inte att göras för ett specifikt företag eller organisation utan istället kommer ökat samarbete kring utvecklandet av en digital tvilling att analyseras.

I PESTLE-analysen kommer rapportens resultat från litteraturstudien och intervjuerna att analyseras. Denna typ av analys valdes att göras eftersom den ansågs kunna utvärdera situationen kring samarbete på ett omfattande och effektivt sätt. Då metoden utreder flera olika men relevanta perspektiv får man en genomgripande analys vilket också bedömdes som en fördel i valet av analysmetod.

3.4 Metoddiskussion

Detta arbete har baserats på tidigare studier samt intervjuer med företag delaktiga i projektet Dig-IT Lab. Fördelarna med att dels skriva arbetet som en litteraturstudie har varit att många forskningsrapporter har funnits som underlag. Digitala tvillingar är ett väldigt aktuellt ämne och antalet artiklar tillgängliga har underlättat sökandet efter relevanta studier. Däremot kan det också ha resulterat i att lämpliga artiklar som kunde ha gagnat arbetet ej har hittats. Det var även få artiklar som fokuserade på samarbete och digitala tvillingar vilket försvårade arbetet med att svara på frågeställningarna.

Vi valde även att göra intervjuer med personer som är insatta i ämnet digitala tvillingar och arbetar för företag som är med i projektet Dig-IT-Lab. Vi fick kontaktuppgifter till sex personer som arbetade på något av dessa företag. Av dessa sex var det fyra som ställde upp på intervju. Samtliga som intervjuades hade erfarenheter av digitala tvillingar och arbetade inom detta område på respektive företag. Intervjuerna var givande och gav intressanta perspektiv på ämnet. Framförallt var det samarbetsfrågan som var intressant att diskutera eftersom de intervjuade då kunde utnyttja sina erfarenheter i svaren. Företagen var aktiva i olika delar av en byggnads livscykel vilket gav bredare förståelse och insyn i processen även fast vi gärna hade velat intervjua ytterligare ett företag som främst agerar under driftfasen. I efterhand hade vi gärna också ställt frågor angående blockkedjor och vad de anser om att potentiellt integrera denna teknik i digitala tvillingar. Frågorna som ställdes försökte i största mån att vara öppna och inte ledande för att få opartiska och breda svar.

För att sammanfatta resultaten och även svara på frågeställningen vad som främjar och hindrar samarbete valde vi att göra en PESTLE-analys. Vi ansåg att denna typ av analys passade ämnet och frågeställningen bra eftersom den delar upp faktorerna i områden som är relevanta för digitala tvillingar, vilket vi märkte extra tydligt under intervjuerna. PESTLE-analysen kan vara intressant för exempelvis aktörer i samarbetsprojekt. Den indikerar faktorer som kan vara incitament för olika aktörer att vilja samarbeta med andra aktörer medan den

också visar saker som kan hindra ambitionen att samarbeta. Därutöver poängterar den yttre faktorer som ofta står bortom företags kontroll, exempelvis politiska beslut. Vi anser sammanfattningsvis att PESTLE-analysen var ett kraftfullt och passande verktyg som hjälpte att besvara arbetets frågeställning.

Intervjuerna genomfördes innan beslutet om att göra en PESTLE-analys togs. Det är därför troligt att frågorna hade formulerats annorlunda om analysverktyget hade bestämts innan istället. Med annorlunda formulerade frågor hade troligtvis ett annat resultat fåtts vilket i sin tur hade påverkat PESTLE-analysens utformning. Å andra sidan ville vi undvika ledande frågor och de svar som gavs från respondenterna kunde ändå i många fall appliceras på PESTLE-analysen.

3.5 Källdiskussion

Till detta arbete och främst till litteraturstudien har ett stort antal källor använts. Till bakgrunden har olika typer av källor använts, alltifrån webbsidor till vetenskapliga artiklar. Till resultatdelen har framförallt forskningsrapporter och studier använts som underlag för texten. Dessa rapporter har hittats genom hemsidor såsom ResearchGate och ScienceDirect eller genom Google Scholar. Dessa verktyg har underlättat att hitta relevanta och trovärdiga källor som är till nytta för att kunna besvara frågeställningarna.

Utöver vetenskapliga artiklar har även vanliga webbsidor använts, främst till rapportens bakgrund. Webbsidor anses oftast mindre trovärdiga än exempelvis vetenskapliga artiklar vilket har krävt att webbsidorna har granskats för att säkerställa att de är tillförlitliga och relevanta för arbetet. Detta har gjorts genom att läsa om utgivarna av webbsidan och deras bakgrund, undersöka deras syfte med den information som finns på webbsidan samt deras anknytning till ämnet.

Som det tidigare i arbetet har diskuterats så är det omtvistat hur en digital tvilling egentligen ska definieras. De källor som har använts har haft liknande definition av digital tvilling och skillnaderna mellan definitionerna har ansetts vara minimala och därför inte påverkat deras relevans för arbetets syfte.

Intervjuerna som har genomförts gjordes med personer väl insatta inom området och med mångårig erfarenhet av branschen. Varje intervju inleddes med frågor om deras arbetsroll och om deras erfarenheter av digitala tvillingar för att säkerställa trovärdighet och relevans för arbetet. Samtliga intervjuade arbetade på företag som deltar i projektet Dig-IT Lab och var rekommenderade av vår handledare.

4. Avgränsningar

Arbetet fokuserar på den svenska bygg- och fastighetsbranschen vilket till exempel innebär att det är svenska lagar och byggregler som åsyftas och som kan påverka utvecklingen av digitala tvillingar. Däremot kan vetenskapliga artiklar som har använts till rapportens litteraturstudie ha analyserat digitala tvillingar i ett annat land. Därutöver kommer begreppet digitala tvillingar att avse digitala tvillingar för byggnader och exempelvis inte verktyg eller fordon. Arbetet kommer delvis att beröra digitala tvillingar för städer på grund av den påverkan som en digital tvilling för en stad kan ha på en byggnad och tvärtom. Ingen avgränsning har gjorts kring vilken typ av byggnad som ska behandlas utan arbetet bör kunna appliceras på allt från kommersiella byggnader till offentliga.

5. Resultat från litteraturstudie

I detta kapitel kommer rapportens resultat att presenteras. Kapitlet inleds med en genomgång av hur digitala tvillingar integreras i varje fas i en byggnads livscykel. Därefter kommer en sammanställning av de intervjuer som har genomförts för arbetet. Kapitlet avslutas med en översikt över hur samarbetet ser ut under byggprocessen samt vilken roll politik kan ha i ämnet.

5.1 Digitala tvillingar och dess roll under en byggnads livscykel

I följande delkapitel kommer en digital tvillings olika funktioner under design- och planeringsfasen, byggskedet samt driftfasen att beskrivas. Det är dock viktigt att poängtera att dessa funktioner inte nödvändigtvis finns i alla digitala tvillingar utan snarare visar de potentiella möjligheter som finns med teknologin. Funktionerna är sammanfattade i Figur 1. i slutet av avsnittet.

5.1.1 Digitala tvillingars funktion under design- och planeringsfasen

Hur en digital tvilling används under design- och planeringsfasen kan variera. Den digitala tvillingen brukar under denna fas främst fungera som en digital modell över hur byggnaden kan komma att se ut. Arkitekter kan till exempel använda sig av BIM för att skapa modellen och sedan använda den för att presentera förslaget för beställaren av byggnaden eller i arkitekttävlingar. Innan man går vidare med ett visst byggnadsförslag kan man också jämföra de uppskattade kostnaderna för varje förslag. När man har bestämt byggnadens utformning kan man sedan med hjälp av BIM, vilket även nämndes i avsnitt *1.1.1 Building Information Model (BIM)*, undersöka vilket och hur mycket material som kommer att behövas, uppskatta hur lång tid det kommer ta att konstruera varje del i byggnaden och få en överblick över kostnaderna. Det är även under denna fas som man kan hitta potentiella fel i konstruktionen som man kan förhindra når byggarbetsplatsen vilket gör att man undviker onödiga kostnader och förseningar under byggskedet (Nordic BIM Group, u.å.). I mer traditionella byggnadsprojekt görs kommunikationen mellan olika parter manuellt när exempelvis information eller ritningar delas mellan varandra. Detta kan leda till olika uppfattningar om vad som ska göras och misskommunikation, vilket försämrar samarbetet och effektiviteten. Med BIM kan detta undvikas eftersom man skapar en digital och visuell plattform där inblandade aktörer kan kommunicera med varandra och dela information gällande projektet. Jämfört med en 2D-skiss kan 3D-visualisering av olika delar av en byggnad öka förståelsen och bidra till enighet mellan designers och byggarbetare över hur den slutgiltiga produkten förväntas se ut och fungera (Tahmasebinia et al., 2023).

Med hjälp av simuleringar i den digitala tvillingen kan man i detta stadie även utforska vilka material som lämpar sig bäst för byggnaden. Det kan till exempel handla om fönstren och

fasaden och vilket material till dessa som förbättrar värmeisoleringen och på så sätt minskar energiförbrukningen. Dessutom skulle man kunna få hjälp från den digitala tvillingen att effektivisera byggnadens ljus- och ventilationssystem vilket också bidrar till en mer hållbar och klimateffektiv byggnad (Tahmasebinia et al., 2023).

I de flesta fall är den data och de värden som används för en digital tvilling för en byggnad inte tillgängligt för utomstående aktörer vilket missgynnar samarbete mellan olika parter. I ett byggnadsprojekt i delstaten Victoria i Australien samarbetade både privata och offentliga aktörer kring att utveckla en digital tvilling för det aktuella exploateringsområdet. Aktörernas datainsamling samlades sedan i ett standardiserat format som sedan kunde delas mellan de inblandade parterna. Detta gjorde att man ur ett planeringsperspektiv kunde analysera hur en viss utformning av en byggnad påverkade exempelvis skuggor, solljus samt närliggande växtlighet och infrastruktur. Därutöver kunde den digitala tvillingen användas för att lättare undersöka om en planerad byggnad följde de planbestämmelser som finns i området vilket skulle kunna underlätta att få godkänt bygglov (Tzachor et al., 2022). Liknande projekt har även genomförts i Sverige. Ett exempel är byggnationen av en industripark i Luleå där Luleå kommun har samarbetat med Luleås Tekniska Universitet och andra privata aktörer för att utveckla en digital tvilling för området i syfte att bland annat förenkla byggprocessen och samarbetet mellan de inblandade parterna (Luleå Kommun, u.å.) (Håkansson, 2024).

En viktig aspekt är att den digitala tvillingen möjliggör att data och erfarenheter från tidigare projekt och byggnader kan återanvändas i denna fas. Det är värt att poängtera att dessa lärdomar inte endast behöver komma från tidigare projekts första fas, utan lärdomar från alla stadier i en byggnads livscykel går att dra nytta av med hjälp av en digital tvilling. Detta kan underlätta kunskapsutbyten vilket därefter kan förbättra design och planering av nya byggnader (Khajavi et al., 2023).

5.1.2 Digitala tvillingars funktion under byggskedet

Under den andra fasen, byggskedet, kan man använda sig av exempelvis sensorer på byggarbetsplatsen för att hjälpa till att övervaka och på så sätt uppdatera den digitala tvillingen allteftersom byggnadsarbetet fortskrider. I detta steg kan det vara fördelaktigt att i den digitala tvillingen skapa olika slags digitala representationer. Till exempel att man har en modell över hur byggnaden är tänkt att vara konstruerad och en annan modell som beskriver hur byggarbetet ska fortgå och i vilken ordning konstruktionen ska ske. Därutöver kan man med hjälp av de sensorer som finns på arbetsplatsen även skapa en modell som följer hur byggnaden utvecklas samt en modell över hur byggnadsarbetet har gått till. Genom att jämföra modellerna, alltså hur byggnaden utvecklades jämfört med den planerade designen och hur arbetet gick till jämfört med hur arbetet var planerat att gå till, kan man bland annat undersöka om olika delar i konstruktionen har monterats på rätt sätt vilket i sin tur kan leda till att risken för fel senare i arbetet minskar. Därutöver kan man enklare kontrollera om tidsplaner hålls och hitta de eventuella avvikelserna som har orsakat förseningar, vilket man

kan dra lärdom ifrån inför kommande projekt genom att ändra arbetssätt och strategier under byggarbetet (Teizer, Johansen & Schultz, 2022).

Under byggskedet kan BIM användas på liknande sätt som i den tidigare fasen. Till exempel kan man använda BIM för att ha översikt över vilka material som behöver införskaffas samt leveranstider för dessa material, vilket bidrar till ökad effektivisering och minskade kostnader (Nordic BIM Group, u.å.). En av de främsta fördelarna med BIM under denna fas är den kontroll över byggskedet som metoden ger. Bland annat kan man dela den virtuella modellen mellan inblandade aktörer vilket minskar risken för dubbelarbete och istället gör det lättare att samarbeta i processen (Thulin, 2021).

Bland arbetstagare i byggbranschen är säkerhet en viktig fråga (Bygg Love, 2023) och intervjuer med byggarbetare har visat att arbetsgivare behöver förbättra sina säkerhetsrutiner (Welfare, Sherratt & Hallowell, 2021). De sensorer som finns kopplade till den digitala tvillingen skulle kunna utnyttjas för att öka säkerheten på byggarbetsplatsen. Vid eventuell fara eller risk för fara skulle sensorerna kunna reagera på detta vilket kan leda till att ett larm går eller att byggarbetarna i riskområdet får en notis till sin mobiltelefon med en varning. Dessutom skulle man kunna koppla ihop sensorerna, till exempel att en kran ska användas vilket en annan sensor reagerar på och påpekar för arbetare i riskzonen att röra sig till ett säkert område. Varningssignalen kan sedan återkopplas till den digitala tvillingen som skulle kunna leta efter tillvägagångssätt för att undvika liknande incidenter där arbetare utsätts för farliga risker (Teizer, Johansen & Schultz, 2022). Dessutom kan digitala tvillingar användas till att hitta orsaker till eventuella olyckor och även för detektering av bränder (Khajavi et al., 2023).

Digitala tvillingar har potentialen att utvidga samarbetet mellan aktörerna under byggprocessen, till exempel med hjälp av BIM som redogjordes tidigare. Genom att tydligt i den digitala tvillingen kunna se hur arbetsprocessen fortlöper kan man tillsammans ta beslut angående bland annat förändringar i planering och scheman. Det är viktigt att den information som delas mellan aktörerna är transparent och tillförlitlig för att samarbetet ska fungera så effektivt som möjligt. Detta är dock inte alltid fallet. Aktörerna har egna intressen och det finns ofta data och information som man inte vill dela med sig av till eventuella konkurrenter. Detta kan leda till att de digitala tvillingarna saknar betydelsefull information som skulle kunna ha förbättrat den. En potentiell lösning på detta som har lyfts fram är att använda sig av blockkedjeteknik. Med hjälp av denna teknologi skulle spårbarheten, säkerheten, transparensen och tillförlitligheten till informationen kunna öka (Jiang et al., 2023).

Användning av blockkedjor under byggskedet skulle även kunna stärka tillförlitligheten till vilka material som levererats och används i byggnaden. Kopplar man blockkedjan, som alltså har information om alla material i byggnaden, till en digital tvilling har man därför en försäkran om att informationen i tvillingen överensstämmer med den verkliga byggnaden. Om materialet eller resursen tas bort vid en potentiell renovering eller ombyggnation skapas ett nytt block i kedjan med information om att materialet har borttagits och ersatts med ett

nytt. Bortsett från ökad tillförlitlighet ger detta även en högre grad av spårbarhet. Det bör dock poängteras att denna teknik, precis som andra digitala verktyg, inte är särskilt utvecklad inom denna bransch (Green et al., 2020).

5.1.3 Digitala tvillingars funktion under driftfasen

I byggnadens tredje och sista fas, driftfasen, har den digitala tvillingen många användningsområden. Främst används digitala tvillingar för att kunna övervaka byggnaden i realtid med hjälp av sensorer kopplade till IoT. Dessutom kan man med hjälp av den digitala tvillingen utföra simulationer av olika scenarier vilket gör att man kan effektivisera bland annat energikonsumtionen och ljusanvändningen (Deng, Menassa & Kamat, 2021). Sensorerna skulle även kunna användas för att mäta och kontrollera fuktighet, temperatur, rörelser, dörrar som är öppna och luftkvalitet. Med hjälp av analyser av den data som samlats in skulle den digitala tvillingen kunna underlätta för effektiv och prediktiv drift (Zhao et al., 2022).

Optimerad energianvändning är den fördel som främst brukar förknippas med digitala tvillingar under driftfasen. Som tidigare har nämnts kan man bland annat effektivisera energiförbrukningen och ljusanvändningen med en digital tvilling. Genom att analysera och lära sig från hur användare i byggnaden beter sig kan tvillingen anpassa energiförbrukningen och ge rekommendationer som maximerar effektiviteten i driften utan att påverka människorna i husets komfort och välbefinnande (Cespedes-Cubides & Jradi, 2024). Därutöver skulle optimerad energianvändning kunna minska driftkostnaderna (Tahmasebinia et al., 2023).

Eftersom 85% av Europas byggnader byggdes innan 2001 (Cespedes-Cubides & Jradi, 2024) är det viktigt att påpeka att digitala tvillingar inte bara kan utvecklas till en ny byggnad, det går även att göra en digital tvilling för en redan existerande byggnad. Ett exempel på ett sådant projekt är fastighetsförvaltaren Akademiska Hus satsning på att göra Umeå universitets byggnader till digitala tvillingar. Byggnaderna skannas i två steg med hjälp av olika kameror. I första steget används laser för att skanna punkter och mäta avstånd mellan föremål i byggnaden. I det andra steget används istället en kamera som kan filma och ta fotografier med 360-graders vinkel. Genom att sedan sammanbinda resultaten från de två stegen kan man skapa en virtuell representation av hur byggnaderna ser ut vilket man därefter kan bygga den digitala tvillingen utifrån. Syftet med att skapa den digitala tvillingen var att försöka uppnå klimatsmartare och mer hållbara byggnader. Genom den digitala tvillingen hoppas fastighetsförvaltaren kunna optimera energianvändningen, lättare hitta fel och skador i byggnaderna och även göra det lättare för studenter och personal att hitta till platser och salar på campuset (Haglund, 2022). En liknande satsning har även gjorts på Karolinska Institutets campus (Akademiska Hus, 2023).

Digitala tvillingar under driftfasen skulle också kunna ha möjligheten att upptäcka fel och avvikelser i byggnadens material, vilket kort nämndes i tidigare stycke. En studie tog bland

annat fram en digital tvilling som kunde urskilja förändringar i byggnaden på grund av normala aktiviteter i byggnaden och förändringar i byggnaden som tydde på fel eller skador. Studien poängterade också att det behövs viktig information om byggnaden för att det ska fungera på ett effektivt sätt, till exempel tidigare underhållsarbeten (Lu et al., 2020b).

Under driftfasen har digitala tvillingar även potentialen att öka säkerheten i fastigheten. Vid till exempel bränder kan en digital tvilling lättare upptäcka branden och hitta var den har uppstått. Med en komplicerad digital tvilling kan man även göra simulationer över hur branden kan uppträda vilket kan underlätta släckningsarbete. Med hjälp av prediktiva analyser av byggnadsmaterialet i fastigheten kan man även minska risken för att bränder uppstår. Utöver brandsäkerhet kan digitala tvillingar även resultera i ökat skydd mot stöld. Vid renoveringar i en fastighet kan digitala tvillingar övervaka hur renoveringen går till och minska riskerna för eventuella faror eller olyckor. Dessutom kan övervakningen minimera kostsamma felkonstruktioner (Khajavi et al., 2023).

I slutet av en byggnads livscykel när byggnaden står inför rivning kan digitala tvillingar hjälpa till med rivningsarbetet. Med hjälp av sensorer på både in- och utsidan kan säkerhetsföreskrifter lättare följas. Informationen från den digitala tvillingen kan också gå att återanvända i andra projekt och byggnader (Khajavi et al., 2023). Med hjälp av informationen om materialet i byggnaden underlättas även återvinningsarbetet och avfallshanteringen (Nordic BIM Group, u.å.).

Trots att digitala tvillingar har potentialen att både energieffektivisera och minska kostnader så är det viktigt att ha i åtanke att resultaten från studier kring digitala tvillingar inte alltid visar fördelar med denna teknologi utan istället visar att påverkan på fastigheter från digitala tvillingar inte är påtaglig (Cespedes-Cubides & Jradi, 2024). Ett annat viktigt ämne att diskutera är säkerheten hos digitala tvillingar. De digitala tvillingarna kan innehålla data och information som kan vara föremål för cyberattacker och det finns ett behov att förbättra säkerheten i dessa (Alshammari, Beach & Rezgui, 2021).

Figur 1. Sammanfattning av en digital tvillings potentiella funktioner i varje fas.

5.1.4 Digitala tvillingen genom faserna

Khajavi et al. (2023) menar att en digital tvilling bör utvecklas gradvis under en byggnads livscykel, från design till byggande och till sist drift. Den får ny information och funktioner i varje fas vilket gör den mer komplicerad och användbar. Den utvecklas med andra ord i takt med den fysiska byggnaden. I slutet av livscykeln rivs byggnaden men informationen från den digitala tvillingen kan återanvändas i andra projekt vilket kan förbättra dessa och bli ännu effektivare. Dessa sömlösa övergångar mellan de olika faserna skapar alltså en väl utvecklad digital tvilling, men oftast ser inte processen ut på det sättet. Detta problem poängteras bland annat i de intervjuer som har gjorts för rapporten och kommer ytterligare att behandlas i kommande kapitel.

Khajavi et al. (2023) skriver dessutom att man potentiellt skulle kunna skapa ett så kallat Internet of Digital Twins. De menar att man skulle kunna koppla ihop digitala tvillingar för olika byggnader, inte bara under drift och förvaltning utan i alla faser under en byggnads livscykel, och att de digitala tvillingarna skulle kunna integrera med varandra. Khajavi et al. hävdar att ihopkopplade digitala tvillingar skulle kunna underlätta för exempelvis hela städer med planering och drift av byggnader.

5.2 Samarbete

Samhället behöver byggnader som har minskad klimatpåverkan men samtidigt gynnar alla parter som är inblandade. Det behövs smarta och hållbara byggnader som är en del av energisystemet och byggnader som är resurseffektiva (Vogel, 2024). En viktig del i detta arbete är ökat samarbete mellan aktörer under byggprocessen.

5.2.1 Kontrakt

Samarbete mellan olika entreprenörer i Sverige är splittrat, vilket innebär att entreprenörer endast ansvarar för sitt eget arbete eller kontrakt. Om entreprenörers arbete inom byggprocessen skulle påverka varandra kan det uppstå förvirring runt ansvar och avtalen. Sådana problem kan skapa hinder för samarbete kring system i de olika faserna i ett byggprojekt. Situationen mellan kontrakt och samarbetet påverkar också möjligheten att implementera digitala verktyg, såsom digitala tvillingar (Vogel 2024). Problemet med digitaliseringen i byggprocessen är att tekniker och mjukvaror måste samarbeta mellan olika faser för att få en fungerande digital tvilling, vilket primärt kan göras med hjälp av förändringar i kontraktens utformning. Såsom avtalen är framställda finns det inga incitament för aktörer att arbeta tillsammans, utan endast arbetar på sin egen del av kontraktet (Jadhav 2016).

I den nuvarande byggprocessen finns det ingen formell överlämning. Aktörer gör det arbete som krävs av dem i relation till kontraktet, sedan lämnas byggnaden över till nästa aktör som fortsätter med utvecklingen av byggnaden (Vogel, 2024). För att kunna utöka och underlätta samarbete behöver kontrakten förändras. Men för att kunna ändra på kontrakten menar Boverket (2019) att projektkulturen behöver ändra på sig först. Som kontrakten är utformade idag är de inte skrivna för dagens samhälle och har inte anpassat sig till den teknologi som finns idag.

5.3 Politiska incitament

Politik kan spela en betydelsefull roll när det kommer till att främja digitaliseringen och samarbete inom bygg- och fastighetsbranschen. Detta avsnitt har som avsikt att belysa hur politiska incitament och beslut kan komma att påverka samarbete i denna sektor. Det är dock viktigt att poängtera att många av de åtgärder som presenteras i detta avsnitt behandlar hur man skulle kunna öka digitaliseringen och samarbetet ur ett mer generellt perspektiv i sektorn och fokuserar därför inte nödvändigtvis på just digitala tvillingar.

Regeringen har begärt flera utredningar i syfte att utforska hur man skulle kunna förbättra och utveckla samhällsbyggnadsprocessen genom digitalisering på ett så effektivt sätt som möjligt (Regeringskansliet, 2023). En tidigare utredning har bland annat resulterat i en rapport från Lantmäteriet där det poängteras hur digitalisering spelar en betydelsefull roll i

samhällsbyggnadsprocessens framtid. Rapporten menar att all information ska finnas digitalt och om informationen används i ett stadie av exempelvis en byggprocess behöver den även finnas tillgänglig i ett senare skede för andra aktörer. Därutöver trycker rapporten på att användningen av nya tekniska lösningar behöver användas i byggbranschen och nämner BIM som ett verktyg som behöver användas mer i byggprojekt. Rapporten menar att man också behöver ändra hur nuvarande kravställningar ser ut. Ett exempel är att processen för bygglov ska digitaliseras (Klintborg & Drewniak, 2018).

I en annan rapport från Lantmäteriet presenteras en färdplan på hur digitaliseringen i samhällsbyggnadsprocessen ska se ut. Rapporten menar att kommuner och regioner ska sträva efter att digitala tvillingar ska användas som standard till perioden 2030 - 2040. Bland annat hävdar rapporten att digitala tvillingar ska användas för att utföra simuleringar och pröva olika planeringar av byggnader. Rapporten trycker också på att väsentlig data hos myndigheter måste finnas lättillgängligt för projekt där digitala tvillingar används och att denna data måste kunna tolkas av de digitala tvillingarna (Lantmäteriet, 2024).

Politiska förändringar kan även komma att påverka den juridiska aspekten av samarbete kring digitala tvillingar. Lantmäteriet har bland annat presenterat målsättningar för en förbättrad samhällsbyggnadsprocess och ett av dessa mål är att man behöver förändra regelverk i till exempel plan- och bygglagen för att kunna öka informationstillgängligheten kring öppen data vilket skulle kunna underlätta för digitalisering (Klintborg & Drewniak, 2018).

Även på kommunal nivå finns det intresse kring digitala tvillingar och flera projekt för digitala tvillingar har gjorts. Exempelvis har Göteborgs Stad (Göteborgs Stad, u.å.) och Sundbybergs Stad (Storsthlm, 2023) utvecklat projekt där de skapar en digital tvilling av sin kommun för att genom simuleringar undersöka hur bland annat ny bebyggelse, trafik och väder påverkar staden. I Sverige har det även genomförts projekt där offentliga aktörer har samarbetat med privata aktörer i framställandet av digitala tvillingar. Ett exempel nämndes i avsnitt *5.1.1 Digitala tvillingars funktion under design- och planeringsfasen* om ett projekt i Luleå där en digital tvilling för en industripark skulle utvecklas. Ett annat fall där offentliga och privata aktörer har samarbetat med varandra är i skapandet av en digital tvilling för ett reningsverk i Helsingborg. Erfarenheter från liknande projekt har pekat på att ett hinder för utvecklingen av digitala tvillingar är bristen på åtkomst till relevant data som behövs för att verktyget ska fungera. Däremot har digitala tvillingar lyfts fram som ett effektivt redskap för att underlätta samarbete, vilket kan vara ett stort problem i projekt där många parter är inblandade och ska arbeta med varandra (RISE, u.å.).

6. Resultat från intervjuer med aktörer

Intervjuer har genomförts med fyra företag som är delaktiga i samarbetsprojektet Dig-IT Lab. Frågorna som huvudsakligen ställdes går att se under *11. Bilagor, Bilaga 1*. Intervjuernas syfte var att få insyn i vad aktörerna själva anser om digitala tvillingar och hur samarbetet mellan aktörer fungerar i nuläget. Resultaten från intervjuerna kommer att sammanfattas i detta kapitel.

6.1 Bakgrund till de intervjuade företagen

De fyra företagen som intervjuades var ProptechCore, EQUA, Bengt Dahlgren och Castellum. Den första intervjun skedde med ProptechCore. Deras verksamhet riktar sig främst mot fastighetsutvecklare, fastighetsägare och förvaltare. De hjälper kunder att sköta ekosystem med information och implementera digitalisering i sina fastigheter till exempel med hjälp av digitala tvillingar. Från ProptechCore intervjuades en av grundarna till företaget och respondenten har arbetat med digitala tvillingar för fastigheter under flera års tid.

EQUA utvecklar simuleringsteknologier såsom BPS, där det viktigaste verktyget kallas IDA/ICE. Simuleringsverktygen används framförallt under den första fasen i designprocessen för att undersöka energiförbrukning och inneklimat i den planerade byggnaden. EQUA är i nuläget nästan bara engagerade i de tidigare stadierna i byggprocessen men de har en vilja att framträda mer under driftfasen. Från EQUA intervjuades en tidigare VD på företaget men som numera arbetar som technical advisor.

Det tredje företaget som intervjuades var Bengt Dahlgren. De är teknikkonsulter och hjälper till med bland annat projektledning, installation av VVS och energianvändning i byggnader. De brukar arbeta i varje steg i byggprocessen från design till drift. Respondenten från Bengt Dahlgren som intervjuades var BIM-samordnare och digital strateg.

Det fjärde och sista företaget som intervjuades var Castellum. Det är ett fastighetsbolag som arbetar med drift och förvaltning av byggnader. Castellum kan vara med genom hela byggprocessen eftersom de förutom drift även är med och bygger fastigheter. Från Castellum intervjuades en teknisk informationsansvarig.

6.2 Sammanställning av resultat från intervjuer

Respondent 1 (R1) - ProptechCore
Respondent 2 (R2) - EQUA
Respondent 3 (R3) - Bengt Dahlgren
Respondent 4 (R4) - Castellum

Intervjuerna inleddes med frågor gällande hur respondenterna definierar en digital tvilling för en fastighet. R1 är tydlig med att en digital tvilling är en representation av verkligheten och förklarar förenklat att man använder sig av data från verkligheten tillsammans med annan information om verkligheten till den digitala tvillingen. BIM nämns då som viktigt i sammanhanget och R1 menar att informationen som ofta finns beskrivet i BIM, till exempel kostnader, ritningar och krav, är viktig data som behövs för en digital tvilling och som kompletteras med data från exempelvis sensorer kopplade till IoT. En liknande definition gavs av R3 som också nämnde BIM och viss 3D-modellering som en potentiell del av en digital tvilling. R2 menade att digitala tvillingar kan delas in i olika nivåer för att försöka skapa en enighet i hur digitala tvillingar ska definieras. På nivå 0 är den digitala tvillingen endast en slags 3D-modell som liknar BIM med mätvärden. För varje nivå blir den digitala tvillingen sedan mer och mer avancerad och får fler inslag av AI och simuleringsverktyg tills den når den sista nivå 4. R4 däremot väljer att undvika begreppet digital tvilling och menar att digitalisering av byggnader är ett tydligare begrepp. De menar å andra sidan att digitaliseringsverktyg är något som kommer att förändra branschen i grunden.

Det undersöktes dessutom vad aktörerna ser för fördelar med användningen av digitala tvillingar. R1 och R2 anser att funktionen att kunna testa olika scenarion är en stor fördel eftersom det är väldigt kostsamt att göra dessa simuleringar på något annat sätt. R2 svarade att med hjälp av simuleringar kan man välja optimalt fönsterglas och material till byggnaden. Utöver R1 och R2 trycker även R3 på att energiprestandan kan bli bättre med hjälp av en digital tvilling. R1 och R3 menar även att värdet på fastigheten ökar om det finns en digital tvilling som tillhör byggnaden. R4 berättade att en fördel med digitalisering och digitala tvillingar är hur det förenklar förvaltningen av fastigheter.

För att få tydligare insyn i hur samarbetet ser ut i utvecklingen av digitala tvillingar diskuterades även detta under intervjuerna. R1 berättade att den digitala tvilling som de skapar under en viss fas nästan aldrig finns med till driftfasen, trots att detta är något de önskar. R1 menade att anledningen till detta kan vara att det är svårt för investerare att inse värdet av att skapa en digital tvilling som kan utvecklas tillsammans med byggnaden. De menar att den ska följa tillgången och att den ska uppdateras och vårdas. De ansåg dessutom att delad data har mycket stort värde. R2 var i en liknande situation och berättade att den information som de har levererat försvinner under byggprocessen och förs inte vidare till senare faser. R2 kritiserar även hur kontrakten mellan aktörer brukar vara upplagda eftersom detta gör att informationen tillfaller konsulter istället för byggnaden. R4 däremot tycker att samarbetet kring digitalisering fungerar bra och menar att de har framgångsrika samarbeten med flera andra aktörer, bland annat Vasakronan. Trots att Vasakronan är en konkurrent till Castellum menar R4 att samarbetet är fördelaktigt eftersom det hjälper till att sätta standarder.

Det diskuterades även hur samarbetet kan förbättras. Samtliga respondenter menade att samarbetsgraden har potential att bli större. R1 svarade att det finns incitament att samarbeta och att det egentligen inte finns några hinder för det, men att det å andra sidan krävs krav och större förståelse från andra aktörer av värdet med digitala tvillingar. Detta menar R1 skulle kunna åtgärdas med ytterligare teknisk kompetens inom branschen eftersom detta skulle leda

ökad uppfattning om de fördelar som digitala tvillingar bär med sig. R2 nämner de kontrakt som görs mellan aktörer under byggprocess som ett hinder mot samarbete. Kontraktens utformning gör att en viss aktör gör sin del i arbetet och sedan lämnar över arbetet till nästa aktör som gör arbetet på sitt sätt. R2 anser att digitala tvillingar kan vara ett sätt att förbättra kommunikationen mellan dessa aktörer. Dessutom nämns tillit som en viktig faktor för samarbete, detta menar dock R2 redan finns mellan aktörer i Norden. R3 ansåg precis som R1 att det krävs större förståelse mellan aktörer, att man måste förstå värdet av en digital tvilling och att den tekniska kunskapen behöver förbättras. R3 beskrev även hur byggbranschen ligger efter med digitalisering och att branschen även är rädd för riskfylld ny teknik i byggnader som planeras att finnas under en lång tid. R3 ansåg att allt detta är ett hinder för samarbete. Vidare menade R3 att samarbetsprojekt mellan aktörer är ett funktionellt sätt att försöka åtgärda dessa problem. R4 svarade att det svaga ekonomiska läget i Sverige och den låga graden av nybyggen är en faktor som gör att företag kan tvingas satsa på nya tekniska lösningar och innovationer, vilket det har funnits en ovilja emot av vissa aktörer. Samtliga respondenter svarade att någon slags politisk åtgärd, till exempel kravändringar eller incitament, skulle kunna vara ett sätt förbättra samarbetet.

7. PESTLE-analys

I detta kapitel kommer en PESTLE-analys över samarbete kring utvecklingen av digitala tvillingar att presenteras. Ämnet kommer att analyseras baserat på litteraturstudien samt intervjuerna utifrån ett politiskt, ekonomiskt, socialt, tekniskt, juridiskt och miljömässigt perspektiv. Analysen är sammanfattad i Figur 2.

7.1 Politik

Från intervjuerna för arbetet är det märkbart att politik kan spela en aktiv roll i att skapa bättre förutsättningar och på så sätt främja samarbete genom hela byggprocessen. Avsnitt *5.3 Politiska incitament* visar också på att det finns ett utbrett politiskt intresse av att underlätta digitaliseringen och ytterligare användning av digitala verktyg såsom digitala tvillingar. De rapporter som har tagits upp i detta arbete har framförallt tryckt på att information och data ska finnas åtkomligt på ett mer lättillgängligt sätt och att data från myndigheter ska kunna tolkas direkt av en digital tvilling. Ett annat exempel som lyftes fram var att processen för bygglov ska digitaliseras vilket även var något som nämndes i intervjuerna och diskuterades kunna vara ett sätt att utveckla graden av digitalisering inom bygg- och fastighetssektorn. Sådana politiska åtgärder skulle kunna underlätta för utvecklingen av digitala tvillingar vilket i sin tur skulle kunna främja ökat samarbete.

Det nämndes i avsnitt *5.3 Politiska incitament* att kommuner har utvecklat projekt för digitala tvillingar av sin kommun i syfte att med hjälp av simuleringar undersöka vad förändringar i den byggda miljön får för konsekvenser och påverkan. Tidigare i denna text har även projekt nämnts där privata aktörer har samarbetat med offentliga aktörer och det kan finnas en vilja mellan dessa sektorer att fortsätta med liknande projekt vilket i sådana fall skulle främja utvecklat samarbete.

Det är uppenbart att politiken på både nationell och kommunal nivå intresserar sig för denna typ av digitalisering. Politiken kommer att ha en stor inverkan på samarbetet mellan aktörer och politiska incitament kan göras för att uppmuntra till större samverkan för digitalisering och på så sätt även för utvecklandet av digitala tvillingar.

7.2 Ekonomi

Något som nämndes i avsnitt *1. Bakgrund* var att bygg- och fastighetssektorn just nu befinner sig i ett svårt ekonomiskt läge och att man på senare år har sett en minskning av investeringar i byggnader. Från intervjuerna finns det dessutom en enighet om att byggnader är kostsamma investeringar vilket kan göra det riskfyllt att utveckla och pröva ny teknik vilket har gjort att branschen ligger efter med digitalisering och verktyg såsom digitala tvillingar. Dessutom finns det en samstämmighet att kunskapen kring ämnet är låg vilket också kan innebära en

kostnad för expertis. Dessa kostnader samt det ansträngda ekonomiska läget kan hindra aktörer från att vilja investera i tekniken och således minska deras engagemang för samarbete.

Det bör dock påpekas att digitala tvillingar har många ekonomiska fördelar vilket har beskrivits tidigare i bland annat avsnitten *5.1.1 - 5.1.3*. Möjligheterna till minskade resurskostnader och lägre risk för felkonstruktioner samt minskade driftkostnader och högre värde på fastigheten kan göra digitala tvillingar till en positiv investering ur ett ekonomiskt perspektiv vilket skulle kunna bidra till att fler aktörer vill öka samarbetet för att få bättre utvecklade digitala tvillingar.

7.3 Social

En effekt av ökat samarbete är att kunskaper sprids mellan aktörerna. Med hjälp av samarbetsprojekt som exempelvis det tidigare diskuterade Dig-IT Lab kan erfarenheter delas mellan varandra och nya initiativ kan tas för förbättrade digitala tvillingar. Eftersom kompetens kan vara en stor kostnad kan dessa typer av samarbetsprojekt vara av nytta på grund av kunskapsutbytet. Skapande av Internet of Digital Twins, som beskrevs i avsnitt *5.1.4 Digitala tvillingen genom faserna*, eller något liknande skulle också kunna främja utökat samarbete och kunskapsutbyte. Detta förklaras mer i *7.4 Teknologi*.

I avsnitt *5.1.2 Digitala tvillingars funktion under byggskedet* nämns det hur sensorer på en byggarbetsplats kan användas för att öka säkerheten hos de anställda. Säkerhet är en viktig fråga för byggarbetare vilket gör att byggföretag behöver utveckla sitt säkerhetsarbete för att kunna förbättra sitt arbetsgivarvarumärke och attrahera kompetent personal. Detta skulle kunna vara ett incitament för dessa aktörer att samarbeta med andra aktörer för att utveckla den digitala tvillingen under byggskedet. Avsnitt *5.1.3 Digitala tvillingars funktion under driftfasen* berörde också hur digitala tvillingar under driftfasen kan ge ökad säkerhet mot exempelvis bränder och stöld. För förvaltare kan detta vara av nytta eftersom de kan ge en säkrare upplevelse till sina kunder.

7.4 Teknologi

Det är tydligt att teknologi har en essentiell roll för utvecklingen av digitala tvillingar. Från intervjuerna fanns det en enighet om att byggbranschen ligger efter med digitaliseringen samt att det saknas standardisering kring hur digitala tvillingar ska se ut vilket ökar svårigheterna med samarbete. Som tidigare nämnt kan samarbetsprojekt vara av vikt för att skapa konsensus kring hur en digital tvilling ska se ut och fungera och på så sätt utveckla samarbetet. Att utveckla den tekniska kompetensen kring digitala tvillingar, vilket även diskuterades under rubriken *7.3 Social*, är också något som kan hindra utvecklat samarbete men skulle kunna åtgärdas med utökad kunskapsdelning.

I avsnitt *5.1.4 Digitala tvillingen genom faserna* samt *7.3 Social* nämns potentialen att skapa ett Internet of Digital Twins genom att koppla ihop digitala tvillingar för byggnader och hur detta skulle kunna hjälpa städer med planering och drift av byggnaderna. Ur ett samarbetsperspektiv skulle detta kunna vara ett väldigt intressant verktyg eftersom man skulle kunna dra nytta av erfarenheter och data från andra projekt på ett lättare och mer sömlöst sätt.

Avsnitt *5.1.3 Digitala tvillingars funktion under driftfasen* berättade om hur digitala tvillingar riskerar att utsättas för cyberattacker på grund av den stora mängd data och information som finns i dem. Ökad säkerhet kring företags data och information kan öka benägenheten att samverka i utvecklingen av digitala tvillingar eftersom det minskar riskerna med tekniken.

Blockkedjor har i rapporten nämnts som något som skulle kunna integreras i en digital tvilling. Blockkedjor skulle kunna underlätta för större tillit mellan aktörer eftersom tekniken kan bidra till ökad säkerhet och tillförlitlighet vilket skulle kunna främja samarbete. Däremot är tekniken inte särskilt utvecklad i denna sektor och i nuläget kan den även innebära höga investeringskostnader vilket försvårar användningen.

7.5 Juridik

Dataskydd går även att diskutera under den juridiska delen. I avsnitt *5.1.2 Digitala tvillingars funktion under byggskedet* beskrivs risken att informationen som finns i digitala tvillingar inte är komplett eller helt tillförlitlig eftersom aktörerna som bidrar till den digitala tvillingen har egna intressen och möjligtvis inte vill dela viss information till konkurrenter. Detta kan hindra samarbete och det krävs lösningar för att göra digitala tvillingar trovärdiga och öka tilliten mellan aktörer i processen. Ett förslag som presenterades är att koppla blockkedjor till den digitala tvillingen, även om denna teknik ännu inte är fullt utvecklad.

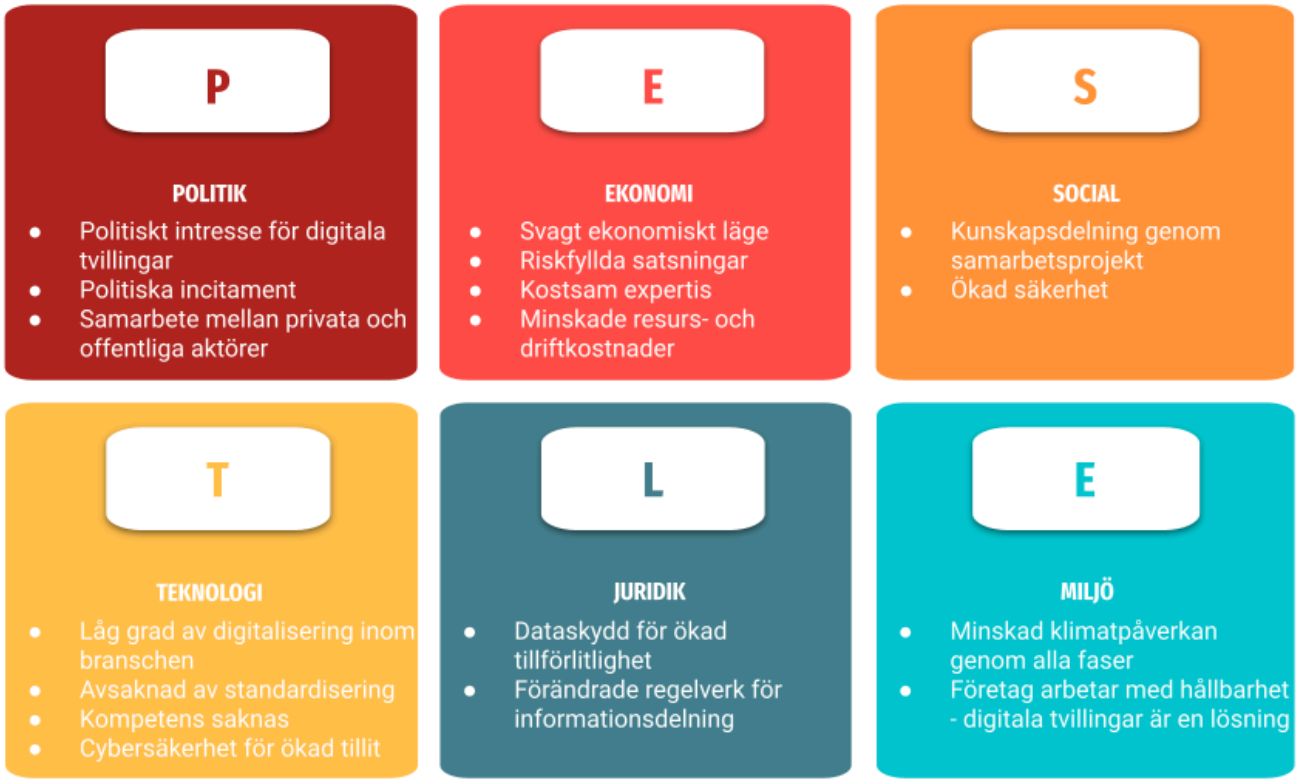
Politiska åtgärder kan också ha en påverkan på den juridiska delen när man analyserar samarbete. Avsnitt *5.3 Politiska incitament* berör att man vill förändra regelverk för att kunna underlätta informationstillgängligheten för öppen data eftersom detta kan bidra till ökad digitalisering i bygg- och fastighetsbranschen. Detta skulle möjligtvis kunna innebära standardisering av dataformat och protokoll, vilket skulle kunna göra det lättare för olika aktörer och system att samverka och integrera sina data och teknologier. Därutöver skulle aktörers samarbete med myndigheter kunna förbättras.

Något som påverkar samarbetet och utvecklingen av en digital tvilling i en byggprocess är juridiken bakom kontrakten mellan aktörerna. Avtalen är gjorda på ett sådant sätt att vissa aktörer inte får dela med sig av information till andra. Respondent 2 i intervjuerna kritiserade hur kontrakten mellan aktörer brukar vara upplagda. Respondenten påpekade bland annat att informationen ofta tillfaller konsulterna, när den istället skulle göra mer nytta genom att vara tillgänglig för aktörer i nästa del i byggprocessen.

7.6 Miljö

Digitala tvillingar har stor potential att göra bygg- och fastighetssektorn mer hållbar med minskad klimatpåverkan. Detta beskrivs bland annat i avsnitten *5.1.1 - 5.1.3*. Med hjälp av digitala tvillingar skulle man bland annat under driftfasen kunna minska energianvändningen och optimera temperaturen. Under tidigare faser kan man använda den digitala tvillingen till noggranna uppskattningar av hur mycket material som behövs vilket minskar risken för svinn. Dessutom kan man med hjälp av simuleringar undersöka vilken design och vilket material som gör byggnaden mest klimateffektiv. Som nämndes i *1. Bakgrund* är det många företag i branschen som ser miljö och hållbarhet som en viktig del i sitt arbete. Användningen av digitala tvillingar kan hjälpa dessa och andra företag att nå sina uppsatta miljömål vilket skulle kunna skapa incitament för dessa att vidare satsa och samarbeta kring digitala tvillingar.

7.7 Sammanfattning av PESTLE-analys



Figur 2. Sammanfattning av PESTLE-analysen.

Det är intressant att analysera hur PESTLE-analysens olika perspektiv hör ihop och påverkar varandra. Exempelvis hur sociala främjanden såsom kunskapsdelning genom samarbeten kan leda till ökad kompetens, vilket i sin tur kan minska kostnader för expertis. Alltså påverkar de sociala faktorerna både de tekniska och ekonomiska faktorerna utifrån just detta exempel. Ett

annat fall är hur politiska incitament skulle kunna underlätta för ökad digitalisering i sektorn. Ett tredje exempel är hur miljömässiga konsekvenser i form av minskade resurser och optimerad energianvändning kan leda till lägre kostnader under både byggprocessen och förvaltningen vilket i sin tur skulle kunna resultera i att fler aktörer ser potentialen i digitala tvillingar. Detta är intressant eftersom det bland annat illustrerar hur faktorerna hänger ihop och hur ett visst hinder från en kategori kan lösas av en åtgärd från en annan. Å andra sidan kan den också visa hur en främjande faktor ur ett perspektiv hindras av faktorer från andra perspektiv. Blockkedjeteknik är ett exempel eftersom användningen av tekniken hindras av både tekniska och ekonomiska orsaker. Analysmetoden visar därmed vikten av att ta alla faktorer i beaktning när man ska analysera hur man skulle kunna öka samarbetet mellan aktörer.

8. Diskussion

Denna rapport har undersökt de olika funktionerna med digitala tvillingar i byggprocessen, från design- och planeringsfasen till byggskedet och driftfasen. Resultaten visar att digitala tvillingar skulle kunna spela en avgörande roll i att minska bygg- och fastighetssektorns klimatpåverkan och bland annat förbättra effektiviteten genom hela byggnadens livscykel. Trots de tydliga fördelarna står sektorn inför flera utmaningar när det gäller att implementera och utnyttja digitala tvillingar fullt ut. Dessa utmaningar omfattar bland annat tekniska och ekonomiska aspekter, samt behovet av förbättrade samarbeten mellan olika aktörer. Detta kapitel har som syfte att diskutera detta samt att blicka vidare på vad som skulle kunna göras i framtida forskning.

8.1 En digital tvilling från livscykelns början?

Eftersom design- och planeringsfasen har en mycket stor inverkan på den framtida byggnadens kostnader och miljöpåverkan kan det vara fördelaktigt att använda sig av en digital tvilling. Med den digitala tvillingen skulle man exempelvis kunna göra simulationer för att utreda hur man utifrån ett designförslag kan minska energianvändningen under driftfasen. När design- och planeringsfasen har övergått till byggskedet har den digitala tvillingen nya användningsområden och detsamma gäller när byggnaden når driftfasen. Detta leder in på frågan om det är gynnsamt att utveckla den digitala tvillingen redan från början i livscykeln och lämna över den till en annan aktör i nästa fas eller om det istället är mer lönsamt att producera en ny digitala tvilling i varje fas som är anpassad för just det stadiet i byggnadens livscykel. Baserat på respondenternas svar under intervjuerna är det tydligt att de vill se att en digital tvilling utvecklas från början under design- och planeringsfasen och sedan förs vidare mellan faserna. Respondent 1 och 2 var till exempel missnöjda med att mycket av deras arbete med digitala tvillingar inte förs vidare till kommande faser. Utifrån resultatet av rapporten går det att förstå att en digital tvilling som har funnits och utvecklats under hela byggnadens livscykel kan vara ett effektivare och bredare verktyg jämfört med en digital tvilling som har utvecklats för endast en av faserna. Däremot finns det flera hinder innan en sådan process kan ske, till exempel på grund av bristande teknisk kompetens i sektorn, kostnadsfrågor och andra svårigheter som har nämnts i rapporten.

8.2 Samarbete kring digitala tvillingar

Det är uppenbart att samarbetet mellan aktörer i en byggprocess kan förbättras avsevärt vilket betonades av en majoritet av respondenterna under intervjuerna. Ett intressant och möjligt samarbetsproblem är tilliten mellan aktörer. Under intervjuerna ställdes ingen explicit fråga kring detta ämne men det var ändå något som nämndes under intervjuerna, bland annat under intervjun med respondent 4 från Castellum. Respondenten menade att detta inte hade varit något problem från deras sida utan att det istället varit positivt och framgångsrikt, trots att de

bland annat samarbetade med en stor konkurrent. Dessutom hävdade respondent 2 att det finns tillit mellan aktörer i Norden. Å andra sidan har resultaten från litteraturstudien visat att det kan uppstå problem med tilliten mellan aktörer vid nära samarbete. Resultatet tyder på att blockkedjeteknik skulle kunna vara ett sätt att hantera dessa eventuella problem på grund av den ökade säkerhet och tillförlitlighet som tekniken kan medföra. Det är dock viktigt att tillägga att tekniken inte är helt utvecklad, framförallt inom bygg- och fastighetssektorn, men däremot är det ett verktyg som bör diskuteras och testas i byggprocesser för att undersöka dess påverkan.

Rapportens andra frågeställning handlade om samarbete mellan aktörerna och faserna och om detta är fördelaktigt. Med ökat samarbete fås en mer komplett och användbar produkt men å andra sidan kan utvecklingen av den digitala tvillingen kräva extra arbete för aktörer som eventuellt inte gagnas av de tillägg som görs till tvillingen, utan istället gynnar exempelvis den framtida förvaltaren. Resultatet tyder på att priset att utveckla en digital tvilling genom hela fasen kan bli kostsam och att en sådan process möjligtvis inte blir lönsam förrän till exempel utbredd teknisk kompetens och förståelse samt ytterligare politiska incitament finns i branschen.

Eftersom digitala tvillingar är ett mycket omtvistat begrepp finns det en avsaknad av standardisering och en grundplattform att utveckla digitala tvillingar runt, vilket även blev tydligt från litteraturstudien och intervjuerna som gjordes. Respondent 4 menade exempelvis att samarbeten med konkurrenter är fördelaktiga eftersom standarder lättare kan bestämmas. Om dessa standarder bestäms samt att man kommer överens om en grundplattform att utveckla de digitala tvillingarna kring skulle samarbetet kunna effektiviseras avsevärt och man skulle även kunna underlätta interoperabilitet. Med en gemensam grundplattform kan skapare av digitala tvillingar utveckla tvillingar med unika funktioner som fungerar som konkurrensfördelar gentemot andra aktörer. Högre interoperabilitet skulle även innebära att man lättare kan samarbeta mellan olika projekt vilket skulle kunna resultera i en förbättrad och effektiviserad utveckling av digitala tvillingar samt underlätta för projekt som Internet of Digital Twins som nämndes i avsnitt *5.1.4 Digitala tvillingen genom faserna*.

8.3 Framtida forskning

Det finns flera olika områden kring detta ämne som skulle vara intressant att undersöka i framtiden. Bland annat hade det varit intressant att göra studier som fokuserar på kostnaden för att utveckla en digital tvilling och jämför olika alternativ. Är det exempelvis fördelaktigt för en förvaltare att investera i en digital tvilling som finns med redan vid design- och planeringsfasen och utvecklas tillsammans med byggnaden eller är det mer lönsamt att skanna byggnaden i efterhand trots den information och de funktioner man går miste om? Resultatet från en sådan eller liknande studie hade ytterligare kunnat svara på frågan om utökat samarbete mellan aktörer är fördelaktigt.

En annan potentiellt givande studie hade varit att analysera ett testprojekt där den digitala tvillingen följer med genom alla faser. Till vårt arbete har vi inte lyckats hitta någon sådan studie och inte heller under intervjuerna nämndes något sådant projekt som respondenterna varit med om. Med ett testprojekt skulle man kunna följa hur tvillingen utvecklas med tiden och hur den används. Framförallt hade det varit intressant att följa överlämningen sker mellan de olika faserna och var i förloppet det möjligtvis kan stötas på hinder. I slutet av studien skulle man även kunna utreda den totala kostnaden för den digitala tvillingen, hur tvillingen påverkade transaktioner och jämföra detta med ett traditionellt projekt. Därutöver kan man göra intervjuer med inblandade aktörer och undersöka om de ser positivt eller negativt på denna förändring i byggprocessen.

Detta arbete har inte fokuserat på äganderätten kring digitala tvillingar. Bör den till exempel tillhöra det företag som primärt har utvecklat den eller ska den tillhöra ägarna av fastigheten? Respondent 1 menade under intervjuerna att den digitala tvillingen ska följa tillgången och utvecklas tillsammans med fastigheten. Detta skulle kunna innebära att den digitala tvillingen ingår i till exempel fastighetsköp och det är fastighetsägarna som ansvarar för den. Detta är ett ämne som skulle vara intressant att utreda eftersom digitala tvillingar av byggnader blir mer och mer vanliga och sådana här diskussioner skulle därför kunna antas bli aktuella.

8.4 Övrig diskussion

Från de intervjuer som har hållits och även från den litteratur som har studerats är det mycket tydligt att digitalisering och i synnerhet digitala tvillingar är något som kraftigt kan förändra bygg- och fastighetsbranschen. Det är viktigt för företag att följa med i utvecklingen och investera i teknik och kunskap i ämnet för att kunna fortsätta att vara konkurrensmässiga. Under historien finns det flera fall där företag som inte har följt utvecklingen har tappat sin marknadsposition och i värsta fall försvunnit från marknaden helt. Det är därför inte svårt att förstå hur samarbetsprojekt som exempelvis Dig-IT Lab intresserar flera stora aktörer på marknaden som vill satsa på utvecklingen av digitala tvillingar.

Med digitala tvillingar kan man samla in oerhörda mängder data som kan användas för att optimera hur en byggnad används. Det är därför essentiellt att ta hänsyn till vilken data det är som samlas in och att denna data endast innehåller nödvändig information. Med tanke på att digitala tvillingar kan vara föremål för cyberattacker och att data från digitala tvillingar skulle kunna användas till olämpliga ändamål, vilket nämndes i avsnitt *1.1.3 Internet of Things (IoT)*, bör exempelvis övervakning av specifika individers rörelsemönster undvikas. Dessutom behöver man vara tydlig och transparent för användarna av en byggnad på vilket sätt de blir övervakade och hur informationen används. Detta blir speciellt betydande om datan som samlas in delas med andra aktörer. För användarnas integritets skull måste det råda konsensus mellan aktörerna hur datan ska behandlas och skyddas.

Denna rapport inleddes med att beskriva hur bygg- och fastighetsbranschen står för en stor del av världens klimatutsläpp och hur digitala tvillingar kan vara ett potentiellt verktyg för att

åtgärda dessa problem. Flera olika sätt har redogjorts för hur en digital tvilling kan resultera i minskade klimatutsläpp under en byggnads livscykel. Optimerad design, minskad resursförbrukning under byggskedet och effektiviserad energianvändning under driftfasen är de kanske tydligaste exemplen på hur man kan reducera sektorns klimatutsläpp. Om man vill motverka sektorns påverkan är det därför viktigt att satsa på nya tekniska lösningar och innovationer såsom digitala tvillingar. Från våra intervjuer och från vissa litteraturkällor har det även varit uppenbart att ett framgångsrikt sätt att utveckla dessa digitala tvillingar är genom utökat samarbete.

En intressant koppling som kan göras är den mellan tanken på att digitala tvillingar kan definieras i nivåer, vilket beskrevs i avsnitt *1.1.5 Olika nivåer av digital tvilling*, och hur en digital tvilling utvecklas under en byggnads livscykel. Under den inledande design- och planeringsfasen finns det ännu inte någon fysisk tvilling och den digitala tvillingen används istället för att utföra exempelvis simulationer för att åstadkomma en så bra och effektiv design som möjligt. Under byggskedet kan den digitala tvillingen ha en övervakande roll för att undersöka hur arbetet går och för att öka säkerheten. Därefter under driftfasen kan den med hjälp av till exempel AI få mer utvecklade funktioner och lära sig av tidigare händelser vilket skapar en effektiviserad drift av byggnader. Denna typ av definition skulle möjligtvis kunna skapa större förståelse gällande begreppet mellan aktörer som verkar i olika faser i en byggnads livscykel.

9. Slutsats

Digitala tvillingar som utvecklas och används från början av ett byggnadsprojekt och genom alla faser av byggnadens livscykel erbjuder en bredare och mer funktionell lösning än en digital tvilling som introduceras i ett senare skede, såsom driftfasen. Genom att påbörja utvecklingen tidigt, kan digitala tvillingar samla in och tillhandahålla detaljerad och tillförlitlig information om byggnadens material och behov, vilket kan saknas om tvillingen skapas senare. Trots detta kan det ändå vara fördelaktigt att utveckla digitala tvillingar för befintliga byggnader under driftfasen, även om de inte har tillgång till all tidigare information, eftersom de fortfarande kan erbjuda betydande förbättringar i hanteringen och underhållet av byggnaden.

Samarbete mellan aktörer i en byggprocess kan avsevärt höja effektiviteten och kvaliteten på slutprodukten, vilket framhävdes av en majoritet av respondenterna i intervjuerna. Ett potentiellt problem som kan uppstå vid ökat samarbete är bristande tillit mellan aktörerna. Blockkedjeteknik kan vara en lösning för att öka säkerheten och tillförlitligheten i samarbetet. Även om ökat samarbete och användningen av digitala tvillingar kan leda till en mer komplett och användbar produkt, innebär det också extra arbete och kostnader. Dessa kostnader och arbetsinsatser kan särskilt påverka de aktörer som inte direkt gynnas av de tillägg som görs till tvillingen, utan istället kan fördelarna ses på längre sikt av exempelvis framtida förvaltare. Därför är det viktigt att noggrant överväga alla parters intressen och väga fördelar mot nackdelar vid implementering av digitala tvillingar genom hela byggnadens livscykel.

10. Referenslista

Adu-Amankwa, N.A.N., Rahimian, F.P., Dawood, N. & Park C. (2023). *Digital Twins and Blockchain technologies for building lifecycle management*. Automation in Construction, 155. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523003242 (Hämtad: 2024-07-02).

Aengenvoort, K. & Krämer, M. (2018). *BIM in the Operation of Buildings*. Building Information Modeling, s. 477–491. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_29 (Hämtad: 2024-07-04).

Agouzoul, A., Tabaa, M., Chegari, B., Emmanuel, S., Dandache, A. & Alami, K. (2021). *Towards a Digital Twin model for Building Energy Management: Case of Morocco*. Procedia Computer Science, 184: s. 404-410. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921006827?via%3Dihub (Hämtad: 2024-07-06).

Akademiska Hus. (2023). *Karolinska Institutet får virtuellt campus*. https://www.akademiskahus.se/Nyheter/2023/januari/karolinska-institutet-far-virtuellt-campus/ (Hämtad: 2024-07-02).

Alshammari, K., Beach, T. & Rezgui, Y. (2021). *CYBERSECURITY FOR DIGITAL TWINS IN THE BUILT ENVIRONMENT: CURRENT RESEARCH AND FUTURE DIRECTIONS*. Journal of Information Technology in Construction, 26, s. 159-173. ITcon. https://www.itcon.org/papers/2021_10-ITcon-Alshammari.pdf (Hämtad: 2024-05-26).

Arditi, D & Nawakorawit, M. (1999). *DESIGNING BUILDINGS FOR MAINTENANCE: DESIGNERS' PERSPECTIVE*. Journal of Architectural Engineering, 5, s. 107-116. American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(1999)5:4(107) (Hämtad: 2024-07-03).

Autodesk. (u.å.). *Digital Twins in Construction, Engineering & Architecture*. https://www.autodesk.com/solutions/digital-twin/architecture-engineering-construction (Hämtad: 2024-06-02).

Boverket. (2019). *Mer helhetssyn, mindre stuprörsmentalitet.* https://www.boverket.se/contentassets/382c126619cd46dd9278418906275258/rapport-undersokning-av-varderingar-och-kultur-i-byggbranschen-2019-1.pdf (Hämtad: 2024-07-06).

Boverket. (2018). *Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn.* Boverket. https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/publikationer/2018/kartlaggning-av-fel-brister-och-skador-inom-byggsektorn/ (Hämtad: 2024-05-28).

Bragança, L., Viera, M.S. & Andrade, B.J. (2014). *Early Stage Design Decisions: The Way to Achieve Sustainable Buildings at Lower Costs*. The Scientific World Journal. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2014/365364 (Hämtad: 2024-07-01).

Byggfakta. (2022). *2a. Hur går bygglovsprocessen till?*. https://www.byggfakta.se/kunskap/byggprocessen/bygglovsprocessen (Hämtad: 2024-04-16).

Byggföretagen. (2023). *Byggkonjunkturen #2 2023*. https://byggforetagen.se/app/uploads/2023/11/BK2_2023-1.pdf (Hämtad: 2024-05-25).

Bygg Love. (2023). *Vad gör en attraktiv arbetsgivare inom byggbemanning?*. https://bygglove.se/attraktiv-arbetsgivare-byggbemanning/ (Hämtad: 2024-05-25).

Camén, C., Gottfridsson, P. & Rundh, B. (2012). Contracts as cornerstones in relationship building. *International Journal of Quality and Service Sciences*, 4(3). https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/17566691211269549/full/html#idm45946404386432 (Hämtad: 2024-07-05).

Castellum. (u.å.). *Castellums agenda för den hållbara staden 2030*. https://www.castellum.se/om-castellum/hallbarhet/mal-och-ambitioner/hallbarhetsstrategi-och-mal/ (Hämtad: 2024-05-26).

Cespedes-Cubides, A.S. & Jradi, M. (2024). *A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage*. Energy Informatics, 7. https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-024-00313-7 (Hämtad: 2024-05-24).

Chow, P T., Cheung, S O. & Chan, K Y. (2012). *Trust-building in construction contracting: Mechanism and expectation*. International Journal of Project Management, 30(8): s. 927-937. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786312000440 (Hämtad: 2024-07-05).

Clarke, J A. & Hensen J L M. (2015). *Integrated Building Performance Simulation:Progress, Prospects and Requirements*. Building and Environment, 91: s. 294-306. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315001602?via%3Dihub (Hämtad: 2024-07-06).

Deng, M., Menassa, C.C. & Kamat, V R. (2021). *FROM BIM TO DIGITAL TWINS: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE EVOLUTION OF INTELLIGENT BUILDING REPRESENTATIONS IN THE AEC-FM INDUSTRY*. Journal of Information Technology in Construction, 26, s. 58-83. ITcon. https://itcon.org/papers/2021_05-ITcon-Deng.pdf (Hämtad: 2024-05-13).

De Wilde, P. (2018). *Building Performance Analysis*. John Wiley & Sons. https://books.google.se/books?id=a99eDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sv#v=onepage&q&f=false (Hämtad: 2024-07-06)

Einar Mattsson. (u.å.). *Miljö och klimat*. https://www.einarmattsson.se/om-oss/hallbarhet/miljo-och-klimat/ (Hämtad: 2024-05-26).

Green, J., Ejlertsson, A., Görman, F., Sandqvist, F., Stattin, E. & Wohlén, M. (2020). *Loggbok för ett obrutet flöde av miljöinformation*. IVL Svenska Miljöinstitutet. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1549448/FULLTEXT01.pdf (Hämtad: 2024-05-15).

Göteborgs Stad. (u.å.). *Digital tvilling*. https://goteborg.se/wps/portal/start/goteborg-vaxer/sa-planeras-staden/digital-stadsutveckling/digital%20tvilling (Hämtad: 2024-05-25).

Haglund, A. (2022). *Digital tvilling av Umeå universitet skapas*. Umeå Universitet. 31 mars. https://www.umu.se/nyheter/digital-tvilling-av-umea-universitet-skapas_11550803/ (Hämtad: 2024-06-28).

Hong, J., Qiping Shen, G., Feng, Y., Sin-tong Lau, W. & Mao, C. (2015). *Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: a case study in China*. Journal of Cleaner Production, 103, s. 249-252. Elsevier Science. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.023 (Hämtad: 2024-07-05).

Håkansson, L. (2024). Collaboration on digital twins in Luleå. *North Sweden Business*. 6 juni. https://northswedenbusiness.com/news/2024/juni/collaboration-on-digital-twins-in-lulea/ (Hämtad: 2024-07-05).

IBM. (u.å.a). *What is a digital twin?*. https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin (Hämtad: 2024-03-25).

IBM (u.å.b) *What is blockchain?*. https://www.ibm.com/topics/blockchain (Hämtad: 2024-05-29).

IBM. (u.å.c). *What is the Internet of Things (IoT)?*. https://www.ibm.com/topics/internet-of-things (Hämtad: 2024-05-29).

Jadhav, N.Y. (2016). *Green and Smart Buildings. Advanced Technology Options*. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-1002-6 (Hämtad: 2024-07-06).

Jiang, Y., Liu, X., Wang, Z., Li, M., Zhong, R.Y. & Huang, G.Q. (2023). *Blockchain-enabled digital twin collaboration platform for fit-out operations in modular integrated construction*. Automation in Construction, 148. Elsevier Science. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104747 (Hämtad: 2024-05-08).

Kenton, W. (2024). *What Is PEST Analysis? Its Applications and Uses in Business*. Investopedia. https://www.investopedia.com/terms/p/pest-analysis.asp (Hämtad: 2024-05-12).

Khajavi, S.H., Tetik, M., Liu, Z., Korhonen, P. & Holmström, J. (2023). *Digital Twin for Safety and Security: Perspectives on Building Lifecycle*. IEEE Access, 11, s. 52339-52356. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10130166 (Hämtad: 2024-06-28).

Klintborg, M. & Drewniak, M. (2018). *Uppdrag att verka för digitalt först - För en smartare samhällsbyggnadsprocess*. Lantmäteriet. https://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/om-oss/2018_1.pdf (Hämtad: 2024-06-29).

Kovacic, I. & Zoller, V. (2015). *Building life cycle optimization tools for early design phases*. Energy, 92. s. 409-419. Elsevier Science. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.027 (Hämtad: 2024-07-01).

KTH. (2023). *Dig-IT Lab – nytt kompetenscentrum snabbar upp byggbranschens digitalisering*. https://www.kth.se/itm/nyheter/dig-it-lab-nytt-kompetenscentrum-snabbar-upp-byggbranschens-digitalisering-1.1277871 (Hämtad: 2024-03-25).

Lantmäteriet. (2024). *Förslag till färdplan för att fortsätta digitalisera samhällsbyggnadsprocessen*. https://www.lantmateriet.se/contentassets/2565ba19e0194661bd8daeaaac54981a/slutrapport-forslag-till-fardplan-for-att-fortsatta-digitalisera-samhallsbyggnadsprocessen.pdf (Hämtad: 2024-06-29).

Lu, Q., Parlikad, A.K., Woodall, P., Ranasinghe, G.D., Xie, X., Liang, Z., Konstantinou, E., Heaton, J. & Schooling, J. (2020a). *Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus*. Journal of Management in Engineering, 36. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000763 (Hämtad: 2024-05-27).

Lu, Q., Parlikad, A.K. & Schooling, J. (2020b). *Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance*. Automation in Construction, 118. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580520303654?via=ihub (Hämtad: 2024-05-28).

Luleå Kommun. (u.å.). *Digital tvilling underlättar planeringen av nya industrietableringar*. https://www.lulea.se/utveckla-lulea/utveckla-lulea/utvecklingsprojekt-och-initiativ/digital-tvilling-av-industriparken.html (Hämtad: 2024-07-05).

Madni, A.M., Madni C.C. & Lucero, S.D. (2019). *Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering*. Systems, 7. https://doi.org/10.3390/systems7010007 (Hämtad: 2024-06-24).

Malmö Universitet. (2024). *Search strategies for systematic reviews*. https://docs.google.com/document/d/1sWdI7HqlEkM5QPwN39Beyul61NNUJY2AKRYIn04TN5g/edit (Hämtad: 2024-06-25).

Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J. & Marrero, M. (2017). *Ecological footprint of the use and maintenance phase of buildings: Maintenance tasks and final results*. Energy and Buildings, 155, s. 339-351. Elsevier Science. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.038 (Hämtad: 2024-07-03).

NASA. (2021). *Digital Twins and Living Models at NASA*. https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699 (Hämtad: 2024-05-13).

Naturvårdsverket. (2023). *Klimatet och bygg- och fastighetssektorn*. https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-bygg--och-fastighetssektorn/ (Hämtad: 2024-03-21).

Niranjanamurthy, M., Nithya, B.M. & Jagannatha, S. (2018). *Analysis of Blockchain technology: pros, cons and SWOT*. Cluster Computing, 22, s. 14743-14757. https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-018-2387-5 (Hämtad: 2024-07-01).

Nordic BIM Group. (u.å.). *BUILDING INFORMATION MODELING*. https://www.nordicbim.com/sv/allt-om-bim (Hämtad: 2024-04-23).

Opuko, D.J., Perera, S., Osei-Kyei, R. & Rashidi, M. (2021). *Digital twin application in the construction industry: A literature review*. Journal of Buidling Engineering, 40. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221005842?casa_token=FIWML5ao69EAAAAA:Q7Wj22XsLXzs8hxTV4FDAna0E24uXI1sW87Z8h9uUJuW35kZ57FbjT1CuC7WY2mcT9COtEG7kw (Hämtad: 2024-06-29).

Pan, Y., Zhu, M., Lv, Y., Yang, Y., Liang, Y., Yin, R., Yang, Y., Jia, X., Wang, X., Zeng, F., Huang, S., Hou, D., Xu, L., Yin, R. & Yuan, X. (2023). *Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies*. Advances in Applied Energy, 10. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666792423000148 (Hämtad: 2023-04-24)

Regeringskansliet. (2023). *Färdplan för en digitaliserad samhällsbyggnadsprocess*. https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2023/11/fardplan-for-en-digitaliserad-samhallsbyggnadsprocess/ (Hämtad: 2024-05-25).

RISE. (u.å.). *Digitala tvillingar kan göra kommuner och företag bättre rustade för framtiden*. https://www.ri.se/sv/berattelser/digitala-tvillingar-kan-gora-kommuner-och-foretag-battre-rustade-for-framtiden (Hämtad: 2024-07-05).

ScienceDirect. (u.å.). *Title: digital twin*. https://www.sciencedirect.com/search?qs=digital%20twin&title=digital%20twin (Hämtad: 2024-06-25).

Shields, D.R., Tucker, L.R. & Thomas, S.R. (2003). *Measurement of Construction Phase Success of Projects*. Construction Research Congress. American Society of Civil Engineers. https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/40671%282003%2928 (Hämtad: 2024-07-05).

SIEMENS. (2020). Apollo 13: The First Digital Twin. *Simcenter.* [Products]. 14 april. https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/ (Hämtad: 2024-05-13).

SISAB. (u.å.). *Hållbara SISAB*. https://sisab.se/sv/om-sisab/hallbara-sisab/ (Hämtad: 2024-05-26).

Storsthlm. (2023). *Digital tvilling förenklar framtidens stadsutveckling i Sundbyberg*. https://www.storsthlm.se/artiklar/digitalisering/2023/digital-tvilling-forenklar-framtidens-stadsutveckling-i-sundbyberg (Hämtad: 2024-05-25).

Svenska Akademiens Ordböcker. (2015a). *digital*. https://svenska.se/saol/?id=0477387&pz=7 (Hämtad: 2024-05-12).

Svenska Akademiens Ordböcker. (2015b). *tvilling*. https://svenska.se/saol/?sok=tvilling&pz=1 (Hämtad: 2024-05-12)

Svensk Byggtjänst. (2021). *Vad är BIM?*. https://byggtjanst.se/artiklar/vad-ar-bim (Hämtad: 2024-04-23).

Swaling, V.H. & Johansson, J. (2018) *NCS3 Studie – IoT-relaterade risker och strategier*. Totalförsvarets Forskningsinstitut. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. https://rib.msb.se/Filer/pdf/28550.pdf (Hämtad: 2024-07-01).

Tahmasebinia, F., Lin, L., Wu, S., Kang, Y. & Sepasgozar, S. (2023). *Exploring the Benefits and Limitations of Digital Twin Technology in Building Energy*. Applied Sciences, 13. https://www.mdpi.com/2076-3417/13/15/8814 (Hämtad: 2024-06-26).

Teizer, J., Johansen, K.W. & Schultz, C. (2022). *The Concept of Digital Twin for Construction Safety*. Construction Research Congress 2022, s. 1156-1165. https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/9780784483961.121 (Hämtad: 2024-05-09).

Thulin, B. (2021). *Fördelarna med Building Information Modeling för investerare, ägare och operatörer*. Schneider Electric Blog. https://blog.se.com/se/byggnader/2021/09/13/fordelarna-med-building-information-modeling-for-investerare-agare-och-operatorer/ (Hämtad: 2024-05-01).

Thomsen, A., Schultmann, F. & Kohler, N. (2011). *Deconstruction, demolition and destruction*. Building Research & Information, 39, s. 327-332. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09613218.2011.585785 (Hämtad: 2024-07-03).

Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C.E., Rajabifard, A. & Acuto, M. (2022). *Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals*. Nature Sustainability, 5, s. 822-829. https://www.nature.com/articles/s41893-022-00923-7 (Hämtad: 2024-05-06).

Uher, E T. & Davenport, P. (2009). *Fundamentals of Building Contract Management*. UNSW Press. https://books.google.se/books?id=pObKMWgurOYC&printsec=frontcover&hl=sv#v=onepage&q&f=false (Hämtad: 2024-07-03).

UNEP. (2023). *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/43293 (Hämtad: 2024-03-21).

United Nations. (u.å.). *Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable*. https://sdgs.un.org/goals/goal11 (Hämtad: 2024-05-25).

VanDerHorn, E. & Mahadevan, S. (2021). *Digital Twin: Generalization, characterization and implementation.* Decision Support Systems, 145. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923621000348?casa_token=8Vkp2Y-FsfwAAAAA:k_rMsX-mMMGLv9vnAJYvs0KAMx0xkd0vfO0e8vJZvsrqROofDJJnBqhWylJOnIGCKC1ne15M6FA Hämtad: (2024-05-12).

Vasakronan. (u.å.). *Så jobbar vi hållbart*. https://vasakronan.se/om-vasakronan/hallbarhet/vart-ansvar/#miljoansvar (Hämtad: 2024-05-26).

Vogel, J. (2024). *Smarta och hållbara byggnader : för minskad klimatpåverkan och ökat fastighetsvärde*. Svensk Byggtjänst. (Hämtad: 2024-05-28).

Welfare, K., Sherratt, F & Hallowell, M. (2021). *Perceptions of Construction Work: Views to Consider to Improve Employee Recruitment and Retention*. Journal of Construction Engineering and Management, 147. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002057 (Hämtad: 2024-06-29)

Wright, L. & Davidson, S. (2020). *How to tell the difference between a model and a digital twin*. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 7. https://link.springer.com/article/10.1186/s40323-020-00147-4 (Hämtad: 2024-06-29).

Yan, H., Shen, Q., Fan, L.C.H., Wang, Y. & Zhang, L. (2010). *Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong*. Building and Environment, 45, s. 949-955. Elsevier Science. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.014 (Hämtad: 2024-07-06).

Zhao, J., Feng, H., Chen, Q. & Garcia de Soto, B. (2022). *Developing a conceptual framework for the application of digital twin technologies to revamp building operation and maintenance processes*. Journal of Building Engineering, 49. Elsevier Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222000419#bib44 (Hämtad: 2024-05-12).

11. Bilagor

Bilaga 1. De huvudsakliga intervjufrågorna.

- Vad arbetar företaget du arbetar på med och vad har du för roll i ditt arbete och på vilket sätt är du insatt i arbetet kring digitala tvillingar?
- Hur skulle du definiera en digital tvilling av en byggnad?
- Hur använder ni er av digitala tvillingar? / Vilka funktioner brukar de digitala tvillingar ni utvecklar ha?
- I vilket stadium i byggprocessen brukar ni vara som mest engagerade?
- Vilka fördelar anser ni finns med att utveckla och använda en digital tvilling?
- Vilka hinder ser ni med användningen/implementeringen av digitala tvillingar?
- Hur ser ert samarbete ut just nu mellan byggare, förvaltare och konsulter kring skapandet/ användning kring digitala tvillingar?
- Anser ni att det finns möjligheter för ökat samarbete mellan aktörerna?
- Vilka fördelar skulle det finnas med ökat samarbete?
- Vilka möjliga hinder skulle kunna uppstå?

TRITA – ITM-EX 2024:202
Stockholm, Sverige 2024

www.kth.se