

11. JANUAR 2024



DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

KONCEPTET, STANDARDER OG EGENSKABER

CHARANYA MANOHARAN
VEJLEDER: KJELD SVIDT
AALBORG UNIVERSITET
4. semester – Bygningsinformatik

FORORD

Denne rapport er lavet i forbindelse med en kandidat afgangseksamen, på studiet *Byggeledelse og bygningsinformatik*, på Aalborg Universitet. Specialet præsenterer resultaterne af et systematisk litteraturstudie af digitale tvillinger i byggebranchen. Digital tvilling – teknologien har vist sig at have et potentiale til at forbedre effektiviteten, kvaliteten og bæredygtigheden af byggeprojekter, og dette speciale søger at belysenøgleaspekter af dens anvendelse og udfordringer i byggebranchen. Formålet med denne litteraturgennemgang er at identificere behovet for klare standarder og egenskaber for digitale tvillinger for at styrke kvaliteten og bæredygtigheden af byggeprojekter. Rapporten undersøger også udfordringerne ved implementeringen af digitale tvillinger i byggebranchen og foreslår en metode til at definere standarder og egenskaber baseret på eksisterende viden og analyse. Jeg håber at dette speciale vil bidrage til en dybere forståelse af digital tvilling – teknologiens rolle i byggebranchen og hjælpe med den implementering i fremtidige byggeprojekter, når der er brug for den.

Jeg vil gerne takke alle dem der har hjulpet mig med dette speciale undervejs, både med akademisk- og moralsk support. En særlig tak skal gå til min vejleder Kjeld Svidt, som har bidraget med god vejledning og sparring undervejs.

ABSTRACT

Digital twins have become a promising technology for improving the efficiency, quality, and sustainability in the building sector. This thesis presents a systematic literature review of digital twins in construction, where the focus is on defining clear standards and properties for digital twins to enhance project quality and sustainability. The study identifies a need for a more holistic approach to digital twin technology, with a focus on adapting digital twins to specific and changing requirements in construction projects. The thesis also highlights the challenges that are associated with implementing digital twins in the building sector, including the need to define when a digital twin becomes a digital twin. In addition, the thesis presents a suggestion for a method for defining standards and properties based on a combination of existing knowledge and analysis to achieve a deeper understanding of the issues surrounding digital twins in construction. The results of this study can be used to enable the implementation of digital twin technology in future construction projects with sustainability as the central focus. However, it is important to recognize that digital twins are not a universal solution for all challenges in the construction industry and that their use should be carefully evaluated in the context of specific project phases, project type and type of challenges.

Search words: Digital twin, construction industry, building information modelling (BIM), sustainability, standardization, systematic literature review.

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Indledning.....	4
2	Metode	6
2.1	Systematisk litteraturstudie	6
3	Analyse	12
3.1	Digitale tvillinger i byggeprojekter	12
3.1.1	Delkonklusion	20
3.2	Standarder og retningslinjer for digitale tvillinger	22
3.2.1	Delkonklusion	26
3.3	Egenskaber for digitale tvillinger	28
3.3.1	Delkonklusion	33
4	Anvendelse af digitale tvillinger til varierende krav i byggeprojekter.....	34
4.1.1	Byggebranchens udfordringer og den digitale tvillings rolle.....	35
4.1.2	Delkonklusion	47
5	Konklusion	48
6	Referenceliste.....	50
7	Bilag	53
7.1	Bilag 1 – Udvælgelse Af Startsat.....	53
7.2	Bilag 2 – Baglæns Snowballing (Fase 1-3).....	53
7.3	Bilag 3 – Forlæns Snowballing	53
8	Tabeloversigt	53
9	Figuroversigt.....	53

1 INDLEDNING

Implementeringen af digitale løsninger er blevet en almindelig og forventet del af ethvert byggeprojekt. Digitale løsninger har en stor indflydelse på projektets effektivitet og kvalitet, samt bæredygtighed. I dag er der stor fokus på bæredygtigheden, og i den kontekst, er der et stort potentiale for at de digitale løsninger kan bidrage positivt. Byggebranchen står over for udfordringer med at minimere affald, reducere energiforbruget og sikre at bygninger er mere miljøvenlige. Samtidig har der været en stigning i anvendelsen af avancerede teknologier, som Internet of Things (IoT), kunstig intelligens (AI) og dataanalyse inden for byggebranchen. (Macchi et al., 2018). I denne sammenhæng, er dette interessant, da den digitale tvilling-teknologi spiller en afgørende rolle, ved at skabe en virtuel kopi af et byggeprojekt, der afspejler dets virkelige tilstand i realtid, giver en digital tvilling mulighed for at analysere, simulere og optimere projektet på en måde, der ellers ville være umulig. Dette kan hjælpe projektteams med at træffe bedre beslutninger, forbedre livscyklusstyring og øge brugerinddragelse.

Det er dog vigtigt at bemærke, at der ikke eksisterer en standardiseret tilgang til oprettelsen af en digital tvilling, hvilket kræver at man skal lave tilpasninger til de specifikke behov der er i et projekt, dette fremhæves af Nour El-Din et al. i artiklen Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. Derudover fremhæves det at *“Some think that a mere building information model is a digital twin, while vendors often present building digital twin solutions as 3D visualizations of a building supplemented with the monitoring of indoor parameters, indoor temperature, or occupancy. However, the use of 3D visualizations does not guarantee the simulation of the real world, since the same can be achieved using static drawings.”* Som udtrykt i citatet, er der ikke én decideret definition af hvad en digital tvilling er, og hvilke egenskaber den bør opfylde. Dette dokumenteres yderligere i det litteraturstudie der er lavet for dette speciale. Oftest bliver kravene til den digitale tvilling opfundet løbende under projektet, og derfor er det interessant at undersøge hvilke egenskaber og krav en digital tvilling bør have, hvordan den digitale tvilling kommer til at se ud og hvilke funktioner der skal udarbejdes for at den kan anvendes i en praktisk kontekst.

Med implementeringen af digitale tvillinger i byggebranchen, kommer der også en række udfordringer. Én af de primære udfordringer er integrationen af forskellige typer af datakilder, altså sensorer, BIM – modeller og andre informationskilder. Denne udfordring og flere, undersøges i forbindelse med dette speciale. På samme måde, diskuteres spørgsmålet om sikkerhed og beskyttelse af data. Når store mængder af data indsamles og analyseres i realtid, er det vigtigt at etablere sikre systemer der kan opbevare det. Her spiller standardiseringer også en afgørende rolle, for dataudveksling og interoperabilitet mellem forskellige systemer og platforme. Forståelsen af disse udfordringer er essentiel for at kunne håndtere dem effektivt. Ved at identificere og løse disse udfordringer, har byggebranchen større mulighed for at udnytte potentialet ved den

digitale tvilling og dens positive indvirkning på effektiviteten, kvaliteten og bæredygtigheden af byggeprojekter. Den centrale problemstilling i dette studie er derfor, *"Hvordan kan vi definere standarder og egenskaber for digitale tvillinger i byggeprojekter for at sikre, at de effektivt bidrager til projektets kvalitet og bæredygtighed?"*. Ved at svare på denne problemstilling er målet at lette implementeringen af digitale tvilling-teknologi i fremtidige byggeprojekter med bæredygtighed som et centralt fokusområde. En grundlæggende del af dette speciale er et systematisk litteraturstudie. Igennem litteraturstudiet udforskes og analyseres den eksisterende viden på området for digitale tvilling både generelt, men med et større fokus på byggebranchen. Grunden til at valget faldt på et litteraturstudie, er at de konklusioner som dette speciale vil bidrage med, træffes på et grundlag af akademiske artikler og konklusioner. Ved at kombinere den eksisterende viden, med analyser og resultater fra dette speciale, opnås der en dybere forståelse til problemstillingerne omkring digitale tvillinger i byggebranchen.

Formålet med dette speciale, er at præsentere et forslag, på hvordan man kan definere klare standarder og egenskaber for den digitale tvilling, med fokus på at forbedre projektets kvalitet og bæredygtighed. For at kunne opnå dette mål, bliver specialet struktureret i forskellige dele der omfatter en analyse af eksisterende praksis, udfordringer og muligheder ved anvendelsen af digitale tvillinger, og til sidst et forslag på hvordan man kunne udarbejde retningslinjer for den digitale tvilling. Derudover er det vigtigt at understrege, at dette speciale kun fokuserer på specifikke aspekter af den digitale tvillinger i byggebranchen, og derfor omfatter retningslinjerne nødvendigvis ikke hele byggebranchen. Samtidig kan der være begrænsninger i tilgængelighed af data og information, som kan påvirke omfanget af analysen og konklusionerne. Dette er udspecificeret nærmere i 2. Metode kapitlet.

2 METODE

Dette kapitel præsenterer den systematiske tilgang til litteraturstudiet, som bliver anvendt til at opnå en dybdegående forståelse af digitale tvillinger inden for byggeindustrien. I dette kapitel beskrives de strategier og værktøjer, der er blevet brugt til at samle og analysere den eksisterende viden på området.

2.1 SYSTEMATISK LITTERATURSTUDIE

Et systematisk litteraturstudie udføres med det formål at opnå en samlet forståelse for den eksisterende viden på et bestemt område. Der findes forskellige tilgange til at gennemfører et litteraturstudie, og i dette projekt anvendes "snowballing" metoden, som vil blive beskrevet i det følgende afsnit. Blandt de alternative metoder til litteraturgennemgang, var systematiske søgninger, metaanalyse og narrative litteraturgennemgange. Grundet til at snowballing – metoden blev valgt, er fordi man har mulighed for at udvide dækningsgraden af den eksisterende viden, ved at finde relevante artikler gennem referencelister, i kilder man allerede har fundet. Med snowballing har man mulighed for at finde artikler, man muligvis ikke havde fundet gennem traditionelle søgninger med søgeord. Med denne tilgang kan man opnå en mere omfattende forståelse af området og det hjælper med at skabe en sammenhængende oversigt over den eksisterende viden.

Inden den endelige anvendelse af snowballing metoden påbegyndes, udføres der en kortlægning af litteraturen ved hjælp af relevante søgeord. Dette trin har til formål at identificere det første sæt af artikler, som også kaldes "startsættet". Det er vigtigt at overveje valget af søgeord, da de danner grundlag for den litteratur der anvendes i specialet. I tabellen nedenfor opstilles en oversigt over udvælgelsesprocessen for søgeordene.

Tabel 1 – Oversigt over udvælgelsesprocessen for søgeord

Fase 1	Fase 2	Fase 3
- Digital twin - Building industry - Building industry AND digital twin - BIM AND digital twin - Construction - Life Cycle Analysis - Life Cycle Analysis AND digital twin - Construction AND digital twin - Smart construction AND digital twin	- Digital twin - Building - Building industry - Construction - Building industry AND digital twin - BIM AND digital twin - Construction AND digital twin - 3D modeling AND Construction AND Digital twin	- Digital twin - Building process AND digital twin - Digitalization - Construction - BIM

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

- Virtual construction AND digital twin - Digital twin AND Facility management - Augmented reality AND Construction AND digital twin - 3D modeling AND Construction AND Digital twin - Digitalization		
---	--	--

Søgeordene, der er blevet benyttet i dette projekt, omfatter: digital twin, building process, BIM, digitalisation, og construction. Som vist i figur 1, er søgeordene sat sammen for at afgrænse søgningen til digitale tvillinger indenfor byggeindustrien samt digitaliseringen af byggeindustrien.

Disse søgeord er valgt, da de repræsenterer centrale aspekter af problemstillingen. Litteraturstudiet blev ikke begrænset til en bestemt tidsperiode, for at få en omfattende forståelse for emnet. Derudover blev søgningerne primært udført i Scopus, hvor udfaldet var 599 artikler. I det næste afsnit beskrives det hvordan snowballing metoden, udføres i Scopus.

The image shows a search workflow interface. It consists of several rows, each representing a search step. Each row has a 'Search within' box (containing 'Article title, Abstract, Keywords') and a 'Search documents' box. The steps are connected by logical operators: AND, OR, AND, OR, AND. The search terms in the 'Search documents' boxes are: 'digital AND twin', 'building AND process', 'bim', 'digitalisation', and 'construction'.

Figur 1 – Oversigt over sammensætning af søgeord

Snowballing metoden kan udføres ved at anvende ressourcer som Google Scholar, Scopus, Web of Science, eller lignende. For dette speciale blev Scopus anvendt. Scopus er en stor database af akademiske artikler fra diverse tidsskrifter. Databasen giver mulighed for at søge efter en artikel og se dens referenceliste. Samtidig giver den nem adgang til forskellige artiklers abstrakter. Det, der gør at Scopus er valgt frem for én af de andre databaser, er at den kan konvertere referencelisterne til en liste af hyperlinks. Dette betyder, at man let kan få adgang til de artikler, som den gældende artikel henviser til, direkte fra referencelisten. Dette samler alle artiklerne i én central database, hvilket gør det nemt at søge og finde relevant information, da man ikke behøver at navigere mellem forskellige kilder eller platforme, og dermed bliver udvælgelsesprocessen effektiviseret.

Søgeordene resulterede i identifikationen af 8 artikler, som udgør startsættet. Startsættet er valgt på baggrund af deres abstrakter og konklusioner. Når startsættet er etableret, kan den første fase af snowballing metoden begynde. Snowballing metoden involverer både en "forward snowballing" og en "backward snowballing", dvs. en forlæns og en baglæns tilgang. Ved brug af baglæns snowballing benyttes referencelisten for

hver artikel i startsættet til at finde nye artikler, som kan være relevante. Under gennemgangen af referencelisten foretages en indledende sortering af artikler, hvor de, der ikke opfylder emnet for litteraturindsamlingen, udelades. I næste trin udføres der en yderligere sortering for at fjerne allerede identificerede artikler. Når denne proces er fuldført, har man et endeligt sæt af artikler, som kan anvendes til bagudrettet snowballing. *"De følgende elementer undersøges i referencelisten"* (Wohlin, 2014):

- *Titel: Er det tentativt?*
- *Publikationssted: Er den udgivet et sted, hvor relevante artikler kan blive offentliggjort?*
- *Forfatter: Ved vi, at forfatteren har offentliggjort relevante artikler inden for det undersøgte område før?"*

Kriterierne anvendes til at bedømme, om en artikel er relevant for emnet. Hvis man vurderer, at en artikel kan være relevant, er det en god idé at begynde at gennemgå abstraktet for at sikre, at det er relevant. Den samme fremgangsmåde anvendes for alle de relevante artikler i referencelisten, som beskrevet i Wohlin, 2014.

Forlæns snowballing følger det samme princip. Her søger man efter artikler, der indeholder henvisninger til de artikler, der er en del af startsættet. Tilgangen til at gennemgå disse artikler er lignende den, der anvendes, når man identificerer artikler ved hjælp af bagudrettet snowballing, som beskrevet af Wohlin (2014). Både ved anvendelse af forlæns- og baglæns snowballing gennemgår man artiklerne i referencelisterne flere gange, indtil man når til et punkt, hvor man enten støder på de samme artikler flere gange eller begynder at finde artikler, der ikke er relevante for emnet. Dette markerer tidspunktet, hvor man kan beslutte at afslutte søgeprocessen.

De 8 artikler der udgør startsættet opstilles foruden:

1. A framework using BIM and digital twins in facilitation LCSA for buildings.
Calin Boje, Álvaro José Hahn Menacho, Antonino Marvuglia, Enrico Benetto, Sylvain Kubicki, Thomas Schaubroeck, Tomás Navarrete Gutiérrez (Boje et al., 2023)
2. A review of the digital twin technology for fault detection in buildings
Haidar Hosamo Hosamo, Henrik Kofoed Nielsen, Ammar Njeeb Alnmr, Paul Ragnar Svennevig and Kjeld Svidt (Hosamo, Nielsen, et al., 2022)
3. A review of the digital twin technology in the AEC – FM Industry
Haidar Hosamo Hosamo, Aksa Imran, Juan Cardenas-Cartagena, Paul Ragnar Svennevig, Kjeld Svidt, and Henrik Kofoed Nielsen (Hosamo, Imran, et al., 2022)
4. Incremental Digital Twin Conceptualizations Targeting Data-Driven Circular Construction

Pedro Mêda, Diego Calvetti, Eilif Hjelseth and Hipólito Sousa (Mêda et al., 2021)

5. Digital Literacy to Develop Long-Term Implementation og Digital twins.

Peter Nørkjær Gade, Dorte Holmberg Lauritzen, Michael Andersen, Thomas Kjærgaard, and Kjeld Svidt. (Gade et al., n.d.)

6. The Development of a BIM-Based Interoperable Toolkit for Efficient Renovation in Buildings: From BIM to Digital Twin.

Bruno Daniotti, Gabriele Masera, Cecilia Maria Bolognesi, Sonia Lupica Spagnolo, Alberto Pavan, Giuliana Iannaccone, Martina Signorini, Simone Ciuffreda, Claudio Mirarchi, Meherun Lucky, and Marco Cucuzza (Daniotti et al., 2022)

7. The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review

Tran Duong Nguyen and Sanjeev Adhikari (Nguyen & Adhikari, 2023)

8. Differentiating digital twin from digital shadow: Elucidating a paradigm shift to expedite a smart, sustainable built environment.

Samad M. E. Sepasgozar (Sepasgozar, 2021)

Artiklerne er valgt på baggrund af deres relevans til dette speciale. Som beskrevet, er det primære formål med denne opgave at kortlægge hvad en digital tvilling er, og hvordan den anvendes i byggebranchen. Derfor har det været vigtigt at finde artikler der dækker forskellige aspekter af problemformuleringen. For eksempel dækker artikel nr. 1 og 4 bæredygtighedsaspektet af problemstillingen og artikel nr. 2 og 3 dækker begrebet digital tvilling. Til sidst er der artikel nr. 5 som er medtaget fordi det er interessant at undersøge hvordan man implementere mere læring om digitale tvillinger, til fordel for brugen af det i praksis. Artikler 6 – 8 er medtaget med henblik på at kunne lave en vejledning eller retningslinjer på hvordan man kan standardisere og anvende den digitale tvilling. På samme måde, har det været vigtigt at finde et bredt udvalg af forfattere, så resultatet af litteraturstudiet afspejler en bred og omfattende forståelse af emnet og giver et godt grundlag for videre forskning og praktisk anvendelse.

I det kommende afsnit beskrives resultatet af de 2 tilgange til snowballing metoden, som er lavet i forbindelse med litteraturstudiet. Resultatet af backward snowballing-processen var 259 artikler. Eventuelle duplikationer blev fjernet under udvælgelsesprocessen, hvilket sikrer, at alle udvalgte artikler er unikke og relevante for specialet. Ud af de 259 artikler, blev 209 artikler valgt fra, på baggrund af deres titler. Herefter blev de udvalgte 53 artikler gennemgået for deres abstrakter, som førte til udvælgelsen af 26 artikler, der var relevante for specialet. På samme måde blev forward snowballing-processen udført. Ved hjælp af Scopus, blev 56 artikler, som havde refereret til artiklerne i startsættet, identificeret. Det skal dog understreges, at artikel 1 ud af de 8 fra startsættet ikke havde nogen artikler der havde refereret til den, ifølge Scopus, og derfor er

der muligvis nogen artikler der ikke er blevet medtaget til udvælgelsesprocessen. Ud af de 56, blev 30 artikler fravalgt, på baggrund af deres titler. Samtidig, blev eventuelle duplikationer sorteret fra. Det efterlod 24 artikler som blev gennemgået for deres abstrakter, hvoraf 19 blev udvalgt til at danne grundlag for litteraturen for dette speciale, sammen med de forhenværende 26 artikler.

Hjemmesiden Rayyan har været et værdifuldt værktøj til at strukturere litteraturstudiet. "Rayyan (<http://rayyan.qcri.org>) was developed specifically to expedite the initial screening of abstracts and titles using a process of semi-automation but with a clear objective of incorporating a level of usability which would be compatible with the skillset of a broad cross-section of potential users." (Ouzzani et al., 2016). Som Ouzzani et. al. beskriver, er det et brugervenligt og effektivt værktøj, som er i stand til at organisere og kategorisere artiklerne på en overskuelig måde. Rayyan gør det muligt at arbejde med en struktureret tilgang, f.eks. er det blevet gjort nemt at vælge artikler til eller fra, ved at bruge "include" og "exclude" funktionen, som er markeret med rødt på figur 2. Samtidig kan man kategorisere og tagge hver artikel med en passende kategori baseret på indholdet af artiklen, som er markeret med gult på figur 2. I denne sammenhæng har kategorierne bl.a. været bæredygtighedsperspektiv, koncept, begrebsafklaring og casestudie. På den måde har det været muligt at oprette en systematisk struktur, der giver et overblik over den eksisterende litteratur på området. Med Rayyan har det været muligt at opnå en dybdegående og omfattende indsigt om emnet.

2023-10-02: Digital twins

Showing 1 to 10 of 26 unique entries (filtered from 259 total unique entries)

Date	Title	Authors	Rating
2022-01-01	The application of life cycle assessment in buildings: challenges, and directions for future research	Fnais A., Rezgui Y., Petri L., B...	
2017-01-01	A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems	Negri E., Fumagalli L., Macch...	
2019-01-01	A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications	Barricelli B.R., Casiraghi E., ...	
2020-01-01	Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research	Fuller A., Fan Z., Day C., Bar...	
2022-01-01	Digital twins for the built environment	Boje C., Kubicki S., Guerrier...	
2019-01-01	Digital Twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings	Khajavi S.H., Motlagh N.H., J...	
2021-01-01	Incremental digital twin conceptualisations targeting data-driven circular construction	Mièda P., Calvetti D., Hjelseth...	
2020-01-01	The industry use cases for the Digital Twin idea	Augustine P.	
2021-01-01	Gemini principles-based digital twin maturity model for asset management	Chen L., Xie X., Lu Q., Parlik...	

Include Maybe Exclude Reason Label Add Note Highlights On Upload PDF full-texts

A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems
 Authors: Negri E., Fumagalli L., Macchi M.;
 Journal: - Volume 3, Issue 0, pp. - published 2017-01-01
 Publication Types: Journal Article
 Topics: Twins
 PDF full-texts:
 1. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems.pdf
 System Id: 585042860
 Search methods: Unrated References (none) (1) rev

2021-01-01 Charanya Bæredygtighedsperspektiv Incremental digital
 2020-01-01 Charanya Bæredygtighedsperspektiv The industry use ca
 2021-01-01 Charanya Casestudie Gemini principles-based digital t

Figur 2 – Udklip af grænsefladen på Rayyan

Til sidst er det vigtigt at overveje nogle begrænsninger ved denne metode. En potentiel kilde til bias kan være at man hælder til at vælge artikler fra visse forfattere eller tidsskrifter mere end andre, dette er forsøgt minimeret ved at inkludere et bredt udvalg af kilder. Derudover kan metoden have en begrænsning i at der kun er inkluderet artikler på engelsk, og dermed kan det være at værdifuld information kan være gået tabt. Til sidst er det muligt, at der er kilder, som ikke har været tilgængelige, eller som af en eller anden grund ikke er blevet inkluderet i søgningen. Disse begrænsninger bør tages i betragtning når resultaterne fortolkes.

3 ANALYSE

Den digitale tvilling repræsenterer et teknologisk fremskridt, på tværs af industrier. Med den digitale tvilling har man mulighed for at simulere, forudsige og optimere processer. Byggeindustrien begynder gradvist at adopterer teknologier som Building Information Modelling (BIM), men den står stadig over for udfordringer med at maksimere effektiviteten i projekter. For at undersøge løsninger til udfordringer som disse, og forstå digitale tvillinger dybere, vil dette afsnit analysere deres anvendelse og fordele i byggeindustrien. Den vil også dykke ned i de udfordringer, der er forbundet med implementeringen af denne teknologi. Derudover vil dette afsnit undersøge, hvornår en digital tvilling egentlig bliver til en digital tvilling, gennem forskellige perspektiver. Kapitlet identificerer fordelene ved digitale tvillinger i byggeri og ulemperne eller udfordringer forbundet med deres anvendelse.

Derefter vil kapitlet udforske nødvendigheden af standardisering inden for digitale tvillinger i bygge – og anlægssektoren. Ydermere vil kapitlet fremhæve implementeringsudfordringer, behovet for brugeraccept og fordele ved en vellykket standardiseringsproces. Kapitlet vil have til formål at fremhæve behovet for standarder og en mere holistisk tilgang til digital tvilling – teknologien i byggebranchen.

3.1 DIGITALE TVILLINGER I BYGGEPROJEKTER

Den digitale tvilling er ikke begrænset til en enkelt industri, for dens anvendelse strækker sig langt ud over byggeindustrien. I industrier som produktionssektoren har digitale tvillinger vist sig at være afgørende for at simulere produktionsprocesser, forudsige driftsmæssige udfordringer og optimere produktionslinjer. (Kritzinger et al., 2018). På samme måde har man i rumfarts- og luftfartsindustrien anvendt digitale tvillinger siden 1970'erne. NASA har anvendt digital tvilling-teknologien til at overvåge rumfartøjer, når de er blevet sendt ud i rummet. På den måde har man altid haft mulighed for at vedligeholde rumfartøjer, selvom man ikke har haft fysisk adgang til dem. (Barricelli et al., 2019). I dette speciale vil fokus dog være rettet mod anvendelsen af digitale tvillinger inden for byggeindustrien, men samtidig kan erfaringer og metoder fra fremstillingssektoren, rumfart og andre områder have stor betydning for at udvikle anvendelsen af digitale tvillinger i byggeindustrien, da disse industrier er førende indenfor området, når de sammenlignes med byggeindustrien (Barricelli et al., 2019)(Boje et al., 2020).

Byggeindustrien anses for at være én af de mindst digitaliserede industrier. Teknologier som Building Information Modelling (BIM), har været med til at ændre dette, men implementeringen af BIM har været en langsom proces, grundet de formodede risici og udfordringer, som antages at følge med. (Opoku et al., 2021). BIM er dog gradvist blevet normen inden for byggeindustrien og har spillet en afgørende rolle i at skubbe branchen mod digitalisering. Alligevel, støder man på udfordringer, især når det kommer til at maksimere

effektiviteten i byggeprojekter. Så selvom man igennem BIM har mulighed for at strukturere data, og styrke samarbejdet på tværs af forskellige fagområder, opstår der stadig behov for mere avancerede værktøjer. Det er her digitale tvillinger kommer ind i billedet, som en potentiel løsning. Konceptet om den digitale tvilling blev introduceret under en præsentation om produktlivscyklusstyring, af Michael Grieves, i 2002. Senere strukturerede han sin digitale tvilling model i en whitepaper og i en bog, som han skrev i samarbejde med J.Vickers. Ifølge Grieves og Vickers, består den digitale tvilling model af tre primære elementer: et virkeligt rum med et fysisk objekt, et virtuelt rum med et virtuelt objekt og en forbindelse til data- og informations flow mellem de to rum (Barricelli et al., 2019). Siden Grieves præsenterede konceptet om den digitale tvilling, har der være en stor interesse indenfor området, og det har ført til flere studier og innovation på området. Dette står klart i litteraturstudiet.

Derudover, viser litteraturstudiet at definitionerne af den digitale tvilling spænder bredt. Definitionerne, selvom de varierer i formulering, ligger tæt op ad hinanden og i sidste ende beskrives de samme fundamentale principper. Denne observation fremhæves af artiklen *“Characterising the Digital Twin: A systematic literature review”*, hvor Almatared et al., 2022, identificere og præsentere 12 egenskaber for den digitale tvilling. Artiklerne fra litteraturstudiet er i stor grad enige om disse egenskaber, hvilket bekræfter den generelle enighed om de grundlæggende egenskaber af den digitale tvilling i litteraturen. De 12 egenskaber listes nedenfor:

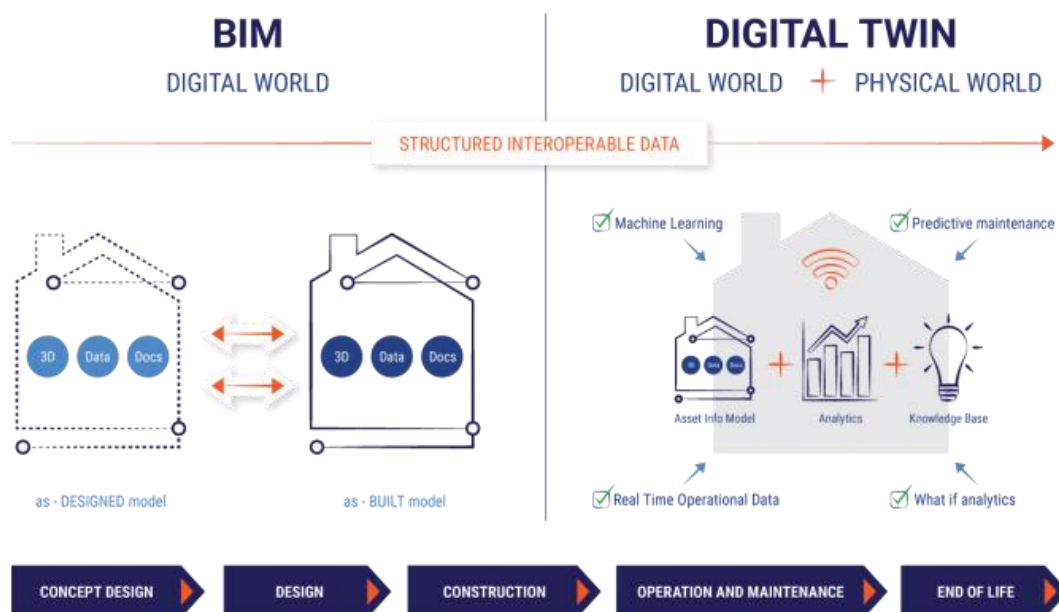
1. En virtuel repræsentation af et fysisk objekt eller system.
2. En dynamisk model, der opdateres i realtid.
3. En integreret model, der kombinerer data fra forskellige kilder.
4. En model, der kan simulere og forudsige adfærd og ydeevne.
5. En model, der kan bruges til at optimere design og drift.
6. En model, der kan bruges til at overvåge og diagnosticere problemer.
7. En model, der kan bruges til at forbedre kommunikation og samarbejde.
8. En model, der kan bruges til at reducere risiko og omkostninger.
9. En model, der kan bruges til at understøtte beslutningsprocesser.
10. En model, der kan bruges til at forbedre kundeoplevelsen.
11. Er en model, der kan bruges til at understøtte bæredygtighed og miljømæssige mål.
12. En model, der kan bruges til at understøtte Industri 4.0-initiativer.

Denne liste viser forskellige aspekter af den digitale tvilling, og hvor fleksibel den kan være i forskellige kontekster. En digital tvilling repræsenterer ikke kunne en virtuel model af fysiske objekter eller systemer, men det er også en dynamisk model. Modellen udnytter data fra forskellige kilder og opdateres løbende i realtid, hvilket gør det muligt at simulere, forudsige og optimere bygningens tilstand.

Den digitale tvilling kan anvendes i alle stadier af byggeprocessen, det er stadiet der bestemmer hvilken type digital tvilling man bør udvikle, da egenskaberne for den digitale tvilling vil variere alt efter hvilket stadie man er i. Samtidig vil typen af byggeri også være med til at bestemme hvilken digital tvilling man bør udvikle. I rapporten *“Digital twins from design to handover of constructed assets”* beskrives det hvordan den digitale

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

tvilling anvendes i de forskellige faser af et byggeprojekt. For eksempel, beskrives det at for at kunne være i stand til at udvikle en digital tvilling i design fasen, kræver det at man udarbejder "*digital assets*", altså en BIM model, tegninger, billeder og andre slags design data og information om byggeprojektet. Derudover, skriver de at. En konstant verificering og validering af data er afgørende, specielt når man arbejder med data. Dette sikrer, at modellen altid afspejler de faktiske data og informationer, der anvendes. Det er netop denne praksis, der udgør kernen i konceptet af den digitale tvilling (Sawhney, 2022). I den næste fase opføres de fysiske aspekter af projektet. Her skabes, opdateres, anvendes og gemmes store mængder data i løbet af konstruktionen. I dette trin er det muligt at kombinere data om de fysiske objekter, i dets designet tilstand, planlagte tilstand og den faktiske byggede tilstand. Hvis der skulle forekomme nogen ændringer under konstruktionen, kan disse integreres i den virtuelle model ved brug af data om den faktiske byggede tilstand. Her kan BIM hjælpe med at strømline styringen af data og informationer, blandt andet ved brug 4D og 5D BIM. En vigtig komponent i udviklingen af den digitale tvilling er brugen sensorer, IoT-enheder og lignende teknologi. Disse implementeres under konstruktionsfasen. Sensorer indsamler detaljerede informationer om bygningens tilstand og dets omgivelser i realtid. Denne data importeres ind i den digitale tvilling, som gør det muligt at lave en præcis repræsentation af, hvordan bygningen fungerer og udvikler sig over tid (Sawhney, 2022). Disse teknologier og datastrømme er afgørende for at forstå både de muligheder og udfordringer, der er forbundet med udviklingen af digitale tvillinger i byggeprojekter.

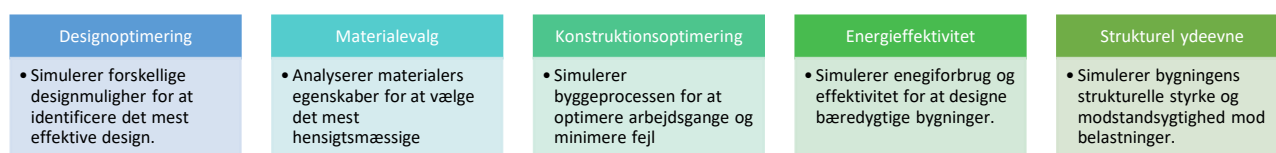


Figur 3 – Overgang fra BIM til digital tvilling (Kilde: <https://cobuilder.com/en/the-digital-twin-a-bridge-between-the-physical-and-the-digital-world/>)

I dette afsnit udforskes trinnene til anvendelsen af digitale tvillinger inden for byggeindustrien. Der dykkes ned i de processer og teknologier, fra simuleringer til forudsigelsesevner, der udgør grundlaget for disse digitale modeller. Hvert trin vil blive uddybet for at give en dybere forståelse af, hvordan digitale tvillinger anvendes og skabes i byggeprojekter.

Simuleringer

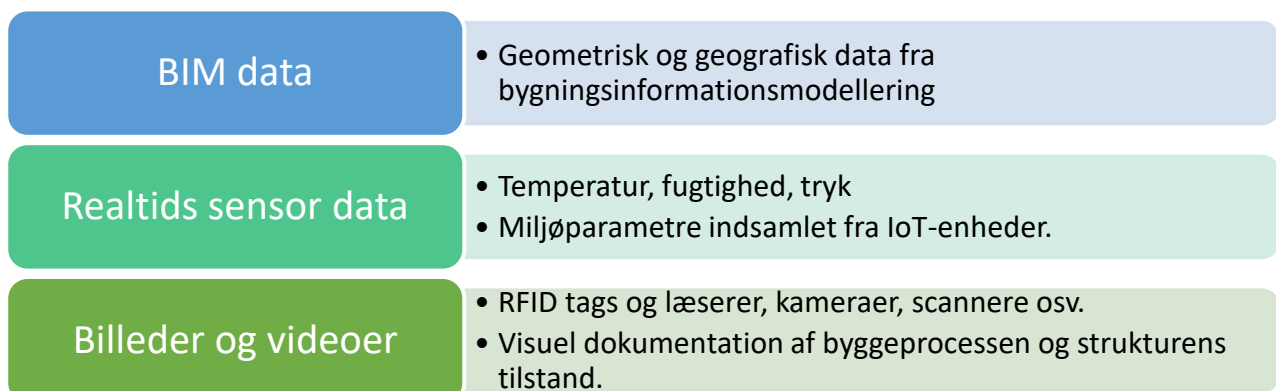
I byggeindustrien er simuleringer afgørende for at forudsige og optimere forskellige aspekter af et byggeri. Disse simuleringer strækker sig fra at optimere designmuligheder og vælge de bedste materialer til at planlægge og gennemfører byggeprocessen. Ved at simulere energiforbrug og strukturelle ydeevne kan man skabe mere bæredygtige og robuste bygninger. Simuleringer hjælper med at identificere og løse potentielle problemer på forhånd, hvilket resulterer i mere effektive byggeprojekter. (Nour El-Din et al., 2022b)



Figur 4 – Simuleringer

Dataindsamling

Der indsamles data fra forskellige kilder i byggeindustrien. Det kan både komme fra building information modelling (BIM) data, realtidsdata eller fra sensorer og IoT-enheder. Denne data giver et detaljeret indblik i bygningens struktur, miljømæssige forhold og byggeprocessens udvikling. BIM – data giver en geometrisk og geografisk repræsentation, mens sensorer bidrager med en kontinuerlig information om temperatur, fugtighed, tryk og andre faktorer i realtid. Dataet der indsamles via sensorer, er også det man kalder realtidsdata, da det bliver indsamlet kontinuerligt, så man altid har data der er opdateret til det aktuelle tidspunkt. (Nour El-Din et al., 2022b)



Figur 5 – Dataindsamling

Sensorer

Sensorer spiller en afgørende rolle i at indsamle reeltidsdata fra bygninger. Sensorerne måler forskellige fysiske parametre som, temperatur, fugtighed, tryk og bevægelse. Ved at bruge forskellige typer sensorer kan bygningens tilstand overvåges konstant, hvilket gør det muligt at opdage problemer i et tidligt stadie og vurdere behovet for vedligeholdelse.(Errandonea et al., 2020)

Temperatursensorer	Fugtighedssensorer	Tryksensorer	Bevægelsessensorer
•Overvåger bygningens temperaturforhold	•Registrerer fugtighedsniveauer i forskellige områder	•Måler trykkek i rørsystemer eller inden for strukturen	•Registrerer bevægelse i forskellige områder for sikkerhed og overvågning

Figur 6 – Sensorer

Forudsigelsesevne

Den digitale tvilling bruger indsamlet data og modelleringsmetoder til at forudsige forskellige scenarier. Dette kan omfatte forudsigelse af mulige fejl og vedligeholdelsesbehov, optimering af energiforbrug og identifikation af potentielle konstruktionsmæssige udfordringer. Her kan der blandt andet bruges simuleringssoftware. AI og maskinlæring integreres i digitale tvillinger for at identificere mønstre og forudsige fremtidige begivenheder baseret på historisk data. På samme måde kan man bruge predictive analytics – værktøjer, som kan behandle store datamængder for at identificere mønstre og forudsige fejl eller vedligeholdelsesbehov. Disse værktøjer og teknologier kombineres for at forudsige scenarier, reducere risici og optimere bygningsdesign.(Errandonea et al., 2020)

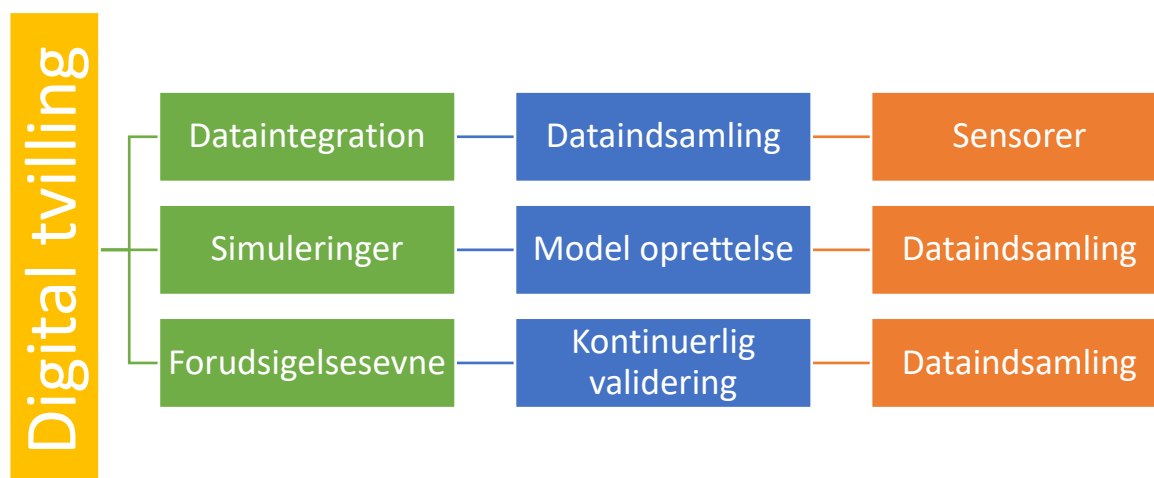
Fejl og vedligeholdelsesbehov	Energioptimering	Konstruktion
•Forudsiger potentielle fejl baseret på opsamlet data	•Estimerer energiforbrug og identificerer områder til forbedring	•Forudser mulige problemer i konstruktionen og foreslår løsninger.

Figur 7 – Forudsigelsesevne

Oprettelse af en digital tvilling

Processen med at skabe en digital tvilling indebærer integration af data fra forskellige kilder, såsom BIM, sensorer, IoT-enheder, og andre informationskilder. Dataintegrationen danner grundlag for oprettelsen af en virtuel repræsentation af bygningen. En konstant validering og opdatering af dataet er afgørende for at sikre,

at den digitale tvilling altid afspejler den faktiske bygning og dette gør det muligt at have en effektiv beslutningstagning og styring af byggeprojekter.



Figur 8 – Oprettelse af en digital tvilling

Figuren viser et overblik over de førnævnte dele af den digitale tvilling og hvordan de hænger sammen. Den grundlæggende del af den digitale tvilling, er dataindsamlingen. For at kunne lave dataindsamlingen, sættes der sensorer op som indsamler dataet. Uden dataindsamlingen, er det ikke muligt at oprette en model, og dermed er det ikke muligt at lave simuleringer. På samme måde er det ikke muligt at validere den indsamlede data, hvis den ikke er blevet indsamlet, og derfor bliver det ikke muligt at lave forudsigelser for bygningen. Så som figuren illustrerer skal alle delene være udført, før man egentlig når det stadie, hvor man har en digital tvilling at arbejde med.

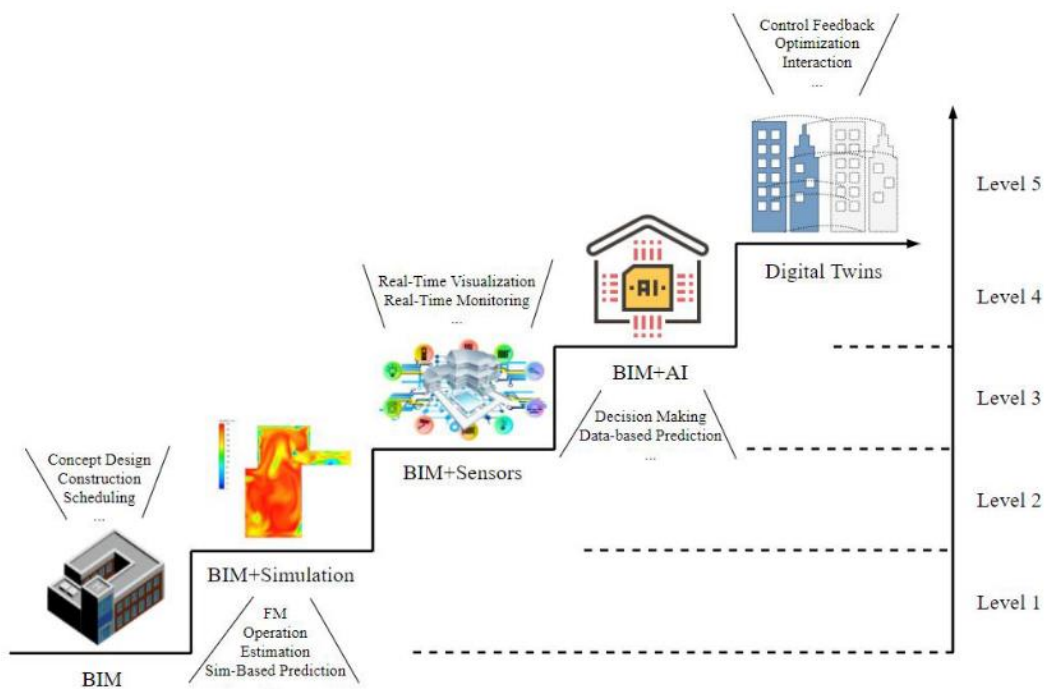
Det følgende afsnit vil fokusere på fordelene ved brugen af digitale tvillinger i byggebranchen. Fordelene strækker sig fra forbedret beslutningsstøtte og øget effektivitet til avanceret risikostyring og bæredygtighedsinitiativer. Senere i afsnittet, vil der blive undersøgt hvilke ulemper eller udfordringer, der er forbundet med deres anvendelse. Den digitale tvilling kan styrke beslutningstagernes evne ved at udstyre dem med realtidsdata, hvilket gør dem i stand til at træffe informerede beslutninger under hele projektet. Dette gør det muligt at bedre planlægning og optimering af ressourcer. Ved at simulere forskellige scenarier kan digitale tvillinger identificere optimale ændringer i design, materialevalg og konstruktion, hvilket resulterer i en mere effektiv byggeproces. Derudover er anvendelsen af en digital tvilling en fordel når det kommer til at forudse og håndtere risici, hvilket gør det muligt at håndtere problemer på forhånd og dermed forbedre projektets sikkerhed. Samtidig er der en stor fordel i dens evne til at man konstant har et flow af data omkring bygningens systemer og udstyr, hvilket gør det muligt at vedligeholde og forebygge fejl eller funktionsfejl. På samme måde, bruger man evnen til at overvåge en bygning under byggeprocessen, hvor man bedre kan optimere arbejdsprocesser, og øge produktiviteten. Under byggeprocessen, kan den digitale tvilling anvendes blandt

interessenter, til at øge samarbejdet og kommunikationen ved at skabe en virtuel repræsentation af byggeprojektet. Dette fremmer bedre forståelse og koordination mellem teammedlemmer, som resulterer i færre fejl og en mere effektiv arbejdsgang. Til sidst, hvis man opsummerer de førnævnte pointer, er der fordele ved at bruge den digitale tvilling igennem hele en bygnings livscyklus. Den kan anvendes fra design til drift og vedligeholdelse. Den virtuelle repræsentation af en bygning, muliggør en bedre styring af vedligeholdelse, renoveringer og fremtidige udvidelser (Salem & Dragomir, 2022). Selvom digitale tvillinger medfører en række fordele, er der også en del udfordringer, der skal tages hånd om, når man vil implementere det i et byggeprojekt. Nogle af disse udfordringer fremhæves i det følgende afsnit.

Den grundlæggende årsag til at man vil anvende en digital tvilling, er for at kunne se en visuel repræsentation af det projekt man har designet, men det kan være komplekst at skabe en overskuelig visualisering af alle de komponenter en bygning indebærer. Her kan man stille spørgsmålet om, hvornår en digital tvilling, bliver en digital tvilling? En anden udfordring er at sikre sig at den data man indsamler, er korrekt. Det kræver at man konstant validere, processer og resultater, inklusiv drift, sikkerhed og vedligeholdelse af den digitale tvilling, stemmer overens med den fysiske bygning. I situationer hvor der skal laves en renovation, hvor der på forhånd ikke er lavet en digital tvilling, kan der være en udfordring i at integrere den digitale tvilling i et eksisterende system. Generelt kræver det ikke kun en tilpasning til eksisterende systemer, men også den data der på forhånd er indsamlet, som kan medføre ændringer i processer og teknologier. Til sidst, kan der opstå en udfordring i at arbejdet omkring et byggeprojekt sjældent udføres på en enkelt lokation. Byggeprojekter involverer ofte forskellige arbejdsmiljøer, og har specifikke udfordringer relateret til sikkerhed, materialeforbrug og tidsfrister. Dette kan forhindre integrering af digitale tvillinger i byggeprojektledelse, da arbejdet oftest er spredt over forskellige lokationer, og der derfor er mange elementer man konstant skal koordinere (Salem & Dragomir, 2022). Den største grund til at disse udfordringer opstår er, at der ikke er en fælles forståelse for hvordan en digital tvilling anvendes, da der ikke er udviklet nogen standarder for hvordan den bruges til fordel for et byggeprojekt. Udviklingen af standarder kunne være en potentiel løsning på nogle af disse udfordringer. En fælles tilgang og ramme for hvordan og hvornår en digital tvilling kan anvendes, ville effektivisere implementeringsprocessen af den digitale tvilling og den ville gøre det muligt at arbejde fra samme udgangspunkt på tværs af forskellige fagområder. Dette ville mindske den tid man ellers ville bruge på at sammensætte modellen. Denne udfordring undersøges nærmere i kapitel 3.2 *Standarder og retningslinjer for digitale tvillinger*.

Afsnittet foroven førte til spørgsmålet om, hvornår en digital tvilling, bliver en digital tvilling? Ifølge Sacks et al. (2020) er der meget akademisk litteratur i byggebranchen der bruger ordet digital tvilling som et synonym for Building Information Modelling (BIM). En model der er udviklet i design og konstruktionsfasen. Andre

opfatter digitale tvillinger som en digital repræsentation af bygninger. Denne opfattelse af en digital tvilling udforskes i et litteraturstudie af Lu et al. (2020), hvor i alt 123 artikler om digitale tvillinger er brugt. Artiklerne er opdelt i niveauer og omhandler henholdsvis, ”*Level 1 – BIM, Level 2 – BIM-supported simulations, Level 3 – BIM integrated with IoT, Level 4 – BIM integrated with artificial intelligence (AI) techniques for predictions, and Level 5 – ideal Digital Twins.*” (Figur 9)



Figur 9 – Niveauer for BIM og den digitale tvilling

Niveau 1 fokuserer på anvendelsen af BIM-teknikker. Niveautet inkluderer underkategorier som BIM til design, BIM til konstruktion, BIM til facility management og BIM til bæredygtighed. Artiklerne som er undersøgt til dette niveau, fokuserer primært på anvendelsen af BIM til en traditionel 3D model og facility management baseret på 3D-gennemgange. Niveau 2 fokuserer på BIM-understøttede simuleringer. I dette niveau implementeres forskellige analyser og simuleringer med BIM-modeller, i stedet for at bruge statiske BIM-modeller til et traditionelt design og facility management baseret på 3D gennemgange. Artiklerne der brugt på dette niveau fokuserer primært på anvendelsen af BIM-understøttede simuleringer til planlægning og optimering af byggeprocessen, forbedring af energieffektiviteten og forbedring af bygningers strukturelle ydeevne. Studierne fremhæver også potentialet af BIM-understøttede simuleringer til udforskning. Niveau 3 fokuserer på integrationen af BIM og IoT-teknikker. I dette niveau forbindes digitale bygningsmodeller med realtids sensor data til overvågning og styring af bygningsmiljøet. Artiklerne der er anvendt på dette niveau fokuserer primært på anvendelsen af IoT-teknikker til at forbedre BIM ved at levere realtidsdata om bygningen, som kan importeres og visualisere i 3D-modeller. Derudover fremhæver studierne potentialet af BIM og IoT-integration til

beslutningstagning og justeringer under enhver fase af byggeprojektet. I niveau 4 fokuseres der på integrationen af BIM og kunstig intelligens teknikker til forudsigelser. Her forsøger man at forbedre beslutningsprocessen ved brug af forudsigende analyser, som er lavet baseret på data der er indsamlet fra bygningen. Niveau 5 er det ideelle digitale tvilling niveau. Niveauet repræsenterer den højeste grad af intelligent bygningsrepræsentation. På dette niveau er den digitale tvilling en præcis virtuel kopi af den fysiske bygning, som løbende bliver opdateret med realtidsdata. Som nævnt, kan den digitale tvilling bruges til avancerede simuleringer, forudsigende analyser og beslutningstagning, som kan optimere bygningen og reducere driftsomkostningerne. Lu et al. (2020) konkluderer dog at, *“the results revealed that no study has reached the anticipated Level 5”*. Lu et al. (2020) fokuserer på den teknologiske udvikling inden for digitale tvillinger i byggebranchen, men i litteraturstudiet, der er udført i forbindelse med dette speciale, er der også fremhævet en mere konceptuel tilgang til forståelsen af overgangen fra BIM til den digitale tvilling. Af Sawhney (2022) defineres overgang som mødet imellem det virtuelle aspekt (modeller, tegninger, billeder og data), og det fysiske aspekt (byggeplads, byggematerialer, håndværkere, værktøj), hvor der konstant sker en synkronisering imellem de to, så man altid har den nyeste model. På samme måde, sammenligner Jones et al. (2020) den digitale tvilling med BIM-niveauer som er defineret af BIM Industry Working Group. Hvor Jones et al. (2020) konkluderer at *“Put within the context of the characteristics of the Digital Twin, Building Information Modelling aims to twin a building, using both virtual to-physical and physical-to-virtual data connections, with the means to measure and realize change in the current state of the physical building.”* Så her konkluderer man at den digitale tvilling bliver en del af BIM processen, da man søger at skabe en detaljeret digital kopi, der kan afspejle og påvirke den faktiske bygning. Dette stemmer, samtidig, overens med det endelige mål for en digital tvilling. De forskellige perspektiver, viser at der er et behov for en holistisk tilgang til den digitale tvilling teknologi. Det er ikke nok at der er et teknologisk fremskridt, men også en forståelse for det konceptuelle og den teoretiske baggrund, der former tilgangene til bygningsstyring- og modellering. Som Lu et al. (2020) fremhæver, kan det være at det ideelle niveau for den digitale tvilling, ikke er nået endnu, hvilket betyder at der er behov for mere forskning og udvikling på området. At implementere standarder for digitale tvillinger, kunne være et afgørende skridt, i denne forbindelse. Dette udforskes i kapitel 3.2 *Standarder og retningslinjer for digitale tvillinger*.

3.1.1 Delkonklusion

Det er klart, at digitale tvillinger har en omfattende anvendelse på tværs af industrier, herunder byggebranchen. Disse teknologier, der begyndte i produktions- og rumfartsindustrierne, har nu vist sig som potentielle løsninger for at forbedre effektiviteten, samarbejdet og forudsigeligheden i byggeprojekter.

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

Inden for byggeindustrien har digitale tvillinger potentiale til at gøre processerne mere effektive, minimere risici og optimere design og drift. Dog er der stadig udfordringer forbundet med deres implementering. En af de centrale udfordringer er at definere, hvornår en digital tvilling faktisk bliver en digital tvilling. Niveauerne af integration med BIM, IoT, AI og den ideelle digitale tvilling er stadig i udvikling, og derfor er der behov for yderligere forskning på området. En anden udfordring er sikringen af korrekt dataindsamling og validering. Verifikation og validering af data er afgørende for at sikre, at den digitale tvilling afspejler den faktiske bygning nøjagtigt. Samtidig kræver implementeringen af disse teknologier tilpasning til eksisterende systemer og standarder, som stadig er under udvikling.

Implementeringen af standarder for digitale tvillinger kunne potentielt løse nogle af disse udfordringer ved at skabe en fælles forståelse og ramme for deres anvendelse. Der er dog stadig behov for mere forskning, udvikling og diskussion for at nå det ideelle niveau for digital tvilling-teknologien i byggebranchen.

3.2 STANDARDER OG RETNINGSLINJER FOR DIGITALE TVILLINGER

Størstedelen af artiklerne fra litteraturstudiet har én ting til fælles. De understreger at der er mangel på standardiseringer for digitale tvillinger i byggebranchen. Her er nogen eksempler:

“Data standardization will be essential for each dimension because the streams of monitored data are drawn from multiple technologies and will require formal syntactic and semantic formats to ensure that the datasets are compatible with the DTC data processing workflow.” (Sacks et al., 2020)

“Finally, we would like to highlight the importance of standardization. [...] In order to facilitate these interactions, there will be a need for standards cutting across different domain areas.”(Rasheed et al., 2020)

“‘High costs, including direct and hidden costs,’ ‘No demand or financial support from clients,’ and ‘Lack of standards’ were ranked as the top three blockers that hinder the use of digital twins during the operation and maintenance phases”(Sawhney, 2022)

“[...] the DT definitions were not characterized by general computing models and simulations. Thus, there is no single definition of this concept due to the lack of standardization and misconceptions about DTs” (Nour El-Din et al., 2022b)

Citaterne fremhæver behovet for standardisering for digitale tvillinger. det vil muliggøre interoperabilitet, integrering og skabe klarhed omkring konceptet og dets anvendelse. På baggrund af dette udvikles der allerede forskellige retningslinjer for hvordan en standardisering indenfor digitale tvillinger kunne se ud. Både Daniotti et al. (2022) og Sawhney (2022) undersøger om det er muligt at anvende BIM standardiseringerne på digitale tvillinger. De BIM standardiseringer der er tale om her er henholdsvis, BS EN ISO 19650-1:2018, ISO 23247-1:2021. ISO 23387:2020. Samtidig ville det give mening at undersøge hvorvidt IFC og IDM standarder kunne implementeres i standarderne for den digitale tvilling, da disse standarder omhandler et hyppigt anvendt filformat og informationshåndtering. Disse standarder undersøges nærmere i de kommende afsnit.

Tabel 2 – Oversigt over hvad de forskellige standarder handler om

DS/EN ISO 19650-1:2018	Fokusere på styring af information gennem hele livscyklussen for bygnings- og anlægsprojekter ved hjælp af BIM. Den giver retningslinjer for effektiv styring af digitale informationer og modeller.
ISO 23247-1:2021	Handler om informationsudveksling for byggeri, anlæg og infrastruktur ved hjælp af BIM. Den beskriver principperne for informationsudveksling og kravene til informationsudvekslingsprocessen mellem forskellige parter i byggebranchen.

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

ISO 23387:2020	Fokuserer på specifikationer for informationsudveksling om byggeri, anlæg og infrastruktur gennem hele livscyklussen. Den giver retningslinjer for udveksling af informationen mellem forskellige interessenter i et byggeprojekt.
DS/ISO 16739-1:2018	Industry Foundation Classes (IFC) er et åbent og internationalt standardiseret filformat. Standarden definerer filformatet og strukturen for informationsudveksling for BIM.
ISO 29481-1:2017	Information Delivery Manuel (IDM) er et dokument, som beskriver hvordan digital information skal struktureres, organiseres og leveres inden for byggeri og anlægsindustrien.

Standardiseringen indenfor digitale tvillinger kan med fordel bruge lignende metoder til informationshåndtering, som beskrevet i DS EN ISO 19650. Dette ville fremme integrationen af forskelligt data, som er væsentlig for at opretholde en virtuel model med aktuelt data. (Organisering Og Digitalisering Af Information Om Bygge-Og Anlægsarbejder, Herunder BIM-Informationshåndtering Med BIM-Del 1, 2018) Som beskrevet, afhænger digital tvillingteknologien i høj grad af IoT-teknologier. Derfor kræver det, at standarderne for IoT bliver forbedret, da de påvirker standardiseringen af digital tvillingteknologien. ISO 23247 og ISO 23387 sætter retningslinjer for informationsstyring gennem hele livscyklussen af byggeri og infrastruktur. Retningslinjerne kan overføres til implementeringen af digitale tvillinger, ved at sikre at data og processer er organiseret og tilgængelige på en ensartet måde i hele livscyklussen for den digitale tvilling. (Automationssystemer Og Integration-Rammer for Produktion Ved Brug Af Digital Tvilling-Teknologi-Del 1, 2021) (BIM-Dataskabeloner Til Bygningsobjekter Anvendt Inden for Byggede Aktivers Livscyklus-Begreber Og Principper, 2020) Denne tilgang, der involverer anvendelsen af BIM-standarder på den digitale tvilling, er også overvejet af Nour El-Din et al., 2022b). I artiklen ” *Digital twins for construction assets using BIM-standard specifications*” udarbejdes nogle rammer for hvordan standardiseringen kan anvendes på en digital tvilling. I korte træk, beskrives tilgangen nedenfor:

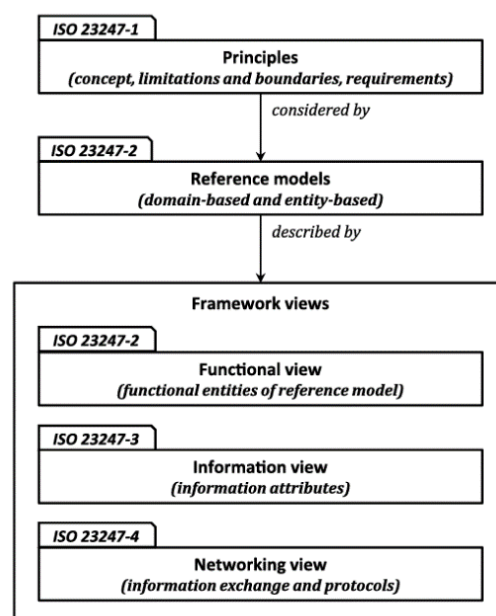
1. Projekt Information Model (PIM): Denne del indeholder alle komponenterne af den data der er nødvendig under design- og konstruktionsfaserne fra BIM-modeller, eller de dokumenter der anvendes i den forbindelse.
2. Asset Information Model (AIM): Denne del indeholder alt den data, der er nødvendig under drifts- og vedligeholdelsesfaserne fra BIM-modeller, eller de dokumenter der anvendes i den forbindelse.
3. Digital Tvilling (DT): Denne del er en virtuel repræsentation af den fysiske enhed, som løbende opdateres med realtidsdata fra sensorer og andre kilder.

4. Digital Twin Platform (DTP): I denne del, samles data fra PIM, AIM og DT for at give et samlet billede af aktivets livscyklus. DTP 'en muliggør dataudveksling og samarbejde mellem forskellige interessenter involveret i enhedens livscyklus.

En væsentlig faktor for implementeringen af disse rammer er udviklingen af interoperable systemer, der kan samle og analysere data fra PIM, AIM og den digitale tvilling. Selvom der ikke nødvendigvis findes en specifik software, der integrerer disse dele, gør denne tilgang det klart at det er afgørende at standardisere datastruktur og fremgangsmåder for et mere strømlinet samarbejde mellem forskellige faser af en bygnings livscyklus.

Standardisering af digitale tvillinger i bygge- og anlægssektoren kræver en åben og standardiseret tilgang, hvilket BuildingSMART aktivt arbejder på at fremme gennem deres udvikling af retningslinjer og standarder inden for bygningsinformationsmodellering (BIM) (Enabling an Ecosystem of Digital Twins, 2020). På nuværende tidspunkt, har BuildingSMART ikke udviklet standarder for digitale tvillinger. I 2020 oprettede BuildingSMART gruppen *Digital Twins Working Group (DTWG)*. ”This group aimed to define what digital twins are and what role an industry body such as BuildingSMART International can have. The group wanted to form strategic alignment to better unlock social, environmental, and societal value for the entire built asset industry. This included the development of an ecosystem of digital twins.” (BuildingSMART, u.d.). Derfor kan det forventes, at der udkommer standarder for digitale tvillinger I den nærmeste fremtid.

Siden der ikke er udviklet nogen standarder for digitale tvillinger indenfor byggeindustrien, gav det mening at undersøge om der var udviklet standarder for den digitale tvillinger indenfor andre industrier. Én af de førende industrier indenfor digitale tvillinger er produktionsindustrien. Derfor var det optimalt at lave en simple Google-søgning indenfor denne industri, hvor søgeordene er ”*standardization for digital twins in the manufacturing industry*”. Formålet med denne søgning var at finde inspiration og viden, der kunne tilpasses og implementeres i byggebranchen. Søgningen resulterede i fundet af ISO 23247. *ISO 23247 Automationssystemer og integration – Rammer for produktion ved brug af digital tvilling teknologi – Del 1-4, som dækker en bred vifte af emner, herunder definitioner, nøglekoncepter og terminologi som er relateret til digitale*



Figur 10 – Figur over delene i ISO 23247

tvillinger. ISO 23247 har til formål at skabe et fælles sprog og en ramme for udvikling, implementering og anvendelse af digitale tvillinger i produktionsindustrien. ISO 23247 består af 4 dele. Del 1 giver en overordnet introduktion til digitale tvillinger i produktionssystemer. Den dækker de grundlæggende principper og retningslinjer, for hvordan digitale tvillinger kan anvendes til at optimere og forbedre produktionsprocesser (ISO 23247 - Del 1, 2021.). Del 2 fokuserer på at etablere retningslinjer for digitale tvillinger. Det omfatter en struktureret ramme for, hvordan digitale tvillinger skal udformes, implementeres og integreres i produktionsmiljøer. Retningslinjerne beskriver hvordan digitale tvillinger kan modellere og simulere fysiske systemer og deres drift (ISO 23247 – Del 2, 2021). I del 3 fokuseres der på simulationssystemet til digitale tvillinger. Den beskriver retningslinjer og metoder til at simulere og evaluere digitale tvillinger. Derudover beskrives det hvordan man indsamler, analyserer og anvender data til at forbedre simuleringen og præcisionen af digitale tvillinger (ISO 23247 – Del 3, 2021). I del 4 præsenteres der eksempler og case – studier, de illustrerer implementeringer og anvendelser af digitale tvillinger i produktionsindustrien. Del 4 giver et praktisk indblik på hvordan digitale tvillinger kan integreres til fordel for forskellige produktionsmiljøer (ISO 23247 – Del 4, 2021). Hver del i ISO 23247 bidrager til at etablere en ramme, retningslinjer og praktiske eksempler, der hjælper med at forme og fremme brugen af digitale tvillinger i produktionsindustrien. Ved at drage inspiration fra ISO 23247 og tilpasse principperne til byggeindustriens behov kan man opnå en struktureret tilgang til anvendelsen af digitale tvillinger i byggeprojekter. Som beskrevet, kan dette bidrage til at forbedre samarbejdet mellem interessenter, effektiviteten af byggeprocessen og måske endda øge kvaliteten og bæredygtigheden af de færdige bygninger.

Indenfor byggeindustrien er Industry Foundation Classes (IFC) og Industry Delivery Manuel (IDM) nogle af de standarder der er anvendt mest. Retningslinjerne og filformatet spiller en central rolle i at formidle information og organisering af data gennem forskellige faser i byggeprocessen. Ligesom man anvender standarderne i forbindelse med informationshåndtering til BIM, kan de også anvendes til digitale tvillinger. Integrationen af IFC og IDM i implementeringen af digitale tvillinger inden for byggeprojekter kan være med til at etablere en ensartet og struktureret tilgang til informationshåndtering gennem alle faser i byggeriet. Ved at anvende IFC, som er et standardiseret filformat, til dataudveksling mellem forskellige BIM-software og digitale tvillingplatforme, kan man sikre en kontinuerlig strøm af opdateret information og 3D – modeller. På samme måde, kunne man anvende IDM som retningslinjer for, hvordan dataet skal organiseres, struktureres og leveres i forskellige faser af bygningens livscyklus. Denne tilgang vil også lette integrationen af PIM, AIM og DT, som står beskrevet for oven. Ved at følge retningslinjerne i IDM og bruge IFC-formatet som et standardiseret grundlag kan data fra design og konstruktionsfaser og drifts- og vedligeholdelses faser integreres på en effektiv måde. Dette vil sikre, at den virtuelle repræsentation af bygningen er opdateret og afspejler den faktiske bygning, hvilket er en væsentlig egenskab for den digitale tvilling, som er understreget flere gange i dette

speciale. Ved at bruge disse standardiserede processer og datahåndteringer kan man opnå en mere fleksibel og koordineret tilgang til informationshåndtering, hvilket kan være afgørende for en succesfuld implementering af digitale tvillinger i bygge- og anlægssektoren. (ISO 16739-1:2018, 2020)(ISO 29481-1:2016, 2017)

Standardiseringen af digitale tvillinger ville give et klart billede af retningslinjerne for deres anvendelse i byggebranchen. Derudover er det afgørende at forstå, hvor stor en rolle implementeringsprocessen spiller i integreringen af disse standarder. Overgangen fra almindelige metoder til de standardiserede tilgange, kræver ikke kun en tilpasning teknologisk, men også en accept fra brugeren af den digitale tvilling. Dette kan være én af de største udfordringer ved implementeringsprocessen. Det indebærer ofte oplæring, ændring af arbejdsgange og tilpasning af eksisterende systemer og processer. Man bør afprøve standardiseringerne gradvist på projekter, så de kan tilpasses, inden de anvendes på tværs af større projekter. Derudover er det vigtigt at være opmærksom på mulig modstand, under implementeringsprocessen. Dette kan f.eks. være frygt for forandring, ligesom man oplevede under implementeringen af BIM. Man kan bruge erfaringerne fra implementeringen af BIM, under implementeringen af den digitale tvilling, da mange af processerne afspejler hinanden. Til sidst skal man huske at implementeringsprocessen ikke skal betragtes som noget der sker med det samme, men som en løbende tilpasning og forbedring. Ved løbende at evaluere og tilpasse standarderne i overensstemmelse med branchens udvikling. En succesfuld implementering af standarder for digitale tvillinger, vil ikke kun skabe en klarhed om konceptet og hvordan den anvendes, men også fremme integrationen, samarbejdet og effektiviteten i byggeprojekter.

3.2.1 Delkonklusion

Denne tabel vil fremhæve pointer fra afsnittet foroven, og præsentere et forslag til, hvilke tilgange man kunne tage for at tilpasse standarderne for den digitale tvilling, der oprindeligt er udviklet til produktionsindustrien, til byggeindustrien.

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

Tabel 3 – Oversigt over hvordan standardiseringsprocessen kunne se ud

Implementeringsproces		
Relevante standarder	ISO 23247:2021 Del 1 - 4	<i>Disse standarder fokuserer på grundlæggende principper, retningslinjer, simulationer og praktiske eksempler for digitale tvillinger i produktionsindustrien.</i> Find paralleller mellem produktionsprocesser og byggeprocesser, så man kan tilpasse principperne til byggebranchen.
	IFC og IDM	<i>Disse standarder er allerede kendte i byggebranchen, og ville derfor være lettere integrerbare.</i> Anvend IFC som et standardiseret filformat til dataudveksling mellem forskellige BIM – software og digitale tvillingplatforme. Anvend IDM – retningslinjerne for at organisere, strukturere og levere data igennem bygningens livscyklus.
Tilpasning til byggebranchen		
Udvikling af struktur for digitale tvillinger	Skab en struktur der passer til byggeprocessen. Her kunne man anvende, en projektinformationsmodel (PIM), en assetinformationsmodel (AIM), den digitale tvilling (DT) og en digital tvillingplatform (DTP), som alle fokuserer på byggeprojektets livscyklus.	
Integration af IoT – standarder	Forbedre standarderne for Internet of Things (IoT), da disse har stor indflydelse på digital tvilling – teknologien. Undersøg hvordan IoT – standarder kan tilpasses til byggeprojekter for at understøtte digitale tvillinger.	
Implementeringsproces		
Tilpasning og test	Start med at implementere og tilpasse standarderne på mindre projekter for at tilpasse dem til byggeindustriens behov, før de anvendes på større projekter.	
Brugeraccept	Forbered brugerne på forandringerne ved hjælp af træning og support. Brug erfaringer fra implementering af BIM til at lette overgangen og mindske modstanden.	
Evaluering og tilpasning		
Evaluering og tilpasning	Implementeringsprocessen bør ses som en løbende proces. Standardernes effektivitet bør analyseres løbende, og tilpasses i overensstemmelse med byggebranchens behov.	
Løbende forbedring	Fortsæt med at forbedre standarder og processer løbende. Det er en løbende tilpasning, som skal følge med branchens udvikling.	

3.3 EGENSKABER FOR DIGITALE TVILLINGER

I dette afsnit udforskes de egenskaber som en digital tvilling bør have, ifølge forskellige kilder fra litteraturstudiet. En opsummering af disse egenskaber, baseret på forskellige kilder, gør det muligt at udvikle en vejledning til hvordan den digitale tvilling kan anvendes til dets fulde potentiale.

Ifølge Sawhney (2022) beskrives en digital tvilling som en kompleks og fleksibel enhed, der bør have et specifikt sæt egenskaber for at fungere effektivt i forskellige områder af byggefasen. Først og fremmest skulle den kunne fremvise en virtuel repræsentation af fysiske objekter og processer, opdatere og synkronisere med en defineret frekvens og nøjagtighed. Derudover er det afgørende, at den kan håndtere og integrere forskellige former for data, der er synkroniseret, for at skabe et klart billede af de fysiske enheder. Brugen af realtidsdata og historisk data er en central del af dens funktion, da disse data anvendes til at skabe et realistisk billede af fortid, nutid og fremtidige simuleringer. Samtidig skal en digital tvilling have evnen til at støtte informerede beslutninger gennem analyser, der giver mulighed for at optimere bygningen. Bortolini et al. (2022) beskriver en digital tvilling som en teknologisk innovation med en række afgørende egenskaber. På samme måde som Sawhney (2022), beskriver Bortolini et al. (2022), at en digital tvilling skal kunne fremvise en virtuel repræsentation af fysiske objekter eller systemer, der gør det muligt at gengive dataet i realtid. Artiklen fremhæver at den digitale tvillings essentielle funktionalitet ligger i dens evne til at være tilsluttet det fysiske objekt via sensorer, hvilket giver mulighed for konstant dataudveksling og analyse. Den konstante strøm af information danner grundlag for dens evne til at simulere og forudsige forskellige scenarier og dens fremtidige drift. En egenskab der fremhæves af artiklen, som ikke er omtalt af Sawhney (2022), er den digitale tvillings evne til at lære og forbedre sig over tid gennem maskinlæring og kunstig intelligens. Ifølge Bortolini et al. (2022), er dette endnu ikke afprøvet, men med den digitale tvilling er man i stand til at udvikle det. Dette fremhæves her, ”*There is the need to ensure that the model results in a self-reliant, self-updatable, and self-learning. DT to help in harnessing the full benefits of DT.*” (Bortolini et al., 2022).

Hvis vi sammenligner disse egenskaber, med egenskaberne præsenteret i afsnit 3.1 af Almatared et al., 2022, er der en bred enighed om hvilke egenskaber den digitale tvilling bør besidde.

1. **Virtuel repræsentation af fysiske objekter:** Begge kilder understreger vigtigheden af at præsentere en virtuel kopi af fysiske objekter.
2. **Realtidsopdatering:** Begge artikler fremhæver behovet for opdatering i realtid og synkronisering mellem den fysiske og virtuelle model.
3. **Dataintegration:** De er enige om behovet for at integrere forskellige datatyper fra forskellige kilder for at skabe et klart billede af de fysiske enheder.

4. **Simulering og forudsigelse:** Begge kilder fremhæver den digitale tvilling evne til at simulere og forudsige driftsprocesser.
5. **Optimering af design og drift:** Begge kilder fremhæver at den digitale tvilling kan bruges til at optimere både design- og driftsprocesser.
6. **Overvågning og diagnosticering:** Begge kilder fremhæver den digitale tvillings rolle i overvågning og diagnosticering af problemer.
7. **Forbedring af kommunikation og samarbejde:** Dette punkt bliver ikke direkte omtalt i artiklerne, men man kan tolke at den digitale tvilling kan skabe en fælles platform for data og derigennem kommunikation, på tværs af interessenter.
8. **Reducerer risiko og omkostninger:** Begge kilder ser den digitale tvilling som en måde at reducere risici og omkostninger igennem bedre beslutningsgrundlag.
9. **Støtte til beslutningsprocesser:** Begge kilder fremhæver den digitale tvilling rolle i at støtteinformede beslutninger.
10. **Forbedring af kundeoplevelse:** Dette punkt bliver ikke direkte omtalt i artiklerne, men man kan antage at en forbedring af design og drift kan føre til en forbedret kundeoplevelse.
11. **Bæredygtighed og miljømæssige mål:** Dette punkt bliver ikke direkte omtalt i artiklerne, men det kan antages at være en fordel, hvis den digitale tvilling bruges til at optimere ressourcebrug og processer.
12. **Støtte til industri 4.0 – initiativer:** Dette punkt bliver ikke direkte omtalt i artiklerne, men begge kilder indikerer at den digitale tvillings rolle understøtter industri 4.0 – initiativer.

Denne sammenligning viser en overensstemmelse mellem de 3 artikler, som yderligere bekræfter en enighed i litteraturen omkring disse afgørende egenskaber.

Det kan diskuteres at de fleste af punkterne repræsenterer egenskaber eller formål for den digitale tvilling. De dækker en bred vifte af anvendelser, der udnytter den digitale tvillings egenskab til at repræsentere fysiske systemer, optimere design og drift, overvåge og diagnosticere problemer og at kunne støtte beslutningsprocesser. Dog er der nogen af punkterne, der kan betragtes som mere problemorienterede, hvor den digitale tvilling kan anvendes som en løsning. For eksempel, når det kommer til at reducere risiko og omkostninger, kan en digital tvilling hjælpe med at identificere potentielle risikoområder igennem simuleringer og forudsigelser, som gør det muligt at håndtere dem på forhånd. På samme måde kan den støtte bæredygtigheds – og miljømæssige mål ved at optimere ressourceforbrug og processer baseret på simuleringer og analyser. Så selvom de fleste punkter er egenskaber eller formål, der allerede findes inden for den digitale tvilling, er der nogle af den, der repræsenterer problemstillinger eller udfordringer, hvor den digitale tvilling kan være

en effektiv løsning. Disse problemstillinger undersøges nærmere i afsnit 4.2.1 *Byggebranchens udfordringer og den digitale tvillings rolle*, hvor der udarbejdes et forslag til hvordan man kunne håndtere disse problemstillinger ved hjælp af den digitale tvilling. Ved at kigge på, hvordan den digitale tvilling kan anvendes på specifikke problemer i byggebranchen, åbner man døren for en mere løsningsorienteret tænkning. Det tillader en mere praktisk tilgang til at udvikle og implementere denne teknologi for at kunne imødekomme branchens behov.

Med en klarhed om hvilke egenskaber en digital tvilling bør have og hvordan den bør anvendes, er det værd at undersøge hvordan disse egenskaber implementeres i praksis i byggeindustrien. I den sammenhæng, fokuseres diskussionen nu på spørgsmålet om, hvorvidt en enkelt digital tvilling, der udvikles løbende, bedst opfylder behovene i forskellige faser af byggeprocessen, eller om flere digitale tvillinger, til specifikke faser, kan være en fordel for byggeprocessen. En enkelt digital tvilling ville potentielt give en kontinuerlig og sammenhængende platform, der kan tilpasses og optimeres løbende, gennem hele livscyklussen af byggeriet. Dette ville gøre det muligt at lave en bredere analyse, en vedvarende forbedring og evnen til at tilpasse sig skiftende krav i byggeprojekter. At vælge en enkelt digital tvilling kan have sine fordele og ulemper. Fordelene ved en samlet digital tvilling, er f.eks. at man har mulighed for at integrere alle data og processer på tværs af forskellige faser af byggeprojektet. Dette gør det muligt at have en mere effektiv udveksling af data, der fremmer samarbejde og sikrer, at alle interessenter har adgang til de samme opdaterede oplysninger. Et enkelt tvilling-system kan sikre en ensartet datamodel, hvilket minimerer tab af data og forbedrer sammenhængen mellem informationerne. Derudover er det muligt, løbende at optimere bygningen gennem hele byggeprojektets livscyklus. Ulemperne ved at anvende én enkelt digital tvilling, kan f.eks. være at den kan komme til at mangle specialisering i specifikke faser af byggeprocessen, hvilket kan resultere i mindre detaljerede eller mindre præcise løsninger. Derudover kan modellen for én digital tvilling blive kompleks, især når det kommer til at integrere data fra forskellige faser og opdatering af datamodeller. Her er der risiko for tab af data, fejl og at systemet svigter. Det kan konkluderes at størrelsen af projektet bestemmer hvorvidt man vil vælge at bruge én enkelt digital tvilling eller flere digitale tvillinger. Flere digitale tvillinger, til forskellige faser, som planlægning, konstruktion, drift og vedligeholdelse, gør det muligt at have en mere målrettet tilgang med fokus på specifikke krav for hver fase. Dette kan muligvis give en mere præcis analyse og optimering af processer i hver fase. Derudover kan kompleksiteten af den enkelte digitale tvilling, reduceres ved at have flere tvillinger, og det kan mindske integrationen og vedligeholdelsen af den digitale tvilling, hvilket gør det lettere at håndtere og opdatere systemerne. Nogle udfordringer ved at anvende flere digitale tvillinger, er at der er en risiko for manglende sammenhæng mellem de forskellige digitale tvillinger. Dette kan resultere i tab af information, og udfordringer i at opretholde en ensartet datamodel på tværs af forskellige faser. Derudover skal man bruge flere ressourcer på at opretholde sammenhængen mellem flere tvillinger og det kræver øget

samarbejde og kommunikation mellem forskellige interessenter. Samtidig er der risiko for overlapning eller konflikt mellem data i separate tvillinger, hvis de ikke integreres korrekt eller hvis der ikke er klare retningslinjer for hvordan de skal anvendes. Det endelige valg mellem en enkelt eller flere digitale tvillinger afhænger derfor af specifikke behov, kompleksitet og målene for det specifikke byggeprojekt, da fordele og ulemper ved begge tilgange er afgørende for at træffe en informeret beslutning.

I tilfældet af at man vælger at arbejde med flere digitale tvillinger, er det vigtigt at forstå, hvordan den digitale tvilling kan anvendes i forskellige faser af byggeprocessen. De forskellige faser, planlægning, design, konstruktion, aflevering og drift og vedligehold, kræver specifikke tilgange og fokusområder. Dette afsnit vil uddybe hvordan den digitale tvilling kan anvendes i de forskellige faser. I planlægningsfasen er der oftest fokus på at definere projektets mål, budget, at identificere ressourcer og tidsplaner. Her kan den digitale tvilling anvendes til at visualisere mulige løsninger, udføre simuleringer og analyser, så man kan overveje forskellige scenarier, og dermed bidrage den til en at træffe informerede beslutninger. Under designfasen, er målet at udvikle detaljerede og funktionelle planer for byggeriet. Her kan en digital tvilling være til fordel, da det bliver muligt at udføre simuleringer og analyser for at vurdere forskellige scenarier, der kan hjælpe med at tage beslutninger. Under konstruktionsfasen, hvor bygningen opføres, kan en digital tvilling bruges til at skabe et overblik over byggeprocessen i realtid ved hjælp af sensorer og indsamling af data. Dette gør det muligt at evaluere fremskridt løbende. Samtidig kan man identificere eventuelle problemer, som man kan løse med det samme, hvis muligt. I afleveringsfasen, er der fokus på at gennemføre de sidste justeringer, kvalitetssikring og at alt er klar til overlevering. En digital tvilling kan her bruges til at oprette dokumentation og sammenligne det færdige byggeri med designspecifikationerne fra designfasen, for at sikre at alt er i overensstemmelse med planerne. Til sidst er der drift og vedligeholdelsesfasen, som begynder når byggeriet er afsluttet og taget i brug. Her kan en digital tvilling anvendes til at overvåge og diagnosticere enheders præstationer, forudsige vedligeholdelsesbehov og optimere driften af bygningen. Dette kan være med til at forlænge bygningens levetid og effektivitet, da man har mulighed for at identificere problemer med det samme, før problemerne bliver for store (Sawhney, 2022).

Sammen med den digitale tvilling bliver teknologier som, Building Information Modeling (BIM), 3D-modeller, Virtual Reality, Augmented Reality (AR), Internet of Things (IoT), Sensorer, anvendt (Nguyen & Adhikari, 2023). Derfor er datakonsistens og dataintegritet en afgørende faktor for at den digitale tvilling kan anvendes korrekt. I denne kontekst refererer datakonsistens til pålideligheden af data på tværs af forskellige systemer og faser i byggeprocessen. Integritet refererer til at den data der anvendes, er nøjagtig, sikker og beskyttet mod ændringer eller adgang der ikke er godkendt. Derfor er det vigtigt at etablere systemer og processer for at sikre dataet, da en digital tvilling er afhængig af en konstant og nøjagtig datastrøm, før den kan fungere

optimalt. Som nævnt tidligere, er det i denne kontekst også vigtigt at udarbejde standarder og vejledninger for dataindsamling, databehandling og datalagring, der er ens på tværs af forskellige platforme og enheder. Samtidig er standarder væsentlige når der arbejdes på tværs af interessenter, såsom entreprenører, ingeniører, arkitekter og projektledere, så man kan sikre at alle arbejder med den samme information og data. Det er vigtigt at sikre datakonsistensen og dataintegriteten, for en effektiv brug af den digitale tvilling gennem hele byggeprocessen. Det er en proces der kræver konstant opmærksomhed, vedligeholdelse og samarbejde for at sikre pålidelig og sikker datadeling på tværs af alle faser af byggeriet (Fuller et al., 2020).

For at opnå en mere visuel oversigt over egenskaberne og deres anvendelse gennem forskellige faser, er der for dette speciale udviklet en tabel, der opsummerer de afgørende egenskaber for en digital tvilling i byggeprocessen. Tabellen fungerer som en vejledning/værktøj som man kan bruge til at identificere og implementere hvilke egenskaber man bør opfylde, før man kan arbejde med en digital tvilling i en bestemt fase. Samtidig er der i tabellen lavet en række, hvor de forskellige teknologier som kan anvendes i faserne i forbindelse med den digitale tvilling, er fremhævet.

Tabel 4 – Tabel over egenskaber for den digitale tvilling

Egenskaber	Planlægning og design	Konstruktion	Færdig bygning	Drift og vedligeholdelse
Teknologier	Building Information Modeling (BIM) Simulerings- og analyseteknologier Virtual Reality (VR) Augmented Reality (AR)	Internet og Things (IoT)	Scanningsteknologi Digital informationsstyring	Predictive Maintenance teknologier Facility management systemer
Skalerbarhed og tilpasning	Tilpasning til forskellige detaljeringsniveauer	Tilpasning til forskellige detaljeringsniveauer		
Interoperabilitet	Integration af forskellige datakilder og formater	Integration af forskellige datakilder og formater		
Simulering og modellering		Avancerede simuleringer		

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

Realisme og præcision		Præcis virtuelrepræsentation	Præcis virtuelrepræsentation	Præcis virtuelrepræsentation
Realtidsovervågning og opdatering		Opdatering baseret på realtidsdata	Opdatering baseret på realtidsdata	Opdatering baseret på realtidsdata
Identificering af fejl		Identificering af fejl og advarsler	Identificering af fejl og advarsler	Identificering af fejl og advarsler
Forudsigelser				Forudsigelse af vedligeholdelsesbehov
Sikkerhedsforanstaltninger	Beskyttelse af data	Beskyttelse af data	Beskyttelse af data	Beskyttelse af data
Brugervenlighed og tilgængelighed	Let at samarbejde og deling af information	Let at samarbejde og deling af information	Let at samarbejde og deling af information	Let at samarbejde og deling af information

3.3.1 Delkonklusion

Dette afsnit undersøger egenskaberne for en digital tvilling i byggeindustrien ifølge forskellige kilder. Disse egenskaber inkluderer virtuel repræsentation af fysiske objekter, realtidsopdateringer, dataintegration, simulering og forudsigelse, optimering af design og drift samt support til beslutningsprocesser og overvågning. Sammenligningen af disse kilder viser enighed om egenskaberne.

Når det kommer til implementering, er der fordele og ulemper ved at bruge enten en enkelt digital tvilling eller flere tvillinger til forskellige faser af byggeprocessen. En enkelt tvilling kan give kontinuitet og samle data på tværs af faser, mens flere tvillinger kan give en mere målrettet tilgang, men kræver mere samarbejde og koordination.

Til sidst undersøges det hvordan en digital tvilling kan anvendes i de forskellige faser af byggeprojektet, herunder planlægning, design, konstruktion, aflevering og drift. Teknologier som BIM, IoT og sensorer understøtter digital tvilling-teknologien. Datakonsistens og -integritet er afgørende for tvillingens succes, og etablering af standarder og retningslinjer er vigtigt for effektiv datadeling.

4 ANVENDELSE AF DIGITALE TVILLINGER TIL VARIERENDE KRAV I BYGGEPROJEKTER

Den digitale tvilling-teknologi har et stort potentiale til at forbedre byggeprocessen. Dog kræver en effektiv digital tvilling, en tilpasning til de specifikke og skiftende krav, som oftest er varierende mellem forskellige typer af bygninger. Dette afsnit vil fokusere på nøgleaspekter som fleksibilitet, specialerede modeller og dynamisk tilpasning til skiftende krav.

Fleksibilitet udgør et væsentligt aspekt af tilpasningen inden for den digitale tvilling-teknologi i forskellige byggeprojekter. Muligheden for at tilpasse omfanget af en digital tvilling i overensstemmelse med behovene i et specifikt byggeri er afgørende. Dette kan f.eks. opnås ved at gøre det muligt at tilføje eller fjerne sensorer, datastrømme eller modeller, så modellen kan skaleres op eller ned efter behov. Ligesom det blev konkluderet i kapitel 3.3, kan man i mere enkle bygninger bruge en mindre detaljeret digital tvilling, som kan give en overordnet forståelse af strukturen og den funktion, hvor i mere komplekse bygninger, ville man anvende en mere detaljeret og omfattende digital(e) tvilling/tvillinger. Dette vil kræve et større udvalg af sensorer og datastrømme for at scanne og analysere de systemer der udvikles. Fleksibilitet handler også om at tilpasse sig ændringer i byggeprojektet. Det er ikke ualmindeligt at der laves ændringer i byggeplanerne, under byggeprocessen, og derfor er det nødvendigt at der er mulighed for at tilføje eller justere elementer i tvillingen. Dette er afgørende for at optimere ressourceforbruget og sikre, at den digitale tvilling afspejler den reelle bygning, hvilket igen bidrager til en mere effektiv planlægning, konstruktion og drift af bygninger. Endnu en måde at tilpasse den digitale tvilling til de varierende krav i byggeprojekter, er at udvikle specialiserede modeller alt efter hvilken type bygning man vil bruge den digitale tvilling til. Hvert byggeprojekt har unikke behov og udfordringer, hvilket kræver tilpassede tilgange for at opnå den optimale funktion af den digitale tvilling. For eksempel kan et almindeligt lejlighedskompleks kræve en digital tvilling med fokus på beboelseskomfort, energieffektivitet og sikkerhed. I denne model kunne man f.eks. have større fokus på sensorer og datastrømme, der primært fokuserer på temperaturkontrol, belysningssystemer og overvågning af adgangsveje. Modellen kan tilpasses til at imødekomme de behov, der er unikke for boligområder og beboelsesmiljøer. På den anden side kan en industri- eller produktionsfacilitet have behov for en digital tvilling, der fokuserer på optimering af produktions flow og kontrol af maskiner og overvågning. Denne model ville integrere sensorer og datasystemer, der er tilpasset til industrielle behov, såsom maskinstatus og produktionskapacitet. Kernen af specialiserede modeller ligger i deres evne til at tilpasses sig specifikke krav og processer i forskellige byggeprojekter. Ved at udvikle tilpassede modeller kan digitale tvillinger blive mere effektive og præcise redskaber til at forbedre både designfasen, og den efterfølgende drift af bygningen, da de imødekommer de udfordringer og behov for den specifikke bygning. Til sidst, kunne det være en fordel at integrere specifikke analyseværktøjer, for at imødekomme varierende krav i forskellige byggeprojekter. For eksempel kan man i

en digital tvilling, som er designet til energieffektivitet, indarbejde simuleringstværværktøjer og datamodeller, der kan analysere energiforbruget på tværs af forskellige systemer i en bygning. Dette vil gøre det muligt at identificere områder til optimere og reducere energispild. På samme måde kan en digital tvilling, hvor fokuset er på sikkerhed have indarbejdet funktioner til overvågning af adgangssystemer, sikkerhedskameraer og identifikation af risikoområder i bygningen. Dette gør det muligt at have en forebyggende tilgang til at forbedre sikkerhedsforanstaltninger og risikostyring. Derudover kan en digital tvilling, som fokuserer på infrastrukturovervågning, implementere analyseværktøjer til konstant overvågning af strukturelle systemer. På den måde kan man identificere potentielle svagheder eller behov for vedligeholdelse, i et tidligt stadie.

Som en del af dette speciale, bliver der udarbejdet et konceptuelt design for et opslagsværk, der gør det muligt at vælge en problemstilling, som vil resultere i en oversigt over hvilken tilgang man kan bruge, for at imødegå problemet. Informationen der er indsamlet i forbindelse med dette speciale, igennem litteraturstudiet, vil danne grundlag for opslagsværket. Der udarbejdes forskellige tabeller som skal repræsentere hver problemstilling med de tilhørende trin som er nødvendige for udviklingen af den digitale tvilling. Dette udarbejdes i det næste afsnit.

4.1.1 Byggebranchens udfordringer og den digitale tvillings rolle

1. *Optimering af bygningens energiforbrug*

I mange bygninger bruges energien ineffektivt på grund af dårlig isolering, ineffektive eller ældre armaturer eller brug af energi hvor der ikke er behov for det (Daniotti et al., 2022). I mange tilfælde fører dette til høje energiomkostninger og det kan skabe gener hos brugerne, som til gengæld skaber ubehag og kan reducere produktiviteten hos brugerne. Samtidig har overforbruget af energien en negativ indvirkning på miljøet ved at øge CO₂-udledningen og ressourceforbruget. Den primære udfordring der kan opstå når man støder på dette problem, er at identificere hvor og hvordan energien spildes. Ofte er de skjulte eller komplekse og kan derfor kræve en detaljeret analyse af bygningens struktur og systemer, før de kan identificeres. For at kunne løse dette problem er det nødvendigt at lave en strategisk og grundig analyse. Dette kan f.eks. gøres ved hjælp af den digitale tvilling. Med den digitale tvilling kan man oprette en virtuel model af bygningen, og dette vil gøre det muligt at lave simuleringer, som man kan bruge til at afprøve forskellige scenarier. På den måde kan man identificere specifikke områder, hvor energien spildes, hvorefter forbedringer kan udføres. Kombinationen af dataindsamling, simuleringer, analyse og implementeringen af de optimerede løsninger, kan bidrage til at reducere forhøjet energiforbrug. Det reducerer ikke kun energiomkostningerne, men det forbedrer også brugernes komfort og bidrager til en mere bæredygtig fremtid ved at reducere bygningens samlede CO₂-udledning. (Daniotti et al., 2022).

Tabel 5 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til optimering af bygningens energiforbrug

Optimering af bygningens energiforbrug		
Eksempel: Under projekteringen af en kontorbygning oplever man at der vil komme høje omkostninger på energi og varierende temperaturer i forskellige områder af bygningen. Dette kunne muligvis være på grund af ineffektive varme- og kølesystemer, og dårlig isolering, som kan resultere i gener hos brugerne og høje omkostninger for ejeren.		
Trin	Beskrivelse	X
Dataindsamling	Indsamling af information om bygningens struktur, armaturer, energiforbrug osv. ved hjælp af sensorer og eksisterende data.	
Digital tvilling	Oprettelse af en digital tvilling af bygningen ved hjælp af indsamlet data for at simulere og forudsige energiforbruget.	
Analyse og identifikation	Gennemføre en analyse af den digitale tvilling for at identificere områder med højt energiforbrug eller ineffektivitet.	
Implementering af løsninger	Implementere ændringer, f.eks. opgradering af isolering, optimering af armaturer, og justering af	
Overvågning og finjustering	Overvågning af energiforbrug ved hjælp af den digitale tvilling for at finjustere systemer og sikre, at de nye løsninger fungerer optimalt.	

Tabellen præsenterer en tilgang til løsningen for optimering af bygningens energiforbrug. Ved at følge disse trin kan man skabe en systematisk gennemgang så man kan identificere områder der er mindre effektive og implementere målrettede løsninger, så man kan skabe en mere energieffektiv bygning, der er både økonomisk fordelagtige og miljøvenlige.

2. *Forbedring af tidsplanlægning i byggeprocessen*

Tidsplanlægningen af byggeprocessen afhænger af en række komplekse faktorer, disse resulterer ofte i forsinkelser, budgetoverskridelser og ineffektivitet i byggeprojekter. Én af de primære udfordringer er at man ikke har mulighed for at forudsige og håndtere kompleksiteten af en konstruktionsproces. Det kan være på grund af flere faktorer, blandt andet unøjagtige tidsplaner, mindre optimal ressourcefordeling, og en begrænset mulighed for at forudse potentielle konflikter i løbet af byggeprocessen. Samtidig er der ofte en manglende kommunikation mellem de forskellige parter som er involveret i byggeprojektet, såsom entreprenører, arkitekter, ingeniører og leverandører. Dette kan føre til misforståelser, fejl og uproduktivt samarbejde, som til gengæld kan forsinke projekterne og øge omkostningerne. På samme måde spiller risikostyring også en afgørende rolle i tidsplanlægning. Uforudsete begivenheder som vejrmæssige forhold, forsinkede

leverancer af materialer eller ændringer i projektet i sidste øjeblik, kan skabe konflikt i planlægningsprocessen, hvis der ikke er en tilstrækkelig fleksibilitet til at håndtere sådanne uventede begivenheder. Ved at implementere en digital tvilling i tidsplanlægningen er der mulighed for at skabe en nøjagtig og dynamisk virtuel model af byggeprojektet. På samme måde som før, giver det mulighed for simuleringer, visualiseringer og analyse af hele byggeprocessen, hvilket gør det muligt at identificere potentielle problemområder og optimere planlægningen i realtid. Integrationen af realtidsdata vil fremme samarbejde og kommunikation mellem alle parter og skabe en mere effektiv tidsplanlægning.

Tabel 6 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til forbedring af tidsplanlægning i byggeprocessen

Forbedring af tidsplanlægning i byggeprocessen		
Eksempel: Et byggeprojekt støder på forsinkelser og budgetoverskridelser på grund af manglende koordination mellem forskellige entreprenører, utilstrækkelig tidsplanlægning og unøjagtige ressourceplanlægning. Dette resulterer i ineffektivitet, øgede omkostninger og frustration blandt involverede parter.		
Trin	Beskrivelse	X
Mål og krav	Definer mål og krav for byggeprojektet, herunder tidslinjer, budgetter og specifikke ressourcer.	
Digital tvilling	Oprettelse af en digital tvilling af byggeprojektet for at simulere og visualisere hele konstruktionsprocessen.	
Ressourceplanlægning	Identificer de nødvendige ressourcer ved hjælp af den digitale tvilling, inklusive arbejdskraft, materialer og maskiner.	
Tidsplanoptimering	Udvikl en detaljeret tidsplan baseret på simuleringer fra den digitale tvilling og identificer potentielle konflikter i processen.	
Samarbejde og kommunikation	Fremme samarbejde og kommunikation mellem forskellige parter gennem deling af den digitale tvilling og opdateringer af planlægningen i realtid.	
Overvågning	Løbende evaluering og tilpasning af tidsplanen baseret på den digitale tvillings simulationer og feedback fra realtidsdata.	

Tabellen præsenterer en systematisk tilgang til at forbedre tidsplanlægningen ved hjælp af en digital tvilling. Ved at følge trinnene kan man optimere tidsplaner, ressourceforbrug og samarbejde mellem forskellige parter, som til gengæld vil reducere risikoen for forsinkelser og omkostninger ved byggeprojektet.

3. Forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer

Vedligeholdelse af bygninger er en essentiel del af bygningens livscyklus, men ofte kan det komme med udfordringer. Problemer med vedligeholdelse opstår, når der ikke er en effektiv måde at forudsige eller standardiseret tilgang til at håndtere de løbende behov der er for reparationer, udskiftninger af bygningen. Dette omfatter selvfølgelig kun bygninger hvor det giver mening at integrere digitale systemer, såsom kontorbygninger, industribygninger eller hospitaler. Dette kunne også omfatte almindelige boliger eller lejlighedskomplekser, men det er ikke sikkert at det ville være rentabelt at integrere sådanne systemer i mindre boliger eller lejlighedskomplekser. Én af de største udfordringer er mangel på forudsigelse af fejl og nedbrud i systemer, der kan være integreret i bygninger. Dette kan være på grund af utilstrækkelig overvågning af bygningens tilstand og manglende evne til at indsamle og analysere data. Dette resulterer i at problemer først opdages når de bliver alvorlige og kræver dyre reparationer eller er grund til afbrydelser i bygningens drift. Samtidig er der en tendens til at problemerne først håndteres, når de opstår, i stedet for at implementere proaktive vedligeholdelsesstrategier, der kunne forhindre potentielle fejl. Ved at implementere avancerede teknologier som sensorer, IoT-enheder og digitale tvillinger er det muligt at overvåge bygningers tilstand i realtid. Teknologien giver mulighed for at skabe et indblik i systemernes ydeevne og gør det muligt at forudsige vedligeholdelse. Det kræver dog at daten ikke kun bliver indsamlet, men også analyseret, som man derefter kan handle efter. Ved at udnytte den digitale tvilling og analysere den indsamlede data, kan man identificere mønstre i systemernes ydeevne og forudsige potentielle fejl eller nedbrud. Dette fører til reducerede vedligeholdelsesomkostninger og en mere pålidelig drift af bygninger og anlæg.

Tabel 7 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer

Forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer		
Eksempel: Et større lejlighedskompleks oplever gentagne udfald i elevatorerne, hvilket resulterer i utilfredse brugere, høje vedligeholdelsesomkostninger og tabt tid på grund af reparationer.		
Trin	Beskrivelse	X
Sensorimplementering	Installation af sensorer og overvågningsenheder for at indsamle data om driftsmønstre, ydeevne og uregelmæssigheder.	
Digital tvilling	Oprettelse af en digital tvilling baseret på indsamlet data for at kunne lave simuleringer, og forudsige potentielle fejl.	
Dataanalyse	Analyse af data fra den digitale tvilling for at identificere mønstre, unormal drift og potentielle fejl.	

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

Forudsigelse af vedligeholdelsesbehov	Brug digital tvilling til at forudsige nedbrud eller hvor der er behov for vedligeholdelse baseret på analysen.	
Planlægning af proaktiv vedligeholdelse	Udform en plan for proaktiv vedligeholdelse der er rette mod specifikke dele af bygningen, som kræver opmærksomhed.	
Implementering af vedligeholdelse	Gennemfør vedligeholdelsesplanen.	
Overvågning	Løbende evaluering og tilpasning af dele af bygning, igennem realtidsdata og sensorer fra den digitale tvilling.	

Tabellen illustrerer trinene, der kan tages for at forebygge vedligeholdelsesproblemer i en bygning, ved at anvende en digital tvilling og analyser til at identificere, forudsige og forhindre potentielle driftsproblemer.

4. Overvågning af ressourcer og forbrug

Styring af ressourcer i byggeprojekter kan udgøre en udfordring, på grund af den uforudsigelighed der kommer med leveringskæder, da det kan være svært at estimere hvor meget materiale man skal stille til rådighed, uden at bestille for meget eller for lidt. Dette kan skabe både spild og ineffektivitet i byggeprocessen. Effektiv styring af leverandører kan være en afgørende faktor. Uforudsete forsinkelser eller utilstrækkelig kvalitet af leverede materialer kan forstyrre tidsplaner og påvirke hvorvidt arbejdet kan fortsætte. En anden udfordring der kan opstå, i forbindelse med ressourcer, er lagerstyring. Opbevaring af materialer på byggeplads kan føre til øgede omkostninger, mens for lidt opbevaret materiale kan forårsage forsinkelse eller afbryde arbejdet. Til sidst har ressourceallokering og arbejdskraft fordeling også en afgørende betydning. Mangelfuld planlægning og koordinering kan føre til spild af arbejdskraft og en mindre effektiv arbejdsgang. Løsningen på disse udfordringer kan være at skabe mere præcise systemer til ressourcestyring, der har nøjagtige estimater, effektiv leverandørstyring og lagerstyring og bedre planlægning af arbejdskraften. Igennem en digital tvilling, hvor sensorer og IoT-enheder er integreret i bygningens fysiske struktur, kan der indsamles data løbende, i realtid. Dataet spænder fra materialernes levering og lagerstatus til maskinernes aktivitet og arbejdsprocesser på byggepladsen. På den måde kan den digitale tvilling analysere og identificere mønstre i ressourceforbruget. Analysen gør det ikke kun muligt at lave en præcis registrering af hvornår og hvor ressourcer anvendes, men den gør det også muligt at forudsige fremtidigt forbrug baseret på tidligere mønstre. Den digitale tvillings evne til at give et detaljeret indblik i et ressourceforbrug er afgørende for at effektivisere og optimere hele byggeprojektets forløb, hvilket kan reducere spild, forbedre effektivitet og alt i alt, forbedre overholdelse af tidsplaner og budgetter.

Tabel 8 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer

Overvågning af ressourcer og forbrug		
Eksempel: Under opførelsen af et nyt lejlighedskompleks oplever entreprenøren udfordringer med at opretholde kontrol over materialebeholdning og ressourceforbrug. Dette resulterer i overindkøb af visse materialer, spild og ineffektiv brug af arbejdskraft.		
Trin	Beskrivelse	X
Ressourceidentifikation	Identificer ressourcebehov og materialer til byggeprojektet baseret på planer og specifikationer.	
Leverandørstyring	Etablering af en effektiv leverandørstyring for at sikre levering af materialer til tiden og undgå forsinkelser.	
Lagerstyring	Implementering af systemer til nøjagtig lagerstyring for at undgå overindkøb og minimere spild af materialer.	
Optimeret ressourceallokering	Planlægning af præcis ressourceallokering og arbejdskrafts fordeling for at minimere spild og øge effektiviteten.	
Overvågning	Kontinuerlig overvågning af ressourceforbrug gennem integrerede sensorer og den digitale tvilling til at analysere realtidsdata om materialer, arbejdskraft og maskiners aktivitet.	
Analyse	Analyse af data om ressourceforbrug for at identificere mønstre og muligheder for forbedring.	

Denne tabel præsenterer en tilgang til hvordan man kan overvåge ressourcer og forbrug i byggeprojekter, ved hjælp af den digitale tvilling og kontinuerlig overvågning af forbrug for at reducere spild og optimere effektiviteten.

5. Kvalitetssikring

Kvalitetssikring er en almindelig del af byggeprocessen, og skal altid gennemføres. Hvis kvalitetssikringen ikke bliver foretaget, kan det resultere i store konsekvenser for byggeprojektet. Dette kan omfatte manglende overholdelse af bygningsreglementet og standarder, eller fejl i materialespecifikationer og byggeteknikker. Konsekvenserne af dette kan omfatte, strukturelle svagheder, sikkerhedsrisici for beboer eller brugere af bygninger, samtidig ville det være behov for reparationer efterfølgende, som ville resultere i flere omkostninger.

Den digitale tvilling kan her benyttes som et kvalitetssikringsværktøj. Som nævnt tidligere i dette speciale, kan den digitale tvilling, i forbindelse med kvalitetssikring, benyttes i designfasen til at simulere og teste

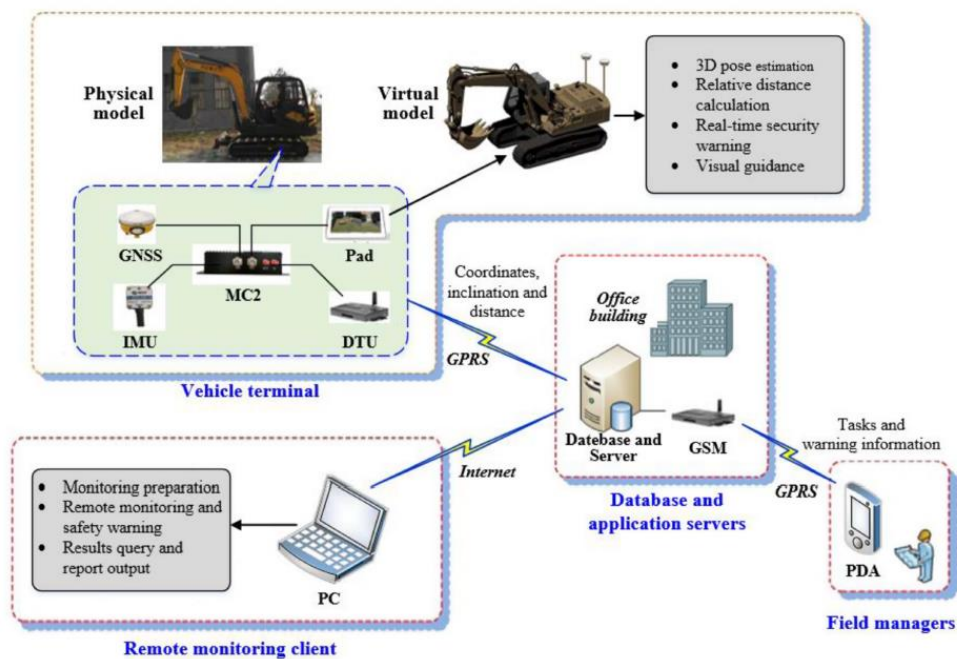
forskellige designforslag, strukturer og materialer. Dette gør det muligt at identificere potentielle kvalitetsproblemer eller svagheder, inden den fysiske opførelse af bygningen kan påbegyndes. Derudover, kan man under selve byggeprocessen, integrere sensorer og IoT-enheder i den fysiske struktur, som gør det muligt at blive ved med at overvåge bygningen i realtid. Enhver afvigelse fra plantegninger eller standarder kan opda- ges med det samme, og forhindres. Ligesom man kan anvende den digitale tvilling til at overvåge ressourcer på byggepladsen, kan den også bruges til at forudsige potentielle fejl eller kvalitetsproblemer, før de opstår i den fysiske konstruktion. Efter opførelsen af bygningen, kan den digitale tvilling, fortsat anvendes til at ana- lysere den færdige struktur og dens ydeevne, dette gør det muligt at optimere og forbedre kvaliteten efter- følgende, ligesom beskrevet i forbindelse med *forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer*.

Tabel 9 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til kvalitetssikring af byggeprojekter

Kvalitetssikring		
Eksempel: Under opførelsen af et lejlighedskompleks, forekommer der for lidt inspektion og kontrol af den bærende konstruktion. Dette resulterer i, at strukturen ikke opfylder de specificerede standarder, som fører til en risiko for kollaps eller strukturelle problemer. Dette opdages først, når bygningen allerede er i brug, og derfor kræver det om- fattende og dyre renoveringer for at sikre at bygningen opfylder alle de nødvendige standarder.		
Trin	Beskrivelse	X
Digital tvilling	Oprettelse af en digital tvilling baseret på indsamlet data for at kunne lave si- muleringer, og kvalitetskontrol	
Designsimule- ring	Anvend den digitale tvilling til at simulere og teste forskellige designelementer, strukturer og materialer for at identificere potentielle kvalitetsproblemer inden fysisk opførelse.	
Sensordatainte- gration	Integrer sensorer og IoT-enheder i den fysiske struktur for realtidsdataindsam- ling om byggeprocessen.	
Realtidsmonito- ring	Overvåg byggeprocessen i realtid ved at analysere og sammenligne data fra den fysiske konstruktion med den digitale tvilling for at identificere afvigelser eller potentielle fejl.	
Analyse	Anvend dataanalysemetoder på indsamlede data for at forudsige og identifi- cere potentielle kvalitetsproblemer og fejl.	
Dynamisk juste- ring	Foretag ændringer i design eller byggeprocessen baseret på resultaterne fra den digitale tvilling for at rette fejl eller forbedre kvaliteten løbende.	
Efterfølgende optimering	Efter byggeriet, anvend den digitale tvilling til at analysere den færdige struktur og dens ydeevne for at optimere og forbedre kvaliteten.	

Denne tabel giver et overblik over hvordan man trinvis kan kvalitetssikre et byggeprojekt ved hjælp af den digitale tvilling. Ved at integrere den digitale tvilling i processen kan man sikre en dybdegående kvalitetssikring gennem hele livscyklussen af byggeriet.

I det kommende afsnit ses der nærmere på hvordan trinnene fra to tabeller kan omsættes til handling i en virkelig situation, som er taget fra casestudier fra litteraturstudiet. Trinnene i casestudierne og tabellen, bliver sammenlignet for at visualisere hvordan det at anvende en digital tvilling i bestemte situation kunne se ud. Det første casestudie er præsenteret i artiklen *"Multisensor and BIM-Integrated Digital Twin to Improve Urban Excavation Safety"*, som fokuserede på udviklingen og anvendelsen af et digitalt tvillingsystem til at forbedre sikkerheden ved by udgravning. Studiet blev gennemført i flere trin for at undersøge potentialet i digital tvilling-teknologi. Først blev formålet med forskningen identificeret med det et mål om at forbedre sikkerheden ved by udgravning gennem digital tvilling-anvendelse. Derefter blev der implementeret multisensoriske løsninger, som Global Navigation Satellite System (GNSS) og inertialsmåleenheder (IMU), på fysiske gravemaskiner. Disse sensorer blev brugt til at estimere 3D-positioner ved hjælp af kinematisk modellering og social edderkoppealgoritme (SSA). En vigtig del af studiet var integrationen af bygningsinformationsmodellering (BIM) af nedgravede forsyningsledninger og by terræn med 3D-modeller af gravemaskiner. Dette resulterede i en dynamisk virtuel model, der afspejlede den reelle udgravning. (Liu et al., 2023)



Figur 11 – Framework of intelligent guidance and safety warning system for urban Excavation. (Liu et al., 2023)

Det digitale tvillingsystem blev derefter brugt til at levere realtids sikkerhedsstyring ved at overvåge udgravningen. Det inkluderede en vurdering af kollisionsrisiko og advarsler mod et potentielt farlige

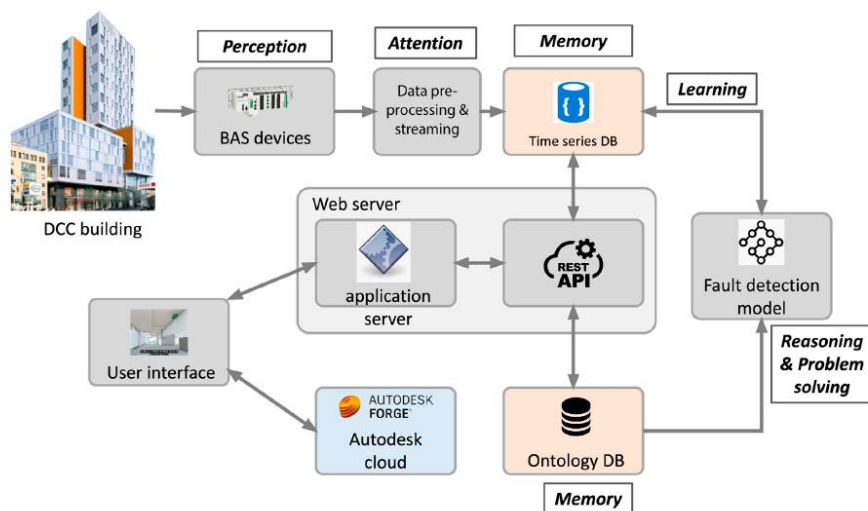
adfærdsmønstre. Gennem udviklingen af et software- og hardware system som understøttede den digitale tvilling teknologi kunne forskerne skabe en realtids overvågningsplatform. Dette system omfattede også funktioner som 3D – visuel fremstilling, overvågning og advarsler om farlige adfærdsmønstre. Ved at anvende denne tilgang i et virkeligt miljø i Shandong, Kina, blev systemets effektivitet bevist. Resultaterne viste en præcis estimering af gravemaskinernes position, forbedret nøjagtighed og evnen til at guide sikker drift i realtid. Samlet set demonstrerede dette case – studie den værdifulde anvendelse af digital tvilling – teknologi til at forbedre sikkerheden ved udgravninger. Ved at udnytte realtidsdata, avancerede simuleringer og proaktive sikkerhedsforanstaltninger, kunne den digitale tvilling teknologi spille en central rolle i at forhindre potentielle ulykker under udgravninger. (Liu et al., 2023)

Hvis disse faktiske hændelser skulle sammenlignes med én af de tabeller der er udarbejdet i dette afsnit, ville den nærmeste tabel være *forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer*. Selvom de specifikke applikationer er forskellige, deler de en række ligheder. Som sagt, blev den digitale tvilling – teknologi anvendt til at forudsige og forhindre potentielle ulykker ved at integrere multisensoriske løsninger og BIM, i casestudiet. I tabellen for vedligeholdelsesforebyggelse anvendes den digitale tvilling til at forudsige fejl og planlægge proaktiv vedligeholdelse for at forhindre nedbrud. Derudover, fokusere begge tilgange på dataindsamling, analyse, forudsigelse og proaktive foranstaltninger. I casestudiet blev den digitale tvilling brugt til at forudsige kollisioner og give realtids sikkerhedsadvarsler, men tabellen foreslår brugen af den digitale tvilling til at forudsige vedligeholdelsesbehov og implementere proaktiv vedligeholdelse. Så selvom, tilgangene er forskellige, fremhæver både tabellen og casestudiet vigtigheden af at bruge digital tvilling – teknologi til at indsamle, analysere og forudsige data for at forebygge potentielle problemer, uanset om det er for at undgå ulykker eller forhindre nedbrud og vedligeholdelsesproblemer.

Det andet casestudie er præsenteret i artiklen ” *Development of a Cognitive Digital Twin for Building Management and Operations*”, som fokuserer på at udvikle en Cognitive Digital Twin (CDT) til en bygning. Et centralt fokus er anvendelsen af en sikker streaming-arkitektur, der muliggør upload af realtidsdata fra Building Automation System (BAS) til en cloud-baseret beregningsressource. Denne arkitektur er designet til at imødekomme sikkerhedsbekymringer omkring adgang til bygningsudstyr og derved skabe en tryk og beskyttet infrastruktur. En vigtig del af CDT-udviklingen er integrationen af realtidsdata fra BAS og andre kilder med Building Information Models (BIM). Denne integration giver mulighed for aggregering, udforskning og visualisering af information efter behov, hvilket bidrager til en mere omfattende forståelse af bygningens drift og muliggør mere effektiv styring. Casestudiet demonstrerer også den praktiske anvendelse af Cognitive Digital Twin (CDT) ved at vise dens evner til at styre og automatisere komplekse systemer inden for den akademiske

bygning. Dette inkluderer optimering af energiforbrug, effektiv planlægning af vedligeholdelse og forbedring af generelle driftsprocesser. (El Mokhtari et al., 2022)

Hvis disse faktiske hændelser skulle sammenlignes med én af de tabeller der er udarbejdet i dette afsnit, ville den nærmeste tabel være *optimering af bygningens energiforbrug (tabel 3)*. I tilfældet af eksemplet hvor formålet er at optimere energiforbruget, skal sensorer placeres strategisk for at måle temperatur, luftfugtighed, lys niveau og energiforbrug. Ved at analysere disse data, kan man få en bedre forståelse af bygningens funktioner. Samtidig kan man analysere eksisterende data, som energiforbrugsregninger og bygningsplaner, for at kortlægge tidligere tendenser og problemer. Derudover bør man gennemgå bygningen for at finde potentielle energitab, som dårlig isolering eller utætte områder. Disse data integreres derefter til at lave en digital tvilling af bygningen. Igennem en analyse af den digitale tvilling, kan man identificere områder med unormalt højt energiforbrug eller ineffektivitet. Analysen af en digital tvilling af en bygning sker igennem en gennemgang af det indsamlede data, for at sikre pålideligheden af dataet. Som allerede nævnt, omfatter dette at identificere områder med et højt energiforbrug, og forudsigelse af energiforbruget under forskellige scenarier ved hjælp af simuleringsteknologi. Resultaterne af disse analyser bruges til at foreslå og evaluere mulige ændringer, der kan optimere bygningens energiforbrug. Analyseprocessen hjælper med at forstå, forudsige og optimere bygningens energiforbrug og fungere som en guide til at implementere effektive løsninger for at forbedre bygningens bæredygtighed og effektivitet. Implementeringer af løsninger kan ske ved f.eks. at opgradere isoleringen, optimere armaturer og finjustere varm- og kølesystemer. Til sidst overvåger man energiforbruget ved hjælp af den digitale tvilling, og foretage løbende optimeringer for at sikre at ændringerne forbedrer bygningens energieffektivitet over tid.



Figur 12 – Overview of CDT implementation architecture. (El Mokhtari et al., 2022)

Hvis vi sammenligner casestudiet, med trinnene præsenteret i tabellen, kan man se at de deler centrale trin til at forbedre bygningsdriftens effektivitet og energiforbrug. I processen med at optimere energiforbruget i en bygning er det første skridt at indsamle data om bygningens struktur, armaturer og tidligere energiforbrug. Dette gøres ved hjælp af sensorer og eksisterende data, for at skabe et informationsgrundlag. På samme måde udnytter casestudiet om CDT bygningsinformation og realtidsdata til at skabe grundlaget for udviklingen af en digital tvilling. Næste trin involverer udviklingen af en digital tvilling af bygningen. Her simuleres og forudses energiforbruget ved hjælp af den data man har indsamlet. I casestudiet fokuserer der også på udviklingen af den Cognitive Digital Twin (CDT), der bruges dataintegration og simuleringer til at forudsige bygningens adfærd og energiforbrug. Efter oprettelsen af den digitale tvilling, laves en analyse for at identificere områder med højt energiforbrug eller ineffektivitet. Dette trin svarer til den analytiske proces i casestudiet om CDT, der fokuserer på at identificere områder, der har brug for forbedringer. Efter at have identificeret områderne med potentiale for forbedringer, implementeres løsninger såsom opgradering af isolering og armaturer. Dette trin svarer til implementeringen af ændringer i bygningens systemer baseret på output fra CDT'en i casestudiet. Til sidst omhandler begge processer en løbende overvågning og finjustering af energiforbruget. Dette gøres ved hjælp af den digitale tvilling for at sikre, at systemerne fungerer optimalt. Casestudiet om CDT fremhæver denne kontinuerlige finjustering og kontrol af systemerne som en afgørende del af at forbedre bygningsstyring og – drift. Sammenligningen mellem disse trin understreger, hvordan begge tilgange deler lignende processer, der udnytter dataindsamling, modellering, analyse og løbende justering for at forbedre bygningers energieffektivitet og drift.

De følgende tabeller giver et mere præcist overblik over lighederne i to casestudier, der illustrerer anvendelsen af digital tvilling – teknologi i forskellige kontekster. Hver tabel sammenligner trinnene eller processerne i hvert casestudie direkte med de tilsvarende trin i tabellerne om digital tvilling – teknologi, som er udarbejdet i forbindelse med dette speciale. Tabellerne giver indsigt i, hvordan konkrete anvendelser af digital tvilling – teknologi i virkelige scenarier understøtter de generelle principper og trin som er præsenteret i tabellerne for digitale tvillinger.

DIGITALE TVILLINGER I BYGGEBRANCHEN

Tabel 10 – Casestudie 1: Sikkerhed ved by udgravning med digital tvilling.

Trin i casestudiet	Tilsvarende trin i tabellen: Vedligeholdelsesforebyggelse
Identifikation af formål med digital tvilling – teknologi og anvendelse i sikkerhed ved by udgravning	Formål med anvendelse af digital tvilling – teknologi i sikkerheds- og vedligeholdelsesscenarier.
Implementering af multisensoriske løsninger og integration af BIM i by udgravningssikkerhed	Integration af sensorer og datakilder samt udvikling af digital tvilling til forudsigelse og forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer.
Anvendelse af digital tvilling til realtids overvågning og sikkerhedsstyring i udgravninger	Anvendelse af digital tvilling til forudsigelse af fejl og proaktiv vedligeholdelse for at forhindre nedbrud.
Resultater: Præcis estimering af positioner og forbedret sikkerhed ved udgravning.	Resultater: Forbedret nøjagtighed og evne til at guide sikker drift i realtid gennem en digital tvilling.

Tabel 11 – Casestudie 2: Energoptimering i bygningsdrift med Cognitive Digital Twin (CDT)

Trin i casestudiet	Tilsvarende trin i tabellen: Optimering af bygnings energiforbrug
Integration af realtidsdata fra BAS og BIM til CDT-udvikling.	Sammenligning af eksisterende data med realtidsdata for at skabe en digital tvilling af bygningen til analyse og optimering af energiforbrug.
Analyse af digital tvilling for identifikation af ineffektiviteter og forbedringsområder.	Analyse af digital tvilling for at identificere områder med højt energiforbrug eller ineffektivitet og foreslå løsninger til forbedring.
Implementering af løsninger og løbende overvågning af energiforbrug.	Implementering af ændringer baseret på digital tvilling-analyse og kontinuerlig overvågning af energiforbrug for vedvarende forbedring.
Resultater: Optimering af energiforbrug, effektiv vedligeholdelse og forbedring af driftsprocesser.	Resultater: Forbedret energieffektivitet og bæredygtighed gennem implementering af ændringer baseret på digital tvilling-analyse.

4.1.2 Delkonklusion

Introduktionen af digitale tvillinger kan transformere tilgangen til løsninger af komplekse udfordringer i byggebranchen. Nogle af disse udfordringer omfatter ineffektivt energiforbrug, dårlig tidsplanlægning, vedligeholdelsesproblemer, ressourcestyring og kvalitetssikring. Ved at integrere digitale tvillinger i forskellige faser af byggeprocessen, har branchen mulighed for at bruge et værktøj der har potentialet til at identificere, forudsige og løse disse udfordringer på en mere effektiv og bæredygtig måde.

Optimering af energiforbrug har været et område, hvor digitale tvillinger gør det muligt at simulere og analysere forskellige scenarier for at identificere energispild og udarbejde målrettede løsninger. Derudover har digital tvillingteknologien mulighed for at forbedre tidsplanlægning, da der er mulighed for at lave realtidsanalyse, samarbejde og kommunikere blandt forskellige aktører i byggeprocessen. Når det kommer til vedligeholdelsesproblemer, kan disse håndteres igennem en digital tvilling, ved at integrere sensorer og IoT – enheder, for at overvåge bygningens tilstand og forudsige vedligeholdelsesbehov. Derudover kan anvendelsen af digitale tvillinger styrke kvalitetssikringen i byggeprojekter, da simuleringerne kan anvendes til test af design før den fysiske opførsel af bygningen, og man har mulighed for at overvåge byggeprocessen for at identificere afvigelser eller potentielle kvalitetsproblemer.

Til sidst er der dykket ned i to konkrete casestudier, som demonstrerer anvendelsen af digital tvilling – teknologi i forskellige scenarier: én fokuseret på forbedring af sikkerhed ved by udgravning og en anden på optimering af bygningsenergiforbrug. Ved at sammenligne trinnene i casestudierne med trinnene i tilsvarende tabeller om digital tvilling – teknologi, bliver det tydeligt, hvordan de praktiske eksempler implementere og understøtter de trin som er udarbejdet som et forslag. Begge casestudier viser, hvordan dataindsamling, analyse, simuleringsmodellering og finjustering er centrale elementer i at udnytte digital tvilling – teknologi til at forbedre sikkerhed og effektivitet i forskellige kontekster. Sammenligningen fremhæver den brede anvendelighed af digital tvilling – teknologi og dens relevans i byggebranchen, til at forebygge problemer og optimere drift.

Alt i alt, kan implementeringen af digitale tvillinger i byggebranchen have stort potentiale til at forbedre effektiviteten, bæredygtigheden og kvaliteten af byggeprojekter.

5 KONKLUSION

Dette speciale har belyst hvordan den digitale tvilling kan anvendes i byggeprojekter, med fokus på at forbedre effektiviteten, kvaliteten og bæredygtigheden af byggeprocessen. Gennem et systematisk litteraturstudie er det blevet klart at der er et behov for klare standarder og egenskaber for digitale tvillinger i byggeprojekter for at sikre deres effektive bidrag til projektets kvalitet og bæredygtighed.

Digital tvillingeteknologi repræsenterer en omfattende løsning, som oprindeligt blev introduceret i industrier som produktion og rumfart, og er nu blevet introduceret i byggebranchen. Teknologien *"lover"* at forbedre effektivitet, samarbejdet og forudsigelighed i byggeprojekter, men dens fulde potentiale er stadig under udvikling. Én af de centrale udfordringer som specialet fremhæver, er definitionen af, hvornår en digital tvilling bliver til en digital tvilling. Meget af litteraturen anvender begrebet digital tvilling, som et synonym for en BIM – model, og dette skaber forskellige definitioner af hvad en digital tvilling er. Dette skaber forvirring og uoverensstemmelse i implementeringen og forståelsen af teknologiens egentlige omfang og potentiale i byggeprojekterne. Dette er én af de centrale fokuser i dette speciale. Potentialet for digital tvillingeteknologi i byggebranchen er stort, for den kan håndtere flere udfordringer, men der er mange dele der skal falde på plads, før det kan blive til et værktøj der kan anvendes i byggebranchen. Gennem analysen er det blevet klart, at etableringen af klare standarder og egenskaber for den digitale tvilling er afgørende for deres effektive integration i byggeprojekter. Metoden til at definere standarder og egenskaber er baseret på en kombination af eksisterende viden og analyser for at opnå en dybere forståelse af problemstillingerne omkring digitale tvillinger i byggebranchen. Etableringen af klare standarder og egenskaber for den digitale tvilling er ikke kun en teknisk udfordring, men også en proces, der kræver en bred forståelse og samarbejde på tværs af forskellige fagområder. Derudover, er det tydeligt at tilpasningen af digitale tvillinger til specifikke og skiftende krav i byggeprojekter er essentielle og en løsningsorienteret tilgang bør prioriteres. En løsningsorienteret tilgang, der anvender digitale tvillinger til at tackle specifikke udfordringer i byggebranchen, kan imødekomme industriens behov.

Det er vigtigt at anerkende, at dette speciale har visse begrænsninger. Selvom litteraturstudiet har bidraget til en dybere forståelse af digitale tvillinger i byggebranchen, er det vigtigt at understrege at implementeringen af digitale tvillinger ikke er en universalløsning for alle udfordringer i byggebranchen. Der vil stadig være problemstillinger, der ikke kan løses udelukkende gennem anvendelsen af digitale tvillinger. Det er derfor vigtigt at man identificerer kontekster, hvor brugen af digitale tvillinger giver mening og kan bidrage positivt til projektets kvalitet, effektivitet og bæredygtighed. Dette omfatter en vurdering af, hvilke faser af byggeprocessen og hvilke typer af projekter der vil have meste gavn af implementeringen af digitale tvillinger. Samtidig er det vigtigt at understrege, at digitale tvillinger ikke kan erstatte vigtige *"menneskelige"*

beslutningstagere og erfaring i byggeprojekter, men at den kan fungere som et værdifuldt værktøj til at informere og støtte beslutningsprocesser.

Samlet set kan resultaterne fra denne undersøgelse anvendes til at lette implementeringen af digitale tvilling-teknologi i fremtidige byggeprojekter med bæredygtighed som et centralt fokusområde. Det er vigtigt at huske på, at implementeringsprocessen ikke skal betragtes som noget der sker med det samme, men som en løbende tilpasning og forbedring. Ved løbende at evaluere og tilpasse standarderne i overensstemmelse med branchens udvikling, kan en succesfuld implementering af standarder for digitale tvillinger skabe en klarhed om konceptet og hvordan den anvendes, fremmer integrationen, samarbejdet og effektiviteten i byggeprojekter.

Fremtidig forskning og udvikling kan fokusere på teknologisk innovation, datastandardisering og rammer for implementering i byggeprojekter. Disse områder repræsenterer potentielle retninger for at udvide anvendelsen af digitale tvillinger og skabe mere effektive, bæredygtige og brugervenlige løsninger i byggebranchen. Ved løbende at tilpasse og evaluere standarder og teknologiske fremskridt vil implementeringen af digitale tvillinger kunne fremmes, og derved støtte integrationen, samarbejdet og effektiviteten i fremtidige byggeprojekter.

6 REFERENCELISTE

- Almatared, M., Liu, H., Tang, S., Sulaiman, M., Lei, Z., & Li, H. X. (2022). Digital Twin in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Bibliometric Review. *Construction Research Congress 2022: Computer Applications, Automation, and Data Analytics - Selected Papers from Construction Research Congress 2022, 2-B*, 670–678. <https://doi.org/10.1061/9780784483961.070>
- Automationssystemer og integration-Rammer for produktion ved brug af digital tvilling-teknologi-Del 1: Overblik og generelle principper* Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 1: Overview and general principles. (2021). www.ds.dk
- Automationssystemer og integration-Rammer for produktion ved brug af digital tvilling-teknologi-Del 2: Referencearkitektur* Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 2: Reference architecture. (2021). www.ds.dk
- Automationssystemer og integration-Rammer for produktion ved brug af digital tvilling-teknologi-Del 3: Digital repraesentation af produktionselementer* Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 3: Digital representation of manufacturing elements. (2021). www.ds.dk
- Automationssystemer og integration-Rammer for produktion ved brug af digital tvilling-teknologi-Del 4: Informationsudveksling* Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 4: Information exchange. (2021). www.ds.dk
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. In *IEEE Access* (Vol. 7). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- BIM-Dataskabeloner til bygningsobjekter anvendt inden for byggede aktivers livscyklus-Begreber og principper* Building information modelling (BIM)-Data templates for construction objects used in the life cycle of built assets-Concepts and principles (ISO 23387:2020). (2020). www.ds.dk
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. In *Automation in Construction* (Vol. 114). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Boje, C., Hahn Menacho, Á. J., Marvuglia, A., Benetto, E., Kubicki, S., Schaubroeck, T., & Navarrete Gutiérrez, T. (2023). A framework using BIM and digital twins in facilitating LCSA for buildings. *Journal of Building Engineering*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107232>
- Bortolini, R., Rodrigues, R., Alavi, H., Vecchia, L. F. D., & Forcada, N. (2022). Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review. In *Energies* (Vol. 15, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15197002>
- Bygningsinformationsmodeller-Manual for informationsleverance (IDM)-Del 1: Metodik og format* Building information models-Information delivery manual-Part 1: Methodology and format (ISO 29481-1:2016). (2017). www.ds.dk
- Daniotti, B., Masera, G., Bolognesi, C. M., Spagnolo, S. L., Pavan, A., Iannaccone, G., Signorini, M., Ciuffreda, S., Mirarchi, C., Lucky, M., & Cucuzza, M. (2022). The Development of a BIM-Based Interoperable

Toolkit for Efficient Renovation in Buildings: From BIM to Digital Twin. *Buildings*, 12(2).
<https://doi.org/10.3390/buildings12020231>

El Mokhtari, K., Panushev, I., & McArthur, J. J. (2022). Development of a Cognitive Digital Twin for Building Management and Operations. *Frontiers in Built Environment*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.856873>

Enabling an Ecosystem of Digital Twins. (2020).

Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. In *Computers in Industry* (Vol. 123). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>

Gade, P. N., Lauritzen, D. H., Andersen, M., Kjaergaard, T., & Svidt, K. (n.d.). *DIGITAL LITERACY TO DEVELOP LONG-TERM IMPLEMENTATION OF DIGITAL TWINS*.

Hosamo, H. H., Imran, A., Cardenas-Cartagena, J., Svennevig, P. R., Svidt, K., & Nielsen, H. K. (2022). A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry. *Advances in Civil Engineering*, 2022.
<https://doi.org/10.1155/2022/2185170>

Hosamo, H. H., Nielsen, H. K., Alnmr, A. N., Svennevig, P. R., & Svidt, K. (2022). A review of the Digital Twin technology for fault detection in buildings. *Frontiers in Built Environment*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1013196>

IFC (Industry Foundation Classes) til datadeling i bygge-og facility managementindustrien-Del 1: Datamodel Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries-Part 1: Data schema (ISO 16739-1:2018). (2020). www.ds.dk

ISO 23247 - Del 1. (n.d.).

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

Liu, D., Sun, C., Chen, ; Junjie, Asce, A. M., & Liu, L. (2023). *Multisensory and BIM-Integrated Digital Twin to Improve Urban Excavation Safety*. <https://doi.org/10.1061/JCCEE5>

Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K., & Schooling, J. (2020). From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 853, pp. 392–404). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_30

Macchi, M., Roda, I., Negri, E., & Fumagalli, L. (2018). Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 790–795. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.415>

Mêda, P., Calvetti, D., Hjelseth, E., & Sousa, H. (2021). Incremental digital twin conceptualisations targeting data-driven circular construction. In *Buildings* (Vol. 11, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/buildings11110554>

- Nguyen, T. D., & Adhikari, S. (2023). The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310462>
- Nour El-Din, M., Pereira, P. F., Poças Martins, J., & Ramos, N. M. M. (2022a). Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. *Buildings*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/buildings12122155>
- Nour El-Din, M., Pereira, P. F., Poças Martins, J., & Ramos, N. M. M. (2022b). Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. *Buildings*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/buildings12122155>
- Opoku, D.-G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>
- Organisering og digitalisering af information om bygge-og anlægsarbejder, herunder BIM-Informationshåndtering med BIM-Del 1: Begreber og principper Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)-Information management using building information modelling-Part 1: Concepts and principles (. (2018). www.ds.dk*
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/S13643-016-0384-4>
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, 1(6). <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- Salem, T., & Dragomir, M. (2022). Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/app12062928>
- Sawhney, A. (2022). *Digital twins from design to handover of constructed assets*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27036.97921>
- Sepasgozar, S. M. E. (2021). Differentiating digital twin from digital shadow: Elucidating a paradigm shift to expedite a smart, sustainable built environment. In *Buildings* (Vol. 11, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>

7 BILAG

- 7.1 BILAG 1 – UDVÆLGELSE AF STARTSÆT
- 7.2 BILAG 2 – BAGLÆNS SNOWBALLING (FASE 1-3)
- 7.3 BILAG 3 – FORLÆNS SNOWBALLING

8 TABELOVERSIGT

Tabel 1 – Oversigt over udvælgelsesprocessen for søgeord	6
Tabel 2 – Oversigt over hvad de forskellige standarder handler om	22
Tabel 3 – Oversigt over hvordan standardiseringsprocessen kunne se ud	27
Tabel 4 – Tabel over egenskaber for den digitale tvilling	32
Tabel 5 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til optimering af bygningens energiforbrug	36
Tabel 6 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til forbedring af tidsplanlægning i byggeprocessen	37
Tabel 7 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer	38
Tabel 8 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til forebyggelse af vedligeholdelsesproblemer	40
Tabel 9 – Tilgang for udvikling af digital tvilling til kvalitetssikring af byggeprojekter	41
Tabel 10 – Casestudie 1: Sikkerhed ved by udgravning med digital tvilling	46
Tabel 11 – Casestudie 2: Energoptimering i bygningsdrift med Cognitive Digital Twin (CDT)	46

9 FIGUROVERSIGT

Figur 1 – Oversigt over sammensætning af søgeord	7
Figur 2 – Udklip af grænsefladen på Rayyan	10
Figur 3 – Overgang fra BIM til digital tvilling (Kilde: https://cobuilder.com/en/the-digital-twin-a-bridge-between-the-physical-and-the-digital-world/)	14
Figur 4 – Simuleringer	15
Figur 5 – Dataindsamling	15
Figur 6 – Sensorer	16
Figur 7 – Forudsigelsesevne	16
Figur 8 – Oprettelse af en digital tvilling	17
Figur 9 – Niveauer for BIM og den digitale tvilling	19
Figur 10 – Figur over delene i ISO 23247	24
Figur 11 – Framework of intelligent guidance and safety warning system for urban Excavation.(Liu et al., 2023)	42
Figur 12 – Overview of CDT implementation architecture.(El Mokhtari et al., 2022)	44