



DIGITALT BYGGERI: DIGITALE TVILLINGER OG DIGITALISERING I UDFØRELSESFASEN

Forfatter

Emil Henchel Risager

Afleveret 9. januar, 2025



Uddannelse:

Cand. Tech. Byggeledelse og Bygningsinformatik

Projekttitel:

Digitalt byggeri: Digitale Tvillinger og Digitalisering i Udførelsesfasen

Projektperiode:

September 2024 – Januar 2025

Projektomfang:

Kandidatspeciale, 30 ECTS-point

Forfatter:

Emil Henchel Risager

Studienr.: 20230344

Studiemail: erisag23@student.aau.dk

Vejleder:

Kjeld Svidt

Sat med: Barlow og Merriweather

Anslag: 144.000

Normalsider: 60

Sideantal: 81

Antal bilag: 4

Afleveret: 09/01/2025

Synopsis:

Dette kandidatspeciale undersøger hvordan avanceret teknologi, som *building information modeling*, kunstig intelligens og digitale tvillinger kan anvendes under byggeperioden og om det kan være med til at effektivisere byggeprocessen.

For at svare på undersøgelsesspørgsmålet, blev et systematisk litteraturstudie udført. Litteratursøgningen kombineret med *snowballing*-metoden, resulterede i 53 videnskabelige forskningsartikler.

Artiklerne blev analyseret og brugt til at undersøge anvendelsesmuligheder, enablers og barrierer for anvendelsen af DT under udførelsen.

Projektets væsentligste fund er DT viser stort potentiale til at revolutionere og effektivisere byggebranchen. Mange enablers er på plads, men der er flere barrierer der skal overkommes. Mangel på standarder og udfordringer relateret til data skal adreseres, inden DT kan implemeneters optimalt.

Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med kandidatspecialet på, og er produktet af, 4. og sidste semester på cand.tech. i byggeledelse og bygningsinformatik, med speciale i bygningsinformatik, på Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet i efterårsemestret 2024 og afspejler en arbejdsbyrde på 30 ECTS-point.

For at besvare rapportens undersøgelsesspørgsmål, er der blevet foretaget et struktureret litteraturstudie, der undersøger digitale tvillingers anvendelse under udførelsesfasen. Det er blevet belyst hvilke anvendelsesmuligheder der findes, hvilke barrierer der er forbundet med disse og hvilke *enablers* der skal til for at udnytte digitale tvillinger i en tilfredsstillende grad.

En særlig tak skal lyde til min vejleder, lektor på AAU BUILD, Kjeld Svidt, der har guidet og kommet med værdifuld feedback under hele forløbet.

Abstract

This report investigates the potential of Digital Twins in the construction phase of building projects, focusing on their applications, necessary enablers, and existing barriers. Through an analysis of literature and practical examples, the study identifies key findings that highlight DT's transformative potential in the construction industry.

DT offers significant benefits, including real-time monitoring, simulation, and predictive problem-solving, by integrating data from IoT devices, BIM models, and AI algorithms. These features enable improved decision-making, reduced errors, and enhanced collaboration among project stakeholders. However, the implementation of DT faces challenges, such as a lack of standardization, cultural resistance to new technologies, high costs, and legal concerns regarding data ownership and security.

For DT to reach its full potential, the development of open standards, workforce upskilling, strengthened collaboration, and public incentives are essential. Addressing these enablers can promote wider adoption, especially among small and medium-sized enterprises, which often face resource constraints.

The report also positions DT within a larger societal and global context. By streamlining processes and enhancing efficiency, DT has the potential to improve construction practices and foster innovation. Insights from other sectors, such as healthcare and manufacturing, demonstrate DT's versatility and cross-industry relevance.

While DT holds the potential to revolutionize the construction industry, realizing this requires overcoming existing barriers through strategic and inclusive efforts. With coordinated action from public and private stakeholders, DT can address pressing challenges in productivity, sustainability, and digital transformation.

Læsevejledning

Rapportens kildehenvisninger er udført efter Harvard Refrencing System (Harvard Anglia).

Figurer og tabeller er nummeret efter afsnit; f.eks. er den første figur i afsnit 1 nummeret 1.1, den anden 1.2, osv. Forklarende tekst og referencer til figurer og tabeller findes hhv. under og over den specifikke figur eller tabel.

I slutningen af rapporten findes en bibliografi, der indeholder de kilder og referencer der er brugt til at underbygge analyser og viden. Bibliografien oplister bøger, artikler og internetsider, og er ordnet efter forfatter, årstal, titel, osv.

Rapporten følger IMRaD-strukturen; Hver del af har sit eget afsnit, der kan ses her under:

Afsnit (IMRaD)	Underafsnit	Beskrivelse
Introduktion	Motivation	Hvorfor vælge netop dette emne?
	Indledning / problemstilling	Introduktion til problemet
	Problemformulering	Undersøgelsesspørgsmål inklusive underspørgsmål
	Afgrænsning	Afgrænsning af undersøgelsesspørgsmål
	Begreber	Præsentation af centrale begreber som AI, BIM og DT
Metode	Litteratursøgning	Ustruktureret og selektiv litteratursøgning
	Bibliometrisk Analyse	Netværksanalyser af forfattere, citationer, mm.
	Systematisk Litteraturstudie	Grundlag for rapportens resultatafsnit
	PRISMA	Beskrivelse af anvendelsen af PRISMA-rammeværktøjet
	Snowballing	Beskrivelse og resultat af forlæns og baglæns <i>snowballing</i>
Resultater	Anvendelsesmuligheder	Hvad kan vi bruge DT til?
	Enablers	Hvad skal der til for at implementere DT?
	Barrierer	Hvad forhindrer os i at implementere og anvende DT?
Diskussion	Diskussion	Diskussion af rapportens resultater
	Konklusion	Hvad fandt vi ud af
	Perspektivering	Hvorfor er det betydningsfuldt og relevant?
	Fremtidige værker	Forslag til mulige fremtidige værker

Forkortelser

Forkortelse	Dansk	Engelsk
AEC	Bygge- og anlægssektoren	Architecture, Engineering and Construction
AI	Kunstig Intelligens	Artificial Intelligence
BIM		Building Information Model(-ing)
CAD		Computer-Aided Design
CDE	Fælles Datamiljø	Common Data Environment
DT	Digital Tvilling	Digital Twin
FM		Facility Management
IFC		Industry Foundation Classes
IoT		Internet of Things
ML	Maskinlæring	Machine Learning
MV		Machine Vision
SLR	Struktureret Litteraturstudie	Structured Literature Review
SME	Små og Mellemstore Virksomheder	Small and Medium-sized Enterprises

Indholdsfortegnelse

1	INTRODUKTION.....	1
1.1	Motivation	2
1.2	Indledning	3
1.3	Problemformulering	7
1.4	Afgrænsning.....	7
2	BEGREBER	8
2.1	Kunstig Intelligens.....	9
2.2	Building Information Modelling	18
2.3	Digital Tvilling	23
3	METODE	27
3.1	Ustruktureret Litteratursøgning	28
3.2	Bibliometrisk Analyse	28
3.3	Selektiv Litteratursøgning	31
3.4	Systematisk Litteraturstudie.....	31
3.5	PRISMA.....	33
3.6	Snowballing	33
4	RESULTAT	37
4.1	Anvendelsesmuligheder	38
4.2	Enablers	43
4.3	Barrierer.....	49
5	DISKUSSION	54
5.1	Diskussion	55
5.2	Konklusion.....	60
5.3	Perspektivering / Fremtidige Værker	61
6	REFERENCER	62
7	BILAG.....	73

1

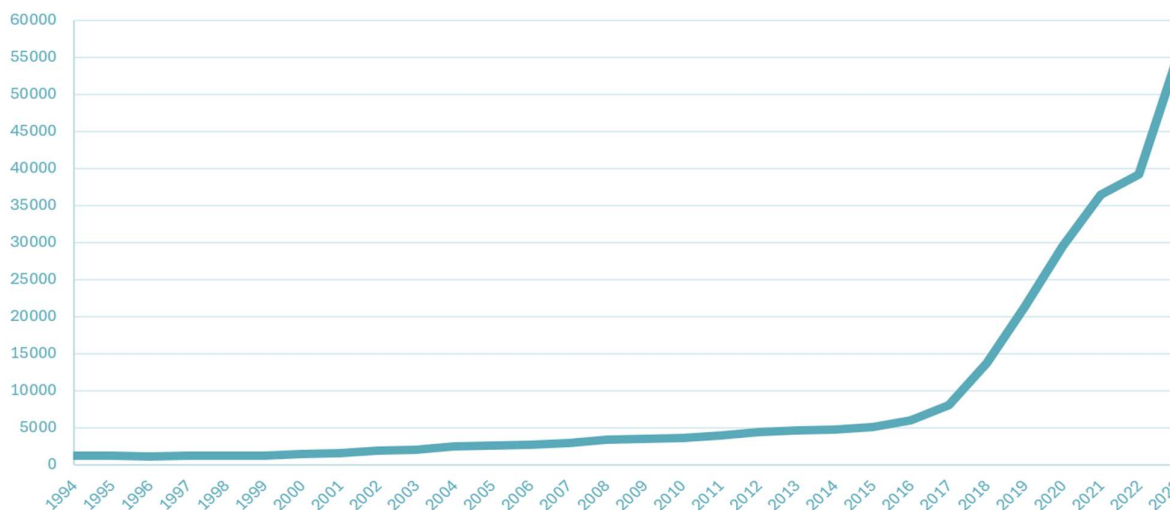
INTRODUKTION

Dette introducerende afsnit præsenterer først motivationen for at vælge at kigge på netop digitale tvillinger og kunstig intelligens, efterfulgt af en mere generel introduktion til udfordringer med effektivisering og digitalisering i byggebranchen. Der bliver berørt emner fra store internationale udfordringer helt ned til specifikke tiltag på nationalt plan. Afsnittet afsluttes med en problemformulering der er rapportens undersøgelsesspørgsmål og udgangspunkt for de efterfølgende afsnit.



1.1 Motivation

Oxford English Dictionary definerer kunstig intelligens (AI) som: *"The capacity of computers or other machines to exhibit or simulate intelligent behaviour"* (Oxford English Dictionary). Denne simulerede intelligens er efterhånden overalt. Vi har selvkørende biler, *smarthomes* der automatisk kontrollerer og balancerer indeklimaet og diverse *chatbots* osv. hvori AI er en integreret del - AI har ændret alle aspekter af vores tilværelse. I det sidste årti har vi set en betydelig spredning af AI-teknologier i de fleste brancher og industrier (Rashid & Kausik, 2024). Teknologien har gennemgået en enorm udvikling og det har gjort os i stand til at løse opgaver, der tidligere var for tidskrævende eller komplicerede (Bonnén & Younan, 2024). AIs anvendelsesomfang og potentialer, er således et område der forskes stærkt i. Selv i byggebranchen, der er notorisk for sin konservative holdning til nye teknologier og udbredte silodannelse, forskes der i hvordan AI kan anvendes (Darko, et al., 2020), hvilket også ses i på tendensen for udgivne publikationer, omhandlende AI i *Architectural-, Engineering- and Construction-industry* (AEC) og *Facility Management* (FM). Udgivelserne er visualiseret i nedenstående Figur 1.1.



Figur 1.1: Publikationer omhandlende AI i AEC & FM-industrien de sidste 30 år. Egen tilvirkning med data fra (SemanticScholar)

Særligt arkitekt- og ingeniørfagene har taget godt imod de nye teknologier. AI har allerede infiltreret tegnestuerne, hvor det, indlejret i vores softwareværktøjer, ændrer måden hvorpå vi projekterer (Campo & Leach, 2022). Samtidig driftes bygninger i stigende omfang med digitale tvillinger (DT), hvori AI hjælper med at træffe energibesparende beslutninger (Lu, et al., 2020), eller forudsige vedligeholdelse og udskiftning af komponenter (Harode, et al., 2024). Hos

entreprenørerne er man dog mere konservative, hvor bl.a. kulturen holder dem fra at omfavne nye teknologier. At tage nye værktøjer i brug ses ofte som en byrde, frem for en fordel.

I fagrelevante dagblade, som Dagens Byggeri og Licitationen, virker det til at der generelt er stor interesse for AI. Mange virksomheder er også allerede klare over hvordan AI kan gavne deres arbejde. Ifølge ConTech Lab er AI allerede moden, billig og let tilgængelig (ConTech Lab, 2024a). Flere større virksomheder er allerede begyndt at implementere forskellige AI-løsninger, mens de små og mellemstore virksomheder (SME) ikke på samme måde er villige til at løbe risikoen med ny teknologi. Det kan virke paradoksalt, da byggebranchens parter ofte er villige til at løbe store risici med f.eks. komplekse byggerier. Og netop byggeriets kompleksitet betyder at mange virksomheder fokuserer deres anvendelse af teknologi på konkrete løsninger på enkelte problemer og glemmer dagligdags- og rutineopgaverne. Mange oplever at køre døde inden de reelt når at høste frugterne.

Med de ting in mente er det interessant at undersøge hvordan man kan anvende og drage nytte af avancerede digitale teknologier som DT under udførelsen.

1.2 Indledning

Mario Draghi, fhv. italienske premierminister og fhv. præsident for den europæiske centralbank, har i sin rapport "*The Future of European Competitiveness*" taget et kritisk kig på Europa og EU; Vi er på vej ind i en periode, hvor befolkningstilvæksten falder, og vækst ikke længere drives af en voksende befolkning. Vækst skal i stedet drives af øget produktivitet. Stiger produktiviteten ikke, kan vi ikke længere opfylde vores mål om at være førende inden for områder som teknologi og klima, og vi vil ej kunne opretholde vores velfærdsstat(er). Byggebranchen spiller en afgørende rolle i både EUs og de nationale økonomier og ifølge Draghi er produktivitetsudfordringen stor; Den eneste måde at løse den på er ved radikale forandringer. (Draghi, 2024a)

Draghi ser digitalisering og digital transformation som et nøgleområde til øget produktivitet. Samtidig kan vi sikre miljømæssige og økonomiske gevinster. I byggebranchen er der betydelige muligheder for innovation gennem digitalisering. (Draghi, 2024b)

For at byggebro mellem den nuværende situation i byggebranchen og dens digitale fremtid, er det nødvendigt at adressere flere centrale udfordringer og muligheder. Digitaliseringen af byggebranchen handler ikke kun om at implementere teknologier, men også om at skabe en kultur af tværfagligt samarbejde og etablere klare rammer for digitalt byggeri, der understøtter både effektivitet og bæredygtighed. En væsentlig fordel ved digitaliseringen er muligheden for at bryde

de traditionelle siloer i byggebranchen og fremme tværfagligt samarbejde. Byggeprojekter kræver i dag et tæt samarbejde mellem arkitekter, ingeniører, entreprenører og leverandører, og digitalisering kan være en nøgelfaktor til at koordinere og effektivisere dette samarbejde. Eksisterende værktøjer som BIM giver mulighed for at skabe og dele information. Ved at samle den information i en fælles platform eller fælles datamiljø (CDE) for projektet, kan alle aktører samarbejde digitalt og tværfagligt. Kan svaret på en sådan platform være DT?

Digitalisering er en tendens vi allerede ser i alle industrier. I daglig tale kaldes det den fjerde industrielle revolution eller *industry 4.0*. Revolutionen er i fuldt flor og er med til at skabe digital udvikling i alle aspekter af samfundet. Byggebranchen har dets egen term kaldet *Build- eller Construction 4.0*, der opstod i 2017 (Teknologisk Institut, u.d.). Formålet med Build 4.0 er at anvende forskellige digitale teknologier, til at skabe digitalisering og digital transformation. Det skal være med til at øge effektiviteten og produktiviteten, træffe bedre beslutninger og øge kvaliteten og sikre at byggeriet udvikler sig i en mere bæredygtig retning. Anvendelsen af digitale teknologier som BIM, AI og DT, samt udbredelsen af digitale systemer som IoT, er alle en del af *Build 4.0*.

I Danmark er erhvervslivet og den offentlige sektor langt fremme i den digitale udvikling, sammenlignet med andre lande. Den digitale omstilling er i fuld gang, og digitale teknologier udvikles konstant. Selvom byggebranchen er blandt de mindst digitaliserede i Danmark, er der ikke længere tvivl om hvorvidt der skal investeres i digitale værktøjer, men hvordan vi skal implementere dem. Brancheorganisationer, som Molio m.fl., arbejder aktivt med det digitale byggeri og har digitaliseringsudvalg, der er med til at sætte præg på den digitale udvikling. (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019)

Byggebranchen har i lang tid haft en ringe udvikling i produktivetsniveauet, sammenlignet med andre brancher, såsom industri og landbrug. Bedre udnyttelse af digitale værktøjer, og en gennemgribende digitalisering af branchen, kan være med til at vende kurven og dermed skabe øget produktivitet og vækst. Byggebranchen er en afgørende del af den danske økonomi og digitaliseringen af denne, er derfor et væsentligt skridt, ikke bare for branchen, men samfundet som helhed (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019).

I ethvert byggeprojekt, generes der hver dag enorme mængde data; Specielt i design- og projekteringsfaserne. Dette data bør anvendes og udnyttes, under udførelsen, til at effektivisere byggeprocessen og skabe nye løsninger og metoder for projektstyring og -ledelse. Der er eksempler

på at der kan brydes med traditionelle metoder fra den analoge verden, og i stedet tænke tværfagligt i et digitalt univers. Flere virksomheder er allerede langt fremme og kan ses som digitale frontløbere, der har været med til at sætte udviklingen i gang i Danmark. Øget samarbejde på tværs af fag og tillid er en afgørende del i at udvikle byggeriet og digitale værktøjer kan binde den fragmenterede værdikæde tættere sammen. Ved at anvende digitale værktøjer kan man f.eks. tidligt i projektet tilrettelægge byggeprocessen og sikre at de næste i værdikæden har adgang til den rette data. Allerede i dag anvendes IKT og BIM i de fleste af byggeriets processer. Men når man kommer ud på byggepladsen er det en anden historie. På byggepladsen er rettidig kommunikation afgørende, og det kan fremmes ved at anvende forskellige digitale løsninger (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019).

For at sikre, at digitaliseringen ikke skaber mere kompleksitet eller forvirring i byggebranchen, er det nødvendigt med klare reguleringer og standarder. Etablering af en fælles digital infrastruktur og standardisering af formater og metoder er afgørende for at skabe et stabilt og effektivt digitalt fundament. En måde at imødekomme det ønskede stigning af digitalisering, er ved at følge Transport-, Bygnings- og Boligministeriets Strategi for Digitalt Byggeri, der indeholder flere indsatsområder:

(1) *Bedre udnyttelse af digitale værktøjer*, der bl.a. går ud på at formidle *best practices*, vejlede i brugen af digitale værktøjer og klarlægge de juridiske rammer for det digitale byggeri. Indsatsområdets formål er at sikre tilfredsstillende udnyttelse af digitale muligheder og igennem øget anvendelse øge produktiviteten og reducere omkostninger. (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019)

(2) *Åbne formater og fælles standarder*, der bl.a. går ud på at have neutrale og åbne filformater samt sikre en dansk BIM-standardisering. Formålet med indsatsområdet er at udbrede og sikre at byggeriets aktører har et fælles grundlag til metoder og processer for anvendelsen af digitale værktøjer. (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019)

(3) *Bedre udnyttelse af data*, der bl.a. går ud på at levere data til at drifte bygningen og indsamle mere data gennem f.eks. sensorer. Formålet med indsatsområdet er at vi skal være bedre til at udnytte BIM-modellens data i alle stadier af bygningens livscyklus. Ved at udnytte dataet mere effektivt, kan vi binde den fragmenterede værdikæde sammen og sikre at alle aktører har de rette data på det rette tidspunkt. (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019)

(4) *Digitale kompetencer til hele værdikæden*, der bl.a. går ud på at rådgive om brugen af digitale værktøjer, løfte de digitale kompetencer for især SMV'er og forske mere i det digitale byggeri. Digitale arbejdsmetoder bliver en stadigt større del af byggebranchen, og formålet med indsatsområdet er at øge virksomhedernes kendskab og kompetencer. Det vil sikre øget produktivitet og bedre konkurrenceevne. (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019)

(5) *Bæredygtig byggeri gennem digitalisering*, der bl.a. går ud på at arbejde med bæredygtighed i digitale værktøjer tidligt i projekteringen. (Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019)

Digitaliseringen vil understøtte en mere industrilignende produktion og give værdi for alle i værdikæden. Digitale 3D-bygningsmodeller er allerede vidt udbredt og bidrager til øget kvalitet og effektivitet i alle faser af byggeriet. Det er dog langt fra altid, at al dataet fra BIM-modellen følger med ind i udførelses- og driftsfasen. En gennemgribende digitalisering, vil betyde at en bygning vil få en DT, der afspejler den reelle bygning, som et digitalt objekt, gennem hele dens livscyklus. Der findes teknologier, der ved hjælp af laserscanninger, kan sammenligne det udførte arbejde med det planlagte. Men for at det kan lade sig gøre, skal BIM-modellen beriges med data, for dermed at skabe en DT.

Et andet område af digitaliseringen der er i rivende udvikling er AI. Byggeriets Modenhedsmåling viser at 21% af danske byggevirksomheder allerede anvender AI. Det er fire gange flere end sidste års måling (ConTech Lab, 2024b). Det kunne tyde på at mange virksomheder ser potentiale i AI-teknologier; De er let tilgængelige, lette at anvende og kræver ikke ekspertviden for at komme i gang. AI og andre avancerede digitale teknologiers potentiale kan ikke ignoreres. Som nævnt viser byggeriets modenhedsmåling, at en stigende andel af danske byggevirksomheder allerede anvender AI. Udbredelsen kan yderligere accelerere optimeringen af byggeprocessen på mange niveauer. F.eks. kan AI-algoritmer bruges til at forudsige materialeforbrug, identificere potentielle forsinkelser, optimere ressourceudnyttelsen mm. Med AI vil byggebranchen kunne levere mere præcise og effektive løsninger, som reducerer omkostninger og forbedrer kvaliteten af byggeriet. AI vil også gøre det lettere at håndtere store datamængder og hjælpe med at analysere og bruge dataene til at træffe bedre beslutninger (ConTech Lab, 2024a).

1.3 Problemformulering

Byggebranchen er blandt de mindst digitaliserede brancher i Danmark. Selvom der er udviklet en række digitale værktøjer og teknologier der kan anvendes for at opnå øget effektivitet og produktivitet, er branchen relativt langsom og ukoordineret i tilegnelsen af disse værktøjer (Indenrigs- og Boligministeriet, 2021). Derfor vil jeg gerne undersøge hvordan man kan anvende avancerede teknologier som DT under udførelsesfasen. Rapportens overordnede undersøgelses-spørgsmål lyder derfor som følger:

Hvordan kan digitale tvillinger anvendes til at effektivisere udførelsesfasen, hvilke enablers skal der være til stede, og hvilke udfordringer er der forbundet med anvendelsen i praksis?

Samt flere underspørgsmål, der skal være med til at facilitere forståelsen for DT som koncept samt potentiale og anvendelse:

- S1: Hvad er den historiske udvikling og anvendelse af AI, BIM og DT?
- S2: Hvilke anvendelsesmuligheder er der for DT i udførelsesfasen?
- S3: Hvilke *enablers* skal der til for at anvende DT?
- S4: Hvilke barrierer er der for anvendelsen af DT?
- S5: Hvordan skal DT anvendes i en dansk kontekst?

1.4 Afgrænsning

Rapporten vil være afgrænset til bygninger og tilknyttede byggepladser, og altså ikke anlægsarbejder o.lign.

Selvom empirien stammer fra, og derfor har fokus på, andre lande end Danmark, vil denne rapport undersøge anvendelsen i en dansk kontekst. Danmark er i mange henseender langt fremme med digitalisering af byggebranchen, og derfor skal dette næste skridt i digitaliseringen også ses i denne sammenhæng.

2

BEGREBER

For at forstå hvordan vi kan implementere avancerede teknologier og de potentielle gevinster der er ved at anvende dem, kræver det en grundlæggende forståelse for anvendelsen hidtil. De centrale begreber AI, BIM og DT vil blive præsenteret for at give læseren et indblik i disse teknologier. For hvert begreb er der en beskrivelse af udviklingen, den historiske anvendelse og betydning, samt hvordan de anvendes i byggebranchen i dag.

Begrebsafsnittet svarer dermed på underspørgsmål S1.



2.1 Kunstig Intelligens

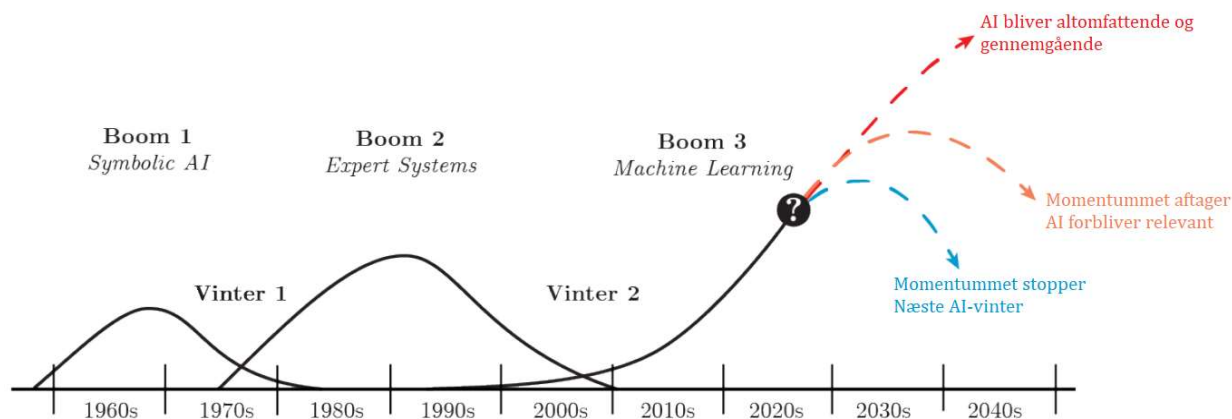
Lige siden den første programmerbare computer, har folk undret sig over om en maskine mon kunne blive intelligent. Ada Lovelace (1815–1852) forudsagde at en maskine ved hjælp af symboler kan processere ”alle emner i universet” (Lovelace, 1843). Maskinen hun havde i tankerne, den såkaldte *analytical engine*, blev aldrig færdig, og der skulle gå over 100 år før vi var vidne til en lignende maskine. Den første moderne computer stod færdig i 1948 (Boden, 2016).

”Fortællinger om skabelsen af en maskine der har menneskelige kvaliteter, har længe været et fascinerende emne i science fiction; Nu er vi vidne til skabelsen af en maskine [...] der er i stand til at opfatte, genkende og identificere dens omgivelser, uden menneskelig indgriben eller kontrol.”

Sådan sagde den amerikanske AI-pioner Frank Rosenblatt (1928–1971) i 1958. Det skildrer tydeligt den optimisme der var fremherskende i de tidlige AI-dage (Rosenblatt, 1958), men selvom vi er nået langt siden, er vi stadig ikke helt i mål endnu.

Oprindeligt skulle AI løse problemer der kan beskrives af et sæt formelle matematiske regler. Sådanne problemer er udfordrende for mennesker, men lige til for maskiner. Opgaverne har siden skiftet karakter og den virkelige udfordring for AI er at løse opgaver der er lette for mennesker, men svære at beskrive med regler, som f.eks. sprog- eller billedgenkendelse, og der forskes i hvordan AI kan imitere den menneskelige intelligens (Goodfellow, et al., 2016). AI bliver stadig mere udbredt og er i dag et spirende felt, med mange praktiske anvendelser og forskellige forskningsområder (Goodfellow, et al., 2016).

I de følgende underafsnit gennemgås AIs udvikling og anvendelse gennem tiden. Afsnittene er opdelt efter ”AI Booms” og ”AI-vintre”. En tidslinje for disse kan ses på nedenstående Figur 2.1



Figur 2.1 De tre AI "Booms", inspireret af (TSRML, 2022). Kurvens højde viser finansiering og interesse for AI

2.1.1 Begyndelsen

1936 Alan Turing (1912–1954) var en britisk matematiker og logiker. Han forsøgte, i sin berømte artikel *On Computable Numbers*, at løse det såkaldte *halting problem*, der ved hjælp af logik skulle kunne bestemme om et computerprogram, ved et givent input, forsætter uendeligt eller stopper (*halts*) på et tidspunkt. Turing udviklede en maskine, *Turing Machine*, der repræsenterede en matematisk model for om et argument er beregneligt – altså om det kan løses af en algoritme. Turing demonstrerede at det er *umuligt* at udvikle et program, der kan afgøre det. Beviset har haft betydning for forståelsen af maskiners begrænsninger, da der altid vil være problemer de ikke kan afgøre. Beviset kaldes *Alan Turings Proof* (Turing, 1936)

1944 Menneskehjernen består af milliarder af celler, kaldet neuroner, der tillader hjernen at behandle information. Forskerne Warren McCulloch (1898–1969) og Walter Pitts (1923–1969) introducerede en matematisk formulering af biologiske neuroner og skabte dermed grundlaget for *kunstige* neuroner. Kunstige neuroner efterligner deres biologiske lige, ved at modtage et input, udføre en simpel beregning og udsende et output. Kunstige neuroner er de grundlæggende enheder i et neuralt netværk, der gennem komplekse mønstre, kan behandle data og beskrive informationsstrømmen gennem et system. (McCulloch & Pitts, 1943)

Der findes et utal af variationer af neurale netværk (se bilag 1), men alle består af inputlag, skjulte lag og outputlag. Inputlaget er der hvor dataet bliver modtaget og afleveres til det næste lag. I det skjulte lag bliver dataet bearbejdet og der dannes mønstre heraf. Jo flere skjulte lag der findes, des mere komplekst kan det blive. Outputlaget giver det endelige svar. (Bonnén & Younan, 2024)

1947 Transistoren er en af de mest fundamentale opfindelser inden for computere. Den fungerer som en forstærker for signaler og kan tænde eller slukke for forbindelser i elektroniske kredsløb. De fungerer i princippet som binære værdier (0 eller 1) og er derfor en vigtig del i logiske kredsløb. Opfindelsen af transistoren har været afgørende i udviklingen af moderne computere, da det er dem der reelt tillader computeren at udføre logiske beregninger.

I dag er der flere milliarder af transistorer på én enkelt mikrochip.

1950 Turing-testen er en af de bedst kendte koncepter inden for kunstig intelligens og stammer fra den førnævnte Alan Turings berømte artikel, *Computing Machinery and Intelligence*, fra 1950. Her stiller han spørgsmålet ”kan maskiner tænke?”. I stedet for at fokusere på *tænkning*, udviklede han en test, *Turing Test* eller *Imitation Game*, til at vurdere maskiners intelligens. Testen går i bund og

grund ud på, at vurdere intelligens gennem sproglig argumentation. Testen foretages af én maskindeltager, én menneskelig deltager og én menneskelig dommer. De to deltagere fører en samtale, og det er dommerens opgave at afgøre hvem af de to der er en maskine. Hvis maskinen imiterer mennesket så godt, at det ikke er muligt at afgøre, er testen bestået og maskinen betragtes som intelligent. (Turing, 1950)

Testen modtog senere kritik af filosofen John Searle (1932-), der argumenterer for at en computer ikke har ægte forståelse for samtalen, men blot leverer de rigtige svar. Searle fremsatte sit *Chinese Room Argument*, der går ud på at der sidder en person i en lukket kasse, der ikke forstår kinesisk, men har adgang til et sæt instrukser der gør at vedkommende kan svare på spørgsmål. Udenfor kassen sidder en kinesisktalende person, der stiller spørgsmål ved at indsætte kinesiske tegn igennem en sprække i kassen. Personen inde i kassen kan, ved hjælp af sine instrukser, svare på spørgsmålet uden at forstå sproget. På samme måde argumenterer Searle for at maskinen ikke forstår betydningen (semantikken) i samtalen, men blot symbolerne (syntaksen). (Stanford, 2004)

1955-1956 Allen Newell (1927-1992) og Herbert A. Simon (1916-2001) udviklede en "tænkende maskine" kaldet *Logic Theorist*. Det er det første program udviklet til at foretage automatisk ræsonnement, og er derfor beskrevet som det første AI-program. Det var udviklet til at bevise matematiske teoremer, fra *Principia Mathematica*, ved hjælp af heuristik og logik (*symbolic logic*). Programmet var i stand til at løse 38 ud af 52 teoremer og fandt endda en ny, mere elegant løsning på ét dem. Det demonstrerede at maskiner ikke blot kan følge forudbestemte trin men udvikle nye løsninger. Den store succes var startskuddet på det første AI-boom. (Gugerty, 2006)

2.1.2 Første boom

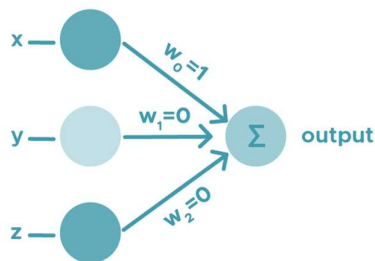
Første boom fandt sted i 1950'erne og -60'erne og var præget af stor optimisme og tro på at computere kunne efterligne menneskelig intelligens. Teknologien var især *symbolic AI*, symbolsk manipulation eller regelbaseret AI, og blev drevet af succesen med bl.a. *Logic Theorist*

1956 Dartmouth Workshop, arrangeret af John McCarthy (1927-2011), en af de mest betydningsfulde personer i AI-historien, og med deltagelse fra datidens førende forskere inden for kognition og datalogi, Marvin Minsky (1927-2016), Ray Solomonoff (1926-2009), Oliver Selfridge (1926-2008) m.fl. Det var ved denne samling at termen, *artificial intelligence*, første gang blev brugt formelt og beskrevet. Hypotesen for workshoppen var at "ethvert aspekt af læring eller anden form

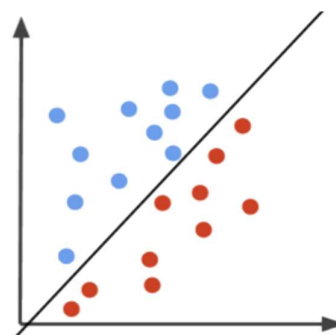
for intelligens, kan beskrives så præcist, at en maskine kan skabes til at simulere det". Workshoppen betragtes i dag som starten på AI som eget forskningsfelt. Det markerede overgangen til at intelligens er noget der kan beskrives og efterlignes på en systematisk måde og man begyndte at undersøge hvordan maskiner kan efterligne menneskelig tankegang. (McCarthy, et al., 1955)

1957 Perceptronen er udviklet af Frank Rosenblatt og er den simpleste neuron (se år 1944) der findes (se Figur 2.3). Den fungerer som en binær klassifikator, ved at afgøre om et input hører til én klasse eller en anden (0 eller 1). Hver input tildeles en vægtning og sammenlignes med en tærskelværdi. Hvis outputtet overskrider tærskelværdien, får den værdien 1, ellers 0 (se Figur 2.2). Perceptronen "lærer" ved at justere på vægtningen; Hvis outputtet er forkert foretages ændring i vægtningen. Justeringen finder sted over mange gentagelser og falder under kategorien *supervised learning*. Rosenblatt udviklede en fysisk prototype, *Perceptron Mark I*, der blev brugt til billedgenkendelse og kan ses som forfaderen til *machine vision*. (Rosenblatt, 1958)

Perceptronen er en af de tidligste modeller for AI og *machine learning* (ML) og er byggestenen i moderne komplekse neurale netværk.



Figur 2.3 Perceptron



Figur 2.2 Illustration af fordeling af outputs efter tærskelværdi

1958 LISP, *List Processing*, udviklet af John McCarthy (fra Dartmouth Workshop), er et af de ældste programmeringssprog der findes, og det første udviklet specifikt til AI. Sproget blev skabt for at understøtte forskning i symbolsk manipulation, relateret til AI, da det ikke var muligt på det tidspunkt. Sproget lagde fundamentet for funktionel programmering og inspirerede til skabelsen af flere andre programmeringssprog. Det er stadig i brug i dag, især inden for udvikling af komplekse algoritmer og avancerede AI-systemer. (ScienceDirect)

1959 Arthur Samuel (1901-1990) var med sin artikel "Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers" en af de første til at erkende at computere kan lære og forbedre sig over tid, uden eksplicit programmering til hver opgave. Samuel introducerede termen *machine learning* (ML) til

at beskrive netop den form for læring. I artiklen beskrives to former for læring (1) gennem neurale netværk, der kan bruges til generelle formål, og (2) gennem et højt organiseret netværk, der er designet til kun at lære specifikke ting. Samuels eksperimentelle ML-program, til at spille dam, er bygget på den sidste. (Samuel, 1959)

1965 DENDRAL-projektet blev udviklet ved Stanford University til at assistere i analysen af molekulære strukturer. Det er det første program, der i stor skala, forsøgte at anvende detaljeret opgavespecifik viden, ekspertviden, til at efterligne beslutningsprocessen hos mennesker og automatisk nå konklusioner. Sådanne programmer kaldes eksperter-system. Selvom anvendelsen af DENDRAL for kemikere har været begrænset, bliver AI-delen betragtet som en af de tidligste succesfulde anvendelser i praksis. (Lindsay, et al., 1993)

Et eksperter-system består af to dele: (1) en vidensdatabase, der bygger på viden fra menneskelige eksperter, og er ofte opbygget efter hvis-så (*if-then*) regler. Og (2) en inferensmotor, der kan fortolke og analysere viden fra databasen. Nyere eksperter-systemer inkorporerer heuristik og evnen til at lære fra erfaring. (Britannica)

1966 ELIZA er udviklet af Joseph Weizenbaum (1923–2008) og var et projekt, hvor en computer kunne simulere en samtale, med et menneske, gennem et chat-baseret program. Programmet benyttede *natural language processing* (NLP) til at forstå mønstre i almindelige samtaler, og blev drevet af regler for tekstbehandling, snarere end ægte intelligens (Weizenbaum, 1966). Weizenbaum designede ELIZA for at vise hvor let mennesker tilskriver menneskelige værdier til computere. Weizenbaum blev senere selv en stor kritiker af overafhængighed af AI i personlige og etiske sammenhænge.

Programmet var startskuddet på forskning inden for NLP og *conversational* AI og er forfaderen til de *chatbots* vi kender i dag.

1969 Tolv år efter perceptronen, skrev Marvin Minsky og Seymour Papert (1928–2016) bogen *Perceptrons*, der er deres analyse af perceptronens evne til at løse specifikke opgaver. Bogen fik perceptronen til at fremstå skidt, resulterende i at forskningen vendte sig væk fra emnet.

Bogen var den første systematiske undersøgelse af parallelisme i beregninger og markerede et vendepunkt for AI-forskning, hvor der blev vendt tilbage til ideen om at intelligens kan opstå fra neurale netværk. (Minsky & Papert, 1969)

1973 Den britiske regering ville evaluere forskningsfeltet og den praktisk anvendelse af AI og den britiske forsker James Lighthill (1924–1998) blev udvalgt til at foretage evalueringen. Rapporten der hed "*Artificial Intelligence: A General Survey*", i daglig tale Lighthill-rapporten, var meget kritisk overfor forskningen og havde et pessimistisk syn på AI. Rapporten fastslår at selvom AI kunne fungere inden for begrænsede rammer, var den meget lidt skalerbar og ude af stand til at løse realistiske problemer (Lighthill, 1973). John McCarthy og Marvin Minsky, var stærkt uenige med Lighthill. De hævdede at rapporten undervurderede de teoretiske fremskridt og fokuserede for snævert på den kortsigtede anvendelse. Nogle forskere mener det hæmmede udviklingen i årtier, mens andre mener det hjalp feltet mod et mere realistisk mål.

Konsekvenserne af rapporten var en betydelig reduktion i forskningsmidler, særligt i Europa. Reduktionen ledte til at flere AI-projekter blev stoppet og vi gik ind i den første AI-vinter, hvor vi så et markant fald i AIs udvikling.

Set i retrospekt, har rapporten skabt en mere pragmatisk tilgang til AI, med fokus på praktisk anvendelse. Samtidig står den som en påmindelse om at teknologiske fremskridt kræver tålmodighed og kontinuerlig finansiering.

2.1.3 Første vinter

Den første AI-vinter var en periode hvor interessen, finansieringen og særligt den hidtil herskende optimisme faldt markant. Perioden blev udløst af en kombination af flere parametre; AIs manglende evne til at opfylde de høje forventninger der blev skabt i løbet af det første boom, særligt på baggrund af Lighthill-rapporten, og en klar teknisk begrænsning, da datidens hardware ikke var kraftfuldt nok.

1979 Stanford Cart, fra Stanford University, var en af de første succesfulde selvkørende køretøjer. Den blev udviklet i løbet 60'erne og 70'erne og var udstyret med et enkelt kamera og en computer til at analysere billederne. I 1979 opnåede den en stor bedrift, da den navigerede, langs en 20 meter lang sti med forhindringer, helt autonomt. Turen tog fem timer, da den kun bevægede sig få centimeter ad gangen. Stanford Cart har haft betydning for *computer vision* og autonome systemer.

1979 Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI) grundlægges med formålet om at fremme forskning inden for AI. Samtidig undersøger de etiske og samfundsmæssige spørgsmål relateret til brugen af AI, for at sikre forsvarlig anvendelse af teknologien.

2.1.4 Andet boom

Det andet AI-boom fandt sted i 1980'erne og blev drevet af fremskridt inden for hardware, ekspertsystemer og en øget kommerciel interesse for anvendelsen af kunstig intelligens.

1980 Det første kommercielle *expert system*, XCON (expert configurator) også kaldet R1, var et banebrydende ekspertsystem, udviklet af John P. McDermott (19xx-) i slutningen af 1970'erne og starten af 1980'erne. Formålet med systemet var at automatisere konfigurationen af komplekse computersystemer, der var en tidskrævende proces udført af mennesker. Det er udviklet ved hjælp af regelbaseret AI bestående af hundredvis af regler og hvis-så sætninger. (McDermott, 1980)

1982 Hopfield Network er en type neuralt netværk der har haft stor betydning i forskning omkring *hvordan* neurale netværk fungerer og hvordan feedback-processer kan bruges til beregning. Det har inspireret udviklingen af moderne neurale netværk til f.eks. mønstergenkendelse og optimering af processer.

1986 Backpropagation er en ML-algoritme der bruges til at træne neurale netværk. Det er en metode til at optimere vægtningen i neurale netværk, ved at minimere forskellen mellem forudsagte og faktiske resultater, og er kernen i hvordan maskiner kan løse komplekse mønstre ud fra data. Det er en af de mest transformative algoritmer i AIs historie og udgør fundamentet for mange moderne AI-applikationer.

2.1.5 Anden vinter

Den anden AI-vinter er en periode i slutningen af 1980'erne og begyndelsen af 1990'erne, hvor forskningen oplevede en markant nedgang i finansiering, interesse og resultater. Nedgangen skyldtes urealistiske forventninger, skuffende resultater og teknologiske begrænsninger, hvilket førte til en bred skepsis over for AI-forskningens relevans. Der blev dog stadig videreudviklet på bl.a. neurale netværk og ML under vinteren.

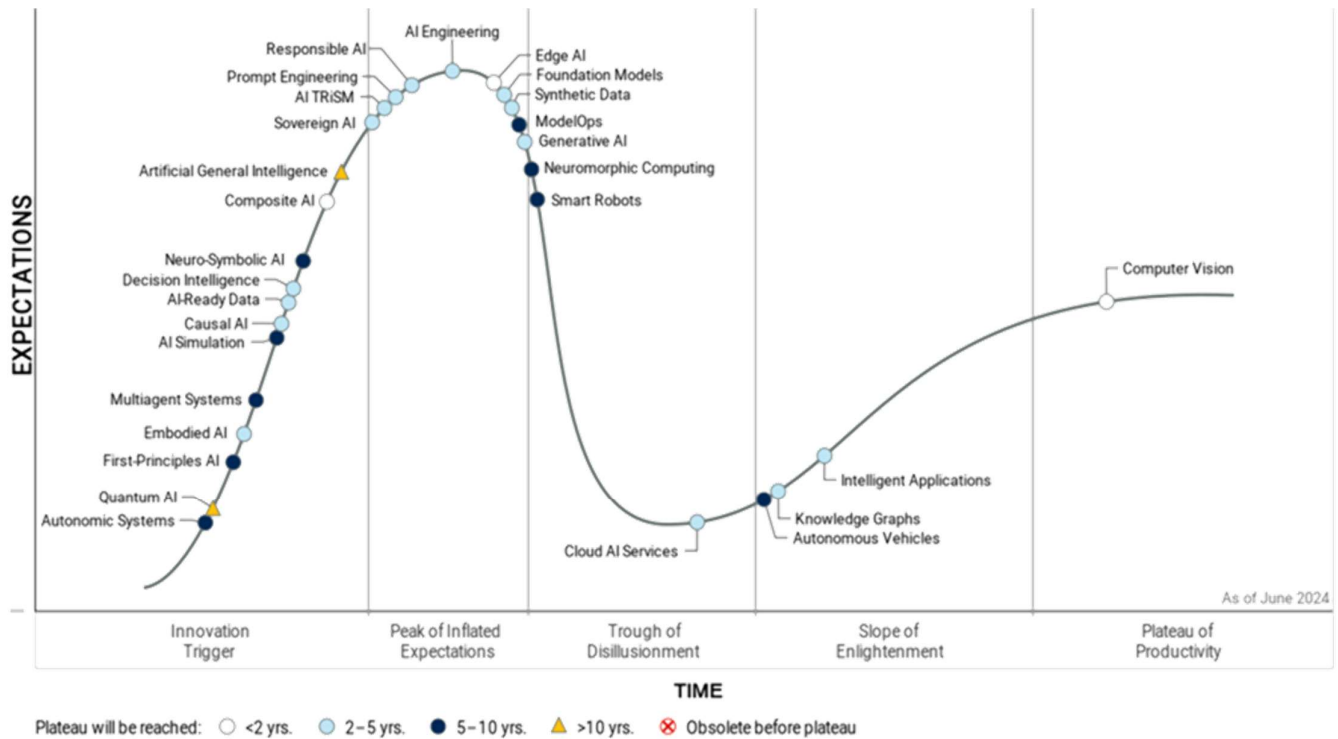
1997 DeepBlue vs. Kasparov: Et ikonisk øjeblik i historien. DeepBlue er udviklet af IBM og er en supercomputer specialiseret i at spille skak. DeepBlue er udviklet over flere år og spillede i den periode mod den daværende verdensmester i skak Garry Kasparov (1963-) et par gange. I 1997 slog DeepBlue Kasparov, og markerede et øjeblik i historien hvor maskine kunne overgå mennesker i intellektuelle discipliner.

2.1.6 Tredje boom til i dag

Det tredje AI-boom betegner den eksplosive vækst og udvikling i AI, der begyndte i 2010'erne og fortsætter ind i 2020'erne. Det er karakteriseret ved en kombination af teknologiske gennembrud, eksplosion i data, kommerciel succes og udbredelsen af AI i næsten alle aspekter af moderne liv.

- 2012** AlexNET er en *deep learning* model der revolutionerede *computer vision*. Det demonstrerede for første gang *deep learnings* overlegenhed i billedgenkendelse. AlexNET blev en katalysator for det tredje AI-boom
- 2014** *General Adversarial Net* (GAN) er en ML-model og er kendt for evnen til at generere data som billeder og tekst. Det fungerer ved at anvende to neurale netværk, hvor det ene (generatoren) generer data ud fra tilfældig støj, og det andet (diskriminatoren) skal sammenligne og bedømme det generede data med ægte data fra et træningssæt. Generatoren bliver ved med at generere data indtil diskriminatoren ikke kan skelne det fra det ægte data.
- 2017** *Generative Pre-trained Transformer* (GPT) er en type *Large Language Model* (LLM) der anvendes i *Generative AI*. Det er prætrænet på enorme datasæt (fra internettet) og kan finjusteres til specifikke opgaver; f.eks. til anvendelse i byggeriet. Giver AI mulighed for at generere bl.a. tekst og billeder og fortolke data mm. Man skal dog være opmærksom på at den kan genere overbevisende, men usande, oplysninger.
- 20??** *Artificial General Intelligence* (AGI) er en endnu hypotetisk type AI der kan udføre enhver intellektuel opgave på samme niveau som et menneske. Det adskiller sig fra nuværende AIs, der ofte er specialiserede til at løse specifikke opgaver, ved at være mere generel.
- 20??** *Artificial Super Intelligence* (ASI) er også en hypotetisk type AI kan udføre enhver intellektuel opgave, men overgår mennesket på alle områder. Den skal kunne løse problemer der endda ligger udenfor den menneskelige erkendelse og vil kunne udvikle nye teknologier uden menneskelig vejledning eller indgriben.

På nedenstående Figur 2.4 ses Gartners forventninger til forskellige AI-teknologier. Flere af de overstående termer findes et sted på kurven.



Figur 2.4 Gartner Hype Effect der viser forventningen til AI-teknologiers formåen over tid (Gartner, 2024)

2.2 Building Information Modelling

Begrebet "BIM" kan forstås på flere måder; Det kan referere til selve 3D-modellen, *Building Information Model* eller processen eller arbejdsmetoden med at skabe modellen og dertilhørende information, *Building Information Modelling*. Oftest anses BIM dog som en proces. Simplificeret er BIM en digital repræsentation af de fysiske og funktionelle karakteristika af en bygning (DTU, u.d.). I løbet af processen anvendes der avancerede *computer-aided design* (CAD)-værktøjer og andet software til at skabe, opdatere og håndtere information i en digital model af en bygning. BIM-modellen er således én enkelt omfattende samling af bygningsinformationer. BIM-processen integrerer struktureret tværfaglige data, så bygningen repræsenteres i alle stadier af dens livscyklus, lige fra projektering, til udførelse og drift. BIM er grundlaget i den digitale transformation af byggebranchen.

I de følgende underafsnit gennemgås BIMs udvikling og anvendelse gennem tiden. Afsnittene er opdelt efter årti og indeholder beskrivelser og milepæle i BIMs historie. Afsnittene bygger bl.a. på Gobesz (2020) artikel *The Roots of BIM* (Gobesz, 2020) samt forskellige brancheorganisationer og BIM-blogs.

2.2.1 1960'erne

De første koncepter for objektbaseret design i arkitekturen dukkede op i starten af 60'erne, hvor visionære ingeniører som Charles Eastman (1940–2020) og Douglas C. Engelbart (1925–2013) (der også er opfinderen af computermusen), begyndte at udforske ideen om at repræsentere bygningsrelateret information som i tre dimensioner, hvilket banede vejen for udviklingen af BIM. Især Engelbart spillede en afgørende rolle i formuleringen af de tidlige BIM-koncepter, hvor ideer om at integrere data i digitale modeller for at forbedre design, konstruktion og styring af byggerier opstod. I løbet af årtiet blev fundamentet til det væsentlige konceptuelle grundlag, for en mere omfattende tilgang til styring af bygningsrelateret information, lagt. Det markerede hermed begyndelsen på hvad der ville blive en fundamental og gennemgribende transformation af byggebranchen. Herunder er en liste med vigtige milepæle fra årtiet:

- 1962** Ivan Sutherland (1938–) skabte det revolutionære tegneprogram *Sketchpad*, der betragtes som et af de mest indflydelsesrige i historien. Programmet var det første til at indeholde en grafisk

brugergrænseflade (GUI) og gav mulighed for at udføre nøjagtige tegninger på en skærm og lagde grundlaget for udviklingen af CAD. (Sutherland, 1963)

- 1962** Douglas C. Engelbarts artikel *Augmenting Human Intellect* klarlagde fundamentet for BIM, hvor han foreslog at anvende objektbaseret design, parametrisk manipulation og en relationsdatabase til at skabe bygningsmodeller. (Engelbart, 1962)

2.2.2 1970'erne

I løbet af 1970'erne blev udviklingen af BIM drevet af dedikeret softwareudvikling. Det markerede en afgørende fase i at materialisere de koncepter, der blev udarbejdet i det foregående årti. Charles Eastman fortsatte med at spille en central rolle i udviklingen af banebrydende software til informationsmodellering i byggeriet. Selvom Engelbart var meget indflydelsesrig, er der mange betragter Eastman som faderen til BIM, da det var ham der introducerede *Building Description System* (BDS). Innovative virksomheder, såsom IBM, begyndte at investere i teknologier, der tillod skabelsen af komplekse modeller og integration af omfattende data. Fremkomsten af specialiseret software afspejlede den voksende erkendelse for betydningen af digitale værktøjer til at skabe tredimensionelle modeller og administrere information.

I løbet af årtiet skete der et skifte fra teori til praksis, hvor softwareudvikling etablerede det væsentlige teknologiske grundlag for den fortsatte udvidelse. BIM-visionen blev en realitet da GUI-teknologien blev sammensat med relationsdatabaser. Softwaret fra dette årti havde begrænset anvendelse og kunne kun anvendes i projekteringsfaserne. Herunder findes en tidslinje med vigtige nedslagspunkter fra årtiet:

- 1974** BDS blev udviklet som en database der kan indeholde tusindvis elementer der anvendes til at beskrive bygninger i en tilstrækkelig grad til at designe og bygge dem. BDS indeholdt et GUI, forskellige views samt en database med informationer og attributter. Eastman beskrev i princippet BIM som vi kender det i dag. (Eastman, 1976)
- 1977** Eastman introducerede et nyt software kaldet *Graphical Language for Interactive Design* (GLIDE), der var en forbedring af BDS. GLIDE tillod mere nøjagtig og pålidelig redigering og kontrol og gav endda mulighed for at udføre kostestimering. (Eastman & Henrion, 1977)

2.2.3 1980'erne

Dette årti er præget af den personlig computers (PC) udbredelse. BIM kunne nu inkorporere mere omfattende designmuligheder, øgede samarbejdsmuligheder og inkludere alle faser i projekts livscyklus. Det var også i løbet af dette årti 3D-modellering blev udbredt, først i industri og produktion og først i slutningen af årtiet i byggebranchen. Herunder findes en tidslinje med vigtige nedslagspunkter fra årtiet:

- 1982 Autodesk udgiver AutoCAD, et af de mest anvendte 2D-CAD-programmer på verdensplan.
- 1985 Vectorworks udkommer som en af de første 3D-CAD-programmer og det første CAD-program til at køre på tværs af platforme. Vectorworks var ligeledes et af de første til at introducere BIM-kapabiliteter.
- 1986 RUCAPS (*Really Universal Computer-Aided Production System*) blev brugt til renoveringen af Heathrow lufthavn og var det første CAD-program til at understøtte præfabrikerede konstruktioner. Det bliver anset som værende forgænger til nutidige BIM-sofwares.
- 1987 ArchiCAD udkommer som det første BIM-software der er tilgængeligt til PC
- 1988 Pro/ENGINEER udkommer som det første modelleringssoftware til parametrisk design.
- 1989 *Building Product Model* (BPM) blev udviklet til at håndtere ikke blot design, men ligeledes kostestimering og byggeproces, og dermed afdække hele byggeprocessen. BPM var dog begrænset til individuelle bygningskomponenter og manglede samarbejdsmuligheder, der som bekendt er meget afgørende i byggebranchen.

2.2.4 1990'erne

Den moderne byggebranche og deres praksisser er gået over til mere kollaborative processer. Arkitekter og ingeniører kunne arbejde sammen i en hidtil umulig arbejdsgang, ved at kunne integrere filer i hinandens systemer. Denne samarbejdskultur har påvirket branchen lige siden. Det har bl.a. betydet at vi har bevæget os væk fra individuelle kontrakter og til et integreret projektafleveringssystem med fælles BIM-modeller til alle projektdeltagere. Herunder findes en tidslinje med vigtige nedslagspunkter fra årtiet:

- 1992 BIM-termen optrådte officielt i en artikel af Nederveen og Tolman hos udgiveren *Automation in Construction* i 1992. Tidligere er termen *Building Modelling* blevet anvendt fra 1986.

- 1993** *Building Design Advisor* (BDA) blev udviklet som et software til at foretage simuleringer og foreslå løsninger baseret på en model.
- 1993** Autodesk udgiver AutoCAD med 3D-modelleringskapabiliteter
- 1995** *Generic Building Model* (GBM) blev introduceret, hvilket gav mulighed for en integreret og kollaborativ brug af information fra starten af designfasen til slutningen af bygningens levetid. GBM lagde grundlaget for BIM efter årtusindskiftet.
- 1995** IFC-filformatet udvikles, hvilket tillod data at blive delt i forskellige softwares og platforme.
- 1997** ArchiCAD teamwork revolutionerede branchen, da det første gang tillod flere arkitekter at arbejde på den samme model på samme tid.
- 1999** Senere opdateringer af ArchiCAD teamwork tillod projektsamarbejde over internettet og skabte et databasedrevet BIM-planlægningssystem, der lagde grundstenene for den fremtidige BIM-integration.

2.2.5 2000'erne

Den teknologiske udvikling i løbet af årtiet betød et skifte fra CAD til BIM, der nu blev implementeret af flere i byggebranchen; lige fra arkitekter og ingeniører til byggeledere. Det var dog stadig en *cutting-edge* teknologi, end standardpraksis. Det var også i løbet af dette årti vi begyndte at se software der kan udføre kollisionskontrol. Teknologien blev forfinet i løbet af årtiet, men var langt fra det modne niveau vi ser i dag. Herunder findes en tidslinje med vigtige nedslagspunkter fra årtiet:

- 2000** Udviklerne af Pro/ENGINEER ønskede at udvikle en arkitektudgave af deres software. Det var sådan Revit blev udviklet. Revit revolutionerede BIM ved at kunne tilføje og redigere parametre gennem objekt-orienteret programmering. Det tillod bl.a. at tilføje tids-attributter.
- 2001** NavisWorks der er et software til at gennemgå 3D-modeller udkommer. Det tilbød forskellige værktøjer til 3D-navigation, samarbejde og koordinering. Softwaret kunne koordinere og samle forskellige filformater og kunne på den måde identificere problemer eller kollisioner.
- 2002** BIM-termen opnår stor opmærksomhed da det optræder i et *white paper* udgivet af Autodesk.
- 2002** Autodesk opkøber Revit

- 2007** Autodesk opkøber NavisWorks og flere mindre BIM-sofwarens
- 2007** IKT-bekendtgørelse bliver vedtaget i Danmark. Bekendtgørelsen stiller krav til anvendelsen af IKT i offentligt byggeri, bl.a. projektweb, digitale bygningsmodeller og digitalt udbud.

2.2.6 2010'erne

BIM er gået fra at være en teknologisk mulighed til at være en central del af byggebranchen. Årtiet bød på krav om anvendelse af BIM i flere lande. Software bliver stadigt mere avancerede og 4D og 5D BIM bliver mere udbredt. I takt med *cloud*-løsninger bliver mere populære stiger samarbejdsmulighederne og kapabiliteterne. BIM udvides til også at kunne håndtere anlægsprojekter. Samtidig så vi også fremkomsten af flere BIM-standarder som ISO 19650. Herunder findes en tidslinje med vigtige nedslagspunkter fra årtiet:

- 2011** Udvidelse af IKT-bekendtgørelsen til også at gælde statsstøttet byggeri.
- 2012** Autodesk udvikler Formit, der muliggør at tilgå BIM-modeller på mobilenheder.
- 2013** Revideret IKT-bekendtgørelse så også kommuner og regioner omfattes. Bekendtgørelsen stiller krav til anvendelsen af IKT-koordinering, digitale bygningsmodeller, projektweb mm. og er den dag i dag stadig gældende.
- 2013** IFC 2x3 *schemaet* udkommer. Det er stadig det mest udbredte i Danmark i dag.
- 2018-** ISO 19650-standarden udkommer (løbende), hvilket giver et rammeværktøj for BIM, baseret på processtandarder udviklet i Storbritannien.

2.2.7 2020'erne

BIM er ikke længere bare et værktøj, men en central del af den digitale transformation af byggebranchen. BIM spiller en stor rolle i at fremme alt fra effektivitet til bæredygtighed. Vi ser også mange forskellige anvendelser af BIM, især i CDE som f.eks. Dalux. Men BIM bliver også kritiseret; Flere store arkitekttegnestuer underskriver i 2020 et åbent brev adresseret til Autodesk, omhandlende bekymringer omkring stigende priser og mangel på udvikling af Revit.

2.3 Digital Tvilling

Termen Digital Tvilling (DT) blev introduceret i 2003, hvor det dukkede op som en del af et universitetskursus omkring *product lifecycle management*. Konceptet blev her sat i forbindelse med udviklingen af nye teknologier (Grieves, 2015). I 2012 blev konceptet videreudviklet af NASA, der udviklede et *roadmap* for modellering og simulering, hvori den første definition af DT fremgår. Her defineres DT som ”En integreret [...] simulering af et [...] system, der anvender de bedste [...] sensorer til at afspejle tilstanden af dens fysiske tvilling.” (Glaessgen & Stargel, 2012). DT er altså udtænkt til at monitorere og kontrollere aktiver gennem hele dets livscyklus. I takt med teknologiske fremskridt, har vi set en løbende forbedring i effektiviteten og udvikling af mere intelligente metoder (Lu, et al., 2022). En oversigt over forskellige definitioner kan ses i Tabel 2.1

Tabel 2.1 Forskellige definitioner af digitale tvillinger

Definition	Reference
En integreret [...] simulering af et [...] system, der anvender de bedste [...] sensorer til at afspejle tilværelsen af dens fysiske tvilling	(Glaessgen & Stargel, 2012)
Kombinationen af en <i>computational</i> model og et <i>real-world</i> system, designet til monitorering, kontrol og optimering af funktionaliteten	(Zhang, et al., 2020)
En integreret multifysisk, multiskala, simulering faciliteret gennem IoT- forbindelser og dataanalyse, til at illustrere det fysiske aktivs i realtid	(Rafsanjani & Nabizadeh, 2023)
Digitalt informationssystem der kan simulere og optimere forskellige stadier i produktets livscyklus	(Piras, et al., 2024)
En digital repræsentation af et unikt aktivt objekt [...] der består af dets karakteristika, egenskaber, informationer og data vedrørende dets livscyklus	(Hosamo, et al., 2022)
Digitalt modstykke til et fysisk produkt	(Opoku, et al., 2021)
Informationsspejlingsmodel der leverer en sand repræsentation af et fysisk fremstillet produkt	(Grieves, 2015)

Virtuel repræsentation af et fysisk aktiv der anvender sensorer og (Madubuike, et al., 2022) kommunikationsnetværk til at opnå realtidsopdateringer og effektuere tovejskoordinering således den virtuelle model repræsenterer en replikation af det fysiske aktiv

En passende synkroniseret samling af nyttig information, for et fysisk (Rasheed, et al., 2020) aktiv, i et virtuelt rum, der ved hjælp af informationsstrømme muliggør konvergens mellem det fysiske og virtuelle aktiv

Selvom DT vundet indpas i forskning og videnskabelig litteratur relateret til byggebranchen, samt fundet praktisk anvendelse, understreger både Zhang et al (2020) og Jahangir et al (2024) at der stadig ikke er enighed om en generel definition, hvilket også ses i Tabel 2.1; Der findes flere typer til forskellige formål, men den generelle ide er konsistent (Jahangir, et al., 2024; Zhang, et al., 2020). De mange definitioner, har det til fælles at de er en dynamisk digital repræsentation af et fysisk objekt, der ved hjælp af data og målinger i realtid, kan bruges til at monitorere forholdene, f.eks. indeklimaet, i en given bygning. Det indsamlede data kan bruges til at monitorere bygningen, samt forudsige og kontrollere indeklimaparametrene. Ifølge Almatared et al (2022) er det væsentligste at DT indeholder data der opdateres løbende med nøjagtige realtidsdata der afspejler virkeligheden (Almatared, et al., 2022). Kommunikationen er essentiel for DT og Madubuike et al (2022) har identificeret flere træk, bl.a. muligheden for at monitorere den nuværende status for bygningen, anvende historiske data til at forudsige fremtidigt vedligehold og optimere og forbedre processer ved at kombinere sensordata med BIM-data. (Madubuike, et al., 2022)

DT kan ses som en udvidelse af BIM, hvor BIM står for det statiske data og sensordataet tilbyder de dynamiske aspekter af data (Alnaser, et al., 2024). Ifølge Tao et al (2019) består en DT af tre dele: (1) et fysisk aktiv, (2) et digitalt modstykke og (3) forbindelsen mellem de to. Forbindelsen er den udveksling af data, information og viden mellem det fysiske og digitale aktiv, der muliggøres af avancerede sensorer som *computer vision*, *IoT* og *ML* (Tao, et al., 2019). Med *generative AI*, er DT blevet forstærket (*enhanced*) med avancerede analytiske værktøjer og (semi)-autonome beslutningstagningsskabiliteter. Integrationen af AI, har transformeret DT fra en statisk model til et dynamisk, selvforbedrende system, der giver dybere indsigt i dataet.

2.3.1 Digitale Tvillinger i Andre Brancher

Selvom dette speciale handler om anvendelsen af DT og andre avancerede teknologier i byggebranchen, vil der blive præsenteret DT for andre brancher. Anvendelsen i byggeriet er stadig begrænset og derfor bør vi kigge på andre brancher, hvor anvendelsen af DT er udbredt i større grad eller har været anvendt i længere tid, og lære af deres erfaringer.

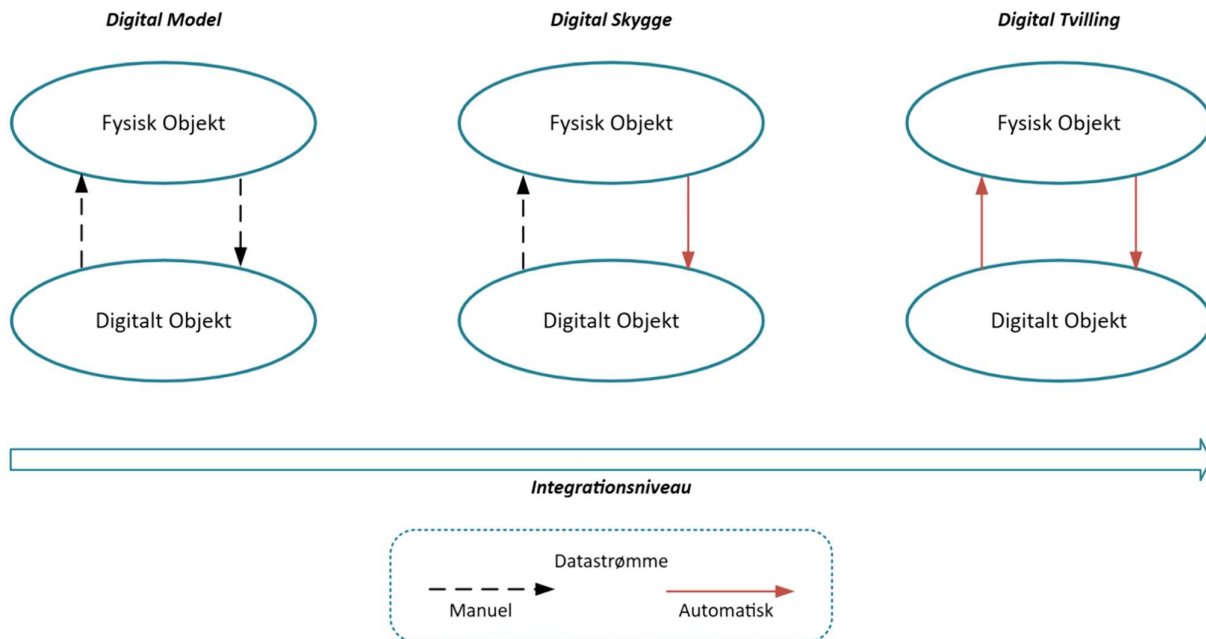
El Jazzar et al (2020) har undersøgt udbredelsen af DT i andre brancher. Tal viser at cirka 35% af forskningen foregår i ingeniørfagene og cirka 24% i computerscience. Det indebærer alt fra produktudvikling til -fremstilling. Samme studie viser at DTs kapabiliteter dækker simulering, øget effektivitet og forudsigelser. (El Jazzar, et al., 2020)

I det seneste årti har vi set DT, og konceptet for datacentreret styring af fysiske systemer, dukke op i bl.a. fremstilling, produktion og drift (Tao, et al., 2019). I fremstilling er det nuværende fokus på planlægning og kontrol af produktionen. Undervejs bliver hele processen monitoreret, hvorpå den løbende kan optimeres ved hjælp af DT. (El Jazzar, et al., 2020)

En gennemgang kan ses i Madubuike et al (2022), der har gennemgået DTs anvendelse i andre industrier, lige fra fly- til bilindustrien til energi, sundhed og fremstillingsvirksomheder (Madubuike, et al., 2022)

2.3.2 Digitale Tvillinger og Lignende Koncepter

Selvom BIM- og DT-koncepterne minder om hinanden er der tre ting der adskiller dem; (1) afhængigheden af eksistensen af et fysisk aktiv, (2) den direkte forbindelse mellem den virtuelle model og det fysiske aktiv, og (3) fuld integration af strukturerede og nøjagtige datastrømme mellem de to (Pan & Zhang, 2023). Det der gør DT til en *tvilling* er tovejskommunikation mellem de to aktiver. Det betyder reelt at der er tale udveksling af data. Andre lignende koncepter har i mere eller mindre manuel grad. På nedenstående Figur 2.5 er der et overblik, inspireret af Grieves (2023), over forskellige DT-koncepter (Grieves, 2023):



Figur 2.5 Forskellige digitale sammensætninger som underkategorier af DT. Inspireret af Grieves (2023)

Digital Model En virtuel repræsentation af et fysisk aktiv. Det kan være i form af 3D-modeller, f.eks. en BIM-model, CAD-tegninger, eller andet data vedrørende aktivet etc. En digital model tillader at visualisere, analysere mm. i et digitalt miljø og repræsenterer en forudsigelse for hvordan aktivet vil præstere. Der er ingen direkte dataforbindelse mellem det digitale objekt og det fysiske objekt det skal repræsentere. Digital model er den nuværende almene praksis i branchen.

Digital Skygge En virtuel repræsentation der spejler den aktuelle tilstand af et fysisk aktiv. Den indsamler løbende data fra det fysiske aktiv ved hjælp af diverse sensorer. På den måde er den digitale skygge ajourført med det fysiske aktiv i en tilstrækkelig grad til at kunne træffe begrundede beslutninger. Der er en direkte forbindelse fra det fysiske til det virtuelle aktiv, men da det er en envejsforbindelse, kan det digitale objekt ikke kontrollere det fysiske aktiv på nogen måde.

Digital Tvilling En model der indeholder data for et fysisk aktiv, der opdateres løbende ved hjælp af f.eks. IoT-sensorer. DT opdateres med data fra det fysiske objekt og er en repræsentation af dets nuværende tilstand. DT indeholder en tovejsforbindelse, mellem det fysiske og digitale objekt, så de kan påvirke og kontrollere hinanden.

3

METODE

Formålet med dette metodeafsnit er at beskrive de forsknings- og fremgangsmetoder, der er anvendt til at indsamle, udvælge og analysere relevant litteratur, samt argumentere for valget heraf. Indledningsvist blev der foretaget en ustruktureret litteratursøgning for at skabe et overblik over det eksisterende forskningsfelt. Herefter blev en bibliometrisk analyse udført for at kortlægge forskningsmønstre og identificere centrale temaer. På baggrund af disse resultater gennemførtes en selektiv litteratursøgning, hvor relevante kilder blev anvendt til at beskrive centrale begreber. Endelig blev der udført et systematisk litteraturstudie for at sikre en omfattende og grundig gennemgang af den relevante forskning. Ved at anvende PRISMA-modellen blev udvælgelsesprocessen struktureret og dokumenteret, og *snowballing*-metoden blev anvendt for at udvide og supplere litteraturgrundlaget.



3.1 Ustruktureret Litteratursøgning

Det overordnede emne blev valgt ud fra interesse. For at indsnævre temaet og identificere mulige problemstillinger blev der foretaget en litteratursøgning via forskellige fagrelevante dagblade som Dagens Byggeri og Licitationen og hos brancheorganisationer som ConTech Lab (der er en del af Molio). Den indledende litteratursøgning var ustruktureret og kan ikke beskrives eller genskabes.

Søgningen var centreret omkring anvendelsesmuligheder for AI og avancerede teknologier i byggeriets organisationer. Ikke alle emner relaterede sig direkte til udførelsesfasen, men har stadig haft indflydelse på litteratursøgningen.

3.2 Bibliometrisk Analyse

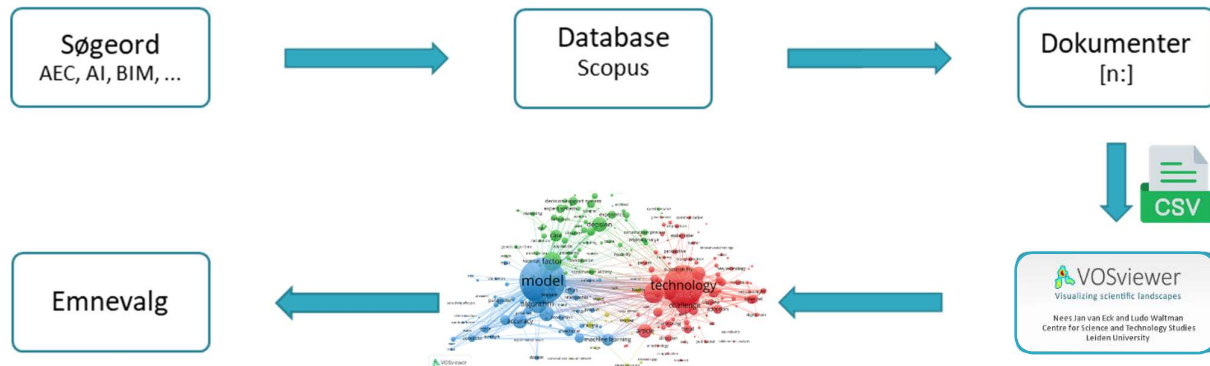
Bibliometri og bibliometrisk analyse er en kvantitativ undersøgelsesmetode, der anvendes til at visualisere og kortlægge mønstre i publikationer inde for et bestemt forskningsområde. Analysen anvendes til at identificere nøglepublikationer, nøgleforfattere, vigtige tidsskrifter osv. (AU, 2024) Formålet med analysen, har i denne rapport, været at identificere de mest centrale begreber, underbygge problemstillingen og indsnævre problemformuleringen.

For at foretage analysen, tages der stilling til hvilke kriterier der indgår, f.eks.: H-index, FWCI, citationer, *keywords*, forfattere, osv. Afhængig af de valgte kriterier, vil analysen give en indikator for hvilke områder der forskes i inde for et bestemt felt, hvem der foretager forskningen osv. og kan anvendes til at belyse nye tendenser i forskningen. Det er dog vigtigt at understrege, at en bibliometrisk analyse ikke bør stå alene, men understøttes af efterfølgende forskning eller litteraturstudie. (Linnenleucke, et al., 2019; AU, 2024)

Scopus, der er den største database for *abstracts* og citationer for *peer-reviewed* videnskabelig litteratur blev udvalgt til analysen. På Scopus er der let adgang til bibliometrisk data i CSV-format ved hjælp af *export*-funktionen. Felterne *Abstract & Keywords*, samt *year* og *citation count*, dannede grundlag for de følgende bibliometriske analyser. Søgeordene blev baseret på problemstillingen og den overordnede tematik og er som følger; (1) "AEC*", (2) "Artificial Intelligence", (3) "BIM", (4) "Construction*" og (5) "Digital Twin".

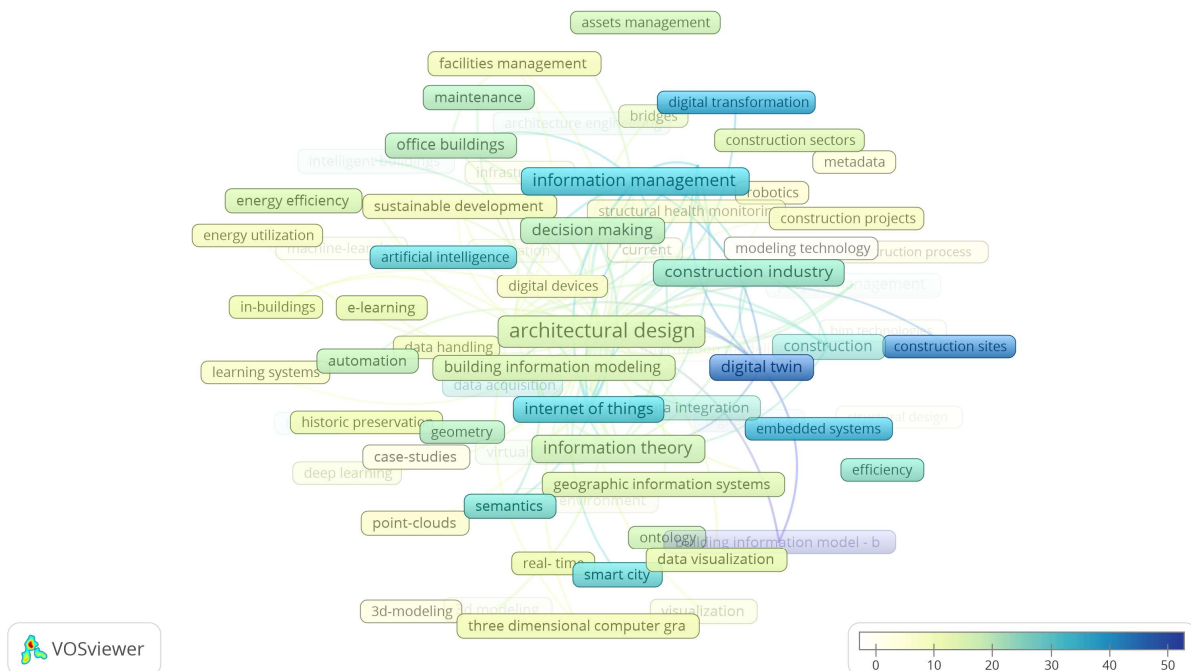
De bibliometriske analyser, blev foretaget ved hjælp af et software, VOSviewer, der gav mulighed for at visualisere bibliometriske netværk, ved at importere de CSV-filer der stammer fra videnskabelige databaser. I softwaret vælges de kriterier netværket skal dannes efter, såsom

minimum antal forekomster af bestemte termer. VOSviewer kan således danne netværket eller kortlægningen, baseret på det foregående (VOSviewer). Fremgangsmåden for bibliometrisk analyse ved hjælp af VOSviewer kan ses på nedenstående Figur 3.1.



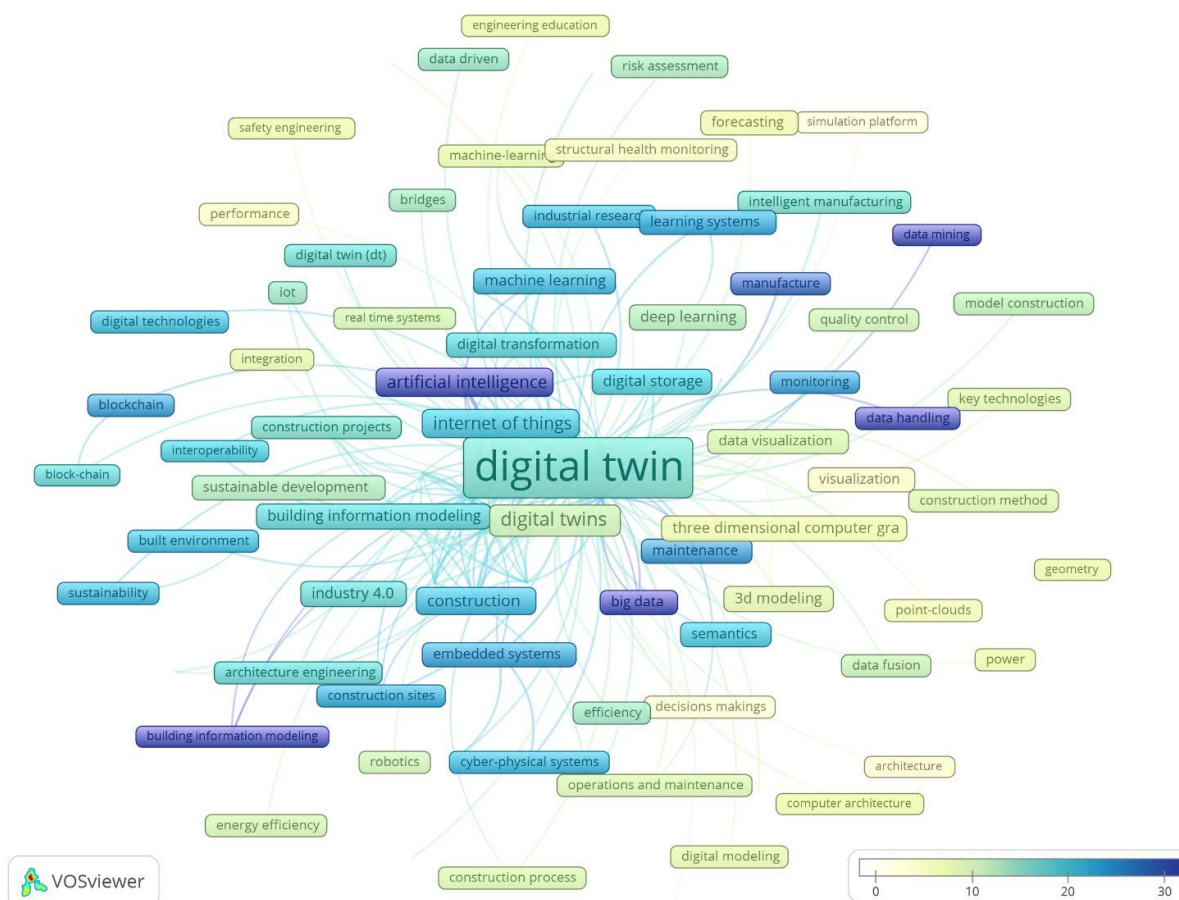
Figur 3.1 Fremgangsmåde for bibliometrisk analyse

På nedenstående Figur 3.2 ses et eksempel på en bibliometrisk analyse foretaget med de førnævnte søgeord. Figuren viser gennemsnitlige citationer for artikler der, udover DT og BIM, indeholder bestemte termer; principielt et billede af hvor populært en bestemt term er i forskningen. Som det fremgår er *digital twin* sammen med *construction sites*, *information management*, *artificial intelligence* og *digital transformation* nogle af de oftest citerede termer. Analysen er baseret på 955 artikler og viser de 100 mest citerede termer.



Figur 3.2 Bibliometrisk netværk for "digital twin" og "BIM". Keywords kombineret med gennemsnitlige citationer

På nedenstående Figur 3.3 ses en bibliometrisk analyse fortaget med samme princip som foregående figur. I denne analyse blev der anvendt DT og *construction** som udgangspunkt. Analysen gav et klart billede af at BIM er en central del i forskningen, samt flere termer relateret til data. Igen er det værd at bemærke at *construction sites* og lignende termer er stærkt repræsenteret. Analysen er baseret på 2936 artikler og viser de 100 mest citerede termer. Nogle termer fremgår i mere end én boks. Det skyldes at softwaret ikke har registreret at de var ens, og derfor ikke har kombineret dem.



Figur 3.3 Bibliometrisk netværk for "digital twin" og "construction*". Keywords kombineret med gennemsnitlige citationer

De to bibliometriske netværk viser artikler hvori bestemte *keywords* fremgår sammen, altså en såkaldt "keyword co-occurrence"-analyse, kombineret med gennemsnitlige citationer for de artikler hvori de fremgår. Fundene harmonerer med undersøgelsesspørgsmålene og giver anledning til at kigge nærmere på emnet.

Yderligere bibliometriske analyser kan ses i bilag 2

3.3 Selektiv Litteratursøgning

Den teoretiske viden om centrale begreber (afsnit 2), blev indsamlet gennem en selektiv litteratursøgning. Det er en proces til at indsamle viden, hvor der er et eksplicit ønske om at belyse bestemte emner eller begreber, på en effektiv måde. I modsætning til systematiske litteraturstudier, indebærer selektiv litteratursøgning en målrettet og afgrænset indsats. Fokus er på at identificere den centrale og mest relevante litteratur, der giver en dybdegående forståelse for et begreb. (Rienecker & Jørgesen, 2008)

Litteratursøgningen er sket ved at bruge Aalborg Universitetsbiblioteks tilgængelige faglitteratur, Dansk Standard og Scopus. For at sikre faglitteraturens relevans blev der anvendt *Melvil Decimal System* (Dewey). Systemet anvendes af biblioteker over hele verden og er et fælles klassifikationssystem for faglige emner. BIM og andre lignende processer kan f.eks. findes under klassifikationen 690.0285 og DT i forbindelse med det byggede miljø kan findes under 720.285.

3.4 Systematisk Litteraturstudie

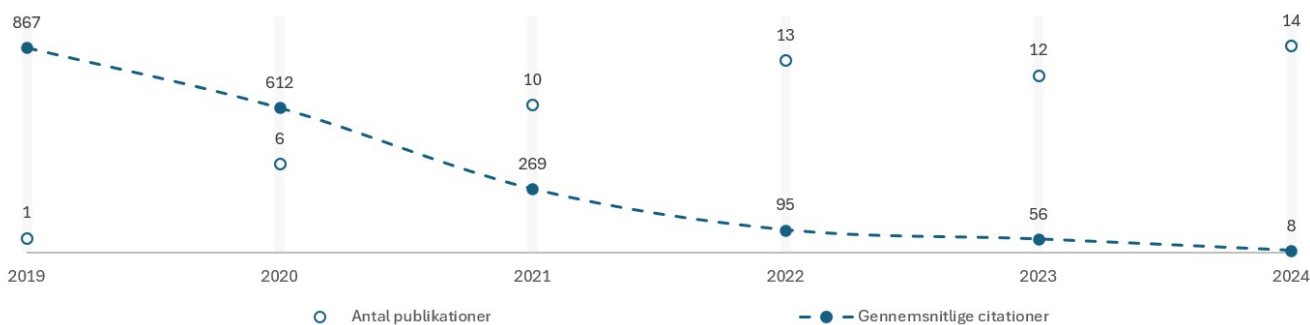
I dette studie er der udført et systematisk litteraturstudie (SLR) for at undersøge anvendelsen af DT i byggebranchen. Et SLR er ikke en simpel opsummering, men en kritisk analyse af den nyeste viden inden for et specifikt forskningsområde (AAU, 2024b). I akademisk forskning spiller litteraturstudier (*reviews*) en essentiel rolle i indsamlingen af eksisterende viden og undersøgelse af det nuværende forskningsstade. Typisk indsamles al tilgængelig evidens vedrørende et emne eller problemstilling inden der tages fat i rapportens undersøgelse. Nogle typer *reviews* lader det være op til læseren selv at bedømme hvorfor forfatteren har inkluderet eller ekskluderet visse kilder frem for andre. Ofte vil forfatteren betro sig til *journals* der anses som værende af høj kvalitet, uden nødvendigvis at betragte et bredere evidensgrundlag. (Linnenleucke, et al., 2019)

Et SLR giver mulighed for systematisk at indsamle evidens og evaluere det mod de forudbestemte kriterier fra PRISMA (afsnit 3.5). Det minimerer risikoen for at inkludere litteratur der blot findes passende på et subjektivt niveau. SLR giver mulighed for at balancere mellem en stor pulje af litteratur, og systematisk at identificere og udvælge litteratur, der passer til kriterierne og som understøtter undersøgelsesspørgsmålene (Linnenleucke, et al., 2019). Til at foretage en omfattende søgning via Scopus, blev der anvendt følgende booleske operatorer og søgestreng; TITLE-ABS-KEY (AI OR "artificial intelligence") AND construction* AND "digital twin*" AND

(BIM OR "building information modeling"). TITLE-ABS-KEY betyder at der søges i artiklernes titler, abstracts og nøgleord (keywords). Asterisken (*) sikrer at ordets endelse kan variere, f.eks. som *twin*, der alternativt kunne være *twins*, *twinning* el.lign. Spørgsmålstegnet (?) kan erstatte bogstaver midt i ordet og sikrer at forskellige stavemåder inkluderes, f.eks. som *modeling* (amerikansk) eller *modelling* (britisk). Ord der indgår i samme parentes (...), sammen med operatoren OR, sikrer at enten det reelle ord eller dets akronym indgår. Søgeordene blev holdt på et generelt niveau for ikke at holde mulighederne åbne.

Et typisk SLR bør foretages af tre eller flere personer for bl.a. at undgå bias, og har en tidshorisont på tolv til atten måneder (AAU, 2024b). Dette litteraturstudie blev foretaget af blot én person, og havde en tidshorisont på omkring fire måneder. Derfor blev der i stedet for det fulde SLR foretaget et *rapid review*, der springer visse skridt over (Khangura, et al., 2012)

På nedenstående Figur 3.4 er der et overblik over publikationer der er anvendt i litteraturstudiet. De er vist efter årstal og figuren viser antallet af publikationer samt gennemsnitlige citationer for publikationerne for hvert år.



Figur 3.4 Overblik over publikationer pr/år og gennemsnitlige citationer

Figuren viser en stigende tendens i antallet af udgivne publikationer, men samtidig et fald i antallet af citationer. DTs popularitet steg i 2019 (Jahangir, et al., 2024), hvilket har betydet at der er flere artikler udgivet om emnet. At citationerne falder, kan skyldes at populariteten eller relevansen af DT er faldende, eller blot at forskningen er mættet af videnskabelige artikler om emnet.

3.5 PRISMA

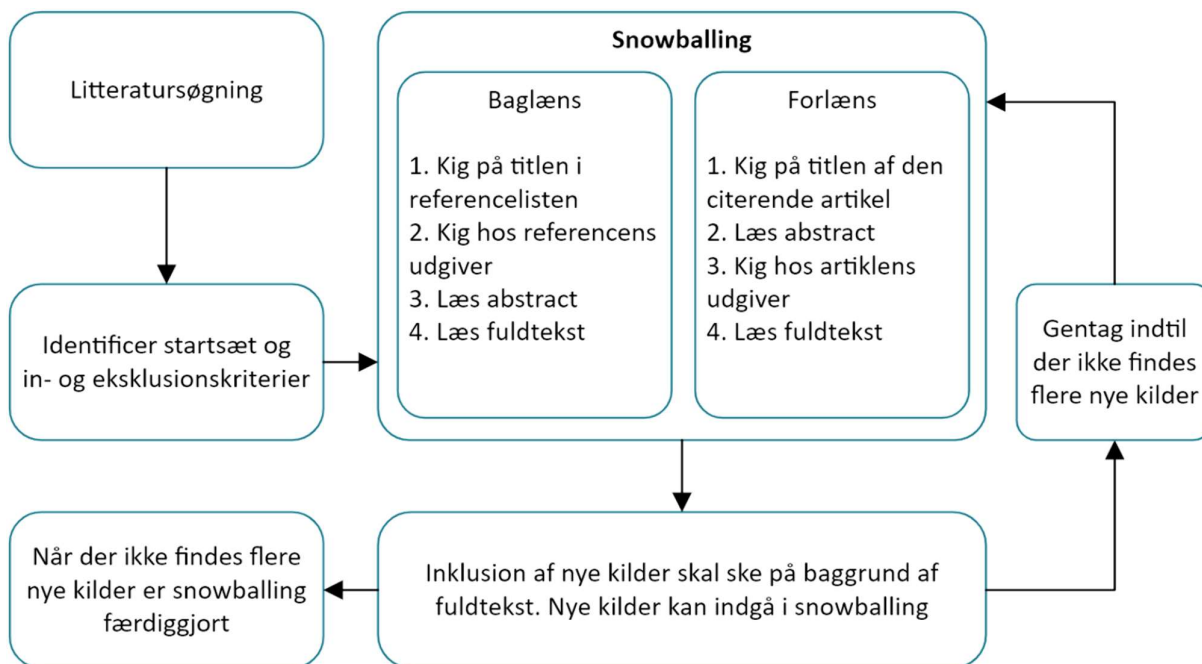
Rapportens fund og resultater er bygget på baggrund af et SLR (afsnit 3.4). Metoden og resultaterne af SLR, skal rapporteres i en detaljeringsgrad der er tilstrækkelig til at kunne vurdere troværdigheden og anvendelsesmulighederne af fundene. PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) er et sæt retningslinjer, der er udviklet til at facilitere transparent, fuldkommen og nøjagtig rapportering af resultaterne, ved at opstille og analysere fundene efter en prædefineret og ensartet metode. Metoden er oprindeligt tiltænkt sundhedsvidenskabelige *reviews*, men grundprincipperne som systematik og transparens kan ligeledes anvendes i andre naturvidenskabelige områder. Forsimplet er fremgangsmåden således; (1) planlægning af SLR; hvorfor lavede vi undersøgelsen?, (2) dokumentation for metoder der blev anvendt, og (3) rapportering af resultaterne, der muliggør kritisk vurdering og genskabelse af studiet. (Page, et al., 2021)

Page et al. (2021) har udarbejdet en PRISMA-checkliste for alt fra abstract til metode til resultater. Artiklen indeholder forklaringer og eksempler for alle (27) elementer og er essentiel for optimal anvendelse af PRISMA. Sammen med checklisten er der udviklet et flowdiagram til at visualisere udvælgelsesprocessen. Flowdiagrammet indeholder identifikation, screening og opsummering af den inkluderede litteratur (Page, et al., 2021). Flowdiagrammet for SLR er inspireret af dette.

En del af PRISMA-værktøjet er udformningen af eks- og inklusionskriterier for litteraturen. Inklusionskriterierne skal sikre at problemformuleringen bliver besvaret (Page, et al., 2021), og er som følger: (1) Omhandle DT, (2) Relateret til byggebranchen, (3) Relateret til udførelsesfasen, (4) Fuldtekst tilgængelig, og (5) Engelsksprogede. Der er ikke lavet en begrænsning for årstal eller typen af litteratur, da det ønskes at skabe et grundigt overblik.

3.6 Snowballing

Som det fremgår af SLR, skal *al* relevant litteratur identificeres. *Snowballing* er en metode der ofte anvendes til at supplere den litteratur der er fundet ved hjælp af traditionelle søgestrengte. Fremgangsmåden kan ses i Figur 3.5 og er beskrevet i den følgende tekst.



Figur 3.5 Proces for snowballing. Efter Wohlin (2014)

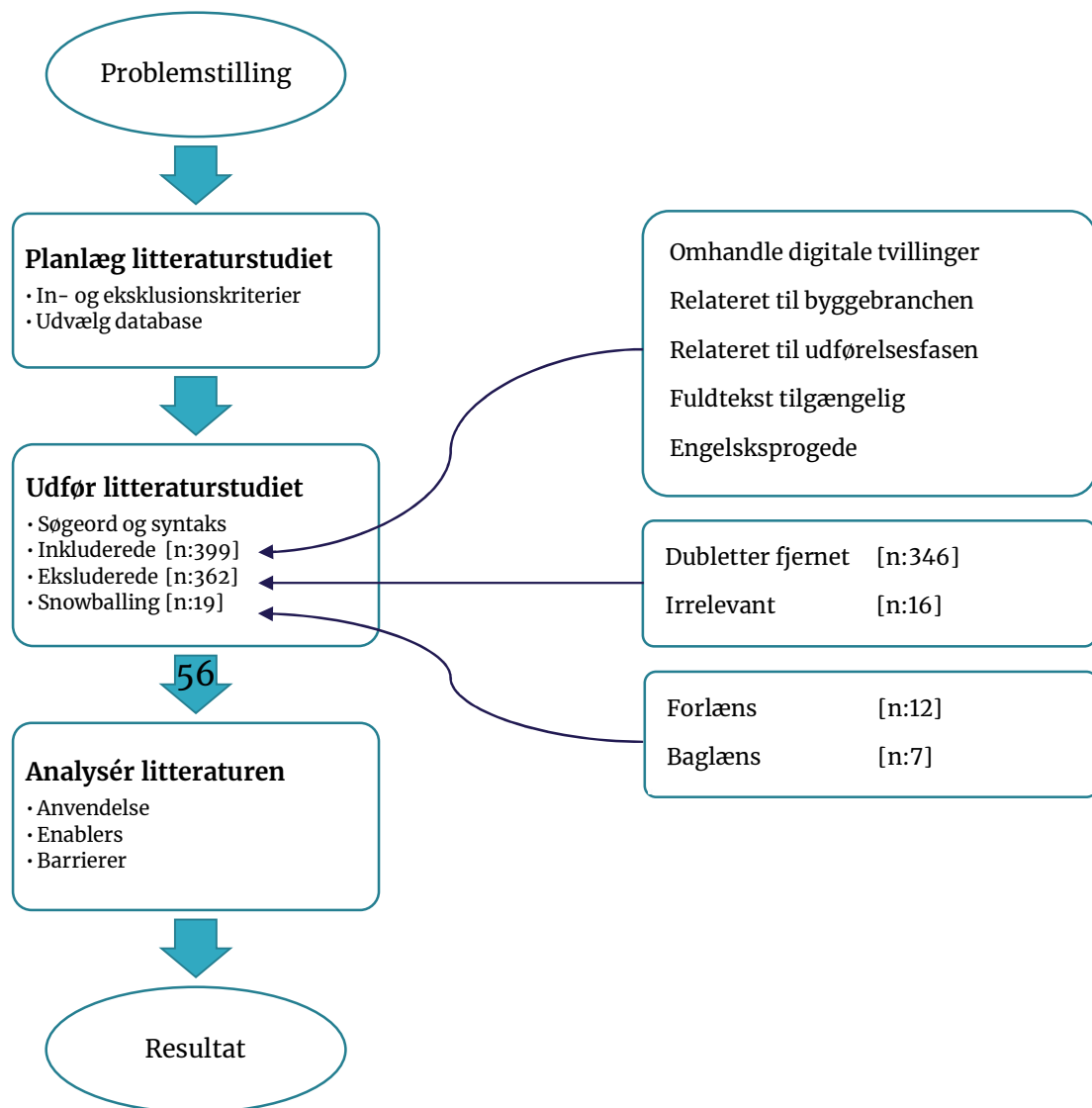
Øverste til venstre, i første kasse er selve litteratursøgningen i databaserne (afsnit 3.4). Efter litteratursøgningen udvælges et startsæt, altså den litteratur hvor der skal foretages *snowballing* på. Ifølge Wohlin (2014) inkluderer et godt startsæt litteratur med en vis grad af diversitet, f.eks. fra forskellige udgivere. Antallet af artikler i startsættet varierer efter bredden af emnet; er der mange, kan man eventuelt vægte højt citerede artikler (Wohlin, 2014). I dette tilfælde bestod det af 53 artikler. Som der fremgår af figuren er det vigtigt at tage stilling til in- og eksklusionskriterier, inden *snowballing* foretages (Wohlin, 2014). Kriterierne for artikler funder gennem *snowballing* vil være identiske med dem der allerede er beskrevet i PRISMA (afsnit 3.5).

Metoden består af to retninger. I venstre side af *snowballing*-kassen på Figur 3.5 findes baglæns *snowballing*, der består i at undersøge den identificerede litteraturs referencer for relevans. Først undersøges titlerne i referencelisten; var de fristende kunne de inkluderes foreløbigt. Referencernes udgivere blev herefter undersøgt for om de er et sted hvor relevante artikler bliver publiceret. Samtidig blev forfatterne, og deres øvrige forskning inden for samme område, undersøgt for relevans – Artiklerne kan dog ikke ekskluderes på baggrund heraf. Inden tredje skridt, blev de foreløbigt inkluderede artikler holdt op mod PRISMA-kriterierne. Levede de op til

kriterierne blev abstract læst, efterfulgt af de mest relevante dele af artiklen (Wohlin, 2014). Ved baglæns *snowballing* blev der identificeret 7 nye artikler.

I højre side af *snowballing*-kassen på Figur 3.5 findes forlæns *snowballing*; hvor citerende litteratur kontrolleres for relevans. Scopus har en funktion der kan vise alle citerende artikler i en liste. Ved at gennemgå listen og undersøge artiklernes titler, blev fristende titler inkluderet foreløbigt. Hvis titlerne ikke indeholdt tilstrækkelig information til at foretage inklusionen, blev abstract læst. Var det heller ikke tilstrækkeligt, blev den citerende artiklers udgiver undersøgt. Hvis det ligeledes viste sig ikke at være tilstrækkeligt, blev fuldttekst, eller de mest relevante dele heraf, læst for at vurdere om artiklen skulle inkluderes. Tilgangen for forlæns og baglæns *snowballing* ligner på mange måder hinanden (Wohlin, 2014). Ved forlæns *snowballing* blev der identificeret 12 nye artikler.

Efter flere iterationer i begge retninger, blev der ikke længere identificeret nye kilder. Litteraturen blev læst i fuld tekst, da inklusion kan kun ske på baggrund af heraf. På næste side ses et flowdiagram (Figur 3.6) for litteratursøgningen, hvor *snowballing* er inkluderet:



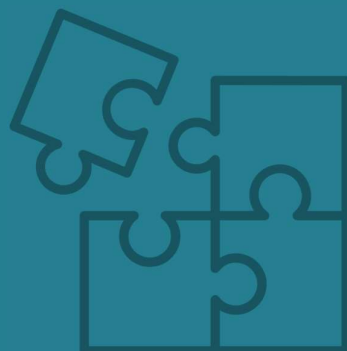
Figur 3.6 Flowdiagram for litteratursøgning

Flowdiagrammet illustrerer litteratursøgningsprocessen. Øverst findes planlægningsstadiet for studiet, hvor bl.a. PRISMA-kriterierne blev udvalgt. I udførelseskassen indgår den litteratur der blev identificeret gennem de traditionelle søgestrengene (bilag 3). Af 1996 læste abstracts blev 399 inkluderet i første omgang. 346 dubletter blev fjernet og 16 levede ikke op til PRISMA-kriterierne. På de tilbageværende artikler blev der foretaget *snowballing* hvilket resulterede i en udvidelse på 19 artikler. Det samlede resultat lyder på 56 artikler, der blev analyseret.

4

RESULTAT

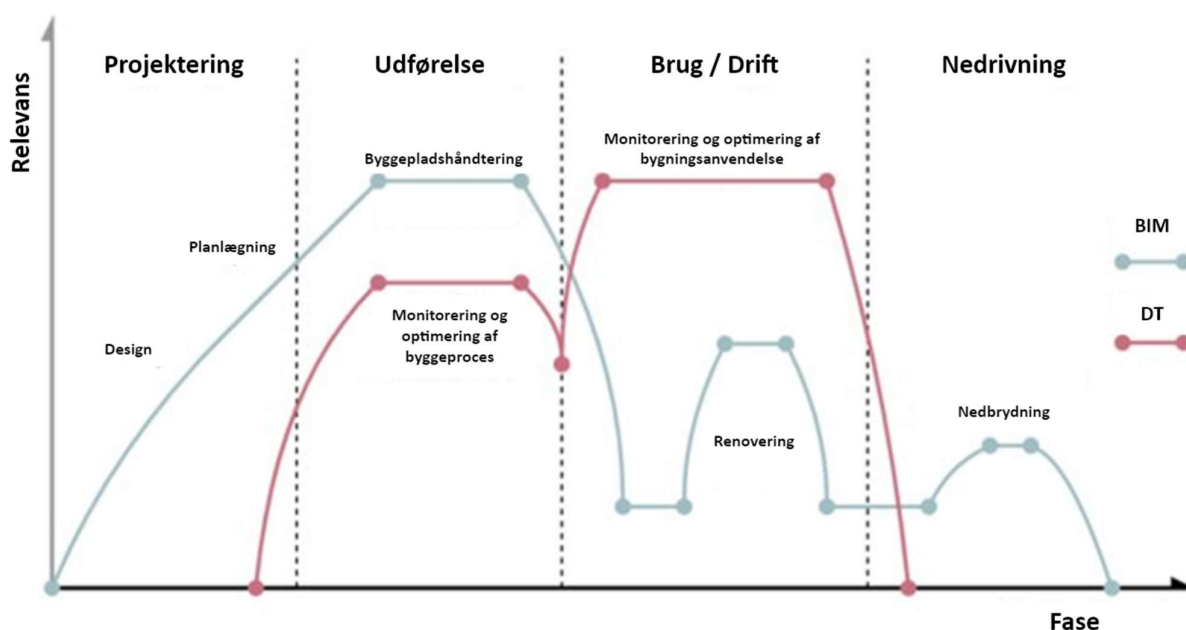
Formålet med dette resultatafsnit er at opsummere den seneste udvikling, eventuelle barrierer og den aktuelle tilstand for digitale tvillinger i udførelsesfasen. Afsnittet bygger på det systematiske litteraturstudie og viser fundene. De følgende afsnit gennemgår hhv. anvendelsesmuligheder (afsnit 4.1), *enablers* (afsnit 4.1) og barrierer (afsnit 4.3). Afsnittene svarer på underspørgsmål S2, S3 og S4, og danner grundlag for besvarelsen af S5.



4.1 Anvendelsesmuligheder

DT har en række anvendelsesmuligheder i forskellige brancher. Men hvad kan DT tilbyde i byggebranchen? For at sikre at DT bliver en succes, er det afgørende at der er en vis åbenhed omkring anvendelsen, forskellige muligheder og tilpasningsevne til forskellige interessenter (Chacón, et al., 2024). Ifølge AlBalhky et al (2024) kan anvendelsen opdeles i seks grupper; (1) miljø og bæredygtighed, (2) *facility management*, (3) sikkerheds-, sundheds- og risikohåndtering, (4) bærende konstruktioner og statik, (5) ledelse af byggeriet, (6) arkitektur og byplanlægning (AlBalkhy, et al., 2024). I de følgende afsnit vil der blive gennemgået nogle af de mange anvendelsesmuligheder og deres forventede fordele, med et særligt fokus på gruppe 5 og til dels gruppe 3.

Nedenstående Figur 4.1 viser hvordan Boje et al (2023) har fordelt anvendelsen af de BIM og DT i et projekts livscyklus. Fundamentalt anvendes BIM til at designe og planlægge og DT anvendes til at monitorere og optimere forbruget af ressourcer. (Boje, et al., 2023)



Figur 4.1 Relevans for BIM og DT i forskellige faser af byggeriets livscyklus. Inspireret af Boje et al (2023)

4.1.1 Monitorering

Computer vision, og de bagvedliggende processer der bruges til at analysere fotos, kan bl.a. anvendes til at identificere objekter i den virkelige verden og skabe 3D-objekter af dem, tracke objekter i realtid, osv. Teknologien kan bl.a. anvendes til at monitorere byggeprocessen og effektivisere den, monitorere byggearbejderne og øge sikkerheden, mm. (Piras, et al., 2024). Kommercielle monitoreringsteknologier bruges generelt isoleret (Sacks, et al., 2020) og fokuserer ofte på én specifik anvendelse og kun et begrænset antal datakilder (Lu, et al., 2020).

Traditionel procesmonitorering kræver visuelle inspektioner og er afhængig af projektlederens personlige dømmekraft og observationsevne. BIM er blevet en essentiel del af procesplanlægningen ved at indeholde som-planlagt byggedata. Projektlederen opdaterer modellen med som-udført data, og kan på den måde kontrollere projekts fremgang. Processen kræver manuelt arbejde og er sårbar overfor menneskelige fejl. Den mest effektive måde at monitorere fremgangen er ved at automatisere den (Alizadehsalehi & Yitmen, 2021). For at generere som-udført data, indsamler diverse sensorer data fra byggepladsen, fortolker det og sammenligne det med en eksisterende digital model (Boje, et al., 2020). De seneste fremskridt i disse teknologier, har gjort det muligt at kunne skabe et lukket kredsløb, der samler, fortolker og bearbejder al data, i et sammenhængende system. Et sådant lukket kredsløb bør følge PDCA-processen. Forskellen på nuværende processer og PDCA-cyklen, er "check"-processen, hvor det data der indsamles, ved hjælp af diverse IoT-sensorer, anvendes til at monitorere og forstå, hvad der sker i byggeprocessen. *Check*-informationerne kan således anvendes i *act*-processen til evaluere på, og forbedre processen igennem flere iterationer af kredsløbet. (Sacks, et al., 2020)

Til at monitorere byggeprocessen med høj præcision, kan man anvende RFID-tags. De kan være integreret i f.eks. præfabrikerede betonelementer, og når de scannes bliver DT automatisk opdateret med den aktuelle fremgang i byggeprocessen (Opoku, et al., 2021). Realtidsoverblikket øger projektledernes opfølgingsmuligheder markant og sikrer en glidende udførelse og rettidig problemløsning (Alnaser, et al., 2024). Samtidig kan projektet overvåges i realtid uden behov for at byggeledelsen behøver at være til stede fysisk. Det giver større fleksibilitet i arbejdssted og bedre udnyttelse af tid (Rasheed, et al., 2020).

Scan-to-BIM, der består af 3D-laserscanning og objektgenkendelse, tillader projektlederen hurtigt at indsamle som-udført data. Det indsamlede data samles med BIM-dataet, og skaber på

den måde en digital skygge. Teknologier som *pointclouds* og 3D-scanning kan anvendes til at monitorere den faktiske tilstand på byggepladsen. Derefter kan dataet bruges til sammenligning og justering af 3D-modellen (Zhang, et al., 2024). Teknologien kan bl.a. fås som et hjelmmonteret kamera (AlBalkhy, et al., 2024). DT kan være relevant til at udforme som-udført tegninger, der generelt bliver skabt ud fra en som-udført-model, der udføres i takt med eller efter byggeriet er opført. I stedet kan det hele samles i en DT, der opdateres løbende. (Opoku, et al., 2021)

I artiklen af Chernyshev et al. (2021) blev der undersøgt hvordan man kan anvende BIM og AI til at detektere digitale objekter, fra en model, på byggepladsen. AI-systemet består af en kombination af et *Convolutional Neural Network* (CNN) og et *Feed-Foward Neural Network* (FFNN). Systemet træner en algoritme, der muliggør genkendelse forskellige objekter i realtid og sammenligne dem med en klassifikation, fra en BIM-model. Den første algoritme, der består af CNN alene (YOLOv3), var i stand til at genkende i gennemsnit 90,4% af objekterne. Disse data blev efterfølgende trænet med FFNN og kunne således genkende 98,4%. Artiklen viser at systemet fungerer og leverer korrekt data til koordinationen af DT (Chernyshev, et al., 2021). Undersøgelsen tager udgangspunkt i en BIM-model. Den første del af dataet kommer fra klassificeret BIM-data. Dette data skal stå standby, indtil IoT-dataet er blevet behandlet. Den anden del kommer fra IoT-enheder. Det rå data bliver opsamlet på byggepladsen og suppleret af big data, bearbejdet og analyseret af YOLO og efterfølgende klassificeret. De to dele samles og bearbejdes af FFNN-modellen. De kunne således bruge de bearbejdede data, til at evaluere det realiserede arbejde (IoT) med det planlagte (BIM-model). Efter evalueringen bliver der skabt en DT gennem et CAD-system. Formålet med det er uklart, men de nævner at systemet i fremtiden vil kunne bearbejde informationen i realtid og dermed skabe en "ægte" synkroniseret DT. (Chernyshev, et al., 2021)

Monitorering kan ske gennem *machine vision* og kan øge effektivitet og produktivitet. Det kan også anvendes til at øge sikkerheden for byggearbejderne og dermed nedbringe ulykker. Dog kan den samme teknologi anvendes til at overvåge byggearbejderne på måder der bryder privatlivets rettigheder. Klar kommunikation om hvordan disse data / information anvendes, er et afgørende skridt for at opretholde et troværdigt samarbejde. (Fox, 2024)

Turner et al (2021) har undersøgt hvordan DT kan anvendes til at se farer eller kontrollere sikkerhedsudstyr automatisk. På en "forbundet" byggeplads kan flere datakilder kombineres og

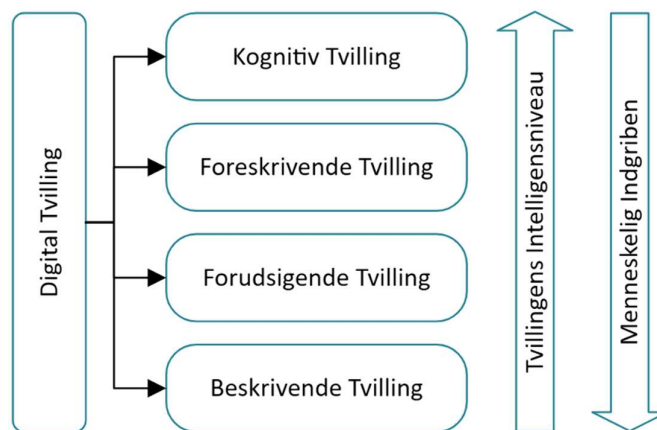
analyseres for at give indsigt på operationelt og strategisk niveau og dermed forbedre sikkerhed på enkelte byggepladser og endda på tværs af byggepladser (Turner, et al., 2021)

4.1.2 Beslutnings- og Risikohåndtering

DT kan assistere med en lang række forskellige ledelsesdiscipliner som bl.a. materiale- og ressourcehåndtering, eller tids- og kvalitetsstyring. Forskellige teknologier som RFID-tags, smarte sensorer og sensornetværk er med til at understøtte processen (Opoku, et al., 2021). Beslutninger foretaget med DT indeholder situationsfornemmelse, ved f.eks. at have realtids-feedback fra monitoreringen (Sacks, et al., 2020)

DTs anvendelse og kapabiliteter kan beskrives ved hjælp af Gartners rammeværktøj for analytiske egenskaber. Modellen består af fire forskellige tilstande, for hvordan DT kan påvirke beslutningstagningsprocessen; (1) beskrivende "hvad sker der?", (2) diagnostiske "hvorfor sker det?", (3) forudsigende "hvad vil der ske?", og (4) foreskrivende "hvad skal der gøres?". Ifølge AlBalhky et al (2024) bruges DT hovedsageligt til beskrivende og forudsigende formål. Der mangler stadig eksempler på hvordan DT skal anvendes i de andre tilstande. (AlBalkhy, et al., 2024)

På samme måde anvender Zhang et al (2020) Gartners rammeværktøj, til at beskrive forholdet mellem DTs intelligensniveau og hvor meget menneskelig indgriben der skal til (Zhang, et al., 2020). Forholdet kan ses i nedenstående Figur 4.2.



Figur 4.2 DTs kapabiliteter i forhold til menneskelig indgriben og DTs intelligensniveau. Efter Zhang et al (2020)

For at sammenligne figuren med AlBahlky et al (2024) fund, kan vi se at den nuværende anvendelse er de to "nederste" intelligensniveauer. Hvis DT og AI integreres vil intelligensniveauet stige og dermed også øge beslutningstagningskapabiliteterne (Zhang, et al., 2020; Almatared, et al., 2022)

DT kan anvendes til at foretage *what-if* analyser. De kan bl.a. bruges til at forudse uventede scenarier og studere systemets (bygningens) reaktion på disse og den tilhørende udformede afværgelsesstrategi. Ved at anvende DT og dens forudsigende kapabiliteter, kan scenariet simuleres uden at bringe det virkelige aktiv i fare og gør projektledere i stand til bedre at foretage risikovurderinger (Rasheed, et al., 2020). DT kan hjælpe med at kontrollere og forudse påvirkninger af byggeaktiviteter og nå til en optimeret og langsigtet løsning (Al-Sehrawy & Kumar, 2021). Optimering kan få en proces til fuldstændig at følge et sæt kriterier og begrænsninger ved at maksimere de forventede virkninger. Under udførelsen af byggeaktiviteter assisterer DT med optimering af ressourceallokering, mandskabsorganisering, fastlæggelse af layout for byggepladsen og til at foretage konsekvente ændringer rettidigt og på en rimelig måde (Kor, et al., 2023). En af de mest signifikante potentialer ved at anvende AI sammen med DT, er dets evne til at kunne forebygge og løse ukendte udfordringer (Yitmen, et al., 2021), da det giver mulighed for aktivt at adressere udfordringer inden de opstår (Opoku, et al., 2021). Adgangen til data og information, kombineret med automatisk rapportering, vil give alle involverede parter bedre indsigt i projektet og giver øget transparens (Rasheed, et al., 2020).

DT indeholder en anseelig datamængde, der giver alle interessenter adgang til rigelig information om byggeprojektet. Det hjælper bl.a. med at reducere omkostningerne, øge kvaliteten og forbedre effektiv ledelse af byggeriet (Opoku, et al., 2021). Og netop denne realtidsdata fra byggepladsen kan hjælpe med at træffe datadrevende beslutninger. Dataet opdaterer dynamisk BIM-modeller der hjælper til at træffe velinformerede valg og forbedrer præcisionen og effektiviteten af beslutningstagningsprocessen (Alnaser, et al., 2024). Adgang til kvantitative data og avancerede analyser af disse, giver mulighed for hurtigere beslutningstagning på et bedre analyseret grundlag. Beslutningerne bliver derfor bedre, hvilket fører til færre fejl og mindre spild (Rasheed, et al., 2020). Mennesket har en vigtig rolle i beslutningstagning, men beslutningerne er ofte baseret på et begrænset antal overvejede scenarier. DT kan overveje et nærmest ubegrænset antal scenarier og blot udvælge de bedste eller mest effektive, for så at lade mennesket tage den endelige beslutning. (Sacks, et al., 2020)

4.1.3 Samarbejde

Fordelen ved datacentrerede projektstyring stammer fra en dybere forståelse for den aktuelle situation. Det er ikke begrænset til blot at forstå den aktuelle status, men også fremtidige valg og mulige konsekvenser. Det giver ledere såvel som håndværkere et bedre udgangspunkt til at være proaktive frem for reaktive (Sacks, et al., 2020). DT hjælper med at forbedre samarbejdet og kontrollen af byggeprocessen, ved at simulere og foretage forudsigelser og foreslå beslutninger baseret på de reelle forhold. Velovervejede beslutninger, der igennem DT bliver upartiske, kan lede til forbedret samarbejde (Asif, et al., 2024). Adeel et al (202) har udformet en platform, der er tilgængelig på mobile enheder, gennem realtidsmonitorering af byggepladsaktiviteter forbedrer samarbejdet (Adeel, et al., 2023).

DT kan assistere med visualiseringen af alle lokationers nuværende tilstand og forudsige deres tilstand. Det resulterer i en byggeplads hvor der ikke er flere i samme område, hvilket mindsker risiko for konflikter og i sidste ende øger samarbejdet (Al-Sehrawy & Kumar, 2021)

4.2 Enablers

For at anvende og udnytte potentialet i DT, og lignende teknologier, kræver det at en række grundlæggende forudsætninger og støttende elementer er på plads. Dette afsnit vil nogle af de mest afgørende faktorer

4.2.1 Integration Mellem BIM og DT

Integrationen mellem BIM og DT er en transformativ tilgang, der revolutionerer byggeprojekter. Integrationen har introduceret et udvalg af værdifulde anvendelsesmuligheder, hvor især realtids-monitorering, af f.eks. fremdrift og ændringer, fremhæves som en central del af DT på byggepladsen (Alnaser, et al., 2024). En rapport af Bosch-Sijtsema et al (2021) viser at DT primært anvendes i pilotprojekter eller tests i mindre skala. På *hype* kurven svarer det til starten på *slope of enlightenment*. Selvom DT er havnet i denne kategori, viser rapportens data at teknologien opfattes som værende længere bagud, og at der er begrænset viden og anvendelse af DT. Kategoriseringen kan skyldes personernes opfattede sammenhæng med BIM, der af respondenterne ses som værende første fase for DT. (Bosch-Sijtsema, et al., 2021)

BIM har allerede mange anvendelser. Udover at repræsentere 3D-geometri med tilhørende data, har tids-aspektet, 4D, også fundet sin anvendelse. Nyere udvikling inkluderer også 5D-modeller,

der inkluderer sundheds- og sikkerhedsaspekter. Flere anvendelser og dimensioner tilføjes løbende og går under paradigmet "nD BIM". For at BIM skal kunne tilpasse sig nye mere integrerede tilgange, er implementeringen af DT essentiel (Boje, et al., 2020). De nyeste anvendelser indbefatter dimensioner som sikkerhedsstyring (*safety management*) og energi- og miljøbekymringer (Boje, et al., 2020). Sideløbende er der blevet forsket i hvordan *semantic web* teknologier og *linked data* kan anvendes til at øge interoperabiliteten og forbinde data på tværs af domæner. (Boje, et al., 2020)

Meget af litteraturen om DT handler om brugen af BIM-modeller. Selv om BIM alene ikke tillader automatisk monitorering, kan anvendelsen af eksisterende og tilgængelige BIM-modeller under udførelsen, øge fordelene og anvendelsen af det af DT (Deng, et al., 2021). Det kræver dog at BIM er veldefineret og velorganiseret (Hosamo, et al., 2022)

I integrationen mellem BIM og DT opstår der udfordringer grundet deres forskellighed. BIM er statisk og DT er dynamisk. Desuden opstår der barrierer i form af forskelligartede dataformater, softwarekompatibilitet og interoperabilitet. Behovet for tværfaglig koordinering øges, ved at integrere BIM og DT. Det kan resultere i kommunikationsbrist eller øget besværighed i koordineringsarbejdet, hvilket kræver en betydelig indsats (Alnaser, et al., 2024)

Sacks et al (2020a) introducerer hvad de kalder *Digital Twin Construction* (DTC), der forener BIM-modeller og -processer og *lean construction* tankegangen med DT og AI for at kreere end datacentreret projektstyringstilgang. De DT-koncepter der anvendes, fokuserer på at skabe high-performance BIM-baserede projektstyringssystemer. DT bør betragtes som mere end blot et fremskridt eller udvidelse af BIM; det er en helhedsorienteret og omfattende tilgang der udnytter data til at foretage bedre beslutninger. (Sacks, et al., 2020).

Hvilket BIM-niveau skal der til at for lave en DT der kan fungere til behovet på byggepladsen. Deng et al (2021) argumenterer for at de forskellige BIM-niveauer (1-5) går fra BIM til DT. For at anvende DT effektivt under udførelsen kræves derfor et højere BIM-niveau (Deng, et al., 2021). BIM består i sig selv af statisk data og kan altså ikke (automatisk) opdateres med realtidsdata, uden data fra andre kilder (Deng, et al., 2021; Tang, et al., 2019). Integrationen mellem sensordata, som IoT, og BIM, har gjort det muligt at synkronisere de statiske data med realtidsdata. Forbindelsen har gjort det muligt at skabe DT for bygninger (Lu, et al., 2020).

4.2.2 Samarbejdsplatform

Interaktionen mellem det fysiske aktiv og den digitale model bliver faciliteret gennem kommunikations- og samarbejdsplatforme. Platformene bliver løbende opdateret med realtids-data fra diverse sensorer. Den kontinuerlige strøm af data tillader DT at være en klog platform (Adeel, et al., 2023). Et omfattende og funktionelt CDE er afgørende (Shahzad, et al., 2022).

Samarbejdsplatformen er et afgørende element i faciliteringen af DT (Piras, et al., 2024). Chacón et al (2024) foreslår at samarbejdsplatformen skal bestå af et *dashboard*, hvor flere informationskilder kan visualiseres sammen og tillade centraliserede anvendelser for f.eks. byggeledere (Chacón, et al., 2024). Adeel et al. (2023) har designet en platform der samler forskellige lag af processen. Funktionerne varierer alt efter behovet, men består bl.a. af *progress tracking*, miljøtracking og kvalitetskontrol. Platformen viser at det er af afgørende betydning at integrere forskellige typer af IKT-værktøjer, specielt BIM, AI, IoT og DT, i byggeprocessen, for at skabe grundlag for miljøvenligt, sikkert og effektivt byggeri. (Adeel, et al., 2023)

4.2.3 Standardisering

Standardisering bruges til at danne et fælles sprog på tværs af virksomheder og sågar landegrænser. Det giver en fælles og ensartet strukturering og håndtering af data, og skaber rammerne for dataskabeloner (Dansk Standard, 2021). Den fælles tilgang til udarbejdelse af data, gør det lettere at skabe en DT. Hvis det ikke er standardiseret, bliver skabelsen af hver DT unik, hvilket hindrer udbredelsen.

Standardisering af data er essentiel. Datastrømme fra forskellige kilder og teknologier, vil kræve en ensartet semantisk struktur / format, for at sikre kompatibilitet med databehandlingsprocessen (Sacks, et al., 2020). Den åbne, neutrale og internationale standard Industry Foundation Classes (IFC) kan være en metode til formålet. IFC indeholder en omfattende række branchespecifikke processer og datamodelskemaer (data model schemas) (Alnaser, et al., 2024). Der opstår dog problemer, da de datakilder DT bygger vi, mangler evnen til at interagere med IFC direkte. En enkelt IFC-fil, indeholdende simpel objektinformation, er utilstrækkelig som grundlag til beslutningstagning. Dataforberedelse er derfor et afgørende skridt, i at repræsentere IFC-skemaet og integrere IoT-kilder i BIM-objekterne på et semantisk niveau. Specifikt kan IFC4-skemaet, ved hjælp af *IfcProcess*, *IfcControl*, *IfcActor*, osv., kortlægge data relateret til aktiviteter og processer,

direkte i IFC-filen. På den måde kan vigtig information tilgås og gemmes i CSV-filer, der kan håndteres af DT. (Pan & Zhang, 2021b)

Implementeringen og anvendelsen af BIM-standarder er så småt begyndt på nationalt plan, og har medført et internationalt skifte mod standardiseret byggeprojektledelse (Alnaser, et al., 2024). En af de mest væsentlige fremskridt er ISO 19650-serien, der fastlægger rammerne for frembringelse og håndtering af information for byggeprojekter med BIM. Serien er baseret på britiske standarder (BS 1192 og PAS 1192-1), og er med til at skabe en global konsensus for effektiv BIM-praksis. (Alnaser, et al., 2024)

Herunder er en samling af forskellige standarder der kan anvendes sammen med DT:

- Strukturering af informationer ved hjælp af DS/EN ISO 23386:2020.
- Dataskabeloner ved hjælp af DS/EN ISO 23387:2020
- Informationshåndteringsproces ved hjælp af DS/EN ISO 19650-serien (se vejl. 17439)
- Level of information needs (LOIN) DS/EN ISO 7817:2024
- IFC DS/EN ISO 16739-1:2024
- Digitale tvillinger – Begreber og terminologi DS/ISO/IEC 30173:2023
- Skabelsen af digitale tvillinger ved hjælp af DS/ISO 23247-serien
- BIM + DT use-cases ved hjælp af DS/CEN/TR 18077:2024

4.2.4 Sensorteknologi

Hensigten med DT er at sammenkæde den digitale og fysiske verden rettidigt. Internet of Things (IoT) er et afgørende element for at det er muligt (Almatared, et al., 2022). IoT er et system af forbundne enheder, bl.a. sensorer, aktuatorer og kommunikationsteknologier, der indsamler og udveksler data. Det er forbindelsen til det fysiske aktiv og dets elementer, der skaber fundamentet for de dynamiske data i DT. IoT skaber allestedsnærværende forbindelse og dermed kontinuerlig kommunikation, hvilket er med til at sikre at dataet er rettidigt og pålidelig. (Piras, et al., 2024)

Sacks et al (2020) understreger at data skal indsamles løbende gennem kontinuerlig monitorering af alt fra designinformationer og værdikæder til den faktiske tilstand på pladsen. (Sacks, et al., 2020)

Sensorteknologi inkluderer forskellige kamerateknologier, lige fra ordinære kameraer til laser- og LiDAR (*Light Detection and Ranging*)-scannere. Scan-to-BIM er, som navnet antyder, en metode til at 3D-scane et objekt og skabe en BIM-model ud fra dataet. (Lu, et al., 2022)

En ny generation af værktøjer, AIoT, er styrket af AI, og overlegenheden over det traditionelle IoT ligger i at levere analyser og kontrollere funktioner for intelligent beslutningstagning (Almatared, et al., 2022). Da AIoT er drevet af AI, ligger dens overlegenhed over det traditionelle IoT i at levere analyse- og kontrolfunktioner til intelligent beslutningstagning (Pan & Zhang, 2021a)

4.2.5 Kunstig Intelligens

Ny teknologi forstærker aktørers nuværende kapabiliteter, frem for at erstatte dem. For at få mest ud af AI, er det vigtigt at udnytte teknologien til fulde ved at bruge de forudsigende og analytiske kapabiliteter (Bernstein, 2024). Bernstein (2024) taler om ML og AI som den femte æra af tilgængelige værktøjer for aktører i byggebranchen (se side 121). (1) Analog tegning 2500 f.v.t.-1985, (2) CAD-værktøjer 1985-2008, (3) BIM 2008-nu, (4) Data-”mellemrummet” 2025, og (5) AI og ML 2030. Vi befinder os nu i det digitale mellemrum, hvor mange dele af projekteringen og byggeprocessen episodisk er digitaliseret, men fortsætter med den sædvanlige opgivelse og mangel på sammenhængende organisering, der karakteriserer meget af byggebranchen. AI, specifikt ML-baserede algoritmer, er lige over horisonten, men har endnu ikke vundet bredere anvendelse. (Bernstein, 2024)

Bosch-Sijtsema et al (2021) har afholdt workshops og interviewet fagpersoner. Rapporten sammenligner fagpersonernes opfattelse af forskellige teknologier med Gartners klassiske *hype curve*. Resultaterne viser at selvom AI endnu ikke er vidt udbredt, har fagpersonerne store forventninger til mulige gevinster. (Bosch-Sijtsema, et al., 2021)

Ifølge Pan og Zhang (2021) skal BIM-modeller være startpunktet for en DT. IoT-sensorer skal indsamle store datamængder og berige modellen. I den DT skal man kunne tilgå både det planlagte arbejde og det udførte arbejde, og der skal hele tiden udveksles og synkroniseres data. For at maksimere udbyttet, foreslår de bl.a. at anvende AI-teknologier til automatisk monitorering af byggeriets fremskridt, tidlig detektering af potentielle udfordringer og optimering af byggelogistik (Pan & Zhang, 2021a). På samme måde konkluderer Heidari et al (2024) at ved at integrere BIM og AI kan opnå forbedret beslutningstagning, optimere processer og øge effektiviteten; Det vil være et paradigmeskifte for byggebranchen (Heidari, et al., 2024). Kor et al (2023) foreslår af integrere

deep learning i DT, til opdage og forudsige komplekse og handlinger og hjælpe til at opdage uforudsigelige problemer inden de opstår (Kor, et al., 2023).

Fox (2024) har undersøgt hvordan man kan transformere sin forretning, til at inkorporere AI, og menneskelig efterspørgsel (*supplication*) af sådanne processer (Fox, 2024); Den hype der er omkring AI, og særligt *generative AI* som chatGPT, har ledt til at der i juni 2023 blev sat en stor reklame op på et stillads ved et byggeprojekt i Antwerpen. Teksten lød ”*Hey chatGPT, finish this building... Your skills are irreplaceable*”, og hentyder til at AI kan bruges til mange ting, men ikke erstatte håndværkere, hvis færdigheder er uerstattelige. Dog bliver AI i stigende grad integreret i stort set alle andre aspekter. Fox (2024) viser at der samlet set er omkring 300 millioner jobs der (potentielt) bliver påvirket af AI globalt. En stor forskel på påvirkningsgraden kan betyde en skævvridning af jobsene og jobtageres vilkår. I og med at selve byggeprocessen ikke kan understøttes af AI, er der heller ingen fordele at høste og derfor heller ikke grundlag for bedre vilkår eller løn. Anderledes ser det ud under projekteringen, hvor der er rig mulighed for at udnytte AI, og derfor opnå bedre vilkår og bedre løn. Et andet emne er at fordelene (øget overskudsgrad f.eks.) udelukkende vil gå til virksomhederne, og der vil være mangel på hjælp til de ansatte til at tilpasse sig nye opgaver og arbejdsgange der involverer AI, eller risiko for helt at miste jobbet. Mange ser potentiale i automatisering, som en metode til at blive fri for slid og øge produktiviteten, mens andre ser det som en trussel mod ”gode jobs”. Denne uoverensstemmelse er rodfæstet i den afstand der er mellem de, hvis arbejde der er mest påvirket og de der får mest ud af den øgede produktivitet. -> eksempel kan en murervirksomhed være meget interesseret i at få robotter til at udføre jobbet, mens de oprindelige arbejdstagere er meget påvirkede af netop den beslutning

Fox (2024) argumenterer også for at en arbejdstager-orienteret tilgang, skal sikre at AI komplementerer arbejdet, i stedet for blot at fortrænge / overtage / degradere det. Denne tilgang skal være med til at fremhæve vigtigheden af det usynlige arbejde der er med at implementere AI-løsninger og samtidig lægge vægt på dem ”på gulvets” holdninger til hvordan et sådanne system skal fungere. Hvis der anvendes *Generative AI* er det også vigtigt at overveje potentielle fejlkilder, som unøjagtigheder eller hallucinationer. Det understreger samtidig vigtigheden af at have en menneskelig kontrol. Uden denne kontrol, der kræver både tid og ekspertise, vil man blive overafhængig af AI, hvilket kan få kostelige, eller i værste fald, farlige konsekvenser. (Fox, 2024)

4.3 Barrierer

Selvom DT tilsyneladende har mange fordele, er implementeringen endnu begrænset. Det skyldes en række barrierer, bl.a. modstand mod forandring i nuværende praksisser, manglende standardisering, tekniske begrænsninger eller omkostninger.

4.3.1 Standardisering

Rasheed et al (2020) fremhæver vigtigheden af standardisering. I en fuldt forbundet og interaktiv verden, vil forskellige fysiske aktiver interagere med hinanden og de tilsvarende DT vil på den måde også interagere med hinanden. For at facilitere dette er der nødt til at være standardisering på tværs af discipliner og domæner. Standarderne kan variere fra filformater til datalagring til datasikkerhed (Rasheed, et al., 2020). Det er imidlertid en udfordring for skabelsen af en omfattende DT, der er afhængig af forbindelsen mellem den digitale og fysiske del (Boje, et al., 2020). Eftersom DT stadig er i sin spæde start, betyder manglen på standarder og fælles praksis at det er udfordrende at promovere (Hosamo, et al., 2022). Zhang et al (2024) understreger dog, at flere brancheorganisationer og standardiseringsorganer er ved at udvikle standarder. (Zhang, et al., 2024)

Bosch-Sijtsema et al (2021) har kigget på BIM, der allerede er en integreret del af byggebranchen og har meget udbredt anvendelse. Efterhånden som BIM modnes, er der blevet klart at der er behov for definerede standarder og klare regler. For at nå det næste modenhedsniveau er der brug for tværfagligt samarbejde på tværs af discipliner. *Best practices* og metoder er ved at blive udviklet. (Bosch-Sijtsema, et al., 2021)

Med fremkomsten af IFC har byggebranchen haft integrerede metoder til at dele og samarbejde om byggeriets data, og har bidraget til et øget samarbejdet mellem byggeriets parter. I takt med at bygningsmodellernes karakter bliver mere kompleks, den overordnede mangel på sammenhæng og synkroniseringsproblemer (*out-of-sync problems*), bliver BIM stadig mere mangelfuld med hensyn til interoperabilitet og automatisering. Selvom interoperabilitetsløsningerne har udviklet sig fra ISO-STEP til IFC og senest Ifc-Owl, kan BIM tilsyneladende ikke videreudvikle sig fra at være statisk til at være dynamisk. (Boje, et al., 2020)

Procesintegration og samarbejde anses som nøgelfaktorer for at øge byggebranchens produktivitet og effektivitet. I undersøgelsen af Zhang et al (2022) foreslås det at anvende DT til

byggeledelse. De understreger at det er nødvendigt at udvide de nuværende LOD-definitioner for BIM, for at DT kan være kompatibel med ledelsesmetoder. Deres rapport tager fat i LOD-niveauer fra forskellige lande (Zhang, et al., 2022).

Sacks et al. (2020a) understreger at der mangler en klar definition på hvad en DT er i byggebranchen. Mange bruger termen DT som et synonym for BIM; Der mangler konsensus, blandt forskere og praktikere, om hvordan DT og datacentrerede teknologier skal understøtte byggeprocessen (Sacks, et al., 2020)

Selvom byggebranchens praksisser er forskellige internationalt, bliver de mere globaliserede, især ved virksomheder der ønsker international tilstedeværelse. Det giver dog udfordringer, da forskellige lande har forskellige regulatoriske begrænsninger og på vidt forskellige teknologiske niveauer. (Izbash & Babayev, 2024) Mangel på interoperabilitet og et fælles sprog er en anseelig barriere (Al-Sehrawy & Kumar, 2021)

4.3.2 Kultur

Byggebranchen er notorisk for at være meget konservativ i sin tilgang til nye avancerede teknologier. Efterhånden som mere avanceret teknologi implementeres, betyder de indbyrdes afhængigheder i teknologien og mellem teknologien og de nuværende praksisser, at der er mindre forståelse for processen (Rafsanjani & Nabizadeh, 2023). Komplexitet og usikkerhed i praktisk anvendelse af DT, BIM og AI, betyder at der mangler empirisk viden og erfaringer, hvilket fører til mangel på tillid mellem projektdeltagere (Pan & Zhang, 2023)

Der er behov for en dramatisk forandring i vores nuværende praksis, for at kunne udføre komplekse reeltidsanalyser. (Rafsanjani & Nabizadeh, 2023). Opoku et al (2023) understreger at mangel på viden om DT, medfører en stor modstand mod forandring og villighed til at ændre i nuværende praksisser. Byggebranchen er kompleks og består af meget fragmenterede processer og faggrupper. Det er med til at besværliggøre en holistisk tilgang til dataintegration, der er nødvendig for at implementere DT (Opoku, et al., 2023).

4.3.3 Data

Siden man begyndte at anvende BIM er datamængden steget eksponentielt (Boje, et al., 2020), og byggeprojekter og dataet bliver større og mere komplekse at indsamle og håndtere. Det bliver stadig sværere at identificere og indsamle det rette data og bruge dem i den rigtige kontekst

(Yitmen, et al., 2021), og flere aktører oplever derfor at drukne i data (Boje, et al., 2020). Den stigende kompleksitet i DT bliver fremhævet af de varierende datastrømme og DTs behov præcis realtidsdata (Yitmen, et al., 2021). Til at imødekomme problemerne fremhæver Sacks et al (2018) tre dimensioner vedrørende data, der er vigtige at tage stilling til: (1) *fidelity*; detaljeringsgrad og nøjagtighed, (2) *purpose*; det tiltænkte formål og (3) *integration*; forbindelsen mellem DT og den fysiske modpart (Sacks, et al., 2018). På samme måde ser Lu et al (2020) DT som datadrevende og for at udvikle en effektiv DT, er der ifølge dem fire store datahåndterings udfordringer der skal adresseres; (1) dataintegration, (2) dataheterogenitet, (3) datasynkronisering og (4) datakvalitet. (Lu, et al., 2020). Al-Sehrawy og Kumar (2021) understreger at der er udfordringer relateret til (5) datasikkerhed (Al-Sehrawy & Kumar, 2021). De forskellige udfordringer beskrives nærmere i følgende tekst:

(1) Data fra forskellige kilder skal samles ét sted, i et *common data environment* (CDE). Der findes flere løsninger på markedet, men generelt er der ikke én der kan løse alle problemer (Lu, et al., 2020). Istanbul et al (2022) ser integrationen af data from forskellige teknologiske kilder med forskellige formater som hovedudfordringen (Istanbul, et al., 2022), og Hosamo et al (2022) har fundet frem til at en af hovedudfordringerne, er at de fleste BIM-sofwarens bruger forskellige proprietære filformater. (Hosamo, et al., 2022). Al-Sadoon et al (2024) foreslår en metode, hvorpå alle modeller, fra design til nedrivning, skal forbindes og dataet på den måde integreres. Deres metode vil anvende en BIM-model på objektniveau mens sensordata beholdes i deres oprindelige format (CSV el.lign.), og vil tildele flere datakilder til det samme BIM-objekt. Metoden skal følge ISO 21597 (Al-Sadoon, et al., 2024). Heidari et al (2024) foreslår at anvende ML-algoritmer til at integrere AI i BIM (Heidari, et al., 2024).

(2) Data fra forskellige kilder kan være disparat, forskelligartede og heterogene. Det har direkte indflydelse på dataintegrationen (Al-Sehrawy & Kumar, 2021; AlBalkhy, et al., 2024). Til tider kan det være svært at afgøre om data fra én maskine er det samme som fra en anden (Feng, et al., 2021). Med udviklingen af nye teknologier er diversiteten og mængden af data steget. Derfor kan vi opleve *informationoverload*, der giver en stor byrde til projektdeltagerne, ved at give enten for meget eller irrelevant information. (Hosamo, et al., 2022)

(3) En almindelig misforståelse er at DT skal repræsentere det fysiske aktiv til fulde og indsamle og bearbejde data i realtid. Det er dog ikke muligt på nuværende tidspunkt (Mihai, et al., 2022).

Selvom IoT-teknologierne er modne, er tab af data stadig et stort problem, grundet især inkompatibelt software og uhomogene data (Deng, et al., 2021). Ligeledes understreger Almatared et al (2022) at tab af data er en udfordring når man importerer og eksporterer data mellem forskellige BIM-applikationer (Almatared, et al., 2022). Istanbulu et al (2022) understreger vigtigheden i at have en kontinuerlig strøm af data, men at det er svært at undgå afbrydelser (Istanbulu, et al., 2022). En stor udfordring i forhold til synkronisering er ifølge Lu et al (2020) timingen for hvornår det skal ske og frekvensen for hvor ofte det skal ske. Det er en afvejning af omkostninger og kvalitet og hvor stort ønsket er om at have en lav latenstid (Lu, et al., 2020). Lang latenstid, altså *ikke*-realtid, kan føre til forsinkelser i beslutningstagningen (Adeel, et al., 2023)

(4) Datakvalitet er defineret som egnethed til brug. Ifølge Lu et al (2020) kan data i DT forringes, og gøre dem uegnede til brug, af flere årsager, bl.a. i dataudvindingsprocessen fra IoT-sensorerne, den oprindelige iboende kvalitet af sensordataet, tab af data grundet dataabstraktion eller komprimering og forskellige kvalitetskrav til dataet, særligt i situationer hvor dataet anvendes på en anden måde end først tiltænkt (Lu, et al., 2020). En anden pointe af Lu et al (2020) er at DT potentielt kan anvende data fra nettet, som f.eks. vejrdata, hvor datakvaliteten kan være tvivlsom (Lu, et al., 2020).

(5) Byggeprojekter indeholder mange data og oplysninger, der ikke nødvendigvis skal være offentligt tilgængelige eller f.eks. kunne anvendes som træningsdata til AIs. Ifølge Opoku et al (2023) er der en bred mangel på tillid til datasikkerhed (Opoku, et al., 2023), ifølge Alizadehsali og Yitmen (2021) mangler der tillid når man sammenligner som-udført med som-planlagt data. (Alizadehsalehi & Yitmen, 2021).

Datasikkerhed er en stor udfordring i forhold til anvendelsen af IoT-udstyr. Sensorerne kan være lette mål for hacker- eller netværksangreb, bl.a. på grund af det brede landskab af forskellige enheder. (Piras, et al., 2024)

4.3.4 Investering

Omkostninger er en stor faktor når man vil implementere DT (Altan & Isik, 2023). Zhang et al (2024) viser at implementerings- og driftsomkostningerne er de mest betydnende. Implementeringen kræver store investeringer i software, hardware (computere, sensorer, osv.) og i mange tilfælde også i datalagring. Derudover kræves specialister der kan opsætte DT og efterfølgende vedligeholde den. Særligt hos små og mellemstore virksomheder (SME) er de høje

omkostninger en barriere (Zhang, et al., 2024). Mihai et al (2022) forudser at drift og vedligeholdelse af DT er den største andel af investeringen (Mihai, et al., 2022)

Virksomheder er tilbageholdende med at investere i DT til dels på grund af de forestillede udviklingsomkostninger og på grund af usikkerhed omkring afkastningsgrad. DT genererer sjældent profit i sig selv, da dets primære opgave er at minimere forbrug (Mihai, et al., 2022). Opoku et al (2021) understreger at det er afgørende at tage stilling til omfang og formål, før man investerer (Opoku, et al., 2021).

5

DISKUSSION

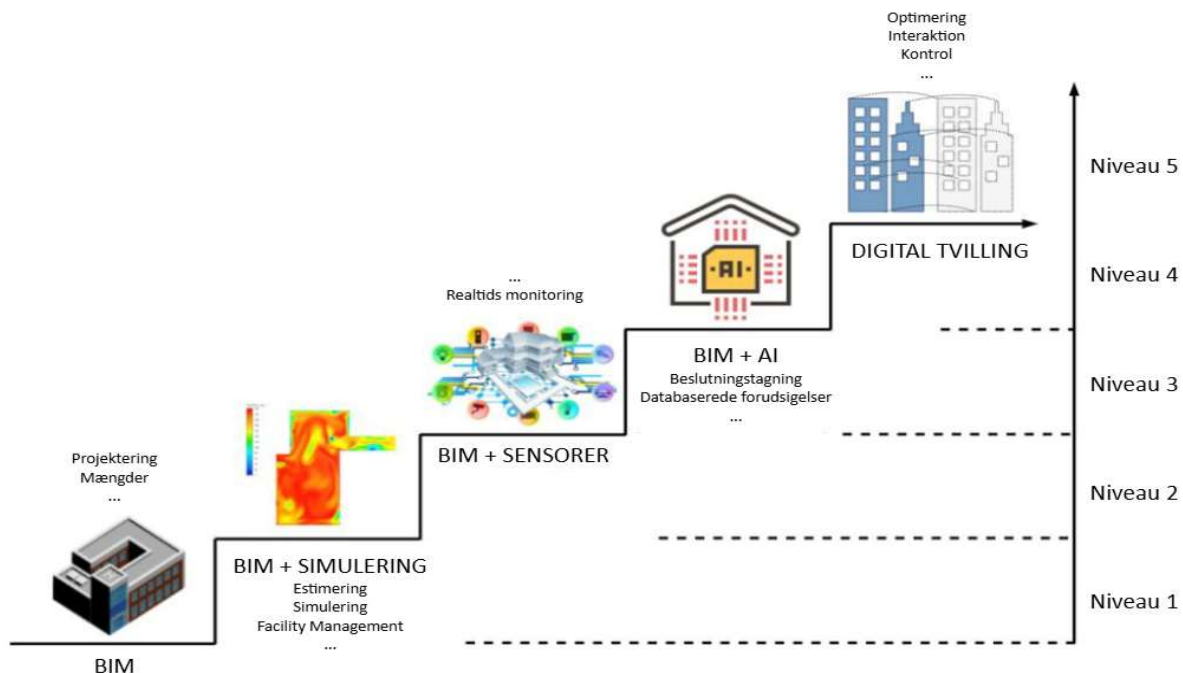
Afsnittet diskuterer undersøgelsens resultat, der belyser de mange fordele, som DT kan bringe til byggebranchen, særligt inden for områder som monitorering, beslutningstagning og risikohåndtering. På trods af disse klare fordele er det værd at bemærke, at de fleste anvendelsesmuligheder kun er blevet afprøvet i mindre skala og endnu ikke er implementeret i større, fuldt funktionelle systemer. Den begrænsede modenhed kan tilskrives flere udfordringer, der nødvendiggør målrettede løsninger og indsatsområder i fremtiden.



5.1 Diskussion

Hvad er en digital tvilling egentlig? Er det et dashboard, en form for 3D-model hvor der er en masse information i? Det kan også være noget helt tredje. Svaret er til diskussion, men en ting er sikkert; hver form har et formål i visse situationer. Et *dashboard* giver et hurtigt og overskueligt overblik. En 3D-model giver et mere detaljeret indblik men er mindre overskuelig. Opoku et al (2021) understreger at det er afgørende at tage stilling til omfang og formål, før man går i gang. (Opoku, et al., 2021). Data er med til at gøre DT nøjagtig, relevant og pålidelig. Men skal vi indsamle *al* data selvom vi ikke ved om vi skal bruge det, eller skal vi kun anvende den mindstmulige men stadig tilstrækkelige datamængde til at udføre opgaven?

Deng et al. (2021) har i deres rapport klassificeret forskellige niveauer af DT (Figur 5.1). Undersøgelsen viser at der endnu ikke er nogen der har nået det højeste niveau. For at nå det er der behov for langt større integration, *seamless* interaktion, intelligente *feedback control systems* og AI. De opsummerer de nødvendige kapabiliteter som (1) visualisering af realtidsdata, f.eks. stade for byggeprocessen, (2) forudsigelser der er baseret på dynamisk data, der er associeret med realtidsmålinger for at støtte beslutningstagning og (3) automatisk kontrolfeedback med optimerede ledelsesstrategier for at introducere interventioner (Deng, et al., 2021). Men er det nødvendigt at nå helt til niveau 5? (Megahed & Hassan, 2022)



Figur 5.1 Forskellige niveauer for DT i byggebranchen. Efter Deng et al (2021)

Ifølge studiet af Alnaser et al (2024) er der flere faktorer der skal til for en succesfuld implementering af DT; (1) opfattelse og mental forandring, (2) tilstedeværelsen af tilstrækkelig infrastruktur, (3) lovmæssige og politiske rammer, (4) fremskreden og omhyggelig planlægning, (5) parathed til at anvende nye teknologier, og (6) forbindelse og samarbejde (Alnaser, et al., 2024). Det handler ikke kun om teknologi, men også om villighed til at gå nye veje og forfølge de spor, hvor potentialet for værdiskabelse er størst. Flere af undersøgelserne tegner samtidig et billede af en svært omstillelig og kompleks industri med mange små aktører.

DT er stadig i sin spæde begyndelse i byggebranchen, men viser stort potentiale inden for en bred vifte af anvendelser (Al-Sehrawy & Kumar, 2021). Tidligere forskning har ofte fremhævet BIM som en grundsten i byggebranchens digitale transformation, men denne undersøgelse viser, at DT tilbyder en mere dynamisk og interaktiv tilgang. Resultaterne understøtter tidligere fund, der fremhæver DTs kapabiliteter, såsom integration af realtidsdata via IoT-sensorer, som muliggør en lukket datahåndteringscyklus gennem PDCA-modellen. Dette stemmer overens med Alnaser et al. (2024), der beskriver DT som en transformativ tilgang og en vigtig udvikling inden for byggeledelse (Alnaser, et al., 2024).

På den anden side fremhæver kritikere som Grieves (2023), at opdelingen af DT i forskellige stadier (digital model, digital skygge og digital tvilling) kan hindre en helhedsorienteret tilgang. Han argumenterer for, at denne opdeling kan føre til den så velkendte silodannelse, hvor funktionerne i en given situation vægtes højere end produktets samlede værdi (Grieves, 2023).

Fordelene ved DT er dog mange, og anvendelsesmulighederne spænder bredt (Al-Sehrawy & Kumar, 2021). Realtidsmonitorering, forbedret sikkerhed og automatisering, kan øge effektiviteten og kvaliteten i byggeprojekter. RFID-tags og 3D-scanning levere et præcist billede af projektets status, hvilket understøtter hurtige og velinformerede beslutninger. Derudover muliggør DT ressourceoptimering og reducerer fejlmarginer. Det er bemærkelsesværdigt, at de fleste eksempler på DTs anvendelse i byggebranchen stadig er i mindre skala og endnu ikke er blevet integreret i operable systemer (AlBalkhy, et al., 2024). Den lave grad af modenhed skyldes en række forskellige barrierer, der er forsøgt belyst i afsnit 4.3. For at overkomme dem skal der en række forskellige løsninger og tiltag til.

Definitionen af AI rykker sig hele tiden, som den bliver udviklet; Det er en flydende definition. Fra et videnskabeligt synspunkt, kan man måske se selve termen AI som formålsløs (AAU, 2024a). For

at definere *kunstig* intelligens, er vi først nødt til at definere intelligens. Men hvad er intelligens reelt? Indtil for nylig, var standarddefinitionen af AI, at den efterstræber at gøre det menneskehjernen kan. I takt med at teknologien forbedres, bliver målet for hvad den skal kunne mere krævende. ChatGPT kan i dag f.eks. godt bestå den famøse Turing Test, man er det virkelig intelligens, eller følges blot et sæt instrukser? (AAU, 2024a)

EU omformulerer deres definition af AI hvert halve år. På et tidspunkt har de fjernet udtrykket *intelligens*, fordi *intelligens* er så svær at definere. Det gør det meget svært at regulere AI, hvis man ikke kan definere nøjagtigt hvad det er der skal reguleres. (AAU, 2024a)

AI-assistance kan supplere ved at fjerne tidskrævende rutinearbejde og frigøre ressourcer til mere værdiskabende opgaver. Samtidig bør man dog være opmærksom på risikoen for overautomatisering, som kan underminere menneskelig ekspertise. Hidtil og indtil for nylig er byggeprojekter løst med menneskelig intelligens alene. I den forbindelse skal vi se AI som et værktøj, f.eks. ligesom en lommeregner. Den kan lave udregningen for dig, men du er stadig den der har ansvaret for at regnestykket er korrekt. AI skal fjerne noget af det "rugbrødsarbejde" der er så meget af, og give projektdeltagerne mulighed for at bruge mere tid på reelt værdiskabende arbejde. Man kan vælge at se AI som en nyuddannet kollega. Man kan give dem opgaver, men man ved reelt ikke hvor dygtige de er, og derfor bør man også være påpasselig med at sætte sit navn på opgaven, før man har kontrolleret kvaliteten af det. Når man så har kontrolleret arbejdet (og fintunet modellen) i en tilstrækkelig grad, kan man begynde at stole på den som en "erfaren kollega".

Den hurtige udvikling og udbredelse af AI, er der opstået bekymringer om hvordan maskiner vil lave moralske beslutninger. Hvordan løser den udfordringer i forbindelse med samfundsmæssige forventninger og etiske principper? Vi går ind i en æra hvor maskiner skal kunne håndtere forskellige beslutninger; Hvordan fordeler vi de forbedringer det medbringer, men ligeledes hvordan AI skal håndtere de tab / skade det uundgåeligt også vil føre med sig. (Awad, et al., 2018)

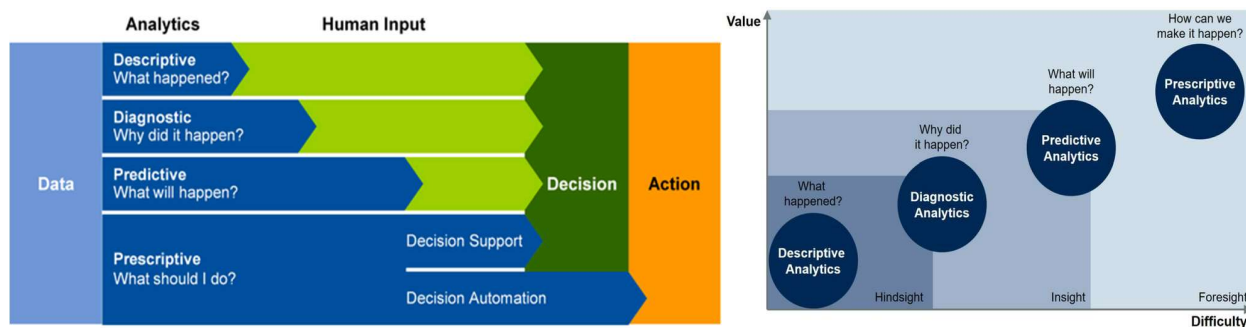
Vi har måske en dårlig vane med blindt at stole på teknologi. Vi tager for gode varer, hvad AI leverer, og vi er ikke kritiske nok over for resultaterne; "*computeren sagde det skulle være sådan her*" er ikke tilstrækkeligt argument eller dokumentation. Folk glemmer nogle gange at BIM og AI blot er værktøj. Det er ikke en person, en specialist eller noget i den dur; De er værktøj man kan udnytte til at træffe beslutninger på et grundlag der er bedre analyseret med større datamængde på kortere

tid. Det er vigtigt at overveje hvorfor og hvad vi reelt vil bruge AI til. Fristelsen til at anvende de til alt er der, men så ender vi med ”*jeg vil have det hele, for det er al sammen så godt*” og så kan vi ende i en situation hvor vi egentlig ikke får så stor nytte af AI.

Kan man forvente, at når ens arbejde bliver mere effektivitet ved hjælp af AI, så skal levere mere arbejde, bedre og hurtigere? Hvis en opgave før tog tolv timer, og den nu kan løses på to, forventes der så man kan løse den opgave seks gange? Man skal passe på man ikke falder i dén fælde.

AI har uden tvivl sin berettigelse i nutidens og fremtidens byggeri. Hidtil er byggeprojekter løst med menneskelig intelligens alene. Fremtiden byder på en langt mere udbredt anvendelse af AI. Det er dog vigtigt at overveje hvordan det skal anvendes. Bernstein (2024) argumenterer for at hvis man ikke kommer i gang med AI-teknologier, vil man blive udkonkurreret af dem der gør. Virksomheder skal derfor stille sig selv spørgsmålet ”*hvordan vil vi anvende den næste store ting?*”. Hvis fortiden er prolog, så er svaret nok *ikke nær så meget som man kunne forvente*. CAD-programmer gjorde det lettere for os at lave nøjagtige tegninger, samtidig eksploderede antallet af tegninger der var nødvendige til at beskrive et design. Måske er moderne bygninger, sammenfaldende med fremkomsten af CAD, bare mere komplekse. Det er dog tvivlsomt om alle tilsyneladende effektivitetsgevinster er bukket under for den øgede kompleksitet. Selvom BIM, og forhåbentligt DT, er bredt anvendt af branchen, vil en integration af AI næppe være et paradigmeskifte. (Bernstein, 2024)

Hicks lov fortæller os at jo flere valgmuligheder man har, jo længere tid tager det at tage beslutninger. Det er en teori der handler om at undgå at overvælde beslutningstagere med beslutninger. I den forbindelse kan avancerede digitale værktøjer anvendes til at minimere antallet af valg og gøre det lettere for brugeren at træffe beslutninger. Det er interessant at kigge på hvor meget af kontrollen der kan automatiseres, for så kun at vise mennesket de mest kritiske områder, og overlade beslutningerne til dem. Se nedenstående Figur 5.2



Figur 5.2 Analyseniveauer for anvendelsen af analyseværktøjer (Gartner, 2014)

Frembringelsen og driften af DT generer drivhusgasser, der er ekstremt svære at kvantificere. Derfor bør emissionerne fra DT, sammenlignes med de energibesparende tiltag den kan frembringe (Zhang, et al., 2024). Samtidig er afvejningen mellem omkostninger og besparelser. Når vi diskuterer de høje omkostninger, er det vigtigt at tage i betragtning, at entreprenører ofte har en lav profitmargin. På den ene side er de tøvende med at investere i ny teknologi, men på den anden side kunne DT potentielt være med til at øge profitten (Zhang, et al., 2024). Investeringens størrelse afhænger af om der findes DT som *of-the-shelf* produkter, eller skal den håndlaves til et specifikt projekt. Det er svært at svare på før der tages stilling til hvad formålet med DT er.

5.2 Konklusion

Denne rapport har undersøgt potentialerne ved digitale tvillinger i byggebranchens udførelsesfase med fokus på anvendelsesmuligheder, nødvendige *enablers* og eksisterende barrierer. Rapportens fund tyder på, at selvom digitale tvillinger befinder sig i sin spæde start, indeholder de stort potentiale til at revolutionere byggebranchen. DT tilbyder mange nye perspektiver og aspekter til den stigende digitalisering i byggebranchen. Kombinationen af fysiske aktiver, digitale modeller og datadrevende analyser, komplimenterer hinanden, og er med til at udvikle et robust system, der tillader os at træffe mere informerede beslutninger, baseret på realtidsmonitorering, simulering og forudsigelser. Hvis BIM-modeller skal anvendes som grundlag for DT, er det afgørende at de er af høj kvalitet. Der skal være styr på modelleringsskik og hvad der reelt er behov for, for at skabe værdi under udførelsen. Vi skal målrettet skabe og vedligeholde netop det. For at det kan lade sig gøre, bør der udvikles standarder for både processen og for det færdige produkt.

I Danmark er byggebranchen allerede godt positioneret til at drage fordel af forskellige digitale teknologier, takket være vores avancerede digitale infrastruktur og politiske fokus på digitalisering. Alligevel kræves yderligere indsats for at sikre bred implementering af digitale teknologier i udførelsesfasen, herunder en stærkere integration af DT. Vi kan konkludere at DT i sin nuværende udgave *kan* være med til at øge produktiviteten og effektivisere processerne relateret til udførelsesfasen. Dog vil byggebranchens tværfaglige og komplekse natur, gøre det vanskeligt at implementere.

5.3 Perspektivering

DT er relevant for byggebranchen da de kan spille en afgørende rolle i den digitale transformation. Vores data og værktøjer er endnu ikke er fuldt udnyttet.

Fremtidig forskning og praksis bør fokusere på at overvinde de eksisterende barrierer og skabe rammer, der fremmer implementeringen af DT. Med en koordineret indsats fra både offentlige og private aktører har vi mulighed for at få det til at ske. Vi skal i fremtiden også se flere eksempler på praktisk anvendelse, hvor pilotprojekter skal bane vejen for en bredere anvendelse.

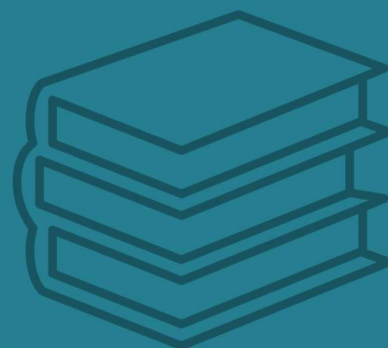
På et nationaløkonomisk niveau kan DT bidrage til at øge produktiviteten i byggebranchen, der traditionelt har været karakteriseret ved lav effektivitet. Teknologiens implementering kan skabe nye arbejdspladser inden for digitale fagområder og styrke Danmarks position som en frontløber inden for det digitale byggeri.

Vi skal også huske at erkende at AI, DT og andre digitale værktøjer ikke er (og nok heller aldrig bliver) løsningen på *alle* vores udfordringer.

6

REFERENCER

Referencer er sket efter Harvard(-Anglia) metoden, der er en af mange metoder, der anvender den såkaldte navne-år-metode. Referenceafsnittets formål er at vise en oversigt over alle referencer der er anvendt. I teksten henvises til referencerne for bl.a. at undgå anklager om plagiat og for at læseren let kan identificere den oprindelige kilde til et bestemt statement, citat eller forskning.



Adeel, M. et al., 2023. *Building Information Modeling and Artificial Intelligence Based Smart Construction Management: Materials and Electrical*, European Journal of Theoretical and Applied Sciences.

Available at: [https://doi.org/10.59324/ejtas.2023.1\(6\).68](https://doi.org/10.59324/ejtas.2023.1(6).68)

AlBalkhy, W. et al., 2024. *Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges*, Automation in Construction.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105368>

Alizadehsalehi, S. & Yitmen, I., 2021. *Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX)*, Smart and Sustainable Built Environment.

Available at: <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2021-0016>

Almatared, M. et al., 2022. *Digital Twin in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Bibliometric Review*, Construction Research Congress.

Available at: [10.1061/9780784483961.070](https://doi.org/10.1061/9780784483961.070)

Alnaser, A. A. et al., 2024. *Assessment Framework for BIM-Digital Twin Readiness in the Construction Industry*, buildings.

Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings14010268>

Al-Sadoon, N., Scherer, R. J. & Menzel, K., 2024. *Multimodel Framework for Digital Twin Empowerment*, Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering.

Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35399-4_38

Al-Sehrawy, R. & Kumar, B., 2021. *Digital Twins in Architecture, Engineering, Construction and Operations. A Brief Review and Analysis*, ICCCBCE.

Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_64

Altan, E. & Isik, Z., 2023. *Digital twins in lean construction: a neutrosophic AHP – BOCR analysis approach*, Engineering, Construction and Architectural Management.

Available at: <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2022-1115>

Arksey, H. & O'Malley, L., 2005. *Scoping Studies: Towards a Methodological Framework*, International Journal of Social Research.

Asif, M., Naeem, G. & Khalid, M., 2024. *Digitalization for sustainable buildings: Technologies, applications, potential, and challenges*, Journal of Cleaner Production.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141814>

AU, 2024. Aarhus Universitetsbibliotek [Online]

Available at: <https://library.au.dk/forskere/bibliometri>

- Awad, E. et al., 2018. *The Moral Machine Experiment*, Nature.
Available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0637-6>
- Baghalzadeh, M. et al., 2022. *Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis*, MDPI / Buildings.
Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings12101503>
- Bernstein, P., 2024. Autonomous Algorithmic Architects: Wicked Problems of Machine Learning in Architecture. *Artificial Intelligence in Architecture*, Vol 94(03:2024), pp. 118-127.
- Boden, M. A., 2016. *AI: Its Nature and Future*. : Oxford University Press.
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S. & Rezgui, Y., 2020. *Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research*, Automation in Construction.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Boje, C. et al., 2023. *A framework using BIM and digital twins in facilitating LCSA for buildings*, Journal of Building Engineering.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107232>
- Bonnén, H. L. & Younan, R. A., 2024. *Customized GPT-model*, Department of Civil and Architectural Engineering.
- Bosch-Sijtsema, P., Claeson-Jonsson, C., Johansson, M. & Roupe, M., 2021. *The hype factor of digital technologies in AEC*, Construction Innovation.
Available at: <https://doi.org/10.1108/CI-01-2020-0002>
- Britannica, u.d. *Britannica / Technology / expert-system*. [Online]
Available at: <https://www.britannica.com/technology/expert-system>
[Senest hentet eller vist den november 2024].
- Campo, M. d. & Leach, N., 2022. Can Machines Hallucinate Architecture?: AI as Design Method. *Machine Hallucinations: Architecture and Artificial Intelligence*, Vol 92(03:2022), pp. 6-13.
- Chacón, R. et al., 2024. *Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure*, Journal of Building Engineering.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522>
- Chaillou, S., 2022. *Artificial Intelligence and Architecture: From Research to Practice*. 1. red. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- Chernyshev, D. et al., 2021. *Digital Object Detection of Construction Site Based on Building Information Modeling and Artificial Intelligence Systems*, International Workshop on Information

Technologies: Theoretical and Applied Problems.

Available at: <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000717>

CIOB, 2024. *CIOB Artificial Intelligence (AI) Playbook*, The Chartered Institute of Building (CIOB).

ConTech Lab, 2024a. *AI i Byggeriet – Hvor langt er vi, og hvad er der på vej?*, ConTech Lab – en del af Molio.

ConTech Lab, 2024b. *Byggeriets Modenhedsmåling*, ConTech Lab – en del af Molio.

Dansk Standard, 2021. *Vejledning til DS/EN ISO 19650 del 1 og 2*, Dansk Standard.

Available at: [ISBN: 978-87-7193-235-5](https://www.danskstandard.dk/978-87-7193-235-5)

Darko, A. et al., 2020. *Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities*, Automation in Construction.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>

Deng, M., Menassa, C. C. & Kamat, V. R., 2021. *FROM BIM TO DIGITAL TWINS: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE EVOLUTION OF INTELLIGENT BUILDING REPRESENTATIONS IN THE AEC-FM INDUSTRY*, Journal of Information Technology in Construction.

Available at: <http://dx.doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>

Dobbins, M., 2017. *Rapid Review Guidebook*, National Collaborating Centre for Methods and Tools.

Draghi, M., 2024a. *The future of European competitiveness – Part A: A competitiveness strategy for Europe*, European Commission.

Draghi, M., 2024b. *The future of European competitiveness – Part B: In-depth analysis and recommendations*, European Commission.

Eastman, C., 1976. *General purpose building description systems*, Computer-Aided Design.

Available at: [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(76\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0010-4485(76)90005-1)

Eastman, C. & Henrion, M., 1977. *Glide: a language for design information systems*, ACM SIGGRAPH Computer Graphics.

Available at: <https://doi.org/10.1145/965141.563863>

El Jazzer, M., Piskernik, M. & Nassereddine, H., 2020. *Digital Twin in construction: An Empirical Analysis*, Workshop on Intelligent Computing in Engineering (pp. 501–510).

Available at: <https://doi.org/10.14279/depositonce-9977>

Engelbart, D. C., 1962. *Augmenting Human Intellect: A Conceptual Framework*, Stanford Research Institute.

Available at: <https://www.doungengelbart.org/pubs/augment-3906.html>

- Feng, H., Chen, Q. & Garcia de Soto, B., 2021. *Application of digital twin technologies in construction: an overview of opportunities and challenges*, International Symposium on Automation and Robotics in Construction.
Available at: <http://dx.doi.org/10.22260/ISARC2021/0132>
- Fox, S., 2024. 'Hey ChatGPT, Finish This Building...'. *Artificial Intelligence in Architecture*, Vol 94(03:2024), pp. 38-45.
- Ganann, R., Ciliska, D. & Thomas, H., 2010. *MEexthpodeodlogiyting systematic reviews: methods and implications of rapid reviews*, Implementation Science.
- Garritty, C. et al., 2020. *Cochrane Rapid Reviews: Interim Guidance from the Cochrane Rapid Reviews Methods Group*, Cochrane.
- Glaessgen, E. H. & Stargel, D. S., 2012. *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).
Available at: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Gobesz, F.-Z., 2020. *The Roots of BIM*, Műszaki Tudományos Közlemények.
Available at: <https://doi.org/10.33894/mtk-2020.12.06>
- Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A., 2016. *Deep Learning*. 1. red. Cambridge: The MIT Press.
- Grievess, M., 2015. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*.
[Online]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- Grievess, M., 2023. *Digital Model, Digital Shadow, Digital Twin*, Preprint.
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/369830792_Digital_Model_Digital_Shadow_Digital_Twin
- Gugerty, L., 2006. *Newell and Simon's Logic Theorist: Historical Background and Impact on Cognitive Modeling*, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting.
Available at: <https://doi.org/10.1177/154193120605000904>
- Harode, A., Yanamala, A. & Thabet, W., 2024. *Exploring the Impact of Data Selection to Support Development of Predictive Twins*, cibW78.
- Heidari, A., Peyvastehgar, Y. & Amanzadegan, M., 2024. *A systematic review of the BIM in construction: from smart building management to interoperability of BIM & AI*, Architectural Science

Review.

Available at: <https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2243247>

Hosamo, H. H. et al., 2022. *A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry*, Advances in Civil Engineering.

Available at: <https://doi.org/10.1155/2022/2185170>

Indenrigs- og Boligministeriet, 2021. *National Strategi for Bæredygtigt Byggeri*, Indenrigs- og Boligministeriet. Udarbejdet af Bolig- og Planstyrelsen.

Istanbullu, A., Wamuziri, S. & Siddique, M., 2022. *BIM Digital twins environment to enhance construction process*, Earth and Environmental Science.

Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1055/1/012006>

Ivanova, S., Kuznetsov, A., Zverev, R. & Rada, A., 2023. *Artificial Intelligence Methods for the Construction and Management of Buildings*, Sensors.

Available at: <https://doi.org/10.3390/s23218740>

Izbash, Y. & Babayev, V., 2024. *Digital Evolution in AEC industry: Bridging BIM, Building Codes, and Future Technologies*, Earth and Environmental Science.

Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012004>

Jahangir, M. F., Schultz, C. P. L. & Kamari, A., 2024. *A REVIEW OF DRIVERS AND BARRIERS OF DIGITAL TWIN ADOPTION IN BUILDING PROJECT DEVELOPMENT PROCESSES*, Journal of Information Technology in Construction.

Available at: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.008>

Khangura, S. et al., 2012. *Evidence summaries: the evolution of a rapid review approach*, Systematic Reviews.

Kor, M., Yitmen, I. & Alizadehsalehi, S., 2023. *An investigation for integration of deep learning and digital twins towards Construction 4.0*, Smart and Sustainable Built Environment.

Available at: <https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2021-0148>

Lighthill, J., 1973. *Artificial Intelligence: A General Survey*, Artificial Intelligence: A paper symposium.

Available at: https://www.chilton-computing.org.uk/inf/literature/reports/lighthill_report/p001.htm

Lindsay, R. K., Buchanan, B. G., Feigenbaum, E. A. & Lederberg, J., 1993. *DENDRAL: A case study of the first expert system for scientific hypothesis formation*, Artificial Intelligence.

Available at: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(93\)90068-M](https://doi.org/10.1016/0004-3702(93)90068-M)

Linnenleucke, M. K., Marrone, M. & Singh, A. K., 2019. *Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses*, Australian Journal of Management.

Available at: <https://doi.org/10.1177/0312896219877678>

Lovelace, A., 1843. *Analytical Engine*, Note G. : .

Lu, Q. et al., 2020. *Developing a Digital Twin at Building and City Levels Case Study of West Cambridge Campus*, American Society of Civil Engineers.

Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763)

Lu, Q. et al., 2022. *Digital Twins on the Built Environment: Fundamentals, principles and applications*.

1. ISBN 978-0-7277-6580-2 (<https://doi.org/10.1680/dtbe.65802.101>) red. Westminster, London: ICE Publishing.

Madubuike, O. C., Anumba, C. J. & Khallaf, R., 2022. *A REVIEW OF DIGITAL TWIN APPLICATIONS IN CONSTRUCTION*, Journal of Information Technology in Construction.

Available at: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.008>

McCarthy, J., Minsky, M., Rochester, N. & Shannon, C., 1955. *A PROPOSAL FOR THE DARTMOUTH SUMMER RESEARCH PROJECT ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE*, Dartmouth College.

Available at: <https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>

McCulloch, W. S. & Pitts, W., 1943. *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*, The Bulletin of Mathematical Biophysics.

Available at: <https://doi.org/10.1007/BF02478259>

McDermott, J., 1980. *R1: an Expert in the Computer Systems Domain*, Carnegie-Mellon University, Department of Computer Science.

Available at: <http://aaai.org/Papers/AAAI/1980/AAAI80-076.pdf>

Megahed, N. A. & Hassan, A. M., 2022. *Evolution of BIM to DTs: A Paradigm Shift for the Post-Pandemic AECO Industry*, Urban Science.

Available at: <https://doi.org/10.3390/urbansci6040067>

Mengist, W., Soromessa, T. & Legese, G., 2020. *Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research*, MethodsX.

Mihai, S. et al., 2022. *Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects*, IEEE Communications Surveys & Tutorials.

Available at: <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>

Minsky, M. & Papert, S. A., 1969. *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*. 1. red. Massachusetts: The MIT Press.

- Munn, Z. et al., 2018. *Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach*, BMC Medical Research Methodology.
- 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.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>
- Opoku, D.-G.J. et al., 2023. *Barriers to the Adoption of Digital Twin in the Construction Industry: A Literature Review*, Informatics.
Available at: <https://doi.org/10.3390/informatics10010014>
- Oxford English Dictionary, 2023. *artificial intelligence*. [Online]
Available at: https://www.oed.com/dictionary/artificial-intelligence_n
- Page, M. J. et al., 2021. *PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews*, BMJ.
Available at: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Pan, Y. & Zhang, L., 2021a. *Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends*, Automation in Construction.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- Pan, Y. & Zhang, L., 2021b. *A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management*, Automation in Construction.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564>
- Pan, Y. & Zhang, L., 2023. *Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions*, Archives of Computational Methods in Engineering.
Available at: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>
- Piras, G., Agostinelli, S. & Muzi, F., 2024. *Digital Twin Framework for Built Environment: A Review of Key Enablers*, Energies.
Available at: <https://doi.org/10.3390/en17020436>
- Rafsanjani, H. N. & Nabizadeh, A. H., 2023. *Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin*, Energy and Built Environment.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004>
- Rasheed, A., San, O. & Kvamsdal, T., 2020. *Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective*, IEEE.
Available at: [10.1109/ACCESS.2020.2970143](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143)

- Rashid, A. B. & Kausik, M. A. K., 2024. *AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications*, Hybrid Advances.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100277>
- Rienecker, L. & Jørgesen, P. S., 2008. *Den Gode Opgave*. 3. red. : Samfunds Litteratur.
- Rosenberg, J., Fonnes, S., Öberg, S. & Andresen, K., 2022. *How to produce a rapid systematic review – a review article*, Danish Medical Journal.
- Rosenblatt, F., 1958. *The Perceptron: A Probabilistic model for information storage and organization in the brain*, ONR Research Reviews.
- Sacks, R. et al., 2020. *Construction with digital twin information systems*, Data-Centric Engineering.
Available at: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G. & Teicholz, P., 2018. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. 3. red. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc..
- Sacks, R., Girolami, M. & Brilakis, I., 2020b. *Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech*, Developments in the Built Environment.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>
- Samuel, A. L., 1959. *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers*, IBM.
Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5392560>
- ScienceDirect, u.d. *ScienceDirect / Topics / Computer Science / LISP*. [Online]
Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/lisp>
[Senest hentet eller vist den oktober 2024].
- Shahzad, M., Shafiq, M. T., Douglas, D. & Kassem, M., 2022. *Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges*, Buildings.
Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings12020120>
- Stanford, 2004. *The Chinese Room Argument*. [Online]
Available at: <https://plato.stanford.edu/entries/chinese-room/>
[Senest hentet eller vist den oktober 2024].
- Sutherland, I. E., 1963. *SKETCHPAD, A MAN-MACHINE GRAPHICAL COMMUNICATION SYSTEM*, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
Available at: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-574.pdf>

Tang, S. et al., 2019. *A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends*, Automation in Construction.
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>

Tao, F. et al., 2019. *Digital twin-driven product design framework*, International Journal of Production Research.
Available at: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>

Transport-, Bygnings- og Boligministeriet, 2019. *Strategi for Digital Byggeri*, Transport-, Bygnings- og Boligministeriet. Udarbejdet af Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen.

Turing, A., 1936. *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*, London Mathematical Society.
Available at: <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>

Turing, A., 1950. *Computing machinery and intelligence*, Mind.
Available at: <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>

Turner, C. J., Oyekan, J., Stergioulas, L. & Griffin, D., 2021. *Utilizing Industry 4.0 on the Construction Site: Challenges and Opportunities*, IEEE.
Available at: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3002197>

VOSviewer, u.d. VOSviewer. [Online]
Available at: <https://www.vosviewer.com/>

Weizenbaum, J., 1966. *ELIZA - a computer program for the study of natural language communication between man and machine*, Communications of the ACM.
Available at: <https://doi.org/10.1145/365153.365168>

Wohlin, C., 2014. *Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering*, EASE.

Yitmen, I., Alizadehsalehi, S., Akiner, . & Akiner, M. E., 2021. *An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management*, Applied Sciences.
Available at: <https://doi.org/10.3390/app11094276>

Zhang, J., Cheng, J. C. P., Chen, W. & Chen, K., 2022. *Digital Twins for Construction Sites Concepts, LoD Definition, and Applications*, Journal of Management in Engineering.
Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000948](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000948)

Zhang, N., Bahsoon, R. & Theodoropoulos, G., 2020. *Towards Engineering Cognitive Digital Twins with Self-Awareness*, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC).
Available at: <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283357>

Zhang, Z. et al., 2024. *Review of Digital Twin Technologies for Enhanced Sustainability in the Construction Industry, Buildings*.

Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings14041113>

AAU, 2024a. *Introduction to Generative AI & ChatGPT*. [Online]

Available at: <https://www.moodle.aau.dk/course/view.php?id=50200>

AAU, 2024b. *Scientific Background Analysis*. [Online]

Available at: <https://www.moodle.aau.dk/course/view.php?id=44458>

7 BILAG

Oversigt og beskrivelse af bilag. Alle bilag er findes i et andet samlet dokument



- Bilag 1: Typer af neurale netværk
- Bilag 2: Bibliometriske analyser
- Bilag 3: Søgestrengene og resultater af litteratursøgningen
- Bilag 4: Regneark der er anvendt til SLR