

# Eksamen

## Systematisk ferdigstilling i jernbaneprosjekter

En litteraturstudie i systems engineering

Studie: Bachelor i byggeplassledelse

Emnekode: BPL3002      Emnenavn: Bacheloroppgave

Studentens navn: Joakim Haug Kristoffersen

Dato for innlevering: 24.11.2025

Godkjennelse for distribuering av oppgaven, av HØFY (sett kryss):  X

---

## Sammendrag

Oppgaven «Systematisk ferdigstillelse i jernbaneprosjekter: en litteraturstudie i systems engineering» undersøkte hvordan systems engineering kunne benyttes til å styre komplekse jernbaneprosjekter, med mål om å videreutvikle dagens modell for systematisk ferdigstillelse innen jernbane. Problemstillingen bygget på erfaringer med kostnadsoverskridelser og varierende grad av suksess ved bruk av systematisk ferdigstillelse. Teoretisk bygget oppgaven på litteratur om systems engineering prosessen med vekt på kravspesifikasjon, funksjonsanalyse og design, V-modellen, ulike prosjektnedbrytningsstrukturer samt verifikasjon og validering. Metodisk ble det gjennomført et kvalitativt litteraturstudium basert på systematiske søk i Google Scholar, etterfulgt av gjennomgang av referanselister på relevant litteratur. Funnene viste at systematisk ferdigstillelse kunne forstås som en skreddersydd anvendelse av systems engineering, men at dagens praksis var preget av disiplinorientert nedbrytning, svak krav og funksjonssporbarhet og fragmentert test og verifikasjonsarbeid. Oppgaven konkluderte med at systems engineering kunne gi en kontraktforankret hierarkisk prosjektnedbrytningsstruktur med tydelig sporbarhet, og dermed et mer robust grunnlag for styring, verifikasjon og validering av jernbaneprosjekter.

## Abstract

The thesis «Systematic completion in railway projects: a literature study in systems engineering» investigated how systems engineering could be used to manage complex railway projects and to further develop the current model for systematic completion within the railway sector. The research problem was based on experiences of cost overruns and varying success in the application of systematic completion. The theoretical framework drew on literature on the systems engineering process, emphasising requirements, functional analysis and design, the V-model, different project breakdown structures, and verification and validation. Methodologically, the study was designed as a qualitative literature review based on systematic searches in Google Scholar, followed by a review of reference lists in relevant literature. The findings showed that systematic completion could be understood as a tailored application of systems engineering, but that current practice was characterised by discipline based breakdowns, weak traceability of requirements and functions, and fragmented testing and verification activities. The thesis concluded that systems engineering could provide a contract aligned hierarchical project breakdown with clear traceability, offering a more robust basis for governance, verification and validation in railway projects.

## Innholdsfortegnelse

Sammendrag .....	ii
Abstract .....	ii
Tabelliste .....	iv
Figurliste.....	iv
1. Innledning .....	1
1.1. Bakgrunn for valg av problemstilling .....	1
1.1. Presentasjon av problemstilling.....	1
1.2. Formålet med prosjektet .....	1
2. Forskningsdesign.....	2
2.1. Metode .....	2
2.2. Litteratursøk.....	2
2.2.1. Kvalitet på kilder .....	4
2.3. Oppbygningen av oppgaven .....	4
3. Resultater .....	5
3.1. Systematisk ferdigstillelse er systems engineering.....	5
3.2. <i>Hva er systems engineering</i> .....	5
3.2.1. System Engineering Prosessen.....	5
3.3. V-modellen .....	8
3.4. Systemnedbrytning.....	10
3.4.1. Funksjonsnedbrytning .....	10
3.4.2. Disiplinnedbrytningsstruktur .....	10
3.4.3. Kontrakts nedbrytningsstruktur.....	12
3.5. <i>Verifikasjon og validering</i> .....	14
3.6. Bane NORs beskrivelse av Systematisk Ferdigstillelse .....	15
3.6.1. Systemnedbrytning .....	15
3.6.2. Arbeidsprosessen.....	16
4. Diskusjon.....	19

4.1.	Begrensninger i dagens praksis .....	19
4.2.	Barrierer for implementering av systems engineering .....	20
4.3.	Kontraktens rolle i styring, verifikasjon og systemutvikling.....	21
5.	Konklusjon og anbefalinger.....	23
5.1.	Refleksjoner .....	23
5.2.	Forslag til videre forskning.....	23
6.	Referanser .....	24

## Tabelliste

Tabell 1	Søkestrategi .....	3
----------	--------------------	---

## Figurliste

Figur 1	PRISMA inspirert flyt diagram for litteratursøk.....	4
Figur 2	Systems engineering prosessen .....	6
Figur 3	Systems engineering prosessen i V-modellen.....	8
Figur 4	Prosjektnedbrytningsstrukturen (PNS) relatert til V-modellen .....	9
Figur 5	Disiplin nedbrytningsstruktur (DNS) etter Sanei .....	11
Figur 6	Potensielle kontraktsskille visualisert i V-modellen.....	13
Figur 7	Systemnedbrytningsstruktur.....	16
Figur 8	Bane NORs modell for Systematisk Ferdigstillelse .....	16
Figur 9	Bane NORs Systematiske Ferdigstillelse i V-modellen.....	18
Figur 10	Plausibel faseinndeling basert på nåværende rammeverk for systematisk ferdigstillelse.....	21

# 1. Innledning

## 1.1. Bakgrunn for valg av problemstilling

Flyvbjerg (2014, s. 9) finner at mega-jernbaneprosjekter har en gjennomsnittlig kostnadsoverskridelse på 44.7 prosent, mot veiprosjekter med en overskridelse på 20.4 prosent. Også i Norge er det eksempler på at kostnadene vokser betydelig og at de vokser mer i jernbaneprosjekter enn det som er vanlig for store statlige investeringsprosjekter (Andersson, 2022, s. 73). Det ble i 2018 etablert en egen avdeling for systematisk ferdigstillelse sentralt i Bane NOR, og metodikken har de siste årene blitt benyttet i flere prosjekter med varierende erfaringer og grad av suksess (Haug & Saastadhagen, 2025). Erfaringene tyder på at metodikken fortsatt trenger tilpasning til jernbanebransjen. Systematisk ferdigstillelse lover å være «En sikkerhet for at prosjektet oppfyller alle funksjonskrav innenfor gitte tids-, kostnads- og kvalitetskrav, planlagt og verifisert gjennom en strukturert prosess [...]» (Hoel & Johansen, 2016, s. 9). Men om metoden faktisk leverer på dette løftet har ikke blitt godt dokumentert ennå (Beste, 2020, s. 3).

Lynghaug et al. (2021, s. 153–154) finner at et av hovedelementene for å lykkes med implementeringen av systematisk ferdigstillelse er kompetanse. De peker samtidig på at de norske veilederne og øvrige beskrivelser av metoden på norsk er langt mindre detaljerte enn tilsvarende materiale fra andre land. Videre identifiserer de en manglende kobling mellom systematisk ferdigstillelse og systems engineering, og stiller spørsmålet «Hvordan kan du finne hva du trenger hvis du ikke vet hva du leter etter?» (min oversettelse) (Lynghaug et al., 2021, s. 153). Dette spørsmålet ledet oppgaven inn på temaet systems engineering i jernbanesektoren.

## 1.1. Presentasjon av problemstilling

Problemstillingen i denne oppgaven er «Hvordan kan systems engineering benyttes til å styre komplekse jernbane prosjekter?». Omfanget av oppgaven avgrenses til hvordan systems engineering kan støtte planlegging og gjennomføring av prosjektaktiviteter i nybyggprosjekter og større ombyggingsprosjekter.

## 1.2. Formålet med prosjektet

Formålet med denne oppgaven er å undersøke litteraturen om systems engineering, særlig slik den benyttes i jernbane- og infrastrukturprosjekter, for å identifisere hvilken kunnskap som finnes, og hvordan denne kunnskapen kan benyttes til å videreutvikle dagens modell for systematisk ferdigstillelse i jernbaneprosjekter.

## 2. Forskningsdesign

### 2.1. Metode

For å belyse denne problemstillingen er det valgt en konstruktivistisk posisjon. I denne forståelsesrammen betraktes systematisk ferdigstilling og systems engineering som sosialt konstruerte fenomener som brukes til å forklare hvordan verden henger sammen, og som derfor også er i kontinuerlig endring (Klakegg & Tvedt, 2024, s. 5).

Videre er det valgt en pragmatisk tilnærming til sannhetsbegrepet. Det innebærer at oppgaven har som mål å identifisere hva vi må vite for å kunne løse praktiske problemer, og i mindre grad legger vekt på hvordan denne kunnskapen er framkommet (Klakegg & Tvedt, 2024, s. 9). En pragmatisk tilnærming betyr også at forståelsen i denne oppgaven bli påvirket av mine verdier og av at jeg søker å løse problemet ut fra mitt eget perspektiv på hva problemet er (Biedenbach & Jacobsson, 2016, sitert i Klakegg & Tvedt, 2024, s. 10).

Oppgaven er en normativ studie, der målet er å utvikle en begrunnet tolkning av hva systematisk ferdigstilling bør være, basert på tilgjengelig empiri (Sayer, 1997, sitert i Klakegg & Tvedt, 2024, s. 11). Kvalitativ datainnsamling anses som mest egnet for å innhente empiri i denne studien, og det benyttes en induktiv tilnærming for å utvikle nye forståelser og eventuelle teoretiske bidrag basert på de innsamlede dataene (Klakegg & Tvedt, 2024, s. 11).

Dette innebærer at oppgaven ikke bare skal besvare hva systematisk ferdigstilling er, men også vurdere hvordan den bør videreutvikles i lys av litteraturen om systems engineering.

### 2.2. Litteratursøk

Datainnsamlingsmetoden som er brukt for å framskaffe empiri til denne oppgaven er et litteraturstudium, der gjennomføringen er inspirert av seksstegsmodellen til Machi og McEvoy (2016). Stegene som er blitt gjort er som følger:

1. Velge tema
2. Planlegge argumentasjonen
3. Søke i litteraturen
4. Sortere litteraturen
5. Syntetisere litteraturen
6. Skrive oppgaven

Først ble temaet valgt og problemstillingen definert. I denne fasen ble det lest generell litteratur om systems engineering, og det ble gjort flere usystematiske søk for å få overblikk over fagområdet samt identifisere relevante begreper og terminologi. I steg to ble det planlagt hvordan argumentasjonen skulle bygges opp for å besvare oppgavens problemstilling. I steg tre ble det gjennomført et

systematisk litteratursøk, og funnene ble samlet inn og organisert i kategorier. I steg fire ble litteraturen analysert for å identifisere hva som er kjent om temaet. I steg fem ble funnene videre analysert, og konklusjonene trukket og strukturert for å støtte opp under oppgavens hovedkonklusjon. I det siste steget (steg seks) ble selve oppgaven skrevet, og konklusjonen ble evaluert. ChatGPT ble i denne fasen benyttet til språkvask og forbedring av formuleringer.

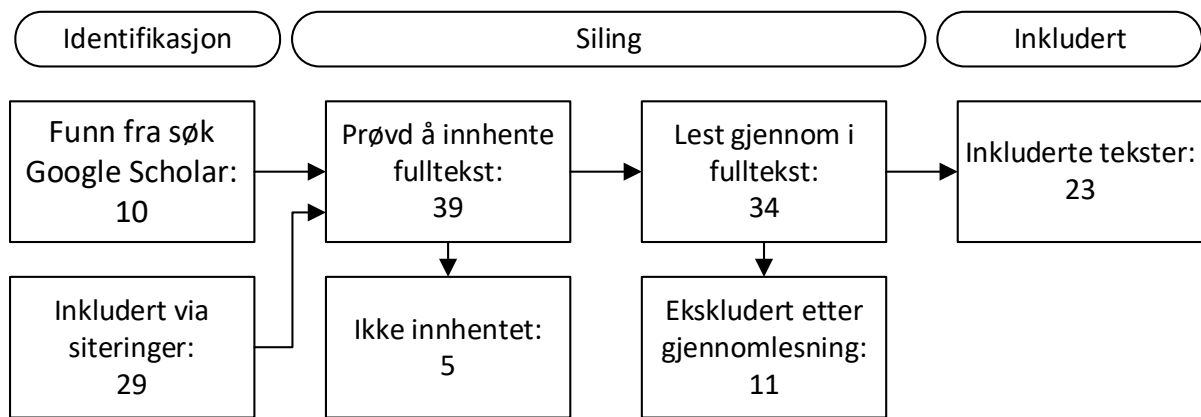
Det ble gjennomført søk i Google Scholar basert på søkestrategien oppsummert i tabell 1.

*Tabell 1 Søkestrategi*

Søke frase	Dato	Treff
"Systematic Completion" 2015-	01.09	438
"rail" "project management" "System Engineering" 2015-	01.09	1020
"rail" "wbs" "Systems Engineering" 2015-	02.09	246
allintitle:"Systems Engineering" Railway 2015-	02.09	33
allintitle: Rail "Systems Engineering"	02.09	52

Utvelgelsen av litteraturen ble gjort etter framgangsmåten beskrevet av Booth et al. (2016, s. 143). Først ble det gjennomført tittelsiling av treffene, og sammendragene til tekstene som ble inkludert på tittel ble deretter lest fortløpende for å effektivisere prosessen. Etter at sammendraget var lest, ble teksten enten inkludert for lesing i fulltekst eller ekskludert. Inklusjonskriteriene var at tekstene omhandlet «systematic completion» eller systems engineering i infrastruktur- og/eller jernbaneprosjekter.

Deretter ble referanselistene til inkluderte tekster gjennomgått for å identifisere ytterligere relevant litteratur (M. Persson, 2021, s. 53). Nettbaserte referansebibliotek ble også benyttet for å se hvem som hadde sitert de inkluderte tekstene og for å finne nyere relevant litteratur. Denne prosessen pågikk parallelt med resten av arbeidet med oppgaven, ettersom behovet for å gå dypere i materialet oppstod underveis. Det ble forsøkt å innhente alle de inkluderte tekstene, men noen av dem ble ikke innhentet for gjennomlesing på grunn av oppgavens begrensede ressurser. Litteratursøket er visualisert i figur 1.



Figur 1 PRISMA inspirert flyt diagram for litteratursøk (PRISMA 2020 Flow Diagram, 2020)

### 2.2.1. Kvalitet på kilder

Det er et stort spenn i litteraturen, fra korte artikler nærmest uten referanser til omfattende doktorgradsarbeider om systems engineering i jernbanesektoren. Synspunktene som presenteres er til dels sprikende, og et gjennomgående trekk er at det finnes mange ulike oppfatninger og tolkninger av hva systems engineering «er». Kildene som er brukt i denne oppgaven er valgt ut på bakgrunn av om de kan belyse oppgavens fokus på hvordan komplekse jernbaneprosjekter kan styres.

### 2.3. Oppbygningen av oppgaven

Først gjøres det en kobling mellom systematisk ferdigstilling og systems engineering. Deretter defineres begrepet systems engineering slik det forstås innenfor rammen av denne oppgaven, før sentrale begreper i systems engineering presenteres, sammen med en beskrivelse av hvordan systematisk ferdigstilling omtales i jernbaneprosjekter. Avslutningsvis diskuteres funnene før oppgaven konkluderer.

## 3. Resultater

I dette kapitlet presenteres funnene fra litteraturstudiet. Først knyttes først systematisk ferdigstillelse til systems engineering. Dette etterfølges av en definisjon av hva system engineering er i konteksten av komplekse jernbaneprosjekter. Dette etterfølges av en beskrivelse av V-modellen, som er mye brukt i systems engineering, for deretter å gå gjennom forskjellige metoder for å lage prosjektnekbrytningsstrukturer. Til slutt beskrives den nåværende modellen for systematisk ferdigstillelse i jernbaneprosjekter.

### 3.1. Systematisk ferdigstillelse er systems engineering

Beste (2020, s. 5) finner at V-modellen som benyttes i systematisk ferdigstillelse bygger på prinsippene fra systems engineering. Lynghaug et al. (2021, s. 152, 2022, s. 4) konkluderer med at prosessen som beskrives i modellen er identiske til INCOSes definisjon av systems engineering, og at den derfor kan betraktes som en skreddersydd versjon av denne disiplinen (Cusumano et al., 2024, s. 68; M. Stevens et al., 2023, s. 1453). Basert på dette konkluderer også denne oppgaven at systematisk ferdigstillelse er basert på systems engineering.

### 3.2. Hva er systems engineering

Aslaksen et al. (2008, s. 2) finner at litteraturen om systems engineering har dreid fra å være en designmetode til å i større grad bli en styringsmetode. De peker videre på at mye av den nyere litteraturen kan klassifiseres som prosjektstyringslitteratur, ettersom temaer som endringskontroll, konfigurasjonsstyring og integrerte utviklingsteam med flere i stor grad har fokusert på styring og kontroll. Persson et al. (2024, s. 7) finner at det heller ikke ser ut til å være enighet om hva som utgjør beste praksis for bruk av systems engineering i jernbaneprosjekter, og peker på et behov for standardisering av retningslinjer og rammeverk. Tilsvarende viser både B. Elliott et al. (2012, s. 206) og B. Elliott (2014, s. 44–45) at det råder ulike oppfatninger innen system engineering felleskapet om både omfanget av systems engineering og hvordan disiplinen bør organiseres. Basert på dette kan det synes som om jernbanesektoren i stor grad mangler en felles forståelse av hva systems engineering innebærer.

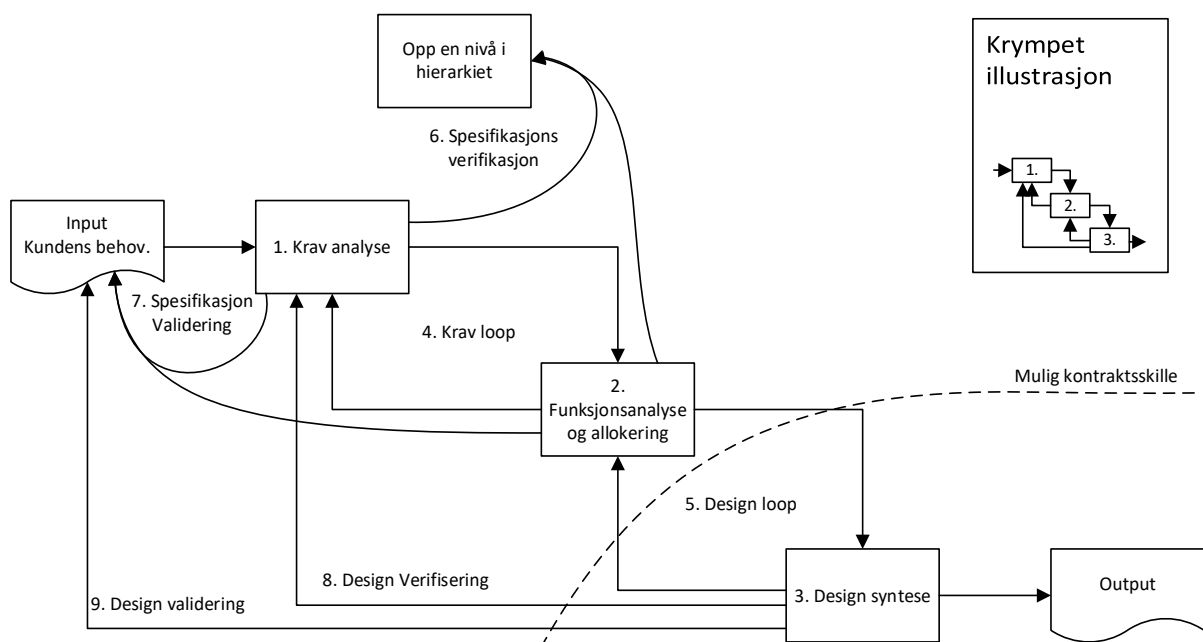
#### 3.2.1. System Engineering Prosessen

Van der Meer et al. (2015, s. 136–137) beskriver systems engineering prosessen, basert på Systems Engineering Fundamentals (2001), som en gjentakende prosess mellom kravanalyse, funksjonsanalyse og designsyntese. De Graaf et al., Lynghaug et al. og Van der Meer et al. (de Graaf

et al., 2016, s. 46, 2017, s. 3–4; Lynghaug et al., 2022, s. 4; van der Meer et al., 2015, s. 136) viser til den samme prosessen når de beskriver hvordan systems engineering anvendes i infrastruktur- og byggeprosjekter. Den nederlandske veilederen for system engineering i infrastrukturprosjekter (ProRail et al., 2013, s. 33) bygger også på denne modellen.

I infrastrukturprosjekter ser det ut til å være relativt bred enighet om hvordan prosessen skal gjennomføres. I slike prosjekter brukes systems engineering på en noe annen måte enn i tradisjonelle utviklingsprosjekter, der fokus typisk ligger på å bygge et teknisk system (Aslaksen et al., 2008, s. 4; Lynghaug et al., 2021, s. 154–155). Her handler det i like stor grad om å designe arbeidsprosessene som å designe det fysiske systemet.

I denne oppgaven legges prosessen slik den beskrives av De Graaf et al. (2016, s. 46, 2017, s. 4) og Systems Engineering Fundamentals (2001, s. 31), til grunn som en operasjonell modell for hva systems engineering er i konteksten av komplekse jernbaneprosjekter. Denne tilnærmingen er valgt fordi det ser ut til å være relativt bred enighet om metoden når den anvendes i infrastrukturprosjekter.



Figur 2 Systems engineering prosessen (Aslaksen et al., 2008, s. 11; de Graaf et al., 2016, s. 46, 2017, s. 4)

De Graaf (2017, s. 4–6) definerer ni elementer i systems engineering-prosessen (se figur 2): tre kjerneelementer og seks tilbakemeldingsløyper. Kjerneelementene er kravanalyse, funksjonsanalyse og allokering samt designsyntese. I det følgende beskrives disse elementene nærmere.

I kravanalysen (element 1) analyseres kravene til analyseobjektet med utgangspunkt i kundenes og interessentenes behov og forventninger. I denne fasen planlegges også hvordan, når og av hvem kravene skal verifiseres og valideres.

I funksjonsanalysen og allokeringen (element 2) beskrives hvilke funksjoner analyseobjektet skal oppfylle, uten at konkrete løsninger angis. Deretter kobles funksjonene til objekter for å danne funksjonelle systemer.

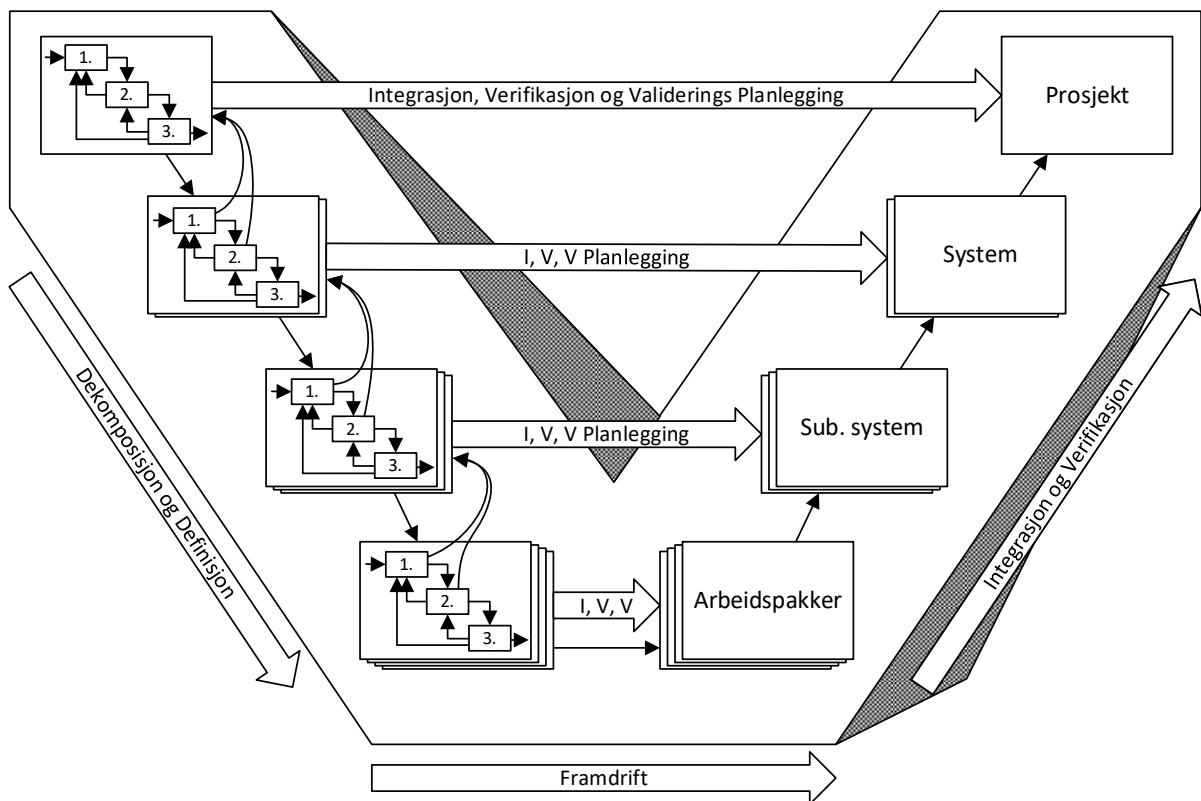
I designsyntesen (element 3) utvikles og vurderes ulike løsningsforslag som skal oppfylle de identifiserte funksjonene, før man velger den løsningen som samlet sett vurderes som mest hensiktsmessig.

De seks øvrige elementene fungerer som tilbakemeldingsløyper. I kravsløyfen (element 4) kan nye funksjoner som avdekkes i funksjonsanalysen føre til at opprinnelige krav må justeres eller suppleres. Designsløyfen (element 5) brukes til å kontrollere at designet er i samsvar med definerte funksjoner og objektspesifikasjoner, og kan samtidig avdekke behov for nye funksjoner.

I spesifikasjonsverifikasjonen (element 6) undersøkes det om krav, funksjoner og objekter er konsistente med tilsvarende elementer på høyere nivå i systemet. Når dette er verifisert, følger spesifikasjonsvalideringen (element 7), der man sammen med kunde og interessenter vurderer om nedbrytingen av krav og funksjoner samsvarer med deres behov, interesser og forventninger.

I designverifiseringen (element 8) kontrolleres det at designet oppfyller alle relevante krav, før designvalideringen (element 9) bekrefter at det endelige designet faktisk møter kundens og interessentenes behov, interesser og forventninger.

Når alle disse stegene er fullført på ett nivå i V-modellen, fortsetter prosessen på neste nivå, inntil designet er tilstrekkelig detaljert til å kunne realiseres i praksis (se figur 3). Tilbakemeldingsløyfe bidrar til kvalitetssikring underveis i arbeidet nedover i hierarkiet ved å redusere risikoen for at feilaktige forutsetninger videreføres. Prosessen gjentas på hvert nivå og resulterer i en hierarkisk representasjon av prosjektet, kalt en systemnedbrytningsstruktur eller arkitektur (se figur 4), som innen systems engineering tilsvarer prosjektnedbrytningsstrukturen (de Graaf et al., 2017, s. 6; Lynghaug et al., 2022, s. 4).



Figur 3 Systems engineering prosessen i V-modellen (Forsberg et al., 2005, s. 109)

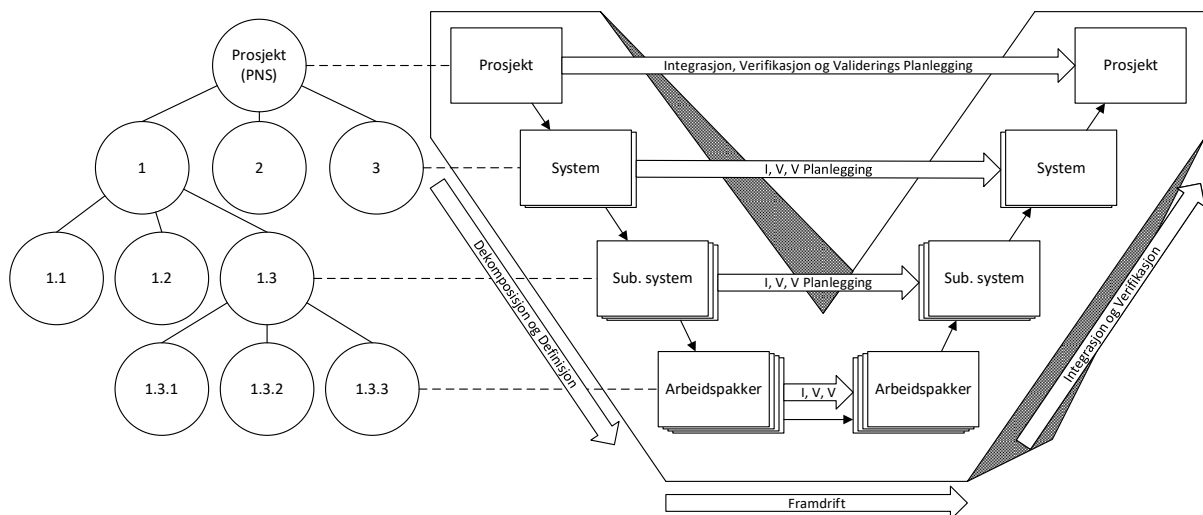
Litteraturen viser at systematisk ferdigstillelse bygger på prinsipper fra systems engineering, og at prosessen kan forstås som en tilpasset anvendelse av denne disiplinen. Samtidig er systems engineering er samtidig et begrep med mange ulike definisjoner. I denne oppgaven er det derfor valgt å ta utgangspunkt i en prosess basert på System Engineering Fundamentals (2001), fordi denne vurderes som hensiktsmessig for gjennomføring av komplekse jernbaneprosjekter.

### 3.3. V-modellen

V-modellen er én av flere modeller som brukes innen systems engineering. Andre modeller inkluderer fossefallsmodellen og spiralmodellen (Boehm, 1988; Forsberg & Mooz, 1991, s. 2, 4; Royce, 1987; Sanei, 2016, s. 89; van der Meer et al., 2015, s. 134–135). V-modellen er imidlertid den mest utbredte og benyttede modellen, og den refereres til i nesten all relevant litteratur på feltet (Aughenbaugh & Paredis, 2004, s. 2; van der Meer et al., 2015, s. 135). Spiralmodellen ble utviklet for å imøtekomme svakhetene ved fossefallsmodellen. Den kan imidlertid oppleves som kompleks, ettersom tidsforløpet i modellen representeres som sykliske runder snarere enn som en lineær prosess fra venstre til høyre (Forsberg et al., 2005, s. 107).

I V-modellen foregår det verifikasjon både mellom de horisontale koblingene samt mellom de ulike fasene (Forsberg & Mooz, 1991, s. 6–9; R. Stevens et al., 1998, referert i Sanei, 2016, s. 89). Modellen kan beskrives som tredimensjonal med parallelle bokser som strekker seg «innover» i papiret for å illustrere at den består av flere elementer, og at kompleksiteten øker for hvert nivå man beveger seg nedover i modellen (Aughenbaugh & Paredis, 2004, s. 2; Forsberg et al., 2005, s. 110; Forsberg & Mooz, 1991, s. 4–5). Den horisontale aksene representerer prosjektets framdrift, mens den vertikale aksene representerer nivået i systemhierarkiet (B. J. Elliott, 2014, s. 96).

Basert på dette kan sammenhengen mellom prosjektnedbrytningsstrukturen (PNS) og V-modellen illustreres som i figur 4. På hvert trinn i prosjektnedbrytningen, når man beveger seg nedover langs venstre side av V-en, planlegger man hvordan det aktuelle delsystemet skal verifiseres og valideres på vei opp langs høyre side (se figur 3). På hvert nivå i nedbrytningen verifiseres det at kravene fra høyere systemnivåer er ivarettatt. Når verifikasjonsmetodene på høyre side av modellen defineres samtidig med spesifikasjonsarbeidet på venstre side, reduseres risikoen for at kravene formuleres på en måte som gjør dem umålbare eller ikke-verifiserbare (Forsberg et al., 2005, s. 110).



Figur 4 Prosjektnedbrytningsstrukturen (PNS) relatert til V-modellen (Forsberg et al., 2005, s. 109; van der Meer et al., 2015, s. 136)

Dette skaper en tydelig kobling og sporbarhet mellom utviklings- og verifikasjonsfasene, noe som gjør V-modellen særlig egnet for store og komplekse prosjekter. Framdriften følger den horisontale aksene fra venstre til høyre, slik det er tradisjonelt visualiseres i prosjektplanlegging. En sentral fordel med V-modellen, sammenlignet med mer tradisjonelle prosjektplanleggingsmetoder, er at den opprettholder sporbarhet gjennom hele prosessen. I tradisjonell planlegging kan denne sporbarheten gå tapt, ettersom man ofte ender opp med en «tegning basert på en tegning basert på en tegning» altså flere ledd fra de opprinnelige kravene (Aslaksen et al., 2008, s. 9).

I dette kapitlet er V-modellens rolle i systems engineering etablert. Modellen fungerer som en visualisering av prosjektnedbrytningsstrukturen, der hvert nivå ned i V-modellen tilsvarer et nivå ned i hierarkiet. For hvert nivå man går ned på venstresiden av V-modellen planlegges arkitekturen for systemer og pakker, samt hvordan det skal verifiseres at arbeidet innenfor det aktuelle omfanget oppfyller krav og funksjoner når man integrerer og tester seg oppover på høyresiden av V-modellen.

## 3.4. Systemnedbrytning

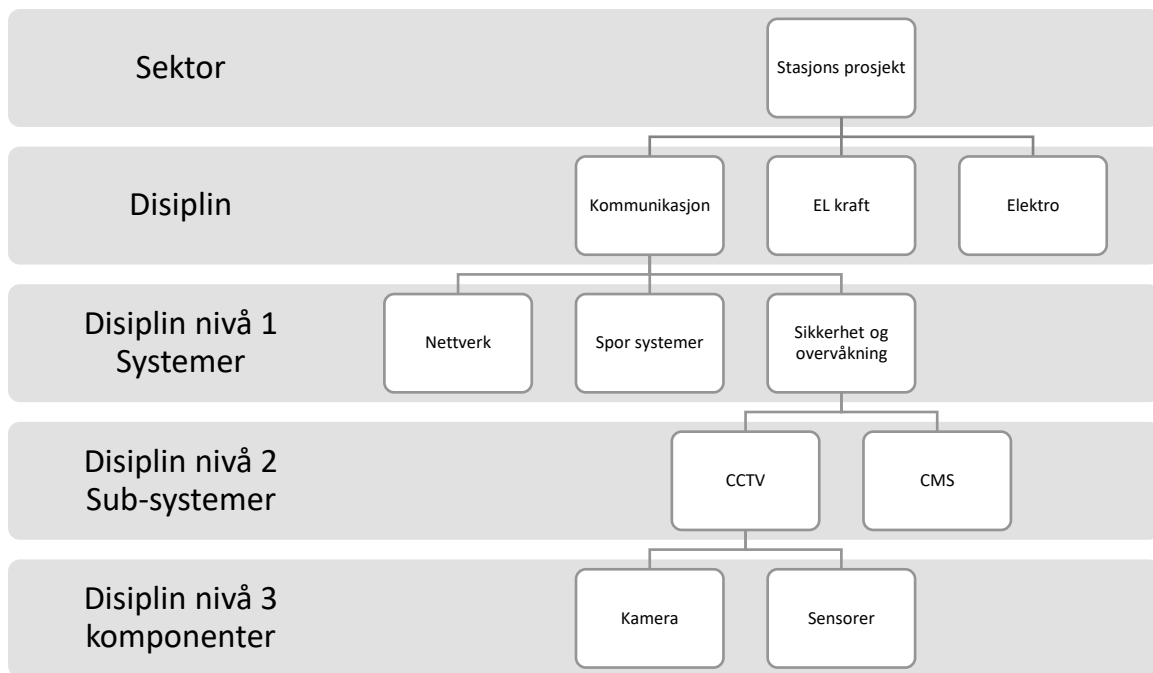
### 3.4.1. Funksjonsnedbrytning

De Graaf et al. (2017, s. 4–5) beskriver at systems engineering metoden danner en hierarkisk nedbrytningsstruktur. Denne strukturen gir hvert objekt en spesifisering av funksjoner, krav og annen relevant informasjon, noe som gjør det mulig å fordele arbeidet mellom kontraktører og leverandører uten å miste helheten av systemet.

Systems engineering metoden danner hierarkiske nedbrytningsstrukturer som sikrer sporbarhet mellom krav, funksjoner og design, samt de tilhørende verifikasjon- og valideringsaktivitetene (de Graaf et al., 2017, s. 4–5). Som litteraturen viser, kan dette gjennomføres på ulike måter, og på hvert nivå må det defineres hvordan systemet skal deles opp. Å ha en felles modell som referanse for alle prosjektmedlemmer er viktig, ettersom det ikke er uvanlig at hvert medlem har sitt eget mentale bilde av systemets grensesnitt, og at disse bildene ofte skiller seg betydelig fra hverandre (Allan et al., 1996, s. 247). Oppdelingen bør optimaliseres for å samle funksjoner samt å minimere antall grensesnitt (Elich et al., 2017, s. 2).

### 3.4.2. Disiplinnedbrytningsstruktur

Sanei (2016, s. 187–188) argumenterer i sin «Disiplinnedbrytningsstruktur» (DNS) for at disiplinene er mer fundamentale enn arbeid, produkter eller organisasjoner i multidisiplinære jernbaneprosjekter, der ulike aktører designer og implementerer ulike deler av infrastrukturen. Disiplinnedbrytningsstrukturen fungerer som et rammeverk for å utvikle en hierarkisk nedbrytning av prosjektet, der disiplinene, som utgjør kjernen i prosjektorganisasjonen, plasseres øverst i hierarkiet for å synliggjøre deres ansvar for å utvikle, levere og integrere prosjektleveranser (se figur 5).



Figur 5 Disiplinbrytingsstruktur (DNS) etter Sanei (2016, s. 188)

Sanei (2016) bygger ikke på den gjentakende prosessen beskrevet i Systems Engineering Fundamentals (2001, s. 31) som en definisjon av hva system engineering er, men legger i stedet vekt på grensesnittshåndtering og utvikling av en nedbrytningsstruktur som integrerer prosjektstyring med systems engineering (Sanei, 2016, s. 240).

Sanei (2016, s. 194–195) beskriver at DNS-en skal fungere som et knutepunkt mellom arbeidsnedbrytningsstrukturen, prosjektstyring og systems engineering, på en mer strukturert måte enn det som tradisjonelt har vært praksis. En av fordelene med DNS-en som trekkes fram, er at den kan etablere en tydelig kobling til alle prosjektaktiviteter, for eksempel ved å kode dokumenter til forskjellige nivå i nedbrytningsstrukturen (Sanei, 2016, s. 240).

Videre omtaler Sanei (2016, s. 213–214) kravhåndtering, inkludert identifisering og allokering av krav, men sier lite om hvordan kravene skal brytes ned. Verifikasjon og validering beskrives også som en del av systems engineering-syklusen, men uten nærmere redegjørelse for hvordan prosessene skal gjennomføres (Sanei, 2016, s. 89–90). Sanei (2016, s. 240) konkluderer samtidig med at DNS-en kan bidra til økt effektivitet ved at ulike typer prosjekter får tilgang til predefinert informasjon, inkludert relevante krav, risikoer og kostnader.

I dette kapittelet er Saneis DNS presentert som en alternativ måte å implementere systems engineering i jernbaneprosjekter på. Metoden baserer seg på forhåndsutviklede nedbrytningsstrukturer for ulike typer prosjekter, som videreutvikles over tid. Dette kan øke

prosjektets effektivitet ved at man gjenbraker predefinert informasjon fra tidligere prosjekter (Sanei, 2016, s. 245).

### 3.4.3. Kontrakts nedbrytningsstruktur

Prosjekter deles vanligvis opp i flere kontrakter, der hver kontraktør betrakter sin fase i prosjektets livsløp som «prosjektet» og dermed mister helhetsperspektivet på hva som utgjør suksess for prosjektet som helhet (Farnham & Aslaksen, 2009, s. 1). Elich et al. (2017, s. 2) påpeker at det ofte utvikles kontraktuelle undersystemer som til sammen skal dekke hele systemet som skal bygges, ettersom entreprenørene i praksis kun har kontrakten som grunnlag for å utvikle sitt delsystem. Grensesnittene mellom kontraktene er ikke nødvendigvis optimale med hensyn til de logiske systemene eller verifikasjon og validering av disse (Elich et al., 2017, s. 2). Integrasjonsfasen på høyre side av V-modellen kan i byggeprosjekter beskrives som prosessen med å koordinere arbeidspakker fra forskjellige underentreprenører og sikre at de samlet ferdigstiller hele leveransen (Aslaksen et al., 2008, s. 6).

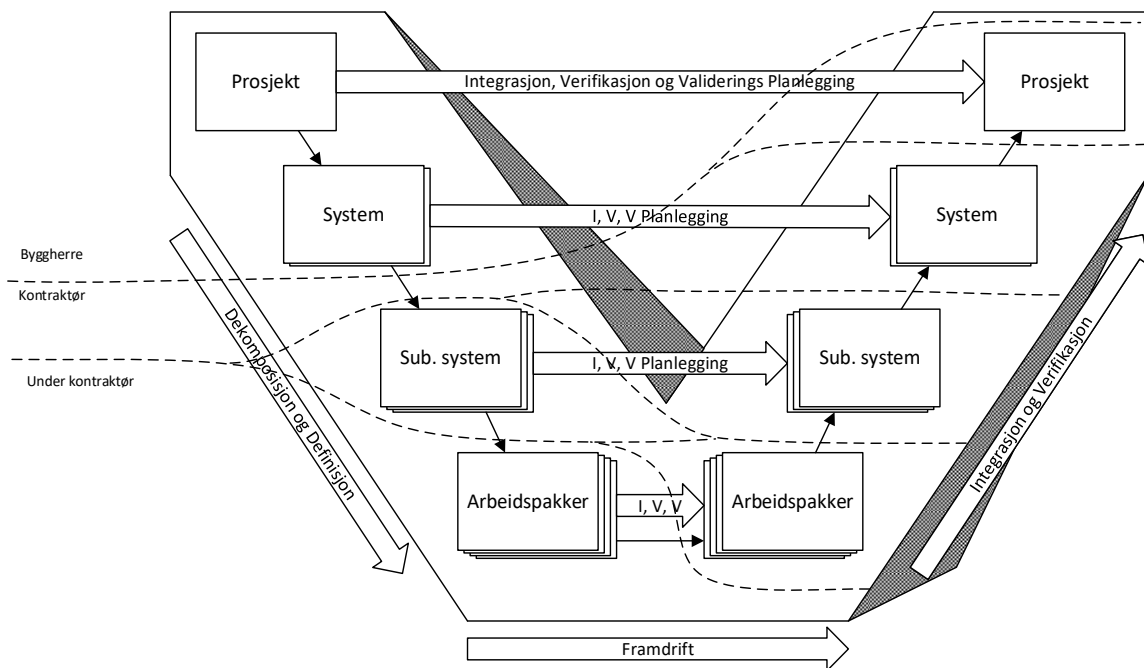
Aslaksen et al. (2012, s. 17–18) og Whyte (2018, s. 8) beskriver at systemarkitekturen og oppdelingen av systemer bør utformes slik at de enkelte delene, enhetene og undersystemene i prosjektet kan fabrikkeres og monteres separat av forskjellige firmaer. Sanei (2016, s. 90) utdyper temaet prosjektgrensesnitt og påpeker at undersystemer kan representere arbeidspakker, fagspesifikke oppgaver og ansvarsområder, team, organisasjoner eller andre former for arbeidsmessig nedbrytning.

Anbudsprosessen begrenser den gjentakende prosessen i systems engineering, ettersom den avbrytes i det byggherre utlyser et anbud på jobben (van der Meer et al., 2015, s. 137). På dette tidspunktet blir entreprenørene stilt overfor beslutninger med høy grad av usikkerhet, basert på et uferdig design. Dette skaper igjen usikkerhet for kontraktøren knyttet til hvorvidt investeringen vil gi forventet avkastning.

En ny avbrytelse oppstår når entreprenørene leverer tilbudet sitt (van der Meer et al., 2015, s. 142). Tilbudet som til slutt vinner, markerer starten på fortsettelsen av V-modellen. I perioden mellom disse avbruddene må tilbudsunderlaget brytes ned og struktureres i undersystemer for å håndtere kompleksiteten og utvikle et tilbudsdesign, uten at all usikkerheten knyttet til integrasjonen mellom undersystemene kan reduseres. Skillet mellom byggherre og kontraktør trekkes også fram av Aslaksen et al. (2008, s. 11), som beskriver at systemet bør brytes så langt ned på venstre side av V-en at risikoen for at systemet ikke blir realisert i henhold til forventningene, er redusert til et akseptabelt nivå før kontrakten inngås.

Makkinga et al. (2018, s. 132, 134) påpeker at den gjentakende prosessen kan brukes til å detaljere systemer ned til et visst nivå, eller til ulike nivåer for forskjellige deler av systemet, når man utarbeider anbudsgrunnlaget. De foreslår også at man i enkelte tilfeller kan unngå å spesifisere de tekniske løsningene for tidlig, slik at kontraktørene får større handlingsrom til å optimalisere egne løsninger. Et tilsvarende skille, der krav og funksjoner er definert, men designet ennå ikke er fastsatt, og som kan gå på tvers av systems engineering prosessen trekkes også fram av Aslaksen et al. (2008, s. 11, 2012, s. 48–49). De skiller mellom kravspesifikasjon og design i overgangen mellom kontraktspartene, slik det er illustrert på figur 2.

Potensielle ansvarsgrenser mellom byggherre, kontraktører og underkontraktører er illustrert på figur 6. Figuren viser at prosjektet kan kontraheres på ulike nivåer i systemhierarkiet, og at man på hvert nivå kan definere hvem som har ansvar for verifikasjons- og integrasjonsaktivitetene.



Figur 6 Potensielle kontraktsskille visualisert i V-modellen (Aslaksen et al., 2008, s. 11; Forsberg et al., 2005; van der Meer et al., 2015, s. 136)

Et fellestrekk ved de ulike nedbrytningsstrukturene er at de skal legge til rette for at de ulike delene kan allokere til forskjellige parter for gjennomføring. For hvert system må det avklares hvem som har ansvar for utførelsen av arbeidet, og det vil derfor være hensiktsmessig å planlegge grensesnittene mellom kontraktørene samtidig med planleggingen av systemene og pakkene.

### 3.5. Verifikasjon og validering

Verifikasjon innebærer å bekrefte, gjennom objektive bevis, at de spesifiserte kravene er oppfylt (Makkinga et al., 2018, s. 132). Validering innebærer å bekrefte, også gjennom objektive bevis, at kravene til den spesifikke tiltenkte bruken er blitt oppfylt. I mange tekster om systems engineering beskrives dette som at verifikasjon sikrer at systemet er bygd riktig, mens validering sikrer at det rette systemet er bygd (Forsberg et al., 2005, s. 115; Makkinga et al., 2018, s. 132).

I litteraturen beskrives det at det er vanlig at verifikasjon utføres av kontraktøren, mens validering gjennomføres av byggherren (de Graaf et al., 2017, s. 4–6; Elich et al., 2017, s. 2; Makkinga et al., 2018, s. 132). I mer integrerte kontraktsformer, der byggherre ikke lenger spesifiserer i detalj hva som skal utføres, endres ansvarsforholdet slik at både verifikasjon og validering blir kontraktørens ansvar (Makkinga et al., 2018, s. 132). Elich et al. (2017, s. 2) påpeker også at det vil være i kontraktørens egen interesse å gjennomføre validering når de selv foretar designvalg, for å sikre at disse valgene ikke får uønskede konsekvenser.

Entreprenøren får ofte kun informasjon om hva som skal bygges og hvor, men mangler sporbarhet mellom funksjon og løsning (Aslaksen et al., 2008, s. 3). Dermed har entreprenøren ingen reell mulighet til å kontrollere om designet samsvarer med kundens krav. Van der Meer et al. (2015, s. 142–143) påpeker at dersom de tidlige designbeslutningene ikke tas på en transparent og systematisk måte, men i stedet baseres på eksperters vurderinger og erfaring, kan dette føre til situasjoner der det ikke er mulig å verifisere den foreslåtte løsningen på grunn av begrensede ressurser. Cusumano et al. (2024, s. 70) finner at byggebransjen i stor grad stoler på håndverk og faglig intuisjon, og at dette ofte fører til aksept for en høyere grad av uspesifikke krav fra byggherren.

Lee et al. (2015, s. 326) skriver at jernbaneprosjekter tradisjonelt ikke har hatt særlig høye krav til ytelse, og at det derfor ikke alltid har vært tydelig om nybygde systemer faktisk oppfyller de overordnede systemkravene. Videre peker de på at verifikasjon og validering av systemer som regel har vært begrenset til standardiserte tester, mens nyere anlegg stiller høyere kapasitetskrav. Dette gjør det, ifølge Lee et al. (2015, s. 327), nødvendig å utvikle skreddersydde krav som sikrer at systemet kan yte sikkert og pålitelig fra første dag.

Som nevnt tidligere er prosjekter ofte inndelt i flere underkontrakter, og et vanlig problem er at verifikasjon og validering ikke utføres tilstrekkelig av underentreprenørene. Videre er det ofte ikke ønsket at underentreprenører har direkte kontakt med kunden (Makkinga et al., 2018, s. 132). Denne mangelen på kontakt gjør det vanskelig, eller tilnærmet umulig for leverandøren å validere eget arbeid.

Velger man en underentreprenør som ikke har tilstrekkelig kompetanse til å utføre verifiseringsprosessen kan et tiltak være å eksplisitt beskrive omfang, ansvar, og forventninger eksplisitt, særlig med tanke på verifikasjonsprosessen og resultatene (Elich et al., 2017, s. 11; Makkinga et al., 2018, s. 134). Det er også avgjørende å vurdere hvor detaljert arbeidet som skal settes bort beskrives i forhold til den aktuelle underentreprenøren, for å hindre problemer knyttet til verifikasjon (Makkinga et al., 2018, s. 137).

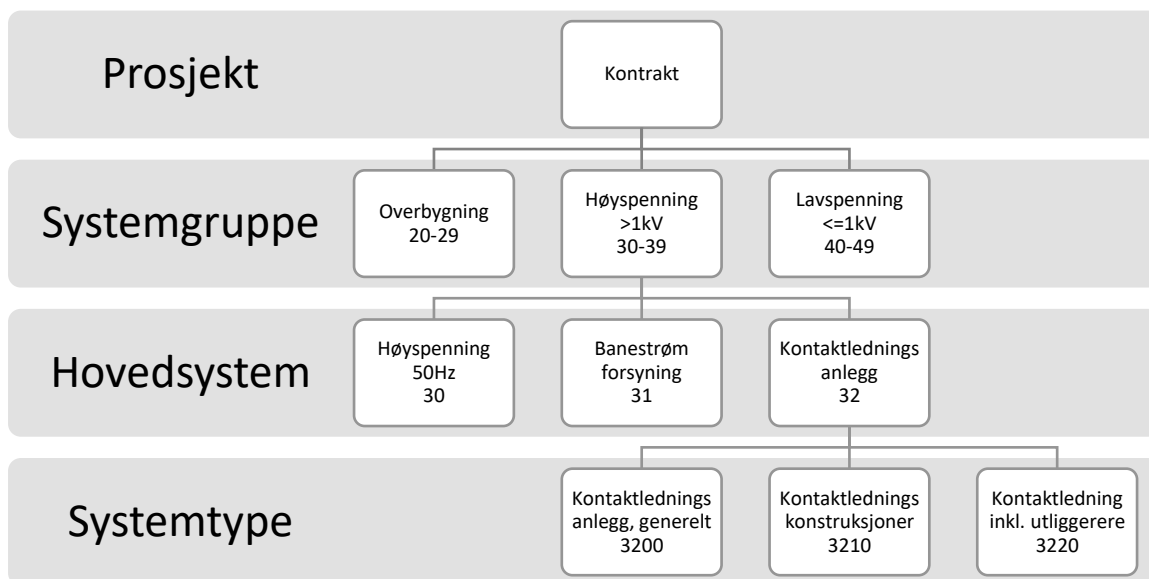
For å oppsummere handler verifikasjon om å sikre at man har gjort ting riktig, det vil si at løsningen oppfyller de spesifiserte kravene. Validering handler om å sikre at man gjør de riktige tingene, altså at løsningen faktisk svarer på kundenes og interessentenes behov. Med flere ledd i kontraktskjeden kan det oppstå problemer med validering, for eksempel fordi man mangler kompetanse, fordi kravene er formulert slik at de ikke lar seg verifisere, eller fordi verifikasjonen ikke utføres tilstrekkelig. For å redusere risikoen for slike problemer er det avgjørende å ha et bevisst forhold til hva som bestilles, og å være eksplisitt i formuleringen av krav og forventninger.

### 3.6. Bane NORs beskrivelse av Systematisk Ferdigstillelse

I dette kapittelet presenteres systematisk ferdigstillelse slik det er beskrevet i kontraktsvedleggene til flere prosjekter i perioden 2021–2024. Beskrivelsene er ikke nødvendigvis fullt representative for hvordan systematisk ferdigstillelse gjennomføres i praksis, men anses som førende for hvordan den planlegges.

#### 3.6.1. Systemnedbrytning

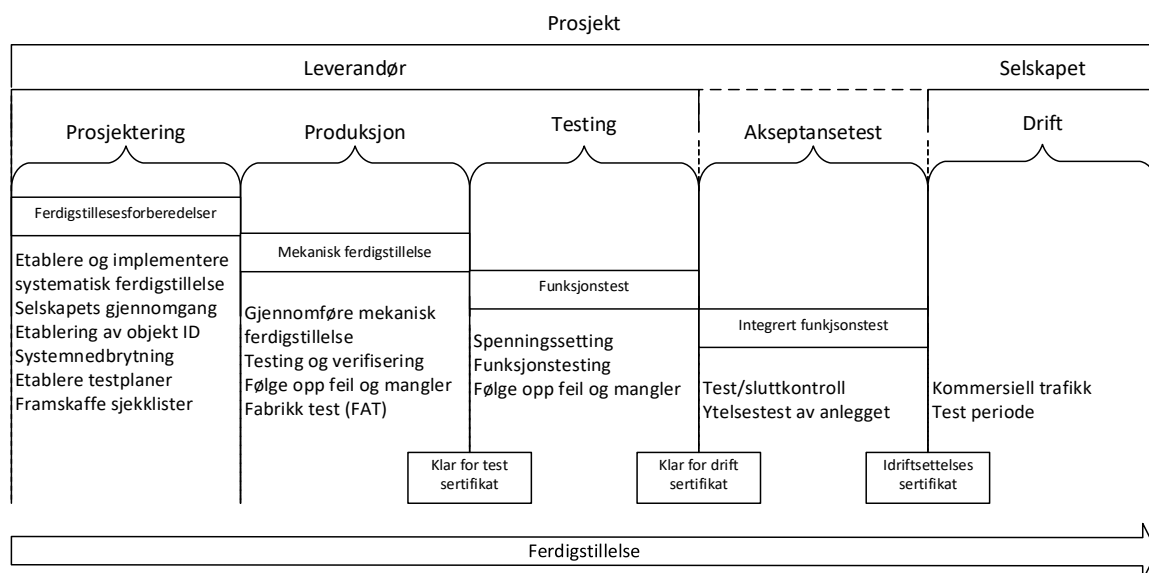
Det beskrives at systematisk ferdigstillelse skal være en integrert del av prosjekteringen, og at prosjekteringsunderlaget skal gjenspeile hvordan det er planlagt å bygge, teste og overlevere et gitt arbeidsomfang. (Bane NOR, 2024a, s. 11). Prosjektet skal deles inn i en hierarkisk trestruktur i henhold til STY-605395 Krav til Prosjektkoding- veiledning, se figur 7 (Bane NOR, 2023a, s. 3, 2024a, s. 4, 12). Systemer beskrives som logiske samlinger av utstyr eller funksjonelle enheter som ferdigstilles og eventuelt testes sammen (Bane NOR, 2023a, s. 5, 2024a, s. 5, 2024b, s. 4).



Figur 7 Systemnedbrytningsstruktur (Bane NOR, 2022, s. 18–20, 2023b, s. 9–12)

### 3.6.2. Arbeidsprosessen

Arbeidsprosessen beskriver at prosjektet skal gjennom flere faser (se figur 8). Først gjennomføres mekanisk ferdigstilling, som innebærer at deler av installasjonen gjøres klar for testing. Deretter utføres funksjonstesting, som danner grunnlag for klarering for drift. Til slutt gjennomføres en akseptansetest, som resulterer i at anlegget kan settes i normal drift.



Figur 8 Bane NORs modell for Systematisk Ferdigstilling (Bane NOR, 2021b, s. 3, 2021a, s. 3, 2022b, s. 5, 2022a, s. 9, 2023, s. 8, 2024b, s. 7, 2024c, s. 6)

På komponentnivå benyttes disiplinrelaterte sjekklister som ligger i ferdigstillingsverktøyet (Bane NOR, 2024a, s. 12, 2024b, s. 11). Dersom de eksisterende sjekklisene ikke er tilstrekkelige eller egnet for verifikasjonen av den aktuelle installasjonen, skal nye sjekklister utvikles eller opprettes.

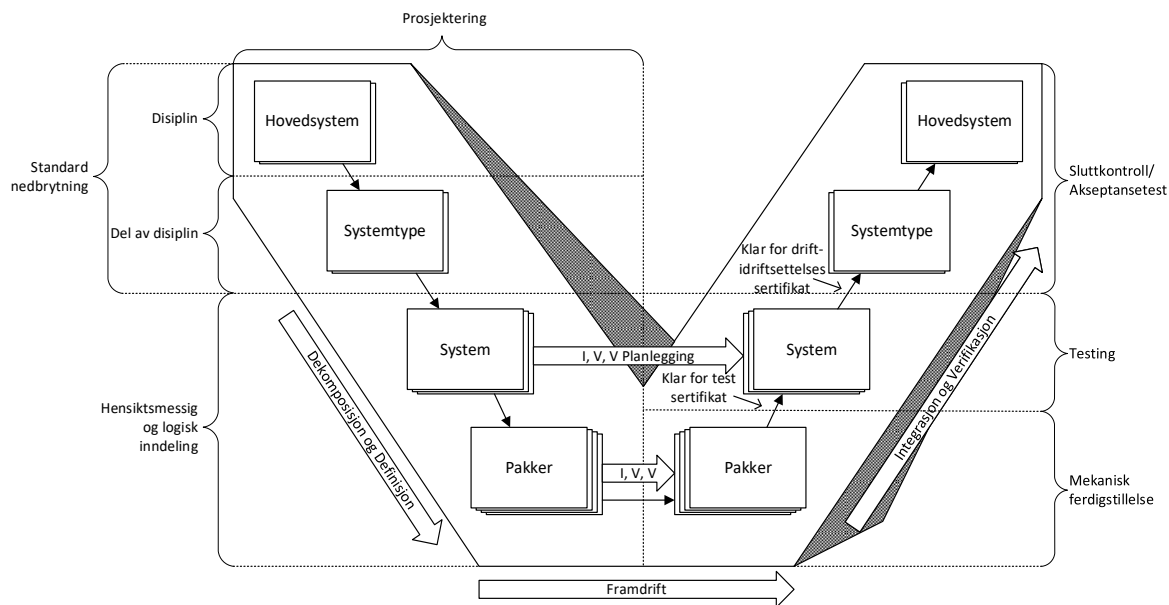
Egendefinerte sjekklister kan også benyttes, men må godkjennes av byggherren

Mekanisk ferdigstilling av enkeltkomponenter omfatter visuell kontroll for å sikre at komponentene er korrekt installert, uten skader, riktig tilkoblet og montert i henhold til krav (Bane NOR, 2024b, s. 12). Det kontrolleres også at installasjoner er sikre, at alle relevante sjekklister er signert, at feil og mangler er registrert, og at all nødvendig dokumentasjon er tilgjengelig.

I testfasen kontrolleres det at dynamiske funksjoner og drift samsvarer med design, at kapasitet og ytelse på utstyr er i henhold til spesifikasjon, at utstyret har tilfredsstillende drift, og at alle grensesnitt fungerer (Bane NOR, 2024a, s. 14, 2024b, s. 14–15). Det skal utarbeides detaljerte testprosedyrer som beskriver alle deler av testingen, samt testkrav og akseptkriterier per system. Disse skal sendes til byggherre for kommentering og eventuell aksept. Testingens framdrift og status skal framgå av omfanget i testene og tilknyttede testfasesjekklister og mangellister (Bane NOR, 2024a, s. 14)

Anlegget anses klar for drift når alle testaktiviteter og sjekklister for et gitt omfang er signert, og alle feil og mangler er utbedret, med unntak av det som er særskilt avtalt (Bane NOR, 2024a, s. 15, 2024b, s. 15). All driftskritisk dokumentasjon skal være levert, og før endelig aksept skal det gjennomføres en sluttbefaring.

Før anlegget blir overtatt av drift skal det gjennomføres en akseptanasetest for å bekrefte at systemet vil fungere tilfredsstillende i drift (Bane NOR, 2024a, s. 16). Testen gjennomføres ved å sette systemet i drift og utføre funksjons-, pålitelighets- og ytelsestester. Byggherren bekrefter ved aksept at hele leveransen er å anse som levert (Bane NOR, 2024b, s. 16–17). Setter man denne beskrivelsen inn i V-modellen vil dette se omtrent ut som illustrert på figur 9.



Figur 9 Bane NORs Systematiske Ferdigstillelse i V-modellen (Forsberg et al., 2005)

Systematisk ferdigstillelse anses som en separat aktivitet fra resten av prosjektet, og forstås hovedsakelig som en form for kvalitetskontroll. I prosjektering foretas det en oppdeling i systemer og pakker, men uten at det beskrives nærmere hvordan denne inndelingen skal gjøres. Kravene det testes opp mot, finnes i kontrakt, Teknisk Regelverk og relevante standarder, men er ikke strukturert i tråd med systemnedbrytningen.

## 4. Diskusjon

Med utgangspunkt i den presenterte teorien og dagens praksis drøftes i dette kapittelet hvordan systems engineering kan brukes til å videreutvikle systematisk ferdigstillelse i jernbaneprosjekter.

### 4.1. Begrensninger i dagens praksis

Den nåværende beskrivelsen av systematisk ferdigstillelse kan forstås som en plan for å verifisere alle komponentene i prosjektet, snarere enn som en helhetlig metode for å styre systemutviklingen. Systemnedbrytningsstrukturen er forhåndsplanlagt i disiplinorienterte siloer, på mange måter tilsvarende Saneis (2016) disiplinnedbrytningsstruktur. Slike disiplinorienterte siloer, kan lede til suboptimale grensesnitt og medfølgende utfordringer knyttet til verifikasjon og validering (M. Stevens et al., 2023, s. 1459). En disiplinorientert inndeling bryter med prinsippet om funksjonell nedbrytning og gjør det vanskeligere å sikre helhetlig sporbarhet fra krav til verifikasjon.

Mange av testene planlegges ikke som en integrert del av prosessen for systematisk ferdigstillelse, men håndteres i andre prosesser. Dette bidrar til at verifikasjon og validering i mindre grad styres av en samlet systemforståelse og i større grad av disiplinvis hensyn. Dagens praksis kan forstås i lys av det Aslaksen et al. (2008, s. 5) påpeker: mye av det arbeidet som utføres i dag, har karakter av systems engineering, men er ikke strukturert innenfor en systems engineering-ramme. Her ligger det et uutnyttet potensial, ved at en strukturering av eksisterende prosesser i tråd med prinsippene for systems engineering vil kunne øke sporbarheten uten å kreve en fullstendig omlegging av praksis.

Å teste et ferdig produkt gjør aldri selve produktet bedre (Elich et al., 2017, s. 1). For å øke kvaliteten på det som bygges, må man i stedet verifisere og validere at løsningene er planlagt slik at sluttproduktet blir tilfredsstillende dersom alt gjennomføres som planlagt. Et sentralt problem er at krav og spesifikasjoner ofte er formulert på en måte som skaper tvetydighet i kontraktsgrunnlaget, noe som igjen fører til verifikasjonsproblemer (Lynghaug et al., 2021, s. 154). Implementering av systems engineering-prosessen kan bidra til å redusere risikoen for at feil først oppdages i sluttfasen av prosjektet, når systemer allerede er installert og eventuelt ikke oppfyller alle krav. At feil ikke fanges opp tidligere kan, som Lee et al. (2015, s. 326) påpeker, henge sammen med at verifikasjon og validering i tradisjonelle prosjekter ofte er begrenset til standardiserte tester, slik at det blir implisitt hvilke aktiviteter som faktisk gjennomføres.

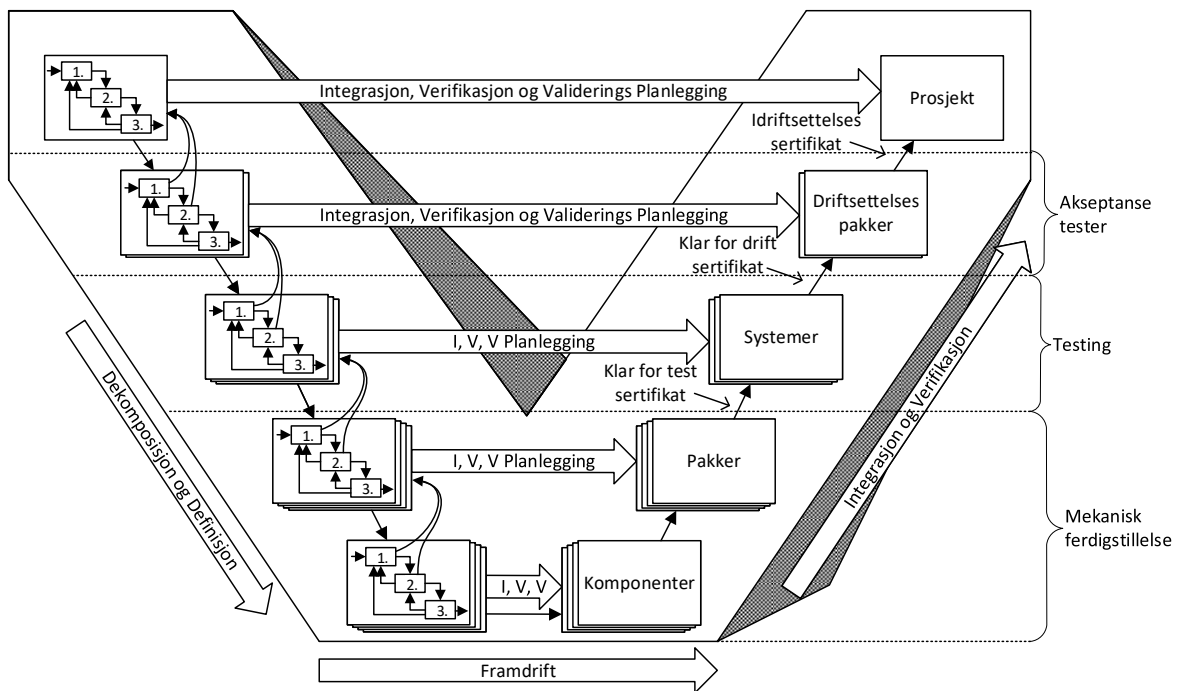
Risikoen for at krav formuleres slik at de blir umålbare eller ikke-verifiserbare, reduseres når verifikasjonsmetodene på høyre side av V-modellen planlegges samtidig med spesifikasjonsarbeidet på venstre side (Forsberg et al., 2005, s. 110). Mangelen på sporbarhet fra krav til

prosjektnedbrytning og videre til testing i den nåværende modellen kan føre til at man ikke verifiserer de kravene kunden faktisk stiller til ytelse og funksjon (Lee et al., 2015, s. 326). Med økende krav til ytelse finner Lee et al. (2015, s. 327) at det er nødvendig med skreddersydde krav for at man skal kunne sikre at det som bygges, vil fungere som tiltenkt. Den nåværende modellen for systematisk ferdigstilling mangler en systematisk håndtering av krav og funksjoner, noe som gjør at prosessen i praksis stopper opp på systemnivå, se figur 9. Dette henger sammen med at systemene ikke nødvendigvis er definert med funksjoner eller delfunksjoner som kan knyttes til andre systemer. Utførelsen blir dermed i praksis en kontroll av at alt er montert, etterfulgt av tester som er planlagt i andre prosesser, for å verifisere om sluttresultatet kan anses som godkjent.

## 4.2. Barrierer for implementering av systems engineering

Systemnedbrytningen må tilpasses de eksisterende systemene. Dette omtaler B. Elliott et al. (2012, s. 206) som en av barrierene ved implementering av systems engineering i jernbanesektoren, da det innebærer en utfordring knyttet til å integrere nye systemer i eksisterende systemer som ikke nødvendigvis er fullstendig dokumentert, og der den tilgjengelige dokumentasjonen ofte ikke følger den systemstrukturen som ligger til grunn for systems engineering. Blanchard og Blyler (2016, s. 401–404) beskriver at man i prosjekter som krever implementering av eksisterende komponenter og undersystemer, kan bruke en «middle-out»-tilnærming. I denne tilnærmingen starter man med det eksisterende anlegget som man skal integreres i designet, og arbeider deretter bakover opp venstresiden av V-modellen for å identifisere de opprinnelige designintensjonene, kravene og funksjonaliteten. En slik middle-out tilnærming kan forstås som et praktisk svar på en av barrierene Elliott et al. (2012) beskriver, ved at den tar utgangspunkt i faktisk, eksisterende infrastruktur heller enn det ideelle, ovenfra-og-ned definert systemstruktur.

En annen barriere som trekkes fram i jernbanesektoren er knyttet til å gjøre endringer på systemer som må være i drift, og der arbeidet kun kan utføres i korte avbrudd mellom perioder med ordinær trafikk (B. Elliott et al., 2012, s. 206). Et mulig tiltak for å håndtere dette kan være å definere funksjonen «drift på banen» høyt i hierarkiet, slik at den kan integreres og testes mot i hvert avbrudd, se mulig løsning i figur 10 basert på dagens terminologi.



Figur 10 Plausibel faseinndeling basert på nåværende rammeverk for systematisk ferdigstillelse (Forsberg et al., 2005)

### 4.3. Kontraktens rolle i styring, verifikasjon og systemutvikling

Lædre (2009, s. 32–33) viser til sammenhengen mellom prosjektnedbrytningsstrukturen og kontraktstrategien, der utformingen av den ene påvirker den andre. Som vist tidligere kan systems engineering-prosessen brukes til å detaljere hva som skal leveres på ulike nivåer i prosjektnedbrytningen, basert på behovet for sikkerhet i entreprisen og kompetansen til den som vurderes til å utføre arbeidet (Makkinga et al., 2018; van der Meer et al., 2015). Dersom dette reflekteres i kontrakten, gir det en mulighet til å kontrollere risiko, både med tanke på hvilket system som planlegges og hvordan leveransen skal verifiseres. Samtidig gir den kontinuerlige verifikasjonen og valideringen av krav, funksjoner og design i systems engineering-prosessen løpende tilbakemelding og bidrar til å sikre at behov, interesser og forventninger blir ivaretatt i den videre planleggingen.

Kontrakten utgjør grunnlaget for designet av systemet, og systemet utformes for å oppfylle kravene i kontrakten (Elich et al., 2017, s. 2). I tilbudsfasen må entreprenørene ta beslutninger med høy grad av usikkerhet, fordi de må designe et system basert på et uferdig design (van der Meer et al., 2015, s. 137). Mangelen på sporbarhet mellom krav og funksjoner i kontraktsunderlaget gjør det, innenfor entreprenørens tilgjengelige ressurser, utfordrende å validere om designet faktisk er i tråd med kundens forventninger og krav (van der Meer et al., 2015, s. 142). Når kontrakten først er inngått, vil kontraktørens insentiv være å levere med lavest mulig kostnad og med en kvalitet som er i samsvar

med kontrakten. Det er derfor helt avgjørende at kundens behov kommer tydelig fram i kontrakten, og at kravene som stilles faktisk gjenspeiler disse behovene (Elich et al., 2017, s. 10).

Med dette som utgangspunkt presenteres i det neste kapitlet oppgavens konklusjon og anbefalinger.

## 5. Konklusjon og anbefalinger

Hvilke konklusjoner kan vi så trekke for å svare på problemstillingen «Hvordan kan systems engineering benyttes til å styre komplekse jernbane prosjekter?».

På bakgrunn av litteraturgjennomgangen konkluderes det med at systems engineering, slik det er forstått i denne oppgaven, er en metode for å etablere en hierarkisk prosjektnedbrytningsstruktur med vekt på kravspesifikasjon, funksjonsanalyse og design. For at denne nedbrytningen faktisk skal kunne brukes til å styre prosjektet, bør kontraktstrategien utformes i tråd med prosjektnedbrytningsstrukturen. Dersom dette ikke gjøres, kan det føre til økte utfordringer knyttet til verifikasjon og validering senere i kontraktskjeden. Metoden gir videre byggherren en strukturert måte å styre prosjektet på også etter kontraktsinngåelse, ved at den videre nedbrytningen kontinuerlig må valideres av byggherren.

For i større grad å lykkes med ambisjonene knyttet til systematisk ferdigstillelse, anbefales det at systems engineering-prosessen legges til grunn for planlegging av prosjekter der metoden skal benyttes. Dette vil kunne gi en tydeligere struktur for hvilke krav og funksjoner som skal verifiseres, hvordan de skal verifiseres i sluttkontrollen, og hvem som skal utføre de ulike kontrollene.

### 5.1. Refleksjoner

For å svare på problemstillingen ble det gjennomført et litteraturstudium. En sentral begrensning ved denne metoden er at utvalgskriteriene i stor grad har vært basert på mine egne vurderinger, og at det ikke er undersøkt hvordan systematisk ferdigstillelse faktisk utføres i praksis. Som forsker har jeg tatt med meg en tydelig forforståelse fra min yrkesbakgrunn innen systematisk ferdigstillelse i olje- og gasssektoren (MC & Commissioning), samt erfaring fra et begrenset antall jernbaneprosjekter. Min forforståelse av hvorfor systematisk ferdigstillelse ikke alltid fungerer som tiltenkt i jernbanesektoren, er at metoden ikke benyttes aktivt til å styre prosjekter, men primært brukes som en sluttkontroll, og at det mangler tydelig koordinering av hvem som skal gjøre hva på hvilket omfang.

### 5.2. Forslag til videre forskning

Rammen for denne oppgaven har vært prosjektgjennomføring på nivået av ett enkelt prosjekt. Et mulig videre perspektiv er å ta et skritt tilbake i V-modellen og studere en portefølje av prosjekter: hvilke prosjekter som velges, hvordan de styres og verifiseres, og hvilke avveieringer som gjøres mellom dem. Å undersøke hvilken organisasjonsstruktur som kan etableres for å støtte opp under systems engineering-metoden i prosjektene, er også et interessant tema for videre forskning.

## 6. Referanser

Allan, J., Burdett, S., & Williams, J. (1996). Use Of A Computer-based Tool For Systems Engineering

Mega Railway Projects. *WIT Transactions on the Built Environment*, 18.

<https://doi.org/10.2495/CR960251>

Andersson, H. (2022). *Kjennetegn ved megaprojekter innenfor jernbane i Norge, og*

*kostnadsutvikling i store jernbaneprosjekter i Norge* [Master thesis, NTNU].

<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3029998>

Aslaksen, E. W., Brouwer, P., & Schreinemakers, P. J. P. (2008). Designing the Construction Process.

*INCOSE International Symposium*, 18(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/j.2334->

5837.2008.tb00787.x

Aslaksen, E. W., deLamare, M., Fehon, K., Godau, R., Knott, A., Kouassi, A., & De Liefde, J. (2012).

*Guide for the Application of Systems Engineering in Large Infrastructure Projects* (No.

INCOSE-TP-2010-007-01). INCOSE Infrastructure Working Group.

Aughenbaugh, J. M., & Paredis, C. J. J. (2004). The Role and Limitations of Modeling and Simulation in

Systems Design. *IMECE2004*, 13–22. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-59813>

Bane NOR. (2022). *Innføring Barkåker-Tønsberg Krav til Systematisk Ferdigstillelse for*

*utførelsesentrepriser* (No. UVB-00-A-00100 (00E)).

Bane NOR. (2023a). *KL AT HH Hønefoss—Haugastøl, Krav til Systematisk Ferdigstillelse* (No. IAT-80-Q-

00020 (00E)).

Bane NOR. (2023b). *Krav til prosjektkoding Nykirke—Berkåker* (No. UVB-60-A-00034 (11E)).

Bane NOR. (2024a). *Krav til Systematisk Ferdigstillelse Totalentrepriser KTT02 Ler-Melhus*.

Bane NOR. (2024b, september 23). *Krav til systematisk ferdigstillelse forberedende arbeider ERTMS*.

Beste, T. M. (2020). Effect of systematic completion on public construction projects. *Facilities*, Vol.

39(No. 3/4), 156–171. <https://doi.org/10.1108/F-11-2019-0127>

- Biedenbach, T., & Jacobsson, M. (2016). The Open Secret of Values: The Roles of Values and Axiology in Project Research. *Project Management Journal*, 47(3), 139–155.  
<https://doi.org/10.1177/875697281604700312>
- Blanchard, B. S., & Blyler, J. E. (2016). *System engineering management* (Fifth edition). Wiley.  
<https://doi.org/10.1002/9781119178798>
- Boehm, B. W. (1988). A spiral model of software development and enhancement. *Computer*, 21(5), 61–72. <https://doi.org/10.1109/2.59>
- Booth, A., Papaioannou, D., & Sutton, A. (2016). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review* (2.). Sage. [https://www.researchgate.net/profile/Andrew-Booth-2/publication/235930866\\_Systematic\\_Approaches\\_to\\_a\\_Successful\\_Literature\\_Review/links/5da06c7f45851553ff8705fa/Systematic-Approaches-to-a-Successful-Literature-Review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andrew-Booth-2/publication/235930866_Systematic_Approaches_to_a_Successful_Literature_Review/links/5da06c7f45851553ff8705fa/Systematic-Approaches-to-a-Successful-Literature-Review.pdf)
- Cusumano, L., Rempling, R., Olsson, N., Jockwer, R., & Granath, M. (2024). Systems engineering in the building construction industry: Comparison with the telecom industry. *Procedia Computer Science*, 239, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.147>
- de Graaf, R., Voordijk, H., & Van Den Heuvel, L. (2016). Implementing Systems Engineering in Civil Engineering Consulting Firm: An Evaluation. *Systems Engineering*, 19(1), 44–58.  
<https://doi.org/10.1002/sys.21336>
- de Graaf, R., Vromen, R. M., & Boes, J. (2017). Applying systems engineering in the civil engineering industry: An analysis of systems engineering projects of a Dutch water board. *Civil Engineering and Environmental Systems*. <https://doi.org/10.1080/10286608.2017.1362399>
- Elich, E., Schreinemakers, P., & Vullings, M. (2017). Verification & Validation; An inconvenient truth. *INSIGHT*, 20(1), 11–17. <https://doi.org/10.1002/inst.12139>
- Elliott, B. J. (2014). *Benefits of adopting systems engineering approaches in rail projects* [Doctoral, University of Birmingham]. <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/5322/>

- Elliott, B., O'Neil, A., Roberts, C., Schmid, F., & Shannon, I. (2012). Overcoming barriers to transferring systems engineering practices into the rail sector. *Systems Engineering*, 15(2), 203–212.  
<https://doi.org/10.1002/sys.20203>
- Farnham, R., & Aslaksen, E. W. (2009). Applying Systems Engineering to Infrastructure Projects. *INCOSE International Symposium*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:111164804>
- Flyvbjerg, B. (2014). What you Should Know about Megaprojects and Why: An Overview. *Project Management Journal*, 45(2), 6–19. <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>
- Forsberg, K., & Mooz, H. (1991). The Relationship of System Engineering to the Project Cycle. *INCOSE International Symposium*, 1(1), 57–65. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.1991.tb01484.x>
- Forsberg, K., Mooz, H., & Cotterman, H. (2005). *Visualizing project management: Models and frameworks for mastering complex systems* (3rd ed). J. Wiley.
- Haug, S. Ø., & Saastadhagen, E. (2025). *Anvendelse av systematisk ferdigstilling i byggefasen av norske jernbaneprosjekter* [Masteroppgave, NTNU]. <https://hdl.handle.net/11250/3221046>
- Hoel, T. I., & Johansen, P. R. (2016). *Veileder—Systematisk ferdigstilling*. BA2015.  
<https://prosjektnorge.no/forskning/fullforte-prosjekter/ba-2015/>
- Klakegg, O. J., & Tvedt, I. M. (2024). Ontology, Epistemology, and Axiology: Understand your philosophy and approach. I B. Pasian & R. Turner (Red.), *Design Methods and Practices for Research of Project Management* (2. utg., s. 3–18). Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9781003469513-2>
- Lee, L., Baek, Y.-G., Park, J.-S., Lee, B.-T., Lee, J.-C., & Kim, Y.-H. (2015). *Review of Systems Engineering—Perspectives from Railway Projects*. The 9th Asia-Pacific Conference on Systems Engineering, Seoul, Korea. <https://www.academia.edu/33577538/>
- Lynghaug, T. F., Kokkula, S., & Muller, G. (2021). Implementing Systems Engineering in the Construction Industry: Literature Review for Research Alignment. *2021 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)*, 150–155.  
<https://doi.org/10.1109/SOSE52739.2021.9497464>

- Lynghaug, T. F., Kokkula, S., & Muller, G. (2022). Investigating Systems Engineering Approaches in the Norwegian Construction Industry: A Multi-Case Study. *INCOSE International Symposium*, 32(1), 792–808. <https://doi.org/10.1002/iis2.12964>
- Lædre, O. (2009). *Kontraktstrategi for bygg-og anleggsprosjekter*. Tapir akademisk forlag.
- Machi, L. A., & McEvoy, B. T. (2016). *The literature review: Six steps to success* (3. edition). Corwin.
- Makkinga, R., Graaf, R. de, & Voordijk, H. (2018). Successful verification of subcontracted work in the construction industry. *Systems Engineering*, 21(2), 131–140. <https://doi.org/10.1002/sys.21425>
- Persson, M. (2021). *Hvordan skrive en litteraturgjennomgang?* (1. utg.). Universitetsforlaget.
- Persson, P., Schönbeck, P., Bergseth, E., & Bergsjö, D. H. (2024). Systems Engineering in complex rail projects—A state-of-the-art scoping review. *2024 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISSE63315.2024.10741130>
- PRISMA 2020 flow diagram*. (2020). PRISMA Statement. <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>
- ProRail, Rijkswaterstaat, Bouwend Nederland, NLingenieurs, Techniek Nederland, & Waterbouwers. (2013). *Guideline for Systems Engineering within the civil engineering sector* (No. Versjon 3). [leidraadse.nl](https://www.leidraadse.nl). <https://www.leidraadse.nl>
- Royce, W. W. (1987). Managing the development of large software systems: Concepts and techniques. *Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering*, 328–338.
- Sanei, H. (2016). *Discipline breakdown structure—Bridging project management and systems engineering to form an integrated management system in multidisciplinary rail projects* [Doctoral, UCL (University College London)]. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1503957/>
- Sayer, A. (1997). Critical Realism and the Limits to Critical Social Science. *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 27(4), 473–488. <https://doi.org/10.1111/1468-5914.00052>

Stevens, M., Eghbaljoo, A., & Thevissen, F. (2023). A Kaizen Event Enabled by System Engineering in an Infrastructure Project. *Proceedings of the 31st Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31)*, 1451–1462. <https://doi.org/10.24928/2023/0113>

Stevens, R., Brook, P., Jackson, K., & Arnold, S. (1998). *Systems Engineering: Coping With Complexity*. Prentice Hall.

*Systems Engineering Fundamentals* (No. ADA606327). (2001). DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY PRESS. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA606327.pdf>

van der Meer, J., Hartmann, A., Van Der Horst, A., & Dewulf, G. (2015). Challenges of using systems engineering for design decisions in large infrastructure tenders. *Engineering Project Organization Journal*, 5(4), 133–145. <https://doi.org/10.1080/21573727.2015.1113401>

Whyte, J. (2018). *Systems Engineering and the Project Delivery Process in the Design and Construction of Built Infrastructure*. Project Production Institute.  
<https://projectproduction.org/journal/systems-engineering-and-the-project-delivery-process/>